

배출저감기술 안내서



2021



책임운영기관
환경부
화학물질안전원

□ 목차 /

제1장 | 서론

1. 목적 및 범위	1
1.1 목적	1
1.2 범위	1
1.3 활용방법 및 제한점	6
1.4 저감기술 개요	7
1.4.1 적용원칙	7
1.4.2 기술종류	7
1.4.3 저감기술 적용 의사 결정도	11

제2장 | 배출특성 및 저감기술

1. 벤젠	18
1.1 개요	18
1.2 배출특성	19
1.3 대체물질	23
1.3.1 용매대체	23
1.3.2 세정 및 세척제 대체	24
1.3.3 액체 및 고체연료 대체	24
1.4 배출공정별 저감기술	25
1.4.1 이송·운반·분배·계량시설	28
1.4.2 저장시설	34
1.4.3 대기오염방지시설	55
2. 트리클로로에틸렌	79
2.1 개요	79
2.2 배출특성	80
2.3 대체물질	84

2.3.1 용매대체	84
2.3.2 세정 및 세척제 대체	85
2.3.3 TURI의 용매대체	86
2.4 배출공정별 저감기술	87
2.4.1 대기오염방지시설	90
2.4.2 탈지·세정·표백공정	104
2.4.3 이송·운반·분배·계량시설	126
2.4.4 저장시설	132
3. 염화비닐	153
3.1 개요	153
3.2 배출특성	154
3.3 대체물질	156
3.3.1 용매대체	156
3.3.2 바닥재 대체	156
3.4 배출공정별 저감기술	157
3.4.1 대기오염방지시설	160
3.4.2 이송·운반·분배·계량시설	174
4. 1,3-부타디엔	180
4.1 개요	180
4.2 배출특성	181
4.3 배출공정별 저감기술	183
4.3.1 이송·운반·분배·계량시설	186
4.3.2 대기오염방지시설	192
5. 디클로로메탄	215
5.1 개요	215
5.2 배출특성	216
5.3 대체물질	223

5.3.1 용매대체	223
5.4 배출공정별 저감기술	224
5.4.1 대기오염방지시설	227
5.4.2 탈지·세정·표백공정	241
6. N,N-디메틸포름아미드	263
6.1 개요	263
6.2 배출특성	264
6.3 대체물질	271
6.3.1 용매대체	271
6.3.2 대체공정	271
6.4 배출공정별 저감기술	272
6.4.1 대기오염방지시설	275
6.4.2 혼합공정	298
6.4.3 코팅공정	304
7. 테트라클로로에틸렌	307
7.1 개요	307
7.2 배출특성	308
7.3 대체물질	310
7.3.1 용매대체	310
7.3.2 세정 및 세척제 대체	310
7.4 배출공정별 저감기술	311
7.4.1 대기오염방지시설	314
7.4.2 탈지·세정·표백공정	328
7.4.3 저장시설	350
8. 아크릴로니트릴	371
8.1 개요	371
8.2 배출특성	372

8.3 배출공정별 저감기술	375
8.3.1 대기오염방지시설	378
8.3.2 이송·운반·분배·계량시설	401
8.3.3 저장시설	407
8.3.4 혼합공정	428
9. 클로로포름	434
9.1 개요	434
9.2 배출특성	435
9.3 대체물질	438
9.3.1 용매대체	438
9.4 배출공정별 저감기술	439
9.4.1 대기오염방지시설	442
9.4.2 코팅공정	456
9.4.3 이송·운반·분배·계량시설	478
9.4.4 저장시설	484
제3장 ■ 부록	
1. TURI 트리클로로에틸렌 용매대체	507
제4장 ■ 참고문헌	
1. 국내 참고문헌	537
2. 국외 참고문헌	538
3. 웹사이트	539

제1장

서론

- ┆ 제1절 목적 및 범위
- ┆ 제2절 활용방법
- ┆ 제3절 저감기술 개요

1

목적 및 범위

1.1

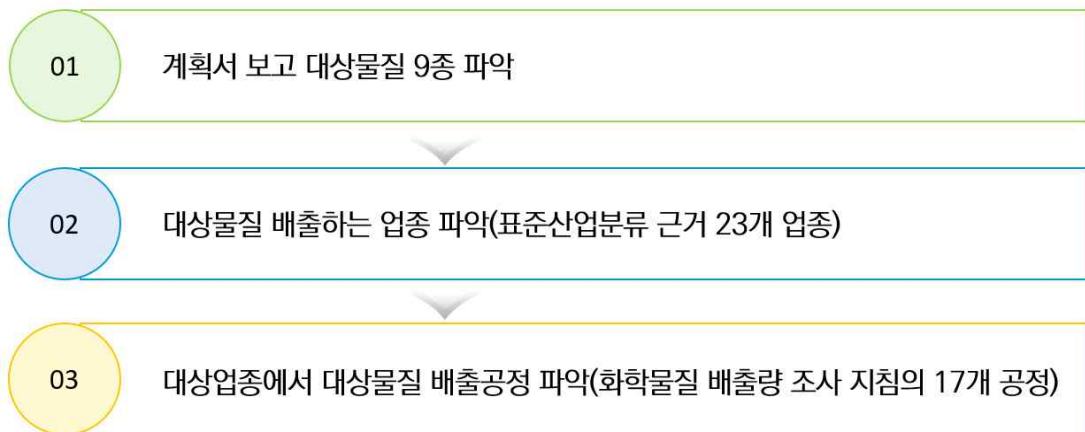
목적

- 본 기술안내서는 화학물질관리법(이하 화관법) 제11조의2인 “화학물질배출저감 계획서의 작성·제출” 시행(2019. 11.29)에 따른 화학물질 배출 저감의 원활한 이행을 위해 관련 정보를 제공하고 저감기술을 확산·전파하는데 그 목적을 두고 있음.

1.2

범위

- (범위) 본 기술안내서는 물질별·업종별·공정별로 저감기술을 소개하고 있으며, 물질별로 배출업종을 먼저 파악하고, 배출업종에서 대상 화학물질이 배출되는 공정을 확인하고, 그 배출공정에서 대상물질의 배출저감 방법과 기술을 소개하고 있음.



□ (물질)1) 화학법 시행규칙, 환경부고시에서 규정한 9개 물질

번호	CAS No.	화학물질명	
		한글명	영문명
1	71-43-2	벤젠	Benzene
2	79-01-6	트리클로로에틸렌	Trichloroethylene
3	75-01-4	염화 비닐	Vinyl chloride
4	106-99-0	1,3-부타디엔	1,3-Butadiene
5	75-09-2	디클로로메탄 (메틸렌클로라이드)	Dichloromethane
6	68-12-2	N,N-디메틸포름아미드	N,N-Dimethylformamide
7	127-18-4	테트라클로로에틸렌	Tetrachloroethylene
8	107-13-1	아크릴로니트릴	Acrylonitrile
9	67-66-3	클로로포름	Chloroform

○ 염화비닐과 N,N-디메틸포름아미드를 제외한 나머지 물질은 휘발성유기화합물 (Volatile Organic Compounds; 이하 VOCs) 지정 고시²⁾에 의한 배출시설의 관리대상 VOCs임.

1) 화학물질관리법 시행규칙 제5조의2 1항

2) 환경부고시 제2019-247호

□ (업종)³⁾ 한국 표준산업분류에 근거한 23개 업종

업종코드	업종
21	의료용 물질 및 의약품 제조업
38	폐기물 수집운반, 처리 및 원료재생업
13	섬유제품 제조업; 의복 제외
28	전기장비 제조업
20	화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품제외
25	금속가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외
19	코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업
22	고무제품 및 플라스틱제품 제조업
24	1차 금속제조업
26	전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업
15	가죽, 가방 및 신발 제조업
14	의복, 의복액세서리 및 모피제품 제조업
27	의료, 정밀, 광학기기 및 시계 제조업
32	가구 제조업
33	기타 제품 제조업
31	기타 운송장비 제조업
30	자동차 및 트레일러 제조업
52	창고 및 운송관련 서비스업
23	비금속 광물제품 제조업
46	도매 및 상품중개업
17	펄프, 종이 및 종이제품 제조업
29	기타 기계 및 장비 제조업
16	목재 및 나무제품 제조업; 가구 제외

3) 통계청의 한국표준산업분류(<http://kostat.go.kr> → 통계분류포털 → 한국 표준산업분류)

□ (공정)4) 화학물질안전원의 화학물질 배출량 조사지침에서 제시한 17개 화학물질 및 취급공정



[그림 1] 화학물질 취급공정

4) 화학물질안전원(2019), 2019 화학물질 배출량 조사지침

[표 1] 공정 분류표

번호	공정명	공정설명
1	저장시설	원료물질을 저장 탱크, 창고, 사일로 등에 저장하거나 생산물, 제품을 일시적으로 창고 등에 보관·저장하는 공정
2	이송·운반·분배·계량시설	배관(밸브, 플랜지, 공정배수구 등)을 통한 흐름이나 소형용기, 탱크로리 등을 이용한 원료, 제품 등의 운송과 관련된 일련의 모든 공정
3	혼합공정	제품을 생산하기 위하여 두 가지 이상의 물질을 물리적으로 섞는 공정(혼합, 교반, 반죽 등)
4	화학반응공정	여러 종류의 화학반응(축합반응, 중합반응, 산화환원반응, 중화반응, 치환반응, 가수분해반응 등)을 통하여 제품을 만드는 공정
5	코팅공정	도장, 염색, 인쇄공정과 같이 물질표면에 염료, 페인트 등을 바르는 공정
6	열처리공정	열을 이용하여 물질의 성능을 향상시켜주는 공정(가열, 증착, 소결, 열분해, 용해, 주조, 땀질, 증발/건조, 농축/증류 등)
7	탈지·세정·표백공정	산, 알칼리, 물, 각종 기체, 모래 등의 물질을 이용하여 표면에 묻어있는 불순물을 제거하는 공정
8	분리·정제 공정	두 가지 이상의 물질이 혼재되어있는 경우 각각 물질로 분리하는 공정(여과, 분리, 정제, 추출 등)
9	기계적가공공정	접착, 박리, 압착, 탈수, 파쇄, 재단 절단, 연삭, 연마, 분쇄, 압출, 연신, 프레스성형 등의 공정
10	조립·포장·검사공정	부품으로부터 제품을 조립하는 공정과 제품을 포장, 검사할 때 불량품을 선별·제거하는 공정
11	용제회수	여러 공정에서 사용한 용제를 재사용하기 위하여 증발, 증류, 추출 등의 과정을 거친 후 냉각기, 응축기 등을 통해 회수하는 공정
12	대기오염방지시설	대기로 발생하는 각종 분진 및 화학물질을 처리하는 시설
13	폐수처리시설	수계로 배출되는 각종 화학물질을 처리하는 시설
14	폐기물처리시설	폐기물을 처리하는 시설(소각, 중화, 침전, 분리회수시설 등)
15	빗물	빗물에 의해 화학물질 중의 일부가 수계로 유입되는 경우
16	비정상조업	장치 세척, 청소, 점검, 보수 등으로 인한 조업 중단 및 시설 개방 시, 재난 및 사고로 인한 누출 등 비정상 조업 시
17	기타	-

1.3

활용방법 및 제한점

- **(활용방법)** 본 기술안내서는 대상물질별로 배출특성을 파악한 다음에 업종별·공정별로 저감기술을 정리 제공하였음. 따라서 특정 대상물질을 배출하는 사업장에서는 기술안내서의 보고 대상물질을 기술한 해당 장을 찾고, 사업장의 해당 업종에서의 배출공정별로 기술안내서의 저감기술을 확인 참고해야 함.

01

보고 대상 사업장의 대상물질을 기술한 저감기술안내서의 '장' 확인

02

대상물질 배출공정 파악하고, '배출공정'의 저감기술에 대한 설명을 저감기술안내서에서 확인

- **(제한점)** 기술안내서에서는 일반적인 내용을 정리한 것으로 사업장 특성에 따라서 적용조건과 비용이 다를 수 있으며, 최신 또는 특화 저감기술 자료가 반영되어 있지 않을 수 있음.

1.4

저감기술 개요

1.4.1

적용원칙

- 저감기술 적용원칙은 첫째, 사전예방, 둘째, 발생최소화, 셋째, 안전처리, 넷째, 비용최소화로 설정하였고, 각 원칙의 정의는 아래 표에서 보는 것과 같음.

원칙	정의
사전예방	▪ 사전관리를 통한 생산공정 및 제반 활동에서 유해 화학물질 발생의 원천적 근절 및 억제
발생최소화	▪ 전 과정 관리를 통한 생산공정 및 제반 활동에서 유해 화학물질의 발생 근절 및 억제
안전처리	▪ 사후 안전처리를 통한 생산공정 및 제반 활동에서 발생하는 유해 화학물질 배출 최소화
비용 최소화	▪ 화학물질의 저감 목표 달성에 필요한 비용의 최소화

1.4.2

기술종류

□ 대체물질

- (정의) 생산공정 또는 각종 활동과정에서 사용하고 있는 화학물질을 다른 화학물질 (유해화학물질이 아닌 물질 또는 독성이 낮은 물질 등)로 변경하여 취급(예, 세척 및 세정제 대체)

□ 대체공정

- (정의) 생산공정에서 화학물질을 취급하는 공정을 유해 화학물질 발생의 원천적 근절 및 억제할 수 있는 대체공정 적용

□ 공정관리

- (정의) 화학물질 사용 및 발생 근절 또는 억제를 위한 공정관리

○ 종류

- (장치개선을 통한 방지) 장치개선을 통해 비산배출원에서의 대상물질의 누출(Leak)을 방지하고 누출 원인이 되는 부분을 개선함으로써 대상물질 배출을 줄이거나 완전 차단하는 기술
- (측정 및 관리시스템 도입) 이송, 운반, 분배, 계량 시설 배출원에 대한 주기적인 감시 및 검지를 통하여 신속한 장비 보수 및 화학물질 배출량과 배출원을 동시에 체계적으로 관리하는 기술
- (밀폐 및 포집 장치를 통한 방지시설로의 이동) 화학물질이 배출될 수 있는 취급공정(시설)에서 부스(Booth)를 설치하여 비산 오염원에 의한 대기 배출량을 저감하는 기술
- (방지시설의 적정관리 및 유지보수) 대상물질을 포함하여 각종 오염물질을 처리하는 방지시설에서도 관리 부실로 인해 대상물질이 배출되므로 방지시설을 기준과 절차에 따라 관리하고 유지·보수하는 기술

□ 재사용/재활용

- (재사용) 한 번 사용된 화학물질을 포집·회수하여 그대로 다시 사용하는 것
 - ※ 재활용과도 유사하나 특별한 가공을 거치지 않는다는 점이 다르다
- (재활용) 배출된 화학물질을 포집·회수 등 재처리 과정을 거쳐 본래의 용도, 혹은 다른 용도를 다시 사용하는 것

□ 후처리기술

- (정의) 배출되는 화학물질을 후 처리기술을 적용하여 저감(예, 연소처리기술)

[표 2] 배출저감기술 현황

대분류	중분류	정의	저감기술 안내서 기준
사전관리기술	대체물질 적용	생산공정 또는 각종 활동과정에서 사용하고 있는 화학물질을 다른 화학물질(유해화학물질이 아닌 물질 또는 독성이 낮은 물질 등)로 변경하여 취급	<ul style="list-style-type: none"> 장치 변경(개선)을 통한 무독성 원료 사용
	대체공정 적용	생산공정에서 화학물질을 취급하는 공정을 유해 화학물질 발생의 원천적 근절 및 억제할 수 있는 대체공정 적용	-
	공정관리	화학물질 사용 및 발생 근절 또는 억제를 위한 공정관리	<ul style="list-style-type: none"> 측정 및 관리시스템 도입 장치개선 밀폐 및 포집장치 방지시설의 적정관리 및 유지보수
사후관리기술	재사용	한 번 사용된 화학물질을 포집·회수하여 그대로 다시 사용하는 것	<ul style="list-style-type: none"> 흡착회수기술 응축회수기술 흡수회수기술 막분리회수기술
	재활용	배출된 화학물질을 포집·회수 등 재처리 과정을 거쳐 본래의 용도, 혹은 다른 용도를 다시 사용하는 것	
	후 처리기술	배출되는 화학물질을 후 처리 기술을 적용하여 저감	<ul style="list-style-type: none"> 연소기술 흡착처리기술 흡수처리기술 생물학적처리기술

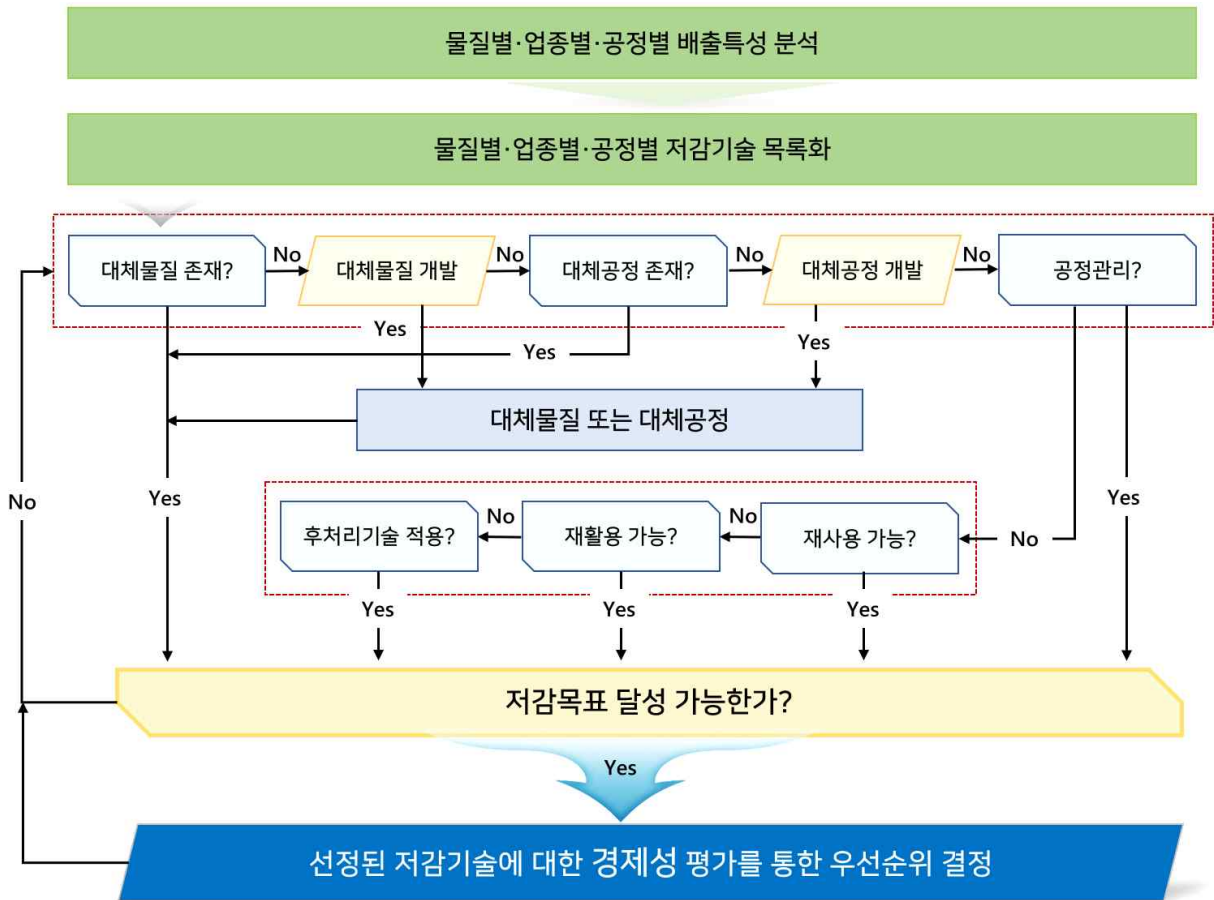
[표 3] 국내 저감기술 현황

구분	저감기술 명칭	정의	처리효율	적용 사례
1	장치 변경(개선) 통한 무독성 원료 사용	유용성 원료를 수용성 원료로 대체(코팅제 등)	30~60%	유
2	측정 및 관리시스템 도입	LDAR 등 누출관리시스템을 활용한 실시간 비산 배출 관리	70%	유
3	장치개선을 통한 방지	비산배출원을 Non-seal type으로 개선하여 누출 방지	90% 이상	유
4	밀폐 및 포집 장치를 통한 방지시설 이동	샘플링 라인, 도장공정 등에 부스를 설치하여 비산 배출 저감	60~99%	유
5	후드/덕트 시설을 통한 포집	폐수처리시설에 덮개/덕트 등 설치하여 대기 배출 방지	90%	유
6	탈지·세척기 관리	공정 밀폐하고 입출구에 응축기를 설치하여 증기 발생 방지	60~99%	유
7	방지시설의 적정관리 및 유지보수	방지시설 특성에 적합한 최적 관리 및 유지	20~90%	유
8	연소에 의한 제거	VOCs를 농도나 종류에 따라 고온으로 연소시켜 제거	95~99%	유
9	응축에 의한 제거	VOCs를 냉매로 응축시켜 대기로의 배출 저감	60~99%	유
10	회수에 의한 재사용	흡착제를 이용하여 포집하고 회수하여 재사용	80~99%	유
11	흡수에 의한 제거	기체상태의 VOCs를 세정액 처리하여 흡수 제거	80%	유
12	흡착에 의한 제거	활성탄 등의 흡착제를 이용하여 대기 배출 저감	1등급: 50% 이상	유
			2등급: 25% 이상	
			3등급: 15% 이상	
			4등급: 15% 미만	

(출처) 환경부(2008), 배출저감기술안내서

1.4.3 저감기술 적용 의사 결정도

□ 저감기술 선정은 저감기술 적용원칙인 사전예방, 발생최소화, 안전처리, 비용최소화에 따라 구성하였으며, 이를 반영한 기술적용 의사결정도는 아래에서 보는 것과 같음.



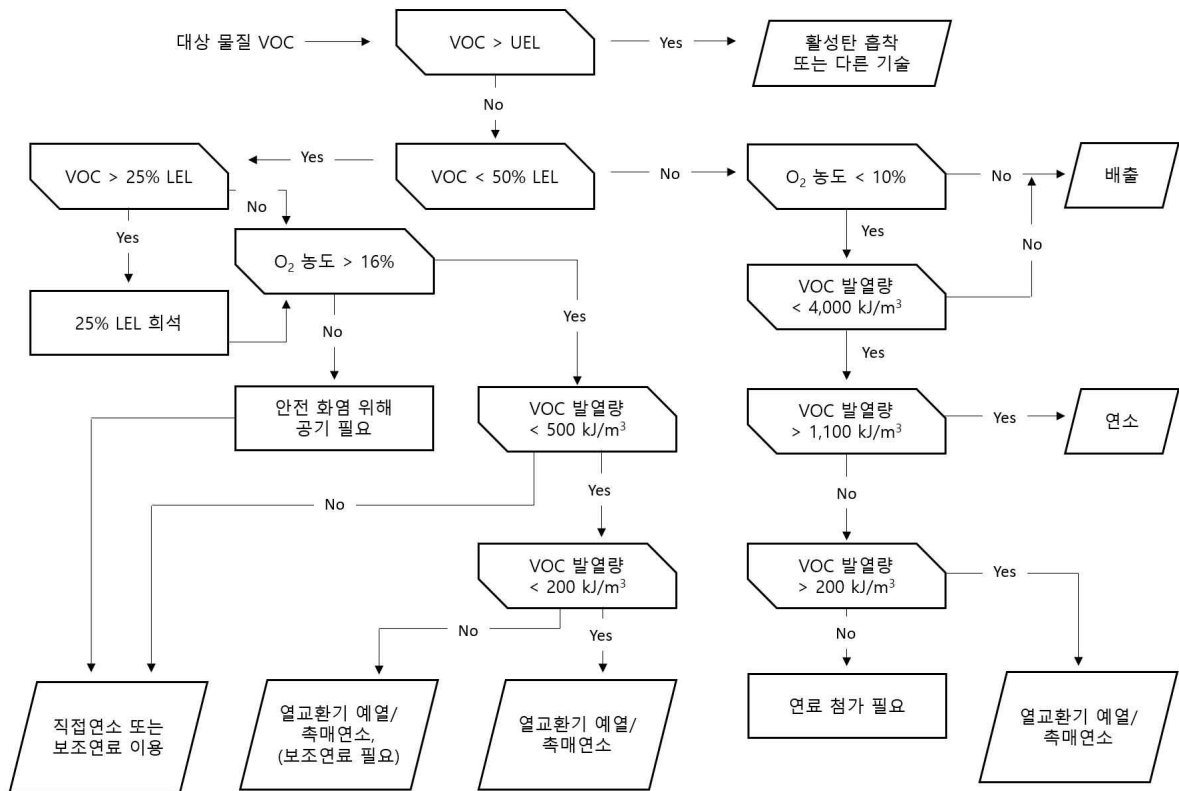
[그림 2] 저감기술 적용 의사결정도

- (배출특성) 물질별로 어느 업종과 어느 공정에서 어느 정도 배출되는지를 파악하고, 어떤 형태(기체, 액체, 고체)로 배출되는지도 파악
- (저감기술 목록화) 배출특성에 고려한 저감 가능한 기술 목록화
- (사전관리기술 적용 점검) 저감기술 중에서 대체물질, 대체공정, 공정관리 등 사전관리 기술의 적용이 가능한지 점검
- (사후관리기술 적용 점검) 저감기술 중에서 재사용, 재활용, 후처리기술 등 사후관리 기술의 적용이 가능한지 점검

○ (저감목표 달성 여부) 위에 도출한 사전관리기술과 사후관리기술이 사업장에서 설정한 저감목표 달성이 가능한지 여부를 확인하고, 달성 못하는 경우는 다음 기술에 대한 동일한 평가 수행

○ (경제성 평가) 저감목표 달성 가능한 기술들을 목록화하고, 각 기술에 대한 경제성을 평가하여 적용 우선순위 결정

□ 대상물질 9종의 대부분이 VOCs이므로 VOCs 처리기술을 선정하기 위한 의사결정도를 [그림 3]에서 보는 것처럼 제시하였음.



[그림 3] 휘발성유기화합물 처리기술 선정 의사결정도

UEL: Upper Explosive Limit, 최고폭발한계, LEL: Lower Explosive Limit, 최저폭발한계
 (출처) 한국환경정책·평가연구원(1997), VOCs 방지기술 현황 및 적용사례, KEI/1997/WO-01

제2장

배출특성 및 저감기술

- ┆ 제1절 벤젠
- ┆ 제2절 트리클로로에틸렌
- ┆ 제3절 염화비닐
- ┆ 제4절 1,3-부타디엔
- ┆ 제5절 디클로로메탄
- ┆ 제6절 N,N-디메틸포름아미드
- ┆ 제7절 테트라클로로에틸렌
- ┆ 제8절 아크릴로니트릴
- ┆ 제9절 클로로포름

□ 물질별 배출공정별 저감기술

대상 물질	이송·운반· 분배·계량시설	저장 시설	탈지·세정 ·표백공정	혼합 공정	코팅 공정	대기오염 방지시설
벤젠	●	●	X	X	X	●
트리클로로 에틸렌	●	●	●	X	X	●
염화비닐	●	X	X	X	X	●
1,3-부타디엔	●	X	X	X	X	●
디클로로메탄	X	X	●	X	X	●
N,N-디메틸포름아미드	X	X	X	●	●	●
테트라클로로에틸렌	X	●	●	X	X	●
아크릴로니트릴	●	●	X	●	X	●
클로로포름	●	●	X	X	●	●

●: 저감기술 있음, X: 저감기술 없음

□ 배출공정별 세부 저감기술 분류

배출원	대분류	중분류	소분류	저감기술 페이지									
				벤젠	트리클로로에틸렌	염화비닐	1,3-부타디엔	디클로로메탄	N,N-디메틸포름아미드	테트라클로로에틸렌	아크릴로니트릴	클로로포름	
이송·운반·분배·계량시설	공정관리	측정 및 관리시스템 도입	.	28	123	170	182	.	.	.	394	469	
	장치개선	펌프 변경	.	30	125	172	184	.	.	.	396	471	
		밀폐식 시료 채취장치	.	30	125	172	184	.	.	.	396	471	
		밀폐 및 포집장치	밀폐형 덮개	.	31	126	173	185	.	.	.	397	472
	포위식 후드		.	31	127	174	186	.	.	.	398	473	
	외부식후드		.	32	127	174	186	.	.	.	398	473	
	푸쉬플후드		.	32	128	175	187	.	.	.	399	474	
저장시설	대체공정	.	.	34	129	.	.	.	.	344	400	475
	공정관리	.	.	35	130	.	.	.	.	345	401	476
	재사용 및 재활용	흡착, 회수기술	.	36	131	346	402	477
		응축, 회수기술	.	42	137	352	408	483
		흡수, 회수기술	.	47	142	357	413	488
막분리, 회수기술		.	51	146	.	.	.	.	.	361	417	492
탈지·세정·표백공정	공정관리	밀폐 및 포집장치	밀폐형 덮개	.	102	.	.	237	.	323	.	.	
			포위식 후드	.	103	.	.	238	.	324	.	.	
			외부식후드	.	103	.	.	238	.	324	.	.	
			푸쉬플후드	.	104	.	.	239	.	325	.	.	
	재사용 및 재활용	흡착, 회수기술	.	.	105	.	.	240	.	326	.	.	
			응축, 회수기술	.	.	111	.	.	246	.	332	.	.
			흡수, 회수기술	.	.	116	.	.	251	.	337	.	.

배출원	대분류	중분류	소분류	저감기술 페이지								
				벤젠	트리클로로에틸렌	염화비닐	1,3-부타디엔	디클로로메탄	N,N-디메틸포름아미드	테트라클로로에틸렌	아크릴로니트릴	클로로포름
		막분리, 회수기술	.	.	120	.	.	255	.	341	.	.
혼합공정	공정관리	측정 및 관리시스템 도입	.	.	.	.	.	.	293	.	420	.
		장치개선	펌프 변경	.	.	.	.	.	295	.	422	.
			밀폐식 시료 채취장치	.	.	.	.	.	295	.	422	.
		밀폐 및 포집장치	밀폐형 덮개	.	.	.	.	.	296	.	423	.
			포위식 후드	.	.	.	.	.	297	.	424	.
			외부식 후드	.	.	.	.	.	297	.	424	.
			푸쉬풀 후드	.	.	.	.	.	298	.	425	.
코팅공정	공정관리	밀폐형 덮개	.	.	.	.	.	299	.	.	448	
		포위식 후드	.	.	.	.	.	300	.	.	449	
		외부식 후드	.	.	.	.	.	300	.	.	449	
		푸쉬풀 후드	.	.	.	.	.	301	.	.	450	
	재사용 및 재활용	흡착, 회수기술	.	.	.	.	.	.	.	.	.	451
		응축, 회수기술	.	.	.	.	.	.	.	.	.	457
		흡수, 회수기술	.	.	.	.	.	.	.	.	.	462
막분리, 회수기술		.	.	.	.	.	.	.	.	.	466	
대기오염방지시설	공정관리	연소에 의한 제거시설	.	54	.	.	188	.	270	.	371	.
		촉매 산화에 의한 제거시설	.	54	.	.	188	.	270	.	371	.
	처리기술	연소기술*	.	57	.	.	191	.	273	.	374	.
		흡착기술	.	65	90	158	199	225	281	311	382	436
		흡수기술	.	67	92	160	201	227	283	313	384	438
		생물학적처리기술	.	73	98	166	207	233	289	319	390	444

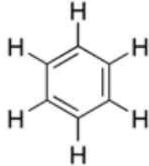
1

벤젠

1.1

개요

□ (정의 및 특성) 벤젠은 6개의 탄소 원자가 동일 평면에 있는 평면 정육각형 고리 구조의 가장 기본적인 방향족 탄화수소 물질로서 화학식은 C_6H_6 이며, 주요 정보는 아래와 같음.

CAS No.	발암물질 분류	위해도 순위	화학구조
71-43-2	1군 발암물질	<ul style="list-style-type: none"> • 1군 발암물질 중에서는 3위 • 전체 발암물질 중에서는 7위 	

□ 물리·화학적 특성⁵⁾

분자량 (g/mol)	휘발성 증기압	친수성 용해도	끓는점	녹는점 /어는점	LEL ⁶⁾ (% vol)	UEL ⁷⁾ (% vol)	n-옥탄올 /물분배계수
78.1	94.8mmHg (25°C)	0.18g/100mℓ (25°C)	80°C	5.5°C	1.3	8.0	2.13

○ 벤젠은 위에서 제시한 물리·화학적 특성 때문에 환경부 고시에 근거하여 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds; 이하 VOCs)⁸⁾로 분류하고 있음.

5) 화학물질 정보처리 시스템(<https://kreachportal.me.go.kr/potweb/main.do>)

6) 최저폭발한계(Lower Explosive Limit)로서 산소 존재 하에서 점화원에 접촉하였을 때 불이 붙어 불꽃이 확산되는 최저 가스농도

7) 최고폭발한계(Upper Explosive Limit)로서 하동명(2009), 벤젠의 위험성 평가를 위한 연소 특성치 고찰, 한국안전학회지, 24(5), 28-33

8) 환경부고시 제2015-181호(휘발성유기화합물 지정 고시)

□ 용도

- (화학물질 및 화학제품 제조업) 화학제품 제조 시 용제, 접착제, 착색제, 연료, 건축용 물질 및 첨가제로 사용
- (코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업) 코크스, 연탄과 석유 정제품 제조 시 절연제, 연료, 중간체, 용제로 사용
- (의료용 물질 및 의약품 제조업) 의료용 물질 및 의약품 제조 시 의약품, 용제로 사용
- (창고 및 운송 관련 서비스업) 연료로 사용

1.2

배출특성⁹⁾

- (배출업종) 벤젠이 주로 배출되는 업종은 화학물질 및 화학제품 제조업(64.3%), 코크스·연탄 및 석유정제품 제조업(30.5%), 창고 및 운송 관련 서비스업(3.1%) 순임.
- (배출공정) 벤젠이 많이 배출되는 공정은 1) 이송·운반·분배·계량시설(36.0%), 2) 대기오염방지시설(21.0%), 3) 저장시설(18.8%), 4) 분리·정제 공정(9.2%) 순임.
- (배출형태) 벤젠이 단독으로 배출되는 경우도 있으나(벤젠을 원료로 사용 또는 벤젠을 제품으로 생산하는 경우), 대부분 여러 물질과 혼합·배출되고 있음. 벤젠은 VOCs이므로 주로 대기로 배출되며, [표 1-1]에서 보는 것처럼 국내 배출원에서는 모두 대기로 점배출(21.6%) 또는 비산배출(78.4%) 되고 있음.
- (시사점) 벤젠은 비산배출 관련 저감기술 및 방법 적용이 필요하며, 중점 관리 분야는 다음과 같음.
 - 이송·운반·분배·계량시설에서의 탈루배출 방지
 - 저장시설에서의 탈루배출 방지
 - 대기오염방지시설의 처리효율 제고

9) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

[표 1-1] 벤젠 배출특성

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	8,590.3	7.830	0.000
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	12,847.1	11.711	0.000
	화학반응공정		비산배출 100	426.0	0.388	0.000
	분리·정제공정		점배출 0.02 비점배출 99.98	5,537.4	5.048	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	5,635.9	5.137	0.000
	비정상조업		비산배출 100	390.6	0.356	0.000
	폐수처리시설	대기 수계	비점배출 99 수계배출 1	63.4	0.058	0.000
화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	저장시설	대기	점배출 0.4 비점배출 99.6	11,945.0	10.888	0.000
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	25,795.6	23.513	0.000
	혼합공정		비산배출 100	84.2	0.077	0.000
	화학반응공정		비산배출 100	13,774.7	12.556	0.000
	분리·정제공정		비산배출 100	4,628.0	4.219	0.000
	조립·포장·검사공정		비산배출 100	103.0	0.094	0.000
	용제회수		점배출 89	9.0	0.008	0.000

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	대기오염방지시설		비점배출 11			
			점배출 100	13,799.3	12.578	0.000
			점배출 100	77.2	0.070	0.000
			비산배출 100	38.3	0.035	0.000
	폐수처리시설	대기 수계	비점배출 0.04 수계배출 99.96	273.8	0.250	0.000
의료용 물질 및 의약품 제조업	이송·운반·분배·계량시설	대기	비산배출 100	1.7	0.002	0.016
	화학반응공정		비산배출 100	0.2	0.000	0.002
	분리·정제공정		비산배출 100	0.2	0.000	0.002
	대기오염방지시설		비산배출 100	8.6	0.008	0.083
1차 금속 제조업	이송·운반·분배·계량시설	대기	비산배출 100	594.8	0.542	0.000
	조립·포장·검사공정		비산배출 100	739.6	0.674	0.000
	폐수처리시설		비산배출 100	33.9	0.031	0.000
전자 부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	대기오염방지시설	대기	점배출 100	522.7	0.476	1.136
자동차 및 트레일러 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	9.5	0.009	0.057
	이송·운반·분배·시설		비산배출 100	4.4	0.004	0.026
폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	저장시설	대기	비산배출 100	0.5	0.000	0.000
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	52.3	0.048	0.021

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	대기오염방지시설		점배출 100	8.9	0.008	0.004
	폐기물처리시설		점배출 100	146.8	0.134	0.059
도매 및 상품 중개업	저장시설	대기	비산배출 100	28.7	0.026	0.004
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	107.4	0.098	0.015
	대기오염방지시설		점배출 100	8.2	0.007	0.001
창고 및 운송 관련 서비스업	저장시설	대기	점배출 4 비점배출 96	55.9	0.051	0.000
	이송·운반·분배·계량시설		점배출 100	258.3	0.235	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	3,104.2	2.830	0.002
누적 합계		-	-	106,601.4	97.169	-

(출처) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

1.3

대체물질

1.3.1

용매 대체

적용업종	용매로서 벤젠을 사용하는 업종 및 공정
대체물질	사이클로헥산(Cyclohexane), 헵탄(Heptane)
적용사례	<ul style="list-style-type: none">• 사이클로헥산은 전기 도금, 고무 제조 등에 사용되는 바니시(Varnish) 용매로 사용되는 벤젠의 대체물질로 사용• 헵탄은 페인트와 코팅 용매로 사용되는 벤젠의 대체물질로 사용• 벤젠의 대안으로 비극성 용매를 대체물질로 사용 가능 (출처) http://banbenzenecampaign.weebly.com/what-are-the-alternatives-to-benzene.html
적용업종	전자 부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업
대체물질	사이클로헥산(Cyclohexane), 헵탄(Heptane)
적용사례	핸드폰 최종 조립단계 용매인 벤젠, n-헥산, 톨루엔 및 염화 유기물 사용 중지(2014년 중국의 조립공장에서 벤젠 사용 중지) (출처) https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Regulated_Substances_Specification_Sept2018.pdf

1.3.2 세정 및 세척제 대체

적용업종	벤젠을 세정 및 세척제로 사용하는 산업 및 공정
대체물질	이소프로필 알콜(Isopropyl Alcohol), 벤질 알콜(Benzyl Alcohol), 에탄올(Ethanol), 메틸 아세테이트(Methyl Acetate)
적용사례	전자산업 세정 및 세척제 (출처) Hamilton, J. and Kado, M. (2018), Benzene, Toluene, and Alternative Chemicals: Health Effects Review, UC Berkeley

1.3.3 액체 및 고체연료 대체

적용업종	<ul style="list-style-type: none"> • 화석연료 기반 액체연료(예, 경유, 중유) 사용 공정 • 화석연료 기반 고체연료(예, 석탄) 사용 공정
대체물질	천연가스(LNG)나 액화석유가스(LPG) ※ 불완전연소 개연성이 높은 액체연료(경유, 중유)와 석탄 등의 고체연료를 청정연료인 LNG와 LPG로 대체하여 다이옥신 등의 유해화학물질 배출 근절
적용사례	인천 A회사에서 2012년에 연료로 사용하던 중유를 청정연료인 액화 천연가스(LNG)로 전환 (출처) http://www.incheontoday.com/news/articleView.html?idxno=114810

- 벤젠의 회수 및 처리기술은 처리방법에 따라 장·단점이 있어 아래 사항을 자세히 검토하여 선택해야 함.
 - 배출가스의 조성 및 농도
 - 함유 유기 화합물질의 특성(폭발한계, 응축성, 용해성, 흡착성 등)
 - 배출가스 내 수분 및 먼지 함유량
 - 배출량(최대, 평균, 최소 유량 등), 온도, 압력, 습도
 - 오염배출원 유형(점, 면, 선오염원, 공정, 불특정 등)
 - 연간 운영시간(가동시간, 가동률, 부하율 등)
 - 장치 위치(실내, 실외, 지표 고도, 지붕, 여유 공간 등)
 - 보조 연료 또는 에너지 비율
 - 각종 유틸리티(수도, 전기, 스팀, 배관, 관거, 구조물) 이용 가능 여부
 - 기존의 대기오염방지시설 설치·운영 사항(종류, 규모, 사용 기간 등)
 - 경제성(초기투자비 및 연간 운영비)

[표 1-2] 휘발성 유기화합물 방지시설 설계 시 고려사항

기술	안정성	오염물질 특성	오염원 특성	제어특성
흡착	폭발물질의 농축이 일어나며 화기 등과 접촉하면 폭발이 일어날 수 있는 매우 위험한 상황 초래 가능	다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	높은 포집 효율을 가지고 있으며, 여러 유형 흡착제(활성탄, 제올라이트, 폴리머 등)를 이용, 낮은 비용으로 고효율 달성이 가능함.
흡수	폭발물질을 중성화시킬 수 있는 흡수액을 폭발물질에 따라 선택해야 함.	화합물에 적합한 흡수제를 사용해야 하고, 화학물질 조성변화에 대응하기 어려움.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 흡착제 배출수 처리장치가 필요함.	포집 효율이 높으나 생성 폐수에 폭발성 물질이 포함될 수 있으므로 사전에 적정 처리방법 수립이 필요함.
응축	니트로글리세린과 같은 폭발성 화합물에는 적용할 수 없음.	제습 과정이 필요하며, 끓는점이 낮은 화합물은 처리하기 어려움.	추가적인 응축장치가 필요함.	특정 화합물에 대해서는 포집 효율이 높으나, 초기 비용이 높음.
생물여과	미생물에 의해 포집된 화합물질을 안정되게 처리할 수 있음.	처리속도가 낮아 처리 규모의 한계가 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물 종류에 따라 높은 처리효율을 나타냄.
열소각	니트로글리세린과 같은 많은 폭발성 화합물은 급속히 가열될 때 매우 불안정해짐.	여러 다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 가지고 있음. 다양한 유형의 소각로(재생식 열소각 등)를 사용, 비용을 절감시키고 전체 효율을 증가시킬 수 있음.
축매소각	반응시간과 유속에 따라 축매 층에서 폭발성 화합물 농축이 일어나는 위험한 상황이 일어날 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리하며 축매 피독으로 효율이 낮아짐.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물질 유형에 따라 높은 파괴효율을 나타냄.
광촉매산화	저온에서 폭발성 화합물 처리가 가능하며, 체류 시간이 짧고 저온에서 운전되므로 폭발 위험성을 줄일 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리함.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 나타내며, 전체 비용이 상대적으로 적은 편임.

(출처) 환경부(2000), 「휘발성유기화합물 방지시설 설계지침」

□ 2016년의 화학물질 배출량 조사¹⁰⁾ 결과에 따르면 벤젠의 주요 배출공정은 이송·운반·분배·계량시설, 저장시설, 대기오염방지시설, 화학반응공정, 분리·정제공정 순으로 배출 비중은 각각 35.4, 20.5, 18.8, 13.0, 9.2% 순임.

공정	업종	배출비중(%)
이송·운반·분배·계량시설	화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	23.5
	코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	11.7
	창고 및 운송 관련 서비스업	0.2
	소계	35.4
대기오염방지시설	화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	12.6
	코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	5.1
	창고 및 운송 관련 서비스업	2.8
	소계	20.5
저장시설	화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	10.9
	코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	7.8
	창고 및 운송 관련 서비스업	0.1
	소계	18.8
화학반응공정	화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	12.6
	코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	0.4
	소계	13.0
분리·정제공정	코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	5.0
	화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	4.2
	소계	9.2

(출처) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

10) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

1.4.1

이송·운반·분배·계량시설

□ (정의) 원료 물질을 저장 탱크, 창고, 사일로 등에 저장하거나 생산물, 제품을 일시적으로 창고 등에 보관·저장하는 공정

1.4.1.1. (공정관리) 측정 및 관리시스템 도입

□ (정의) 누출오염원관리시스템(Leak Detection and Repair; 이하 LDAR)을 활용하여 이송·운반·분배·계량 시설 배출원에 대한 주기적 감시 및 검지를 시행하여, 이상 있는 장치는 즉시 정비 또는 교체하여 벤젠 배출량과 배출원을 동시에 체계적으로 관리하는 기술

○ 이송·운반·분배·계량 시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 누출지점이 많고, 누출되더라도 육안 식별이 어렵고, 화학물질에 따라서 무색·무취인 경우도 있어 측정하지 않고서는 누출 파악이 어려운 상황이 존재함.

○ 누출 가능성이 큰 지점에 바코드가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고, LDAR 시스템에 의해 주기적으로 점검 관리함.

[표 1-3] LDAR 점검주기 및 화학업종과 정유업종 저감율

장치 및 화학물질	화학업종 저감율(%)		정유업종 저감율(%)	
	매월 감시	매분기 감시	매월 감시	매분기 감시
밸브-기체	87	67	88	70
밸브-경질유	84	61	76	61
펌프-경질유	69	45	68	45
압축기-기체	-	-	-	33
연결부-기체, 경질유	-	33	-	
압력안전밸브-기체	-	44	-	44

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

기술 개요	Leak Detection and Repair(이하 LDAR) 등 누출관리시스템을 활용한 실시간 화학물질의 비산배출 관리기술로 최근 광학이미지 카메라를 이용한 Flare, 저장시설 등 VOCs 누출 모니터링과 공정 배출감시를 위한 Fence Line 모니터링 기술도 활용되고 있음			
적용산업 및 공정	벤젠의 이송·운반·분배·계량 공정이 있는 전 업종			
적용효과	(적용 전) 이송·운반·분배·계량시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 배출원 수가 많고 누출이 되더라도 누출 여부의 육안 확인이 어려운 상황			
	(적용 후) LDAR를 도입하여 대상 공정의 누출지점에 바코드 번호가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고 VOCs 측정기(검지기)를 이용하여 배출원에 대한 주기적 점검을 통해 누출 확인 및 신속한 장비 보수 가능			
저감효과 (%)	70	처리비용	설치비용	100백만 원 이상
			운영비용	1,000원/관리지점

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

1.4.1.2. (공정관리) 장치개선

- (정의) 장치개선 및 교체를 통해 벤젠의 비산 배출원으로부터의 누출(Leak)을 방지하고 누출 원인이 되는 부분을 개선함으로써 배출량을 줄이거나 완전히 차단하는 기술
- (펌프 변경) 펌프 Seal에서 벤젠이 누출되는 것을 방지하기 위해 Seal이 없는 Sealless(Non-seal) 펌프(Canned 펌프 등)나 Double-sealed 펌프로 교체
- (밀폐식 시료 채취장치) 시료 채취 과정에서 벤젠이 비산 배출되는 것을 방지하기 위해 밀폐식 시료 채취장치로 변경

장치 종류	개선 방법	저감률(%)
펌프	• Seal-less design (Canned Pump etc.)	99
	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
밸브	• Seal-less design • (Bellows type, Diaphragm, etc.)	99
압축기	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
압력 안전밸브	• Rupture Disk Assembly	99
	• Closed Vent System	90*
연결부	• Socket Welding Type	99
개방식 라인	• Blind, Plug, Cap or Second Valve	99
시료 채취 연결부	• Closed-loop System	99
공정 배수구	• Closed-loop and Water Seal	99

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 배출관이 연소처리 등에 연결하여 처리할 경우는 99%, 미 연결된 경우는 90% 수준임.

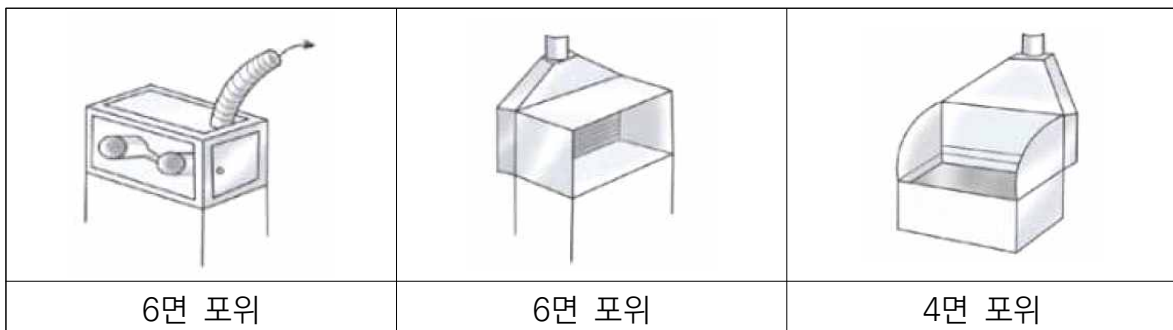
1.4.1.3. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 벤젠이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 벤젠의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
- (밀폐형 덮개) 벤젠 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 1-1] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

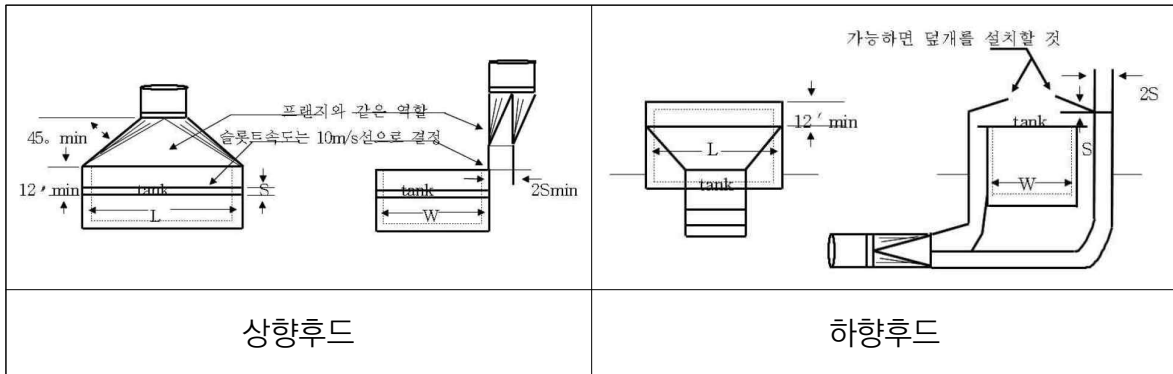
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 1-2] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

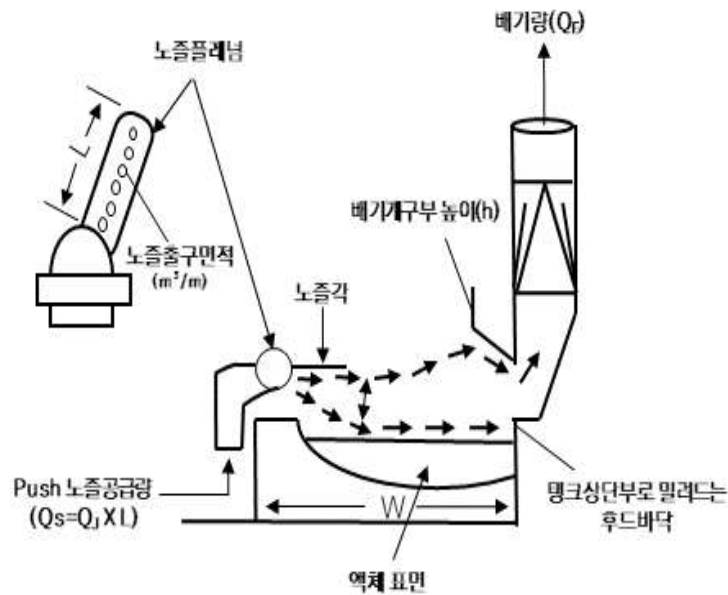
- (외부식후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 1-3] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 1-4] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- **(설치 유의사항)** 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- **(운영 유의사항)** 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요


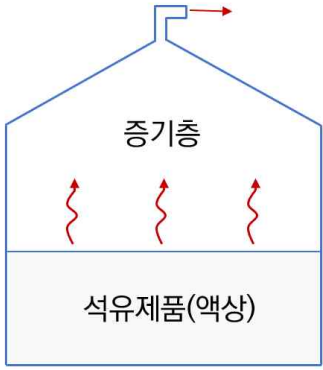

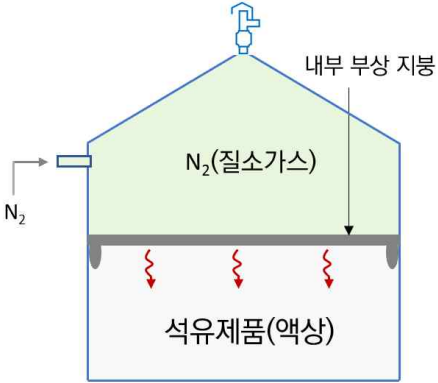
저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것
 (출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

1.4.2

저장시설

1.4.2.1. 대체공정

적용업종	<ul style="list-style-type: none"> • 화학물질 및 화학제품 제조업 • 코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업 			
대체공정	<p>(변경 전)</p> <p>기존 CRT(Cone Roof Tank)는 VOCs를 함유한 원료 및 제품의 저장시설 내부 증기압이 높아지면 안전밸브가 자동으로 열리면서 VOCs가 외부로 배출</p> 	<p>VOCs의 압력이 높아지면 안전밸브가 열림</p> 		
	<p>(변경 후)</p> <p>IFRT(Internal Floating Roof Tank)는 저장시설의 액위에 따라 내부 부상 지붕이 이동하므로 증기층 발생을 최소화하며, 발생 증기를 연소시설, 흡착탑 등으로 이송 처리하며, 질소 봉입으로 VOCs 누출을 최소화하고 있음.</p> 	 <p>제품 액위 변화에 따라 내부 부상 지붕 이동으로 증기 발생 최소화</p>		
저감효율 (%)	<p>IFRT: 95% 이상</p> <p>질소 봉입: 97% 이상</p> <p>연소시설 : 99% 이상</p>	처리비용	<p>설치비용</p> <p>운영비용</p>	<p>1,800백만원(IFRT+연소시설 연결)</p> <p>-</p>

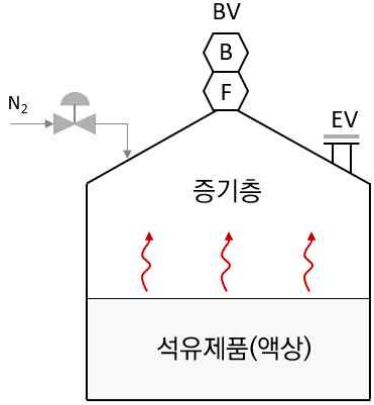
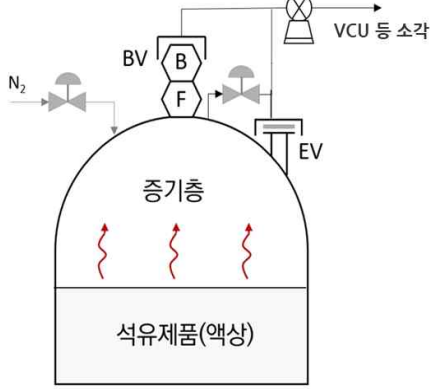
※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

(출처) <https://www.indiamart.com/proddetail/cathodic-protection-system-for-tanks-20242520612.html>

(출처) <http://www.fullmost.com.tw/de/Internal-Floating-Roof-IFR/>

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술사례집

1.4.2.2. 공정관리

적용산업	<ul style="list-style-type: none"> • 화학물질 및 화학제품 제조업/저장시설 • 코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업/저장시설 			
저장시설 관리개선	<p>(변경 전)</p> <p>BV(Breath Valve)를 열리게 하기 위한 설계압력이 150 mmH₂O로 낮아 VOCs 대기 배출이 많음.</p>  <ul style="list-style-type: none"> • 설계압력이 낮아 BV와 EV가 정상 운전에서도 탈루 발생 • Corn Roof Tank 			
	<p>(변경 후)</p> <p>설계압력을 10,000 mmH₂O로 높여 설계하고 평소 운전 압력을 최대 9,000 mmH₂O로 관리하여 배출가스 양을 감소하였고, 배출가스는 소각 처리하여 VOCs 대기 배출 최소화</p>  <ul style="list-style-type: none"> • 설계압력을 높여 BV와 EV를 통한 대기 방출 없애고, BV와 EV를 내압으로 인해 개방되더라도 Vent Gas는 VCU 등 소각 처리됨 • Dome Roof Tank 			
저감효율 ¹ (%)	90%	처리비용	설치비용 ²	70백만원 이상
			운영비용	-

1: (출처) 이우근 외 3(2006), VOCs 배출현황 및 저감방안, 대한환경공학회지

2: (출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집 인용

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

1.4.2.3. 재사용 및 재활용

흡착·회수	대기 중으로 배출되는 VOCs를 흡착제에 흡착시키고, 온도 또는 압력 조절을 통해 탈착·회수하는 기술
응축·회수	응축기 등을 통해 유체 온도나 압력 변화로 대상 VOCs를 분리·회수하는 기술
흡수·회수	액상 흡수제를 가스상의 VOCs와 접촉하여 VOCs를 흡수제로 물질 이동시켜 분리·회수하는 기술
막분리·회수	혼합가스 각각의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술

1) 흡착·회수기술

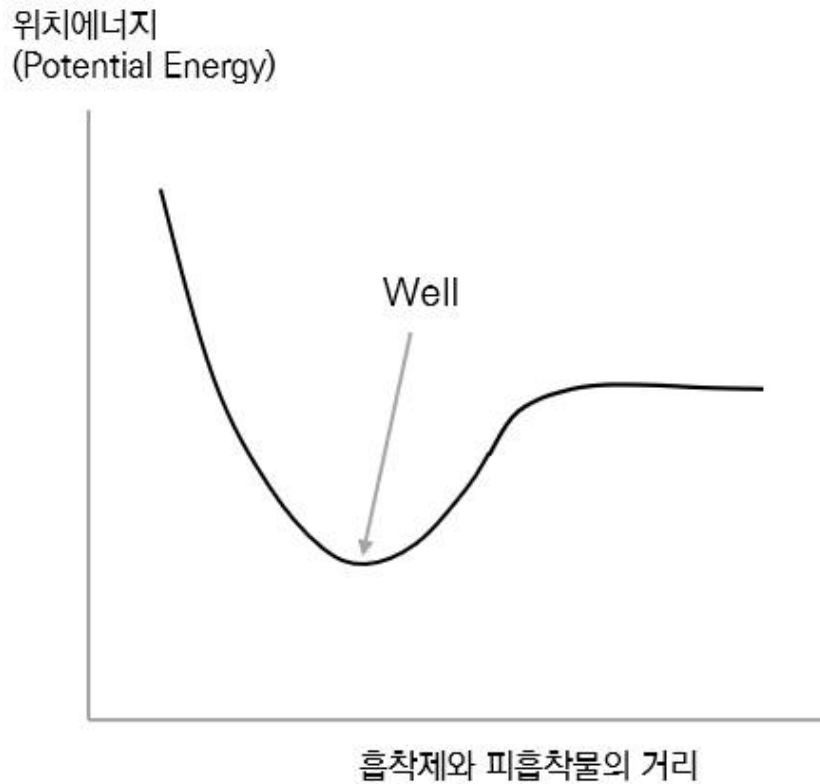
□ (기술 개요) VOCs를 흡착제 표면에 물리적으로 흡착시키고 탈착·회수 재이용하는 기술

○ (흡착) 흡착공정은 화학적 흡착과 물리적 흡착으로 구분할 수 있으며, 화학적 흡착은 피흡착물과 흡착제가 화학적으로 결합하므로, 피흡착물과 흡착제의 화학적 결합을 끊어야 하므로 원래 형태로의 피흡착물 회수가 용이하지 않음. 반면 물리적 흡착은 원래 형태로 피흡착물의 회수가 가능하므로 흡착·회수 재사용기술에서는 물리적 흡착을 적용하고 있음.

- (물리적 흡착원리) 아래 그림은 흡착제 표면으로부터의 거리와 위치에너지 (Potential Energy)의 상관관계를 보여주고 있음. 흡착제와 피흡착물 간에는 ‘반발 (Repulsion)¹¹⁾’과 ‘견인(Attraction)¹²⁾’이 동시에 작용하여 균형을 이루고 있음. 흡착제와 피흡착물의 거리 중에서 위치에너지가 가장 낮은 지점(Well 또는 Dip)에서 흡착이 일어나며, 피흡착물의 탈착을 위해 필요한 에너지가 외부에서 운동 에너지(Kinetic Energy) 형태로 공급되면 탈착이 일어남.

11) 흡착제와 피흡착물의 전자군(Cloud of Electrons) 간의 반발력

12) 전자 핵(Nuclear) 간의 Van der Waals force에 의한 견인력

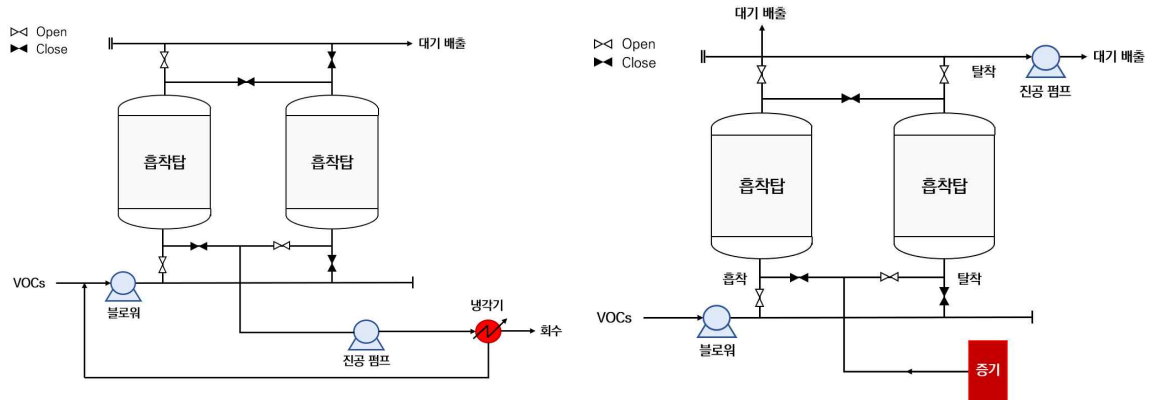


[그림 1-5] 흡착제와 피흡착물의 거리에 따른
위치에너지 변화

(출처) EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?,
Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004

- **(탈착)** 포화된 흡착제 재생 방법은 온도 차이를 이용한 열탈착 방식(Temperature Swing Adsorption, 이하 TSA)과 압력탈착 방식(Pressure Swing Adsorption, 이하 PSA)이 주로 적용되고 있음.
 - **(TSA)** 고온 증기를 이용해 흡착제(예, 활성탄)에 흡착된 VOCs를 회수하는 방법으로 흡착제에 잔류하는 수분을 건조해야 하며, 고온 증기사용으로 화재 등 위험성이 있으며, 운전비용이 높고, 시간이 많이 소요되는 단점이 있음.
 - **(PSA)** 고압에서 VOCs를 흡착시키고, 압력을 낮춰 VOCs를 탈착시키는데 고압에서 운전하므로 운전비용이 높고, 공정 규모가 커지는 단점이 있음.
- **(공정 구성)** 일반적으로 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이

운전되는 동안에 다른 하나는 탈착하게 됨.



[그림 1-6] 흡착·회수공정 모식도

(출처) SEST주식회사 홈페이지 (http://www.sestco.com/kor/vru_01.php) 인용

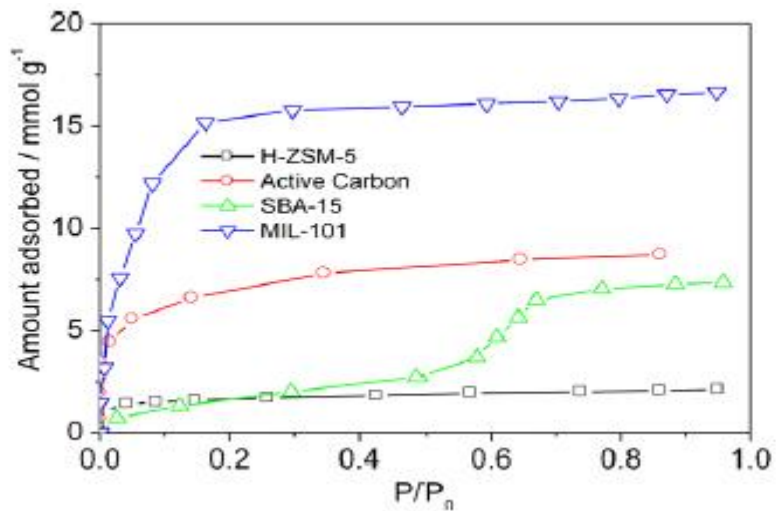
- (적용조건) 1) 벤젠 단일물질 또는 벤젠 혼합 VOCs, 2) 단일배출구의 점오염원, 3) 고농도 벤젠 또는 VOCs 등이며 벤젠과 VOCs의 회수·재이용을 위해서는 처리보다 경제성 있어야 하고, 벤젠과 VOCs 가격과 배출가스 특성에 의해 결정됨.
- (배출가스 특성) 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, 벤젠과 VOCs 농도, 수분량, 온도 등이며, 이는 흡착제 종류에 따라 달라지므로 '흡착제 종류'에서 상세히 설명하였음.
- (흡착제 종류) 벤젠 등의 VOCs 흡착제 종류는 1) 활성탄, 2) 제올라이트(Zeolite), 3) 폴리머(Polymer), 4) MOFs(Metal-organic Frameworks)를 꼽을 수 있으며, 각 흡착제의 특성은 아래에서 보는 것과 같음.

[표 1-4] 흡착제 특성 비교

항목	활성탄	제올라이트	폴리머
표면적	600~1,400 m ² /g	천연 (300~600 m ² /g) 합성 (800~900 m ² /g)	
공극 크기	micropore (공극 직경 < 2 nm), mesopore (2 nm < 공극 직경 < 50 nm), macropore (공극 직경 > 50 nm)	3~30 nm (일정한 공극 크기)	Porous polymers (1~1.6 nm)
표면특성	친수성 ¹ 과 소수성 특성을 모두 보유하고 있음	천연 제올라이트는 친수성이나, 합성 제올라이트는 친수성 또는 소수성으로 목적에 맞게 합성 제작	대부분은 소수성이나 사용 목적에 적합하도록 물성을 변형 합성 제작하는 경우도 있음.
배출가스 유량	60~3,500 m ³ /hr (단일) 병렬 사용시 용량 증가 가능 (for VRU)	60~3,500 m ³ /hr	
VOCs 유입농도	700~1,000 ppm (LEL 25% 이하) 경제성을 고려하면 10~70 VOL% (100,000~700,000 ppmv) (For VRU)	1,000~10,000 ppm (LEL 25% 이하)	
수분량 (상대습도)	50% 미만	94~96%까지 허용	
온도	55°C 이하	상온	
탈착방법	증기 열탈착 ² 진공(Vacuum) 탈착	열탈착 ⁴	열탈착 ⁵
탈착효율 ³	50% 회수효율 98% 이상	90%	50~90%
교체주기	6개월~5년(증기 열탈착) 7년 이상(진공 탈착)	5년 이상	교체주기는 폴리머에 따라 다르나 일반적으로 상당 기간 교체를 하지 않아도 되는 것으로 알려져 있음

- 1: 활성탄의 친수성 특성 때문에 물이 활성탄에 흡착된 피흡착물을 치환·탈착하는데 주요 역할 담당하며, 재생에 필요한 증기량은 목표 제거효율(또는 출구 농도)에 좌우되고, 일정한 증기가 흡수층 온도를 재생온도로 올리는 탈착에너지 공급
- 2: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 활성탄 착화 온도보다는 낮아야 함(재생 최고 온도는 120~180°C)이고, 탈착을 위한 증기 사용량은 0.25~0.35 kg H₂O/kg AC
- 3: EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004
- 4: 열에 강하기 때문에 고온 탈착도 가능
- 5: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 폴리머 용점(Melting Point)보다는 낮아야 하고, 열에 약하기 때문에 탈착 온도는 비교적 낮은 온도에서 운전

- 최근 연구¹³⁾에서는 금속-유기 기반 구조(Metal-organic Frameworks; 이하 MOFs) 촉매가 벤젠 흡착에 있어서 활성탄, 제올라이트보다 성능이 더 좋다고 알려져, MOFs의 적용을 검토해 볼 필요가 있으나 MOFs는 고가이므로 경제성 검토를 통해 결정할 필요가 있음.



[그림 1-9] 여러 흡착제의 벤젠 흡착능 비교

(참고) MIL-101은 Al, Cr이 담지된 Terephthalate로서 MOFs 일종

○ 흡착제 비교 평가

- 활성탄은 화재 위험성이 높고, 비점이 높은 유기화합물에 적용하기 어렵고, 수분 조절이 필요하다는 단점을 갖고 있으며, 이를 극복하기 위해 제올라이트 흡착제가 개발 적용되고 있으나, 제올라이트는 고가이므로 활성탄 적용이 어려운 특정 목적에 주로 활용되고 있음.
- 한편 폴리머 흡착제는 표면특성 조절이 가능하다는 특성 때문에 개발 적용되고 있으나, 열에 취약하고 고가라는 단점을 갖고 있으나, 활성탄이 적용하기 어려운 특정 목적으로 고려해 볼 수 있음.
- 활성탄은 적용사례가 많아 기술적 안정성이 높고, 가장 저렴하나 교체 관련 번거로움이 있으며(최장 사용 기간은 7년), VOCs의 배출특성을 고려하여 제올라이트와 폴리머도 대안으로 고려·결정할 필요가 있음.

13) Khan, N. A., Hasan, Z., Jhung, S. H. (2013), Adsorptive Removal of Hazardous Materials using Metal-organic Frameworks (MOFs): A Review

□ 처리효율과 비용

흡착제	회수효율	설치비용	운전비용	비고
활성탄 ¹	80% 이상	500백만원 이상 ³	2.4백만원/톤	회수 재사용으로
제올라이트 ²	90~96%	-	61,000~163,000원/m ³	원료물질 대체로
폴리머	-	-	-	운전비용 상쇄 효과

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: Khan, F. I., Ghoshal A. Kr. (2000), Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air: A Review

3: 유입 가스 유량과 농도에 따라 비용 차이 발생

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 벤젠의 지속적 재사용으로 인한 구매 비용 절감 벤젠의 환경 유입을 차단하여 환경 개선 효과 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 벤젠 재사용으로 환경 개선 효과가 있는 반면 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 관리가 용이하지 않음.

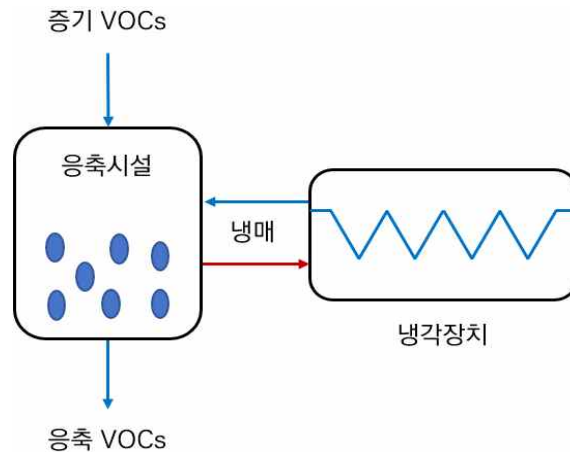
□ **(벤젠 적용)** 벤젠은 대표적 VOCs이며, 분자량이 78.1 g/mol로서 활성탄 흡착(분자량 45~130 g/mol)에 유리한 것으로 알려져 활성탄을 활용한 흡착·회수 재이용이 보편적으로 적용되고 있음.

벤젠 흡착성능(mg/g)	조건*	출처
27.50	25℃, 3.6 l/hr, 6,000 ppm	Park et al. (2010)
161.42	0.680P ₀	Mohan et al. (2009)

* 벤젠 유입압력

2) 응축·회수기술

- (기술 개요) 응축은 온도를 낮추어 기체상태 물질을 액체 상태로 전환하는 방법으로 냉매를 활용하여 기체상태 혼합물의 온도를 낮추어 응축 가능한 물질(VOCs 등)을 응축 불가능한 물질로부터 분리하는 기술

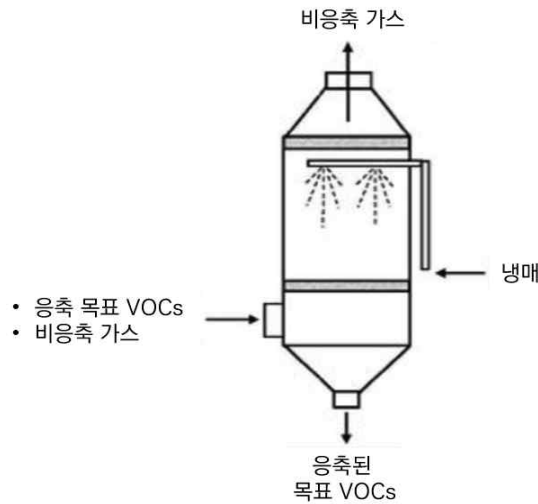


[그림 1-10] 응축·회수 공정도

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

- (원리) 기체상태 물질은 노점(Dew Point)¹⁴⁾에서 응축이 일어나며, 일정한 압력에서 온도를 점차 낮추면 노점이 다른 물질들이 특정 온도에서 응축이 일어나면서 분리 추출됨. 또는 온도는 일정하게 유지하면서 압력을 높여줌으로써 냉각응축을 유도하여 특정 물질을 분리할 수도 있음.
- (종류) 응축은 비냉각방식(Non-refrigeration Method)과 냉매를 사용하는 냉각방식(Refrigeration)으로 구분할 수 있으며, VOCs 회수에서는 냉각방식을 주로 활용하고 있음.
- (응축기 종류) 냉각응축을 유도하는 방법으로 접촉 응축방법과 표면 응축방법으로 구분할 수 있음.
 - (접촉 응축기) 응축 대상 기체를 냉매와 직접 접촉 혼합하면서 열적·물리적 평형이 이루어지면서 VOCs를 응축하여 냉각용 액체(배기가스 중의 물이 어는 것을 방지하기 위해 메탄올 주입)에 흡수됨. 접촉 응축방식의 냉각제는 계속 사용할 수 없고, 냉각제에 응축된 VOCs도 바로 재사용하지 못하고 분리 과정을 거쳐야 하는 단점 때문에 경제적이지 못함.

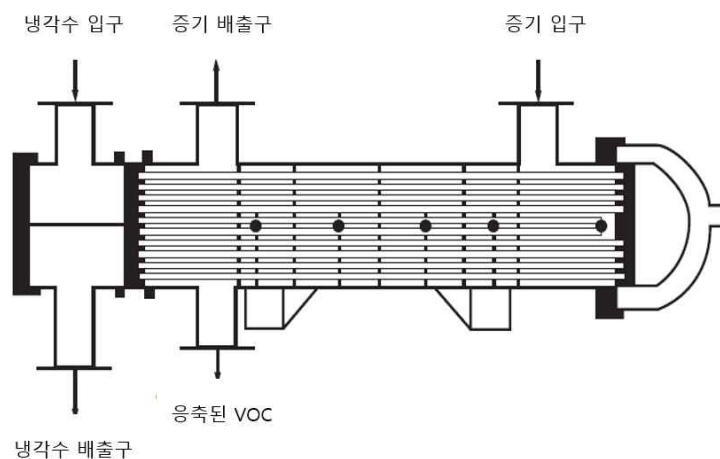
14) 기체상태 물질의 분압과 그 물질의 증기압이 동일한 온도



[그림 1-11] 접촉 응축기

(출처) Jan Carlson(2016), Air Pollution Control Technology Review : Condensationhttps

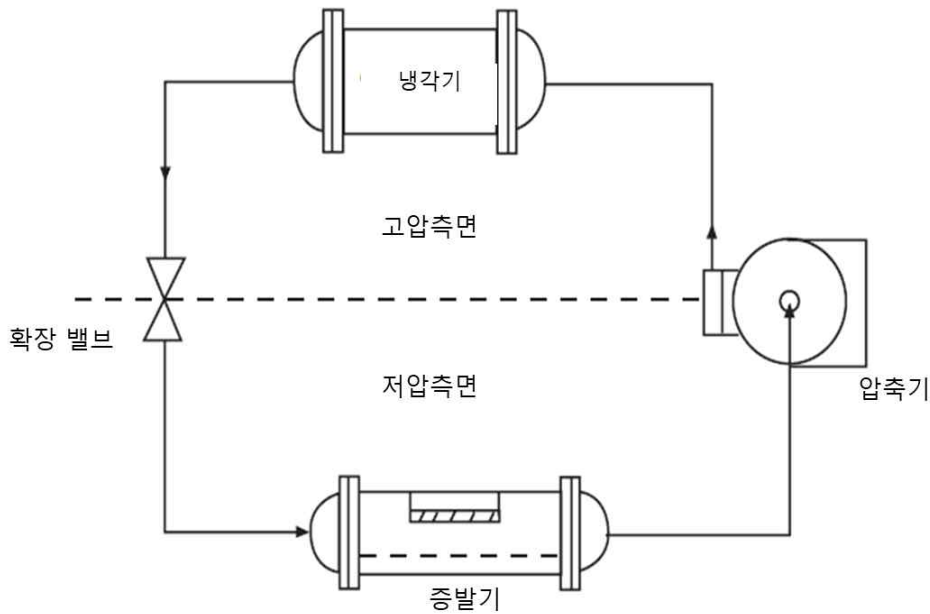
- (표면 응축기) 다관식 열교환기 형태로 관 내부에 냉매를 통과시키는 반면 관 외부로 VOCs를 유입시켜 냉매가 통과하는 관 표면에 VOCs를 응축시키는 방법으로 Shell-and-Tube 응축기가 이에 속하며, 냉매와 VOCs가 직접 접촉하지 않아 분리하지 않고 VOCs를 재사용할 수 있는 장점이고, 냉각제도 지속해서 사용 가능하나, 직접 응축방법보다는 냉각효율이 낮은 단점이 있음.



[그림 1-12] 표면 응축기

(출처) EPA, Section 3: VOC Controls 2-5

- 표면 응축방법은 냉매가 증발·압축·응축·확장 등의 4단계를 거치면서 냉각이 이뤄지며, 냉매는 관을 통해 순환되면서 VOCs를 응축시킴.



[그림 1-13] 냉매 순환단계 모식도

(출처) EPA, Section 3 VOC Controls 2-6

- (냉매 종류) 냉매는 주로 물, 냉수, 염수(Brine), 수소불화탄소(HFC), 암모니아, 저온 유체 등이 있으며, 이들 냉매의 적용 가능한 물질의 응축온도는 냉수는 7°C, 염수(Brine)는 -35°C, 염화불화탄소는 -68°C이며, 질소 또는 이산화탄소와 같은 저온 유체는 -195°C까지 가능함.

냉매	적용 가능 응축온도(°C)	냉각온도(°C)
물	15.5 ~ 26.7	(T _{con} - 9) 응축온도보다 9°C 낮게 설정
냉수	7.2 < T _{con} < 15.2	
염수(Brine, 염화칼슘)	-34.4 < T _{con} < 7.2	
HFC-134a	-67.8 < T _{con} < -34.4	

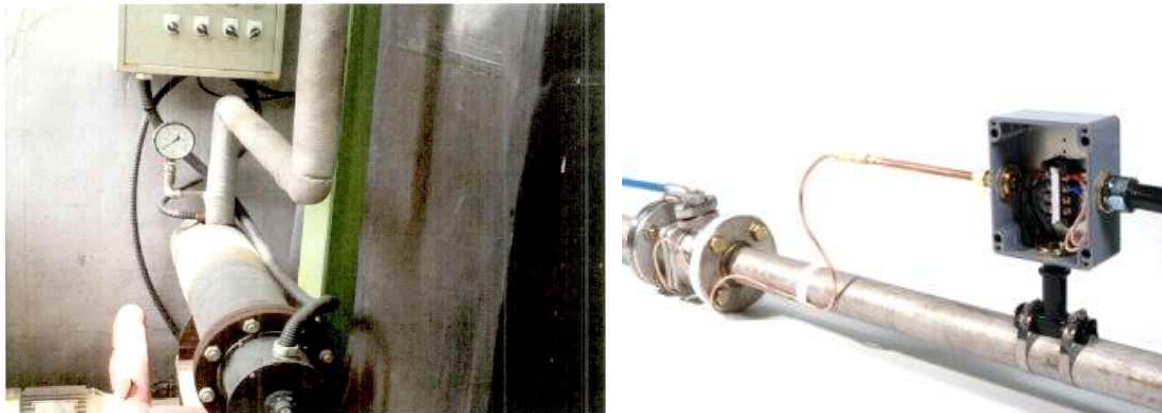
T_{con}: 응축온도(노점, Dew Point)

- (적용조건) 응축·회수 적용을 위해서는 비등점이 38°C(100°F) 이상인 VOCs가 적합하며, 유입농도는 5,000ppm 이상이면 유리하나, 비등점이 낮은 물질은 극저온 또는 압력을 가하는 추가적인 노력이 필요함. VOCs는 비등점, 빙점 등이 유사한 물질이 많아 혼합 VOCs에서 특정 물질(예, 벤젠)의 분리·회수가 쉽지 않아 응축·회수는 단일 VOC 회수에 적합함.

□ **(적용사례)** 원유 저장시설에 기화된 VOCs를 진공펌프로 추출하고, 스크러버로 응축하여 VOCs를 회수하는 기술로서 회수율은 95%¹⁵⁾ 정도로 알려졌다.

□ **유의사항**

- **(결빙 문제)** 응축 대상 VOCs 중에 수분이 함유되어 있거나, 빙점이 높은 VOCs(예, 벤젠, 빙점이 5.5℃)는 응축 과정에서 얼어붙어 관을 폐쇄하므로 운전 문제를 초래하고 생산공정도 중단해야 하므로 수분을 사전에 제거하거나 가열선을 설치하여 간헐적으로 얼음을 녹여주어야 함.



[그림 1-14] 가열선을 설치하여 얼음을 녹이는 배관

(출처) 안산녹색환경지원센터(2011), 응축 기술을 이용한 VOCs 제거 및 회수 설비에 관한 연구
(출처) Heatizon Systems, <https://www.heatizon.com/products/heatizon-brands/guttermelt>

- **(스케일 문제)** 표면 응축방법의 경우 고비점의 유기화합물(타르 등)이 응축기 표면에 응축되면서 스케일을 형성하여 성능 저하 초래
 - 여과장치 등의 전처리를 설치하여 스케일 원인 물질 제거
- **(벤젠 적용)** 벤젠 농도 및 압력에 따른 노점은 아래 표에서 보는 것과 같으며, 상압 조건에서는 냉각온도가 40℃ 이하이므로 냉각 부하가 커져 경제성이 떨어짐.

15) <http://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/units-and-plants-practices/VOCs-recovery-systems/#reference-10>

[표 1-5] 벤젠의 농도와 압력에 따른 노점 변화

압력	농도(ppm)	노점(°C)
1atm	100	-70
	200	-64
	500	-55
	1,000	-48
	2,000	-41
	4,000	-32
	8,000	-23
3atm	100	-60
	200	-54
	500	-44
	1,000	-36
	2,000	-27
	4,000	-17
	8,000	-6

(출처) 환경부(2011), 초저온 냉각기술 이용 휘발성유기화합물 회수기술 개발, 032-091-017

- 벤젠의 낮은 빙점으로 인해 저온 냉매를 적용해야 하며, 회수율도 90%이므로 벤젠을 응축·회수방법은 경제성이 떨어짐.

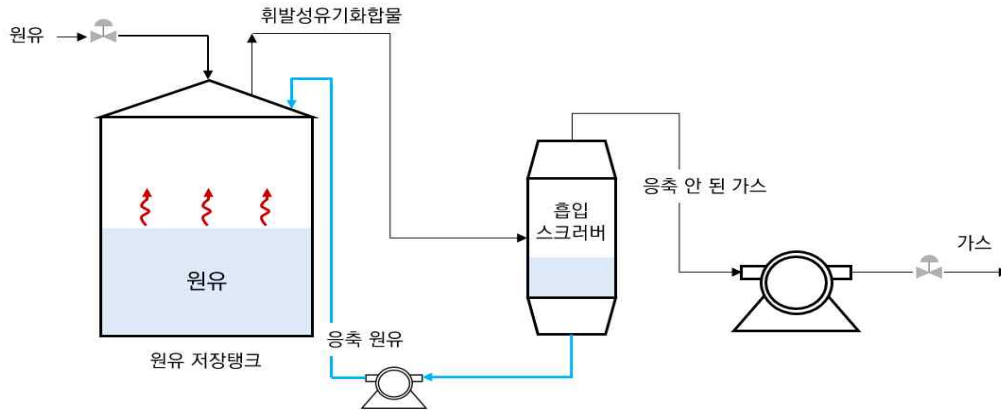
회수율(%)*	설치비용	운영비용	비고
90	100백만원 이상	30백만원 이상	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 액체질소 적용한 경우

3) 흡수·회수기술

□ (기술 개요) 단일 VOCs(예, 벤젠) 또는 혼합 VOCs가 포함된 배출가스를 흡수제에 물리흡수 시킨 다음 방산(Stripping) 공정을 통해 VOCs를 분리한 다음 응축 과정을 거쳐 회수하는 기술



[그림 1-15] 흡수·회수 시설의 공정도

(출처) ipieca(2013), VOC recovery Systems 인용

○ (소극적 회수기술, Passive Recovery Technology) 저장시설 등으로부터 추출된 VOCs에 압력을 가해 원유에 흡수¹⁶⁾시키거나, 다양한 유기용제(예, Kerosene)를 흡수제로 사용하여 응축 흡수¹⁷⁾(원유 저장시설의 경우는 원유 자체를 흡수제로 사용)한 다음 저장시설에 재투입하고, 회수하지 못한 VOCs는 고온 산화 처리 또는 다른 용도로 활용

16) 압력 흡수의 회수율은 80%

17) 응축 흡수의 회수율은 90%



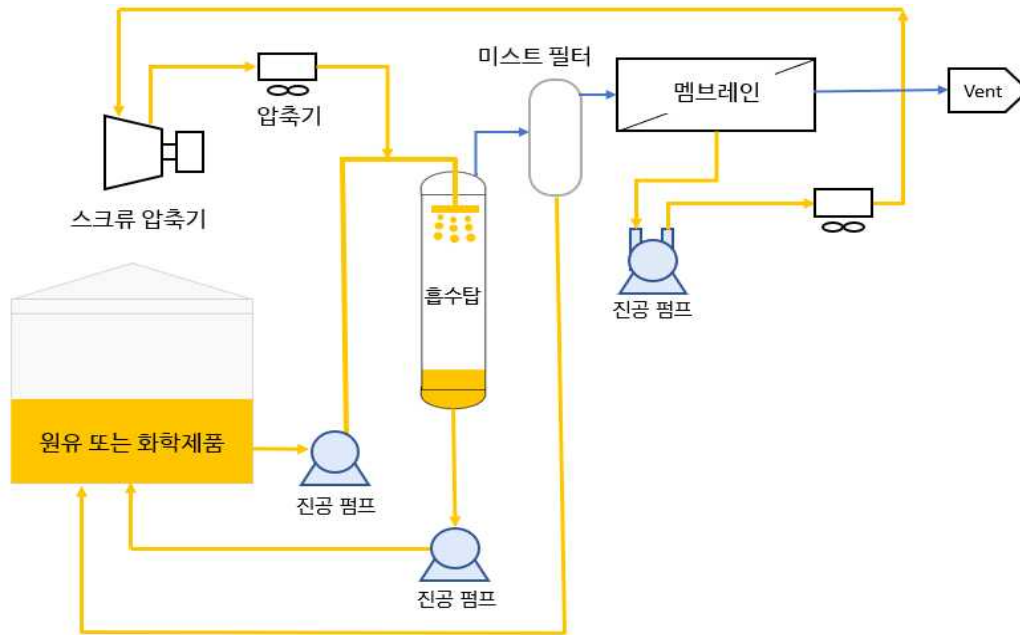
[그림 1-16] 선박에서 원유 하역 과정에서의 VOCs 흡수·회수 및 고온 산화 처리

(출처) JX(2013), Technologies for Volatile Organic Compounds

- (운전조건) 흡수 반응기 운전조건은 상황에 따라 달라지며(현장 적용사례18): 온도는 3~7℃, 압력은 0.3~0.5 MPa), 흡수제로는 원유 또는 석유화학제품 등 저장시설의 물질과 같은 물질을 사용하여 용해·회수
- (적극적 회수기술, Active Recovery Technology) 저장시설로부터 VOCs를 포집한 다음 흡수공정과 타 회수공정을 연계하여 VOCs를 회수하는 기술(흡수공정만으로는 회수효율이 떨어지므로 연계 공정 적용)
 - (흡수/막분리 연계방식) 흡수 단독공정에 막분리를 후속으로 연결한 방식으로 흡수 단독공정의 경우 VOCs 회수율이 70% 수준에 불과하였으나 막분리 공정을 후속으로 연결하여 회수율이 95%로 높아졌음19).

18) JX Nippon Oil and Energy에서 일본 가고시마의 키이레 터미널(Kiire Terminal)에 설치 운전(처리규모: 20,000 Sm³/hr)

19) CARBOVAC, Vapor Recovery Solutions

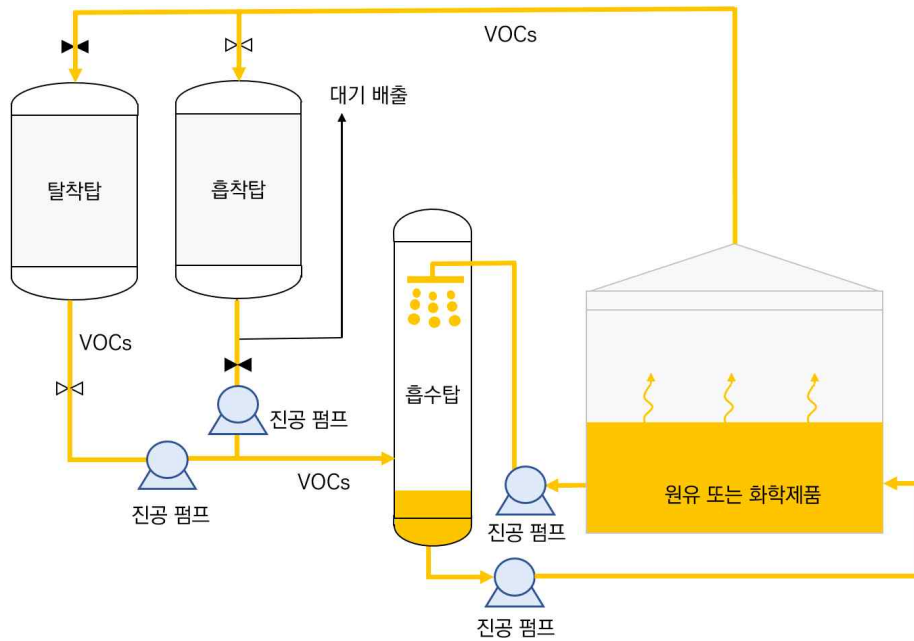


[그림 1-17] 흡수/막분리 연계 회수공정

(출처) BORSIG Membrane Technology GmbH, BMEMBRANE TECHNOLOGY FOR PROCESSES AND ENVIRONMENT, 8p 인용

- (흡수/흡착 연계방식) 흡수공정 앞에 활성탄을 활용한 흡·탈착공정을 설치하여 저장시설 또는 운반시설로부터 휘발·배출된 VOCs를 흡착시킨 다음 감압하여 VOCs를 탈착시킴. 탈착된 VOCs를 흡수탑에 주입하여 저장시설의 원유 또는 석유화학제품에 용해·회수하는 방식임. VOCs 회수율이 흡수 단독공정의 70% 안팎에서 90~99%로 높아졌음.
- (흡착) 활성탄 등의 흡착시설을 이용하여 저장시설 등으로부터 배출되는 VOCs를 흡착시켜 불활성기체²⁰⁾와 분리
- (탈착) 일반적으로 흡착탑에 진공펌프를 걸어 VOCs 탈착

20) 운반기체로서 농도 조절과 화재 위험도를 낮추기 위한 목적



[그림 1-18] 흡수/흡착 연계 회수공정

(출처) logo alma Carbovac, Vapour Recovery Units, 4p 인용

□ 적용조건(흡수 단독공정 기준)

○ 배출가스 특성(충전탑 기준)

항목	정보
배출가스 유량	900~126,000 sm ³ /hr
벤젠 유입농도	250~10,000 ppm (LEL 25% 이하)
배출가스 유입온도	4~38℃, 온도가 높아질수록 흡수율은 저하

(출처) EPA(2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-015

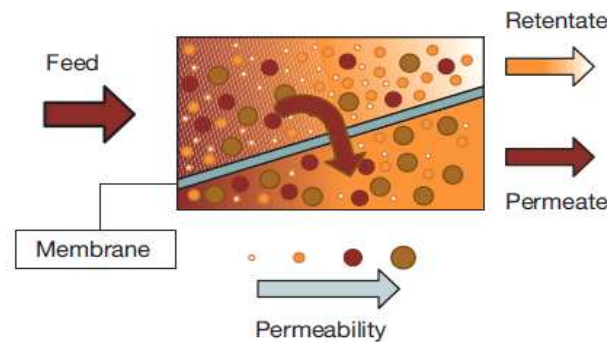
□ **(유의사항)** 벤젠 등의 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 상대적으로 낮은 압력손실 • 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 • 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 • 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 • 상대적으로 낮은 설치비용 • 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 폐수처리 문제 • 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 벤젠 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 흡수·회수기술은 벤젠 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

4) 막분리·회수기술

- (기술 개요) 각각 가스의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술로서 가스 분리는 막의 양단에 가스 분압 차이(농도 차이)를 이용함.
- (분리막) 혼합 성분으로부터 선택적으로 특정 성분을 분리할 수 있는 물리적 경계층으로 막 양단의 가스 분압 차이(농도 차이)가 물질 전달력임.
- (분리막 성능) 혼합 성분 중에서 분리 목표 물질의 선택성과 막 양단의 압력 차에 의해 분리막 성능이 결정되며, 선택성은 10 이상, 압력 차 성능지표인 압력비(공급측 총압에 대한 투과측 총압 비)는 일반적으로 30~50 정도이어야 기술적으로 실현가능함.



[그림 1-19] 막분리 프로세스

(출처) ITM-CNR, Membrane per la separazione di CO₂ erattori a membrana per il suo uso
(<https://www.enea.it/it/seguici/events/co2/IULIANELLI.pdf>) 인용

□ 적용조건

- 벤젠을 막으로 분리하기 위해서는 혼합가스 종류, 벤젠 농도, 유량, 배출가스 온도 등 다양한 정보가 필요하며, 이는 대상 업종 및 공정에 따라 다른 수요맞춤형 막이 개발 적용되어야 함. 그러므로 벤젠 분리를 위한 적용조건을 일반화하기는 어려운 상황임.

□ 적용사례

- (필요성) 미국 에너지부(Department of Energy, 이하 DOE)의 관할 지역에서 염소계 VOCs로 오염된 토양으로부터 배출되는 염소계 VOCs 함유 가스의 적정 처리 필요성 대두
- (적용 시기 및 지점) 1999년 3월부터 2000년 2월까지 미국 캘리포니아 주의 Sacramento 시 외곽에 있는 McClellan Air Force Base(AFB)

○ 조건 및 설계목표

항목	내용
설계 유량	58.9 Sm ³ /hr
배출 VOCs 농도	23 ~ 101 ppm
처리 목표 VOCs 농도	10 ppm

○ (적용 결과) Membrane Technologies and Research, Inc.(MTR)는 막 (Permselective Membrane)을 사용하여 VOCs를 선택적으로 공기와 분리하여 (VOCs는 막을 통과시키고, 공기는 배제) VOCs를 액상으로 회수하였고, 설계 목표치도 달성하였음.

○ (적용 문제점)

- (CO₂ 문제점) 배출가스 중에 CO₂ 농도는 1~3%이었으며, CO₂에 의해 막분리 성능이 2~4배 정도 감소하였음.

- (오일과 물의 문제점) 배출가스 중의 오일과 물은 막의 막힘 현상(Fouling)을 초래하여 막분리 성능을 저하한다고 밝혀졌으며, 이는 효과적 전처리로 해결할 수 있다고 결론 내렸음.

○ (비용 분석) VOCs 농도 5,000 ppm의 배출가스 300 Sm³/hr를 VOCs 농도 10 ppm 이하로 처리하기 위한 시설 설치비용은 780백만원²¹⁾ 정도 필요하고, 운영비용은 800백만원²¹⁾ 정도 필요하다고 보고하였음.

VOCs 유입농도	연간 운영비용*
100 ppm	499.2백만원
1,000 ppm	585.6백만원
5,000 ppm	799.2백만원
10,000 ppm	856.8백만원

* 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정
(출처) US DOE(2001), Membrane System for the Recovery of Volatile Organic Compounds from Remediation Off-Gases, DOE/EM-0614

21) 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 분리 과정에서 상변화가 없으므로 에너지 소모가 적음 • 장치 구성이 단순하고 기계 장치가 최소화되어서 유지관리가 쉬움 • 특정 물질 선택성이 탁월함 • 다양한 목적에 적용 가능한 막 제조가 가능함(원료가 다양하여 목적에 따라 다양한 막 제조 가능) • 환경에 무해한 또는 영향이 적은 원료 또는 재질을 사용하므로 환경친화적 공정 	<ul style="list-style-type: none"> • 막의 특정 화학물질에 대한 취약성(특정 화학물질과의 접촉을 피해야 하므로 공정 적용 한계) • 중합체이므로 온도에 영향을 받기 때문에 특정 화학반응 공정(온도가 높은 공정)에 적용하기 어려움(적용의 한계) • 규모 확장의 한계(일반적으로 단위 모듈을 반복적으로 연결하여 규모 확장하는 방식으로 대용량 설치의 한계) • 막 오염과 막힘 현상으로 교체 필요성(높은 운영비용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 벤젠 등의 VOCs에 대한 선택성이 탁월하고, 석유화학산업에서 이미 적용한 사례가 존재하여 벤젠을 분리·회수 재사용은 기술적으로 가능함 • 막분리 시설의 설치 및 운영비가 높아 타 기술과 효율 및 경제성을 비교 평가하여 막분리시설의 적용 여부를 결정할 필요가 있음

- **(벤젠 적용)** 벤젠과 사이클로헥산을 막으로 분리한 연구²²⁾²³⁾는 다수 존재하나, 특정 산업 및 공정에 직접 적용한 사례는 많지 않음. 그리고 석유화학산업에서 막을 사용하여 고농도 혼합 폐가스에서 고부가가치 VOCs를 회수하는데 적용한 사례가 있음. 그러므로 기술적으로 막분리·회수기술을 벤젠의 분리 회수에 적용 가능하나, 경제성에 대한 검토가 필요함.

22) Villalunga, J.P. and Tabe-Mohammadi, A. (2000), A Review on Separation of Benzene/Cyclohexane Mixtures by Pervaporation Process, J. of Membrane Sci. 169, 159-174

23) Peng et al. (2007) Novel Poly(vinyl alcohol)/Carbon Nanotube Hybrid Membranes for Pervaporation Separation of Benzene/Cyclohexane Mixtures, J. of Membrane Sci. 297, 236-242

1.4.3

대기오염방지시설

1.4.3.1. 공정관리

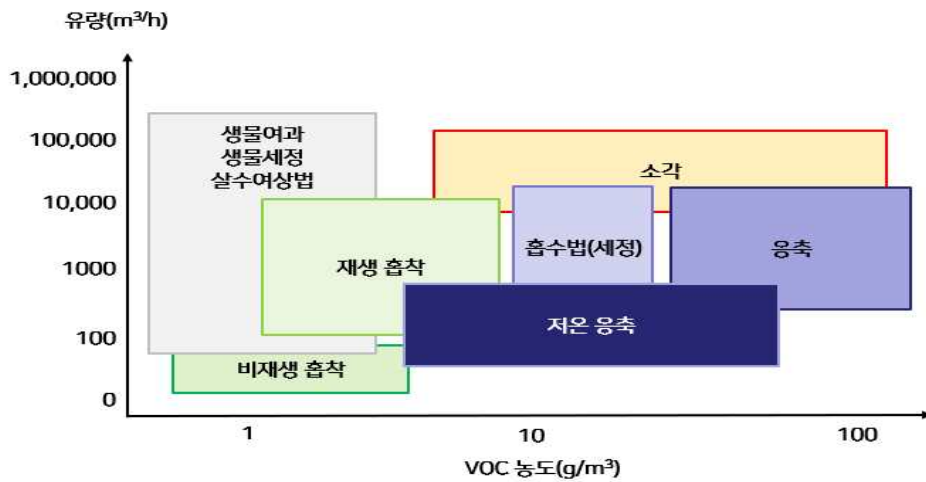
대기오염방지시설	적정관리 및 유지보수 방법
연소에 의한 제거시설	<ul style="list-style-type: none"> 배출가스 처리온도를 적정 관리하여 불완전연소에 의한 배출량 최소화(축열식 연소산화장치; Regenerative Thermal Oxidizer; RTO) 시설의 경우 750~800℃ 유지) → 저농도 가스에 적용/VCU(Vapor combustion Unit) → 고농도 가스에 적용(파괴효율:98% 이상)/CEB(Certified Ultra-Low Emissions Burner) (파괴효율 : 99.99%)
촉매 산화에 의한 제거시설	<ul style="list-style-type: none"> 촉매 산화에 의한 화학물질 제거시설의 경우 흡착시설과 마찬가지로 시간이 지날수록 촉매 산화 효율이 떨어지므로 공정 운전조건에 따라 교체주기를 결정하고, 정기적으로 성능을 파악하여 적정 수준 처리효율 유지

1.4.3.2. 처리기술

□ 화학물질을 처리하는 방법은 아래 표에서 보는 것처럼 크게 연소기술, 흡착기술, 흡수기술, 생물학적 처리기술로 구분할 수 있음.

대분류	소분류
연소기술	고온산화법(열소각법); TO: Thermal Oxidation
	촉매산화(촉매연소)법; CO: Catalytic Oxidation
	축열식 열소각기술; RTO: Regenerative TO
	축열식 촉매산화기술; RCO: Regenerative Catalytic Oxidation
	무화염 열산화법; FTO: Flameless Thermal Oxidation
	흡탈착 촉매산화법; CCO: Concentration Catalytic Oxidation
	흡착·처리기술
	흡수·처리기술
	생물학적 처리기술

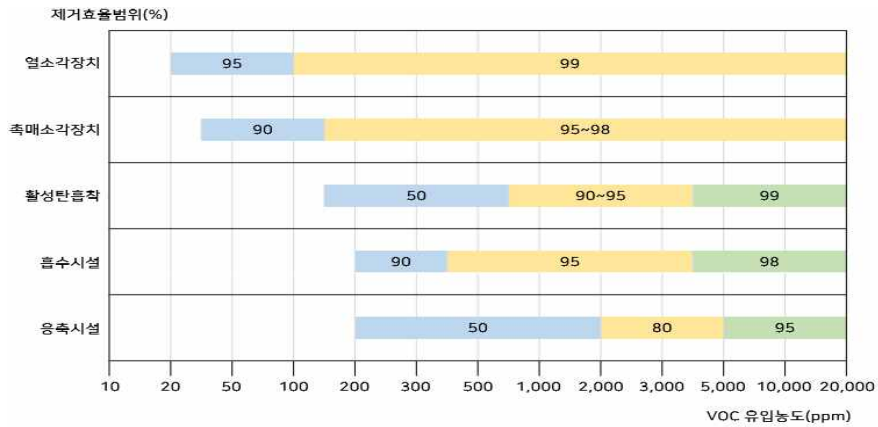
□ [그림 1-20]은 VOCs 유입 유량과 농도에 대한 처리기술의 적용조건을 개략적으로 도시하고 있음. 생물학적 방법은 적용 유량의 범위는 넓지만, 적용 가능한 농도는 상대적으로 협소함을 알 수 있음. 반면에 소각은 적용 농도 범위는 넓지만, 적용 가능한 유량 범위는 넓지 않음을 알 수 있음.



[그림 1-20] VOCs 처리기술별 VOCs 농도와 유입 유량의 적용 범위

(출처) Joseph S. Devinny, Marc A. Deshusses, Todd S. Webster, Biofiltration for Air pollution control

□ [그림 1-21]는 VOCs 처리기술별로 VOCs 유입농도에 대한 처리효율을 도시하고 있음. 열소각장치와 촉매소각장치는 상대적으로 넓은 유입농도 범위에서 95% 이상의 효율을 보인 반면 활성탄과 응축시설은 상대적으로 높은 농도인 500ppm 이상에서 95%의 성능을 보여주고 있음.



[그림 1-21] VOCs 처리기술의 VOCs 유입농도 대비 처리효율

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

□ [표 1-6]은 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술 선택 기준을 제시하고 있어, 방지기술 선택 지침으로 활용할 수 있음.

[표 1-6] 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술의 선택 기준

대상물질	응축	흡착	열소각	촉매연소	축열식 열소각	무화염 열소각
저유량 저농도	●	●	●	●	○	●
고유량 저농도	●	●	●	●	●	●
저유량 고농도	●	○	●	○	○	●
고유량 고농도	●	○	●	○	○	●
비응축 탄화수소 가스	X	○	●	●	●	●
응축 탄화수소 가스	●	●	●	●	●	●
비응축 CI/S 포함가스	X	○	●	○	●	●
응축 CI/S 포함가스	●	●	●	○	●	●
연속 운전	●	●	●	●	●	●
회분식 운전	●	●	○	○	○	●

●: 매우 좋음, ●: 좋음, ●: 보통, ○: 나쁨, X: 적용 불가

(출처) 양고수, '열처리 기술을 이용한 VOCs/악취 처리기술 및 관리현황' 자료 수정 인용

□ [그림 1-20], [그림 1-21], [표 1-6]에서 보는 것처럼 대상물질의 유입농도와 유량

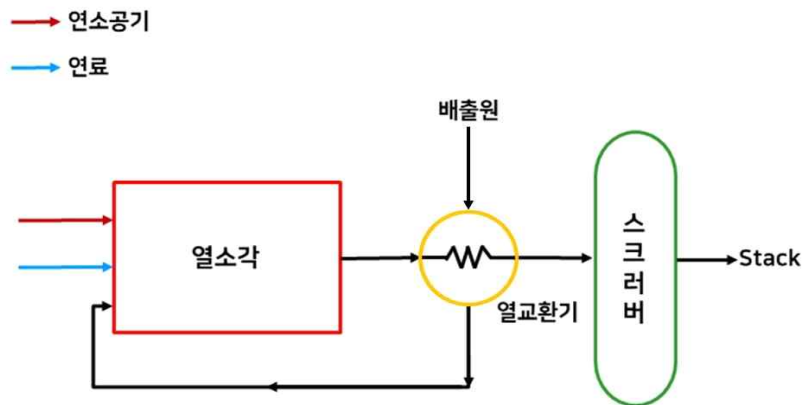
정보를 활용하여 기술적으로 적합한 대상물질의 처리기술을 일차적으로 선정할 수 있음. 다음으로는 저감목표, 경제성, 현장 조건(예, 설치부지 등), 혼합물 종류, 온도와 압력 등을 종합적으로 고려하여 처리기술을 최종적으로 선정해야 함.

1) 연소기술

가) 고온산화(열소각)기술

□ (기술 개요) 벤젠 함유 배출가스와 예열 공기를 잘 혼합한 후 고온에서 연소시켜 VOCs를 이산화탄소와 물로 전환

○ 고온산화법의 벤젠 처리효율은 소각온도, 체류시간, 벤젠 유입농도, 벤젠 함유 배출가스의 균질성 등에 의존함.



[그림 1-22] 고온산화(열소각)법 공정 예시

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

□ 적용조건

○ 배출가스 특성

항목	정보
배출가스 유량 ¹	864~86,400 sm ³ /hr
벤젠 농도 ²	100~2000 ppm(LEL 25% 이하)

1: EPA(2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-019

2: Khan, F.I. and Ghoshal, A.K. (2000), Removal of Volatile Organic Compounds from Polluted Air

○ (소각온도 및 체류시간) VOCs 처리를 위한 소각온도는 일반적으로 700~800℃이며²⁴⁾, 벤젠의 소각온도는 764℃, 체류시간 1초에서 99.99% 처리효율²⁵⁾을 보인다고 알려지고 있음. 그러나 벤젠 이외의 물질이 포함되어 있는 경우는 소각온도와 체류시간이 달라질 수 있음.

24) KONETIC(2015), 도장공정의 VOCs 저감기술

25) 환경부(2000), VOCs 방지시설 설계지침

○ **(산소농도)** 벤젠의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL를 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.

□ **(유의사항)** 할로젠과 황을 포함한 화학물질은 연소과정에서 HCl, SO₂ 등의 강산 가스를 생산하여 장치 부식을 초래할 수 있어 가급적으로 처리하지 않는 것이 바람직함. 벤젠을 처리할 때는 문제가 없으나 할로젠과 황을 포함한 화학물질이 배출가스 중에 함께 출현하는 경우는 강산 가스의 생성량 등을 고려하여 적용 여부를 결정할 필요가 있음.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 적용 사례가 많은 높은 처리 효율의 안정된 기술 LEL의 20% 이상이고 높은 처리효율을 요구할 경우 최상의 선택 중 하나 	<ul style="list-style-type: none"> 벤젠 농도가 낮은 경우 보조 연료 사용으로 높은 운영비 유량 변동이 심한 경우는 적용 부적합 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 벤젠 농도를 처리할 수 있으나, 벤젠 농도가 낮은 경우는 보조연료 사용으로 운영비가 높아질 수 있어 소각 앞 단계 농축시설을 설치 운영하여 농도를 일정 수준 이상으로 높일 필요가 있음

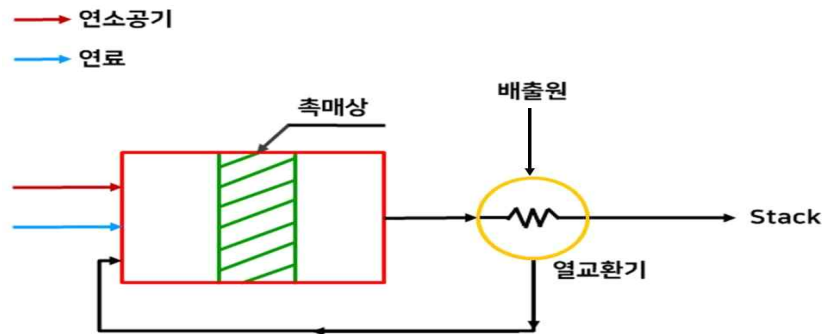
□ **(벤젠 적용)** 벤젠의 고온산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 고온산화 기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99.9	180백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

나) 촉매산화(촉매연소)기술

- (기술 개요) 촉매산화법은 연소기 내부에 충전되어 있는 촉매가 연소에 필요한 활성화에너지를 낮춤으로써 350~500℃ 정도의 비교적 저온에서 연소가 가능토록 하는 연소방식
 - 촉매로서는 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금이 주로 사용되며, 백금촉매는 HCl 등에 의해 비활성화가 빨리 일어나므로 염소계 VOCs 촉매산화를 위해서는 산화코발트, 산화구리/산화망간 등의 산화금속 촉매가 사용되고 있음.
 - 벤젠은 염소계 VOCs가 아니므로 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금 촉매를 적용해도 무방
 - 촉매산화법의 벤젠 처리효율은 벤젠 유입농도, 소각온도, 체류시간, 산소농도, 촉매 특성, 공간속도²⁶⁾ 등에 의존함.



[그림 1-23] 촉매산화(촉매연소)법 공정 예시
(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

□ 적용조건

○ 배출가스 특성

항목	정보
배출가스 유량 ¹⁾	1,200~86,400 sm ³ /hr
벤젠 농도 ²⁾	1 ppm(LEL 25% 이하) 이상
배출가스 유입온도	320~430℃

1: EPA(2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-018

2: 낮은 농도에서도 효과적이며, LEL 25% 이하로 조절하도록 규제하고 있으며, 벤젠의 농도를 낮추기 위해서는 투입 전에 공기로 희석해야 함.

26) 공간속도는 촉매상으로 들어가는 가스 유량을 촉매상의 겉보기 부피로 나눈 값

- (소각온도) 효과적·효율적으로 VOCs 촉매산화처리를 위해서는 벤젠이 함유된 배출 가스를 320 ~ 430℃로 예열한 다음 촉매연소기에 투입하며, 촉매반응기 출구 온도 상한선은 540 ~ 675℃가 되도록 설계함. 촉매 종류에 따라 온도 상한선은 다르지만, 고온일수록 촉매 수명이 짧아짐.

□ 유의사항

- (피독 현상) 촉매산화반응에서 가장 치명적인 것은 촉매 비활성화를 초래하는 피독 현상을 꼽을 수 있으며, 촉매 피독은 1) 미세먼지, 타르 고분자물질 등이 촉매 표면에 물리적으로 흡착하여 활성 저하, 2) 염소, 브롬, 불소 등에 의한 화학적 피독, 3) 황, 인, 규소, 중금속 등이 촉매 표면에 있는 공극을 폐쇄하여 표면적 감소 등을 꼽을 수 있음.
 - 도장 도료 중에 유기실리콘 화합물이 포함되어 있는 경우가 많은데 이것이 연소 되면서 무기 규소화합물로 전환되면서 공극을 폐쇄하여 촉매 효과를 저하시킴.
- (대응방안) 일반적으로 전처리를 하지 않으나, 미세먼지, 타르, 촉매 피독 원인물질을 촉매소각장치 유입 전에 미리 제거하는 것이 촉매 수명 연장을 위해 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 벤젠 처리가 가능함 • 연료 사용량이 적음 • 낮은 온도 조작이 가능함 • 화재 위험이 적음 • 화염 역류가 적음 • 고온산화방식과 비교하여 동일 성능에서 규모가 상대적으로 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • 초기 비용이 높음 • 촉매 비활성화로 촉매 교체가 정기적으로 이뤄져 운영비용이 높음 • 촉매 피독 원인물질을 사전에 제거해 주어야 함 • 폐촉매는 지정폐기물로 관리해야 함 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술이며 저농도 처리가 가능한 반면 배출가스 유량이 낮고, VOCs 종류 및 농도 변화가 심하지 않은 시설에 적합함

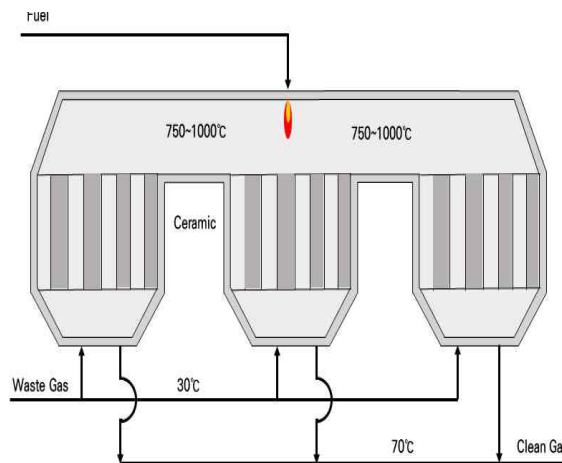
□ **(벤젠 적용)** 벤젠의 촉매산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 촉매산화 기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99.9	210백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

다) 축열식 열소각기술

□ **(기술 개요)** 기본적으로 열소각기술과 VOCs 처리방법은 동일하나, 축열식 열소각기술은 Shell-and-Tube 형태의 열교환기를 활용하여 에너지 회수율을 기존의 열소각기술의 50~60%에서 85~95%로 높인 기술



[그림 1-24] 축열식 열소각기술

(출처) 환경보전협회, 환경정보 no.370 대기오염 방지시설 선정 및 유지관리 기술 인용

□ 적용조건

○ 배출가스 특성

항목	정보
배출가스 유량	8,640~864,000 sm ³ /hr
벤젠 유입농도	100ppm 이하까지 처리 가능(LEL 25% 이하)
배출가스 유입온도	천연가스로 공기를 760~820°C로 예열한 다음 연소기 투입

(출처) EPA(2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-021

- (소각온도 및 체류시간) RTO의 소각온도는 1,100℃이며²⁷⁾, 체류시간은 1초 이하임. 벤젠의 소각온도는 764℃, 체류시간 1초에서 99.99% 처리효율²⁸⁾을 보이고 있어 RTO의 일반적 소각온도에서는 벤젠은 99.99%의 처리율을 보일 것으로 여겨짐.
- (산소농도) 벤젠의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL을 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.
- (유의사항) 할로젠과 황을 포함한 화학물질은 연소과정에서 HCl, SO₂ 등의 강산 가스를 생산하여 장치 부식을 초래할 수 있어 가급적으로 처리하지 않는 것이 바람직함. 벤젠을 처리할 때는 문제가 없으나 할로젠과 황을 포함한 화학물질이 배출가스 중에 함께 출현하는 경우는 강산 가스의 생성량 등을 고려하여 적용 여부를 결정할 필요가 있음.
- 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 에너지 회수율이 높아 연료 소모량이 적음 • 높은 운전온도로 처리효율 향상 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 초기 투자비용 • 시설 규모가 고온산화시설보다 커짐 • 높은 유지관리 보수비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 저농도 벤젠을 처리할 수 있으나 초기 투자비용과 운영비용이 높음

- (벤젠 적용) 벤젠의 축열식 열소각기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 축열식 열소각기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99%	300백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

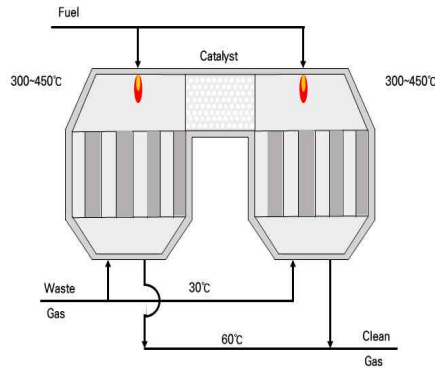
※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

27) EPA(2017), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-021
 28) 환경부(2000), VOCs 방지시설 설계지침

라) 축열식 촉매산화기술

□ (기술 개요) 축열식 촉매산화기술은 기본적으로 촉매산화기술과 동일하나, 축열식 산화기술은 Shell-and-Tube 형태의 열교환기를 활용하여 열교환 효율을 기존의 열소각기술의 50~60%에서 85~95%로 높인 기술

- 촉매로서는 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금이 주로 사용되며, 백금촉매는 HCl 등에 의해 비활성화가 빨리 일어나므로 염소계 VOCs 촉매산화를 위해서는 산화코발트, 산화구리/산화망간 등의 산화금속 촉매가 사용되고 있음.
- 벤젠은 염소계 VOCs가 아니므로 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금 촉매를 적용해도 무방



[그림 1-25] 축열식 촉매산화기술

(출처) 환경보전협회, 환경정보 no.370 대기오염 방지시설 선정 및 유지관리 기술 인용

□ 적용조건

○ 배출가스 특성

항목	정보
배출가스 유량 ¹	8,640~864,000 sm ³ /hr
벤젠 유입농도 ¹	100ppm 이하까지 처리 가능(LEL 25% 이하)
배출가스 유입온도 ²	천연가스로 공기를 320~430°C로 예열한 다음 촉매연소기 투입

1: EPA(2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-021

2: EPA(2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-018

- (소각온도 및 체류시간) RCO의 소각온도는 350~500°C이며²⁹⁾, 체류시간은 1초 이하임.

- (산소농도) 벤젠의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL를 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.

□ 유의사항

- (피독 현상) 촉매산화반응에서 가장 치명적인 것은 촉매 비활성화를 초래하는 피독 현상을 꼽을 수 있으며, 촉매 피독은 1) 미세먼지, 타르 고분자물질 등이 촉매 표면에 물리적으로 흡착하여 활성 저하, 2) 염소, 브롬, 불소 등에 의한 화학적 피독, 3) 황, 인, 규소, 중금속 등이 촉매 표면에 있는 공극을 폐쇄하여 표면적 감소 등을 꼽을 수 있음.
 - 도장 도료 중에 유기실리콘 화합물이 포함되어 있는 경우가 많은데 이것이 연소되면서 무기 규소화합물로 전환되면서 공극을 폐쇄하여 촉매 효과를 저하시킴.
- (대응방안) 일반적으로 전처리를 적용하고 있지 않으나, 미세먼지, 타르, 촉매 피독 원인물질을 촉매소각장치 유입 전에 미리 제거하여 촉매 수명을 연장하기도 함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 온도에서 운전하므로 연료 소모량이 RTO보다 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 초기 투자비용 • 시설 규모가 고온산화시설보다 커짐 • 높은 유지관리 보수비용 • 촉매 피독 • 폐촉매는 재생되지 못하고 지정폐기물로 처리 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 저농도 벤젠을 낮은 온도에서 처리할 수 있으나 시설 비용이 높고, 촉매 피독으로 인해 촉매 교체가 불가피하여 운영비용이 높음

- (벤젠 적용) 벤젠의 축열식 촉매산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 축열식 촉매산화기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99%	360백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

29) EPA(2017), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-021

2) 흡착 처리기술

□ (기술 개요) 화학물질을 흡착제 표면에 물리적으로 흡착하여 처리하는 기술

○ (공정 구성) 일반적으로 활성탄이 많이 사용되고 있으며, 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 증기 또는 열에 의해 피흡착물의 탈착이 이뤄지는 흡착탑 재생공정임. 탈착 과정에서 농도가 높아진 피흡착물이 배출되며, 이를 연소처리기술 등의 후속 공정에서 처리함.

○ (흡착원리) 흡착제와 피흡착물 간에 Van der Waals 힘이 작용하고 있으며, 흡착제와 피흡착물 간의 거리에 따라 위치에너지가 달라짐. 위치에너지가 가장 낮은 지점이 형성되며, 그 지점에서 흡착이 일어남.

○ (흡착·회수 재사용과 차이점) 흡착·처리기술은 벤젠 등의 유기오염물질을 흡착·처리하는데 목적을 두고 있지만, 흡착·회수 재사용 기술은 벤젠 등을 회수하여 재사용하는데 초점을 맞추고 있음. 즉 두 기술의 원리는 동일하나 목적에서 차이가 있음.

□ (적용조건) 흡착·처리 공정 단독으로 운영하기보다는 연소처리기술 전단에 설치하여 처리대상물질의 농도를 적정 수준 이상으로 높여 연소처리기술의 처리 성능을 배가시키는 역할을 담당하며, 활성탄이 주로 사용되고 있음.

○ (배출가스 특성) 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, VOCs 농도, 수분량, 온도 등임.

항목	정보
배출가스 유량	sm ³ /hr
벤젠 유입농도	ppm(LEL 25% 이하)
수분량(상대습도)	50% 미만
온도	55℃ 이하

(출처) EPA(2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-019

(출처) Khan, F.I. and Ghoshal, A.K. (2000), Removal of Volatile Organic Compounds from Polluted Air

□ **(유의사항)** 활성탄 자체가 고온에서 화재 위험성³⁰⁾이 있고, 화재 및 폭발위험성 물질이 농축되어 화재 및 폭발 가능성이 있으므로 활성탄 흡착·처리공정을 설계할 때 이런 점을 유의하여 설계할 필요가 있음.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 연소처리기술과 연계하여 처리하므로 벤젠 등의 VOCs 처리 시너지 효과가 있음. 저농도 벤젠 등의 VOCs 처리가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 연소처리기술과 연계하면 저농도의 벤젠 등의 VOCs 처리가 가능하나, 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 화재 위험성 등으로 관리가 용이하지 않음.

□ **(벤젠 적용)** 벤젠은 대표적 VOCs이며, 분자량이 78.1 g/mol로서 활성탄 흡착(분자량 45~130 g/mol)에 유리한 것으로 알려져 활성탄을 활용한 흡착·회수 재이용이 보편적으로 적용되고 있음.

벤젠 흡착성능(mg/g)	조건*	출처
27.50	25°C, 3.6 l/hr, 6,000 ppm	Park et al. (2010)
161.42	0.680P ₀	Mohan et al. (2009)

* 벤젠 유입압력

□ **(벤젠 적용)** 벤젠의 흡착처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 흡착처리 기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
-	18백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

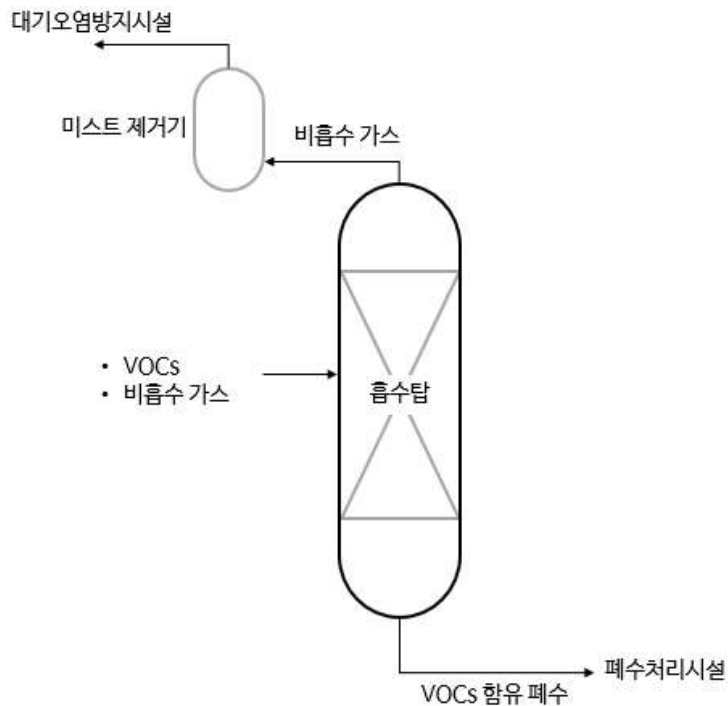
(출처) 한국물가정보(2017년 3월호)

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

30) 활성탄 자체 착화온도는 400~500°C

3) 흡수 처리기술

□ (기술 개요) 혼합 기체를 액체와 접촉하게 시켜 기체의 특정 성분을 액체 속에 용해 흡수·처리하는 기술로서 물리흡수와 화학흡수로 구분할 수 있음. 물리흡수는 흡수제에 대상 기체를 물리적으로 용해시키는 방법이고, 화학흡수는 흡수제 중의 용질 성분과 기체 성분이 화학반응에 의해 흡수되는 방법임.

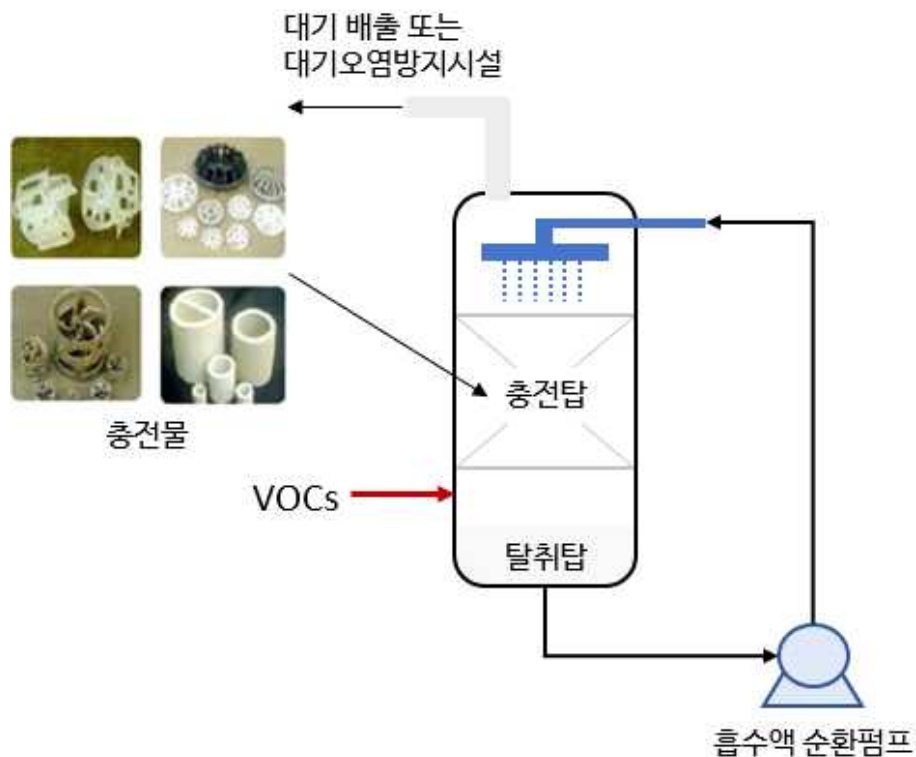


[그림 1-26] 흡수처리기술

○ (VOCs 흡수) VOCs의 흡수는 물리흡수에 이루어지며, VOCs를 함유한 가스에서부터 액상 흡수제로 VOCs가 물질 전달되는 현상으로 물질 전달 구동력은 가스상과 액상 내의 VOCs 특성에 좌우되며 헨리의 법칙(Henry's Law)에 따라 흡수액에 용해되는 양이 결정됨.

- VOCs 흡수제 종류는 물, 고비점 석유오일(Non-volatile Petroleum Oil), 미네랄 오일(Mineral Oil) 등이 있으며, 친수성 VOCs는 물을 활용하여 흡수·제거할 수 있는 최적 흡수제이고, 소수성 VOCs는 고비점 석유오일을 흡수제로 사용하거나, 수용액에 양성(친수성과 소수성 기능을 동시 보유)을 지닌 공중합체(Copolymer)를 투입하여 소수성 VOCs의 흡수를 유도함.

- (VOCs 탈착) VOCs를 흡수제로부터 탈착하여 재생하는 방산(Stripping) 공정이 있으며, 일반적으로 열을 가하거나, 진공을 걸어서 VOCs를 물리적으로 탈착시키며, 응축기와 연결하여 VOCs를 회수할 수 있음.
- (흡수장치 종류) 가스상과 액상이 흐르는 방식에 따라 향류(Counter Flow)와 병류(Co-current Flow) 방식이 있으나, 대부분은 향류 방식이고, 흡수장치의 종류는 충전탑(Packed Bed), 다단탑(Tray Tower), 분무탑(Spray Tower), 벤츄리 스크러버(Venturi Scrubber) 등이 있음. 일반적으로 VOCs 처리에는 충전탑과 다단탑이 많이 적용되고 있음.
- (충전탑) 금속, 세라믹, 플라스틱 재료로 된 불규칙 충전물이나 규칙 충전물로 채워져 있으며, 액체는 기체와의 접촉면적을 높이기 위해 탑 상부에서 고르게 분산되며, 분산된 액체는 충전물의 표면에 박막(Thin Film)을 형성하면서 아래로 흐름. 폐가스는 탑 하부에서 유입되며 흡수액과 접촉하면서 배출가스 중 VOCs 등의 특정 성분이 액상으로 흡수되고, 배출가스의 나머지 성분들은 탑 상부로 배출됨.

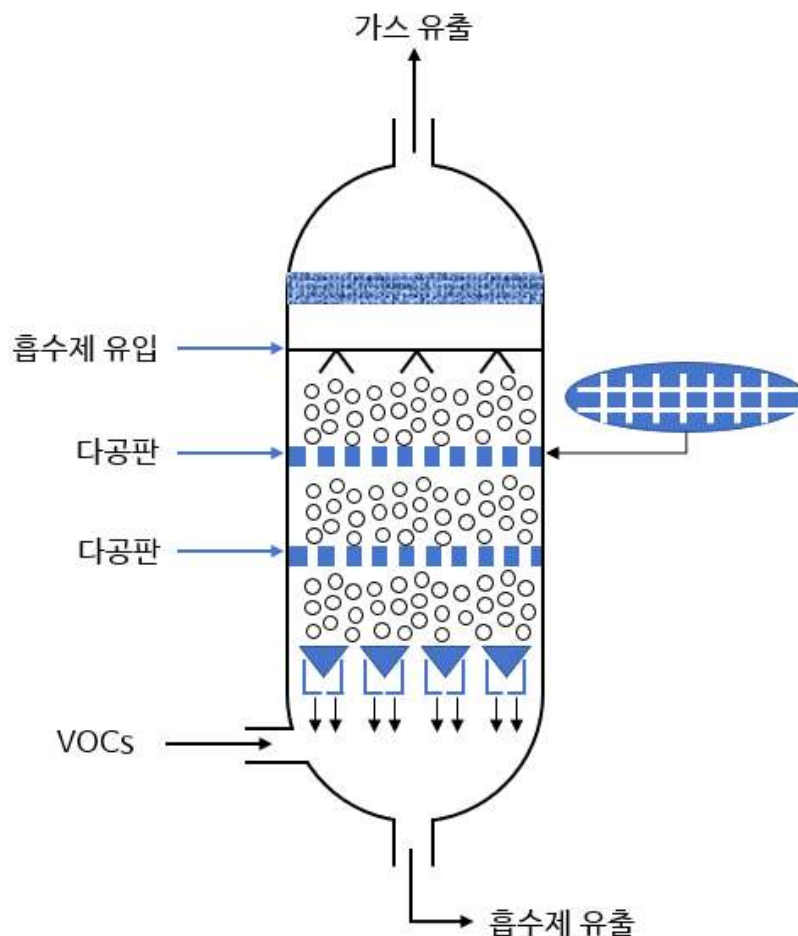


[그림 1-27] 흡수처리기술의 충전탑

(출처) 안전보건공단(2015), 폐수처리설비(스크러버) 화재·폭발 예방대책 매뉴얼

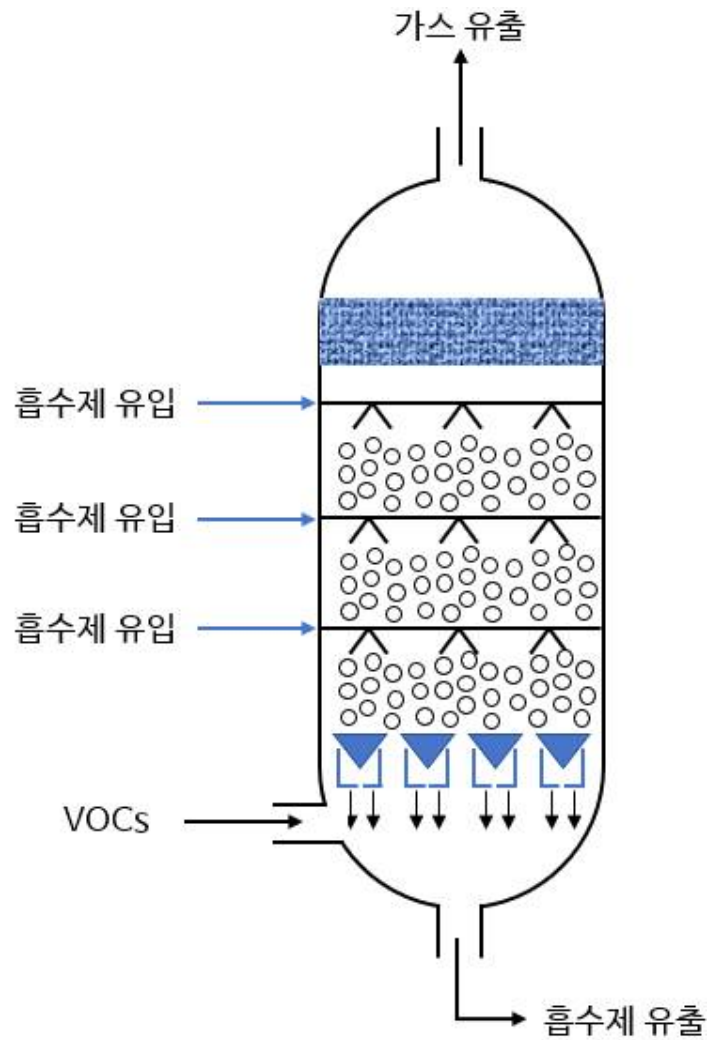
충전탑은 탑 상부에서 흡수액 분산이 성능에 큰 영향을 미치므로, 기체 흐름을 방해하지 않는 범위에서 흡수액이 고르게 분산되어야 하고, 충전물은 액상 박막이 넓게 형성되어 흡수 면적을 키우도록 설계해야 함. 충전탑은 처리효과가 크고, 침전물이 발생하는 가스 처리에도 적합하다는 장점이 있지만 충전층의 공극이 폐색될 수 있고, 충전물이 고가라서 초기 설치비용이 높으며, 가스 유속이 과도한 경우 범람이 발생할 수 있음.

- (다단탑) 증류 공정의 증류탑과 유사하고, 접촉시간이 비교적 길고, 각 단의 액체에 기체가 고르게 분산될 수 있다는 특징을 가지고 있어 흡수탑으로 많이 사용되고 있음. 장점으로는 충전탑에 비해 부유물이 있는 흡수액에 대해 적응성이 좋고, 온도 변화가 심한 조건에도 적용이 수월하나, 초기 비용이 높고 압력손실이 큰 단점이 있음.



[그림 1-28] 다단탑 흡수처리시설

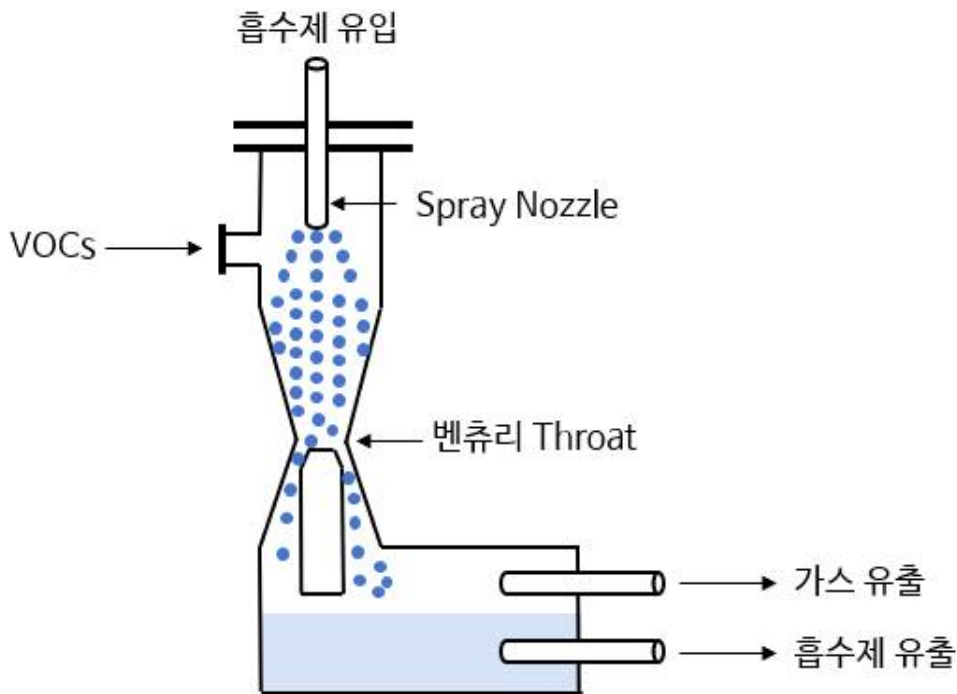
- (분무탑) 충전물을 사용하지 않는 반면 흡수액을 매우 적은 액적으로 만들어 분사함으로써 VOCs가 흡수될 면적을 극대화함. 분무탑의 기체와 액체 접촉시간이 짧아 물에 용해도가 높은 가스(예, 암모니아, 이산화황) 처리에 적합하고, 벤젠과 같은 VOCs 처리에는 적합하지 않다고 알려져 있음. 분무탑은 충전탑보다 저렴하고, 압력손실이 적은 반면 분사 노즐이 잘 막히고 편류를 일으키기 쉽고 분무액과 기체의 균일한 접촉이 용이하지 않은 단점이 있음.



[그림 1-29] 분무탑 흡수처리시설

- (벤츄리 스크러버) 벤츄리 노즐에서 배출가스와 흡수액을 강제로 접촉시켜 배출가스 중의 특정 성분을 흡수·처리하는 설비임. 흡수액과 배출가스와의 접촉시간이 매우 짧아 대부분의 VOCs보다는 용해도가 높은 가스 제거에 적합함.

벤츄리 스크러버는 소형으로 대용량 가스 처리가 가능하고 흡수효율이 탁월한 장점이 있는 반면 가스 압력손실이 커서 동력비가 높은 단점이 있음.



[그림 1-30] 벤츄리 스크러버 흡수처리시설

(출처) <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/venturi-scrubber> 인용

□ 적용조건(충전탑 기준)

○ 배출가스 특성

항목	정보
배출가스 유량	900~126,000 sm ³ /hr
벤젠 유입농도	250~10,000 ppm (LEL 25% 이하)
배출가스 유입온도	4~38℃, 온도가 높아질수록 흡수율은 저하

(출처) EPA(2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-015

□ **(유의사항)** 벤젠 등의 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 상대적으로 낮은 압력손실 ▪ 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 ▪ 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 ▪ 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 ▪ 상대적으로 낮은 설치비용 ▪ 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폐수처리 문제 ▪ 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 벤젠 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 경제성 때문에 벤젠 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

□ **(벤젠 적용)** 벤젠의 흡수처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡수처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%) ¹	설치비용(100m ³ /min) ²	연간 운영비용(m ³ /min)	비고
70~90	30백만원	-	-

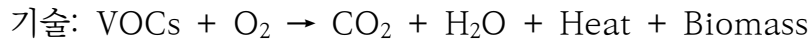
1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: 물가정보(2019.11)

※ 사업장 여건에 따라 적응성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

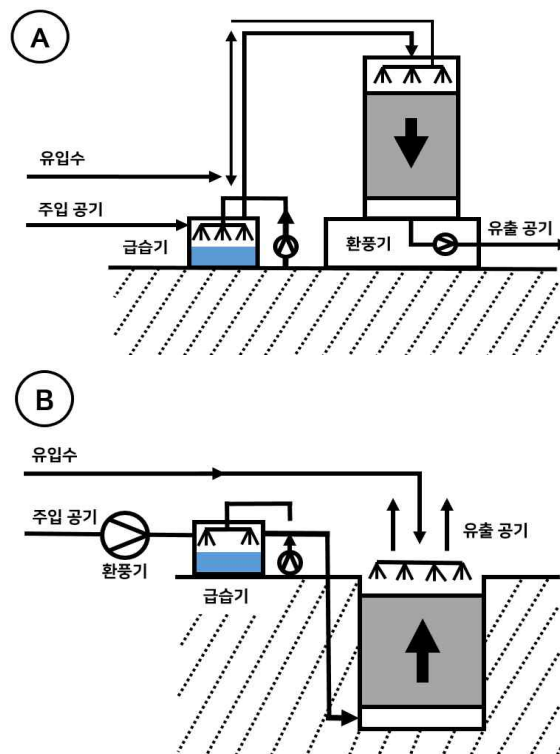
4) 생물학적 처리기술

□ (기술 개요) 생물학적 처리기술은 호기성 미생물을 활용하여 VOCs를 산화·분해하는



○ (종류) 생물학적 처리기술의 종류는 첫째, 바이오필터(Biofilter), 둘째, 바이오스크러버(Bioscrubber), 셋째, 바이오탁링 필터(Biotrickling Filter)임.

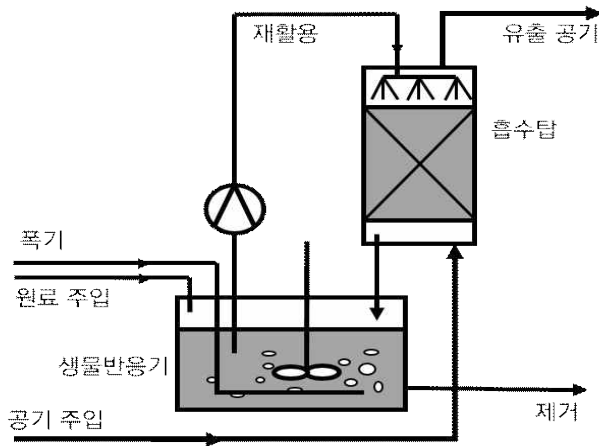
- (바이오필터) 바이오필터 고정체(하우징, Housing)는 가습장치, 온도조절장치, 분무장치로 구성되어 있는 밀폐형 구조임. 바이오필터 충전제는 미생물 서식에 최적 조건을 제공할 수 있는 물질(활성탄, 퇴비 등)로 구성되어 있어 미생물 농도는 토양 사용 시 보다 최고 140배까지 높일 수 있음. 바이오필터의 충전제는 오염물질을 1차적으로 흡수한 후 충전체 속의 미생물이 오염물질을 처리하도록 되어 있으며, 연속적 충전제의 재생이 가능한 시스템으로 한 번 설치하면 2~7년 정도 충전제 교체 없이 운전이 가능함.



[그림 1-31] 바이오필터 구성

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

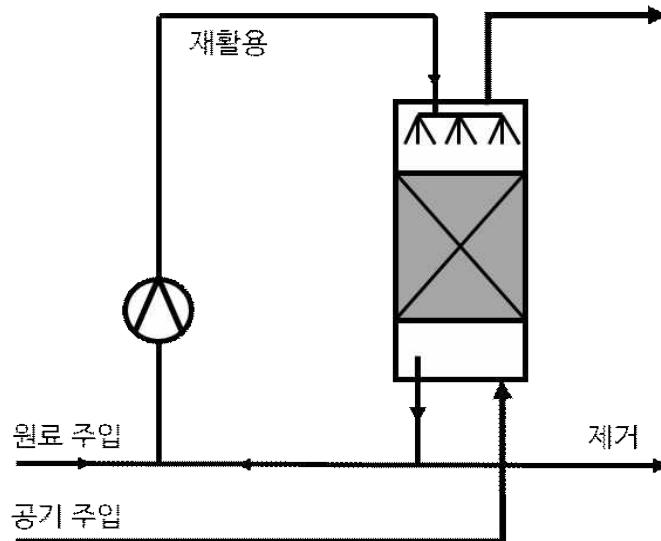
- (바이오스크리버) 배출가스를 세정탑에 통과시켜 오염물질을 물에 흡수시킨 후 이를 포기조에서 미생물 활동에 의해 제거하는 것임. 바이오스크리버에 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 벤젠 등 대부분 VOCs는 적합하지 않음.



[그림 1-32] 바이오 스크리버

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- (바이오텀리클링 필터) 바이오필터와 바이오스크리버가 혼합된 형태로서 미생물을 불활성 담체에 배양 충전시키고, 오염된 물을 상부에서 미생물이 충전된 담체에 분무하여 처리하는 시스템임. 바이오스크리버와 마찬가지로 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 벤젠 등 대부분 VOCs 적용에는 적합하지 않음.



[그림 1-33] 바이오텀리클링 필터

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- **(적용조건)** 생물학적 처리방법은 일반적으로 저농도 VOCs를 포함한 상온의 배출가스 처리에 적합하며, VOCs 농도, 온도, 배출가스 유량, 기타 미생물에 치명적인 성분 등을 고려하여 적용성을 검토해야 함.

항목	추천범위	비고
VOCs 유입농도(ppm)	500 이하	톨루엔 기준
단위 체적 당 부하(g/m ³ ·hr)	100 이하	-
제거효율(%)	90 이상	-
배출가스 유량(m ³ /hr)	300 이하	설치 공간 고려
배출가스 온도(°C)	20 ~ 40	-
배출가스 습도(%)	제한 없음	-
할로겐 및 SO ₂	제한적	전 처리 필요
분진	제한적	전 처리 필요

□ **운전인자**

- **(수분함량)** 생물학적 처리방법에서 가장 중요한 인자는 수분함량으로 특히 바이오필터는 수분 조절이 어려워 실패하는 사례도 있음.
- **(온도)** 미생물의 활동도는 온도 증가에 따라 증가하나. 온도가 한계치 이상 오르면 미생물이 오히려 폐사됨. 그러므로 최고 활성을 일어나는 온도를 파악하고, 그 이상으로 온도가 올라가지 않도록 세심하게 조정하는 것이 필요함.
- **(pH)** 각각 미생물들은 고유의 최적 pH를 가지고 있어 일정 범위의 pH 조건에서 활성이 좋으며, 이 범위를 벗어나면 활성이 떨어지거나 폐사하게 됨.
- **(영양분)** 미생물은 에너지와 탄소원을 얻기 위해 오염물질을 분해하나 질소, 인, 칼륨, 황, 칼슘, 나트륨, 철 및 수많은 다른 성분의 미네랄도 필요하므로 미생물의 활성도를 왕성하게 유지하기 위해서는 이런 성분들을 충분히 공급해야 함.
- **(오염물 농도 부하와 표면 부하)** 단위시간 당 단위부피 당 생물학적 처리공정에 들어가는 오염물질의 총량을 농도 부하로 정의하고 있으며, 생물학적 처리공정 설계 및 운전에 중요한 인자임.

- (산소 농도) VOCs 처리에 필요한 산소의 화학양론비적 양이 평형상태에서 용해되는 산소량보다 적으면 산소 소진이 일어나므로 산소 농도를 적정 수준에서 유지할 수 있도록 생물학적 처리공정 설계 및 운전이 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저렴한 설치 및 운영비용 • 낮은 압력손실 • 비선택성으로 다양한 물질로 구성된 VOCs의 동시 처리 가능 • 폐수, 폐기물 등의 2차 오염 물질 배출이 최소화 • 설치 융통성 	<ul style="list-style-type: none"> • 넓은 부지 필요 • 느린 처리속도 • 특정 물질 처리에 적합한 선택적으로 미생물 적용(따라서 복합 미생물 군집 적용 필요하나 배양이 쉽지 않음) • VOCs 회수 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 VOCs 처리에 적합하며, 설치 운영비용이 저렴하고 2차 오염물질 생성 배출이 적지만 처리속도가 느리고 설치 부지 면적이 넓다는 단점이 있음.

- (벤젠 적용) 벤젠의 생물학적처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 생물학적처리 기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	비고
50~70	100백만원 + α	바이오필터
50~70	150백만원 + α	바이오스크러버
50~70	290백만원 + α	바이오트리클링필터

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

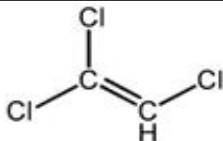
2

트리클로로에틸렌

2.1

개요

- (정의 및 특성) 트리클로로에틸렌은 C_2HCl_3 화학식을 갖는 유기화합물의 일종으로 산업 용매로 흔히 사용되는 할로겐화탄소이며, 주요정보는 아래와 같음.

CAS No.	발암물질 분류	위해도 순위	화학구조
79-02-6	1군 발암물질	<ul style="list-style-type: none"> 1군 발암물질 중에서는 1위 전체 발암물질 중에서는 1위 	

- 물리·화학적 특성³¹⁾

분자량 (g/mol)	휘발성 증기압	친수성 용해도	끓는점	녹는점 /어는점 32)	LEL ³³⁾ (% vol)	UEL ³⁴⁾ (% vol)	n-옥탄올 /물분배계수
131.39	69mmHg (25℃)	0.128g/100mL (25℃)	87.2℃	-84.7℃	8	10.5	2.61

- 트리클로로에틸렌은 위에서 제시한 물리·화학적 특성 때문에 환경부 고시에 근거하여 휘발성유기화합물(VOCs)³⁵⁾로 분류하고 있음.

- 용도

- (자동차 및 트레일러 제조업) 자동차 및 트레일러 제조 시 용매제로 사용
- (금속가공제품 제조업) 금속가공제품 제조 시 세정 및 세척제, 용매제로 사용

31) 화학물질 정보처리 시스템 (<https://kreachportal.me.go.kr/potweb/main.do>)

32) 교육미디어(2016), 염화비닐 노출 근로자 건강관리, 산업재해예방 안전보건공단

33) 최저폭발한계(Lower Explosive Limit)로서 자연 폭발을 일으키는 최저 가스농도

34) 최고폭발한계(Upper Explosive Limit)로서 환경부(2005), 화학사고대응을 위한 사고대비물질 정보집, 국립환경과학원, 화학물질안전관리센터,109(114)

35) 환경부고시 제2015-181호(휘발성유기화합물 지정 고시)

- **(배출업종)** 트리클로로에틸렌이 주로 배출되는 업종은 고무·플라스틱제품 제조업(37.6%), 1차 금속 제조업(29.9%), 자동차 및 트레일러 제조업(16.9%), 전자 부품·컴퓨터·영상·음향 및 통신장비 제조업(9.3%) 순임.
- **(배출공정)** 트리클로로에틸렌이 많이 배출되는 공정은 1) 대기오염방지시설(33.9%), 2) 탈지·세정·표백공정(24.2%), 3) 이송·운반·분배·계량시설(11.6%), 4) 저장시설(7.2%)순임,
- **(배출형태)** 트리클로로에틸렌은 대기로 배출될 개연성이 높고, [표 2-1]에서 보는 것처럼 국내 배출원에서는 모두 대기로 점배출(40.8%) 또는 비산배출(59.2%)되고 있음.
- **(시사점)** 트리클로로에틸렌은 비산배출 관련 저감기술 및 방법 적용이 필요하며, 중점관리 분야는 다음과 같음.
 - 대기오염방지시설로서 처리효율 제고
 - 탈지·세정·표백공정에서의 탈루배출 방지
 - 이송·운반·분배·계량시설 및 저장시설에서의 탈루배출 방지

36) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

[표 2-1] 트리클로로에틸렌 배출특성

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	분리·정제공정	대기	비산배출 100	3.0	0.000	0.013
화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	저장시설	대기	비산배출 100	0.4	0.000	0.000
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	0.5	0.000	0.000
	혼합공정		비산배출 100	0.6	0.000	0.000
	화학반응공정		비산배출 100	131.8	0.020	0.017
	탈지·세정·표백공정		점배출 23 비산배출 77	10,052.0	1.544	1.298
	대기오염방지시설		점배출 100	1.0	0.000	0.000
고무 및 플라스틱제품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	128.1	0.020	0.052
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	71,095.7	10.920	29.019
	혼합공정		비산배출 100	29,746.4	4.569	12.141
	탈지·세정·표백공정		비산배출 100	10,864.0	1.669	4.434
	용제회수		비산배출 100	36,274.4	5.572	14.806
	대기오염방지시설		점배출 100	18,265.6	2.806	7.455
	기타		비산배출 100	78,625.8	12.077	32.092
1차 금속 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	12.4	0.002	0.004
	이송·운반·분배		비산배출 100	3,124.5	0.480	1.080

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	·계량시설					
	탈지·세정·표백공정		점배출 26 비산배출 74	50,958.0	7.827	17.609
	대기오염방지시설		점배출 100	140,415.0	21.568	48.521
금속 가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외	저장시설	대기	비산배출 100	68.1	0.010	0.012
	코팅공정		비산배출 100	1,756.8	0.270	0.319
	탈지·세정·표백공정		점배출 1.1 비산배출 98.9	17,407.9	2.674	3.158
	대기오염방지시설		점배출 100	10,954.0	1.683	1.987
전자 부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	저장시설	대기	점배출 50.2 비산배출 49.8	44,172.0	6.785	29.162
	이송·운반·분배 ·계량시설		비산배출 100	20.0	0.003	0.013
	탈지·세정·표백공정		점배출 52.5 비산배출 47.5	4,600.7	0.707	3.037
	대기오염방지시설		점배출 100	12,076.1	1.855	7.973
기타 기계 및 장비 제조업	대기오염방지시설	대기	점배출 100	242.7	0.037	0.987
자동차 및 트레일러 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	2,652.2	0.407	0.173
	이송·운반·분배 ·계량시설		비산배출 100	1,328.7	0.204	0.087

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	혼합공정		비산배출 100	1,775.0	0.273	0.116
	탈지·세정·표백공정		점배출 7 비산배출 93	63,871.5	9.811	4.163
	기계적가공공정		비산배출 100	1,328.0	0.204	0.087
	용제회수		점배출 100	24.5	0.004	0.002
	기타		비산배출 100	2.4	0.000	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	38,957.9	5.984	2.539
	폐수처리시설		비산배출 100	59.0	0.009	0.004
폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	폐기물처리시설	대기	점배출 100	48.2	0.007	0.100
누적 합계		-	-	651,044.9	100	-

(출처) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

2.3

대체물질

2.3.1

용매 대체

적용업종	<ul style="list-style-type: none"> • 금속가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외 • 자동차 및 트레일러 제조업 • 1차 금속 제조업 • 전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업 • 화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외 • 고무제품 및 플라스틱제품 제조업 • 기타 기계 및 장비 제조업
대체물질	사이클로헥산(Cyclohexane), 헵탄(Heptane)
적용사례	<p>(주)성진케미칼에서 세척용으로 사용하던 고독성의 트리클로로에틸렌을 저독성인 non-TCE 용매제로 대체 사용하여 저감사례를 보여줌.</p> <p>(출처) 환경부(2010) 보도자료, 모든 사업장의 화학물질 배출량 공개, 우수사례</p>
적용업종	용매로서 트리클로로에틸렌 사용하는 업종
대체물질	Methylene chloride, acetone, acetone/heptane blends, n-propyl bromide (출처) 대체물질평가(저감기술확인 TURI자료)
적용업종	접착제 제조업 용매로서 트리클로로에틸렌 사용하는 업종
대체물질	Terpenes, water-based adhesives, solid adhesives (출처) TURI(2007), Summary of policy analysis, TCE (CAS 79-02-6)

2.3.2

세정 및 세척제 대체

적용업종	<ul style="list-style-type: none"> • 금속가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외 • 자동차 및 트레일러 제조업 • 1차 금속 제조업 • 전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업 • 화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외 • 고무제품 및 플라스틱제품 제조업 • 기타 기계 및 장비 제조업
대체물질	친환경세정제 BCS-시리즈(주요성분 : 디클로로프로판, 이염화프로필렌)
적용사례	F사 TCE대체 세정제 적용사례(친환경세정제 BCS-1000) (출처) http://www.jmchem.co.kr/bbs/board.php?bo_table=case&wr_id=7&sc_a=&sfl=wr_subject&stx=BCS-1000&sop=and

적용업종	<ul style="list-style-type: none"> • 금속가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외 • 자동차 및 트레일러 제조업 • 1차 금속 제조업 • 전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업 • 화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외 • 고무제품 및 플라스틱제품 제조업 • 기타 기계 및 장비 제조업
대체물질	<ol style="list-style-type: none"> 1. d-Limonene (출처) "Green" Alternatives Wizard http://ehs.mit.edu/greenchem/ 2. SC-2100(디클로로프로판) (출처) 휘발성 유기화합물질 배출물질 대체 3. 나프텐계 (출처) [일본]PRTR 대상화학물질의 배출 감소를 위한 사례집(2005.8) 4. 나프텐, 파라핀 혼합용제 (출처) [일본]PRTR 대상화학물질의 배출 감소를 위한 사례집(2005.8) 5. 2-브로모프로판 (출처) [일본]PRTR 대상화학물질의 배출 감소를 위한 사례집(2005.8)

2.3.3

TURI의 용매대체

☐ 트리클로로에틸렌 용매대체 국외 자료 부록137)

CleanerSolutions Database
Toxics Use Reduction Institute - Surface Solutions Laboratory

Replace a Solvent Search Results | Search Again

Current Search Information

Search Criteria Solvent: (Safety Score); Trichloroethylene (37) **Results** Found 1143 records
Showing records 1 - 50

Help Search Results Field Definitions
Contact the lab

Showing records 1 - 50 of 1143 | Field Definitions

Company Name Product Name	Safety Score	Classification	Contaminant	Substrate	Equipment	Client #			Effective
						Project #	Trail #		
Buckeye International Shopmaster LPH [compare]	48	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics	299	1	11	✓
Brunli Corporation AquaVantage 1400 [compare]	46	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics	299	1	11	✓
Buckeye International Shopmaster HP [compare]	45	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics	299	1	11	✓
Oakite Products Inprodean 3800 [compare]	42	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics	299	1	11	✓
Bio Chem Systems Bio T 300 B [compare]	37	Terpene-Semi-Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics	299	1	11	✗
Gemtek Products SC Aircarb & Metal Cleaner [compare]	49	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics	299	1	11	✓
Buckeye International Shopmaster LPH [compare]	48	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation	299	1	8	✗
Buckeye International Shopmaster HP [compare]	45	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation	299	1	8	✗
Bio Chem Systems Bio T 300 B [compare]	37	Terpene-Semi-Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation	299	1	8	✗
Gemtek Products SC Aircarb & Metal Cleaner [compare]	49	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation	299	1	8	✓
Oakite Products Inprodean 3800 [compare]	42	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation	299	1	8	✗
Brunli Corporation AquaVantage 1400 [compare]	46	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation	299	1	8	✗
Buckeye International Shopmaster LPH [compare]	48	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation	299	1	7	✗
Buckeye International Shopmaster HP [compare]	45	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation	299	1	7	✗
Bio Chem Systems Bio T 300 B [compare]	37	Terpene-Semi-Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation	299	1	7	✗
Gemtek Products SC Aircarb & Metal Cleaner [compare]	49	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation	299	1	7	✓
Oakite Products									✗

[그림 2-1] 트리클로로에틸렌 용매대체 TURI 사이트 화면

37) (출처) http://www.cleansolutions.org/?action=contaminant_search

- 트리클로로에틸렌의 회수 및 처리기술은 처리방법에 따라 장·단점이 있어 아래 사항을 자세히 검토하여 선택해야 함.
 - 배출가스의 조성 및 농도
 - 함유 유기화합물질의 특성(폭발한계, 응축성, 용해성, 흡착성 등)
 - 배출가스 내 수분 및 먼지 함유량
 - 배출량(최대, 평균, 최소 유량 등), 온도, 압력, 습도
 - 오염배출원 유형(점, 면, 선오염원, 공정, 불특정 등)
 - 연간 운영시간(가동시간, 가동률, 부하율 등)
 - 장치 위치(실내, 실외, 지표 고도, 지붕, 여유 공간 등)
 - 보조 연료 또는 에너지 비율
 - 각종 유틸리티(수도, 전기, 스팀, 배관, 관거, 구조물) 이용 가능 여부
 - 기존의 대기오염방지시설 설치·운영 사항(종류, 규모, 사용 기간 등)
 - 경제성(초기투자비 및 연간 운영비)

[표 2-2] 휘발성 유기화합물 방지시설 설계 시 고려사항

기술	안정성	오염물질 특성	오염원 특성	제어특성
흡착	흡착 시 폭발물질의 농축이 일어나며 이는 매우 유해함.	다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있음.	높은 포집 효율을 가지고 있으며, 여러 유형 흡착제(활성탄, 제올라이트, 폴리머 등)를 이용, 낮은 비용으로 고효율 달성이 가능함.
흡수	폭발물질을 중성화시킬 수 있는 흡수액을 폭발물질에 따라 선택해야 함.	화합물에 적합한 흡수제를 사용해야 하고, 화학물질 조성변화에 대응하기 어려움.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 흡착제 배출수 처리장치가 필요함.	포집 효율이 높으나 생성 폐수에 폭발성 물질이 포함될 수 있으므로 사전에 적정 처리방법 수립이 필요함.
응축	니트로글리세린과 같은 폭발성 화합물에는 적용할 수 없음.	제습 과정이 필요하며, 끓는점이 낮은 화합물은 처리하기 어려움.	추가적인 응축장치가 필요함.	특정 화합물에 대해서는 포집 효율이 높으나, 초기비용이 높음.
생물여과	미생물에 의해 포집된 폭발성 화합물질을 쉽게 처리할 수 있음.	처리속도가 낮아 처리 규모의 한계가 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물 종류에 따라 높은 처리효율을 나타냄.
열소각	니트로글리세린과 같은 많은 폭발성 화합물은 급속히 가열될 때 매우 불안정해짐.	여러 다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 가지고 있음. 다양한 유형의 소각로(재생식 열소각 등)를 사용, 비용을 절감시키고 전체 효율을 증가시킬 수 있음.
촉매소각	반응시간과 유속에 따라 촉매 층에서 폭발성 화합물 농축이 일어나는 위험한 상황이 일어날 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리하며 촉매 피독으로 효율이 낮아짐.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물질 유형에 따라 높은 파괴효율을 나타냄.
광촉매산화	저온에서 폭발성 화합물질 처리가 가능하며, 체류 시간이 짧고 저온에서 운전되므로 폭발 위험성을 줄일 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리함.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 나타내며, 전체 비용이 상대적으로 적은 편임.

(출처) 환경부(2000), 「휘발성유기화합물 방지시설 설계지침」 자료

□ 2016년의 화학물질 배출량 조사³⁸⁾ 결과에 따르면 트리클로로에틸렌의 주요 배출공정은 대기오염방지시설, 탈지·세정·표백공정, 이송·운반·분배·계량시설, 저장시설 순으로 배출비중은 각각 32.2, 20.0, 11.6, 7.7% 순임.

공정	업종	배출비중(%)
대기오염방지시설	1차 금속 제조업	21.58
	자동차 및 트레일러 제조업	5.984
	고무·플라스틱제품 제조업	2.806
	전자부품·컴퓨터·영상·음향 및 통신장비 제조업	1.855
	소계	32.225
탈지·세정·표백공정	자동차 및 트레일러 제조업	9.811
	1차 금속 제조업	7.827
	고무·플라스틱제품 제조업	1.669
	전자부품·컴퓨터·영상·음향 및 통신장비 제조업	0.707
	소계	20.014
이송·운반·분배·계량시설	고무·플라스틱제품 제조업	10.920
	1차 금속 제조업	0.480
	자동차 및 트레일러 제조업	0.204
	전자부품·컴퓨터·영상·음향 및 통신장비 제조업	0.003
	소계	11.607
저장시설	전자부품·컴퓨터·영상·음향 및 통신장비 제조업	6.785
	1차 금속 제조업	0.480
	자동차 및 트레일러 제조업	0.407
	고무·플라스틱제품 제조업	0.020
	소계	7.692

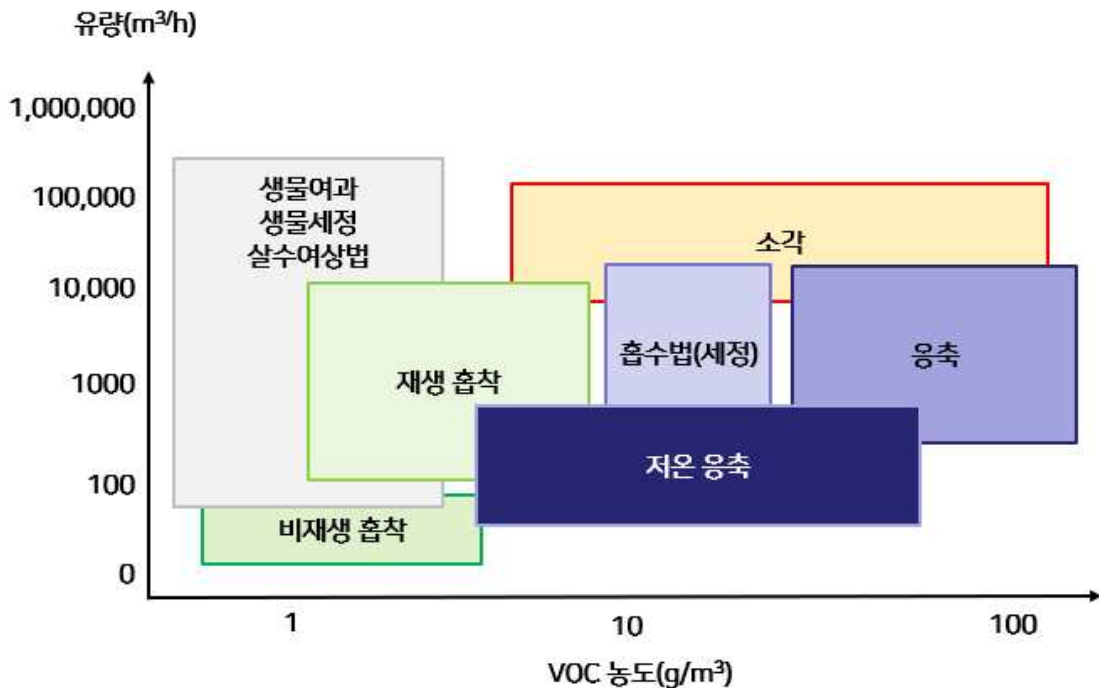
(출처) 화학물질안전원(2016)의 “2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)” 자료 근거

38) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

2.4.1 대기오염방지시설

2.4.1.1. 처리기술

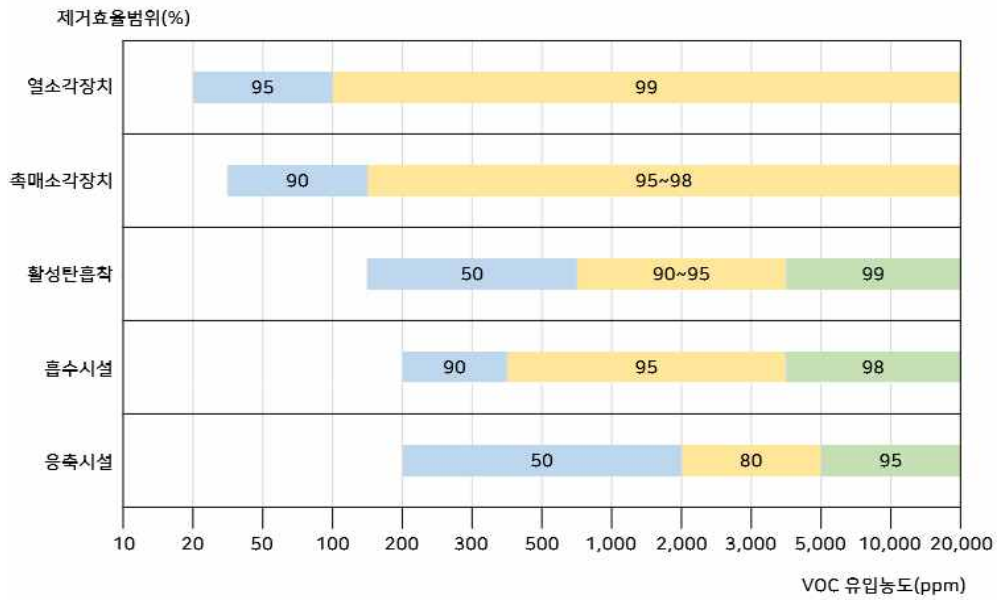
- 화학물질을 처리하는 방법은 흡착기술, 흡수기술, 생물학적 처리기술로 크게 구분할 수 있음.
- [그림 2-2]는 VOCs 유입 유량과 농도에 대한 처리기술의 적용조건을 개략적으로 도식화 하고 있음. 생물학적 방법은 적용 유량의 범위는 넓지만, 적용 가능한 농도는 상대적으로 협소함을 알 수 있음. 반면에 소각은 적용 농도 범위는 넓지만, 적용 가능한 유량 범위는 넓지 않음을 알 수 있음.



[그림 2-2] VOCs 처리기술별 VOCs 농도와 유입 유량의 적용 범위

(출처) Joseph S, Devanny, Marc A. Deshusses, Todd S. Webster, Biofiltration for Air pollution control

- [그림 2-3]은 VOCs 처리기술별로 VOCs 유입농도에 대한 처리효율을 도식화하고 있음. 열소각장치와 촉매소각장치는 상대적으로 넓은 유입농도 범위에서 95% 이상의 효율을 보인 반면 활성탄과 응축시설은 상대적으로 높은 농도인 500ppm 이상에서 95%의 성능을 보여주고 있음.



[그림 2-3] VOCs 처리기술의 VOCs 유입농도 대비 처리효율

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

□ [표 2-3]은 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술 선택 기준을 제시하고 있어, 방지기술 선택 지침으로 활용할 수 있음.

[표 2-3] 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술의 선택 기준

대상물질	응축	흡착	열소각	촉매연소	촉열식 열소각	무화염 열소각
저유량 저농도	●	●	●	●	○	●
고유량 저농도	●	●	●	●	●	●
저유량 고농도	●	○	●	○	○	●
고유량 고농도	●	○	●	○	○	●
비응축 탄화수소 가스	X	○	●	●	●	●
응축 탄화수소 가스	●	●	●	●	●	●
비응축 Cl/S 포함가스	X	○	●	○	●	●
응축 Cl/S 포함가스	●	●	●	○	●	●
연속 운전	●	●	●	●	●	●
회분식 운전	●	●	○	○	○	●

●: 매우 좋음, ●: 좋음, ●: 보통, ○: 나쁨, X: 적용 불가

(출처) 양고수, '열처리 기술을 이용한 VOCs/약취 처리기술 및 관리현황' 자료 수정 인용

□ [그림 2-2], [그림 2-3], [표 2-3]에서 보는 것처럼 대상물질의 유입농도와 유량 정보를 활용하여 기술적으로 적합한 대상물질의 처리기술을 일차적으로 선정할 수 있음. 다음으로는 저감목표, 경제성, 현장 조건(예, 설치부지 등), 혼합물 종류, 온도와 압력 등을 종합적으로 고려하여 처리기술을 최종적으로 선정해야 함.

1) 흡착 처리기술

□ (기술 개요) 화학물질을 흡착제 표면에 물리적으로 흡착하여 처리하는 기술

○ (공정 구성) 일반적으로 활성탄이 많이 사용되고 있으며, 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 증기 또는 열에 의해 피흡착물의 탈착이 이뤄지는 흡착탑 재생공정임. 탈착 과정에서 농도가 높아진 피흡착물이 배출되며, 이를 연소처리기술 등의 후속 공정에서 처리함.

○ (흡착원리) 흡착제와 피흡착물 간에 Van der Waals 힘이 작용하고 있으며, 흡착제와 피흡착물 간의 거리에 따라 위치에너지가 달라짐. 위치에너지가 가장 낮은 지점이 형성되며, 그 지점에서 흡착이 일어남.

○ (흡착·회수 재사용과 차이점) 흡착·처리기술은 트리클로로에틸렌 등의 유기오염물질을 흡착·처리하는데 목적을 두고 있지만, 흡착·회수 재사용 기술은 트리클로로에틸렌 등을 회수하여 재사용하는데 초점을 맞추고 있음. 즉 두 기술의 원리는 동일하나 목적에서 차이가 있음.

□ (적용조건) 흡착·처리 공정 단독으로 운영하기보다는 연소처리기술 전단에 설치하여 처리대상물질의 농도를 적정 수준 이상으로 높여 연소처리기술의 처리 성능을 배가시키는 역할을 담당하며, 활성탄이 주로 사용되고 있음.

□ (유의사항) 활성탄 자체가 고온에서 화재 위험성³⁹⁾이 있고, 화재 및 폭발위험성 물질이 농축되어 화재 및 폭발 가능성이 있으므로 활성탄 흡착·처리공정을 설계할 때 이런 점을 유의하여 설계할 필요가 있음.

39) 활성탄 자체 착화온도는 400~500℃

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 연소처리기술과 연계하여 처리하므로 트리클로로에틸렌 등의 VOCs 처리 시너지 효과가 있음. 저농도 트리클로로에틸렌 등의 VOCs 처리가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 연소처리기술과 연계하면 저농도의 트리클로로에틸렌 등의 VOCs 처리가 가능하나, 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 화재 위험성 등으로 관리가 용이하지 않음.

□ (트리클로로에틸렌 적용) 트리클로로에틸렌의 흡착처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 흡착처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

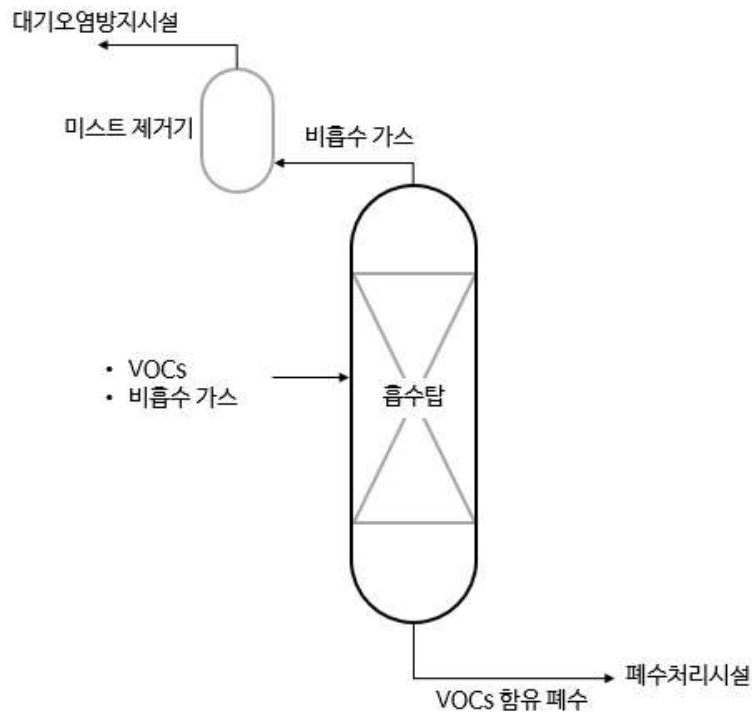
처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
-	18백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

(출처) 한국물가정보(2017년 3월호)

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

2) 흡수처리기술

□ (기술 개요) 혼합 기체를 액체와 접촉하게 시켜 기체의 특정 성분을 액체 속에 용해 흡수·처리하는 기술로서 물리흡수와 화학흡수로 구분할 수 있음. 물리흡수는 흡수제에 대상 기체를 물리적으로 용해시키는 방법이고, 화학흡수는 흡수제 중의 용질 성분과 기체 성분이 화학반응에 의해 흡수되는 방법임.

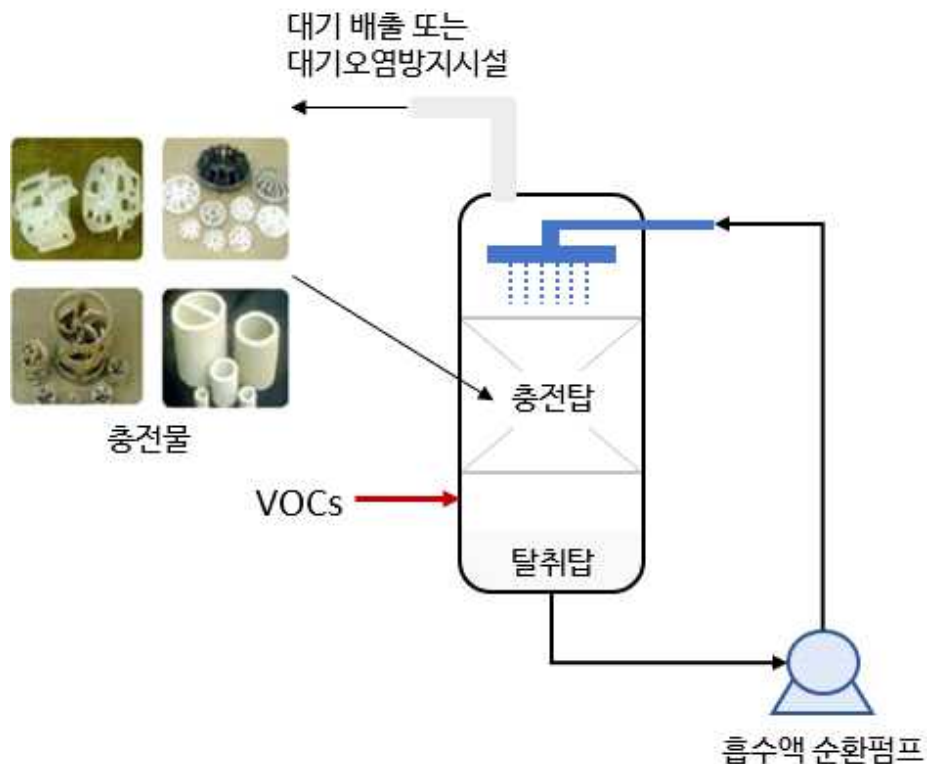


[그림 2-4] 흡수처리기술

○ (VOCs 흡수) VOCs의 흡수는 물리흡수에 이루어지며, VOCs를 함유한 가스에서부터 액상 흡수제로 VOCs가 물질 전달되는 현상으로 물질 전달 구동력은 가스상과 액상 내의 VOCs 특성에 좌우되며 헨리의 법칙(Henry's Law)에 따라 흡수액에 용해되는 양이 결정됨.

- VOCs 흡수제 종류는 물, 고비점 석유오일(Non-volatile Petroleum Oil), 미네랄 오일(Mineral Oil) 등이 있으며, 친수성 VOCs는 물을 활용하여 흡수·제거할 수 있는 최적 흡수제이고, 소수성 VOCs는 고비점 석유오일을 흡수제로 사용하거나, 수용액에 양성(친수성과 소수성 기능을 동시 보유)을 지닌 공중합체(Copolymer)를 투입하여 소수성 VOCs의 흡수를 유도함.

- (VOCs 탈착) VOCs를 흡수제로부터 탈착하여 재생하는 방산(Stripping) 공정이 있으며, 일반적으로 열을 가하거나, 진공을 걸어서 VOCs를 물리적으로 탈착시키며, 응축기와 연결하여 VOCs를 회수할 수 있음.
- (흡수장치 종류) 가스상과 액상이 흐르는 방식에 따라 향류(Counter Flow)와 병류(Co-current Flow) 방식이 있으나, 대부분은 향류 방식이고, 흡수장치의 종류는 충전탑(Packed Bed), 다단탑(Tray Tower), 분무탑(Spray Tower), 벤츄리 스크러버(Venturi Scrubber) 등이 있음. 일반적으로 VOCs 처리에는 충전탑과 다단탑이 많이 적용되고 있음.
- (충전탑) 금속, 세라믹, 플라스틱 재료로 된 불규칙 충전물이나 규칙 충전물로 채워져 있으며, 액체는 기체와의 접촉면적을 높이기 위해 탑 상부에서 고르게 분산되며, 분산된 액체는 충전물의 표면에 박막(Thin Film)을 형성하면서 아래로 흐름. 폐가스는 탑 하부에서 유입되며 흡수액과 접촉하면서 배출가스 중 VOCs 등의 특정 성분이 액상으로 흡수되고, 배출가스의 나머지 성분들은 탑 상부로 배출됨.

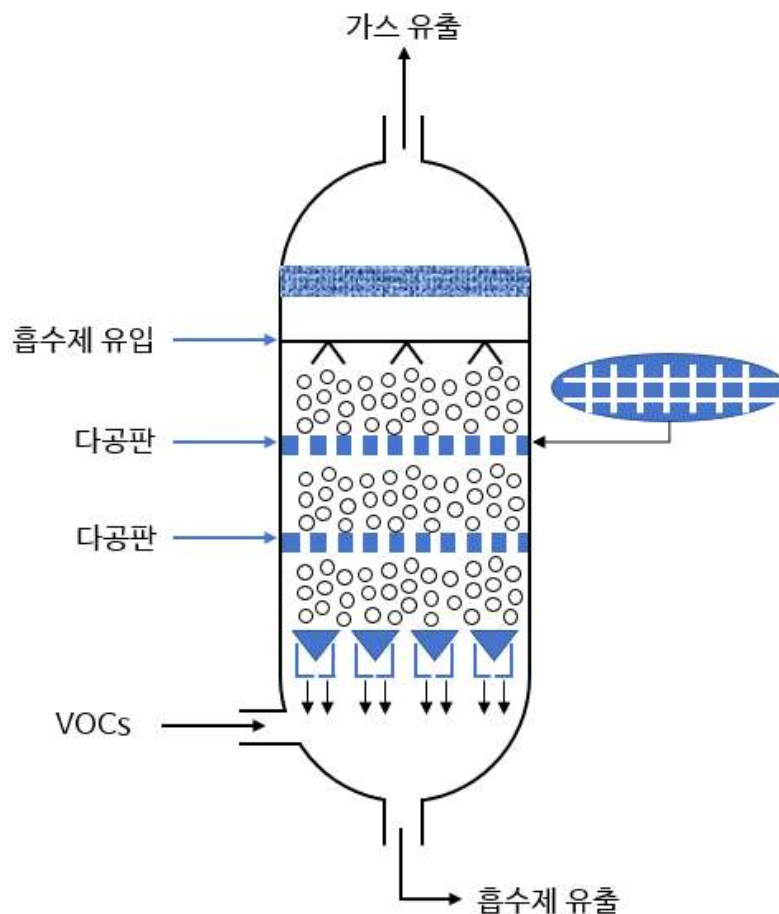


[그림 2-5] 흡수처리기술의 충전탑

(출처) 안전보건공단(2015), 폐수처리설비(스크러버) 화재·폭발 예방대책 매뉴얼

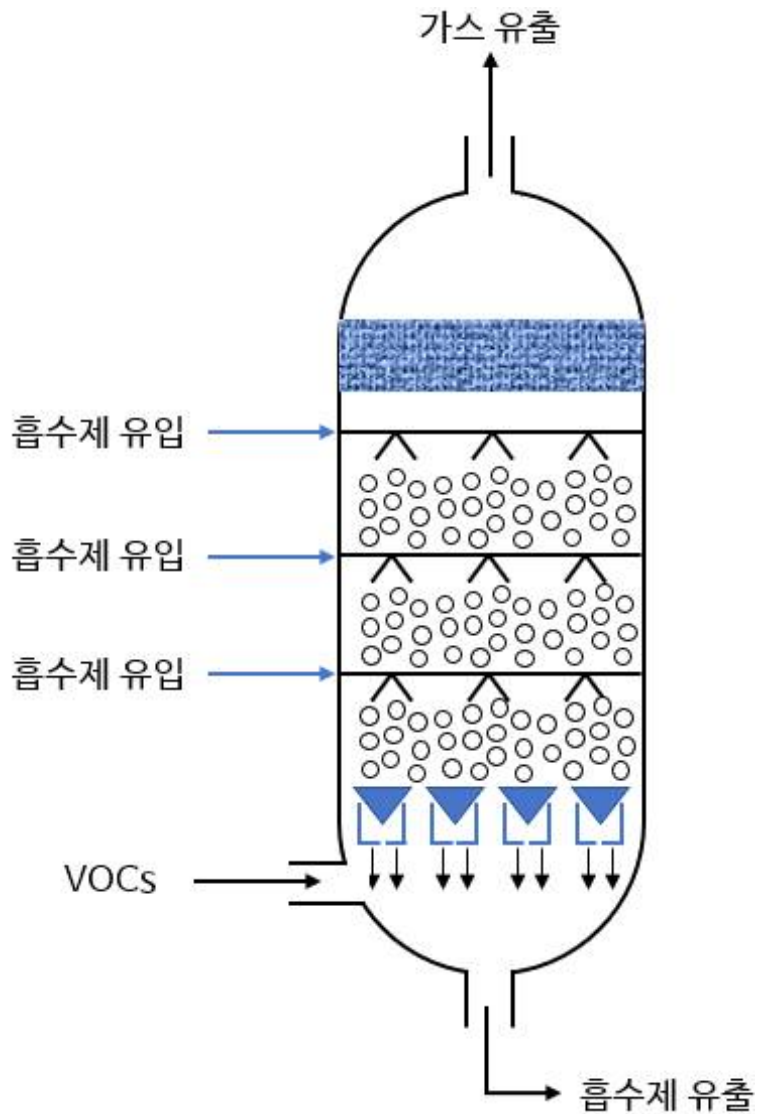
충전탑은 탑 상부에서 흡수액 분산이 성능에 큰 영향을 미치므로, 기체 흐름을 방해하지 않는 범위에서 흡수액이 고르게 분산되어야 하고, 충전물은 액상 박막이 넓게 형성되어 흡수 면적을 커지도록 설계해야 함. 충전탑은 처리효과가 크고, 침전물이 발생하는 가스 처리에도 적합하다는 장점이 있지만 충전층의 공극이 폐색될 수 있고, 충전물이 고가라서 초기 설치비용이 높으며, 가스 유속이 과도한 경우 범람이 발생할 수 있음.

- **(다단탑)** 증류 공정의 증류탑과 유사하고, 접촉시간이 비교적 길고, 각 단의 액체에 기체가 고르게 분산될 수 있다는 특징을 가지고 있어 흡수탑으로 많이 사용되고 있음. 장점으로는 충전탑에 비해 부유물이 있는 흡수액에 대해 적응성이 좋고, 온도 변화가 심한 조건에도 적용이 수월하나, 초기 비용이 높고 압력손실이 큰 단점이 있음.



[그림 2-6] 다단탑 흡수처리시설

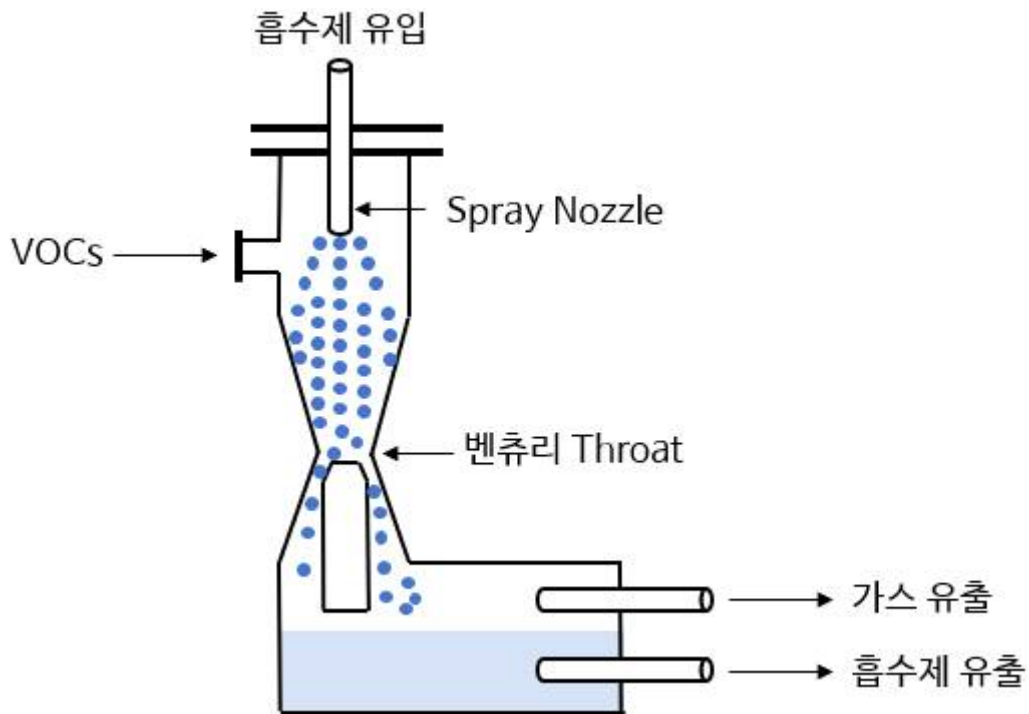
- (분무탑) 충전물을 사용하지 않는 반면 흡수액을 매우 적은 액적으로 만들어 분사함으로써 VOCs가 흡수될 면적을 극대화함. 분무탑의 기체와 액체 접촉시간이 짧아 물에 용해도가 높은 가스(예, 암모니아, 이산화황) 처리에 적합하고, 트리클로로에틸렌과 같은 VOCs 처리에는 적합하지 않다고 알려져 있음. 분무탑은 충전탑보다 저렴하고, 압력손실이 적은 반면 분사 노즐이 잘 막히고 편류를 일으키기 쉽고 분무액과 기체의 균일한 접촉이 용이하지 않은 단점이 있음.



[그림 2-7] 분무탑 흡수처리시설

- (벤츄리 스크리버) 벤츄리 노즐에서 배출가스와 흡수액을 강제로 접촉시켜 배출 가스 중의 특정 성분을 흡수·처리하는 설비임. 흡수액과 배출가스와의 접촉시간이 매우 짧아 대부분의 VOCs보다는 용해도가 높은 가스 제거에 적합함.

벤츄리 스크리버는 소형으로 대용량 가스 처리가 가능하고 흡수효율이 탁월한 장점이 있는 반면 가스 압력손실이 커서 동력비가 높은 단점이 있음.



[그림 2-8] 벤츄리 스크리버 흡수처리시설

(출처) <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/venturi-scrubber> 인용

- (유의사항) 트리클로로에틸렌 등의 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 상대적으로 낮은 압력손실 ▪ 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 ▪ 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 ▪ 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 ▪ 상대적으로 낮은 설치비용 ▪ 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폐수처리 문제 ▪ 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 트리클로로에틸렌 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 경제성 때문에 트리클로로에틸렌 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

□ (트리클로로에틸렌 적용) 트리클로로에틸렌의 흡수처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡수처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%) ¹	설치비용(100m ³ /min) ²	연간 운영비용(m ³ /min)	비고
70~90	30백만원	-	-

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술사례집

2: 물가정보(2019.11)

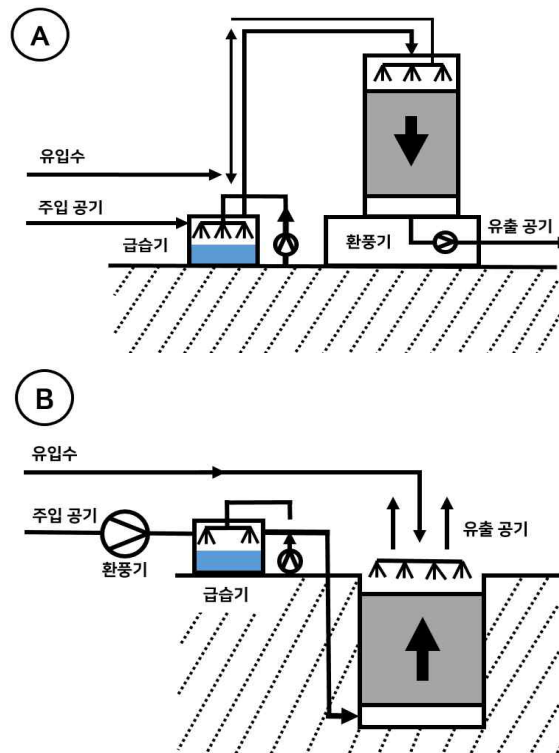
※ 사업장 여건에 따라 적응성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

3) 생물학적 처리기술

□ (기술 개요) 생물학적 처리기술은 호기성 미생물을 활용하여 VOCs를 산화·분해하는 기술: $VOCs + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + Heat + Biomass$

○ (종류) 생물학적 처리기술의 종류는 첫째, 바이오필터(Biofilter), 둘째, 바이오스크러버(Bioscrubber), 셋째, 바이오탁리클링 필터(Biotrickling Filter)임.

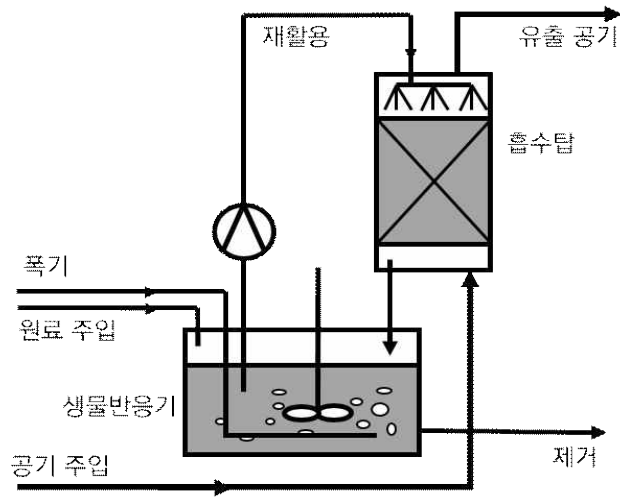
- (바이오필터) 바이오필터 고정체(하우징, Housing)는 가습장치, 온도조절장치, 분무장치로 구성되어 있는 밀폐형 구조임. 바이오필터 충전제는 미생물 서식에 최적 조건을 제공할 수 있는 물질(활성탄, 퇴비 등)로 구성되어 있어 미생물 농도는 토양 사용 시 보다 최고 140배까지 높일 수 있음. 바이오필터의 충전제는 오염물질을 1차적으로 흡수한 후 충전체 속의 미생물이 오염물질을 처리하도록 되어 있으며, 연속적 충전체의 재생이 가능한 시스템으로 한 번 설치하면 2~7년 정도 충전제 교체 없이 운전이 가능함.



[그림 2-9] 바이오필터 구성

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

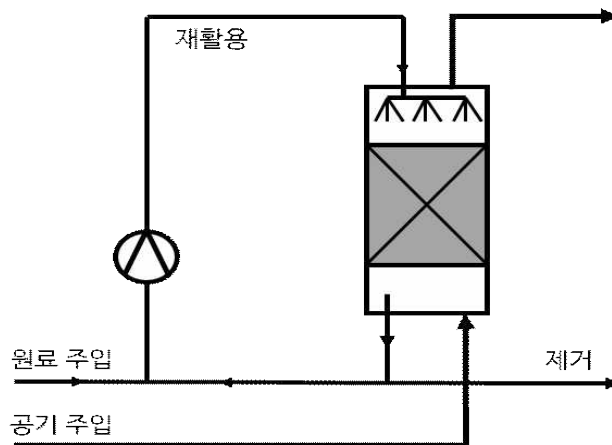
- (바이오스크리버) 배출가스를 세정탑에 통과시켜 오염물질을 물에 흡수시킨 후 이를 포기조에서 미생물 활동에 의해 제거하는 것임. 바이오스크리버에 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 트리클로로에틸렌 등 대부분 VOCs는 적합하지 않음.



[그림 2-10] 바이오 스크리버

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- (바이오투리클링 필터) 바이오필터와 바이오스크리버가 혼합된 형태로서 미생물을 불활성 담체에 배양 충전시키고, 오염된 물을 상부에서 미생물이 충전된 담체에 분무하여 처리하는 시스템임. 바이오스크리버와 마찬가지로 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 트리클로로에틸렌 등 대부분 VOCs 적용에는 적합하지 않음.



[그림 2-11] 바이오투리클링 필터

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- **(적용조건)** 생물학적 처리방법은 일반적으로 저농도 VOCs를 포함한 상온의 배출가스 처리에 적합하며, VOCs 농도, 온도, 배출가스 유량, 기타 미생물에 치명적인 성분 등을 고려하여 적용성을 검토해야 함.

항목	추천범위	비고
VOCs 유입농도(ppm)	500 이하	톨루엔 기준
단위 체적 당 부하(g/m ³ ·hr)	100 이하	-
제거효율(%)	90 이상	-
배출가스 유량(m ³ /hr)	300 이하	설치 공간 고려
배출가스 온도(°C)	20 ~ 40	-
배출가스 습도(%)	제한 없음	-
할로겐 및 SO ₂	제한적	전 처리 필요
분진	제한적	전 처리 필요

□ **운전인자**

- **(수분함량)** 생물학적 처리방법에서 가장 중요한 인자는 수분함량으로 특히 바이오필터는 수분 조절이 어려워 실패하는 사례도 있음.
- **(온도)** 미생물의 활동도는 온도 증가에 따라 증가하나. 온도가 한계치 이상 오르면 미생물이 오히려 폐사됨. 그러므로 최고 활성을 일어나는 온도를 파악하고, 그 이상으로 온도가 올라가지 않도록 세심하게 조정하는 것이 필요함.
- **(pH)** 각각 미생물들은 고유의 최적 pH를 가지고 있어 일정 범위의 pH 조건에서 활성이 좋으며, 이 범위를 벗어나면 활성이 떨어지거나 폐사하게 됨.
- **(영양분)** 미생물은 에너지와 탄소원을 얻기 위해 오염물질을 분해하나 질소, 인, 칼륨, 황, 칼슘, 나트륨, 철 및 수많은 다른 성분의 미네랄도 필요하므로 미생물의 활성도를 왕성하게 유지하기 위해서는 이런 성분들을 충분히 공급해야 함.
- **(오염물 농도 부하와 표면 부하)** 단위시간 당 단위부피 당 생물학적 처리공정에 들어가는 오염물질의 총량을 농도 부하로 정의하고 있으며, 생물학적 처리공정 설계 및 운전에 중요한 인자임.

- (산소 농도) VOCs 처리에 필요한 산소의 화학양론비적 양이 평형상태에서 용해되는 산소량보다 적으면 산소 소진이 일어나므로 산소 농도를 적정 수준에서 유지할 수 있도록 생물학적 처리공정 설계 및 운전이 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저렴한 설치 및 운영비용 • 낮은 압력손실 • 비선택성으로 다양한 물질로 구성된 VOCs의 동시 처리 가능 • 폐수, 폐기물 등의 2차 오염 물질 배출이 최소화 • 설치 융통성 	<ul style="list-style-type: none"> • 넓은 부지 필요 • 느린 처리속도 • 특정 물질 처리에 적합한 선택적으로 미생물 적용(따라서 복합 미생물 군집 적용 필요하나 배양이 쉽지 않음) • VOCs 회수 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 VOCs 처리에 적합하며, 설치 운영비용이 저렴하고 2차 오염물질 생성 배출이 적지만 처리속도가 느리고 설치 부지 면적이 넓다는 단점이 있음.

- (트리클로로에틸렌 적용) 트리클로로에틸렌의 생물학적처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 생물학적처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	비고
50~70	100백만원 + α	바이오필터
50~70	150백만원 + α	바이오스크러버
50~70	290백만원 + α	바이오투리클링필터

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

2.4.2

탈지·세정·표백공정

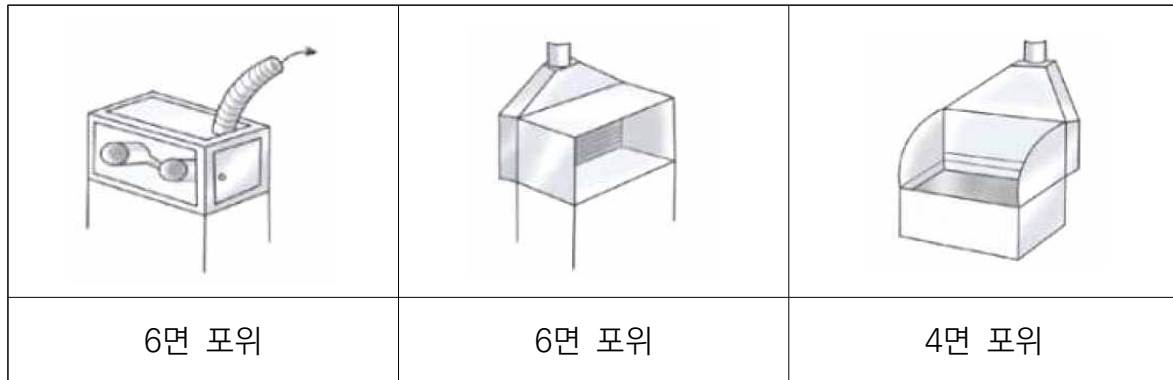
2.4.2.1. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 트리클로로에틸렌이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 트리클로로에틸렌의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
 - (밀폐형 덮개) 트리클로로에틸렌 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기 오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 2-12] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

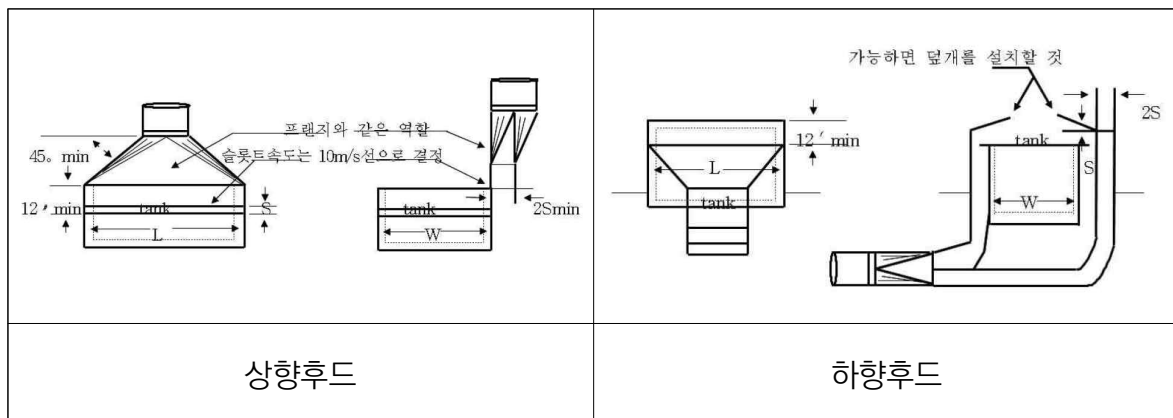
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 2-13] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

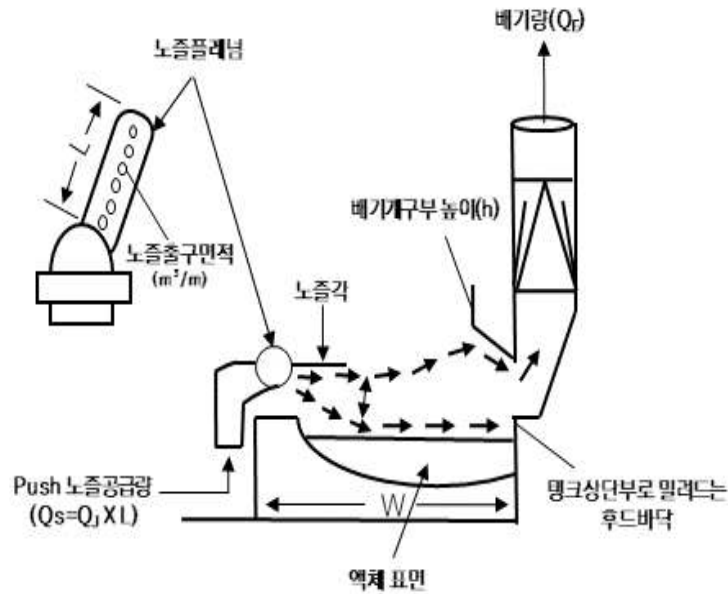
- (외부식 후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 2-14] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 2-15] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

2.4.2.2. 재사용 및 재활용

흡착·회수	대기 중으로 배출되는 VOCs를 흡착제에 흡착시키고, 온도 또는 압력 조절을 통해 탈착·회수하는 기술
응축·회수	응축기 등을 통해 유체 온도나 압력 변화로 대상 VOCs를 분리·회수하는 기술
흡수·회수	액상 흡수제를 가스상의 VOCs와 접촉하여 VOCs를 흡수제로 물질 이동시켜 분리·회수하는 기술
막분리·회수	혼합가스 각각의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술

1) 흡착·회수기술

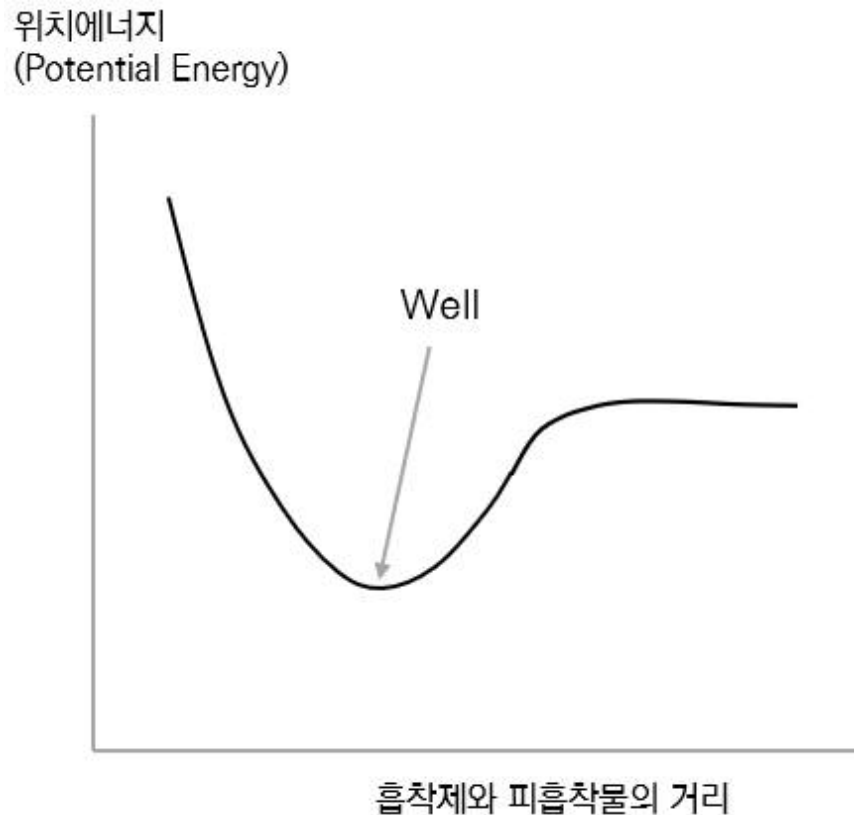
□ (기술 개요) VOCs를 흡착제 표면에 물리적으로 흡착시키고 탈착·회수 재이용하는 기술

○ (흡착) 흡착공정은 화학적 흡착과 물리적 흡착으로 구분할 수 있으며, 화학적 흡착은 피흡착물과 흡착제가 화학적으로 결합하므로, 피흡착물과 흡착제의 화학적 결합을 끊어야 하므로 원래 형태의 피흡착물 회수가 용이하지 않음. 반면 물리적 흡착은 원래 형태로 피흡착물의 회수가 가능하므로 흡착·회수 재사용기술에서는 물리적 흡착을 적용하고 있음.

- (물리적 흡착원리) 아래 그림은 흡착제 표면으로부터의 거리와 위치에너지 (Potential Energy)의 상관관계를 보여주고 있음. 흡착제와 피흡착물 간에는 '반발 (Repulsion)⁴⁰⁾'과 '견인(Attraction)⁴¹⁾'이 동시에 작용하여 균형을 이루고 있음. 흡착제와 피흡착물의 거리 중에서 위치에너지가 가장 낮은 지점(Well 또는 Dip)에서 흡착이 일어나며, 피흡착물의 탈착을 위해 필요한 에너지가 외부에서 운동 에너지(Kinetic Energy) 형태로 공급되면 탈착이 일어남.

40) 흡착제와 피흡착물의 전자군(Cloud of Electrons) 간의 반발력

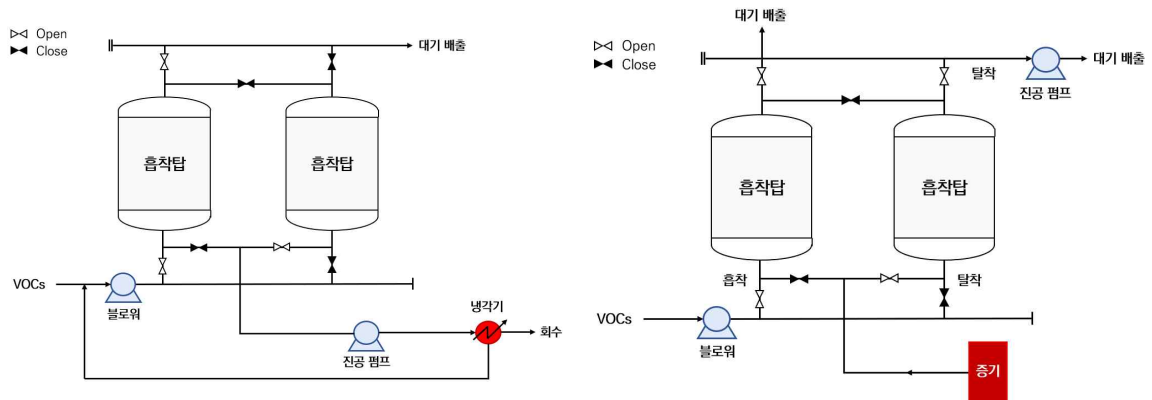
41) 전자 핵(Nuclear) 간의 Van der Waals force에 의한 견인력



[그림 2-16] 흡착제와 피흡착물의 거리에 따른 위치에너지 변화

(출처) EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004

- **(탈착)** 포화된 흡착제 재생 방법은 온도 차이를 이용한 열탈착 방식(Temperature Swing Adsorption, 이하 TSA)과 압력탈착 방식(Pressure Swing Adsorption, 이하 PSA)이 주로 적용되고 있음.
 - **(TSA)** 고온 증기를 이용해 흡착제(예, 활성탄)에 흡착된 VOCs를 회수하는 방법으로 흡착제에 잔류하는 수분을 건조해야 하며, 고온 증기사용으로 화재 등 위험성이 있으며, 운전비용이 높고, 시간이 많이 소요되는 단점이 있음.
 - **(PSA)** 고압에서 VOCs를 흡착시키고, 압력을 낮춰 VOCs를 탈착시키는데 고압에서 운전하므로 운전비용이 높고, 공정 규모가 커지는 단점이 있음.
- **(공정 구성)** 일반적으로 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 탈착하게 됨.



[그림 2-17] 흡착·회수공정 모식도

(출처) SEST주식회사 홈페이지 (http://www.sestco.com/kor/vru_01.php) 인용

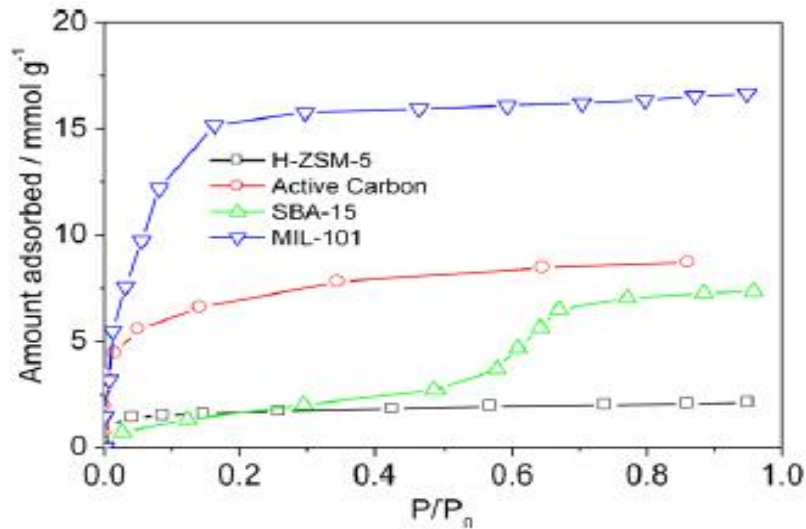
- **(적용조건)** 1) 트리클로로에틸렌 단일물질 또는 트리클로로에틸렌 혼합 VOCs, 2) 단일배출구의 점오염원, 3) 고농도 트리클로로에틸렌 또는 VOCs 등이며 트리클로로에틸렌과 VOCs의 회수·재이용을 위해서는 처리보다 경제성 있어야 하고, 트리클로로에틸렌과 VOCs 가격과 배출가스 특성에 의해 결정됨.
- **(배출가스 특성)** 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, 트리클로로에틸렌과 VOCs 농도, 수분량, 온도 등이며, 이는 흡착제 종류에 따라 달라지므로 ‘흡착제 종류’에서 상세히 설명하였음.
- **(흡착제 종류)** 트리클로로에틸렌 등의 VOCs 흡착제 종류는 1) 활성탄, 2) 제올라이트 (Zeolite), 3) 폴리머(Polymer), 4) MOFs(Metal-organic Frameworks)를 꼽을 수 있으며, 각 흡착제의 특성은 아래에서 보는 것과 같음.

[표 2-4] 흡착제 특성 비교

항목	활성탄	제올라이트	폴리머
표면적	600~1,400 m ² /g	천연 (300~600 m ² /g) 합성 (800~900 m ² /g)	
공극 크기	micropore (공극 직경 < 2 nm), mesopore (2 nm < 공극 직경 < 50 nm), macropore (공극 직경 > 50 nm)	3~30 nm (일정한 공극 크기)	Porous polymers (1~1.6 nm)
표면특성	친수성 ¹ 과 소수성 특성을 모두 보유하고 있음	천연 제올라이트는 친수성이나, 합성 제올라이트는 친수성 또는 소수성으로 목적에 맞게 합성 제작	대부분은 소수성이나 사용 목적에 적합하도록 물성을 변형 합성 제작하는 경우도 있음.
배출가스 유량	60~3,500 m ³ /hr (단일) 병렬 사용시 용량 증가 가능 (for VRU)	60~3,500 m ³ /hr	
VOCs 유입농도	700~1,000 ppm (LEL 25% 이하) 경제성을 고려하면 10~70 VOL% (100,000~700,000 ppmv) (For VRU)	1,000~10,000 ppm (LEL 25% 이하)	
수분량 (상대습도)	50% 미만	94~96%까지 허용	
온도	55°C 이하	상온	
탈착방법	증기 열탈착 ² 진공(Vacuum) 탈착	열탈착 ⁴	열탈착 ⁵
탈착효율 ³	50% 회수효율 98% 이상	90%	50~90%
교체주기	6개월~5년(증기 열탈착) 7년 이상(진공 탈착)	5년 이상	교체주기는 폴리머에 따라 다르나 일반적으로 상당 기간 교체를 하지 않아도 되는 것으로 알려져 있음

- 1: 활성탄의 친수성 특성 때문에 물이 활성탄에 흡착된 피흡착물을 치환·탈착하는데 주요 역할 담당하며, 재생에 필요한 증기량은 목표 제거효율(또는 출구 농도)에 좌우되고, 일정량 증기가 흡수층 온도를 재생온도로 올리는 탈착에너지 공급
- 2: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 활성탄 착화 온도보다는 낮아야 함(재생 최고 온도는 120~180°C)이고, 탈착을 위한 수증기 사용량은 0.25~0.35 kg H₂O/kg AC
- 3: EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004
- 4: 열에 강하기 때문에 고온 탈착도 가능
- 5: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 폴리머 용점(Melting Point)보다는 낮아야 하고, 열에 약하기 때문에 탈착 온도는 비교적 낮은 온도에서 운전

- 최근 연구⁴²⁾에서는 금속-유기 기반 구조(Metal-organic Frameworks; 이하 MOFs) 촉매가 트리클로로에틸렌 흡착에 있어서 활성탄, 제올라이트보다 성능이 더 좋다고 알려져, MOFs의 적용을 검토해 볼 필요가 있으나 MOFs는 고가이므로 경제성 검토를 통해 결정할 필요가 있음.



[그림 2-18] 여러 흡착제의 트리클로로에틸렌 흡착능 비교

(참고) MIL-101은 Al, Cr이 담지된 Terephthalate로서 MOFs 일종

○ 흡착제 비교 평가

- 활성탄은 화재 위험성이 높고, 비점이 높은 유기화합물에 적용하기 어렵고, 수분 조절이 필요하다는 단점을 갖고 있으며, 이를 극복하기 위해 제올라이트 흡착제가 개발 적용되고 있으나, 제올라이트는 고가이므로 활성탄 적용이 어려운 특정 목적에 주로 활용되고 있음.
- 한편 폴리머 흡착제는 표면특성 조절이 가능하다는 특성 때문에 개발 적용되고 있으나, 열에 취약하고 고가라는 단점을 갖고 있으나, 활성탄이 적용하기 어려운 특정 목적으로 고려해 볼 수 있음.
- 활성탄은 적용사례가 많아 기술적 안정성이 높고, 가장 저렴하나 교체 관련 번거로움이 있으며(최장 사용 기간은 7년), VOCs의 배출특성을 고려하여 제올

42) Khan, N. A., Hasan, Z., Jhung, S. H. (2013), Adsorptive Removal of Hazardous Materials using Metal-organic Frameworks (MOFs): A Review

라이트와 폴리머도 대안으로 고려·결정할 필요가 있음.

□ 처리효율과 비용

흡착제	회수효율	설치비용	운전비용	비고
활성탄 ¹	80% 이상	500백만원 이상 ³	2.4백만원/톤	회수 재사용으로
제올라이트 ²	90~96%	-	61,000~163,000원/m ³	원료물질 대체로
폴리머	-	-	-	운전비용 상쇄 효과

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: Khan, F. I., Ghoshal A. Kr. (2000), Removal of Volatile Organic compounds from polluted air: A Review

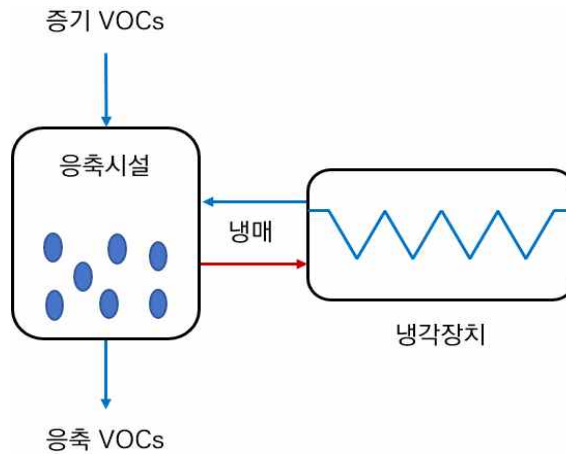
3: 유입 가스 유량과 농도에 따라 비용 차이 발생

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 트리클로로에틸렌의 지속적 재사용으로 인한 구매 비용 절감 • 트리클로로에틸렌의 환경 유입을 차단하여 환경 개선 효과 	<ul style="list-style-type: none"> • 고가의 설치·운영비용 • 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 트리클로로에틸렌 재사용으로 환경 개선 효과가 있는 반면 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 관리가 용이하지 않음.

2) 응축·회수기술

- (기술 개요) 응축은 온도를 낮추어 기체상태 물질을 액체 상태로 전환하는 방법으로 냉매를 활용하여 기체상태 혼합물의 온도를 낮추어 응축 가능한 물질(VOCs 등)을 응축 불가능한 물질로부터 분리하는 기술



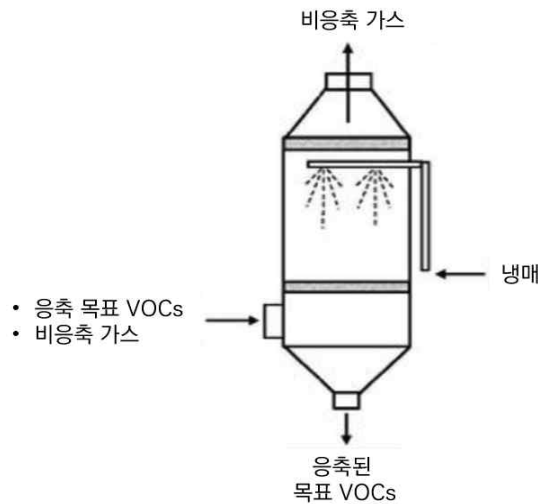
[그림 2-19] 응축·회수 공정도

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

- (원리) 기체상태 물질은 노점(Dew Point)⁴³⁾에서 응축이 일어나며, 일정한 압력에서 온도를 점차 낮추면 노점이 다른 물질들이 특정 온도에서 응축이 일어나면서 분리 추출됨. 또는 온도는 일정하게 유지하면서 압력을 높여줌으로써 냉각응축을 유도하여 특정 물질을 분리할 수도 있음.
- (종류) 응축은 비냉각방식(Non-refrigeration Method)과 냉매를 사용하는 냉각방식(Refrigeration)으로 구분할 수 있으며, VOCs 회수에서는 냉각방식을 주로 활용하고 있음.
- (응축기 종류) 냉각응축을 유도하는 방법으로 접촉 응축방법과 표면 응축방법으로 구분할 수 있음.

43) 기체상태 물질의 분압과 그 물질의 증기압이 동일한 온도

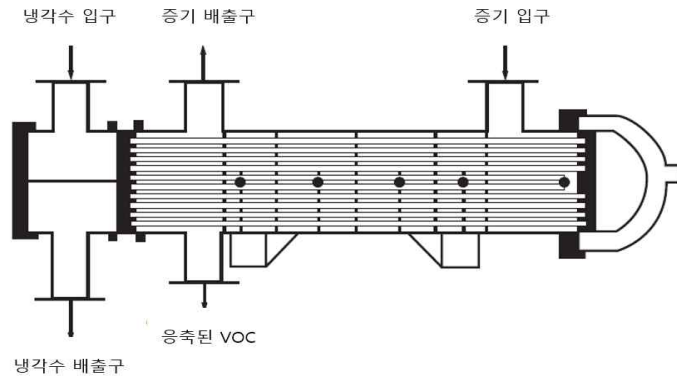
- **(접촉 응축기)** 응축 대상 기체를 냉매와 직접 접촉 혼합하면서 열적·물리적 평형이 이루면서 VOCs를 응축하여 냉각용 액체(배기가스 중의 물이 어는 것을 방지하기 위해 메탄올 주입)에 흡수됨. 접촉 응축방식의 냉각제는 계속 사용할 수 없고, 냉각제에 응축된 VOCs도 바로 재사용하지 못하고 분리 과정을 거쳐야 하는 단점 때문에 경제적이 못함.



[그림 2-20] 접촉 응축기

(출처) Jan Carlson(2016), Air Pollution Control Technology Review : Condensationhttps

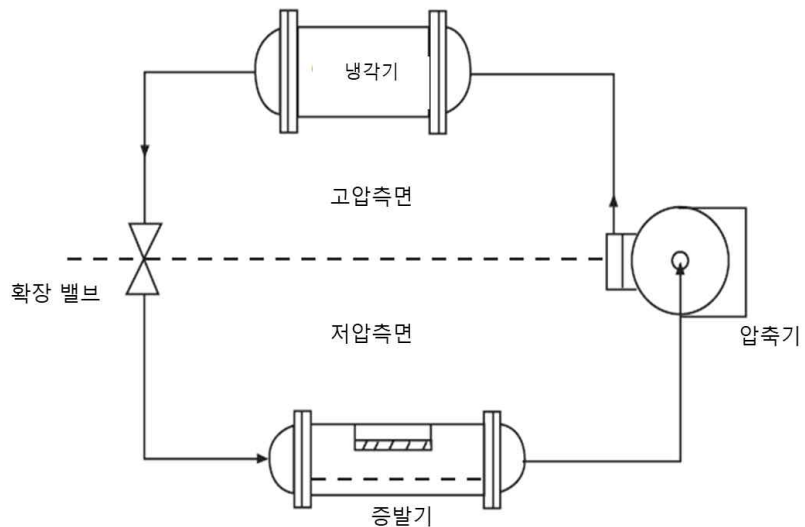
- **(표면 응축기)** 다관식 열교환기 형태로 관 내부에 냉매를 통과시키는 반면 관 외부로 VOCs를 유입시켜 냉매가 통과하는 관 표면에 VOCs를 응축시키는 방법으로 Shell-and-Tube 응축기가 이에 속하며, 냉매와 VOCs가 직접 접촉하지 않아 분리하지 않고 VOCs를 재사용할 수 있는 장점이고, 냉각제도 지속해서 사용 가능하나, 직접 응축방법보다는 냉각효율이 낮은 단점이 있음.



[그림 2-21] 표면 응축기

(출처) EPA, Section 3: VOC Controls 2-5

- 표면 응축방법은 냉매가 증발·압축·응축·확장 등의 4단계를 거치면서 냉각이 이뤄지며, 냉매는 관을 통해 순환되면서 VOCs를 응축시킴.



[그림 2-22] 냉매 순환단계 모식도

(출처) EPA, Section 3 VOC Controls 2-6

- (냉매 종류) 냉매는 주로 물, 냉수, 염수(Brine), 수소불화탄소(HFC), 암모니아, 저온 유체 등이 있으며, 이들 냉매의 적용 가능한 물질의 응축온도는 냉수는 7°C, 염수(Brine)는 -35°C, 염화불화탄소는 -68°C이며, 질소 또는 이산화탄소와 같은 저온 유체는 -195°C까지 가능함.

냉매	적용 가능 응축온도(°C)	냉각온도(°C)
물	15.5 ~ 26.7	(T _{con} - 9) 응축온도보다 9°C 낮게 설정
냉수	7.2 < T _{con} < 15.2	
염수(Brine, 염화칼슘)	-34.4 < T _{con} < 7.2	
HFC-134a	-67.8 < T _{con} < -34.4	

T_{con}: 응축온도(노점, Dew Point)

- **(적용조건)** 응축·회수 적용을 위해서는 비등점이 38°C(100°F) 이상인 VOCs가 적합하며, 유입농도는 5,000ppm 이상이면 유리하나, 비등점이 낮은 물질은 극저온 또는 압력을 가하는 추가적인 노력이 필요함. VOCs는 비등점, 빙점 등이 유사한 물질이 많아 혼합 VOCs에서 특정 물질의 분리·회수가 쉽지 않아 응축·회수는 단일 VOCs 회수에 적합함.
- **(적용사례)** 원유 저장시설에 기화된 VOCs를 진공펌프로 추출하고, 스크리버로 응축하여 VOCs를 회수하는 기술로서 회수율은 95%⁴⁴⁾ 정도로 알려졌다.
- **유의사항**
 - **(결빙 문제)** 응축 대상 VOCs 중에 수분이 함유되어 있거나, 빙점이 높은 VOCs는 응축 과정에서 얼어붙어 관을 폐쇄하므로 운전 문제를 초래하고 생산공정도 중단해야 하므로 수분을 사전에 제거하거나 가열선을 설치하여 간헐적으로 얼음을 녹여주어야 함.

44) <http://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/units-and-plants-practices/VOCs-recovery-systems/#reference-10>



[그림 2-23] 가열선을 설치하여 얼음을 녹이는 배관

(출처) 안산녹색환경지원센터(2011), 응축 기술을 이용한 VOCs 제거 및 회수 설비에 관한 연구
 (출처) Heatizon Systems, <https://www.heatizon.com/products/heatizon-brands/guttermelt>

○ (스케일 문제) 표면 응축방법의 경우 고비점의 유기화합물(타르 등)이 응축기 표면에 응축되면서 스케일을 형성하여 성능 저하 초래

- 여과장치 등의 전처리를 설치하여 스케일 원인 물질 제거

□ (트리클로로에틸렌 적용) 트리클로로에틸렌의 응축회수기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 응축회수기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

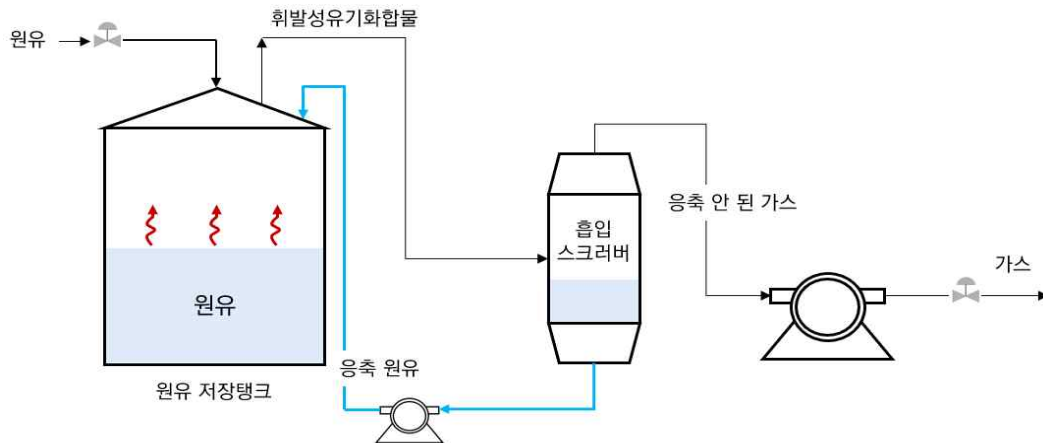
회수율(%)*	설치비용	운영비용	비고
90	100백만원 이상	30백만원 이상	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 액체질소 적용한 경우

3) 흡수·회수기술

□ (기술 개요) 단일 VOCs 또는 혼합 VOCs가 포함된 배출가스를 흡수제에 물리흡수 시킨 다음 방산(Stripping) 공정을 통해 VOCs를 분리한 다음 응축 과정을 거쳐 회수하는 기술



[그림 2-24] 흡수·회수 시설의 공정도

(출처) ipieca(2013), VOC recovery Systems 인용

○ (소극적 회수기술, Passive Recovery Technology) 저장시설 등으로부터 추출된 VOCs에 압력을 가해 원유에 흡수⁴⁵⁾시키거나, 다양한 유기용제(예, Kerosene)를 흡수제로 사용하여 응축 흡수⁴⁶⁾(원유 저장시설의 경우는 원유 자체를 흡수제로 사용)한 다음 저장시설에 재투입하고, 회수하지 못한 VOCs는 고온 산화 처리 또는 다른 용도로 활용

45) 압력 흡수의 회수율은 80%

46) 응축 흡수의 회수율은 90%



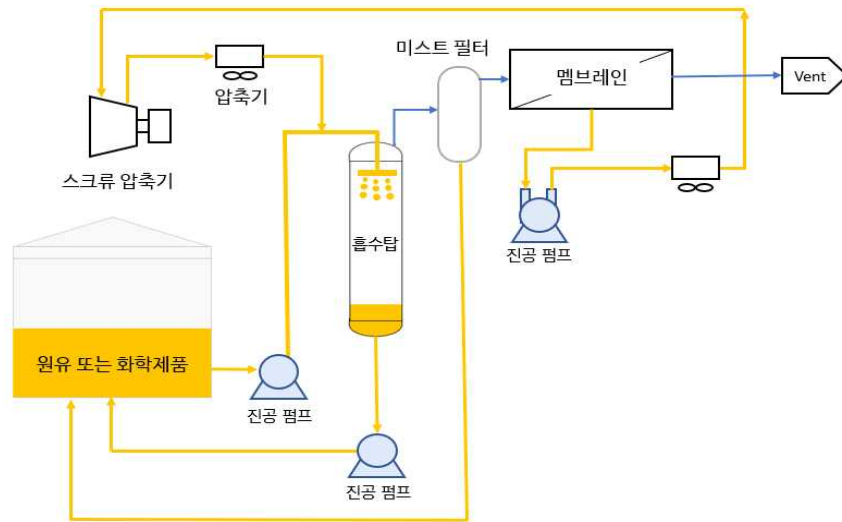
[그림 2-25] 선박에서 원유 하역 과정에서의 VOCs 흡수·회수 및 고온 산화 처리

(출처) JX(2013), Technologies for Volatile Organic

- (운전조건) 흡수 반응기 운전조건은 상황에 따라 달라지며(현장 적용사례⁴⁷⁾ : 온도는 3~7℃, 압력은 0.3~0.5 MPa), 흡수제로는 원유 또는 석유화학제품 등 저장시설의 물질과 같은 물질을 사용하여 용해·회수
- (적극적 회수기술, Active Recovery Technology) 저장시설로부터 VOCs를 포집한 다음 흡수공정과 타 회수공정을 연계하여 VOCs를 회수하는 기술(흡수공정만으로는 회수효율이 떨어지므로 연계 공정 적용)
- (흡수/막분리 연계방식) 흡수 단독공정에 막분리를 후속으로 연결한 방식으로 흡수 단독공정의 경우 VOCs 회수율이 70% 수준에 불과하였으나 막분리 공정을 후속으로 연결하여 회수율이 95%로 높아졌음⁴⁸⁾.

47) JX Nippon Oil and Energy에서 일본 가고시마의 키이레 터미널(Kiire Terminal)에 설치 운전(처리규모: 20,000 Sm³/hr)

48) CARBOVAC, Vapor Recovery Solutions

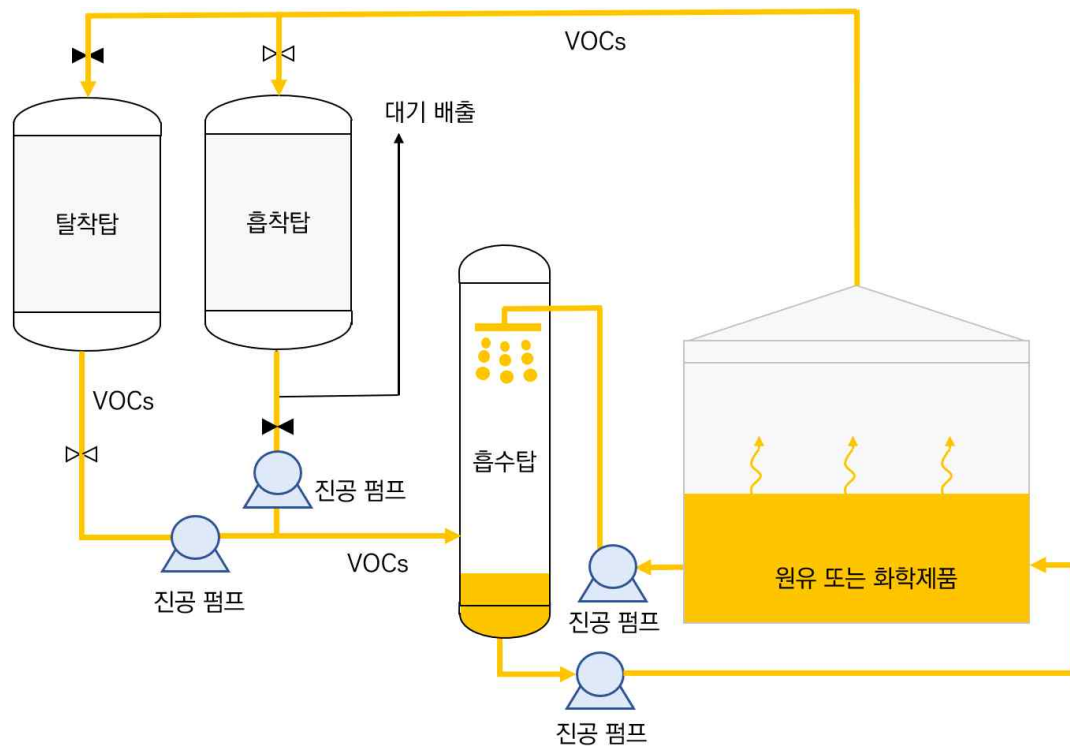


[그림 2-26] 흡수/막분리 연계 회수공정

(출처) BORSIG Membrane Technology GmbH, BMEMBRANE TECHNOLOGY FOR PROCESSES AND ENVIRONMENT, 8p 인용

- **(흡수/흡착 연계방식)** 흡수공정 앞에 활성탄을 활용한 흡·탈착공정을 설치하여 저장시설 또는 운반시설로부터 휘발·배출된 VOCs를 흡착시킨 다음 감압하여 VOCs를 탈착시킴. 탈착된 VOCs를 흡수탑에 주입하여 저장시설의 원유 또는 석유화학제품에 용해·회수하는 방식임. VOCs 회수율이 흡수 단독공정의 70% 안팎에서 90~99%로 높아졌음.
- **(흡착)** 활성탄 등의 흡착시설을 이용하여 저장시설 등으로부터 배출되는 VOCs를 흡착시켜 불활성기체⁴⁹⁾와 분리
- **(탈착)** 일반적으로 흡착탑에 진공펌프를 걸어 VOCs 탈착

49) 운반기체로서 농도 조절과 화재 위험도를 낮추기 위한 목적



[그림 2-27] 흡수/흡착 연계 회수공정

(출처) logo alma Carbovac, Vapour Recovery Units, 4p 인용

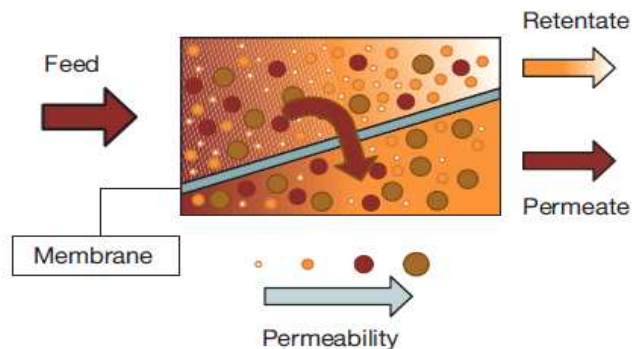
- (유의사항) 트리클로로에틸렌 등의 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 상대적으로 낮은 압력손실 • 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 • 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 • 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 • 상대적으로 낮은 설치비용 • 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 폐수처리 문제 • 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 트리클로로에틸렌 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 흡수·회수기술은 트리클로로에틸렌 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

4) 막분리·회수기술

- (기술 개요) 각각 가스의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술로서 가스 분리는 막의 양단에 가스 분압 차이(농도 차이)를 이용함.
- (분리막) 혼합 성분으로부터 선택적으로 특정 성분을 분리할 수 있는 물리적 경계층으로 막 양단의 가스 분압 차이(농도 차이)가 물질 전달력임.
- (분리막 성능) 혼합 성분 중에서 분리 목표 물질의 선택성과 막 양단의 압력 차에 의해 분리막 성능이 결정되며, 선택성은 10 이상, 압력 차 성능지표인 압력비(공급측 총압에 대한 투과측 총압 비)는 일반적으로 30~50 정도이어야 기술적으로 실현가능함.



[그림 2-28] 막분리 프로세스

(출처) ITM-CNR, Membrane per la separazione di CO₂ erattori a membrana per il suo uso
(<https://www.enea.it/it/seguici/events/co2/IULIANELLI.pdf>) 인용

□ 적용조건

- 트리클로로에틸렌을 막으로 분리하기 위해서는 혼합가스 종류, 트리클로로에틸렌 농도, 유량, 배출가스 온도 등 다양한 정보가 필요하며, 이는 대상 업종 및 공정에 따라 다른 수요맞춤형 막이 개발 적용되어야 함. 그러므로 트리클로로에틸렌 분리를 위한 적용조건을 일반화하기는 어려운 상황임.

□ 적용사례

- (필요성) 미국 에너지부(DOE)의 관할 지역에서 염소계 VOCs로 오염된 토양으로부터 배출되는 염소계 VOCs 함유 가스의 적정 처리 필요성 대두
- (적용 시기 및 지점) 1999년 3월부터 2000년 2월까지 미국 캘리포니아 주의 Sacramento 시 외곽에 있는 McClellan Air Force Base(AFB)

○ 조건 및 설계목표

항목	내용
설계 유량	58.9 Sm ³ /hr
배출 VOCs 농도	23 ~ 101 ppm
처리 목표 VOCs 농도	10 ppm

○ (적용 결과) Membrane Technologies and Research, Inc.(MTR)는 막(Permselective Membrane)을 사용하여 VOCs를 선택적으로 공기와 분리하여(VOCs는 막을 통과시키고, 공기는 배제) VOCs를 액상으로 회수하였고, 설계 목표치도 달성하였음.

○ (적용 문제점)

- (CO₂ 문제점) 배출가스 중에 CO₂ 농도는 1~3%이었으며, CO₂에 의해 막분리 성능이 2~4배 정도 감소하였음.
- (오일과 물의 문제점) 배출가스 중의 오일과 물은 막의 막힘 현상(Fouling)을 초래하여 막분리 성능을 저하한다고 밝혀졌으며, 이는 효과적 전처리로 해결할 수 있다고 결론 내렸음.

○ (비용 분석) VOCs 농도 5,000 ppm의 배출가스 300 Sm³/hr를 VOCs 농도 10 ppm 이하로 처리하기 위한 시설 설치비용은 780백만원⁵⁰⁾ 정도 필요하고, 운영비용은 800백만원 정도 필요하다고 보고하였음.

VOCs 유입농도	연간 운영비용*
100 ppm	499.2백만원
1,000 ppm	585.6백만원
5,000 ppm	799.2백만원
10,000 ppm	856.8백만원

* 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정
(출처) US DOE(2001), Membrane System for the Recovery of Volatile Organic compounds from Remediation Off-Gases, DOE/EM-0614

50) 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 분리 과정에서 상변화가 없으므로 에너지 소모가 적음 • 장치 구성이 단순하고 기계 장치가 최소화되어서 유지관리가 쉬움 • 특정 물질 선택성이 탁월함 • 다양한 목적에 적용 가능한 막 제조가 가능함(원료가 다양하여 목적에 따라 다양한 막 제조 가능) • 환경에 무해한 또는 영향이 적은 원료 또는 재질을 사용하므로 환경친화적 공정 	<ul style="list-style-type: none"> • 막의 특정 화학물질에 대한 취약성(특정 화학물질과의 접촉을 피해야 하므로 공정 적용 한계) • 중합체이므로 온도에 영향을 받기 때문에 특정 화학반응 공정(온도가 높은 공정)에 적용하기 어려움(적용의 한계) • 규모 확장의 한계(일반적으로 단위 모듈을 반복적으로 연결하여 규모 확장하는 방식으로 대용량 설치의 한계) • 막 오염과 막힘 현상으로 교체 필요성(높은 운영비용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 트리클로로에틸렌 등의 VOCs에 대한 선택성이 탁월하고, 석유화학산업에서 이미 적용한 사례가 존재하여 트리클로로에틸렌을 분리·회수 재사용은 기술적으로 가능함 • 막분리 시설의 설치 및 운영비가 높아 타 기술과 효율 및 경제성을 비교 평가하여 막분리시설의 적용 여부를 결정할 필요가 있음

2.4.3

이송·운반·분배·계량시설

- (정의) 원료 물질을 저장 탱크, 창고, 사일로 등에 저장하거나 생산물, 제품을 일시적으로 창고 등에 보관·저장하는 공정

2.4.3.1. (공정관리) 측정 및 관리시스템 도입

- (정의) 누출오염원관리시스템(LDAR)을 활용하여 이송·운반·분배·계량 시설 배출원에 대한 주기적 감시 및 검지를 시행하여, 이상 있는 장치는 즉시 정비 또는 교체하여 트리클로로에틸렌 배출량과 배출원을 동시에 체계적으로 관리하는 기술
- 이송·운반·분배·계량 시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 누출지점이 많고, 누출되더라도 육안 식별이 어렵고, 화학물질에 따라서 무색·무취인 경우도 있어 측정하지 않고서는 누출 파악이 어려운 상황이 존재함.
- 누출 가능성이 큰 지점에 바코드가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고, LDAR 시스템에 의해 주기적으로 점검 관리함.

[표 2-5] LDAR 점검주기 및 화학업종과 정유업종 저감율

장치 및 화학물질	화학업종 저감율(%)		정유업종 저감율(%)	
	매월 감시	매분기 감시	매월 감시	매분기 감시
밸브-기체	87	67	88	70
밸브-경질유	84	61	76	61
펌프-경질유	69	45	68	45
압축기-기체	-	-	-	33
연결부-기체, 경질유	-	33	-	
압력안전밸브-기체	-	44	-	44

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

기술 개요	Leak Detection and Repair(이하 LDAR) 등 누출관리시스템을 활용한 실시간 화학물질의 비산배출 관리기술로 최근 광학이미지 카메라를 이용한 Flare, 저장시설 등 VOCs 누출 모니터링과 공정 배출감시를 위한 Fence Line 모니터링 기술도 활용되고 있음			
적용산업 및 공정	트리클로로에틸렌의 이송·운반·분배·계량 공정이 있는 전 업종			
적용효과	(적용 전) 이송·운반·분배·계량시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 배출원 수가 많고 누출이 되더라도 누출 여부의 육안 확인이 어려운 상황			
	(적용 후) LDAR를 도입하여 대상 공정의 누출지점에 바코드 번호가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고 VOCs 측정기(검지기)를 이용하여 배출원에 대한 주기적 점검을 통해 누출 확인 및 신속한 장비 보수 가능			
저감효과 (%)	70	처리비용	설치비용	100백만원 이상
			운영비용	1,000원/관리지점

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

2.4.3.2. (공정관리) 장치개선

- (정의) 장치개선 및 교체를 통해 트리클로로에틸렌의 비산 배출원으로부터의 누출 (Leak)을 방지하고 누출 원인이 되는 부분을 개선함으로써 배출량을 줄이거나 완전히 차단하는 기술
- (펌프 변경) 펌프 Seal에서 트리클로로에틸렌이 누출되는 것을 방지하기 위해 Seal이 없는 Sealless(Non-seal) 펌프(Canned 펌프 등)나 Double-sealed 펌프로 교체
- (밀폐식 시료 채취장치) 시료 채취 과정에서 트리클로로에틸렌이 비산 배출되는 것을 방지하기 위해 밀폐식 시료 채취장치로 변경

장치 종류	개선 방법	저감률(%)
펌프	• Seal-less design (Canned Pump etc.)	99
	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
밸브	• Seal-less design • (Bellows type, Diaphragm, etc.)	99
압축기	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
압력 안전밸브	• Rupture Disk Assembly	99
	• Closed Vent System	90*
연결부	• Socket Welding Type	99
개방식 라인	• Blind, Plug, Cap or Second Valve	99
시료 채취 연결부	• Closed-loop System	99
공정 배수구	• Closed-loop and Water Seal	99

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 배출관이 연소처리 등에 연결하여 처리할 경우는 99%, 미 연결된 경우는 90% 수준임.

2.4.3.3. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 트리클로로에틸렌이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 트리클로로에틸렌의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
 - (밀폐형 덮개) 트리클로로에틸렌 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기 오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 2-29] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

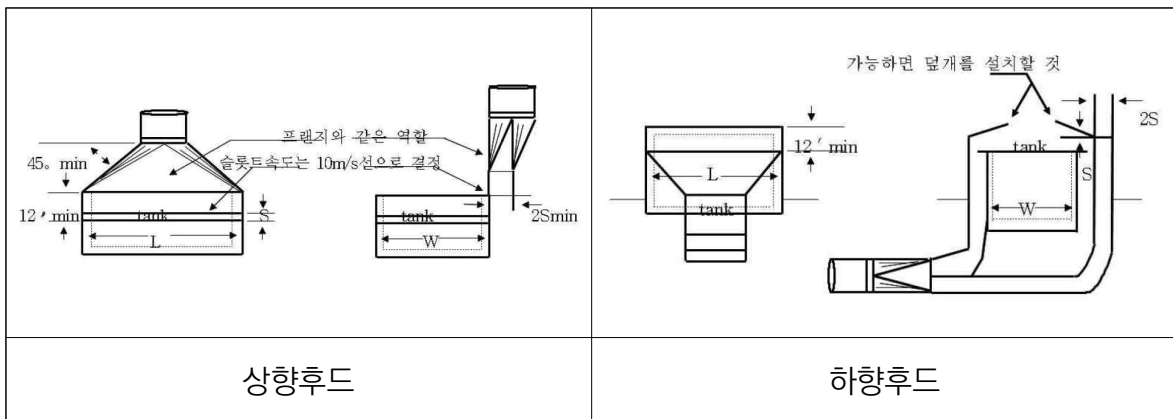
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 2-30] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

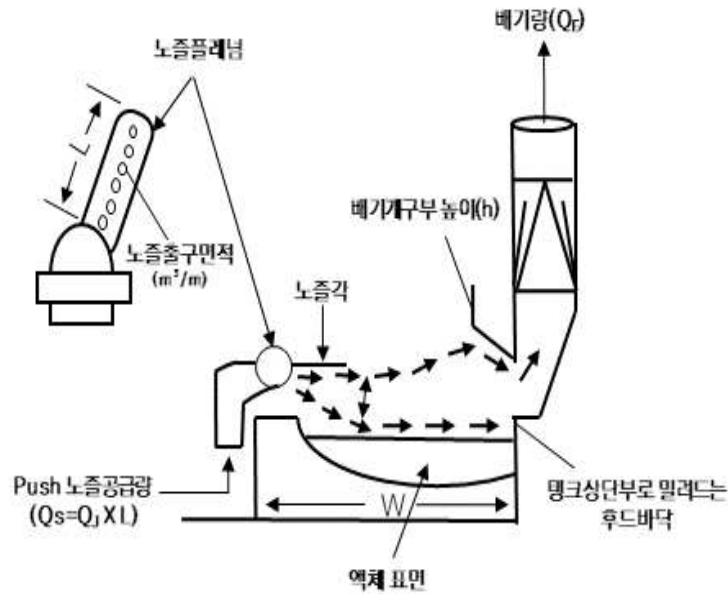
- (외부식 후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 2-31] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 2-32] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음


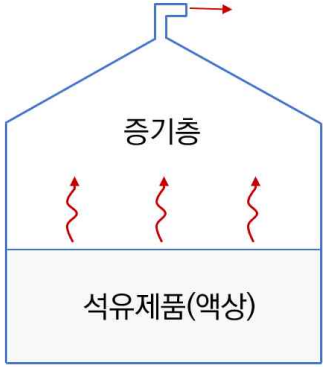

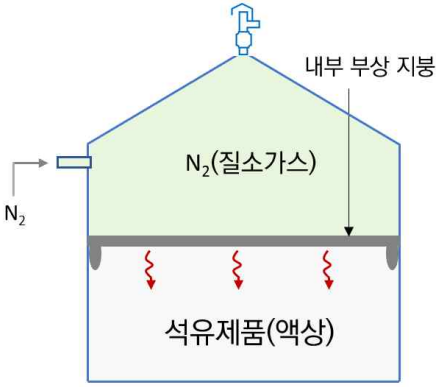
(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

2.4.4

저장시설

2.4.4.1. 대체공정

적용업종	<ul style="list-style-type: none"> • 화학물질 및 화학제품 제조업 • 코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업 			
대체공정	<p>(변경 전) 기존 CRT(Cone Roof Tank)는 VOCs를 함유한 원료 및 제품의 저장시설 내부 증기압이 높아지면 안전밸브가 자동으로 열리면서 VOCs가 외부로 배출</p> 	<p>VOCs의 압력이 높아지면 안전밸브가 열림</p> 		
	<p>(변경 후) IFRT(Internal Floating Roof Tank)는 저장시설의 액위에 따라 내부 부상 지붕이 이동하므로 증기층 발생을 최소화하며, 발생 증기를 연소시설, 흡착탑 등으로 이송 처리하며, 질소 봉입으로 VOCs 누출을 최소화하고 있음.</p> 	 <p>제품 액위 변화에 따라 내부 부상 지붕 이동으로 증기 발생 최소화</p>		
저감효율 (%)	IFRT: 95% 이상 질소 봉입: 97% 이상 연소시설 : 99% 이상	처리비용	설치비용 운영비용	1,800백만원 (IFRT+연소시설 연결) -

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

(출처) <https://www.indiamart.com/proddetail/cathodic-protection-system-for-tanks-20242520612.html>

(출처) <http://www.fullmost.com.tw/de/Internal-Floating-Roof-IFR/>

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2.4.4.2. 공정관리

<p>적용산업</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 화학물질 및 화학제품 제조업/저장시설 • 코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업/저장시설 			
<p>저장시설 관리개선</p>	<p>(변경 전)</p> <p>BV(Breath Valve)를 열리게 하기 위한 설계압력이 150 mmH₂O로 낮아 VOCs 대기 배출이 많음.</p> <div style="text-align: center;"> </div> <ul style="list-style-type: none"> • 설계압력이 낮아 BV와 EV가 정상 운전에서도 탈루 발생 • Corn Roof Tank 			
	<p>(변경 후)</p> <p>설계압력을 10,000 mmH₂O로 높여 설계하고 평소 운전 압력을 최대 9,000 mmH₂O로 관리하여 배출가스 양을 감소하였고, 배출가스는 소각 처리하여 VOCs 대기 배출 최소화</p> <div style="text-align: center;"> </div> <ul style="list-style-type: none"> • 설계압력을 높여 BV와 EV를 통한 대기 방출 없애고, BV와 EV를 내압으로 인해 개방되더라도 Vent Gas는 VCU 등 소각 처리됨 • Dome Roof Tank 			
<p>저감효율¹ (%)</p>	<p>90%</p>	<p>처리비용</p>	<p>설치비용²</p>	<p>70백만원 이상</p>
			<p>운영비용</p>	<p>-</p>

1: (출처) 이우근 외 3(2006), VOCs 배출현황 및 저감방안, 대한환경공학회지

2: (출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

2.4.4.3. 재사용 및 재활용

흡착·회수	대기 중으로 배출되는 VOCs를 흡착제에 흡착시키고, 온도 또는 압력 조절을 통해 탈착·회수하는 기술
응축·회수	응축기 등을 통해 유체 온도나 압력 변화로 대상 VOCs를 분리·회수하는 기술
흡수·회수	액상 흡수제를 가스상의 VOCs와 접촉하여 VOCs를 흡수제로 물질 이동시켜 분리·회수하는 기술
막분리·회수	혼합가스 각각의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술

1) 흡착·회수기술

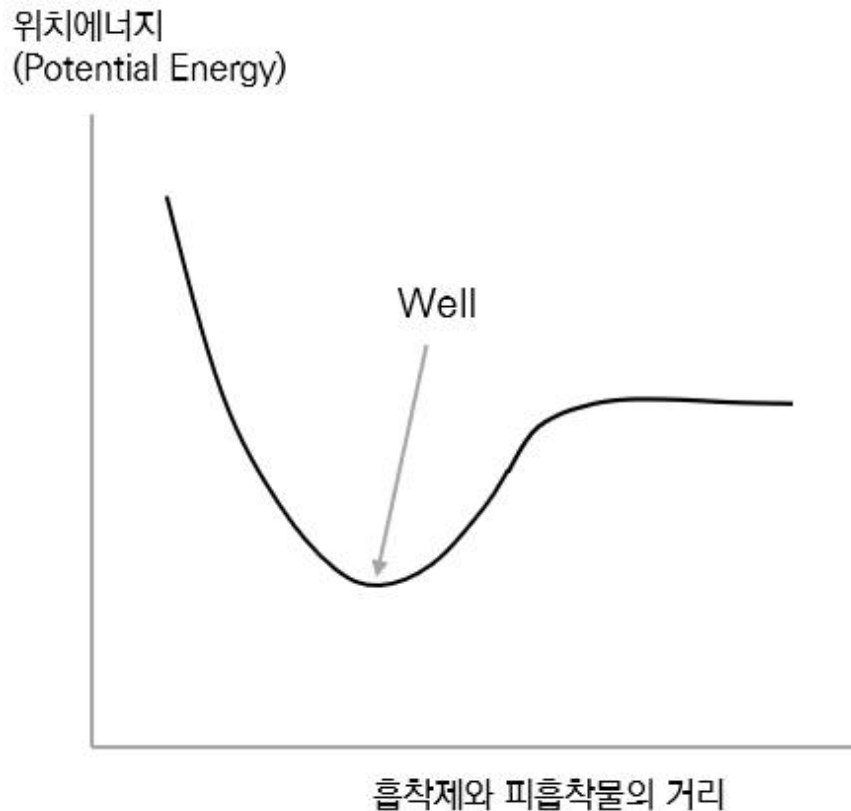
□ (기술 개요) VOCs를 흡착제 표면에 물리적으로 흡착시키고 탈착·회수 재이용하는 기술

○ (흡착) 흡착공정은 화학적 흡착과 물리적 흡착으로 구분할 수 있으며, 화학적 흡착은 피흡착물과 흡착제가 화학적으로 결합하므로, 피흡착물과 흡착제의 화학적 결합을 끊어야 하므로 원래 형태로의 피흡착물 회수가 용이하지 않음. 반면 물리적 흡착은 원래 형태로 피흡착물의 회수가 가능하므로 흡착·회수 재사용기술에서는 물리적 흡착을 적용하고 있음.

- (물리적 흡착원리) 아래 그림은 흡착제 표면으로부터의 거리와 위치에너지 (Potential Energy)의 상관관계를 보여주고 있음. 흡착제와 피흡착물 간에는 ‘반발 (Repulsion)⁵¹⁾’과 ‘견인(Attraction)⁵²⁾’이 동시에 작용하여 균형을 이루고 있음. 흡착제와 피흡착물의 거리 중에서 위치에너지가 가장 낮은 지점(Well 또는 Dip)에서 흡착이 일어나며, 피흡착물의 탈착을 위해 필요한 에너지가 외부에서 운동 에너지(Kinetic Energy) 형태로 공급되면 탈착이 일어남.

51) 흡착제와 피흡착물의 전자군(Cloud of Electrons) 간의 반발력

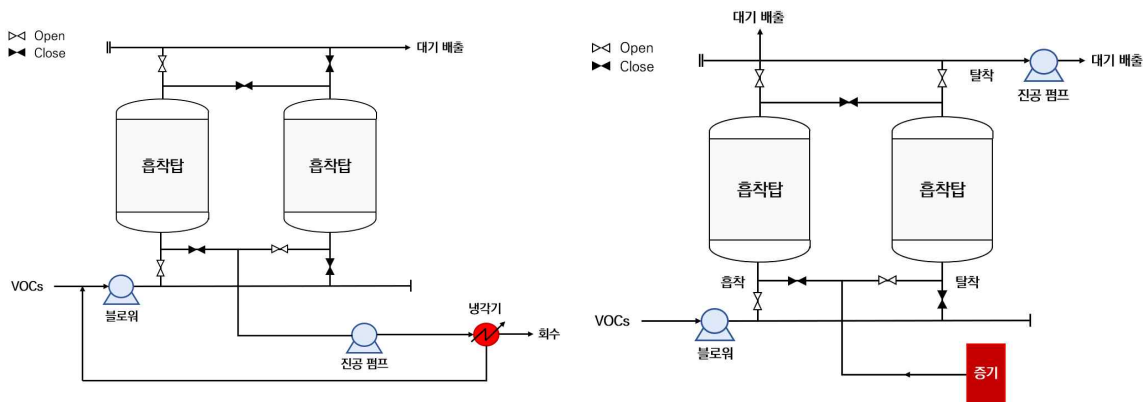
52) 전자 핵(Nuclear) 간의 Van der Waals force에 의한 견인력



[그림 2-33] 흡착제와 피흡착물의 거리에 따른 위치에너지 변화

(출처) EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004

- **(탈착)** 포화된 흡착제 재생 방법은 온도 차이를 이용한 열탈착 방식(Temperature Swing Adsorption, 이하 TSA)과 압력탈착 방식(Pressure Swing Adsorption, 이하 PSA)이 주로 적용되고 있음.
 - **(TSA)** 고온 증기를 이용해 흡착제(예, 활성탄)에 흡착된 VOCs를 회수하는 방법으로 흡착제에 잔류하는 수분을 건조해야 하며, 고온 증기사용으로 화재 등 위험성이 있으며, 운전비용이 높고, 시간이 많이 소요되는 단점이 있음.
 - **(PSA)** 고압에서 VOCs를 흡착시키고, 압력을 낮춰 VOCs를 탈착시키는데 고압에서 운전하므로 운전비용이 높고, 공정 규모가 커지는 단점이 있음.
- **(공정 구성)** 일반적으로 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 탈착하게 됨.



[그림 2-34] 흡착·회수공정 모식도

(출처) SEST주식회사 홈페이지 (http://www.sestco.com/kor/vru_01.php) 인용

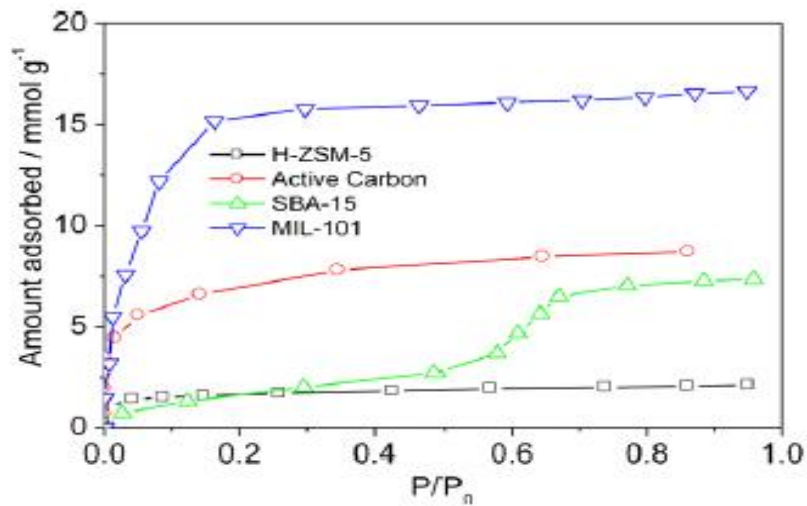
- **(적용조건)** 1) 트리클로로에틸렌 단일물질 또는 트리클로로에틸렌 혼합 VOCs, 2) 단일배출구의 점오염원, 3) 고농도 트리클로로에틸렌 또는 VOCs 등이며 트리클로로에틸렌과 VOCs의 회수·재이용을 위해서는 처리보다 경제성 있어야 하고, 트리클로로에틸렌과 VOCs 가격과 배출가스 특성에 의해 결정됨.
- **(배출가스 특성)** 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, 트리클로로에틸렌과 VOCs 농도, 수분량, 온도 등이며, 이는 흡착제 종류에 따라 달라지므로 ‘흡착제 종류’에서 상세히 설명하였음.
- **(흡착제 종류)** 트리클로로에틸렌 등의 VOCs 흡착제 종류는 1) 활성탄, 2) 제올라이트 (Zeolite), 3) 폴리머(Polymer), 4) MOFs(Metal-organic Frameworks)를 꼽을 수 있으며, 각 흡착제의 특성은 아래에서 보는 것과 같음.

[표 2-7] 흡착제 특성 비교

항목	활성탄	제올라이트	폴리머
표면적	600~1,400 m ² /g	천연 (300~600 m ² /g) 합성 (800~900 m ² /g)	
공극 크기	micropore (공극 직경 < 2 nm), mesopore (2 nm < 공극 직경 < 50 nm), macropore (공극 직경 > 50 nm)	3~30 nm (일정한 공극 크기)	Porous polymers (1~1.6 nm)
표면특성	친수성 ¹ 과 소수성 특성을 모두 보유하고 있음	천연 제올라이트는 친수성이나, 합성 제올라이트는 친수성 또는 소수성으로 목적에 맞게 합성 제작	대부분은 소수성이나 사용 목적에 적합하도록 물성을 변형 합성 제작하는 경우도 있음.
배출가스 유량	60~3,500 m ³ /hr (단일) 병렬 사용시 용량 증가 가능 (for VRU)	60~3,500 m ³ /hr	
VOCs 유입농도	700~1,000 ppm (LEL 25% 이하) 경제성을 고려하면 10~70 VOL% (100,000~700,000 ppmv) (For VRU)	1,000~10,000 ppm (LEL 25% 이하)	
수분량 (상대습도)	50% 미만	94~96%까지 허용	
온도	55°C 이하	상온	
탈착방법	증기 열탈착 ² 진공(Vacuum) 탈착	열탈착 ⁴	열탈착 ⁵
탈착효율 ³	50% 회수효율 98% 이상	90%	50~90%
교체주기	6개월~5년(증기 열탈착) 7년 이상(진공 탈착)	5년 이상	교체주기는 폴리머에 따라 다르나 일반적으로 상당 기간 교체를 하지 않아도 되는 것으로 알려져 있음

- 1: 활성탄의 친수성 특성 때문에 물이 활성탄에 흡착된 피흡착물을 치환·탈착하는데 주요 역할 담당하며, 재생에 필요한 증기량은 목표 제거효율(또는 출구 농도)에 좌우되고, 일정한 증기가 흡수층 온도를 재생온도로 올리는 탈착에너지 공급
- 2: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 활성탄 착화 온도보다는 낮아야 함(재생 최고 온도는 120~180°C)이고, 탈착을 위한 수증기 사용량은 0.25~0.35 kg H₂O/kg AC
- 3: EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004
- 4: 열에 강하기 때문에 고온 탈착도 가능
- 5: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 폴리머 용점(Melting Point)보다는 낮아야 하고, 열에 약하기 때문에 탈착 온도는 비교적 낮은 온도에서 운전

- 최근 연구⁵³⁾에서는 금속-유기 기반 구조(Metal-organic Frameworks; 이하 MOFs) 촉매가 트리클로로에틸렌 흡착에 있어서 활성탄, 제올라이트보다 성능이 더 좋다고 알려져, MOFs의 적용을 검토해 볼 필요가 있으나 MOFs는 고가이므로 경제성 검토를 통해 결정할 필요가 있음.



[그림 2-35] 여러 흡착제의 트리클로로에틸렌 흡착능 비교

(참고) MIL-101은 Al, Cr이 담지된 Terephthalate로서 MOFs 일종

○ 흡착제 비교 평가

- 활성탄은 화재 위험성이 높고, 비점이 높은 유기화합물에 적용하기 어렵고, 수분 조절이 필요하다는 단점을 갖고 있으며, 이를 극복하기 위해 제올라이트 흡착제가 개발 적용되고 있으나, 제올라이트는 고가이므로 활성탄 적용이 어려운 특정 목적에 주로 활용되고 있음.
- 한편 폴리머 흡착제는 표면특성 조절이 가능하다는 특성 때문에 개발 적용되고 있으나, 열에 취약하고 고가라는 단점을 갖고 있으나, 활성탄이 적용하기 어려운 특정 목적으로 고려해 볼 수 있음.
- 활성탄은 적용사례가 많아 기술적 안정성이 높고, 가장 저렴하나 교체 관련 번거로움이 있으며(최장 사용 기간은 7년), VOCs의 배출특성을 고려하여 제올

53) Khan, N. A., Hasan, Z., Jhung, S. H. (2013), Adsorptive Removal of Hazardous Materials using Metal-organic Frameworks (MOFs): A Review

라이트와 폴리머도 대안으로 고려·결정할 필요가 있음.

□ 처리효율과 비용

흡착제	회수효율	설치비용	운전비용	비고
활성탄 ¹	80% 이상	500백만원 이상 ³	2.4백만원/톤	회수 재사용으로 원료물질 대체로 운전비용 상쇄 효과
제올라이트 ²	90~96%	-	61,000~163,000원/m ³	
폴리머	-	-	-	

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: Khan, F. I., Ghoshal A. Kr. (2000), Removal of Volatile Organic compounds from polluted air: A Review

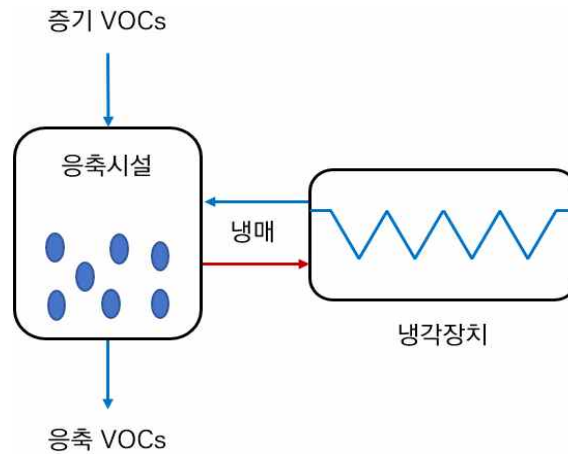
3: 유입 가스 유량과 농도에 따라 비용 차이 발생

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 트리클로로에틸렌의 지속적 재사용으로 인한 구매 비용 절감 • 트리클로로에틸렌의 환경 유입을 차단하여 환경 개선 효과 	<ul style="list-style-type: none"> • 고가의 설치·운영비용 • 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 트리클로로에틸렌 재사용으로 환경 개선 효과가 있는 반면 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 관리가 용이하지 않음.

2) 응축·회수기술

- (기술 개요) 응축은 온도를 낮추어 기체상태 물질을 액체 상태로 전환하는 방법으로 냉매를 활용하여 기체상태 혼합물의 온도를 낮추어 응축 가능한 물질(VOCs 등)을 응축 불가능한 물질로부터 분리하는 기술



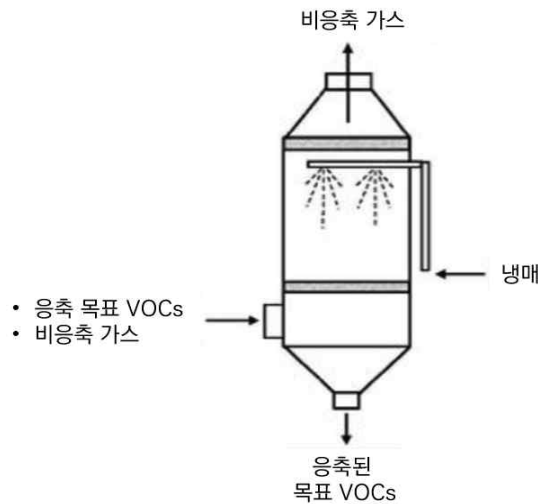
[그림 3-36] 응축·회수 공정도

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

- (원리) 기체상태 물질은 노점(Dew Point)⁵⁴⁾에서 응축이 일어나며, 일정한 압력에서 온도를 점차 낮추면 노점이 다른 물질들이 특정 온도에서 응축이 일어나면서 분리 추출됨. 또는 온도는 일정하게 유지하면서 압력을 높여줌으로써 냉각응축을 유도하여 특정 물질을 분리할 수도 있음.
- (종류) 응축은 비냉각방식(Non-refrigeration Method)과 냉매를 사용하는 냉각방식(Refrigeration)으로 구분할 수 있으며, VOCs 회수에서는 냉각방식을 주로 활용하고 있음.
- (응축기 종류) 냉각응축을 유도하는 방법으로 접촉 응축방법과 표면 응축방법으로 구분할 수 있음.

54) 기체상태 물질의 분압과 그 물질의 증기압이 동일한 온도

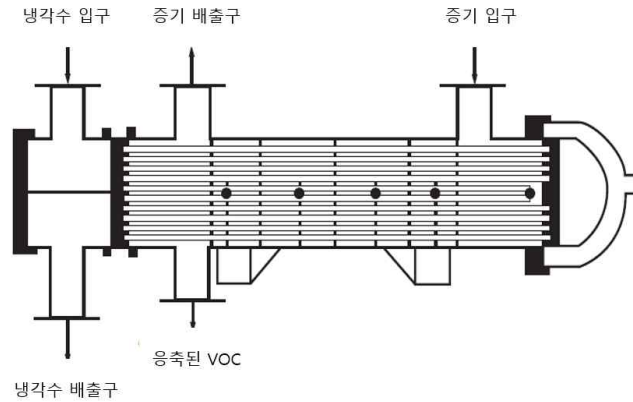
- **(접촉 응축기)** 응축 대상 기체를 냉매와 직접 접촉 혼합하면서 열적·물리적 평형이 이루면서 VOCs를 응축하여 냉각용 액체(배기가스 중의 물이 어는 것을 방지하기 위해 메탄올 주입)에 흡수됨. 접촉 응축방식의 냉각제는 계속 사용할 수 없고, 냉각제에 응축된 VOCs도 바로 재사용하지 못하고 분리 과정을 거쳐야 하는 단점 때문에 경제 적이지 못함.



[그림 2-37] 접촉 응축기

(출처) Jan Carlson(2016), Air Pollution Control Technology Review : Condensationhttps

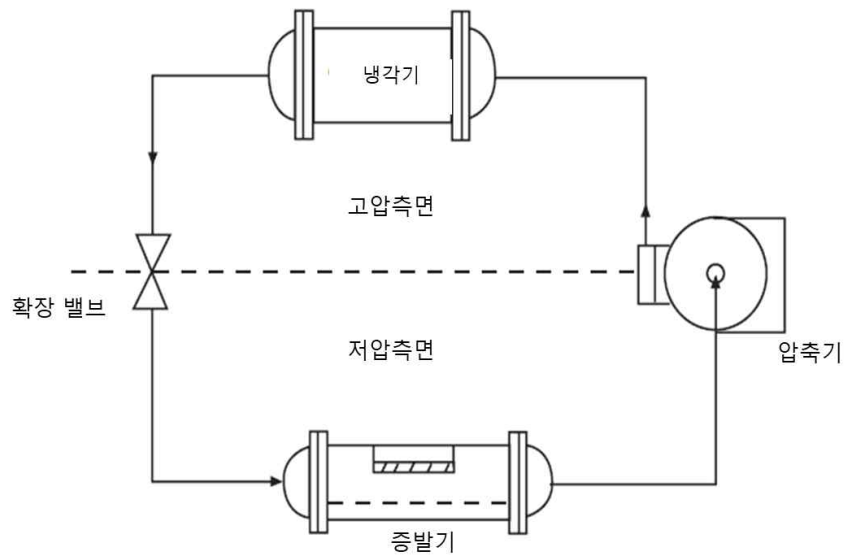
- **(표면 응축기)** 다관식 열교환기 형태로 관 내부에 냉매를 통과시키는 반면 관 외부로 VOCs를 유입시켜 냉매가 통과하는 관 표면에 VOCs를 응축시키는 방법으로 Shell-and-Tube 응축기가 이에 속하며, 냉매와 VOCs가 직접 접촉하지 않아 분리 하지 않고 VOCs를 재사용할 수 있는 장점이고, 냉각제도 지속해서 사용 가능하나, 직접 응축방법보다는 냉각효율이 낮은 단점이 있음.



[그림 2-38] 표면 응축기

(출처) EPA, Section 3: VOC Controls 2-5

- 표면 응축방법은 냉매가 증발·압축·응축·확장 등의 4단계를 거치면서 냉각이 이뤄지며, 냉매는 관을 통해 순환되면서 VOCs를 응축시킴.



[그림 2-39] 냉매 순환단계 모식도

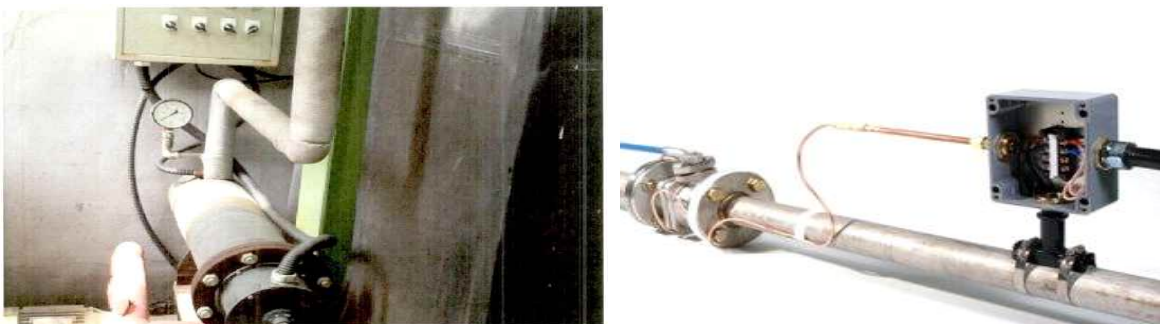
(출처) EPA, Section 3 VOC Controls 2-6

- (냉매 종류) 냉매는 주로 물, 냉수, 염수(Brine), 수소불화탄소(HFC), 암모니아, 저온 유체 등이 있으며, 이들 냉매의 적용 가능한 물질의 응축온도는 냉수는 7°C, 염수(Brine)는 -35°C, 염화불화탄소는 -68°C이며, 질소 또는 이산화탄소와 같은 저온 유체는 -195°C까지 가능함.

냉매	적용 가능 응축온도(°C)	냉각온도(°C)
물	15.5 ~ 26.7	(T _{con} - 9) 응축온도보다 9°C 낮게 설정
냉수	7.2 < T _{con} < 15.2	
염수(Brine, 염화칼슘)	-34.4 < T _{con} < 7.2	
HFC-134a	-67.8 < T _{con} < -34.4	

T_{con}: 응축온도(노점, Dew Point)

- **(적용조건)** 응축·회수 적용을 위해서는 비등점이 38°C(100°F) 이상인 VOCs가 적합하며, 유입농도는 5,000ppm 이상이면 유리하나, 비등점이 낮은 물질은 극저온 또는 압력을 가하는 추가적인 노력이 필요함. VOCs는 비등점, 빙점 등이 유사한 물질이 많아 혼합 VOCs에서 특정 물질의 분리·회수가 쉽지 않아 응축·회수는 단일 VOCs 회수에 적합함.
- **(적용사례)** 원유 저장시설에 기화된 VOCs를 진공펌프로 추출하고, 스크리버로 응축하여 VOCs를 회수하는 기술로서 회수율은 95%⁵⁵⁾ 정도로 알려졌다.
- **유의사항**
 - **(결빙 문제)** 응축 대상 VOCs 중에 수분이 함유되어 있거나, 빙점이 높은 VOCs는 응축 과정에서 얼어붙어 관을 폐쇄하므로 운전 문제를 초래하고 생산공정도 중단해야 하므로 수분을 사전에 제거하거나 가열선을 설치하여 간헐적으로 얼음을 녹여주어야 함.



[그림 2-40] 가열선을 설치하여 얼음을 녹이는 배관

(출처) 안산녹색환경지원센터(2011), 응축 기술을 이용한 VOCs 제거 및 회수 설비에 관한 연구
(출처) Heatizon Systems, <https://www.heatizon.com/products/heatizon-brands/guttermelt>

55) <http://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/units-and-plants-practices/VOCs-recovery-systems/#reference-10>

- (스케일 문제) 표면 응축방법의 경우 고비점의 유기화합물(타르 등)이 응축기 표면에 응축되면서 스케일을 형성하여 성능 저하 초래
 - 여과장치 등의 전처리를 설치하여 스케일 원인 물질 제거
- (트리클로로에틸렌 적용) 트리클로로에틸렌의 응축회수기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 응축회수기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

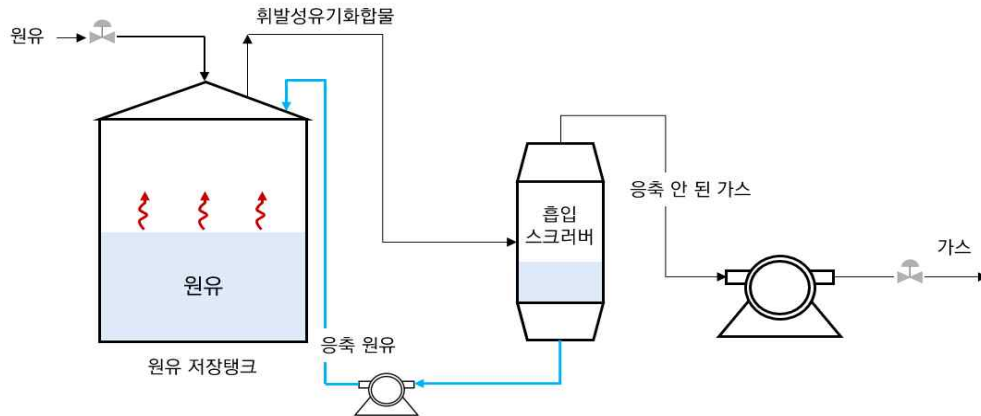
회수율(%)*	설치비용	운영비용	비고
90	100백만원 이상	30백만원 이상	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 액체질소 적용한 경우

3) 흡수·회수기술

□ (기술 개요) 단일 VOCs 또는 혼합 VOCs가 포함된 배출가스를 흡수제에 물리흡수 시킨 다음 방산(Stripping) 공정을 통해 VOCs를 분리한 다음 응축 과정을 거쳐 회수하는 기술



[그림 2-41] 흡수·회수 시설의 공정도

(출처) ipieca(2013), VOC recovery Systems 인용

○ (소극적 회수기술, Passive Recovery Technology) 저장시설 등으로부터 추출된 VOCs에 압력을 가해 원유에 흡수⁵⁶⁾시키거나, 다양한 유기용제(예, Kerosene)를 흡수제로 사용하여 응축 흡수⁵⁷⁾(원유 저장시설의 경우는 원유 자체를 흡수제로 사용)한 다음 저장시설에 재투입하고, 회수하지 못한 VOCs는 고온 산화 처리 또는 다른 용도로 활용

56) 압력 흡수의 회수율은 80%

57) 응축 흡수의 회수율은 90%



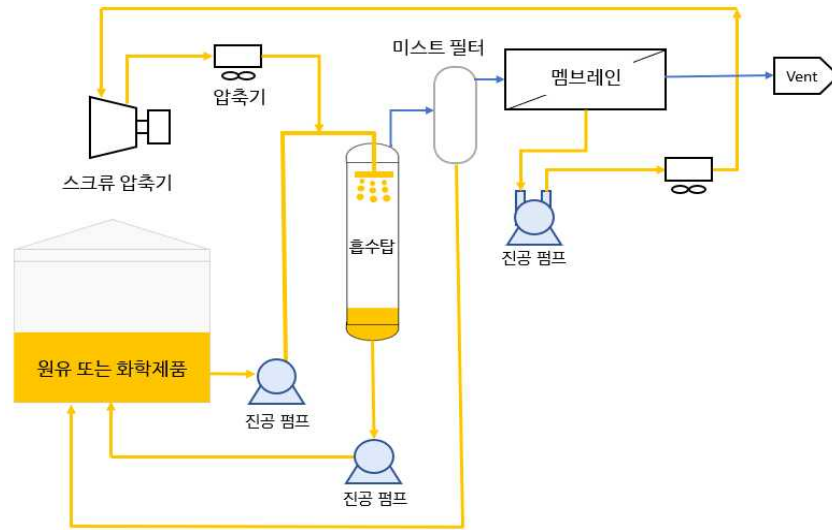
[그림 2-42] 선박에서 원유 하역 과정에서의 VOCs 흡수·회수 및 고온 산화 처리

(출처) JX(2013), Technologies for Volatile Organic Compounds

- (운전조건) 흡수 반응기 운전조건은 상황에 따라 달라지며(현장 적용사례58) : 온도는 3~7℃, 압력은 0.3~0.5 MPa), 흡수제로는 원유 또는 석유화학제품 등 저장시설의 물질과 같은 물질을 사용하여 용해·회수
- (적극적 회수기술, Active Recovery Technology) 저장시설로부터 VOCs를 포집한 다음 흡수공정과 타 회수공정을 연계하여 VOCs를 회수하는 기술(흡수공정만으로는 회수효율이 떨어지므로 연계 공정 적용)
 - (흡수/막분리 연계방식) 흡수 단독공정에 막분리를 후속으로 연결한 방식으로 흡수 단독공정의 경우 VOCs 회수율이 70% 수준에 불과하였으나 막분리 공정을 후속으로 연결하여 회수율이 95%로 높아졌음59).

58) JX Nippon Oil and Energy에서 일본 가고시마의 키이레 터미널(Kiire Terminal)에 설치 운전(처리규모: 20,000 Sm³/hr)

59) CARBOVAC, Vapor Recovery Solutions

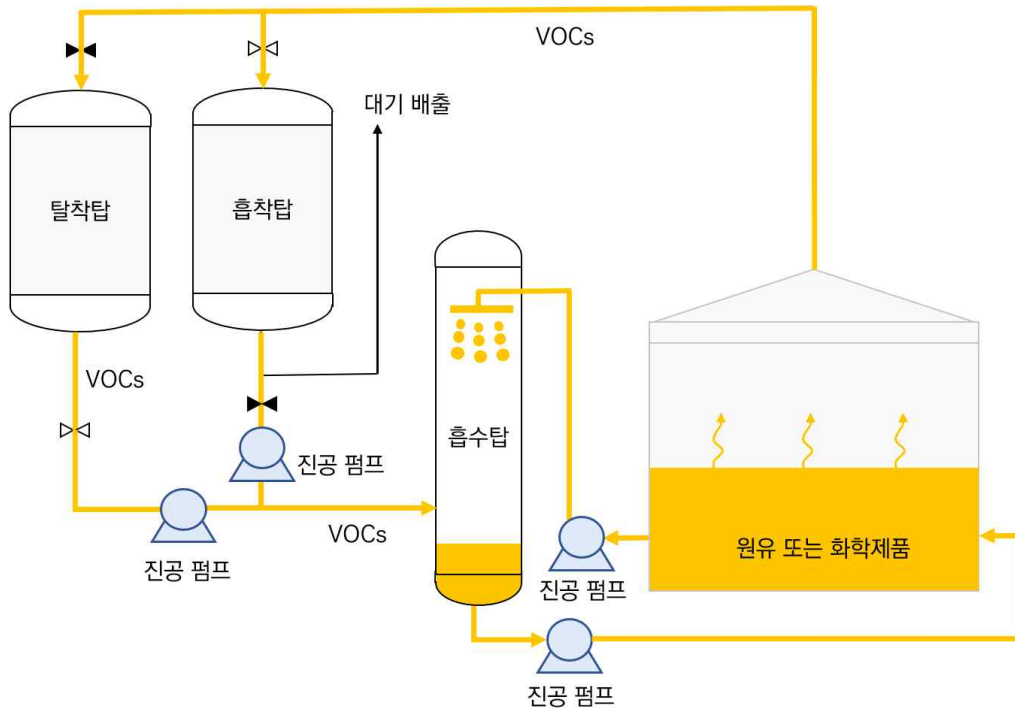


[그림 2-43] 흡수/막분리 연계 회수공정

(출처) BORSIG Membrane Technology GmbH, BMEMBRANE TECHNOLOGY FOR PROCESSES AND ENVIRONMENT, 8p 인용

- (흡수/흡착 연계방식) 흡수공정 앞에 활성탄을 활용한 흡·탈착공정을 설치하여 저장시설 또는 운반시설로부터 휘발·배출된 VOCs를 흡착시킨 다음 감압하여 VOCs를 탈착시킴. 탈착된 VOCs를 흡수탑에 주입하여 저장시설의 원유 또는 석유화학제품에 용해·회수하는 방식임. VOCs 회수율이 흡수 단독공정의 70% 안팎에서 90~99%로 높아졌음.
- (흡착) 활성탄 등의 흡착시설을 이용하여 저장시설 등으로부터 배출되는 VOCs를 흡착시켜 불활성기체⁶⁰⁾와 분리
- (탈착) 일반적으로 흡착탑에 진공펌프를 걸어 VOCs 탈착

60) 운반기체로서 농도 조절과 화재 위험도를 낮추기 위한 목적



[그림 2-44] 흡수/흡착 연계 회수공정
 (출처) logo alma Carbovac, Vapour Recovery Units, 4p 인용

□ 적용조건(흡수 단독공정 기준)

○ 배출가스 특성(충전탑 기준)

항목	정보
배출가스 유량	900~126,000 sm ³ /hr
유입농도	250~10,000 ppm (LEL 25% 이하)
배출가스 유입온도	4~38℃, 온도가 높아질수록 흡수율은 저하

(출처) EPA(2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-015

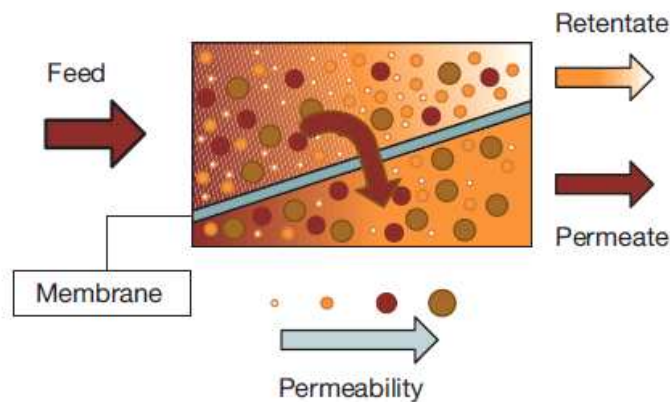
□ **(유의사항)** 트리클로로에틸렌 등의 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 상대적으로 낮은 압력손실 • 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 • 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 • 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 • 상대적으로 낮은 설치비용 • 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 폐수처리 문제 • 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 트리클로로에틸렌 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 흡수·회수기술은 트리클로로에틸렌 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

4) 막분리·회수기술

- (기술 개요) 각각 가스의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술로서 가스 분리는 막의 양단에 가스 분압 차이(농도 차이)를 이용함.
- (분리막) 혼합 성분으로부터 선택적으로 특정 성분을 분리할 수 있는 물리적 경계층으로 막 양단의 가스 분압 차이(농도 차이)가 물질 전달력임.
- (분리막 성능) 혼합 성분 중에서 분리 목표 물질의 선택성과 막 양단의 압력 차에 의해 분리막 성능이 결정되며, 선택성은 10 이상, 압력 차 성능지표인 압력비(공급측 총압에 대한 투과측 총압 비)는 일반적으로 30~50 정도이어야 기술적으로 실현가능함.



[그림 2-45] 막분리 프로세스

(출처) ITM-CNR, Membrane per la separazione di CO₂ erettori a membrana per il suo uso (<https://www.enea.it/it/seguici/events/co2/IULIANELLI.pdf>) 인용

□ 적용조건

- 트리클로로에틸렌을 막으로 분리하기 위해서는 혼합가스 종류, 트리클로로에틸렌 농도, 유량, 배출가스 온도 등 다양한 정보가 필요하며, 이는 대상 업종 및 공정에 따라 다른 수요맞춤형 막이 개발 적용되어야 함. 그러므로 트리클로로에틸렌 분리를 위한 적용 조건을 일반화하기는 어려운 상황임.

□ 적용사례

- (필요성) 미국 에너지부(DOE)의 관할 지역에서 염소계 VOCs로 오염된 토양으로부터 배출되는 염소계 VOCs 함유 가스의 적정 처리 필요성 대두

- (적용 시기 및 지점) 1999년 3월부터 2000년 2월까지 미국 캘리포니아 주의 Sacramento 시 외곽에 있는 McClellan Air Force Base(AFB)

○ 조건 및 설계목표

항목	내용
설계 유량	58.9 Sm ³ /hr
배출 VOCs 농도	23 ~ 101 ppm
처리 목표 VOCs 농도	10 ppm

- (적용 결과) Membrane Technologies and Research, Inc.(MTR)는 막 (Permselective Membrane)을 사용하여 VOCs를 선택적으로 공기와 분리하여 (VOCs는 막을 통과시키고, 공기는 배제) VOCs를 액상으로 회수하였고, 설계 목표치도 달성하였음.

○ (적용 문제점)

- (CO₂ 문제점) 배출가스 중에 CO₂ 농도는 1~3%이었으며, CO₂에 의해 막분리 성능이 2~4배 정도 감소하였음.
- (오일과 물의 문제점) 배출가스 중의 오일과 물은 막의 막힘 현상(Fouling)을 초래하여 막분리 성능을 저하한다고 밝혀졌으며, 이는 효과적 전처리로 해결할 수 있다고 결론 내렸음.

- (비용 분석) VOCs 농도 5,000 ppm의 배출가스 300 Sm³/hr를 VOCs 농도 10 ppm 이하로 처리하기 위한 시설 설치비용은 780백만원⁶¹⁾ 정도 필요하고, 운영비용은 800백만원⁶¹⁾ 정도 필요하다고 보고하였음.

VOCs 유입농도	연간 운영비용*
100 ppm	499.2백만원
1,000 ppm	585.6백만원
5,000 ppm	799.2백만원
10,000 ppm	856.8백만원

* 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정
(출처) US DOE(2001), Membrane System for the Recovery of Volatile Organic compounds from Remediation Off-Gases, DOE/EM-0614

61) 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 분리 과정에서 상변화가 없으므로 에너지 소모가 적음 • 장치 구성이 단순하고 기계 장치가 최소화되어서 유지관리가 쉬움 • 특정 물질 선택성이 탁월함 • 다양한 목적에 적용 가능한 막 제조가 가능함(원료가 다양하여 목적에 따라 다양한 막 제조 가능) • 환경에 무해한 또는 영향이 적은 원료 또는 재질을 사용하므로 환경친화적 공정 	<ul style="list-style-type: none"> • 막의 특정 화학물질에 대한 취약성(특정 화학물질과의 접촉을 피해야 하므로 공정 적용 한계) • 중합체이므로 온도에 영향을 받기 때문에 특정 화학반응 공정(온도가 높은 공정)에 적용하기 어려움(적용의 한계) • 규모 확장의 한계(일반적으로 단위 모듈을 반복적으로 연결하여 규모 확장하는 방식으로 대용량 설치의 한계) • 막 오염과 막힘 현상으로 교체 필요성(높은 운영비용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 트리클로로에틸렌 등의 VOCs에 대한 선택성이 탁월하고, 석유화학산업에서 이미 적용한 사례가 존재하여 트리클로로에틸렌을 분리·회수 재사용은 기술적으로 가능함 • 막분리 시설의 설치 및 운영비가 높아 타 기술과 효율 및 경제성을 비교 평가하여 막분리시설의 적용 여부를 결정할 필요가 있음

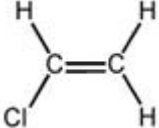
3

염화비닐

3.1

개요

- (정의 및 특성) 염화비닐은 C_2H_3Cl 화학식을 갖는 유기 할로젠 화합물로, 주요내용은 아래와 같음.

CAS No.	발암물질 분류	위해도 순위	화학구조
75-01-4	1A군 발암물질	1군 발암물질 중에서는 8위 전체 발암물질 중에서는 17위	

- 물리·화학적 특성⁶²⁾

분자량 (g/mol)	휘발성 증기압	친수성 용해도	끓는점	녹는점 /어는점 63)	LEL ⁶⁴⁾ (% vol)	UEL ⁶⁵⁾ (% vol)	n-옥탄올 /물분배계수
62.5	2,980mmHg (25°C)	2.7g/ℓ	-13.37°C	-155.7°C	3.6	33.0	1.58

- 용도

- (공업용 자재) 경질 염화비닐은 기계적 특성이 우수하고, 내약품성, 난연성, 내후성 등이 우수하여 파이프, 빗물 통 등 건재나 탱크 등 공업용 자재로서 널리 사용됨.

62) 화학물질 정보처리 시스템 (<https://kreachportal.me.go.kr/potweb/main.do>)

63) 교육미디어(2016), 염화비닐 노출 근로자 건강관리, 산업재해예방 안전보건공단

64) 최저폭발한계(Lower Explosive Limit)로서 자연 폭발을 일으키는 최저 가스농도

65) 최고폭발한계(Upper Explosive Limit)로서 환경부(2005), 화학사고대응을 위한 사고대비물질 정보집, 국립환경과학원, 화학물질안전관리센터,109(114)

3.2

배출특성

- **(배출업종)** 염화비닐이 주로 배출되는 업종은 화학물질 및 화학제품 제조업(75.9%), 고무 및 플라스틱제품 제조업(24.1%)순임.
- **(배출공정)** 염화비닐이 많이 배출되는 공정⁶⁶⁾은 1) 대기오염방지시설(81.6%), 2) 이송·운반·분배·계량시설(14.9%)순임,
- **(배출형태)** 염화비닐은 대기로 배출될 개연성이 높고, [표 3-1]에서 보는 것처럼 국내 배출원에서는 모두 대기로 점배출(81.6%) 또는 비산배출(18.4%)되고 있음.
- **(시사점)** 염화비닐은 비산배출 관련 저감기술 및 방법 적용이 필요하며, 중점 관리 분야는 다음과 같음.
 - 대기오염방지시설로서 처리효율 제고
 - 이송·운반·분배·계량시설에서의 탈루배출 방지

66) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

[표 3-1] 염화비닐 배출특성

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	저장시설	대기	비산배출 100	18.0	0.032	0.000
	이송·운반·분배 ·계량시설		비산배출 100	6,911.2	12.476	0.000
	혼합공정		비산배출 100	41.8	0.075	0.000
	화학반응공정		비산배출 100	1,075.4	1.941	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	25,224.6	45.534	0.001
고무 및 플라스틱제품 제조업	이송·운반·분배 ·계량시설	대기	비산배출 100	1,330.1	2.401	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	19,324.6	34.884	0.003
금속 가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외	코팅공정	대기	비산배출 100	810.6	1.463	20.015
	대기오염방지시설		점배출 100	648.5	1.171	16.012
폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	대기오염방지시설	대기	점배출 67 비산배출 23	12.3	0.022	0.750
누적 합계		-	-	55,397.1	99.999	-

(출처) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

3.3

대체물질

3.3.1

용매 대체

적용업종 및 공정	합성수지로서 염화비닐 사용하는 업종 및 공정
대체물질	1-Propene ; Propylene, Calcium hydroxide (Ca(OH) ₂), reaction products with iron oxide (Fe ₂ O ₃), magnesium hydroxide and silica
적용사례	<ul style="list-style-type: none">• 미감재, 주식회사 디오

3.3.2

바닥재 대체

적용업종	바닥재로서 염화비닐을 사용하는 업종
대체물질	iQ One(제품명)
적용사례	<ul style="list-style-type: none">• iQ One은 Cradle to Cradle™Gold 인증을 획득한 탄력성 바닥재임. PVC 또는 가소제를 포함하지 않으며 수명이 김. (출처) https://professionals.tarkett.com/en_EU/collection-C000372-iq-one

- 염화비닐의 회수 및 처리기술은 처리방법에 따라 장·단점이 있어 아래 사항을 자세히 검토하여 선택해야 함.
 - 배출가스의 조성 및 농도
 - 함유 유기화합물질의 특성(폭발한계, 응축성, 용해성, 흡착성 등)
 - 배출가스 내 수분 및 먼지 함유량
 - 배출량(최대, 평균, 최소 유량 등), 온도, 압력, 습도
 - 오염배출원 유형(점, 면, 선오염원, 공정, 불특정 등)
 - 연간 운영시간(가동시간, 가동률, 부하율 등)
 - 장치 위치(실내, 실외, 지표 고도, 지붕, 여유 공간 등)
 - 보조 연료 또는 에너지 비율
 - 각종 유틸리티(수도, 전기, 스팀, 배관, 관거, 구조물) 이용 가능 여부
 - 기존의 대기오염방지시설 설치·운영 사항(종류, 규모, 사용 기간 등)
 - 경제성(초기투자비 및 연간 운영비)

[표 3-2] 휘발성 유기화합물 방지시설 설계 시 고려사항

기술	안정성	오염물질 특성	오염원 특성	제어특성
흡착	흡착 시 폭발물질의 농축이 일어나며 이는 매우 유해함.	다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있음.	높은 포집 효율을 가지고 있으며, 여러 유형 흡착제(활성탄, 제올라이트, 폴리머 등)를 이용, 낮은 비용으로 고효율 달성이 가능함.
흡수	폭발물질을 중성화시킬 수 있는 흡수액을 폭발물질에 따라 선택해야 함.	화합물에 적합한 흡수제를 사용해야 하고, 화학물질 조성변화에 대응하기 어려움.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 흡착제 배출수 처리장치가 필요함.	포집 효율이 높으나 생성 폐수에 폭발성 물질이 포함될 수 있으므로 사전에 적정 처리방법 수립이 필요함.
응축	니트로글리세린과 같은 폭발성 화합물에는 적용할 수 없음.	제습 과정이 필요하며, 끓는점이 낮은 화합물은 처리하기 어려움.	추가적인 응축장치가 필요함.	특정 화합물에 대해서는 포집 효율이 높으나, 초기 비용이 높음.
생물여과	미생물에 의해 포집된 폭발성 화합물질을 쉽게 처리할 수 있음.	처리속도가 낮아 처리 규모의 한계가 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물 종류에 따라 높은 처리효율을 나타냄.
열소각	니트로글리세린과 같은 많은 폭발성 화합물은 급속히 가열될 때 매우 불안정해짐.	여러 다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 가지고 있음. 다양한 유형의 소각로(재생식 열소각 등)를 사용, 비용을 절감시키고 전체 효율을 증가시킬 수 있음.
촉매소각	반응시간과 유속에 따라 촉매 층에서 폭발성 화합물 농축이 일어나는 위험한 상황이 일어날 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리하며 촉매 피독으로 효율이 낮아짐.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물질 유형에 따라 높은 파괴효율을 나타냄.
광촉매산화	저온에서 폭발성 화합물 처리가 가능하며, 체류 시간이 짧고 저온에서 운전되므로 폭발 위험성을 줄일 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리함.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 나타내며, 전체 비용이 상대적으로 적은 편임.

(출처) 환경부(2000), 「휘발성유기화합물 방지시설 설계지침」 자료

□ 2016년의 화학물질 배출량 조사⁶⁷⁾ 결과에 따르면 염화비닐의 주요 배출공정은 대기 오염방지시설, 이송·운반·분배·계량시설 순으로 배출비중은 각각 47.9, 37.3 % 순임.

공정	업종	배출비중(%)
대기오염방지시설	화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외)	45.5
	고무 및 플라스틱제품 제조업	2.4
	소계	47.9
이송·운반·분배· 계량시설	고무 및 플라스틱제품 제조업	34.9
	화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외)	2.4
	소계	37.3

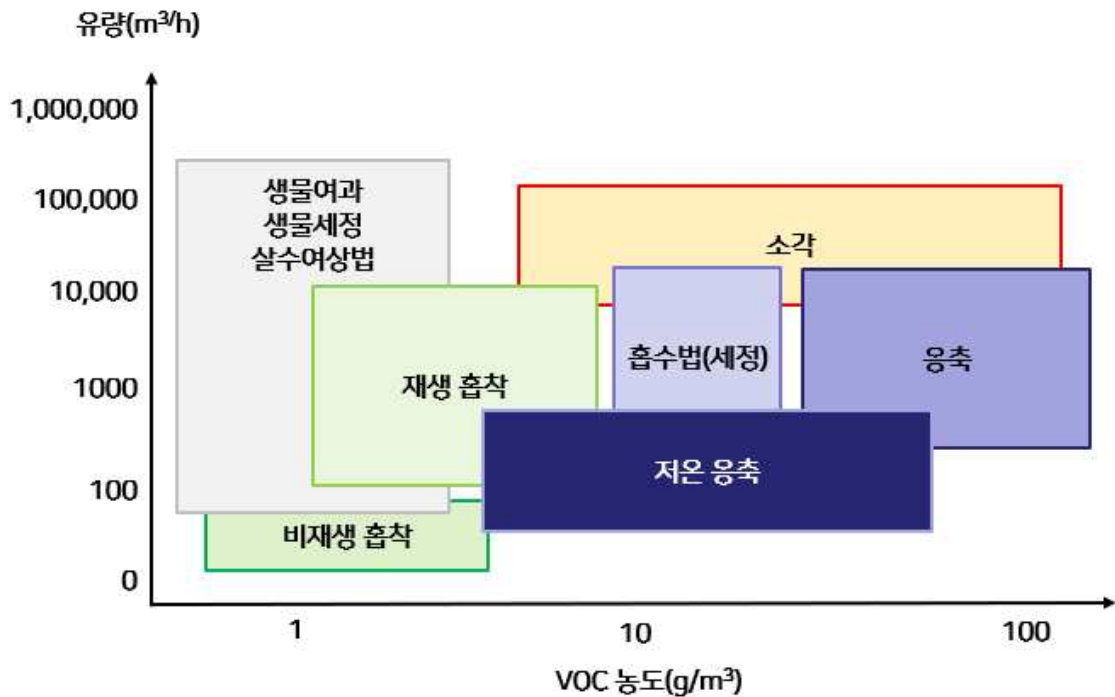
(출처) 화학물질안전원(2016), “2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)” 자료 근거

67) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

3.4.1 대기오염방지시설

3.4.1.1. 처리기술

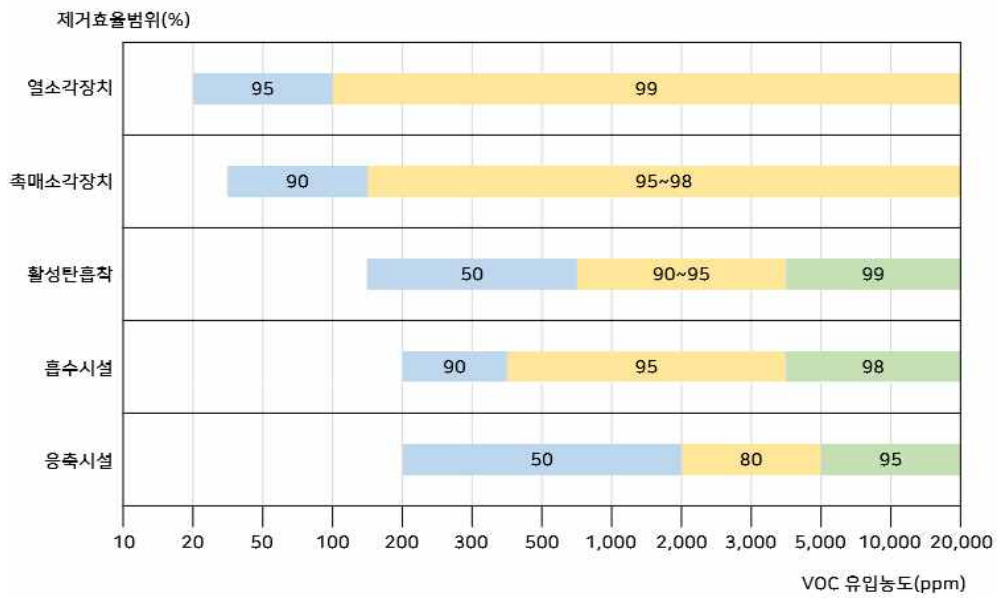
- 화학물질을 처리하는 방법은 흡착기술, 흡수기술, 생물학적 처리기술로 크게 구분할 수 있음.
- [그림 3-1]은 VOCs 유입 유량과 농도에 대한 처리기술의 적용조건을 개략적으로 도시하고 있음. 생물학적 방법은 적용 유량의 범위는 넓지만, 적용 가능한 농도는 상대적으로 협소함을 알 수 있음. 반면에 소각은 적용 농도 범위는 넓지만, 적용 가능한 유량 범위는 넓지 않음을 알 수 있음.



[그림 3-1] VOCs 처리기술별 VOCs 농도와 유입 유량의 적용 범위

(출처) Joseph S, Deviny, Marc A. Deshusses, Todd S. Webster, Biofiltration for Air pollution control

- [그림 3-2]는 VOCs 처리기술별로 VOCs 유입농도에 대한 처리효율을 도시하고 있음. 열소각장치와 촉매소각장치는 상대적으로 넓은 유입농도 범위에서 95% 이상의 효율을 보인 반면 활성탄과 응축시설은 상대적으로 높은 농도인 500ppm 이상에서 95%의 성능을 보여주고 있음.



[그림 3-2] VOCs 처리기술의 VOCs 유입농도 대비 처리효율

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

□ [표 3-3]은 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술 선택 기준을 제시하고 있어, 방지기술 선택 지침으로 활용할 수 있음.

[표 3-3] 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술의 선택 기준

대상물질	응축	흡착	열소각	촉매연소	촉열식 열소각	무화염 열소각
저유량 저농도	●	●	●	●	○	●
고유량 저농도	●	●	●	●	●	●
저유량 고농도	●	○	●	○	○	●
고유량 고농도	●	○	●	○	○	●
비응축 탄화수소 가스	X	○	●	●	●	●
응축 탄화수소 가스	●	●	●	●	●	●
비응축 Cl/S 포함가스	X	○	●	○	●	●
응축 Cl/S 포함가스	●	●	●	○	●	●
연속 운전	●	●	●	●	●	●
회분식 운전	●	●	○	○	○	●

●: 매우 좋음, ●: 좋음, ○: 보통, ○: 나쁨, X: 적용 불가

(출처) 양고수, '열처리 기술을 이용한 VOCs/악취 처리기술 및 관리현황' 자료 인용

□ [그림 3-1], [그림 3-2], [표 3-3]에서 보는 것처럼 대상물질의 유입농도와 유량 정보를 활용하여 기술적으로 적합한 대상물질의 처리기술을 일차적으로 선정할 수 있음. 다음으로는 저감목표, 경제성, 현장 조건(예, 설치부지 등), 혼합물 종류, 온도와 압력 등을 종합적으로 고려하여 처리기술을 최종적으로 선정해야 함.

1) 흡착 처리기술

□ (기술 개요) 화학물질을 흡착제 표면에 물리적으로 흡착하여 처리하는 기술

○ (공정 구성) 일반적으로 활성탄이 많이 사용되고 있으며, 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 증기 또는 열에 의해 피흡착물의 탈착이 이뤄지는 흡착탑 재생공정임. 탈착 과정에서 농도가 높아진 피흡착물이 배출되며, 이를 연소처리기술 등의 후속 공정에서 처리함.

○ (흡착원리) 흡착제와 피흡착물 간에 Van der Waals 힘이 작용하고 있으며, 흡착제와 피흡착물 간의 거리에 따라 위치에너지가 달라짐. 위치에너지가 가장 낮은 지점이 형성되며, 그 지점에서 흡착이 일어남.

○ (흡착·회수 재사용과 차이점) 흡착·처리기술은 염화비닐 등의 유기오염물질을 흡착·처리하는데 목적을 두고 있지만, 흡착·회수 재사용 기술은 염화비닐 등을 회수하여 재사용하는데 초점을 맞추고 있음. 즉 두 기술의 원리는 동일하나 목적에서 차이가 있음.

□ (적용조건) 흡착·처리 공정 단독으로 운영하기보다는 연소처리기술 전단에 설치하여 처리대상물질의 농도를 적정 수준 이상으로 높여 연소처리기술의 처리 성능을 배가시키는 역할을 담당하며, 활성탄이 주로 사용되고 있음.

□ (유의사항) 활성탄 자체가 고온에서 화재 위험성⁶⁸⁾이 있고, 화재 및 폭발위험성 물질이 농축되어 화재 및 폭발 가능성이 있으므로 활성탄 흡착·처리공정을 설계할 때 이런 점을 유의하여 설계할 필요가 있음.

68) 활성탄 자체 착화온도는 400~500℃

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 연소처리기술과 연계하여 처리하므로 염화비닐 등의 VOCs 처리 시너지 효과가 있음. 저농도 염화비닐 등의 VOCs 처리가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 연소처리기술과 연계하면 저농도의 염화비닐 등의 VOCs 처리가 가능하나, 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 화재 위험성 등으로 관리가 용이하지 않음.

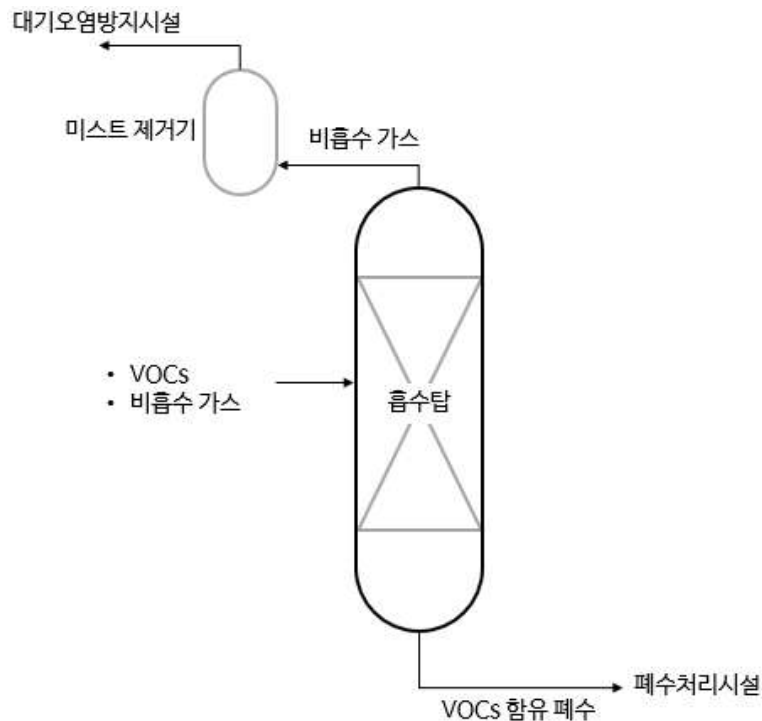
□ (염화비닐 적용) 염화비닐의 흡착처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡착처리 기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
-	18백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.
(출처) 한국물가정보(2017년 3월호)

2) 흡수처리기술

□ (기술 개요) 혼합 기체를 액체와 접촉하게 시켜 기체의 특정 성분을 액체 속에 용해 흡수·처리하는 기술로서 물리흡수와 화학흡수로 구분할 수 있음. 물리흡수는 흡수제에 대상 기체를 물리적으로 용해시키는 방법이고, 화학흡수는 흡수제 중의 용질 성분과 기체 성분이 화학반응에 의해 흡수되는 방법임.

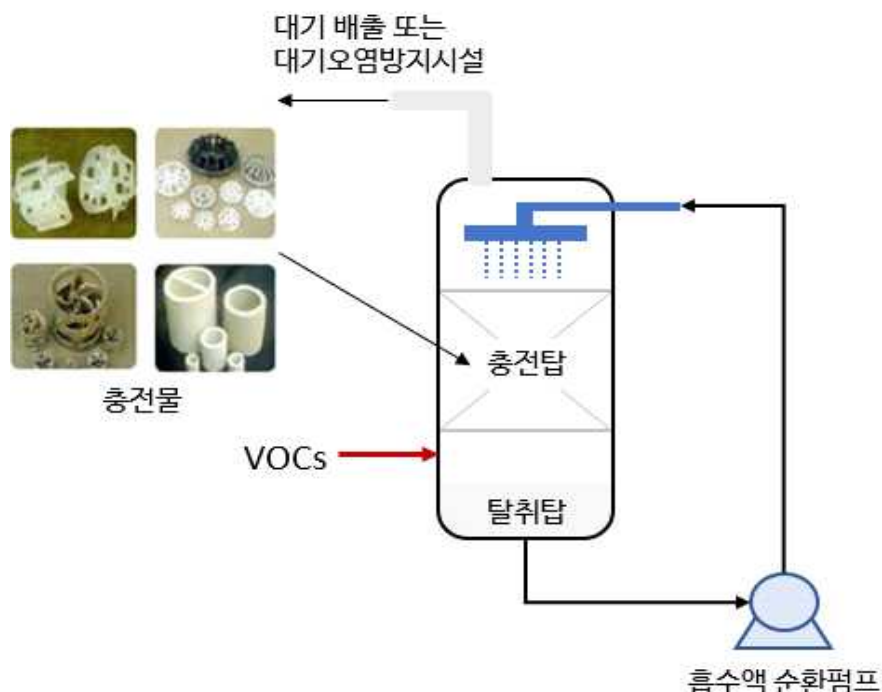


[그림 3-3] 흡수처리기술

○ (VOCs 흡수) VOCs의 흡수는 물리흡수에 이루어지며, VOCs를 함유한 가스에서부터 액상 흡수제로 VOCs가 물질 전달되는 현상으로 물질 전달 구동력은 가스상과 액상 내의 VOCs 특성에 좌우되며 헨리의 법칙(Henry's Law)에 따라 흡수액에 용해되는 양이 결정됨.

- VOCs 흡수제 종류는 물, 고비점 석유오일(Non-volatile Petroleum Oil), 미네랄 오일(Mineral Oil) 등이 있으며, 친수성 VOCs는 물을 활용하여 흡수·제거할 수 있는 최적 흡수제이고, 소수성 VOCs는 고비점 석유오일을 흡수제로 사용하거나, 수용액에 양성(친수성과 소수성 기능을 동시 보유)을 지닌 공중합체(Copolymer)를 투입하여 소수성 VOCs의 흡수를 유도함.

- (VOCs 탈착) VOCs를 흡수제로부터 탈착하여 재생하는 방산(Stripping) 공정이 있으며, 일반적으로 열을 가하거나, 진공을 걸어서 VOCs를 물리적으로 탈착시키며, 응축기와 연결하여 VOCs를 회수할 수 있음.
- (흡수장치 종류) 가스상과 액상이 흐르는 방식에 따라 향류(Counter Flow)와 병류(Co-current Flow) 방식이 있으나, 대부분은 향류 방식이고, 흡수장치의 종류는 충전탑(Packed Bed), 다단탑(Tray Tower), 분무탑(Spray Tower), 벤츄리 스크러버(Venturi Scrubber) 등이 있음. 일반적으로 VOCs 처리에는 충전탑과 다단탑이 많이 적용되고 있음.
- (충전탑) 금속, 세라믹, 플라스틱 재료로 된 불규칙 충전물이나 규칙 충전물로 채워져 있으며, 액체는 기체와의 접촉면적을 높이기 위해 탑 상부에서 고르게 분산되며, 분산된 액체는 충전물의 표면에 박막(Thin Film)을 형성하면서 아래로 흐름. 폐가스는 탑 하부에서 유입되며 흡수액과 접촉하면서 배출가스 중 VOCs 등의 특정 성분이 액상으로 흡수되고, 배출가스의 나머지 성분들은 탑 상부로 배출됨.

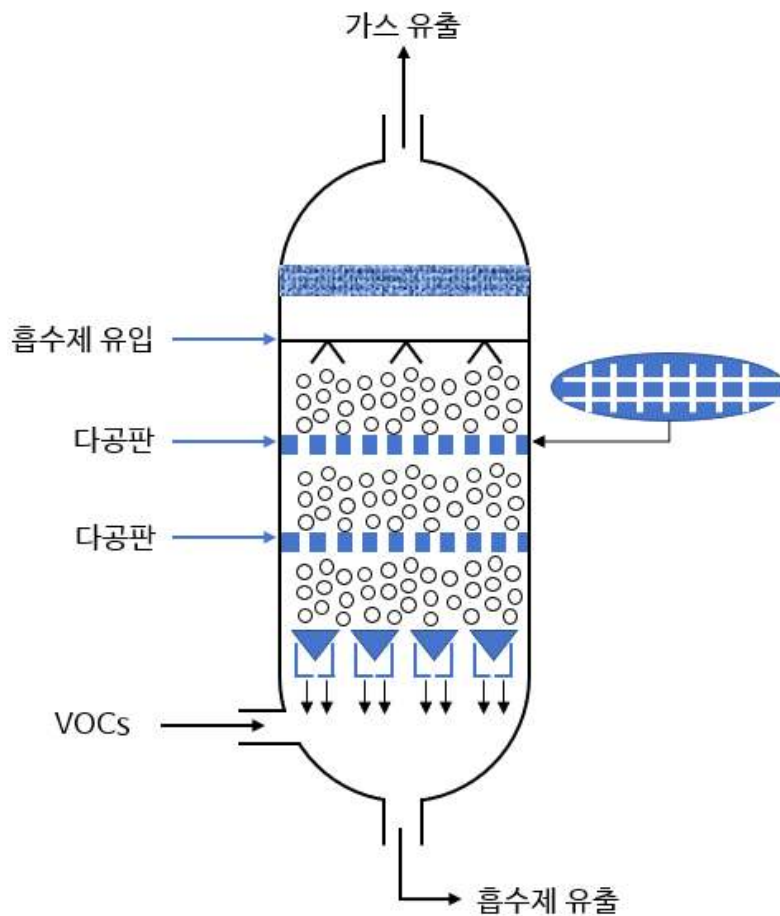


[그림 3-4] 흡수처리기술의 충전탑

(출처) 안전보건공단(2015), 폐수처리설비(스크러버) 화재·폭발 예방대책 매뉴얼

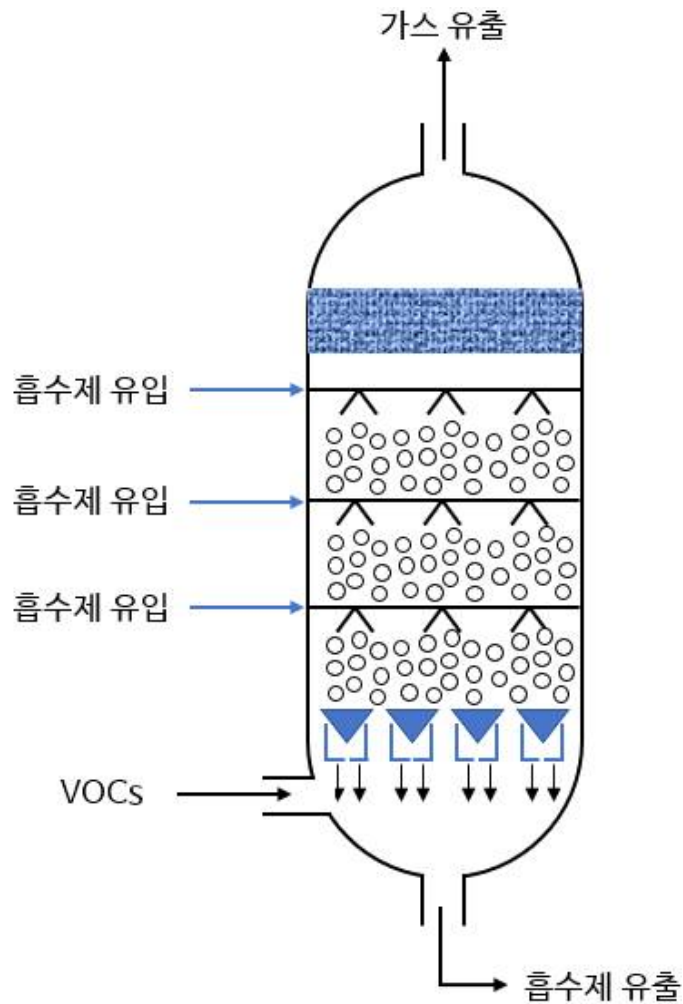
충전탑은 탑 상부에서 흡수액 분산이 성능에 큰 영향을 미치므로, 기체 흐름을 방해하지 않는 범위에서 흡수액이 고르게 분산되어야 하고, 충전물은 액상 박막이 넓게 형성되어 흡수 면적을 키우도록 설계해야 함. 충전탑은 처리효과가 크고, 침전물이 발생하는 가스 처리에도 적합하다는 장점이 있지만 충전층의 공극이 폐색될 수 있고, 충전물이 고가라서 초기 설치비용이 높으며, 가스 유속이 과도한 경우 범람이 발생할 수 있음.

- **(다단탑)** 증류 공정의 증류탑과 유사하고, 접촉시간이 비교적 길고, 각 단의 액체에 기체가 고르게 분산될 수 있다는 특징을 가지고 있어 흡수탑으로 많이 사용되고 있음. 장점으로는 충전탑에 비해 부유물이 있는 흡수액에 대해 적응성이 좋고, 온도 변화가 심한 조건에도 적용이 수월하나, 초기 비용이 높고 압력손실이 큰 단점이 있음.



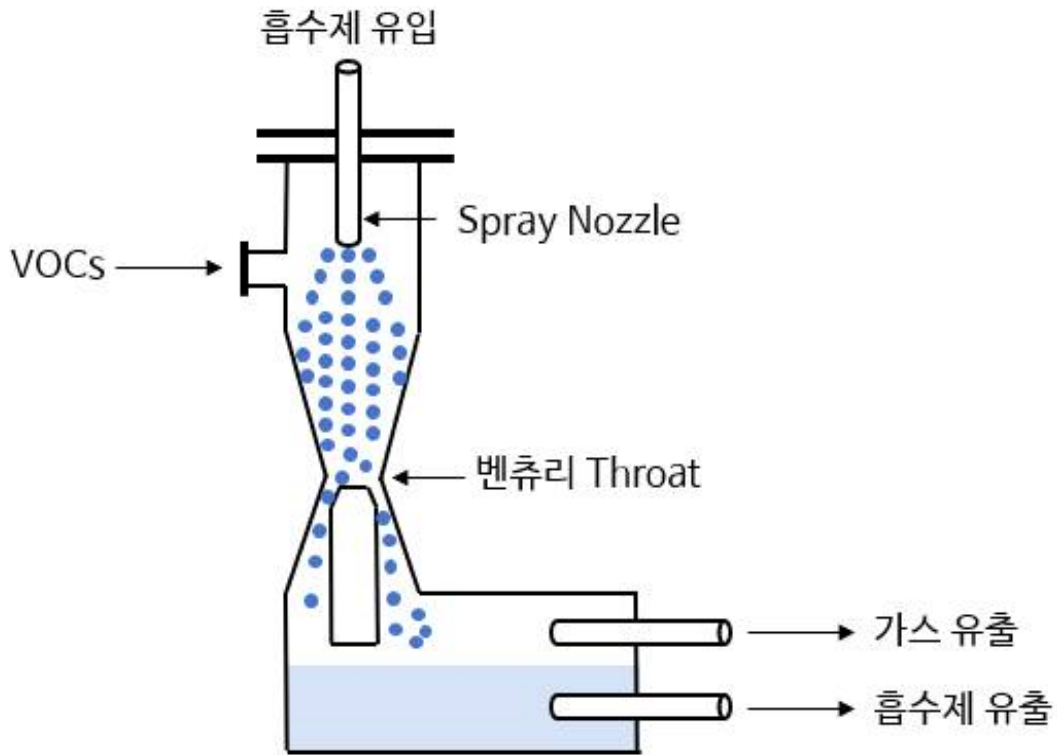
[그림 3-5] 다단탑 흡수처리시설

- (분무탑) 충전물을 사용하지 않는 반면 흡수액을 매우 적은 액적으로 만들어 분사함으로써 VOCs가 흡수될 면적을 극대화함. 분무탑의 기체와 액체 접촉시간이 짧아 물에 용해도가 높은 가스(예, 암모니아, 이산화황) 처리에 적합하고, 염화비닐과 같은 VOCs 처리에는 적합하지 않다고 알려져 있음. 분무탑은 충전탑보다 저렴하고, 압력손실이 적은 반면 분사 노즐이 잘 막히고 편류를 일으키기 쉽고 분무액과 기체의 균일한 접촉이 용이하지 않은 단점이 있음.



[그림 3-6] 분무탑 흡수처리시설

- (벤츄리 스크러버) 벤츄리 노즐에서 배출가스와 흡수액을 강제로 접촉시켜 배출 가스 중의 특정 성분을 흡수·처리하는 설비임. 흡수액과 배출가스와의 접촉시간이 매우 짧아 대부분의 VOCs보다는 용해도가 높은 가스 제거에 적합함. 벤츄리 스크러버는 소형으로 대용량 가스 처리가 가능하고 흡수효율이 탁월한 장점이 있는 반면 가스 압력손실이 커서 동력비가 높은 단점이 있음.



[그림 3-7] 벤츄리 스크러버 흡수처리시설

(출처) <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/venturi-scrubber> 인용

- (유의사항) 증기압이 낮은 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 상대적으로 낮은 압력손실 ▪ 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 ▪ 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 ▪ 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 ▪ 상대적으로 낮은 설치비용 ▪ 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폐수처리 문제 ▪ 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 염화비닐 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 경제성 때문에 염화비닐 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

□ (염화비닐 적용) 염화비닐의 흡수처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡수처리 기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%) ¹	설치비용(100m ³ /min) ²	연간 운영비용(m ³ /min)	비고
70~90	30백만원	-	-

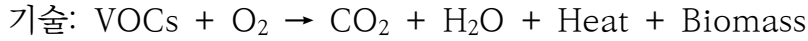
1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: 물가정보(2019.11)

※ 사업장 여건에 따라 적응성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

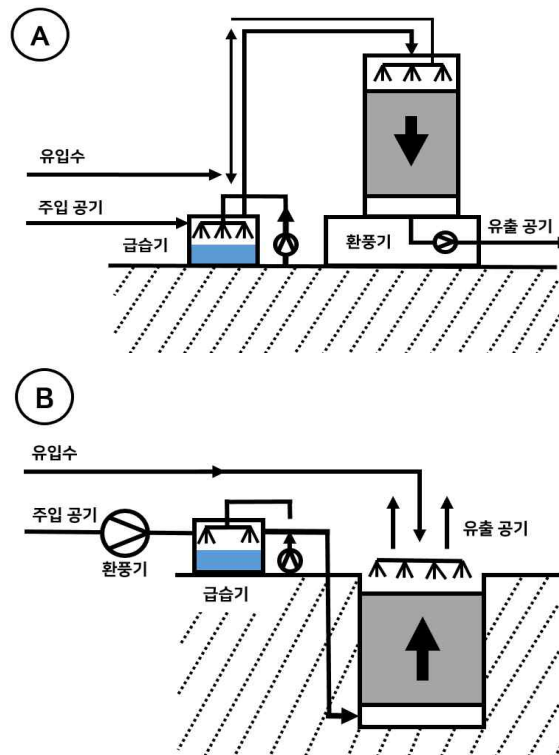
3) 생물학적 처리기술

□ (기술 개요) 생물학적 처리기술은 호기성 미생물을 활용하여 VOCs를 산화·분해하는



○ (종류) 생물학적 처리기술의 종류는 첫째, 바이오필터(Biofilter), 둘째, 바이오스크리버(Bioscrubber), 셋째, 바이오탁리클링 필터(Biotrickling Filter)임.

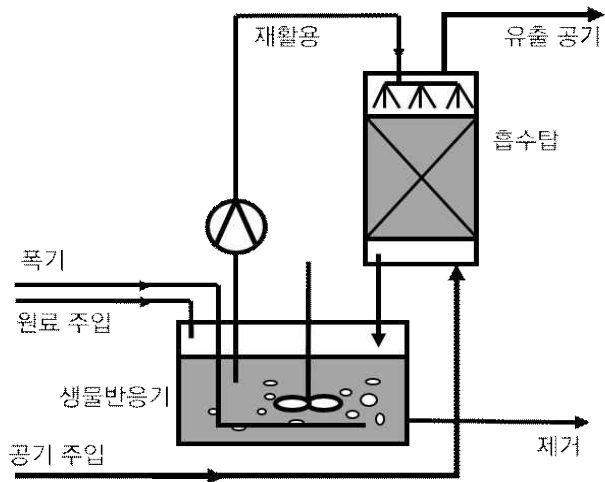
- (바이오필터) 바이오필터 고정체(하우징, Housing)는 가습장치, 온도조절장치, 분무장치로 구성되어 있는 밀폐형 구조임. 바이오필터 충전제는 미생물 서식에 최적 조건을 제공할 수 있는 물질(활성탄, 퇴비 등)로 구성되어 있어 미생물 농도는 토양 사용 시 보다 최고 140배까지 높일 수 있음. 바이오필터의 충전제는 오염 물질을 1차적으로 흡수한 후 충전제 속의 미생물이 오염물질을 처리하도록 되어 있으며, 연속적 충전제의 재생이 가능한 시스템으로 한 번 설치하면 2~7년 정도 충전제 교체 없이 운전이 가능함.



[그림 3-8] 바이오필터 구성

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

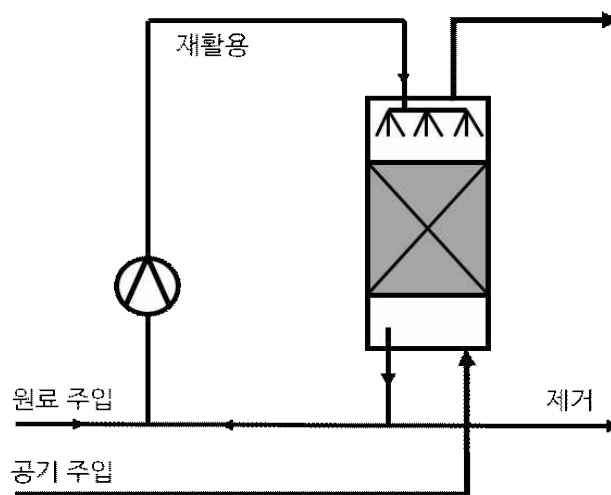
- (바이오스크리버) 배출가스를 세정탑에 통과시켜 오염물질을 물에 흡수시킨 후 이를 포기조에서 미생물 활동에 의해 제거하는 것임. 바이오스크리버에 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 염화비닐 등 대부분 VOCs는 적합하지 않음.



[그림 3-9] 바이오 스크리버

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- (바이오투리클링 필터) 바이오필터와 바이오스크리버가 혼합된 형태로서 미생물을 불활성 담체에 배양 충전시키고, 오염된 물을 상부에서 미생물이 충전된 담체에 분무하여 처리하는 시스템임. 바이오스크리버와 마찬가지로 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 염화비닐 등 대부분 VOCs 적용에는 적합하지 않음.



[그림 3-10] 바이오투리클링 필터

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- **(적용조건)** 생물학적 처리방법은 일반적으로 저농도 VOCs를 포함한 상온의 배출가스 처리에 적합하며, VOCs 농도, 온도, 배출가스 유량, 기타 미생물에 치명적인 성분 등을 고려하여 적용성을 검토해야 함.

항목	추천범위	비고
VOCs 유입농도(ppm)	500 이하	톨루엔 기준
단위 체적 당 부하(g/m ³ ·hr)	100 이하	-
제거효율(%)	90 이상	-
배출가스 유량(m ³ /hr)	300 이하	설치 공간 고려
배출가스 온도(°C)	20 ~ 40	-
배출가스 습도(%)	제한 없음	-
할로겐 및 SO ₂	제한적	전 처리 필요
분진	제한적	전 처리 필요

□ **운전인자**

- **(수분함량)** 생물학적 처리방법에서 가장 중요한 인자는 수분함량으로 특히 바이오필터는 수분 조절이 어려워 실패하는 사례도 있음.
- **(온도)** 미생물의 활동도는 온도 증가에 따라 증가하나, 온도가 한계치 이상 오르면 미생물이 오히려 폐사됨. 그러므로 최고 활성을 일어나는 온도를 파악하고, 그 이상으로 온도가 올라가지 않도록 세심하게 조정하는 것이 필요함.
- **(pH)** 각각 미생물들은 고유의 최적 pH를 가지고 있어 일정 범위의 pH 조건에서 활성이 좋으며, 이 범위를 벗어나면 활성이 떨어지거나 폐사하게 됨.
- **(영양분)** 미생물은 에너지와 탄소원을 얻기 위해 오염물질을 분해하나 질소, 인, 칼륨, 황, 칼슘, 나트륨, 철 및 수많은 다른 성분의 미네랄도 필요하므로 미생물의 활성도를 왕성하게 유지하기 위해서는 이런 성분들을 충분히 공급해야 함.
- **(오염물 농도 부하와 표면 부하)** 단위시간 당 단위부피 당 생물학적 처리공정에 들어가는 오염물질의 총량을 농도 부하로 정의하고 있으며, 생물학적 처리공정 설계 및 운전에 중요한 인자임.

- (산소 농도) VOCs 처리에 필요한 산소의 화학양론비적 양이 평형상태에서 용해되는 산소량보다 적으면 산소 소진이 일어나므로 산소 농도를 적정 수준에서 유지할 수 있도록 생물학적 처리공정 설계 및 운전이 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저렴한 설치 및 운영비용 • 낮은 압력손실 • 비선택성으로 다양한 물질로 구성된 VOCs의 동시 처리 가능 • 폐수, 폐기물 등의 2차 오염물질 배출이 최소화 • 설치 융통성 	<ul style="list-style-type: none"> • 넓은 부지 필요 • 느린 처리속도 • 특정 물질 처리에 적합한 선택적으로 미생물 적용(따라서 복합 미생물 군집 적용 필요하나 배양이 쉽지 않음) • VOCs 회수 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 VOCs 처리에 적합하며, 설치 운영비용이 저렴하고 2차 오염물질 생성 배출이 적지만 처리속도가 느리고 설치 부지 면적이 넓다는 단점이 있음.

- (염화비닐 적용) 염화비닐의 생물학적처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 생물학적 처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	비고
50~70	100백만원 + α	바이오필터
50~70	150백만원 + α	바이오스크러버
50~70	290백만원 + α	바이오탁리클링필터

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

3.4.2

이송·운반·분배·계량시설

- (정의) 원료 물질을 저장 탱크, 창고, 사일로 등에 저장하거나 생산물, 제품을 일시적으로 창고 등에 보관·저장하는 공정

3.4.2.1. (공정관리) 측정 및 관리시스템 도입

- (정의) 누출오염원관리시스템(LDAR)을 활용하여 이송·운반·분배·계량 시설 배출원에 대한 주기적 감시 및 검지를 시행하여, 이상 있는 장치는 즉시 정비 또는 교체하여 염화비닐 배출량과 배출원을 동시에 체계적으로 관리하는 기술
- 이송·운반·분배·계량 시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 누출지점이 많고, 누출되더라도 육안 식별이 어렵고, 화학물질에 따라서 무색·무취인 경우도 있어 측정하지 않고서는 누출 파악이 어려운 상황이 존재함.
- 누출 가능성이 큰 지점에 바코드가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고, LDAR 시스템에 의해 주기적으로 점검 관리함.

[표 3-4] LDAR 점검주기 및 화학업종과 정유업종 저감율

장치 및 화학물질	화학업종 저감율(%)		정유업종 저감율(%)	
	매월 감시	매분기 감시	매월 감시	매분기 감시
밸브-기체	87	67	88	70
밸브-경질유	84	61	76	61
펌프-경질유	69	45	68	45
압축기-기체	-	-	-	33
연결부-기체, 경질유	-	33	-	
압력안전밸브-기체	-	44	-	44

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

기술 개요	Leak Detection and Repair(이하 LDAR) 등 누출관리시스템을 활용한 실시간 화학물질의 비산배출 관리기술로 최근 광학이미지 카메라를 이용한 Flare, 저장시설 등 VOCs 누출 모니터링과 공정 배출감시를 위한 Fence Line 모니터링 기술도 활용되고 있음			
적용산업 및 공정	염화비닐의 이송·운반·분배·계량 공정이 있는 전 업종			
적용효과	(적용 전) 이송·운반·분배·계량시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 배출원 수가 많고 누출이 되더라도 누출 여부의 육안 확인이 어려운 상황			
	(적용 후) LDAR를 도입하여 대상 공정의 누출지점에 바코드 번호가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고 VOCs 측정기(검지기)를 이용하여 배출원에 대한 주기적 점검을 통해 누출 확인 및 신속한 장비 보수 가능			
저감효과 (%)	70	처리비용	설치비용	100백만원 이상
			운영비용	1,000원/관리지점

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

3.4.2.2. (공정관리) 장치개선

- (정의) 장치개선 및 교체를 통해 염화비닐의 비산 배출원으로부터의 누출(Leak)을 방지하고 누출 원인이 되는 부분을 개선함으로써 배출량을 줄이거나 완전히 차단하는 기술
- (펌프 변경) 펌프 Seal에서 염화비닐이 누출되는 것을 방지하기 위해 Seal이 없는 Sealless(Non-seal) 펌프(Canned 펌프 등)나 Double-sealed 펌프로 교체
- (밀폐식 시료 채취장치) 시료 채취 과정에서 염화비닐이 비산 배출되는 것을 방지하기 위해 밀폐식 시료 채취장치로 변경

장치 종류	개선 방법	저감률(%)
펌프	• Seal-less design (Canned Pump etc.)	99
	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
밸브	• Seal-less design • (Bellows type, Diaphragm, etc.)	99
압축기	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
압력 안전밸브	• Rupture Disk Assembly	99
	• Closed Vent System	90*
연결부	• Socket Welding Type	99
개방식 라인	• Blind, Plug, Cap or Second Valve	99
시료 채취 연결부	• Closed-loop System	99
공정 배수구	• Closed-loop and Water Seal	99

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 배출관이 연소처리 등에 연결하여 처리할 경우는 99%, 미 연결된 경우는 90% 수준임.

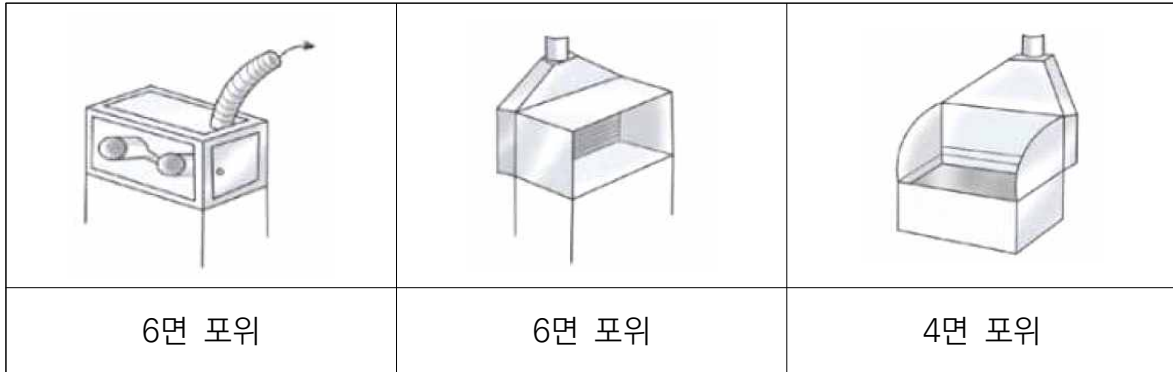
3.4.2.3. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 염화비닐이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 염화비닐의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
- (밀폐형 덮개) 염화비닐 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 3-11] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

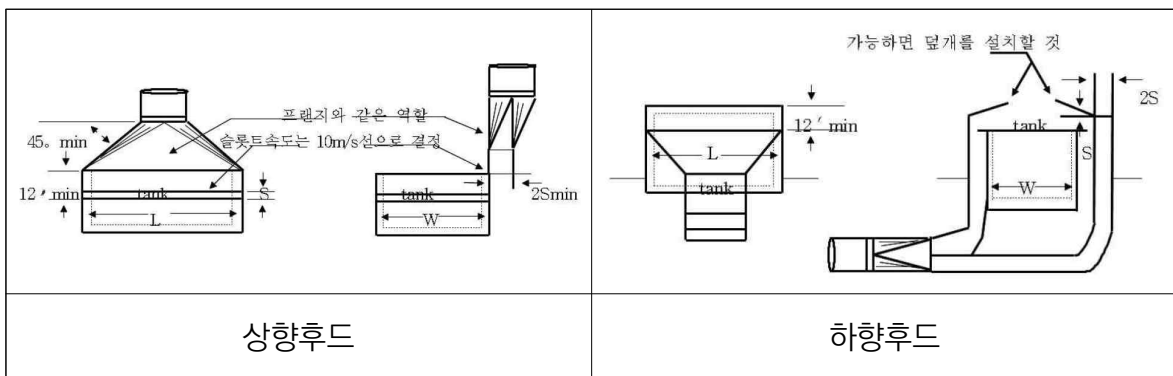
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 3-12] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

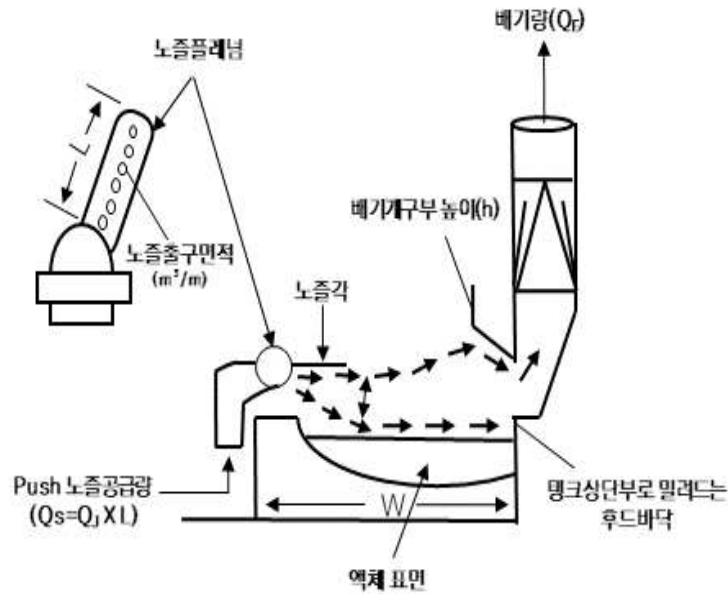
- (외부식 후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 3-13] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 3-14] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것
(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

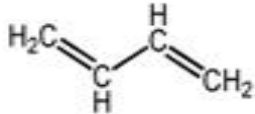
4

1,3-부타디엔

4.1

개요

- (정의 및 특성) 1,3-부타디엔은 C₄H₆ 화학식을 갖는 유기화합물로, 주요내용은 아래와 같음.

CAS No.	발암물질 분류	위해도 순위	화학구조
106-99-0	1군 발암물질	1군 발암물질 중에서는 11위	

- 물리·화학적 특성⁶⁹⁾

분자량 (g/mol)	휘발성 증기압	친수성 용해도	끓는점	녹는점 /어는점	LEL (% vol)	UEL (% vol)	n-옥탄올 /물분배계수
54.1	1,837.7mmHg (25℃)	0.735g/100mℓ (25℃)	-4.4℃	-109℃	1.1	16.3	2.13

- 1,3-부타디엔은 위에서 제시한 물리·화학적 특성 때문에 환경부 고시에 근거하여 휘발성 유기화합물(VOCs)⁷⁰⁾로 분류하고 있음.

69) 안전보건공단 화학물질정보 MSDS검색 (<https://msds.kosha.or.kr/kcic/msdsdetailGet.do>)

70) 환경부고시 제2015-181호(휘발성유기화합물 지정 고시)

□ 용도

- 부타디엔-스티렌 고무와 발포제, 화학물질, 레진 제조에 사용
- 발열성 레진과 고무의생산용으로 주로 사용
- 부타디엔-스티렌 코폴리머 탄성체, 음식 포장재로와 라텍스 페인트 산업뿐만 아니라 아디포니트릴(adiponitrile)과 연가소성 탄성체와 같은 다양한 합성 고무 제품과 화학물의 제조에 사용
- 카펫의 바닥면과 종이 코팅을 위한 코폴리머 라텍스, 자동차와 전기제품의 부품으로 사용
- 곱팡이 제거제의 원료로도 사용
- 스티렌-부타디엔 고무보다도 탄성, 대마모성, 저온 특성에 뛰어나 타이어의 기능 개선의 목적으로 섞어서도 사용

4.2

배출특성⁷¹⁾

- **(배출업종)** 1,3-부타디엔이 주로 배출되는 업종은 화학물질 및 화학제품 제조업(93.7%), 고무 및 플라스틱 제품 제조업(6.09%) 순임.
- **(배출공정)** 1,3-부타디엔이 많이 배출되는 공정은 1) 이송·운반·분배·계량시설(52.8%), 2) 대기오염방지시설(19.7%) 순임.
- **(배출형태)** 1,3-부타디엔은 VOCs이므로 대기로 배출될 개연성이 높고, [표 4-1]에서 보는 것처럼 국내 배출원에서는 모두 대기로 점배출(20.5%) 또는 비산배출(79.5%)되고 있음.
- **(시사점)** 1,3-부타디엔은 비산배출 관련 저감기술 및 방법 적용이 필요하며, 중점 관리 분야는 다음과 같음.
 - 이송·운반·분배·계량시설에서의 탈루배출 방지
 - 대기오염방지시설로서 처리효율 제고
 - 화학반응공정 처리효율 제고

71) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

[표 4-1] 1,3-부타디엔 배출특성

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	276.0	0.964	0.003
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	17.2	0.060	0.000
	분리·정제공정		비산배출 100	2.2	0.008	0.000
화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	저장시설	대기	비산배출 100	659.3	2.303	0.000
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	14,648.1	51.167	0.000
	혼합공정		비산배출 100	0.3	0.001	0.000
	화학반응공정		점배출 0.02 비산배출 9.98	4,494.4	15.699	0.000
	분리·정제공정		비산배출 100	2,132.0	7.447	0.000
	기타		비산배출 100	17.0	0.059	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	5,661.2	19.775	0.000
	폐수처리시설		비산배출 100	13.1	0.046	0.000
고무 및 플라스틱제품 제조업	이송·운반·분배·계량시설	대기	비산배출 100	487.2	1.702	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	220.0	0.768	0.000
누적 합계		-	-	28,628	99.999	-

(출처) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

- 1,3-부타디엔의 회수 및 처리기술은 처리방법에 따라 장·단점이 있어 아래 사항을 자세히 검토하여 선택해야 함.
- 배출가스의 조성 및 농도
 - 함유 유기화합물질의 특성(폭발한계, 응축성, 용해성, 흡착성 등)
 - 배출가스 내 수분 및 먼지 함유량
 - 배출량(최대, 평균, 최소 유량 등), 온도, 압력, 습도
 - 오염배출원 유형(점, 면, 선오염원, 공정, 불특정 등)
 - 연간 운영시간(가동시간, 가동률, 부하율 등)
 - 장치 위치(실내, 실외, 지표 고도, 지붕, 여유 공간 등)
 - 보조 연료 또는 에너지 비율
 - 각종 유틸리티(수도, 전기, 스팀, 배관, 관거, 구조물) 이용 가능 여부
 - 기존의 대기오염방지시설 설치·운영 사항(종류, 규모, 사용 기간 등)
 - 경제성(초기투자비 및 연간 운영비)

[표 4-2] 휘발성 유기화합물 방지시설 설계 시 고려사항

기술	안정성	오염물질 특성	오염원 특성	제어특성
흡착	흡착 시 폭발물질의 농축이 일어나며 이는 매우 유해함.	다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있음.	높은 포집 효율을 가지고 있으며, 여러 유형 흡착제(활성탄, 제올라이트, 폴리머 등)를 이용, 낮은 비용으로 고효율 달성이 가능함.
흡수	폭발물질을 중성화시킬 수 있는 흡수액을 폭발물질에 따라 선택해야 함.	화합물에 적합한 흡수제를 사용해야 하고, 화학물질 조성변화에 대응하기 어려움.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 흡착제 배출수 처리장치가 필요함.	포집 효율이 높으나 생성 폐수에 폭발성 물질이 포함될 수 있으므로 사전에 적정 처리방법 수립이 필요함.
응축	니트로글리세린과 같은 폭발성 화합물에는 적용할 수 없음.	제습 과정이 필요하며, 끓는점이 낮은 화합물은 처리하기 어려움.	추가적인 응축장치가 필요함.	특정 화합물에 대해서는 포집 효율이 높으나, 초기비용이 높음.
생물 여과	미생물에 의해 포집된 폭발성 화합물질을 쉽게 처리할 수 있음.	처리속도가 낮아 처리 규모의 한계가 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물 종류에 따라 높은 처리효율을 나타냄.
열소각	니트로글리세린과 같은 많은 폭발성 화합물은 급속히 가열될 때 매우 불안정해짐.	여러 다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 가지고 있음. 다양한 유형의 소각로(재생식 열소각 등)를 사용, 비용을 절감시키고 전체 효율을 증가시킬 수 있음.
축매 소각	반응시간과 유속에 따라 축매 층에서 폭발성 화합물 농축이 일어나는 위험한 상황이 일어날 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리하며 축매 피독으로 효율이 낮아짐.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물질 유형에 따라 높은 파괴효율을 나타냄.
광촉매 산화	저온에서 폭발성 화합물질 처리가 가능하며, 체류 시간이 짧고 저온에서 운전되므로 폭발 위험성을 줄일 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리함.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 나타내며, 전체 비용이 상대적으로 적은 편임.

(출처) 환경부(2000), 「휘발성유기화합물 방지시설 설계지침」 자료

□ 2016년의 화학물질 배출량 조사⁷²⁾ 결과에 따르면 1,3-부타디엔의 주요 배출공정은 이송·운반·분배·계량시설, 저장시설, 대기오염방지시설, 화학반응공정, 분리·정제공정 순으로 배출 비중은 각각 52.9, 20.6, 15.7, 7.4% 순임.

공정	업종	배출비중(%)
이송·운반·분배· 계량시설	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	51.2
	고무 및 플라스틱제품 제조업	1.7
	소계	52.9
대기오염방지시설	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	19.8
	고무 및 플라스틱제품 제조업	0.8
	소계	20.6
화학반응공정	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	15.7
분리·정제공정	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	7.4

(출처) 화학물질안전원(2016)의 “2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)” 자료

72) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

4.3.1 이송·운반·분배·계량시설

□ (정의) 원료 물질을 저장 탱크, 창고, 사일로 등에 저장하거나 생산물, 제품을 일시적으로 창고 등에 보관·저장하는 공정

4.3.1.1. (공정관리) 측정 및 관리시스템 도입

□ (정의) 누출오염원관리시스템(LDAR)을 활용하여 이송·운반·분배·계량 시설 배출원에 대한 주기적 감시 및 검지를 시행하여, 이상 있는 장치는 즉시 정비 또는 교체하여 1,3-부타디엔 배출량과 배출원을 동시에 체계적으로 관리하는 기술

○ 이송·운반·분배·계량 시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 누출지점이 많고, 누출되더라도 육안 식별이 어렵고, 화학물질에 따라서 무색·무취인 경우도 있어 측정하지 않고서는 누출 파악이 어려운 상황이 존재함.

○ 누출 가능성이 큰 지점에 바코드가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고, LDAR 시스템에 의해 주기적으로 점검 관리함.

[표 4-3] LDAR 점검주기 및 화학업종과 정유업종 저감율

장치 및 화학물질	화학업종 저감율(%)		정유업종 저감율(%)	
	매월 감시	매분기 감시	매월 감시	매분기 감시
밸브-기체	87	67	88	70
밸브-경질유	84	61	76	61
펌프-경질유	69	45	68	45
압축기-기체	-	-	-	33
연결부-기체, 경질유	-	33	-	
압력안전밸브-기체	-	44	-	44

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

기술 개요	Leak Detection and Repair(이하 LDAR) 등 누출관리시스템을 활용한 실시간 화학물질의 비산배출 관리기술로 최근 광학이미지 카메라를 이용한 Flare, 저장시설 등 VOCs 누출 모니터링과 공정 배출감시를 위한 Fence Line 모니터링 기술도 활용되고 있음			
적용산업 및 공정	1,3-부타디엔의 이송·운반·분배·계량 공정이 있는 전 업종			
적용효과	<p>(적용 전)</p> <p>이송·운반·분배·계량시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 배출원 수가 많고 누출이 되더라도 누출 여부의 육안 확인이 어려운 상황</p> <p>(적용 후)</p> <p>LDAR를 도입하여 대상 공정의 누출지점에 바코드 번호가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고 VOCs 측정기(검지기)를 이용하여 배출원에 대한 주기적 점검을 통해 누출 확인 및 신속한 장비 보수 가능</p>			
저감효과 (%)	70	처리비용	설치비용	100백만원 이상
			운영비용	1,000원/관리지점

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

4.3.1.2. (공정관리) 장치개선

- (정의) 장치개선 및 교체를 통해 1,3-부타디엔의 비산 배출원으로부터의 누출(Leak)을 방지하고 누출 원인이 되는 부분을 개선함으로써 배출량을 줄이거나 완전히 차단하는 기술
- (펌프 변경) 펌프 Seal에서 1,3-부타디엔이 누출되는 것을 방지하기 위해 Seal이 없는 Sealless(Non-seal) 펌프(Canned 펌프 등)나 Double-sealed 펌프로 교체
- (밀폐식 시료 채취장치) 시료 채취 과정에서 1,3-부타디엔이 비산 배출되는 것을 방지하기 위해 밀폐식 시료 채취장치로 변경

장치 종류	개선 방법	저감률(%)
펌프	• Seal-less design (Canned Pump etc.)	99
	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
밸브	• Seal-less design • (Bellows type, Diaphragm, etc.)	99
압축기	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
압력 안전밸브	• Rupture Disk Assembly	99
	• Closed Vent System	90*
연결부	• Socket Welding Type	99
개방식 라인	• Blind, Plug, Cap or Second Valve	99
시료 채취 연결부	• Closed-loop System	99
공정 배수구	• Closed-loop and Water Seal	99

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 배출관이 연소처리 등에 연결하여 처리할 경우는 99%, 미 연결된 경우는 90% 수준임.

4.3.1.3. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 1,3-부타디엔이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 1,3-부타디엔의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
 - (밀폐형 덮개) 1,3-부타디엔 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 1-1] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

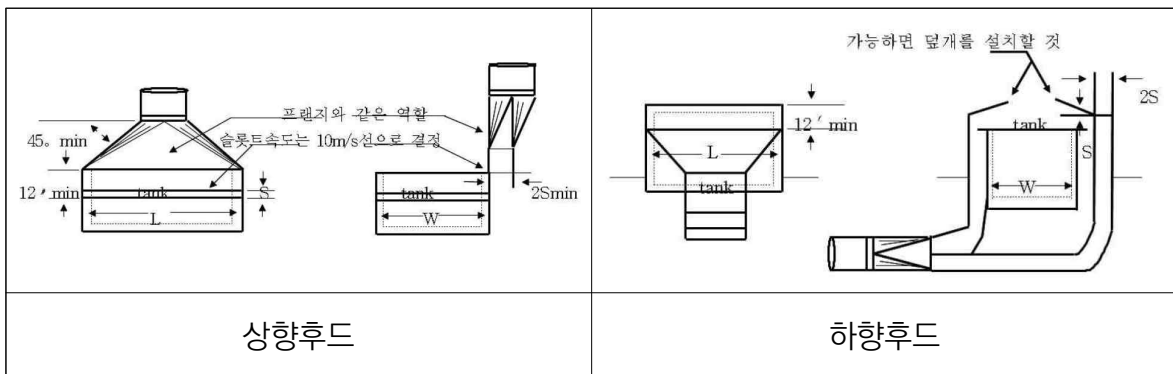
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 4-2] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

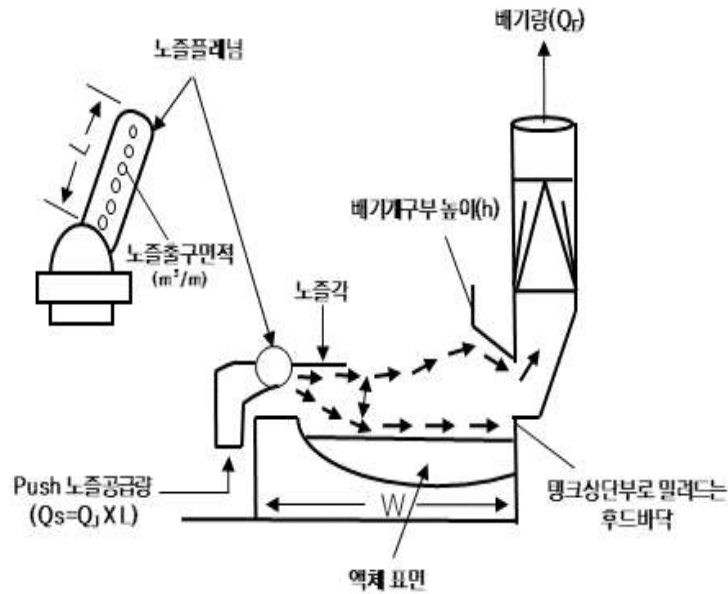
- (외부식 후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 4-3] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 4-4] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것
(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

4.3.2

대기오염방지시설

4.3.2.1. 공정관리

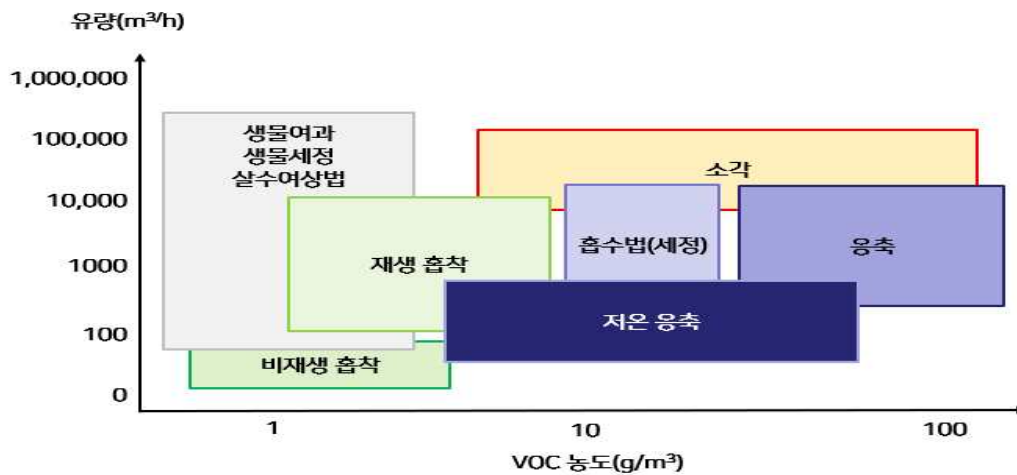
대기오염방지시설	적정관리 및 유지보수 방법
연소에 의한 제거시설	<ul style="list-style-type: none"> 배출가스 처리온도를 적정 관리하여 불완전연소에 의한 배출량 최소화(축열식 연소산화장치; Regenerative Thermal Oxidizer; RTO) 시설의 경우 750~800℃ 유지) → 저농도 가스에 적용/VCU(Vapor combustion Unit) → 고농도 가스에 적용(파괴효율:98% 이상)/CEB(Certified Ultra-Low Emissions Burner) (파괴효율 : 99.99%)
촉매 산화에 의한 제거시설	<ul style="list-style-type: none"> 촉매 산화에 의한 화학물질 제거시설의 경우 흡착시설과 마찬가지로 시간이 지날수록 촉매 산화 효율이 떨어지므로 공정 운전조건에 따라 교체주기를 결정하고, 정기적으로 성능을 파악하여 적정 수준 처리효율 유지

4.3.2.2. 처리기술

□ 화학물질을 처리하는 방법은 아래 표에서 보는 것처럼 크게 연소기술, 흡착기술, 흡수기술, 생물학적 처리기술로 구분할 수 있음.

대분류	소분류
연소기술	고온산화법(열소각법); TO: Thermal Oxidation
	촉매산화(촉매연소)법; CO: Catalytic Oxidation
	축열식 열소각기술; RTO: Regenerative TO
	축열식 촉매산화기술; RCO: Regenerative Catalytic Oxidation
	무화염 열산화법; FTO: Flameless Thermal Oxidation
	흡탈착 촉매산화법; CCO: Concentration Catalytic Oxidation
	흡착·처리기술
	흡수·처리기술
	생물학적 처리기술

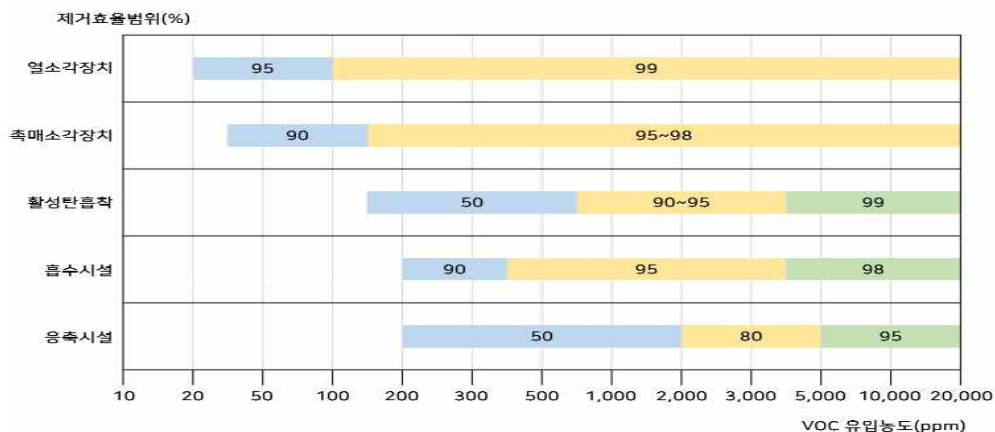
□ [그림 4-5]은 VOCs 유입 유량과 농도에 대한 처리기술의 적용조건을 개략적으로 도시하고 있음. 생물학적 방법은 적용 유량의 범위는 넓지만, 적용 가능한 농도는 상대적으로 협소함을 알 수 있음. 반면에 소각은 적용 농도 범위는 넓지만, 적용 가능한 유량 범위는 넓지 않음을 알 수 있음.



[그림 4-5] VOCs 처리기술별 VOCs 농도와 유입 유량의 적용 범위

(출처) Joseph S, Devinny, Marc A. Deshusses, Todd S. Webster,
Biofiltration for Air pollution control

□ [그림 4-6]는 VOCs 처리기술별로 VOCs 유입농도에 대한 처리효율을 도시하고 있음. 열소각장치와 촉매소각장치는 상대적으로 넓은 유입농도 범위에서 95% 이상의 효율을 보인 반면 활성탄과 응축시설은 상대적으로 높은 농도인 500ppm 이상에서 95%의 성능을 보여주고 있음.



[그림 4-6] VOCs 처리기술의 VOCs 유입농도 대비 처리효율

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

□ [표 4-4]은 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술 선택 기준을 제시하고 있어, 방지기술 선택 지침으로 활용할 수 있음.

[표 4-4] 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술의 선택 기준

대상물질	응축	흡착	열소각	촉매연소	축열식 열소각	무화염 열소각
저유량 저농도	●	●	●	●	○	●
고유량 저농도	●	●	●	●	●	●
저유량 고농도	●	○	●	○	○	●
고유량 고농도	●	○	●	○	○	●
비응축 탄화수소 가스	X	○	●	●	●	●
응축 탄화수소 가스	●	●	●	●	●	●
비응축 Cl/S 포함가스	X	○	●	○	●	●
응축 Cl/S 포함가스	●	●	●	○	●	●
연속 운전	●	●	●	●	●	●
회분식 운전	●	●	○	○	○	●

●: 매우 좋음, ●: 좋음, ○: 보통, ○: 나쁨, X: 적용 불가

(출처) 양고수, '열처리 기술을 이용한 VOCs/악취 처리기술 및 관리현황' 자료 인용

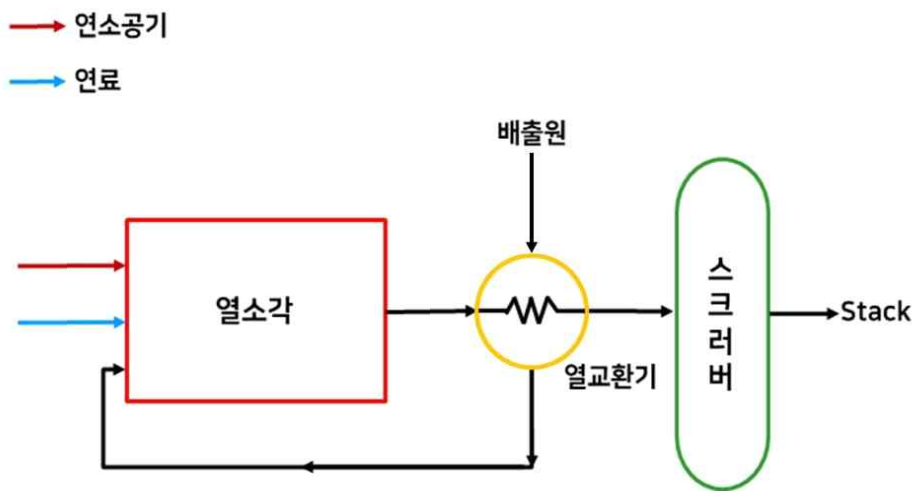
□ [그림 4-5], [그림 4-6], [표 4-4]에서 보는 것처럼 대상물질의 유입농도와 유량 정보를 활용하여 기술적으로 적합한 대상물질의 처리기술을 일차적으로 선정할 수 있음. 다음으로는 저감목표, 경제성, 현장 조건(예, 설치부지 등), 혼합물 종류, 온도와 압력 등을 종합적으로 고려하여 처리기술을 최종적으로 선정해야 함.

1) 연소기술

가) 고온산화(열소각)기술

□ (기술 개요) 1,3-부타디엔 함유 배출가스와 예열 공기를 잘 혼합한 후 고온에서 연소시켜 VOCs를 이산화탄소와 물로 전환

- 고온산화법의 1,3-부타디엔 처리효율은 소각온도, 체류시간, 1,3-부타디엔 유입농도, 1,3-부타디엔 함유 배출가스의 균질성 등에 의존함.



[그림 4-7] 고온산화(열소각)법 공정 예시

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

□ 적용조건

- (소각온도 및 체류시간) VOCs 처리를 위한 소각온도는 일반적으로 700~800℃이며⁷³⁾, 체류시간 1초에서 99.99% 처리효율⁷⁴⁾을 보인다고 알려지고 있음. 그러나 1,3-부타디엔 이외의 물질이 포함되어 있는 경우는 소각온도와 체류시간이 달라질 수 있음.
- (산소농도) 1,3-부타디엔의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL를 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.

73) KONETIC(2015), 도장공정의 VOCs 저감기술

74) 환경부(2000), VOCs 방지시설 설계지침

□ **(유의사항)** 할로젠과 황을 포함한 화학물질은 연소과정에서 HCl, SO₂ 등의 강산 가스를 생산하여 장치 부식을 초래할 수 있어 가급적으로 처리하지 않는 것이 바람직함. 1,3-부타디엔을 처리할 때는 문제가 없으나 할로젠과 황을 포함한 화학물질이 배출가스 중에 함께 출현하는 경우는 강산 가스의 생성량 등을 고려하여 적용 여부를 결정할 필요가 있음.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 적용 사례가 많은 높은 처리 효율의 안정된 기술 LEL의 20% 이상이고 높은 처리효율을 요구할 경우 최상의 선택 중 하나 	<ul style="list-style-type: none"> 1,3-부타디엔 농도가 낮은 경우 보조연료 사용으로 높은 운영비 유량 변동이 심한 경우는 적용 부적합 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 1,3-부타디엔 농도를 처리할 수 있으나, 1,3-부타디엔 농도가 낮은 경우는 보조연료 사용으로 운영비가 높아질 수 있어 소각 앞 단에 농축시설을 설치 운영하여 농도를 일정 수준 이상으로 높일 필요가 있음

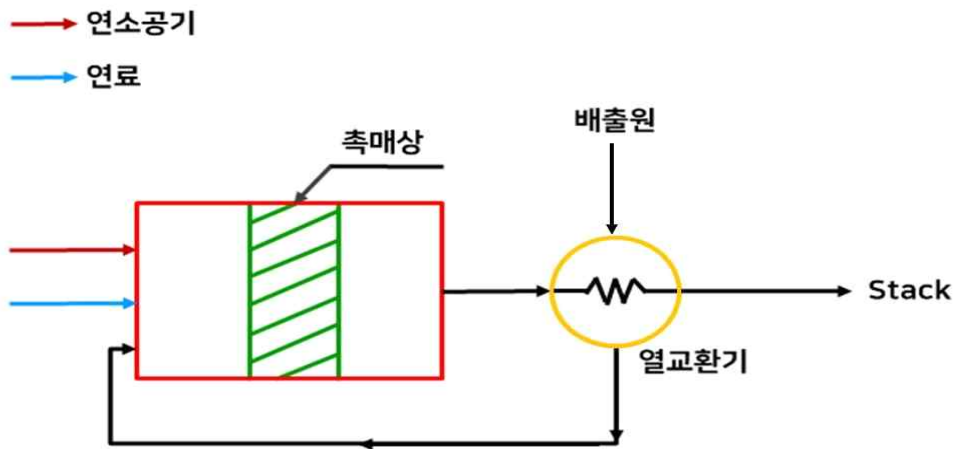
□ **(1,3-부타디엔 적용)** 1,3-부타디엔의 고온산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 고온산화기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99.9	180백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

나) 촉매산화(촉매연소)기술

- (기술 개요) 촉매산화법은 연소기 내부에 충전되어 있는 촉매가 연소에 필요한 활성화 에너지를 낮춤으로써 350~500℃ 정도의 비교적 저온에서 연소가 가능토록 하는 연소방식
 - 촉매로서는 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금이 주로 사용되며, 백금촉매는 HCl 등에 의해 비활성화가 빨리 일어나므로 염소계 VOCs 촉매산화를 위해서는 산화코발트, 산화구리/산화망간 등의 산화금속 촉매가 사용되고 있음.
 - 1,3-부타디엔은 염소계 VOCs가 아니므로 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금 촉매를 적용해도 무방
 - 촉매산화법의 1,3-부타디엔 처리효율은 1,3-부타디엔 유입농도, 소각온도, 체류시간, 산소농도, 촉매 특성, 공간속도⁷⁵⁾ 등에 의존함.



[그림 4-8] 촉매산화(촉매연소)법 공정 예시
(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

□ 적용조건

- (소각온도) 효과적·효율적으로 VOCs 촉매산화처리를 위해서는 배출가스를 320~430℃로 예열한 다음 촉매연소기에 투입하며, 촉매반응기 출구 온도 상한선은 540~675℃가 되도록 설계함. 촉매 종류에 따라 온도 상한선은 다르지만, 고온일수록 촉매 수명이 짧아짐.

75) 공간속도는 촉매상으로 들어가는 가스 유량을 촉매상의 겉보기 부피로 나눈 값

□ 유의사항

- **(피독 현상)** 촉매산화반응에서 가장 치명적인 것은 촉매 비활성화를 초래하는 피독 현상을 꼽을 수 있으며, 촉매 피독은 1) 미세먼지, 타르 고분자물질 등이 촉매 표면에 물리적으로 흡착하여 활성 저하, 2) 염소, 브롬, 불소 등에 의한 화학적 피독, 3) 황, 인, 규소, 중금속 등이 촉매 표면에 있는 공극을 폐쇄하여 표면적 감소 등을 꼽을 수 있음.
 - 도장 도료 중에 유기실리콘 화합물이 포함되어 있는 경우가 많은데 이것이 연소 되면서 무기 규소화합물로 전환되면서 공극을 폐쇄하여 촉매 효과를 저하시킴.
- **(대응방안)** 일반적으로 전처리를 하지 않으나, 미세먼지, 타르, 촉매 피독 원인물질을 촉매소각장치 유입 전에 미리 제거하는 것이 촉매 수명 연장을 위해 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 1,3-부타디엔 처리가 가능함 • 연료 사용량이 적음 • 낮은 온도 조작이 가능함 • 화재 위험이 적음 • 화염 역류가 적음 • 고온산화방식과 비교하여 동일 성능에서 규모가 상대적으로 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • 초기 비용이 높음 • 촉매 비활성화로 촉매 교체가 정기적으로 이뤄져 운영 비용이 높음 • 촉매 피독 원인물질을 사전에 제거해 주어야 함. • 폐촉매는 지정폐기물로 관리해야 함. 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술이며 저농도 처리가 가능한 반면 배출가스 유량이 낮고, VOCs 종류 및 농도 변화가 심하지 않은 시설에 적합

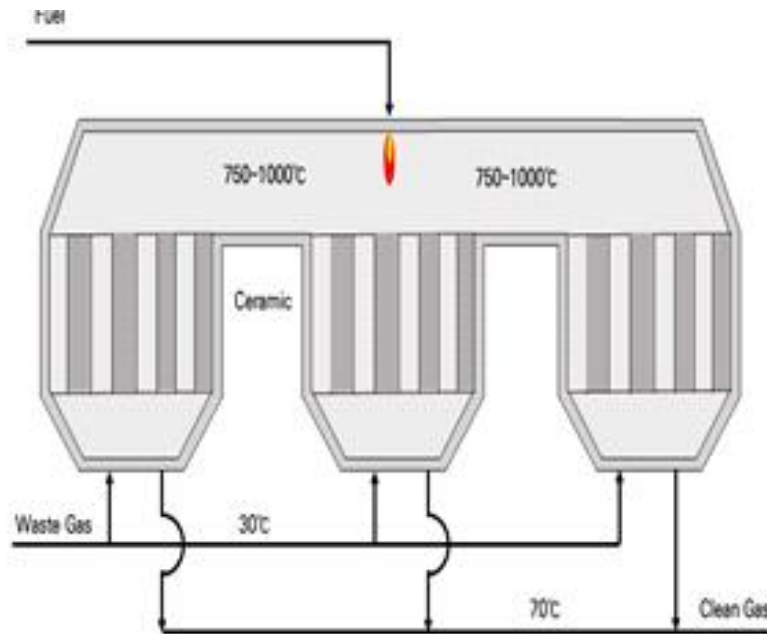
□ **(1,3-부타디엔 적용)** 1,3-부타디엔의 촉매산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 촉매산화기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99.9	210백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

다) 축열식 열소각기술

- (기술 개요) 기본적으로 열소각기술과 VOCs 처리방법은 동일하나, 축열식 열소각기술은 Shell-and-Tube 형태의 열교환기를 활용하여 에너지 회수율을 기존의 열소각기술의 50~60%에서 85~95%로 높인 기술



[그림 4-9] 축열식 열소각기술
(출처) 환경보전협회, 환경정보 no.370 대기오염 방지시설 선정 및 유지관리 기술 인용

□ 적용조건

- (소각온도 및 체류시간) RTO의 소각온도는 1,100°C이며⁷⁶⁾, 체류시간은 1초 이하임. 체류시간 1초에서 99.99% 처리효율⁷⁷⁾을 보이고 있음.
- (산소농도) 1,3-부타디엔의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL을 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.

76) EPA(2017), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-021
77) 환경부(2000), VOCs 방지시설 설계지침

□ **(유의사항)** 할로젠과 황을 포함한 화학물질은 연소과정에서 HCl, SO₂ 등의 강산 가스를 생산하여 장치 부식을 초래할 수 있어 가급적으로 처리하지 않는 것이 바람직함. 1,3-부타디엔을 처리할 때는 문제가 없으나 할로젠과 황을 포함한 화학물질이 배출가스 중에 함께 출현하는 경우는 강산 가스의 생성량 등을 고려하여 적용 여부를 결정할 필요가 있음.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 에너지 회수율이 높아 연료 소모량이 적음 높은 운전온도로 처리효율 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 높은 초기 투자비용 시설 규모가 고온산화시설보다 커짐 높은 유지관리 보수비용 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 저농도 1,3-부타디엔을 처리할 수 있으나 초기 투자비용과 운영비용이 높음

□ **(1,3-부타디엔 적용)** 1,3-부타디엔의 축열식 열소각기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 축열식 열소각기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99%	300백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

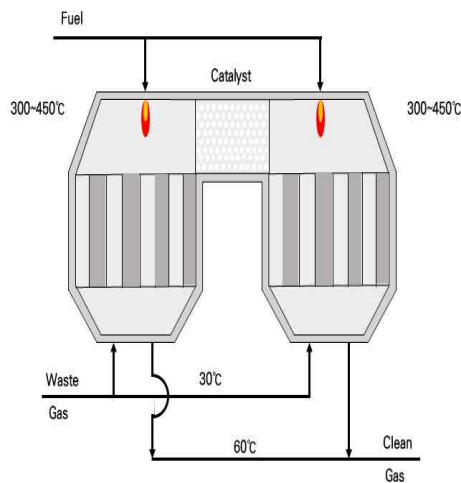
※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

라) 축열식 촉매산화기술

□ (기술 개요) 축열식 촉매산화기술은 기본적으로 촉매산화기술과 동일하나, 축열식 산화기술은 Shell-and-Tube 형태의 열교환기를 활용하여 열교환효율을 기존의 열소각 기술의 50~60%에서 85~95%로 높인 기술

○ 촉매로서는 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금이 주로 사용되며, 백금촉매는 HCl 등에 의해 비활성화가 빨리 일어나므로 염소계 VOCs 촉매산화를 위해서는 산화코발트, 산화구리/산화망간 등의 산화금속 촉매가 사용되고 있음.

- 1,3-부타디엔은 염소계 VOCs가 아니므로 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금 촉매를 적용해도 무방



[그림 4-10] 축열식
촉매산화기술

(출처) 환경보전협회, 환경정보 no.370 대기오염 방지시설 선정 및 유지관리 기술 인용

□ 적용조건

○ (소각온도 및 체류시간) RCO의 소각온도는 350~500°C이며⁷⁸⁾, 체류시간은 1초 이하임.

○ (산소농도) 1,3-부타디엔의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL를 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게

78) EPA(2017), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-021

설정·공급하면 문제가 없음.

□ 유의사항

○ **(피독 현상)** 촉매산화반응에서 가장 치명적인 것은 촉매 비활성화를 초래하는 피독 현상을 꼽을 수 있으며, 촉매 피독은 1) 미세먼지, 타르 고분자물질 등이 촉매 표면에 물리적으로 흡착하여 활성 저하, 2) 염소, 브롬, 불소 등에 의한 화학적 피독, 3) 황, 인, 규소, 중금속 등이 촉매 표면에 있는 공극을 폐쇄하여 표면적 감소 등을 꼽을 수 있음.

- 도장 도료 중에 유기실리콘 화합물이 포함되어 있는 경우가 많은데 이것이 연소 되면서 무기 규소화합물로 전환되면서 공극을 폐쇄하여 촉매 효과를 저하시킴.

○ **(대응방안)** 일반적으로 전처리를 적용하고 있지 않으나, 미세먼지, 타르, 촉매 피독 원인물질을 촉매소각장치 유입 전에 미리 제거하여 촉매 수명을 연장하기도 함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 온도에서 운전하므로 연료 소모량이 RTO보다 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 초기 투자비용 • 시설 규모가 고온산화시설보다 커짐 • 높은 유지관리 보수비용 • 촉매 피독 • 폐촉매는 재생되지 못하고 지정폐기물로 처리 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 저농도 1,3-부타디엔을 낮은 온도에서 처리할 수 있으나 시설 비용이 높고, 촉매 피독으로 인해 촉매 교체가 불가피하여 운영비용이 높음

□ **(1,3-부타디엔 적용)** 1,3-부타디엔의 축열식 촉매산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 축열식 촉매산화기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99%	360백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

2) 흡착 처리기술

□ (기술 개요) 화학물질을 흡착제 표면에 물리적으로 흡착하여 처리하는 기술

○ (공정 구성) 일반적으로 활성탄이 많이 사용되고 있으며, 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 증기 또는 열에 의해 피흡착물의 탈착이 이뤄지는 흡착탑 재생공정임. 탈착 과정에서 농도가 높아진 피흡착물이 배출되며, 이를 연소처리기술 등의 후속 공정에서 처리함.

○ (흡착원리) 흡착제와 피흡착물 간에 Van der Waals 힘이 작용하고 있으며, 흡착제와 피흡착물 간의 거리에 따라 위치에너지가 달라짐. 위치에너지가 가장 낮은 지점이 형성되며, 그 지점에서 흡착이 일어남.

○ (흡착·회수 재사용과 차이점) 흡착·처리기술은 1,3-부타디엔 등의 유기오염물질을 흡착·처리하는데 목적을 두고 있지만, 흡착·회수 재사용 기술은 1,3-부타디엔 등을 회수하여 재사용하는데 초점을 맞추고 있음. 즉 두 기술의 원리는 동일하나 목적에서 차이가 있음.

□ (적용조건) 흡착·처리 공정 단독으로 운영하기보다는 연소처리기술 전단에 설치하여 처리대상물질의 농도를 적정 수준 이상으로 높여 연소처리기술의 처리 성능을 배가시키는 역할을 담당하며, 활성탄이 주로 사용되고 있음.

○ (배출가스 특성) 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, VOCs 농도, 수분량, 온도 등임.

□ (유의사항) 활성탄 자체가 고온에서 화재 위험성⁷⁹⁾이 있고, 화재 및 폭발위험성 물질이 농축되어 화재 및 폭발 가능성이 있으므로 활성탄 흡착·처리공정을 설계할 때 이런 점을 유의하여 설계할 필요가 있음.

79) 활성탄 자체 착화온도는 400~500℃

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 연소처리기술과 연계하여 처리하므로 1,3-부타디엔 등의 VOCs 처리 시너지 효과가 있음. 저농도 1,3-부타디엔 등의 VOCs 처리가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 연소처리기술과 연계하면 저농도의 1,3-부타디엔 등의 VOCs 처리가 가능하나, 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 화재 위험성 등으로 관리가 용이하지 않음.

□ (1,3-부타디엔 적용) 1,3-부타디엔의 흡착처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡착처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

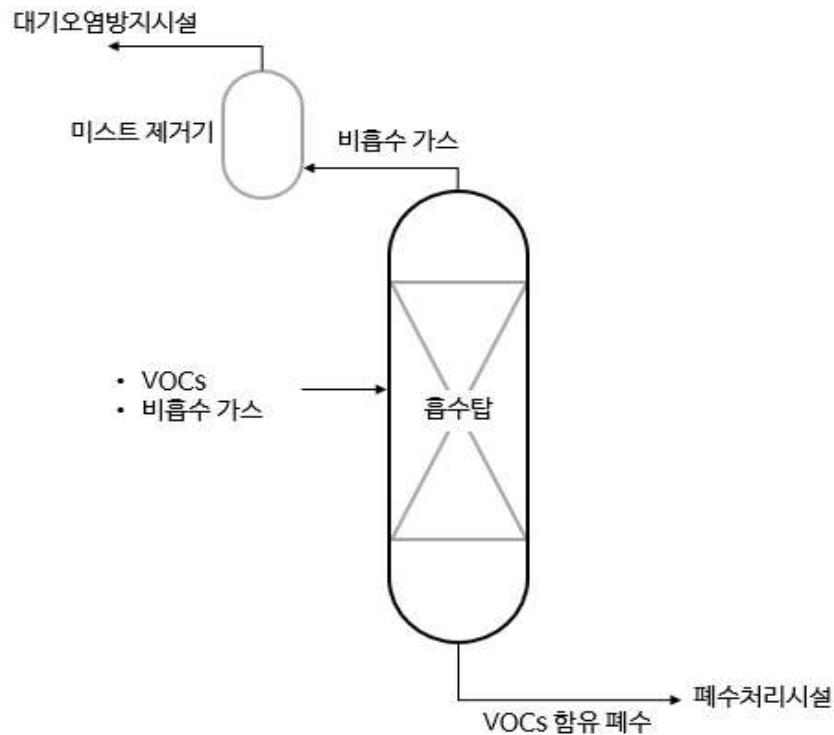
처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
-	18백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

(출처) 한국물가정보(2017년 3월호)

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

3) 흡수처리기술

□ (기술 개요) 혼합 기체를 액체와 접촉하게 시켜 기체의 특정 성분을 액체 속에 용해 흡수·처리하는 기술로서 물리흡수와 화학흡수로 구분할 수 있음. 물리흡수는 흡수제에 대상 기체를 물리적으로 용해시키는 방법이고, 화학흡수는 흡수제 중의 용질 성분과 기체 성분이 화학반응에 의해 흡수되는 방법임.

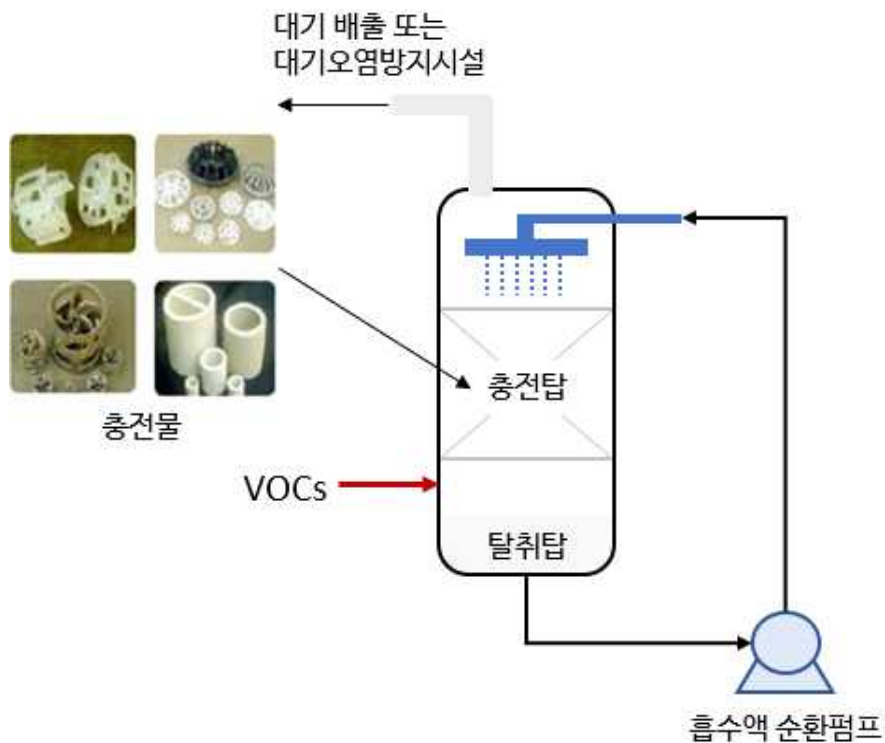


[그림 4-11] 흡수처리기술

○ (VOCs 흡수) VOCs의 흡수는 물리흡수에 이루어지며, VOCs를 함유한 가스에서부터 액상 흡수제로 VOCs가 물질 전달되는 현상으로 물질 전달 구동력은 가스상과 액상 내의 VOCs 특성에 좌우되며 헨리의 법칙(Henry's Law)에 따라 흡수액에 용해되는 양이 결정됨.

- VOCs 흡수제 종류는 물, 고비점 석유오일(Non-volatile Petroleum Oil), 미네랄 오일(Mineral Oil) 등이 있으며, 친수성 VOCs는 물을 활용하여 흡수·제거할 수 있는 최적 흡수제이고, 소수성 VOCs는 고비점 석유오일을 흡수제로 사용하거나, 수용액에 양성(친수성과 소수성 기능을 동시 보유)을 지닌 공중합체(Copolymer)를 투입하여 소수성 VOCs의 흡수를 유도함.

- (VOCs 탈착) VOCs를 흡수제로부터 탈착하여 재생하는 방산(Stripping) 공정이 있으며, 일반적으로 열을 가하거나, 진공을 걸어서 VOCs를 물리적으로 탈착시키며, 응축기와 연결하여 VOCs를 회수할 수 있음.
- (흡수장치 종류) 가스상과 액상이 흐르는 방식에 따라 향류(Counter Flow)와 병류(Co-current Flow) 방식이 있으나, 대부분은 향류 방식이고, 흡수장치의 종류는 충전탑(Packed Bed), 다단탑(Tray Tower), 분무탑(Spray Tower), 벤츄리 스크러버(Venturi Scrubber) 등이 있음. 일반적으로 VOCs 처리에는 충전탑과 다단탑이 많이 적용되고 있음.
- (충전탑) 금속, 세라믹, 플라스틱 재료로 된 불규칙 충전물이나 규칙 충전물로 채워져 있으며, 액체는 기체와의 접촉면적을 높이기 위해 탑 상부에서 고르게 분산되며, 분산된 액체는 충전물의 표면에 박막(Thin Film)을 형성하면서 아래로 흐름. 폐가스는 탑 하부에서 유입되며 흡수액과 접촉하면서 배출가스 중 VOCs 등의 특정 성분이 액상으로 흡수되고, 배출가스의 나머지 성분들은 탑 상부로 배출됨.

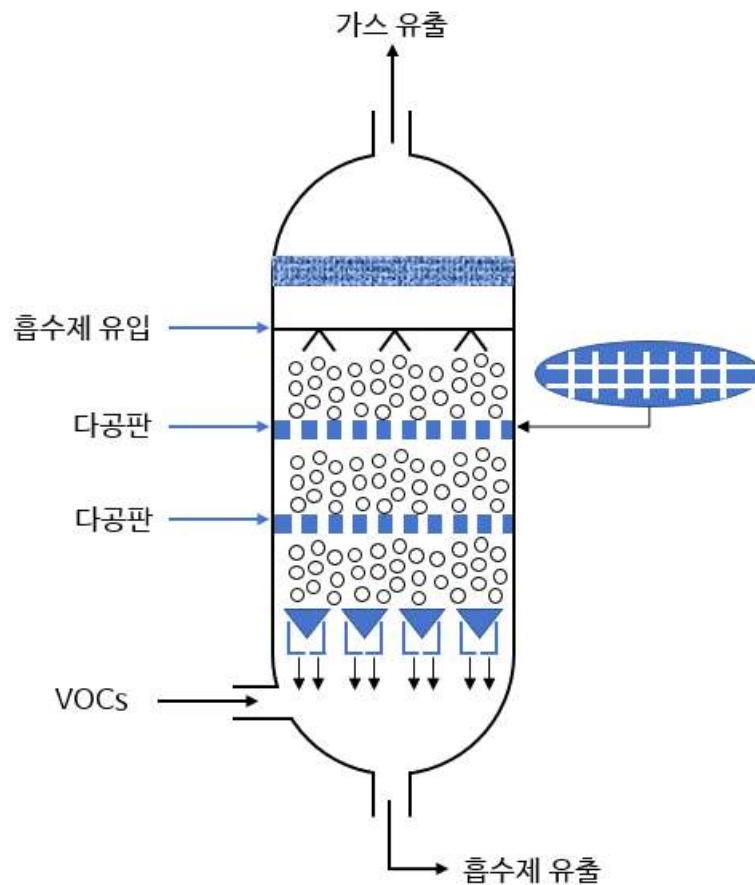


[그림 4-12] 흡수처리기술의 충전탑

(출처) 안전보건공단(2015), 폐수처리설비(스크러버) 화재·폭발 예방대책 매뉴얼

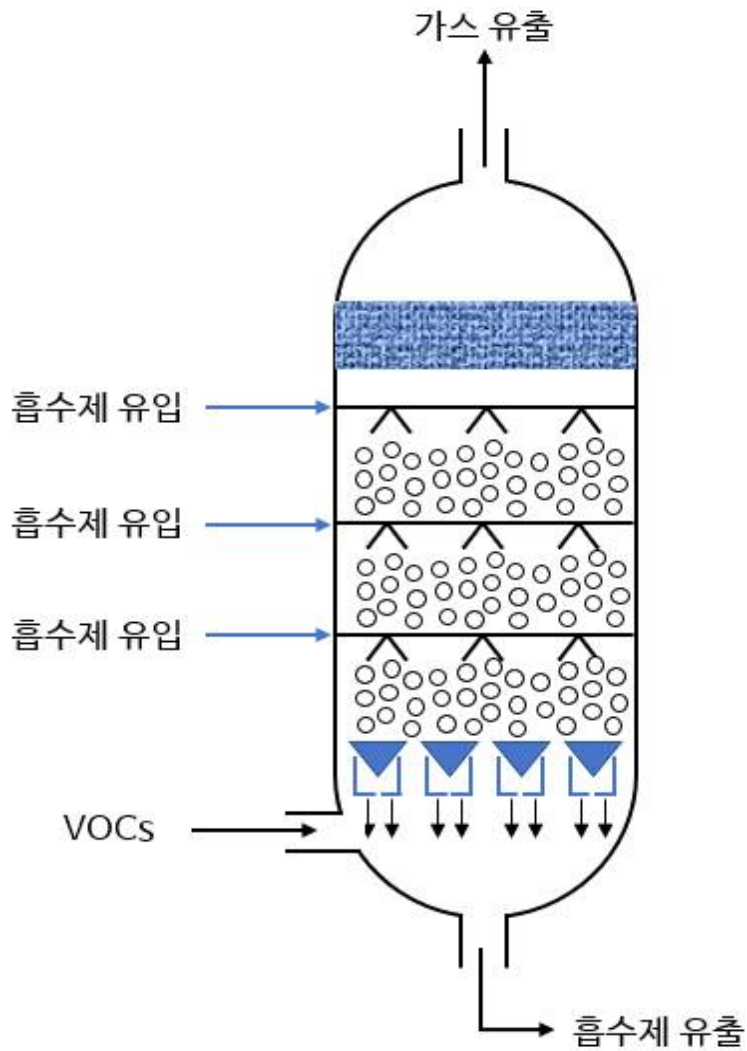
충전탑은 탑 상부에서 흡수액 분산이 성능에 큰 영향을 미치므로, 기체 흐름을 방해하지 않는 범위에서 흡수액이 고르게 분산되어야 하고, 충전물은 액상 박막이 넓게 형성되어 흡수 면적을 키우도록 설계해야 함. 충전탑은 처리효과가 크고, 침전물이 발생하는 가스 처리에도 적합하다는 장점이 있지만 충전층의 공극이 폐색될 수 있고, 충전물이 고가라서 초기 설치비용이 높으며, 가스 유속이 과도한 경우 범람이 발생할 수 있음.

- **(다단탑)** 증류 공정의 증류탑과 유사하고, 접촉시간이 비교적 길고, 각 단의 액체에 기체가 고르게 분산될 수 있다는 특징을 가지고 있어 흡수탑으로 많이 사용되고 있음. 장점으로는 충전탑에 비해 부유물이 있는 흡수액에 대해 적응성이 좋고, 온도 변화가 심한 조건에도 적용이 수월하나, 초기 비용이 높고 압력손실이 큰 단점이 있음.



[그림 4-13] 다단탑 흡수처리시설

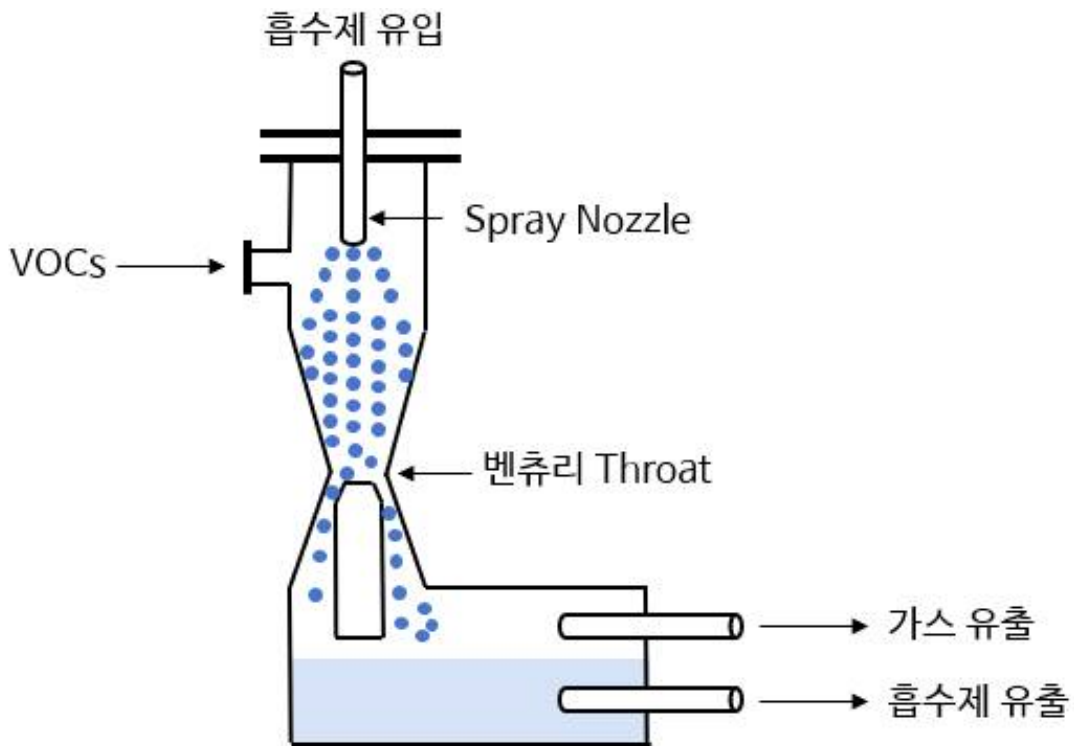
- (분무탑) 충전물을 사용하지 않는 반면 흡수액을 매우 적은 액적으로 만들어 분사함으로써 VOCs가 흡수될 면적을 극대화함. 분무탑의 기체와 액체 접촉시간이 짧아 물에 용해도가 높은 가스(예, 암모니아, 이산화황) 처리에 적합하고, 1,3-부타디엔과 같은 VOCs 처리에는 적합하지 않다고 알려져 있음. 분무탑은 충전탑보다 저렴하고, 압력손실이 적은 반면 분사 노즐이 잘 막히고 편류를 일으키기 쉽고 분무액과 기체의 균일한 접촉이 용이하지 않은 단점이 있음.



[그림 4-14] 분무탑 흡수처리시설

- (벤츄리 스크러버) 벤츄리 노즐에서 배출가스와 흡수액을 강제로 접촉시켜 배출 가스 중의 특정 성분을 흡수·처리하는 설비임. 흡수액과 배출가스와의 접촉시간이 매우 짧아 대부분의 VOCs보다는 용해도가 높은 가스 제거에 적합함.

벤츄리 스크러버는 소형으로 대용량 가스 처리가 가능하고 흡수효율이 탁월한 장점이 있는 반면 가스 압력손실이 커서 동력비가 높은 단점이 있음.



[그림 4-15] 벤츄리 스크러버 흡수처리시설

(출처) <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/venturi-scrubber> 인용

- (유의사항) 증기압이 낮은 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 상대적으로 낮은 압력손실 ▪ 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 ▪ 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 ▪ 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 ▪ 상대적으로 낮은 설치비용 ▪ 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폐수처리 문제 ▪ 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1,3-부타디엔 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 경제성 때문에 1,3-부타디엔 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

□ (1,3-부타디엔 적용) 1,3-부타디엔의 흡수처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡수처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%) ¹	설치비용(100m ³ /min) ²	연간 운영비용(m ³ /min)	비고
70~90	30백만원	-	-

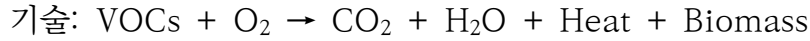
1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술사례집

2: 물가정보(2019.11)

※ 사업장 여건에 따라 적응성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

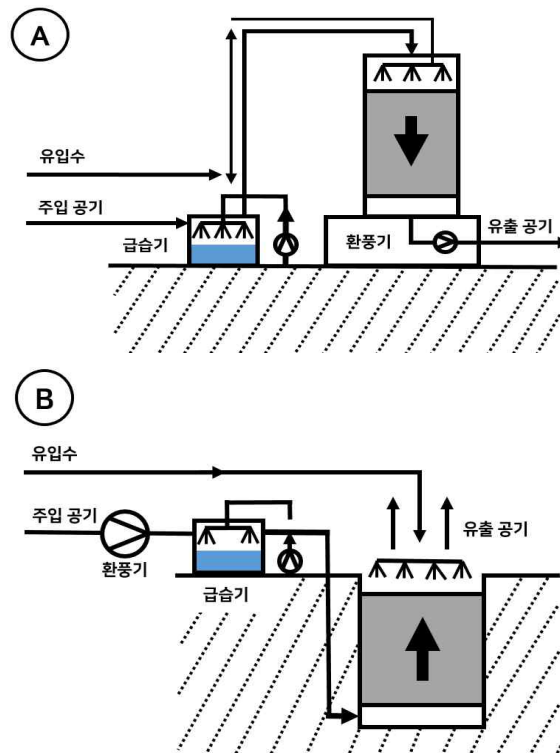
4) 생물학적 처리기술

□ (기술 개요) 생물학적 처리기술은 호기성 미생물을 활용하여 VOCs를 산화·분해하는



○ (종류) 생물학적 처리기술의 종류는 첫째, 바이오필터(Biofilter), 둘째, 바이오스크리버(Bioscrubber), 셋째, 바이오탁리클링 필터(Biotrickling Filter)임.

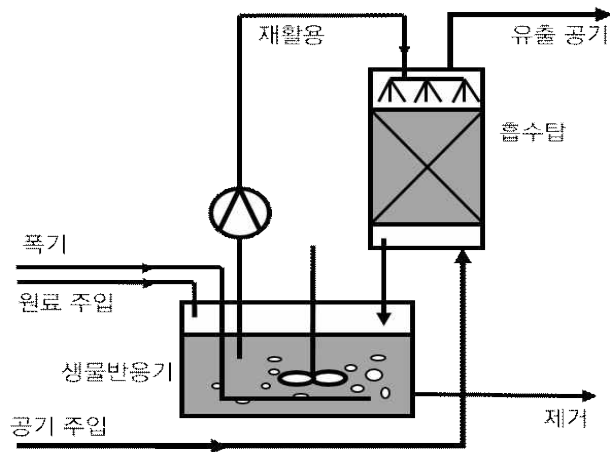
- (바이오필터) 바이오필터 고정체(하우징, Housing)는 가습장치, 온도조절장치, 분무장치로 구성되어 있는 밀폐형 구조임. 바이오필터 충전제는 미생물 서식에 최적 조건을 제공할 수 있는 물질(활성탄, 퇴비 등)로 구성되어 있어 미생물 농도는 토양 사용 시 보다 최고 140배까지 높일 수 있음. 바이오필터의 충전제는 오염물질을 1차적으로 흡수한 후 충전체 속의 미생물이 오염물질을 처리하도록 되어 있으며, 연속적 충전체의 재생이 가능한 시스템으로 한 번 설치하면 2~7년 정도 충전제 교체 없이 운전이 가능함.



[그림 4-16] 바이오필터 구성

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

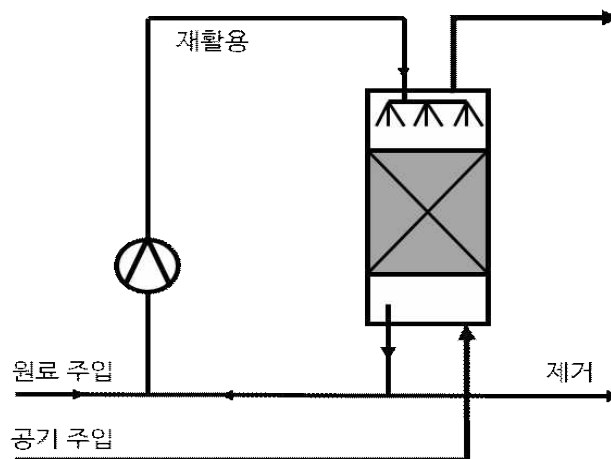
- (바이오스크리버) 배출가스를 세정탑에 통과시켜 오염물질을 물에 흡수시킨 후 이를 포기조에서 미생물 활동에 의해 제거하는 것임. 바이오스크리버에 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 1,3-부타디엔 등 대부분 VOCs는 적합하지 않음.



[그림 4-17] 바이오 스크리버

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- (바이오투리클링 필터) 바이오필터와 바이오스크리버가 혼합된 형태로서 미생물을 불활성 담체에 배양 충전시키고, 오염된 물을 상부에서 미생물이 충전된 담체에 분무하여 처리하는 시스템임. 바이오스크리버와 마찬가지로 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 1,3-부타디엔 등 대부분 VOCs 적용에는 적합하지 않음.



[그림 4-18] 바이오투리클링 필터

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- **(적용조건)** 생물학적 처리방법은 일반적으로 저농도 VOCs를 포함한 상온의 배출가스 처리에 적합하며, VOCs 농도, 온도, 배출가스 유량, 기타 미생물에 치명적인 성분 등을 고려하여 적용성을 검토해야 함.

항목	추천범위	비고
VOCs 유입농도(ppm)	500 이하	톨루엔 기준
단위 체적 당 부하(g/m ³ ·hr)	100 이하	-
제거효율(%)	90 이상	-
배출가스 유량(m ³ /hr)	300 이하	설치 공간 고려
배출가스 온도(°C)	20 ~ 40	-
배출가스 습도(%)	제한 없음	-
할로겐 및 SO ₂	제한적	전 처리 필요
분진	제한적	전 처리 필요

□ **운전인자**

- **(수분함량)** 생물학적 처리방법에서 가장 중요한 인자는 수분함량으로 특히 바이오필터는 수분 조절이 어려워 실패하는 사례도 있음.
- **(온도)** 미생물의 활동도는 온도 증가에 따라 증가하나, 온도가 한계치 이상 오르면 미생물이 오히려 폐사됨. 그러므로 최고 활성을 일어나는 온도를 파악하고, 그 이상으로 온도가 올라가지 않도록 세심하게 조정하는 것이 필요함.
- **(pH)** 각각 미생물들은 고유의 최적 pH를 가지고 있어 일정 범위의 pH 조건에서 활성이 좋으며, 이 범위를 벗어나면 활성이 떨어지거나 폐사하게 됨.
- **(영양분)** 미생물은 에너지와 탄소원을 얻기 위해 오염물질을 분해하나 질소, 인, 칼륨, 황, 칼슘, 나트륨, 철 및 수많은 다른 성분의 미네랄도 필요하므로 미생물의 활성도를 왕성하게 유지하기 위해서는 이런 성분들을 충분히 공급해야 함.
- **(오염물 농도 부하와 표면 부하)** 단위시간 당 단위부피 당 생물학적 처리공정에 들어가는 오염물질의 총량을 농도 부하로 정의하고 있으며, 생물학적 처리공정 설계 및 운전에 중요한 인자임.

- (산소 농도) VOCs 처리에 필요한 산소의 화학양론비적 양이 평형상태에서 용해되는 산소량보다 적으면 산소 소진이 일어나므로 산소 농도를 적정 수준에서 유지할 수 있도록 생물학적 처리공정 설계 및 운전이 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저렴한 설치 및 운영비용 • 낮은 압력손실 • 비선택성으로 다양한 물질로 구성된 VOCs의 동시 처리 가능 • 폐수, 폐기물 등의 2차 오염 물질 배출이 최소화 • 설치 융통성 	<ul style="list-style-type: none"> • 넓은 부지 필요 • 느린 처리속도 • 특정 물질 처리에 적합한 선택적으로 미생물 적용(따라서 복합 미생물 군집 적용 필요하나 배양이 쉽지 않음) • VOCs 회수 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 VOCs 처리에 적합하며, 설치 운영비용이 저렴하고 2차 오염물질 생성 배출이 적지만 처리속도가 느리고 설치 부지 면적이 넓다는 단점이 있음.

- (1,3-부타디엔 적용) 1,3-부타디엔의 생물학적처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 생물학적처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	비고
50~70	100백만원 + α	바이오필터
50~70	150백만원 + α	바이오스크러버
50~70	290백만원 + α	바이오탁리클링필터

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

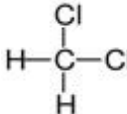
5

디클로로메탄

5.1

개요

- (정의 및 특성) 디클로로메탄은 CH_2Cl_2 화학식을 갖는 양원자성 유기 화합물로, 주요 내용은 아래와 같음.

CAS No.	발암물질 분류	위해도 순위	화학구조
75-09-2	2A군 발암물질	2A군 발암물질 중에서는 3위 전체 발암물질 중에서는 11위	

- 물리·화학적 특성⁸⁰⁾

분자량 (g/mol)	휘발성 증기압	친수성 용해도	끓는점	녹는점 /어는점	LEL (% vol)	UEL (% vol)	n-옥탄올 /물분배계수
84.9	355.5mmHg (25°C)	1.3g/100mℓ (25°C)	40°C	-95°C	1.1	16.3	2.13

- 디클로로메탄은 위에서 제시한 물리·화학적 특성 때문에 환경부 고시에 근거하여 휘발성유기화합물(VOCs)⁸¹⁾로 분류하고 있음.

- 용도

- (고무 및 플라스틱 제조업) 고무 및 플라스틱 제조 시 용매제로 사용
- (자동차 및 트레일러 제조업) 자동차 및 트레일러 제조업에서 금속탈지 세정제로 사용
- (화학물질 및 화학제품 제조업) 화학제품 제조 시 용제로 사용
- 페인트 박리제로 사용

80) 화학물질 정보처리 시스템 (<https://kreachportal.me.go.kr/potweb/main.do>)

안전보건공단 화학물질정보 MSDS검색 (<https://msds.kosha.or.kr/kcic/msdsdetailGet.do>)

81) 환경부고시 제2015-181호(휘발성유기화합물 지정 고시)

- **(배출업종)** 디클로로메탄이 주로 배출되는 업종은 고무 및 플라스틱제품 제조업(35.3%), 전기장비 제조업(19.0%), 자동차 및 트레일러 제조업(3.1%) 순임.
- **(배출공정)** 디클로로메탄이 많이 배출되는 공정은 1) 용제회수(41.0%), 2) 대기오염방지시설(31.0%), 3) 탈지·세정·표백공정(14.7%) 순임.
- **(배출형태)** 디클로로메탄은 VOCs이므로 대기로 배출될 개연성이 높고, [표 5-1]에서 보는 것처럼 국내 배출원에서는 모두 대기로 점배출(34.5%) 또는 비산배출(65.5%)되고 있음.
- **(시사점)** 디클로로메탄은 비산배출 관련 저감기술 및 방법 적용이 필요하며, 중점 관리 분야는 다음과 같음.
 - 용제회수시설에서의 탈루배출 방지
 - 대기오염방지시설로서 처리효율 제고
 - 이송·운반·분배·계량시설에서의 탈루배출 방지
 - 탈지 세정 표백공정에서의 탈루배출 방지

82) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

[표 5-1] 디클로로메탄 배출특성

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
섬유제품 제조업; 의복 제외	저장시설	대기	비산배출 100	64.4	0.002	0.156
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	269.5	0.009	0.651
	혼합공정		비산배출 100	1,097.4	0.036	2.651
	코팅공정		비산배출 100	1,656.7	0.055	4.002
	대기오염방지시설		점배출 100	604.5	0.020	1.460
목재 및 나무제품 제조업; 가구 제외	대기오염방지시설	대기	점배출 100	5,527.5	0.183	10.00
화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	저장시설	대기 수계	점배출 0.9 비산배출 99.1	4,960.0	0.164	0.01
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	3,324.6	0.110	0.00
	혼합공정		비산배출 100	505.0	0.017	0.001
	화학반응공정		비산배출 100	5,093.5	0.169	0.011
	코팅공정		비산배출 100	13.0	0.000	0.000
	탈지·세정·표백공정		점배출 23 비산배출 77	73,665.8	2.437	0.152
	분리·정제공정		점배출 100	199.3	0.007	0.000

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	조립·포장·검사공정		점배출 15 비산배출 85	440.0	0.015	0.001
	용제회수		점배출 0.03 비산배출 99.97	139,390.6	4.611	0.287
	기타		비산배출 100	47.7	0.002	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	65,827.1	2.178	0.136
	폐수처리시설		수계배출 100	3.0	0.000	0.000
의료용 물질 및 의약품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	9,521.9	0.315	0.094
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	5,240.9	0.173	0.052
	혼합공정		비산배출 100	3,938.7	0.130	0.039
	화학반응공정		점배출 20 비산배출 80	14,338.9	0.474	0.141
	코팅공정		점배출 12 비산배출 88	4,952.5	0.164	0.049
	열처리공정		비산배출 100	18.9	0.001	0.000
	분리·정제공정		비산배출 100	1,649.7	0.055	0.016
	용제회수		점배출 0.05 비산배출 99.95	105,503.5	3.490	1.037

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	기타		점배출 100	70.2	0.002	0.001
	대기오염방지시설		점배출 74 비산배출 26	94,757.9	3.135	0.931
	폐수처리시설		점배출 1 비산배출 99	6,932.3	0.229	0.068
	비정상조업		비산배출 100	2.1	0.000	0.000
고무 및 플라스틱제품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	5,159.7	0.171	0.022
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	78,876.5	2.609	0.329
	혼합공정		비산배출 100	201.7	0.007	0.001
	화학반응공정		점배출 66 비산배출 34	7,813.0	0.258	0.033
	탈지·세정·표백공정		비산배출 100	15,067.1	0.498	0.063
	용제회수		비산배출 100	892,498.0	29.527	3.728
	대기오염방지시설		점배출 100	67,514.0	2.234	0.282
1차 금속 제조업	탈지·세정·표백공정	대기	점배출 66 비산배출 34	5,281.1	0.175	14.670
	대기오염방지시설		점배출 100	4,327.9	0.143	12.022

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
금속 가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외	저장시설	대기	비산배출 100	341.0	0.011	0.082
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	192.3	0.006	0.046
	혼합공정		비산배출 100	35,178.0	1.164	8.487
	탈지·세정·표백공정		점배출 8.4 비산배출 91.6	96,245.3	3.184	23.220
	대기오염방지시설		점배출 100	127,090.3	4.205	30.661
전자 부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	이송·운반·분배·계량시설	대기	비산배출 100	2,277.8	0.075	0.173
	혼합공정		비산배출 100	3,918.1	0.130	0.298
	코팅공정		비산배출 100	16,598.3	0.549	1.264
	탈지·세정·표백공정		비산배출 100	3,152.1	0.104	0.240
	대기오염방지시설		점배출 100	90,864.3	3.006	6.919
의료, 정밀, 광학 기기 및 시계 제조업	탈지·세정·표백공정	대기	비산배출 100	714.0	0.024	3.078
	대기오염방지시설		점배출 100	2,859.0	0.095	12.323
전기장비 제조업	저장시설	대기 수계	비산배출 100	2,155.8	0.071	0.329

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	30,869.3	1.021	4.707
	탈지·세정·표백공정		비산배출 100	30,467.0	1.008	4.646
	분리·정제공정		점배출 100	30,751.0	1.017	4.689
	용제회수		비산배출 100	101,169.0	3.347	15.427
	대기오염방지시설		점배출 100	377,399.5	12.486	57.548
	폐수처리시설		수계배출100	1.5	0.000	0.000
기타 기계 및 장비 제조업	탈지·세정·표백공정	대기	점배출 68 비산배출 32	45,878.2	1.518	43.819
	분리·정제공정		점배출 100	10,621.3	0.351	10.145
	대기오염방지시설		점배출 100	312.5	0.010	0.298
자동차 및 트레일러 제조업	이송·운반·분배·계량시설	대기	비산배출 100	110,816.3	3.666	18.241
	탈지·세정·표백공정		점배출 4.7 비산배출 95.3	149,235.1	4.937	24.565
	대기오염방지시설		점배출 100	94,343.5	3.121	15.530

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
가구 제조업	탈지·세정·표백공정	대기	점배출 23 비산배출 77	15,860.0	0.525	52.000
기타 제품 제조업	혼합공정	대기	비산배출 100	229.0	0.008	0.200
	탈지·세정·표백공정		점배출 100	9,372.8	0.310	8.193
폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	저장시설	대기	점배출 25.7 비산배출 74.3	870.9	0.029	0.029
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	64.8	0.002	0.002
	혼합공정		비산배출 100	3.7	0.000	0.000
	탈지·세정·표백공정		비산배출 100	439.5	0.015	0.014
	대기오염방지시설		점배출 100	4,614.8	0.153	0.152
	폐기물처리시설		점배출 100	1,016.9	0.034	0.034
창고 및 운송관련 서비스업	이송·운반·분배·계량시설	대기	비산배출 100	0.2	0.000	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	412.8	0.014	0.062
누적 합계		-	-	잘못된 계산식	잘못된 계산식	-

(출처) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

5.3

대체물질

5.3.1

용매 대체

적용업종	디클로로메탄을 세척제로 사용하는 업종 및 공정
대체물질	BCS-NEW 1000, 3000, 5000
적용사례	<ul style="list-style-type: none"> F사 PCE 대체 세정제 적용사례(친환경세정제 BCS-1000) (출처) https://blog.naver.com/ssaldduk1/220405284994

적용업종	접착제 제품에서 디클로로메탄을 용매제로 사용하는 업종 및 공정
대체물질	라텍스 또는 라텍스 합성 혼합물을 사용하는 수용성 담체를 포함하는 비-용매계 물질 (출처) TURI(2014), Massachusetts Chemical Fact Sheet(Methylene Chloride)

적용업종	디클로로메탄을 용매제로 사용하는 업종 및 공정
대체물질	Diethoxymethane은 인화성이지만 시약 및 공정 용매로서 효과적인 대안임. (출처) TURI(2014), Massachusetts Chemical Fact Sheet(Methylene Chloride)

적용업종	디클로로메탄을 용매제로 사용하는 업종 및 공정
대체물질	Ethyl acetate는 디클로로메탄의 효과적인 대체 분리 용매임. 인화성이 있어 가수분해의 영향을 받을 수 있음. (출처) TURI(2014), Massachusetts Chemical Fact Sheet(Methylene Chloride)

- 디클로로메탄의 회수 및 처리기술은 처리방법에 따라 장·단점이 있어 아래 사항을 자세히 검토하여 선택해야 함.
 - 배출가스의 조성 및 농도
 - 함유 유기화합물질의 특성(폭발한계, 응축성, 용해성, 흡착성 등)
 - 배출가스 내 수분 및 먼지 함유량
 - 배출량(최대, 평균, 최소 유량 등), 온도, 압력, 습도
 - 오염배출원 유형(점, 면, 선오염원, 공정, 불특정 등)
 - 연간 운영시간(가동시간, 가동률, 부하율 등)
 - 장치 위치(실내, 실외, 지표 고도, 지붕, 여유 공간 등)
 - 보조 연료 또는 에너지 비율
 - 각종 유틸리티(수도, 전기, 스팀, 배관, 관거, 구조물) 이용 가능 여부
 - 기존의 대기오염방지시설 설치·운영 사항(종류, 규모, 사용 기간 등)
 - 경제성(초기투자비 및 연간 운영비)

[표 5-2] 휘발성 유기화합물 방지시설 설계 시 고려사항

기술	안정성	오염물질 특성	오염원 특성	제어특성
흡착	흡착 시 폭발물질의 농축이 일어나며 이는 매우 유해함.	다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있음.	높은 포집 효율을 가지고 있으며, 여러 유형 흡착제(활성탄, 제올라이트, 폴리머 등)를 이용, 낮은 비용으로 고효율 달성이 가능함.
흡수	폭발물질을 중성화시킬 수 있는 흡수액을 폭발물질에 따라 선택해야 함.	화합물에 적합한 흡수제를 사용해야 하고, 화학물질 조성변화에 대응하기 어려움.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 흡착제 배출수 처리장치가 필요함.	포집 효율이 높으나 생성 폐수에 폭발성 물질이 포함될 수 있으므로 사전에 적정 처리방법 수립이 필요함.
응축	니트로글리세린과 같은 폭발성 화합물에는 적용할 수 없음.	제습 과정이 필요하며, 끓는점이 낮은 화합물은 처리하기 어려움.	추가적인 응축장치가 필요함.	특정 화합물에 대해서는 포집 효율이 높으나, 초기 비용이 높음.
생물여과	미생물에 의해 포집된 폭발성 화합물질을 쉽게 처리할 수 있음.	처리속도가 낮아 처리 규모의 한계가 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물 종류에 따라 높은 처리효율을 나타냄.
열소각	니트로글리세린과 같은 많은 폭발성 화합물은 급속히 가열될 때 매우 불안정해짐.	여러 다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 가지고 있음. 다양한 유형의 소각로(재생식 열소각 등)를 사용, 비용을 절감시키고 전체 효율을 증가시킬 수 있음.
축매소각	반응시간과 유속에 따라 축매 층에서 폭발성 화합물 농축이 일어나는 위험한 상황이 일어날 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리하며 축매 피독으로 효율이 낮아짐.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물질 유형에 따라 높은 파괴효율을 나타냄.
광축매산화	저온에서 폭발성 화합물질 처리가 가능하며, 체류 시간이 짧고 저온에서 운전되므로 폭발 위험성을 줄일 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리함.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 나타내며, 전체 비용이 상대적으로 적은 편임.

(출처) 환경부(2000), 「휘발성유기화합물 방지시설 설계지침」 자료

□ 2016년의 화학물질 배출량 조사⁸³⁾ 결과에 따르면 디클로로메탄의 주요 배출공정은 용제회수, 대기오염방지시설, 탈지·세정·표백공정, 이송·운반·분배·계량시설 순으로 배출비중은 각각 32.8, 17.8, 6.4% 순임.

공정	업종	배출비중(%)
용제회수	고무 및 플라스틱제품 제조업	29.5
	전기장비 제조업	3.3
	소계	32.8
대기오염방지시설	전기장비 제조업	12.5
	자동차 및 트레일러 제조업	3.1
	고무 및 플라스틱제품 제조업	2.2
	소계	17.8
탈지·세정·표백공정	자동차 및 트레일러 제조업	4.9
	전기장비 제조업	1.0
	고무 및 플라스틱제품 제조업	0.5
	소계	6.4

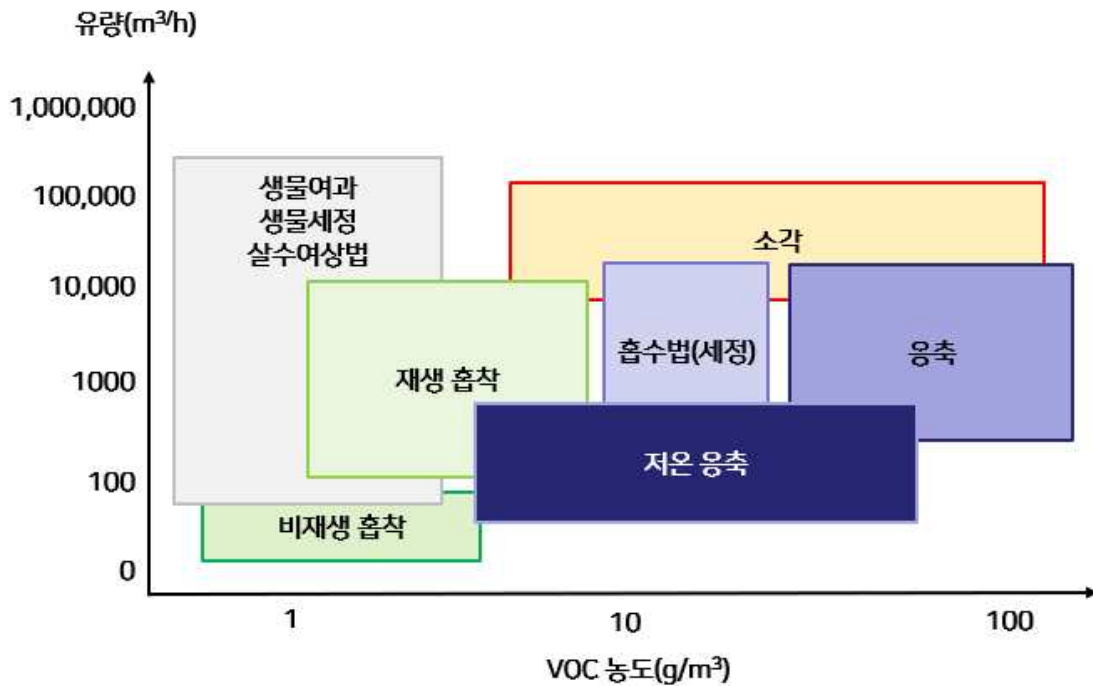
(출처) 화학물질안전원(2016)의 “2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)” 자료

83) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

5.4.1 대기오염방지시설

5.4.1.1. 처리기술

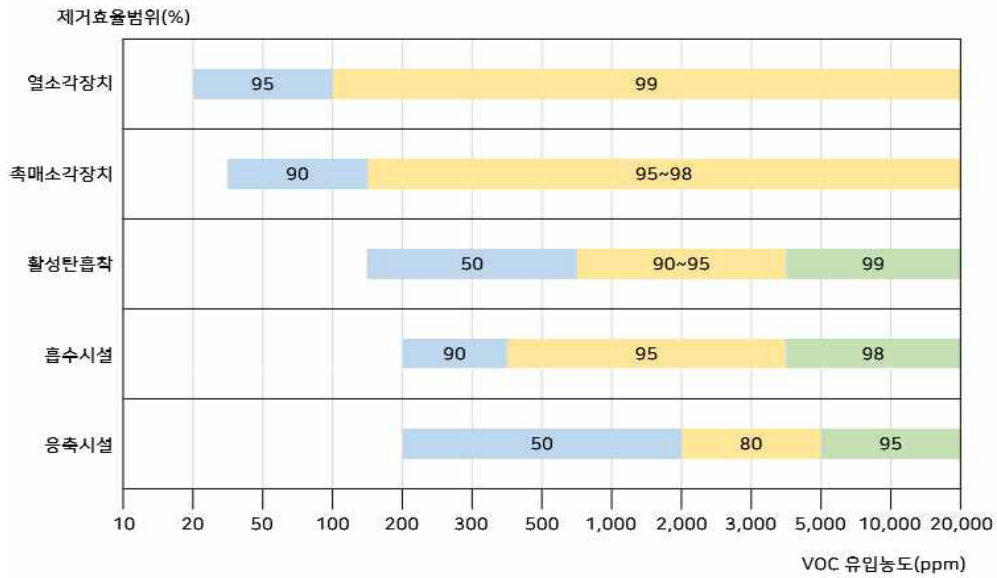
- 화학물질을 처리하는 방법은 흡착기술, 흡수기술, 생물학적 처리기술로 크게 구분할 수 있음.
- [그림 5-1]은 VOCs 유입 유량과 농도에 대한 처리기술의 적용조건을 개략적으로 도시하고 있음. 생물학적 방법은 적용 유량의 범위는 넓지만, 적용 가능한 농도는 상대적으로 협소함을 알 수 있음. 반면에 소각은 적용 농도 범위는 넓지만, 적용 가능한 유량 범위는 넓지 않음을 알 수 있음.



[그림 5-1] VOCs 처리기술별 VOCs 농도와 유입 유량의 적용 범위

(출처) Joseph S, Devanny, Marc A. Deshusses, Todd S. Webster, Biofiltration for Air pollution control

- [그림 5-2]는 VOCs 처리기술별로 VOCs 유입농도에 대한 처리효율을 도시하고 있음. 열소각장치와 촉매소각장치는 상대적으로 넓은 유입농도 범위에서 95% 이상의 효율을 보인 반면 활성탄과 응축시설은 상대적으로 높은 농도인 500ppm 이상에서 95%의 성능을 보여주고 있음.



[그림 5-2] VOCs 처리기술의 VOCs 유입농도 대비 처리효율

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

□ [표 5-3]은 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술 선택 기준을 제시하고 있어, 방지기술 선택 지침으로 활용할 수 있음.

[표 5-3] 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술의 선택 기준

대상물질	응축	흡착	열소각	촉매연소	촉열식 열소각	무회염 열소각
저유량 저농도	●	●	●	●	○	●
고유량 저농도	●	●	●	●	●	●
저유량 고농도	●	○	●	○	○	●
고유량 고농도	●	○	●	○	○	●
비응축 탄화수소 가스	X	○	●	●	●	●
응축 탄화수소 가스	●	●	●	●	●	●
비응축 Cl/S 포함가스	X	○	●	○	●	●
응축 Cl/S 포함가스	●	●	●	○	●	●
연속 운전	●	●	●	●	●	●
회분식 운전	●	●	○	○	○	●

●: 매우 좋음, ●: 좋음, ●: 보통, ○: 나쁨, X: 적용 불가

(출처) 양고수, '열처리 기술을 이용한 VOCs/약취 처리기술 및 관리현황' 자료 인용

□ [그림 5-1], [그림 5-2], [표 5-3]에서 보는 것처럼 대상물질의 유입농도와 유량 정보를 활용하여 기술적으로 적합한 대상물질의 처리기술을 일차적으로 선정할 수 있음. 다음으로는 저감목표, 경제성, 현장 조건(예, 설치부지 등), 혼합물 종류, 온도와 압력 등을 종합적으로 고려하여 처리기술을 최종적으로 선정해야 함.

1) 흡착 처리기술

□ (기술 개요) 화학물질을 흡착제 표면에 물리적으로 흡착하여 처리하는 기술

○ (공정 구성) 일반적으로 활성탄이 많이 사용되고 있으며, 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 증기 또는 열에 의해 피흡착물의 탈착이 이뤄지는 흡착탑 재생공정임. 탈착 과정에서 농도가 높아진 피흡착물이 배출되며, 이를 연소처리기술 등의 후속 공정에서 처리함.

○ (흡착원리) 흡착제와 피흡착물 간에 Van der Waals 힘이 작용하고 있으며, 흡착제와 피흡착물 간의 거리에 따라 위치에너지가 달라짐. 위치에너지가 가장 낮은 지점이 형성되며, 그 지점에서 흡착이 일어남.

○ (흡착·회수 재사용과 차이점) 흡착·처리기술은 디클로로메탄 등의 유기오염물질을 흡착·처리하는데 목적을 두고 있지만, 흡착·회수 재사용 기술은 디클로로메탄 등을 회수하여 재사용하는데 초점을 맞추고 있음. 즉 두 기술의 원리는 동일하나 목적에서 차이가 있음.

□ (적용조건) 흡착·처리 공정 단독으로 운영하기보다는 연소처리기술 전단에 설치하여 처리대상물질의 농도를 적정 수준 이상으로 높여 연소처리기술의 처리 성능을 배가시키는 역할을 담당하며, 활성탄이 주로 사용되고 있음.

□ (유의사항) 활성탄 자체가 고온에서 화재 위험성⁸⁴⁾이 있고, 화재 및 폭발위험성 물질이 농축되어 화재 및 폭발 가능성이 있으므로 활성탄 흡착·처리공정을 설계할 때 이런 점을 유의하여 설계할 필요가 있음.

84) 활성탄 자체 착화온도는 400~500℃

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 연소처리기술과 연계하여 처리하므로 디클로로메탄 등의 VOCs 처리 시너지 효과가 있음. 저농도 디클로로메탄 등의 VOCs 처리가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 연소처리기술과 연계하면 저농도의 디클로로메탄 등의 VOCs 처리가 가능하나, 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 화재 위험성 등으로 관리가 용이하지 않음.

□ (디클로로메탄 적용) 디클로로메탄의 흡착처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡착처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

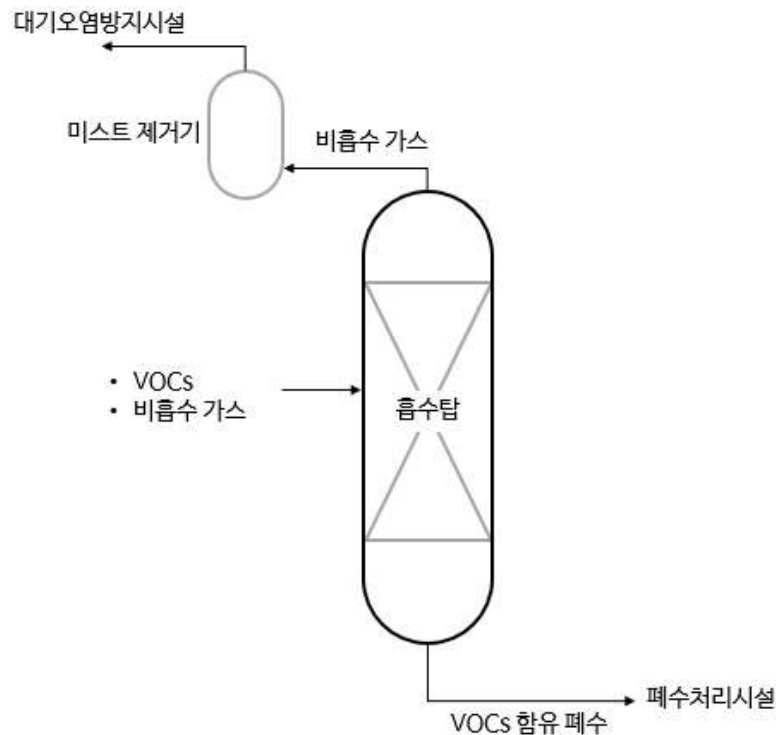
처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
-	18백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

(출처) 한국물가정보(2017년 3월호)

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

2) 흡수처리기술

□ (기술 개요) 혼합 기체를 액체와 접촉하게 시켜 기체의 특정 성분을 액체 속에 용해 흡수·처리하는 기술로서 물리흡수와 화학흡수로 구분할 수 있음. 물리흡수는 흡수제에 대상 기체를 물리적으로 용해시키는 방법이고, 화학흡수는 흡수제 중의 용질 성분과 기체 성분이 화학반응에 의해 흡수되는 방법임.

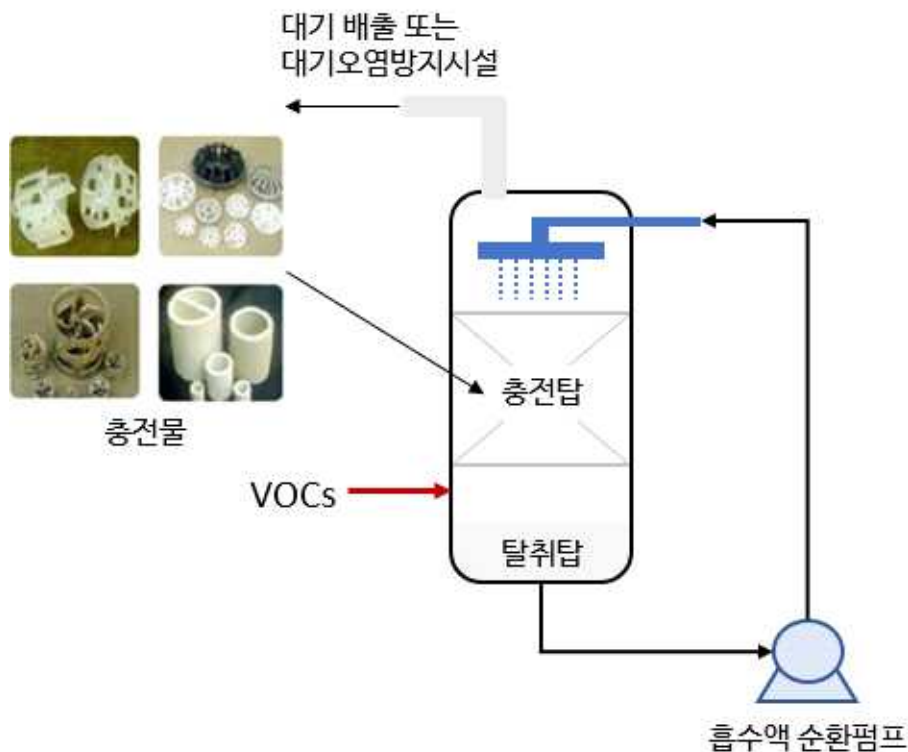


[그림 5-3] 흡수처리기술

○ (VOCs 흡수) VOCs의 흡수는 물리흡수에 이루어지며, VOCs를 함유한 가스에서부터 액상 흡수제로 VOCs가 물질 전달되는 현상으로 물질 전달 구동력은 가스상과 액상 내의 VOCs 특성에 좌우되며 헨리의 법칙(Henry's Law)에 따라 흡수액에 용해되는 양이 결정됨.

- VOCs 흡수제 종류는 물, 고비점 석유오일(Non-volatile Petroleum Oil), 미네랄 오일(Mineral Oil) 등이 있으며, 친수성 VOCs는 물을 활용하여 흡수·제거할 수 있는 최적 흡수제이고, 소수성 VOCs는 고비점 석유오일을 흡수제로 사용하거나, 수용액에 양성(친수성과 소수성 기능을 동시 보유)을 지닌 공중합체(Copolymer)를 투입하여 소수성 VOCs의 흡수를 유도함.

- (VOCs 탈착) VOCs를 흡수제로부터 탈착하여 재생하는 방산(Stripping) 공정이 있으며, 일반적으로 열을 가하거나, 진공을 걸어서 VOCs를 물리적으로 탈착시키며, 응축기와 연결하여 VOCs를 회수할 수 있음.
- (흡수장치 종류) 가스상과 액상이 흐르는 방식에 따라 향류(Counter Flow)와 병류(Co-current Flow) 방식이 있으나, 대부분은 향류 방식이고, 흡수장치의 종류는 충전탑(Packed Bed), 다단탑(Tray Tower), 분무탑(Spray Tower), 벤츄리 스크러버(Venturi Scrubber) 등이 있음. 일반적으로 VOCs 처리에는 충전탑과 다단탑이 많이 적용되고 있음.
- (충전탑) 금속, 세라믹, 플라스틱 재료로 된 불규칙 충전물이나 규칙 충전물로 채워져 있으며, 액체는 기체와의 접촉면적을 높이기 위해 탑 상부에서 고르게 분산되며, 분산된 액체는 충전물의 표면에 박막(Thin Film)을 형성하면서 아래로 흐름. 폐가스는 탑 하부에서 유입되며 흡수액과 접촉하면서 배출가스 중 VOCs 등의 특정 성분이 액상으로 흡수되고, 배출가스의 나머지 성분들은 탑 상부로 배출됨.

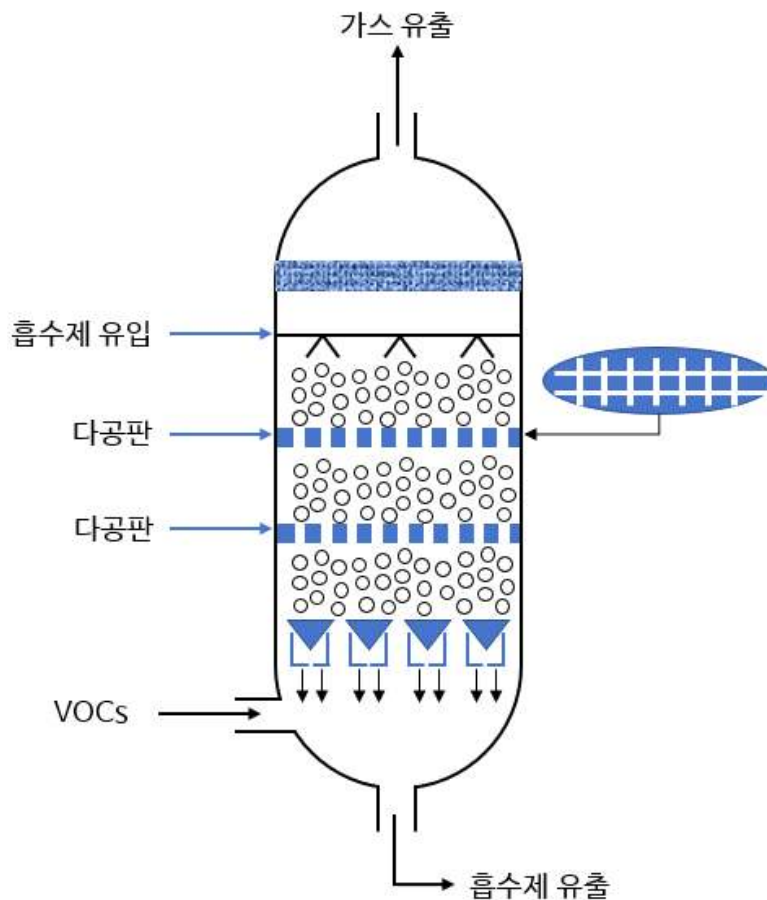


[그림 5-4] 흡수처리기술의 충전탑

(출처) 안전보건공단(2015), 폐수처리설비(스크러버) 화재·폭발 예방대책 매뉴얼

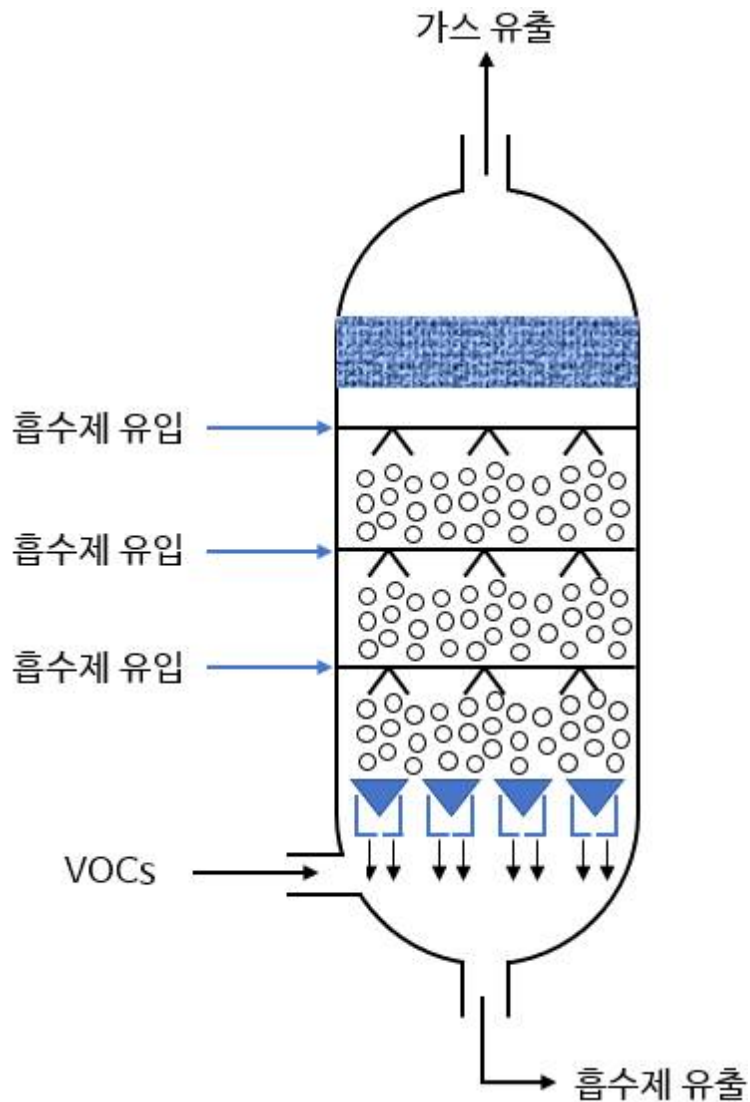
충전탑은 탑 상부에서 흡수액 분산이 성능에 큰 영향을 미치므로, 기체 흐름을 방해하지 않는 범위에서 흡수액이 고르게 분산되어야 하고, 충전물은 액상 박막이 넓게 형성되어 흡수 면적을 키우도록 설계해야 함. 충전탑은 처리효과가 크고, 침전물이 발생하는 가스 처리에도 적합하다는 장점이 있지만 충전층의 공극이 폐색될 수 있고, 충전물이 고가라서 초기 설치비용이 높으며, 가스 유속이 과도한 경우 범람이 발생할 수 있음.

- (다단탑) 증류 공정의 증류탑과 유사하고, 접촉시간이 비교적 길고, 각 단의 액체에 기체가 고르게 분산될 수 있다는 특징을 가지고 있어 흡수탑으로 많이 사용되고 있음. 장점으로는 충전탑에 비해 부유물이 있는 흡수액에 대해 적응성이 좋고, 온도 변화가 심한 조건에도 적용이 수월하나, 초기 비용이 높고 압력손실이 큰 단점이 있음.



[그림 5-5] 다단탑 흡수처리시설

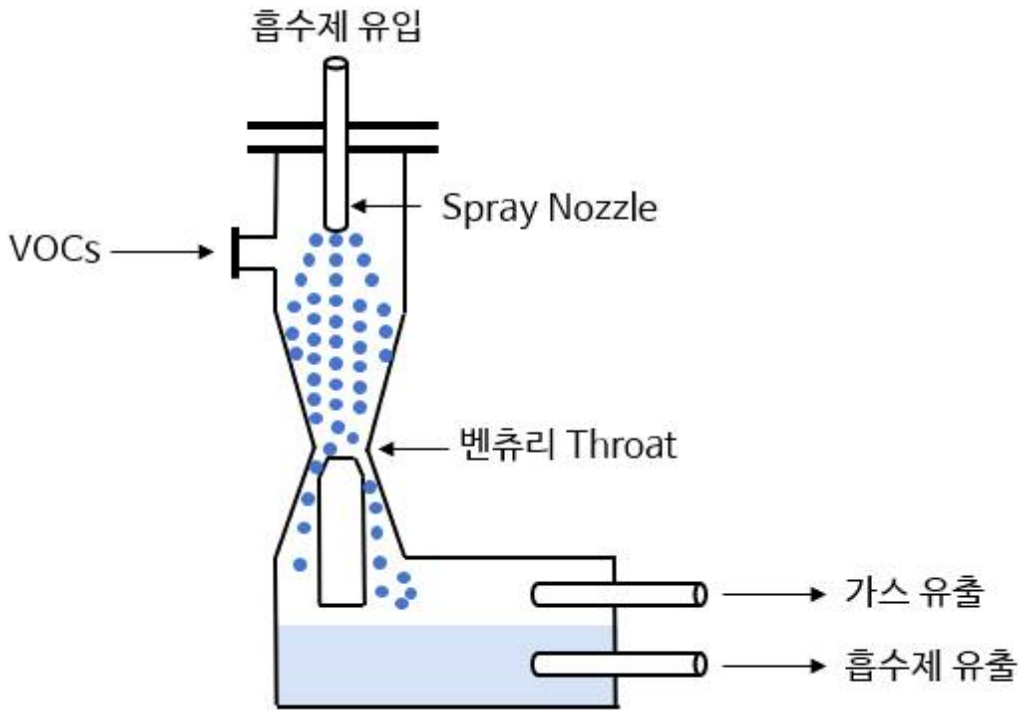
- (분무탑) 충전물을 사용하지 않는 반면 흡수액을 매우 적은 액적으로 만들어 분사함으로써 VOCs가 흡수될 면적을 극대화함. 분무탑의 기체와 액체 접촉시간이 짧아 물에 용해도가 높은 가스(예, 암모니아, 이산화황) 처리에 적합하고, 디클로로메탄과 같은 VOCs 처리에는 적합하지 않다고 알려져 있음. 분무탑은 충전탑보다 저렴하고, 압력손실이 적은 반면 분사 노즐이 잘 막히고 편류를 일으키기 쉽고 분무액과 기체의 균일한 접촉이 용이하지 않은 단점이 있음.



[그림 5-6] 분무탑 흡수처리시설

- (벤츄리 스크리버) 벤츄리 노즐에서 배출가스와 흡수액을 강제로 접촉시켜 배출 가스 중의 특정 성분을 흡수·처리하는 설비임. 흡수액과 배출가스와의 접촉시간이 매우 짧아 대부분의 VOCs보다는 용해도가 높은 가스 제거에 적합함.

벤츄리 스크리버는 소형으로 대용량 가스 처리가 가능하고 흡수효율이 탁월한 장점이 있는 반면 가스 압력손실이 커서 동력비가 높은 단점이 있음.



[그림 5-7] 벤츄리 스크리버 흡수처리시설

(출처) <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/venturi-scrubber> 인용

□ (유의사항) 증기압이 낮은 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 상대적으로 낮은 압력손실 ▪ 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 ▪ 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 ▪ 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 ▪ 상대적으로 낮은 설치비용 ▪ 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폐수처리 문제 ▪ 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 디클로로메탄 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 경제성 때문에 디클로로메탄 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

□ (디클로로메탄 적용) 디클로로메탄의 흡수처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡수처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%) ¹	설치비용(100m ³ /min) ²	연간 운영비용(m ³ /min)	비고
70~90	30백만원	-	-

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: 물가정보(2019.11)

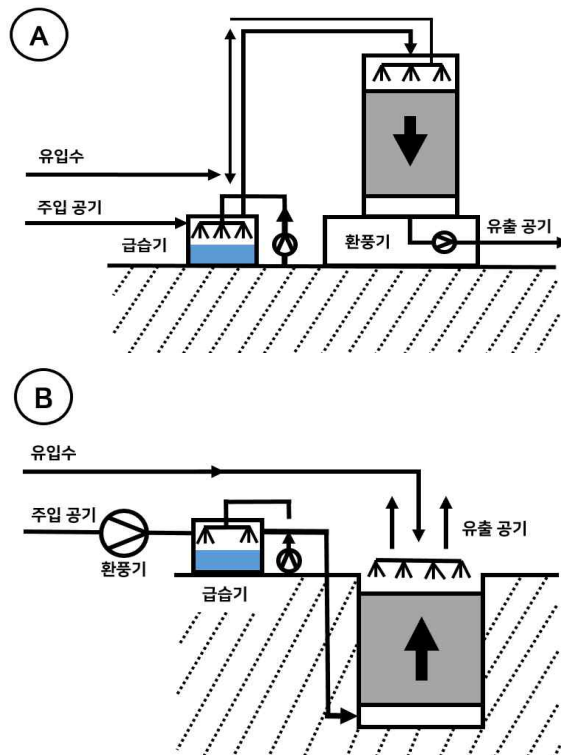
※ 사업장 여건에 따라 적응성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

3) 생물학적 처리기술

□ (기술 개요) 생물학적 처리기술은 호기성 미생물을 활용하여 VOCs를 산화·분해하는 기술: $VOCs + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + Heat + Biomass$

○ (종류) 생물학적 처리기술의 종류는 첫째, 바이오필터(Biofilter), 둘째, 바이오스크리버(Bioscrubber), 셋째, 바이오탁리클링 필터(Biotrickling Filter)임.

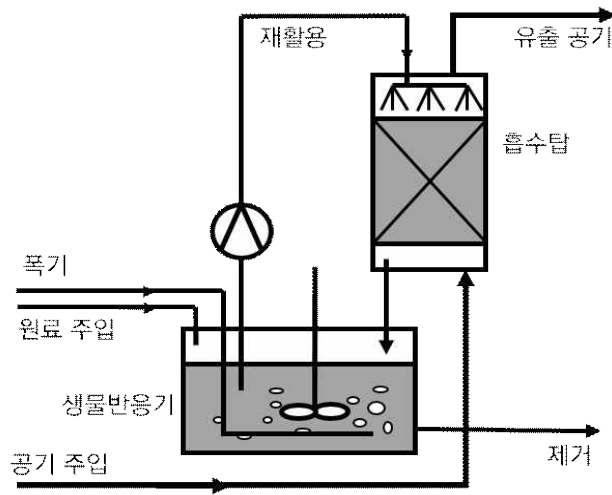
- (바이오필터) 바이오필터 고정체(하우징, Housing)는 가습장치, 온도조절장치, 분무장치로 구성되어 있는 밀폐형 구조임. 바이오필터 충전제는 미생물 서식에 최적 조건을 제공할 수 있는 물질(활성탄, 퇴비 등)로 구성되어 있어 미생물 농도는 토양 사용 시 보다 최고 140배까지 높일 수 있음. 바이오필터의 충전제는 오염 물질을 1차적으로 흡수한 후 충전제 속의 미생물이 오염물질을 처리하도록 되어 있으며, 연속적 충전제의 재생이 가능한 시스템으로 한 번 설치하면 2~7년 정도 충전제 교체 없이 운전이 가능함.



[그림 5-8] 바이오필터 구성

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

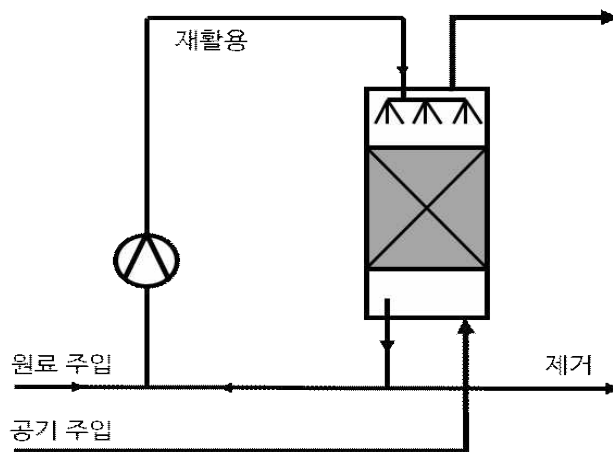
- (바이오스크리버) 배출가스를 세정탑에 통과시켜 오염물질을 물에 흡수시킨 후 이를 포기조에서 미생물 활동에 의해 제거하는 것임. 바이오스크리버에 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 디클로로메탄 등 대부분 VOCs는 적합하지 않음.



[그림 5-9] 바이오 스크리버

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- (바이오투리클링 필터) 바이오필터와 바이오스크리버가 혼합된 형태로서 미생물을 불활성 담체에 배양 충전시키고, 오염된 물을 상부에서 미생물이 충전된 담체에 분무하여 처리하는 시스템임. 바이오스크리버와 마찬가지로 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 디클로로메탄 등 대부분 VOCs 적용에는 적합하지 않음.



[그림 5-10] 바이오투리클링 필터

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- **(적용조건)** 생물학적 처리방법은 일반적으로 저농도 VOCs를 포함한 상온의 배출가스 처리에 적합하며, VOCs 농도, 온도, 배출가스 유량, 기타 미생물에 치명적인 성분 등을 고려하여 적용성을 검토해야 함.

항목	추천범위	비고
VOCs 유입농도(ppm)	500 이하	톨루엔 기준
단위 체적 당 부하(g/m ³ ·hr)	100 이하	-
제거효율(%)	90 이상	-
배출가스 유량(m ³ /hr)	300 이하	설치 공간 고려
배출가스 온도(°C)	20 ~ 40	-
배출가스 습도(%)	제한 없음	-
할로겐 및 SO ₂	제한적	전 처리 필요
분진	제한적	전 처리 필요

□ **운전인자**

- **(수분함량)** 생물학적 처리방법에서 가장 중요한 인자는 수분함량으로 특히 바이오필터는 수분 조절이 어려워 실패하는 사례도 있음.
- **(온도)** 미생물의 활동도는 온도 증가에 따라 증가하나, 온도가 한계치 이상 오르면 미생물이 오히려 폐사됨. 그러므로 최고 활성을 일어나는 온도를 파악하고, 그 이상으로 온도가 올라가지 않도록 세심하게 조정하는 것이 필요함.
- **(pH)** 각각 미생물들은 고유의 최적 pH를 가지고 있어 일정 범위의 pH 조건에서 활성이 좋으며, 이 범위를 벗어나면 활성이 떨어지거나 폐사하게 됨.
- **(영양분)** 미생물은 에너지와 탄소원을 얻기 위해 오염물질을 분해하나 질소, 인, 칼륨, 황, 칼슘, 나트륨, 철 및 수많은 다른 성분의 미네랄도 필요하므로 미생물의 활성도를 왕성하게 유지하기 위해서는 이런 성분들을 충분히 공급해야 함.
- **(오염물 농도 부하와 표면 부하)** 단위시간 당 단위부피 당 생물학적 처리공정에 들어가는 오염물질의 총량을 농도 부하로 정의하고 있으며, 생물학적 처리공정 설계 및 운전에 중요한 인자임.

- (산소 농도) VOCs 처리에 필요한 산소의 화학양론비적 양이 평형상태에서 용해되는 산소량보다 적으면 산소 소진이 일어나므로 산소 농도를 적정 수준에서 유지할 수 있도록 생물학적 처리공정 설계 및 운전이 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저렴한 설치 및 운영비용 • 낮은 압력손실 • 비선택성으로 다양한 물질로 구성된 VOCs의 동시 처리 가능 • 폐수, 폐기물 등의 2차 오염 물질 배출이 최소화 • 설치 융통성 	<ul style="list-style-type: none"> • 넓은 부지 필요 • 느린 처리속도 • 특정 물질 처리에 적합한 선택적으로 미생물 적용(따라서 복합 미생물 군집 적용 필요하나 배양이 쉽지 않음) • VOCs 회수 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 VOCs 처리에 적합하며, 설치 운영비용이 저렴하고 2차 오염물질 생성 배출이 적지만 처리속도가 느리고 설치 부지 면적이 넓다는 단점이 있음.

- (디클로로메탄 적용) 디클로로메탄의 생물학적 처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 생물학적 처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	비고
50~70	100백만원 + α	바이오필터
50~70	150백만원 + α	바이오스크러버
50~70	290백만원 + α	바이오탁리클링필터

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

5.4.2

탈지·세정·표백공정

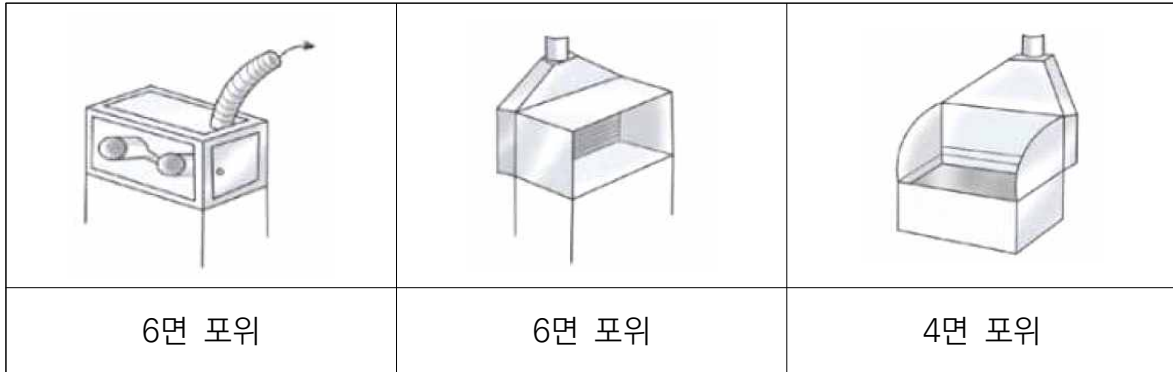
5.4.2.1. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 디클로로메탄이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 디클로로메탄의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
 - (밀폐형 덮개) 디클로로메탄 등의 VOCs 함유 폐수는 처리 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 폐수처리시설에 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송시켜 처리하고 있음.



[그림 1-11] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

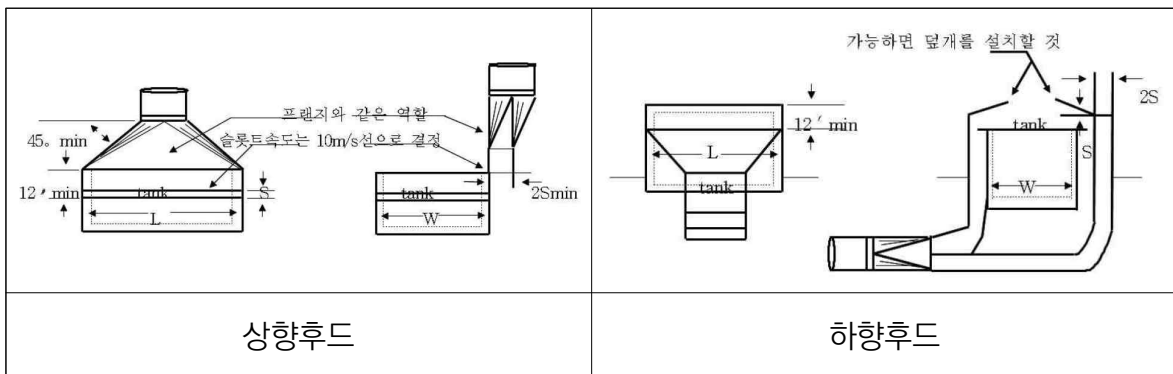
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 5-12] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

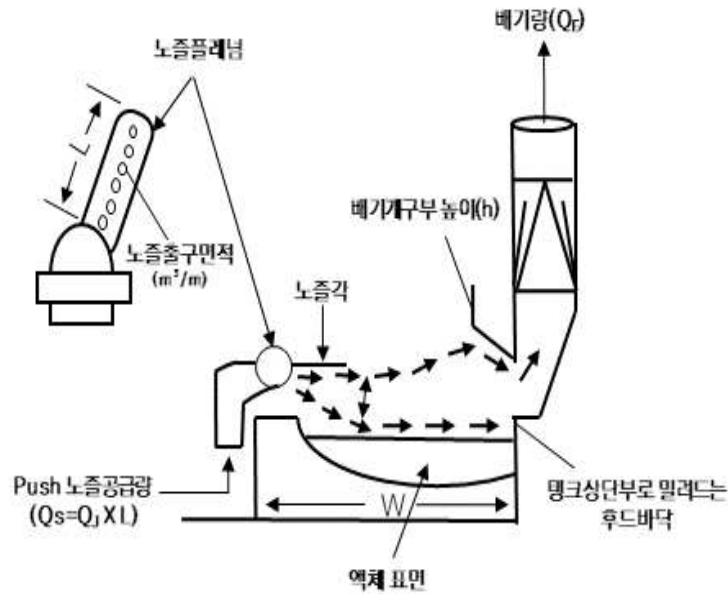
- (외부식 후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 5-13] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 5-14] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것
(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

5.4.2.2. 재사용 및 재활용

흡착·회수	대기 중으로 배출되는 VOCs를 흡착제에 흡착시키고, 온도 또는 압력 조절을 통해 탈착·회수하는 기술
응축·회수	응축기 등을 통해 유체 온도나 압력 변화로 대상 VOCs를 분리·회수하는 기술
흡수·회수	액상 흡수제를 가스상의 VOCs와 접촉하여 VOCs를 흡수제로 물질 이동시켜 분리·회수하는 기술
막분리·회수	혼합가스 각각의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술

1) 흡착·회수기술

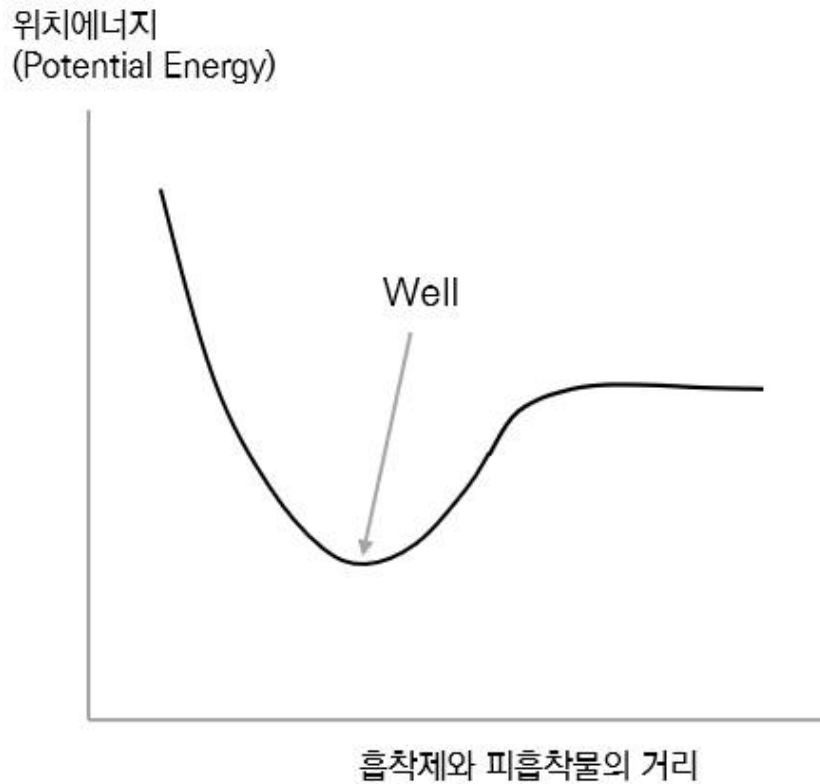
□ (기술 개요) VOCs를 흡착제 표면에 물리적으로 흡착시키고 탈착·회수 재이용하는 기술

○ (흡착) 흡착공정은 화학적 흡착과 물리적 흡착으로 구분할 수 있으며, 화학적 흡착은 피흡착물과 흡착제가 화학적으로 결합하므로, 피흡착물과 흡착제의 화학적 결합을 끊어야 하므로 원래 형태로의 피흡착물 회수가 용이하지 않음. 반면 물리적 흡착은 원래 형태로 피흡착물의 회수가 가능하므로 흡착·회수 재사용기술에서는 물리적 흡착을 적용하고 있음.

- (물리적 흡착원리) 아래 그림은 흡착제 표면으로부터의 거리와 위치에너지 (Potential Energy)의 상관관계를 보여주고 있음. 흡착제와 피흡착물 간에는 ‘반발 (Repulsion)⁸⁵⁾’과 ‘견인(Attraction)⁸⁶⁾’이 동시에 작용하여 균형을 이루고 있음. 흡착제와 피흡착물의 거리 중에서 위치에너지가 가장 낮은 지점(Well 또는 Dip)에서 흡착이 일어나며, 피흡착물의 탈착을 위해 필요한 에너지가 외부에서 운동 에너지(Kinetic Energy) 형태로 공급되면 탈착이 일어남.

85) 흡착제와 피흡착물의 전자군(Cloud of Electrons) 간의 반발력

86) 전자 핵(Nuclear) 간의 Van der Waals force에 의한 견인력

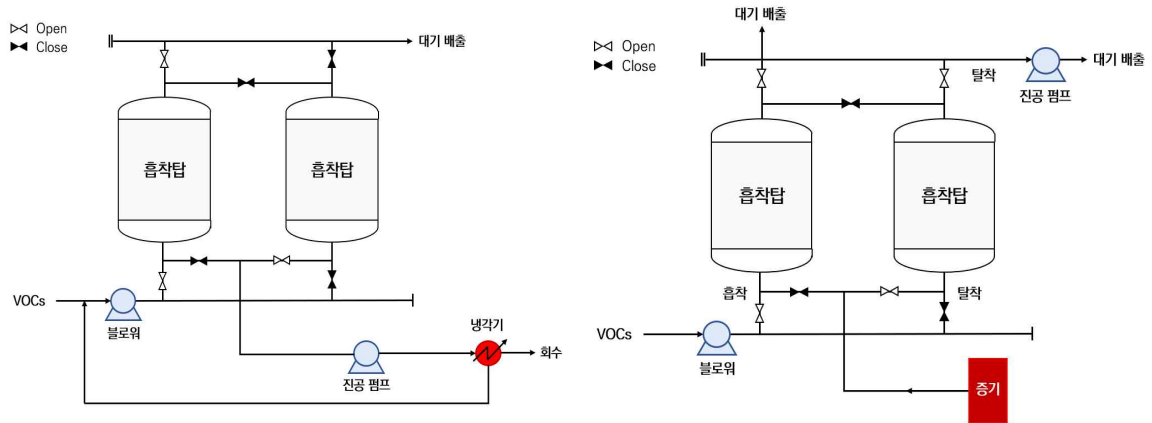


[그림 5-15] 흡착제와 피흡착물의 거리에 따른 위치에너지 변화

(출처) EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004

- **(탈착)** 포화된 흡착제 재생 방법은 온도 차이를 이용한 열탈착 방식(Temperature Swing Adsorption, 이하 TSA)과 압력탈착 방식(Pressure Swing Adsorption, 이하 PSA)이 주로 적용되고 있음.
 - **(TSA)** 고온 증기를 이용해 흡착제(예, 활성탄)에 흡착된 VOCs를 회수하는 방법으로 흡착제에 잔류하는 수분을 건조해야 하며, 고온 증기사용으로 화재 등 위험성이 있으며, 운전비용이 높고, 시간이 많이 소요되는 단점이 있음.
 - **(PSA)** 고압에서 VOCs를 흡착시키고, 압력을 낮춰 VOCs를 탈착시키는데 고압에서 운전하므로 운전비용이 높고, 공정 규모가 커지는 단점이 있음.
- **(공정 구성)** 일반적으로 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이

운전되는 동안에 다른 하나는 탈착하게 됨.



[그림 5-16] 흡착·회수공정 모식도

(출처) SEST주식회사 홈페이지 (http://www.sestco.com/kor/vru_01.php) 인용

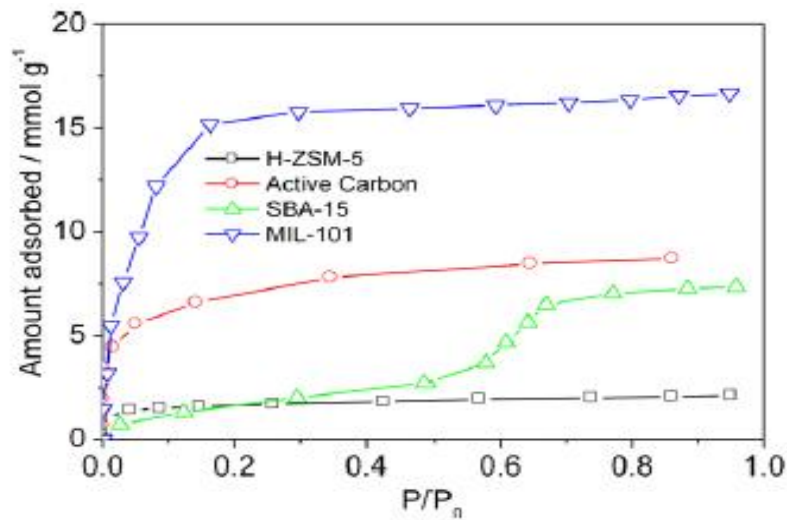
- (적용조건) 1) 디클로로메탄 단일물질 또는 디클로로메탄 혼합 VOCs, 2) 단일배출구의 점오염원, 3) 고농도 디클로로메탄 또는 VOCs 등이며 디클로로메탄과 VOCs의 회수·재이용을 위해서는 처리보다 경제성 있어야 하고, 디클로로메탄과 VOCs 가격과 배출가스 특성에 의해 결정됨.
- (배출가스 특성) 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, 디클로로메탄과 VOCs 농도, 수분량, 온도 등이며, 이는 흡착제 종류에 따라 달라지므로 ‘흡착제 종류’에서 상세히 설명하였음.
- (흡착제 종류) 디클로로메탄 등의 VOCs 흡착제 종류는 1) 활성탄, 2) 제올라이트 (Zeolite), 3) 폴리머(Polymer), 4) MOFs(Metal-organic Frameworks)를 꼽을 수 있으며, 각 흡착제의 특성은 아래에서 보는 것과 같음.

[표 5-4] 흡착제 특성 비교

항목	활성탄	제올라이트	폴리머
표면적	600~1,400 m ² /g	천연 (300~600 m ² /g) 합성 (800~900 m ² /g)	
공극 크기	micropore (공극 직경 < 2 nm), mesopore (2 nm < 공극 직경 < 50 nm), macropore (공극 직경 > 50 nm)	3~30 nm (일정한 공극 크기)	Porous polymers (1~1.6 nm)
표면특성	친수성 ¹ 과 소수성 특성을 모두 보유하고 있음	천연 제올라이트는 친수성이나, 합성 제올라이트는 친수성 또는 소수성으로 목적에 맞게 합성 제작	대부분은 소수성이나 사용 목적에 적합하도록 물성을 변형 합성 제작하는 경우도 있음.
배출가스 유량	60~3,500 m ³ /hr (단일) 병렬 사용시 용량 증가 가능 (for VRU)	60~3,500 m ³ /hr	
VOCs 유입농도	700~1,000 ppm (LEL 25% 이하) 경제성을 고려하면 10~70 VOL% (100,000~700,000 ppmv) (For VRU)	1,000~10,000 ppm (LEL 25% 이하)	
수분량 (상대습도)	50% 미만	94~96%까지 허용	
온도	55°C 이하	상온	
탈착방법	증기 열탈착 ² 진공(Vacuum) 탈착	열탈착 ⁴	열탈착 ⁵
탈착효율 ³	50% 회수효율 98% 이상	90%	50~90%
교체주기	6개월~5년(증기 열탈착) 7년 이상(진공 탈착)	5년 이상	교체주기는 폴리머에 따라 다르나 일반적으로 상당 기간 교체를 하지 않아도 되는 것으로 알려져 있음

- 1: 활성탄의 친수성 특성 때문에 물이 활성탄에 흡착된 피흡착물을 치환·탈착하는데 주요 역할 담당하며, 재생에 필요한 증기량은 목표 제거효율(또는 출구 농도)에 좌우되고, 일정한 증기가 흡수층 온도를 재생온도로 올리는 탈착에너지 공급
- 2: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 활성탄 착화 온도보다는 낮아야 함(재생 최고 온도는 120~180°C)이고, 탈착을 위한 증기 사용량은 0.25~0.35 kg H₂O/kg AC
- 3: EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004
- 4: 열에 강하기 때문에 고온 탈착도 가능
- 5: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 폴리머 용점(Melting Point)보다는 낮아야 하고, 열에 약하기 때문에 탈착 온도는 비교적 낮은 온도에서 운전

- 최근 연구⁸⁷⁾에서는 금속-유기 기반 구조(Metal-organic Frameworks; 이하 MOFs) 촉매가 디클로로메탄 흡착에 있어서 활성탄, 제올라이트보다 성능이 더 좋다고 알려져, MOFs의 적용을 검토해 볼 필요가 있으나 MOFs는 고가이므로 경제성 검토를 통해 결정할 필요가 있음.



[그림 5-17] 여러 흡착제의 디클로로메탄 흡착능 비교
(참고) MIL-101은 Al, Cr이 담지된 Terephthalate로서 MOFs 일종

○ 흡착제 비교 평가

- 활성탄은 화재 위험성이 높고, 비점이 높은 유기화합물에 적용하기 어렵고, 수분 조절이 필요하다는 단점을 갖고 있으며, 이를 극복하기 위해 제올라이트 흡착제가 개발 적용되고 있으나, 제올라이트는 고가이므로 활성탄 적용이 어려운 특정 목적에 주로 활용되고 있음.
- 한편 폴리머 흡착제는 표면특성 조절이 가능하다는 특성 때문에 개발 적용되고 있으나, 열에 취약하고 고가라는 단점을 갖고 있으나, 활성탄이 적용하기 어려운 특정 목적으로 고려해 볼 수 있음.
- 활성탄은 적용사례가 많아 기술적 안정성이 높고, 가장 저렴하나 교체 관련 번거로움이 있으며(최장 사용 기간은 7년), VOCs의 배출특성을 고려하여 제올라이트와 폴리머도 대안으로 고려·결정할 필요가 있음.

87) Khan, N. A., Hasan, Z., Jhung, S. H. (2013), Adsorptive Removal of Hazardous Materials using Metal-organic Frameworks (MOFs): A Review

□ 처리효율과 비용

흡착제	회수효율	설치비용	운전비용	비고
활성탄 ¹	80% 이상	50백만원 이상 ³	2.4백만원/톤	회수 재사용으로
제올라이트 ²	90~96%	-	61,000~163,000원/m ³	원료물질 대체로
폴리머	-	-	-	운전비용 상쇄 효과

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: Khan, F. I., Ghoshal A. Kr. (2000), Removal of Volatile Organic compounds from polluted air: A Review

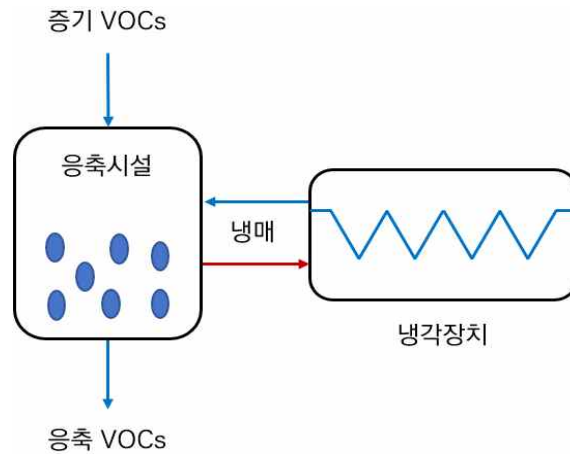
3: 유입 가스 유량과 농도에 따라 비용 차이 발생

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 디클로로메탄의 지속적 재사용으로 인한 구매 비용 절감 • 디클로로메탄의 환경 유입을 차단하여 환경 개선 효과 	<ul style="list-style-type: none"> • 고가의 설치·운영비용 • 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 디클로로메탄 재사용으로 환경 개선 효과가 있는 반면 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 관리가 용이하지 않음.

2) 응축·회수기술

- (기술 개요) 응축은 온도를 낮추어 기체상태 물질을 액체 상태로 전환하는 방법으로 냉매를 활용하여 기체상태 혼합물의 온도를 낮추어 응축 가능한 물질(VOCs 등)을 응축 불가능한 물질로부터 분리하는 기술



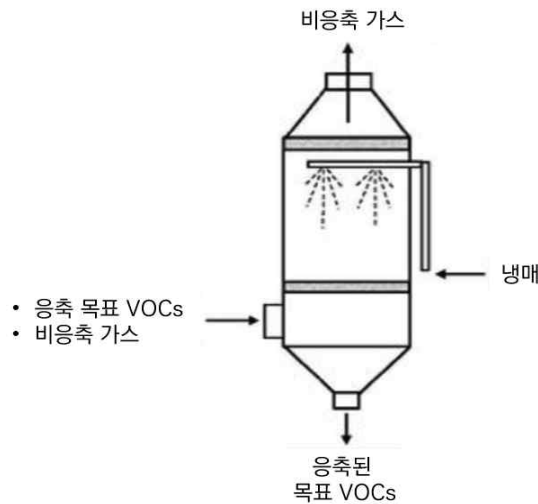
[그림 5-18] 응축·회수 공정도

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

- (원리) 기체상태 물질은 노점(Dew Point)⁸⁸⁾에서 응축이 일어나며, 일정한 압력에서 온도를 점차 낮추면 노점이 다른 물질들이 특정 온도에서 응축이 일어나면서 분리 추출됨. 또는 온도는 일정하게 유지하면서 압력을 높여줌으로써 냉각응축을 유도하여 특정 물질을 분리할 수도 있음.
- (종류) 응축은 비냉각방식(Non-refrigeration Method)과 냉매를 사용하는 냉각방식(Refrigeration)으로 구분할 수 있으며, VOCs 회수에서는 냉각방식을 주로 활용하고 있음.
- (응축기 종류) 냉각응축을 유도하는 방법으로 접촉 응축방법과 표면 응축방법으로 구분할 수 있음.

88) 기체상태 물질의 분압과 그 물질의 증기압이 동일한 온도

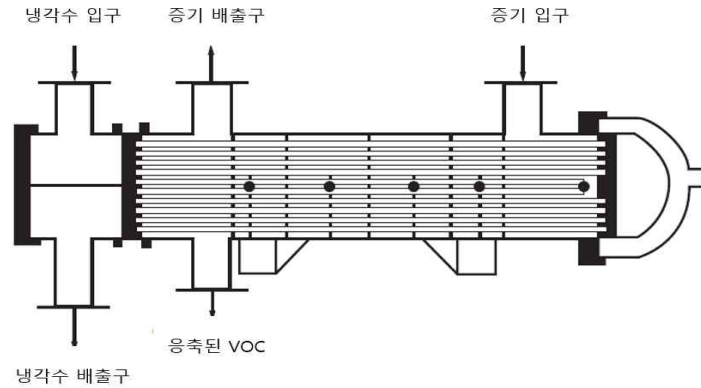
- **(접촉 응축기)** 응축 대상 기체를 냉매와 직접 접촉 혼합하면서 열적·물리적 평형이 이루어지면서 VOCs를 응축하여 냉각용 액체(배기가스 중의 물이 어는 것을 방지하기 위해 메탄올 주입)에 흡수됨. 접촉 응축방식의 냉각제는 계속 사용할 수 없고, 냉각제에 응축된 VOCs도 바로 재사용하지 못하고 분리 과정을 거쳐야 하는 단점 때문에 경제 적이지 못함.



[그림 5-19] 접촉 응축기

(출처) Jan Carlson(2016), Air Pollution Control Technology Review : Condensationhttps

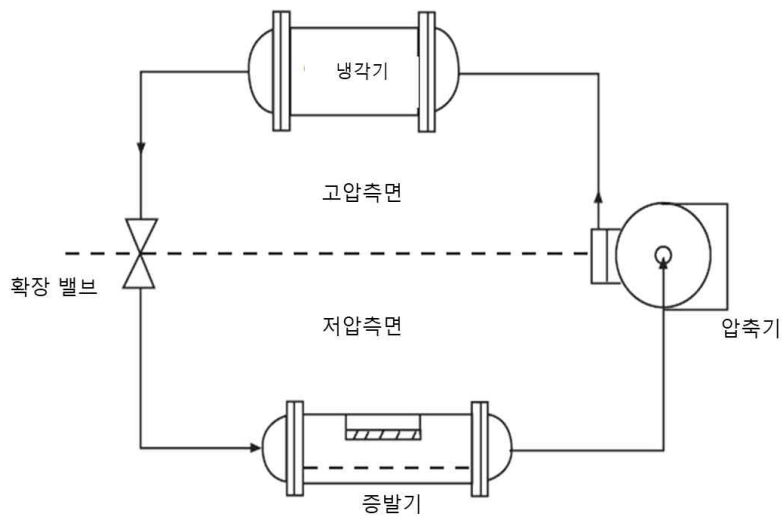
- **(표면 응축기)** 다관식 열교환기 형태로 관 내부에 냉매를 통과시키는 반면 관 외부로 VOCs를 유입시켜 냉매가 통과하는 관 표면에 VOCs를 응축시키는 방법으로 Shell-and-Tube 응축기가 이에 속하며, 냉매와 VOCs가 직접 접촉하지 않아 분리 하지 않고 VOCs를 재사용할 수 있는 장점이고, 냉각제도 지속해서 사용 가능하나, 직접 응축방법보다는 냉각효율이 낮은 단점이 있음.



[그림 5-20] 표면 응축기

(출처) EPA, Section 3: VOC Controls 2-5

- 표면 응축방법은 냉매가 증발·압축·응축·확장 등의 4단계를 거치면서 냉각이 이뤄지며, 냉매는 관을 통해 순환되면서 VOCs를 응축시킴.



[그림 5-21] 냉매 순환단계 모식도

(출처) EPA, Section 3 VOC Controls 2-6

- (냉매 종류) 냉매는 주로 물, 냉수, 염수(Brine), 수소불화탄소(HFC), 암모니아, 저온 유체 등이 있으며, 이들 냉매의 적용 가능한 물질의 응축온도는 냉수는 7°C, 염수(Brine)는 -35°C, 염화불화탄소는 -68°C이며, 질소 또는 이산화탄소와 같은 저온 유체는 -195°C까지 가능함.

냉매	적용 가능 응축온도(°C)	냉각온도(°C)
물	15.5 ~ 26.7	(T _{con} - 9) 응축온도보다 9°C 낮게 설정
냉수	7.2 < T _{con} < 15.2	
염수(Brine, 염화칼슘)	-34.4 < T _{con} < 7.2	
HFC-134a	-67.8 < T _{con} < -34.4	

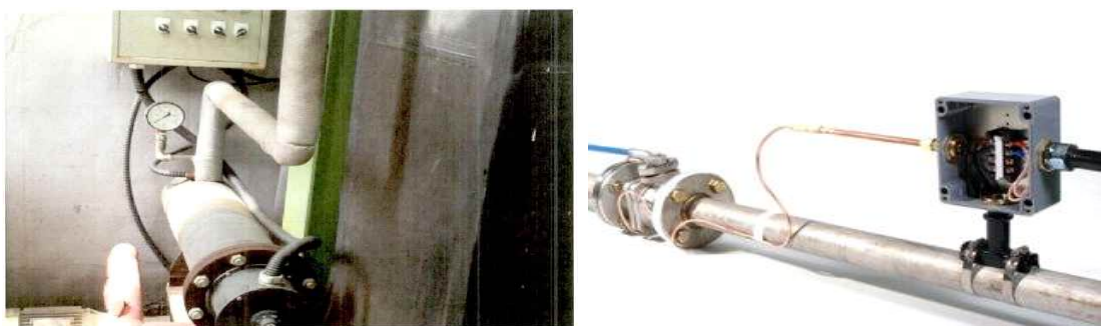
T_{con}: 응축온도(노점, Dew Point)

□ **(적용조건)** 응축·회수 적용을 위해서는 비등점이 38°C(100°F) 이상인 VOCs가 적합하며, 유입농도는 5,000ppm 이상이면 유리하나, 비등점이 낮은 물질은 극저온 또는 압력을 가하는 추가적인 노력이 필요함. VOCs는 비등점, 빙점 등이 유사한 물질이 많아 혼합 VOCs에서 특정 물질의 분리·회수가 쉽지 않아 응축·회수는 단일 VOCs 회수에 적합함.

□ **(적용사례)** 원유 저장시설에 기화된 VOCs를 진공펌프로 추출하고, 스크리버로 응축하여 VOCs를 회수하는 기술로서 회수율은 95%⁸⁹⁾ 정도로 알려졌다.

□ **유의사항**

○ **(결빙 문제)** 응축 대상 VOCs 중에 수분이 함유되어 있거나, 빙점이 높은 VOCs는 응축 과정에서 얼어붙어 관을 폐쇄하므로 운전 문제를 초래하고 생산공정도 중단해야 하므로 수분을 사전에 제거하거나 가열선을 설치하여 간헐적으로 얼음을 녹여주어야 함.



[그림 5-22] 가열선을 설치하여 얼음을 녹이는 배관

(출처) 안산녹색환경지원센터(2011), 응축 기술을 이용한 VOCs 제거 및 회수 설비에 관한 연구
(출처) Heatizon Systems, <https://www.heatizon.com/products/heatizon-brands/guttermelt>

89) <http://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/units-and-plants-practices/VOCs-recovery-systems/#reference-10>

○ (스케일 문제) 표면 응축방법의 경우 고비점의 유기화합물(타르 등)이 응축기 표면에 응축되면서 스케일을 형성하여 성능 저하 초래

- 여과장치 등의 전처리를 설치하여 스케일 원인 물질 제거

□ (디클로로메탄 적용) 디클로로메탄의 응축회수기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 응축회수기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

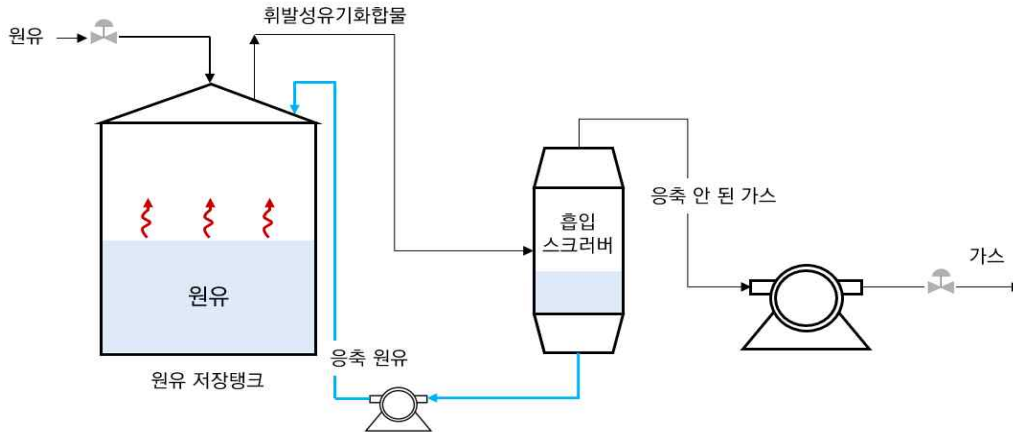
회수율(%)*	설치비용	운영비용	비고
90	100백만원 이상	30백만원 이상	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 액체질소 적용한 경우

3) 흡수·회수기술

□ (기술 개요) 단일 VOCs 또는 혼합 VOCs가 포함된 배출가스를 흡수제에 물리흡수시킨 다음 방산(Stripping) 공정을 통해 VOCs를 분리한 다음 응축 과정을 거쳐 회수하는 기술



[그림 5-23] 흡수·회수 시설의 공정도

(출처) ipieca(2013), VOC recovery Systems 인용

○ (소극적 회수기술, Passive Recovery Technology) 저장시설 등으로부터 추출된 VOCs에 압력을 가해 원유에 흡수⁹⁰⁾시키거나, 다양한 유기용제(예, Kerosene)를 흡수제로 사용하여 응축 흡수⁹¹⁾(원유 저장시설의 경우는 원유 자체를 흡수제로 사용)한 다음 저장시설에 재투입하고, 회수하지 못한 VOCs는 고온 산화 처리 또는 다른 용도로 활용

90) 압력 흡수의 회수율은 80%

91) 응축 흡수의 회수율은 90%



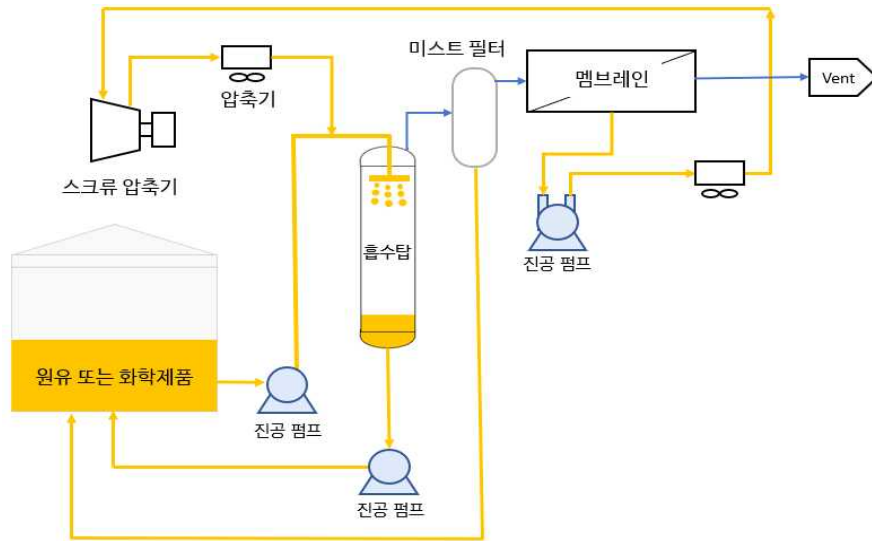
[그림 5-24] 선박에서 원유 하역 과정에서의 VOCs 흡수·회수 및 고온 산화 처리

(출처) JX(2013), Technologies for Volatile Organic Compounds

- (운전조건) 흡수 반응기 운전조건은 상황에 따라 달라지며(현장 적용사례⁹²⁾ : 온도는 3~7℃, 압력은 0.3~0.5 MPa), 흡수제로는 원유 또는 석유화학제품 등 저장시설의 물질과 같은 물질을 사용하여 용해·회수
- (적극적 회수기술, Active Recovery Technology) 저장시설로부터 VOCs를 포집한 다음 흡수공정과 타 회수공정을 연계하여 VOCs를 회수하는 기술(흡수공정만으로는 회수효율이 떨어지므로 연계 공정 적용)
- (흡수/막분리 연계방식) 흡수 단독공정에 막분리를 후속으로 연결한 방식으로 흡수 단독공정의 경우 VOCs 회수율이 70% 수준에 불과하였으나 막분리 공정을 후속으로 연결하여 회수율이 95%로 높아졌음⁹³⁾.

92) JX Nippon Oil and Energy에서 일본 가고시마의 키이레 터미널(Kiire Terminal)에 설치 운전(처리규모: 20,000 Sm³/hr)

93) CARBOVAC, Vapor Recovery Solutions

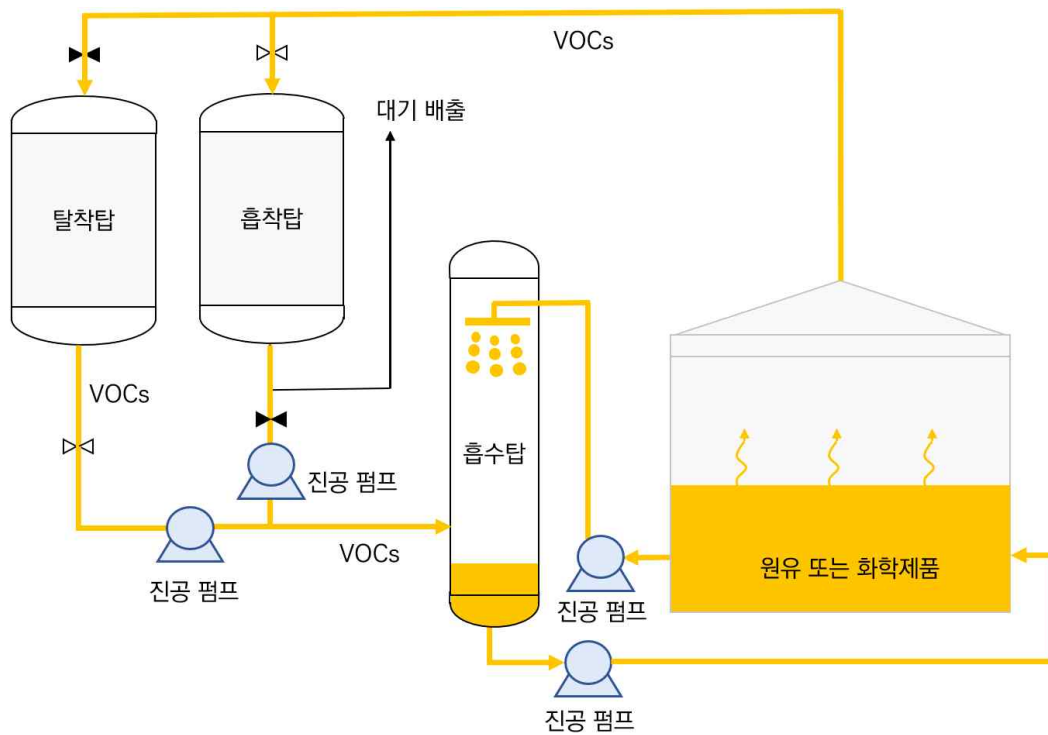


[그림 5-25] 흡수/막분리 연계 회수공정

(출처) BORSIG Membrane Technology GmbH, BMEMBRANE TECHNOLOGY FOR PROCESSES AND ENVIRONMENT, 8p 인용

- **(흡수/흡착 연계방식)** 흡수공정 앞에 활성탄을 활용한 흡·탈착공정을 설치하여 저장시설 또는 운반시설로부터 휘발·배출된 VOCs를 흡착시킨 다음 감압하여 VOCs를 탈착시킴. 탈착된 VOCs를 흡수탑에 주입하여 저장시설의 원유 또는 석유화학제품에 용해·회수하는 방식임. VOCs 회수율이 흡수 단독공정의 70% 안팎에서 90~99%로 높아졌음.
- **(흡착)** 활성탄 등의 흡착시설을 이용하여 저장시설 등으로부터 배출되는 VOCs를 흡착시켜 불활성기체⁹⁴⁾와 분리
- **(탈착)** 일반적으로 흡착탑에 진공펌프를 걸어 VOCs 탈착

94) 운반기체로서 농도 조절과 화재 위험도를 낮추기 위한 목적



[그림 5-26] 흡수/흡착 연계 회수공정
 (출처) logo alma Carbovac, Vapour Recovery Units, 4p 인용

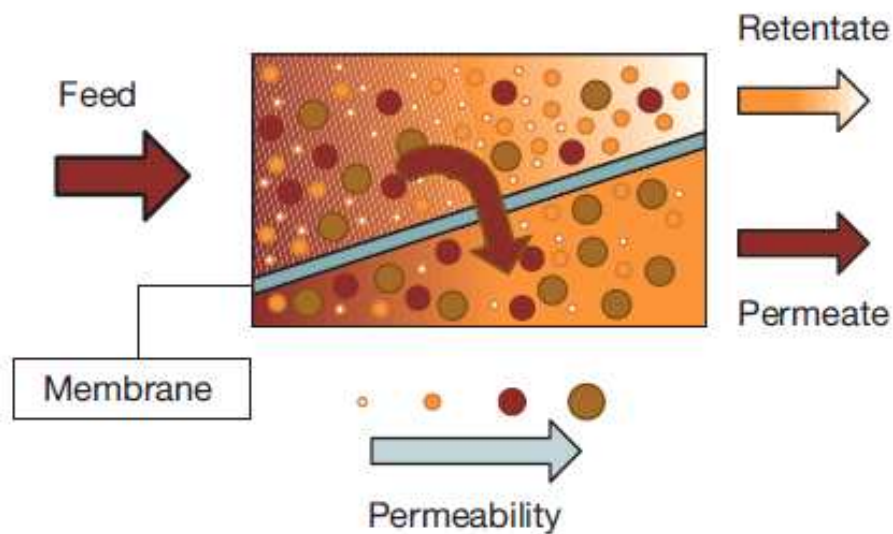
- (유의사항) 증기압이 낮은 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 상대적으로 낮은 압력손실 • 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 • 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 • 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 • 상대적으로 낮은 설치비용 • 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 폐수처리 문제 • 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 디클로로메탄 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 흡수·회수기술은 디클로로메탄 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

4) 막분리·회수기술

- (기술 개요) 각각 가스의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술로서 가스 분리는 막의 양단에 가스 분압 차이(농도 차이)를 이용함.
- (분리막) 혼합 성분으로부터 선택적으로 특정 성분을 분리할 수 있는 물리적 경계층으로 막 양단의 가스 분압 차이(농도 차이)가 물질 전달력임.
- (분리막 성능) 혼합 성분 중에서 분리 목표 물질의 선택성과 막 양단의 압력 차에 의해 분리막 성능이 결정되며, 선택성은 10 이상, 압력 차 성능지표인 압력비 (공급측 총압에 대한 투과측 총압 비)는 일반적으로 30~50 정도이어야 기술적으로 실현가능함.



[그림 5-27] 막분리 프로세스

(출처) ITM-CNR, Membrane per la separazione di CO₂ erattori a membrana per il suo uso
(<https://www.enea.it/it/seguici/events/co2/IULIANELLI.pdf>) 인용

□ 적용조건

- 디클로로메탄을 막으로 분리하기 위해서는 혼합가스 종류, 디클로로메탄 농도, 유량, 배출가스 온도 등 다양한 정보가 필요하며, 이는 대상 업종 및 공정에 따라 다른 수요 맞춤형 막이 개발 적용되어야 함. 그러므로 디클로로메탄 분리를 위한 적용조건을 일반화하기는 어려운 상황임.

□ 적용사례

- (필요성) 미국 에너지부(DOE)의 관할 지역에서 염소계 VOCs로 오염된 토양으로부터 배출되는 염소계 VOCs 함유 가스의 적정 처리 필요성 대두
 - (적용 시기 및 지점) 1999년 3월부터 2000년 2월까지 미국 캘리포니아 주의 Sacramento 시 외곽에 있는 McClellan Air Force Base(AFB)

○ 조건 및 설계목표

항목	내용
설계 유량	58.9 Sm ³ /hr
배출 VOCs 농도	23 ~ 101 ppm
처리 목표 VOCs 농도	10 ppm

- (적용 결과) Membrane Technologies and Research, Inc.(MTR)는 막(Permselective Membrane)을 사용하여 VOCs를 선택적으로 공기와 분리하여(VOCs는 막을 통과 시키고, 공기는 배제) VOCs를 액상으로 회수하였고, 설계 목표치도 달성하였음.
- (적용 문제점)
 - (CO₂ 문제점) 배출가스 중에 CO₂ 농도는 1~3%이었으며, CO₂에 의해 막분리 성능이 2~4배 정도 감소하였음.
 - (오일과 물의 문제점) 배출가스 중의 오일과 물은 막의 막힘 현상(Fouling)을 초래하여 막분리 성능을 저하한다고 밝혀졌으며, 이는 효과적 전처리로 해결할 수 있다고 결론 내렸음.
- (비용 분석) VOCs 농도 5,000 ppm의 배출가스 300 Sm³/hr를 VOCs 농도 10 ppm 이하로 처리하기 위한 시설 설치비용은 780백만원⁹⁵⁾ 정도 필요하고, 운영비용은 800백만원⁹⁵⁾ 정도 필요하다고 보고하였음.

95) 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정

VOCs 유입농도	연간 운영비용*
100 ppm	499.2백만원
1,000 ppm	585.6백만원
5,000 ppm	799.2백만원
10,000 ppm	856.8백만원

* 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정
(출처) US DOE(2001), Membrane System for the Recovery of Volatile Organic compounds from Remediation Off-Gases, DOE/EM-0614

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 분리 과정에서 상변화가 없으므로 에너지 소모가 적음 • 장치 구성이 단순하고 기계 장치가 최소화되어서 유지관리가 쉬움 • 특정 물질 선택성이 탁월함 • 다양한 목적에 적용 가능한 막 제조가 가능함(원료가 다양하여 목적에 따라 다양한 막 제조 가능) • 환경에 무해한 또는 영향이 적은 원료 또는 재질을 사용하므로 환경친화적 공정 	<ul style="list-style-type: none"> • 막의 특정 화학물질에 대한 취약성(특정 화학물질과의 접촉을 피해야 하므로 공정 적용 한계) • 중합체이므로 온도에 영향을 받기 때문에 특정 화학반응 공정(온도가 높은 공정)에 적용하기 어려움(적용의 한계) • 규모 확장의 한계(일반적으로 단위 모듈을 반복적으로 연결하여 규모 확장하는 방식으로 대용량 설치의 한계) • 막 오염과 막힘 현상으로 교체 필요성(높은 운영비용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 디클로로메탄 등의 VOCs에 대한 선택성이 탁월하고, 석유화학산업에서 이미 적용한 사례가 존재하여 디클로로메탄을 분리·회수 재사용은 기술적으로 가능함 • 막분리 시설의 설치 및 운영비가 높아 타 기술과 효율 및 경제성을 비교 평가하여 막분리시설의 적용 여부를 결정할 필요가 있음

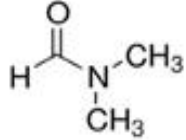
6

N,N-디메틸포름아미드

6.1

개요

- (정의 및 특성) N,N-디메틸포름아미드는 C_3H_7NO 화학식을 갖는 유기화합물로, 주요 내용은 아래와 같음.

CAS No.	발암물질 분류	위해도 순위	화학구조
68-12-2	1B군 발암물질	<ul style="list-style-type: none"> 1B군 발암물질 중에서는 3위 전체 발암물질 중에서는 7위 	

- 물리·화학적 특성⁹⁶⁾

분자량 (g/mol)	휘발성 증기압	친수성 용해도	끓는점	녹는점 /어는점	LEL ⁹⁷⁾ (% vol)	UEL ⁹⁸⁾ (% vol)	n-옥탄올 /물분배계수
73.1	3.87mmHg (25°C)	1000mg/ml (25°C)	153°C	-61°C	15.2	2.2	-0.87

- 용도

- 인공가죽피혁 또는 우레탄계 합성피혁 및 스판덱스섬유로 사용
- 분석화학용(용매, 포르밀화시약)과 유기합성용매(염료 및 중간체 합성용)로 사용
- 농약, 의약, 각종 고분자 용매(아크릴로니트릴형중합체)로 사용
- 가스 흡수제(부타디엔, 에틸렌, 아세틸렌, 프로필렌, 아황산, 황화수소 등)로 사용
- 색소용제, 접착제, 합성섬유방사용

96) 화학물질 정보처리 시스템 (<https://kreachportal.me.go.kr/potweb/main.do>)

97) 최저폭발한계(Lower Explosive Limit)로서 산소 존재 하에서 점화원에 접촉하였을 때 불이 붙어 불꽃이 확산 되는 최저 가스농도

98) 최고폭발한계(Upper Explosive Limit)로서 하동명(2009), N,N-디메틸포름아미드의 위험성 평가를 위한 연소 특성치 고찰, 한국안전학회지, 24(5), 28-33

- **(배출업종)** N,N 디메틸포름아미드의 주로 배출되는 업종은 화학물질 및 화학제품 제조업 (25.0%), 고무 및 플라스틱제품 제조업(23.5%), 창고 및 운송관련 서비스업(15.9%) 순임.
- **(배출공정)** N,N 디메틸포름아미드의 많이 배출되는 공정은 1) 대기오염방지시설 (47.3%), 2) 혼합공정 (16.6%), 3)코팅공정(15.5%) 순임.
- **(배출형태)** N,N 디메틸포름아미드는 VOCs이므로 대기로 배출될 개연성이 높고, [표 6-1]에서 보는 것처럼 국내 배출원에서는 모두 대기로 점배출(44.3%) 또는 비산배출 (55.7%)되고 있음.
- **(시사점)** N,N 디메틸포름아미드는 비산배출 관련 저감기술 및 방법 적용이 필요하며, 중점 관리 분야는 다음과 같음.
 - 대기오염방지시설로서 처리효율 제고
 - 혼합공정의 탈루배출 방지
 - 코팅공정 탈루배출 방지

99) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

[표 6-1] N,N 디메틸포름아미드 배출특성

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
가죽, 가방 및 신발 제조업	혼합공정	대기	비산배출 100	37,600.2	3.087	0.674
	코팅공정		점배출 19 비산배출 81	8,855.0	0.727	0.159
	탈지·세정·표백공정		점배출 39 비산배출 61	3,220.0	0.264	0.058
	대기오염방지시설		점배출 100	38,905.0	3.194	0.698
고무제품 및 플라스틱제품 제조업	저장시설	대기 수계	비산배출 100	430.9	0.035	0.001
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	9,036.6	0.742	0.029
	혼합공정		비산배출 100	144,700.9	11.880	0.467
	화학반응공정		비산배출 100	49.6	0.004	0.000
	코팅공정		비산배출 100	30,527.9	2.506	0.099
	열처리공정		비산배출 100	15.0	0.001	0.000
	분리·정제공정		비산배출 100	2,159.0	0.177	0.007
	조립·포장·검사공정		비산배출 100	44.9	0.004	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	213,822.7	17.555	0.690
	폐수처리시설		수계배출 100	25,400.0	2.085	0.082

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
금속가공제품 제조업;기계 및 가구 제외	대기오염방지시설	대기	점배출 100	95.2	0.008	0.480
기타 제품 제조업	코팅공정	대기	비산배출 100	410.0	0.034	1.000
비금속 광물제품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	626.3	0.051	0.486
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	1,153.5	0.095	0.895
	혼합공정		비산배출 100	2.8	0.000	0.002
	코팅공정		비산배출 100	936.7	0.077	0.727
	대기오염방지시설		점배출 100	2,208.7	0.181	1.713
섬유제품 제조업; 의복제외	저장시설	대기	비산배출 100	11,624.4	0.954	0.080
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	539.6	0.044	0.004
	혼합공정		점배출 0.00002 비산배출 9.9999	59,053.6	4.848	0.407
	코팅공정		비산배출 100	76,656.2	6.294	0.528
의료용 물질 및 의약품 제조업	열처리공정	대기	점배출 0.03 비산배출 99.97	1,121.4	0.092	0.008
	기계적가공공정		점배출 100	210.1	0.017	0.001

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	대기오염방지시설		점배출 100	181,765.4	14.923	1.252
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	98.3	0.008	0.014
	혼합공정		비산배출 100	537.5	0.044	0.075
	화학반응공정		점배출 87 비산배출 13	3,967.8	0.326	0.557
	분리·정제공정		비산배출 100	0.2	0.000	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	912.0	0.075	0.128
	폐수처리시설		비산배출 100	176.0	0.014	0.025
	비정상조업		비산배출 100	1.9	0.000	0.000
의복, 의복액세서리 및 모피제품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	2,750.4	0.226	0.132
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	3,429.6	0.282	0.164
	혼합공정		비산배출 100	31.2	0.003	0.001
	코팅공정		비산배출 100	16,987.4	1.395	0.814
	열처리공정		비산배출 100	1,400.3	0.115	0.067
	기타		비산배출 100	20.2	0.002	0.001

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	대기오염방지시설		점배출 100	64,517.8	5.297	3.091
	폐기물처리시설		비산배출 100	2.5	0.000	0.000
전기장비 제조업	이송·운반·분배·계량시설	대기	비산배출 100	0.1	0.000	0.001
	코팅공정		비산배출 100	29.0	0.002	0.148
	대기오염방지시설		점배출 100	3.2	0.000	0.016
전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	1.5	0.000	0.000
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	1,438.8	0.118	0.120
	혼합공정		비산배출 100	36.9	0.003	0.003
	코팅공정		비산배출 100	3,456.6	0.284	0.289
	대기오염방지시설		점배출 100	3,513.6	0.288	0.294
창고 및 운송관련 서비스업	이송·운반·분배·계량시설	대기	비산배출 100	6.0	0.000	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	32.1	0.003	0.000
펄프, 종이 및 종이제품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	434.9	0.036	0.002
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	23,774.9	1.952	0.115

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	혼합공정		비산배출 100	9.7	0.001	0.000
	코팅공정		비산배출 100	113,514.3	9.320	0.551
	대기오염방지시설		점배출 100	81,309.1	6.676	0.395
	폐수처리시설		비산배출 100	17,194.7	1.412	0.083
폐기물 수집운반, 처리 및 원료재생업	저장시설	대기	비산배출 100	25.4	0.002	0.001
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	126.8	0.010	0.007
	분리·정제공정		점배출 100	26.0	0.002	0.001
	대기오염방지시설		점배출 100	732.3	0.060	0.040
	폐기물처리시설		점배출 100	1,013.2	0.083	0.055
화학물질 및 화학제품 제조업;의약품 제외	저장시설	대기	비산배출 100	635.9	0.052	0.002
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	4,916.4	0.404	0.015
	혼합공정		비산배출 100	1,548.5	0.127	0.005
	화학반응공정		점배출 4 비산배출 96	1,332.6	0.109	0.004
	코팅공정		비산배출 100	146.9	0.012	0.000

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
	기계적가공공정		비산배출 100	0.2	0.000	0.000
	조립·포장·검사공정		비산배출 100	3,144.7	0.258	0.010
	대기오염방지시설		점배출 100	13,580.1	1.115	0.041
	누적 합계	-	-	1,190,760.1	97.761	-

(출처) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

6.3

대체물질

6.3.1

용매 대체

적용업종	N,N-디메틸포름아미드를 사용하는 코팅공정
대체물질	수성 Polyurethane(PU), 친환경 바이오 PU
적용사례	일반적인 PU 대신 수성PU, 친환경 바이오 PU와 같은 대체물질의 사용을 권장할 수 있지만 재료의 원가 상승에 대한 부담. (출처) 박용기(2017), 폴리우레탄 기반 소비자 제품의 디메틸포름아미드 잔류량과 이의 저감화를 위한 조사 및 연구

적용업종	N,N-디메틸포름아미드를 사용하는 전자산업
대체물질	Propylene glycol
적용사례	Propylene glycol은 전자 제품 제도, 폴리우레탄 코팅 및 일반 용제 적용 사용 가능한 N,N-디메틸포름아미드의 대체물질로 사용 (출처) (2013),Massachusetts Chemical Fact Sheet https://www.turi.org/TURI_Publications/TURI_Chemical_Fact_Sheets/Dimethylformamide_Fact_Sheet

6.3.2

대체공정

적용업종 및	N,N-디메틸포름아미드를 사용하는 수세공정
대체물질	수성 Polyurethane(PU), 친환경 바이오 PU
적용사례	응고, 수세, 건조로 구성된 공정을 보면 사실상 제품으로부터의 Dimethylformamide(DMF) 분리와 제거는 대부분 응고 과정에서 발생하는데 이 과정을 통해 PU는 고화가 진행되면서 소비자가 사용하게 되는 제품의 형태를 갖추게 되며, 수세 및 건조 단계에서는 고화가 진행된 PU제품의 표면 등에 잔류하고 있는 미량의 DMF를 추가적으로 제거하게 됨. (출처) 박민호(2018), 스쿼시 안전실태조사

□ N,N-디메틸포름아미드의 회수 및 처리기술은 처리방법에 따라 장·단점이 있어 아래 사항을 자세히 검토하여 선택해야 함.

- 배출가스의 조성 및 농도
- 함유 유기화합물질의 특성(폭발한계, 응축성, 용해성, 흡착성 등)
- 배출가스 내 수분 및 먼지 함유량
- 배출량(최대, 평균, 최소 유량 등), 온도, 압력, 습도
- 오염배출원 유형(점, 면, 선오염원, 공정, 불특정 등)
- 연간 운영시간(가동시간, 가동률, 부하율 등)
- 장치 위치(실내, 실외, 지표 고도, 지붕, 여유 공간 등)
- 보조 연료 또는 에너지 비율
- 각종 유틸리티(수도, 전기, 스팀, 배관, 관거, 구조물) 이용 가능 여부
- 기존의 대기오염방지시설 설치·운영 사항(종류, 규모, 사용 기간 등)
- 경제성(초기투자비 및 연간 운영비)

[표 6-2] 휘발성 유기화합물 방지시설 설계 시 고려사항

기술	안정성	오염물질 특성	오염원 특성	제어특성
흡착	흡착 시 폭발물질의 농축이 일어나며 이는 매우 유해함.	다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있음.	높은 포집 효율을 가지고 있으며, 여러 유형 흡착제(활성탄, 제올라이트, 폴리머 등)를 이용, 낮은 비용으로 고효율 달성이 가능함.
흡수	폭발물질을 중성화시킬 수 있는 흡수액을 폭발물질에 따라 선택해야 함.	화합물에 적합한 흡수제를 사용해야 하고, 화학물질 조성변화에 대응하기 어려움.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 흡착제 배출수 처리장치가 필요함.	포집 효율이 높으나 생성 폐수에 폭발성 물질이 포함될 수 있으므로 사전에 적정 처리방법 수립이 필요함.
응축	니트로글리세린과 같은 폭발성 화합물에는 적용할 수 없음.	제습 과정이 필요하며, 끓는점이 낮은 화합물은 처리하기 어려움.	추가적인 응축장치가 필요함.	특정 화합물에 대해서는 포집 효율이 높으나, 초기 비용이 높음.
생물여과	미생물에 의해 포집된 폭발성 화합물질을 쉽게 처리할 수 있음.	처리속도가 낮아 처리 규모의 한계가 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물 종류에 따라 높은 처리효율을 나타냄.
열소각	니트로글리세린과 같은 많은 폭발성 화합물은 급속히 가열될 때 매우 불안정해짐.	여러 다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 가지고 있음. 다양한 유형의 소각로(재생식 열소각 등)를 사용, 비용을 절감시키고 전체 효율을 증가시킬 수 있음.
촉매소각	반응시간과 유속에 따라 촉매 층에서 폭발성 화합물 농축이 일어나는 위험한 상황이 일어날 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리하며 촉매 피독으로 효율이 낮아짐.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물질 유형에 따라 높은 파괴효율을 나타냄.
광촉매산화	저온에서 폭발성 화합물 처리가 가능하며, 체류 시간이 짧고 저온에서 운전되므로 폭발 위험성을 줄일 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리함.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 나타내며, 전체 비용이 상대적으로 적은 편임.

(출처) 환경부(2000), 「휘발성유기화합물 방지시설 설계지침」 자료

□ 2016년의 화학물질 배출량 조사¹⁰⁰⁾ 결과에 따르면 N,N-디메틸포름아미드의 주요 배출공정은 대기오염방지시설, 혼합공정, 코팅공정 순으로 배출비중은 각각 18.7, 12.0, 2.5% 순임.

산업	공정	배출비중(%)
대기오염방지시설	고무 및 플라스틱제품 제조업	17.6
	화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외)	1.1
	창고 및 운송관련 서비스업	0.003
	소계	18.7
혼합공정	고무 및 플라스틱제품 제조업	11.9
	화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외)	0.1
	소계	12.0
코팅공정	고무 및 플라스틱제품 제조업	2.5
	화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외)	0.012
	소계	2.5

(출처) 화학물질안전원(2016)의 “2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)” 자료 근거

100) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

6.4.1

대기오염방지시설

6.4.1.1. 공정관리

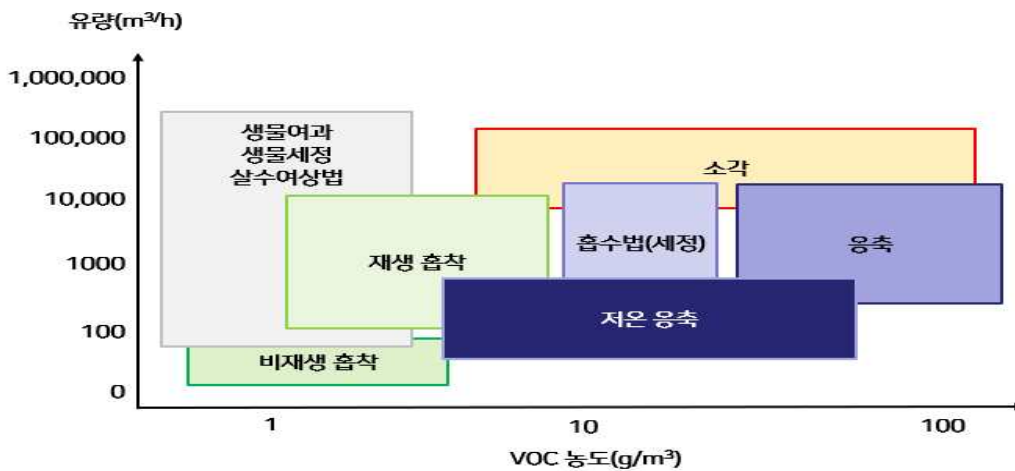
대기오염방지시설	적정관리 및 유지보수 방법
연소에 의한 제거시설	<ul style="list-style-type: none"> 배출가스 처리온도를 적정 관리하여 불완전연소에 의한 배출량 최소화(축열식 연소산화장치; Regenerative Thermal Oxidizer; RTO) 시설의 경우 750~800℃ 유지) → 저농도 가스에 적용/VCU(Vapor combustion Unit) → 고농도 가스에 적용(파괴효율:98% 이상)/CEB(Certified Ultra-Low Emissions Burner) (파괴효율 : 99.99%)
촉매 산화에 의한 제거시설	<ul style="list-style-type: none"> 촉매 산화에 의한 화학물질 제거시설의 경우 흡착시설과 마찬가지로 시간이 지날수록 촉매 산화 효율이 떨어지므로 공정 운전조건에 따라 교체주기를 결정하고, 정기적으로 성능을 파악하여 적정 수준 처리효율 유지

6.4.1.2. 처리기술

□ 화학물질을 처리하는 방법은 아래 표에서 보는 것처럼 크게 연소기술, 흡착기술, 흡수기술, 생물학적 처리기술로 구분할 수 있음.

대분류	소분류
연소기술	고온산화법(열소각법); TO: Thermal Oxidation
	촉매산화(촉매연소)법; CO: Catalytic Oxidation
	축열식 열소각기술; RTO: Regenerative TO
	축열식 촉매산화기술; RCO: Regenerative Catalytic Oxidation
	무화염 열산화법; FTO: Flameless Thermal Oxidation
	흡탈착 촉매산화법; CCO: Concentration Catalytic Oxidation
	흡착·처리기술
	흡수·처리기술
	생물학적 처리기술

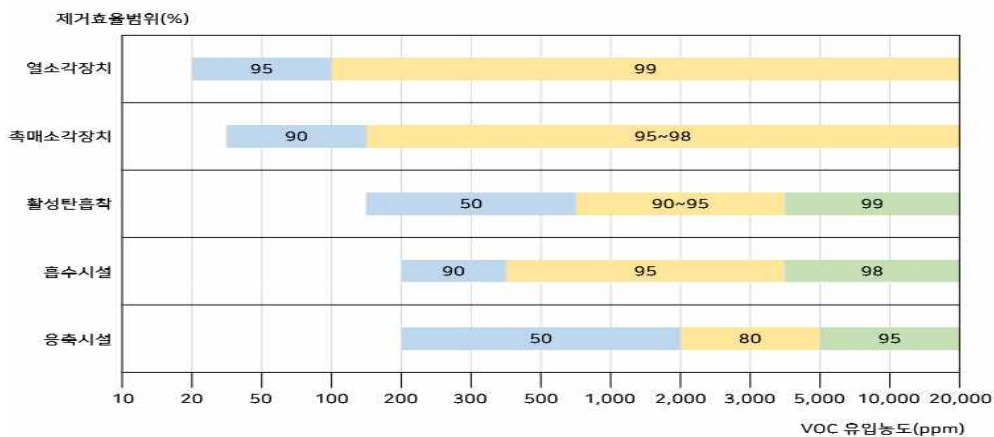
□ [그림 6-1]은 VOCs 유입 유량과 농도에 대한 처리기술의 적용조건을 개략적으로 도시하고 있음. 생물학적 방법은 적용 유량의 범위는 넓지만, 적용 가능한 농도는 상대적으로 협소함을 알 수 있음. 반면에 소각은 적용 농도 범위는 넓지만, 적용 가능한 유량 범위는 넓지 않음을 알 수 있음.



[그림 6-1] VOCs 처리기술별 VOCs 농도와 유입 유량의 적용 범위

(출처) Joseph S. Devinny, Marc A. Deshusses, Todd S. Webster,
Biofiltration for Air pollution control

□ [그림 6-2]는 VOCs 처리기술별로 VOCs 유입농도에 대한 처리효율을 도시하고 있음. 열소각장치와 촉매소각장치는 상대적으로 넓은 유입농도 범위에서 95% 이상의 효율을 보인 반면 활성탄과 응축시설은 상대적으로 높은 농도인 500ppm 이상에서 95%의 성능을 보여주고 있음.



[그림 6-2] VOCs 처리기술의 VOCs 유입농도 대비 처리효율

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

□ [표 6-3]은 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술 선택 기준을 제시하고 있어, 방지기술 선택 지침으로 활용할 수 있음.

[표 6-3] 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술의 선택 기준

대상물질	응축	흡착	열소각	촉매연소	촉열식 열소각	무화염 열소각
저유량 저농도	●	●	●	●	○	●
고유량 저농도	●	●	●	●	●	●
저유량 고농도	●	○	●	○	○	●
고유량 고농도	●	○	●	○	○	●
비응축 탄화수소 가스	X	○	●	●	●	●
응축 탄화수소 가스	●	●	●	●	●	●
비응축 Cl/S 포함가스	X	○	●	○	●	●
응축 Cl/S 포함가스	●	●	●	○	●	●
연속 운전	●	●	●	●	●	●
회분식 운전	●	●	○	○	○	●

●: 매우 좋음, ●: 좋음, ●: 보통, ○: 나쁨, X: 적용 불가

(출처) 양고수, '열처리 기술을 이용한 VOCs/악취 처리기술 및 관리현황' 자료 수정 인용

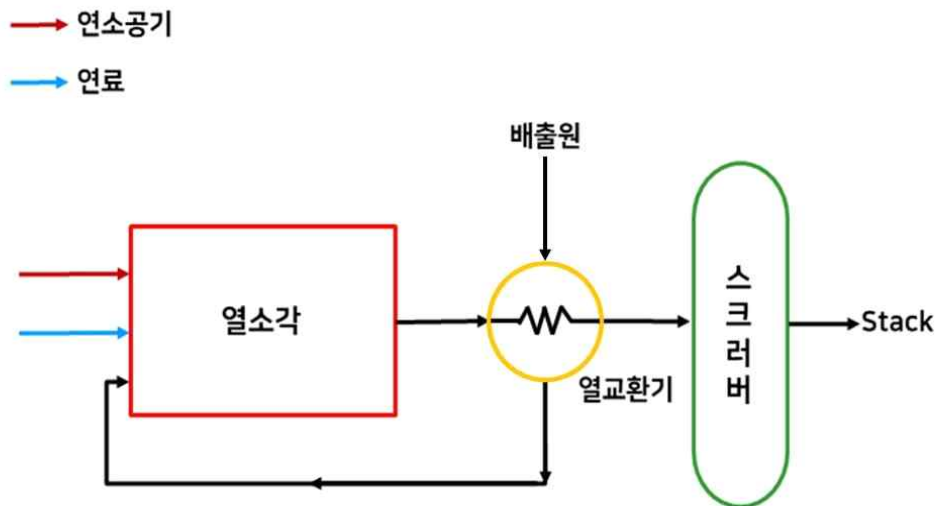
□ [그림 6-1], [그림 6-2], [표 6-3]에서 보는 것처럼 대상물질의 유입농도와 유량 정보를 활용하여 기술적으로 적합한 대상물질의 처리기술을 일차적으로 선정할 수 있음. 다음으로는 저감목표, 경제성, 현장 조건(예, 설치부지 등), 혼합물 종류, 온도와 압력 등을 종합적으로 고려하여 처리기술을 최종적으로 선정해야 함.

1) 연소기술

가) 고온산화(열소각)기술

□ (기술 개요) N,N-디메틸포름아미드 함유 배출가스와 예열 공기를 잘 혼합한 후 고온에서 연소시켜 VOCs를 이산화탄소와 물로 전환

○ 고온산화법의 N,N-디메틸포름아미드 처리효율은 소각온도, 체류시간, N,N-디메틸포름아미드 유입농도, N,N-디메틸포름아미드 함유 배출가스의 균질성 등에 의존함.



[그림 6-3] 고온산화(열소각)법 공정 예시

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

□ 적용조건

- (소각온도 및 체류시간) VOCs 처리를 위한 소각온도는 일반적으로 700~800°C이며¹⁰¹⁾, 체류시간 1초에서 99.99% 처리효율¹⁰²⁾을 보인다고 알려지고 있음. 그러나 N,N-디메틸포름아미드 이외의 물질이 포함되어 있는 경우는 소각온도와 체류시간이 달라질 수 있음.
- (산소농도) N,N-디메틸포름아미드의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전 연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL를 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.

101) KONETIC(2015), 도장공정의 VOCs 저감기술

102) 환경부(2000), VOCs 방지시설 설계지침

□ **(유의사항)** 할로젠과 황을 포함한 화학물질은 연소과정에서 HCl, SO₂ 등의 강산 가스를 생산하여 장치 부식을 초래할 수 있어 가급적으로 처리하지 않는 것이 바람직함. N,N-디메틸포름아미드를 처리할 때는 문제가 없으나 할로젠과 황을 포함한 화학물질이 배출가스 중에 함께 출현하는 경우는 강산 가스의 생성량 등을 고려하여 적용 여부를 결정할 필요가 있음.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 적용 사례가 많은 높은 처리 효율의 안정된 기술 LEL의 20% 이상이고 높은 처리효율을 요구할 경우 최상의 선택 중 하나 	<ul style="list-style-type: none"> N,N-디메틸포름아미드 농도가 낮은 경우 보조연료 사용으로 높은 운영비 유량 변동이 심한 경우는 적용 부적합 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 N,N-디메틸포름아미드 농도를 처리할 수 있으나, N,N-디메틸포름아미드 농도가 낮은 경우는 보조연료 사용으로 운영비가 높아질 수 있어 소각 앞 단계 농축시설을 설치 운영하여 농도를 일정 수준 이상으로 높일 필요가 있음

□ **(N,N-디메틸포름아미드 적용)** N,N-디메틸포름아미드의 고온산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 고온산화기술관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99.9	180백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

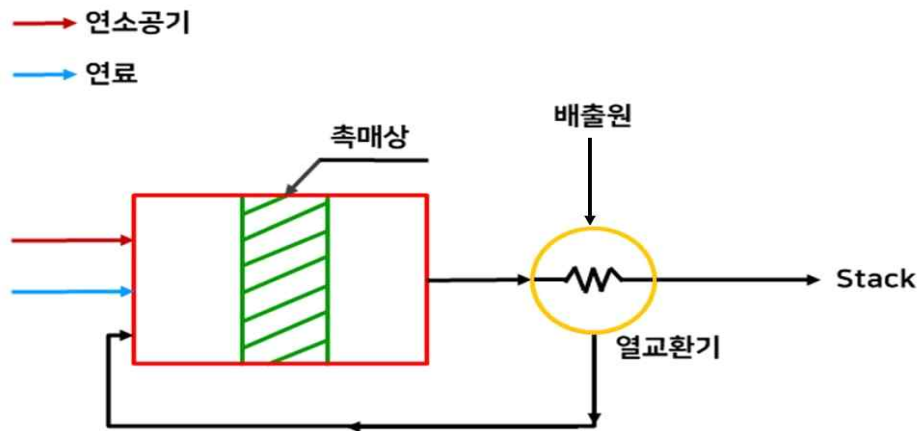
나) 촉매산화(촉매연소)기술

□ (기술 개요) 촉매산화법은 연소기 내부에 충전되어 있는 촉매가 연소에 필요한 활성화 에너지를 낮춤으로써 350~500℃ 정도의 비교적 저온에서 연소가 가능토록 하는 연소 방식

○ 촉매로서는 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금이 주로 사용되며, 백금촉매는 HCl 등에 의해 비활성화가 빨리 일어나므로 염소계 VOCs 촉매산화를 위해서는 산화코발트, 산화구리/산화망간 등의 산화금속 촉매가 사용되고 있음.

- N,N-디메틸포름아미드는 염소계 VOCs가 아니므로 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금 촉매를 적용해도 무방

○ 촉매산화법의 N,N-디메틸포름아미드 처리효율은 N,N-디메틸포름아미드 유입농도, 소각온도, 체류시간, 산소농도, 촉매 특성, 공간속도¹⁰³⁾ 등에 의존함.



[그림 6-4] 촉매산화(촉매연소)법 공정 예시

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

□ 적용조건

○ (소각온도) 효과적·효율적으로 VOCs 촉매산화처리를 위해서는 배출가스를 320 ~ 430℃로 예열한 다음 촉매연소기에 투입하며, 촉매반응기 출구 온도 상한선은 540~675℃가 되도록 설계함. 촉매 종류에 따라 온도 상한선은 다르지만, 고온일수록 촉매 수명이 짧아짐.

103) 공간속도는 촉매상으로 들어가는 가스 유량을 촉매상의 겉보기 부피로 나눈 값

□ 유의사항

- (피독 현상) 촉매산화반응에서 가장 치명적인 것은 촉매 비활성화를 초래하는 피독 현상을 꼽을 수 있으며, 촉매 피독은 1) 미세먼지, 타르 고분자물질 등이 촉매 표면에 물리적으로 흡착하여 활성 저하, 2) 염소, 브롬, 불소 등에 의한 화학적 피독, 3) 황, 인, 규소, 중금속 등이 촉매 표면에 있는 공극을 폐쇄하여 표면적 감소 등을 꼽을 수 있음.
- 도장 도료 중에 유기실리콘 화합물이 포함되어 있는 경우가 많은데 이것이 연소 되면서 무기 규소화합물로 전환되면서 공극을 폐쇄하여 촉매 효과를 저하시킴.
- (대응방안) 일반적으로 전처리를 하지 않으나, 미세먼지, 타르, 촉매 피독 원인물질을 촉매소각장치 유입 전에 미리 제거하는 것이 촉매 수명 연장을 위해 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 N,N-디메틸포름아미드 처리가 가능함 • 연료 사용량이 적음 • 낮은 온도 조작이 가능함 • 화재 위험이 적음 • 화염 역류가 적음 • 고온산화방식과 비교하여 동일 성능에서 규모가 상대적으로 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • 초기 비용이 높음 • 촉매 비활성화로 촉매 교체가 정기적으로 이뤄져 운영 비용이 높음 • 촉매 피독 원인물질을 사전에 제거해 주어야 함 • 폐촉매는 지정폐기물로 관리해야 함 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술이며 저농도 처리가 가능한 반면 배출가스 유량이 낮고, VOCs 종류 및 농도 변화가 심하지 않은 시설에 적합

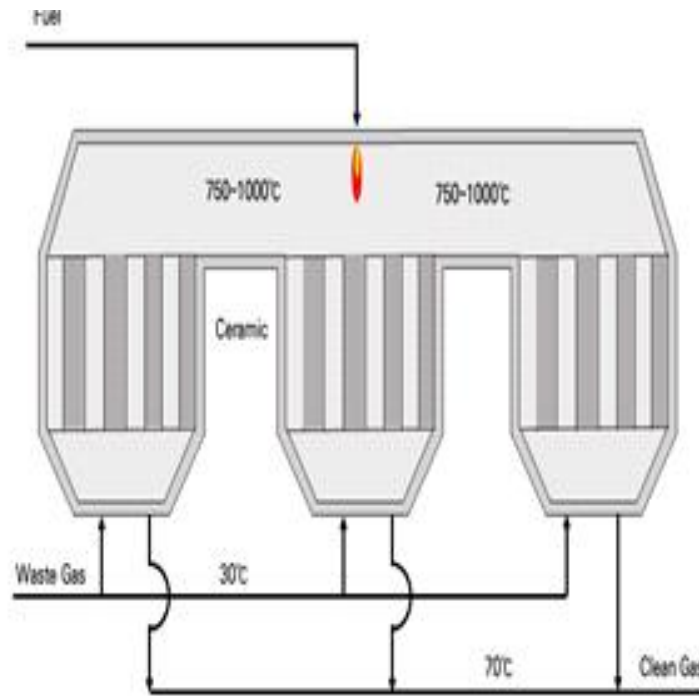
- (N,N-디메틸포름아미드 적용) N,N-디메틸포름아미드의 촉매산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 촉매산화기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99.9	210백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

다) 축열식 열소각기술

- (기술 개요) 기본적으로 열소각기술과 VOCs 처리방법은 동일하나, 축열식 열소각기술은 Shell-and-Tube 형태의 열교환기를 활용하여 에너지 회수율을 기존의 열소각기술의 50~60%에서 85~95%로 높인 기술



[그림 6-5] 축열식 열소각기술

(출처) 환경보전협회, 환경정보 no.370 대기오염 방지시설 선정 및 유지관리 기술 인용

□ 적용조건

- (소각온도 및 체류시간) RTO의 소각온도는 1,100°C이며¹⁰⁴⁾, 체류시간은 1초 이하임. 체류시간 1초에서 99.99% 처리효율¹⁰⁵⁾을 보이고 있음.
- (산소농도) N,N-디메틸포름아미드의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전 연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL을 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.

104) EPA(2017), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-021

105) 환경부(2000), VOCs 방지시설 설계지침

□ **(유의사항)** 할로젠과 황을 포함한 화학물질은 연소과정에서 HCl, SO₂ 등의 강산 가스를 생산하여 장치 부식을 초래할 수 있어 가급적으로 처리하지 않는 것이 바람직함. N,N-디메틸포름아미드를 처리할 때는 문제가 없으나 할로젠과 황을 포함한 화학물질이 배출가스 중에 함께 출현하는 경우는 강산 가스의 생성량 등을 고려하여 적용 여부를 결정할 필요가 있음.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 에너지 회수율이 높아 연료 소모량이 적음 높은 운전온도로 처리효율 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 높은 초기 투자비용 시설 규모가 고온산화시설보다 커짐 높은 유지관리 보수비용 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 저농도 N,N-디메틸포름아미드를 처리할 수 있으나 초기 투자비용과 운영비용이 높음

□ **(N,N-디메틸포름아미드 적용)** N,N-디메틸포름아미드의 축열식 열소각기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 축열식 열소각기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99%	300백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

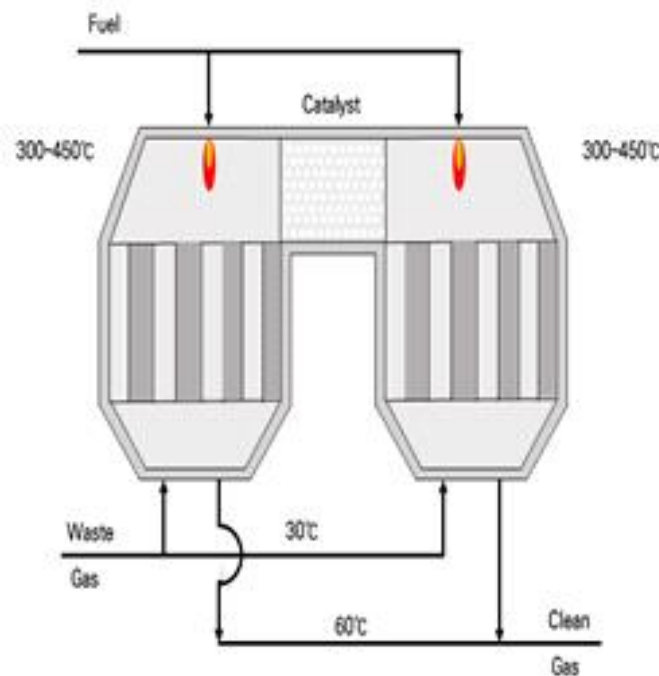
※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

라) 축열식 촉매산화기술

□ (기술 개요) 축열식 촉매산화기술은 기본적으로 촉매산화기술과 동일하나, 축열식 산화기술은 Shell-and-Tube 형태의 열교환기를 활용하여 열교환효율을 기존의 열소각 기술의 50~60%에서 85~95%로 높인 기술

○ 촉매로서는 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금이 주로 사용되며, 백금촉매는 HCl 등에 의해 비활성화가 빨리 일어나므로 염소계 VOCs 촉매산화를 위해서는 산화코발트, 산화구리/산화망간 등의 산화금속 촉매가 사용되고 있음.

- N,N-디메틸포름아미드는 염소계 VOCs가 아니므로 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금 촉매를 적용해도 무방함.



[그림 6-6] 축열식 촉매산화기술

(출처) 환경보전협회, 환경정보 no.370 대기오염 방지시설 선정 및 유지관리 기술 인용

□ 적용조건

○ 배출가스 특성

○ (소각온도 및 체류시간) RCO의 소각온도는 350~500°C이며¹⁰⁶⁾, 체류시간은 1초 이하임.

106) EPA(2017), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-021

- (산소농도) N,N-디메틸포름아미드의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전 연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL를 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.

□ 유의사항

- (피독 현상) 촉매산화반응에서 가장 치명적인 것은 촉매 비활성화를 초래하는 피독 현상을 꼽을 수 있으며, 촉매 피독은 1) 미세먼지, 타르 고분자물질 등이 촉매 표면에 물리적으로 흡착하여 활성 저하, 2) 염소, 브롬, 불소 등에 의한 화학적 피독, 3) 황, 인, 규소, 중금속 등이 촉매 표면에 있는 공극을 폐쇄하여 표면적 감소 등을 꼽을 수 있음.
 - 도장 도료 중에 유기실리콘 화합물이 포함되어 있는 경우가 많은데 이것이 연소되면서 무기 규소화합물로 전환되면서 공극을 폐쇄하여 촉매 효과를 저하시킴.
- (대응방안) 일반적으로 전처리를 적용하고 있지 않으나, 미세먼지, 타르, 촉매 피독 원인물질을 촉매소각장치 유입 전에 미리 제거하여 촉매 수명을 연장하기도 함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 온도에서 운전하므로 연료 소모량이 RTO보다 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 초기 투자비용 • 시설 규모가 고온산화시설보다 커짐 • 높은 유지관리 보수비용 • 촉매 피독 • 폐촉매는 재생되지 못하고 지정폐기물로 처리 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 저농도 N,N-디메틸포름아미드를 낮은 온도에서 처리할 수 있으나 시설 비용이 높고, 촉매 피독으로 인해 촉매 교체가 불가피하여 운영비용이 높음

- (N,N-디메틸포름아미드 적용) N,N-디메틸포름아미드의 축열식 촉매산화기술에 대한 부족하여 일반적인 축열식 촉매산화기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99%	360백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

2) 흡착 처리기술

□ (기술 개요) 화학물질을 흡착제 표면에 물리적으로 흡착하여 처리하는 기술

○ (공정 구성) 일반적으로 활성탄이 많이 사용되고 있으며, 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 증기 또는 열에 의해 피흡착물의 탈착이 이뤄지는 흡착탑 재생공정임. 탈착 과정에서 농도가 높아진 피흡착물이 배출되며, 이를 연소처리기술 등의 후속 공정에서 처리함.

○ (흡착원리) 흡착제와 피흡착물 간에 Van der Waals 힘이 작용하고 있으며, 흡착제와 피흡착물 간의 거리에 따라 위치에너지가 달라짐. 위치에너지가 가장 낮은 지점이 형성되며, 그 지점에서 흡착이 일어남.

○ (흡착·회수 재사용과 차이점) 흡착·처리기술은 N,N-디메틸포름아미드 등의 유기오염 물질을 흡착·처리하는데 목적을 두고 있지만, 흡착·회수 재사용 기술은 N,N-디메틸 포름아미드 등을 회수하여 재사용하는데 초점을 맞추고 있음. 즉 두 기술의 원리는 동일하나 목적에서 차이가 있음.

□ (적용조건) 흡착·처리 공정 단독으로 운영하기보다는 연소처리기술 전단에 설치하여 처리대상물질의 농도를 적정 수준 이상으로 높여 연소처리기술의 처리 성능을 배가시키는 역할을 담당하며, 활성탄이 주로 사용되고 있음.

□ (유의사항) 활성탄 자체가 고온에서 화재 위험성¹⁰⁷⁾이 있고, 화재 및 폭발위험성 물질이 농축되어 화재 및 폭발 가능성이 있으므로 활성탄 흡착·처리공정을 설계할 때 이런 점을 유의하여 설계할 필요가 있음.

107) 활성탄 자체 착화온도는 400~500℃

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 연소처리기술과 연계하여 처리하므로 N,N-디메틸포름아미드 등의 VOCs 처리 시너지 효과가 있음. 저농도 N,N-디메틸포름아미드 등의 VOCs 처리가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 연소처리기술과 연계하면 저농도의 N,N-디메틸포름아미드 등의 VOCs 처리가 가능하나, 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 화재 위험성 등으로 관리가 용이하지 않음.

□ (N,N-디메틸포름아미드 적용) N,N-디메틸포름아미드의 흡착처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 흡착처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

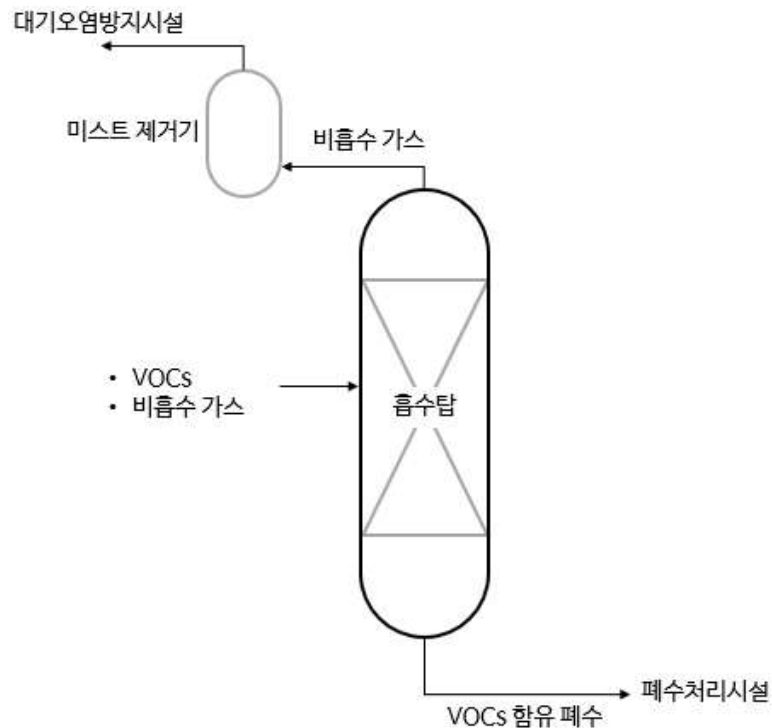
처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
-	18백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

(출처) 한국물가정보(2017년 3월호)

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

3) 흡수처리기술

□ (기술 개요) 혼합 기체를 액체와 접촉하게 시켜 기체의 특정 성분을 액체 속에 용해 흡수·처리하는 기술로서 물리흡수와 화학흡수로 구분할 수 있음. 물리흡수는 흡수제에 대상 기체를 물리적으로 용해시키는 방법이고, 화학흡수는 흡수제 중의 용질 성분과 기체 성분이 화학반응에 의해 흡수되는 방법임.

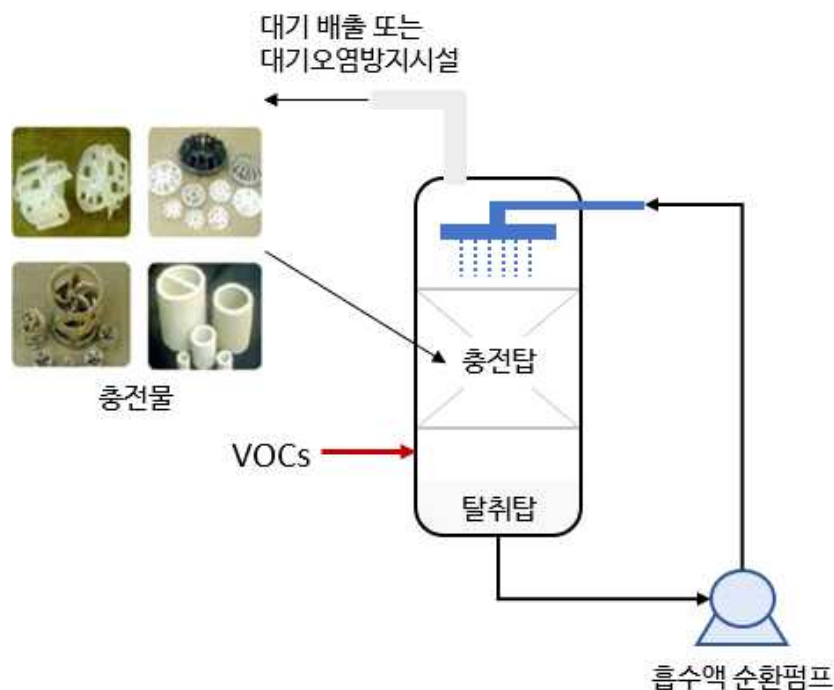


[그림 6-7] 흡수처리기술

○ (VOCs 흡수) VOCs의 흡수는 물리흡수에 이루어지며, VOCs를 함유한 가스에서부터 액상 흡수제로 VOCs가 물질 전달되는 현상으로 물질 전달 구동력은 가스상과 액상 내의 VOCs 특성에 좌우되며 헨리의 법칙(Henry's Law)에 따라 흡수액에 용해되는 양이 결정됨.

- VOCs 흡수제 종류는 물, 고비점 석유오일(Non-volatile Petroleum Oil), 미네랄 오일(Mineral Oil) 등이 있으며, 친수성 VOCs는 물을 활용하여 흡수·제거할 수 있는 최적 흡수제이고, 소수성 VOCs는 고비점 석유오일을 흡수제로 사용하거나, 수용액에 양성(친수성과 소수성 기능을 동시 보유)을 지닌 공중합체(Copolymer)를 투입하여 소수성 VOCs의 흡수를 유도함.

- (VOCs 탈착) VOCs를 흡수제로부터 탈착하여 재생하는 방산(Stripping) 공정이 있으며, 일반적으로 열을 가하거나, 진공을 걸어서 VOCs를 물리적으로 탈착시키며, 응축기와 연결하여 VOCs를 회수할 수 있음.
- (흡수장치 종류) 가스상과 액상이 흐르는 방식에 따라 향류(Counter Flow)와 병류(Co-current Flow) 방식이 있으나, 대부분은 향류 방식이고, 흡수장치의 종류는 충전탑(Packed Bed), 다단탑(Tray Tower), 분무탑(Spray Tower), 벤츄리 스크러버(Venturi Scrubber) 등이 있음. 일반적으로 VOCs 처리에는 충전탑과 다단탑이 많이 적용되고 있음.
- (충전탑) 금속, 세라믹, 플라스틱 재료로 된 불규칙 충전물이나 규칙 충전물로 채워져 있으며, 액체는 기체와의 접촉면적을 높이기 위해 탑 상부에서 고르게 분산되며, 분산된 액체는 충전물의 표면에 박막(Thin Film)을 형성하면서 아래로 흐름. 폐가스는 탑 하부에서 유입되며 흡수액과 접촉하면서 배출가스 중 VOCs 등의 특정 성분이 액상으로 흡수되고, 배출가스의 나머지 성분들은 탑 상부로 배출됨.

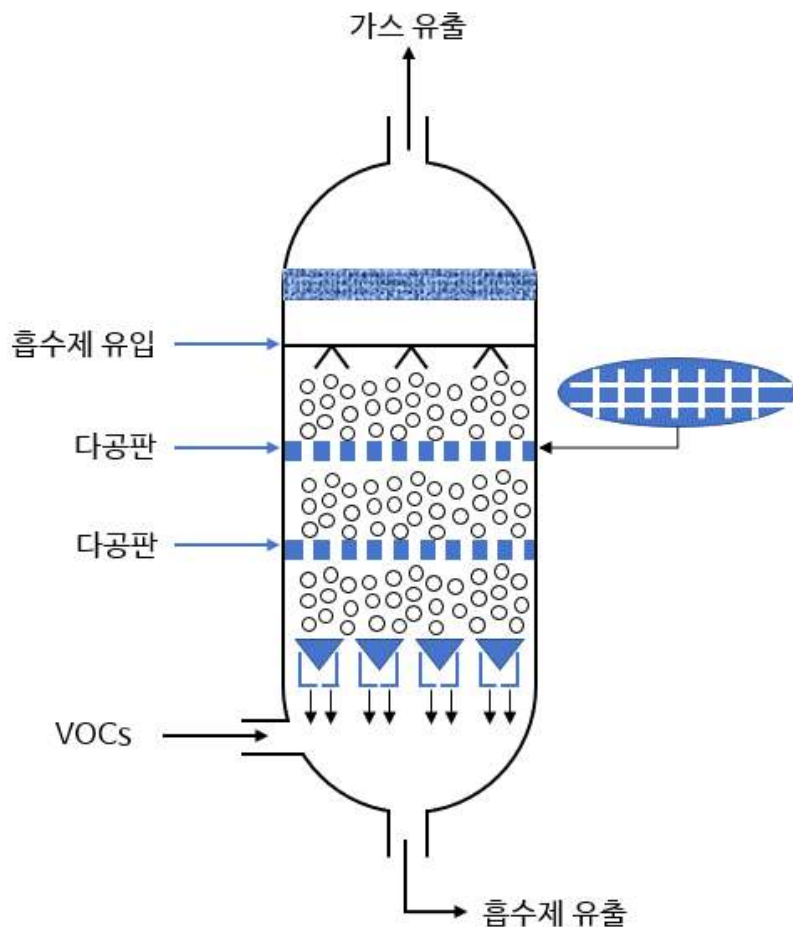


[그림 6-8] 흡수처리기술의 충전탑

(출처) 안전보건공단(2015), 폐수처리설비(스크러버) 화재폭발 예방대책 매뉴얼

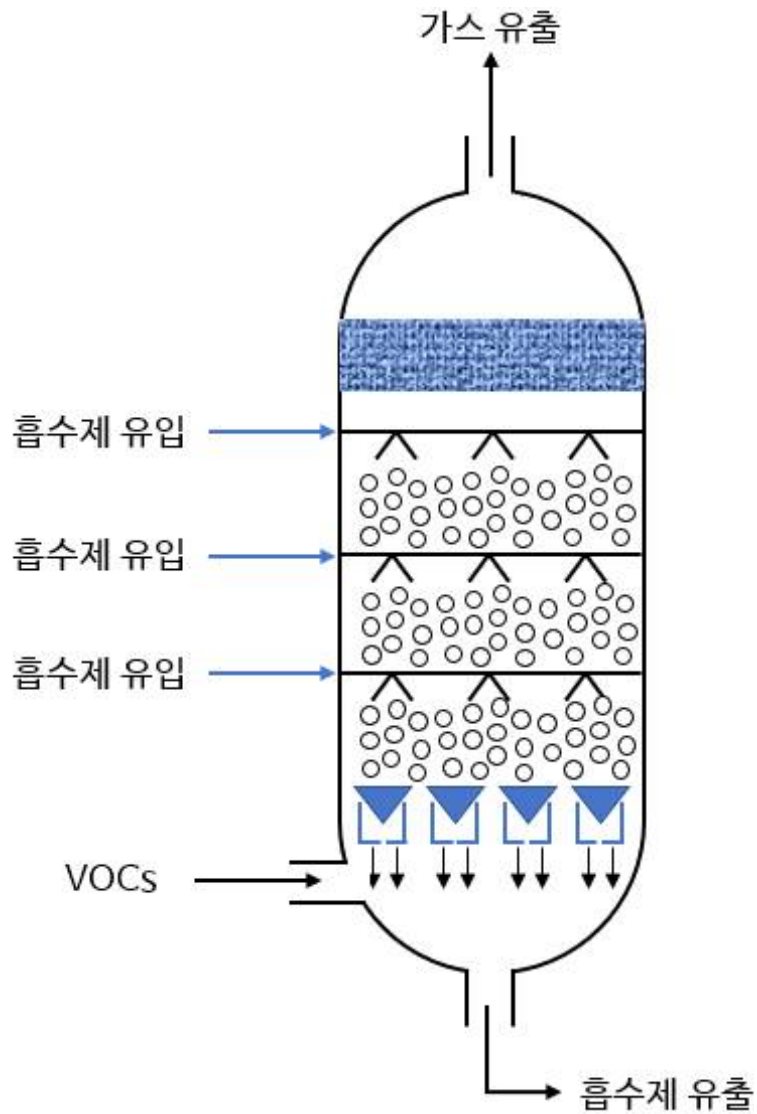
충전탑은 탑 상부에서 흡수액 분산이 성능에 큰 영향을 미치므로, 기체 흐름을 방해하지 않는 범위에서 흡수액이 고르게 분산되어야 하고, 충전물은 액상 박막이 넓게 형성되어 흡수 면적을 커지도록 설계해야 함. 충전탑은 처리효과가 크고, 침전물이 발생하는 가스 처리에도 적합하다는 장점이 있지만 충전층의 공극이 폐색될 수 있고, 충전물이 고가라서 초기 설치비용이 높으며, 가스 유속이 과도한 경우 범람이 발생할 수 있음.

- (다단탑) 증류 공정의 증류탑과 유사하고, 접촉시간이 비교적 길고, 각 단의 액체에 기체가 고르게 분산될 수 있다는 특징을 가지고 있어 흡수탑으로 많이 사용되고 있음. 장점으로는 충전탑에 비해 부유물이 있는 흡수액에 대해 적응성이 좋고, 온도 변화가 심한 조건에도 적용이 수월하나, 초기 비용이 높고 압력손실이 큰 단점이 있음.



[그림 6-9] 다단탑 흡수처리시설

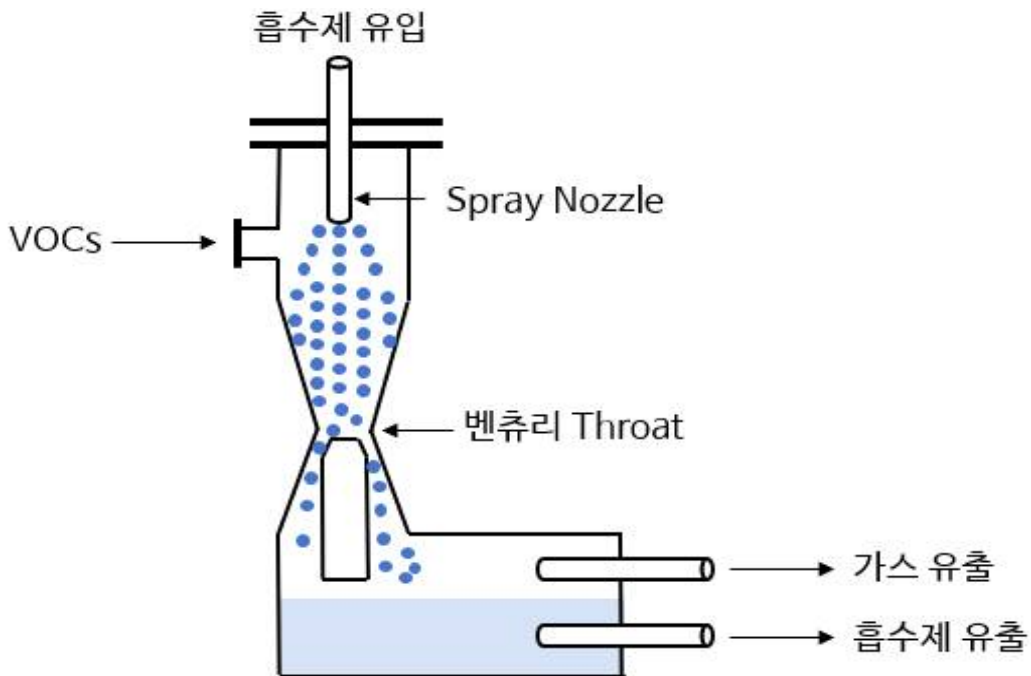
- (분무탑) 충전물을 사용하지 않는 반면 흡수액을 매우 적은 액적으로 만들어 분사함으로써 VOCs가 흡수될 면적을 극대화함. 분무탑의 기체와 액체 접촉시간이 짧아 물에 용해도가 높은 가스(예, 암모니아, 이산화황) 처리에 적합하고, N,N-디메틸포름아미드와 같은 VOCs 처리에는 적합하지 않다고 알려져 있음. 분무탑은 충전탑보다 저렴하고, 압력손실이 적은 반면 분사 노즐이 잘 막히고 편류를 일으키기 쉽고 분무액과 기체의 균일한 접촉이 용이하지 않은 단점이 있음.



[그림 6-10] 분무탑 흡수처리시설

- (벤츄리 스크러버) 벤츄리 노즐에서 배출가스와 흡수액을 강제로 접촉시켜 배출 가스 중의 특정 성분을 흡수·처리하는 설비임. 흡수액과 배출가스와의 접촉시간이 매우 짧아 대부분의 VOCs보다는 용해도가 높은 가스 제거에 적합함.

벤츄리 스크러버는 소형으로 대용량 가스 처리가 가능하고 흡수효율이 탁월한 장점이 있는 반면 가스 압력손실이 커서 동력비가 높은 단점이 있음.



[그림 6-11] 벤츄리 스크러버 흡수처리시설

(출처) <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/venturi-scrubber> 인용

- (유의사항) N,N-디메틸포름아미드 등의 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 상대적으로 낮은 압력손실 ▪ 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 ▪ 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 ▪ 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 ▪ 상대적으로 낮은 설치비용 ▪ 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폐수처리 문제 ▪ 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N,N-디메틸포름아미드 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 경제성 때문에 N,N-디메틸포름아미드 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

□ (N,N-디메틸포름아미드 적용) N,N-디메틸포름아미드의 흡수처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡수처리기술 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%) ¹	설치비용(100m ³ /min) ²	연간 운영비용(m ³ /min)	비고
70~90	30백만원	-	-

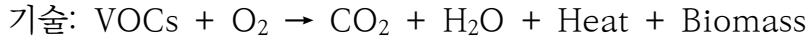
1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: 물가정보(2019.11)

※ 사업장 여건에 따라 적응성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

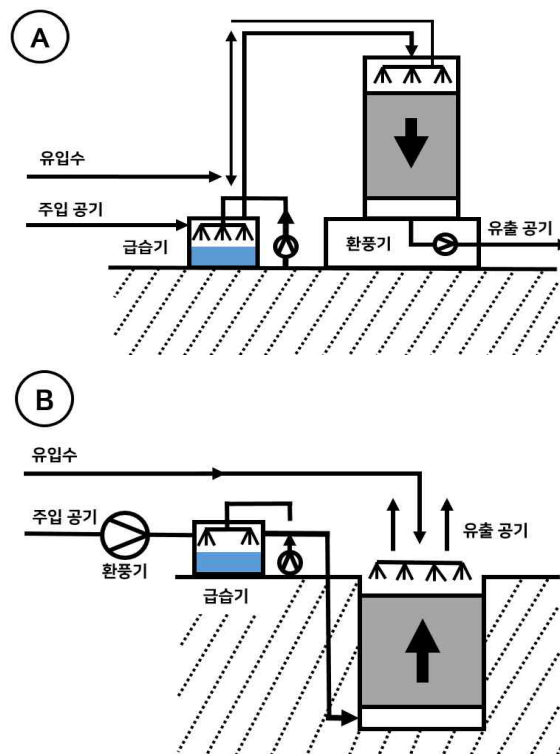
4) 생물학적 처리기술

□ (기술 개요) 생물학적 처리기술은 호기성 미생물을 활용하여 VOCs를 산화·분해하는



○ (종류) 생물학적 처리기술의 종류는 첫째, 바이오필터(Biofilter), 둘째, 바이오스크러버(Bioscrubber), 셋째, 바이오트리클링 필터(Biotrickling Filter)임.

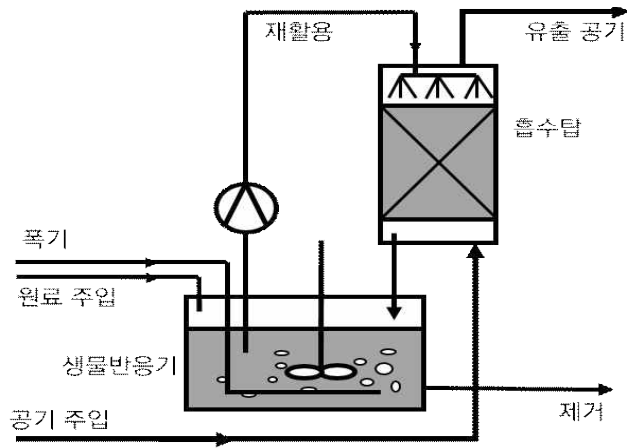
- (바이오필터) 바이오필터 고정체(하우징, Housing)는 가습장치, 온도조절장치, 분무장치로 구성되어 있는 밀폐형 구조임. 바이오필터 충전제는 미생물 서식에 최적 조건을 제공할 수 있는 물질(활성탄, 퇴비 등)로 구성되어 있어 미생물 농도는 토양 사용 시 보다 최고 140배까지 높일 수 있음. 바이오필터의 충전제는 오염 물질을 1차적으로 흡수한 후 충전제 속의 미생물이 오염물질을 처리하도록 되어 있으며, 연속적 충전제의 재생이 가능한 시스템으로 한 번 설치하면 2~7년 정도 충전제 교체 없이 운전이 가능함.



[그림 6-12] 바이오필터 구성

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

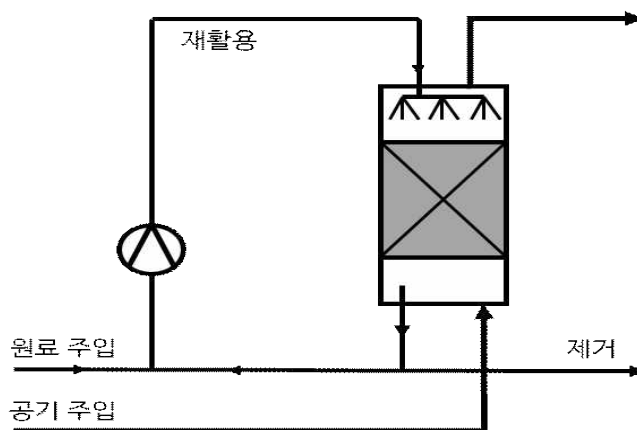
- (바이오스크리버) 배출가스를 세정탑에 통과시켜 오염물질을 물에 흡수시킨 후 이를 포기조에서 미생물 활동에 의해 제거하는 것임. 바이오스크리버에 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 N,N-디메틸포름아미드 등 대부분 VOCs는 적합하지 않음.



[그림 6-13] 바이오 스크리버

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- (바이오텀리클링 필터) 바이오필터와 바이오스크리버가 혼합된 형태로서 미생물을 불활성 담체에 배양 충전시키고, 오염된 물을 상부에서 미생물이 충전된 담체에 분무하여 처리하는 시스템임. 바이오스크리버와 마찬가지로 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 N,N-디메틸포름아미드 등 대부분 VOCs 적용에는 적합하지 않음.



[그림 6-14] 바이오텀리클링 필터

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- **(적용조건)** 생물학적 처리방법은 일반적으로 저농도 VOCs를 포함한 상온의 배출가스 처리에 적합하며, VOCs 농도, 온도, 배출가스 유량, 기타 미생물에 치명적인 성분 등을 고려하여 적용성을 검토해야 함.

항목	추천범위	비고
VOCs 유입농도(ppm)	500 이하	톨루엔 기준
단위 체적 당 부하(g/m ³ ·hr)	100 이하	-
제거효율(%)	90 이상	-
배출가스 유량(m ³ /hr)	300 이하	설치 공간 고려
배출가스 온도(°C)	20 ~ 40	-
배출가스 습도(%)	제한 없음	-
할로겐 및 SO ₂	제한적	전 처리 필요
분진	제한적	전 처리 필요

□ **운전인자**

- **(수분함량)** 생물학적 처리방법에서 가장 중요한 인자는 수분함량으로 특히 바이오필터는 수분 조절이 어려워 실패하는 사례도 있음.
- **(온도)** 미생물의 활동도는 온도 증가에 따라 증가하나, 온도가 한계치 이상 오르면 미생물이 오히려 폐사됨. 그러므로 최고 활성을 일어나는 온도를 파악하고, 그 이상으로 온도가 올라가지 않도록 세심하게 조정하는 것이 필요함.
- **(pH)** 각각 미생물들은 고유의 최적 pH를 가지고 있어 일정 범위의 pH 조건에서 활성이 좋으며, 이 범위를 벗어나면 활성이 떨어지거나 폐사하게 됨.
- **(영양분)** 미생물은 에너지와 탄소원을 얻기 위해 오염물질을 분해하나 질소, 인, 칼륨, 황, 칼슘, 나트륨, 철 및 수많은 다른 성분의 미네랄도 필요하므로 미생물의 활성도를 왕성하게 유지하기 위해서는 이런 성분들을 충분히 공급해야 함.
- **(오염물 농도 부하와 표면 부하)** 단위시간 당 단위부피 당 생물학적 처리공정에 들어가는 오염물질의 총량을 농도 부하로 정의하고 있으며, 생물학적 처리공정 설계 및 운전에 중요한 인자임.

- (산소 농도) VOCs 처리에 필요한 산소의 화학양론비적 양이 평형상태에서 용해되는 산소량보다 적으면 산소 소진이 일어나므로 산소 농도를 적정 수준에서 유지할 수 있도록 생물학적 처리공정 설계 및 운전이 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저렴한 설치 및 운영비용 • 낮은 압력손실 • 비선택성으로 다양한 물질로 구성된 VOCs의 동시 처리 가능 • 폐수, 폐기물 등의 2차 오염 물질 배출이 최소화 • 설치 융통성 	<ul style="list-style-type: none"> • 넓은 부지 필요 • 느린 처리속도 • 특정 물질 처리에 적합한 선택적으로 미생물 적용(따라서 복합 미생물 군집 적용 필요하나 배양이 쉽지 않음) • VOCs 회수 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 VOCs 처리에 적합하며, 설치 운영비용이 저렴하고 2차 오염물질 생성 배출이 적지만 처리속도가 느리고 설치 부지 면적이 넓다는 단점이 있음.

- (N,N-디메틸포름아미드 적용) N,N-디메틸포름아미드의 생물학적 처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 생물학적 처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	비고
50~70	100백만원 + α	바이오필터
50~70	150백만원 + α	바이오스크러버
50~70	290백만원 + α	바이오탁리클링필터

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

6.4.2

혼합공정

6.4.2.1. (공정관리) 측정 및 관리시스템 도입

- (정의) 누출오염원관리시스템(LDAR)을 활용하여 이송·운반·분배·계량 시설 배출원에 대한 주기적 감시 및 검지를 시행하여, 이상 있는 장치는 즉시 정비 또는 교체하여 N,N-디메틸포름아미드 배출량과 배출원을 동시에 체계적으로 관리하는 기술
- 이송·운반·분배·계량 시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 누출지점이 많고, 누출되더라도 육안 식별이 어렵고, 화학물질에 따라서 무색·무취인 경우도 있어 측정하지 않고서는 누출 파악이 어려운 상황이 존재함.
- 누출 가능성이 큰 지점에 바코드가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고, LDAR 시스템에 의해 주기적으로 점검 관리함.

[표 6-4] LDAR 점검주기 및 화학업종과 정유업종 저감율

장치 및 화학물질	화학업종 저감율(%)		정유업종 저감율(%)	
	매월 감시	매분기 감시	매월 감시	매분기 감시
밸브-기체	87	67	88	70
밸브-경질유	84	61	76	61
펌프-경질유	69	45	68	45
압축기-기체	-	-	-	33
연결부-기체, 경질유	-	33	-	
압력안전밸브-기체	-	44	-	44

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

기술 개요	Leak Detection and Repair(이하 LDAR) 등 누출관리시스템을 활용한 실시간 화학물질의 비산배출 관리기술로 최근 광학이미지 카메라를 이용한 Flare, 저장시설 등 VOCs 누출 모니터링과 공정 배출감시를 위한 Fence Line 모니터링 기술도 활용되고 있음			
적용산업 및 공정	N,N-디메틸포름아미드의 이송·운반·분배·계량 공정이 있는 전 업종			
적용효과	(적용 전) 이송·운반·분배·계량시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 배출원 수가 많고 누출이 되더라도 누출 여부의 육안 확인이 어려운 상황			
	(적용 후) LDAR를 도입하여 대상 공정의 누출지점에 바코드 번호가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고 VOCs 측정기(검지기)를 이용하여 배출원에 대한 주기적 점검을 통해 누출 확인 및 신속한 장비 보수 가능			
저감효과 (%)	70	처리비용	설치비용	100백만원 이상
			운영비용	1,000원/관리지점

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

6.4.2.2. (공정관리) 장치개선

- (정의) 장치개선 및 교체를 통해 N,N-디메틸포름아미드의 비산 배출원으로부터의 누출 (Leak)을 방지하고 누출 원인이 되는 부분을 개선함으로써 배출량을 줄이거나 완전히 차단하는 기술
- (펌프 변경) 펌프 Seal에서 N,N-디메틸포름아미드가 누출되는 것을 방지하기 위해 Seal이 없는 Sealless(Non-seal) 펌프(Canned 펌프 등)나 Double-sealed 펌프로 교체
- (밀폐식 시료 채취장치) 시료 채취 과정에서 N,N-디메틸포름아미드가 비산 배출되는 것을 방지하기 위해 밀폐식 시료 채취장치로 변경

장치 종류	개선 방법	저감률(%)
펌프	• Seal-less design (Canned Pump etc.)	99
	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
밸브	• Seal-less design • (Bellows type, Diaphragm, etc.)	99
압축기	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
압력 안전밸브	• Rupture Disk Assembly	99
	• Closed Vent System	90*
연결부	• Socket Welding Type	99
개방식 라인	• Blind, Plug, Cap or Second Valve	99
시료 채취 연결부	• Closed-loop System	99
공정 배수구	• Closed-loop and Water Seal	99

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 배출관이 연소처리 등에 연결하여 처리할 경우는 99%, 미 연결된 경우는 90% 수준임.

6.4.2.3. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 N,N-디메틸포름아미드가 누출 및 비산배출될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 N,N-디메틸포름아미드의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
- (밀폐형 덮개) N,N-디메틸포름아미드 등의 VOCs 함유 폐수는 처리 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 폐수처리시설에 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송시켜 처리하고 있음.



[그림 1-15] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

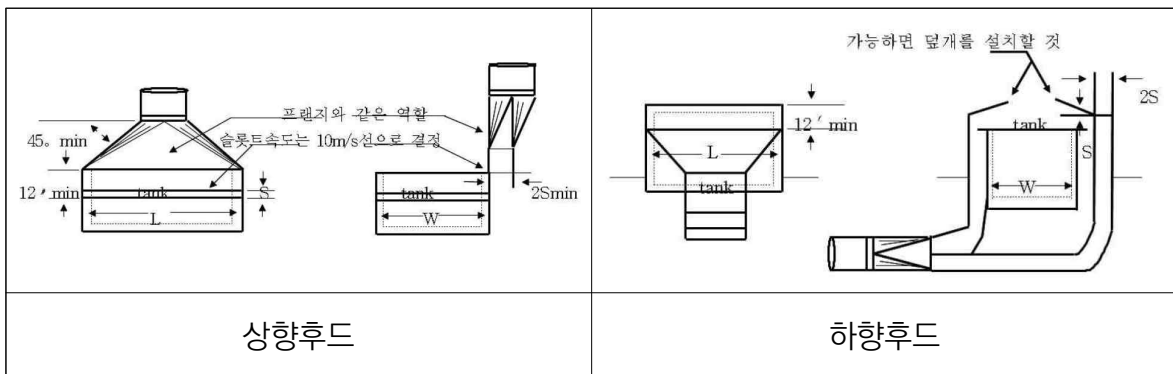
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 6-16] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

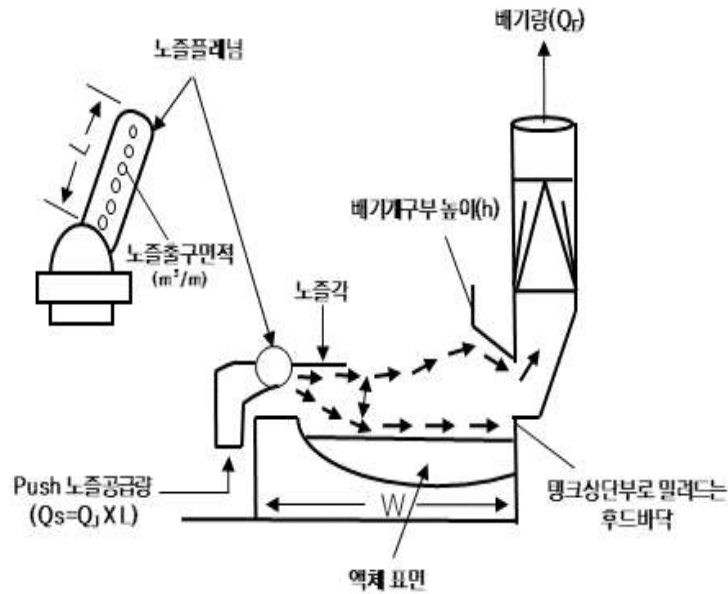
- (외부식 후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 6-17] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 6-18] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

6.4.3

코팅공정

6.4.3.1. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 N,N-디메틸포름아미드가 누출 및 비산배출될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 N,N-디메틸포름아미드의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
 - (밀폐형 덮개) N,N-디메틸포름아미드 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 1-19] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

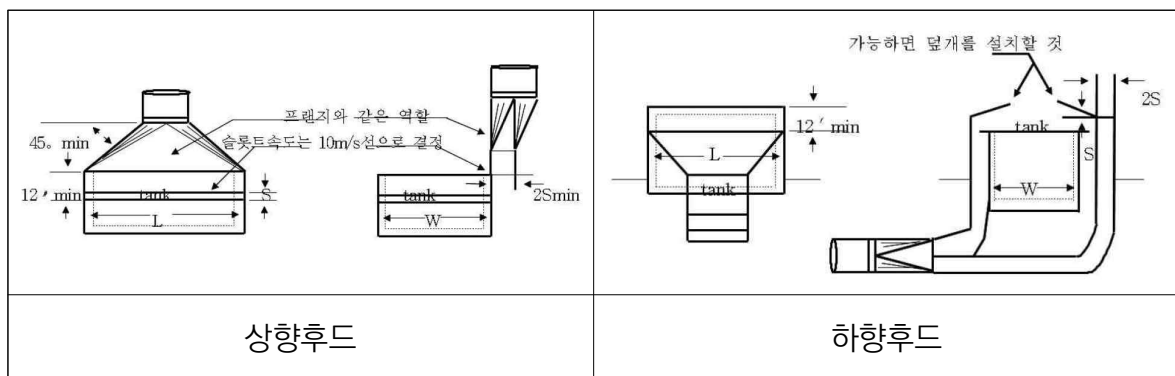
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 6-20] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

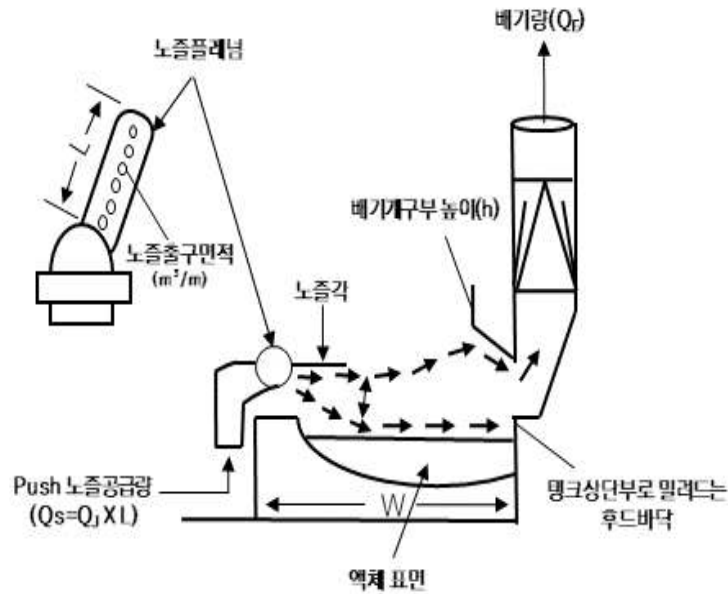
- (외부식 후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 6-21] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 6-22] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

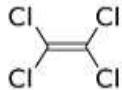
7

테트라클로로에틸렌

7.1

개요

- (정의 및 특성) 테트라클로로에틸렌은 C_2Cl_4 화학식을 갖는 직물의 드라이클리닝에 널리 사용되는 드라이클리닝 유체라고 하며, 주요 내용은 아래와 같음.

CAS No.	발암물질 분류	위해도 순위	화학구조
127-18-4	2A군 발암물질	<ul style="list-style-type: none"> • 2A군 발암물질 중에서는 2위 • 전체 발암물질 중에서는 9위 	

- 물리·화학적 특성¹⁰⁸⁾

분자량 (g/mol)	휘발성 증기압	친수성 용해도	끓는점	녹는점 /어는점	LEL ¹⁰⁹⁾ (% vol)	UE ¹¹⁰⁾ (% vol)	n-옥탄올 /물분배계수
165.83	15.8mmHg (22°C)	0.02g/100mℓ (25°C)	121.3°C	-22.3°C	-	-	3.40

- 테트라클로로에틸렌은 위에서 제시한 물리·화학적 특성 때문에 환경부 고시에 근거하여 휘발성유기화합물(VOCs)¹¹¹⁾로 분류하고 있음.

- 용도

- 세탁소에서 드라이클리닝의 용매로 사용
- 유기물질용으로 용매 사용
- 자동차 및 금속 작업 산업에서 금속 부품의 그리스 제거 용도로 사용
- 페인트 스트리퍼와 리무버의 용도로 사용

108) 화학물질 정보처리 시스템 (<https://kreachportal.me.go.kr/potweb/main.do>)

109) 최저폭발한계(Lower Explosive Limit)로서 산소 존재 하에서 점화원에 접촉하였을 때 불이 붙어 불꽃이 확산되는 최저 가스농도

110) 최고폭발한계(Upper Explosive Limit)로서 하동명(2009), 테트라클로로에틸렌의 위험성 평가를 위한 연소 특성치 고찰, 한국안전학회지, 24(5), 28-33

111) 환경부고시 제2015-181호(휘발성유기화합물 지정 고시)

- **(배출업종)** 테트라클로로에틸렌이 주로 배출되는 업종은 의복, 의복 액세서리 및 모피 제품 제조업(40.8%), 1차 금속 제조업(29.6%), 기타 운송장비 제조업(23.5%)순임.
- **(배출공정)** 테트라클로로에틸렌이 많이 배출되는 공정은 1) 대기오염방지시설(51.2%), 2) 탈지·세정·표백공정(36.9%), 3) 저장시설(10.2%)순임.
- **(배출형태)** 테트라클로로에틸렌은 VOCs이므로 대기로 배출될 개연성이 높고, [표 7-1]에서 보는 것처럼 국내 배출원에서는 모두 대기로 점배출(53.5%) 또는 비산배출(46.5%)되고 있음.
- **(시사점)** 테트라클로로에틸렌은 비산배출 관련 저감기술 및 방법 적용이 필요하며, 중점 관리 분야는 다음과 같음.
 - 대기오염방지시설로서 처리효율 제고
 - 탈지·세정·표백공정 처리효율 제고
 - 저장시설 처리효율 제고

112) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

[표 7-1] 테트라클로로에틸렌 배출특성

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
의복, 의복 액세서리 및 모피제품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	13,600.0	10.064	5.251
	탈지·세정·표백공정		비산배출 100	41,410.0	30.645	15.988
코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	5.1	0.004	0.002
	혼합공정		비산배출 100	34.0	0.025	0.012
	분리·정제공정		비산배출 100	2,335.0	1.728	0.832
화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	저장시설	대기	비산배출 100	1.8	0.001	0.001
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	101.2	0.075	0.043
	탈지·세정·표백공정		점배출 100	3,062.0	2.266	1.314
	대기오염방지시설		점배출 100	0.3	0.000	0.000
1차 금속 제조업	탈지·세정·표백공정	대기	비산배출 100	3,760.8	2.783	5.482
	대기오염방지시설		점배출 100	36,241.2	26.820	52.830
금속 가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외	탈지·세정·표백공정	대기	비산배출 100	1,604.8	1.188	10.030
	대기오염방지시설		점배출 100	1,283.9	0.950	8.024
기타 운송장비 제조업	대기오염방지시설	대기	점배출 100	31,685.9	23.449	33.389
폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	대기오염방지시설	대기	점배출 100	2.6	0.002	0.020
누적 합계		-	-	135,126	0	-

(출처) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

7.3

대체물질

7.3.1

용매 대체

적용업종 및 공정	용매로서 테트라클로로에틸렌을 사용하는 업종 및 공정
대체물질	1-Bromopropane, Carbon dioxide, Hydrocarbon solvents, Propylene glycol
적용사례	드라이클리닝 용매에 대한 대안 개발(캘리포니아 EPA, 2008) (출처) https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK294284/#a007.R69)

7.3.2

세정 및 세척제 대체

적용업종 및 공정	테트라클로로에틸렌을 세정 및 세척제로 사용하는 산업 및 공정
대체물질	친환경세정제 BCS-1000(주요성분: 디클로로프로판, 이염화프로필렌)
적용사례	F사 PCE 대체 세정제 적용사례(친환경세정제 BCS-1000) (출처) https://blog.naver.com/ssaldduk1/220405284994)

- 테트라클로로에틸렌의 회수 및 처리기술은 처리방법에 따라 장·단점이 있어 아래 사항을 자세히 검토하여 선택해야 함.
 - 배출가스의 조성 및 농도
 - 함유 유기화합물질의 특성(폭발한계, 응축성, 용해성, 흡착성 등)
 - 배출가스 내 수분 및 먼지 함유량
 - 배출량(최대, 평균, 최소 유량 등), 온도, 압력, 습도
 - 오염배출원 유형(점, 면, 선오염원, 공정, 불특정 등)
 - 연간 운영시간(가동시간, 가동률, 부하율 등)
 - 장치 위치(실내, 실외, 지표 고도, 지붕, 여유 공간 등)
 - 보조 연료 또는 에너지 비율
 - 각종 유틸리티(수도, 전기, 스팀, 배관, 관거, 구조물) 이용 가능 여부
 - 기존의 대기오염방지시설 설치·운영 사항(종류, 규모, 사용 기간 등)
 - 경제성(초기투자비 및 연간 운영비)

[표 7-2] 휘발성 유기화합물 방지시설 설계 시 고려사항

기술	안정성	오염물질 특성	오염원 특성	제어특성
흡착	흡착 시 폭발물질의 농축이 일어나며 이는 매우 유해함.	다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있음.	높은 포집 효율을 가지고 있으며, 여러 유형 흡착제(활성탄, 제올라이트, 폴리머 등)를 이용, 낮은 비용으로 고효율 달성이 가능함.
흡수	폭발물질을 중성화시킬 수 있는 흡수액을 폭발물질에 따라 선택해야 함.	화합물에 적합한 흡수제를 사용해야 하고, 화학물질 조성변화에 대응하기 어려움.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 흡착제 배출수 처리장치가 필요함.	포집 효율이 높으나 생성 폐수에 폭발성 물질이 포함될 수 있으므로 사전에 적정 처리방법 수립이 필요함.
응축	니트로글리세린과 같은 폭발성 화합물에는 적용할 수 없음.	제습 과정이 필요하며, 끓는점이 낮은 화합물은 처리하기 어려움.	추가적인 응축장치가 필요함.	특정 화합물에 대해서는 포집 효율이 높으나, 초기 비용이 높음.
생물여과	미생물에 의해 포집된 폭발성 화합물질을 쉽게 처리할 수 있음.	처리속도가 낮아 처리 규모의 한계가 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물 종류에 따라 높은 처리효율을 나타냄.
열소각	니트로글리세린과 같은 많은 폭발성 화합물은 급속히 가열될 때 매우 불안정해짐.	여러 다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 가지고 있음. 다양한 유형의 소각로(재생식 열소각 등)를 사용, 비용을 절감시키고 전체 효율을 증가시킬 수 있음.
촉매소각	반응시간과 유속에 따라 촉매 층에서 폭발성 화합물 농축이 일어나는 위험한 상황이 일어날 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리하며 촉매 피독으로 효율이 낮아짐.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물질 유형에 따라 높은 파괴효율을 나타냄.
광촉매산화	저온에서 폭발성 화합물 처리가 가능하며, 체류 시간이 짧고 저온에서 운전되므로 폭발 위험성을 줄일 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리함.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 나타내며, 전체 비용이 상대적으로 적은 편임.

(출처) 환경부(2000), 「휘발성유기화합물 방지시설 설계지침」 자료

□ 2016년의 화학물질 배출량 조사¹¹³⁾ 결과에 따르면 테트라클로로에틸렌의 주요 배출 공정 대기오염방지시설, 탈지·세정·표백공정, 저장시설 순으로 배출비중은 각각 50.2, 33.4, 10.1% 순임.

공정	업종	배출비중(%)
대기오염방지시설	1차 금속 제조업	26.8
	기타 운송장비 제조업	23.4
	소계	50.2
탈지·세정·표백공정	의복, 의복 액세서리 및 모피제품 제조업	30.6
	1차 금속 제조업	2.8
	소계	33.4
저장시설	의복, 의복 액세서리 및 모피제품 제조업	10.1

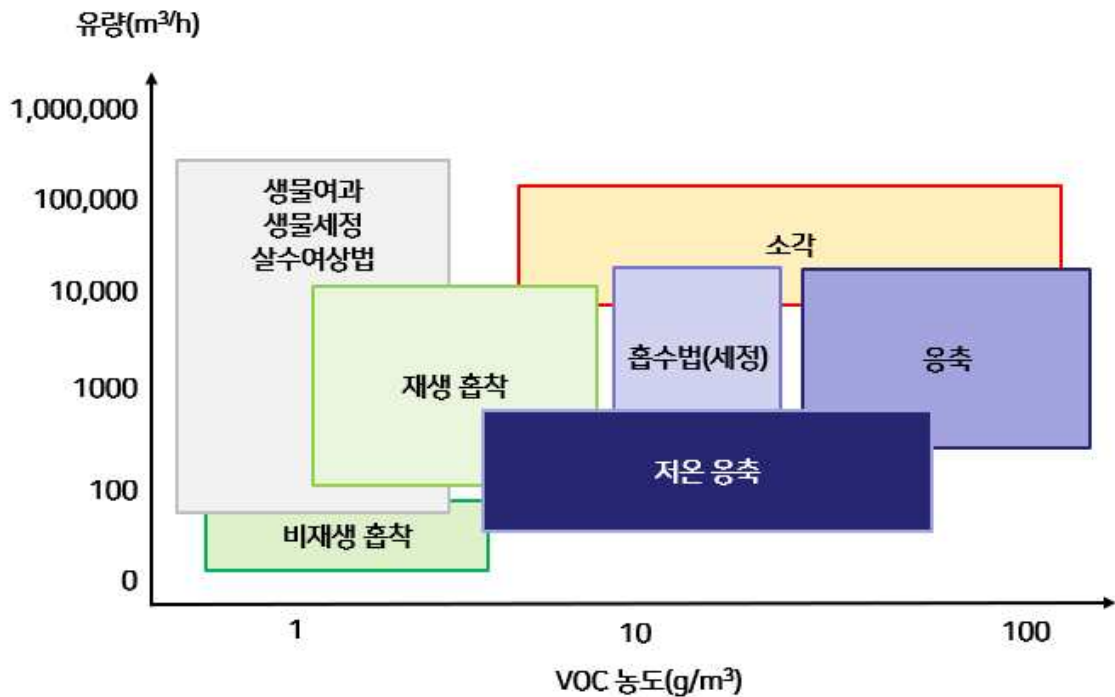
(출처) 화학물질안전원(2016)의 “2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)” 자료 근거

113) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

7.4.1 대기오염방지시설

7.4.1.1.처리기술

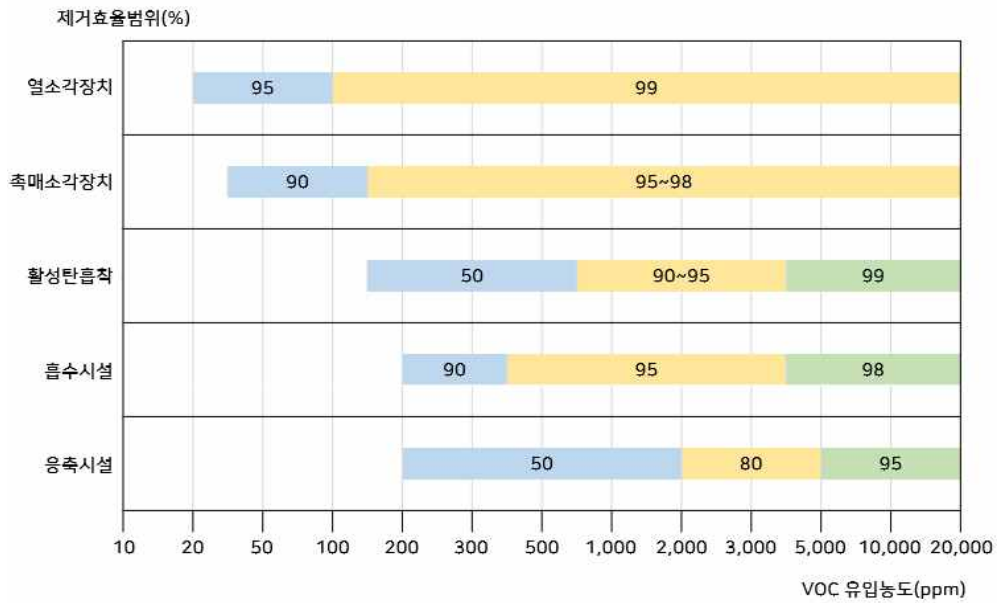
- 화학물질을 처리하는 방법은 흡착기술, 흡수기술, 생물학적 처리기술로 크게 구분할 수 있음.
- [그림 7-1]은 VOCs 유입 유량과 농도에 대한 처리기술의 적용조건을 개략적으로 도시하고 있음. 생물학적 방법은 적용 유량의 범위는 넓지만, 적용 가능한 농도는 상대적으로 협소함을 알 수 있음. 반면에 소각은 적용 농도 범위는 넓지만, 적용 가능한 유량 범위는 넓지 않음을 알 수 있음.



[그림 7-1] VOCs 처리기술별 VOCs 농도와 유입 유량의 적용 범위

(출처) Joseph S. Devanny, Marc A. Deshusses, Todd S. Webster, Biofiltration for Air pollution control

- [그림 7-2]는 VOCs 처리기술별로 VOCs 유입농도에 대한 처리효율을 도시하고 있음. 열소각장치와 촉매소각장치는 상대적으로 넓은 유입농도 범위에서 95% 이상의 효율을 보인 반면 활성탄과 응축시설은 상대적으로 높은 농도인 500ppm 이상에서 95%의 성능을 보여주고 있음.



[그림 7-2] VOCs 처리기술의 VOCs 유입농도 대비 처리효율

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

□ [표 7-3]은 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술 선택 기준을 제시하고 있어, 방지기술 선택 지침으로 활용할 수 있음.

[표 7-3] 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술의 선택 기준

대상물질	응축	흡착	열소각	촉매연소	촉열식 열소각	무화염 열소각
저유량 저농도	●	●	●	●	○	●
고유량 저농도	●	●	●	●	●	●
저유량 고농도	●	○	●	○	○	●
고유량 고농도	●	○	●	○	○	●
비응축 탄화수소 가스	X	○	●	●	●	●
응축 탄화수소 가스	●	●	●	●	●	●
비응축 Cl/S 포함가스	X	○	●	○	●	●
응축 Cl/S 포함가스	●	●	●	○	●	●
연속 운전	●	●	●	●	●	●
회분식 운전	●	●	○	○	○	●

●: 매우 좋음, ●: 좋음, ●: 보통, ○: 나쁨, X: 적용 불가

(출처) 양고수, '열처리 기술을 이용한 VOCs/악취 처리기술 및 관리현황' 자료 인용

□ [그림 7-1], [그림 7-2], [표 7-3]에서 보는 것처럼 대상물질의 유입농도와 유량 정보를 활용하여 기술적으로 적합한 대상물질의 처리기술을 일차적으로 선정할 수 있음. 다음으로는 저감목표, 경제성, 현장 조건(예, 설치부지 등), 혼합물 종류, 온도와 압력 등을 종합적으로 고려하여 처리기술을 최종적으로 선정해야 함.

1) 흡착 처리기술

□ (기술 개요) 화학물질을 흡착제 표면에 물리적으로 흡착하여 처리하는 기술

○ (공정 구성) 일반적으로 활성탄이 많이 사용되고 있으며, 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 증기 또는 열에 의해 피흡착물의 탈착이 이뤄지는 흡착탑 재생공정임. 탈착 과정에서 농도가 높아진 피흡착물이 배출되며, 이를 연소처리기술 등의 후속 공정에서 처리함.

○ (흡착원리) 흡착제와 피흡착물 간에 Van der Waals 힘이 작용하고 있으며, 흡착제와 피흡착물 간의 거리에 따라 위치에너지가 달라짐. 위치에너지가 가장 낮은 지점이 형성되며, 그 지점에서 흡착이 일어남.

○ (흡착·회수 재사용과 차이점) 흡착·처리기술은 테트라클로로에틸렌 등의 유기오염물질을 흡착·처리하는데 목적을 두고 있지만, 흡착·회수 재사용 기술은 테트라클로로에틸렌 등을 회수하여 재사용하는데 초점을 맞추고 있음. 즉 두 기술의 원리는 동일하나 목적에서 차이가 있음.

□ (적용조건) 흡착·처리 공정 단독으로 운영하기보다는 연소처리기술 전단에 설치하여 처리대상물질의 농도를 적정 수준 이상으로 높여 연소처리기술의 처리 성능을 배가시키는 역할을 담당하며, 활성탄이 주로 사용되고 있음.

□ (유의사항) 활성탄 자체가 고온에서 화재 위험성¹¹⁴⁾이 있고, 화재 및 폭발위험성 물질이 농축되어 화재 및 폭발 가능성이 있으므로 활성탄 흡착·처리공정을 설계할 때 이런 점을 유의하여 설계할 필요가 있음.

114) 활성탄 자체 착화온도는 400~500℃

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 연소처리기술과 연계하여 처리하므로 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs 처리 시너지 효과가 있음. 저농도 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs 처리가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 연소처리기술과 연계하면 저농도의 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs 처리가 가능하나, 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 화재 위험성 등으로 관리가 용이하지 않음.

□ (테트라클로로에틸렌 적용) 테트라클로로에틸렌의 흡착처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡착처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

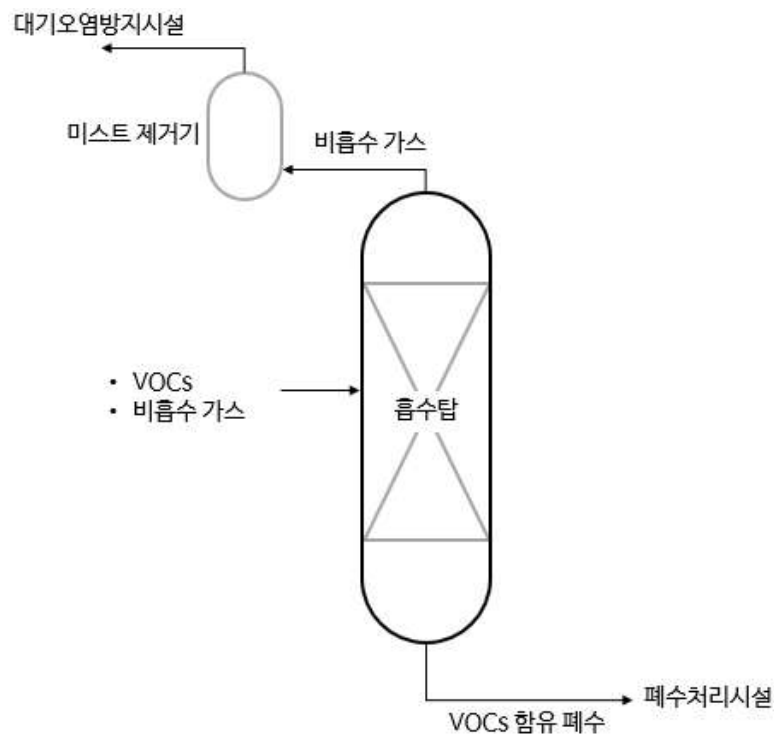
처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
-	18백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

(출처) 한국물가정보(2017년 3월호)

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

2) 흡수처리기술

□ (기술 개요) 혼합 기체를 액체와 접촉하게 시켜 기체의 특정 성분을 액체 속에 용해 흡수·처리하는 기술로서 물리흡수와 화학흡수로 구분할 수 있음. 물리흡수는 흡수제에 대상 기체를 물리적으로 용해시키는 방법이고, 화학흡수는 흡수제 중의 용질 성분과 기체 성분이 화학반응에 의해 흡수되는 방법임.

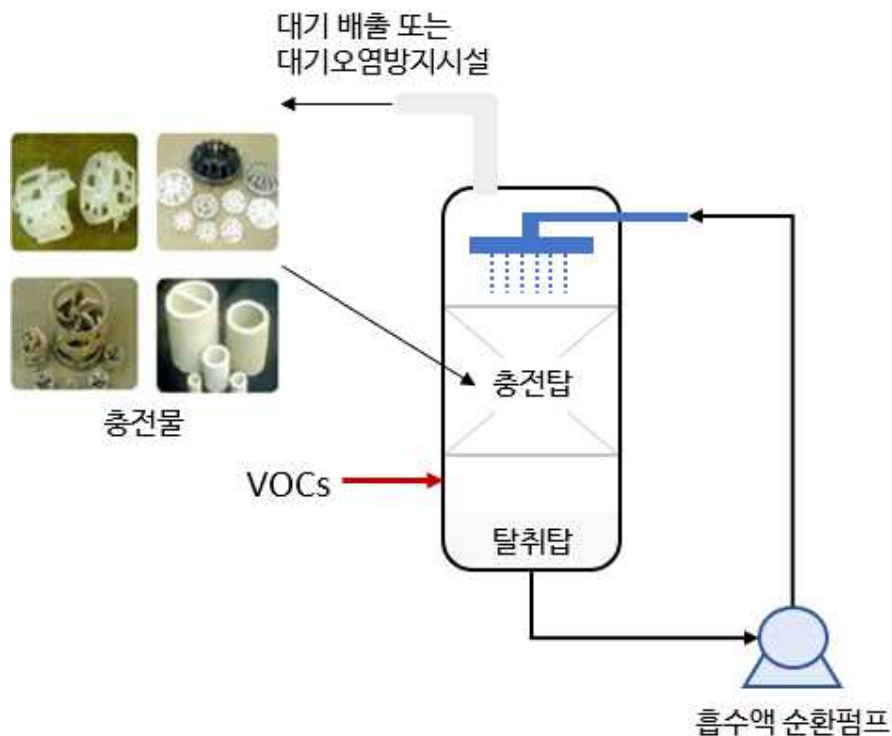


[그림 7-3] 흡수처리기술

○ (VOCs 흡수) VOCs의 흡수는 물리흡수에 이루어지며, VOCs를 함유한 가스에서부터 액상 흡수제로 VOCs가 물질 전달되는 현상으로 물질 전달 구동력은 가스상과 액상 내의 VOCs 특성에 좌우되며 헨리의 법칙(Henry's Law)에 따라 흡수액에 용해되는 양이 결정됨.

- VOCs 흡수제 종류는 물, 고비점 석유오일(Non-volatile Petroleum Oil), 미네랄 오일(Mineral Oil) 등이 있으며, 친수성 VOCs는 물을 활용하여 흡수·제거할 수 있는 최적 흡수제이고, 소수성 VOCs는 고비점 석유오일을 흡수제로 사용하거나, 수용액에 양성(친수성과 소수성 기능을 동시 보유)을 지닌 공중합체(Copolymer)를 투입하여 소수성 VOCs의 흡수를 유도함.

- (VOCs 탈착) VOCs를 흡수제로부터 탈착하여 재생하는 방산(Stripping) 공정이 있으며, 일반적으로 열을 가하거나, 진공을 걸어서 VOCs를 물리적으로 탈착시키며, 응축기와 연결하여 VOCs를 회수할 수 있음.
- (흡수장치 종류) 가스상과 액상이 흐르는 방식에 따라 향류(Counter Flow)와 병류(Co-current Flow) 방식이 있으나, 대부분은 향류 방식이고, 흡수장치의 종류는 충전탑(Packed Bed), 다단탑(Tray Tower), 분무탑(Spray Tower), 벤츄리 스크러버(Venturi Scrubber) 등이 있음. 일반적으로 VOCs 처리에는 충전탑과 다단탑이 많이 적용되고 있음.
- (충전탑) 금속, 세라믹, 플라스틱 재료로 된 불규칙 충전물이나 규칙 충전물로 채워져 있으며, 액체는 기체와의 접촉면적을 높이기 위해 탑 상부에서 고르게 분산되며, 분산된 액체는 충전물의 표면에 박막(Thin Film)을 형성하면서 아래로 흐름. 폐가스는 탑 하부에서 유입되며 흡수액과 접촉하면서 배출가스 중 VOCs 등의 특정 성분이 액상으로 흡수되고, 배출가스의 나머지 성분들은 탑 상부로 배출됨.

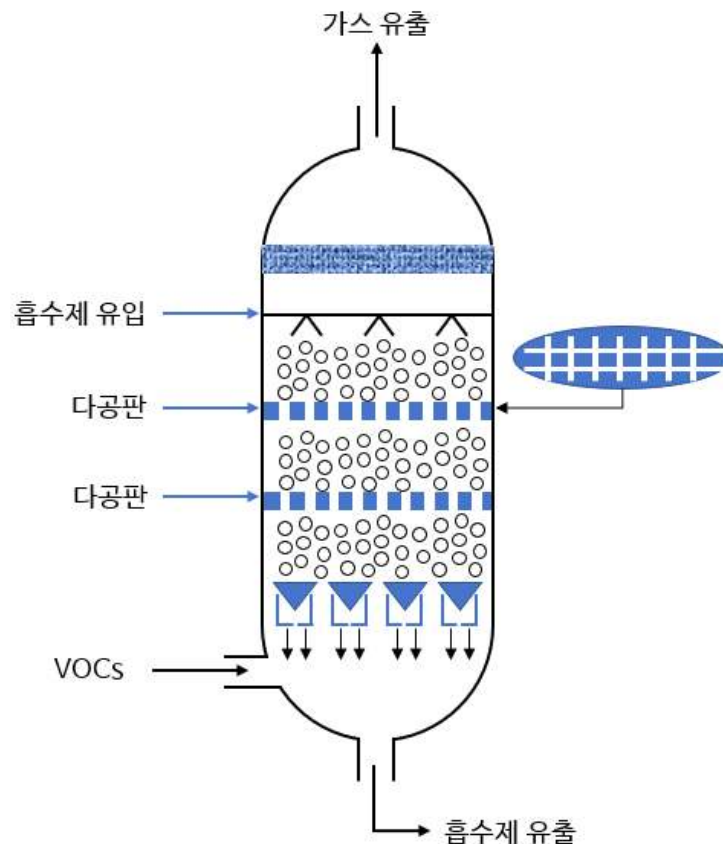


[그림 7-4] 흡수처리기술의 충전탑

(출처) 안전보건공단(2015), 폐수처리설비(스크러버) 화재·폭발 예방대책 매뉴얼

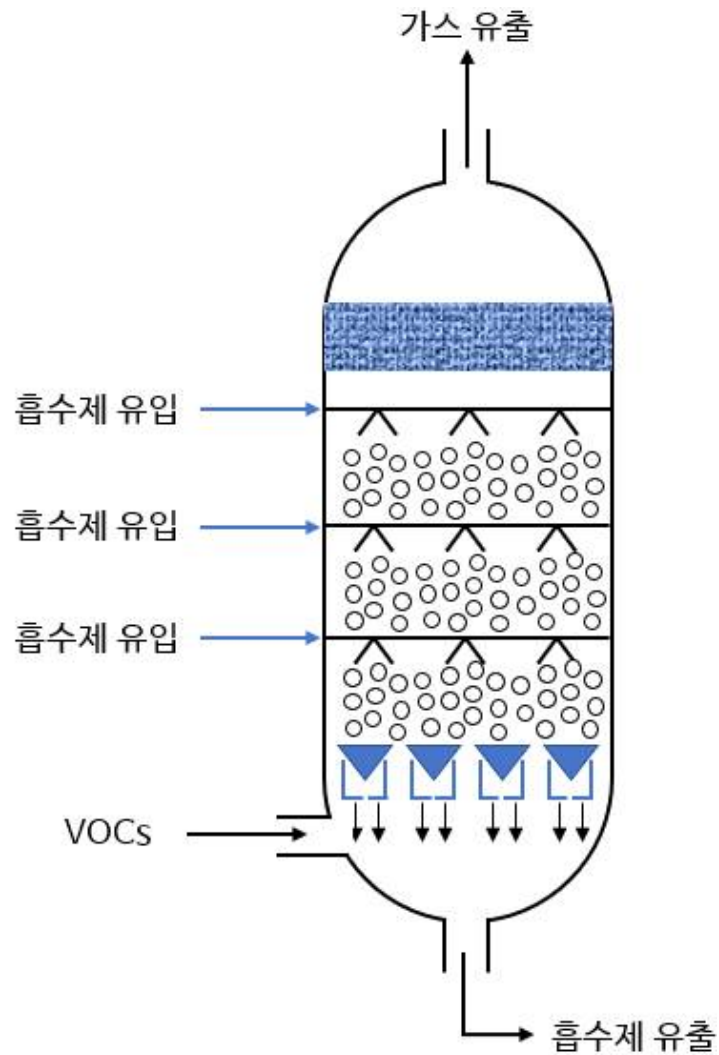
충전탑은 탑 상부에서 흡수액 분산이 성능에 큰 영향을 미치므로, 기체 흐름을 방해하지 않는 범위에서 흡수액이 고르게 분산되어야 하고, 충전물은 액상 박막이 넓게 형성되어 흡수 면적을 커지도록 설계해야 함. 충전탑은 처리효과가 크고, 침전물이 발생하는 가스 처리에도 적합하다는 장점이 있지만 충전층의 공극이 폐색될 수 있고, 충전물이 고가라서 초기 설치비용이 높으며, 가스 유속이 과도한 경우 범람이 발생할 수 있음.

- **(다단탑)** 증류 공정의 증류탑과 유사하고, 접촉시간이 비교적 길고, 각 단의 액체에 기체가 고르게 분산될 수 있다는 특징을 가지고 있어 흡수탑으로 많이 사용되고 있음. 장점으로는 충전탑에 비해 부유물이 있는 흡수액에 대해 적응성이 좋고, 온도 변화가 심한 조건에도 적용이 수월하나, 초기 비용이 높고 압력손실이 큰 단점이 있음.



[그림 7-5] 다단탑 흡수처리시설

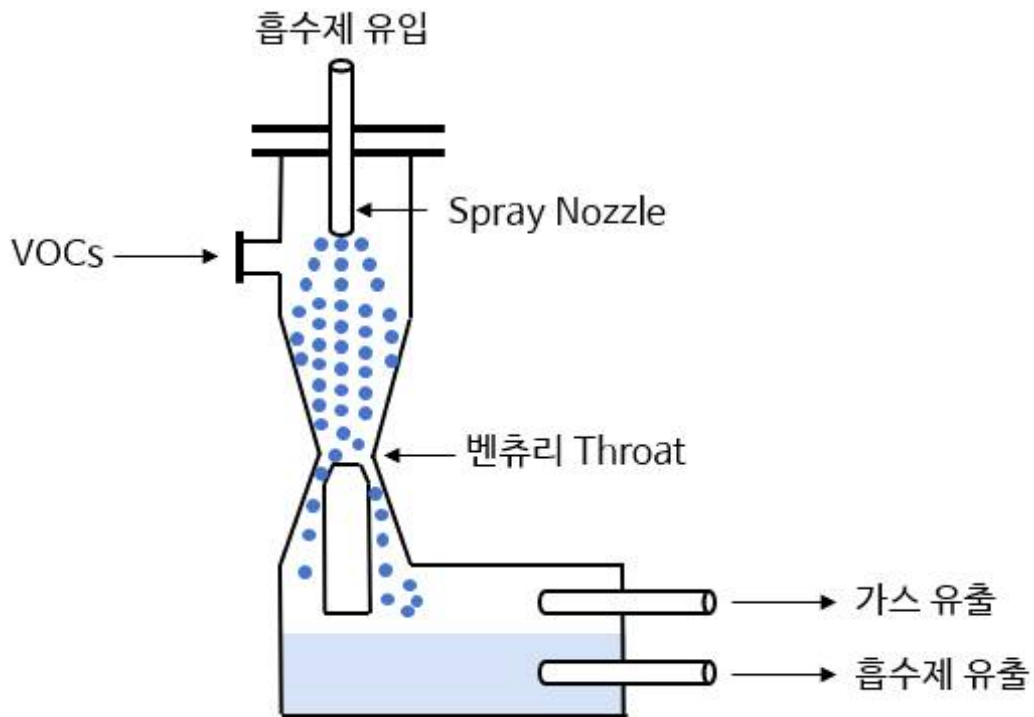
- (분무탑) 충전물을 사용하지 않는 반면 흡수액을 매우 적은 액적으로 만들어 분사함으로써 VOCs가 흡수될 면적을 극대화함. 분무탑의 기체와 액체 접촉시간이 짧아 물에 용해도가 높은 가스(예, 암모니아, 이산화황) 처리에 적합하고, 테트라클로로에틸렌과 같은 VOCs 처리에는 적합하지 않다고 알려져 있음. 분무탑은 충전탑보다 저렴하고, 압력손실이 적은 반면 분사 노즐이 잘 막히고 편류를 일으키기 쉽고 분무액과 기체의 균일한 접촉이 용이하지 않은 단점이 있음.



[그림 7-6] 분무탑 흡수처리시설

- (벤츄리 스크리버) 벤츄리 노즐에서 배출가스와 흡수액을 강제로 접촉시켜 배출 가스 중의 특정 성분을 흡수·처리하는 설비임. 흡수액과 배출가스와의 접촉시간이 매우 짧아 대부분의 VOCs보다는 용해도가 높은 가스 제거에 적합함.

벤츄리 스크리버는 소형으로 대용량 가스 처리가 가능하고 흡수효율이 탁월한 장점이 있는 반면 가스 압력손실이 커서 동력비가 높은 단점이 있음.



[그림 7-7] 벤츄리 스크리버 흡수처리시설

(출처) <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/venturi-scrubber> 인용

- (유의사항) 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 상대적으로 낮은 압력손실 ▪ 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 ▪ 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 ▪ 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 ▪ 상대적으로 낮은 설치비용 ▪ 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폐수처리 문제 ▪ 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 테트라클로로에틸렌 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 경제성 때문에 테트라클로로에틸렌 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

□ (테트라클로로에틸렌 적용) 테트라클로로에틸렌의 흡수처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡수처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%) ¹	설치비용(100m ³ /min) ²	연간 운영비용(m ³ /min)	비고
70~90	30백만원	-	-

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: 물가정보(2019.11)

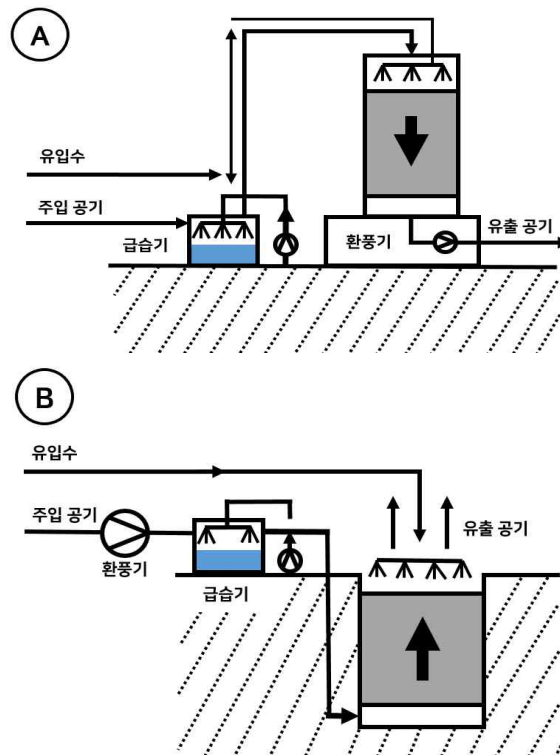
※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

3) 생물학적 처리기술

□ (기술 개요) 생물학적 처리기술은 호기성 미생물을 활용하여 VOCs를 산화·분해하는 기술: $VOCs + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + Heat + Biomass$

○ (종류) 생물학적 처리기술의 종류는 첫째, 바이오필터(Biofilter), 둘째, 바이오스크리버(Bioscrubber), 셋째, 바이오탁리클링 필터(Biotrickling Filter)임.

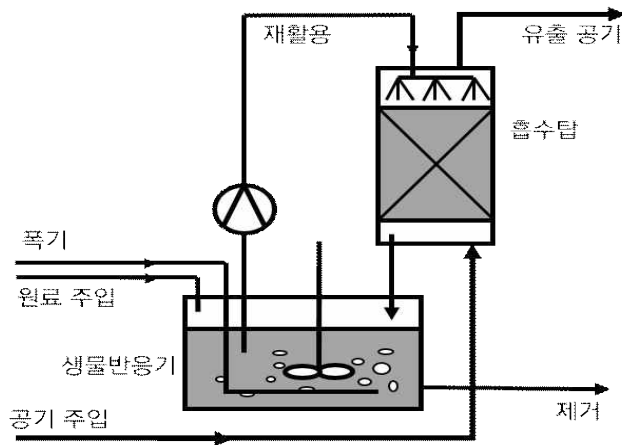
- (바이오필터) 바이오필터 고정체(하우징, Housing)는 가습장치, 온도조절장치, 분무장치로 구성되어 있는 밀폐형 구조임. 바이오필터 충전제는 미생물 서식에 최적 조건을 제공할 수 있는 물질(활성탄, 퇴비 등)로 구성되어 있어 미생물 농도는 토양 사용 시 보다 최고 140배까지 높일 수 있음. 바이오필터의 충전제는 오염물질을 1차적으로 흡수한 후 충전제 속의 미생물이 오염물질을 처리하도록 되어 있으며, 연속적 충전제의 재생이 가능한 시스템으로 한 번 설치하면 2~7년 정도 충전제 교체 없이 운전이 가능함.



[그림 7-8] 바이오필터 구성

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

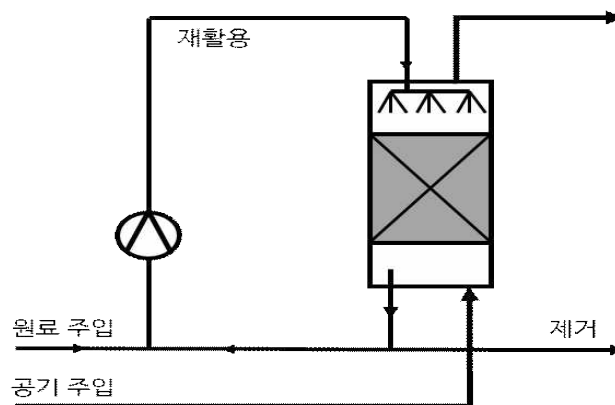
- (바이오스크리버) 배출가스를 세정탑에 통과시켜 오염물질을 물에 흡수시킨 후 이를 포기조에서 미생물 활동에 의해 제거하는 것임. 바이오스크리버에 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 테트라클로로에틸렌 등 대부분 VOCs는 적합하지 않음.



[그림 7-9] 바이오 스크리버

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- (바이오탁리클링 필터) 바이오필터와 바이오스크리버가 혼합된 형태로서 미생물을 불활성 담체에 배양 충전시키고, 오염된 물을 상부에서 미생물이 충전된 담체에 분무하여 처리하는 시스템임. 바이오스크리버와 마찬가지로 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 테트라클로로에틸렌 등 대부분 VOCs 적용에는 적합하지 않음.



[그림 7-10] 바이오탁리클링 필터

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- **(적용조건)** 생물학적 처리방법은 일반적으로 저농도 VOCs를 포함한 상온의 배출가스 처리에 적합하며, VOCs 농도, 온도, 배출가스 유량, 기타 미생물에 치명적인 성분 등을 고려하여 적용성을 검토해야 함.

항목	추천범위	비고
VOCs 유입농도(ppm)	500 이하	톨루엔 기준
단위 체적 당 부하(g/m ³ ·hr)	100 이하	-
제거효율(%)	90 이상	-
배출가스 유량(m ³ /hr)	300 이하	설치 공간 고려
배출가스 온도(°C)	20 ~ 40	-
배출가스 습도(%)	제한 없음	-
할로겐 및 SO ₂	제한적	전 처리 필요
분진	제한적	전 처리 필요

□ **운전인자**

- **(수분함량)** 생물학적 처리방법에서 가장 중요한 인자는 수분함량으로 특히 바이오필터는 수분 조절이 어려워 실패하는 사례도 있음.
- **(온도)** 미생물의 활동도는 온도 증가에 따라 증가하나, 온도가 한계치 이상 오르면 미생물이 오히려 폐사됨. 그러므로 최고 활성을 일어나는 온도를 파악하고, 그 이상으로 온도가 올라가지 않도록 세심하게 조정하는 것이 필요함.
- **(pH)** 각각 미생물들은 고유의 최적 pH를 가지고 있어 일정 범위의 pH 조건에서 활성이 좋으며, 이 범위를 벗어나면 활성이 떨어지거나 폐사하게 됨.
- **(영양분)** 미생물은 에너지와 탄소원을 얻기 위해 오염물질을 분해하나 질소, 인, 칼륨, 황, 칼슘, 나트륨, 철 및 수많은 다른 성분의 미네랄도 필요하므로 미생물의 활성도를 왕성하게 유지하기 위해서는 이런 성분들을 충분히 공급해야 함.
- **(오염물 농도 부하와 표면 부하)** 단위시간 당 단위부피 당 생물학적 처리공정에 들어가는 오염물질의 총량을 농도 부하로 정의하고 있으며, 생물학적 처리공정 설계 및 운전에 중요한 인자임.

- (산소 농도) VOCs 처리에 필요한 산소의 화학양론비적 양이 평형상태에서 용해되는 산소량보다 적으면 산소 소진이 일어나므로 산소 농도를 적정 수준에서 유지할 수 있도록 생물학적 처리공정 설계 및 운전이 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저렴한 설치 및 운영비용 • 낮은 압력손실 • 비선택성으로 다양한 물질로 구성된 VOCs의 동시 처리 가능 • 폐수, 폐기물 등의 2차 오염 물질 배출이 최소화 • 설치 융통성 	<ul style="list-style-type: none"> • 넓은 부지 필요 • 느린 처리속도 • 특정 물질 처리에 적합한 선택적으로 미생물 적용(따라서 복합 미생물 군집 적용 필요하나 배양이 쉽지 않음) • VOCs 회수 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 VOCs 처리에 적합하며, 설치 운영비용이 저렴하고 2차 오염물질 생성 배출이 적지만 처리속도가 느리고 설치 부지 면적이 넓다는 단점이 있음.

- (테트라클로로에틸렌 적용) 테트라클로로에틸렌의 생물학적 처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 생물학적 처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	비고
50~70	100백만원 + α	바이오필터
50~70	150백만원 + α	바이오스크러버
50~70	290백만원 + α	바이오탁리클링필터

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

7.4.2

탈지·세정·표백공정

7.4.2.1. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 테트라클로로에틸렌이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 테트라클로로에틸렌의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
 - (밀폐형 덮개) 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 1-11] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

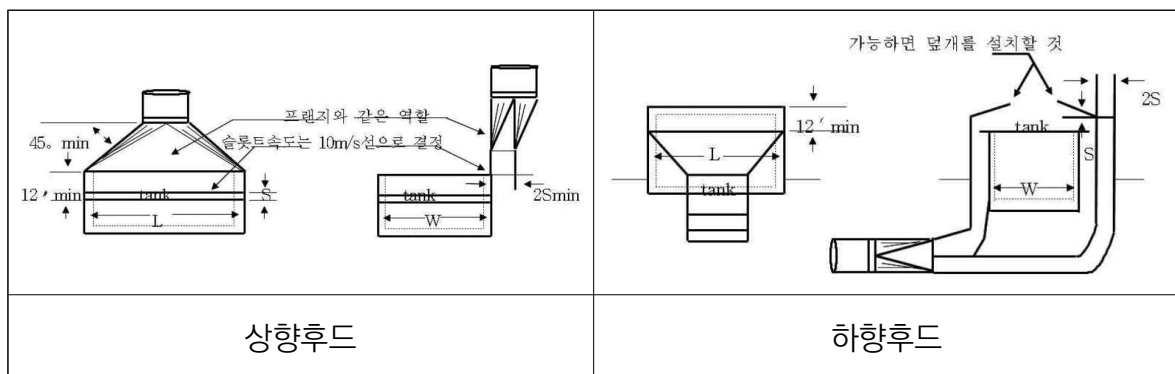
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 7-12] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

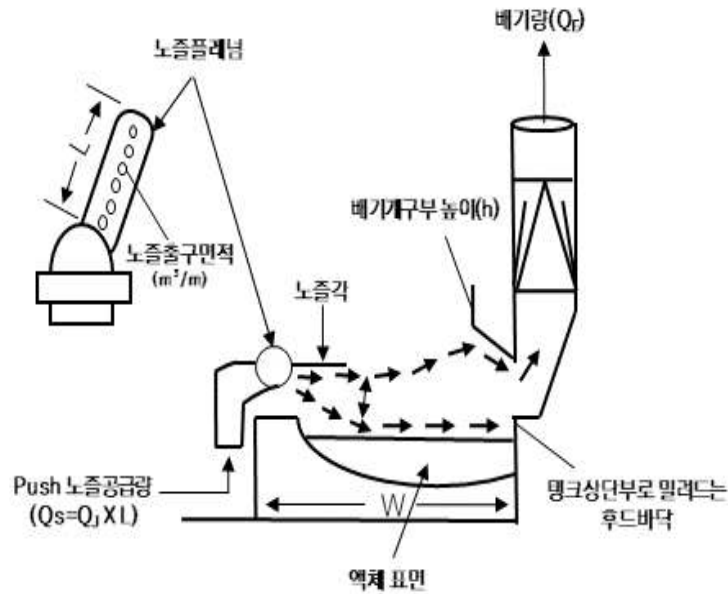
- (외부식후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 7-13] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 7-14] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

7.4.2.2. 재사용 및 재활용

흡착·회수	대기 중으로 배출되는 VOCs를 흡착제에 흡착시키고, 온도 또는 압력 조절을 통해 탈착·회수하는 기술
응축·회수	응축기 등을 통해 유체 온도나 압력 변화로 대상 VOCs를 분리·회수하는 기술
흡수·회수	액상 흡수제를 가스상의 VOCs와 접촉하여 VOCs를 흡수제로 물질 이동시켜 분리·회수하는 기술
막분리·회수	혼합가스 각각의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술

1) 흡착·회수기술

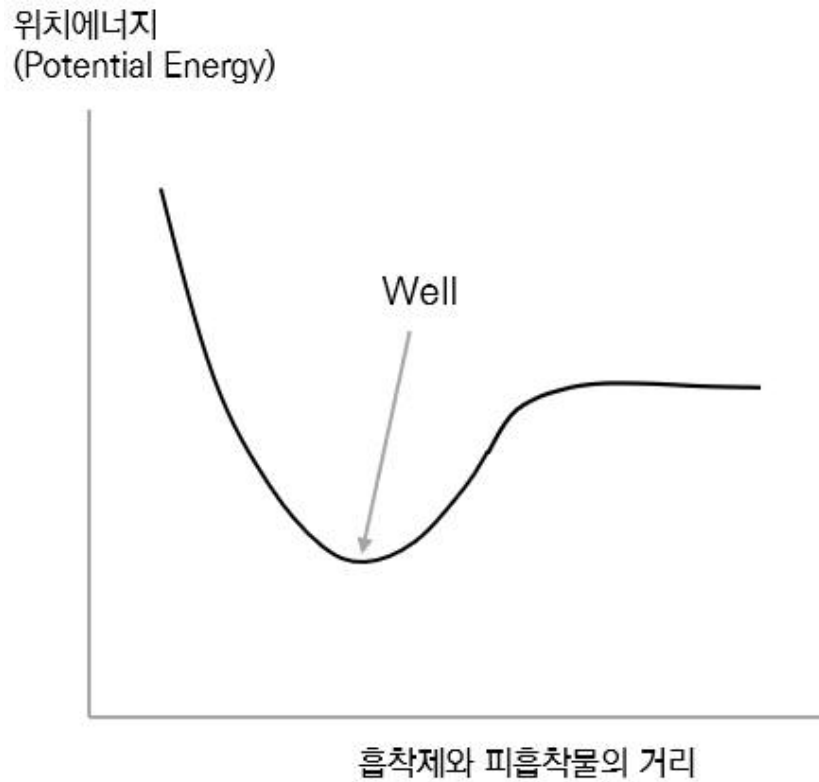
□ (기술 개요) VOCs를 흡착제 표면에 물리적으로 흡착시키고 탈착·회수 재이용하는 기술

○ (흡착) 흡착공정은 화학적 흡착과 물리적 흡착으로 구분할 수 있으며, 화학적 흡착은 피흡착물과 흡착제가 화학적으로 결합하므로, 피흡착물과 흡착제의 화학적 결합을 끊어야 하므로 원래 형태로의 피흡착물 회수가 용이하지 않음. 반면 물리적 흡착은 원래 형태로 피흡착물의 회수가 가능하므로 흡착·회수 재사용기술에서는 물리적 흡착을 적용하고 있음.

- (물리적 흡착원리) 아래 그림은 흡착제 표면으로부터의 거리와 위치에너지 (Potential Energy)의 상관관계를 보여주고 있음. 흡착제와 피흡착물 간에는 '반발 (Repulsion)¹¹⁵⁾'과 '견인(Attraction)¹¹⁶⁾'이 동시에 작용하여 균형을 이루고 있음. 흡착제와 피흡착물의 거리 중에서 위치에너지가 가장 낮은 지점(Well 또는 Dip)에서 흡착이 일어나며, 피흡착물의 탈착을 위해 필요한 에너지가 외부에서 운동 에너지(Kinetic Energy) 형태로 공급되면 탈착이 일어남.

115) 흡착제와 피흡착물의 전자군(Cloud of Electrons) 간의 반발력

116) 전자 핵(Nuclear) 간의 Van der Waals force에 의한 견인력

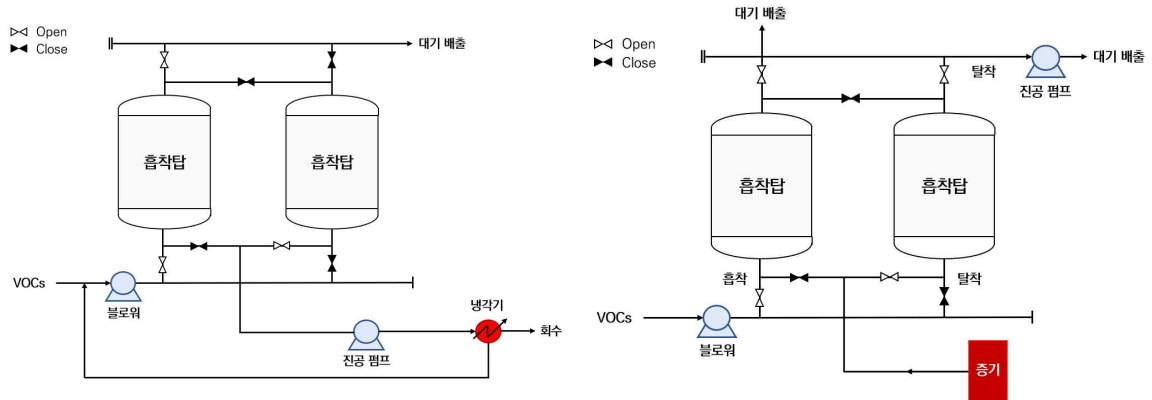


[그림 7-15] 흡착제와 피흡착물의 거리에 따른 위치에너지 변화

(출처) EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004

- **(탈착)** 포화된 흡착제 재생 방법은 온도 차이를 이용한 열탈착 방식(Temperature Swing Adsorption, 이하 TSA)과 압력탈착 방식(Pressure Swing Adsorption, 이하 PSA)이 주로 적용되고 있음.
 - **(TSA)** 고온 증기를 이용해 흡착제(예, 활성탄)에 흡착된 VOCs를 회수하는 방법으로 흡착제에 잔류하는 수분을 건조해야 하며, 고온 증기사용으로 화재 등 위험성이 있으며, 운전비용이 높고, 시간이 많이 소요되는 단점이 있음.
 - **(PSA)** 고압에서 VOCs를 흡착시키고, 압력을 낮춰 VOCs를 탈착시키는데 고압에서 운전하므로 운전비용이 높고, 공정 규모가 커지는 단점이 있음.
- **(공정 구성)** 일반적으로 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이

운전되는 동안에 다른 하나는 탈착하게 됨.



[그림 7-16] 흡착·회수공정 모식도

(출처) SEST주식회사 홈페이지 (http://www.sestco.com/kor/vru_01.php) 인용

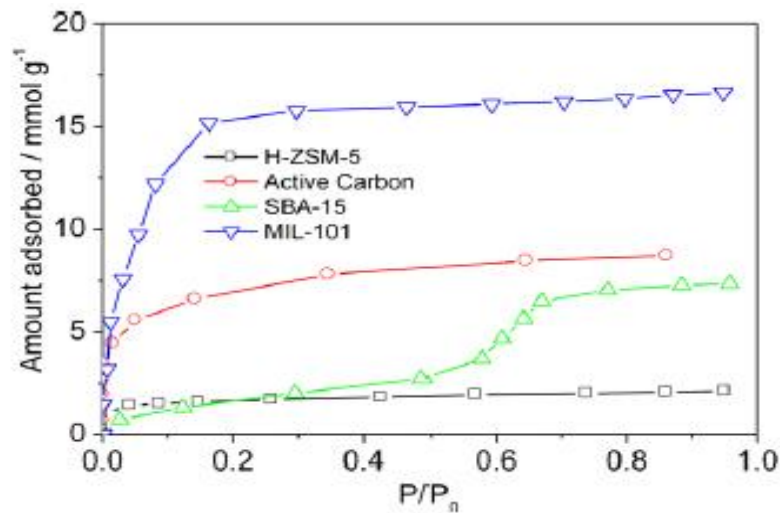
- (적용조건) 1) 테트라클로로에틸렌 단일물질 또는 테트라클로로에틸렌 혼합 VOCs, 2) 단일배출구의 점오염원, 3) 고농도 테트라클로로에틸렌 또는 VOCs 등이며 테트라클로로에틸렌과 VOCs의 회수·재이용을 위해서는 처리보다 경제성 있어야 하고, 테트라클로로에틸렌과 VOCs 가격과 배출가스 특성에 의해 결정됨.
- (배출가스 특성) 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, 테트라클로로에틸렌과 VOCs 농도, 수분량, 온도 등이며, 이는 흡착제 종류에 따라 달라지므로 '흡착제 종류'에서 상세히 설명하였음.
- (흡착제 종류) 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs 흡착제 종류는 1) 활성탄, 2) 제올라이트 (Zeolite), 3) 폴리머(Polymer), 4) MOFs(Metal-organic Frameworks)를 꼽을 수 있으며, 각 흡착제의 특성은 아래에서 보는 것과 같음.

[표 7-4] 흡착제 특성 비교

항목	활성탄	제올라이트	폴리머
표면적	600~1,400 m ² /g	천연 (300~600 m ² /g) 합성 (800~900 m ² /g)	
공극 크기	micropore (공극 직경 < 2 nm), mesopore (2 nm < 공극 직경 < 50 nm), macropore (공극 직경 > 50 nm)	3~30 nm (일정한 공극 크기)	Porous polymers (1~1.6 nm)
표면특성	친수성 ¹ 과 소수성 특성을 모두 보유하고 있음	천연 제올라이트는 친수성이나, 합성 제올라이트는 친수성 또는 소수성으로 목적에 맞게 합성 제작	대부분은 소수성이나 사용 목적에 적합하도록 물성을 변형 합성 제작하는 경우도 있음.
배출가스 유량	60~3,500 m ³ /hr (단일) 병렬 사용시 용량 증가 가능 (for VRU)	60~3,500 m ³ /hr	
VOCs 유입농도	700~1,000 ppm (LEL 25% 이하) 경제성을 고려하면 10~70 VOL% (100,000~700,000 ppmv) (For VRU)	1,000~10,000 ppm (LEL 25% 이하)	
수분량 (상대습도)	50% 미만	94~96%까지 허용	
온도	55°C 이하	상온	
탈착방법	증기 열탈착 ² 진공(Vacuum) 탈착	열탈착 ⁴	열탈착 ⁵
탈착효율 ³	50% 회수효율 98% 이상	90%	50~90%
교체주기	6개월~5년(증기 열탈착) 7년 이상(진공 탈착)	5년 이상	교체주기는 폴리머에 따라 다르나 일반적으로 상당 기간 교체를 하지 않아도 되는 것으로 알려져 있음

- 1: 활성탄의 친수성 특성 때문에 물이 활성탄에 흡착된 피흡착물을 치환·탈착하는데 주요 역할 담당하며, 재생에 필요한 증기량은 목표 제거효율(또는 출구 농도)에 좌우되고, 일정한 증기가 흡수층 온도를 재생온도로 올리는 탈착에너지 공급
- 2: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 활성탄 착화 온도보다는 낮아야 함(재생 최고 온도는 120~180°C)이고, 탈착을 위한 증기 사용량은 0.25~0.35 kg H₂O/kg AC
- 3: EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004
- 4: 열에 강하기 때문에 고온 탈착도 가능
- 5: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 폴리머 용점(Melting Point)보다는 낮아야 하고, 열에 약하기 때문에 탈착 온도는 비교적 낮은 온도에서 운전

- 최근 연구¹¹⁷⁾에서는 금속-유기 기반 구조(Metal-organic Frameworks; 이하 MOFs) 촉매가 테트라클로로에틸렌 흡착에 있어서 활성탄, 제올라이트보다 성능이 더 좋다고 알려져, MOFs의 적용을 검토해 볼 필요가 있으나 MOFs는 고가이므로 경제성 검토를 통해 결정할 필요가 있음.



[그림 7-17] 여러 흡착제의 테트라클로로에틸렌 흡착능 비교

(참고) MIL-101은 Al, Cr이 담지된 Terephthalate로서 MOFs 일종

○ 흡착제 비교 평가

- 활성탄은 화재 위험성이 높고, 비점이 높은 유기화합물에 적용하기 어렵고, 수분 조절이 필요하다는 단점을 갖고 있으며, 이를 극복하기 위해 제올라이트 흡착제가 개발 적용되고 있으나, 제올라이트는 고가이므로 활성탄 적용이 어려운 특정 목적에 주로 활용되고 있음.
- 한편 폴리머 흡착제는 표면특성 조절이 가능하다는 특성 때문에 개발 적용되고 있으나, 열에 취약하고 고가라는 단점을 갖고 있으나, 활성탄이 적용하기 어려운 특정 목적으로 고려해 볼 수 있음.
- 활성탄은 적용사례가 많아 기술적 안정성이 높고, 가장 저렴하나 교체 관련 번거로움이 있으며(최장 사용 기간은 7년), VOCs의 배출특성을 고려하여 제올

117) Khan, N. A., Hasan, Z., Jung, S. H. (2013), Adsorptive Removal of Hazardous Materials using Metal-organic Frameworks (MOFs): A Review

라이트와 폴리머도 대안으로 고려·결정할 필요가 있음.

□ 처리효율과 비용

흡착제	회수효율	설치비용	운전비용	비고
활성탄 ¹	80% 이상	500백만원 이상 ³	2.4백만원/톤	회수 재사용으로
제올라이트 ²	90~96%	-	61,000~163,000원/m ³	원료물질 대체로
폴리머	-	-	-	운전비용 상쇄 효과

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: Khan, F. I., Ghoshal A. Kr. (2000), Removal of Volatile Organic compounds from polluted air: A Review

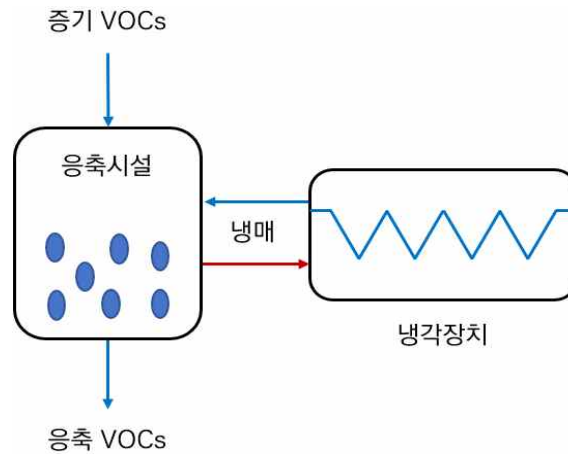
3: 유입 가스 유량과 농도에 따라 비용 차이 발생

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 테트라클로로에틸렌의 지속적 재사용으로 인한 구매 비용 절감 테트라클로로에틸렌의 환경 유입을 차단하여 환경 개선 효과 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 테트라클로로에틸렌 재사용으로 환경 개선 효과가 있는 반면 설치·운영 비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 관리가 용이하지 않음.

2) 응축·회수기술

- (기술 개요) 응축은 온도를 낮추어 기체상태 물질을 액체 상태로 전환하는 방법으로 냉매를 활용하여 기체상태 혼합물의 온도를 낮추어 응축 가능한 물질(VOCs 등)을 응축 불가능한 물질로부터 분리하는 기술



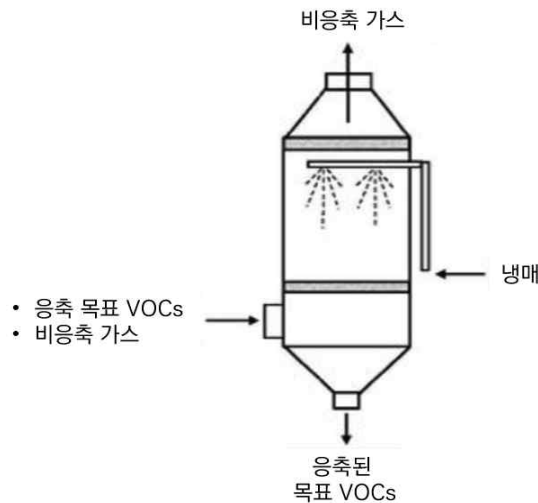
[그림 7-18] 응축·회수 공정도

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

- (원리) 기체상태 물질은 노점(Dew Point)¹¹⁸⁾에서 응축이 일어나며, 일정한 압력에서 온도를 점차 낮추면 노점이 다른 물질들이 특정 온도에서 응축이 일어나면서 분리 추출됨. 또는 온도는 일정하게 유지하면서 압력을 높여줌으로써 냉각응축을 유도하여 특정 물질을 분리할 수도 있음.
- (종류) 응축은 비냉각방식(Non-refrigeration Method)과 냉매를 사용하는 냉각방식(Refrigeration)으로 구분할 수 있으며, VOCs 회수에서는 냉각방식을 주로 활용하고 있음.
- (응축기 종류) 냉각응축을 유도하는 방법으로 접촉 응축방법과 표면 응축방법으로 구분할 수 있음.

118) 기체상태 물질의 분압과 그 물질의 증기압이 동일한 온도

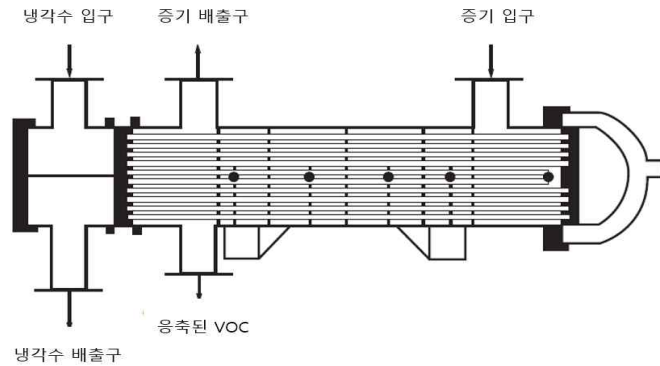
- **(접촉 응축기)** 응축 대상 기체를 냉매와 직접 접촉 혼합하면서 열적·물리적 평형이 이루면서 VOCs를 응축하여 냉각용 액체(배기가스 중의 물이 어는 것을 방지하기 위해 메탄올 주입)에 흡수됨. 접촉 응축방식의 냉각제는 계속 사용할 수 없고, 냉각제에 응축된 VOCs도 바로 재사용하지 못하고 분리 과정을 거쳐야 하는 단점 때문에 경제적이지 못함.



[그림 7-19] 접촉 응축기

(출처) Jan Carlson(2016), Air Pollution Control Technology Review : Condensationhttps

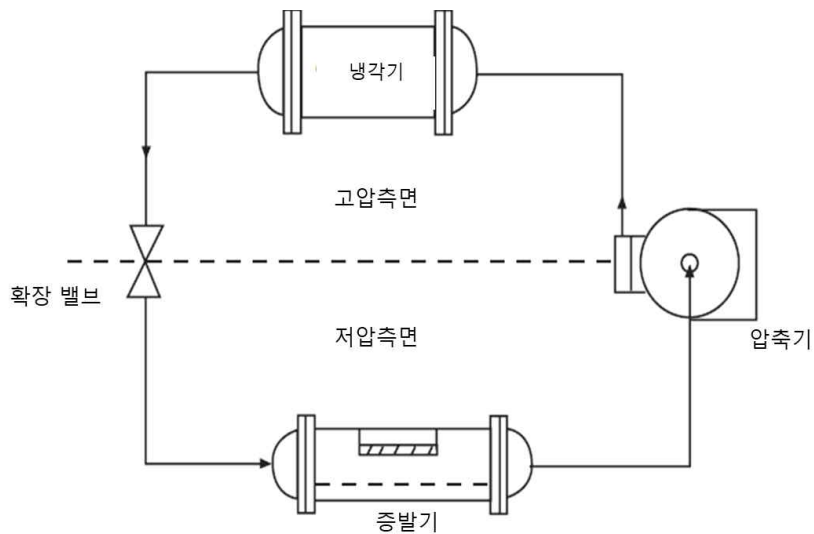
- **(표면 응축기)** 다관식 열교환기 형태로 관 내부에 냉매를 통과시키는 반면 관 외부로 VOCs를 유입시켜 냉매가 통과하는 관 표면에 VOCs를 응축시키는 방법으로 Shell-and-Tube 응축기가 이에 속하며, 냉매와 VOCs가 직접 접촉하지 않아 분리하지 않고 VOCs를 재사용할 수 있는 장점이고, 냉각제도 지속해서 사용 가능하나, 직접 응축방법보다는 냉각효율이 낮은 단점이 있음.



[그림 7-20] 표면 응축기

(출처) EPA, Section 3: VOC Controls 2-5

- 표면 응축방법은 냉매가 증발·압축·응축·확장 등의 4단계를 거치면서 냉각이 이뤄지며, 냉매는 관을 통해 순환되면서 VOCs를 응축시킴.



[그림 7-21] 냉매 순환단계 모식도

(출처) EPA, Section 3 VOC Controls 2-6

- (냉매 종류) 냉매는 주로 물, 냉수, 염수(Brine), 수소불화탄소(HFC), 암모니아, 저온 유체 등이 있으며, 이들 냉매의 적용 가능한 물질의 응축온도는 냉수는 7°C, 염수(Brine)는 -35°C, 염화불화탄소는 -68°C이며, 질소 또는 이산화탄소와 같은 저온 유체는 -195°C까지 가능함.

냉매	적용 가능 응축온도(°C)	냉각온도(°C)
물	15.5 ~ 26.7	(T _{con} - 9) 응축온도보다 9°C 낮게 설정
냉수	7.2 < T _{con} < 15.2	
염수(Brine, 염화칼슘)	-34.4 < T _{con} < 7.2	
HFC-134a	-67.8 < T _{con} < -34.4	

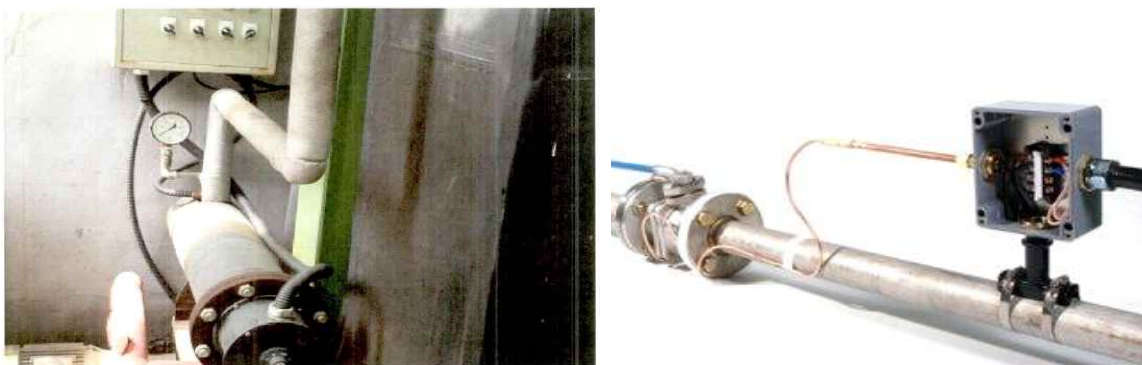
T_{con}: 응축온도(노점, Dew Point)

□ (적용조건) 응축·회수 적용을 위해서는 비등점이 38°C(100°F) 이상인 VOCs가 적합하며, 유입농도는 5,000ppm 이상이면 유리하나, 비등점이 낮은 물질은 극저온 또는 압력을 가하는 추가적인 노력이 필요함. VOCs는 비등점, 빙점 등이 유사한 물질이 많아 혼합 VOCs에서 특정 물질의 분리·회수가 쉽지 않아 응축·회수는 단일 VOCs 회수에 적합함.

□ (적용사례) 원유 저장시설에 기화된 VOCs를 진공펌프로 추출하고, 스크리버로 응축하여 VOCs를 회수하는 기술로서 회수율은 95%¹¹⁹⁾ 정도로 알려졌다.

□ 유의사항

○ (결빙 문제) 응축 대상 VOCs 중에 수분이 함유되어 있거나, 빙점이 높은 VOCs는 응축 과정에서 얼어붙어 관을 폐쇄하므로 운전 문제를 초래하고 생산공정도 중단해야 하므로 수분을 사전에 제거하거나 가열선을 설치하여 간헐적으로 얼음을 녹여주어야 함.



[그림 7-22] 가열선을 설치하여 얼음을 녹이는 배관

(출처) 안산녹색환경지원센터(2011), 응축 기술을 이용한 VOCs 제거 및 회수 설비에 관한 연구

(출처) Heatizon Systems, <https://www.heatizon.com/products/heatizon-brands/guttermelt>

119) <http://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/units-and-plants-practices/VOCs-recovery-systems/#reference-10>

○ (스케일 문제) 표면 응축방법의 경우 고비점의 유기화합물(타르 등)이 응축기 표면에 응축되면서 스케일을 형성하여 성능 저하 초래

- 여과장치 등의 전처리를 설치하여 스케일 원인 물질 제거

□ (테트라클로로에틸렌 적용) 테트라클로로에틸렌의 응축회수기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 VOCs 응축회수기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

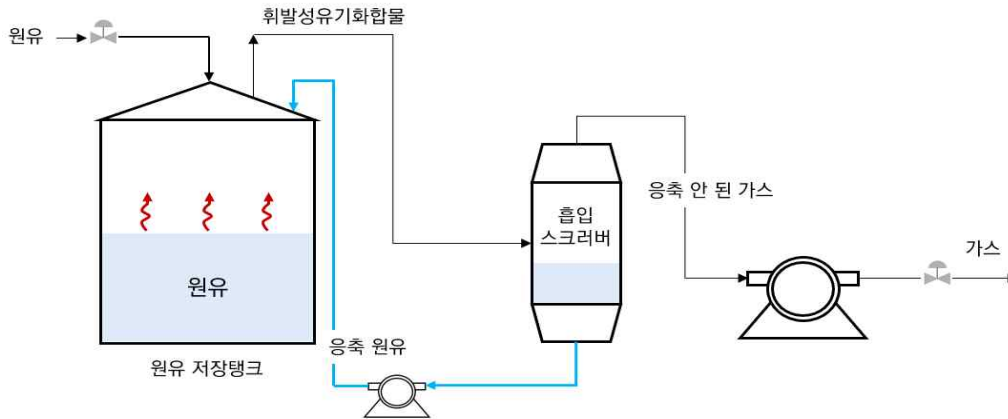
회수율(%)*	설치비용	운영비용	비고
90	100백만원 이상	30백만원 이상	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 액체질소 적용한 경우

3) 흡수·회수기술

- (기술 개요) 단일 VOCs 또는 혼합 VOCs가 포함된 배출가스를 흡수제에 물리흡수 시킨 다음 방산(Stripping) 공정을 통해 VOCs를 분리한 다음 응축 과정을 거쳐 회수하는 기술



[그림 7-23] 흡수·회수 시설의 공정도

(출처) ipieca(2013), VOC recovery Systems 인용

- (소극적 회수기술, Passive Recovery Technology) 저장시설 등으로부터 추출된 VOCs에 압력을 가해 원유에 흡수¹²⁰⁾시키거나, 다양한 유기용제(예, Kerosene)를 흡수제로 사용하여 응축 흡수¹²¹⁾(원유 저장시설의 경우는 원유 자체를 흡수제로 사용)한 다음 저장시설에 재투입하고, 회수하지 못한 VOCs는 고온 산화 처리 또는 다른 용도로 활용

120) 압력 흡수의 회수율은 80%

121) 응축 흡수의 회수율은 90%



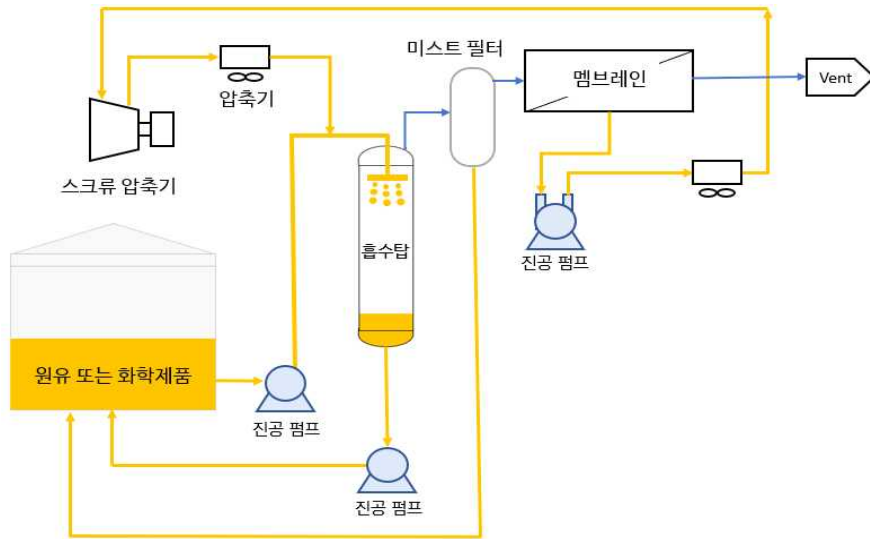
[그림 7-24] 선박에서 원유 하역 과정에서의 VOCs 흡수·회수 및 고온 산화 처리

(출처) JX(2013), Technologies for Volatile Organic compounds

- (운전조건) 흡수 반응기 운전조건은 상황에 따라 달라지며(현장 적용사례122) : 온도는 3~7℃, 압력은 0.3~0.5 MPa), 흡수제로는 원유 또는 석유화학제품 등 저장시설의 물질과 같은 물질을 사용하여 용해·회수
- (적극적 회수기술, Active Recovery Technology) 저장시설로부터 VOCs를 포집한 다음 흡수공정과 타 회수공정을 연계하여 VOCs를 회수하는 기술(흡수공정만으로는 회수효율이 떨어지므로 연계 공정 적용)
- (흡수/막분리 연계방식) 흡수 단독공정에 막분리를 후속으로 연결한 방식으로 흡수 단독공정의 경우 VOCs 회수율이 70% 수준에 불과하였으나 막분리 공정을 후속으로 연결하여 회수율이 95%로 높아졌음123).

122) JX Nippon Oil and Energy에서 일본 가고시마의 키이레 터미널(Kiire Terminal)에 설치 운전(처리규모: 20,000 Sm³/hr)

123) CARBOVAC, Vapor Recovery Solutions

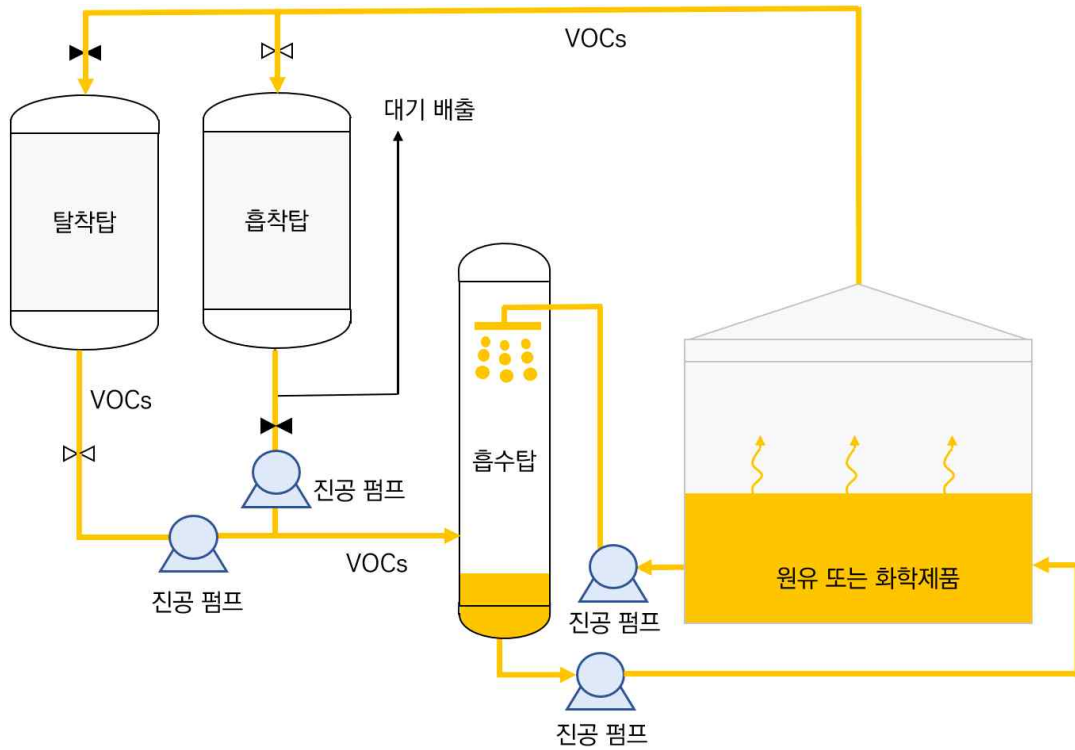


[그림 7-25] 흡수/막분리 연계 회수공정

(출처) BORSIG Membrane Technology GmbH, BMEMBRANE TECHNOLOGY FOR PROCESSES AND ENVIRONMENT, 8p 인용

- (흡수/흡착 연계방식) 흡수공정 앞에 활성탄을 활용한 흡·탈착공정을 설치하여 저장시설 또는 운반시설로부터 휘발·배출된 VOCs를 흡착시킨 다음 감압하여 VOCs를 탈착시킴. 탈착된 VOCs를 흡수탑에 주입하여 저장시설의 원유 또는 석유화학제품에 용해·회수하는 방식임. VOCs 회수율이 흡수 단독공정의 70% 안팎에서 90~99%로 높아졌음.
- (흡착) 활성탄 등의 흡착시설을 이용하여 저장시설 등으로부터 배출되는 VOCs를 흡착시켜 불활성기체¹²⁴⁾와 분리
- (탈착) 일반적으로 흡착탑에 진공펌프를 걸어 VOCs 탈착

124) 운반기체로서 농도 조절과 화재 위험도를 낮추기 위한 목적



[그림 7-26] 흡수/흡착 연계 회수공정
 (출처) logo alma Carbovac, Vapour Recovery Units, 4p 인용

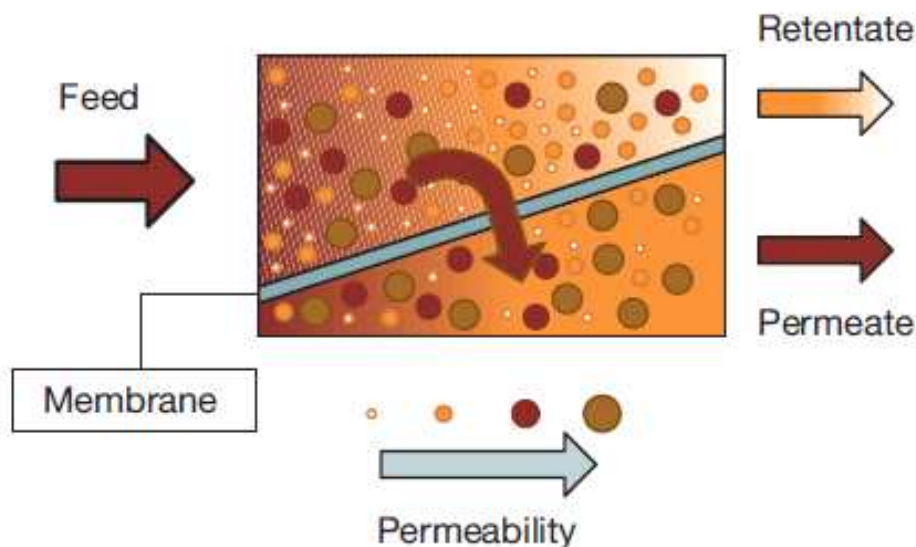
□ (유의사항) 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 상대적으로 낮은 압력손실 • 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 • 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 • 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 • 상대적으로 낮은 설치비용 • 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 폐수처리 문제 • 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 테트라클로로에틸렌 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 흡수·회수기술은 테트라클로로에틸렌 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

4) 막분리·회수기술

- (기술 개요) 각각 가스의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술로서 가스 분리는 막의 양단에 가스 분압 차이(농도 차이)를 이용함.
- (분리막) 혼합 성분으로부터 선택적으로 특정 성분을 분리할 수 있는 물리적 경계층으로 막 양단의 가스 분압 차이(농도 차이)가 물질 전달력임.
- (분리막 성능) 혼합 성분 중에서 분리 목표 물질의 선택성과 막 양단의 압력 차에 의해 분리막 성능이 결정되며, 선택성은 10 이상, 압력 차 성능지표인 압력비 (공급측 총압에 대한 투과측 총압 비)는 일반적으로 30~50 정도이어야 기술적으로 실현가능함.



[그림 7-27] 막분리 프로세스

(출처) ITM-CNR, Membrane per la separazione di CO₂ erattori a membrana per il suo uso
(<https://www.enea.it/it/seguci/events/co2/IULIANELLI.pdf>) 인용

□ 적용조건

- 테트라클로로에틸렌을 막으로 분리하기 위해서는 혼합가스 종류, 테트라클로로에틸렌 농도, 유량, 배출가스 온도 등 다양한 정보가 필요하며, 이는 대상 업종 및 공정에 따라 다른 수요맞춤형 막이 개발 적용되어야 함. 그러므로 테트라클로로에틸렌 분리를 위한 적용조건을 일반화하기는 어려운 상황임.

□ 적용사례

- (필요성) 미국 에너지부(DOE)의 관할 지역에서 염소계 VOCs로 오염된 토양으로부터 배출되는 염소계 VOCs 함유 가스의 적정 처리 필요성 대두
 - (적용 시기 및 지점) 1999년 3월부터 2000년 2월까지 미국 캘리포니아 주의 Sacramento 시 외곽에 있는 McClellan Air Force Base(AFB)

○ 조건 및 설계목표

항목	내용
설계 유량	58.9 Sm ³ /hr
배출 VOCs 농도	23 ~ 101 ppm
처리 목표 VOCs 농도	10 ppm

- (적용 결과) Membrane Technologies and Research, Inc.(MTR)는 막(Permselective Membrane)을 사용하여 VOCs를 선택적으로 공기와 분리하여(VOCs는 막을 통과 시키고, 공기는 배제) VOCs를 액상으로 회수하였고, 설계 목표치도 달성하였음.
- (적용 문제점)
 - (CO₂ 문제점) 배출가스 중에 CO₂ 농도는 1~3%이었으며, CO₂에 의해 막분리 성능이 2~4배 정도 감소하였음.
 - (오일과 물의 문제점) 배출가스 중의 오일과 물은 막의 막힘 현상(Fouling)을 초래하여 막분리 성능을 저하한다고 밝혀졌으며, 이는 효과적 전처리로 해결할 수 있다고 결론 내렸음.
- (비용 분석) VOCs 농도 5,000 ppm의 배출가스 300 Sm³/hr를 VOCs 농도 10 ppm 이하로 처리하기 위한 시설 설치비용은 780백만원¹²⁵⁾ 정도 필요하고, 운영비용은 800백만원¹²⁵⁾ 정도 필요하다고 보고하였음.

125) 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정

VOCs 유입농도	연간 운영비용*
100 ppm	499.2백만원
1,000 ppm	585.6백만원
5,000 ppm	799.2백만원
10,000 ppm	856.8백만원

* 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정
(출처) US DOE(2001), Membrane System for the Recovery of Volatile Organic compounds from Remediation Off-Gases, DOE/EM-0614


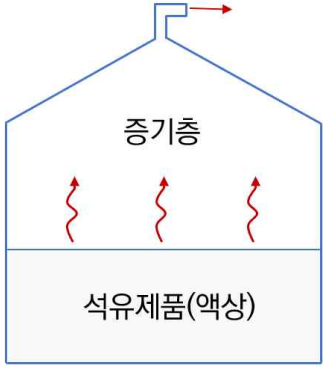

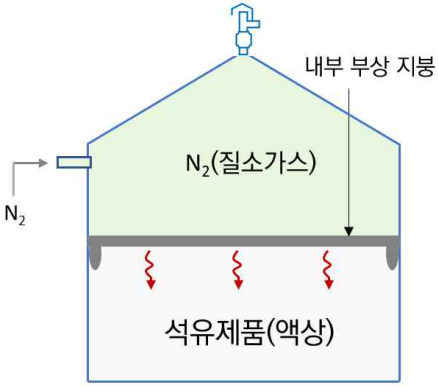
□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 분리 과정에서 상변화가 없으므로 에너지 소모가 적음 • 장치 구성이 단순하고 기계 장치가 최소화되어서 유지관리가 쉬움 • 특정 물질 선택성이 탁월함 • 다양한 목적에 적용 가능한 막 제조가 가능함(원료가 다양하여 목적에 따라 다양한 막 제조 가능) • 환경에 무해한 또는 영향이 적은 원료 또는 재질을 사용하므로 환경친화적 공정 	<ul style="list-style-type: none"> • 막의 특정 화학물질에 대한 취약성(특정 화학물질과의 접촉을 피해야 하므로 공정 적용 한계) • 중합체이므로 온도에 영향을 받기 때문에 특정 화학반응 공정(온도가 높은 공정)에 적용하기 어려움(적용의 한계) • 규모 확장의 한계(일반적으로 단위 모듈을 반복적으로 연결하여 규모 확장하는 방식으로 대용량 설치의 한계) • 막 오염과 막힘 현상으로 교체 필요성(높은 운영비용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs에 대한 선택성이 탁월하고, 석유화학산업에서 이미 적용한 사례가 존재하여 테트라클로로에틸렌을 분리·회수 재사용은 기술적으로 가능함 • 막분리 시설의 설치 및 운영비가 높아 타 기술과 효율 및 경제성을 비교 평가하여 막분리시설의 적용 여부를 결정할 필요가 있음

7.4.3

저장시설

7.4.3.1. 대체공정

적용업종	<ul style="list-style-type: none"> • 화학물질 및 화학제품 제조업 • 코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업 			
대체공정	<p>(변경 전) 기존 CRT(Cone Roof Tank)는 VOCs를 함유한 원료 및 제품의 저장시설 내부 증기압이 높아지면 안전밸브가 자동으로 열리면서 VOCs가 외부로 배출</p> 	<p>VOCs의 압력이 높아지면 안전밸브가 열림</p> 		
	<p>(변경 후) IFRT(Internal Floating Roof Tank)는 저장시설의 액위에 따라 내부 부상 지붕이 이동하므로 증기층 발생을 최소화하며, 발생 증기를 연소시설, 흡착탑 등으로 이송 처리하며, 질소 봉입으로 VOCs 누출을 최소화하고 있음.</p> 	 <p>제품 액위 변화에 따라 내부 부상 지붕 이동으로 증기 발생 최소화</p>		
저감효율 (%)	IFRT: 95% 이상 질소 봉입: 97% 이상 연소시설 : 99% 이상	처리비용	설치비용 운영비용	1,800백만원 (IFRT+연소시설 연결) -

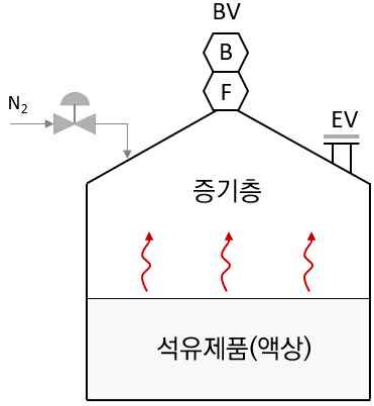
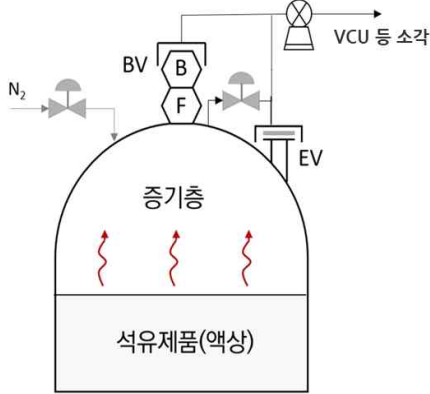
※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

(출처) <https://www.indiamart.com/proddetail/cathodic-protection-system-for-tanks-20242520612.html>

(출처) <http://www.fullmost.com.tw/de/Internal-Floating-Roof-IFR/>

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술사례집

7.4.3.2. 공정관리

적용산업	<ul style="list-style-type: none"> • 화학물질 및 화학제품 제조업/저장시설 • 코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업/저장시설 			
저장시설 관리개선	<p>(변경 전)</p> <p>BV(Breath Valve)를 열리게 하기 위한 설계압력이 150 mmH₂O로 낮아 VOCs 대기 배출이 많음.</p>		 <ul style="list-style-type: none"> • 설계압력이 낮아 BV와 EV가 정상 운전에서도 탈루 발생 • Corn Roof Tank 	
	<p>(변경 후)</p> <p>설계압력을 10,000 mmH₂O로 높여 설계하고 평소 운전 압력을 최대 9,000 mmH₂O로 관리하여 배출가스 양을 감소하였고, 배출가스는 소각 처리하여 VOCs 대기 배출 최소화</p>		 <ul style="list-style-type: none"> • 설계압력을 높여 BV와 EV를 통한 대기 방출 없애고, BV와 EV를 내압으로 인해 개방되더라도 Vent Gas는 VCU 등 소각 처리됨 • Dome Roof Tank 	
저감효율 ¹ (%)	90%	처리비용	설치비용 ²	70백만원 이상
			운영비용	-

1: 이우근 외 3(2006), VOCs 배출현황 및 저감방안, 대한환경공학회지

2: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

7.4.3.3. 재사용 및 재활용

흡착·회수	대기 중으로 배출되는 VOCs를 흡착제에 흡착시키고, 온도 또는 압력 조절을 통해 탈착·회수하는 기술
응축·회수	응축기 등을 통해 유체 온도나 압력 변화로 대상 VOCs를 분리·회수하는 기술
흡수·회수	액상 흡수제를 가스상의 VOCs와 접촉하여 VOCs를 흡수제로 물질 이동시켜 분리·회수하는 기술
막분리·회수	혼합가스 각각의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술

1) 흡착·회수기술

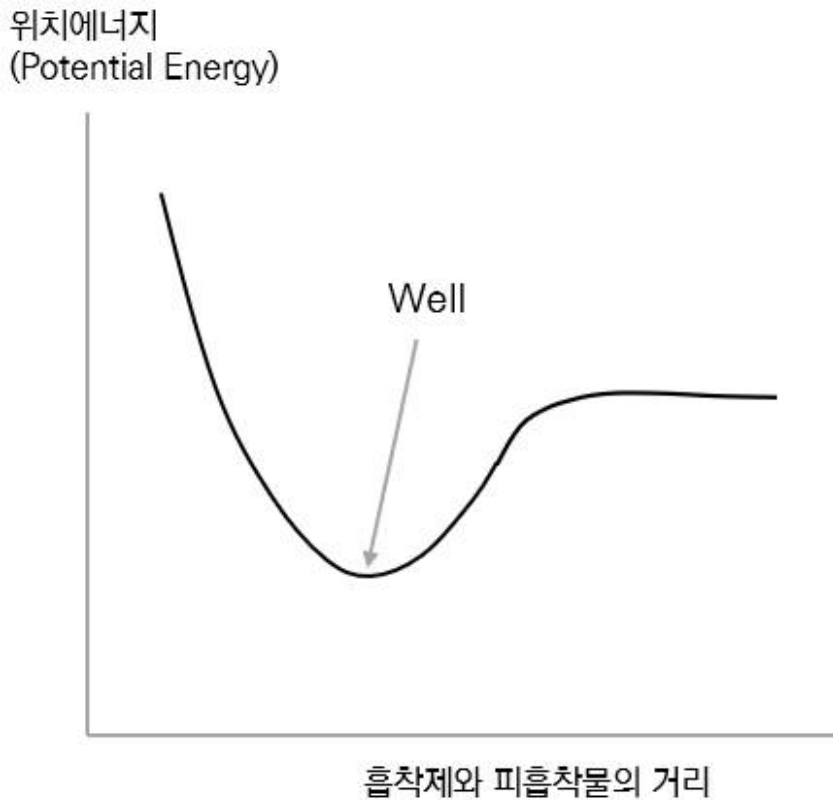
□ (기술 개요) VOCs를 흡착제 표면에 물리적으로 흡착시키고 탈착·회수 재이용하는 기술

○ (흡착) 흡착공정은 화학적 흡착과 물리적 흡착으로 구분할 수 있으며, 화학적 흡착은 피흡착물과 흡착제가 화학적으로 결합하므로, 피흡착물과 흡착제의 화학적 결합을 끊어야 하므로 원래 형태로의 피흡착물 회수가 용이하지 않음. 반면 물리적 흡착은 원래 형태로 피흡착물의 회수가 가능하므로 흡착·회수 재사용기술에서는 물리적 흡착을 적용하고 있음.

- (물리적 흡착원리) 아래 그림은 흡착제 표면으로부터의 거리와 위치에너지 (Potential Energy)의 상관관계를 보여주고 있음. 흡착제와 피흡착물 간에는 '반발 (Repulsion)¹²⁶⁾'과 '견인(Attraction)¹²⁷⁾'이 동시에 작용하여 균형을 이루고 있음. 흡착제와 피흡착물의 거리 중에서 위치에너지가 가장 낮은 지점(Well 또는 Dip)에서 흡착이 일어나며, 피흡착물의 탈착을 위해 필요한 에너지가 외부에서 운동 에너지(Kinetic Energy) 형태로 공급되면 탈착이 일어남.

126) 흡착제와 피흡착물의 전자군(Cloud of Electrons) 간의 반발력

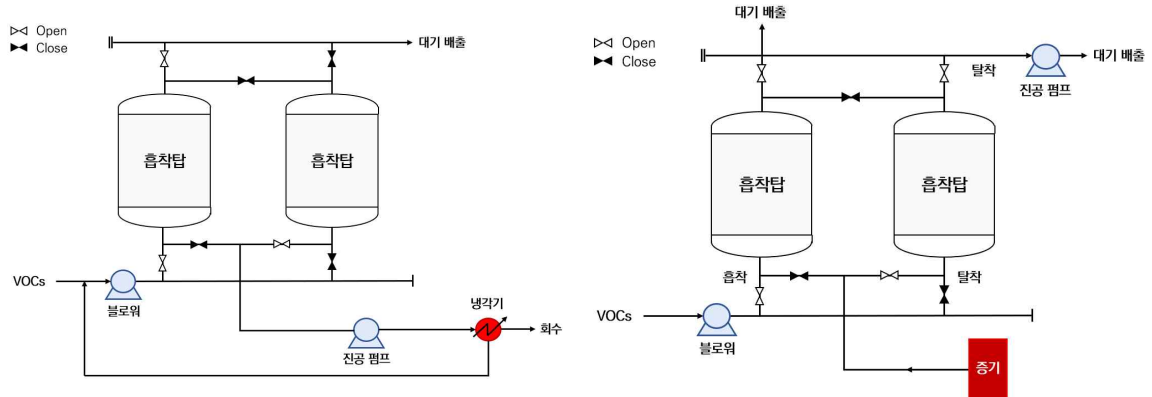
127) 전자 핵(Nuclear) 간의 Van der Waals force에 의한 견인력



[그림 7-28] 흡착제와 피흡착물의 거리에 따른 위치에너지 변화

(출처) EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004

- **(탈착)** 포화된 흡착제 재생 방법은 온도 차이를 이용한 열탈착 방식(Temperature Swing Adsorption, 이하 TSA)과 압력탈착 방식(Pressure Swing Adsorption, 이하 PSA)이 주로 적용되고 있음.
 - **(TSA)** 고온 증기를 이용해 흡착제(예, 활성탄)에 흡착된 VOCs를 회수하는 방법으로 흡착제에 잔류하는 수분을 건조해야 하며, 고온 증기사용으로 화재 등 위험성이 있으며, 운전비용이 높고, 시간이 많이 소요되는 단점이 있음.
 - **(PSA)** 고압에서 VOCs를 흡착시키고, 압력을 낮춰 VOCs를 탈착시키는데 고압에서 운전하므로 운전비용이 높고, 공정 규모가 커지는 단점이 있음.
- **(공정 구성)** 일반적으로 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 탈착하게 됨.



[그림 7-29] 흡착·회수공정 모식도

(출처) SEST주식회사 홈페이지 (http://www.sestco.com/kor/vru_01.php) 인용

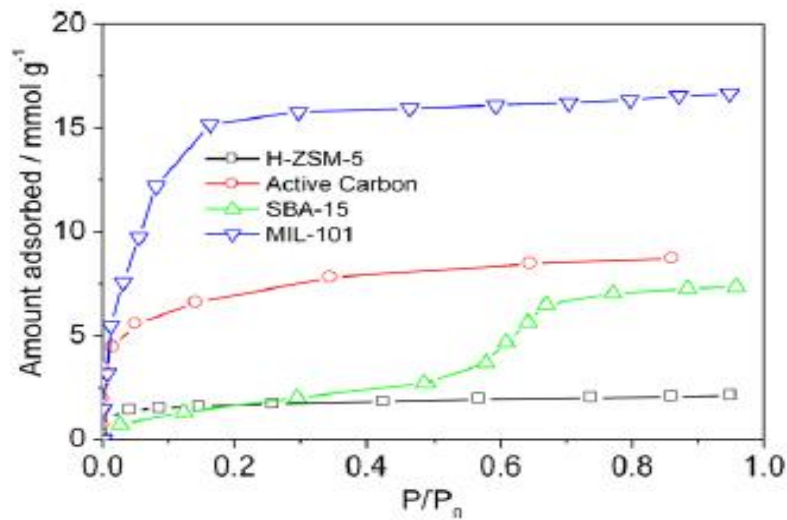
- **(적용조건)** 1) 테트라클로로에틸렌 단일물질 또는 테트라클로로에틸렌 혼합 VOCs, 2) 단일배출구의 점오염원, 3) 고농도 테트라클로로에틸렌 또는 VOCs 등이며 테트라클로로에틸렌과 VOCs의 회수·재이용을 위해서는 처리보다 경제성 있어야 하고, 테트라클로로에틸렌과 VOCs 가격과 배출가스 특성에 의해 결정됨.
- **(배출가스 특성)** 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, 테트라클로로에틸렌과 VOCs 농도, 수분량, 온도 등이며, 이는 흡착제 종류에 따라 달라지므로 '흡착제 종류'에서 상세히 설명하였음.
- **(흡착제 종류)** 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs 흡착제 종류는 1) 활성탄, 2) 제올라이트 (Zeolite), 3) 폴리머(Polymer), 4) MOFs(Metal-organic Frameworks)를 꼽을 수 있으며, 각 흡착제의 특성은 아래에서 보는 것과 같음.

[표 7-5] 흡착제 특성 비교

항목	활성탄	제올라이트	폴리머
표면적	600~1,400 m ² /g	천연 (300~600 m ² /g) 합성 (800~900 m ² /g)	
공극 크기	micropore (공극 직경 < 2 nm), mesopore (2 nm < 공극 직경 < 50 nm), macropore (공극 직경 > 50 nm)	3~30 nm (일정한 공극 크기)	Porous polymers (1~1.6 nm)
표면특성	친수성 ¹ 과 소수성 특성을 모두 보유하고 있음	천연 제올라이트는 친수성이나, 합성 제올라이트는 친수성 또는 소수성으로 목적에 맞게 합성 제작	대부분은 소수성이나 사용 목적에 적합하도록 물성을 변형 합성 제작하는 경우도 있음.
배출가스 유량	60~3,500 m ³ /hr (단일) 병렬 사용시 용량 증가 가능 (for VRU)	60~3,500 m ³ /hr	
VOCs 유입농도	700~1,000 ppm (LEL 25% 이하) 경제성을 고려하면 10~70 VOL% (100,000~700,000 ppmv) (For VRU)	1,000~10,000 ppm (LEL 25% 이하)	
수분량 (상대습도)	50% 미만	94~96%까지 허용	
온도	55°C 이하	상온	
탈착방법	증기 열탈착 ² 진공(Vacuum) 탈착	열탈착 ⁴	열탈착 ⁵
탈착효율 ³	50% 회수효율 98% 이상	90%	50~90%
교체주기	6개월~5년(증기 열탈착) 7년 이상(진공 탈착)	5년 이상	교체주기는 폴리머에 따라 다르나 일반적으로 상당 기간 교체를 하지 않아도 되는 것으로 알려져 있음

- 1: 활성탄의 친수성 특성 때문에 물이 활성탄에 흡착된 피흡착물을 치환·탈착하는데 주요 역할 담당하며, 재생에 필요한 증기량은 목표 제거효율(또는 출구 농도)에 좌우되고, 일정량 증기가 흡수층 온도를 재생온도로 올리는 탈착에너지 공급
- 2: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 활성탄 착화 온도보다는 낮아야 함(재생 최고 온도는 120~180°C)이고, 탈착을 위한 증기 사용량은 0.25~0.35 kg H₂O/kg AC
- 3: EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004
- 4: 열에 강하기 때문에 고온 탈착도 가능
- 5: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 폴리머 용점(Melting Point)보다는 낮아야 하고, 열에 약하기 때문에 탈착 온도는 비교적 낮은 온도에서 운전

- 최근 연구¹²⁸⁾에서는 금속-유기 기반 구조(Metal-organic Frameworks; 이하 MOFs) 촉매가 테트라클로로에틸렌 흡착에 있어서 활성탄, 제올라이트보다 성능이 더 좋다고 알려져, MOFs의 적용을 검토해 볼 필요가 있으나 MOFs는 고가이므로 경제성 검토를 통해 결정할 필요가 있음.



[그림 7-30] 여러 흡착제의 테트라클로로에틸렌 흡착능 비교

(참고) MIL-101은 Al, Cr이 담지된 Terephthalate로서 MOFs 일종

○ 흡착제 비교 평가

- 활성탄은 화재 위험성이 높고, 비점이 높은 유기화합물에 적용하기 어렵고, 수분 조절이 필요하다는 단점을 갖고 있으며, 이를 극복하기 위해 제올라이트 흡착제가 개발 적용되고 있으나, 제올라이트는 고가이므로 활성탄 적용이 어려운 특정 목적에 주로 활용되고 있음.
- 한편 폴리머 흡착제는 표면특성 조절이 가능하다는 특성 때문에 개발 적용되고 있으나, 열에 취약하고 고가라는 단점을 갖고 있으나, 활성탄이 적용하기 어려운 특정 목적으로 고려해 볼 수 있음.
- 활성탄은 적용사례가 많아 기술적 안정성이 높고, 가장 저렴하나 교체 관련 번거로움이 있으며(최장 사용 기간은 7년), VOCs의 배출특성을 고려하여 제올

128) Khan, N. A., Hasan, Z., Jung, S. H. (2013), Adsorptive Removal of Hazardous Materials using Metal-organic Frameworks (MOFs): A Review

라이트와 폴리머도 대안으로 고려·결정할 필요가 있음.

□ 처리효율과 비용

흡착제	회수효율	설치비용	운전비용	비고
활성탄 ¹	80% 이상	500백만원 이상 ³	2.4백만원/톤	회수 재사용으로
제올라이트 ²	90~96%	-	61,000~163,000원/m ³	원료물질 대체로
폴리머	-	-	-	운전비용 상쇄 효과

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: Khan, F. I., Ghoshal A. Kr. (2000), Removal of Volatile Organic compounds from polluted air: A Review

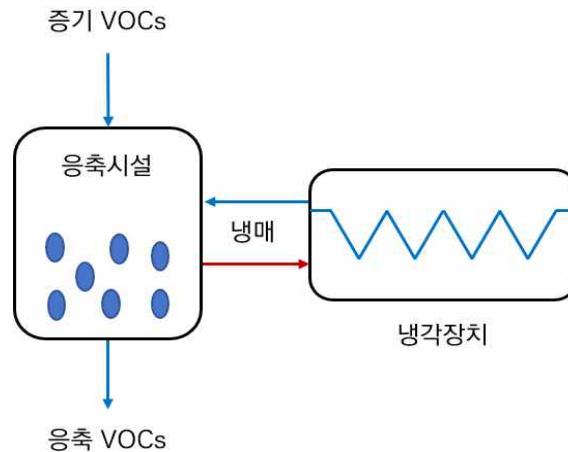
3: 유입 가스 유량과 농도에 따라 비용 차이 발생

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 테트라클로로에틸렌의 지속적 재사용으로 인한 구매 비용 절감 테트라클로로에틸렌의 환경 유입을 차단하여 환경 개선 효과 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 테트라클로로에틸렌 재사용으로 환경 개선 효과가 있는 반면 설치·운영 비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 관리가 용이하지 않음.

2) 응축·회수기술

- (기술 개요) 응축은 온도를 낮추어 기체상태 물질을 액체 상태로 전환하는 방법으로 냉매를 활용하여 기체상태 혼합물의 온도를 낮추어 응축 가능한 물질(VOCs 등)을 응축 불가능한 물질로부터 분리하는 기술



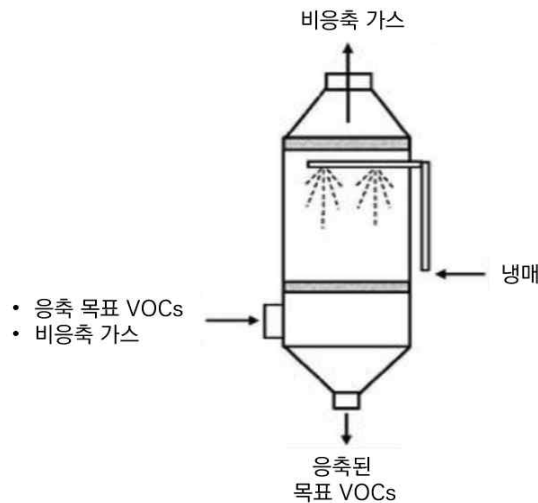
[그림 7-31] 응축·회수 공정도

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

- (원리) 기체상태 물질은 노점(Dew Point)¹²⁹⁾에서 응축이 일어나며, 일정한 압력에서 온도를 점차 낮추면 노점이 다른 물질들이 특정 온도에서 응축이 일어나면서 분리 추출됨. 또는 온도는 일정하게 유지하면서 압력을 높여줌으로써 냉각응축을 유도하여 특정 물질을 분리할 수도 있음.
- (종류) 응축은 비냉각방식(Non-refrigeration Method)과 냉매를 사용하는 냉각방식(Refrigeration)으로 구분할 수 있으며, VOCs 회수에서는 냉각방식을 주로 활용하고 있음.
- (응축기 종류) 냉각응축을 유도하는 방법으로 접촉 응축방법과 표면 응축방법으로 구분할 수 있음.

129) 기체상태 물질의 분압과 그 물질의 증기압이 동일한 온도

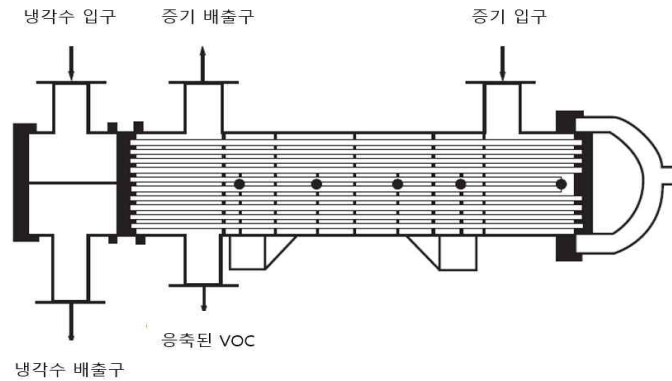
- **(접촉 응축기)** 응축 대상 기체를 냉매와 직접 접촉 혼합하면서 열적·물리적 평형이 이루어면서 VOCs를 응축하여 냉각용 액체(배기가스 중의 물이 어는 것을 방지하기 위해 메탄올 주입)에 흡수됨. 접촉 응축방식의 냉각제는 계속 사용할 수 없고, 냉각제에 응축된 VOCs도 바로 재사용하지 못하고 분리 과정을 거쳐야 하는 단점 때문에 경제 적이지 못함.



[그림 7-32] 접촉 응축기

(출처) Jan Carlson(2016), Air Pollution Control Technology Review : Condensationhttps

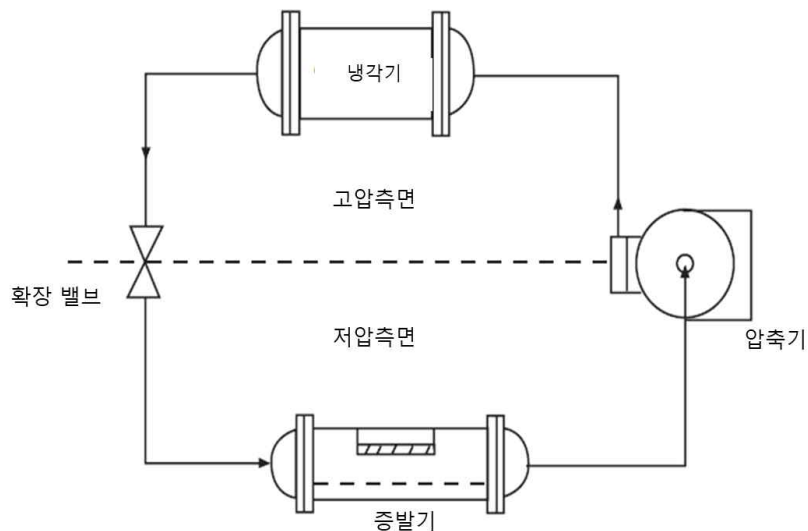
- **(표면 응축기)** 다관식 열교환기 형태로 관 내부에 냉매를 통과시키는 반면 관 외부로 VOCs를 유입시켜 냉매가 통과하는 관 표면에 VOCs를 응축시키는 방법으로 Shell-and-Tube 응축기가 이에 속하며, 냉매와 VOCs가 직접 접촉하지 않아 분리 하지 않고 VOCs를 재사용할 수 있는 장점이고, 냉각제도 지속해서 사용 가능하나, 직접 응축방법보다는 냉각효율이 낮은 단점이 있음.



[그림 7-33] 표면 응축기

(출처) EPA, Section 3: VOC Controls 2-5

- 표면 응축방법은 냉매가 증발·압축·응축·확장 등의 4단계를 거치면서 냉각이 이뤄지며, 냉매는 관을 통해 순환되면서 VOCs를 응축함



[그림 7-34] 냉매 순환단계 모식도

(출처) EPA, Section 3 VOC Controls 2-6

- (냉매 종류) 냉매는 주로 물, 냉수, 염수(Brine), 수소불화탄소(HFC), 암모니아, 저온 유체 등이 있으며, 이들 냉매의 적용 가능한 물질의 응축온도는 냉수는 7°C, 염수(Brine)는 -35°C, 염화불화탄소는 -68°C이며, 질소 또는 이산화탄소와 같은 저온 유체는 -195°C까지 가능함.

냉매	적용 가능 응축온도(°C)	냉각온도(°C)
물	15.5 ~ 26.7	(T _{con} - 9) 응축온도보다 9°C 낮게 설정
냉수	7.2 < T _{con} < 15.2	
염수(Brine, 염화칼슘)	-34.4 < T _{con} < 7.2	
HFC-134a	-67.8 < T _{con} < -34.4	

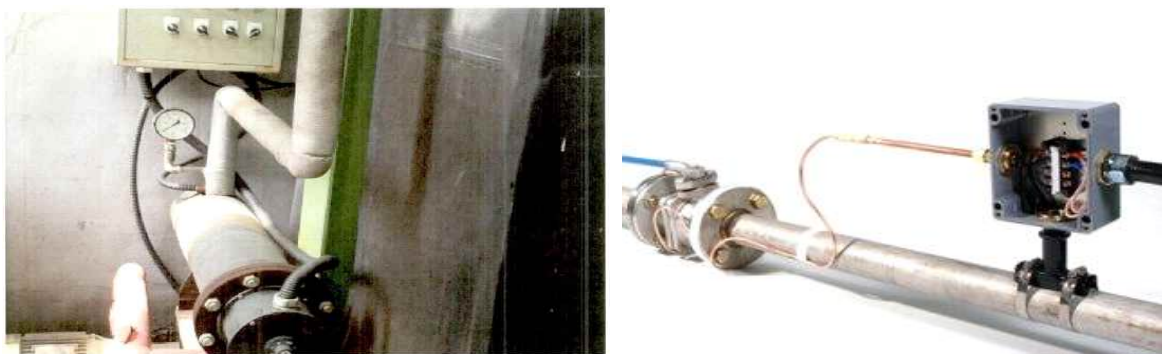
T_{con}: 응축온도(노점, Dew Point)

□ (적용조건) 응축·회수 적용을 위해서는 비등점이 38°C(100°F) 이상인 VOCs가 적합하며, 유입농도는 5,000ppm 이상이면 유리하나, 비등점이 낮은 물질은 극저온 또는 압력을 가하는 추가적인 노력이 필요함. VOCs는 비등점, 빙점 등이 유사한 물질이 많아 혼합 VOCs에서 특정 물질의 분리·회수가 쉽지 않아 응축·회수는 단일 VOCs 회수에 적합함.

□ (적용사례) 원유 저장시설에 기화된 VOCs를 진공펌프로 추출하고, 스크리버로 응축하여 VOCs를 회수하는 기술로서 회수율은 95%¹³⁰⁾ 정도로 알려졌다.

□ 유의사항

○ (결빙 문제) 응축 대상 VOCs 중에 수분이 함유되어 있거나, 빙점이 높은 VOCs는 응축 과정에서 얼어붙어 관을 폐쇄하므로 운전 문제를 초래하고 생산공정도 중단해야 하므로 수분을 사전에 제거하거나 가열선을 설치하여 간헐적으로 얼음을 녹여주어야 함.



[그림 7-35] 가열선을 설치하여 얼음을 녹이는 배관

(출처) 안산녹색환경지원센터(2011), 응축 기술을 이용한 VOCs 제거 및 회수 설비에 관한 연구

(출처) Heatizon Systems, <https://www.heatizon.com/products/heatizon-brands/guttermelt>

130) <http://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/units-and-plants-practices/VOCs-recovery-systems/#reference-10>

- (스케일 문제) 표면 응축방법의 경우 고비점의 유기화합물(타르 등)이 응축기 표면에 응축되면서 스케일을 형성하여 성능 저하 초래
 - 여과장치 등의 전처리를 설치하여 스케일 원인 물질 제거
- (테트라클로로에틸렌 적용) 테트라클로로에틸렌의 응축회수기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 응축회수기술에 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

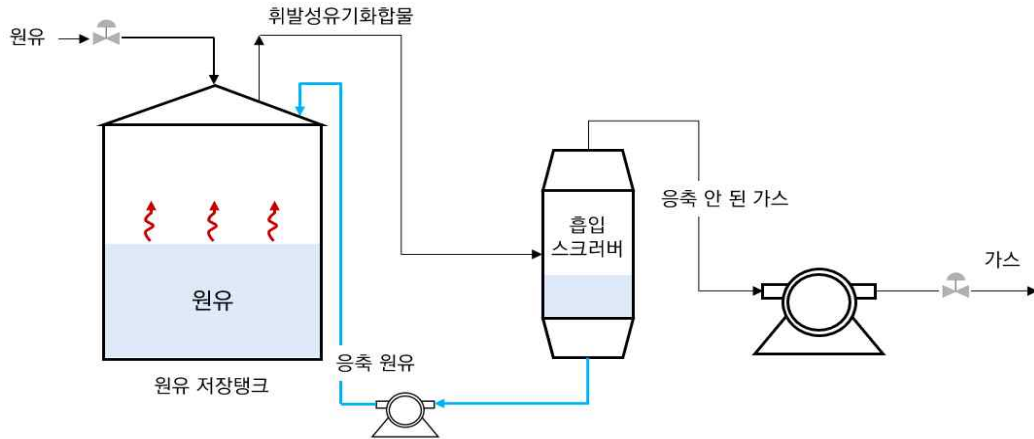
회수율(%)*	설치비용	운영비용	비고
90	100백만원 이상	30백만원 이상	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

*: 액체질소 적용한 경우

3) 흡수·회수기술

- (기술 개요) 단일 VOCs 또는 혼합 VOCs가 포함된 배출가스를 흡수제에 물리흡수 시킨 다음 방산(Stripping) 공정을 통해 VOCs를 분리한 다음 응축 과정을 거쳐 회수하는 기술



[그림 7-36] 흡수·회수 시설의 공정도

(출처) ipieca(2013), VOC recovery Systems 인용

- (소극적 회수기술, Passive Recovery Technology) 저장시설 등으로부터 추출된 VOCs에 압력을 가해 원유에 흡수¹³¹⁾시키거나, 다양한 유기용제(예, Kerosene)를 흡수제로 사용하여 응축 흡수¹³²⁾(원유 저장시설의 경우는 원유 자체를 흡수제로 사용)한 다음 저장시설에 재투입하고, 회수하지 못한 VOCs는 고온 산화 처리 또는 다른 용도로 활용

131) 압력 흡수의 회수율은 80%

132) 응축 흡수의 회수율은 90%



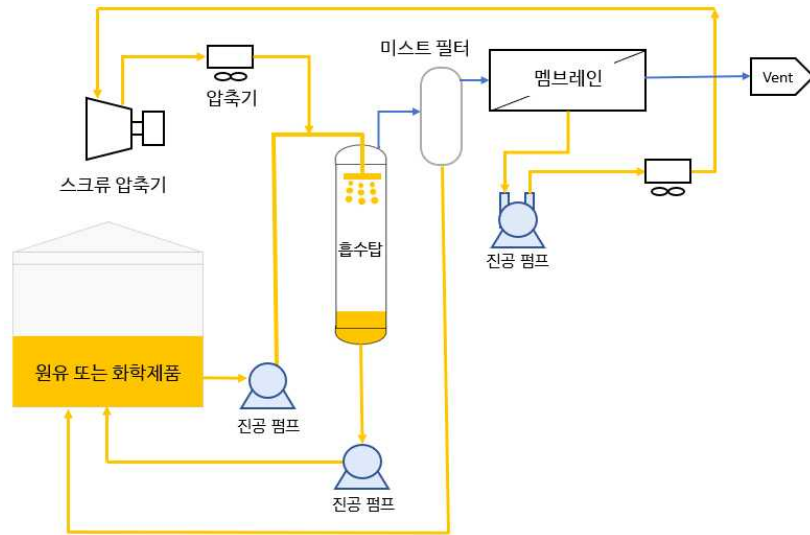
[그림 7-37] 선박에서 원유 하역 과정에서의 VOCs 흡수·회수 및 고온 산화 처리

(출처) JX(2013), Technologies for Volatile Organic compounds

- (운전조건) 흡수 반응기 운전조건은 상황에 따라 달라지며(현장 적용사례133) : 온도는 3~7℃, 압력은 0.3~0.5 MPa), 흡수제로는 원유 또는 석유화학제품 등 저장시설의 물질과 같은 물질을 사용하여 용해·회수
- (적극적 회수기술, Active Recovery Technology) 저장시설로부터 VOCs를 포집한 다음 흡수공정과 타 회수공정을 연계하여 VOCs를 회수하는 기술(흡수공정만으로는 회수효율이 떨어지므로 연계 공정 적용)
- (흡수/막분리 연계방식) 흡수 단독공정에 막분리를 후속으로 연결한 방식으로 흡수 단독공정의 경우 VOCs 회수율이 70% 수준에 불과하였으나 막분리 공정을 후속으로 연결하여 회수율이 95%로 높아졌음¹³⁴⁾.

133) JX Nippon Oil and Energy에서 일본 가고시마의 키이레 터미널(Kiire Terminal)에 설치 운전(처리규모: 20,000 Sm³/hr)

134) CARBOVAC, Vapor Recovery Solutions

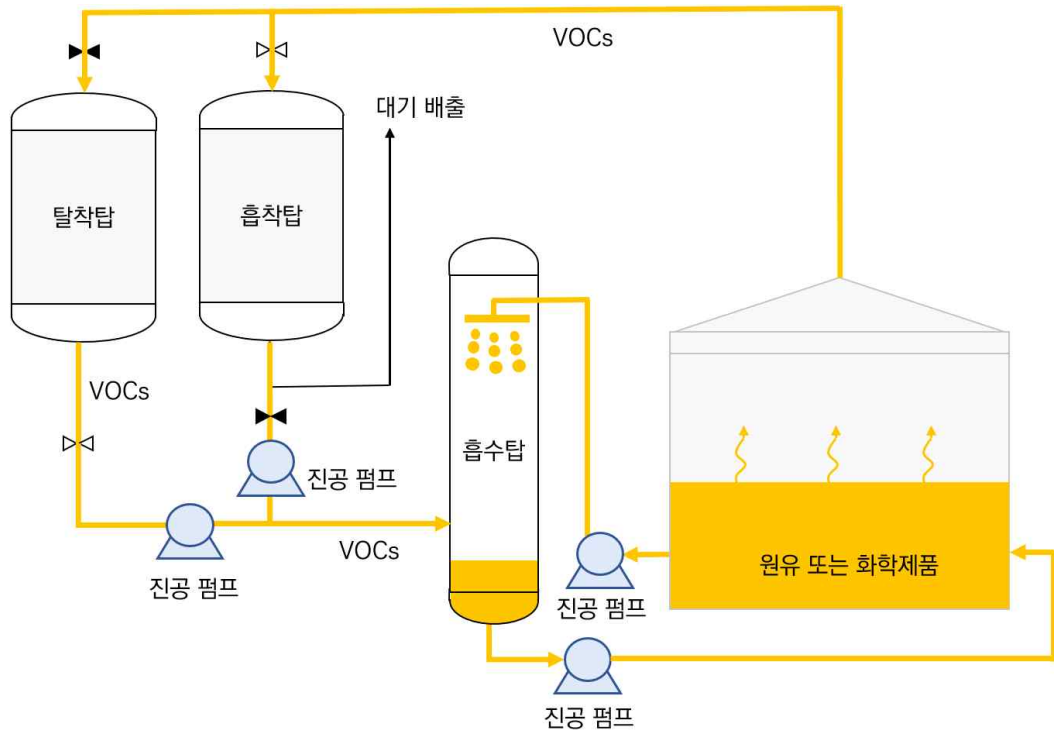


[그림 7-38] 흡수/막분리 연계 회수공정

(출처) BORSIG Membrane Technology GmbH, BMEMBRANE TECHNOLOGY FOR PROCESSES AND ENVIRONMENT, 8p 인용

- **(흡수/흡착 연계방식)** 흡수공정 앞에 활성탄을 활용한 흡·탈착공정을 설치하여 저장시설 또는 운반시설로부터 휘발·배출된 VOCs를 흡착시킨 다음 감압하여 VOCs를 탈착시킴. 탈착된 VOCs를 흡수탑에 주입하여 저장시설의 원유 또는 석유화학제품에 용해·회수하는 방식임. VOCs 회수율이 흡수 단독공정의 70% 안팎에서 90~99%로 높아졌음.
- **(흡착)** 활성탄 등의 흡착시설을 이용하여 저장시설 등으로부터 배출되는 VOCs를 흡착시켜 불활성기체¹³⁵⁾와 분리
- **(탈착)** 일반적으로 흡착탑에 진공펌프를 걸어 VOCs 탈착

135) 운반기체로서 농도 조절과 화재 위험도를 낮추기 위한 목적



[그림 7-39] 흡수/흡착 연계 회수공정
 (출처) logo alma Carbovac, Vapour Recovery Units, 4p 인용

□ 적용조건(흡수 단독공정 기준)

○ 배출가스 특성(충전탑 기준)

항목	정보
배출가스 유량	900~126,000 sm ³ /hr
유입농도	250~10,000 ppm (LEL 25% 이하)
배출가스 유입온도	4~38℃, 온도가 높아질수록 흡수율은 저하

(출처) EPA(2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-015

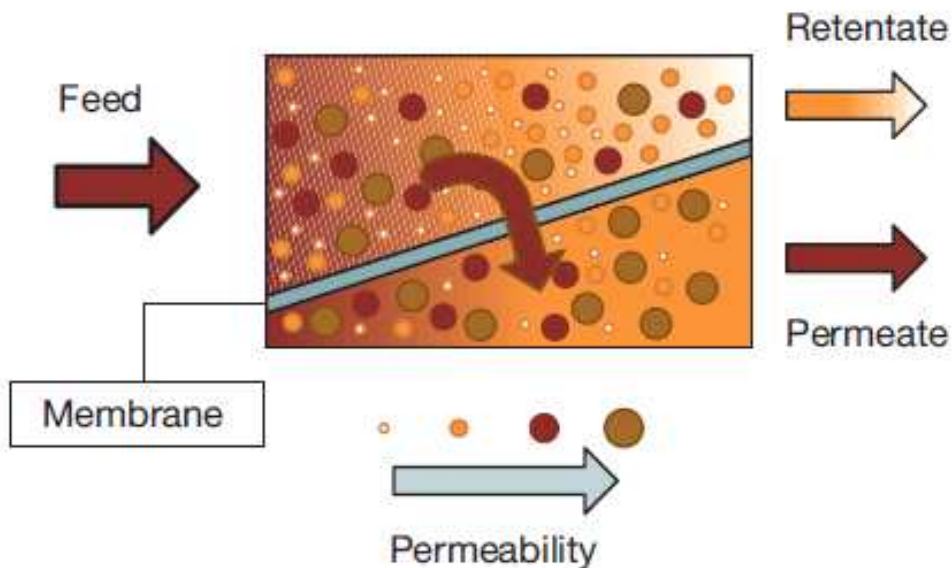
□ **(유의사항)** 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 상대적으로 낮은 압력손실 • 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 • 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 • 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 • 상대적으로 낮은 설치비용 • 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 폐수처리 문제 • 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 테트라클로로에틸렌 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 흡수·회수기술은 테트라클로로에틸렌 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

4) 막분리·회수기술

- (기술 개요) 각각 가스의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술로서 가스 분리는 막의 양단에 가스 분압 차이(농도 차이)를 이용함.
- (분리막) 혼합 성분으로부터 선택적으로 특정 성분을 분리할 수 있는 물리적 경계층으로 막 양단의 가스 분압 차이(농도 차이)가 물질 전달력임.
- (분리막 성능) 혼합 성분 중에서 분리 목표 물질의 선택성과 막 양단의 압력 차에 의해 분리막 성능이 결정되며, 선택성은 10 이상, 압력 차 성능지표인 압력비(공급측 총압에 대한 투과측 총압 비)는 일반적으로 30~50 정도이어야 기술적으로 실현가능함.



[그림 7-40] 막분리 프로세스

(출처) ITM-CNR, Membrane per la separazione di CO₂ erettori a membrana per il suo uso
(<https://www.enea.it/it/seguici/events/co2/IULIANELLI.pdf>) 인용

□ 적용조건

- 테트라클로로에틸렌을 막으로 분리하기 위해서는 혼합가스 종류, 테트라클로로에틸렌 농도, 유량, 배출가스 온도 등 다양한 정보가 필요하며, 이는 대상 업종 및 공정에 따라 다른 수요맞춤형 막이 개발 적용되어야 함. 그러므로 테트라클로로에틸렌 분리를 위한 적용조건을 일반화하기는 어려운 상황임.

□ 적용사례

- (필요성) 미국 에너지부(DOE)의 관할 지역에서 염소계 VOCs로 오염된 토양으로부터 배출되는 염소계 VOCs 함유 가스의 적정 처리 필요성 대두
 - (적용 시기 및 지점) 1999년 3월부터 2000년 2월까지 미국 캘리포니아 주의 Sacramento 시 외곽에 있는 McClellan Air Force Base(AFB)

○ 조건 및 설계목표

항목	내용
설계 유량	58.9 Sm ³ /hr
배출 VOCs 농도	23 ~ 101 ppm
처리 목표 VOCs 농도	10 ppm

- (적용 결과) Membrane Technologies and Research, Inc.(MTR)는 막(Permselective Membrane)을 사용하여 VOCs를 선택적으로 공기와 분리하여(VOCs는 막을 통과 시키고, 공기는 배제) VOCs를 액상으로 회수하였고, 설계 목표치도 달성하였음.
- (적용 문제점)
 - (CO₂ 문제점) 배출가스 중에 CO₂ 농도는 1~3%이었으며, CO₂에 의해 막분리 성능이 2~4배 정도 감소하였음.
 - (오일과 물의 문제점) 배출가스 중의 오일과 물은 막의 막힘 현상(Fouling)을 초래하여 막분리 성능을 저하한다고 밝혀졌으며, 이는 효과적 전처리로 해결할 수 있다고 결론 내렸음.
- (비용 분석) VOCs 농도 5,000 ppm의 배출가스 300 Sm³/hr를 VOCs 농도 10 ppm 이하로 처리하기 위한 시설 설치비용은 780백만원¹³⁶⁾ 정도 필요하고, 운영비용은 800백만원¹³⁶⁾ 정도 필요하다고 보고하였음.

136) 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정

VOCs 유입농도	연간 운영비용*
100 ppm	499.2백만원
1,000 ppm	585.6백만원
5,000 ppm	799.2백만원
10,000 ppm	856.8백만원

* 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정
 (출처) US DOE(2001), Membrane System for the Recovery of Volatile Organic compounds from Remediation Off-Gases, DOE/EM-0614

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 분리 과정에서 상변화가 없으므로 에너지 소모가 적음 • 장치 구성이 단순하고 기계 장치가 최소화되어서 유지관리가 쉬움 • 특정 물질 선택성이 탁월함 • 다양한 목적에 적용 가능한 막 제조가 가능함(원료가 다양하여 목적에 따라 다양한 막 제조 가능) • 환경에 무해한 또는 영향이 적은 원료 또는 재질을 사용하므로 환경친화적 공정 	<ul style="list-style-type: none"> • 막의 특정 화학물질에 대한 취약성(특정 화학물질과의 접촉을 피해야 하므로 공정 적용 한계) • 중합체이므로 온도에 영향을 받기 때문에 특정 화학반응 공정(온도가 높은 공정)에 적용하기 어려움(적용의 한계) • 규모 확장의 한계(일반적으로 단위 모듈을 반복적으로 연결하여 규모 확장하는 방식으로 대용량 설치의 한계) • 막 오염과 막힘 현상으로 교체 필요성(높은 운영비용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 테트라클로로에틸렌 등의 VOCs에 대한 선택성이 탁월하고, 석유화학산업에서 이미 적용한 사례가 존재하여 테트라클로로에틸렌을 분리·회수 재사용은 기술적으로 가능함 • 막분리 시설의 설치 및 운영비가 높아 타 기술과 효율 및 경제성을 비교 평가하여 막분리시설의 적용 여부를 결정할 필요가 있음

8

아크릴로니트릴

8.1

개요

- (정의 및 특성) 아크릴로니트릴은 백색, 무취의 결정성 고체로 화학적·산업적 용도로 널리 사용되는 비닐 단량체로 화학식은 C_2H_3N 이며, 주요 정보는 아래와 같음.

CAS No.	발암물질 분류	위해도 순위	화학구조
107-13-1	2B군 발암물질	<ul style="list-style-type: none"> • 2B군 발암물질 중에서는 2위 • 전체 발암물질 중에서는 5위 	

- 물리·화학적 특성¹³⁷⁾

분자량 (g/mol)	휘발성 증기압	친수성 용해도	끓는점	녹는점 /어는점	LEL (% vol)	UEL (% vol)	n-옥탄올 /물분배계수
53.07	109mmHg (25 °C)	7.45g/100mℓ (25 °C)	77°C	-84°C	3	17	0.25

- 아크릴로니트릴은 위에서 제시한 물리·화학적 특성 때문에 환경부 고시 제2015-181호에 근거하여 휘발성유기화합물(VOCs)¹³⁸⁾로 분류하고 있음.

- 용도

- (화학물질 및 화학제품 제조업) 화학제품 제조 시 중간체, 연화제 및 발포제 등으로 사용
- (고무 및 플라스틱제품 제조업) 고무 및 플라스틱 난연제로 사용

137) 안전보건공단, 화학물질정보(<https://msds.kosha.or.kr/kcic/msdsdetailGet.do>)

138) 환경부고시 제2015-181호(휘발성유기화합물 지정 고시)

- **(배출업종)** 아크릴로니트릴이 주로 배출되는 업종은 화학물질 및 화학제품 제조업(72.6%), 창고 및 운송관련 서비스업(18.3%), 고무 및 플라스틱 제품 제조업(9.1%) 순임.
- **(배출공정)** 아크릴로니트릴이 많이 배출되는 공정은 1) 대기오염방지시설(74.4%), 2) 이송·운반·분배·계량시설(16.2%), 3) 저장시설(4.9%), 4) 혼합공정(1.7%)순임.
- **(배출형태)** 아크릴로니트릴은 VOCs이므로 대기로 배출될 개연성이 높고, [표 8-1]에 서 보는 것처럼 국내 배출원에서는 모두 대기로 점배출(75.4%) 또는 비산배출(24.6%) 되고 있음.
- **(시사점)** 아크릴로니트릴은 점배출 관련 저감기술 및 방법 적용이 필요하며, 중점 관리 분야는 다음과 같음.
 - 대기오염방지시설로서 처리효율 제고
 - 이송·운반·분배·계량시설에서의 탈루배출 방지
 - 저장시설에서의 처리효율 제고

139) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

[표 8-1] 아크릴로니트릴 배출특성

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	저장시설	대기	비산배출 100	456.6	0.375	0.000
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	19,497	16.029	0.001
	혼합공정		비산배출 100	2,050	1.686	0.000
	화학반응공정		점배출 55 비산배출 45	1,527.9	1.256	0.000
	용제회수		비산배출 100	1,495.1	1.229	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	16,570	13.622	0.001
고무 및 플라스틱제품 제조업	저장시설	대기	비산배출 100	4,474	3.678	0.002
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	93.0	0.076	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	12,068	9.921	0.006
폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	저장시설	대기	비산배출 100	27.5	0.023	0.025
	대기오염방지시설		점배출 100	23.4	0.019	0.021
	폐기물처리시설		점배출 100	440.7	0.362	0.395

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
창고 및 운송관련 서비스업	저장시설	대기	비산배출 100	965.6	0.794	0.000
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	128.6	0.106	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	61,820	50.823	0.015
누적 합계		-	-	121,637.4	99.999	-

(출처) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

아크릴로니트릴의 회수 및 처리기술은 처리방법에 따라 장·단점이 있어 아래 사항을 자세히 검토하여 선택해야 함.

- 배출가스의 조성 및 농도
- 함유 유기화합물질의 특성(폭발한계, 응축성, 용해성, 흡착성 등)
- 배출가스 내 수분 및 먼지 함유량
- 배출량(최대, 평균, 최소 유량 등), 온도, 압력, 습도
- 오염배출원 유형(점, 면, 선오염원, 공정, 불특정 등)
- 연간 운영시간(가동시간, 가동률, 부하율 등)
- 장치 위치(실내, 실외, 지표 고도, 지붕, 여유 공간 등)
- 보조 연료 또는 에너지 비율
- 각종 유틸리티(수도, 전기, 스팀, 배관, 관거, 구조물) 이용 가능 여부
- 기존의 대기오염방지시설 설치·운영 사항(종류, 규모, 사용 기간 등)
- 경제성(초기투자비 및 연간 운영비)

[표 8-2] 휘발성 유기화합물 방지시설 설계 시 고려사항

기술	안정성	오염물질 특성	오염원 특성	제어특성
흡착	흡착 시 폭발물질의 농축이 일어나며 이는 매우 유해함.	다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있음.	높은 포집 효율을 가지고 있으며, 여러 유형 흡착제(활성탄, 제올라이트, 폴리머 등)를 이용, 낮은 비용으로 고효율 달성이 가능함.
흡수	폭발물질을 중성화시킬 수 있는 흡수액을 폭발물질에 따라 선택해야 함.	화합물에 적합한 흡수제를 사용해야 하고, 화학물질 조성변화에 대응하기 어려움.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 흡착제 배출수 처리장치가 필요함.	포집 효율이 높으나 생성 폐수에 폭발성 물질이 포함될 수 있으므로 사전에 적정 처리방법 수립이 필요함.
응축	니트로글리세린과 같은 폭발성 화합물에는 적용할 수 없음.	제습 과정이 필요하며, 끓는점이 낮은 화합물은 처리하기 어려움.	추가적인 응축장치가 필요함.	특정 화합물에 대해서는 포집 효율이 높으나, 초기비용이 높음.
생물 여과	미생물에 의해 포집된 폭발성 화합물질을 쉽게 처리할 수 있음.	처리속도가 낮아 처리 규모의 한계가 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물 종류에 따라 높은 처리효율을 나타냄.
열소각	니트로글리세린과 같은 많은 폭발성 화합물은 급속히 가열될 때 매우 불안정해짐.	여러 다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 가지고 있음. 다양한 유형의 소각로(재생식 열소각 등)를 사용, 비용을 절감시키고 전체 효율을 증가시킬 수 있음.
축매 소각	반응시간과 유속에 따라 축매 층에서 폭발성 화합물 농축이 일어나는 위험한 상황이 일어날 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리하며 축매 피독으로 효율이 낮아짐.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물질 유형에 따라 높은 파괴효율을 나타냄.
광촉매 산화	저온에서 폭발성 화합물질 처리가 가능하며, 체류 시간이 짧고 저온에서 운전되므로 폭발 위험성을 줄일 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리함.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 나타내며, 전체 비용이 상대적으로 적은 편임.

(출처) 환경부(2000), 「휘발성유기화합물 방지시설 설계지침」 자료

□ 2016년의 화학물질 배출량 조사¹⁴⁰⁾ 결과에 따르면 아크릴로니트릴의 주요 배출공정은 대기오염방지시설, 이송·입력·분배·계량시설, 저장시설, 혼합공정 순으로 배출비중은 각각 74.3, 16.2, 4.9, 1.7% 순임

공정	업종	배출비중(%)
대기오염방지시설	창고 및 운송관련 서비스업	50.82
	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	13.62
	고무 및 플라스틱제품 제조업	9.92
	폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	0.01
	소계	74.37
이송·입력·분배· 계량시설	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	16.03
	창고 및 운송관련 서비스업	0.11
	고무 및 플라스틱제품 제조업	0.08
	소계	16.22
저장시설	고무 및 플라스틱제품 제조업	3.68
	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	0.38
	창고 및 운송관련 서비스업	0.79
	폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	0.02
	소계	4.87
혼합공정	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	1.69

(출처) 화학물질안전원(2016)의 “2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)” 자료 근거

140) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

8.3.1

대기오염방지시설

8.3.1.1. 공정관리

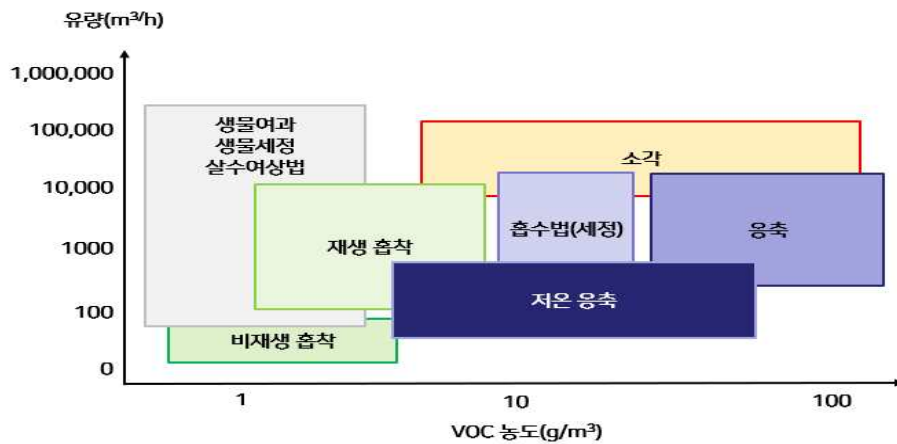
대기오염방지시설	적정관리 및 유지보수 방법
연소에 의한 제거시설	<ul style="list-style-type: none"> 배출가스 처리온도를 적정 관리하여 불완전연소에 의한 배출량 최소화(축열식 연소산화장치; Regenerative Thermal Oxidizer; RTO) 시설의 경우 750~800℃ 유지) → 저농도 가스에 적용/VCU(Vapor combustion Unit) → 고농도 가스에 적용(파괴효율:98% 이상)/CEB(Certified Ultra-Low Emissions Burner) (파괴효율 : 99.99%)
촉매 산화에 의한 제거시설	<ul style="list-style-type: none"> 촉매 산화에 의한 화학물질 제거시설의 경우 흡착시설과 마찬가지로 시간이 지날수록 촉매 산화 효율이 떨어지므로 공정 운전조건에 따라 교체주기를 결정하고, 정기적으로 성능을 파악하여 적정 수준 처리효율 유지

8.3.1.2. 처리기술

□ 화학물질을 처리하는 방법은 아래 표에서 보는 것처럼 크게 연소기술, 흡착기술, 흡수기술, 생물학적 처리기술로 구분할 수 있음.

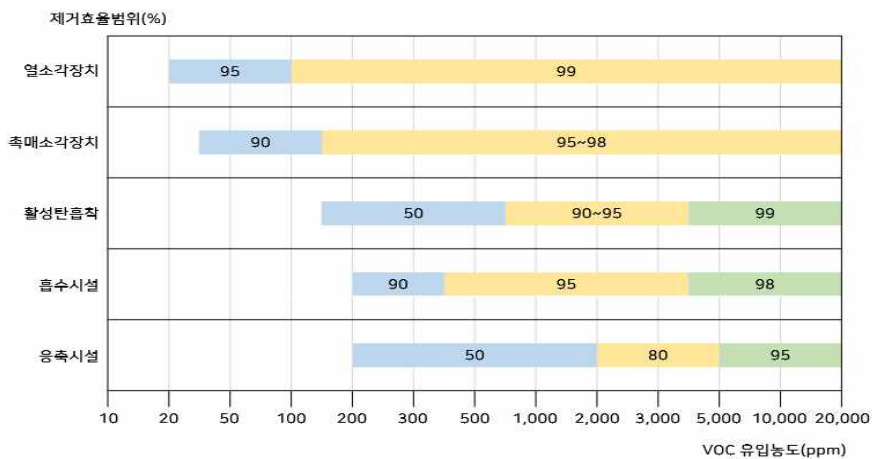
대분류	소분류
연소기술	고온산화법(열소각법); TO: Thermal Oxidation
	촉매산화(촉매연소)법; CO: Catalytic Oxidation
	축열식 열소각기술; RTO: Regenerative TO
	축열식 촉매산화기술; RCO: Regenerative Catalytic Oxidation
	무화염 열산화법; FTO: Flameless Thermal Oxidation
	흡탈착 촉매산화법; CCO: Concentration Catalytic Oxidation
	흡착·처리기술
	흡수·처리기술
	생물학적 처리기술

□ [그림 8-1]은 VOCs 유입 유량과 농도에 대한 처리기술의 적용조건을 개략적으로 도시하고 있음. 생물학적 방법은 적용 유량의 범위는 넓지만, 적용 가능한 농도는 상대적으로 협소함을 알 수 있음. 반면에 소각은 적용 농도 범위는 넓지만, 적용 가능한 유량 범위는 넓지 않음을 알 수 있음.



[그림 8-1] VOCs 처리기술별 VOCs 농도와 유입 유량의 적용 범위
(출처) Joseph S, Devinny, Marc A. Deshusses, Todd S. Webster, Biofiltration for Air pollution control

□ [그림 8-2]는 VOCs 처리기술별로 VOCs 유입농도에 대한 처리효율을 도시하고 있음. 열소각장치와 촉매소각장치는 상대적으로 넓은 유입농도 범위에서 95% 이상의 효율을 보인 반면 활성탄과 응축시설은 상대적으로 높은 농도인 500ppm 이상에서 95%의 성능을 보여주고 있음.



[그림 8-2] VOCs 처리기술의 VOCs 유입농도 대비 처리효율
(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

□ [표 8-3]은 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술 선택 기준을 제시하고 있어, 방지기술 선택 지침으로 활용할 수 있음.

[표 8-3] 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술의 선택 기준

대상물질	응축	흡착	열소각	촉매연소	축열식 열소각	무화염 열소각
저유량 저농도	●	●	●	●	○	●
고유량 저농도	●	●	●	●	●	●
저유량 고농도	●	○	●	○	○	●
고유량 고농도	●	○	●	○	○	●
비응축 탄화수소 가스	X	○	●	●	●	●
응축 탄화수소 가스	●	●	●	●	●	●
비응축 Cl/S 포함가스	X	○	●	○	●	●
응축 Cl/S 포함가스	●	●	●	○	●	●
연속 운전	●	●	●	●	●	●
회분식 운전	●	●	○	○	○	●

●: 매우 좋음, ●: 좋음, ●: 보통, ○: 나쁨, X: 적용 불가
 (출처) 양고수, '열처리 기술을 이용한 VOCs/악취 처리기술 및 관리현황' 자료 인용

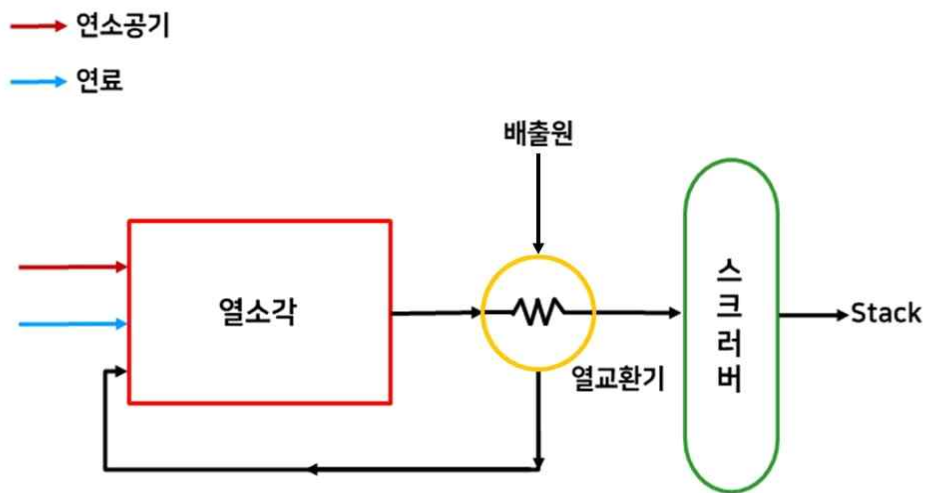
□ [그림 8-1], [그림 8-2], [표 8-3]에서 보는 것처럼 대상물질의 유입농도와 유량 정보를 활용하여 기술적으로 적합한 대상물질의 처리기술을 일차적으로 선정할 수 있음. 다음으로는 저감목표, 경제성, 현장 조건(예, 설치부지 등), 혼합물 종류, 온도와 압력 등을 종합적으로 고려하여 처리기술을 최종적으로 선정해야 함.

1) 연소기술

가) 고온산화(열소각)기술

□ (기술 개요) 아크릴로니트릴 함유 배출가스와 예열 공기를 잘 혼합한 후 고온에서 연소시켜 VOCs를 이산화탄소와 물로 전환

○ 고온산화법의 아크릴로니트릴 처리효율은 소각온도, 체류시간, 아크릴로니트릴 유입 농도, 아크릴로니트릴 함유 배출가스의 균질성 등에 의존함.



[그림 8-3] 고온산화(열소각)법 공정 예시

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

□ 적용조건

- (소각온도 및 체류시간) VOCs 처리를 위한 소각온도는 일반적으로 700~800℃이며¹⁴¹⁾, 체류시간 1초에서 99.99% 처리효율¹⁴²⁾을 보인다고 알려지고 있음. 그러나 아크릴로니트릴 이외의 물질이 포함되어 있는 경우는 소각온도와 체류시간이 달라질 수 있음.
- (산소농도) 아크릴로니트릴의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL를 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.

141) KONETIC(2015), 도장공정의 VOCs 저감기술

142) 환경부(2000), VOCs 방지시설 설계지침

□ **(유의사항)** 할로젠과 황을 포함한 화학물질은 연소과정에서 HCl, SO₂ 등의 강산 가스를 생산하여 장치 부식을 초래할 수 있어 가급적으로 처리하지 않는 것이 바람직함. 아크릴로니트릴을 처리할 때는 문제가 없으나 할로젠과 황을 포함한 화학물질이 배출가스 중에 함께 출현하는 경우는 강산 가스의 생성량 등을 고려하여 적용 여부를 결정할 필요가 있음.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 적용 사례가 많은 높은 처리 효율의 안정된 기술 LEL의 20% 이상이고 높은 처리효율을 요구할 경우 최상의 선택 중 하나 	<ul style="list-style-type: none"> 아크릴로니트릴 농도가 낮은 경우 보조연료 사용으로 높은 운영비 유량 변동이 심한 경우는 적용 부적합 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 아크릴로니트릴 농도를 처리할 수 있으나, 아크릴로니트릴 농도가 낮은 경우는 보조연료 사용으로 운영비가 높아질 수 있어 소각 앞단에 농축시설을 설치 운영하여 농도를 일정 수준 이상으로 높일 필요가 있음

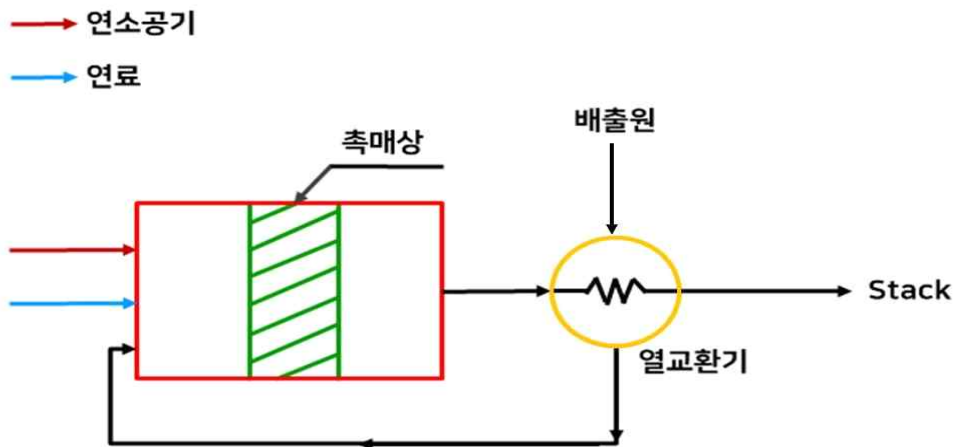
□ **(아크릴로니트릴 적용)** 아크릴로니트릴의 고온산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 고온산화기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99.9	180백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

나) 촉매산화(촉매연소)기술

- (기술 개요) 촉매산화법은 연소기 내부에 충전되어 있는 촉매가 연소에 필요한 활성화 에너지를 낮춤으로써 350~500℃ 정도의 비교적 저온에서 연소가 가능토록 하는 연소방식
 - 촉매로서는 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금이 주로 사용되며, 백금촉매는 HCl 등에 의해 비활성화가 빨리 일어나므로 염소계 VOCs 촉매산화를 위해서는 산화코발트, 산화구리/산화망간 등의 산화금속 촉매가 사용되고 있음.
 - 아크릴로니트릴은 염소계 VOCs가 아니므로 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금 촉매를 적용해도 무방
 - 촉매산화법의 아크릴로니트릴 처리효율은 아크릴로니트릴 유입농도, 소각온도, 체류시간, 산소농도, 촉매 특성, 공간속도¹⁴³⁾ 등에 의존함.



[그림 8-4] 촉매산화(촉매연소)법 공정 예시
 (출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

□ 적용조건

- (소각온도) 효과적·효율적으로 VOCs 촉매산화처리를 위해서는 배출가스를 320 ~ 430℃로 예열한 다음 촉매연소기에 투입하며, 촉매반응기 출구 온도 상한선은 540 ~ 675℃가 되도록 설계함. 촉매 종류에 따라 온도 상한선은 다르지만, 고온일수록 촉매 수명이 짧아짐.

143) 공간속도는 촉매상으로 들어가는 가스 유량을 촉매상의 겉보기 부피로 나눈 값

□ 유의사항

- (피독 현상) 촉매산화반응에서 가장 치명적인 것은 촉매 비활성화를 초래하는 피독 현상을 꼽을 수 있으며, 촉매 피독은 1) 미세먼지, 타르 고분자물질 등이 촉매 표면에 물리적으로 흡착하여 활성 저하, 2) 염소, 브롬, 불소 등에 의한 화학적 피독, 3) 황, 인, 규소, 중금속 등이 촉매 표면에 있는 공극을 폐쇄하여 표면적 감소 등을 꼽을 수 있음.
- 도장 도료 중에 유기실리콘 화합물이 포함되어 있는 경우가 많은데 이것이 연소 되면서 무기 규소화합물로 전환되면서 공극을 폐쇄하여 촉매 효과를 저하시킴.
- (대응방안) 일반적으로 전처리를 하지 않으나, 미세먼지, 타르, 촉매 피독 원인물질을 촉매소각장치 유입 전에 미리 제거하는 것이 촉매 수명 연장을 위해 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 아크릴로니트릴 처리가 가능함 • 연료 사용량이 적음 • 낮은 온도 조작이 가능함 • 화재 위험이 적음 • 화염 역류가 적음 • 고온산화방식과 비교하여 동일 성능에서 규모가 상대적으로 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • 초기 비용이 높음 • 촉매 비활성화로 촉매 교체가 정기적으로 이뤄져 운영 비용이 높음 • 촉매 피독 원인물질을 사전에 제거해 주어야 함 • 폐촉매는 지정폐기물로 관리해야 함 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술이며 저농도 처리가 가능한 반면 배출가스 유량이 낮고, VOCs 종류 및 농도 변화가 심하지 않은 시설에 적합함

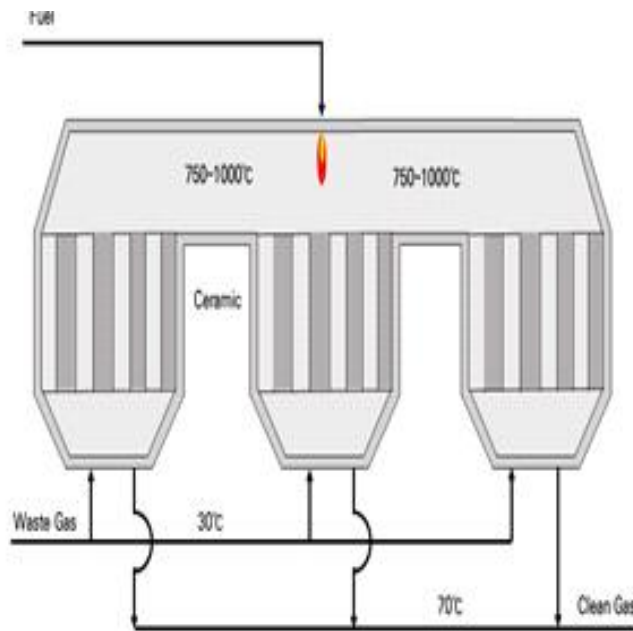
□ (아크릴로니트릴 적용) 아크릴로니트릴의 촉매산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 촉매산화기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99.9	210백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

다) 축열식 열소각기술

- (기술 개요) 기본적으로 열소각기술과 VOCs 처리방법은 동일하나, 축열식 열소각 기술은 Shell-and-Tube 형태의 열교환기를 활용하여 에너지 회수율을 기존의 열소각 기술의 50~60%에서 85~95%로 높인 기술



[그림 8-5] 축열식 열소각기술

(출처) 환경보전협회, 환경정보 no.370 대기오염 방지시설 선정 및 유지관리 기술 인용

□ 적용조건

- (소각온도 및 체류시간) RTO의 소각온도는 1,100°C이며¹⁴⁴⁾, 체류시간은 1초 이하임. 체류시간 1초에서 99.99% 처리효율¹⁴⁵⁾을 보이고 있음.
- (산소농도) 아크릴로니트릴의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL을 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.

144) EPA(2017), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-021

145) 환경부(2000), VOCs 방지시설 설계지침

□ **(유의사항)** 할로젠과 황을 포함한 화학물질은 연소과정에서 HCl, SO₂ 등의 강산 가스를 생산하여 장치 부식을 초래할 수 있어 가급적으로 처리하지 않는 것이 바람직함. 아크릴로니트릴을 처리할 때는 문제가 없으나 할로젠과 황을 포함한 화학물질이 배출가스 중에 함께 출현하는 경우는 강산 가스의 생성량 등을 고려하여 적용 여부를 결정할 필요가 있음.

□ **장·단점 및 평가**

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 에너지 회수율이 높아 연료 소모량이 적음 높은 운전온도로 처리효율 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 높은 초기 투자비용 시설 규모가 고온산화시설보다 커짐 높은 유지관리 보수비용 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 저농도 아크릴로니트릴을 처리할 수 있으나 초기 투자비용과 운영비용이 높음

□ **(아크릴로니트릴 적용)** 아크릴로니트릴의 축열식 열소각기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 축열식 열소각기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99%	300백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

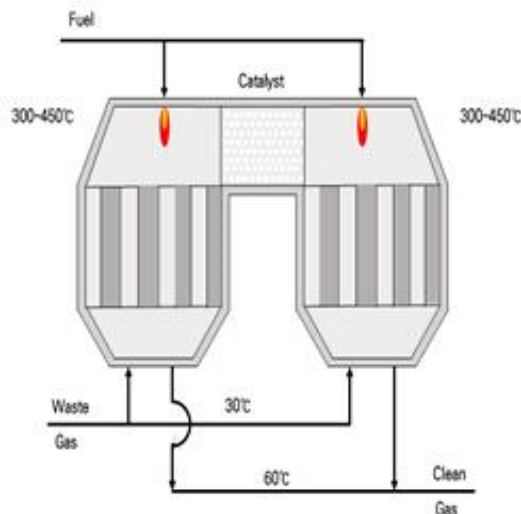
※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

라) 축열식 촉매산화기술

□ (기술 개요) 축열식 촉매산화기술은 기본적으로 촉매산화기술과 동일하나, 축열식 산화기술은 Shell-and-Tube 형태의 열교환기를 활용하여 열교환효율을 기존의 열소각 기술의 50~60%에서 85~95%로 높인 기술

○ 촉매로서는 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금이 주로 사용되며, 백금촉매는 HCl 등에 의해 비활성화가 빨리 일어나므로 염소계 VOCs 촉매산화를 위해서는 산화코발트, 산화구리/산화망간 등의 산화금속 촉매가 사용되고 있음.

- 아크릴로니트릴은 염소계 VOCs가 아니므로 백금, 팔라듐과 같은 귀금속계 합금 촉매를 적용해도 무방



[그림 8-6] 축열식 촉매산화기술

(출처) 환경보전협회, 환경정보 no.370 대기오염 방지시설 선정 및 유지관리 기술 인용

□ 적용조건

- (소각온도 및 체류시간) RCO의 소각온도는 350~500°C이며¹⁴⁶⁾, 체류시간은 1초 이하임.
- (산소농도) 아크릴로니트릴의 농도가 너무 높으면 연소가 안 되거나 불완전연소 개연성이 높으므로 산소농도를 LEL과 UEL를 고려하여 조정할 필요가 있음. 일반적으로 LEL의 25% 이하로 유지하면서 산소농도를 소각에 필요한 화학양론 값보다 1.2배 정도 높게 설정·공급하면 문제가 없음.

146) EPA(2017), Air Pollution Control Technology Fact Sheet, EPA-452/F-03-021

□ 유의사항

- (피독 현상) 촉매산화반응에서 가장 치명적인 것은 촉매 비활성화를 초래하는 피독 현상을 꼽을 수 있으며, 촉매 피독은 1) 미세먼지, 타르 고분자물질 등이 촉매 표면에 물리적으로 흡착하여 활성 저하, 2) 염소, 브롬, 불소 등에 의한 화학적 피독, 3) 황, 인, 규소, 중금속 등이 촉매 표면에 있는 공극을 폐쇄하여 표면적 감소 등을 꼽을 수 있음.
- 도장 도료 중에 유기실리콘 화합물이 포함되어 있는 경우가 많은데 이것이 연소 되면서 무기 규소화합물로 전환되면서 공극을 폐쇄하여 촉매 효과를 저하시킴.
- (대응방안) 일반적으로 전처리를 적용하고 있지 않으나, 미세먼지, 타르, 촉매 피독 원인물질을 촉매소각장치 유입 전에 미리 제거하여 촉매 수명을 연장하기도 함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 온도에서 운전하므로 연료 소모량이 RTO보다 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 초기 투자비용 • 시설 규모가 고온산화시설보다 커짐 • 높은 유지관리 보수비용 • 촉매 피독 • 폐촉매는 재생되지 못하고 지정폐기물로 처리 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술이며 넓은 범위의 유량과 저농도 아크릴로니트릴을 낮은 온도에서 처리할 수 있으나 시설 비용이 높고, 촉매 피독으로 인해 촉매 교체가 불가피하여 운영비용이 높음

- (아크릴로니트릴 적용) 아크릴로니트릴의 축열식 촉매산화기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 축열식 촉매산화기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(200Nm ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
99%	360백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

2) 흡착 처리기술

□ (기술 개요) 화학물질을 흡착제 표면에 물리적으로 흡착하여 처리하는 기술

○ (공정 구성) 일반적으로 활성탄이 많이 사용되고 있으며, 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 증기 또는 열에 의해 피흡착물의 탈착이 이뤄지는 흡착탑 재생공정임. 탈착 과정에서 농도가 높아진 피흡착물이 배출되며, 이를 연소처리기술 등의 후속 공정에서 처리함.

○ (흡착원리) 흡착제와 피흡착물 간에 Van der Waals 힘이 작용하고 있으며, 흡착제와 피흡착물 간의 거리에 따라 위치에너지가 달라짐. 위치에너지가 가장 낮은 지점이 형성되며, 그 지점에서 흡착이 일어남.

○ (흡착·회수 재사용과 차이점) 흡착·처리기술은 아크릴로니트릴 등의 유기오염물질을 흡착·처리하는데 목적을 두고 있지만, 흡착·회수 재사용 기술은 아크릴로니트릴 등을 회수하여 재사용하는데 초점을 맞추고 있음. 즉 두 기술의 원리는 동일하나 목적에서 차이가 있음.

□ (적용조건) 흡착·처리 공정 단독으로 운영하기보다는 연소처리기술 전단에 설치하여 처리대상물질의 농도를 적정 수준 이상으로 높여 연소처리기술의 처리 성능을 배가시키는 역할을 담당하며, 활성탄이 주로 사용되고 있음.

□ (유의사항) 활성탄 자체가 고온에서 화재 위험성¹⁴⁷⁾이 있고, 화재 및 폭발위험성 물질이 농축되어 화재 및 폭발 가능성이 있으므로 활성탄 흡착·처리공정을 설계할 때 이런 점을 유의하여 설계할 필요가 있음.

147) 활성탄 자체 착화온도는 400~500℃

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 연소처리기술과 연계하여 처리하므로 아크릴로니트릴 등의 VOCs 처리 시너지 효과가 있음. 저농도 아크릴로니트릴 등의 VOCs 처리가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 연소처리기술과 연계하면 저농도의 아크릴로니트릴 등의 VOCs 처리가 가능하나, 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 화재 위험성 등으로 관리가 용이하지 않음.

□ (아크릴로니트릴 적용) 아크릴로니트릴의 흡착처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡착처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

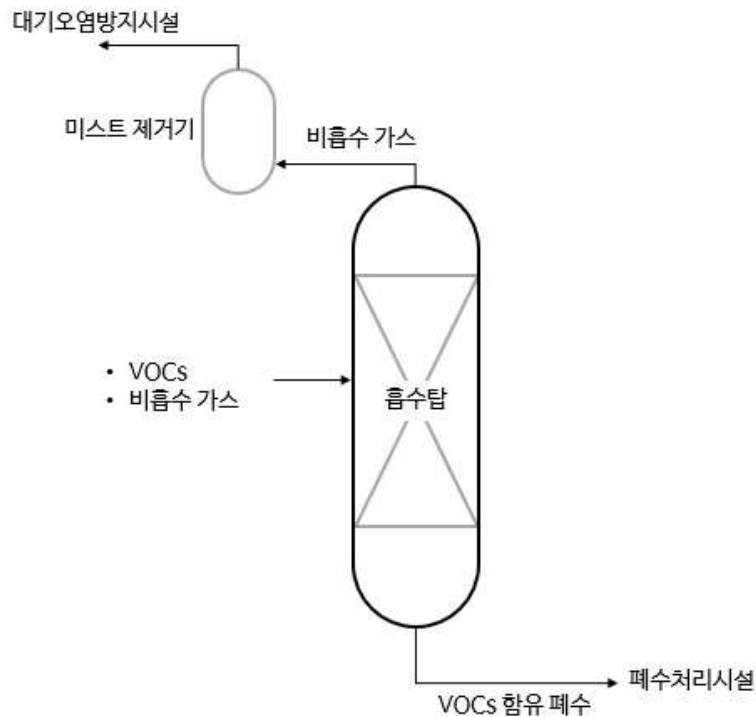
처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
-	18백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

(출처) 한국물가정보(2017년 3월호)

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

3) 흡수처리기술

□ (기술 개요) 혼합 기체를 액체와 접촉하게 시켜 기체의 특정 성분을 액체 속에 용해 흡수·처리하는 기술로서 물리흡수와 화학흡수로 구분할 수 있음. 물리흡수는 흡수제에 대상 기체를 물리적으로 용해시키는 방법이고, 화학흡수는 흡수제 중의 용질 성분과 기체 성분이 화학반응에 의해 흡수되는 방법임.

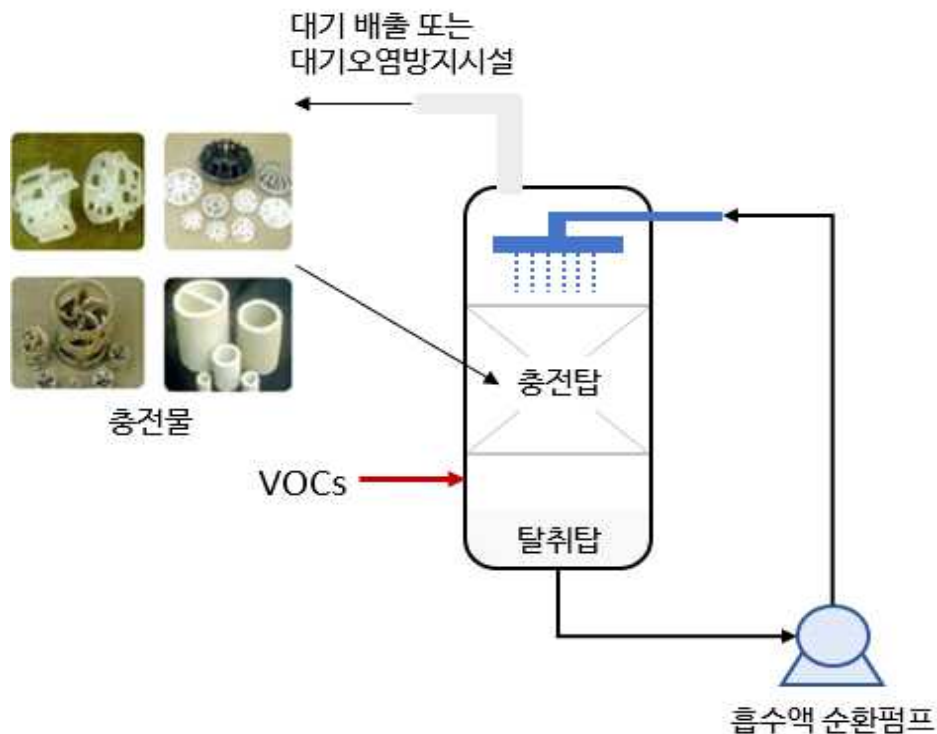


[그림 8-7] 흡수처리기술

○ (VOCs 흡수) VOCs의 흡수는 물리흡수에 이루어지며, VOCs를 함유한 가스에서부터 액상 흡수제로 VOCs가 물질 전달되는 현상으로 물질 전달 구동력은 가스상과 액상 내의 VOCs 특성에 좌우되며 헨리의 법칙(Henry's Law)에 따라 흡수액에 용해되는 양이 결정됨.

- VOCs 흡수제 종류는 물, 고비점 석유오일(Non-volatile Petroleum Oil), 미네랄 오일(Mineral Oil) 등이 있으며, 친수성 VOCs는 물을 활용하여 흡수·제거할 수 있는 최적 흡수제이고, 소수성 VOCs는 고비점 석유오일을 흡수제로 사용하거나, 수용액에 양성(친수성과 소수성 기능을 동시 보유)을 지닌 공중합체(Copolymer)를 투입하여 소수성 VOCs의 흡수를 유도함.

- (VOCs 탈착) VOCs를 흡수제로부터 탈착하여 재생하는 방산(Stripping) 공정이 있으며, 일반적으로 열을 가하거나, 진공을 걸어서 VOCs를 물리적으로 탈착시키며, 응축기와 연결하여 VOCs를 회수할 수 있음.
- (흡수장치 종류) 가스상과 액상이 흐르는 방식에 따라 향류(Counter Flow)와 병류(Co-current Flow) 방식이 있으나, 대부분은 향류 방식이고, 흡수장치의 종류는 충전탑(Packed Bed), 다단탑(Tray Tower), 분무탑(Spray Tower), 벤츄리 스크러버(Venturi Scrubber) 등이 있음. 일반적으로 VOCs 처리에는 충전탑과 다단탑이 많이 적용되고 있음.
- (충전탑) 금속, 세라믹, 플라스틱 재료로 된 불규칙 충전물이나 규칙 충전물로 채워져 있으며, 액체는 기체와의 접촉면적을 높이기 위해 탑 상부에서 고르게 분산되며, 분산된 액체는 충전물의 표면에 박막(Thin Film)을 형성하면서 아래로 흐름. 폐가스는 탑 하부에서 유입되며 흡수액과 접촉하면서 배출가스 중 VOCs 등의 특정 성분이 액상으로 흡수되고, 배출가스의 나머지 성분들은 탑 상부로 배출됨.

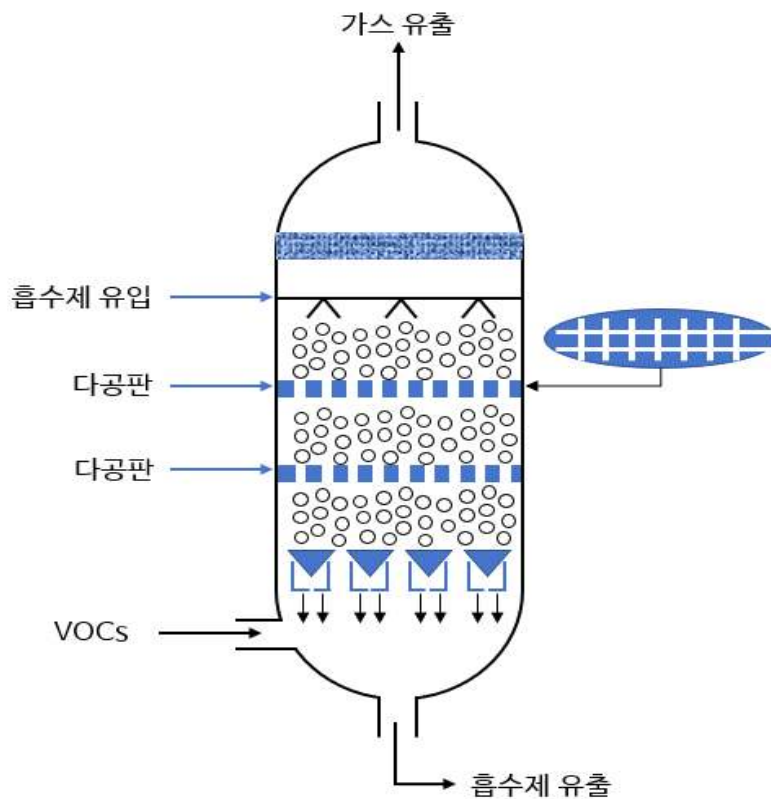


[그림 8-8] 흡수처리기술의 충전탑

(출처) 안전보건공단(2015), 폐수처리설비(스크러버) 화재·폭발 예방대책 매뉴얼

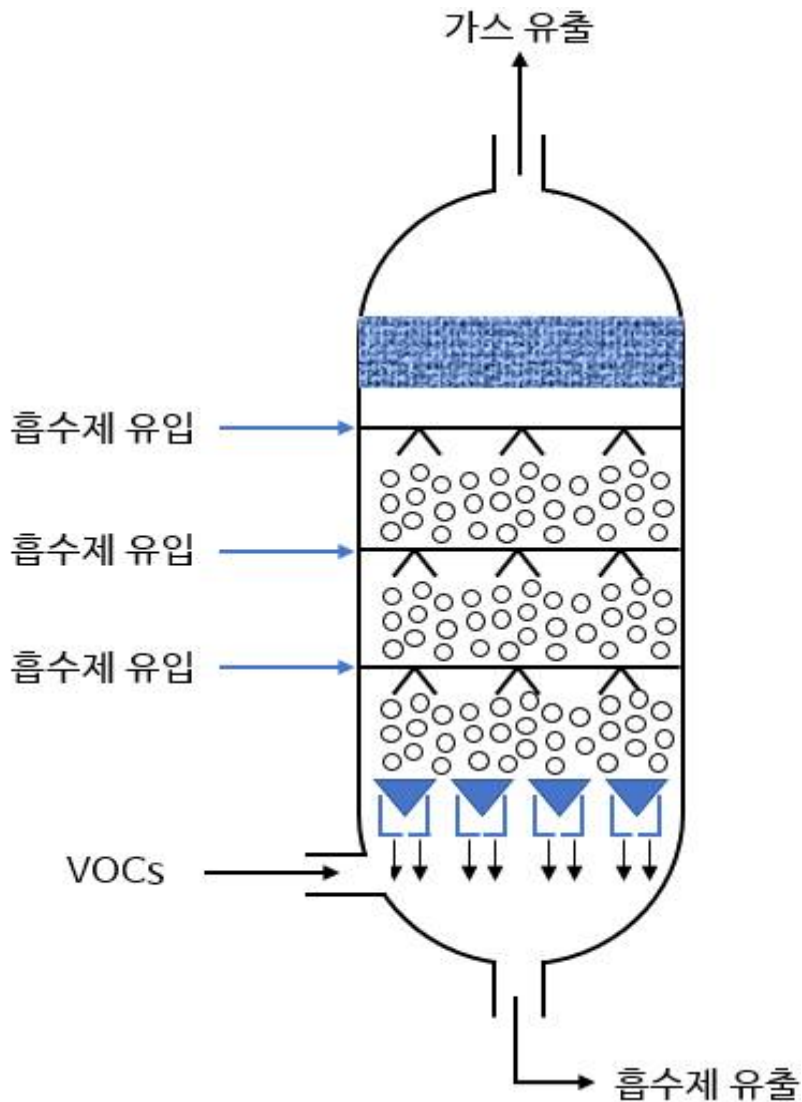
충전탑은 탑 상부에서 흡수액 분산이 성능에 큰 영향을 미치므로, 기체 흐름을 방해하지 않는 범위에서 흡수액이 고르게 분산되어야 하고, 충전물은 액상 박막이 넓게 형성되어 흡수 면적을 커지도록 설계해야 함. 충전탑은 처리효과가 크고, 침전물이 발생하는 가스 처리에도 적합하다는 장점이 있지만 충전층의 공극이 폐색될 수 있고, 충전물이 고가라서 초기 설치비용이 높으며, 가스 유속이 과도한 경우 범람이 발생할 수 있음.

- (다단탑) 증류 공정의 증류탑과 유사하고, 접촉시간이 비교적 길고, 각 단의 액체에 기체가 고르게 분산될 수 있다는 특징을 가지고 있어 흡수탑으로 많이 사용되고 있음. 장점으로는 충전탑에 비해 부유물이 있는 흡수액에 대해 적응성이 좋고, 온도 변화가 심한 조건에도 적용이 수월하나, 초기 비용이 높고 압력손실이 큰 단점이 있음.



[그림 8-9] 다단탑 흡수처리시설

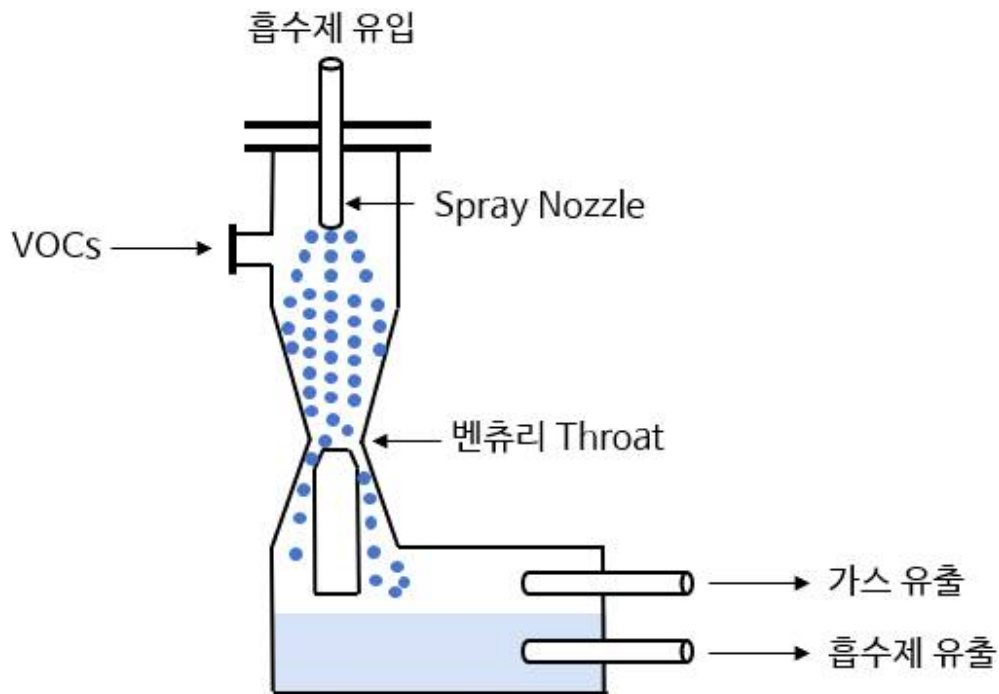
- (분무탑) 충전물을 사용하지 않는 반면 흡수액을 매우 적은 액적으로 만들어 분사함으로써 VOCs가 흡수될 면적을 극대화함. 분무탑의 기체와 액체 접촉시간이 짧아 물에 용해도가 높은 가스(예, 암모니아, 이산화황) 처리에 적합하고, 아크릴로니트릴과 같은 VOCs 처리에는 적합하지 않다고 알려져 있음. 분무탑은 충전탑보다 저렴하고, 압력손실이 적은 반면 분사 노즐이 잘 막히고 편류를 일으키기 쉽고 분무액과 기체의 균일한 접촉이 용이하지 않은 단점이 있음.



[그림 8-10] 분무탑 흡수처리시설

- (벤츄리 스크러버) 벤츄리 노즐에서 배출가스와 흡수액을 강제로 접촉시켜 배출 가스 중의 특정 성분을 흡수·처리하는 설비임. 흡수액과 배출가스와의 접촉시간이 매우 짧아 대부분의 VOCs보다는 용해도가 높은 가스 제거에 적합함.

벤츄리 스크러버는 소형으로 대용량 가스 처리가 가능하고 흡수효율이 탁월한 장점이 있는 반면 가스 압력손실이 커서 동력비가 높은 단점이 있음.



[그림 8-11] 벤츄리 스크러버 흡수처리시설

(출처) <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/venturi-scrubber> 인용

- (유의사항) 증기압이 낮은 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 상대적으로 낮은 압력손실 ▪ 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 ▪ 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 ▪ 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 ▪ 상대적으로 낮은 설치비용 ▪ 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폐수처리 문제 ▪ 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 아크릴로니트릴 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 경제성 때문에 아크릴로니트릴 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

□ (아크릴로니트릴 적용) 아크릴로니트릴의 흡수처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡수처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%) ¹	설치비용(100m ³ /min) ²	연간 운영비용(m ³ /min)	비고
70~90	30백만원	-	-

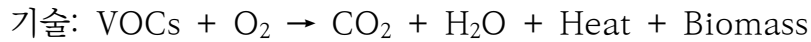
1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: 물가정보(2019.11)

※ 사업장 여건에 따라 적응성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

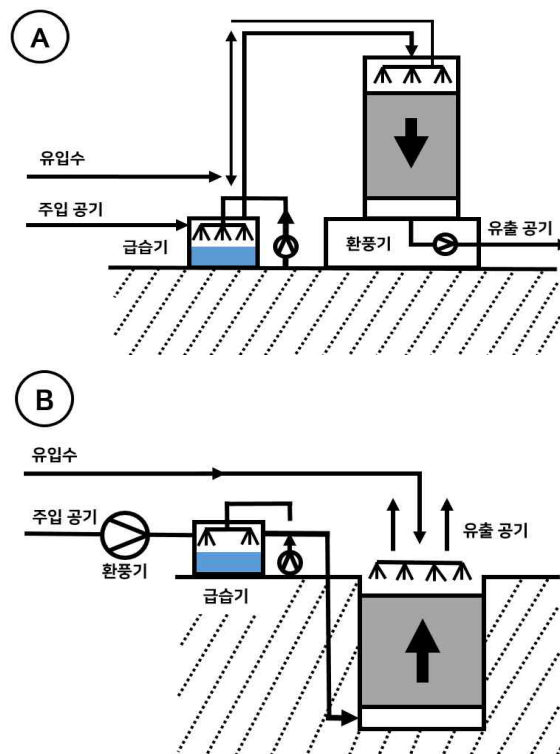
4) 생물학적 처리기술

□ (기술 개요) 생물학적 처리기술은 호기성 미생물을 활용하여 VOCs를 산화·분해하는



○ (종류) 생물학적 처리기술의 종류는 첫째, 바이오필터(Biofilter), 둘째, 바이오스크리버(Bioscrubber), 셋째, 바이오탁리클링 필터(Biotrickling Filter)임.

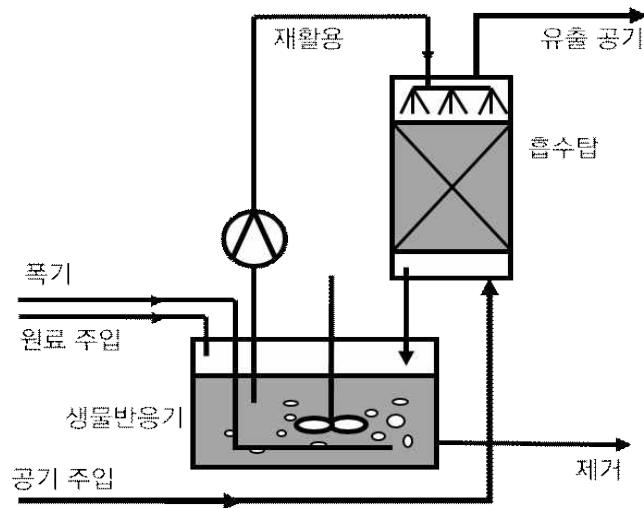
- (바이오필터) 바이오필터 고정체(하우징, Housing)는 가습장치, 온도조절장치, 분무장치로 구성되어 있는 밀폐형 구조임. 바이오필터 충전제는 미생물 서식에 최적 조건을 제공할 수 있는 물질(활성탄, 퇴비 등)로 구성되어 있어 미생물 농도는 토양 사용 시 보다 최고 140배까지 높일 수 있음. 바이오필터의 충전제는 오염물질을 1차적으로 흡수한 후 충전체 속의 미생물이 오염물질을 처리하도록 되어 있으며, 연속적 충전제의 재생이 가능한 시스템으로 한 번 설치하면 2~7년 정도 충전제 교체 없이 운전이 가능함.



[그림 8-12] 바이오필터 구성

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

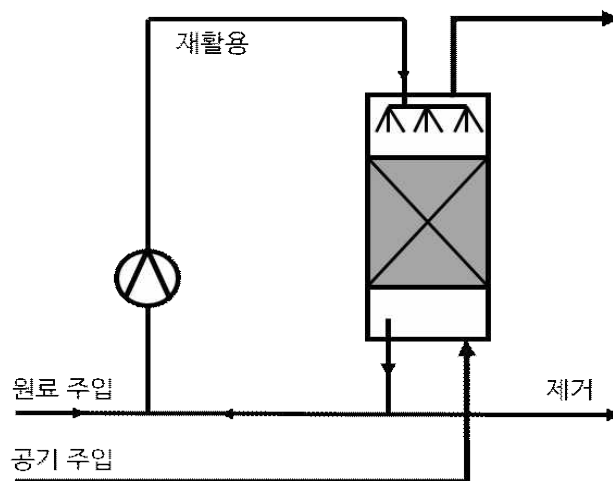
- (바이오스크리버) 배출가스를 세정탑에 통과시켜 오염물질을 물에 흡수시킨 후 이를 포기조에서 미생물 활동에 의해 제거하는 것임. 바이오스크리버에 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 아크릴로니트릴 등 대부분 VOCs는 적합하지 않음.



[그림 8-13] 바이오 스크리버

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- (바이오텀리클링 필터) 바이오필터와 바이오스크리버가 혼합된 형태로서 미생물을 불활성 담체에 배양 충전시키고, 오염된 물을 상부에서 미생물이 충전된 담체에 분무하여 처리하는 시스템임. 바이오스크리버와 마찬가지로 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 아크릴로니트릴 등 대부분 VOCs 적용에는 적합하지 않음.



[그림 8-14] 바이오텀리클링 필터

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- **(적용조건)** 생물학적 처리방법은 일반적으로 저농도 VOCs를 포함한 상온의 배출가스 처리에 적합하며, VOCs 농도, 온도, 배출가스 유량, 기타 미생물에 치명적인 성분 등을 고려하여 적용성을 검토해야 함.

항목	추천범위	비고
VOCs 유입농도(ppm)	500 이하	톨루엔 기준
단위 체적 당 부하(g/m ³ ·hr)	100 이하	-
제거효율(%)	90 이상	-
배출가스 유량(m ³ /hr)	300 이하	설치 공간 고려
배출가스 온도(°C)	20 ~ 40	-
배출가스 습도(%)	제한 없음	-
할로겐 및 SO ₂	제한적	전 처리 필요
분진	제한적	전 처리 필요

□ **운전인자**

- **(수분함량)** 생물학적 처리방법에서 가장 중요한 인자는 수분함량으로 특히 바이오필터는 수분 조절이 어려워 실패하는 사례도 있음.
- **(온도)** 미생물의 활동도는 온도 증가에 따라 증가하나, 온도가 한계치 이상 오르면 미생물이 오히려 폐사됨. 그러므로 최고 활성을 일어나는 온도를 파악하고, 그 이상으로 온도가 올라가지 않도록 세심하게 조정하는 것이 필요함.
- **(pH)** 각각 미생물들은 고유의 최적 pH를 가지고 있어 일정 범위의 pH 조건에서 활성이 좋으며, 이 범위를 벗어나면 활성이 떨어지거나 폐사하게 됨.
- **(영양분)** 미생물은 에너지와 탄소원을 얻기 위해 오염물질을 분해하나 질소, 인, 칼륨, 황, 칼슘, 나트륨, 철 및 수많은 다른 성분의 미네랄도 필요하므로 미생물의 활성도를 왕성하게 유지하기 위해서는 이런 성분들을 충분히 공급해야 함.
- **(오염물 농도 부하와 표면 부하)** 단위시간 당 단위부피 당 생물학적 처리공정에 들어가는 오염물질의 총량을 농도 부하로 정의하고 있으며, 생물학적 처리공정 설계 및 운전에 중요한 인자임.

- (산소 농도) VOCs 처리에 필요한 산소의 화학양론비적 양이 평형상태에서 용해되는 산소량보다 적으면 산소 소진이 일어나므로 산소 농도를 적정 수준에서 유지할 수 있도록 생물학적 처리공정 설계 및 운전이 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저렴한 설치 및 운영비용 • 낮은 압력손실 • 비선택성으로 다양한 물질로 구성된 VOCs의 동시 처리 가능 • 폐수, 폐기물 등의 2차 오염 물질 배출이 최소화 • 설치 융통성 	<ul style="list-style-type: none"> • 넓은 부지 필요 • 느린 처리속도 • 특정 물질 처리에 적합한 선택적으로 미생물 적용(따라서 복합 미생물 군집 적용 필요하나 배양이 쉽지 않음) • VOCs 회수 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 VOCs 처리에 적합하며, 설치 운영비용이 저렴하고 2차 오염물질 생성 배출이 적지만 처리속도가 느리고 설치 부지 면적이 넓다는 단점이 있음.

- (아크릴로니트릴 적용) 아크릴로니트릴의 생물학적 처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 생물학적 처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	비고
50~70	100백만원 + α	바이오필터
50~70	150백만원 + α	바이오스크러버
50~70	290백만원 + α	바이오탁리클링필터

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

8.3.2

이송·운반·분배·계량시설

□ (정의) 원료 물질을 저장 탱크, 창고, 사일로 등에 저장하거나 생산물, 제품을 일시적으로 창고 등에 보관·저장하는 공정

8.3.2.1. (공정관리) 측정 및 관리시스템 도입

□ (정의) 누출오염원관리시스템(LDAR)을 활용하여 이송·운반·분배·계량 시설 배출원에 대한 주기적 감시 및 검지를 시행하여, 이상 있는 장치는 즉시 정비 또는 교체하여 아크릴로니트릴 배출량과 배출원을 동시에 체계적으로 관리하는 기술

○ 이송·운반·분배·계량 시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 누출지점이 많고, 누출되더라도 육안 식별이 어렵고, 화학물질에 따라서 무색·무취인 경우도 있어 측정하지 않고서는 누출 파악이 어려운 상황이 존재함.

○ 누출 가능성이 큰 지점에 바코드가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고, LDAR 시스템에 의해 주기적으로 점검 관리함.

[표 8-4] LDAR 점검주기 및 화학업종과 정유업종 저감율

장치 및 화학물질	화학업종 저감율(%)		정유업종 저감율(%)	
	매월 감시	매분기 감시	매월 감시	매분기 감시
밸브-기체	87	67	88	70
밸브-경질유	84	61	76	61
펌프-경질유	69	45	68	45
압축기-기체	-	-	-	33
연결부-기체, 경질유	-	33	-	
압력안전밸브-기체	-	44	-	44

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

기술 개요	Leak Detection and Repair(이하 LDAR) 등 누출관리시스템을 활용한 실시간 화학물질의 비산배출 관리기술로 최근 광학이미지 카메라를 이용한 Flare, 저장시설 등 VOCs 누출 모니터링과 공정 배출감시를 위한 Fence Line 모니터링 기술도 활용되고 있음			
적용산업 및 공정	아크릴로니트릴의 이송·운반·분배·계량 공정이 있는 전 업종			
적용효과	(적용 전) 이송·운반·분배·계량시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 배출원 수가 많고 누출이 되더라도 누출 여부의 육안 확인이 어려운 상황			
	(적용 후) LDAR를 도입하여 대상 공정의 누출지점에 바코드 번호가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고 VOCs 측정기(검지기)를 이용하여 배출원에 대한 주기적 점검을 통해 누출 확인 및 신속한 장비 보수 가능			
저감효과 (%)	70	처리비용	설치비용	100백만원 이상
			운영비용	1,000원/관리지점

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

8.3.2.2. (공정관리) 장치개선

- (정의) 장치개선 및 교체를 통해 아크릴로니트릴의 비산 배출원으로부터의 누출(Leak)을 방지하고 누출 원인이 되는 부분을 개선함으로써 배출량을 줄이거나 완전히 차단하는 기술
- (펌프 변경) 펌프 Seal에서 아크릴로니트릴이 누출되는 것을 방지하기 위해 Seal이 없는 Sealless(Non-seal) 펌프(Canned 펌프 등)나 Double-sealed 펌프로 교체
- (밀폐식 시료 채취장치) 시료 채취 과정에서 아크릴로니트릴이 비산 배출되는 것을 방지하기 위해 밀폐식 시료 채취장치로 변경

장치 종류	개선 방법	저감률(%)
펌프	• Seal-less design (Canned Pump etc.)	99
	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
밸브	• Seal-less design • (Bellows type, Diaphragm, etc.)	99
압축기	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
압력 안전밸브	• Rupture Disk Assembly	99
	• Closed Vent System	90*
연결부	• Socket Welding Type	99
개방식 라인	• Blind, Plug, Cap or Second Valve	99
시료 채취 연결부	• Closed-loop System	99
공정 배수구	• Closed-loop and Water Seal	99

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

*배출관이 연소처리 등에 연결하여 처리할 경우는 99%, 미 연결된 경우는 90% 수준임.

8.3.2.3. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 아크릴로니트릴이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 아크릴로니트릴의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
 - (밀폐형 덮개) 아크릴로니트릴 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 1-15] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

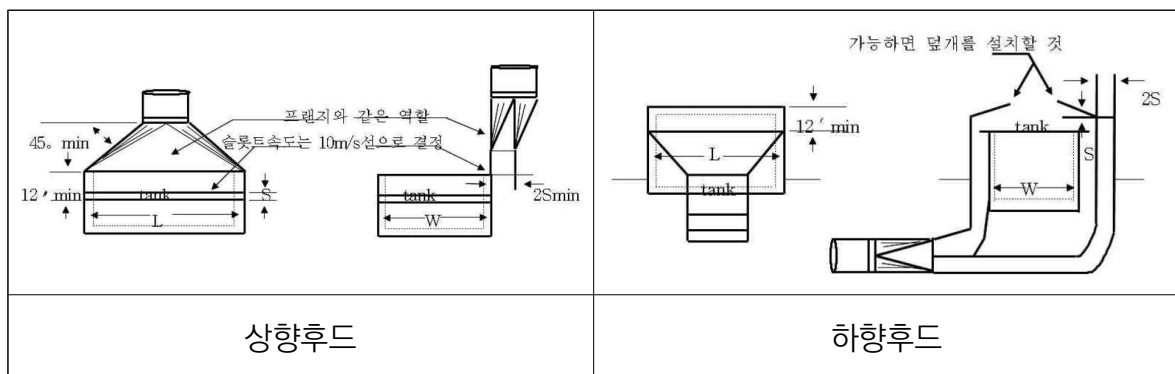
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 8-16] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

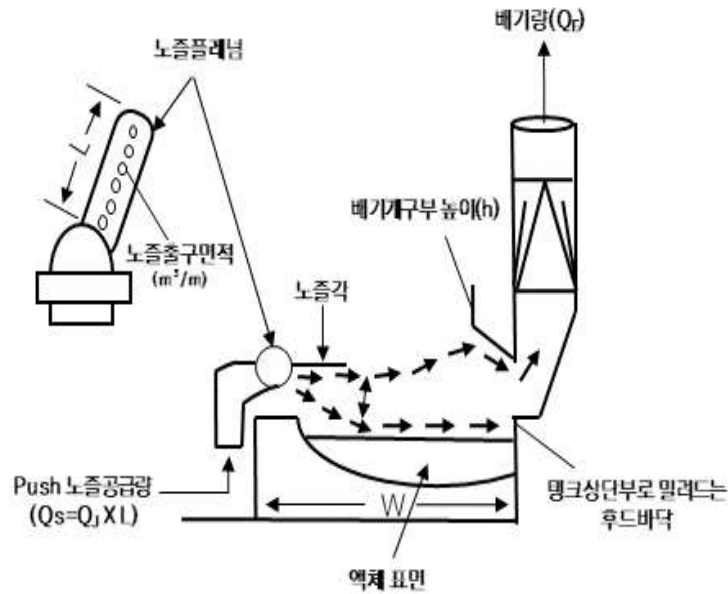
- (외부식후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 8-17] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 8-18] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음


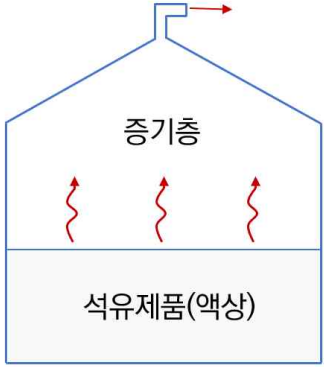

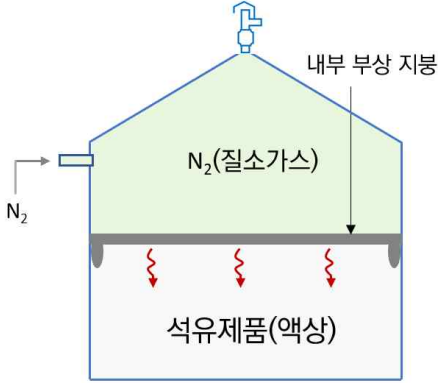
(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

8.3.3

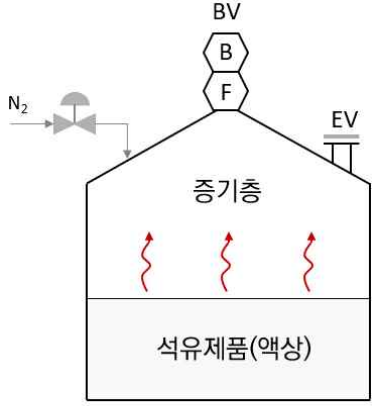
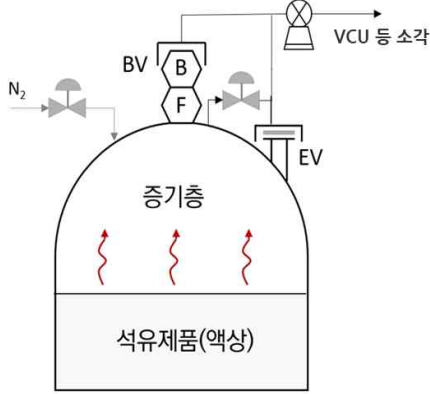
저장시설

8.3.3.1. 대체공정

<p>적용업종</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 화학물질 및 화학제품 제조업 • 코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업 			
<p>대체공정</p>	<p>(변경 전) 기존 CRT(Cone Roof Tank)는 VOCs를 함유한 원료 및 제품의 저장시설 내부 증기압이 높아지면 안전밸브가 자동으로 열리면서 VOCs가 외부로 배출</p> 		<p>VOCs의 압력이 높아지면 안전밸브가 열림</p> 	
	<p>(변경 후) IFRT(Internal Floating Roof Tank)는 저장시설의 액위에 따라 내부 부상 지붕이 이동하므로 증기층 발생을 최소화하며, 발생 증기를 연소시설, 흡착탑 등으로 이송 처리하며, 질소 봉입으로 VOCs 누출을 최소화하고 있음.</p> 		 <p>제품 액위 변화에 따라 내부 부상 지붕 이동으로 증기 발생 최소화</p>	
<p>저감효율 (%)</p>	<p>IFRT: 95% 이상 질소 봉입: 97% 이상 연소시설 : 99% 이상</p>	<p>처리비용</p>	<p>설치비용 운영비용</p>	<p>1,800백만원 (IFRT+연소시설 연결) -</p>

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것
 (출처) <https://www.indiamart.com/proddetail/cathodic-protection-system-for-tanks-20242520612.html>
 (출처) <http://www.fullmost.com.tw/de/Internal-Floating-Roof-IFR/>
 (출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

8.3.3.2. 공정관리

적용산업	<ul style="list-style-type: none"> • 화학물질 및 화학제품 제조업/저장시설 • 코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업/저장시설 			
저장시설 관리개선	<p>(변경 전)</p> <p>BV(Breath Valve)를 열리게 하기 위한 설계압력이 150 mmH₂O로 낮아 VOCs 대기 배출이 많음.</p>		 <ul style="list-style-type: none"> • 설계압력이 낮아 BV와 EV가 정상 운전에서도 탈루 발생 • Corn Roof Tank 	
	<p>(변경 후)</p> <p>설계압력을 10,000 mmH₂O로 높여 설계하고 평소 운전 압력을 최대 9,000 mmH₂O로 관리하여 배출 가스 양을 감소하였고, 배출가스는 소각 처리하여 VOCs 대기 배출 최소화</p>		 <ul style="list-style-type: none"> • 설계압력을 높여 BV와 EV를 통한 대기 방출 없애고, BV와 EV를 내압으로 인해 개방되더라도 Vent Gas는 VCU 등 소각 처리됨 • Dome Roof Tank 	
저감효율 ¹ (%)	90%	처리비용	설치비용 ²	70백만원 이상
			운영비용	-

1: 이우근 외 3(2006), VOCs 배출현황 및 저감방안, 대한환경공학회지

2: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

8.3.3.3. 재사용 및 재활용

흡착·회수	대기 중으로 배출되는 VOCs를 흡착제에 흡착시키고, 온도 또는 압력 조절을 통해 탈착·회수하는 기술
응축·회수	응축기 등을 통해 유체 온도나 압력 변화로 대상 VOCs를 분리·회수하는 기술
흡수·회수	액상 흡수제를 가스상의 VOCs와 접촉하여 VOCs를 흡수제로 물질 이동시켜 분리·회수하는 기술
막분리·회수	혼합가스 각각의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술

1) 흡착·회수기술

□ (기술 개요) VOCs를 흡착제 표면에 물리적으로 흡착시키고 탈착·회수 재이용하는 기술

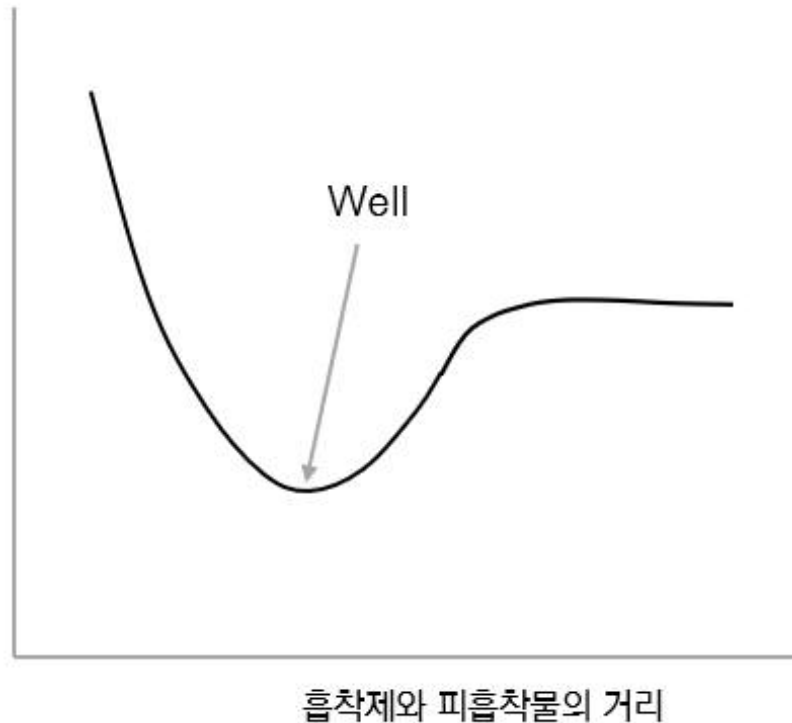
○ (흡착) 흡착공정은 화학적 흡착과 물리적 흡착으로 구분할 수 있으며, 화학적 흡착은 피흡착물과 흡착제가 화학적으로 결합하므로, 피흡착물과 흡착제의 화학적 결합을 끊어야 하므로 원래 형태로의 피흡착물 회수가 용이하지 않음. 반면 물리적 흡착은 원래 형태로 피흡착물의 회수가 가능하므로 흡착·회수 재사용기술에서는 물리적 흡착을 적용하고 있음.

- (물리적 흡착원리) 아래 그림은 흡착제 표면으로부터의 거리와 위치에너지 (Potential Energy)의 상관관계를 보여주고 있음. 흡착제와 피흡착물 간에는 '반발 (Repulsion)¹⁴⁸⁾'과 '견인(Attraction)¹⁴⁹⁾'이 동시에 작용하여 균형을 이루고 있음. 흡착제와 피흡착물의 거리 중에서 위치에너지가 가장 낮은 지점(Well 또는 Dip)에서 흡착이 일어나며, 피흡착물의 탈착을 위해 필요한 에너지가 외부에서 운동 에너지(Kinetic Energy) 형태로 공급되면 탈착이 일어남.

148) 흡착제와 피흡착물의 전자군(Cloud of Electrons) 간의 반발력

149) 전자 핵(Nuclear) 간의 Van der Waals force에 의한 견인력

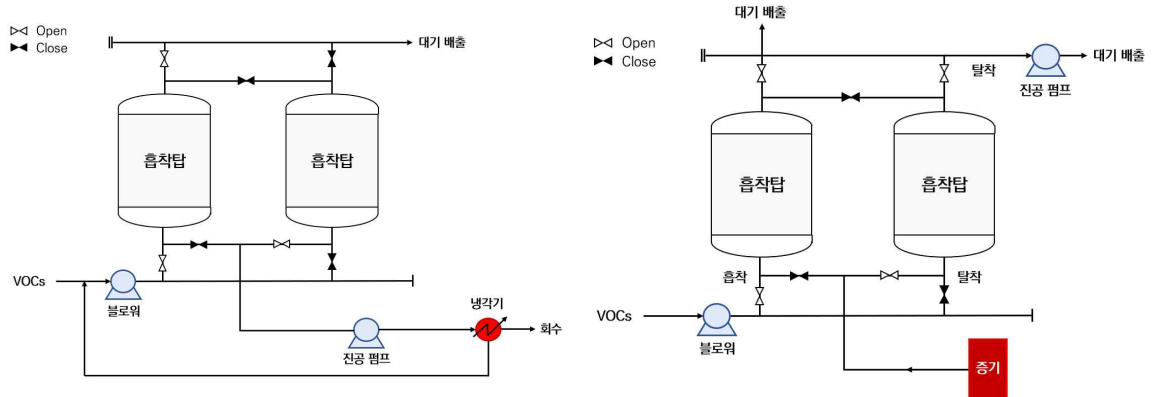
위치에너지
(Potential Energy)



[그림 8-19] 흡착제와 피흡착물의 거리에 따른 위치에너지
변화

(출처) EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004

- **(탈착)** 포화된 흡착제 재생 방법은 온도 차이를 이용한 열탈착 방식(Temperature Swing Adsorption, 이하 TSA)과 압력탈착 방식(Pressure Swing Adsorption, 이하 PSA)이 주로 적용되고 있음.
 - **(TSA)** 고온 증기를 이용해 흡착제(예, 활성탄)에 흡착된 VOCs를 회수하는 방법으로 흡착제에 잔류하는 수분을 건조해야 하며, 고온 증기사용으로 화재 등 위험성이 있으며, 운전비용이 높고, 시간이 많이 소요되는 단점이 있음.
 - **(PSA)** 고압에서 VOCs를 흡착시키고, 압력을 낮춰 VOCs를 탈착시키는데 고압에서 운전하므로 운전비용이 높고, 공정 규모가 커지는 단점이 있음.
- **(공정 구성)** 일반적으로 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 탈착하게 됨.



[그림 8-20] 흡착·회수공정 모식도

(출처) SEST주식회사 홈페이지 (http://www.sestco.com/kor/vru_01.php) 인용

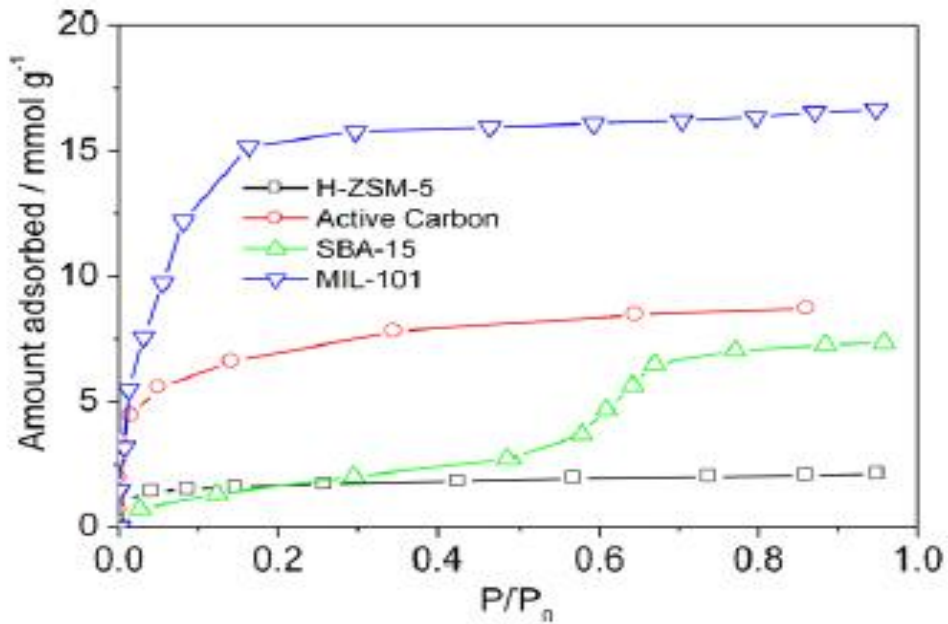
- (적용조건) 1) 아크릴로니트릴 단일물질 또는 아크릴로니트릴 혼합 VOCs, 2) 단일 배출구의 점오염원, 3) 고농도 아크릴로니트릴 또는 VOCs 등이며 아크릴로니트릴과 VOCs의 회수·재이용을 위해서는 처리보다 경제성 있어야 하고, 아크릴로니트릴과 VOCs 가격과 배출가스 특성에 의해 결정됨.
- (배출가스 특성) 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, 아크릴로니트릴과 VOCs 농도, 수분량, 온도 등이며, 이는 흡착제 종류에 따라 달라지므로 '흡착제 종류'에서 상세히 설명하였음.
- (흡착제 종류) 아크릴로니트릴 등의 VOCs 흡착제 종류는 1) 활성탄, 2) 제올라이트 (Zeolite), 3) 폴리머(Polymer), 4) MOFs(Metal-organic Frameworks)를 꼽을 수 있으며, 각 흡착제의 특성은 아래에서 보는 것과 같음.

[표 8-5] 흡착제 특성 비교

항목	활성탄	제올라이트	폴리머
표면적	600~1,400 m ² /g	천연 (300~600 m ² /g) 합성 (800~900 m ² /g)	
공극 크기	micropore (공극 직경 < 2 nm), mesopore (2 nm < 공극 직경 < 50 nm), macropore (공극 직경 > 50 nm)	3~30 nm (일정한 공극 크기)	Porous polymers (1~1.6 nm)
표면특성	친수성 ¹ 과 소수성 특성을 모두 보유하고 있음	천연 제올라이트는 친수성이나, 합성 제올라이트는 친수성 또는 소수성으로 목적에 맞게 합성 제작	대부분은 소수성이나 사용 목적에 적합하도록 물성을 변형 합성 제작하는 경우도 있음.
배출가스 유량	60~3,500 m ³ /hr (단일) 병렬 사용시 용량 증가 가능 (for VRU)	60~3,500 m ³ /hr	
VOCs 유입농도	700~1,000 ppm (LEL 25% 이하) 경제성을 고려하면 10~70 VOL% (100,000~700,000 ppmv) (For VRU)	1,000~10,000 ppm (LEL 25% 이하)	
수분량 (상대습도)	50% 미만	94~96%까지 허용	
온도	55°C 이하	상온	
탈착방법	증기 열탈착 ² 진공(Vacuum) 탈착	열탈착 ⁴	열탈착 ⁵
탈착효율 ³	50% 회수효율 98% 이상	90%	50~90%
교체주기	6개월~5년(증기 열탈착) 7년 이상(진공 탈착)	5년 이상	교체주기는 폴리머에 따라 다르나 일반적으로 상당 기간 교체를 하지 않아도 되는 것으로 알려져 있음

- 1: 활성탄의 친수성 특성 때문에 물이 활성탄에 흡착된 피흡착물을 치환·탈착하는데 주요 역할 담당하며, 재생에 필요한 증기량은 목표 제거효율(또는 출구 농도)에 좌우되고, 일정한 증기가 흡수층 온도를 재생온도로 올리는 탈착에너지 공급
- 2: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 활성탄 착화 온도보다는 낮아야 함(재생 최고 온도는 120~180°C)이고, 탈착을 위한 증기 사용량은 0.25~0.35 kg H₂O/kg AC
- 3: EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004
- 4: 열에 강하기 때문에 고온 탈착도 가능
- 5: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 폴리머 용점(Melting Point)보다는 낮아야 하고, 열에 약하기 때문에 탈착 온도는 비교적 낮은 온도에서 운전

- 최근 연구¹⁵⁰⁾에서는 금속-유기 기반 구조(Metal-organic Frameworks; 이하 MOFs) 촉매가 아크릴로니트릴 흡착에 있어서 활성탄, 제올라이트보다 성능이 더 좋다고 알려져, MOFs의 적용을 검토해 볼 필요가 있으나 MOFs는 고가이므로 경제성 검토를 통해 결정할 필요가 있음.



[그림 8-21] 여러 흡착제의 아크릴로니트릴 흡착능 비교
(참고) MIL-101은 Al, Cr이 담지된 Terephthalate로서 MOFs 일종

○ 흡착제 비교 평가

- 활성탄은 화재 위험성이 높고, 비점이 높은 유기화합물에 적용하기 어렵고, 수분 조절이 필요하다는 단점을 갖고 있으며, 이를 극복하기 위해 제올라이트 흡착제가 개발 적용되고 있으나, 제올라이트는 고가이므로 활성탄 적용이 어려운 특정 목적에 주로 활용되고 있음.
- 한편 폴리머 흡착제는 표면특성 조절이 가능하다는 특성 때문에 개발 적용되고 있으나, 열에 취약하고 고가라는 단점을 갖고 있으나, 활성탄이 적용하기 어려운 특정 목적으로 고려해 볼 수 있음.

150) Khan, N. A., Hasan, Z., Jung, S. H. (2013), Adsorptive Removal of Hazardous Materials using Metal-organic Frameworks (MOFs): A Review

- 활성탄은 적용사례가 많아 기술적 안정성이 높고, 가장 저렴하나 교체 관련 번거로움이 있으며(최장 사용 기간은 7년), VOCs의 배출특성을 고려하여 제올라이트와 폴리머도 대안으로 고려·결정할 필요가 있음.

□ 처리효율과 비용

흡착제	회수효율	설치비용	운전비용	비고
활성탄 ¹	80% 이상	500백만원 이상 ³	2.4백만원/톤	회수 재사용으로
제올라이트 ²	90~96%	-	61,000~163,000원/m ³	원료물질 대체로
폴리머	-	-	-	운전비용 상쇄 효과

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: Khan, F. I., Ghoshal A. Kr. (2000), Removal of Volatile Organic compounds from polluted air: A Review

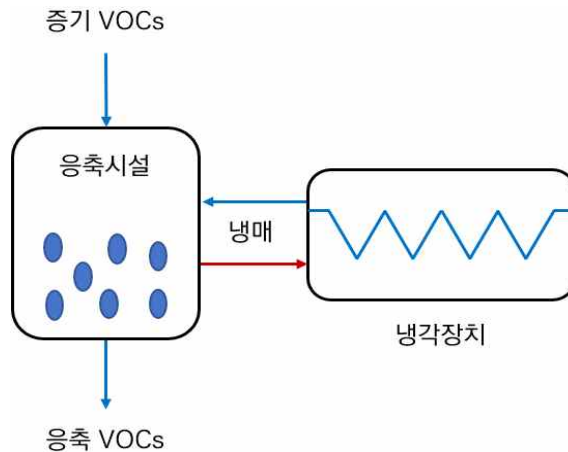
3: 유입 가스 유량과 농도에 따라 비용 차이 발생

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 아크릴로니트릴의 지속적 재사용으로 인한 구매 비용 절감 • 아크릴로니트릴의 환경 유입을 차단하여 환경 개선 효과 	<ul style="list-style-type: none"> • 고가의 설치·운영비용 • 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 아크릴로니트릴 재사용으로 환경 개선 효과가 있는 반면 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 관리가 용이하지 않음.

2) 응축·회수기술

- (기술 개요) 응축은 온도를 낮추어 기체상태 물질을 액체 상태로 전환하는 방법으로 냉매를 활용하여 기체상태 혼합물의 온도를 낮추어 응축 가능한 물질(VOCs 등)을 응축 불가능한 물질로부터 분리하는 기술



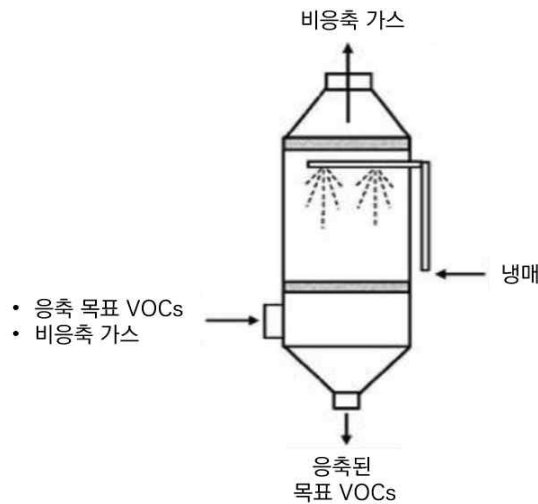
[그림 8-22] 응축·회수 공정도

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

- (원리) 기체상태 물질은 노점(Dew Point)¹⁵¹⁾에서 응축이 일어나며, 일정한 압력에서 온도를 점차 낮추면 노점이 다른 물질들이 특정 온도에서 응축이 일어나면서 분리 추출됨. 또는 온도는 일정하게 유지하면서 압력을 높여줌으로써 냉각응축을 유도하여 특정 물질을 분리할 수도 있음.
- (종류) 응축은 비냉각방식(Non-refrigeration Method)과 냉매를 사용하는 냉각방식(Refrigeration)으로 구분할 수 있으며, VOCs 회수에서는 냉각방식을 주로 활용하고 있음.
- (응축기 종류) 냉각응축을 유도하는 방법으로 접촉 응축방법과 표면 응축방법으로 구분할 수 있음.

151) 기체상태 물질의 분압과 그 물질의 증기압이 동일한 온도

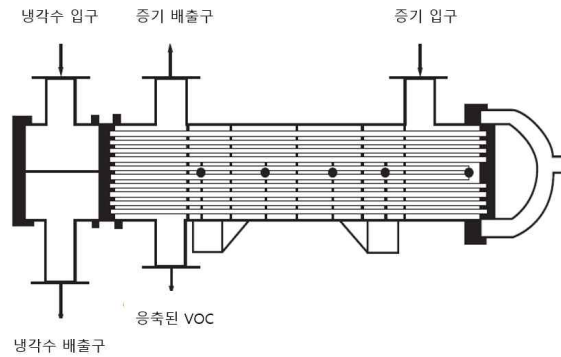
- **(접촉 응축기)** 응축 대상 기체를 냉매와 직접 접촉 혼합하면서 열적·물리적 평형이 이루면서 VOCs를 응축하여 냉각용 액체(배기가스 중의 물이 어는 것을 방지하기 위해 메탄올 주입)에 흡수됨. 접촉 응축방식의 냉각제는 계속 사용할 수 없고, 냉각제에 응축된 VOCs도 바로 재사용하지 못하고 분리 과정을 거쳐야 하는 단점 때문에 경제적이지 못함.



[그림 8-23] 접촉 응축기

(출처) Jan Carlson(2016), Air Pollution Control Technology Review : Condensationhttps

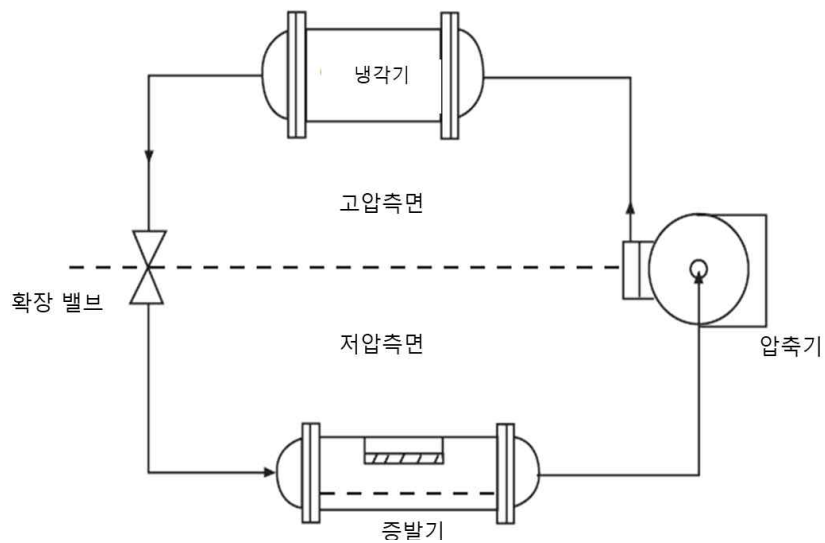
- **(표면 응축기)** 다관식 열교환기 형태로 관 내부에 냉매를 통과시키는 반면 관 외부로 VOCs를 유입시켜 냉매가 통과하는 관 표면에 VOCs를 응축시키는 방법으로 Shell-and-Tube 응축기가 이에 속하며, 냉매와 VOCs가 직접 접촉하지 않아 분리하지 않고 VOCs를 재사용할 수 있는 장점이고, 냉각제도 지속해서 사용 가능하나, 직접 응축방법보다는 냉각효율이 낮은 단점이 있음.



[그림 8-24] 표면 응축기

(출처) EPA, Section 3: VOC Controls 2-5

- 표면 응축방법은 냉매가 증발·압축·응축·확장 등의 4단계를 거치면서 냉각이 이뤄지며, 냉매는 관을 통해 순환되면서 VOCs를 응축시킴.



[그림 8-25] 냉매 순환단계 모식도

(출처) EPA, Section 3 VOC Controls 2-6

- (냉매 종류) 냉매는 주로 물, 냉수, 염수(Brine), 수소불화탄소(HFC), 암모니아, 저온 유체 등이 있으며, 이들 냉매의 적용 가능한 물질의 응축온도는 냉수는 7°C, 염수(Brine)는 -35°C, 염화불화탄소는 -68°C이며, 질소 또는 이산화탄소와 같은 저온 유체는 -195°C까지 가능함.

냉매	적용 가능 응축온도(°C)	냉각온도(°C)
물	15.5 ~ 26.7	(T _{con} - 9) 응축온도보다 9°C 낮게 설정
냉수	7.2 < T _{con} < 15.2	
염수(Brine, 염화칼슘)	-34.4 < T _{con} < 7.2	
HFC-134a	-67.8 < T _{con} < -34.4	

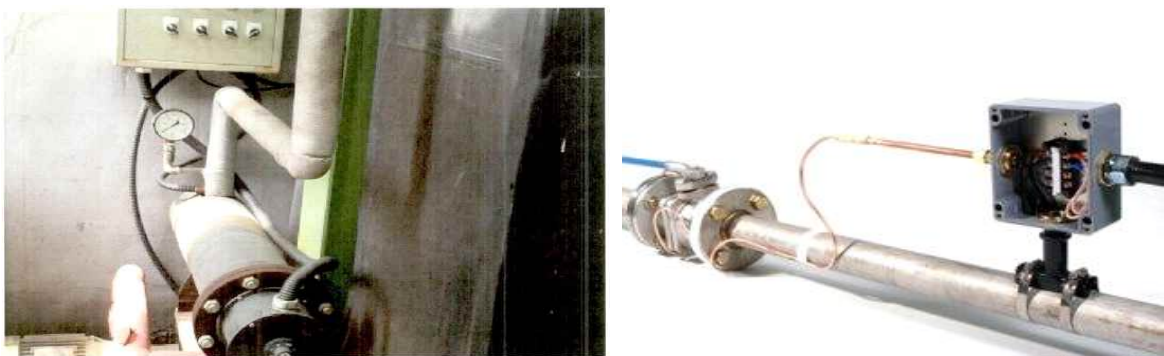
T_{con}: 응축온도(노점, Dew Point)

□ **(적용조건)** 응축·회수 적용을 위해서는 비등점이 38°C(100°F) 이상인 VOCs가 적합하며, 유입농도는 5,000ppm 이상이면 유리하나, 비등점이 낮은 물질은 극저온 또는 압력을 가하는 추가적인 노력이 필요함. VOCs는 비등점, 빙점 등이 유사한 물질이 많아 혼합 VOCs에서 특정 물질의 분리·회수가 쉽지 않아 응축·회수는 단일 VOC 회수에 적합함.

□ **(적용사례)** 원유 저장시설에 기화된 VOCs를 진공펌프로 추출하고, 스크리버로 응축하여 VOCs를 회수하는 기술로서 회수율은 95%¹⁵²⁾ 정도로 알려졌다.

□ **유의사항**

○ **(결빙 문제)** 응축 대상 VOCs 중에 수분이 함유되어 있거나, 빙점이 높은 VOCs는 응축 과정에서 얼어붙어 관을 폐쇄하므로 운전 문제를 초래하고 생산공정도 중단해야 하므로 수분을 사전에 제거하거나 가열선을 설치하여 간헐적으로 얼음을 녹여주어야 함.



[그림 8-26] 가열선을 설치하여 얼음을 녹이는 배관

(출처) 안산녹색환경지원센터(2011), 응축 기술을 이용한 VOCs 제거 및 회수 설비에 관한 연구
(출처) Heatizon Systems, <https://www.heatizon.com/products/heatizon-brands/guttermelt>

152) <http://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/units-and-plants-practices/VOCs-recovery-systems/#reference-10>

○ (스케일 문제) 표면 응축방법의 경우 고비점의 유기화합물(타르 등)이 응축기 표면에 응축되면서 스케일을 형성하여 성능 저하 초래

- 여과장치 등의 전처리를 설치하여 스케일 원인 물질 제거

□ (아크릴로니트릴 적용) 아크릴로니트릴의 응축회수기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 응축회수처리 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

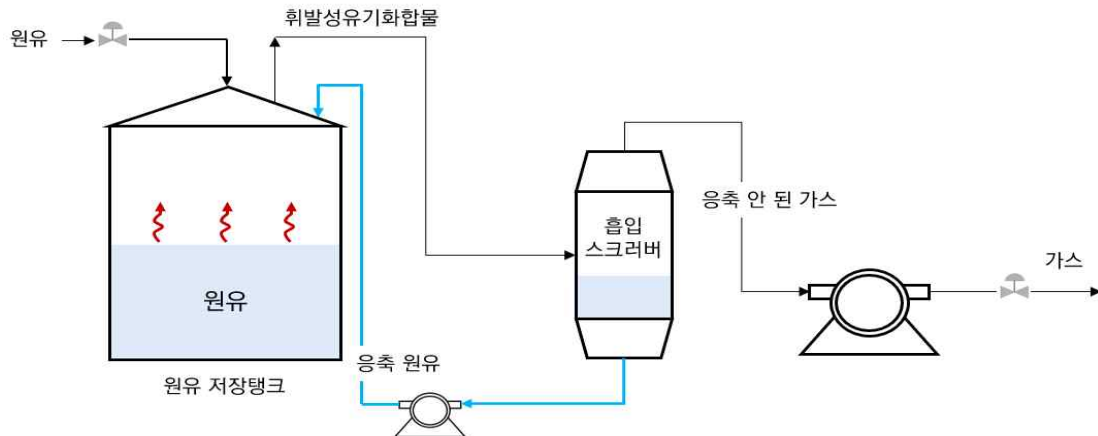
회수율(%)*	설치비용	운영비용	비고
90	100백만원 이상	30백만원 이상	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

*: 액체질소 적용한 경우

3) 흡수·회수기술

□ (기술 개요) 단일 VOCs 또는 혼합 VOCs가 포함된 배출가스를 흡수제에 물리흡수 시킨 다음 방산(Stripping) 공정을 통해 VOCs를 분리한 다음 응축 과정을 거쳐 회수하는 기술



[그림 8-27] 흡수·회수 시설의 공정도

(출처) ipieca(2013), VOC recovery Systems 인용

○ (소극적 회수기술, Passive Recovery Technology) 저장시설 등으로부터 추출된 VOCs에 압력을 가해 원유에 흡수¹⁵³⁾시키거나, 다양한 유기용제(예, Kerosene)를 흡수제로 사용하여 응축 흡수¹⁵⁴⁾(원유 저장시설의 경우는 원유 자체를 흡수제로 사용) 한 다음 저장시설에 재투입하고, 회수하지 못한 VOCs는 고온 산화 처리 또는 다른 용도로 활용

153) 압력 흡수의 회수율은 80%

154) 응축 흡수의 회수율은 90%



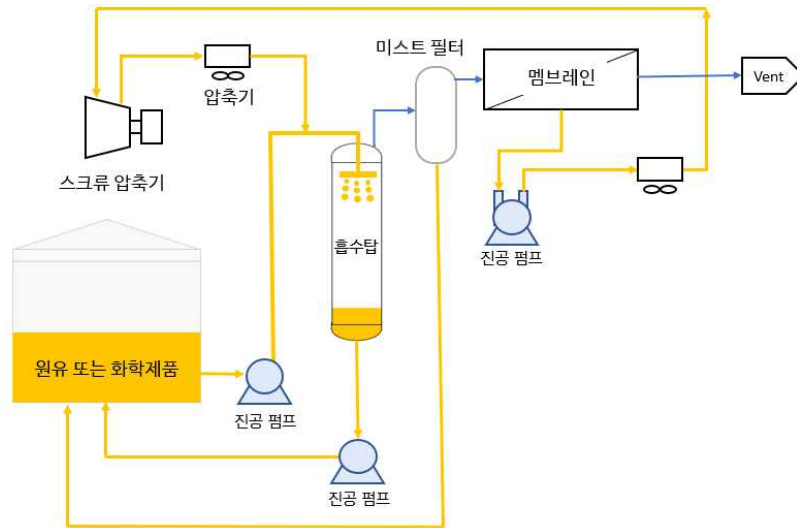
[그림 8-28] 선박에서 원유 하역 과정에서의 VOCs 흡수·회수 및 고온 산화 처리

(출처) JX(2013), Technologies for Volatile Organic compounds

- (운전조건) 흡수 반응기 운전조건은 상황에 따라 달라지며(현장 적용사례155) : 온도는 3~7℃, 압력은 0.3~0.5 MPa), 흡수제로는 원유 또는 석유화학제품 등 저장시설의 물질과 같은 물질을 사용하여 용해·회수
- (적극적 회수기술, Active Recovery Technology) 저장시설로부터 VOCs를 포집한 다음 흡수공정과 타 회수공정을 연계하여 VOCs를 회수하는 기술(흡수공정만으로는 회수효율이 떨어지므로 연계 공정 적용)
- (흡수/막분리 연계방식) 흡수 단독공정에 막분리를 후속으로 연결한 방식으로 흡수 단독공정의 경우 VOCs 회수율이 70% 수준에 불과하였으나 막분리 공정을 후속으로 연결하여 회수율이 95%로 높아졌음156).

155) JX Nippon Oil and Energy에서 일본 가고시마의 키이레 터미널(Kiire Terminal)에 설치 운전(처리규모: 20,000 Sm³/hr)

156) CARBOVAC, Vapor Recovery Solutions

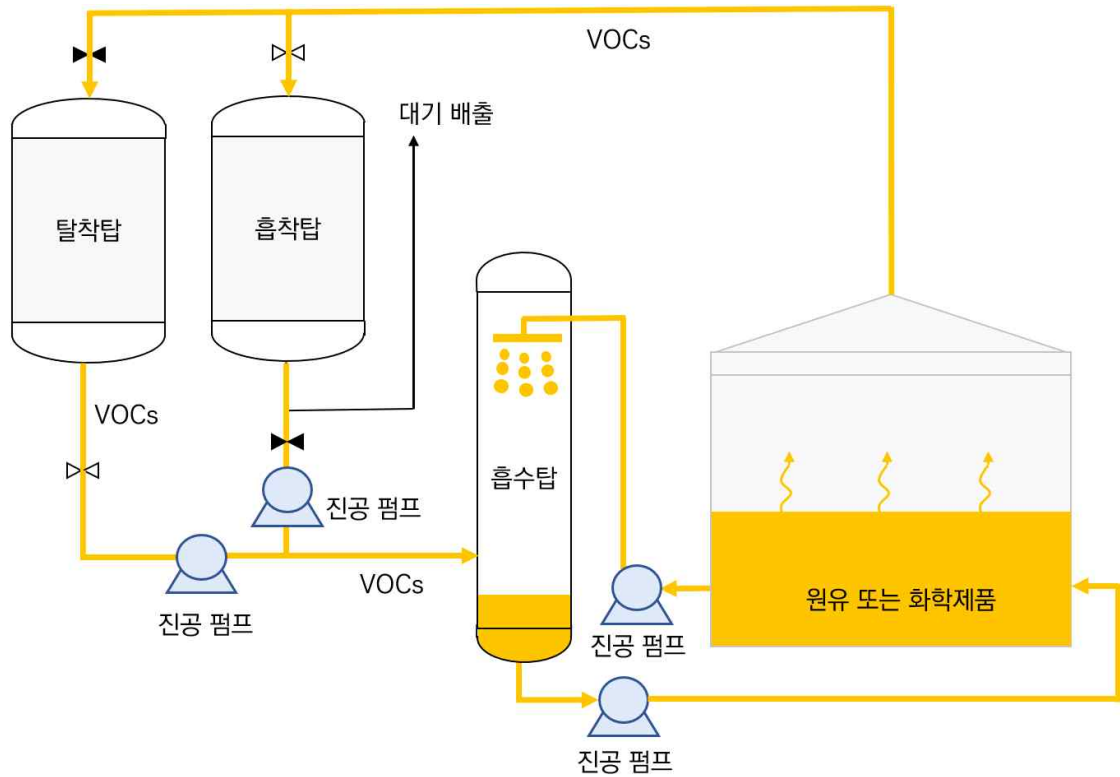


[그림 8-29] 흡수/막분리 연계 회수공정

(출처) BORSIG Membrane Technology GmbH, BOMEMBRANE TECHNOLOGY FOR PROCESSES AND ENVIRONMENT, 8p 인용

- **(흡수/흡착 연계방식)** 흡수공정 앞에 활성탄을 활용한 흡·탈착공정을 설치하여 저장시설 또는 운반시설로부터 휘발·배출된 VOCs를 흡착시킨 다음 감압하여 VOCs를 탈착시킴. 탈착된 VOCs를 흡수탑에 주입하여 저장시설의 원유 또는 석유화학제품에 용해·회수하는 방식임. VOCs 회수율이 흡수 단독공정의 70% 안팎에서 90~99%로 높아졌음.
- **(흡착)** 활성탄 등의 흡착시설을 이용하여 저장시설 등으로부터 배출되는 VOCs를 흡착시켜 불활성기체¹⁵⁷⁾와 분리
- **(탈착)** 일반적으로 흡착탑에 진공펌프를 걸어 VOCs 탈착

157) 운반기체로서 농도 조절과 화재 위험도를 낮추기 위한 목적



[그림 8-30] 흡수/흡착 연계 회수공정
 (출처) logo alma Carbovac, Vapour Recovery Units, 4p 인용

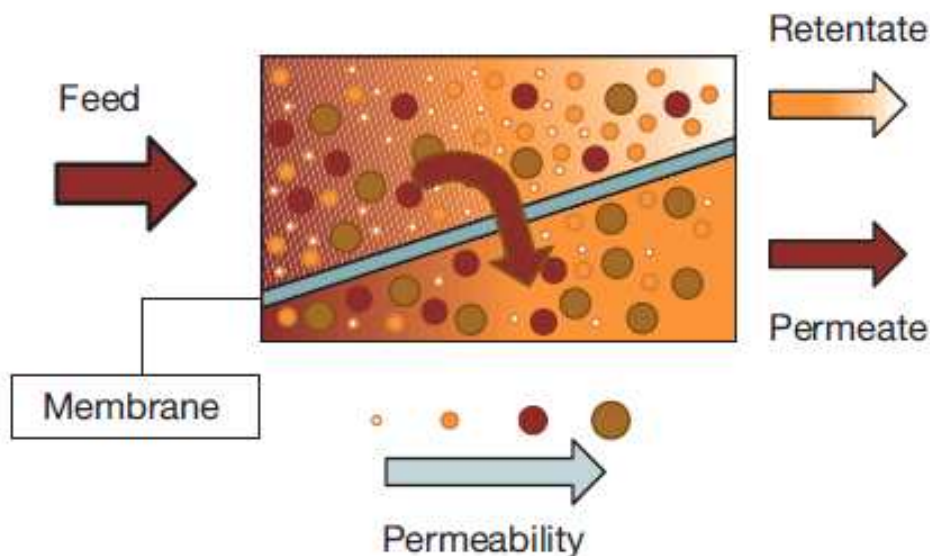
- (유의사항) 증기압이 낮은 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 상대적으로 낮은 압력손실 • 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 • 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 • 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 • 상대적으로 낮은 설치비용 • 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 폐수처리 문제 • 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 아크릴로니트릴 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 흡수·회수기술은 아크릴로니트릴 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

4) 막분리·회수기술

- (기술 개요) 각각 가스의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술로서 가스 분리는 막의 양단에 가스 분압 차이(농도 차이)를 이용함.
- (분리막) 혼합 성분으로부터 선택적으로 특정 성분을 분리할 수 있는 물리적 경계층으로 막 양단의 가스 분압 차이(농도 차이)가 물질 전달력임.
- (분리막 성능) 혼합 성분 중에서 분리 목표 물질의 선택성과 막 양단의 압력 차에 의해 분리막 성능이 결정되며, 선택성은 10 이상, 압력 차 성능지표인 압력비 (공급측 총압에 대한 투과측 총압 비)는 일반적으로 30~50 정도이어야 기술적으로 실현가능함.



[그림 8-31] 막분리 프로세스

(출처) ITM-CNR, Membrane per la separazione di CO₂ erattori a membrana per il suo uso
(<https://www.enea.it/it/seguici/events/co2/IULIANELLI.pdf>) 인용

□ 적용조건

- 아크릴로니트릴을 막으로 분리하기 위해서는 혼합가스 종류, 아크릴로니트릴 농도, 유량, 배출가스 온도 등 다양한 정보가 필요하며, 이는 대상 업종 및 공정에 따라 다른 수요맞춤형 막이 개발 적용되어야 함. 그러므로 아크릴로니트릴 분리를 위한 적용조건을 일반화하기는 어려운 상황임.

□ 적용사례

○ (필요성) 미국 에너지부(DOE)의 관할 지역에서 염소계 VOCs로 오염된 토양으로부터 배출되는 염소계 VOCs 함유 가스의 적정 처리 필요성 대두

- (적용 시기 및 지점) 1999년 3월부터 2000년 2월까지 미국 캘리포니아 주의 Sacramento 시 외곽에 있는 McClellan Air Force Base(AFB)

○ 조건 및 설계목표

항목	내용
설계 유량	58.9 Sm ³ /hr
배출 VOCs 농도	23 ~ 101 ppm
처리 목표 VOCs 농도	10 ppm

○ (적용 결과) Membrane Technologies and Research, Inc.(MTR)는 막(Permselective Membrane)을 사용하여 VOCs를 선택적으로 공기와 분리하여(VOCs는 막을 통과 시키고, 공기는 배제) VOCs를 액상으로 회수하였고, 설계 목표치도 달성하였음.

○ (적용 문제점)

- (CO₂ 문제점) 배출가스 중에 CO₂ 농도는 1~3%이었으며, CO₂에 의해 막분리 성능이 2~4배 정도 감소하였음.

- (오일과 물의 문제점) 배출가스 중의 오일과 물은 막의 막힘 현상(Fouling)을 초래하여 막분리 성능을 저하한다고 밝혀졌으며, 이는 효과적 전처리로 해결할 수 있다고 결론 내렸음.

○ (비용 분석) VOCs 농도 5,000 ppm의 배출가스 300 Sm³/hr를 VOCs 농도 10 ppm 이하로 처리하기 위한 시설 설치비용은 780백만원¹⁵⁸⁾ 정도 필요하고, 운영비용은 800백만원¹⁵⁸⁾ 정도 필요하다고 보고하였음.

158) 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정

VOCs 유입농도	연간 운영비용*
100 ppm	499.2백만원
1,000 ppm	585.6백만원
5,000 ppm	799.2백만원
10,000 ppm	856.8백만원

* 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정
(출처) US DOE(2001), Membrane System for the Recovery of Volatile Organic compounds from Remediation Off-Gases, DOE/EM-0614

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 분리 과정에서 상변화가 없으므로 에너지 소모가 적음 • 장치 구성이 단순하고 기계 장치가 최소화되어서 유지관리가 쉬움 • 특정 물질 선택성이 탁월함 • 다양한 목적에 적용 가능한 막 제조가 가능함(원료가 다양하여 목적에 따라 다양한 막 제조 가능) • 환경에 무해한 또는 영향이 적은 원료 또는 재질을 사용하므로 환경친화적 공정 	<ul style="list-style-type: none"> • 막의 특정 화학물질에 대한 취약성(특정 화학물질과의 접촉을 피해야 하므로 공정 적용 한계) • 중합체이므로 온도에 영향을 받기 때문에 특정 화학반응 공정(온도가 높은 공정)에 적용하기 어려움(적용의 한계) • 규모 확장의 한계(일반적으로 단위 모듈을 반복적으로 연결하여 규모 확장하는 방식으로 대용량 설치의 한계) • 막 오염과 막힘 현상으로 교체 필요성(높은 운영비용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 아크릴로니트릴 등의 VOCs에 대한 선택성이 탁월하고, 석유화학산업에서 이미 적용한 사례가 존재하여 아크릴로니트릴을 분리·회수 재사용은 기술적으로 가능함 • 막분리 시설의 설치 및 운영비가 높아 타 기술과 효율 및 경제성을 비교 평가하여 막분리시설의 적용 여부를 결정할 필요가 있음

8.3.4

혼합공정

□ (정의) 제품을 생산하기 위하여 두가지 이상의 물질을 물리적으로 섞는 공정

8.3.4.1. (공정관리) 측정 및 관리시스템 도입

□ (정의) 누출오염원관리시스템(LDAR)을 활용하여 이송·운반·분배·계량 시설 배출원에 대한 주기적 감시 및 검지를 시행하여, 이상 있는 장치는 즉시 정비 또는 교체하여 아크릴로니트릴 배출량과 배출원을 동시에 체계적으로 관리하는 기술

○ 이송·운반·분배·계량 시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 누출지점이 많고, 누출되더라도 육안 식별이 어렵고, 화학물질에 따라서 무색·무취인 경우도 있어 측정하지 않고서는 누출 파악이 어려운 상황이 존재함.

○ 누출 가능성이 큰 지점에 바코드가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고, LDAR 시스템에 의해 주기적으로 점검 관리함.

[표 8-6] LDAR 점검주기 및 화학업종과 정유업종 저감율

장치 및 화학물질	화학업종 저감율(%)		정유업종 저감율(%)	
	매월 감시	매분기 감시	매월 감시	매분기 감시
밸브-기체	87	67	88	70
밸브-경질유	84	61	76	61
펌프-경질유	69	45	68	45
압축기-기체	-	-	-	33
연결부-기체, 경질유	-	33	-	
압력안전밸브-기체	-	44	-	44

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

기술 개요	Leak Detection and Repair(이하 LDAR) 등 누출관리시스템을 활용한 실시간 화학물질의 비산배출 관리기술로 최근 광학이미지 카메라를 이용한 Flare, 저장시설 등 VOCs 누출 모니터링과 공정 배출감시를 위한 Fence Line 모니터링 기술도 활용되고 있음			
적용산업 및 공정	아크릴로니트릴의 이송·운반·분배·계량 공정이 있는 전 업종			
적용효과	(적용 전) 이송·운반·분배·계량시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 배출원 수가 많고 누출이 되더라도 누출 여부의 육안 확인이 어려운 상황			
	(적용 후) LDAR를 도입하여 대상 공정의 누출지점에 바코드 번호가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고 VOCs 측정기(검지기)를 이용하여 배출원에 대한 주기적 점검을 통해 누출 확인 및 신속한 장비 보수 가능			
저감효과 (%)	70	처리비용	설치비용	100백만원 이상
			운영비용	1,000원/관리지점

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

8.3.4.2. (공정관리) 장치개선

- (정의) 장치개선 및 교체를 통해 아크릴로니트릴의 비산 배출원으로부터의 누출(Leak)을 방지하고 누출 원인이 되는 부분을 개선함으로써 배출량을 줄이거나 완전히 차단하는 기술
- (펌프 변경) 펌프 Seal에서 아크릴로니트릴이 누출되는 것을 방지하기 위해 Seal이 없는 Sealless(Non-seal) 펌프(Canned 펌프 등)나 Double-sealed 펌프로 교체
- (밀폐식 시료 채취장치) 시료 채취 과정에서 아크릴로니트릴이 비산 배출되는 것을 방지하기 위해 밀폐식 시료 채취장치로 변경

장치 종류	개선 방법	저감률(%)
펌프	• Seal-less design (Canned Pump etc.)	99
	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
밸브	• Seal-less design • (Bellows type, Diaphragm, etc.)	99
압축기	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
압력 안전밸브	• Rupture Disk Assembly	99
	• Closed Vent System	90*
연결부	• Socket Welding Type	99
개방식 라인	• Blind, Plug, Cap or Second Valve	99
시료 채취 연결부	• Closed-loop System	99
공정 배수구	• Closed-loop and Water Seal	99

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

*배출관이 연소처리 등에 연결하여 처리할 경우는 99%, 미 연결된 경우는 90% 수준임.

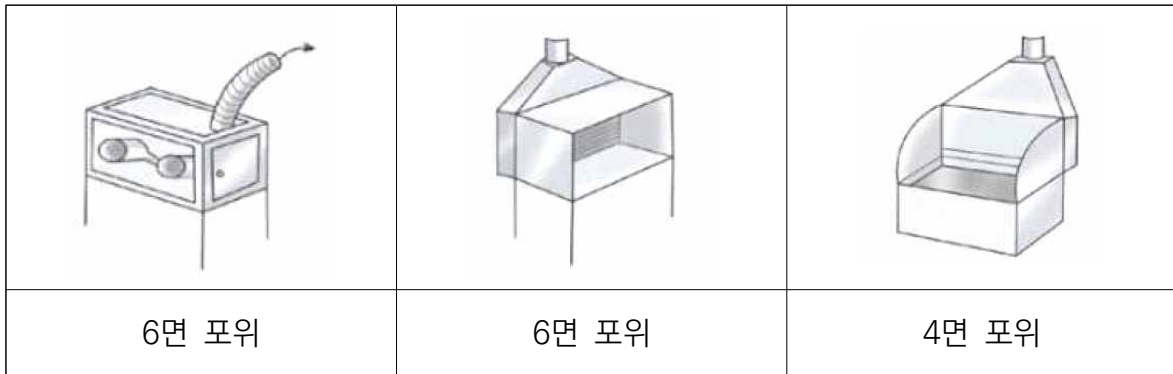
8.3.4.3. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 아크릴로니트릴이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 아크릴로니트릴의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
 - (밀폐형 덮개) 아크릴로니트릴 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 1-32] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

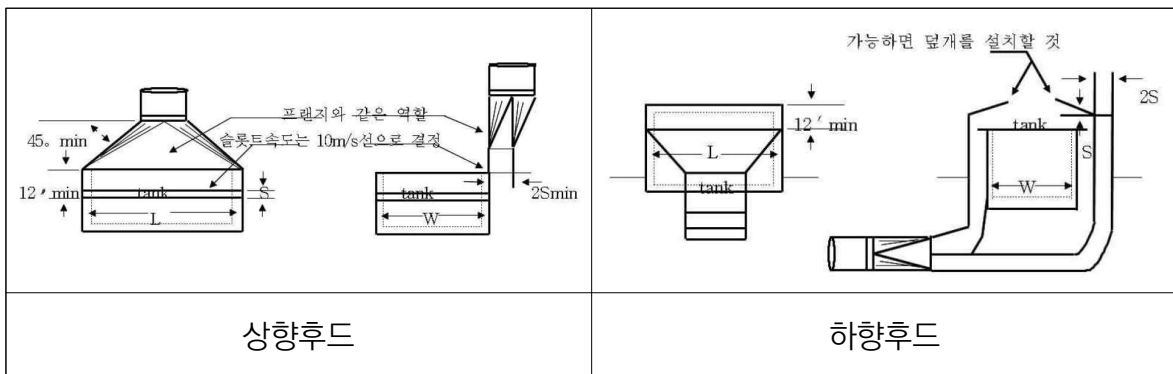
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 8-33] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

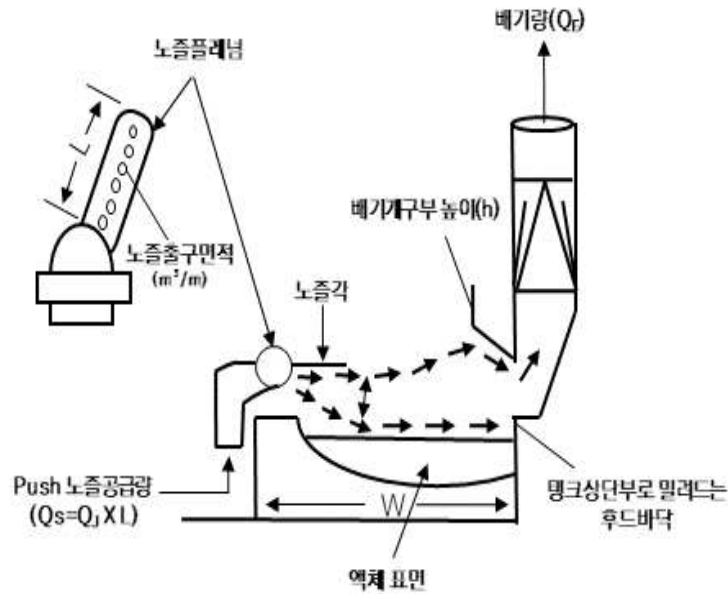
- (외부식 후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 8-34] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입처리하는 형태



[그림 8-35] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

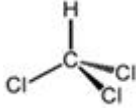
9

클로로포름

9.1

개요

- (정의 및 특성) 클로로포름은 탄소와 염소로 이루어진 화합물로 화학식은 CHCl_3 이며, 주요 정보는 아래와 같음.

CAS No.	발암물질 분류	위해도 순위	화학구조
67-66-3	2B군 발암물질	<ul style="list-style-type: none"> • 2B군 발암물질 중에서는 3위 • 전체 발암물질 중에서는 6위 	

- 물리·화학적 특성¹⁵⁹⁾

분자량 (g/mol)	휘발성 증기압	친수성 용해도	끓는점	녹는점 /어는점	LEL (% vol)	UEL (% vol)	n-옥탄올 /물분배계수
119.38	21.2kPa (20℃)	0.8g/100ml (20℃)	62℃	-64℃	-	-	1.97

- 클로로포름은 위에서 제시한 물리·화학적 특성 때문에 환경부 고시에 근거하여 휘발성유기화합물(VOCs)¹⁶⁰⁾로 분류하고 있음.
- 용도
- (화학제품 제조업) 화학제품 제조 시 용매제, 중간체 및 착색제로 사용
 - (의약품 제조업) 의약품 제조 시 용매제로 사용

159) 안전보건공단, 화학물질정보(<https://msds.kosha.or.kr/kcic/msdsdetailGet.do>)

160) 환경부고시 제2015-181호(휘발성유기화합물 지정 고시)

- **(배출업종)** 클로로포름이 주로 배출되는 업종은 화학물질 및 화학제품 제조업(97.8%), 의료용 물질 및 의약품 제조업(1.4%), 폐기물 수집·운반·처리 및 원료 재생업(0.6%), 섬유제품 제조업(0.2%) 순임.
- **(배출공정)** 클로로포름이 많이 배출되는 공정¹⁶²⁾은 1) 대기오염방지시설(45.76%), 2) 코팅공정(17.3%), 3) 이송·운반·분배·계량시설(14.1%), 4) 저장시설(7.9%)순임,
- **(배출형태)** 클로로포름은 VOCs이므로 대기로 배출될 개연성이 높고, [표 9-1]에서 보는 것처럼 국내 배출원에서는 모두 대기로 점배출(48.0%) 또는 비산배출(52.0%)되고 있음.
- **(시사점)** 클로로포름은 비산배출 관련 저감기술 및 방법 적용이 필요하며, 중점 관리 분야는 다음과 같음.
 - 대기오염방지시설로서 처리효율 제고
 - 코팅공정에서의 탈루배출 방지
 - 이송·운반·분배·계량시설에서의 탈루배출 방지

161) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

162) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량

[표 9-1] 클로로포름 배출특성

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
섬유제품 제조업; 의복 제외	저장시설	대기	비산배출 100	119.9	0.453	0.125
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	54.5	0.206	0.057
	혼합공정		비산배출 100	445.0	1.681	0.465
	코팅공정		비산배출 100	4,589.3	17.331	4.801
	대기오염방지시설		점배출 100	2,157.6	8.148	2.257
화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	저장시설	대기	비산배출 100	1,487.4	5.617	0.004
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	3,263.9	12.326	0.008
	혼합공정		비산배출 100	486.8	1.838	0.001
	화학반응공정		비산배출 100	334.9	1.265	0.001
	분리·정제공정		비산배출 100	180.0	0.680	0.000
	조립·포장·검사공정		비산배출 100	9.8	0.037	0.000
	기타		비산배출 100	11.2	0.042	0.000
	대기오염방지시설		점배출 100	7,730.1	29.192	0.020
	폐수처리시설		비산배출 100	52.6	0.199	0.000

업종	배출공정	매체	배출형태(%)	배출량(kg/yr)	배출비중(%)	배출량 /취급량(%)
의료용 물질 및 의약품 제조업	저장시설	대기 수계	비산배출 100	485.6	1.834	0.090
	이송·운반·분배·계량시설		비산배출 100	402.5	1.520	0.075
	화학반응공정		비산배출 100	1,282.7	4.844	0.238
	분리·정제공정		비산배출 100	1.3	0.005	0.000
	용제회수		비산배출 100	166.0	0.627	0.031
	대기오염방지시설		점배출 100	2,202.2	8.316	0.409
	폐수처리시설		수계배출 100	813.6	3.073	0.151
폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	대기오염방지시설	대기	점배출 100	24.5	0.093	0.011
	폐기물처리시설		점배출 100	178.6	0.674	0.079
누적 합계		-	-	26,480	100.0	-

(출처) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

9.3

대체물질

9.3.1

용매 대체

적용업종 및 공정	화학물질 및 화학제품 제조업 의료용 물질 및 의약품 제조업
대체물질	methylene chloride
적용사례	<ul style="list-style-type: none">유기화학 실험실에서 클로로포름의 대체물질로 methylene chloride가 용매로 사용됨. (출처) http://www.commonorganicchemistry.com/Common_Reagents/Chloroform/Chloroform.htm

- 클로로포름의 회수 및 처리기술은 처리방법에 따라 장·단점이 있어 아래 사항을 자세히 검토하여 선택해야 함.
 - 배출가스의 조성 및 농도
 - 함유 유기화합물질의 특성(폭발한계, 응축성, 용해성, 흡착성 등)
 - 배출가스 내 수분 및 먼지 함유량
 - 배출량(최대, 평균, 최소 유량 등), 온도, 압력, 습도
 - 오염배출원 유형(점, 면, 선오염원, 공정, 불특정 등)
 - 연간 운영시간(가동시간, 가동률, 부하율 등)
 - 장치 위치(실내, 실외, 지표 고도, 지붕, 여유 공간 등)
 - 보조 연료 또는 에너지 비율
 - 각종 유틸리티(수도, 전기, 스팀, 배관, 관거, 구조물) 이용 가능 여부
 - 기존의 대기오염방지시설 설치·운영 사항(종류, 규모, 사용 기간 등)
 - 경제성(초기투자비 및 연간 운영비)

[표 9-2] 휘발성 유기화합물 방지시설 설계 시 고려사항

기술	안정성	오염물질 특성	오염원 특성	제어특성
흡착	흡착 시 폭발물질의 농축이 일어나며 이는 매우 유해함.	다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있음.	높은 포집 효율을 가지고 있으며, 여러 유형 흡착제(활성탄, 제올라이트, 폴리머 등)를 이용, 낮은 비용으로 고효율 달성이 가능함.
흡수	폭발물질을 중성화시킬 수 있는 흡수액을 폭발물질에 따라 선택해야 함.	화합물에 적합한 흡수제를 사용해야 하고, 화학물질 조성변화에 대응하기 어려움.	어떤 구조물에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 흡착제 배출수 처리장치가 필요함.	포집 효율이 높으나 생성 폐수에 폭발성 물질이 포함될 수 있으므로 사전에 적정 처리방법 수립이 필요함.
응축	니트로글리세린과 같은 폭발성 화합물에는 적용할 수 없음.	제습 과정이 필요하며, 끓는점이 낮은 화합물은 처리하기 어려움.	추가적인 응축장치가 필요함.	특정 화합물에 대해서는 포집 효율이 높으나, 초기 비용이 높음.
생물여과	미생물에 의해 포집된 폭발성 화합물질을 쉽게 처리할 수 있음.	처리속도가 낮아 처리 규모의 한계가 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물 종류에 따라 높은 처리효율을 나타냄.
열소각	니트로글리세린과 같은 많은 폭발성 화합물은 급속히 가열될 때 매우 불안정해짐.	여러 다양한 화합물을 처리할 수 있음.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 가지고 있음. 다양한 유형의 소각로(재생식 열소각 등)를 사용, 비용을 절감시키고 전체 효율을 증가시킬 수 있음.
촉매소각	반응시간과 유속에 따라 촉매 층에서 폭발성 화합물 농축이 일어나는 위험한 상황이 일어날 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리하며 촉매 피독으로 효율이 낮아짐.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	화합물질 유형에 따라 높은 파괴효율을 나타냄.
광촉매산화	저온에서 폭발성 화합물질 처리가 가능하며, 체류 시간이 짧고 저온에서 운전되므로 폭발 위험성을 줄일 수 있음.	상대적으로 처리 규모가 낮은 조건에 유리함.	어떤 구조물에도 쉽게 적용할 수 있음.	매우 높은 처리효율을 나타내며, 전체 비용이 상대적으로 적은 편임.

(출처) 환경부(2000), 「휘발성유기화합물 방지시설 설계지침」 자료

□ 2016년의 화학물질 배출량 조사¹⁶³⁾ 결과에 따르면 클로로포름의 주요 배출공정은 대기오염방지시설, 코팅공정, 이송·운반·분배·계량시설, 저장시설로 배출비중은 각각 46.4, 17.3, 15.8, 7.9% 순임.

산업	공정	배출비중(%)
대기오염방지시설	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	29.2
	의료용 물질 및 의약품 제조업	8.3
	섬유제품 제조업; 의복 제외	8.2
	폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	0.7
	소계	46.4
코팅공정	섬유제품 제조업; 의복 제외	17.3
이송·입력·분배·계량시설	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	12.3
	섬유제품 제조업; 의복 제외	2.0
	의료용 물질 및 의약품 제조업	1.5
	소계	15.8
저장시설	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	5.6
	의료용 물질 및 의약품 제조업	1.8
	섬유제품 제조업; 의복 제외	0.5
	소계	7.9

(출처) 화학물질안전원(2016), “2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)” 자료 근거

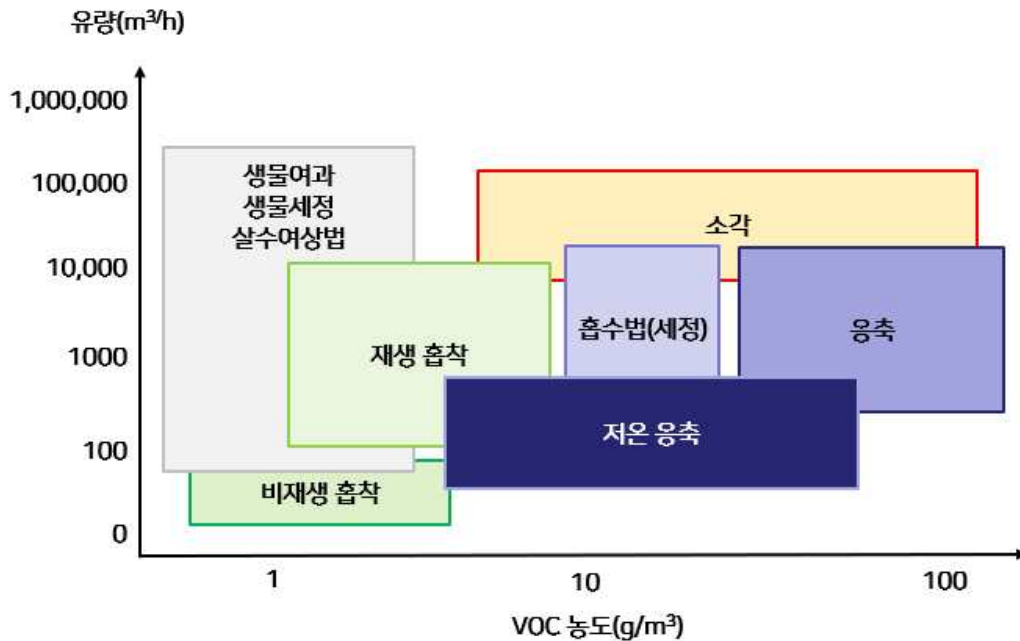
163) 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)

9.4.1

대기오염방지시설

9.4.1.1.처리기술

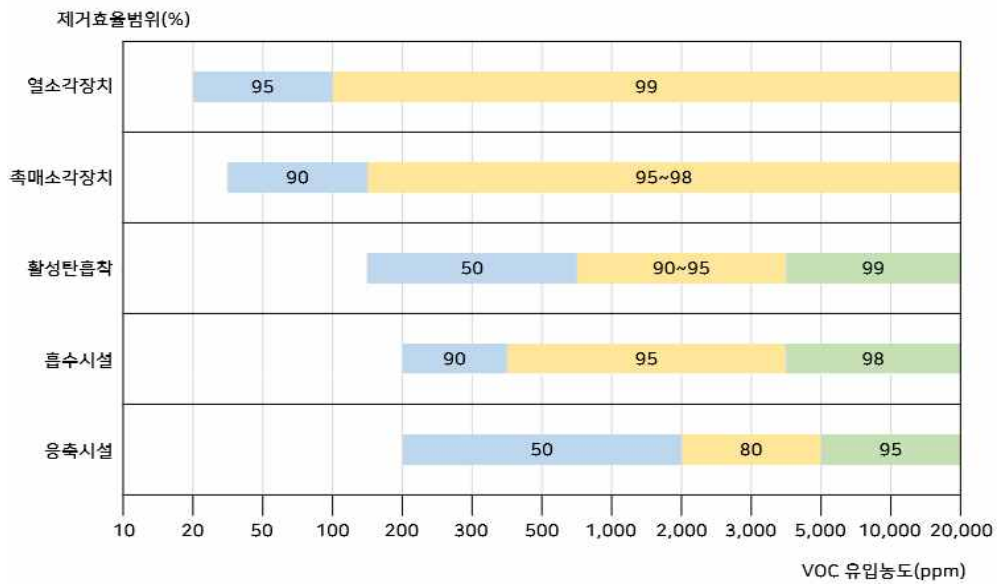
- 화학물질을 처리하는 방법은 흡착기술, 흡수기술, 생물학적 처리기술로 크게 구분할 수 있음.
- [그림 9-1]은 VOCs 유입 유량과 농도에 대한 처리기술의 적용조건을 개략적으로 도시하고 있음. 생물학적 방법은 적용 유량의 범위는 넓지만, 적용 가능한 농도는 상대적으로 협소함을 알 수 있음. 반면에 소각은 적용 농도 범위는 넓지만, 적용 가능한 유량 범위는 넓지 않음을 알 수 있음.



[그림 9-1] VOCs 처리기술별 VOCs 농도와 유입 유량의 적용 범위

(출처) Joseph S. Devinny, Marc A. Deshusses, Todd S. Webster,
Biofiltration for Air pollution control

- [그림 9-2]는 VOCs 처리기술별로 VOCs 유입농도에 대한 처리효율을 도시하고 있음. 열소각장치와 촉매소각장치는 상대적으로 넓은 유입농도 범위에서 95% 이상의 효율을 보인 반면 활성탄과 응축시설은 상대적으로 높은 농도인 500ppm 이상에서 95%의 성능을 보여주고 있음.



[그림 9-2] VOCs 처리기술의 VOCs 유입농도 대비 처리효율

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

□ [표 9-3]은 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술 선택 기준을 제시하고 있어, 방지기술 선택 지침으로 활용할 수 있음.

[표 9-3] 대상물질의 배출특성에 따른 방지기술의 선택 기준

대상물질	응축	흡착	열소각	촉매연소	촉열식 열소각	무화염 열소각
저유량 저농도	●	●	●	●	○	●
고유량 저농도	●	●	●	●	●	●
저유량 고농도	●	○	●	○	○	●
고유량 고농도	●	○	●	○	○	●
비응축 탄화수소 가스	X	○	●	●	●	●
응축 탄화수소 가스	●	●	●	●	●	●
비응축 Cl/S 포함가스	X	○	●	○	●	●
응축 Cl/S 포함가스	●	●	●	○	●	●
연속 운전	●	●	●	●	●	●
회분식 운전	●	●	○	○	○	●

●: 매우 좋음, ●: 좋음, ○: 보통, ○: 나쁨, X: 적용 불가

(출처) 양고수, '열처리 기술을 이용한 VOCs/악취 처리기술 및 관리현황' 자료 인용

□ [그림 9-1], [그림 9-2], [표 9-3]에서 보는 것처럼 대상물질의 유입농도와 유량 정보를 활용하여 기술적으로 적합한 대상물질의 처리기술을 일차적으로 선정할 수 있음. 다음으로는 저감목표, 경제성, 현장 조건(예, 설치부지 등), 혼합물 종류, 온도와 압력 등을 종합적으로 고려하여 처리기술을 최종적으로 선정해야 함.

1) 흡착 처리기술

□ (기술 개요) 화학물질을 흡착제 표면에 물리적으로 흡착하여 처리하는 기술

○ (공정 구성) 일반적으로 활성탄이 많이 사용되고 있으며, 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 증기 또는 열에 의해 피흡착물의 탈착이 이뤄지는 흡착탑 재생공정임. 탈착 과정에서 농도가 높아진 피흡착물이 배출되며, 이를 연소처리기술 등의 후속 공정에서 처리함.

○ (흡착원리) 흡착제와 피흡착물 간에 Van der Waals 힘이 작용하고 있으며, 흡착제와 피흡착물 간의 거리에 따라 위치에너지가 달라짐. 위치에너지가 가장 낮은 지점이 형성되며, 그 지점에서 흡착이 일어남.

○ (흡착·회수 재사용과 차이점) 흡착·처리기술은 클로로포름 등의 유기오염물질을 흡착·처리하는데 목적을 두고 있지만, 흡착·회수 재사용 기술은 클로로포름 등을 회수하여 재사용하는데 초점을 맞추고 있음. 즉 두 기술의 원리는 동일하나 목적에서 차이가 있음.

□ (적용조건) 흡착·처리 공정 단독으로 운영하기보다는 연소처리기술 전단에 설치하여 처리대상물질의 농도를 적정 수준 이상으로 높여 연소처리기술의 처리 성능을 배가시키는 역할을 담당하며, 활성탄이 주로 사용되고 있음.

□ (유의사항) 활성탄 자체가 고온에서 화재 위험성¹⁶⁴⁾이 있고, 화재 및 폭발위험성 물질이 농축되어 화재 및 폭발 가능성이 있으므로 활성탄 흡착·처리공정을 설계할 때 이런 점을 유의하여 설계할 필요가 있음.

164) 활성탄 자체 착화온도는 400~500℃

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> 연소처리기술과 연계하여 처리하므로 클로로포름 등의 VOCs 처리 시너지 효과가 있음. 저농도 클로로포름 등의 VOCs 처리가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 고가의 설치·운영비용 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 연소처리기술과 연계하면 저농도의 클로로포름 등의 VOCs 처리가 가능하나, 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 화재 위험성 등으로 관리가 용이하지 않음.

□ (클로로포름 적용) 클로로포름의 흡착처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡착처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

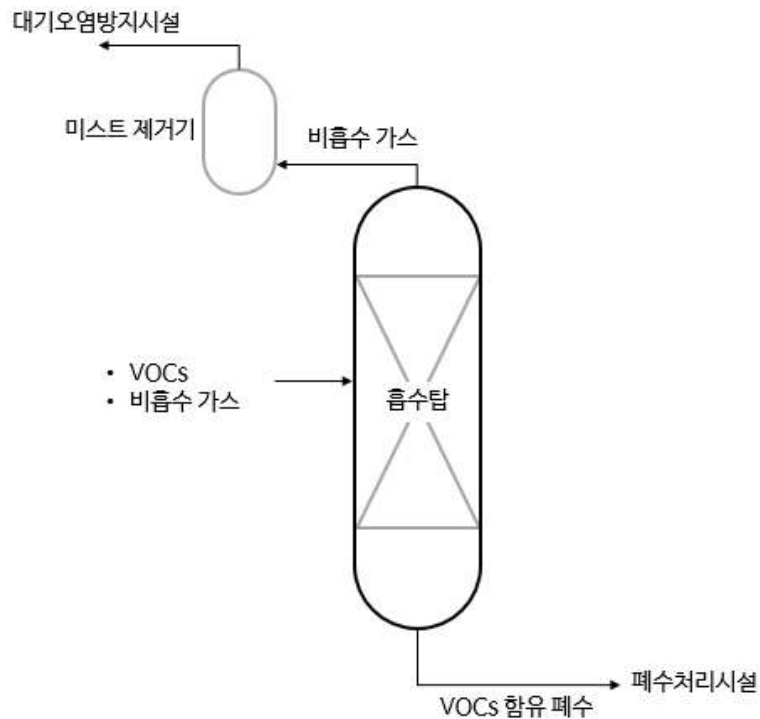
처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	연간 운영비용(Nm ³ /min)	비고
-	18백만원 ± α	-	국내 적용사례 있음

(출처) 한국물가정보(2017년 3월호)

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

2) 흡수처리기술

□ (기술 개요) 혼합 기체를 액체와 접촉하게 시켜 기체의 특정 성분을 액체 속에 용해 흡수·처리하는 기술로서 물리흡수와 화학흡수로 구분할 수 있음. 물리흡수는 흡수제에 대상 기체를 물리적으로 용해시키는 방법이고, 화학흡수는 흡수제 중의 용질 성분과 기체 성분이 화학반응에 의해 흡수되는 방법임.

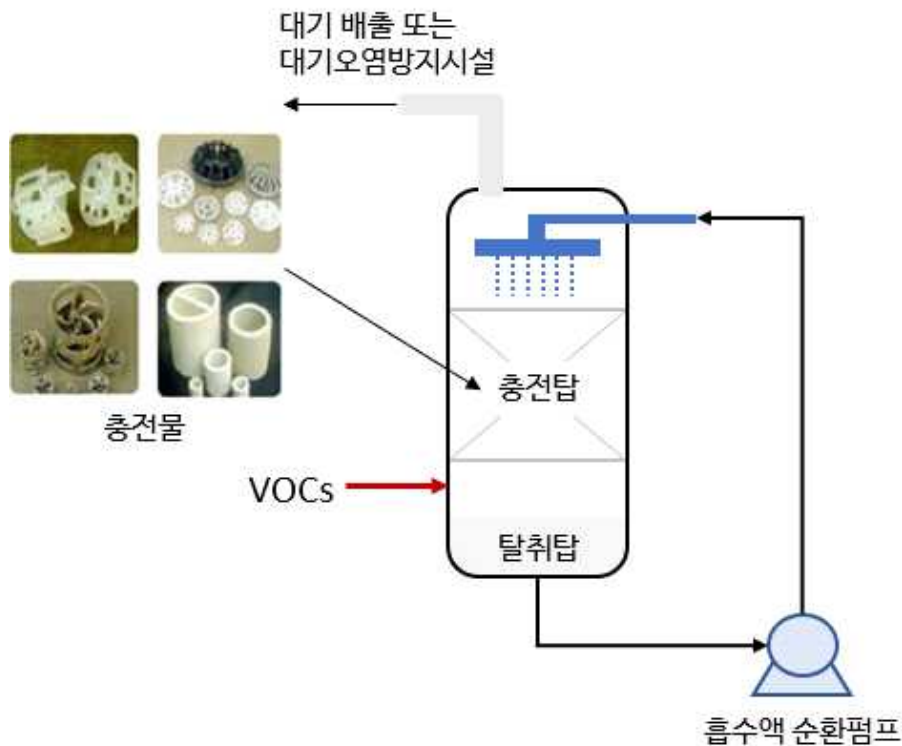


[그림 9-3] 흡수처리기술

○ (VOCs 흡수) VOCs의 흡수는 물리흡수에 이루어지며, VOCs를 함유한 가스에서부터 액상 흡수제로 VOCs가 물질 전달되는 현상으로 물질 전달 구동력은 가스상과 액상 내의 VOCs 특성에 좌우되며 헨리의 법칙(Henry's Law)에 따라 흡수액에 용해되는 양이 결정됨.

- VOCs 흡수제 종류는 물, 고비점 석유오일(Non-volatile Petroleum Oil), 미네랄 오일(Mineral Oil) 등이 있으며, 친수성 VOCs는 물을 활용하여 흡수·제거할 수 있는 최적 흡수제이고, 소수성 VOCs는 고비점 석유오일을 흡수제로 사용하거나, 수용액에 양성(친수성과 소수성 기능을 동시 보유)을 지닌 공중합체(Copolymer)를 투입하여 소수성 VOCs의 흡수를 유도함.

- (VOCs 탈착) VOCs를 흡수제로부터 탈착하여 재생하는 방산(Stripping) 공정이 있으며, 일반적으로 열을 가하거나, 진공을 걸어서 VOCs를 물리적으로 탈착시키며, 응축기와 연결하여 VOCs를 회수할 수 있음.
- (흡수장치 종류) 가스상과 액상이 흐르는 방식에 따라 향류(Counter Flow)와 병류(Co-current Flow) 방식이 있으나, 대부분은 향류 방식이고, 흡수장치의 종류는 충전탑(Packed Bed), 다단탑(Tray Tower), 분무탑(Spray Tower), 벤츄리 스크러버(Venturi Scrubber) 등이 있음. 일반적으로 VOCs 처리에는 충전탑과 다단탑이 많이 적용되고 있음.
- (충전탑) 금속, 세라믹, 플라스틱 재료로 된 불규칙 충전물이나 규칙 충전물로 채워져 있으며, 액체는 기체와의 접촉면적을 높이기 위해 탑 상부에서 고르게 분산되며, 분산된 액체는 충전물의 표면에 박막(Thin Film)을 형성하면서 아래로 흐름. 폐가스는 탑 하부에서 유입되며 흡수액과 접촉하면서 배출가스 중 VOCs 등의 특정 성분이 액상으로 흡수되고, 배출가스의 나머지 성분들은 탑 상부로 배출됨.

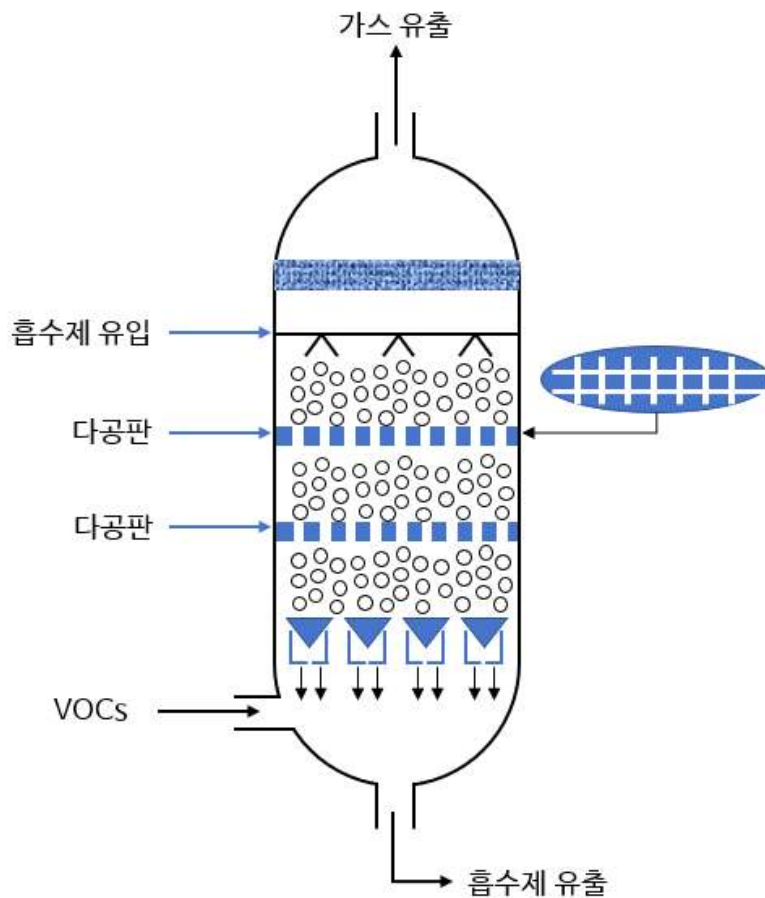


[그림 9-4] 흡수처리기술의 충전탑

(출처) 안전보건공단(2015), 폐수처리설비(스크러버) 화재·폭발 예방대책 매뉴얼

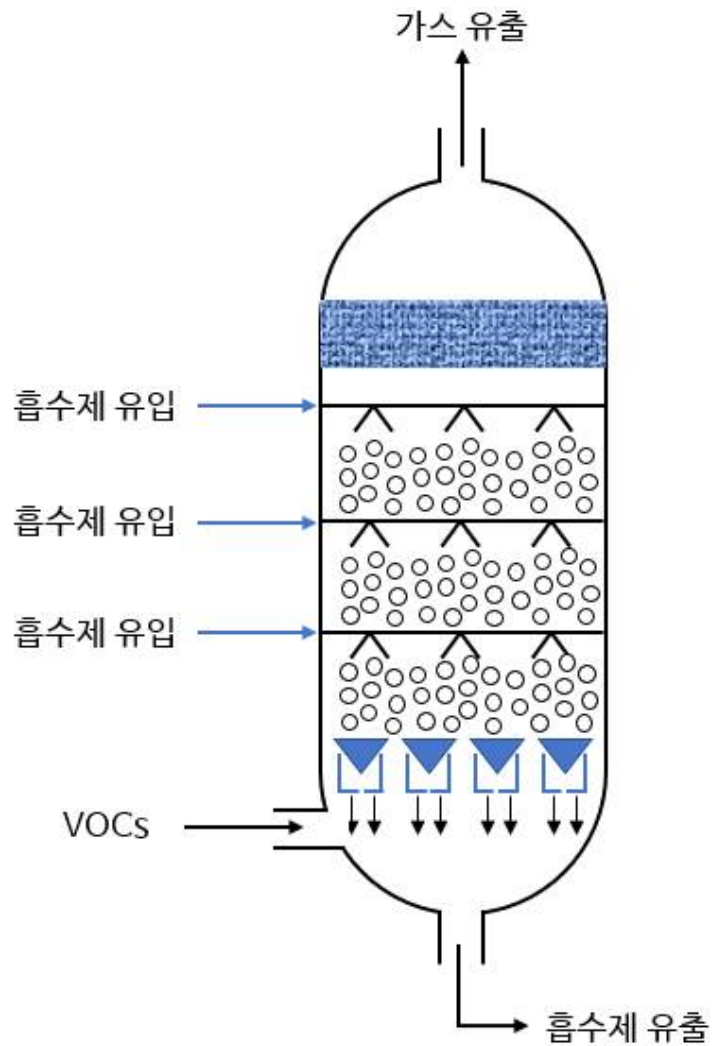
충전탑은 탑 상부에서 흡수액 분산이 성능에 큰 영향을 미치므로, 기체 흐름을 방해하지 않는 범위에서 흡수액이 고르게 분산되어야 하고, 충전물은 액상 박막이 넓게 형성되어 흡수 면적을 키우도록 설계해야 함. 충전탑은 처리효과가 크고, 침전물이 발생하는 가스 처리에도 적합하다는 장점이 있지만 충전층의 공극이 폐색될 수 있고, 충전물이 고가라서 초기 설치비용이 높으며, 가스 유속이 과도한 경우 범람이 발생할 수 있음.

- (다단탑) 증류 공정의 증류탑과 유사하고, 접촉시간이 비교적 길고, 각 단의 액체에 기체가 고르게 분산될 수 있다는 특징을 가지고 있어 흡수탑으로 많이 사용되고 있음. 장점으로는 충전탑에 비해 부유물이 있는 흡수액에 대해 적응성이 좋고, 온도 변화가 심한 조건에도 적용이 수월하나, 초기 비용이 높고 압력손실이 큰 단점이 있음.



[그림 9-5] 다단탑 흡수처리시설

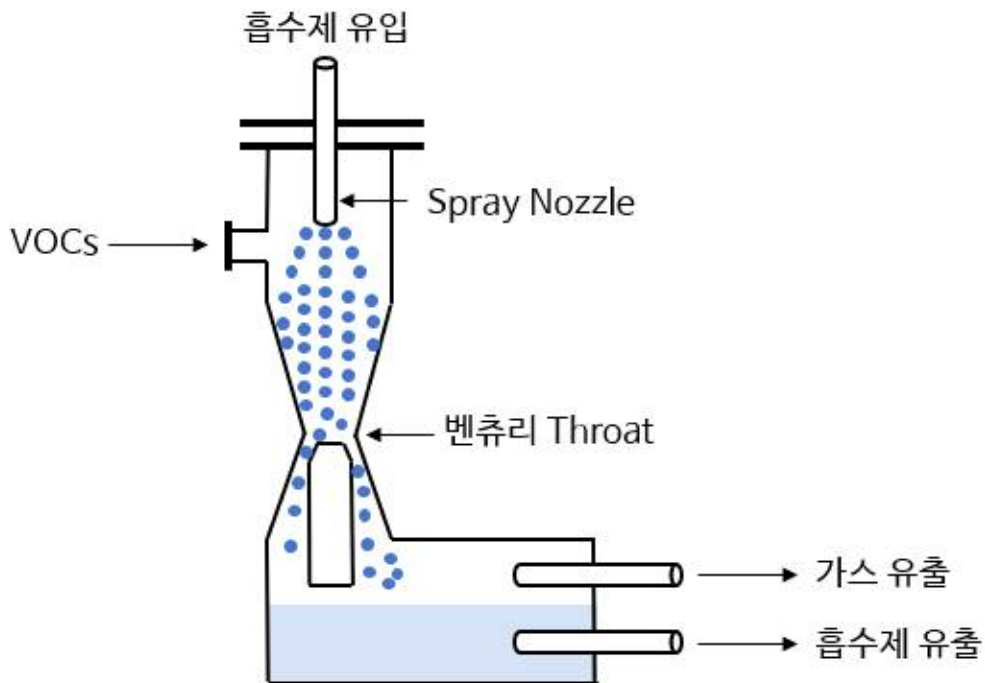
- (분무탑) 충전물을 사용하지 않는 반면 흡수액을 매우 적은 액적으로 만들어 분사함으로써 VOCs가 흡수될 면적을 극대화함. 분무탑의 기체와 액체 접촉시간이 짧아 물에 용해도가 높은 가스(예, 암모니아, 이산화황) 처리에 적합하고, 클로로포름과 같은 VOCs 처리에는 적합하지 않다고 알려져 있음. 분무탑은 충전탑보다 저렴하고, 압력손실이 적은 반면 분사 노즐이 잘 막히고 편류를 일으키기 쉽고 분무액과 기체의 균일한 접촉이 용이하지 않은 단점이 있음.



[그림 9-6] 분무탑 흡수처리시설

- (벤츄리 스크러버) 벤츄리 노즐에서 배출가스와 흡수액을 강제로 접촉시켜 배출 가스 중의 특정 성분을 흡수·처리하는 설비임. 흡수액과 배출가스와의 접촉시간이 매우 짧아 대부분의 VOCs보다는 용해도가 높은 가스 제거에 적합함.

벤츄리 스크러버는 소형으로 대용량 가스 처리가 가능하고 흡수효율이 탁월한 장점이 있는 반면 가스 압력손실이 커서 동력비가 높은 단점이 있음.



[그림 9-7] 벤츄리 스크러버 흡수처리시설

(출처) <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/venturi-scrubber> 인용

- (유의사항) 증기압이 낮은 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 상대적으로 낮은 압력손실 ▪ 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 ▪ 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 ▪ 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 ▪ 상대적으로 낮은 설치비용 ▪ 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폐수처리 문제 ▪ 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 클로로포름 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 경제성 때문에 클로로포름 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

□ **(클로로포름 적용)** 클로로포름의 흡수처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 흡수처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%) ¹	설치비용(100m ³ /min) ²	연간 운영비용(m ³ /min)	비고
70~90	30백만원	-	-

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: 물가정보(2019.11)

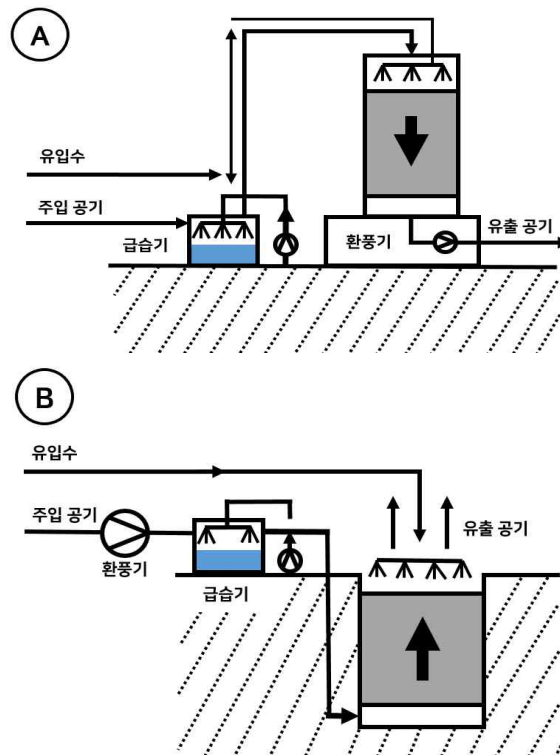
※ 사업장 여건에 따라 적응성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

3) 생물학적 처리기술

□ (기술 개요) 생물학적 처리기술은 호기성 미생물을 활용하여 VOCs를 산화·분해하는 기술: $VOCs + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + Heat + Biomass$

○ (종류) 생물학적 처리기술의 종류는 첫째, 바이오필터(Biofilter), 둘째, 바이오스크리버(Bioscrubber), 셋째, 바이오탁리클링 필터(Biotrickling Filter)임.

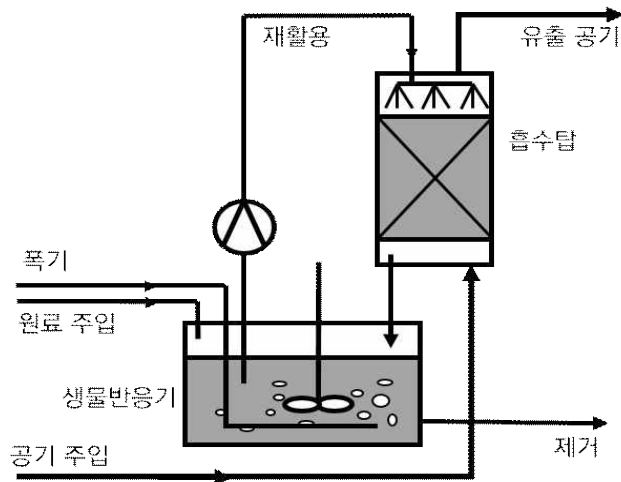
- (바이오필터) 바이오필터 고정체(하우징, Housing)는 가습장치, 온도조절장치, 분무장치로 구성되어 있는 밀폐형 구조임. 바이오필터 충전제는 미생물 서식에 최적 조건을 제공할 수 있는 물질(활성탄, 퇴비 등)로 구성되어 있어 미생물 농도는 토양 사용 시 보다 최고 140배까지 높일 수 있음. 바이오필터의 충전제는 오염물질을 1차적으로 흡수한 후 충전제 속의 미생물이 오염물질을 처리하도록 되어 있으며, 연속적 충전제의 재생이 가능한 시스템으로 한 번 설치하면 2~7년 정도 충전제 교체 없이 운전이 가능함.



[그림 9-8] 바이오필터 구성

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

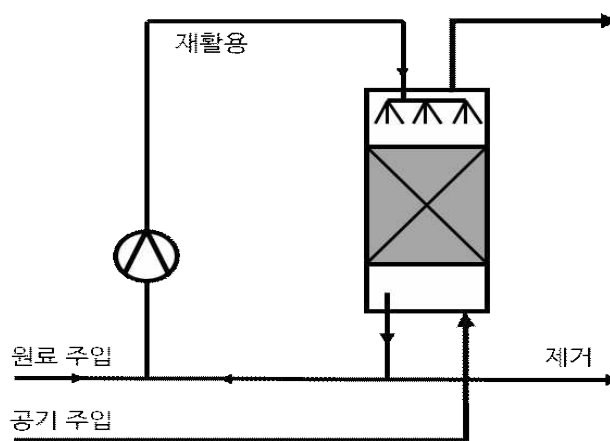
- (바이오스크리버) 배출가스를 세정탑에 통과시켜 오염물질을 물에 흡수시킨 후 이를 포기조에서 미생물 활동에 의해 제거하는 것임. 바이오스크리버에 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 클로로포름 등 대부분 VOCs는 적합하지 않음.



[그림 9-9] 바이오 스크리버

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

- (바이오텀리클링 필터) 바이오필터와 바이오스크리버가 혼합된 형태로서 미생물을 불활성 담체에 배양 충전시키고, 오염된 물을 상부에서 미생물이 충전된 담체에 분무하여 처리하는 시스템임. 바이오스크리버와 마찬가지로 적용 가능한 물질은 물에 잘 용해되어야 하므로 클로로포름 등 대부분 VOCs 적용에는 적합하지 않음.



[그림 9-10] 바이오텀리클링 필터

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000

□ (적용조건) 생물학적 처리방법은 일반적으로 저농도 VOCs를 포함한 상온의 배출가스

처리에 적합하며, VOCs 농도, 온도, 배출가스 유량, 기타 미생물에 치명적인 성분 등을 고려하여 적용성을 검토해야 함.

항목	추천범위	비고
VOCs 유입농도(ppm)	500 이하	톨루엔 기준
단위 체적 당 부하(g/m ³ ·hr)	100 이하	-
제거효율(%)	90 이상	-
배출가스 유량(m ³ /hr)	300 이하	설치 공간 고려
배출가스 온도(°C)	20 ~ 40	-
배출가스 습도(%)	제한 없음	-
할로겐 및 SO ₂	제한적	전 처리 필요
분진	제한적	전 처리 필요

□ 운전인자

- **(수분함량)** 생물학적 처리방법에서 가장 중요한 인자는 수분함량으로 특히 바이오필터는 수분 조절이 어려워 실패하는 사례도 있음.
- **(온도)** 미생물의 활동도는 온도 증가에 따라 증가하나, 온도가 한계치 이상 오르면 미생물이 오히려 폐사됨. 그러므로 최고 활성을 일어나는 온도를 파악하고, 그 이상으로 온도가 올라가지 않도록 세심하게 조정하는 것이 필요함.
- **(pH)** 각각 미생물들은 고유의 최적 pH를 가지고 있어 일정 범위의 pH 조건에서 활성이 좋으며, 이 범위를 벗어나면 활성이 떨어지거나 폐사하게 됨.
- **(영양분)** 미생물은 에너지와 탄소원을 얻기 위해 오염물질을 분해하나 질소, 인, 칼륨, 황, 칼슘, 나트륨, 철 및 수많은 다른 성분의 미네랄도 필요하므로 미생물의 활성도를 왕성하게 유지하기 위해서는 이런 성분들을 충분히 공급해야 함.
- **(오염물 농도 부하와 표면 부하)** 단위시간 당 단위부피 당 생물학적 처리공정에 들어가는 오염물질의 총량을 농도 부하로 정의하고 있으며, 생물학적 처리공정 설계 및 운전에 중요한 인자임.

- (산소 농도) VOCs 처리에 필요한 산소의 화학양론비적 양이 평형상태에서 용해되는 산소량보다 적으면 산소 소진이 일어나므로 산소 농도를 적정 수준에서 유지할 수 있도록 생물학적 처리공정 설계 및 운전이 필요함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 저렴한 설치 및 운영비용 • 낮은 압력손실 • 비선택성으로 다양한 물질로 구성된 VOCs의 동시 처리 가능 • 폐수, 폐기물 등의 2차 오염 물질 배출이 최소화 • 설치 융통성 	<ul style="list-style-type: none"> • 넓은 부지 필요 • 느린 처리속도 • 특정 물질 처리에 적합한 선택적으로 미생물 적용(따라서 복합 미생물 군집 적용 필요하나 배양이 쉽지 않음) • VOCs 회수 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저농도 VOCs 처리에 적합하며, 설치 운영비용이 저렴하고 2차 오염물질 생성 배출이 적지만 처리속도가 느리고 설치 부지 면적이 넓다는 단점이 있음.

- (클로로포름 적용) 클로로포름의 생물학적 처리기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 생물학적 처리기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

처리율(%)	설치비용(100m ³ /min)	비고
50~70	100백만원 + α	바이오필터
50~70	150백만원 + α	바이오스크러버
50~70	290백만원 + α	바이오탁리클링필터

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것.

9.4.2

코팅공정

9.4.2.1.(공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 클로로포름이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 클로로포름의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
 - (밀폐형 덮개) 클로로포름 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 1-11] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

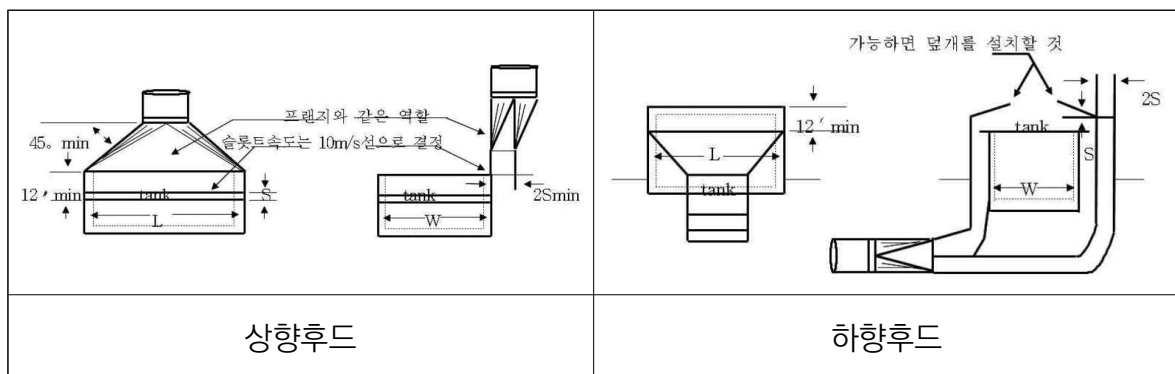
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 9-12] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

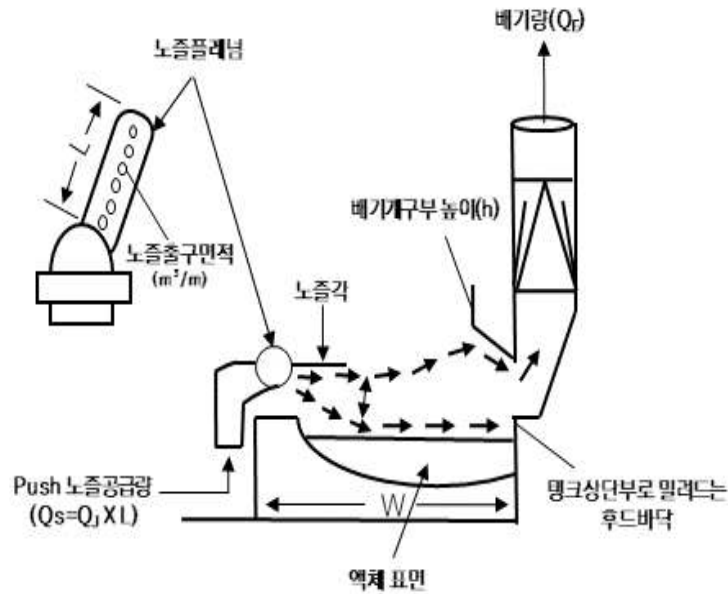
- (외부식 후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 9-13] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 9-14] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

9.4.2.2. 재사용 및 재활용

흡착·회수	대기 중으로 배출되는 VOCs를 흡착제에 흡착시키고, 온도 또는 압력 조절을 통해 탈착·회수하는 기술
응축·회수	응축기 등을 통해 유체 온도나 압력 변화로 대상 VOCs를 분리·회수하는 기술
흡수·회수	액상 흡수제를 가스상의 VOCs와 접촉하여 VOCs를 흡수제로 물질 이동시켜 분리·회수하는 기술
막분리·회수	혼합가스 각각의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술

1) 흡착·회수기술

□ (기술 개요) VOCs를 흡착제 표면에 물리적으로 흡착시키고 탈착·회수 재이용하는 기술

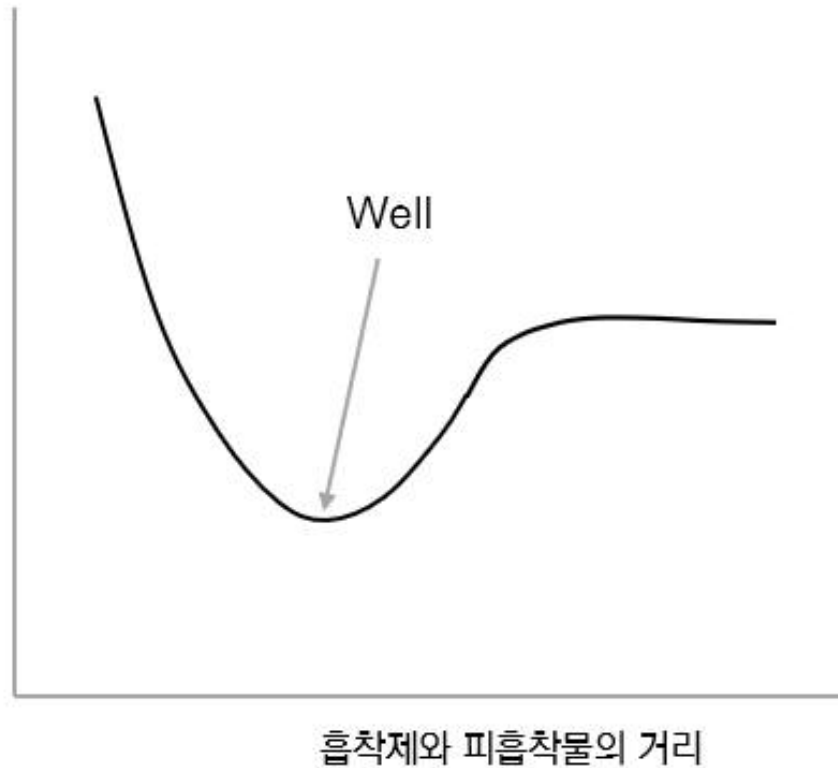
○ (흡착) 흡착공정은 화학적 흡착과 물리적 흡착으로 구분할 수 있으며, 화학적 흡착은 피흡착물과 흡착제가 화학적으로 결합하므로, 피흡착물과 흡착제의 화학적 결합을 끊어야 하므로 원래 형태로의 피흡착물 회수가 용이하지 않음. 반면 물리적 흡착은 원래 형태로 피흡착물의 회수가 가능하므로 흡착·회수 재사용기술에서는 물리적 흡착을 적용하고 있음.

- (물리적 흡착원리) 아래 그림은 흡착제 표면으로부터의 거리와 위치에너지 (Potential Energy)의 상관관계를 보여주고 있음. 흡착제와 피흡착물 간에는 '반발 (Repulsion)¹⁶⁵⁾'과 '견인(Attraction)¹⁶⁶⁾'이 동시에 작용하여 균형을 이루고 있음. 흡착제와 피흡착물의 거리 중에서 위치에너지가 가장 낮은 지점(Well 또는 Dip)에서 흡착이 일어나며, 피흡착물의 탈착을 위해 필요한 에너지가 외부에서 운동 에너지(Kinetic Energy) 형태로 공급되면 탈착이 일어남.

165) 흡착제와 피흡착물의 전자군(Cloud of Electrons) 간의 반발력

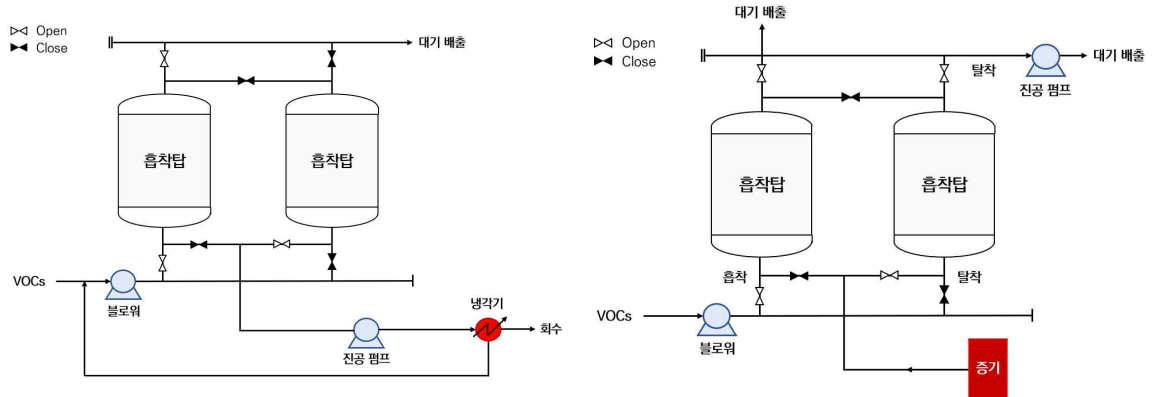
166) 전자 핵(Nuclear) 간의 Van der Waals force에 의한 견인력

위치에너지
(Potential Energy)



[그림 9-15] 흡착제와 피흡착물의 거리에 따른 위치에너지 변화
(출처) EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004

- **(탈착)** 포화된 흡착제 재생 방법은 온도 차이를 이용한 열탈착 방식(Temperature Swing Adsorption, 이하 TSA)과 압력탈착 방식(Pressure Swing Adsorption, 이하 PSA)이 주로 적용되고 있음.
 - **(TSA)** 고온 증기를 이용해 흡착제(예, 활성탄)에 흡착된 VOCs를 회수하는 방법으로 흡착제에 잔류하는 수분을 건조해야 하며, 고온 증기사용으로 화재 등 위험성이 있으며, 운전비용이 높고, 시간이 많이 소요되는 단점이 있음.
 - **(PSA)** 고압에서 VOCs를 흡착시키고, 압력을 낮춰 VOCs를 탈착시키는데 고압에서 운전하므로 운전비용이 높고, 공정 규모가 커지는 단점이 있음.
- **(공정 구성)** 일반적으로 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 탈착하게 됨.



[그림 9-16] 흡착·회수공정 모식도

(출처) SEST주식회사 홈페이지 (http://www.sestco.com/kor/vru_01.php) 인용

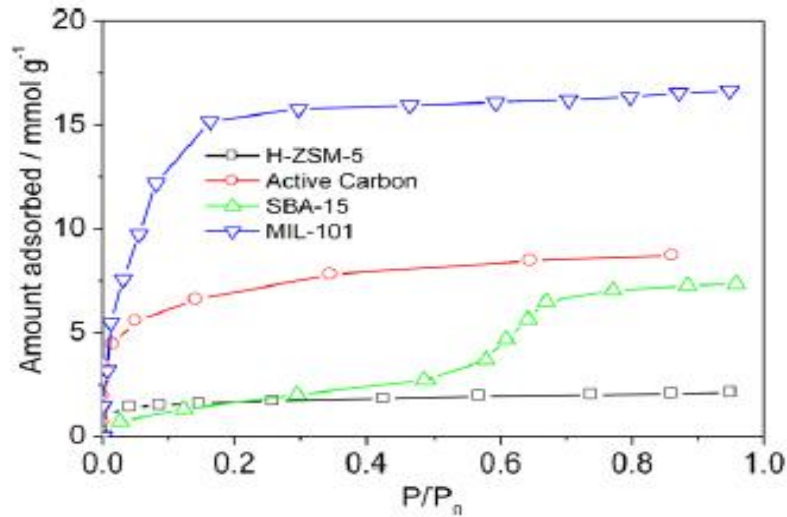
- **(적용조건)** 1) 클로로포름 단일물질 또는 클로로포름 혼합 VOCs, 2) 단일배출구의 점 오염원, 3) 고농도 클로로포름 또는 VOCs 등이며 클로로포름과 VOCs의 회수·재이용을 위해서는 처리보다 경제성 있어야 하고, 클로로포름과 VOCs 가격과 배출가스 특성에 의해 결정됨.
- **(배출가스 특성)** 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, 클로로포름과 VOCs 농도, 수분량, 온도 등이며, 이는 흡착제 종류에 따라 달라지므로 ‘흡착제 종류’에서 상세히 설명하였음.
- **(흡착제 종류)** 클로로포름 등의 VOCs 흡착제 종류는 1) 활성탄, 2) 제올라이트 (Zeolite), 3) 폴리머(Polymer), 4) MOFs(Metal-organic Frameworks)를 꼽을 수 있으며, 각 흡착제의 특성은 아래에서 보는 것과 같음.

[표 9-5] 흡착제 특성 비교

항목	활성탄	제올라이트	폴리머
표면적	600~1,400 m ² /g	천연 (300~600 m ² /g) 합성 (800~900 m ² /g)	
공극 크기	micropore (공극 직경 < 2 nm), mesopore (2 nm < 공극 직경 < 50 nm), macropore (공극 직경 > 50 nm)	3~30 nm (일정한 공극 크기)	Porous polymers (1~1.6 nm)
표면특성	친수성 ¹ 과 소수성 특성을 모두 보유하고 있음	천연 제올라이트는 친수성이나, 합성 제올라이트는 친수성 또는 소수성으로 목적에 맞게 합성 제작	대부분은 소수성이나 사용 목적에 적합하도록 물성을 변형 합성 제작하는 경우도 있음.
배출가스 유량	60~3,500 m ³ /hr (단일) 병렬 사용시 용량 증가 가능 (for VRU)	60~3,500 m ³ /hr	
VOCs 유입농도	700~1,000 ppm (LEL 25% 이하) 경제성을 고려하면 10~70 VOL% (100,000~700,000 ppmv) (For VRU)	1,000~10,000 ppm (LEL 25% 이하)	
수분량 (상대습도)	50% 미만	94~96%까지 허용	
온도	55°C 이하	상온	
탈착방법	증기 열탈착 ² 진공(Vacuum) 탈착	열탈착 ⁴	열탈착 ⁵
탈착효율 ³	50% 회수효율 98% 이상	90%	50~90%
교체주기	6개월~5년(증기 열탈착) 7년 이상(진공 탈착)	5년 이상	교체주기는 폴리머에 따라 다르나 일반적으로 상당 기간 교체를 하지 않아도 되는 것으로 알려져 있음

- 1: 활성탄의 친수성 특성 때문에 물이 활성탄에 흡착된 피흡착물을 치환·탈착하는데 주요 역할 담당하며, 재생에 필요한 증기량은 목표 제거효율(또는 출구 농도)에 좌우되고, 일정한 증기가 흡수층 온도를 재생온도로 올리는 탈착에너지 공급
- 2: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 활성탄 착화 온도보다는 낮아야 함(재생 최고 온도는 120~180°C)이고, 탈착을 위한 증기 사용량은 0.25~0.35 kg H₂O/kg AC
- 3: EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004
- 4: 열에 강하기 때문에 고온 탈착도 가능
- 5: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 폴리머 용점(Melting Point)보다는 낮아야 하고, 열에 약하기 때문에 탈착 온도는 비교적 낮은 온도에서 운전

- 최근 연구¹⁶⁷⁾에서는 금속-유기 기반 구조(Metal-organic Frameworks; 이하 MOFs) 촉매가 클로로포름 흡착에 있어서 활성탄, 제올라이트보다 성능이 더 좋다고 알려져, MOFs의 적용을 검토해 볼 필요가 있으나 MOFs는 고가이므로 경제성 검토를 통해 결정할 필요가 있음.



[그림 9-17] 여러 흡착제의 클로로포름 흡착능 비교
(참고) MIL-101은 Al, Cr이 담지된 Terephthalate로서 MOFs 일종

○ 흡착제 비교 평가

- 활성탄은 화재 위험성이 높고, 비점이 높은 유기화합물에 적용하기 어렵고, 수분 조절이 필요하다는 단점을 갖고 있으며, 이를 극복하기 위해 제올라이트 흡착제가 개발 적용되고 있으나, 제올라이트는 고가이므로 활성탄 적용이 어려운 특정 목적에 주로 활용되고 있음.
- 한편 폴리머 흡착제는 표면특성 조절이 가능하다는 특성 때문에 개발 적용되고 있으나, 열에 취약하고 고가라는 단점을 갖고 있으나, 활성탄이 적용하기 어려운 특정 목적으로 고려해 볼 수 있음.
- 활성탄은 적용사례가 많아 기술적 안정성이 높고, 가장 저렴하나 교체 관련 번거로움이 있으며(최장 사용 기간은 7년), VOCs의 배출특성을 고려하여 제올라이트와 폴리머도 대안으로 고려·결정할 필요가 있음.

167) Khan, N. A., Hasan, Z., Jung, S. H. (2013), Adsorptive Removal of Hazardous Materials using Metal-organic Frameworks (MOFs): A Review

□ 처리효율과 비용

흡착제	회수효율	설치비용	운전비용	비고
활성탄 ¹	80% 이상	500백만원 이상 ³	2.4백만원/톤	회수 재사용으로
제올라이트 ²	90~96%	-	61,000~163,000원/m ³	원료물질 대체로
폴리머	-	-	-	운전비용 상쇄 효과

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: Khan, F. I., Ghoshal A. Kr. (2000), Removal of Volatile Organic compounds from polluted air: A Review

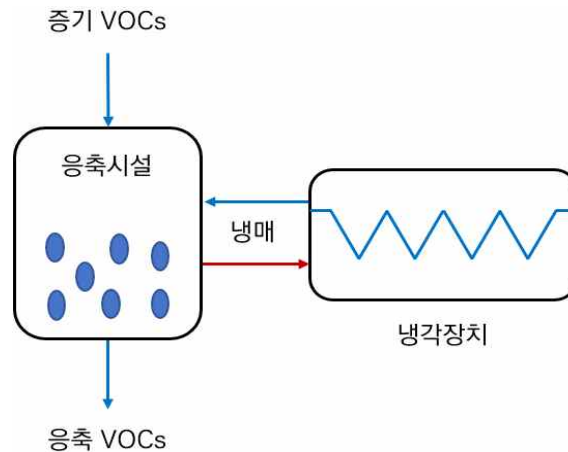
3: 유입 가스 유량과 농도에 따라 비용 차이 발생

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 클로로포름의 지속적 재사용으로 인한 구매 비용 절감 • 클로로포름의 환경 유입을 차단하여 환경 개선 효과 	<ul style="list-style-type: none"> • 고가의 설치·운영비용 • 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 클로로포름 재사용으로 환경 개선 효과가 있는 반면 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 관리가 용이하지 않음.

2) 응축·회수기술

- (기술 개요) 응축은 온도를 낮추어 기체상태 물질을 액체 상태로 전환하는 방법으로 냉매를 활용하여 기체상태 혼합물의 온도를 낮추어 응축 가능한 물질(VOCs 등)을 응축 불가능한 물질로부터 분리하는 기술



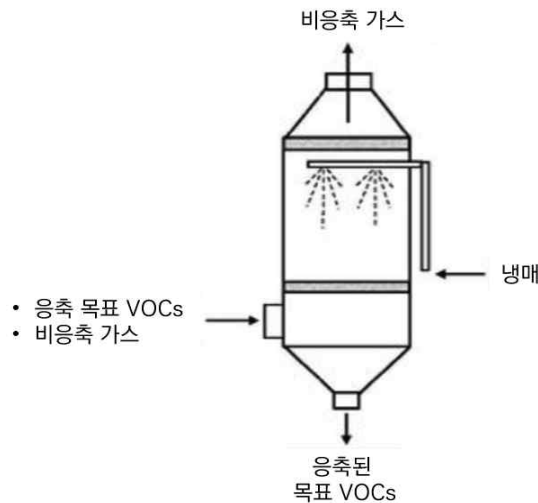
[그림 9-18] 응축·회수 공정도

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

- (원리) 기체상태 물질은 노점(Dew Point)¹⁶⁸⁾에서 응축이 일어나며, 일정한 압력에서 온도를 점차 낮추면 노점이 다른 물질들이 특정 온도에서 응축이 일어나면서 분리 추출됨. 또는 온도는 일정하게 유지하면서 압력을 높여줌으로써 냉각응축을 유도하여 특정 물질을 분리할 수도 있음.
- (종류) 응축은 비냉각방식(Non-refrigeration Method)과 냉매를 사용하는 냉각방식(Refrigeration)으로 구분할 수 있으며, VOCs 회수에서는 냉각방식을 주로 활용하고 있음.
- (응축기 종류) 냉각응축을 유도하는 방법으로 접촉 응축방법과 표면 응축방법으로 구분할 수 있음.

168) 기체상태 물질의 분압과 그 물질의 증기압이 동일한 온도

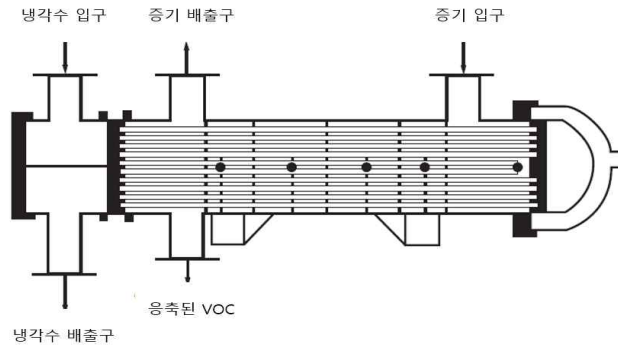
- **(접촉 응축기)** 응축 대상 기체를 냉매와 직접 접촉 혼합하면서 열적·물리적 평형이 이루면서 VOCs를 응축하여 냉각용 액체(배기가스 중의 물이 어는 것을 방지하기 위해 메탄올 주입)에 흡수됨. 접촉 응축방식의 냉각제는 계속 사용할 수 없고, 냉각제에 응축된 VOCs도 바로 재사용하지 못하고 분리 과정을 거쳐야 하는 단점 때문에 경제적이지 못함.



[그림 9-19] 접촉 응축기

(출처) Jan Carlson(2016), Air Pollution Control Technology Review : Condensationhttps

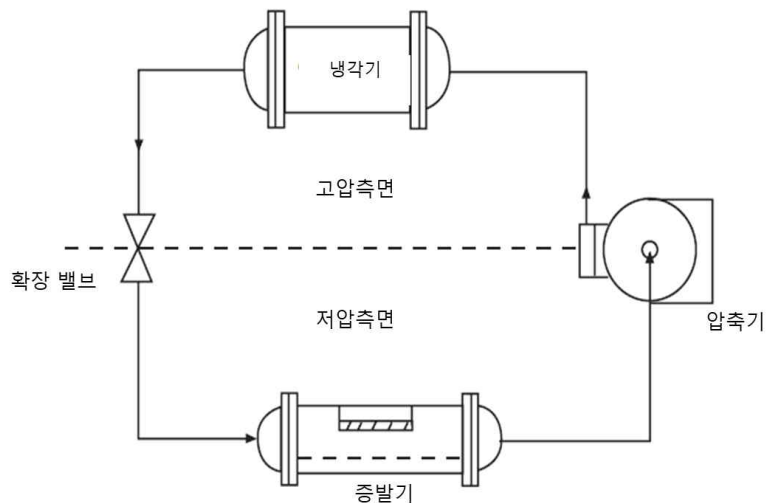
- **(표면 응축기)** 다관식 열교환기 형태로 관 내부에 냉매를 통과시키는 반면 관 외부로 VOCs를 유입시켜 냉매가 통과하는 관 표면에 VOCs를 응축시키는 방법으로 Shell-and-Tube 응축기가 이에 속하며, 냉매와 VOCs가 직접 접촉하지 않아 분리하지 않고 VOCs를 재사용할 수 있는 장점이고, 냉각제도 지속해서 사용 가능하나, 직접 응축방법보다는 냉각효율이 낮은 단점이 있음.



[그림 9-20] 표면 응축기

(출처) EPA, Section 3: VOC Controls 2-5

- 표면 응축방법은 냉매가 증발·압축·응축·확장 등의 4단계를 거치면서 냉각이 이뤄지며, 냉매는 관을 통해 순환되면서 VOCs를 응축시킴.



[그림 9-21] 냉매 순환단계 모식도

(출처) EPA, Section 3 VOC Controls 2-6

- (냉매 종류) 냉매는 주로 물, 냉수, 염수(Brine), 수소불화탄소(HFC), 암모니아, 저온 유체 등이 있으며, 이들 냉매의 적용 가능한 물질의 응축온도는 냉수는 7°C, 염수(Brine)는 -35°C, 염화불화탄소는 -68°C이며, 질소 또는 이산화탄소와 같은 저온 유체는 -195°C까지 가능함.

냉매	적용 가능 응축온도(°C)	냉각온도(°C)
물	15.5 ~ 26.7	(T _{con} - 9) 응축온도보다 9°C 낮게 설정
냉수	7.2 < T _{con} < 15.2	
염수(Brine, 염화칼슘)	-34.4 < T _{con} < 7.2	
HFC-134a	-67.8 < T _{con} < -34.4	

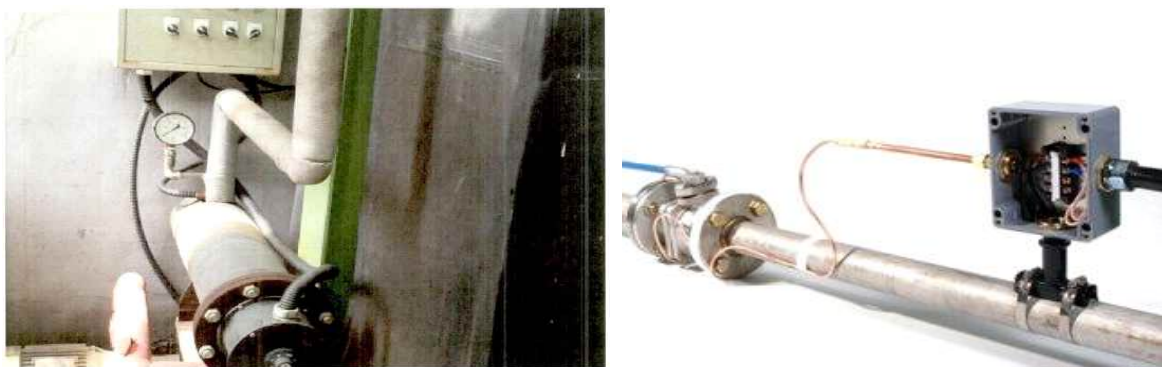
T_{con}: 응축온도(노점, Dew Point)

□ (적용조건) 응축·회수 적용을 위해서는 비등점이 38°C(100°F) 이상인 VOCs가 적합하며, 유입농도는 5,000ppm 이상이면 유리하나, 비등점이 낮은 물질은 극저온 또는 압력을 가하는 추가적인 노력이 필요함. VOCs는 비등점, 빙점 등이 유사한 물질이 많아 혼합 VOCs에서 특정 물질의 분리·회수가 쉽지 않아 응축·회수는 단일 VOCs 회수에 적합함.

□ (적용사례) 원유 저장시설에 기화된 VOCs를 진공펌프로 추출하고, 스크리버로 응축하여 VOCs를 회수하는 기술로서 회수율은 95%¹⁶⁹⁾ 정도로 알려졌다.

□ 유의사항

○ (결빙 문제) 응축 대상 VOCs 중에 수분이 함유되어 있거나, 빙점이 높은 VOCs는 응축 과정에서 얼어붙어 관을 폐쇄하므로 운전 문제를 초래하고 생산공정도 중단해야 하므로 수분을 사전에 제거하거나 가열선을 설치하여 간헐적으로 얼음을 녹여주어야 함.



[그림 9-22] 가열선을 설치하여 얼음을 녹이는 배관

(출처) 안산녹색환경지원센터(2011), 응축 기술을 이용한 VOCs 제거 및 회수 설비에 관한 연구
(출처) Heatizon Systems, <https://www.heatizon.com/products/heatizon-brands/guttermelt>

169) <http://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/units-and-plants-practices/VOCs-recovery-systems/#reference-10>

○ (스케일 문제) 표면 응축방법의 경우 고비점의 유기화합물(타르 등)이 응축기 표면에 응축되면서 스케일을 형성하여 성능 저하 초래

- 여과장치 등의 전처리를 설치하여 스케일 원인 물질 제거

□ (클로로포름 적용) 클로로포름의 응축회수기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 응축 회수기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

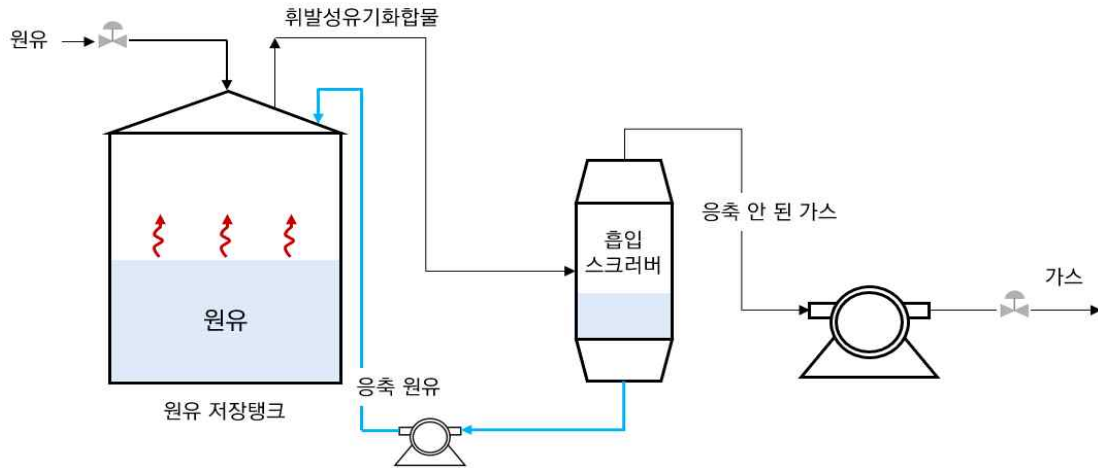
회수율(%)*	설치비용	운영비용	비고
90	100백만원 이상	30백만원 이상	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 액체질소 적용한 경우

3) 흡수·회수기술

- (기술 개요) 단일 VOCs 또는 혼합 VOCs가 포함된 배출가스를 흡수제에 물리흡수 시킨 다음 방산(Stripping) 공정을 통해 VOCs를 분리한 다음 응축 과정을 거쳐 회수하는 기술



[그림 9-23] 흡수·회수 시설의 공정도

(출처) ipieca(2013), VOC recovery Systems 인용

- (소극적 회수기술, Passive Recovery Technology) 저장시설 등으로부터 추출된 VOCs에 압력을 가해 원유에 흡수¹⁷⁰⁾시키거나, 다양한 유기용제(예, Kerosene)를 흡수제로 사용하여 응축 흡수¹⁷¹⁾(원유 저장시설의 경우는 원유 자체를 흡수제로 사용)한 다음 저장시설에 재투입하고, 회수하지 못한 VOCs는 고온 산화 처리 또는 다른 용도로 활용

170) 압력 흡수의 회수율은 80%

171) 응축 흡수의 회수율은 90%



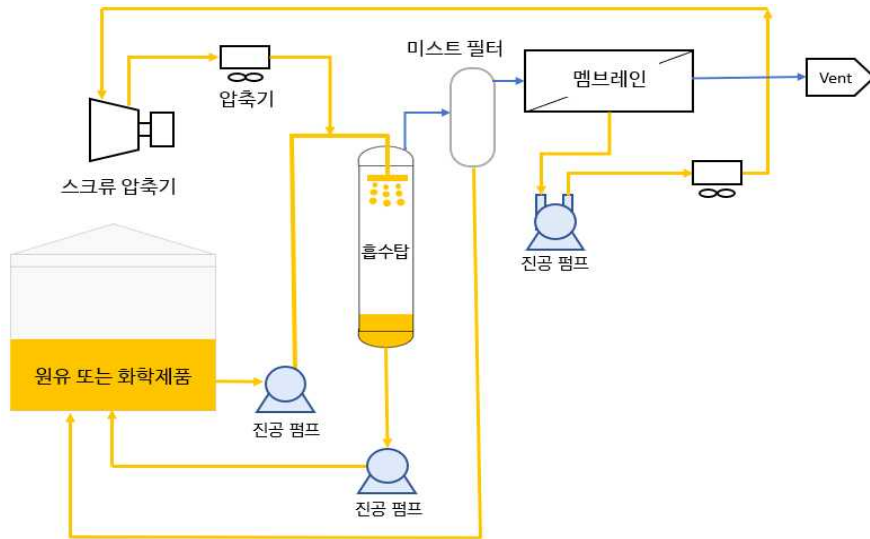
[그림 9-24] 선박에서 원유 하역 과정에서의 VOCs 흡수·회수 및 고온 산화 처리

(출처) JX(2013), Technologies for Volatile Organic compounds

- (운전조건) 흡수 반응기 운전조건은 상황에 따라 달라지며(현장 적용사례 172) : 온도는 3~7℃, 압력은 0.3~0.5 MPa, 흡수제로는 원유 또는 석유화학제품 등 저장시설의 물질과 같은 물질을 사용하여 용해·회수
- (적극적 회수기술, Active Recovery Technology) 저장시설로부터 VOCs를 포집한 다음 흡수공정과 타 회수공정을 연계하여 VOCs를 회수하는 기술(흡수공정만으로는 회수효율이 떨어지므로 연계 공정 적용)
- (흡수/막분리 연계방식) 흡수 단독공정에 막분리를 후속으로 연결한 방식으로 흡수 단독공정의 경우 VOCs 회수율이 70% 수준에 불과하였으나 막분리 공정을 후속으로 연결하여 회수율이 95%로 높아졌음(173).

172) JX Nippon Oil and Energy에서 일본 가고시마의 키이레 터미널(Kiire Terminal)에 설치 운전(처리규모: 20,000 Sm³/hr)

173) CARBOVAC, Vapor Recovery Solutions

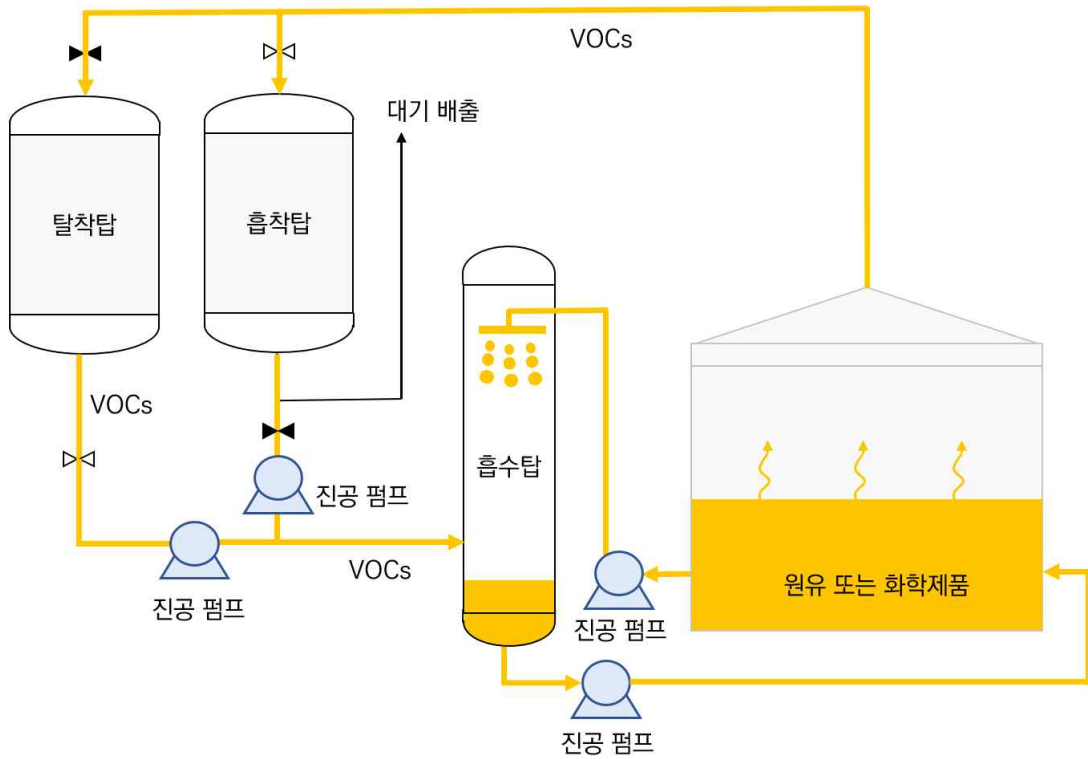


[그림 9-25] 흡수/막분리 연계 회수공정

(출처) BORSIG Membrane Technology GmbH, BMEMBRANE TECHNOLOGY FOR PROCESSES AND ENVIRONMENT, 8p 인용

- **(흡수/흡착 연계방식)** 흡수공정 앞에 활성탄을 활용한 흡·탈착공정을 설치하여 저장시설 또는 운반시설로부터 휘발·배출된 VOCs를 흡착시킨 다음 감압하여 VOCs를 탈착시킴. 탈착된 VOCs를 흡수탑에 주입하여 저장시설의 원유 또는 석유화학제품에 용해·회수하는 방식임. VOCs 회수율이 흡수 단독공정의 70% 안팎에서 90~99%로 높아졌음.
- **(흡착)** 활성탄 등의 흡착시설을 이용하여 저장시설 등으로부터 배출되는 VOCs를 흡착시켜 불활성기체¹⁷⁴⁾와 분리
- **(탈착)** 일반적으로 흡착탑에 진공펌프를 걸어 VOCs 탈착

174) 운반기체로서 농도 조절과 화재 위험도를 낮추기 위한 목적



[그림 9-26] 흡수/흡착 연계 회수공정
 (출처) logo alma Carbovac, Vapour Recovery Units, 4p 인용

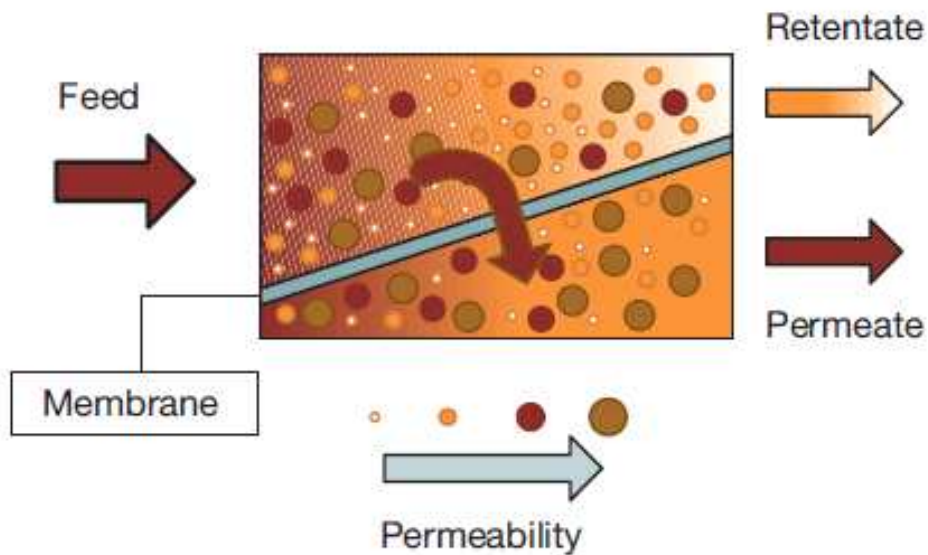
□ (유의사항) 증기압이 낮은 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 상대적으로 낮은 압력손실 • 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 • 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 • 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 • 상대적으로 낮은 설치비용 • 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 폐수처리 문제 • 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 클로로포름 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 흡수·회수기술은 클로로포름 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

4) 막분리·회수기술

- (기술 개요) 각각 가스의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술로서 가스 분리는 막의 양단에 가스 분압 차이(농도 차이)를 이용함.
- (분리막) 혼합 성분으로부터 선택적으로 특정 성분을 분리할 수 있는 물리적 경계층으로 막 양단의 가스 분압 차이(농도 차이)가 물질 전달력임.
- (분리막 성능) 혼합 성분 중에서 분리 목표 물질의 선택성과 막 양단의 압력 차에 의해 분리막 성능이 결정되며, 선택성은 10 이상, 압력 차 성능지표인 압력비(공급측 총압에 대한 투과측 총압 비)는 일반적으로 30~50 정도이어야 기술적으로 실현가능함.



[그림 9-27] 막분리 프로세스

(출처) ITM-CNR, Membrane per la separazione di CO₂ erattori a membrana per il suo uso

(<https://www.enea.it/it/seguici/events/co2/IULIANELLI.pdf>) 인용

□ 적용조건

- 클로로포름을 막으로 분리하기 위해서는 혼합가스 종류, 클로로포름 농도, 유량, 배출 가스 온도 등 다양한 정보가 필요하며, 이는 대상 업종 및 공정에 따라 다른 수요맞춤형 막이 개발 적용되어야 함. 그러므로 클로로포름 분리를 위한 적용조건을 일반화하기는 어려운 상황임.

□ 적용사례

- (필요성) 미국 에너지부(DOE)의 관할 지역에서 염소계 VOCs로 오염된 토양으로부터 배출되는 염소계 VOCs 함유 가스의 적정 처리 필요성 대두
 - (적용 시기 및 지점) 1999년 3월부터 2000년 2월까지 미국 캘리포니아 주의 Sacramento 시 외곽에 있는 McClellan Air Force Base(AFB)

○ 조건 및 설계목표

항목	내용
설계 유량	58.9 Sm ³ /hr
배출 VOCs 농도	23 ~ 101 ppm
처리 목표 VOCs 농도	10 ppm

- (적용 결과) Membrane Technologies and Research, Inc.(MTR)는 막(Permselective Membrane)을 사용하여 VOCs를 선택적으로 공기와 분리하여(VOCs는 막을 통과 시키고, 공기는 배제) VOCs를 액상으로 회수하였고, 설계 목표치도 달성하였음.
- (적용 문제점)
 - (CO₂ 문제점) 배출가스 중에 CO₂ 농도는 1~3%이었으며, CO₂에 의해 막분리 성능이 2~4배 정도 감소하였음.
 - (오일과 물의 문제점) 배출가스 중의 오일과 물은 막의 막힘 현상(Fouling)을 초래하여 막분리 성능을 저하한다고 밝혀졌으며, 이는 효과적 전처리로 해결할 수 있다고 결론 내렸음.
- (비용 분석) VOCs 농도 5,000 ppm의 배출가스 300 Sm³/hr를 VOCs 농도 10 ppm 이하로 처리하기 위한 시설 설치비용은 780백만원¹⁷⁵⁾ 정도 필요하고, 운영비용은 800백만원¹⁷⁵⁾ 정도 필요하다고 보고하였음.

175) 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정

VOCs 유입농도	연간 운영비용*
100 ppm	499.2백만원
1,000 ppm	585.6백만원
5,000 ppm	799.2백만원
10,000 ppm	856.8백만원

* 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정
(출처) US DOE(2001), Membrane System for the Recovery of Volatile Organic compounds from Remediation Off-Gases, DOE/EM-0614

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 분리 과정에서 상변화가 없으므로 에너지 소모가 적음 • 장치 구성이 단순하고 기계 장치가 최소화되어서 유지관리가 쉬움 • 특정 물질 선택성이 탁월함 • 다양한 목적에 적용 가능한 막 제조가 가능함(원료가 다양하여 목적에 따라 다양한 막 제조 가능) • 환경에 무해한 또는 영향이 적은 원료 또는 재질을 사용하므로 환경친화적 공정 	<ul style="list-style-type: none"> • 막의 특정 화학물질에 대한 취약성(특정 화학물질과의 접촉을 피해야 하므로 공정 적용 한계) • 중합체이므로 온도에 영향을 받기 때문에 특정 화학반응 공정(온도가 높은 공정)에 적용하기 어려움(적용의 한계) • 규모 확장의 한계(일반적으로 단위 모듈을 반복적으로 연결하여 규모 확장하는 방식으로 대용량 설치의 한계) • 막 오염과 막힘 현상으로 교체 필요성(높은 운영비용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 클로로포름 등의 VOCs에 대한 선택성이 탁월하고, 석유 화학산업에서 이미 적용한 사례가 존재하여 클로로포름을 분리·회수 재사용은 기술적으로 가능함 • 막분리 시설의 설치 및 운영비가 높아 타 기술과 효율 및 경제성을 비교 평가하여 막분리시설의 적용 여부를 결정할 필요가 있음

9.4.3

이송·운반·분배·계량시설

□ (정의) 원료 물질을 저장 탱크, 창고, 사일로 등에 저장하거나 생산물, 제품을 일시적으로 창고 등에 보관·저장하는 공정

9.4.3.1. (공정관리) 측정 및 관리시스템 도입

□ (정의) 누출오염원관리시스템(LDAR)을 활용하여 이송·운반·분배·계량 시설 배출원에 대한 주기적 감시 및 검지를 시행하여, 이상 있는 장치는 즉시 정비 또는 교체하여 클로로포름 배출량과 배출원을 동시에 체계적으로 관리하는 기술

○ 이송·운반·분배·계량 시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 누출지점이 많고, 누출되더라도 육안 식별이 어렵고, 화학물질에 따라서 무색·무취인 경우도 있어 측정하지 않고서는 누출 파악이 어려운 상황이 존재함.

○ 누출 가능성이 큰 지점에 바코드가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고, LDAR 시스템에 의해 주기적으로 점검 관리함.

[표 9-6] LDAR 점검주기 및 화학업종과 정유업종 저감율

장치 및 화학물질	화학업종 저감율(%)		정유업종 저감율(%)	
	매월 감시	매분기 감시	매월 감시	매분기 감시
밸브-기체	87	67	88	70
밸브-경질유	84	61	76	61
펌프-경질유	69	45	68	45
압축기-기체	-	-	-	33
연결부-기체, 경질유	-	33	-	
압력안전밸브-기체	-	44	-	44

(출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

기술 개요	Leak Detection and Repair(이하 LDAR) 등 누출관리시스템을 활용한 실시간 화학물질의 비산배출 관리기술로 최근 광학이미지 카메라를 이용한 Flare, 저장시설 등 VOCs 누출 모니터링과 공정 배출감시를 위한 Fence Line 모니터링 기술도 활용되고 있음			
적용산업 및 공정	클로로포름의 이송·운반·분배·계량 공정이 있는 전 업종			
적용효과	(적용 전) 이송·운반·분배·계량시설은 장치별(밸브, 플랜지, 시료 채취 연결부, 교반기 등)로 배출원 수가 많고 누출이 되더라도 누출 여부의 육안 확인이 어려운 상황			
	(적용 후) LDAR를 도입하여 대상 공정의 누출지점에 바코드 번호가 부여된 인식표(Tag)를 설치하고 VOCs 측정기(검지기)를 이용하여 배출원에 대한 주기적 점검을 통해 누출 확인 및 신속한 장비 보수 가능			
저감효과 (%)	70	처리비용	설치비용	100백만원 이상
			운영비용	1,000원/관리지점

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

9.4.3.2. (공정관리) 장치개선

- (정의) 장치개선 및 교체를 통해 클로로포름의 비산 배출원으로부터의 누출(Leak)을 방지하고 누출 원인이 되는 부분을 개선함으로써 배출량을 줄이거나 완전히 차단하는 기술
- (펌프 변경) 펌프 Seal에서 클로로포름이 누출되는 것을 방지하기 위해 Seal이 없는 Sealless(Non-seal) 펌프(Canned 펌프 등)나 Double-sealed 펌프로 교체
- (밀폐식 시료 채취장치) 시료 채취 과정에서 클로로포름이 비산 배출되는 것을 방지하기 위해 밀폐식 시료 채취장치로 변경

장치 종류	개선 방법	저감률(%)
펌프	• Seal-less design (Canned Pump etc.)	99
	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
밸브	• Seal-less design • (Bellows type, Diaphragm, etc.)	99
압축기	• Closed Vent System	90*
	• Dual Mechanical Seal	99
압력 안전밸브	• Rupture Disk Assembly	99
	• Closed Vent System	90*
연결부	• Socket Welding Type	99
개방식 라인	• Blind, Plug, Cap or Second Valve	99
시료 채취 연결부	• Closed-loop System	99
공정 배수구	• Closed-loop and Water Seal	99

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

*배출관이 연소처리 등에 연결하여 처리할 경우는 99%, 미 연결된 경우는 90% 수준임.

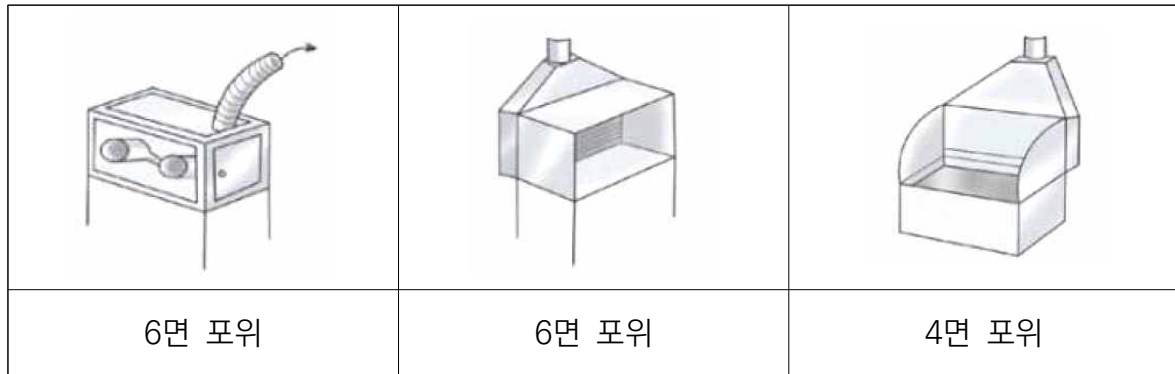
9.4.3.3. (공정관리) 밀폐 및 포집장치

- (기술 개요) 시료 채취 라인, 계량시설 등 클로로포름이 누출 및 비산배출 될 수 있는 주요 공정(시설)에 후드를 설치하여 비산 오염원을 통한 클로로포름의 대기 배출량 저감
- (기술 종류) 화학물질을 포집하는 덮개 및 후드의 종류는 아래에서 보는 것과 같음.
- (밀폐형 덮개) 클로로포름 등의 VOCs를 취급하는 과정에서 대기로 쉽게 배출되고 있어 이를 방지하기 위해 밀폐형 덮개를 설치하고, 내부 공기를 흡입하여 대기오염방지시설에 이송 처리하고 있음.



[그림 1-28] 밀폐형 덮개 설치
(출처) 한국환경공단 보도자료(2020.4.14.)

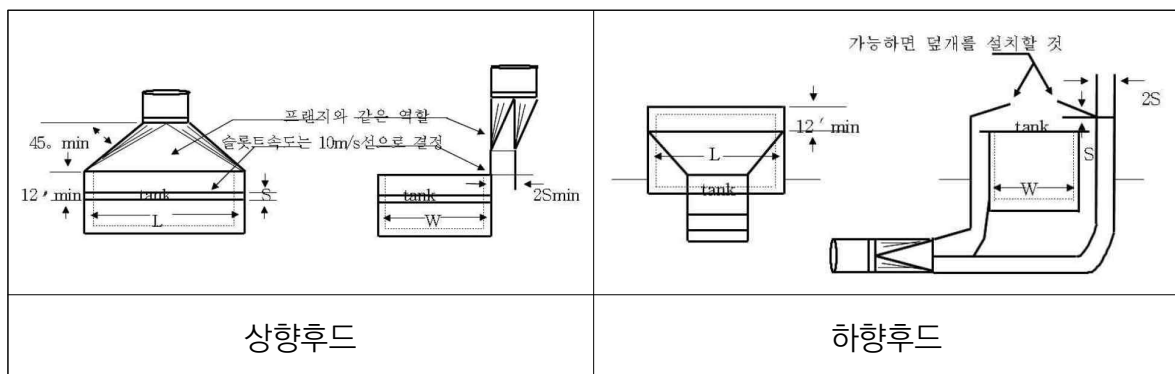
- (포위식 후드) 화학물질 발생원이 후드 안에 있는 경우 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 방지하는 형태이며, 외부 난기류의 영향을 받는 일이 적고 흡인효과가 좋음.



[그림 9-29] 포위식 후드의 종류

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

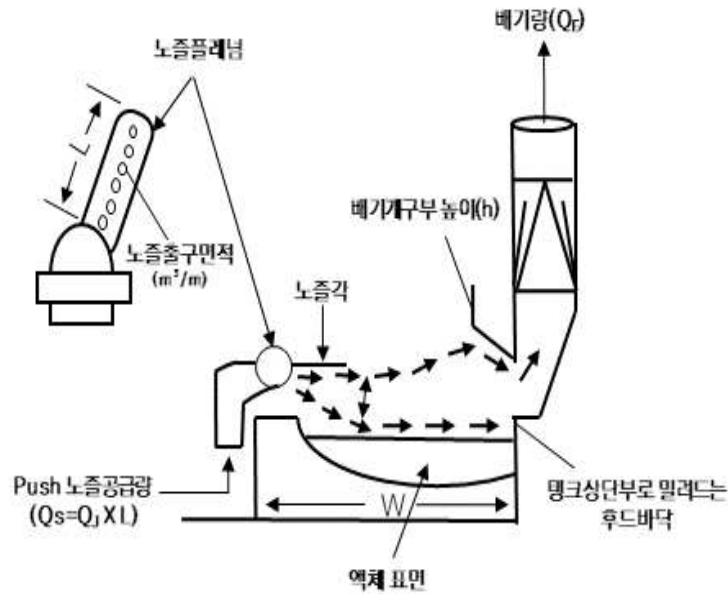
- (외부식후드) 화학물질 발생원과 후드가 일정거리 떨어져 있는 경우로 공정특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 후드로 끌어드리는 형태(측방흡인형, 하방흡인형, 상방흡인형)이며, 외부 난기류의 영향을 받으며 흡인효과가 손실되기 쉬움.



[그림 9-30] 외부식 후드의 종류(상향/하향후드)

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (푸쉬플후드) 오염물질 배출시설 표면에 Air Curtain을 쳐서 오염물질이 확산되는 것을 방지하여 Push측 후드로 흡입 처리하는 형태



[그림 9-31] 푸쉬플 후드

(출처) 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침

- (설치 유의사항) 후드는 가급적 밀폐하고, 발생원과 후드 거리를 최대한 줄이며, 배출원 개구 면적을 충분히 덮을 수 있도록 후드 면적을 설계하고, 유지보수 등의 목적으로 한 면은 개폐가 가능한 형태로 설계 필요
- (운영 유의사항) 후드 관과 흡입 관련 시설 등에 먼지가 누적될 경우 압력손실 증가의 원인이 될 수 있으므로 주기적 청소 등의 유지관리 필요

저감률(%)	설치비용	운영비용	비고
60~99	10백만원 이상	-	국내 적용사례 있음


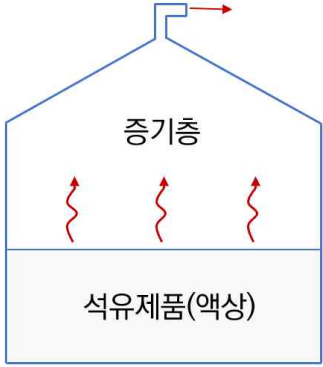

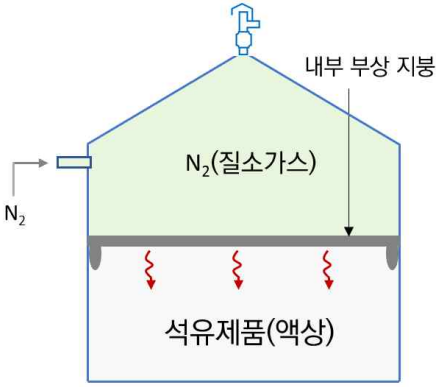
(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

9.4.4

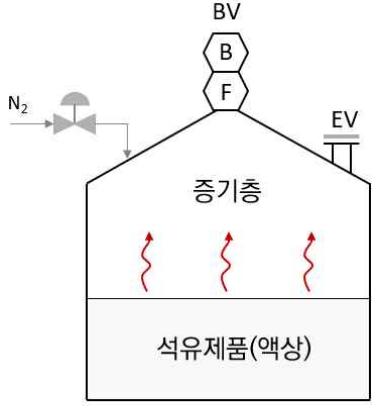
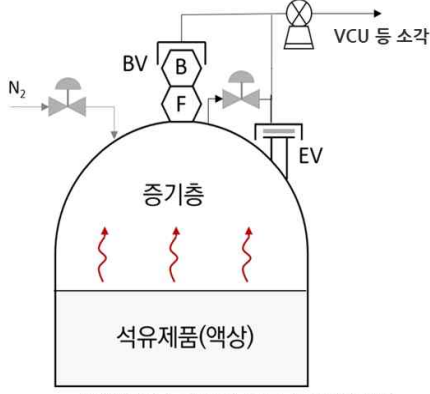
저장시설

9.4.4.1. 대체공정

<p>적용업종</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 화학물질 및 화학제품 제조업 • 코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업 			
<p>대체공정</p>	<p>(변경 전) 기존 CRT(Cone Roof Tank)는 VOCs를 함유한 원료 및 제품의 저장시설 내부 증기압이 높아지면 안전밸브가 자동으로 열리면서 VOCs가 외부로 배출</p> 	<p>VOCs의 압력이 높아지면 안전밸브가 열림</p> 		
	<p>(변경 후) IFRT(Internal Floating Roof Tank)는 저장시설의 액위에 따라 내부 부상 지붕이 이동하므로 증기층 발생을 최소화하며, 발생 증기를 연소시설, 흡착탑 등으로 이송 처리하며, 질소 봉입으로 VOCs 누출을 최소화하고 있음.</p> 	 <p>제품 액위 변화에 따라 내부 부상 지붕 이동으로 증기 발생 최소화</p>		
<p>저감효율 (%)</p>	<p>IFRT: 95% 이상 질소 봉입: 97% 이상 연소시설 : 99% 이상</p>	<p>처리비용</p>	<p>설치비용 운영비용</p>	<p>1,800백만원 (IFRT+연소시설 연결) -</p>

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것
 (출처) <https://www.indiamart.com/proddetail/cathodic-protection-system-for-tanks-20242520612.html>
 (출처) <http://www.fullmost.com.tw/de/Internal-Floating-Roof-IFR/>
 (출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

9.4.4.2. 공정관리

적용산업	<ul style="list-style-type: none"> • 화학물질 및 화학제품 제조업/저장시설 • 코크스, 연탄 및 석유 정제품 제조업/저장시설 			
저장시설 관리개선	<p>(변경 전)</p> <p>BV(Breath Valve)를 열리게 하기 위한 설계압력이 150 mmH₂O로 낮아 VOCs 대기 배출이 많음.</p>		 <ul style="list-style-type: none"> • 설계압력이 낮아 BV와 EV가 정상 운전에서도 탈루 발생 • Corn Roof Tank 	
	<p>(변경 후)</p> <p>설계압력을 10,000 mmH₂O로 높여 설계하고 평소 운전 압력을 최대 9,000 mmH₂O로 관리하여 배출가스 양을 감소하였고, 배출가스는 소각 처리하여 VOCs 대기 배출 최소화</p>		 <ul style="list-style-type: none"> • 설계압력을 높여 BV와 EV를 통한 대기 방출 없애고, BV와 EV를 내압으로 인해 개방되더라도 Vent Gas는 VCU 등 소각 처리됨 • Dome Roof Tank 	
저감효율 ¹ (%)	90%	처리비용	설치비용 ²	70백만원 이상
			운영비용	-

1: (출처) 이우근 외 3(2006), VOCs 배출현황 및 저감방안, 대한환경공학회지

2: (출처) 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

※ 사업장 여건에 따라 적용성 및 처리효율이 다르므로 사업장 여건을 충분히 고려할 것

9.4.4.3. 재사용 및 재활용

흡착·회수	대기 중으로 배출되는 VOCs를 흡착제에 흡착시키고, 온도 또는 압력 조절을 통해 탈착·회수하는 기술
응축·회수	응축기 등을 통해 유체 온도나 압력 변화로 대상 VOCs를 분리·회수하는 기술
흡수·회수	액상 흡수제를 가스상의 VOCs와 접촉하여 VOCs를 흡수제로 물질 이동시켜 분리·회수하는 기술
막분리·회수	혼합가스 각각의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술

1) 흡착·회수기술

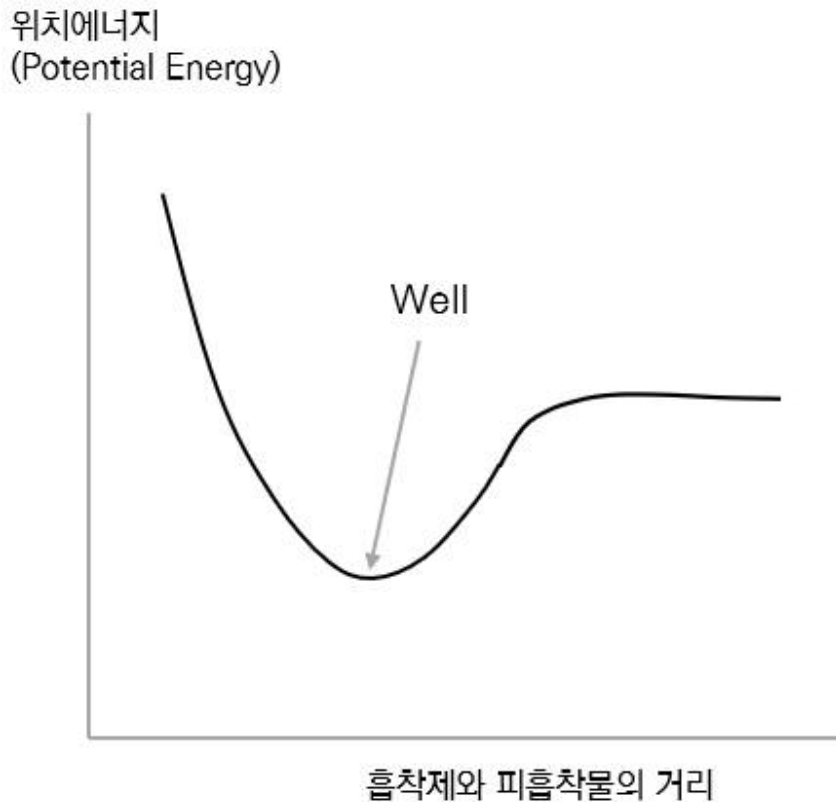
□ (기술 개요) VOCs를 흡착제 표면에 물리적으로 흡착시키고 탈착·회수 재이용하는 기술

○ (흡착) 흡착공정은 화학적 흡착과 물리적 흡착으로 구분할 수 있으며, 화학적 흡착은 피흡착물과 흡착제가 화학적으로 결합하므로, 피흡착물과 흡착제의 화학적 결합을 끊어야 하므로 원래 형태로의 피흡착물 회수가 용이하지 않음. 반면 물리적 흡착은 원래 형태로 피흡착물의 회수가 가능하므로 흡착·회수 재사용기술에서는 물리적 흡착을 적용하고 있음.

- (물리적 흡착원리) 아래 그림은 흡착제 표면으로부터의 거리와 위치에너지 (Potential Energy)의 상관관계를 보여주고 있음. 흡착제와 피흡착물 간에는 '반발 (Repulsion)¹⁷⁶⁾'과 '견인(Attraction)¹⁷⁷⁾'이 동시에 작용하여 균형을 이루고 있음. 흡착제와 피흡착물의 거리 중에서 위치에너지가 가장 낮은 지점(Well 또는 Dip)에서 흡착이 일어나며, 피흡착물의 탈착을 위해 필요한 에너지가 외부에서 운동 에너지(Kinetic Energy) 형태로 공급되면 탈착이 일어남.

176) 흡착제와 피흡착물의 전자군(Cloud of Electrons) 간의 반발력

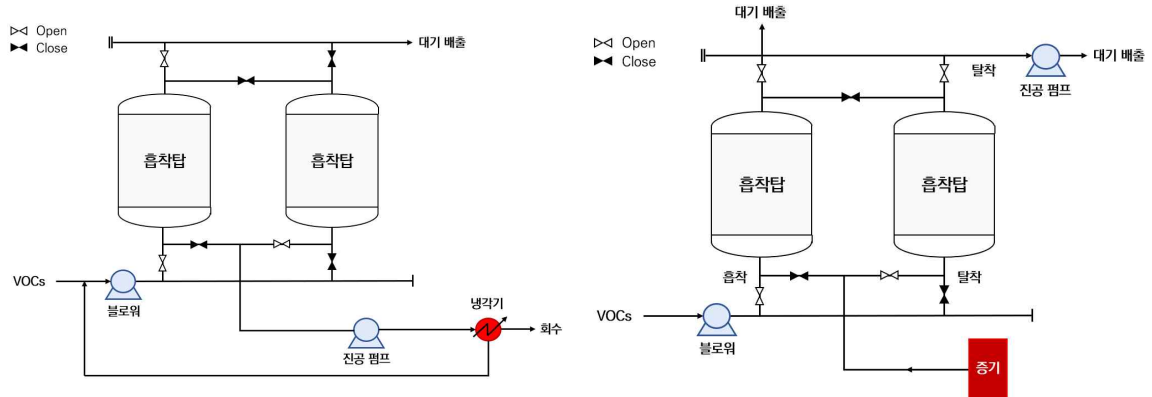
177) 전자 핵(Nuclear) 간의 Van der Waals force에 의한 견인력



[그림 9-32] 흡착제와 피흡착물의 거리에 따른 위치에너지 변화

(출처) EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004

- **(탈착)** 포화된 흡착제 재생 방법은 온도 차이를 이용한 열탈착 방식(Temperature Swing Adsorption, 이하 TSA)과 압력탈착 방식(Pressure Swing Adsorption, 이하 PSA)이 주로 적용되고 있음.
 - **(TSA)** 고온 증기를 이용해 흡착제(예, 활성탄)에 흡착된 VOCs를 회수하는 방법으로 흡착제에 잔류하는 수분을 건조해야 하며, 고온 증기사용으로 화재 등 위험성이 있으며, 운전비용이 높고, 시간이 많이 소요되는 단점이 있음.
 - **(PSA)** 고압에서 VOCs를 흡착시키고, 압력을 낮춰 VOCs를 탈착시키는데 고압에서 운전하므로 운전비용이 높고, 공정 규모가 커지는 단점이 있음.
- **(공정 구성)** 일반적으로 두 개의 흡착탑이 병렬로 구성되어 있으며, 하나의 흡착탑이 운전되는 동안에 다른 하나는 탈착하게 됨.



[그림 9-33] 흡착·회수공정 모식도

(출처) SEST주식회사 홈페이지 (http://www.sestco.com/kor/vru_01.php) 인용

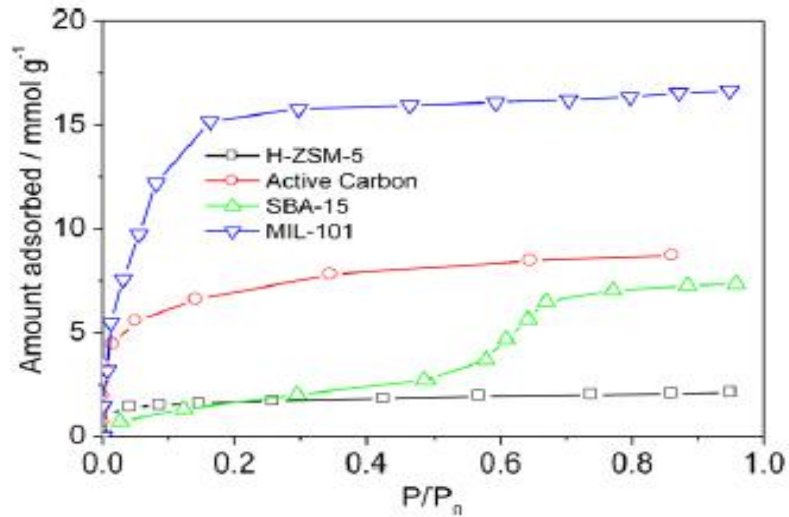
- **(적용조건)** 1) 클로로포름 단일물질 또는 클로로포름 혼합 VOCs, 2) 단일배출구의 점 오염원, 3) 고농도 클로로포름 또는 VOCs 등이며 클로로포름과 VOCs의 회수·재이용을 위해서는 처리보다 경제성 있어야 하고, 클로로포름과 VOCs 가격과 배출가스 특성에 의해 결정됨.
- **(배출가스 특성)** 흡착제 적용 범위를 결정짓는 배출가스 특성은 배출가스 유량, 클로로포름과 VOCs 농도, 수분량, 온도 등이며, 이는 흡착제 종류에 따라 달라지므로 ‘흡착제 종류’에서 상세히 설명하였음.
- **(흡착제 종류)** 클로로포름 등의 VOCs 흡착제 종류는 1) 활성탄, 2) 제올라이트 (Zeolite), 3) 폴리머(Polymer), 4) MOFs(Metal-organic Frameworks)를 꼽을 수 있으며, 각 흡착제의 특성은 아래에서 보는 것과 같음.

[표 9-7] 흡착제 특성 비교

항목	활성탄	제올라이트	폴리머
표면적	600~1,400 m ² /g	천연 (300~600 m ² /g) 합성 (800~900 m ² /g)	
공극 크기	micropore (공극 직경 < 2 nm), mesopore (2 nm < 공극 직경 < 50 nm), macropore (공극 직경 > 50 nm)	3~30 nm (일정한 공극 크기)	Porous polymers (1~1.6 nm)
표면특성	친수성 ¹ 과 소수성 특성을 모두 보유하고 있음	천연 제올라이트는 친수성이나, 합성 제올라이트는 친수성 또는 소수성으로 목적에 맞게 합성 제작	대부분은 소수성이나 사용 목적에 적합하도록 물성을 변형 합성 제작하는 경우도 있음.
배출가스 유량	60~3,500 m ³ /hr (단일) 병렬 사용시 용량 증가 가능 (for VRU)	60~3,500 m ³ /hr	
VOCs 유입농도	700~1,000 ppm (LEL 25% 이하) 경제성을 고려하면 10~70 VOL% (100,000~700,000 ppmv) (For VRU)	1,000~10,000 ppm (LEL 25% 이하)	
수분량 (상대습도)	50% 미만	94~96%까지 허용	
온도	55°C 이하	상온	
탈착방법	증기 열탈착 ² 진공(Vacuum) 탈착	열탈착 ⁴	열탈착 ⁵
탈착효율 ³	50% 회수효율 98% 이상	90%	50~90%
교체주기	6개월~5년(증기 열탈착) 7년 이상(진공 탈착)	5년 이상	교체주기는 폴리머에 따라 다르나 일반적으로 상당 기간 교체를 하지 않아도 되는 것으로 알려져 있음

- 1: 활성탄의 친수성 특성 때문에 물이 활성탄에 흡착된 피흡착물을 치환·탈착하는데 주요 역할 담당하며, 재생에 필요한 증기량은 목표 제거효율(또는 출구 농도)에 좌우되고, 일정한 증기가 흡수층 온도를 재생온도로 올리는 탈착에너지 공급
- 2: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 활성탄 착화 온도보다는 낮아야 함(재생 최고 온도는 120~180°C)이고, 탈착을 위한 수증기 사용량은 0.25~0.35 kg H₂O/kg AC
- 3: EPA(1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin, EPA 456/F-99-004
- 4: 열에 강하기 때문에 고온 탈착도 가능
- 5: 운전 온도는 VOCs 비점보다는 높고, 폴리머 용점(Melting Point)보다는 낮아야 하고, 열에 약하기 때문에 탈착 온도는 비교적 낮은 온도에서 운전

- 최근 연구¹⁷⁸⁾에서는 금속-유기 기반 구조(Metal-organic Frameworks; 이하 MOFs) 촉매가 클로로포름 흡착에 있어서 활성탄, 제올라이트보다 성능이 더 좋다고 알려져, MOFs의 적용을 검토해 볼 필요가 있으나 MOFs는 고가이므로 경제성 검토를 통해 결정할 필요가 있음.



[그림 9-34] 여러 흡착제의 클로로포름 흡착능 비교
(참고) MIL-101은 Al, Cr이 담지된 Terephthalate로서 MOFs 일종

○ 흡착제 비교 평가

- 활성탄은 화재 위험성이 높고, 비점이 높은 유기화합물에 적용하기 어렵고, 수분 조절이 필요하다는 단점을 갖고 있으며, 이를 극복하기 위해 제올라이트 흡착제가 개발 적용되고 있으나, 제올라이트는 고가이므로 활성탄 적용이 어려운 특정 목적에 주로 활용되고 있음.
- 한편 폴리머 흡착제는 표면특성 조절이 가능하다는 특성 때문에 개발 적용되고 있으나, 열에 취약하고 고가라는 단점을 갖고 있으나, 활성탄이 적용하기 어려운 특정 목적으로 고려해 볼 수 있음.
- 활성탄은 적용사례가 많아 기술적 안정성이 높고, 가장 저렴하나 교체 관련 번거로움이 있으며(최장 사용 기간은 7년), VOCs의 배출특성을 고려하여 제올라이트와 폴리머도 대안으로 고려·결정할 필요가 있음.

178) Khan, N. A., Hasan, Z., Jung, S. H. (2013), Adsorptive Removal of Hazardous Materials using Metal-organic Frameworks (MOFs): A Review

□ 처리효율과 비용

흡착제	회수효율	설치비용	운전비용	비고
활성탄 ¹	80% 이상	500백만원 이상 ³	2.4백만원/톤	회수 재사용으로
제올라이트 ²	90~96%	-	61,000~163,000원/m ³	원료물질 대체로
폴리머	-	-	-	운전비용 상쇄 효과

1: 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집

2: Khan, F. I., Ghoshal A. Kr. (2000), Removal of Volatile Organic compounds from polluted air: A Review

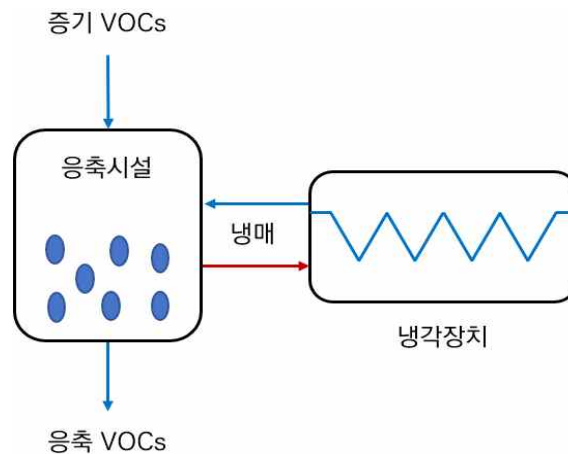
3: 유입 가스 유량과 농도에 따라 비용 차이 발생

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 클로로포름의 지속적 재사용으로 인한 구매 비용 절감 • 클로로포름의 환경 유입을 차단하여 환경 개선 효과 	<ul style="list-style-type: none"> • 고가의 설치·운영비용 • 활성탄을 사용하는 경우 화재 및 폭발 위험성 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정된 기술로서 성능 예측이 가능하고, 클로로포름 재사용으로 환경 개선 효과가 있는 반면 설치·운영비용이 높고, 활성탄과 폴리머 흡착제는 관리가 용이하지 않음.

2) 응축·회수기술

- (기술 개요) 응축은 온도를 낮추어 기체상태 물질을 액체 상태로 전환하는 방법으로 냉매를 활용하여 기체상태 혼합물의 온도를 낮추어 응축 가능한 물질(VOCs 등)을 응축 불가능한 물질로부터 분리하는 기술



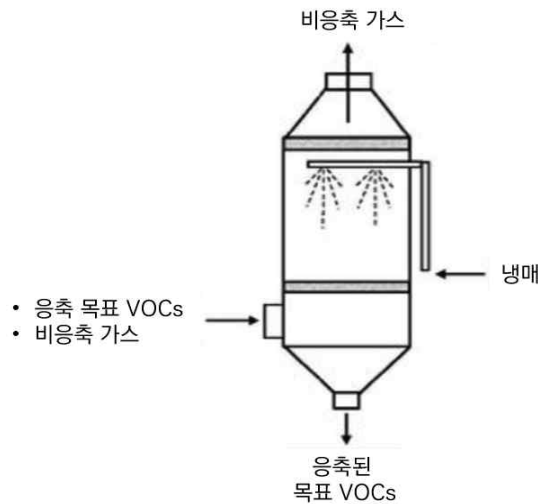
[그림 9-35] 응축·회수 공정도

(출처) 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000 인용

- (원리) 기체상태 물질은 노점(Dew Point)¹⁷⁹⁾에서 응축이 일어나며, 일정한 압력에서 온도를 점차 낮추면 노점이 다른 물질들이 특정 온도에서 응축이 일어나면서 분리 추출됨. 또는 온도는 일정하게 유지하면서 압력을 높여줌으로써 냉각응축을 유도하여 특정 물질을 분리할 수도 있음.
- (종류) 응축은 비냉각방식(Non-refrigeration Method)과 냉매를 사용하는 냉각방식(Refrigeration)으로 구분할 수 있으며, VOCs 회수에서는 냉각방식을 주로 활용하고 있음.
- (응축기 종류) 냉각응축을 유도하는 방법으로 접촉 응축방법과 표면 응축방법으로 구분할 수 있음.

179) 기체상태 물질의 분압과 그 물질의 증기압이 동일한 온도

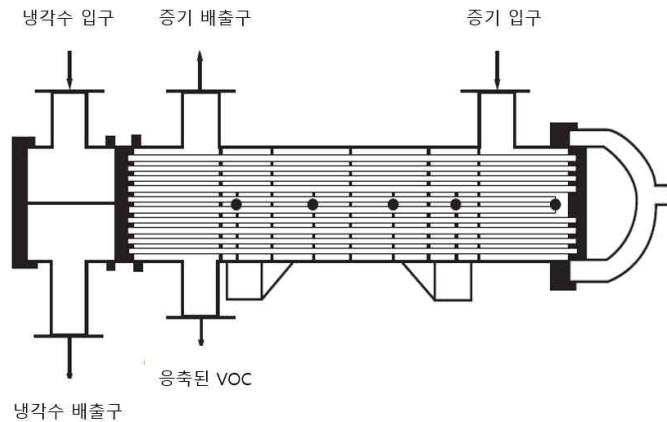
- **(접촉 응축기)** 응축 대상 기체를 냉매와 직접 접촉 혼합하면서 열적·물리적 평형이 이루어면서 VOCs를 응축하여 냉각용 액체(배기가스 중의 물이 어는 것을 방지하기 위해 메탄올 주입)에 흡수됨. 접촉 응축방식의 냉각제는 계속 사용할 수 없고, 냉각제에 응축된 VOCs도 바로 재사용하지 못하고 분리 과정을 거쳐야 하는 단점 때문에 경제적이 못함.



[그림 9-36] 접촉 응축기

(출처) Jan Carlson(2016), Air Pollution Control Technology Review : Condensationhttps

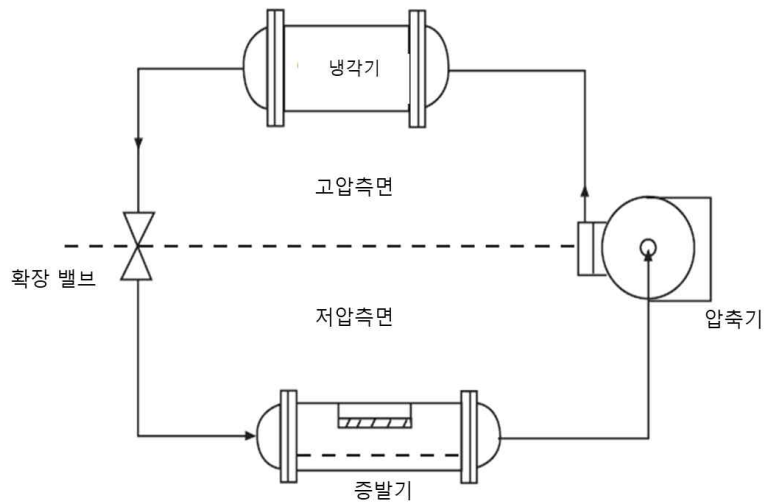
- **(표면 응축기)** 다관식 열교환기 형태로 관 내부에 냉매를 통과시키는 반면 관 외부로 VOCs를 유입시켜 냉매가 통과하는 관 표면에 VOCs를 응축시키는 방법으로 Shell-and-Tube 응축기가 이에 속하며, 냉매와 VOCs가 직접 접촉하지 않아 분리하지 않고 VOCs를 재사용할 수 있는 장점이고, 냉각제도 지속해서 사용 가능하나, 직접 응축방법보다는 냉각효율이 낮은 단점이 있음.



[그림 9-37] 표면 응축기

(출처) EPA, Section 3: VOC Controls 2-5

- 표면 응축방법은 냉매가 증발·압축·응축·확장 등의 4단계를 거치면서 냉각이 이뤄지며, 냉매는 관을 통해 순환되면서 VOCs를 응축시킴.



[그림 9-38] 냉매 순환단계 모식도

(출처) EPA, Section 3 VOC Controls 2-6

- (냉매 종류) 냉매는 주로 물, 냉수, 염수(Brine), 수소불화탄소(HFC), 암모니아, 저온 유체 등이 있으며, 이들 냉매의 적용 가능한 물질의 응축온도는 냉수는 7°C, 염수(Brine)는 -35°C, 염화불화탄소는 -68°C이며, 질소 또는 이산화탄소와 같은 저온 유체는 -195°C까지 가능함.

냉매	적용 가능 응축온도(°C)	냉각온도(°C)
물	15.5 ~ 26.7	(T _{con} - 9) 응축온도보다 9°C 낮게 설정
냉수	7.2 < T _{con} < 15.2	
염수(Brine, 염화칼슘)	-34.4 < T _{con} < 7.2	
HFC-134a	-67.8 < T _{con} < -34.4	

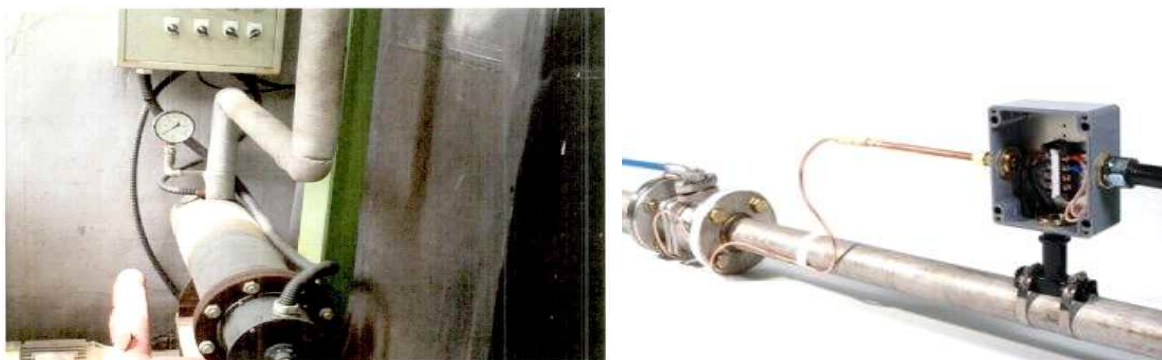
T_{con}: 응축온도(노점, Dew Point)

□ **(적용조건)** 응축·회수 적용을 위해서는 비등점이 38°C(100°F) 이상인 VOCs가 적합하며, 유입농도는 5,000ppm 이상이면 유리하나, 비등점이 낮은 물질은 극저온 또는 압력을 가하는 추가적인 노력이 필요함. VOCs는 비등점, 빙점 등이 유사한 물질이 많아 혼합 VOCs에서 특정 물질의 분리·회수가 쉽지 않아 응축·회수는 단일 VOCs 회수에 적합함.

□ **(적용사례)** 원유 저장시설에 기화된 VOCs를 진공펌프로 추출하고, 스크리버로 응축하여 VOCs를 회수하는 기술로서 회수율은 95%¹⁸⁰⁾ 정도로 알려졌다.

□ **유의사항**

○ **(결빙 문제)** 응축 대상 VOCs 중에 수분이 함유되어 있거나, 빙점이 높은 VOCs는 응축 과정에서 얼어붙어 관을 폐쇄하므로 운전 문제를 초래하고 생산공정도 중단해야 하므로 수분을 사전에 제거하거나 가열선을 설치하여 간헐적으로 얼음을 녹여주어야 함.



[그림 9-39] 가열선을 설치하여 얼음을 녹이는 배관

(출처) 안산녹색환경지원센터(2011), 응축 기술을 이용한 VOCs 제거 및 회수 설비에 관한 연구
(출처) Heatizon Systems, <https://www.heatizon.com/products/heatizon-brands/guttermelt>

¹⁸⁰⁾<http://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/units-and-plants-practices/VOCs-recovery-systems/#reference-10>

- **(스케일 문제)** 표면 응축방법의 경우 고비점의 유기화합물(타르 등)이 응축기 표면에 응축되면서 스케일을 형성하여 성능 저하 초래
 - 여과장치 등의 전처리를 설치하여 스케일 원인 물질 제거
- **(클로로포름 적용)** 클로로포름의 응축회수기술에 대한 정보가 부족하여 일반적인 응축회수기술 관련 정보를 아래와 같이 수록하였음.

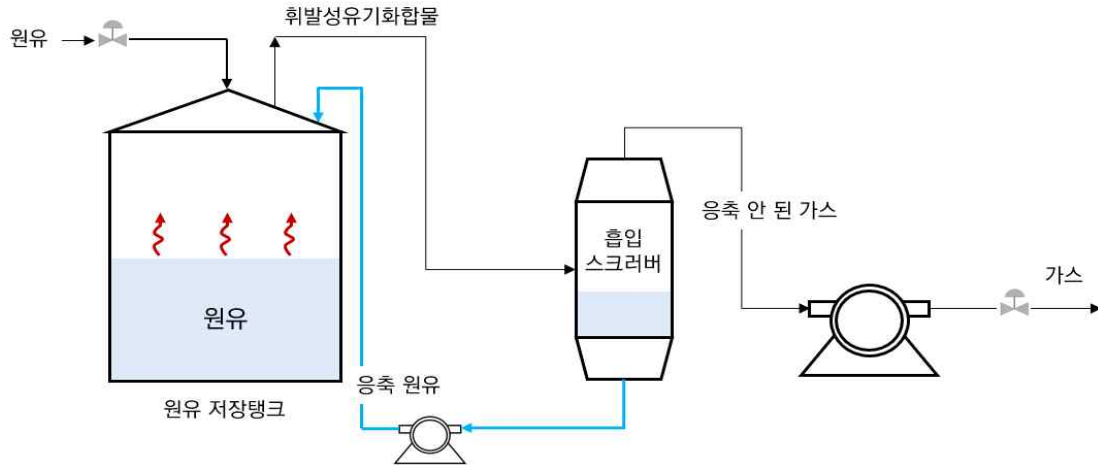
회수율(%)*	설치비용	운영비용	비고
90	100백만원 이상	30백만원 이상	국내 적용사례 있음

(출처) 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서

* 액체질소 적용한 경우

3) 흡수·회수기술

□ (기술 개요) 단일 VOCs 또는 혼합 VOCs가 포함된 배출가스를 흡수제에 물리흡수 시킨 다음 방산(Stripping) 공정을 통해 VOCs를 분리한 다음 응축 과정을 거쳐 회수하는 기술



[그림 9-40] 흡수·회수 시설의 공정도

(출처) ipieca(2013), VOC recovery Systems 인용

○ (소극적 회수기술, Passive Recovery Technology) 저장시설 등으로부터 추출된 VOCs에 압력을 가해 원유에 흡수¹⁸¹시키거나, 다양한 유기용제(예, Kerosene)를 흡수제로 사용하여 응축 흡수¹⁸²(원유 저장시설의 경우는 원유 자체를 흡수제로 사용)한 다음 저장시설에 재투입하고, 회수하지 못한 VOCs는 고온 산화 처리 또는 다른 용도로 활용

181) 압력 흡수의 회수율은 80%

182) 응축 흡수의 회수율은 90%



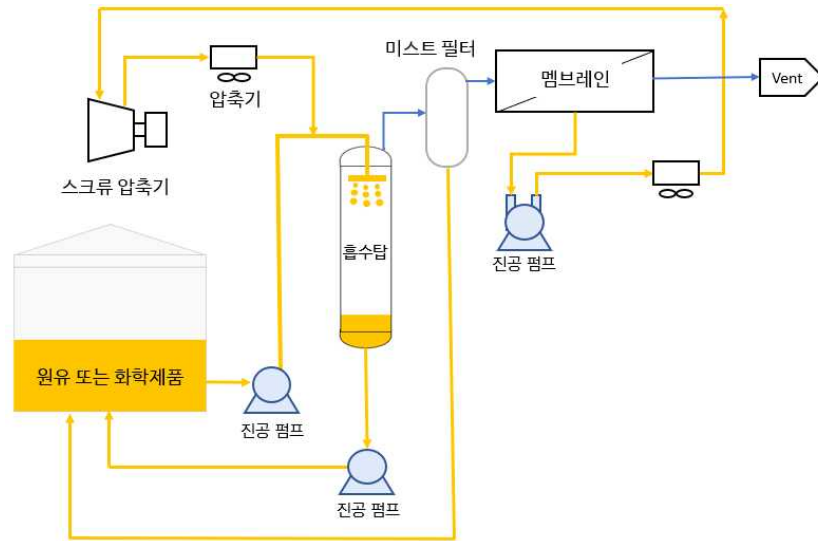
[그림 9-41] 선박에서 원유 하역 과정에서의 VOCs 흡수·회수 및 고온 산화 처리

(출처) JX(2013), Technologies for Volatile Organic compounds

- (운전조건) 흡수 반응기 운전조건은 상황에 따라 달라지며(현장 적용사례183) : 온도는 3~7℃, 압력은 0.3~0.5 MPa), 흡수제로는 원유 또는 석유화학제품 등 저장시설의 물질과 같은 물질을 사용하여 용해·회수
- (적극적 회수기술, Active Recovery Technology) 저장시설로부터 VOCs를 포집한 다음 흡수공정과 타 회수공정을 연계하여 VOCs를 회수하는 기술(흡수공정만으로는 회수효율이 떨어지므로 연계 공정 적용)
- (흡수/막분리 연계방식) 흡수 단독공정에 막분리를 후속으로 연결한 방식으로 흡수 단독공정의 경우 VOCs 회수율이 70% 수준에 불과하였으나 막분리 공정을 후속으로 연결하여 회수율이 95%로 높아졌음(184).

183) JX Nippon Oil and Energy에서 일본 가고시마의 키이레 터미널(Kiire Terminal)에 설치 운전(처리규모: 20,000 Sm³/hr)

184) CARBOVAC, Vapor Recovery Solutions

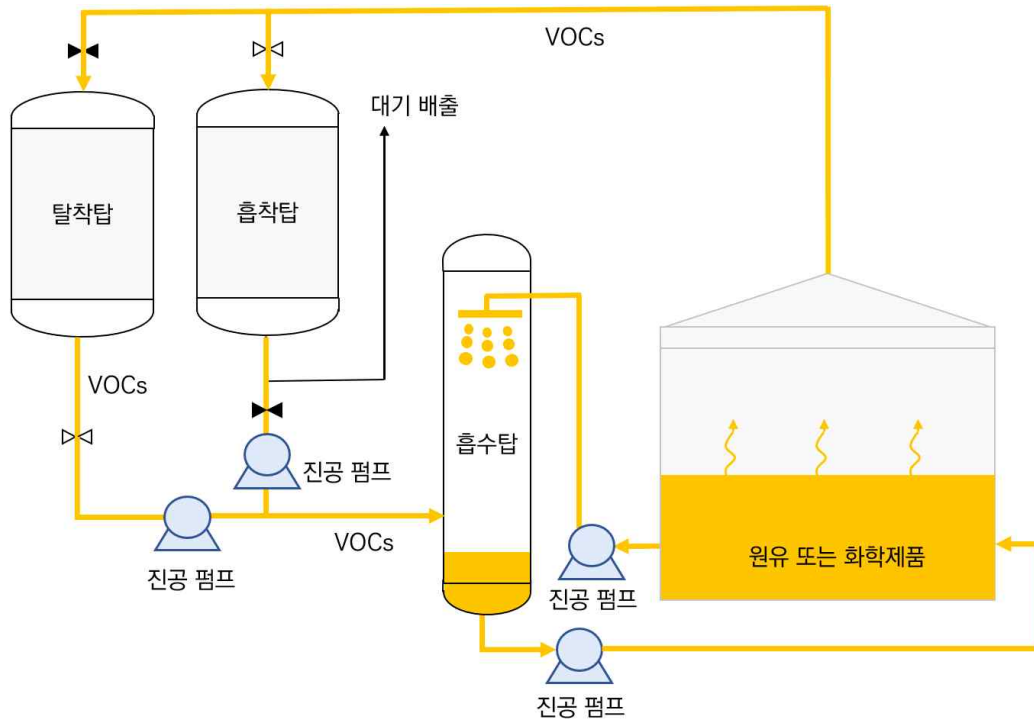


[그림 9-42] 흡수/막분리 연계 회수공정

(출처) BORSIG Membrane Technology GmbH, BMEMBRANE TECHNOLOGY FOR PROCESSES AND ENVIRONMENT, 8p 인용

- (흡수/흡착 연계방식) 흡수공정 앞에 활성탄을 활용한 흡·탈착공정을 설치하여 저장시설 또는 운반시설로부터 휘발·배출된 VOCs를 흡착시킨 다음 감압하여 VOCs를 탈착시킴. 탈착된 VOCs를 흡수탑에 주입하여 저장시설의 원유 또는 석유화학제품에 용해·회수하는 방식임. VOCs 회수율이 흡수 단독공정의 70% 안팎에서 90~99%로 높아졌음.
- (흡착) 활성탄 등의 흡착시설을 이용하여 저장시설 등으로부터 배출되는 VOCs를 흡착시켜 불활성기체(185)와 분리
- (탈착) 일반적으로 흡착탑에 진공펌프를 걸어 VOCs 탈착

185) 운반기체로서 농도 조절과 화재 위험도를 낮추기 위한 목적



[그림 9-43] 흡수/흡착 연계 회수공정
(출처) logo alma Carbovac, Vapour Recovery Units, 4p 인용

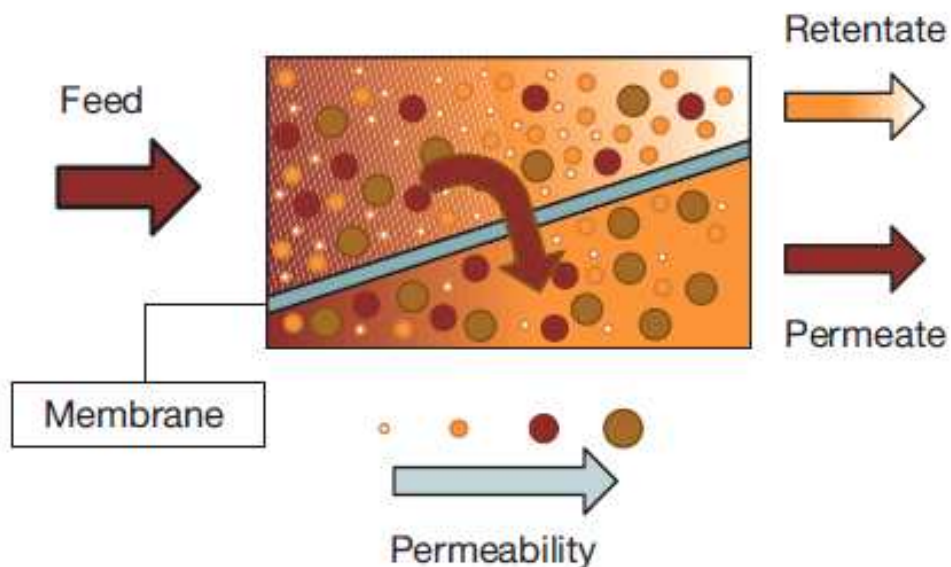
- **(유의사항)** 증기압이 낮은 VOCs는 증기압이 낮아 흡수액에서 쉽게 증발 배출될 수 있으므로 분사탑 등의 전처리를 설치 운영하고, 온도가 낮게 유지될 수 있도록 설계해야 함. 또한 저농도로 처리하기 위해서는 충전탑 높이가 상당히 높아져야 하므로 경제성이 떨어짐. 흡수장치에 의한 단독 처리보다는 응축기 또는 연소처리시설 등과 연계하여 처리하는 것이 바람직함.

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 상대적으로 낮은 압력손실 • 처리 가능한 유량 범위와 농도 범위가 넓음 • 극한 조건(부식성이 높은 가스)에도 운전 적응성이 높음 • 추가적 장비 설치 없이 반응탑의 높이만을 조절하여 처리 목표 달성 가능 • 상대적으로 낮은 설치비용 • 상대적으로 적은 공간 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 폐수처리 문제 • 상대적으로 높은 운영비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 클로로포름 용해도가 낮아 흡수액으로 물 대신에 고비점 석유오일을 사용하거나, 공중합체를 적용해야 하므로 흡수·회수기술은 클로로포름 처리에는 부적합하다고 여겨짐.

4) 막분리·회수기술

- (기술 개요) 각각 가스의 분리막에 대한 침투율 차이를 이용하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리하는 기술로서 가스 분리는 막의 양단에 가스 분압 차이(농도 차이)를 이용함.
- (분리막) 혼합 성분으로부터 선택적으로 특정 성분을 분리할 수 있는 물리적 경계층으로 막 양단의 가스 분압 차이(농도 차이)가 물질 전달력임.
- (분리막 성능) 혼합 성분 중에서 분리 목표 물질의 선택성과 막 양단의 압력 차에 의해 분리막 성능이 결정되며, 선택성은 10 이상, 압력 차 성능지표인 압력비 (공급측 총압에 대한 투과측 총압 비)는 일반적으로 30~50 정도이어야 기술적으로 실현가능함.



[그림 9-44] 막분리 프로세스

(출처) ITM-CNR, Membrane per la separazione di CO₂ erattori a membrana per il suo uso
(<https://www.enea.it/it/seguici/events/co2/IULIANELLI.pdf>) 인용

□ 적용조건

- 클로로포름을 막으로 분리하기 위해서는 혼합가스 종류, 클로로포름 농도, 유량, 배출 가스 온도 등 다양한 정보가 필요하며, 이는 대상 업종 및 공정에 따라 다른 수요 맞춤형 막이 개발 적용되어야 함. 그러므로 클로로포름 분리를 위한 적용조건을 일반화하기는 어려운 상황임.

□ 적용사례

○ (필요성) 미국 에너지부(DOE)의 관할 지역에서 염소계 VOCs로 오염된 토양으로부터 배출되는 염소계 VOCs 함유 가스의 적정 처리 필요성 대두

- (적용 시기 및 지점) 1999년 3월부터 2000년 2월까지 미국 캘리포니아 주의 Sacramento 시 외곽에 있는 McClellan Air Force Base(AFB)

○ 조건 및 설계목표

항목	내용
설계 유량	58.9 Sm ³ /hr
배출 VOCs 농도	23 ~ 101 ppm
처리 목표 VOCs 농도	10 ppm

○ (적용 결과) Membrane Technologies and Research, Inc.(MTR)는 막(Permselective Membrane)을 사용하여 VOCs를 선택적으로 공기와 분리하여(VOCs는 막을 통과 시키고, 공기는 배제) VOCs를 액상으로 회수하였고, 설계 목표치도 달성하였음.

○ (적용 문제점)

- (CO₂ 문제점) 배출가스 중에 CO₂ 농도는 1~3%이었으며, CO₂에 의해 막분리 성능이 2~4배 정도 감소하였음.

- (오일과 물의 문제점) 배출가스 중의 오일과 물은 막의 막힘 현상(Fouling)을 초래하여 막분리 성능을 저하한다고 밝혀졌으며, 이는 효과적 전처리로 해결할 수 있다고 결론 내렸음.

○ (비용 분석) VOCs 농도 5,000 ppm의 배출가스 300 Sm³/hr를 VOCs 농도 10 ppm 이하로 처리하기 위한 시설 설치비용은 780백만원¹⁸⁶⁾ 정도 필요하고, 운영비용은 800백만원¹⁸⁶⁾ 정도 필요하다고 보고하였음.

186) 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정

VOCs 유입농도	연간 운영비용*
100 ppm	499.2백만원
1,000 ppm	585.6백만원
5,000 ppm	799.2백만원
10,000 ppm	856.8백만원

* 원 환율은 2019년 12월 기준(1\$=1,189원)으로 산정
(출처) US DOE(2001), Membrane System for the Recovery of Volatile Organic compounds from Remediation Off-Gases, DOE/EM-0614

□ 장·단점 및 평가

장점	단점	평가
<ul style="list-style-type: none"> • 분리 과정에서 상변화가 없으므로 에너지 소모가 적음 • 장치 구성이 단순하고 기계 장치가 최소화되어서 유지관리가 쉬움 • 특정 물질 선택성이 탁월함 • 다양한 목적에 적용 가능한 막 제조가 가능함(원료가 다양하여 목적에 따라 다양한 막 제조 가능) • 환경에 무해한 또는 영향이 적은 원료 또는 재질을 사용하므로 환경친화적 공정 	<ul style="list-style-type: none"> • 막의 특정 화학물질에 대한 취약성(특정 화학물질과의 접촉을 피해야 하므로 공정 적용 한계) • 중합체이므로 온도에 영향을 받기 때문에 특정 화학반응 공정(온도가 높은 공정)에 적용하기 어려움(적용의 한계) • 규모 확장의 한계(일반적으로 단위 모듈을 반복적으로 연결하여 규모 확장하는 방식으로 대용량 설치의 한계) • 막 오염과 막힘 현상으로 교체 필요성(높은 운영비용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 클로로포름 등의 VOCs에 대한 선택성이 탁월하고, 석유 화학산업에서 이미 적용한 사례가 존재하여 클로로포름을 분리·회수 재사용은 기술적으로 가능함 • 막분리 시설의 설치 및 운영비가 높아 타 기술과 효율 및 경제성을 비교 평가하여 막분리시설의 적용 여부를 결정할 필요가 있음

제3장

부 록

- └ 제1절 TURI 트리클로로에틸렌 용매대체

부록 1.

TURI 트리클로로에틸렌 용매대체¹⁸⁷⁾

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
3M	HFE 71DE	HFE	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
3M	HFE 7100	HFE	Oil	Steel	Immersion/Soak
3M	HFE 7200	HFE	Oil	Steel	Immersion/Soak
3M	HFE 7100	HFE	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
3M	HFE 7200	HFE	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
AG Environmental Products	Soy Clear 1500	Ester	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Immersion/Soak
AG Environmental Products	Soy Gold 2000	Biobased	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Immersion/Soak
AGA Chemical	AK 225	HCFC	Oil	Copper	Immersion/Soak
AGA Chemical	AK 225	HCFC	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
AGA Chemical	AK 225	HCFC	Oil	Steel	Immersion/Soak
AGA Chemical	AK 225	HCFC	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
AGA Chemical	AK 225	HCFC	Coatings	Steel	Immersion/Soak
AGA Chemical	AK 225	HCFC	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak

187) 출처 : http://www.cleansolutions.org/?action=contaminant_search

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Ultrasonics
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Immersion/Soak
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Aluminum	Low Pressure Spray
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Plastic	Low Pressure Spray
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Plastic	Immersion/Soak
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Copper	Immersion/Soak
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Immersion/Soak
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Fingerprints	Brass	Ultrasonics

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Nickel	Ultrasonics
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Chrome	Ultrasonics
Alconox Inc	Detergent 8	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Low Pressure Spray
Ardrox Inc	6333	Caustic	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
AW Chesterton	278 Super Solv	Petroleum Distillate	Paints	Steel	Immersion/Soak
AW Chesterton	278 Super Solv	Petroleum Distillate	Oil	Steel	Immersion/Soak
AW Chesterton	278 Super Solv	Petroleum Distillate	Coatings	Steel	Immersion/Soak
AW Chesterton	KPC 820 N	Alkaline Aqueous	Oil	Carbon Steel	Immersion/Soak
AW Chesterton	KPC 820 N	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
AW Chesterton	KPC 820 N	Alkaline Aqueous	Oil	Aluminum	Mechanical Agitation
AW Chesterton	KPC 820 N	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Mechanical Agitation

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
AW Chesterton	KPC 820 N	Alkaline Aqueous	Oil	Carbon Steel	Mechanical Agitation
AW Chesterton	KPC 820 N	Alkaline Aqueous	Oil	Copper	Mechanical Agitation
Bio Chem Systems	Bio T 300 B	Terpene-Semi-Aqueous	Coatings	Aluminum	Mechanical Agitation
Bio Chem Systems	Solsafe 245	Petroleum Distillate	Coatings	Aluminum	Immersion/Soak
Bio Chem Systems	Solsafe 245	Petroleum Distillate	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Immersion/Soak
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Solsafe 245	Petroleum Distillate	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Immersion/Soak
Bio Chem Systems	Solsafe 245	Petroleum Distillate	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Immersion/Soak
Bio Chem Systems	Green Stuff (6325)	Alkaline Aqueous	Oil	Aluminum	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Green Stuff (6325)	Alkaline Aqueous	Oil	Carbon Steel	Ultrasonics

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Bio Chem Systems	Green Stuff (6325)	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Green Stuff (6325)	Alkaline Aqueous	Lubricating/Lapping Oils	Steel	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Green Stuff (6325)	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Fluxes	Aluminum	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Waxes	Aluminum	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Dirt	Aluminum	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Oil	Aluminum	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Fluxes	Brass	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Waxes	Brass	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Dirt	Brass	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Oil	Brass	Ultrasonics

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Fluxes	Stainless Steel	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Waxes	Stainless Steel	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Dirt	Stainless Steel	Ultrasonics
Bio Chem Systems	Bio T Max	Terpene-Semi-Aqueous	Oil	Stainless Steel	Ultrasonics
Bruhin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics
Bruhin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Coatings	Aluminum	Mechanical Agitation
Bruhin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation
Bruhin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Immersion/Soak
Bruhin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Ultrasonics
Bruhin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Immersion/Soak
Bruhin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Ultrasonics
Bruhin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Oil	Cold Rolled Steel	Ultrasonics

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Brulin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Oil	Cold Rolled Steel	Immersion/Soak
Brulin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Lubricating/Lapping Oils	Stainless Steel	Immersion/Soak
Brulin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Brulin Corporation	Formula 815 GD	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Brulin Corporation	Aquavantage 1400	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Brulin Corporation	Compliance	Caustic	Inks	Plastic	Immersion/Soak
Brulin Corporation	Compliance	Caustic	Paints	Plastic	Immersion/Soak
Buckeye International	Shopmaster LPH	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics
Buckeye International	Shopmaster HP	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics
Buckeye International	Shopmaster LPH	Alkaline Aqueous	Coatings	Aluminum	Mechanical Agitation
Buckeye International	Shopmaster HP	Alkaline Aqueous	Coatings	Aluminum	Mechanical Agitation
Buckeye International	XL 100	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Buckeye International	XL 100	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Copper	Immersion/Soak
Buckeye International	Shopmaster HP	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
Calgon Corporation	Geo Guard 2215	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Calgon Corporation	Geo Guard 2215	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Calgon Corporation	Geo Guard 2215	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Immersion/Soak
Calgon Corporation	Geo Guard 2215	Alkaline Aqueous	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Calgon Corporation	Geo Guard 2215	Alkaline Aqueous	Waxes	Brass	Immersion/Soak
Calgon Corporation	Geo Guard 2215	Alkaline Aqueous	Dirt	Brass	Immersion/Soak
Calgon Corporation	Geo Guard 2215	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
Calgon Corporation	Geo Guard 2215	Alkaline Aqueous	Oil	Carbon Steel	Immersion/Soak
Calgon Corporation	Geo Guard 2215	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Chrisal USA Inc	Super CMF 240	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Chrisal USA Inc	Super CMF 240	Alkaline Aqueous	Inks	Plastic	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Chrisal USA Inc	Super CMF 240	Alkaline Aqueous	Paints	Plastic	Immersion/Soak
Dow Chemical Company	OS 10	Volatile Methyl Siloxanes	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Dow Chemical Company	OS 20	Volatile Methyl Siloxanes	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Dow Chemical Company	OS 30	Volatile Methyl Siloxanes	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
DuPont	Vertrel XP 10	HFE	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
DuPont	Vertrel MCA	HFE	Oil	Copper	Immersion/Soak
DuPont	Vertrel MCA	HFE	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
DuPont	Vertrel MCA	HFE	Oil	Steel	Immersion/Soak
DuPont	Vertrel CCA	HFE	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
DuPont	Vertrel CCA	HFE	Buffing/Polishing compound	Aluminum	Immersion/Soak
DuPont	Vertrel MCA	HFE	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
DuPont	Vertrel CCA	HFE	Oil	Steel	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
DuPont	Vertrel CCA	HFE	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Dysol	DS 104	Petroleum Distillate	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Ultrasonics
Dysol	DS 104	Petroleum Distillate	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Immersion/Soak
Dysol	DS 108	Petroleum Distillate	Paints	Steel	Immersion/Soak
Dysol	DS 108	Petroleum Distillate	Oil	Steel	Immersion/Soak
Dysol	DS 108	Petroleum Distillate	Coatings	Steel	Immersion/Soak
Ecolink	Vortex	Semi-Aqueous	Oil	Carbon Steel	Immersion/Soak
Ecolink	Vortex	Semi-Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Enviro Tech International Inc	Ensolv	nPB	Oil	Copper	Immersion/Soak
Enviro Tech International Inc	Ensolv	nPB	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Enviro Tech International Inc	Ensolv	nPB	Oil	Steel	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Enviro Tech International Inc	Ensolv	nPB	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Enviro Tech International Inc	Ensolv	nPB	Buffing/Polishing compound	Aluminum	Immersion/Soak
Enviro Tech International Inc	Ensolv A	nPB	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Enviro Tech International Inc	Ensolv A	nPB	Paints	Steel	Vapor Degreasing
Enviro Tech International Inc	Ensolv A	nPB	Oil	Steel	Vapor Degreasing
Enviro Tech International Inc	Ensolv	nPB	Paints	Steel	Immersion/Soak
Enviro Tech International Inc	Ensolv A	nPB	Paints	Steel	Immersion/Soak
Enviro Tech International Inc	Ensolv A	nPB	Oil	Steel	Immersion/Soak
Enviro Tech International Inc	Ensolv	nPB	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Enviro Tech International Inc	Ensolv A	nPB	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Fine Organic Corporation	FO 2085 M	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Ultrasonics
Fine Organic Corporation	FO 2085 M	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Gemtek Products	SC Aircraft & Metal Cleaner	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics
Gemtek Products	SC Aircraft & Metal Cleaner	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation
Gemtek Products	SC Aircraft & Metal Cleaner	Alkaline Aqueous	Coatings	Aluminum	Mechanical Agitation
Gemtek Products	SC Supersolve	Biobased	Coatings	Aluminum	Immersion/Soak
Gemtek Products	SC Supersolve	Biobased	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Immersion/Soak
Gemtek Products	SC Aircraft & Metal Cleaner	Alkaline Aqueous	Paints	Steel	Immersion/Soak
Gemtek Products	SC Aircraft & Metal Cleaner	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Ultrasonics
Gemtek Products	SC Aircraft & Metal Cleaner	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Immersion/Soak
Gemtek Products	SC Aircraft & Metal Cleaner	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Gemtek Products	SC Aircraft & Metal Cleaner	Alkaline Aqueous	Coatings	Steel	Immersion/Soak
Gemtek Products	SC Aircraft & Metal Cleaner	Alkaline Aqueous	Lubricating/Lapping Oils	Steel	Mechanical Agitation
Gemtek Products	SC Aircraft & Metal Cleaner	Alkaline Aqueous	Lubricating/Lapping Oils	Stainless Steel	Immersion/Soak
Hubbard Hall Inc	Ultrasoak 127	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
Hubbard Hall Inc	Ultrasoak 127	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
International Products Corporation	Micro 90	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
International Products Corporation	Surface Cleanse 930	Neutral Aqueous	Oil	Steel	Immersion/Soak
International Products Corporation	Surface Cleanse 930	Neutral Aqueous	Oil	Brass	Ultrasonics
International Products Corporation	Surface Cleanse 930	Neutral Aqueous	Oil	Brass	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
International Products Corporation	Micro 90	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
International Products Corporation	Surface Cleanse 930	Neutral Aqueous	Oil	Cold Rolled Steel	Immersion/Soak
International Products Corporation	Surface Cleanse 930	Neutral Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Stainless Steel	Immersion/Soak
International Products Corporation	Surface Cleanse 930	Neutral Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
International Products Corporation	Surface Cleanse 930	Neutral Aqueous	Lubricating/Lapping Oils	Stainless Steel	Immersion/Soak
Kyzen Corporation	Metalnox M6310	Alkaline Aqueous	Coatings	Aluminum	Immersion/Soak
Kyzen Corporation	Ionox HC 2	Alcohol	Coatings	Aluminum	Immersion/Soak
Kyzen Corporation	Metalnox M6310	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Manual Wipe
Kyzen Corporation	Metalnox M6960	nPB	Greases	Stainless Steel	Immersion/Soak
Kyzen Corporation	Metalnox M6960	nPB	Greases	Steel	Immersion/Soak
Kyzen Corporation	Metalnox M6960	nPB	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Kyzen Corporation	Metalnox M6960	nPB	Oil	Steel	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Kyzen Corporation	Optisolv OP7168	Alcohol-Semi Aqueous	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Ultrasonics
Kyzen Corporation	Optisolv OP7168	Alcohol-Semi Aqueous	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Immersion/Soak
Kyzen Corporation	Metalnox M6960	nPB	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Kyzen Corporation	Metalnox M6960	nPB	Paints	Steel	Vapor Degreasing
Kyzen Corporation	Metalnox M6960	nPB	Oil	Steel	Vapor Degreasing
Kyzen Corporation	Metalnox M6960	nPB	Paints	Steel	Immersion/Soak
Kyzen Corporation	Metalnox M6960	nPB	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Lifetime Solutins Ltd	Commercial All Purpose	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Immersion/Soak
MacDermid Industrial Products	ND 17	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Mechanical Agitation
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Immersion/Soak
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Immersion/Soak
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Oil	Copper	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Oil	Copper	Immersion/Soak
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Copper	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Copper	Immersion/Soak
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Oil	Cold Rolled Steel	Immersion/Soak
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Oil	Aluminum	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Oil	Carbon Steel	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Lubricating/Lapping Oils	Steel	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 283	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 282 GF	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Magnaflux	Daraclean 282	Alkaline Aqueous	Inks	Alumina	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 282	Alkaline Aqueous	Paints	Alumina	Ultrasonics

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Magnaflux	Daraclean 282	Alkaline Aqueous	Inks	Alumina	Immersion/Soak
Magnaflux	Daraclean 282	Alkaline Aqueous	Paints	Alumina	Immersion/Soak
Magnaflux	Daraclean 282 GF	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Ultrasonics
Magnaflux	Daraguard 416	Organic	Oil	Stainless Steel	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 282 GF	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Magnaflux	Daraclean 232	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Ultrasonics
Magnaflux	Daraclean 232	Alkaline Aqueous	Oil	Tin	Ultrasonics
Man Gill Chemical Company	Gillite 0650 CI	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Matchless Metal Polish Company	MC 580	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Ultrasonics
Matchless Metal Polish Company	MC 580	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Immersion/Soak
Matchless Metal Polish Company	MC 132	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Matchless Metal Polish Company	MC 132	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Nickel	Ultrasonics
Matchless Metal Polish Company	MC 132	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Chrome	Ultrasonics

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Matchless Metal Polish Company	MC 132	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
Matchless Metal Polish Company	MC 580	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
Metabolix Inc	Metabolix E3HB	Ester	Paints	Steel	Immersion/Soak
Metabolix Inc	Metabolix E3HB	Ester	Oil	Steel	Immersion/Soak
Metabolix Inc	Metabolix E3HB	Ester	Coatings	Steel	Immersion/Soak
Micro Care	Heavy Duty Degreaser C	HFE	Buffing/Polishing compound	Brass	Vapor Degreasing
Micro Care	Heavy Duty Degreaser C	HFE	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Micro Care	Flux Remover C	HFE	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Micro Care	Flux Remover C	HFE	Oil	Steel	Immersion/Soak
Micro Care	Heavy Duty Degreaser C	HFE	Oil	Steel	Immersion/Soak
Mirachem Corporation	Mirachem 500	Alkaline Aqueous	Oil	Cold Rolled Steel	Immersion/Soak
Mirachem Corporation	Mirachem 500	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Stainless Steel	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Mirachem Corporation	Mirachem 500	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Newport Biodiesel	Biodiesel	Biobased	Coatings	Aluminum	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Steel	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Aluminum	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Coatings	Aluminum	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Cold Rolled Steel	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Cold Rolled Steel	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Stainless Steel	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Lubricating/Lapping Oils	Stainless Steel	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Coatings	Steel	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Aluminum	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Carbon Steel	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Lubricating/Lapping Oils	Steel	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Waxes	Brass	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Dirt	Brass	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 4000 T	Terpene-Organic	Oil	Carbon Steel	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 4000 T	Terpene-Organic	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Oakite Products	Inproclean 4000 T	Terpene-Organic	Paints	Alloys	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Inks	Plastic	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Paints	Plastic	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Inks	Alumina	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Paints	Alumina	Ultrasonics
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Inks	Alumina	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Paints	Alumina	Immersion/Soak
Oakite Products	Inproclean 2000	Alkaline Aqueous	Waxes	Aluminum	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 2000	Alkaline Aqueous	Oil	Aluminum	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 2000	Alkaline Aqueous	Waxes	Brass	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 2000	Alkaline Aqueous	Waxes	Carbon Steel	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 2000	Alkaline Aqueous	Waxes	Copper	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Aluminum	Mechanical Agitation

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Copper	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Waxes	Aluminum	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Waxes	Brass	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Waxes	Copper	Mechanical Agitation
Oakite Products	Inproclean 3800	Alkaline Aqueous	Waxes	Steel	Mechanical Agitation
Petroferm Inc	Lenium ES	nPB	Buffing/Polishing compound	Brass	Vapor Degreasing
Petroferm Inc	Lenium ES	nPB	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Petroferm Inc	Lenium ES	nPB	Buffing/Polishing compound	Aluminum	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Petroferm Inc	Lenium GS	nPB	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Poly Systems USA Inc	Solvon IP	nPB	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Poly Systems USA Inc	Solvon PB	nPB	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Poly Systems USA Inc	Solvon PB	nPB	Paints	Steel	Vapor Degreasing
Poly Systems USA Inc	Solvon PB	nPB	Oil	Steel	Vapor Degreasing
Poly Systems USA Inc	Solvon PB	nPB	Paints	Steel	Immersion/Soak
Poly Systems USA Inc	Solvon IP	nPB	Paints	Steel	Immersion/Soak
Poly Systems USA Inc	Solvon PB	nPB	Oil	Steel	Immersion/Soak
Poly Systems USA Inc	Solvon IP	nPB	Oil	Steel	Immersion/Soak
Poly Systems USA Inc	Solvon PB	nPB	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Poly Systems USA Inc	Solvon IP	nPB	Oil	Sterling/Silver	Immersion/Soak
Solvent Kleene Inc	D Greeze 500 LO	Organic	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Ultrasonics

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Solvent Kleene Inc	D Greeze 500 LO	Organic	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Immersion/Soak
Solvent Kleene Inc	D Greeze 1000	Petroleum Distillate	Paints	Steel	Immersion/Soak
Solvent Kleene Inc	D Greeze 1000	Petroleum Distillate	Coatings	Steel	Immersion/Soak
Solvent Kleene Inc	D Greeze 1000	Petroleum Distillate	Oil	Steel	Immersion/Soak
Solvent Kleene Inc	D Greeze 500 LO	Organic	Oil	Carbon Steel	Immersion/Soak
Solvent Kleene Inc	D Greeze 500 LO	Organic	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Texo Corporation	Texolite 1734 XL	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
Texo Corporation	Texolite 1734 XL	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
Twin Rivers Technologies	Methyl Ester 1618	Ester	Oil	Carbon Steel	Immersion/Soak
Twin Rivers Technologies	Methyl Ester 1618	Ester	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Ultrasonics

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 C	Caustic	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Ultrasonics
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Stainless Steel	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Carbon Steel	Ultrasonics
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Aluminum	Low Pressure Spray
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Plastic	Low Pressure Spray
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Plastic	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Copper	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Sterling/Silver	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Oil	Steel	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Ultrasonics
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Oil	Brass	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Fingerprints	Brass	Ultrasonics
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Nickel	Ultrasonics
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Chrome	Ultrasonics
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Oil	Copper	Ultrasonics
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Oil	Copper	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 XS	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Copper	Ultrasonics
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 P	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Immersion/Soak

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 P	Alkaline Aqueous	Buffing/Polishing compound	Brass	Ultrasonics
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 P	Alkaline Aqueous	Oil	Carbon Steel	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polyspray Jet 790 P	Alkaline Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polychem DEOX 007	Alkaline Aqueous	Inks	Alumina	Immersion/Soak
US Polychem Corporation	Polychem DEOX 007	Alkaline Aqueous	Paints	Alumina	Immersion/Soak
Warren Chemical Company	Sea Wash Blue	Neutral Aqueous	Oil	Steel	Ultrasonics
Warren Chemical Company	Sea Wash Blue	Neutral Aqueous	Oil	Steel	Immersion/Soak
Warren Chemical Company	Sea Wash Blue	Neutral Aqueous	Oil	Brass	Ultrasonics
Warren Chemical Company	Sea Wash Blue	Neutral Aqueous	Oil	Brass	Immersion/Soak
Warren Chemical Company	Sea Wash Blue	Neutral Aqueous	Oil	Stainless Steel	Ultrasonics

회사명	제품명	분류	오염물질	기질	설비
Warren Chemical Company	Sea Wash Blue	Neutral Aqueous	Oil	Cold Rolled Steel	Ultrasonics
Warren Chemical Company	Sea Wash Blue	Neutral Aqueous	Oil	Cold Rolled Steel	Immersion/Soak
Warren Chemical Company	Sea Wash Blue	Neutral Aqueous	Cutting/Tapping Fluids	Stainless Steel	Immersion/Soak
Warren Chemical Company	Sea Wash Blue	Neutral Aqueous	Oil	Stainless Steel	Immersion/Soak
Warren Chemical Company	Sea Wash Blue	Neutral Aqueous	Lubricating/Lapping Oils	Stainless Steel	Immersion/Soak
Warren Chemical Company	Sea Wash 8 New	Neutral Aqueous	Lubricating/Lapping Oils	Stainless Steel	Immersion/Soak
Water	Steam	Neutral Aqueous	Waxes	Aluminum	Vapor Degreasing

제4장

참고문헌

- ↳ 제1절 국내 참고문헌
- ↳ 제2절 국외 참고문헌
- ↳ 제3절 웹사이트

- 국립환경과학원(2008), 배출저감기술 안내서
- 국립환경과학원(2008), 배출저감기술안내서
- 안산녹색환경지원센터(2011), 응축 기술을 이용한 VOCs 제거 및 회수 설비에 관한 연구
- 안전보건공단(2015), 폐수처리설비(스크러버) 화재·폭발 예방대책 매뉴얼
- 양고수, 열처리 기술을 이용한 VOCs/악취 처리기술 및 관리현황
- 이우근(2006), VOCs 배출현황 및 저감방안, 대한환경공학회지
- 하동명(2009), 최고폭발한계(Upper Explosive Limit)로서 벤젠의 위험성 평가를 위한 연소 특성치 고찰, 한국안전학회지, 24(5), 28-33
- 한국물가정보
- 한국화학물질관리협회(2016), 화학물질 배출저감 기술·사례집
- 한국환경정책평가연구원(1997), VOCs 방지기술 현황 및 적용사례
- 화학물질 배출저감계획서의 작성 등에 관한 규정(제2019-247호)
- 화학물질안전원(2016), 2016년 화학물질 배출량 조사 현황(PRTR)
- 화학물질안전원(2019), 2019 화학물질 배출량 조사지침
- 환경보전협회, 환경정보 no.370 대기오염 방지시설 선정 및 유지관리 기술
(<http://www.ndsl.kr/ndsl/search/list/article/articleSearchResultList.do?page=2&query=%eb%b0%a9%ec%a7%80%ec%8b%9c%ec%84%a4&prefixQuery=&collectionQuery=&showQuery=%eb%b0%a9%ec%a7%80%ec%8b%9c%ec%84%a4&resultCount=10&sortName=RANK&sortOrder=DESC&colType=scholar&colTypeByUser=&filterValue=>), Bulletin of Korea environmental preservation association v.29 no.370 = no.370 ,pp. 56 - 60 , 2007
- 환경부(2000), 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 2000
- 환경부(2011), 초저온 냉각기술 이용 휘발성유기화합물 회수기술 개발
- 환경부(2016), 유해대기오염물질 비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침
- 환경부, 「화학물질관리법」(시행규칙 제 5조의2 1항)
- 환경부고시, 휘발성유기화합물 지정 고시

- BORSIG Membrane Technology GmbH, BOMEMBRANE TECHNOLOGY FOR PROCESSES AND ENVIRONMENT
- Carbovac, Vapour Recovery Units compose
- EPA (1999), Choosing an Adsorption System for VOCs: Carbon, Zeolite, or Polymers?, Technical Bulletin
- EPA (2002), Air Pollution Control Technology Fact Sheet
- EPA (2017), Air Pollution Control Technology Fact Sheet
- EPA, Section 3: VOC Controls
- ipieca(2013), VOC recovery Systems
- ITM-CNR, Membrane per la separazione di CO₂ erettori a membrana per il suo uso (<https://www.enea.it/it/seguici/events/co2/IULIANELLI.pdf>)
- Jan Carlson(2016), Air Pollution Control Technology Review : Condensationhttps
- Joseph S, Devinny, Marc A. Deshusses, Todd S. Webster, Biofiltration for Air pollution control
- JX(2013), Technologies for Volatile Organic compounds
- Khan, F. I. (2000), Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air
- Khan, N. A. (2013), Adsorptive Removal of Hazardous Materials using Metal-organic Frameworks (MOFs)
- logo alma Carbovac, Vapour Recovery Units
- Peng et al. (2007) Novel Poly(vinyl alcohol)/Carbon Nanoture Hybrid Membranes for Pervaporation Separation of Benzene/Cyclohexane Mixtures, J. of Membrane Sci.
- US DOE (2001), Membrane System for the Recovery of Volatile Organic Compounds from Remediation Off-Gases
- Villaluenga, J.P. and Tabe-Mohammadi, A. (2000), A Review on Separation of Benzene/Cyclohexane Mixtures by Pervaporation Process, J. of Membrane Sci.

- 통계청, 한국표준산업분류(<http://kostat.go.kr>)
- 화학물질정보처리시스템(<https://kreachportal.me.go.kr/potweb/main.do>)
- emis (<https://emis.vito.be/en/techniekfiche/venturi-scrubber>)
- Heatizon Systems
(<https://www.heatizon.com/products/heatizon-brands/guttermelt>)
- <http://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/units-and-plants-practices/VOCs-recovery-systems/#reference-10>
- IFRT(<http://www.fullmost.com.tw/de/Internal-Floating-Roof-IFR/>)
- indiamart(<https://www.indiamart.com/proddetail/cathodic-protection-system-for-tanks-20242520612.html>)
- SEST주식회사 (http://www.sestco.com/kor/vru_01.php)
- TURI, 트리클로로에틸렌 용매대체,
(http://www.cleansolutions.org/?action=contaminant_search)