

VOCs 방지기술현황 및 적용사례(5)



한화진 / 한국환경정책·평가연구원 연구위원

목 차

I. 서론

II. VOCs 방지기술 현황

1. VOCs 방지기술의 개요
2. 연소기술
3. 흡착·농축 기술
4. 흡수·응축 기술
5. 생물학적 처리 기술
6. 기타 최신기술

III. VOCs 방지기술의 적용사례

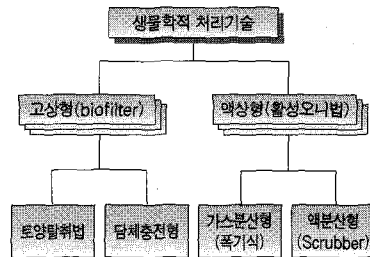
1. FTO를 이용한 황합유 VOCs 처리사례
2. 비열 플라즈마 기술을 이용한 VOCs 와 NOx 처리사례
3. 2단 재생 열산화 기술을 이용한 VOCs 배출처리 사례
4. 탄소 및 지올라이트 흡착제를 이용한 산업공정 배기가스로부터의 VOCs 제거사례
5. 미국의 합성유기화합물 제조공장 적용사례

IV. 결론



5. 생물학적 처리기술(Biological Technology)

생물학적 처리는 미생물을 이용하여 배출가스중에 함유되어 있는 각종 성분을 제거하는 기술로 구미에서는 VOCs 처리나 악취제거, 그리고 유해 염소계 화합물의 처리장치로 사용되어 화학공장, 식품공장, 인쇄공장, 사진 film 공장, 향료공장, 목재 가공공장, 하수처리장 등 폭넓은 분야에 적용되고 있다. 생물학적 처리기술을 다른 처리기술과 비교해 보면 ① 작동비용(running cost)이 매우 저렴하며 ② 운전관리가 간단하고 ③ 2차 오염의 염려가 없다는 특징이 있다. 반면 넓은 부지를 필요로 하는 등 불리한 점도 있으나 지속적인 미생물 제어기술의 개발로 처리할 수 있는 물질의 종류도 더 많아지고 처리능력도 증대될 것으로 전망된다. 생물학적 처리방법은 다음과 같이 분류된다. 본 절에서는 생물학적 처리기술 중 생물학적 여과법을 중심으로 설명하였다.



생물학적 처리 방법 분류

생물학적 처리기술을 다른 처리기술과 비교해 보면 작동비용(running cost)이 매우 저렴하며 운전관리가 간단하고 2차 오염의 염려가 없다는 특징이 있다. 반면 넓은 부지를 필요로 하는 등 불리한 점도 있으나 지속적인 미생물 제거기술의 개발로 처리할 수 있는 물질의 종류도 더 많아지고 처리능력도 증대될 것으로 전망된다.

5.1. 생물학적 여과법(Biofiltration)

5.1.1. 생물학적 여과법의 개요

생물학적 여과법은 오염기체내의 VOCs를 제거하기 위해 최근들어 많이 적용되는 생물학적 처리법의 일종으로 과거에는 주로 악취제거에 사용되었다. 이 공정은 구멍난 파이프위에 채워진 퇴비(compost)나 흙 등의 여과재 층(bed)을 이용하여 오염기체가 파이프의 구멍과 충전물을 통과하여 위로 흘러가도록 되어 있다. 미생물의 왕성한 활동으로 VOCs는 산화되어 CO₂와 H₂O로 변환된다. 충전물들이 일시에 많은 양의 VOCs를 흡착할 수 없을 경우 충전물 층에 살고 있는 효소가 이를 산화시키며 연속적으로 산화와 VOCs 제거가 이루어지게 한다.

대기오염물질 처리를 위해 생물여과장치에 사용되는 미생물에는 박테리아, 곰팡이, actinomycete 등이 있다. 퇴비화 여과재는 토양보다도 풍부한 미생물을 함유할 수 있는데 여과재에서 미생물의 성장과 신진대사 활성에 영향을 미치는 인자는 생물막 내의 용존산소(DO), 미생물에 독성을 주는 성분의 존재 유·無, 충분한 수분, 온도 및 pH 등이다.

대기오염 배출원의 가동이 24시간 동안 연속적으로 이루어지지 않아 미여과재의 미생물활동에 영향이 있을

것이라 생각되었으나, 일부 연구보고에 따르면 약 2주 동안은 미생물 활동에 영향을 주지 않고 최대 2개월동안은 미생물이 생존하는 것으로 밝혀졌다. 또한 산소부족을 피하기 위해 특히, 공장의 가동중단 시기동안에는 주기적인 폭기(aeration)가 필요하다.

생물여과 장치에서 가장 중요한 문제는 VOCs, 악취, HAPs 등을 생물학적으로 산화시키는 특정 미생물을 유지하기 위한 유기물질의 공급으로 담체는 미생물이 유기물과 VOCs를 에너지원으로 사용할 수 있도록 환경을 제공하여야 한다. 생물여과 공정에서 생물학적 산화를 최적화하려면 미생물에게 최적 환경을 제공해야 하며 이를 위해 습도, 온도 및 pH를 조절하여야 한다. 따라서 생물여과는 물에 대한 용해도가 높고 분자량이 작은 화합물의 제거에 매우 적합하

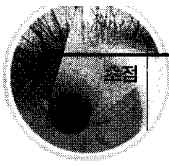
다. 용해도와 생물여과막의 효과적인 제거사이의 상관관계는 휘발성 화합물이 증기상에서 생물학적 산화과정이 일어나는 물속으로 이동하기 때문에 용해도가 높은 화합물은 증기상에서 액체상으로의 질량전달속도가 높다. 생물여과를 통해 효과적인 제거가 가능한 화합물로는 알칸, 알콜, 알데히드, 케톤, 석유 증류제품과 비할로겐 방향족을 들 수 있다.

저농도의 VOCs 공급시 생물여과법을 수행한 결과를 <표 II-14>에 나타내었다. 유속은 5scfm, VOCs 농도는 150~250ppm, 온도는 26.7~29.4℃로 유지한 경우 생물여과 공정은 정상상태 조건하에서 80% 이상의 제거효율을 나타내었다. 층의 온도가 낮아지면 VOCs의 제거효율 역시 감소하고 기술된 유도화합물은 낮은 증기압에서 제거효율이 가장 높다.

<표 II-14> 생물학적 여과법에 의한 석유화학제품의 제거효율*

화합물	유입농도(ppb ^a)	배출농도(ppb ^b)	제거효율(%)
벤젠	ND	90	-
톨루엔	4,700	330	93
m, p-크실렌	34,000	890	97
o-크실렌	17,000	750	96
1,3,5-트리메틸벤젠	5,800	550	91
1,2,4-트리메틸벤젠	11,000	150	99
이소펜탄	ND	10	-
n-펜탄	ND	9.7	-
사이클로펜탄	ND	ND	-
n-헥산	ND	50	-
메틸사이클로펜탄	160	150	7
2,2,4-트리메틸펜탄	410	290	29
n-헵탄	380	180	53
메틸사이클로헥산	710	430	39
n-옥테인	190	ND	97
n-옥탄	2,400	580	76

주) *EPA Method TO-14 ^a 유입농도 규제치 100 ppb, ^b 배출농도 규제치 6 ppb
자료 : Zurlinden, 1994



생물학적 여과법의 장·단점은 다음과 같다.

장 점

생물학적 여과공정은 합성물질이 아닌 천연물질을 충전물(filter material)로 사용하므로 자본비와 운영비가 비교적 합리적인데 공정의 자본비는 biofilter의 크기에 비례한다. VOCs 처리시 화학약품이나 열을 이용하지 않고 미생물을 이용하여 산화시키므로 자본비와 운영비를 최소화할 수 있다. 또한 blower 작동을 위한 전기사용이나 충전물의 교환에만 운영비가 소요되므로 다른 공정에 비해 저렴하고 저농도의 배출가스에 유리하며 장기간 운영시 비용절감 효과를 얻을 수 있다.

단 점

생물학적 여과의 효율은 층내의 공기 체류시간에 크게 의존하므로 생물학적으로 난분해성인 TCE(TriChloroEthylene), TCS(TriChloroeth Ane) 등과 같은 할로젠 화합물에 대해서는 비효과적이다. 이는 생분해성이 낮으면 유입되는 공기유속이 낮고 따라서 보다 큰 층 부피가 요구되기 때문이다. 충분한 제어효율을 얻기 위해서는 큰면적의 여과 층을 필요로 하며 이 경우 자본비의 대폭적인 상승이 우려되며 이의 대안으로 고려되

는 다층 역시 자본비와 운영비를 상승시킨다. 특히 생물학적 여과 공정은 용매를 회수하거나 재이용할 수 없다. 또한 효과적인 VOCs 제거를 위해 층내의 수분량과 같은 미생물 활동과 성장을 위한 각종 환경조건이 적절히 유지되어야 하는데 층이 건조할 경우 미생물의 활동이 저하되며 따라서 처리되지 않은 VOCs가 그대로 배출되어 결과적으로 제거효율이 저하된다. 경우에 따라서는 일시적인 작동정지가 일어날 수도 있다. 이러한 문제들은 오염기체를 파이프로 흘려보내기 전에 가습장치를 설치함으로써 해결될 수 있으나 운영비 증가의 요인이 된다. 아울러 우리나라의 경우 계절적 변화에 따른 유지관리에 어려움이 따른다.

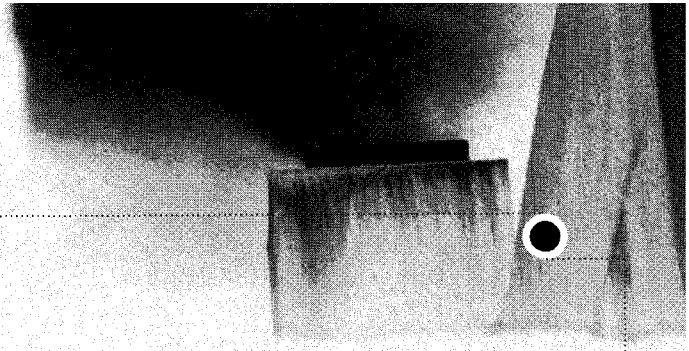
5.1.2. 생물학적 여과법의 적용 연구

생물학적 여과법은 고용량·저농도 처리에 적절하다고 알려져 있으며 제약(pharmaceutical) 공정의 건조, 처리(procession), 그리고 저장으로부터 발생하는 유해 대기오염물질의 처리에 효과적이다. Kesser와 Luch는 table coating 조작에서 발생하는 VOCs를 처리하기 위해 생물학적 여과공정의 적용을 검토하였다. 아세톤이나 isopropanol에 잘 용해되는 coating은 tablet위에 뿌려지고 건

조 과정에서 휘발하여 배출 시스템을 통해 빠져나간다. 이 배출가스중의 VOCs농도는 2,050 mg/m³으로 2단의 생물학적 여과공정으로 처리를 하였는데 1단을 거친 후의 VOCs 농도는 24 mg/m³으로 약 98.8%의 제거효율을 얻을 수 있었고 최종 단을 거친 후의 농도는 1mg/m³으로 약 99.95%의 제거효율을 얻을 수 있었다.

Leson, Tabatabai, Winer 등은 생물학적 여과법을 다른 분야에 적용하기 위해 연구하였다. 1991년도에는 대규모 생물여과를 이용하여 미국의 acrylic glass 제조공장에서 발생하는 메틸메르캅탄을 제거하였는데 초기 실험에서 90% 이상의 제거효율을 얻을 수 있었다. 유해 대기오염물질을 배출하는 설비에 대한 또 다른 시험에 따르면 pelletized 중합체의 생산에서 발생하는 VOCs의 경우 90~99%의 제거효율을 얻을 수 있었다.

기타 제어방법들과 같이 생물학적 여과법 역시 많은 문제점을 내포하고 있는데 배출가스의 성분파악이 불완전할 경우 여과상의 크기가 부적절하게 결정될 수 있고 독성가스의 존재시 미생물이 무기력해지며 분진의 존재시 오니를 형성하여 막힘현상을 야기할 수 있다. 불충분한 수분공급 역시 치명적이며 온도, pH 조절도 유의해야 한다. 이러한 난제에도 불구하고



고 미생물의 분해속도 증가, 미생물 환경조건의 개선, 여과 층의 규모 축소, 여과재의 수명 연장, 에너지 및 유지보수 비용의 절감, 유지보수의 단순성 측면에서 연구가 계속 진행되고 있다. 운영상 최적온도는 대략 37.8℃인 것으로 알려져 있으나 보다 넓은 온도범위에서 사용할 수 있다. VOCs의 산화반응은 많은 열을 방출하지 않기 때문에 층의 온도는 보통 유입되는 가스의 온도로 결정된다.

VOCs 유입에 적응하기 위해 미생물층이 갖는 적응시간(adaption time)은 VOCs의 생분해도(biodegradability)에 의존하며 경우에 따라 소요시간이 몇시간 정도로 짧을 수 있다. 생물학적 여과장치의 제거효율(RE)은 다음 식으로 정의될 수 있다.

$$RE = (1 - C_2/C_1) = 1 - \exp(-k \cdot t)$$

여기서 k : 실험상수,

t : 층내 공기의 체류시간,

C₁ : 초기 VOCs 농도,

C₂ : 최종 VOCs 농도

실험상수 k는 유기물의 생분해성에 따라 변하므로 요구하는 제거효율을 얻기 위한 중요한 설계변수(design parameter)는 층내의 체류시간이다.

〈표 II-15〉는 대표적인 VOCs의 생분해 정도를 상대적으로 비교하여

나타낸 것이며 〈그림 II-11〉은 전형적인 생물학적 여과공정을 나타낸 것이다.

〈표 II-15〉 VOCs의 생분해도

VOC	생분해도
트리클로로에틸렌	매우 느림
크리올로에탄	매우 느림
메탄올	빠름
아세트알데하드	빠름
크실렌	느림
벤젠	느림
스틸렌	느림
에틸에틸케톤	빠름
시염화탄소	매우 느림
펜타클로로메놀	매우 느림
톨루엔	느림

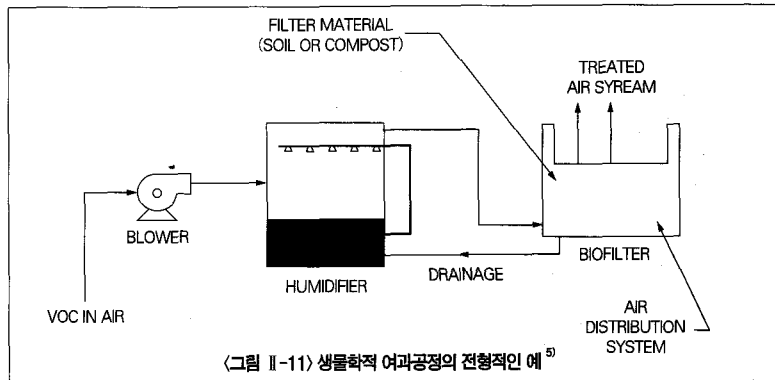
자료 : AWMA, Emerging Solutions to VOCs & Air Toxics Control, Air 7 Waste Management Association, 1996.2.

국 및 유럽 등에서는 VOCs 처리에, 일본에서는 환원성 황화합물 등과 같은 악취물질의 처리에 사용되는데 구조 및 운전조건면에서 조금 다르다. 다음에는 환원성 황화합물을 주로 하는 악취 처리용 및 VOCs 처리용 담체 충전형과 scrubber 식의 실제 적용 예를 제시하였다.

(1) 담체 충전형

① 환원성 황화합물을 주로하는 악취 처리용

주로 일본에서 사용되는 방식으로 황화수소(H₂S), 메틸메르캡탄

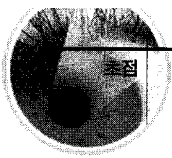


5.1.3. 적용 사례

미국 및 유럽과 일본에서 많이 사용되는 2가지 방식은 생물학적 여과법중의 하나인 담체충전형과 액상형인 scrubber식이다. 담체충전형은 미

(methyl mercaptan), 황화이메틸(dimethyl sulfide) 등의 악취원인물질을 함유한 시료, 하수처리장 관련 시설의 악취처리에 이용된다.

담체에 황산화세균을 담지시켜 배가스중의 환원성 황화합물을 산화·



분해함으로써 악취를 제거하며 담체에는 환원성 황화합물의 산화 생성물인 황이 서서히 증가되어 pH가 저하된다. pH가 저하된 상태에서도 H₂S를 제거하는 미생물은 활동을 할 수 있으나 메틸메르캅탄, 황화이메틸 등을 분해하는 미생물은 활성이 떨어지게 되므로 전반적인 탈취성능이 저하된다. 따라서 처리대상 성분이 환원성 황화합물과 같은 악취물질인 경우 안정된 처리성능을 위해 담체의 pH 저하를 방지하여야 하며 이를 위해 적절한 물 세척이 중요하다.

충전재의 특성으로 보수력, 미생물 담지력, 낮은 압력손실 등이 요구되며 세라믹 등의 무기재료나 스폰지 등 고분자 재료를 기본으로 한 것이 사용되고 있다.

미생물은 비슷한 장치의 세정액이나 하수처리장의 활성오니액을 순환하여 충전재에 부착시킨 다음 처리대상 가스를 1주일 정도 흘려 보내며 숙성시키지만 메틸메르캅탄, 황화이메틸이 많은 경우나 농도변화가 큰 경우에는 1개월 정도의 숙성 기간이 요구되기도 한다.

미생물 균체는 서로 응집성이 적어 물 세척시 새로 증식된 미생물이 씻겨져 나가지만 필요한 양의 미생물이 담체에 담지되어 있으므로 미생물의 보충이나 미생물 증가에 따른 충전재의 교환 등이 불필요하다.

일반적으로 가스유속을 0.2~0.3m/ses, 충전높이를 1~4m 정도까지 높임으로서 수백ppm 농도의 환원성 황화합물도 효과적으로 처리할 수 있으나 VOCs 등과 같은 유기화합물이 혼합되어 있는 경우 유기성분을 분해하는 미생물은 활발한 반면 황산화세균의 움직임이 상대적으로 약해져 처리불량이 된다. 아울러 유기합성을 분해하는 미생물의 응집성으로 인해 충전재의 막힘을 일으키는 등 문제를 발생시킬 수 있기 때문에 유기물 전처리나 충전재의 세정이 요구된다.

② VOCs 처리용

미국 및 유럽에서 VOCs 처리에 사용하는 방법으로 알콜류, 유기산은 물론 아세톤, MEK 등의 케톤류나 에스테르류, 톨루엔, 크실렌, 스타이렌 등의 방향족 화합물과 미량의 벤젠, 사이크로에탄 등의 유기성분을 처리, 분해하는 미생물이 이용된다. 일본에서 많이 활용되는 환원성 황화합물을 대상으로 하는 경우와는 달리 충전재를 자주 세정하고 축적물을 씻어내리는 조작은 미생물에 필요 이상의 수분을 공급하게 되어 충전재의 막힘을 야기하는 다른 미생물이 생성되는 등 피해가 일어나기 때문에 충전층을 세정하지는 않는다. 다만 필요에 따라 전처리로서 배기가스의 습도를 조절

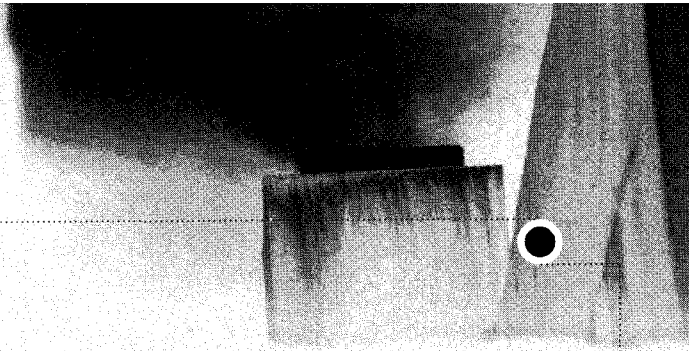
하기 위해 물을 뿌려 필요한 수분을 공급한다.

충전재로서 퇴비, 구상발포 스티로폴 등의 혼합물이 사용되며 충전높이를 한층에 1m 이상으로 할 경우 충전재 자체의 무게에 의해 압축되어 압력손실이 증가하거나 편류가 발생하여 처리성능이 저하되기 때문에 한층을 1m 정도로 하여 최대 3층 정도가 적당하다. 충전재의 단위부피당 유기물 부하량을 50g/m³·hr 정도 이하로 억제하여 처리대상 유기물 농도를 최대 5g/m³, 가능하면 1~3g/m³ 이하로 하고 분해생성물로 황산이나 염산 등을 생성하는 황화합물이나 유기염소화합물은 가능한 주입시키지 않는 것이 좋으며 이 경우 농도, 비율에 따라 다르나 몇 년에 한번 충전재 교환이 필요하다.

대상가스의 유속은 성분, 농도나 처리목표치에 의해 결정되나 일본방식의 표준가스유속인 0.2~0.3m/s에 비해 훨씬 작은 0.05~0.3m/s의 넓은 범위에서 사용된다.

(2) Scrubber식

Scrubber식은 일반적으로 사용되는 스크러버와 활성오니액을 사용하는 유해가스의 처리장치로서 고상타입에 비해 통과속도가 1~4m/s로 10배 이상 빠르며 장치가 소형으로 활성오니에 의한 폐쇄문제가 없는 스크



라버를 사용한다면 처리효율이 좋은 매우 유리한 장치이다. 그러나 활성 오니는 수중에 분산되므로 가스중의 VOCs 제거는 수중에서의 용해, 이동, 활성오니에 의한 흡착, 분해 등의 과정을 거치며 VOCs 처리장치와는 접촉시간이 짧기 때문에 생물 분해성이 좋고, 수용성 성분을 대상으로 하는 경우에만 적용할수 있는 등 적용 분야가 제한된다. 또한 배수처리에 있어서 활성오니 처리장치와 동일하게 단위중량당 활성오니의 처리한계 유기물질량이 BOD 계산으로 0.4kg(kg활성오니 · 일정시간)정도 이므로 처리대상 가스중의 유기물 성분농도는 고정상 타입과 동일하게 최대 5g/m³ 이하, 가능한 1~3g/m³ 이하가 실용적이다.

유럽의 경우 VOCs 처리용 담체 층전형으로 처리할 수 없는 유기염소화합물을 포함한 배기가스의 처리 목적으로 스크라버형 생물처리장치가 연구되고 있는데 이 경우 사전에 속성한 미생물을 사용하며 유기염소성분의 분해에 의해 생기는 HCl을 중화하기 위한 알칼리의 주입과 발생하는 소금의 제거를 목적으로 하는 물갈이가 필요하다. 염소수가 2이하인 비교적 단순한 유기화합물까지는 처리가 가능하다.

일본의 경우 스크라버식은 고상타입과 같이 악취처리장치로 개발되어

자동차 엔진 제조과정중 일부인 셀몰드 공정의 배기가스 처리장치로서 페놀, 포름알데히드, 암모니아의 처리뿐만 아니라 자동차 도장 건조공정의 악취처리 등에 사용되고 있다.

6. 기타 최신기술(Other Advanced Technology)

지금까지 제시한 실제 활용중인 기술이 갖는 장·단점과 VOCs의 배출공정이 매우 다양하다는 점을 고려하여 각각의 경우에 적합한 새롭고 획기적인 제어방법이 필요하게 되었고 현재 여러 가지 기술들이 개발중이거나 pilot scale 상태 또는 full-scale로 운전중에 있다.

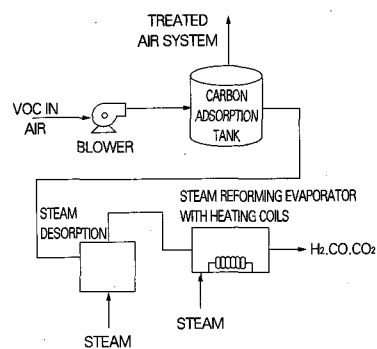
다음에 소개되는 ① Steam Reforming ② Membrane Separation ③ High Energy Corona Discharge 기술들은 제어대상이 되는 오염물질의 종류뿐만 아니라 처리되어야 할 공기량, 제거 목표량, 사용공간 등과 같은 변수들에 의해 영향을 받기 때문에 적용분야가 제한된다.

6.1. 증기 재생법 (STEAM REFORMING)

6.1.1. 운영원리

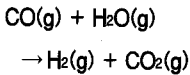
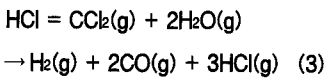
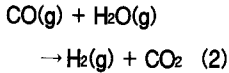
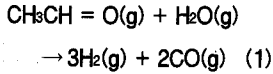
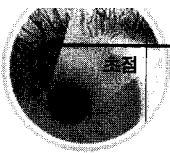
증기 재생공정은 2단계 흡착공정의 두 번째 단계에 해당되는 것으로 첫

단계에서는 과립상 활성탄(granulated activated carbon : 이하 'GAC'라 약함)이나 중합체구슬(polymer bead)과 같은 흡착체에 유기 오염물질이 흡착되며 보통 사용된 흡착체는 다음 처리를 위하여 다른 곳으로 이동된다. 증기 재생공정에서는 약 260℃의 수증기를 이용하여 GAC에 흡착된 오염물질을 탈착시키고 탈착된 VOCs 함유 기류(VOCs-laden stream)는 700℃에서 작동되는 이동층 증발기(moving bed evaporator)를 통과하면서 VOCs가 H₂, CO, CO₂로 전환된다. 이동층 증발기는 증기 재생공정의 열원(heat source)으로 작용한다. <그림 II-12>는 증기 재생시스템의 공정도를 나타낸 것이다.

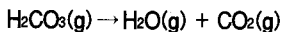
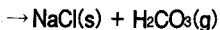
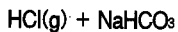


<그림 II-12> 증기 재생시스템의 공정도⁵⁾

다음은 증기 재생법에 의한 알데히드와 trichloroethylene(TCE)의 분해과정을 나타낸 것이다.



염화된 유기물을 과열 수증기로 처리하면 위의 반응식 (3)과 같이 H₂, CO, CO₂ 외에 HCl이 발생한다. 생성된 HCl의 제거를 위해 sodium bicarbonate(NaHCO₃) 슬러리로 코팅된 세라믹 볼과 물을 이동상 증발기에 공급하면 다음 반응에 의해 HCL 기체 NaHCO₃와 반응하여 NaCl, H₂O, CO₂를 생성하면서 중화된다.



증발기로부터 빠져나온 증기속에는 H₂, CO, CO₂, HCl(염화계 유기물이 처리되었을 경우), 그리고 약간의 미처리된 TCE가 포함되는데 이 배출기체중의 나머지 VOCs를 처리하기 위하여 1500℃의 증기로 다시 처리하며 이 때 배출되는 소량의 HCl은 상용 흡착제에 흡착되어 제거된

다. 필요한 경우 CO와 나머지 유기물들은 촉매산화기를 이용하여 제거할 수 있다.

6.1.2 증기 재생법의 장·단점

다양하게 적용할 수 있는 증기 재생공정은 할로젠계를 제외한 VOCs를 다른 부산물의 생성없이 제거할 수 있고 설치비가 적게 소요되는 장점이 있는 반면 운영비가 많이 소요되고 회수된 용매를 재이용할 수 없다는 단점이 있다. 특히, HCl의 제거시 NaHCO₃ 슬러리의 공급이나 산성기체 제거장치를 설치하여야 하므로 그에 따른 부가경비가 소요되고 NaHCO₃ 슬러리의 사용 후 슬러리 처리에도 경비가 소요된다. 아울러 GAC의 재생이나 교환에도 많은 운영비가 필요하다.

6.1.3 적용가능 분야

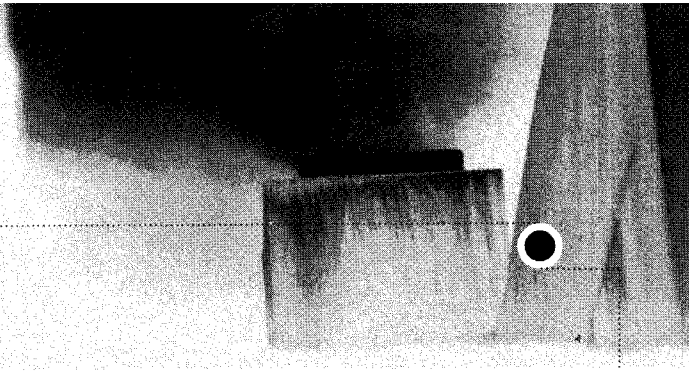
증기 재생법을 적용할 수 있는 대표적인 분야는 유해 폐기물 복원으로 부터 배출되는 VOCs의 처리로서 토양복원을 위한 토양증기추출(Soil Vapor Extraction : 이하 'SVE'라 약함) 시스템이 한 예이다. SVE시스템으로 토양을 처리할 경우 발생하는 화합물로 TCE, PCE(PerChlorl Ethylene), 1,1,2-TCA(TriChloroe

thane)등이 있는데 이 경우 산성기체 제거 모듈과 함께 증기 재생이 좋은 제어방법이 되며 특히 대규모 제조공장 같은 많은 양의 스팀이 존재하는 경우 더욱 유리하다.

Galloway는 현장(on-site)에 소규모 자동화 패키지를 설치하여 유해 폐기물을 제거하는 새로운 화학공정을 연구하였는데 이 장치는 앞서 언급한 화학반응 (1)과 (2)를 이용하는 증기 기화기법(steam gasification technology)을 적용한 것으로 용매나 폐기물에 존재하는 유기물을 증발시키기 위해 가열한 다음 이를 증기 기화 전환기(steam gasification converter)에 공급하여 H₂, H₂O, CO, 그리고 소량의 메탄으로 전환시킨다. 또한 이 장치를 이용할 경우 클로로포름, 사염화탄소, 이소프로판올, 메틸이소부틸케톤, 크실렌 등과 같은 VOCs를 99.9% 이상 제거할 수 있다.

위에서 살펴본 바에 따르면 증기 재생공정은 크실렌과 톨루엔을 배출할 가능성이 있는 도장부스(paint spray booth)나 다양한 VOCs를 배출할 가능성이 있는 인쇄 잉크(letterpress ink) 공정 등에 사용가능할 것으로 전망된다.

6.2. 막 분리법(MEMBRANE SEPARATION)



6.2.1 운영원리

막 분리법은 기공이 없는 기체 분리막의 공급(feed)측과 투과(permeate)측의 압력차에 의한 유기물의 이동차를 이용하여 유기성 증기(organic vapor)와 공기를 분리하는 기술이다. 이 공정은 투과측의 증기압을 공급측의 증기압보다 낮게 유지하기 위해 진공펌프를 사용하며 기체 분리막은 유기성 증기는 통과시키나 공기에 대해서는 반투과성을 나타낸다. 처리대상 기체가 막을 통과하면서 유기성 증기는 응축·제거되고 정화된 공기는 잔재물로 제거된다. <그림 II-13>은 전형적인 가스막 분리공정을 나타낸 것이다.

분리막의 성능은 막의 선택성(selectivity)과 압력차에 의해 영향을 받고 선택성은 분리되는 두 화합물의 투과도의 비로 결정되며 사용되는 막에 따라 다르다. 막 분리법이 기술적으로 실현가능해지기 위해서는 선택성이 10 이상은 되어야 한다.

압력비(pressure ratio)는 공급측 총압(total pressure)과 투과측 총압의 비를 의미하며 실용적인 system의 경우 대략 30~50 정도를 나타낸다. 이 압력비와 공급측의 농도로부터 단일 단 공정(single stage operation)에서 얻을 수 있는 투과측의 최대농도를 구할 수 있으며 보다

높은 투과측 VOCs 농도를 얻기 위해서는 다단 공정(multi-stage operation)이 필요하다.

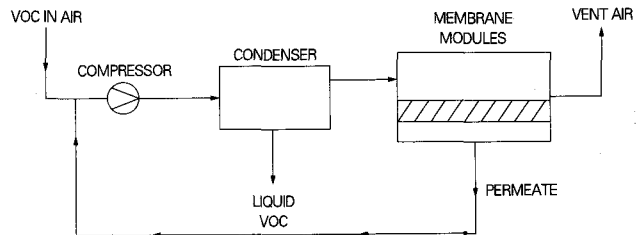
6.2.2. 막 분리법의 장·단점

막 분리공정의 가장 두드러진 장점은 연소나 분해공정에서 발생될 수 있는 부산물의 생성이 전혀 없다는 점으로 화합물은 다른 원하지 않는 부산물로 분해되지 않고 재이용할 수 있는 형태로 회수할 수 있다. 또한 고농도의 VOCs를 포함한 배가스도 경제적으로 제어할 수 있다. 반면 진공펌프와 냉각장치를 이용하기 때문에 자본비와 운영비가 많이 소요되고 고농도의 VOCs를 얻기 위해 다른 공정이 필요하며 그에 따른 자본비가 소요된다는 단점이 있다. 그러나 막 분리공정의 전반적인 운영비는 비교적 합리적인 것으로 알려져 있다.

6.2.3. 적용가능 분야

표면도장(surface coating), 대량

제약 건조기, 그리고 상업적 살균기 등을 포함한 여러 분야에서 발생하는 VOCs와 HAPs 처리에 이용되고 효과적으로 회수할 수 있음을 실험적으로 증명되었다. 이러한 막 분리법으로 회수할 수 있는 오염물질로 아세트알데히드, 아세톤, 벤젠, 클로로포름, 톨루엔, 크실렌, TCE, 헥산과 염화비닐 등이 있다. 또한 막 분리법은 병원이나 산업공정에서 사용되는 살균기로부터 발생하는 에틸렌 옥사이드(ethylene oxide)의 제어에도 이용되며 가장 많이 사용되고 있는 12wt% 에틸렌 옥사이드와 88wt% CFC-12 혼합물을 회수할 수 있음이 밝혀졌다. 막 분리법은 PVC 제조공정에서 발생하는 염화비닐의 제어에도 이용되어 90~99%의 회수율을 얻을 수 있음이 보고되었다. 이밖에 폴리올레핀 생산공정에서 발생하는 여러 가지 탄화수소배출의 제어에도 효과적으로 이 중 헥산의 회수율은 95~99%라고 보고되었다.



<그림 II-13> 전형적인 가스막 분리공정⁵⁾