

연속재생형 VOCs(Volatile Organic Compounds) 처리장치

○ 김태형 | (주)신성이엔지 기술연구소 차장
공조냉동기계기술사
E-mail : kth@shinsung.co.kr

1. 서 론

생활 수준의 향상과 쾌적한 삶의 질에 대한 요구가 확산됨에 따라 환경문제에 대한 인식이 점차 높아지고 있다. 과거의 대기오염물질은 자연적인 배출이 대부분을 차지하였지만, 현재는 산업화에 따른 인위적인 배출이 대부분을 차지하고 있다.

최근 급격한 자동차의 증가와 각종 유기용제의 사용량 증가로 인하여 대기중의 휘발성 유기화합물(VOC : Volatile Organic Compounds)의 배출량이 증대되고 있다. VOC는 증기압이 높아 대기중으로 쉽게 증발되고, 대기중에서 질소산화물과 공존시 태양광의 작용을 받아 광화학반응을 통해 오존 및 PAN(PeroxyAcetyl Nitrate) 등 광화학 산화성 물질을 생성시켜 광화학스모그를 유발하는 물질의 총칭이다.

현재 국내에서는 탄화수소류중 석유화학제품·유기용제 또는 기타 물질로서 환경부장관이 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 고시하는 것을 말한다. VOC는 수많은 화합물의 총칭이고, 발생원도 다양하여 그 범주를 정하기는 어렵지만 미국 및 일본 등에서는 표 1과 같이 정의하고 있다.

이러한 VOC에 대해 미국의 경우 대기중의 오존농도 감소와 건강피해 감소를 위해 VOC의 배출저감을 대기질 관리정책의 주요 수단으로 활용하고

있다. 초기 오존저감을 목표로 시작된 VOC 규제판리는 1990년 대기정화법 개정안(Clean Air Act Amendments, CAAA)을 통해 작업장 안전과 인체 건강보호차원에서 유해 대기 오염물질의 규제관리로 점차 강화되고 있으며, 미국의 VOC는 오존에 관한 규정과 유해대기오염물질 규정의 2가지로 관리되고 있다. 유럽에서는 '장거리월경대기오염협약'을 배경으로 1984년 유럽경제공동체(EEC)가 중심이 되어 VOC 배출저감에 대한 논의가 시작되었다. 그 후 1992년 유럽경제공동체는 비교적 엄격한 독일규제법을 기초로 대기오염 규제의 통일 기준안을 만들었으며, BATNEEC(Best Available Technique Not Entailing Excessive Cost, 과잉비용이 들지 않는 최대이용기술)의 대책기술을 이용하여 저감목표를 달성할 것을 추구하고 있다. 주로 공정 및 산업설비로부터 발생하는 VOC의 배출량 억제가 주요내용이다¹⁾.

국내의 경우 배출시설에서의 VOC 규제판리는 1995년 12월 대기환경보전법 개정안의 대기환경규제지역에서의 규정으로 시작된다. 대기환경규제지역이란 대기환경보전법의 환경기준을 초과하거나 초과할 우려가 있는 지역으로써 대기질 개선이 긴급하다고 인정되는 지역을 의미한다. 이러한 대기환경보전법의 시행에 맞추어 대기환경 규제 지역 내에서 규제 대상으로 하고 있는 석유정제 및 석유

표 1. VOC의 정의

국 가	정 의
미국 환경보호청 (EPA)	<ul style="list-style-type: none"> - VOC는 일산화탄소 이산화탄소, 탄산 금속성 탄산염 및 탄산암모늄을 제외한 탄소화합물로서 대기중에서 태양광선에 의해 질소산화물(NOx)과 광화학적 산화반응을 일으켜 지표면의 오존농도를 증가시켜 스모그현상을 일으키는 유기화합물질 - 대표적인 물질들로서 벤젠 톨루엔 프로판 부탄 헥산 등 광화학반응성이 에탄보다 큰 318종의 물질과 이들 물질이 포함된 진증기압(True Vapor Pressure : TVP)이 1.5 psi 이상인 석유화학제품 및 유기용제 - 단 메탄, 에탄, 메틸클로라이드, 메틸클로르포름, 클로르플로르탄소류 및 퍼플로르탄소류 등 광화학반응성이 낮은 화합물은 제외
일본 탄화수소류 대책 지도지침	<ul style="list-style-type: none"> - 탄소화합물중 일산화탄소 이산화탄소, 탄산 등 염류를 제외한 유기화합물질(단, 메탄은 제외)로 다음의 화합물이 해당 <ol style="list-style-type: none"> 1) 원유, 기술린, 나프타 및 항공터빈연료유 4호(JP-4) : 원유 등 석유제품 2) 1) 이외의 물질로 단일물질은 비중이 1기압에서 섭씨 150℃ 이하인 물질, 혼합물질은 1기압에서 5퍼센트 유출점이 섭씨 150℃ 이하인 물질, 단 일산화탄소, 이산화탄소, 탄산 및 그 염류, 메탄, 에탄, 트리클로로에탄 및 트리클로르트리플로르에탄 등 광화학반응성이 없는 물질은 제외
유럽(VOC Control Directive 94/63/EC)	<ul style="list-style-type: none"> - 레이드증기압(Reid Vapor Pressure : RVP)이 27.6 kPa(4.01 psi) 이상인 석유류제품 (첨가제 유무에 무관)으로 액화석유가스는 제외

화학 제조업, 저유소, 주유소의 저장시설, 세탁시설, 유기용제 및 페인트 제조업, 선박 및 대형철구조물 제조업, 자동차 제조업, 기타 제조업, 폐기물 보관 처리시설, 자동차 정비시설 등과 같은 10개 VOC 발생업종에 대한 세부관리기준을 설정하고 있다.

또한 최근 들어 비산배출에 대한 검토가 이루어지고 있다. 비산배출이란 굴뚝이 아닌 공정 및 설비

등에서 배출되는 형태를 말한다. 전국사업장에서 배출되는 특정대기유해물질의 63.4%는 방지시설을 거치지 않고 배출되기 때문에 비산배출 억제관리가 필요하고, 비산배출 되는 경우 사람이나 생태계에 직접 노출되기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다²⁾.

일반적으로 유기용제가 사용되거나 VOC가 발생하는 생산공정의 경우 대기오염방지 시설을 갖추고 공정 내부에서 발생하는 VOC등의 오염물질을 처리한다. 하지만, 제조공정 등에서 발생하는 비산배출의 경우 인체에 직접 노출되며, 비산 배출된 오염물질은 대기오염방지 시설을 갖춘 배기가 아닌 일반배기라인으로 배출되는 문제점이 발생한다. 따라서 비산 배출되는 VOC를 적절히 처리하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 고에서는 비산 배출되는 VOC를 연속재생형 VOC 처리장치를 통한 처리방법과 그 사례를 통해 VOC 처리 기술을 검토해 보고자 한다.

2. 작업환경내 VOC 발생

표 2에 나타난 바와 같이 휘발성 유기화합물은 다양한 산업과 공정에서 발생한다. FPD산업, 대규모 화학플랜트, 자동차 산업에서 도장공정, 비료 및 사료를 제조하는 공장, 각종 합성수지를 생산하는 공장 등에서는 공정의 특성에 따라 다양한 VOC가 방출된다. 물론 규모가 큰 공장의 경우 대기환경보존법에 따라 적절한 배기설비를 통해 VOC를 관리하고 있지만, 비산 배출이 되는 작업환경에서는 VOC를 처리하는 것이 곤란하다.

특히, FPD 제조공정 중 기판위에 PR (Photo-Resist)을 도포하는 공정과 건조공정에서 VOC가 발생하며, 제조공정의 특성상 VOC가 발생하는 유기용제의 사용은 필수 불가결하다. 이러한 모든 제조공정에서는 발생된 VOC를 처리하기 위해 다양한 설비를 갖추고 대기오염방지에 주력하고 있다. 하지만, 일부 비산 배출되는 VOC에 대한 처리에는 문제점이 있다.

표 2. 제조설비에 따른 VOC 발생원 및 종류

공장의 종류	발생원	VOC 물질의 종류
FPD 산업	PR 코팅공정, 건조공정	Acetone, IPA, PGMEA
화학공장	석유화학, 유기합성공정	Benzene, Toluene, Xylene, Aldehyde, Alcohols, 유기산 등
자동차 및 석유화학	도장 및 BTX공정	지방족 및 방향족 탄화수소 등
악취물질 취급 공장	비료, 사료 등	아민류 및 황화합물
용매, 접착제 및 합성수지 제조공장	플라스틱, 합판 제조공정	Stylene, Aldehyde, Esters 등
도장 및 잉크제조 공장	자동차, 전자제품, 도장 및 건조기	Benzene, Toluene, Xylene, Naphtha, Alcohols, Esters, 유기 용매 등
섬유 제조공장	화섬 직조 공정 등	Acetone, Alcohols 등
드라이크리닝	대형 세탁소 등	Hydrogenated Hydrocarbon, 유기용제 등

이렇게 비산 배출되는 VOC는 작업환경에 항상 존재하게 되며, 작업자와 제품에 악영향을 미치게 된다. 제조 환경 측면에서는 제품 표면에 파티클 (Particle) 및 필름형성, 표면 소수화에 따른 세정효과 감소, 에칭(Etching)의 불균일화와 광학장비 렌즈에 불순물 등이 발생할 수 있다.

3. 작업환경내 VOC 처리방법

표 3은 VOC를 처리하는 대표적인 방법이다. 다량의 고농도 VOC가 발생하는 화학 및 석유화학 공장 등에서 발생된 VOC는 완전연소 시킨 후 배기하는 직접연소법을 사용하며, 농도가 낮고 다용량의 경우에는 흡착식로터(Rotor)를 이용해 VOC를 농축하여 연소시키는 방식이 채택된다. 그 밖에 각 환경과 조건에 따라 다양한 방법을 통해 VOC를 제거

표 3. 대표적인 VOC 처리 기술⁽³⁾

기술명	원 리	적 용	특 징
직접연소법	700~900℃에서 직접연소	대부분 연소성가스	고농도 유리, 운전비용 고가, 장치내구성 저하
농축+직접연소법	VOC를 농축(5~20배)후 연소	대부분 연소성가스	풍량저감, 운전비용 저감
흡착법	활성탄 혹은 제올라이트를 이용하여 흡착	대부분 악취 및 냄새	전처리(케톤, 알데히드, 에스테르) 및 재생장치 필요
축매산화법	축매를 이용하여 200~400℃에서 연소	대부분 연소성가스	제거효율 높고, 운전비용 저감, 축매교체필요, 축매독(As, P, Pb, Si)
생물학적 처리법	생물학적 분해	대부분 악취 및 냄새	동결방지시설 필요, 대용량 처리 곤란
응축법	냉각 및 응축	고비점 VOC	고농도 물질 제거 유리, 회수장치 필요
화학세정법	산, 염기로 중화	산/염기성	산/염기성 폐수처리 시설 필요
플라즈마법	플라즈마를 이용한 열분해	VOC 및 악취	소규모 처리 상용화 중

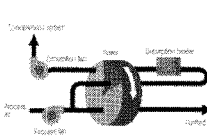
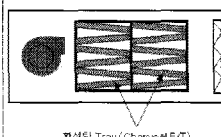
할 수 있다.

작업환경의 경우 VOC를 처리하는 방법은 VOC를 농축하여 유기배기로 배출하는 방법과 활성탄을 이용해 VOC를 흡착하는 방법이 있다.

작업환경에서 비산 배출되는 VOC의 처리는 다용량 처리가 가능하고 경제성이 우수한 방식으로 채택되어야 한다. 이와같은 이유로 작업환경에서 발생하는 VOC를 처리하는 방법은 표 4와 같이 연속재생형 및 활성탄을 이용한 방법이 적용가능하다.

연속재생형의 경우 VOC를 농축한뒤 유기배기라인을 통해 농축된 VOC를 배출하는 방식으로 기존 생산라인 설비에 설치되어 있는 VOC배기(RTO 설비 등)를 이용하는 것이고, 활성탄 방식은 발생된 VOC를 활성탄을 이용해 흡착하는 방식이다.

표 4. 클린룸내에서 적용 가능한 VOC처리방식

기술명	연속재생형 (VOC 농축후 배기)	활성탄
기본 구성		
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 연속흡착/재생을 통한 장시간 사용가능 - 시간경과에 따른 제거효율변화 없음 - 유지관리 용이 - 소요동력(히터)비용 < 활성탄 교체비용 - 제올라이트(소수성)사용으로 클린룸내 기습 부하 영향 없음 	<ul style="list-style-type: none"> - 초기투자비 저렴 (vs. 연속재생) - 초기 설치 간단 - VOC 처리용으로 인지도 높음
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 초기투자비 높음 (vs. 활성탄) - 초기설치 복잡(유기배기) - 재생열원(전기사용) - 재생온도 한계로 인한 고비점 VOC 처리 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> - 활성탄 잦은 교체 필요 (운전비용 상승) - 활성탄 수명 예측곤란 - 수분흡착으로 인한 기습부하에 영향 - 활성탄내 VOC 농축에 따른 발화유형성 내재

4. 연속재생형 VOC 처리장치

활성탄을 이용한 VOC 처리장치의 경우 적용이 간편하고 초기투자비용이 낮은 장점이 있으나, VOC 농도가 높은 경우 수명이 단축된다. 그리고 위치별 농도분포에 따라 활성탄 파괴시점이 달라지기 때문에 교체주기 시점을 관리하는데 애로사항이 있다. 또한 활성탄의 경우 펠렛 형태로 가공후 다공성 케이스에 포장하여 설치하는데, 교체에 따른 다량의 파티클(particle) 발생으로 인해 오염을 유발할 수 있다.

연속재생형 VOC 처리장치에 사용되는 로터(Rotor)는 그림 1과 같이 세라믹 페이퍼를 이용하여 허니컴구조의 로터를 제조한 후 제올라이트를 함침하여 사용한다.

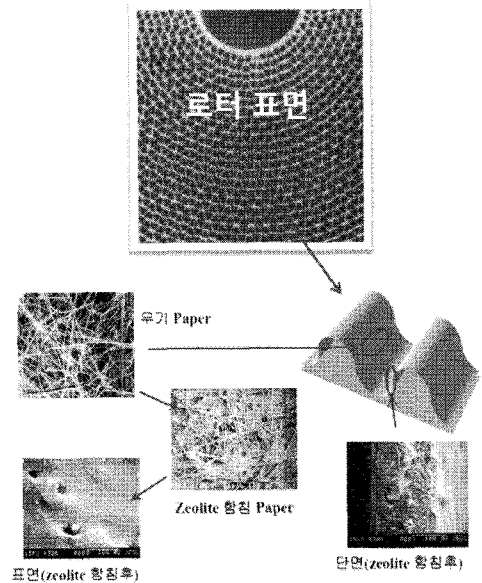
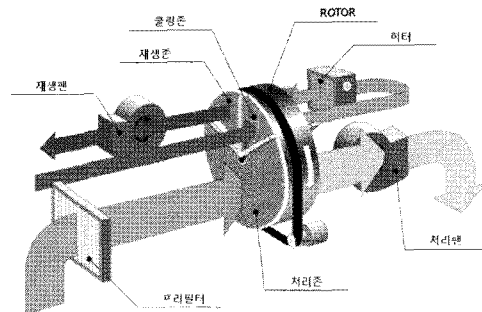
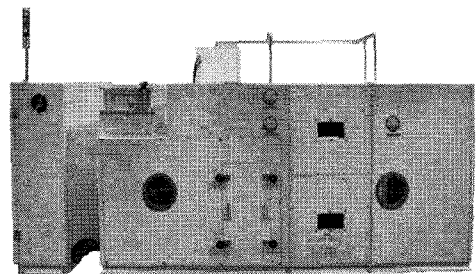


그림 1. VOC로터 표면과 제작과정



(a) Flow diagram

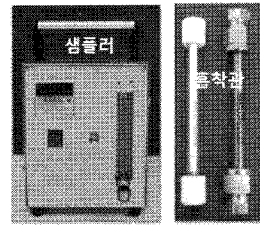


(b) 장비 외형

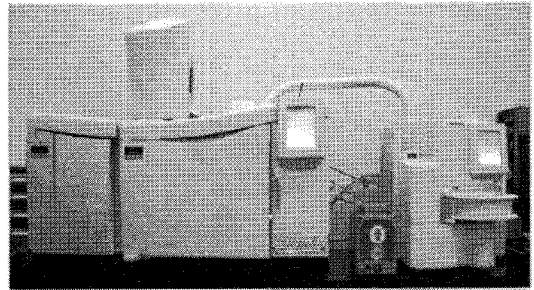
그림 2. 연속재생형 VOC 처리장치

연속 재생형 VOC 처리장치는 VOC농도의 높고 낮음, 위치별 VOC 농도의 편차에 상관없이 항상 일정한 VOC 처리효율(90% 이상)을 가지고 있어 유지보수가 간편한 시스템이다.

그림 2에 연속재생형 VOC 처리장치의 VOC 처리방법과 장비외형을 나타내었다. 작업환경내에서 비산배출에 의해 발생된 VOC는 처리존을 통과하면서 흡착 제거되고, VOC가 제거되어 깨끗해진 공기는 작업환경으로 재순환된다. 처리존에서 흡착된 VOC는 로터의 회전에 따라 재생존으로 이동하며, 재생존에서 고온의 공기로 탈착되어 유기배기라인으로 배기된다. VOC가탈착된 로터는 처리존으로 이동하면서 VOC를 재흡착하는 연속적인 운전이 가능해진다. 이 때 재생존과 처리존 사이의 쿨링존은 재생공기의 예열과 로터를 냉각시키는 역할을 수행한다. 즉, 재생공기 예열을 통해 히터의 부하를 감소시켜 에너지 절약을 가능하게 하며, 재생존에서 뜨거워진 로터를 냉각시키므로 처리존을 통과하는 공기의 온도 상승을 막아준다.



(a) 샘플러 및 흡착관



(b) GC-MS 및 TD

그림 3. VOC 측정 및 분석장비

5. VOC 평가 방법 및 설치 사례

VOC의 평가는 펌프가 내장된 샘플러를 이용하여 Tenax-TA가 충전된 흡착관에 VOC를 흡착한다. 흡착시간과 유량은 VOC 농도에 따라 달라지며, 50~100ml/min 유량으로 10~30분간 샘플링하는 것이 일반적이다. 흡착관에 흡착된 시료는 열탈착기를 이용해 탈착 후 GC-MS에서 작업환경내 존재하는 VOC의 종류와 양을 정확하게 분석한다. 사용되는 샘플러와 분석장비를 그림 3에 나타내었다.

GC-MS로 분석된 결과는 그림 4와 같이 얻어지며, 각각의 생산공정과 사용되는 유기용제에 따라 작업환경에 존재하는 VOC의 조성과 양이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 5는 작업환경내에서 VOC 비산발생에 대한 개념도이다. 그림에서 나타내어진 것처럼 VOC가

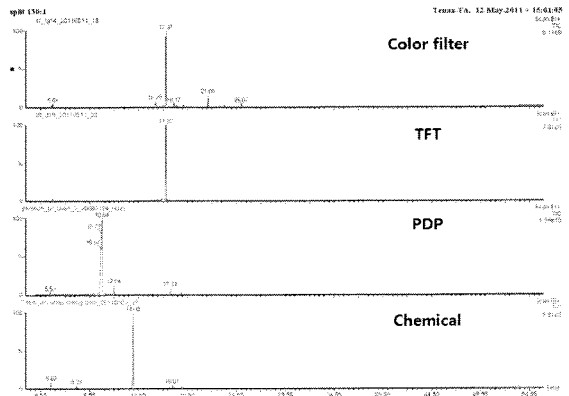


그림 4. 작업환경별 VOC 분석결과

비산발생되는 장비가 존재하고 이렇게 발생된 VOC는 작업환경에 지속적으로 누적되며 도입되는 외기와 배기량에 따라 일정 농도로 유지된다. 따라

서 이러한 개념을 통해 작업환경내에 발생하는 VOC 양을 역으로 추정할 수 있다. 추정된 VOC 발생량, 외기도입량, 배기량 그리고 작업환경내 VOC 목표 농도를 이용하여 필요한 장비대수를 선정할 수 있다. 필요한 장비대수는 VOC 초기농도 대비 유지하고자 하는 VOC 농도에 따라 변경된다. 즉, 낮게 유지하고자 할수록 장비 대수는 증가한다.

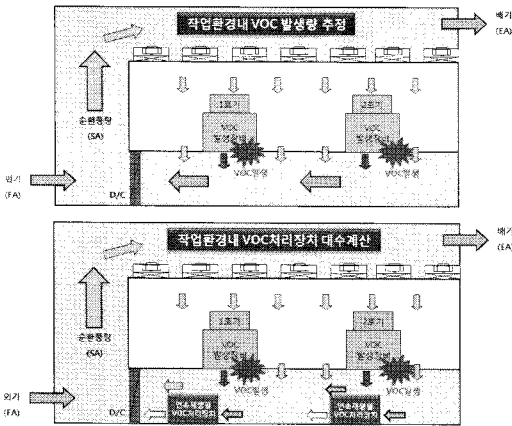


그림 5. VOC 처리장치 대수 계산 개념도

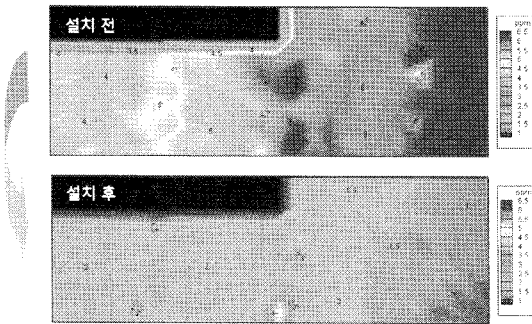


그림 6. 연속재생형 VOC 처리장치 설치 전후 클린룸내 VOC 농도분포

그림 6은 연속재생형 VOC 처리장치 설치 전후 클린룸내 VOC 농도분포를 나타내었다. 클린룸의 규모는 가로 180m, 세로 80m 규모의 LCD 제조라

인이다. 장비의 설치는 클린룸 하부 플레넘에 설치되며, PID(광이온화) VOC 측정기를 이용해 농도가 가장 높은 지역에 설치된다. 설치 한 달 후 재측정 결과 (b)와 같이 클린룸내 VOC농도는 초기 농도대비 60~80% 정도 감소됨을 알 수 있다. 설치되는 장비 대수가 많을수록 VOC 농도를 더욱 감소시킬 수 있지만, 설치공간과 기타 여러 가지 제약 조건으로 설치가 가능한 최대대수 산정이 필요하다.

6. 결론

산업전반에서 발생하는 VOC는 작업자의 쾌적한 근무환경과 제품수율 향상을 위해 제거되어야 한다. 연속재생형 VOC 처리장치는 유지보수가 간단하고 안정적인 시스템으로 다양한 활용이 가능하다.

설치사례에서 살펴본바와 같이 VOC 농도의 정성 및 정량분석, 정확한 설치대수 파악, 기류 및 생산장비 위치 등을 고려한 설치를 통해 연속재생형 VOC 처리장치가 작업환경내에서 VOC농도 저감에 확실한 효과가 있음을 확인하였다.

- 참고문헌 -

1. 한화진, 1997, “국내외 VOC 규제 동향 및 기업 대응방안”
2. 환경부, 2010. 5, “대기환경보전법 일부개정법률안”
3. 한화진, 1994. 12. “유해 대기오염물질 규제에 관한 국내 대응방안 연구”