

악취 또는 VOCs를 제거할 수 있는 필터 기술

○ 김 인 기 | (주)에코프로 환경소재사업본부
 선임연구원
 E-mail : ikkim@ecopro.co.kr

1. 서 론

산업혁명 이래 문명의 발전은 에너지 사용과 밀접한 관계가 있는데, 산업발전 속도가 빨라짐에 따라 에너지 사용량이 급격히 증가하고 있다. 우리가 사용하고 있는 대부분의 에너지는 화석연료의 연소에 의해 얻어지고 있으며 화석연료는 연소과정에서 공해물질로 배출된다. 최근 화석연료의 사용 증가에 따른 대기오염 문제가 심각해짐에 따라 세계 각국에서는 지구환경을 보호하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

특히, 화석연료의 연소과정에서 발생하는 질소산화물(NOx)은 대기오염과 산성비를 유발하기 때문에 많은 나라에서 배출을 규제하고 있는데, 선진국 뿐만 아니라 우리나라에서도 규제가 점점 강화되고 있는 실정이다.

또한, 페인트 제조, 인쇄, 자동차, 도장, 금속과 플라스틱의 코팅공장과 같이 유기용제를 사용하는 곳에서는 제품의 생산 과정에서 필연적으로 유기용제를 배출하게 된다. 이와 같은 산업공정에서 대

기로 배출되는 유기용제를 통칭하여 휘발성 유기화합물(volatile organic compound)이라 부르는데, 비록 낮은 농도로 존재하지만 암의 유발과 같이 인체에 상당한 피해를 주며, 태양광선을 받아 질소산화물과 반응하여 스모그를 생성하고 지구온난화와 오존층을 파괴하여 국제적인 환경문제로 인식된 지 오래되었다.

국내에서는 1995년 12월 대기환경보전법을 개정하여 VOC의 관련근거를 마련하였고, 이에 따라 1999년부터 대기환경보전법 제28조 2규정에 의하여 지정된 대기환경규제지역에 대하여 휘발성 유기화합물을 규제하도록 하고 있다. 국립환경연구원의 VOC 배출량 조사에 따르면 우리나라에서 배출되는 휘발성 유기화합물의 배출량은 연간 67만톤 정도 되는데, 배출시설별로 구분하면 표 1과 같다. 표에서 보는 바와 같이 도장산업의 배출량이 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 자동차 등의 교통수단이 그 뒤를 차지하고 있다.

한편, 세계기후변화협약(교토 의정서)이 2005년 2월부터 공식적으로 발효됨에 따라 일본, 유럽, 미

표 1. 국내의 VOC 배출량 비교

(단위 : 1,000톤/년)

배출원	합 계	페인팅	자동차	가스 충전소	오일 저장고	잉 크	포장재료	드라이 클리닝
합 계	667	308	230	40	31	22	22	14
(%)	100	46.2	34.5	6.0	4.6	3.3	3.3	2.1

국 등과 같은 선진국과 국내에서는 가연성 폐기물은 물론 각종 오니(슬러리)류와 음식물류 폐기물을 자원화하는 자원 순환기술이 활발하게 개발되고 있다. 각종 오니(슬러리)류와 음식물류 폐기물의 순환자원화를 도모하기 위해 필수적인 첫 단계 공정이 건조공정을 통한 탈수공정이다. 그러나, 현재 이러한 자원 순환 시스템에서 대기오염 및 악취 문제로 인한 민원이 끊임없이 발생하고 있어 사회적인 문제로 대두되고 있다.

따라서, 고경 배출원을 중심으로 현재 국내 및 선진국의 산업현장에서 적용되고 있는 촉매를 사용한 대기오염물질(VOCs, 악취물질) 제거기술과 화학적 처리를 통한 화학흡착제, 화학필터 기술을 중심으로 조사, 분석하여 대기오염물질 제어 및 저감 기술개발의 방향을 제시하고자 한다.

2. 필터 제거 기술

현재 악취 및 VOCs를 제거 및 처리할 수 있는 일반적인 방법으로는 흡수, 흡착, 응축, 연소, 촉매를 이용한 제어 기술 등이 있다. 오염물질은 하나만을 사용하거나 두 가지 이상을 사용해서 제거한다. 본 글에서는 산업 현장 및 관련된 분야에서 적용되고 있는 휘발성 유기화합물 및 악취가스에 제거에 관한 내용을 기술하고자 한다.

2.1 VOC 제거 기술

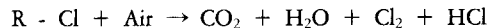
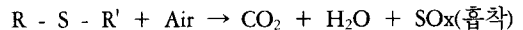
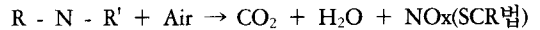
휘발성 유기 화합물은 어떤 특정 물질을 명하는 이름이 아니라, 대기 중에서 질소 산화물과 함께 광화학 반응을 일으켜 오존 등을 생성시키거나, 스모그를 유발하는 물질을 총칭하는 말이다. 자연적 발생원으로는 습지나, 수목류 그리고, 초지에서 발생하며 인위적 발생원으로는 수송 수단인 자동차, 선박, 비행기 등이 있고 용제를 사용하는 도장시설에서도 주로 발생한다.

이런 VOC는 광화학 스모그의 원인이 될 뿐만 아니라 어떤 종류는 발암성이 있는 유해물질이며, 대개 매우 자극적이고 냄새가 심하다. 알데히드나 벤

젠 등의 다핵탄화수소(PAH) 외에는 인체에 유해성이 없으며, 질소 화합물과 함께 반응을 일으켜, 인체나 실물에 피해를 입힌다.

휘발성 유기화합물을 제거하기 위해 매우 다양한 방법이 연구되어지고 있는데, 휘발성 유기화합물이 고부가가치 물질이 아니어서 회수가 불필요한 경우, 완전산화반응을 통한 이산화탄소와 H₂O로의 전환하는 것이 가장 바람직한 방법이라 할 수 있다.

일반적인 VOC의 연소반응 메카니즘은 다음과 같다.



(wet scrubbing)

VOC 처리기술로는 고온산화, 촉매산화, 흡착, 흡수, 냉각응축, 생물학적 처리, 분리막 기술 등이 있다. 고온 산화법은 배출가스 중 VOC를 함유한 공기를 포집해서 예열하고 잘 혼합한 후 고온으로 태워 VOC를 이산화탄소와 물로 전환시켜주는 공정이다. 촉매산화는 촉매가 충전된 연소실에서 고온으로 연소시켜 이산화탄소와 물로 전환시킨다. 그러나, 연소실내에 있는 촉매가 VOC 연소에 필요한 활성화 에너지를 낮춰주기 때문에 열소각보다 낮은 온도에서 연소가 일어난다. 결과적으로 촉매산화에서 연료비는 열 소각 장치보다 훨씬 적어질 수 있다.

그림 1은 촉매의 반응원리를 표시한 것이며 촉매를 사용하게 되면서 서서히 진행되는 반응을 빠른 시간에 진행시킬 수가 있고, 근본적으로 어려운 반응도 간단히 이루어질 수 있다.

흡착은 기체상태의 VOC 분자가 고체 흡착제와 접촉해서 약한 분자간의 인력에 의해 결합하여 분리되는 공정이다. 흡착의 수명을 연장하기 위해서는 흡착된 유기화합물을 회수해서 흡착제를 재생하여 계속 사용할 수 있다. 흡수는 기체와 액체가

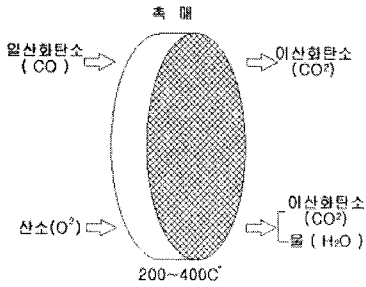


그림 1. 허니컴 형태의 촉매 기능

향류 또는 병류로 접촉해서 VOC 함유 기체로부터 VOC가 액상 흡수제로 전달되는 공정이다.

냉각응축은 냉각조작에 의해 비응축성 가스로부터 VOC를 분리해 주는 공정이다. 이 방법은 일정한 압력에서 온도를 낮추거나 또는 일정한 온도에서 압력을 높여줌으로써 일어나게 된다. 응축에 사용되는 냉매로는 주로 냉수, 브라운, 염화불화탄소, 저온유체 등이 있으며 이들 냉매의 사용온도는 보통 냉수는 7℃, 브라운은 -35℃, 염화불화탄소는 -68℃ 등이다. 질소나 이산화탄소와 같은 저온유체는 온도를 -195℃까지 내릴 수 있다.

생물화학적 처리방법은 미생물을 이용해서 VOC를 이산화탄소, 물, 무기질로 변환시켜 주는 공정이다.

분리막 기술은 반투과성 막을 사용하여 배출가스로부터 VOC를 선택적으로 분리하는 공정이다. 막은 오랫동안 음용수를 처리하는데 사용되어 왔으며, 이를 VOC 처리에 적용시키고자 하는 기술은 최근의 일이다. 분리막 기술은 염소계 탄화수소나 염화불화탄소 등 과거에 회수하기 어려웠던 기체들을 회수하는데 효과적이다. 반투과성 막은 합성 고분자로 만들며 분리시의 구동은 막 사이의 압력차를 이용한다. 진공펌프를 사용하여 막 모듈내의 압력을 낮게 유지해주며 VOC 함유기체를 막에 통과시키면 VOC만 막을 통과하고 공기는 통과하지 못해 결국 VOC와 공기가 분리된다.

2.2 악취 제거 기술

악취란 황화수소, 메틸머캅탄, 아민류, 기타 자극성 있는 기체상 물질이 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새로, 사람에게 특정냄새 자체로 심리적, 정신적 피해를 주는 감각오염의 한 형태이다.

악취는 발생물질의 종류와 배출원이 다양하고, 여러 물질이 복합적으로 작용하며, 생활환경과 사람의 심리상태에 따라서 오염도에 대한 인식이 달라지는 특성도 있어 다른 대기오염물질과는 달리

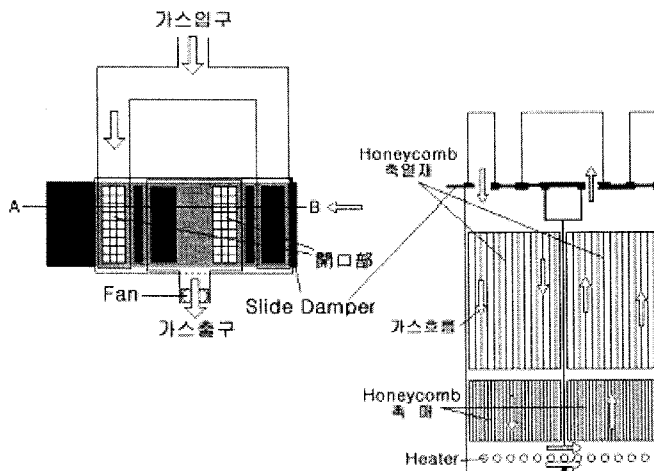


그림 2. 촉열식 촉매 산화 연소장치

효과적으로 발생원을 관리하고 저감대책을 수립하는 데에 어려움이 있다.

악취는 자연적인 미생물에 의한 단백질 분해 또는 물질자체가 가지는 고유한 냄새 등으로 그 종류와 양이 대단히 많은 것으로 알려져 있다. 예를 들어, 황화수소의 자연발생량은 1~3억톤, 암모니아는 37억톤에 달하는 것으로 추정된다.

자연발생량의 경우 비록 그 발생량은 많으나, 넓은 지역에서 저농도로 발생하므로 악취를 느끼지 못하는 경우가 대부분이다.

그러나, 일부 국지적으로 악취를 유발하는 경우가 있는데, 하천 등에서 용존 산소가 부족하여 혐기성 분해가 일어날 때 발생하는 인돌(Indol), 스카톨(Skatol), 황화수소(H₂S), 메탄(CH₄) 및 암모니아(NH₃) 가스등이 복합되어 나는 냄새가 악취로 느껴지며, 우물물 등에서는 조류나 세균류에 의한 곰팡

이 냄새가 나기도 한다. 악취는 주로 물질의 발효·부패에 따른 분해가스의 배출과 염소, 염화수소, VOC등 악취를 유발하는 화학물질의 누출, 물질의 불완전 연소에 따른 소각가스 등에서 발생하는 경우가 많으며, 이로 인해 주변 주민들로부터 민원을 야기시킨다. 발생원별 주요 악취물질을 살펴보면 축산시설, 분뇨·하수처리장, 사료공장, 펄프제조 등 물질부패가 예상되는 시설에서는 황화수소, 메틸메르캅탄류 등이 주로 발생되며, 합판제조, 도료제조, 인쇄·잉크제조, 도장시설 등 유기용제의 사용이 많은 시설에서는 벤젠, 톨루엔, 스티렌, 자일렌 등의 탄화수소류와 알데히드, 에스테르계 물질이, 비료제조시설, 소각시설 등에서는 염소·염화수소 등이, 식품품제조시설에서는 아민류 등의 물질이, 드라이크리닝·세탁시설에서는 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌 등이 주로 배출된다.

표 2. 주요 물질별 악취의 특성

화합물	냄새의 특성	원인물질명
황화합물	양파, 양배추 썩는 냄새	메틸메르캅탄(CH ₃ SH), 황화메틸[(CH ₃) ₂ S], 이황화메틸(CH ₃ SSCH ₃) 등
	계란썩는 냄새	황화수소(H ₂ S) 등
질소화합물	분뇨 냄새	암모니아(NH ₃), 에틸아민(CH ₃ CH ₂ NH ₂) 등
	생선썩는 냄새	메틸아민(CH ₃ NH ₂), 트리메틸아민[(CH ₃) ₃ N] 등
알데히드류	자극적이며, 새콤하고 타는 듯한 냄새	아세트알데히드(CH ₃ CHO), 프로피온알데히드(CH ₃ CH ₂ CHO), 노말부틸알데히드[CH ₃ (CH ₂) ₂ CHO], 이소부틸알데히드[(CH ₃) ₂ CHCHO], 노말발레르알데히드[CH ₃ (CH ₂) ₃ CHO], 이소발레르알데히드[(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CHO] 등
탄화수소류	자극적인 신나냄새	아세트산에틸(CH ₃ CO ₂ C ₂ H ₅), 메틸이소부틸케톤[CH ₃ COCH ₂ CH(CH ₃) ₂] 등
	가솔린 냄새	톨루엔(C ₆ H ₅ CH ₃), 스티렌(C ₆ H ₅ CH=CH ₂), 자일렌[C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂] 등
지방산류	자극적인 신냄새	프로피온산(CH ₃ CH ₂ COOH) 등
	땀냄새	노말부티르산[CH ₃ (CH ₂) ₂ COOH] 등
	젖은 구두에서 나는 냄새	노말발레르산[CH ₃ (CH ₂) ₃ COOH], 이소발레르산[(CH ₃) ₂ CHCH ₂ COOH] 등
할로겐원소	자극적인 냄새 자극성 냄새	염소, 불소 등

악취 냄새를 유발하는 물질의 종류는 매우 다양하여, 과거 일본에서 조사한 바에 따르면 주요 악취오염물질만도 1,000여종에 이른다고 한다. 냄새는 물질의 종류에 따라 차이가 있으며, 이러한 물질 일부가 악취로 인식되게 된다. 악취종류를 모두 나타낼 수는 없으나, 주요 형태로는 계란·생선 등이 썩는 것과 같은 부패성 냄새, 암모니아성 냄새, 땀냄새, 강한 자극을 주는 냄새 등으로 구분하여 볼 수 있다.

주요 물질별 악취의 형태를 예시하면 다음 표 2와 같다.

악취는 개별 물질마다 사람이 느낄 수 있는 최소 농도나 냄새의 질이 다르다. 어떤 물질이 사람에게

냄새로 느껴지기 시작되는 최소의 농도를 최소 감지값(최소감지농도, 역치(閾値) 또는 Threshold)이라 한다. 최소 감지값은 사람마다 조금씩 차이를 나타내고 민족이나 연령에 따라서도 차이가 있다.

황화수소나 유기 황화합물 등의 악취물질이 고농도로 대기 중에 존재하는 경우에는 여러가지 사고가 발생되지만, 저농도에서도 장기간에 걸쳐 환경에 존재하는 경우에는 동·식물에 여러 가지 생리적 장애를 일으킬 수 있다. 또한, 악취물질에 의해 금속의 부식, 고무의 열화, 구조물의 손상 등의 광범위한 영향도 일어날 수 있으나, 이는 악취에 의한 영향보다는 개별물질의 물리·화학적 성격에

표 3. 주요 화학물질의 최소 감지값

화 합 물	ppm	화 합 물	ppm
Ammonia	0.1	Formaldehyde	0.50
Methyl mercaptane	0.0001	Acrolein	0.0085
Hydrogen sulfide	0.0005	Acrylonitrile	8.8
Dimethyl sulfide	0.0001	Methanol	0.52
Dimethyl disulfide	0.0003	Dimethylamine	0.033
Trimethylamine	0.0001	Methylamine	0.035
Acetaldehyde	0.002	Acetic acid	0.0057
Propionaldehyde	0.002	Benzene	2.7
n-Butylaldehyde	0.0003	Phenol	0.00028
i-Butylaldehyde	0.0009	Carbon disulfide	0.21
n-Valeraldehyde	0.0007	Pyridine	0.063
i-Valeraldehyde	0.0002	Methyl alkyl sulfide	0.00014
i-Butanol	0.01	Carbon tetrachloride	4.6
Ethyl acetate	0.3	Chloroform	3.8
Methyl isobutyl ketone	0.2	Indole	0.00030
Toluene	0.9	Skatole	0.0000056
Stylene	0.03	Ethyl benzene	0.17
o-Xylene	0.38	1,3-Butadiene	0.23
m-Xylene	0.041	Diethyl sulfide	0.000033
p-Xylene	0.058	Ethanol	0.094
Propionic acid	0.002	Ethyl acrylate	0.00026
n-Butyric acid	0.00007	Ethyl mercaptan	0.0000087
n-Valeric acid	0.0001	Methyl ethyl ketone	0.44
i-Valeric acid	0.00005	Sulfur dioxide	0.055
1,2,4-Trimethyl benzene	0.12	Nitrogen dioxide	0.12
1,3,5-Trimethyl benzene	0.17	Methyl acetate	1.7
Acetone	42	Ethyl acetate	0.87
Dichloromethane	160	i-Butyl acetate	0.0080
Trichloroethylene	3.9	o-Cresol	0.00010
Tetrachloroethylene	0.77	m-Cresol	0.000054

표 4. 대기 중 황화수소(H₂S) 농도와 생체반응

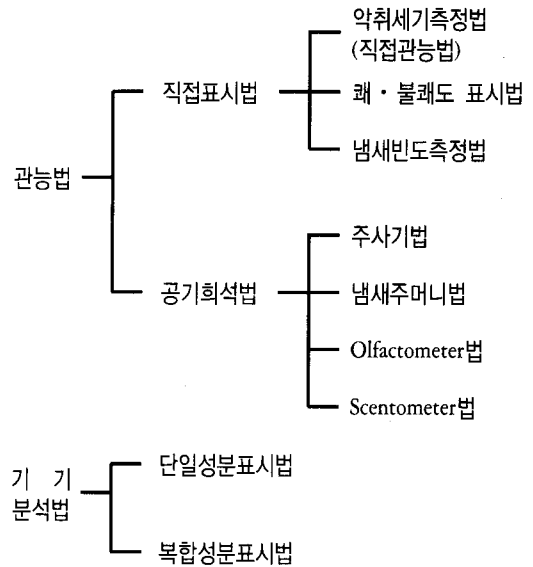
농도(ppm)	증상
0.025	민감한 사람은 냄새를 알 수 있다.
0.3	누구든지 냄새를 알 수 있다.
3~5	냄새가 강하며 상당히 불쾌하다.
20	장시간 일할 수 있다.
20~30	냄새가 독하지만 견딜 수 있다. 이 냄새에 매우 둔해진다.
70~150	장시간 노출로 눈, 코, 점막, 목 등이 따갑고 통증을 느끼게 된다.
200이상	냄새에 익숙해져 불쾌감은 오히려 줄어든다.
170~300	1시간 정도가 버틸 수 있는 한계이다.
400~700	30분~1시간 노출되면 생명이 위험하다.
700이상	수분 내에 실신, 호흡정지, 치사한다.

따른 영향으로 볼 수 있다.

악취를 측정하는 방법에는 크게 사람의 후각을 이용하는 관능시험방법과 기기를 이용하여 악취의 성분을 분석하는 기기분석법이 있다. 관능법의 경우 현장에서 직접 악취의 세기(강도)를 측정하는 방법(직접관능법), 냄새의 쾌·불쾌도를 나타내는 방법, 냄새의 빈도를 측정하는 방법, 악취를 깨끗한 공기와 희석하여 냄새가 발생되지 않을 때까지의 희석배수를 측정하는 방법(공기희석방법) 등이 있으며, 기기분석법의 경우 개별적인 악취의 성분을 분석하는 단일성분표시법(좁은 의미의 기기분석법)과 전체 악취물질의 정도를 파악하는 복합성분표시법으로 구분할 수 있다.

일반적으로 악취를 제거할 수 있는 탈취 체계로는 활성탄과 같은 무기 흡착제를 이용하여 흡착작용과 화학처리를 통하여 냄새를 제거하는 방법이 가장 많이 활용되는 기술이다. 흡착은 기체상의 물질이 고체상의 표면에 붙는 현상으로 이해할 수 있다. 흡착은 단순히 Van der Waals 힘과 같이 매우 약한 결합력이 작용하는 물리적 흡착이 있으며, 고체상에 화학 물질을 침착하여 화학적 결합력에 의하여 기체상 물질이 붙게하는 화학적 흡착이 있다. 보통 일반적인 유기용제의 경우 흡착 메카니즘은

표 5. 악취 강도 표시법



물리적 흡착이 대부분이며 악취 가스의 경우 화학적 흡착이 이루어진다. 보통의 고체상 물질은 흡착이 일어날 수 있는 표면적도 매우 작고 흡착이 일어난 후에 쉽게 탈착이 일어날 수 있기 때문에 기체상 물질을 쉽게 제거할 수 없다. 따라서, 활성탄과 같은 내부에 무수히 많은 미세기공(micropore)이 있어 표면적이 매우 넓고 미세기공에 흡착된 기체상 물질이 쉽게 탈착이 일어나지 않는 물질을 사용한다. 그 외에 제올라이트, 실리카, 알루미늄, 클레이, 다공성 물질 등을 지지체로 사용한다.

그림 3은 활성탄 표면에서의 가스 분자가 기공 구조에 흡착되는 현상을 모식화 한 것이다.

반면, 화학적 흡착은 흡착제의 표면과 흡착되는 분자 사이의 결합을 형성하는 화학반응으로 전자의 이동이 수반된다. 아주 가볍거나 휘발성이 강한 오염물질 분자는 물리적 흡착에 의해 제거되기 어려우므로 반응성이 강한 화학물질을 흡착제의 표면에 침착(impregnate)하여 오염물질과 흡착제 표면 사이에 화학흡착이 쉽게 일어나게 하는 경우도 있다. 화학흡착은 일단 결합이 형성되면 오염물질은 화학적으로 변형되므로 공기중으로 원래의 형

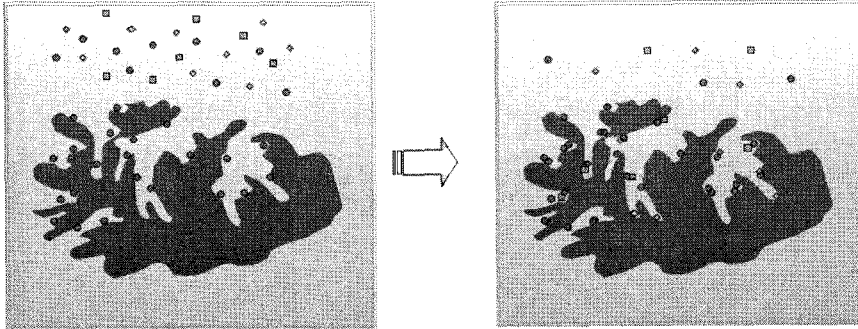


그림 3. 다공질 흡착제의 기공내 흡착 현상

표 6. 물리흡착 및 화학흡착 특성

물리 흡착	화학 흡착
Van der Waals force	Chemical bonding
흡착된 분자의 구조 변화 없음	흡착제와 흡착질 사이의 전자 이동
8~20kj/mol(액화열과 유사)	40~80kj/mol
빠른 흡착 속도	느린 흡착속도
다분자층 흡착 가능	단분자층 흡착
표면적 측정	특정 물질의 분산도 측정

태로 돌아갈 수 없게 만드는 비가역적인 반응이다. 일반적으로 오염물질은 화학적 흡착에 의해서 무해한 고체로 변하게 된다.

화학적 흡착제로는 침착 활성탄(Impregnated Carbon), 침착 알루미나(Impregnated Alumina), 침착 제올라이트(Impregnated Zeolite)등이 있다.

화학적 흡착이 잘 일어나도록 흡착제의 표면에 침착하는 물질은 제거대상 오염물질에 적합해야 하는 이러한 물질의 예로는 과망간산칼륨(KMnO₄)이 있으며, 과망간산칼륨은 포름알데히드(formaldehyde)를 물과 이산화탄소로 변화시키며 황화합물 제거에도 사용한다. 일반적인 화학적 가스 제거 메카니즘은 다음과 같다.

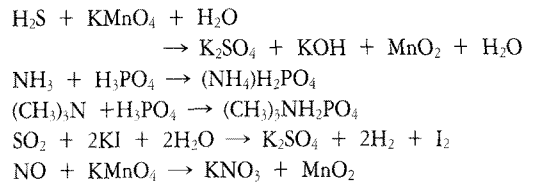


그림 4는 현재 악취제거용 필터 소재로 사용되고 있는 파쇄형, 펠렛 형태의 침착활성탄과 구형 형태의 침착알루미나를 예시하였으며, 그림 5는 화학흡착제를 적용하여 제조된 필터 제품을 보여주고 있다.

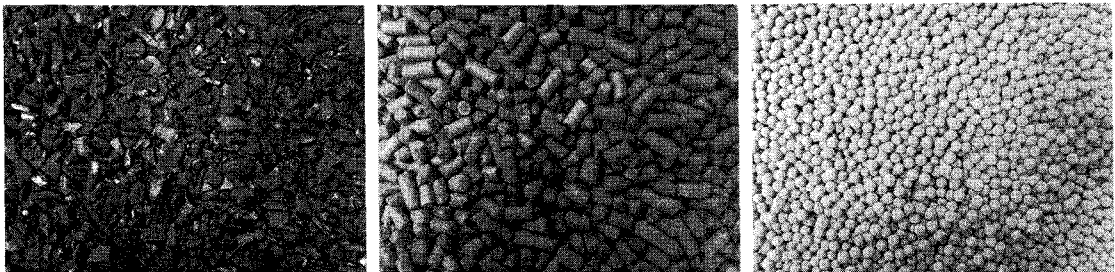


그림 4. 화학흡착제 형상

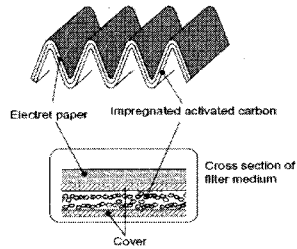
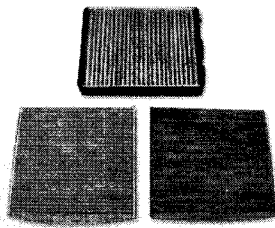


그림 5. 냄새 제거 필터 제품(좌) 및 내부 형상(우)

3. 결론

국민 소득의 증가와 함께 주변 환경에 대한 인식이 제고되고 법적규제가 강화되면서 탈취에 대한 요구도 높아지고, 대상 범위 또한 넓어지면서, 악취 제거 기술은 필수사항으로 자리 매김하고 있다. 기술적 측면에서 소각처리기술과 마찬가지로 아직까지 해외 선진 기술에 의존도가 높지만, 정부의 저탄소녹색성장 선포를 기점으로 환경산업에 대한 지원이 이루어질 것으로 본다. 따라서, 향후 악취 및 VOC 물질에 대한 규제강화가 본격화될 것을 감안할 때, 더욱 관련 기술의 필요성은 부각될 것으로 예상된다.

- 참고 문헌 -

1. 촉매 연소 기술시장, 2004, 에너지 제31호.
2. 이건주, 휘발성 유기염소화합물의 촉매 연소 연구, 상지대.
3. 대한석유협회, 1996, VOC 배출원별 배출량 산정 및 저감기술.
4. 오창섭 외, 2005, 촉매연소 기술을 이용한 대기

오염물질 저감 및 제어기술, 한국과학기술정보연구원.

5. Yang R.T, 1993, 기체분리를 위한 흡착공정, 지구문화사.
6. 박철진 외, 악취관련, 국립환경연구원.
7. 대기환경보전법, 제2조(정의) 제 7호, 악취.
8. 악취방지법, 1996, 악취법령연구회(일본), pp. 24-27.
9. 양성봉, 1998, 악취관리방안에 관한 연구, 환경부.
10. 전주영 외, 기능성 촉매제에 의한 실내공기질 개선효과 실험, 주택도시연구원, 주택도시 제 89호.
11. 탈취기술, 203, 한국과학기술정보원.
12. 김대승 외, 산업현장·악취제거기술의 최근 동향.
13. 최영주, 유해가스 및 중금속 처리기술, KAIST.
14. 윤동원, 2004, 주거용 건물의 실내공기환경과 대응방안, 환경기술정보지.
15. 환경부, 2006, 다중이용시설등의 실내공기관리법 시행규칙 일부개정령안.
16. Akira Hashimoto, 촉열식 촉매산화연소장치 <http://www.shimakawa.co.kr/>