실내용 공기청정기 기술동향

오명도 • 노광철 | 서울시립대학교 기계정보공학과
교수, 대학원생(박사과정)
E-Mail : mdoh@uos.ac.kr

1. 머리말

현대인들의 하루생활을 분석하면 시간의 90%를 주택, 사무실, 지하공간 등의 실내에서 사용하는 것으로 보고 되고 있다. 그러나 건축기술의 발달과 에너지 절약에 대한 노력으로 건물들은 점차 고단열화, 고기밀화가 이루어졌고 이에 따른 환기횟수의 감소로 인하여 상대적으로 실내의 공기환경은 악화되어 왔다. 또한 건축자재나 공조설비 등에서 발생하는 오염물질의 증가, 자동차의 매연이나 공장굴뚝에서 나오는 배기가스의 실내 유입 등으로 인해 실내공기질(indoor air quality)은 더욱 악화되어 있는 실정이다. 그러나 최근 들어 사람들의 생활수준이 향상됨에 따라 건강에 대한 관심이 증대되고 인간의 건강과 직결되는 실내에서의 공기청정에 대한 관심이 높아지면서 공기청정기의 사용이 점차 늘고 있으며 이와 관련된 실내공기질 관련법에 관한 규정도 강화되고 있다. 이와 관련하여 국내에서는 지하생활공간 공기질 관리법(1997년 환경부령으로 제정)을 "다중이용시설등의 실내공기질관리법"으로 개정이 이루어지고 있으며 2003년 내로 입법화가 이루어져 시행될 예정이다.

표 1은 국내의 "다중이용시설등의 실내공기질관리법"에서 제시하는 실내 환경기준과 외국의 실내 환경기준을 나타낸 것이다. 미국의 경우는 실내 및 작업환경 조건에 대한 환경기준을 OSHA(Occupational Safety and Health Administration), ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)에서 규정하여 관리하고 있고 ASHRAE에서도 Standard 55-1992에서 재실자를 위한 온열환경 조건을, 그리고 Standard 62-1989에서는 실내공기의 질에 대한 조건을 제시하고 있다. 특히 ASHRAE에서는 실험적인 평가를 통하여 허용 공기환경기준으로 규정하고 있는데 오염물질의 경우에 적어도 비전문가가 20명이상 포함된 평가집단의 80%이상이 대상 공간에 들어가서 15초 이내에 답변한 평가의 결과가 만족스러운 것일 때 허용 가능한 실내공기환경으로 정의하고 있다. 일본의 경우에는 후생성의 빌딩위생관리법, 건설성의 건축기준법, 노동성의 노동안전위생법, 사무소 위생규칙 등 노동환경 기준치, 학교보건법 등의 생활환경 기준치를 제정하여 관리하고 있다. 유럽 등의 국가들의 경우에는 노르웨이, 덴마크를 비롯한 많은 나라에서는 WHO에서 실내공기환경과 건강 측면의 여러 연구결과의 축적된 증거자료를 참고로제정한 '실내 공기환경 지침서(Air Quality Guidelines for Europe)'에 근거하여 기준을 설정하고 있으며 점차 많은 나라에서 건강위해성평가(Health Risk Assessment)의 기초 자료로 채택되고 있다. 만약 비산업용 건물에서 기준이나 지침이

표 1. 국내외 실내 공기환경 허용기준

오염물질	국 내	미 국	일 본	유 럽 등
부유분진 TSP	0.15㎎/㎥	0.075㎎/㎥	0.15㎎/㎥(빌딩위생관리법/건축법) 0.15㎎/㎥(사무소위생기준)	0.1-0.12㎎/㎥ (WHO, 8시간평균)
일산화탄소 CO	9ppm/2시간 (다중이용시설)	50ppm(OSHA, TWA)	10ppm(건축법/빌딩위생관리법) 20ppm(학교위생기준) 50ppm(산업위생학회)	8.6ppm (WHO, 8시간 평균) 25ppm (WHO, 1시간평균)
이산화탄소 CO_2	1000ppm	1000ppm(ASHRAE) 5000ppm(OSHA TWA)	1000ppm(건축기준법/사무소위생기준)	920ppm (WHO Europe)
이산화황 SO_2	0.05ppm/2h (다중이용시설)	2ppm(ACGIH, TLV TWA) 5ppm(ACGIH, STEL)	5ppm(산업위생학회)	0.12ppm (WHO/STEL, 1시간) 0.18ppm (WHO/STEL, 15분)
이산화질소 NO_2	0.05ppm/2h (다중이용시설)	3ppm(ACGIH, TLV TWA) 0.3ppm(ACGIH, STEL)	0.10ppm(산업위생학회)	0.21ppm (WHO 1시간 평균) 0.075ppm (WHO 8시간 평균)
포름알데히드 HCHO	0.1ppm(다중이용시설) 0.05ppm(의료기관, 유치원 등)	0.1ppm(ASHIRAE) 1ppm(ACGIH, TLV TWA) 2ppm(ACGIH, STEL)	2ppm(산업위생학회)	0.08ppm(WHO) 0.1ppm(스웨덴)
휘발성 유기화합물 VOCs	500$\mu g/m^3$/2시간(다중이용시설) 400$\mu g/m^3$/2시간(의료기관, 유치원 등)	벤젠 10ppm (OHSA TWA, ACGIH) 톨루엔 200ppm (OHSA TWA) 100ppm (NIOSH, ACGIH) 크실렌 100ppm (ACGIH TLV)	TVOC 400$\mu g/m^3$ (후생노동성)	0.2~0.6㎎/㎥ (핀란드 FISLAQ) - 톨루엔 - 2.1ppm (European WHO)
오존 O_3	0.06ppm/8시간	0.05ppm (ACGIH 8시간 평균) 0.1ppm (ACGIH TLV TWA) 0.3ppm (ACGIH STEL)	0.10ppm (일본 산업위생학회)	0.03ppm (뉴질랜드8시간평균) 0.08ppm (WHO 8시간 평균) 0.1ppm (WHO 1시간 평균)
라돈 Radon	4pCi/㎖/2시간	4pCi/㎖(EPA) 4pCi/㎖(ASHRAE)	-	2.7PCi/㎖(WHO) 2.9pCi/㎖(스웨덴, 주택)
석면	0.01개/cc/8시간	0.1f/cc(OSHA PEL)	2f/cc (일본 산업위생학회)	-

※ 참고 : OSHA는 시간가중평균농도(TWA: Time Weighted Average concentration), 단기노출농도한계(STEL: Short Term Exposure Limits), 허용 노출농도한계(PEL: Permissible Exposure Limits)를 사용하고, ACGIH에서는 최대허용한계치(TLV: Threshold Limit Value)를 적용하며, NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 권장노출농도한계(REL: Recommended Exposure Limits)로 표기한다. 또한 국내 자료는 "다중이용시설등의실내공기질관리법"의 초안을 기초로 작성되었다)

마련되지 못한 오염물질의 경우에는 대개 최대허용 한계(Threshold Limit Value) 농도의 1/10 또는 1/100을 임시 지침으로 채택하는 것이 일반적인 경향이다.

실내공기질에 대한 관리가 강화되고 실내 공기청정에 대한 관심이 증대되면서 최근 들어서는 공기청정기의 수요가 크게 증가하고 있는 추세이다. 이러한 공기청정기는 에어필터와 같이 공기 중에 포함되어 있는 오염물질을 제거하기 위한 소재나 단위 장치를 의미하고 실내에 부유하는 입자 및 가스상 물질을 제거하여 실내의 위생환경과 작업환경을 유지하기 위한 실내용과 배출되는 오염물질에 의한 대기오염을 방지하는 산업용으로 구분되어 사용된다. 실내로 청정공기를 공급하기 위한 공기청정장치는 건축물의 공기조화장치나 환기계통의 일부로서 급기 중의 오염물질을 제거하기 위하여 도입외기와 재순환공기의 급기 측에 설치된다. 그리고 일반적인 주택이나 중앙 공조식 환기가 이루어지지 않는 건물, 흡연실과 같이 국부적인 오염이 심각한 곳에서는 오염을 저감시키기 위하여 실내의 필요한 위치에 공기청정기를 설치하여 사용한다. 다량의 오염물질이 발생하는 공장 등에서 사용되는 배기정화장치는 대기오염을 방지하기 위하여 배기 측에 설치하고 오염물질을 제거하여 대기로 방출한다. 이와 같이 공기청정장치는 사용목적에 따라 종류가 매우 다양하며 여러 가지 관점에서 분류할 수 있다.

따라서 본고에서는 최근의 공기청정기 기술동향에 대해 살펴보고 여러 가지 공기청정 방식에 대한 원리와 성능에 관하여 논의해 보고자 한다.

2. 기술동향

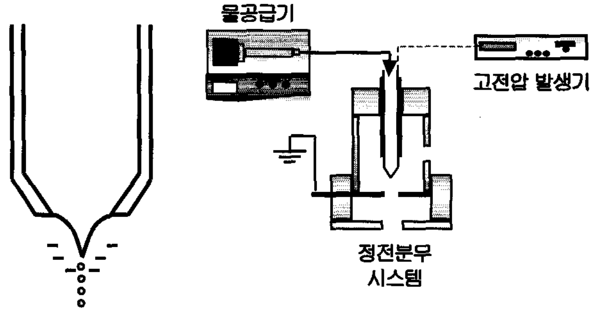
이전에 공기청정을 위하여 사용한 방법은 대부분 입자상과 가스상 유해물질을 개별적으로 제어하는 방식이었고 그 기술들을 요약하면 다음과 같다. 먼저 입자상 물질을 제거하기 위해 많이 사용되었던 방법은 섬유필터방식과 전기집진방식의 두 가지 방식이 있다. 첫째로 섬유필터방식은 필터를 통해 관성충돌, 중력침강, 차단, 확산 등의 포집 메카니즘에 의해서 입자를 제거하는 방식이다. 이러한 섬유필터방식의 종류로는 저성능 필터(pre filter), 중성능 필터(medium filter), 고성능 필터(HEPA, High Efficiency Particulate Air filter), 초고성능 필터(ULPA, Ultra Low Penetration Air filter) 등이 있다. 중성능 필터는 보통 비색법에 의한 집진 효율이 60~90%의 범위를 차지하며, 이 때의 압력 강하는 15~30㎜Aq정도이다. HEPA 필터는 0.3㎛입경의 입자를 99.97%이상을 처리하는 것으로 압력 강하는 25~50㎜Aq정도이고, ULPA 필터는 0.12~0.17㎛입경 범위의 입자를 99.9999%이상을 처리하며 압력 강하는 HEPA 필터와 유사한 범위를 가진다. 이들 고효율 필터는 대개 전자 및 반도체분야의 클린룸이나 실내공기청정기에서 입자상 물질을 포집하는데 주로 사용된다. 그러나 섬유필터방식 필터는 많은 용량을 처리하는 것이 불가능하고 압력손실이 상당히 커서 소비 동력이 많이 드는 단점이 있다.

둘째로 정전기력을 이용한 입자상 물질을 제거하는 방법이 있다. 정전기력을 이용하는 필터의 종류로는 코로나 방전을 이용한 정전 필터 방식과 전기집진 방식으로 나눌 수 있다. 정전 필터는 기존 섬유 필터의 단점인 압력 강하의 증가에 따른 운전비용의 증가를 보완하기 위해 이용되기 시작하였다. 정전 필터는 그 제조 방법에 따라 필터 자체가 정전기를 갖게 되는 대전 필터와 외부에서의 강한 전기장에 의한 필터 섬유에 극성을 띄게 하는 유전 필터가 있다. 이러한 정전 필터들은 일반 섬유 필터에 비해 압력 강하가 낮으면서 집진효율이 매우 좋아 진공청소기, 방진 마스크, 공기 청정기 등에 널리

사용되고 있다. 그러나 이러한 필터의 경우 사용조건에 따라 필터 섬유의 전기가 중화되어 집진 효율이 급격히 나빠지는 단점이 있다. 그리고, 전기집진방식은 코로나 방전(corona discharge)을 통해 생성된 양 또는 음이온이 입자를 하전시키고 반대 극성으로 대전되어 있는 집진판으로 하전된 입자를 포집시키는 기술이다. 이러한 방전을 통한 전기집진방식은 주어진 운전조건에 따라 차이는 있으나 중량법에 의한 제거효율이 약 99%인 고효율 집진장치이다. 또한, 여과방식에 비해 낮은 압력강하로 인하여 유지비가 적게 들고 한 번 설치 후에 추가적으로 변동비가 들지 않아서 경제적이지만 그 집진효율은 HEPA 필터나 ULPA 필터에 크게 미치지 못하여 고청정을 유지하는 곳에서는 쓰이지 않는다. 앞서 설명한 바와 같이 질량기준으로 99% 이상의 효율을 가진다고 알려져 있지만 0.05㎛이하의 나노입자는 부분하전(partial charging)의 문제로 제거효율이 떨어지고 방전방식 및 형태에 따라 오존 및 NOx가 발생되는 문제점이 있다. 이외에도 많이 사용되고 있는 기술로는 습식의 scrubber방식과 공기세척방식 등이 실내 공기청정에 많이 사용되고 있다.

기존의 가스상 오염물질을 제거하기 위해서 사용되는 공기청정 기술로는 흡착방식, 흡수방식, 촉매방식, 전기방전방식 등이 있다. 흡착방식은 무수히 많은 작은 구멍들을 갖는 활성탄, 활성백토, 규조토 등의 표면에 물리적 또는 화학적으로 가스상 물질을 흡착시켜 제거하는 방법이다. 이때 사용되는 흡착제는 덩어리 모양으로 성형하여 에어필터와 같은 형틀로 충전하여 만든다. 활성탄은 뛰어난 흡착성능을 통해서, 악취와 VOCs, 오존까지도 빠르게 제거할 수 있는 특징을 가진다. 그러나 활성탄(activated carbon) 필터는 유해물질의 흡착 후 분해가 어려워 사용시간이 지남에 따라 필터의 표면이 포화되어 필터의 재사용이 어렵고, 사용한 필터의 폐기가 불가피하여 이에 따른 2차적 환경오염을 야기시키는 단점이 있다. 액체용제를 이용하는 흡수방식은 화학적으로 용제에 용해 흡수시켜 가스상 오염물질을 제거한다. 예를 들면 아황산가스나 황화수소와 같은 친수성 가스는 공조기에서 열교환용으로 이용되는 에어와셔(air washer)의 물방울과의 직접 접촉에 의하여 물에 흡수시킨 후 제거한다. 산화촉매방식은 백금, 팔라듐 등의 촉매를 사용해서 상온보다 약간 높은 온도에서 가스를 제거하는 방식이다. 즉 촉매에 어떠한 물리·화학적 자극을 가하여 촉매에서 유해가스를 분해시킬 수 있는 물질이 발생되고 이를 통해 제거하는 것이다. 이 방식은 촉매의 촉매독 문제로 인한 처리의 안정성과 고가의 설치비용등의 문제가 있다. 전기방전방식은 입자상 물질을 제거하는 기술인 코로나 방전 등을 이용하여 공기 중에 존재하는 산소를 분해, 결합하고 이때 생성되는 오존과 같은 반응활성종(radical)을 이용하여 NOx, SOx, VOC 등의 유해가스를 산화시키는 방법이다. 이 방법은 앞서 설명한 바와 같이 오존 및 NOx를 발생시키는 단점이 있어 이 장치의 후반부에 오존 등을 제거할 수 있는 후처리 설비가 필요하게 된다.

최근 들어, 입자상 물질을 제거하는 기술로 정전분무방식이 개발되어 사용되고 있고 이 방식은 기존의 전기집진방식보다 에너지 소모가 작고 저 압력강하를 나타내며 HEPA 필터나 정전필터에 비해 포집효율이 우수한 것으로 연구결과가 발표되었다. 그리고 촉매기술 분야에서는 나노촉매기술이 기존의 산화촉매반응이 적용되는 분야를 대체하는 기술로 대두되고 있다. 이 분야의 기술로는 나노광촉매기술과 활성금속 및 금속산화물을 담체에 나노크기로 담지시킴으로써 산화온도를 상온 또는 상온근처에서 가능하도록 하는 나노담지촉매 기술이 있다.



(a) 정전분무의 원리

(b) 정전분무 시스템

그림 1. 정전분무시스템

그러나 아직까지 나노촉매에 대한 개념은 광촉매분야에서 정립되어 있지 못하고 금속산화물이나 나노구조체의 경우에도 아직 연구가 초기단계에 있지만 이러한 나노촉매기술이 실용화되거나 실용화단계에 진입한 결과들이 나오고 있어 그 이용영역이 크게 확대될 것으로 기대된다. 그리고 실내에서의 공기청정이 중요한 문제로 부각되면서 실내에서 존재하는 입자 및 가스상 물질들을 동시에 제거하는 방식들이 많이 개발되고 있다. 이러한 기술로는 저온플라즈마 방식, UV/광촉매 방식, 바이오필터 방식, 광촉매와 저온플라즈마 방식 등을 동시에 이용하는 hybrid 방식 등이 많이 사용되고 있다.

3. 최신 공기청정기술

3.1 정전분무 방식

이 방식은 정전기력을 이용하여 물방울을 미세하게 하전된 액적으로 분해시키는 방식으로 그림 1과 같이 물이 공급되는 노즐의 끝과 접지 사이에 수천 볼트의 전기적 포텐셜을 인가함으로써 쉽게 얻어질 수 있다. 이러한 정전분무에 의해 발생된 미세한 액적은 매우 높게 하전이 되고 쿨롱 반발력에 의해 자기 스스로 분해된다. 이때 액적 간에 응집현상이 나타나지 않는 특성을 가지고 있어 수많은 이온의 발생량도 유지할 수 있다고 알려져 있다. 이렇게 발생된 수~수십 나노미터의 크기를 가진 액적은 먼지와 충돌하게 되고 먼지는 높은 하전량을 띄게 된다. 이때 하전되는 먼지는 코로나 방전에 의해 대전되는 것보다 높은 하전량을 띄게 된다. 따라서 0.1㎛ 이하 입경의 먼지도 더 작은 액적의 브라운 운동에 의해 쉽게 하전을 띄게 되고 이렇게 하전된 먼지는 정전집진부로 유입되어 포집된다.

이 방식의 특징은 정전분무(electro-spraying)에 있고 이는 그림 1에서 확인할 수 있다. 그림 1(a)에서 물 공급기와 연결된 전극에는 고전압이 가해지고 모세관(capillary tube)끝에서 약 1~2cm정도 밑에 위치한 전극(plate 형상)은 접지된다. 전극에 고전압을 가해주기 전에는 정수 압력과 표면장력이 평형을 이루다가 전극에 약간의 전압이 가해지면 모세관 끝에 반구형의 물방울이 형성된다. 적당한 압력과 전압(threshold voltage)에서 물방울의 모양은 cone jet 모드를 형성되고 콘의 정점에서 제트가 분사된다. 이때 cone jet 모드를 형성하며 분무

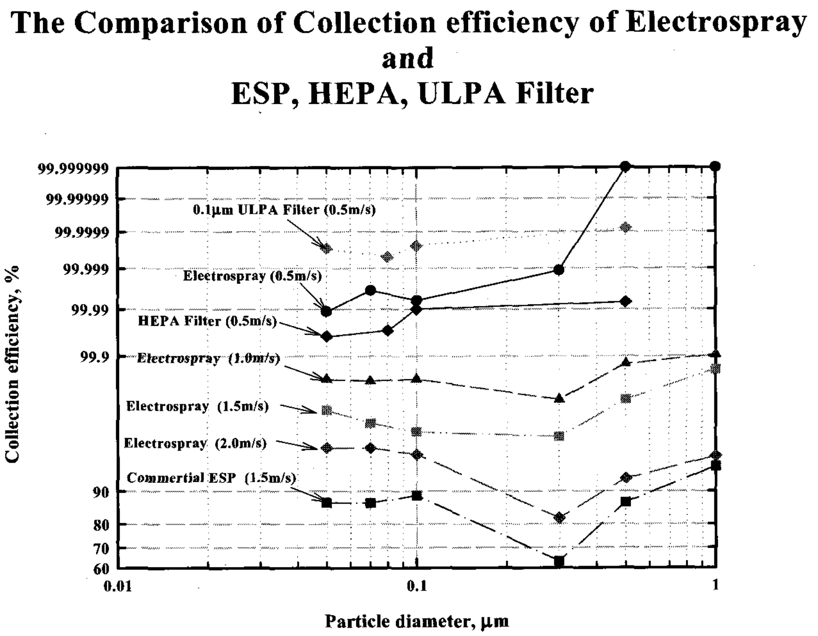


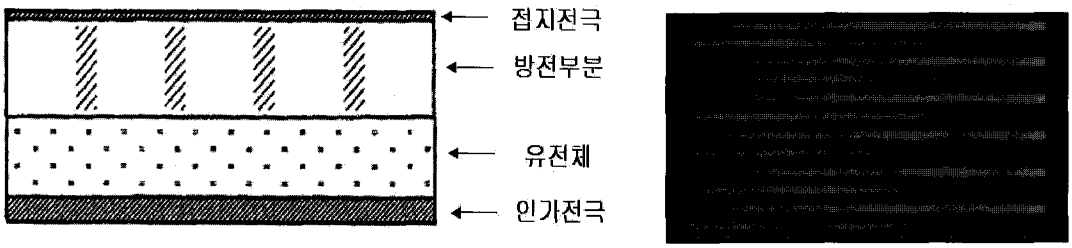
그림 2. 입자 포집 방식에 따른 집진 성능 비교

(spray)를 하기 위한 전압의 크기는 접지전극(ground plate)과 액체 콘의 정점사이의 간격에 의존한다. 전극에 가해주는 전압이 커질수록 발생되는 액적의 양도 많아지지만 이것은 제한된 전압 아래에서만 가능하다. cone jet 모드에 의해서 미세입자가 발생되는 전압은 대략 3~5kV근방이며 콘의 정점과 접지판과의 간격에 따라 그 이상에서도 가능하다. 그러나 한계전압(threshold voltage)이하에서는 액적의 미립화는 발생되지 않는다. 전압을 더욱 증가시키면 노즐의 끝에서의 액적의 모양이 두 곳 이상에서 분사가 일어나는 멀티 젯이 나타난다.

그림 2는 정전분무 시스템과 기존의 전기집진방식, 기계식 고성능필터의 입자제거효율을 비교하여 나타낸 것이다. 정전분무 시스템의 최적 분사 조건에서 수행된 외부 입자의 대전 효과는 거의 100%에 도달되고 이로 인하여 초미세 입자의 포집에 고효율을 나타내게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 면풍속이 0.5m/s인 경우, 100nm이하의 입자에 대해 99.99%이상의 집진효율을 보였고, 2.0m/s인 경우에는 100nm이하의 입자의 경우 96%이상의 고효율을 보였다. 그리고 정전분무 시스템은 ULPA 필터보다는 집진 효율이 다소 떨어지는 경향을 나타내지만 기존의 HEPA필터나 전기집진방식보다는 높은 집진효율을 보이고 있고 압력 손실에서도 1/10배이상 우수하며 전력의 손실이 상대적으로 작기 때문에 HEPA 필터나 전기집진기의 대체용으로 가능할 것으로 기대되고 있다.

3.2 저온 플라즈마 방식

최근 들어 국내뿐만 아니라 캐나다의 McMaster



(a) 구성 개념도 (b) 방전시 발생 스트리머

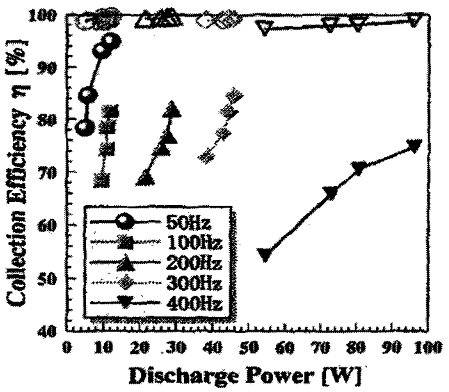
그림 3. 저온 플라즈마 방식(예 : DBD방전 방식)

대학, 미국의 Tecogen 회사와 Los Alamos대학, 러시아의 Kurchatov 원자력연구소, 일본 오사카대학과 무사시 공업대학, 중국의 Tianjin 대학 등에서 연구되는 유전체 배리어 방전(Dielectric Barrier Discharge; DBD)을 이용한 저온플라즈마 방식의 공기청정 기술이 있다. 이 기술은 상온에서 특수한 방전방식으로 플라즈마를 발생시키고 여기에서 나오는 전자와 반응활성종으로 입자뿐만 아니라 악취, VOCs, NOx, CFCs 등 대부분의 유해가스 물질들을 제거하는 기술이다.

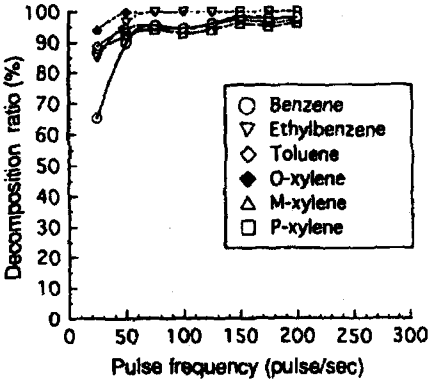
그림 3과 같이 고전압이 인가되고 접지되는 양전극 사이에 세라믹과 같은 유전체를 두어 특수한 방전시스템을 형성시켜 플라즈마를 발생시키고, 이때 발생되는 플라즈마의 온도는 낮지만(상온~1,000K), 전자(electron)에너지를 약 1~10 eV로 높게 유지시킴으로써 입자상 및 가스상 물질의 동시저감이 가능하다. 보통 상압에서 한 쌍의 전극에서 한쪽 또는 양쪽 전극의 표면을 유리 등의 절연체로 감싸고 전극간의 간격은 수㎜ 이내로 구성된다. 이때 교류 전압을 가하고 전극 사이에서 직접방전이 일어나지 않도록 하면 유전체에 전하축적(charge build-up)현상이 발생하고 교류전원에 의해 인가되는 전압효율이 극대화되어 균일한 스트리머(streamer) 혹은 글로우(glow) 방전상태를 얻게 된다. 이때 방전시 높은 에너지를 가진 고농도 전자의 충돌현상으로 반응활성종이 생성되는데, 이것을 입자와 유해가스의 제거에 이용하게 된다. 또한 AC 교류전기장을 이용함으로써 DBD 장치 내에서 하전되어 나온 입자를 응집을 통해 크기를 성장시킴으로써 기존의 전기집진방식보다 입자제거효율을 극대화시킬 수 있다.

그림 4는 DBD 하전장치를 이용했을 때는 주파수 변화에 따른 입자 및 가스 제거효율의 예를 보여주고 있다. (a)에서 보는 바와 같이 입자상 물질에 대해서는 주파수의 영향이 없이도 95%이상의 높은 집진효율을 가지는 것을 확인할 수 있고 이는 DBD 하전방식을 사용하지 않은 기존의 AC방전 방식에 비해 높은 효율을 나타내고 있다. (b)는 VOC의 제거효율을 예로 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 일정한 주파수를 초과하면 VOC의 제거효율은 90%이상이 됨을 알 수 있다. 이는 기타의 유해 가스에 대해서도 적용이 되며 일반적으로 가스에 대한 제거효율은 주파수와 방전전력에 따라 달라진다. 그러나 이 기술이 무엇보다도 안정성과 신뢰성을 가질 수 있으려면, 장치의 작동에 최적의 운전상태를 결정하는 것이 중요하다. 입자상 물질에 있어서는 하전성능의 개선에 반하여 장치에 인가되는 교류전기장에 의해서 입자가 전극



(a) 입자집진효율



(b) 가스제거효율

그림 4. 주파수 변화에 따른 입자 및 가스 제거효율

에 부착되는 현상이 나타나고 이로 인해 Arc 방전이 발생되어 장치자체를 파괴시킬 수 있는 문제가 생길 수 있다. 또한 AC가 인가되는 방식인 경우에는 집진부에서는 AC하전의 영향으로 입자의 중화 또는 역전리(back corona)현상으로 인하여 입자의 제거효율이 크게 감소할 수도 있다.

또한 부산물(byproduct)로 다량의 오존과 NOx가 생성되는 점이 큰 문제로 대두되고 있고 이를 해결하기 위하여 MnO_2, UV촉매 등과 같은 촉매의 부가적 사용을 통해 이에 대한 해결방안이 연구되어지고 있다.

3.3 나노촉매 방식

3.3.1 UV/광촉매 방식

UV/광촉매 방식은 태양에너지를 흡수하고 광에너지에 의한 화학적 반응을 유도하여 공기 중에 존재하는 유해한 유기물질(VOC), 황화수소, 암모니아, NOx, SOx 등의 가스를 제거할 뿐만 아니라 발생된 광전자로 먼지 등을 대전시켜 제거하는 기술이다. 이러한 반응의 초기 유발을 도와주는 물질을 광촉매라고 하고 주로 반도체 재료인 TiO_2, SiO_2, ZnO, WO_3 등이 사용된다. 이중 Anatase type의 TiO_2 가 가장 많이 사용되고 있는데 이는 다른 것에 비해 활성도가 높고 인체에 무해한 물질이며 화학적 안정성을 지니고 있기 때문이다.

그림 5는 광촉매반응이 일어나는 과정을 보여준다. TiO_2와 같이 띠간격(band gap)이 큰 반도체(3.2 eV)에 띠간격 이상의 에너지를 가지는 파장(λ <400 nm)의 자외선이 조사되면, 반도체의 띠간격 이상의 에너지를 갖는 광자($h\nu \geq E_g$)가 흡수되어 공유띠(valence band)에서 전도띠(conduction band)로 전자여기(electron excitation)를 일으키게 된다. 이때 TiO_2 표면에 있는 전자(electron)는 공유띠에서 전도띠로 전이가 일어나게 되고 이로 인하여 공유띠에는 정공(hole)이 생성된다. 이렇게 생성된 전자와 정공은 TiO_2 표면으로 확산 이동하게 된다. TiO_2 표면에 흡착된 물이나 OH^-가 정공과 반응하여 OH 라디칼을 생성하기도 하고 산소의 경우에는 전자와 반응하여 O_2^{2-} 라디칼을 생성하여 TiO_2 표면의 유기물질 등을 분해하게 된다. 이때

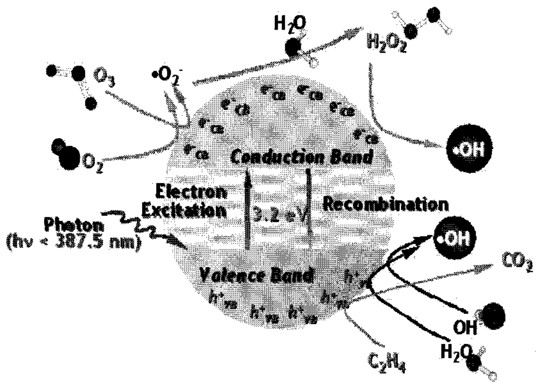


그림 5. 광촉매 방식

OH 라디칼과 O_2^{2-} 라디칼은 반응의 중간생성물로 생성되는 H_2O_2에 의하여도 생성되기도 한다.

H_2O_2, O_2, HO_2·은 생성된 전자를 소비하여 재결합(recombination)을 방지하고 OH 라디칼의 생성을 증가시키며, 광촉매 반응에서 생성된 OH 라디칼과 O_2^{2-} 라디칼은 유기물질을 산화시키는 산화제로 사용된다.

이와 같은 반도체 광촉매(SC)를 이용한 광산화·환원반응의 일반적 경로를 아래 반응식으로 나타낼 수 있다.

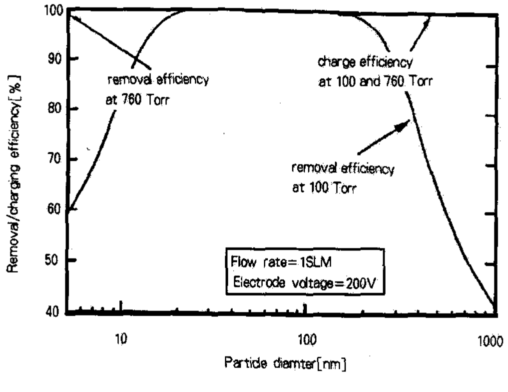
$$SC + h\nu(\geq E_g) \rightarrow e_{cb}^- + h_{vb}^+$$

$$e_{cb}^- + h_{vb}^+ \rightarrow SC + hv(or\ heat)$$

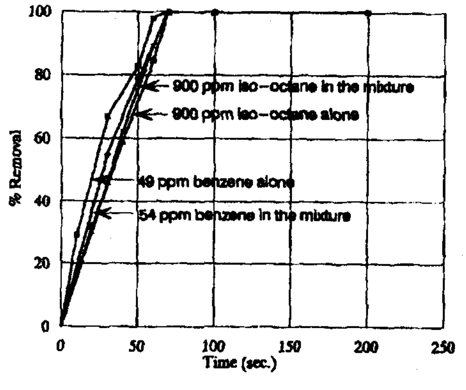
여기서 $h\nu$는 조사되는 빛에너지를 나타내는데 다시 h는 Planck상수이고 ν는 frequency로 빛의 속도를 파장으로 나눈 값이다.

그림 6은 UV/광촉매 방식에 의한 입자 및 가스의 제거효율을 보여준다. (a)는 Shimada 등의 연구결과에 기초한 그래프로 압력에 상관없이 Shimada에 의해 제안된 UV/광촉매 공기청정기에서 입자의 하전율이 거의 100%에 이르는 것으로 나타났다. 따라서 적절한 집진판을 설치하여 대기압상태에서 입자의 제거효율을 측정하면 거의 100%가 된다. 그리고 (b)는 고농도의 VOC에 대하여 반응기에 머무르는 시간에 따른 가스제거효율을 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 시간이 지남에 따라, 그리고 VOC의 농도가 작아짐에 따라 제거효율은 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 이 방식은 trichloroethylene을 완전히 산화시킬 수 없으며, 광촉매가 활성을 잃었을 경우 수증기를 포함한

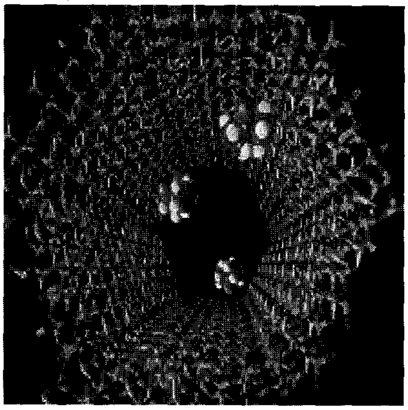


(a) 입자집진효율

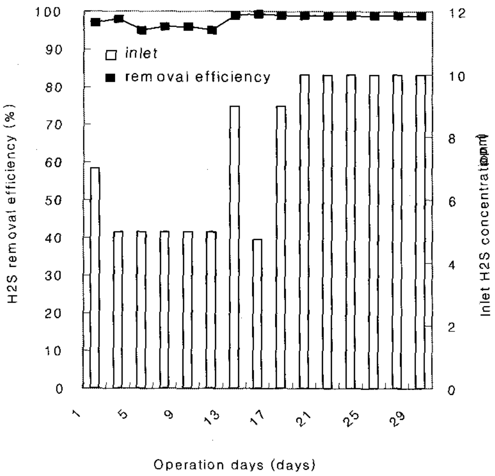


(b) 가스제거효율

그림 6. UV/광촉매 방식에서의 입자 및 가스 제거효율



(a) 담지된 나노촉매의 형상



(b) 가스제거효율

그림 7. 담지촉매를 이용한 방식

공기로 재생시켜야 하는 문제가 있고 광촉매 표면에 반응의 중간체(intermediates)나 생성물(by-product)이 흡착되거나 많이 존재하는 경우에는 촉매활성을 저하시키는 단점이 있다.

광촉매 활용기술의 실용화 가능성을 뒷받침하는 또 다른 기술로는 나노소재를 이용하여 표면적을 증가시키는 광촉매 제조기술이 있으며, 전자와의 친화력이 강한 귀금속 촉매의 첨가로 전자-정공 재결합 반응을 억제하여 광분해 효율을 증가시키는 기술, 그리고 산화, 환원반응을 선택적으로 유발시키는 다른 금속산화물과의 composite 구성 기술 등이 있다.

3.3.2 담지촉매 방식

촉매의 활성은 활성성분의 표면적이 클 경우 높게 나타난다는 것은 이미 잘 알려진 사실이고 이러한 관점에서 오랫동안 촉매연구자들은 나노란 개념이 도입되기 이전부터 활성 촉매입자를 가능한 한 작게 유지하려 노력해 왔다. 그러나 활성촉매의 크기가 작다고 해서 반응활성이나 촉매안정성을 제공하지는 않지만 이들 촉매작용을 촉진할 수 있는 필요조건이 된다. 이러한 이유로 광촉매방식과 더불어 활발하게 개발하고 있는 방식이 담지촉매를 이용한 공기청정방식이다.

이러한 담지촉매 방식은 금을 Fe_2O_3, Co_3O_4나 TiO_2 등의 담체에 나노크기로 담지하는 방법, 제오라이트 같은 나노세공체에 활성금속 또는 금속산화물을 나노크기로 담지시키는 방법, 산화물에 나노활성물질을 담지시키는 방법등이 있고 이 방식들은 화학촉매나 환경촉매로 매우 높은 활성을 보이는 것으로 나타났다. 금이 나노크기로 담지되는 경우, -70℃에서도 CO에 대해 높은 산화력을 보이고, 크기가 작아질수록 CO 산화반응의 활성은 현격히 증가하게 되는 것으로 알려져 있다. 이렇게 나노크기로 담지된 촉매의 저온에서의 높은 산화력은 악취물질의 제거에 유용하게 사용되고 있으며 H_2S나 황화합물에 높은 흡착능력을 가지고 있어 이들의 산화반응에 매우 효과적인 것으로 알려져 있다. 또한 Fe_2O_3이 제오라이트 같은 나노세공체에 나노크기로 담지되는 경우에는 NOx, 황화수소나 암모니

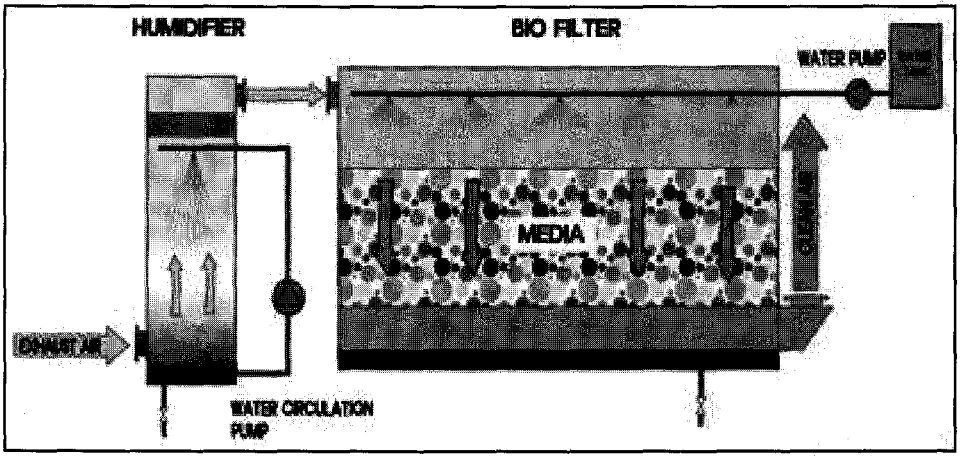


그림 8. 바이오필터

아 같은 대표적인 악취물질을 제거하는 중요한 반응인 산화-환원(redox) 반응이 촉진될 수 있다는 것이 증명되었고, 산화철을 마그네슘이외의 다른 금속산화물에 담지시키는 경우에도 담지된 산화철이 13K의 저온에서 상자성(paramagnetic)의 특성을 가지고 있어 산화-환원반응에 효과적인 활성점이 될 수 있는 것으로 나타났다.

이러한 이유로 이렇게 제조된 나노담지촉매는 NOx, VOC 뿐만 아니라 대표적인 악취물질인 H_2S, NH_3 등의 가스를 제거하기 위하여 주로 이용되고 있고 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 높은 처리 효율을 보인다. 그림에서 보듯이 Fe/MgO 촉매를 이용한 악취처리기술은 황화수소나 암모니아에 대해 95% 이상의 높은 효율을 보여주고 있다. 이러한 이유로 Fe_2O_3에 담지된 나노금촉매는 일본에서 악취제거제로 상용화되어 많이 사용되고 있다.

3.4 바이오필터

바이오필터는 가스속의 오염물질을 생물학적으로 처리하는 방법 중의 하나로서, 미생물을 다공성의 담체에 고정화시켜 미생물의 대사활동에 의해 오염물질을 물, 이산화탄소 그리고 무해한 염으로 분해하는 환경친화적이고 경제적인 기술이다. 이러한 바이오필터 방식은 1957년 Pomeroy에 의해 개발되었으며, 1970년대에 들어 네덜란드와 독일을 중심으로 개방형 바이오필터로 발전하게 되었다. 그 후 북유럽에서 지금의 바이오필터 시스템으로 발전시켜 현재 미국을 비롯한 선진국에서는 악취 및 VOCs 처리기술 중에 BACT(best available control technology)로 인정받고 있으며, 국내에서도 공기처리, 하수처리장, 퇴비장 등을 시작으로 많은 분야에 적용이 확대되고 있다.

바이오필터 방식은 최대의 효율을 유지할 수 있도록 필터층에 있는 미생물의 서식환경을 최적화하는 것이 가장 중요한 요소이다. 따라서 바이오필터는 온도, 습도, 분진 등을 전처리할 수 있는 전처리부, 오염물질을 분해하는 필터반응탑, 그리고 송풍기, 제어판, 영양분탱크 등을 포함하는 부대설비로 구성된다. 이 방식은 공기 중에 존재하는 오염물을 분해하기 위해 세공매체에 고정된 미생물을 이용한

다. 악취 및 VOCs를 포함하는 가스는 필터반응탑을 통과하는 동안 미생물담체에 흡착되거나 담체표면에 형성된 바이오필름에 흡수된 후 미생물에 의해 분해가 된다. 필터반응층에서 오염물질을 생물학적으로 분해하는데는 호기성 미생물이 중요한 역할을 하는데 바이오필터에서는 폐가스 속의 오염물질을 탄소원으로 이용하는 종속영양세균(hetero-organotrophic)과 이들과 상호작용을 하는 독립영양세균 등의 10종 이상이 주로 이용된다. 미생물에 의한 효소작용으로 유해가스와 VOCs, 악취 등을 분해하는 반응기작은 다음과 같다.

- **질소계열 악취**

  $NH_3 + O_2 \rightarrow$ (질산화세균) $\rightarrow NO_2^-$ or NO_3^-

- **황계열 악취**

  $H_2S + O_2 \rightarrow$ (황산화세균) $\rightarrow$ S or SO_4^{2-}

- **VOCs**

  $HC + O_2 \rightarrow$ (VOCs 분해세균) $\rightarrow H_2O + CO_2$

바이오필터는 미생물이 내부에 존재하기 때문에 온도, 수분, pH, 영양분 등의 인자에 영향을 받는다. 일반적으로 온도 20~40℃, 상대습도 90%이상이 되도록 유지해야 하고 항상 적정수분을 확보할 수 있어야 한다. 그리고 pH는 6~8범위(황산화 세균의 경우, pH는 2이하 유지)를 유지해야 하며, 탄소원, 질소, 인 이외의 칼륨, 황, 칼슘, 철 등 미량의 영양분이 필요하다. 이러한 조건들이 유지되는 상태에서 실험을 수행한 결과, 가스에 대한 제거효율이 80~99%임 보였으며 분진에 대한 제한적인 처리가 가능한 것으로 보고 되었다. 이 방식은 저농도, 고풍량의 복합가스처리에 적합하고 2차오염이 없으며 운전비용이 적게 든다는 장점이 있지만 장치의 설치 면적이 크고 고온 배출가스 및 고농도 가스 처리에는 부적합하며 항상 적정습도를 유지해야만 하는 단점도 있다.

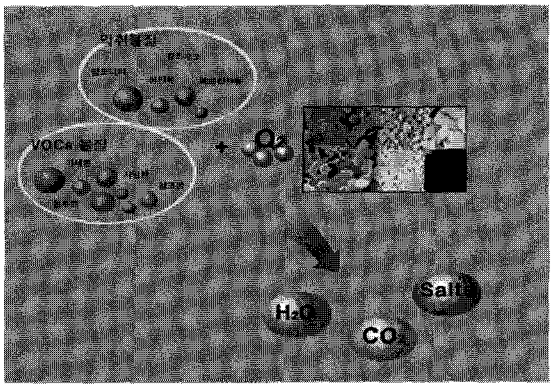


그림 9. 바이오필터의 제거원리

최근 미국을 비롯한 선진국에서는 이 방식에 대한 연구개발이 가속화되고 있으며 특히 미생물인 박테리아를 이용하여 독성가스를 생물학적으로 분해하는 연구를 많이 수행하고 있으나 기술적인 적용은 아직 실제로 중요하게 얻어진 것은 없고, 단지 몇 가지의 공정에 대해서만 박테리아가 적용되어 질 수 있다고 알려져 있다. 국내에서도 바이오필터를 이용하여 VOC의 일종인 휘발유나 벤젠, 톨루엔, 자일렌 등의 유독물질을 정화하는 장치를 개발하여 사용되고 있다.

3.5 하이브리드(hybrid) 방식

최근에 개발된 실내용 공기청정기에 많이 사용되고 있는 하이브리드 방식은 입자상과 가스상 오염물질을 동시에 제거하기 위한 부분이 모두 포함되어 있다. 이 방식은 일반적으로 그림 10과 같이 집진필터부와 탈취필터부, 항균필터부, 음이온 발생부 등으로 구성되어 진다.

집진필터부는 전기집진방식, 또는 정전기를 대전시킨 정전필터가 사용되고 반도체 공장의 클린룸 등에서 사용되는 HEPA나 ULPA필터 등을 사용하

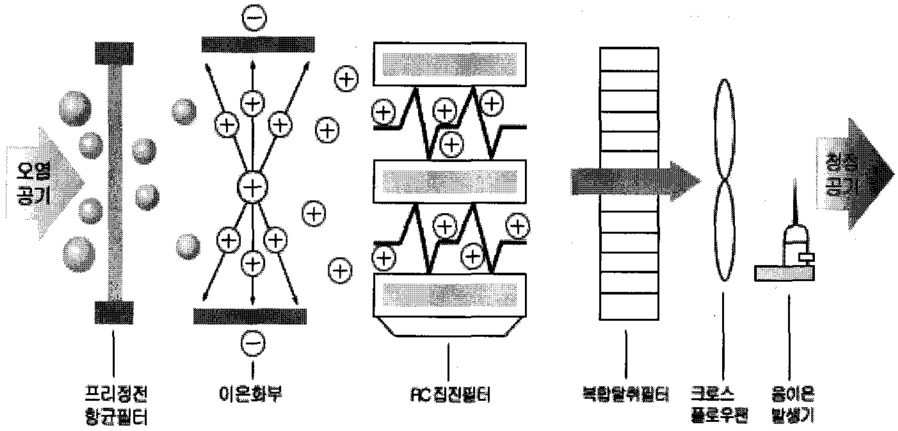


그림 10. 하이브리드 방식

기도 한다. 탈취필터는 공기 중의 냄새를 제거하기 위한 목적으로 활성탄과 활성 알루미나를 많이 사용한다. 활성탄에는 특수가공을 하여 탈취효율의 향상과 장수명화를 꾀하기도 한다. 활성알루미나는 활성탄과 비슷한 다공성 물질로 칼륨과 망간산염을 포화시켜 사용한다. 여기서 칼륨은 냄새분자를 산화시키는 강한 산화제의 역할을 하므로 이들은 실내에서 제어해야할 포름알데히드를 산화하여 이산화탄소와 물로 변환시키는데 매우 효과적이다. 최근에는 광촉매에 자외선을 쬐게하는 것에 의해 산화반응을 촉진시켜 악취를 산화, 분해하는 UV/광촉매장치와 플라즈마 방전에 의해 냄새를 제거하는 장치를 사용하는 것도 있다. 또한 필터표면에 항균가공을 하여 곰팡이나 세균이 번식할 수 없도록 항균처리된 재료를 사용한 항균필터도 있다. 그리고 그 효용이 확실하게 입증되지는 않았지만, 인체 세포 내로 음이온을 공급해줌으로써 신진대사를 원활하게 해준다는 보고를 통해 음이온 발생기가 사용되기도 한다. 그러나 음이온을 발생시키기 위해서 음코로나 방전(Negative Corona Discharge)기술을 주로 사용하는데, 실제의 경우 많은 양의 음이온이 발생되는 동시에 오존도 많이 배출되어 인체에 심각한 문제를 일으킬 수도 있는 것으로 알려져 있다.

이 방식은 장치가 구성되는 방식에 따라 달라지지만 현재 일반적으로 사용되고 있는 공기청정기에서는 입자상 물질에 대해 90%이상, 가스상 물질은 80%이상의 제거효율을 나타내고, 곰팡이 등의 균류에 대한 살균성능은 99%이상인 것으로 보고 되고 있다. 이와 같이 집진성능 및 살균성능이 우수한 이유는 하이브리드 방식에 사용된 각종 필터들이 입자 및 가스 등을 중복하여 제거하기 때문이다. 따라서 추후에는 이 방식에 대한 성능 최적화 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 맺음말

본고에서는 공기청정기에 사용되고 있는 정전분무 방식, 저온 플라즈마 방식, UV/광촉매 방식, 담지촉매 방식, 바이오필터, 하이브리드 방식 등의 신

기술에 대하여 개략적으로 논하였다. 최근 들어 생활수준의 향상으로 실내공기질에 대한 관심이 증대되고 공기청정기의 수요가 폭발적으로 증가하여 국내 공기청정기 시장이 이미 천억원을 넘어서고 있으며 매년 20%정도 급성장하고 있지만 아직까지 국내 공기청정기 업체들은 해외 선진기술을 도입하여 생산, 판매하는 수준에 머물러 있어 독자적인 공기청정 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 따라서 미세입자 및 가스제거기술과 관련된 지속적인 투자와 연구를 수행하여 향후 상당한 규모의 잠재력을 가진 공기청정기 시장에 대한 국제적인 경쟁력을 갖춰야 할 것이다.

- 참고문헌 -

1. 오명도, 노광철, 2003, "실내 공기청정기술 및 성능평가", 대한설비공학회 공조부문 학술강연회, pp. 237-242.
2. 한국과학기술정보원, 2002, "공기정화기", 심층정보분석보고서.
3. 오명도, 2000, "21세기 공기청정기술의 발전동향", 공기청정기술, 제13권 제1호, pp. 15-33.
4. Minuno, A., 2000, "Electrostatic Precipitation," IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 7, No. 5, pp. 615-624.
5. Noh, K.C., Lee, Y. H., Oh, M. D., 2003, "Generation characteristics of ozone and NOx and particle removal in the electrostatic precipitator", AAC2003.
6. 안강호, 안진홍, 김광영, 2002, "정전분무이용 나노먼지 대전 및 집진기술," 공기청정기술, 통권 57, pp. 14-23.
7. Chen, D., Pui, D.Y.H., and Kaufman, S.L., 1995, "Electrospraying of Conducting Liquids for Monodisperse Aerosol Generation in the 4nm to 1.8um Diameter Range", J. of Aerosol Sci., Vol. 26, No. 6, pp. 963-977.
8. 황정호, 2002, "저온플라즈마를 이용한 공기청정기술," 공기청정기술, 제14권,제1호, pp. 87-89.
9. 황정호, 변정훈, 2002, "실내공간 나노입자와 가스상 물질 동시저감기술," 공기청정기술, 제14권 제2호, pp. 1-13.
10. Niu, J .L., Tung, T. C. W., and Burnett, J., 2001, "Quantification of Dust Removal and Ozone Emission of Ionizer Air-Cleaners by Chamber Testing," J. Electrostatics, Vol. 51-52, pp. 20-24.
11. 정광덕, 주오심, 2002, "나노촉매이용 악취제거," 공기청정기술, 통권 57, pp. 24-32.
12. 김용진, 2000, "지하공기정화용 UV 공기정화시스템," International Symposium on Air Cleaning Technology.
13. 김용진, 1999, 광촉매에 의한 가스상 오염물질 제어기술, 공기청정기술-한국공기청정협회, Vol. 12, No. 2, pp. 15-25.
14. 이태규, 김종순, 최원용, 2001, "나노 광촉매의 제조와 전망", Vol 4, No.6, pp. 28-43.
15. 강준원, 박훈수, 최광호, 1995, "이산화티타늄 광촉매에서의 광분해반응에 의한 유기물질 제거에 관한 연구", 대한환경공학회, Vol. 17, No.3, pp. 283-294.
16. 유경훈, 1999, "UV/광전자법을 이용한 클린룸 미세입자 제어기술", 공기청정기술지, 제12권, 제2호, pp. 58-78.
17. 이성화, 2001, "실내 부유미생물과 공기청정", 공기청정기술세미나, pp. 33-40.
18. 엔바이온, 2003, "악취 및 휘발성유기물질을 처리하기 위한 생물학적 처리기술(biofilter)", 엔바이온 기술자료집.