

실내공간 나노입자의 가스상 물질 동시 저감 기술

황정호 · 변정훈 | 연세대학교
기계공학부 교수 · 대학원생
E-Mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

1. 머리말

나노입자는 통상적으로 그 물질의 미세구조의 크기가 100 nm 이내인 말한다. 연구자에 따라서는 50 nm 이내로 혹은 1-10 nm의 미세구조 물질로 정의되는 경우도 있지만 최근 과학기술부 주관으로 진행되는 뉴프런티어사업, 나노기술연구개발사업, 나노표준화사업 등을 볼 때 작게는 분자크기인 수 Å에서 크게는 몇 백 nm의 크기 액체 및 고체입자도 나노의 범주로 보고 있다. 반면 미세입자는 통상 2.5 μm 이하의 입자상 물질을 총칭한다.

국내에서의 실내공기질 개선에 관한 연구는 아직 미흡하지만 2002년 3월 15일에 환경부와 한국공기청정연구조합 후원으로 실내공기질 통합관리체계 구축을 위한 정책토론회가 열렸으며 그 결과 지하생활공간 공기질 관리법(1997년 환경부령으로 제정)을 실내 공기질 관리법으로 강화시켜 국회에 상정하기에 이르렀다. 현재 국내 실내공기환경 관련 기준은 중앙관리방식의 공조설비를 갖춘 건물에 대하여 건축법 시행규칙 23조의 건축물 설비기준 등에 의한 규칙과 공중위생법의 실내공기 환경기준이 아래의 표 1과 같이 설정되어 있다. 최근의 황사, 중금속, VOC, 미세먼지 문제 등을 고려한다면 현재의 이 기준은 앞으로 강화될 전망이다. 또한 실내의 먼지 관련기준이 실외의 기준과 동일한 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 임을 고려한다면, 이는 실내를 깨끗이 하기 위하여

외부의 공기로 환기시키는 것으로는 실내를 깨끗이 할 수 없고, 별도의 공기정화설비를 사용해야 함을 의미한다.

중앙 관리식 냉난방시스템을 채택하는 경우 실내의 채실공간에 필요한 열량을 공급하고 인체유해 오염물질을 제어하도록 필요한 환기량을 설정하고 있으나 기술자의 경험과 반복적인 조정을 통한 외기용 댐퍼의 각도나 개구면적을 조정함으로써 Zone별 공급 외기량을 조절하는 방법을 채택하고 있는 실정이다. 더욱이 주상복합빌딩, 오피스, 고급 아파트 등에 채택되어 있는 환기시스템들은 집진기능이 부가되어 있지 않아 대기중의 분진 및 mist 등에 의해 사용 후 수개월 이내에 열교환면이 오염되어 성능 저하가 초래되고 있으며, 실내의 디퓨저까지 연결되는 덕트 내의 오염을 가속화시켜 실내 공기질의 악화를 초래할 수도 있는 실정이다. 일반적인 아파트의 경우는 더 열악하여 공조식 환기장치는 거의 없는 실정이다. 현재 일반적인 대형 건물의 환기설비를 살펴보면, 외기가 실내로 유입되는 부분에는 10 μm 이상의 분진을 제거하기 위해 Pre-Filter와 Medium-Filter가 사용되고 있고 다시 미세먼지 등을 제거하기 위해 HEPA 필터 등 고성능에어필터 또는 소형 전기집진기를 사용하며 악취 등을 제거하기 위해 활성탄 필터를 사용한다. 이와 같이 집진법은 PM을 제거하기 위하여 많이 사용되고 있으나 최근 관심 대상인 미세입자/Nano

표 1. 현재(2002년)의 실내환경기준 및 외국의 기준

구 분	실내 위생관리 기준	외국 기준
TSP($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	150	150 (일본빌딩위생관리법, 노동안전 위생법)
CO(ppm)	10	10 (일본빌딩위생관리법, 노동안전 위생법) 20 (일본 학교위생 기준) 9 (WHO기준, 8시간), 35 (WHO기준, 1시간)
CO2(ppm)	1,000	1,000 (일본건축기준법, 빌딩, 노동안전) 1,500 (일본학교환경기준) 920 (WHO기준, 8시간)
온도	17 - 28℃유지	10 - 30℃ (일본학교환경기준)
상대습도	40 - 70%	30 - 80% (일본학교환경기준)
기류	0.5m/sec	-
조명	100lux이상유지	200 lux이상 (일본학교환경기준)
낙하세균	-	평균 30개 이상
이산화질소 (ppm)	-	0.21 (유럽기준) 5 (일본산업위생허용기준)
아황산가스 (ppm)	-	5 (일본산업위생허용기준) 0.04 (일본공해대책기본법)
포름알데히드 (ppm)	-	0.1 (유럽기준) 2 (일본산업위생허용농도)
석면 (개/cc)	-	0.01 (미국 석면 긴급대책법) 2 (일본 산업 위생학회)
라돈 (Bq/m ²)	-	100 (WHO 유럽 신축주거) 70 (스웨덴 신축주거) 100 (일본 과기청고시) 3700 (미국광산위생국)

입자들의 포집효율은 저조한 실정이다. 미국에서는 1998년도부터 PM2.5에 대한 규제기준이 적용되고 있으며, PM2.5 중에서도 특히, 0.1 - 1 μm 의 미세입자들과 그 이하의 Nano 입자들은 장시간 공기 중에 부유하여 폐 깊숙이 침투해 암을 유발하거나 돌연변이를 유발할 수 있다고 알려져 있다.¹⁾ HEPA

필터 등은 포집효율은 우수하나 가격이 비싸고 보수유지를 자주 해야 하는 단점이 있으며 압력손실이 커지게 되므로 장치가 커지고 에너지 손실이 증가하게 된다.

그리고, 기기의 보전에 대한 것으로 전자공학이나 정밀공학의 기술 발달과 더불어 정밀도가 높은

기기의 사용이 증가하고 있다. 이러한 정밀기기의 안전한 작동을 위하여 정밀기기가 설치된 실내의 공기오염도는 매우 중요한 요소이다.¹⁾ 이러한 경우에, 종류에 따라 다르지만, 대개는 사람(재실자)을 대상으로 한 실내의 환경기준보다 엄격하게 관리되며, 이를 위하여 성능이 높은 고성능 공기청정장치를 필요로 하고 있다. 또한, 제품의 품질 유지는 반도체 IC의 제조공장이나 필름공장, 정밀도가 높은 베어링 제조공장 등에서는 공기 중의 미세입자가 매우 중요한 요소이다. 제품의 제조과정에서 미세입자와 같은 오염물질이 부품에 부착된다면 품질의 저하를 초래하거나 불량품의 발생빈도가 증가한다. 따라서 이러한 공장에서는 공장 전체 또는 가장 중요한 작업을 실시하는 공정에 대하여 오염방지 및 제어설비가 필요하며 공기환경을 청정한 상태로 유지하여야 한다. 이러한 목적의 공간을 공정 클린룸이라고 하며, 여기에는 매우 성능이 높은 공기청정장치가 요구된다. 그 외, 동·식물, 식품, 의학 등에 관련된 무균실은 약품공장, 병원의 수술실, 식품공장 등에서 내부의 공기를 무균상태로 유지하는 것이 중요하다. 이러한 곳에서는 고성능 공기청정장치를 사용하여 실내 공간의 무균화를 실현할 수 있으며 이러한 실을 무균실 또는 바이오 클린룸(BCR : bio-clean room)이라고 한다.²⁾

2. 기술동향

공기청정기란 에어필터와 같이 공기 중에 포함되어 있는 오염물질을 제거하기 위한 소재나 단위 장치를 의미하나, 넓은 의미로는 클린룸이나 클린벤치와 같이 공기청정을 위한 총체적 청정시스템을 포함한다. 공기청정기는 실내의 위생환경과 작업환경을 유지하기 위한 용도와 배출되는 오염물질에 의한 대기오염을 방지하는 용도로 사용되고 있다. 실내로 청정공기를 공급하기 위한 공기청정장치는

건축물의 공기조화장치나 환기시스템의 일부로서 급기 중의 오염물질을 제거하기 위하여 도입외기와 재순환공기의 급기 측에 설치된다. 그러나 다량의 오염물질이 발생하는 공장 등에서 사용되는 배출공기 정화장치는 대기오염을 방지하기 위하여 배기 측에 설치하고 오염물질을 제거하여 대기로 방출한다.³⁾ 공기청정장치는 그 종류가 매우 다양하며 여러 가지 관점에서 분류할 수 있다. 실내공기청정기의 종류는 대부분 실내에 부유하는 입자 및 가스상 물질을 제거하기 위해, 두 부분으로 나뉘어져 구성된다. 그리고, 이에 적용되는 장치의 결정은, 목적하는 용도에 따라 이루어진다.

나노입자를 포함한 입자상 물질을 제어하는 방식에는 크게 여과집진과 전기집진의 두 가지 방식으로 나눌 수 있다. 그 외 여러 가지 방식이 있지만, 효율이나 부수적인 문제를 고려할 때, 나노입자의 제어에는 그 성능이 주목할 만하지 못하다. 여과집진이란 말 그대로 필터를 통해 관성충돌, 중력침강, 차단, 확산 등의 포집메카니즘에 의해서 입자를 제거하는 방식을 말한다. 나노입자에 대해서는 중력침강 외의 메카니즘들에 의해서 입자를 제거하며, 이를 제거하는데 가장 효과적인 것으로 HEPA 필터와 ULPA 필터가 대표적이다. HEPA 필터는 미국 Military에서 제시한 $0.3\mu\text{m}$ 크기의 DOP(Di-Octyl Phthalate)입자에 대해 99.97%의 제거효율을 가진다. 그리고, ULPA 필터는 $0.12\sim 0.17\mu\text{m}$ 범위의 입자에 대해 99.9995%의 제거효율을 가진다. 이들 고효율 필터는 대개 전자 및 반도체분야의 클린룸이나, 실내공기청정기에서 입자상 물질을 포집하는데 주로 사용된다.

$0.3\mu\text{m}$ 크기정도의 입자를 전후로 그보다 작은 입자에 대해서는 입자의 브라운 운동에 의해서, 그리고 그보다 큰 입자에 대해서는 입자의 관성 및 차단에 의해서 제거효율이 좋아지므로 필터성능곡선은

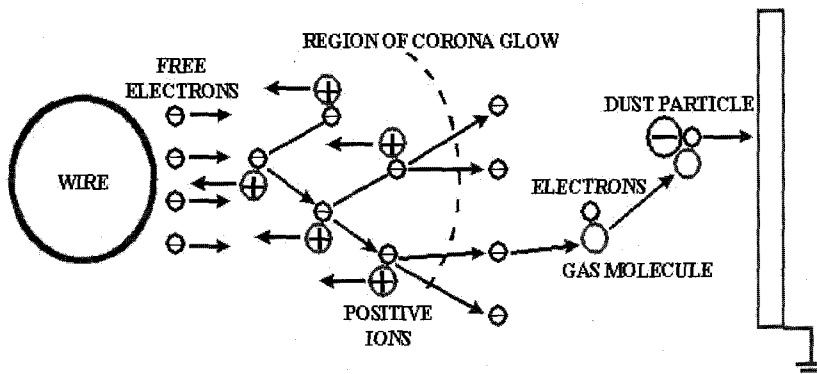


그림 1. Corona Discharge (Negative)

0.3 μ m 크기범위 근방을 기준으로 전후로 제거상승 곡선을 그린다.⁴⁾ 이러한 성능만을 보면 HEPA 필터와 ULPA 필터만으로도 나노입자의 제어는 해결된 것이라고 생각할 수 있으나, 공기청정장치를 설치하고 운영할 때, 빼놓아서는 안 될 경제성의 문제를 고려하면, 필터의 높은 설치비 그리고 재생이 거의 불가능한데서 오는 교체에 드는 비용, 또한 높은 제거효율에 뒤따르는 큰 압력강하(공기청정장치에서의 풍속이 2.5 m/sec일 때, HEPA 필터는 25 mmAq 정도이고 ULPA 필터는 25~50 mmAq 정도임. 전기집진기의 경우는 설계에 따라 다르지만, 5 mmAq 이내로 거의 0에 가깝다)에 의한 유지비 부담의 문제로 소규모 실험실의 용도를 제외한 산업용도로서는 낮은 경쟁력을 갖는 문제가 있다.

그리고, 전기집진 방식이 있는데, 이는 그림 1과 같이 코로나 방전(Corona Discharge)을 통해서 생성된 양 또는 음이온이 입자에 붙어서 입자를 하전시켜 반대 극성으로 대전되어 있는 집진판으로 포집시키는 기술을 말한다. 형광등 내 약 0.01 기압 이하에서 불빛을 나타내는 글로우 방전(Glow Discharge)과는 달리 코로나 방전은 상압 혹은 그 이하에서 주로 발생된다.^{5,6)} 코로나 방전은 또한 발

생되는 전자의 충돌작용으로 생성되는 반응활성종(Radical)에 의한 NO_x, SO_x, VOC 등의 유해가스의 산화에도 많이 이용되고 있다. 코로나 방전을 야기시키는 전극형상은 Wire-to-Plate가 가장 많이 사용되는데, Wire의 두께나 표면 형상에 변화를 주어 입자의 하전효율을 상승시키기도 한다.^{7,8)} 이러한 방전을 통한 전기집진은 주어진 운전조건에 따라 차이는 있으나 질량제거효율이 약 99% 정도인 고효율 집진장치이다. 또한, 여과방식에 비해 낮은 압력강하로 인한 적은 유지비와 한 번 설치 후에 추가적으로 변동비가 들지 않아서 경제적이다. 하지만, 집진 효율을 보통 질량기준으로 하기 때문에, 99% 이상의 효율을 가진다고 해도 큰 입자에 비해 상대적으로 작은 질량을 가진 나노입자의 제거효율에 대해서는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제로 나노입자의 집진에 대한 문제를 해결하기 위한 연구는 끊임없이 이루어지고 있는 실정이다.

실내에서 발생하는 CO₂, VOC, 악취 뿐 아니라 외부에서 유입되는 NO_x, SO_x 등 가스상 유해물질의 제거는 인체에서 기기에까지 악영향을 준다는 점에서 반드시 제어되어야 한다. 현재 실내공기청정을 위해서 사용되는 공기청정기에는 입자상 물질

HEPA필터방식



(a) 여과방식 공기청정시스템

전기집진방식



(b) 전기집진방식 공기청정시스템

그림 2. 실내공기청정 시스템

의 제거부분과 함께 이와 같은 가스상 오염물질을 제거하기 위한 부분이 함께 포함되어 있으며 이를 여과방식 및 전기집진 방식으로 나누어 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보면 활성탄 필터 등의 흡착작용을 사용해서 유해가스를 처리하고 있음을 알 수 있다. 흡착작용에 의한 제거방법은 무수히 많은 작은 구멍들을 갖는 활성탄, 활성백토, 규조토 등의 표면에 물리적 또는 화학적으로 가스상 물질을 흡착시켜 제거하는 방법이다. 이러한 흡착제는 덩어리 모양으로 성형하여 에어필터와 같은 형태로 충전하여 만든다. 활성탄은 뛰어난 흡착능을 통해서, 악취와 VOCs에서 오존까지도 빠르게 제거할 수 있는 특징을 가진다. 그러나 활성탄(AC) 필터는 유해물질의 흡착 후 분해가 어려워 사용시간이 지남

에 따라 필터의 표면이 포화되어 필터의 재사용이 어렵고 사용한 필터의 폐기가 불가피하여 이에 따른 2차적 환경오염을 야기 시키는 단점이 있다.

그림 2에서는 또한 최근에 그 효율이 확실하게 입증되지는 않았지만, 인체 세포 내로 음이온을 공급해줌으로써 신진대사를 원활하게 해준다는 보고를 통해 공기청정기와 더불어 음이온 발생기가 제품으로 많이 출시되고 있음을 보여준다. 음이온은, 음(-)전기를 띠는 일종의 미립자로서, 대부분 폭포나 계곡과 같이 물과 지면의 마찰 및 충돌 또는 소나무와 같이 잎이 뾰족한 침엽수가 어떠한 기상조건과 관련된 반응을 통해 많이 발생된다고 한다. 그렇기 때문에, 공기 중의 질소, 산소, 탄산가스, 수소, 수증기 등의 물질이 음전하를 가지게 되면서 음이온이 되는

것이 일반적일 것이다. 일반적으로 음이온을 발생시키기 위해서 음코로나 방전(Negative Corona Discharge)기술을 주로 사용하는데, 실제의 경우 많은 양의 음이온이 발생되는 동시에 오존을 많이 배출한다.⁹⁾ 오존은 인체에 대해 가슴과 목의 통증 및 기침 등을 유발할 수 있으며, 만성 호흡기 질환을 앓는 환자의 상태를 더욱 악화시킬 수 있는 것으로 미국환경보호청(EPA)은 발표하고 있다.

활성탄과 같은 흡착작용을 이용한 유해가스 처리 방법 외에는 산화법이 있다. 이는 가스상 물질을 산화시켜 제거함으로써 위생적으로 유해도가 작은 농도상태로 변화시킨다. 산화법에는 높은 온도에서 직접 산화시키는 산화법과 백금, 팔라듐 등의 촉매를 사용해서 상온보다 약간 높은 온도에서의 촉매 산화법이 있다. 즉 촉매에 어떠한 물리·화학적 자극이 가해져서 촉매에서 유해가스를 분해시킬 수 있는 물질이 발생되어 제거하는 것이다. 이것도 촉매의 촉매독 문제로 인한 처리의 안정성과 고가의 설치비용이 문제가 된다. 그 밖의 방법으로 액체용제를 이용하는 용해법이 이용되기도 하는데, 기포 분모 충전식 등에 의해 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 흡수시킨다. 습식 에어와셔 형식은 이와 같은 친수성 가스를 물방울이나 수막에 의하여 흡수 제거한다.

최근에는 설치비와 유지비의 저렴함과, 처리효율에서도 고효율을 가지는 전기적 방식의 유해가스 분해기술이 많이 대두되고 있다. 저온(상온)에서 특수한 방전방식으로 플라즈마를 발생하여 여기에서 나오는 반응활성종으로 유해가스를 분해하는 기술로 이는 악취, VOCs, NOx, CFCs 등^{10~20)}의 대부분의 유해가스 물질에 대해서 적용이 가능하다. 이

런 분야를 저온플라즈마 기술이라고 하며, 그 종류로는 유전체 배리어 방전(Dielectric Barrier Discharge; DBD)외에 코로나 방전, 마이크로웨이브 방전, 라디오주파수 방전 등이 있고, 공기청정기술에 주로 이용되는 기술은 DBD 방전 기술과, 코로나 방전 기술이다.^{21~25)} 무성방전(Silent Discharge)이라고도 불리우는 DBD 방전기술에 대해서 설명하면, 그림 3과 같이 고전압이 인가되고 접지 되는 양전극 사이에 세라믹과 같은 유전체를 두어 특수한 방전 시스템을 형성시켜 플라즈마를 발생시키고, 이때 발생하는 플라즈마의 온도는 낮지만(상온~1,000K), 전자(electron)의 온도를 10,000~100,000 K로 높게 유지시킴으로써 원하는 사용 목적에 따라 다양하게 적용된다.²¹⁾ 이는 보통 상압에서 한 쌍의 전극에서 한쪽 또는 양쪽 전극의 표면을 유리 등의 절연체(혹은 유전체)로 감싸고 전극간의 간격은 수mm 이내로 하여, 이 전극간에서 직접방전이 일어나지 않도록 해 두고 교류 전압을 가하는 경우로 유전체의 전하축적(Charge Build-Up)현상을 이용하여 교류전원에 의해 인가되는 전압효율을 극대화시켜서 Micro discharge를 통한 균일한 Streamer 혹은 Glow를 얻는다. 원래 DBD 방전기술은 수처리에서의 정수 및 하수 정화와 살균, 표백 등의 분야에 많이 이용되는 오존(ozone)의 발생장치로 주로 이용된 기술이다. DBD 방전시 높은 에너지를 가진 고농도 전자의 충돌현상으로 반응활성종이 생성되는데, 이것을 유해가스의 분해에 이용하는 것이 기술의 기본 내용이다. 그림 4는 특정 조건에서의 단 DBD 방전 사진 예를 보여준다.

정리하면 현재 국내 시장에서 이용되는 공기 정화 방식은 오존과 음이온 발생을 유도하여 오염원을 파괴하는 방법과 저온 플라즈마를 이용하는 방법, HEPA 필터 등의 여과재를 이용하는 방법, 광촉매 시스템을 이용하는 방법들이 있다. 또한, 경우

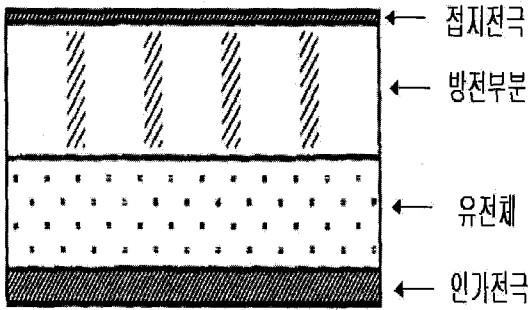


그림 3. Dielectric Barrier Discharge

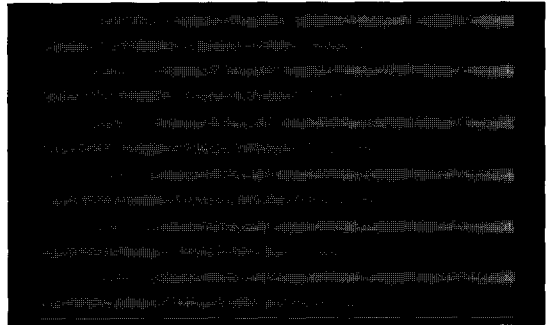


그림 4. DBD 방전시 발생 스트리머

에 따라서는 광 촉매와 저온 플라즈마 방법을 동시에 이용하는 것과 같은 hybrid 형¹¹⁾을 사용하는 경우도 있다. 전기집적의 예로 강남필터(KNC)의 CW 전기집진형 공기 여과기가 있으며 전기식/촉매식의 예로 LG전자의 LP-255CA 제품이 있으며, 필터식의 예로 삼성인버터에서 개발한 HEPA 필터를 사용 (300 nm 까지의 미세먼지를 포집) 하는 공기청정기가 있다. 저온플라즈마 방식은 유럽, 북미, 일본 등의 선진국에서 현재 많이 연구진행 중에 있으며, 뛰어난 처리효율, 운전의 용이성, 설치와 유지비의 저렴함으로 산업분야 및 실내공기의 정화시설에 유용하게 사용될 수 있을 것이라고 본다. DBD형 전기방전을 이용한 가스제거 연구는 캐나다의 McMaster 대학, 미국의 Tecogen 회사, 러시아의

Kurchatov 원자력연구소, 일본 오사카대학, 미국 Los Alamos, 중국의 Tianjin 대학 등에서 수행되어 왔다.

3. 나노물질 제거 기술

이상 입자상 및 가스상 물질의 제어에 대한 대표적인 기술을 언급하였는데, 입자상 물질의 제어 있어서는 HEPA 또는 ULPA 필터를 사용함으로써, 높은 효율을 가질 수 있으나, 설치 및 유지비의 문제로 경제적이지 못하다는 것이 해결해야 될 문제이며, 그 보다 효율은 떨어지지만, 비유적으로 경제적인 전기집진기술의 발전이 필요하다고 설명하였다. 또한 유해가스(VOCs, CFC, 악취, NOx 등)의 분해에 있어서는도 설치, 유지비 및 처리효율에 있어

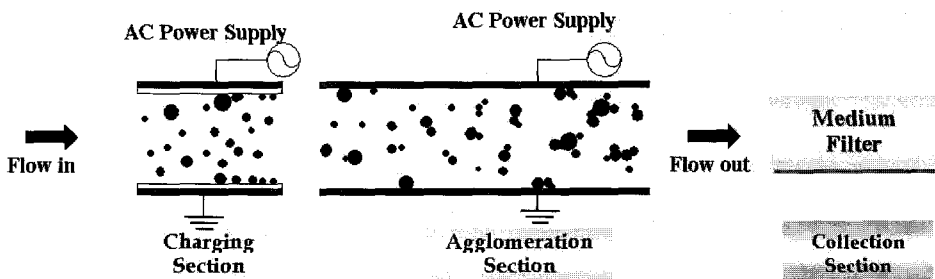


그림 5. 입자의 하전-응집현상

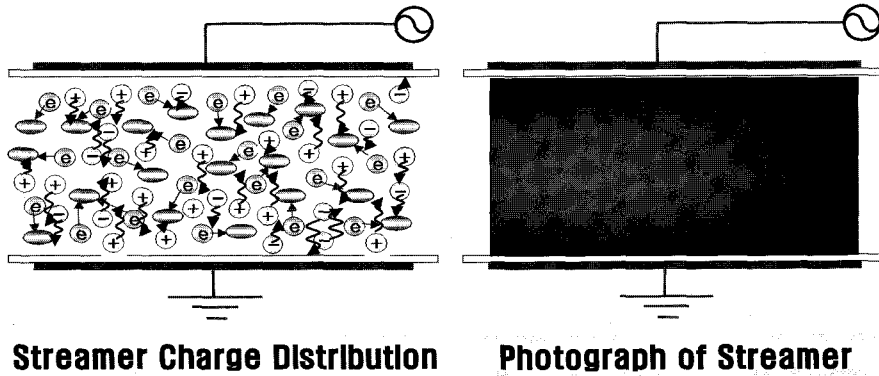


그림 6. DBD 하전기 내에서의 하전 분포

서 저온플라즈마 기술이 기존의 처리기술에 비해 경제적이라는 것도 설명하였다.

위에서 언급한 DBD 기술을 나노입자의 하전에 응용한다면, 한 Unit에서 나노크기를 포함하는 입자의 하전과 유해가스의 분해가 동시에 이루어질 수 있다는 장점을 가질 수 있다. 본 연구실에서는 DBD 기술을 이용해서 나노입자의 하전성능을 개선하고, 이어서 AC 교류전기장을 이용하여 DBD 장치 내에서 하전되어 나온 나노입자를 응집을 통해 크기를 성장시킴으로써, 후단에서 중성능 필터만으로도 나노입자를 포집 할 수 있는 연구를 진행 중에 있다. 그림 5에서는 장치의 개요도를 보여 준다. 그리고, 그림 6에서는 DBD에서 발생하는 스트리머(또는 균일한 글로우)의 실제 사진과 발생된 스트리머 내에서의 하전원리에 대해 나타내었다. DBD를 통해 발생된 전자는 매체(유입가스의 원자 단 혹은 분자)에 충돌하여 분자에서 전자를 떨어져 나가게 하여 양이온, 반대로 전자를 더 보유하게 하여 음이온을 생성시켜, 입자에 있어서 양극성 하전의 특징을 나타내게 한다. 실제로 DBD 장치 내에서 발생하는 전자에너지는 약 1~10 eV로 다른 방전기술보다 크므로²³⁾, 가스상 물질의 분해 또한 하나의 DBD 장치내에서 달성시킴으로써, 입자상 및

가스상 물질의 동시저감이 가능하다.

DBD형 전기방전을 이용한 나노입자 하전은 일본의 무사시 공업대학을 제외하고는 현재까지 발표된 연구가 없다. 그림 7을 보면 DBD 하전장치를 이용했을 때는 주파수의 영향이 없이 95%이상의 높은 집진효율을 가지고, DBD 하전방식을 사용하지 않은 기존의 하전방식에 의한 효율은 DBD 하전장치를 사용한 것보다는 낮은 효율로 주파수에 큰 변화를 가지는 것으로 나타났다.²⁶⁾ 그 외의 유사한 연구로 일본의 SINKO, 미국의 신시네티대학, 캐나다 기벨런대학 등에서 DC를 이용한 COSA/TRON 시스템, UV-광전자법 등을 이용하여 미세입자를 효율적으로 하전시키는 방법을 개발하여 왔다. 국내의 미세입자를 제어하는 기술로는 KIMM에서 개발중인 초음파 응집기가 있다.

이러한 기술이 무엇보다도 안정성과 신뢰성을 가질 수 있으려면, 장치의 작동에 최적의 운전상태를 결정하는 것이 중요하다. DBD 장치에서 입자상 물질에 있어서는 하전성능의 개선에 반하여 장치에 인가되는 교류전기장에 의해서 입자가 전극에 부착되는 현상이 나타날 수 있다. 입자가 전극에 부착되면서 오랜 시간 작동되면, 전극사이가 막히거나, 부착된 입자로 인한 국부적인 전류의 급상승으로 Arc

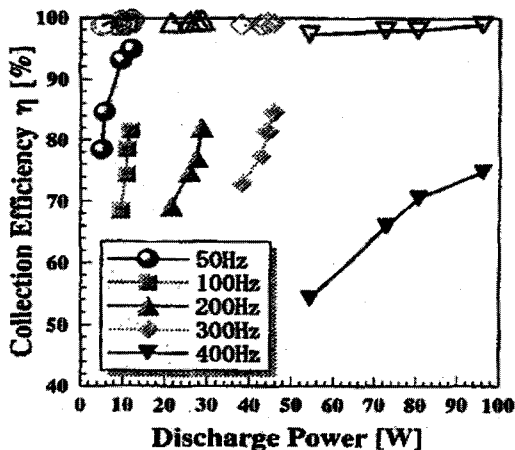


그림 7. 주파수 변화에 따른 방전전력-집진효율 결과 (유속 : 1.5 m/sec)

방전이 발생되어 장치자체를 파괴시킬 수 있는 문제가 생길 수 있다. 또 다른 문제로는 부산물로 오존이 생성되는 점이다.

오존은 3개의 산소 원자 중 하나를 다른 물질에 주는 동작이 아주 재빠른 것이 특징으로 성층권에서 자외선을 차단하는 것도 이런 이유 때문으로 오존은 성층권에서 자외선을 거의 99% 흡수하게 된다. 대기 중에서 인체에 해를 미치는 것도 같은 원리로 워낙 반응성이 좋아 피부에 있는 유기물질과도 타치는 대로 결합을 시도, 인체에 해로운 물질을 생성하고 치명적인 장애를 일으키게 된다. 이러한 인체와의 반응성에 대한 구체적인 것은 충분히 해명되진 않았지만 예컨대 폐세포를 공격하면 조직을 파괴시켜 호흡기능을 떨어뜨릴 수 있으며, 더욱 위험한 것은 세포핵 속의 유전자를 손상시키는 것으로 이럴 경우 DNA의 돌연변이로 암까지도 유발할 수 있으며 또한 각막 같은 연한 조직도 오존의 손쉬운 공격대상이 될 수 있다. 특히, 오존은 어린이, 노약자, 심장병환자 등에게 심각한 영향을 미치는데 오존농도가 0.1ppm 이상 올라가면 사망자 수

가 7%나 늘어난다는 연구결과가 나올 정도로 위험한 가스중의 하나이다. 표 2는 오존의 농도에 따른 인체에의 영향에 대해 나타내었다. 전기집진기에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 오존을 거의 발생시키지 않는 Positive 코로나 방전을 입자의 하전에 주로 이용하고 있는 실정이다. 하지만, 현재 많이 나오는 음이온 발생기는 반대로 Negative 코로나 방전을 사용함에 따라 생기는 오존의 발생문제로 MnO₂ 등과 같은 촉매의 부가적 사용을 통해 제거하는 방법에 대한 연구도 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구실에서는 DBD 기술을 사용할 때 생길 수 있는 문제를 해결하기 위한 방법으로 DBD 전극에 열을 가함으로써 열영동에 의해 입자의 부착을 억제하고, 응집을 가속시키며, 열에 대해 소멸속도가 굉장히 빠른 오존의 기본적인 물리화학적 성질을 이용해서 촉매 없이도 오존 소멸이 잘 될 수 있도록

표2. 오존의 인체에의 영향

오존(ppm)	인체에 미치는 영향
0.01 - 0.03	냄새를 느끼는 정도
0.1	강한 냄새, 코나 목에 자극을 준다
0.2 - 0.5	3-6시간 정도의 노출에도 시력이 떨어짐
0.5	확실하게 기도 등 호흡기에 자극을 느낀다.
1 - 2	두통, 호흡기에 가래 등을 일으킴, 노출이 반복되면 만성이 됨.
5 - 10	맥박 증가, 폐수종을 일으킴
15 - 20	작은 동물은 2시간 이내에 죽을 수 있음
50	사람도 1시간 이내로 생명이 위험한 상태로 될 수 있음

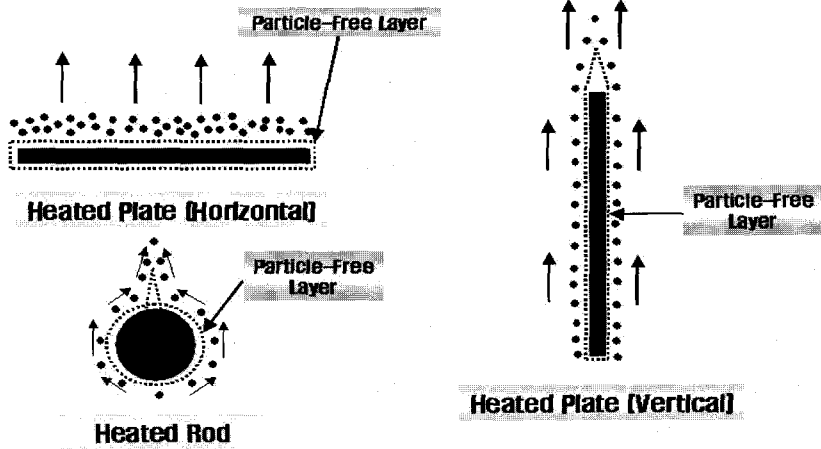


그림 8. 열영동에 의한 Particle-Free Layer 형성

조건을 형성함으로써, 입자의 부착 및 오존발생의 문제를 동시에 해결하려는 연구도 진행되고 있다. 열영동은 기체 중에 온도차가 생기면 기체 중에 있는 에어로졸 입자는 온도가 저하하는 방향으로 이동하는 현상을 말하며 그림 8에 이러한 현상을 나타내었고, 이를 지배하는 힘을 열영동력이라고 한다. 열영동력은 이론적으로 다음 식으로 나타내어진다.^{27,28)}

$$F_{th} = \frac{-p\lambda}{T} \frac{d^2 \nabla T}{T} \quad (\text{단, } d < \lambda)$$

여기서 p는 기체의 압력, λ는 기체분자의 평균 자유행정, T는 절대온도이다. 열영동력은 온도가 저하하는 방향으로 작용하므로 음의 부호가 붙게 된다. 결국, 이 힘이 DBD 하전기 내에서 입자가 양 유전체 전극으로 향하는 전기적인 운동력보다 크게 작용되어지면, 전극으로의 입자의 부착을 막을 수 있게된다. 열영동에 의한 Carbon Soot 입자의 부착억제에 대한 실제 테스트 결과를 그림 9에 나타내었다. 결국, 열영동 현상을 이용해서 DBD 하전기 내의 입자오염을 방지하고, 따라서 입자부착에 의한 오염으로 생길 수 있는 Arc의 발생을 막아 장

치를 안전하게 보전할 수 있다.

그리고 오존의 제어에 관한 것으로 오존이 열에 의해서 잘 분해되는 성질¹²⁾을 이용, DBD 장치내로 유입되는 유체의 온도를 상승시켜 부산물로 발생하는 오존의 소멸속도를 증가시킨다. DBD 기술의 산업적 응용은 처음에 오존발생기로서 이루어졌는데, 여기에서 중요한 문제 중에 하나는 DBD를 통해서

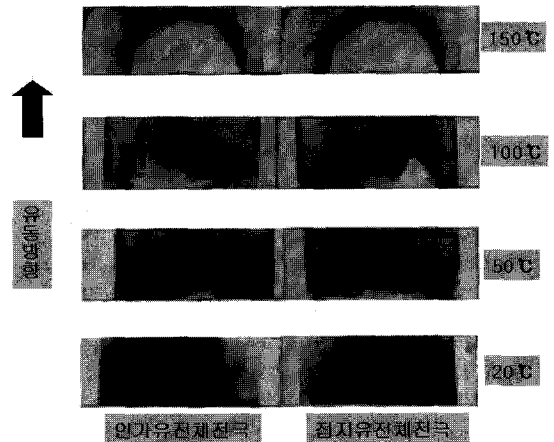
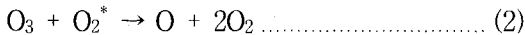
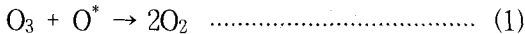


그림 9. 유전체 전극 온도 증가에 따른 입자 부착 상태

오존을 생성시킬 때, 유전체 전극의 온도가 전류 및 저온 플라즈마의 영향으로 상승하게 되고, 이러한 유전체 전극의 온도상승이 오존의 생성에 치명적인 지장을 준다는 것이다.^{29,30)} 온도상승에 의존하는 오존소멸에 반응에 대한 내용으로⁷⁾ 각각의 온도에 의존하는 반응률은 (1)의 경우 $1.5 \times 10^{-11} \exp(-2218/T)$ 이고, (2)의 경우는 $1.2 \times 10^{-11} \exp(-2400/T)$ 로서 온도의 증가에 따라 오존의 소멸률은 증가함을 알 수 있다. 결국, 오존을 얻기 위해 DBD 기술을 사용하는 것이 아니라면, 오존이 거의 존재하지 않아 실내로 유입되지 않는 조건의 조성이 필요한데, 이를 입자부착억제에 사용된 전극 가열방법으로 오존소멸증가에 필요한 조건을 형성시켜줌으로써 해결할 수 있을 것이다.



위에서 서술하였듯이 DBD를 이용한 입자 및 가스상 물질의 동시저감기술과 이 기술이 더욱 안정적, 효율적, 경제적으로 이용될 수 있도록 부수적으로 생기는 문제들을 효율적으로 제거하는 기술의 발전이 반드시 필요하며, 이러한 기술의 발전은 결국, 공기청정기술에 큰 영향을 줄 수 있을 것이라고 생각한다.

4. 결 론

실내공기청정기술은 관련 법규가 강화됨에 따라 미세먼지 뿐 아니라 나노입자까지 제어가 가능하고 효율 시스템으로 발전되어야 할 것이다. 본 고에서는 나노입자를 포함한 입자 및 유해가스를 제어하는 기술 중 하나를 현재의 실내공기청정기술의 대안으로 소개하였다. 아직 기초연구가 진행중이므로 지속적인 연구를 통해서 아이디어를 찾고, 또한

수정-보완해 가면서 최적화를 이루어야 할 것이다.

- 참고문헌 -

1. 한국공기청정연구조합, 1996, "공기청정편람," 제1권 기초편, pp. 233-277
2. 한국공기청정연구조합, 2002, "공기청정편람," 제2권 기기편, pp. 3-179
3. Cooper, C. D., and Alley, F. C., 1994, "Air Pollution Control : A Design Approach," Waveland Press, pp. 155-214
4. 지준호, 황정호, 배귀남, 김용진, 2001, "AC 전기장치내 하전 액체 입자의 응집에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제25권, 제3호, pp. 442~450
5. Chang, J. S., 1991, "Corona Discharge Processes," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 19, No 6, pp. 1152-1166
6. Eliasson, B., 1991, "Nonequilibrium Volume Plasma Chemical Processing," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 19, No. 6, pp. 1063-1077
7. Ohkubo, T., Hamasaki, S., Nomoto, Y., Chang, J. S., and Adachi, T., 1990, "The Effect of Corona Wire Heating on the Downstream Ozone Concentration Profiles in an Air-Cleaning Wire-Duct Electrostatic Precipitator," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 26, No. 3, pp. 542-549
8. Okubo, M., Yamamoto, T., Kuroki, T., and Fukumoto, H., 2001, "Electric Air Cleaner Composed of Nonthermal Plasma Reactor and Electrostatic Precipitator," IEEE Trans. Industry Appl., Vol. 37, No. 5, pp. 1505-1511
9. 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
10. 김용진, 2000, "지하공기정화용 UV 공기정화 시스템," International Symposium on Air Cleaning Technology
 11. Einaga, H., Ibusuki, T., and Futamura, S., 2000, "Performance Evaluation of Hybrid Systems Comprising Silent Discharge Plasma and Catalysts for VOC Control," IEEE Ind. Appl. Conf., Vol. 2 pp. 858-863
 12. Moon, J. D., Lee, G. T., and Geum, S. T., 2000, "Discharge and NOx Removal Characteristics of Nonthermal Plasma Reactor with A Heated Corona Wire," J. Electrostatics, Vol. 50, pp. 1-15
 13. Nagao, I., Nishada, M., Yukimura, K., Kambara, S., and Maruyama, T., 2001, "NOx Removal Using Nitrogen Gas Activated by Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure," Vacuum, Uncorrected Proof
 14. Penetrante, B. M., Hsiao, M. C., and Merritt, B. T., 1995, "Comparison of Electrical Discharge Techniques for Nonthermal Plasma Processing of NO in N2," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 23, No. 4, pp. 679-687
 15. Takaki, K., Jani, M. A., and Fujiwara, T., 1999, "Removal of Nitric Oxide in Flue Gases by Multipoint to Plane Dielectric Barrier Discharge," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 27, No. 4, pp. 1137-1145
 16. Oda, T., Kato, T., Takahashi, T., and Shimizu, K., 1997, "Nitric Oxide Decomposition in Air by Using Non-thermal Plasma Processing with Additives and Catalyst," J. Electrostatics, Vol. 42, pp. 151-157
 17. Yamamoto, T., Rajanikanth, B. S., Okubo, M., Kuroki, T., and Nishino, M., 2001, "Performance Evaluation of Nonthermal Plasma Reactors for NO Oxidation in Diesel Engine Exhaust Gas Treatment," IEEE Ind. Appl. Conference 2001, Vol. 2, pp. 1092-1098
 18. Okubo, M., Kuroki, T., Kametaka, H., and Yamamoto, T., 2001, "Odor Control Using the AC Barrier-Type Plasma Reactors," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 5, pp. 1447-1455
 19. Yamamoto, T., 1997, "VOC Decomposition by Nonthermal Plasma Processing - A New Approach," J. Electrostatics, Vol. 42, pp. 227-238
 20. Futamura, S., Zhang, A. H., and Yamamoto, T., 1997, "The Dependence of Nonthermal Plasma Behavior of VOCs on Their Chemical Structures," J. Electrostatics, Vol. 42, pp. 51-62
 21. 황정호, 2002, "저온플라즈마를 이용한 공기청정기술," 공기청정기술, 통권 56, pp. 87-89
 22. 황정호, 2002, "IT, BT, NT, ET, ST 기술과 기계공학," 기계저널, Vol. 42, No. 4, pp. 24-25
 23. Futamura, S., Einaga, H., and Zhang, A., 2001, "Comparison of Reactor Performance in the Nonthermal Plasma Chemical Processing of Hazardous Air Pollutants," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 37, No. 4, pp.

- 978-985
24. Wilson, C. R., Giddings, T. J., and Smith, P. W., 1997, "The Use of Barrier Discharges for Pollution Control," The Institution of Electrical Engineers, pp. 14/1-14/3
 25. Falkenstein, Z., 1998, "Application of Dielectric Barrier Discharges," 12th Int. Conf. High-Energy Particle Beams, pp. 117-120
 26. Sano, Y., Kuroda, Y., Kawada, Y., Takahashi, T., Ehara, Y., Ito, T., Zukeran, A., and Takamatsu, T., 2001, "Effect of Electric Source Frequency at ESP by Barrier Discharge System," European Aerosol Conf., pp. s881-s882
 27. Reist, P. C., 1993, "Aerosol Science and Technology," McGraw-Hill, Inc., pp. 163-177
 28. Hinds, W. C., 1999, "Aerosol Technology," John Wiley & Sons, Inc., pp. 171-181
 29. Rice, C. R., Netzer, A., 1982, "Handbook of Ozone Technology and Applications," Ann Arbor Science, pp. 41-75
 30. Liu, L., Guo, J., Li, J., and Sheng, L., 2000, "The Effect of Wire Heating and Configuration on Ozone Emission in A Negative Ion Generator," J. Electrostatics, Vol. 48, pp. 81-91