

저온플라즈마 / 광촉매 이용 공기청정 시스템

황 정 호 | 연세대학교 기계공학부
정교수

E-Mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

변정훈 · 박재홍 · 윤기영 | 연세대학교 대학원
박사과정

1. 서 론

최근 사회적으로 가장 주목받고 있는 것은 웰빙(well-being)이다. 먹고 살기 힘들었던 과거에서 기본적인 의식주가 보장되는 현대사회에 이르러 사람들은 삶의 질 문제에 눈을 돌리기 시작했다. 보다 좋은 물과 보다 좋은 음식을 통해서 건강한 신체를 만들고, 보다 다양하고 많은 문화생활을 통해서 정신적으로도 건강한 삶을 살아가려고 하고 있다. 이 중에서 무엇보다도 인간이 살아가는데 가장 기본적인 물과 공기에 대한 사람들의 관심은 매우 높다. 좋은 물을 먹기 위해서 과거부터 많은 정수 방법이 연구되어 왔고, 대부분의 가정집에서는 정수기나 생수를 이용하고 있다. 공기도 마찬가지다. 정수보다는 출발은 늦었지만 공기청정에 대해서는 최근에 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 지구환경 변화와 산업화에 따른 오염원의 증가로 인해 실생활에서 환경, 공기 등 주거관련 환경의 악화가 가속되는 속도에 발 맞춰 연구는 보다 복잡하고 다양한 분야에 걸쳐 이루어지고 있다. 특히 실내공간에서의 공기청정 문제는 다른 환경 문제보다는 조금 늦게 대두되었다. 그림 1에 나타난 바와 같이 1970년대 후반에 일어난 에너지 위기로 인해 사회전반에 걸쳐 여러 가지 파문이 있었으며 건축물도 그 중의 하나였다. 실내에서의 에너지 절약 대책으로 환기량의

감소, 외기의 침입을 극소화한 거주공간의 기밀화가 진행되었다. 이로 인해서 기존에는 없었던 에너지의 경제성과 실내공기질 향상과의 상호 모순 등이 단적으로 나타나게 되었다. 그 대표적인 예가 빌딩 증후군이라 불리는 SBS(sick building syndrome)다. 1980년경부터 시작된 미국 각지의 에너지 절약에 따른 기밀화된 빌딩에 의하여 거주자들은 현기증, 구토, 두통, 어지럼증, 눈, 코, 목 등의 점막과 피부의 건조감 등의 호흡기계통의 제반증상 등을 빌딩의 소유자와 국가, 주 등의 공공단체에 고통을 호소한 것으로 보고되었다. 빌딩 증후군 이외에도 새집증후군이나 헌집증후군과 같은 실내공기질 문제가 새롭게 대두되고 있다. 현재 인간 생활의 대부분이 사무실이나 학교 같은 실내에서 이루어지고 있다는 점을 고려하면 매우 급박한 문제가 된다. 이에 따라 정부에서도 「다중이용시설등의 실내공기질관리법」을 2004년 5월 30일부터 시행중에 있다. 현재까지는 이들 문제를 해결하기 위한 공기청정기술이 어느 정도 많이 나와 있지만, 결정적인 대안이라기보다는 어느 정도 가능성만을 보여주고 있다. 아직까지 많은 연구가 필요한 실정이다. 현재 가장 많이 쓰이는 공기청정 방식에는 필터 방식과 전기집진 방식이 있다. 본 내용에서는 여러 공기청정 방법 중 하나로 새롭게 대두되고 있는 플라즈마/광촉매 이용 공기청정 시스템에 관하여 소개하고자 한다.

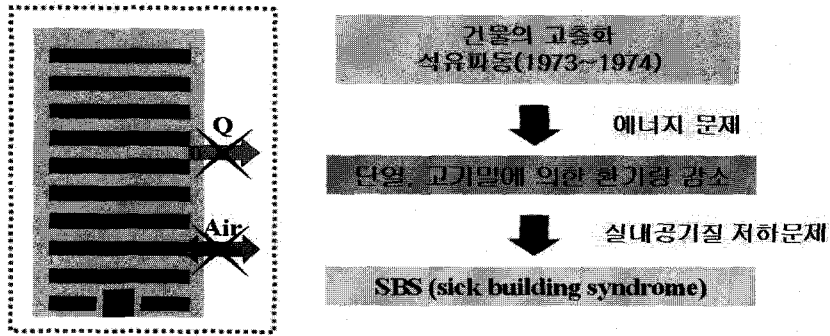


그림 1. 실내공기질 문제의 대두

2. 저온플라즈마/광촉매 이용 공기청정 시스템

공기청정 방식에는 여러 방법이 있다. 공기 중의 오염원에 따라 그 방식이 달라지며 경우에 따라서는 복합적으로 사용하기도 한다. 공기 중의 오염원은 크게 입자상 물질과 가스상 물질로 나뉜다. 필터 방식의 경우 공기 중의 오염물질들을 물리적인 방법과 화학적인 방법을 이용해서 제거한다. 그러나 필터 방식은 몇 가지 문제점이 있다. 주기적으로 교체해 주어야 하며 압력손실이 생기기 때문에 팬(fan)에 사용되는 소모전력이 증가하게 된다. 또한 필터에 포집된 기상부유균(bioaerosol)에 의해 2차적인 오염이 이루어질 가능성이 있다. 기존 연구에서는 HEPA(high efficiency particulate air)필터를 삽입하여 입자상 오염물질을 대상으로 평가를 하였으나, 압력강화와 이에 따른 소음 등의 문제로 한계를 보이는 것으로 나타났다.⁽¹⁾ 또 다른 방식 중 하나로 전기집진 방식이 있다. 일정 간격 떨어져 있는 두 도체 전극 사이에 고전압을 인가하여 생성된 방전, 즉 플라즈마를 이용하여 오염물질을 제거하는 방식이다. 이 방식의 경우 압력손실은 적으나 입자상 오염물질의 집진효율이 필터 방식에 비해 낮

고 가스상 물질의 제거효율도 그다지 높지 않다. 또한 오존(Ozone; O₃) 등의 부산물 발생 문제가 있어 최근에 많은 논란이 되고 있다. 앞서의 기술들과는 다른 대안으로 플라즈마/광촉매 시스템을 소개해 보고자 한다.

2.1 저온플라즈마 시스템

플라즈마(plasma)라고 하면 보통 고온을 떠올리게 된다. 그러나 공기청정에서 사용하는 플라즈마는 앞서 소개한 전기집진 방식과 같은 저온플라즈마이다. 일반적으로 전기집진 방식에 많이 사용되는 플라즈마는 코로나 방전(corona discharge)이다. 이와는 조금 다른 저온플라즈마로 유전체 배리어 방전(dielectric barrier discharge)이 있다. 유전체 배리어 방전은 저온플라즈마 중의 하나로 일정 간격 떨어져 있는 유전체로 둘러싸인 도체전극에 교류(AC) 또는 펄스(pulse)형 고전압을 인가하여 발생한다.⁽²⁾

그림 2는 유전체 배리어 방전의 원리를 보여준다. 유전체 배리어로 인한 전하축적(build-up)현상으로 인해서 방전면 사이에는 마이크로 방전에 의한 고농도의 전자가 발생한다. 코로나 방전과 비교할 때 유전체 배리어 방전은 전자밀도와 전자에너

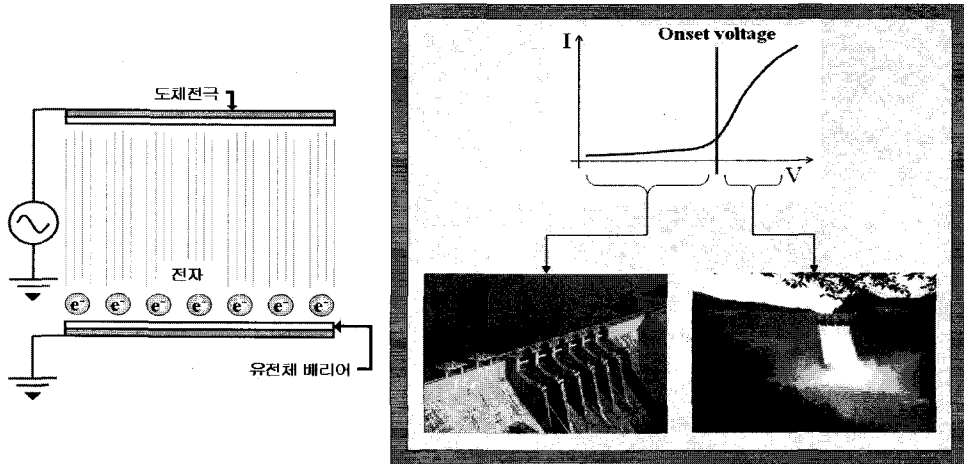


그림 2. 유전체 배리어 방전의 원리

지가 높고, 이로 인해 발생하는 이온의 농도가 높다.⁽³⁾ 마치 냄에 썰여 있던 물이 한번에 쏟아져 나오는 것과 같은 이치이다. 이와 같은 특성을 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x) 등의 유해가스 제거에 적용한 연구가 있었다.^(4, 5) 또다른 가스상 오염물질인 휘발성 유기화합물(VOCs; Volatile Organic Compounds)과 악취제거에도 적용한 연구가 있었다.^(6, 7) 최근에는 유전체 배리어 방전의 높은 전자밀도를 이용한 입자상 오염물질의 집진에 대한 연구도 이루어지고 있다. 그 중 하나는 유전체 배리어 방전을 입자 하전에 사용하는 2단형 전기집진기에 대한 연구이다. 일반적으로 사용하고 있는 전기집진기는 하전과 동시에 집진이 일어나는 구조로 되어 있다. 때문에 하전된 입자가 전기집진기 내부를 충분히 체류하지 못해 집진효율이 떨어지게 된다. 이와 같은 문제점을 개선하고자 2단형 전기집진기가 연구되었다. 그림 3은 유전체 배리어 방전을 하전기로 이용한 2단형 전기집진기의 구조와 집진 원리를 나타내고 있다. 2단형 전기집진기는 크게 저온플라즈마를 이용한 입자 하전부와 하전된

입자를 집진하는 집진부로 구성되어 있다. 집진부는 일정 간격 떨어져 있는 도체전극 사이에 고전압을 인가하여 전기장을 형성하는 구조이다. 유전체 배리어 방전이 일어나는 구간을 입자상 물질들이 지나면서 내부의 고농도 이온들에 의해 하전되고, 이후 하전된 입자들은 유전체 배리어 방전부의 후단에 위치한 집진부를 지나면서 집진부에 형성된 전기장에 의한 전기적 인력으로 집진부로 집진된다. 일본에서 입자 하전기로 유전체 배리어 방전을 사용한 연구에서 서브마이크론 및 마이크로 크기의 입자 제거에 큰 가능성을 보였으며, 국내에서도 이를 이용해 현재 새롭게 문제점으로 지적되고 있는 나노 및 서브마이크론 크기의 입자를 대상으로 연구를 수행했다.^(8, 9)

2.2 광촉매 시스템

광촉매란 빛을 뜻하는 광(photo)이란 글자와 촉매(catalyst)란 단어로 만들어진 합성어이다. 광촉매는 그 이름에서 알 수 있듯이 빛을 받아 촉매의 성질을 나타내게 된다. 이를 이용해서 이전부터 태

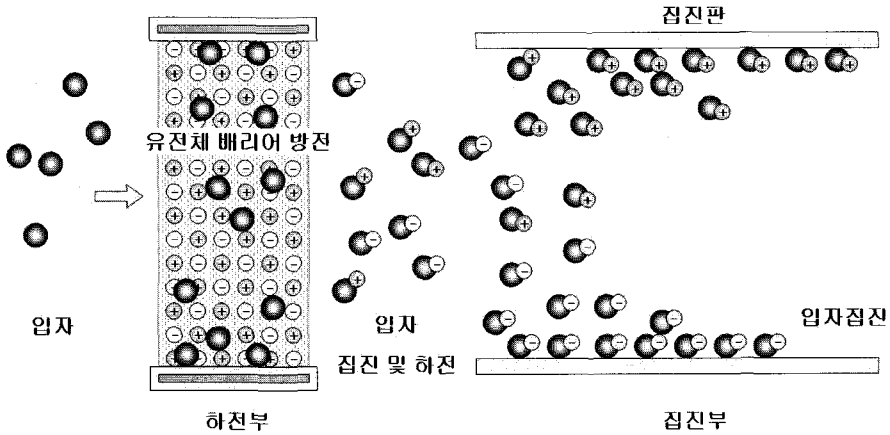


그림 3. 유전체 배리어 방전을 이용한 2단형 전기집진기의 집진 원리

양을 이용한 물의 전기분해를 통해 수소를 얻고자 많은 연구가 있었으나 공업적인 전망을 얻을 수 없어서 연구가 시들해졌다. 그러나 광촉매의 또 다른 적용 방법에 대한 연구가 1980년대에 들어서면서 시작되었다. 산업화 이후 언제나 문제시 되고 있는 대기환경 문제에 대한 한 가지 대안으로 광촉매에 대한 연구가 시작된 것이다. 연구의 시작은 우연한 발견에서였다. 그림 4와 같이 벽에 바른 페인트가 햇빛에 의해 벗겨지는 원인을 조사하던 중에 페

인트에 첨가된 이산화티타늄(TiO_2)이 빛을 받아 페인트의 다른 유기물들을 분해하고 있음을 알게 되었다. 이런 점을 착안해서 이산화티타늄을 이용한 인체에 유해한 휘발성 유기화합물들을 분해하는 연구가 시작되었다.

광촉매의 원리는 그림 5에 잘 나타나 있다. 광촉매는 일종의 n형 반도체로 이산화티타늄 등의 광촉매에 자외선(UV; 250-420 nm)을 비추주면 광촉매 내부의 가전자대(VB; valence band)의 전자가 자외선에 의한 에너지로 인해 전도대(CB; conduction band)로 활성화된다. 가전자대에서는 전자가 빠져나간 자리에 정공(hole)이 생성되어 정공-전자쌍(charge carrier pair: hole-electron)을 형성한다. 가전자대에서 정공은 공기 중의 수분을 촉매 표면에서 흡착하여 산화시키고, 이때 산화력이 강한 하이드록시 라디칼(hydroxyl radical: $\bullet OH$)이 생성된다. 이를 통해서 유기화합물 등을 산화시킨다. 이외에도 촉매표면에서 직접적으로 흡착된 유기물을 산화시킨다. 전도대에서 전자는 흡착된 산소에 전자를 줌으로써 과산화이온($O_2^{\bullet -}$)을 생성시키고 생성된 과산화이온은 유기화합물 또는 수분 등과 산

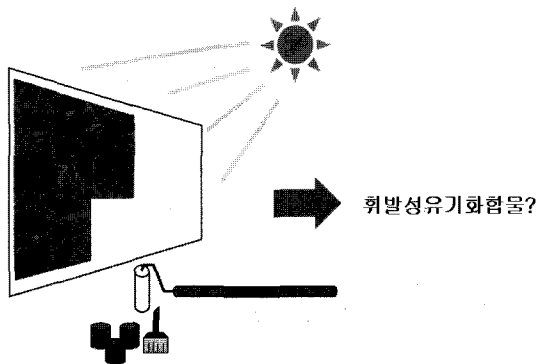


그림 4. 페인트칠에서 시작된 광촉매를 이용한 휘발성 유기화합물의 제거 연구

화 반응한다. 이때 생성된 산화력이 우수한 화학종들이 촉매 표면에서 유기화합물을 분해하여 이산화탄소(CO₂)와 물(H₂O)을 생성한다.⁽¹⁰⁾

2.3 저온플라즈마 시스템과 광촉매 시스템의 만남

저온플라즈마 시스템과 광촉매 시스템은 각각 단독으로 사용되어도 어느 정도 효과가 있는 공기청정 기술이다. 그러나 단독으로 사용될 경우 문제점이 있다. 저온플라즈마 시스템의 경우 공기 중의 산소를 분해하여 오존을 생성하는 문제점이 있다. 오존은 산화력이 강해서 눈을 자극하고 물에 난용성이므로 쉽게 심부까지 도달하여 폐수종, 폐출혈 등을 유발시킨다.⁽¹¹⁾ 화학적으로 활발한 가스이기 때문에 방사선과 비슷하게 DNA나 RNA에 작용하여 유전인자에 변화를 일으킬 수 있다.⁽¹²⁾ 그 위험성 때문에 실제로 미국의 식품의약품에서는 어떠한 장치에 대해서도 오존 발생량을 0.05ppm 이하로 제한하고 있다.^(13, 14) 플라즈마에 의한 오존 발생은 그림 6에 나타내 보았다. 때문에 인체에 피해가 없이 가동되게 하려면 전기집진 방식에 의해 발생하는 고농도의 오존을 제거해야만 한다. 이를 위해 일반적으로 전기집진 방식의 공기청정기에는 전기집진기 후단에 화학필터(chemical filter)나 오존 제

거 촉매를 사용한다.⁽¹⁵⁾ 이와 같은 방식 중에서 흡착을 이용하는 방식은 그 수명이 비교적 짧으며 정확한 수명을 예측할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 O₃ 제거 촉매로서 광촉매가 그 대안 기술로 연구되었다. 기존 연구에서 광촉매의 가스처리 및 재생에 오존을 이용한 방법이 있었다.⁽¹⁶⁾ 다시 말해서 플라즈마에서 발생한 오존을 통해서 광촉매의 수명도 늘리고 오존을 제거하는 부수적인 효과를 얻을 수 있다. 실제로 한 연구에서는 광촉매의 오존 분해 성능을 오존 분해 촉매와 비교 평가한 결과 광촉매가 수명이나 제거효율에서 안정성을 보이고 있었다.⁽¹⁷⁾

저온플라즈마/광촉매 이용 공기청정 시스템의 개념을 그림 7에 나타내었다. 유전체 배리어 방전을 입자하전에 이용한 2단형 전기집진기 후단에 광촉매 필터와 UV 램프가 직렬로 위치하는 구조로 되어 있다. 유전체 배리어 방전에서는 입자상 오염물질의 하전 및 집진, 그리고 가스상 오염물질의 분해가 이루어진다. 집진판에서는 유전체 배리어 방전을 거치면서 집진되지 않고 하전되어 나온 입자상 오염물질을 2차적으로 집진하게 된다. 마지막으로 광촉매 필터는 유전체 배리어 방전으로 생성된 오존을 분해하고 2차적인 가스상 오염원의 분해가 이루어지게 된다. 입자상 및 가스상 오염물질의 동시처

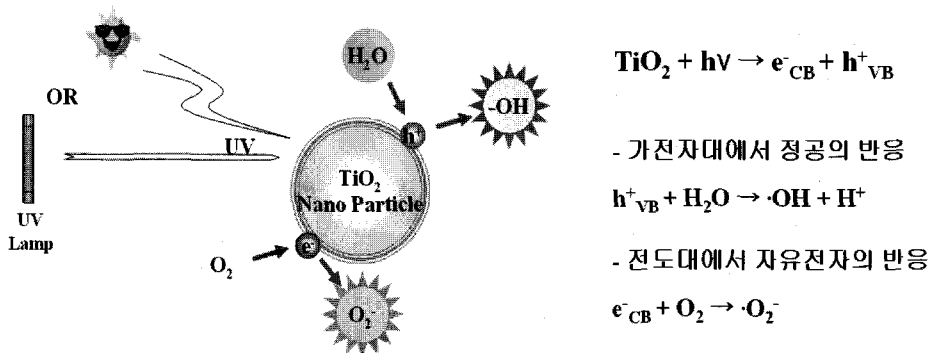


그림 5. 광촉매의 유기화합물 분해 원리

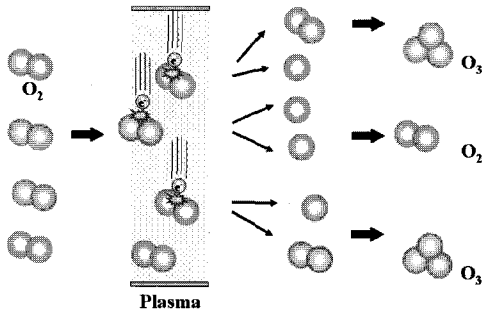


그림 6. 플라즈마에 의한 오존 생성 원리

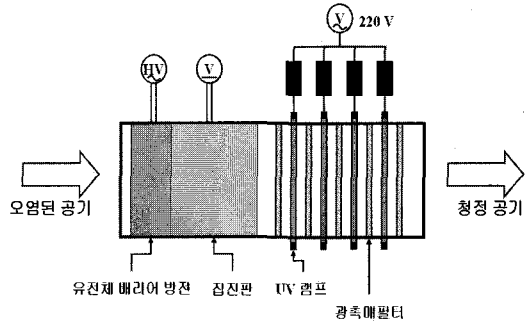


그림 7. 저온플라즈마/광촉매 이용 공기청정 시스템의 개념도

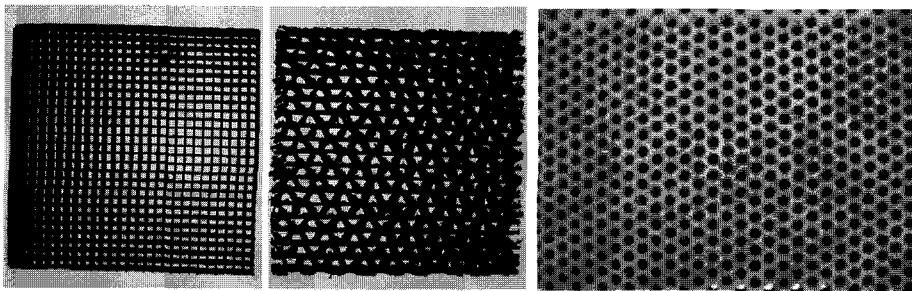


그림 8. 광촉매 필터의 형상

리가 조합된 시스템을 통해 2차에 걸쳐 이루어지는 것이다. 이런 일련의 공기청정 과정을 거치는 동안 압력손실은 거의 없다. 저온플라즈마 시스템이나 집진판 등의 요소별 기술들이 특성상 압력손실이 거의 없고 광촉매의 경우도 그림 8과 같이 압력손실이 적은 형태를 취하고 있기 때문이다. 광촉매 시스템의 경우는 가스상 오염물질의 제거에 있어서 가스와 촉매 사이의 접촉 시간이 중요한 변수가 된다. 광촉매는 가스 분해 시, 최소 수 초 이상의 접촉 시간을 필요로 한다. 때문에 보통은 벽지에 코팅하는 등의 방법을 사용한다. 그러나 공기청정 시스템에 적용하면 가스상 오염물질과 촉매가 1초 이하의 접촉시간을 갖게 된다. 또한 시스템 내부에 장착하

기 위해서는 그림과 같이 필터형태로 이용해야 한다. 이를 위해서 활성탄이나 제올라이트와 같은 비표면적이 큰 다른 첨가제들과 같이 사용해서 가스상 오염물질과 촉매와의 접촉시간을 늘려줘야 한다.

물론 이 기술은 완벽하다고 말할 수 없다. 요소기술들의 최적화에 대한 연구가 아직 시작단계에 있으며 이로 인해 어느 정도 문제점을 안고 있다. 유전체 배리어 방전에서는 고전압 사용에 따른 전기적 차폐 문제, 방전의 안정성 확보, 유전체 배리어 전극의 제작 등이 조금 어려운 기술이다. 광촉매 시스템의 경우도 자외선을 비추기 위한 램프의 수명이 1000시간 정도여서 주기적 교체가 필요하며, 램

프라는 부수적인 시스템으로 복잡해질 우려가 있다. 물론 자외선 발광다이오드(UV-LED)를 이용하면 되지만, 아직은 상용화가 활발하지 않아서 제품 양산 시 가격이 올라갈 수 있다.

3. 결 론

인간이 살아가는데 공기는 필수적인 요소이다. 인간들의 활동 범위가 점차 늘어나고 있으며 언젠가는 우주공간처럼 공기가 없는 곳까지 좋은 공기를 마시며 살아가는 시대가 올 것이다. 아주 먼 미래의 이야기지만 이를 위한 여러 기술들이 지금 걸음마를 하고 있다. 그 중 한 가지 기술로 저온플라즈마/광촉매 이용 공기청정 시스템을 소개해 보았다. 저온플라즈마 시스템은 필터 시스템이 안고 있는 많은 문제점에 대한 해결책의 가능성을 보여주고 있다. 광촉매 시스템은 그 응용분야가 한때 주춤했지만, 최근 들어서 그 다양한 기능에 힘입어 공기청정 분야에서 광촉매가 좋은 대안이 될 가능성은 많다. 그러나 한 가지 중요하게 짚고 넘어가야 할 점은 저온플라즈마 시스템이나 광촉매 시스템이 단독으로 만능이 될 수 없다는 점이다. 앞서 소개한 연구처럼 단독으로 사용하면 각각의 시스템은 최대 효율을 발휘할 수 없고 오히려 문제점들을 갖고 있다. 저온플라즈마 시스템은 오존 발생이라는 문제점이, 광촉매 시스템은 입자상 오염물질을 제거하지 못한다는 문제점이 있다. 때문에 이들을 함께 이용하여 시너지 효과를 노려야 한다. 저온플라즈마 시스템에서 가스상 오염물질과 입자상 오염물질을 1차적으로 처리하고, 집진판에서 2차적으로 집진을 하고, 마지막으로 광촉매 시스템으로 저온플라즈마 시스템에서 발생된 오존과 가스상 오염물질을 2차적으로 처리하는 하나의 시스템으로 시너지 효과를 얻을 수 있다. 앞으로는 이들 조합의 최적화를 위한

많은 연구가 필요하다. 각 요소별로 저온플라즈마와 광촉매 시스템의 성능향상을 위한 연구 등이 필요하다. 예를 들면 광촉매의 경우 성능을 최적화시킬 수 있는 비표면적이 넓은 첨가제에 관한 연구를 들 수 있다.

앞서 소개한 기술은 공기청정의 한 가지 대안일 뿐이다. 아직은 공기청정에 대한 모든 기술들이 걸음마 단계이다. 오염원의 종류는 계속 늘고 있으며, 최근 기상부유균과 같은 살아있는 오염원 문제도 대두되고 있다. 깨끗한 공기를 위해서는 계속 생각하고 노력하는 많은 시간이 필요하다. 공기청정은 앞잡아볼 만큼 쉬운 기술이 아니다. 공기에는 많은 변수들이 숨어있다. 그 각각의 변수들을 통제하기 위해 반드시 다른 기술들과 연계해야 한다.

- 참고문헌 -

1. Rudnick, S. N., 2004, "Optimizing the design of room air filters for the removal of submicrometer Particles," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 38, pp. 861-869.
2. Falkenstein, Z., 1998, "Application of dielectric barrier discharge," 12th Int. Conf on High-Energy Particle Beams, Beams'98, Haifa, Israel, June 7~12, pp. 117-120.
3. Mizuno, A., 2000, "Electrostatic precipitation," *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 7, No. 5, pp. 615-624.
4. Breault, R. W., McLarnon, C., and Mathur, V. K., 1992, "Reaction kinetics for flue gas treatment of NO_x," *Proceedings of NATO Advanced Research Workshop on Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control*, Cambridge, pp. 239-256.
5. Higashi, M., Uchida, S., Suzuki, N., and Fujii,

- K., 1992, "Soot elimination and NO_x and SO_x reduction in diesel-engine exhaust by a combination of discharge plasma and oil dynamics," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-12.
6. Yamamoto, T., Okubo, M., Nagaoka, T., and Hayakawa, K., 2000, "Simultaneous removal of NO_x and SO_x in flue gas emission using plasma-chemical hybrid process," *Industry Applications Conf., Conference Record of the 2000 IEEE*, Vol. 1, pp. 641-647.
 7. Rosocha, L. A., Coogan, J. J., and Kang, M., 1994, "Use of silent electrical discharges for environmental remediation," *IEEE Int. Conf.*, p. 88.
 8. Kawada, Y., Kubo, T., Ehara, Y., Ito, T., Zukeran, A., Takahashi, T., Kawakami, H., and Takamatsu, T., 1999, "Development of high collection efficiency ESP by barrier discharge system," *Industry Applications Conf. IEEE*, Vol. 2, pp. 1130-1135.
 9. 강석훈, 지준호, 변정훈, 황정호, 2003, "배리어 유전체 방전을 이용한 전기 집진부에서의 나노 입자 집진 특성," *대한기계학회논문집 B*, Vol. 27(11), pp. 1542-1547.
 10. Ao, C. H., Lee, S. C., and Yu, J. C., 2003, "Photocatalyst TiO₂ supported on glass fiber for indoor air purification: Effect of NO on the photodegradation of CO and NO₂," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 156, No. 1-3, pp. 171-177.
 11. Mudway, I. S. and Kelly, F. J., 2000, "Ozone and the lung: A sensitive issue," *Molecular Aspects of Medicine*, Vol. 21, Issues 1-2, pp. 1-48.
 12. Cheng, T. J., Kao, H. P., Chan, C. C. and Chang, W. P., 2003, "Effects of ozone on DNA single-strand breaks and 8-oxoguanine formation in A549 cells", *Environmental Research*, Vol. 93, Issue 3, pp. 279-284.
 13. Dorsey, J. A., and Davidson, J. H., 1994, "Ozone production in electrostatic air cleaners with contaminated electrodes," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 30, No. 2, pp. 370-376.
 14. Tanasomwang, T., and Lai, F. C., 1997, "Long-term ozone generation from electrostatic air cleaners," *IEEE Trans. on Industry Applications Annual Meeting*, pp. 2037-2044.
 15. Rakitskaya, T. L., Bandurko, A. Y., Ennan, A. A., and Paina, V. Y., 1999, "Catalysts for sanitary air cleaning from ozone," *Catalysis Today*, Vol. 53, No. 4, pp. 703-713.
 16. Pengyi, Z., Fuyan, L., Gang, Y., Qing, C., and Wanpeng, Z., 2003, "A comparative study on decomposition of gaseous toluene by O₃/UV, TiO₂/UV and O₃/TiO₂/UV", *J. Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 156, pp. 189-194.
 17. 변정훈, 박재홍, 황정호, 2004, "오존촉매 필터와 광촉매 필터의 오존제거특성," *한국실내환경학회지*, Vol. 1, No. 1, pp. 76-87.