

정전기적 힘을 이용한 실내공기 미세부유먼지 제거 요소기술의 개발을 위한 기술별 시장현황 및 연구 동향 분석

윤영한^{1*}, 주진철¹, 안호상¹, 남숙현¹

¹한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 환경연구실

Analyses of the current market trend and research status of indoor air quality control to develop an electrostatic force-based dust control technique

Young H. Yoon^{1*}, Jin-Chul Joo¹, Ho-Sang Ahn¹ and Sook-Hyun Nam¹

¹Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction & Technology

요 약 본 연구에서는 실내공기 오염물질의 제어를 통하여 공기질을 개선 할 수 있는 요소기술의 개발을 위하여 최근의 관련 기술 및 시장 현황을 살펴보고, 실내공기질 오염물질의 특성과 최근에 이루어진 연구를 바탕으로 실내공기 질 제어 기술의 특징 및 장·단점을 분석하였다. 적용기술에 따른 공기청정장치의 종류 중에는 현재 필터를 이용한 기계식 여과기술 및 장치산업이 대부분을 차지하고 있으나, 최근에는 설치와 작동이 간편하고 에너지 효율과 기술의 적용성도 좋은 전기전자식 기술이 주목받고 있으며 기계식 장치(5.5%), 이온화 장치(-0.3%), 오존청정(-0.5%) 등 다른 기술에 비하여 향후 시장 발전가능성(성장률 6.3%)이 높은 것으로 분석되었다. 실내 공기질의 오염은 가스상의 VOCs와 입자상의 미세먼지들이 주 원인물질인데 특히 입자가 매우 작은 미세먼지들은 그 특성으로 인해 내부에 깊숙이 침투하여 건강을 위협하고 가스상 오염물질과 반응하여 2차 오염물질을 낼 수 있어 근본적인 제어 기술이 필요하다. 전기전자식 기술 중 유전영동 및 정전기력을 이용한 먼지 제어 기술은 전기적으로 미세먼지와 같은 입자를 부유시켜 제어하는 기술로서 미세부유먼지에 많은 사람들이 노출될 수 있는 다중이용시설 등에 적용될 수 있으며 이를 위해 실내 온도 및 습도, 대상물질의 수분 함량과 같은 주변 조건에 의한 부유먼지의 이동 특성이 함께 고려되어야 한다. 미세 부유먼지를 효과적으로 제어할 수 있는 전기전자식 기술을 이용하여 다중이용시설 뿐 아니라 사무실 및 일반가정 등의 실내 공기질 개선을 위한 핵심기술로 발전할 수 있는 가능성이 높을 것으로 판단된다.

Abstract This study examined the current and future Indoor Air Quality (IAQ) control device markets and analyzed the recent studies on indoor air pollutant removal to develop a new technology for fine dust control. Currently, the mechanical filter technique occupies the bulk of the IAQ control market but the electronic technique is emerging as an alternative to control fine dust efficiently. Among the gaseous VOCs and fine dust particles contaminating the indoor air quality, fine dust particles are more problematic because they threaten human health by penetrating deep into the body and producing secondary contaminants by chemical reaction with VOCs. The electronic IAQ control device using dielectrophoretic and electrostatic forces is a good option for public spaces where many people pass, and at the same time, it needs to consider temperature, humidity, and the particle properties of specific areas to highlight the control efficiency. Electronic-related technology is expected to be used widely in many public/private spaces wherever a dust-free environment is required.

Key Words : Air purification, Airborne dust, Indoor air quality, Multi-purposed facility, Research trend analysis

본 논문은 한국건설기술연구원의 주요사업(유전영동, 정전기력 기반의 먼지차폐 원천기술 개발, 2013-0134)의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Young H. Yoon(Korea Institute of Construction & Technology)

Tel: +82-31-9100-397 email: yoyoon74@kict.re.kr

Received November 5, 2013 Revised December 4, 2013 Accepted December 5, 2013

1. 서론

최근 급진적인 도시화와 산업화가 진행되면서 도시의 인구 및 경제활동 범위의 팽창에 따른 산업시설과 교통량의 증가가 대기환경 오염도가 심화되었고, 도심이 발전하면서 국민의 생활수준이 점차 높아짐과 더불어 대부분의 사람들이 하루 중 80-90%의 시간을 사무실, 가정, 학교 등의 실내공간에서 보내게 되면서 실내공기질의 청정도는 삶의 질을 결정하는 중요한 척도로 자리매김하게 되었다[1].

이러한 실내공기질(IAQ: Indoor Air Quality)에 대한 관심이 발생된 배경은 구조적으로 실내공기질 관리가 어려운 건물 또는 지하상가 등의 활용도가 증가함에 따라 공기질 오염이 심화되고 건축물 내부 자재의 기능향상 및 내부 장식화를 위한 복합 화학물질의 사용과 건물의 단열을 위한 밀폐화 및 에너지 절감 시스템 설치 등의 증가가 실내공기 오염도를 악화시키는 주요 요인으로 작용하고 있고[2], 이에 따라 실내공기질을 개선하기 위한 관련 기술이 개발되고 있다. 그 중 일부는 상품화되어 우리 주변 실생활에서 쉽게 접할 수 있다.

우리나라 정부는 실내공기질의 관리와 관련하여 2003년 ‘다중이용시설 등의 실내공기질 관리법’의 개정으로 실내공기질 관리를 위한 법적 기틀을 마련하였고, 최근에는 실내공기질 관리를 위한 중장기 종합계획(2009~2013)으로 실내공기질 관리 기본계획을 수립하였다. 관리오염 대상물질을 10가지 항목으로 규정하였고, 적용대상을 지하역사, 지하상가, 의료기관 등을 포함한 17개 시설군으로 확대함으로써 경제활동이 활발한 다중이용시설의 실내공기 쾌적화를 증진시키고자 노력하고 있다[3].

이와 같은 다중이용시설의 실내공기질 오염을 제어하는 주된 방법으로는 온도, 습도, 환기, 통풍 조절 등의 시스템적인 방법과 내부 오염원 또는 외부로부터 유입된 입자상 및 가스상 오염물질, 부유성 미생물 등을 제어하는 요소기술 방법이 있을 수 있으며, 오염원에 따라서 공조시스템에 의한 자연통풍으로 오염물질을 제거할 수 있는 반면 자연환기 및 통풍으로도 제거할 수 없는 경우도 있다[4]. Seppanen and Fisk(2002)의 연구에 의하면 자연통풍 시스템과 비교했을 경우 공기정화 시스템(air-conditioning)과 같은 공조시스템으로 정화시킨 건물에 대하여 새집증후군(SBS, sick building syndrome) 현상이 30-200%까지 증가하는 것으로 보고되고 있어 실내공기질의 개선을 위한 요소기술 및 장치의 개발 노력은 대부분의 시간을 실내공간에서 보내는 현대인들에게는 매우 중요하다고 할 수 있다[5].

실내공기질과 관련된 산업은 1970년대 에너지 위기로

인한 건축물의 강제적인 효율증대 및 기밀화로 인하여 소유주, 설계자, 관리자 및 거주자들에게 매우 중요한 사안으로 부각되었고, 건물의 설계에서부터 기준을 맞추기 위하여 가정, 사무실 및 학교 등에 공기 정화시설 및 시스템의 설치가 상대적으로 줄어들게 되었다. 이러한 에너지 효율성을 염두한 설계 및 운영이 건축물의 에너지 관리비용을 줄여주는 효과를 가져온 반면 내부공간에 부유오염물질이 증가되는 결과를 가져오게 되었다. 이와 같이 저하된 실내공기질에 의하여 실내 거주자에게 호흡질환과 같은 심각한 건강상 장애를 가져오게 되어 이러한 문제들로 인하여 실내공기질과 관련된 시장의 발전을 가져왔다[6].

본 연구에서는 전기적인 방법으로 실내공기 오염물질의 제어를 통하여 공기질을 저감시킬 수 있는 요소기술의 개발 및 적용을 위하여 실내공기질 개선과 관련된 기술 및 사업의 시장 현황을 살펴보고 제거대상인 미세먼지를 중심으로 실내공기질 오염물질의 특성과 최근에 이루어진 실내공기질 개선과 관련된 연구를 바탕으로 실내공기질 제어 기술의 특징 및 장단점을 분석하였다. 이를 통하여 향후 연구 및 개발 방향을 모색함으로써 새로운 실내공기질 제어 연구 방향을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 실내공기질 관련산업의 시장 현황[6]

실내공기질과 관련한 산업으로는 공기질 제어 및 시스템 관련 산업, 환경 서비스 산업, 그리고 오염측정 및 컨설팅 분야로 구분되어 향후 2017년까지 미국 내에서의 시장전망은 Table 1과 같으며, 실내공기질 제어 및 관리를 위한 장치관련 산업에는 공기청정기, 통풍 시스템, HVAC 필터, 기타 관련 장치 등으로 분류되며 각각에 대한 시장전망은 Table 2와 같다.

[Table 1] IAQ Market by Segment, through 2017(\$ Millions)[6]

Segment	2011	2012	2017	CAGR% '12-'17
Equipment	3,617	3,734	4,727	7.8
Environmental Services	1,805	1,925	2,390	4.4
Consulting and testing services	1,540	1,640	2,040	4.5
Total	6,962	7,299	9,157	4.6

[Table 2] IAQ Equipment Market by type, through 2017(\$ Millions)[6]

Segment	2011	2012	2017	CAGR% '12-'17
Air Cleaner	1,635	1,680	2,055	4.1
Ventilation equipment	1,020	1,050	1,420	6.2
Replacement filters	930	970	1,210	4.5
IAQ instrumentation	32	34	42	4.3
Total	3,617	3,734	4,727	4.8

2.1.1 활용방식에 따른 공기 청정기 시장

공기 청정기의 적용방식으로는 휴대용과 덕트 시스템에 의한 것으로 분류된다. 2011년 미국의 휴대용 및 덕트 공기 청정기 시장 규모는 약 16 억 달러 규모로 2008년에 비하여 15%가 줄어들었고 2012년에는 약 3%(총 시장규모: 17 억 달러), 2017년까지 거의 21 억 달러 규모에 이를 것으로 보고하고 있다.

전자오븐과 같은 일반 가전제품과 달리 휴대용 공기 청정기는 일반 소비자가 구매하기 보다는 알레르기나 호흡기 질환과 같이 의학적으로 문제가 있는 소비자가 구매하는 경우가 많아서 소비패턴이 덕트 공기 청정기 시장(약 6%)보다는 연평균 성장률(CAGR)이 낮을 것으로 예측하고 있다.

2.1.2 적용기술에 따른 공기 청정기 시장

실내 공기청정기에 적용된 기술에 따른 분류를 살펴보면 기계식, 전기전자식, 하이브리드, 오존발생, 이온화 방법 등으로 분류되며 Table 3와 같이 각 분야에 대한 시장 전망이 예측되어 2017년까지 평균 4.1%의 평균 성장률을 나타낼 것으로 보고하고 있다.

[Table 3] Air cleaning Market by technology type through 2017(\$ Millions)[6]

Technology	2011	2012	2017	CAGR% '12-'17
Mechanical	785	822	1,075	5.5
Electronic	320	333	453	6.3
Ionizer	215	213	210	- 0.3
Hybrid	125	125	135	1.6
Ozone	115	113	110	- 0.5
Other	75	74	72	- 0.5
Total	1,635	1,680	2,055	4.1

가장 대중적으로 활용되는 방식은 기계역학적인 기술로 대표적인 기술은 HEPA 필터에 의한 여과에 의해서

실내 공기 오염물질을 제거하는 기술이다. 2011년 시장 규모는 785 백만 달러를 나타내었고, 2012년에는 822 백만 달러, 2017년에는 연평균 성장률을 5.5%를 나타내어 약 11 억 달러까지 이를 것으로 전망하고 있다.

정전기 방식을 포함하는 전기전자식 공기 청정기의 시장규모는 2011년에 320 백만 달러, 2012년에는 333 백만 달러로 성장하고 2017년까지 6.3%의 성장률을 나타내며 약 453 백만 달러까지 시장규모가 확대될 것으로 예측하고 있으며 이온화 장치의 경우, 2012년에 약 213 백만 달러, 2017년까지 약 210 백만 달러로 - 0.3%의 성장률을 보이면서 시장이 감소할 것으로 보고 있다. 이와 같이 적용기술에 따른 시장의 성장률이 다른 이유는 기술에 대하여 소비자들의 편의성이 다르기 때문이다. HEPA 필터와 같은 기계역학적 방식 및 정전기 방식과 같은 전기전자식 공기청정기는 오존발생이나 이온화 장치에 비하여 상대적으로 설치와 작동이 간편하고, 유지관리가 용이하며 에너지 소모율이 낮은 특징이 있어 향후 관련시장이 증가되는 것으로 분석되고 있다. 특히 정전기 방식은 기술의 적용성이 가장 효과적이고, 필터가 비교적 깨끗하게 유지될 수 있어 소비자 성장률이 다소 높고 덕트와 같은 기계식 공기청정기는 소음이 발생하는 문제점이 있으나, 운영의 용이성으로 인하여 시장성에서는 다소 유리한 것으로 분석된다.

기계식 공기청정기는 한 번의 설치로 최대 5년 동안 교체 없이 높은 제거효율을 갖는 것이 대표적인 장점이고, 최근 탄소나노튜브 등의 새로운 소재의 필터가 개발되고 있어 시장가능성이 높은 것으로 예측하고 있다. 이처럼 기존의 필터방식이 우리 주변에 많은 분야에서 다양하게 적용되고 있어 앞으로도 지속적으로 시장은 확대될 것으로 분석된다.

2.2 실내공기질 오염물질의 종류와 특성

실내 공기환경은 열적 쾌적성과 실내공기질의 필요조건을 만족시켜야 한다. 열적 쾌적성은 내부온도, 습도, 공기속도, 복사열 등과 같은 요인에 의해서 영향을 받으며 최적의 실내공기질 조건을 유지하기 위해서는 공기질 개선 장치 및 방안이 적용되어야 한다[4]. 많은 전문가들이 실내공기질 개선이 건강을 위하여 매우 중요한 사안으로 인식하고 있으나 기타 다른 환경문제와 견주어 상대적으로 간과되고 있는 것이 현실이다. 실내공기질을 오염시키는 물질들을 가스상 및 입자상 물질로 분류하여 이들의 종류와 물리화학적 특성을 살펴보았다.

[Table 4] Typical air pollutions in indoor air[7]

Group	Particles	Gaseous Pollutants	Radon and its progeny
Example	Very small liquid or solid substances in the air : mists, dust, pollen, cigarette, smoke, viruses, bacteria, molds	CO, CO ₂ , NO _x , formaldehyde, VOCs	Radioactive gases
Origin	Outdoor air, combustion, carpets, human activity, decaying building	Combustion, human activity, building material, furniture, cleaning products, mold development etc.	Rock, soil, groundwater, natural gas, mineral building materials
Health effects	Irritation to eyes and/or respiratory tissues, allergies, cancer, indirect effect through biological production of toxins	Irritation to eyes and/or respiratory tissues, allergies, cancer, indirect effect on the respiratory liver, immune, reproductive and/or nervous system	Lung cancer

2.2.1 가스상 물질

실내공기질을 오염시키는 주된 가스상 오염물질은 CO, CO₂, NO_x, SO₂, O₃, VOCs, Radon 등이 있다. 최근에는 다양한 종류의 화학물질이 건축자재, 가구, 장식재 등에서 배출되어 실내 공기환경을 오염시키고 있지만 독성 및 유해성이 가장 높아 제거해야하는 중요한 가스상 오염물질은 VOCs로서 인체의 호흡기관과 관련된 질병에 심각한 영향을 끼치며 그동안 많은 연구자들과 기술자들에 의해서 실내공기질 개선을 위한 연구의 대상이 되어 왔다[8].

특히 건축물 내부와 가구 등의 장식을 위하여 사용되는 도료에서 주로 배출되고 그 중에서도 7가지 VOCs(1-ethyl-3-methylbenzene, 1,2,4-trimethylbenzene, *n*-hexane, 1,3,5-trimethylbenzene, propylbenzene, *o*-xylene, toluene) 물질이 총 VOCs의 85% 정도를 차지하고 있으며 총 VOCs의 65.2%가 4시간 이내에 실내공기로 배출되어 오염시키고 그 이후에는 배출정도는 줄어들고 매우 오랜 시간 동안 실내에 체류하면서 사라지지 않고 유지된다[9].

가스상 오염물질은 화학반응에 의하여 다른 종류의 가스상 또는 입자상 오염물질과 반응하여 2차 실내공기 오

염물질을 생성할 수 있다. 오존과 불포화 탄화수소의 반응은 2차 오염물질을 생성하는 주요한 원인으로 free radicals, 알데하이드, 케톤, 미세입자 등을 발생시키고 이들 물질은 반응물질보다 더욱 인체에 자극적인 것으로 보고되고 있어[10], 쾌적한 실내공기질의 유지를 위해서는 원인물질과 이들에 의한 2차 반응물까지도 고려한 체계적인 관리 및 제어방안이 요구된다.

2.2.2 입자상 물질

실내 공기환경을 오염시키는 물질의 발생원은 실내 및 실외 오염원으로 구분할 수 있고, 각각의 농도 및 성분은 발생원에 따라 서로 다르다[11]. 거주용 건물의 내부에서 취사 및 흡연 등에 의해서 발생하는 실내 오염원의 입자들은 대부분 입경크기가 매우 작은 형태를 갖고 있어 PM_{2.5}의 농도가 일반 수준보다 3~30배까지 높아지는 것으로 보고되고 있다. 실외로부터 유입되는 오염원은 먼지나 창호의 틈새 또는 공기정화 시스템으로부터 신선한 공기와 함께 0.1 μ m보다 작은 크기를 나타내며 실내로 유입되어 이보다 큰 입경을 갖는 입자의 분포는 10% 미만을 나타낸다[12].

다중이용시설과 같은 단일 건물 및 시설물 내에서 실내 환경을 오염시키는 PM_{2.5}의 화학적 특성에 대하여 Table 5와 같이 조사되었다[13]. 구성 성분 중 유기탄소(organic carbon)가 상당 부분을 차지하여 PM_{2.5}의 화학적 특성에 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었고 실내 공간에서 유기탄소가 높은 비율로 차지하고 있어 박테리아의 번식에도 일부 기여를 하는 것으로 나타나 실내 거주자의 건강에 직간접적으로 영향을 미치고 있다. 특히 높은 온도의 표면에 쌓인 PM_{2.5}와 같은 물질들은 화학물질을 배출하여, 150-600℃에서 가열된 실내공기 미세먼지로부터 CO, CO₂, NO_x, NH₃와 같은 기체가 검출되는 것으로 보고되고 있는데, 미세입자의 크기가 매우 작고 비표면적이 넓어 다양한 원인물질이 표면에 흡착하고 있어 열에 의하여 탈리되어 공기를 오염시키는 것으로 판단된다.

[Table 5] Main composition of PM_{2.5} and mass percentage in Residence and School room

Spec.	PM _{2.5} mass %	
	Residence	School room
Organic carbon	40-60	26-50
nitrate	13-14	20
trace elements	11-12	22
ammonium	8	-
elemental carbon	6	6-7
sulfate	4	6-7

이와 같이 인체에 유해한 대부분의 입자상 오염물질은 입경이 매우 작은 특성을 갖고 있고, 매우 작은 크기로 인하여 인체 내부까지 침투되며 넓은 비표면적으로 인하여 반응성이 높아 미세한 유해물질을 흡착시켜 이동시키는 특성을 갖는다. 특히 앞서 조사된 가스상 오염물질과도 화학적으로 반응하여 2차 오염물질을 생성하여 실내 공기질을 더욱 오염시키는 요인을 제공하는 원인물질로도 작용하고 있어 공기질의 개선을 위해서는 근본적인 차단 또는 제어기술이 필요하다.

2.3 실내공기질 오염물질 제거기술 연구현황

2.3.1 여과방식

필터 등과 같은 여과방식은 실내공기질의 개선을 위한 방법 중에서 가장 경제적이고 효과적인 기술로 공기정화 시스템에서 주요한 물질들을 제거할 수 있다. 필터에 의한 여과방식은 쌓이는 오염물질이 새로운 필터로 작용하여 제거효율을 증가시키는 기능을 할 수도 있다[4]. Zhao 연구진은 클린필터와 현장에 적용되었던 일반필터를 이용하여 실험조건에서 오존의 제거율을 측정하였다. 이 연구에서 클린필터에서는 9%의 제거율이 나타났고 일반필터에서는 10-41%의 제거율이 측정되어 이미 오염물질이 쌓인 필터에서 더 높은 오존의 제거율이 나타났고 부분적으로 오존의 제거효율이 회복되는 현상을 보고하였다[14]. 그러나 오존과 필터에 쌓인 화학물질이 서로 반응하여 산화작용에 의해 포름알데히드와 같은 새로운 물질을 생성될 수도 있는 단점이 있다[15]. 또한 유해한 미생물이 필터에 쌓여 번식할 수 있으며 결과적으로는 필터의 기능 및 효율이 저하되고 동시에 실내 공간 거주자의 건강에 위해를 줄 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 필터에 항균(antimicrobial) 처리를 함으로써 필터 기능을 향상시키는 연구도 진행되고 있다[16].

2.3.2 흡착방식

활성탄, 제올라이트, 활성 알루미늄, 실리카겔 등을 포함한 흡착제는 실내공기질을 개선할 수 있는 물질이다. 활성탄은 비표면적이 넓고 많은 미세공극으로 인한 높은 흡착반응성을 갖고 있어 낮은 농도에서도 많은 양의 오염물질을 제거할 수 있다. 이러한 특징을 이용한 활성탄 필터(Activated Carbon Filter, ACF)는 입상활성탄(Granular Activated Carbon, GAC) 보다 성능이 우수하여 가스상 물질로 오염된 실내공기질을 정화시킬 수 있다[4].

활성탄필터의 제조공정을 통하여 미세공극의 분포 및 크기와 비표면적을 더욱 증가시킬 수 있는데

Polyacrylonitrile 기반의 활성탄필터(PAN-ACF)는 산화 온도($\sim 270^{\circ}\text{C}$)와 시간을 조절하여 비표면적의 넓이를 극대화시킬 수 있고[17], 극미량으로도 악취를 유발하는 물질인 methyl propyl ketone, methyl ethyl ketone, n-hexane, acetone, methylene chloride와 같은 물질을 99.9%까지 제거할 수 있다[18].

활성탄 필터의 경우, 일정 시간동안 사용되면 흡착능이 저하되어 재생한 후에도 활성은 지속적으로 낮아지는 단점이 있다. 또한 아직까지 단가가 일반 GAC보다 5~100배 높아 실제 적용하기에는 무리가 있고 일부 특정 물질에 대해서만 흡착능이 있는 것으로 보고되고 있다[4]. 그러나 실내공기질을 오염시키는 물질은 매우 복잡하고 다양한 특징이 있으므로 활성탄 필터를 적용하여 공기를 정화시키는 방법은 매우 효과적인 것으로 분석되고 있다.

2.3.3 광촉매 산화 방식

광촉매에 의한 오염물질 제거 기술은 초기에는 오염된 하수의 정화를 위하여 많이 적용되어 왔으나 최근에는 건축물 내의 사무실 등을 포함한 실내공간의 오염된 실내공기질을 정화하는 기술로도 적용되고 있다[19]. 광촉매 산화에 의한 기술은 자외선의 조사에 의하여 발생되는 강력한 산화제인 superoxide, hydroperoxide anions 또는 hydroxyl radicals를 광촉매 표면에 발생시켜 공기 중에 존재하는 VOCs와 같은 유해한 유기화합물을 무해한 CO_2 와 H_2O 로 분해 및 제거하는 기술이다. 이와 같이 자외선과 같은 외부 광원에 의해서 반응의 초기 활성화 에너지를 줄여 본 반응을 도와주는 물질을 광촉매라고 하고 반도체 재료인 TiO_2 , SiO_2 , ZnO , WO_3 등이 주로 사용되고 있다[20].

반응속도는 광촉매 효율성을 평가하는 중요한 인자이다. 광촉매 반응속도에 영향을 주는 인자는 습도, 광원, 초기 오염물질의 농도, 광촉매의 특성과 반응기의 형태가 대표적이다. 특히, 광촉매 표면에서는 물 분자 뿐만 아니라 물의 화학적 해리로 인하여 발생하는 수산기 그룹을 이동시킬 수 있어 수증기가 없는 조건에서는 광촉매 분해가 지연되어 CO_2 가 발생하지 않는다. 반대로 광촉매 표면에 수증기가 과도하게 많으면 물 분자가 반응물의 활성화부위에 먼저 반응하게 되어 반응 속도를 감소시키는 특성이 있어 실내공기질 정화에 적용을 위해서는 내부의 습도 조건도 주요한 인자라 할 수 있다.

광원의 파장과 광세기 또한 광촉매 효율을 결정하는 중요한 인자로서, 짧은 파장일수록 높은 에너지를 발생시키지만 단파장이 항상 오염물질을 분해하는데 있어 효과적이지는 않다. Zhang 연구진(2003)은 toluene의 분해를

위해서는 254 nm 보다는 365 nm의 파장이 더 높은 효과가 있는 것으로 보고하였고, trichloroethylene의 분해과정에서 200-300 nm의 자외선 보다는 315-400 nm의 자외선이 더 적합한 것으로 나타났다[21]. 또한 이론적으로는 빛의 강도가 높을수록 많은 광자(photon)가 발생되어 반응속도 높아져야 하지만 실제로는 광세기가 증가할수록 광자의 활용률이 저하되고, 전자와 정공의 재결합이 증가된다. 이에 따라 다른 종류의 대상 오염물질에 대해서는 반응속도가 변화될 수 있으므로 해당하는 광세기와 최적 반응하는 특정 범위의 오염물질 농도에서 반응시켜야 한다[19].

광촉매를 이용한 오염물질 제거기술의 큰 문제점은 가시광선에서의 반응성 및 처리효율이 자외선보다는 낮거나 없다는 것이다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 다양한 방안 및 연구가 진행되고 있다. 공급하는 광원의 파장대에서 반응성을 증가시키기 위한 광촉매 표면 광여기 처리[22], 전자와 정공의 재결합 반응을 지연시키기 위한 귀금속, 전이금속, 불활성 물질 첨가[23], 비표면적을 증가시켜 반응조건을 향상시키기 위한 복합체 제조[24] 등이 최근까지 연구되고 있다.

이와 같이 광촉매 산화는 실내 공기조건에서 반응속도와 효율성이 상대적으로 낮기 때문에 사용되는 광촉매의 성능을 향상시키기 위한 노력과 새로운 방식의 광촉매의 개발이 요구된다. 광산화 과정에서 유해한 물질이 중간 생성물로 발생될 수 있으며 최적의 반응조건을 찾기 위하여 반응기작을 심도 있게 연구할 필요가 있다. 광촉매 산화 반응은 실내공기질 오염물질에 대하여 단일 오염물질 뿐만 아니라 여러 종류의 복합 오염물질에 대해서도 제거할 수 있는 사례가 보고되고 있어 이와 관련된 추가적인 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 판단된다.

2.4 유전영동 및 정전기력을 이용한 먼지제어

태양광 및 태양열을 이용하여 전기를 얻는 방법은 집열판을 통하여 자연으로부터 빛과 복사열을 모아서 전기 에너지를 얻는 기술로써 대표적인 신재생에너지 활용기술이다. 태양열 집열판 표면에 외부로부터 꽃가루, 강하 분진, 미세먼지 등의 물질이 쌓이게 되면 집열판의 표면적이 줄어들어 에너지 효율이 저하된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 집열판 표면에 특수 표면처리를 하거나 주기적인 청소 및 관리를 통하여 효율을 유지시킬 수 있다.

Calle 연구진은 화성이나 달과 같은 우주공간에서 먼지폭풍에 의하여 발생하는 먼지가 탐사선 및 탐사장비로 쌓여 운영효율을 저하시키는 문제점을 해결하기 위한 연구로 전기역학적 먼지 제어(Electrodynamic dust shield)에

관한 기술개발을 수행하였다[25]. 이 방법은 전기적으로 하전되거나 하전되지 않은 먼지를 유전영동 및 정전기적 힘에 의하여 표면으로부터 부상 및 이동시키는 기술에 의한 것으로 이는 전기커튼의 개념과 유사하다.

높은 진공조건에서 20 mg의 모의 먼지샘플(50-75 μ m)로 실험한 결과, 태양 집열판의 효율을 11-23%까지 저하시켰고, 전기역학적 먼지 제어를 적용한 후에는 성능이 90%까지 개선된 것으로 나타났으며 집열판 자체의 성능에도 어떠한 영향도 미치지 않는 것으로 실험결과가 도출되었다.

3. 결론

본 연구에서는 전기적인 방법으로 실내공기 오염물질의 제어를 통하여 공기질을 저감시킬 수 있는 요소기술의 개발 및 적용을 위하여 실내공기질 개선과 관련된 기술 및 사업의 미국 내 시장 현황을 살펴보았다. 또한 최근에 이루어진 실내공기질 개선과 관련된 연구를 바탕으로 제거대상인 미세먼지 등의 실내공기질 오염물질 특성과 기술의 특징 및 장단점을 분석하였다. 이를 통하여 향후 연구 및 개발 방향을 모색함으로써 새로운 실내공기질 제어 연구 방향을 제시하고자 하였다.

실내공기질을 개선하기 위한 시장 분석결과 필터를 이용한 기계식 여과기술 및 장치산업이 대부분을 차지하고 있으며, 전기전자식 기술이 향후 시장 발전가능성이 높은 것으로 조사되었다. 이는 사용 편의성과 경제성 측면에서 우수하고, 다른 형태의 기술보다 오염물질 제거효율과 안전성이 높기 때문인 것으로 사료된다. 유전영동 및 정전기력을 이용한 전기역학적 먼지 제어 기술은 다중이용시설과 같이 다양한 실내공기 오염물질이 발생하는 곳에 적용하기에 앞서 실내 온도 및 습도, 대상물질의 수분 함량 및 전기화학적 특성 고려와 같은 문제점을 해결해야 한다. 미세먼지가 제거되어야 하는 특수한 환경조건이 요구되는 작업장의 경우에는 이와 같은 기술이 적용될 수 있으며, 위와 같은 문제점이 해결된다면 실내공기질 개선을 위한 요소기술로 개발이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Molhave, L., Krzyanowski, M. *The right to health indoor air; status by 2002. Indoor Air.* pp. 50-53, 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1034/j.1600-0668.13.s.6.7.x>
- [2] Z. Wang, Z. Bai, H. Yu, J. Zhang, T. Zhu, 'Regulatory

- standards related to building energy conservation and indoor-air-quality during rapid urbanization in China', *Energy build.*, 36, pp. 1299-1308, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.09.013>
- [3] Young chol, C., "Direction of improvement of management system for indoor air quality", Korea association for public administration, 2012.
- [4] B.F. Yu, Z.B. Hu, M. Liu, H.L. Yang, Q.X. Kong, Y.H. Liu, "Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health", *International Journal of Refrigeration*, pp. 32, 3-20, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.05.004>
- [5] Seppanen, O., Fisk, W.J. Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers. *Indoor Air*. pp. 98-112, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1034/j.1600-0668.2002.01111.x>
- [6] U.S. *Indoor Air Quality Market*, BCC Research, 2012.
- [7] U.S. EPA, Indoor Air Quality, <http://www.epa.gov/iaq/index.html>. (accessed Oct., 15, 2013)
- [8] Cox, S.S., Little, J.C., Hodgson, A.T., "Predicting the emission rate of volatile organic compounds from vinyl flooring. *Environ.*", *Sci. Technol.* 36, pp. 709-714, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es010802>
- [9] L.Z. Zhang, J.L. Nju, "Effects of substrate parameters on the emissions of volatile organic compounds from wet coating materials", *Bulid. Environ.* 38, pp. 939-946, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00032-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00032-5)
- [10] A. Rohr, C.J. Weschler, P. Koutrakis, "Generation and quatification of ultrafine particles through terpene/ozone reaction in a chamber setting", *Aerosol Sci. Technol.* 37(1), pp. 65-78, 2003.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02786820300892>
- [11] He, C.R., Morawska, L., Hitchins, J., Gilbert, D., "Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses". *Atmos. Environ.* 38, pp. 3405-3415, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.027>
- [12] Gramotnev, G., Ristovski, Z., "Experimental investigation of ultra-fine particle size distribution near a busy road", *Atmos. Environ.* 38(12), pp. 1767-1776, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.12.028>
- [13] Sawant, A.A., Na, K., Zhu, X.N., Cocker, K., Butt, S., Song, C., Cocker III, D.R., "Characterization of PM_{2.5} and selected gas-phase compounds at multiple indoor and outdoor sites in Mira Loma, California Austria", *Atmos. Environ.* 38, pp. 6269-6278, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.043>
- [14] P. Zhao, J.A. Siegel and R.L. Corsi, "Ozone removal by HVAC filters", *Atmos. Environ.* 41, pp. 3151-3160, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.059>
- [15] M. Hyttinen, P. Pasanen, P. Kalliokoski, "Reactions of ozone on clean, dusty and sooty plenums", *ASHARE Trans.* 112(2), pp. 581-591, 2006.
- [16] M.C. Verdenelli, C. Cecchini, C. Orpianesi, G. M. Dadea, A. Cresci, "Efficacy of antimicrobial filter treatment on microbial colonization of air panel filters", *J. Appl. Microbiol.*, 94, pp. 9-15, 2003.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.01820.x>
- [17] Z.H. Huang, F.Y. Kang, K.M. Liang and J.M. Hao. Breakthrough of methylethylketone and benzene vapor in activated carbon fiber beds, p.107-115, *J. Hazard. Mater.*, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00284-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00284-4)
- [18] K.D. Dombrowski, C.M.B. Lehmann, P.D. Sullivan, D. Ramirez, M.J. Rood., K.J. Hay, "Organic vapor recovery and energy efficiency during electric regeneration of an activated carbon filter cloth adsorber", *J. Environ. Eng.*, 130(3), pp. 268-275, 2004.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2004\)130:3\(268\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:3(268))
- [19] J. Zhao., X. Yang, "Photocatalytic oxidation for indoor air purification: a literature review", *Build. Environ.* 38(38), pp. 645-654, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00212-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00212-3)
- [20] W. H. Yang, D. W. Kim, M. H. Chung, J. S. Yang., K. S. Pakr, "Improvement of indoor air quality by coating of indoor materials of TiO₂ Photocatalyst sol", *Kor. J. Env. Hlth.*, 30(2), pp. 92-97, 2004.
- [21] P, Y, Zhang, F. Y. Liang, G. Yu, Q. Chen, W. P. Zhu, "A comparative study on decomposition of gaseous toluene by O₃/UV, TiO₂/UV and O₃/TiO₂/UV", *J. Photochem. Photobiol.* A156(1-3), pp. 189-194, 2003.
- [22] Y. Choi, W. Choi, C.H. Lee, T. Hyeon, H.I. Lee, "Visible light-induced degradation of carbon tetrachloride on dye-sensitized TiO₂", *Environ. Sci. Technol.*, 35(5), pp. 966-970, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es001245e>
- [23] M. Zhang, Z. S. Jin, J. W. Zhang, Z. J. Zhang, H. X. Dang. Effect of calcination and reduction treatment on the photocatalytic activity of CO oxidation on Pt/TiO₂, p. 59-63, *J. Mol. Catal., A: Chem.*, 225, 2005.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molcata.2004.08.034>

- [24] J.K. Kim, J. Alajmy, A.C. Borges, J.C. Joo, H.S. Ahan, L.C. Campos. *Degradation of humic acid by photocatalytic reaction using nano-sized ZnO/laponite composite (NZLC)*, p. 224-1749, Water Air Soil Pollut. 2005.
- [25] C.I. Calle, C.R. Buhler, J.L. McFall, S.J. Snyder. *Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions*, p. 89-62, J. Electrostatics 67, 2009.

윤 영 한(Young Han Yoon)

[정회원]



- 2003년 2월 : 광주과학기술원 환경공학과 (공학석사)
- 2008년 2월 : 연세대학교 토목환경공학과 (박사수료)
- 2002년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구실 수석연구원

<관심분야>

도시 물순환, 하수고도처리, 실내공기질관리

주 진 철(Jin Chul Joo)

[정회원]



- 2001년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학석사)
- 2007년 12월 : Colorado State University, USA (공학박사)
- 2007년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구실 연구위원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 부교수

<관심분야>

토양지하수 오염 복원, 대기·수질관리

안 호 상(Hosang Ahn)

[정회원]



- 2007년 7월 : University of Florida (재료공학 석사)
- 2011년 12월 : Auburn University (재료공학 박사)
- 2012년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원, 환경연구실 수석연구원

<관심분야>

실내공기질, 센서, 환경소재,

남 숙 현(Sook-Hyun Nam)

[정회원]



- 2000년 8월 : 고려대학교 환경공학과(공학석사)
- 2000년 9월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구실 연구원

<관심분야>

고도정수처리, 소독부산물, 미생물