

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[□], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업			
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명		국토교통기술혁신연구			
공고번호	공고-제05호				총괄연구개발 식별번호				-		
					연구개발과제번호				20CTAP-C156950-01		
국가과학기술 표준분류	EH0102		60%	EH1202		20%	EH1102		10%		
총괄연구개발명	국문	생활공간 내 복합 실내공기 오염물질 정화를 위한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발									
	영문	Development of porous ceramic dielectric barrier discharge system for indoor air purification									
연구개발과제명	국문	생활공간 내 복합 실내공기 오염물질 정화를 위한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발									
	영문	Development of porous ceramic dielectric barrier discharge system for indoor air purification									
주관연구기관	기관명	성균관대학교 산학협력단				사업자등록번호		101-82-12009			
	주소	(우)16419 경기도 수원시 장안구 서부로 2066 성균관대학교 자연과학캠퍼스				법인등록번호		101-82-12009			
주관연구책임자	성명	장암				직위		교수			
	연락처	직장전화	031-290-7526				휴대전화		010-6523-9731		
		전자우편	amjang@skku.edu				국가연구자번호		1009-9079		
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (21개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31 (9개월)									
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (12개월)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그외기관 등의 지원금 지방자치단체 기타()				합계		연구개발비 외 지원금	
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계			
	총계	370,000			-	-	-	-	370,000		-
	1년차	160,000			-	-	-	-	160,000		-
	2년차	210,000			-	-	-	-	210,000		-
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고					
공동연구기관						역할		기관유형			
위탁연구기관											
연구기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명	이현호				직위		연구원			
	연락처	직장전화	031-290-7535				휴대전화		010-8367-3709		
		전자우편	viem1234@gmail.com				국가연구자번호		1177-6445		

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 01 월 13 일

주관연구책임자 :

장 암

주관연구기관의 장 :

성균관대학교 산학협력단

박선규

(직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업				총괄연구개발 식별번호		-					
내역사업명		국토교통기술혁신연구				연구개발과제번호		20CTAP-C156950-01					
국가과학기술 표준분류		EH0102		60%		EH1202		20%		EH1102		10%	
총괄연구개발명		생활공간 내 복합 실내공기 오염물질 정화를 위한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발											
연구개발과제명		생활공간 내 복합 실내공기 오염물질 정화를 위한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발											
전체 연구개발기간		2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (21개월)											
총 연구개발비		총 370,000 천원 (정부지원연구개발비 : 370,000 천원)											
연구개발단계		기초[□] 응용[] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]				기술성숙도		착수시점 기준(2단계) 종료시점 목표(3-4단계)					
연구개발과제 유형		지정공모 [] 자유공모 [□]											
연구개발과제 특성		기반연구											
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		• 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템을 통해 미세먼지 및 실내공기 유해물질을 제거하여 건물 내 공기질 개선을 위한 핵심요소기술 및 미래원천기술 확보										
	전체 내용		• 미세먼지 및 실내 유해물질을 포함한 공기를 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템에 접촉 및 여과시켜, 반응기내에서 실내공기 유해물질을 분해하고 동시에 미세먼지를 제거하여 건물 내 깨끗한 공기질을 확보하고 유지할 수 있는 친환경 공기청정 시스템을 개발하고자 함.										
	1년차	목표	• Lab-scale 규모의 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 설계 및 제작										
		내용	- 실내공기 유해물질 제거에 관한 국내·외 기술동향 및 유전체 장벽 방전 연구현황 등에 대한 조사 및 분석 - 실내공기질 개선에 적합한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템의 최적 전극, 유전체 선정 - 실내공기질 개선에 적합한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템의 전극, 유전체 최적 배열 설계 - Lab-scale 규모의 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 구축										
	2년차	목표	• 전압, 유입유량, 방전거리, 체류시간 등에 따른 다공성 유전체 장벽 방전 시스템 최적 운전조건 선정 • 미세먼지 입자크기 별, 실내공기 유해물질 농도별 분해율 및 부산물의 독성 평가 • 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템에 요구되는 분해 능력 대비 처리 면적당 전력 소모량 산정										
		내용	- 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전에서 발생하는 활성종 분석 - 방전 처리 조건(전압, 유입유량 등)에 따른 최적 운전 시간 도출 - 최적 제거율을 가질 수 있는 체류시간 결정을 통한 최적 설계 인자 확보 - 미세먼지 입자크기(PM10, PM2.5)에 따른 제거효율 평가 - 실내공기 유해물질 농도별 제거효율 평가 - 미세먼지(PM10, PM2.5) 및 실내공기 유해물질 복합시료의 제거효율 평가 - 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템으로 제거·분해된 미세먼지·실내공기 유해물질 복합시료의 부산물 분석 및 독성 평가 - 제거율 및 분해산물(오존) 평가에 따른 최적 반응기 형태 선정 - 최적조건에서 유전체 장벽 방전/여과 장치 운전 시, 미세먼지 및 실내공기 유해물질 분해율에 따른 요구전력 비용 산정(99% 이상 분해의 경우에 한함)										
연구개발성과													
		구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
		성과 (N/Y)	Y	Y	Y	N	N	N	N	생명 정보	생물 자원	정보	실물
		• SCI급 논문 3편 게재 • 특허출원 1건											

	- 인력양성 석사 2명 배출 - 보고서원문 1건 - 시작품 2건											
연구개발성과 활용방안 및 기대효과	- 미세먼지 제거 및 실내공기 유해물질 분해를 통한 건물 내 실내 공기질 개선의 핵심요소 기술 및 미래원천기술 확보(시스템 기술) - 후속 연구를 통한 프로토타입 장치를 개발 및 제작하여 시스템의 신뢰성과 안전성을 평가하고, 시범운영을 통해 실용화 및 사업화를 위한 실제 환경 사용 가능성과 사용 적합성 증명 - 실내공기 유해물질 분해 부산물 無배출을 통해 향후 스마트 시티 구축의 핵심기술로써 소규모 건물 단위의 그린 인프라 구축시 활용 가능 - 실내 공기질 개선 장치: 건물 내 유입된 미세먼지를 제거하고 실내에서 발생하는 공기 유해물질을 분해함으로써 쾌적하고 건강한 생활환경을 조성하고 유지하도록 함 - 친환경 공기청정 시스템: 기존 공기청정 시스템에서 사용되어지는 전처리 고분자 기반 필터를 사용하지 않음으로써 폐필터 발생 및 잦은 필터 교체가 없어 폐기물 발생이 없는 친환경 공기청정 시스템											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당 없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	3	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
국문핵심어 (5개 이내)	실내공기 유해물질		미세먼지		공기정화		다공성 세라믹		유전체 장벽 방전			
영문핵심어 (5개 이내)	Indoor air pollutants		Fine dust		Air purification		Porous ceramic		Dielectric barrier discharge			

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	
1-1. 최종 목표	5
1-2. 연차별 목표	6
1-3. 연구개발과제의 필요성 및 국내외 현황	8
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	
2-1. 1차년도 연구개발내역	21
2-2. 2차년도 연구개발내역	33
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	47
4. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여도	55
5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	56

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

○ 건물 내 공기질 향상을 위해 실내 미세먼지 및 유해물질 제거가 가능한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 핵심요소기술 및 원천 기술 개발

1. 건물 내에서 발생하는 미세먼지와 주요 실내공기 유해물질 선정 및 유해성 평가
 2. 미세먼지 및 선정된 주요 실내공기 유해물질 분해와 분해산물 無배출이 가능한 Lab-scale 규모 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발 및 최적 구조 선정
 3. 복합 유해물질(미세먼지+실내공기 유해물질)의 분해효율 및 분해산물 독성 평가
-

- 다공성 세라믹을 적용한 유전체 장벽 방전 시스템을 통해 실내 공기 유해물질을 분해하여 공기질을 개선하는 연구는 아이디어에서 응용연구로 진행되는 단계이며, 다수의 공극을 가지는 세라믹 유전체를 사용하여 평판형, 충전형 반응기 구조에 따라 미세먼지(입자성 물질)와 실내공기 유해물질을 동시에 제거하기 위한 연구는 요소기술들의 가능성 및 효율을 확인하기 위한 실험적 연구를 설계하고 있는 단계임.
- 연구 기간 및 기보유한 기술들과의 연계성, 실험계획의 타당성, 여과 공정 설계 및 운전에 많은 경험과 실적을 보유한 연구자의 역량을 고려하여 기존 다른 분야에서 시도되었던 요소기술들을 맞춤형 최적화를 통해 실험실 규모에서 건물 내 실내 미세먼지 및 공기 유해물질 분해 시스템의 검증을 목표로 함.

2) 연구개발과제의 년차별 목표

1) 1차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(성균관대학교 산학협력단):
 - a. 건물 내에서 발생하는 미세먼지와 주요 실내공기 유해물질 선정 및 유해성 평가
 - b. 미세먼지 및 선정된 주요 실내공기 유해물질 분해와 분해산물 無배출이 가능한 Lab-scale 규모 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발 및 제작

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(성균관대학교 산학협력단):
 - a. 실내공기 유해물질 제거에 관한 국내·외 기술동향 및 유전체 장벽 방전 연구현황 등에 대한 조사 및 분석
 - b. 실내공기질 개선에 적합한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전시스템의 최적 전극, 유전체 선정
 - c. 실내공기질 개선에 적합한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전시스템의 전극, 유전체 최적 배열 설계
 - d. 다공성 세라믹 재질, 구조에 따른 미세먼지 입자크기별(PM 2.5, PM 10) 제거율 평가
 - e. Lab-scale 규모의 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발 및 제작
-

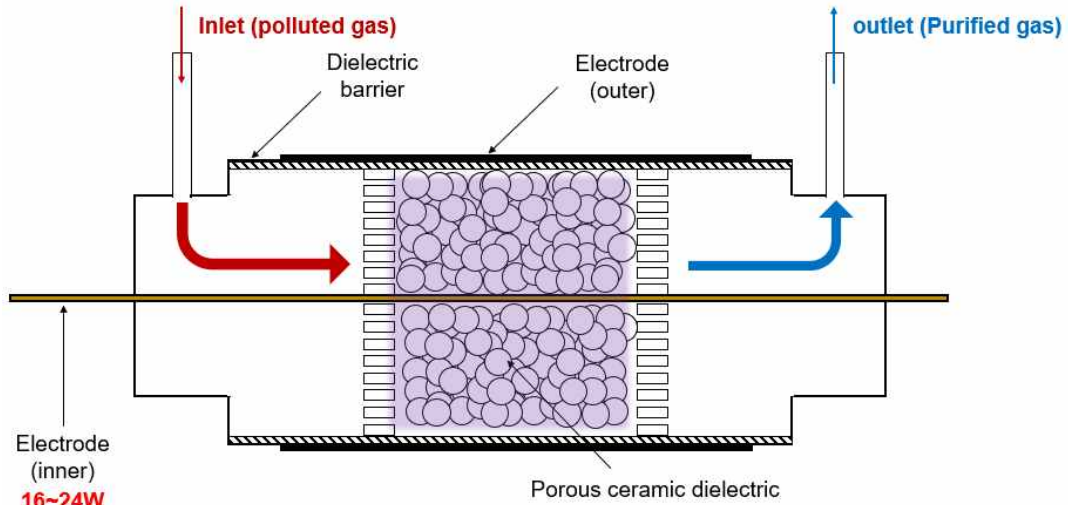


그림 1. 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 기술 개요도

2) 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(성균관대학교 산학협력단):
 - a. 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 최적 조건 선정
 - b. 복합 유해물질(미세먼지+실내공기 유해물질)의 분해효율 및 분해산물 독성 평가

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(성균관대학교 산학협력단):
 - a. 전압, 유입유량, 방전거리, 체류시간 등에 따른 다공성 유전체 장벽 방전 시스템 최적 운전조건 선정
 - 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전에서 발생하는 활성종 분석
 - 방전 처리 조건(전압, 유입유량 등)에 따른 최적 운전 시간 도출
 - 최적 제거율을 가질 수 있는 체류시간 결정을 통한 최적 설계 인자 확보
 - b. 미세먼지 입자크기 별, 실내공기 유해물질 농도별 분해율 및 부산물의 독성 평가
 - 미세먼지 입자크기(PM10, PM2.5)에 따른 제거효율 평가
 - 실내공기 유해물질 농도(VOCs)별 제거효율 평가
 - 미세먼지 입자크기(PM10, PM2.5)별·실내공기 유해물질 복합시료에서 제거효율 평가
 - 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전시스템으로 제거·분해된 미세먼지·실내공기 유해물질 복합시료의 부산물 분석 및 독성 평가
 - 제거율 및 분해산물(오존) 평가에 따른 최적 반응기 형태 선정
 - c. 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템에 요구되는 분해 능력 대비 처리 면적당 전력 소모량 산정
 - 최적조건에서 유전체 장벽 방전/여과 장치 운전 시, 미세먼지 및 실내공기 유해물질 분해율에 따른 요구전력 비용 산정 (99% 이상 분해의 경우에 한함)
 - 처리체적(m^3)당 요구 전력량(원/ m^3) = [처리 시간(분) x 시간 당 전기비용(원/분)] / 처리체적(m^3)

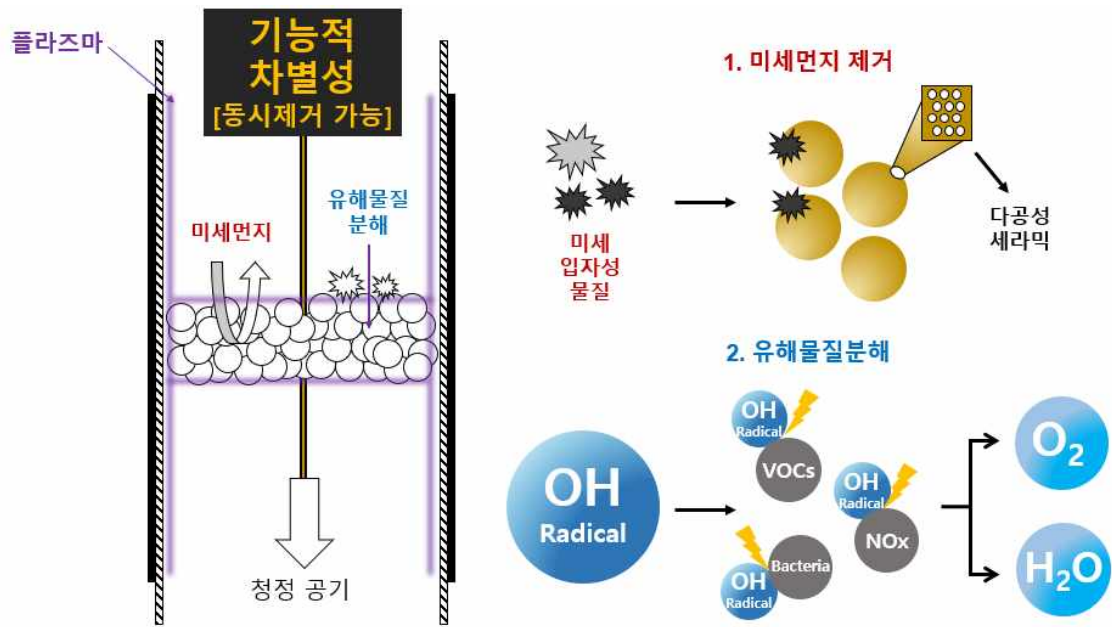


그림 2. 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템의 미세먼지 및 유해물질 제거 공정 개요도

3) 연구개발과제의 필요성 및 국내외 현황

○ 연구개발의 개요

- 미세먼지, 실내공기 유해물질(Volatile Organic Compounds; VOCs, CO₂, 포름알데히드 등)을 포함한 오염된 실내(외)공기를 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전(Porous ceramic dielectric barrier discharge reactor) 반응기 내부로 유입시켜, 미세먼지(입자성물질)는 다공성 세라믹 유전체를 통해 분리·제거하고 다공성 세라믹 표면에서 발생하는 플라즈마에 의해 실내공기 유해물질을 분해 및 흡착시켜 깨끗한 공기를 실내로 순환시킴으로써, 하나의 반응기 내에서 입자성 물질과 실내공기 유해물질을 동시에 처리하여 실내 공기질 개선이 가능한 시스템 개발을 목표로 함. 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 기술은 실내공기 유해물질을 효과적으로 분해 할 수 있을 뿐만 아니라 입자성 물질을 제거하는 전처리 필터의 역할을 동시에 수행할 수 있으므로 장치를 콤팩트화 하고, 사용된 다공성 세라믹을 간편하게 세척함으로써 지속적인 사용이 가능한 장점이 있음.

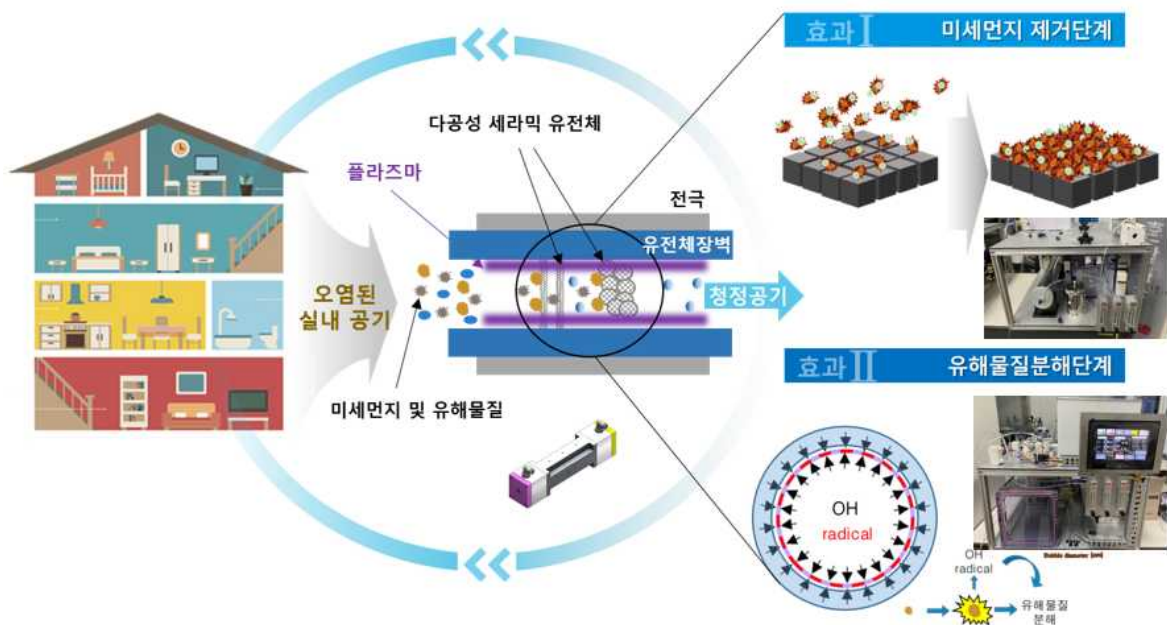


그림 3. 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 기술 개요도

○ 핵심기술

- 다공성 세라믹 충전식 유전체 장벽 방전(플라즈마) 이용 공기 정화 기술: 실내의 오염된 공기를 흡기하여 다공성 세라믹에 의한 물리적 처리와 유전체 역할을 하는 다공성 세라믹 및 전극 접촉 유전체에서 발생하는 플라즈마에 의한 전기화학적 처리를 동시에 달성하여 실내공기 유해물질과 미세먼지를 제거하는 시스템 개발.
- 다공성 세라믹 유전체 구조의 최적화 및 효율 비교: 다공성 세라믹 구조의 유전체를 적용하고 처리 효율을 비교하여 개발된 시스템의 최적 조건 도출.
- 분해산물 독성 최소화를 위한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 반응기 최적화 기술: 플라즈마를 이용한 실내 공기 청정 시 문제가 되는 분해산물 및 오존의 독성을 최소화 할 수 있는 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 반응기 개발.

○ 국내·외 연구 및 기술개발 현황

- 세계 수준의 미세먼지 제거기술은 초미세먼지 규제가 강화된 미국과 일본을 중심으로 다양한 설비들이 개발되었지만 대규모 산업설비의 배기후 처리장치 개발에 집중 되어 **실내 초미세먼지 및 공기 유해물질을 동시에 제거하기 위한 기술개발은 미흡**한 상태임(미세먼지 기술동향, 과학기술일자리진흥원, 2015).
- 미국은 1970년대부터 실내 공기질 관련 연구가 진행되어왔으며, 인체영향 규명, 위해 저감기술, 위해성 평가 기술 등을 중심으로 통합 발전하고 있으며, 최근에는 광투과 방식을 이용한 원격측정장치기술, 배출탐지 센서 기술 등 실내 공기질 모니터링 및 측정진단 기술 중심으로 개발하고 있음.
- 유럽의 경우, 2000년대 초반부터 주요 유해인자를 중심으로 실내 공기질 관련 연구가 실시되었으며, 최근에는 민감 계층에 대한 위해성 평가 관련 연구가 증가하고 있고 온·습도 및 실내 공기질 등을 반영하여 에너지 효율 문제 등과 조화를 이루는 실내 공기질 개선 기술을 개발 중에 있음.
- 실내 공기질 관리를 위하여 주로 사용하는 공기정화 기술은 기계식과 전기식, 그리고 기계식과 전기식을 같이 사용하는 복합식으로 분류됨.

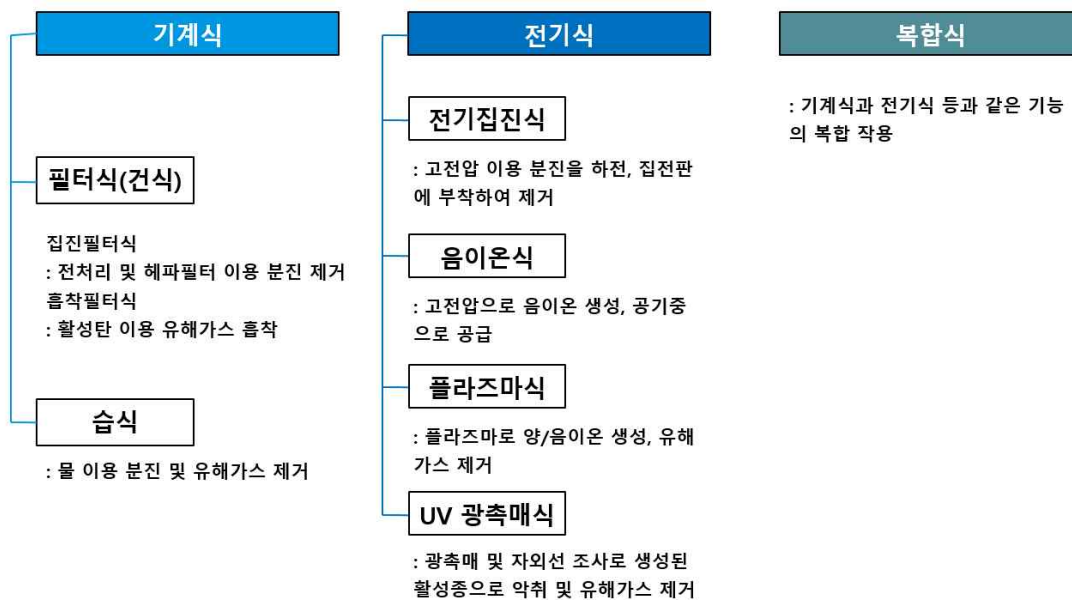


그림 4. 공기 정화 기술의 방식별 분류(한국공기청정협회)

- 기계식 정화기술의 대표적 방법 중 하나인 필터식 제거기술에서 사용되는 Pre-filter는 10 μ m 이상의 입자성 물질 제거를 위해 공기청정기의 전처리 역할을 하고 있지만 제거효율이 낮고 메인 필터인 High efficiency particulate air(HEPA) 필터는 99%이상의 입자성 물질(0.3~1 μ m) 제거가 가능하지만 필터비용이 고가이며 두 필터 모두 주기적인 교체와 그에 따른 추가비용이 발생한다는 단점을 가지고 있음.
- HEPA 필터보다 더 작은 크기의 입자성 물질 제거가 가능한 Ultra low penetration air(ULPA) 필터 또한 고가이며 **HEPA, ULPA 필터 모두 VOCs, 포름알데히드, 라돈 등 실내공기 유해물질을 제거하는 데는 한계가 있음(제거율: <70%)**.
- 실내에서 발생하는 공기 유해물질은 형태에 따라 크게 입자·가스상 물질, 생물학적 요인 의해

발생되는 물질로 구분 할 수 있으며, 입자상 오염물질의 대부분은 실외에서 유입되거나 실내 활동에 의해 생성됨.

- 가스상 유해물질로는 일산화탄소, VOCs, 라돈, 포름알데히드 등이 있으며 생물학적 요인에 의해 발생되는 유해물질은 알레르겐, 곰팡이, 포자 등이 있음.
- 기계식 정화기술로 제거가 되지 않는 가스상 유해물질들은 UV, 광촉매, 플라즈마 등의 전기식 정화기술이 적용되고 있지만 높은 전력 소모로 인해 유지비용이 높고 오존 등과 같은 부산물이 발생 할 수 있어 단독으로 입자(미세먼지 등)·가스상 물질을 제거하는데는 어려움이 있음.
- 실내 공기질을 정화하여 개선시키기 위해서는 입자성 물질 뿐 아니라 가스상 물질의 동시 제거가 가능한 시스템 개발이 요구되며, 특히 실내 사용이 가능한 콤팩트한 공기청정 시스템 구축을 통해 세계 수준의 공기질 개선에 관한 원천기술 개발이 필요함.



그림 5. 대표적인 실내공기 오염물질(출처: Bio platinum)

- 국내 미세먼지 대응 기술 수준은 최고 기술 보유국 대비 평균 70.5%, 기술 격차 7.5년으로 평가 받고 있으며, 대기업을 중심으로 미세먼지 처리 소재 및 공정개발 기술 분야, 스크러버 분야, ICT 기반 오염물질 관리 분야 등에 대한 기술 확보가 이루어지고 있음.
- 국내 학·연 등 연구기관에서는 물질별 제거 반응 원인 규명, 소재 원천기술 및 공정 주요 핵심 기술 분야에 집중하여 연구가 이루어지고 있으며, 기존 설비의 개선 및 집진기술 성능 개선 등에도 많은 관심을 가지고 있음.
- 실내 공기질 관리를 위해 가장 많이 이용되는 필터식 분진 제거를 위해서는 필터 제조 기술력 확보가 가장 중요하며 국내 필터 제조 기술력은 멜트브로운 방식의 합성고분자 필터 제조기술, 정전처리 기술을 융합시킨 에어필터 제조기술, HEPA필터 제조 기술 등을 보유하고 있으나, 유리섬유 미디어를 이용한 HEPA필터 국내 제조기술은 없으며, 외국의 몇몇 대기업만 보유하여 필터를 공급하고 있는 실정임.

표 1. 기계식 공기 정화 기술의 특징과 한계(한국환경산업기술원, 2014)

	특징	한계
EPA 필터	직경 0.3μm 이하 물질 99.7% 이상 제거가능	매년 1회 이상 필터 교체 필요
캐빈필터	낮음 차압, 긴 수명	- 미세먼지(3-5μm)의 제거율: 75% - 유해가스 제거율: 50-60%
Pre-filter	상대적으로 저렴한 비용	10μm 이상의 먼지 포집 가능 - 제거효율: 60-85%
Medium filter	상대적으로 저렴한 비용	1-10μm 의 먼지 포집 가능 - 제거효율: 60-90%
Hepa filter	0.3-1μm 포집가능	- 고비용 - 장시간 방치 시 압력손실이 큼 - 주기적인 필터 교체 필요
Uipa filter	0.1-0.17μm 포집가능	비용이 높음
집진 필터식	- Hepa필터를 사용하여 입자제거 - 높은 집진효율	- 압력손실이 높음 - 필터 관리 필수
전기집진식	- 정전기력을 이용한 분진 제거 - 대용량 배출가스를 빠른 유속으로 처리가능 - 낮은 압력손실 및 반영구적인 사용가능	- 분진제거율: 90% - 낮은 초미세먼지 제거율 - 주기적인 관리가 필요 - 오존 발생 가능

표 2. 전기식 공기 정화 기술의 특징과 한계(한국공기청정협회)

	특징	한계
전기집진식	- 정전기력을 이용한 분진 제거 - 대용량 배출가스를 빠른 유속으로 처리가능 - 낮은 압력손실 및 반영구적인 사용가능	- 분진제거율: 90% - 낮은 초미세먼지 제거율 - 주기적인 관리가 필요 - 오존 발생 가능
UV 방식	- 자외선을 발생시켜 미생물의 DNA 및 RNA를 파괴시킴 - 미생물의 신진대사 또는 증식이 불가능하도록 불활성화 - 오존 발생이 적음	- 주기적으로 UV램프의 교체 필요 - 타 방식에 비해 높은 전기 비용
광촉매 방식	태양광, 형광 등의 자외선을 통해 광촉매에서 발생하는 활성 수산기를 사용한 높은 효율의 살균 방식	- 주기적인 램프의 교체 필요 - 광촉매 구입 추가 비용 발생 - 오존 발생 가능
플라즈마 방식	플라즈마를 통한 공기 중 활성 종 생성으로 살균 및 실내공기 유해물질 분해	오존 및 오존 부산물의 발생으로 인한 오염 우려

- 플라즈마 방식은 전기식 방식의 대표적인 방법으로서 방전 전압 및 방식에 따라 글로우 방전, 코로나 방전, 유전체 장벽 방전, 아크 방전 등으로 분류되며 하단과 같이 다양한 실내오염물질에 대해 높은 제거율을 보임.
- 유전체 장벽 방전 방식은 하단과 같이, 두 개의 평행한 금속전극 사이에 최소한 전극 중 하나는 유전체 층으로 덮여있는 구조를 가지며 절연체를 사용하게 될 경우, 전극을 통한 전류의 흐름이 불가능하므로 교류 전력을 사용함.
- 유전체 장벽 방전 방식은 국부적으로 파동이나 잡음을 발생시키는 불꽃이 존재하지 않는 저소음 방전 방식이며 다른 전극 방전 방식에 비해 상대적으로 적은 전력을 소모하므로 실내공기처리에 적합함.
- 유전체 장벽 방전 방식은 전압 등의 구동 조건에 따라 발생하는 오존 농도의 조절이 필수적이며 포름알데히드, VOCs와 같은 실내공기 유해물질 제거에 있어 높은 효율을 보이지만, 필터 없이 유전체 장벽 방식 단독으로는 입자성 물질(미세먼지 등)은 제거할 수 없다는 한계가 있음.

표 3. 플라즈마 발생 방식에 따른 실내유해물질 제거 성능(Arne M.V., 2011)

	제거율 (%)			에너지 소비량(g/kWh)
	Trichloro ethylene	Benzene	Toluene	
유전체장벽 방전	90 ~ 99	50 ~ 99	46 ~ 75	0.3 ~ 6.3
펄스코로나 방전	80 ~ 90	75	93	6.7 ~ 86.1
직류코로나 방전	67	-	-	0.1 ~ 2.2 이상
글로우 방전	47	90	-	0.9 ~ 29.5

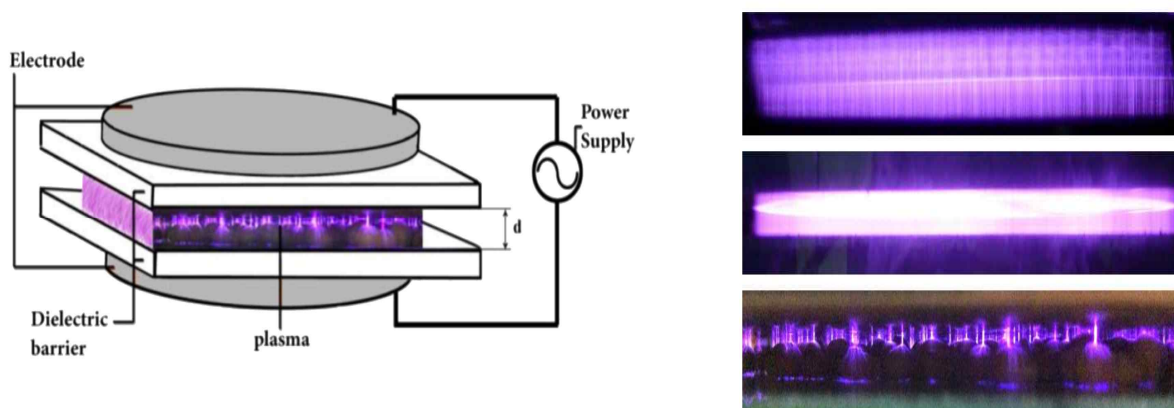


그림 6. 유전체 장벽 플라즈마의 구조(출처: NIK Plasma)

- 현재, 국내에서 다공성 세라믹을 유전체로 이용한 장벽 방전 시스템은 전무하며, 유전체 장벽 방전 시스템을 이용한 실내공기 유해물질 제거 기술에 관한 연구 또한 미흡한 상태임. 최근 한양대학교 환경 및 산업의학연구소에서 비열 유전체 장벽 방전 플라즈마를 이용한 미생물 살균에 관한 연구를 진행 한 바 있으며, 한국기계연구원에서 플라즈마를 이용한 고농도 유증 및 악취 제거 장치 개발에 관한 연구를 진행한 바 있음.
- 기존 유전체 장벽 방전 시스템을 이용한 미세먼지 및 실내공기 유해물질 제거 시스템은 처리과정 중 입자성 물질을 고농도로 농축·연소하여 분해산물이 발생하는 문제점이 있으며, 오존 등의 인체 유해성분으로 인해 2차 처리가 필수적으로 요구되어야 했음. 그러나 본 연구과제에서 제안하는 다공성 세라믹 유전체를 이용한 장벽 방전 시스템은, 미세먼지의 농축 없이 다공성 세라믹 유전체에 통과 시켜 줌으로써 입자성 물질을 효과적으로 제거하고 동시에 유전체 장벽 시스템으로 활용함으로써 실내공기 유해물질을 정화하여 적정 실내 공기질을 유지하고, 쾌적한 실내공간을 조성하는 새로운 기술로써 적용 가능함.

○ 국내·외 시장 현황

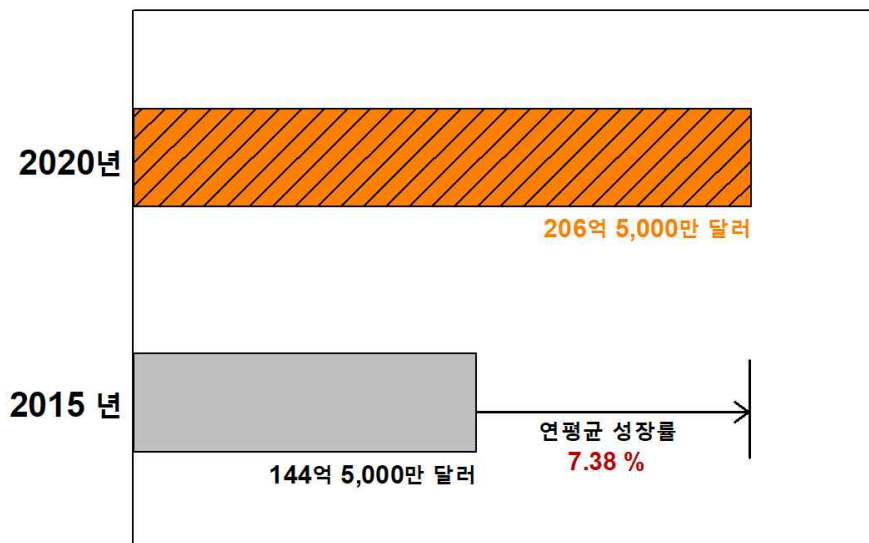


그림 7. 세계 공기정화시스템 시장규모 전망

(출처: Markets and markets, Air purification systems market, 2017)

- 13년 10월, 세계보건기구(WHO)가 미세먼지를 1급 발암물질로 지정하는 등 미세먼지 및 대기 중 유해물질에 대한 문제가 전 세계적으로 대두되었고, 이를 계기로 공기정화 시스템 관련 시장이 확대되고 있는 추세임.
- 북미, 유럽, 일본을 중심으로 실내 공기질에 대한 관심이 증가함에 따라, 실내 공기정화시스템 시장이 증가하게 되었고, 공기청정기를 중심으로 북미에서는 연평균 7.5% 증가하고 있으며, 일본의 경우 2010년에 공기청정기 시장이 이미 천억 엔대를 돌파함.
- 세계 공기 정화 시스템 시장은 2015년부터 2020년 동안 7.4%의 성장률을 보일 것으로 전망되며, 2020년도에는 206억 5000만 달러 규모의 시장으로 성장할 것으로 예상됨.

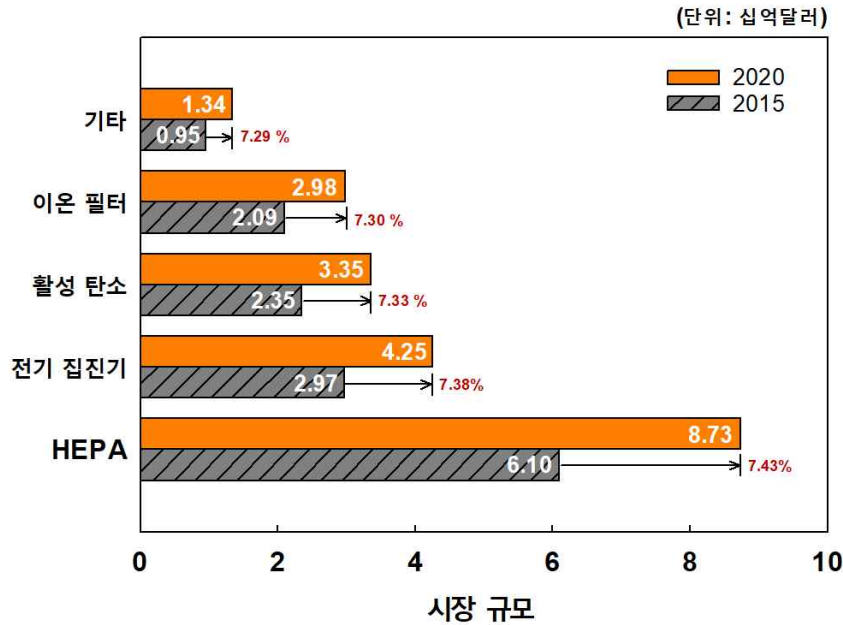


그림 8. 세계 공기정화 시스템 시장의 구성 요소별 시장규모 전망, 단위: 십억 달러
(출처: Markets and markets, Air purification systems market, 2017)

- 전 세계적으로 HEPA 필터를 이용한 공기정화 시스템이 가장 높은 시장 점유율을 가지고 있고, 전기집진기, 활성탄소, 이온필터 시장이 그 뒤를 따르고 있으며, 모든 부문의 공기정화 시장이 7.2% 이상의 높은 성장률을 보이고 있음.
- 그러나 필터를 이용한 공기정화 시스템은 주기적으로 필터를 교체해야하기 때문에 유지/보수비용이 발생하게되므로, 본 연구에서 개발하는 재생 가능한 다공성 세라믹 유전체를 이용한 공기정화 시스템은 기존 필터를 이용한 공기정화 시스템에 비하여 장기적으로 높은 경쟁력을 보일 것으로 예상됨.

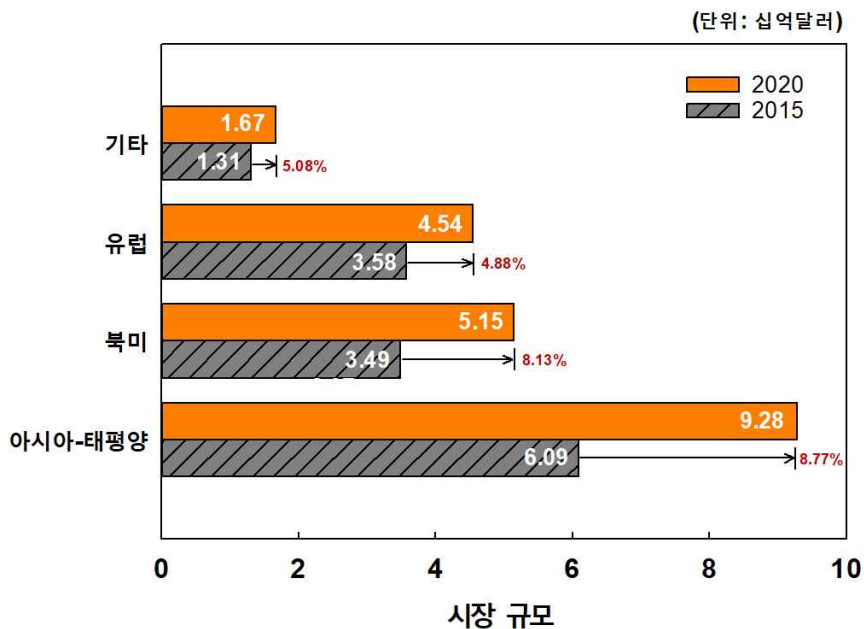


그림 9. 세계 공기정화 시스템 시장의 지역별 시장규모 전망, 단위: 십억 달러
(출처: Markets and markets, Air purification systems market, 2017)

- 전 세계 지역별 공기 정화 시스템 시장은 아시아-태평양, 북미, 유럽 순으로 형성되어 있으며, 아시아 지역에서 8.77% 규모의 연평균 성장률을 보이며 빠르게 성장할 것으로 전망되며, 그 중 한국이 2020년 기준 10억 달러 규모의 연평균 성장률 9.0%의 높은 성장률로 성장할 것으로 예상됨.

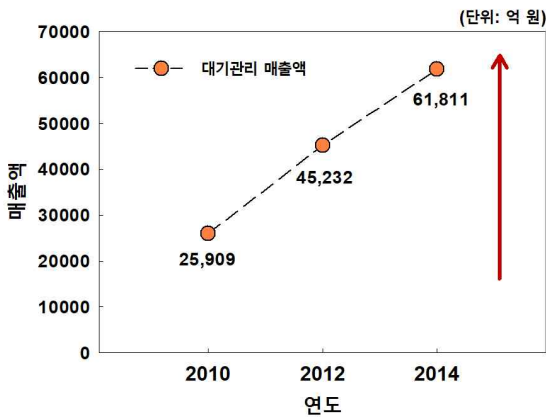


그림 10. 국내 대기관리 부문 매출액
(출처: 환경부, 환경산업통계조사보고서, 2015)

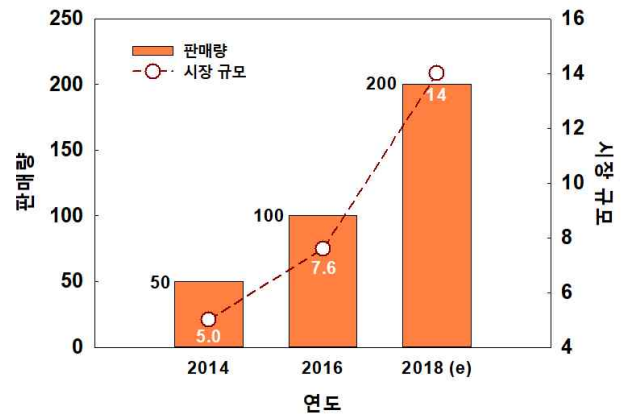


그림 11. 국내 공기청정기 시장규모 및 판매량
(출처: 한국과학기술정보연구원, 2017)

- 국내의 경우, 2013년 실내 공기질 관리 기본계획을 수립한 이래로 지속적으로 대기관리 분야 시장이 성장하고 있는 추세이며, 날로 심각해지는 외부 공기질 악화로 인하여 자연환기를 이용한 실내 환기가 어려워짐에 따라 기계식 환기설비 시장이 급속도로 확대될 것으로 전망됨.
- 국내 공기청정기 보급률은 45%정도로 시장 호황이 지속되고 있으나, **국내 시장의 높은 성장률에도 불구하고 기술의 국산화율이 현저히 낮음**. 따라서 새로운 공기 정화 시스템 개발을 통하여 기술의 국산화를 도모하고, 이를 통하여 급성장하는 공기 정화 시스템에서 새로운 비전을 제시하여 세계 공기 정화 시장을 선도해야 함.
- 특히, 플라즈마를 사용한 공기청정기 시장은 최근 감염병 이슈 뿐만 아니라, 실내유해물질에 대한 관심도의 증가에 따라 ‘공기 청정 및 살균’시장으로 확대되고 있음. 플라즈마 기술은 현재 실내유해물질, 감염병 이슈 등을 동시에 해결할 수 있는 기술로서 각광받고 있음.
- 스위스 공기청정기 제조사 IQ에어는 독자적인 플라즈마 기술을 통해 격리환자용 음압격리실에 사용되는 공기청정기를 서울대-중앙대-한양대 등 주요 대학교 병원에 납품하여 유해물질제거 및 살균기능이 포함된 공기청정기를 유통하는 등 해외 공기청정기 생산 기업들의 국내 진출이 활발해지고 있으며, 반영구적 유해물질의 완전 분해를 강조하고 있음. 이는, 기존 필터형 공기청정기가 보유하지 못한 특성이지만, 본 연구에서 제안하는 다공성 세라믹 유전체 장벽 플라즈마 장비는 필터를 교체할 필요 없는 기술일 뿐 아니라 실내유해물질과 미세먼지를 동시에 효과적으로 제거할 수 있는 방안으로서 선진국들과의 기술 경쟁에서 우위를 점할 수 있을 것으로 기대됨.

○ 경쟁기관 현황

- 전 세계적으로 공기 정화 시스템에 대한 수요가 증가함에 따라, 3M company, Honeywell International Inc., Sharp Corp. 등의 글로벌 기업의 진출이 두드러지게 나타남(공기정화시장, 연구개발특구진흥재단, 2017).
- 3M company는 65개국에 지사를 두고 전기장치, 산업 인프라 구축 등의 기술을 통하여 공기 정화 시스템 사업에 진출하고 있으며, 필터 제조/생산 기술 등을 앞세운 통합 솔루션 운영 사업을 다룸.
- 특히, Filtrete™ 제품군을 개발하여 공기청정이 필요한 자동차 및 대용량 에어컨, 공기정화기, 마스크 등 상품을 다양화하여 다각적으로 공기정화 사업에 뛰어들고 있음.
- Honeywell International사는 항공 우주제품 및 서비스, 제어기술, 특수 화학물질 및 섬유재료를 제공하는 글로벌 기업으로써, 성능 소재 기술을 통하여 탄화수소 공정기술, 흡착제, 촉매 등의 고성능 소재를 제공하고 있음. 특히, 자동화 및 제어 솔루션 부문을 통해 환경 및 연소제어, 보안, 감지 및 제어, 스캐닝, 건물 통합 솔루션, 주거 및 산업 시설의 프로세스 자동화를 통하여 시장 점유율을 높이고 있음.
- Sharp사는 전기통신 및 전자 장비의 선도적인 제조업체로 디지털 정보기기, 에너지 솔루션, 비즈니스 솔루션, 공기청정기, 공기 팬과 같은 건강 및 환경 장비를 제조하는 데에 높은 기술력을 가진 기업임.
- Newell Brands사는 미국에 본사를 두고 있는 글로벌 제조업체로써 자회사인 Jarden Consumer Solutions사를 통하여 공기청정기, 냉방기, 제습기, 가습기 등 다양한 제품을 판매하고 있음.
- Babcock & Wilcox Power Generation사는 집진 장치 등의 공기오염제어시스템에 연속 배출 모니터링 시스템, 데이터 수집 및 처리시스템 등을 결합하여 다각적 서비스를 제공하고 있음.
- 국내에서는 LG필리케어, 코웨이, 위닉스 등 많은 기업이 공기정화시스템 분야에서 점유하고 있으나 대부분의 기업이 플라즈마 기술을 이용한 공기정화제품은 유통하지 않고 있음.
- 코웨이는 정수기, 공기청정기 등 생활환경개선 제품을 제조, 판매하고 있으며 RBD플라즈마를 사용하여 세균과 곰팡이 등 병원성물질을 제거를 목적으로 한 공기정화제품을 시중에 유통하고 있음.
- 공기정화 분야의 대부분의 경쟁기관은 필터 기술을 핵심기술로 하여 공기정화시스템을 제조하고 있으며, 소수의 기업이 병원성 물질 및 실내유해물질의 제거율을 높이기 위해 필터 후단 플라즈마 기술을 도입하고 있으나 **다공성 세라믹을 활용한 유전체 장벽 플라즈마 공기정화장치는 경쟁 업체에서 시도한 바가 없으므로** 기술 차별성 및 혁신성 부문에서 높은 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 예상됨.

○ 논문 및 지식재산권 현황

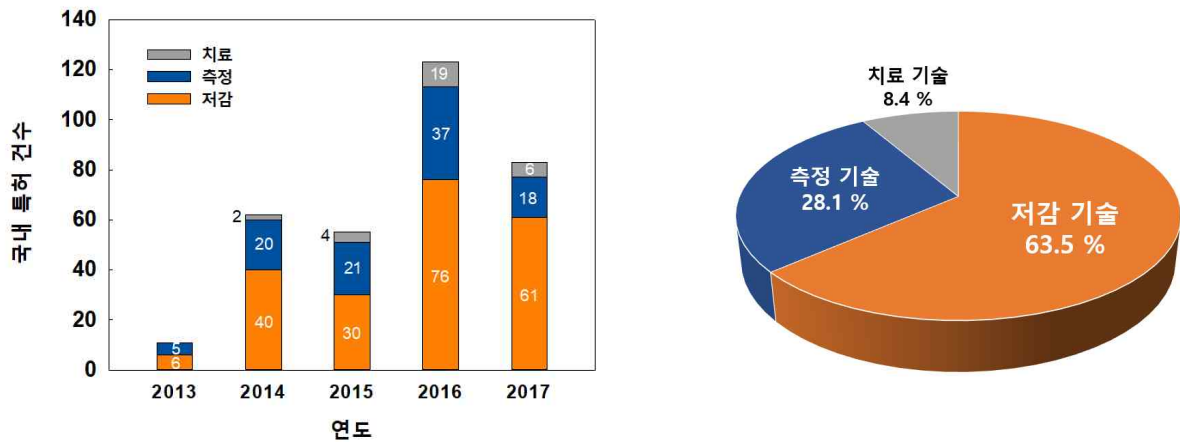


그림 12. 국내 미세먼지 관련 특허 동향
(단위: 건, 출처: 미세먼지 기술동향, 과학기술일자리진흥원, 2018)

- 2011년부터 2016년까지 국내 미세먼지 관련 특허 출원이 지속적으로 증가하고 있으며 특히 미세먼지 저감과 관련된 특허의 증가가 두드러지게 나타남. 이는 2013년부터 국내 미세먼지에 관한 관심이 증가하면서 미세먼지의 측정 및 저감과 관련한 기술 수요가 높아졌기 때문으로 분석됨.
- 기술 분야별로는 미세먼지 저감 관련 특허가 전체 64%(247건)로 가장 많이 차지하고 있고, 측정 28%(109건), 치료 8%(32건) 순으로 비중을 차지하고 있음(미세먼지 기술동향, 과학기술일자리진흥원, 2018).
- 최근 실내공기질 관리기준 강화(민감계층 이용시설: 100→75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM10), 70→35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM2.5) 일반시설: 150→100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM10))되고, 일반시설에서의 PM2.5 기준이 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 신설됨에('18. 6월, 환경부)에 따라 실내공간에서의 미세먼지 저감기술과 관련한 특허가 지속적으로 증가할 것으로 예상됨.

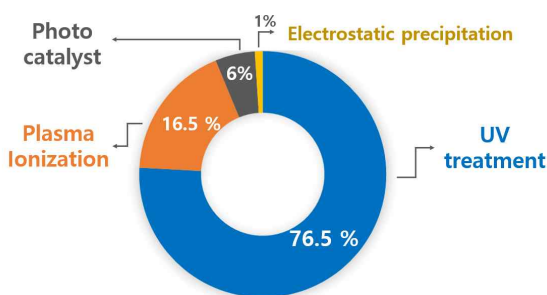


그림 13. 실내유해물질 처리 관련 논문 동향 (UV, 플라스마, 광촉매, 전기집진)
(출처: Web of science, 2010 ~ 2019)

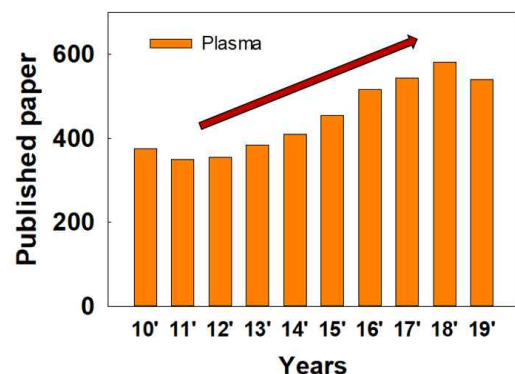


그림 14. 플라스마 처리 관련 논문 동향
(대상: 라돈, VOCs, CO, HCHO)
(출처: Web of science, 2010 ~ 2019)

- 실내공기 유해물질인 라돈, 포름알데히드, VOCs 및 일산화탄소 제거와 관련된 논문은 최근 10년간 UV를 이용한 처리 방식이 약 76.5%로 가장 큰 관심을 받고 있으며 플라즈마(16.5%), 광촉매(6%) 등을 이용한 실내공기 유해물질 분해에 관한 연구는 최근 지속적으로 증가하고 있음.
- 플라즈마를 이용한 실내공기 유해물질을 처리에 관한 연구는 2011년 이후로 400편 이상의 논문이 출판되고 있으나, 플라즈마의 경우 입자성 물질(미세먼지)은 제거할 수 없다는 단점이 있음.
- 본 연구에서 사용되는 다공성 세라믹을 유전체로 활용한 플라즈마 방식은 입자성 물질(미세먼지)과 실내공기 오염물질(라돈, 포름알데히드, VOCs, 일산화탄소 등)을 동시에 제거할 수 있다는 기능적 측면에서 학술적 창의성 및 독창성을 가질 수 있을 것으로 사료됨.

○ 플라즈마를 활용한 실내공기질 세부 연구 현황

1) 플라즈마를 활용한 실내공기질 개선 솔루션 개발

- 과제 개요
 - 랩스케일 규모의 실험을 통해 기초 데이터를 축적하고 기술력을 확보함으로써 현장 적용 가능한 저에너지 소형 플라즈마 장비 개발을 목적으로 함.
 - CDBD(Corona Dielectric Barrier Discharge)을 통해 음이온을 생성하는 기술과 기존 촉매와 SAP(Sliding Arc Plasma) 기술을 융합하여 실내유해물질을 효과적으로 제거할 수 있었으나, **입자성 물질(미세먼지 등)의 유입으로 공정 효율이 감소**하므로 전단 필터와 같은 입자성 물질을 제거하기 위한 전처리 공정이 필수적임.
- 해당 과제와의 차별성
 - 해당 기술은 제거효율을 높이기 위해 에너지소모가 큰 아크 플라즈마를 적용하였지만, 본 연구는 **비열 플라즈마 방식으로 상대적으로 낮은 에너지를 소모**한다는 차별성이 있음.
 - 또한, 실내유해물질 제거에 초점을 둔 해당 기술과는 달리 본 기술은 다공성 세라믹을 유전체로 사용하기 때문에 실내 유해 물질과 **미세먼지를 동시에 제거하는 것을 목표로 함**.



그림 15. SAP(좌)와 CDBD(중) 반응기 및 플라즈마 운전(우)
(출처: 최종 보고서_플라즈마를 활용한 실내공기질 개선 솔루션 개발, 2011)

2) 나노 섬유를 활용한 VOC 제거 기술 개발

• 과제 개요

- 사업장내에서 발생하는 VOC와 같은 실내 유해 물질을 제거하기 위해 흡착능이 우수한 다공성 제올라이트 나노섬유 개발을 목표로 하였으며, 높은 표면적의 다공성 제올라이트 나노 섬유 소재를 선정하여 실내 유해 물질 제거 성능을 평가함.

• 개발 과제와의 차별성

- 위 기술은 사업장내에서 사용할 수 있는 방독면을 대상 필터로 진행된 연구이며 경량화에 초점을 두고 진행되었지만, 본 연구는 건물 내 실내 공간 공기 정화에 초점을 두어 중-대용량 공기 정화가 가능하다는 차별성이 있음.
- 또한 해당 연구는 실내유해물질을 대상으로 진행되었으며 미세먼지에 대한 평가는 이루어지지 않았지만, 본 연구는 **미세먼지 제거 후 사용한 다공성 세라믹의 재이용이 가능하다** 점에서 차별성이 있음.

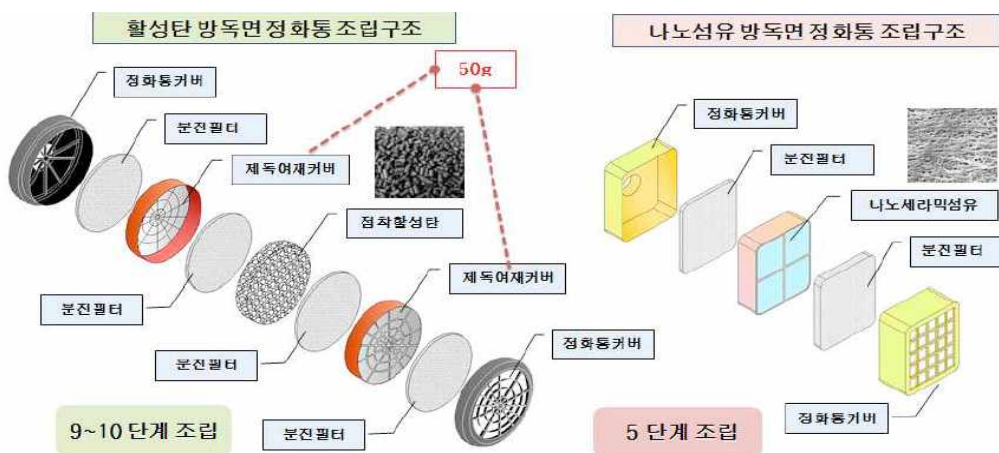


그림 16. 활성탄과 나노섬유의 방독면 정화통 조립구조 비교

(출처: 최종보고서_나노섬유를 활용한 VOC 제거 기술 개발, 한국생산기술연구원, 2018)

3) 대나무 흡착필터 적용 4단 필터 시스템 IoT 공기청정기 개발

• 과제 개요

- 실내 공기를 정화하기 위해 폐 대나무를 활용하여 실내오염물질을 흡착할 수 있는 대나무 활성탄 최적 제조 기술 개발에 목적이 있음.
- 정전기 필터를 함께 운용하여 대나무 활성탄의 실내유해물질 흡착뿐만 아니라 미세먼지 제거율을 극대화시킴(탈취효율 96.5%, 집진효율 90.1%).

• 개발 과제와의 차별성

- 위 기술은 미세먼지를 제거하기 위해 추가적인 HEPA 필터를 대나무 흡착필터 후단에 배치하여 사용하므로 대나무 흡착필터 자체의 미세먼지 제거율에 대한 평가가 부족하지만, 본 연구개발의 경우 하나의 반응기 내에서 미세먼지의 제거와 실내유해물질의 분해 및 흡착을 동시에 달성할 수 있다는 점에서 차별성이 있음.
- 폐 대나무를 활용한 흡착 필터는 해외 수출 및 시장성을 고려한다면 소개 공급에 어려움이 있지

만 ‘다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템’의 세라믹 유전체의 경우 산화알루미늄을 사용하므로 공급에 어려움이 없음.



그림 17. 대나무 활성탄 정전 필터 제작 과정 및 프로토타입
(출처: 중소기업 기술개발사업 최종 보고서, 2018)

4) 살균효과 극대화를 위한 유전체 방전 및 금속 플라즈몬 소재 개발

- 과제 개요

- 2020년 까지 연구가 계획되어 있는 과제로서, 공기 살균기능을 극대화하기 위해 유전체 장벽 방전을 일으킬 수 있는 유전체 소재개발과 인체에 무관한 가시광 광원을 이용하여 대기 중에서 안정한 금속 물질의 표면에서 발생하는 표면 플라즈모닉스 및 광촉매 활성화가 가능한 소재를 개발하는 것을 목표로 함.

- 살균 관련 기술에 많이 적용 되지 않은 유전체 장벽 플라즈마를 활용하여 플라즈모닉과 결합함으로써 살균 기능을 확대할 수 있을 것으로 기대되며 저온 대기압 플라즈마 장치 개발로 실내 공기 정화 분야뿐만 아니라 바이오, 의료 분야 등 적용범위를 확대할 수 있을 것으로 기대됨.

- 개발 과제와의 차별성

- 해당 기술 개발의 초점은 실내유해물질 제거 및 살균력 증대를 위한 최적 플라즈마 전극 개발에 있으며 미세먼지를 제거하는 기술은 포함되어 있지 않으나 본 연구의 경우 **전극을 포함한 공정 및 시스템 개발**에 초점을 두고 있으며 실내 유해 물질 뿐만 아니라 **미세먼지를 동시에 제거**할 수 있다는 점에서 차별성이 있음.

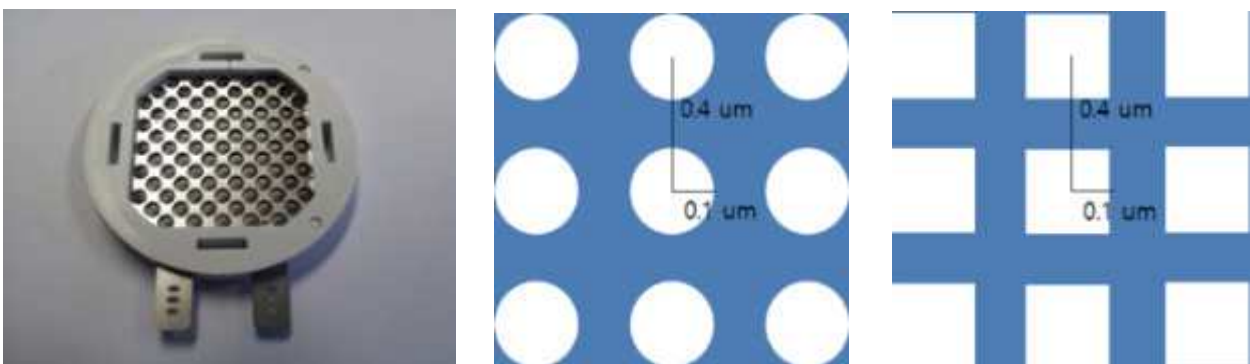


그림 18. 유전체 장벽 전극과 다양한 전극 형태
(출처: 기현철, 오병윤, J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., 2018)

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

○ 1차년도

(가) 유해물질 선정 및 유해성 평가를 통한 방전시스템 개발

- 실내에서 발생하는 공기 유해물질은 형태에 따라 크게 입자·가스상 물질, 생물학적 요인 의해 발생하는 물질로 구분 할 수 있으며, 입자상 오염물질의 대부분은 실외에서 유입되거나 실내 활동에 의해 생성됨.
- 미세먼지의 경우 자동차 배기가스, 공사장, 공장 등에서 주로 발생되지만 실내 유입 및 내부 이유로 인해 실내에서도 측정될 수 있음. 직경 10 μm 이하의 입자로 숨을 쉴 때 호흡기관을 통해 폐 깊숙이 들어가 폐의 기능을 떨어뜨리고 면역력을 저하시킬 수 있음.

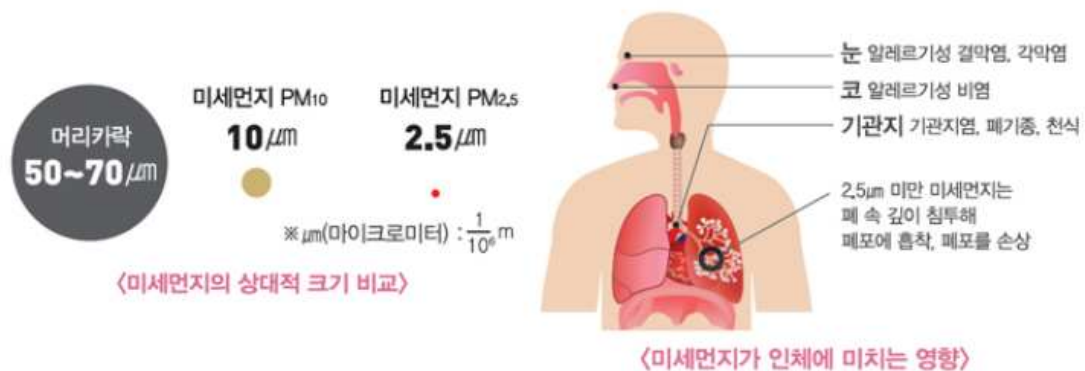


그림 19. 미세먼지가 인체에 미치는 영향
(출처 : 환경부, 수도권대기환경청)

- 대기 유해물질 중 하나인 휘발성 유기 화합물은 대표적인 실내 공기 유해물질 중 하나임.
- 휘발성 유기 화합물은 대기 중에서 질소산화물과 함께 광화학반응으로 오존 등 광화학산화제를 생성하여 광화학스모그를 유발하기도 하고, 벤젠과 같은 물질은 발암성물질로서 인체에 매우 유해하며, 스티렌을 포함하여 대부분의 휘발성 유기 화합물은 악취를 일으키는 물질임.

표 4. 휘발성 유기 화합물 위해성(출처 : 환경부, 수도권대기환경청)

번호	물질명	주요 위해성
1	아세트알데히드	졸음, 의식불명, 통증, 설사, 현기증, 구토
2	벤젠	졸음, 의식불명, 통증, 설사, 현기증, 경련, 구토 발암성 특히 백혈병 유발
3	에틸렌	졸음, 의식불명
4	포름알데히드	호흡곤란, 심각한화상, 통증, 수포, 복부경련 발암성(B1)
5	트리클로로에탄	현기증, 졸음, 두통, 의식불명, 통증, 복통
6	톨루엔	현기증, 졸음, 두통, 구토, 의식불명, 복통
7	스티렌	현기증, 졸음, 두통, 구토, 복통
8	자일렌	현기증, 졸음, 두통, 의식불명, 복통

- 기계식 정화기술로 제거가 되지 않는 가스상 유해물질들은 UV, 광촉매, 플라즈마 등의 전기식 정화기술이 적용되고 있지만 높은 전력 소모로 인해 유지비용이 높고 오존 등과 같은 부산물이 발생할 수 있어 단독으로 입자(미세먼지 등)·가스상 물질을 제거하는데는 어려움이 있음.
- 실내 공기질을 정화하여 개선시키기 위해서는 입자성 물질 뿐 아니라 가스상 물질의 동시 제거가 가능한 시스템 개발이 요구되며, 특히 실내 사용이 가능한 콤팩트한 공기청정 시스템 구축을 통해 세계 수준의 공기질 개선에 관한 원천기술 개발이 필요함.

표 5. 국외 실내오염물질 관련 기술개발 현황

연구수행 기관	연구개발 내용	연구성과 활용현황
TORNEX(일본)	100m³급 전기식 공기정화장치 개발	공항 및 공공기관에 설치·운영 국내 공항 및 병원진출
Japan Vlene Company(일본)	Multi-nozzle Electrospinning Process 이용 나노섬유 대량생산공정 및 시스템 개발	필터 분야로의 파일럿 스케일 진행 중
3M(미국)	Filtrete TM 제품군 개발	자동차 및 대용량 에어컨
	초극세 Meltblown 설비를 활용하여 고효율 마스크 및 승용차용 여재 및 모듈 개발	마스크, 고급 승용차용 사용제품 생산
Minnesota 대학(미국)	나노 fiber 필터섬유 및 정전 필터 연구	3M사 등 적용
Carl Fruderberg(독일)	코로나 방전 이용 2-layer 승용차 및 공기 청정용 여재 개발	고급 승용차용 제품 생산
Electrolux(스웨덴)	와이어 방전형 하전장치 및 비금속 집진장치 활용 전기 집진식 공기정화장치 개발	20ppb 이하의 저오존 발생 성능확보·상용화

- 세계 수준의 미세먼지 및 VOCs 저감 기술은 미국과 일본을 중심으로 다양한 설비를 개발 중이지만, 개발 기술이 산업설비의 배기후처리장치 개발에 집중되고 실내 초미세먼지 및 VOCs 저감 기술은 아직 미흡함.
- 미국은 최근 광투과 방식을 이용한 원격측정장치, 배출탐지 센서 기술 등 실내 공기질 모니터링 및 측정진단 기술개발에 중점을 두고 있으며, 유럽은 민감계층에 대한 위해성 평가 관련 연구와 온·습도 및 실내 공기질 등을 반영한 에너지 효율 문제와 조화를 이루는 실내 공기질 개선 기술을 개발 중에 있음
- 중국의 경우 국내와 마찬가지로 공기오염물질 제거효율 증가를 위한 고효율화, 촉매 등 소재 개량을 위해 집중하고 있으며 최근 5년간 미세먼지 관련 주요 논문의 45%를 중국이 차지하고 있음
- 2020년 Chemical Engineering Journal에 발간된 “The application of dielectric barrier discharge non-thermal plasma in VOCs abatement” 리뷰논문 및 기존 논문에서 유전체 장벽 방전 시스템을 이용하여 휘발성 유기 화합물을 제거하는 연구를 볼 수 있음.
- 유전체 장벽 방전 시스템은 다른 방전과는 달리 대기압에서도 구동이 가능하며, 소음이 적고 유전체를 사용하여 플라즈마를 고르게 분포하여 발생시킬 수 있다는 장점을 가지고 있음.
- 2020년 Sustainable Cities and Society에 발간된 “New electrostatic precipitator with dielectric coatings to efficiently and safely remove sub-micro particles in the building environment” 논문에서 전극에 유전체를 입힌 모듈을 만들어 미세먼지를 대전시켜 제거하는 방식의 연구를 진행하였음.
- 전극에 유전체를 입힐 시 breakdown 현상을 줄일 수 있으며, 미세먼지 제거효율을 높일 수 있다는 장점이 있음.

(나) 플라즈마 VOC 가스 저감 테스트 장치

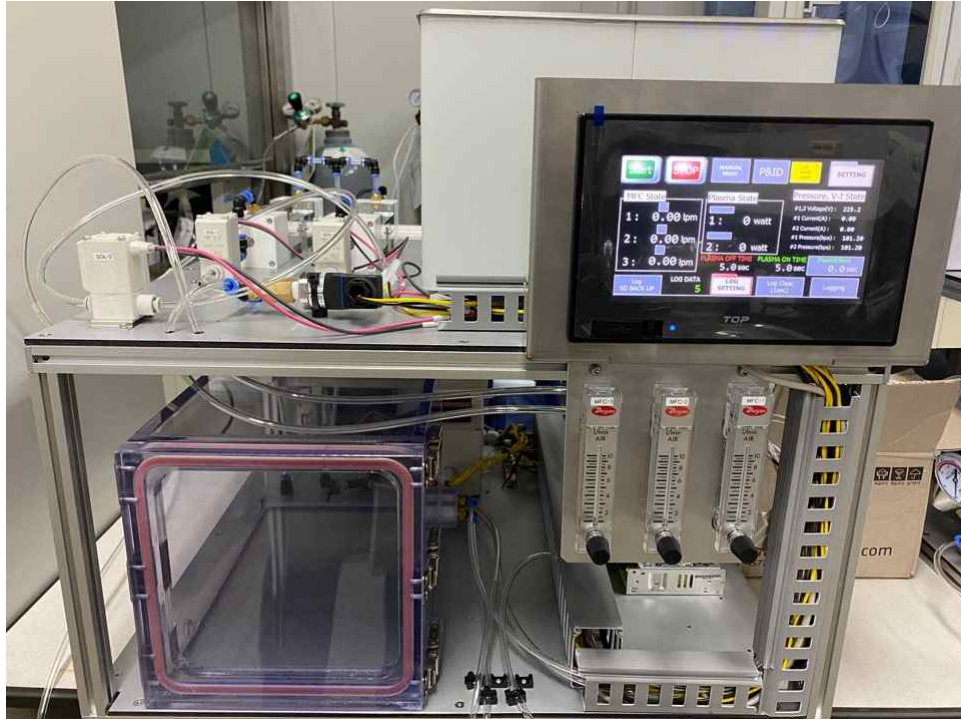


그림 20. 플라즈마 VOC 가스 저감 테스트 장치

- DBD플라즈마를 발생시켜 VOC가스 저감실험을 진행하기 위한 “플라즈마 VOC 가스 저감 테스트 장치”를 그림2와 같이 제작함.
- 장치는 크게 VOC 기체 발생 부분과, 발생시킨 VOC기체를 원하는 농도로 희석시키는 VOC기체 mixing tank, 그리고 VOC기체를 통과시켜 VOC 기체를 제거시킬 수 있는 플라즈마 소스가 있으며 플라즈마 소스 내부에는 유전체이자 흡착제 역할을 수행하는 다공성 세라믹 볼이 충전되어 있음.
- VOC 기체 발생은 액체로 된 VOC물질을 병에 담은 후 항온수조인 water bath에 병을 넣어 VOC물질의 온도를 일정하게 만들어준 후 이와 동시에 미세 기포를 VOC물질에 풀어넣어 VOC기체를 발생시키는 “bubbling” 방식을 이용함.
- 주요구성 부분 및 Specification은 다음과 같음.
 - 소비전력 : 500W
 - 전압 : 220V 5A 60Hz

① 플라즈마

- 1) 플라즈마 발생원: DBD 타입
CPS(Cylindrical Plasma Source) 타입
- 2) 수량 : 2 ea
- 3) 구동 압력: 500~900 torr
- 4) 추천 유량: 0~50 lpm
- 5) 소스출력 : 세트당 10 to 100W 2 Set
- 6) 플라즈마 파워 전압 : 10 to 20kV (linear step)
- 7) 주파수: 16~28 kHz (Voltage Dependence)
- 8) Inner Diameter: 30mm
- 9) Inner electrode: 10,12,14,16,18mm
- 10) Length of Reactor Body: 150mm

② 제어 시스템

- 1) PLC, ADC
- 2) Program: XG5000, Top-DesignStudio
- 3) 모니터 : 7 inch LCD (touch)
- 4) 통신규격, RS 232, RS 485
- 5) Controls: Touch or Button
- 6) 수동제어, 자동제어(타임제어), 피드백제어
- 7) 데이터 로깅(타임, 프로세스, 출력 로깅)

③ MFC 시스템

- 1) Control 0~10lpm
- 2) 전원: 5~24 VDC
- 3) 4~20mA, RS485
- 4) 피팅 1/4" LOK
- 5) 가스: VOC+AIR
- 6) D-SUB 9 PIN

④ 설치환경

- 1) 온도 : 20~35℃ / 습도 : 80% 이하
- 2) 전원 : 220V AC, 1KW 미만, 50~60Hz

⑤ Dimension

- 1) Main Unit : 500(W) × 600(D) × 590(H)mm
- 2) Control Unit : 300(W) × 200(D) × 590(H)mm
- 3) 중 량 : 50kg 이하

(다) 미세먼지 저감 테스트 장치

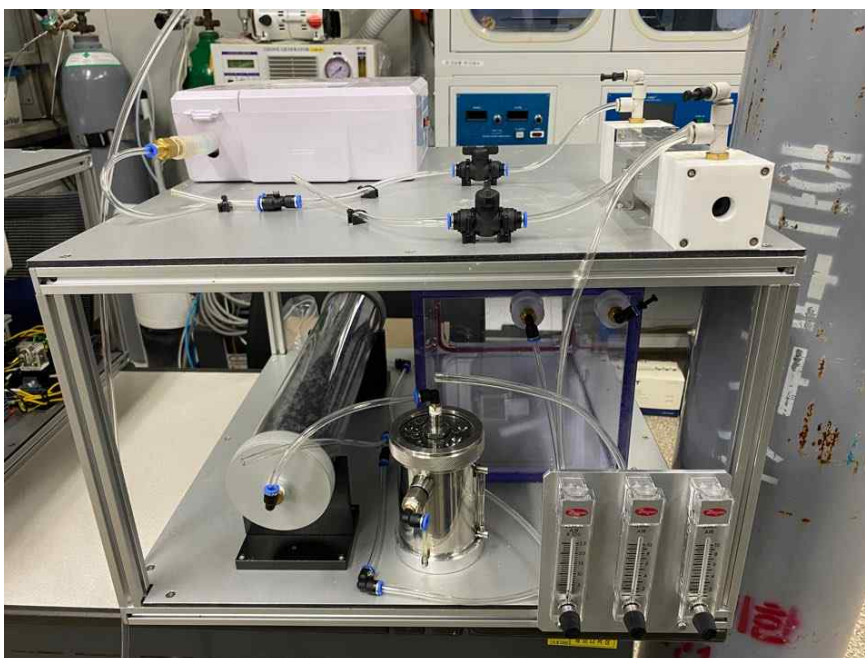


그림 21. 미세먼지 저감 테스트 장치

- 미세먼지를 발생시켜 다공성세라믹 볼에 통과시켜 미세먼지 저감정도를 알아보는 실험을 진행하기 위해 “미세먼지 저감 테스트 장비”를 제작함
- 장치는 크게 미세먼지 생성 및 발생 장치와, 발생시킨 미세먼지를 원하는 농도로 희석시키는 미세먼지 mixing tank, 그리고 미세먼지를 통과시켜 미세먼지를 제거시킬 수 있는 다공성 세라믹 볼을 담고 있는 반응기, 그리고 미세먼지 농도를 측정할 수 있는 장치로 구성되어 있음.



그림 22. 미세먼지 발생장치 Atomizer

-
- 미세먼지 발생은 스프레이 방식 미세액적 발생장치인 “Atomizer”를 이용해 발생시킴.
 - 미세먼지 발생은 KCl 수용액을 이용해 발생시키며, Jet 노즐을 통해 공기가 스프레이(확산 분사)되는데 수용액은 음압에 의해 자동으로 빨려 올라가 공기와 함께 분사되는 방식임.
 - 분사된 미세한 액적 형태의 수용액이 건조되면서 입자화 되며, 입자의 크기는 노즐 구경과 KCl 수용액 농도에 따라 결정됨.
 - 주요구성 부분 및 Specification은 다음과 같음.
 - 소비전력 : 200W
 - 전압 : 220V 2A 60Hz

① 아토마이저

- 1) 스프레이 방식 미세액적 발생
- 2) Jet 노즐 : 0.3mm, 0.5mm (2ea)
- 3) 사용압력 : 15~60 psi
- 4) 재질: SUS316 (본체)
- 5) 유량: 2.4 lpm at 2 atm(0.3mm)
- 6) Air Inlet
- 7) 실리카겔 건조 시스템

② Reactor

- 1) Inner Diameter: 30mm
- 2) Inner rode: 10,12,14,16,18mm
- 3) Length of Reacotr Body: 150mm

③ 미세먼지 모니터 시스템

- 1) 방식: Light scattering
- 2) 광학: Light source Laser Diode classIII
- 3) 측정범위: PM2.5, PM10
PM2.5: 0~750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\pm 5\%$, PM10: 0~2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- 4) 표시방법: $\pm 0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$
- 5) 측정유량: 2 LPM
- 6) 전원 : 24VDC, 650mA

④ 설치환경

- 1) 온도 : 20~35 $^{\circ}\text{C}$ / 습도 : 20%~75%
- 2) 전원 : 220V AC, 1KW 미만, 50~60Hz

⑤ Dimension

- 1) Main Unit : 400(W) $\times$ 500(D) $\times$ 590(H)mm
- 2) Control Unit : 300(W) $\times$ 200(D) $\times$ 590(H)mm
- 3) 중 량 : 30kg 이하

(라) 전극 직경을 이용한 최적 방전간격 선정 및 최적전극 결정

- 방전간격이 1~3mm까지는 필요한 기본 인가전력이 5~15W로 적정하며, 그림5와 같이 방전의 형태가 전극을 바라보고 균일하게 방전되는 정상형태의 방전이 발생하나, 방전간격이 3mm이상이 될 시, 필요한 기본 인가전력이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 그림5와 같이 방전의 형태가 전극과 전극 사이에서 발생할 뿐만 아니라 전극과 공기사이에서도 방전이 발생하여 사방으로 불규칙하게 방전이 발생하는 불필요한 방전이 발생하는 데슬라 방전 형태의 방전이 발생함. 따라서 방전간격을 더 좁혀서 적정 방전간격을 정할 필요가 있음.
- 세라믹볼 투입 시 세라믹 볼 사이즈와 방전 간격에 따른 필요최소인가전력을 알아보는 실험을 진행하였으며, 하단 표에서, 세라믹볼을 투입하지 않고 플라즈마를 발생시킬 때보다, 세라믹볼을 투입 할 시 필요 최소 인가 전력 값을 낮춰주는 경향을 보임. 이는 세라믹볼이 유전체 역할을 하여 방전을 고르게 만들어주고 전극과 세라믹볼, 세라믹볼과 볼 사이에서도 방전을 발생시켜 전극과 공기사이에서 방전이 발생하는 것을 막아주기 때문인 것으로 사료됨.

표 6. 세라믹 볼 투입 시 방전 간격에 따른 필요최소인가전력

필요최소인가전력(W)		Gap(mm)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
세라믹 볼 사이즈	투입X	5	10	15	30	40	50	55	55
	Zeolite 13X	3~5	7~8	12	27	35	50	55	55
	Zeolite 3A	3~5	7~8	11	26	35	50	55	55

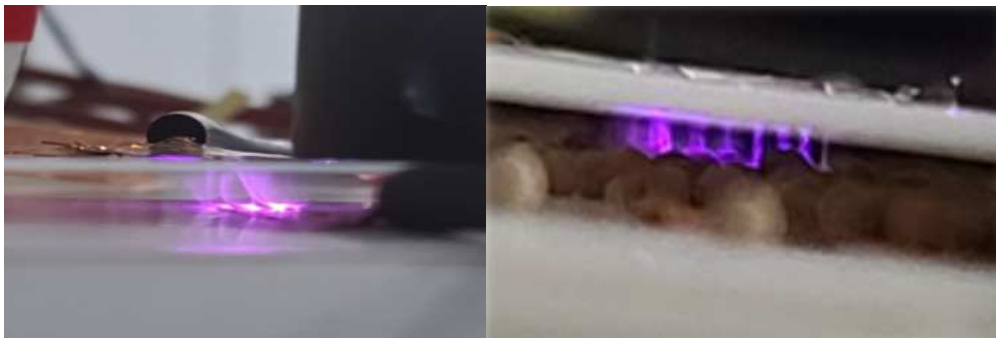


그림 23. 대기압 방전(좌)과 세라믹볼 충전(우) 방전시 방전형태

- 세라믹볼 투입 시 세라믹 볼 사이즈와 방전 간격에 따른 필요 최소인가전력을 알아보는 실험을 진행하였으며, 위의 표로부터, 세라믹볼을 투입하지 않고 플라즈마를 발생시킬 때보다, 세라믹볼을 투입 할 시 필요 최소인가 전력 값을 낮춰주는 경향을 보임. 이는 세라믹볼이 유전체 역할을 하여 방전을 고르게 만들어주고 전극과 세라믹볼, 세라믹볼과 볼 사이에서도 방전을 발생시켜 전극과 공기사이에서 방전이 발생하는 것을 막아주기 때문임.
- 그러나, 세라믹볼을 투입함에도 불구하고, 방전간격이 3mm이상 시 필요 최소인가전력 값이 급격하게 올라가는 현상이 관찰됨에 따라, 방전간격을 좁힐 수 있는 적정 방전간격 실험을 진행할 필요가 있음.

(마) 전극 및 유전체 배열 설계

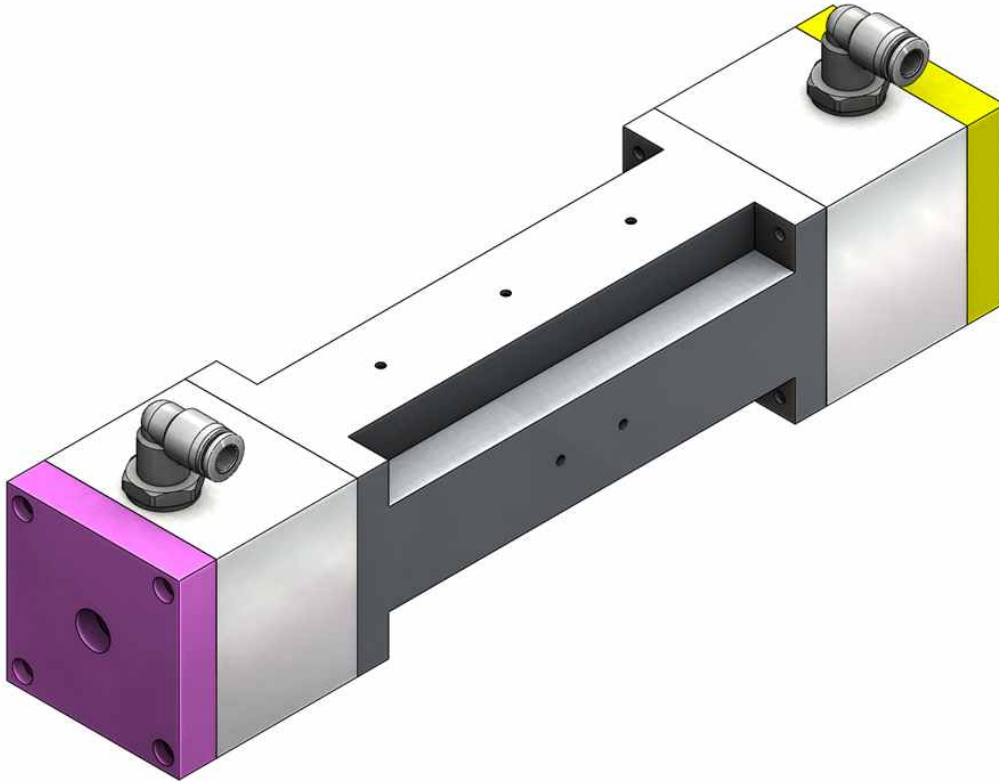


그림 24. 유전체 장벽 플라즈마 소스

- 방전간격을 조절하여 최적의 방전간격을 결정하기 위해 방전간격을 조절할 수 있도록 설계하는 것이 중요하며, 그림과 같이 내부를 원통형으로 시스템을 설계 시 내부전극의 직경을 조절하여 방전간격을 쉽게 조절 할 수 있는 원통형 시스템으로 제작함.
 - 원통형 시스템 모양에 맞춰 내부전극을 원통형으로 제작하며, 내부전극이 원통 정중앙에 위치하여 어느 위치에서든 동일한 방전간격을 유지할 수 있음.
 - 내부전극 교체와 다공성 세라믹볼을 플라즈마 소스 내부에 넣을 수 있도록 플라즈마 소스는 일체형이 아닌 조립식으로 구성하여 내부전극과 다공성 세라믹볼을 자유롭게 교체 할 수 있게 제작됨.
 - 플라즈마 소스 내부가 원통형인 것에 맞춰 전극을 감싸고 있는 유전체와 외부 전극 역시 원통형으로 제작하였으며, 외부 전극과 유전체를 겹친 원통형으로 제작하여 플라즈마 방전 시 유전체가 플라즈마를 균일하게 형성하도록 제작됨.
 - 본 실험인 “생활공간 내 복합 실내공기 오염물질 정화를 위한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발”을 위해 내부전극을 이용하여 방전간격을 조절하여 최적 전극직경을 찾고자 하며, 전극 직경을 달리하였음.
-



그림 25. 직경이 각기 다른 내부 전극 (좌측부터 직경
사이즈: 23.6mm, 24.0mm, 24.4mm, 24.8mm, 25.2mm)

- 표면의 공극 및 형태를 확인하기 위해서 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 다공성 세라믹 볼을 촬영하였으며, 하단 그림에 나타난 바와 같이, 다수의 기공 형성과 넓은 표면적을 통해 다공성 세라믹 볼의 흡착능이 뛰어날 것으로 예상됨.

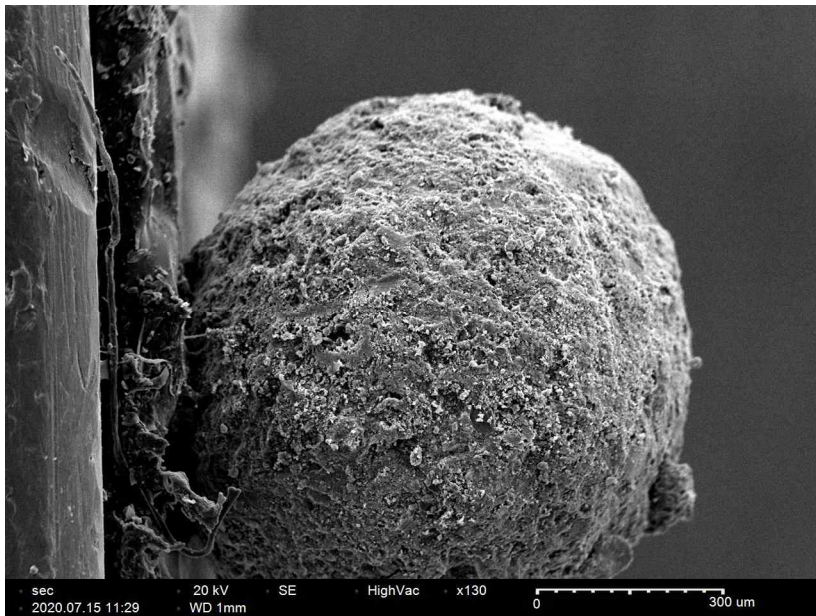


그림 26. 다공성 세라믹 볼 표면 (X130)

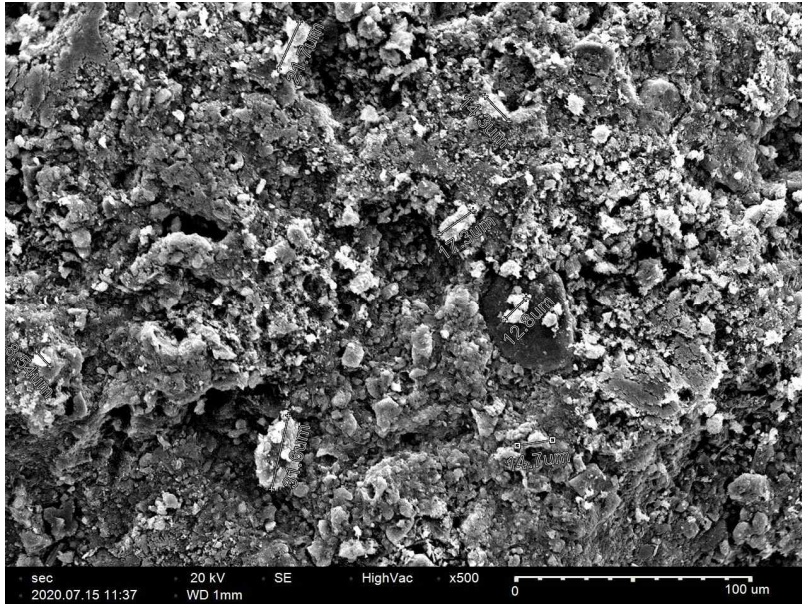


그림 27. 다공성 세라믹 볼 표면 (X500)

(바) 시제품 적용

- 플라스마 VOC가스 저감 테스트 장치와 미세먼지 저감 테스트 장치의 시제품은 현재 휘발성 유기화합물 제거실험과 미세먼지 제거 실험을 위해 실험실에서 설치 및 운영되고 있음.
- 시제품은 대기 중 휘발성 유기화합물과 미세먼지의 동시 제거가 가능하기 때문에 공기청정기와 같은 기능으로 활용될 수 있으며, 차후 시제품을 완성도 있게 완성시키거나 제품화를 고려할 때, 일반 실내 공기청정기와 같은 규격으로 일반 가정에서 가정 전원을 통해 실내 휘발성 유기화합물과 미세먼지를 제거할 수 있을 것으로 기대됨.
- 또한, 기존의 공기청정기는 HEPA 필터를 장착하여 대기 중 휘발성 유기화합물이나 미세먼지를 제거하며, HEPA필터는 장기간 사용 시 필터를 주기적으로 교체해줘야 한다는 단점이 있으나, 본 시제품은 HEPA 필터 대신 다공성 세라믹 볼을 충전하여 사용하기 때문에 다공성 세라믹볼이 제 성능을 다할 시 물세척이나 공기세척과 같은 간편한 세척을 통해 재사용 할 수 있다는 장점이 있음.

(사) 유입 외기(Ambient air) 기초인자 분석

1. 유입 외기 미세먼지 농도 범위 및 측정 입경 크기

- 환경부에서는 대기오염으로 인한 국민건강 피해를 최소화하기 위해 미세먼지 예보 등급을 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨의 4가지 단계로 구분함.
- 미세먼지로 인해 대기가 나빠지는 범위에 들어가는 나쁨 범위는 미세먼지의 농도가 PM10 80~150 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), PM2.5 36~75($\mu\text{g}/\text{m}^3$)이며, 매우 나쁨은 미세먼지 농도가 PM10 151($\mu\text{g}/\text{m}^3$)이상, PM2.5 76($\mu\text{g}/\text{m}^3$)이상임.
- 대기 중 미세먼지는 크게 직경이 $2.5\mu\text{m}$ 이하인 PM2.5와 직경이 $10\mu\text{m}$ 이하인 PM10입자로 나뉨.

2. 유입 외기 휘발성 유기 화합물 농도

표 7. 실내공기질 관리법 시행규칙, 실내공기질 권고기준(참고 : 국가법령정보센터, 실내공기질 관리법 시행규칙)

다중이용시설 오염물질 항목	이산화질소 (ppm)	라돈 (Bq/m ³)	총휘발성 유기 화합물 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	석면 (개/cc)	오존 (ppm)
지하역사, 지하도상가, 여객자동차터미널의 대합실, 철도역사의 대합실, 공항시설 중 여객터미널, 항만시설 중 대합실, 도서관·박물관 및 미술관, 장례식장, 목욕장, 대규모점포, 영화상영관, 학원, 전시시설, 인터넷컴퓨터게임시설제공업 영업시설	0.05 이하	148 이하	500 이하	0.01 이하	0.06 이하
의료기관, 어린이집, 노인요양시설, 산후조리원			400 이하		
실내주차장	0.30 이하		1,000 이하		0.08 이하

- 실내공기질 관리법 시행규칙, 실내공기질 권고기준(제4조 관련)에 실내의 총 휘발성 유기 화합물 권고 기준 농도는 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 라고 공시되어 있음.

(아) 미세먼지, 휘발성 유기 화합물 발생장치 및 평가 방법

1. 미세먼지 발생장치



그림 28. 미세먼지 발생장치(Atomizer)

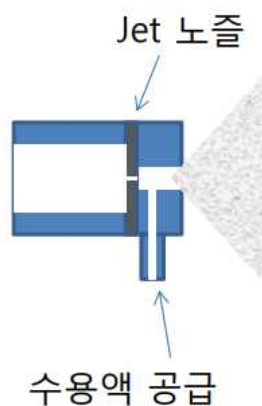


그림 29. Atomizer 입자 발생 원리

- 본 연구에서 사용되는 미세먼지 발생장치는 Atomizer를 사용함.
- Atomizer는 jet노즐을 통해 Air가 확산 분사 되는데 수용액은 음압에 의해 자동으로 빨려 올라가 Air와 함께 분사되는 방식임. 분사된 미세한 액적 형태의 KCl수용액이 실리카겔을 통과하면서 건조되어 입자화 됨.

2. 휘발성 유기 화합물 발생장치



그림 30. 휘발성 유기 화합물 기체 발생장치

- 본 연구에서 사용되는 휘발성 유기 화합물 발생장치는 bubbling방식을 이용함.
- 휘발성 유기 화합물 액체가 담긴 병을 항온수조에 넣어 온도를 일정하게 유지한 다음 휘발성 유기 화합물 액체에 기체를 불어넣어 기체상태의 휘발성 유기 화합물을 만들어 냄.

3. 미세먼지 및 휘발성 유기화합물 제거 평가 방법



그림 31. 미세먼지 측정장치 MDL-125모델

- 미세먼지 제거율 평가방법은 광산란법을 이용하여 미세먼지 농도를 측정 할 수 있는 미세먼지 농도 측정장치인 (주)랩코사의 MDL-125 모델을 사용함.
- MDL-125모델을 이용하여 시제품 장치 통과 전 미세먼지 농도와 시제품 통과 후 미세먼지 농도를 측정하여 미세먼지 제거효율을 평가함.

(가) 미세먼지 제거 성능 평가

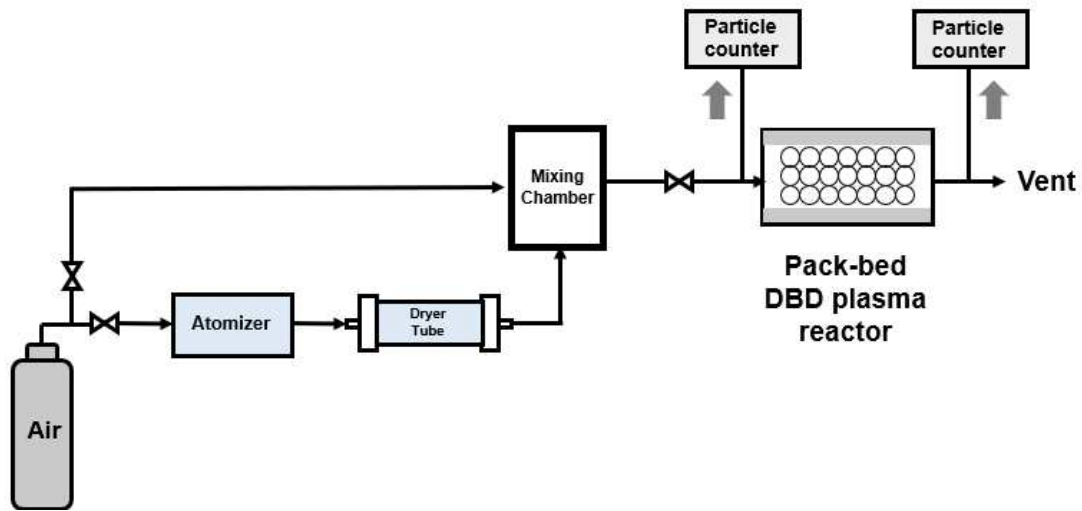


그림 32. Pack-bed DBD 플라즈마 시스템 구조도

- 2차년도 연구에서, 실내 미세먼지 제거 실험을 위해, 상단의 그림과 같은 Pack-bed DBD plasma 시스템을 구축하였음. Air 탱크로부터 건조 공기가 2% KCl 수용액이 충전된 Atomizer로 유입되고, Atomizer 내부에서 zet nozzle을 통해 공기와 KCl 입자가 스프레이 방식으로 분무됨. 이후 실리카 겔이 충전된 Dryer tube를 통과 한 후, Mixing chamber에서 유량 조절을 위해 건조 Air와 혼합됨. 총 유량 4 L/min의 절반은 Particle counter로 유입되어 초기 미세먼지 농도가 측정 되고, 나머지 절반은 Pack-bed DBD plasma 장치를 통과함. 통과한 기체는 Particle counter로 유입되어 처리 후 미세먼지 농도가 측정 됨.

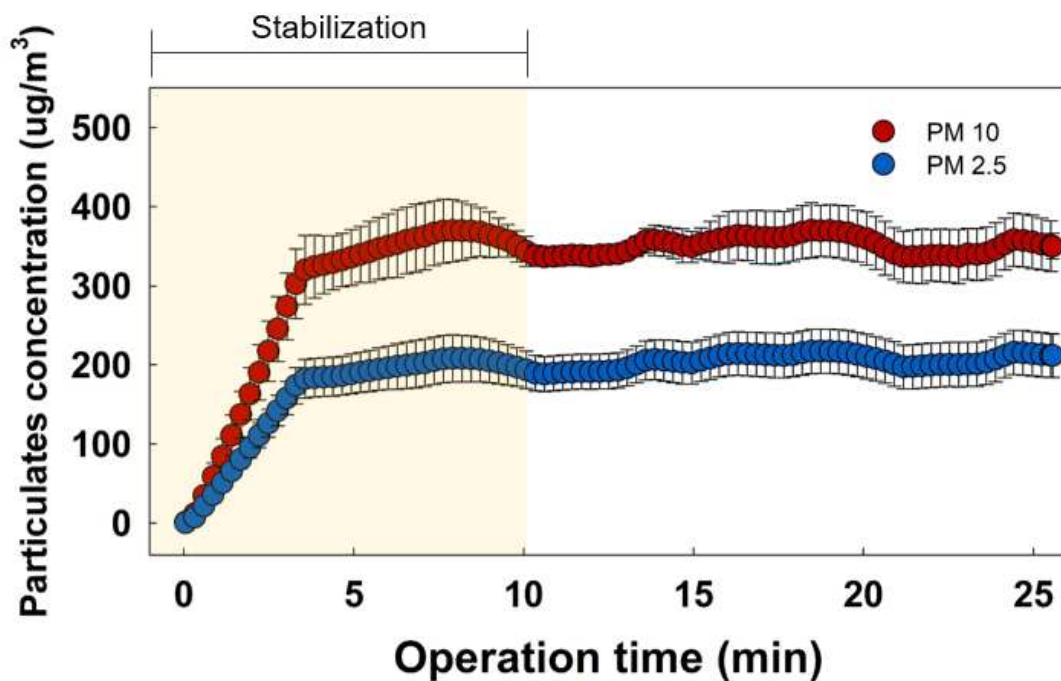


그림 33. 0.1 KCl 농도 조건에서 시간에 따른 PM 10 and PM 2.5의 발생량 변화

- (공통실험조건) 실내 미세먼지 제거 실험을 위해, Atomizer를 통해 발생된 PM10과 PM2.5 입자들은 위 그림과 같이 PM10은 실내 온도에서 약 $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5는 약 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도로 발생되었으며, 모든 실험은 미세먼지 측정 장비 및 플라즈마 장비의 균일 방전 시간을 확보하기 위해 실험 시작 후 10분간의 Stabilization을 거친 뒤 진행되었음.

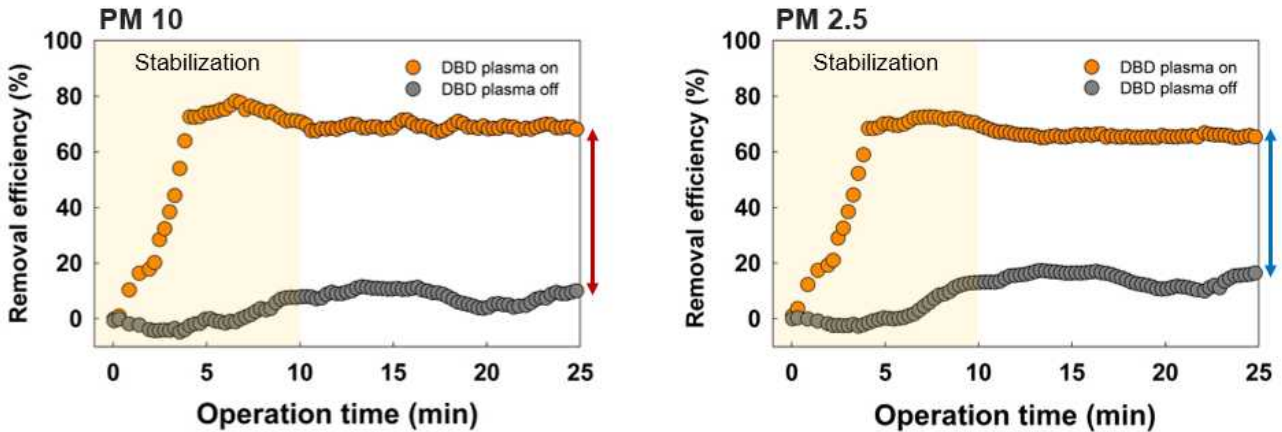


그림 34. Zeolite 13X가 충전된 DBD 플라즈마 시스템에서 전원 여부에 따른 (a)PM10과 (b)PM2.5 의 제거율 비교

- (실험 조건)본 실험에서는 Packing materials로서 Zeolite 13X가 DBD 플라즈마 내부에 충전되었을 때, 플라즈마 on-off에 따른 제거 성능을 평가하였으며, 실험 조건으로서, 인가 전력은 20W, 내부전극과 외부전극의 방전 간격은 3.2mm로 실험을 진행하였음.
- 위 그림에서는 pack-bed DBD 플라즈마가 작동할 때와 작동하지 않았을 때, PM10 입자의 제거율 성능 차이를 보여줌. DBD 플라즈마를 작동하였을 때, 제거율은 65.3%, 작동하지 않았을 때, 제거율은 11.3%의 성능이 관찰되었음. 이는 단순 물리적 흡착에 의한 미세먼지 제거보다 DBD 플라즈마를 작동하였을 때, 발생하는 Electrostatic precipitation이 주된 제거 메커니즘으로 작용하였기 때문으로 사료됨.
- 또한, 아래 그림에서와 같이 PM2.5 입자도 위의 결과와 유사하게 DBD 플라즈마를 작동하였을 때, 제거율은 67.7%, 작동하지 않았을 때, 제거율은 12.5%의 성능이 관찰되었음. 결과적으로 입자 크기별 제거율 성능 차이는 유의미한 결과를 보이지 않았으나, 입자 크기와 관계없이 주된 제거 메커니즘이 Electrostatic precipitation임을 확인 할 수 있었음.

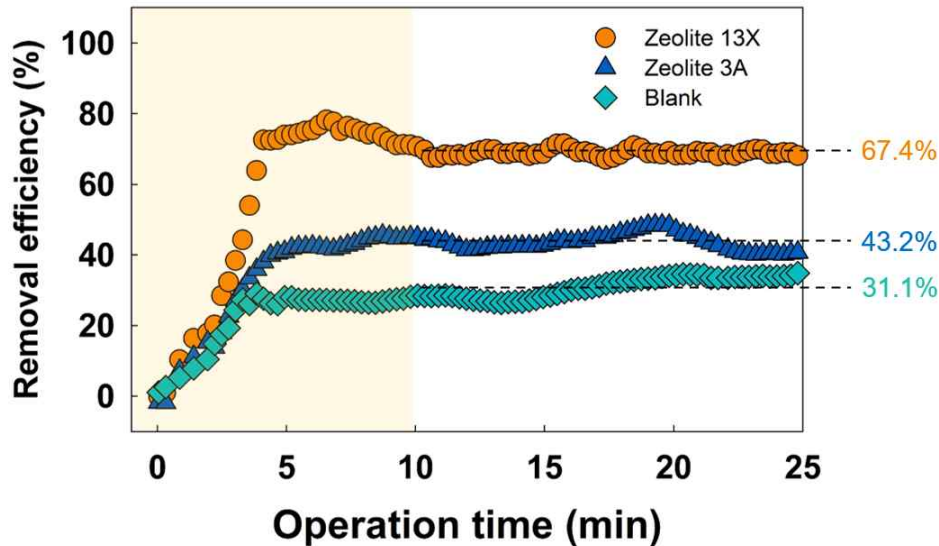


그림 35. 충전 물질에 따른 DBD 플라즈마의 미세먼지 제거율
(실험 조건: 20W, 3.2 mm discharge distance)

- (실험 조건)본 실험에서는 다양한 충전 물질에 따른 미세먼지의 제거 성능을 평가하기 위해, Packing materials로서 Zeolite 13X, Zeolite 3A가 DBD 플라즈마 내부에 충전되었을 때 제거 성능을 비교 평가하였으며, 실험 조건으로서, 인가 전력은 20W, 내부전극과 외부전극의 방전 간격은 3.2 mm로 실험을 진행하였음.
- 위 그림에서는 DBD 플라즈마 내부에 Packing materials이 충전되지 않았을 때 (녹색), Zeolite 3A가 충전되었을 때 (파랑) 그리고 Zeolite 13X가 충전되었을 때 (주황)이 비교 평가되었음. 내부가 비어있는 DBD 플라즈마를 작동하였을 때, 제거율은 31.1%이 나타났으며, Zeolite 3A가 충전되었을 때 제거율은 43.2% 그리고 Zeolite 13X가 충전되었을 때 제거율은 67.4%로 나타났음. 이는 Electrostatic precipitation이 외부전극에 위치한 유전체에서 발생하는 ‘Blank-녹색’의 경우 보다 내부에 Packing materials이 채워져 있는 ‘Zeolite 3A-파랑’ 및 ‘Zeolite 13X-주황’의 경우에서 더 많이 발생하기 때문인 것으로 사료됨.
- 특히 Zeolite 3A와 13X는 아래 표와 같이 높은 BET 면적을 보유하고 있음. 그러나 두 물질의 BET 차이에 비해 미세먼지 제거율 증가율이 상대적으로 낮음을 확인할 수 있음. 이는 미세먼지의 크기가 μm 단위임에 비해, Zeolite의 미세기공 크기는 0.3~1.3 nm 수준으로 매우 작기 때문이며, 미세먼지의 Electrostatic precipitation은 Micropore 보다는 External surface (외부 표면적)의 크기에 더 큰 영향을 받았음을 아래 표와 질소 흡착능을 보여주는 아래 그림에서 Zeolite 13X가 Zeolite 3A보다 약간의 차이 (Micropore area 차이에 비해)를 보이는 것을 통해 확인할 수 있음.

표 8. 충전 물질별 비표면적 분석 결과

Pack-bed material	BET surface area (m ² /g)	Micropore area (m ² /g)	External surface area (m ² /g)
Zeolite 3A	28.9457	6.7425	22.2033
Zeolite 13X	621.2567	550.1112	71.1455

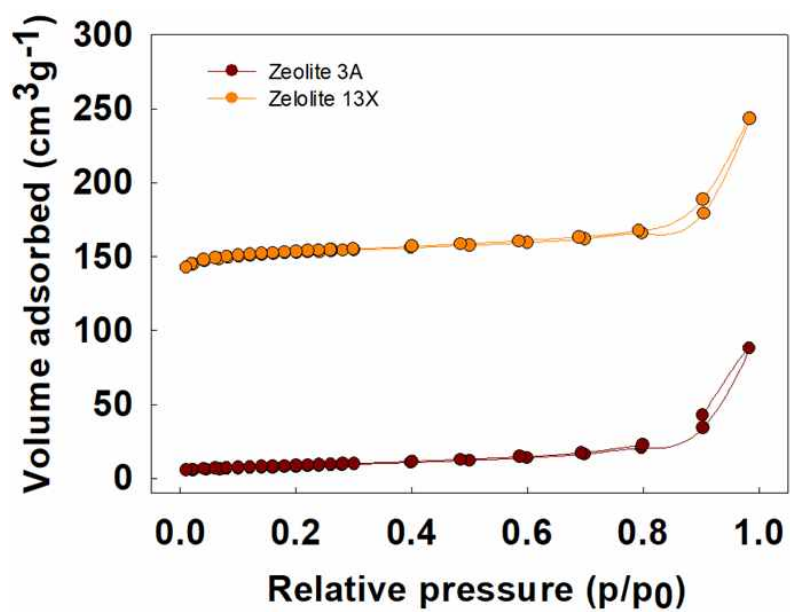


그림 36. Zeolite 3A 와 13X의 N₂ 흡착-탈착 평형

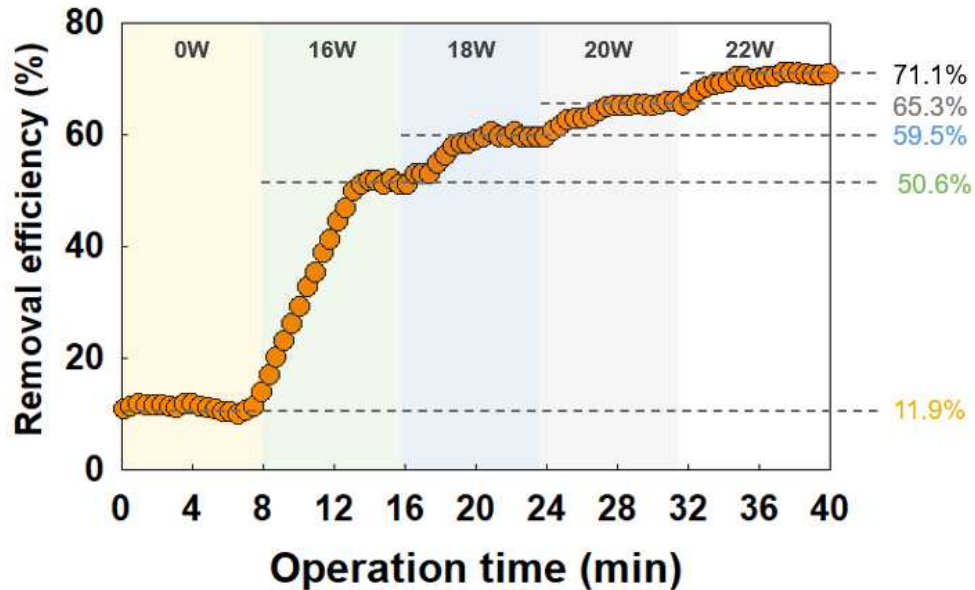


그림 37. 인가 전력에 따른 DBD 플라즈마의 미세먼지 제거 성능 평가

(실험 조건: Zeolite 13X in DBD plasma, 2.6 mm discharge distance)

- (실험 조건)본 연구에서는 Pack-DBD 플라즈마 발생시, 인가 전력 (0, 16, 18, 20, 22W)에 따른 미세먼지 제거 성능을 평가하였음. 내부는 Zeolite 13X로 충전되어있고 방전 간격은 2.6 mm에서 실험이 진행되 었으며, 플라즈마를 작동하지 않았을 때 (0W) 제거율은 11.9%로 나타났으며, 순차적으로 인가전력을 16, 18, 20, 22W로 증가시키기에 따라 미세먼지 제거율은 50.6%, 59.5%, 65.3%, 71.1%로 증가하였음.
- Pack-bed DBD 플라즈마에 적용되는 인가전력이 증가할수록 외부전극과 내부전극사이에 발생하는 자기장의 세기는 이에 비례하여 증가함. 따라서, 인가전력 증가로 인해 상승된 자기장의 세기는 Charged된 미세먼지가 Zeolite 13X 표면에 Electrostatic precipitation 되는 양을 증가시킬 수 있으며 이로 인해 미세먼지의 제거율이 상승한 것으로 사료됨.

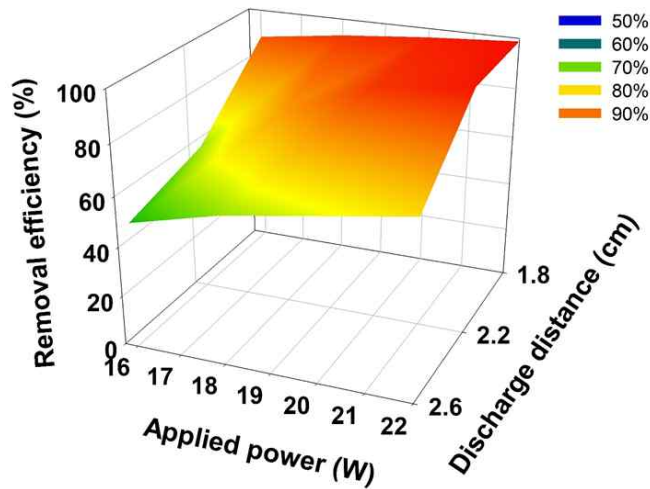


그림 38. 방전 간격에 따른 DBD 플라즈마의 미세먼지 제거 성능 평가
(실험 조건: Zeolite 13X in DBD plasma, applied power: 14~22 W)

- (실험 조건)본 연구에서는 Pack-bed DBD 플라즈마 발생시, 외부 전극과 내부 전극 사이의 방전 간격에 따른 미세먼지 제거 성능 영향 평가를 진행하였음. 내부는 Zeolite 13X로 충전되어있고 인가 전력은 14~22W에서 실험이 진행되었음. 방전간격이 증가할수록 모든 인가 전력에서 미세먼지 제거율이 감소하는 것이 확인되었음.
- 이는 방전 간격이 증가 할수록 플라즈마를 발생시키기 위한 최소인가전력이 증가하게 되고 이는 같은 플라즈마 제거 성능을 위해서 상대적으로 높은 전력이 요구됨을 의미함. 이는 Pack-bed DBD 플라즈마 발생시 Zeolite와 같은 Packing materials의 표면이 플라즈마가 전달되는 통로로 작용 할 수 있음에도, 방전 간격이 넓어지면 Air-Zeolite 사이의 방전이 유도되어 손실되는 전력이 발생하는 것으로 판단됨.
- 입자성 물질 99% 제거율 달성을 위해서는 방전간격 1.8 mm와 22W 전력이 필요한 것으로 연구 되었음.

표 9. 충전 물질과 방전 간격에 따른 최소인가전력 비교

	Discharge distance (mm)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Applied power (W)							
Blank	5	10	15	30	40	50	55	55
Zeolite 3A	3~5	7~8	12	27	35	50	55	55
Zeolite 13X	3~5	7~8	11	26	35	50	55	55

←
→

적정 영역
과도한 최소 인가 전력 필요

(나) 휘발성 유기화합물질 제거 성능 평가



그림 39. 본 연구실에서 기 보유한 가스크로마토그래프-질량분석기 (GC-MS)

- 휘발성 유기 화합물 평가방법은 실험실 내에 기 구축되어 있는 GC-MS를 이용하여 시제품 통과 전 휘발성 유기 화합물 농도와 시제품 통과 후 휘발성 유기 화합물 농도를 측정하여 휘발성 유기 화합물의 상대적인 제거효율을 평가함.
- 본 연구에서는 실내유해물질 중 염소계열 독성유해물질 중 대표적인 Trichloroethylene(TCE)가 선정되어 평가되었음.
- 하단 그림에서와 같이 기체상의 실내유해물질을 흡착시키기 위해 ‘Tenax tube’가 사용되었음. 먼저 TCE 물질의 Calibration 작성을 위해, Methanol 용매에 각각 0, 10, 30, 50, 70 mg/L로 희석하여 5개의 Tanax tube에 1uL 씩 주입하였음. 즉, Tenax tube에 실제 주입된 TCE의 총량은 각각 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07 uL/tube 로 계산되었음.

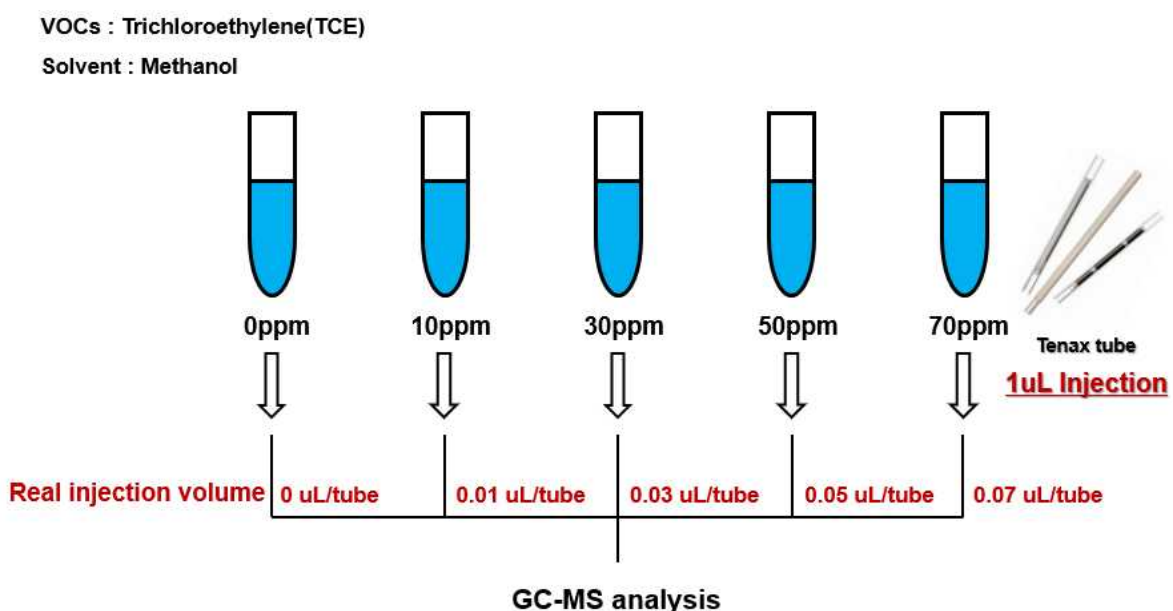


그림 40. Tenax tube를 사용한 TCE의 Calibration 준비 과정

Experimental Data

GC-MS Library Data

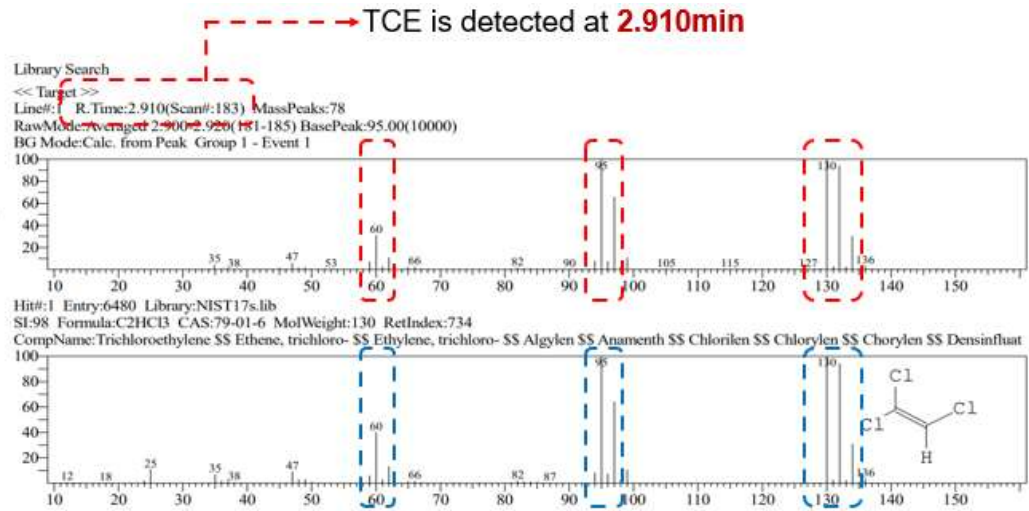
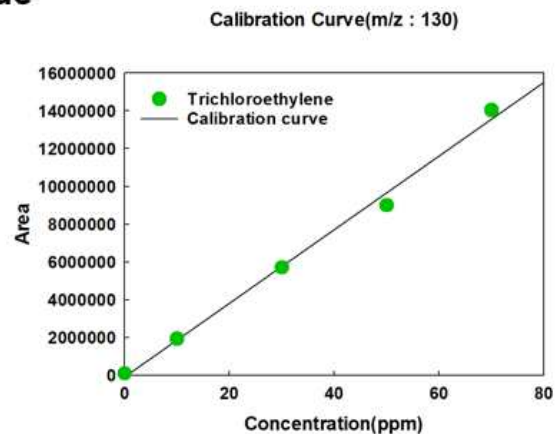
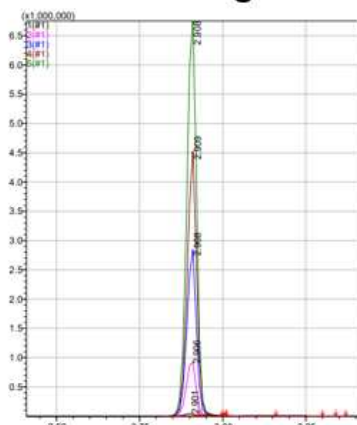


그림 41. GC-MS를 사용한 TCE 물질의 정성 분석

- 상단 그림에서와 같이, GC-MS 분석에서 TCE는 2.910 min에 검출되었음. 이때, Fragment peak은 60, 95, 130 m/z에서 검출되었으며, 실제 GC-MS library와 비교하였을 때, 일치하는 결과를 보여 주었음. 이를 통해, TCE가 정상적으로 GC-MS에서 검출되었다는 것을 확인 할 수 있음.
- m/z 130에서 가장 높은 Peak area 값을 보여주었기 때문에, 60, 95, 130 중에서 m/z 130을 선정하여 Calibration curve를 농도 별로 작성하였음. 하단 그림에서와 같이, r^2 값이 0.994 이상으로 높은 정확도를 보였으며, 본 실험에서는 해당 Calibration curve 데이터를 사용하여 결과값을 분석하였음.

Calibration curve using m/z : 130 value



Level	Concentration(ppm)	Area
1	0	93,038
2	10	1,929,141
3	30	5,706,352
4	50	8,997,959
5	70	14,046,241
R^2 value		0.994282

그림 42. m/z 130 에서의 TCE Calibration curve

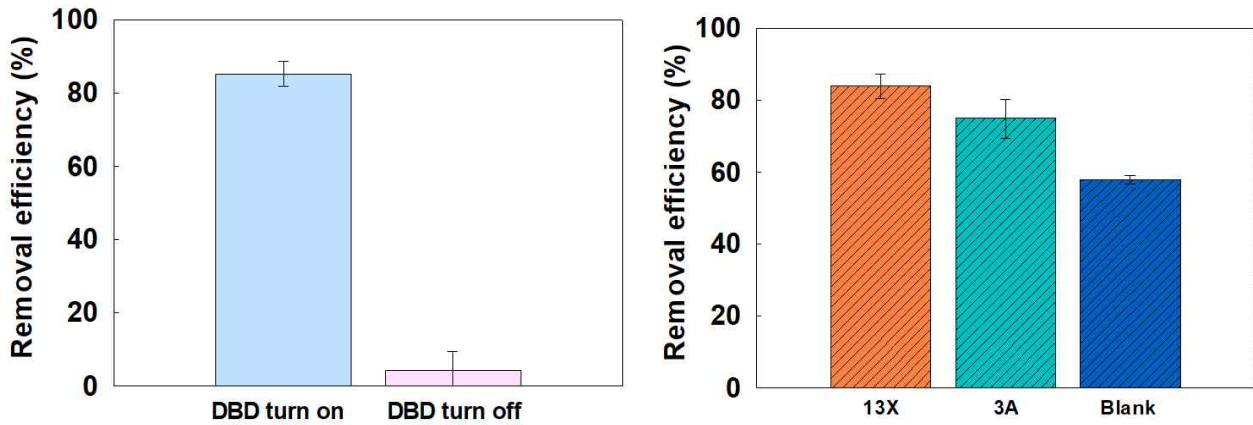


그림 43. DBD 플라즈마 가동여부(좌) 및 충전물질(우)에 따른 TCE 제거 성능 평가
(실험 조건: 16W, 3.2 mm discharge distance)

- 본 연구에서는 DBD 플라즈마의 가동여부에 따른 TCE 제거 성능이 평가되었음. 위 그림에서와 같이, DBD 플라즈마를 발생시키지 않았을 때, Zeolite 13X에 의한 제거율은 0~10% 이내의 매우 낮은 성능을 보여주었음. 이는 짧은 시간에 발생하는 Pack-bed DBD 플라즈마 반응기 내 물리적 흡착은 TCE 제거에 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 사료됨. 그러나 Pack-bed **DBD 플라즈마를 통한 TCE의 제거 성능은 84.4% 가량의 높은 효율을 보여주었음**. 이는 Pack-bed DBD 반응기 내에서 발생한 플라즈마가 TCE의 분해에 효과적으로 작용하였기 때문으로 사료됨.
- 또한, 본 연구에서는 DBD 플라즈마의 충전물질 (Zeolite 13X, Zeolite 3A and blank)에 따른 TCE 물질의 제거 성능 또한 평가되었음. 위 그림에서와 같이, DBD 플라즈마 내부에 **Zeolite 13X가 충전되었을 때의 제거율을 84.4%, Zeolite 3A가 충전되었을 때의 제거율은 75.7%, 아무것도 채워지지 않은 Blank 상태에서의 제거율은 57.5%로 측정**되었음. Blank 상태에서도 상대적으로 높은 제거 성능을 보여주었는데, 이는 DBD 반응기 내 충전 물질이 없는 경우에도, 양 전극 및 외부전극표면의 유전체 사이에서 발생한 플라즈마가 TCE를 제거하는데 작용하였기 때문으로 사료됨. Zeolite 13X의 경우 미세먼지 실험에서도 증명되었듯이 Zeolite 3A 보다 **상대적으로 높은 비표면적**을 가지고 있기 때문에 (**Zeolite 13X: 621.2, Zeolite 3A: 28.9 m²/g**), 충전제 표면에서 발생한 플라즈마가 TCE와 반응하는 데 있어, 넓은 비표면적이 상대적으로 높은 분해율에 영향을 주었을 것으로 판단됨.

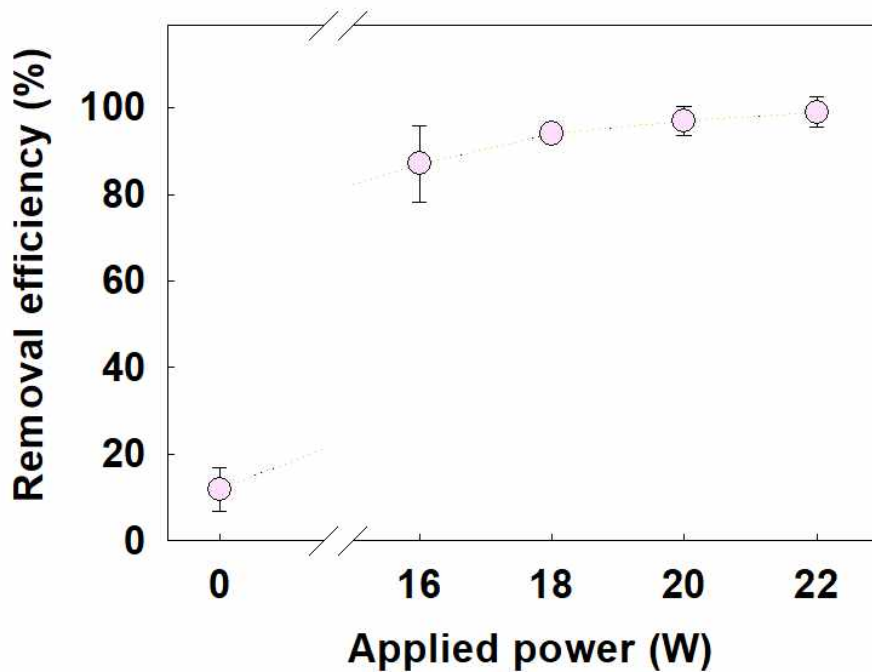


그림 44. 인가 전력에 따른 TCE 제거 성능 평가

- (실험조건)본 연구에서는 Pack-bed DBD 플라즈마의 인가 전력 (0, 16, 18, 20, 22W)에 따른 TCE 제거 성능이 평가되었음. 본 연구에서 적용된 실험 조건인 3.2 mm 방전간격에서 DBD 플라즈마의 최소 인가 전력은 15W로서 안정적인 DBD 방전을 유도하기 위해 인가전력을 16W 이상에서부터 적용하여 실험을 진행하였음.
- 0W에 해당하는 DBD 플라즈마를 발생시키지 않은 경우, Zeolite 13X에 의한 제거율은 0~10% 이내의 매우 낮은 성능을 보여주었음. 그러나 인가 전력을 16W로 적용하였을 때, 제거율은 84.4%로 확인한 제거율 성능 향상을 보여주었음. 이후, 전력은 2W 단위로 증가시켰을 때, 명확히 제거율이 상승하였으며, 18W에서 92.2%, 20W에서 96.9%, 22W에서 98.0%의 제거 성능을 확보할 수 있었음.
- Pack-bed DBD 플라즈마에 적용되는 인가전력이 증가할수록 외부전극과 내부전극사이에 발생하는 플라즈마의 발생량은 이에 비례하여 증가함. 따라서, 인가전력 증가로 인해 상승된 플라즈마 발생량은 단위시간 당 통과하는 TCE를 더 효과적으로 분해 시킬 수 있으며 이로 인해 TCE의 제거율이 상승한 것으로 사료됨.

- 본 연구에서는 1차년도 중간 평가에서 복합유해물질 제거에 있어 공인성적서 발급을 제안받았으며, 이를 수행하기 위해 평가 가능한 기관을 탐색하였고, (주)에너지인증연구소에서 복합유해물질에 대한 평가를 진행하였음.
- 하지만, 본 실험에서 제작된 시제품은 단일 DBD 반응기로 이루어진 소규모 처리장치이기 때문에, 1~10 L/min 의 유량의 처리가 가능하며, 일반적인 공기청정기 등에 비해 매우 낮은 수준임. 따라서 본 시제품을 직접적으로 일반 공기청정기와 비교하는 것은 어려운 수준이며 동등한 수준으로 평가하기 위해서는 DBD 플라즈마 반응기의 개수를 증가시키거나 고 유량의 처리 (1000L/min 이상)가 가능한 시제품을 새로 제작해야하는 한계가 있음.
- 본 시험은 고정실험실 조건에서 실내유해물질의 내부 초기 농도를 1 mg/m³ 수준으로 조절하여 평가를 진행하였음. 본 기기의 유량 조건에서는 3m³ 에 해당하는 고정실험실 부피를 충분히 순환시킬 수 없음에도 불구하고 시간당 제거 성능의 경우 초산은 353 ug/m³*h, 암모니아는 199 ug/m³*h, 포름알데히드는 105 ug/m³*h, 아세트알데히드의 경우 96 ug/m³*h 의 성능을 보여주었음.
- 본 시험의 한계로 생각되는, 유량 문제와 Reactor 개수 문제의 경우, 이후, 더 높은 유량이 적용 가능한 시제품 혹은 본 시제품의 반응기 배열 개수를 증가시킨다면, 복합실내유해물질에 대한 확실한 제거 성능 확보가 가능할 것으로 사료됨.

㈜에너지인증연구소 Energy Certifying Laboratory(ECL) 경기도 수원시 영통구 신원로 22 Tel. 031-204-5123 Fax. 031-204-5127	시험 성적서	 Energy Certifying Laboratory 영어자 : () / (●)	㈜에너지인증연구소 Energy Certifying Laboratory(ECL) 경기도 수원시 영통구 신원로 22 Tel. 031-204-5123 Fax. 031-204-5127	시험 결과	 Energy Certifying Laboratory 영어자 : () / (●)
성격서 번호(REPORT NO.) : ECL-TR-21-0551		성격서 번호(REPORT NO.) : ECL-TR-21-0551			

I. 의뢰자

회사명: 성균관대학교

주소: 경기 수원시 장안구 서부로 2066 (천전동) 제2공학관 27202

II. 시험품

품명: 플라즈마 VOC 가스 저감 테스트 장치

모델명: -

제조사: -

III. 시험일자: 2021. 12. 10.

IV. 시험장소: ☒ 고정 시험실 ☐ 현장 시험
 주소: ㈜에너지인증연구소 (경기도 수원시 영통구 신원로 22)

V. 시험방법: 의원자 제시 조건
 (SPS KACA 002-132:2008 실험기기형식기 IL5 유해가스저거(탈취) 효율시험 참조)

VI. 시험결과: 후속 페이지 결과 참조

이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인증과 관련 없습니다.
 이 시험결과는 의뢰자가 제공한 자료 및 시료에만 한정됩니다.
 이 성적서는 탈 취 과정의 습안 및 탈취 일부만 복제되어서는 안됩니다.

I-4. 설치사진



작성자

성명: 구영선 (서명)

기술책임자

성명: 정지은 (서명)

2021. 12. 16.

㈜에너지인증연구소 대표이사 (인)

*시험실적서의 진위여부에 대한 책임이 필요하신 경우에는 notary 오피스 문의 부탁 드립니다.

시험가스	단위	탈취효율 1 (30 min)	탈취효율 2 (60 min)
포알대하이드 (HCHO)	%	6.0	10.5
암모니아 (NH3)	%	12.9	19.9
아세트알데하이드 (CH3CHO)	%	3.1	9.6
초산 (CH3COOH)	%	18.9	35.3

(라) 부산물 생성 평가

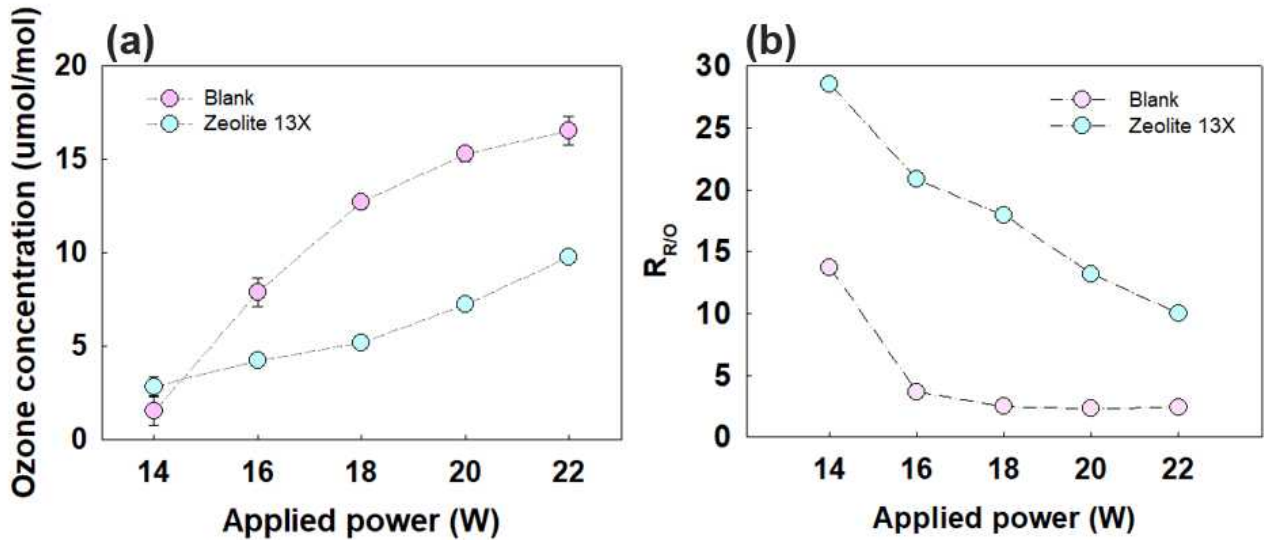


그림 45. 인가 전력에 따른 오존발생량과 오존발생량 대비 제거율

- 본 연구에서는 플라즈마에서 발생하는 대표적인 부산물인 오존 발생량을 평가하기 위해, DBD 플라즈마와 Zeolite 13X가 포함된 충전형 DBD 플라즈마의 오존 발생량을 비교하였음.
- 오존 측정 장비는 Ozonetec에서 제조된 UV기반 기체 오존 측정 장비를 DBD 플라즈마 장비 Outlet 측에 직접 라인으로 연결하여 이를 평가하였음. 따라서 본 연구는 플라즈마 장비에서 발생하는 Ozone을 전량 분석하는 실험이며, 일반적인 공기청정기에서 평가하는 오존측정실험 (약 50mm의 간격을 두고 오존을 측정하는 실험)과는 차이가 있음
- 상단의 그림에서와 같이 (a)에서 인가 전력에 따른 오존 농도를 측정하였으며, 결과적으로 Blank의 경우보다 Zeolite 13X를 충전하였을 때 상대적으로 낮은 오존 발생량을 관찰할 수 있었음. 이는 Zeolite 13X가 오존 흡착 및 분해에 높은 효율을 가지고 있기 때문이며 따라서, **Zeolite 13X는 DBD 플라즈마의 미세먼지와 VOCs 제거 성능 향상 뿐만 아니라 오존 발생량 감소에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 확인 할 수 있음.**
- 또한, 상단의 그림에서와 같이 (b)에서 인가 전력에 따른 오존 발생량 대비 실내유해물질 제거율에 대한 비율을 그래프로 나타내었음.

$$R_{R/O} = \text{Removal efficiency} / \text{Ozone concentration}$$

- 결과적으로, Zeolite 13X가 Blank에 비해서 상대적으로 오존발생량 대비 제거율 또한 높은 것을 확인할 수 있었음. 그러나 인가 전력의 경우 오히려 높은 인가 전력에서 오존발생량 대비 제거율이 하락하는 것을 확인할 수 있음. 이는 인가 전력의 증가로 인한 제거율 상승보다 오존 발생량이 더 높았기 때문으로 사료되며, **오존 발생을 우선적으로 고려한다면, 제거율 대비 전력을 낮게 유지하는 쪽이 바람직 할 수 있다는 것을 보여줌.**

(마) 제거 능력 대비 처리 면적당 전력 소모량 산정

- 구체적인 제거율 대비 전력 소모량 산정을 위해 아래와 같은 Specific energy input과 Energy yield 계산식을 사용하여 이를 비교 평가하였음. 제거율은 실내 복합유해물질 조건을 반영하기 위해서 같은 조건에서 TCE와 미세먼지 제거율의 평균치를 사용하여 평가되었음.

$$SEI = \frac{P}{Q} \times 3.6$$

- SEI (Specific energy input; J/L), P (Applied power; W), Q (Gas flow rate; m³/h)

$$EY = \frac{C_i - C_f}{SEI \times 1000} \times 3.6$$

- EY (Energy yield; g/kWh), Ci (Inlet side concentration; ug/m³), Cf (Outlet side concentration; ug/m³)

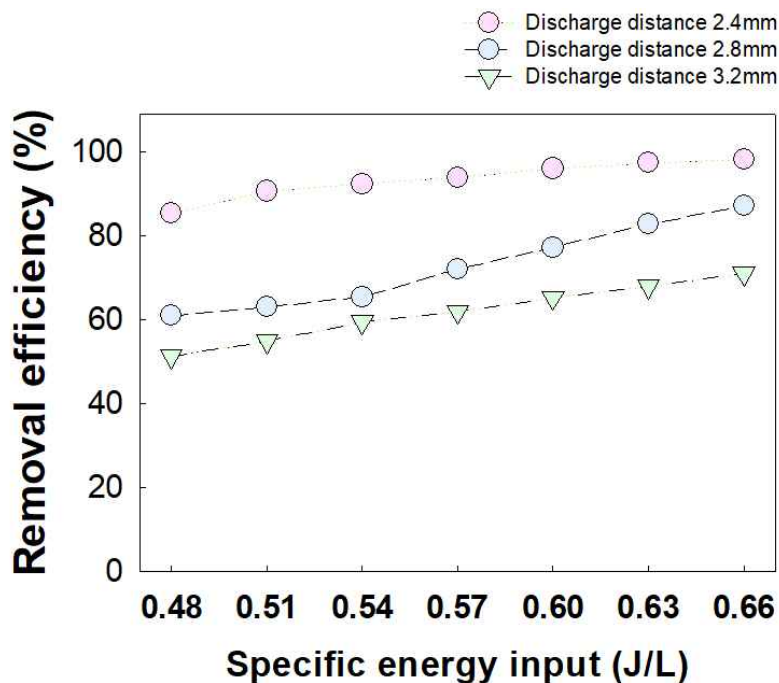


그림 46. 에너지 주입과 방전간격에 따른 복합유해물질 제거효율

- 본 연구에서는 Specific energy input에 따른 미세먼지-TCE 복합 유해물질 제거 성능을 평가하였음. Specific energy input이 증가함에 따라 제거 성능은 일관되게 향상되었으며, 특히 방전간격의 경우 2.4, 2.8, 3.2 mm로 증가됨에 따라 제거 성능은 오히려 감소되었음. 이는 방전간격이 증가함에 따라 DBD 플라즈마 반응기 내의 Air 내의 방전으로 인해 전력이 손실되기 때문으로 판단됨.

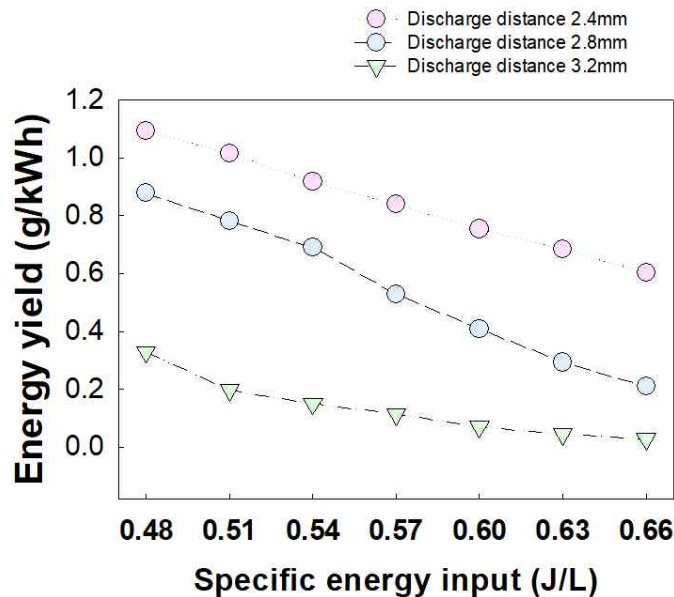


그림 47. 에너지 주입과 방전 거리에 따른 복합유해물질 Energy yield

- 이러한 제거율 차이를 바탕으로 Specific energy input (J/L)에 따른 Energy yield가 본 연구에서 평가되었음. 본 결과는 에너지 효율성을 나타내는 척도로 사용될 수 있으며, 이는 전력이 증가할수록 오히려 전력 투입량 대비 실내복합유해물질 제거율은 낮아지는 것을 확인할 수 있음. 따라서, 에너지 효율 측면에서는 투입 에너지를 낮추는 것이 상대적인 효율성을 확보할 수 있을 것으로 사료됨.
- 방전 간격의 경우 2.4, 2.8, 3.2 mm로 증가됨에 따라 에너지 효율은 제거 성능과 동일하게 감소되었음. 이는 방전 간격이 에너지 투입량에 미치는 영향이 미미하기 때문에, 제거 성능과 동일한 결과를 보여준 것으로 판단됨.
- 이전 실험 결과를 기반으로, 미세먼지 제거율의 경우 18W 조건에서 목표로 하는 99%를 달성하였고 TCE의 경우 16W 이상에서 70% 이상을 달성하였음. 제거율 성능과 에너지 효율성을 모두 고려하여 **방전 간격 2.4 mm, 인가 전력 18W 를 최적 조건**으로 선정하였음. 이때, 미세먼지 제거율은 제거 능력 대비 처리 면적당 전력 소모량을 아래와 같이 산정하였음.

$$\begin{aligned} & \text{처리체적(m}^3\text{)당 요구 전력량(원/m}^3\text{)} \\ & = [\text{처리 시간(분)} \times \text{시간 당 전기비용(원/분)}] / \text{처리체적(m}^3\text{)} \end{aligned}$$

- 본 연구에서는 개별 조건별 미세먼지 및 VOC 제거 실험과는 별개로, 실내복합유해물질 처리를 위해 상대적 고유량인 100 mL/min를 기준으로 제거 성능 평가를 진행하였음. 결과적으로 **91.05 원/m³의 운영 비용을 도출할 수 있었음**. 즉, 미세먼지 99%이상 제거, TCE 70% 이상 제거 조건을 달성하는 최소 운영 비용은 91.05 원/m³으로 평가되며 본 연구에서 목표로 하였던 85-95 원/m³을 달성할 수 있음.
- 2019.09월 한국소비자원의 공기청정기 품질시험결과에 따르면, 상용화 제품의 경우 1m² 당 소비 전력이 0.51~0.93W/m²인데 비해, 본 연구에서 개발된 0.76W/m²으로 비슷한 수준으로 사료되나, 본 제품은 미세먼지와 VOCs를 동시에 제거할 수 있다는 차별성을 가지고 있음.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

세부목표	연구개발목표	달성내용	달성도(%)
건물 내에서 발생하는 미세먼지와 주요 실내공기 유해물질 선정 및 유해성 평가	실내공기 유해물질 제거에 관한 국내·외 기술동향 및 유전체 장벽 방전 연구현황 등에 대한 조사 및 분석	• 건물 내에서 발생하는 미세먼지와 주요 실내공기 유해물질 문헌 조사 완료 • 국내·외 실내공기 유해물질 처리기술 및 유전체 장벽 방전 연구현황 조사 완료 • 국내·외 실내공기 유해물질 처리기술 논문 및 특허 문헌조사 완료	100
Lab-scale 규모 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발 및 제작	다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발	• DBD 플라즈마 VOC 가스 저감 테스트 장치 제작 • 미세먼지 저감 테스트 장치 제작	100
	최적 전극, 유전체 선정 및 세전극, 유전체 최적 배열 설계	• 전극 직경을 이용한 최적 방전간격 선정 및 최적전극 결정 • 내부전극 교체와 다공성 세라믹볼을 플라즈마 소스 내부에 넣을 수 있도록 플라즈마 소스는 일체형이 아닌 조립식으로 구성 • 외부 전극과 유전체를 겹쳐서 원통형으로 제작하여 플라즈마 방전 시 유전체가 플라즈마를 고르게 생성하도록 해주어 플라즈마를 균일하게 형성	100
	다공성 세라믹 재질, 구조에 따른 미세먼지 입자크기별(PM 2.5, PM 10) 제거율 평가	• Zeolite 13 및 Zeolite 3와 Blank 조건을 비교하여 미세먼지 입자크기별 (PM 2.5, PM 10) 제거율 평가	100
	다공성 세라믹 유전체 장벽 방전	• 전압, 방전간격, 충전 여부에 따른 다공성 유전체 장	100

시스템 최적 조건 선정	장벽 방전 시스템 최적 운전조건 선정	벽 방전 시스템에서의 미세 먼지와 VOCs 제거율 평가를 통해 각 인자가 미치는 영향을 파악	
	미세먼지 입자크기 별, 실내공기 유해물질 농도별 분해율 및 부산물의 독성 평가	- 미세먼지 입자크기 (PM10, PM2.5) 및 다양한 유해물질의 제거율 평가를 통해 입자크기가 미치는 영향은 미미함을 확인 - 대표 독성 부산물인 오존 발생량 및 농도 평가를 통해 Zolite 13X의 오존 발생량 감소를 확인	100
복합 유해물질의 분해효율 및 전력 소모 최적화	다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템에 요구되는 분해 능력 대비 처리 면적당 전력 소모량 산정	- 하단의 식으로 목표 수치인 VOCs 70%, 미세먼지 99% 이상 성능 확보를 위한 전력 소모량 산정 - 처리체적(m^3)당 요구 전력량($원/m^3$) = [처리 시간(분) x 시간 당 전기비용(원/분)] / 처리체적(m^3) 91.05 원/m^3의 운영 비용 확보	100
	복합 유해물질의 분해효율 및 분해산물 독성 평가	- 미세먼지 및 TCE 혼합 제거 성능 평가 및 제거율 확보 - 실내복합유해물질의 제거 성능 평가를 통해 유량대비 높은 제거 성능 확보	100

(2) 정량적 연구개발성과

구분	성과목표	달성도	비고
특허	특허출원 1건	특허출원 1건 (100%)	
시제품 제작	시제품 1건	시제품 2건 (200%)	
국내외 논문	SCI 논문 3건	SCI 논문 3건 (100%)	

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

☐ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Real-time monitoring of forward osmosis membrane fouling in wastewater reuse process performed with a deep learning model	Chemosphere	Sung Ju Im	275	영국	Elsevier	SCIE	21. 02. 22	0045-6535	100%
2	An osmotic membrane bioreactor/clarifier system with a deep learning model for simultaneous reduction of salt accumulation and membrane fouling	Chemosphere	Nguyen Duc Viet	272	영국	Elsevier	SCIE	21. 02. 06	0045-6535	100%
3	Development of artificial intelligence-based models for the prediction of filtration performance and membrane fouling in an osmotic membrane bioreactor	Journal of Environmental Chemical Engineering	Nguyen Duc Viet	9	영국	Elsevier	SCIE	21. 12. 30	2213-3437	100%

☐ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명

☐ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식

☐ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호

☐ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

☐ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	실내오염 제거장치	대한민국	장암	20. 11. 04	10-2020- 0146206				100%	자체 활용

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율

☐ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

☐ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

☐ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

○ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	플라즈마 VOC 가스 저감 테스트 장치	2020-08-21	TGT	성균관대학교 자연과학캠퍼스 수리실험동 24109B,C호	VOC가스 저감 테스트 장치	-	-	-
2	미세먼지 저감 테스트 장치	2020-08-21	TGT	성균관대학교 자연과학캠퍼스 수리실험동 24109B,C호	미세먼지 저감 테스트 장치	-	-	-

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)

□ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	

	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
	향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획				
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
	수 출				

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도							
기대 목표							

□ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

□ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

☐ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

☐ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)

☐ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타

☐ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

☐ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

☐ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

☐ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

☐ 연구시설 · 장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설 · 장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설 · 장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

[그 밖의 성과](해당 시 작성)

- 해당없음.

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

- 해당없음.

4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

□ 미세먼지와 VOCs 동시 제거 기술 개발 및 시장성 확대

- 플라즈마 방식은 전기식 방식의 대표적인 방법으로서 방전 전압 및 방식에 따라 글로우 방전, 코로나 방전, 유전체 장벽 방전, 아크 방전 등으로 분류되며 다양한 실내오염 물질에 대해 높은 제거율을 보이며 그 중 유전체 장벽 방전 방식은 국부적으로 파동이나 잡음을 발생시키는 불꽃이 존재하지 않는 저소음 방전 방식이며 다른 전극 방전 방식에 비해 상대적으로 적은 전력을 소모하므로 실내공기처리에 적합함.
 - 유전체 장벽 방전 방식은 전압 등의 구동 조건에 따라 발생하는 오존 농도의 조절이 필수적이며 포름알데히드, VOCs와 같은 실내공기 유해물질 제거에 있어 높은 효율을 보이지만, 필터 없이 유전체 장벽 방식 단독으로는 입자성 물질(미세먼지 등)은 제거율이 낮으며, 이에 대한 연구가 부족한 실정이었음.
 - 입자성 물질 뿐 아니라 가스상 물질의 동시 제거 및 분해가 가능한 시스템 개발을 통해 본 연구에서 제시한 실내 사용이 가능한 콤팩트한 오염물질 저감 시스템 구축 뿐만 아니라 차량용 미세먼지 및 VOCs 배출 저감 장비 등 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 사료됨.
 - 특히, 플라즈마 시장은 최근 감염병 이슈 뿐만 아니라, 실내유해물질에 대한 관심도의 증가에 따라 ‘공기 청정 및 살균’시장으로 확대되고 있음. 따라서 본 기술은 현재 실내 유해물질, 감염병 이슈 등을 동시에 해결할 수 있는 기술로서 사용될 수 있음.
 - 본 연구에서 제안하는 다공성 세라믹 유전체 장벽 플라즈마 장비는 필터를 교체할 필요 없는 기술일 뿐 아니라 실내유해물질과 미세먼지를 동시에 효과적으로 제거할 수 있는 방안으로서 활용될 수 있을 것으로 사료됨.
-

5. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

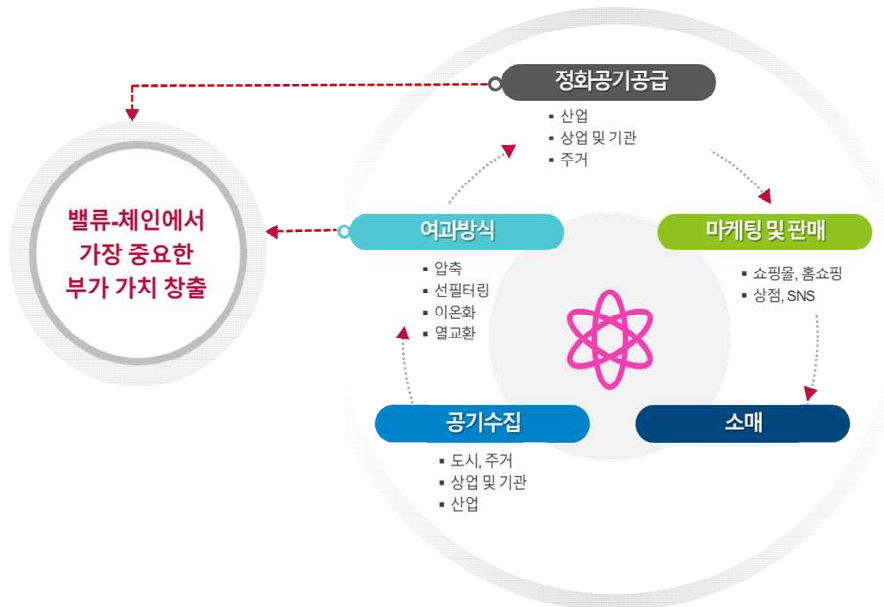


그림 48. 공기정화시스템 시장의 가치사슬(Value-chain)

- 미세먼지를 포함한 환경분야 산업은 환경정책과 규제 등의 시장 외적 요소에 의해 수요가 창출되기 때문에 미세먼지 저감·관리 방법과 관련된 소재기술 뿐 아니라 감지·측정 시스템으로 구성되어 기계, 전자, 화학 분야를 포함하는 종합적인 사업으로 기술집약적인 고부가가치로 평가됨.
- 관련 산업으로 제조업, 저감 및 제거 서비스업, 빅데이터 수집, 분석, 모니터링 서비스업 등이 있으며 공기청정기, 가습기, 마스크 사업 등이 지속적으로 성장하고 있으며, 사용자의 편의성을 높이기 위해 지능화, 복합화 되고 있음.
- 후방산업은 미세먼지 처리 소재 제조업, 검출을 위한 센서 산업 등이 있으며, 전방산업으로는 저감 공정 설계를 포함한 시설 건설 산업 등이 있음.

○ 기대효과: 기술적 측면

- 다공성 세라믹 유전체를 이용한 장벽 방전 시스템의 원천 기술 개발은 입자성 물질인 미세먼지를 통과시켜 초미세먼지 크기까지 제거하고 단순 세척·건조를 통해 필터의 잦은 교체 없이 반영구적인 사용이 가능한 정화 기술.
- 입자성 물질 제거에 사용된 다공성 세라믹을 장벽 방전 플라즈마 유전체로 활용함으로써 입자성 물질과 실내공기 유해물질의 동시 제거가 가능하기 때문에 기존의 실내 공기질 개선을 위한 정화기술들과 비교해서 복합적으로 오염된 실내 공기의 연속적인 정화가 가능.
- 유전체 장벽 방전 기술 활용은 실내공기 유해 물질의 포집 및 분해 효율을 높여 기존 공기 필터를 이용한 정화기술에 비해 미세먼지의 99% 이상 제거와 실내공기 유해물질의 70% 이상 분해가 가능.

○ 기대효과: 경제적·산업적 측면

- 실내 미세먼지 99%, 공기 유해물질 70% 이상 제거할 수 있는 다공성 세라믹 유전체 장벽 플라즈마 기반 기술은 가정용 공기청정기와 빌딩 공기질 개선 시스템 뿐만 아니라 규모 확장을 통해 산업체 내부 공기질 개선에도 적용될 수 있을 것으로 기대.
- 실내공기질 개선을 위한 다공성세라믹 유전체 장벽 플라즈마 기반 공기청정기의 원천기술 확보를 통한 기기의 수입대체 효과 유발.
- 기존 필터 및 실내유해물질 제거 시설 대비 소모 전력 감소 및 유지관리 비용 절감 효과
- 획기적인 실내 미세먼지 및 공기 유해물질 제거 기술 선점을 통해 우리나라를 비롯하여 해외 각국으로(특히, 아시아 또는 중동지역) 기술이전 및 사업화가 가능할 것으로 예상.
- 분해물산물을 無배출하여 친환경적 실내 공기질 개선 기술을 확보하고 IoT 기술과 접목함으로써 미래 스마트 도시 관련 분야에 경쟁력 및 신시장 확보와, 연관 산업체의 성장을 통한 전문 인력 확보 및 신규 일자리의 창출 효과 기대
- 건설사 및 지자체 등 대규모 인프라 구축사업 및 실내 인테리어 산업 등에 이용이 기대

○ 기대효과: 사회적 측면

- 다공성 세라믹 유전체 장벽 플라즈마 기술은 기존 공기청정기의 폐필터 발생으로 인한 폐기물 발생을 원천적으로 차단하여 사회-환경적 측면의 개선 효과가 기대.
- 또한, 실내 공기질 개선 미래 기술 확보를 통한 그린 인프라 구축 분야의 국가경쟁력 강화하고 국민 건강 증진 및 실내공기 유해물질과 미세 먼지에 대한 국민적 우려를 긍정적으로 전환 가능.
- 실내 공기질 개선 및 미세먼지 저감 관련 인적 교류를 통한 네트워크 구축

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘생활공간 내 복합 실내공기 오염물질 정화를 위한 다공성 세라믹 유전체 장벽 방전 시스템 개발’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.