

16CTAP
-C0780
32-03

국
토
교
통
기
술
촉
진
연
구
사
업

최
종
보
고
서

2017

국토
교통
과
학기
술진
흥원

Development of eco-purification technology to remove PM2.5 and reduce SBS(Sick Building Syndrome) R&D Report

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()
국토교통기술촉진연구사업 제3차 연도 최종보고서

R&D / 16CTAP-C078032-03

초미세먼지(PM2.5)제거 및 SBS(Sick
Building Syndrome)완화를 위한
Eco-Purification 기술개발
최종보고서

2017. 08. 16.

주관연구기관 / 인천대학교산학협력단
협동연구기관 / 한국건설기술연구원
(주)플러스파운틴

국토교통부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'초미세먼지(PM2.5) 제거 및 SBS(sick Building Syndrome)완화를 위한 Eco-Purification기술 개발'(연구개발 기간: 2014.07.18 ~ 2017.07.17) 과제의 최종보고서 6부를 제출합니다.

주관연구기관명 : 인천대학교 산학협력단 (대표자) 김 영 관 (인)
협동연구기관명 : 한국건설기술연구원 (대표자) 이 태 식 (인)
참여기관명 : 플러스파운틴(주) (대표자) 김 우 진 (인)



주관연구기관책임자: 이 희 관
협동연구기관책임자: 안 호 상
참여기관책임자: 한 상 훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	16CTAP-C07803 2-03	해당 단계 연구 기간	2017.07.18- 2017.07.17	단계구분	3/3
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	초미세먼지(PM2.5) 제거 및 SBS(sick Building Syndrome)완화를 위한 Eco-Purification기술개발			
	세부과제명	건물공간내 오염원별 맞춤형 제거기술 개발			
연구책임자	이희관	해당단계 참여 연구원 수	총: 22명 내부: 22명 외부: 0명	해당단계 연구개발비	정부: 300천원 기업: 100천원 정부 외: 천원 계: 400천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 35명 내부: 35명 외부: 0명	총 연구개발비	정부: 900천원 기업: 300천원 정부 외: 천원 계:1,200천원
연구기관명 및 소속 부서명	인천대학교 산학협력단			참여기업명	플러스파운틴(주), 한국건설기술연구원
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
- 현재 상용화되어 있는 실내공기청정기는 대부분 송형공간을 대상으로 있어, 다중이용시설과 같이 중규모 이상 대형공간에서의 실내공기오염제어는 기술적 제한이 따르며 이를 극복하기 위한 다중이용시설용 실내공기청정 기술 및 장치 개발 - 1차 청정효과를 나타내는 식물모듈과 2차 청정효과를 나타내는 광물모듈로 구성되며, 최근 사회이슈가 되는 대기 중 미세먼지, 특히 다중이용시설 내 실내환경에서의 미세먼지 제거에 매우 효과적 - 더욱이 실내공기와 접하는 ECOPS 전면이 식물벽으로 구성되어 있어 실내환경 및 재실자 또는 시설 이용객들에게 심리적인 안정감 증대 - 본 연구개발을 통해 초미세먼지 저감과 SBS(Sick Building Syndrome) 완화를 위한 기술개발로 인한 시제품을 개발하여 다중이용시설내에 적용/실증실험을 진행 중에 있으며 지속적인 연계 사업을 통해 다양한 다중이용시설내에 적용을 기대할 수 있다.				보고서 면수 132page	

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	□ 미세수분, 식물근부/근부미생물의 생물·화학적 공기정화기술과 광물질, 바이오 필터모듈을 통한 생물·물리학적 친환경 공기정화 요소기술개발 □ 건축물 내 친환경 실내공기 오염저감 및 실내공기질 개선을 위한 요소기술 융복합 Eco Purification 기술개발 및 Chamber실험을 통한 기능 정량화 □ 대상지/대상처별 오염물질의 발생 및 공기순환 차이점을 고려한 Eco Purification 실내 공기질 개선 System 개발 및 모니터링/ 제어시스템 연동을 통한 설계기법 도출 □ 미세수분, 식물근부 및 근부 미생물 등을 활용한 자연형 공기정화 요소기술 개발 □ 가스상 오염물질 제거를 위한 맞춤형 필터, 광물섬유필터를 기반으로한 중금속, 초미세먼지 입자상 제거필터 등 친환경 필터 요소기술 개발 □ 각각의 요소기술의 정화순서 정의 및 대상오염물질에 대응 가능한 Eco Purification 설계인자 도출(미세먼지 → 미세수분, SBS유발물질(VOCs등) → 미생물필터, 공기질 개선 → 식물정화 등) □ Chamber 실험구 및 유사환경실험(Test-Bed)을 통한 Eco Purification 요소기술의 검증 및 조합방법도출 □ 주거시설 및 공공이용시설 등 대상처별 오염물질의 순환구조와 거실, 부엌 등 대상지별 거주자의 이용패턴에 따라 발생하는 오염물질을 고려한 실내공기질 개선기술 개발 및 모니터링·제어기술을 통합한 Eco Purification System 설계기법 개발				
연구개발성과	□ 건축물 내 초미세먼지(PM2.5) 및 SBS(Sick Building Syndrome) 원인물질 저감을 통한 실내공기정화 Eco Purification 기술 □ 미세수분, 식물근부 및 근부 미생물 등을 활용한 자연형 공기정화 요소기술과 IAQ오염물질의 종류에 따른 맞춤형 광물, 미생물필터 모듈 및 제작기술 □ 대상처 및 대상지별로 최적화된 친환경공기순환 최적화기법 및 모니터링/ 제어기술을 통합한 Eco Purification System 설계기법 개발				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	□ 기술의 활용방안으로는 주거공간 내 건축물 자체의 오염원 뿐 아니라 주거활동으로 인해 발생하는 다양한 공기오염원에 대한 제거 및 공기질 개선에 있어 기존의 실내공기 총량적 범주에서의 대류 및 순환에 의한 실내공기의 제어 방식이 아닌 보다 적극적인 실내공기 오염원의 제거측면에서 기술의 활용이 가능할 것으로 예상되며 식물의 활용을 통한 실내 경관성 향상과 더불어 공기질 개선이라는 두 가지 측면에서 다양한 활용이 가능할 것으로 예상됨 □ 기술의 활용대상으로서는 모니터링·제어기술의 융복합화를 통한 Eco Purification System의 설계기법 개발을 통해 본 과제의 대상지인 주거지역 내 주방·부엌·방·거실 등 오염원발생 대상지별 오염원발생에 따른 공기질개선 시스템의 적용 뿐 아니라 공공기관, 교육시설, 의료시설, 공항 및 터미널, 집단업무시설, 대형상업공간 등 다양한 대상처에 대한 Eco Purification System의 적용 제안이 가능함				
핵심어 (5개 이내)	자연친화적 정화	미생물 필터시스템	실내공기질	스마트환기	새집증후군

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	☐ Develop the environmental friendly bio-physio air cleaning technology by introducing plant roots, minerals, moisture, etc. ☐ Enhance the air filter capability for reducing the air pollution and improving the air quality of the indoor spaces by developing the eco-purification technology and validate the performance via Chamber experiment. ☐ Develop the eco-purification system applicable for cleaning the indoor air pollutants for different location and sources. ☐ Develop the environmental friendly and natural air purification technology using micro-organism/moisture, bio-plant roots while the micro-organism helps to reduce the VOCs whereas the plants root with moisture so called as bio-filters absorb the VOCs, CO2 and also block the particulate matters. ☐ Mineral filters are designed technically for filtering the fine to coarse particulate matters whereas the EM plays the additive role for absorbing the gaseous pollutants, especially VOCs. ☐ Both the filters are integrated as one single unit to enhance the filtering efficiency of air pollutants covering both the particulates and gaseous pollutants. ☐ The system will be stand alone type while in-situ performance is tested by designing the special experimental chamber.				
Results	☐ Reviewed natural air purification technology using micro organisms/moisture and bio-filters. ☐ Developed the Eco-purification technology integrated with bio-filter and mineral filter for removing the ultra dust (PM2.5) and Sick Building Syndrome (SBS) causing substances. ☐ The system was reasonably applicable for filtering the PM2.5, PM10, VOCs of the indoor spaces.				
Expected Contribution	☐ Natural environmental friendly air purification technology will be developed for filtering the particulate and gaseous pollutants of the indoor spaces. ☐ The optimized technology will be applicable for improving the air quality and maintaining the comfort of the indoor spaces. ☐ Further, the technology will be helpful to catch the public perception regarding the health, nature and satisfaction as public are aware about the indoor air quality mostly in the urban life.				
Keywords	Eco purification	Micro organism filter system	Indoor air quality	Smart ventilation	Sick building syndrome

< **Table of Contents** >

1. Introduction of Research and Development Project	1
2. Current Trend of Technology in Korea and Other countries	6
3. Research Performances and Achievements	18
4. Accomplishment of Objectives and Contribution to Related Field	119
5. Application of Research Results and Performance	121
6. Collection of International Science and Technology Information	123
7. Disclosure Agreement about Research and Development	124
8. Registration of Research Facilities and Equipment to National Science and Technology Information system	125
9. Research Laboratory and Facilities Safety Procedures	126
10. Representative Research Achievement and Performance	128
11. Other Information	129
12. Reference	130

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	6
3. 연구 수행 내용 및 성과	18
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	123
5. 연구개발성과의 활용 계획	125
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	127
7. 연구개발성과의 보안등급	128
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	129
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	130
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	132
11. 기타 사항	133
12. 참고 문헌	134

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 국토교통기술촉진사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

제1장. 연구개발과제의 개요

1절. 연구개발 목적

- 최근 실내 공기의 질은 냉난방 에너지절감을 위해 건축물 밀폐화에 따라 일상생활에서 발생하는 미세먼지와 건축자재에서 발생하는 다양한 유해 가스 상 물질로 인해 악화되고 있는 실정이며, 이러한 오염을 저감하기 위한 방법으로 창문을 통한 환기가 대부분이나, 도시 내 대기는 중국발 황사와 화석연료의 과다 사용으로 인한 공기오염과 미세먼지 발생에 따른 우려의 목소리가 커지고 있어, 자연 환기를 통한 실내공기질 개선이 어려운 실정임.
- 이러한 도시 내 공기오염으로 인해 최근 실내공기 정화를 위한 방법으로 공기청정기 또는 기계적 환기시설을 활용하고 있으나, 시설 설치초기 고비용이 소요되거나, 유지관리비로 인한 주기적인 관리의 부족 또는 환기시설 자체의 오염 등으로 인해 오염물질 제거의 기능을 수행하지 못하거나, 새로운 오염물질을 발생시켜 공기질을 오히려 악화시키는 경우가 많음. 또한 공기청정기 등의 소형 가전제품을 활용할 경우 일시적인 오염물질의 저감 효과는 있으나, 지속적인 환경개선 효과는 미비한 실정임.

업체명 (브랜드명)		LG 전자	삼성 전자	위닉스	코마홀딩스 (샤 오미)	쿠쿠전자
모델명		AS111 VAS 주1	AX40K 3020GWD	AEH421W- W9	AC-M2-AA	CAC- B1210FW 주2
제품사진						
성 능	표준사용면 적(미세먼지 제거능력) [㎡] 주3	36.4	39.9	41.2	36.4	41.1
	탈취효율 주 4	★★★★	★★★★	★★★★	★★	★★
	유해가스 제 거효율 주5	★★	★★★★	★★	★★★★	★★★★
	소음	★★★★	★★★★	★★	★	★★

그림 1. 시중 공기청정기 시험-평가 결과표

- 이에 대한 해결책으로, 최근 공기정화에 효과적인 식물들을 활용하여 실내공기질을 개선하기 위한 노력들이 이루어지고 있으며 식물의 종류, 재배를 위한 배지, 수분공급장치에 따라 이산화탄소 등의 기체물질 흡수 및 미세먼지와 같은 고체물질의 흡착 등 실내공기질 개선에 효과를 보이는 것으로 보고되고 있음. 그러나 그 기능적 효과는 기존 기계적 환기방식에 비해 미비하며, 정량적이지 못한 단점을 갖고 있으며 대부분 식물의 존치만으로 실내공기질을 정화하고자 하고 있어 그 정량적인 기능의 규명과 이에 대한 활용이 필요함

-
- 이러한 식물의 공기개선 기능은 크게 식물자체의 이산화탄소 흡수 및 산소공급기능과 식물의 잎 및 근부의 VOCs나 포름알데히드와 같은 기체상의 오염물질을 흡수 및 유기물의 영양원으로서 흡수기능이 있으며 본 과제에서는 이러한 식물의 근부와 토양에 공생하고 있는 다양한 형태의 미생물의 기능을 검증하고 이에 대한 효율성을 극대화 할 수 있는 방안을 연구하여 보다 효율적인 식물의 실내오염물에 대한 저감기능을 개발하고자 함.
 - 또한 미세수분을 이용하여 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5)와 같은 입자상물질을 흡착하고 이를 식물이 활용 가능하도록 함으로써 미세수분을 이용한 관수와 오염물질의 식물체 흡수를 통한 처리에 대해서도 함께 개발하고자 함.
 - 이와 더불어 기존 하수처리시설, 하수구 등에서 발생하는 악취제거용 EM기반의 바이오필터를 근간으로 하여 실내공기내 포름알데히드, 자일렌, 벤젠, 톨루엔 등의 유해 가스상 물질을 이차적으로 제거하여 공기의 오염물질의 제거효율을 극대화 하고자 함.
 - 가스상 오염물질 이외에, 식물체내에서 미처 처리되지 못한 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5) 등의 입자상 물질은 광물필터를 통해 제거하여 이중처리를 통한 오염물 제거의 효율성을 증대하고자 함. 즉 일차적으로 식물 뿌리에 공급되는 미세수분에서 입자상 오염물질을 제거하며, 물속 또는 흡입되는 공기 속에 걸러지지 못한 입자상 오염물질을 일라이트 기반의 광물필터를 활용하여 제거하고자 함.
 - 생육 시에 나타날 수 있는 병원균의 증식과 곰팡이류의 번식을 억제하기 위하여 EM균을 배지에 살포하여 이상의 문제점을 해결할 수 있는지도 같이 검사할 것임. 식물 재배의 실제적인 환경에서는 검정비닐로 생육배지를 감싸서 태양광이 투과되지 않기 때문에 곰팡이의 증식이 상당히 저하되고 있고 양액을 식물에 공급할 시에는 양액이 흐르는 상태로 공급이 되기 때문에 이 두가기의 조건에서는 곰팡이류의 생육은 미비함.
 - 또한 EM균을 이용한 미생물 억제는 많은 연구를 통해서 알려져 왔지만 식물생육에 직접 EM균을 사용하는 예는 아직 연구되어 있지 않다. 하지만 하수구의 악취제거나 축산물 생산에 있어서 EM균의 이용은 이제 보편적인 기술로 알려져 있는데 이번 프로젝트에는 EM균을 첨가한 재배배지를 실험하여 공기중 악취나 병원균의 증식 등을 알아볼 것임.
 - 동시에 양육배지와 EM균의 상호작용과 양액의 조성비 변화에 대해서도 조사 하고자 함
 - 이러한 요소기술들은 chamber실험을 통해 오염원 및 오염조건 별 능력치를 정량화 하여 오염원에 최적화된 융복합 Eco Purification기술로 발전시킬 예정임
 - 마지막으로, 주거공간 내 거실·부엌·방 등 적용대상지별 주된 오염원을 유형화 하여 대 상공간의 크기별, 오염물질 발생원별 공기흐름, 오염물질 종류의 차이점을 CFD 기반의 시뮬레이션, 모형실험을 통해 검증하여 Eco Purification 기술을 적용 설계기법을 개발·제안하고자 하며 차 후 주거 공간 뿐 아니라 공공이용시설에도 활용가능 한 Eco Purification system으로 발전시키고자 하며, 이에 따른 본 연구의 최종 개발 목표는 다음과 같음.
-

- 미세수분, 식물근부/근부미생물의 생물·화학적 공기정화기술과 광물질, 바이오필터모듈을 통한 생물·물리학적 "친환경 공기정화 요소기술개발"
- 건축물 내 친환경 실내공기 오염저감 및 실내공기질 개선을 위한 요소기술 "융복합 Eco Purification 기술개발" 및 "Chamber실험을 통한 기능 정량화"
- 대상지/대상처별 오염물질의 발생 및 공기순환 차이점을 고려한 "Eco-Purification System 개발" 및 모니터링/제어시스템 연동을 통한 "대상지/대상처별 설계기법도출"

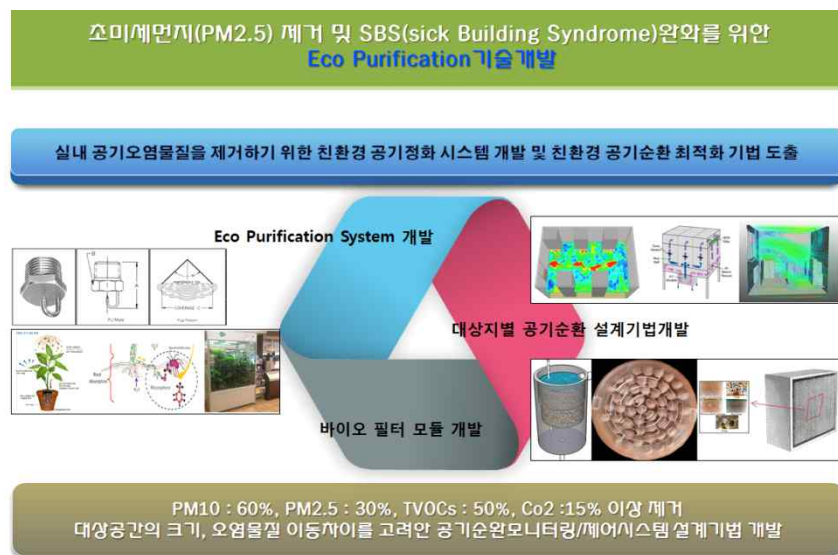


그림 2. 최종목표 및 연구내용 요약

2절. 연구개발의 필요성

- 현대인들은 보통 하루 일과의 80~90%이상을 실내에서 생활함으로써 실내 환경오염이 건강에 미치는 영향은 매우 크며, 실내에서 공기오염이 발생할 경우 이에 대한 대처방안은 사실상 전무한 상황임. 또한 각종 산업분야에서 에너지 절감 및 효율을 높이기 위해 실내공간이 더욱 밀폐화되고 복합 화합물질로 구성된 건축자재의 사용이 증가함에 따라 “SBS(Sick Building Syndrome)” 및 건물 실내 환기부족으로 오염물질이 실내에 머물거나 떠돌아다니며 VOCs 등 여러 오염물질의 위험에 노출되어 있어 실내 공기질 문제가 심각한 실정임.
- 공기오염의 새로운 주범인 미세먼지의 경우 호흡기질환 및 심혈관계질환 뿐 아니라 노인 사망률 증가, 임산부의 사산 및 저체중 태아출산증가 등 매우 위험한 오염물질로 대두되고 있음. 그 기준을 살펴보면 TSP(Total Suspended Particulate), PM10(공기역학직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지), PM2.5(공기역학직경 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지)로 점점 그 기준이 강화되고 있으며 미국의 경우 24시간기준 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기준을 적용하여 적극적으로 대기 중 미세먼지의 농도를 관리하고 있으나 국내의 경우 2015년 시행예정으로 24시간 평균 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기준을 적용하고 있어 보다 적극적인 대응방안이 요구됨.
- 또한 정부에서는 실내공기질 관리와 관련하여 2003년 ‘다중이용시설 등의 실내공기질 관리법’의 개정을 통해 실내공기질 관리를 위한 법적 기틀을 마련하였고, 최근에는 실내공기질 관리를 위한 중장기 종합계획(2009~2013)으로 실내공기질 관리 기본계획을 수립하여 관리오염 대상물질을 10가지 항목으로 규정하였고, 적용대상을 지하역사, 지하상가, 의료기관 등을 포함한 17개 시설군으로 확대하여 적용하고 있으나 주거환경개선 분야에 있어 주거지역 내 실내공기질 개선을 위한 대책마련은 아직 적용대상에 포함되지 못하고 있음.
- 서울시의 경우 2014년 현재 약 $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 미세먼지가 관측되어 기존 수준의 약 4배 농도를 보이는 것으로 나타나 매우 심각한 상황이며, 이에 따라 실내에 유입되는 미세먼지의 양 또한 매우 증가할 것으로 보여 외부공기의 실내 유입 및 건축물 내 실내공기 오염원 처리에 대한 대비책 마련이 시급함. 더욱이 많은 선행 연구들에 의하면 일반대기 중의 오염물질이 건물환기나 침기/누기에 의해 건물 내로 유입되며 이로 인한 실내공기오염 부하가 가중되는 것으로 보고됨. 특히 개별 주거공간의 경우에는 이에 대한 추가의 제어방안이 마련되지 않은 경우가 대부분이며 그로 인해 거주인에게 악영향을 나타내게 됨.
- 자동차 배기가스, 난방연료 사용에 따른 대기오염과 질병 발생률 증가, 더욱 높은 생활환경 수준을 추구하는 요구에 힘입어 실내공기 정화시장의 규모가 나날이 증가하는 추세이며, 중국의 실내공기정화 시장의 경우 2006~2012년 27%이상 성장속도를 보였으며, 2011~2015년은 30%의 고속 성장률을 유지할 것으로 예상됨(중국환경센터). 또한, 국내에서는 중국에서 날아드는 미세먼지 등이 이슈화 되어 실내공기에 관심이 증대되고 있으며, 2015년 PM2.5 수준의 기준이 제시될 예정으로 공공장소 및 개인 주거지의 실내공기정화 설비 시장이 증대 될 것으로 예측됨.

- 실내공기 오염물질 제어기술은 필터 등에 따른 여과방식, 활성탄·제올라이트·실리카겔 등을 포함한 흡착방식, 광촉매에 의한 산화방식, 유전영동 및 정전기력을 이용한 먼지제어 방식 등이 활용되고 있으나, 본 과제기술의 특성은 자연에서 이루어지는 정화작용을 활용하여 실내에 적용함으로써 미세먼지 등의 실내오염물질 제거와 더불어 이산화탄소 저감 및 산소공급, 음이온 발생, 수분조절 등 실내공기의 질을 보다 높여 쾌적한 공기를 느낄 수 있도록 하는데 있음.

3. 연구개발 범위

- 미세수분, 식물근부 및 근부 미생물 등을 활용한 자연형 공기정화 요소기술 개발
- 가스상 오염물질 제거를 위한 맞춤형 필터, 광물섬유필터를 기반으로 한 중금속, 초미세먼지 입자상 제거필터 등 친환경 필터 요소기술 개발
- 각각의 요소기술의 정화순서 정의 및 대상오염물질에 대응 가능한 Eco Purification 설계 인자 도출(미세먼지 → 미세수분, SBS유발물질(VOCs등) → 미생물필터, 공기질 개선 → 식물정화 등)



그림 3. ECOPS 정화공정

- Chamber 실험구 및 유사환경실험(Test Bed)을 통한 Eco Purification 요소기술의 검증 및 조합방법도출
- 주거시설 및 공공이용시설 등 대상처별 오염물질의 순환구조와 거실, 부엌 등 대상지별 거주자의 이용패턴에 따라 발생하는 오염물질을 고려한 실내공기질 개선기술 개발 및 모니터링·제어기술을 통합한 Eco Purification system 설계기법 개발

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1절. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

가. 국가 연구개발사업 유사연구 실적

부처명	사업명	과제명	예산	비 고
환경부	차세대 핵심환경 기술개발사업	□ 식물을 이용한 실내환경 개선 시스템 개발 - 식물의 정화능력에 기인하여 식물의 생육 및 정화능력에 영향을 주는 인자들을 분석 - 실내환경 개선을 위한 요소로 식물만을 고려	4.65	2004 ~2006
	차세대 핵심환경 기술개발사업	□ 실내공기자연정화를 위한 phyto-planting system 개발 - 실내 휘발성오염원 및 생활오염원 제거를 위해 식물, 토양배지, 토양미생물을 이용한 화분형 시스템 개발 - 시스템의 구조상 이용이 제한적이며 일정 면적 이상의 넓은 공간에 활용하기에는 한계가 있음	7.02	2005 ~2008
		□ 먼지.유해가스 (NOx) 동시처리용 다기능성 세라믹필터 제조 및 열화특성 - 먼지와 유해가스를 동시에 처리하는 세라믹필터라는 측면에서 유사점을 보이나, 섬유필터가 아닌 세라믹필터라는 점에서 차이점을 보임. - 가스상과 먼지 동시제거 라는 측면에서 부합하나, 세라믹 필터의 제조 및 특성 파악이 목적이며, 적용하여 제거하는 연구가 없음	-	2001~ 2002
농림부	국책기술개발	□ 대형건물 내 실내환경조절용 bio-filtration 시스템을 활용한 에너지효율 빌딩구축(식물의 Bio-filtration 기능 극대화 기술개발) - 대형건물 내 실내환경 조절을 위해 식물, 배양토, 미생물 등의 개별 단위들이 Bio filtration의 성능에 미치는 효과 구명 - 배양토 처리에 따른 처리효율 비교, 중금속 흡착이 가능한 일라이트 광물토 사용 - 미생물 처리기반으로 유기물 함량에 따른 차이점 비교, 가스상별 미생물의 차별화 시도가 아님 - 대형건물에만 국한된 적용방식	7.0	2012~ 2015
	농업기술공동 연구	□ 새집증후군 해소를 위한 식물의 기능성 탐색 및 이용기술 개발 - 휘발성유기화합물에 의해 발생하는 새집증후군을 완화시키는 실내 식물종 선정 및 적정투입량 산출에 대해 연구	3.1	2005~ 2007
한국환 경산업 기술원	일반사업	□ VOCs 저감을 위한 고효율 복합 바이오필터 기술과 인지서킷 기반의 관리기술(미생물 소재 필터 공적 최적화를 위한 입자성(유적, 분진) 물질 90% 이상 제거기술 개발	0.6	2012~ 2014

		- 특정 바이오필터 활용, 효율극대화를 위한 전처리 공정의 검토 및 공정구성으로 접근 - 최적의 공정 설계입자 도출 - 세정스크러머 방식 활용 - 촉매산화세정수 제조장치 도입 - 대상물질에 따른 미생물필터의 다변화 측면에서 차별성. - 전처리 공정이 아닌 흡입라인의 구조적 설계 및 기계적 ventilation 부착을 통한 효율의 극대화 추구하는 방향에서 차별화		
중소 기업청	중소기업기술 혁신개발	☐ 일라이트 컴포지트 제조 및 응용기술 개발 - pp에 일라이트 점토광물을 활용하여 고기능성 소재를 생산하기 위한 기술 개발에 관한 연구임 - 본 과제에서 활용코자 하는 일라이트 점토광물의 미생물 생육 필터의 지지체로 활용 시 활용 가능한 기술로 사료됨 - 현재 활용처의 의복쪽으로부터 한정되어 있으므로, 공기정화용 필터로의 활용 시 기술의 활용 측면에서 도움이 되리라 사료됨	2.44	2009~ 2011
		☐ 이오나이저와 전기장이 적용된 활성탄소섬유 필터를 이용한 기상부유균 및 미세입자 제거연구 - 활성탄섬유에 이오나이저와 전기장 시스템을 결합한 미세입자 집진연구로 - 부유세균과 입자상 물질을 제거한다는 측면에서, 본 과제에서 접근중인 가스상 물질과 입자상 물질의 제거라는 연구방향에서 차별성을 가짐 - 이오나이저와 전기장의 도움으로 필터의 효율화를 꾀하는 측면이 본과제의 접근법인 흡입구설계, 맞춤형 미생물 및 중금속 흡착가능 일라이트 점토광물 활용 필터라는 측면에서 차별성을 이룸	-	2009~ 2010
	산학연공동 기술개발	☐ 실내공기청정을 위한 지능형 임베디드 모니터링 및 제어시스템(IMCS) 개발 - 실내공기청정을 위한 지능형 임베디드 모니터링 및 제어 시스템 IMCS 개발이 목표임 - CO2, VOCs, NO2, 미세먼지, 온습도 측정이라는 측면에서 유사성을 가짐 - 대형건물에만 국한된 적용방식 - 대기센서모듈을 활용하여 실내공기질 (발암성 VOC, 포름알데히드, 초미세먼지)에 특화된 센서와 감지대상 VOC에서 차이점을 보임 - 단순 공조효율의 증대를 위해 제어시스템을 활용한 점에서 차이점을 보임	0.52	2009~ 2010
미래	첨단융합기술	☐ 실내공간 에코청정화 원천기술개발(IT를 접합	5.2	2009~

창조부	개발	한 인지/제어 기능을 탑재한 공기정화 원천기술 개발) - MEMS 기반의 고성능 CO2 센서개발 - 하이퍼 아민계 다공질 흡착제 개발 - NDIR 기반의 기체입자 충돌확률 향상 센서 설계 - 등 요소기술 개발 내용에서 보듯이, 모니터링 센서분야의 기술고도화를 위한 내용이 주된것임 - 실질적인 실내공기질 개선보다는 모니터링 전자 시스템 개발에 치중된 내용으로 향후 모니터링 기술방면에서 활용가능성은 높다고 사료됨		2014
소방방재청	인적재난안전 기술개발	□ 도시방재를 위한 지하공동구 이상기류 감지 및 환기제어 시스템 개발(기자 공동구 다중센서 기반 스마트 DVC 시스템 개발) - 지하공동구내 열, 기류특성 파악 공기질 대상 인자 설정, 제어수준 설정이라는 개념은 대상이 주거지 포함 실내공간이라는 점에서 유사함 - 대상이 지하공동구라는 측면에서 가장 차이점이 있음 - 일상적인 상황이 아닌 재난상황에서 발생하는 공기질의 변화를 감지한다는 측면에서 대상물질과 목적이 차이점이 있음 - 오염물질의 필터링을 통한 제어라는 개념이 아닌 유동물질의 흐름에 따른 환기의 최적화를 위한 기술개발이라는 점에서 차이점	1.87	2013~2016

(1) 기존 유사연구에 대한 분석

- 현재까지 개발된 실내정원 및 식물적용기술은 재실자의 심리적인 안정감을 유도하는 동시에 식물을 이용한 장식적인 효과를 중심으로 대부분 설치, 제거, 관리되고 있으며, 이에 대한 편의성에 주안점을 두고 연구가 진행되어 왔음
- 관련한 기술개발 역시 식물의 하자발생방지 및 지속적인 관리를 위한 제품의 개발이 주를 이루고 있으며 본 연구에서 다루는 공기정화관련 기술은 아직 본격적으로 연구와 기술개발이 매우 미진한 단계임
- 각종 오염물질을 효과적으로 제거하기 위한 방법으로 식물의 구체적인 부위(뿌리)를 이용하고 활발한 정화기능을 위해 부가요소(토양, 미생물)를 추가적으로 활용하는 기술 개발에 있어 현재 국내에는 특허 및 출원이 미미한 상황임

(2) Stand-alone 공기정화기술

- 기존의 실내정화용 정원조성 및 식물정화기술의 경우에는 환기개념을 도입하지 않은 경우가 많으며 이와 같은 기술적용의 경우 시스템과 실내공기가 접촉할 수 있는 조건이 되지 않아 설계상에서 제시하는 공기정화 기능을 기대하기 어려움
- 최근 연구 또는 현재 진행되고 있는 건물환기시스템과 연계하는 시스템의 경우에는 기존 건물 환기시스템의 수정이 요구되며, 이 경우 전체 환기시스템, 특히 환기분배에 영향을 미칠 수 있어 기술적인 어려움이 수반. 더욱이 이로 인한 설치의 경제적 부담이 야기되어

개발기술의 현장 적용성에 제한요소로 작용

- 본 연구에서 제안하는 기술은 환기기능을 도입하여 기존 유사기술의 성능 상에서의 제한요소를 해소하고, 나아가서는 기존 건물시스템과 독립적인 환기개념을 도입하여 효율향상을 도모하고 그 적용측면의 제한요소도 개선될 것으로 기대
- 식물을 통한 공기정화효과를 극대화시키기 위하여 실내 공기의 순환시스템을 연구하여 일정 공간 안에서 정화된 공기를 가장 효율적으로 순환시키기 위하여 공조 기술을 적용시키고 이를 시스템화 하여 각 대상지에 따라 적용이 가능하도록 통합적인 실내공기정화 시스템을 개발함
- 개발 시스템 적용 시 실내 환경개선을 위하여 설치가 불가피 했던 공기정화기, 산소 발생기, 습도 조절기 등의 시설물을 식물근부, 토양미생물, 미세수분, 광물질/미생물필터 등이 융복합된 하나의 기술로 대체가 가능하며 시설물 설치비용의 감소와 함께 에너지 소비절감 등 부가적인 효과가 창출됨

(3) 식물의 뿌리, 토양, 미생물을 이용한 친환경적 실내공기정화 기술 개발

- 고효율 공기정화를 위하여 기존의 식물의 배치 존치를 통한 실내 공기정화방식에 더하여, 실제적인 공기정화기능을 담당하는 식물의 근부, 배치, 미생물의 기능을 검증하고 정화기능의 효율성을 증대할 수 있는 방안을 재고하여 친환경적인 공기정화 기술을 개발하고자 함.

(4) 식물 생육과 유익 미생물의 생육에 적합한 토양 및 토양대체 배지 개발

- 식물의 근부 및 미생물의 서식공간인 생육 배지에 공기정화 기능을 위한 공기전달이 가능한 물질(암면, 황토, 일라이트 등)과 토양미생물 등을 첨가하여 공기청정 기능과 식물 생육을 동시에 수행할 수 있는 공기정화형 식물생육배지를 개발
- 또한 미세수분노즐을 이용하여 식물생육을 위한 수분 및 양액공급시에 공기를 투과시켜 공기 중에 있는 입자상 유해물질 중 수용성 물질을 제거 하거나 흡착하여 차 후 식물의 양액으로 재이용하는 친환경 미세먼지 제거기술 개발

2절. 국내외 관련 기술 특허 동향

가. 실내 공기정화 기술

현재 이미 개발된 실내공기정화 기술은 공기를 맑게 하는 방식에 따라 크게 3가지 방식으로 분류할 수 있는데 필터식, 전기집진식, 이 두 가지 방식을 혼합한 복합식으로 나눌 수 있음 (채윤정, 2006-03-22, 디지털타임스).

(1) 필터식

- 필터식은 팬을 통해 공기를 끌어 당겨 정화를 하는 형식임
- 기계식 공기장화장치의 필터는 여러 가지인데 그 중 첫 번째 필터는 공기 중의 카본이나 재와 같이 큰 오염물질을 정화하는 것이고, 헤파(HEPA)필터는 그 보다 작은 먼지를 정화하며 냄새제거의 역할도 겸하고 있음
- 장점: 공기 중 오염물질 뿐만 아니라, 탈취 효과도 탁월
- 단점: 2-3년마다 정기적으로 필터 교체 필요, 부대비용 발생

(2) 전기집진식

- 전기집진방식은 오염물질을 모으는 데 다양한 전자적 방법을 사용함
- 공기 중에 떠도는 대부분의 오염물질보다 더 작은 0.001 마이크론의 오염물질도 제거할 수 있음
- 공기 속의 오염 물질을 이온화 해 강력한 집진력을 가진 집진판에 흡착시키는 방식을 사용하며 흡입된 공기 속의 입자들은 고전압에 의해 (+)전하를 띄게 되고 이 (+)전하를 띤 입자들은 각각 (+), (-)로 대전돼 있는 대전판을 지나면서 미세입자가 음극판에 달라붙어 오염물질을 걸러냄
- 장점: 공기 중 오염물질 제거 기능 탁월, 물로 세척 가능, 추가 비용 없음
- 단점: 정기적 관리에 따른 불편함



그림 4. 전기집진식 공기정화방식

나. 식물정화 기술관련 국내 기술현황

- 식물이 가진 실내공기정화기능은 이미 많은 연구를 통해 증명되었으며 실제로 공기정화 관련 특별한 기술이 접목되지 않더라도 실내에 식물을 재배하는 것만으로도 새집증후군 효과를 저감하는 공기정화효과가 증명되고 있음
- 식물의 공기정화효과는 수중에 따라 큰 차이를 보이고 있으나 대체적으로 1㎡의 잎면적이 1분에 흡수하는 유독가스의 양은 일산화탄소 3마이크로리터(1마이크로리터는 1백만

분의 1리터), 이산화탄소 10마이크로리터, 오존 50마이크로리터, 이산화질소 57마이크로리터, 염소 62마이크로리터, 이산화황 85마이크로리터, 불화수소 1백13마이크로리터로 알려져 있음

- 현재 국내 실내 공기정화와 관련된 기술들은 대부분 식물 자체의 정화능력에 의존하고 있으며 실내 벽면녹화 분야에서 공기흐름을 식물로 유도하는 식물 공기정화기술이 개발되고 있음. 그러나 대부분이 식물자체가 지닌 오염물질제거나 산소발생능력 등의 기능적 측면을 고려하지 않고 외형의 유지에 주안점을 두고 있기 때문에 그 쓰임이 극히 제한적이고 장기적으로 부가가치를 창출하기 힘든 실정임
- 또한 국내 실내 공기정화 관련 기술들은 주로 공기청정기, 산소발생기, 습도조절기 등 실내 환기 등 개선을 위한 연구 및 개발이 개별적으로 이루어지고 있어, 식물을 활용한 정화기술까지 통합적으로 해결할 수 있는 친환경 기술의 개발이 시급한 상황임

(1) 도시와 숲 (에코플랜터)

- 식재면을 부직포와 에코플랜터를 이용하여 부식의 가능성이 현저히 낮고, 부직포의 특성상 수분을 널리 전달시키기 때문에 전체적으로 고른 관수가 이루어져 하자 발생률이 적음
- 토양이 들어갈 수 있는 에코플랜터에 식재를 하기 때문에 식물의 건강한 생육이 이루어짐
- 식재의 다양한 디자인이 가능하며, 때에 따라서는 목본류의 수종도 식재가 가능하며, 디자인을 장기간 유지할 수 있음
- 벽면녹화의 이용 적 측면에 초점을 맞춘 기술로, 지속적인 관리가 용이하며 제품하자발생률이 타사제품에 비해 낮다는 장점이 있음
- 하지만 식물의 기능적 측면에 대한 고려의 부재로 식물자체가 가진 능력을 발휘시키기 힘든 구조임

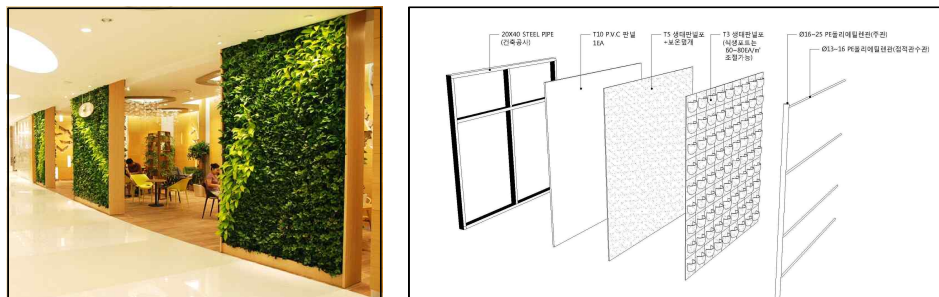


그림 5. 에코플랜터 설치 사례 및 제품 구조 개념도

(2) 그린와이즈 (식물공기청정기)

- 2011년 팬과 인공필터를 이용한 소형모듈형식의 식물공기청정기를 개발함
- 벽면과 플랜터 사이에 공간을 조성하고 팬을 이용하여 공기를 식물로 통과시킴 식물을 통과한 공기는 뿌리와 토양을 거쳐 2차적으로 인공필터를 거치게 되고 오염물질이 제거된 공기는 다시 실내로 방출되어 실내공기를 정화시킴

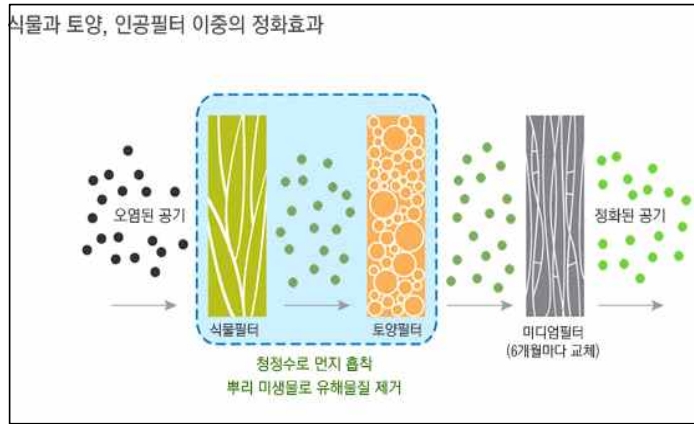


그림 6. 공기청정기 제품 및 정화효과 개념도

- 식물공기정화기능을 갖춘 소형모듈로써 설치 및 관리가 용이하다는 장점이 있음
- 하지만 식물자체의 능력을 최대한으로 발휘시켜 주는 시설환경시스템과의 연계에 대한 연구 부족으로 효과적인 기능 발휘가 힘들
- 따라서 건축물 내부의 총체적인 공기정화에 한계를 보임

다. 식물정화 기술관련 국외 관련기술 현황

- 국외의 식물을 이용한 실내공기정화 기술은 식물자체만을 이용한 방식에서 벗어나 식물이 가지는 능력(오염물질 제거, 산소발생, 습도조절)을 적극 활용한 다기능 제품의 개발이 활발히 진행 중이며, 이를 통해 실내 환경 개선 시 필요한 공기청정기, 산소발생기, 습도조절기 등의 기계장비를 대체할 수 있으며, 이에 따른 경제적 비용의 절감효과를 기대할 수 있음
- 또한 기존 경관개선/공간디자인적 측면의 실내식물을 이용한 플랜트박스나 벽면녹화에 공조기술을 적용시킴으로써, 식물을 하나의 장식요소에서 친환경적 기술의 주요소재로 활용하는 연구경향을 보이고 있으며, 이는 과거의 식물을 활용한 소단위 모듈 개발방식에서 한 단계 진보한 새로운 차원의 실내공기정화방식으로 에너지절감 효과 및 맞춤형 실내 환경 조성이 가능하다는 장점이 있음

(1) LECTUS (levande filter /스웨덴)

- 실내공기정화전문업체로 식물소재와 바이오필터를 이용한 이동식 공기 정화 캐비닛 (Levande Filter)을 개발하여 특정오염물질에 대한 정화기술연구를 지속적으로 진행하고 있음
- 열대우림의 식생을 소형화시켜 이를 특수 제작된 캐비닛 내부에 조성하는 기술로, 다양한 크기의 캐비닛은 실내규모에 관계없이 간편하게 설치 가능함
- 팬을 장착한 공기 정화 캐비닛은 직접 실내의 공기를 흡입하여, 여과재와 미생물로 이루어진 바이오필터를 통해 오염물질을 제거하는 방식으로 실내공기를 정화함

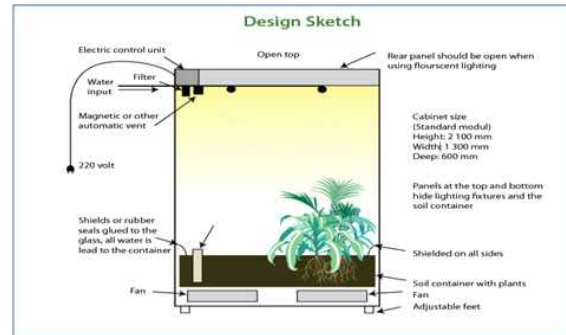


그림 7. Levande Filter 설치 사례 및 제품 개념도

- 스웨덴의 미드대학(Mid University)에서 실시한 연구를 통해 인체에 무해한 제품으로 인정받은 후, 공항부터 유아교육시설에까지 광범위하게 이용되고 있음
- 이동형 캐비넷 형태로 설치 및 관리가 용이하며 식물의 기능적 측면도 강조되어 실제적인 기능 발휘를 기대할 수 있다는 장점이 있음
- 하지만 캐비넷 크기에 한계가 있으며 총체적인 공기정화관리시스템의 부재로 대규모 공간에 적용이 힘들 것으로 예상됨

(2) NEDLAW (Living Wall/ 캐나다)

- 2008년에 창립한 옥상 및 벽면녹화 전문업체로 식물의 뿌리, 미생물, 공조시스템 등을 이용한 친환경기술로 실내공기를 정화시키는 'Living Wall' 기술을 개발
- 기존의 실내공기정화기술이 식물전체를 이용한 비구체적인 방법을 고수해 온 것에 반해, 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있는 식물의 구체적인 부위를 제시하고 이를 적극 활용함
- 공기정화기술의 핵심은 식물의 오염물질 제거 및 공기정화 능력은 잎이 아닌 근권부에 있으며 토양미생물에 의해 정화작용이 활성화 된다는 것을 강조함

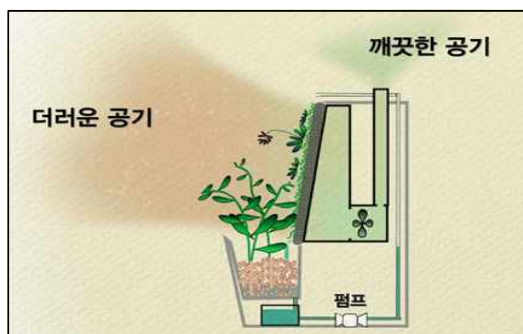


그림 8. Living Wall 설치 사례 및 공기 정화 개념도

- 식물과 토양, 뿌리의 적극적인 이용으로 건축물 내 대규모 공간의 친환경적인 공기정화 관리가 가능하며 공조시스템과의 연계로 식물이 능력을 발휘하는데 최적의 환경을 조성할 수 있다는 장점이 있음

(3) Queen's University, Faculty of Engineering and Applied Science (Bio Wall/ 캐나다)

- 퀸즈대학 내 응용과학대학 건물로 Live Building이라 불리며, 모든 연구실의 공기질 상

태와 온도, 습도 등이 자동시스템화 되어 실시간으로 모니터링 됨

- 실내벽면녹화(Bio Wall)와 대형 팬을 이용하여 신선한 공기를 필요에 따라 이용하는 자동공기순환시스템을 구축함
- 3층 구조의 건축물벽면에 식물을 피복시키고 각층마다 설치된 대형 팬을 통하여 공기 중의 오염물질을 식물벽으로 흡입시켜 이를 통과하게 만듦.
- 식물을 거쳐 정화된 공기는 건축물 내부의 자동공조시스템에 의해 상황에 따라 필요한 곳으로 전달됨

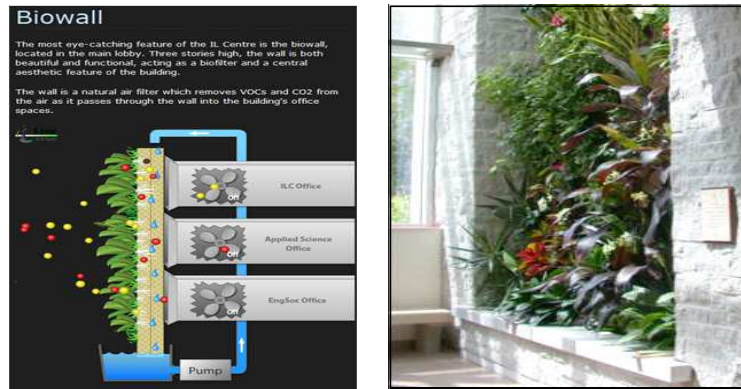


그림 9. Bio Wall 설치 사례 및 공기 정화 개념도

- 건축물내부의 대형 팬은 오염물질의 흡입정도와 각 공간이 필요로 하는 정화된 공기의 양에 따라 가동되기 때문에 필요에 따른 공기정화 정도를 지정할 수 있다는 장점이 있음.
- 하지만 건축물 설계 초기에 도입되지 않으면 시공 상 제약이 발생함

(4) SOM (AMP시스템: Active Modular Phytoremediation 시스템/ 미국)

- 1936년에 창립한 종합건축설계회사로 식물을 이용하여 에너지 절감 및 공기정화 효과를 동시에 창출할 수 있는 AMP시스템을 개발함
- 공기정화식물소재의 활용을 바탕으로 실내의 공기순환에 대한 연구를 통해 공기 정화에 적합한 공조 시스템을 구축함
- 나사(NASA)의 식물뿌리를 이용한 공기정화기술을 바탕으로 한 AMP시스템은 기존 공기정화식물의 공기정화능력을 약 200~300% 향상시켜주는 장점이 있음(Architect, August, 11, 2009)
- 또한 실내난방과 환기에 소모되는 에너지 절감효과로 건축물전체에너지 소모량의 40~50%가량을 감소시킴(Inside Rensselaer, April, 2, 2010)

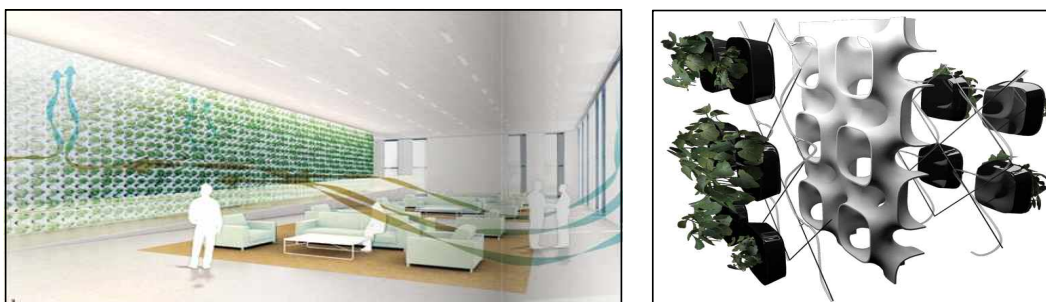


그림 10. AMP시스템 가상이미지 및 제품 가상이미지

- 소형모듈자체의 공기정화기능과 건물 내 실내공간의 총체적인 환기시스템이 연계되어 효

울적인 실내 환경 개선효과를 기대할 수 있다는 장점이 있음

- 모델 개발 후 테스트 중에 있으며 실제적용사례가 없어 지속적인 연구가 필요함

3절. 국내외 시장분석 및 산업동향

구 분		현재의 시장규모 (2014년)	예상 시장규모 (2017년)
세계 시장규모		공기청정기 시장 규모 연간 32억 달러 수준(매년 1320만대)	최대시장인 중국의 경우 지난해 138%의 증가율을 보였으며, 향후 증가될 것으로 예상됨.
국내 시장규모	공기청정기	2013년 : 약 2800억원 2014년 1분기 : 전년도 대비 25% 증가	향후 공기 오염과 실내공기질 개선을 위한 관심증대로 25% 이상 증가할 것으로 예상됨
	실내녹화 ----- ----	국내 대형건축물 로비 및 실내시장에 장식형 녹화시장 약 20억 내외	국내 대형건축물 로비 및 실내시장에 공기정화기능 실내정원 및 벽면녹화 도입 시작
	[산출 근거]	[예시) 대형 건축물등 실내 녹화사업대상지 연간 약 50곳 내외 x 평균조성비 1억원 내외 약 100억 내외 (실내녹화 관련 중소기업체 국내 약 20개사 미만)]	예시) 대형 건축물등 실내 녹화사업대상지 연간 약 200여곳 이상 예상 평균조성비 2~3억 내외 약 400~600억 내외

HS 코드		8421390050				
설명		가정용의 기계 여과기, 공기청정기				
수입국가 현황						
순위	국가	금액(달러)		M/S(%)		증가율(%)
		2008	2009	2006	2007	07/06
1	일본	-	359,451	-	43%	-
2	이탈리아	84,943	190,423	42%	23%	124%
3	중국	52,072	166,617	25%	20%	220%
4	영국	-	56,129	-	7%	-
5	말레이시아	-	28,680	-	3%	-
6	태국	38,722	13,170	19%	2%	-66%
7	미국	898	12,378	0%	1%	1278%
8	이스라엘	-	5,906	-	1%	-
9	인도	-	1,776	-	0%	-
10	스위스	-	936	-	0%	-
	합계	204,404	836,566	100%	100%	309%

자료원 : COMPAS

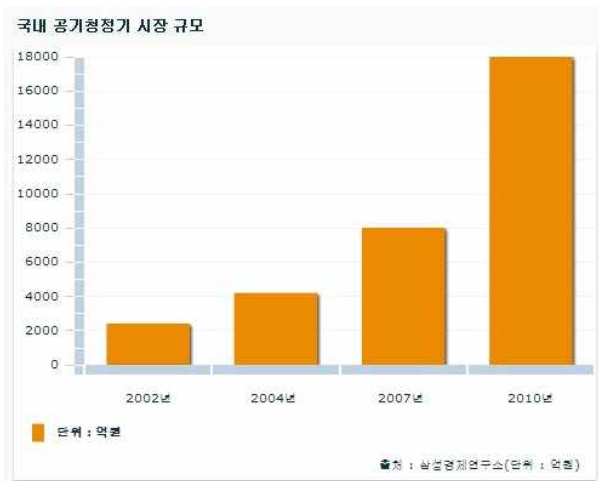


그림 11. 국내외 공기청정기 시장규모

국내 · 외 주요 주요시장 경쟁사

경쟁사명	제품명	판매가격 (천원)	연 판매액 (천원)
① 그린와이즈	식물공기청정기	m2당 400	확인불가
② NEDLAW	Living Wall	m2당 500	확인불가
③ SOM	AMPS	미정	미정

국내·외 지식재산권 현황

지식재산권명	지식재산권출원인	출원국/출원번호
① 식물공기청정기	(주)그린와이즈	한국/제 10-0989705 호
② 벽면형 조경 장치	(주)에코숲길	한국/제 10-0843700호
③ 벽면형 조경 장치 및 제조방법	(주)에코숲길	한국/제 10-0721809호
④ 부직포식재구조	(주)도시와숲	한국/제 10-0901962호
⑤ 장식용 식재장치	유해웅	한국/제 10-0101533호

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1절. Eco-Purification System

가. 식물의 공기정화 관련 문헌조사

- 식물이 가진 실내공기정화기능은 이미 많은 연구를 통해 증명되었으며 실제로 공기정화 관련 특별한 기술이 접목되지 않더라도 실내에 식물을 재배하는 것만으로도 새집증후군 효과를 저감하는 공기정화효과가 증명되고 있음
- 식물의 공기정화효과는 수종에 따라 큰 차이를 보이고 있으나 대체적으로 1m²의 앞면적이 1분에 흡수하는 유독가스의 양은 Co 3 μ l, Co2 10 μ l, O3 50 μ l, No2 57 μ l, Cl 62 μ l, So2 85 μ l, Hf 113 μ l 로 알려져 있음
- 현재 국내 실내 공기정화와 관련된 기술들은 대부분 식물 자체의 정화능력에 의존하고 있으며 실내 벽면녹화 분야에서 공기흐름을 식물로 유도하는 식물 공기정화기술이 개발되고 있음. 그러나 대부분이 식물자체가 지닌 오염물질 제거나 산소발생능력 등의 기능적 측면을 고려하지 않고 외형의 유지에 주안점을 두고 있기 때문에 그 쓰임이 극히 제한적이고 장기적으로 부가가치를 창출하기 힘든 실정임
- 국내실내 공기정화 관련 기술들은 주로 공기청정기, 산소발생기, 습도조절기 등 실내 환기 등 개선을 위한 연구 및 개발이 개별적으로 이루어지고 있어, 식물을 활용한 정화기술까지 통합적으로 해결할 수 있는 친환경 기술의 개발이 시급한 상황임

나. 국내 관련기술 현황

(1) 도시와 숲 (에코플랜터)

- 부직포를 이용하여 식재주머니를 만들어 배지를 채우고 식재를 하는 방식으로 부직포의 특성상 수분을 널리 전달시키기 때문에 전체적으로 고른 관수가 이루어짐
- 벽면녹화의 관상적 측면에 초점을 맞춘 기술로, 지속적인 관리가 용이하나 부직포라는 섬유의 특성상 시간이 지나면 제품의 변형이 발생하여 하자발생률이 높음



그림 12. 에코플랜터 설치 사례 및 제품 구조 개념도

(2) 그린와이즈 (식물공기청정기)

- 팬과 인공필터를 이용한 소형모듈형식의 식물공기청정기로 벽면과 플랜터 사이에 공간을 조성하고 팬을 이용하여 공기를 식물로 통과시킴
- 식물을 통과한 공기는 뿌리와 토양을 거쳐 2차적으로 인공필터를 거치게 되고 오염물질이 제거된 공기는 다시 실내로 방출되어 실내공기를 정화시킴
- 식물공기정화기능을 갖춘 소형모듈로써 설치 및 관리가 용이하다는 장점이 있으나 공기

정화용량이 적어 건축물 내부의 총체적인 공기정화에 한계를 보임

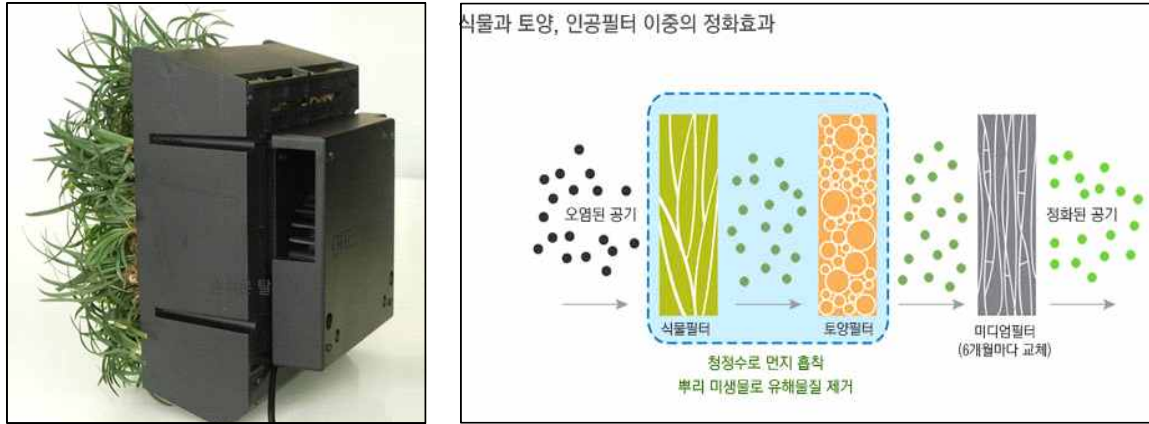


그림 13. 공기청정기 제품 및 정화효과 개념도

(3) 국립원예특작과학원

- 사무실 공기정화용 Bio wall 및 주거공간별 공기정화식물 플랜터 개발
- 공기정화식물 정보를 현장에서 볼 수 있는 스마트폰 앱 및 말하는 화분 개발 등 실내공기 정화 토털시스템을 개발
- 가정과 사무공간을 주 타겟으로 진행하여 공공시설에 총체적인 정화 한계를 보임



그림 14. 정화시스템 구상도 및 공기청정기 제품

표 3-1. 국내 서적 참고문헌

	내용
저자	최정란(디쉬가든 및 분식물의 실내 공기환경 개선효과)
년도	2008. 전북대학교 박사
기기	챔버(재료 : 유리, 스테인레스, 테프론) 포름알데히드 측정 Data Logging System(Z300-Xp, Envieronmental Sensors Co., Boca Raton 현장측정: PM10측정은 E-BAM Mass Monitor.Met Oneinstruments, Inc, USA 음이온측정 :이온 측정기(Itc-201A, AndesElectric co. Japan)
오염물질	챔버 : 포름알데히드 현장적용(전북대 세미나실) : 담배연기
대상식물	천남성과 식물 중 디펜바키아 카밀라(Dieffenbachia camilla) 필도덴드론 셀로움(Philodenderon bipinnatifidum) 에피프렘넘(Epipremnum aureum) 두릅나무과 식물 중 팔손이 나무(Fatsiajaponica) 아이비(Hedera helix)
결과	포름알데히드 제거효과 : 수생분무형> 적습형> 수생형 음이온방출 및 미세먼지제거 효과 : 수생분수형> 슯적습형

	내용
저자	김여정(관엽식물이 실내미세분진 제거에 미치는 영향)
년도	2003. 건국대학교 석사
기기	온도 23도, 습도 60% 조건의 밀폐형 챔버 사용 담배연기로 분진 발생시킨후, TSP(Total suspended particulate)측정은 산란광식 디지털 분진계(microdust pro, cacella cel, USA), paricle counter(GT-521, SIBATA, JAPAN)
오염물질	실내미세분진 중 환경담배연기
대상식물	인도고무나무, 서양담쟁이, 싱고늄, 벤자민고무나무, 파키라
결과	인도고무나무와 벤자민 고무나무 모두 광합성율과 증산량이 분진제거율과 상관성이 높다. 인도고무나무는 습도가 높아도 빠른 분진감소능력이 있다.
저자	송정은(식물을 이용한 실내공기환경 개선효과에 관한 연구)
년도	2006, 한양대 석사
기기	‘인공환경조절실’ 에서 실험 -환기량 : 멀티가스모니터 이용 -VOCs(휘발성 유기화합물) : GC-FID(Gas Chromatography-Flame Ionization Detector) 이용 -포름알데히드 : DNPH-Cartridge를 이용하여 미니펌프로 공기를 30분간 샘플링을 한 후 Acetonitrile용액 5ml로 추출하여 Hplc로(hihg performance liquid chromatography)분석
오염물질	VOCs(톨루엔, 포름알데히드, 벤젠, 에틸벤젠, 자일렌, 스틸렌), 포름알데히드, 환기량
대상식물	벤자민 고무나무, 웨프렐라, 이글라오네마, 스킨답서스, 네이비, 칼란코에, 산세베리아

결과

<표 3-12> 식물 종에 따른 농도저감량과 농도저감비율 순위

	벤자민 고무나무		세프 렐라		아글 라오 네마		스킨 답서스		네이버		칼란 코예		산세 베리아	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Benzene	2	5	1	4	3	6	6	7	4	3	5	2	7	1
Toluene	1	6	6	7	2	2	4	4	7	1	3	3	5	5
Ethyl benzene	1	4	6	6	2	7	3	1	5	2	7	5	4	3
Xylene	4	7	7	4	6	6	2	1	5	5	3	2	1	3
Stylene	3	1	1	5	7	7	4	4	2	2	6	3	5	6
Form aldehyde	1	4	7	5	3	7	2	3	5	1	4	2	6	6

* A: 농도저감량[$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 순위

B: 농도저감비율[%] 순위

다. 벽면녹화 관련 국외 기술현황

- 국외의 식물을 이용한 실내공기정화 기술은 식물자체만을 이용한 방식에서 벗어나 식물이 가지는 능력(오염물질 제거, 산소발생, 습도조절)을 적극 활용한 다기능 제품의 개발이 활발히 진행 중이며, 이를 통해 실내 환경 개선 시 필요한 공기청정기, 산소발생기, 습도 조절기 등의 기계장비를 대체할 수 있으며, 이에 따른 경제적 비용의 절감효과를 기대할 수 있음
- 또한 기존 경관개선/공간디자인적 측면의 실내식물을 이용한 플랜트박스나 벽면녹화에 공조기술을 적용시킴으로써, 식물을 하나의 장식요소에서 친환경적 기술의 주요소재로 활용하는 연구경향을 보이고 있으며, 이는 과거의 식물을 활용한 소단위 모듈 개발방식에서 한 단계 진보한 새로운 차원의 실내공기정화방식으로 에너지절감 효과 및 맞춤형 실내 환경 조성이 가능하다는 장점이 있음

표 3-2. 국외 서적 참고문헌

Common indoor toxic chemical	Green wall plants best at removing these toxins
Formaldehyde (CH_2O)	Peace lily (<i>Spathiphyllum</i> sp.) Boston fern (<i>Nephrolepis exaltata</i> 'Bostoniensis') English ivy (<i>Hedera helix</i>)
Carbon Monoxide (CO)	Spider plant (<i>Chlorophytum comosum</i>) Janet Craig Dracaena (<i>Dracaena deremensis</i> 'Janet Craig') Ficus sp.
Volatile Organic Compounds (VOCs)	Golden Pothos (<i>Scindapsus aureus</i>) Devil's ivy (<i>Epipremnum aureum</i>) Philodendron sp.
Trichloroethylene (TCE)	Mother-in-law's tongue (<i>Sansevieria trifasciata</i> 'Laurentii') Chrysanthemum (<i>Chrysanthemum morifolium</i>) Dracaena sp.
Benzene (C_6H_6) / Toluene (C_7H_8) / Xylene (C_8H_{10})	Kimberly Queen Fern (<i>Nephrolepis oblitterata</i>) Orchid sp. (<i>Phalenopsis</i> sp.) Dieffenbachia sp.
Toxic chemicals and the tropical (green wall) plant species which are best at removing them. Adapted from Dr. B.C. Wolverton's book - How to Grow Fresh Air, 1996.	

(1) Green Air (바이오 포트)

- 형태는 둥근 모양의 포트로 잎과 뿌리를 통해 오염 물질을 흡수하는 구조로 공기정화 식물인 산세베리아, 맥문동, 벤자민, 행운목 등을 심고 포트에 내장된 태양열 전자판으로 팬을 이용해 실내를 순환
- 물은 하단부 수조탱크에서 나일론 관을 통해 공급되는 시스템을 갖추고 있음
- 그린 에어는 유지비가 적고 에너지도 절감되나 사무용으로 제작되어 공기정화보다 디자인 측면이 강조됨

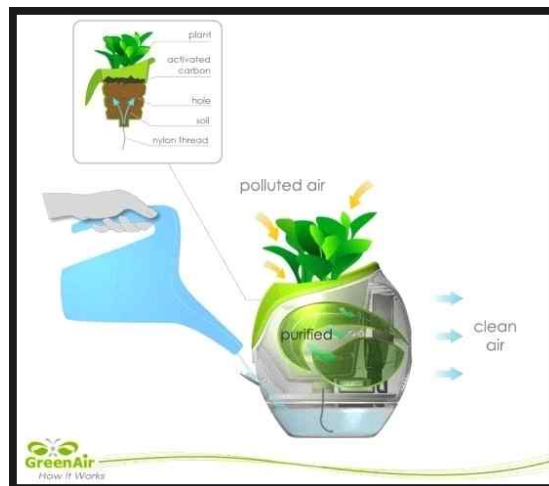


그림 15. 공기청정기 제품 및 구성도

(2) Green Flow

- 이탈리아 디자이너 Jessica Scanlon 제작으로 소형디자인부터 진행하여 포트내부에 USB 전기공급으로 유지비를 줄이고 포트자체를 투명하게 만들어 개방형태의 친환경분위기를 낼 수 있게 구성
- 독성입자를 하부에 있는 팬으로 밀어 내면서 식물에서 세정해서 내보내는 형식
- 가정용 벽면녹화 시스템, 전구형태 시스템, 식탁용 등 실내를 중심으로 사용됨



그림 16. 제품디자인 및 디자인

(3) 안드레아 공기청정기

- 프랑스 LABO Design Group 에서 출시하였으며 Mathieu Lehanneur 와 미국 Art Science 랩 교수인 David Edwards에 의하여 디자인 및 개발됨
- 서랍식 용기에 물을 넣고 저음속 팬을 사용하여 소음을 줄였고 English Ivy, 관음죽, 스

파디 필름을 사용하는 것을 추천하였지만 NASA가 지정한 50여종의 공기정화 식물 사용 가능

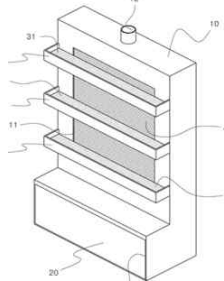
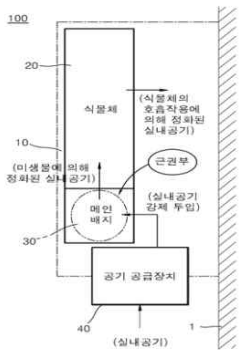
- 기능성과 디자인을 인정받고 있으나 소형으로 제작되어 면적당 정화효율이 적음



그림 17. 정화 개념도 및 제품

라. 관련특허 조사

명칭	이미지	특징
이끼벽과 실내식물을 이용한 공기청정용 실내정원 시스템		- 이끼벽과 실내식물을 이용한 공기청정용 실내정원 시스템 - 주택의 실내벽체나 각종 빌딩의 실내 벽체에 설치하고자 하는 공간의 크기에 따라 적합한 규모로 자유롭게 설치 가능
벽걸이형 화분장치		- 실내 환경변화를 위해 또는 채광위치 등에 따라 간편하게 화분의 위치를 이동시킬 수 있도록 한 벽걸이형 화분장치
벽면 녹화와 공기정화를 위한 건물 외벽 버티칼 가든 박스 및 그 시공 방법		- 건물의 외벽에 식물이 식재된 식생 공간을 마련하고, 그 식생 공간이 하우징에 의하여 외부 환경과 단절되어 밀폐된 상태를 유지토록 한 상태에서 그 식생 공간의 공기와 건물 내부의 실내 공기가 순환되는 구조를 갖도록 하여 실내의 오염된 공기가 식생 공간의 식물 및 뿌리, 배양토 등을 경유하면서 정화되어 신선한 공기로 바뀌어 실내로 재공급되도록 함
벽면녹화를 이용한 공기정화장치		- 코코넛매트로 제작된 부직포형태의 식재주머니를 이용한 벽면녹화 기법

실내녹화 겸 공기청정장치		- 전면에 형성된 통기공에 습식필터가 구비되어 통기공을 통해 흡입된 공기의 습도를 조절하며, 공기를 정화할 수 있는 장치
공기강제투입형 벽면식 식물이용 공기정화시스템		- 공기 강제투입형 벽면식 식물이용 공기정화 시스템은 건물의 벽체에 배치되어 메인 배지로 실내 공기를 투입시키는 공기 공급장치를 포함하여, 메인 배지로 투입되는 오염물질이 식물체의 근권부에 위치하는 미생물에 의해 분해되면서 실내 공기의 정화가 이루어지도록 함

마. 모니터링 센서 선정 및 테스트

(1) 신뢰성 검증을 위한 비교실험

- 일반적으로 대기 중 미세먼지 측정에 사용되고 있는 광산란법 장비는 네펠로미터방식과 스펙트로미터 방식으로 구분
- 네펠로미터 방식의 장비는 측정기로 유입되는 모든 입자의 광산란량을 측정하여 총 부유 입자의 농도를 결정하는 방식
- 본 연구에서 수행한 미세먼지 농도측정 장비는 MDL-125 Series로 스펙트로미터 방식임
- 스펙트로미터 방식은 유입되는 미세먼지를 정렬시켜 측정챔버에 개별입자가 유입되도록 하여 개별 입자의 광산란 특성을 측정함으로써, 개별 입자의 크기를 측정하여 전체 입자의 크기분포를 획득하는 방식
- MDL-125 Series 같은 측정방식인 GRIMM-108으로 비교실험을 통하여 검증 실행



MDL-125 Series



GRIMM - Model 1.109

그림 18. 먼지측정기

- 광산란방식 측정기기는 실시간으로 비교적 간편하게 입자 질량에 대한 다양한 정보 취득
- 자료의 신뢰성에 대하여 많은 이견이 존재할 수 있으며 다양한 비교실험이 지속적으로 필요
- 본 신뢰성 검증 실험은 국내외 널리 사용되고 있는 스펙트로미터 방식의 광산란 측정장비인 Grimm사의 Dust Spectrometer와 국내 스펙트로미터 방식의 광산란 측정장비인 LABCO사의 Clean_Air Model MDL series의 동일한 알고리즘 검증

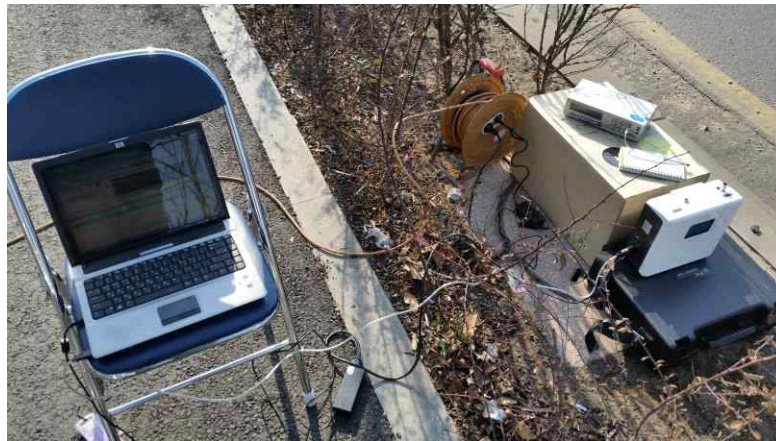


그림 19. 측정기기 신뢰성 검증을 위한 비교실험 현장

- 2015년 02월 03일 12시부터 15시 10분까지 3시간 10분간 남동공단입구 사리
- 광산란방식 측정기기 (Grimm, Labco사의 Dust Monitor (Model 1.209), Clean_Air Model MDL series)를 이용하여 비교 실험을 진행

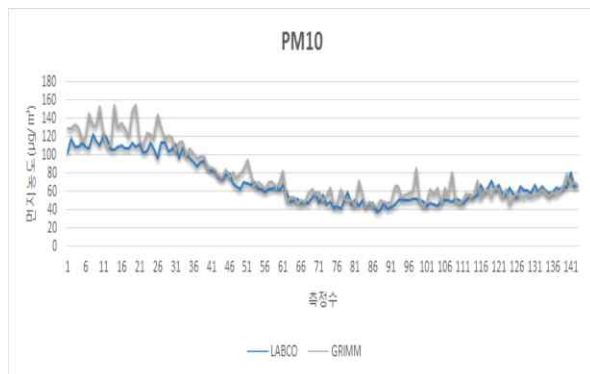


그림 19. PM₁₀ 동향분석

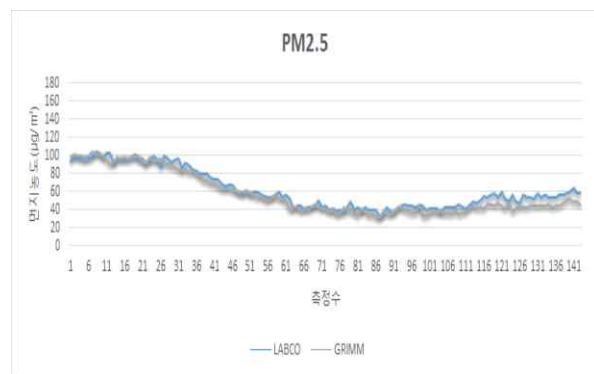


그림 20. PM_{2.5} 동향분석

실험장소	날짜	시간	측정기기
남동공단입구	2015.02.03	12:00-15:10	Grimm, Labco

- Grimm과 Labco의 비교실험에서 상대적으로 동일 패턴 구현
- 도로의 비산상태에 따라 샘플 입구 크기에 있어 농도 측정치 급격히 상승
- 대체적으로 PM_{2.5}에서는 동일한 상성을 보였으며 PM₁₀에서는 특정 트럭으로 인한 발

표 3-3. 국외 신뢰성 검증

선행연구	측정기기	내용
TSI Aerodynamic Particle Sizer 3321, Grimm Aerosol Spectrometer 1.109, HCT Particle Sensor 3030을 이용한 PM2.5 측정결과 비교, 2012	• TSI사의 APS 3321 • Grimm사의 AS 1.109 • HCT사의 PS-3030을 이용하여 PM2.5 입자에 대한 측정 성능을 비교	• PM2.5 입자의 모사를 위해서 $1.0\mu\text{m}$, $1.5\mu\text{m}$, $2.0\mu\text{m}$, $2.5\mu\text{m}$의 PSL 입자를 사용 하였으며 각 장비로 측정된 모드 입경의 경우 APS 3321이 시험입자에 해당하는 정확한 값을 나타냈으며 AS 1.109와 PS-3030의 경우 시험입자의 크기와 측정된 모드 입경에 다소 차이가 나타남 • 입경별 수농도 분포 측정결과는 APS 3321이 모드 입경을 중심으로 비교적 분산 값이 작은 폭이 좁은 곡선을 보였으며 다른 두 장비의 경우 APS 3321과 비교하여 분산값이 큰 곡선을 보임
University of Washington Lander Hall Construction Project: Final Assessment of PM2.5 Air Quality Impacts and Potential Health Risks, 2013	• BAM-1020 • DustTrak • WCCC Playground for approximately 20 days between January 9 and January 28, 2013.	• PM2.5 Hourly-Average BAM vs DustTrak : $R^2=0.90$ • PM2.5 24-hr Average BAM vs DustTrak : $R^2=0.97$
Comparison of Particulate Matter (PM10) Monitoring Using Beta Attenuation Monitor (BAM) and Simple Instrument, 2013	• Beta Attenuation Monitor (BAM) • Direct Reading Monitor (DRM) • 16 to 29 July 2011 (14 days) • Perai, Penang (Sekolah Kebangsaan Taman Inderawasih)	• PM10(a Record) BAM vs DRM : $R^2=0.9170$ • PM10(b Record) BAM vs DRM : $R^2=0.7810$

(2) 미세먼지 측정기기 신뢰성 검증

- LABCO의 동향성과 신뢰성은 GRIMM사와의 비교측정으로 동일패턴 확인
- 동일 회사의 측정기기 센서기에 교정 및 정확성 실험 진행이 필요
- 기초실험을 통한 요소인자 별 데이터 확보 및 적용량 산정 실험

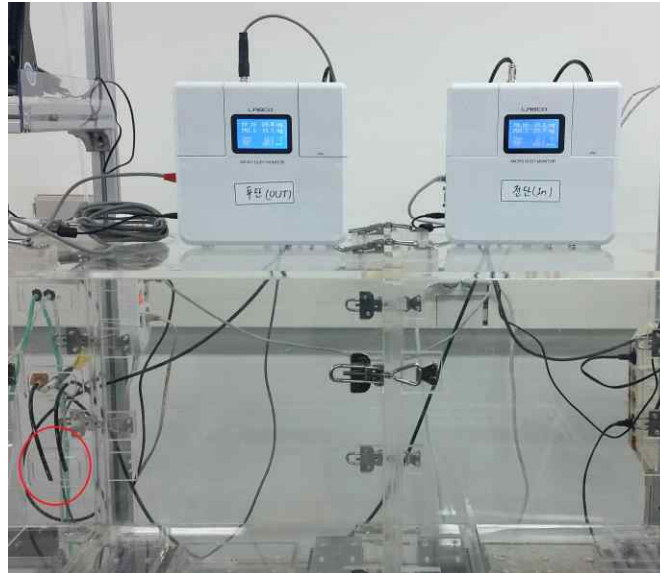


그림 20. 실험실 동일 측정기기 신뢰성 검증

- 2015년 04월 24일 3시부터 10시30분까지 약 7시간 Chamber 실험구 내부에 호수관을 사용하여 측정
- 내부 미세먼지 농도 측정으로 동일측정기기의 신뢰성을 검증
- Chamber 내부 동일구간에서 측정

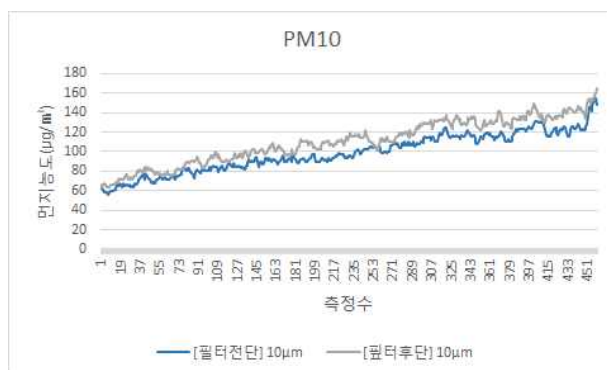


그림 21. PM₁₀ 비교분석

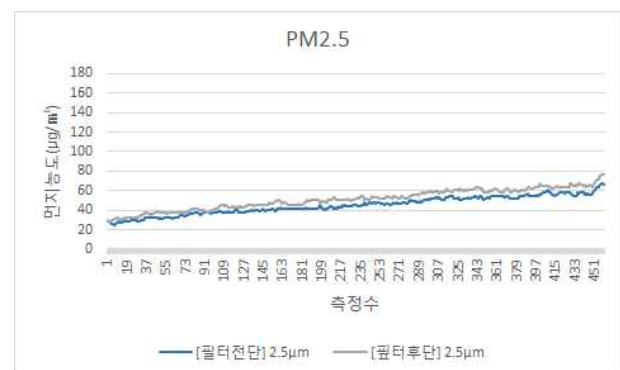


그림 22. PM_{2.5} 비교분석

실험장소	날짜	시간	측정기기
Chamber 실험구	2015.04.24	03:00-10:30	Labco

- 2015년 4월 24일 3시부터 10시까지 대기질 농도가 증가 및 실험실 내부 먼지농도 동시 증가
- 호수관의 길이와 측정시간의 차이로 측정거리가 짧은 측정기(후단)에서 조금 더 농도가 높게 측정
- 측정 샘플링 펌프 유량이 2.79~2.93 L/m, 호수관의 측정거리와 펌프 유량에 따라 농도 수치에 영향이 있는지 실험진행



그림 23. 실험실 동일 측정기기 신뢰성 검증

- 2015년 05월 16일 샘플링 유량과 측정값 관계 실험 진행
- 호수관을 제거 후, 동일 위치 실험 진행

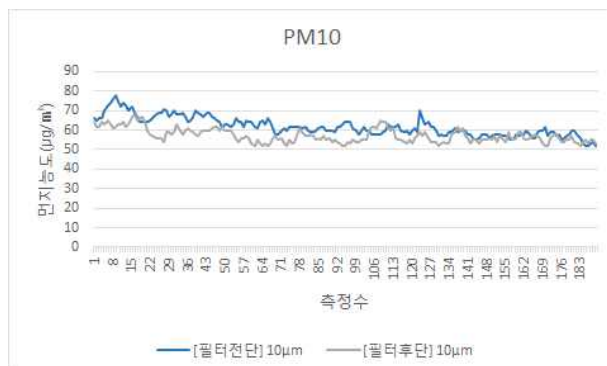


그림 24. PM₁₀ 비교분석

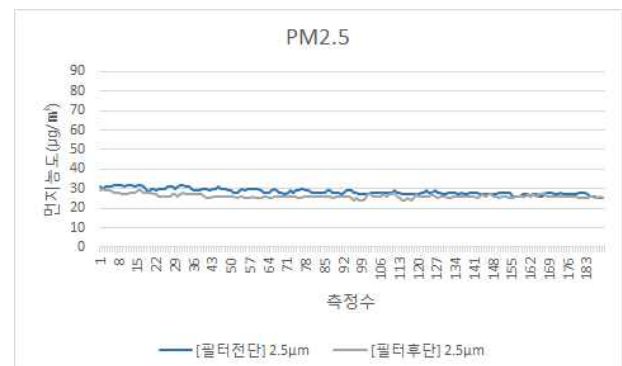


그림 25. PM_{2.5} 비교분석

실험장소	날짜	시간	측정기기
공과대학 120호 실험실	2015.05.16	16:00-24:00	Labco

- 후단 측정기기 농도가 후, 유량에 따라 농도의 수치 변화
- 유량에 따른 호수관 길이 변화 및 유량 보정 필요

(3) VOC 측정기 동일성 실험

- 일반적으로 불꽃이온화검출기(FID, Flame Ionization Detector)와 광이온화 검출기(PID, Photo Ionization Detector) 이용
- 불꽃이온화검출기는 수소를 이용하여 불꽃 만들어야 하므로 위험 소지 및 항상 불꽃이 붙은 상태에서 사용해야 하므로 가연성가스나 폭발의 위험성이 있는 곳에서 사용 불편과 미량의 VOC 측정 불가
- 광이온화 검출기는 UV Lamp를 사용하여 미량의 VOC 농도 측정 가능 및 ppm, ppd, mg/m³, µg/m³ 측정 단위로 측정 가능



그림 26. RAE 3000 측정기



그림 27. 동일측정기기 신뢰성
검사 현장

- 2015년 03월 04일 실내공간에 측정기를 설치하여 실내TVOC 측정
- 같은 위치 측정 후, 두 측정기기 간 교정범위 체크 목적 실험 진행

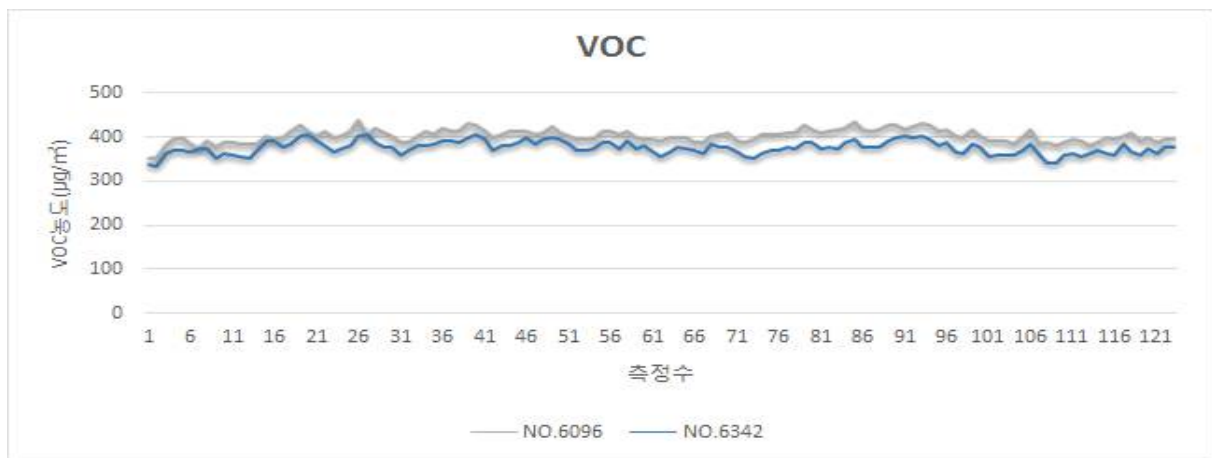


그림 28. VOC 측정 비교분석

실험장소	날짜	시간	측정기기
공과대학 237호	2015.03.04	13:20-16:00	RAE

- 실시간으로 측정되기 때문에 사무실에서 측실시간 측정으로 수분 제어가 가능하도록 사무실에서 측정
- 온열 및 실내공간의 건조 상태에서 실험 실행, 연속 사용에도 농도 교정 안정상태 유지 확인
- 10%의 교정범위 내 측정 농도 유지

(4) 온도, 습도 측정기

- Eco-purification은 공기정화 및 쾌적조건 위한 온습도 조정 가능
- Chamber 실험테스트에 있어 측정 장비들의 온습도 영향 확인
- 실험구 내부의 온습도 측정장비가 필요 및 정밀도 확인 필요



그림 29. SATO (SK-110TRH)
온습도 센서기

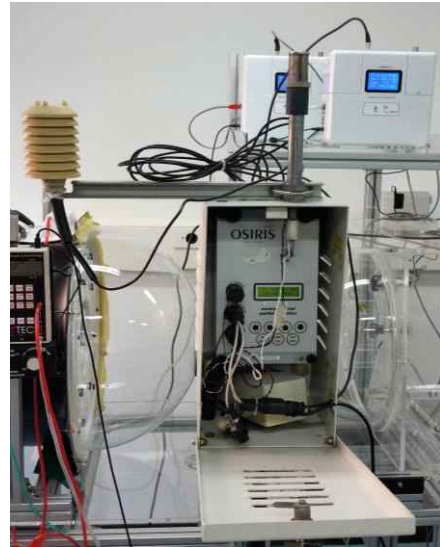


그림 30. 온습도센서 검사 현장

- 2015년 3월 20일 실험실 내부에 온습도를 측정
- Chamber에 영향을 줄 수 있는 온습도를 측정 및 각 측정장비의 교정여부 비교실험을 실행

표 3-4. 온습도 측정범위 및 오차범위

종류	측정 범위	오차
온도	-20 ~ 60 도	3도
습도	0 ~ 100%	5%



그림 31. 온도 측정 비교



그림 32. 습도 측정 비교

실험장소	날짜	시간	측정기기
공과대학 120호 실험실	2015.03.20	15:00-20:00	SATO, Osiris

- Osiris측정기기 및 SATO측정기기 비교
- Osiris측정기의 온습도 값이 높으나 오차 범위에 수정이 가능
- 실험에 사용될 두 측정기기간의 오차범위는 적고 패턴 경향이 같음

(5) 수분제거트랩 실험



그림 33. 수분제거트랩 제작



그림 34. 수분제거트랩 실행

- 실리카겔을 사용한 수분제거트랩 사용 후 실리카겔 색변화 및 미세먼지 농도 안정화 실험실행
- 동일측정 구역에서 측정하여 수분의 영향이 있는지 확인 및 식물필터 수분사용 안정화 확인



그림 35. 필터 수분 사용 시 안정화 확인 실험현황

- 실리카겔 습기제거 장치의 신뢰성을 확인하기 위해 같은 위치에서 측정
- 식물필터에서 수분을 사용, 후단 습기제거 장치 장착 후 농도 안정화 측정

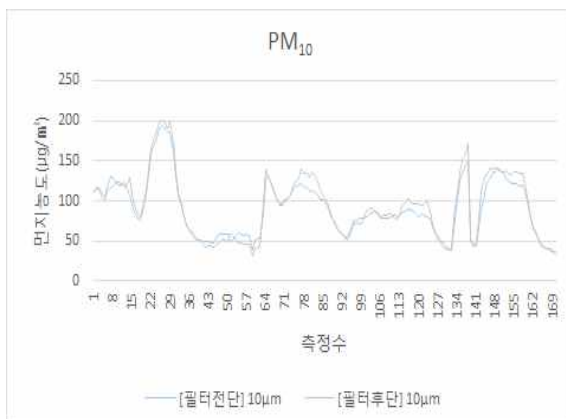


그림 36.
PM10 수분제거트랩 설치 농도

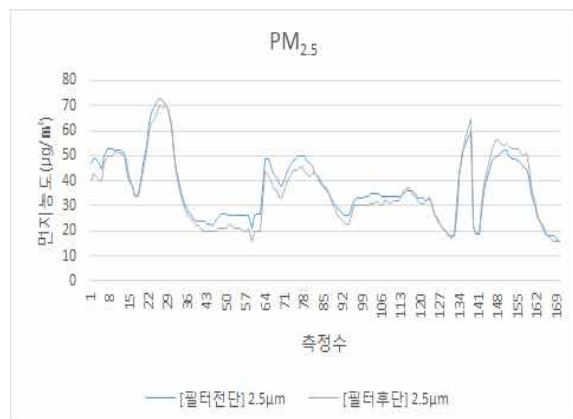


그림 37.
PM2.5 수분제거트랩 설치 농도

- 수분으로 농도 변화 데이터가 변화되는 것을 안정화시키고 장시간 사용변화에 대한 실험진행
- 열 제거 시스템을 개별로 제작 및 장착 시 아크릴판 및 플라스틱이 액화되어 VOC가 발생하고 VOC 측정에 오류가 발생
- 실리카겔 습기제거로 농도산정의 오류에 대한 실험을 진행하였고 측정기기의 안정화를 확인하였음

(6) Resuspension Chamber 설계

- 2003년 지하생활공간공기질 관리법을 다중이용시설등의 실내공기질 관리법으로 개정하며 실내공기질 기준이 강화
- 2004년 실내공기질관리 기본계획 수립 및 실내환경개선 협의회 구성으로 실내공기질 관리체계가 구축
- 2009~2013년 교육과학기술부, 지식경제부, 보건복지가족부, 환경부, 노동부, 국토해양부에서 실내공기질 관리 기본계획을 내며 실내공기질 유기기준이 계속 강화

표 3-5. 실내공기질 유지기준 <개정 2014.3.20.>

다중이용시설 오염물질 항목	미세먼지 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	이산화탄소 (ppm)	폼알데하이드 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	총부유세균 (CFU/ m^3)	일산화탄소 (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	150 이하	1,000 이하	100 이하		10 이하
의료기관, 어린이집, 노인요양시설, 산후조리원	100 이하			800 이하	
실내주차장	200 이하				25 이하

- 실험실내부의 미세먼지 농도와 Generator의 농도를 혼합시켜 유지기준 및 유지기준 이상의 농도를 유지
- 균일하게 분포될 수 있는 혼합구간을 제작

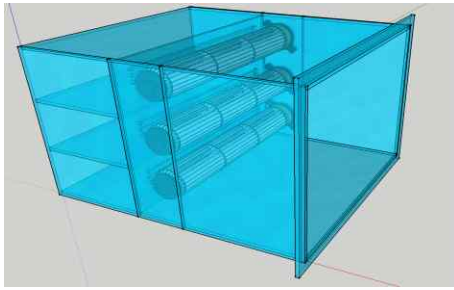


그림 38. 혼합구간 구상도 1

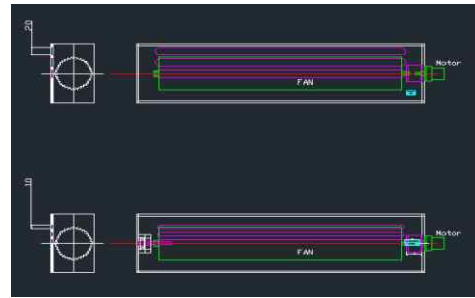


그림 39. 혼합 기기 CAD도면

- 위, 중간, 아래 구간으로 나누고 혼합팬을 이용하여 균일하게 분포될 수 있도록 구상
- 외부공기와 혼합구간의 길이가 짧기 때문에 늘릴 수 있도록 재구상

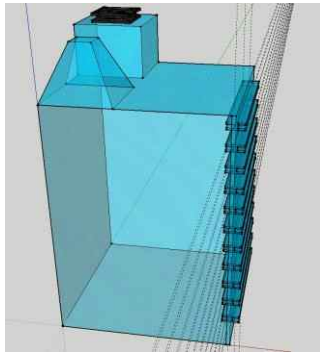


그림 40. 혼합구간 구상도 2

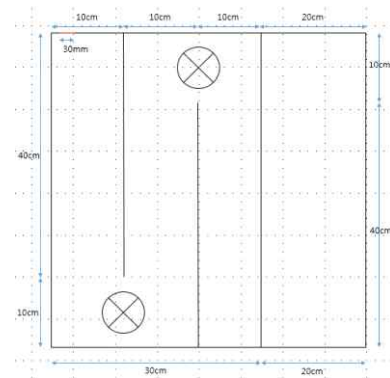


그림 41. 혼합구간 구상도 2

- 입구구간을 위로 올리고 인위적 오염물질을 넣을 수 있는 구간을 새로 제작실행
- 실내공기와 인위오염물질 입구구간을 각각 장착하였으나 개방형식으로 변경
- 내부의 혼합구간 형태는 CFD모델링을 통해서 설정



그림 42. 혼합팬 시스템 1



그림 43. 혼합팬 시스템 2

- 혼합구간에서 팬을 사용하여 지그재그 형태에서도 오염물질이 Chamber 안으로 들어갈 수록 팬을 제작
- 팬의 크기에 있어 형태 변화를 2개로 나누었으며 무정전 코팅재질로 제작
- 팬의 속도를 조절할 수 있는 팬 컨트롤러 제작

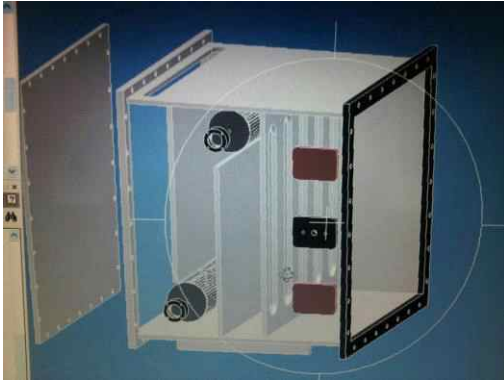


그림 44. Chamber 혼합구간 확정도면

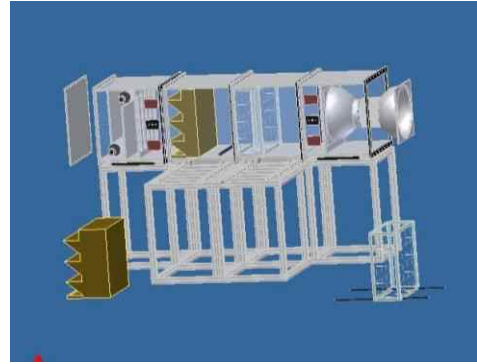


그림 45. 전체 Chamebr 구상도

- 구간마다 슬라이드를 만들어 케이스를 교체하도록 함
- 실내 공간 공기정화를 실험을 위해 혼합구간 앞부분을 탈·부착 구조로 설계
- 인위적 먼지농도, VOC농도를 증가시켜 필터효율을 확인하는 방법과 자연적 순환적 필터 효율을 확인하는 방법 모두를 수용할 수 있도록 설계함



그림 46. Chamber 1단 구간 CAD 도면도

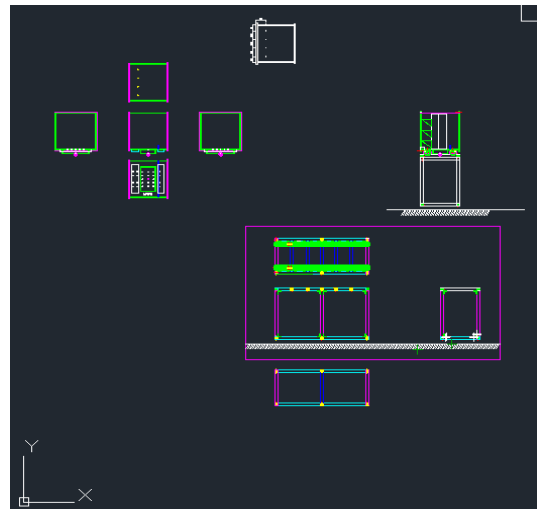


그림 47. Chamber 2단 구간 CAD 도면도

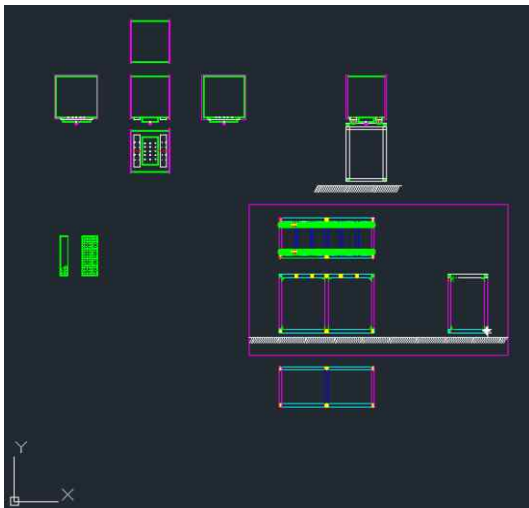


그림 48. Chamber 3단 구간 CAD 도면도

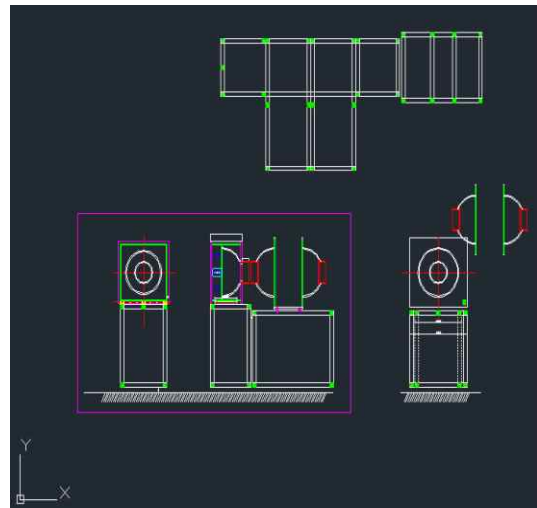


그림 49. Chamber 4단 구간 CAD 도면도

- 1단구간은 혼합구간으로 팬구간 제작 설치 구간 및 혼합길이를 늘릴 수 있도록 제작
- 2단 구간은 식물의 수분이 음압으로 인해 후단으로 흘러가는 것을 방지하기 위해 방지턱 설치
- 2단, 3단 구간에서 수분 및 EM사용 시 밖으로 나갈 수 있도록 밑부분에 수분조를 제작
- 공기순환 Blower door 구간에서는 팬의 속도로 Chamber에 충격이 있지 않게 충격완화 설치

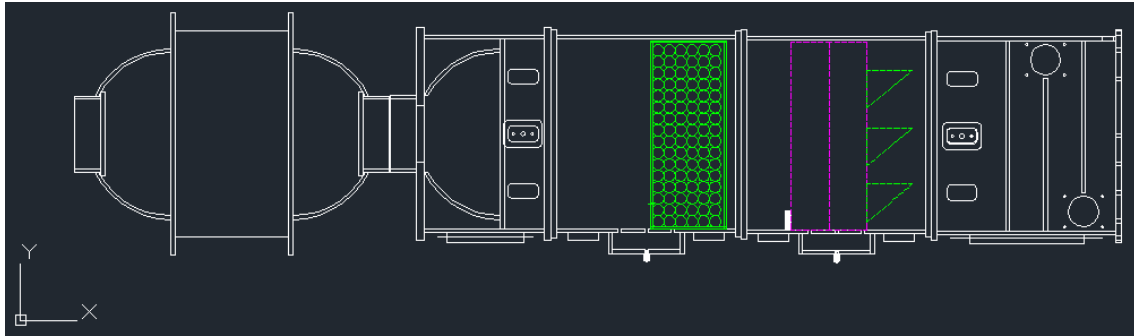


그림 50. Chamebr CAD 제작 도면도

- 전 후에 미세먼지 센서, 온습도 센서, VOC 센서가 장착 구간을 설정
- 공기 순환의 세기를 조절할 수 있는 Blower door 시스템을 장착
- 각 구간에서 케이스를 변경할 수 있도록 조립방식으로 설계
- 실험 파트당 0.5m * 0.5m * 0.5m (가로, 세로, 높이) 크기로 제작
- 필터에서 정화되는 값을 데이터 로거 장치를 통해 시간대별로 측정확인



그림 51. Chamber 설치 현장

- 알루미늄 프로파일 10cm 두께 사용, Chamber 고정·분리가 용이
- 무정전 알루미늄을 사용하여 되도록 전정기로 인한 알루미늄 흡착이 없음
- 전단 부분에 실내공기와 인위오염물질 발생혼합구간을 만들고 균일 분포 되도록 제작
- EM 및 수분을 사용으로 습기가 발생하여도 측정 정확도가 유지될 수 있게 습기제거장치를 제작 및 설치
- 후단 부분에는 공기 순환의 세기를 조절할 수 있도록 Blower door을 설치하여 속도를 제어할 수 있도록 하였다.

(7) Chamber 기밀성 테스트

- Blower door란 건물의 기밀성을 측정하는데 사용되는 시스템
- 실내와 실외 사이의 공기 흐름을 측정하며 공기 누출 부위를 찾아 냄
- Chamber의 누출 구간이 있어 수치를 신뢰성이 낮아지는 것을 방지하기 위해 기밀성 테스트를 실행
- Blower door은 실내를 가압, 감압을 시킬 수 있는 팬으로 외부 압력과 팬의 풍량을 측정가능
- 기본적으로 Blower door 시스템은 교정 팬, 도어 패널 시스템, 압력 측정 장치 3가지로 구성



그림 52. TEC사 Blower door 구성 부품



그림 53. Blower door 설치 상황

- Blower door 기술은 1977년 스웨덴에서 시작되었는데 초기에는 문보다는 창에 장착 팬을 사용
- 문에 장착되는 팬은 Princeton 대학에서 Harrje, Blomsterberg, Persily에 의해 개발되었고 1980년 미국에서 시판, 1981년 판매
- 팬 압력에 의해 측정된 값은 건물의 유효 누설 면적(Effective Leakage area)을 계산할 수 있는데 각 틈과 깨진 구역의 총 누설 영역의 면적 애기함
- 유효 누설 면적은 건물의 개별적 누설구역의 모든 영역이 하나의 이상적인 구멍으로 결합된다는 것을 가정
- 유효 누설 구역(Effective Leakage area)의 계산은 사용 기준 압력에 따라 달라지는데 4Pa 기준 압력은 일반적으로 US에서 사용되고 10Pa 압력은 캐나다에서 사용
- 우리나라 건축기밀성 기준 압력에 대한 기준이 없지만 4Pa US형식을 따르고 있음

$$ELA = C_{Building} * \sqrt{\frac{\rho}{2}} * \Delta P_{Ref}^{n_{Building} - 0.5}$$

수식 1. 유효 누설 면적(Effective Leakage area) 계산식

ELA = Effective Leakage Area (m² or in²)
 C_{Building} = Building air leakage coefficient
 ρ = Air density (kg/m³ or lb/in³), typically a standard density is used
 ΔP_{Ref} = Reference Pressure (Pa or lb_{Force}/in²), typically 4Pa in US and 10Pa in Canada
 n_{building} = Building pressure exponent

- C_{Building} 과 n_{Building}은 SI 단위를 사용
- ρ 와 ΔP_{Ref}은 각각 kg/m³과 Pa로 사용
- C_{Building} 과 n_{Building}은 영국식 단위를 사용하여 계산 될 수 있고 ρ 와 ΔP_{Ref}은 각각 lb/ft³ 와 lb_{Force}/in² 로 사용
- 누출구역 확인 실험에 있어 챔버 전체를 연결 후 누출구간은 입구구간만 형성되도록 하여 실험을 진행
- 입구구간을 완전히 막으면 Chamber 안에 압력이 높아 자동 Blower door가 꺼지기 때문에 최대로 막은 수치는 3/4



그림 54. Chamber의 누출구간 확인 실험 현장



그림 55. Chamber 입구구간 확인

표 3-6. Effective Leakage area test

	입구구간 전체	입구구간 3/4	입구구간 2/4	입구구간 1/4
Effective Leakage area(cm2)	106.1	87.3	55.4	30.5
Leakage area(cm2)	139	104	70	35

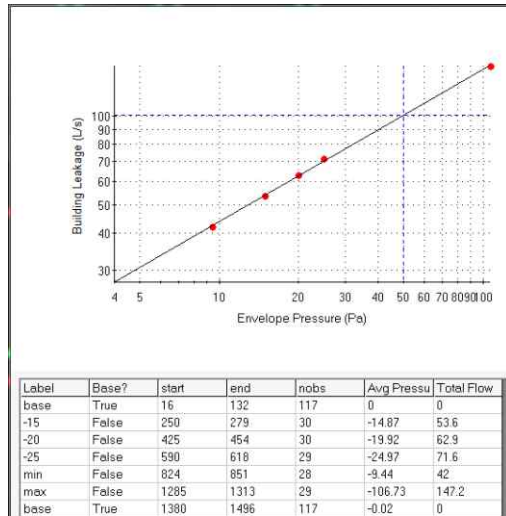


그림 56. 입구구간 전체 시스템 가동현황

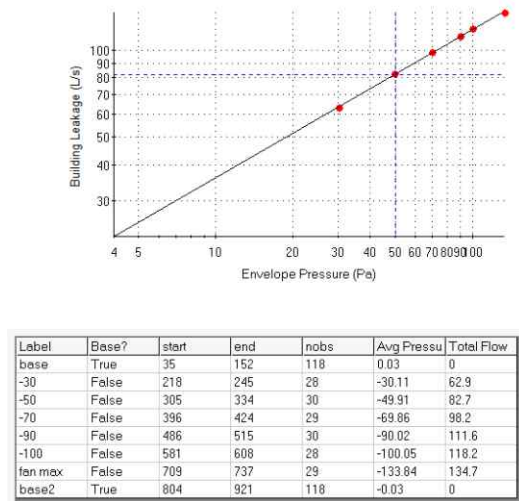


그림 57. 입구구간 3/4 시스템 가동현황

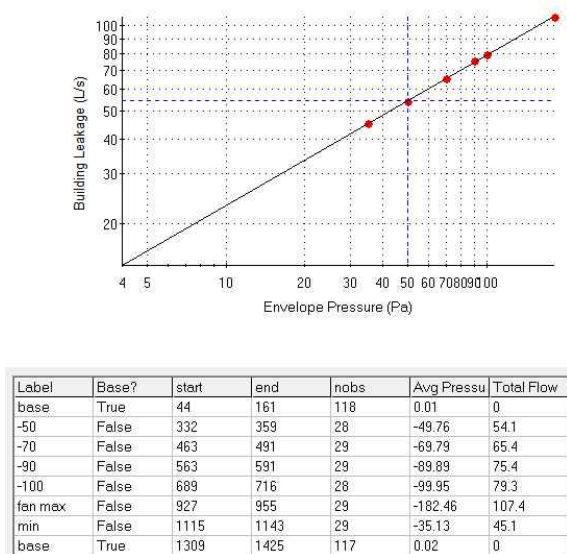


그림 58. 입구구간 2/4 시스템 가동현황

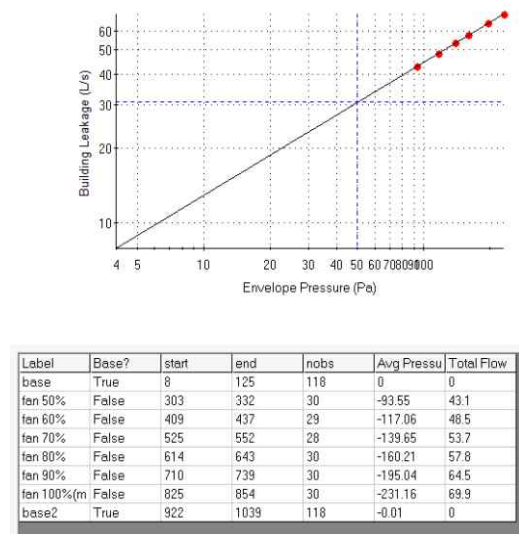


그림 59. 입구구간 1/4 시스템 가동현황

- 팬의 압력과 Chamber 내부압력으로 Leakage area를 측정
- 누출구간이 많으면 팬의 속도를 빨라야 압력을 측정할 수 있음
- 실험 압력은 측정 수치가 잡히는 상황부터 임의로 결정이 됨

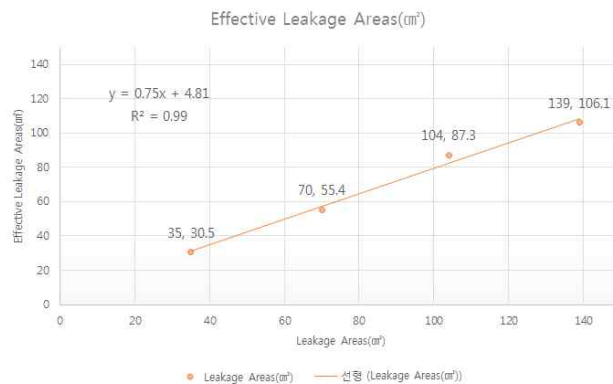


그림 60. Chamber Effective Leakage Area
및 기밀성 확보 그래프

- 공기의 흐름에 있어 마찰 손실에 의한 것 외에 유입, 유출, 굴곡, 만곡, 굴절, 등 장애물에 의해 에너지 손실이 발생
- 이론적 누출지역보다 높게 나오는 현상은 Chamber 내부에서 누출지역이 형성된다는 것을 의미
- 실험을 통한 실제 누출지역은 혼합구간의 굴절, 굴곡 등의 에너지 손실이 발생하여 낮게 측정되었고 Chamber 내부 기밀성 확보 확인



그림 61. Flow Marker 공기흐름 및 기밀성 확인



그림 63. 실시간 모니터링

- 필터 통과 전후 오염물질 농도 모니터링
- 데이터 자동 저장 (PM_{10} , $PM_{2.5}$, 온도, CO_2)
- 팬 유량, Chamber 압력 데이터 자동 저장
- Chamber 공기 누출지역 확인가능
- 공기흐름 제어 및 팬 유량 조절 가능

(8) CFD 모델링

- CFD 시뮬레이션은 기류/ 대기오염분산 특성을 이해하기 위해 제작되었고 그림 65와 같이 기초 Chamber CFD 시뮬레이션 프로세스 설정
- 설정 기본 요소로 Chamber 크기, 케이스 분별, 질량 유량, 압력, 온도, 유동물질의 밀도, 필터 매체의 공극률 등을 시뮬레이션 진행시 고려됨
- 운동량 보존, 연속 방정식, 확산 방정식, 난류 운동 에너지와 같은 수학 공식은 어디나 적용가능
- CFD 시뮬레이션은 (가) 혼합부와 (나) 필터 매체부에 대해 개별적으로 실행

(가) CFD 혼합부 시물레이션

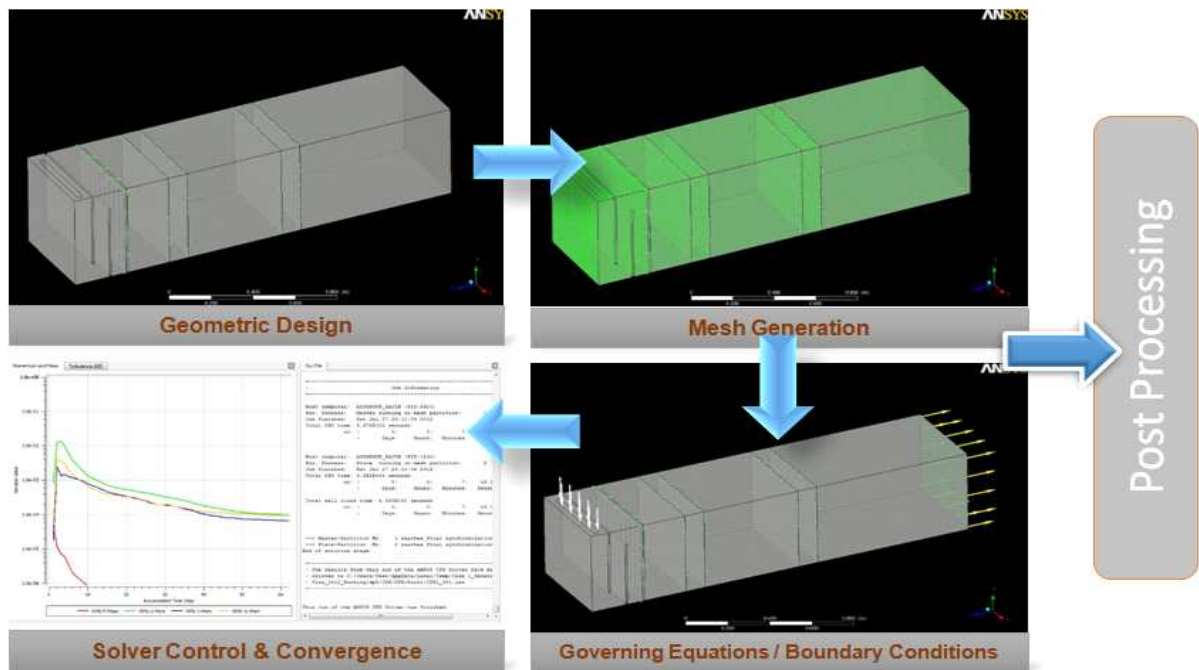
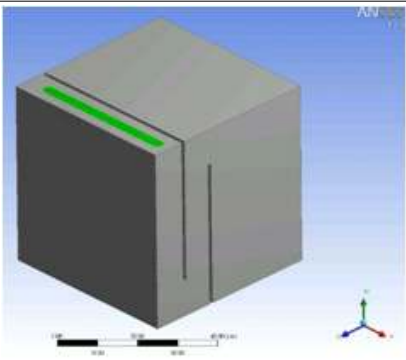
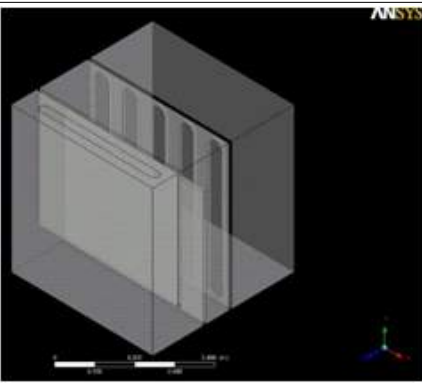


그림 63. CFD simulation process by covering from geometric design to post processing

CFD 케이스	Parameters
 그림 64. Case I. Without the vertical baffle plate	- 혼합구간은 Chamber 공기입구 측에 설계된 곳으로 상부 모서리로부터 오염된 공기가 공급 - 혼합구간의 목적은 필터매체를 향해 균일하게 오염물질을 공급 - 혼합구간의 전체크기는 50cm × 50cm × 50cm이고 일반 파티션 (Case I)과 추가 분할칸막이 (Case II)로 시물레이션이 실행
 그림 65. Case II. With the vertical baffle plate	- 초기 및 경계조건 • 챔버 표면은 평활면으로 마찰이 무시되는 것으로 간주 • 질량 유량은 실제 실험계획에 따라 65g/s로 공급. • 흐름 유체는 STP에서 이상 기체로 간주한다. • 유속, 압력, 난류 운동 에너지 등도 그림<68> (a)와(b) 같이 챔버에 다른 지점에서 두 경우를 모니터링

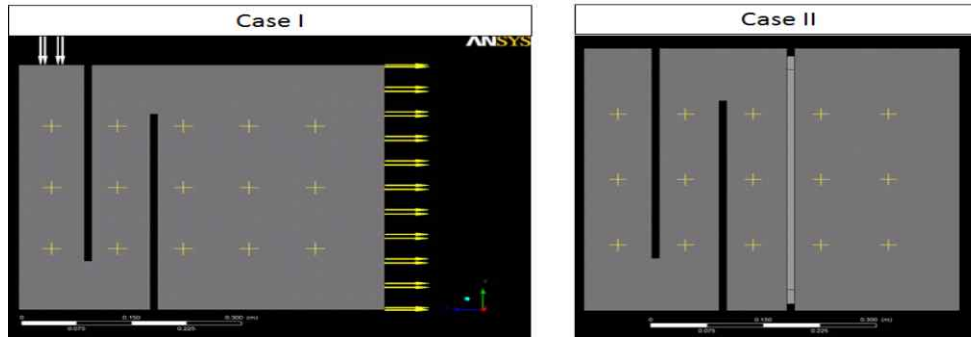
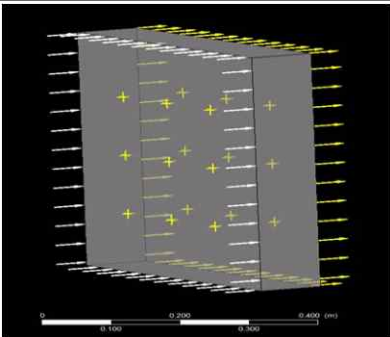
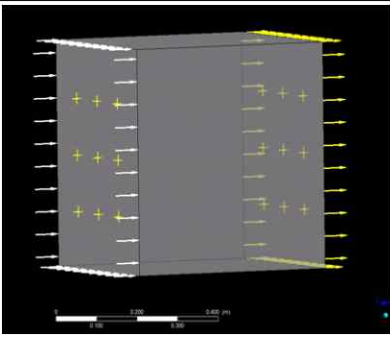


그림 66. Factors monitoring points (a) Case I and (b) Case II

- 혼합 구역의 목적은 필터 매체를 통해 전달하기 전에 안정적으로 오염물질을 혼합하여 데이터 모니터링 지점까지 보냄
- 입구구간의 속도와 질량 흐름에 의한 압력은 Case I보다 Case II가 더 높음
- Case I 입구부분에서 높은 소용돌이를 발견하였는데 수직 칸막이(Case II)를 설치한 후 감소
- 수직 칸막이를 설치한 후 중간부분 이후 균일한 공기흐름이 형성되었고 센서 샘플링 위치로 칸막이 뒷부분으로 선정

(나) 필터구간별 CFD 시뮬레이션

Simulation cases	Parameters
 그림 67. Filter section with thickness 10cm	- 필터구간 CFD 시뮬레이션의 주요 목적은 일정한 질량 유량의 압력 강하에 여과재의 여과 의 두께 및 누설 영역 (다공성) - CFD 시뮬레이션은 각각의 다공성 조건에 대한 10cm와 50cm 케이스로 진행 • Case I (Thickness = 10cm, porosity 4.1%) - Hydro ball (5mm diameter) • Case II (Thickness = 50cm, porosity 4.1%) - Hydro ball (5mm diameter) • Case III (Thickness = 10cm, porosity 8.6%) - Mineral filter (1cm diameter) • Case IV (Thickness = 50cm, porosity 8.6%) - Mineral filter (1cm diameter) - 질량 유량은 65g/s로 고정 - 다른 매체변수는 혼합 Chamber와 유사하게 설정
 그림 68. Filter section with thickness 50cm	

- 그림<71>의 모델링의 경우에는 압력과 속도 변화를 (I)과 (II)로 나누어 표시하였고 필터 매체를 통과하는 최대 흐름 속도가 약 5.36m/s이며 흡입되는 유량은 65g/s
- Case (II)인 경우 전방 측에서 압력 변동이 없고 여과 크기에 있어 높은 저항력과 공기 유량이 작기 때문에 투과율이 적어 압력변동이 없음

- 따라서, Chamber 실험에 사용하는 필터 사이즈를 감소
- Case (III)와 Case (IV)에 사용되는 필터는 미세칼필터 지름 1cm 사이즈 볼 크기로 다공성은 약 8.6%으로 이전의 경우보다 기공 크기가 증가되고 필터를 통한 유동 속도는 2.5m/s로 감소되었고 필터 매체의 압력변화는 그림<72>과 같이 필터 매체를 65g/s의 유량을 통해 0.16Pa~0.29Pa까지 변화됨

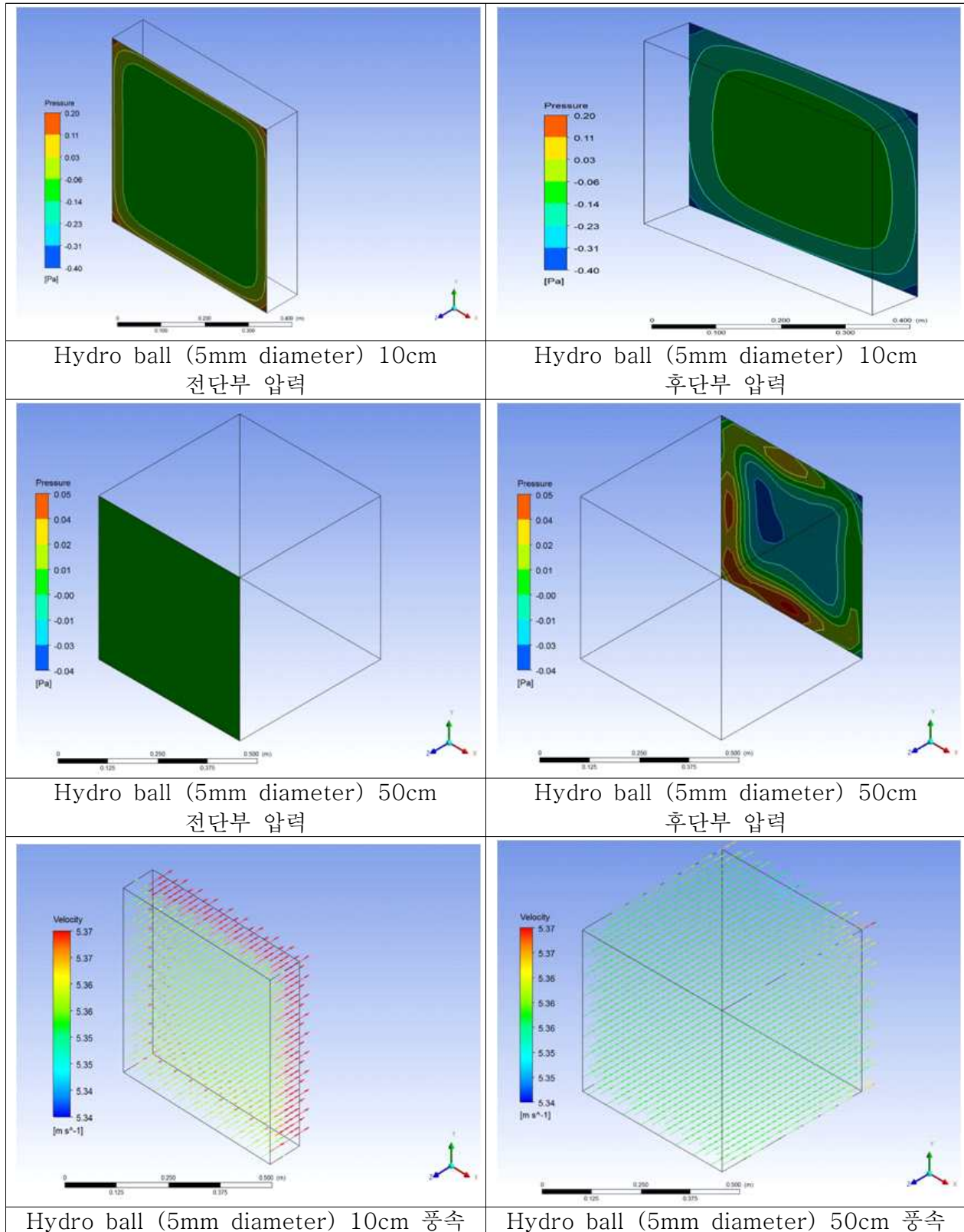


그림 69. Summary of the airflow characteristics in the filter bed with porosity 4.1%

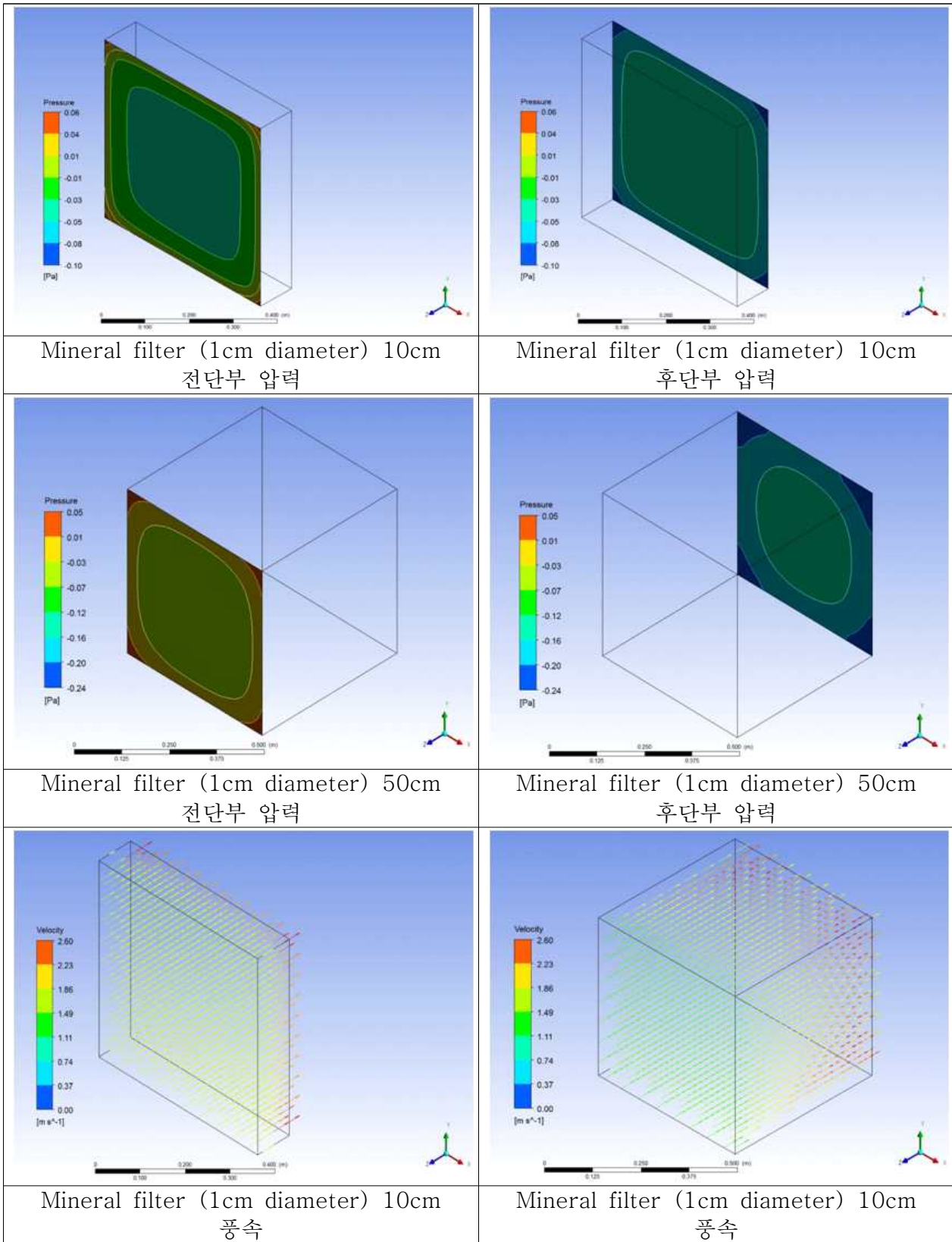


그림 70. Summary of the airflow characteristics in the filter bed with porosity 8.6%

(10) 환기시스템 제어 데이터 확보로 인한 1차 Chamber 수정 및 보완

(가) 1차 Chamber 보완

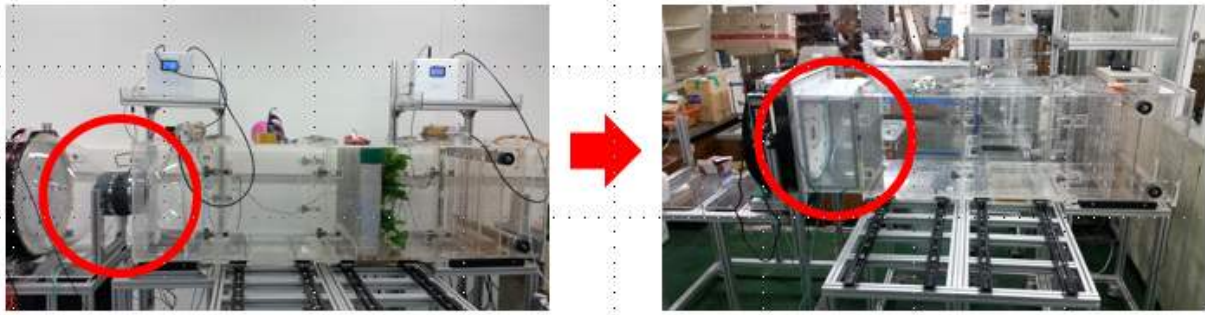


그림 73. 1차 Chamber 후단의 압력출입구 부분 보완

- 후단 Blower 연결부분을 500mm×500mm의 정사각형으로 수정
- Blower Ring 변경을 쉽게 할 수 있도록 수정

(나) 유속범위 측정



그림 74. 유속범위 측정 실험



그림 75. Ventilation hood



그림 76. Blower Ring 교체

- Ventilation hood를 Chamber 전면에 부착하고 주위에 다른 유속이 생기지 않도록 막은 다음 실시간 측정 데이터 확인
- Ring A부터 C까지 변경하여 Blower의 유속을 측정하였으며 0.72%로 파워를 조정하였을 때 최소유속을 나타내고 100%로 조정하였을 때 최대 유속을 나타냄
- 측정횟수는 %당 20~30개의 측정 데이터를 실시간 확인

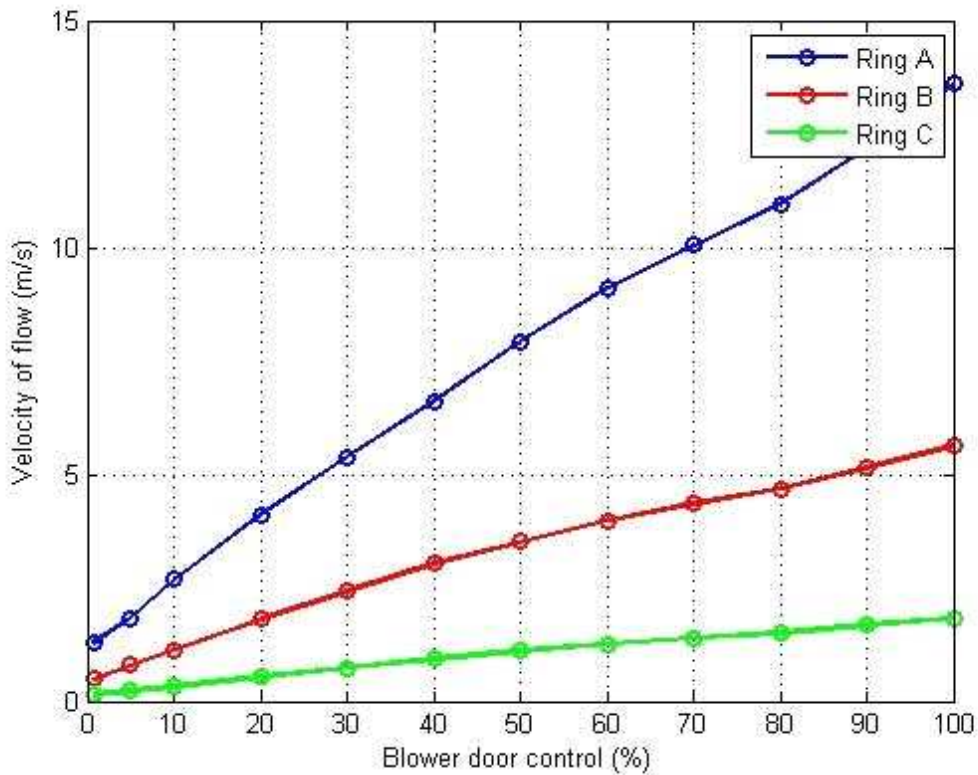


그림 77. Blower Ring 변화로 인한 유속범위 그래프

표 3-7. Blower Ring에 따른 유속범위

Ring A		Ring B		Ring C	
Blower control (%)	유속 (m/s)	Blower control (%)	유속 (m/s)	Blower control (%)	유속 (m/s)
0.72	1.28	0.72	0.50	0.72	0.14
5	1.84	5	0.80	5	0.22
10	2.68	10	1.13	10	0.32
20	4.10	20	1.81	20	0.54
30	5.39	30	2.43	30	0.74
40	6.62	40	3.03	40	0.94
50	7.92	50	3.51	50	1.10
60	9.10	60	3.99	60	1.26
70	10.05	70	4.35	70	1.40
80	10.95	80	4.69	80	1.50
90	12.20	90	5.14	90	1.67
100	13.60	100	5.63	100	1.84

- 1차년도 요소기술 정화실험에 유속은 0.18m/s를 사용하였고 이에 동일할 실험을 진행할 시 Blower Ring C, 3%로 Control하여 측정
- 1.2~1.8m/s까지는 Blower Ring과 상관없이 측정이 가능하고 0.14~0.5m/s는 Ring C만 사용가능하고 5.6~13.6m/s는 Ring A만 사용가능

(다) 보완 전 · 후 유량과 압력손실

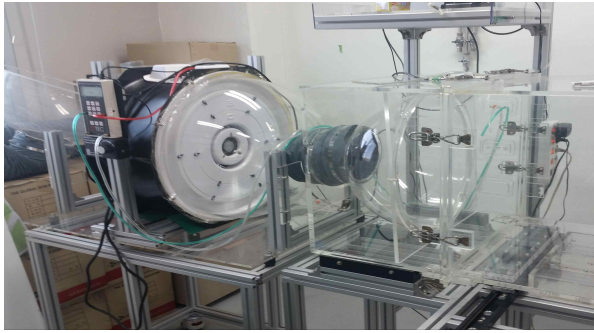


그림 78. 보완 전 Chamber 측정모습



그림 79. 보완 후 Chamber 측정모습

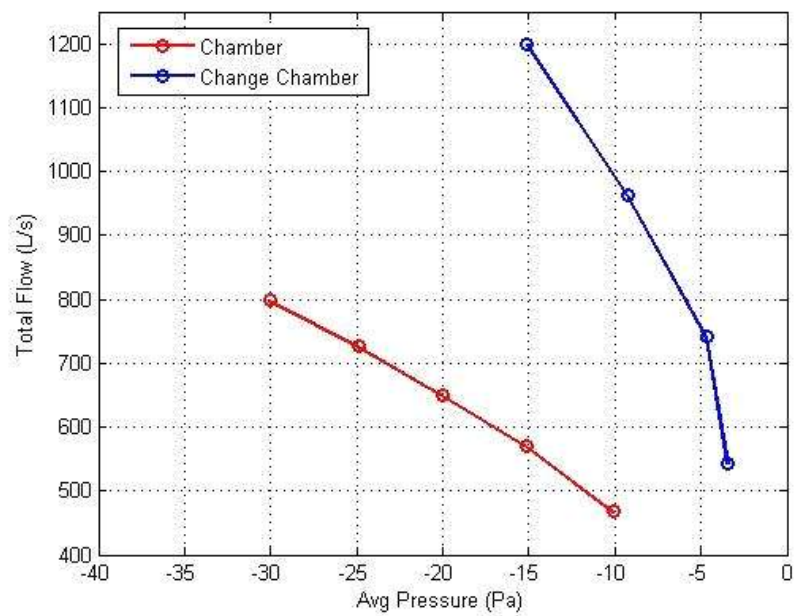


그림 80. 1차 보완 전 · 후 유량 및 압력손실 그래프

표 3-8. 1차 보완 전 · 후 유량 및 압력손실 데이터

압 력	-15Pa
보완 전 Chamber 유량	570L/s
보완 후 Chamber 유량	1200L/s

- 1차 실험은 Chamber 입구를 개방하여 실험을 진행하며 Chamber 내부 압력이 -15Pa 유지할 때 유량을 확인
- 보완된 Chamber는 유량이 강하게 빨려야지 압력이 걸리며 팬의 부하로 인해 -20Pa 이상은 측정이 불가능
- 보완 후 Chamber 내부에서 걸리는 압력손실을 줄 일 수 있어 이후 필터로 인한 압력손실에 대한 데이터를 폭넓게 확인 할 수 있게 되었음.

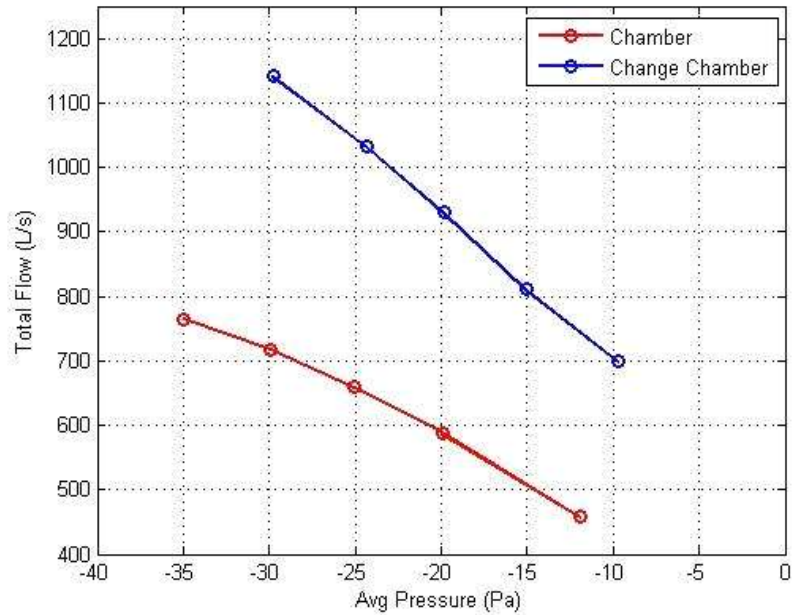


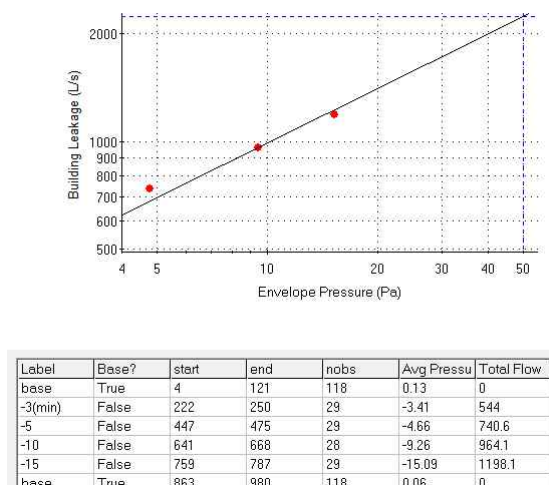
그림 81. 1차 보완 전 · 후 유량 및 압력손실 그래프

표 3-9. 1차 보완 전 · 후 유량 및 압력손실 데이터

압 력	-20Pa
보완 전 Chamber 유량	588L/s
보완 후 Chamber 유량	1030L/s
압 력	-30Pa
보완 전 Chamber 유량	718L/s
보완 후 Chamber 유량	1142L/s

- 2차 실험은 Chamber 입구를 2000cm² 개방하여 실험을 진행하여 압력의 데이터의 개수를 늘려서 확인
- 보완 전에는 낮은 유속으로도 압력이 바로 잡혔지만 보완 후 Chamber 자체의 압력손실이 적기 때문에 강한 유속에 압력이 잡힌 것을 확인

(라) 보완된 Chamber의 누출지역 확인 실험



Label	Base?	start	end	nobs	Avg Pressu	Total Flow
base	True	4	121	118	0.13	0
-3(min)	False	222	250	29	-3.41	544
-5	False	447	475	29	-4.66	740.6
-10	False	641	668	28	-9.26	964.1
-15	False	759	787	29	-15.09	1198.1
base	True	863	980	118	0.06	0

그림 82. 2500cm² Effective Leakage area

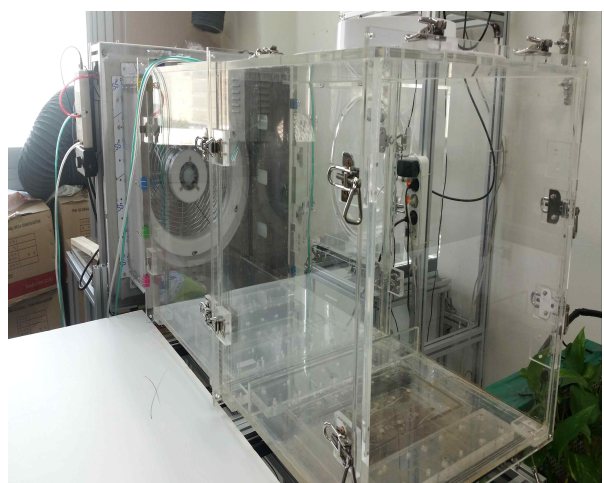


그림 83. 2500cm² 개방 실험

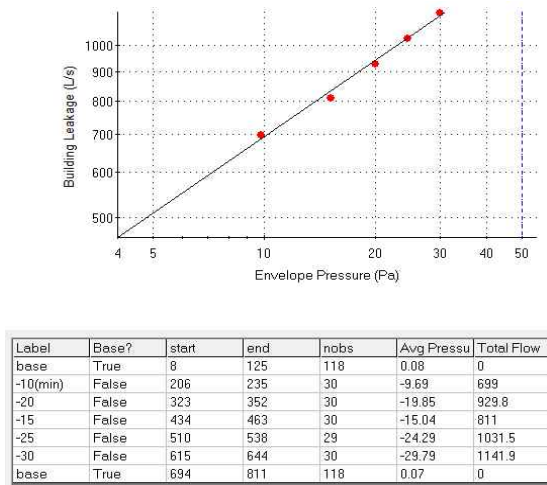


그림 84. 2000cm³ Effective Leakage area

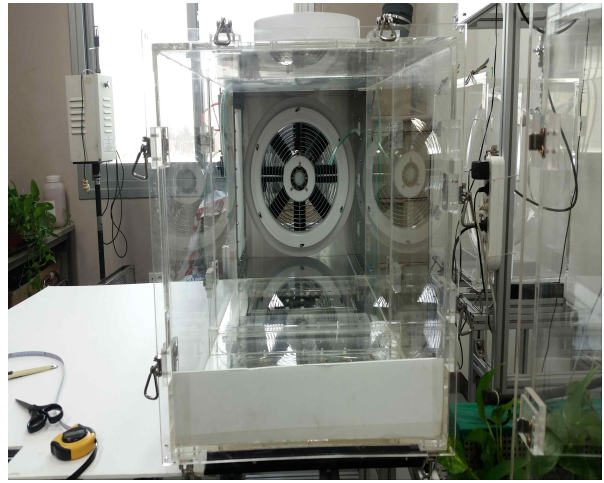


그림 85. 2000cm³ 개방 실험

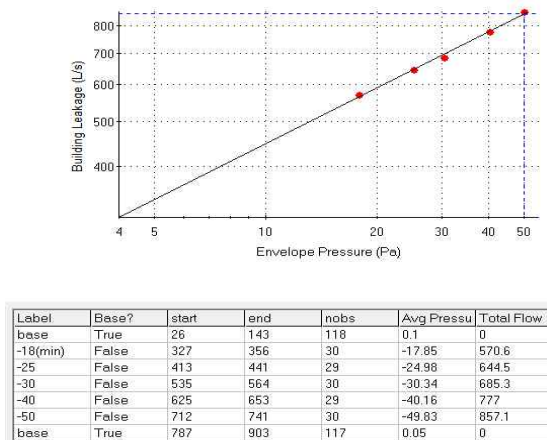


그림 86. 1500cm³ Effective Leakage area

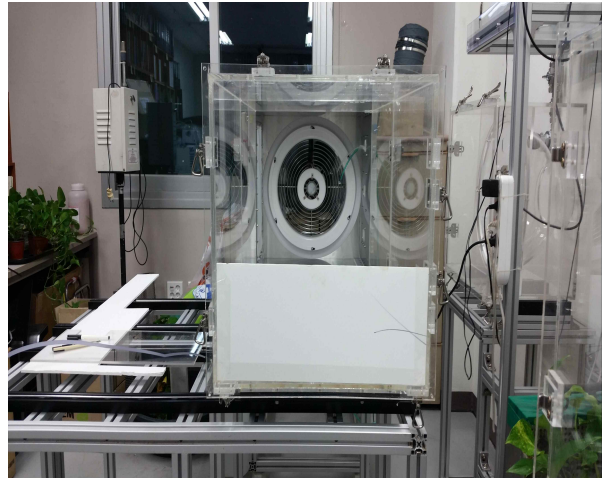


그림 87. 1500cm³ 개방 실험

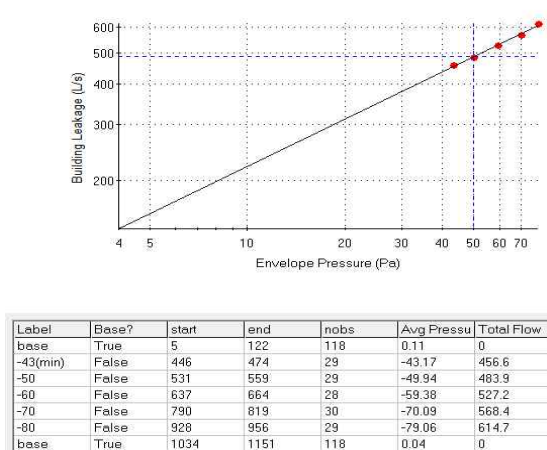


그림 88. 1000cm³ Effective Leakage area

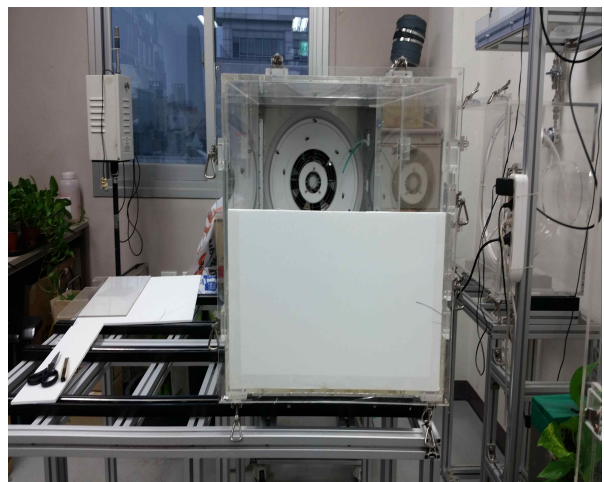
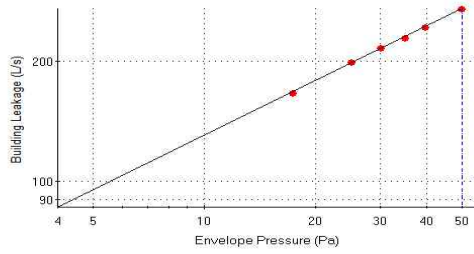


그림 89. 1000cm³ 개방 실험



Label	Base?	start	end	nobs	Avg Pressu	Total Flow
base	True	4	121	118	0.09	0
-17(min)	False	195	224	30	-17.23	167.1
-25	False	267	296	30	-24.91	189.7
-30	False	352	380	29	-29.96	216.4
-35	False	426	455	30	-34.75	229.5
-40	False	524	551	28	-39.47	243.9
-50	False	588	616	29	-49.74	271.4
base	True	663	780	118	0.05	0

그림 90. 500cm³ Effective Leakage area

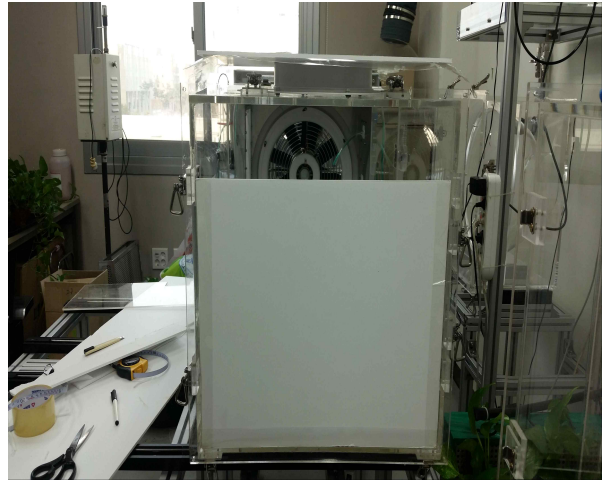


그림 91. 500cm³ 개방 실험

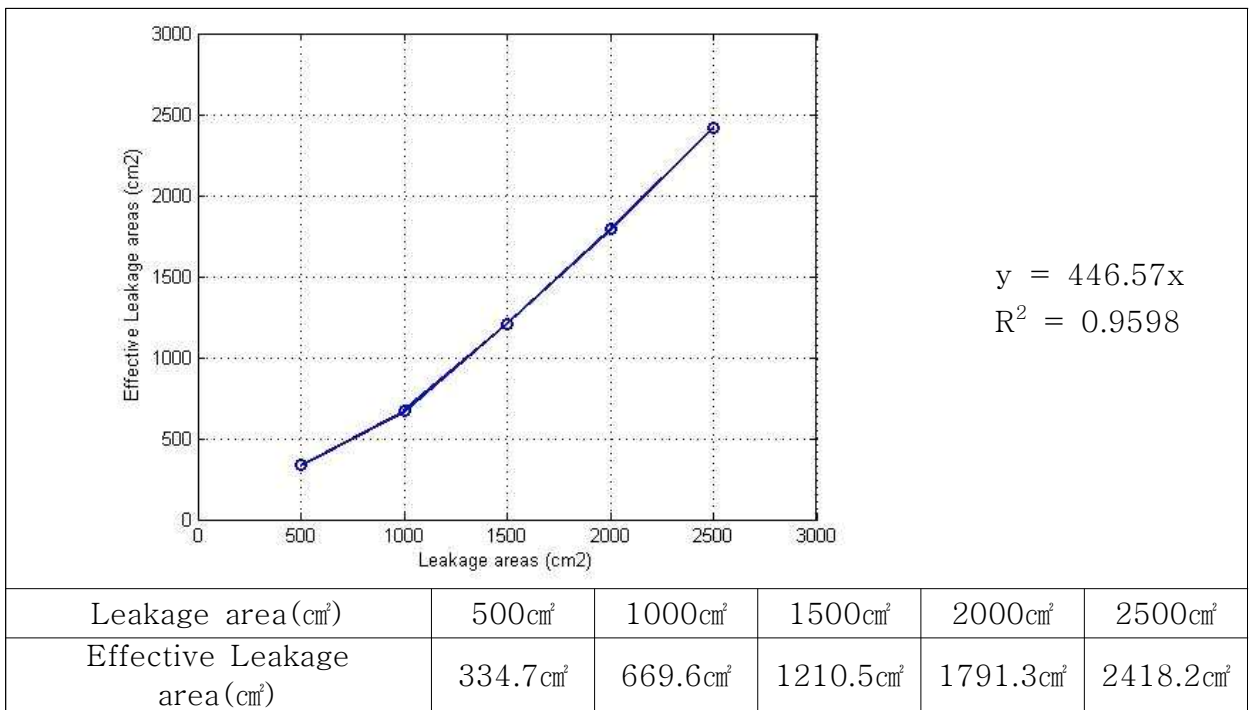


그림 92. 보완 된 Chamber의 안정성을 위한 Effective Leakage area 결과

- 2500cm³, 2000cm³, 1500cm³, 1000cm³, 500cm³ 전면을 open하여 실험진행
- R2 = 0.9598을 나타내며 입구 외에 누출면적이 적은 것으로 확인
- 이론 누출수치보다 낮게 보이지만 계산 공식에서 나타나는 ±4~50%을 추가하면 비슷한 경향 확인 할 수 있었음

(11) 실시간 컴퓨터 모니터링 및 환기시스템 최적 운전 조건 연구

(가) 환기시스템 제어 및 산출방법 연구

표 3-10. 공기정화시스템 정화량 산출방법

$VR = A \cdot v$	$ART = L \cdot v^{-1}$
VR: 공기정화량($\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$)	ART: 공기체류시간(sec)
A: 바이오필터의 단면적(cm^2)	L: 식재토양의 깊이(cm)
v : 바이오필터내 풍속($\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$)	v : 바이오필터내 풍속($\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$)

– Stabilization of Soil Moisture and Improvement of Indoor Air Quality by a Plant-Biofilter Integration System 논문에서 나타난 공식을 이용

(나) TVOC와 CO₂ 정화향상 실험 진행 및 정화효율을 확인

표 3-11. TVOC 제거효율 운전 조건 연구

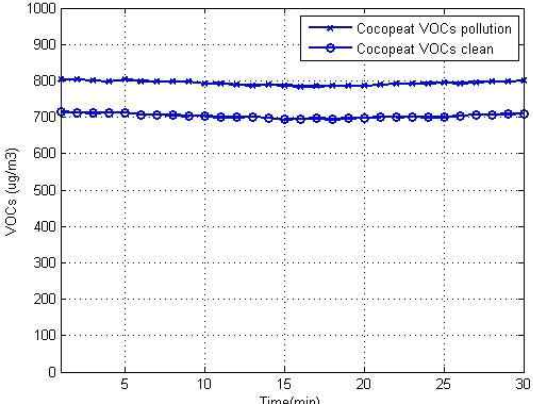
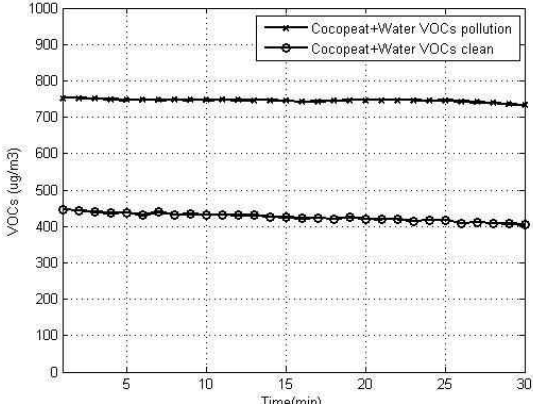
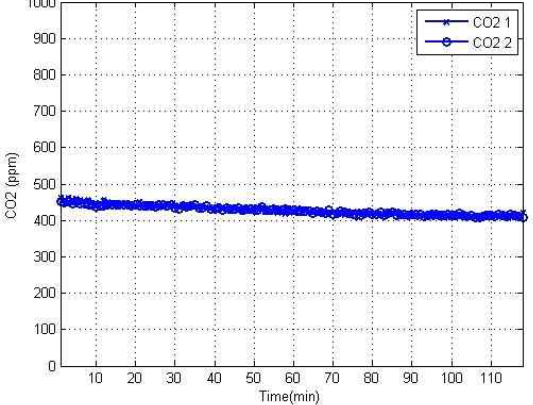
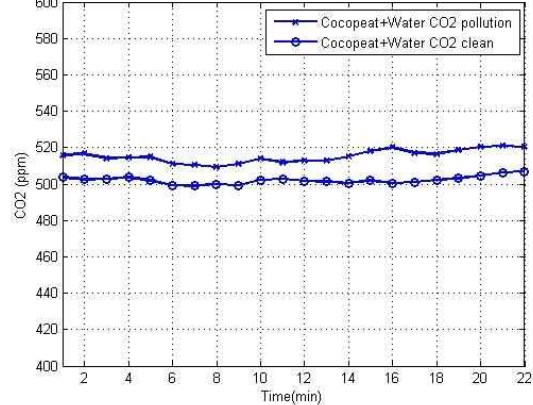
건조상태 TVOC 제거효율	습식상태 TVOC 제거효율
	
입구 농도 평균 : 793.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	입구 농도 평균 : 745.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
출구 농도 평균 : 703.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	출구 농도 평균 : 425.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
정화 효율 평균 : 11.4 %	정화 농도 평균 : 43 %

표 3-12. CO₂ 제거효율 운전 조건 연구

건조상태 CO ₂ 제거효율	습식상태 CO ₂ 제거효율
	
입구 농도 평균 : 493.4 ppm	입구 농도 평균 : 515.2 ppm
출구 농도 평균 : 498.9 ppm	출구 농도 평균 : 502.1 ppm
정화 농도 평균 : -	정화 농도 평균 : 2.54 %

- 식물의 생육을 위해 수분이 토양에 일정량 함유되고 있으나 ECOPS에 사용될 베드필터는 건조하였을 때의 제거가능성을 확인
- TVOC와 CO₂는 수분이 함유되었을 때 제거효율이 높아지는 것을 확인
- 유속은 0.18m/s에서 측정하였으며 건조상태인 베드필터 보다 수분을 일정량 지속적으로 공급하여 정화할 수 있는 방안으로 연구되어야 함

(다) 2차 성능평가장치에서 발생된 TVOC test 실험 진행

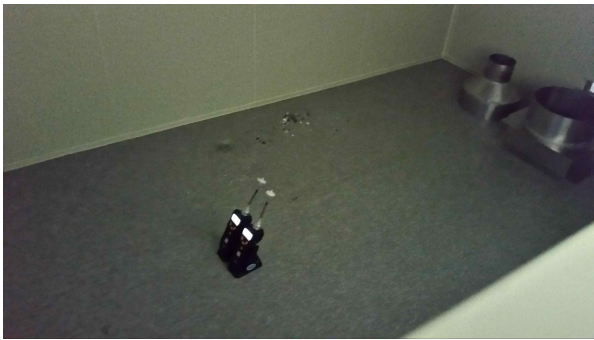


그림 93. 2016년 5월 10일 측정상황



그림 94. 2016년 6월 1일 측정상황

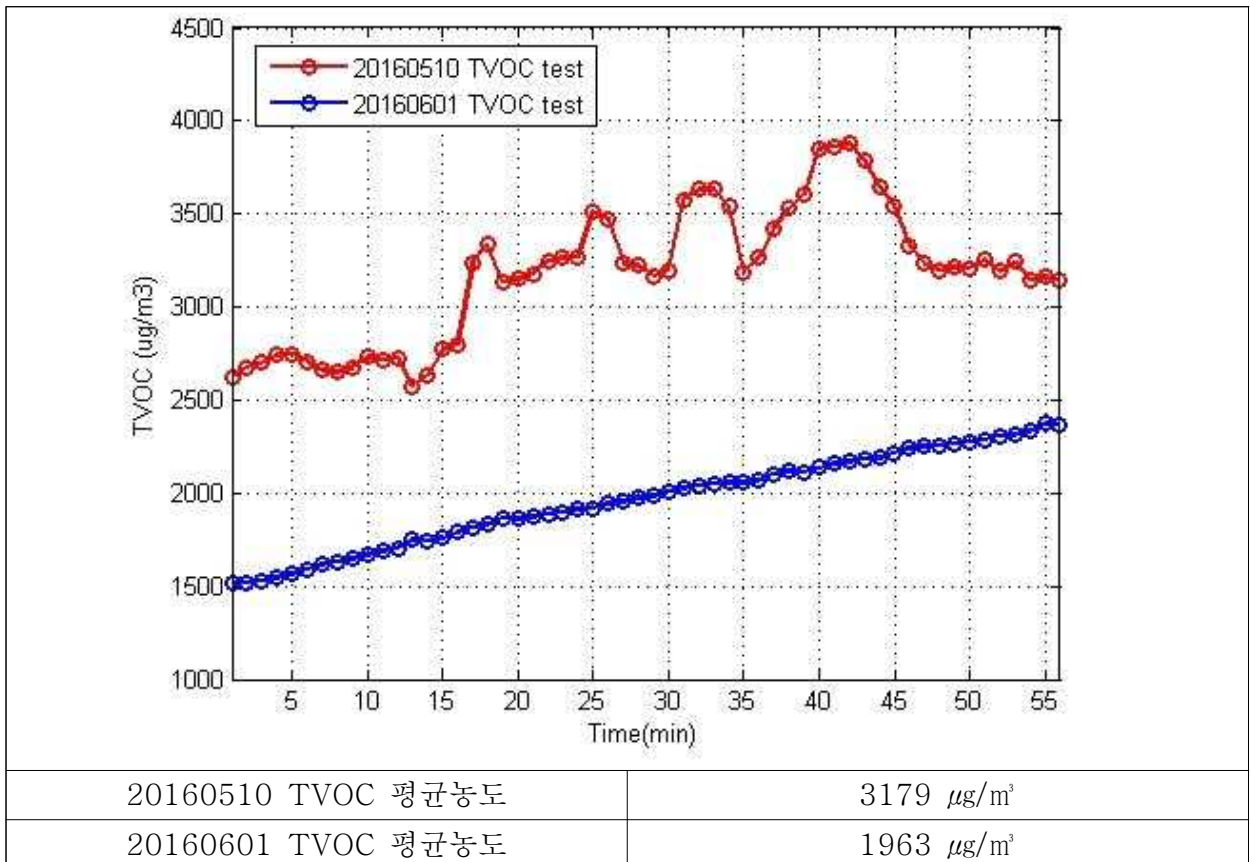


그림 95. 2차 성능평가 장치 내부 TVOC 측정 결과

- 2016년 5월 10일 2차 성능평가 장치 중간검사 및 TVOC 발생량을 확인
- 2차성능장치 발생 TVOC 수정 보완
- 실내 온도를 상승시켜 유해가스 분자운동이 활성화 시켜 기화시키는 원리인 Bake-Out 방식을 통해 2차성능장치내 TVOC를 기화시켜 제거

- 2차 성능장치 내 온도를 6~10시간 동안 상승 시킨 후 환기를 5번 반복하여 장치 내 TVOC 농도 실내권고기준 수준으로 저감.

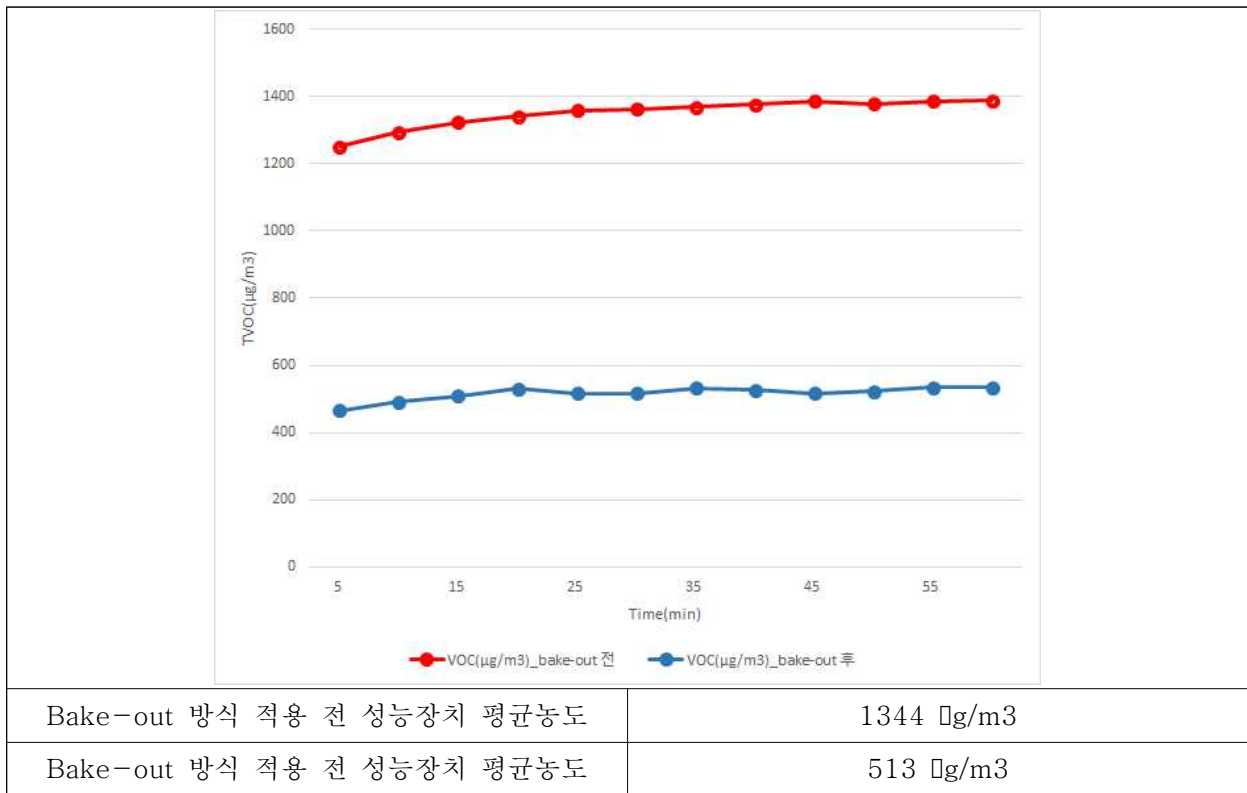


그림 96. 수정 보완된 챔버 내 TVOC 농도

(라) 실내 공간을 고려한 2차 성능평가 장치 구조 설계 계획

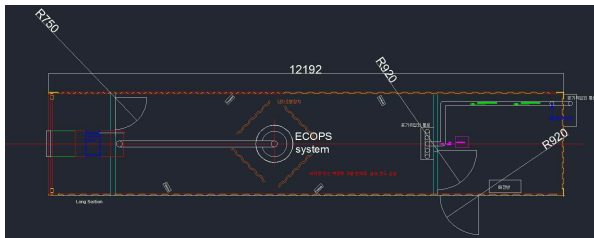


그림 97. 1차 2차성능평가장치 설계도

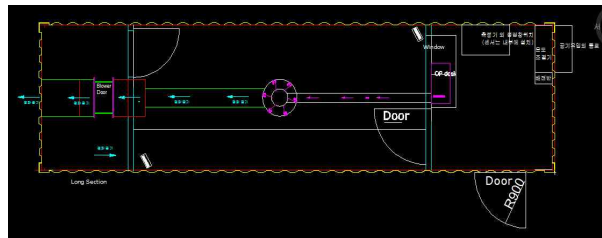


그림 98. 2차 2차성능평가장치 설계도

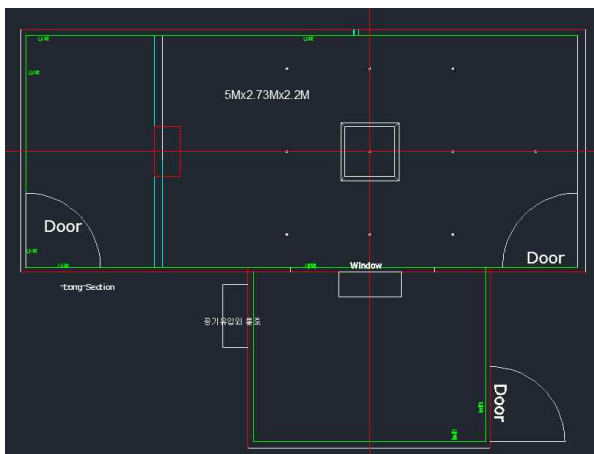


그림 99. 3차 2차성능평가장치 설계도

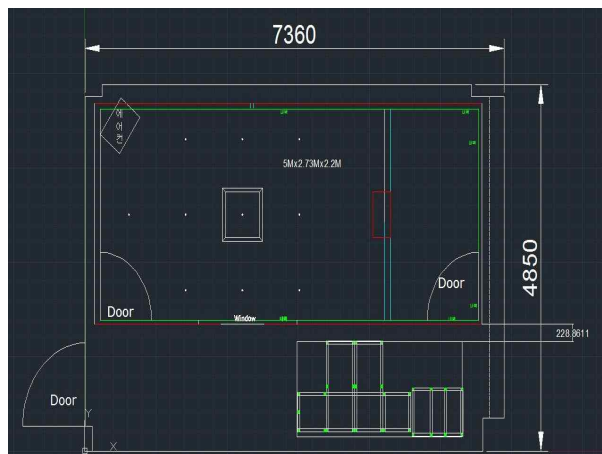


그림 100. 4차 2차성능평가장치 설계도

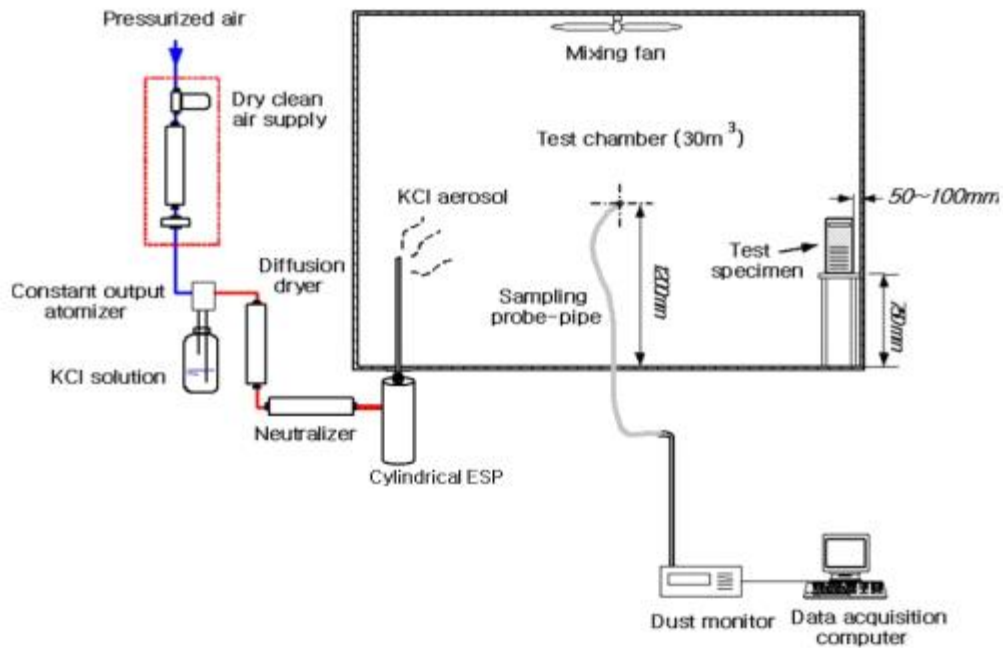


그림 103. 2차 성능평가장치 설치

- 일상생활환경을 고려한 2차성능평가 장치 내 각 요소기술을 통합한 통합장치 및 측정 장비 설치
- 본 요소기술 통합장치의 성능평가를 위해 진행된 2차 챔버 실험의 경우, ECOPS 시스템을 시험할 수 있는 국내 연구원 또는 기성장비가 개발되어 있지 않은 상황이어서 관련 기술평가 시 적용되는 국내 기술규격을 준용함.
- 세부적으로 KACA 규격의 입자 청정화능력 시험방법을 토대로 진행하였고, 시험방법은 SPS-KACA002-132 규격에 따라 일정 크기의 챔버 내에서 공기청정기를 가동하는 경우, 공기 중 입자의 농도 감소량을 측정하는 시험으로 공기청정기 운전에 의한 입자농도와 자연감소에 의한 입자 농도를 측정하여 공기정화능력을 평가함
- 운전에 따른 입자농도 변화 측정을 위해 제작된 2차챔버에서 $0.3\mu\text{m}$ 입자 크기 채널의 배경 동도가 $300,000\text{개}/\text{m}^3$ 이하가 되도록 유지한 이후, 교반기를 통해 입자를 일정 농도로 공급하는 시험입자 공급장치(Dust Generator)로 KCl 입자를 발생/공급하며, 시험입자 공급이 종료된 후 챔버 내 설치된 요소기술 통합장치를 운전하여 챔버 바닥으로부터 120cm에 설치된 샘플링 튜브를 이용해 입자농도를 연속 모니터링 함.
- 성능평가 장치가 실내에 설치할 수 있게 되어 열선 및 온냉방 유지가 가능
- 모니터링 설비와 계측기 위치, Data 샘플링 측정 위치 변경으로 모니터링 장소를 수정 설계

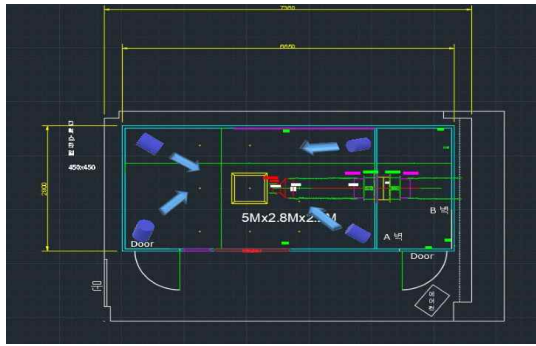


그림 104. 일상생활 환경을 고려한 Chamaber 내부 환경 조성

- 실험방법 중량법을 이용한 1Cycle 방식과 밀폐공간 내 공기 Recycle을 통해 정화되는 방법 2가지의 실험을 진행



그림 105. 1Cycle / Recycle 실험 측정

(바) 실내 공간 면적을 고려한 환기시스템 제어 및 산출방법

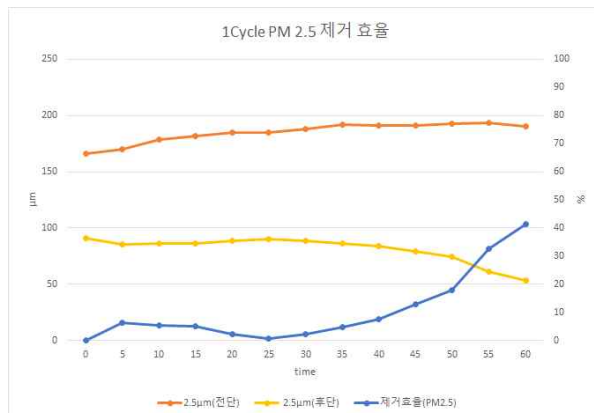
- 1차 Chamber 실험 결과를 통한 통합요소기술장치의 CADR(Clean Air Delivery Rate)를 산정
- CADR평가법은 미국 AHAM(Association of Home Appliance Manufacturer)에서 표준으로 지정한 공기청정 성능지수로서 Tobacco Smoke, Dust, Pollen에 대한 제거 성능을 표기
- 측정된 결과를 통하여 입자 감쇠상수 감쇠상수 K_e 와 자연감쇠상수 K_n 을 산정

표 3-13. C ADR 산정식

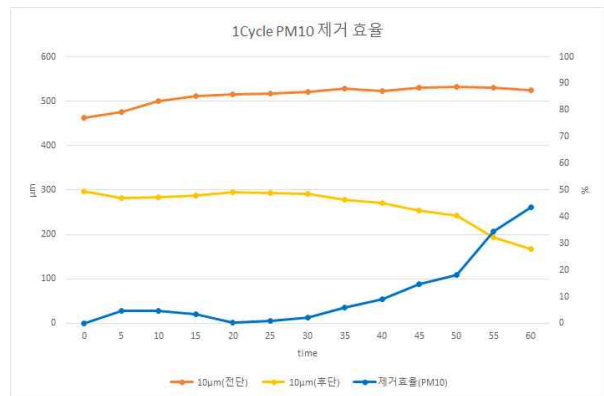
$C_t = C_{ie}^{-Kt}$	$V(K_e - K_n)$
C_t : t분 경과후 입자수 C_i : 초기 입자수 K : 감쇠상수 (minute ⁻¹) t : 시간 (minute)	V : room 체적 (ft ³)
감쇠상수 산정	CADR 지수 산정

- 본 통합요소기술장치의 필터면적과 2차 Chamber 내부 용량에 따른 환기회수를 고려하여 CADR 지수를 산정 하여 통합요소기술장치의 운전조건을 적용하여 실험 진행

(사) 환기시스템 운전조건 적용



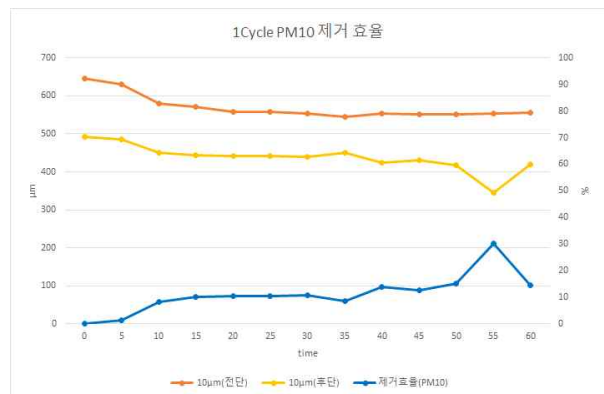
환기시스템 운전 조건 미적용 1cycle 미세먼지 농도



환기시스템 운전 조건 미적용 1cycle 미세먼지 농도



환기시스템 운전 조건 적용 1cycle 미세먼지 농도



환기시스템 운전 조건 적용 1cycle 미세먼지 농도

그림 106. 1Cycle 방식 환기시스템 적용 전후 미세먼지 농도 그래프

- 2017.05.06. 도출된 환기시스템 운전 조건을 적용 후 실험
- 산출된 환기 조건 적용 시 적용 전 보다 미세먼지 제거효율이 높아진 것을 확인
- 환기시스템 운전 조건 적용 시 적용 전 제거효율 보다 PM10 28.2%, PM2.5 32% 정도의 제거 효율이 상승

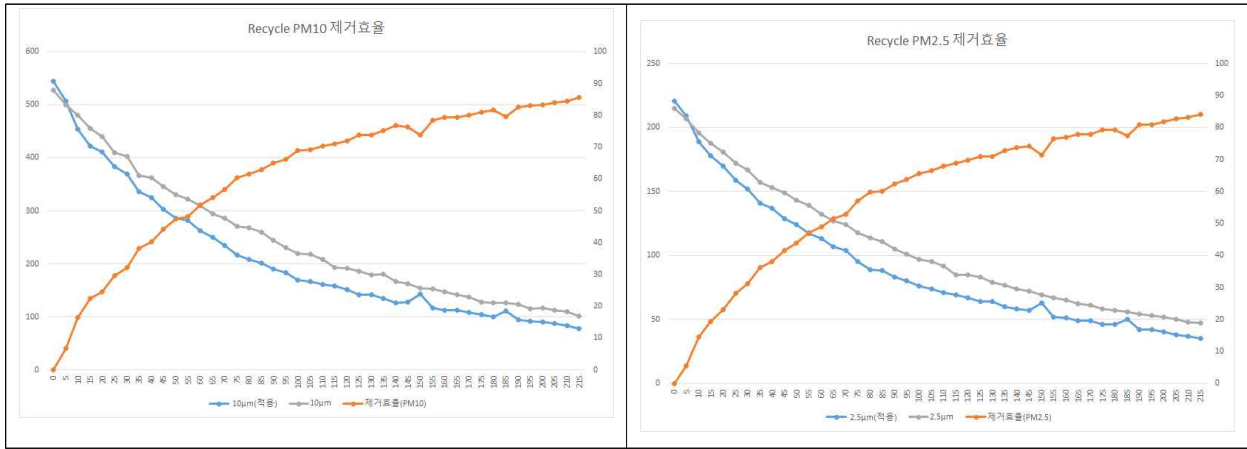
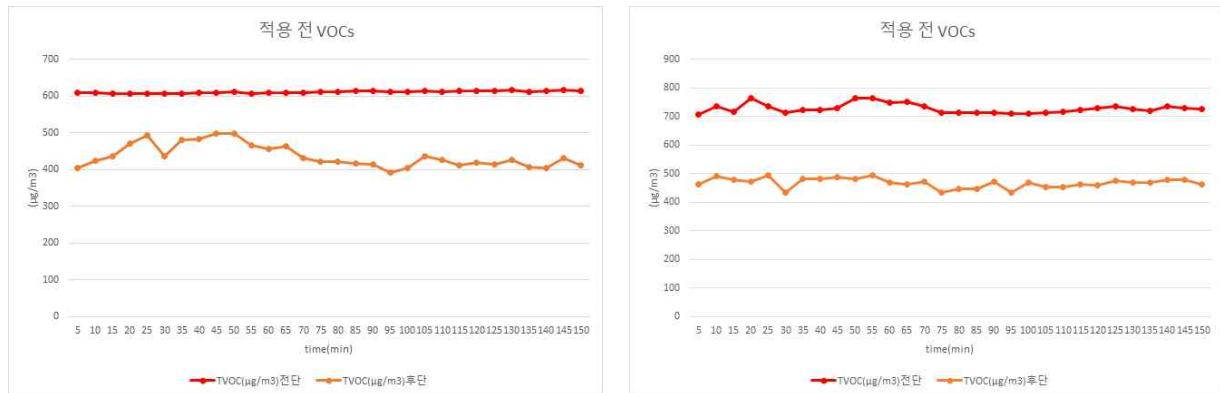


그림 107. Recycle 방식 환기시스템 적용 후 미세먼지 농도 그래프

- Recycle 실험에 환기시스템 운전 조건 적용 전/후 1Cycle 방식과 동일하게 실험 진행
- 운전 조건 적용 시 운전조건을 미적용 하기 전 보다 미세먼지의 제거효율이 PM10 12%, PM2.5 7.2% 정도 상승
- 운전 조건 적용 시 제거 속도도 상향되는 것을 확인

표 3-14. 환기시스템 적용 전/후 TVOC농도 변화 그래프



1Cycle 적용 전 TVOC

1Cycle 적용 후 TVOC



Recycle TVOC

-
- VOC의 경우, 1Cycle 실험에서는 환기시스템 운전 적용시 TVOC 농도가 적용 전인 69.93% 보다 60.38%로 약 9%의 제거효율이 높은 것으로 나타났으며, 적용 전의 제거율 보다 안정적으로 제거효율이 나타났음
 - Recycle 실험에서는 초기 농도보다 약 27%의 TVOC 농도가 감소하는 것을 보이며, 조건 물질 노출시 초동대응 가능여부를 판단하기 위해 진행이 되었음.

2절. 식생기반 Eco-Purification 기술 개발

가. EcoPS (Eco Purification System) 기술 개요

(1) EcoPs (Eco Purification System) 공기정화 개요

- EcoPS는 식물의 잎, 뿌리, 뿌리부 미생물, 식생용토 등을 활용한 생물·화학적 공기정화 기술과 유용 미생물 및 광물질필터 등을 활용한 생물·물리적 공기정화 기술을 융·복합하여 초미세먼지(PM2.5), 미세먼지(PM10) 제거와 SBS(Sick Building Syndrome) 완화를 위한 친환경 실내공기 정화시설임

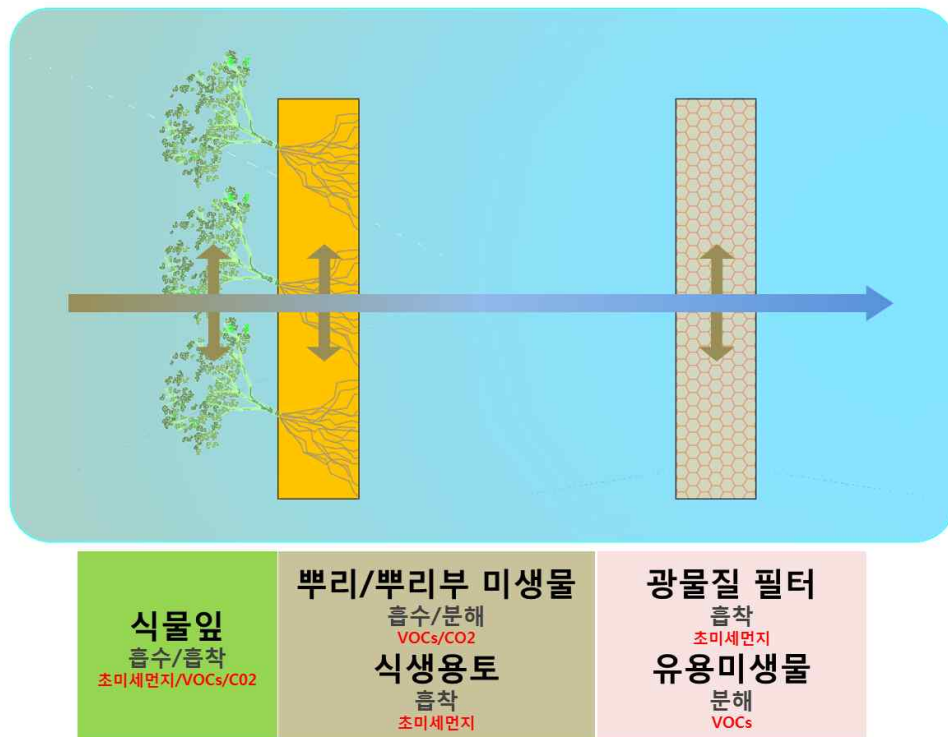


그림 108. EcoPS (Eco Purification System) 정화 Process

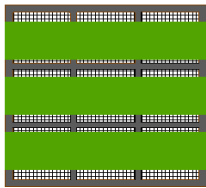
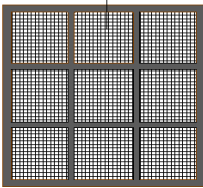
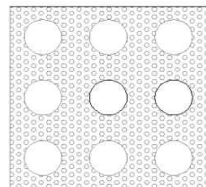
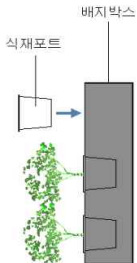
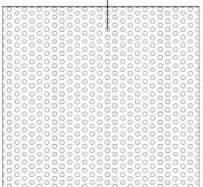
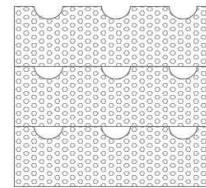
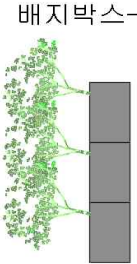
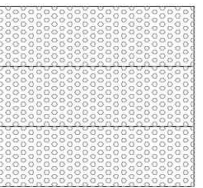
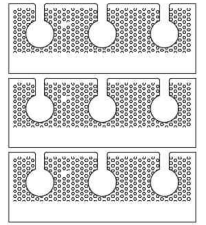
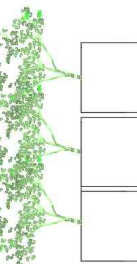
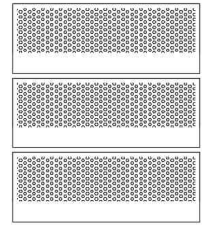
- 식물은 광합성, 증산작용, 토양 내 미생물과의 상호작용을 통해 공기 중 오염물질을 제거하며 잎에서 흡수된 오염물질은 식물의 대사산물로 이용되어 일부는 제거되고 일부는 뿌리로 이동하여 뿌리부 미생물의 영양원으로 활용됨
- 포름알데히드와 같은 기체상 오염물질은 잎의 기공을 통해 흡수된 후 광합성과정을 거치면서 정화되고 먼지 등 입자성 오염물질은 식물의 증산작용을 통해 발생한 부압에 의해 토양 내 흡착되어 유기물질은 분해되고 무기물질은 토양 내 흡착됨
- 1단계 식생기반 필터는 생물학적 기능을 이용하므로 식물의 생육정도나 주위환경의 영향으로 정량적 기능유지에 차이가 발생할 수 있으므로 유용미생물을 활용한 광물질 필터를 2단계 정화필터로 사용하여 정화효율을 극대화할 수 있도록 함

나. 식생기반 Eco Purification System 기능 검증

(1) 식생모듈 설계 및 제작

- 식생모듈은 EcoPS(Eco Purification System)의 식생기반 Eco-Purification 요소기술로서 공기정화 요소인 식물의 생육기반이 되는 장치로 식물이 원활히 성장할 수 있고 유지관리가 용이해야 하며, 오염된 공기가 식생모듈을 통과하여 식물 잎, 뿌리 및 뿌리부 미생물, 식생용토를 통해 초미세먼지(PM2.5)와 VOCs가 제거되는 시스템이므로 공기가 투과될 수 있는 구조로 제작함

표 3-15. 식생모듈 시제품(연차별)

1차년도 (1안)	  	
1차년도 (2안)	  	
2차년도	배지박스-적층   	
3차년도	  	

- 1차년도 식생모듈(1안)은 식물이 식재되는 ‘식재포트’와 식물이 성장하는 ‘배지박스’로 구분하여 제작함
- 식재포트는 아크릴 소재로 제작하였으며 포트 하부에 구멍을 뚫어 상단에 공급된 물이 하단에 전달되도록 하였으며, 배지박스는 수분에 의한 부식과 내부 배지 및 외부의 충격에 강한 S.T.S 재질로 프레임을 제작하였고 전면부와 후면부의 공기의 흐름을 위해 S.T.S재질의 망을 설치함
- 식재포트와 배지박스는 연결되는 구조로 식재포트 내 식재되는 식생의 뿌리가 시간이 지남에 따라 배지박스로 확장하여 식생의 공기정화 기능이 주로 이루어지는 뿌리의 발달과 이로 인한 뿌리부 미생물의 서식공간이 증가할 수 있도록 함
- 1차년도 식생모듈(1안)의 공기투과율을 알아보기 위하여 Leakage Areas 측정을 한 결과 식재포트가 공기의 흐름을 방해하고 식생모듈의 전체면적이 아닌 식재포트가 없는 곳으로 공기의 흐름을 유도하여 식생모듈 전단부에서 지체현상 발생함
- 이를 개선하기 위하여 식재포트를 없애고 배지박스에 직접 식물을 식재하여 식생모듈 전면에서 공기를 투과시킬 수 있는 1차년도 식생모듈(2안) 시작품을 제작함
- 또한 공기의 투과를 위해 설치한 식생모듈 전단과 후단의 와이어메쉬가 내부배지의 압력에 의해 변형이 발생하여 타공판으로 교체하여 내구성을 증진시킴
- 분리식 식재포트를 배지박스 내 삽입하는 방식으로 식물의 생장불량 및 고사 등의 이유로 식물 교체 시 유지관리가 용이함
- 1차년도 식생모듈(2안)의 장기적 식물생육을 관찰한 결과 식물뿌리가 식재포트의 구멍을 통과하여 배지박스로 확장하는데 용이하지 않아 식물생장에 문제가 발생하였고 500*500mm 크기의 식생모듈은 관수 후 일정기간 경과 시 상부와 하부의 토양수분의 차이가 발생함
- 2차년도 식생모듈은 식생모듈에 식물을 바로 식재하여 뿌리 활착이 용이하도록 제작하였고 1차년도 식생모듈(500×500×100mm)보다 2차년도 식생모듈(500×165×100mm)은 단 위크기를 줄여 식생모듈 내 수분분포가 균등하도록 개선함
- 기존에 개발되었던 벽면녹화장치의 사례를 보면 식물 생육에 가장 빈번하게 발생하는 하자는 관수부분이며 수직으로 설치하는 제품의 특성상 중력방향으로 수분이 이동하기 때문에 상부는 건조하고 하부는 과습되는 문제점이 발생함
- 1, 2차년도 식생모듈의 관수 방법이 상부의 관수장치에서 물을 보내서 각각의 식생모듈을 거쳐 하부로 전달되는 방식이므로 식생모듈별 균일한 토양수분 유지를 위하여 3차년도 식생모듈은 식생용토가 담겨지는 부분과 물이 담겨지는 부분을 분리하여 일정량의 물이 지속적으로 식생용토로 유입될 수 있도록 식생모듈의 구조를 변경함
- EcoPs 상부에 설치된 관수장치에서 상부의 식생모듈로 물이 떨어지면 일정수위(17mm)를 채우고 하부의 식생모듈로 overflow되어 전달되는 방식으로 각각의 식생모듈은 일정량의 물을 포함하고 있어 물은 아래로부터 모세관 작용에 의해 식물에 흡수되는 저면관수 방식이며 지속적인 관수에 의해 토양이 단단해져 식물의 생육을 저해하는 단점과 상하부 토양수분의 차이로 건조와 과습이 발생하는 문제점을 개선하였음

표 3-16. 식생모듈 개선방향(연차별)

모듈type	시제품 특징 및 개선점	문제점
1차년도 (1안)	-식재포트와 배지박스로 분리 -공기투과를 위해 망구조로 제작 -식재포트의 식물뿌리가 성장하면서 배지박스로 확장	-식재포트에 의한 공기흐름의 방해
1차년도 (2안)	-식재포트를 배지박스에 삽입 -배지박스의 내구성 향상을 위해 망구조에서 타공판으로 변경	-식재포트에서 배지박스로 식물뿌리 확장 어려움
2차년도	-식물의 원활한 생육을 위하여 식생모듈에 직접 식재 -상부에서 하부로 물의 전달이 용이하도록 식생모듈 단위크기 변경 (500×500×100mm→500×165×100mm)	-다단으로 적층시 하부에 위치한 식생모듈과 상부 식생모듈의 수분차이 발생으로 균일한 관수 어려움
3차년도	-식생모듈을 식물이 식재되는 부분과 물이 담겨지는 부분을 공간적으로 분리하여 저류된 물이 지속적으로 식물쪽으로 유입되도록 개선	-

(2) 식생모듈의 미세먼지 제거효율 검증

(가) 1차 측정 _ 식생용토 선정 실험

- 식생모듈의 미세먼지 제거효율을 알아보기 위하여 식생모듈이 설치될 수 있도록 두께 10mm의 투명아크릴 재질을 사용하여 내부크기 500*500*500mm로 챔버를 제작함
- 챔버 전면부에는 미세먼지 발생기를 설치하였고 후단부에는 blower를 설치하여 blower를 통해 오염된 공기를 흡입하면 식생모듈을 통과하여 정화된 공기가 배출되는 방식으로 설계함
- 미세먼지 발생기에서 유입된 미세먼지가 식생모듈을 통과하기 전후의 먼지 농도를 측정하여, 식생모듈의 미세먼지 제거효율을 측정함

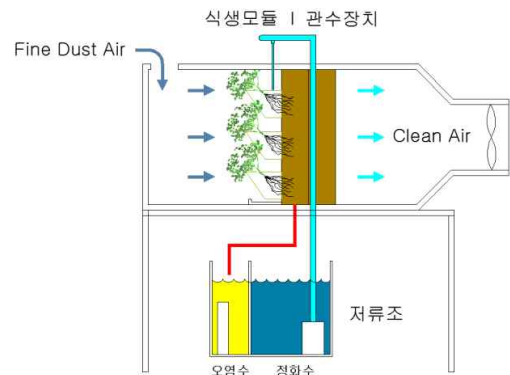
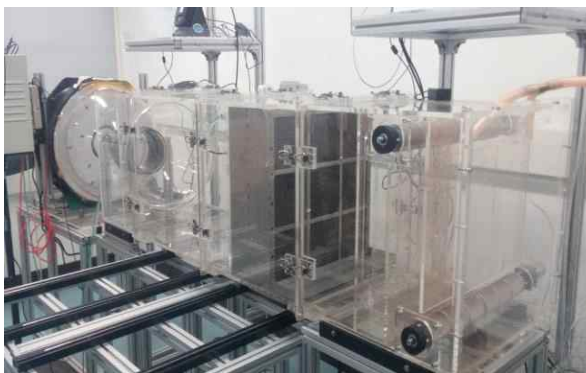


그림 109. 측정챔버_1차

- 식생모듈에서 식물생육과 미세먼지 제거 기능을 하는 식생용토의 선정을 위해 하이드로볼 (황토와 물을 혼합하여 고온에서 소성가공), 코이어펠트(야자열매의 과피를 이루는 섬유를 추출하여 접착가공), 코코피트(코코넛 열매에서 섬유질을 추출하고 남은 부위를 분쇄가공) 등 3종을 선별하여 미세먼지 제거실험을 진행함
- 식생모듈의 형태에 따른 미세먼지 제거효율을 검토하기 위하여 식생용토가 담겨 있는 배지박스 전면부에 식물을 식재할 수 있는 포트가 설치된 '식재포트 type'과 배지박스 자체에 식물을 식재할 수 있는 구조로 되어 있는 '배지박스 type'을 제작하여 실험을 진행함

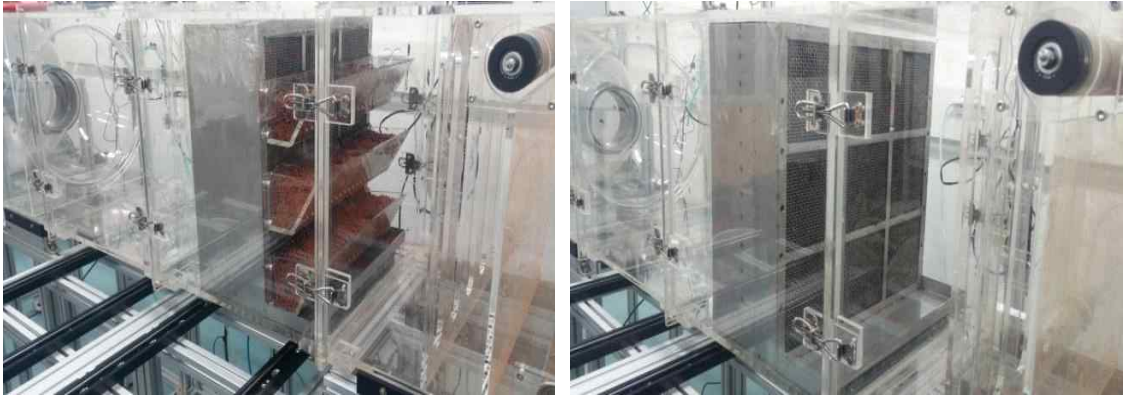


그림 110. 식생모듈 type_1차년도 1안 (좌-식재포트 type, 우-배지박스 type)

- 실험조건은 아래 표와 같이 하이드로볼, 코이어펠트, 코코피트의 식생용토 3종과 식재포트 type, 배지박스type의 식생모듈 2종으로 총 6가지 조건으로 실험 진행함

표 3-17. 식생모듈의 미세먼지 제거효율 실험조건_1차년도(1안)

구분	배지종류	식생모듈 type	무게	필터 사이즈
1	하이드로볼 (5mm)	식재포트 type	42Kg	50cm X 50cm X 10cm
2	하이드로볼 (5mm)	배지박스 type	40Kg	
3	코이어펠트	식재포트 type	15Kg	
4	코이어펠트	배지박스 type	13Kg	
5	코코피트	식재포트 type	22Kg	
6	코코피트	배지박스 type	20Kg	

- 식생배지별 미세먼지 제거효율 측정결과는 아래 표에서 보는 바와 같이 PM10과 PM2.5 모두 코코피트, 하이드로볼 (5mm), 코이어펠트 순으로 제거효율이 높은 것으로 측정됨
- 이는 식생모듈의 공기 투과정도를 측정하기 위해 선행한 Leakage Areas측정 시 보여진 결과와 반비례하는 것으로 코이어펠트 > 하이드로볼 (5mm) > 코코피트 순으로 Leakage Areas가 넓은 것으로 측정됨
- 식생모듈 type은 각각 배지별로 비교하면 배지박스 type보다 식재포트 type이 미세먼지 제거에 우수한 효율을 보이는 것으로 판단됨
- 식재포트 type은 배지박스에 식재포트가 결합된 형태로 배지박스 type보다 배지층이 두껍기 때문에 효율이 높은 것으로 보여짐

표 3-18. 식생모듈별 미세먼지 제거율_1차년도(1안)

구분	배지종류	식생모듈 type	제거율(%)	
			PM2.5	PM10
1	하이드로볼(5mm)	식재포트 type	23.8	31.7
2	하이드로볼(5mm)	배지박스 type	10.1	17.1
3	코이어펠트	식재포트 type	6.9	12.3
4	코이어펠트	배지박스 type	4.7	9.0
5	코코피트	식재포트 type	37.2	42.6
6	코코피트	배지박스 type	32.4	37.2

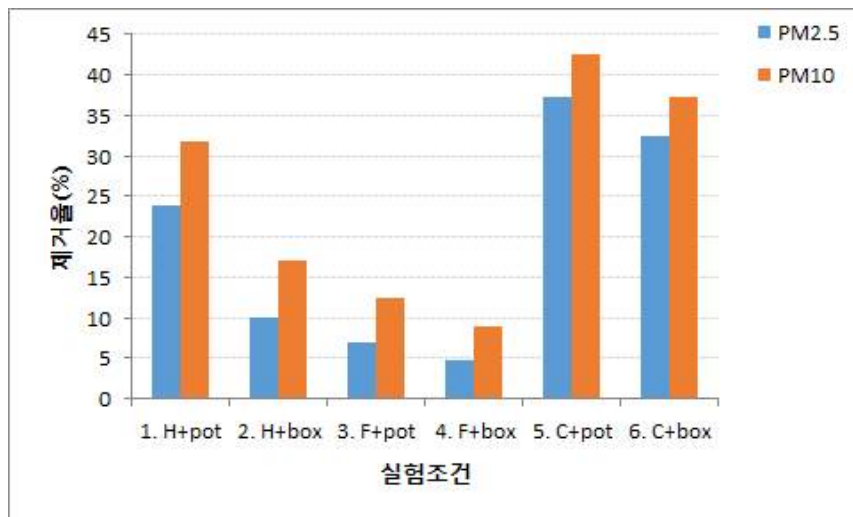


그림 111. 식생모듈의 조건별 미세먼지 제거율_1차년도(1안)

- 1차년도(1안) 식생모듈의 미세먼지 제거 실험에서 미세먼지 제거에 우수한 효율을 보인 하이드로볼과 코코피트를 식생용토로 선정하여 기존 식생모듈을 개선한 1차년도(2안) 실험을 진행함
- 식생모듈 type은 배지박스 type보다 식재포트 type이 PM10, PM2.5제거에서 우수한 효율을 보였으나 전면부의 식재포트가 유입된 공기가 식생모듈을 통과하는데 방해요소로 작용하고, 배지박스의 전면적이 아니라 부분적으로 공기흐름을 유도하여 1차년도(2안) 실험에서는 배지박스 type으로 제작하여 실험을 진행함
- 실험조건은 아래 표와 같이 하이드로볼, 코코피트 등 식생용토 2종을 선정하여 실험을 진행하였으며, 1차 실험결과 PM10과 PM2.5의 제거는 배지의 소재와 공극률의 크기에 관계가 있는 것으로 판단되어 하이드로볼 크기를 기존 5mm에서 4mm로 변경하여 실험을 진행함

표 3-19. 식생모듈 미세먼지 제거효율 실험조건

구분	식생용토종류	식생모듈 type	공시식물	필터 사이즈
1	하이드로볼(4mm)	배지박스 type	에피프레넴	50cm X 50cm X 10cm
2	코코피트	배지박스 type	에피프레넴	

- 식생용토별 미세먼지 제거효율 측정결과는 아래 표에서 보는 바와 같이 1차 실험결과와 비슷한 양상으로 PM10과 PM2.5 모두 코코피트, 하이드로볼(4mm) 순으로 제거효율이 높은 것으로 측정되어 코코피트를 식생모듈의 식생용토로 선정함

표 3-20. 식생모듈별 미세먼지 제거효율

구분	배지종류	식생모듈 type	제거율(%)	
			PM2.5	PM10
1	하이드로볼(4mm)	배지박스 type	30.1	31.0
2	코코피트	배지박스 type	41.9	44.3

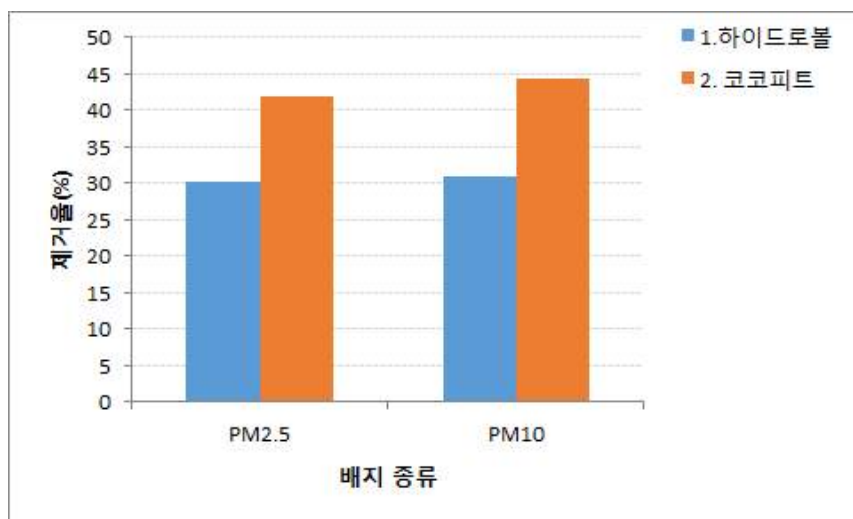


그림 112. 식생모듈의 배지별 미세먼지 제거율(%)

(나) 2차 측정

- 2차년도에 신규 제작한 식생모듈의 미세먼지 제거효율을 측정하기 위하여 식생용토로 코코피트를 사용하고 에피프렘넘(Epipremnum aureum)을 식재하여 1차년도 식생모듈과 제거율을 비교 측정함
- 전면에 미세먼지 발생기, 후면에 블로우 도어를 설치한 내부 크기 500*500*500mm로 제작된 챔버 내의 전, 후단부에 미세먼지 측정기를 설치함
- 챔버 내에 식생모듈을 설치한 후 후단의 블로우 도어를 작동하여 챔버내 공기 흐름이 발생하게 하여 챔버 전, 후단부의 측정기로 식생틀을 통과하기 전 공기와 통과한 후의 공기를 측정하여 미세먼지 제거 효율을 측정함



그림 113. 미세먼지 제거율 측정실험 (2차년도)

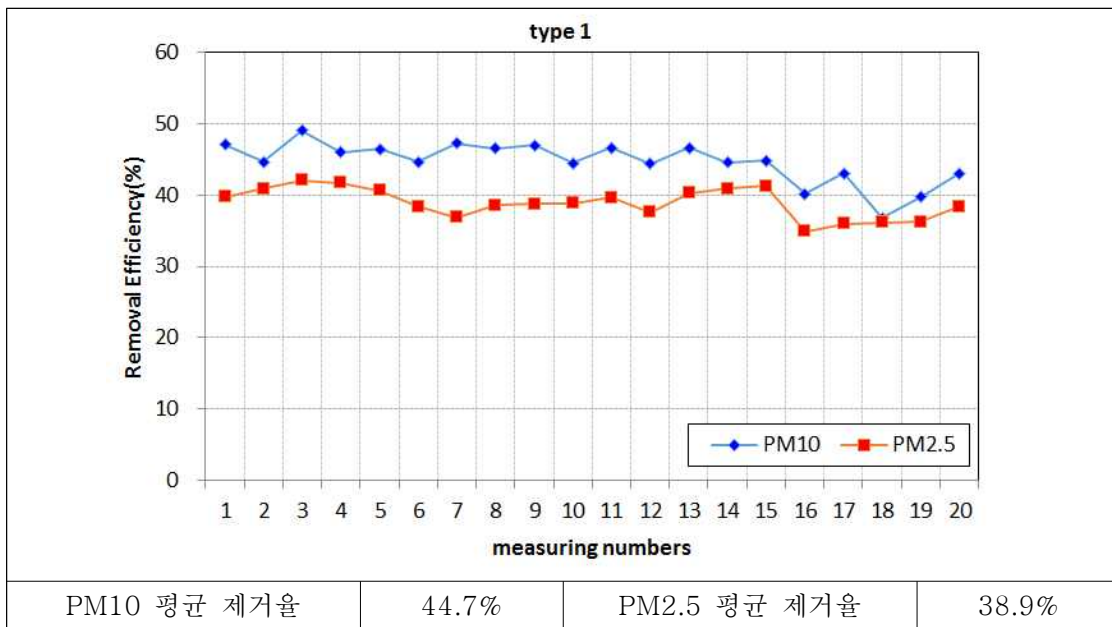


그림 114. PM10, PM2.5 제거율 _ 1차년도 식생모델

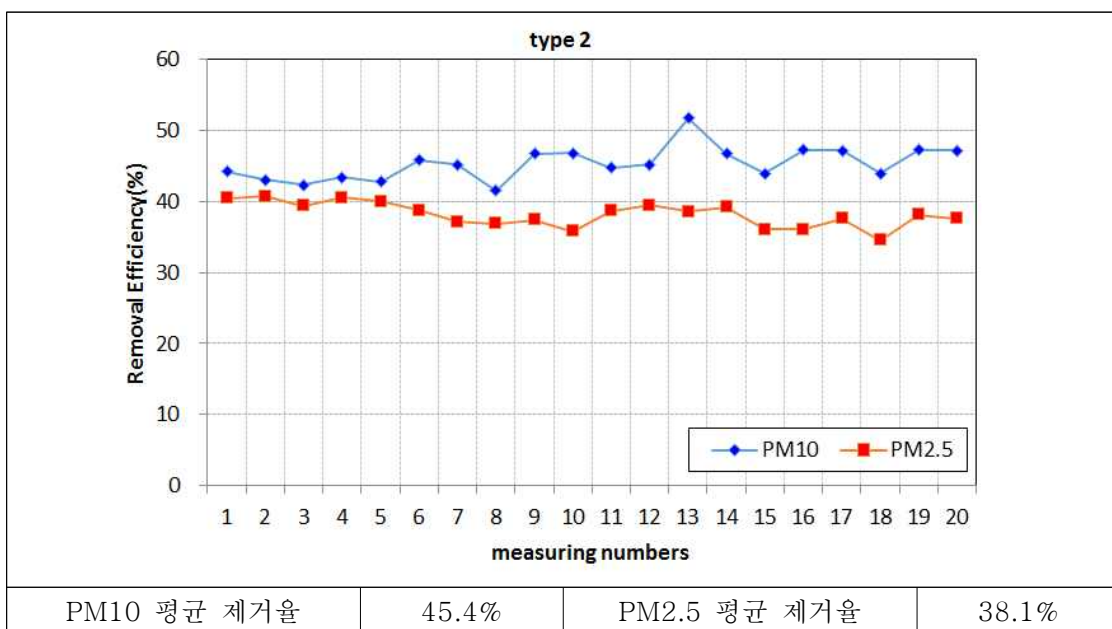


그림 115. PM10, PM2.5 제거율 _ 2차년도 식생모델

- 1차년도(Type1), 2차년도(Type2) 식생모듈의 PM10, PM2.5 제거율은 각각 44.7%, 38.9%와 45.4%, 38.1%로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보아 제거율은 식생모듈의 구조보다 식생용토의 종류 및 공급률의 차이에서 나타나는 것으로 판단됨

(다) 3차 측정

- 1차, 2차 측정은 1차 실험챔버의 전단부와 후반부에 측정센서를 설치하여 공기를 식생모듈로 1회 통과시킨 후 통과하기 전, 후의 공기를 측정하여 미세먼지 제거효율을 측정하였으나 이는 시간 대비 정화효율을 측정하는데 한계가 있음
- 3차 측정은 6,500×2,800×H2,200 크기의 밀폐된 공간에 EcoPS(Eco Purification System) 시제품을 설치한 후 미세먼지 발생기를 통해 공기 내 미세먼지 농도를 증가시킨 후 시간의 흐름에 따라 제거되는 양을 측정함
- EcoPS(Eco Purification System) 시제품 후면에 blower를 설치하여 blower를 통해 오염된 공기를 흡입하면 식생모듈을 통과하여 미세먼지를 제거하고 다시 내부로 배출하여 순환하는 방식으로 실험을 진행함

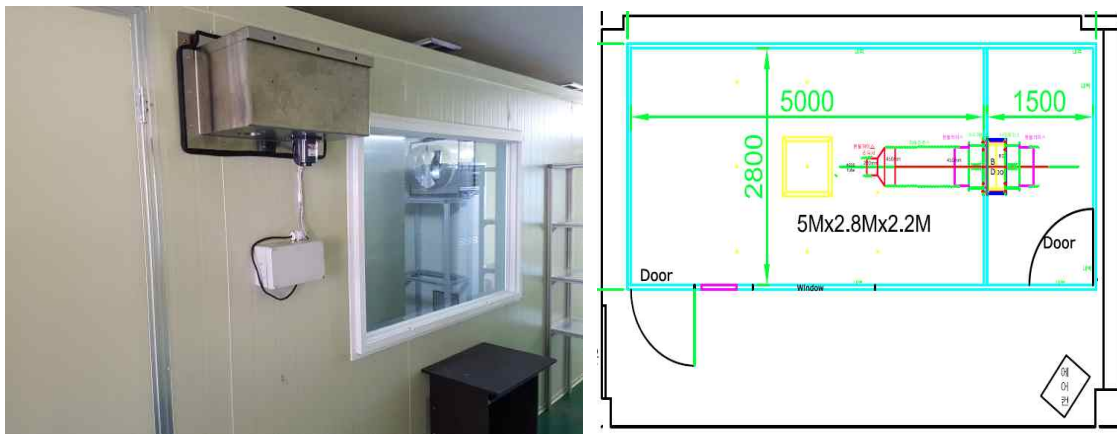


그림 116. 측정챔버_순환형

- EcoPS(Eco Purification System) 시제품은 1,065×530×H2,000mm 크기로 식생모듈, 광물질필터, 관수장치로 구성되어 있으며 후면에 blower를 연결할 수 있도록 제작됨



그림 117. ECOPS 시제품_요소기술 통합장치

- 요소기술 통합장치는 EcoPS(Eco Purification System)의 시작품으로 실내 공간을 고려한 Lab scale 규모의 2차 성능평가장치 내에 설치되어 공기정화 기능을 평가하기 위한 것임
- Stand-alone 형태의 장치로 일상 생활환경에 적용할 수 있도록 크기를 W1.0×L0.5×H2.0m로 계획하였으며 플러스파운틴(주)에서 개발하고 있는 식생기반 정화장치와 한국건설기술연구원에서 개발하고 있는 광물질필터 및 미생물필터를 장착할 수 있는 구조로 제작함
- 실험을 위한 내부장치의 교환을 위해 식생기반 정화장치는 전면부에서, 광물질필터 및 미생물필터는 측면부에서 교체가 가능하도록 제작함
- 실험 제어를 위해 공기순환 팬은 2차 성능평가장치에 설치된 블로우 도어를 배관을 이용해 연결하는 방식으로 설계하였고, 실험을 통해 적정 팬 용량이 결정되면 향후 통합장치에 설치할 수 있도록 함

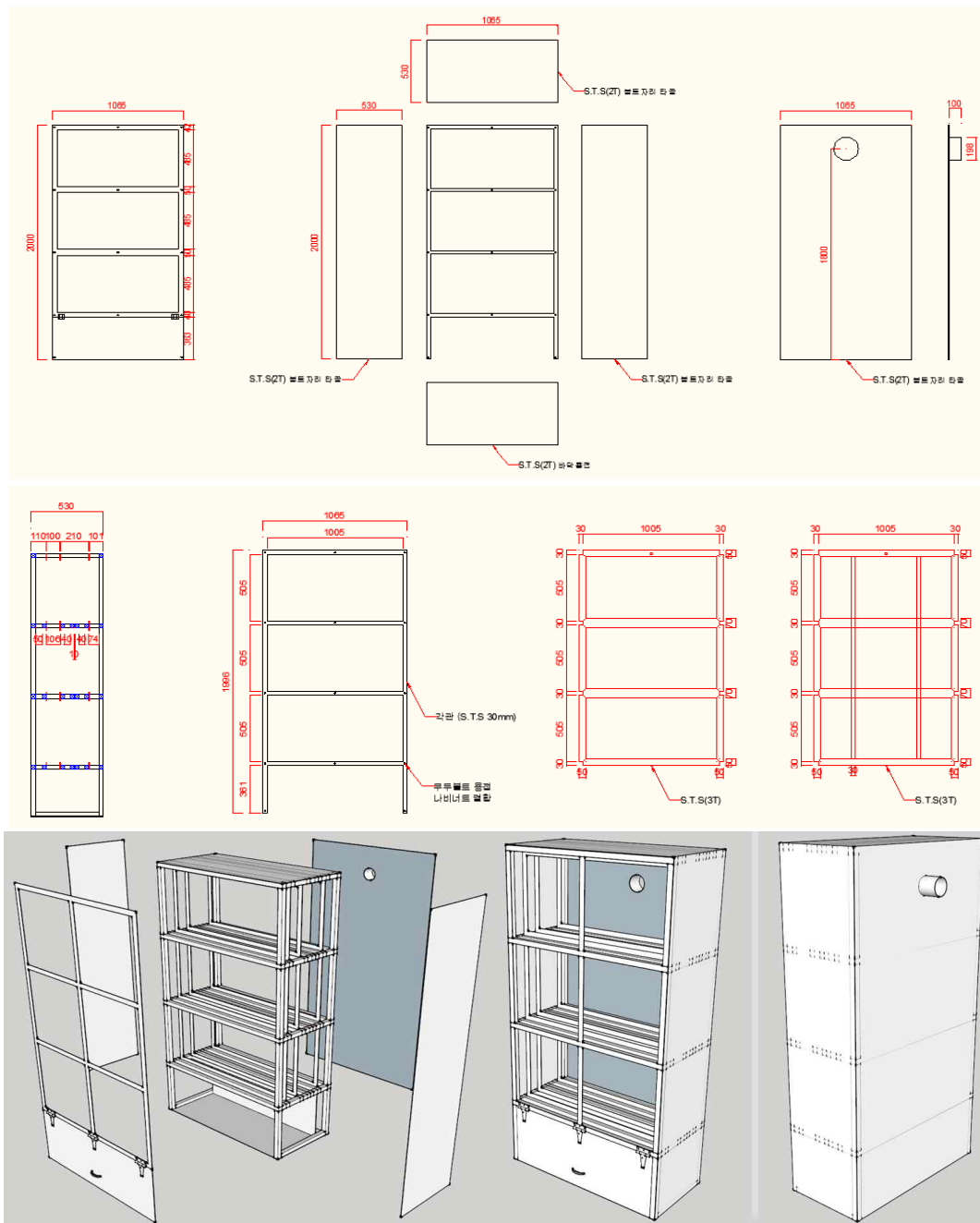


그림 118. 요소기술 통합장치 설계안



그림 119. 요소기술 통합장치 제작 및 설치

- EcoPS(Eco Purification System)시제품은 1차 정화필터인 식생모듈과 2차 정화필터인 광물질필터로 이루어져 있으나 식생모듈의 정화능력을 평가하기 위하여 광물질필터는 제외하고 식생모듈만 설치하여 실험을 진행함
- 먼지발생기를 설치하여 실험챔버 내 미세먼지 농도를 증가시킨 후 EcoPS(Eco Purification System)시제품을 가동하여 18시간동안 농도변화 추이를 관찰함
- PM2.5와 PM10을 10분 단위로 각각 측정하였으며 결과는 아래와 같음

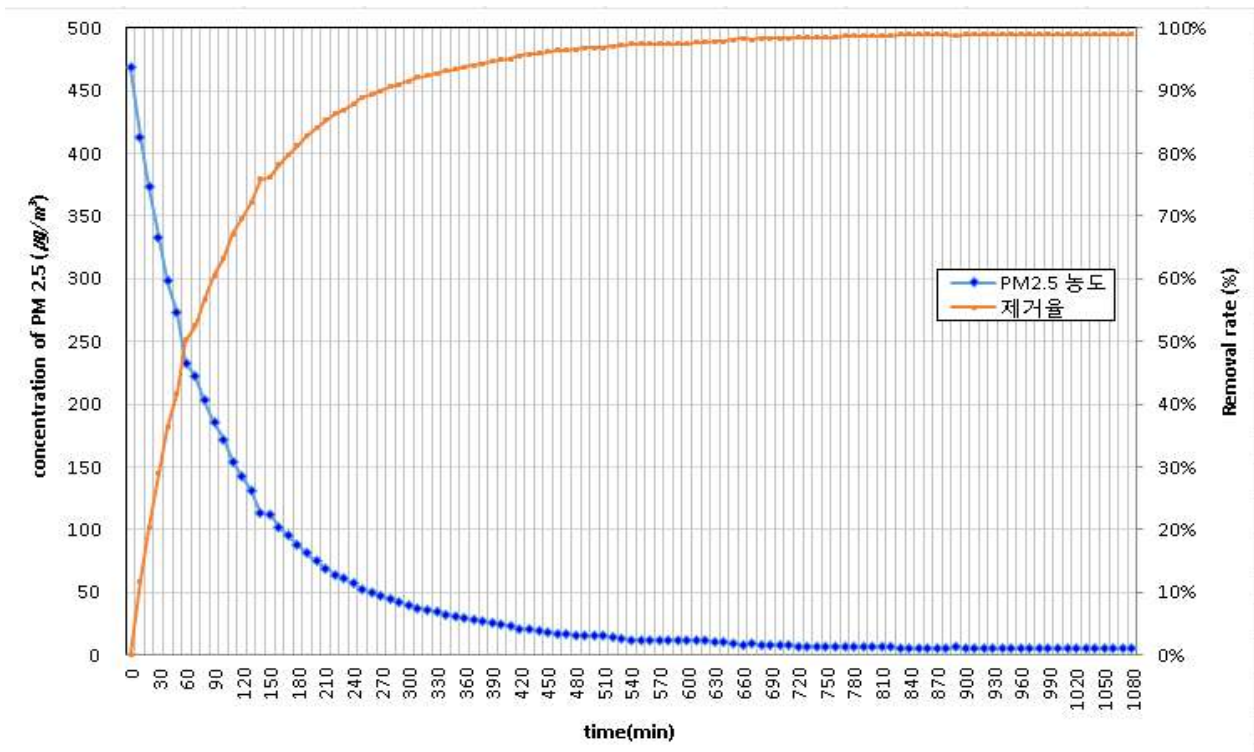


그림 120. 식생모듈의 PM2.5 농도 및 제거율 변화량

표 3-21. 식생모듈의 PM2.5 제거율

측정시간(분)	PM2.5 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	제거율(%)	시간당 제거율(%)
0	468	0.00	0.00
60	233	50.21	50.21
120	142	69.66	19.44
180	88	81.20	11.54
240	57	87.82	6.62
300	40	91.45	3.63
360	29	93.80	2.35
420	21	95.51	1.71
480	16	96.58	1.07
540	12	97.44	0.85
600	12	97.44	0.00
660	8	98.29	0.85
720	7	98.50	0.21
780	6	98.72	0.21
840	5	98.93	0.21
900	5	98.93	0.00
960	5	98.93	0.00
1020	5	98.93	0.00
1080	5	98.93	0.00

- PM2.5는 EcoPS(Eco Purification System) 가동 시작부터 60분 경과시 50.21%, 120분 69.66%, 180분 81.20%, 240분 87.82%, 300분 91.45%, 360분 93.80% 등의 제거율을 보임
- 시간당 제거율은 60분 경과시 50.21%, 60~120분 19.44%, 120~180분 11.54%, 180~240분 6.62%, 240~300분 3.63%, 300~360분 2.35% 등을 보여 EcoPS(Eco Purification System) 가동 후 180분 이내 높은 효율을 보이다가 점차 감소하는 추세를 보임

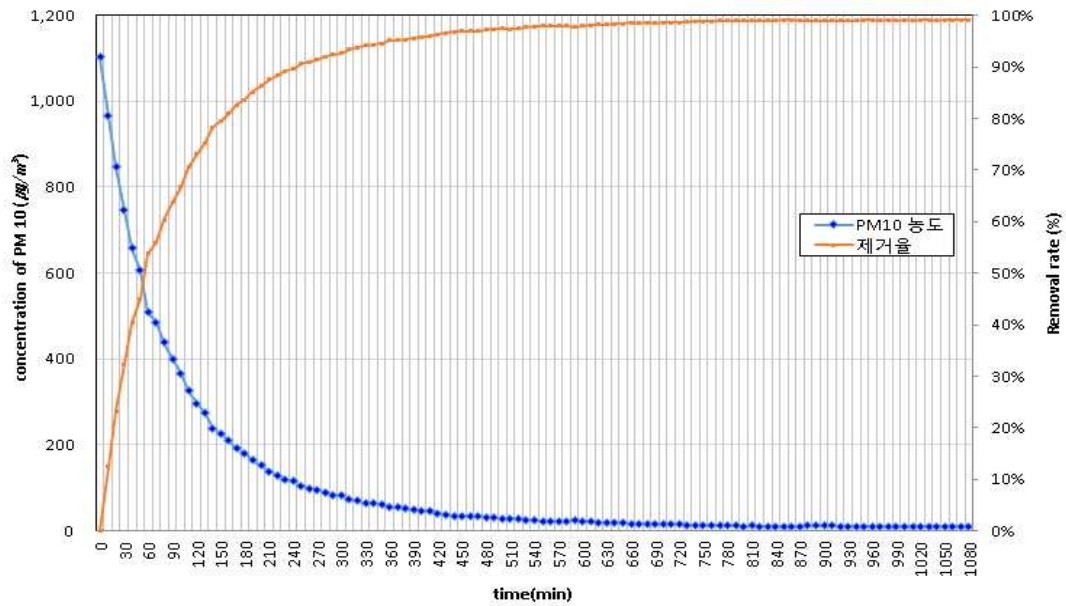


그림 121. 식생모듈의 PM10 농도 및 제거율 변화량

표 3-22. 식생모듈의 PM10 제거율

측정시간(분)	PM10 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	제거율(%)	시간당 제거율(%)
0	1102	0.00	0.00
60	509	53.81	53.81
120	297	73.05	19.24
180	181	83.58	10.53
240	115	89.56	5.99
300	82	92.56	2.99
360	54	95.10	2.54
420	41	96.28	1.18
480	31	97.19	0.91
540	24	97.82	0.64
600	23	97.91	0.09
660	16	98.55	0.64
720	15	98.64	0.09
780	12	98.91	0.27
840	11	99.00	0.09
900	12	98.91	-0.09
960	10	99.09	0.18
1020	10	99.09	0.00
1080	10	99.09	0.00

- PM10은 EcoPS(Eco Purification System) 가동 시작부터 60분 경과시 53.81%, 120분 73.05%, 180분 83.58%, 240분 89.56%, 300분 92.56%, 360분 95.10% 등의 제거율을 보임
- 시간당 제거율은 60분 경과시 53.81%, 60~120분 19.24%, 120~180분 10.53%, 180~240분 5.99%, 240~300분 2.99%, 300~360분 2.54% 등을 보여 EcoPS(Eco Purification System) 가동 후 180분 이내 높은 효율을 보이다가 점차 감소하는 추세를 보임

(3) 식생모듈의 VOCs 제거효율 검증

(가) 1차 챔버 측정

- 코코피트, 하이드로볼, 코코피트+식물, 하이드로볼+식물의 4가지 type을 선정하여 진행하였으며 식물은 에피프렘넘(Epipremnum aureum)을 적용하여 제거율을 비교 측정함
- 내부 크기 500*500*500mm의 챔버 내에 식생모듈을 설치한 뒤 챔버 전, 후단부에 VOCs 측정기 설치함



그림 122. VOCs 측정 챔버 (1차 측정)

- 챔버 후단의 블로우 도어를 작동하여 챔버 내 공기 흐름이 발생하게 하여 챔버 전, 후단부의 측정기로 식생모듈을 통과하기 전 공기와 통과한 후의 공기를 측정하여 VOCs 제거 효율을 측정함
- 실험결과는 아래 표와 같으며 챔버 전, 후단부의 VOCs 농도를 측정하여 제거율을 비교분석하였음

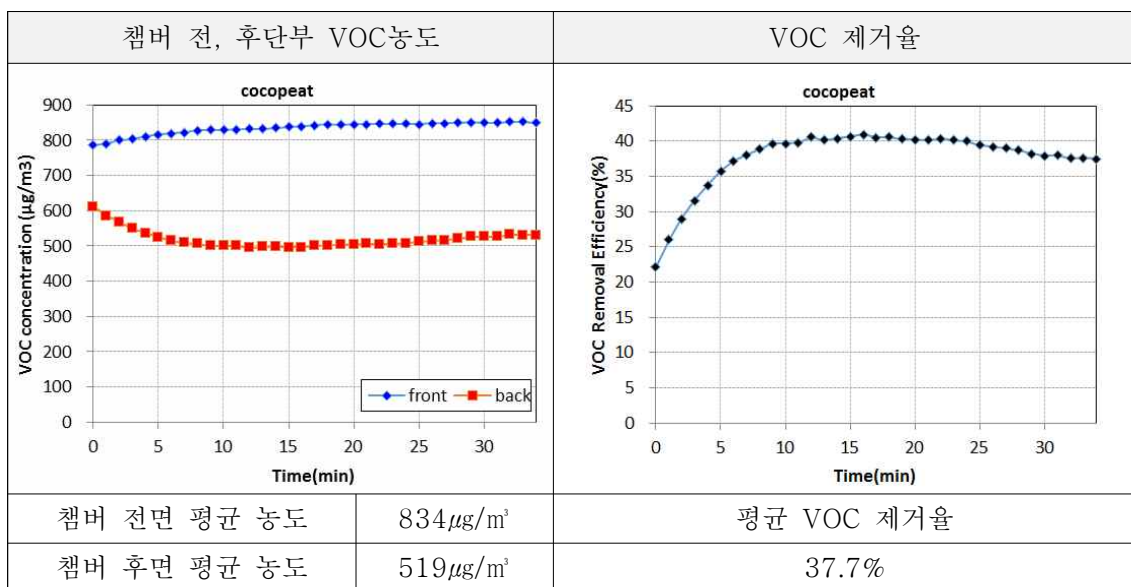


그림 123. VOCs 농도 및 제거율 - 코코피트

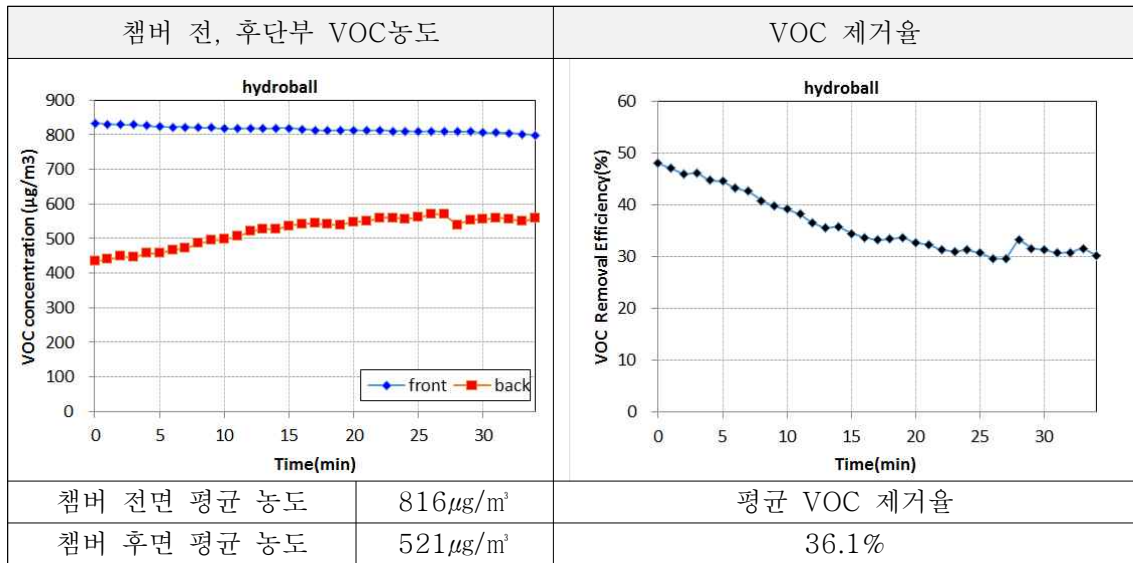


그림 124. VOCs 농도 및 제거율 _ 하이드로볼

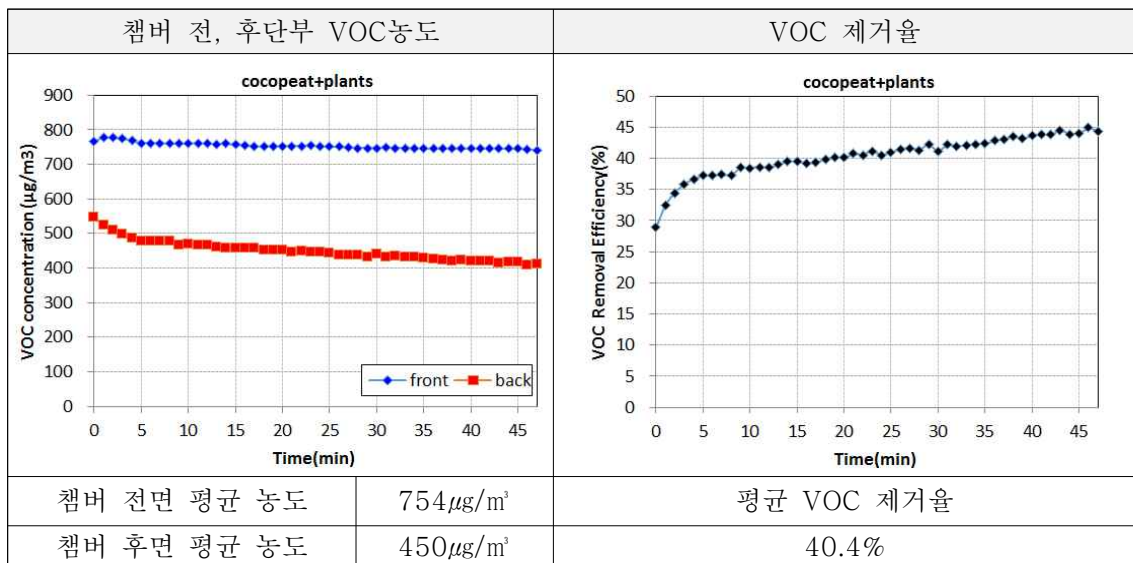


그림 125. VOCs 농도 및 제거율 _ 코코피트+식물

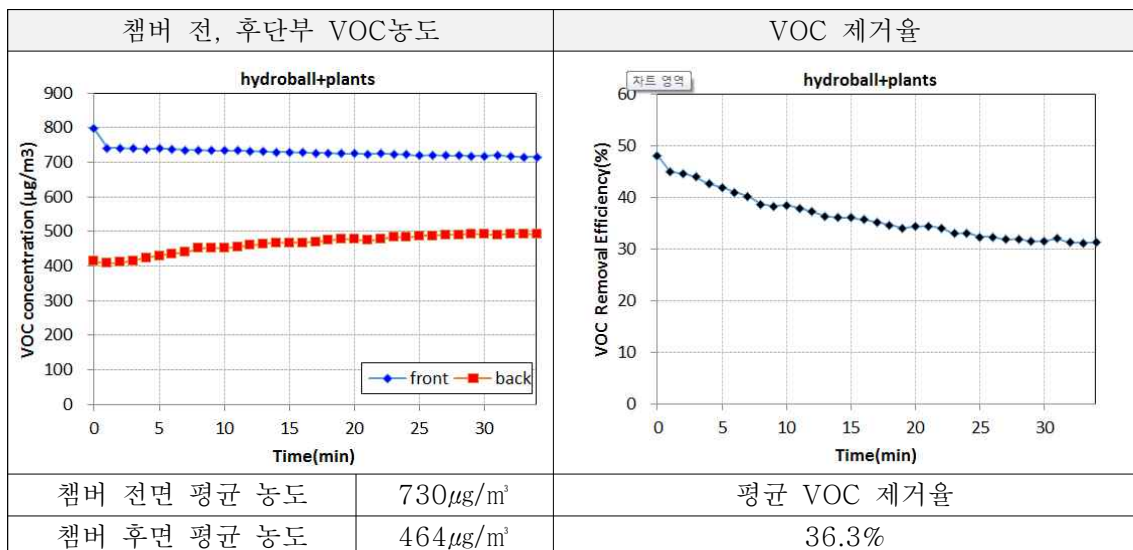


그림 126. VOCs 농도 및 제거율 _ 하이드로볼+식물

- 배지의 차이와 식물의 유무에 따른 각 조건별 VOC 제거효율을 측정하는 실험임
- 실험 결과 코코피트+식물 40.4% > 코코피트 37.7% > 하이드로볼+식물 36.3% > 하이드로볼 36.1%순으로 4가지의 조건 중 코코피트와 식물이 식재된 실험조건에서 가장 제거효율이 높게 나타났으나 다른 3가지 조건들과 큰 차이를 보이지 않음
- 식물 식재 유무에 따른 VOC 정화능력을 비교해 본 결과 코코피트는 2.7%, 하이드로볼은 0.2%의 차이를 보여 식물의 VOC 정화능력이 미비한 것으로 측정되었지만 1차 측정챔버는 식생모듈에서 공기의 1회 통과로 정화되는 제거율을 측정하므로 정화기작 작용에 시간이 소요되는 식물의 특성이 고려되지 못했으므로 2차 측정챔버에서 시간당 정화효율을 측정하였음

(나) 2차 챔버 측정

- 6,500×2,800×H2,200 크기의 제작된 2차 챔버에 EcoPS(Eco Purification System) 시제품을 설치한 후 VOCs를 투입하여 농도를 증가시킨 후 시간의 흐름에 따라 제거되는 양을 측정함
- EcoPS(Eco Purification System) 시제품에 설치된 식생모듈은 500×100×H165mm 18개이며, 식생용토는 코코피트, 식물은 에피프렘넘(Epipremnum aureum)을 사용하였고 1시간 관수 후 실험을 진행함
- EcoPS(Eco Purification System) 시제품 후면에 blower를 설치하여 blower를 통해 오염된 공기를 흡입하면 식생모듈을 통과하여 VOCs를 제거하고 다시 내부로 배출하여 순환하는 방식으로 실험을 진행함

표 3-23. 식생모듈의 VOCs 농도 및 제거율 _ 2차 챔버(순환식)

측정시간(분)	VOCs 농도 (µg/m³)	제거율(%)
0	801	0.00
20	768	4.12
40	705	11.99
60	660	17.60
80	548	31.59
100	499	37.70
120	459	42.70
140	434	45.82
160	417	47.94
180	405	49.44
200	336	58.05

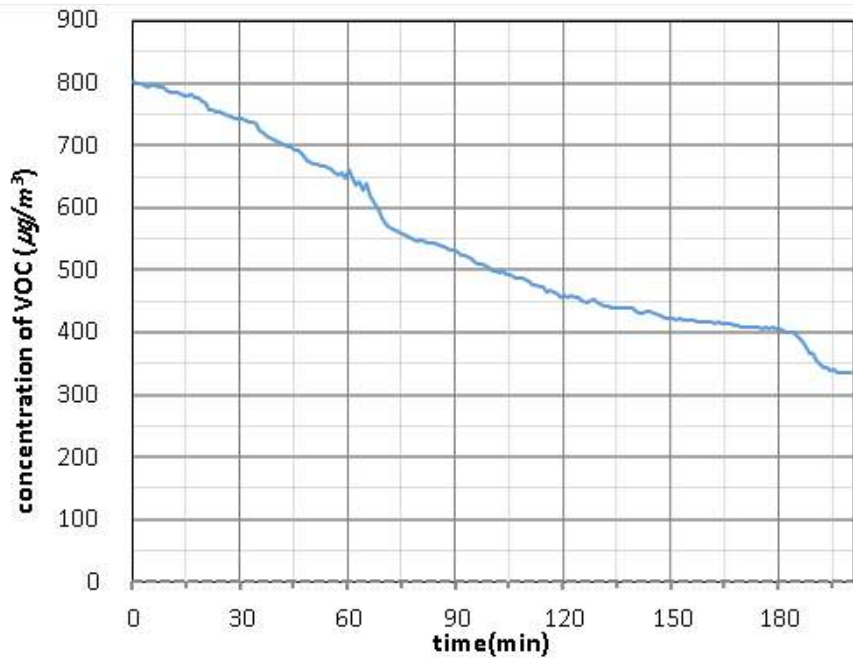


그림 127. 식생모듈의 VOCs 농도 변화

- 식생모듈의 미세먼지 제거효율이 초기에 높았다가 농도가 떨어지면서 제거효율이 감소하는 양상을 보이는 반면 VOCs 제거효율은 지속적으로 유지되는 현상을 보임
- 미세먼지는 식물의 잎, 식생용토, 토양 내 수분 등에 흡수 및 흡착을 통해 제거되는 반면 VOCs는 잎의 기공을 통해 흡수되므로 식물의 호흡량과 관계가 있어 제거량이 일정하게 유지되는 것으로 판단됨

(4) 식생모듈의 식물활착률 검증

(가) 식생모듈 내 실험

- 밀폐된 실내 공간에서 식물도입을 통해 벤젠, 암모니아, 포름알데히드, 질소산화물과 같은 VOCs가 효과적으로 감소됨 (Orwell et.al., 2004, Kim et.al., 2008)
- Orwell et.al., 2004)는 7가지 다른 포트 식물을 사용하여 Benzene의 제거량을 측정한 결과 품종에 따라서 하루에 12-27ppm의 제거량을 보였으며 제거는 주로 근부에서 발생하지만 지상부에서도 제거효과는 발생한다고 보고됨
- 실내식물에 의한 정화효과는 잎의 기공 및 뿌리에서의 흡수·제거뿐만 아니라 음이온 및 수분의 방출에 의해서도 이루어짐
- EcoPS(Eco Purification System)에 적용되는 식물은 광, 온도, 습도 등 실내의 제한된 생육환경에서 생존이 가능하고, 유지관리가 용이하며 공기정화의 효과가 우수한 관엽식물을 중심으로 선별하고자 함
- EcoPS(Eco Purification System)에 적용하기 앞서 식물의 생육공간인 식생모듈에서의 식물활착률을 검증하기 위하여 엽장, 엽폭, 초장, 엽수가 비슷한 에피프렘넘(Epipremnum aureum)을 선별하여 실험을 진행함
- 에피프렘넘(Epipremnum aureum)은 낮은 광도 및 실내 온습도에 대한 적응력이 강하고, 유지관리가 용이하며 포름알데히드, 크실렌, 벤젠, 일산화탄소 제거 능력이 우수하여 벽면 녹화나 실내녹화에서 많이 사용되는 식물로써 생육 적정온도는 21-32℃, 실내도입시 생장

에 적절한 광도는 $20 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 으로 보고됨 (Wolverton, 1989)\

- 1차년도 실험은 코코피트와 하이드로볼 식생용토를 사용하여 식생모듈에 9개체씩 4반복 식재하여 온도 $25 \pm 5^\circ\text{C}$, 습도 $45 \pm 10\%$ 의 실내에서 2015년 4월 중순부터 6월 중순까지 8주간 실험을 진행하였고 2차년도 실험은 식생용토로 코코피트를 선정하고 1차년도(2안) 식생모듈과 2차년도 식생모듈에 9개체씩 4반복 식재하여 온도 $25 \pm 5^\circ\text{C}$, 습도 $45 \pm 10\%$ 의 실내에서 2016년 4월 초순부터 6월 초순까지 8주간 실험을 진행하여 활착률 및 생장량을 비교 분석함
- 식물의 생육을 위하여 매일 1시간씩 관수하여 식생용토에 수분이 충분한 상태를 유지함
- 식재 후 식물활착률 검증을 위해 고사유무를 1주 간격으로 측정하였고, type별 생육 정도를 비교하기 위하여 8주 후 지하부를 제외한 지상부의 생체중과 엽면적을 측정하여 비교함



그림 128. 식물활착률 검증 및 생장량 측정

- 식생모듈에서의 식물활착률 검증실험 결과는 아래 표와 같이 1차년도, 2차년도 실험 모두에서 고사개체 없이 모두 생존하였음

표 3-24. 식물활착률 및 식생용토별 생장비교 _ 1차년도

배지종류	식물고사 개체수	엽면적(cm^2/plant)	생체중(g/plant)
하이드로볼(4mm)	0	904.7	51
코코피트	0	974.8	58

표 3-25. 식물 활착률 및 식생모듈별 생장비교 _ 2차년도

식생모듈 Type	고사식물 개체수	엽면적(cm^2/plant)	생체중(g/plant)
1차년도(2안)	0	966.8	56
2차년도	0	971.2	57

- 1차년도, 2차년도 실험에서 부분적으로 고사 잎이 발생하였으나 대부분 안쪽에 위치한 잎이었으며, 잎이 크고 엽수가 많은 에피프렘넴의 특성상 안쪽에 위치한 잎은 빛을 충분히 받지 못해 생육이 원활하지 못한 것으로 판단되며 이는 식물의 생장과정에서 발생하는 자연현상으로 판단됨
- 1차년도 실험에서 하이드로볼과 코코피트에서의 생육을 비교하면 엽면적과 생체중 모두 코코피트 배지에서 생육이 우수한 것으로 관찰되었음
- 2차년도 실험에서 식생모듈 type별 엽면적과 생체중을 비교한 결과 차이가 미비하여 식물 모듈의 구조와 식물생장과는 큰 의미가 없는 것으로 판단됨

(5) 식생모듈의 수분균등분포율 검증

(가) 1차 실험

- 식물생육에 필요한 수분의 원활한 공급과 상·하 식생모듈간 균등한 수분전달을 검토하기 위해 수직으로 배치된 식생모듈 상부와 하부에 토양수분센서를 설치하여 측정함



그림 129. 식생모듈에서의 수분균등분포율 실험

- 1차년도 식생모듈은 상부와 하부에 각각 3개씩, 2차년도 식생모듈은 1차년도 식생모듈과 모듈개체 크기가 다르므로 결합 시 1차년도 식생모듈과 같은 위치에 토양수분센서를 설치하여 비교함
- EcoPS(Eco Purification System)의 관수주기와 같은 조건으로 1시간 관수 후 식생용토 내 수분의 변화 추이를 측정함

표 3-26. 수분균등분포율 측정센서

데이터로거 : WP700	토양수분센서 : CoCo-200
	
- SIZE: 26 x 17.5 x 100cm - Contact output: 2kW - Input Voltage: AC 220[V] - Operating Range: 0~60 ° C	- SIZE: W82 x H150 x D32mm - Charge: 110/220V 9V 500mA - Measuring Range: Moisture 0-99.9%(± 3%) - EC: 0-9.99dS/m(± 0.1 dS/m) - Temperature: 0-60 ° C(± 0.5 ° C)

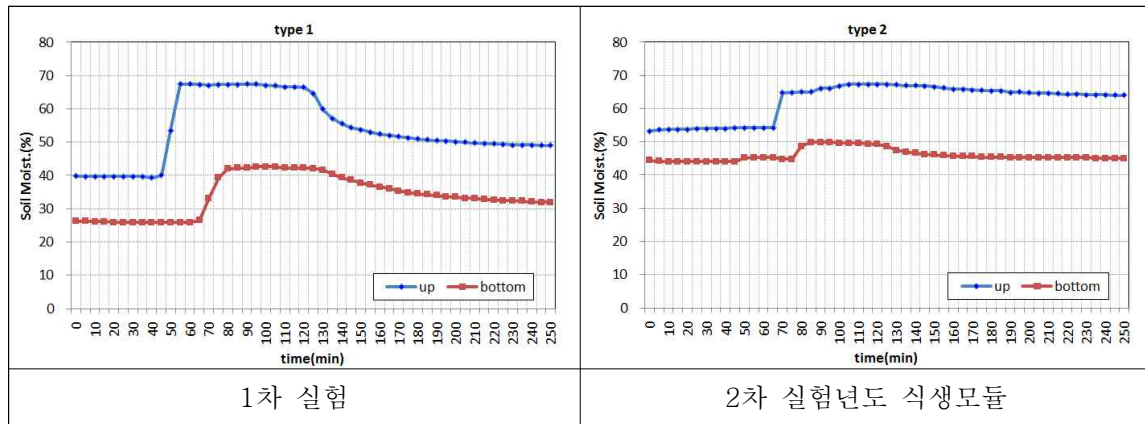


그림 130. 토양수분 측정값

- 식생틀 상단에서 하단으로 수분전달 시간은 1차년도 식생모듈 20분, 2차년도 식생모듈 10분 정도 소요되는 것으로 측정되었으며, 이는 1차년도 식생모듈은 $500 \times 500 \times 100\text{mm}$ 의 크기이며 2차년도 식생모듈은 $500 \times 165 \times 100\text{mm}$ 크기로 세로방향으로 긴 1개 형태의 구조보다 여러 개로 나뉜 구조가 수분전달에 용이한 것으로 판단됨
- 1차년도 식생모듈의 경우 측정 후 16분 후 배지 내 함수율이 증가하여 50~80%였으나 1분 30초 후 감소하는 현상은 관수 후 표면장력으로 인한 병목현상으로 인해 식생용토 내 공극이 막혀 수분량이 증가하다가 시간 경과 후 서서히 투과되어 일정비율의 수분율을 유지하는 것으로 판단됨

(나) EcoPS(Eco Purification System) 설치장소의 총부유세균 측정

- 실내공기 오염물질은 미세먼지, VOCs 같은 입자성, 가스성 외에 미생물형 오염물질이 존재하며 이는 먼지나 수증기 등에 붙어 생존하며 다른 실내공기 오염물질과 달리 스스로 번식하는 생물학적 오염요소임
- EcoPS(Eco Purification System)는 식물의 생육을 위해 식생용토와 수분 등이 포함되며 이러한 조건들은 세균이 서식하는 환경이 될 수 있으므로 총부유세균 측정을 통하여 오염물질을 배출 여부를 검토함



그림 131. 총부유세균 측정

- 측정장소는 2차 챔버($6,500 \times 2,800 \times H2,200$ 컨테이너)와 인천시청역 역사(테스트베드) 2곳에서 실시하였으며, 충돌방식을 이용한 총부유세균 샘플러를 사용하여 시료를 채취하고 실험실에서 48시간 배양 후 분석함

표 3-27. EcoPS(Eco Purification System)설치장소의 부유세균 측정결과

측정장소	측정유량(L/min)	계수		환산값	CFU/m³
		24시간	48시간		
2차 챔버	100	10	4	14	140
	100	10	2	12	120
인천시청역 역사	100	4	12	16	160
	100	3	4	7	70

- 측정결과 2차 챔버는 120, 140 CFU/m³, 인천시청역 역사에서는 70, 160 CFU/m³로 다 중이용시설에서의 유지기준인 800 CFU/m³ 이하로 측정됨
- 2차 챔버는 2017년 3월~7월까지 EcoPS(Eco Purification System) 시제품을 운영하고 있었으며 총부유세균 측정결과 부유세균 증식에 영향을 미치지 않는 것으로 판단됨

3절. 오염원별 오염물질 제거를 위한 광물필터 및 미생물필터 개발

가. 일라이트 광물필터 볼 사이즈 별 SEM, BET, XRD 분석

- 광물 필터에 투입할 일라이트를 구 형태로 열처리하여 각각의 사이즈(R=1cm, 2cm, 3cm)별로 일라이트 볼 제조

(1) 일라이트 광물 볼 SEM 분석

- 사이즈별 광물필터의 기공 및 형태를 알아보기 위해 SEM을 측정
- 분석결과 일라이트는 운모류의 특징인 얇은 판형의 입자들과 많은 기공으로 구성
- 1, 3 cm 볼타입 일라이트 보다 2 cm 볼타입 일라이트가 많은 판형과 기공으로 이루어져 있음
- 일라이트의 얇은 판과 판사이의 공간에서 점토광물의 흡착요인인 양이온과 음이온의 교환 반응이 일어나며, 양이온 및 음이온의 교환능력에 따라 흡착용량이 결정

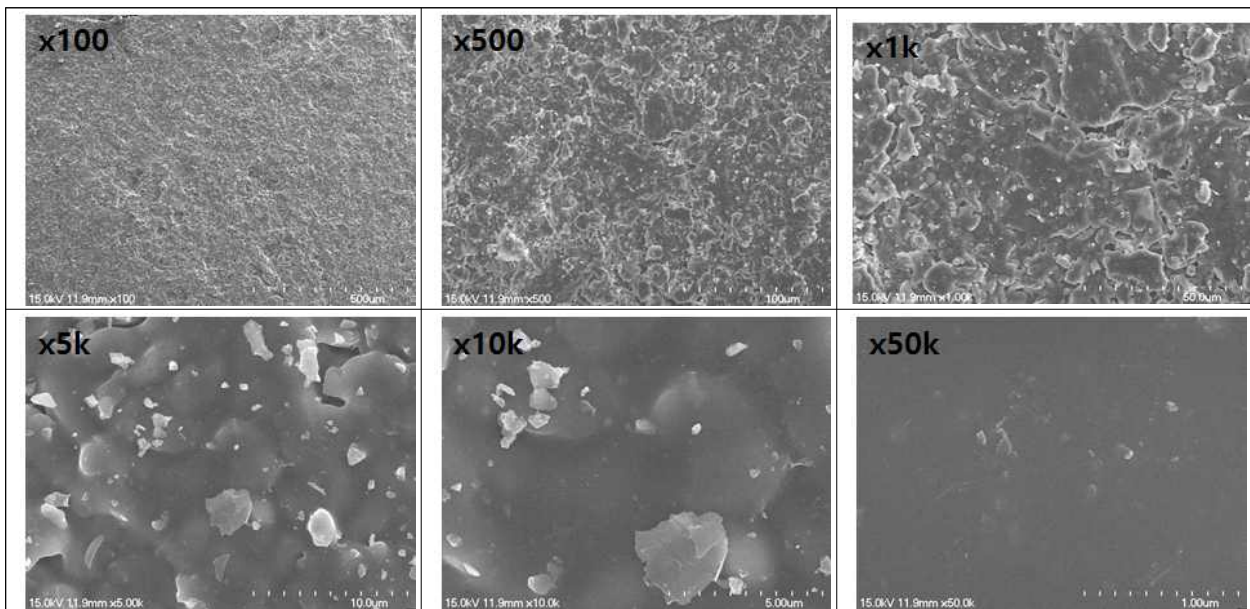


그림 132. R=1cm 일라이트 볼

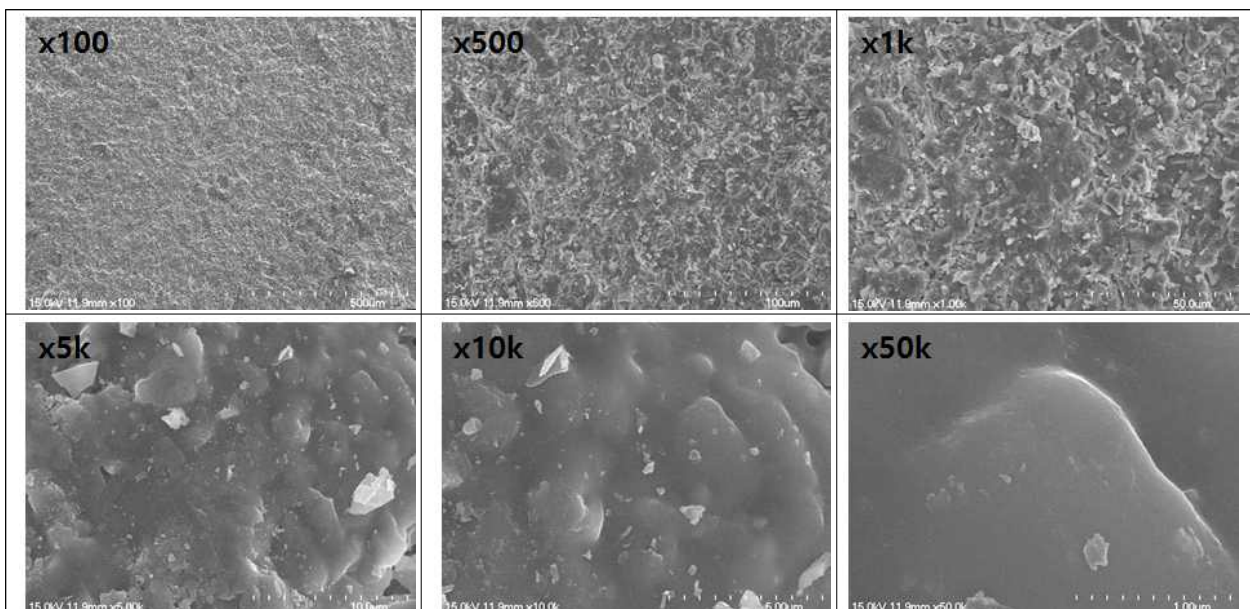


그림 133. R=2cm 일라이트 볼

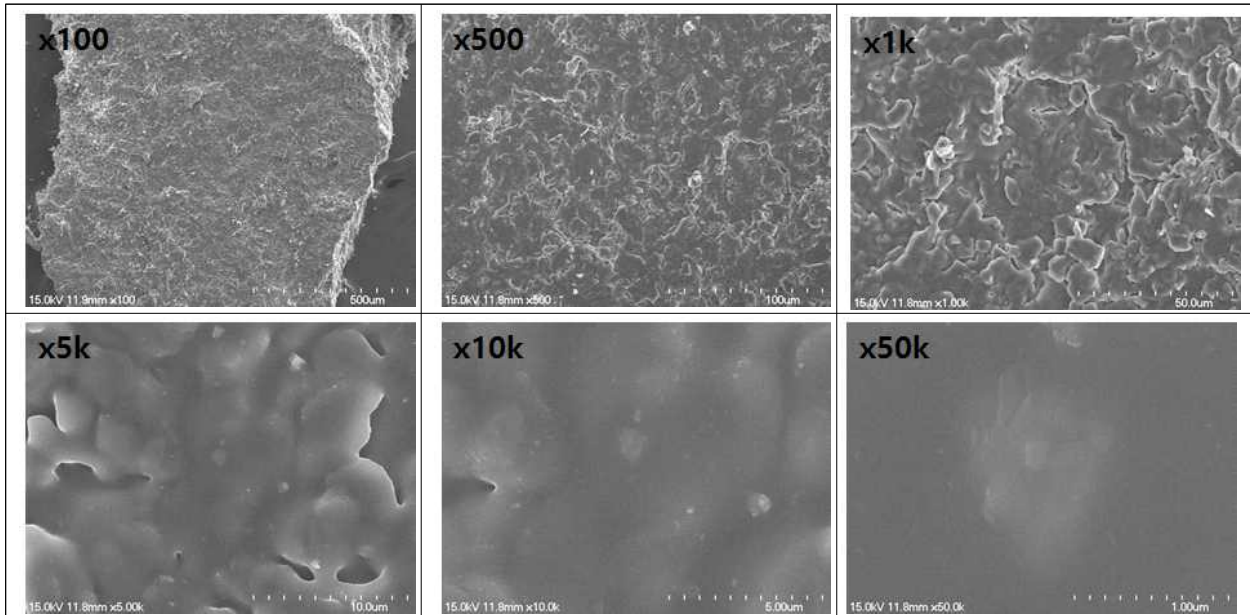


그림 134. R=3cm 일라이트 볼

(2) 일라이트 광물 볼 BET 분석

- 지름 1, 2, 3 cm의 일라이트 볼을 물리흡착분석기(BET)를 통해 비표면적 측정 및 기공의 크기와 분포를 측정
- 각 사이즈 별 일라이트 볼의 기공 크기에 따른 기공 분포는 흡착 시 비슷한 경향을 보이며 각 사이즈 별 값의 차이가 크지 않음
- 탈착 시 각 사이즈 별 일라이트 볼의 경우에도 비슷한 경향을 보임
- 하지만, 흡착 시와 다르게 각 사이즈 별 값의 차이가 크며 그중 D=2cm 사이즈의 일라이트 볼이 두드러지게 높은 값을 보이는 것을 알 수 있음

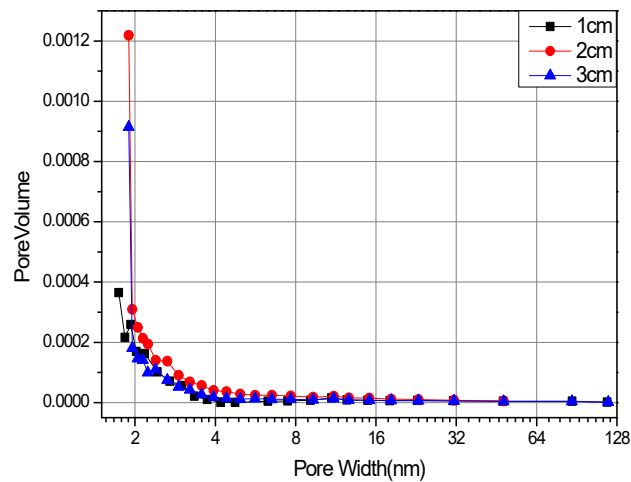


그림 135. 흡착시 기공폭에 따른 사이즈별 용적

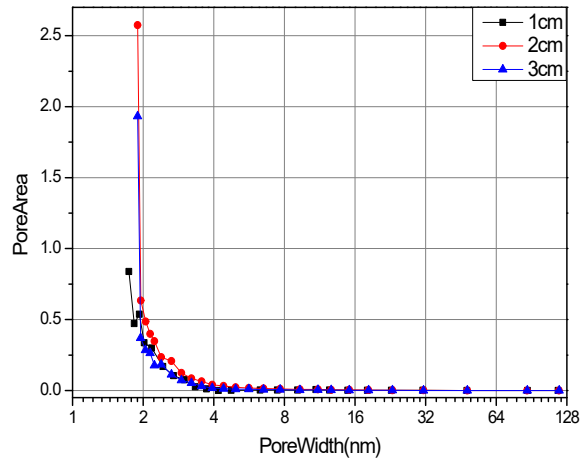


그림 136. 흡착시 기공폭에 따른 사이즈별 기공 구역

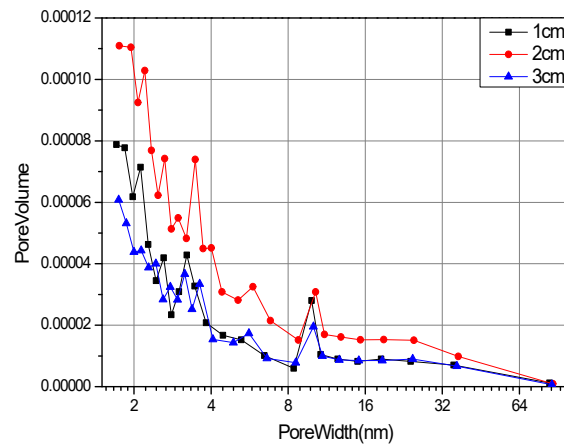


그림 137. 탈착시 기공폭에 따른 사이즈별 용적

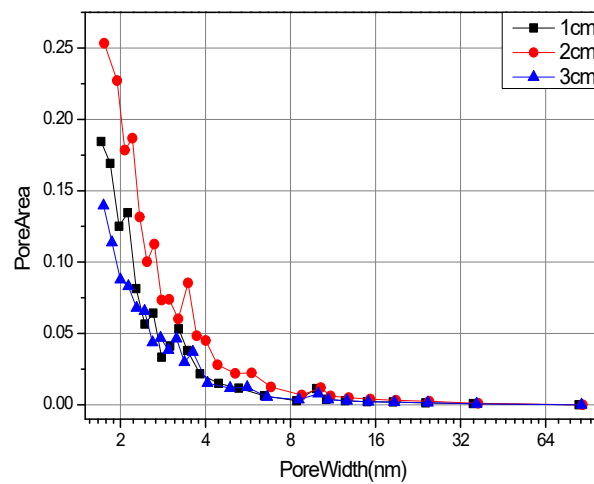


그림 138. 탈착시 기공폭에 따른 사이즈별 기공 구역

(3) 일라이트 광물 불 XRD 분석

- 1, 2, 3 cm의 일라이트 불을 XRD 분석을 통해 각각의 열처리 소성온도에 따라 일라이트

- 결정상의 변화가 있는지 입자크기 (grain size)의 변화가 있는지 관찰함
- 결정상의 큰 차이는 없는 것으로 보임
 - 하지만, 볼의 크기가 커짐에 따라 응집을 위한 강도의 세기가 증가해야하므로, 이에 따른 열처리 온도 및 시간에서 약간의 증가로 인해, 일라이트 결정상의 결정도가 약간 증가하는 것으로 보임
 - 이로 인해 1, 2cm 볼 경우보다 입자크기의 크기가 약간 증가하고, 입자간 기공의 크기가 약간 증가하는 것으로 관측됨
 - 이를 결론으로, 볼의 크기가 작을수록 열처리 소성온도의 감소와 처리시간의 감소로, 미세 입자크기는 줄어들고, 미세입자 기공의 숫자는 다소 증가하는 것으로 나타남
 - 결론적으로 볼의 사이즈를 줄이는 것이 오염물질의 흡착측면에서는 유리한 것으로 분석됨

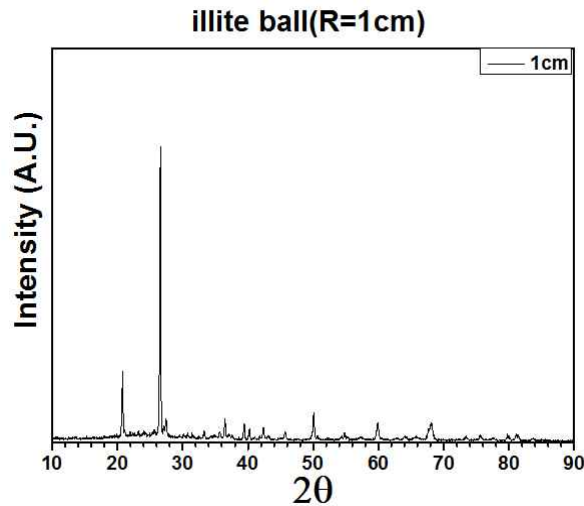


그림 139. R=1cm 일라이트 볼 XRD 분석

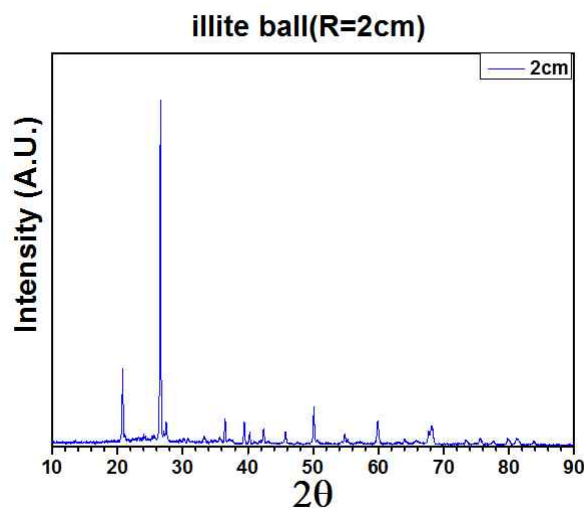


그림 140. R=2cm 일라이트 볼 XRD 분석

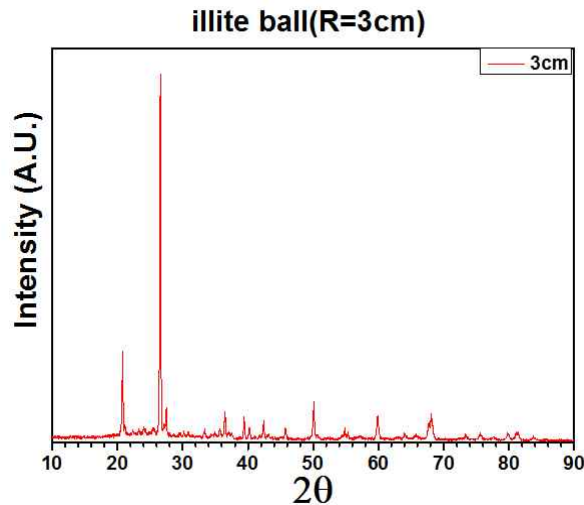


그림 141. R=3cm 일라이트 볼 XRD 분석

나. 일라이트 광물 필터 및 EM(미생물) 필터를 이용한 미세먼지 제거실험

(1) 광물 필터를 이용한 미세먼지 제거실험

- 광물 필터의 미세먼지 제거 효율을 보기 위하여 일라이트 볼을 이용한 광물 필터의 미세먼지 제거실험을 진행
- 챔버 전면부 공기 유입부에 먼지 발생기로 먼지를 발생하여 챔버에 유입시켜 필터를 통과하기 전후 공기의 먼지 농도를 측정, 필터의 미세먼지 제거 효율을 측정
- 실험조건은 다음표와 같이 1, 2, 3 cm 사이즈별과 1+2cm, 1+3cm, 2+3cm 혼합시(중량비 1:1) 총 6가지로 실험
- 광물필터에 의한 미세먼지 제거효율은 표 2-28과 그림 144와 같으며, 실험결과 일라이트 광물필터 1+3cm 일 때 PM2.5는 20.2%, PM10은 26.5%로 가장 높은 제거효율로 나타남

표 3-28. 광물 필터를 이용한 미세먼지 제거효율 실험조건

구분	광물필터	혼합비	무게	필터 사이즈
1	1cm	100%	33Kg	50cm X 50cm X 10cm
2	2cm	100%	31.5Kg	
3	3cm	100%	29.5Kg	
4	1cm+2cm	50%+50%	15.5Kg + 15.5Kg	
5	1cm+3cm	50%+50%	15.5Kg + 15.5Kg	
6	2cm+3cm	50%+50%	15.5Kg + 15.5Kg	

표 3-29. 광물 필터를 이용한 미세먼지 제거효율

구분	광물필터	제거율(%)	
		PM2.5	PM10
1	1cm ball	18.6	8.9
2	2cm ball	17.3	20.3
3	3cm ball	19.1	24.8
4	1+2cm ball	17.7	7.3
5	1+3cm ball	20.2	26.5
6	2+3cm ball	17.6	23.7

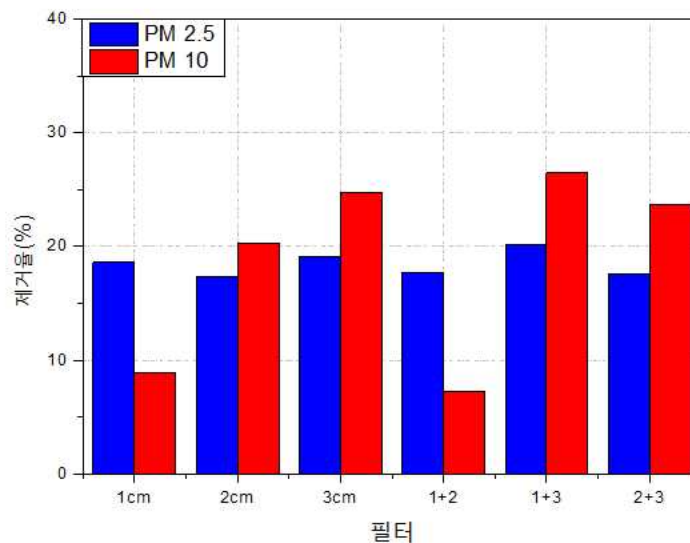


그림 142. 일라이트 광물에 따른 조건별 미세먼지 제거율(%)

(2) 미생물(EM) 필터를 이용한 미세먼지 제거실험

- 미생물(EM) 필터의 미세먼지 제거 효율을 보기 위하여 미세먼지 제거실험 진행
- 챔버 전면부 공기 유입부에 먼지 발생기로 먼지를 발생하여 챔버에 유입시켜 필터를 통과 하기 전후 공기의 먼지 농도를 측정, 필터의 미세먼지 제거 효율을 측정
- 일라이트 광물 필터 실험시 공기의 투과 속도가 너무 빨라 필터와 미세먼지의 접촉 시간이 짧았던 것을 감안하여 아크릴로 된 차폐막을 설치, 공기의 흐름을 조절하여 필터와 공기의 접촉 시간을 늘리고자 함.
- 실험조건은 다음 표 과 같음
- 미생물(EM) 필터에 의한 미세먼지 제거효율은 표 3-30과 그림 145와 같으며, 실험결과 EM +스펀지 20cm +아크릴 일 때 PM2.5는 13.9%, PM10은 37.3%로 가장 높은 제거 효율로 나타남

표 3-30. EM(미생물) 필터를 이용한 미세먼지 제거효율 실험조건

구분	실험조건			필터 사이즈
	EM	스펀지(cm)	아크릴	
1	X	10	X	50cm * 50cm * 10cm
2	X	10	O	
3	X	20	O	
4	O	20	O	

표 3-31. 광물 필터를 이용한 미세먼지 제거효율

구분	미생물필터	제거율(%)	
		PM2.5	PM10
1	스펀지 10cm	0.0	21.8
2	스펀지 10cm + 아크릴	11.5	26.9
3	스펀지 20cm + 아크릴	13.1	32.0
4	EM + 스펀지 20cm + 아크릴	13.9	37.3

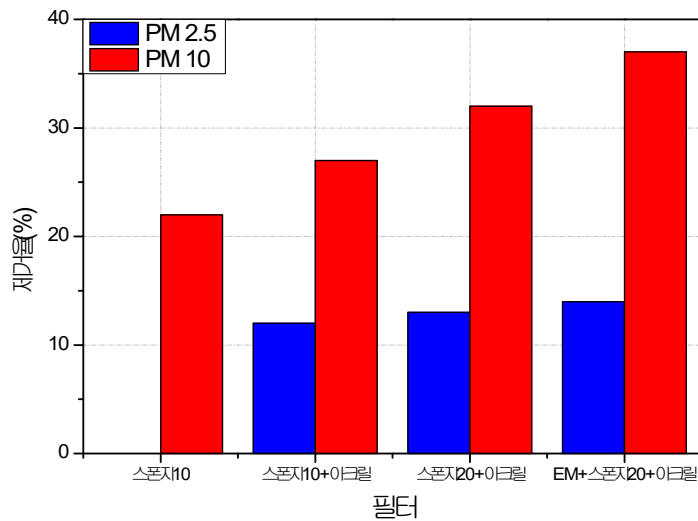


그림 143. 미생물(EM)필터에 따른 조건별 미세먼지 제거율(%)

(3) 광물+미생물(EM) 필터 혼합시 미세먼지 제거실험

- 광물 +미생물(EM) 필터 혼합시 미세먼지 제거효율을 보기위해 실험을 진행함
- 챔버 전면부 공기 유입부에 먼지 발생기로 먼지를 발생하여 챔버에 유입시켜 필터를 통과 하기 전후 공기의 먼지 농도를 측정, 필터의 미세먼지 제거 효율을 측정
- 실험조건은 광물필터 1+3cm(중량비 1:1)와 미생물필터 EM+스펀지 10cm로 혼합하여 실험
- 혼합시 미세먼지 제거효율은 표 3-32와 그림 146과 같으며, 실험결과 광물필터(1+3cm)

+미생물필터(EM+스펀지 10cm) 일 때 PM2.5는 30.1%, PM10은 37.2%의 제거효율로 나타남

표 3-32. 광물 필터+미생물(EM)필터를 이용한 미세먼지 제거효율

구분	필터	제거율(%)	
		PM2.5	PM10
1	스펀지 10cm	7.0	24.0
2	EM + 스펀지 10cm	28.3	35.1
3	광물필터(1+3cm) + 미생물필터(EM+스펀지 10cm)	30.1	37.2

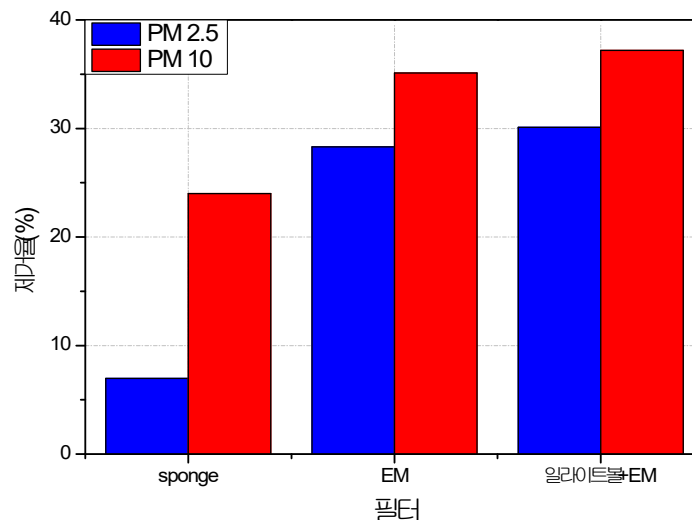


그림 144. 미생물(EM) 필터 및 광물필터+미생물(EM) 필터에 따른 미세먼지 제거율(%)

(4) 결론

- PM2.5의 경우 제거율은 광물필터내의 볼사이즈의 조합에 큰 영향을 받지 않으며 대동소이하게 20% 범위내의 제거율을 보임
- PM10의 경우 제거율은 광물필터내 볼사이즈의 조합에 따라 제거율의 증가를 보이며 이는 볼자체의 특성 즉 볼 표면의 기공분포나 기공의 사이즈, 기공의 수 등에 영향을 받기보다는 필터내 볼 구성에 따른 통기성에 더 큰 영향을 받는 것으로 보임
- EM스펀지필터와 광물필터를 조합한 경우 전체적으로 광물만 쓴경우보다 10% 정도의 제거율에서 증가를 보였으며 스펀지만 쓴경우를 비교했을 때 증가가 없는 것을 고려하면, EM용액의 투입에 따른 스펀지 기공내 수막의 형성에 따른 증가율로 사료됨
- 본 실험에서 쓰인 스펀지의 기공이 ppi 10 level로 기공의 크기가 2000 μ m 범위로 다소 커서 제거율 증가에 기여함이 그다지 크지 않은 것으로 사료됨

다. 일라이트 광물 필터 및 EM(미생물) 필터의 미세먼지 제거 효율

: 일라이트 광물필터 및 EM(미생물) 필터의 미세먼지 제거 효율을 보기 위한 실험을 진행

(1) 실험 방법

- 미세먼지 측정기를 이용하여 챔버내 미세먼지 농도를 측정한 수치를 기준으로 설정
- 챔버 가운데 일라이트 광물 필터 및 EM(미생물) 필터를 설치 한 뒤 필터를 중심으로 챔버 전, 후단부에 미세먼지 측정기를 설치
- 챔버 후단의 블로우 도어를 작동하여 챔버내 공기 흐름이 발생하게 하고, 미세먼지 발생기로 챔버 전단부에 미세먼지를 유입한 뒤 챔버 전, 후단부의 측정기를 필터를 통과하기 전 공기와 통과한 후의 공기를 측정하여 필터의 미세먼지 제거 효율을 측정

(2) 실험 결과

- 일라이트 광물필터와 미생물 스펀지 필터의 조건별 VOC제거 효율은 아래와 같음

표 3-33. 미생물(EM) 필터를 이용한 미세먼지 제거 효율

구분	필터	제거율(%)	
		PM2.5	PM10
1	스펀지 10cm	7.0	24.0
2	EM + 스펀지 10cm	33.8	41.3
3	EM + 스펀지 20cm	32.8	41.3
4	EM + 스펀지 40cm	45.9	50.3

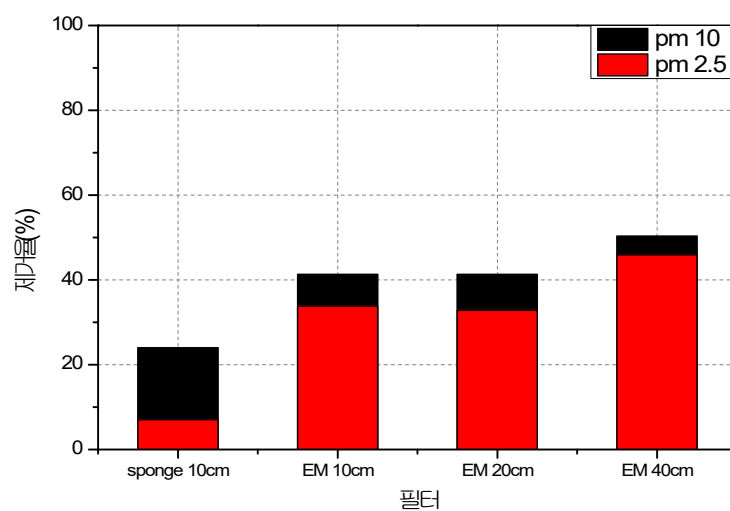


그림 145. 미생물(EM) 필터의 미세먼지 제거율

라. 일라이트 광물필터 및 EM(미생물) 필터의 VOC 제거 효율

: 일라이트 광물필터 및 EM(미생물) 필터의 VOC 제거 효율을 보기 위한 실험 진행

(1) 실험 방법

- VOC 측정기를 이용하여 실내 공기내 VOC 농도를 측정한 수치를 기준으로 설정
- 챔버 가운데 일라이트 광물필터를 설치한 뒤 필터를 중심으로 챔버 전, 후단부에 VOC 측

정기를 설치

- 챔버 후단의 블로우 도어를 작동하여 챔버내 공기 흐름이 발생하게 하여 챔버 전, 후단부의 측정기로 필터를 통과하기 전 공기와 통과한 후의 공기를 측정하여 일라이트 광물 필터의 VOC 제거 효율을 측정
- 광물 볼의 사이즈를 1cm, 2cm, 3cm으로 설정하여 조건에 따른 제거율을 측정
- 일라이트 광물필터와 같은 방식으로 챔버 설정 뒤 50cm*50cm*10cm, 50cm*50cm*20cm, 50cm*50cm*30cm 사이즈로 필터 조건을 3가지로 설정한 뒤 공극율 30ppi, 45ppi의 두 가지 스펀지 필터를 이용하여 조건별 VOC 제거 효율을 측정
- 공극율을 달리한 스펀지필터를 물과 1:200비율로 희석한 EM(미생물) 활성액에 담지한 뒤 필터틀에 설치하여 챔버내 VOC농도를 측정하여 제거 효율을 확인하였음

(2) 실험 결과

- 일라이트 광물필터와 미생물 스펀지 필터의 조건별 VOC제거 효율은 아래와 같음

표 3-34. 1cm 일라이트 광물필터

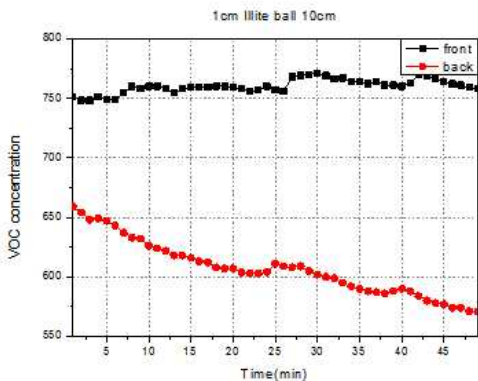
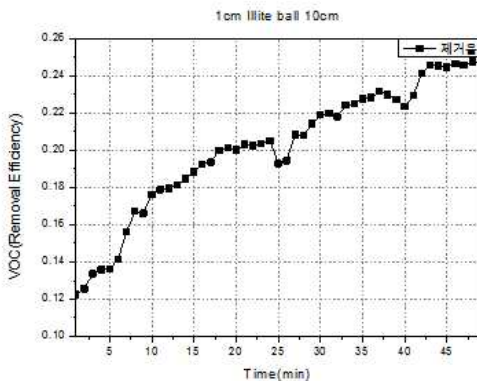
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	760µg/m³	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	607µg/m³	20%

표 3-35. 2cm 일라이트 광물필터

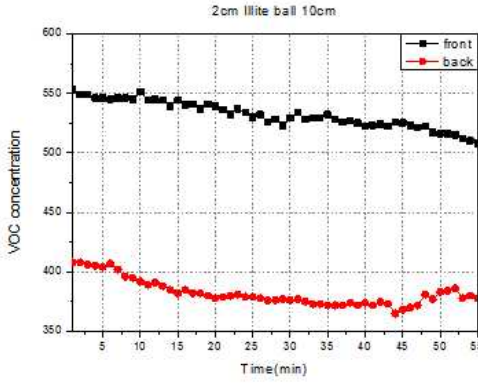
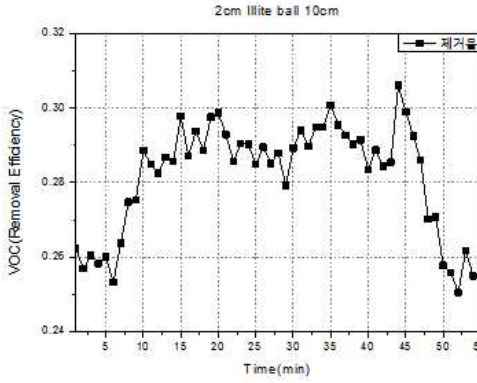
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	532µg/m³	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	382µg/m³	28%

표 3-36. 3cm 일라이트 광물필터

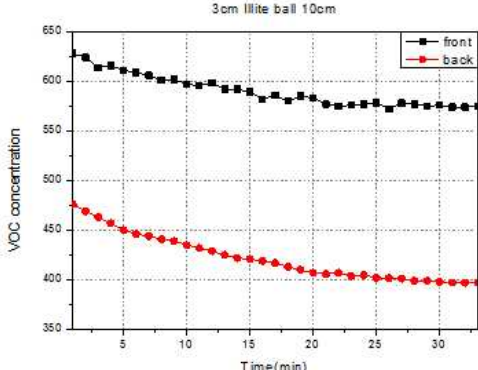
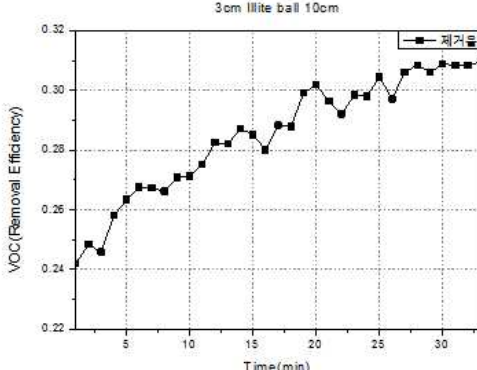
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	590 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	422 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	28.53%

표 3-37. 1+3cm 일라이트 광물필터

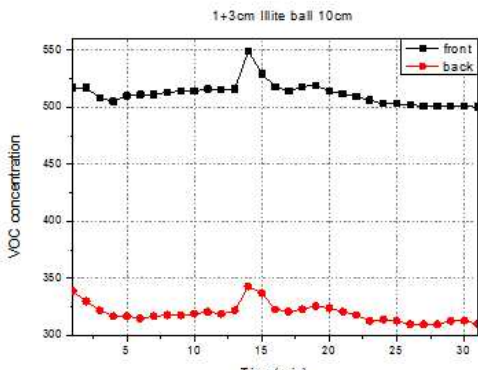
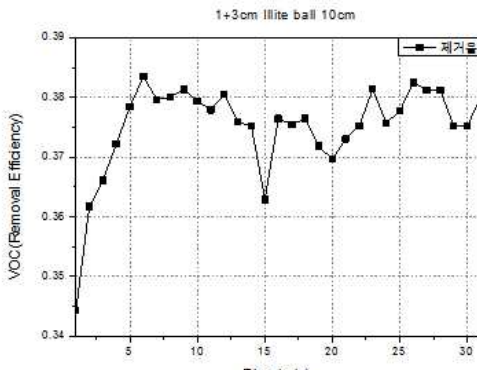
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	512 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	320 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	37.51%

표 3-38. 1+2cm 일라이트 광물필터

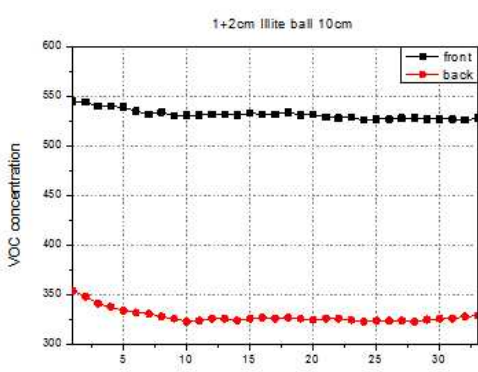
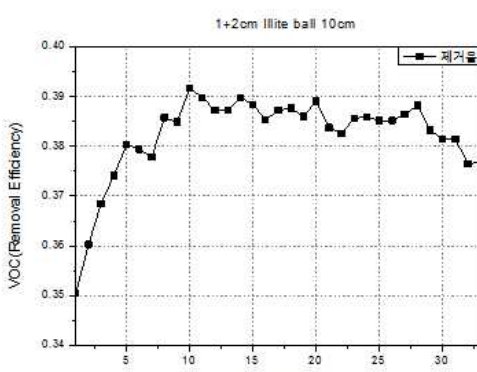
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	532 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	329 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	38.22%

표 3-39. 2+3cm 일라이트 광물필터

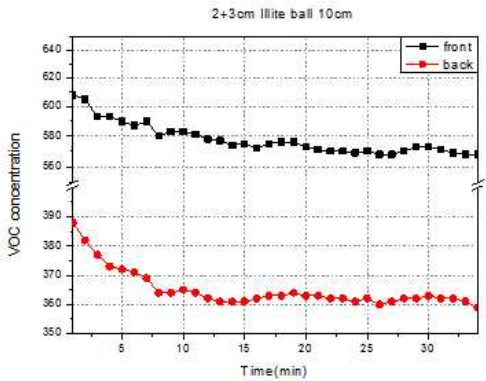
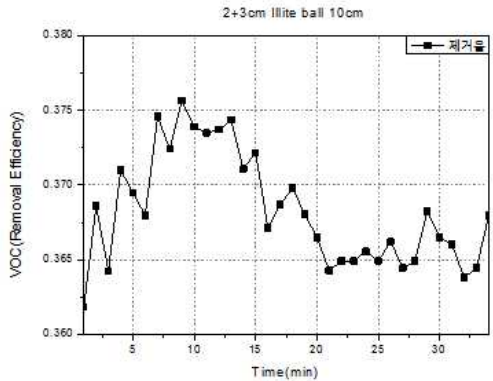
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	578 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	36.83

표 3-40. 45ppi 스펀지 10cm + EM 200배 희석액

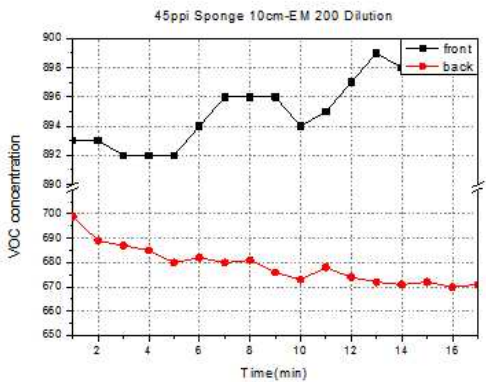
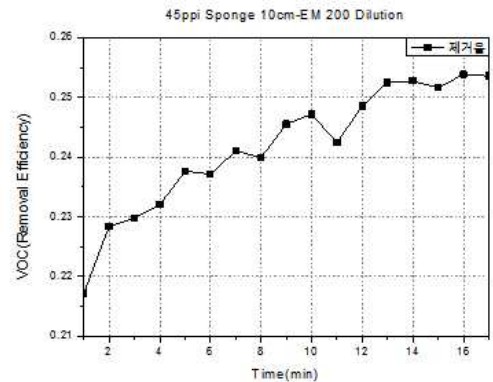
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	895 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	679 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24%

표 3-41. 45ppi 스펀지 20cm + EM 200배 희석액

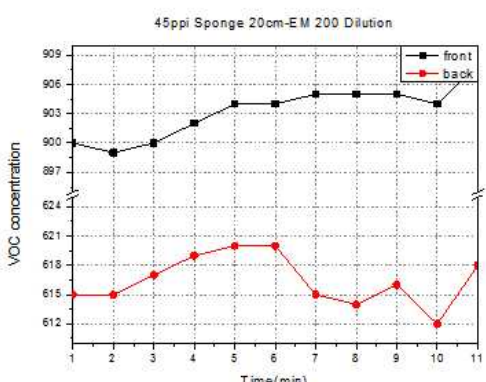
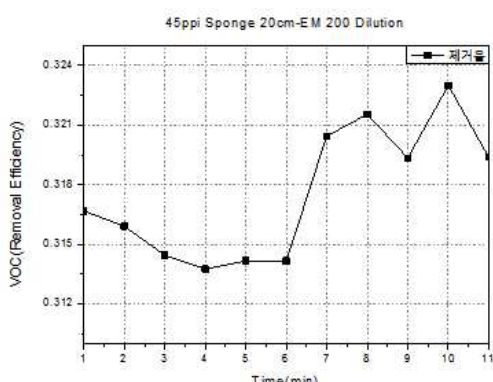
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	903 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	616 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	32%

표 3-42. 45ppi 스펀지 30cm + EM 200배 희석액

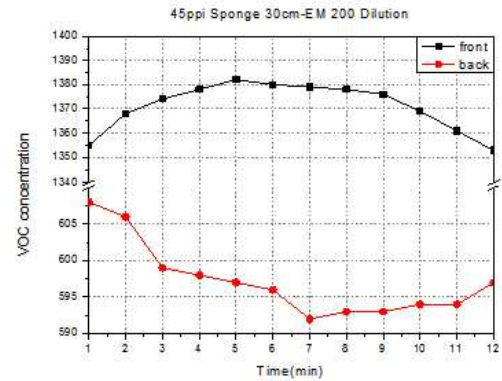
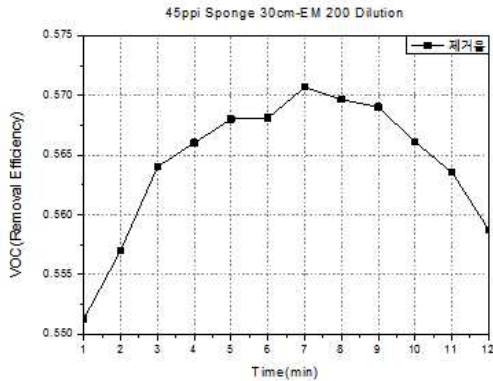
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	1371 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	597 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	56.44%

표 3-43. 30ppi 스펀지 10cm + EM 200배 희석액

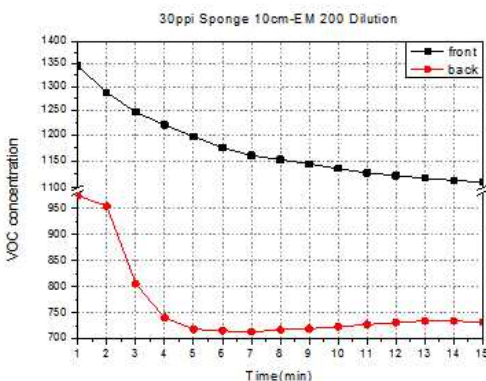
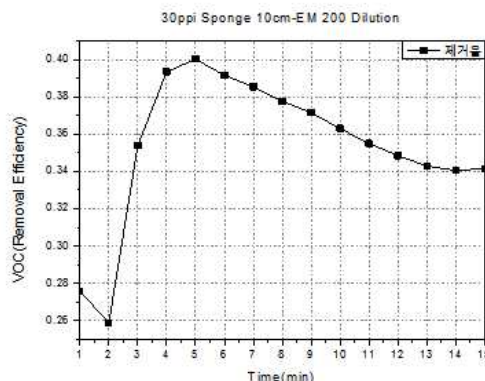
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	853 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	586 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	31.42%

표 3-44. 30ppi 스펀지 10cm + EM 200배 희석액

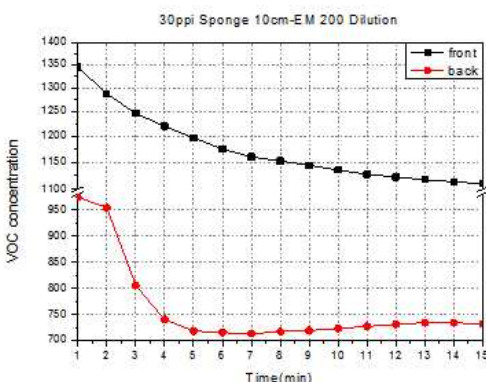
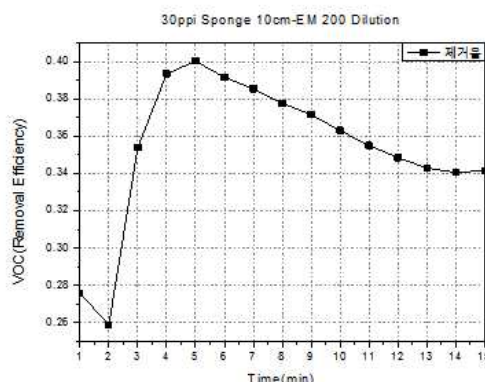
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	853 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	586 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	31.42%

표 3-45. 30ppi 스펀지 20cm + EM 200배 희석액

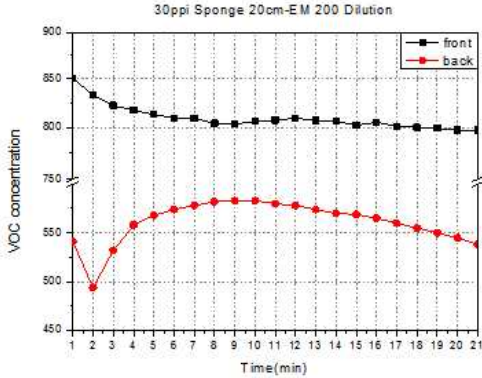
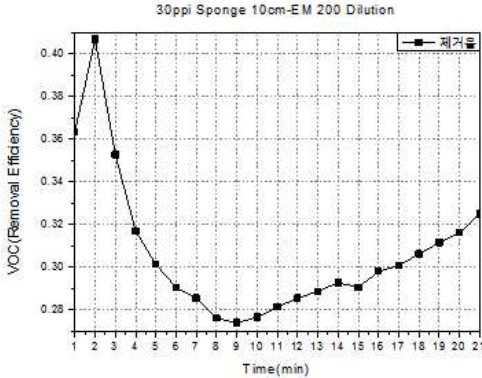
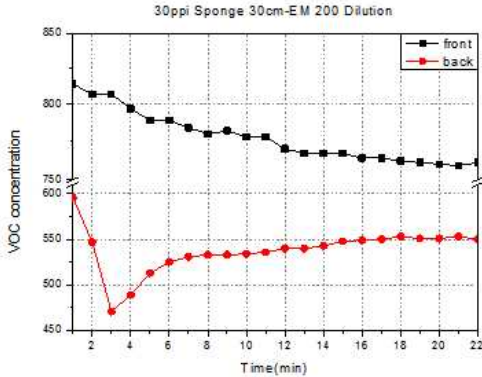
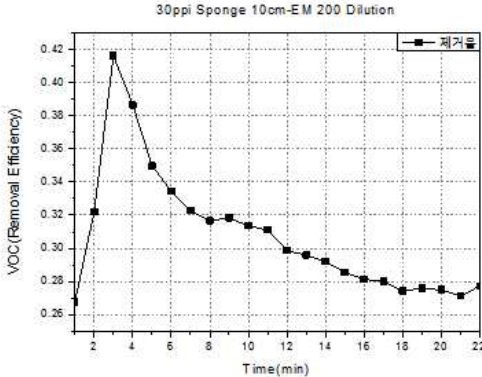
챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	809 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	561 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30.67

표 3-46. 30ppi 스펀지 30cm + EM 200배 희석액

챔버 전, 후단부 VOC농도		VOC 제거율
		
챔버 전면 평균 농도	778 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	평균 VOC 제거율
챔버 후면 평균 농도	538 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30.76%

(3) 결론

- 실험을 통해 일라이트 광물필터 및 EM(미생물) 스펀지필터의 각 조건별 VOC제거효율을 측정할
- 일라이트 광물필터와 EM(미생물) 스펀지필터 각각의 단일 필터 사용시 가장 제거 효율이 높게 나타난 필터는 공극율 45ppi 스펀지 필터를 EM활성액을 물에 200배 희석한 뒤 담지하여 제작한 미생물 스펀지 필터를 50cm*50cm*30cm 조건의 미생물필터
- 측정시 45ppi스펀지 필터 30cm두께로 실험 진행시 챔버 전단부의 공기가 한번에 빠져 나가지 못하고 조금씩 축적되면서 챔버 전단부의 VOC농도도 함께 증가하는 것을 확인
- 이를 토대로 공기의 흐름이 원활하지 않을수록 제거효율이 높아짐을 알 수 있었으며, 추후 지속적인 실험과 연구를 통해 공기 흐름을 원활하게 유지하면서 제거효율을 높일 수 있는 최적의 조건을 도출하고자 함

마. 반응시간 최대화를 위한 필터틀 설계

- (1) 기존 사각틀 형태의 필터틀의 경우 필터를 통과하는 공기가 너무 빨리 지나가 오염된 공기와 필터틀간의 접촉시간이 낮다는 문제점이 제기 되었음
- (2) 이에 이를 해결하기 위해 필터틀의 형태를 달리하여 접촉시간을 늘리고 원활한 공기 흐름을 유도하여 오염물질 제거 효율을 높이하고자 함
- (3) 아크릴을 이용하여 50cm*50cm*10cm 사이즈의 일라이트 광물필터용 필터틀과 미생물 필터용 필터틀을 제작
- (4) 제작한 필터틀의 형태는 아래와 같으며 지속적인 실험과 측정을 통해 개선해가고자 함

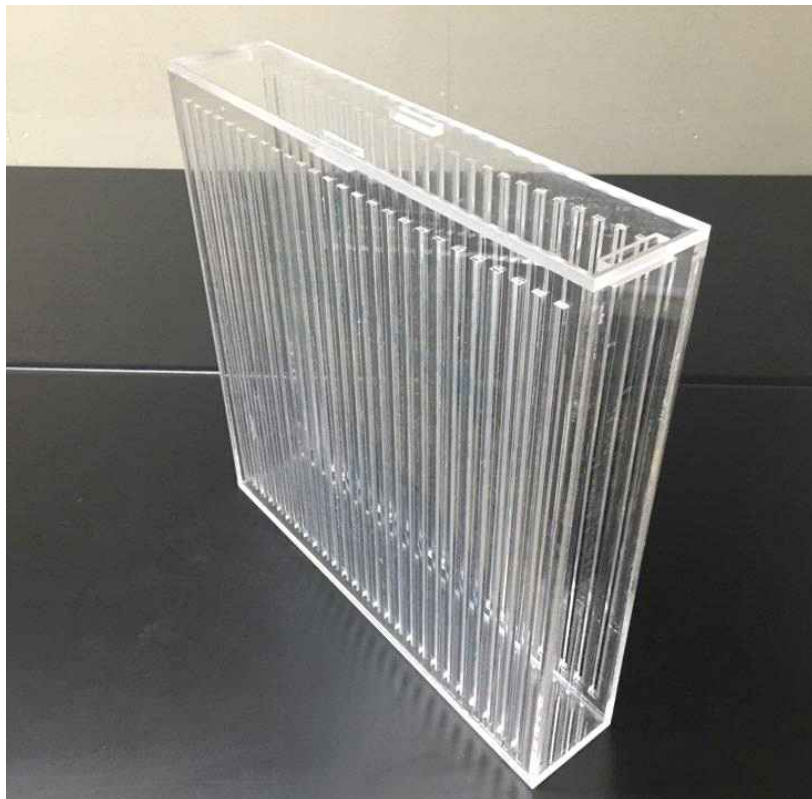


그림 146. 일라이트 광물필터 1

- 기존의 일라이트 광물 필터와 같은 형태로 공기가 통과하는 전 후면에 통로를 좁히는 방식으로 공기와의 접촉 시간을 늘리는 형태



그림 147. 일라이트 광물필터 2

- 일라이트 광물 필터 자체의 하중을 줄이고 공기와의 접촉 시간을 늘리기 위해 필터틀 내에 공기 흐름을 인위적으로 조절한 통로를 낸 형태

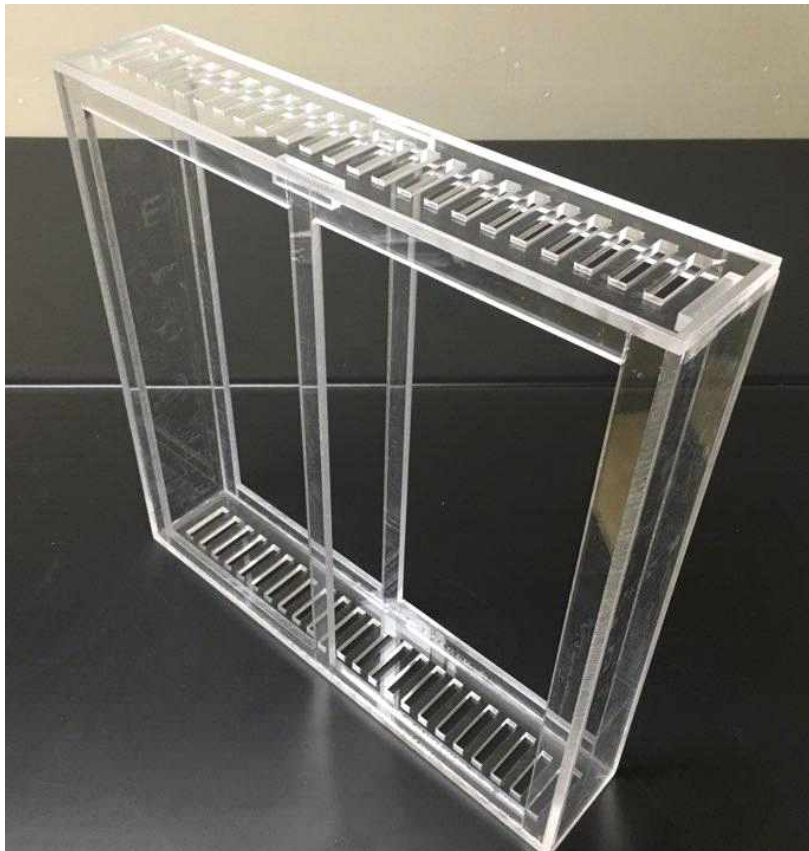


그림 148. 미생물 스펀지 필터

- 스펀지 필터의 경우 하중과 상관없이 공기 흐름 조절이 가능(스펀지필터 공극율 조절, 스펀지필터 두께 조절 등)하여 가장 기본적인 형태로 틀을 제작하였음.

바. 오염원별 오염물질 제거를 위한 광물필터 및 미생물 필터 개발

(1) 기존 실험 및 연구 수행, 분석을 통해 필터 개선

(가) 일라이트 광물 필터 개선

① 일라이트 광물 필터 필터틀 개선

- 기존 1, 2차년도 일라이트 광물 필터틀이 오염된 공기와의 접촉시간이 낮아 제거율이 높지 않다는 단점을 개선하기 위해 필터틀의 형태 및 성능 개선을 지속적으로 진행.
- 2차년도 실험 데이터를 참고하여 개선된 일라이트 광물 필터틀을 제작.
- 개선된 필터틀은 50cm * 50cm * 10cm * 8T 사이즈로 아크릴을 이용하여 제작. 필터틀 전면과 후면에 각각 15cm 사이즈의 공기가 유입, 배출 될 수 있는 통로를 만들고 그 외 부분은 밀폐하였으며, 필터틀 내부에 30cm * 10cm * 0.5cm 사이즈의 가림막을 2개 설치하여 오염된 공기가 필터틀로 유입된 이후 광물 필터와 최대한 접촉할 수 있도록 공기 흐름을 유도할 수 있게 제작.

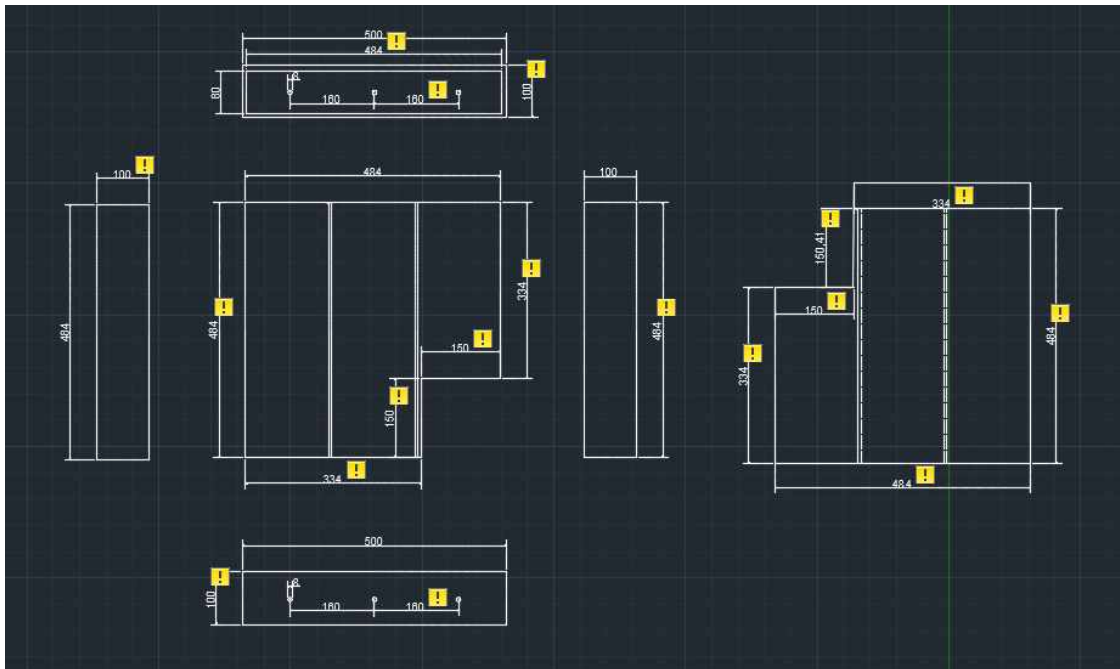


그림 149. 개선 아크릴 필터틀 개선 설계도 (전면)

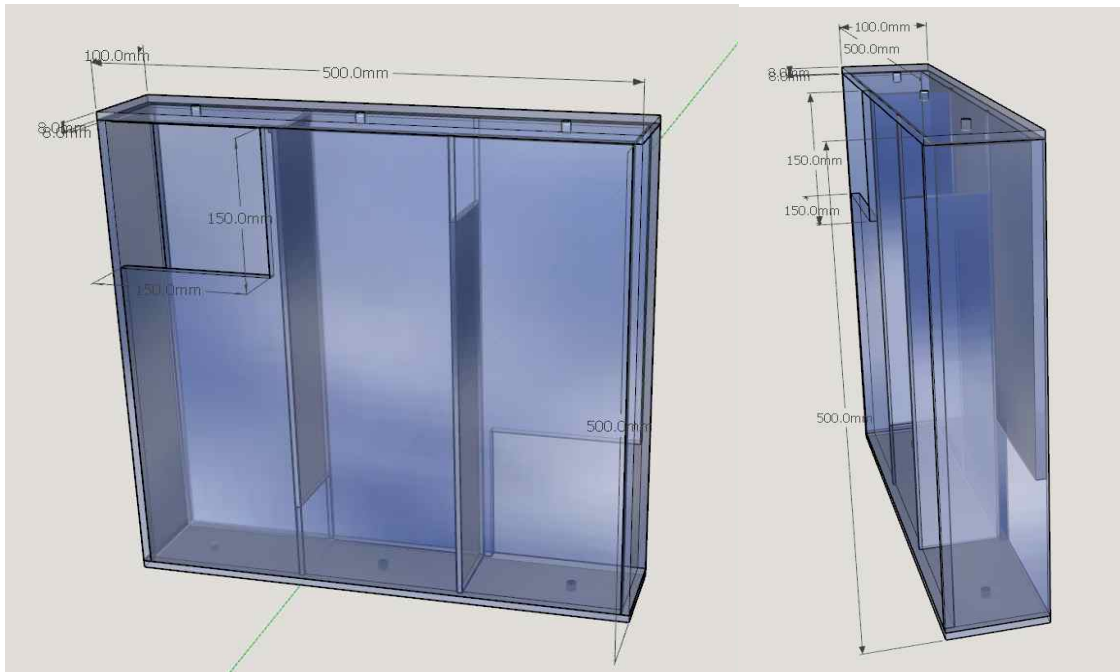


그림 150. 개선 아크릴 필터틀 개선 설계도(3D)



그림 151. 개선 아크릴 필터틀 전면



그림 152. 개선 아크릴 필터틀 상단

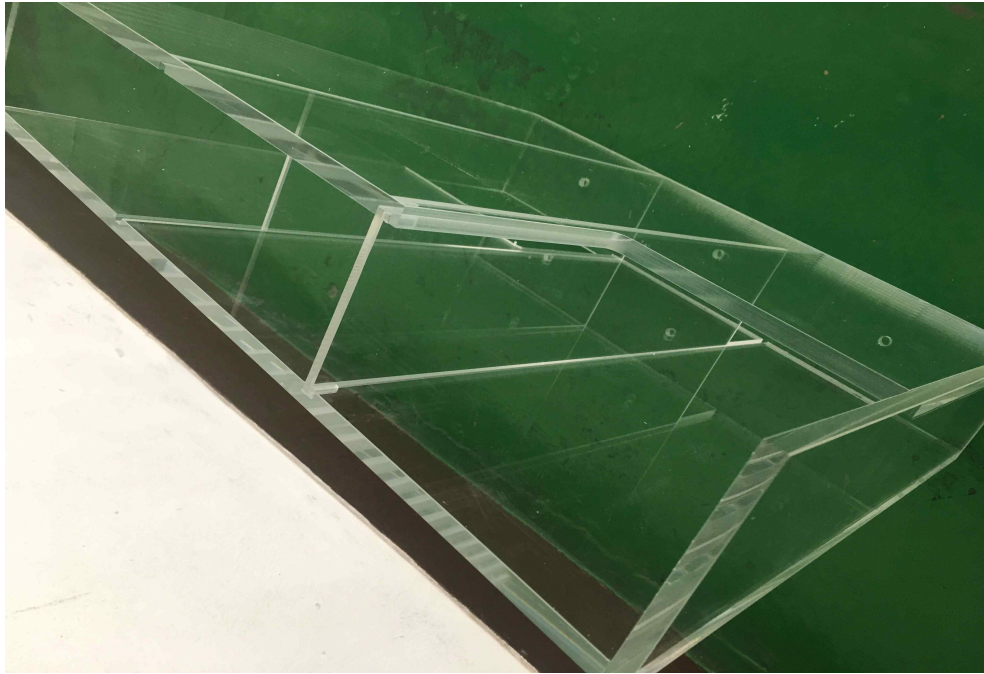


그림 153. 개선 아크릴 필터를 공기 유입구

(나) 미생물 필터 적용 방법 개선

① 필터틀내 미생물 적용 방법 개선

- 1, 2차년도 실험 결과를 토대로 일라이트 광물 필터를 개선을 진행하면서 EM(미생물) 필터의 개선 역시 함께 진행.
- 기존의 EM(미생물) 필터는 50cm * 50cm * 10cm 사이즈의 45ppi 스펀지 필터에 EM 활성액 Pure-water 200배 희석액을 담지 한 형태로 일라이트 필터를 후면에 바로 위치하여 일라이트 광물 필터를 통과한 오염 된 공기를 EM(미생물) 필터를 이용하여 한번 더 필터링하는 방식이었음.
- 기존 방식을 이용할 경우 오염 제거율이 높아지지만, 그만큼 공기의 흐름에 영향을 미쳐, 원활한 공기 흐름을 방해하고, 지속 된 공기와의 접촉으로 스펀지 필터에 담지한 EM 활성액 Pure-water 200배 희석액이 쉽게 증발한다는 단점이 존재함.
- 이에 3차년도 현장 적용 2차 챔버 제작을 진행하면서 챔버 사이즈의 변화 및 하중 부담, 원활한 공기 흐름을 고려하여 EM(미생물) 필터의 개선을 진행하였음.
- 기존의 50cm * 50cm * 10cm 사이즈의 45ppi 스펀지 필터에 EM 활성액 Pure-water 200배 희석액을 담지 하여 사용하던 필터틀 방식 대신 EM 활성액 Pure-water 200배 희석액을 직접 일라이트 광물 필터의 일라이트 광물 볼 표면에 고르게 도포하여 일라이트 광물 필터와 EM(미생물) 필터를 하나로 합치는 방안으로 개선을 진행하였음.
- 이에 2차 챔버 및 현장적용 챔버 제작 시 챔버 하단에 EM 활성액 Pure-water 200배 희석액을 보관할 수 있는 저류조를 설치하고, 펌프를 이용하여 챔버 상단에 설치한 분사 장치를 통해 일라이트 광물 필터 상단에 EM 활성액 Pure-water 200배 희석액을 고루 분사할 수 있도록 제작하였으며, 각 일라이트 광물 필터틀 하단에 물이 배출 될 수 있는 통로를 내어 광물볼 표면에 도포 되고 남은 EM 활성액 Pure-water 200배 희석액이 배출구를 통해 하단의 일라이트 광물 필터틀로 흐를 수 있도록 제작하였음.
- 또한 저류조에 설치한 펌프에는 타이머 장치를 설치하여 3시간마다 15분씩 EM 활성액 Pure-water 200배 희석액을 분사할 수 있도록 하여 일라이트 광물 필터내 일라이트 볼

표면에 EM 활성액 Pure-water 200배 희석액이 마르지 않도록 설치하였음.



그림 154. 2차 챔버 및 EM활성액 Pure-water 200배 희석액 분사 호스



그림 155. 블로우 도어 및 공기 배출구

(2) 미세먼지 및 VOCs 제거 실험

(가) 1차 챔버 미세먼지 제거 실험

① 실험 방법

- 기존 1차 챔버내에 아크릴을 이용하여 제작한 개선 된 50cm * 50cm * 10cm 사이즈의 일라이트 광물 필터틀을 설치하고, 후단에 EM 활성액 Pure-water 200배 희석액을 담지 한 50cm * 50cm * 10cm 사이즈의 45ppi 스펀지필터를 설치하여 미세먼지 제거 효율을 측정하는 실험을 수행하였음.
- 일라이트 광물 필터틀에 투입 된 일라이트 볼은 기존 실험에서 가장 높은 제거율을 보였던 1cm과 3cm 사이즈의 일라이트 볼을 1:1 비율로 혼합하여 투입하였음.
- 미세먼지 측정기를 이용하여 챔버내 미세먼지 농도를 측정한 뒤 기준으로 설정.
- 챔버 전단 및 후단에 미세먼지 측정 센서를 설치하고, 그 사이에 일라이트 광물 필터 및 EM(미생물) 필터를 설치.
- 챔버 후단 블로우 도어 작동하여 챔버 전단으로 유입 된 오염 된 공기가 필터를 통과해 밖으로 배출 되도록 설정. 챔버 전단부에는 미세먼지 발생기를 이용하여 미세먼지를 챔버내로 유입 되도록 설정.

② 실험 결과

- 1차 챔버에 개선 된 아크릴 필터를 설치하여 진행한 미세먼지 제거 실험의 결과는 아래와 같음.

표 3-47. 1차 챔버 미세먼지 제거 실험 데이터

시간	PM 2.5 전단($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	PM 2.5 후단($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	PM 2.5 제거율(%)	PM 10 전단($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	PM 10 후단($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	PM 10 제거율(%)
15:15	138	85	38.41%	322	174	45.96%
15:20	128	82	35.94%	297	166	44.11%
15:25	121	78	35.54%	292	155	46.92%
15:30	120	81	32.50%	271	160	40.96%
15:35	123	76	38.21%	285	154	45.96%
15:40	115	74	35.65%	272	143	47.43%
15:45	111	76	31.53%	257	146	43.19%
15:50	102	62	39.22%	236	125	47.03%
15:55	104	59	43.27%	241	119	50.62%
16:00	95	63	33.68%	232	131	43.53%
16:05	103	58	43.69%	238	116	51.26%
16:10	57	40	29.82%	132	79	40.15%
16:15	56	37	33.93%	137	79	42.34%

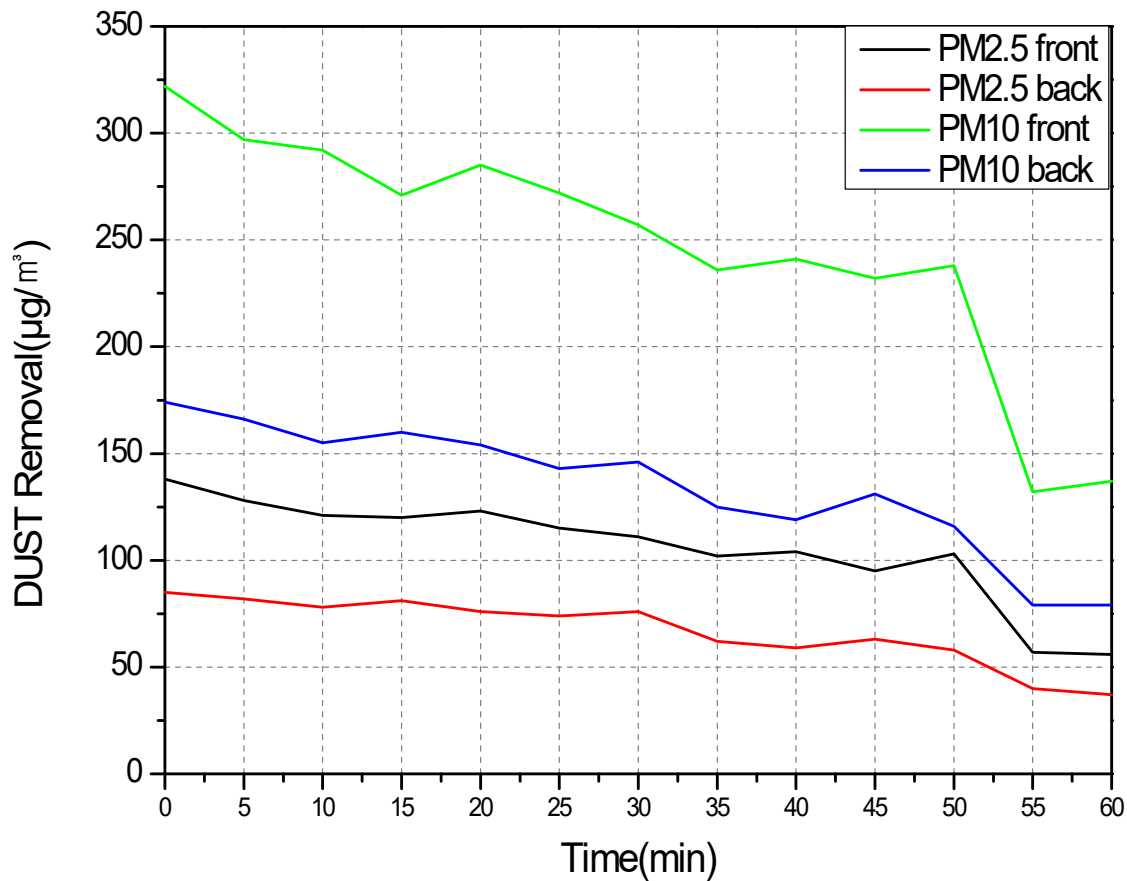


그림 156. 1차 챔버 미세먼지 농도 변화

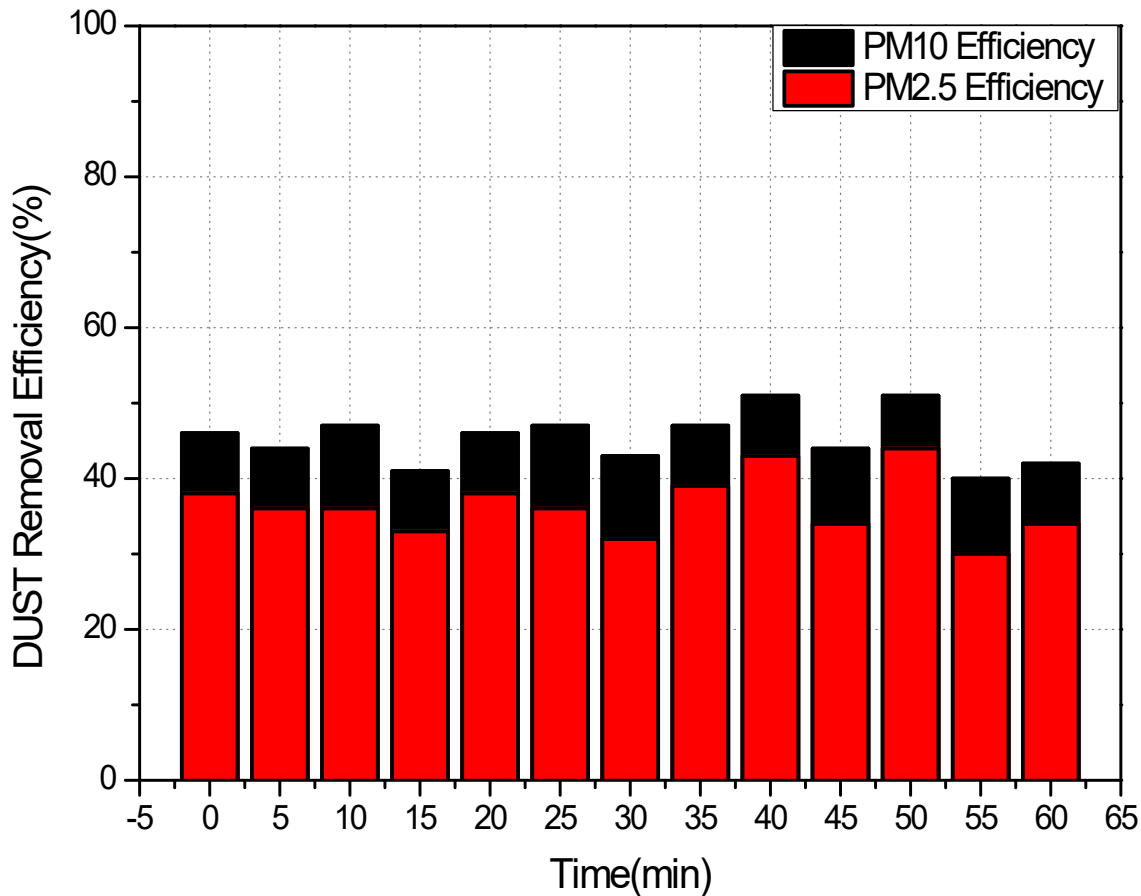


그림 157. 1차 챔버 미세먼지 제거율

③ 결과 고찰

- 1차 챔버를 이용한 미세먼지 실험은 5분 단위로 진행이 되었으며, 초기농도 범위를 PM2.5는 $138 \mu\text{m}/\text{m}^3$ 부터 $56 \mu\text{m}/\text{m}^3$ 범위에서 측정을 하였음
- 1회 사이클로 진행된 실험에서는 PM2.5와 PM10 둘다 30~40%의 제거효율을 보이는 것으로 나타났으며 상대적으로 PM10의 제거효율이 높게 나타남. 이는 PM10과 PM2.5의 입자크기로 인해 air blower로 후단으로 흡입시 상대적인 챔버내 체류시간과 확산정도의 차이에 의해 기인하는 것으로 보임

(나) 1차 챔버 VOCs 제거 실험

① 실험 방법

- 미세먼지 제거 효율 측정 실험과 같이 1cm, 3cm 사이즈 일라이트 볼을 1:1 비율로 필터에 투입한 뒤, 챔버 중간에 일라이트 광물 필터 및 EM(미생물) 필터를 설치.
- 챔버가 설치 된 실내 공간의 VOC를 측정하여 기준 수치로 설정한 뒤 VOCs 측정기를 챔버 전단부와 후단부에 설치.
- 블로우 도어를 작동하여 유입 된 공기가 필터를 통과하여 배출 되도록 설정.

② 실험 결과

- 1차 챔버에 개선 된 아크릴 필터틀을 설치하여 진행한 VOCs 제거 실험 결과는 아래와 같음.

표 3-48. 1차 챔버 VOC 농도

시간	VOCs 농도 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)		VOCs 제거율 (%)
	전단	후단	
14:40	444	342	22.97
14:45	430	310	27.91
14:50	406	299	26.35
14:55	399	324	18.80
15:00	429	331	22.84
15:05	441	334	24.26
15:10	452	333	26.33
15:15	462	332	28.14
15:20	464	330	28.88
15:25	463	327	29.37
15:30	466	328	29.61
15:35	467	328	29.76
15:40	468	328	29.91

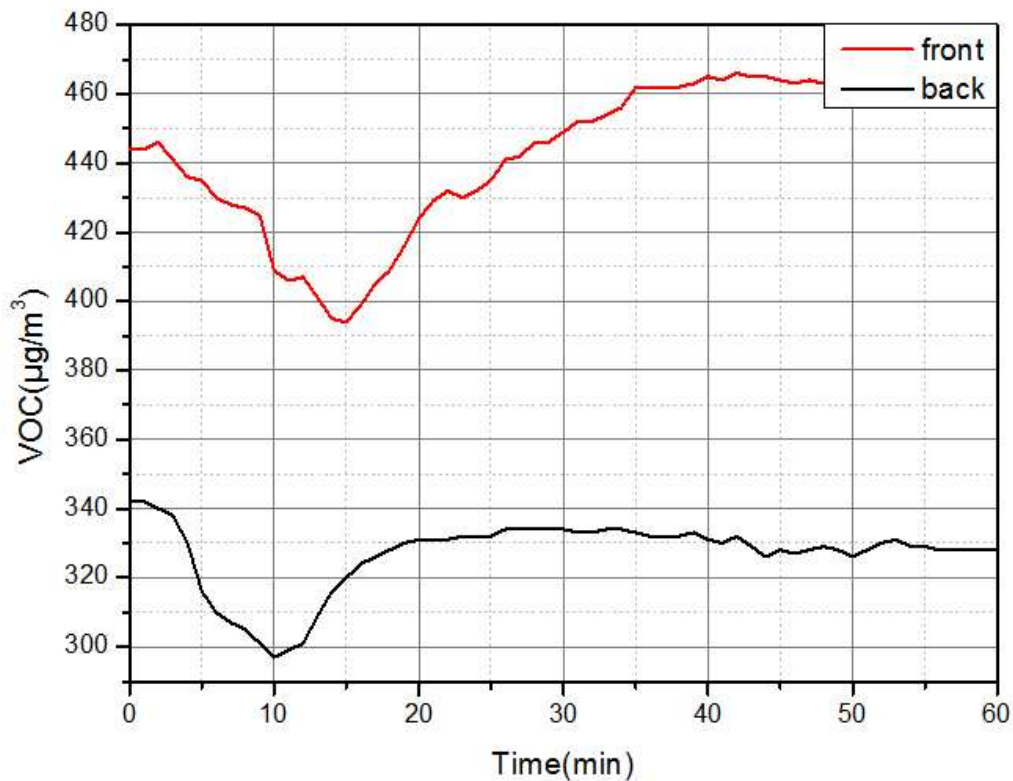


그림 158. 1차 챔버 VOC 농도 변화

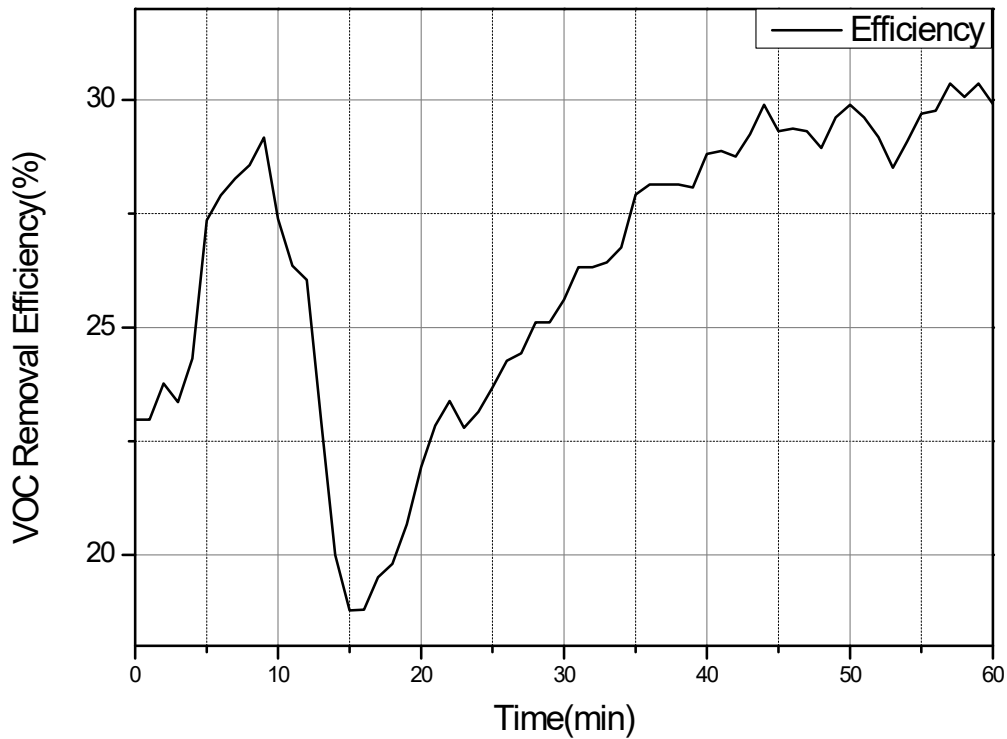


그림 159. 1차 챔버 VOC 제거율

③ 결과 고찰

- 1차 챔버를 활용한 VOC의 제거율은 20~30%의 효율을 보이는 것으로 나타남 초기농도는 $400\mu\text{m}/\text{m}^3$ 를 기준으로 10%의 오차범위로 유지되었으며 후단부에서 1회 흡입 시 제거되는 농도는 $300\mu\text{m}/\text{m}^3$ 의 범위에서 측정되는 것을 알 수 있음
- 더스트에 비해 상대적으로 VOC의 챔버내 유동이 일정하지 못함으로 인해 전단에서의 농도도 시간단위로 변화하는 것이 관찰되었으며 이로 인해 전체적인 제거효율이 VOC가 낮은 것으로 관찰됨. 2차 년도에 수행된 바와 같이 VOC의 특성상 챔버내 수분농도 및 분사된 EM용액의 잔류 및 반응시간에 좌우가 되는 것을 고려하여 식생지지기반인 지지체에서 1차적인 제거가 필요한 것으로 보임

(다) 2차 챔버 순환식 미세먼지 제거 실험

① 실험 방법

- 컨테이너로 제작된 테스트베드내에 2차 챔버를 설치하고, 1차 챔버에 사용된 1, 3cm 사이즈 일라이트 볼을 1 : 1 비율로 필터에 혼합 투입한 뒤, EM(미생물) 활성액 200배 희석액을 일라이트 볼 표면에 고르게 도포하였음.
- 안정화 후 미세먼지를 투입한 뒤 미세먼지 농도를 측정하여 기준으로 설정하고, 2차 챔버의 블로우 도어를 가동하여 오염된 공기가 필터를 통과한 뒤 외부가 아닌 테스트베드 내부로 배출되어 다시 필터로 흡입되어 필터링 되는 순환 방식 실험을 수행.
- 미세먼지 측정기를 테스트베드 내부에 설치하여 최초 미세먼지 농도 및 순환방식 필터링 이후 미세먼지 농도를 시간대별로 측정하였음.

② 실험 결과

- 2차 챔버를 이용한 순환식 미세먼지 제거 실험결과는 아래와 같음.

표 3-49. 2차 챔버 순환식 미세먼지 농도

시간	2.5 μ m	10 μ m
11:15	284	551
11:45	203	386
12:15	155	286
12:45	102	187
13:15	84	153
13:45	71	128
14:15	59	106

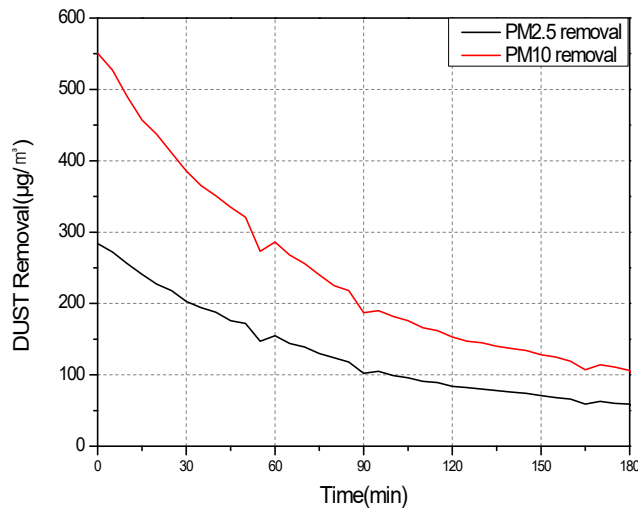


그림 160. 2차 챔버 순환식 실험 미세먼지 농도 변화

③ 결과 고찰

- 2차 챔버는 1차 챔버와는 다르게 30분마다 정화된 공기를 순환으로 다시 투입하여 지속적인 시스템의 정화능력을 관찰하였음
- 이를 기반으로 볼 때, 1사이클 가동시 제거되는 필터만의 효율은 20~30%의 범위로 1차 챔버때의 제거능력과 유사한 범위의 결과를 보이며, 순환을 통한 지속적인 가동으로 초기 농도 대비 PM2.5의 경우 최대 79%, PM10의 경우 80% 가량의 제거효율을 나타내었음
- 이를 볼 때 광물 및 미생물 기반의 필터 자체의 입자상 오염물질 제거능력은 실험에 사용된 입자상 물질의 크기에는 영향을 받지 않는 것으로 보임

(라) 2차 챔버 순환식 VOCs 제거 실험

① 실험 방법

- 컨테이너로 제작된 테스트베드내에 2차 챔버를 설치하고, 1차 챔버에 사용된 1, 3cm 사이즈 일라이트 볼을 1 : 1 비율로 필터에 혼합 투입한 뒤, EM(미생물) 활성액 200배 희석액을 일라이트 볼 표면에 고르게 도포하였음.
- 안정화 후 VOCs를 투입한 뒤 VOCs 농도를 측정하여 기준으로 설정하고, 2차 챔버의 블로우 도어를 가동하여 오염된 공기가 필터를 통과한 뒤 외부가 아닌 테스트베드 내부로 배출되어 다시 필터로 흡입되어 필터링 되는 순환 방식 실험을 수행.
- VOCs 측정기를 테스트베드 내부에 설치하여 최초 VOCs 농도 및 순환방식 필터링 이후 VOCs 농도를 시간대별로 측정하였음.

② 실험 결과

-2차 챔버를 이용한 순환식 VOCs 제거 실험결과는 아래와 같음.

표 3-50. 2차 챔버 순환식 VOC 농도

시간	VOC 농도
13:32	61684
14:02	60529
14:32	58978
15:02	55953
15:32	54735

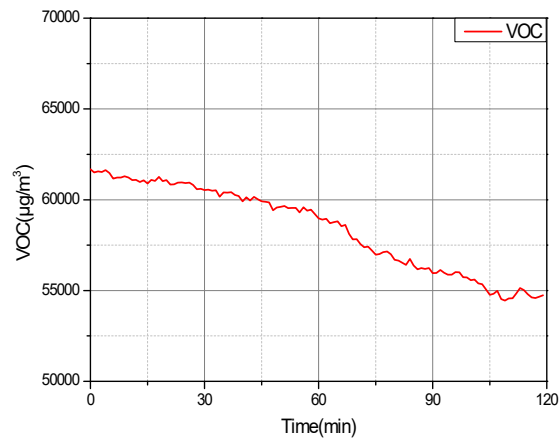


그림 161. 2차 챔버 순환식 실험 VOC 농도변화

③ 결과 고찰

-VOC의 경우, 동일한 방법으로 4회 순환실험을 진행하였고, 초기농도 대비 11% 가량 감소한 것으로 나타남. 이는 이전에 1차 챔버 실험에 비해 전체적인 감소능력은 떨어진 것으로 보이나 초기농도를 인위적으로 기존대비 100배 이상 높은 농도에서 실험이 진행되어 나타난 현상이며, 실내공기질 제어뿐만 아니라 향후 적용 예상처인 화학물질 노출시 초동대응 가능여부를 판단하기 위해 진행이 되었음.

(마) 결론

- 3년간의 1차 챔버 및 2차 챔버 실험을 통해 도출 된 데이터를 토대로 일라이트 광물 필터와 미생물 필터의 최적 조건을 도출하였음
- 1차 챔버 실험 당시 일라이트 볼 광물 필터와 EM(미생물) 필터를 따로 제작하여 각각 설치하였으나 2차 챔버 및 현장적용 챔버 제작시 공기 흐름 및 공간, 하중 등의 문제 해결을 위해 EM(미생물) 활성액 200배 희석액을 45ppi 스펀지 필터에 담지하여 사용하던 기존 방식 대신 일라이트 광물 필터내 광물 볼 표면에 직접적으로 EM(미생물) 활성액 200배 희석액을 도포하여 일라이트 광물 볼 및 EM(미생물) 활성액 200배 희석액의 효과를 보고자 하였음
- 실험 결과 일라이트 광물 필터와 EM(미생물) 스펀지 필터를 각각 설치하여 실험 했던 1차 챔버보다 미세먼지 및 VOC의 제거율은 낮아 졌지만, 공기의 흐름이 원활해졌으며 전체적인 필터 하중을 줄이는 효과를 볼 수 있었음

-
- 이에 2차 챔버 및 현장적용 실험부터 일라이트 광물 필터 볼 표면에 EM(미생물) 활성액 200배 희석액을 직접 도포하는 방식을 채택하였음
 - 또한 오염 된 공기를 한번만 필터에 통과 시키는 1차 챔버 실험과 달리 2차 챔버 실험부터는 오염 된 실내 공기를 지속적으로 챔버에 흡입하여 필터링 시키는 순환방식을 도입하여 오염 된 공기를 2중, 3중의 지속적으로 필터링 하고자 하였음
 - 이에 단일 제거율은 1차 챔버보다 낮아 졌으나 일정 시간 순환방식의 필터링시 원활한 공기 흐름과 오염물 제거 효과를 볼 수 있었음

4절. 시제품 제작 및 현장적용

가. 시제품 제작

(1) 상용화를 위한 제품 디자인

(가)EcoPS (Eco Purification System) 제품디자인을 위한 고려사항

- 오염물질의 제거는 식물의 기능을 활용한 정화단계와 광물질필터 및 미생물바이오필터를 활용한 정화단계를 통해 이루어지므로 외부에서 유입된 공기의 흐름이 내부에서 순차적으로 이루어지도록 해야 함
- 정화 순서는 식물→ 토양 및 근부미생물→ 광물질필터→ 미생물 바이오필터 순으로 단계적으로 이루어짐
- 식물 및 미생물의 생육에 필요한 수분의 공급 및 관리가 용이하여야 함
- 식물의 관리 및 교체가 용이하여야 하며 필터의 관리가 가능한 구조이어야 함

(나) 기존 요소기술 통합장치의 문제점 및 개선방안

- 기존 시스템은 식물전면에서 흡입한 오염된 공기를 소재별 정화단계 단계를 거쳐 하부로 배출하는 방식이었으나 공간 내 하부의 미세먼지를 비산시켜 공기 중으로 확산시킬 우려가 있어 소재별 위치 변경 및 시스템의 상부 측면에서 배출하는 방식으로 변경함

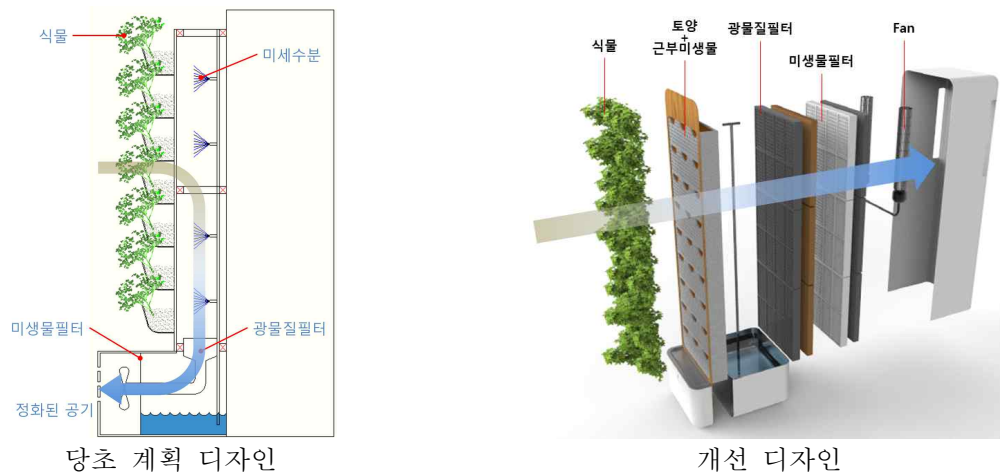


그림 162. 공기흐름 변경 디자인

- 식물의 생육을 위한 수분 공급은 하부 수조에 물을 저류하여 펌프를 통해 점적관수를 이용하고 있으며, 상부 식생포트부터 수분이 공급되어 하부 식생포트로 전달되어 순환되는 형식으로 토양 유출로 수조의 물이 오염되거나 펌프 및 관수라인의 막힘 현상이 발생 할 우려가 있음. 이에 대한 개선방안으로 관수 후 수조로 인입되는 토양 및 수분에 고착된 미세 먼지를 침전시키는 침전부를 두고 수중필터를 설치하여 오염을 방지하도록 함

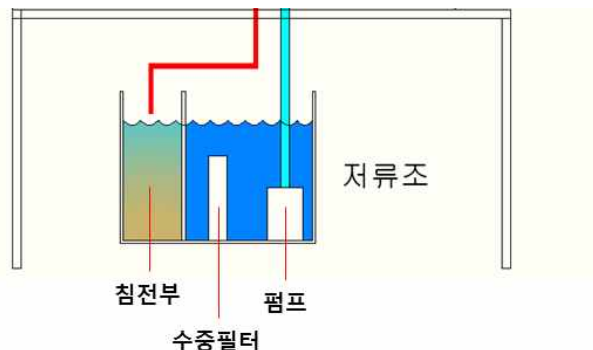


그림 163. 저류조 구조

(다)Eco Purification System 디자인

— 소형 type

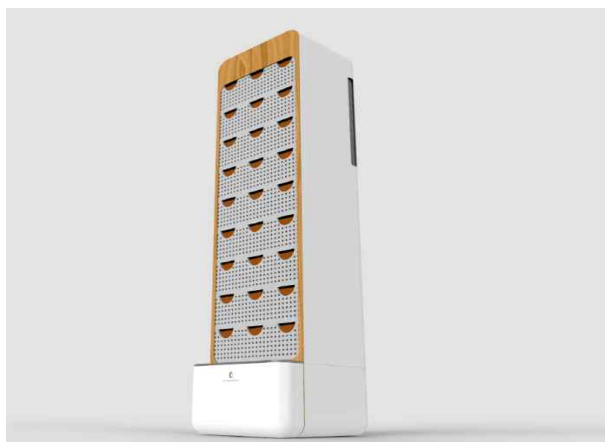
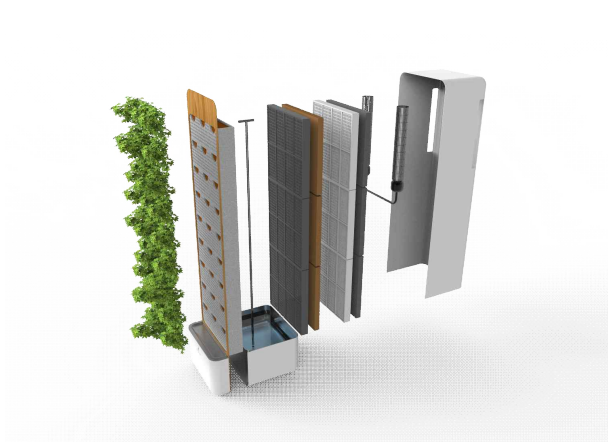


그림 164. 소형 Type 컨셉디자인



그림 165. 중 · 대형 Type 컨셉디자인

(라) 제품 프레임

- EcoPS(Eco Purification System) 는 식생모듈이 전면에 배치되기 때문에 제품 프레임은 식생모듈의 크기를 기본으로 함
- 식생모듈 크기가 400×100×H165mm 이므로 EcoPS 전면부 제품너비는 400mm, 800mm, 1,200mm 등 400mm의 배수로 조절가능함
- Test Bed에 설치될 EcoPS(Eco Purification System) 시제품은 대상지의 설치공간을 고려하여 1,200×600×2,200mm으로 제작함
- 시제품의 구조는 상하로 공기배출구, 식생모듈, 저류조로 되어 있으며 전후로는 식생모듈, 광물질필터, 흡입팬 으로 구분할 수 있음

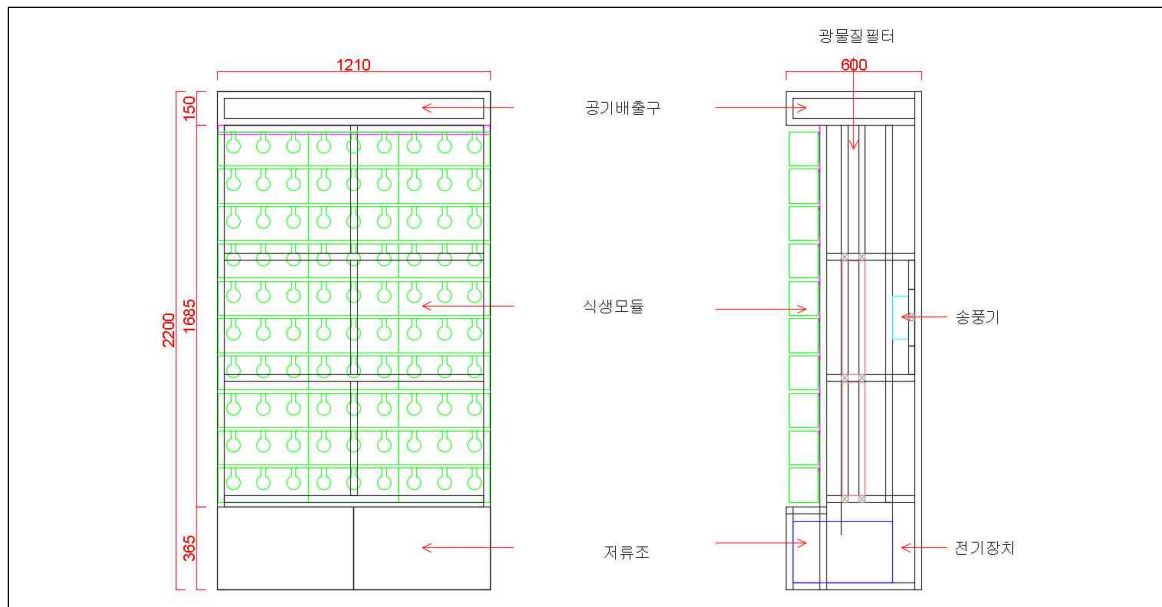


그림 166. EcoPS 구조도

(마) 관수장치

- 식생모듈의 식물생육과 광물질필터의 미생물제재 공급을 위해 각각의 필터에 관수장치를 설치함
- 관수의 방법은 물을 외부에서 직접 유입시켜 관수 후 배출수를 배수하는 방식과 내부에 저류조를 설치하여 관수후 배출수를 다시 순환활용하는 방식이 있으며 대상지는 외부의 물을 직접 유입시킬 수 있는 수도시설이 없어 저류조를 설치하여 순환사용하는 방식으로 제작함
- 하부의 저류조는 칸막이를 두고 각각에 수중모터를 설치하여 식생모듈과 광물질필터에 수분을 공급할 수 있도록 하였으며 16mm 연질관과 점적단추를 이용하여 제작함

(바) 전기장치

- EcoPS(Eco Purification System)는 식생모듈, 광물질필터에 수분공급을 위한 수중모터 2개와 공기의 흡입을 위한 흡입팬을 작동시키기 위한 조절장치(타이머)가 필요함
- 대상지의 온도, 습도, 유동인구, 오염물질 유입 및 발생 요소 등 대상지 상황에 맞게 관수 시간 및 흡입팬 작동시간의 조절이 가능하도록 제작함

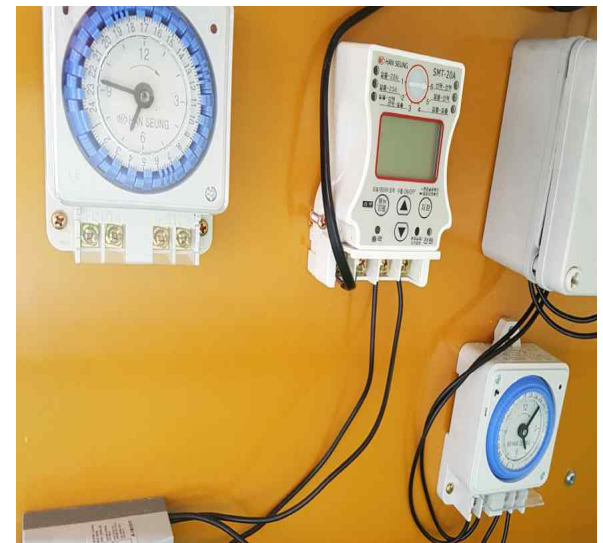


그림 167 EcoPS(Eco Purification System) 시제품 제작

- 2차년도 요소기술 통합장치는 식생모듈을 프레임에 적층하는 구조로 제작되었는데 관수시 프레임을 타고 물의 누수되는 현상이 발생하였으며 식생모듈 교체시 개별 교체가 되지않는 문제점이 발생하여 3차년도 시제품에서는 식생모듈과 시제품프레임의 걸림쇠를 달아 거치하는 방식으로 변경함
- 식생모듈은 시제품 프레임의 전면에 거치하여 설치 및 관리에 용이하게 하였고 광물질필터는 프레임의 좌우측에서 삽입할 수 있도록 함
- 식생모듈 및 광물질필터 뒷면에 칸막이를 설치하여 필터외부로 공기가 새어나가지 않도록 함

나. 시제품 설치

(1) 시제품 설치

(가) 대상지 현황

- 지하철 인천시청역은 인천1호선과 2호선이 만나는 환승역이며 EcoPS (Eco Purification System)를 설치할 대상지는 역사 내 주민이용공간으로 댄스연습실이 있어 청소년들의 활동이 많은 곳으로 미세먼지 발생이 우려되는 공간임

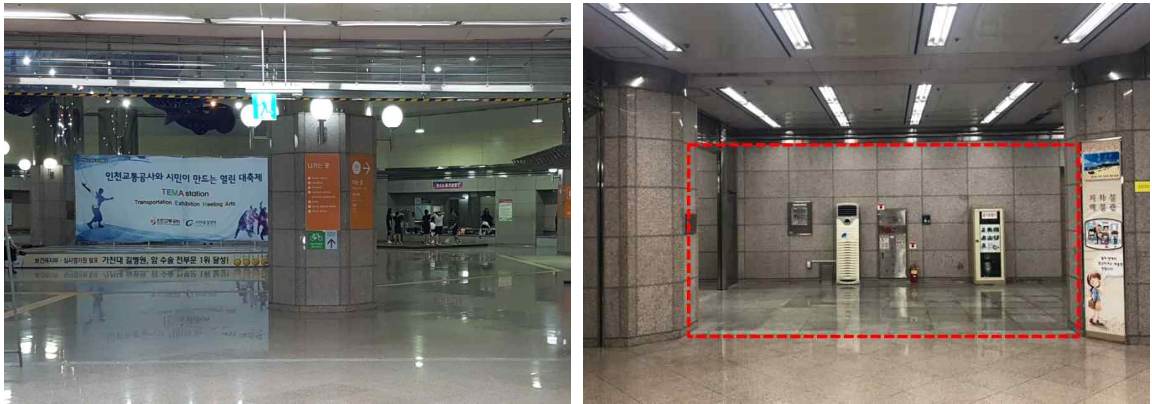


그림 168. 설치 대상지

(나) 설치 계획

- 지하철 이용객의 동선에 방해 되지 않도록 기둥과 기둥사이(H3.50m×W5.05m)에 EcoPS (Eco Purification System)를 H2.20m×W4.84m 크기로 설치함

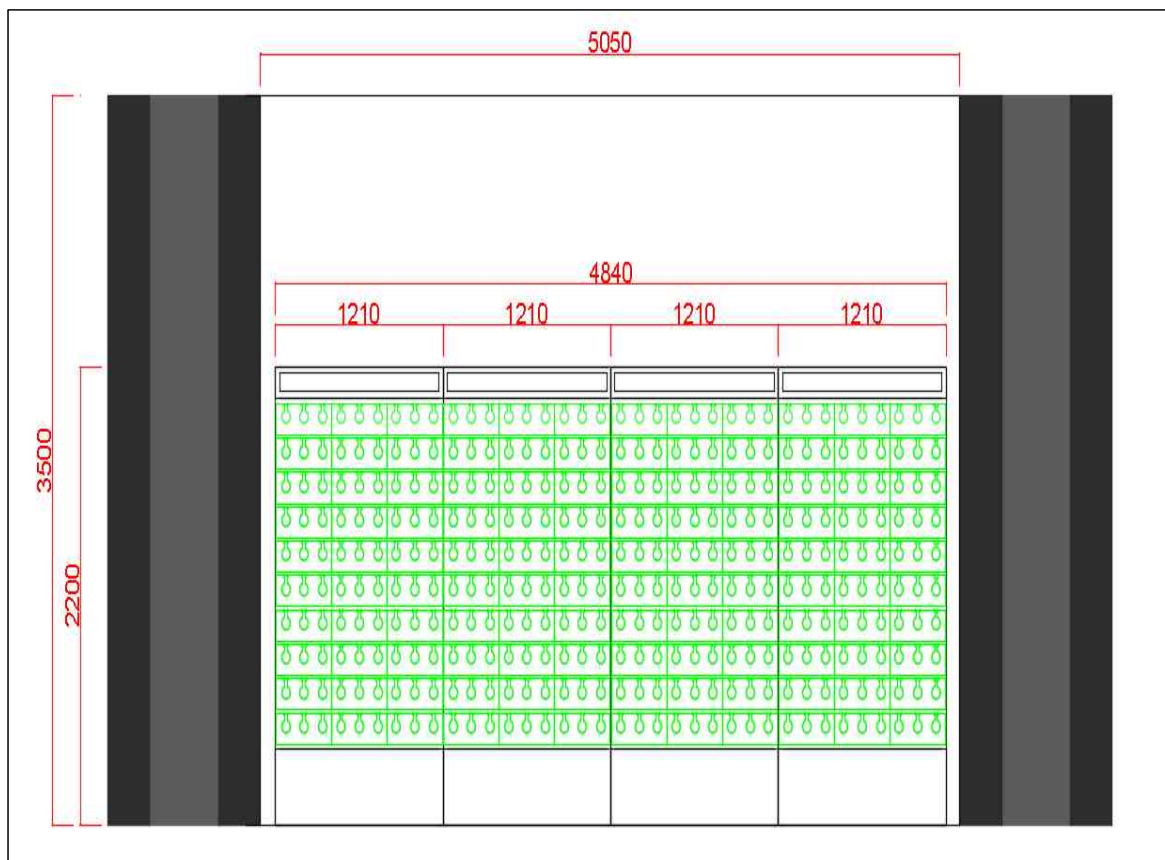


그림 169. EcoPS 설치 계획도

- 지하철 역사는 외부온도의 영향을 많이 받아 일반적인 실내보다 온도변화가 크고 지하공간으로 광량이 부족할 수 있기 때문에 저온과 저광도에 적합하고 관리가 용이한 식물로 선정하였으며 다양한 식물을 패턴화하여 시각적으로 이용객들의 흥미를 유발할 수 있도록 계획함

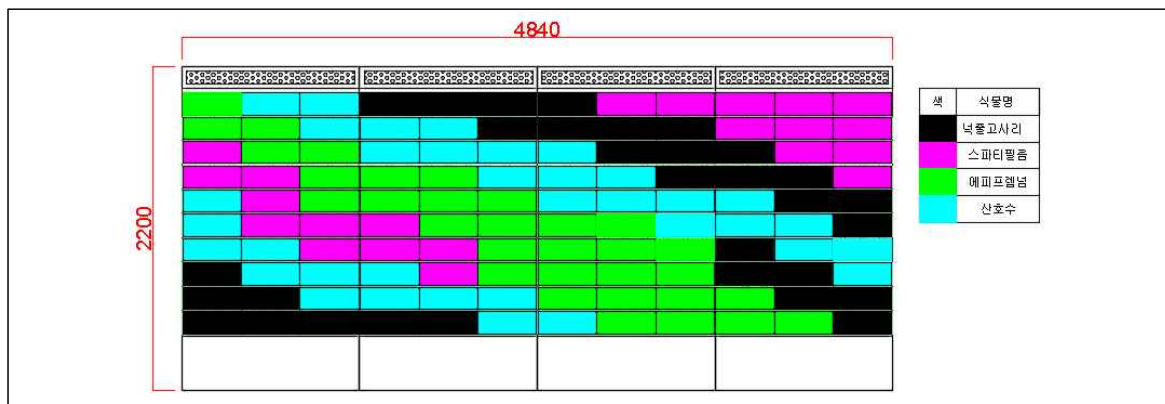
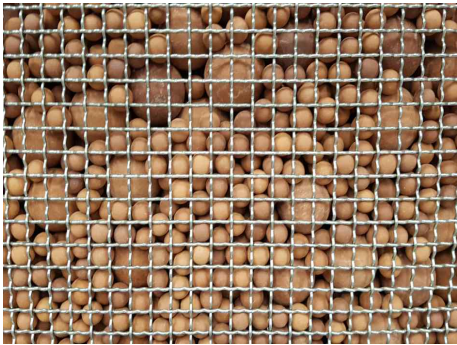


그림 170. EcoPS 식물배치 계획도

(다) 설치 공정

－ 설치 공정은 다음과 같음

식물 식재(식재모듈)	
광물질 채움 (광물질필터)	
프레임 배치	

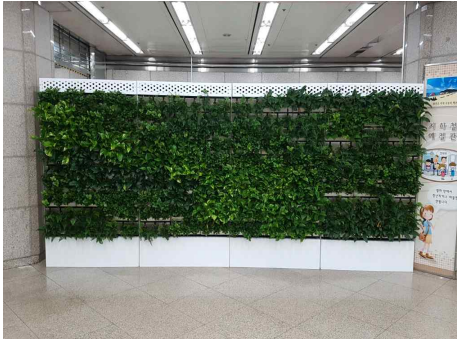
광물질 필터 설치	
식생모듈 설치	
전원장치 연결 및 시운전	
설치 완료	

그림 171. EcoPS 설치 공정

다. 시제품 성능 평가를 위한 다중이용시설 내 적용 및 실내공기질 모니터링

(1) 개발 제품 성능 검증을 위한 인천 시청 내 모니터링 시스템 구축

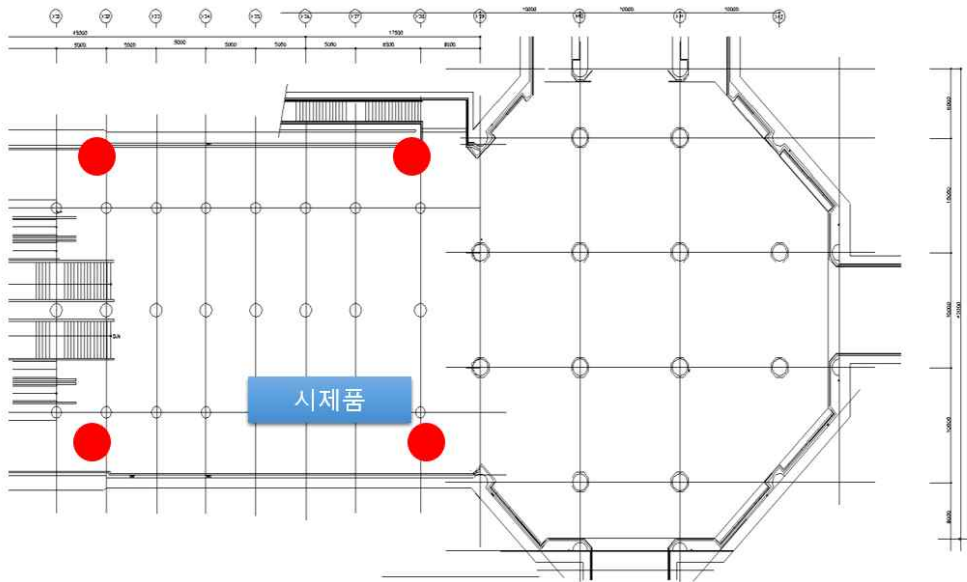


그림 172. 시제품 성능 검증을 위한 인천시청 역사 내 모니터링 시스템 설치

- 인천시청 역사 시제품 설치 지역의 공간 공기질 변화에 따른 개발제품 성능 검증을 위한 모니터링 시스템 구축
- 제품 설치 구역과 제품의 환기용량과 공간 범위를 고려한 측정 부 4곳을 선정
- 장기간 모니터링을 위한 모니터링 장치 IAQ 700 설치
- 지그비 무선 통신 방식을 사용하며 원거리에서 실시간으로 데이터 전송 가능
- 온도, 습도, 이산화탄소, 먼지 동시 측정 가능
- 인천시청역 개발 제품 설치 공간의 전체적인 공기질 모니터링 데이터 확보 가능



그림 173. IAQ 700/ 신뢰성 확보를 위한 비교 측정

- 모니터링 장치의 신뢰성 확보를 위한 비교 측정 실험 진행
- 비교 측정 장비에는 Chamber test에 사용된 LABCO를 사용
- IAQ의 경우에는 PM10 기준의 먼지 측정을 하므로 PM10 기준의 비교 test 진행
- IAQ700과 Labco의 비교실험에서 상대적으로 동일 패턴 구현

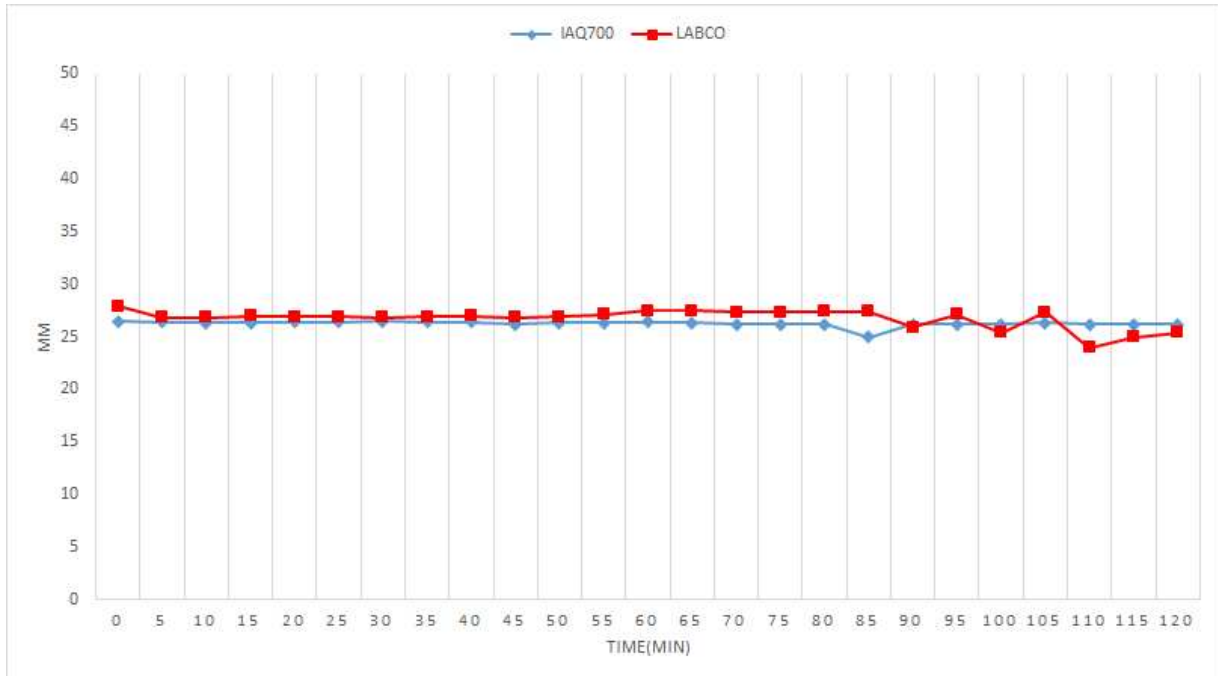


그림 174. IAQ700/LABCO 비교 측정 데이터

(2) 개발제품 설치에 따른 인천시청 역사 내 공기 질 변화

- 인천시청 역사 내 개발 제품 설치에 따른 공기질 모니터링 변화 분석
- 2017.06.28. ~ 2017.07.01. 약 4일간 개발제품 가동 전 데이터와 가동 후 데이터를 수집하여 비교 분석
- 개발 제품 가동 전 기간 약 평균 52 μ m의 측정치를 나타냈으며, 개발제품 가동 후 전 기간 약 평균 39 μ m의 측정치를 나타냄
- 전체 측정기간의 농도 변화율의 경우 지속적으로 미세먼지 농도 감소되는 것으로 관측됨
- 이산화탄소도 미세먼지 농도 변화율과 비슷한 추세로 농도가 감소되는 것으로 나타남.

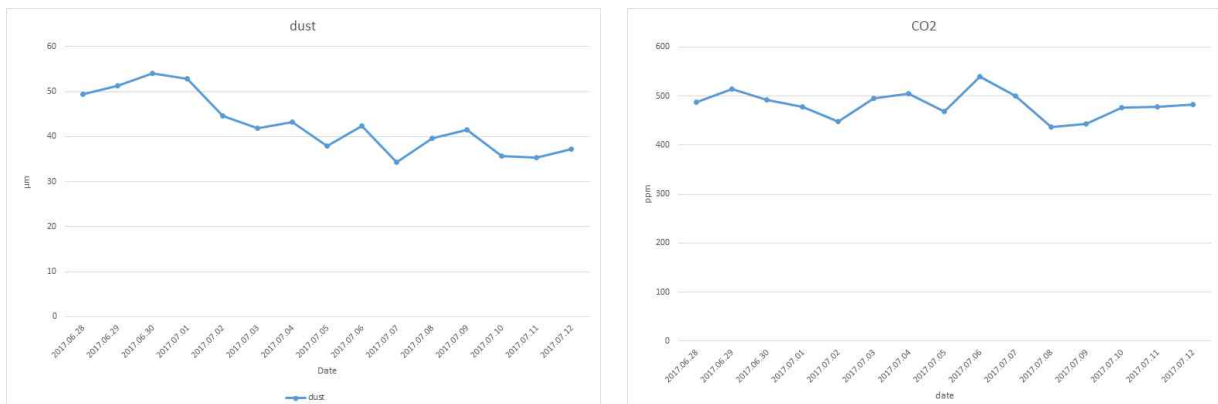


그림 175. 인천시청 역사 내 개발 제품 설치에 따른 공기질 변화

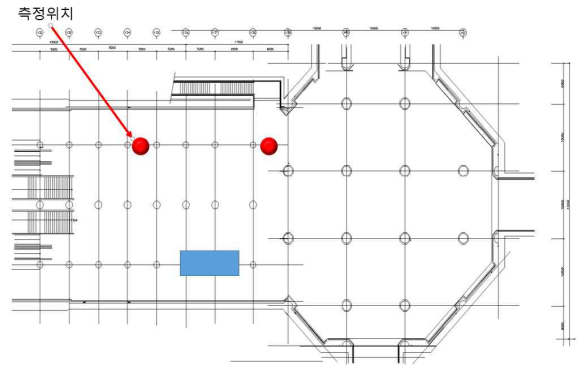


그림 176. 시제품 운전/비운전 시 24시간 실내공기질 측정

- 개발 제품의 직접적인 성능평가를 위하여 비교 측정을 위해 LABCO를 이용하여 개발 제품 적용 장소에 설치 후 24시간 모니터링 진행
- 측정 위치의 선정은 개발 제품의 직접적인 공기정화율 확인을 위해 설치 위치 정면 방향에서 각 측면에 위치한 기둥 쪽에 설치 후 측정 진행

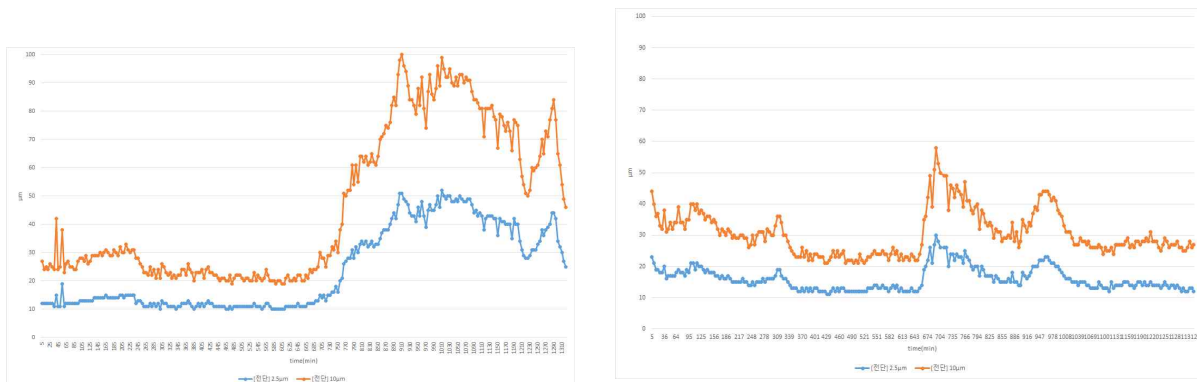


그림 177. 시제품 미 운전/운전 시 24시간 미세먼지 농도 변화

- 2개의 실험 모두 동일한 PM 20:00부터 실험을 진행함
- 미 운전시의 평균 농도는 PM 10 46µm, PM2.5 24µm로 나타났고 가장 높은 경우에는 PM10 100µm, PM2.5 52µm 까지 높아지는 것을 확인
- 미세먼지 농도가 Peak까지 올라간 시점은 인천시청역사내 유동인구수가 가장 활발한 출근 시간에 농도가 높아지는 것을 확인
- 개발 제품의 운전 시 평균농도는 PM10 30µm, PM2.5 16µm 정도로 확인되었으며, 이에 가동 전 보다 PM 10은 51.82%, PM2.5는 38.4%가 감소
- 가장 농도가 높은 출퇴근 시간인 오전 6:00 ~ 09:00 시간대에서도 평균 농도가 미 운전 시보다 운전 시 보다 약 32% 감소
- 그러나 본 실험의 경우 일시적인 실험을 진행한 것으로 추후 서울중구시설관리공단과의 협조를 서울에 위치한 다중이용시설에 해당하는 공간을 선정하여 동일한 조건의 데이터를 확보하여 본 연구 개발 제품의 성능에 대한 검증은 확인

라. 시범사업 운영 계획

(1) 다중이용시설 내 본 시제품 적용을 통한 시범사업 운영

- 현재 서울중구시설관리공단 관리 하에 있는 실내 다중이용시설에 인천 시청에 적용된 Stand-Type의 Test-bed가 9월 중순경에 설치 및 운영 예정
- 서울중구시설관리공단에서 시범사업 종료 후 추후 시범사업의 진행을 위해 서울교통공사와의 협의를 통하여 서울 지하철 노선 내 유동인구가 상당한 역사 선정에 대해 논의 후 11월 중순경에 원형 Test-bed를 설치 운영 예정임



중구시설관리공단 시범사업 제안 : 필요성

- 시제품 설치 필요성**
- 현대인들은 주거공간을 포함한 대부분의 시간(80% 이상)을 실내공간에서 보내고 있고 특히 여러 사람이 이용하는 다중이용시설에서 많은 시간을 보내고 있음
 - 이러한 다중이용시설의 공기질 또한 사람들의 건강에 상당한 영향을 미치고 있음
 - 따라서, 새질종루균 및 조류미생물의 문제가 심각하게 다루되고 있는 만큼 다중이용시설의 실내 공기질을 개선하고 유지하기 위하여 본 기술의 시범사업이 필요함
- 기대효과**
- (초미세먼지 제거 효과)
 - 공기정화효과, 휘발성 유기화합물(VOCs) 저감으로 시민들의 건강증진 효과
 - 전자기파의 차단, 습도조절, 산소발생, 향기를 감소로 에너지절감
 - 실내 인테리어 효과로 시민들의 쾌적한 장소 제공 가능

연구과제 시범사업 소개

- 사업소개**
- 본 사업은 건설교통기술혁신연구사업의 '초미세먼지(PM2.5) 제거 및 SBS(sick Building Syndrome) 완화'를 위한 'Eco-Purification기술개발' 연구과제의 결과물로, 2014년부터 2017년까지 한국건설기술연구원 및 플러스파우티유 이 합계 연구하였으며, 기술사업화를 위한 3차년도 시범사업을 진행하고 있음
- 기술내용**
- (장미) 공기정화식물과 광촉매필터를 이용한 친환경 실내공기 정화시스템에 적용되는 기술로, 식물 군주 공기 정화, 미세 먼지, 광촉매 및 미생물 필터를 중첩한 실내공기정화시스템
 - (작동원리) 송풍팬을 통해 공기를 순환시키면서, 식물과 광촉매 필터를 중첩 적용하여 공기를 정화함
 - (기술개발단계) 현재 시제품을 제작 완료하였으며, 기술사업화를 위한 시범사업을 준비중임
 - (실적목적) 시제품 설치기간 전 후 주변 공기질을 측정하여 공기질 개선에 대한 효과 연구
- 관련특허**
- | No. | 발명의 명칭 | 출원국가 | 출원일 | 출원번호 | 등록일 | 등록번호 |
|-----|--------------------------------|------|------------|-----------------|------------|------------|
| 1 | 공기정화식물과 광촉매필터를 이용한 친환경 공기정화시스템 | 대한민국 | 2015.06.16 | 10-2015-0084797 | 2017.04.17 | 10-1729395 |

중구시설관리공단 시범사업 제안 : 구체적 내용

- 시제품 설치 및 유지관리**
- 시제품 설치 Type : 현재 미관상 원형형 Type 2대 설치하는 것을 제안함
 - 시제품 설치 기간 : 수개월 가능 다만, 시범사업 설치 기간은 협의 가능하여, 설치, 철거 및 운영기간 동안 식물 등의 유지관리는 인천대에서 전달함
- 현장 검토사항**
- 전기선 설치 가능 여부
 - 실내온도 일정수준 유지 가능 여부 (최소 15°C (야간 제외))
 - 대상지 전경고

그림 178. 서울중구시설관리공단에 제출한 제안서

5절. 연구개발 성과 성능 및 유지관리

가. 개발제품 성능

- 본 개발제품의 경우 적용 현장에 따른 개발제품의 용량을 산정하여 공간에 따른 최적운전 조건을 적용하여 적용공간 맞춤형 공기정화시스템임
- 현재 제작된 Test-bed 제품의 최적 성능의 기존의 실내공기청정기 성능에 따른 필요 환기량을 기준으로 공간 크기에 따른 적용 면적별 필요 환기회수에 따라 Test-bed 유닛단위의 환기량을 산출하였고 필요 환기량은 아래 표와 같음.

표 5-1 적용공간별 Ecops 운전조건

Room	Width	40m
	Length	50m
	Height	4m
	Volume	8000m ³
CADR	Dust	0.174725 ACH
	Required Flow rate	1397.801m ³ /hr
Ecops	Width	0.8m
	Height	2m
	Filter area	1.6m ³
	Units	1ea
	Unit Velocity	0.22674m ³ /sec

- 위 운전조건을 적용하여 밀폐된 일정공간에서 본 개발제품 연속 운전 시 PM10과 PM2.5의 경우 약 90%, TVOC 85%, CO2 38%의 제거 성능을 나타냈고, 본 개발제품을 적용공간에서 연속적으로 운행시 지속적인 오염물질의 제거효과를 기대할 수 있음

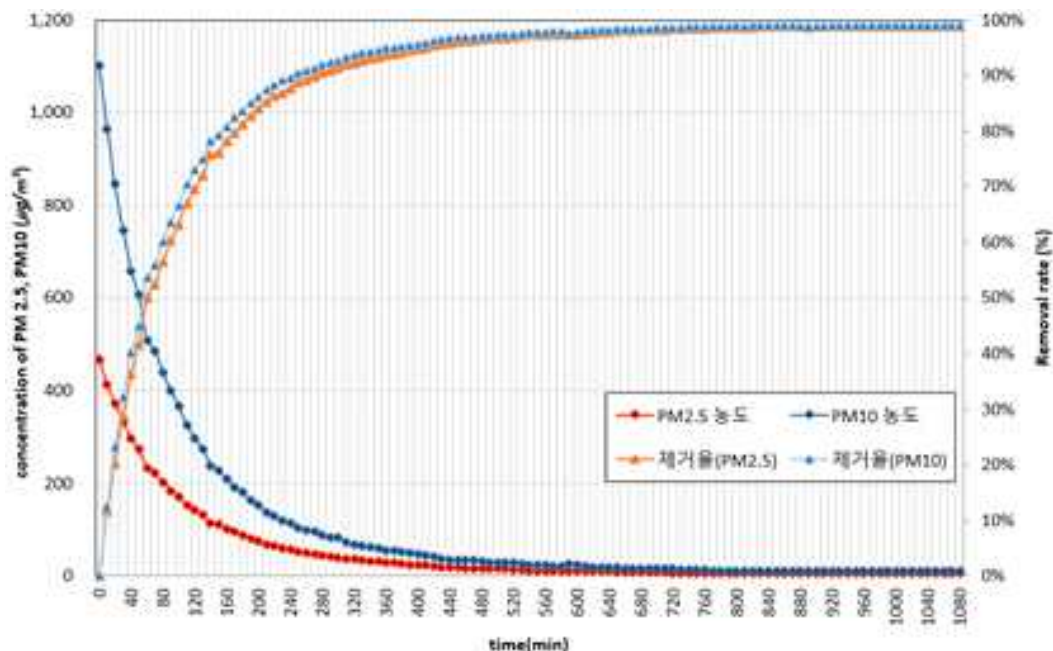


그림 5.1 PM 10/2.5 제거효율

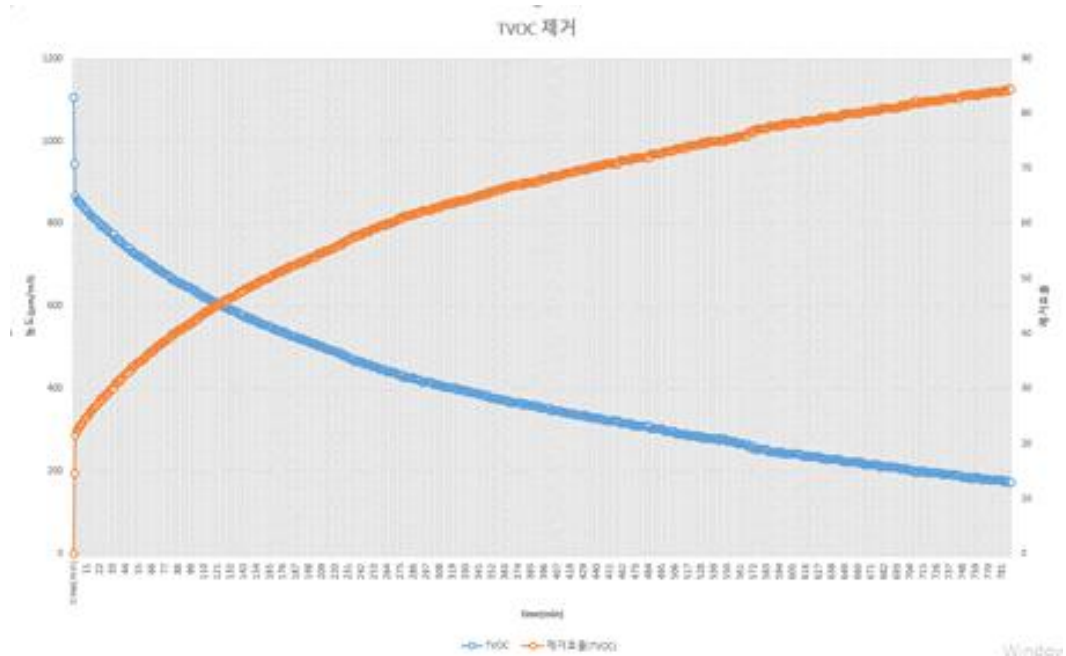


그림 5.2 TVOC 제거효율

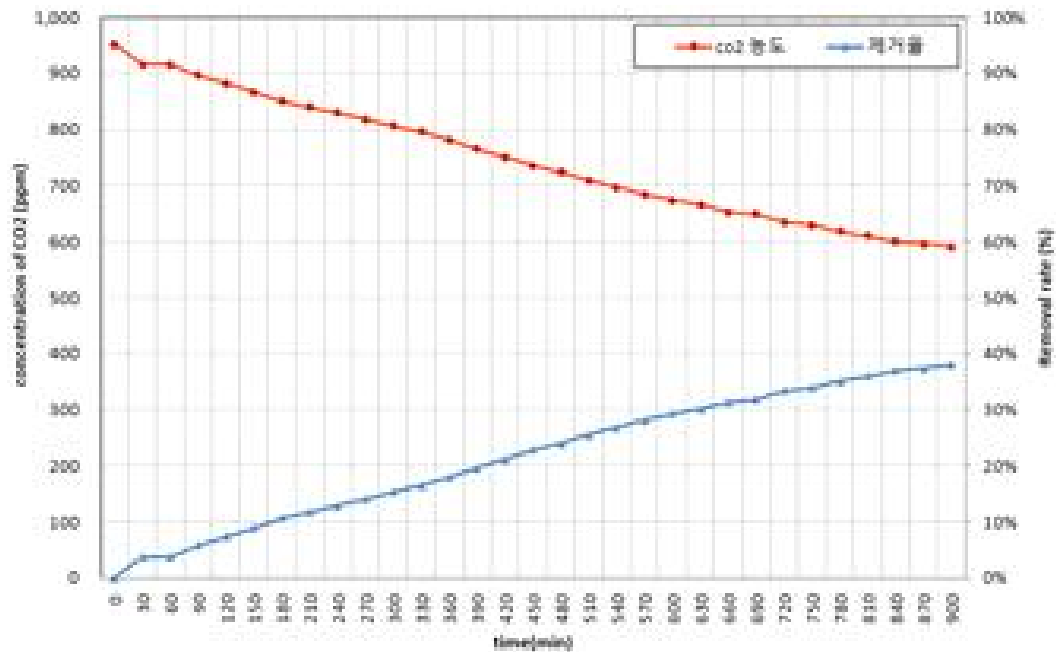


그림 5.3 CO2 제거 효율

나. 유지관리 계획

(1) EcoPS (Eco Purification System) 식물관리

- EcoPS 내 식물은 광량, 온도, 대기 중 습도, 환기가능 유무 등 설치현장의 제한된 생육환경을 고려하고 심미적 효과가 우수하고 유지관리가 용이한 것으로 선정하여야 함
- 식물은 살아있는 생명체로 성장과 소멸을 반복하며 성장하기 때문에 식물의 고사 유무와 관계없이 시든 잎이 발생할 수 있으며 미관상 좋지 않고 병충해 발생의 우려가 있으므로 제거해 주어야 함
- EcoPS 설치시 토양 내 영양분을 공급하여주나 6개월 경과시 외부에서 유입되는 영양물질이 없기 때문에 식물의 성장과 개화를 위해 일반적으로 식물이 왕성한 성장을 하게 되는 5월~9월 사이에 영양분을 공급하는 것이 바람직함
- 식물의 생육에 중요한 관수 주기는 식물의 종류, 설치환경의 온도 및 대기습도에 따라 다

르게 하여야 하며 EcoPS는 자동관수장치가 설치되어 있어 관수주기를 설정할 수 있으므로 설치 초기 관수 후 1~3주일 기간 동안 토양의 건조정도를 파악하여 관수주기를 설정하여야 함

- EcoPS는 식물이 심겨지는 식생모듈 내 일정량을 물을 저장한 후 overflow되어 하단의 식생모듈에 물이 전달되는 구조이므로 초기 설치 시 전체 식생모듈에 물이 저류되는 시간을 측정하여 관수타이머의 시간을 조절하여 관수량을 설정하여야 함
- EcoPS의 관수방법은 직수유입 및 퇴수배출방식과 수조저장 및 순환이용방식으로 나뉘 수 있으며 직수유입 및 퇴수배출방식은 유입수를 관수장치와 직접 연결하여 수분 공급 후 잉여 수분은 배출하는 방식이며 수조저장 및 순환이용방식은 유입수를 직접 연결할 수 없을 시 EcoPS 하단에 설치된 수조에 물을 저장한 후 펌프를 이용하여 관수 후 잉여 수분을 다시 수조에 저장하여 지속적으로 순환하여 사용하는 방식임
- 직수유입 및 퇴수배출방식은 유입수의 수압에 의한 누수여부를 관찰하여야 하며 수조저장 및 순환이용방식은 물 부족시 저수조에 물을 보충하여야 하고 수조에서의 세균발생을 방지하기 위하여 월1회 이상 세척하여야 함

(2) EcoPS (Eco Purification System) 전기장치 관리

- EcoPS에는 수조의 물을 식물에 공급하는 수중펌프와 관수주기를 설정하는 타이머로 구성된 관수장치와 공기순환을 위해 blow fan과 타이머로 구성된 공기 공급장치가 설치되어 있음
- 관수장치는 식물의 생존여부와 관계가 있으므로 가동여부를 지속적으로 관찰하여야 하며 연 2회 수중펌프의 세척을 통해 수중펌프의 원활한 가동을 유지시켜야 함

표 5-2 EcoPS 유지관리 내용

항목		관리주기	관리내용
식물	식물 관리	수시	시든 잎 제거, 고사식물 교체
	영양분 투입	연 1~2회	식물생장용 비료 시비
수조	물 보충	월 2~4회	수조 일정수위 유지
	수조 세척	월 1회	수조 내 이물질 제거 및 세척
타이머	관수 및 blow fan	수시	가동여부 확인
수중펌프	수중펌프 청소	연 2회 이상	수중펌프 내 이물질 제거 및 세척
blow fan	blow fan 청소	연 2회 이상	blow fan 흡착 먼지 제거

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1절. 목표 달성도

연차	연구목표	연구결과	달성률 %
1차 년도	■ 요소기술별 효율 증대방안 도출 ■ 요소기술개발 및 시작품설계	- 미세먼지제거를 위한 미세수분 적용기법개발 - 실내공기질 개선, SBS완화를 위한 식물근부 및 근부 미생물을 활용한 정화효율 증대방안 도출 - 요소기술개발대안 마련 및 시작품 설계	100
	■ Filtration 모듈화를 위한 기존제품, 해당미생물 조사 및 선정을 통한 제작	- 광물필터의 조사 및 선정을 통한 입자상 물질 정화용 최적의 필터구조 도출을 통한 제작 - TVOC, 이산화탄소 제거에 적합한 EM조사 및 선정 - granule, pot 형태의 일라이트 광물필터 제작 - 슬롯형태의 EM바이오필터 제작	100
	■ 적용처별 맞춤형 필터테스트(가스별, 입자상별)	- eco-purification의 성능평가를 위한 추적오염물질 - 대상오염물질 원격 모니터링기술 발굴/개발	100
2차 년도	■ 요소기술 융복합 eco-purification 기술개발	- 미세수분, 식물정화, 미생물필터 등 요소기술통합 시작품제작 - 요소기술별 기능과 융복합시 효율증대방안 도출 - 시작품제작 및 유사환경 설치(TestBed 적용) - TestBed모니터링 방법결정 및 모니터링 시스템 설치	100
	■ 램스케일 실험을 통한 오염물질별 필터모듈 조합 및 사용시간에 따른 재생방법 도출	- 대상오염물질별 (PM2.5, PM10, TVOC, 이산화탄소) 광물필터, 미생물바이오필터 연동 제거효율 파악 - 오염물질 배출원별 광물필터 또는 바이오필터 또는 2가지 필터조합조건 도출 - 연속실험을 통한 필터 가동조건 도출 및 재생방법 도출	100
	■ 공기질에 따른 환기시스템 제어 및 최적인전 조건 산출	- eco-purification 시스템 성능의 주요 인자가 되는 고른 공기흐름 - 대상오염물질 모니터링 시스템 설계/제작	100
3차 년도	■ 유사환경 검증보완 및 실용화/상용화	- 유사환경 모니터링 결과검증 및 평가/기술보완 - 시제품제작 - 공인기관 인증, 홍보자료작성	100
	■ 유사환경 적용을 통한 실험실 수치 검증 및 보완/상용화	- 실사용 테스트 (거주지 환경별, 공간크기별) 에 기반한 검증보완 및 내구성 확인 및 수정/보완을 통한 상용화 - 품질확보 및 생산을 위한 생산업체 모색 및 상용화 논의	100
	■ 에너지효율을 고려한 최적의 환기 시스템 운전 조건 마련	- eco-purification의 현장적용에 있어서 유사성(similarity)을 고려한 확대(scale up) 설계와 현장 적용/검증 - 실내공기오염 원격 모니터링 시스템 운영	100

2절. 관련 분야 기여도

- Eco Purification 기술의 개발은 Test-bed를 통하여 검증하고 본 연구의 설계, 시공, 유지관리 공정으로 기존 공기정화 기술에 활용될 수 있을 것으로 예상
- 개발된 기술은 실내 공간 형태에 따른 미세먼지 및 가스상 오염물질 등을 효율적으로 저감할 수 있는 친환경 공기정화시스템으로 다양한 실내공간 공기정화 분야에 요소기술로 활용가능.
- 미세수분, 미생물, 식물 등 요소기술을 융복합한 친환경 공기정화기술과 건물 내 공조기술을 통합하여 공기정화기능을 극대화 시키는 방식은 국내기술개발이 아직까지 미비한 상황이며, 국내의 다양한 대상공간에 적용 가능한 보다 다양한 실내 공기정화 기술의 방향을 제시 가능
- 현재 대두되고 있는 실내대기질 문제에 있어서 설치 및 유지 관리 비용이 고가인 기계식의 정화장치 보다, 유지관리에 비용에 있어서 비용에 대한 절감과 또한 자연친화적인 필터 외면의 식재로 인해 공간 조성에 있어 조화를 이룰 있어서 비용 절감 뿐 아니라 가정 및 실내다중이용시설 내에서 친환경 공간 조성을 위한 구성품으로도 활용 가능



가정 적용 예시도



그 외 공간 적용 예시도

- 친환경 공기정화기술을 통해 부가적으로 창출되는 실내온도조절, 산소발생, 습도조절 등의 효과는 건축물 내 공기순환에 연관된 냉난방조절, 환기, 상대습도조절 등 각종 건축물 유지비용 절감에도 긍정적인 영향을 미침
- 미세먼지제거, 새집증후군 완화 등 각 정화대상에 맞는 요소기술 산업의 활성화와 함께 공기정화를 통한 실내 환경개선으로 삶의 질을 우선시하는 고령사회의 실버산업과도 직접적인 연계가 가능할 것으로 예상
- 또한 설계기법의 모듈화를 정형화된 기초 설계기법을 특화함으로써 사업화 기반 구축과 공공기관의 본 제품을 적용을 통해 개발제품의 상용화를 통해 Eco-Purification 정화 기술 제품의 수요를 창출하여 관련 분야의 전문 인력과 설치 후 지속적인 관리와 모니터링이 중요한 사업으로써 전문 인력의 수요 창출 및 차후 취업을 희망하는 인력을 활용하여 교육 및 유지관리 관련 고용창출도 가능함.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1절. 연구개발성과의 활용방안

- 기술의 활용방안으로는 주거공간 내 건축물 자체의 오염원 뿐 아니라 주거활동으로 인해 발생하는 다양한 공기오염원에 대한 제거 및 공기질 개선에 있어 기존의 실내공기 총량적 범주에서의 대류 및 순환에 의한 실내공기의 제어 방식이 아닌 보다 적극적인 실내공기 오염원의 제거측면에서 기술의 활용이 가능할 것으로 예상되며 식물의 활용을 통한 실내 경관성 향상과 더불어 공기질 개선이라는 두 가지 측면에서 다양한 활용이 가능할 것으로 예상됨
- 기술의 활용대상으로서는 모니터링·제어기술의 융복합화를 통한 Eco Purification system의 설계기법 개발을 통해 본 과제의 대상지인 주거지역 내 주방·부엌·방·거실 등 오염원발생 대상지별 오염원발생에 따른 공기질개선 시스템의 적용 뿐 아니라 공공기관, 교육시설, 의료시설, 공항 및 터미널, 집단업무시설, 대형상업시설 내 실내공간 등 다양한 대상처로 적용이 가능함
- 최근 이슈화 되고있는 초미세먼지, 미세먼지의 농도상승 및 실내환기시 외부에서 유입으로 인한 실내공기질 악화등의 문제에 대응하기 위한 유입 외부공기의 실내 투입시 환기용 장비로 활용
- 기후변화로 인해 날로 극한화 되고 있는 생활환경의 대안으로 제시되는 극한지, 지하공간, 우주등의 환경의 실내환경 유지 및 환경조건 유지를 위한 오염물질 제거장치로의 활용

세부활용계획

가. 기술적 측면

- 유해물질이 포함되는 등 점차 심해지고 있는 황사와 최근 일본에서의 원자력발전기 사고 등에 의한 방사능물질의 한반도 유입 등 외부공기의 오염과 심리적 불안감이 심해짐에 따라 실내 공기정화에 있어 외부공기 유입보다는 자체공기 순환관련 기술이 점차 중요해지고 있는 시점임, 본 과제의 친환경 공기정화 기술은 단순한 공기정화 외에 자체적으로 산소발생, VOCs제거, 습도조절 등의 중요한 실내공기질 개선요소를 가지고 있어 기술개발에 대한 관심이 증가.
- 미세수분, 미생물, 식물 등 요소기술을 융복합한 Eco Purification기술은 공공주택을 기반으로 거실, 주방 등 주거생활에서 발생하는 다양한 공기오염물질 그리고 건축물 자체에서 나오는 SBS(Sick Building Syndrome)유발물질 등을 제거 하고 쾌적한 공기질을 유지시켜 보다 다양한 실내 공기정화 기술의 방향을 제시 가능.
- 본 기술은 기존의 실내오염물질 정화나 공기질 개선에 있어 필터·Ventilation·IAQ시설 등을 통해 기계적으로 정화시키는 시스템의 대안으로 친환경 공기정화를 위한 최적의 기술을 개발하는 것으로 기존기술의 대체적 위치를 가짐

나. 경제적·산업적 측면

- 친환경 공기정화기술을 통해 부가적으로 창출되는 실내온도조절, 산소발생, 습도조절 등의 효과는 건축물 내 공기순환에 연관된 냉난방조절, 환기, 상대습도조절 등 각종 건축물유지비용 절감에도 긍정적인 영향을 미침
- 도시공기오염이 심한 중국, 일본 등 해외시장 진출 등 제품 및 기술수출도 가능.

다. 사회적 측면

- 미세먼지제거, 새집증후군 완화 등 각 정화대상에 맞는 요소기술 산업의 활성화 촉진
- 공기정화를 통한 실내 환경개선으로 삶의 질을 우선시하는 고령사회의 실버산업과도 직접적인 연계 가능
- 설치 후 지속적인 관리와 모니터링이 중요한 사업분야로 전문 인력의 수요창출 및 차후 취업을 희망하는 인력을 활용해 교육 및 유지관리관련 고용창출성 상승 예상

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

○ 해당없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

○본 과제는 보안과제로 지정되지 않은 일반등급으로 보안등급의 분류 및 결정사유에 대해 해당사항 없다

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

○ 해당없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

가. 기술적 위험요소 분석

(1). 연구실 안전조치 이행계획 및 단계별 예방대책

참여연구원들의 휴먼에러(human error)를 예방하고 연구실의 안전을 확보하기 위해서 예방적 차원의 조치들의 순서를 다음 순서와 같이 진행함.

- (가). 본 구조재료 실험 연구실의 안전점검 및 정밀안전진단을 실시함.
- (나). 참여연구원들의 교육훈련 및 건강검진을 실시함
- (다). 참여연구원들의 산재보험가입을 함.
- (라). 연구실의 위험 요소 자체를 근본적으로 없애기 위한 노력을 기울임
- (마). 현실적으로 위험 요소 자체를 100% 없애거나 어려운 경우 이를 완화할 수 있는 방법을 강구하였고 이에 따라 조치함.
- (바). 심리적 갈등이나 휴먼에러 등이 발생해도 사고로 이어지지 않게 하는 방호장치(안전장치)를 부착함
- (사). 사고가 발생할 가능성이 있거나 사고가 발생하는 경우 조치를 위한 경보장치를 부착함.
- (아). 위험요소에 노출을 막기 위한 개인보호구를 구비함.
- (자). 참여연구원 스스로 심리적으로 안정된 환경유지로 안전 규칙 등을 준수할 수 있도록 권고함.

참여연구원들에게 안전확보를 위해 고려해야 하는 각 조치들은 위와 같은 순서를 따르게 하고 초기 단계일수록 안전에 기여하는 정도가 크기 때문에, 설계 단계에서부터 근원적으로 사고를 예방하는 것이 가장 효과적임.

나. 안전관리대책

근원적으로 에러를 100% 막는다는 것은 실제로 매우 힘들 수 있고, 경제성 때문에 그렇게 할 수 없는 경우가 많음. 이런 경우에는 가능한 에러 발생 확률을 최대한 낮추어 줄 수 있는 심리적 안전 환경유지, 재료나 기계·설비 등을 사용한다. 본 구조 재료 연구실에서는 가구·기계·설비 등의 모서리의 각을 완화시켜 충돌 시 다치는 것을 방지하고자 하였음. 또한, 강화 유리를 사용한 실험 도구 등을 사용하여 파열 등의 사고를 완화시키는 한편 다음과 같은 연구실안전 확보 계획을 준수함.

(1). 방호장치(안전장치) 활용

방호장치 혹은 안전장치는 연구실에서 사용하는 기구·기구·설비 등에 사고를 예방하기 위한 장치로 콘크리트 믹서기와 같은 기계의 위험한 구역에 심적 현상인 무의식적으로 손을 넣을 경우 광센서에 의해 자동으로 기계를 멈추게 하는 등 본 연구실에 이미 이와 같은 방호장치가 구비되어 있는 관계로 이를 적절히 활용함.

(2). 경보장치 활용

경보장치는 사고가 발생하려는 징후가 있거나, 사고가 발생한 경우에 이를 알려주는 장치로 화재 경보기나 실험 설비 등에 이상이 있을 때 경보를 알려줄 수 있도록 하는 것으로 본 구조재료 실험동에 경보장치가 설치되어 있어 이러한 경보시스템 또는 안전표지판 등을 이용함.

(3). 개인보호구 이용

사고가 나거나, 위험 요인에 노출될 때를 대비해 참여연구원들에게 헬멧이나, 보안경 등을 착

용함.

(4). 참여연구원들의 규칙 준수

위에 언급한 조치들에 의해 위험요소가 완화되거나 각종 방호장치, 경보장치, 개인보호구가 갖추어지더라도, 최종적으로 안전에 대해서도 각 참여연구원이 안전 규칙을 준수해 행동하도록 주지시킴. 이렇게 할 때에 사고를 사전에 예방하거나, 사고가 나더라도 그 피해를 최소화 함. 새롭게 연구 장비 및 실험체들을 구입하거나 제작할 때, 이러한 에러 제거 원칙과 에러완화 원칙 등이 충분히 반영되도록 계획하였고 이에 따라 진행함.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	정화기능 식생틀의 Leakage Area와 미세먼지 제거율비교	플러스파 운틴(주)	주저 자	한국환경기 술학회지 16권 3호	—	2015	Y	비SCI
2	논문	일라이트 광물볼의 구성과 스펀지필터 조합의 입자상 오염물질(PM2. 5, PM10) 제거율 상관분석	한국건설 기술연구 원	주저 자	한국환경기 술학회지 16권 3호	—	2015	Y	비SCI
3	특허	공기정화식물과 광물필터를 이용한 친환경 공기정화시스템	인천대학 교 산학협력 단	출원 인	대한민국		2015	—	국내
4	특허	식물과 미세공기방울을 이용한 실내공기정화 장치	플러스파 운틴(주)	출원 인	대한민국		2015	—	국내
5	특허	실내공기내 입자상, 가스상 오염물질 제거를 위한 광물, EM 필터	한국건설 기술연구 원	출원 인	대한민국		2015	—	국내

제11장. 기타 사항

○ 해당없음

제12장. 참고 문헌

- [1] Zhongjun. X, Li. W, Haiping. H. (2011). “Formaldehyde removal by potted plant-soil systems” J. Hazardous Materials, 192(1), pp. 314-318
- [2] 배귀남, 지준호. (2013). “국내 실내공기질 관리정책의 변천 및 제어기술의 현황” 한국대기환경학회지, 29(204), pp. 378-389
- [3] 경기개발연구원, 2007, 다중이용시설 실내공기질 관리방안, 대한민국
- [4] 남궁형규, 송지한, 김수연, 김희만, 권순박. (2016). “지상과 지하역사의 실내공기질 특성과 외기영향 평가” 한국산학기술학회논문지, 17(5), pp. 17-25
- [5] 서울연구원, 2013, 서울시 주택의 실내공기질 개선 방안, 대한민국
- [6] World Health Organization (WHO), 2000, *Air Pollution including WHO's 1999 Guidelines for Air Pollution Control.*, Geneva, Switzerland
- [7] Ministry of Environment (MOE), 2012, *Environment white paper*, Ministry of Environment, Republic of Korea.
- [8] Ministry of Environment (MOE), 2014, *Environment white paper*, Ministry of Environment, Republic of Korea.
- [9] 최용석, 윤종철, 이준복, 김영호, 이상열, 윤중섭, 엄석원, 채영주. (2012). “서울시 대기에서의 고농도 미세먼지 사례 시 특성” 보건환경연구원보, 48, pp. 126-135
- [10] Kwon, H.O., Y.S. Lee, J. Ye, H.S. Son, C.S. Kim, and S.D. Choi. (2012). “Levels of hazardous air pollutants(HAPs) in a new library.” J. Kor. Soc. Environ. Anal, 15(1), pp. 1-8.
- [11] 김미정, 김광진, 조정거, 박천호. (2008). “광도에 따른 실내식물 팔손이나마와 스킨답서스의 포름알데히드 제거 및 생리적 반응” 원예과학기술지, 26(2), pp. 188-196.
- [12] 송학진, 2015. “공기정화식물 근권부 미생물의 분리, 동정 및 VOCs 제거확인”, 석사학위, 건국대학교
- [13] 박신애, 김민지, 류명화, 오명민, 손기철. (2010). “다섯가지 관엽식물의 광합성에 의한 실내 이산화탄소 제거능력 비교” 원예과학기술지, 28(5), pp. 864-870
- [14] 이진희, 조인숙. (2008). “식물을 이용한 실내 공기질 개선용 Biofilter system 개발에 관한 연구” 한국인간식물환경학회지, 11(4), pp. 33-46
- [15] 방성원, 김정예, 송중은, 김광진, 김두환. (2013). “실내환경 개선을 위한 ‘Bio Green Wall System’의 효과” 한국인간식물환경학회지, 16(6), pp. 415-420
- [16] 환경부, 2002, *실내공간 실내공기오염 특성 및 관리방법 연구*, 대한민국
- [17] Thatcher, T. L. (1995). “Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence.” Atmospheric Environment, 29(13), 1487-1497.
- [18] 박성준, 김지혜, 조구상, 여명석, 김광우. (2015). “보육시설 실내 미세먼지의 입경별 실내·외 발생원 분석” 대한건축학회지, 31(12), pp. 215-222
- [19] 김용식, 성민기, 이승민. (2006). “공동주택 건축내장용 벽지 및 마루바닥재 등의 포름알데히드 및 휘발성유기화합물 방출 특성 평가” 한국생활환경학회지, 13(3), pp. 241-249
- [20] 유복희. (2010). “기존 공동주택의 실내 유해화학물질 오염발생원에 대한 특성 분석” 한국주거학회지, 21(6), pp. 11-18
- [21] 김여정, 2003, “관엽식물이 실내미세분진 제거에 미치는 영향”, 석사학위, 건국대학교
- [22] 권계정, 박봉주. (2014). “4가지 관엽식물을 이용한 바이오필터의 미세먼지 제거 효과” 농업

- 과학연구, 30(2), pp. 157-160
- [23] Gabriela. S, Michael. D, Alan. D. (2013). “Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants – A mini-review” J. Chemical Engineering, 299, pp. 585-594
- [24] 농촌진흥청, 2015, *대형건물내 실내환경조절용 Bio-Filtration 시스템을 활용한 에너지 효율빌딩 구축*, 대한민국
- [25] 손기철, 이성한, 서상규, 송중은. (2000). “관엽식물 및 배양토가 실내공기 오염물질의 흡수 및 흡착에 미치는 영향” 원예과학기술지, 41(3), pp. 305-309
- [26] 노희환, 2015, “습식 세정 집진기에 사용되는 흡수제 개발을 통한 효율 연구”, 석사학위, 명지대학교
- [27] 류주환, 2015, “습식 세정 집진기에 사용되는 흡수제 개발을 통한 효율 연구”, 석사학위, 한경대학교
- [28] Freundlich, H. M. F. (1906). “Over the adsorption in solution” J. Physical Chemistry, 57, pp. 385-470.
- [29] Lanmuir. I. (1918). “The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum” J. Am. Chem. Soc., 40, pp. 1361-1403.
- [30] 박민영, 2006, “일라이트와 섬유상 활성탄소에 의한 세습 흡착에 관한 연구”, 석사학위, 충남대학교
- [31] 권오현, 김진효, 김민휘, 석윤진, 정재원. (2010). “Blower Door를 이용한 국내 주거용 건물의 기밀도 실측 사례 분석” 대한건축학회지, 26(7), pp. 303-310
- [32] ASTM E 779-03, 2004, *Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization*, United States of America
- [33] 박현설, 2013, “일반 환기용 에어필터 성능평가를 위한 국제 시험기준”, 공기청정기술, 26(4), pp. 39-60
- [34] ASHRAE 52.1-1992, 1992, *Gravimetric And Dust Spot Procedures For Testing Air Cleaning Devices Used In General Ventilation For Removing Particulate Matter*, United States of America
- [35] ASHRAE 52.2-2012, 2012, *Method Of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices For Removal Efficiency By Particle Size*, United States of America
- [36] EN 779:2012, 2012, *Particulate air filters for general ventilation. Determination of the filtration performance*, Europe
- [37] 한국공기청정협회, 일반공조 및 환기용 에어필터의 입경별 입자 제거율 시험방법 (SPS-KACA002 Standard), 대한민국
- [38] 최봄, 2015, “바이오필터의 식물 생육과 실내 공기질 정화”, 석사학위, 환경대학교
- [39] 송지한, 2011, “지하철 터널과 역사 환경에서의 열차풍 제어와 환기에 미치는 영향에 관한 연구”, 박사학위, 인천대학교
- [40] JIS Z 8901, *APPIE JIS TEST POWDERS*, Japan
- [41] Soogil. L, Kiyoun. Lee, Sooyun. S, Seongki. J. (2011). “Impact of regulation on indoor volatile organic compounds in new unoccupied apartment in Korea” Atmospheric Environment, 45(11), pp. 1994-2000
- [42] Kostianinen R. (1995). “Volatile organic compounds in the indoor air of normal and sick houses” Atmospheric Environment, 29(6), pp. 693-702
- [43] 김건우, 2008, “입주전 신축공동주택의 HCHO, VOCs 및 TVOC 농도분포 실태조사에 관한

연구” , 석사학위, 중앙대학교

- [44] 이병규, 정의량. (2006). “황사기간 동안의 실내 및 실외 공기 중의 입자상 오염물질의 농도 특성 연구” 한국환경학회 학술발표회지, 15(1), pp. 82-83
- [45] Zhiqiang. W., Jensen. S.Z. (2011). “Characterization and performance evaluation of a full-scale activated carbon-based dynamic botanical air filtration system for improving indoor air quality” Building and Environment, 46(3), pp. 758-768
- [46] Wolverton, B. C. and J. D. Wolverton. (1993). “Plants and soil microorganisms: removal of formaldehyde, xylene, and ammonia from the indoor environment.” Journal of the Mississippi Academy of Sciences, 38(2), pp. 11-15
- [47] 송규성, 한상훈, 박종형, Rajib Pokhrel, 이희관. (2015). “정화기능 식생들의 Leakage Area와 미세먼지(PM10, PM2.5) 제거율 비교” 한국환경기술학회지, 16(3), pp. 233-238
- [48] 이승준, 2007, “황토볼을 이용한 마을 하수 고도처리 공정의 성능 평가” , 석사학위, 가톨릭 관동대학교
- [49] 김이열. (2003). “코코피트와 피트모스의 특성” 토양과 비료, 13, pp. 14-21
- [50] R. E. Grim, R. H. Bray, and W. F. Bradley. (1937). “The mica in argil laceous sediments” Am, Miner., 22(7), pp. 813-829
- [51] 이원희, 최홍주, 구경완, 허정. (2001). “영동산 일라이트의 성형 및 비유전율 측정” 한국전자과학회논문지, 15(5), pp. 747-754
- [52] 김진철, 구경완, 류명환, 한위생. (2001). “영동산 일라이트를 이용한 공조기의 프리필터 개발” 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, pp. 507-510
- [53] 주민, 정병권, 김영석, 안호상. (2015). “일라이트 광물볼의 구성과 스펀지필터 조합의 입자상 오염물질 (PM2.5, PM10) 제거율 상관분석” 한국환경기술학회지, 16(3), pp. 196-200