

20CTAP-C
151907-02

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 20CTAP-C151907-02

공동주택의 미세먼지 70% 유입 저감을 위한 프리필터 시스템 적용 및 초음파 측정기법 기초원천기술 개발

2021.03.03.

주관연구기관 / 숭실대학교
협동연구기관 / 사단법인 한국패시브건축협회

공동주택의 미세먼지 70%유입 저감을 위한
프리필터 시스템 적용 및 초음파 측정기법
기초원천기술 개발 최종보고서(안)

2020 국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

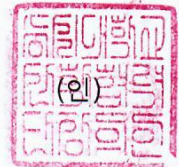
국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘공동주택의 미세먼지 70% 유입 저감을 위한 프리필터 시스템 적용 및 초음파 측정기법 기초 원천 기술 개발’ (연구개발 기간 : 2019. 04.~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서(보완본) 1부를 제출합니다.

2021 . 03 . 03 .

주관연구기관명 : 숭실대학교 산학협력단
공동연구기관명 : 사단법인 한국패시브 건축협회

(이진욱)



주관연구기관책임자: 최 하 진
공동연구기관책임자: 이 정 훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C151 907-02	해당 단계 연구 기간	2020. 01. 01~ 2020. 12. 31	단계구분	2차년도/ 2차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	-			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	공동주택의 미세먼지 70% 유입 저감을 위한 프리필터 시스템 적용 및 초음파 측정기법 기초원천기술 개발			
연구책임자	최 하 진	해당단계 참여연구원 수	총: 9명 내부: 5명 외부: 4명	해당단계 연구비	정부:200,000천원 계: 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 11명 내부: 7명 외부: 4명	총 연구비	정부:360,000천원 계: 천원
연구기관명 및 소속 부서명	송실대학교 산학협력단			참여기업명	-
국제공동연구	상대국명: -			상대국 연구기관명: -	
위탁연구	연구기관명: -			연구책임자: -	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	-				

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록· 기탁 번호	8	1	4			1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

■ 연구개발 최종 목표

- 초음파 산란 기반 미세먼지농도 간이측정 기초원천기술 개발
- 프리필터 시스템 기반 공동주택 미세먼지 실내유입 저감

■ 연구개발성과

- SCI/비SCI 논문 6건 투고 및 게재
- 초음파 미세먼지 측정방식 관련 특허 출원
- 공기질 실시간 모니터링 키트 소프트웨어 개발 및 등록
- 프리필터 시스템 시제품 제작 및 성능검증 완료

보고서 면수

103 page

요약문

연구의 목적 및 내용	- 현재 실내 미세먼지농도에 대한 간이측정방법은 광산란방식을 사용하고 있지만 그 정확도가 매우 낮다. 그 이유는 광산란은 전자기파의 일종으로서 미세먼지입자의 전자기적 성질에 의거한 산란의 정도를 기계적 성질인 밀도로 환산해야하는 근본적인 한계에 있다. 본 연구에서는 기계적 파동인 초음파를 사용하여 미세먼지의 물리적 변화를 반영하여 초음파 산란 기반 미세먼지농도 간이측정법을 개발하는 기초원천기술 개발 연구(정확도 최대 97%)를 수행하였다. - 실내공기질 관리를 위한 방법으로 재실자는 자연환기를 택해왔으나 미세먼지를 비롯한 외부 공기질 악화로 현재는 공기청정기에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 공기 청정기는 일정 부분 공기질 개선에 도움을 주지만 완전한 해결책이 될 수 없다. 따라서 공동주택에 보급된 기계식 환기장치에 연계 가능한 ‘프리필터 시스템’을 개발하여 미세먼지 실내유입을 기존 시스템 대비 70%이상(외기 미세먼지 집진율 95% 이상) 저감하였다. ■ 초음파 산란 기반 미세먼지농도 간이측정 기초원천기술 개발 - 다중 산란 모델 분석 및 적용 범위 도출 - 초음파 간이측정 시스템 개발 및 산란 실험 수행 - 데이터를 통한 산란 모델 추정 기법 개발 - 다중모델 평균화를 통한 미세먼지농도 측정 기법 개발 ■ 프리필터 시스템 기반 공동주택 미세먼지 실내유입 저감 - 공동주택 환기장치에 설치 가능한 프리필터 시스템의 크기 및 용량 설정 - 국내외 필터의 용량 및 면적 대비 효율 분석 - 데이터 기반 프리필터 시스템 샘플 제작 - 프리필터 시스템 내외부 실험을 통한 성능 검증 - 기계식 환기장치와의 결합 및 유지관리 매뉴얼 제작				
연구개발성과	- 초음파 기반 미세먼지 농도 간이측정법 개발 - 초음파 다중 산란모델 및 신호처리 통합 GUI 프로그램 개발 - 프리필터 시스템 프로토타입 개발 및 성능검증				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 초음파 산란현상을 활용한 간이 미세먼지 측정기기의 정확도 확보 - 건축관련 전문가 및 대중을 대상으로한 실내공기질 및 환기시스템 관련 교육□홍보를 통해 환기장치□프리필터 시스템의 필요성 및 사용성 부여 - 프리필터 시스템 설치를 통해 방치된 공동주택의 환기장치를 재사용하고 필터링 성능향상을 이루어 쾌적한 실내공기질을 통한 국민의 건강 보호 - 유관기관과의 협력 및 기술 교류를 통한 기술 이전 및 후속과제 도출				
국문핵심어 (5개 이내)	미세먼지	프리필터 시스템	초음파 산란	간이측정기법	실내공기질
영문핵심어 (5개 이내)	Particulate matter (PM)	Pre-filter system	Ultrasonic scattering	Simple measurement technique	Indoor air quality (IAQ)

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	5
1-1. 연구 개발의 개요	5
1-2. 연구 개발 대상의 국내·외 현황	14
2. 연구수행내용 및 성과	21
2-1. 연구 개발의 추진전략·방법 및 추진체계	21
2-2. 연구 내용	24
가. 주관연구기관(송실대학교)	24
나. 공동연구기관(한국패시브건축협회)	53
다. 기관 공동 실측	72
2-3. 연구 개발 성과	75
2-4. 연구 결과	84
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	88
3-1. 목표	88
3-2. 목표 달성여부	92
3-3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)	96
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	97
붙임. 참고문헌	102

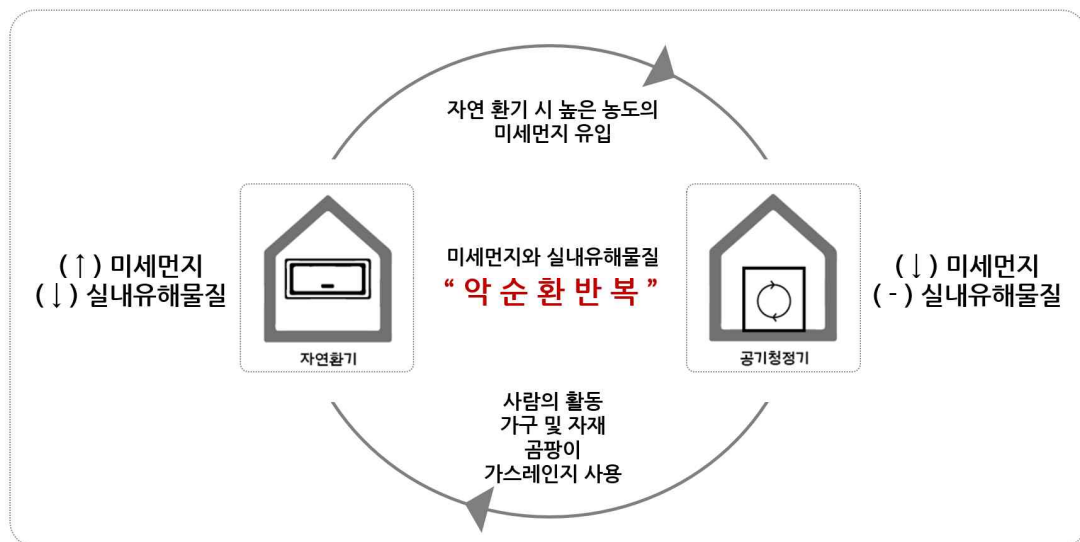
<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구 개발의 개요

□ 실내공기질 관리의 중요성 및 대기 미세먼지로 인한 악순환 현상

- 하루 일과의 80%이상을 실내공간에서 보내는 현대인에게 실내공기질이 미치는 영향은 매우 크다. 휘발성 유기화합물, 포름알데히드, 이산화탄소, 곰팡이 등 건강에 악영향을 미치는 실내오염 물질은 「실내공기질 관리법」 개정으로 경계의 대상이 되었으나, 에너지절감을 목표로 하는 현대건축의 패러다임(패시브건축, 제로에너지건축 등)은 건물을 더욱 기밀하게 짓도록 요구하고 있어 자연환기에 대한 중요성이 대두되고 있다.
- 미세먼지/초미세먼지(통칭: 미세먼지 이하)의 등장으로 실내외 공기질은 심각한 상황에 이르렀으며 겨울철 ‘삼한사미’라는 신조어가 생겨날 정도로 공기질이 악화되고 있다. 중국의 영향과 국내에서 발생하는 미세먼지로 인하여 실내오염물질을 배출할 수 있는 자연환기마저 어려운 상황이다.
- 자연환기에 대한 설문조사 결과, 설문 대상의 71.7%는 미세먼지 때문에 평소 환기 횟수를 줄였으며 미세먼지가 심각할 때 환기를 전혀 하지 않는다고 답했다.¹⁾
- 실내공기질 관리를 위하여 대부분 공기청정기에 의존하고 있지만, 창문을 열지 않고 공기청정기로만 실내공기질을 관리할 경우 화학적 부유물질이 제거되지 않아 재실자의 건강에 해로운 영향을 끼친다.²⁾ 반대로 실내의 화학적 부유물을 제거하기 위하여 자연환기를 할 경우 대기 중의 미세먼지가 대량 유입된다. 즉, 현재 공동주택에서는 대기 중의 미세먼지와 실내에서 발생하는 화학적 부유물질에 지속적으로 노출되는 악순환이 일어나게 된다(그림 1).



[그림 1] 공기청정기 의존 및 자연환기로 인하여 발생하는 악순환 구조

1) 환경부 권장 "하루 3회 실내환기" 이행 가점은 8% 뿐, 오픈서베이, 2017.03

2) 학교 미세먼지 관리목표 및 저감방안 마련을 위한 연구, 연세대학교 환경공해연구소, 2018.01

□ 미세먼지 농도 간이측정법 필요성 및 부정확성

- 국가대기질 미세먼지는 중량법과 베타선법으로 측정된다. 두 방법 모두 정확도가 높지만 24시간 먼지를 포집(중량법)하거나 방사선 계열의 위험성(베타선법) 때문에 실내공기의 미세먼지를 측정하기는 어렵다.
- 미세먼지는 크게 국가, 도시, 지역 단위로 나뉘어서 계측 및 기록 되지만 현대인의 생활에 직접적으로 영향을 미치는 실내공간에 대한 측정은 간이측정기에 의존하고 있다. 간이측정기는 일반적으로 휴대가 가능하여 다양한 공간에서의 계측으로 미세먼지의 모니터링을 가능하게 한다.
- 시중에서 쉽게 구입할 수 있는 미세먼지 간이측정기는 광산란 방식을 사용한다. 가시광선계열의 광원을 공급한 후 미세먼지에 의하여 발생하는 산란 혹은 감쇠의 정도를 파악한다. 하지만, 광산란 방식은 미세먼지 농도를 정확하게 계측하기에는 전자기파의 근본적인 단점을 가지고 있다.³⁾⁴⁾
- 전자기적 성질에 의하여 간섭받는 전자기파로부터 기계적인 물성치를 알아내기 위해서는, 계측한 신호에 특수한 상황에서 정의된 경험적 계수를 적용하여 변환하여야 한다. 실제로 광산란 방식의 간이측정기는 대부분 측정된 신호를 입자의 수 혹은 크기로 가정하고, 경험 계수(평균 밀도)를 사용하여 농도로 변환한다. 위와 같은 2차 변환과정은 측정 상황의 환경요인에 따라 매우 큰 오차를 발생시킨다.
- 특히 전자기적 성질에 직접적으로 영향을 미치는 대기 중 습도는 광산란 방식으로 얻은 미세먼지 농도 값에 매우 큰 오차를 불러일으킬 수 있다. 또한 실내공간에서는 가습기 사용 등 다양한 조건의 습도 변화 때문에 간이측정기의 신뢰도는 더욱 떨어지게 된다.⁵⁾⁶⁾⁷⁾
- 환경부에서는 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」에서 간이측정기의 오차에 따른 혼란을 막고자 성능인증제도를 운영하고 있다. 하지만 실험실 챔버에서 검증되는 간이측정기의 인증 과정은 습도에 쉽게 영향을 받는 전자기파의 근본적인 단점을 간과한 절차이며, 실제로 환경부의 간이측정기 가이드북⁸⁾에 따르면 간이측정기에 따라 그 결과가 서로 상이하여 오차가 매우 큰 것으로 나타났다(표 1).

3) Kim, S. D., Kim, C. H., Hwang, U. H.(2008), A Study on the Particles Density Estimation in Seoul Metropolitan, *Journal of Environmental Health Sciences*, 34(2), 131-136.

4) Kim, E. Y., Seo, S. J., Kim, S. M., Jung, S. W., Lee, Y. M., Oh, S. H., Park, G. T., Kim, K. H., Kim, J. W., Hong, Y. D., Lee, T. H., Bae, M. S.(2018), Determination of Hourly Density Using Real Time PM2.3 Mass and Volume Concentrations at the Road Side-OPS Correction Based on Optical Absorption of eBC, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 865-875.

5) Kim, S. J., Kang, H. S., Son, Y. S., Yoon, S. L., Kim, C. J., Kim, G. S., Kim, I. W.(2010), Compensation of Light Scattering Method for Real-Time Monitoring of Particulate Matters in Subway Stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 533-542.

6) Lee, N. R., Um, H. U., Cho, H. S.(2018), Development of Detection and Monitoring by Light Scattering in Real Time, *Fire Science and Engineering*, 32(3), 134-139.

7) Lee, B. J., Park, S. S.(2019), Evaluation of PM10 and PM2.5 Concentrations from Online Light Scattering Dust Monitors Using Gravimetric and Beta-ray Absorption Methods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 357-369.

8) 초미세먼지 간이측정기 가이드북, 환경부 국립환경과학원, 2018.10

[표 1] 미세먼지 간이 측정기 장단점

구분	내용
장점	• 일반측정기와 비교하여 상대적으로 가격이 저렴 • 크기가 작아 휴대도 가능 • 보급률을 높여 공간적 관측 해상도를 높일 수 있음 • 오염물의 농도수준이 높을 때 유리 • 초미세먼지(PM-2.5)와 인체위해성 등에 대한 연구에 활용
단점	• 습도, 온도 및 풍속과 같은 기상 조건 중 습도의 영향을 많이 받음 • 환경변화나 오류에 취약하여 미세먼지의 농도를 결정하기 어려움 • 정확도에 대한 신뢰가 부족 • 다량의 비검증 자료와 의심스러운 자료가 양산되는 것이 우려됨

□ 실내공기질 개선을 위한 기계식 환기장치의 보급 활성화 및 실태

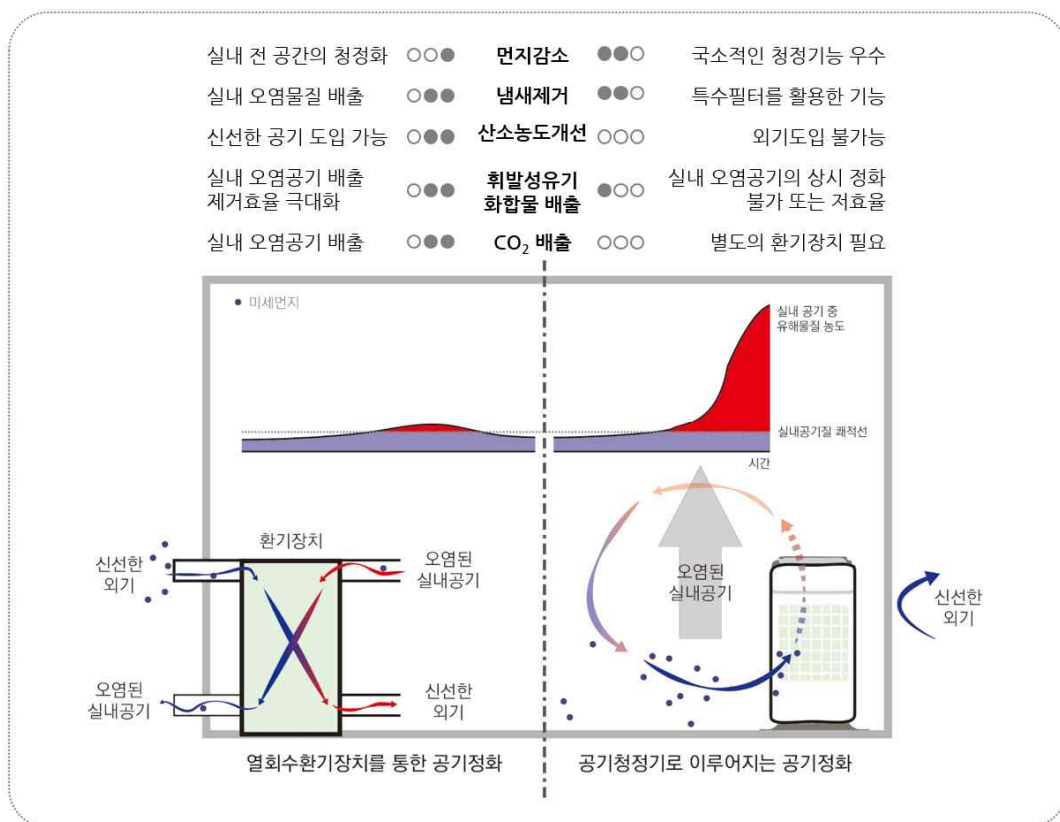
- 실내에서 발생하는 화학적 부유물질에 대한 개선은 기계식 환기장치 설치로 그 해결방안을 찾을 수 있다. 2006년부터 개정된 「실내공기질 관리법」에 따르면, 100세대 이상의 공동주택에는 의무적으로 환기장치가 설치되도록 하였다.
 - 자연환기는 건물 내외부의 온도 차이에 의한 정압 혹은 풍압에 의하여 기류이동이 발생하는 현상이다. 자연환기는 외기의 풍속, 풍향 및 온도에 의해 크게 영향을 받으므로 실내의 필요 환기량을 일정하게 유지시키는데 어려움이 있을 뿐만 아니라 환경 요인에 따라서 건물의 외벽체에 설치된 급기구와 배기구의 기능이 바뀔 수도 있다. 또한 냉난방의 효율성을 통한 건축물 에너지 절약을 추구하고 있기 때문에, 내외부 공기가 순환되어 내부의 온기 또는 냉기를 잃어버리는 과정인 자연환기 보다는 기계 설비를 이용한 환기를 국가적 차원에서 유도하고 있다.
 - 2019년 현재, 서울을 기준으로 공동주택의 약 20%에 해당하는 총 30만 5511세대에 기계식 환기장치가 설치되어 있지만 천장과 같이 잘 보이지 않는 부분에 설치가 되어 대부분의 재실자는 환기장치 시스템을 인지하지 못하고 그 실제 사용성이 매우 떨어진다. 또한 법에서 강제하는 환기장치 설치의무를 지키기 위하여 유명무실한 저가형 환기장치를 설치하는 등 현재 공동주거 시설에 적용된 환기장치는 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.
- ① **필터와 기기 사이의 틈새 과다:** KS에서 규정하는 환기장치의 성능에는 필터항목이 존재하지 않는다. 현재 설치되어있는 환기장치의 대부분은 필터로써의 기능을 하지 못하는 제품이 많다. 그림 2와 같이 환기장치와 필터의 연결부위 틈새를 통해 들어오는 공기의 경우, 미세먼지가 걸러지지 않고 환기장치를 통과하게 되어 실내로 유입된다.
 - ② **결로 및 곰팡이 발생:** 현행법에서 지정하는 기계식 환기장치의 열교환소자 효율은 70%이다. 설치를 인식하는 입주자가 거의 없기 때문에 최저가 입찰을 하게 되고 업체는 최저 효율만을 지키는 가장 저렴한 제품을 공급하게 된다. 이로 인해 환기장치 사용 시 기기 내부에 결로 및 곰팡이 등이 발생한다.
 - ③ **단열결손 및 소음 발생:** 기계식 환기장치의 효율만을 만족하는 규정은 실제 시공 과정에서 추가적인 문제를 발생시킨다. 기계식 환기장치 내부에 열교환소자가 들어가고 남는 공간은 텅 빈 공간으로 남겨두기 때문에 기기의 단열결손 및 소음문제가 발생하여 생활에 불편을 준다.



[그림 2] 기계식 환기장치 내부에 설치된 필터의 틈새

□ 공기청정기와 기계식 환기장치 성능 비교 및 프리필터 시스템

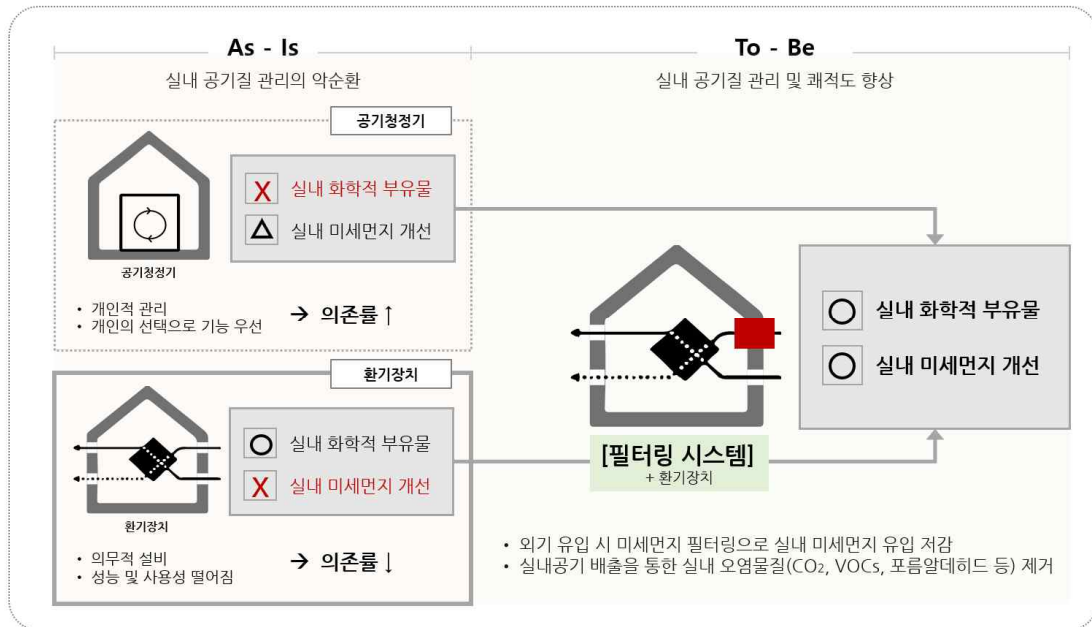
- 공기청정기와 기계식 환기장치는 그림 3과 같은 차이점을 갖는다. 공기청정기는 필터에 의존하여 내부 공기를 순환하기 때문에 먼지 및 냄새는 어느 정도 제거된다. 하지만 휘발성 유기화합물이나 이산화탄소는 외부에 있는 산소를 포함한 신선한 공기가 들어오지 않는다는 전제하에 실내에 쌓여간다.
- 2018년 6월 SBS 뉴스에서 방영된 자료에 따르면, 초등학교 교실에서 미세먼지 저감을 위하여 출입문을 닫은 채 공기청정기만을 사용했을 때 미세먼지는 40%가량 줄었지만 이산화탄소는 약 3배가 늘어나 40분 만에 실내 이산화탄소 기준치인 1000ppm을 쉽게 넘어가는 것을 확인할 수 있었다.
- 반면에 기계식 환기장치는 실내공기를 강제적으로 배출시키거나 필요 환기량을 정확하게 급기할 수 있도록 건물의 외벽체 부근에 급기 혹은 배기팬을 설치하여 운전하는 환기방식이다. 그러므로 공기청정기가 제거하지 못한 휘발성 유기화합물 및 이산화탄소의 농도를 희석시켜 실내 공기질을 유지해준다.



[그림 3] 환기장치와 공기청정기의 실내공기질 관리 효과

- 따라서 본 연구과제에서는 실내공기질 개선에 직접적으로 영향을 미치는 기계식 환기장치의 사용성을 극대화 하는 동시에 실내에 유입되는 미세먼지를 **70% 이상 선제거할 수 있는 프리필터 시스템을 제안한다(그림 4).** 추가적으로 실내공기질 관리의 악순환을 배경으로 건축물의 환기실

태를 확인하고, 실효성 높은 프리필터 시스템 개발을 통하여 실내유해물질과 미세먼지 모두를 정화 또는 제거하여 실내공기질을 개선하고자 하며, 유지관리 매뉴얼 제작을 통하여 시장밀착형 기술을 보급하고자 한다.



[그림 4] 기존/제안 방법의 차이점 비교 및 프리필터 시스템의 적용 개념도

□ 미세먼지 유입저감 기준 및 평가법

- 프리필터 시스템을 평가하기 위한 측정법은 환경부의 ‘실내공기질공정시험기준’을 기본으로 측정한다.

① 시료채취세대 선정

건축물의 에너지효율정도에 따른 미세먼지 실내 유입 차이를 고려하기 위해 모니터링 세대 선정 시 고단열·고기밀화 주택과 일반 공동주택을 나누어 선정한다.

② 시료채취 위치

거실의 중앙 점에서 바닥면으로부터 1.2~1.5M 높이에서 실시한다.

③ 시료채취조건

오후 1~6시사이에 실시하며 1) 30분이상환기 2) 5시간 밀폐 3) 시료채취 순의 방법을 따른다. 시료채취시간은 VOC는 30분, 이산화탄소는 1시간, 미세먼지의 경우 6시간이상 1회 측정한다.

- 모니터링을 시행할 때 실내 공기 중 흡인펌프를 이용하여 미세먼지를 여과지에 1~30L/min 공기 유량으로 채취하여 채취전후의 여과지 중량차이를 이용해 미세먼지 농도를 측정하는 방법인 중량법을 사용하여 프리필터 시스템 적용 전후의 농도차이를 비교한다.

- 중량법에 의한 미세먼지 농도는 다음과 같은 식으로 계산이 가능하다.

$$C = \frac{(W_2 - W_1) - (B_2 - B_1)}{V_{(25^\circ C, 1atm)}}$$

C : 공기 중 미세먼지의 농도(μ g/m³)

W1 : 시험 전 여과지 무게(μ g)

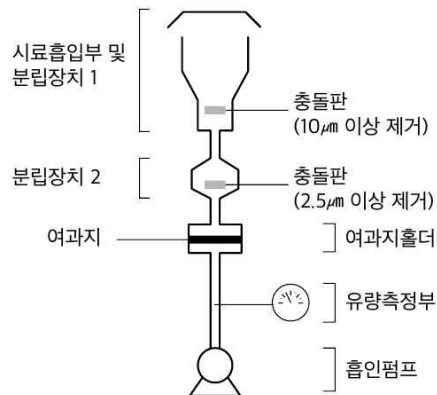
W2 : 시험 후 여과지 무게(μ g)

B1 : 시험 전 바탕시료 여과지 무게(μ g)

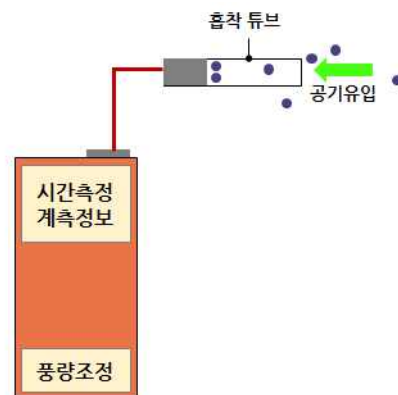
B2 : 시험 후 바탕시료 여과지 무게(μ g)

V(25° C, 1atm) : 보정된 채취공기의 부피(m³)

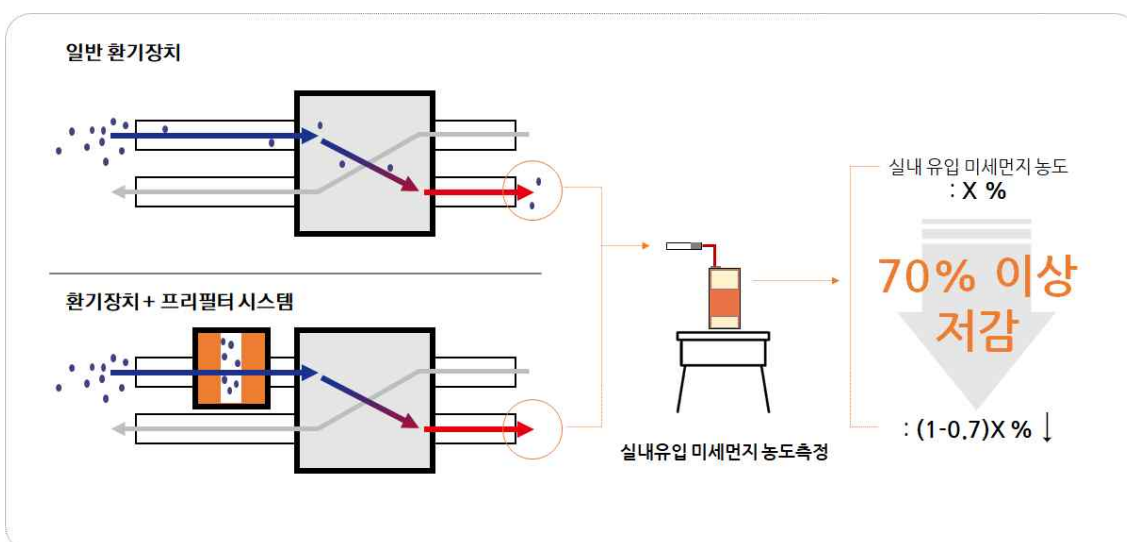
- 중량법은 정확하지만 24시간동안 먼지를 포집해야하며 측정 전·후 일정한 온도와 습도에서 무게를 측정해야하기 때문에 시간이 오래 걸린다는 단점이 있으며, 현존하는 미세먼지 간이측정기의 정확도는 현저히 낮은 수준이다.
- 환기장치의 미세먼지 저감량을 초음파 산란 측정방법을 통해 측정하여 중량법 측정 결과와 비교하여 기초원천기술을 보완하여 발전할 수 있도록 한다.
- 또한 공기청정기와 환기의 차이점을 드러내기 위해 VOC 및 CO₂와 같은 실내공기 유해물질을 함께 측정하여 환기의 필요성을 시사한다.
- 본 연구과제의 실내유입 미세먼지농도는 프리필터 시스템의 적용 전후 환기장치의 급기 중 미세먼지의 농도를 기준으로 하며 목표치는 70%이다.



[그림 5] 미세먼지를 포집하기 위한 중량법 계측기의 기본구성



[그림 6] 가스성입자 유해물질을 포집하기 위한 계측기



[그림 7] 프리필터 시스템 적용을 통한 실내 미세먼지 유입농도 저감 정도 측정 방법

□ 초음파 기반 미세먼지 농도 측정 기초원천기술 개발

- 실내 미세먼지 농도의 정확한 판단 및 프리필터 시스템과 기계식 환기장치의 효율성에 대한 근거를 제시하기 위해서는 기존 측정법을 개선할 수 있는 원천기술의 개발이 수반되어야 한다. 따라서 본 연구과제에서는 기계식 파동인 초음파를 사용하여 미세먼지의 농도를 경험적 가정 계수 없이 도출할 수 있는 레일리 산란(Rayleigh scattering) 기반 기초원천기술 개발을 제안한다(그림 8).

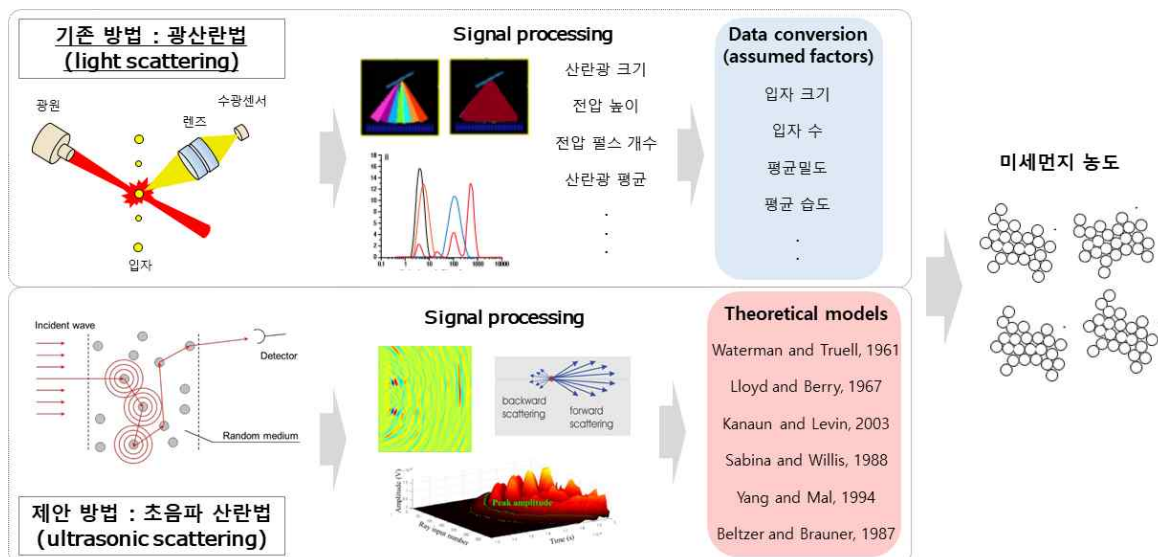
- 파동의 전달에 있어서 산란에 가장 큰 영향을 미치는 반사계수는 다음과 같다.

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{vs.} \quad R_{12} = \frac{\sqrt{\eta_{r2}} - \sqrt{\eta_{r1}}}{\sqrt{\eta_{r2}} + \sqrt{\eta_{r1}}}$$

$$Z = \rho V \quad \eta = \mu_r / \epsilon_r$$

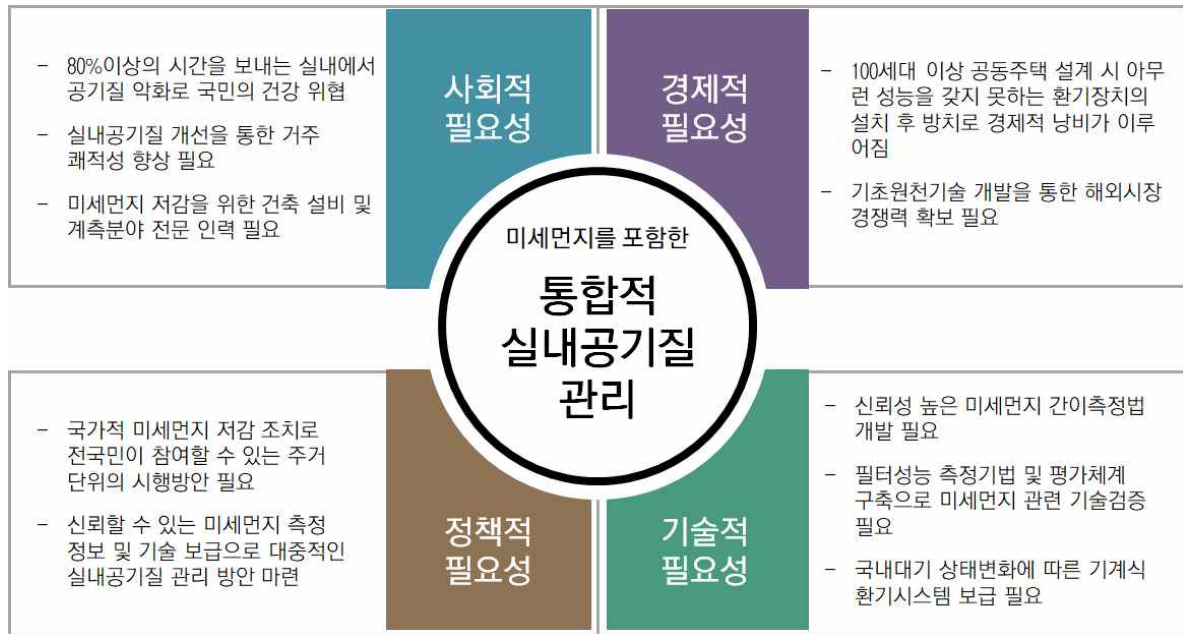
역학적 파동인 초음파는 사물의 밀도와 파동의 속도와 관련되어 있는 계수인 반면에 전자기파는 전기적 유전율(ϵ_r : *di-electric permittivity*)과 자기적인 투자율(μ_r : *magnetic permeability*)이 그 상관관계에 있다. 습도는 전자지적인 성질에 있어서 매우 큰 영향을 미치며 그 유전율 및 투자율과의 상관관계를 실험적으로 정밀하게 측정하기에 한계가 있다. 이에 다양한 시뮬레이션 이론을 통한 연구가 진행중에 있다. 하지만 공기 중의 밀도와 습도의 상관관계는 그 측정이 용이하며 상온에서 미소한 차이만을 보이는 것으로 발표되고 있다.

- 산란을 발생시키는 입자의 크기보다 약 열배 정도 작은 파장으로 발생하는 레일리 산란에 근거한 초음파 산란 이론은 다양한 이론적 모델에 의하여 기계적 물성치(밀도 등)를 역추정할 수 있다. 또한 최근 급격히 발전한 고주파 비접촉 초음파 트랜스듀서, MEMS센서 등을 활용하여 계측의 정확도를 높일 수 있다.



[그림 8] 기존/제안 방법의 차이점 비교 및 초음파 기반 미세먼지 농도 측정 개념도

□ 연구개발의 중요성 및 시급성



[그림 9] 연구개발 필요성

- 세계보건기구(WHO)는 대기오염에 의한 사망자 수는 연간 최대 600만 명에 달하고, 그 중 실내 공기오염에 의한 사망자는 280만 명에 이른다고 밝혔다. 이 중 실내 오염물질이 실외 오염물질보다 폐에 전달될 확률은 약 1000배 높다고 추정했다.
- 국내 국민 건강위해성평가(Health Risk Assessment, HRA)는 1980년대 후반부터 오염물질에 대한 위해성·위험성 평가 개념이 소개되기 시작한 이후로 관리 대상 구역, 물질별 기반 모델을 구축하여 위험성을 확인하는 연구를 수행하였다. 현재 HRA와 관련된 법이나 규정은 마련되어 있지 않지만 그 필요성은 활발히 요구되고 있다.
- 1996년에 제정된 지하생활공간 공기질 관리법이 2003년 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법으로 개정되면서 어린이집 등 다중이용시설로 관리대상 범위가 넓어졌다. 2016년 12월 23일부터는 실내공기질 관리법으로 법령이 바뀌면서 다중이용시설의 실내오염원과 유해물질에 대한 관리가 강화되었다.
- 미세먼지 측정에 대한 불확실성 및 신뢰성 없는 자료가 무분별하게 양산되는 것을 방지하기 위하여 환경부 주관의 성능인증제도를 운영하고 있지만, 국가별 실내 미세먼지 권고 규정 및 필터에 대한 성능 평가방법 또한 상이한 실정이다.
- 대한민국 미세먼지 농도는 경제협력개발기구(OECD) 35개국 중 터키 다음이며, 그 뒤를 따르는 이탈리아, 독일, 일본과도 격차가 벌어지고 있는 추세이다.⁹⁾ 반면, 실내 적정 미세먼지 농도 기준과 기계식 환기장치에 요구되는 필터의 성능은 미세먼지가 많지 않은 유럽과 비교하여 현저히 낮은 수준이다.

9) Explore the data_Air Quality, 미 보건영향연구소(HEI), 2019.02.01

1-2. 연구 개발 대상의 국내·외 현황

□ 미세먼지 관련 국내 연구 현황

- 김우열(2018)은 질소 산화물을 선택적으로 환원시킬 수 있는 광촉매 표면 개질 및 시분해 적외선 분광기를 통한 미세먼지 흡착/탈착 거동 모니터링 및 메커니즘 분석하여 분자수준의 자연 및 모사 태양광촉매를 이용한 친환경 초미세먼지 및 대기오염 저감 기술 개발하고자 함.
- 원안나(2018)는 독립된 공기정화장치를 활용하며, 교실 내 급배기구의 배관연장에 따른 오염물질 제거효율에 따른 배치계획을 바탕으로, 기존의 공기정화장치를 개선한 초등학교 실내에 적합한 공기정화장치를 계획함.
- 김탁현(2018)은 파일럿 규모 전자선 기반 미세먼지 저감 시스템 설계 및 제작하여 전자선 기반 미세먼지 저감 시스템 구축 및 현장 운전인자 도출 후 시스템 운전 최적화 및 성능 고도화를 통한 현장 실증연구 (공인시험 성적서 획득). 전자선 기반 질소/황산화물 동시처리 시스템 최적화 (질소산화물 제어효율 90% 이상)를 목표로 함.
- 한방우(2018)은 국내 주택 미세먼지 발생 및 관리 측정 분석생활보호제품 비용효과 조사 분석 및 분석 알고리즘 개발 후 환기장치 연계 실 환경 생활보호제품 실 환경 평가 방법 개발 및 공기질 예측모델 실증 주택 검증 및 비용-효과 기반 스마트 유지관리 방안 제시를 목표로 함.
- 아이자랩(2018)은 최근 3년 동안 정부 R&D를 통하여 라돈측정 관련 기술개발을 지속적으로 수행하여(3건) 성공하였으며 기술 관련 등록 특허를 보유하고 있고 현재도 관련 기술에 대한 특허 출원을 하고 있으며 그 기술을 적용하여 가정용 라돈 및 미세먼지 측정기를 개발하고자 함. 세계수준 20%의 정확도보다 높은 15% 정확도를 갖는 반도체 방식 라돈 포집기 개발 및 직경 2.5 μm 이하의 초미세먼지 센서를 활용한 검출기를 개발하고자 함.
- 경대승(2018)은 입체녹화를 통한 식물 흡착·흡수 기작과 신소재 기반 태양광 활용 집진패널 기술을 융합한 Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 저감 장치를 개발하여 설치반경 3m 이내 도시미세먼지(PM10 기준) 노출을 90% 저감함으로써 사회적 이슈인 미세먼지 문제를 효과적으로 해결하는 것을 목표로 함.
- 최동희(2018)는 1차년도에서 주거건물의 외부 미세먼지(PM10, PM2.5) 침입 실태조사 및 침입경로를 분석하여 주거건물의 현장측정을 통한 외부 미세먼지 침입 실태조사를 실시하고 외부 미세먼지의 주거건물 침입경로 분석 및 기여도 산출을 통하여 외부 미세먼지 침입 평가를 위한 평가요소를 도출하였으며 실험세대 대상 외부 미세먼지 실내침입 현장평가기법 도출 및 검증할 예정.
- 신수환(2018)은 2차 년도에 개발된 ROIC를 검증하고 최적화하기 위하여 ROIC Revision FAB 및 검증 및 개발된 패키지에 MEMS 미세먼지 센서와 마이크로히터를 MCP하여 하나의 패키지로 제작하여 MCP된 먼지 센서와 ROIC를 연동하여 먼지센서를 검증하고 이를 사업화하기 위한 작업진행.
- 조현숙(2018)은 기존의 센서칩을 수입해 모듈화 하는 수준에 그치고 있는 국내 센서 기술의 한계를 극복하고, 먼지센서 국산화, 저전력 슬립 모드 구현을 위한 하드웨어 및 소프트웨어 개발을 통하여 원천기술을 확보하고자 함.
- 안진홍(2018)은 기존 초저가 센서에 적용된 IRED 방식의 광량 측정 방식을 탈피한 입자계수 방식을 도입하여 국내 환경에 최적화된 광학식 미세먼지 센서의 개발 센서 네트워크 구성을 통한

모니터링 서비스 개발하고자 함.

- 조성진(2018)은 선행 연구에서는 미세먼지 필터링을 위한 나노섬유 기반 기술 확보, 세계 최초 미세먼지 제거를 위한 나노섬유 필터 코팅 시스템을 개발하고 가능성을 확인하였고 후속연구에서 자연환경에서의 필드 테스트와 고속 패터닝 기술을 활용하여 미세먼지 제거와 실내 자연 환기가 동시에 가능한 초고효율 나노섬유 필터 및 고속 코팅 시스템을 개발하고자 함.

□ 국가별 실내 적정 미세먼지 농도 기준

- 미세먼지의 입경과 인체의 위해성 간의 연관성을 고려하여 각 국가별 또는 기관들이 실내 공기 중 미세먼지농도 기준을 PM2.5와 PM10로 구분하여 제시하고 있다.
- 한국의 실내 미세먼지 규정농도는 WHO와 EU에 비하여 2배가량 높다(표 2). 2018년 환경부 발표에 따르면 연 평균 및 일평균 기준 세계 기준에 맞게 PM10과 PM2.5의 미세먼지에 대하여 각각 15, 35로 개정을 진행 중이다.
- WHO의 미세먼지 권고기준에 맞추어 보면 현재 한국의 규정농도는 모두 잠정목표(2)에 해당한다(표 3). 이는 권고기준보다 미세먼지로 인한 심폐질환과 폐암에 대한 사망 위험률이 약 12% 높은 단계이다. 즉, 한국에서 미세먼지가 보통으로 기록되는 날도 WHO 권고기준에 비하여 매우 높은 현실이다.

[표 2] 각 국가별 실내 미세먼지 평가표 (출처 : 국립환경과학원 대기환경 연보)

국가 또는 기관	시간	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
WHO	24시간 (1일)	25	50
	1년	2	20
호주	24시간 (1일)	25	50
	1년	8	-
캐나다	24시간 (1일)	28	-
	1년	10	-
중국	24시간 (1일)	75	150
	1년	35	70
EU	24시간 (1일)	-	50
	1년	25	40
홍콩	24시간 (1일)	75	100
	1년	35	50
일본	24시간 (1일)	35	100
	1년	15	-
태국	24시간 (1일)	35	125
	1년	15	65
미국	24시간 (1일)	35	150
	1년	12	-
한국	24시간 (1일)	35	100
	1년	15	50

[표 3] 세계보건기구(WHO) 권고 미세먼지 기준($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 농도

구분	목표단계	PM10	PM2.5	상대적 위험도
연평균	잠정목표(1)	70	35	권고기준보다 사망위험률이 약 15% 높음
	잠정목표(2)	50	25	잠정목표(1)보다 약 6%(2~11%)의 사망 위험률 감소
	잠정목표(3)	30	15	잠정목표(2)보다 약 6%(2~11%)의 사망 위험률 감소
	권고기준	20	10	심폐질환과 폐암에 의한 사망률 증가가 가장 낮은 수준
일평균	잠정목표(1)	70	35	권고기준보다 사망위험률이 약 5% 높음
	잠정목표(2)	100	50	권고기준보다 사망위험률이 약 2.5% 높음
	잠정목표(3)	75	37.5	권고기준보다 사망위험률이 약 1.2% 높음
	권고기준	50	20	연평균농도와의 상관관계에 의한 수준

□ 미세먼지 관련 국내 대책

- 한국은 2016년 「미세먼지 관리 특별대책」이 수립된 이후 조금씩 변화하여 2017년 7월 5일부터 미세먼지 관리 종합대책이 수립되어 운영되고 있다(그림 10).
- 미세먼지 종합대책에 따르면(표 4), 정책적으로 과학적 측정을 통한 미세먼지 예경보시스템을 강화하는 분야와 아이들을 위한 실내기준 마련 분야가 중점 추진과제로 지정되어있다. 세계기준으로 미세먼지 농도가 심각한 한국은 미세먼지생산 저감 대책과 함께 기존 설비를 활용한 실내공간의 즉각적인 미세먼지 제거방안이 필수적이다. 국가 종합대책과 발맞추어 본 연구 과제를 통하여 과학적인 측정 기법 개발 및 실내공간의 미세먼지 유입을 저감할 수 있는 방안을 제안하고자 한다.



[그림 10] 미세먼지 종합대책 수립경과 (출처: 환경부)

[표 4] 미세먼지 종합대책 핵심내용 (출처: 환경부)

분야		중점 추진과제
국내 배출 감축	발전부문	노후 석탄화력 폐지 등 석탄발전 비중 축소 발전용 에너지 세율체계 조정 검토 친환경적 제 8차 전력수급계획 수립 재생에너지 보급 확대
	산업부문	총량관리 대상지역 확대 및 먼지총량제 실시 질소산화물 배출부과금 신설
	수송부문	노후 경유차 저공해화 및 운행제한 확대 LPG차, 전기차 등 친환경차 보급 확대 친환경차협력금 제도 시행 선박건설기계 미세먼지 관리 강화
	생활부문	공사장 불법소각 등 관리 사각지대 집중 관리 도로청소차 보급 및 도시 숲 확대
국제 협력	한중, 동아시아 미세먼지 협력	한중 정상회의를 통한 공동선언문 발표 추진 동아시아 미세먼지 저감 협약 체결 검토
민감 계층 보호	민감계층 보호 인프라 및 서비스	아이들을 위한 <u>실내기준 마련</u> 어린이집, 학교 주변 미세먼지 측정망 우선 설치 학교 실내 체육시설 확대 민감계층 대상 찾아가는 케어서비스
정책 기반	과학적 관리 기반	<u>환경위성 등 활용한 측정 및 예경보시스템 강화</u> 미세먼지 국가전략 프로젝트(R&D) 추진

□ 에어필터 국내외 시험기준 비교

- 건축물의 기계식 환기시스템에 적용되는 에어필터는 외부로부터 도입되는 공기에 섞여 있는 미세분진 등을 거르는 역할을 한다. 국내에서는 공식적으로 KS B 6141규격이 사용되고 있으나, 에어필터 제조업체에서 실질적으로 사용되고 있는 시험규격은 미국 및 유럽규격이다(표 5).
- 국내외 시험기준의 가장 큰 차이는 결과의 보고 방법에 있다. 국내기준의 경우 에어필터에 대한 실험적 효율값을 제공하는 반면, ISO기준의 경우 에어필터의 성능지표를 대기질을 평가하는 지표와 동일하게 표기하여 사용자가 실내공기질 개선에 직접적으로 반영할 수 있게 하였다. 또한 ANSI/ASHRAE기준은 매우 보수적으로 에어필터를 검증하고 각 입자별 최소 효율 등급을 에어필터 성능으로 보고하도록 하였다.
- 최근 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙에서는 100세대 이상에 설치해야 하는 기계식 환기장치의 에어필터 기준을 비색법(광산란 중 빛의 감쇠 측정 기법) 60%에서 80%로 강화하고, 500세대 이상의 공동주택에 적용되는 건강친화형 주택 건설기준에서는 비색법 90%에서 95%로 강화하였다. 이는 미세먼지에 대한 경각심 증가와 함께 광산란 기법의 부정확성을 나타내는 결과이다.

[표 5] 국가별 에어필터 테스트 방식 비교

Cod e	Test Item	Test partic le	Test particle concentra tion	Particle Diamet er (μm)	Aeros ol Partic le Count er	Sampli ng Chan nel	Test Rated flow	Temp Hum	Chamb er type
KS B 6141	형식1 입자포집률 압력손실	DOP	농도 규정 없음	0.3	KS B 6336 광산란식 자동입자 계수기	-	제조사 제공	-	wind tunnel
	형식2 입자포집률 압력손실 분진유지용량	KS A 0090 분진11종	3 ± 2 mg/m³ 70 ±30 mg/m³	분질별 질량 지름 표시	KS A 0079 비색법/ 광산란 적산법	-			wind tunnel
	형식3 입자포집률 압력손실 분진유지용량	KS A 0090 분진15종	3 ± 2 mg/m³ 70 ± 30 mg/m³		저울 (분해능0.1g)	-			top-down Windtunnel
ISO 16890	ePM 1 ePM 2,5 ePM 10	DEHS KCl	-	0.3~10	OPC	-	3400 m³/h (900~5400 m³/h)	23±5℃ 45±10 % R.H	wind tunnel
	Loading Dust	ISO 15957 L2 dust	(140±14)mg/m³ 3 ~ 300 Pa	-	-	-			top-down Windtunnel
ANSI/ASHRAE 52.2	Particle size removal efficiency	KCl	30% 1L water	0.3~10	OPC	12	2.5 m/s 0.90±0.03 m³/s	10~38℃ 45±10 % R.H	ASHRAE wind tunnel
	Loading Dust	ASHRAE DUST	70 ~ 350 Pa	-	-	-			

□ 국내외 공동주택 용 기계식 환기장치 비교

- 효율 및 성능이 뛰어난 독일산 기계식 환기장치와 국내 아파트에 적용되고 있는 기계식 환기장치의 요소들을 비교하면 다음과 같다.¹⁰⁾

① **환기구의 위치 차이:** 독일산 기계식 환기장치는 기본적으로 네 개의 환기구가 모두 한쪽 방향으로 설치되어 있다(그림 11). 기본적으로 바닥이나 벽에 고정할 수 있도록 설계된 방안으로써 사용자가 필터를 바꾸거나 관리를 하는 등 유지보수에 용이하다. 반면 국내의 환기장치는 대부분 환기구가 한쪽으로 몰려있지 않고, 분리되어 있다. 또한 천장에 설치되는 경우가 다수이기 때문에 인지도가 떨어지며 관리가 용이하지 않다.

10) 건축물 환기/공조용 국내의 에어필터 시험방법 비교 분석, 신철웅 외 1명, 2018.11



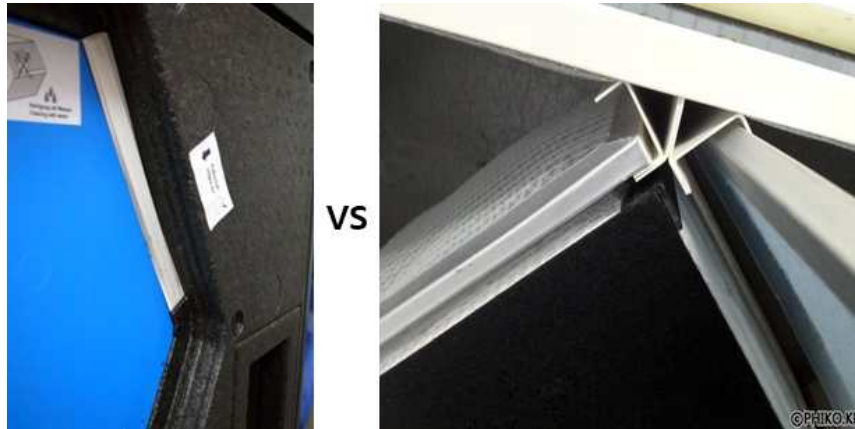
[그림 11] 국내외 기계식 환기장치 위치 비교, 독일산(좌), 국내산(우)

② **열교환효율 차이:** 독일산 기계식 환기장치는 검정색 EPP폼 등 단열재로 제작되어 본체에서 빠져나가는 열을 최소화하고 효율을 극대화한다(그림 12). 또한 열교환소자를 관리하기 위한 뚜껑 자체도 기밀성능을 높였다. 반면 국내제품의 경우 이와 같은 조치를 찾아보기 어려워 열교환효율이 저하된다.



[그림 12] 국내외 기계식 환기장치 제작 비교, 독일산(좌), 국내산(우)

③ **열교환소자와 필터의 간격:** 열교환소자와 필터의 간격은 실내로 유입되는 미세먼지 등의 부유 물질이 걸러지는 정도와 반비례한다. 독일산 환기장치의 경우 틈새를 확인할 수 없는 반면, 국내 장치의 경우 얇은 부직포 필터와 열교환소자의 간격이 벌어져있는 것을 확인할 수 있다. 이는 환기장치에서 필터를 고정하는 철물과 필터의 크기가 그림 13과 같이 맞지 않을 경우 쉽게 발생한다.



[그림 13] 국내외 기계식 환기장치 설치 비교, 독일산(좌), 국내산(우)

□ 국내· 외 연구개발 대상의 현황 분석을 통한 소결

- 2006년 이후 설계된 공동주거에는 실내공기질을 관리할 수 있는 기계식 환기장치가 보급되어있지만 실질적으로 사용되지 않고 있다. 또한 실내의 미세먼지를 정확하게 측정하기 위한 간이측정기의 신뢰성이 매우 낮지만 측정방법에 대한 연구는 진행되지 않고 있다.
- 이에 재실자가 능동적으로 실내공기질을 관리 할 수 있도록, 주기적으로 교체해야하는 필터를 환기장치와 분리하여 사용자의 관리가 용이한 곳에 설치하고 기존의 환기장치와 연결하는 선제적 방안(pre-filter system) 및 환경요인(습도)을 반영하여 미세먼지 농도를 정확히 계측할 수 있는 기초연구를 제안한다. 즉, 프리 필터 시스템은 기계식 환기장치와 외기를 공급하는 덕트 사이에서 박스 형태로 분리가 되어 재실자의 접근성이 용이한 곳에 위치시킨다.



[그림 14] 프리필터 시스템이 적용된 환기 시스템 개괄

2. 연구수행내용 및 성과

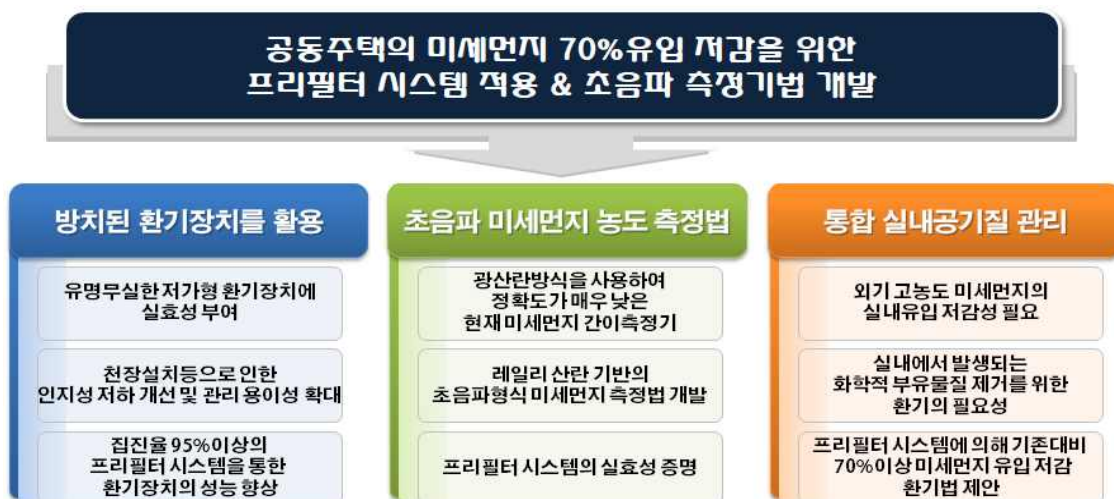
2-1. 연구 개발의 추진전략·방법 및 추진체계

□ 단계별 연구개발 추진방법

- 연구개발 단계를 기초 원천기술 확보를 위한 핵심요소기술 개발 단계(1차년도)와 개발 기법 검증 및 설비시스템 구축을 위한 통합·검증 단계(2차년도)로 설정
- 1차년도(핵심요소기술 개발 단계)는 예비 연구 결과를 활용하여 핵심 요소기술 개발을 마무리하고 개발된 핵심 요소기술들에 대한 수치 검증을 수행
- 프리필터 시스템 제작 및 실험은 위 핵심요소기술 개발과 관계없이 수행이 가능하고 2차년도 연구진행에 크게 영향을 미치지 때문에 계획된 연구일정보다 먼저 수행하고자 함. 이는 기 보유하고 있는 관련 장비 및 기구를 활용하면 충분히 달성할 수 있을 것으로 판단됨
- 2차년도(개발기술 통합·검증 단계)는 개발된 핵심요소기술을 하나의 원천기술로 통합·검증하고, 이를 사용자 친화적인 매뉴얼로 제작하는 것임. 해당 연차에 가장 중요한 요소는 개발된 핵심 요소 기술과 설비 시스템 검증·보완임

□ 개발기술의 실용화를 위한 후속연구과제 추진전략

- 개발 기술 홍보 및 개발된 원천기술을 토대로 개발 기술의 수요처와 공동연구 형태로 실용화 단계 (TRL7~8단계)를 위한 후속연구과제를 기술 수요처와 공동연구 형태로 지원하고 다양한 조건(온습도, 다유형 기계식 환기장치 등)에 적용하여 제안기법을 일반화하고 실용화하고자 함
- 개발 기술의 실용화를 위해 단계별 연구개발 수행이 타당하며, 이를 통해 연구개발 Risk 최소화를 할 수 있을 것이며 성과활용 목적의 전략적 기초연구를 진행하고자 함

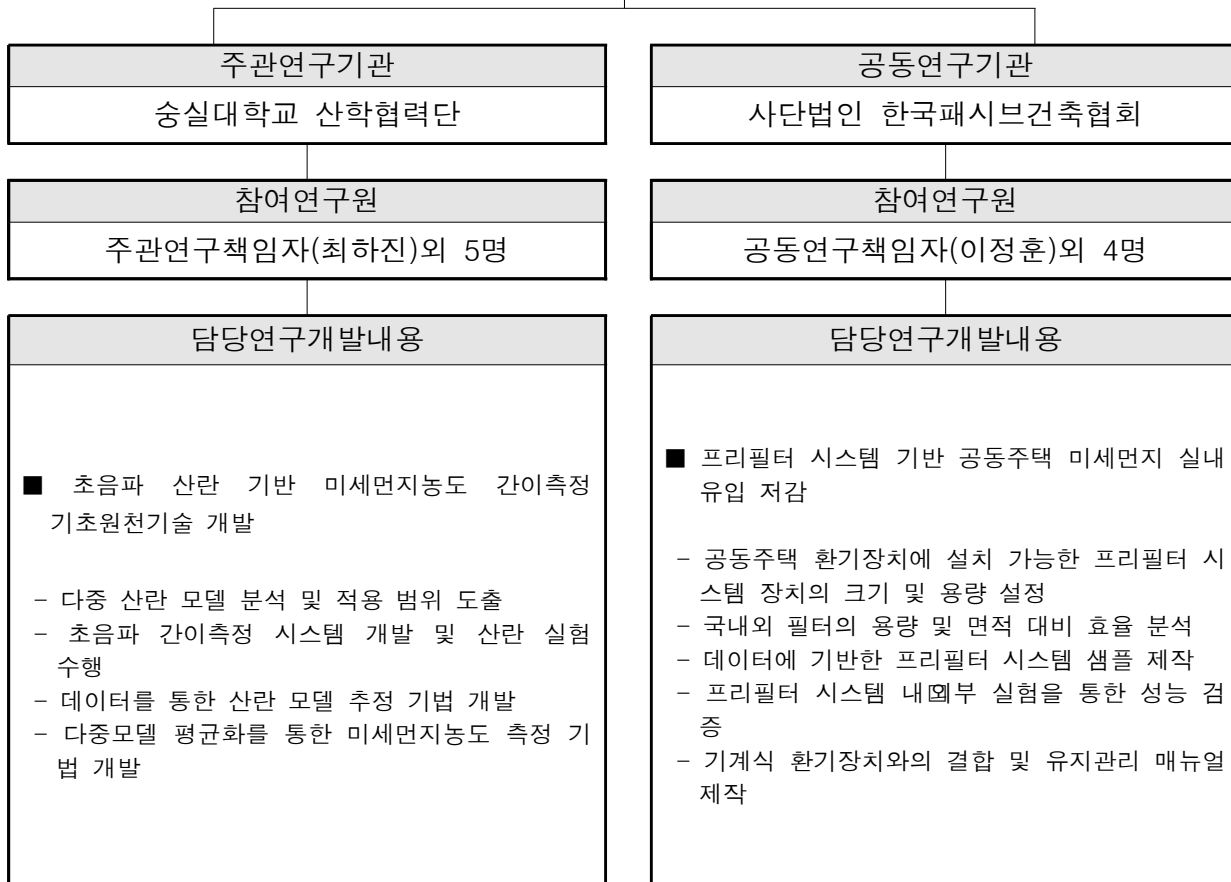


[그림 15] 연구의 차별성 및 의의

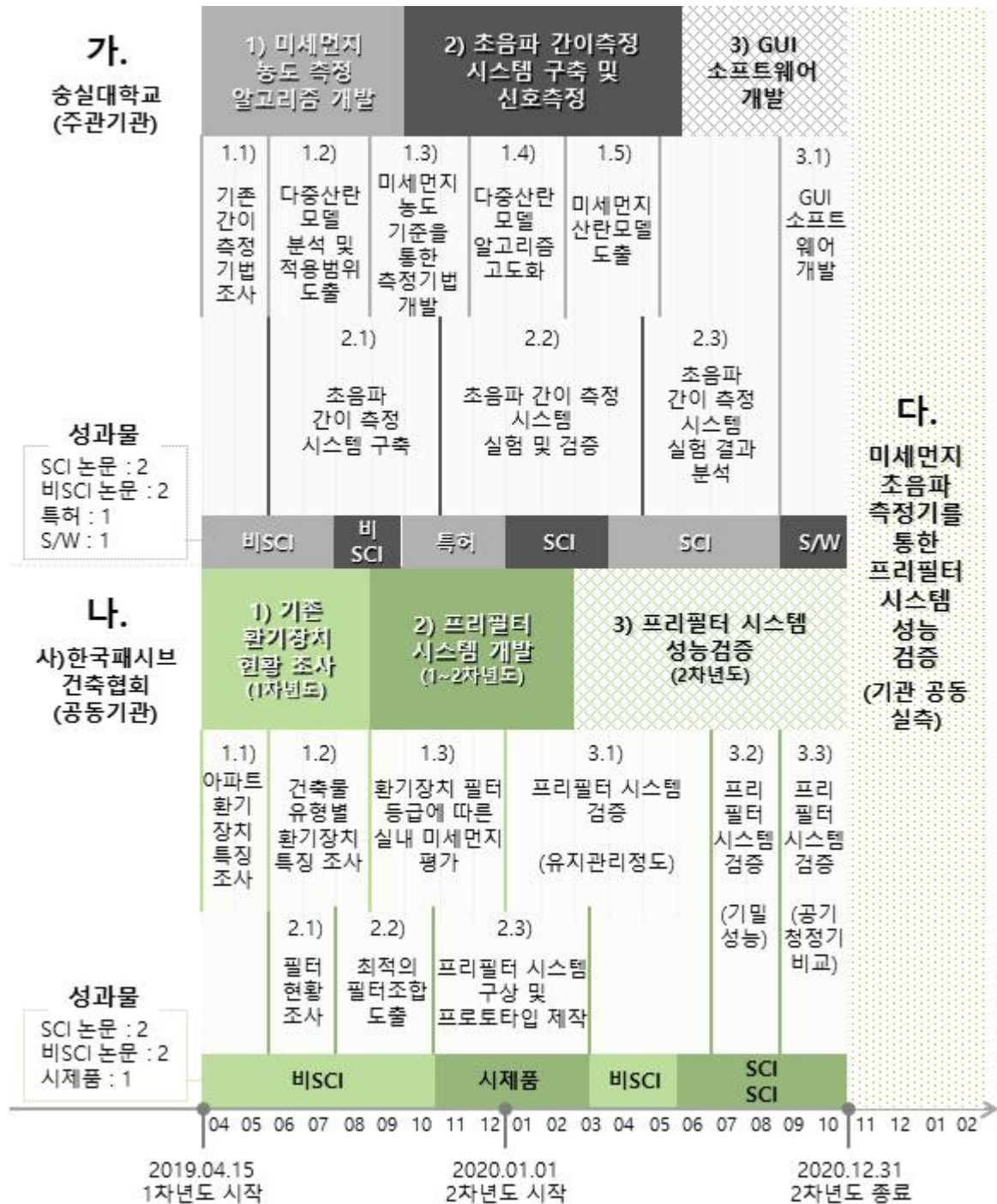
- 연구개발 단계를 기초 원천기술 확보를 위한 핵심요소기술 개발 단계(1차년도)와 개발 기법 검증 및 설비시스템 구축을 위한 통합검증 단계(2차년도)로 설정하였다.

연구개발과제	
과제명	공동주택의 미세먼지 70% 유입 저감을 위한 프리필터 시스템 적용 및 초음파 측정기법 기초원천기술 개발

기관별 참여현황			
구분	기관수	인원수	총인원수
산업계			11
대학	1	6	
국공립(연)			
출연(연)			
기타	1	5	

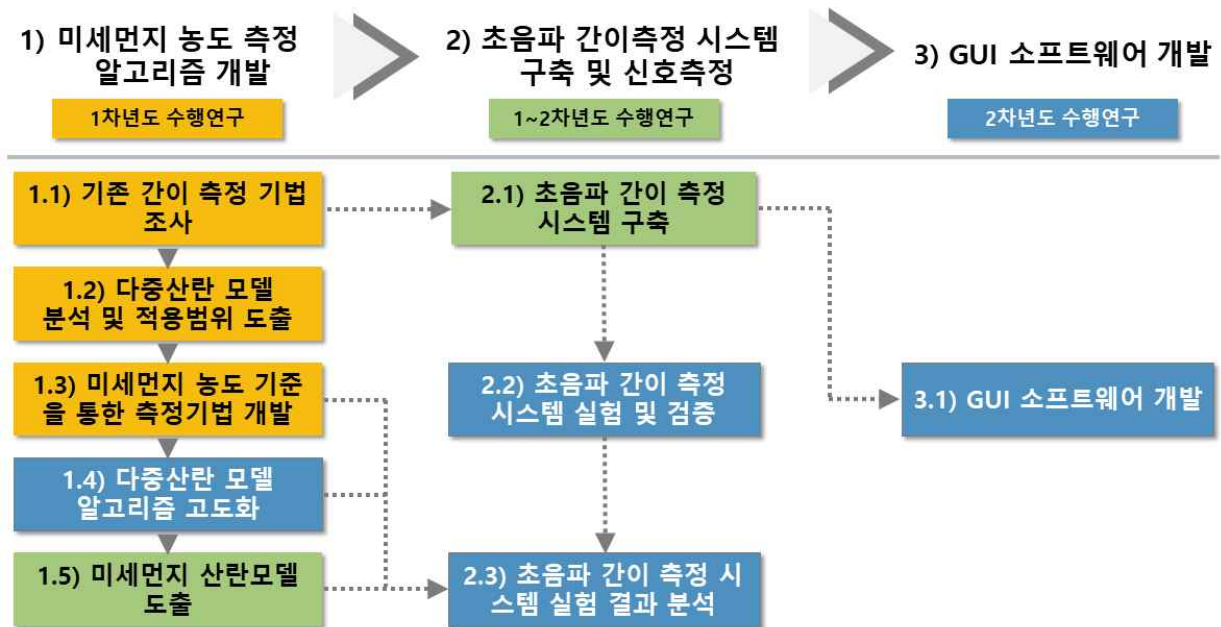


- 연구개발 추진 과정은 그림 16과 같으며, 연차별 연구 수행 내용은 다음과 같다.



[그림 16] 연구개발 추진 과정

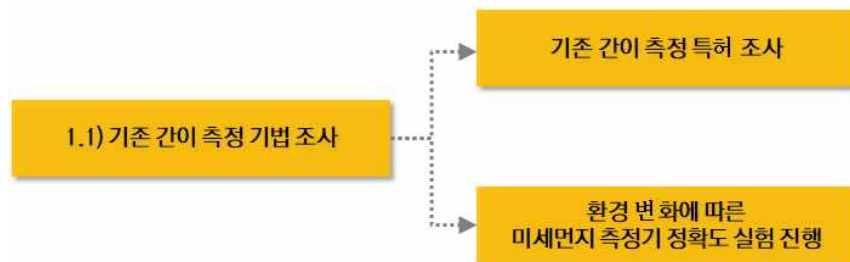
가. 송실대학교



[그림 17] 송실대학교 연구개발 수행내용 모식도

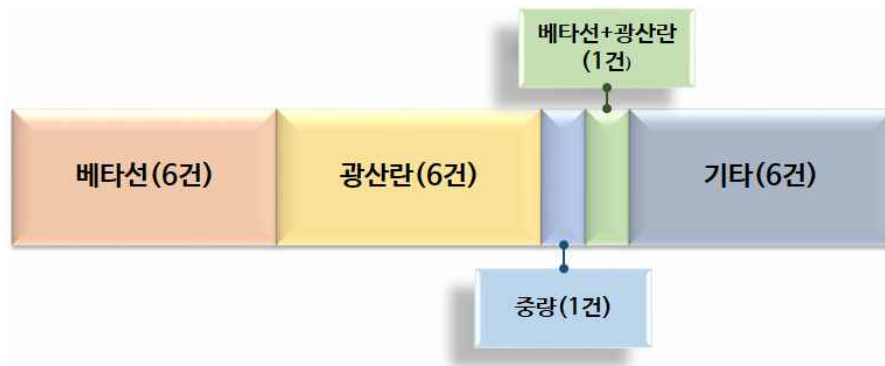
1) 미세먼지 농도 측정 알고리즘 조사

1.1) 기존 간이 측정 기법 조사



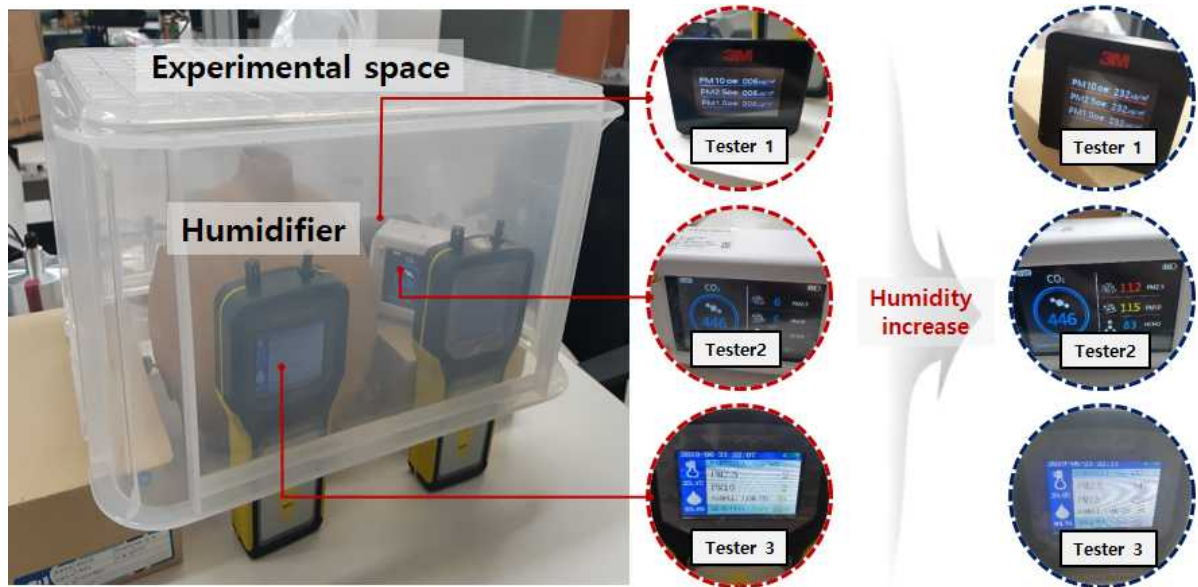
[그림 18] 기존 간이 측정 기법 조사 수행내용 모식도

- 미세먼지 관련 기술에 대한 현재 시장의 동태를 파악하기 위하여 미세먼지 측정 기술에 대한 특허와 저감방법에 관련된 특허 조사를 진행하였다. 미세먼지 관련 특허는 총 30건으로 측정 기술에 대한 특허 20건, 저감기술에 대한 특허 10건으로 조사되었다.
- 미세먼지 측정 기술에 대한 특허는 베타선을 이용하여 측정 기술 6건, 광산란을 이용한 측정 기술 6건, 중량포집을 이용한 측정 기술 1건, 베타선과 광산란을 접목하여 측정하는 기술 1건, 기타 6건이다(그림 19). 대부분의 경우 기존에 미세먼지 측정을 향상시키는 기술로 조사되었다. 기타 항목의 특허 기술로는 기압, 멤스를 이용한 미세먼지 농도 측정 기술들이 존재하는 것으로 나타났다.



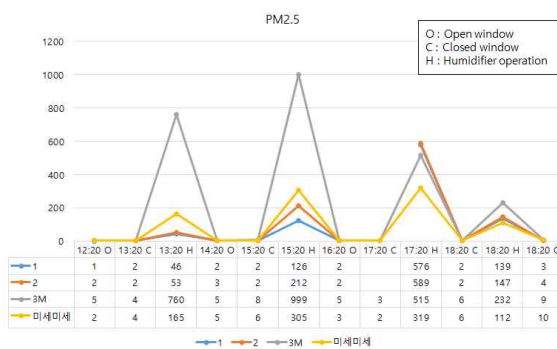
[그림 19] 미세먼지 측정기 종류 및 사양

- 현재 시중에 판매되고 있는 간이 미세먼지 측정기를 조사하였다. 제품은 시중에서 많이 판매되고 있는 순서로, 측정 방식과 측정 가능 항목을 중심으로 정리하였다. 간이 미세먼지 측정기의 측정 방식은 광산란을 주로 이용하며 측정 가능 항목으로는 PM2.5/PM10의 미세먼지 농도, TVOC, CO2, HCHO, 온도, 상대 습도 등이 있다.
- 광산란법은 전자기파의 파동 전달에 직접적으로 영향을 미치는 유전체 유전율 및 상대 유전율이 상대 습도에 민감한 구조를 가지고 있다는 점과, 가정을 통한 계수의 적용으로 인해 정확도 측면에서 신뢰도 문제가 지속적으로 보고되고 있다.
- 김정호(2014)는 광산란법, 베타선법, 중량법의 측정결과를 기준으로 측정 값을 보정했으며, 측정 장소와 계절에 따라 미세먼지의 밀도에 차이가 있음을 고려할 때 광산란법은 중량법을 기준으로 보완할 필요가 있음을 보여준다.
- 이창호(2020)는 광산란법으로부터 측정된 미세먼지 농도와 상대습도와의 상관관계를 조사했으며, 50.8~74.5%의 상대습도 구간에서는 미세먼지와 상대습도의 상관성이 높기 때문에 측정된 미세먼지 농도는 습도에 따른 보정이 필요함을 알 수 있다.
- 현 미세먼지 측정기의 환경 변화(습도)에 대한 측정값의 오류를 확인하고 데이터화하고자 하였다. 실험을 수행하기 위해, 앞서서 수행된 미세먼지 측정기 조사를 통해 국내에 유통되고 있는 미세먼지 측정기 3가지를 선정하여 구입하였다. 선정된 미세먼지 측정기는 레이저 광산란 방식의 3M 미세먼지 측정기, 레이저 산란활성 흡입 방식의 코아레스 미세먼지 측정기, 레이저 산란 방식의 센서로닉 미세먼지 측정기이다.
- 그림 20은 기존 미세먼지 측정기를 이용한 실험 사진이다. 환경변화에 따른 미세먼지 측정의 오류를 확인하기 위해 가습기를 이용하여 습도를 조절하였다. 3가지의 미세먼지 측정기를 이용하여 가습기 작동 전과 작동 후의 미세먼지 농도 차이를 확인하였다.

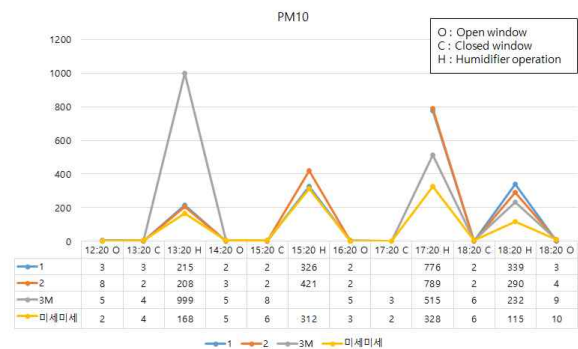


[그림 20] 습도에 따른 미세먼지 측정 실험 사진

- 그림 21, 22는 습도에 따른 미세먼지 측정 실험 결과값이다. 실험 결과 가습기를 작동 전과 후 PM2.5에서 최소 2 μ g/m³에서 46 μ g/m³로 약 23배, 최대 8 μ g/m³에서 999 μ g/m³로 약 125배로 수치변화를 확인하였다. PM10에서는 최소 4 μ g/m³에서 168 μ g/m³ 약 42배, 최대 4 μ g/m³에서 999 μ g/m³로 약 250배 변화함을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 미세먼지 측정기가 공기 중의 물 입자를 미세먼지로 인식하여 측정하기 때문으로 사료된다.

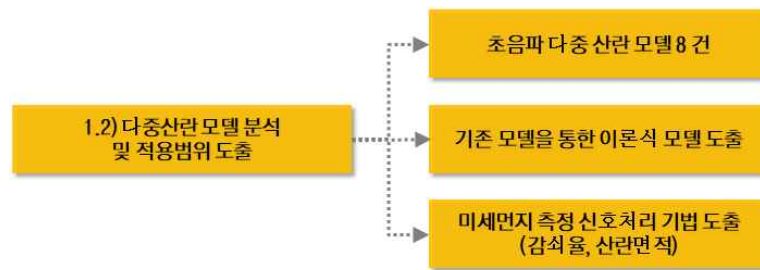


[그림 21] 습도에 따른 PM2.5 미세먼지 측정 실험 결과 값



[그림 22] 습도에 따른 PM10 미세먼지 측정 실험 결과 값

1.2) 다중산란 모델 분석 및 적용범위 도출



[그림 23] 다중 산란 모델 분석 및 적용범위 도출 수행내용 모식도

- 국내외 초음파 다중 산란에 관련된 문헌을 조사하여 다음 표 6으로 정리하였다. 조사된 초음파 다중 산란 모델은 8가지 종류이며 각각의 정의는 다음과 같다.¹¹⁾

[표 6] 초음파 다중 산란 모델

Model	Assumption/microstructure
Waterman and Truell	Point scatterers
Lloyd and Berry	Point scatterers
Varadan, Varadan and Ma	QCA, isolated scatterers
Kim	Aggregated(granular)
Kanaun and Levin	Aggregated(granular)
Sabina and Willis	Constant fields in scatterers Aggregated(granular)
Yang and Mal	Isolated scatterers(three-phase model), constant density
Beltzer and Brauner	Isolated scatterers

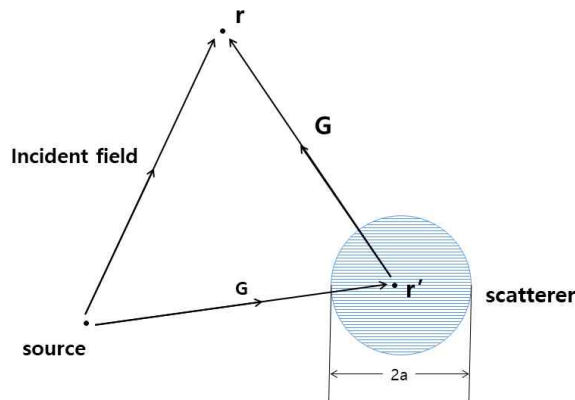
- Waterman and Truell 모델을 수정한 Lloyd and Berry 모델은 liquid 매질에서 초음파의 거동을 표현한 다중 산란의 기초이론이지만 현재까지도 많은 추가적 이론의 기본 공식이다. 다중 산란에 대하여 처음으로 통계학적 분석을 제안한 Fordy의 이론에 근거하여 유효파수를 정의함으로써 다중 산란을 예측하였다.
- Varadan, Varadan and Ma는 산란으로 발생하는 wavefield에 대하여 지속적인 추가계산 형태(wave function expansion)로 다중 산란을 제시하였다. 위 두 모델과의 차이점은 매질에서 한 점으로 존재하는 산란자의 형태가 아닌 quasicrystalline approximation(QCA)로 산란자를 가정하여 불규칙적인 준결정체로 매질을 정의하였다는 것이다.
- Kim, Kanaun and Levin, 그리고 Sabina and Willis의 경우, Waterman and Truell이 제안한 유효파수의 개념을 확장한 이론인 유효 매질(effective medium)에 근거하여 그 매질에 대한 정의를 제안하였다. 유효 매질이란 산란자가 한 매질안에서 상호작용 없이 독립적으로 거동하여 그 전체 매질을 평균 개념인 유효 성질로 표현할 수 있는 상태를 말한다. 각각의 모델은 유효 매질안에 산란자의 성질을 밀도와 부피비로 계산하여 적용시켰으며 주로 고체에 석인

11) Kim, J. Y.(2010), Models for wave propagation in two-dimensional random composites: A comparative study, *Journal of the Acoustical Society of America*, 127(4), 2201-2209.

섬유나 골재를 표현한 모델링 할 때 사용한다.

- Yand and Mal 모델은 유효 매질이론과 Waterman and Truell의 통계학적 이론을 동시에 적용시킨 발전된 형태의 개념이다. 즉 식(1)의 후반부 각도에 대한 함수에 유효 매질이론을 접목시킨 후, 독립적으로 거동하는 산란자의 분포를 정규분포(Gaussian distribution)로 가정하여 유효 파수를 다시 정의하였다. 일반적으로 일정한 밀도를 갖는 산란자의 분포에 높은 정확도를 갖는다.
- Beltzer and Brauner는 유효 매질에서 파동이 전달될 때 이력 현상에 따른 에너지의 감소를 추가하였다. 즉, 점탄성(visco-elastic)의 개념을 도입하여 다중 산란이 일어나는 동시에 매질의 성질에 따른 파동 에너지의 감소를 추가로 고려해 줄 수 있다.
- 본 연구에서 대기중의 미세먼지 분포에 가장 밀접한 영향을 가지고 있는 Waterman and Truell 모델과 Lloyd and Berry 모델을 바탕으로 이론식을 도출하고자 하였다. 미세먼지 입자는 그 크기가 매우 작고 균질하지 않아서 통계학적 분석이 필요하다. 또한, 그 위치가 공기 중에서 정해져있지 않기 때문에 독립적으로 거동한다고 보기 힘들다. 이에 따라 평균합산 개념이 적용된 두 모델에 근거하여 초음파 다중산란 모델을 도출하였다.
- 그림 24.과 같이 초음파의 다중 산란은 산란자의 위치(r)로부터 초음파 가진원의 위치(r')간의 탄성파동을 나타내는 미분방정식으로 정의한다(식 (1)). 이때, $G(w, r, r')$ 는 초음파 가진원과 산란자 사이에서 전달되는 파동방정식의 그린 함수(Green' s fuction), $k(w, r)$ 는 파수(rad/m), $\rho(r)$ 는 밀도 (kg/m3)이다.¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾

$$\Delta G(w, \mathbf{r}, \mathbf{r}') + k^2(w, \mathbf{r}) G(w, \mathbf{r}, \mathbf{r}') = -(\nabla \log \rho(\mathbf{r}) \cdot \nabla) G(w, \mathbf{r}, \mathbf{r}') + \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad \text{식 (1)}$$



[그림 24] 다중 산란 지배방정식의 개념도

- 산란자로부터 새롭게 발생하는 모든 경우의 초음파 전달을 나타내기 위해서 새로운 산란자의 위치(r_1)으로의 간섭에 대한 계수를 정규분포로 가정하여 $V(r_1)$ 로 표현한다. 그 후 산란자가 없는 매질에서의 파동 거동(G_0)과 내부 무한대로 펼쳐져 있는 산란자의 영향을 모사하여 다

12) Tourin, A., Derode, A., Peyre, A., Fink, M.(2000), Transport parameters for an ultrasonic pulsed wave propagating in a multiple scattering medium, *Journal of the Acoustical Society of America*, 108(2), 503-512.

13) Derode, A., Tourin, A., Fink, M.(2001), Random Multiple Scattering of Ultrasound. I. Coherent and Ballistic Waves, *Physical Review E*, 64, 36605.

14) Chekroun, M., Le Marrec, L., Abraham, O., Durand, O., Villain, G.(2009), Analysis of Coherent Surface Wave Dispersion and Attenuation for Non-destructive Testing of Concrete, *Ultrasonics*, 49(8), 743-751.

음 식(2)과 같이 나타낸다.

$$G(\omega, \mathbf{r}, \mathbf{r}') = G_0(\omega, \mathbf{r}, -\mathbf{r}') + \int G_0(\omega, \mathbf{r}, -\mathbf{r}_1) \times V(\mathbf{r}_1) G(\omega, \mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad \text{식 (2)}$$

- 식 (16)은 무한대의 산란자의 영향으로 한 번의 산란(single scattering)으로 설명할 수 있으나 그 정해를 구할 수는 없다. 그렇기에 불규칙적이고 무한대로 발생하는 다중 산란의 주요 에너지를 최소화하는 평균 합산(ensemble average) 개념을 도입하여 다음의 식 (3)을 유도한다.

$$\langle G(\omega, \mathbf{r} - \mathbf{r}') \rangle = G_0(\omega, \mathbf{r} - \mathbf{r}') + \int G_0(\omega, \mathbf{r} - \mathbf{r}') \sum (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \times \langle G(\omega, \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_0) \rangle d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \quad \text{식 (3)}$$

- 여기서 $\sum (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$ 는 자유에너지라 칭하며 산란자간의 거리가 매우 작을 때 발생하는 산란자들 간의 간섭 계수이다. 식 (3)은 Dyson Equation이라 불리며 다중산란의 주요 에너지를 포함하고 있는 가간섭파(coherent wave)에 대한 정해를 구할 수 있다. 평균 합산(ensemble averaging)을 통하여 불규칙적인 비간섭파(incoherent wave)는 생략이 가능하다. 평균합산에 대한 주파수-파수 도면에서의 정해는 다음 식 (4)와 같다.

$$\langle G(\omega, \mathbf{k}) \rangle = \frac{1}{k_0^2(\omega) - \sum (\omega, \mathbf{k}) - k^2} \quad \text{식 (4)}$$

- 여기서 k_0 는 산란자가 없는 매질에서의 파수이며 만약 본 연구의 초음파와 미세먼지간의 상관관계와 같이 산란자의 크기가 초음파 파동의 파장보다 크지 않은 경우, 자유에너지는 다중 산란이 일어나는 매질의 파수와 관계없는 변수가 되로 정의된다. 이 과정을 independent scattering approximation이라 칭하며, 산란자가 없는 매질의 파수에서 다중 산란이 일어나는 산란자간의 의미를 가지고 있는 자유에너지를 제거한 유효파수의 개념을 다음 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_e^2(\omega) = k_0^2(\omega) - \sum (\omega) \quad \text{식 (5)}$$

- 즉, 평균합산을 통하여 얻은 가간섭파의 거동은 마치 특정한 경계조건에서 초음파의 유도(guided)를 나타내는 분산효과(dispersion)처럼, 다중 산란으로 인한 일정한 가간섭파의 감쇠를 정해로 얻을 수 있다(식 (6)).

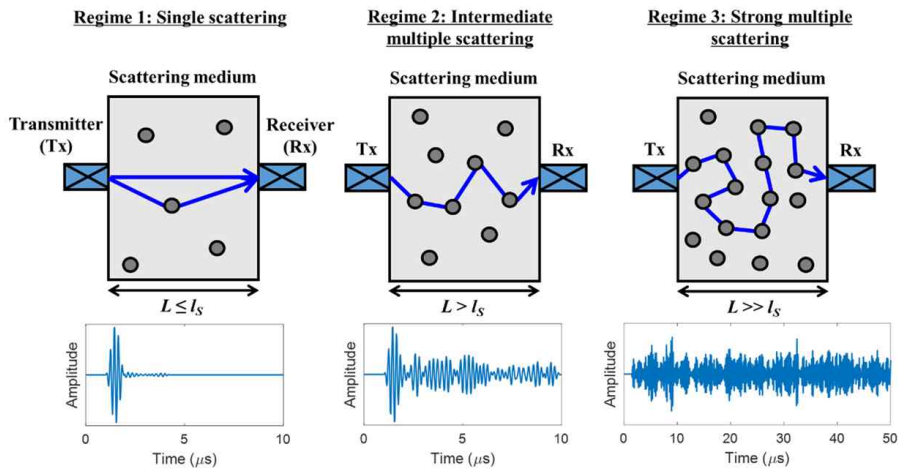
$$\langle G(\omega, \mathbf{k}) \rangle = \frac{1}{k_e^2(\omega) - k^2} \quad \text{식 (6)}$$

- 이때, $\langle \rangle$ 기호는 평균합산, k_e 는 다중산란이 일어나는 유효매질(effective medium)에서의 유효 파수이다. 유효매질이란 평균합산 후 탄성 파동이 전달되는 에너지가 산란자에 의하여 급격하게 감쇠되는 구간을 의미하며, 그 구간 내에서 내부의 산란자가 충돌하지 않고 독립적으로

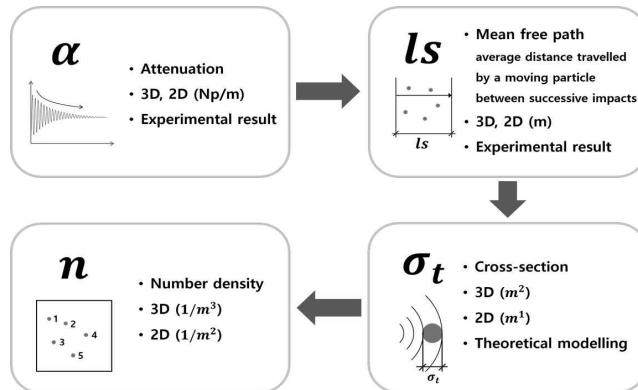
탄성 파동이 진행할 수 있는 평균거리를 평균 자유 경로(mean free path, m)라고 정의한다. 평균 자유 경로(l_s)는 다음 식 (7)과 같이 유효파수의 허수($Im(k_e)$)와의 관계로 나타난다.

$$l_s = \frac{1}{2Im(k_e)} \quad \text{식 (7)}$$

- 그림 25는 미세먼지로 인한 초음파의 다중산란에 대한 개념도이다. 다중산란에 대한 이론적 공식은 파동이 산란자에 도달하게 되면 산란자의 위치를 새로운 초음파 가진원으로 정의하고 있다.
- 이를 통해 미세먼지 농도 측정 신호처리 알고리즘을 개발하였다. 그림 26은 알고리즘의 개념도이다. 미세먼지 농도 측정 신호처리 순서는 다음과 같다. 첫째, 가진원으로부터 발생한 초음파를 센서를 통하여 여러 번 계측하고 평균 합산한다. 둘째, 평균 합산된 신호를 신호처리를 통하여 주파수 해석한다. 셋째, 주파수별 감쇠율을 계산하고 평균 자유 경로를 도출한다. 넷째, 미세먼지의 산란 면적을 기준으로 미세먼지의 단위 밀도를 계산한다.



[그림 25] 다중산란 개념도



[그림 26] 미세먼지 측정 알고리즘 개념도

- 초음파 다중산란을 통해 발생한 유효매질에서의 감쇠를 계측하여 미세먼지의 개수를 예측한다. 공기 중 미세먼지는 규칙성 없이 배치되어 있기 때문에 계측된 초음파 신호는 불규칙적

인 파동(incoherent wave)을 포함한다. 불규칙적인 신호를 최소화하며, 공기 중 미세먼지의 농도를 대변하는 연속적인 파동(coherent wave)을 도출하기 위해 평균합산을 이용한다.

- 위치좌표 x 에서 수신한 신호를 $f(t,x)$ 라고 할 때 $f(t,x)$ 는 랜덤으로 배치된 미세먼지로 인해 불규칙적으로 산란된 신호가 포함되어 있다. 이를 평균합산을 통해 불규칙적으로 산란된 신호를 대폭 축소하여 유효매질 내에서 발생한 초음파의 에너지가 감소된 부분만 도출할 수 있으며, 평균합산한 신호는 $\overline{f(t,x)}$ 로 표기한다.
- 실험적으로 다중 산란된 초음파 신호의 주파수별 감쇠율(α)을 측정하여 평균 자유 경로를 도출할 수 있다. 감쇠율이란 보낸 신호의 에너지 대비 받은 신호의 에너지 감소를 의미하며 감쇠율의 단위는 (1/m)이다. 감쇠율의 역수는 평균 자유 경로를 의미하며, 평균 자유 경로와 감쇠율 및 산란면적을 통해 도출한 미세먼지의 개수밀도는 식 (8)과 같다.

$$n = \frac{1}{l_s \sigma} = \frac{\alpha}{\sigma} \quad \text{식 (8)}$$

- 여기서, n 은 미세먼지의 개수 밀도(number density, 1/m³) 값이고, σ 는 산란면적(m²)을 의미한다.

(가) 감쇠율

- 감쇠율은 주파수 도메인에서 분석하며 $\overline{f(t,x)}$ 의 신호를 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transform)을 사용하여 주파수 도메인으로 변환하여 분석한다.
- 주파수 도메인의 신호를 $\overline{f(w,x)}$ 라고 할 때, 첫 번째 센서에서의 신호를 $\overline{f(w,x_1)}$, n 번째 센서에서의 신호를 $\overline{f(w,x_n)}$ 으로 나타낸다. 주파수 함수는 일정하며, n 번째의 센서로 갈수록 파동의 진폭은 감쇠된다. 다중 산란이 발생하는 공간의 첫 번째 센서부터 다음 센서의 위치로 전달되는 파동의 신호 진폭의 비율($\overline{f(w,x_i-x_1)}$)은 주파수 도메인에서 식 (9)와 같이 정의된다.

$$\overline{f(w,x_i-x_1)} = \overline{f(w)} e^{-\alpha(x_i-x_1)} \quad \text{식 (9)}$$

- 위 식에 로그를 취해 식 (10)과 같이 도출할 수 있다. 결과적으로 도출하고자 하는 감쇠율은 1차 방정식에서의 기울기를 의미한다.

$$\ln \overline{f(w,x_i-x_1)} = -\alpha(x_i-x_1) + \ln \overline{f(w)} \quad \text{식 (10)}$$

(나) 산란 반경

- 산란 반경이란 두 입자의 충돌에서 산란 과정이 발생할 확률을 의미한다. 산란 반경은 입사 입자의 횡단면영역(2D) 관점에서 표현되며 식 (11)과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{1}{nl_s} = \pi(2r)^2 \quad \text{식 (11)}$$

- 산란 반경은 산란자의 충돌이 발생하지 않는 경로에서 단위 공간에 존재하는 산란자의 개수를 말하며, 면적에 대한 개념으로 나타낼 수 있다. 산란자를 상호작용하는 반경 r 의 원으로 가정했을 때 산란 반경과 실제 면적은 4배의 차이를 보인다. 이와 같이 산란반경의 가정인 직접적으로 개수 농도에 영향을 미친다.
- 본 연구에서는 습도와 같은 환경적 요소로 인한 계측 값의 오차를 개선하기 위해 매질의 물리적 변화를 직접적으로 반영할 수 있는 기계적 파동에 근거한 초음파 전달 및 산란을 이용하였다. 적용한 초음파의 중심 주파수는 5MHz와 1~10MHz이며, 파장은 $68.6\mu m$, $34.1\sim 343\mu m$ 으로 미세먼지 입자($2.5\mu m \sim 10\mu m$)에 의해 레일리 산란(Rayleigh scattering)이 발생한다. 따라서, 사용되는 주파수의 파장 대비 입자의 직경이 작기 때문에 입자의 부피를 구형으로 가정하여 산란반경에 대한 효과를 최소화 할 수 있다.

1.3) 미세먼지 농도 기준을 통한 측정기법 고도화



[그림 27] 미세먼지 농도 기준을 통한 측정기법 고도화 수행내용 모식도

- 실내에서 사용하는 간이 미세먼지 측정기는 입자 크기와 개수농도를 측정하며, 이를 질량농도로 변환하여 출력한다.
- Antonio et al.(2018)은 저가형 미세먼지 측정기의 상대습도에 대한 오차를 보정하여 정확한 미세먼지 농도 값을 계산하는 연구를 하였다. 연구에서 사용된 기기는 모두 광산란방식의 미세먼지 측정기였으며, 기기 내부적으로 개수 농도에서 입자의 질량농도로의 변환이 이루어졌다. 위 연구에 따르면 개수농도에서 질량농도(MC; Mass Concentration)($\mu g/m^3$)로의 변환 방정식은 다음과 같다.¹⁵⁾

$$MC = nV\rho \quad \text{식 (12)}$$

- 여기서, n 는 입자의 개수 밀도(개/ m^3) 값이고, V 는 입자의 부피 (m^3), ρ 는 입자의 밀도 ($\mu g/m^3$)를 의미한다.
- park et al. (2014)는 입자의 입경을 분해하여 입경에 따른 개수를 측정하는 SMPS-APS system과 β -ray 흡수법 장비간의 질량농도 비교를 통해 SMPS-APS system의 미세먼지 질량농도 모니터링 가능성을 검토하였고, 서울 지역 대기 중 미세입자의 입경과 습도변화에 따른 밀도 변화를 살펴보았다. 위 연구에 따르면 미세먼지는 구성하고 있는 성분의 종류와 비율에 따라

15) Antonio, A. D., Popoola, O. A. M., Ouyang, B., Saffell, J., Jones, R. L.(2018), Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter, Sensors, 18(9), 2790.

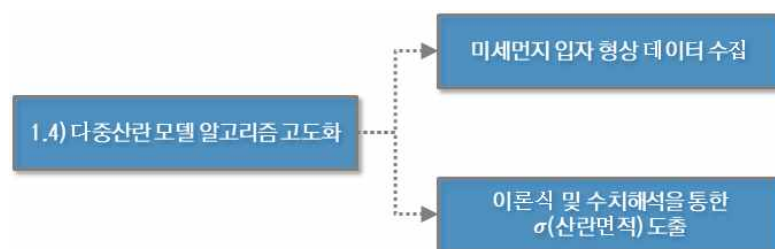
전체 밀도가 달라지지만, 간이 미세먼지 측정기에서 측정된 데이터를 기반으로 개수농도에서 질량농도로 변환 시 입자들의 밀도는 $1.6g/m^3$ 으로 가정한다.¹⁶⁾

- 광산란법 측정기는 미세먼지의 개수농도를 질량농도로 변환할 때, 입자의 부피를 완전한 구로 가정한다. 미세먼지 입자는 밀도와 모양이 균일한 구체로 가정하며, 입자의 부피 V 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{\pi}{6} D^3 \quad \text{식 (13)}$$

- 광산란법은 450, 550, 700nm의 파장을 가진 전자기파를 입사시키고, 입자의 크기 ($2.5\mu m \sim 10\mu m$)에 의하여 산란되는 미 산란(Mie scattering)을 이용한다. 미 산란의 경우 입자의 크기가 파장보다 크기 때문에 입자의 형태에 따라서 산란반경에 영향을 미친다. 또한 건조 과정을 거친 뒤 농도를 측정하는 중량법과 달리 건조 과정을 거치지 않는 광산란법 측정기는 습도에 큰 영향을 받는다. 일반적으로 상대습도가 높을수록 흡습성 입자는 주변의 습도를 흡수한다. 습도를 흡수한 입자의 크기는 커지며, 완전한 구 형태의 가정은 미 산란에 막대한 영향을 미치게 된다. 그러므로 최종적으로 측정되는 미세먼지 농도에 오차가 발생하게 된다.
- 광산란법을 사용하는 간이 미세먼지 측정기의 질량농도 측정 과정은 다음과 같다. 흡입부를 통해 유입된 공기의 부피를 산정하고, 측정부로 특정 사이즈의 입자가 포함된 공기를 유입시켜 개수농도를 측정한다. 개수농도와 가정된 입자의 부피와 밀도를 사용하여 질량농도를 도출한다. 도출된 질량농도는 1차적으로 입자의 부피에 따른 오차율과 가정에 근거한 밀도에 의해서 최종 계측된 질량농도에 오차가 발생하게 된다.

1.4) 다중산란 모델 알고리즘 고도화



[그림 28] 다중산란 모델 알고리즘 고도화 수행내용 모식도

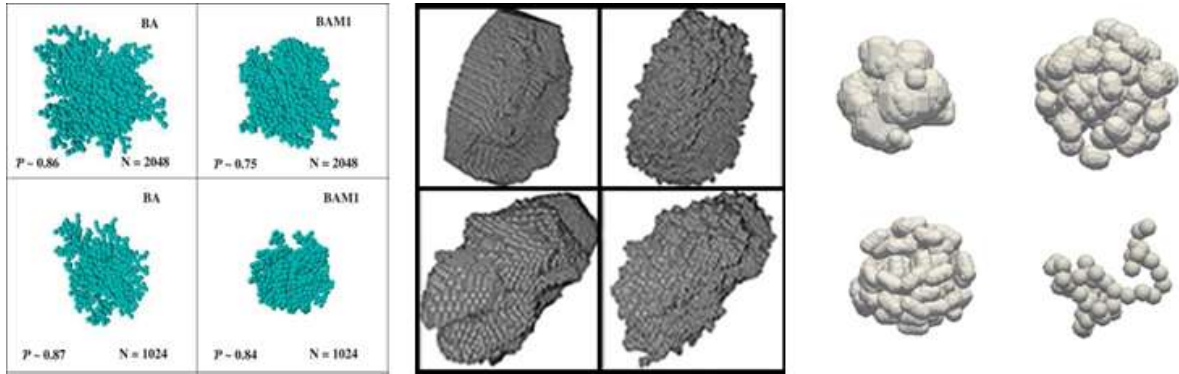
- 문헌 조사 및 주사 전자 현미경(SEM)을 통해 다양한 미세먼지 입자의 형상 데이터를 수집하였다. 문헌 조사로 수집된 미세먼지의 형상 데이터는 그림 n과 같다.
- Prithish Halder(2018)는 다공성 범위($P = 0.59 \sim 0.98$)가 넓은 먼지(직경 $0.7\mu m \sim 2.0\mu m$)의 다양한 산란 매개 변수의 특성과 종속성을 조사했다. 위와 같은 빛 산란 특성은 클러스터 형태의 먼지를 대상으로 시뮬레이션을 시행하여 분석했다.¹⁷⁾
- Tahar Mehri(2018)는 광물질 먼지 입자의 크기 및 모양에 대한 후방 산란의 의존성을 조사했다. 이를 위해 스테레오그램 측정에서 도출된 실제 대기 중 광물 분진 입자에 대해 광산란

16) 박종성, 문광주, 박승명, 송인호, 김현재, 홍유덕, & 한진석. (2014). SMPS-APS 를 이용한 PM 10 및 PM 2.5 질량농도 모니터링 가능성 평가. 한국환경분석학회지, 17(3), 161-172.

17) Halder, P., Roy, P. D., & Das, H. S. (2018). Dependence of light scattering properties on porosity, size and composition of dust aggregates. Icarus, 312, 45-60.

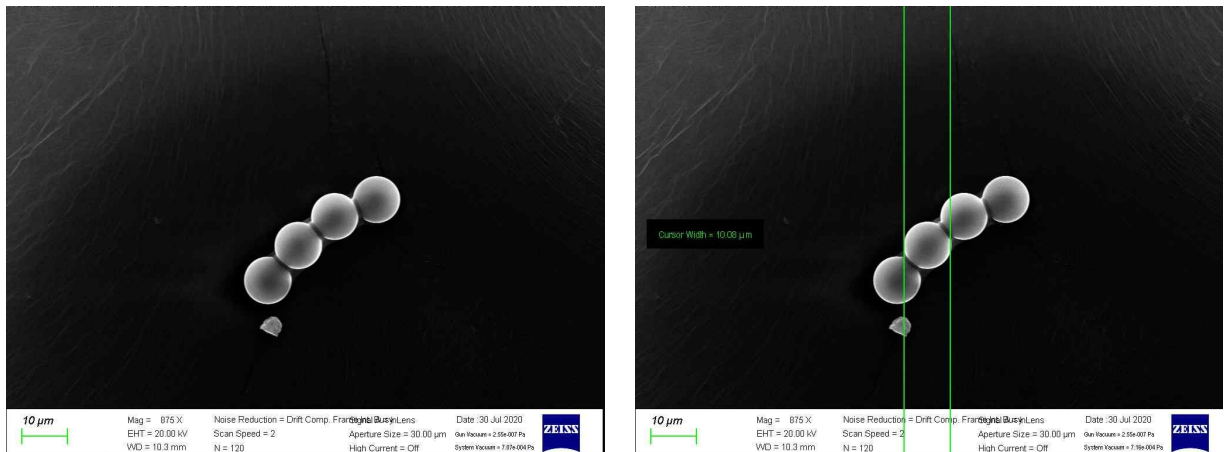
수치 시뮬레이션이 수행되며, 수학적 형태 모델과 비교했다.¹⁸⁾

- Patricio Piedra(2019)는 광산란을 기반으로 한 미세먼지 모양 분류의 정확성을 평가하기 위해 7개의 서로 다른 모양을 가진 입자 모델에서 계산된 광산란 패턴에 기계 학습 알고리즘을 적용했다. 입자 모델은 육면체, 타원체, 실린더, 응집체, 프랙탈 응집체로 구성되어 있으며, 이중 응집체, 프랙탈 응집체는 자연 발생 모양을 모델링한 것이다.¹⁹⁾



[그림 29] 문헌조사를 통해 수집한 미세먼지 형상 데이터

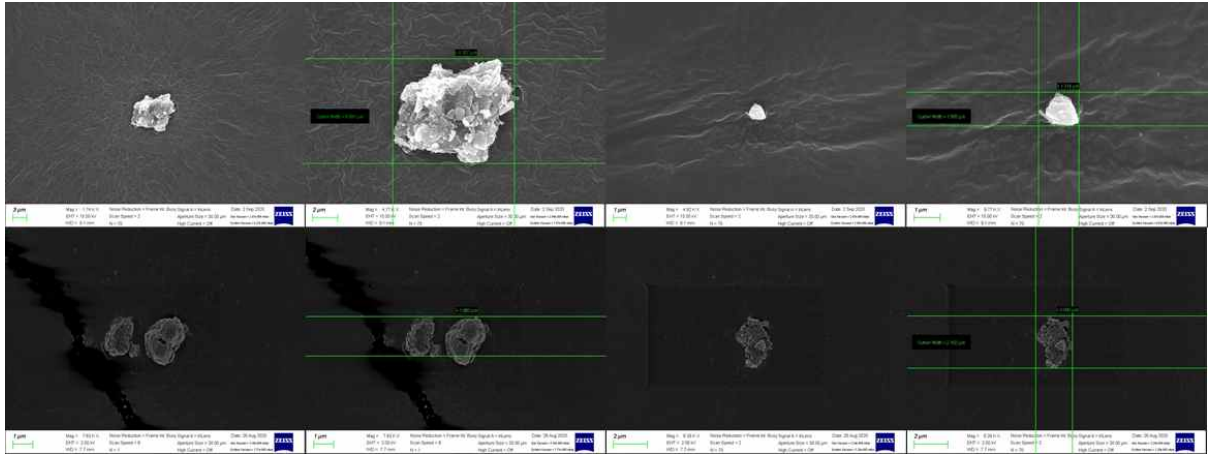
- 주사 전자 현미경(SEM)을 이용하여 정확한 입자 크기에 대한 교정을 제공할 수 있도록 일정한 직경을 가진 표준입자와 미세먼지 입자의 형상 데이터를 수집하였다. 미세먼지 입자의 경우 정확도 높은 형상 데이터를 수집하고자 배율을 점차 높이며 관찰 반경을 좁혀나갔다.
- 문헌조사 및 실험을 통해 얻어진 미세먼지 형상 데이터는 산란반경 도출을 위한 기본 자료로 활용된다.



[그림 30] 표준입자 SEM 이미지

18) Mehri, T., Kemppinen, O., David, G., Lindqvist, H., Tyynelä, J., Nousiainen, T., ... & Miffre, A. (2018). Investigating the size, shape and surface roughness dependence of polarization lidars with light-scattering computations on real mineral dust particles: Application to dust particles' external mixtures and dust mass concentration retrievals. *Atmospheric Research*, 203, 44-61.

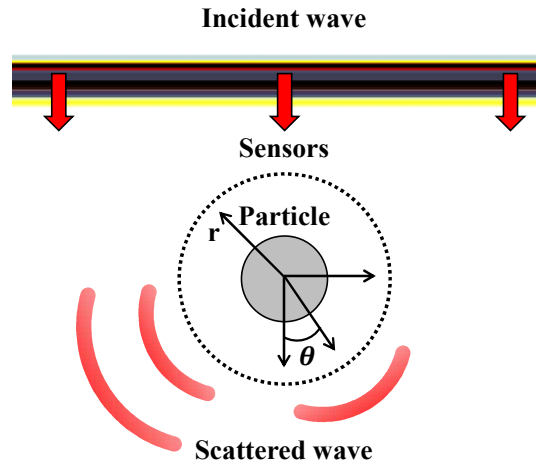
19) Piedra, P., Kalume, A., Zubko, E., Mackowski, D., Pan, Y. L., & Videen, G. (2019). Particle-shape classification using light scattering: an exercise in deep learning. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 231, 140-156.



[그림 31] 미세면지 SEM 이미지

(가) 이론식을 이용한 산란면적 도출

- 이론식을 통해 원형 입자의 산란면적을 도출했다. 그림 32와 같이 입사되는 초음파(Incident wave)가 구형 미세면지 입자에 전달될 경우 각각의 방위각으로 초음파의 산란(Scattered wave)이 일어난다.



[그림 32] 산란면적 이론 개념도

- 센서에 도달하는 신호(Total wave field)는 입사된 초음파와(Incident wave) 산란된 초음파(Scattered wave)의 합과 같으며, 다음 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_T(w, \vec{r}) = P_I(w, \vec{r}) + P_S(w, \vec{r}) \quad \text{식 (14)}$$

- 식 (15)와 (16)은 각각 입사된 초음파와(Incident wave) 산란된 초음파(Scattered wave)를 의미한다.

$$P_I(w, \vec{r}) = A \times \exp(i, \vec{k}_0, \vec{r}) \quad \text{식 (15)}$$

$$P_S(w, \vec{r}) = -f(\theta) \frac{\exp(i, \vec{k}_0, \vec{r})}{\sqrt{r}} \quad \text{식 (16)}$$

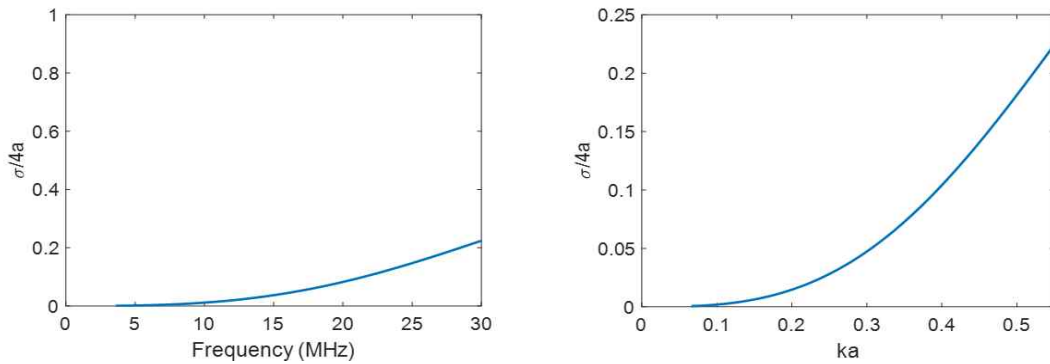
- $P_T(w, \vec{r}), P_I(w, \vec{r}), P_S(w, \vec{r})$ 는 각도와 거리에 대한 함수이며, $A, \vec{k}_0, \vec{r}, f(\theta)$ 는 각각 입사파의 최대 진폭, 파수, 초음파의 전달 거리, 각도 함수를 의미한다. 위 식을 통해 각도 함수를 나타내면 다음과 같다.

$$f(\theta) = -P_S(w, \vec{r}) \frac{\sqrt{r}}{A \times \exp(i, \vec{k}_0, \vec{r})} \quad \text{식 (17)}$$

- 2차원에서 각도함수는 단일 각도 θ 에 의존하며, 다음 식 (18)과 같이 각도 함수를 모든 방위각에 대해 적분함으로 이론적인 산란 면적을 도출할 수 있다.

$$\sigma = \int_0^{2\pi} |f(\theta)|^2 d\theta \quad \text{식 (18)}$$

- 입자의 반지름이 $1\mu m$ 인 원형 미세먼지 입자의 주파수별 산란 면적은 다음과 같다.



[그림 33] 반지름 $1\mu m$ 원형 미세먼지의 주파수별 산란 면적

(나) 수치해석을 이용한 산란면적 도출

- 이론식(Analytical solution)을 통하여 산란면적을 구하는 방법은 미세먼지 입자의 형태가 평면상의 원이거나, 3차원 공간의 구에서만 적용이 되어, 미세먼지 입자의 형태에 제한이 존재한다.
- 주사 전자 현미경을 통해 구축된 미세먼지 입자의 기하학적 반경 데이터를 바탕으로 수치해석을 통해 실제 형상에 맞는 산란면적을 도출했다.
- 수치해석은 유한차분법(finite difference method)을 기반으로 초음파 거동에 대한 2-D 시간이력 해석을 수행하였다. 해석에는 Matlab기반 k-wave toolbox²⁰⁾를 사용하였다. k-wave는 1D,

20) Firouzi, K., Cox, B. T., Treeby, B. E., Saffari, N.(2012), A first-order k-space model for elastic wave propagation in heterogeneous media,

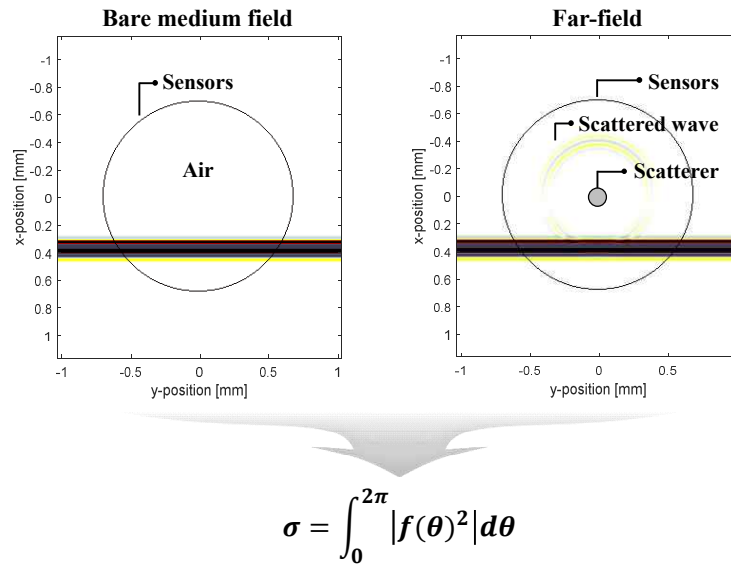
2D, 3D로 전파되는 음파의 시간 영역 시뮬레이션을 위해 설계된 오픈소스이다.

- 그림 34는 수치해석을 이용한 산란 면적 도출 개념도이다. 수치해석을 통한 산란 면적 도출의 시나리오는 다음과 같다.

1) 미세먼지가 없는 모델(bare medium field)과 하나의 미세먼지(scatterer)가 존재하는 모델(far-field)를 설정하여 각각 파동 전달 시뮬레이션을 진행했다. 이때 미세먼지 형상은 구축한 데이터를 기반으로 모델링을 수행하고 GPU기반 시간이력 해석을 수행했다.

2) 하나의 미세먼지를 기준으로 far-field에 원형으로 배치된 센서를 통해 산란에 대한 각도 함수(angular dependent tern)를 구한다. 도출된 함수를 바탕으로 전체 각도에 대해 적분하여 미세먼지 1개에 대한 산란 면적(scattering cross-section)을 구한다.

3) 앞선 과정을 다른 미세먼지 형상에 대하여 반복하고 산란면적에 대한 데이터 구축을 통하여 대표성을 가지고 있는 형상에 관하여 통계 분석한다.

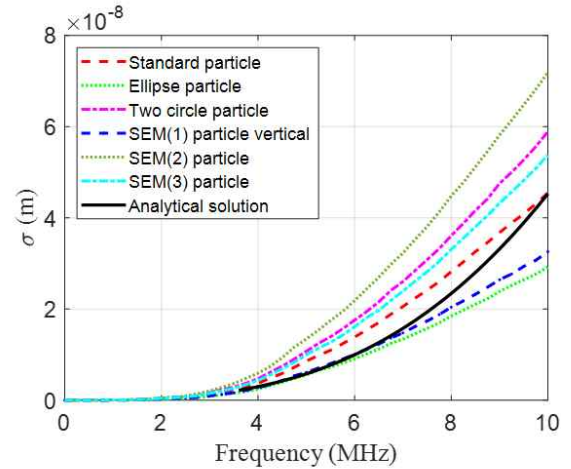
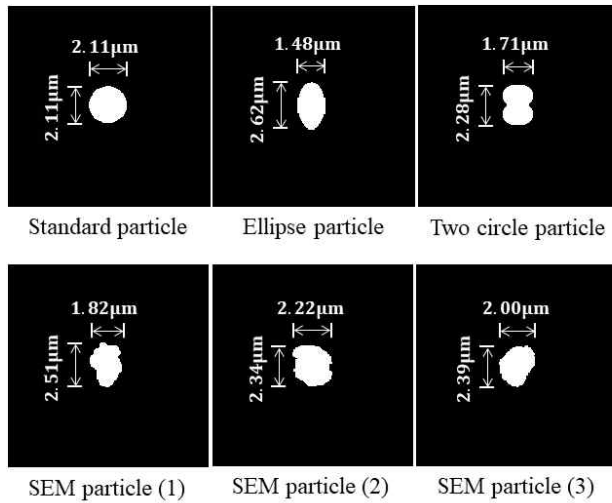


[그림 34] 수치해석을 이용한 산란 면적 도출 개념도

- 그림 35(a)는 수치해석에 사용된 미세먼지 형상 데이터를 나타낸다. 수치해석에 사용된 미세먼지 형상은 평균 반지름이 $1\mu m$ 인 표준입자(Standard particle), 타원형 입자(Ellipse particle), 입자 두 개가 합쳐진 형태의 입자(Two circle particle), 주사 전자 현미경을 통해 구축된 4종류의 실제 미세먼지의 입자(SEM particle)로 총 6가지로 구성되어있다.

- 그림 35(b)는 실제 미세먼지 형태의 데이터를 바탕으로 수행한 수치해석 결과를 보여준다.

- 표 7은 수치해석 결과와 이론식(analytical solution)을 이용한 원형의 산란 면적 값을 나타낸다. 본 연구의 초음파 실험에서 사용하는 5MHz 대역에서의 산란 면적을 비교하였다. 산란 면적의 값이 입자 모양에 따라 크게 다르다. 이는 다양한 입자의 형상이 미세먼지의 개수농도를 추정하는데 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.



(a)

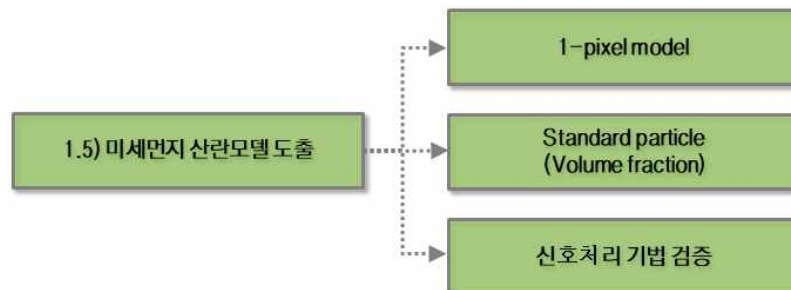
(b)

[그림 35] 미세먼지 형상데이터 및 수치해석 결과

[표 7] 산란면적 비교 (5MHz 대역)

Particle shape		Cross-section
Analytical solution (Circle)		5.88×10^{-9}
Standard particle (Circle)		8.59×10^{-9}
Ellipse particle	vertical	5.56×10^{-9}
	horizontal	1.12×10^{-8}
Two circle particle	vertical	1.07×10^{-8}
	horizontal	7.37×10^{-9}
SEM particle (1)	vertical	6.13×10^{-9}
	horizontal	1.01×10^{-8}
SEM particle (2)	vertical	1.34×10^{-8}
	horizontal	1.23×10^{-8}
SEM particle (3)	vertical	9.94×10^{-9}
	horizontal	7.71×10^{-9}

1.5) 미세먼지 산란모델 도출



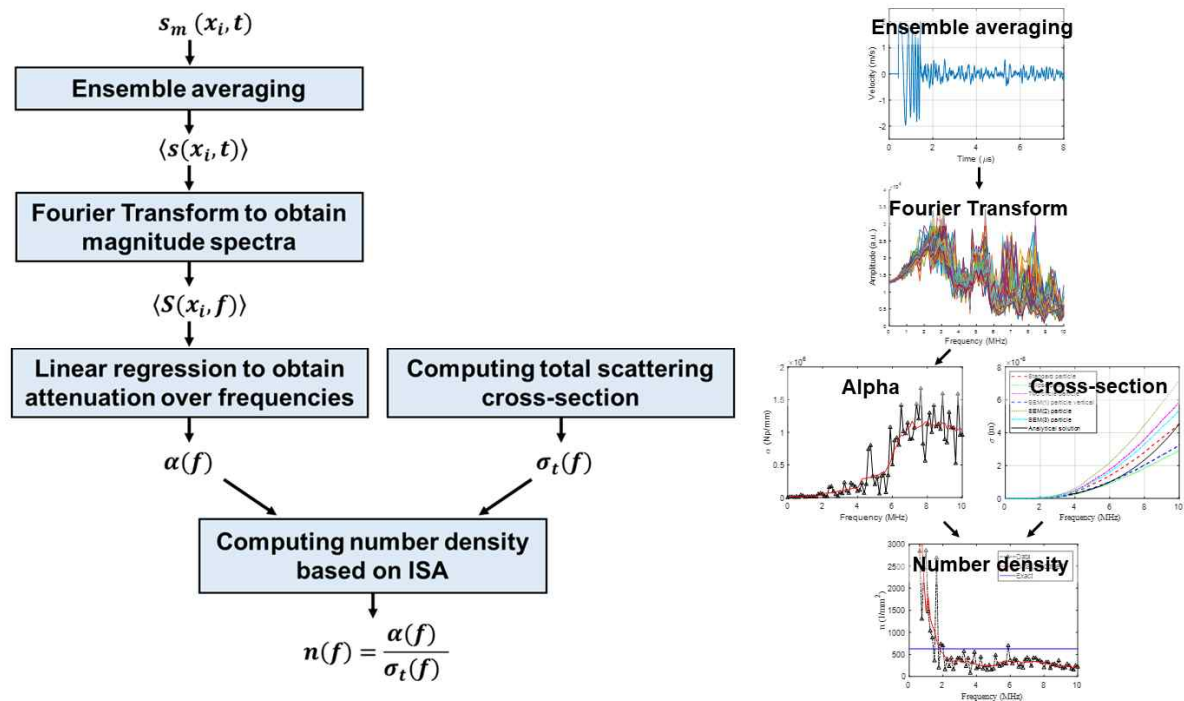
[그림 36] 미세먼지 산란모델 도출 수행내용 모식도

- 본 보고서에는 유한차분법을 기반으로 한 다중 산란 시뮬레이션을 두 가지로 나누어 진행하였다.

첫째, 농도에 따른 초음파의 다중 산란과정을 관찰하고자 한 미세먼지 입자를 시뮬레이션의 grid의 1 pixel로 치환한 1-pixel model 시뮬레이션

둘째, 미세먼지 형상 분석을 통하여 모델링한 표준입자를 시뮬레이션에 사용하여 입자의 형상에 따라 계측 값의 오차를 관찰하고자 한 standard particle model 시뮬레이션으로 진행하였다.

- 표 8는 시뮬레이션에 입력한 각각의 변수들을 정리한 것이며, 1-pixel model의 경우 대기 중 미세먼지의 농도를 1%, 0.1%, 0.01%로 설정하였으며, 미세먼지 입자 한 개당 grid 1개로 할당하였다. 가진 주파수는 중심주파수 5MHz를 갖는 toneburst 신호로써 넓은 대역의 주파수 (broadband)를 포함하고 있다. standard particle model의 경우 대기 중 미세먼지 농도를 2, 5, 10, 15%로 설정하였다. 가진 주파수는 1-10MHz를 갖는 Chirp 신호로써 넓은 대역의 주파수 (broadband)를 포함하고 있다.
- 두 시뮬레이션 모두 미세먼지의 위치는 시뮬레이션 공간에 랜덤하게 배치하였으며, 파동의 전달은 평면파로 설정하였다. 초음파 파동의 시뮬레이션은 반사파 발생으로 인해 해석에 어려움이 있다. 이를 제거하기 위해 시뮬레이션 공간 둘레에 전달되는 파동을 흡수하는 층 (Perfectly Matched Layer, PML)을 모델링하였다. PML의 감쇠 계수는 $2Np/m$ 로 설정하였다.
- 시뮬레이션 결과에 대한 신호처리는 다음과 같이 진행되었다. 수집한 데이터에 대하여 평균 합산을 진행하여 연속적인 파동을 도출한다. 푸리에 변환을 사용하여 시간 영역의 데이터를 주파수 영역으로 변환한다. 변환된 주파수 영역의 신호들을 센서의 위치에 따라 파동 신호 진폭의 비율을 주파수 영역에서 정의한다. 이를 선형 최소자승법을 통해 감쇠율을 계산한다. 감쇠율과 계산된 미세먼지 입자에 대한 산란 면적을 통해 공기 중 미세먼지의 개수밀도를 계산한다. 위 과정들은 그림 37과 같이 예시와 함께 나타내었다.



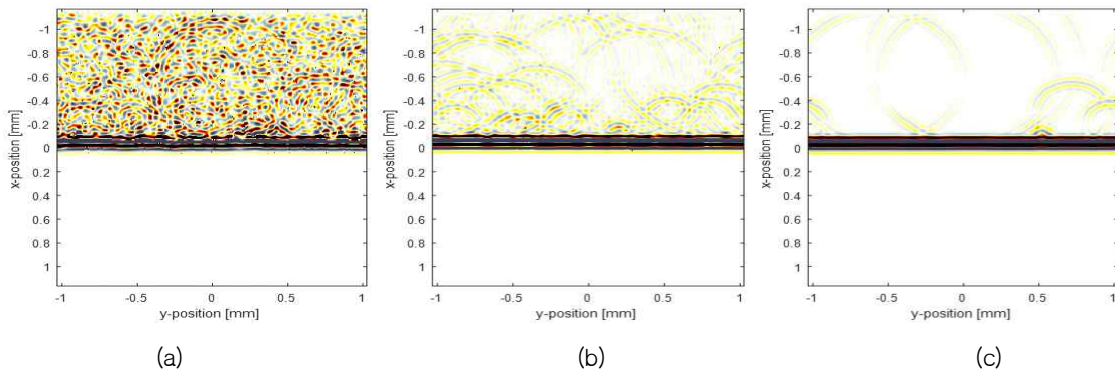
[그림 37] 미세먼지 개수농도 신호처리 기법

[표 8] 1-pixel model, particle model 시뮬레이션 설정 값

Simulation Parameter	1-pixel model	standard particle model
Number of grids (N_x)	300	25000
Number of grids (N_y)	300	1000
dx	$6.86\mu m$	$0.057\mu m$
dy	$6.86\mu m$	$0.057\mu m$
Length of grid	$2.058mm \times 2.058mm$	$1425\mu m \times 57\mu m$
Total area	$4.24mm^2$	$0.081mm^2$
time end	$20\mu s$	$8\mu s$
dt	$2ns$	$0.0166ns$
Number of sensors	60000 (200×300)	1050 (35×30)
Input frequency	5MHz	1-10MHz
Input type	3 cycles tone burst	Chirp signal
Wave type	Plane wave	
PMLSize	[20,0]	[100,0]
PMLAlpha	$2Np/m$	
CFL	0.1	
ρ_{air}	$1.2754kg/m^3$	
$\rho_{fine dust}$	$2650kg/m^3$	$1050kg/m^3$
c_{air}	343 m/s	

(가) 미세먼지 농도에 따른 다중 산란 시뮬레이션 (1-pixel mode)

- 유한차분법을 기반으로 한 2-D 다중 산란 모델의 1-pixel 시뮬레이션 과정을 그림 38에 나타내었다. 평면파가 미세먼지가 포함된 매질을 통과함에 따라 미세먼지의 반경으로 파동이 산란되는 과정을 살펴볼 수 있다. 미세먼지의 부피비에 따른 다중 산란의 차이를 관찰할 수 있었다. 해석 시간은 각 모델 평균 2분 36초이다.

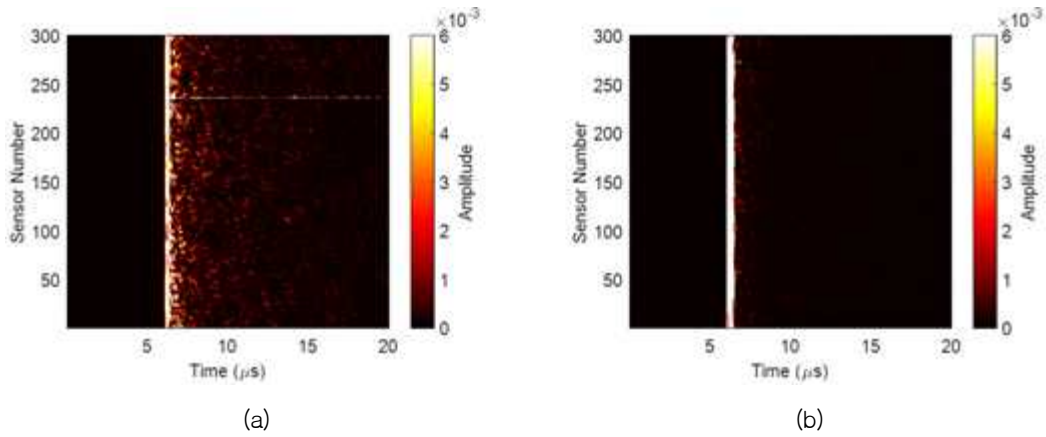


[그림 38] 미세먼지 부피비에 따른 다중 산란 시뮬레이션;

(a) 1%, (b) 0.1%, (c) 0.01%

- 그림 39은 시뮬레이션 공간 x축 150열에 놓여있는 200개의 신호에 대한 신호누적 그래프

(B-scan)이다. 그림 38의 (a)의 경우 평균합산을 하지 않은 신호의 B-scan이고 (b)의 경우 평균합산을 300회 수행한 신호의 B-scan이다. 평균 합산을 통하여 가상의 공간에 배치된 모든 센서에서 규칙적으로 전달되는 가간섭 파동을 뚜렷하게 확인할 수 있었으며, 불규칙한 비간섭 파동은 사라짐을 확인할 수 있었다. 가간섭 파동이란 주기와 위상이 일정한 파를 말하며 물리량 간의 상관관계를 설명하기 때문에 미세먼지 농도를 대변한다. 비간섭 파동은 공기 중 불규칙적으로 배치되어 있는 미세먼지로 인한 다중 산란으로 발생하는 불규칙한 진폭과 위상을 가지는 파를 말한다.



[그림 39] 평균 합산에 따른 B-scan;

(a) 신호 누적 그래프, (b) 평균 합산된 신호 누적 그래프

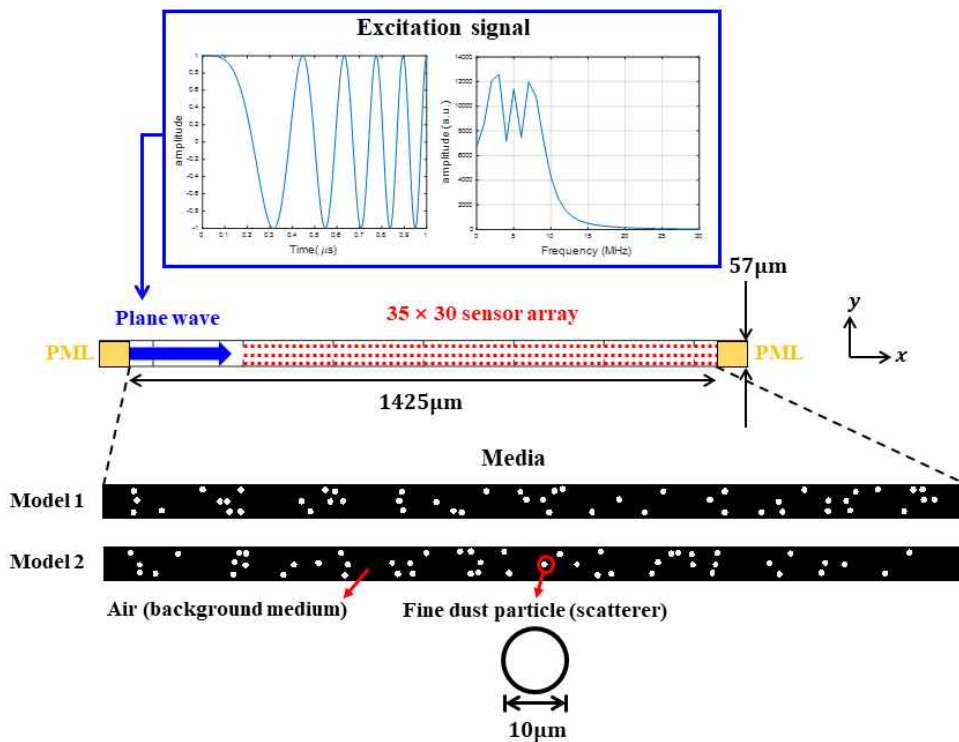
- 시뮬레이션 결과 가진 신호의 중심 주파수인 5MHz를 대상으로 미세먼지 부피비 예측에 대한 오차 결과를 표 9에 나타내었다. 미세먼지 개수 밀도는 2-D 시뮬레이션 공간 대비 각 부피비에 따른 개수로 계산되어 $1/mm^2$ 의 단위이다. 산란 면적(σ_T)은 2-D 시뮬레이션에서 mm 의 단위를 갖는 산란 반경으로 치환되며, 1-pixel model 시뮬레이션에서는 미세먼지로 설정된 그리드의 사각형 면적을 등가원형면적으로 환산한 후 계산된 지름보다 5배 작은 $1.37\mu m$ 으로 가정하였다. 각 부피비에 해당하는 오차는 개수 밀도 단위 최소 0.7 최대 24.9로 계산되었다(정확도 97%).

[표 9] 1-pixel model 시뮬레이션 결과 (5MHz, $\sigma = 1.37\mu m$)

Volume fraction	0.01 %	0.1 %	1 %
$\alpha(Np/mm)$	0.0038	0.0236	0.2569
$l_s(mm)$	263.2	42.37	3.893
n_exact ($1/mm^2$)	2.12	21.25	212.5
n_calculate ($1/mm^2$)	2.78	17.24	187.62
error (%)	-0.7	4.0	24.9

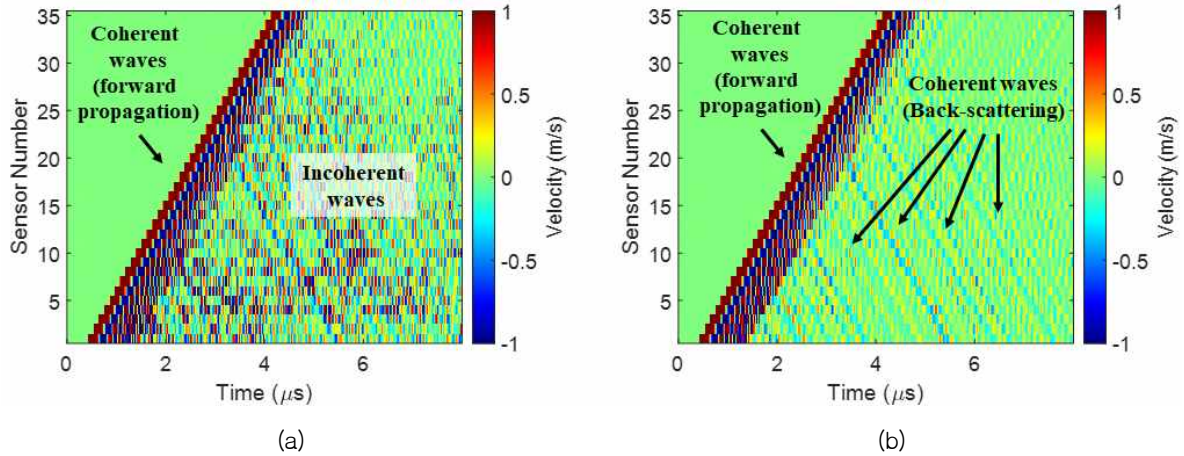
(나) 미세먼지 농도에 따른 다중 산란 시뮬레이션 (standard particle model)

- standard particle model 시뮬레이션 모델링 개략도를 그림 40에 나타내었다. 시뮬레이션은 PM10의 미세먼지 입자를 각각 2, 5, 10, 15%의 부피비로 배치하여 진행하였다. 각 부피비에 해당하는 미세먼지의 개수밀도는 각각 259, 647, 1295, 1942개이다.
- standard particle model의 경우 표준 입자의 형상을 시뮬레이션에 반영했기 때문에 1-pixel model에 비해 dx, dy 의 단위가 작고, grid의 수가 많아 해석에 많은 시간이 소요된다. 시뮬레이션 계산 시간을 향상시키고자, GPU를 활성화하여 진행하였다. Matlab은 NVIDIA CUDA를 지원하여 GPU를 활성화할 수 있다. CUDA는 GPU에서 수행하는 병렬처리 알고리즘을 C 프로그래밍언어를 사용하여 작성할 수 있는 기술이다. k-wave toolbox는 NVIDIA에서 개발한 CUDA SDK 인터페이스를 사용하여 C 프로그램을 GPU에서 실행할 수 있다. 해석 시간은 평균적으로 24시간이 소요됐다.



[그림 40] standard particle model 시뮬레이션 모델링 개략도

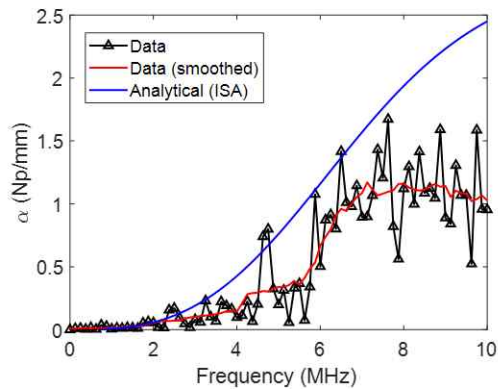
- 그림 41과 같이 신호는 각 부피비 모델에 대해 35×30의 센서 어레이에 의해 수집되었으며, 총 1050개의 센서로부터 계측된 신호 분석을 수행하였다. 신호는 파동의 위상이 일정한 연속적인 파동(coherent wave)과 다중 산란으로 인해 발생한 불규칙적인 위상을 가진 불규칙적인 파동(incoherent wave)로 구성되어 있다. 부피비 2%에 대한 신호와 60회의 평균합산을 진행한 신호의 신호누적 그래프는 그림 39와 같다.



[그림 41] standard particle 2% Volume fraction model B-scan 이미지

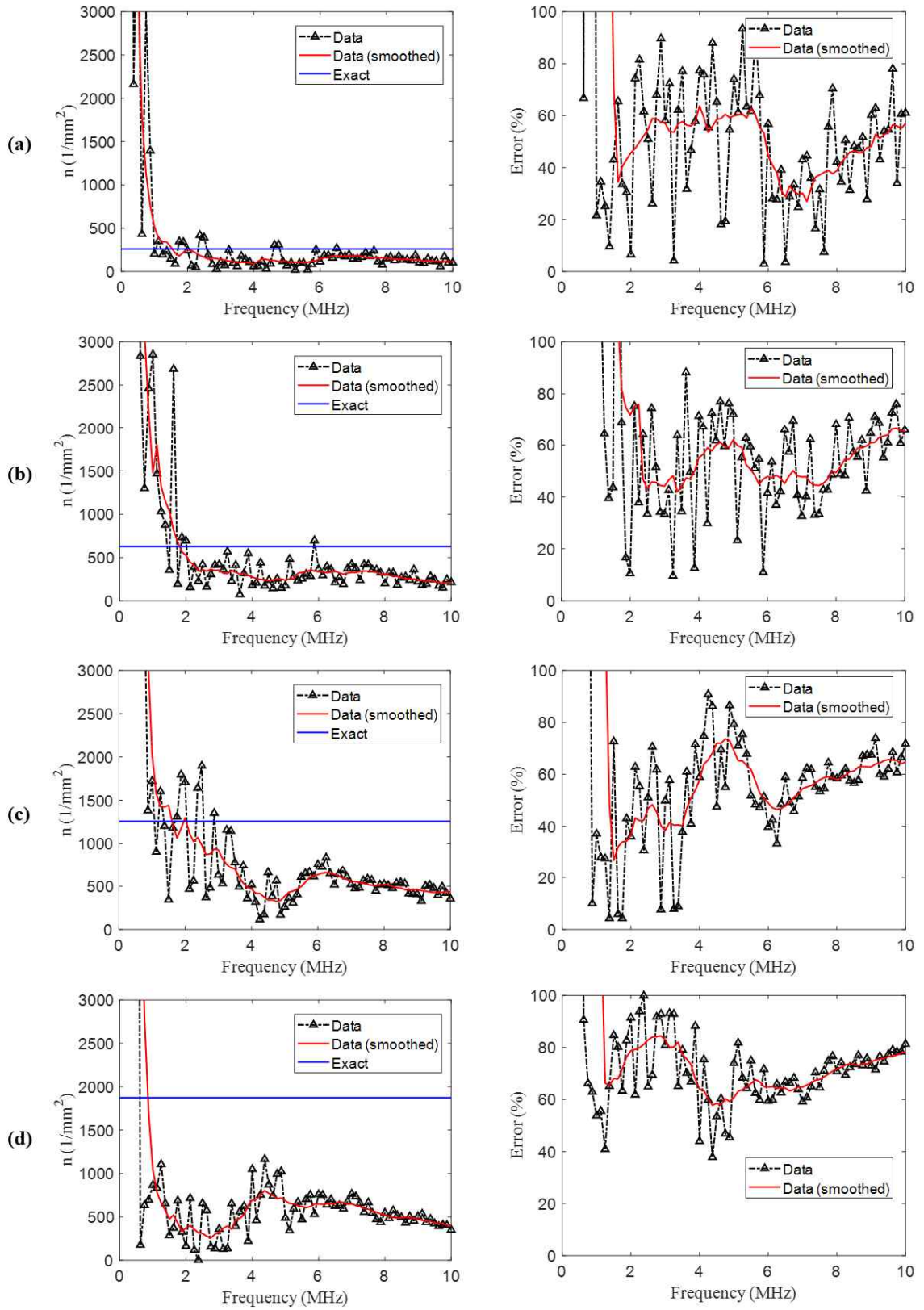
(a) 신호누적 그래프, (b) 평균합산된 신호누적 그래프

- 그림 41(b)에 나타나있는 연속적인 파동 데이터를 사용하여 계산한 감쇠율과 이론적으로 계산한 감쇠율을 그림 41에 나타냈다. 주파수의 증가에 따른 연속적인 파동 데이터를 사용한 감쇠율과 이론적인 감쇠율의 증가 추세가 일치하는 것을 보여준다.



[그림 42] 부피비 2% model에 대한 연속적인 파동 및 이론적인 감쇠율

- 부피비에 따른 다중 산란 모델을 통해 도출한 미세먼지 측정 알고리즘을 통해 계산된 개수 농도 값과 오차율은 그림 43과 같다. 부피비가 증가함에 따라 추정되는 개수밀도의 오차는 증가하는 경향을 보인다. 본 연구에서 진행한 부피비(2~15%)는 세계 보건 기구의 대기질 지침($50\mu g/m^3$)을 초과하는 수치이며 실제 미세먼지의 부피비는 1% 미만이다. 이에 가장 작은 부피비인 2%를 확인하였을 때 저주파수 영역(1MHz 미만)을 제외하고 추정된 개수 농도 값은 배치된 개수 농도 값(259개)에 근접해있다. 1MHz에서 10MHz 사이의 오차의 평균은 47.8%이며, 최소값은 5.88MHz에서 2.95%로 나타났다.

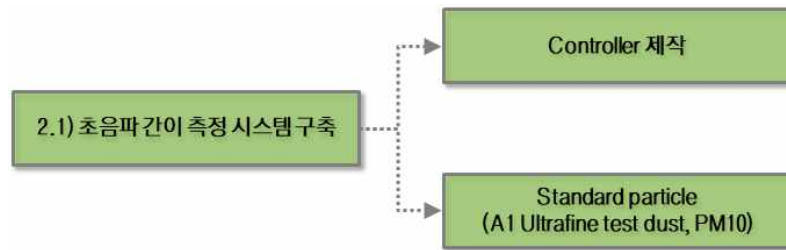


[그림 43] 다중 산란 모델을 통해 도출된 개수농도 및 오차율

(a) 2%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15%

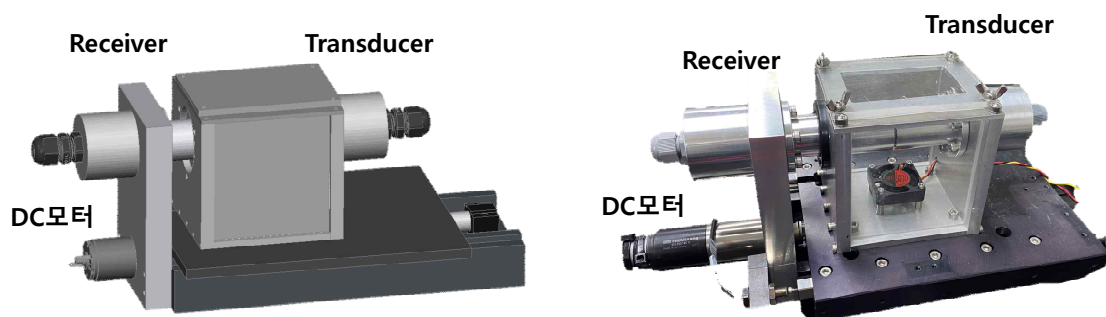
2) 초음파 간이 측정 시스템 구축 및 신호 측정

2.1) 초음파 간이 측정 시스템 구축



[그림 44] 초음파 간이 측정 시스템 구축 수행내용 모식도

- 미세먼지 농도에 따라 도출된 평균자유경로의 실험적 최적 길이를 찾고자 측정 시스템을 제작하였다. 그림 45와 같이 미세먼지 측정 시스템은 트랜스듀서, 리시버, DC모터, 컨트롤러, 트랜스듀서와 리시버의 고정 프레임으로 구성되어 있다. DC모터는 2619-024SR과 3242-024CR을 사용하였다. DC모터의 상세정보는 표 9에 나타내었다.

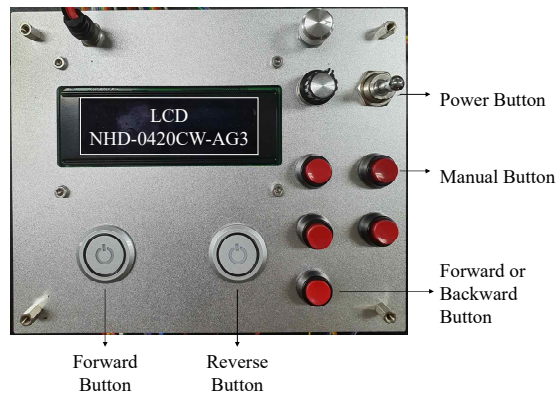


[그림 45] 미세먼지 측정 시스템

[표 10] DC모터 사양

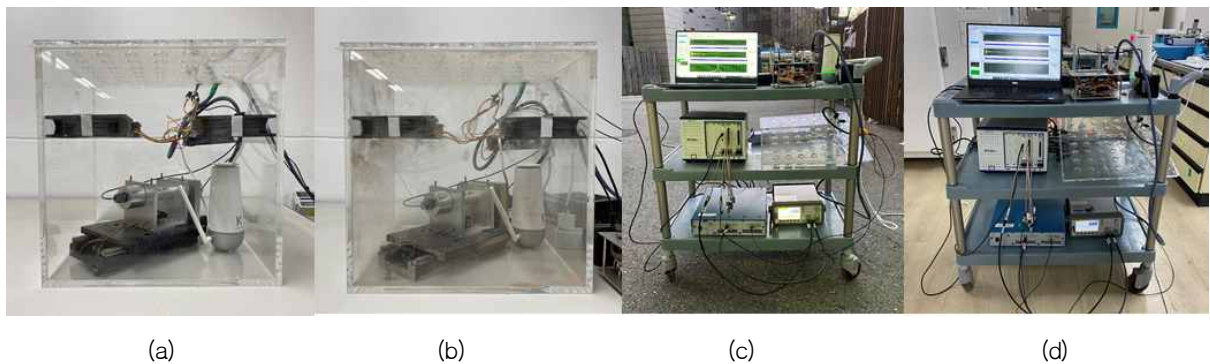
	X 축	Y 축
시리즈	2619-024SR	3242-024CR
모터 전원	24V	24V
모터 전력	1.22W (100mNm)	31W (41mNm)
기어비	112:1	68:1
엔코더 출력타입	Open Collector	Open Collector
엔코더 전원	5V	5V
엔코더 펄스	16	512
브레이크	X	O (24V)

- 그림 46은 미세먼지 측정 시스템의 컨트롤러이다. 컨트롤러는 트랜스듀서의 전진과 후진 버튼, 이동 거리를 나타내는 디스플레이, 전원 버튼, 지정한 거리에 맞춰 이동하는 버튼, 거리제한 없이 지정된 속도에 맞춰 이동하는 버튼으로 구성되어있다.



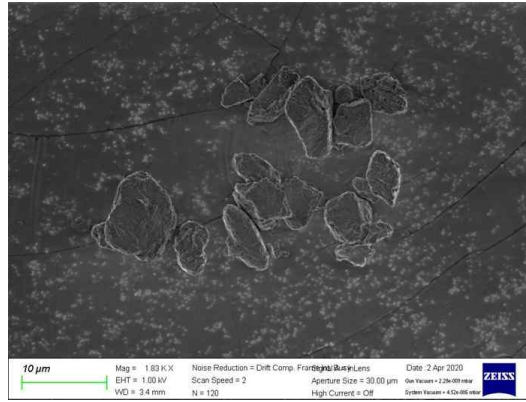
[그림 46] 조작부 상세도

- 제작된 미세먼지 측정 시스템을 통해 초음파 다중 산란 실험을 수행하였다. 실험은 400mm×400mm×400mm의 아크릴 챔버에서 진행하였으며, 챔버에는 내부 미세먼지 순환을 위해 5000RPM의 팬을 4개와 실험 중 온도와 습도를 측정하기 위해 K-weather IAQ-Station-LTE 환경 계측기를 배치하였다.
- 실험은 총 3가지 종류로 아크릴 챔버에 미세먼지 0g, 0.004g, 0.008g, 0.012g을 투입하여 진행한 실험과 실외와 실내 환경에서의 실험을 진행하였다. 실제 실험은 다음 그림 47와 같이 진행되었다.
- 챔버를 이용한 초음파 간섭 측정 시스템 실험에는 A1 Ultrafine test dust(ISO12103-1)를 사용하였으며, 시료의 입자 형상을 확인하기 위해 주사 전자 현미경을 사용하였다. 그림 48에서 볼 수 있듯이 A1 Ultrafine test dust의 공칭 직경은 10 μ m 미만이지만, 불규칙적인 형상을 가지고 있다.



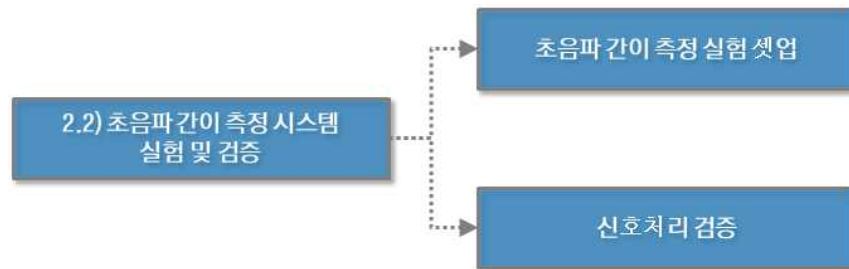
[그림 47] 초음파 간섭 측정 시스템 실험사진

(a) 실험 전 아크릴 챔버, (b) 실험 후 아크릴 챔버, (c) 실외 실험, (d) 실내 실험



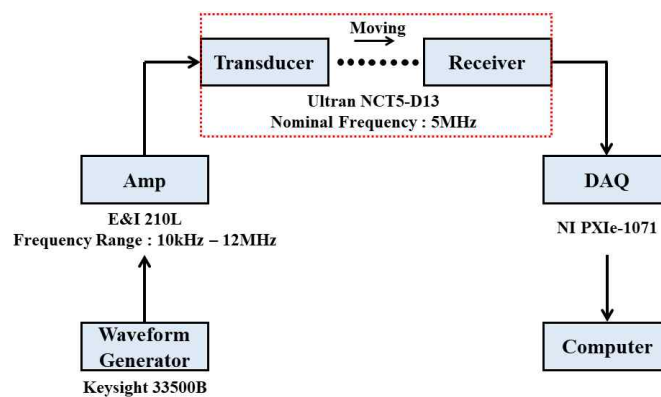
[그림 48] A1 Ultrafine test dust SEM 이미지

2.2) 초음파 간이 측정 시스템 실험 및 검증



[그림 49] 초음파 간이 측정 시스템 실험 및 검증 수행내용 모식도

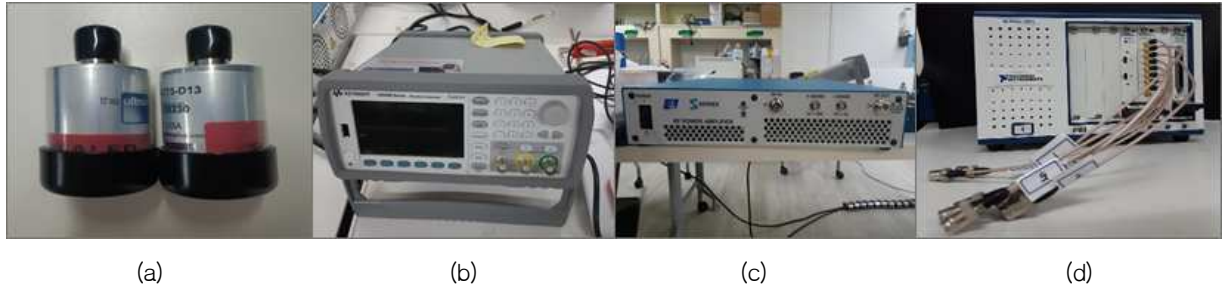
- 그림 50는 초음파 간이 측정 시스템의 개략도이다. 시스템에는 초음파 가진기(Transducer) 및 수신기(Receiver), 임의파형발생기(Arbitrary waveform generator), 신호 증폭기(Amplifier), 데이터 수집기(Data acquisition)으로 구성된다. 초음파 가진기의 경우 5MHz로 구축하였다. 이는 공기 중 $10\mu m$ 미세먼지를 산란시킬 수 있는 주파수인 34MHz의 약 1/6에 해당하는 고주파 초음파 가진기에 해당한다.



[그림 50] 초음파 간이 측정 시스템 개략도

- 초음파 간이 측정 시스템의 신호의 순서는 다음과 같다. 첫째, 임의 파형 발생기(그림 51(b))를 이용하여 파형의 형태를 만든다. 둘째, 만든 파형을 신호 증폭기(그림 51(c))를 이용하여

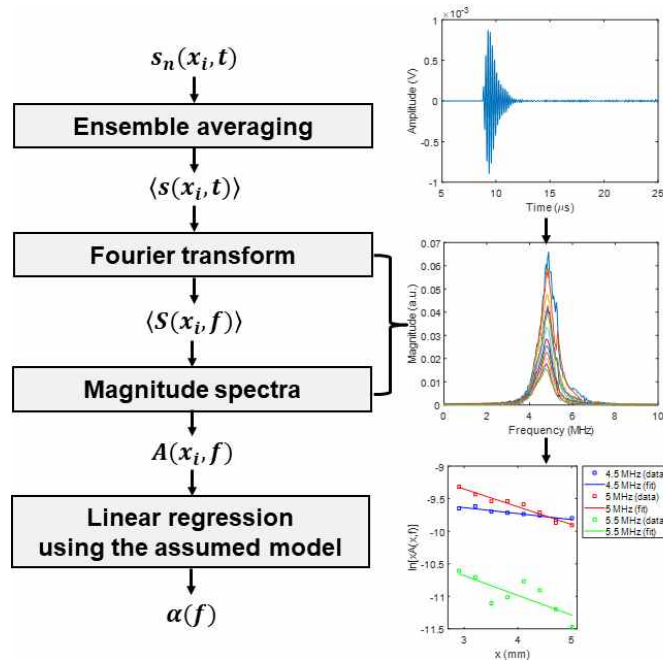
가진기를 가진시켜준다. 셋째, 가진된 신호는 수신기를 통해 데이터를 수집한다. 넷째, 데이터 수집기(그림 51(d))를 통해 컴퓨터로 신호를 저장한다.



[그림 51] 초음파 간섭 측정 시스템 구축 장비 사진;

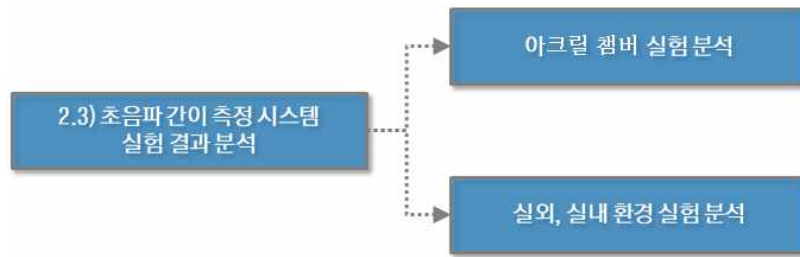
(a) Transducer, (b) Arbitrary waveform generator, (c) Amplifier, (d) Data acquisition

- 제작된 미세먼지 측정 시스템에서의 변수는 트랜스듀서와 리시버 사이의 거리이다. 평균자유경로의 최적 길이를 찾기 위한 미세먼지 측정 시스템의 거리 간격(dx)은 $300\mu m$ 로 설정하였다. 각 간격에서 평균 합산을 위해 데이터 수집을 10번 반복하였고, 실험 당 총 120개의 데이터를 수집하였다.
- 신호처리 과정을 그림 52에 표현하였으며 다음과 같이 진행된다. 평균 합산을 통해 도출한 연속적인 파동의 데이터를 주파수 영역으로 변환하고, 센서의 위치에 따라 파동 신호 진폭의 비율을 주파수 영역에서 정의한다. 이를 선형 최소자승법을 통해 감쇠율을 계산하였다.



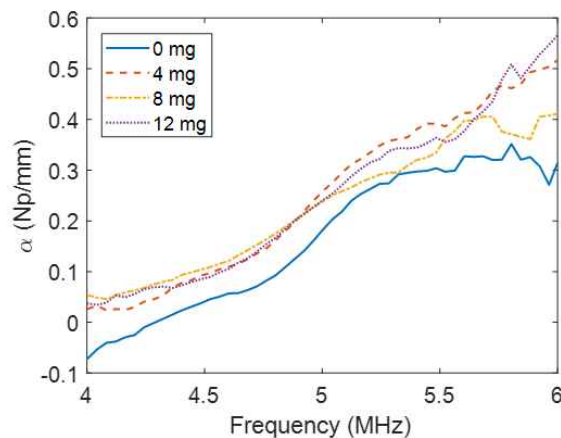
[그림 52] 감쇠율 도출을 위한 신호처리 개략도

2.3) 초음파 간섭 측정 시스템 실험 결과 분석



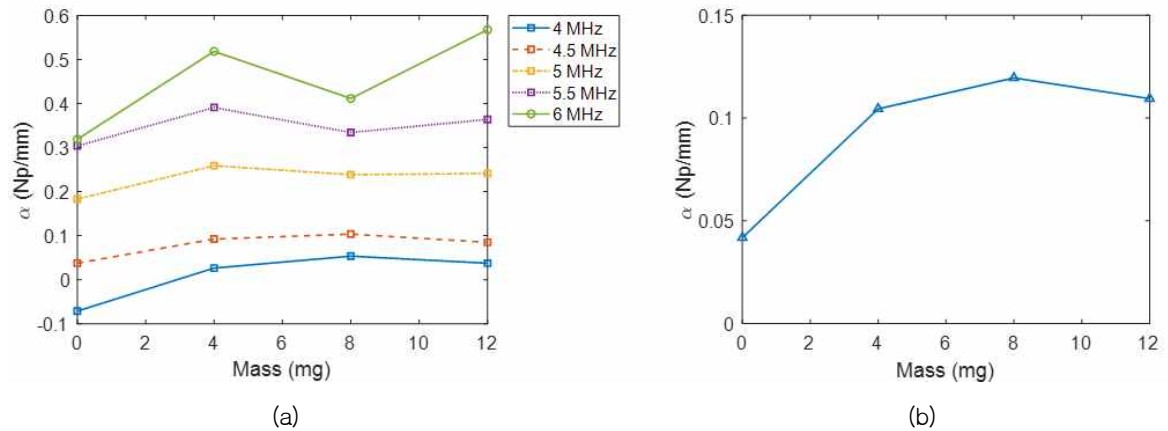
[그림 53] 초음파 간섭 측정 시스템 실험 및 검증 수행내용 모식도

- 아크릴 챔버 실험에 대해 다중산란 모델 알고리즘을 통해 도출된 감쇠는 그림 54과 같다. 미세먼지의 양과 관계 없이 모든 경우에 주파수가 증가함에 따라 산란 감쇠가 증가한다. 0.004g, 0.008g, 0.012g의 경우 미세먼지를 투여하지 않았을 때보다 더 높은 감쇠를 보이는 데, 이는 챔버 내부의 미세먼지에 의한 감쇠로 판단된다.



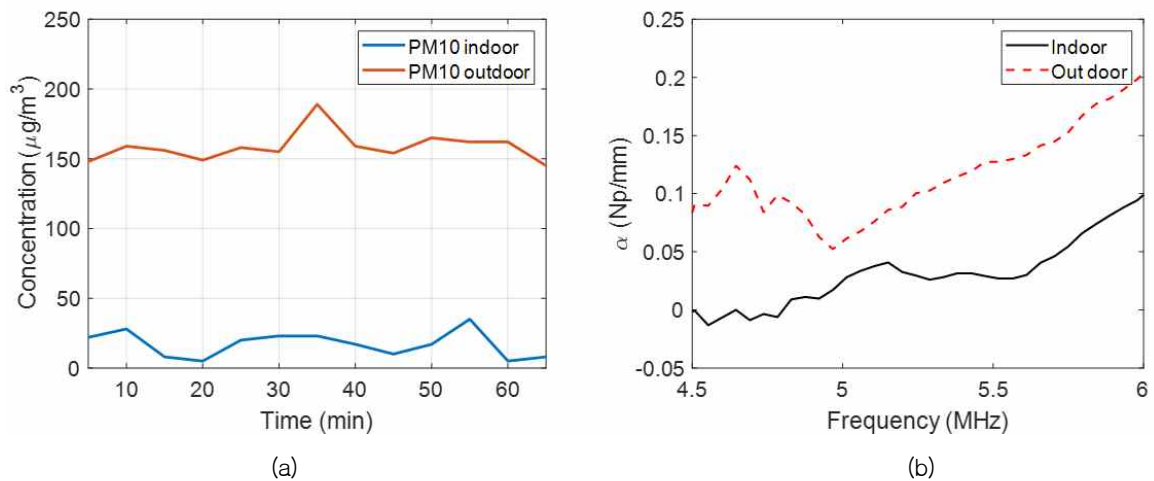
[그림 54] 미세먼지 투여량에 따른 주파수별 감쇠율

- 그림 55은 주파수별 투여한 미세먼지의 양에 대한 감쇠를 나타낸다. 그림 54(a)에서 일반적으로 미세먼지 투여량이 증가함에 따라 감쇠가 증가함을 알 수 있다. 그러나 5.5MHz 및 6MHz구간에서 0.004g에서 0.008g으로 투여량이 증가했음에도 감쇠가 낮아진 모습을 볼 수 있다. 이는 실험에서의 파동 에너지가 충분하지 않다고 판단된다.
- 이에 그림 54(b)와 같이 주파수 범위에서 평균화를 진행하였으며, 0.004g에서 0.008g으로의 주파수 감쇠가 증가함을 확인하였다.



[그림 55] 주파수에 따른 미세먼지 투여량에 대한 감쇠율
(a) 여러 주파수에 대한 감쇠율, (b) 주파수 범위에서의 평균 감쇠율

- 대기 미세먼지의 농도가 높을 때의 실외와 미세먼지 농도가 낮은 실내에서의 실험을 진행하였다. 실외의 경우 미세먼지 농도가 $96\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 실외 측정위치 및 실내에서의 미세먼지 농도를 알기위해 K-weather IAQ-Station-LTE 환경 계측기를 이용하여 PM10의 농도를 확인하였다. 측정된 PM10의 농도는 그림 56(a)과 같이 실외 평균 $170\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 실내 평균 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다.
- 실외와 실내 실험에 대해 다중산란 모델 알고리즘을 통해 도출된 감쇠는 그림 56(b)와 같다. 미세먼지의 농도가 낮은 실외에 비해 미세먼지 농도가 높은 실내에서 더 높은 감쇠를 보인다. 미세먼지 투입을 통한 아크릴 챔버에서의 실험과 실외, 실내에서의 실험은 미세먼지의 농도가 높을수록 감쇠율의 증가 추세가 명확하다는 것을 확인할 수 있다.



[그림 56] 초음파 간이 측정 시스템 실험 결과
(a) 실내, 실외 미세먼지 농도(기준), (b) 실내, 실외 실험에 대한 감쇠율(제안)

3) GUI 소프트웨어 개발

3.1) GUI 소프트웨어 개발

- 대기질(온습도, CO₂, 포름알데히드, 미세먼지, VOCs)을 실시간으로 모니터링 및 데이터 저장을 할 수 있는 GUI(Graphic user software)기반 소프트웨어를 개발하였으며, 그림 57에 나타내었다.



[그림 57] 대기질 측정 시스템 소프트웨어 및 개발된 C code 예시

- 하드웨어에 사용된 센서의 세부사항과 Firmware와 센서 간의 통신 방식은 다음과 같다.
- 개발된 대기질 측정 시스템의 소프트웨어는 다음과 같다. 각 센서의 측정값을 실시간으로 확인할 수 있으며, 계측 시간 간격은 1초이다. 또한, 계측 값은 자동으로 저장되어 추후 데이터를 확인할 수 있다.

[표 11] 센서 세부 사항

측정 센서	F/W to 센서	통신 방식	파일저장항목
온습도 센서	DHT22	I2C	Temperature
			Humidity
CO ₂	RX9-Simple	ADC	CO ₂ -State
			CO ₂ -Step
			CO ₂
포름알데히드 센서	FS00501	UART	Formaldehyde
미세먼지 센서	PM2008M	UART	Formaldehyde Range
			PM2.5
VOCs	iAQ-Core	I2C	VOCs_Dummy1
			VOCs_Status
			VOCs_Dummy1
			VOCs_tvocs

- 센서의 측정 범위 및 측정 시간을 조절하기 위해 Firmware와 Software를 개발하였으며, 개발 플랫폼, 언어, F/W와 S/W 간의 통신 방식은 다음과 같다.

[표 12] 개발 세부 사항

구분	개발 플랫폼	개발 언어	F/W to S/W 통신 방식
Firmware	Nucleo-F411RE	IAR Embedded	RS-232c to USB
	ARM 32bit Cotex -M4 CPU	C 언어	115200bps
Software	Visual Studio 2019	C#	8bit
		.Net 4.5.2	1초 간격 데이터 수집

나. 사)한국패시브건축협회



[그림 58] 연구개발 수행내용 모식도

1) 기존 환기장치 현황조사

1.1) 국내 아파트에 설치된 환기장치의 특징 조사

① 환기장치 요소별 특징

- 기존에 설치된 환기장치의 미세먼지 저감 성능 현황을 파악하기 위해 국내 기업 15곳이 공동주택을 대상으로 유통하는 2019년 이전까지 공동주택에 설치되어 온 제품 63개를 조사하였으며, 결과는 다음 표와 같다.
- 특히, 필터 구성의 경우 프리필터만 적용되었거나 필터 성능 자체의 정보가 없는 경우가 70%에 달했다. 즉, 미세먼지 문제가 두드러지기 전 설치된 환기 장치들은 먼지 집진 효율을 대부분 고려하지 않은 것으로 파악되었다.

[표 13] 환기장치의 현황

요소	필터 구성		OA 덕트 사이즈(mm)		풍량(CMH)		풍량에 따른 소비전력 분포(W)		
	필터 구성 타입	개수	OA 덕트 사이즈	개수	풍량	개수	풍량	최소 소비전력	최대 소비전력
현황	프리필터	23	100	1	100	6	100	37	55
	미들펬터	4	150	31	150	21	150	48	115
	헤파필터	13	200	10	200	13	200	70	140
	알 수 없음	21	알 수 없음	21	250	9	250	88	120
	-		-		300	0	300	-	-
					350	2	350	150	155
					알 수 없음	12	-		
합계		63		63		63	-		

1.2) 건축물 유형별 환기장치의 특징 조사

- 건축물 유형별로 적용된 환기장치의 특징을 파악하기 위해 33개 가구(공동주택 20개, 단독주택 13개)를 모집하여 환기장치를 포함한 건축물 성능을 파악하였다. 결론적으로 단독주택과 비교하면 아파트에는 저성능의 환기장치가 유지관리가 힘든 위치에 시공되어 있으며, 아파트 이외의 빌라, 다세대와 같은 공동주택은 환기장치가 거의 존재하지 않았다.
- 특히 실내 재실자의 건강에 영향을 끼치는 PM2.5 는 건축물의 기밀성능에 의해 실외에서 실내로 유입되는 정도가 다르기 때문에²¹⁾²²⁾ 본 연구에서는 blower door test를 통해 건축물의 기밀성능을 측정하였다. 그 결과 아파트는 ACH@50<3/h-1로 유지되고 있지만, 단독주택과 공동주택은 기밀성능 분포가 큰 것으로 확인되었다.

[표 14] 성능조사 건축물의 결과 값

기호	건물 유형	구조유형	준공연도	연면적 (㎡)	체적 (㎡)	기밀도 : n50 (h ⁻¹)	필터 등급 (EN799/1822)	적용 실험
선정 가구								
A	단독주택	목구조	2019	160.0	465.2	0.09	H13	본문 1.3)
B	단독주택	목구조	2018	87.7	274.5	0.32	H13	
C	아파트	철근콘크리트	2019	127.2	305.3	1.34	H13	
D	아파트	철근콘크리트	2008	116.0	290.0	2.68	H13	
E	아파트	철근콘크리트	2008	116.0	290.0	2.68	F8	
F	단독주택	철근콘크리트	2016	106.3	334.3	1.66	F7	
G	단독주택	철근콘크리트	2016	106.3	334.3	1.66	M5	
H	아파트	철근콘크리트	2008	116.0	290.0	2.68	M5	
I	아파트	철근콘크리트	2008	116.0	290.0	2.68	창문환기	
J	아파트	철근콘크리트	2012	169.0	388.0	2.74	창문환기	
K	단독주택	목구조	2015	109.9	386.7	0.62	E11 / H13 (필터박스 전/후)	본문 3.1)
L	단독주택	철근콘크리트	2015	136.0	597.1	1.30	E11 / H13 (필터박스 전/후)	
M	단독주택	목구조	2017	250.0	778.0	0.54	F7 / H13 (필터박스 전/후)	
N	공동주택*	철근콘크리트	2019	47.87	114.88	5.76	없음 / H13 (필터박스 전/후)	본문 3.2)
O	아파트	철근콘크리트	2015	30.85	78.2	6.49	H13 (필터박스 후)	본문 3.3)
비 선정 가구								
a	아파트	철근콘크리트	2019	94.2	226.1	2.17	알 수 없음	
b	아파트	철근콘크리트	2010	151.0	377.4	2.22	알 수 없음	
c	단독주택	복합구조	2014	150.1	400.0	2.23	없음	
d	공동주택*	철근콘크리트	2019	56.5	135.6	2.82	없음	
e	공동주택*	철근콘크리트	2006	68.4	215.1	3.46	-	
f	단독주택	블록조	1988	179.0	537.0	3.51	-	
g	단독주택	목구조	2017	84.3	263.3	5.42	-	
h	아파트	철근콘크리트	2004	153.7	384.2	5.42	-	
i	공동주택*	철근콘크리트	2019	47.9	114.9	5.76	-	
j	공동주택*	철근콘크리트	2019	17.9	41.1	6.38	-	
k	공동주택*	철근콘크리트	2016	30.9	78.2	6.49	-	
l	아파트	철근콘크리트	1988	56.9	131.6	6.67	-	
m	공동주택*	철근콘크리트	2019	29.6	68.1	7.93	-	
n	단독주택	블록조	1970	88.5	221.4	9.20	-	
o	공동주택*	철근콘크리트	1991	254.7	636.8	9.81	-	
p	단독주택	목구조	2010	224.0	670.0	10.03	-	
q	단독주택	블록조	1972	180.0	550.0	17.74	-	
r	공동주택*	철근콘크리트	1989	254.7	636.8	24.28	-	

* 공동주택 : 연립주택, 다세대주택 및 100세대 미만의 아파트

환기설비 의무 설치 대상 : 2006년 이후 준공된 100세대 이상 공동주택 (아파트)

21) E. Diapouli, K. Eleftheriadis, A.A. Karanasiou, S. Vratolis, O. Hermansen, I. Colbeck, M. Lazaridis, Indoor and outdoor particle number and mass concentrations in Athens. Sources, sinks and variability of aerosol parameters, Aerosol Air Qual. Res. 11 (2011) 632-642. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2010.09.0080>.

22) F. Wang, D. Meng, X. Li, J. Tan, Indoor-outdoor relationships of PM2.5 in four residential dwellings in winter in the Yangtze River Delta, China, Environ. Pollut. 215 (2016) 280-289. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.023>.

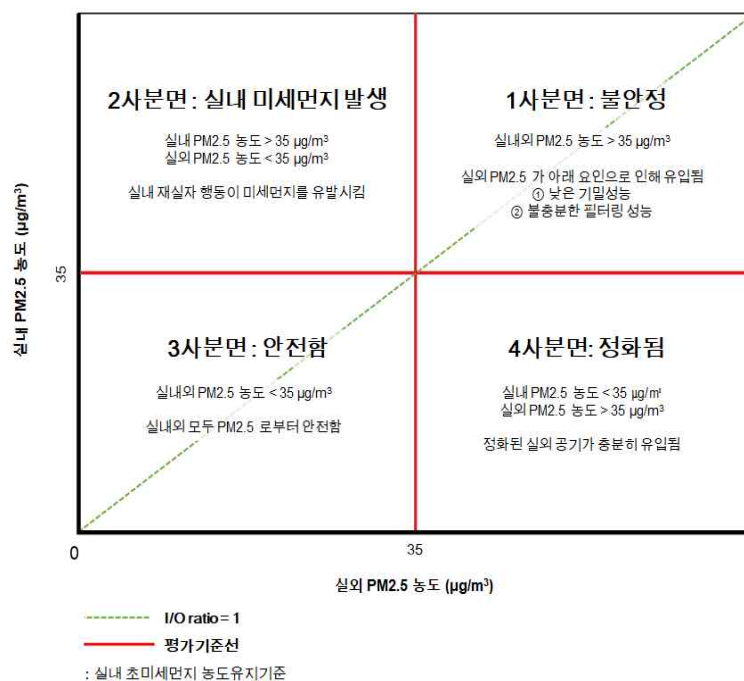
1.3) 기설치된 환기장치 필터 등급에 따른 실내 미세먼지 평가

① 실내 미세먼지 안정성 평가 방식

- 본 연구에서는 환기장치 필터링 성능의 적합성을 판별하기 위해 실내 미세먼지 농도의 안정성을 평가할 수 있는 2가지 새로운 그래프 분석방식을 도입하였다. 이는 실내 미세먼지 분석 선행연구들에서 사용되어 온 그래프 작성법에 한국의 초미세먼지 예보기준을 더한 분석방법이다.
- 실내 미세먼지 안정성 판별기준은 실외 미세먼지 농도가 예보기준 최대 수치 미만의 범위 일 때($76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만) 실내 미세먼지 농도가 보통($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이하로 유지되는지로 정하였다. 실외 미세먼지 농도의 위험성을 알리는 한국의 초미세먼지 예보는 현재 4단계로 나누어져 있다 (좋음 : $0\sim15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ / 보통 : $16\sim35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ / 나쁨 : $36\sim75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ / 매우나쁨 : $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ~). 따라서 해당 판별기준을 직관적으로 이해하기 쉽도록 각 그래프의 기준선 및 기준점을 선정하여 그래프 평가 방식을 고안하였다.

◆ 실내· 외 미세먼지 농도 안정성 분석 그래프

- x, y축에서 각각 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 기준선이 되도록 하여 사분면을 구성하였다. 각 사분면이 의미하는 실내 미세먼지 상황을 사분면의 명칭으로 하여 직관적으로 실내 미세먼지 농도의 안정성 정도를 평가할 수 있도록 하였다.



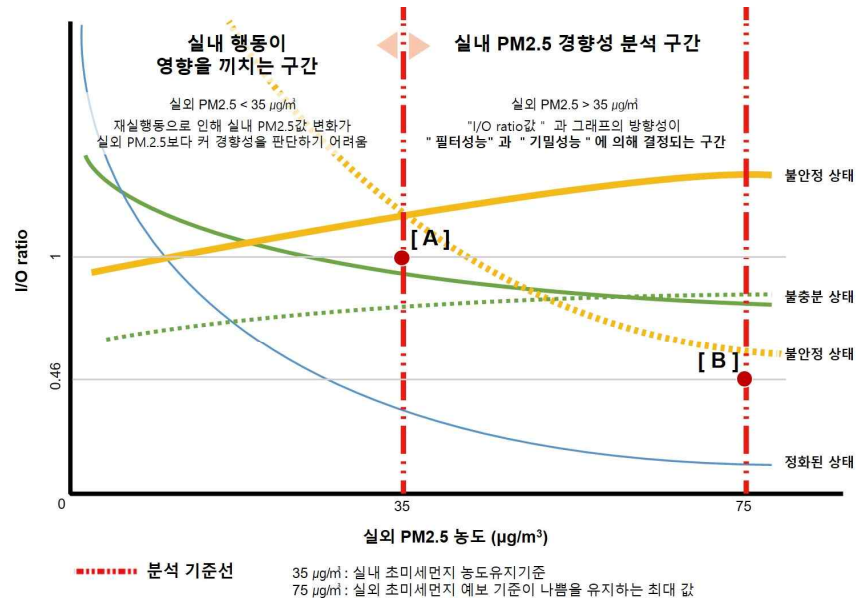
[그림 59] 실내외 PM2.5 농도 안정성 분석 그래프 예시

◆ 실외 PM2.5 농도에 따른 I/O ratio 그래프

- I/O ratio는 실내외간 미세먼지 영향성을 파악할 수 있는 지표들 중 가장 이해하기 쉽고 흔히 사용되는 값으로, (실내 미세먼지 농도 / 실외 미세먼지 농도)로 정의되는 값이다. 그러나 I/O ratio 값은 실외 미세먼지 농도가 낮을수록 유동적이기 때문에, 실외 미세먼지 농도와 함께 고려되어야 할 필요성이 있다. 선행연구들에서 수행된 I/O ratio의 값은

연구별로 매우 상이하게 나타나고 있다²³⁾. 이는 연구 디자인이 다르기 때문이기도 하지만, I/O ratio를 단순히 실측 후 실내외 PM 2.5 농도의 최대, 최소, 평균값을 바탕으로 I/O ratio의 값과 범위를 계산하기 때문에 나타나는 오류로 판단된다.

- 이에 본 연구에서는 실외 PM2.5 농도에 따른 I/O ratio 그래프에서 가구별 추세선을 초미세먼지 예보 판별지점인 A, B 와 비교하여 실내 미세먼지 안정화 정도를 판단하였다.
- 추가로, 추세선의 방향을 통한 실내 미세먼지 농도 개선 방식을 함께 명시하였다.



실내 PM2.5 상태

추세선 방향	
불안정 상태 * [A] 와 [B] 보다 높음	우상향 - 필터성능 : 낮음 - 기밀성능 : 기밀함
불충분 상태 * [A] 보다 낮지만 [B] 보다 높은 상태	우하향 - 필터성능과 기밀성능 중 적어도 1개 이상의 요인이 개선되어야 함
정화됨 * [A] 와 [B] 보다 낮음	- 필터성능 : 높음 - 기밀성능 : 기밀함

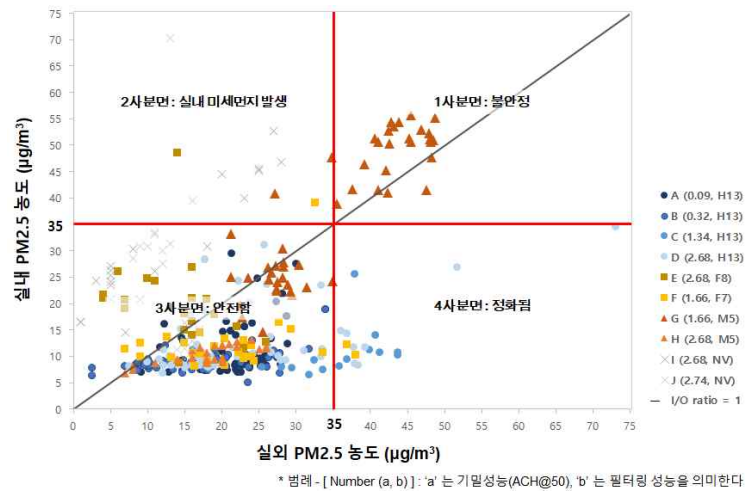
* 그래프의 R²이 0.5 미만인 경우 재실자가 장기 외출한 데이터를 통해 추가적으로 판단할 필요성이 있음
* 위 다이어그램에 그린 추세선은 각 상태를 대표하는 예시선들이다.

[그림 60] 실외 PM2.5 농도에 따른 I/O ratio그래프 예시와 분석방법

23) C. Chen, B. Zhao, Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor, Atmos. Environ. 45 (2011) 275-288. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048>.

② 실내 미세먼지 안정성 평가

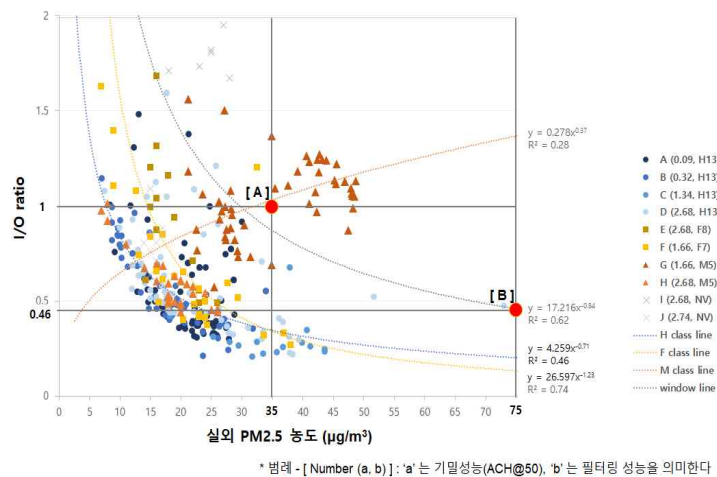
◆ 실내·외 미세먼지 농도 안정성 분석 그래프



[그림 61] A~J가구의 실내·외 미세먼지 농도 안정성 분석 그래프

– 해당 데이터들은 환기장치를 통한 실외 미세먼지 저감정도를 평가하기 위해 재실자의 행동이 없는 시간대에서만 추출되었다. 결과적으로 실내·외 미세먼지 농도 안정성 분석 그래프를 통해서 $ACH @ 50 < 3h^{-1}$ 이하의 기밀한 주거에서는 M50 이하의 필터성능이 장착된 환기장치를 작동하거나 자연환기가 수행될 경우 실내미세먼지 관리가 어렵다고 판단된다.

◆ 실외 PM2.5 농도에 따른 I/O ratio 그래프



[그림 62] A~J가구의 실외 미세먼지 농도에 따른 I/O ratio 그래프

– 실외 PM2.5의 예보기준이 나쁨 ($35 \sim 75 \mu g/m^3$)일 경우 I/O ratio는 M class > window > E class > H class > F class가 적용된 가구 순으로, 오히려 자연환기시보다 M class 필터를 적용할 경우 I/O ratio 추이가 높은 것으로 나타났으며 I/O ratio값 또한 10이상으로 우상향하여 실외 PM2.5 농도가 실내 PM2.5 농도에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

2) 프리필터 시스템 개발

2.1) 국내유통 건축□공조 필터 현황 조사

- 필터 유통 및 제조사의 홈페이지 및 카탈로그들을 통해 국내 환기□공조용으로 유통되고 있는 필터는 아래 표에 나타난 필터 종류들임을 확인하였다. 실내 환기□공조에 필터가 사용될 경우, 실내 미세먼지 전체의 99%를 차지하는 1.0 μ m 이하의 미세먼지임을 고려한다면²⁴⁾ EN규정 등급 E100이상의 성능을 갖추는 최종필터를 사용하는 것이 효용성 있다고 판단된다.

[표 15] 국내 유통 건축□공조 필터 현황

필터 종류	등급(EN)	세척가능여부	특징
프리필터	G1 ~ G4	△	재질: Special synthetic fiber or metal (Metal) 10 μ m크기의 먼지를 집진하기 위한 초기 필터
미듬필터	F7 ~ E10	X	재질: Glass fiber 1 μ m 이상의 먼지를 처리하기 위한 중간 필터
헤파필터	H13 ~ 14	X	0.3 μ m의 입자 크기에 대해 99.95 % 이상의 포집 효율을 갖는 고효율 필터
울파필터	U15~17	X	0.3 μ m의 입자 크기에서 99.999 % 이상의 포집 효율을 갖는 고효율 필터
데미스터 필터	G3	O	흩어져있는 미세한 물 · 오일 입자 제거에 사용 주로 물 □ 오일이 발생하는 다양한 타워 및 지하 공간 에어컨 시설에서 사용
카본필터	G1 ~ H13	X	냄새 제거 (담배 연기, 음식 냄새, 애완동물 냄새, 변기 등 생명 냄새) 및 암모니아 및 아세트 알데히드와 같은 유해 가스 제거
무전원정전식 필터	G3 ~ M6	O	필터에 정전기를 부여하기 위해 탄소로 구성됨 전원이 공급되지 않더라도 공기 중의 오염 물질을 정전기적으로 제거

2.2) 환기장치에 적용하기 위한 최적의 필터조합 도출

① 필터조합 A~C 도출

- 본 연구에서는 환기장치에 사용될 효율적인 필터조합을 평가하기 위해 KS B 6141규정에 따라 전문 검증기관을 통해 15가지 싱글필터 및 필터조합의 성능을 검토하였다. KS B 6141규정은 고효율 필터의 효율을 검증하는 시험으로, 0.3 μ m의 PM_{2.5}감효율을 기준으로 필터의 성능을 평가하였다.

[표 16] KS B 6141 필터성능평가 규정에 따른 필터 효율 및 압력손실 평가결과

단일필터 (두께 mm)	0.3 μ m에서의 효율 (%)	필터조합 (두께, mm)	0.3 μ m에서의 효율 (%)	압력손실 (Pa)
M(30)	2.0			
M(50)	1.4	G(20) + M(50)	2.4	-
F(30)	38.5			
F(50)	81.0	G(20) + F(50)	83.6	-
E(30)	62.8	G(10) + F(30)+E(30)	83.0	136.1
E(50)	79.7	G(20) + E(50)	86.6	105.5
		G(10) + M(30) + H(30)	98.3	143.1
H(30)	97.0	G(10) + F(30) + H(30)	99.0	188.3
H(50)	98.3	G(20) + H(50)	98.1	172.1

M: M5, F: F8, E: E11, H: H13을 의미한다

24) Park, H., Kim, H., Kang, K. & Kim, T. (2018). Analysis of Size-resolved Characteristics on Indoor and Outdoor Particles in Korean Apartments, Architectural Institute of Korea, 38(1), 384-385.

- 결과적으로, 단일필터의 경우 필터 두께가 50T 이상이 적용되어야 80 %이상의 0.3 μm 저감이 가능한 것으로 평가되었다. 필터조합의 경우 최종 필터가 같은 등급의 성능이더라도 필터조합을 구성하는 필터갯수가 많아지면 효율이 다소 증가하는 것으로 판단된다. 동시에 필터갯수가 많아질수록 저성능 필터를 자주 갈아주어 0.3 μm 보다 큰 먼지에 의해 저하되는 최종 필터의 사용기한을 늘릴 수 있어 필터를 조합할 경우 2개보다는 3개 필터를 사용하는 것이 사용 측면에서 좋을 것으로 예상된다.
- 따라서 본 연구에서는 성능평가가 이루어진 필터조합 중 아래 3가지 필터조합을 재실자의 요구 및 환기장치의 성능에 따라 적용할 수 있는 대표 조합으로 선정하였다.

□ System A : 프리필터(G4) 10T + 미들펀터(F8) 30T + 헤파필터(H13) 30T

가장 효율이 좋은 필터조합이지만, 환기장치의 팬 성능에 의해 공급공기의 풍량이 가장 많이 줄어 들 수 있는 단점이 있음

□ System B : 프리필터(G4) 10T + 미들펀터(F8) 30T + 에파필터(E11) 30T

1.0 μm 의 효과적인 제거가 가능한 최소 등급인 E11 필터가 적용된 최소성능의 필터조합

□ System C : 프리필터(G4) 20T + 헤파필터(H13) 50T

2개의 필터로 관리가 용이하며 A조합에 비해 압력부하가 적음

② 필터조합별 VE 가치평가

- 도출된 필터조합(System A~C)의 종합적인 평가를 위해 VE가치평가를 수행하였다. 미세먼 지 저감성능인 품질향상에 가장 큰 가중치를 두고, 필터의 비용, 압력부하에 따른 환기장치의 기기안정성 및 필터제작의 제약성 4가지 기준으로 평가하여 아래 표에 나타내었다.
- 평가 결과, System C가 범용적으로 적용하기에 적합한 구성으로 도출되었으며, 보다 고성능이 요구되는 곳은 System A, 환기장치의 기기 성능이 좋지 않은 곳은 System B를 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

[표 17] VE 가치평가에 따른 결과값

5:매우 좋음 4:좋음 3:보통 2:나쁨 1:매우 나쁨										
필터조합	성능		가격		안전성		제약성		총합	순위
	가중치	50	가중치	30	가중치	10	가중치	10		
	평가등급	합계	평가등급	합계	평가등급	합계	평가등급	합계		
필터조합 A	4	200	3	90	3	30	3	30	350	2
필터조합 B	3	150	3	90	4	40	3	30	310	3
필터조합 C	4	200	4	120	3	30	2	20	370	1

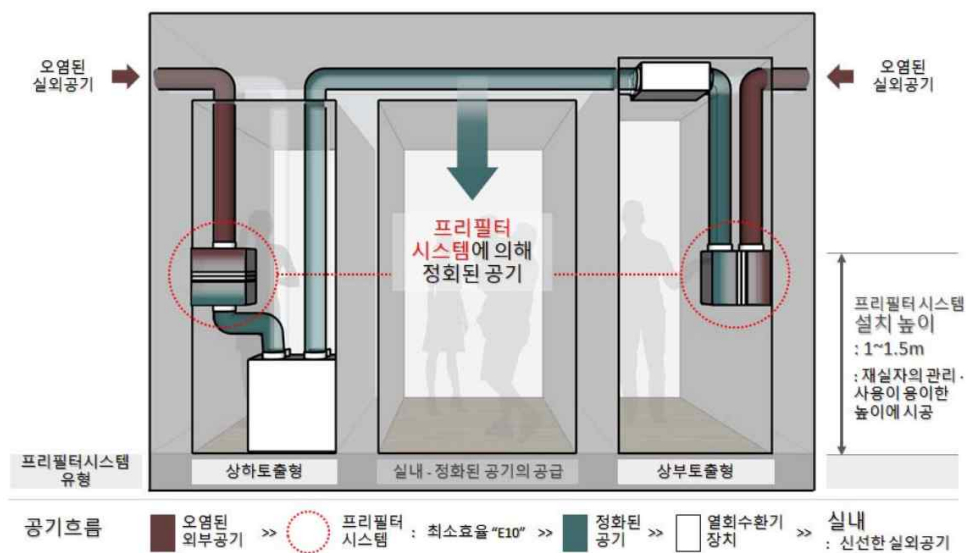
2.3) 프리필터 시스템의 필요성

① 개요 및 특징

◆ 개발의도

- 환기설비 의무 설치 규정이 기존 100세대에서 30세대로 그 설치 범위가 확대되고 있으며 필터 성능 기준 또한 EN등급기준 F8 등급으로 향상되었다. 그러나 [본문 1.3 : 기설치된 환기장치 필터 등급에 따른 실내 미세먼지 평가] 결과에 의하면 재실자의 행동이 없을 때 최소 F등급 필터가 적용되어야 하므로, 실생활에서 필터성능은 더욱 향상되어야 할 필요성이 있다. 또한, 천장 혹은 매립형 환기장치와 같이 힘든 필터교체 방식은 환기장치의 사용성을 저하시키는 주요 요인이다. 그로 인해 환기장치의 기밀성 및 기기 내부의 유지관리가 이루어지지 않을 경우 필터의 성능이 향상되더라도 그 성능을 발휘하기 힘들 것으로 판단된다²⁵⁾²⁶⁾.
- 이에 본 보고서에서는 환기장치 사용 시 필터링 성능과 사용성을 향상시켜주는 프리필터 시스템의 적용을 추천한다. 프리필터 시스템은 환기장치의 OA덕트에 부가적으로 설치하는 고성능· 고기밀한 필터조합을 가진 박스로 아래와 같은 장점이 있다.

- 기존 환기장치의 필터구성과 관계없이 실내 미세먼지 농도 저감 가능
 - 환기장치 내부로 먼지가 유입되지 않아 환기장치의 내구성 향상
 - 공간 및 사용자 특성에 맞도록 설치 위치 선정이 가능하여 환기장치의 인지성 개선 및 필터 교체· 관리용이
 - 재실자의 요구사항 및 기기의 성능을 고려한 여러 타입의 필터조합 적용 가능
- 또한, 기존에 설치되어 있는 환기장치의 형태, 설치위치, 설치공간 등 다수의 요인을 고려하여 아래 그림과 같은 2가지 형태의 프리필터 시스템을 제작하였다.



[그림 63] 프리필터 시스템의 실내 공기질 관리 다이어그램

25) How to deal with PM wisely,' Use the installed ventilation system properly'. Kweather. Published online 2019:3. <http://kweather.co.kr/upload/>

26) Yeo, I. (2019, June). Focus on solutions for apartment builders with Particulate matter. Kharn, 045, pp. 36-54

- 추가적으로 본 보고서의 성능검증 실험에 사용된 프리필터 시스템의 필터조합은 효과적인 실내 미세먼지 저감 효과를 위해 System A : G4(10T) + F8(30T) + H13(30T)가 적용되었다. 기존 환기장치에 적용되어오지 않던 필터조합을 적용할 경우, 추가적인 압력 부하가 생겨 급배기 밸런스가 붕괴될 위험성이 있기 때문에, 프리필터 시스템 시공 시 TAB를 함께 수행하여 프리필터 시스템 설치 전후의 환기횟수가 동일하도록 하였다.



[그림 64] 프리필터 시스템 설치에 따른 TAB수행 방법

② 상하토출형 프리필터 시스템

- 바닥상치형 환기장치의 OA덕트는 [외벽 환기구 - 바닥 환기장치]로 연결되는 부분이다. 외벽 환기구의 경우 보통 천장 설비층 높이에 맞춰 설치되기 때문에 천장에서 환기장치 상부까지 세로로 긴 OA덕트가 형성된다.
- 바닥상치형 환기장치의 경우 별도의 선반 위에 설치하지 않을 경우 허리를 구부리거나 앉아서 필터교환을 하는 번거로움이 있으므로, 프리필터 시스템 설치 시 재실자의 편의에 맞는 위치를 선정하여 편의성을 높일 수 있다.
- 따라서 덕트방향을 바꾸거나 연장할 필요 없이 OA덕트 부분의 일부를 제거하고 상하토출형 프리필터 시스템을 적용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

③ 상부토출형 프리필터 시스템

- 천장형(혹은 천장 매립형) 환기장치의 OA덕트는 [외벽 환기구 - 천장 환기장치]로 연결되는 부분이다. 환기장치가 위치하는 실의 경우 공간의 크기가 크지 않기 때문에 외벽환기구에서 환기장치까지의 이격거리가 짧아 OA덕트도 짧은 경향이 있다.
- 천장형 환기장치의 경우 그 설치 위치로 인해 필터교체 시 의자 혹은 디딤대가 필요하다. 또한, 기기 내부 필터 교체 시 필터 및 열교환소자의 추락 위험이 있다. 따라서 필터 교체 방식을 바꿔주는 프리필터 시스템의 적용은 그 위험성을 낮추고 편의성을 높일 수 있는 방안이다.
- 따라서 기존 OA덕트의 길이를 연장하여 재실자의 사용이 편한 위치에 상부토출형 프리필터 시스템을 적용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.



[그림 65] 상하토출형 프리필터 시스템과 상부토출형 프리필터 시스템 설치 예시도

④ 프리필터 시스템 시제품 제작

- 실제 프리필터 시스템의 미세먼지 저감 성능을 파악하기 위해 기밀성이 확보되도록 프리필터 시스템 박스를 주문제작하여 열회수환기장치에 적용하였다. 또한, 시스템 내 필터조합은 A 조합을 사용하여 미세먼지 저감 효율이 가장 높도록 하였다.



[그림 66] 프리필터 시스템 프로토타입 설치 사진

- 프리필터 시스템 설치 후 필터링 성능과 기밀시공의 여부를 확인하기 위해 아래 그림과 같이 필터조합 전·후 공간에서 미세먼지 농도 및 개수를 측정을 통한 실제 효율을 평가하였다. 해당 실측은 광산란 방식의 간이 측정기를 사용하였으며, 개폐 후 최소 1분 이상의 안정화 시간을 두고 미세먼지 농도 및 파티클 개수값을 확인하였다.



[그림 67] 프리필터 시스템 내부 필터통과 전 미세먼지 측정값 (64)



[그림 68] 프리필터 시스템 내부 필터통과 후 미세먼지 측정값 (1)

3) 프리필터 시스템의 성능검증

3.1) 환기장치 유지관리 정도에 따른 프리필터 시스템 적용 효율성 검증

① 실측 개요

- 서로 다른 유지관리 현황을 갖는 세 가구에서 실내외 미세먼지 실측을 수행하여 장치의 유지관리 중요성을 파악하였으며, 동일한 성능의 프리필터 시스템 설치를 통해 가구별 프리필터 시스템의 실내 미세먼지 저감성능을 비교하였다.

② 실측 가구의 유지관리 현황

[표 19] 실측 가구별 유지관리 현황

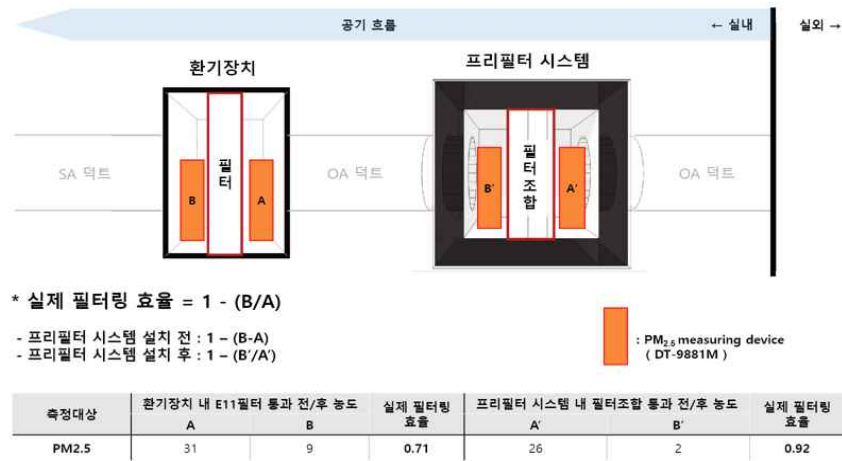
	프리필터 시스템 설치 전 유지관리 현황	특징
K 가구		유지관리가 잘 이루어지는 편이지만, 필터고정대의 특징으로 인해 필터 성능 저하가 의심되는 상황
L 가구		외벽 균열을 통해 OA덕트 내로 빗물이 유입되고, 환기장치 내부 유지관리를 수행하지 않는 상황
M 가구		먼지로 인해 외벽 환기구가 완전히 막힌 상태로, 프리필터 시스템 시공 시 방진망을 없앴

③ 프리필터 시스템 시공

[표 20] 실측 가구별 프리필터 시스템 시공 상황

가구	프리필터 시스템 설치 현황	특징
K 가구		바닥상치형 환기장치의 긴 OA덕트 일부를 제거하고 상하토출형 프리필터 시스템을 시공함
L 가구		낮고 좁은 기계실 공간으로 인해 환기장치의 위치, OA덕트 길이를 조절하여 상부토출형태의 프리필터 시스템을 설치함
M 가구		바닥상치형 환기장치임에도 OA덕트 길이가 충분하지 않아 상부토출형태 프리필터 시스템 설치

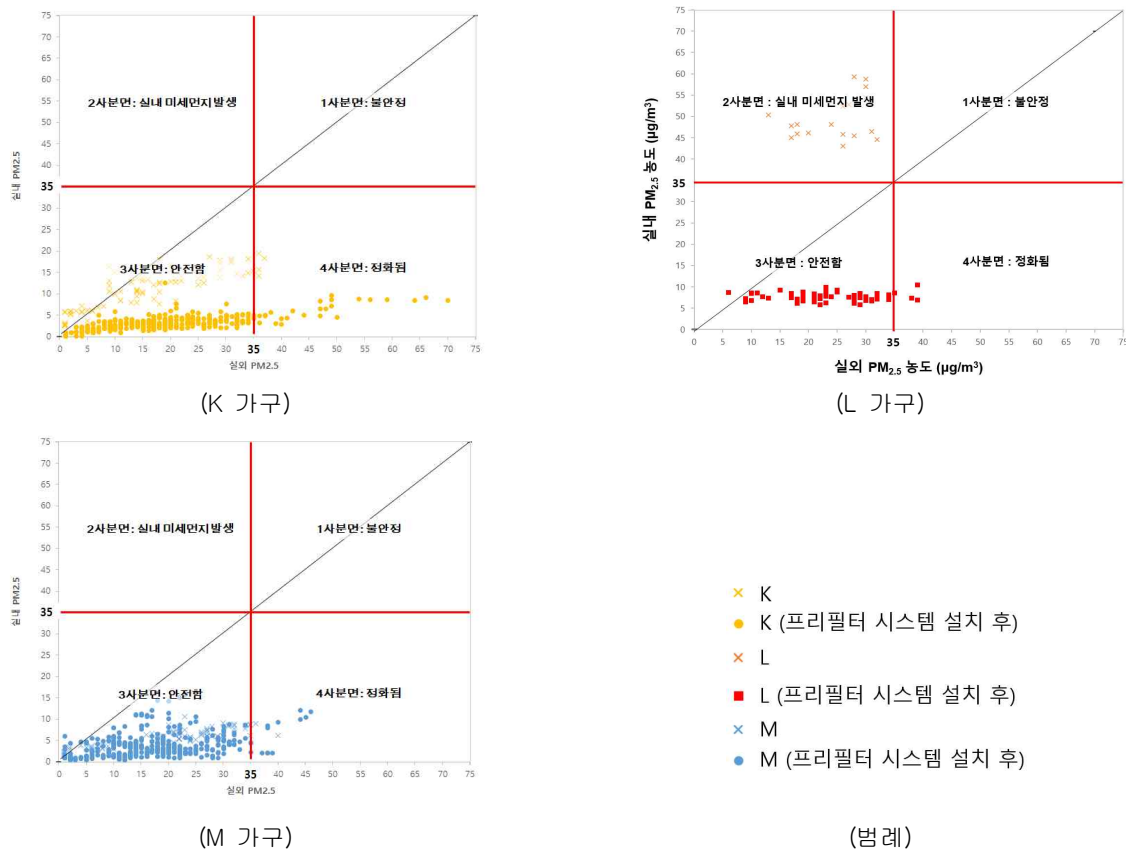
- K 가구에서는 환기장치에 기본적으로 설치된 필터와 프리필터 시스템의 실제 효율을 비교하기 위해 실제 필터링 효율을 아래 그림과 같이 측정하였다. 결과적으로 기존 환기장치 필터 성능은 기밀성을 확보하지 못하는 필터 고정대로 인해 E11 필터의 효율이 71%에 그친 것을 확인할 수 있었다. 이에 반해 프리필터 시스템의 실제 필터링 효율을 측정한 결과 92 %의 미세먼지를 저감하여 기밀하게 시공되어 있음을 확인하였다.



[그림 70] 환기장치와 프리필터 시스템의 실제 필터링 효율을 측정한 결과

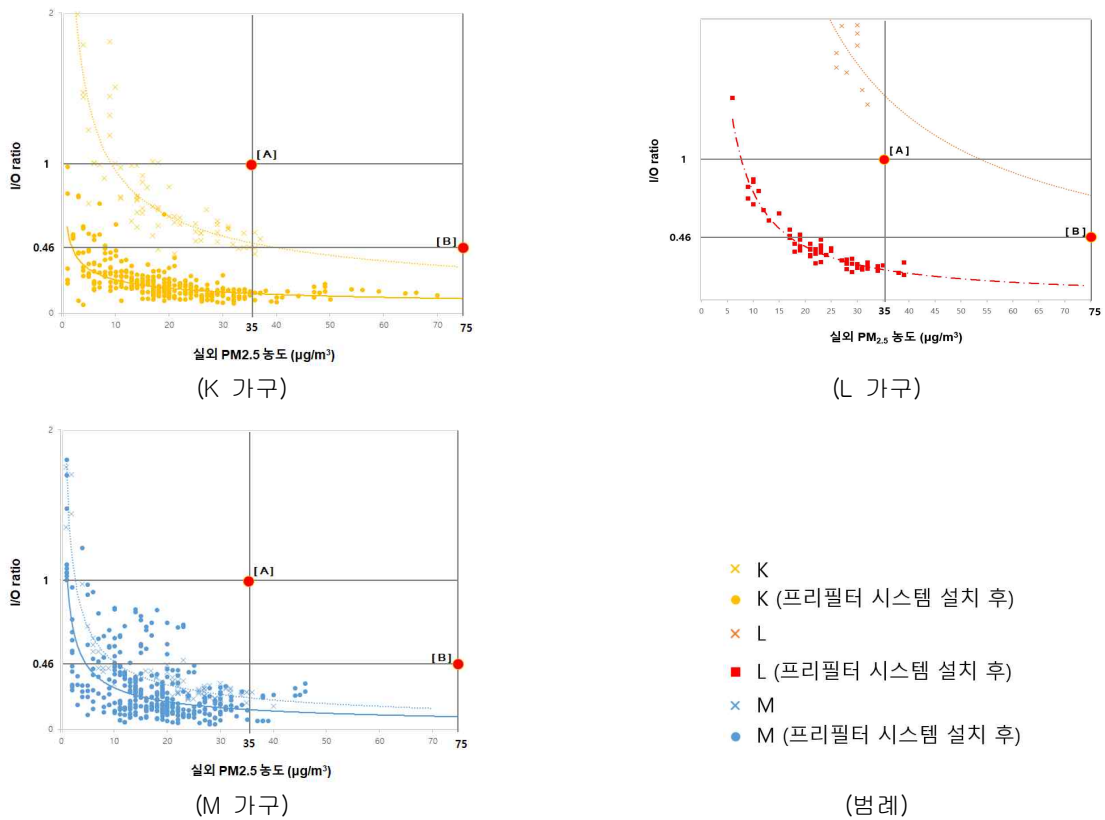
④ 실측 데이터 분석

- ◆ 실내· 외 미세먼지 농도 안정성 분석



[그림 71] K, L, M 가구의 실내외 미세먼지 농도 안정성 분석 그래프

◆ 실외 미세먼지 농도에 따른 I/O ratio 그래프 분석



[그림 72] K, L, M 가구의 실외 미세먼지 농도에 따른 I/O ratio 그래프

[표 21] K, L, M 가구의 실외 미세먼지 농도에 따른 I/O ratio 그래프 추세선 식

가구명	프리필터 시스템 설치 전 추세선 식	프리필터 시스템 설치 후 추세선 식
K 가구	$y = 3.4729x^{-0.562}$	$y = 0.5758x^{-0.415}$
L 가구	$y = 34.831x^{-0.891}$	$y = 7.9374x^{-1.015}$
M 가구	$y = 1.8057x^{-0.601}$	$y = 1.0897x^{-0.593}$

- 종합적으로 기존 환기장치 유지관리 상태가 각기 다른 K, L, M 가구에서 실외 PM2.5 농도가 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 때 프리필터 시스템 적용할 경우 실내 PM2.5 저감 정도가 각각 38%, 87%, 39%, 로 최대 56%정도의 차이가 있음을 확인하였다.
- 프리필터 시스템은 사용자의 요구에 따라 설치 위치 조절이 가능한 특징을 가지고 있다. 이러한 점에서 기존의 환기장치의 설치위치, 필터교환 방식 등으로 인한 유지관리가 힘든 가구들에 적용된다면 실내 미세먼지 저감에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

3.2) 기밀성능에 따른 프리필터 시스템 적용 효율성 검증

① 실측 개요

- 현재까지 실측을 진행한 가구들과 달리 100세대 미만의 공동주택의 경우 $ACH @ 50 = 2.82 \sim 24.28 \text{ h}^{-1}$ 로 기밀성능정도가 넓은 범위를 갖고 있다. 실외 공기질 악화와 환기의 중요성이 대두되면서 환기장치 설치 의무 기준이 100세대에서 30세대로 확대되고 있지만, 기밀성능과 관련된 성능기준은 제정되지 않은 상태이다. 이에 $ACH@50=5.76 \text{ h}^{-1}$ 의 기밀하지 않은 가구를 실측 대상으로 선정하고 프리필터 시스템을 설치하여 H13의 고성능 필터링이 실내 미세먼지 농도에 어느 정도 영향을 끼치는지 파악하고자 하였다.

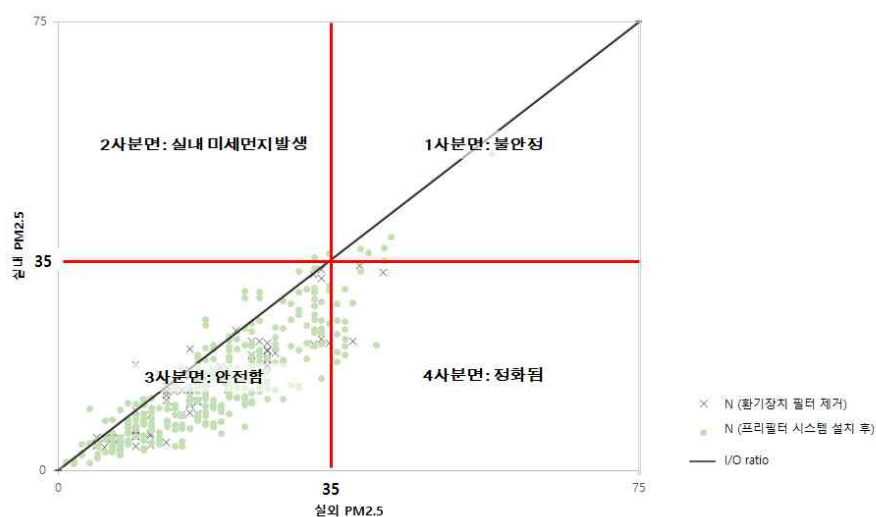
② 프리필터 시스템 시공

[표 22] 실측 가구별 프리필터 시스템 시공 상황

가구	프리필터 시스템 설치 현황	특징
N 가구		환기장치 설치가 기본적으로 되어있지 않은 가구로, 거실 창호 공간 일부에 단열재 / 덕트를 시공하여 환기장치를 설치 덕트형이 아닌 카세트형 환기장치로 거실에서만 급배기가 이루어지며, 측정기기 또한 거실에 위치함

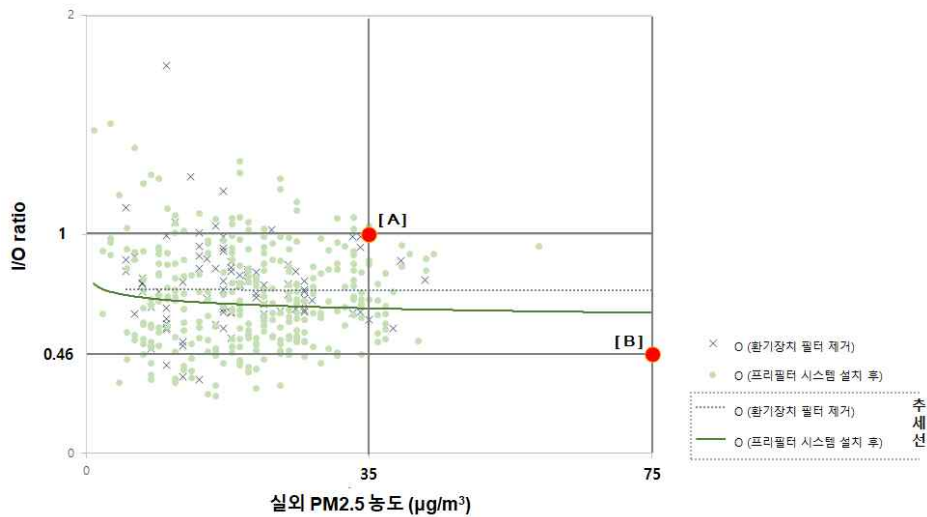
③ 실측 데이터 분석

- ◆ 실내· 외 미세먼지 농도 안정성 분석



[그림 73] N 가구의 실내· 외 미세먼지 농도 안정성 분석 그래프

◆ 실외 미세먼지 농도에 따른 I/O ratio 그래프 분석



[그림 74] N가구의 실외 미세먼지 농도에 따른 I/O ratio 그래프

[표 23] N 가구의 실외 미세먼지 농도에 따른 I/O ratio 그래프 추세선 식

가구명	거듭제곱 추세선 식	가구명	거듭제곱 추세선 식
N 가구	$y = 0.7518x^{-0.002}$	N 가구 (프리필터 시스템 설치 후)	$y = 0.7749x^{-0.045}$

- 프리필터 시스템 설치 전·후 추세선 기울기는 우하향에 속하면서 거의 평행한 상태에 가깝다. 이는 환기장치에서 필터링 되어 실내로 공급되는 풍량 만큼의 공기가 낮은 기밀성능에 의한 누기로 인해 실외 미세먼지가 재 유입되기 때문으로 예측된다. 따라서, N가구와 같이 기밀성능이 낮은 가구에서는 고성능 필터를 적용함과 동시에 ① 환기횟수 증가와 ② 창호교체 등을 통한 기밀성능 향상이 함께 수행될 필요가 있다고 판단된다.

3.3) 공기청정기와 프리필터 시스템의 미세먼지 저감 효율 비교

① 실측 개요

- 재실자의 실내행동 중 PM2.5유발에 큰 영향을 끼치는 요리행위를 수행할 때 환기장치와 공기청정기 가동이 실내 공기질에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 실험을 진행하였다.
- 동일한 공간(실험공간 : 30.85 m²)에 적용하여야 하는 기기의 풍량을 확인한 결과, 환기장치(150 CMH)보다 공기청정기(285.79 CMH)의 규정이 1.91배 크도록 규정되어 있음을 알 수 있다.

◆ 환기장치

: 환기장치는 한국의 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙에 의거하여 환기횟수가 0.5 h⁻¹회에 부합하도록 150 CMH의 용량을 가지는 제품을 사용하였으며, 공기청정기와 비슷한 조합인 G(10) + F(30) + H(30)의 필터조합을 갖는 프리필터 시스템을 설치하여 실험을 진행하였다.

◆ 공기청정기

: 한국의 공기청정기의 경우 KS규정에 따라 표준사용면적을 기기 스펙에 명시하게 되어있으며, 한국소비자원에서는 사용공간의 130 %에 해당하는 표준사용면적을 적정 수준으로 권장하고 있다. 따라서 실험을 진행한 30.85 m²공간에 부합하는 공기청정기의 표준사용면적은 40.10 m²으로, 본 연구에서도 40 m²의 표준사용면적을 가지는 공기청정기를 선택하였다.

: KS C 9314에서 사용하는 표준사용면적 식들을 역산하여 최대 풍량이 285.79 CMH임을 계산하였다.

② 프리필터 시스템 시공

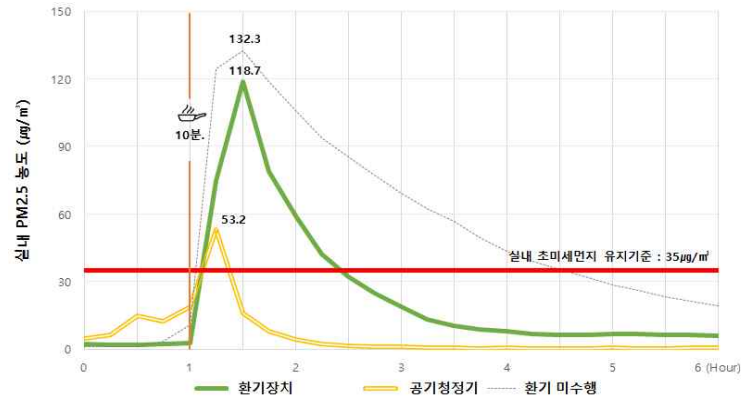
[표 24] 실측 가구별 프리필터 시스템 시공 상황

가구	프리필터 시스템 설치 현황	특징
○ 가구		환기장치 설치가 기본적으로 되어있지 않은 가구로, 거실 창호 공간 일부에 단열재 / 덕트를 시공하여 환기장치를 설치

③ 실측 데이터 분석

◆ PM2.5 분석

- 피크농도값을 달성하는데 소요 시간은 공기청정기가 15분, 환기장치와 환기 미수행의 경우 30분으로 1:2의 비를 가짐을 확인하였으며 실내 초미세먼지 유지기준 농도에 도달하는 시간은 가열시작 후 공기청정기가 30분, 환기장치가 1시간 30분, 환기 미수행이 3시간 30분으로 측정되었다.
- 이를 통해 PM2.5 발생농도의 피크값을 크게 줄인 공기청정기가 환기장치에 비해 1/3시간 만에 실내 PM2.5를 안정적으로 유지시킬 수 있음을 확인하였다.



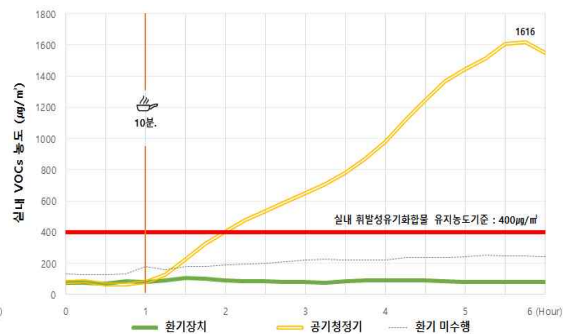
[그림 75] 요리 시 공기질 관리방식 별 실내 PM2.5 농도

◆ CO₂, VOCs 분석

- PM2.5 농도 분석과 달리 공기청정기 가동 시 CO₂농도와 VOCs농도가 가장 높은 수치를 기록함을 확인할 수 있다. CO₂와 VOCs가 지속적으로 증가하는 것은 기름을 별도의 장소로 치우지 않아 가열된 기름에서 계속적으로 발생하는 것으로 추정된다.



[그림 76] 요리 시 공기질 관리방식 별
실내 CO₂ 농도



[그림 77] 요리 시 공기질 관리방식 별
실내 VOCs 농도

- 결론적으로, CO₂, VOCs를 포함한 실내 공기질을 유지하려면 환기장치를 24시간 가동하는 것이 추천되며, 체적에 맞는 환기장치와 공기청정기기 사용 시 공기청정기가 약 2배정도의 풍량을 가지기 때문에 실내 재실자가 PM2.5를 발생시키는 행위를 할 경우 공기청정기의 일시적인 가동이 필요하다.

3.4) 결론

- 본 연구과제에서 개발한 프리필터 시스템은 환기장치의 필터링 성능을 향상시키는 장치로, 프로토타입의 미세먼지 필터링 성능이 90% 이상 확보됨을 앞선 내용에서 확인할 수 있다.
- 그러나, 실외 미세먼지가 실내로 유입되는 방식은 크게 아래 2가지로, 환기장치만의 성능 향상을 통해서 완벽한 실내 미세먼지 저감을 달성하기 어렵다.
 - 환기설비의 미흡한 필터링 성능으로 인해 유입
 - 건축물의 기밀하지 못한 부위를 통해 유입
- 따라서 본 연구의 목표인 ‘공동주택의 미세먼지 70% 유입 성능’은 실내 재실자에게 직접적으로 영향을 끼치는 실내 미세먼지 농도를 기준으로 하며, 프리필터 시스템 설치 전·후의 실내 미세먼지 농도 저감률을 의미한다.
- 3.1)의 경우 공동주택의 기밀성능이 $ACH@50 < 3h^{-1}$ 에 해당하는 3개 주택에 프리필터 시스템을 설치하여 (실외 미세먼지농도 = $75\mu g/m^3$) 기준 38-87 %의 실내 미세먼지 농도 저감을 달성하였다. 최대 실내 미세먼지 농도 저감효율이 87%를 달성하였으므로, 목표치인 70% 이상 유입 저감에 성공하였다.
- 3.2)의 경우 공동주택보다 기밀성능이 열악한 곳($ACH@50=5.76 h^{-1}$)을 실측대상으로 하였으며, 프리필터 시스템 설치 후 실내미세먼지 농도 저감률이 14 %로, 건축물의 기밀성능의 향상 혹은 환기장치의 환기풍량 추가확보가 필요함을 확인하였다.
- 3.3)은 한 곳의 가구에서 공기청정기와 환기장치를 가동하였을 때 요리 시 미세먼지, CO₂, VOCs 농도 비교를 수행하였다. 같은 등급의 필터를 사용할 경우 환기장치의 적정 환기풍량이 공기청정기의 0.5배로 실내 미세먼지 저감성능은 다소 떨어지지만, 공기청정기를 사용할 경우 가스상 농도는 오히려 증가하기 때문에 환기장치가 종합적 실내 공기질 유지관리를 위해 필수적인 기기임을 확인하였다.

다. 기관 공동 실측

1.1) 미세먼지 초음파 측정기를 통한 프리필터 시스템 성능 검증

① 측정 개요

- 프리필터 시스템 성능 검증 및 시중에 유통되고 있는 광산란 측정 기기별 측정값 비교를 위해 9개의 광산란 측정기기와 초음파 간이 측정 시스템을 통해 실측을 수행하였다. 그래프와 함께 기기간의 오차정도를 판별하기 쉽도록 3가지 수치(R, IOA, RMSE)로 분석하였으며 각 수치는 아래의 특징을 가지고 있다²⁷⁾²⁸⁾.

- ◆ RMSE (평균제곱근편차) : 관측값 간의 상호간 편차. 0에 가까울수록 좋음
- ◆ IOA(연관성 지표) : 값의 절대값 일치하는 정도. 1에 가까울수록 좋으며 0.5이상일 경우 미세먼지 예보 시 적절한 오차율로 판단함
- ◆ R(상관계수) : 값의 증감과 관련한 정도. 1에 가까울수록 좋으며 0.7 이상일 경우 높은 연관성이 있다고 판단함

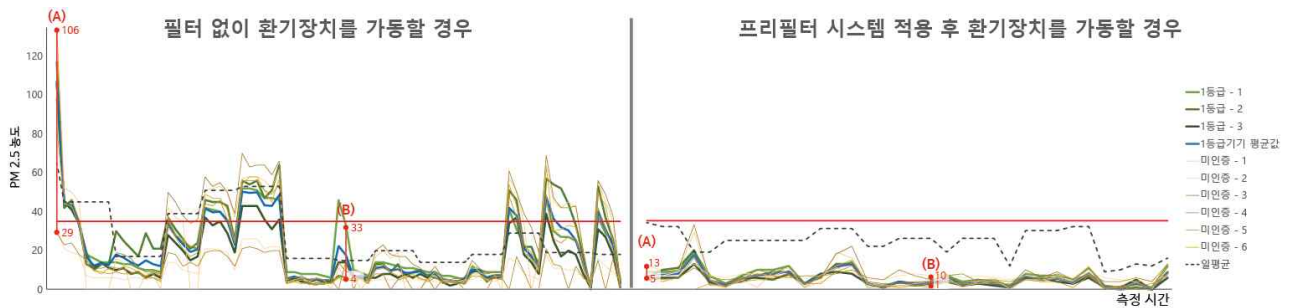
[표 25] 광산란 측정기기 및 측정사진



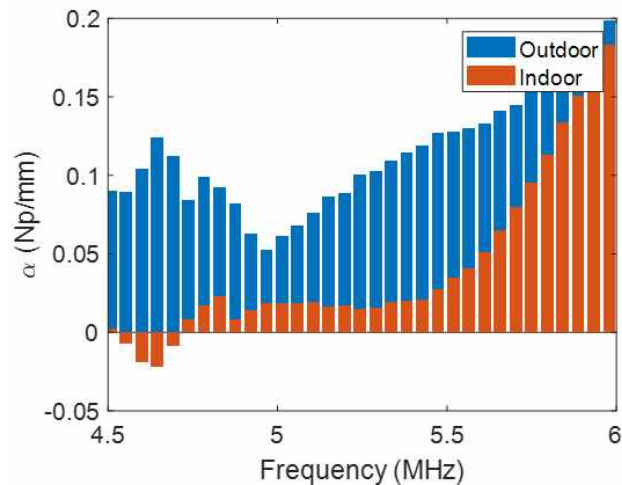
27) Jeon K, Lee J, Park J, Park H, Lee Y, Lee H, Nam K, Myoung J, Choi K, Kim T. A study of data accuracy improvement for national air quality forecasting. NIER. 2016;NIER-RP201. doi:<https://doi.org/10.23000/TRKO201700008074>

28) Mukaka MM. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. Malawi Med J 2012;24:69-71. doi:10.1016/j.cmpb.2016.01.020

② 결과값



[그림 78] 미세먼지 광산란 측정기기별 PM2.5 측정값 추이



[그림 79] 실외와 실내에서의 초음파 간섭 측정 시스템 감쇠율 비교

- 초음파 간섭 측정 실험 결과에 따르면 실외와 실내에 따른 감쇠율의 추세가 명확하였다. 필터 없이 환기장치를 가동할 경우 외벽 환기구의 방충망과 환기장치 내 열교환소자로 인해 외기 농도의 일부가 포집되어 73%가 실내로 유입되며 프리필터 시스템을 설치할 경우 외기 농도의 25% 미세먼지 실내 유입이 일어난다. 즉, 환기장치에 프리필터 시스템을 설치할 경우 필터가 없는 환기장치 대비 66%(2.92배)의 실내 미세먼지 저감이 가능하며, 추가적으로 열교환 소자의 보호가 가능해 오래 사용할 수 있는 장점이 있다. 단, 해당 실험의 경우 실외 미세먼지 평균농도가 낮아 프리필터 시스템으로 인한 저감률이 저평가된 것으로 예측된다.
- 1등급 기기의 오차율은 2가지 상황에서의 RMSE, IOA, R의 최소-최대값의 차이가 크지 않고 평균 값이 오차범위를 만족하여 주변 환경의 미세먼지 농도에 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 이에 비해 등급외 혹은 미인증 기기의 R값은 주변 미세먼지 농도가 저농도가 아닌 경우(필터없이 환기장치 가동 시 : $19.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 최소 0.39의 값을 가지기 때문에 증감추이를 판단하는 용도로만 사용하는 것이 추천된다.

[표 26] 미세먼지 광산란 측정기기별 PM2.5 오차율

필터없이 환기장치 가동			프리필터 시스템 적용 후 환기장치 가동		
실외 미세먼지 평균 농도		실내 미세먼지 평균 농도	실외 미세먼지 평균 농도		실내 미세먼지 평균 농도
27.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		19.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	38.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		5.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
동일 시간대 기기간 농도 최대값 차이 (A)			동일 시간대 기기간 농도 최대값 차이 (A)		
(최대-최소)측정값	최대측정값	최소측정값	(최대-최소)측정값	최대측정값	최소측정값
106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
동일 시간대 기기간 농도 최대 비율 (B)			동일 시간대 기기간 농도 최대 비율 (B)		
(최대/최소)측정값	최대측정값	최소측정값	(최대/최소)측정값	최대측정값	최소측정값
8.3 배	33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 배	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
동일 시간대 기기간 농도 평균 비율			동일 시간대 기기간 농도 평균 비율		
평균	평균	평균	평균	평균	평균
(최대/최소)측정값	최대측정값	최소측정값	(최대/최소)측정값	최대측정값	평균 최소측정값
3.5 배	30.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	8.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3.0 배	9.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

1등급 기기간 오차율							
	평균값	최소값	최대값		평균값	최소값	최대값
RMSE	7.78	5.61	10.50	RMSE	2.40	1.88	2.92
IOA	0.96	0.94	0.98	IOA	0.89	0.79	0.95
R	0.93	0.89	0.95	R	0.91	0.89	0.94

[1등급 기기의 평균값] - [등급외 혹은 미인증 기기] 간의 오차율							
	평균값	최소값	최대값		평균값	최소값	최대값
RMSE	14.68	5.43	25.08	RMSE	2.63	1.04	3.85
IOA	0.84	0.60	0.98	IOA	0.86	0.75	0.97
R	0.86	0.39	0.99	R	0.88	0.67	0.96

2-3. 연구 개발 성과

[표 27] 주요 연구개발성과 요약

구분	년도	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	평가목표 및 착안점						
				논문		특허	시제품	기술 보고서	소프트 웨어	홍보 성과
				SCI	비SCI					
1차년도	2019	<주관> 초음파 산란 기반 미세먼지 농도 간이측정 요소 기술 개발	다중 산란 모델 검증 및 신호 처리 효율 향상	1	1			1		1
			실험실 규모 테스트를 통한 본 실험 장치 성능향상			1 (출원)				
		<공동> 공동주택 미세먼지 유입 실태 및 필터링 시스템의 기초연구	국내 공동주택 설치 환기장치 성능 비교 분석		1			1		
			프리필터 시스템 타입별 Prototypre 개발		1			1		
2차년도	2020	<주관> 다중 산란 모델 농도 측정 기법 개발	다중 산란 모델 알고리즘 고도화		1					1
			미세먼지 농도 측정기법 개발 및 적용	1					1	
		<공동> 공동주택 실내 미세먼지 저감을 위한 프리필터 시스템 개발	프리필터 시스템 및 환기장치 연계 실증				5	1		1
			프리필터 시스템 성능검증	2						

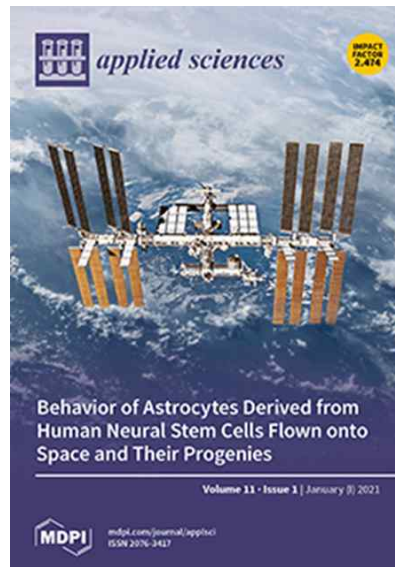
1) 논문

(1) 숭실대학교

① SCI 논문

- ㉠ Numerical analysis of ultrasonic multiple scattering for fine dust number density estimation

저자	투고일	게재승인일	발행처	ISSN
Homin Song, Hajin Choi, Ukyong Woo	2020.12.12	2021.01.05	Journal of Applied Sciences	2076-3471



Numerical Analysis of Ultrasonic Multiple Scattering for Fine Dust Number Density Estimation

Homin Song ¹, Ukyong Woo ² and Hajin Choi ^{2,*}

¹ Department of Mechanical Engineering-Engineering Mechanics, Michigan Technological University, Houghton, MI 49921, USA; shm3313@gmail.com

² School of Architecture, Soongsil University, Seoul 06978, Korea; ukdragon@soongsil.ac.kr

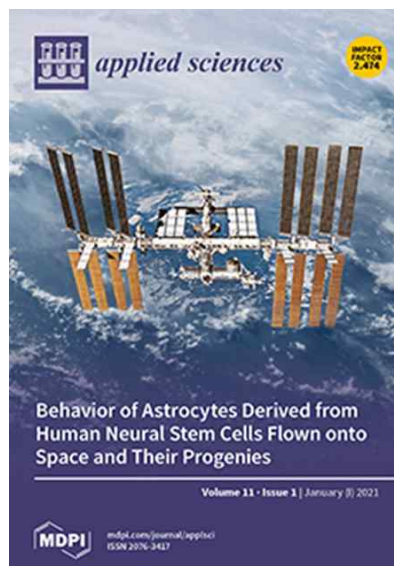
* Correspondence: hjchoi@ssu.ac.kr

Abstract: In this study, a method is presented for estimating the number density of fine dust particles (the number of particles per unit area) through numerical simulations of multiple scattered ultrasonic wavefields. The theoretical background of the multiple scattering of ultrasonic waves under different regimes is introduced. A series of numerical simulations were performed to generate multiple scattered ultrasonic wavefield data. The generated datasets are subsequently processed using an ultrasound data processing approach to estimate the number density of fine dust particles in the air based on the independent scattering approximation theory. The data processing results demonstrate that the proposed approach can estimate the number density of fine dust particles with an average error of 43.4% in the frequency band 1–10 MHz (wavenumber $\times$ particle radius ≤ 1) at a particle volume fraction of 1%. Several other factors that affect the accuracy of the number density estimation are also presented.

Keywords: ultrasound; multiple scattering; attenuation; independent scattering approximation

- ④ Experimental analysis of ultrasonic multiple scattering attenuation through the air with fine dust

저자	투고일	게재승인일	발행처	ISSN
Ukyong Woo, Hajin Choi, Homin Song	2020.12.30	2021.01.13	Journal of Applied Sciences	2076–3471



Experimental Analysis of Ultrasonic Multiple Scattering Attenuation through the Air with Fine Dust

Ukyong Woo ¹, Hajin Choi ^{1,*} and Homin Song ^{2,*}

¹ School of Architecture, Soongsil University, Seoul 06978, Korea; ukdragon@soongsil.ac.kr

² Department of Mechanical Engineering-Engineering Mechanics, Michigan Technological University, Houghton, MI 49921, USA

* Correspondence: hjchoi@ssu.ac.kr (H.C.); shm3313@gmail.com (H.S.)

Abstract: In this study, we experimentally evaluated the application of multiple scattering theory for measuring ultrasonic attenuation. Based on the independent approximation theory, the method adopted for calculating the attenuation of coherent waves through air with fine dust is discussed. To obtain a scattering wavefield, a unique ultrasonic scattering hardware was developed, and signal processing schemes were suggested. Four cases of standard particle sizes (0, 0.004, 0.008, and 0.012 g) were investigated inside a chamber. The results obtained from the experiments demonstrate that the proposed signal processing approach successfully calculates the scattering attenuation, which correlates well with the applied doses of fine dust. In addition, we discuss the irregular shape and composition of fine dust relative to the scattering cross-section.

Keywords: ultrasound; multiple scattering; attenuation; independent scattering approximation

- ② 비SCI 논문

- ㉠ 초음파 산란 기법을 적용한 미세먼지 측정법 개발

저자	투고일	게재승인일	발행처	ISSN
최하진, 우옥용	2019.10.17	2019.11.27	한국구조물진단유지 관리공학회	2234–6937



Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 23, No. 7, December 2019, pp.40~48
<https://doi.org/10.1112/jkms.2019.23.7.40>

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

초음파 산란 기법을 적용한 미세먼지 측정법 개발

최하진^{1*}, 우옥용², 홍진영³

Development of Fine Dust Measurement Method based on Ultrasonic Scattering

Hajin Choi^{1*}, Ukyong Woo², Jinyoung Hong³

Abstract: New concept of fine dust measurement method is suggested based on ultrasonic scattering. These days, fine dust has been social problem in Korea, and many researches has been conducted including the area structural maintenance. Conventional measurement system such as optical scattering and semiconductor has a limit from environmental factors like relative humidity. However, ultrasound is based on mechanical waves, which perturb mechanical properties of medium such as density and elastic constants. Using the advantage, the algorithm for fine dust measurement is derived and evaluated using 2-D finite difference method. The numerical analysis simulates ultrasonic wave propagation inside multiple scattering medium like fine dust in air. Signal processing scheme is also suggested and the results show that the error of the algorithm is around minimum of 0.7 and maximum of 24.9 in the number density unit. It is shown that cross-section of fine dust is a key parameter to improve the accuracy of algorithm.

Keywords: fine dust, particulate matter, structural maintenance, ultrasonic, scattering, sensing, numerical simulation

㉔ 비산먼지 측정 정확도 개선을 위한 시뮬레이션 초음파 다중 산란 알고리즘 검증

저자	투고일	게재승인일	발행처	ISSN
우옥용, 최하진	2020.10.30	2020.11.27	한국구조물진단유지관리공학회	2234-6937



Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 24, No. 6, December 2020, pp.119~129
<https://doi.org/10.1112/jkms.2020.24.6.119>

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

비산먼지 측정 정확도 개선을 위한 시뮬레이션 초음파 다중 산란 알고리즘 검증

우옥용¹, 최하진^{2*}

Evaluation of Ultrasonic Multiple Scattering Method to Improve the Accuracy of Fine Dust Measurement

Ukyong Woo¹, Hajin Choi^{2*}

Abstract: An ultrasonic multiple scattering simulation using cross-section of fine dust particles were proposed. These days, along with awareness of air pollution, social interest in fine dust is increasing. In the construction field, awareness of fine dust is increasing, and research on preparing various countermeasures is underway. The light scattering method fine dust meter currently in use is affected by environmental factors such as relative humidity, and reliability problems in terms of accuracy are continuously reported. However, the transmission of ultrasonic waves can directly reflect the physical change of the medium based on the mechanical wave. Using these advantages of ultrasonic waves, fine dust measurement simulation was performed using the scattering cross section and ultrasonic multiple scattering theory. The shape data of the fine dust particles were collected using a SEM (Scanning Electron Microscope), and a cross-section according to the fine dust particles was derived through numerical analysis. As a result of signal processing, the error for the number density corresponding to each cross-section is minimum 19, maximum 3455.

Keywords: fine dust, particulate matter, structural maintenance, ultrasonic, scattering, multiple scattering, sensing, numerical simulation, cross-section

(2) 사)한국패시브건축협회

① SCI 논문

㉓ Assessment of pre-filter systems to control the indoor inflow of particulate matter

저자	투고일	게재승인일	발행처	ISSN
Minju Kim, Su-Gwang Jeong, Jongil Park, Jeong-Hun Lee	2020.12.06	Submissions Being Processed	Journal of Building Engineering	2352-7102

Energy & Buildings Assessment of pre-filter systems to control the indoor inflow of particulate matter --Manuscript Draft--

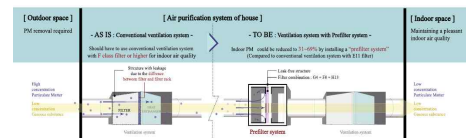
Manuscript Number:	
Article Type:	Full Length Article
Section/Category:	Indoor Environmental Quality
Keywords:	PM2.5; Ventilation system; Air leakage; Pre-filter system; Indoor/Outdoor ratio; Monitoring
Corresponding Author:	JEONG-HUN LEE
First Author:	Minju Kim
Order of Authors:	Minju Kim Su-Gwang Jeong, Doctor Jongil Park, Master Jeong-Hun Lee, Doctor
Abstract:	Ventilation systems are installed for the purpose of introducing fresh outside air to improve indoor air quality. However, since outdoor particulate matter (PM) is continuously deteriorating, an additional method to reduce the PM of supply air (SA) is necessary. Therefore, in Step-1, we tried to determine the current status of the indoor PM2.5 concentration based on the filter grade of the installed ventilation system. In Step-2, a pre-filter system with a guaranteed filtering performance and usability was installed in the outdoor air (OA) duct of the ventilation system to compensate for its shortcomings, and an indoor PM2.5 concentration reduction evaluation was conducted. To determine the filtering performance and suitability of the ventilation system, the indoor-outdoor PM2.5 concentration graph and I/O ratio-outdoor PM2.5 concentration graph were presented based on the WHO standard concentration. Additionally, the usability of the pre-filter system was improved by installing it in two houses using the same ventilation system. Consequently, an F grade filter or a higher EN grade standard should be used for general ventilation systems. Through the installation of the pre-filter system, the indoor PM2.5 concentration was reduced by 31% and 69% according to the maintenance of the ventilation system.
Suggested Reviews:	Sugyan Kim Fraunhofer Institute for Building Physics sugyan.kim@ibp.fraunhofer.de Seung-In Chang, Doctor Gyeongsang National University of Science and Technology sic@gnitech.ac.kr
Opposed Reviews:	

Abstract

Ventilation systems are installed for the purpose of introducing fresh outside air to improve indoor air quality. However, since outdoor particulate matter (PM) is continuously deteriorating, an additional method to reduce the PM of supply air (SA) is necessary. Therefore, in Step-1, we tried to determine the current status of the indoor PM2.5 concentration based on the filter grade of the installed ventilation system. In Step-2, a pre-filter system with a guaranteed filtering performance and usability was installed in the outdoor air (OA) duct of the ventilation system to compensate for its shortcomings, and an indoor PM2.5 concentration reduction evaluation was conducted. To determine the filtering performance and suitability of the ventilation system, the indoor-outdoor PM2.5 concentration graph and I/O ratio-outdoor PM2.5 concentration graph were presented based on the WHO standard concentration. Additionally, the usability of the pre-filter system was improved by installing it in two houses using the same ventilation system. Consequently, an F grade filter or a higher EN grade standard should be used for general ventilation systems. Through the installation of the pre-filter system, the indoor PM2.5 concentration was reduced by 31% and 69% according to the maintenance of the ventilation system.

Keywords

PM2.5; Ventilation system; Air leakage; Pre-filter system; Indoor/Outdoor ratio; Monitoring



㉔ Application of pre-filter system for reducing indoor PM2.5 concentrations under different relative humidity

저자	투고일	게재승인일	발행처	ISSN
Su-Gwang Jeong Minju Kim Taemin Lee Jeong-Hun Lee	2020.09.29	Accepted	Building and Environment	0360-1323

Building and Environment Application of pre-filter system for reducing indoor PM2.5 concentrations under different relative humidity --Manuscript Draft--

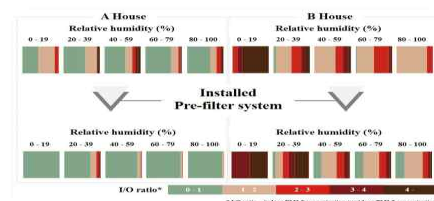
Manuscript Number:	BAE-D-20-03023R2
Article Type:	Original Research Paper
Keywords:	PM2.5; Ventilation system; Pre-filter system; I/O ratio; Relative humidity
Corresponding Author:	Jeong-Hun Lee, Doctor Passive House Institute Korea KOREA, REPUBLIC OF
First Author:	Su-Gwang Jeong
Order of Authors:	Su-Gwang Jeong Minju Kim Taemin Lee Jeong-Hun Lee, Doctor
Abstract:	In most urban environments, outdoor air pollutants affect indoor air quality. In 2019, Seoul, South Korea mandated filtered ventilation systems in newly constructed buildings to reduce PM2.5 levels. This study aimed to evaluate PM2.5 concentrations before and after the installation of a pre-filter and to analyze the behavior under different relative humidity conditions. The pre-filter system was installed in two selected houses having the same ventilation system to evaluate indoor and outdoor PM2.5 concentrations. To reduce indoor PM2.5 concentrations through the ventilation system, a high-performance filtering system (G4 + F8 + H13) was additionally installed. The ventilation system was better at maintaining indoor air quality than an air cleaner. Furthermore, the pre-filter was effective in reducing PM2.5 that was introduced from the outside than that generated indoors. A new fundamental I/O ratio analysis diagram was established to correlate indoor and outdoor PM2.5 concentrations. The results revealed that the averages of the I/O ratio were 1.36 ± 0.09 μm³/m³ and 2.25 ± 0.09 μm³/m³ for houses A and B without the pre-filter installed. After the pre-filter was installed, the average I/O ratio for house A was 0.41 ± 0.58 μm³/m³ and that for house B was 2.07 ± 0.05 μm³/m³. After pre-filter installation, the percentage of I/O ratio (range of 0-1) increased with an increase in the relative humidity, that is from 72.15% to 86.15% for house A, and from 19.81% to 50.10% for house B. Thus, installing a pre-filter can reduce indoor PM2.5 concentrations.

Abstract

In most urban environments, outdoor air pollutants affect indoor air quality. In 2019, Seoul, South Korea mandated filtered ventilation systems in newly constructed buildings to reduce PM2.5 levels. This study aimed to evaluate PM2.5 concentrations before and after the installation of a pre-filter and to analyze the behavior under different relative humidity conditions. The pre-filter system was installed in two selected houses having the same ventilation system to evaluate indoor and outdoor PM2.5 concentrations. To reduce indoor PM2.5 concentrations through the ventilation system, a high-performance filtering system (G4 + F8 + H13) was additionally installed. The ventilation system was better at maintaining indoor air quality than an air cleaner. Furthermore, the pre-filter was more effective in reducing PM2.5 that was introduced from the outside than that generated indoors. The results revealed that after installation of pre-filter system, PM2.5 (≤ 10 μg/m³) increased by 48% and 10%. Also the averages of the I/O ratio were 1.4 ± 0.09 and 2.3 ± 0.09 for houses A and B without the pre-filter installed. After the pre-filter was installed, the average I/O ratio for house A was 0.4 ± 0.58 and that for house B was 2.1 ± 0.05. After pre-filter installation, the percentage of I/O ratio (range of 0-1) increased with an increase in the relative humidity, that is from 72.1% to 95.1% for house A, and from 8.5% to 24.7% for house B.

Keywords: PM2.5; Indoor air quality; Ventilation system; Pre-filter system; I/O ratio; Relative humidity

Graphical abstract



2) 특허

(1) 송실대학교

특허명칭	등록번호	출원일	등록일	출원인 (등록권리자)
초음파 다중 산란에 따른 미세먼지의 농도를 측정하는 미세먼지 측정 장치 및 방법	10-2019-0129525	2019.10.18	심사중	송실대학교 산학협력단

3) 소프트웨어

(1) 송실대학교

SW명칭	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명
공기질 실시간 모니터링 키트	2020.11.23	송실대학교 산학협력단	2020.12.08	C-2020-048543호	송실대학교 산학협력단

3) 시제품

(1) 사)한국패시브건축협회



[그림 81] 상하토출형 프리필터 시스템 시제품



[그림 82] 상부토출형 프리필터 시스템 시제품

- 프리필터 시스템의 기밀성은 미세먼지 유출입이 되지 않기 위한 중요한 요소이다. 이를 위해 일체형 철제 박스를 제작하여 틈새가 없도록 하였다. 또한 내부에는 팽창성 있는 고무 발포단열재를, 개구부 모서리에도 팽창 테이프를 적용하여 기밀성능 유지할 수 있도록 제작하였다.
- 내부 필터의 경우 미세먼지 포집 효율이 가장 좋은 필터조합 A(G4 + F8 + H13)를 적용하여 프리필터 시스템 적용을 통한 미세먼지 저감효율 분석에 활용하였다. 사용한 프리필터 시스템 내부 필터 조합 사진을 통해 프리필터에 큰 먼지가, 미동 및 헤파필터는 입자가 확인되지 않는 미세먼지가 걸러짐을 확인할 수 있다.



[그림 83] 필터조합 A의 사용 후 사진

Technical drawing of the top view of a square table. The overall width is 385 and the overall height is 390. The central square area has a width of 120 and a height of 120. There are four rectangular attachment points, one on each side, with a width of 150 and a height of 120. The drawing shows the table's footprint and the locations of the attachment points for the legs.

〈주의〉

1. 도면과 같이 각 필터를 해당 위치에 장착할 것
2. 필터별 네임스티커가 보이게 장착하며, 탈착용 손잡이가 노출되도록 장착할 것
3. 각 필터에 손상이 가지 않도록하고, 구부러지거나 찢어지지 않도록 주의할 것.
4. 표면에 오물, 열폭, 긁힘 등이 없을 것
5. 기타 사항은 시공자와 협의할 것

Technical drawing of a rectangular object, likely a component of a machine. The drawing shows a top view and a side view. The top view is a rectangle with a width of 420 and a height of 390. The side view is a rectangle with a width of 420 and a height of 390. The drawing includes dimensions and features:

- Top view dimensions: 20, 150, 80, 150, 20 (horizontal segments), 420 (total width).
- Side view dimensions: 390 (total height).
- Features: Two small rectangular protrusions on the top edge, and two small rectangular protrusions on the side edge.

〈주의〉

1. 도면과 같이 각 필터를 해당 위치에 장착할 것
2. 필터별 네임스티커가 보이게 장착하며, 탈착용 손잡이가 노출되도록 장착할 것
3. 각 필터에 손상이 가지 않도록 하고, 구부러지거나 찢어지지 않도록 주의할 것.
4. 표면에 오물, 열폭, 긁힘 등이 없을 것
5. 기타 사항은 시공자와 협의할 것

4) 기술보고서

(1) 숭실대학교

① 1차년도

㉠ 보고서 A-1_주관

: 초음파 산란 기반 미세먼지 농도 간이 측정 요소 기술 개발 보고서

(2) 사)한국패시브건축협회

① 1차년도

㉠ 보고서 B-1_공동

: 국내 유통 필터 현황분석 및 환기설비에 적용 가능한 필터조합 성능분석 보고서

㉡ 보고서 B-2_공동

: 프리필터 시스템 구성(안) 보고서

② 2차년도

- 보고서 D_공동

: 환기장치 성능 향상을 위한 프리필터 시스템 개발 및 성능검증

5) 홍보 및 기타성과

(1) 숭실대학교

① 연구개발 관련 홍보

- 실내 상대 습도 조건에 따른 기존 측정법의 오차 및 초음파 기반 미세먼지 계측 알고리즘 개념 홍보
- 미세먼지 기존 측정법을 개선할 수 있는 초음파 기반 미세먼지 계측 알고리즘 필요성 및 효용성 관련 홍보

② 미세먼지 저감 및 물리적 산란과정에 대한 융합적 지식을 갖춘 인력배양

- 본 연구과제를 통하여 박사진학 1명, 석사 2명 배출

(2) 사)한국패시브건축협회

① 연구개발 관련 홍보

- 고농도 실외 미세먼지에 대응하는 실내 공기질 관리방식으로서 환기장치 플러그인 장치인 프리필터 시스템의 필요성 및 효용성 관련 홍보

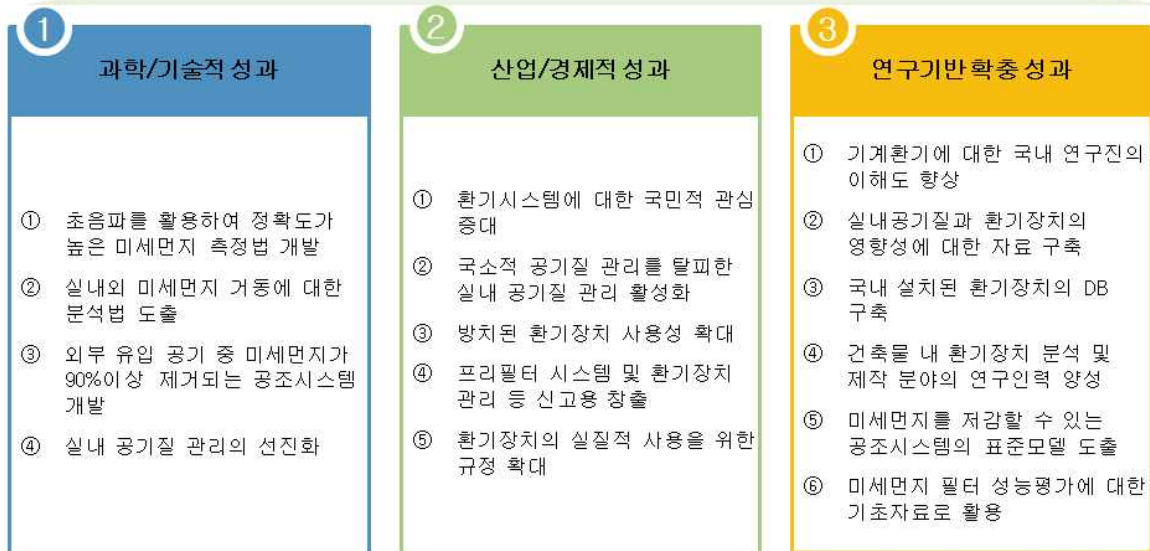
(3) 기관 공동

① 대학과 협회의 학문적/실무적 교류로 인한 대형과제 창출

- 지속적 연구 업무 교류로 연구재단 및 서울산업진흥원 과제를 도출하였으며 MOU를 통한 인력 및 실무적 협력을 공식화 함

“ 공동주택의 미세먼지 70% 유입 저감을 위한 프리필터 시스템 적용 및 초음파 측정기법 기초원천기술 개발 ”

연구 결과의 광범위한 활용가능성



[그림 85] 연구결과의 활용 가능성

1) 과학/기술적 성과

① 초음파를 활용하여 정확도가 높은 미세먼지 측정법 개발

- 기존 미세먼지 측정법은 환경적 요소인 상대습도에 취약한 구조를 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 환경요인으로 인한 계측 값의 오차를 줄일 수 있는 초음파 산란 기반 미세먼지 측정법을 개발하였다.
- 문헌 분석과 이론식 도출을 통해 입사파의 미세 입자 전달 과정을 분석하였으며, 미세먼지 밀도 추정을 위한 초음파 다중 산란 모델 이론식을 도출하였다.
- 미세먼지 개수 밀도 추정을 위한 초음파 다중산란 모델 이론식을 도출하였으며, 농도 측정 알고리즘 기법을 개발하였다.
- 미세먼지 형상 분석을 통해 기하학적 반경 데이터를 축적하였으며, 이를 통해 이론식 및 수치해석을 통한 산란면적을 도출하여 알고리즘을 고도화하였다.
- 도출된 알고리즘의 검증을 진행하였으며, 검증은 유한차분법을 기반으로 한 다중 산란 시뮬레이션을 통해 진행하였다. 개수밀도 단위 최소 0.7 개, 정확도 97%를 보인다.

② 실내외 미세먼지 거동에 대한 분석법 도출

- 실내 미세먼지가 안전하게 유지될 수 있는 필터링 성능이 환기장치에 적용되어 있는지를 평가하기 위해서는 특정 기준이 필요하였다. 이에 본 연구에서는 실내 초미세먼지 유지기준을 실내 미세먼지 농도 안전성 평가기준으로 선정하여 그래프 분석에 활용하였다.

- 한국에서는 실내 PM2.5의 농도 유지기준을 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 삼고 있으며, 실외 PM2.5 > $76\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 경우 실외 미세먼지 예보가 매우나쁨 단계로 들어서게 된다. 실내의 경우, 적어도 좋음~나쁨 수준의 실외 미세먼지일 때 안전함을 유지해야한다고 판단했기 때문에 실외 미세먼지 농도가 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 때 실내 미세먼지 농도가 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하가 유지되는지를 평가 기준으로 선정하였다.
- ③ 외부 유입 공기 중 미세먼지가 90%이상 제거되는 공조시스템 개발
 - 프리필터 시스템 내부 필터 조합의 경우 필터효율 측정 전문기관의 성능테스트를 통해 $0.3\mu\text{m}$ 입径의 먼지를 99% 저감할 수 있음을 검증받았다.
 - 또한, 프리필터 시스템 시공 후 필터조합 전후 공간에서 미세먼지 농도를 측정한 결과 92%의 효율을 가짐을 확인하였다.
- ④ 실내 공기질 관리의 선진화
 - 공기 중 오염물질은 크게 가스상 물질과 입자상 물질로 나뉜다. 실내 공기질의 가스상 물질의 경우 환기를 통해 농도 저감이 가능하고, 입자상 물질의 경우 필터를 통한 포집 또는 발생 물질의 제어를 통한 농도 저감이 가능하다.
 - 일반적으로 사용하는 공기청정기의 경우 공기 중 가스상 물질을 제어하는데 한계가 있으며 기존 환기장치의 경우 미세먼지 필터링 성능이 저조해 입자상 물질을 처리하기 힘들다. 이에 어느 하나의 기기로 실내 공기질의 종합적인 관리가 곤란한 상황이었다.
 - 본 연구에서 개발한 프리필터 시스템을 환기장치에 설치할 경우 환기와 먼지 포집 두 가지가 가능한 장점이 있다. 따라서 하나의 기기로 실내 공기질의 종합적인 관리가 가능하도록 하여 효율성과 편의성을 증대시켰다고 볼 수 있다.

2) 산업/경제적 성과

- ① 환기시스템에 대한 국민적 관심 증대
 - 당면한 실내 공기질 관리 중 가장 큰 문제인 미세먼지를 저감함과 동시에 환기를 할 수 있는 방안을 제시함으로써 실내 미세먼지 및 가스상 물질로 인한 재실자의 건강상 문제를 저감시키는 효과를 기대할 수 있다.
 - 또한 일시적으로 효과를 볼 수 있는 자연환기 및 공기청정기의 청정기능에 비해 24시간 가동을 원칙으로 하는 환기장치를 사용함으로써 쾌적한 실내 공기질의 지속성을 증대시켰다.
- ② 국소적 공기질 관리를 탈피한 실내 공기질 관리 활성화
 - 환기장치는 각 실마다 설치되어 있는 디퓨저를 통해 흡배기가 가능한 시스템으로 해당 가구 전체의 공기를 움직이게 하는 특성이 있다.
 - 따라서 프리필터 시스템이 설치된 환기장치의 경우 재실자가 많이 머무는 공간에 미세먼지가 제거된 신선한 외기를 도입하고 주방, 화장실과 같은 오염물질이 발생하는 공기를 실외로 배출하여 가구의 전반적인 실내 공기질을 관리할 수 있다.
- ③ 방치된 환기장치 사용성 확대
 - 기존에 천장에 설치되어있는 환기장치의 경우 유지관리가 힘들고 인지성이 떨어지는 단점이 존재하였다.
 - 프리필터 시스템의 경우 설치 공간, 사용자의 키, 요구 성능 등을 고려하여 재실자의 사용 편의성 증대가 가능한 장점이 있다.

④ 프리필터 시스템 및 환기장치 관리 등 신고용 창출

- 프리필터 시스템 설치 시 필터링 성능의 변화로 인해 디퓨저의 급배기 밸런스 붕괴가 발생할 수 있다. 배기 풍량이 급기 풍량보다 많아질 경우 실내 공간이 음압으로 전환되고 이로 인해 실외 미세먼지가 건축물의 틈새를 통해 오히려 더 유입될 수 있는 가능성이 있다.
- 따라서 TAB를 통한 급배기 풍량 조절이 필수적이며 이를 수행할 전문인력 양성이 필요하다.
- 또한, 프리필터 시스템 시공의 경우 OA덕트와 기기 간 기밀성능 유지 정도가 필터링 성능에 직결되어 전문가가 필요한 상황이다.

⑤ 환기장치의 실질적 사용을 위한 규정 확대

- 환기장치의 필터링 성능은 계수법 60%이상의 입자 포집률을 가지도록 규정되어있다. 해당 기준은 ASHRAE 52.2의 MERV 10~12, EN 799 의 M6 정도의 수준이다.
- 그러나 본 연구에 따르면 2006년 이후 준공된 기밀한 아파트의 경우 F등급 이상의 필터링 성능이 필요하다. 또한, 환기장치 기기의 기밀성능으로 인해 환기장치 내 필터링 성능이 제대로 발현되고 있지 않은 실정을 확인할 수 있었다.
- 또한 같은 크기의 공간에서 공기청정기보다 환기장치의 풍량이 1/2에 해당하여 일시적인으로 발생하는 실내 미세먼지에 대응하기 어려웠다.
- 따라서 본 연구 보고서를 통해 관련 규정의 확대가 필요함을 확인하였다.

⑥ 원스톱 실내 공기질 관리방식으로 인한 실내 환경유지비용 감소

- 현재 실내 미세먼지를 관리하는 방안인 공기청정기와 열순환환기(환기장치) 두 가지 방안 대비 본 연구에서 개발된 프리필터 시스템을 적용하였을 경우에 대한 경제성 분석은 다음과 같다.

[표 28] 공기청정기와 환기장치, 프리필터 시스템의 경제성 비교

	공기청정기*			환기장치 새제품**			프리필터 시스템***
평형	20평형 (66㎡)	30평형 (99㎡)	40평형 (132㎡)	20평형 (66㎡)	30평형 (99㎡)	40평형 (132㎡)	- (평형별 차이 없음)
필요기기수	2	3	4	1			1
제품비용(원)	410,000	620,000	930,000	1,750,000	1,750,000	1,800,000	220,000
설치비용(원)	0						300,000
필터교체비(원)	120,000	230,000	290,000	156,000			81,500
합계	530,000	850,000	1,220,000	1,906,000	1,906,000	1,956,000	601,500

* 공기청정기의 평균 제품비용, 필터교체비용은 가전제품전문 사이트인 노써치의 자료를 토대로 금액을 산정하였습니다.

** 환기장치 새제품의 경우 협회 자체에서 실시한 환기장치 분해비교를 통해 필터 누기가 가장 적은 국산제품을 기준으로 작성하였습니다.

*** 프리필터 시스템의 필터교체비용 가격은 필터효율이 가장 높은 조합인 G4 + F7 + H13 필터조합을 기준으로 작성하였습니다.

3) 연구기반 확충 성과

- ① 기계환기에 대한 국내 연구진의 이해도 향상
 - 본 연구과제의 결과물은 건축설계, 시공사, 연구기관 등 산학연에서 수행하고 있는 실내 공기질 관리에 대한 기초연구자료로 활용할 수 있으며 환기장치 연구에 대한 인식 제고와 활성화를 유도할 수 있다.
- ② 실내공기질과 환기장치의 영향성에 대한 자료 구축
 - 환기장치의 필터 등급에 따른 실내 미세먼지 평가를 수행하여 실내 공기질 유지를 위해서는 최소 F등급 이상의 필터가 환기장치에 적용되어야함을 도출하였다.
 - 프리필터 시스템 설치 시 환기장치 유지관리 정도에 따라 38~87%의 실내 미세먼지 저감률을 가질 수 있음을 확인하였다.
 - 기밀성능이 $ACH@50 \geq 5h^{-1}$ 인 경우 환기장치의 필터링 성능 이외 풍량을 증가시키거나 창호교체 등의 기밀성을 증가시키는 것이 필요하다.
 - 공기청정기와 환기장치의 비교 실험을 통해 가스물질을 포함한 종합적인 실내 공기질 관리를 위해서는 환기장치의 가동이 필수적임을 확인하였다.
- ③ 국내 설치된 환기장치의 DB구축
 - 기 설치된 열회수환기장치의 미세먼지 저감성능 현황을 파악하기 위해 국내 기업 15곳이 유통하는 63개 기기를 조사하여 5가지 항목(설치위치 및 규격, 필터구성 등)의 DB를 구성하였다.
- ④ 건축물 내 환기장치 분석 및 제작 분야의 연구인력 양성
 - 본 연구의 수행과정 중 현재 국내 환기장치 필터링 성능의 문제점들을 파악한 바 있다.
 - 이를 환기설비 관련 업종에서 활용할 경우 새로운 환기장치 혹은 환기장치 플러그인 기기가 나올 수 있는 바탕이 될 것으로 예상된다.
- ⑤ 미세먼지를 저감할 수 있는 공조시스템의 표준모델 도출
 - 공조시스템을 통해 실외 미세먼지를 저감하기 위해서는 고성능 필터링 구성을 기밀하게 유지할 수 있어야 한다는 조건이 있다.
 - 이에 본 연구에서는 환기장치로 실외 공기가 도달하기 이전에 프리필터 시스템에서 실외 미세먼지를 거르는 모델을 도출하였다.
- ⑥ 미세먼지 필터 성능평가에 대한 기초자료로 활용
 - 국내 실내 미세먼지 유지관리기준에 맞는 실내외 미세먼지 거동에 대한 분석법을 도출하여 필터 성능평가에 대한 기초자료로 활용될 가능성이 높다고 판단된다.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1. 목표

1) 최종 목표



[그림 86] 연구개발 목표별 TRL 단계

(1) 연구개발의 최종 목표

구분	내용
최종 목표	본 연구의 최종 목표는 공동 주택의 미세먼지 70% 유입 저감이며, 이를 위하여 (1) 초음파 산란현상을 이용한 실내 미세먼지 농도 측정의 정확도 개선, (2) 공동주택의 미세먼지유입 저감을 위한 프리필터 시스템 적용에 대해 연구한다.
세부 목표	○ 초음파 산란현상을 이용한 실내 미세먼지 농도 측정의 정확도 개선 (TRL 4) - 연구목표1: 다중 산란 모델 분석 및 적용 범위 도출 - 연구목표2: 초음파 간이측정 시스템 구축 및 신호 측정 - 연구목표3: 다중 산란 모델 알고리즘 고도화 - 연구목표4: 미세먼지 농도 측정기법 개발 및 적용 ○ 공동주택의 미세먼지유입 저감을 위한 프리필터 시스템 적용 (TRL 5) - 연구목표1: 국내 유통 필터의 유형별 성능 분석 - 연구목표2: 미세먼지 집진율 95% 이상 최적 필터링 시스템 구성(안) 도출 - 연구목표3: 프리필터 시스템 Proto-type 개발 및 효율분석 - 연구목표4: 프리필터 시스템 실증 및 Field test를 통한 성능 분석

(2) 최종성과물의 기술성숙도 설정

구분		연구착수	연구종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☒	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☒	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

최종성과물	기술성숙도(TRL)		설정근거
	시작시	종료시	
초음파 산란 기반 미세먼지농도 간이측정 기초원천기술 개발	TRL 2	TRL 4	- 기존에 연구되지 않았던 새로운 접근방식(초음파 산란 모델)을 미세먼지 농도 측정에 적용하고자 함 - 각 연차별 기술성숙도 설정근거는 다음과 같음 1차년도: 제안된 방법의 개념 및 타당성을 증명하고 핵심 요소 기술 개발 (TRL 3) 2차년도: 실험실 규모의 테스트(미세먼지 농도 측정 실험 및 프리필터 시스템 검증)를 통하여 기술을 검증 (TRL 4)
프리필터 시스템 기반 공동주택 미세먼지 실내유입 저감	TRL 3	TRL 5	- 본 연구를 통하여 개발된 프리필터 시스템은 시제품 제작의 형태로 그 성능을 검증하고자 함 - 개발된 설비 시스템은 검증된 범위 내의 유사한 기계식 환기장치와 결합하여 활용 가능하도록 핵심적인 기능 및 모듈 구성 - 각 연차별 기술성숙도 설정근거는 다음과 같음 1차년도: 프리필터 시스템을 제작하고 일부데이터를 통하여 개별적인 기능 및 활용가능성 검증 (TRL 4) 2차년도: 공동주택에 보급되어 있는 기계식 환기시스템과의 연결을 통한 일체형 검증 및 활용 가능 매뉴얼 제작 (TRL 5)

2) 연도(단계)별 개발 목표 및 결과

(1) 1차년도

구분(연도/단계))	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 년도 (2019)	초음파 산란 기반 미세먼지 농도 간이측정 요소 기술 개발	다중산란 모델 분석 및 적용 범위 도출	1. 문헌 분석 및 이론식 도출을 통한 입사파의 미세 입자 전달 과정 분석 2. 다양한 다중 산란을 바탕으로 미세먼지의 산란 모델 도출(2건) 3. 초음파 산란 분야 및 비파괴 학문의 업적이 있는 국내외 연구진의 최신 연구 동향 파악 및 연구 자문	1. 문헌 분석을 통한 이론적 다중 산란 모델 도출 2. 시뮬레이션을 통한 미세먼지 개수 밀도 추정 알고리즘 개발 (특허출원:10-2019-0129525) 3. 해외 학회 참석을 통한 해외 연구진의 초음파 다중 산란에 관한 연구 자문(Univ. of Illinois, Dr. John S. Popovis/ Argonne National Laboratory, Dr. Homin Song)
		초음파 간이측정 시스템 구축 및 신호 측정	1. 환경요인을 변수로 하는 미세먼지 대상 초음파 실험을 수행하기 위한 시스템 구축 2. 다중 산란 유효 구간 설정 및 신호 감쇠 정도 분석	1-1. 온습도 모니터링 가능한 챔버, 초음파 가진기, 수신기 구입 및 검증 완료 1-2. 초소형 센서 64 MEMS array 제작 완료 1-3. 초음파 다중 산란을 이용한 미세먼지 농도 측정 기구 제작(특허출원: 10-2019-0129525) 2-1. 실험 및 시뮬레이션을 통한 초음파 다중 산란 유효구간 및 감쇠 분석 완료 2-2. 신호처리 기법 개발 완료
	공동주택 미세먼지 개선 현황 및 필터링 시스템의 기초연구	국내 유통 필터의 유형별 성능 분석	1. 국내 유통 에어필터 유형 파악 2. 에어필터 유형 중 기계환기설비에 적용가능한 필터유형 선정 3. 열회수환기장치에 적용가능한 필터유형 조사· 분석	1. 국내 유통 에어필터 중 환기· 공조용 필터의 조사· 분석 완료 2. 환기· 공조용 필터 중 미세먼지 저감 성능에 따른 유형 재정리 완료 3. 프리필터 시스템의 미세먼지 저감성능확보 및 열회수환기장치 고장을 방지하기 위한 필터조합 마지막 여재의 필터등급 선정 완료
		필터 조합별 크기, 구성, 성능, 경제성 분석	1. 열회수환기장치에 우리가 가지 않는 저압력 필터조합구성 도출 2. 필터조합 성능, 가격, 안전성, 제약성을 고려한 가치평가 실행	1. 85-99%성능 범위의 최적 필터조합 3가지 도출 2. 3가지 필터조합에 대한 VE가치평가 완료
		미세먼지 집진율 95%이상 최적 필터링 시스템 구성(안) 도출	1. 기계환기 설비에 적용 가능한 필터조합 요건 설정 2. 설정요건 중 최소· 최대 효율을 가질 수 있는 필터조합 도출 3. 시험성능평가를 통한 객관적인 미세먼지 저감을 및 압력부하 도출	1. 필터조합 크기 및 최대· 최소 효율 설정 완료 2. 3가지 저압력 필터조합 도출 3. 필터조합의 시험성능평가 완료
		외기유입 체적량에 따른 구성 형태, 성능 분석	1. 기설치된 열회수환기장치 설치위치, 풍량, 크기, 필터링 성능 등 현황파악 실시	1-1. 열회수환기장치 63개 기기 분석을 통한 현황파악 완료 1-2. 추가적으로 기밀도에 따라 실내 미세먼지유입차이가 있을 것으로 판단되어 파티클카운터 및 농도측정기로 추가적인 실험을 할 예정
		프리필터 시스템 구성(안) 도출	1. 열회수환기장치 특징에 따라 실제 설치가 가능하도록 형태 설계 2. 시스템 내 필터조합의 성능이 저하를 방지하기 위해 기밀하게 설계	1. 열회수환기장치 설치위치에 따른 2가지 유형의 구성(안) 도출 2. 실제 프로토타입 제작 및 필터조합 성능실험을 통한 프리필터 시스템 테스트 완료

(2) 2차년도

구분(연도/단계))	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차 년도 (2020)	다중 산란 모델 검증 및 미세먼지 농도 측정 기법 개발	다중 산란 모델 검증 및 신호 처리 기법 개발	1. 다중산란 모델 알고리즘 고도화 2. 미세먼지 산란 모델 도출	1. 문헌조사 및 주사전자현미경을 통해 다양한 미세먼지 입자의 형상데이터 수집 완료 2. 형상데이터에 따른 수치해석을 통한 산란면적 도출 3. 형상데이터에 대한 산란모델 도출(k-wave simulation)
		미세먼지 농도 측정 기법 개발 및 적용	1. 초음파 간이 측정 시스템 실험 및 검증 2. 초음파 간이 측정 시스템 실험 결과 분석	1. 공기질 실시간 모니터링 키트 소프트웨어 등록(등록 번호 : C-2020-048543호) 2. 측정부의 거리조절이 되는 초음파 간이측정 시스템 개발 3. 초음파 간이 측정 시스템 실험 및 검증(미세먼지 투여량 : 0.004, 0.008, 0.012g)
	공동주택 미세먼지 개선 현황 및 필터링 시스템의 기초연구	국내 공동주택 설치 환기장치 성능 비교 분석	1. 건축물 유형별 환기장치의 구성요소 파악 2. 프리필터 시스템 설치 전 실측을 통한 실내 환경 평가 수행으로 현재 환기장치의 필터링 성능을 확인	1. 총 33개의 가구를 아파트, 단독주택, 공동주택(100세대 미만)으로 분류하였고, 유형별로 적용된 환기장치의 특징을 파악함 2. 기밀도 30이하 10개가구의 환기장치 가동 시 실내외 미세먼지 농도 분석을 통해 현 환기장치의 필터링 성능을 확인하였으며, EN등급 기준 최소 F등급 이상의 필터링 성능이 적용되어야 함을 확인함
		프리필터 시스템 타입별 Prototype 개발	1. 환기장치 유형에 따른 2가지 타입의 프리필터 시스템 설계· 제작	1. 상부도출형, 상하도출형태의 프리필터 시스템 시제품을 제작하였으며, 5가구에 설치 완료함
		프리필터 시스템 및 환기장치 연계 실증	1. 프리필터 시스템 시공방안 도출 2. 프리필터 시스템 시공 및 유지관리 매뉴얼 제작	1-1. 시공이 편리한 3가구에 프리필터 시스템을 우선 설치하여 시공방법 및 성능파악을 수행함 1-2. 환기장치 설치위치에 따라 프리필터 시스템 형식을 고르는 것이 일반적이지만 OA덕트 길이, 설치공간 등을 종합적으로 고려한 기초설계가 필요함 2. 프리필터 시스템 시공 및 사용방법, 유지관리와 관련된 내용을 담은 매뉴얼을 제작함
		프리필터 시스템 성능검증	1. 프리필터 시스템의 실험실 성능과 현장 성능 비교 분석 2. 프리필터 시스템 적용 전· 후 실측가구 미세먼지 농도 상호분석	1. 프리필터 시스템 설치 후 시스템 내부 필터 전후공간에서 미세먼지 측정기기를 통해 도출된 미세먼지 저감 성능을 실험실 성능과 비교함 2. 3가지 주제로 프리필터 시스템 성능 분석을 수행함 (환기장치 유지관리 정도에 따른 프리필터 시스템 적용 효율성 / 기밀성능에 따른 프리필터 시스템 적용 효율성 / 공기청정기와 프리필터 시스템 적용의 효율성 비교)

3-2. 목표 달성여부

1) 총괄 성과점검 기준표

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준					양적성과기준		
					질적 성과지표		목표치	달성치 (%)	검증 방법	가중치	목표치	달성치
주관	A 1차년도	초음파 산란 기반 미세먼지 농도 간이측정 시스템 구축	A-1 초음파 산란 기반 간이측정 시스템 구성(안)	① 다중 산란 모델 분석 및 적용 범위 도출	최소 2건	2건 (100)	보고서 제시	5	특허: 출원 1 건 논문(SQ): 1 건 논문(BQ): 1 건	특허: 출원 1 건 논문(SQ): 1 건 논문(BQ): 1 건	5	
				② 초음파 간이측정 시스템 구축 및 신호 분석	최소 1건	2건 (200)		10			10	
	B 2차년도	초음파 기반 미세먼지 농도 간이측정법 개발	B-1 초음파 기반 미세먼지 농도 간이측정법 개발	① 다중 산란 모델 검증 및 신호 처리 기법 개발	최소 2건	2건 (100)	보고서 제시	15	특허: 등록 1 건 논문(SQ): 1 건 논문(BQ): 1 건 SW: 1 건 * 수정 후 심사중이며, 21년 상반기 중 등록 예정	특허: 등록 1 건* 논문(SQ): 1 건 논문(BQ): 1 건 SW: 1 건	15	
				② 실험실 규모의 테스트	최소 2건	4건 (200)		10			10	
			B-2 GUI 소프트웨어 개발	① 신호처리 과정 단순화	1건	1건 (100)	보고서 제시	10			10	
공동	C 1차년도	프리필터 시스템 구성(안) 개발	C-1 필터링 시스템 구성(안)	① 국내 유통되는 필터 유형 및 성능 분석	최소 5건	6건 (120)	보고서 제시	3	논문(SQ): 1 건 논문(BQ): 1 건	논문(SQ): 1 건 논문(BQ): 1 건	3	
				② 필터 조합별 크기, 구성, 성능, 경제성 분석				5			5	
				③ 미세먼지 집진율 95%이상 최적 필터링 시스템 구성(안) 도출				4			4	
			C-2 프리필터 시스템 구성(안)	① 외기유입 체적량에 따른 구성 형태, 성능 분석	최소 1건	2건 (200)	보고서 제시	5			5	
				② 프리필터 시스템 구성(안) 도출				8			8	
	D 2차년도	프리필터 시스템 Proto-type 개발 및 성능검증	D-1 프리필터 시스템 Prototype 개발	① 국내 공동주택에 설치된 환기장치 유형 및 성능 분석	5건	33건 공동/ 단독주택 (660)	보고서 제시	2	논문(SQ): 1 건* 논문(BQ): 1 건 시제품: 5 건 * 투고완료상태이며, 21년 상반기 중 게재 예정	논문(SQ): 1 건* 논문(BQ): 1 건 시제품: 5 건	2	
				② 프리필터 시스템 타입별 Prototype 개발	1건	1건 (100)		보고서 제시			8	8
			D-2 프리필터 시스템 성능검증	① 프리필터 시스템 및 환기장치 연계 실증	3건	5건 (167)	보고서 제시	10			10	
				② 프리필터 시스템 성능검증	5건	5건 (100)		5			5	
계								100	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문(SQ): 4 건 논문(BQ): 4 건 시제품: 1 건 SW: 1 건	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문(SQ): 4 건 논문(BQ): 4 건 시제품: 5 건 SW: 1 건	100	

2) 핵심연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형	연구기관	해당 연차	TRL
A	초음파 기반 미세먼지 농도 간이측정법	· 기존 광산란 기반의 부정확한 간이측정법을 개선하여 환경요인에 의한 오차를 최소화 - 다중 산란 이론의 실제 적용을 통한 기초원천기술개발 - 신뢰성 높은 데이터의 제공으로 미세먼지 농도의 다유형 모니터링이 가능한 기초기술 제공 · 초음파 계측 시스템 구축 - 온습도 모니터링 챔버 및 초음파 측정기 - 초음파의 수신은 초소형(MEMS) array로 구축 - 에어 필터의 성능 검증을 수행할 수 있는 시스템	공법·기법	송실대학교	2차 연도	4단계
B	초음파 다중 산란 모델 및 신호처리 통합 GUI 프로그램	· 각각의 모델 및 신호처리를 하나의 소프트웨어 기반으로 통합하여 복잡한 이론과정을 사용자 편의적으로 사용할 수 있도록 개발 - 적용 다중 산란 모델 설정 및 결과 계산 - 기본적 신호처리 과정을 코딩 없이 수행 - 그래픽 유저인터페이스(GUI)기반으로 비전문가의 활용도 개선	소프트웨어	송실대학교	2차 연도	4단계
C	프리필터 시스템 구성(안) 개발	· 국내 필터를 활용한 미세먼지 필터링 시스템 구성 - 국내 유통되고 있는 필터의 유형 및 성능분석, DB축적 - 필터의 크기, 종류, 재질 등 특성을 고려하여 이론적으로 미세먼지를 95%이상 저감 가능한 필터 구성안 도출 - 도출된 구성안들 중 성능 및 경제성을 평가하여 상위 3~4개안 선정 후 샘플 제작 진행 준비 · 필터링 시스템을 적용하여 환기장치와 연계된 프리필터 시스템 구성(안) 도출 - 외기유입 체적량에 따라 요구되는 구성 형태 및 성능 분석 - 프리필터 시스템 구성(안) 도출	공법·기법	사단법인 한국패시브 건축협회	1차 연도	2단계
D	프리필터 시스템 Proto-type 개발 및 성능검증	· 공동주택에 적용할 수 있는 프리필터 시스템 Proto-type 개발 - 국내 공동주택에 설치된 환기장치 유형 및 성능 분석 - 프리필터 시스템 타입별 Proto-type 개발 · 프리필터 시스템 field-test를 통한 성능검증 - 프리필터 시스템 및 환기장치 연계방안 마련 및 샘플 설치 - 프리필터 시스템 성능검증을 통한 목표치 달성 여부 확인 및 보완사항 제시로 추후 연구 촉진	장비·장치	사단법인 한국패시브 건축협회	2차 연도	5단계

3) 총 연구 성과 목표 및 달성도

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	4건	100	
	비SCI			
	계	4건	100	3건 완료, 1건 심사 중 (성과증빙 01-01~04)
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	4건	100	
	계	4건	100	4건 완료 (성과증빙 02-01~04)
특허 출원	국내	1건	100	
	국외			
	계	1건	100	출원번호: 10-2019-0129525 (성과증빙 03-01)
특허 등록	국내	0건	0	
	국외			
	계	0건	0	
소프트웨어 등록	국내	1건	100	
	국외			
	계	1건	100	등록번호: C-2020-048543호 (성과증빙 04-01)
인력 양성	석사			
	박사			
	계			
기술 이전	계약 건수			
	계약액			
	징수액			
국제 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
국내 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문	4		기술보고서 작성 (성과증빙 05-01~04)
	연구시설·장비			
	기술요약정보			프리필터 시스템 매뉴얼 작성 (성과증빙 05-05)
	생명자원	생명정보		
		생물자원		
		신품종		
	소프트웨어			
	화학물			
기타	시제품	1건	500	5개 제작 후 설치완료 (성과증빙 06-01)
	성과 홍보			3건 완료 (성과증빙 07-01~03)
	일자리 창출			

4) 관련 분야 기여도

성과 목표	자체 평가
초음파 산란 기반 미세먼지농도 간이측정 기초원천기술 개발	- 초음파 산란 미세먼지 측정 기법은 다중 산란 알고리즘 고도화를 통해 미세먼지의 형상 데이터를 분석함. - 이는 신뢰성 높은 미세먼지 농도 측정이 가능하여 다양한 학문적인 활용이 기대됨 - 추가적인 실내, 실외 미세먼지 형상 분석과 실내 생활 패턴에 따른 미세먼지 성분 구조 분석 연구를 통해 다양한 환경 변수에 따른 정확한 미세먼지 측정이 가능할 것으로 사료됨
프리필터 시스템 기반 공동주택 미세먼지 실내유입 저감	- 외부 유입 미세먼지가 90%이상 제거될 수 있는 공조시스템을 개발하여 실내 입자상/가스상 물질을 종합적으로 관리할 수 있는 선진적 방안 마련 - 방치된 환기장치의 사용성을 증진시키는 프리필터 시스템 개발을 성공적으로 수행하여 환기시스템에 대한 국민적 관심 증가가 기대됨

3-3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

1) 송실대학교

◆ 특허 등록 1건

특허명칭	등록번호	출원일	출원인 (등록권리자)
초음파 다중 산란에 따른 미세먼지의 농도를 측정하는 미세먼지 측정 장치 및 방법	10-2019-0129525	2019.10.18	송실대학교 산학협력단

- 위 특허는 2019년 10월 18일에 출원이 되었으며, 2020년 11월 02일 특허 등록을 위한 의견제출통지서 접수 안내를 받았다.
- 이에 2020년 11월 26일 본 특허에 대한 의견서 및 보정서를 제출하였다. 제출한 보정서는 검토가 완료된 상황이며, 2021년 2월 내에 특허등록이 진행될 수 있도록 조치할 예정이다.

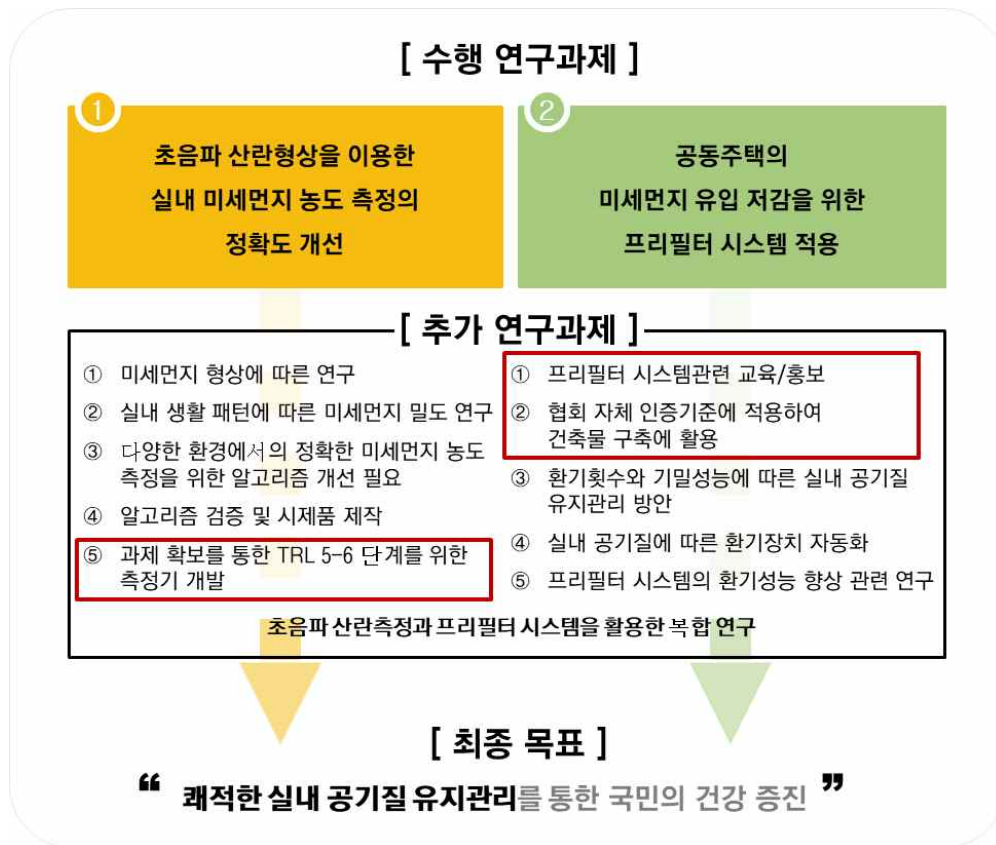
2) 사)한국패시브건축협회

◆ SCI 논문 1건

논문명	투고일	진행상황
Assessment of pre-filter systems to control the indoor inflow of particulate matter	2020.12.06	Submissions Being Processed

- SCI 논문은 최종연구 성과물인 프리필터 시스템의 성능입증을 위해 작성되었으며, 장기간 실내외 미세먼지 및 공기질의 실측 모니터링 결과 분석 내용으로 서술되었다.
- 논문작성을 위한 데이터 분석은 ' 20.07월 이후부터 가능하였기 때문에 논문의 투고일이 계획보다 다소 늦어지게 되었다. 프리필터 시스템의 시제품 제작은 1차년도(' 19) 설계 진행을 통해 ' 20.02에 완료되었지만, COVID-19로 인한 가구 모집 및 시공방식 선정기간이 다소 늦춰져 ' 20.04에 실측가구에 첫 시제품 설치가 가능하였다.
- 또한, 환기장치 및 프리필터 시스템 자체만의 성능을 평가하기 위해서는 비재실 혹은 취침 시간의 데이터만을 추출하여 분석해야 하므로 장기간의 모니터링 수행과 분석기간이 필요하였다.
- 이에 1건의 논문 투고가 20년도 하반기에 이루어졌으며, 현재는 정상적으로 검토가 이루어지고 있는 상황이다.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등



1) 초음파 산란현상을 이용한 실내 미세먼지 농도 측정의 정확도 개선

① 미세먼지 형상에 따른 연구 필요

- 본 연구에서 문헌 조사 및 주사 전자 현미경을 통한 미세먼지 입자의 형상 데이터를 수집하였다. 문헌 조사에서는 다공성 및 응집체에 대한 형상을 수집하였으며, 미세먼지의 단일 입자에 대한 형상은 주사 전자 현미경을 통해 수집하였다.
- 주사 전자 현미경으로 수집한 미세먼지 형상 데이터 7가지와 임의로 생성한 형상 4가지에 대한 산란면적을 수치해석을 이용하여 도출하였고, 이를 이용하여 형상에 따른 다중 산란 시뮬레이션의 개수 농도 측정 계산 값을 도출하였다. 그러나 시뮬레이션에 입력한 미세먼지의 형상과 개수 농도 추정식의 r (부피) 값은 표준입자의 형상에 대한 값을 입력하여 예측되는 α (감쇠율) 값은 표준입자에 의한 값으로 도출하게 된다.
- 이에 기존의 시뮬레이션 및 개수 농도 추정에 대한 보완을 위해 추가적인 미세먼지 형상 데이터의 수집이 필요하며 각 입자의 부피와 같은 물성치에 대한 분석 연구가 필요하다.

② 실내 생활 패턴에 따른 미세먼지의 밀도 연구 필요

- 대기 중의 미세먼지는 주로 3가지 경로를 거쳐 실내로 유입된다. 기계적 환기시설을 통한 유입, 자연 환기를 통한 유입, 건물을 형성하고 있는 건축 구조물에 존재하는 미세한 균열 또는 건물의 틈새를 통한 유입이다.

- Chen(2011)은 실내공기와 대기 중의 먼지 농도를 동시에 측정하여 실내의 먼지 농도와 대기 먼지 농도의 비율을 보고한 전 세계 77개의 연구 결과들을 총괄하여 요약했다. 77개 연구들 중 개별 연구의 가정집 수가 20개 이상인 규모가 큰 연구들만을 따로 추출하여 분석했을 때 PM2.5의 중간 값은 1.25이고, PM10은 0.9로 나타났다. 이 연구에 따르면 PM2.5의 경우 조사 대상에 포함된 가정집의 50% 이상에서 실내 PM2.5 농도가 대기 중의 농도보다 높다는 것을 알 수 있다. 이처럼 실내의 농도가 대기의 PM농도보다 높을 수 있다는 것은 실내에 미세먼지의 오염원이 존재한다는 사실을 말해준다.
 - 보통 실내공기 중의 PM2.5 성분을 보면 유기탄소가 총 먼지 질량의 약 50%를 차지하며, 황산염이 약 20%, 질산염과 암모늄이 각각 8%를 차지하고, 원소탄소가 3% 그리고 나트륨, 규소, 철과 같은 금속 성분이 약 3%, 나머지 다른 성분들이 3%를 구성한다고 보고되어 있다. 대기 중의 먼지 구성 성분과 실내 먼지 구성 성분을 비교했을 때 특이한 사항은 탄수화물관련 유기 에어로졸이 실내 미세먼지에는 대기보다 2배 이상 높다. 반면에 질산염의 비율은 실내가 대기보다 약 3배 정도 낮다는 것이다.
 - 이렇게 실외 미세먼지보다 실내 미세먼지에서 유기물질 함량이 높다는 것은 실내에서 미세먼지가 새롭게 분비되거나 생성되고, 대기에서 실내로 유입된 미세먼지도 실내에서 화학 반응을 거쳐 유기물 함량이 높아진 것이라고 볼 수 있다.
 - 실내 유입 또는 실내 생활 패턴에 따라 미세먼지의 구성 성분과 구성 성분의 비율에 변화가 생긴다. 이러한 실내 미세먼지의 ρ (밀도) 값의 검증에 대한 연구가 필요하다.
- ③ 다양한 환경에서의 정확한 미세먼지 농도 측정을 위한 알고리즘 개선 필요
- 미세먼지는 발생환경에 따라 구성 성분과 크기가 변하기 때문에 다양한 환경에서의 미세먼지의 부피와 밀도와 같은 물리적 성질에 대한 데이터베이스 구축이 필요하다.
 - 미세먼지 형상에 따른 연구와 실내 유입 미세먼지와 실내 발생 미세먼지 밀도 연구를 바탕으로 실외 발생, 실외 유입, 실내 발생과 같은 다양한 환경에서의 정확한 미세먼지 농도 측정이 가능하도록 초음파 산란 기반 미세먼지 농도 간이측정법의 알고리즘의 개선이 필요하다.
 - 추가적으로, 비산먼지 발생량의 30% 이상을 차지하고 있는 건설공사현장과 같은 먼지의 발생이 높은 환경에서의 적용이 필요하다.
- ④ 알고리즘 검증 및 시제품 제작
- 서울 산업진흥원에서 발주한 2020년도 서울시 산학연 협력사업인 G밸리 ICT 융복합 기술사업화 지원사업을 통해 총 232,000,000원의 사업비를 지원받아 본 연구의 알고리즘 검증 및 TRL 5~6 단계를 위한 측정기 개발 중에 있다.
 - 위 사업의 개발 기술 개요는 다음과 같다. 첫째, 센서의 오작동이나 에러 발생 등을 줄이고 신뢰성 향상을 위한 3중 센서를 개발한다. 둘째, 미세먼지의 크기에 따른 농도 구분을 위한 신호처리 회로 보드 설계 및 제작한다. 셋째, 센서 데이터 분석 및 신호처리를 위한 보드 설계 및 개발된 3중 센서 내장형 측정기를 개발한다. 넷째, 모바일 및 PC 기반 센서 제어를 위한 통합 GUI 개발과 센서의 데이터 전송 및 저장을 위한 시스템을 구축한다. 다섯째, 추후 개발 제품 성능 검증 및 실내 공간 실증 테스트를 진행한다.

2) 공동주택의 미세먼지유입 저감을 위한 프리필터 시스템 적용

① 프리필터 시스템 관련 교육/홍보 수행

- 실외 공기질 악화로 인해 실내 공기질의 중요성이 증대되고 있지만, 실내 공기질의 유지 관리 방안은 아직까지 미세먼지 저감에만 초점이 맞춰진 공기청정기 사용으로 한정되어 있다. 그 요인 중 하나는 건축 관련 전문가와 일반인들에게 환기장치의 역할 및 중요성에 대한 인식과 기기자체의 인지성이 미흡하기 때문으로 판단된다.
- 따라서 올바른 실내 공기질과 환기방식에 대한 교육을 통해 환기장치의 설치·사용의 인식 재고가 필요한 실정이며, 이와 함께 저렴하게 환기장치의 성능과 사용성을 개선시킬 수 있는 프리필터 시스템을 함께 홍보할 시 환기장치에 대한 불편함을 개선시켜 활발한 환기장치의 사용을 기대할 수 있을 것으로 예측된다.
- 이러한 교육효과를 일으키기 위해서는 주기적이고 체계적인 교육프로그램을 수행할 수 있는 기관이 필요하며 공동기관인 사)한국패시브건축협회에서 이를 수행할 예정이다. 해당 협회는 건축물에 고효율, 에너지절약설계기법을 도입한 패시브건축물을 일반대중에게 교육, 보급하기 위해 설립된 건축 전문사회단체로써, 환기장치에 대한 전문적인 지식을 갖춘 인력들로 구성되어있다.
- 특히, 건축관련 전문가를 대상으로 연간 4회 이상의 교육을 자체적으로 수행하고 있어 환기장치와 프리필터 시스템 교육이 효과적으로 가능한 기관으로 판단된다.
- 또한, ' 20.02부터 운영된 유튜브 채널인 PHIKO NET은 총 20만회 이상의 조회수를 얻고 있으므로, 프리필터 시스템에 대한 교육·홍보를 온라인으로 운영할 경우 더 많은 보급효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

② 협회 인증기준에 적용하여 실내 공기질 쾌적성을 유지할 수 있는 건축물 구축에 활용

- 사)한국패시브건축협회는 재실자가 쾌적한 건축물에서 생활이 가능하도록 자체인증을 수행하고 있으며, 2009년이후 협회 인증을 받은 건축물은 200건에 달하며, 건축물의 에너지성능과 쾌적성에 대한 이슈가 중요해짐에 따라 인증 건수도 함께 증가하고 있는 추세이다.
- 그 중 쾌적성의 중요한 요소인 실내공기질과 환기 시 온도유지를 위해 환기시스템의 적용과 일정 성능을 필수 기준으로 수립하고 있다. 따라서 환기장치의 필터링 성능을 본 연구과제를 통해 제안된 최소 필터링 성능 기준 이상으로 설정하고 프리필터 시스템 적용 시 해당 기준을 만족하는 것으로 설정하게 된다면 프리필터 시스템의 사용이 활발해질 것으로 예측된다.

③ 환기횟수와 기밀성능에 따른 실내 공기질 유지관리 방안에 관한 연구

- 1인가구의 증가와 30세대 이상의 공동주택으로 환기장치 의무설치 기준이 확대되고 있다. 이로 인해 소형화된 건축물에서 $0.5/h^{-1}$ 회의 환기성능을 갖춘 소용량 환기장치의 개발이 활발하게 진행되고 있다.
- 하지만, 현재 100세대 미만 공동주택의 경우 기밀성능이 $ACH@50 < 3h^{-1}$ 이 확보되지 않고 있는 상황이다. 또한 본 연구결과에서 기밀성능이 $ACH@50 = 5.76h^{-1}$ 인 가구에 H13의 고성능 필터가 장착된 프리필터 시스템 적용 시 미세먼지 저감 효율이 낮고, 실내가 불안정한 상태에 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 기밀성능이 저조할 경우 가장 좋은 필터성능을 환기장치에 사용하더라도 실외 미세먼지의 실내 누기량이 많아 신선한 공기의 풍량이 불충분한 상황이다.

- 따라서 저평형, 저기밀한 가구의 경우 환기 횟수 증가를 통한 신선 외기의 다량 도입이 필요하며 그와 관련된 연구가 수행되어야 할 시점이라 판단된다.

④ 실내 공기질에 따른 환기장치 자동화에 관한 연구

- 기존 환기장치들의 자동모드의 경우 실내 CO₂농도를 기준으로 하거나 전력소비 저감을 위해 시간에 따라 풍량이 조절되는 것에 그치고 있다.
- 본 연구에 따르면 요리 등의 재실자 활동으로 인해 실내에서 발생하는 VOCs, CO₂와 같은 가스상 물질은 환기장치를 통해 저감이 가능하지만, 실내유발 미세먼지 저감에 관해서는 미흡한 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 환기장치 기기의 풍량 성능을 향상시키기 위해서는 모터와 기기의 크기가 커지고 가격이 향상되는 단점이 있다.
- 따라서 공간마다 설치되는 디퓨저에 자동 오염감지기 및 풍량조절형 디퓨저를 적용하여 한정적인 기기 풍량 안에서 실내 오염물질을 빠르게 저감시킬 수 있는 새로운 환기장치가 필요하다.
- 또한, 프리필터 시스템을 적용할 경우 환기장치의 유지관리 정도에 따라 38~87%의 실내 미세먼지 저감이 가능함을 확인하였으나, 프리필터 시스템 또한 내부 필터의 유지관리가 장기간 수행되지 않을 경우 필터링 성능이 저하될 가능성이 있다.
- 필터 교체 주기의 경우 환기장치 가동시간과 실외 미세먼지 농도에 따라 달라질 수 있다. 그러나 실외 미세먼지 농도의 경우 같은 지역이더라도 인접해있는 도로 상황, 실외 활동, 풍향 및 풍속 등에 따라 차이가 날 수 밖에 없다.
- 본 연구에서는 필터 교체주기로 일반적인 청소 및 교체주기를 도입하였다. 그러나 실외 미세먼지 농도에 따라 해당 기간의 변동이 크기 때문에 재실자의 육안 확인을 통한 필터 교체가 필요함을 권고하였다. 이에 재실자가 수시로 확인하지 않아도 필터 교체주기를 알려주는 성능이 필요하다고 판단된다.
- 이에 환기장치의 전력부하 증가 감지센서, 프리필터 시스템 내 압력 및 풍속 차이 감지센서 등을 선별적으로 활용하여 먼지포집으로 인한 필터압력 증가 알림서비스를 개발할 필요가 있다.

⑤ 프리필터 시스템의 환기성능 향상 관련 연구

- 프리필터 시스템을 기존 환기장치에 적용할 경우 필터링 성능은 87%까지 향상되지만 필터에 의한 압력부하로 인해 환기풍량이 줄어드는 단점이 있다.
- 기존 설치되어진 환기장치들은 최소 환기풍량을 간신히 만족하는 정도의 성능이 적용되어 있으므로, 프리필터 시스템 적용 전과 대비하여 적용 후에는 미세먼지 이외 가스상 물질 저감효율이 다소 떨어질 가능성이 있다.
- 따라서 필터 두께, 크기, 재질 등의 필터링 시스템을 압력부하가 더 낮도록 교체 하거나 추가로 팬을 설치하는 등을 통해 프리필터 시스템 적용 후에도 환기장치 가동 시 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙에서 명명하는 최소 환기량 및 기타 사항이 준수되도록 추가 연구가 필요하다.

3) 초음파 산란측정과 프리필터 시스템을 활용한 복합연구

- 재실자가 자발적으로 실내 공기질을 파악하여 환기장치의 가동·유지관리를 수행하기는 현실적으로 한계가 있다. 실제로 현재 적용된 환기장치의 사용법에 대하여 모르는 경우도 많기 때문에 사용 빈도가 낮은 실정이다.
- 특히, 필터의 노후화가 발생하면 필터 압력손실 증가, 환기장치의 급기 풍량 감소를 일으켜 충분한 양의 실외 공기를 실내로 전달하지 못하게 되며, 육안으로는 정확한 교체 주기를 산정할 수 없다.
- 따라서 초음파 미세먼지 측정기술과 추가적인 기타 공기질 모니터링 시스템(온습도, 바이러스 등)을 프리필터 시스템과 연계하여 알림 서비스를 구축할 경우 재실자의 환기설비 유지관리 편의성 및 실내 공기질 쾌적성을 확보할 수 있는 중요한 기술이 될 것으로 판단된다.

붙임 . 참고문헌

- 1) 환경부 권장 "하루 3회 실내환기" 이행 가정은 8% 뿐, 오픈서베이, 2017.03
- 2) 학교 미세먼지 관리목표 및 저감방안 마련을 위한 연구, 연세대학교 환경공해연구소, 2018.01
- 3) Kim, S. D., Kim, C. H., Hwang, U. H.(2008), A Study on the Particles Density Estimation in Seoul Metropolitan, *Journal of Environmental Health Sciences*, 34(2), 131-136.
- 4) Kim, E. Y., Seo, S. J., Kim, S. M., Jung, S. W., Lee, Y. M., Oh, S. H., Park, G. T., Kim, K. H., Kim, J. W., Hong, Y. D., Lee, T. H., Bae, M. S.(2018), Determination of Hourly Density Using Real Time PM_{2.3} Mass and Volume Concentrations at the Road Side-OPS Correction Based on Optical Absorption of eBC, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 865-875.
- 5) Kim, S. J., Kang, H. S., Son, Y. S., Yoon, S. L., Kim, C. J., Kim, G. S., Kim, I. W.(2010), Compensation of Light Scattering Method for Real-Time Monitoring of Particulate Matters in Subway Stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 533-542.
- 6) Lee, N. R., Um, H. U., Cho, H. S.(2018), Development of Detection and Monitoring by Light Scattering in Real Time, *Fire Science and Engineering*, 32(3), 134-139.
- 7) Lee, B. J., Park, S. S.(2019), Evaluation of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations from Online Light Scattering Dust Monitors Using Gravimetric and Beta-ray Absorption Methods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 357-369.
- 8) 초미세먼지 간이측정기 가이드북, 환경부 국립환경과학원, 2018.10
- 9) Explore the data_Air Quality, MI 보건영향연구소(HEI), 2019.02.01.
- 10) 건축물 환기/공조용 국내외 에어필터 시험방법 비교 분석, 신철웅 외 1명, 2018.11
- 11) E. Diapouli, K. Eleftheriadis, A.A. Karanasiou, S. Vratolis, O. Hermansen, I. Colbeck, M. Lazaridis, Indoor and outdoor particle number and mass concentrations in Athens. Sources, sinks and variability of aerosol parameters, *Aerosol Air Qual. Res.* 11 (2011) 632-642. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2010.09.0080>.
- 12) F. Wang, D. Meng, X. Li, J. Tan, Indoor-outdoor relationships of PM_{2.5} in four residential dwellings in winter in the Yangtze River Delta, China, *Environ. Pollut.* 215 (2016) 280-289. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.023>.
- 13) C. Chen, B. Zhao, Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor, *Atmos. Environ.* 45 (2011) 275-288. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048>.
- 14) Park, H., Kim, H., Kang, K. & Kim, T. (2018). Analysis of Size-resolved Characteristics on Indoor and Outdoor Particles in Korean Apartments, *Architectural Institute of Korea*, 38(1), 384-385.
- 15) How to deal with PM wisely,' Use the installed ventilation system properly' . Kweather. Published online 2019:3. <http://kweather.co.kr/upload/>
- 16) Kim, J. Y.(2010), Models for wave propagation in two-dimensional random composites: A comparative study, *Journal of the Acoustical Society of America*, 127(4), 2201-2209.
- 17) Tourin, A., Derode, A., Peyre, A., Fink, M.(2000), Transport parameters for an ultrasonic pulsed wave propagating in a multiple scattering medium, *Journal of the Acoustical Society of America*, 108(2), 503-512.
- 18) Derode, A., Tourin, A., Fink, M.(2001), Random Multiple Scattering of Ultrasound. I. Coherent and Ballistic Waves, *Physical Review E*, 64, 36605.
- 19) Chekroun, M., Le Marrec, L., Abraham, O., Durand, O., Villain, G.(2009), Analysis of Coherent Surface Wave Dispersion and Attenuation for Non-destructive Testing of Concrete, *Ultrasonics*, 49(8), 743-751.
- 20) Antonio, A. D., Popoola, O. A. M., Ouyang, B., Saffell, J., Jones, R. L.(2018), Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter, *Sensors*, 18(9), 2790.
- 21) 박종성, 문광주, 박승명, 송인호, 김현재, 홍유덕, & 한진석. (2014). SMPS-APS 를 이용한 PM 10 및 PM 2.5 질량 농도 모니터링 가능성 평가. *한국환경분석학회지*, 17(3), 161-172.
- 22) Halder, P., Roy, P. D., & Das, H. S. (2018). Dependence of light scattering properties on porosity, size and composition of dust aggregates. *Icarus*, 312, 45-60.
- 23) Mehri, T., Kemppinen, O., David, G., Lindqvist, H., Tyynelä, J., Nousiainen, T., ... & Miffre, A. (2018).

Investigating the size, shape and surface roughness dependence of polarization lidars with light-scattering computations on real mineral dust particles: Application to dust particles' external mixtures and dust mass concentration retrievals. *Atmospheric Research*, 203, 44-61.

- 24) Piedra, P., Kalume, A., Zubko, E., Mackowski, D., Pan, Y. L., & Videen, G. (2019). Particle-shape classification using light scattering: an exercise in deep learning. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 231, 140-156.
- 25) How to deal with PM wisely,' Use the installed ventilation system properly' . Kweather. Published online 2019:3. <http://kweather.co.kr/upload/>
- 26) Yeo, I. (2019, June). Focus on solutions for apartment builders with Particulate matter. *Kharn*, 045, pp. 36-54
- 27) Jeon K, Lee J, Park J, Park H, Lee Y, Lee H, Nam K, Myoung J, Choi K, Kim T. A study of data accuracy improvement for national air quality forecasting. NIER. 2016;NIER-RP201. doi: <https://doi.org/10.23000/TRKO201700008074>
- 28) Mukaka MM. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Med J* 2012;24:69-71. doi:10.1016/j.cmpb.2016.01.020

뒷면지

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.