

20CTAP
-C151876
-02

보안 과제(), 일반 과제(√) / 공개(√), 비공개()발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제 2차 연도 최종보고서

R&D / 20CTAP-C151876-02

생체모사 흡착강화필터 개발 및 이를 이용한 차세대 미세먼지 집진플랫폼 구축 최종보고서

2021. 03. 02.

주관연구기관 / 중앙대학교 산학협력단

2021

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘생체모사 흡착강화필터 개발 및 이를 이용한 차세대 미세먼지 집진플랫폼 구축’(연구개발 기간 : 2019.04.15 ~ 2020.12.31) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2021.03.02.

주관연구기관명 : 중앙대학교 산학협력단 고 중 혁 (인)

주관연구기관책임자: 우 상 혁

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.
--

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C151 876-02	해당 단계 연구 기간	2020.01.01.~ 2020.12.31.	단계구분	(2단계) / (2단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	생체모사 흡착강화필터 개발 및 이를 이용한 차세대 미세먼지 집진플랫폼 구축			
연구책임자	우 상 혁	해당단계 참여연구원 수	총: 7 명 내부: 7 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:206,000 천원 계:206,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 8 명 내부: 8 명 외부: 명	총 연구비	정부:370,000 천원 계:370,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	중앙대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	보안성 미요구
----------------------	---------

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·기 탁 번호	Y	Y									

국가과학기술중합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
(주)에니텍	입자발생장치	300*300* 300	1	20.05.11	19,800	031-695- 6210	중앙대 학교 209관 502호	
(주)IST	풍동챔버	300*300* 300	1	20.05.11	19,250	031-695- 6210	중앙대 학교 209관 502호	

고체필터의 문제인 압력손실과 집진효율의 상충성을 해결하고자, 높은 통기성을 유지하며 먼지와 흡착력을 극대화시킨 아래와 같은 새로운 개념의 생체모사 흡착강화필터를 개발하고 이를 이용하여 차세대 미세먼지 집진플랫폼을 구축한다.

(1) 나노/마이크로 계층적구조 필터: 게코 도마뱀의 발판과 같이 반데르발스힘을 증가시켜 흡착력을 강화시킨 구조의 필터

(2) 비휘발성 액상-겔 박막 필터: 호흡 시 액체-고체 간의 강한 흡착으로 인체로 유입되는 먼지를 걸러주는 비강의 점액을 모사한 형태의 필터

이러한 흡착강화 필터는 기존 고체필터 대비 10~1000배 이상의 강한 흡착력을 바탕으로 우수한 통기성과 효과적인 미세먼지 집진효율을 확보하여 기존의 고체필터의 패러다임을 바꾸는 새로운 개념의 필터로서 기존의 필터로는 적용이 어려웠던 새로운 집진 분야를 개척한다.

보고서 면수
21쪽

요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구단은 고체필터의 근원적인 문제인 압력손실과 집진효율의 상충성을 해결하고자, 생체모사 (i) 나노/마이크로 계층적구조 필터와 (ii) 비휘발성 액상-겔 박막필터를 구현하였다. 본 필터들은 먼지와 흡착력을 극대화시킨 새로운 개념의 흡착강화 필터로, 나노스케일에서의 표면/계면제어를 통해 구현 가능하며 정량화 분석을 통해 집진에 최적화된 구조를 확보하였다. 이를 바탕으로 높은 통기성과 먼지포집효율을 바탕으로 마스크, 공기청정기 필터와 같은 기존 집진분야에 적용할 뿐만 아니라, 공사장 및 도로 비산먼지 포집용 필터와 창호용 필터 등으로의 응용을 통해 새로운 미세먼지 집진 플랫폼을 구축한다. 본 연구에서 개발된 계층적구조 고체필터와 비휘발성 액상-겔 박막필터는 각각 (i) 게코 도마뱀의 발판과 같이 반데르발스힘을 증가시켜 흡착력을 강화시킨 구조와 (ii) 호흡 시 액체-고체간의 강한 흡착으로 인체로 유입되는 먼지를 걸러주는 비강의 점액을 모사한 형태로, 다음과 같은 단계별 연구를 통해 구현하였다. [나노/마이크로 계층적구조 필터 개발 연구] - 1단계: 마이크로 가공 기판 표면에 실리콘고분자 나노필라멘트(직경: 3~10nm)가 합성된 나노/마이크로 계층적구조 필터를 구현하였다. 합성조건을 조절하여 나노필라멘트의 직경 및 구조를 변화시키고 이를 바탕으로 계층적구조 필터와 미세먼지 간의 흡착력을 극대화 하였다. - 2단계: 필터와 미세먼지간의 흡착력을 정량화 하고 미세먼지 포집효율 및 압력손실을 분석을 통해 필터의 구조를 최적화 하였다. 계층적구조 필터는 기존의 고체필터와 같이 사용 가능하기 때문에 우수한 통기성 및 집진효율을 바탕으로 기존 고체필터를 이용하는 마스크 및 실내 미세먼지 정화용 고효율 필터로 적용 시 집진효과를 극대화 할 수 있으며, 본 응용을 위한 시제품을 제작하였다. [비휘발성 액상-겔 박막필터] - 1단계: 액상-겔 박막필터는 비강을 통해 들어오는 공기의 먼지를 거르는 점액을 모사한 구조로 다공성 기판을 실리콘 오일에 담지시킨 겔 박막형태로 구현하였다. 더불어 미세먼지를 포집효율 극대화를 위한 기판의 종류, 박막의 두께, 오일의 점도에 따른 포집효율을 분석하였다. - 2단계: 필터 최적화를 통해 압력손실 50Pa 이하에서 PM2.5 포집효율 98% 이상의 흡착강화 필터를 구현하였다. 이러한 우수한 통기성 및 포집효율을 바탕으로 환기 시 외부로부터 유입되는 먼지차단에 효과적인 창호용 필터 구현 및 건설현장에서 발생하는 비산먼지 포집용 필터 개발 등 응용 및 실용화 연구를 수행하여, 이를 토대로 기존의 실내 공기 질 개선용 집진 시스템의 성능을 한층 높일 뿐만 아니라 외부유입 먼지를 차단하고, 근원적으로는 비산먼지의 발생을 억제가능 한 실내공기질 개선 토탈 집진 플랫폼을 구축한다.
연구개발성과	흡착강화 필터는 기존 고체필터 대비 10~1000배 이상의 강한 흡착력을 바탕으로 우수한 통기성과 효과적인 미세먼지 집진효율 확보가 가능하다. 이는 기존 여과방식 고체필터의 패러다임을 바꾸는 새로운 개념의 필터로 다양한 집진분야에 응용 될 수 있을 뿐만 아니라 기존 필터들로는 적용이 어려웠던 새로운 집진 분야를 개척 할 수 있다. 본 연구는 기초원천기술개발 연구로 연구기간동안 Top SCI 저널에 논문 투고 및 특허출원 뿐만 아니라 시제품 제작을 통해 궁극적으로 실내공기질 개선에 기여하는 가시적 성과를 확보하였다.

연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	계층적구조 필터와 액상-겔 필터와 같은 흡착강화 필터는 상대적으로 낮은 압력손실에서도 효과적인 집진이 가능하기 때문에 <u>높은 통기성의 고효율 집진필터 구현</u> 이 가능하다. 또한 본 연구를 통해 개발된 흡착강화 필터들은 <u>제조공정이 간단하고 대면적 합성이 용이</u> 하여, 높은 통기성과 집진효율이 모두 요구되는 <u>마스크 및 기존 공기정화 시스템</u> 에 도입 시 압력손실을 저감시켜 더욱 효과적인 미세먼지 포집을 가능하게 할 뿐만 아니라, 미세먼지 유입을 막는 <u>창호용 필터, 공사장 및 도로에서 발생하는 비산먼지 필터</u> 등으로써의 활용을 통해 <u>미세먼지 정화 뿐만 아니라 유입과 발생을 원천적으로 억제하는 새로운 종합집진플랫폼</u> 구축이 가능하다.				
국문핵심어 (5개 이내)	미세먼지	흡착	먼지필터	계층적구조	액상-겔 박막
영문핵심어 (5개 이내)	Fine Dust	Adhesion	Dust Filter	Hierarchical Structure	Liquid-Gel Thin Film

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	6
2. 연구수행내용 및 성과	8
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	16
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	20
붙임. 참고 문헌	

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

고농도의 미세먼지는 최근 들어 많은 사회/경제적 문제를 야기하고 있으며 실내/외 공기질 모두에 영향을 미치는 등 시민들의 건강에 직접적인 위협을 미치고 있다. 때문에 **미세먼지의 발생을 억제하고 외부에서 실내로 유입되는 먼지들 또한 더욱 효과적으로 차단 및 포집할 수 있는 새로운 필터 기술이 반드시 필요한 상황이다.**

1-1. 기존 미세먼지/유해가스 포집기술

기존 HEPA(High Efficiency Particulate Air)필터와 같은 고체필터는 고체미세먼지와 낮은 흡착력(반데르발스 힘, 정전기력)의 한계 때문에 **작은 기공을 만들고 기공보다 큰 크기의 먼지를 여과하는 방식이** 주로 사용되어 왔다. 하지만 2.5 μm 이하 크기의 초미세먼지 등 작은 크기의 먼지를 포집하기 위해서는 그보다 더욱 작은 크기의 기공이 사용되어야 하고, 이 경우 기체의 압력손실이 증가하여 효율적인 포집에 어려움이 있다.

고체필터를 이용하는 방식이 아닌 액상물질을 이용하는 습식포집은 액체-고체미세먼지간의 강한 흡착 및 유해가스 흡수를 바탕으로 한 효과적인 대기오염물질 포집이 가능하다. 때문에 지속적인 물 분사를 이용한 흡수탑(Scrubber) 혹은 인공강우 등을 이용한 습식포집이 개발되어 활용되고 있으나, 중력에 의해 흐르고 고정되어있지 못하는 특성으로 인해 고체필터들과 같이 고정형으로 다양한 분야에서 이용 되지 못하고 있는 실정이다.

1-2. 본 과제의 연구대상 및 독창성

기존 고체필터가 갖는 근원적 문제인 집진효율과 통기성의 상충은 미세먼지와 필터간의 약한 흡착력이 그 주요 원인이다. 따라서 본 연구는 **미세먼지와의 흡착력을 극대화 한 새로운 개념의 고체필터((1) 나노/마이크로 계층적구조 필터, (2) 비휘발성 액상-겔 박막필터)를 구현하고, 흡착강화 필터들을 이용한 집진설비를 구축하는 핵심성과를 확보한다.** 이는 습식포집과 같이 미세먼지에 대한 강한흡착을 이용하기 때문에 상대적으로 **낮은 압력손실에서도 효과적인 미세먼지 포집이 가능하여 이를 바탕으로 우수한 통기성의 확보가 가능하다 (그림1).** 또한 기존 고체필터와 같이 고정형으로 다양한 분야에서의 적용이 가능하기 때문에 **기존 집진시스템의 패러다임을 바꾸는 새로운 집진플랫폼으로써 공기질 향상에 기여할 수 있을 것으로** 기대된다.

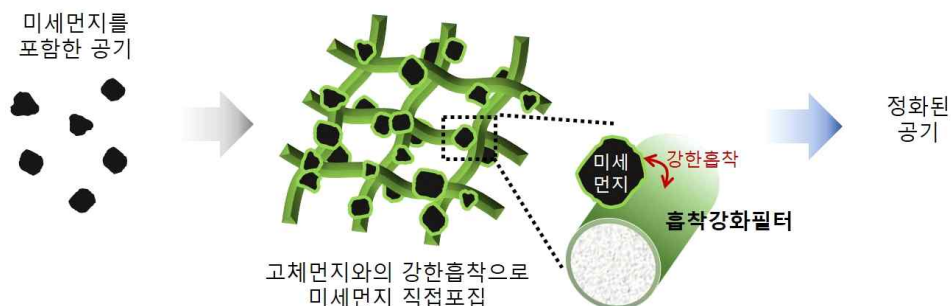


그림 1. 직접흡착포집 방식의 흡착강화필터 공기 중 미세먼지 포집 모식도.

본 연구에서 제안하는 두 가지 다른 필터들은 모두 자연 및 인체에서 강한 흡착력을 갖는 기관을 모사한 생체모방형 필터이다. 먼저 나노/마이크로 계층적구조 필터는 높은 반데르발스 힘을 갖는 게코(Gecko) 도마뱀의 발판을 모사한 구조로 마이크로 다기공 기관 표면에 나노필라멘트를 합성하여 미세먼지와의 흡착력을 극대화 한다 (그림2). 반데르발스 힘은 계면의 면적에 비례하기 때문에 나노필라멘트로 인해 넓어진 계면은 기존 고체필터 대비 10~100배 가량의 흡착력 증가에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

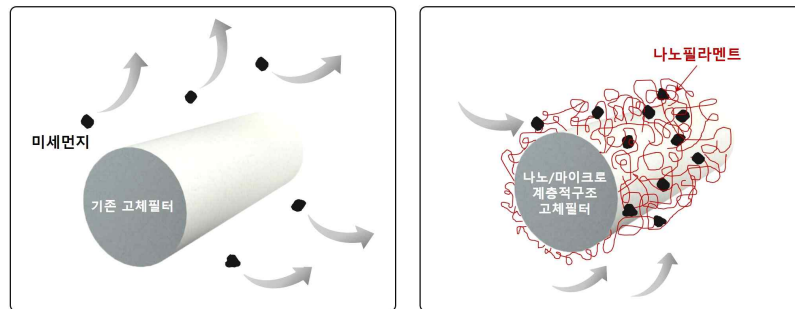


그림 2. 기존 고체필터(왼쪽)와 계층적구조 필터(오른쪽) 표면 구조. 나노필라멘트에 의해 강화된 반데르발스 (van der Waals) 힘으로 효과적으로 표면에 직접 흡착/포집된 미세먼지(오른쪽).

액상-겔 박막필터는 마이크로 다기공 기관 표면위에 액상-겔 박막으로 이루어진 흡착강화층을 단량체중합과 실리콘고분자 액상-겔 박막 코팅을 통해 구현한다. 이는 호흡 시 유입되는 미세먼지를 차단하는 비강의 점액을 모사한 구조로 액체와 고체간의 강한 흡착을 통해 미세먼지를 포집한다 (그림3). 액체와 고체간의 흡착은 고체-고체 간 흡착에 비해 약 100~10000배 이상의 강한 흡착으로, 안정한 액상-겔 박막의 구현을 통해 기존에 없던 높은 집진효율 및 통기성 확보가 기대된다.

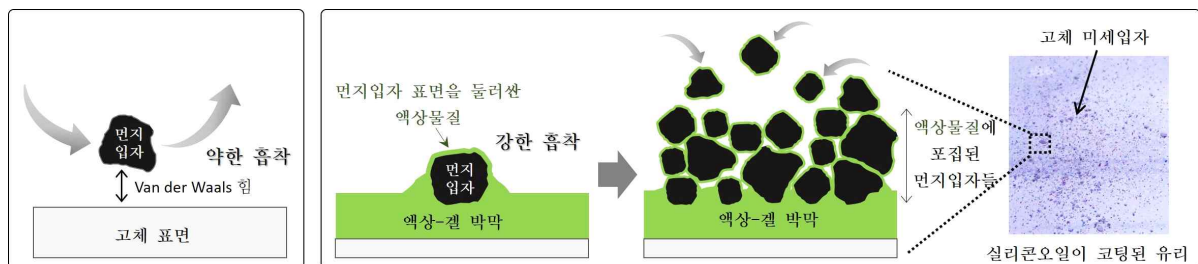


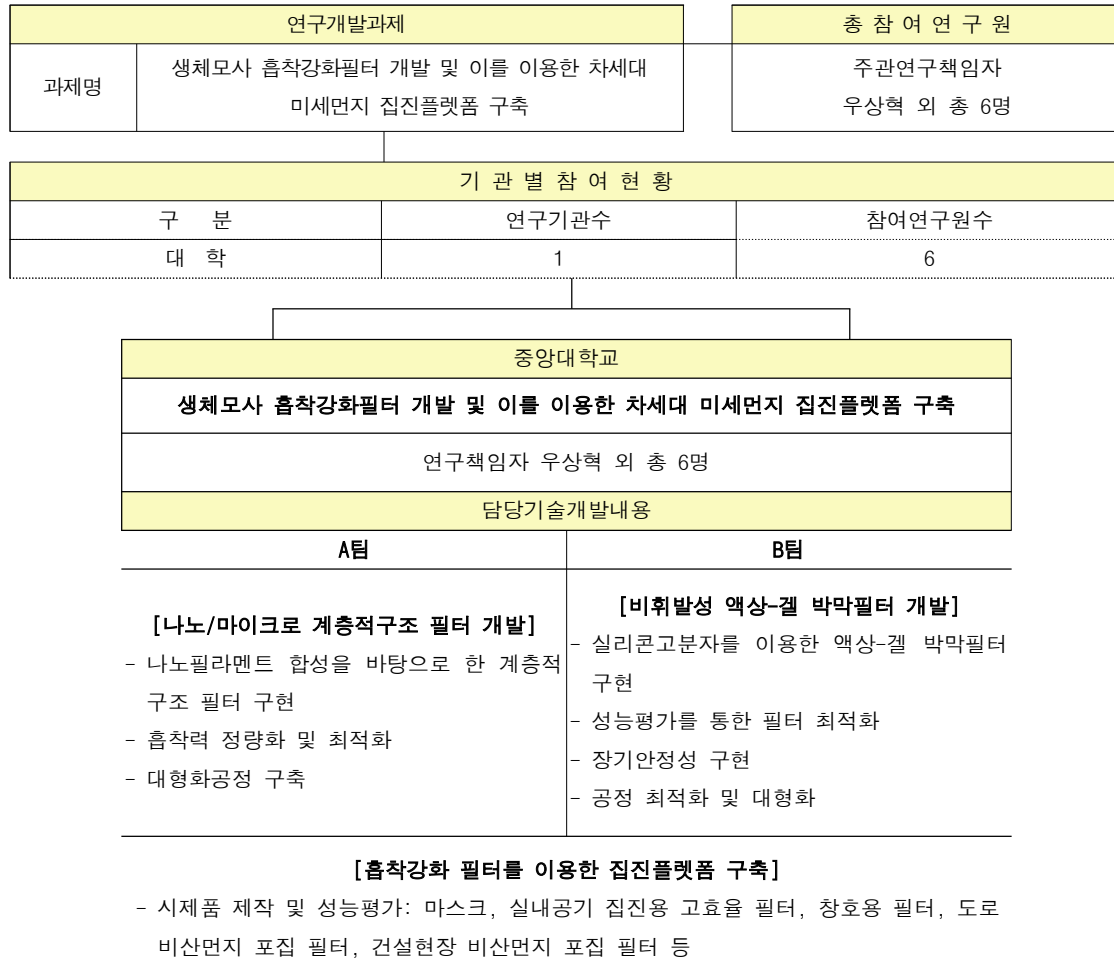
그림 3. 고체-고체 간 약한 흡착(왼쪽)과 고체-액체 간 강한 흡착(오른쪽). 고체-액체 간 강한 흡착을 바탕으로 한 액상-겔 박막의 효과적인 미세먼지 포집 모식도와 실리콘오일 막에 포집된 고체 미세입자 사진(오른쪽).

흡착강화 필터는 우수한 통기성에도 높은 집진효율이 기대되며, 계층적구조 필터는 특히 1 μ m 이하 크기의 초미세먼지에 대한 우수한 포집효과가 기대되기 때문에 (i) 계층적구조 필터를 이용한 실내용 고효율 집진설비를 구축하고 (ii) 기존 고체필터들을 대체할 고효율 마스크로의 적용이 가능하다. 액상-겔 박막필터는 대부분 크기의 (초)미세먼지에 대한 효과적인 포집이 가능할 것으로 예상되지만 액상물질을 함유하고 있기 때문에 기존의 고체필터와 융합에 한계가 있을 것으로 예상된다. 따라서 기존 집진설비와의 융합화 보다는 (iii) 환기 시 외부에서 유입되는 먼지차단을 위한 창호용 필터 및 (iv) 건설현장과 도로 등에서의 비산먼지 포집용 필터 등 새로운 집진분야를 개척하고, 이를 바탕으로 미세먼지 종합 집진플랫폼을 구축한다.

2. 연구수행내용 및 성과

2-1. 연구 개발 추진 전략 및 방법

(1) 연구개발 추진 체계



(2) 연구개발 추진 일정

1차년도														
일련 번호	연구내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	계획수립 및 선행연구 자료조사										-	-	-	이상혁 (중앙대 학교)
2	나노필라멘트 합성 및 계층적구조 필터 구현										-	-	-	이상혁 (중앙대 학교)
3	액상-겔 박막필터 구현										-	-	-	이상혁 (중앙대 학교)

4	나노필라멘트 크기 조절											-	-	-	우상혁 (중앙대학교)
5	액상-겔 박막 두께 조절											-	-	-	우상혁 (중앙대학교)
6	집진설비 구조 디자인											-	-	-	우상혁 (중앙대학교)
2차년도															
1	성능평가 표준방법 확립														우상혁 (중앙대학교)
2	흡착력 정량화 및 이미징														우상혁 (중앙대학교)
3	필터 성능평가 및 모의실험														우상혁 (중앙대학교)
4	흡착력 및 필터효율 최적화														우상혁 (중앙대학교)
5	장기안정성 테스트														우상혁 (중앙대학교)
6	시제품 설계도면 작성														우상혁 (중앙대학교)
7	시제품 가공 및 평가														우상혁 (중앙대학교)
8	공정 최적화 및 대형화														우상혁 (중앙대학교)

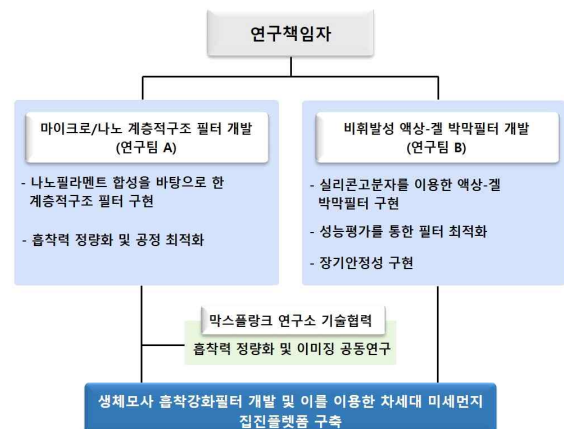
(3) 연구개발 추진 방법

본 연구단은 2개 팀(A, B팀)을 구성하여 각각 나노/마이크로 계층적구조 고체필터(A팀)와 비휘발성 액상-겔 박막필터(B팀)를 개발함.

- 1차년도에 A팀은 다양한 마이크로기공 기관에 실리콘고분자 나노필라멘트 합성하였고 나노필라멘트의 크기 및 구조 조절을 위한 합성법 확보 연구를 수행.

- B팀은 마이크로 다기공 기관 표면에 실리콘오일과 PDMS를 이용한 액상-겔 박막을 합성하였고 점도, 두께 등을 조절하는 연구를 수행.

- 이후 이렇게 구현된 두 흡착강화 필터들의 미세면지와의 흡착력을 정량화 하고 집진효율 및



압력손실 등 필터 성능을 평가함(A, B팀 모두).

- 흡착력 정량화의 경우 흡착력 분석의 전문가들로 구성된 독일 막스플랑크(Max Planck Institute) 고분자연구소의 계면물리팀과의 공동연구로 분석을 수행됨(연구책임자 방문 및 학생 장기과견으로 수행).

- 2차년도에는 정량화 결과의 피드백을 통해 필터들의 성능을 각각 최적화 하였고 이를 바탕으로 한 흡착강화 필터들의 응용연구가 수행됨.

- 비산먼지 제거필터(도로 및 건설용), 공기청정기 필터 및 창호용 필터로의 응용을 위해 시제품을 제작하여 응용화 가능성을 조사함.

- 이와 같은 연구를 통해 본 연구단은 기존 필터적용 분야뿐만 아니라 새로운 집진분야의 개척을 시도하였으며 흡착강화 필터를 이용한 새로운 미세먼지 저감플랫폼을 구축하여 미세먼지 저감에 실질적 기여할 수 있는 원천기반기술을 확보하였음(A, B팀 모두).

2-2. 연구 개발 성과

(1) 국내 · 외 논게재문

번호	논문명	학술지명	권	페이지 번호	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	Fluorocarbon Lubricant Impregnated Nanoporous Oxide for Omniorrosion-Resistant Stainless Steel	Journal of Colloid and Interface Science	558	301	네덜란드	Elsevier	SCI	2019.12.15
2	One-Step Fabrication of Universal Slippery Lubricated Surface	Advanced Materials Interfaces	7	2000305	독일	Wiley-VCH GmbH	SCI	2020.06.29
3	Design and Experimental Studies of Self-healable Anti-corrosion Coating: Passivation of Metal Surfaces by Silicone Oil Impregnated Porous Oxides	Surface & Coating Technology	404	126595	네덜란드	Elsevier	SCI	2020.12.25
4	Tailoring the Morphology of Supraparticles by Primary Colloids with Different Shapes, Sizes and Dispersities	Crystals			스위스	MDPI	SCI	In press

(2) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명	발표유형
1	한국막학회	우상혁	2019.05.24	경기대학교	대한민국	초청강연
2	일본고분자학회(The Society of Polymer Science, Japan)	우상혁	2019.05.30	오사카 컨벤션센터, 오사카	일본	초청강연
3	International Conference on Nature Inspired Surface Engineering	우상혁	2019.06.12	Stevens Institute of Technology, 뉴저지	미국	구두발표
4	ACS colloid & Surface Science	우상혁	2019.06.19	아틀란타	미국	구두발표
5	대한환경공학회	우상혁	2019.06.28	아주대학교	대한민국	초청강연
6	한국고분자학회	우상혁	2019.10.10	제주 ICC	대한민국	초청강연
7	Okinawa Colloids	우상혁	2019.11.08	오키나와	일본	초청강연
8	한국고분자학회	우상혁	2020.10.07	광주	대한민국	초청강연
9	한국공업화학회	김지혜	2019.05.03	부산 벅스코	대한민국	포스터
10	한국공업화학회	문찬식	2019.05.03	부산 벅스코	대한민국	포스터
11	한국고분자학회	김현진	2019.10.10	제주 ICC	대한민국	포스터
12	한국고분자학회	황혜선	2019.10.10	제주 ICC	대한민국	포스터

(3) 지식재산권(특허)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			
			출원인	출원일	출원번호	등록 번호*	등록인	등록일	등록 번호	등록 번호*
1	[특허] 다층 구조의 먼지 필터	대한민국	중앙대학교 산학협력단	2019.06.07	10-2019-0067398	-	-	-	-	-
2	[특허] 계층적 구조의 필터 및 이의 제조 방법	대한민국	중앙대학교 산학협력단	2019.10.21	10-2019-0130488	-	-	-	-	-
3	[특허] 윤활 박막, 및 이의 제조방법	대한민국	중앙대학교 산학협력단	2019.10.21	10-2019-0130492	-	-	-	-	-
4	[특허] 액상막이 표적 코팅된 먼지 포집용 필터	미국	중앙대학교 산학협력단	2020.07.15	16/962,320	-	-	-	-	-
5	[특허] 불밀링 공정을 이용한 무기물 입자의 표면 개질 방법 및 상기 방법으로 개질된 무기물 입자	대한민국	중앙대학교 산학협력단	2020.12.23	10-2020-0182236	-	-	-	-	-

2-3. 연구 내용 및 연구 결과

(1) 연구 내용

가. 계층적 구조 고체필터 구현

- 나노필라멘트를 필터여재 표면에 구현하여 먼지가 닿아 흡착되는 필터의 표면적을 극대화시키기 위한 연구 (그림4)

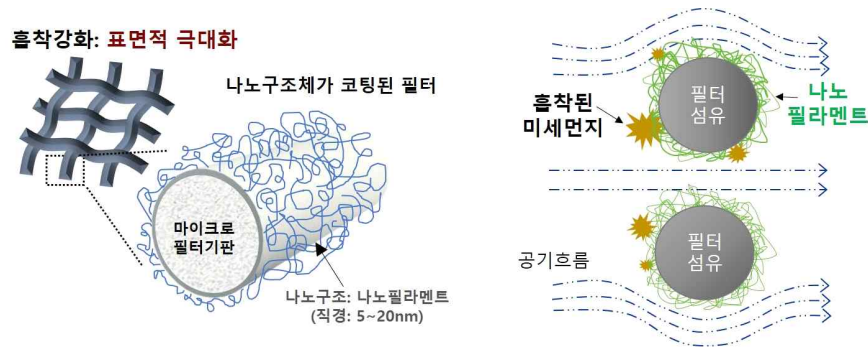


그림 4. 나노필라멘트 계층적 구조필터의 구조(왼쪽) 및 미세먼지 포집 메카니즘(오른쪽)

- 나노필라멘트 전구체(Methyltrichlorosilane (TCMS))의 반응 온도 및 단량체와 촉매의 함량 조절을 통해 나노필라멘트의 크기와 구조를 조절을 바탕으로 직경 목표치인 10-20nm 직경의 나노필라멘트를 성공적으로 구현
- 여기에 추가적으로 반응 온도와 용매 및 시간을 바꾸어가며 나노필라멘트 외에도 나노돌기와 나노필라구조가 합성되는 것을 확인하여 다양한 나노/마이크로 계층적 구조를 구현 (그림5)

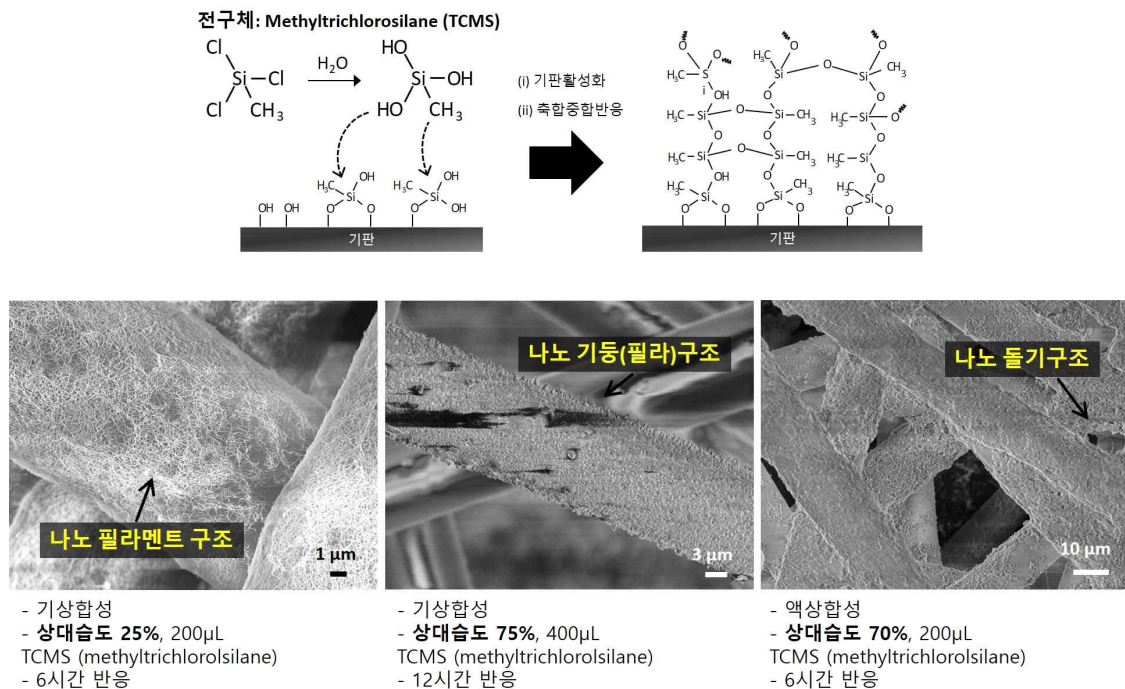


그림 5. 나노필라멘트 합성방법 모식도(위) 및 폴리에틸렌필터 여재 위에 합성된 나노필라멘트, 나노필라, 나노돌기 구조의 전자현미경 이미지(아래)

나. 비휘발성 액상-겔 박막필터 구현

- 액체-고체 간 강한 흡착력을 미세먼지 필터링에 이용하기 위하여 액상막을 필터여재 표면에 구현 (그림6)
- 실리콘 단량체와 산성촉매를 함유한 용액에 기판을 담지하여 PDMS 나노브러쉬를 형성시킨 후 액상 박막을 코팅하는 방식으로 액상 박막을 안정적으로 구현하였고, 액상 박막의 농도와 점도 조절을 통해 두께 조절 연구를 함께 수행함. 박막 두께 목표치인 $0.3\text{--}5\mu\text{m}$ 의 두께를 구현.

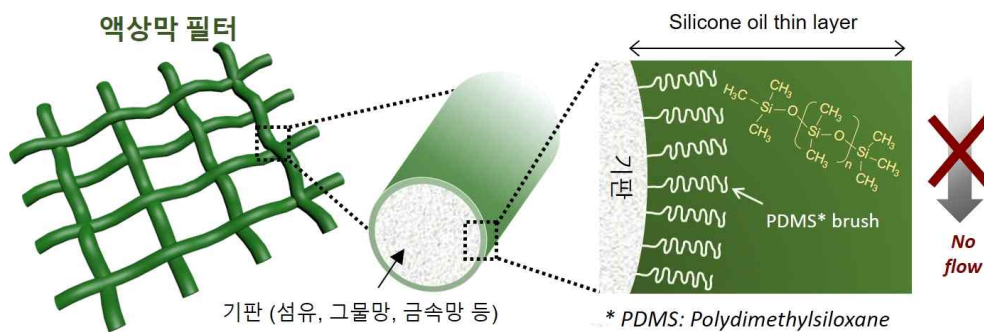


그림 6. 필터여재의 표면개질과 액상막 코팅을 통해 구현된 액상막 필터 모식도

- 콜로이드 탐침현미경(미세입자: $10\mu\text{m}$ 지름의 실리카와 Polystyrene 입자)을 이용하여 미세먼지와 필터와의 흡착력을 정량화(그림7)
- 고체기판(유리)과 액상막을 구현한 동일기판에서의 미세입자에 대한 흡착력 비교 결과 액상막 위에서 미세입자의 순간흡착력이 약 10~20배 향상된 것을 확인
- 이는 무기물(실리카) 뿐만 아니라 고분자(Polystyrene) 입자에 대해서도 유사한 결과를 보임을 확인하여 무기물/유기물 입자에 대해 높은 흡착력의 필터 구현이 가능함을 확인함

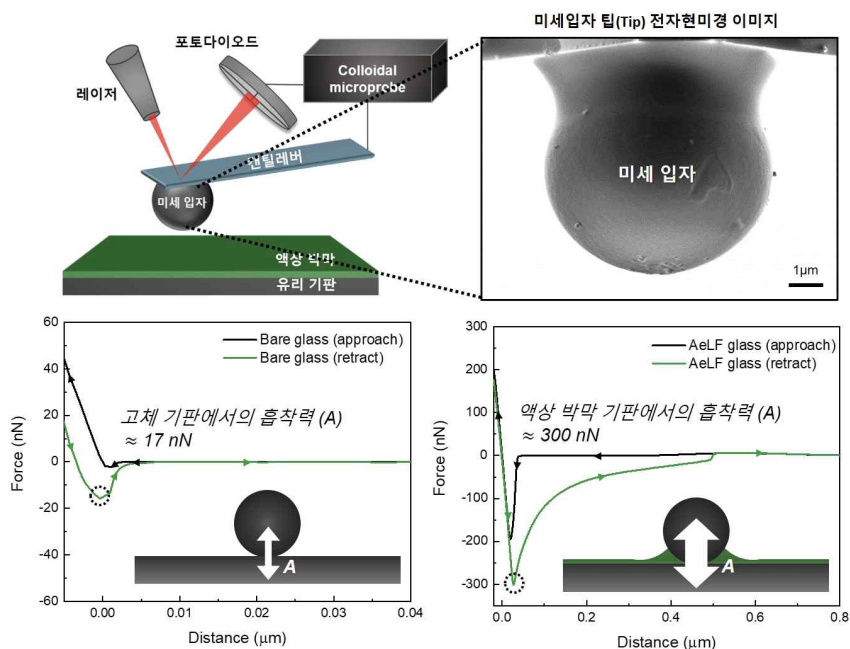


그림 7. 콜로이드탐침 현미경 측정 모식도(위-왼쪽)와 미세입자(실리카)의 전자현미경 이미지(위-오른쪽). 고체 기관과 액상 박막 기관에서의 흡착력 측정 결과(아래)

- 액상막을 코팅한 필터의 경우 동일 여재에 비해 본 연구단 풍동장비를 이용 PM2.5와 PM10에 대해서 10~20% 높은 집진 효율을 보임을 확인(그림8)하였고 한국생산기술연구원 CABIN 효율측정을 이용 먼지 크기별 10% 이상 높은 집진 효율을 확인함(증빙1)
- 집진효율을 향상되었으나 통기도와 압력손실은 변화하지 않아 높은 양질계수(Quality Factor)가 계산됨(그림8)

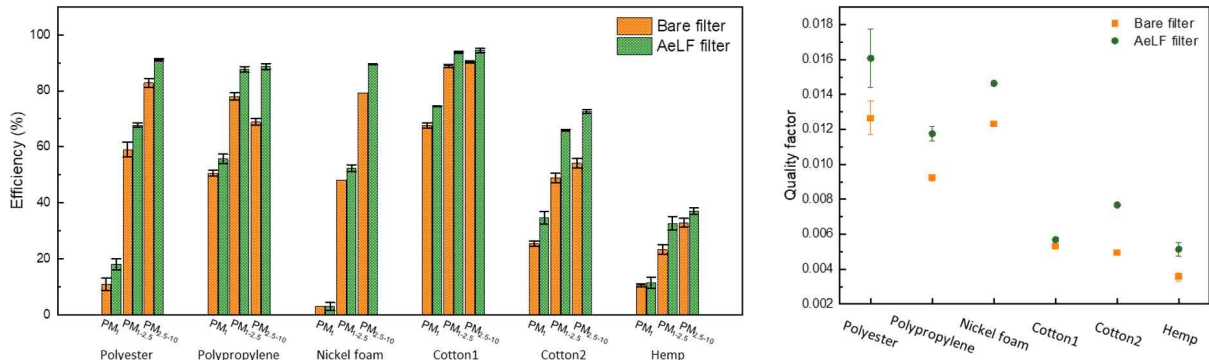


그림 8. 다양한 필터 여재에서의 미세먼지 포집효율 비교(왼쪽; 주황색: 고체, 초록색: 액상막)와 양질계수 비교(오른쪽)

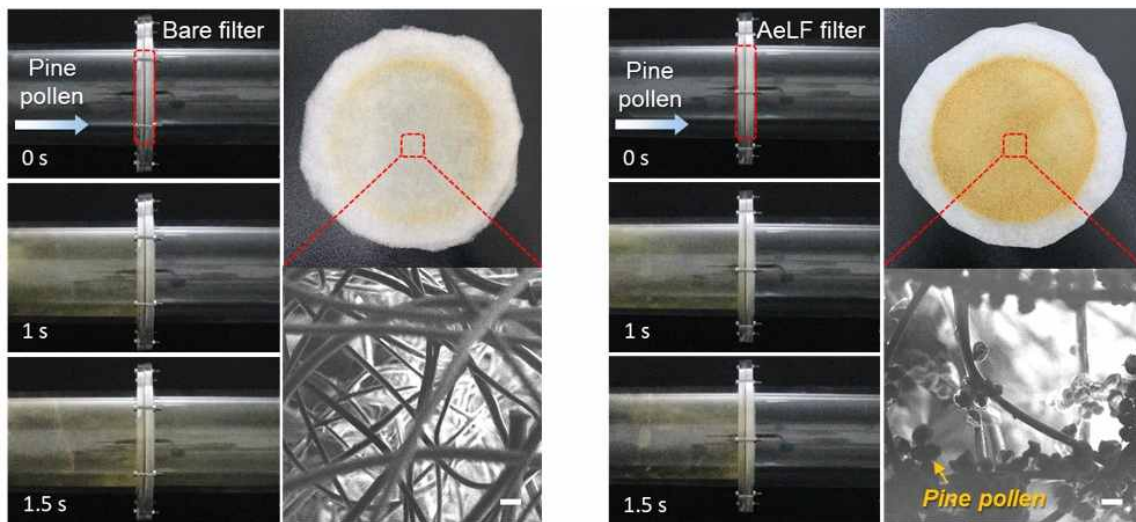


그림 9. 폴리에스터 프리필터(왼쪽)와 액상막을 코팅한 동일 프리필터(오른쪽)를 이용한 송화가루 집진 영상의 집진 스냅샷 사진과, 집진 후 필터 사진과 전자현미경 결과

- 동일 통기도에서 집진효율만을 향상시켜 향후 높은 통기도에서의 고속 집진 등에 가능성을 확인함

다. 흡착강화 필터를 이용한 집진 설비구축



그림 10. 액상막 필터를 이용한 자연풍 집진, 방충망 집진 및 대형 공기청정기용 필터로의 적용

- 다양한 필터여재를 사용하여 각 사용처에 따른 시제품을 구현 하였고 이를 각 장소에 배치하여 높은 집진 효율을 보임을 확인함

(2) 기술적, 경제적 성과

- **기술적 성과:** 본 연구단에서 개발한 흡착력 강화 필터는 기존에 없던 새로운 필터 소재로 본 연구 과제를 통해 원천기반기술을 확보하였을 뿐만 아니라 새로운 필터 소재의 메커니즘 분석 등의 기초연구도 함께 수행되어 추후 다양한 응용연구를 수행 할 수 있는 기반을 마련함. 이는 세계적으로도 처음 개발한 소재기술이기 때문에 기술개발을 선도적으로 수행하는 퍼스트무버로써의 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대됨.
- **경제적 성과:** 본 필터 소재는 기존 필터여재에 도입하여 기존 필터의 성능을 높여주는 역할을 할 수 있을 뿐만 아니라 새로운 집진영역을 개척하는 소재로 활용이 가능. 이를 바탕으로 국내에서의 미세먼지 저감 뿐만 아니라 수출 및 기술제휴를 통한 세계시장에서 다양한 집진 설비를 구축하는 역할을 수행 할 수 있을 것으로 기대.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1. 연구목표

본 연구는 고체에 대한 흡착력을 극대화 한 미세먼지 포집용 흡착강화 필터를 구현하고 이를 이용한 실내 대기질 개선을 위한 집진플랫폼 구축을 목표로 한다. 이는 기존 고체필터들의 한계인 고체(미세먼지)에 대한 약한흡착을 극복할 새로운 개념의 필터로, 강화된 흡착력을 바탕으로 상대적으로 더욱 큰 크기의 기공에서도 효과적인 미세먼지 포집이 가능 할 것으로 기대되며, 이를 바탕으로 높은 미세먼지 포집 효율 및 통기성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

세부적으로, 본 연구단은 흡착강화 필터로써 (1) 계층적구조 고체필터와 (2) 비휘발성 액상-겔 박막필터를 개발하고 관련 원천기반기술을 확보한다. 또한 흡착강화 필터의 높은 미세먼지 포집력 및 통기성을 바탕으로 기존 고체필터들을 보완 혹은 새로운 집진설비로의 응용을 통한 집진플랫폼을 구축함을 목표로 한다.

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	높은 통기성 및 먼지포집효율의 생체모사 흡착강화 필터 개발과 이를 이용한 차세대 실내공간 집진플랫폼 구축
세부 목표	- 나노/마이크로 계층적구조 필터 구현 - 비휘발성 액상-겔 박막필터 구현 - 필터 응용 및 실용화를 통한 차세대 집진플랫폼 구축

<표1. 연차별 연구개발 목표>

높은 통기성 및 먼지포집효율의 흡착강화 필터 개발과 이를 이용한 실내공간 집진플랫폼 구축		
구분	연차별 연구내용	세부연차목표
1차 년도	계층적구조 고체필터 구현	- 다기공 기판 표면위에서 실리콘고분자 나노필라멘트 합성 - 나노필라멘트 크기 조절 (10~100 nm) - 나노필라멘트 dipole 조절을 위한 표면개질
	비휘발성 액상-겔 박막필터 구현	- PDMS겔과 실리콘오일을 이용한 액상-겔 박막(두께: 100~500nm)필터 구현 - 액상-겔 박막 6개월 이상 장기안정성 확보
2차 년도	계층적구조 고체필터 집진효율 최적화	- 통기성 및 먼지포집효율 최적화 (압력손실 90Pa 이하에서 PM2.5 집진효율 9.9% 이상 구현)
	비휘발성 액상-겔 박막필터 집진효율 최적화	- 통기성 및 먼지포집효율 최적화 (압력손실 50Pa 이하에서 PM2.5 집진효율 9.8% 이상 구현) - 액상-겔 박막 18개월 이상 장기안정성 확보
	필터 응용 및 실용화를 통한 집진플랫폼 구축	- 실내먼지포집용, 마스크용, 창호용, 비산먼지포집 필터 등 응용을 위한 시제품 개발 - 시제품 성능평가 - 공정최적화를 통한 경제성 확보

3-2. 목표 달성여부

(1) 정량적 연구성과 목표 및 달성도

(단위 : 편, 건, 명, 천원)

구분		1차년도	2차년도	계	달성도	비고
국외논문 게재	목표	2	4	6	67	2편 추가투고 준비 중
	결과	1	3	4		
특허출원	목표	2	4	6	83	2건 추가출원 준비 중
	결과	3	2	5		
인력양성	목표	1	4	5	100	
	결과	1	4	5		
시제품	목표	3	1	4	100	
	결과	3	1	4		

(2) 성과 목표에 대한 자체 평가

성과 목표	자체 평가
계층적구조 고체필터	- 나노필라멘트의 반응 온도 및 단량체와 촉매의 함량 조절을 통해 나노필라멘트의 크기와 구조를 조절하는 연구를 수행 - 추가적으로 나노돌기와 나노필라구조를 합성하여 다양한 나노/마이크로 계층적 구조를 구현
액상-겔 박막 필터	- PDMS 나노브러쉬를 형성시킨 후 액상 박막을 코팅하는 방식으로 액상 박막을 안정적으로 구현 - 액상 박막의 농도와 조절을 통해 두께 조절 연구를 함께 수행 - 액상 박막을 코팅한 필터의 집진 효율 향상을 확인 - 동일 통기도와 압력손실에서 집진 효율만이 향상됨 - 콜로이드탐침 현미경을 통해 향상된 집진 효율이 먼지와 높은 액체-고체 흡착력 때문인 것을 확인
대면적 합성	- 액상막 필터를 균일하게 10m² 이상 크기로 합성하여 실증을 위한 대면적 필터 구현에 기반을 마련
창호용 필터	- 기공의 크기가 큰 기판을 이용해 액상박막을 코팅시킨 창호용필터를 제작하여 우수한 통기성과 집진성능을 확인
도로용 비산먼지 필터	- 액상박막을 코팅시킨 프리 필터를 이용하여 중앙대학교 학내 도로에 설치하여 자연풍에서의 집진이 가능함을 확인
대용량 집진 설비 필터	- 흡착강화 필터를 이용한 집진 플랫폼을 구축하기 위해 대면적의 필터 시제품을 제작하였으며 LH공사와의 협업을 통해 고덕신도시에서 미세먼지 프리존 설비를 통해 시연
공기청정기용 필터	공기청정기 필터로 도입 후 고체필터와의 비교 시연을 통해 기존 고체 필터대비 약 20%의 집진향상 효과가 있음을 확인

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

(1) 연도별 연구 목표 및 평가 착안점에 입각한 연구개발 목표의 달성도

핵심 성과물	단위 성과물	성과점검기준						
		질적 성과지표	목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	달성도
나노/마이크로 계층구조의 흡착강화 고체필터	마이크로 다기공 기관 표면에 합성된 나노필라멘트 구조	나노필라멘트 직경 조절 (nm)	5-20nm	10-20nm	전자현미경	보고서	10	100
		대면적 합성 (m ²)	10m ² 이상	10m ² 이상	전자현미경, 사진, 필터효율	보고서	5	100
	계층적구조의 미세먼지 필터	흡착력 (Newton)	0.6μN 이상	측정 불가	콜로이드탐침현미경	보고서	5	측정 불가
		먼지포집 효율 (%): PM2.5 와 PM10	99.9% 이상	97%	입자카운터	보고서	5	80
		압력손실 (Pascal)	90Pa 이하	90Pa 이하	차압계	보고서	5	100
		공인인증기관 성적서를 통한 필터의 미세먼지 포집성능 검증	99.9% 이상	측정 예정	공인인증기관평가	보고서	5	측정 예정
비휘발성 액상-겔 박막 흡착강화 필터	액상-겔 박막	액상-겔 박막 (nm)	0.1-5μm	0.1-5μm	원자현미경	보고서	20	100
	액상-겔 박막필터	흡착력 (Newton)	1μN 이상	3μN 이상	콜로이드탐침현미경	보고서	5	100
		먼지포집 효율 (%): PM2.5 와 PM10	98% 이상	98% 이상	입자카운터	보고서	5	100
		압력손실 (Pascal)	50Pa 이하	50Pa 이하	차압계	보고서	5	100
		공인인증기관 성적서를 통한 필터의 미세먼지 포집성능 검증	98% 이상	98% 이상	공인인증기관평가	보고서	5	100
흡착강화 필터를 이용한 집진 플렉스폼	창호용 필터	먼지포집 효율 (%)	99% 이상	95%	입자카운터	시제품 시연	5	90
	도로용 비산먼지 필터	먼지포집 효율 (%)	97% 이상	97% 이상	입자카운터	시제품 시연	5	100
	건설현장용 비산먼지 필터	먼지포집 효율 (%)	97% 이상	97% 이상	입자카운터	시제품 시연	5	100
	공기청정기용 필터	먼지포집 효율 (%)	99.9% 이상	99.9% 이상	입자카운터	시제품 시연	10	100
계							100	89

- 2년간의 본 연구과제를 통해 액상-겔 박막 필터를 성공적으로 구현하였고, 안정적인 액상막 구현 뿐만 아니라 액상물질의 두께 조절 연구를 수행함
- 아울러 콜로이드탐침 현미경 분석(독일 막스플랑크 연구소와의 협업: 참여연구원 파견을 통해 직접측정)을 통해 액상막과 미세먼지간의 흡착력 향상성을 정량적으로 분석하였고, 액상-겔 박막 필터의 집진효율 향상성을 확인함
- 동일 통기도와 압력손실의 필터여재에서 약 10~20% 가량의 집진효율 증가를 확인하여 통기도와 집진 효율간의 상충성을 완화한 필터임을 확인함
- 계층적 구조의 필터는 나노필라멘트를 실리콘 전구체 용액 합성공정을 통해 성공적으로

합성

- 합성실험 조건을 변화시킴에 따라 나노필라멘트 구조 외에도 나노필라와 나노돌기 구조가 합성됨을 확인
- 액상-겔 박막 필터는 실험실 스케일에서 높은 수준의 성능을 보임이 확인 되었기에 실제 응용 가능성을 타진하기 위해 다양한 시제품으로 구현됨
- 2년간의 연구를 통해 코로나 사태로 인해 측정이 어려워진 계층적 구조 필터 외에 본 연구단이 최초 제시한 연구목표를 대부분 달성하였고, 처음 예상했던 성능 이상의 필터 성능들을 확인하여 매우 성공적인 연구결과와 원천기술을 확보함

(2) 목표 미달성 원인 및 후속연구의 필요성

- 액상-겔 박막 필터의 경우 처음 예상치를 웃도는 결과를 확보 (목표초과달성)
- 소재의 다양성을 위해 액상-겔 박막과 고체입자의 충돌분석을 통한 새로운 먼지포집 메커니즘 도출이 요구됨
- 계층적 필터의 경우 나노구조를 필터여재 표면에 성공적으로 합성하였으나, 나노구조들의 거칠기 때문에 콜로이드탐침 현미경으로는 일관된 흡착력 측정이 어려움 (거칠기와 나노기공에 따라 측정 point에 따른 흡착력 결과가 상이)
- 평평한 표면에서 더 균일한 구조를 합성하여 2차 년도 하반기에 측정을 시도하고자 하였으나 코로나 사태로 인한 연구원 파견에 어려움으로 연구기간 내 측정이 불가능해 짐
- 이에 따라 추후 팬데믹 이후에 계층적 구조 필터와 관련된 흡착력 정량화를 통한 메커니즘 분석 및 집진 효율 분석연구가 후속 연구로 요구됨
- 액상-겔 박막의 자가세정능력(self-cleaning)을 바탕으로 먼지가 포집된 표면의 재사용이 예상되며 이에 따른 후속 연구가 필요함

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

4-1. 추가 연구의 필요성: 실증화를 통한 흡착강화필터 집진 플랫폼 구축

- 고속집진(면풍속 > 3m/s) 공기정화설비 실증: 상대적으로 낮은 압력손실 및 높은 통기도의 필터여재에서도 우수한 집진이 가능한 액상-겔 박막 필터는 지하철, 지하상가, 학교, 병원 등 빠른 유속에서 대용량 집진이 요구되는 다중이용시설의 환기설비와 공기청정시스템에 적합할 것으로 기대됨(그림11)



그림11. 흡착강화 필터를 이용한 고속집진 모식도와 적용 대상 시설

- 고효율 HEPA/ULPA 필터의 차압증가 완화용 프리/미디움 필터 실증: 본 연구를 통해 흡착강화 필터를 프리/미디움 필터로 이용 시 높은 집진성능을 바탕으로 HEPA/ULPA 필터의 작은 기공이 막히는 문제를 20~30%가량 완화해주는 것을 확인. 이러한 현상을 이용해 HEPA/ULPA 필터와 복합필터를 제조하면 기존 HEPA/ULPA 필터의 차압완화로 인한 성능향상 뿐만 아니라 교체주기의 획기적 향상을 도모할 수 있을 것으로 기대(그림12)

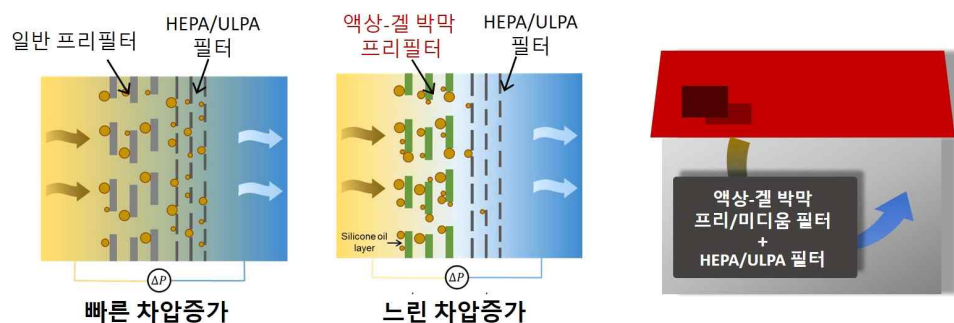


그림12. 흡착강화 필터를 이용한 고속집진 모식도와 적용 대상 시설

- **자연풍(바람) 이용 청정 집진설비 실증:** 흡착강화 필터는 기존 고체필터보다 약 10~20배 이상 높은 순간흡착력 및 200이상 높은 평형흡착력을 보임을 확인. 때문에 한번 흡착된 먼지는 다시 탈착되지 않는 성능을 확인하였고 이를 활용해 자연풍과 같은 조건에서 다방향 집진이 가능함을 확인. 이에 따라 자연 바람을 이용한 친환경 집진설비로의 적용이 기대됨
- **공동주택과 상업시설의 공기순환 및 열교환 시스템용 집진설비 실증:** 액상-겔 박막 필터는 높은 통기도와 높은 효율을 바탕으로 처리 공기량이 많은 공동주택과 상업시설의 공기순환 및 열교환 시스템에 적용 시 기존 대비 적은 에너지로도 충분한 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대

4-2. 산업화 추진 방안

- 본 연구는 기존에 없던 새로운 필터소재를 구현하였고 기존 대비 매우 효과적인 집진 성능을 보임을 확인함
- 본 연구를 통해 확보한 원천기술을 바탕으로 국내뿐만 아니라 세계적으로도 미세먼지가 심각한 도시 및 다중이용시설들에 적용하여 집진성능을 향상시킬 수 있는 다양한 응용방안이 기대됨
- 이를 바탕으로 산업화 시 세계시장 선점과 함께 세계기술 및 시장을 선도하는 역할이 기대됨
- 본 연구를 통해 개발된 원천기술을 세부적인 특허 및 해외특허 출원을 통해 보호를 목표로 함

붙임. 참고문헌

주 의

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