

최종보고서(일반과제용)										보안등급 일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부			사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업				
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명		국토교통기술혁신연구				
공고번호	공고-제05호			총괄연구개발 식별번호		-					
국가과학기술 표준분류	EI0499	40%	EB0207	30%	EB0204	30%					
총괄연구개발명	국문	-									
	영문	-									
연구개발과제명	국문	미세먼지 차단 효율이 95% 이상인 건물 창호용 3차원 미세망상구조 기반 통기성 반투명 세라믹스 개발									
	영문	Development of breathable and translucent ceramics based on 3D micro-network structure for building windows with particulate matter filtering efficiency of more than 95%									
주관연구기관	기관명	금오공과대학교 산학협력단			사업자등록번호	513-82-07067					
	주소	(39177) 경상북도 구미시 대학로 61			법인등록번호	176071-0002155					
주관연구책임자	성명	박준용			직위	조교수					
	연락처	직장전화	054-478-7732		휴대전화	010-8935-1780					
		전자우편	jpark@kumoh.ac.kr		국가연구자번호	10800777					
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(0년 9개월)									
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년 0개월)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그외기관 등의 지원금 자발채체 기타()				합계		연구개발비 외 지원금	
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	350,000	0	0	-	-	-	-	350,000	0	350,000	
1년차	150,000	0	0	-	-	-	-	150,000	0	150,000	
2년차	200,000	0	0	-	-	-	-	200,000	0	200,000	
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고 역할		기관유형			
공동연구기관											
위탁연구기관											
연구기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명	안준용			직위	대학원생					
	연락처	직장전화	054-478-7751		휴대전화	010-9921-2917					
		전자우편	junyonga@kumoh.ac.kr		국가연구자번호	12481110					

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

2022 년 2 월 23 일

주관연구책임자 : 박준용 (직인)

주관연구기관의 장 : 금오공과대학교 산학협력단 김동성 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

< 요약 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업		총괄연구개발 식별번호		-	
내역사업명		국토교통기술혁신연구		연구개발과제번호		21CTAP-C157620	
국가과학기술 표준분류		EI0499	40%	EB0207	30%	EB0204	30%
총괄연구개발명		-					
연구개발과제명		미세먼지 차단 효율이 95% 이상인 건물 창호용 3차원 미세망상구조 기반 통기성 반투명 세라믹스 개발					
전체 연구개발기간		2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)					
총 연구개발비		총 350,000천원 (정부지원연구개발비 : 350,000천원, 기관부담연구개발비 : 0천원, 지방자치단체 : 0천원, 그 외 지원금 : 0천원)					
연구개발단계		기초[☒] 응용[☐] 개발[☐] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[☐]		기술성숙도		착수시점 기준(2단계) 종료시점 목표(5단계)	
연구개발과제 유형		지정공모 [☐] 자유공모 [☒]					
연구개발과제 특성		실용화					
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	미세먼지 차단 효율이 95% 이상인 독립된 멤브레인 형태의 3차원 미세망상구조 기반 통기성 반투명 세라믹스 원천소재 개발					
	전체 내용	○ 반도체공정 기반의 첨단 나노공정·소재 기술을 바탕으로 한, '3차원 다공성 세라믹 멤브레인' 특화 제조공정 개발 및 신규 기공 구조의 소재 구현 ○ 성공적으로 제조된 '3차원 다공성 세라믹 멤브레인'에 대한 창호용 초미세먼지 필터로서의 종합적인 물성/성능 분석 및 최적화를 통한 고성능 차세대 필터 소재 구현					
	1년차	목표	'3차원 미세망상구조 세라믹스' 제조공정 개발 및 소재 구현				
		내용	○ 용액 또는 저온 에칭 가능한 고분자 템플릿 탐색 및 선정 ○ 광학 3차원 리소그래피를 통한 주기적 3차원 미세망상구조 템플릿 구현 ○ 공정변수 설계를 통한 3차원 미세망상구조 정밀 제어 ○ 자가지지(freestanding) 멤브레인화 공정 개발 ○ 반도체공정 기반 2종 이상 세라믹 물질전환 공정 개발				
	2년차	목표	'3차원 미세망상구조 세라믹스' 물성분석/성능평가 및 최적화				
		내용	○ 미세먼지 필터효율, 투광성, 통기성에 대한 평가기준 확립 및 성능평가 ○ 3차원 미세망상구조 변화에 따른 다종 물성/성능 연계분석 ○ 물성/성능 피드백을 통한 3차원 미세망상구조 최적화 ○ 1인치급 시작품 제작 ○ 유사환경 성능평가 (PM10 차단효율: >95%, PM2.5 차단효율: >90%, 투광성: >65% @ 600nm, 감압: <500Pa @ 1~5cm/s)				
연구개발성과		○ 3차원 미세망상구조 세라믹스 특화 제조공정기술 개발 (관련 특허 다수 확보) ○ 1인치급 3차원 미세망상구조 세라믹스 방진막 시작품 3종 구현 (최종성과물 목표 달성) ○ PM2.5 차단효율: >99%, 투광성: >75%, 감압: <500Pa (정량적 성능지표 달성) ○ 기타 정량적 성과지표: - 국내외 특허 8건 출원 (PCT 1건 포함) - 국내 학술지 논문 1건 게재 - 국외 SCI급 논문 4건 투고 (JCR 상위 2% 이내 1건, 5% 이내 2건 포함 심사 중) - 국내 학술회의 8건 발표 (우수발표 수상실적 4건 포함, 초청강연 1건 포함) - 전문인력 8명 양성 (석사 3명, 학사 5명) - 연구장비 3종 구축 (원자층증착기, 초임계건조기, 플라즈마처리기) - 홍보성과 1건					
연구개발성과 활용방안 및 기대효과		○ [과학·기술적 측면] 본 연구의 최종성과물은 기존 방사 공정 기반 고분자 나노섬유 원천특허로부터 완전히 탈피하는 '3차원 다공성 세라믹 멤브레인 원천소재 및 특화 제조공정'으로, 연구가 종료된 이후 후속 연계 사업을 통해 건축 및 창호 업체와 협업하여 기술 상용화를 이룩할 수 있음					

	○ [경제적 측면] 초미세먼지 이슈와 연동하여 공기청정기 시장은 이미 국내 시장만 3조원에 달하는 거대 규모로 성장하였고, 방진막 등 건축 부자재 시장까지 포함하면 최소 수십조원에 달하는 시장이 형성됨. 본 연구의 개발성과는 차세대 고부가가치 필터 소재와 관련한 미래 시장을 선점하는데 기여할 수 있음 ○ [경제적 측면] 공정 설계를 통해 HEPA 필터 또는 분리막 등에 적합한 물성/성능을 갖도록 최종성과물을 변형하면, 이차전지 및 공기청정기를 포함한 각종 응용산업에 핵심 부품 소재로 요긴하게 활용될 수 있어 신규 시장을 창출할 수 있음 ○ [사회적 측면] 초미세먼지 차단용 신개념 창호 자재는 최근 대두되는 실내 공기오염과 관련한 건강문제를 원천적으로 해결할 수 있는 가능성이 있어 잠재적으로 국민 건강보건 증진에 기여할 수 있음											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	5	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
국문핵심어 (5개 이내)	기능성 창		미세먼지		방진막		다공성 재료		세라믹스			
영문핵심어 (5개 이내)	Functional window		Particulate matter		Dustproof screen		Porous material		Ceramics			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구개발과제의 수행과정 및 수행 내용	3
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	10
4. 목표 미달 시 원인분석	33
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	35
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	36

별첨자료(참고문헌 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

[연구개발과제 수행 배경 및 필요성]

- 실내 공기질을 저하시키는 다양한 오염원 중에서도 최근 들어 가장 문제가 심각한 것은 **초미세먼지 (particulate matter, PM 2.5)**로, 대기 중에 부유하는 분진 중 직경이 $2.5\mu\text{m}$ 보다 작은 먼지를 의미한다. 초미세먼지의 크기는 대략 머리카락 직경의 1/20~1/30 수준으로 매우 작기 때문에 **방충망이나 창호 틈새를 통해 손쉽게 실내로 유입**되어 실내 공기질을 저하시키곤 한다.
- 초미세먼지 차단용 창호 기술의 핵심은 **통기와 시야에 방해**를 주지 **않으면서도** $2.5\mu\text{m}$ 크기의 초미세먼지를 효과적으로 걸러낼 수 있는 방진막 소재를 구현하는 것이다. 이를 위해선 **3차원 미세망상구조 (micro-network structure) 기반의 다공성 멤브레인 개발**이 필수적이다.
- 기존에 고분자 나노섬유 기반 HEPA 필터 원천소재 기술(관련 특허: US 6428610 B1, 2002)을 보유하고 있던 3M은 창호 부자재가 결합된 창호용 방진막 제품을 개발하여 **초미세먼지 차단용 방진막 시장을 선도**하고 있다. 국내에서는 대표적으로 LG하우시스와 한화 L&C에서 미세먼지 저감용 나노섬유 기반 방충망을 출시하였으나, 초미세먼지를 효과적으로 차단하는 데는 어려움이 있고 유지관리 측면에서 실효성이 적어 소비자들의 만족도가 높지 않다.
- 현 기술 수준에서 고분자 나노섬유 방진막은 가장 대중적으로 손쉽게 활용할 수 있는 미세먼지 차단용 창호 자재임이 분명하다. 하지만, **고분자 나노섬유 방진막은 열적·기계적·화학적**으로 매우 취약하여 외부 환경변화에 민감하고 내구성에 근본적인 문제가 있다. 무엇보다도, **초미세먼지에 대한 물리적 필터 효율을 높이기** 위해선 방진막을 구성하는 기공의 크기를 극도로 줄여야 하는데, 이 경우 미세기공에 의한 **광 산란이 심화**되어 방진막이 불투명해지는 **심미적 문제**가 발생한다.
- 이와 같은 기존 초미세먼지 차단용 방진막의 기술적 한계를 극복하고 기능적·심미적 관점에서 수요자들의 눈높이를 충족하기 위해선 **방진막을 구성하는 소재 및 제조공정 측면에서 혁신적인 시도**가 반드시 **요구**되나, 고분자 방사 기반 원천소재·공정기술로부터의 탈피가 쉽지 않은 실정이다.
- 최근, 재료공학 분야에서는 **반도체공정을 기반으로 한 융복합 제조공정의 개발**을 통해 **고분자 이외에도 세라믹과 같은 무기소재로 구현된 고기능성 멤브레인**을 제조하고자 하는 연구가 활발히 수행되고 있다. 특히, 나노공정·소재 기술은 재료공학 분야에서 이미 상당히 고도화되어 건축자재의 기술혁신을 가져오고 새로운 시장을 개척할 수 있음에도 불구하고, 이러한 형태의 융합연구는 국내·외에서 거의 시도된 바 없다.

[연구개발과제 최종 목표]

- 이에, 본 연구개발에서는 반도체공정을 기반으로 한 첨단 물질전환 공정을 바탕으로, **미세먼지 차단효율이 95% 이상인 독립된 멤브레인 형태의 3차원 미세망상구조 기반 통기성 반투명 세라믹 원천소재의 개발**이라는 도전적인 과제를 시도해 보고자 한다.
- 오염된 공기가 유입될 때 (초)미세먼지를 선택적으로 여과하고 깨끗한 공기 분자만을 원활히 통과시킬 수 있도록 최종개발품은 평균 기공 크기가 $2.5\mu\text{m}$ 이하인 고 기공률의 열린 기공 구조로 설계된다.

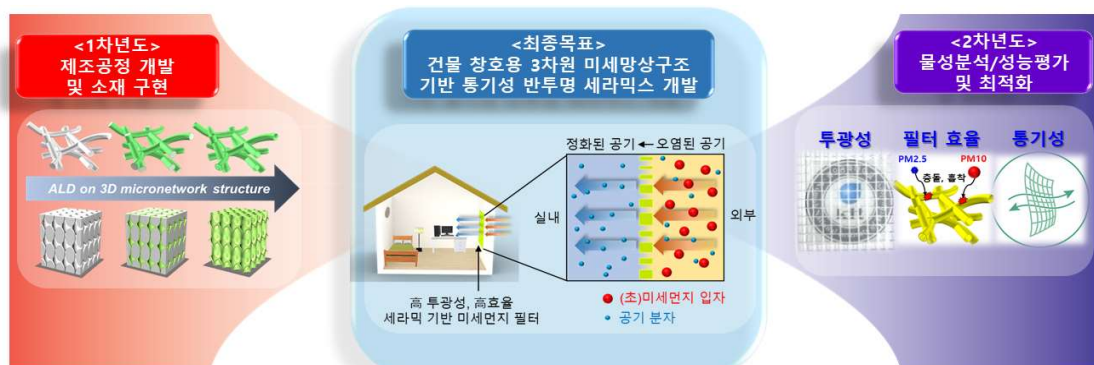


그림 2. 최종 목표 달성을 위한 연구개발 계획을 나타내는 모식도.

2) 연구개발과제의 년차별 목표

○ 1차년도 (2020.04.13.~2020.12.31.) : '3차원 미세망상구조 세라믹스' 제조공정 개발 및 소재화

- 용액 또는 저온 에칭 가능한 3차원 미세망상구조 템플릿 탐색 및 선정
- 광학 3차원 리소그래피를 통한 주기적 3차원 미세망상구조 템플릿 제조
- 공정변수 설계를 통한 3차원 미세망상구조 정밀 제어 (기공 크기: $<2.5\mu\text{m}$)
- 자가지지(freestanding) 멤브레인화 공정 개발 (막 두께: $>25\mu\text{m}$)
- 반도체공정(ALD, RIE 등) 기반 2종 이상 세라믹 물질전환 공정 개발

○ 2차년도 (2021.01.01.~2021.12.31.) : '3차원 미세망상구조 세라믹스' 물성분석/성능평가/최적화

- 미세먼지 필터효율, 투광성, 통기성에 대한 평가기준 확립 및 성능평가
- 3차원 미세망상구조 변화에 따른 다종 물성/성능 연계분석
- 물성/성능 피드백을 통한 3차원 미세망상구조 최적화
- 대면적 시작품 제작 (면적: $>1\text{in}^2$)
- 유사환경 성능평가 (PM10 차단효율: $>95\%$, PM2.5 차단효율: $>90\%$, 투광성: $>65\%$ @600nm, 감압: $<500\text{Pa}$ @1~5cm/s)

<표 1. 연차별 핵심 연구개발성과 및 연구개발 목표치 요약>

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	3차원 미세망상구조 템플릿을 제조하기 위한 광학 3차원 나노패터닝 기술 확립	대면적 노광장치 셋업 및 광학 3차원 리소그래피 공정 확립	(한국/K대 기준) 면적: 355nm 레이저 단일노광 기준 1인치	면적: $>1\text{in}^2$	레이저 광원 기준 국내·외 최고 수준	25
		패터닝 공정변수 최적화를 통한 3차원 미세망상구조 템플릿 구현	(한국/K대 기준) 기공크기: 150nm~2.5 μm	기공크기: $<2.5\mu\text{m}$	초 미세 먼지 PM2.5 기준	25
	3차원 미세망상구조의 세라믹 소재화를 위한 물질전환공정 확립	ALD 전구체 선정 및 세라믹 박막 증착 조건 확립	(한국/K대 기준) 증착두께: 3D 나노다공체 기판 활용 기준 77~700nm	증착두께: $<100\text{nm}$	65% 이상의 높은 투광성을 보장하기 위한 대략적인 최대 범위	25
		고분자 템플릿 제거 공정 개발 및 최적화	(한국/K대 기준) 최종 막 두께: 자가지지 멤브레인 기준 10 μm	최종 막 두께: $>25\mu\text{m}$	멤브레인 소재의 핸들링을 위한 대략적인 최소 두께 (홀더부 제외)	25
2년차 (2021)	3차원 미세망상구조 세라믹스 물성분석/성능평가 플랫폼 구축	(초)미세먼지 필터 효율, 압력 감소간이 측정 플랫폼 개발	해당 없음	측정 플랫폼 제작 성공	제작 여부에 따라 정성적으로 판단	25
		3차원 미세망상구조 세라믹 소재의 대표 3종 물성/성능 평가	해당 없음	물성/성능 획득 성공	측정 여부에 따라 정성적으로 판단	25
	물성/성능 피드백을 통한 3차원 미세망상구조 최적화 및 목표성능 구현	다종 물성/성능 연계분석 기반 기공 구조 최적화	해당 없음	측정된 물성/성능을 반영한 공정 최적화 수행 여부	피드백 여부에 따라 정성적으로 판단	25
		투광성, 통기성, 미세먼지 필터효율이 최적화된 인치급 시작품 제작	(미국/3M 기준) 투광성: $<40\%$ PM10 필터효율: $<95\%$ PM2.5 필터효율: $<85\%$ 압력감소: $<550\text{Pa}$	(세라믹 기준) 투광성: $>65\%$ PM10 필터효율: $>95\%$ PM2.5 필터효율: $>90\%$ 압력 감소: $<500\text{Pa}$	현재 비교할만한 세라믹 기반 방진막 상용품은 없으나, 고분자 기반 방진막 대비 우수한 수준	25

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

[본 연구개발과제 수행을 위한 2가지 핵심 기반기술]

○ [핵심 기반기술 ①] 근접장 나노패터닝(Proximity field nanoPatterning, PnP)

- 근접장 나노패터닝은 기술원리적으로 반도체공정의 포토리소그래피에서 비롯되어 지금까지 개발된 다양한 3차원 나노패터닝 기술 중에서도 공정재현성, 반도체공정 호환성, 대면적화 및 양산에 큰 이점이 있고, 잠재적으로 산업화 가능성이 매우 큰 차세대 공정기술로 평가받고 있음
- 포토마스크의 일종인 컨포멀(conformal) 위상 마스크에 빛이 입사될 때 발생하는 빛의 3차원적인 간섭 분포를 포토레지스트에 각인시켜, 단 **한번의 노광으로 3차원 정렬 나노다공성 고분자 필름을 대면적 상에서 빠르게 제조할 수 있는 진보된 형태의 포토리소그래피 기술임** (그림 2)
- 본 연구진은 이 기술과 관련하여 선도적 연구를 수행하고 있는 그룹 중 하나로, 그간의 연구결과를 30편 이상의 세계적 학술지(Nature Comm., Adv. Mater., Adv. Funct. Mater., ACS Nano 등)에 보고하였고 관련 특허를 다수 확보하고 있음
- 본 연구개발과제에서 이 기술은 **상용 고분자 멤브레인과는 구조적으로 완전히 차별화되는 정렬된 균질 기공 구조를 갖는 차세대 고부가가치형 멤브레인 템플릿을 제조하는데 활용됨**

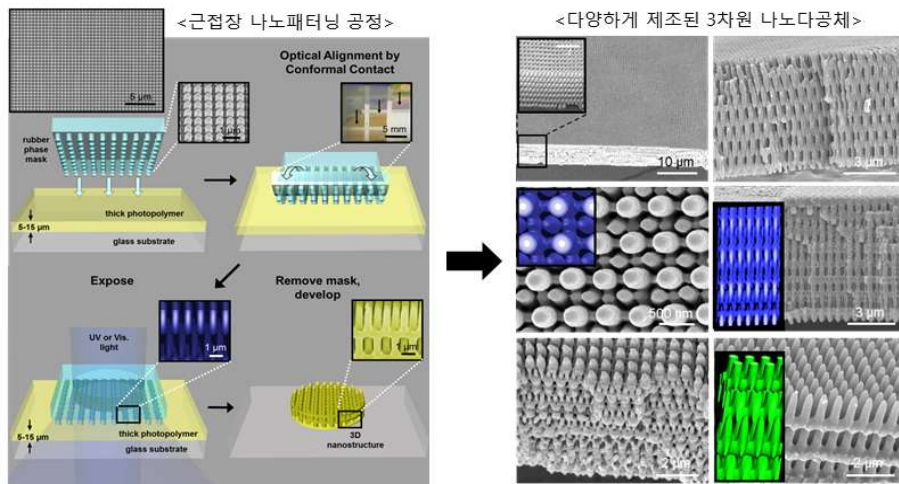


그림 3. 근접장 나노패터닝 공정 모식도(좌) 및 공정 결과물의 예(우).

○ [핵심 기반기술 ②] 3차원 나노다공체 특화 반도체공정 기반 물질전환 기술

- 3차원 나노다공체는 부피 대비 높은 표면적, 원활한 내부 물질 이동, 기공 조절에 따른 필터 성능 제어 등 구조적 요소에 의한 다양한 장점을 가짐
- 이러한 구조적 장점에도 불구하고, 제조공정 상 3차원 나노다공체를 구성하는 물질은 주로 고분자로 제한되어 그 활용성이 제한적임
- 본 연구진은 3차원 나노구조화된 고분자 소재를 템플릿으로 활용하여 반도체공정을 기반으로 한 물질 전환 기술을 통해 다양한 무기소재로 전환하는 선행연구를 수행한 경험과 이에 대한 기술적 노하우가 있음 (그림 3)
- 본 연구개발과제에서 이 기술은 **선별된 상용 고분자 멤브레인 또는 근접장 나노패터닝을 통해 제조된 3차원 정렬 나노다공성 멤브레인을 세라믹 복합화하거나 세라믹으로 완전히 전환하는데 활용됨**

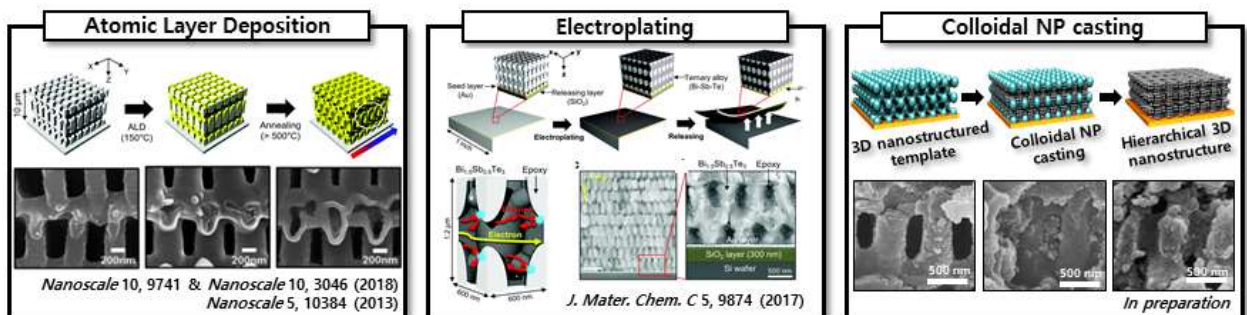


그림 4. 3차원 나노다공체 특화 물질전환 기술의 예.

[본 연구개발과제의 4가지 핵심 기술난제 및 해결 전략]

- **[핵심 기술난제 ①] 미세먼지 필터 효율의 저하 없는 투광성 선택적 증대 (목표치: >65% @ 600nm)**
 - 시중에서 판매되는 대부분의 미세먼지 저감용 나노섬유 고분자 멤브레인은 가시광 투과율이 대략 30% 내외로 방충망에 시공 시 실내에서 외부 시야가 거의 확보되지 않고 햇빛의 입사량이 감소하는 문제가 있음 (그림 4)
 - 이는 다공성 멤브레인 소재에서 일반적으로 발생하는 **필터 효율과 투광성의 trade-off 관계** 때문임
 - 예를 들어, 2.5 μ m 수준의 초미세먼지에 대한 물리적 필터 효율을 높이기 위해선 i) 방진막을 구성하는 기공의 크기를 그보다 작게 하거나, ii) 수직 방향으로 적층되는 기공 층의 개수를 늘려야 하는데, 두 경우 모두 **미세기공에 의한 광 산란이 심화되어 멤브레인이 불투명해지는 심미적 문제가 발생함**
 - 이는 **기존 고분자 방사 기반의 제조공정과 결과적인 비정렬 기공 구조로는 원천적으로 해결이 어려운 기술 난제**가 분명함



그림 5. 3M 사 등에서 제조·판매되는 상용 미세먼지 저감용 창호 부자재의 예.

- **[핵심 기술난제 ①의 해결 전략] 반도체공정 기반 물질전환 기술을 통한 신규 기공 구조의 실현**
 - (초)미세먼지에 대한 높은 필터 효율을 유지한 채 투광성을 선택적으로 증대시키기 위해선 신규 기공 구조의 개발이 필요하고, 이를 위해선 **멤브레인 제조공정 및 소재의 혁신이 도전적으로 시도되어야 함**
 - 이에 본 연구에서 수립한 신규 기공 구조 확보 전략은 다음과 같음: i) **템플릿으로 활용될 3차원 미세망상구조 고분자 멤브레인 확보**, ii) **3차원 연속적인 초박막 형태의 금속산화물 증착을 통한 코어-셀 네트워크 구조의 고분자-세라믹 복합 멤브레인 제조**, iii) **고분자 선택적 제거 공정을 통한 3차원 중공(hollow) 세라믹 미세망상구조 멤브레인 제조**
 - 상기 전략을 실행함에 있어, 기술원리적으로 자가제한반응(self-limiting reaction)에 의해 스텝 커버리지(step coverage)가 비할 데 없이 우수하고, 증착된 박막 두께의 제어가 나노미터 수준에서 가능하며, 100 $^{\circ}$ C 이하의 저온 공정이 가능한 **원자층 증착법(Atomic Layer Deposition, ALD)은 3차원 미세망상구조에 초박막 금속 산화물을 컨포멀(conformal) 코팅하는데 최적화된 공정**이라 할 수 있음
 - 이에, 물질전환을 위한 핵심 기반공정으로 ALD를 선정하고, Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO 등 다양한 금속 산화물을 저온 증착할 수 있는 ALD용 화학 반응 레시피에 대한 탐색 및 고분자 템플릿 표면 위 화학반응을 개시하기 위한 화학적 표면개질 연구를 선제적으로 수행하였음
 - 3차원 중공(hollow) 세라믹 미세망상구조 멤브레인은 **기공률이 극도로 높고 구성 물질의 유효 부피가 작아 상용 고분자 멤브레인과 비교했을 때 투광성이 크게 증대될 것으로 기대되며, 동일 기공 구조를 가정하였을 때 세라믹 벽(wall)의 두께에 의존적으로 투광성이 결정될 것으로 예상됨**
 - 따라서, **ALD를 통해 증착되는 세라믹 박막의 두께를 sub-100 nm 수준에서 정밀하게 제어하여 멤브레인의 투광성을 극대화하는 연구를 집중적으로 수행**하였음
 - 특히, 본 연구개발의 목표는 개시단계가 TRL1~2단계 수준인 기초원천연구 사업의 취지에 알맞도록 도전적으로 설정되어 있어, 1년 9개월에 걸친 짧은 기간 동안 반드시 원천소재를 확보하고 목표한 성능지표를 달성할 수 있도록 제조공정 측면에서 2가지 트랙을 전략적으로 설정하여 투광성이 65% 이상인 세라믹 기반 3차원 미세망상구조 멤브레인 원천소재 개발을 시도하였음 (그림 5)
 - <트랙 1>은 **근접장 나노패터닝으로 직접 제조된 3차원 정렬 기공 구조의 멤브레인을 중심으로 한 공정 개발로, 차세대 고부가가치 멤브레인을 위한 원천공정 및 원천소재를 확보하고자 하는 전략**임
 - <트랙 2>는 **상용 고분자 멤브레인과 ALD 공정변수 최적화를 중심으로 한 공정 개발로, 후속 공정과의 적합성에 의거 잘 선정된 상용 템플릿을 바탕으로 기술사업화 가능성을 보다 높이고자 하는 전략**임

〈투광성이 증대된 ‘세라믹 기반 3차원 미세망상구조 멤브레인’ 확보 전략〉

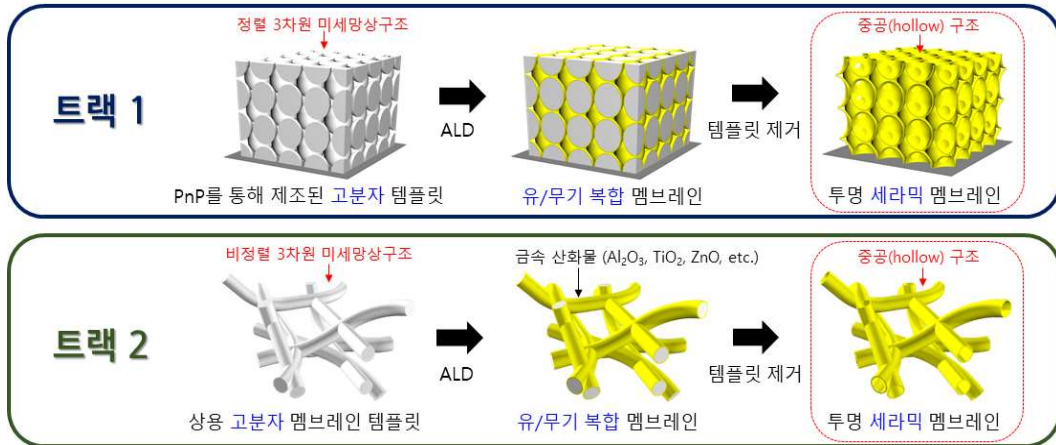


그림 6. 高 투광성 3차원 미세망상구조 멤브레인 소재 확보를 위한 Two-track 전략.

○ [핵심 기술난제 ②] 3차원 정렬 나노다공체의 자가지지(freestanding) 멤브레인화

- 상기 <트랙 1>과 관련하여, 근접장 나노패터닝은 수십 nm ~ 수 μm 범위에서 기공 크기를 정밀하게 제어할 수 있고, 비교적 대면적 상에서 기공 크기 및 분포를 균질화할 수 있는 몇 안 되는 차세대 3차원 나노패터닝 기술로, 결과물에 있어 멤브레인 응용과의 적합성이 매우 우수하고 차세대 고부가가치 멤브레인으로 발전할 가능성이 충분함
- 3차원 나노다공체와 관련한 근접장 나노패터닝의 우수한 기술역량이 지난 십여년 간 세계적 학술지 (Nature Commun., PNAS, Adv. Mater., ACS Nano 등)에 보고되어 왔으나, 여전히 제조 가능한 제품의 형태와 역할은 주로 딱딱한 실리콘 또는 유리 기판 위 기능성 코팅으로 제한됨
- 패터닝된 $10\mu\text{m}$ 내외 두께의 高 기공률 3차원 나노다공성 멤브레인을 기판으로부터 온전히 탈착하여 기체 투과성(gas permeable)이 있는 독립형 멤브레인 소재·부품으로 구현하는 것은 공정적으로 매우 어려운 기술난제이며, 탄소 및 금속 계열 물질로 전환하여 멤브레인을 구현한 일부 사례가 존재하나 최종산물이 완전히 불투명하여 창호 자재로 활용하기에는 부적합함
- 따라서, 멤브레인 응용을 위해선 근접장 나노패터닝을 통해 제조되는 3차원 정렬 기공 구조의 고분자 나노다공체를 자가지지(freestanding) 멤브레인화를 위한 별도의 신규 공정 개발이 필요함

○ [핵심 기술난제 ②의 해결 전략] 기체 투과성 다공성 멤브레인을 기판으로 활용한 패터닝 최초 시도

- 그간 근접장 나노패터닝에 의해 제조되어 온 3차원 나노다공체는 대부분 $1\mu\text{m}$ 내외 두께의 얇은 접착층을 통해 기판에 반영구적으로 부착된 상태로, 3차원 나노다공성 자가지지 멤브레인을 얻기 위해선, i) 두꺼운 포토레지스트를 패터닝 후 전사 공정을 시도하거나 ii) 기체 투과성(gas permeable)이 있는 다공성 멤브레인을 기판으로 활용하여 패터닝을 시도하는 방안이 새롭게 고려될 수 있음 (그림 6)
- <전략 i>의 경우, 포토레지스트 현상(developing) 및 건조 과정에서 $25\mu\text{m}$ 내외의 비교적 두꺼운 高 기공률 3차원 나노다공체의 기계적 수축/팽창을 제어하는 것이 매우 어렵고, 이후 전사(transfer) 과정에서 균열 등 물리적 결함 발생을 제어하는 것이 불가능한 문제가 있었음
- 이에, <전략 ii>를 기반으로 자가지지 멤브레인화 목표를 달성하는데 연구개발 역량을 집중하였음
- 포토리소그래피에 사용되는 일반적인 실리콘 또는 유리 기판으로부터 탈피하여 다공성 멤브레인을 기판으로 사용할 경우, 포토레지스트 코팅 과정에서 액상 포토레지스트의 일부가 모세관력에 의해 기판 표면의 기공으로 스며드는 현상이 필연적으로 발생하기 때문에 최적의 기공 구조와 내화화성을 갖는 다공성 기판을 선별하고, 함침 깊이를 의도적으로 제어할 수 있는 신규 공정을 개발하는 것에 집중함
- 이후, 다공성 기판의 한쪽 표면에 균질 크기($2.5\mu\text{m}$ 이하)의 미세기공이 고밀도로 분포한 정렬 다공성층을 재현성 있게 형성하기 위하여 근접장 나노패터닝의 공정변수 최적화를 수행하였음
- 핵심 기술난제 ①을 고려하여, 다공성 기판 위 형성되는 포토레지스트 층의 두께(=패터닝 후 미세기공 층의 개수를 결정)를 공정적으로 제어하고, 이를 통해 궁극적으로 자가지지된 멤브레인 템플릿의 초기 투광성을 극대화하는 것에 집중하였음

〈 PnP 기반 3차원 정렬 나노다공체의 자가지지 멤브레인화 전략 〉

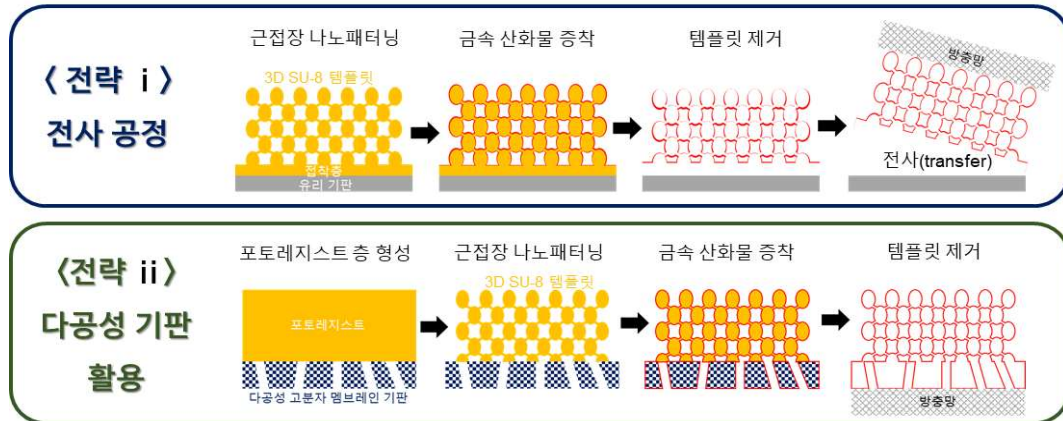


그림 7. 근접장 나노패터닝으로 제조되는 정렬 나노다공체의 자가지지 멤브레인화 전략.

- **[핵심 기술난제 ③] 고분자 템플릿 제거 과정에서 발생하는 물리적 결함 발생(균열 등) 억제**
 - ALD를 통한 세라믹 물질(Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO 등) 코팅 후 고분자 템플릿을 제거하기 위해선 일반적으로 **450℃ 이상의 고온 열처리 또는 산소 플라즈마 에칭 공정이 수반됨**
 - 이 과정에서 **高 기공율 3차원 미세망상구조의 물리적 수축/팽창과 3차원 미세망상구조의 불완전성 등으로 인해 균열 등의 결함이 빈번히 발생**하여 온전한 상태의 멤브레인을 얻기가 매우 어려움 (그림 7)
 - 이러한 물리적 결함은 추후 초미세먼지가 이동할 수 있는 통로를 제공하여 멤브레인의 전반적인 필터 효율을 저하시키기에 반드시 해결해야 하는 기술적 이슈이나, 공정변수 제어를 통한 해결이 쉽지 않아 핵심 기술난제라 할 수 있음

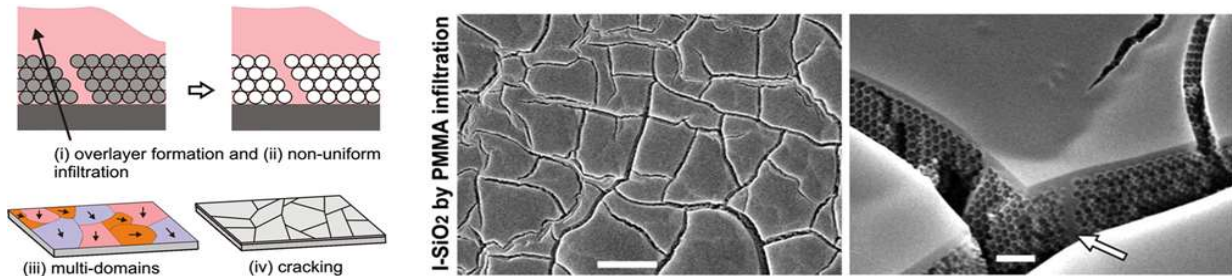


그림 8. 고분자 템플릿 제거 과정에서 발생할 수 있는 물리적 결함의 예. (PNAS, 107, 10354, 2010)

- **[핵심 기술난제 ③의 해결 전략] 열처리 공정 최적화 시도 및 습식 제거 공정 확립**
 - 근접장 나노패터닝 기술에 일반적으로 사용되는 에폭시형 포토레지스트인 SU-8은 최소 450℃ 이상의 비교적 고온 환경에서 제거되기 때문에 **3차원 미세망상구조에 가해지는 열적 충격을 가능한 완화(buffer)하기 위한 다단계 열처리 공정을 시도하였음** (그림 8, 왼쪽)
 - 기판 부착 상태에서는 마이크로 및 거시적 균열의 발생을 상당히 억제하는 효과가 있었으나, 자가지지 멤브레인 상태에서 주로 발생하는 거시적 균열은 방지할 수 없었음
 - 습식 제거 공정으로의 전환을 위해 유기용매에 의해 쉽게 제거될 수 있는 SU-8 이외의 포토레지스트 (KMPR, AR-N 4400 등)를 탐색 및 선정하고 근접장 나노패터닝을 시도하였으나, 감광도, 가교도, 기계적 강도 등의 측면에서 grayscale 리소그래피의 일종인 근접장 나노패터닝에는 다소 부적합하였음
 - 이에, 고온의 열처리 또는 산소 플라즈마 처리 없이 **습식 공정으로 상온에서 손쉽게 템플릿 제거가 가능하며 미세먼지 필터로서 적합한 기공 구조를 갖는 상용 고분자 멤브레인의 탐색을 시도하였음** (그림 8, 오른쪽)
 - 내화확성이 우수한 고분자 멤브레인(PTFE, nylon, PE 등)을 제외한 nitrocellulose, cellulose acetate, PES, PVDF, PC 기반의 고분자 멤브레인들이 습식 제거 공정을 위한 후보군으로 고려될 수 있음
 - 습식 제거 과정에서 3차원 미세망상구조를 이루는 고분자 코어(core)를 둘러싼 세라믹 껍데기(shell)가 일종의 보호층(passivation) 역할을 하기 때문에 **ALD 사이클(=증착물 두께를 결정)과 침지 시간에 따른 고분자 코어의 용해 거동을 집중적으로 분석하고, 공정변수를 최적화하는 연구를 수행하였음**

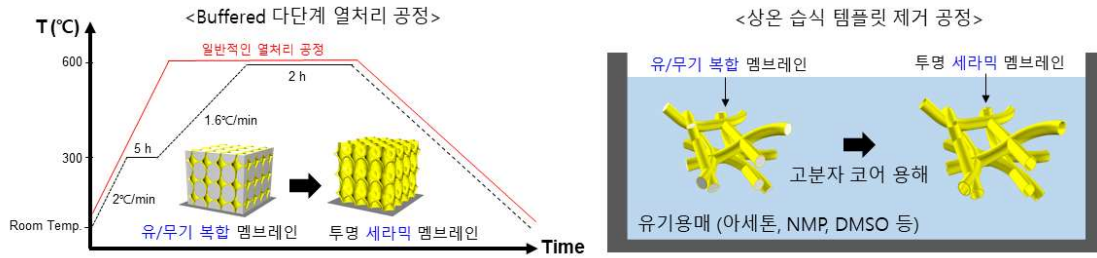


그림 9. 균열 등 결함 발생을 억제하기 위한 템플릿 제거 공정 개발 전략.

○ **[핵심 기술난제 ④] 세라믹화된 3차원 미세망상구조 멤브레인 시작품의 미세먼지 필터 성능 평가**

- 현 기술개발 수준(TRL2~5단계)에서 수 인치급 이상의 대면적 시작품을 만드는 것은 어렵기 때문에 공 인시험장치를 활용하여 개발품의 미세먼지 필터 성능을 측정 및 평가하는 것은 무리가 있음
- 또한, 세라믹 기반 멤브레인은 일반적으로 취성을 갖기 때문에 기존 고분자로 만들어진 미세먼지 필터 (예: KF94 마스크)를 대상으로 한 대다수의 시험장치 홀더부와 구조적으로 호환이 어려움

○ **[핵심 기술난제 ④의 해결 전략] 시작품 평가를 위한 간이 시험평가장치 설계 및 구축**

- 초미세먼지(PM-2.5) 간이측정기 가이드북(환경부 제공, 발간등록번호:11-1480000-000000-00)과 미세먼지 필터 관련 각종 논문들을 참고하여, **실험실 수준에서 인치 크기의 세라믹 또는 고분자-세라믹 복합 멤브레인 시작품을 안정적으로 장착하고 미세먼지 필터 효율과 감압 특성을 동시에 평가할 수 있는 간이 측정 플랫폼을 CAD 기반으로 설계함** (그림 9)
- 성공적으로 측정된 세라믹 기반 멤브레인의 **(초)미세먼지 차단 효율, 감압과 함께 투광성 및 기계적 안정성을 종합적으로 고려하여, 신규 기공 구조를 최적화하는 연구를 수행함**

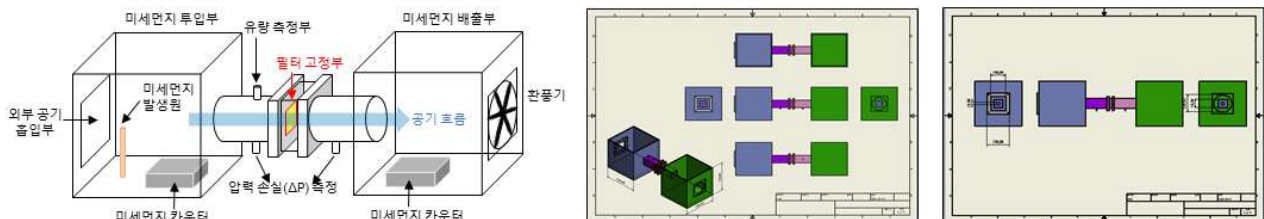


그림 10. (초)미세먼지 필터효율 및 감압 측정용 간이 시험평가장치 설계도.

[연구개발 추진 일정 및 추진 체계]

- 상기 연구개발 핵심 기술난제들을 해결하고, 기한 내 연구개발 최종목표를 달성하기 위한 대략적인 연차별 추진 일정을 아래 그림에 도식적으로 나타냄 (그림 10)



그림 11. 연구개발 최종목표 달성을 위한 대략적인 추진 일정 요약.

<표 2. 연구개발 최종목표 달성을 위한 세부 추진 일정>

1차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	대면적 노광장치 셋업 및 광학 3차원 리소그래피 공정 확립													40,000	박준용 (금오공 과대학 교 산학협 력단)
2	패터닝 공정변수 최적화를 통한 3차원 미세망상구조 템플릿 구현													35,000	박준용 (금오공 과대학 교 산학협 력단)
3	ALD 전구체 선정 및 세라믹 박막 증착 조건 확립													40,000	박준용 (금오공 과대학 교 산학협 력단)
4	고분자 템플릿 제거 공정 개발 및 최적화													35,000	박준용 (금오공 과대학 교 산학협 력단)

2차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	(초)미세먼지 필터효율, 압력 감소 간이 측정 플랫폼 개발													65,000	박준용 (금오공 과대학 교 산학협 력단)
2	3차원 미세망상구조 세라믹 소재의 대표 3종 물성/성능 평가													35,000	박준용 (금오공 과대학 교 산학협 력단)
3	다종 물성/성능 연계분석 기반 기공 구조 최적화													40,000	박준용 (금오공 과대학 교 산학협 력단)
4	투광성, 통기성, 미세먼지 필터효율이 최적화된 인치급 시작품 제작													60,000	박준용 (금오공 과대학 교 산학협 력단)

○ 본 연구개발의 추진 체계를 아래 표에 나타냄

<표 3. 연구개발 최종목표 달성을 위한 추진 체계>

연구개발과제		총 참 여 연 구 원
(총괄)과제명	미세먼지 차단 효율이 95% 이상인 건물 창호용 3차원 미세망상구조 기반 통기성 반투명 세라믹스 개발	주관연구책임자 (박준용)외 총 8명

기 관 별 참 여 현 황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 기 업	0	0
중견기업	0	0
중소기업	0	0
대 학	1	9
국공립(연)	0	0
출 연 (연)	0	0
기 타	0	0

주관연구기관명: 금오공과대학교 산학협력단
주관과제명: 미세먼지 차단 효율이 95% 이상인 건물 창호용 3차원 미세망상구조 기반 통기성 반투명 세라믹스 개발
연구책임자명: 박준용
총 참여연구원: (박준용)외 총 8명
담당기술개발내용
· 3차원 미세망상구조 템플릿을 제조하기 위한 광학 3차원 나노패터닝 기술
· 3차원 미세망상구조의 세라믹 소재화를 위한 물질전환 기술
· 3차원 미세망상구조 세라믹스 물성분석/성능평가 플랫폼 개발
· 통기성, 필터효율, 투광성이 최적화된 3차원 미세망상구조 방진막 소재

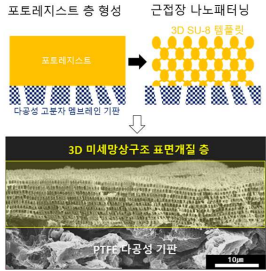
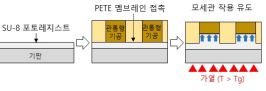
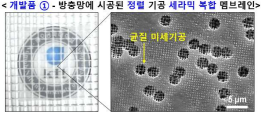
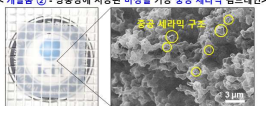
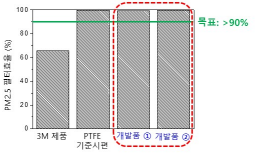
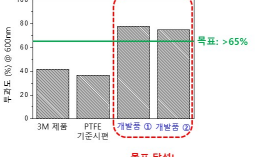
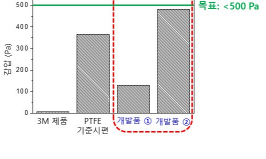
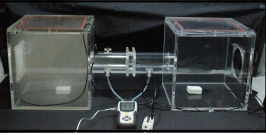
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ 총 1년 9개월 간의 연구개발을 통한 정성적 연구개발성과를 대표 도면과 함께 아래 표에 요약함

<표 4. 정성적 연구개발성과 요약표>

총 연구개발 기간 : 2020. 04.13. ~ 2021. 12. 31. (1년 9개월)			
구분	연구개발성과 내용	대표 도면	관련 사사 실적
제조 공정 개발 성과	자가지지 멤브레인 제조에 특화된 근접장 나노패터닝 기반 공정 개발 성공		• [특허출원] “정렬된 기공층을 포함하는 멤브레인 및 이의 제조 방법”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2020-0186923, PCT/KR2021/013120) • [특허출원] “정렬된 기공을 포함하는 미세입자 제조방법 및 이로 부터 제조된 정렬된 기공을 포함하는 미세입자를 지지체/담지체로 활용한 기능성 미세입자”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2021-0122464) • [논문투고] “Optimal design of phase grating for high-resolution two-photon”, 박준용 외 1인, <i>Optics & Laser Technology</i> (Q1, JCR 상위 20.71%, Impact Factor: 3.867)
	기체 투과성 다공성 기판에 적용 가능한 포도레지스트 도포 공정 개발 성공		• [특허출원] “열적 유도 모세관 작용에 의한 계면 접합 기술 및 이로부터 형성된 다층 소재”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2021-0162558)
	균열 등 결함 발생이 억제된 습식 템플릿 제거 공정 개발 성공		• [특허출원 준비 중] “다공성 세라믹 멤브레인 제조를 위한 습식 제거 공정”, 박준용 외 1인 (2022년 2월 중 출원 계획) • [논문투고 준비 중] “Large-scale and freestanding microporous ceramic membranes fabricated using dissolvable templates”, 박준용 외 2인 (2022년 2월 중 투고 계획)
소재 개발 성과	1인치급, 高 투광성(>75%), PM2.5 필터효율 우수(>99%), 통기성 우수(<500Pa) 3차원 정렬 기공 고분자-세라믹 복합 멤브레인	 	• [특허출원] “투광성 및 필터 효율이 향상된 미세다공성 유/무기 복합 멤브레인”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2022-0001596) • [특허출원] “내화화성이 증진된 복합 멤브레인 및 이의 제조 방법”, 박준용 외 1인 (출원번호: 10-2022-0002251) • [특허출원] “계층적 미세구조화된 표면을 가지는 유무기 복합소재 및 이의 제조방법”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2021-0137472) • [논문게재] “Hydrophobic Organic/Inorganic Composite Films with 3D Hierarchical Nanostructured Surfaces”, 박준용 외 2인, <i>Composites Research</i> 34(4), 246, 2021 (한국연구재단 등재지) • [논문투고] “Stretchable translucent nanocomposite membranes with 3D heterogeneous interfaces derived from sugar templates for mechanochromic applications”, 박준용 외 3인, <i>Composites Part B: Engineering</i> (Q1, JCR 상위 0.56%, Impact Factor: 9.078) • [논문투고] “Transparent polyester track-etched/aluminum oxide composite membranes with tunable pore size and optical transparency for indoor air purification”, 박준용 외 2인, <i>Journal of Membrane Science</i> (Q1, JCR 상위 3.89%, Impact Factor: 8.742) • [논문투고] “Composite membranes with ultrathin and conformal passivation for universal microfiltration compatible with organic solvents”, 박준용 외 2인, <i>Journal of Membrane Science</i> (Q1, JCR 상위 3.89%, Impact Factor: 8.742)
	1인치급, 高 투광성(>75%), PM2.5 필터효율 우수(>99%), 통기성 우수(<500Pa) 3차원 비정렬 기공 중공 세라믹 멤브레인	  	
장비 구축 성과	미세먼지 필터 성능 측정을 위한 간이 시험평가장치 외 3종 (ALD, 초임계건조기, 플라즈마 처리기)		• [특허출원] “취성 멤브레인의 필터 성능 측정 장치”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2022-000160)

[핵심 연구개발성과 ①] 자가지지(freestanding) 3차원 정렬 기공 멤브레인 개발 - 성공

○ 관련 성과 목록

- **[특허출원]** “정렬된 기공층을 포함하는 멤브레인 및 이의 제조방법”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2020-0186923, PCT/KR2021/013120)
- **[특허출원]** “열적 유도 모세관 작용에 의한 계면 접합 기술 및 이로부터 형성된 다층 소재”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2021-0162558)
- **[특허출원]** “정렬된 기공을 포함하는 미세입자 제조방법 및 이로부터 제조된 정렬된 기공을 포함하는 미세입자를 지지체/담지체로 활용한 기능성 미세입자”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2021-0122464)
- **[논문투고]** “Optimal design of phase grating for high-resolution two-photon”, 박준용 외 1인, *Optics & Laser Technology* (Q1, JCR 상위 20.71%, Impact Factor: 3.867)

○ [세부 연구결과] 근접장 나노패터닝 공정기반 확립 (1차년도 수행)

- Finite element modeling (FEM) 및 Rigorous couple-wave analysis (RCWA) 기반의 상용 광학 시뮬레이션 소프트웨어를 활용하여, 균질 크기(2.5 μm 이하)의 미세기공이 정렬된 3차원 나노다공체를 제조하기 위한 근접장 나노패터닝용 컨포멀 위상 마스크를 설계하였음 (그림 17)
- 355nm 파장의 Nd:YAG 기반 UV 레이저와 광학계를 활용하여, 균질 세기(5mW/cm² 내외)의 1인치 면적으로 확대/평행시준된 노광 플랫폼을 성공적으로 구축하였음
- 에폭시 기반 네거티브톤 포토레지스트인 SU-8을 포함하여 KMPR, AR-N 4400 등 다양한 포토레지스트의 3차원 나노패터닝을 시도하였고, 구조 안정성이 우수하면서 수백 nm에서 수십 μm 범위에서 두께 조절이 용이한 SU-8을 주력으로 활용하였음
- 현상 후 건조 단계에서 발생하는 3차원 미세망상구조의 거대한 수축(노광량에 따라 20~40% 범위)에 의한 구조 무너짐을 최소화하기 위하여 초임계 건조기(Supercritical dryer, SCD)를 구축하고 적극적으로 활용하였음
- 그 결과, 기공 크기가 수평 및 수직 방향으로 각각 300nm 및 700nm인 비등방성 미세기공들이 주기적으로 배열된 3차원 정렬 나노다공성 고분자 템플릿을 성공적으로 제조할 수 있었고, 약 25 μm 두께의 SU-8 필름에 16~17층 가량의 균질 미세기공 층이 존재함을 확인할 수 있었음

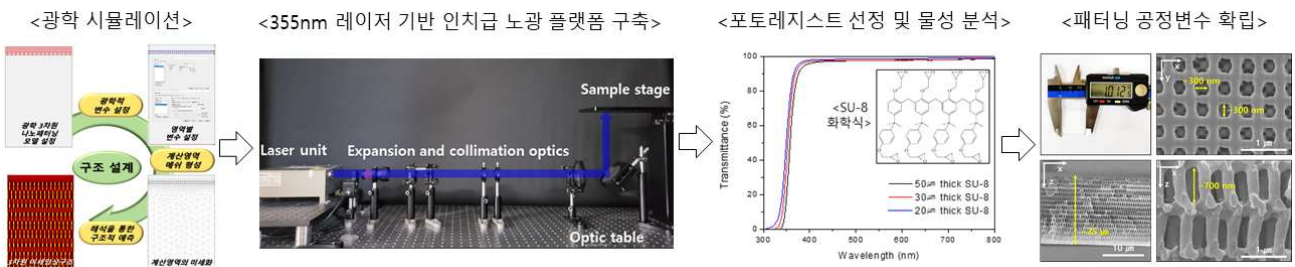


그림 18. 근접장 나노패터닝 공정기반 확립을 위한 연구개발 흐름도.

○ [세부 연구결과] 3차원 정렬 나노다공체의 자가지지 멤브레인화 공정 개발 (1차년도 수행)

- 근접장 나노패터닝에 의해 제조되는 3차원 정렬 나노다공체를 독립된 소재·부품으로 구현하기 위하여 다양한 신규 공정을 고안하였고 실제 시도하였음 (그림 18)
- 수많은 실험적 시행착오를 통하여, 다공성 멤브레인을 기판으로 활용하여 근접장 나노패터닝을 시도하는 방안이 가장 실현 가능성이 높은 것을 확인하였음
- 이에, 현상액에도 버틸만큼 내화화성이 우수한 PTFE 멤브레인(기공 크기: 수 μm)을 기체 투과성 기판으로 활용하여, 근접장 나노패터닝을 통해 보다 미세한 기공(기공 크기: 500nm 이하)을 갖는 3차원 정렬 나노구조체를 기판의 한쪽 표면을 형성함으로써 PTFE 멤브레인의 필터 역량을 개선하는데 성공하였음 (그림 19)
- 본 연구결과는 근접장 나노패터닝 기반 후처리 공정을 통해 상용 고분자 멤브레인을 고부가가치화 할 수 있음을 보여주며, 결과적으로 제조된 자가지지 비대칭막은 원천소재로 신규성이 있어 특허 출원을 완료하였음 (출원번호: 10-2020-0186923, PCT/KR2021/013120)

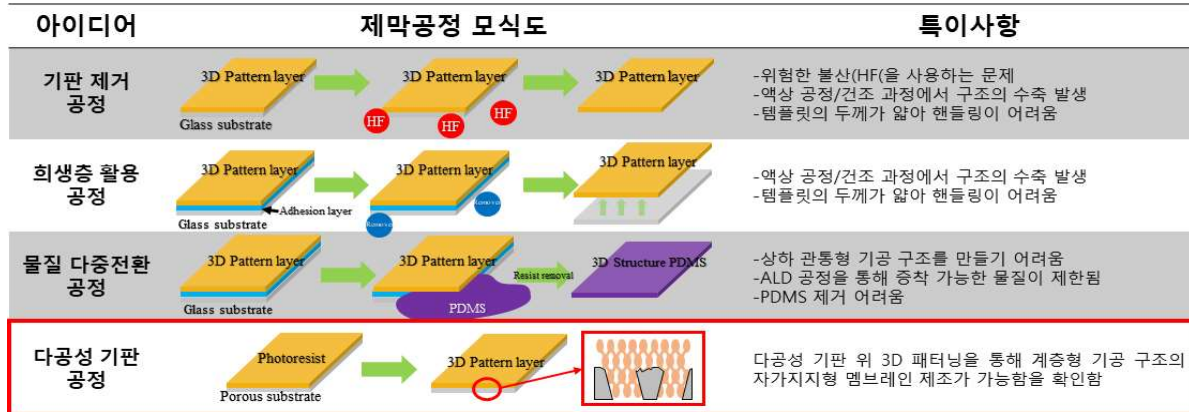


그림 19. 근접장 나노패터닝으로 제조되는 3차원 나노다공체의 자가지지 멤브레인화를 위한 전략.

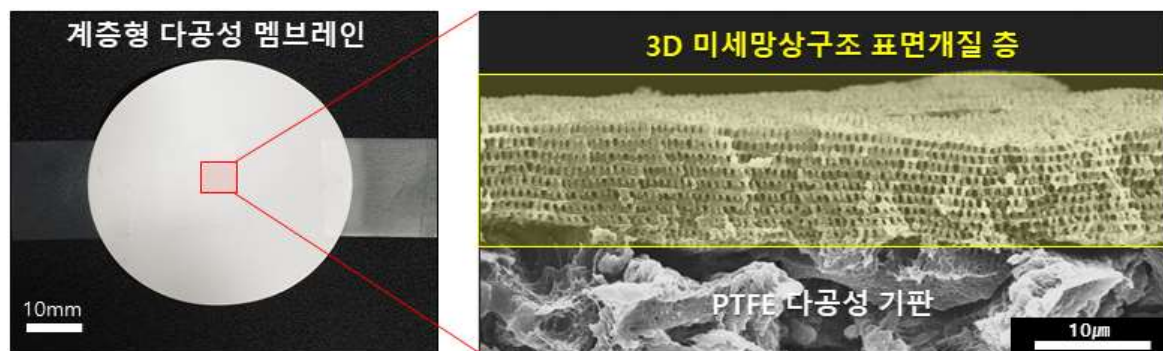


그림 20. 다공성 기판 활용 근접장 나노패터닝을 통해 성공적으로 제조된 기체 투과성 비대칭막.

○ [세부 연구결과] 패터닝 공정 최적화를 통한 **高 투과성(>75%) 멤브레인 구현 (1~2차년도 수행)**

- 상기 신규 개발된 PTFE 기반 비대칭막은 우수한 초미세먼지 필터 효율과 원활한 공기 흐름성이 기대되었으나, i) PTFE 기판 자체가 매우 불투명하고 ii) 근접장 나노패터닝에 의해 형성된 표면개질 층에 존재하는 수많은 초미세기공에 의한 광 산란이 너무 심하여, 이후의 물질전환 공정을 통한 중공 세라믹 구조화 후에도 획기적인 투과성 증대를 기대하기 어려웠음 (목표: 65% @ 600nm)
- 이에, 상용 고분자 멤브레인의 구조 및 물성에 대한 라이브러리를 구축하고 비교한 결과, 수직 관통형 기공 구조를 갖는 멤브레인들이 상대적으로 투명하여 근접장 나노패터닝용 다공성 기판으로 적합한 것을 확인하였음 (그림 20)
- 폴리카보네이트 기반의 PCTE(track-etched polyester) 멤브레인은 내화확성이 낮아 현상(developing) 과정 중 SU-8 현상액인 PGMEA에 의해 용해되는 문제가 발생함
- 반면, 폴리에스터 기반의 PETE(track-etched polyester) 멤브레인은 가시광 투과율이 약 75% 정도로 높으며, 현상액에 충분히 견딜만큼 내화확성이 우수하고, 기공 크기가 1~10μm 수준에서 다양하게 제어될 수 있어, 본 연구개발을 위한 다공성 기판 소재로는 최적의 것으로 판단하였음
- 다공성 기판 위 액상의 포토레지스트 도포 과정에서 포토레지스트의 일부가 기판 표면의 기공으로 스며들어 원치 않는 포토레지스트 층의 불균일성이 발생하기에, 이를 해결할 수 있도록 고상 계면에서 열적으로 유도된 모세관 작용을 통한 신규 포토레지스트 도포 공정을 개발하고 특허 출원하였음 (출원번호: 10-2021-0162558) (그림 21)
- 상기 개발 공정을 활용하면 PETE 멤브레인의 표면에서 관통형 기공 내부로 함침되는 포토레지스트의 깊이를 정밀하게 조절할 수 있기 때문에 근접장 나노패터닝에 의해 형성되는 균질 미세기공 층의 두께를 1~3층 수준으로 극도로 낮출 수 있고, 이에 따라 투과성 및 공기 흐름성 저하를 최소화하면서 선택적으로 미세먼지 필터 역량만을 향상할 수 있음
- 최종적으로 본 연구개발을 통해 확립된 근접장 나노패터닝 기반 신규 공정을 활용하여, PETE 기판의 원래 기공(평균 크기: 3μm)보다 10배 가량 작은 미세기공(평균 크기: 300nm) 층으로 표면개질된 자가지지 멤브레인을 성공적으로 구현하였으며, 투과성 저하가 전혀 발생하지 않음을 확인하였음 (논문 및 특허 추가 사사 준비 중) (그림 22)

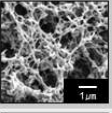
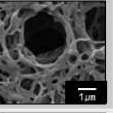
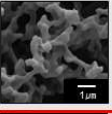
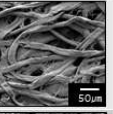
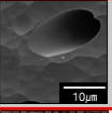
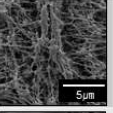
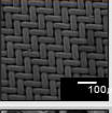
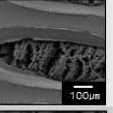
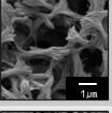
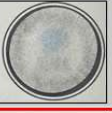
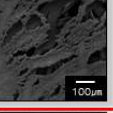
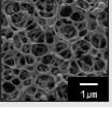
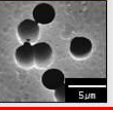
멤브레인 소재	실사 이미지	기공 구조	대표 이미지	기공 크기	멤브레인 소재	실사 이미지	기공 구조	대표 이미지	기공 크기
셀룰로오스 아세테이트		3차원 네트 워크형		0.2 μm	폴리비닐리덴 플루오라이드		3차원 네트 워크형		0.45 μm
니트로 셀룰로오스		3차원 네트 워크형		3.0 μm	알파 셀룰로오스		3차원 네트 워크형		3.0 μm
폴리카보네이트		수직 관통형		10.0 μm	폴리테트라플루오로에틸렌		3차원 네트 워크형		0.45 μm
나일론		주기적인 3차원 네트 워크형		10.0 μm	폴리테트라플루오로에틸렌		3차원 네트 워크형		1.0 μm
나일론		3차원 네트 워크형		0.45 μm	폴리테트라플루오로에틸렌		3차원 네트 워크형		3.0 μm
혼합 셀룰로오스 에스터		3차원 네트 워크형		0.2 μm	폴리에스터		수직 관통형		3.0 μm

그림 21. 상용 고분자 멤브레인 라이브러리.

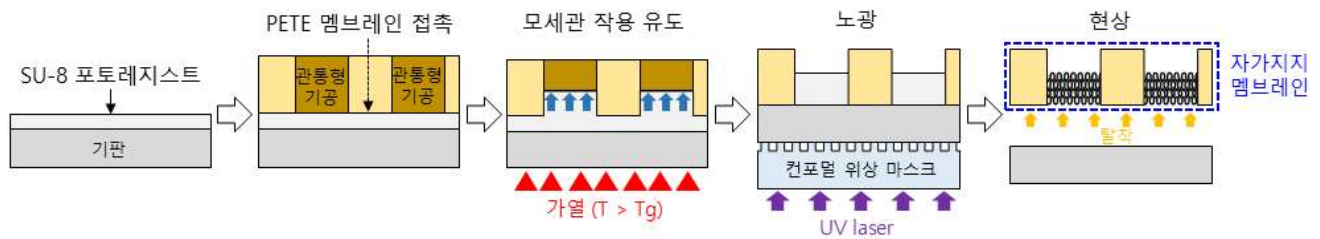


그림 22. 열적 유도 모세관 작용 기반 자가지지 멤브레인 제조 공정.

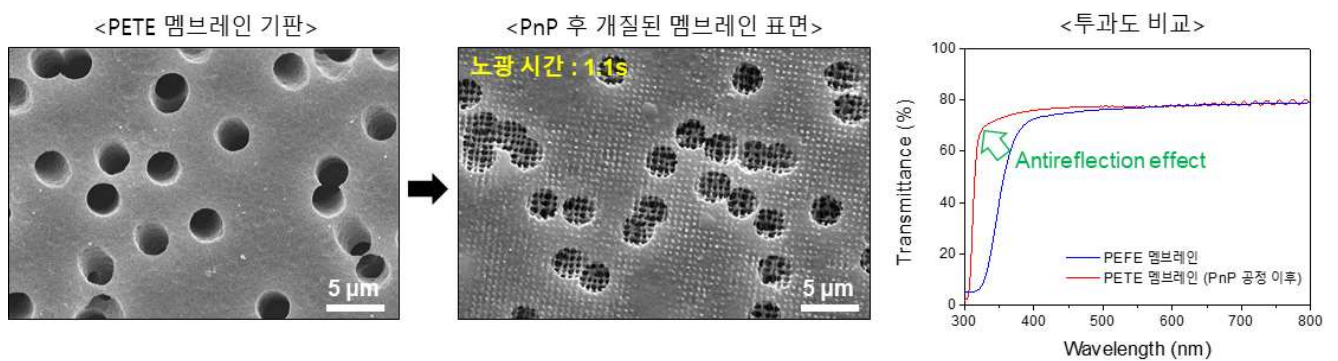


그림 23. 근접장 나노패터닝을 통해 성공적으로 구현된 高 투광성 3차원 정렬 기공 구조의 고분자 멤브레인.

[핵심 연구개발성과 ②] 세라믹 기반의 3차원 미세망상구조 멤브레인 개발 - 성공

○ 관련 성과 목록

- [특허출원] “투광성 및 필터 효율이 향상된 미세다공성 유/무기 복합 멤브레인”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2022-0001596)
- [특허출원] “내화화학성이 증진된 복합 멤브레인 및 이의 제조 방법”, 박준용 외 1인 (출원번호: 10-2022-0002251)
- [특허출원] “계층적 미세구조화된 표면을 가지는 유무기 복합소재 및 이의 제조방법”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2021-0137472)
- [논문게재] “Hydrophobic Organic/Inorganic Composite Films with 3D Hierarchical Nanostructured Surfaces”, 박준용 외 2인, *Composites Research* 34(4), 246, 2021 (한국연구재단 등재지)
- [논문투고] “Stretchable translucent nanocomposite membranes with 3D heterogeneous interfaces derived from sugar templates for mechanochromic applications”, 박준용 외 3인, *Composites Part B: Engineering* (Q1, JCR 상위 0.56%, Impact Factor: 9.078)
- [논문투고] “Composite membranes with ultrathin and conformal passivation for universal microfiltration compatible with organic solvents”, 박준용 외 2인, *Journal of Membrane Science* (Q1, JCR 상위 3.89%, Impact Factor: 8.742)

○ [세부 연구결과] 3종의 세라믹 물질 증착을 위한 ALD 공정기반 확립 (1차년도 수행)

- 본 연구개발과제에서 편성한 장비비를 통해 실험실 수준에서 활용 가능한 1인치 시편용 간이 ALD 장비를 신규 구축하였음 (그림 23)
- 포토레지스트를 포함한 대부분의 고분자는 유리전이온도(glass transition temperature, T_g) 이상에서 리플로우(reflow)가 발생하여 3차원 미세망상구조의 무너짐이 개시되기 때문에 100℃ 이하 저온에서 세라믹을 증착할 수 있는 화학반응 레시피를 탐색하고 선정하였으며, 다양한 화학적 상태의 고분자 표면에서도 화학반응이 성공적으로 개시될 수 있도록 수산화기(OH-)를 형성해주는 산소 플라즈마 처리 공정을 최적화하였음
- 이를 통해, 90℃의 저온 챔버에서 3종의 금속 산화물(Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO)을 재현성 있게 증착할 수 있는 공정조건을 확보하였고(XRD 상 분석 및 EDS 원소 분석을 통해 확인), ALD 사이클에 따른 증착 박막의 두께를 측정하여 물질 당 증착률을 성공적으로 추론할 수 있었음 (그림 24)



그림 24. 1인치급 ALD 장비 구축 사례 (금오공대 테크노관 T231호).

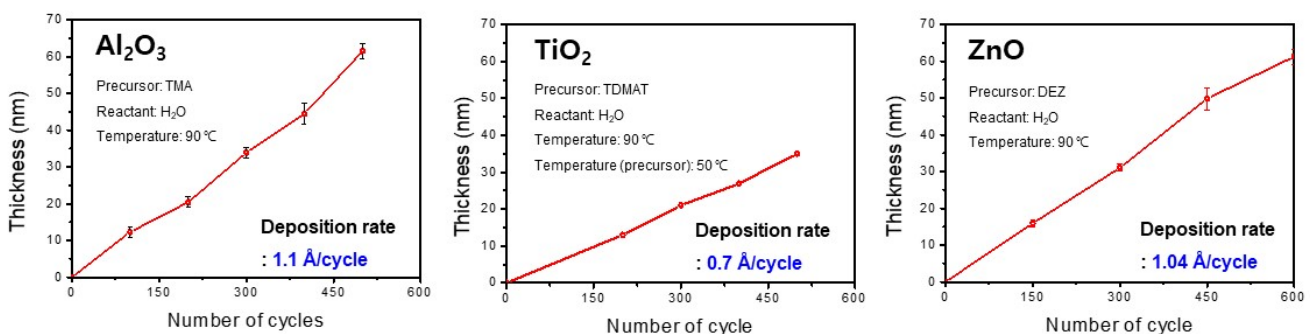


그림 25. 90℃ 증착 공정을 통한 3종 금속 산화물(Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO)의 증착률.

○ [세부 연구결과] 정렬 기공 구조를 갖는 **高 투광성 세라믹 복합 멤브레인 구현 (1~2차년도 수행)**

- 본 최종보고서의 2장 ‘연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용’ 중 설정한 <트랙 1>과 관련한 연구결과로, 근접장 나노패터닝을 통해 성공적으로 제조된 높은 투광성(>75% @ 600nm)의 3차원 정렬 기공 고분자 멤브레인을 템플릿으로 활용하여, 3차원 연속적인 금속 산화물 박막을 컨포멀 코팅함으로써 **코어-셸 형태의 고분자-세라믹 복합 멤브레인을 구현하고자 시도하였음** (그림 25)
- ALD를 통한 3종의 금속 산화물(Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO) 증착을 시도하였으며, EDS 분석 결과 모두 컨포멀 증착이 잘 수행되어 기공 막힘 없이 정렬 기공 구조의 고분자-세라믹 복합 멤브레인이 성공적으로 제조되었음을 확인할 수 있었음 (그림 26)
- 특히, 500~1000 사이클 범위에서 최적 사이클의 ALD를 수행하였을 때 고분자-세라믹 복합 멤브레인의 가시광 투과율이 증착이 수행되지 않은 대조군 시편 대비 2% 정도 향상되는 현상을 발견하였고, 이는 반사방지 효과(anti-reflection effect)로부터 기인한 것으로 판단하였음
- 이에, **세라믹 복합화를 통한 다공성 멤브레인의 투광성 향상과 관련한 특허를 출원하였음** (출원번호: 10-2022-0001596)
- **최종개발품 중 하나인 3차원 정렬 기공 구조의 고분자-세라믹 복합 멤브레인은 Al_2O_3 박막이 900 사이클의 ALD를 통해 코팅되었을 때 600nm 파장에서 약 79%의 우수한 가시광 투과율을 나타내었고, 이는 당초 목표한 성능지표를 충분히 상회하는 결과임 (목표: >65% @ 600nm)**
- 본 최종개발품이 우수한 투광성을 나타내는 요인은 다음과 같이 요약할 수 있음: i) 최적 기공 구조의 다공성 기판 선정, ii) 필터 역량 개선을 위해 기판 표면에 형성되는 3차원 정렬 미세기공 층의 개수 최소화, iii) 3차원 연속적으로 증착된 금속 산화물 박막에 의한 반사방지 효과
- 대표적인 미세먼지 필터 관련 상용품과 비교하였을 때 본 최종개발품이 우수한 투광성을 보이는 것을 확인할 수 있었고, 점착물을 이용하여 방충망 위에 성공적으로 시공될 수 있음을 증명함 (그림 27)

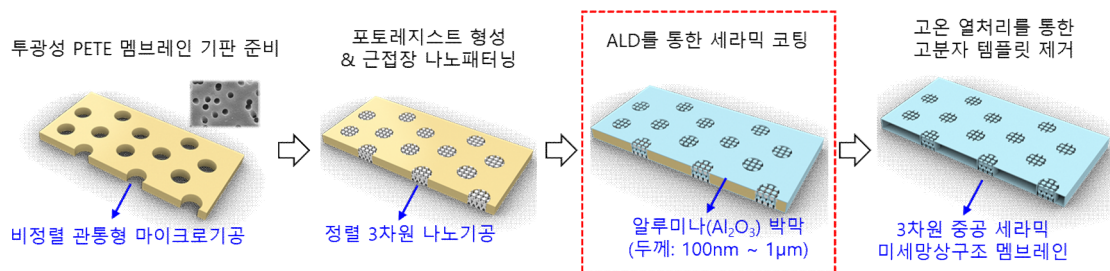


그림 26. 근접장 나노패터닝으로 제조된 3차원 정렬 기공 멤브레인의 세라믹화 전략.

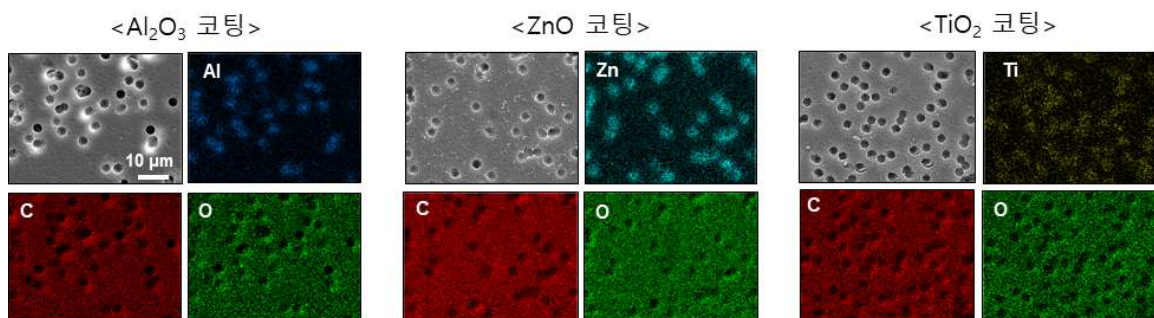


그림 27. 3종 세라믹 박막이 증착된 3차원 정렬 기공 멤브레인의 표면 미세구조 및 원소 분포.



그림 28. 본 연구개발을 통해 개발된 고분자-세라믹 복합 멤브레인과 상용품의 투광성 비교.

- 추가적으로, 600℃의 고온 열처리 공정을 수행하여 SU-8을 포함한 고분자 템플릿을 제거함으로써 멤브레인의 완전한 중공 세라믹화를 시도하였으나, 100nm 이하 두께의 세라믹 박막으로 구성된 초 고 기공률의 중공 네트워크가 열 변화에 의한 물리적 수축/팽창을 견디지 못해 마이크로 및 거시적 균열이 발생하는 것을 확인하였음 (그림 28)
- 이에, 수많은 실험적 시행착오를 통해 승온 속도를 0.2℃/min 수준으로 극도로 낮춰 완화된 열처리 공정을 수행하면 마이크로 균열의 발생을 크게 억제할 수 있음을 확인하였으나, 여전히 거시적 균열의 발생은 막을 수 없어 온전한 멤브레인을 얻지는 못하였음 (그림 29)
- 이에, 세라믹으로만 구성된 초 고 기공률의 중공 네트워크형 멤브레인을 얻기 위해선 결국 고온의 열처리 공정으로부터 탈피한 상온 습식 제거 공정의 적용이 반드시 필요할 것으로 판단되었음

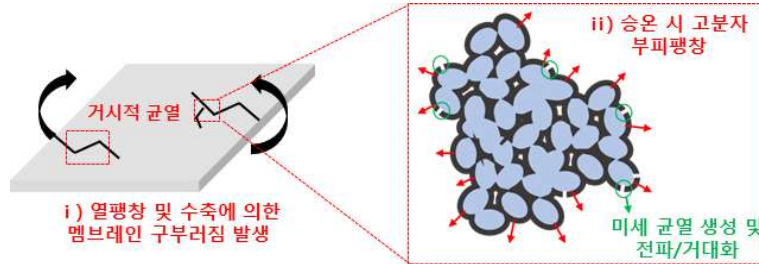


그림 29. 고온 열처리 시 균열 발생 원리.



그림 30. 고온 열처리에 의한 템플릿 제거 과정에서 발생하는 거시적 균열 및 국부적 영역 분석.

○ 3차원 미세망상구조를 갖는 高 투광성 중공 세라믹 멤브레인 구현 (1~2차년도 수행)

- 본 최종보고서의 2장 ‘연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용’ 중 설정한 <트랙 2>와 관련한 연구결과로, 온전히 세라믹으로만 구성된 3차원 미세망상구조 멤브레인을 얻기 위해선 상온에서 유기용매에 의해 쉽게 용해될 수 있는 고분자 템플릿의 확보가 필요하다고 판단하였음
- 이에, 본 연구개발을 통해 구축한 상용 고분자 멤브레인의 구조 및 물성에 대한 라이브러리(그림 20)를 참고하여, 아세톤, NMP, DMSO 등의 유기용매에 즉각적으로 용해될 수 있는 니트로셀룰로오스 (nitrocellulose, NC) 멤브레인을 중공 세라믹 멤브레인 구현을 위한 템플릿으로 선정하였음
- 상용 고분자 멤브레인의 경우 주로 섬유(fiber) 방사 공정을 통해 무작위한 네트워크 형태로 제조되기 때문에 근접장 나노패터닝을 통해 제조되는 3차원 정렬 기공 구조의 차세대 고부가가치형 멤브레인과는 다르게 기공 크기의 균질화 및 기공의 정렬이 근본적으로 불가능하고, 이에 따라 기판의 초기 투광성 제어가 쉽지 않음
- 하지만, 상온 습식 제거 공정의 도입을 통해 템플릿 제거 과정에서 3차원 미세망상구조에 가해지는 물리적 수축/팽창만 최소화할 수 있다면, ALD에 의해 증착되는 세라믹 층의 두께를 10nm 이하 수준으로 극소화하여도 3차원 중공 미세망상구조를 구조적으로 지탱할 가능성이 있고, 이에 따라 생성되는 초 고 기공률의 세라믹 멤브레인은 구성 물질의 유효 부피가 극도로 작아 우수한 투광성을 보일 가능성이 있음
- 즉, 접근 방향에 있어 <트랙 1>과의 가장 큰 차이점은 상용 고분자 멤브레인 템플릿의 비정렬 3차원 미세망상구조에 의한 불투명성을 극복하기 위하여, 100 사이클 미만의 극소화된 ALD 증착을 통해 10nm 미만의 초박막 세라믹층을 형성하는 것에 있으며, 이러한 접근이 가능한 이유는 고온의 열처리 공정을 피해 습식 제거 공정을 적용할 수 있기 때문임 (그림 30)

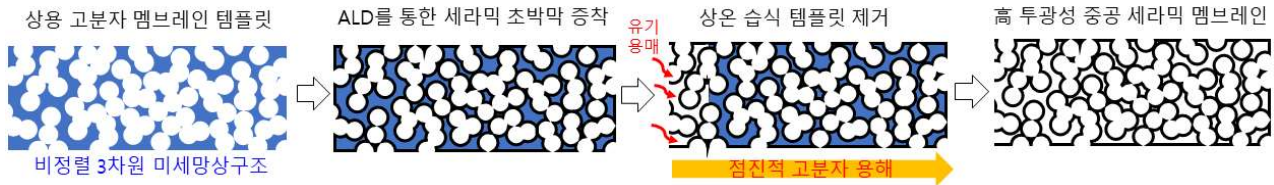


그림 31. 습식 템플릿 제거 공정을 통한 高 투광성 중공 세라믹 멤브레인 확보 전략.

- 먼저, 니트로셀룰로오스 멤브레인에 150 사이클의 ALD를 통해 ZnO를 증착한 결과, 보통의 니트로셀룰로오스 멤브레인이 아세톤에 의해 즉각 용해되는 것과는 다르게 일주일 이상 장시간 침지되어도 (immersed) 균열 없이 온전한 형태를 잘 유지하고 있음을 확인하였음 (그림 31, 왼쪽)
- 건조된 니트로셀룰로오스-ZnO 복합 멤브레인의 미세구조를 주사전자현미경을 통해 분석한 결과, 고분자 코어가 잘 용해되어 완전한 중공 세라믹 구조로 전환되었음을 확인할 수 있었음 (그림 32, 중간)
- 또한, ALD 사이클을 600 사이클까지 증가함에 따라 더 두껍고 견고한 세라믹 막이 코팅되어, 동일 시간 유기용매 욕조에 침지하였을 때 유기용매의 내부 침투가 어려워지고 고분자 코어의 전반적인 용해 속도가 저하되는 것을 실험적으로 확인하였음 (그림 31, 오른쪽)
- 이를 역으로 활용하면, 유기용매 내성이 획기적으로 강화된 고분자-세라믹 복합 멤브레인을 구현할 수 있어 반도체/디스플레이 공정 중 발생하는 폐수처리 등 다양한 환경 정화에 활용 가능한 범용성 액상 필터를 제조할 수 있음을 부가적으로 확인하였음 (그림 32)
- 즉, 재현성이 높은 ALD 공정을 통해 값싼 상용 고분자 멤브레인을 고부가가치화하고, 개발품은 상대적으로 고가인 내화학성 PTFE 멤브레인을 대체할 수 있는 가능성이 있어 관련 특허를 출원하였음 (출원 번호: 10-2022-0002251)
- 하지만, ZnO는 가시광의 단파장 영역~자외선 영역까지 물질 고유의 흡광도가 높아 투광성 측면에서 손실이 있고, 150 사이클 이상의 ALD를 통해 제조된 시편은 3차원 미세망상구조를 구성하는 세라믹 벽의 두께 및 유효 부피가 무시할 수 없는 수준이기에 많은 광 산란이 야기되어 투광성이 30% 이하인 문제가 발생하였음

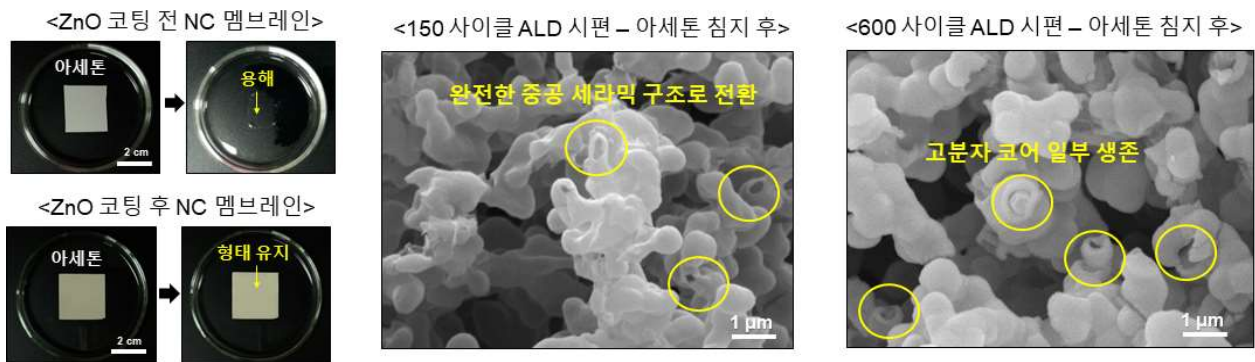


그림 32. 습식 제거 공정 시 ALD 사이클(=증착 두께)에 따른 고분자 코어의 용해 거동 변화.

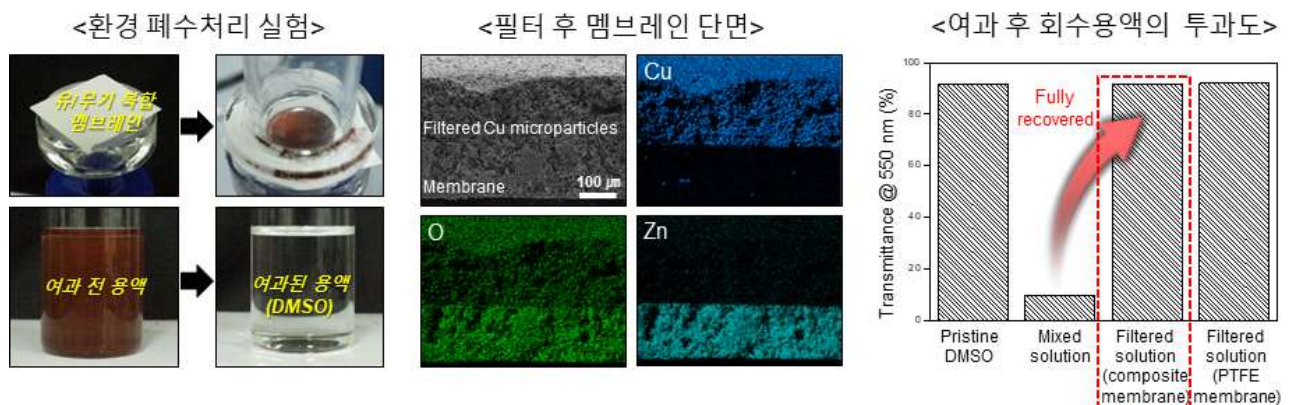


그림 33. 개발된 고분자-세라믹 복합 멤브레인의 폐수처리용 액상 필터로서의 우수한 역량 증명.

- 이에, 증착 물질을 보다 투명한 Al_2O_3 로 전환하고, **균열 없이 온전한 3차원 중공 미세망상구조 세라믹 멤브레인**을 획득할 수 있는 **최소의 ALD 사이클**을 찾기 위한 공정변수 최적화 연구를 시도하였음
- ALD 사이클을 20~100까지 순차적으로 변화하면서 Al_2O_3 를 증착한 결과, 고분자-세라믹 복합 멤브레인 상태에서는 상용 멤브레인 고유의 **高 산란 비정렬 구조**로 인해 모두 불투명하였음 (그림 33, 상단)
- 놀랍게도, 유기용매에 의한 상온 습식 템플릿 제거 공정을 수행 후 건조된 시편은 투명~반투명한 상태로 변화하였고, **20 사이클 시편의 경우 너무 얇은 세라믹 벽 두께($\sim 2.2\text{nm}$)로 인해 3차원 미세망상구조를 지탱하지 못하고 갈기갈기 찢어졌지만, 40 사이클 이후의 시편부터는 균열 없는 온전한 중공 세라믹 멤브레인을 획득할 수 있었음 (그림 33)**
- 광학적 측면에서는 ALD 사이클이 증가함에 따라 세라믹 벽의 유효 부피가 무시할 수 없는 수준으로 증가하면서 점차적으로 불투명해지는 경향이 있었고, 100 사이클 이후부터는 동일 침지 조건에서 고분자 코어가 완벽히 제거되지 않음을 확인하였음
- UV-VIS 스펙트로미터를 이용한 가시광 투과율 분석 결과, **40 사이클의 ALD를 통해 제조된 3차원 중공 미세망상구조 세라믹 멤브레인의 투광성이 600nm 파장 기준 75.1%인 것으로 측정되어 본 연구개발의 최종목표 중 하나인 65%를 충분히 만족하는 것으로 확인하였음 (그림 34)**
- 1인치 크기로 제조된 최종개발품의 미세구조를 분석한 결과, 멤브레인의 총 두께는 약 $135\mu\text{m}$ 이고, 중공 세라믹 구조화가 성공적으로 완료되었음을 확인하였음 (특허 및 논문 추가 사사 준비 중) (그림 35)



그림 34. 습식 제거 공정을 고려한 ALD 공정변수 최적화 과정.

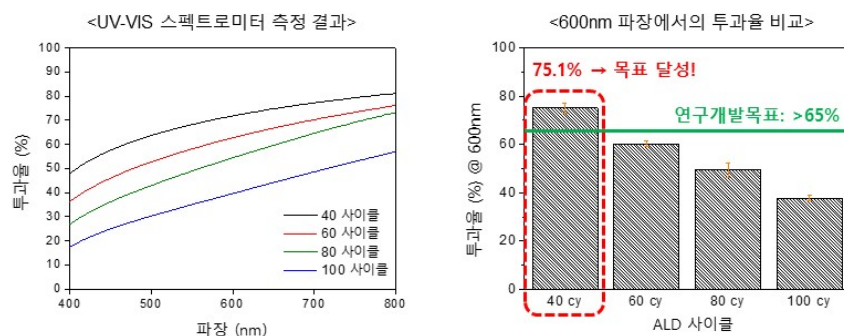


그림 35. 최종개발품에 대한 가시광 투광성 평가.

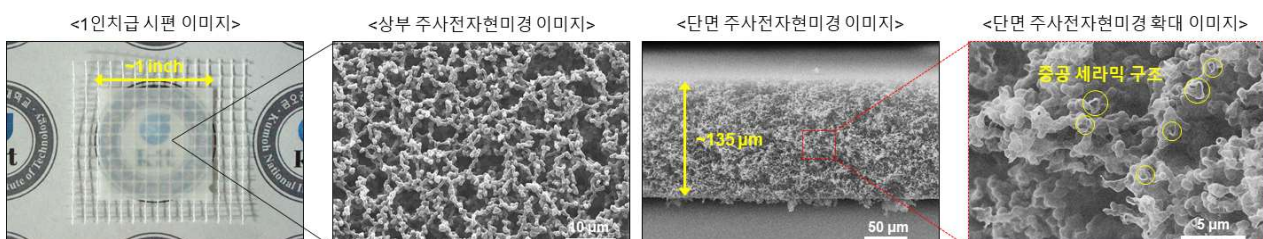


그림 36. 최종개발품인 3차원 중공 미세망상구조 세라믹 멤브레인에 대한 미세구조 분석.

[핵심 연구개발성과 ③] 세라믹 기반 멤브레인의 미세먼지 필터 성능 측정을 위한 간이 시험평가 장치 구축 및 분석 (최종개발품의 성능지표 목표 달성 포함) - 성공

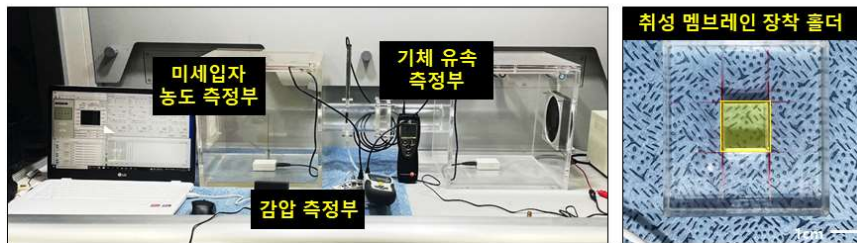
○ 관련 성과 목록

- [특허출원] “취성 멤브레인의 필터 성능 측정 장치”, 박준용 외 2인 (출원번호: 10-2022-000160)
- [논문투고] “Transparent polyester track-etched/aluminum oxide composite membranes with tunable pore size and optical transparency for indoor air purification”, 박준용 외 2인, *Journal of Membrane Science* (Q1, JCR 상위 3.89%, Impact Factor: 8.742)

○ [세부 연구결과] 취성 멤브레인용 미세먼지 필터 성능 측정 장치 설계 및 구축 (2차년도 수행)

- 초미세먼지(PM-2.5) 간이측정기 가이드북(환경부 제공, 발간등록번호:11-1480000-000000-00)과 미세먼지 필터 관련 각종 논문들을 참고하여, 실험실 수준에서 미세먼지 필터 효율과 감압 특성을 동시에 평가할 수 있는 간이 측정 플랫폼을 설계 및 성공적으로 구축하였고, **장치 구성 상 취성의 멤브레인을 장착할 수 있는 홀더부가 기존 고분자 멤브레인의 시험평가 장치와는 차별화되는 신규성이 있어서 관련 특허를 출원함** (출원번호: 10-2022-000160) (그림 36)

<세라믹 기반 멤브레인의 미세먼지 필터 성능 측정을 위한 간이 시험 장치>



<간이 시험 장치를 통해 측정 및 평가 가능한 변수들>



그림 37. 실제 구축된 미세먼지 필터 효율 간이 시험평가 장치.

○ [세부 연구결과] 2종의 최종개발품에 대한 미세먼지 필터 성능 평가 (2차년도 수행)

- 구축된 장비를 활용하여 본 연구개발을 통해 최종적으로 개발된 2종의 세라믹 기반 高 투광성(>75%) 멤브레인에 대한 미세먼지 필터로서의 성능 분석을 수행하고 상용품과 비교하였음: <개발품 ①> 3차원 정렬 기공 구조를 갖는 고분자-세라믹 복합 멤브레인, <개발품 ②> 3차원 비정렬 기공 구조를 갖는 중공 세라믹 멤브레인 (그림 37)

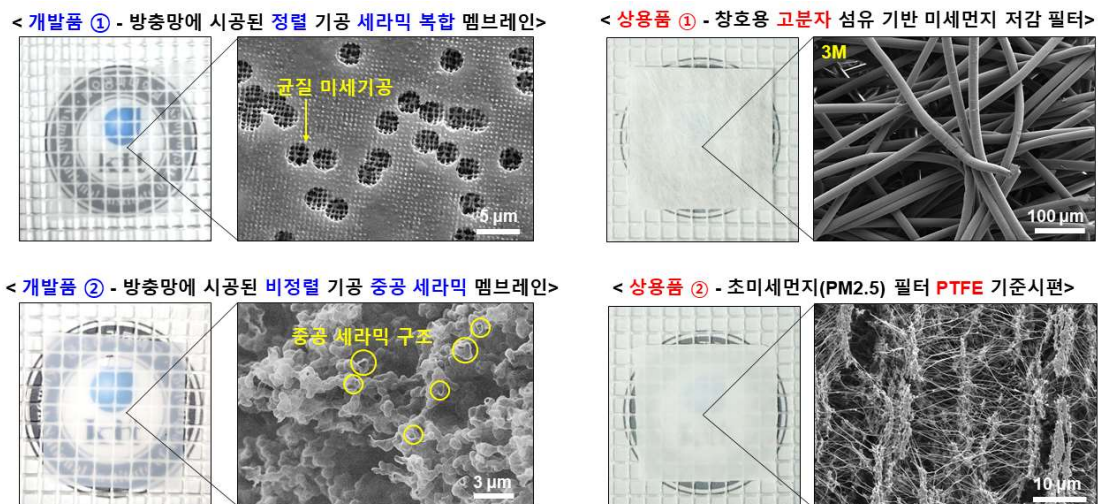


그림 38. 미세먼지 필터로서의 성능 비교에 활용된 개발품 및 상용품 목록.

- 구축된 장비를 활용한 미세먼지 필터 성능 측정 결과,中间的의 멤브레인 홀더부를 중심으로 왼쪽 inlet 챔버에서 발생한 고농도($5000 \mu\text{g}/\text{cm}^3$)의 (초)미세먼지 입자들이 홀더에 장착된 최종개발품에 의해 효과적으로 여과되어 오른쪽 outlet 챔버쪽으로 이동하지 못하는 것을 관찰하였음 (그림 38)
- 본 연구개발을 통해 제조된 최종개발품 2종 모두 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)에 대해 99% 이상의 매우 우수한 필터 효율과 함께 양호한 통기성(감압: $<500 \text{ Pa} @ 10\text{cm/s}$)을 보였고, 종합적인 미세먼지 필터로서의 성능은 상용으로 판매되는 초미세먼지(PM2.5) 필터용 PTFE 기준시편과 유사한 수준이지만 투광성이 30% 이상 높아 심미적으로 월등히 우수한 장점이 있음
- 특히, 현재 시중에서 판매되고 있는 3M 사의 창호용 미세먼지 필터와 성능을 비교해보면, 본 최종개발품의 경우 평균 기공 크기가 $2.5 \mu\text{m}$ 이하인 고 기공률의 열린 기공 구조로 인해 초미세먼지(PM2.5) 필터 효율 및 가시광 투과도가 모두 30% 이상 우수함
- 결론적으로, 신규 기공 구조를 갖는 세라믹 기반의 두 개발품 모두 당초 목표한 성능지표(PM10 필터효율: $>95\%$, PM2.5 필터효율: $>90\%$, 투광성: $>65\% @ 600\text{nm}$, 감압: $<500\text{Pa}$ at $1 \sim 5\text{cm/s}$)를 빠짐없이 성공적으로 만족하였음 (그림 39)
- 또한, 개발품 중 투광성이 특히 우수한 3차원 정렬 기공 구조의 고분자-세라믹 복합 멤브레인을 기반으로 3종의 세라믹(Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO) 물질로 구현된 1인치급 시작품을 제시하였고, 이는 후속 연구개발을 통해 건물 창호용 반투명 미세먼지 방진막으로 활용될 수 있을 것으로 기대됨 (그림 40)
- 상기 1인치급 시작품의 우수한 투광성을 검증하기 위하여 한국인정기구(KOLAS)로부터 인정 받은 기관에서 공인시험(규격: KS S 2014, 판유리의 가시광선 투과율)을 수행하였으며, 판유리에 부착 후 측정 시 3종의 세라믹 물질 모두 71% 이상의 가시광 투과율을 보였고, 이에 본 최종보고서의 뒤쪽 별첨 부분에 증빙자료로써 공인시험성적서를 첨부하였음 (성적서 상 투과율 수치는 380~780nm에 해당하는 전체 가시광 파장에 대한 평균 투과율이며, 단파장 쪽에서 발생하는 세라믹 물질의 상대적으로 높은 흡광도로 인해 600nm 단일 파장에서는 실제로 더욱 높은 수치를 보이게 됨. 또한, 시험 규격 상 판유리가 반드시 기판으로 사용되어야 하기에 판유리에 의한 투과율 저하가 4% 가량 포함된 수치임)



그림 39. 최종개발품을 활용한 미세먼지 필터 성능 시험 현장.

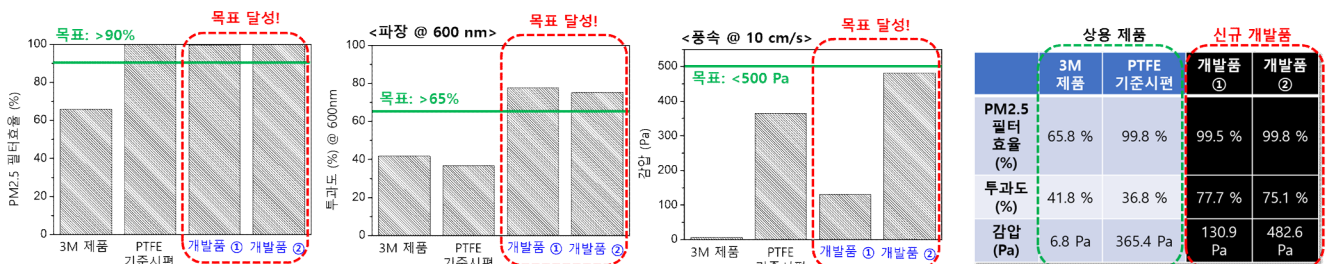


그림 40. 최종개발품의 미세먼지 필터로서의 종합적인 성능 비교.

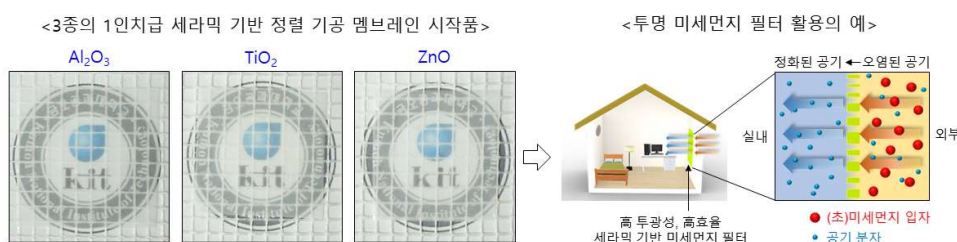


그림 41. 3종의 세라믹 물질로 구현된 최종개발품 및 최종개발품 활용의 예.

(2) 정량적 연구개발성과

- 총 1년 9개월 간의 연구개발을 통한 정량적 연구개발성과를 i) 최종개발품에 대한 성능지표와 ii) 성과 지표로 구분하여 아래 표에 요약함

<표 5. 최종개발품에 대한 정량적 성능지표 달성도>

2종 시작품	성능지표	구분	정량적 수치	달성여부	비고
3차원 정렬 기공 고분자-세라믹 복합체 멤브레인	미세먼지 (PM10)	목표	95% 이상	달성	-
	필터 효율	결과	99.4%		
	초미세먼지(PM2.5)	목표	90% 이상	달성	-
	필터 효율	결과	99.2%		
	투광성 (@ 600nm)	목표	65% 이상	달성	-
		결과	78%		
	통기성 (@ 1~5cm/s)	목표	500 Pa 이하	달성	-
		결과	131 Pa		
3차원 비정렬 기공 중공 세라믹 멤브레인	미세먼지 (PM10)	목표	95% 이상	달성	-
	필터 효율	결과	99.6%		
	초미세먼지(PM2.5)	목표	90% 이상	달성	-
	필터 효율	결과	99.5%		
	투광성 (@ 600nm)	목표	65% 이상	달성	-
		결과	75%		
	통기성 (@ 1~5cm/s)	목표	500 Pa 이하	달성	-
		결과	482 Pa		

<표 6. 본 연구개발을 통한 정량적 성과지표 달성도>

구분		1차년도	2차년도	계	달성도 (%)	비고
논문 게재	목표	1	2	3	100 (예정)	SCI급 저널 4건 투고 완료 및 Peer-review 단계 (JCR 상위 1% 이내 1건, JCR 상위 5% 이내 2건 포함) 과제 종료일 이후 1건 추가 사사 예상 (22년 3월 이내 투고)
	결과	0	(4)	(4)		
특허 출원	목표	1	3	4	100	초과 달성
	결과	1	7	8		
특허 등록	목표	0	1	1	0	과제 종료일 이후 달성 예상 (22년 상반기 중)
	결과	0	0	0		
인력 양성	목표	2	1	3	100	석사급 전문인력 3인 배출
	결과	2	1	3		
홍보 실적	목표	0	1	1	100	논문 게재 승인 후 1건 이상 추가 예정
	결과	1	0	1		
장비 구축	목표	1	1	2	100	원자충증착기, 초임계건조기, 플라즈마 처리기 구축 완료
	결과	2	1	3		
학술 발표	목표	0	0	0	해당 없음	추가 달성 (초청강연 1건 포함)
	결과	3	5	8		
수상 실적	목표	0	0	0	해당 없음	추가 달성 (우수연구발표상 4건)
	결과	2	2	4		

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재 (논문명**: 투고 완료, 심사 중)

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	3D 계층적 나노구조화된 표면을 갖는 소수성 유/무기 복합 필름	Composites Research	서희진, 박준용	4	대한민국	한국복합재료 학회	비SCIE	2021.10.22.	2288-2103	33
2	Optimal design of phase grating for high-resolution two-photon interference lithography**	Optics & Laser Technology	안진성, 박준용		네덜란드	Elsevier	SCIE		0030-3992	50
3	Composite membranes with ultrathin and conformal passivation for universal microfiltration compatible with organic solvents**	Journal of Membrane Science	안준용, 박준용		네덜란드	Elsevier	SCIE		0376-7388	50
4	Stretchable translucent nanocomposite membranes with 3D heterogeneous interfaces derived from sugar templates for mechanochromic applications**	Composites Part B: Engineering	윤서한, 박준용		네덜란드	Elsevier	SCIE		1359-8368	50
5	Transparent polyester track-etched/aluminum oxide composite membranes with tunable pore size and optical transparency for indoor air purification**	Journal of Membrane Science	류태현, 박준용		네덜란드	Elsevier	SCIE		0376-7388	50

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2020 한국복합재료학회 추계학술대회	Fabrication of 3D porous magnetic microparticles loaded with Fe ₂ O ₃ nanoparticles	안진성	2020.11.05.	경주 블루원리조트	대한민국
2	2020 차세대리소그래피 학술회	Advanced optical 3D nanolithography for top-down fabrication of functional porous microparticles	안진성	2020.11.18.	온라인	대한민국
3	2020 한국세라믹학회 추계학술대회	Magnetic-responsive porous microparticles formed by optical 3D nanopatterning	안진성	2020.11.25.	대전 컨벤션센터	대한민국
4	2021 Nano convergence conference	Lambertian diffuse reflector with 3D nanostructure formed by Proximity field nanoPatterning	안진성	2021.01.19.	곤지암리조트	대한민국
5	2021 Nano convergence conference	Lithographically fabricated magnetic porous microparticles with 3D nanoarchitectures	안진성	2021.01.19.	곤지암리조트	대한민국
6	2021 레이저가공학회 춘계학술대회	Fabrication of 3D Porous Microparticles via Laser-Based 3D Photolithography	안준용	2021.06.04.	온라인	대한민국
7	2021 한국표면공학학회 춘계학술대회	Organic / Inorganic Composite Films with Hierarchical 3D Nanostructured Hydrophobic Surfaces	서희진	2021.06.25.	온라인	대한민국
8	2021 차세대리소그래피 학술회	Development of new optical components through proximity-field nanopatterning	박준용	2021.11.17	평창 알펜시아	대한민국

□ 기술 요약 정보

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

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

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

[기술적 성과]

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

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	정렬된 기공층을 포함하는 멤브레인 및 이의 제조방법	대한민국	박준용, 안준용, 안진성	2020.12.30.	10-2020-0186923				80	
2	특허	정렬된 기공을 포함하는 미세입자 제조방법 및 이로부터 제조된 정렬된 기공을 포함하는 미세입자를 지지체/담지체로 활용한 기능성 미세입자	대한민국	박준용, 안진성, 안준용	2021.09.14.	10-2021-0122464				33	
3	특허	정렬된 기공을 포함하는 멤브레인 및 이의 제조방법	PCT	박준용, 안준용, 안진성	2021.09.27.	PCT/KR2021/013120				80	
4	특허	계층적 미세구조화된 표면을 가지는 유무기 복합소재 및 이의 제조방법	대한민국	박준용, 서희진, 안준용	2021.10.15.	10-2021-0137472				33	
5	특허	열적 유도 모세관 작용에 의한 계면 접합 기술 및 이로부터 형성된 다층 소재	대한민국	박준용, 안진성	2021.11.23.	10-2021-0162558				50	
6	특허	투광성 및 필터 효율이 향상된 미세다공성 유/무기 복합 멤브레인	대한민국	박준용, 류태현, 안준용	2022.01.05	10-2022-0001596				75	
7	특허	취성 멤브레인의 필터 성능 측정 장치	대한민국	박준용, 류태현, 안준용	2022.01.05	10-2022-0001600				100	
8	특허	내화화성이 증진된 복합 멤브레인 및 이의 제조 방법	대한민국	박준용, 안준용	2022.01.06	10-2022-0002251				75	

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1										√	
2										√	
3										√	
4										√	
5										√	
6										√	
7										√	
8										√	

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율

☐ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

☐ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

☐ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

○ 국제표준

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

[경제적 성과]

☐ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

☐ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

□ 기술 실시(이전)

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

□ 사업화 투자실적

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

□ 사업화 현황

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

□ 매출 실적(누적)

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

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

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

☐ 고용 창출

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

☐ 고용 효과

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

☐ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

☐ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

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

☐ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

☐ 기술 무역

(단위 : 천원)

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

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

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

☐ 정책 활용 내용

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

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

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

☐ 신진연구자 채용

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

☐ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	인력 양성	2020	0	2	1	0	3	0	0	0	3	0	0
2	인력 양성	2021	0	1	4	0	3	2	0	0	5	0	0

☐ 산업 기술 인력 양성

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

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

☐ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

☐ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	언론 보도	온라인	금오공대 교수 4명, 국토부 주관 기반연구 과제 동시 선정	2020.04.20.

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	수상	도초우수발표학술상	우수연구발표상	안진성, 안준용, 오병윤, 박준용	2020.11.06.	한국복합재료학회
2	수상	학회포스터상 최우수논문	우수연구발표상	안진성, 안준용, 박준용	2020.11.25.	한국세라믹학회
3	수상	우수포스터발표상	우수연구발표상	안진성	2021.01.20.	나노기술연구협의회
4	수상	우수 포스터상	우수연구발표상	안준용, 박준용, 안진성, 윤서한	2021.06.04.	한국레이저가공학회

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

번호	구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)
1	금오공과대학교 산학협력단	표면 플라즈마 처리기기	CUTE	X	X	-	20.12.11	10,000	금오공과대학교 T231호
2	금오공과대학교 산학협력단	초임계유체건조장치	R-403	X	X	-	20.12.18	18,975	금오공과대학교 T231호
3	금오공과대학교 산학협력단	원자층증착기	ICOT mini basic	X	X	-	21.10.29	29,400	금오공과대학교 T231호

[그 밖의 성과](해당 시 작성)

○ 해당 없음

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

- 당초 계획하였던 특허출원 목표 건수 대비 초과 달성하였음 (목표: 4건, 달성: 8건)
- 당초 계획하지 않았던 국내 학술지(KCI) 논문을 1건 게재하였음 (Composites Research 34(4), 246, 2021)
- 당초 계획하지 않았던 학술회의 발표를 8건(초청강연 1건 포함) 수행하였고, 연구결과의 우수성을 인정받아 우수연구발표상을 4건 수상하였음

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표		달 성 내 용	달성도(%)
<1차년도> ‘3차원 미세망상구조 세라믹스’ 제조공정 개발 및 소재 구현	광학 3차원 리소그래피를 통한 주기적 3차원 미세망상구조 템플릿 제조	- 근접장 나노패터닝(Proximity field nanopatterning) 수행을 위한 이론적/실험적 공정 플랫폼 확립 및 주기적 3차원 미세망상구조 템플릿 제조 성공 (달성율: 100%)	<1차년도> 100% 달성
	용액 또는 저온 에칭 가능한 3차원 미세망상구조 템플릿 탐색 및 선정	- 아세톤, DMSO, NMP 등 유기용매에 의해 상온 습식으로 손쉽게 제거 가능한 3차원 미세망상구조의 니트로셀룰로오스 멤브레인 탐색 및 선정 완료 (달성율: 100%)	
	반도체 공정 (ALD, RIE) 기반 2종 이상 세라믹 물질전환 공정 개발	- 저온(90℃) ALD 공정을 통한 3종 세라믹(Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO) 물질전환 공정 확립 완료 (달성율: 100%)	
	공정변수 설계를 통한 3차원 미세망상구조 정밀제어 (기공 크기: $<2.5\mu\text{m}$)	- 포토레지스트 도포 공정, 노광량, 포스트베이킹 등 공정변수 최적화를 통한 sub-micron 크기의 균질 미세기공을 갖는 3차원 정렬 나노다공체 구현 성공 (달성율: 100%)	
	자가지지 멤브레인화 공정 개발 (막 두께: $>25\mu\text{m}$)	- 다공성 기판 활용 근접장 나노패터닝 공정을 신규 개발하여 $25\mu\text{m}$ 두께 이상의 자가지지 비대칭막 개발 성공 (달성율: 100%)	
<2차년도> ‘3차원 미세망상구조 세라믹스’ 물성분석/성능평가 및 최적화	미세먼지 필터성능, 투광성, 통기성 평가 기준 확립 및 성능 평가	- 세라믹 기반 멤브레인의 종합적 미세먼지 필터 성능 측정을 위한 간이 시험평가장치 설계 및 구축 완료 - UV-VIS 분광기를 활용한 투광성 평가기준 확립 완료 - 3종 물성/성능(PM2.5 & PM10 차단 효율, 투광성, 감압) 측정 및 평가 성공 (달성율: 100%)	<2차년도> 100% 달성
	3차원 미세망상구조 변화에 따른 다종 물성/성능 연계분석	- 근접장 나노패터닝 공정변수 및 ALD 사이클에 따른 3차원 미세망상구조 변화 거동 확인 - 각기 다른 3차원 미세망상구조를 갖는 멤브레인에 대한 3종 물성/성능 분석 완료 (달성율: 100%)	
	물성/성능 피드백을 통한 3차원 미세망상구조 최적화	- 측정된 3종 물성/성능 분석 데이터를 바탕으로 근접장 나노패터닝 공정변수 및 ALD 사이클 최적조건 확립 완료 (달성율: 100%)	
	대면적 시작품 제작 ($>1\text{inch}^2$)	- 1인치급, 3차원 미세망상구조화된 고분자-세라믹 복합 멤브레인 및 중공 세라믹 멤브레인 제작 성공 (달성율: 100%)	
	유사환경 성능평가 (미세먼지 필터효율: $>95\%$, 초미세먼지 필터효율: $>90\%$, 투광성: $>65\%$ @600nm, 압력 감소: $<500\text{ Pa}$ @1~5cm/s)	- 자체 개발된 간이 시험평가장치를 활용하여 고농도($5000\mu\text{g}/\text{cm}^3$)의 (초)미세먼지를 발생시킨 후 필터 효율을 평가하는 데 성공 - 최종개발품 2종 모두 당초 목표한 성능지표를 모두 달성하였음 (측정 결과: PM10 필터효율: $>99\%$, PM2.5 필터효율: $>99\%$, 투광성: $>75\%$, 압력 감소: $<500\text{Pa}$) (달성율: 100%)	

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 당초 설정한 본 연구개발과제의 **정성적 연구개발목표** 및 **최종개발품에 대한 성능지표**는 100% 충족하였으나, 과제종료일(2021. 12. 31.) 내에 **성과지표** 중 일부를 달성하지 못하였음 (하단 표 참조)
- 2020년 4월 13일 과제가 개시되었으나 코로나로 인해 전반적인 행정이 지연되어 6월 이후에 연구비가 지급되었고 2개월 이상 연구수행이 지체됨. 본 연구실은 지역국립대 소속의 신생 연구실이기에 전반적인 연구수행 일정 확보에 차질이 많이 발생하였음
 - 대구/경북 지역에서 집단적으로 발생한 불가항력적인 코로나 상황 악화로 인해 연구원들의 비상근 업무 상태가 수시로 발생하였고, 실제 단체로 자가격리되는 상황도 발생하여 전반적인 연구 및 행정 업무가 지연되었음
 - 그럼에도 불구하고, 연구수행에 최선을 다하여 총 1년 9개월의 짧은 과제기간에도 불구하고 **국내 KCI급 학술지 논문 1건 게재, 국제 SCI급 학술지 논문 4건 투고(peer-review 단계), 특허 출원 8건(PCT 1건 포함)을 달성**하였음
 - 국제 SCI급 논문 4건은 모두 Q1 등급의 저널에 투고되었으며, 모두 에디터 스크리닝을 통과 후 peer-review 단계에 있음. 특히, 이 중 1건은 JCR 상위 1% 이내 저널에서 심사 중이며, 2건은 JCR 상위 5% 이내 저널에서 심사 중임
 - 2022년 3월 이내에 게재 승인이 완료될 것으로 기대되며, 논문 게재 후 우수연구성과에 대한 추가적인 홍보실적 달성이 가능한 것으로 사료됨
 - 코로나로 인한 행정 지연으로 인해 1차년도에 출원한 특허 1건에 대한 등록 심사가 비록 과제종료일(2021.12.31.)까지 마무리되지 못하였으나, 특허법원에서 수행한 사전 특허분석 결과가 우수하여 2022년 상반기 중 등록될 것으로 확신함

<본 연구개발과제의 계획서 상 성과지표 목표 및 달성 현황 비교표>

구분	논문		특허		성과홍보	인력양성 (석사)
	국외 SCIE	국내 비SCIE	출원	등록		
1차년도 (목표건수 / 달성건수)	1 / 0	0 / 0	1 / 1	0 / 0	0 / 1	2 / 2
2차년도 (목표건수 / 달성건수)	2 / 4	0 / 1	3 / 7	1 / 0	1 / 0	1 / 1
계	3 / 4	0 / 1	4 / 8	1 / 0	1 / 1	3 / 3
달성 여부	달성	달성	달성	미달성	달성	달성
비고	심사 중인 논문 4건 포함	-	PCT 1건 포함	2022년 상반기 중 등록 예상	-	-

2) 자체 보완활동

○ 국제 SCI급 논문 4건 게재 완료

- 현재 peer-review 중인 4편의 논문이 3월 이내에 게재 완료될 수 있을 것으로 기대됨

○ 홍보 실적 추가

- 현재 투고된 4편의 논문 중 1편이 상위 1%, 2편이 상위 5% 이내 저널에서 심사 중이기에 논문이 성공적으로 게재 승인될 경우 우수연구성과에 대한 언론보도를 실행할 계획임

○ 특허 8건 등록 완료

- 2020년 하반기에 출원한 1건의 특허는 2022년 상반기 중 등록될 것으로 기대되며, 이외의 7건의 특허 또한 2022년 하반기나 늦어도 2023년 상반기 중 등록될 것으로 예상함

○ 추가 사사 계획

- 현재 최종개발품에 대한 연구개발 내용 중 일부를 정리하여 1건의 SCI급 논문 투고와 1건의 특허 출원을 추가로 준비 중이며, 2022년 3월 이내에 투고 및 출원될 것으로 예상됨.

3) 연구개발 과정의 성실성

○ 도전적인 정성적 연구개발목표(과제 난이도: 上) 설정 및 기간 내 달성

- 본 연구개발과제의 목표는 개시단계가 TRL1~2단계 수준인 기초원천연구 사업의 취지에 알맞도록 매우 도전적으로 설정되었음
- 원론적으로 미세먼지 필터효율과 투광성의 관계는 trade-off 관계임에도 불구하고, 제조공정 및 기공 구조 측면에서 이를 극복하기 위한 신규 전략을 수립하고 실현함으로써 상용 제품의 성능을 넘어서는 원천소재를 개발하는 데 성공하였음
- 이 과정에서 최종보고서에 모두 담지 못한 수많은 실험적 시행착오와 중간연구결과가 발생하였으며, 전체 연구기간 동안 참여연구원이 모두 헌신적으로 연구개발에 임하였기에 실현 불가능할 것 같았던 정성적 연구개발목표를 과제종료일 내에 성공적으로 달성할 수 있었음
- 전반적인 행정 지연으로 인한 실 연구기간이 1년 7개월 가량임에도 불구하고 도전적인 과제를 성실히 진행하여, 고성능 미세먼지 필터의 투광성 향상이라는 도전적인 목표를 무사히 달성하고 원천소재/공정 및 장치와 관련한 기술특허를 8건이나 출원하였음
- 종합적으로, 본 연구개발과제의 정성적 연구개발목표 및 최종개발품에 대한 성능지표 목표는 100% 달성하였고, 논문/특허 등 성과지표 또한 추적사사를 통해 100% 달성할 수 있으리라 자신하기에 연구개발 과정이 충분히 성실하였던 것으로 판단됨

○ 당초 계획 대비 계획하지 않은 성과 달성 또는 계획한 성과 초과달성

- 당초 계획하였던 특허출원 목표 건수 대비 초과 달성하였음 (목표: 4건, 달성: 8건)
- 당초 계획하지 않았던 국내 학술지(KCI) 논문을 1건 게재하였음
- 당초 계획하지 않았던 학술회의 발표를 8건(초청강연 1건 포함) 수행하였고, 연구결과의 우수성을 인정받아 우수연구발표상을 4건 수상하였음

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 미세먼지 저감 기술과 관련한 현 시장 규모

- 외부 환경의 초미세먼지 농도가 급증함에 따라 이에 연동적으로 대두되는 실내 공기오염 문제는 국민의 기초 건강보건 증진과 관련한 중요한 사회적 이슈임
- 이에 따라, 공기청정기 시장은 필터 소재를 포함하여 이미 국내 시장만 3조원에 달하는 거대 규모로 성장하였고, 방진막 등 건축 부자재 시장까지 포함하면 최소 수십조 원에 달하는 시장이 형성됨

○ 미세먼지 차단용 방진막 소재와 관련한 현 기술 수준 및 한계

- 현 기술 수준에서 고분자 나노섬유 방진막은 가장 대중적으로 손쉽게 활용할 수 있는 미세먼지 차단용 창호 자재임이 분명한데 열적·기계적·화학적 매우 취약하고, 무엇보다도 초미세먼지에 대한 물리적 필터 효율을 높이기 위해선 방진막을 구성하는 기공의 크기를 극도로 줄여야 하는데 이 경우 미세기공에 의한 광 산란이 심화되어 방진막이 불투명해지는 심미적 문제가 발생함
- 또한, 기술적으로 해외의 3M 사 등에서 보유하고 있는 고분자 방사 기반 원천소재·공정기술로부터의 탈피가 쉽지 않아 신규 시장 진입 및 점유율 확대가 어려운 상황임

○ 본 연구개발성과의 원천성 및 우월성

- 본 연구개발성과는 원론적으로 불가능할 것 같았던 초미세먼지에 대한 높은 필터 효율을 유지한 채 투광성만을 선택적으로 증대시킬 수 있는 신규 미세기공 구조와 이를 구현하기 위한 특화 제조공정을 함께 개발하였음
- 이를 통해 실험적으로 구현된 2종의 최종개발품은 99% 수준의 높은 초미세먼지 필터 효율을 보임과 동시에 시각적으로 투명 또는 반투명(가시광 투과율: >75%)한 특징이 있어, 방충망 위에 시공 시 실내에서 외부 시야가 거의 확보되지 않고 햇빛의 입사량을 크게 저하시키는 기존 초미세먼지 방진막 상용품과는 완전히 기능적으로 차별화됨

○ 본 연구개발성과의 기술사업화 가능성 및 경제적 효과

- 특히, 광학적으로 투명한 다공성 세라믹 멤브레인을 성공적으로 구현한 사례는 산업계 뿐만아니라 학계에서도 극히 드물며, 시중에 디스크 형태의 AAO(anodic aluminum oxide) 멤브레인이 판매되고 있으나 제조단가가 높아 1인치 시편 기준 장당 가격이 대략 15,000원 정도로 매우 비싼 편임
- 본 연구개발을 통해 신규 개발된 제조공정을 활용하면 아주 값싼 상용 고분자 멤브레인을 템플릿으로 사용하여 고가인 AAO와 유사한 성능의 세라믹 멤브레인을 손쉽게 제조할 수 있고, 향후 양산화 시 경제적으로 훨씬 경쟁력 있는 제품을 생산 및 판매할 수 있음 (ALD 공정이 비교적 고가의 공정이나, 증착 두께를 최소화하면 공정비용이 크지 않고 이미 산업적으로 8인치급 이상의 대면적 증착이 가능함)
- 근접장 나노패터닝이 적용된 3차원 정렬 기공 구조의 고분자-세라믹 복합 멤브레인은 현 상용 기술 수준으로는 구현할 수 없는 수준의 우수한 기공 구조 균질성과 필터 성능을 발휘할 수 있기에 양산성만 해결된다면 차세대 고부가가치 멤브레인 소재로 자리매김할 수 있고 미래 시장을 선점할 수 있음
- 향후 제품 상용화를 위해선 제조공정에서 발생할 수 있는 미세균열 등 결함을 최소화하는 후속 보완연구가 필요하며, 보다 높은 공정 온도에서 ALD를 수행함으로써 증착되는 세라믹 박막의 막질을 근본적으로 향상하거나, 멤브레인 후면에 지지체를 덧대어 핸들링 과정 중 외부로부터 가해지는 응력을 최소화하는 방안 등 다각적 접근을 통해 이를 해결할 수 있음

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 연구개발성과의 관리 추진 체계

- 본 연구개발의 최종성과는 원천소재 및 제조공정을 포함하기에 잠재적으로 기술사업화 가능성이 있어 과제종료 후에도 연구책임자인 박준용 교수의 책임 하에 금오공대 '나노구조재료 및 소자 연구실'에서 지속적으로 기술검증 및 보완할 계획을 가지고 있음
- 이를 위하여 후속 관리를 위한 전담 연구원으로 1인의 박사과정과 2인의 석사과정 학생을 배치하였음
- 본 연구개발의 최종성과를 바탕으로, 국토교통부의 후속 연구개발사업 및 타부처의 연계사업을 적극적으로 탐색 및 발굴할 계획임
- 교내 산학협력단 및 중소기업산학협력센터와의 협력을 통해 기술사업화를 적극적으로 도모할 계획임

○ 연구개발성과의 활용분야 및 활용방안 (타 연구에의 응용방안 포함)

- 본 연구개발의 최종성과물은 기존 방사 공정 기반 고분자 나노섬유 원천특허로부터 완전히 탈피하는 '투명 다공성 세라믹 멤브레인 원천소재 및 특화 제조공정'으로, 본 연구개발에서 제안한 건물 창호용 방진막 소재 이외에도 응용분야가 무궁무진함
- 최종개발품이 직접적으로 활용 가능한 분야는 방충망에 추가로 시공되는 형태의 창호용 부자재인 미세 먼지 저감용 방진막이 포함될 수 있고, 이외에도 투명성과 내화확성이 동시에 요구되는 나노다공성 필터 응용이라면 현재 상용화된 소재기술 중 마땅한 대안이 없는 상태이기에 즉각적으로 활용될 수 있음
- 최종개발품의 기공 크기를 더욱 축소하거나 화학적 특성을 필요에 따라 개질할 경우, 공기청정기 또는 자동차용 HEPA 필터, 배터리용 분리막, 바이오 필터, 연구개발용 다목적 여과지 등으로 응용범위가 충분히 확장될 수 있음
- 종합적으로, 본 연구개발의 최종성과물은 원천소재 및 제조공정을 포함하기에 다양한 분야에 범용적으로 활용될 것으로 기대됨

○ 기술상용화 방안

- 본 연구개발성과는 실험실 수준에서 시작품에 대한 유사 환경 테스트를 마친 TRL 5단계 수준에 해당함
- 현 기술 수준에서는 개발품의 생산면적이 1인치급에 불과하기에 다양한 공인성적시험을 수행하기에는 어려움이 있으나, 추후 생산면적을 4인치급 이상으로 확대하여 상용 미세먼지 방진망과 동일한 규격의 성능시험(KS K ISO 9237 또는 ASTM D 737)을 수행하고, 기공 구조 최적화를 통해 자연환기 가능한 수준($>250\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$)의 공기투과도 성능을 확보할 계획임
- 본 연구개발과제 종료 후에도 교내 산학협력단 및 중소기업산학협력센터와 긴밀히 협업하여 본 연구개발성과의 기술개발단계를 더욱 끌어올릴 수 있도록 후속 연구개발사업을 적극적으로 탐색 또는 발굴할 계획임
- 종료 후 3년 이내에 본 연구개발성과의 기술 검증 및 보완을 완료하는 것을 목표로 하고, 최종개발품이 직접적으로 적용될 수 있는 미세먼지 저감용 창호 부자재, 공기청정기 또는 자동차용 HEPA 필터, 배터리용 분리막, 바이오 필터, 연구개발용 다목적 여과지 등의 제품을 개발/생산/판매하는 기업을 적극적으로 모색하여 i) 교내 산학협력단 협력 하에 기술이전을 실시하거나 ii) 2021년 교내에 성공적으로 유치한 구미강소특구사업의 이노폴리스 캠퍼스 사업 또는 TIPS 창업 프로그램을 통해 직접 창업하여 신규 시장을 개척하고자 함

< 별첨 >

별첨 자료

1. 참고문헌

2. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료

3. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

[참고문헌]

- [1] 허정현, “미세먼지 명칭부터 '발암물질'로 바뀌 인식 전환해야”, 한국일보 (2019)
- [2] 월간 THE LIVING, “기능성 미세방충망, 향후 시장 확대 전망”, The Living (2017)
- [3] X. A. Zhang et al., “Ordered 3D thin-shell nanolattice materials with near-unity refractive indices”, *Advanced Functional Materials*, 25, 6644 (2015)
- [4] A. Bagal et al., “Large-area nanolattice film with enhanced modulus, hardness, and energy dissipation”, *Scientific Reports*, 7, 9145 (2017)
- [5] J. Xiao, et. al., “Advanced Materials for Capturing Particulate Matter: Progress and Perspectives”, *Small Methods*, 2, 1800012 (2018)
- [6] C. Liu, et. al., “Transparent air filter for high-efficiency PM2.5 capture”, *Nature Communications*, 6, 6205 (2015)
- [7] B. Hatton et al., “Assembly of large-area, highly ordered, crack-free inverse opal films”, 107, 10354 (2010)
- [8] S. Jeon et al., “Fabricating complex three-dimensional nanostructures with high-resolution conformable phase masks”, 101, 12428 (2004)
- [9] C. Ahn et al., “Monolithic 3D titania with ultrathin nanoshell structures for enhanced photocatalytic activity and recyclability”, *Nanoscale*, 5, 10384 (2013)
- [10] S. Nam et al., “Fundamental Principles and Development of Proximity-field Nanopatterning toward Advanced 3D Nanofabrication”. 14. 2965 (2021)
- [11] J. Ahn et al., “Atomic Layer Deposition of Inorganic Thin Films on 3D Polymer Nanonetworks”, 9, 1990 (2019)
- [12] H. Seo et al., “Hydrophobic Organic/Inorganic Composite Films with 3D Hierarchical Nanostructured Surfaces”, 34, 264 (2021)
- [13] J. Ahn et al., “3D-ordered porous composite microparticles formed via substrate-free optical 3D lithography”, 2, 045007 (2020)
- [14] S. Cho et al., “3D Nanostructured N-doped TiO₂ Photocatalysts with Enhanced Visible Absorption”, 10, 9747 (2018)
- [15] K. Kim et al., “Anomalous Thermoelectricity of Pure ZnO from 3D Continuous Ultrathin Nanoshell Structures”, 10, 3046 (2018)
- [16] 이창희, “구미 금오공대, 교수 4명 국토부 기반연구 과제 동시 선정”, 매일신문 (2020)
- [17] 권현수, “금오공대 교수 4명, 국토부 주관 기반연구 과제 동시 선정”, 머니투데이 (2020)
- [18] 나동욱, “금오공대 교수 4명, 국토부 주관 기반연구 과제 동시 선정”, 베리타스알파 (2020)

[총 연구개발기간 성과점검기준표]

○ 총괄

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준								양적성과 현황			
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만원)	목표치	달성치	가중치
주관	A	2중 이상의 3차원 미세 망 상 구 조 세 라 믹 스 방진막 시 작품	A-1	'3차원 미세망상 구조 세라믹스' 제조공정 개발 및 소재화	①	면적	>1in ²	1in ²	상용 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정	측정된 샘플의 가로, 세로길이가 각각 1in 이상인지 확인	42.9	금오공 과대학 교 산학협 력단	150	특허: 출원 2건 등록 1건 논문(SCI): 2건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 6건 등록 0건 논문(SCI): 3건 논문(BI): 1건 시제품: 0건 SW: 0건	62.5
					②	기공크기	<2.5 μ m	x축:0.3 μ m y축:0.3 μ m z축:0.7 μ m	상용 SEM 또는 TEM 이미지를 분석하여 μ m 단위로 측정	측정된 기공의 x축, y축 길이가 각각 2.5 μ m 이하인지 확인						
					③	증착 두께	<100nm	3~70nm	상용 SEM 또는 AFM 또는 ellipsometer를 이용하여 증착된 박막의 두께 측정	증착된 세라믹 박막 두께가 100nm 이하인지 확인						
					④	최종 막 두 께	>25 μ m	>100 μ m	상용 Alpha-step으로 총 10번 측정하여 평균 두께 환산	측정된 3차원 미세망상구조 막 평균 두께가 25 μ m 이상인지 확인						
			A-2	'3차원 미세망상 구조 세라믹스' 물 성분 석/성 능 평가/최적화	①	투광성	65%	75.1%	상용 UV-VIS Spectrometer를 이용하여 가시광 투과도 측정(%)	가시광 영역 투과도 공인성적서 증빙	57.1	금오공 과대학 교 산학협 력단	200	특허: 출원 2건 등록 0건 논문(SCI): 1건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 2건 등록 0건 논문(SCI): 1건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	37.5
					②	통기성	500Pa	482Pa	간이 측정기를 이용하여 풍속 1~5cm/s에서 압력 감소 정도를 측정(Pa)	측정된 압력감소(Δ P)가 500Pa 이하인지 확인						
					③	미 세 먼 지 필터효율 (PM10)	95%	99%	간이 측정기를 이용하여 10 μ m 이하 미세먼지의 포집효율을 측정(%)	측정된 미세먼지(PM10) 포집 효율이 95% 이상인지 확인						
					④	초미세먼지 필 터 효 율 (PM 2.5)	90%	99%	간이 측정기를 이용하여 2.5 μ m 이하 미세먼지의 포집효율을 측정(%)	측정된 초미세먼지(PM2.5) 포집 효율이 90% 이상인지 확인						
공동	C		C-1		①											
계											100		350	특허: 출원 4건 등록 1건 논문(SCI): 3건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 8건 등록 0건 논문(SCI): 4건 논문(BI): 1건 시제품: 0건 SW: 0건	100

○ 1차년도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준							양적성과 현황			
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만원)	목표치	달성치	가중치
주관	A	3차원 미세망 상구조 템플릿 을 제조하기 위한 광학 3차 원 나노패터닝 기술 확립	A-1	대면적 노광장 치 셋업 및 광 학 3차원 리소 그래피 공정 확 립	① 면적	>1in ²	1in ²	상용 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정	측정된 샘플의 가로, 세로길이가 각각 1in 이상인지 확인	50	금오공 과대학 교 산학협 력단	75	특허: 출원 0건 등록 0건 논문(SCI): 1건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 0건 등록 0건 논문(SCI): 1건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	100
			A-2	패터닝 공정변 수 최적화를 통 한 3차원 미세 망상구조 템플 릿 구현	① 기공크기	<2.5 μ m	x축:0.3 μ m y축:0.3 μ m z축:0.7 μ m	상용 SEM 또는 TEM 이미지를 분석하여 μ m 단위로 측정	측정된 기공의 x축, y축 길이가 각각 2.5 μ m 이하인지 확인				특허: 출원 1건 등록 0건 논문(SCI): 0건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 5건 등록 0건 논문(SCI): 0건 논문(BI): 1건 시제품: 0건 SW: 0건	
	B	3차원 미세망 상구조의 세라 믹 소재화를 위한 물질전환 공정 확립	B-1	ALD 전구체 선 정 및 세라믹 박막 증착 조건 확립	① 증착 두께	<100nm	3~70nm	상용 SEM 또는 AFM 또는 ellipsometer를 이용하여 증착된 박막의 두께 측정	증착된 세라믹 박막 두께가 100nm 이하인지 확인	50	금오공 과대학 교 산학협 력단	75	특허: 출원 0건 등록 0건 논문(SCI): 0건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 1건 등록 0건 논문(SCI): 2건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	0
			B-2	고분자 템플릿 제거 공정 개발 및 최적화	① 최종 막 두 께	>25 μ m	>100 μ m	상용 Alpha-step으로 총 10번 측정하여 평균 두께 환산	측정된 3차원 미세망상구조 막 평균 두께가 25 μ m 이상인지 확인				특허: 출원 0건 등록 0건 논문(SCI): 0건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 0건 등록 0건 논문(SCI): 0건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	
공동	C		C-1		①		-								
계										100		150	특허: 출원 1건 등록 0건 논문(SCI): 1건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 6건 등록 0건 논문(SCI): 3건 논문(BI): 1건 시제품: 0건 SW: 0건	100

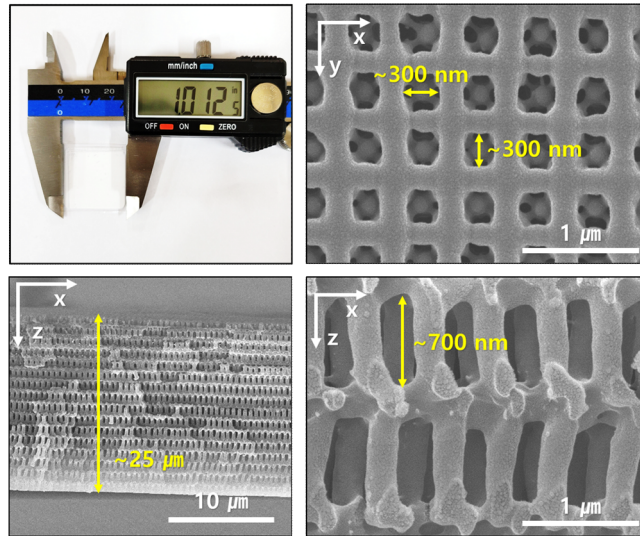
○ 2차년도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준									양적성과 현황		
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만원)	목표치	달성치	가중치
주관	A	3차원 미세망상구조 세라믹스 물성분석/성능평가 플랫폼 구축	A-1	(초)미세먼지 필터효율, 압력 감소 간이 측정 플랫폼 개발	①	측정 플랫폼 제작 여부	YES	YES	정성적으로 평가	간이 측정 플랫폼의 도면 및 실사 제시 여부 확인	50	금오공과대학교 산학협력단	100	특허: 출원 2건 등록 0건 논문(SCI): 0건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 1건 등록 0건 논문(SCI): 0건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	50
			A-2	3차원 미세망상구조 세라믹 소재의 대표 3종 물성/성능 평가	①	물성/성능 획득 여부	YES	YES	정성적으로 평가	간이 측정 플랫폼을 활용하여 획득한 3종 물성/성능 데이터 제시 여부 확인				특허: 출원 0건 등록 0건 논문(SCI): 1건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 0건 등록 0건 논문(SCI): 0건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	
	B	물성/성능 피드백을 통한 3차원 미세망상구조 최적화 및 목표성능 구현	B-1	다중 물성/성능 연계분석 기반 기공 구조 최적화	①	측정된 물성/성능을 반영한 공정 최적화 수행 여부	YES	YES	정성적으로 평가	피드백을 통해 수정된 공정변수 및 최적화된 기공 구조 SEM 이미지 제시 여부 확인	50	금오공과대학교 산학협력단	100	특허: 출원 1건 등록 1건 논문(SCI): 1건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 1건 등록 0건 논문(SCI): 1건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	50
					B-2	투광성, 통기성, 미세먼지 필터 효율이 최적화된 인치급 시제품 제작	①	투광성	65%	75.1%				상용 UV-VIS Spectrometer를 이용하여 가시광 투과도 측정(%)	가시광 영역 투과도 공인성적서 증빙	
			②	통기성			500Pa	482Pa	간이 측정기를 이용하여 풍속 1~5cm/s에서 압력 감소 정도를 측정(Pa)	측정된 압력감소(ΔP)가 500Pa 이하인지 확인						
			③	미세먼지 필터효율 (PM10)			95%	99%	간이 측정기를 이용하여 10μm 이하 미세먼지의 포집효율을 측정(%)	측정된 미세먼지(PM10) 포집효율이 95% 이상인지 확인						
			④	초미세먼지 필터효율 (PM2.5)			90%	99%	간이 측정기를 이용하여 2.5μm 이하 미세먼지의 포집효율을 측정(%)	측정된 초미세먼지(PM2.5) 포집효율이 90% 이상인지 확인						
			공동	C		C-1		①						-		
계										100		200	특허: 출원 3건 등록 1건 논문(SCI): 2건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	특허: 출원 2건 등록 0건 논문(SCI): 1건 논문(BI): 0건 시제품: 0건 SW: 0건	100	

[성과점검기준표 질적성과 증빙자료]

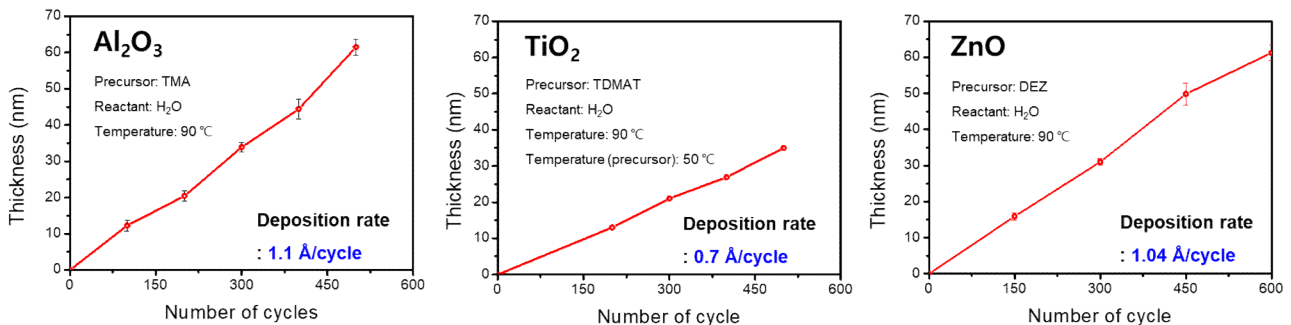
○ 인치급 광학 3차원 나노패터닝 공정 기반 대면적 3차원 미세망상구조 템플릿 제조

- 공정 면적 1 in² 이상 달성 및 기공 크기 각 축별로 2.5 μm 이하 달성
(성과점검기준표 '1차년도' 기준, 질적성과지표 A-1 ①, A-2 ① 달성)



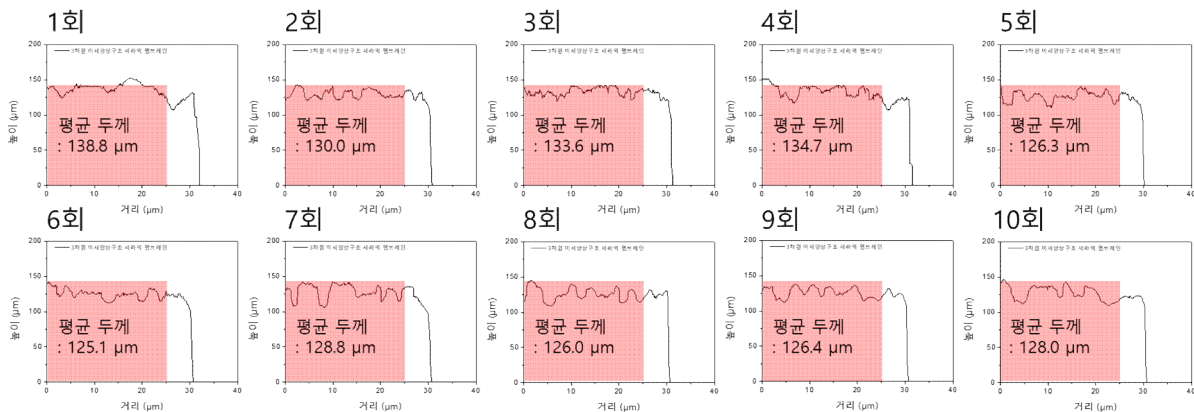
○ ALD 사이클별 증착 두께 측정을 통한 증착 속도 조건 확립

- AFM을 이용하여 ALD 사이클별 증착 두께 측정 및 분석, 증착 두께 100 nm 이하의 초박막 공정조건 확립
(성과점검기준표 '1차년도' 기준, 질적성과지표 B-1 ① 달성)



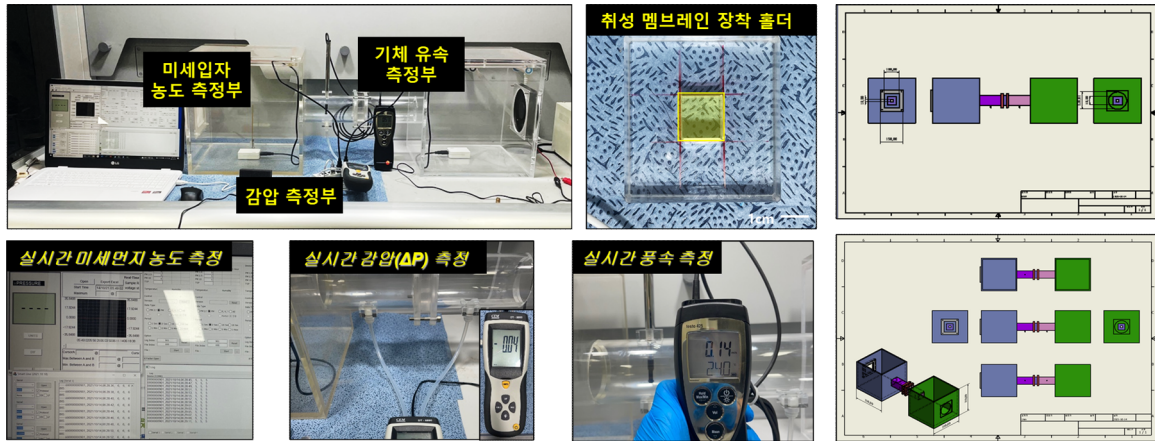
○ 고분자 템플릿 제거 공정을 통해 제조된 3차원 미세망상구조 세라믹스의 두께 측정

- 상용 Alpha-step을 이용하여 10번 측정하여 최종 막 두께 측정, 당초 목표인 100 μm 이상 달성
(성과점검기준표 '1차년도' 기준, 질적성과지표 B-2 ① 달성)

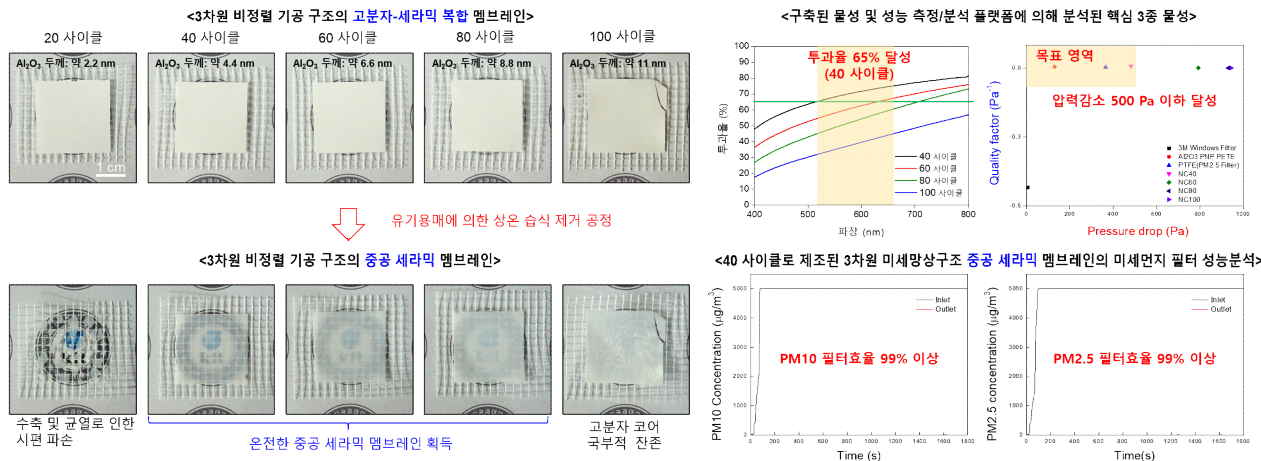


Alpha-step 10회 측정 결과 3차원 미세망상구조 세라믹스
평균 두께 약 130 μm

- (초)미세먼지 필터효율, 압력 감소 간이 측정 플랫폼 개발
- 미세먼지 필터링 간이 측정 플랫폼 자체 설계 및 제작 성공
(성과점검기준표 '2차년도' 기준, 질적성과지표 A-1 ① 달성)



- (초)미세먼지 필터효율, 압력 감소 간이 측정 플랫폼 개발 및 3차원 미세망상구조 최적화
- 핵심 3종 물성/성능 측정을 통한 3차원 미세망상구조 최적화 및 목표 성능구현 성공
(성과점검기준표 '2차년도' 기준, 질적성과지표 A-2 ①, B-1 ①, B-2 ②, ③, ④ 달성)



- 개발품의 투과성에 대한 공인시험성적서 (KOLAS 인증 기관 시행 / 시험 규격: KS S 2014)
- 3종 세라믹 물질로 구현된 1인치급 멤브레인이 부착된 판유리(자체 투과율: 4% 내외)의 최종 가시광 투과율은 모두 71% 이상으로 목표 달성 (목표: 600 nm 파장 기준 65% 이상)
(성과점검기준표 '2차년도' 기준, 질적성과지표 B-2 ① 달성)

시험성적서							
한밭대학교 산학협력단 스마트광학혁신사업단 주소: 대전광역시 유성구 대덕로 75 전화: 042-939-4831 팩스: 042-939-4734 http://www.ico.co.kr/ 발행처명: T-22-002							
1. 의뢰자	· 기관명: 공주대학교 산학협력단 산학협력사업단 · 주소: 경북 구미시 대덕로 61 태크노파크 지하 114호 · 의뢰일자: 2022.01.07						
2. 시료명	공학박막융합원 판유리(시료번호: 002, 수량: 1장)						
3. 시험기간	2022.01.11						
4. 시험항목	☒ 광투과율 ☐ 편광시험 (주: 대면 유성구 태크노1로 75 한밭대학교 대덕산학융합원 105호 인증평가실)						
5. 시험방법	KS L 2514-2011						
6. 시험결과	<table border="1"> <thead> <tr> <th>시험항목</th> <th>단위</th> <th>결과</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>가시광선 투과율</td> <td>%</td> <td>73.2</td> </tr> </tbody> </table>	시험항목	단위	결과	가시광선 투과율	%	73.2
시험항목	단위	결과					
가시광선 투과율	%	73.2					
※ 이 성적서의 시험결과에 의의가 제시된 시료 및 시료명에만 한정됩니다. ※ 이 성적서 전체본문이 불요로된 경우, Tel.042-939-4864로 연락주시면 확인하여 드립니다. ※ 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인증방식에 해당하는 공인성격서입니다.							
위 성적서는 국제시험기관인증협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분에 대한 시험결과입니다. 한국인정기구, 인정 한밭대학교 산학협력단 스마트광학혁신사업단장 (인) 2022. 01. 12 ISO-TP-15-02(00) 페이지 (1/1)							

[논문 증빙]

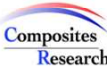
- 국외 SCIE급 논문 4편(투고 완료 및 심사 중)
- 국내 비SCIE급 논문 게재 1건

Composites Part B	
Stretchable translucent nanocomposite membranes with 3D heterogeneous interfaces derived from sugar templates for mechanochromic applications	
--Manuscript Draft--	
Manuscript Number:	JCOMB-D-22-00068
Article Type:	Full Length Article
Keywords:	Smart window; Atomic layer deposition; heterogeneous interface; 3D nanostructure; poly(dimethylsiloxane)
Corresponding Author:	Junyong Park, Ph.D. Kumoh National Institute of Technology Gumi, Gyeongbuk KOREA, REPUBLIC OF
First Author:	Seohan Yun
Order of Authors:	Seohan Yun Jieun Lee Taehyun Ryu Junyong Park, Ph.D.
Manuscript Region of Origin:	Asia Pacific
Abstract:	Technology that consists of a structured material with the ability to control the transmission of light through mechanical stimulation is receiving enormous attention as a future energy-saving solution for smart windows or sensors because it does not consume power. However, the previously reported process for imparting mechanochromic properties to elastomers through microstructuring is rather complicated and expensive. Herein, we propose an efficient method for fabricating stretchable and translucent composites whose opacity dynamically increases when stretched. The microstructure of the developed composite derives from a plate-shaped microporous sugar cube that is handcrafted through a wet agglomeration process. The resulting composite embeds a three-dimensional (3D) networked ultrathin (~60 nm) ceramic layer that forms a continuous heterogeneous interface between the elastomeric parts. Numerous voids are created at this 3D continuous heterogeneous

Journal of Membrane Science	
Composite membranes with ultrathin and conformal passivation for universal microfiltration compatible with organic solvents	
--Manuscript Draft--	
Manuscript Number:	MEMSCI-D-21-03029
Article Type:	Full Length Article
Section/Category:	Inorganic / Hybrid Membranes
Keywords:	Microfiltration; Porous membranes; Composites; Solvent resistance; Atomic layer deposition
Corresponding Author:	Junyong Park, Ph.D. Kumoh National Institute of Technology Gumi, Gyeongbuk KOREA, REPUBLIC OF
First Author:	Junyong Ahn
Order of Authors:	Junyong Ahn Taehyun Ryu Junyong Park, Ph.D.
Abstract:	The development of porous membranes with excellent solvent resistances is an important technical task in relation to environmental and energy issues, including chemical waste treatment in the semiconductor industry. However, common polymer membranes, except for Teflon-based membranes, do not guarantee universal resistance to various organic solvents. In this study, a universal strategy is proposed to improve the solvent resistances of polymeric porous membranes through conformal passivation of ultrathin metal oxide layers via atomic layer deposition. Conformal ZnO shells with a thickness below ~42 nm can significantly improve the inherently low resistances of nitrocellulose, polyethersulfone, and polycarbonate membranes to organic solvents without significantly degrading the flux. Although the polymer core is gradually dissolved by the organic solvent penetrating through the native cracks of the ZnO shell as the time of exposure to the organic solvent increases, the rigid porous network composed of hollow ZnO can well maintain its monolithic form for more than 1 week. Thus, it is possible to effectively filter pollen grains and heavy metal microparticles dispersed in harsh organic solvents without expensive Teflon-based membranes. This study opens new opportunities for selection of organic solvent-compatible membranes for microfiltration.

Journal of Membrane Science	
Transparent polyester track-etched/aluminum oxide composite membranes with tunable pore size and optical transparency for indoor air purification	
--Manuscript Draft--	
Manuscript Number:	MEMSCI-D-22-00014
Article Type:	Full Length Article
Section/Category:	Inorganic / Hybrid Membranes
Keywords:	Composite membrane; Polyester; Atomic layer deposition; Particulate matter; Air filter
Corresponding Author:	Junyong Park, Ph.D. Kumoh National Institute of Technology Gumi, Gyeongbuk KOREA, REPUBLIC OF
First Author:	Taehyun Ryu
Order of Authors:	Taehyun Ryu Junyong Ahn Junyong Park, Ph.D.
Abstract:	The material candidates for optically transparent porous membranes with high removal efficiency for ultrafine dust are very limited. In this study, a composite polyester track-etched (PETE) membrane with a conformally passivated, ultrathin metal oxide layer is proposed as a transparent filter for air purification. The pore size of the resulting composite membrane was determined from the thickness of the alumina layer that was conformally deposited on the PETE membrane via atomic layer deposition. Maximum antireflection characteristics were achieved for alumina layer thickness of ~55 nm. The corresponding transmittance of the PETE/Al ₂ O ₃ composite membrane was ~81.3%. Compared with the pristine PETE membrane, the developed composite membrane showed improved filtration efficiency (~98.1% for PM1.0), possibly due to pore size reduction. The findings of this study demonstrate the potential use of the composite membrane as an aesthetic window filter to improve indoor air quality.
Suggested Reviewers:	Dah-Young Khang Yonsei University dykhang@yonsei.ac.kr He has recently reported a number of membrane-related studies and is an eminent

Optics and Laser Technology	
Optimal design of phase grating for high-resolution two-photon interference lithography	
--Manuscript Draft--	
Manuscript Number:	JOLT-D-21-02376
Article Type:	Research Paper
Section/Category:	Nonlinear Optics
Keywords:	Two-photon lithography; Proximity-field nanopatterning; 3D interference lithography; 3D nanostructure; 3D nanofabrication
Corresponding Author:	Junyong Park, Ph.D. Kumoh National Institute of Technology Gumi, Gyeongbuk KOREA, REPUBLIC OF
First Author:	Jinseong Ahn
Order of Authors:	Jinseong Ahn Junyong Park, Ph.D.
Abstract:	Two-photon interference lithography with an elastomeric phase grating that allows spontaneous conformal contact to the photoresist can be used to fabricate practical-scale, three-dimensional (3D) photonic crystals through a single exposure. In principle, the unit cell symmetry and fill factor of the 3D periodic nanostructures produced using this technique are strongly depend on the structural parameters of the phase grating. However, theoretical approaches to derive the optimal parameters of the phase grating for realizing high-definition 3D nanostructures are still lacking. Here, we systematically predict the change in the Talbot interference pattern with the relief height of the phase grating under the conditions in which two-photon interference lithography is performed through optical simulations. The collective set of results reveals the design error of the relief height of the phase grating, as inferred by the scalar approximation thus far, and presents the optimal condition that satisfies the π -phase shift inferred by the full-vectorial numerical solution.
Suggested Reviewers:	Paul Braun pbraun@illinois.edu John A Rogers jrogers@uconnhstem.edu



Composites
Research

Paper

Vol. 34, No. 4, 264-268 (2021)
DOI: <http://dx.doi.org/10.7234/composites.2021.34.4.264>
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

3D 계층적 나노구조화된 표면을 갖는 소수성 유/무기 복합 필름

서희진*** · 안진성*** · 박준용***

Hydrophobic Organic/Inorganic Composite Films with 3D Hierarchical Nanostructured Surfaces

Huijin Seo***, Jinseong Ahn***, Junyong Park***

ABSTRACT: In this study, we propose a method for fabricating hydrophobic coatings/films with three-dimensional (3D) hierarchical nanostructured organic/inorganic composite surfaces. An epoxy-based, large-area 3D ordered nanoporous template is first prepared through an advanced photolithography technique called Proximity-field nanopatterning (PnP). Then, a hierarchically structured surface is generated by densely impregnating the template with silica nanoparticles with an average diameter of 22 nm through dip coating. Due to the coexisting micro- and nano-scale roughness on the surface, the fabricated composite film exhibits a higher contact angle (>137 degrees) for water droplets compared to the reference samples. Therefore, it is expected that the materials and processes developed through this study can be used in various ways in the traditional coating/film field.

초록: 이 연구에서 우리는 3차원 계층적 나노구조화된 유/무기 복합 표면을 가진 소수성 코팅/필름을 제조하는 방법을 제안한다. 먼저 근접장 나노패터닝(PnP)이라 불리는 원단 포토리소그래피 기술을 통해 에폭시 기판의 대면적 3차원 정렬 나노다공성 템플릿을 준비하였다. 이후, 딥 코팅을 통해 평균 직경이 22 nm인 실리카 나노입자를 템플릿에 조밀하게 함침시켜 계층적 구조화된 표면을 구현하였다. 표면에 공존하는 마이크로 및 나노 스케일 거칠기로 인해, 제조된 복합 필름은 대조군에 비해 물에 대한 높은 접촉각(>137도)을 나타내었다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 소재 및 공정은 전통적인 코팅/필름 분야에서 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words: 표면 텍스처링(Surface texturing), 계층적 구조(Hierarchical structure), 나노패터닝(Nanopatterning), 나노구조(Nanostructure), 유/무기 복합체(Organic/inorganic composite)

- 국내특허 출원 7건
- PCT 출원1건

[illegible]

제출일: 1-4

관인생략

출원번호통지서

출원일	2020.12.30
출가사	황신(사할구) 출가신청서(무) 청주본부(0625)
출원번호	10-2020-0306033 (접수번호 1-1-2020-1430706-41) (DAS금리코드E9F)
출원인명	금호공과대학교 신학대학원(2004-69820-2)
대리인성	목회법인오광호(2016-100031) 씨
발명자성	박준용 안준용 안진성
발명명	정밀한 기공술을 포함하는 정보처리 및 이익 배분방법

특허청장

«* 판례*»

1. 아래의 출원인(법인)이 청정하게로 접수되었으므로, 이후에 심사 진행할
 는 출원번호를 통해 파악하실 수 있습니다.
 2. 출원료 미납 수수료는 접수일로부터 다름날까지 동봉한 납입영수증에 의
 한 납부기한을 넘을 기일까지 기각은 유예하고 있는 문헌에 납부하여야 합니다.
 3. 납부지점: 031(9)0000000 > 일반계

[illegible][illegible][illegible][illegible]

관업생학	
출원번호통지서	
출원일자	2022.01.06
작가서명	심사정구(函) 공개사(函)원) 최정현(函)0607)
출원번호	10-2022-0202515 (출원번호 1-1-2022-0219144-36) (과심검문번호: 1964)
출원인명	공공도서관과 산학협력(函) 2004-09989(函)
대리인명	최정현(函)원) 2018-10033(函)
발명자명	최정현(函)원)
발명서명	내셔널라이브 출판물 제작 방법론 및 데이터 처리 방법
특허청장	
☞ 안내 ☞ 1. 귀하의 출원번호와 출원 일자 및 발명자명(函)을 참조하여, 특허청에서 진행중인 출원번호를 이용하여 특허청 홈페이지(www.patent.go.kr)에서 확인하실 수 있습니다. 2. 출원에 관한 세부 사항은 접수일로부터 출원번호를 발급받은 후 출원 접수증과 출원번호를 기재하여 귀하의 출원 번호는 특허청에 발급되어 있습니다. 3. 발명자명, 발명자명(函) 및 발명자명(函)을 참조하여, 특허청에서 진행중인 출원번호를 이용하여 특허청 홈페이지(www.patent.go.kr)에서 확인하실 수 있습니다. 4. 귀하의 발명자명(函)과 출원 번호를 특허청 홈페이지에 등록하시거나 특허과제담당자(函) 1544-8000에 문의하여 주시기 바랍니다. 5. 문의처: 특허청 (函) www.patent.go.kr (24시간)	

특허 협조 조약 (PATENT COOPERATION TREATY)		PCT/R2022/031320
발원국(들) (출원인) 특허청(들)		PCT 국제협력조약 및 국제협력 조약서 -PCT 규정 제38조-
대한민국 (대한민국 특허청 제 100, 2023-01, 2023-02, 2023-03, 2023-04, 2023-05, 2023-06, 2023-07, 2023-08, 2023-09, 2023-10, 2023-11, 2023-12, 2023-13, 2023-14, 2023-15, 2023-16, 2023-17, 2023-18, 2023-19, 2023-20, 2023-21, 2023-22, 2023-23, 2023-24, 2023-25, 2023-26, 2023-27, 2023-28, 2023-29, 2023-30, 2023-31, 2023-32, 2023-33, 2023-34, 2023-35, 2023-36, 2023-37, 2023-38, 2023-39, 2023-40, 2023-41, 2023-42, 2023-43, 2023-44, 2023-45, 2023-46, 2023-47, 2023-48, 2023-49, 2023-50, 2023-51, 2023-52, 2023-53, 2023-54, 2023-55, 2023-56, 2023-57, 2023-58, 2023-59, 2023-60, 2023-61, 2023-62, 2023-63, 2023-64, 2023-65, 2023-66, 2023-67, 2023-68, 2023-69, 2023-70, 2023-71, 2023-72, 2023-73, 2023-74, 2023-75, 2023-76, 2023-77, 2023-78, 2023-79, 2023-80, 2023-81, 2023-82, 2023-83, 2023-84, 2023-85, 2023-86, 2023-87, 2023-88, 2023-89, 2023-90, 2023-91, 2023-92, 2023-93, 2023-94, 2023-95, 2023-96, 2023-97, 2023-98, 2023-99, 2023-100, 2023-101, 2023-102, 2023-103, 2023-104, 2023-105, 2023-106, 2023-107, 2023-108, 2023-109, 2023-110, 2023-111, 2023-112, 2023-113, 2023-114, 2023-115, 2023-116, 2023-117, 2023-118, 2023-119, 2023-120, 2023-121, 2023-122, 2023-123, 2023-124, 2023-125, 2023-126, 2023-127, 2023-128, 2023-129, 2023-130, 2023-131, 2023-132, 2023-133, 2023-134, 2023-135, 2023-136, 2023-137, 2023-138, 2023-139, 2023-140, 2023-141, 2023-142, 2023-143, 2023-144, 2023-145, 2023-146, 2023-147, 2023-148, 2023-149, 2023-150, 2023-151, 2023-152, 2023-153, 2023-154, 2023-155, 2023-156, 2023-157, 2023-158, 2023-159, 2023-160, 2023-161, 2023-162, 2023-163, 2023-164, 2023-165, 2023-166, 2023-167, 2023-168, 2023-169, 2023-170, 2023-171, 2023-172, 2023-173, 2023-174, 2023-175, 2023-176, 2023-177, 2023-178, 2023-179, 2023-180, 2023-181, 2023-182, 2023-183, 2023-184, 2023-185, 2023-186, 2023-187, 2023-188, 2023-189, 2023-190, 2023-191, 2023-192, 2023-193, 2023-194, 2023-195, 2023-196, 2023-197, 2023-198, 2023-199, 2023-200, 2023-201, 2023-202, 2023-203, 2023-204, 2023-205, 2023-206, 2023-207, 2023-208, 2023-209, 2023-210, 2023-211, 2023-212, 2023-213, 2023-214, 2023-215, 2023-216, 2023-217, 2023-218, 2023-219, 2023-220, 2023-221, 2023-222, 2023-223, 2023-224, 2023-225, 2023-226, 2023-227, 2023-228, 2023-229, 2023-230, 2023-231, 2023-232, 2023-233, 2023-234, 2023-235, 2023-236, 2023-237, 2023-238, 2023-239, 2023-240, 2023-241, 2023-242, 2023-243, 2023-244, 2023-245, 2023-246, 2023-247, 2023-248, 2023-249, 2023-250, 2023-251, 2023-252, 2023-253, 2023-254, 2023-255, 2023-256, 2023-257, 2023-258, 2023-259, 2023-260, 2023-261, 2023-262, 2023-263, 2023-264, 2023-265, 2023-266, 2023-267, 2023-268, 2023-269, 2023-270, 2023-271, 2023-272, 2023-273, 2023-274, 2023-275, 2023-276, 2023-277, 2023-278, 2023-279, 2023-280, 2023-281, 2023-282, 2023-283, 2023-284, 2023-285, 2023-286, 2023-287, 2023-288, 2023-289, 2023-290, 2023-291, 2023-292, 2023-293, 2023-294, 2023-295, 2023-296, 2023-297, 2023-298, 2023-299, 2023-300, 2023-301, 2023-302, 2023-303, 2023-304, 2023-305, 2023-306, 2023-307, 2023-308, 2023-309, 2023-310, 2023-311, 2023-312, 2023-313, 2023-314, 2023-315, 2023-316, 2023-317, 2023-318, 2023-319, 2023-320, 2023-321, 2023-322, 2023-323, 2023-324, 2023-325, 2023-326, 2023-327, 2023-328, 2023-329, 2023-330, 2023-331, 2023-332, 2023-333, 2023-334, 2023-335, 2023-336, 2023-337, 2023-338, 2023-339, 2023-340, 2023-341, 2023-342, 2023-343, 2023-344, 2023-345, 2023-346, 2023-347, 2023-348, 2023-349, 2023-350, 2023-351, 2023-352, 2023-353, 2023-354, 2023-355, 2023-356, 2023-357, 2023-358, 2023-359, 2023-360, 2023-361, 2023-362, 2023-363, 2023-364, 2023-365, 2023-366, 2023-367, 2023-368, 2023-369, 2023-370, 2023-371, 2023-372, 2023-373, 2023-374, 2023-375, 2023-376, 2023-377, 2023-378, 2023-379, 2023-380, 2023-381, 2023-382, 2023-383, 2023-384, 2023-385, 2023-386, 2023-387, 2023-388, 2023-389, 202		

[학술회의 발표 실적]

○ 학술회의 발표 8건 (초청강연 1건 포함)

Fabrication of 3D porous magnetic microparticles loaded with Fe_3O_4 nanoparticles

Jinseong Ahn^{1,2}, Junyoung Ahn^{1,2}, Byongsun Oh^{1,2}, Junyoung Park^{1,2}
¹School of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology
²Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology

Backgrounds

Bottom-Up Fabrication

Top-Down Fabrication

Results and Discussions

Optical Strategy

Optical Analysis

3D Membrane Fabrication

Ultrasonic Fragmentation

Magnetic porous microparticles

Reproducibility

Summary

In this work, we introduce a top-down approach to produce a large amount of functional porous microparticles with 3D porous nanostructures. The highlights of this work include:

- Production of functional 3D porous porous membranes by introducing a new type of porous nanostructure.
- Development of a novel optical strategy for the fabrication of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.

This research was supported by the K2A-Grant-2019 and NRF-2020R1A5A1A01000001.

Magnetic-responsive porous microparticles formed by optical 3D nanopatterning

Jinseong Ahn^{1,2}, Junyoung Ahn^{1,2}, Byongsun Oh^{1,2}, Junyoung Park^{1,2}
¹School of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology
²Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology

Backgrounds

Bottom-Up Fabrication

Top-Down Fabrication

Results and Discussions

Optical Strategy

Optical Analysis

3D Membrane Fabrication

Ultrasonic Fragmentation

Magnetic porous microparticles

Reproducibility

Summary

In this work, we introduce a top-down approach to produce a large amount of functional porous microparticles with 3D porous nanostructures. The highlights of this work include:

- Production of functional 3D porous porous membranes by introducing a new type of porous nanostructure.
- Development of a novel optical strategy for the fabrication of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.

This research was supported by the K2A-Grant-2019 and NRF-2020R1A5A1A01000001.

Lambertian diffuse reflector with 3D nanostructure formed by Proximity field nanoPatterning

Jinseong Ahn^{1,2}, Junyoung Ahn^{1,2}, Byongsun Oh^{1,2}, Junyoung Park^{1,2}
¹School of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology
²Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology

Backgrounds

Diffuse Reflection

Two types of reflections

Applications

Results

Fabrication Process

Surface Hydrophobicity

Surface Characterization

Optical Characteristics

Technical Issues

Key Technique: Proximity field nanoPatterning (PnP)

Conclusion and Summary

In this work, we introduce a top-down approach to produce a large amount of functional porous microparticles with 3D porous nanostructures. The highlights of this work include:

- Production of functional 3D porous porous membranes by introducing a new type of porous nanostructure.
- Development of a novel optical strategy for the fabrication of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.

This research was supported by the K2A-Grant-2019 and NRF-2020R1A5A1A01000001.

Lithographically fabricated magnetic porous microparticles with 3D nanoarchitectures

Jinseong Ahn^{1,2}, Junyoung Ahn^{1,2}, Byongsun Oh^{1,2}, Junyoung Park^{1,2}
¹School of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology
²Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology

Backgrounds

Bottom-Up Fabrication

Top-Down Fabrication

Results and Discussions

3D Membrane Fabrication

Ultrasonic Fragmentation

Magnetic porous microparticles

Reproducibility

Summary

In this work, we introduce a top-down approach to produce a large amount of functional porous microparticles with 3D porous nanostructures. The highlights of this work include:

- Production of functional 3D porous porous membranes by introducing a new type of porous nanostructure.
- Development of a novel optical strategy for the fabrication of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.

This research was supported by the K2A-Grant-2019 and NRF-2020R1A5A1A01000001.

2020 Next Generation Lithography Conference

2020 차세대 리소그래피 학술대회

Program Book

Nov. 18-19, 2020
 Online Conference
www.nglcf.kr

ASML, ETEL, ESOL, Nikon, etc.

Detailed Schedule (연일정)

Nov. 18, 2020 (Wed.)

Nov. 19, 2020 (Thu.)

Nov. 20, 2020 (Fri.)

Nov. 21, 2020 (Sat.)

Nov. 22, 2020 (Sun.)

Nov. 23, 2020 (Mon.)

Nov. 24, 2020 (Tue.)

Nov. 25, 2020 (Wed.)

Nov. 26, 2020 (Thu.)

Nov. 27, 2020 (Fri.)

Nov. 28, 2020 (Sat.)

Nov. 29, 2020 (Sun.)

Nov. 30, 2020 (Mon.)

Nov. 31, 2020 (Tue.)

Advanced optical 3D nanolithography for top-down fabrication of functional porous microparticles

Jinseong Ahn^{1,2}, Junyoung Ahn^{1,2}, Byongsun Oh^{1,2}, Junyoung Park^{1,2}
¹School of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology
²Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology

Summary

In this work, we introduce a top-down approach to produce a large amount of functional porous microparticles with 3D porous nanostructures. The highlights of this work include:

- Production of functional 3D porous porous membranes by introducing a new type of porous nanostructure.
- Development of a novel optical strategy for the fabrication of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.

This research was supported by the K2A-Grant-2019 and NRF-2020R1A5A1A01000001.

Fabrication of 3D Porous Microparticles via Laser-Based 3D Photolithography

Junyoung Ahn^{1,2}, Jinseong Ahn^{1,2}, Seohan Yoon^{1,2}, Junyoung Park^{1,2}
¹School of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology
²Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology

Backgrounds

Bottom-Up Fabrication

Top-Down Fabrication

Results and Discussions

Optical Strategy

Optical Analysis

3D Membrane Fabrication

Ultrasonic Fragmentation

Magnetic porous microparticles

Reproducibility

Summary

In this work, we introduce a top-down approach to produce a large amount of functional porous microparticles with 3D porous nanostructures. The highlights of this work include:

- Production of functional 3D porous porous membranes by introducing a new type of porous nanostructure.
- Development of a novel optical strategy for the fabrication of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.

This research was supported by the K2A-Grant-2019 and NRF-2020R1A5A1A01000001.

Organic / Inorganic Composite Films with Hierarchical 3D Nanostructured Hydrophobic Surfaces

Huiliu Seo^{1,2}, Jinseong Ahn^{1,2}, Junyoung Park^{1,2}
¹School of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology
²Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology

Research Backgrounds

Concept & Strategy

Fabrication Procedure

Structure & Elemental Analysis

Surface Characterization

Conclusion & Summary

In this work, we have developed a novel 3D nanostructured porous films with hierarchical, structured surfaces through nanopatterning using 3D nanostructured porous films.

- Production of functional 3D porous porous membranes by introducing a new type of porous nanostructure.
- Development of a novel optical strategy for the fabrication of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.
- Development of a novel optical analysis method for the characterization of porous membranes.

This research was supported by the K2A-Grant-2019 and NRF-2020R1A5A1A01000001.

2021 차세대 리소그래피 학술대회

2021 Next Generation Lithography Conference

Oral Sessions (Nov. 17, 2021 (Wed.))

Opening Ceremony / Plenary Session I (원정중)

Chair: 이진관 (연하대)

13:00-14:20

14:20-14:40

14:40-15:10

15:10-15:30

15:30-15:50

15:50-16:10

16:10-16:30

16:30-16:50

16:50-17:10

17:10-17:30

17:30-17:50

17:50-18:10

18:10-18:30

18:30-18:50

18:50-19:10

19:10-19:30

19:30-19:50

19:50-20:10

20:10-20:30

20:30-20:50

20:50-21:10

21:10-21:30

21:30-21:50

21:50-22:10

22:10-22:30

22:30-22:50

22:50-23:10

23:10-23:30

23:30-23:50

23:50-24:10

24:10-24:30

24:30-24:50

24:50-25:10

25:10-25:30

25:30-25:50

25:50-26:10

26:10-26:30

26:30-26:50

26:50-27:10

27:10-27:30

27:30-27:50

27:50-28:10

28:10-28:30

28:30-28:50

28:50-29:10

29:10-29:30

29:30-29:50

29:50-30:10

30:10-30:30

30:30-30:50

30:50-31:10

31:10-31:30

31:30-31:50

31:50-32:10

32:10-32:30

32:30-32:50

32:50-33:10

33:10-33:30

33:30-33:50

33:50-34:10

34:10-34:30

34:30-34:50

34:50-35:10

35:10-35:30

35:30-35:50

35:50-36:10

36:10-36:30

36:30-36:50

36:50-37:10

37:10-37:30

37:30-37:50

37:50-38:10

38:10-38:30

38:30-38:50

38:50-39:10

39:10-39:30

39:30-39:50

39:50-40:10

40:10-40:30

40:30-40:50

40:50-41:10

41:10-41:30

41:30-41:50

41:50-42:10

42:10-42:30

42:30-42:50

42:50-43:10

43:10-43:30

43:30-43:50

43:50-44:10

44:10-44:30

44:30-44:50

44:50-45:10

45:10-45:30

45:30-45:50

45:50-46:10

46:10-46:30

46:30-46:50

46:50-47:10

47:10-47:30

47:30-47:50

47:50-48:10

48:10-48:30

48:30-48:50

48:50-49:10

49:10-49:30

49:30-49:50

49:50-50:10

50:10-50:30

50:30-50:50

50:50-51:10

51:10-51:30

51:30-51:50

51:50-52:10

52:10-52:30

52:30-52:50

52:50-53:10

53:10-53:30

53:30-53:50

53:50-54:10

54:10-54:30

54:30-54:50

54:50-55:10

55:10-55:30

55:30-55:50

55:50-56:10

56:10-56:30

56:30-56:50

56:50-57:10

57:10-57:30

57:30-57:50

57:50-58:10

58:10-58:30

58:30-58:50

58:50-59:10

59:10-59:30

59:30-59:50

59:50-60:10

60:10-60:30

60:30-60:50

60:50-61:10

61:10-61:30

61:30-61:50

61:50-62:10

62:10-62:30

62:30-62:50

62:50-63:10

63:10-63:30

63:30-63:50

63:50-64:10

64:10-64:30

64:30-64:50

64:50-65:10

65:10-65:30

65:30-65:50

65:50-66:10

66:10-66:30

66:30-66:50

66:50-67:10

67:10-67:30

67:30-67:50

67:50-68:10

68:10-68:30

68:30-68:50

68:50-69:10

69:10-69:30

69:30-69:50

69:50-70:10

70:10-70:30

70:30-70:50

70:50-71:10

71:10-71:30

71:30-71:50

71:50-72:10

72:10-72:30

72:30-72:50

72:50-73:10

73:10-73:30

73:30-73:50

73:50-74:10

74:10-74:30

74:30-74:50

74:50-75:10

75:10-75:30

75:30-75:50

75:50-76:10

76:10-76:30

76:30-76:50

76:50-77:10

77:10-77:30

77:30-77:50

77:50-78:10

78:10-78:30

78:30-78:50

78:50-79:10

79:10-79:30

79:30-79:50

79:50-80:10

80:10-80:30

80:30-80:50

80:50-81:10

81:10-81:30

81:30-81:50

81:50-82:10

82:10-82:30

82:30-82:50

82:50-83:10

83:10-83:30

83:30-83:50

83:50-84:10

84:10-84:30

84:30-84:50

84:50-85:10

85:10-85:30

85:30-85:50

85:50-86:10

86:10-86:30

86:30-86:50

86:50-87:10

87:10-87:30

87:30-87:50

87:50-88:10

88:10-88:30

88:30-88:50

88:50-89:10

89:10-89:30

89:30-89:50

89:50-90:10

90:10-90:30

90:30-90:50

90:50-91:10

91:10-91:30

91:30-91:50

91:50-92:10

92:10-92:30

92:30-92:50

92:50-93:10

93:10-93:30

93:30-93:50

93:50-94:10

94:10-94:30

94:30-94:50

94:50-95:10

95:10-95:30

95:30-95:50

95:50-96:10

96:10-96:30

96:30-96:50

96:50-97:10

97:10-97:30

97:30-97:50

97:50-98:10

98:10-98:30

98:30-98:50

98:50-99:10

99:10-99:30

99:30-99:50

99:50-100:10

100:10-100:30

100:30-100:50

100:50-101:10

101:10-101:30

101:30-101:50

101:50-102:10

102:10-102:30

102:30-102:50

102:50-103:10

103:10-103:30

103:30-103:50

103:50-104:10

104:10-104:30

104:30-104:50

104:50-105:10

105:10-105:30

105:30-105:50

105:50-106:10

106:10-106:30

106:30-106:50

106:50-107:10

107:10-107:30

107:30-107:50

107:50-108:10

108:10-108:30

108:30-108:50

108:50-109:10

109:10-109:30

109:30-109:50

109:50-110:10

110:10-110:30

110:30-110:50

110:50-111:10

111:10-111:30

111:30-111:50

111:50-112:10

112:10-112:30

112:30-112:50

112:50-113:10

113:10-113:30

113:30-113:50

113:50-114:10

114:10-114:30

114:30-114:50

114:50-115:10

115:10-115:30

115:30-115:50

115:50-116:10

116:10-116:30

116:30-116:50

116:50-117:10

117:10-117:30

117:30-117:50

117:50-118:10

118:10-118:30

118:30-118:50

118:50-119:10

119:10-119:30

119:30-119:50

119:50-120:10

120:10-120:30

120:30-120:50

120:50-121:10

121:10-121:30

121:30-121:50

121:50-122:10

122:10-122:30

122:30-122:50

122:50-123:10

123:10-123:30

123:30-123:50

123:50-124:10

124:10-124:30

124:30-124:50

124:50-125:10

125:10-125:30

125:30-125:50

125:50-126:10

126:10-126:30

126:30-126:50

126:50-127:10

127:10-127:30

127:30-127:50

127:50-128:10

128:10-128:30

128:30-128:50

128:50-129:10

129:10-129:30

129:30-129:50

129:50-130:10

130:10-130:30

130:30-130:50

130:50-131:10

131:10-131:30

131:30-131:50

131:50-132:10

132:10-132:30

132:30-132:50

132:50-133:10

133:10-133:30

133:30-133:50

133:50-134:10

134:10-134:30

134:30-134:50

134:50-135:10

135:10-135:30

135:30-135:50

135:50-136:10

136:10-136:30

136:30-136:50

136:50-137:10

137:10-137:30

137:30-137:50

137:50-138:10

138:10-138:30

138:30-138:50

138:50-139:10

139:10-139:30

139:30-139:50

139:50-140:10

140:10-140:30

140:30-140:50

140:50-141:10

141:10-141:30

141:30-141:50

141:50-142:10

142:10-142:30

142:30-142:50

142:50-143:10

143:10-143:30

143:30-143:50

143:50-144:10

144:10-144:30

144:30-144:50

144:50-145:10

145:10-145:30

145:30-145:50

145:50-146:10

146:10-146:30

146:30-146:50

146:50-147:10

147:10-147:30

147:30-147:50

147:50-148:10

148:10-148:30

148:30-148:50

148:50-149:10

149:10-149:30

149:30-149:50

149:50-150:10

150:10-150:30

150:30-150:50

150:50-151:10

151:10-151:30

151:30-151:50

151:50-152:10

152:10-152:30

152:30-152:50

152:50-153:10

153:10-153:30

153:30-153:50

153:50-154:10

154:10-154:30

154:30-154:50

154:50-155:10

155:10-155:30

155:30-155:50

155:50-156:10

156:10-156:30

156:30-156:50

156:50-157:10

157:10-157:30

157:30-157:50

157:50-158:10

158:10-158:30

158:30-158:50

158:50-159:10

159:10-159:30

159:30-159:50

159:50-160:10

160:10-160:30

160:30-160:50

160:50-161:10

161:10-161:30

161:30-161:50

161:50-162:10

162:10-162:30

162:30-162:50

162:50-163:10

163:10-163:30

163:30-163:50

163:50-164:10

164:10-164:30

164:30-164:50

164:50-165:10

165:10-165:30

165:30-165:50

165:50-166:10

166:10-166:30

166:30-166:50

166:50-167:10

167:10-167:30

167:30-167:50

167:50-168:10

168:10-168:30

168:30-168:50

168:50-169:10

169:10-169:30

169:30-169:50

169:50-170:10

170:10-170:30

170:30-170:50

170:50-171:10

171:10-171:30

171:30-171:50

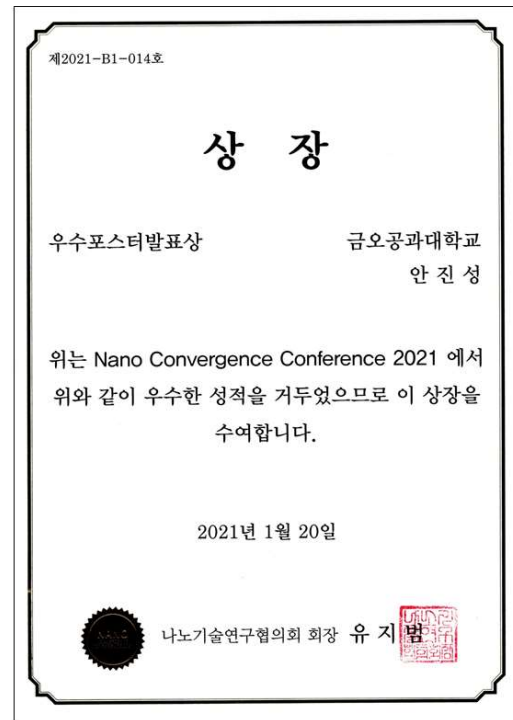
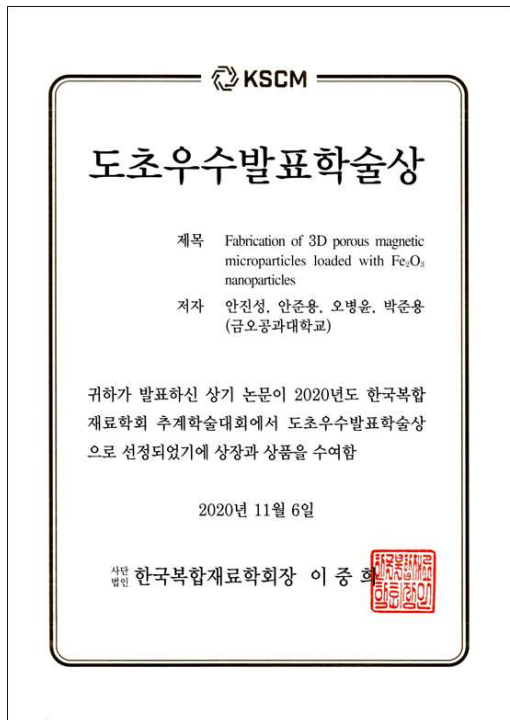
171:50-172:10

172:10-172:30

172:30-172

[수상 실적]

○ 학술대회 우수연구발표상 수상 4건



[인력양성]

○ 석사급 전문인력 3인 배출

Thesis for Master of Engineering
Fabrication of Functional 3D Nanostructured Materials via Non-contact Mode Proximity Field Nanopatterning with Air-Gap Phase Mask
December 2020
Graduate School Kumoh National Institute of Technology
Department of Advanced Materials Science and Engineering (Department of Energy Engineering Convergence)
Ahn Jinseong

공학석사학위논문
자연모방 계층형 미세구조 기반 전도성 건식 접착패치의 제조 및 응용
2020 년 12 월
금오공과대학교 대학원
신소재공학과 에너지공학융합전공
오 병 윤

공학석사학위논문
원자층 증착법을 통한 내화화성이 개선된 고분자-세라믹 복합 막의 제조 및 이의 정밀여과 응용
2021 년 12 월
금오공과대학교 대학원
신소재공학과 에너지공학융합전공
안 준 용

[홍보 실적]

○ 언론보도 1건

<기사 본문 내용 중 일부 발췌>

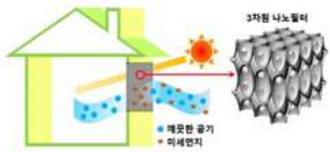
마지막으로 3차원 나노구조 기능성 소재 분야를 선도하는 박준용 교수는 건물 창호 자재로 활용 가능한 미세먼지 필터 원천소재 개발에 도전한다.

최근 미세먼지로 인한 실내 공기오염 문제가 사회적 이슈로 대두된 만큼 나노기술의 실용화를 통한 신규 시장 창출과 함께 첨단 소재·부품의 국산화로 해외 의존도 문제도 해소할 것으로 보인다.

한편 이번 사업은 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원이 '국토교통과학기술 연구개발 종합계획'에 제시된 연구주제 가운데 창의적 아이디어 발굴과 기반연구를 지원하기 위해 마련됐다.

사진 4. 박준용 교수(좌측), 연구 관련 그림(우측)





미세먼지 차단 효율이 95% 이상인 건물 창호용 3차원 미세망상구조 기반 통기성 반투명 세라믹스 개발

박준용 교수

교수신문 2020.04.20.
금오공대 교수 4명, 국토부 주관 기반연구 과제 동시 선정
 박준용 교수 이번 사업은 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원이 「국토교통과학기술 연구개발 종합계획(18~27)」에 제시된 연구주제 가운데 창의적 아이디어 ...

한국대학신문 2020.04.20.
금오공대 교수 4명, 국토부 주관 기반연구 과제 동시 선정
 김우석·노승준·주택석·박준용 교수 [한국대학신문 조영은 기자] 금오공과대학교(총장 이상철)는 교수 4명의 연구과제가 국토교통부 산하 국토교통과학기술진흥원...

경북일보 2020.04.20.
금오공대, 국토교통기술혁신연구사업 '두각'
 원혁부티 주택석, 김우석, 박준용, 노승준 교수, 금오공과대학교 교수 4명의 연구과제가 국토교통부 산하 국토교통과학기술진흥원의 '2020년 국토교통기술혁신연구...

베리타스알파 2020.04.20.
금오공대 교수 4명, 국토부 주관 기반연구 과제 동시 선정
 금오공과대학교(이하 금오공대)는 교수 4명의 연구과제가 국토교통부 산하 국토교통과학기술진흥원의... (신소재공학부 박준용 교수) 등 총 4건이다. 4차 산업혁명 ...

머니투데이 2020.04.20. 네이비뉴스
금오공대 교수 4명, 국토부 주관 기반연구 과제 동시 선정
 금오공과대학교는 최근 교내 교수 4명의 연구과제가 국토교통부 산하 국토교통과학기술진흥원의 '2020년... 개발, 박준용(신소재공학부) 교수 등 총 4건이다. 김우...



주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘미세먼지 차단 효율이 95% 이상인 건물 창호용 3차원 미세망상구조 기반 통기성 반투명 세라믹스 개발’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.