

연구개발 최종보고서·요약서

I. 인쇄 규격

1. 크기: A4 신판(가로 210mm * 세로 297mm)
2. 제본: 좌철
3. 용지
 - 가. 표지: 백상지(150g/m²)
 - 나. 내용: 백상지(80g/m²)
4. 인쇄 방법
 - 가. 표지: 바탕 백색, 활자 흑색
 - 나. 내용: 흑색 지정 활자

II. 편집 순서

1. 표지
2. 제출문
3. 보고서 요약서
4. 국문 요약문
5. 영문 요약문
6. 영문 목차
7. 본문 목차
8. 뒷면지

III. 참고 사항

전자 조판 인쇄 시에는 이에 준한다.

IV. 편집 순서별 서식

1. 표지

3cm	17CTAP -C11501 2-02	4cm	보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개() 국토교통기술촉진사업사업 제2차연도 최종보고서
			3cm
			0.5cm R&D / 17CTAP-C115012-02
			2.5cm 9cm
			(견고덱31p) 5cm
	자연 모사형 초발수성 내외장용 건설재료 개선을 위한 이온빔 활용기술 개발 2018	R&D Report	자연모사형 초발수성 내외장용 건설재료 개선을 위한 이온빔 활용기술개발 최종보고서
3cm			(0.1cm)
			2018. 07. 20.
			0.15cm
	국 토 교 통 국 토 교 통 부	(견고덱 25p)	주관연구기관 / 위덕대학교 협동연구기관 /
	국 토 교 통 과 학 기 술 진 흥 원		국 토 교 통 부 (전문기관)국토교통과학기술진흥원

2. 제출문

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘자연모사형 초발수성 내외장용 건설재료 개선을 위한 이온빔 활용 기술개발’ (연구개발 기간 : 2016. 06. 24. ~ 2018. 06. 23.) 과제의 최종보고서 7부를 제출합니다.

2018. 07. 20 .

주관연구기관명 : 위덕대학교 산학협력단	(박정도)	(인)
협동연구기관명 :	(대표자)	(인)
참여기관명 :	(대표자)	(인)

주관연구기관책임자: 이동훈

협동연구기관책임자:

참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.
--

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C11501 2-02	해당 단계 연구 기간	2016.06.24. - 2018.06. 23	단계구분	(해당단계) / (총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진사업			
연구과제명	대과제명	대과제가 있을 경우 기재합니다(단위과제일 경우에는 아래에 기재합니다)			
	세부과제명	자연모사형 초발수성 내외장용 건설재료 개선을 위한 이온빔 활용 기술개발			
연구책임자	이동훈	해당단계 참여 연구원 수	총: 4명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부:50,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:50,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 4명 내부: 명 외부: 명	총 연구개발비	정부:100,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:100,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	위덕대학교/그린에너지공학부			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
본 연구개발의 자연모사형 초발수성 내외장용 건설재료 개선을 위한 이온빔 활용기술개발은 2가지의 연구개발 성과를 최종목표로 가지고 있다. 첫 번째는 접촉각을 기존의 초발수 특성인 150° 이상 두 번째는 가시광투과도를 기존 80% 이상을 성취할 것 본 연구개발에서는 목표치를 훨씬 초과하여 달성하여 접촉각 162° 와 가시광 투과도는 93%를 달성하였다. 이를 기반으로 양적성과건수는 아래와 같은 결과를 달성하였다. 학술대회: 국제 2회 국내 2회 국제학술지(SCI): 1편(JCR 상위 10%) 국내학술지: 2편 인력양성: 석사 2명				보고서 면수: 33	

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구개발은 이온빔 조사를 이용하여 기존의 건설재료가 갖는 단점과 현재 사용되고 있는 초발수성 기술의 단점을 보완할 수 있는 독창적인 연구로서 자연모사형 초발수성 내외장용 건설재료 개선을 위한 이온빔 활용기술개발을 최종목표로한다.				
연구개발성과	학술대회: 국제 2회, 국내 2회 국제학술지 (SCI): 1편 국내학술지: 2편				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	기술적측면 - 새로운 초발수성 나노구조 제조기술 확보 - 관련분야의 기술 수준의 향상 - 새로운 연구분야 개척 및 인력양성 경제·산업적 측면 - 다양한 산업분야에 응용 - 초발수성 표면기능 시장의 확대				
핵심어 (5개 이내)	초발수성	이온빔	내외장재		

5. 영문 요약문

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	The major goals for this studies are follows: Supplementation of new technology for superhydrophobic surface fabrication - Simple and highly productive compared to traditional mechanical and chemical methods - Controlable fabrication by mean of easy optimize of ion irradiation				
Results	Conference 4 time Domestic Journal Paper 2 time International SCI Journal Paper 1 time				
Expected Contribution	Technical aspect ① Guarantee of new superhydrophobicity material technology ② Improvement of technology level of related field ③ Training human resource in the new research field industry · economic aspect ① Application to various industrial field ② Extension of superhydrophobic surface functional market				
Keywords	super water repellency	ion beam	interior/exterior materials		

6. 영문 목차

< Table of contents >

1. Summary of research and development Project	5
2. Present conditions of domestic and overseas technology development	11
3. Performance of research and attainment	11
4. Goal attainment and Contribution of related field	22
5. Plan to utilize Research and development attainment	23
6. Obtained information on overseas science technology during Research	25
7. Security level of Research and development attainment	27
8. Registered research facilities and equipment at national science and technology information system	27
9. Result of fulfilment of laboratory safety while carrying out Research and development Project	27
10. Representative Research Results of research and development Project	28
11. Others	29
12. Reference	29

7. 본문 목차

< 목 차 >

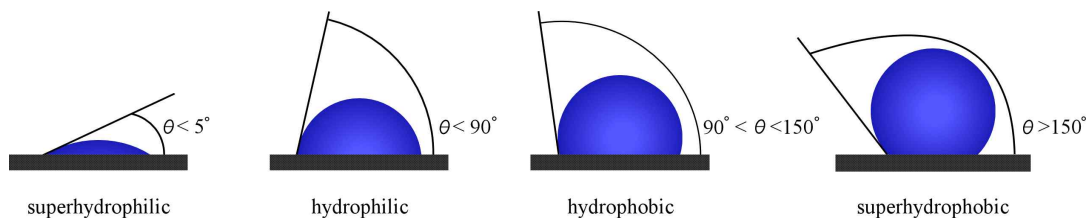
1. 연구개발과제의 개요	5
2. 국내외 기술 개발 현황	11
3. 연구 수행 내용 및 성과	11
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	22
5. 연구개발성과의 활용 계획	23
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	125
7. 연구개발성과의 보안등급	27
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	27
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	27
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	28
11. 기타 사항	29
12. 참고 문헌	29

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

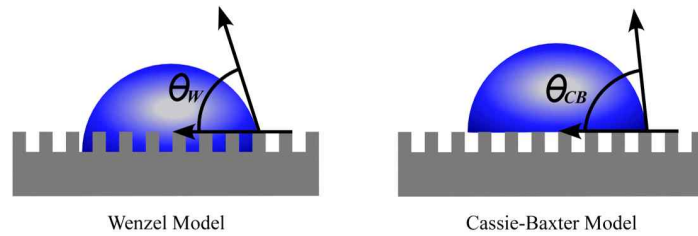
새로운 산업화기술의 패러다임에 따라 청정하고 지속가능한 환경의 요구가 증가하고 융합산업발전과 사회변화의 핵심으로서 건축물의 대형화, 고층화, 다양화는 건축물관리에 대한 어려움과 비용의 증가를 야기시켰다. 이러한 건축물에 대한 관리를 위해서 간단한 작업만으로 자기 세정이 되는 기술개발 및 보급이 필요시 되고 있다. 특히, 이러한 기능은 유리와 같이 투과성을 가지는 경우 외관의 오염상태가 실내에서도 보게 되어 경제적, 환경적, 사회적 상 태에서도 문제시 되고 있다.

물질 표면의 친수성, 소수성 구분하는 척도는 일반적으로 접촉각의 크기에 따라 분류된다.접촉각(contact angle, CA)이란 일정한양의 액체가 고체인 표면에 놓여있을 때 액체면과 고체면 사이에 이루는 각도를 의미하며 접촉각은 표면의 젖음성 측정하는 척도가 된다. 접촉각은 각의 크기에 따라 초친수(superhydrophilic, $\theta < 10^\circ$), 친수(hydrophilic, $\theta < 90^\circ$), 발수(hydrophobic, $90^\circ < \theta < 150^\circ$), 초발수(superhydrophobic, $\theta > 150^\circ$) 분류한다. 젖음 성을 나타내는 접촉각은 표면의 에너지와 표면의 거칠기에 영향을 많이 받는다고 알려져 있다.



< 물방울 접촉각 각도에 따른 표면현상 분류 >

거친 표면의 접촉각이 증가하는 것은 다음 두 모델을 이용하여 설명이 가능하다. Wenzel은 물방울 아래의 면적이 완전히 젖었다고 가정한다. 이 경우에서 거친 표면은 고체와 액체 사이의 접촉면적을 증가시키는 효과를 가져와 접촉각을 증가시킨다. 반면에 Cassie-Baxter는 물방울 아래 공기가 표면에 갇힌 상태로 남아 있다고 가정한다. 그 결과 고체와 물방울 사이의 접촉 면적이 감소하고 접촉각이 증가한다. 여기서 이중 조도를 갖는 표면은 같은 원리로 공기 중에서 물방울의 접촉각을 증가시킨다.

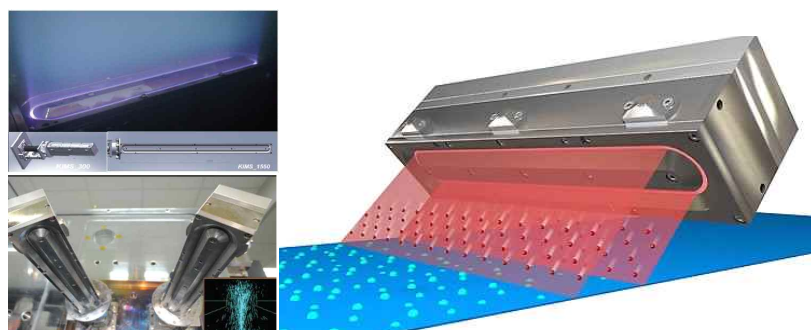


< 두 가지 모델에서의 고체 표면위의 물방울 모양 >

위 두 가지 모델을 바탕으로 물질 표면의 친수성, 소수성은 표면의 굴곡과 표면에너지의 두 가지 특성에 의해서 결정된다. 소수성을 가진 표면을 얻기 위해서는 표면의 굴곡을 증가시켜야 하고 표면에너지를 작게 해야 한다. 표면의 굴곡은 표면의 마이크로 혹은 나노구조와 밀접한 관계가 있고, 표면에너지는 각각의 물질마다 어떤 값을 가지고 있는 특성이다.

표면의 굴곡을 증가시키기 위해서는 기계적 가공, 플라즈마 식각, 주조 등의 방법들이 많이 사용되고 있다. 이러한 기계적인 방법은 비교적 정교하여 균일한 표면구조를 만들 수 있지만 한 번의 공정으로 만들 수 있는 면적이 매우 작기 때문에 대면적으로 만들 경우에는 많은 시간과 비용이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 기계적인 방법으로는 대량 생산이 힘들다. 표면에너지를 작게 하는 방법으로는 폴리머 물질을 표면에 코팅, 혼합, 또는 고분자화하는 방법 등이 사용되고 있다. 이러한 방법들은 대부분 화학적 공정이며 플라즈마 고분자화, 왁스 응고, 금속의 음극 산화, 용액 침전, 화학기상증착, 승화물질첨가, 상 분리 등이 있다. 이 화학적 공정들은 화학반응을 통해서 넓은 면적의 소수성 표면을 얻을 수 있으나 여러 가지 복잡한 공정을 거쳐야 하며, 한 공정에서 다른 공정으로 옮겨갈 때에 불순물이 들어갈 확률이 높고, 불순물 때문에 소수성 표면의 균일도에 문제가 있을 수 있다.

이온 빔의 경우, 중성기체를 전기방전 시켜 발생한 이온을 전기장으로 가속하게 되면 방향성을 갖는 높은 에너지 상태의 이온빔을 형성한다. 빔 에너지가 시료 표면에서 운동 에너지로 변환되어 빔이 조사된 영역 내부의 원자들 연쇄 충돌을 일으킨다. 변환된 에너지에 의해 시료 표면의 원자들은 증발 또는 탄성충돌에 의해 제거되거나 용융 또는 비탄성 충돌에 의해 재배열된다. 이처럼 에너지 빔 가공 기술은 시료의 표면을 원자 레벨의 미세 영역에서 물리적, 화학적 특성을 변형시킬 수 있기 때문에 마이크로/나노 단위의 미세 가공 기술로 활용되고 있다.



< 광폭선형 이온빔 발생장치 및 표면처리 개략도 >

본 연구는 이러한 이온빔의 특성을 극대화 시켜 한 번에 대량으로 표면처리가 가능한 기 개발된 이온빔 조사기기를 이용하였다. 이는 양성자, 헬륨, 질소, 아르곤, 제논 등의 이온을 대량 발생시킨 귀 수십 KeV 이상으로 가속해서 물질내에 주입하거나 조사하는 장치이며 이를 이용하여 자연모사형 초발수성 건설소재 분야에 적용시켜 발수성, 발유성, 윤활성, 비점착성, 저표면장력, 방오염성을 개선하여 현재 기초적인 연구수준에 머물고 있는 초발수성 소재 기술을 산업화로 도약시킬 수 있는 획기적인 연구개발 기술로 전환시켜 친환경적인 상용화 기술 확대 · 보급에 기여할 것이며, 또한 국제적인 기술교류 추진 및 국제적인 경쟁력 강화의 계기를 마련할 것이다.

2. 연구개발의 필요성

1) 연구의 기술적 측면의 필요성

- 현대도시의 발전으로 인한 대형화, 고층화, 다양화에 따른 건축물 오염으로 인한 문제발생
→ 높은 표면굴곡과 낮은 표면에너지에 갖는 초발수성 소재개발이 요구됨.
- 기존의 기계적 공정(플라즈마식각, 기계적 가공 등)의 문제점인 대면적 공정상의 높은 생산단가 발생
→ 대면적 대비 저가의 생산단가 기술개발이 요구됨.
- 기존의 화학적공정(코팅, 고분자화 등)의 문제점인 다단계공정으로 인한 불순물 및 표면 균일도 저하
→ 단순한 공정개발로 인한 불순물제거 및 균일한 표면처리 기술개발이 요구됨.

2) 연구의 경제적 측면의 필요성

- 초소수성 표면기술개발은 도로산업, 접착제산업, 섬유산업, 정밀화학산업, 전기전자산업, 자동차산업및 금속산업 등 발수성, 발유성, 방오성, 윤활성, 비점착성, 저표면장력 등의 기능성을 부여하는 다양한 용도로 산업 전반에 걸쳐서 다양하게 응용될 수 있다.
- 산업화 발전으로 인한 미세먼지와 황사로 인해 환경오염처리비용이 급속도로 증가하고 있는 추세이다. 초소수성표면 기술개발로 인한 방오염성 개선으로 환경오염비용을 크게 감소시킬 수 있다.
- 건축소재의 초발수성으로 물에 의한 화학적 반응이나 표면 산화가 일어나지 않아 소재 내구성 개선으로 인한 건축비용 절감을 예상할 수 있다.
- 옥외 건축소재 경우 초발수성 표면처리로 전기누전으로 인한 산업재해를 방지함.

3) 연구의 사회적/환경적측면의 필요성

- 세계적으로 건설소재의 친환경, 고내구성, 재활용화 특성을 요구하는 연구개발이 이루어지고 있다.
- 미세먼지, 황사로 인한 외벽재 오염 때문에 주거환경의 개선요구가 절실히 필요함.
- 건축물의 오염으로 인한 에너지절감 차원의 연구개발이 요구됨.
- 본 연구의 관련된 분야의 원천기술은 아직 전 세계적으로 개발 초기단계이기 때문에 원천기술 확보 여부에 따라 산업화의 다양화를 야기할 수 있음.
- 본 연구기술개발로 인한 국가경쟁력 확보를 통한 환경, 에너지, 안전 등의 기술 선진국 도약이 야기됨.

3. 연구개발 범위

첫 번째로 이온빔 조사를 이용한 초발수성 건축소재 개발로써 공법·기법 유형으로 연구 착수 시점에는 기 개발된 이온빔 연구기술을 이용한 창의기술로써 아직 건축소재를 적용한 경우가 전무하며 이온빔을 활용한 유사과제를 통해서 초발수성 건축소재에 적용할 경우 원천기술 확보를 할 수 있음.

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

두 번째로 건축소재별 초발수성 건축소재 제조의 기술개발 성숙도로써 재료·자재유형에 해당되며 이온빔을 이용한 표면개질 연구는 있으나 건축소재에 적용한 초발수성 연구는 전무한 실정이다. 기 개발된 이온빔 기술을 이용하여 건축소재 제조의 프로토 타입이 개발된다면 본 기술로 인한 사용화 및 사업화를 기대해도 좋을 것이다.

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

연구범위

최적화된 이온과 이온조사량에 따른 최적화된 시스템 규격을 통한 초발수성 건축소재 개발

연구수행방법

- 초발수성 물질 예비실험 및 이온빔 조사량 선정

: 판유리에 초발수성을 나타내는 최적화된 이온빔 조사량을 선정함

- 이온빔 조사실험 및 조사변수의 최적화 설정

:Ar, O₂ 이온의 가스비율, 파워밀도, 가스유량, 전극간의 거리, 처리속도 등을 고려하여 최적화 시스템을 규격화 시킴

- 제조된 소재의 모폴로지 분석 및 접촉각 측정

:접촉각 및 SEM을 통하여 표면분석 및 접촉각을 측정하여 기술개발을 증명하고 초발수성의 효율을 높임

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차년도	■ 초발수성 물질 예비실험 및 이온빔 조사량 선정	건축소재(내·외장재)중에 초발수성을 나타내는 최적화된 이온빔 조사량을 선정한다.
	■ 이온빔 조사실험 및 조사변수의 최적화 설정	다양한 이온빔 조사를 통하여 가스비율, 파워밀도, 가스유량, 전극간의 거리, 처리속도 등을 고려하여 최적화 시스템을 규격화 시킨다.
	■ 제조된 소재의 morphology 분석 및 접촉각 측정	접촉각, AFM, SEM 등을 통하여 표면 분석 및 접촉각을 측정하여 기술개발을 증명하며 효율성을 높인다.

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
2차년도	■ 건축소재별 초발수성 표면제조	금속, 고분자, 유리 등 다양한 건축소재별 초발수성 표면 개질한다.
	■ 응용 가능한 건축소재 적용	기존 건축소재를 이용하여 다양한 건축소재에 이온빔을 조사하여 적용시킨다.
	■ 건축소재의 morphology 분석 및 접촉각 측정	접촉각, AFM, SEM 등을 통하여 표면 분석 및 접촉각을 측정하여 기술개발을 증명하며 효율성을 높인다.
	■ 시제품 제작	상용화 가능성에 입각하여 시제품 제작한다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

○ 국내 현황

- 국내의 초소수성 기술개발은 고분자 소재를 기반으로 한국기계연구원, 포항공대, 서울대학교, KAIST등에 의해 연구되고 있다. 기초연구단계로써 건설자재에 적용된 경우는 없음.
 - AAO template를 몰드로 사용하여 나노섬모 돌기를 가진 고분자 제조 (한국기계연구원 유연은 박사팀)
 - 고분자 나노섬모 제조 및 기능화를 위한 기반 기술개발 (포항공대 조길원 교수팀)
 - 나노 임프린팅 기술을 이용한 마이크로/나노돌기 형성연구 (서울대 서갑양 교수팀)
 - 카본나노튜브에 유기물을 결합한 소재연구 (KAIST 정희태 교수팀)
- 요소기술분석으로 국내특허는 방오염성(12), 초발수(22), 플라즈마(406), 내후성(2258)로 출원된 것으로 분석됨.

○ 국외 현황

- 미국의 Nano tex에서 초발수성 의류개발/ Ferro 자정작용용 페인트 특허출원
 - 독일의 Sto사에서 페인트 개발/ EWABO사에서 코팅제 개발
 - 중국과학원의 Lei jiang 교수팀에 의해 매우 활발히 연구되고 있음.
 - 해외의 특허는 총 3,000건 이상의 특허출원이 된 것으로 분석됨. 거의 대부분의 특허들이 소재를 이용한 특허나 의류, 코팅제로 인한 특허출원으로 분석됨. 건축물에 대한 연구가 이루어졌으나 상용화 되어 있지 않음.
-

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

• 연구개발 목표별 연구추진 방법

-이온빔 조사에 따른 최적화도 구현

:초발수성 표면을 구현하기 위해서 안정적이며 최적화에 영향을 주는 가스비율, 파워밀도, 가스유량, 전극간의 거리, 처리속도 등을 고려하여야 한다.

-건축소재별 초발수성 표면제조

:다양한 건축소재별로 재료의 종류와 형상 또한 공정변수로서 중요한 요소이므로 이를 고려하여야 한다.

-초발수성 표면분석

: 제조된 소재의 분석은 ① 물에 대한 접촉각 (water contact angle), ② FT-IR의 기능기 분석, ③ FE-SEM에 의한 표면형상 분석, ④ AFM 분석에 의한 미세표면 거칠기 분석 ⑤ UV-VIS에 의한 투과도 분석

연구추진 일정

구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄															
주관	자연모				자료 조사		5								
	사형				초발수성 예비실험 및		15								
	초발수				이온빔 조사량 선정		15								
	성				이온빔 조사실험 및		15								
	내외장				조사변수 및 최적화 설정		15								
	용				제조된 소재의		15								
	건설재				morphology 분석 및		15								
	료				접촉각 측정		10								
공동	개선을				건축소재별 초발수성		15								
	위한				표면제조		15								
	이온빔				응용가능한 건축소재 적용		15								
	활용				건축소재의 morphology		15								
	기술개				분석 및 접촉각 측정		10								
	발(위덕				시제품 제작		10								
	대학교)														
		B	B-1	B-1-①											

○ 성과 목표 - (기초원천, 창조형 모험 분야만 해당)

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	1건	1건
일반학술지게재(1점)	2건	1건
특허출원(1점)		
특허등록(2점)		
소계(점수)	4점	3점

본 연구개발에 대한 SCI 국제학술지 1건(2점) 게재와 일반학술지 2건(2건) 총 4점을 취득하여 최소 성과목표는 초과 달성하였으며 현재 심사 중인 SCI 국제학술지 1건(2점)을 하면 총 6점으로 성과목표를 달성하였다.

(7쪽 중 제6쪽)

○ 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형 ¹⁾	연구기관	해당 연차	TRL
1	이온빔을 이용한 초발수 구조체 제조	이온빔을 이용하여 최적화 조건을 선정하기 위해서 실험소재에 대한 이온빔 조사실험을 수행한다. 초발수성에 필수적인 계층구조가 존재함을 확인한다.	공법·기법	위 덕 대학교 (주관기관)	1차년도	3
2	건축소재 적용 및 시제품 제작	건축소재별(금속, 고분자, 유리 등) 이온빔 조사를 적용한 소재를 기존소재와 비교·확인한다.	재료·소재	위 덕 대학교 (주관기관)	2차년도	3

○ 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1		
정의	이온빔을 이용한 초발수 구조체 제조	
목적	이온빔을 이용하여 최적화 조건을 선정하기 위해서 실험소재에 대한 이온빔 조사실험을 수행한다. 초발수성에 필수적인 계층구조가 존재함을 확인한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 접촉각 150° 이상 (세계최고수준) (개발기술 수준) 접촉각 150° 이상 (세계최고수준)	
성과달성 책임자 (소속기관)	이동훈(위덕대학교)	
소요기간	'16.06 ~ '17.05(1년0개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	AFM 과 접촉각 측정기로 분석가능	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[출원 : 0건, 등록 : 0건]
	논문	[SCI(E) : 1건, 학술지 : 0건]

핵심 성과지표인 접촉각은 성능목표인 150°을 초과 달성하는 162°로 성능목표를 달성하였다.

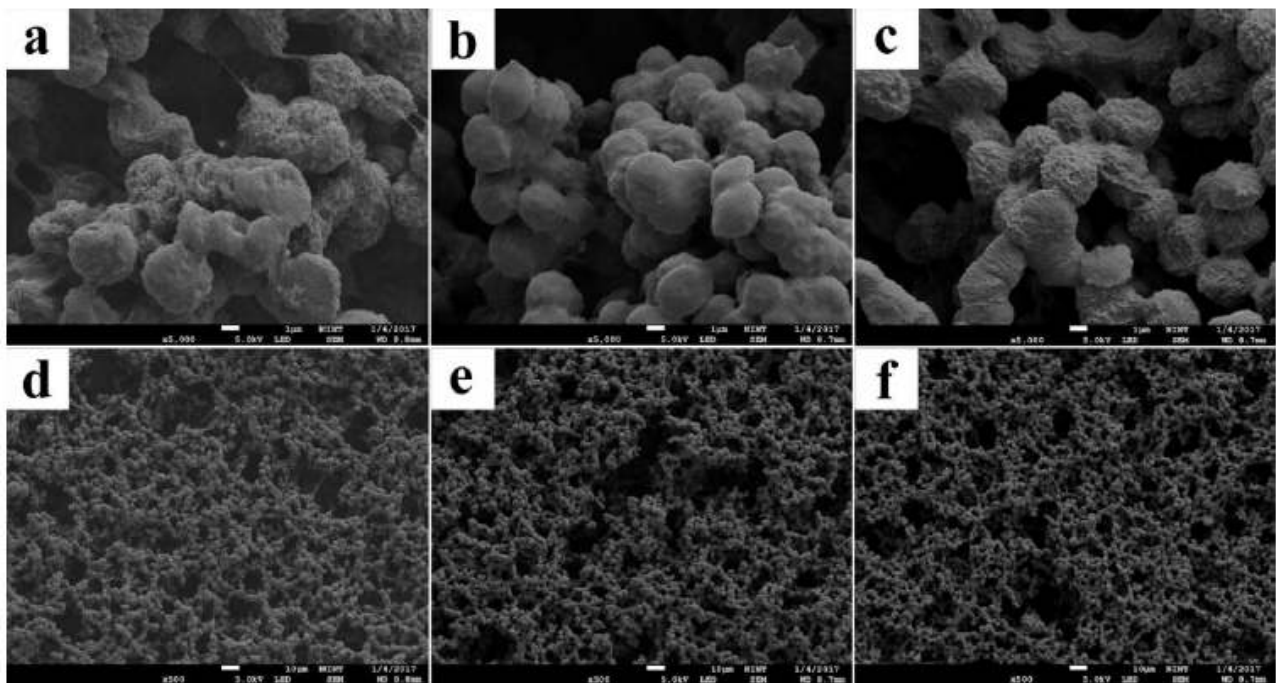
핵심성과 2		
정의	건축소재 적용 및 시제품 제작	
목적	건축소재별(금속, 고분자, 유리 등) 이온빔 조사를 적용한 소재를 기존소재와 비교·확인한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 접촉각 150° 이상, 가시광투과도 80% (세계최고수준) (개발기술 수준) 접촉각 150° 이상, 가시광투과도 80% (세계최고수준)	
성과달성 책임자 (소속기관)	이동훈(위덕대학교)	
소요기간	'17.06 ~ '18.05(2년0개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	AFM 과 접촉각 측정기, 투과도 측정기로 분석가능	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[출원 : 0건, 등록 : 0건]
	논문	[SCI(E) : 1건, 학술지 : 2건]
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심 성과지표인 접촉각은 성능목표인 150°을 초과 달성하는 162°로 성능목표를 달성하였으며 가시광 투과도 역시 성능목표인 80%을 초과 달성하여 93%를 달성하였다.

또한 유리, 고분자 등의 소재표면에 따른 소재의 성능목표 역시 위와 동일하다.

○ 연구수행성과 결과물

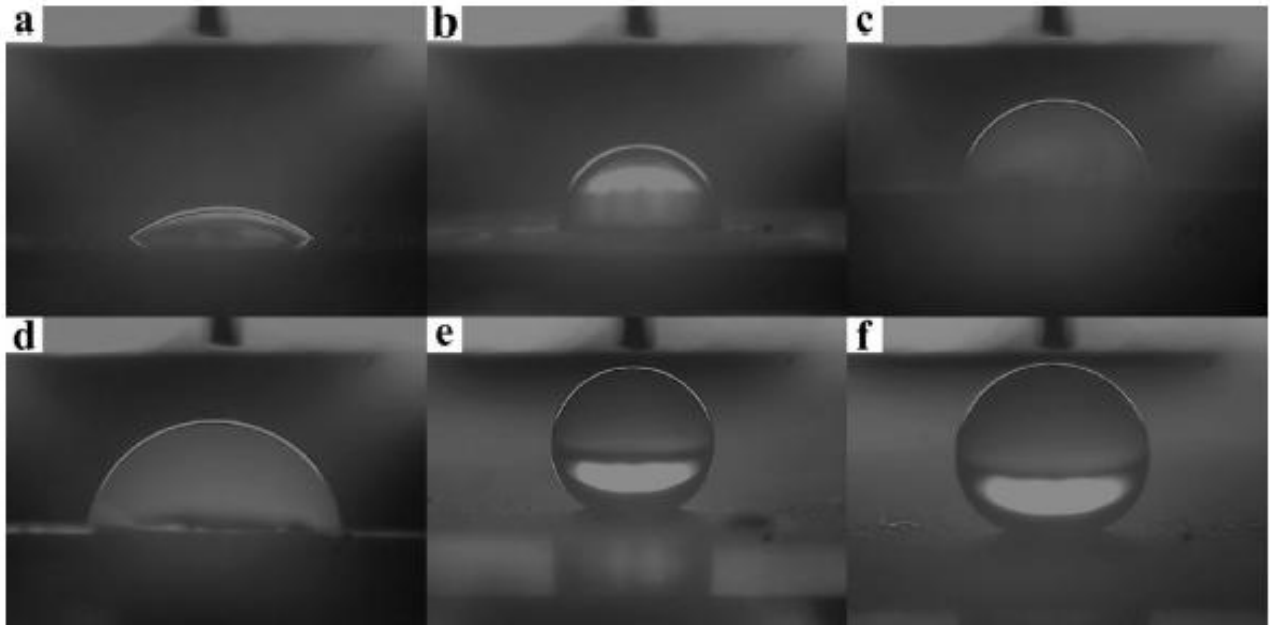
- 초발수 표면 SEM 데이터



샘플 표면의 나노구조 계층의 거칠기 생성 확인을 위한 SEM 이미지

기존의 아무 처리하지 않은 표면에(a, b) 두가지 이온(b, e),(c, f) 표면 처리한 결과 나노 구조의 거칠기를 생성함을 확인

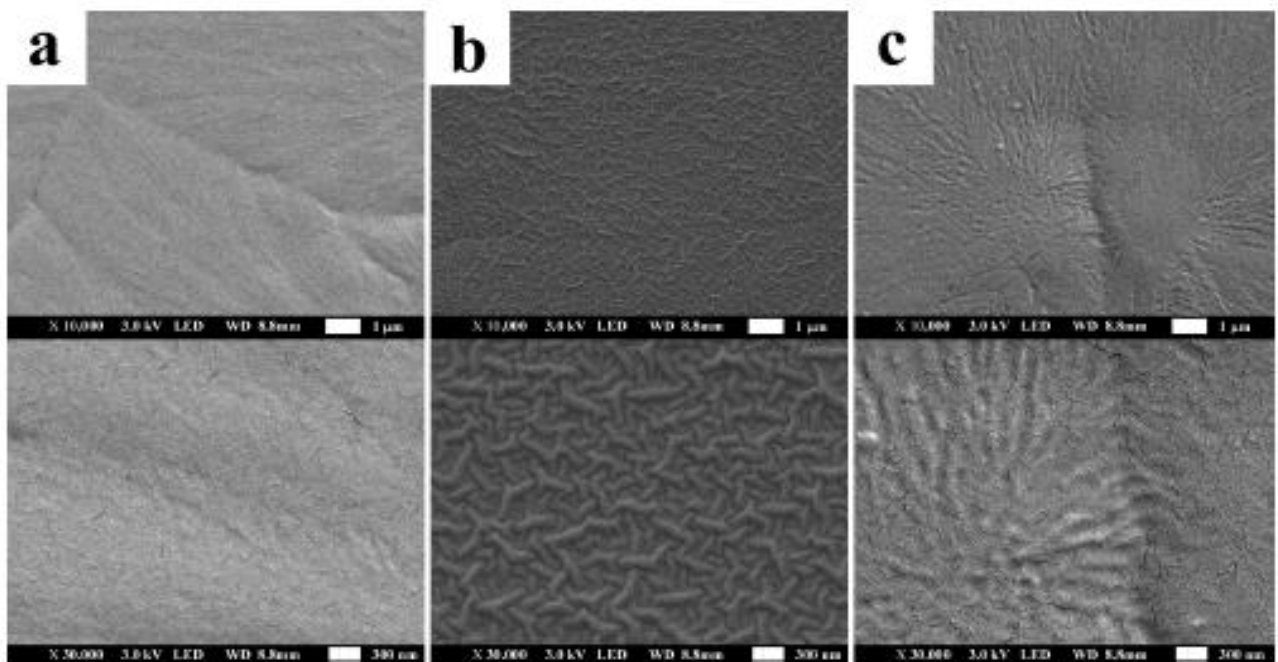
- 초발수 표면 접촉각 측정 데이터



시편의 이온빔 조사 전과 조사 후 접촉각 변화와 표면에너지를 낮출 수 있는 플루오르 코팅 후 접촉각을 나타냄

아무 처리하지 않은 유리 기판(a)과 이온빔 조사를 통해 나노 크기의 거칠기 생성을 극대화하기 위한 Polypropylene(PP) 코팅 후 접촉각은 35°에서 105°로 증가하지만, 이온빔 조사 후(c, d) 접촉각은 각각 70°와 75°로 낮아지게 된다. 이는 이온빔 조사과정 중 표면에 화학적 조성 변화 때문에 표면에너지가 변화하면서 나타나는 현상이다. 이후 플루오르 코팅을 통해 표면에너지를 제어함으로써 나노 크기의 구조물과 표면에너지를 낮춘 시편의 접촉각은 160°(e), 163°(f)로 향상된다.

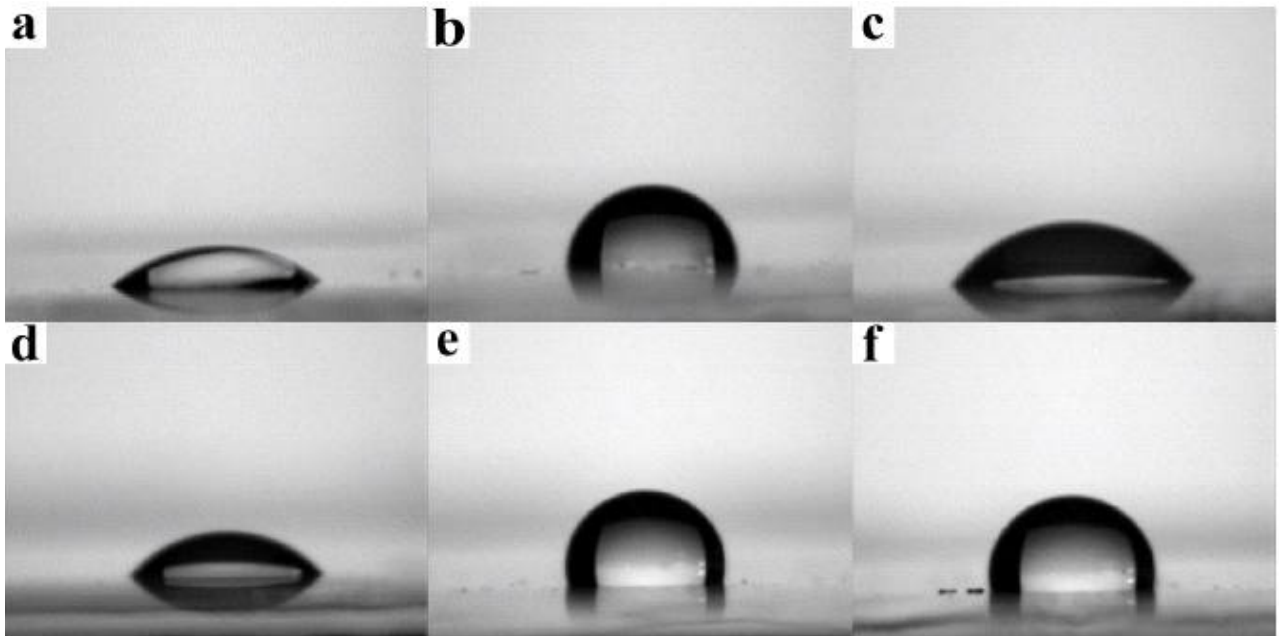
-초발수 표면 SEM 데이터



샘플 표면의 나노구조 계층의 거칠기 생성 확인을 위한 SEM 이미지

기존의 아무 처리하지 않은 표면에(a) 두가지 이온(b), (c) 표면 처리한 결과 나노 구조의 거칠기를 생성함을 확인

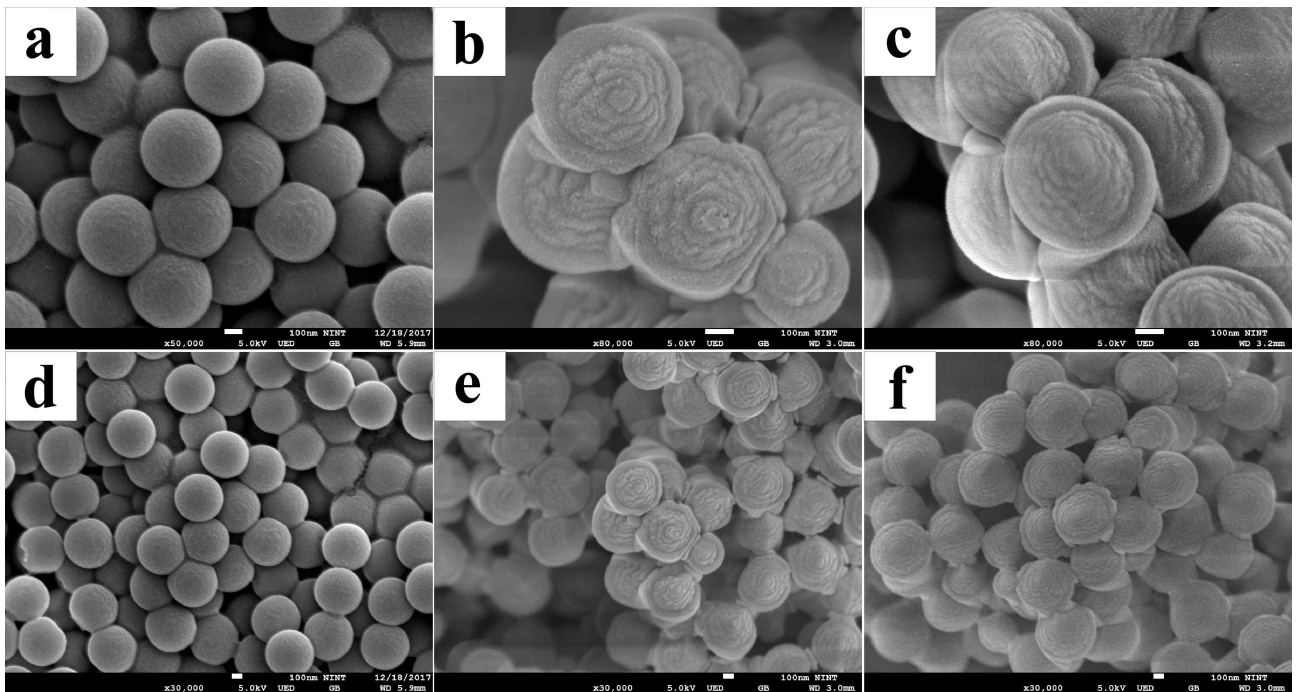
- 초발수 표면 접촉각 측정 데이터



시편의 이온빔 조사 전과 조사 후 접촉각 변화와 표면에너지를 낮출 수 있는 플루오르 코팅 후 접촉각을 나타냄

아무 처리하지 않은 유리 기판(a)과 이온빔 조사를 통해 나노 크기의 거칠기 생성을 극대화 하기위한 Polypropylene(PP) 코팅 후 접촉각은 35°에서 102°로 증가하지만, 이온빔 조사 후(c, d) 접촉각은 각각 72°와 50°로 낮아지게 된다. 이는 이온빔 조사과정 중 표면에 화학적 조성 변화 때문에 표면에너지가 변화하면서 나타나는 현상이다. 이후 플루오르 코팅을 통해 표면에 에너지를 제어함으로써 나노 크기의 구조물과 표면에너지를 낮춘 시편의 접촉각은 106°(e), 108°(f)로 향상된다.

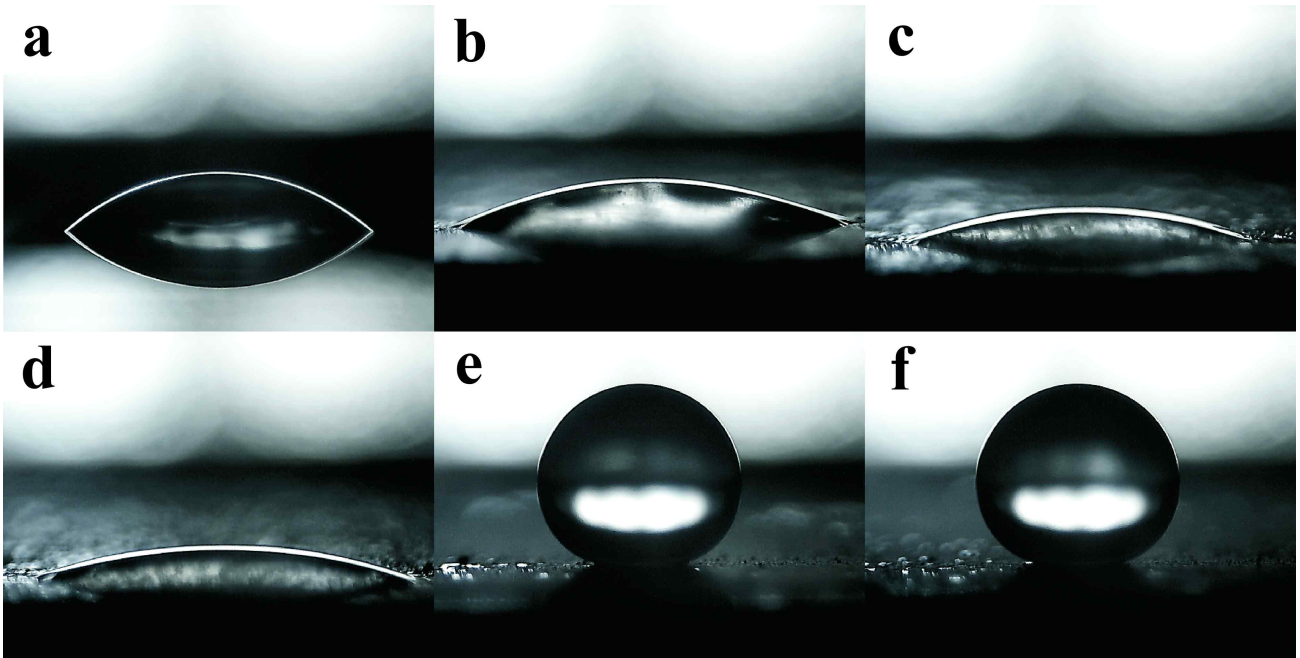
-초발수 표면 SEM 데이터



샘플 표면의 나노구조 계층의 거칠기 생성 확인을 위한 SEM 이미지

기존의 아무 처리하지 않은 표면에(a, b) 두가지 이온(b, e),(c, f) 표면 처리한 결과 나노 구조의 거칠기를 생성함을 확인

- 초발수 표면 접촉각 측정 데이터



시편의 이온빔 조사 전과 조사 후 접촉각 변화와 표면에너지를 낮출 수 있는 플루오르 코팅 후 접촉각을 나타냄

아무 처리하지 않은 유리 기판(a)과 이온빔 조사를 통해 나노 크기의 거칠기 생성을 극대화 하기 위한 Silica nanoparticles 코팅 후 접촉각은 35° 에서 32° 로 변화하고, 이온빔 조사 후(c, d) 접촉각은 각각 26° 와 21° 로 낮아지게 된다. 이는 이온빔 조사과정 중 표면에 화학적 조성 변화 때문에 표면에너지가 변화하면서 나타나는 현상이다. 이후 플루오르 코팅을 통해 표면에너지를 제어함으로써 나노 크기의 구조물과 표면에너지를 낮춘 시편의 접촉각은 152° (e), 160° (f)로 향상된다.

- 가시광투과도 측정 데이터

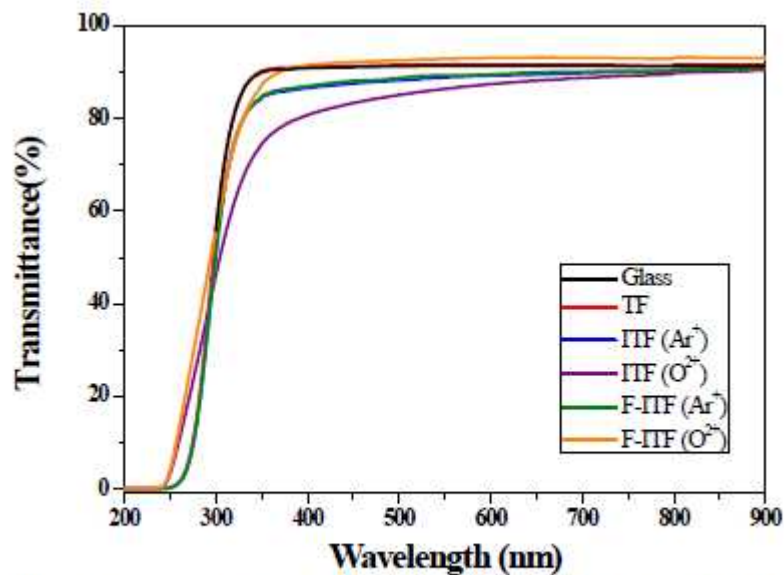


Fig. 6 UV-vis. transmittance of Glass, TF, IIF(Ar⁺), IIF(O₂⁺), F-IIF(Ar⁺), F-IIF(O₂⁺).

시편의 광학적 특성인 투과도를 측정하기 위해 UV-vis. 측정기를 사용한 데이터이다. 자외선 및 가시광선 영역에 해당하는 200-900nm 범위에서 투과율 특성변화를 분석한 결과 가시광선 영역인 400-800nm에서 최소 80% 이상의 투과율은 확보하였으며, 특히 플루오르 코팅을 거친 시편의 투과율은 가시광선 영역대에서 90% 이상 투과율로 우수한 광학적 성질을 가지고 있음을 확인하였다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

내외장용 건축소재의 효율적인 유지관리를 위한 이온 빔을 활용한 초발수성 건축소재 개발

- 접촉각 150° 이상 ---> 접촉각 162° 목표달성
- 가시광투과도 80% 이상 ---> 가시광투과도 93% 목표달성
- 국제학술대회 2회 발표
- 국내학술대회 2회 발표
- 국제 학술지 (SCI) 1건 게재 (JCR 상위 10% 이내) :추가 1건 심사중
- 국내 학술지 2건 게재
- 인력양성 석사 2명 졸업
- 핵심성과물 달성도

목표	달성도	내용
이온빔을 이용하여 최적화 조건을 선정하기 위해서 실험소재에 대한 이온빔 조사실험을 수행한다. 초발수성에 필수적인 계층구조가 존재함을 확인한다.	100%	■ 초발수성 물질 예비실험 및 이온빔 조사량 선정 :건축소재(내·외장재)중에 초발수성을 나타내는 최적화된 이온빔 조사량을 선정한다. ■ 이온빔 조사실험 및 조사변수의 최적화 설정 :다양한 이온빔 조사를 통하여 가스비율, 파워밀도, 가스유량, 전극간의 거리, 처리속도 등을 고려하여 최적화 시스템을 규격화 시킨다. ■ 제조된 소재의 morphology 분석 및 접촉각 측정 :접촉각, AFM, SEM 등을 통하여 표면 분석 및 접촉각을 측정하여 기술개발을 증명하며 효율성을 높인다.
건축소재별(금속, 고분자, 유리 등) 이온빔 조사를 적용한 소재를 기존소재와 비교·확인한다.	100%	■ 건축소재별 초발수성 표면제조 :금속, 고분자, 유리 등 다양한 건축소재별 초발수성 표면 개질한다. ■ 응용 가능한 건축소재 적용 :기존 건축소재를 이용하여 다양한 건축소재에 이온빔을 조사하여 적용시킨다. ■ 건축소재의 morphology 분석 및 접촉각 측정 :접촉각, AFM, SEM 등을 통하여 표면 분석 및 접촉각을 측정하여 기술개발을 증명하며 효율성을 높인다. ■ 시제품 제작 :상용화 가능성에 입각하여 시제품 제작한다.

2. 관련 분야 기여도

○본 연구개발 기술은 대형화·고층화되어 가는 건축물의 외관을 청결하게 유지하도록 하는 새로운 친환경적 기술로서 건축 외장재 유리를 비롯하여 건물 외벽, 도로 시설물의 다른 분야에 적용이 가능하며 기능성 건축 자재 시장창출이 가능 할 것으로 판단된다.

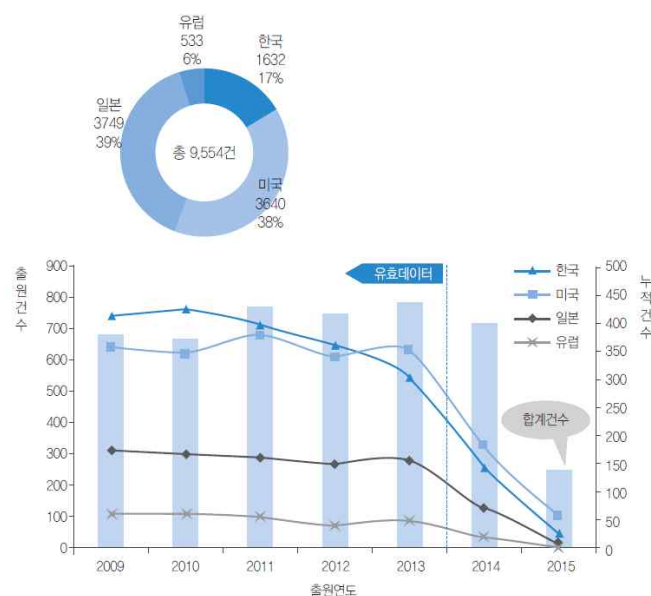
특히나 본 개발기술의 예상 수요기업으로 기능성 판유리 생산업체, 욕실 내장재 생산업체, 거울 가공업체, 간판 및 표지판 제작업체, 옥외 태양전지 생산업체, 스마트 강판 생산업체 등에 실용화 될 것으로 예상된다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

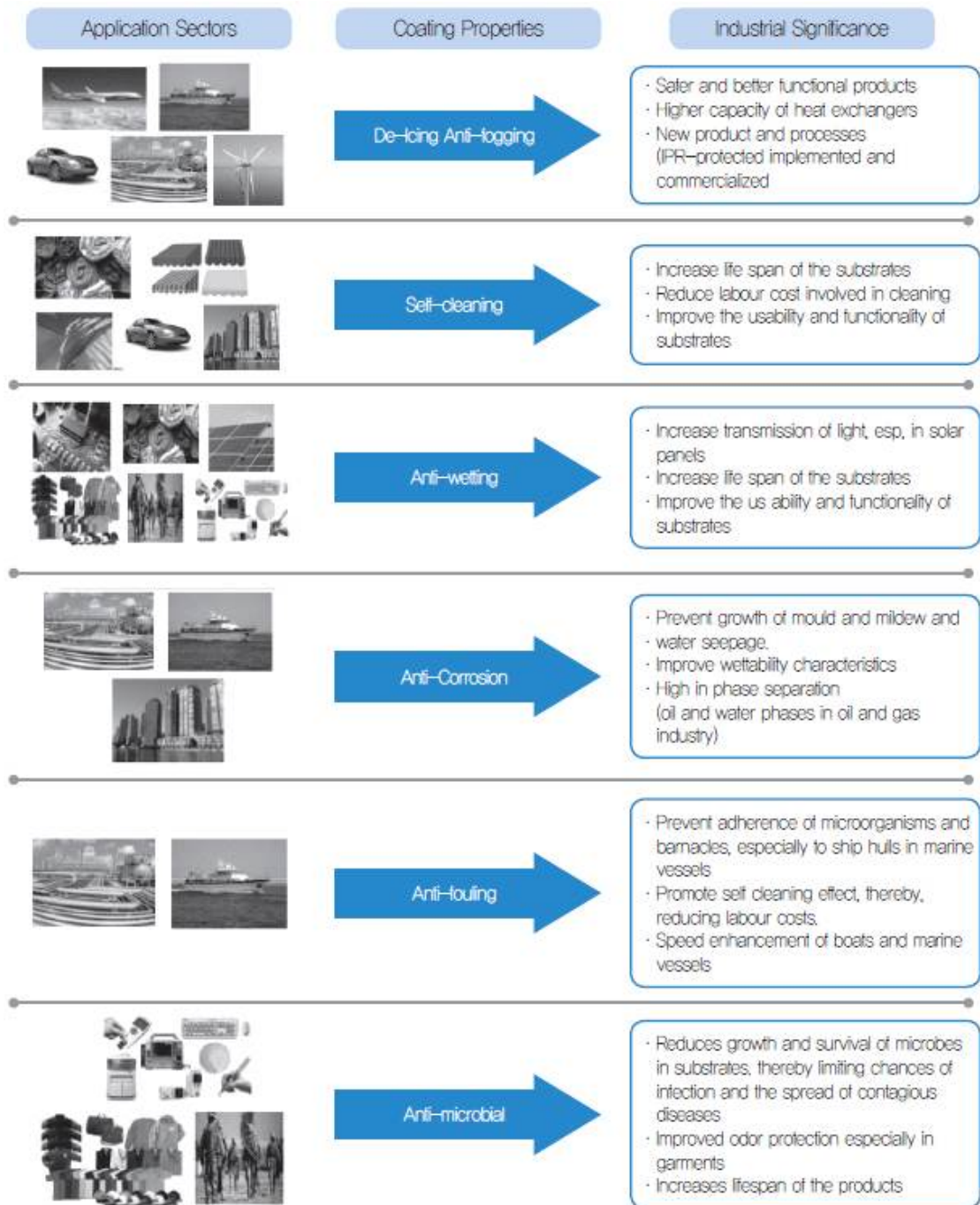
최근 다양한 환경 및 조건에서 다양한 기능을 발현할 수 있는 소재에 대한 중요성이 대두되면서, 플라스틱 및 금속 표면에 다양한 기능 발현이 요구되고 있으면 이로 인해서 현재 코팅 소재 기술의 동향은 단순한 기재 보호에 국한되지 않고 기재 표면에 다양한 기능을 부여하는 코팅 소재에 대한 요구가 급격하게 증가하고 있는 실정이다. 기재 표면에 부여되는 기능 중에서 산업적으로 관심이 큰 기능은 고경도, 친수, 발수, 방청, 전자파, 산소·수분 차단성 등이며 이러한 기능을 부여할 수 있는 코팅 소재 개발에 연구 및 상품 개발이 집중되고 있음.

최근 국내에서도 이러한 표면 기능 부여가 가능한 특수 코팅 소재에 대한 중요성을 인식하고 다양한 표면에 표면 특성 부여가 가능한 코팅 소재에 대한 연구 개발이 진행되어져 왔으나, 원천 소재에 대한 특허권이나 관련 원천 기술 확보에 어려움을 겪고 있는 상황임. 현재 이러한 특수 코팅용 소재들은 대부분 유무기 하이브리드 기반 소재들이나 실란 및 실라잔과 같은 무기물 소재들이 사용되고 있으며 이러한 소재들의 다양한 기재 표면에 대한 부착력, 내구성 및 여러 가지 물성 개선을 위하여 다양한 연구가 진행되고 있음. 현재 유무기 하이브리드 기반 소재들이나 실란 및 실라잔과 같은 무기물 소재들은 대기업보다는 중소·중견 기업을 주도 생산 판매가 진행되고 있는 실정임.

최근 반도체, 휴대폰, 디스플레이와 같은 전자소자의 박막화 및 슬림화 추세로 인하여, 유연하면서도 고경도와내구성 가지고 우수한 화학적, 광학적 성질 등 다양한 표면 기능을 가지고 있는 소재의 개발이 요구되고 있음. 다양한 소재 (플라스틱, 금속, 유리 소재) 표면에 다양한 기능부여용 코팅 소재로는 유/무기 하이브리드를 사용하거나 원료 자체의 표면을 기능성화 시킴으로써 제조될 수 있으며, 토목/건축용, 자동차/선박용, 에너지용 전극, 전자/디스플레이용(경박단소화 전자 제품; 스마트폰 터치패널, 투명 전극, 플렉시블 디스플레이, 태양전지), 군수(국방)용, 섬유용, 의료 및 식품 포장용, 정전기 방지 및 전자파 차단 필름, 인쇄전자(전자종이, 3D 프린터), 선박, 탱크, 광학용 등에 적용되고 있음.



<초발수 기술의 국가.연도별 특허출원 동향>



< 초발수성 기술의 산업적 응용 >

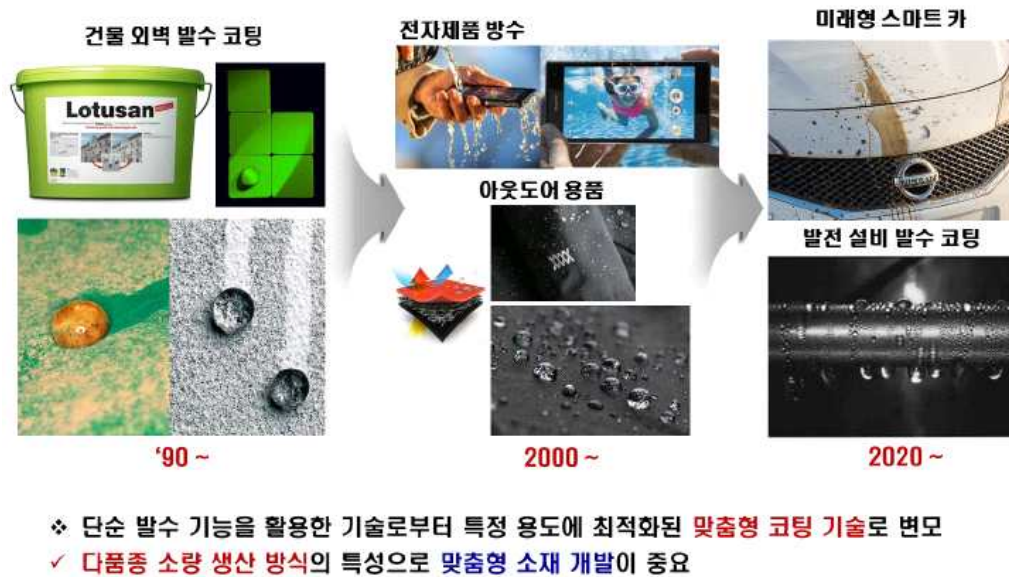
주요 내외장재의 시장 규모를 보면 2015년 현재 외장재, 패넬강판, 사이딩, 지붕재, 천장재, 창호재 규모가 10조 규모이며 매년 증가율이 평균 7%이상의 증가율을 적용하고 있음.

비록 건설 경기의 세계적 하락세, 중국 및 동남아 건설업체의 질적인 향상과 선진 건설업체의 국내 진출 및 중국 진출 등으로 인해 향후 치열한 경쟁구도가 예상되고 있지만 단순한 가격경쟁이 아닌 신 기능성 초발수 건설재료 제품의 개발이 적용된다면 새로운 시장의 창출을 통하여 세계시장을 선점 할 수 있을 것이다.

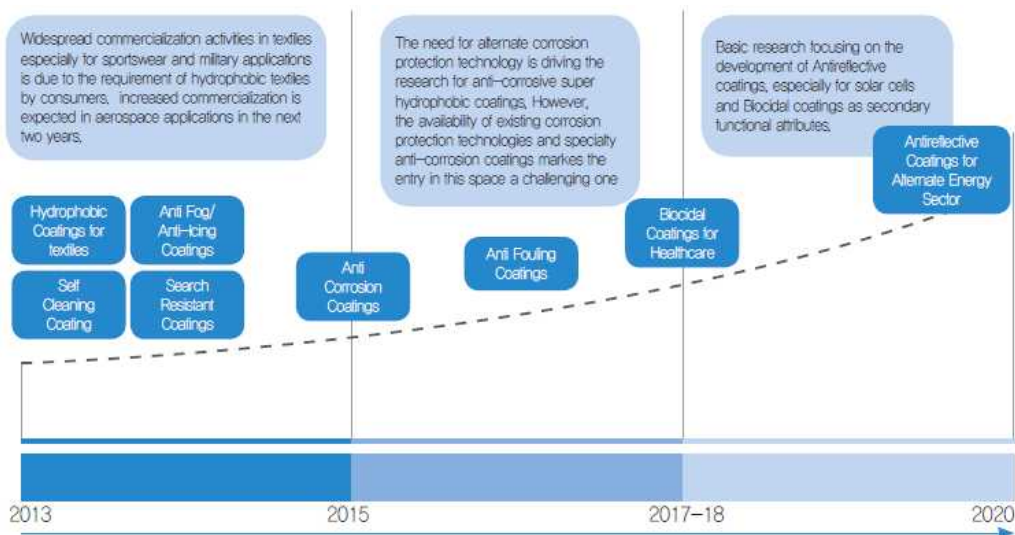
초발수성에 의한 방오염 기술에 대한 국내 제품 출시 및 성능이 입증되면 향후 국내시장의 활성화는 물론이고 수출도 10배이상으로 예측될 만큼 수요가 확대될 것이다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

○ 초발수 기술 시장 동향



○ 초발수 기술 개발 로드맵



○ 해외 주요업체의 초발수 기술 응용 제품 개발 현황

국외 선진 기업들은 이미 오랜기간 동안 유기실란화합물을 합성할 수 있는 합성 기술을 연구하여서 유기관능기의 종류 및 분자량을 자유롭게 조절할 수 있는 원천기술을 보유하고 있으므로 지축 건조, 급속 경화, 저온 경화가 가능하면서도 높은 표면물성을 발현할 수 있는 회사 고유의 실란화합물과 이러한 유기 실란화합물의 중합공정을 보유하고 있으므로 국내 코팅 및 도료 기업들이 비교가 불가능할 정도의 우수한 성능을 나타내는 유무기 하이브리드 코팅소재를 판매, 개발하고 있음.



< 해외 주요업체의 초발수 기술 응용 제품 개발 현황 >

○ 국제 연구기관의 초발수성 연구

연구기관명	개요
Balcony Systems Solutions Ltd (영국)	자동차, 건설, 태양에너지에 적용하기 위한 저가형 의자기 정확형 발수 코팅 소재 개발
NanoShell (영국)	유리 표면에 적용하기 위한 발수성 자가 세정 및 목재의 방수를 위한 코팅 기술 개발
New Energy Technologies (NET) (미국)	SolarWindow에 코팅하기 위한 환경 친화적인 탄화수소 기반의 소수성 코팅 소재 개발
Zschimmer & Schwarz Mohsdorf GmbH & Co. (독일)	물과 기름에 대한 반발력이 우수한 에멀전 형태의 섬유·의류 코팅용 초발수 마감코팅재 (Anthydrin NK) 개발
Nero Shields Inc. (캐나다)	정전기적 자기 조립을 이용한 초발수 나노 기술 기반 자가 세정 및 내 곰팡이성을 가지는 소수성 실링소재를 개발
NTT Advanced Technology Corporation (미국)	레이더, 안테나, 통신탑 등 통신 설비에 물, 얼음, 눈 등의 부착을 방지하기 위한 초발수 코팅 기술 개발 (HIREC Series)
Ross Nanotechnology (미국)	다양한 분야에 발수, 방빙, 내부식, 항균, 자기세정의 용도로 적용되는 수접촉각 160 ~ 175도를 보이는 초발수 코팅 기술 개발 (NeverWet)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		✓
결정 사유	기술개발이 시작 단계이며 상용화까지는 많은 연구가 필요함.	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

가. 연구실 안전조치 이행계획

- 기술적 위험요소 분석
 - 이온빔 사용에 따른 가속기 취급 위험요소
 - 시약 및 용매 등 사용에 따른 위험물 취급 위험요소
- 안전관리대책
 - 위덕대학교 연구실험실 안전관리 규정(제정 2007. 12. 03)에 시행
 - 1. 연구실 안전을 위해 안전관리규정 제정
 - 가. 연구실(실험실)별 안전관리 책임자 및 담당자 지정
 - 나. 연구실 안전과 관련한 주요사항 협의를 위한 “연구실안전관리위원회” 운영
 - 다. 안전관리 주관부서인 본교 시설관리팀에서 안전점검, 안전교육, 안전진단 계획 수립 및 운영
 - 라. 중대한 안전사고 발생 시 사고대책위원회 운영
 - 2. 안전점검활동
 - 가. 일상점검 : 안전관리담당자가 연구 활동을 시작하기 전 매일 1회 실시
 - 나. 정기점검 : 대통령령 제25050호 제8조의 요건을 갖춘 외부전문기관에 의뢰하여 매년 실시
 - 다. 특별안전점검 : 원장의 판단으로 연구자의 안전에 치명적 위험을 야기할 가능성이 있는 경우 실시
 - 3. 보험
 - 가. 연구실에서 발생한 사고로 인한 생명 및 신체상의 손해를 보상하는 보험을 가입하며, 보상 금액은 미래창조과학부령 제14호 7조에 준하는 금액을 책정
 - 4. 교육훈련
 - 가. 연구원장은 연구자에게 연구실 사용에 따르는 안전성 확보 및 사고예방에 필요한 교육·훈련을 실시 하고, 그 결과를 서면으로 보관

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기 타	소속 기관 명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부	특기 사항
1	논문	Effect of irradiation on the surface morphology of nanostructured superhydrophobic surfaces fabricated by ion beam irradiation	Elsevier	교신 저자	Applied surface science	4.439	2018.xx.xx (inpress, 인터넷판 개재)	단독	SCI (JCR 상위 10%)
2	논문	A facile approach to fabrication of hollow ZnO nanoparticles	한국 복합 재료 학회	교신 저자	composites research	등재지	2018.06.23	단독	
3	논문	이온빔을 이용한 표면 미세구조 제어를 통한 발수표면 제조	한국 부식 방식 학회	교신 저자	Corrosion science and technology	등재지	2018.06.19	단독	
4	국제학 술대회	Effect and surface morphology of nanostructure superhydrophobic fabricated by ion beam irradiation	SETC OR	교신 저자	Interantional surface, coating & interface conference surfcoat korea 2017		2017.4	단독	
5	국제학 술대회	A facile approach to fabrication of hollow ZnO nanoparticles	SETC OR	교신 저자	Interantional surface, coating & interface conference surfcoat korea 2018		2018.3	단독	
6	국내학 술대회	The fabricaton of superhydrophobic property of silica nanoparticles by ion beam irradiation	고분 자학 회	교신 저자	대한고분자학회		2017.10	단독	
7	국내학 술대회	Fabrication of superhydrophobic property of nano silica composites by ion beam irradiation	고분 자학 회	교신 저자	대한고분자학회		2018.4	단독	

제12장. 참고 문헌

- [1] A fluorine-free superhydrophobic PPS composite coating with high thermal stability, wear resistance, corrosion resistance, Chongjiang Lv, Huaiyuan Wang, Yanji Zhu, Progress in Organic Coatings, 2017, 110, 47–54
 - [2] Superhydrophobic surfaces by hybrid raspberry-like particles, Maria D’Acunzi, Hans-Jurgen Butt and Doris Vollmer, Faraday Discussions, 2010, 146, 35–48
 - [3] Superhydrophobicity due to the hierarchical scale roughness of PDMS surfaces, Stefania D’ Amone, Barbara Cortese, Langmuir, 2008, 24, 2712–2718
 - [4] Colloidal surface assemblies: nanotechnology meets bioinspiration, Tobias Kraus, Andreas Fery, Advanced Functional Materials, 2013, 23, 4529–4541
 - [5] Fabrication of superhydrophobic surfaces with hierarchical structure through a solution-immersion process on copper and galvanized iron substrates, Hongqin Liu, Wenguo Xu, Langmuir, 2008, 24, 10895–10900
 - [6] Superhydrophobic bionic surfaces with hierarchical microsphere/SWCNT composite arrays, Yue Li, Sung Oh Cho, Langmuir, 2007, 23, 2169–2174
 - [7] Mechanical durability of superhydrophobic surface: The role of surface modification technologies, Jing Hui Zhi, Li Zhi Zhang, Applied Surface Science, 2017, 392, 286–296
 - [8] Self-assembled biomimetic superhydrophobic hierarchical arrays, Xuan Dou, Hongta Yang, Journal of Colloids and Interface Science, 2013, 405, 51–57
 - [9] A Lotus-leaf-like superhydrophobic surface prepared by solvent-induced crystallization, Ning Zhao, Jian Xu, ChemPhyschem, 2006, 7, 824–827
 - [10] Corrosion-resistant superhydrophobic coatings on Mg alloy surfaces inspired by lotus seedpod, Dongmian Zang, Mingjie Liu, Lei Jiang, Advanced Functional Materials, 2017, 27, 1605446
 - [11] Facile creation of biomimetic systems at the interface and in bulk, Xiaoyan Zhang, Jian Xu, Advanced Materials, 2008, 20, 2938–2946
-

- [12] Fabrication of biomimetic superhydrophobic coating with a micro–nano–binary structure, Ning Zhao, Jian Xu, *Macromolecular Rapid Communications*, 2006, 26, 1075–1080
- [13] Superhydrophobic materials and coating: a review, John T Simpson, Tolga Aytug, *Rep.Prog. Phys.*, 2015, 78, 086501
- [14] Switchable transparency and wetting of elastomeric smart windows, Seung Goo Lee, Kil Won Cho, *Advanced Materials*, 2010, 22, 5013–5017
- [15] Hierarchically featured and substrate independent bulk–deposition of ‘reactive’ polymeric nanocomplex for controlled and strategic manipulation of durable biomimicking wettability, Kousik Maji, Uttam Manna, *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6, 6642–6653
- [16] Nanotextured Si surfaces derived from block–copolymer self–assembly with superhydrophobic, superhydrophilic, or superamphiphobic properties, Agnieszka Telecka, Rafael Taboryski, *RSC Adv*, 2018, 8, 4204–4213
- [17] Nanostructured superhydrophobic silk fabric fabricated using the ion beam method, Ji Hyun Oh, Myoung Woon Moon, Chung Hee Park, *RSC Adv*, 2014, 4, 38966–38973
- [18] Mechanically robust, thermally stable, highly transparent superhydrophobic coating with low temperature sol gel process, Yanping Zhang, Binghai Dong, Shimin Wang, *RSC Adv*, 2017, 7, 47357
- [19] Hydrophobic and superhydrophobic surface fabricated using atmospheric pressure cold plasma technology: A review, Panagiotis Dimitrakellis, Evangelos Gogolides, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2018, 254, 1–21
- [20] Hierarchical micro/nano structures for super–hydrophobic surfaces and super–lyophobic surface against liquid metal, Daeyoung Kim, Youngsam Yoon, *Micro and Nano Systems Letters*, 2014, 2, 13527
- [21] Fabrication of superhydrophobic surfaces with controllable electrical conductivity and water adhesion, Lijun Ye, Yongjin Li, *LANGMUIR*, 2017, 33, 1368–1374
- [22] Progress in superhydrophobic surface development, Paul Roach, Neil J. Shirtcliffe, *Soft Matter*, 2008, 4, 224–240
- [23] Active control over the wettability from superhydrophobic to superhydrophilic by electrochemically altering the oxidation state in a low voltage range, Benicmin Zahiri, Walter Merida, *Adv. Mater. Interfaces*, 2017, 4, 1700121

- [24] Stretchable superhydrophobicity from monolithic, three-dimensional hierarchical wrinkles, Won Kyu Lee, Teri W. Odom, *Nano Lett.*, 2016, 16, 3774–3779
- [25] Superhydrophobic surfaces from various polypropylenes, M. Voue, R. Rioboo, *Langmuir* 2008, 24, 9508–9514
- [26] Mechanically durable superhydrophobic surfaces, Tuukka Verho, Robin H. A. Ras, *Adv. Mater.*, 2011, 23, 673–678
- [27] A facile and effective method to fabricate superhydrophobic/superoleophilic surface for the separation of both water/oil mixtures and water-in-oil emulsions, Feiran Li, Yunlu Pan, *Polymers*, 2017, 9, 563
- [28] Transparent, durable and thermally stable PDMS-derived superhydrophobic surfaces, Xiaojiang Liu, Zisheng Guan, *Applied Surface Sci.*, 2015, 339, 94–101
- [29] Nearly perfect durable superhydrophobic surfaces fabrication by simple one-step plasma treatment, Jeongeun Ryu, Sang Joon Lee, *Scientific Reports*, 2017, 7, 2981.
- [30] Robust, self-healing superhydrophobic fabrics prepared by one step coating of PDMS and octadecylamine, Chao-Hua Xue, Shun-Tian Jia, *Scientific Reports*, 2016, 6, 27262
- [31] Branched hydrocarbon low surface energy materials for superhydrophobic nanoparticle derived surfaces, Shirin Alexander, Andrew R. Barron, *ACS applied materials & interfaces*, 2016, 8, 660–666
- [32] A study self-cleaning and anti-corrosion superhydrophobic coating assembled by amino silicon oil modifying potassium titanate whisker—silica particles, Chongjiang Lv, Yanji Zhu, *Applied Surface Science*, 2018, 435, 903–913
- [33] Multifunctional superhydrophobic polymer/carbon nanocomposites: graphene, carbon nanotubes, or carbon black?, Ashish Asthana, Dimos Poulikakos, *ACS applied materials & interfaces*, 2014, 6, 8859–8867
- [34] Fabrication of a superhydrophobic surface with under water air-retaining properties by electrostatic flocking, Yawen Zheng, Tianmin Tu, *RSC Advances*, 2018, 8, 10719–10726
- [35] Self-assembled hemispherical nanowell arrays for superhydrophobic antireflection coatings, Cheng Yen Lin, Hongta Yang, *Journal of Colloid and interfaces Sci.*, 2017, 490, 174–180
- [36] Synthesis of ‘reactive’ and covalent polymeric multilayer coatings with durable superoleophobic and superoleophilic properties under water, Dibyangang Parbat, Uttam Manna, *Chemical Sci.*, 2017, 8, 6092–6102

- [37] Extreme wettability of nanostructures glass fabricated by non-lithographic, anisotropic etching, Eusun Yu, Myoung Woon Moon, Scientific Reports, 2015, 5, 9362
- [38] Durable, self-healing, superhydrophobic fabrics from fluorine-free, waterborne, polydopamine/alkyl silane coatings, Hongxia Wang, Tong Lin, RSC Advances, 2017, 7, 33986–33993
- [39] A dual-functional surface with hierarchical micro/nanostructure arrays for self-cleaning and antireflection, Zhenwei Mao, Yongfeng Lu, RSC Advances, 2017, 7, 49649–49654
- [40] Fabrication of periodic nanostructure assemblies by interfacial energy driven colloidal lithography, A. Dev, S. Anand, Advance Functional Materials, 2014, 24, 4577–4583
- [41] Petal effect: a superhydrophobic state with high adhesive force, Lin Feng, Lei Jiang, Langmuir, 2008, 24, 4144–4119
- [42] Formation and mechanism of a super-hydrophobic surface with wear and salt spray resistance, Zhi Wang, Guizhe Zhao, RSC Advances, 2017, 7, 43181–43185
- [43] Facile fabrication of raspberry-like composite microspheres for the construction of superhydrophobic films and applications in highly efficient oil–water separation, Mingguang Yu, Dongchu Chen, RSC Advances, 2017, 7, 39471–39479
- [44] Synthesis of monodisperse, hierarchically mesoporous, silica microspheres embedded with magnetic nanoparticles, Yong Wang, Jing Zhao, ACS applied materials & interfaces, 2012, 4, 2735–2742
- [45] Controlled three-dimensional hierarchical structuring by memory-based, sequential wrinkling, Won Hyu Lee, Teri W. Odom, Nano letters, 2015, 15, 5624–5629
- [46] Dual dimensional nanostructures with highly durable non-wetting properties under dynamic and underwater conditions, Seunghyeon Baek, Kijung Yong, Nanoscale, 2018, 9, 6665–6673
- [47] Durable superoleophobic polypropylene surfaces, Philip S. Brown, Bharat Bhushan, Phil. Trans.R.Soc. A 2016. 374, 0193
- [48] Development of functional polymer surfaces with controlled wettability, Spiros H., Anastasiadis, Langmuir, 2013, 29, 9277–9290
- [49] Multifunctional surfaces produces by femtosecond laser pulses, A.Y.Vorobyev, Chunlei Guo, Journal of Applied Physics, 2015, 117, 033103
- [50] Structure of multiresponsive brush-decorated nanoparticles: a combined electrokinetics, DLS and SANS study, Jennifer R. S. Martin, Jerome F. L. Duval, Langmuir, 2015, 31, 4779–4790

- [51] Superhydrophobic coatings with edible materials, Wei Wang, Arun K. Kota, ACS applied materials & interfaces, 2016, 8, 18664–18668
- [52] Two-step self-assembly of hierarchically-ordered nanostructures, Qiannan Liu, Shi Xue Dou, Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3, 11688–11699
- [53] Topological and chemical investigation on super-hydrophobicity of PTFE surface caused by ion irradiation, Yan Chen, Yingmin Liu, Applied Surface Sci., 2007, 254, 464–467
- [54] Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces, Reiner Furstner, Wilhelm Barthlott, Langmuir, 2005, 21, 956–961
- [55] An eco-friendly one-step method to fabricate superhydrophobic nanoparticles with hierarchical architectures, Mengke Wang, Xuehu Men, Chemical Engineering Journal, 2017, 327, 530–538
- [56] Ultra-durable and transparent self-cleaning surfaces by large-scale self-assembly of hierarchical interpenetrated polymer networks, William S. Y. Wong, Antonio Tricoli, ACS applied materials & interfaces, 2016, 8, 13615–13623

주 의

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