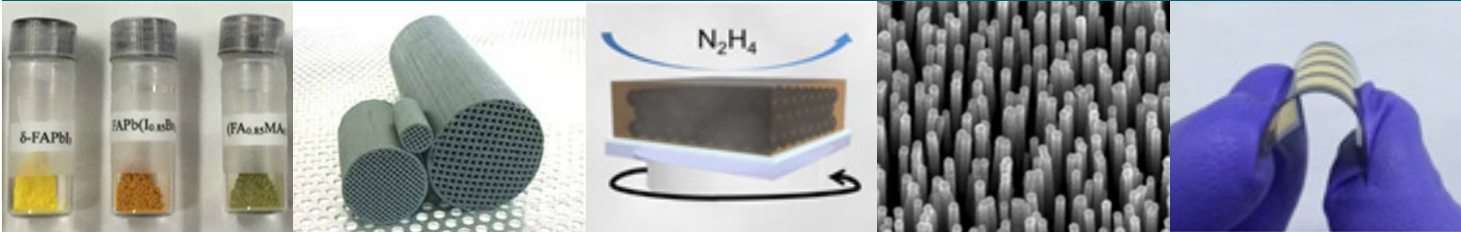


융합연구리뷰

Convergence Research Review

유무기 하이브리드 페로브스카이트
태양전지 융합 기술
—
환경 분야의 융합 기술 전략과
주요 사례



C o n v e r g e n c e R e s e a r c h R e v i e w

Contents

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2017 May vol.3 no.5

- 01 편집자 주
- 04 유무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지 융합 기술
- 36 환경 분야의 융합 기술 전략과 주요 사례



발행일 2017년 05월 15일

발행인 하성도

편집인 안주명 김보림

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 승일미디어그룹 주식회사 Tel. 070-7416-4124

디자인 지봉열 이숙현 유정아



[편집자주]

| 에너지 패러다임의 변화, 페로브스카이트 태양전지 융합기술

작년 '블룸버그 뉴에너지 파이낸스(BNEF)'는 화석연료시대 끝을 예견하고, 가장 저렴한 태양광 에너지 시장성장을 보도했다. 태양광 에너지는 발전기 도움 없이 '태양전지'를 이용해 태양에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 발전방식으로 생성된다. 현재 태양전지의 대부분은 실리콘 재질로 높은 에너지 변환율과 긴 수명이 장점인 반면, 높은 생산 비용과 낮은 효율성이 단점으로 꼽히고 있다.

이러한 한계를 뛰어넘기 위해 다양한 소재개발이 진행되고 있으며, 실리콘의 뒤를 이룰 차세대 주자로 개발된 것이 바로 '페로브스카이트'이다. 2013년 Science紙 선정 세계 10대 breakthrough 기술 및 2014년 Nature紙 선정 사업화가 기대되는 유망기술로 발표되었으며, 2009년 처음 등장 이후 6년 만인 2015년 20.1%의 효율을 달성한 향후 기존 화석연료 대비 경쟁력 있는 패스트 트랙 기술로 소개되기도 하였다.

현재 페로브스카이트 태양전지는 현존 태양광 에너지의 최고 수준인 21% 효율을 달성하였고, 실리콘 대비 낮은 원가에 얇고 가벼운 특성을 보여 활용분야가 다양할 뿐 아니라, 이론적 변환효율의 한계치가 실리콘 태양전지의 2배 이상으로 평가되어, 앞으로 에너지 전체의 패러다임을 바꿀 것이란 전망이 나오고 있다. 이에 본 호 1부에서는 페로브스카이트 태양전지의 핵심 기술 및 개발 동향에 대해 살펴보고자 한다.

| 자생적인 융합생태계, 수처리를 위한 환경융합기술

산업의 발달로 대두되기 시작한 환경 문제는 최근 미세먼지, 산업 폐기물, 수질오염, 생태계 파괴 등으로 심화되면서 전세계적으로 환경 관련 연구에 대한 관심이 더욱 높아졌다. 그러나 이러한 관심에 비해 환경공학을 대표하는 기술은 다들 쉽게 떠올리기가 힘들다. 그 이유는, 환경공학이 그동안 다양한 분야간의 융합 연구를 필수적으로 수행하여 하나의 대표되는 이미지를 찾기 어렵기 때문이다.

융합연구가 필수인 환경공학, 그 중에서도 수처리 분야의 연구를 오랫동안 수행해 온 한국과학기술연구원 의 이상협 박사는 환경공학기술을 특정 기술을 개발하기 보다는 '오염 대상 매체에 효과적인 다른 분야 기술을 찾아내고, 적용하는 연구를 통해 오염 대상을 처리하는 기술'이라고 이야기 하고 있다. 타 기술의 적극적인 응용을 통해 기술간 융합을 이루는 것이 환경융합공학에서의 주요 기술 개발 전략인 것이다.

이렇듯 그동안 자연스럽게 분야간 융합을 수행해온 환경융합기술들의 융합 전략을 살펴보면, 타분야의 과학기술 R&D를 수행함에 있어 효과적인 기술 융합의 팀을 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 이에 본 호 2부에서는 환경융합기술사업에서 수처리 기술 개발을 위해 수행된 융합의 사례 및 기술융합전략에 대해 살펴보고자 한다.

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2017 May vol.3 no.5

<http://crpc.kist.re.kr>

01

유무기 하이브리드
페로브스카이트 태양전지
융합 기술

노준홍 교수 (고려대학교 건축사회환경공학부)
고민재 교수 (한양대학교 화학공학과)
(junhnoh@korea.ac.kr, mjko@hanyang.ac.kr)



01 서론

현재 인류는 기후변화에 대응할 수 있는 환경 친화적이며 지속 가능한 에너지 기술 개발이란 도전적 요구에 직면하여 있다. 2015년 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP21)에서 법적 구속력이 있는 지구 온난화 방지를 위한 온실가스 배출 감축에 195개국이 동의하여 이제 전 세계적으로 기후변화에 대응한 저탄소경제 체제로의 전환이 현실화되고 있다. COP21 이후 주요 선진국들은 미국의 주도로 미션 이노베이션(Mission Innovation) 선언을 통해 청정에너지기술 공공 R&D 투자를 향후 5년간 2배 확대하는데 노력하기로 약속하였고, 제1차 미션 이노베이션 장관회의(미국, 2016년 6월 1일 ~ 2일)에서 21개 전체 회원국이 약 137억, 한국은 4.9억 달러의 공공투자를하기로 선언하였다. 국내에서는 이를 대응하기 위해 관계부처 합동으로 신 기후체제의 에너지 R&D 투자 포트폴리오 “청정에너지기술로드맵”이 작성되었고, 태양전지는 13대 중점투자대상기술에 포함되어 정책적으로 육성할 계획을 세우고 있다.¹⁾

태양전지 기술은 화석연료를 사용하지 않고 미래 에너지 수요에 능동적으로 대응할 수 있어, 지속적 경제 성장을 위한 가장 궁극적 해결책이다. 따라서 태양전지 기술은 향후 신 기후변화 경제 체제에서 그 중요성이 더욱더 높아 질 것이다. 태양전지는 태양빛이 가진 광에너지를 직접 전기로 변환시켜주는 반도체 소자로서, 광기전력 효과(Photovoltaic effect)를 이용하는 광전변환소자이며, 태양광발전의 가장 기본단위이다. 하지만 기존의 태양전지 기술 수준으로 미래 인류의 에너지 수요 및 기후 변화에 대응하기에 부족하기 때문에 이를 위해서는 현재 태양전지 기술 수준을 뛰어 넘는 기술적 혁신이 필요하다. 이를 위해 차세대 태양전지로 불리는 염료감응 태양전지, 유기물 태양전지, 양자점 태양전지와 같은 혁신적 소재와 공정이 가능한 태양전지 기술들이 개발되어 왔으나 현재에도 10% 수준의 낮은 효율로 상용화에 큰 장벽을 갖고 있다. 참고로, 상용화를 위한 태양광 모듈 효율은 보통 20%에 근접해야 상업적 경제성을 갖는다고 알려져 있다.

2009년 일본 미야자카 교수 그룹에서 처음으로 발표한 페로브스카이트 태양전지는 무기물과 유기물이 혼성화되어 페로브스카이트 결정구조를 갖는 할로겐화물을 기반으로 하고 있다. 이후 2012년 우리나라 박남규 교수(성균관대) 연구 그룹에서 전고체상 소자 구조로 10% 수준의 광전변환 효율이 보고된 이후 지난 4

년여 동안 전례 없는 효율 향상을 보이고 있으며, 현재는 22.1%의 인증 효율이 보고되고 있다.²⁾ 이는 이미 상용화된 결정질 실리콘 태양전지(25%)나, 박막형 태양전지(23%)와 유사한 효율로, 페로브스카이트 태양전지가 200℃ 이하의 저온에서 용액공정을 통해 제작이 가능하다는데 큰 의미가 있다. 이는 저온 용액공정으로 인해 저가화가 가능하기 때문이며, 페로브스카이트 태양전지가 미래 태양전지 기술로 크게 주목 받는 이유이기도 하다. 청정에너지 기술로드맵에서도 “한계돌파형 차세대 태양전지”와 “마이크로 프로슈머형 태양전지” 전략과제군에 속해있어 정책적 지원과 함께 산학연 합동연구가 활발하게 진행 중이다.

02 페로브스카이트 태양전지 핵심기술

2.1 고효율화 기술

앞서 언급했듯이, 일본의 미야자카 교수 연구팀에 의해 2009년 처음으로 3.8%의 효율을 갖는 페로브스카이트 태양전지가 보고되었다.³⁾ 이때의 소자 구조는 두꺼운 다공성 TiO_2 를 이용한 염료감응형 태양전지의 형태로 유기 염료를 대신해 MAPbI_3 (MA=methyl ammonium, CH_3NH_3)와 MAPbBr_3 를 이용하여 페로브스카이트 물질의 태양전지로의 가능성을 확인하였다. 이 후 페로브스카이트 태양전지는 염료감응형 태양전지 구조인 감응형 태양전지 구조 보다 박막형 태양전지 구조에서 더욱 효율적으로 광전에너지 변환을 시킬 수 있음이 밝혀지면서 급격한 효율 향상을 보였고, 현재는 미국 신재생에너지 태양전지 효율 차트에 22.1%의 고효율이 보고되어 있다.⁴⁾ 이러한 발전 속도라면 실리콘 태양전지의 25%의 효율도 달성 가능할 것으로 예상된다. 하지만 이를 위해서는 페로브스카이트 할로겐화물 소재뿐만 아니라 n-type (전자를 수송하는 역할을 하는 반도체), p-type (정공을 수송하는 역할을 하는 반도체) 반도체 소재의 개발 역시 동반되어야만 한다. 또한 고효율화를 위해서는 소자구조, 박막 및 물질제어 기술의 개발도 중요하다.

2.2 소자구조 기술

2.2.1. 감응형 구조 (Sensitized Structure)

〈그림 1a〉에서 볼 수 있듯이, 기존의 수 마이크로 미터 두께의 다공성 TiO_2 막과 액상 전해질을 이용하는 염료감응형 태양전지구조에서 TiO_2 나노입자 표면에 흡착된 염료를 페로브스카이트로 대체한 구조가 페로브스카이트 물질을 이용한 광전변환 특성을 보인 최초의 페로브스카이트 태양전지이다. 2011년 성균관대학교 박남규 교수 연구팀은 같은 물질과 구조에서 다공성 TiO_2 막 두께 및 페로브스카이트 물질 도포 양 제어 등을 통해 6.6%의 광전변환 효율을 갖는 페로브스카이트 감응형 태양전지를 보고하였으며, 2012년 〈그림 1b〉와 같이 액상형 전해질을 고상형 Spiro-MeOTAD 정공 전달 물질로 대체하여 9.7%의 높은 효율의 고상형 페로브스카이트 감응형 태양전지를 보고하였다.⁵⁾

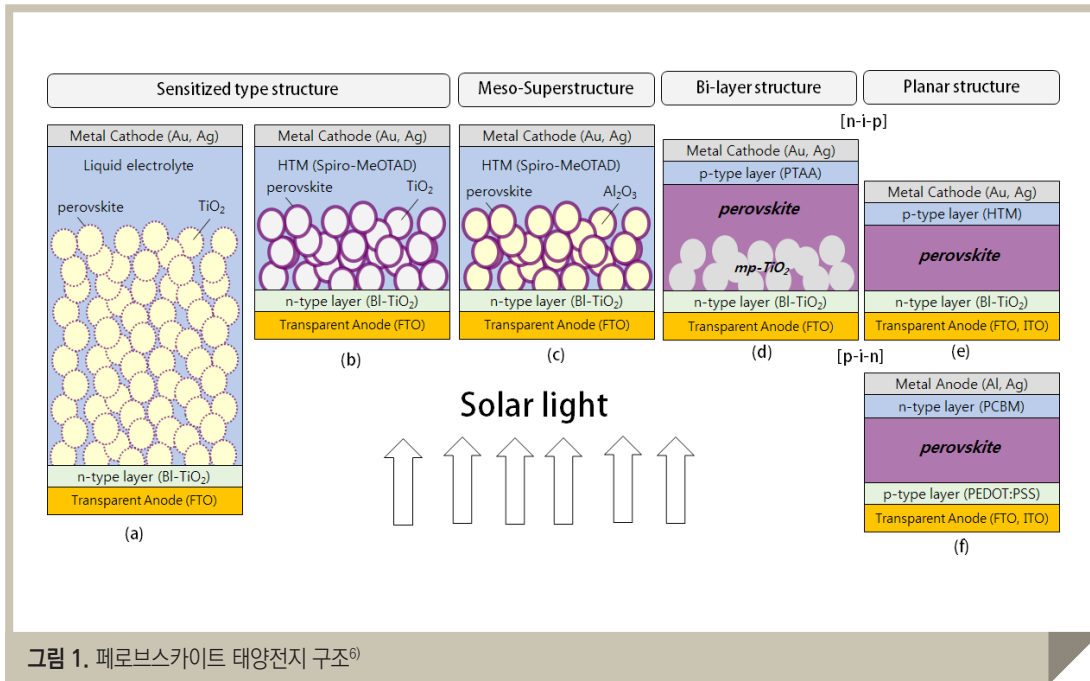


그림 1. 페로브스카이트 태양전지 구조⁶⁾

감응형 태양전지는 광흡수체, 전자 전달체, 정공 전달체가 각각 역할을 분리해 구성되어 있는 것이 특징이며, 광흡수체에서 전자 혹은 정공의 이동이 이뤄지지 않을 수 있기 때문에 염료와 같은 단분자 물질을 광흡

수체로 사용하거나 상대적으로 낮은 순도의 물질을 광흡수체로 이용할 경우 전하 전달 시 일어날 수 있는 손실을 최소화 할 수 있는 큰 장점이 있다. 최근 페로브스카이트 물질 자체로 전자와 정공이 효율적으로 전달 되는 것이 밝혀지고 감응형 태양전지 구조에 관한 연구가 줄어들고 있지만, 감응형 구조의 고유 장점은 물질 선택 및 활용 분야의 다양성을 고려해 크게 활용 될 수 있다.

2.2.2. 메조 구조 (Meso-Superstructure)

2012년 영국 옥스퍼드 대학의 H. Snaith 교수 연구 팀은 일본의 미야자카 교수 연구팀과 협업을 통해 $\text{MAPbI}_3:\text{Cl}$ 물질을 기반으로 하는 meso-superstructure라는 구조의 태양전지를 발표하였다⁷⁾ 이 구조의 특징은 <그림 1c>에서 보듯이 기존의 감응형 태양전지와 달리 전자전달 전극 층으로 사용하던 다공성 TiO_2 층을 없애고 Al_2O_3 라는 부도체 물질을 다공성 층으로 사용하여 그 표면에 페로브스카이트 물질이 도포된 형태이다. 또한 이렇게 페로브스카이트 물질이 도포된 다공성 Al_2O_3 층의 기공을 Spiro-MeOTAD라는 정공 전달 물질이 채우는 구조로 이루어져 있다. 이 구조에서 특징적인 점은 기존의 감응형 태양전지의 동작 원리와는 달리 광흡수체인 페로브스카이트 물질에서 생성된 전자가 페로브스카이트 물질 자체를 통해 음극(anode)로 이동된다는 것이다. 물론 당시 설명으로는 감응형 태양전지의 작동 원리와 유사하게 침투된 Spiro-MeOTAD라는 정공 전달 물질이 페로브스카이트로부터 정공을 전달 받아 주요하게 정공을 양극(cathode)쪽으로 전달한다고 보고 하였다. 다시 말하면, 페로브스카이트에서 생성된 전자는 페로브스카이트 자신을 따라 이동하고 정공은 정공 전달 물질이 전달하는 감응형 태양전지와 유사한 역할 분리형 작동 원리를 보여 주고 있다.

하지만 이 meso-superstructure는 결국 페로브스카이트 자체의 정공 전달 특성을 이용하게 되는 구조의 지지체인 Al_2O_3 층이 없는 평판형(planar) 형태의 박막형 구조로 발전되었다<그림 1e>. 2013년 같은 그룹에서 TiO_2 박막상에 바로 페로브스카이트 물질을 진공 열증기 증착법을 이용해 박막으로 증착한 형태인 TiO_2 /Perovskite/Spiro-MeOTAD 박막형 구조를 제작 보고하였다.⁸⁾ 추후 이 박막형 소자의 경우 전류밀도-전압 곡선 측정 상 발생하는 이력(hysteresis) 문제로 인해 부정확한 효율 값이 측정된다는 문제가 제기되어 이 박막형 구조의 수정 혹은 신규 물질의 개발이 요구되었다.

2.2.3. 이중층 구조 (Bi-layer structure)

앞서 살펴본 감응형 구조, meso-superstructure의 페로브스카이트 태양전지의 발표와 독립적으로 한국 화학연구원의 석상일 박사 연구팀은 2013년 필러(Pillar) 구조 형태의 페로브스카이트 태양전지를 발표하였다.⁹⁾ 필러 구조의 페로브스카이트 태양전지는 감응형 구조와 meso-superstructure와 다른 형태를 보인다. 구체적으로, 필러 구조는 다공성 TiO₂ 층의 기공을 페로브스카이트 물질로 완전히 채우는 동시에 그 다공성 TiO₂ 층 위에 페로브스카이트 물질의 막이 섬(island) 형태로 존재하는 구조이다. 감응형 구조와 meso-superstructure의 확연히 다른 점은 다공성 막의 나노 입자 표면만을 페로브스카이트 물질이 도포하는 것이 아니라 다공성 막의 기공을 모두 채우며 막 형태의 페로브스카이트가 그 위에 존재하는 것이다. 당시 다공성 층 위에 존재하는 섬 형태의 페로브스카이트가 다공성 내부의 기공들에 채워져 있는 페로브스카이트와 연결되어 있어 이 형태를 필러 구조라 설명하였다.

이 구조에서는 구조상 광을 흡수해 형성된 정공이 페로브스카이트 자체를 통해 양극으로 이동되어야만 한다. 이때 사용된 정공 전달체는 Polytrialylamine(PTAA)라는 고분자로 70nm의 박막형태로 필러 구조 위에 형성되었다. 감응형 태양전지, meso-superstructure에서 사용된 단분자 spiro-MeOTAD 물질이 다공성 막으로 침투하여 형성되어 주로 정공을 전달하는 역할을 한 것과 대비되게 PTAA의 경우 페로브스카이트가 모두 채워져있는 기공안으로 침투 하지 못하고 표면에 막 형태로 존재하므로 앞선 구조에서의 정공 전달체 역할 보다 전자 차단 역할이 주요 한 것으로 보인다.

이러한 필러 구조는 당시 12%의 고효율을 보여주었다. 그 후 한국화학연구원 연구팀은 이 필러 구조를 더욱 발달시킨 <그림 1d>와 같은 이중층(bi-layer) 구조의 페로브스카이트 태양전지로 발전 시켜 국제 인증 효율로서 16.2%의 고효율을 2014년 발표하였다.¹⁰⁾ 이 이중층 구조는 기존의 필러 구조에서 다공성 TiO₂ 위의 섬 형태의 페로브스카이트를 완전한 박막형태로 형성시킨 것이다. 이 구조에서 이중층이란 다공성 TiO₂의 기공을 페로브스카이트로 모두 채운 TiO₂:Perovskite 혼합층의 제1층과 그 위의 순수한 페로브스카이트 층의 제2층으로 이루어진 구조를 의미한다. 이 이중층 구조의 페로브스카이트 태양전지에 FAPbI₃를 기반으로 하는 페로브스카이트 물질을 적용하여 17.9%의 인증 효율을 나타냈으며, 이 구조를 적용한 형태의 소자 구조에서 20% 이상의 고효율이 가능한 것으로 알려져 있다

2.2.4. p-i-n 소자 구조

앞에서 살펴보았던 구조들은 주로 투명 전극 막 상에 n-type의 TiO_2 막을 형성하고 그 위에 페로브스카이트 물질과 p-type 정공 전달 물질을 층층이 도포하는 구조이다. 태양광이 조사되는 면을 기준으로 보고 페로브스카이트 물질을 intrinsic 한 형태로 본다면 이 구조 들은 크게 (n-type)-intrinsic-(p-type)의 n-i-p 구조로 볼 수 있다(그림 1d,e). 이러한 식의 구조 분리는 정립된 형태는 아니지만 최근 많이 연구되고 있는 p-i-n 형태의 구조와 구분을 위해 유용하게 이용 될 수 있다.

p-i-n 구조란 태양광의 조사 면을 기준으로 p-type물질이 우선 위치한 형태로 볼 수 있다. 투명전극 상에 p-type 층이 위치하고 그 위에 페로브스카이트, 다시 그 위에 n-type층이 위치한 형태로 앞서 살펴본 n-i-p 구조의 역구조이다(그림 1f). 주로 유기 태양전지에 사용되었던 p-type물질로 PEDOT:PSS를 n-type 물질로 PCBM([6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester)을 이용하는 p-i-n 페로브스카이트 태양전지가 2013년 최초로 보고되었다.¹¹⁾ 이 구조의 큰 장점은 모든 공정이 용액 공정으로 저온 공정이 가능하다는 점이다. 초기 페로브스카이트 물질을 완벽하게 균일하고 치밀한 형태의 막으로 제조하지 못하였을 때 진공 열증기 증착법으로 p-i-n 구조가 구현되어 사용되었지만, 최근에는 용액 공정으로 페로브스카이트 박막을 균일하고 치밀하게 제어하는 기술과 관련된 논문들이 많이 보고되고 있다.

최근에는 p-type 물질로 열, 수분, 자외선에 비교적 취약할 수 밖에 없는 유기 물질의 단점을 극복하기 위해 NiO 라는 산화물을 이용하는 논문들이 게재되고 있으며 이는 추후 안정성 측면에서 장점을 가질 수 있다. 현재의 p-i-n 구조의 효율은 고효율 n-i-p 구조(22%)에 비해 약간 낮은 수준인 20% 수준으로까지 효율 향상을 보여 그 응용 가능성이 높다.

2.3 박막 제어기술

페로브스카이트 박막은 일반 유기 박막과는 다르게 단순 스핀코팅ⁱ⁾을 이용하여 균일하고 치밀하게 형성하기 매우 어렵다. MAI와 PbI_2 간의 빠른 반응 및 자기 조립 성질로 인해 다양한 박막형태가 나타나게 된

i) 코팅할 물질의 용액이나 액체 물질을 기질 위에 떨어뜨리고 고속으로 회전시켜 얇게 퍼지게 하는 코팅 방법

다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 한국화학연구원 연구팀은 2013년 단일 코팅법의 한계인 빠른 결정화로 인한 다양한 형태의 모폴로지를 갖는 페로브스카이트 박막을 균일하고 치밀하게 제어하는 방법을 개발하여 보고하였다(그림 2). 이 방법은 빠른 결정화를 늦추어주는 Dimethylsulfoxide(DMSO)가 페로브스카이트 물질에 포함된 PbI_2 -DMSO-MAI 중간상을 유도하여 치밀한 박막을 제조할 수 있는 것이다. <그림 2>는 DMSO가 포함된 용액을 이용하여 기존 스핀코팅 과정 중에 용매를 적하하는 방법을 도입하여 투명하고 치밀한 PbI_2 -DMSO-MAI 중간상 막을 얻고, 얻어진 중간상을 저온에서 열처리해 주게 되면 균일하고 치밀한 $MAPbI_3$ 박막을 제조하는 과정을 나타내었다. 이 과정에서 용매 적하 방법은 과량의 중간자인 DMSO 추출 역할을 하는 것으로 알려져 있다. DMSO 중간상을 이용한 용매 공학법으로 얻어진 페로브스카이트 박막을 이용하여 고효율 태양전지를 제작할 수 있었고, 16.5%의 효율(인증효율 16.2%)을 확보하여 미국재생에너지연구원(NREL) 세계 공인효율 기록 차트에 등재 되었다. 이는 용매 적하 및 중간자를 이용하는 방법을 최초로 구현한 연구로, 용액공정으로 치밀하고 균일한 페로브스카이트 할로겐화물 박막을 제조한 첫 결과이었다. 용매공학법의 균일하고 치밀한 박막이 고효율을 얻을 수 있음을 발표하자, 많은 연구자들이 페로브스카이트 박막을 균일하고 치밀하게 제작하기 위한 여러 가지 공정 기술 방법을 발표하기 시작하였다. 자기조립 특성이 강한 페로브스카이트 물질의 반응성 제어를 위한 순차적 제어법(two-step), 진공증기 증착법, 진공용액증착법, 고압조사법, 분자교환반응법 등이 개발되었다. 이중에 진공용액증착법과 분자교환반응법에 대해 간략히 살펴보고자 한다. 진공용액증착(vacuum flash-assisted solution process) 코팅법은 스위스 연방공대의 마이클 그라첼 교수 연구팀에 의해서 최근 개발되었다.¹²⁾ 이 방법은 우선 페로브스카이트 용액을 스핀코팅하여 평탄화 과정을 거친 후 잔여 용매를 적절한 진공(20 Pa)으로 뽑아 DMSO가 포함되어 있는 중간상을 형성한 후 열처리하여 페로브스카이트 박막을 형성하는 방법이다. 이 방법을 이용하면 20 Pa의 진공 처리를 하였을 때, 가장 균일하고 치밀한 박막이 얻어진다고 보고하였다. 이 방법을 통해 단위셀 기준으로 20.5%의 광전변환 효율을 얻었고 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 에서 19.6%의 인증효율을 보고하였다. 분자교환반응법은 앞선 용매공학법의 중간자로 사용하였던 DMSO를 이용하여 PbI_2 (DMSO) 파우더를 얻어내고, 이를 이용하여 PbI_2 (DMSO) 필름을 형성한다. 그 후 FAI와 DMSO를 상호 교환하여 결정화 시키는 방법이다.¹³⁾ 이 방법을 이용하면 균일하고 치밀한 박막을 얻는 동시에 20% 이상의 인증효율을 갖는 페로브스카이트 태양전지를 제작할 수 있다. 최근에는 용매공학법을 이용한 다양한 응용으로 21%의 고효율도 보고되고 있다.¹⁴⁾

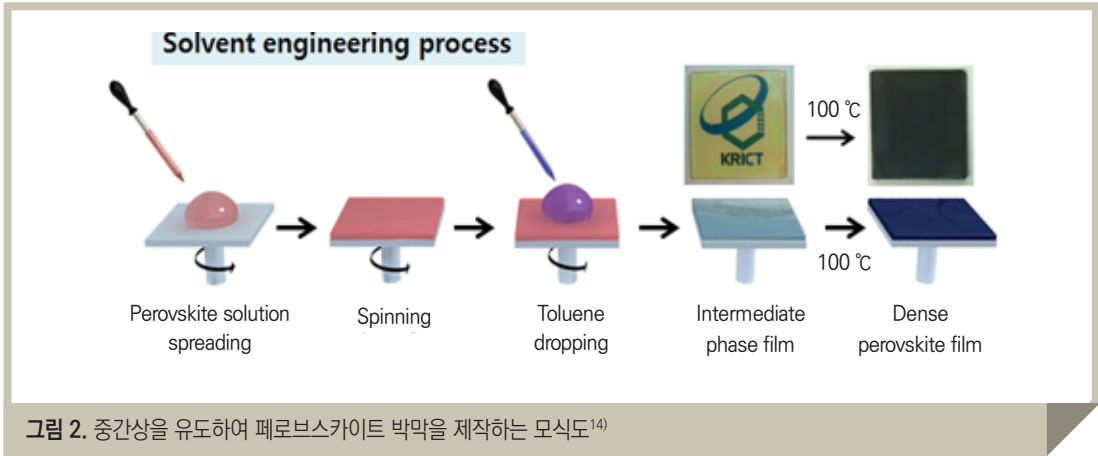


그림 2. 중간상을 유도하여 페로브스카이트 박막을 제작하는 모식도¹⁴⁾

2.4 페로브스카이트 광흡수층 물질제어 기술

AMX₃의 조성(A는 1가의 양이온으로 세슘이온 Cs⁺, 루비듐 이온 Rb⁺ 과 같은 무기양이온과 메틸암모늄 이온 CH₃NH₃⁺, 포름아미디늄 이온 HC(NH₂)₂⁺ 같은 유기양이온을, M은 2가 양이온으로 납이온 Pb²⁺, 주석 이온 Sn²⁺ 같은 금속이온을, X는 할로젠이온으로 염화이온 Cl⁻, 브롬이온 Br⁻, 요오드화이온 I⁻ 같은 음이온으로 구성)을 갖는 대표적인 물질은 유기양이온인 MA⁺와 2가 금속양이온인 납 그리고 1가 음이온인 할로젠 물질로 이루어진 MAPbI₃이다. 초창기 페로브스카이트 태양전지에 사용되는 물질의 대부분은 1.57 eV의 밴드갭ⁱⁱ⁾을 갖는 MAPbI₃이고 많은 연구자들을 통해 자연스럽게 다양한 연구가 진행되었다. 현재 MAPbI₃를 이용한 페로브스카이트 태양전지 연구논문이 5년여 동안 수천 편에 달할 정도로 매우 활발한 연구가 진행되고 있다. 이에 연장선상으로 한국화학연구원에서는 MAPbI₃에 MAPbBr₃를 도입하여 다양한 밴드갭을 갖는 태양전지를 보고하였다. 이 조성을 이용하면 1.74 eV 밴드갭을 갖는 태양전지를 제작할 수 있기 때문에 텀덤 태양전지(두 개 이상의 태양전지를 접합하여 제작한 적층형 태양전지)에 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 수분 안정성이 획기적으로 증가시킬 수 있음을 발표한 것이다. 하지만 더 높은 광전류밀도를 얻기 위해서는 밴드갭이 작은 물질이 절실히 요구되었다. 이러한 요구에 발맞춰 1.47 eV의 밴드갭을 갖는 FAPbI₃를 이용하여 더 넓은 태양광 스펙트럼을 흡수할 수 있는 연구결과가 발표되었다. FAPbI₃는 페로브스카이트 상과 비페

ii) 전자가 존재하고 있는 가장 높은 에너지 레벨에서부터 전자가 존재하지 않는 가장 낮은 에너지레벨 사이의 에너지 준위나 그 에너지 차이

로브스카이트 상이 공존하는 다형체로 매우 독특한 물질이다. 비페로브스카이트상은 넓은 밴드갭으로 인해 페로브스카이트 태양전지에서 효율 저하에 원인이 되므로, 이를 해결하기 위한 연구결과가 잇달아 주목을 받기 시작했다. 즉, 비페로브스카이트 상 안정성 향상을 위한 연구 결과인 $(\text{FAPbI}_3)_{0.85}(\text{MAPbBr}_3)_{0.15}$ 조성이 발표된 것이다.¹⁵⁾ $(\text{FAPbI}_3)_{0.85}(\text{MAPbBr}_3)_{0.15}$ 조성에서 FAPbI_3 가 갖는 비페로브스카이트 상이 존재하지 않음을 확인하였고, FAPbI_3 에 갖는 MAPbBr_3 를 첨가한 조성은 파우더로 얻었을 경우 페로브스카이트 상으로만 얻을 수 있음이 확인된 것이다(그림 3). 이 조성을 이용하여 18.4%(인증효율 17.9%)의 고효율을 보고하였다. 더불어 최근에는 페로브스카이트 $(\text{FAPbI}_3)_{0.85}(\text{MAPbBr}_3)_{0.15}$ 에 유기 양이온 이외에 무기 양이온인 Cs를 소량 첨가한 연구결과가 많이 보고되고 있다. Cs이 포함된 $(\text{FAPbI}_3)_{0.85}(\text{MAPbBr}_3)_{0.15}$ 기반의 페로브스카이트 태양전지는 21%를 상회하는 높은 효율을 나타내는 것으로 발표되고 있다.¹⁶⁾

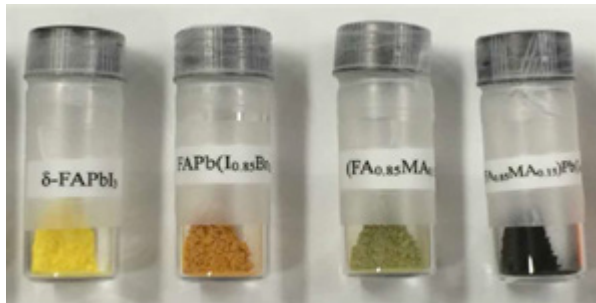


그림 3. MAPbBr_3 조성에 따른 페로브스카이트 상 발현¹⁵⁾

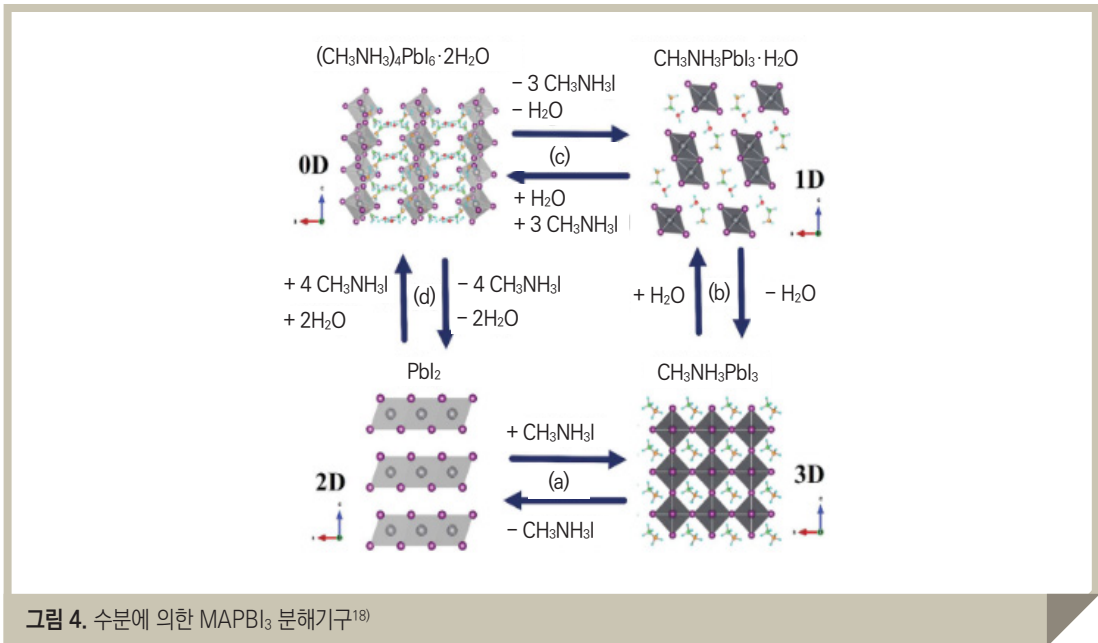
페로브스카이트 태양전지는 분명 여느 차세대 태양전지보다 고효율 가능성을 보였기 때문에 상용화가 매우 기대되는 차세대 태양전지임에 분명하다. 현재 22.1%의 광전변환 효율이 세계최고효율로 인증되고 있지만, 더 고효율인 실리콘 태양전지와 비슷한 25%를 상회하는 효율을 얻기 위해서는 층간소재 및 페로브스카이트 물질제어가 절실히 필요해 보인다. 이를 통해 개방전압 및 광전류밀도를 향상 시킨다면 충분히 달성 가능한 수치라 할 수 있다.

2.5 안정성 확보기술

페로브스카이트 태양전지의 안정성을 떨어뜨리는 주요 인자는 빛(자외선), 열, 수분으로 이들 인자들은 광 흡수 소재로 사용되는 유무기 하이브리드 요오드화 납 화합물과 층간소재로 사용되는 유기 정공전도체의 열화를 유도할 뿐만 아니라, 각 소재 사이의 계면특성을 변화시켜 효율을 떨어지게 한다. 각 열화 인자들이 소재 및 소자에 미치는 영향과 이를 극복하기 위해 진행된 연구들을 살펴보면 다음과 같다.¹⁷⁾

2.5.1. 수분 안정성

광흡수층에 사용되는 유무기 하이브리드 화합물은 공기 중 수분에 매우 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. 대표적인 유무기 하이브리드 화합물인 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3)가 수분을 만나게 되면 $\text{MAPbI}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 와 $\text{MA}_4\text{PbI}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 와 같은 수화물을 형성하면서 열화가 시작된다. 열화가 진행되면서 MAPbI_3 에서 CH_3NH_2 와 HI 가 기화되어 날아가고 PbI_2 가 남는 분해과정이 일어난다¹⁸⁾(그림 4). 또한 정공수송층ⁱⁱⁱ⁾으로 사용되는 유기물의 경우 충분한 전도도 확보를 위해 첨가되는 물질이 수분을 흡수하여 소자의 열화를 일으키기도 한다.



iii) 정공수송층(Hole Transport Layer)은 소자에서 Electron hole을 전달하는 역할

수분에 의한 소자 열화를 방지하기 위해서 수분 안정성이 뛰어난 광흡수층 소재 및 층간 소재를 개발하는 접근법이 있지만, 고효율을 확보하는데 제약이 있고 궁극적인 장기 안정성을 확보하는데 어려움이 있다. 따라서, 소수성 박막의 코팅 및 OLED에 사용되던 다양한 봉지소재와 공정을 적용하여 수분의 침투를 근본적으로 막기 위한 연구가 진행되고 있으며, 양질의 봉지(encapsulation)기술^{iv)}이 적용되면 수분에 의한 안정성 문제는 해결될 것으로 보인다.

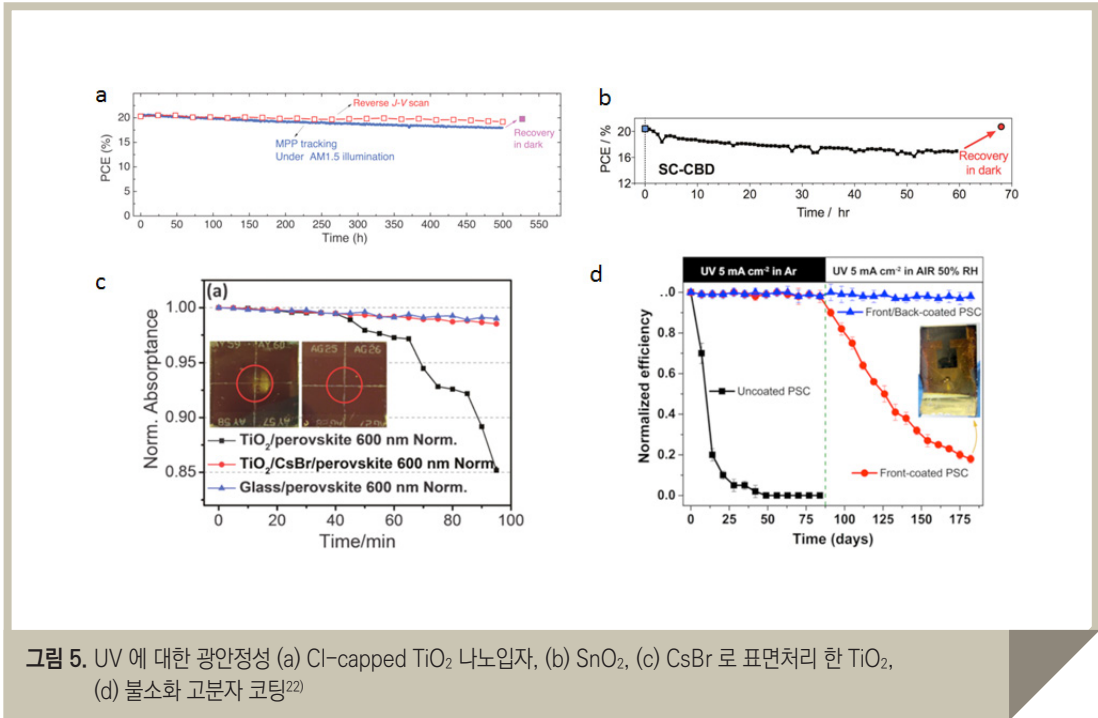
2.5.2. 광 안정성

수분과 산소 같은 외부요인에 의한 열화는 원인인자를 차단하면 해결이 되는 문제이지만, 빛에 의한 열화는 태양전지 내 소재에서 해결해야 되는 본질적인 문제이다. 현재 세계 최고효율을 기록하고 있는 페로브스카이트 태양전지 소자는 TiO_2 를 전자전달층으로 사용하고 있는데, TiO_2 가 자외선을 흡수하여 여기(excitation)된 광전자가 TiO_2 표면의 결함사이트와 표면에 흡착된 산소를 매개로 페로브스카이트 광흡수층 소재를 열화 시키는 것으로 알려져 있다¹⁹⁾

따라서, 광안정성을 확보하기 위한 노력으로 TiO_2 를 대체할 수 있는 전자전달층 소재 개발이 진행되고 있다. 최근 SnO_2 를 전자전달 소재로 사용한 페로브스카이트 태양전지가 20%가 넘는 높은 효율과 개선된 광안정성을 나타내는 것으로 발표되고 있다.²⁰⁾ 또한, 기존 TiO_2 소재를 그대로 사용하여 고효율을 유지하기 위한 방안으로 TiO_2 표면을 다른 재료로 덮어 TiO_2 와 페로브스카이트 소재 계면에서의 열화기구를 제거하는 연구가 진행되고 있다. 대표적으로 Cl로 덮인 TiO_2 나노입자를 이용하는 것으로, 이 경우 500시간이 넘는 광안정성이 확보되었으며²¹⁾, CsBr로 표면 처리해주는 경우 역시 광안정성이 크게 향상된 결과가 보고되었다²²⁾(그림 5).

다른 접근법으로 소자를 자외선으로부터 보호하기 위해 자외선 차단막을 코팅하여 광안정성을 증가시킨 연구결과가 있다. Fluorinate polymer를 유리 기판 위에 코팅했을 경우 자외선을 흡수하여 가시광 영역의 빛을 방출하기 때문에 소자의 효율저하를 최소화하면서 광안정성을 확보한 연구가 그것이다.²³⁾

iv) OLED 유기물질과 외부의 접촉을 막아주는 기술



2.5.3. 열 안정성

강한 햇빛에 노출된 태양전지는 80°C 이상의 고온으로 올라가게 되어, 특히 일교차가 큰 지역에서의 경우 큰 폭의 열사이클에 노출된다. 따라서 빛에 의한 열화뿐만 아니라 열에 의한 열화 또한 소재개발을 통해 근본적으로 해결해야 할 문제이다.

높은 온도에 의해 일어날 수 있는 열화 현상으로 유기 하이브리드 페로브스카이트 소재의 분해, 유기 정공수송 소재의 변형, 물질 확산에 의한 계면 및 소재의 특성 저하 등이 제기되고 있다. 특히, 유기 정공수송 소재의 경우 열에 가장 취약한 것으로 알려져 있다. 가장 널리 알려져 있는 Spiro-MeOTAD와 같이 단분자 기반의 정공수송 소재의 경우 비교적 낮은 온도에서 결정화가 일어나 전기적 특성이 변화하면서 소재의 효율을 떨어뜨리는 것으로 알려져 있다. 반면 PTAA와 같은 고분자 정공수송 소재의 경우 단분자 소재보다 열 안정성이 더 높다. 물질 확산에 의한 소재의 열화는 페로브스카이트 소재로부터 정공수송층으로의 요오드 확산과 전극으로 쓰이는 금이 정공수송층으로 확산되는 문제가 보고되어 있다.^{24,25)} 확산에 의한 문제의 경우 확산 방지층 및 버퍼층을 도입하여 열안정성을 향상시킬 수 있다.

탄소 소재를 이용하여 유기 정공수송 소재와 전극을 대체하는 것 또한 좋은 대안 중 하나로 제시되고 있다. 에너지 변환 효율은 유기 정공수송층을 사용할 때에 비해 떨어지지만, 탄소를 이용한 소재의 경우 100°C에서 1,500시간 이상 안정적으로 유지되는 것이 보고되었다²⁶⁾(그림 6). 또한, 페로브스카이트 소재 자체의 열안정성을 향상시키기 위한 노력들도 진행되고 있다. MAPbI₃를 기초로 페로브스카이트 소재의 경우 고온에서 열안정성이 떨어지기 때문에, CH(NH₂)₂PbI₃(FAPbI₃)를 기초로 한 페로브스카이트 소재에 Cs과 Rb와 같은 무기 원소로 유기 양이온을 일부 치환하여 열안정성을 높인 연구들이 소개되었다.²⁷⁾

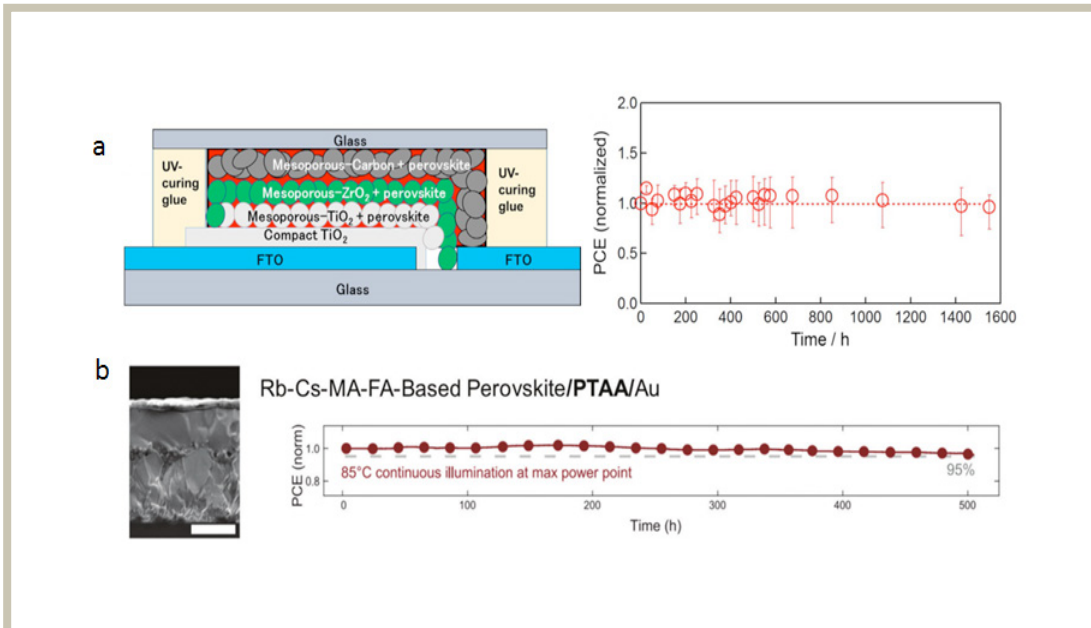


그림 6. 탄소(a)와 PTAA(b)를 정공수송층으로 사용한 페로브스카이트 태양전지의 열 안정성²⁶⁾

최근 보도된 연구 결과를 보면 광, 열에 대한 페로브스카이트 태양전지의 장기 안정성은 어느 정도 확보된 것을 보이며, 수분 안정성은 봉지 기술의 적용으로 확보할 수 있을 것으로 보인다. 따라서, 추후 과제는 20% 이상의 효율을 유지하면서 모든 열화인자로부터 안정성을 확보할 수 있는 소재와 공정을 개발하는 것이며 저가의 봉지 기술을 적용하더라도 높은 수명을 확보할 수 있도록 수분, 산소에 대한 안정성을 높이는 연구가 필요하다.

2.6 대면적화 기술

대면적화 기술은 상용화 모듈 개발을 위한 기초 기술로, 단위 소자에서 20% 이상의 효율을 갖는 페로브스카이트 태양전지의 제작이 가능해짐에 따라, 대면적 모듈에 관한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 2015년 벨기에 Imec 사에서는 레이저 식각(ething)과 기계적 스크라이빙(scribing)을 통해 손실 면적을 줄이고, geometrical fill factor(GFF)를 크게 향상시켜 16 cm² 미니 모듈에서 11.9%의 효율을 보고하였고, 최근에는 4 cm² 크기의 편홀이 없는 모듈을 제작하여 13.6%의 효율을 보고하였다.²⁸⁾ 최근 중국의 Hangzhou Microquanta Semiconductor에서는 4 cm × 4 cm 면적을 갖는 sub-module을 개발하였다. 이 모듈은 15.24%의 효율을 인증 받아 페로브스카이트 태양전지의 대면적 모듈화의 높은 가능성을 보여주고 있다.

이와 더불어 다양한 코팅 방법을 이용하여 페로브스카이트 태양전지 대면적 모듈의 개발이 이루어지고 있다. 독일 프라운호퍼 ISE 연구소에서는 잉크젯 프린팅 방식을 통한 페로브스카이트 모듈 개발 연구가 진행 중이다. 호주 CSIRO 박두진 박사 연구팀은 슬롯다이 코팅(유동을 갖고 있는 액상의 유체를 금형 판 사이로 공급하여 코팅하는 방식)을 통한 페로브스카이트 단위 소자를 제작하여 11.96% 효율을 발표하였고, 슬롯다이를 이용한 롤투를 제작^{v)} 가능성을 보여주었다.²⁹⁾ 그 밖에도 페로브스카이트의 대면적화를 위해 그라비아 인쇄(Gravure printing), 플렉소그래피 인쇄(flexographic printing)와 같은 인쇄 공정이 제시되고 있다. 특징적인 부분은 이미 활발히 개발되었던 유기태양전지, 염료감응 태양전지, 박막형 태양전지 모듈 요소 기술의 접목으로, 영국, 중국, 벨기에, 호주 등에서 모듈 설계와 공정 부분에서 많은 기술 개발이 이루어지고 있다. 그러나 현재까지 대면적 모듈 제작에 주로 이용되는 스펀코팅과 blade 코팅 방식으로는 모듈 크기에 제한이 있어, 실질적인 페로브스카이트 태양전지 모듈 개발을 위해서는 대면적화가 용이한 슬롯다이, 잉크젯 프린팅 방식 등을 이용한 박막 제조 기술이 필요할 것으로 보인다.¹⁷⁾

v) 연속 제조방식 중의 하나로 다수의 롤 위에 기판이나 소자를 굴리거나 감아서 이송하면서 제작하는 방식

2.7 친환경 소재기술

페로브스카이트 태양전지의 빠른 성장과 함께 페로브스카이트의 핵심 재료로 사용되는 Pb의 독성에 관한 문제가 끊임없이 제기되고 있다. 환경과 인체에 대한 Pb의 유해성은 페로브스카이트의 상용화를 방해하는 주된 요인 중 하나라고 할 수 있다. 이를 해결하기 위해 중심 금속으로 Pb 대신 다른 금속을 대체하는 페로브스카이트 물질을 비롯한 신규 페로브스카이트 물질에 대한 연구가 진행되고 있다.¹⁷⁾

Sn은 Pb와 같은 족에 속한 원소 중 Pb와 가장 비슷한 이온 반지름을 갖는 원소이다. Sn 기반의 페로브스카이트 물질은 높은 흡광 계수(absorption coefficient), 낮은 엑시톤 결합 에너지, 1.3~1.4 eV 사이의 적합한 밴드갭 등 우수한 특성을 갖는 것으로 알려져 있어, Pb를 대체하기 위한 가장 유망한 후보이다.

2014년 영국 옥스퍼드 대학의 H. J. Snaith 교수 연구팀은 methylammonium tin iodide(CH₃NH₃SnI₃, MASnI₃) 페로브스카이트를 광흡수층으로 사용한 n-i-p 구조로 6.4%의 효율을 나타내는 태양전지를 성공적으로 제조하였고³⁰⁾, 같은 해 미국 Northwestern 대학의 M. G. Kanatzidis 교수 연구팀은 Br의 함량에 따라 1.30 eV에서 2.15 eV까지 밴드갭 조절이 가능한 methylammonium tin halide(CH₃NH₃SnI_{3-x}Br_x) 페로브스카이트를 제조하여 CH₃NH₃SnIBr₂일 때 최고효율 5.73%를 달성하였다.³¹⁾ 그러나, Sn²⁺이온은 Pb²⁺와는 다르게 공기 중에서 쉽게 Sn⁴⁺로 산화되는 경향이 있어, 모든 공정을 질소조건에서 진행하더라도 소자의 안정성과 재현성을 확보하기 힘든 것으로 알려져 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, Sn 기반의 페로브스카이트 태양전지에서 Sn²⁺의 산화를 효과적으로 제어하기 위한 다양한 접근법이 시도되고 있다. 싱가포르 난양 공과대학의 Nripan Mathews 교수 연구팀은 CsSnI₃페로브스카이트 막을 제조할 때 SnF₂를 첨가제로 사용하여 Sn⁴⁺의 형성을 효과적으로 제어하였다.³²⁾ 화학전위 상태도 계산을 통한 열역학적 분석으로부터 CsSnI₃와 SnF₂두 가지 상이 공존할 때 Sn vacancy 형성 에너지가 증가하는 결과라고 설명할 수 있다(그림 7). 결과적으로, SnF₂의 첨가는 CsSnI₃의 캐리어 농도를 크게 감소시켜 소자의 효율을 향상시킨 것이다.

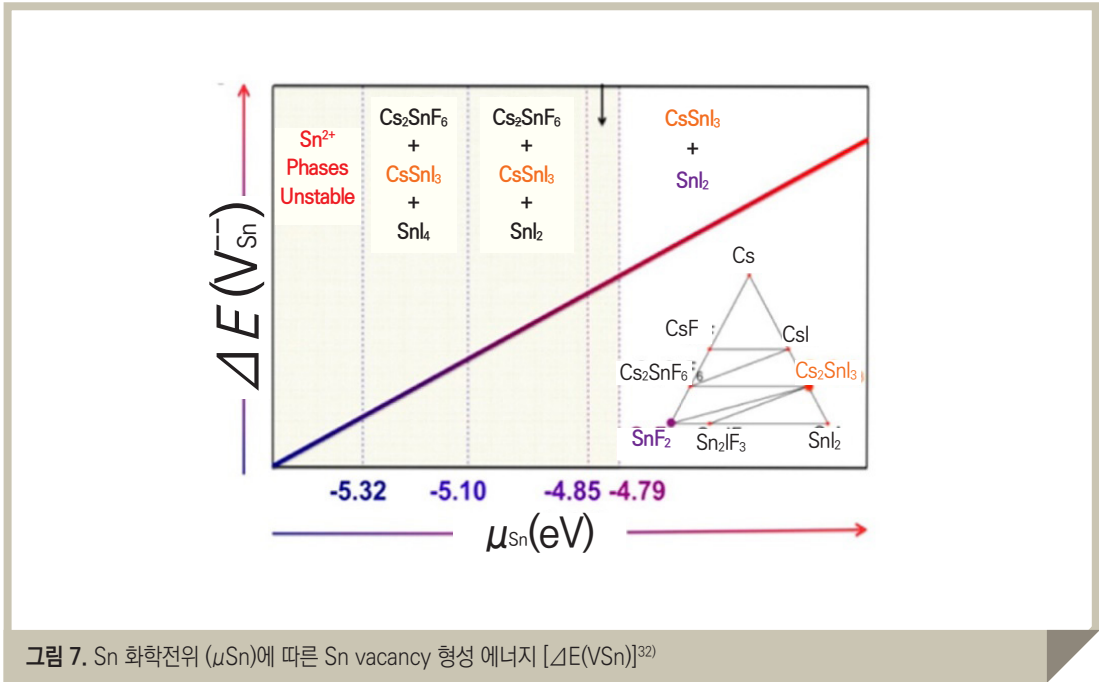


그림 7. Sn 화학전위 (μ_{Sn})에 따른 Sn vacancy 형성 에너지 [$\Delta E(V_{Sn})$]³²⁾

2016년 우리나라 한국화학연구원 연구팀은 SnF_2 를 포함하는 페로브스카이트 막의 모폴로지를 개선하고 SnF_2 의 효과를 극대화시키기 위한 방안으로 SnF_2 -pyrazinecomplex를 도입하여, Sn 기반 페로브스카이트 태양전지의 효율과 재현성을 크게 향상시켰다.³³⁾ 미국 Northwestern 대학의 M. G. Kanatzidis 교수 연구팀은 페로브스카이트 막 형성 시, hydrazine(N_2H_4)을 이용한 환원조건을 조성하여 Sn^{4+} 의 형성을 효과적으로 제어하였다. 이러한 접근법은 $CsSnI_3$ 이외에 Sn 기반의 페로브스카이트 물질에도 광범위하게 적용이 가능하다(그림 8).

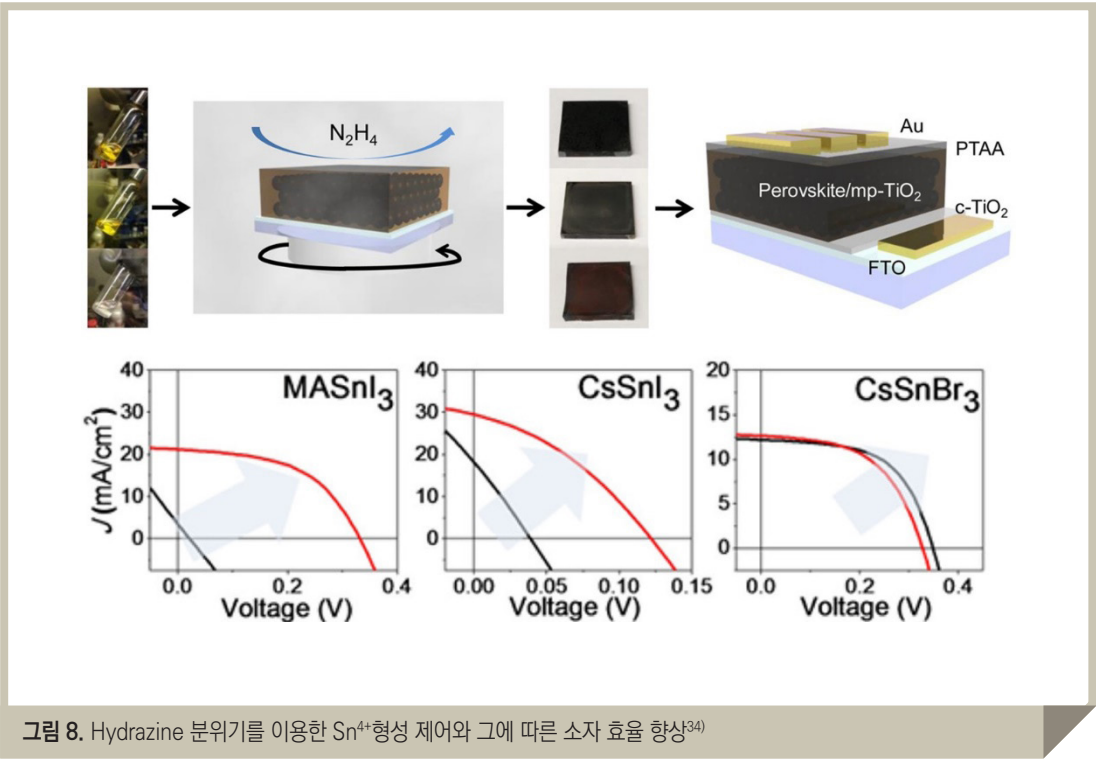


그림 8. Hydrazine 분위기를 이용한 Sn⁴⁺형성 제어와 그에 따른 소자 효율 향상³⁴⁾

한편, 2015년 싱가포르 난양 공과대학의 Nripan Mathews 교수 연구팀에 의해 처음으로 태양전지에 적용된 formamidinium tin iodide(CH(NH₂)₂SnI₃, FASnI₃) 페로브스카이트 물질은 고온(200℃)에서도 상이 안정하고, MASnI₃와 비교할 때 Sn²⁺의 산화에 대해 비교적 안정하여(그림 9), 같은 조건에서 제작한 소자의 경우 재현성이 더 뛰어난 것으로 보고되었다.^{35,36)} FASnI₃를 이용한 페로브스카이트 태양전지의 성능은 2015년에 처음 2.10% 광전변환 효율을 시작으로, Sn 기반의 페로브스카이트 물질 중에서 가장 빠른 속도로 향상되고 있다(그림 10). 미국 Toledo 대학의 Yanfa Yan 교수 연구팀의 6.22% 효율을 갖는 p-i-n 구조 FASnI₃ 페로브스카이트 태양전지가 최근까지 보고된 연구라고 할 수 있다.³⁷⁾

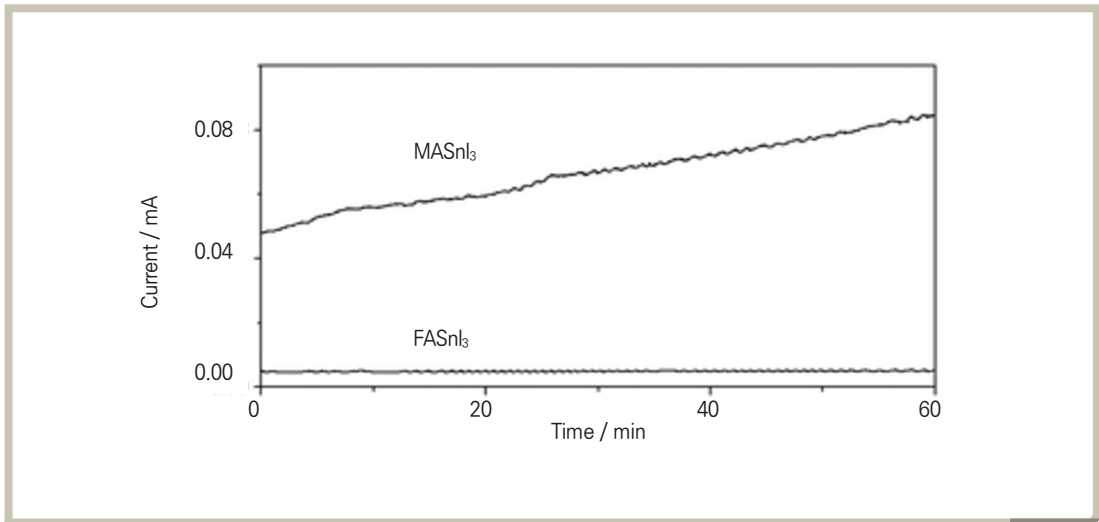


그림 9. 글로브 박스(O₂:0.2~0.3ppm, H₂O:0.4~0.5ppm)에서 측정된 MASnI₃와 FASnI₃소자의 시간에 따른 전류 변화³⁶⁾

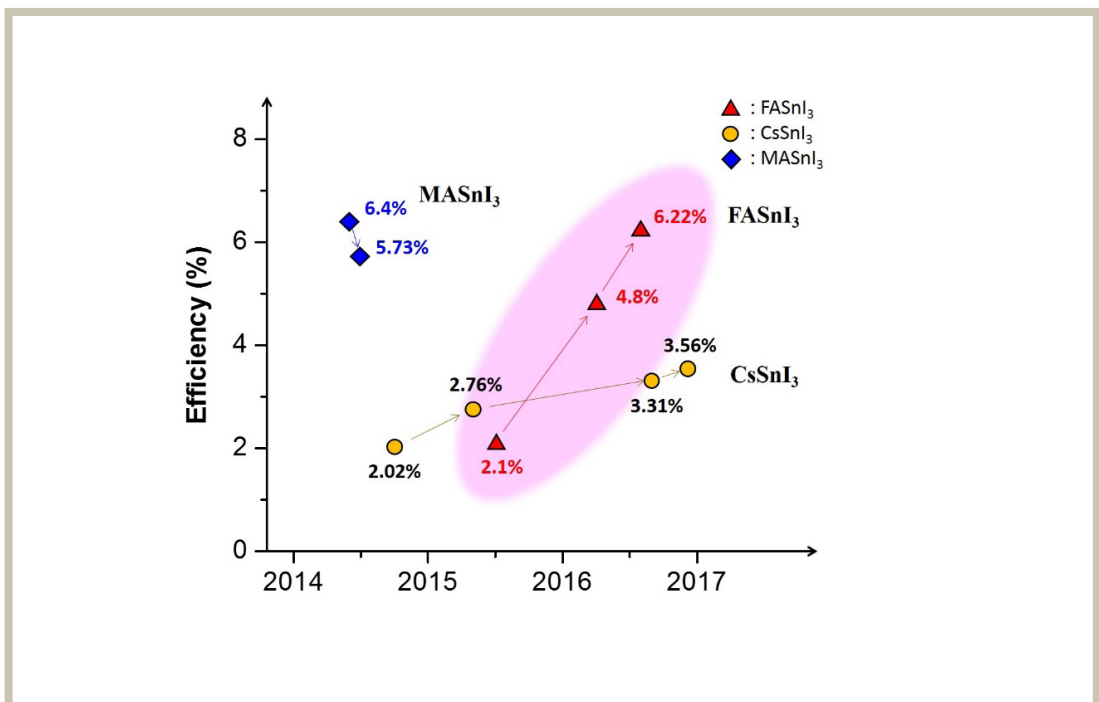


그림 10. 최근 3년동안 Sn 기반 페로브스카이트 태양전지의 효율 증가 추이³⁷⁾

최근 Sn 기반의 페로브스카이트 소자를 봉지화하면, 공기 중에서 100일이 지나도 그 성능이 유지된다는 결과가 보고되었다³⁶⁾. 이는 봉지화 기술을 통해 Sn 기반 페로브스카이트 소자의 장기 안정성이 어느 정도 확보되었음을 시사하는 고무적인 결과이다. 고효율을 갖는 Sn 기반의 페로브스카이트 태양전지 제작을 위해, Sn²⁺의 산화를 효과적으로 제어할 수 있는 기술과 산화에 비교적 안정한 페로브스카이트 조성의 개발이 계속적으로 이루어져야 할 것으로 보인다. 이와 더불어 층간 소재와 소자 구조의 최적화 과정이 이루어진다면, 빠른 시일 내에 Pb를 대체하는 친환경적인 페로브스카이트 태양전지의 개발이 가능할 것이라고 기대된다.

2.8 플렉서블화 기술

투명 플라스틱과 금속포일 같은 유연 소재 기반 기반의 태양전지는 자동차 및 건물일체형부터 휴대용 웨어러블 전자기기까지 다양한 분야에서 효과적인 에너지 공급을 가능하게 한다. 페로브스카이트 태양전지의 흡광층인 페로브스카이트 박막은 150°C 이하의 저온공정으로 제작이 가능하며, 높은 광전 변환 효율을 발휘하기 때문에 유연 태양전지로의 적용 가능성이 크다. <그림 11>은 최근 보고된 페로브스카이트 태양전지 관련 특허와 논문의 연도별 개수를 나타내고 있으며, 저온 공정(Low-Temp)과 유연 기판(f-PSCs) 기반의 페로브스카이트 태양전지 연구가 활발이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다.

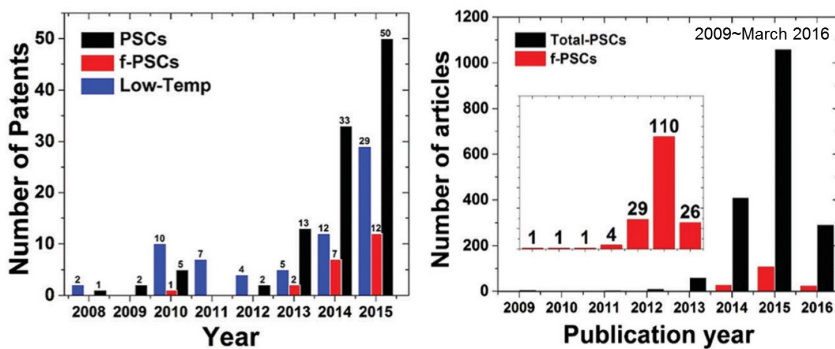


그림 11. 최근 보고된 페로브스카이트 태양전지(Perovskite solar cells, PSCs)의 연도별 특허 및 논문 개수와 종류별 (f-PSC: 유연 페로브스카이트 태양전지, Low-Temp: 저온 공정 기반의 페로브스카이트 태양전지) 비중을 나타내는 그래프³⁸⁾

유연 페로브스카이트 태양전지는 대부분 ITO(Indium Tin Oxide)^{vi)}가 코팅된 polyethylene terephthalate(PET)나 polyethylene naphthalate(PEN) 기판을 기반으로 제작 되어 왔다. PET와 PEN같은 고분자 기판은 150°C 이하의 저온 공정을 필요로 한다. p-i-n 구조의 페로브스카이트 태양전지는 모든 공정이 저온에서 가능하기 때문에 유연 기판에 가장 적합한 구조로 많은 연구가 이루어졌다. 일반적으로 정공을 추출하는 층으로 PEDOT:PSS, 전자 추출층으로 PCBM이 사용된다. p-i-n 구조 기반의 유연 페로브스카이트 태양전지 연구는 주로 페로브스카이트 박막 성장 기술과 기존의 전하 수송층(PEDOT:PSS, PCBM)를 대신할 물질 개발에 집중되어 있다. PEDOT:PSS의 경우 산성(pH ~1)을 띠어 ITO와 페로브스카이트 층의 장기적 안정성의 문제가 될 뿐만 아니라, 페로브스카이트(CH₃NH₃PbI₃)의 valence band maximum(~5.3 eV)에 비해 낮은 일함수^{vii)}(~5.0 eV)를 가지기 때문에 소자의 built-in potential에 loss가 발생한다. 최근 이런 이슈를 가진 PEDOT:PSS를 대체할 수 있는 정공전달물질로 p-type 고분자물질인 PhNa-1T가 연구되고 있다. PhNa-1T는 1,4-bis(4-sulfonatobutoxy)benzene과 thiophene이 중합된 물질로 $2.6 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ 의 높은 전기 전도도와 PEDOT:PSS 보다 더 큰 5.2 eV의 높은 일함수를 가진다. 저온의 용액공정으로 ITO/PEN 기판에 코팅이 가능하여 이를 기반으로 유연 페로브스카이트 태양전지를 제작하였을 때, PEDOT:PSS 기반의 소자(8.4%) 보다 월등히 높은 14.7%의 광전변환 효율을 발휘하였다. 또한 PhNa-1T는 pH 7.12의 중성을 띠기 때문에 소자의 장기안정성 테스트(25°C, 습도 40% 조건)에서 PEDOT:PSS 기반의 소자와 비교하여 더 향상된 안정성을 보였다<그림 12>.

vi) 전기 전도성을 가진 투명도전막

vii) 물질 내에 있는 전자 하나를 밖으로 끌어내는 데 필요한 최소의 일 또는 에너지

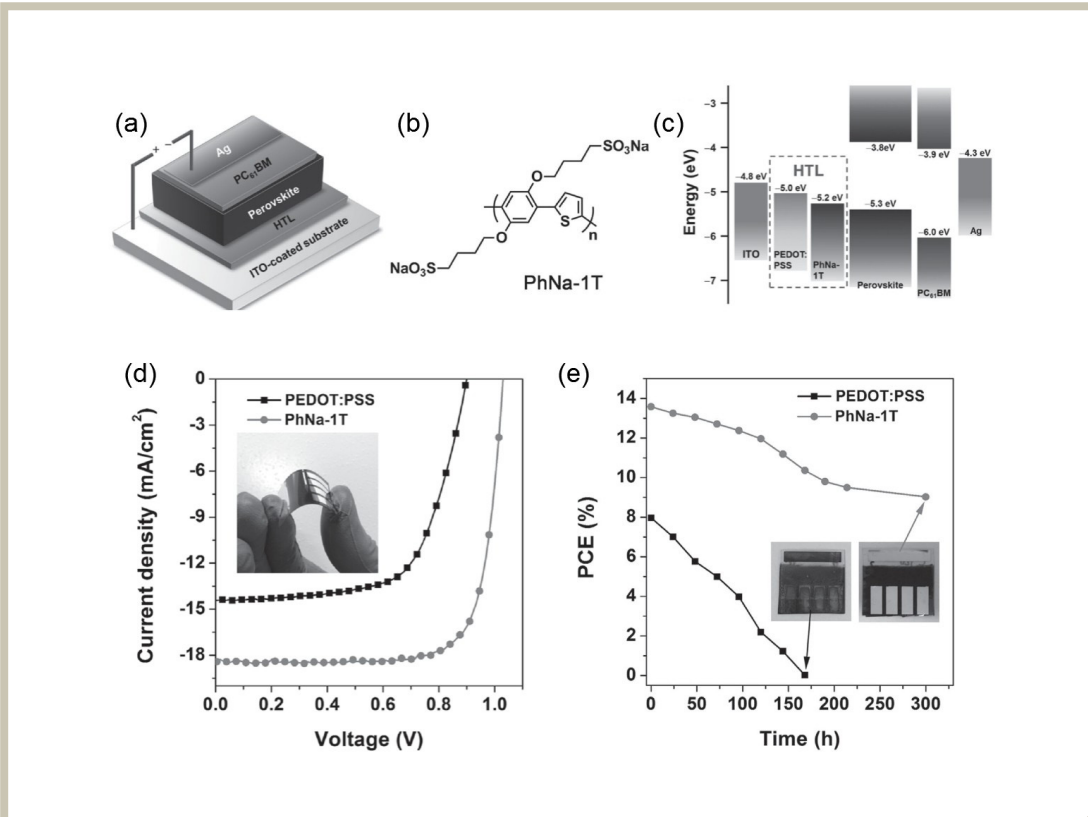
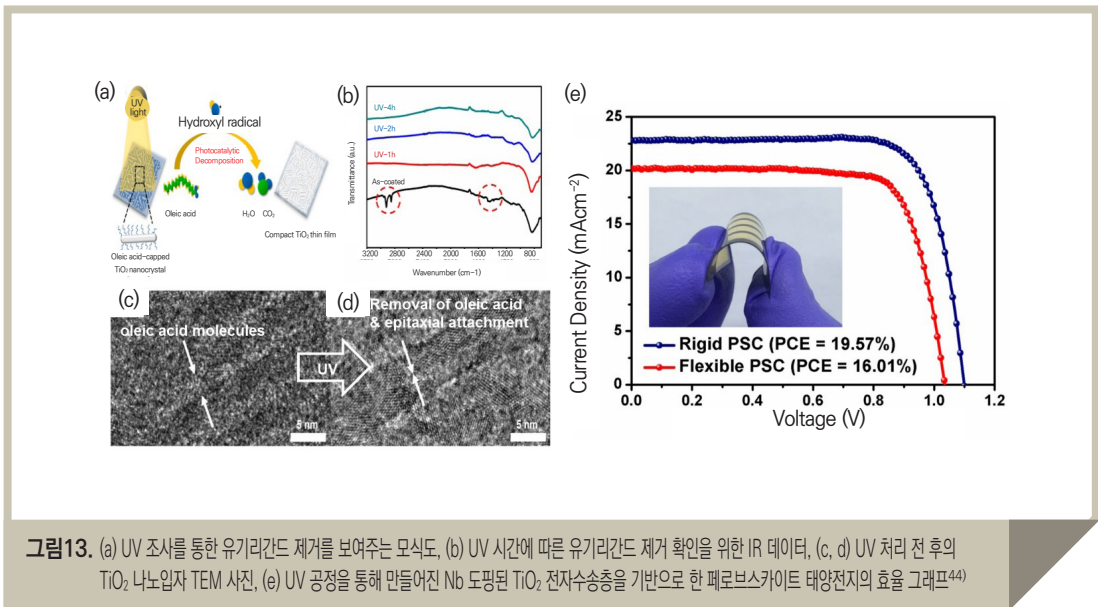


그림 12. (a) p-i-n 페로브스카이트 태양전지 구조, (b) PhNa-1T의 화학구조, (c) 페로브스카이트 태양전지를 구성하는 물질들의 에너지레벨, (d) PEDOT:PSS와 PhNa-1T를 각각 정공 수송층으로 사용하는 ITO/PEN 기반의 유연 페로브스카이트 태양전지 효율 비교, (e) 소자의 장기 안정성 비교³⁹⁾

n-i-p 구조의 페로브스카이트 태양전지는 TiO_2 , ZnO , SnO_2 등의 metal oxide 전자수송층을 기반으로 한다. 일반적으로 고성능의 TiO_2 전자 수송층을 제작하기 위해서는 500°C 의 고온 소성과정을 필요로 한다. TiO_2 전자 수송층을 유연기판에 적용하기 위해 진공증착법인 atomic layer deposition (ALD) 나 DC magnetron sputtering으로 TiO_2 박막을 저온으로 제작하였고, 이를 기반으로 15.07%의 유연 페로브스카이트 태양전지가 개발이 되었다.^{40,41)} 최근에는 서울대 최만수 교수 연구팀에서 진공증착을 이용하여 C60 박막층을 전자수송층으로 사용한 16% 효율을 갖는 유연 페로브스카이트 태양전지를 발표하였다.⁴²⁾ 하지만 이런 진공 증착법은 공정조건이 까다롭고 공정단가가 비싸다는 단점이 있어 용액공정으로 저온의 전자 수송층을 제작하는 연구들도 활발히 이루어지고 있다. 한국화학연구원에서는 90°C 이하에서 합성할 수 있는 Zn_2SnO_4 나노입자를 개발하였고, 이 입자가 분산된 용액을 스핀 코팅 및 100°C 의 열처리 과정을 통해 우

수한 전자전달층을 제작하였다. 이 유연 페로브스카이트 태양전지는 15.3% 효율을 내는 것으로 보고되었다.⁴³⁾ 최근에 한국과학기술연구원에서는 UV처리를 통해 TiO₂ 전자수송층을 저온으로 제작하는 기술을 개발하였다.⁴⁴⁾ 유기리간드가 달린 Nb가 도핑된 TiO₂ 나노입자를 합성하고, 잘 분산된 용액을 스핀 코팅 후 UV를 조사하게 되면, 광촉매 효과를 통해 표면에 달린 유기리간드가 제거되고 입자들이 서로 밀집되면서 균일하고 뽀뽀한 TiO₂ 박막이 제작된다. 또한, Nb가 도핑 됨으로써 전기전도도가 높아지고 에너지 레벨이 조절되면서 도핑되지 않은 TiO₂보다 전자 추출이 더 용이하게 되었다. 이는 500℃ 고온 열처리를 통해 제작된 TiO₂ 전자수송층보다 우수한 특성을 보였으며, 결과적으로 유리기판 기반으로는 19.57%, 유연기판인 ITO/PEN 기반으로는 16.01%의 고효율을 보였다(그림 13).



03 국가별 페로브스카이트 태양전지 관련 정책 및 개발동향⁴⁵⁾

3.1 미국

미국 에너지성(DOE)은 2014년 10월부터 ‘SunShot Initiative’ 차세대 태양전지 3 라운드 프로젝트를 통해 페로브스카이트 태양전지에 적극 투자하고 있다. 이 프로젝트의 주요 투자 방향은 페로브스카이트 태양전지와 기존 실리콘 또는 박막형 태양전지와의 텐덤(이중 또는 동종의 태양전지를 다중 적층화), 그리고 페로브스카이트 물질 자체간의 텐덤에 주로 투자하고 있다는 점이다. 그 결과 스탠포드 대학의 M. McGehee 교수 그룹에서는 2016년 10월 결정질 실리콘 태양전지와 페로브스카이트 태양전지를 2-터미널 텐덤화하여 23.6%의 공인 효율을 발표하였다. 또한 네브래스카 링컨 대학의 J. Huang 교수 그룹은 p-i-n 구조 페로브스카이트 태양전지의 고효율화 기술을 활발히 개발하고 있으며, 이를 바탕으로 실리콘과의 4-터미널 텐덤 소자 23.0%의 효율을 보고하는 등 페로브스카이트 태양전지 텐덤화 기술 개발에 박차를 가하고 있다. 또한, 결정질 실리콘 태양전지와 페로브스카이트 태양전지와의 텐덤으로 30% 이상의 효율 달성을 목표로 연구 중이다.

노스웨스턴 대학의 M. G. Kanatzidis 교수 연구팀은 납을 쓰지 않는 무납 페로브스카이트 조성 개발 및 수분 안정성을 높이는 층상 구조 페로브스카이트 할로젠화물 개발을 진행 중이다. 국가 연구소를 보면, National Renewable Energy Lab.(NREL)과 Los Alamos National Lab.(LANL)에서 페로브스카이트 할로젠화물의 고품질화 관련 연구를 진행하고 있다.

3.2 EU

유럽의 경우 기존의 염료감응형 태양전지 관련 주요 연구진이 페로브스카이트 태양전지 기술 개발을 주도하고 있다. 영국 옥스퍼드 대학의 H. Snaith 교수 그룹은 2012년 메조 슈퍼 구조(meso-superstructure)를 갖는 페로브스카이트 태양전지를 보고하였고 그 후 페로브스카이트 태양전지 관련 기술을 선도하고 있다.

특히 H. Snaith 교수가 스펀오프한 Oxford PV는 페로브스카이트 태양전지를 이용한 결정질 실리콘과의 2-터미널 텐덤 태양전지와 건물일체형 태양전지(Building integrated photovoltaics, BIPV) 개발을 진행 중에 있다.

스위스 로잔 연방 공과대학(EPFL)의 M. Graetzel, A. Hagfeldt 교수 연구팀은 2013년 최초로 NREL 효율 차트에 페로브스카이트 태양전지 효율 14.1%를 기록하였으며, 최근 2015년 12월엔 21.0%를 기록하였을 정도로 페로브스카이트 태양전지 고효율화 연구를 진행 중이다. 또한, 2016년 9월에는 루비듐(Rb)이 도핑된 페로브스카이트 할로젠화물을 이용하여 85℃에서 표준 태양광 조사 조건에서 500시간동안 안정한 고내구성 페로브스카이트 태양전지를 발표하는 등 고내구성 연구를 진행하고 있다.

벨기에 Imec에서는 페로브스카이트 태양전지 대면적 모듈 기술 개발을 진행하고 있으며, 레이저 식각(etching) 기술을 성공적으로 적용하여 100cm²이상의 크기에서 95% 개구율을 갖는 페로브스카이트 태양전지 모듈을 제작하였다.

3.3 일본

토인 대학교의 T. Miyasaka 교수 그룹은 2009년 최초로 페로브스카이트 할로젠화물을 광흡수체로 사용한 형태의 태양전지를 보고 하였다. 당시에는 액체 전해질의 사용으로 극도로 낮은 내구성을 보였으나, 2012년 옥스퍼드 대학의 H. Snaith 교수와 공동으로 고체형 메조 슈퍼 구조를 발표하였으며, 현재 저온 공정용 산화물 n-type 물질을 개발하고 있다. Advanced Institute of Science and Technology(AIST)에서는 2015년 1cm × 1cm 대면적 효율 15%를 보고하는 등 대면적화 연구를 진행 중에 있다.

3.4 중국

항저우 대학의 Hongwie Han 교수 그룹은 정공 전달 물질을 사용하지 않고 상대전극으로 카본을 사용하는 스크린 프린팅 기반으로 페로브스카이트 태양전지를 제작하였다. 이 태양전지는 우수한 수분과 광 안정성을 보여주어 큰 주목을 받고 있다. 최근 중국은 정부의 과감한 투자로 내구성 확보 및 대면적 모듈 제작 관련 연구가 활발히 진행 중에 있으며 급격한 논문, 특허 수의 증가를 보이고 있다.

viii) 전체 면적대비 성능을 발휘하는데 기여하는 활성층의 면적 비율

3.5 한국

페로브스카이트 태양전지 기술은 국내 연구진이 개발을 주도하고 있는 연구 분야이다. 성균관대학교 박남규 교수 그룹은 광흡수체로서 페로브스카이트 할로겐화물을 이용한 태양전지를 연구해 왔으며, 2012년 9.7%의 광전변환 효율을 갖는 고체형 페로브스카이트 태양전지를 최초 보고하였다. 한국화학연구원의 광에너지융합소재 연구센터에서는 페로브스카이트 태양전지 효율을 4번 갱신하여왔으며, 현재 울산과학기술원 석상일 교수 연구그룹과 공동으로 22.1%의 세계 최고 효율을 보고하는 등 고효율 분야에서 기술을 선도하고 있다. 또한, 고효율을 위한 소자의 구조, 제작 공정, 페로브스카이트 물질 기술을 개발하며 그 원천 기술을 보유하고 있다. 한국화학연구원에서는 실리콘 태양전지와 접목 가능한 탠덤용 페로브스카이트 태양전지 기술 및 인쇄공정을 적용한 대면적 모듈 제작 관련 연구를 진행 중에 있다. 한국과학기술연구원에서는 수월성이 확보된 유기태양전지 기술을 바탕으로 유연 페로브스카이트 태양전지 기술과 고효율과 고안정성을 동시에 동시에 만족할 수 있는 페로브스카이트 태양전지용 소자 및 소재를 개발하고 있다.

미래창조과학부 지원 글로벌프론티어사업의 멀티스케일에너지시스템 연구단(서울대)에서는 국내 우수 페로브스카이트 태양전지 연구진을 구성하여 상용화를 위한 핵심 요소 기술인 고효율, 고내구성, 대면적 모듈 기술 개발을 추진 중에 있다. 또한, 기후변화대응 기술 개발의 일환으로 고내구성, 무납 페로브스카이트 소재, 유연 페로브스카이트 기술 개발을 지원하고 있으며, 에너지기술평가원에서는 인쇄공정 페로브스카이트 모듈 개발, 2-터미널 페로브스카이트 태양전지 기술 개발에 투자하고 있다. 페로브스카이트 소재 자체뿐만 아니라 기존의 경쟁력 있는 유기 반도체 물질 관련 연구자들과 염료감응형 태양전지 연구자들의 적극적인 참여로 페로브스카이트 태양전지 연구가 활발히 진행되고 있다

04 맺음말

페로브스카이트 태양전지는 등장과 함께 급격한 효율 향상을 보이며 현재 22.1%의 세계 최고 인증 효율이 보고되고 있다. 이런 성과는 기존의 다양한 차세대 태양전지 분야의 축적된 융합기술의 결과이며, 향후

산업화를 위한 발전과정에서도 기존 태양전지에서 확립된 기술과의 접목이 반드시 필요하다. 태양전지 기술은 기본적으로 반도체와 디스플레이 기술과 유사한 면이 있기 때문에, 이 분야의 세계 최강국인 우리나라가 페로브스카이트 태양전지 기술을 세계적으로 선도하고 있다는 것은 크게 놀라운 일만은 아닐 것이다. 현재 전세계적으로 경쟁이 심화되고 있는 페로브스카이트 태양전지 분야에서 향후에도 대한민국이 기술수월성을 유지하여, 새로운 시장을 창출할 수 있도록 국가성장동력으로 성장시키는 전략이 필요하다. 이와 동시에 인류의 에너지 문제를 해결할 만한 완성된 기술로 진화 시켜야 하는 큰 과제에 직면해 있다. 향후 시장진입을 위해서는 친환경 무독성 소재의 개발, 장기안정성의 확보, 대면적 공정기술, 저가화 기술, 적층화 기술개발 등을 위한 장기적이고 꼼꼼한 연구전략수립이 필요하며, 이는 여러 분야의 전문가들의 협업과 융합을 통해서만 이뤄질 수 있다. 아울러 사업화를 위해서는 페로브스카이트 태양전지에 적합한 전략적인 비즈니스 모델을 설정하고, 기술 스펙과 표준화 작업을 통해 기술과 정책, 마케팅 모델까지 고려한 전략을 세워야 상용화 기술의 조기달성이 가능하다. 이렇게 개발된 페로브스카이트 상용화 기술은 기존 결정질 실리콘 태양전지가 점유하고 있는 기존 태양전지 시장을 크게 바꿔놓을 수 있는 혁신적 기술이 될 수 있을 것이라고 기대된다.

저자 **노 준 홍**

Jun Hong Noh

학력 서울대학교 재료공학부 박사
서울대학교 재료공학부 학사

경력 現)고려대학교 건축사회환경공학부 조교수
前)한국화학연구원 선임연구원
前)서울대학교 재료공학부 박사후연구원

저자 **고 민 재**

Min Jae Ko

학력 서울대학교 재료공학부 박사
서울대학교 섬유고분자공학과 석사
서울대학교 섬유고분자공학과 학사

경력 現)한양대학교 화학공학과 교수
前)한국과학기술연구원 책임연구원
前)삼성전자 LCD 총괄 책임연구원
前)M.I.T. 화학공학과 박사후과정

참고문헌

1. 신기후체제의 에너지 R&D 투자포트폴리오 청정에너지기술로드맵, 한국에너지기술평가원 (2016)
2. 양태열, 전남중, 서장원, 노준홍, 페로브스카이트 태양전지 공정 기술, 전기전자재료학회지 제 29권 제8호 (2016년 8월)
3. A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells, *J. Am. Chem. Soc.*, 131, 6050–6051 (2009).
4. National Renewable Energy Labs (NREL) Efficiency Chart.
<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>
5. H.-S. Kim, C.-R. Lee, J.-H. Im, K.-B. Lee, T. Moehl, A. Marchioro, S.-J. Moon, R. Humphry-Baker, J.-H. Yum, J. E. Moser, M. Grätzel, and N.-G. Park, Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%, *Scientific Reports*, 2, 591 (2012).
6. 2015년 제16권 제1호 13. 기술특집.페로브스카이트 태양전지의 기술 동향. 노준홍
7. M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami, and H. J. Snaith, Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites, *Science*, 338, 643–647 (2012).
8. M. Liu, M. B. Johston, and H. J. Snaith, *Nature*, 501, 395–398 (2013).
9. J. H. Heo, S. H. Im, J. H. Noh, T. N. Mandal, C.-S. Lim, J. A. Chang, Y. H. Lee, H. Kim, A. Sarkar, M. K. Nazeeruddin, M. Gratzel, and S. I. Seok, *Nature Photonics*, 7, 486–491 (2013).
10. N. J. Jeon, J. H. Noh, Y. C. Kim, W. S. Yang, S. Ryu, and S. I. Seok, *Nature Mater.*, 13, 897–903 (2014).
11. J.-Y. Jeng, Y.-F. Chiang, M.-H. Lee, S.-R. Peng, T.-F. Guo, P. Chen, and T.-C. Wen, *Adv. Mater.*, 25, 3727–3732 (2013).

12. X. Li, D. Bi, C. Yi, J.-D. Décoppet, J. Luo, S. M. Zakeeruddin, A. Hagfeldt, and M. Grätzel, A vacuum flash-assisted solution process for high-efficiency large-area perovskite solar cells, *Science*, 353, 58-62 (2016).
13. W. S. Yang, J. H. Noh, N. J. Jeon, Y. C. Kim, S. Ryu, J. Seo, and S. I. Seok, High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange, *Science*, 348, 1234-1237 (2015).
14. Nam Joong Jeon, Jun Hong Noh, Young Chan Kim, Woon Seok Yang, Seungchan Ryu & Sang Il Seok, Solvent engineering for high-performance inorganic-organic hybrid perovskite solar cells, *Nature Materials* 13, 897-903 (2014)
15. N. J. Jeon, J. H. Noh, W. S. Yang, Y. C. Kim, S. Ryu, J. Seo, and S. I. Seok, Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells, *Nature*, 517, 476-480 (2015).
16. M. Saliba, T. Matsui, J.-Y. Seo, K. Domanski, J.-P. Correa-Baena, M. K. Nazeeruddin, S. M. Zakeeruddin, W. Tress, A. Abate, A. Hagfeldt, and M. Grätzel, Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency, *Energy Environ. Sci.*, 9, 1989-1997 (2016).
17. 이선주, 양태열, 전남중, 서장원, 노준홍, 한국공업화학회, <공업화학전망> 20권2호 (2017), pp.59-76
18. Z. Song, A. Abate, S. C. Watthage, G. K. Liyanage, A. B. Phillips, U. Steiner, M. Grätzel, and M. J. Heben, Perovskite solar cell stability in humid air: partially reversible phase transitions in the $\text{PbI}_2\text{-CH}_3\text{NH}_3\text{I-H}_2\text{O}$ system, *Adv. Energy Mater.*, 6, 1600846 (2016).
19. S. Ito, S. Tanaka, K. Manabe, and H. Nishino, Effects of surface blocking layer of Sb_2S_3 on nanocrystalline TiO_2 for $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite solar cells, *J. Phys. Chem. C*, 118, 16995-17000 (2014).
20. E. H. Anaraki, A. Kermanpur, L. Steier, K. Domanski, T. Matsui, W. Tress, M. Saliba, A. Abate, M. Grätzel, A. Hagfeldt, and J.-P. Correa-Baena, Highly efficient



and stable planar perovskite solar cells by solution-processed tin oxide, *Energy Environ. Sci.*, 9, 3128 (2016).

21. H. Tan, A. Jain, O. Voznyy, X. Lan, F. P. García de Arquer, J. Z. Fan, R. Quintero-Bermudez, M. Yuan, B. Zhang, Y. Zhao, F. Fan, P. Li, L. N. Quan, Y. Zhao, Z.-H. Lu, Z. Yang, S. Hoogland, and E. H. Sargent, Efficient and stable solution-processed planar perovskite solar cells via contact passivation, *Science*, 355, 722-726 (2017).
22. W. Li, W. Zhang, S. V. Reenen, R. J. Sutton, J. Fan, A. A. Haghighirad, M. B. Johnston, L. Wang, and H. J. Snaith, Enhanced UV-light stability of planar heterojunction perovskite solar cells with caesium bromide interface modification, *Energy Environ. Sci.*, 9, 490 (2016).
23. F. Bella, G. Griffini, J.-P. Correa-Baena, G. Saracco, M. Grätzel, A. Hagfeldt, S. Turri, and C. Gerbaldi, Improving efficiency and stability of perovskite solar cells with photocurable fluoropolymers, *Science*, DOI: 10.1126/science.aah4046 (2016).
24. J. Carrillo, A. Guerrero, S. Rahimnejad, O. Almora, I. Zarazua, E. Mas-Marza, J. Bisquert, and G. Garcia-Belmonte, Ionic reactivity at contacts and aging of methylammonium lead triiodide perovskite solar cells, *Adv. Energy Mater.*, 6, 1502246 (2016).
25. K. Domanski, J. Correa-Baena, N. Mine, M. Nazeeruddin, A. Abate, M. Saliba, W. Tress, A. Hagfeldt, and M. Grätzel, Not all that glitters is gold: metal-migration-induced degradation in perovskite solar cells, *ACS Nano*, 10, 6306-6314 (2016).
26. A. Baranwal, S. Kanaya, T. Peiris, G. Mizuta, T. Nishina, H. Kanda, T. Miyasaka, H. Segawa, and S. Ito, 100 °C thermal stability of printable perovskite solar cells using porous carbon counter electrodes, *ChemSusChem*, 9, 2604-2608 (2016).
27. M. Saliba, T. Matsui, K. Domanski, J.-Y. Seo, A. Ummadisingu, S. M. Zakeeruddin, J.-P. Correa-Baena, W. R. Tress, A. Abate, A. Hagfeldt, and M. Grätzel, Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance, *Science*, 354, 206-209 (2016).

28. W. Qiu, T. Merckx, M. Jaysankar, C. M. Huerta, L. Rakocevic, W. Zhang, U. W. Paetzold, R. Gehlhaar, L. Froyen, J. Poortmans, D. Cheyns, H. J. Snaith, and P. Heremans, Pinhole-free perovskite films for efficient solar modules, *Energy Environ. Sci.*, 9, 484–489 (2016).
29. K. Hwang, Y.-S. Jung, Y.-J. Heo, F. H. Scholes, S. E. Watkins, J. Subbiah, D. J. Jones, D.-Y. Kim, and D. Vak, Toward large scale roll-to-roll production of fully printed perovskite solar cells, *Adv. Mater.*, 27, 1241–1247 (2015).
30. N. K. Noel, S. D. Stranks, A. Abate, C. Wehrenfennig, S. Guarnera, A.-A. Haghighirad, A. Sadhanala, G. E. Eperon, S. K. Pathak, M. B. Johnston, A. Petrozza, L. M. Herz, and H. J. Snaith, Lead-free organic-inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications, *Energy Environ. Sci.*, 7, 3061–3068 (2014).
31. F. Hao, C. C. Stoumpos, D. H. Cao, R. P. H. Chang, and M. G. Kanatzidis, Lead-free solid-state organic-inorganic halide perovskite solar cells, *Nature Photon.*, 8, 489–494 (2014).
32. M. H. Kumar, S. Dharani, W. L. Leong, P. P. Boix, R. R. Prabhakar, T. Baikie, C. Shi, H. Ding, R. Ramesh, M. Asta, M. Grätzel, S. G. Mhaisalkar, and N. Mathews, Lead-free halide perovskite solar cells with high photocurrents realized through vacancy modulation, *Adv. Mater.*, 26, 7122–7127 (2014).
33. S. J. Lee, S. S. Shin, Y. C. Kim, D. Kim, T. K. Ahn, J. H. Noh, J. Seo, and S. I. Seok, Fabrication of efficient formamidinium tin iodide perovskite solar cells through SnF₂-pyrazine complex, *J. Am. Chem. Soc.*, 138, 3974–3977 (2016).
34. T.-B. Song, T. Yokoyama, C. C. Stoumpos, J. Logsdon, D. H. Cao, M. R. Wasielewski, S. Aramaki, and M. G. Kanatzidis, Importance of reducing vapor atmosphere in the fabrication of tin-based perovskite solar cells, *J. Am. Chem. Soc.*, 139, 836–842 (2017).
35. T. M. Koh, T. Krishnamoorthy, N. Yantara, C. Shi, W. L. Leong, P. P. Boix, A. C. Grimsdale, S. G. Mhaisalkar, and N. Mathews, Formamidinium tin-based



- perovskite with low E_g for photovoltaic applications, *J. Mater. Chem. A.*, 3, 14996–15000 (2015).
36. F. Wang, J. Ma, F. Xie, L. Li, J. Chen, J. Fan, and N. Zhao, Organic cation-dependent degradation mechanism of organotin halide perovskites, *Adv. Funct. Mater.*, 26, 3417–3423 (2016).
 37. W. Liao, D. Zhao, Y. Yu, C. R. Grice, C. Wang, A. J. Cimaroli, P. Schulz, W. Meng, K. Zhu, R.-G. Xiong, and Y. Yan, Lead-free inverted planar formamidinium tin triiodide perovskite solar cells achieving power conversion efficiencies up to 6.22%, *Adv. Mater.*, 28, 9333–9340 (2016).
 38. F. D. Giacomo, A. Fakharuddin, R. Jose, T. M. Brown. *Energy Environ. Sci.* 2016, 9, 3007
 39. J. W. Jo, M-S. Seo, M. Park, J-Y. Kim, J-S. Park, I. K. Han, H. Ahn, J. W. Jung, B-H. Sohn, M. J. Ko, H. J. Son, *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26, 4464
 40. B. J. Kim, D. H. Kim, Y-Y. Lee, H-W. Shin, G. S. Han, J. S. Hong, K. Mahmood, T. K Ahn, Y-C. Joo, K. S. Hong, N-G. Park, S. Lee, H. S. Jung, . *Energy Environ. Sci.* 2015, 8, 916
 41. D. Yang, R. Yang, J. Zhang, Z. Yang, S. Liu, C. Li, . *Energy Environ. Sci.* 2015, 8, 3208
 42. H. Yoon, S. M. Kang, J-K. Lee, M. Choi, . *Energy Environ. Sci.* 2016, 9, 2262
 43. S. S. Shin, W. S. Yang, J. H. Noh, J. H. Suk, N. J. Jeon, J. H. Park, J. S. Kim, W. M. Seong, S. I. Seok, *Nat. Commun.*, 2015, 6, 7410
 44. I. Jeong, H. Jung, M. Park, J-S. Park, H. J. Son, J. Joo, J. Lee, M. J. Ko, *Nano Energy*, 2016, 28, 380
 45. 2016 녹색기술백서, 녹색기술센터 발간

02

환경 분야의 융합 기술 전략과 주요 사례

한국과학기술연구원
이상협 박사
(yisanghyup@kist.re.kr)



01 나랑 지금 장난하나? vs 장난 지금 나랑하나? : 융합 환경 기술 vs 환경 융합 기술

요즘 예능 프로그램에서 인기를 끌고 있는 문구이다. 많은 사람들이 말장난이라고 생각하면서도 많은 시청자들에게 웃음을 주는 참신한 아이디어의 문구이다.

융합 기술 사례에 대한 원고를 출발하면서 예능 문구가 등장해서 많은 분들이 의아해 하셨을 것으로 생각한다. 개인적인 짧은 국어 문법 지식수준에서는 문법적으로는 짧은 두 문장 모두 큰 문제는 없다고 생각한다. 대부분 사람들이 두 짧은 문장을 모두 ‘너 지금 나랑 장난하고 있니?’라는 의미로 받아들일 것으로 생각한다. 물론 아직 말하기와 글쓰기를 전혀 모르는 유아이거나 한국어를 처음 배우는 외국인들에게는 두 짧은 문장이 전혀 다른 말이라고 생각하고 당황하거나 전혀 못 알아듣는 상황이 발생할 수 있다고 생각한다. 해당 기고를 읽으시는 독자 분들은 두 문장이 모두 같은 의미라는 것을 충분히 알고 계실 것이라고 생각한다. 융합 기술이라는 주제로 원고를 시작하면서 처음부터 과학기술과는 전혀 관계없는 농담 수준의 이야기로 시작한 이유에 대하여 이제부터 기술해 보고자 한다.

1.1 환경 공학 기술은? (What is the Environment Engineering and Technology)

본고에서 기술할 주제는 환경 공학 분야이다. 환경 공학은 사전적 의미로 ‘환경이 생물에 미치는 영향을 연구하고, 환경의 오염과 악화를 방지하는 방법을 연구하는 학문’이다(국립국어원 표준국어대사전). 1980년대 환경 공학(Environment Engineering)은 86년 아시안게임과 88년 올림픽을 서울에서 개최하면서 대한민국 공과대학에서 가장 인기가 있었던 학과 가운데 하나였다. 당시 세계적으로도 환경오염에 대한 인식이 높아짐에 따라 맑고 깨끗한 환경에 대한 요구 증가로 해당 학과의 인기가 높았다. 또한 기술적으로도 분석기술이 빠른 속도로 발전되어 과거 ppm(part per million, 1/1,000,000) 수준의 측정 수준이 ppb(part per billion, 1/1,000,000,000)로, 더 나아가 ppt(part per trillion, 1/1,000,000,000,000) 수준까지 발전되었다. 이로 인해 과거에는 파악할 수 없었던 오염 물질들이 노출되면서 이에 대한 대응 방법을 고민하기 시작

하였다. 이렇게 높아진 요구와 고도의 대응 방법의 필요성으로 국가적으로 많은 투자가 진행되었다. 이런 분위기로 인해 많은 우수한 고등학생들이 환경공학과로 진학을 하였고, 이들은 현재 환경공학과 관련된 많은 분야에서 왕성한 활동을 하고 있다.

그러나 현재 환경공학과는 공과대학에서 어떤 상황에 놓여 있는지 돌아볼 시간이라고 생각한다. 공과대학에서 학과의 인기도와 중요성은 사회의 수요와 필요 정도이다. 과거 환경공학과 출신의 수요와 필요성은 매우 높았다. 현재는 과거에 비하여 수요와 필요성이 많이 떨어진 것이 현실이다. 이유는 무엇일까? 환경 공학과 졸업생들이 관련 전공 학과 졸업생들에 비하여 전문성이 부족하다는 것이 일반적으로 수요처에서 지적하는 사항이다. 즉, 수처리 공정 설계를 위한 공정 공학(Process engineering) 관련 전문 지식에서는 공정 공학이 주 학문 분야인 화학공학과에 비하여 부족하고, 미생물 관련 전문 지식에서는 생물학과에 비하여 부족하고, 수처리 소재 개발을 위한 소재 관련 전문 지식에서는 신소재 공학과에 비하여 부족함을 보이는 등 전문 분야 졸업생에 비하여 전문지식이 다소 부족함을 보인다는 기업 실무자 및 인사팀들의 의견이다. 이것은 환경공학과 입장에서는 피할 수 없는 문제이다. 이유는 환경공학은 환경오염 물질을 효과적으로 처리하는 관련 기술과 환경오염 물질의 특성을 동시에 파악해야 하는 위치에 있기 때문이다.

1.2 환경 융합 기술 vs 융합 환경 기술

그러면 '환경공학과 출신들을 채용하지 않고 해당 분야 출신들을 채용하면 되지 않느냐'라는 질문에 담당자들은 그럴 수 없는 것이 환경공학 관련 기술 개발 분야라고 대답한다. 환경 공학과 출신들이 전문 지식은 상대적으로 부족하지만 오염된 환경 매체 특성에 대한 전문 지식은 가장 높기 때문이라는 것이다. 쉽게 설명하면 전문 기술자들이 훌륭한 기술을 개발했다라도 적용할 오염 대상에 대한 이해도가 없으면 개발 기술의 효용성을 극대화하기 힘들뿐 만 아니라 극단적인 경우에는 오염된 환경에 전혀 사용할 수 없는, 즉 의미 없는 기술 개발로 마무리 될 가능성도 있다. 다시 말하면 오염된 환경 매체의 중요 특징을 이해해야 하고 동시에 오염 대상에 대한 정확한 특징을 파악한 후, 필요 기술을 개발하는 것이 환경 기술 개발 과정에서 가장 중요한 고려 대상이라고 할 수 있다. 정확히 이야기 하면 환경 기술은 오염 환경 매체에 대한 정확한 지식을 가진 전문가들과 대상 오염 물질을 효과적으로 처리, 제거할 수 있는 관련 기술 전문가들의 역량과 전문성이 합쳐져야만(≒융합되어야만) 하는 기술 분야라고 할 수 있다. 이렇게 추진되는 것이 환경오염 물질의 처리 및 제거 기술 분야의 고도화, 미래화를 효과적으로 실현 할 수 있는 방법론이라고 생각한다.

이렇게 대상 매체와 대상 매체에 높은 효과를 가진 기술 사이에서 환경오염 물질 처리 및 제거 효율을 극대화하기 위한 두 기술의 융합 전략 효과를 극대화하기 위해서는 ‘환경 융합 기술이 최종적으로 추구하는 기술은 환경오염 처리 기술’이라는 기본 축은 반드시 지켜져야 한다. 환경에 적용하기 어려운, 실험실에서는 효과적이거나 실제 오염 환경에 적용되는 순간 효율이 나타나지 않는 환경 융합 기술은 환경 기술이 아니다. 소재와 관련된 기술은 신소재 기술이고 미생물과 관련된 기술 미생물 기술일 뿐, 환경기술은 아니다.

‘나랑 지금 장난하나?’ 그리고 ‘장난 지금 나랑하나?’ 두 가지 문장이 모두 같은 의미이듯 환경융합기술도 다른 기술이 아닌 환경 기술이라는 점을 반드시 기억하고 환경 융합 기술을 개발하는 것이 효과적인 기술 개발 방법이라고 생각한다.

1.3 환경공학을 대표하는 이미지는?

해당 질문에 선뜻 대답을 하기는 매우 어려울 것이다. 가장 먼저 일반적으로 떠오르는 이미지는 오염된 하천, 호수와 늪, 뿌연 대기, 자동차 매연 등 기술보다는 오염된 매체 이미지이다. 이처럼 환경공학기술은 명확하고 쉽게 떠올릴 수 있는 기술 이미지를 찾기 어렵다.



그림 1. 환경 공학 이외의 다양한 공학 이미지 vs 환경 공학 이미지

환경공학기술은 출발선이 ‘응용 기술’, ‘오염 매체에 효과적인 다른 분야 기술의 활용’, ‘오염 대상 매체를 효과적으로 처리하는 기술을 찾아내고 적용하는 방법을 찾아내는 기술’로 정의하는 것이 적절하다고 생각한다.

그렇지만 환경 공학도 공학 기술이다. 그런 환경 공학 가운데 수처리 기술을 예로 들어 보자. 수처리 기술의 출발점은 어디인가? 저자는 토목 공학 기술이라고 생각한다. 수질오염, 대기오염, 폐기물오염 등 다양한 환경 공학 가운데 수처리 기술과 토목 공학 기술, 언뜻 생각하면 어울리지 않는다. 그렇지만 ‘물을 처리하기 위한 첫 출발점은 물을 처리하기 위하여 물이 저장되어야 하는 대형 물 저장고이다’ 대형 물 저장고라는 구조물을 만드는 기술은 토목 공학 기술 가운데 구조물 건설 기술로, 물을 저장하고 특정 반응을 이용한 수질 오염 처리 기술이 수질 오염 처리 기술의 출발선이다.

구조물이 완성되고 난 후, 본격적인 수처리 기술로 완성되기 위하여 토목 공학 이외의 다양한 기술들이 저장되어있는 오염된 물에 적용된다. 오염된 물 처리 분야에서 현재까지 가장 일반적으로 사용되는 기술은 미생물을 이용한 생물학적 처리 기술이다. 미생물만을 고려한다면, 생물학 전문가들이 참여하는 것만으로 기술의 완성이 가능하다고 생각된다. 그러나 다양한 오염된 물의 오염 조건에서 효과적으로 미생물들이 기능을 수행하기 위해서는, 미생물과 하수와의 가교 역할을 할 수 있는 환경 공학 전문가들의 참여가 필수 사항이다.

1.4 환경공학은 타 기술의 적극적 응용 더 나아가 융합이 기본적인 주요 기술개발 전략이다.

앞서 기술했듯이 수질 오염에 대응하는 일반적인 기술은 미생물을 이용한 생물학적 처리 기술이다. 그러나 최근 수질 오염 물질의 다양화, 독성 강도 증가 등의 원인과 처리 대상의 급격한 양 증가로 미생물을 기반으로 한 수질 오염 처리 기술에 한계가 드러나고 있다. 이런 한계성을 극복하기 위한 전략은 미생물을 기반으로 한 기술보다 고효율의 다른 분야 기술을 효과적으로 수질 오염 처리 기술에 적용하는 것이다. 이것이 바로 환경 융합 기술 전략이다.

초기 환경 융합 기술 개발 단계에서는 기존 수질 오염 처리 기술보다 효율적인 측면에서, 기존 기술에서는 달성하기 어려운 고효율 실현이 가능한 다양한 소재, 다양한 공정이 개발되었다. 환경 공학 기술 분야 연구자들과 기술자들은 미래 환경오염에 효과적으로 대응할 수 있는 기반 기술 확보에 대한 큰 희망을 갖게 되

었다. 그러나 개발된 새로운 환경 융합 기술은 실제 수질 오염에 적용하는 과정에서 큰 단점을 발견하게 되었다. 환경 매체에는 다양한 환경 조건이 존재한다는 사실을 간과하고 환경 융합 기술 개발이 진행되어 이런 다양한 환경 조건에서 효과가 급격하게 저감할 수 있다는 사실을 간과했던 것이다. 많은 신소재공학과, 화학과, 화학공학과 연구자들이 오염 매체와 수질 오염 환경 특성을 정확하게 파악하지 않고 단일 오염 물질 그리고 증류수라는 지극히 실험적 상태에서 기술 개발을 진행하여 많은 시행착오가 발생하였다.

02 환경 융합 기술의 가장 효과적인 파트너 = 나노 소재 기술

과거 수처리 기술은 공정 기술(Process Technology)로 강하게 인식되었고 현재도 '환경 공학 기술 = 공정 기술, 공정 최적화 기술'이라는 인식은 강하게 그리고 넓게 자리 잡고 있다. 그러나 최근 들어 오염물질의 다양화, 오염 물질 처리 농도가 ppt(part per trillion) 수준의 극저농도, 난분해성 특성 강화 등의 방향으로 진행되면서 공정 기술로는 해결하기가 어려운 상황이 자주 등장하고 있다.

표 1. 수질 오염 물질의 주요 성상 변화

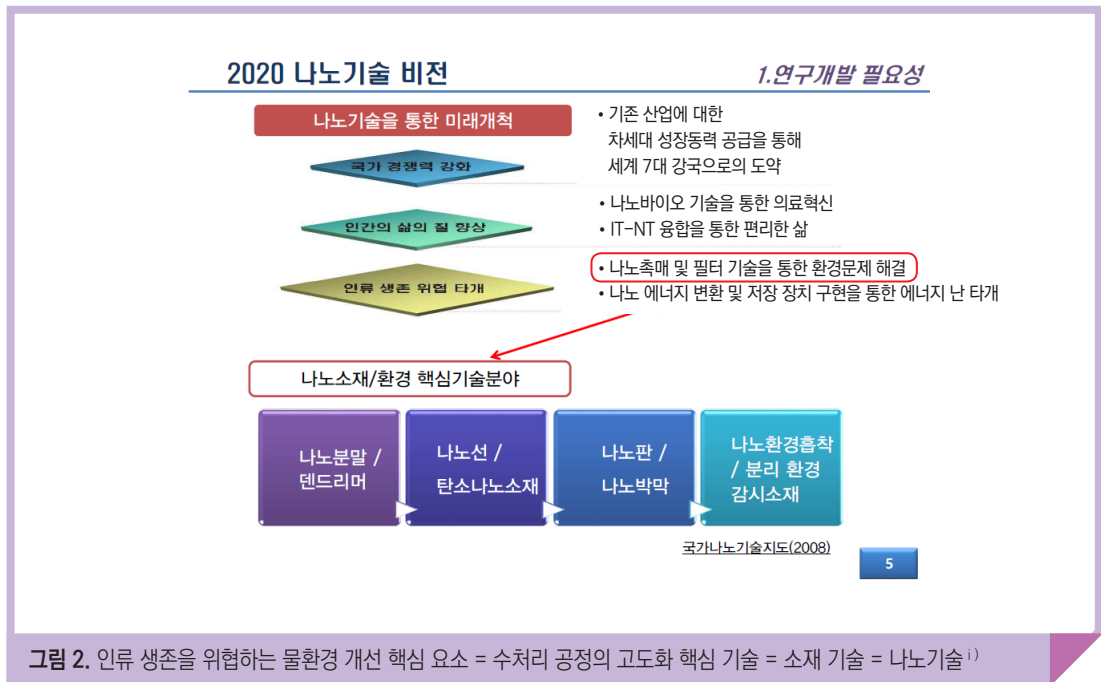
	과거	현재	미래
상징적 오염물질	흙, 건더기*	Organic pollutants**	Emerging pollutants***
오염물질농도	1/10	ppm (1/106)	ppb ~ ppt (1/109-12)
적용 기술	밀리미터 (mm)	마이크로미터 (μm)	나노미터 (nm)

*건더기는 공학적 용어로 현탁 물질(suspended solid)로 표현함.

**유기오염물질로 탄소(C), 질소(N), 인(P)을 중심으로 한 기존 수질오염기준에 규정되어 있는 수질 오염 물질을 의미함.

***신종유해물질로 기존 수질오염기준에 규정되지 않는 수질 오염 물질을 의미함. 대표적으로 항생제를 포함한 의약품이 많이 포함됨.

이런 환경오염 특성의 변화에 따라 환경 기술 분야에서의 공정 기술의 한계를 해결할 수 있는 기술 개발 방법론에 대한 고민이 많아지게 되었다. 이에 대한 효율적인 해결 방법으로 공정의 효율 향상이 기본적인 접근 방법이었다. 공정 효율 향상을 위한 가장 기본적인 접근 방법으로 공정에 사용되는 '소재·부품의 효율을 향상 및 적용되는 단위 공정(unit process)의 효율 향상을 통한 전 공정의 효율 향상'의 방법이 제시되었다. 이런 분위기에 환경 기술의 '고도화 = 환경 공정에 사용되는 소재·부품·단위공정의 고도화'라는 인식이 조금씩 확대되었다.



i) 덴드리머는 Dendrimer로 거대 고분자 물질을 의미함. 고분자 물질과 차별성은 고분자 물질에서 나타날 수 없는 규칙적 분자 배열 특징을 나타냄. 이를 통해 분자량 조절을 통한 기공도 확보가 용이함.

소재 기술이 환경 공학 기술의 한계점을 해결할 수 있는 높은 인식하에 과거 10년 동안 소재 기술 분야의 ‘꽃’이라 할 수 있는 나노 기술(Nano Technology)이 주목을 받게 되었다. 나노 기술은 기존 소재에서는 발현되지 않는 다양한 특성을 보인다. 다양한 나노 특성 가운데 나노 크기 기공(nano pore)과 높은 비표면적(high surface area)은 환경 기술 분야에서 많은 곳에서 활용할 수 있는 특성이다.

국내 수처리 분야 기술 수준은 수처리 관련 다수 연구를 수행한 연구자료써 선진국 대비 약 90% 수준이라고 생각한다. 다음으로 대한민국의 나노 기술 수준은 다양한 자료를 기반으로 판단컨대 저자는 90% 수준이라고 생각한다. 그러면 90%의 수처리 기술 수준과 90% 수준의 나노 기술 수준이 융합을 하면 달성될 수 있는 기술 수준은 어느 정도일까? 저자는 아래 그림을 제시하고 싶다.

즉, 단순하게 산술적으로 90% 기술 수준의 두 가지 기술이 융합되는 시너지는 180% 또는 8,100%라고 생각할 수 있다. 그러나 수처리 기술과 나노 기술을 융합해 본 경험자인 저자는 단순한 산술 계산에 전적으로 동의하기 어렵다. 저자는 아래 그림과 같이 90.9%, 90.1%라는 개인적 의견을 말하고 싶다.

Level of Water Treatment Technology And Nano Technology Convergence of KOREA	Personal Level of Water Treatment Technology And Nano Technology of KOREA
90% + 90% = 180%	90% + 90% = 90.9%
90% - 90% = 0%	90% - 90% = 0%
90% x 90% = 8,100%	90% x 90% = 90.1%
90% / 90% = 1%	90% / 90% = 1%

그림 3. 수처리 기술과 나노 기술의 융합¹⁾

2.1 최근 수처리 기술의 중심 기술 = 분리막 여과(membrane filtration technology)

수처리 기술은 크게 정수처리 기술과 하수처리 기술로 분류된다. 정수처리는 우리가 먹는 수돗물을 만드는 기술이고 하수처리는 우리가 버린 하수를 생태계 부하가 되지 않을 정도로 처리하는 기술이다. 과거 정수처리 분야의 중심 기술은 모래여과(sand filtration)ⁱⁱ⁾ 기술이었다. 모래입자가 만드는 공간을 이용하여 오염물질들을 여과하는 것이 해당 기술이다. 하수 처리 분야는 하수에 존재하는 대부분의 오염물질을 탄소성분을 기본으로 하는 유기물이다. 따라서 이런 유기물을 생물학적 에너지로 활용하는 미생물을 이용한 처리를 기본 메카니즘으로 하는 생물학적 처리ⁱⁱⁱ⁾이다(Biological Treatment).

정수 처리에서 활용되는 주요 특성은 오염 물질을 효과적으로 여과하는 나노 기공이고 하수 처리에서 활용되는 특성은 미생물들의 활성도를 최대화하는 나노 크기의 산소를 공급하는 것이다. 나노 기공 제조 기술의 등장으로 정수 처리 분야에서는 신종 미량 유해 물질의 고효율 처리가 가능하게 되어 먹는 물의 안정성(safety)이 대폭적으로 향상되었다. 나노 크기의 산소 공급 기술은 수중에 산소를 공급하는 산기관(air diffuser)에 나노 기술 접목을 유도하였다. 나노 크기 산소를 수중에 공급할 수 있는 나노 기술이 접목된 산기관이 등장하게 되어 미생물의 활성도를 올리고 미생물 유지 농도를 향상 시킬 수 있게 되어 과거에 비하여 단위 시간, 단위 부피에 오염 물질을 처리할 수 있게 되었다. 이로 인해 하수처리장의 면적 저감, 수생태계 오염 부하 저감 등의 효과를 달성할 수 있게 되었다. 나노 기공 기술은 하수처리에도 기여하여 하수처리 효율을 대폭적으로 향상 할 수 있게 되었다. 최종 처리된 하수는 처리된 물과 미생물을 분리하는 기술이 필요하다. 이 단계에서 나노 기공 분리막을 적용함으로써 물과 미생물을 분리하는 시간과 공간을 대폭적으로 감소할 수 있게 되었다. 이처럼 하수 처리 분야에서 나노 기술이 접목됨에 따라 오염 물질 처리 효율을 대폭적으로 향상함으로써 수생태계의 오염 부하(load)을 크게 저감할 수 있게 되었다. 이처럼 나노 기술이 수처리 분야에 활용되면서 수처리 기술은 과거 기술에서 미래 기술로 업그레이드되는 계기를 마련하였다.

ii) 모래 여과 공정(sand filtration process)는 지하수가 만들어지는 과정을 공정으로 구현한 기술로 역사적인 영국의 페스트 사건에 효과적으로 대응함으로써 약 150년 이상 정수처리 공정의 중심 기술로 자리잡아 왔음.

iii) 생물학적 처리기술은 세포 구성 5대 성분인 탄소, 수소, 산소, 질소, 인 공급원을 하수로 활용함으로써 미생물의 신진대사활동을 최대화하여 수질 오염 성분인 세포 구성 5대 성분을 제거하는 기술임.

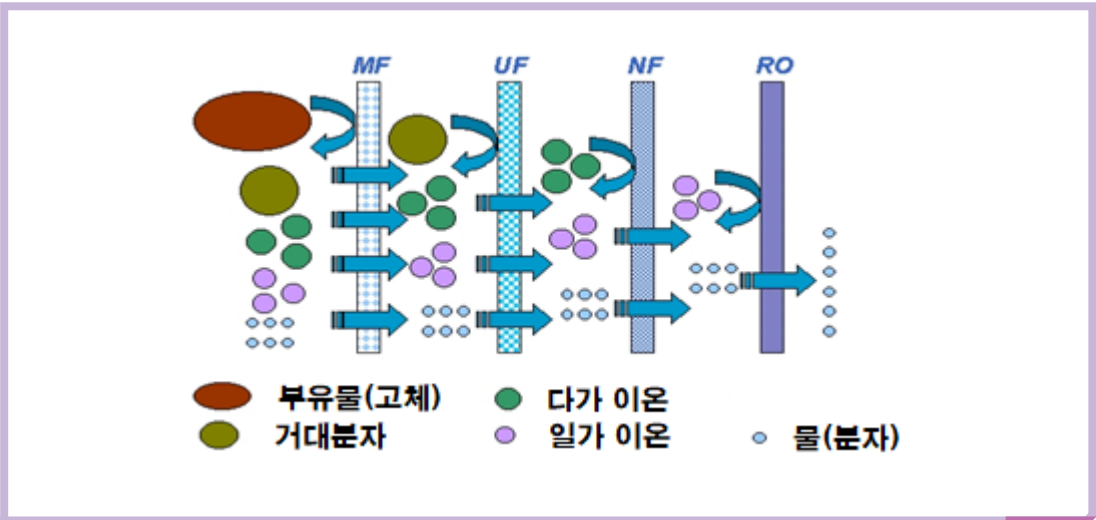


그림 4. 분리막 종류 및 주요 제거 대상. MF:Micro Filtration(정밀여과), UF:Ultra Filtration(한외여과), NF:Nano Filtration(나노여과), RO:Reverse Osmosis(역삼투)

2.2 난분해성 물질의 고효율 처리를 위한 산화, 흡착 공정 필요성 증가

수처리 기술 분야에서 기술의 업그레이드 및 미래 기술 개발의 필요성이 증가하게 된 배경은 신종 미량 유해 물질(emerging trace toxic pollutants)의 등장 때문이다. 대표적인 대상 물질로는 항생제 등을 포함한 의약 물질이 있다. 해당 물질은 나노 분리막으로 효과적인 수중 매체와 분리는 가능하나, 원천적으로 분해하여 무(無)의 상태가 되는 것은 불가능하다. 이런 분해 과정에서 효율성을 극대화하기 위한 기술로 개발된 공정이 고도산화공정^{iv)}(AOP: Advanced Oxidation Process)이다. 고도산화공정의 대표적인 기술은 염소, 오존과 같이 높은 산화력의 산화제를 사용하는 것이다. 그러나 해당 기술은 특정 유해 물질을 수중에 주입한다는 거부감이 항상 존재한다. 이런 거부감을 일정 수준 저감하기 위하여 약품이 아닌 물질을 사용하는 공정이 개발되었고 그 대표 기술이 촉매를 사용하는 기술이다.

iv) 고도산화공정(Advanced Oxidation Process)는 기존의 산화공정보다 산화전위가 높은 산화제를 이용하여 유기오염물질을 보다 효과적으로 분해하는 기술로 대표 기술로 오존(O₃), 자외선(UV)등이 있음.

환경 분야에서 가장 일반적으로 사용되는 촉매는 광촉매(photocatalyst)이다. 광촉매 산화 반응은 무독성의 TiO_2 를 사용한다는 안전성으로 인해 다양한 적용 기술이 활발하게 연구 개발되고 있다. 첫 번째 광촉매 기술의 효율 향상을 위한 핵심 기술은 높은 비표면적을 확보하는 기술이다. 높은 비표면적으로 인해 오염물질과의 반응이 가능한 표면이 확대됨으로써 반응 효율을 대폭적으로 향상시킬 수 있다. 비표면적 확대를 위하여 나노 기술이 융합된 다양한 TiO_2 입자 제조와 관련된 연구가 진행되고 있다. TiO_2 입자 연구의 두 번째 주방향은 광촉매 활성에너지를 자외선이 아닌 가시광선에서 활성화가 가능한 입자의 개발이다. 다양한 연구 결과가 보고되고 있으며 그 결과 가운데 하나가 입자 크기를 나노 스케일로 제조함으로써 활성화 메커니즘이 가시광선에서 작동된다는 연구 결과도 보고되어 있다.²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾

정수처리 분야에서 신종 미량 유해 물질 외, 주 처리 대상 물질은 휘발성 맛·냄새 물질이다. 해당 물질은 휘발 특성이 있지만 정수 처리 공정에서는 보다 빠른 시간에 처리되어야 하는 제약이 있다. 이때 적용되는 대표 기술이 흡착 공정(adsorption process)이다. 흡착 공정은 수중의 오염 물질을 흡착제 표면으로 이동시키는 메커니즘을 이용하는 공정으로 고효율 흡착제는 고비표면적(high surface area) 특성이 최우선적으로 필요하다.

입자의 고비표면 특성을 나타내게 하는 최우선의 방법은 입자의 나노화 기술이다. 나노 기술은 자연 모사를 통하여 인위적으로 탄생한 기술영역으로, 자연계에서는 발견되기 어려운 다양한 특성을 확보할 수 있다. 비표면적 확대 방법의 두 가지 중요 기술은 기공 크기의 나노화 그리고 균일한(uniform size) 기공 분포이다. 나노 기술은 균일한 나노 기공을 균질하게(uniform) 존재할 수 있는 조건을 제공할 수 있다. 따라서 자연계에서 나타나는 비균일한(diverse sized) 기공 분포와 비균질한(ununiform) 조건에 비하여 비표면적이 대폭적으로 증가하게 된다.

이처럼 수처리 공정에서 나노 기술의 적용을 통한 고비표면적 확보 기술은 생태계의 오염 부하 저감 및 먹는 물의 안전성을 확보하는데 크게 기여하고 있다.

03 나노 물질의 고성능 vs 나노 물질의 위해성

지금까지 나노 기술이 활용되고 접목됨에 따라 좋은 점, 효과적인 점에 대하여 많은 이야기를 했다. 세상 모든 이치는 좋은 점이 있으면 나쁜 점이 있는 것이다. 나노 기술이 수처리 기술에 접목되면 과연 좋은 점만 있는 것일까?

최근 나노 기술의 위해성(risk)과 관련된 연구 결과가 많이 보고되고 있다.

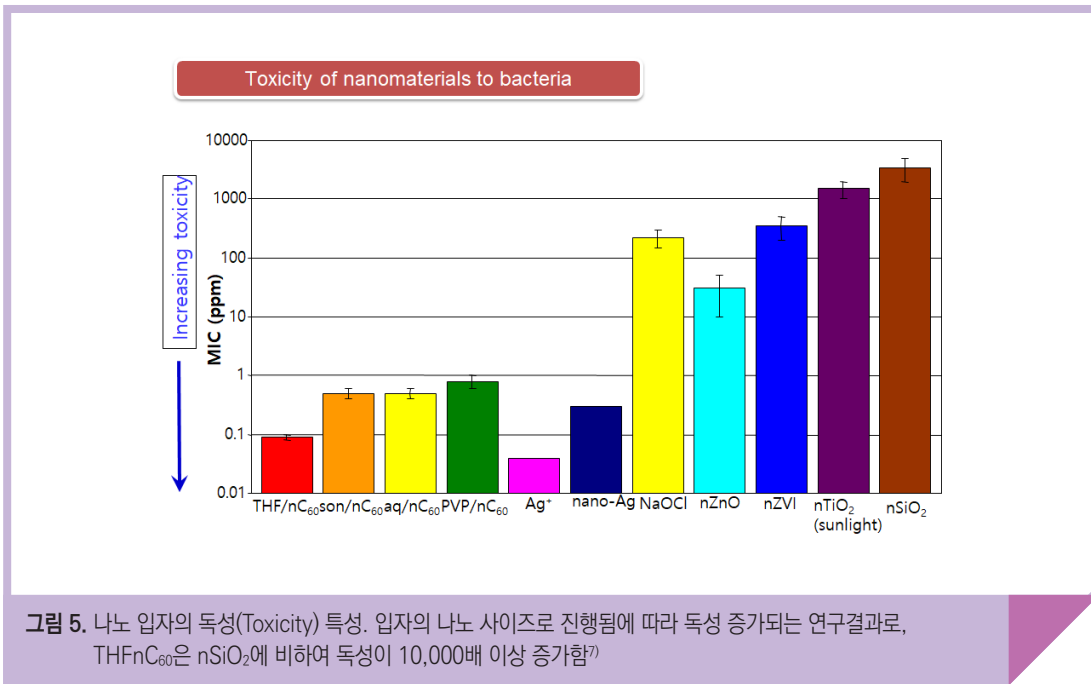


그림 5. 나노 입자의 독성(Toxicity) 특성. 입자의 나노 사이즈로 진행됨에 따라 독성 증가되는 연구결과로, THF/nC₆₀은 nSiO₂에 비하여 독성이 10,000배 이상 증가함⁷⁾

나노 기술의 위해성은 어떻게 나타나는 것일까? 해답은 간단하다. '파악할 수 없다(identified). 보이지 않는다(invisible)'는 이유이다. 나노 물질은 기본적으로 인체에 흡수되거나 통과할 수 있는 크기이다. 이로 인해 인체에 다양한 피해가 야기 될 수 있다는 연구결과가 보고되어 있다.

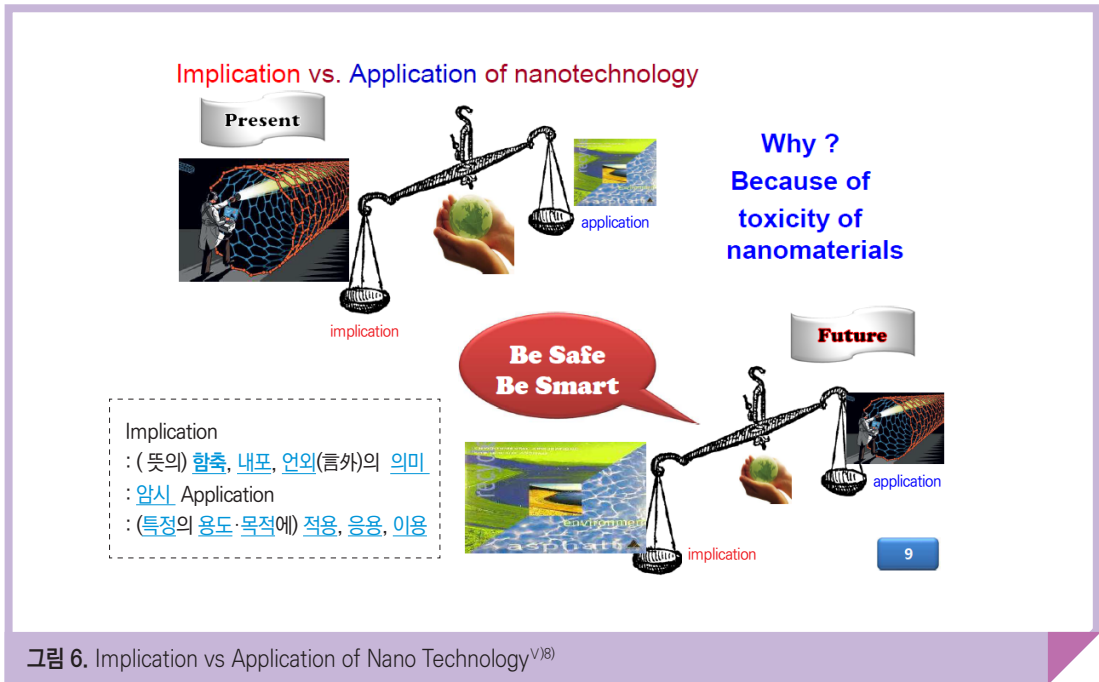


그림 6. Implication vs Application of Nano Technology^{v)8)}

그러나 나노 물질의 기술적 효용성 및 효율성을 위해성으로 인해 과감히 포기하는 것은 과학자, 기술자들에게는 매우 어려운 유혹이다. 과학 기술자들은 나노 물질의 효용성을 유지하면서 인체에 대한 위해성을 최소화 할 수 있는 방법에 대한 고민을 시작하였다. 찾은 해답은 나노 입자의 고정화(fixation)였다. 그러나 입자의 고정화는 극단적으로 입자 표면의 50%를 저감해야 한다는 기술적인 아쉬움이 존재한다. 이를 해결하기 위한 방법으로 나노 입자를 준나노(semi nano) 물질에 고정화, 입자 형태 이외의 형태를 제조하여 적층(lamination)하는 방법 등이 등장하였다. 해당 기술을 적용함으로써 고정으로 인한 나노 입자 표면의 무용화를 최소화할 수 있게 되었고 나노 입자의 확산 및 분산으로 인해 야기될 수 있는 인체의 위해성을 최소화할 수 있게 되었다.

v) 현재 나노 기술의 응용을 통하여 기존 기술에서는 달성할 수 없는 효율을 달성하게 됨으로써 응용에 대한 활발한 연구가 진행되고 있음. 미래에는 나노 기술의 응용보다는 나노 기술이 환경에 유출됨으로써 나타나는 위해성에 대한 연구가 활발하게 진행될 것으로 예상하고 있음.

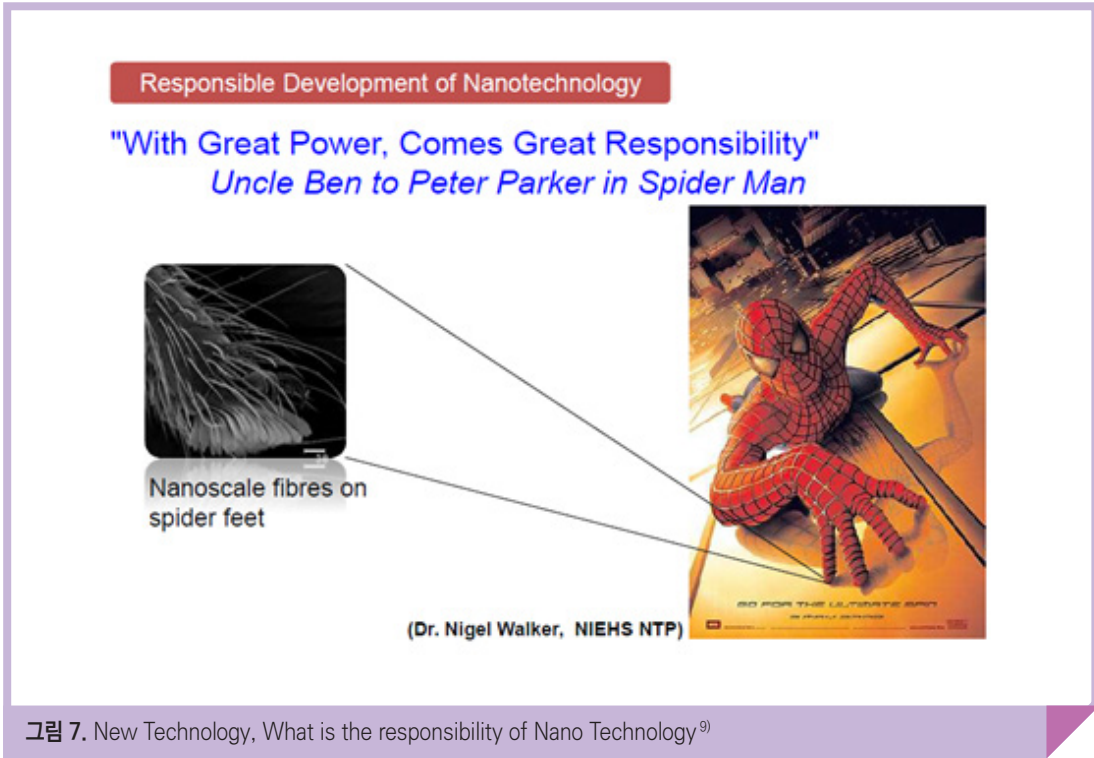


그림 7. New Technology, What is the responsibility of Nano Technology⁹⁾

04 환경 융합 기술 vs 융합 환경 기술

4.1 탄생 배경

환경부는 환경 수질 기준을 결정하고 해당 기준에 따라 환경오염을 엄격하게 관리하고 배출 매체를 규제하는 부처이다. 따라서 환경오염의 개념이 시간과 함께 변화되면 규제도 동시에 변화되어야 한다. 환경에 대한 국민의 기대치는 점점 높아지고 주변 환경의 안전성에 대한 요구도 계속 증가하고 있다. 또한 환경오염 물질 역시 시간이 변화됨에 따라 미량화, 난분해성, 맹독성으로 변화되면서 기존 처리 기술에서는 명확한 처리 한계가 나타나고 있다. 이런 배경 하에 2009년 환경부에서는 미래 환경오염 문제에 효과적으로 대응하

기 위한 방향으로 환경 이외의 기술과 환경 기술의 융합 방안을 도입하게 되었다. 융합이 환경 기술에 도입될 수 있었던 가장 큰 배경은 앞에서 언급했듯이 환경 기술은 '다양한 기술을 오염된 환경 매체에 적용하여 매체에서 오염 물질을 분리·제거하는 기술'의 성격이 높기 때문이다. 기존 기술에서 한계가 나타났을 때, 새롭게 등장한 기술 활용을 통하여 오염 물질에 효과적으로 대응할 수 있다면 환경 기술의 목적은 충실하게 달성하는 것이기 때문이다.

환경부에서 환경 융합 기술이라는 개념 도입을 적극 검토한 2009년, 기술 분야는 NT(Nano technology), BT(Bio technology), IT(Information technology), CT(Culture technology), ST(Space technology), ET(Environment & Energy technology), GT로 분류되는 시기였다. 새롭게 분류된 6가지의 기술과 환경 기술을 융합함으로써 기존 기술의 한계를 해결하는 방안을 모색하고자 하는 것이었다. 저자의 연구팀은 환경 기술 가운데 수처리 기술에 나노 기술을 적용하는 방법을 선택하였고 흡착제, 촉매를 개발 대상 매체로 선택하고 융합 전략을 모색하였다.

4.2 핵심 융합 전략

해당 연구팀은 한국과학기술연구원(KIST)을 중심으로 한 '기능성 나노 흡착/촉매 소재 기반 친환경 공정 플랫폼 개발'이라는 목표를 설정하고 연구팀을 구성하였다. 기술 개발 전략은 수처리 중심의 한국과학기술연구원 연구 그룹과 흡착제와 촉매에 적용할 수 있는 나노 기술을 보유하고 있는 연구 그룹과의 융합 구성을 통한, 나노 기술 기반 흡착제, 촉매 합성 기술을 개발하고 최종적으로 수처리 공정을 개발하는 것이었다.

연구팀의 구성 전략은 수처리 기술과 나노 기술의 융합 전략을 효과적으로 실현하기 위하여 선택과 집중 전략을 기반으로 하였다. 이를 통해 수처리 기술은 한국과학기술연구원이 전적으로 담당하고, 소재 개발은 소재 전문 기관으로만 구성한다는 것이었다.

4-2-1 기술의 융합이란? : 융합(融合) vs 복합(複合) vs 통섭(統攝)

2009년 국가과학기술위원회 안건 중에 나노 기술 발전 전략 관련 안건이 있다. 해당 회의 문서에서 융합 전략을 다음과 같이 정의하고 있다. '이종간(異種間) 기술을 접목하여 기존 기술에서 획득할 수 없는 높은 성능의 기술 향상의 시너지 효과를 획득하는 전략'




저자는 해당 문구에 대한 의미를 생각하기 전에 제목에 기술되어 있듯이 융합, 복합, 통섭의 의미를 집고 원고를 진행하고 싶다. 가장 먼저 표준국어대사전에 명시된 사전적 의미를 알아보자.

표 2. 융합, 복합, 통섭의 국어 사전적 정의¹⁰⁾

융합 (融合)	1. 다른 종류의 것이 녹아서 서로 구별이 없게 하나로 합하여지거나 그렇게 만들. 또는 그런 일. 2. <심리> 둘 이상의 요소가 합쳐져 하나의 통일된 감각을 일으키는 일. 정신 분석에서는 생(生)의 본능과 죽음의 본능을 동시에 충족시키려는 충동을 이른다.
복합 (複合)	두 가지 이상이 하나로 합침. 또는 두 가지 이상을 하나로 합침.
통섭 (統攝)	전체를 도맡아 다스림.

설명된 문장을 읽어보면 쉽게 이해할 수 있는 독자는 많지 않을 것으로 생각한다. 저자는 국어사전에 나오는 의미를 그동안의 융합 관련 연구를 수행하면서 나름대로 적절한 영어 단어를 다음과 같이 떠올려 보았다.

표 3. 융합, 복합, 통섭의 연구자 입장에서의 개념

융합	Convergence / Fusion	
복합	Mix	
통섭	Consilience	<p>통섭 (Consilience)</p>  <ul style="list-style-type: none"> • '서로 다른 것을 한데 묶어 새로운 것을 잡는다' • 'consilience' = 'jumping together'. • '서로 다른 현상들로부터 도출되는 귀납들이 서로 일치하거나 정연한 일관성을 보이는 상태' • 사회생물학자 에드워드 윌슨 • 그에 대한 비판 ...

저자가 나름 생각한 각 단어의 의미를 설명한 영어 단어가 적절하지 않은 의견일수도 있다. 대한민국에서 융합은 표처럼 영어로 convergence 와 fusion 두 가지로 분류된다. 한글은 둘 다 융합이지만 영어적 의미는 다소 차이가 있다. Convergence는 ‘수렴’이라는 뜻으로 많이 사용하고 fusion이 ‘융합’이라는 뜻으로 많이 사용된다. 미국에서는 융합을 convergence 라고 많이 사용하고 fusion은 일본에서 비롯된 의미라고 저자는 파악하고 있다. Convergence는 대한민국 공업 수학 번역본에 ‘수렴’이라고 해석되어 있다. 저자는 융합의 참된 의미는 convergence가 더욱 적절하게 의미하고 있다고 생각한다.

‘수렴’이라는 뜻을 생각하면서 저자는 ‘서로 다른 두 가지 분야의 기술이 과연 하나의 기술로 convergence (수렴)이 가능할까?’라는 의문을 쉽게 지울 수 없다. 그렇지만 최근 5년간 기술 개발의 주된 틀은 융합이 자리 잡고 있다. 더 나아가 기술간 융합의 틀에서 벗어나 ‘인문학과 과학 기술간 융합’이라는 틀까지 확대되고 있다. 따라서 기술 개발에 있어 융합이라는 방법론을 벗어나기는 어렵다고 생각한다.

4-2-2 융합이라는 기술 개발 전략을 어떻게 추진해야 할 것인가?

저자는 융합 방법론을 활용한 기술 개발 경험을 바탕으로 기술 융합 전략의 필수 항목은 ‘하나의 정신’과 관련된 연구그룹의 통일성이라고 생각한다. 저자가 생각하고 있는 하나의 정신에 대한 개념은 ‘본인 보유 기술 프레임은 유지하면서, 개발 기술의 개발 방향, 활용과 관련된 프레임은 환경 기술이라는 프레임에 넣어야 한다.’이다.

환경 융합 기술 초기, 환경 공학 이외의 다양한 연구자들이 연구 개발에 참여하였다. 화학, 물리, 기계, 화공, 미생물 등 다양한 학문 분야에서 참여하였는데 그 이유는 환경 공학이 응용 공학(applied engineering)이라는 특성이 있기 때문이라고 생각한다. 본인들이 전문성을 가지고 있는 기술이 환경오염 물질을 분해하고 제거하는 능력이 있다면 본인들의 기준으로 환경 기술이라고 판단할 수 있다고 생각한다. 오염 물질은 기본적으로 분자량, 분자 구조 등의 차이는 있지만 탄소 결합을 기본으로 하는 유기 화합물이기 때문에 분해 반응을 유도할 수 있는 기술이라면 환경 공학 측면에서 말하는 ‘유기 오염 물질 제거’의 목표를 달성할 수 있다.

이런 배경으로 환경 공학자들 입장에서는 접근하기 어려운 나노 기술 기반의 다양한 촉매 및 흡착제, 생명 공학 기술 기반의 신종 미생물 동정 및 분류, 정보 통신 기술 기반의 인공 지능형 유지 관리 기술 등 기존 환



경 공학 연구자들 입장에서는 도전하기 어려운 소재, 미생물, 운영 관리 시스템 등의 기술이 추진되었다. 이를 통해 ‘기능성 나노 흡착/촉매 소재 기반 친환경 공정 플랫폼 개발’ 연구팀은 환경부 연구개발 사업 가운데 최우수 사업으로 선정되는 등 큰 성과를 이루었다. 이유는 나노 기술의 활용, 바이오 기술의 활용, 정보 통신 기술의 활용 등으로 환경 공학 분야에서 접근하기 어려운 High Impact Factor를 갖는 연구 논문 성과를 달성 할 수 있었기 때문이다. 이를 통해 매우 성공적인 사업의 기반이 구축될 수 있었다.

그러나 이렇게 새로운 환경 공학 이외의 연구자들의 참여로 기존의 틀에서 달성하기 어려운 연구 성과는 달성하였지만 참여한 연구자들 의식에는 본인이 개발한 기술이 참된 환경 기술이라고 생각한 연구자는 많지 않았다. 물론 환경에 대한 이해와 환경 기술이 갖추어야 할 지식을 사전에 파악하고 도전한 타 분야 연구자들도 있었고 해당 연구자들은 환경이라는 매체를 고려한 연구 성과물을 도출하였다. 그렇지만 화학자는 화학 기술, 기계공학자는 기계공학기술, 신소재공학자는 소재 기술 이라고 생각했지 환경 기술이라고 생각하지는 않았다. 해당 연구자들은 환경이라는 매체에 대한 정확한 파악이 부족했기 때문이었다.

이런 상황에서 환경 공학을 오랫동안 경험해 온 연구자들 입장에서는 높은 IF 논문 성과를 쉽게 받아들이기 힘들었다. 이유는 환경 공학 연구자들이 대상으로 하는 분야와 환경 공학 이외의 과학자들이 대상하는 환경 분야는 너무 큰 차이가 있었기 때문이다.

극단적인 예로 나노 소재 효율이 기존에 비하여 10배 이상의 결과 발현에서 환경 공학 이외의 연구자들은 증류수, 단일 특성^{vi)}의 오염 성분, 비이커 처리 용량이라는 조건이었던 반면, 환경 공학 연구자들은 현상 하수, 다양한 특성의 오염 성분, 대용량(100,000톤/일)의 조건이었다. 소재의 경우, 소재 필요량에서 환경 공학자들은 수십 kg 수준이고 환경 공학 이외의 연구자들은 수 mg 수준이었다.

vi) 증류수에 수질오염물질 1종을 주입한 상태로, 일반적으로 환경공학 수처리 연구는 1종의 오염 물질이 아닌 헤아릴 수 없는 오염물질이 존재하는 조건에서 실험을 진행함.

이런 다양한 관점에서의 큰 시각 차이는 좁히기 매우 힘든 사항이었다. 극단적인 예로 나노 기술 기반 촉매 소재 합성이라는 세부 연구팀의 결과물을 실제 하수처리 공정에 적용하기 위하여 나노 소재팀으로부터 공급되는 소재량은 수 mg 수준이다. 환경 공학 기술자들은 최소 수 kg을 기대하고 있는 상황이었다.

이런 큰 생각차로 인한 오류를 최소화하기 위하여 환경 융합 기술 개발 사업은 1단계 2년, 2단계 3년의 체제로 시작하였다. 이런 차등화 전략은 매우 효과적인 계획이었다고 생각한다. 1단계를 마치면서 약 40%의 연구진 과제가 종료되었고, 실제 환경오염 공정에 안정적으로 적용되고 안정적인 효율을 유지할 수 있는 소재를 포함한 기술들이 마지막까지 진행되었다.

이처럼 환경 융합 기술이 6T를 포함한 미래 기술과 환경 기술이 융합됨으로써 큰 기술적 시너지 효과가 발생할 수 있다는 것은 지극히 이상적인 내용이었다. 그렇지만 환경 공학 기술 분야에서는 미래 기술의 환경오염 물질 제거에 필요성을 크게 느끼고 있었기에 최소한의 융합 가능성이 있는 기술과의 융합을 도모할 수 있었다. 이처럼 환경 융합 기술의 필요성, 그리고 미래 환경오염 대응에 효율성을 고려하여 융합이 추진된다면 최우선적인 사항은 환경 공학 이외의 연구자들의 정신 융합이 필요하다고 생각한다.

환경 융합 기술이 성공적인 환경 기술이 되기 위해서는, 세부적인 융합 대상 기술들의 프레임은 유지하되 융합 프로그램에 포함되어 있는 연구자들은 최종 기술이 나노 소재 기술이 아닌 환경 공학 기술이 되어야 한다는 의식의 융합이 최우선적으로 되어야 한다고 생각한다. 의식의 융합이 전제조건이 되지 않는다면 진정한 환경 공학 기술이 완성되기 어렵다고 생각한다. 따라서 기술의 융합이 성공적으로 완성되기 위해서는 최종 추구해야 하는 기술을 확실하게 인식하고 본인들의 연구 분야가 최종 달성 기술이 추구하는 목표에 효과적으로 달성할 수 있는 지를 항상 고민하고 수정하는 것이 최우선적으로 필요한 사항이라고 생각한다. 이를 효과적으로 진행하기 위해서는 통합 연구 책임자의 리드가 매우 중요한 기술 개발 성패의 요소라고 생각한다.

또 하나 기술 융합에 가장 필요한 사항은 상대방의 기술에 대한 관심을 유도하는 것이다. 이는 세부 참여 연구자들이 최종 추구 기술의 효율적 융합 방법을 찾아내고 더욱 많은 고민을 할 수 있는 중요한 항목이라고 생각한다. 세부 연구자들 사이에서는 관심을 갖지 않더라도 최종 개발 기술 책임자가 추구하는 환경 기술에 대해서는 지속적인 관심을 갖고 책임자와의 지속적인 교류가 유지될 수 있도록 해야 한다.

05 환경 융합 기술 사업에서 나노 소재 기술과 수처리 기술과의 융합 사례

5.1 사업 전략

본 사업은 나노 기술을 수처리에 적용하는 기술 개발을 목표로 과제가 시작되었다. 연구팀 구성을 위하여 나노 소재 합성 전문가들과의 협의를 통하여 참여 연구진들을 선발하였고, 기술의 최종 목표는 ‘신중 미량 유해 물질 고효율 처리를 위한 고도 산화 공정 개발’, ‘나노 기술 기반 중금속 폐수에서 유가 중금속의 고효율 회수 공정 개발’, ‘분말 형태의 합성 나노 소재의 위해성을 최소화하기 위한 나노 물질의 고정화 방법 개발’ 세 가지로 결정하고 추진하였다.

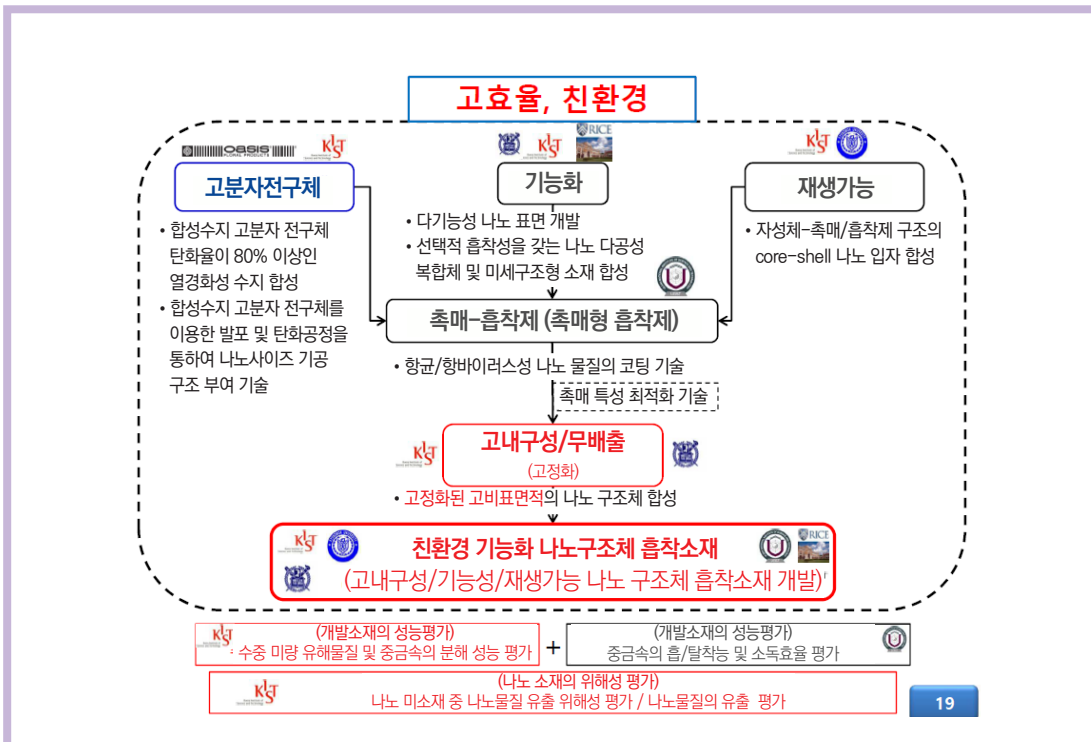


그림 8. 환경융합기술개발사업 한국과학기술연구원 주관 연구팀 구성

연구 사업 출발과 동시에 참여 연구진 모두에게 최종 달성 기술이 나노 소재를 기반으로 하는 ‘환경 기술’이라는 점을 다양한 회의를 통하여 주지하였다. 반면 개별 연구자들의 전문성이 충분히 확보된 분야의 연구는 개인적 기술 프레임을 유지하였다. 개별 연구 프레임이 환경 기술이라는 최종 목표에 효율적으로 도달하기 위한 방법론 개발은 연구 책임자의 몫으로 결정하였다. 1단계 출발 시, 추진 체계는 다음과 같다.

연구팀의 기본적인 방향은 개발 소재의 환경 적용성 평가 및 공정 개발을 제외한 소재 개발팀에게 독립성을 부여하는 것이었다. 소재 개발의 중심 방향은 1)신규 나노 물질 합성, 2)표면적 확대 이외의 다기능 부여, 3)나노 물질의 유출을 최소화하고 경제성 확보를 위한 재생 기술로 구성하였다. 추진 체계처럼 명확한 환경 융합 기술이라는 점을 고려하여 최종 목표는 환경 기술 가운데 수처리 기술이라는 점을 명확히 하여 “친환경 기능화 나노구조체 흡착 소재 개발”로 설정하였다. 각각의 구성원은 수처리와 관련된 연구 경험은 없지만 나노 소재 합성과 관련된 연구 분야에서는 선도적 수준의 연구자들로, 도전적 구성원들로 계획하였다.

5.2 ‘합성(공급) 가능한 양’ vs ‘필요한 양’

〈그림 8〉의 구성 체계에서 알 수 있듯이 나노 소재의 지속적 공급과 개발 소재의 적용을 통한 수처리 공정 개발의 순환적 연구 방법을 진행하였다. ‘고분자 전구체, core-shell 나노 입자 합성 등을 포함한 신소재 합성과 공급 그리고 신소재가 적용된 고도 수처리 공정 개발’ 구성 체계만을 보았을 때는 이상적인 융합 연구 구성 체계이다. 그렇지만 이 과정에서 융합 연구 분야에서 발생할 가능성이 높은 문제를 파악하게 되었다. 바로 제목 그대로 물질 합성 연구 분야에서 합성(공급) 할 수 있는 최대 양과 수처리 공정을 구성할 수 있는 최소한의 양 측면에서 scale 차이를 극복해야 하는 문제였다. 즉, 공급 가능한 최대량은 수 mg 단위이고 필요한 최소량은 수십 kg 단위라는 큰 인식의 차이가 발생하였다. 이 문제 대하여 다양한 해결방안을 찾기 위한 두 연구 그룹의 노력이 진행되었고 결론적으로 합성 소재의 나노 특성을 일정 수준까지 저감하는 방법으로 접근하였다. 즉, 수처리 공정에 필요한 수질 조건을 맞추기 위한 최소 효율 특성의 나노 기술 기반 소재를 합성하는 방법을 선택하였다. 이를 통하여 실험실에서 확보된 합성 조건을 바탕으로 양산화 공정이 확보된 소재 합성 공정에서 수질 기준을 맞출 수 있는 소재를 대량으로 합성하여 1톤/day 처리 용량의 수처리 공정을 완성하였다. 해당 공정은 기존 동일 공정에 비하여 효율이 높게는 2.7배까지 향상되는 처리 효율을 달성하는 것을 관찰하였다.

5.3 나노 촉매 및 나노 흡착제 중심의 수처리 기술 개발

앞에서 언급했듯이 미래 환경오염은 신종 미량 유해 물질이 중요 이슈로 자리 잡을 것으로 생각한다. 따라서 나노 기술을 활용한 고비표면적 확보 신종 미량 유해 물질 고효율 처리 가능 촉매 개발을 수행하였다. 그리고 나노 물질의 위해성 문제에 선제적으로 대응하기 위하여 나노 물질의 고정화 기술에 대한 연구도 포함하였다.

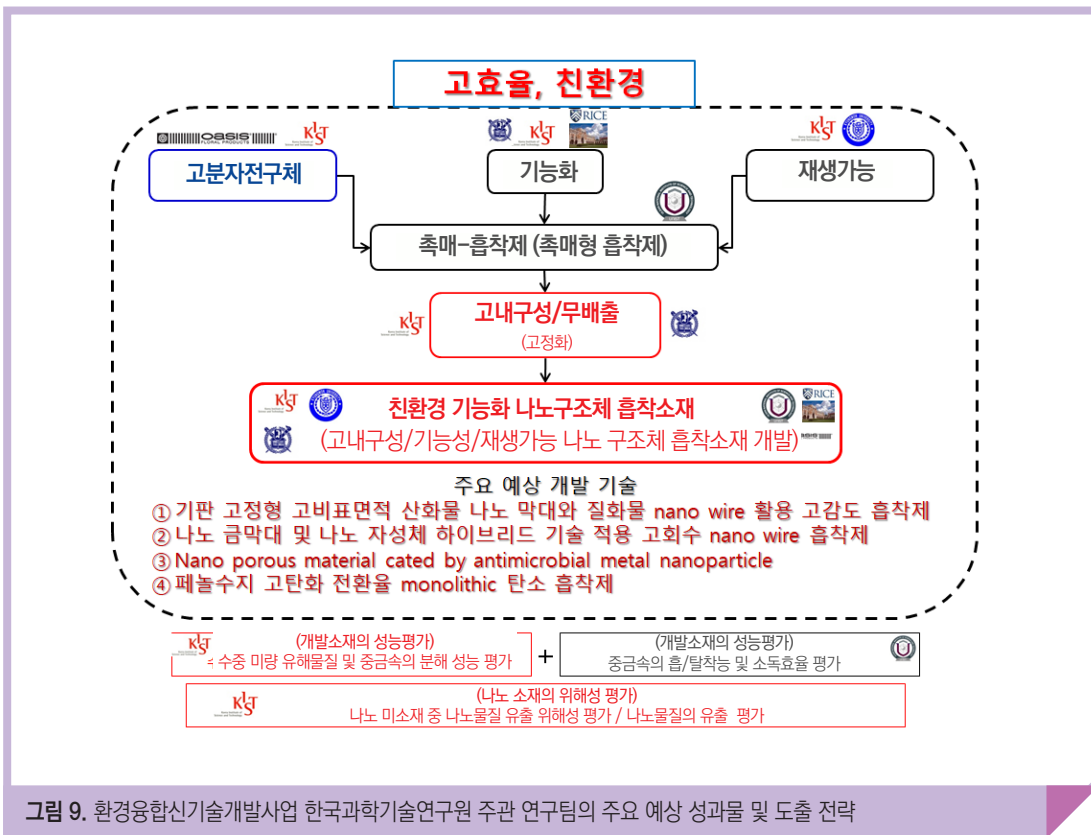
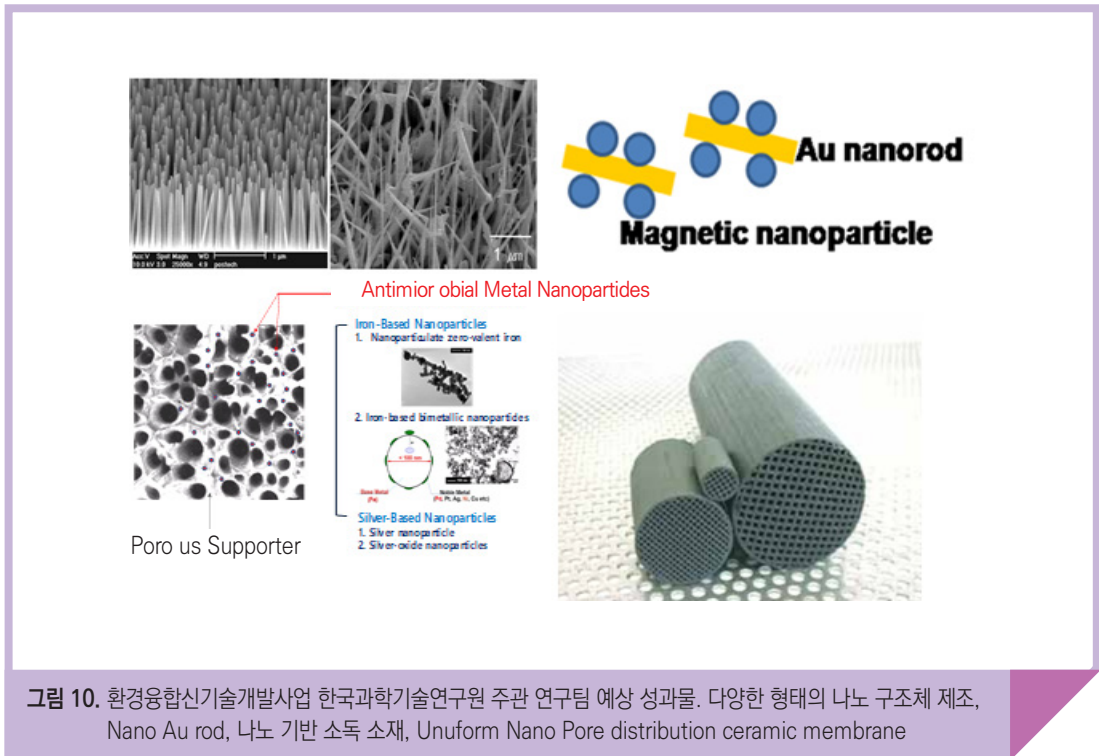


그림 9. 환경융합신기술개발사업 한국과학기술연구원 주관 연구팀의 주요 예상 성과물 및 도출 전략

또한 최근 오염 대응 관련 기술의 흐름은 ‘단순 처리’에서 ‘폐수 및 하수로부터 효율적인 유용 자원 성분의 회수’에 대한 개념으로 빠르게 확산되고 있다. 본 과제에서는 이런 흐름에 효과적으로 대응하기 위하여 다양한 중금속 및 유기 성분이 존재하는 중금속 폐수에서 유기(有價) 중금속을 폐수로부터 효과적으로 분리하고 제거 할 수 있는 흡착제 개발을 수행하였다.



이처럼 본 연구에서는 나노 소재 기술을 기반으로 하여 나노 촉매를 활용한 고도 산화 공정, 그리고 자원 순환형 개념이 도입된 특정 중금속 성분에 대한 고선택형 나노 흡착제 활용 중금속 폐수 처리 공정과 관련된 연구를 수행하였다. 연구가 진행되는 동안 1단계에서 실제 수처리 공정에 적용 가능성이 낮은 소재는 1단계에서 '원천 기술 확보 수준'에서 과제를 마무리 하였다. 이후 2단계를 시작하면서 실제 수처리 공정에 적용할 수 있는 소재를 중심으로 소재 양산 업체와 공동으로 소재 양산화 기술과 함께 공정 개발을 병행하며 최종적으로 소재 양산화 공정과 수처리 공정 개발을 완성하였다. 지금부터 1단계 원천 기술 개발과 2단계 실용화 기술 개발로 구분하여 주요 개발 성과물에 대한 기술 소개와 결과물을 소개하겠다.

5.4 1단계 원천 기술 개발

5-4-1 Nano rod 형태의 그래핀 옥사이드 기반의 광촉매 개발 (서울대 이규철 교수)

다양한 형태(rod, needle 등)의 CNT(Carbon nanotube), Graphene Oxide 합성 기술을 보유하고 있는 서울대 팀에서는 수처리에서 사용되는 산화철(Fe_2O_3)과 이산화티타늄(TiO_2)을 다양한 나노 형태로 합성하여 기존의 입자 크기에서는 확보하기 어려운 넓은 비표면적 확보에 대한 기술 개발을 진행하였다. 넓은 비표면적을 확보함으로써 반응 속도 및 반응 효율을 향상을 시도하였다.

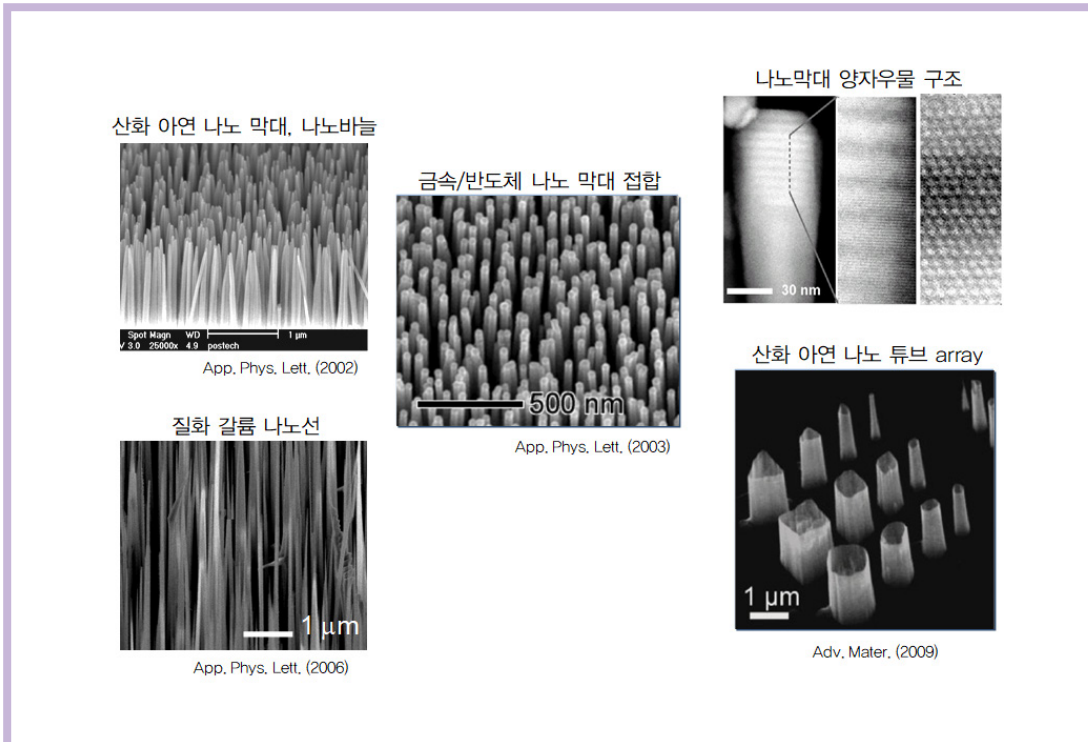


그림 11. 다양한 형태의 나노 구조체^{vii)}

vii) 수처리에 적용되는 담체(media) 표면을 나노 형상화하여 표면적을 최대화하고 다기능화를 위한 담체 표면에 다양한 형태의 나노 구조체 도입 기술

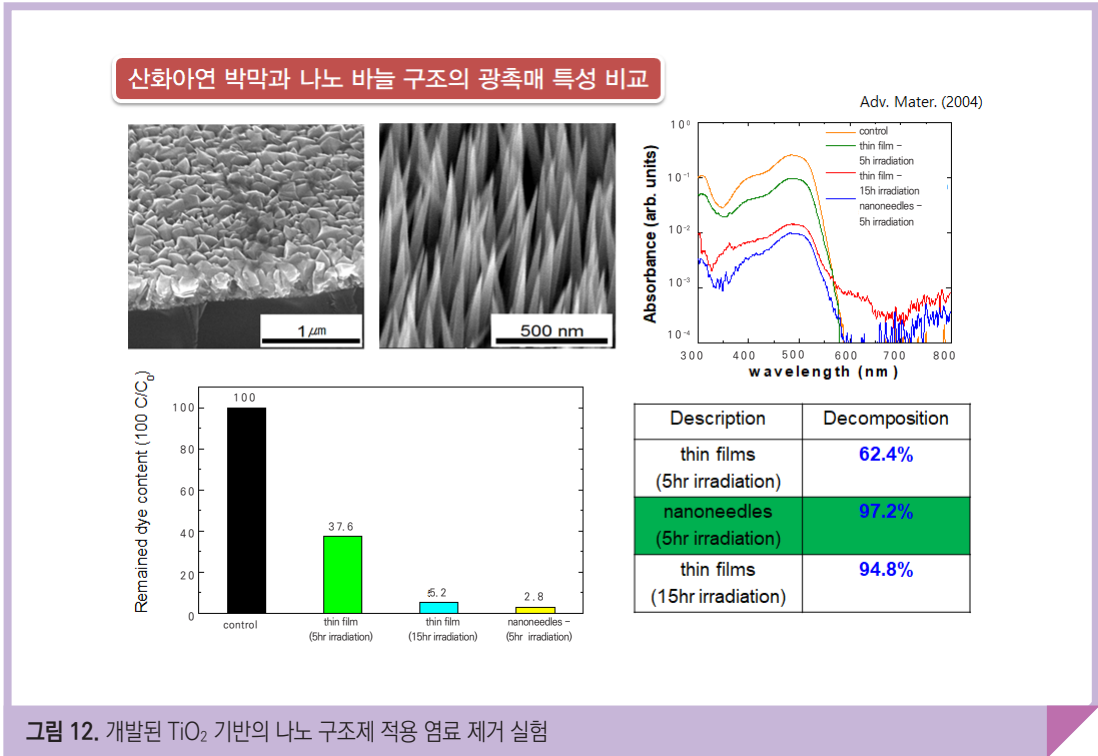


그림 12. 개발된 TiO₂ 기반의 나노 구조제 적용 염료 제거 실험

〈그림 11〉에서 알 수 있듯이 Fe₂O₃ 및 TiO₂를 소재를 기반으로 하여 rod, needle 등 다양한 형태의 촉매를 개발하였다. 개발된 촉매를 사용하여 항생제 오염 물질 분해 실험을 수처리를 전문으로 하는 KIST에서 수행하였다. 실험 결과, 기존 입자 형태 기반의 입자 촉매의 분해 효율에 비하여 2.7배의 분해 효율 향상 결과를 확인할 수 있었다. 또한 분해 속도 역시 2.3배 향상 결과를 확인하였다. 해당 실험 조건은 모두 증류수에 분해 대상 단일 오염 물질을 주입한 조건에서 실험을 수행하였다. 이후 다양한 유기 오염 물질이 공존하는 실제 생활하수에 분해 대상 오염 물질을 주입하여 분해 실험을 수행하였다. 그 결과 증류수에서 나타났던 고효율의 결과는 관찰되지 않았다. 이러 단점을 해결하기 위하여 나노 입자 주입 농도를 증가시켰다. 그 결과 나노 입자들 뭉침 현상이 발생하였고 오염 물질 분해에 대한 실질적인 기능은 발현되지 않았다. 따라서 나노 입자 주입 농도 증가에 대한 효과는 관찰할 수 없었다. 이에 대한 접근 방법으로 유리등 담체에 나노 입자를 고정화하였다. 그 결과, 증류수에 입자를 주입한 조건에 비하여 효율도 급격하게 감소하였고 실제 하수를 대상으로 한 실험에서는 효율 향상 결과를 전혀 관찰 할 수 없었다. 이런 결과를 바탕으로 서울대 연구팀과 함께 나노 입자의 효율 향상 결과는 확인되었지만, 실제 수처리 공정에 적용하여 오염물질을 처리하고 합

성된 나노 입자 특성을 효율적으로 활용하기에는 단독·단일 공정으로는 다소 무리가 있는 결론을 내리고 해당 연구는 1단계 원천 기술 연구에서 종료하였다.

5-4-2 TiO₂ 기반의 층상 구조 형태 나노 입자 합성 (이화여대 황성주 교수 연구팀)

이화여대 황성주 교수 연구팀은 나노입자의 대량 합성 관련 기술과 가시광선 영역대에서 광촉매 활성을 나타내는 나노 입자 합성 기술을 보유하고 있다. 해당 기술을 활용하여 나노 입자의 대량 합성 기술을 확보하고 동시에 가시광선에서 활성을 확보함으로써 저에너지 광촉매 고도 산화공정 개발을 시도하였다.

기존 합성 공정보다는 저가 조건에서 양적으로 증가된 결과를 확인할 수 있었다. 서울대 연구팀과 마찬가지로 시료를 받아 KIST에서 서울대 팀과 동일 물질을 대상으로 분해 실험을 수행하였다. 마찬가지로 증류수 조건에서는 약 3배의 효율 향상이 확인되었고 서울대 연구팀 소재와는 달리 실제 하수 조건에서도 약 1.5배의 효율 향상이 확인되었다. 따라서 이화여대 연구팀은 2단계 실용화 기술 개발 참여에 대한 가능성을 확인하였다.

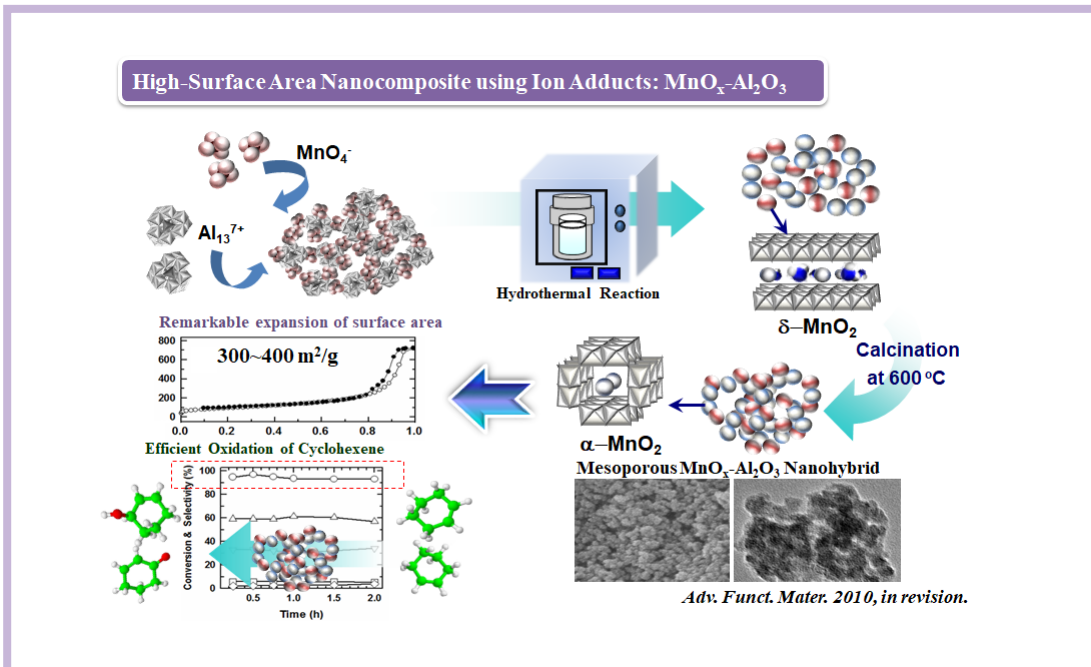
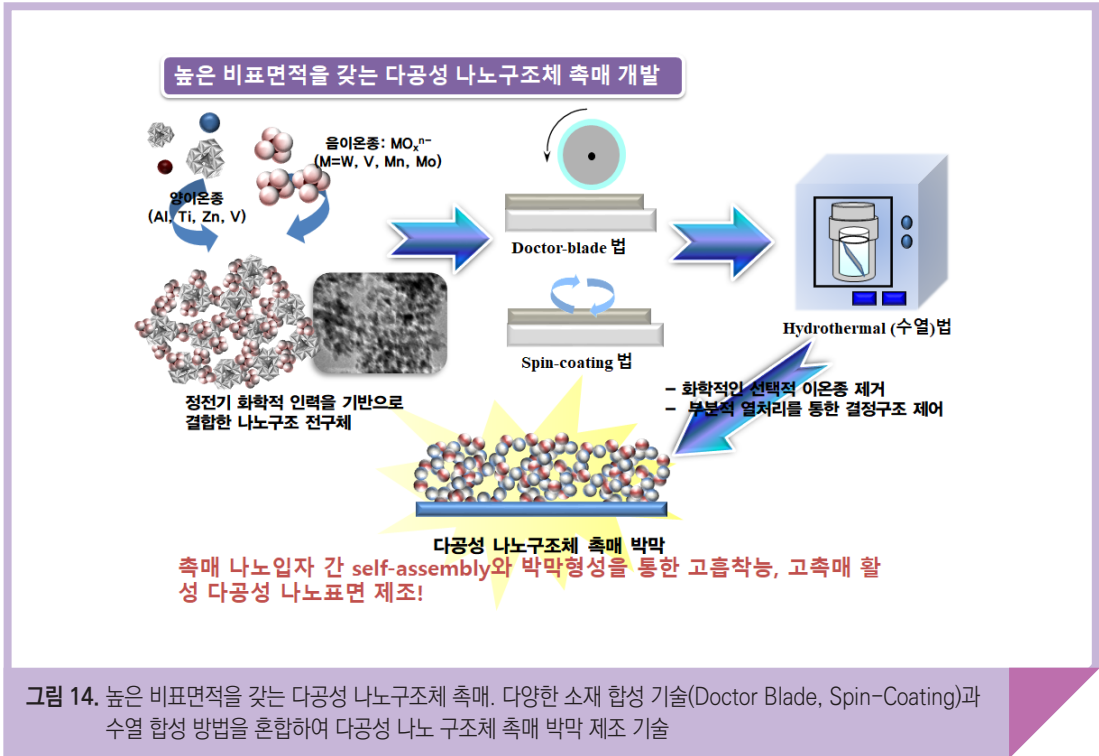


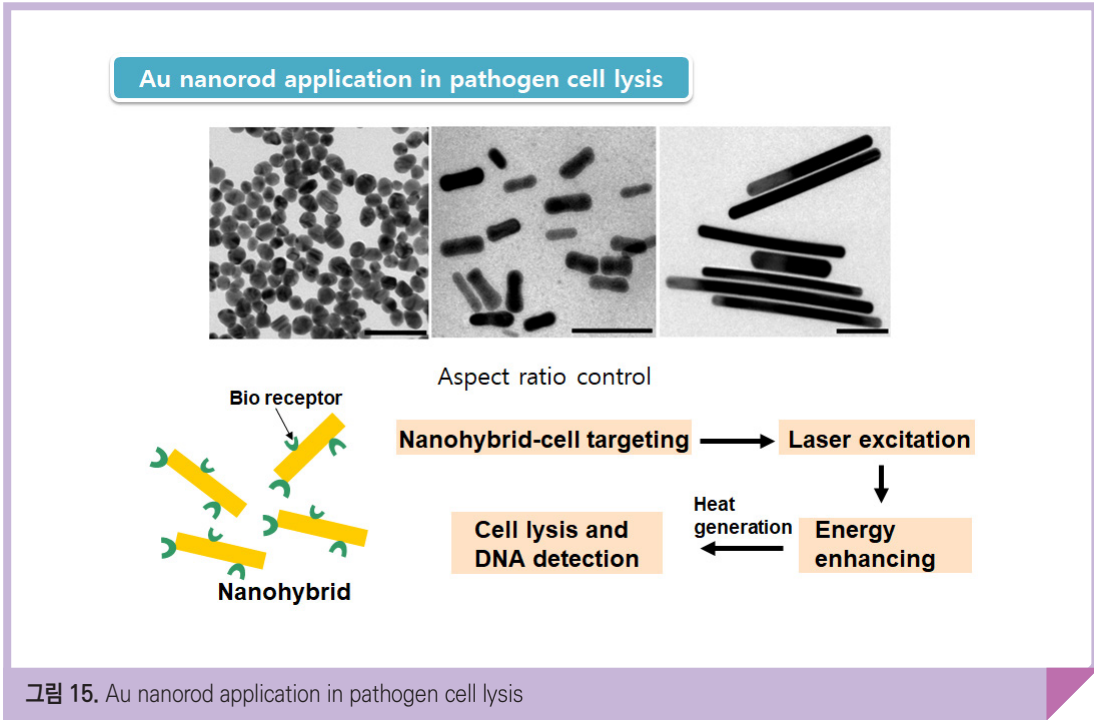
그림 13. High surface area nanocomposite using Ion Adducts. 수열 합성 반응을 이용하여 기존 나노 입자 합성에 비하여 제조 시간을 단축하고 합성량을 증가시킨 연구



5-4-3 Nano Gold Rod를 이용한 고효율 산화/소독 기술 개발 (명지대 이동기 교수 연구팀)

명지대 이동기 교수 연구팀은 순간적으로 온도를 2,000°C 이상 올릴 수 있는 gold rod를 합성하고, 해당 소재가 박테리아 살균 공정으로 활용 될 수 있는지 검토하였다.

〈그림 15〉에서도 알 수 있듯이 효과적인 gold rod를 연구팀에서 합성하였고 KIST에서 합성 소재의 박테리아 살균 효과 검증을 수행하였다. 실험 결과 99.99% 이상의 살균 효과를 확인하였다. 수처리에서 살균은 염소살균, 오존살균, 자외선살균이 사용되고 있으며, 85% 이상 염소 살균 공정이 보급되어 있다. 그러나 해당 살균 기술은 대장균에는 효과적이지만 박테리아는 해당 살균 기술로도 높은 살균 효율을 달성하지 못하는 것으로 알려져 있다. 이에 반해 gold rod는 박테리아에 99.99%의 효과가 나타나 대체 소독 기술에 대한 가능성을 확인하였다. 그러나 소재 출발 원료가 gold라는 한계점을 극복하는 것은 불가능했다. 따라서 해당 기술은 원천 기술 확보 단계에서 마무리 하였다.

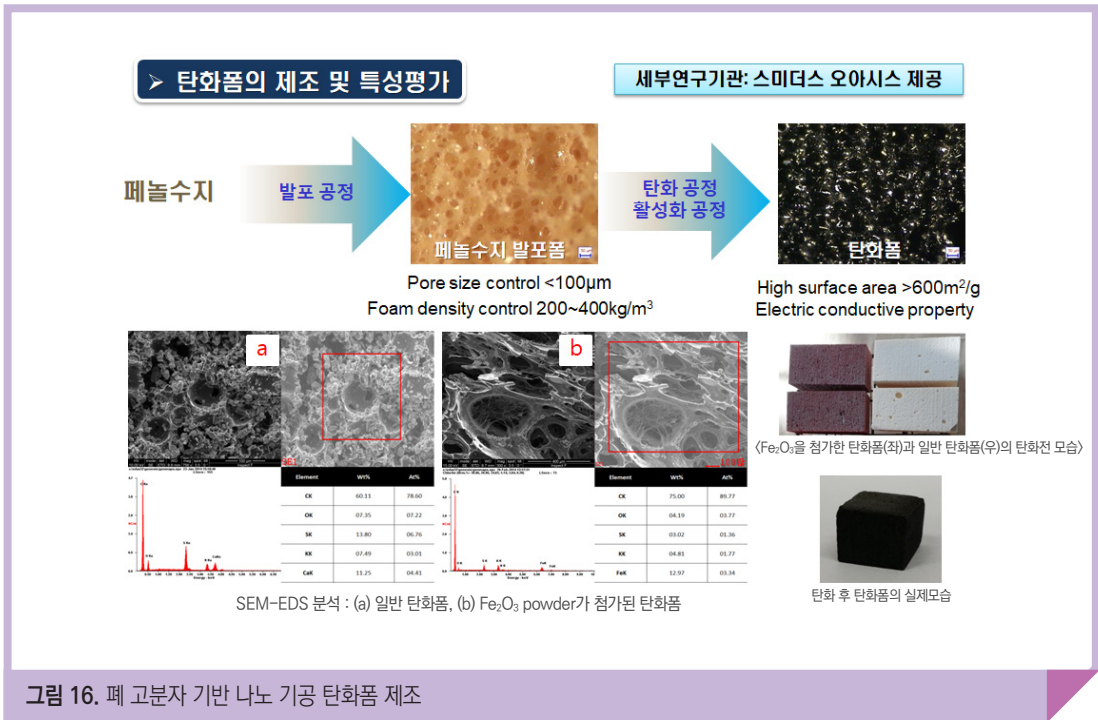


5-4-4 폐기 고분자 전구체에 nano pore 형성 및 표면 개질을 통한 중금속의 선택적 흡착 및 회수 기술

(한국스미더스오아시스 박상현소장)

해당 연구팀은 대학교 및 연구소가 아닌 소재 기업 부설 연구소이다. 해당 기업은 페놀 수지 기반의 고분자 관련 제품을 제조하여 판매하는 기업으로 생산 고분자 제품은 높은 기공률(porosity)을 확보하여 고분자 제품 내부에 수분을 장기간 유지하는 것을 주요 특징으로 하고 있다.

이런 배경 하에 기공률 향상을 위하여 기공을 나노 스케일로 생성할 수 있다면 수분 유지 능력이 향상 될 수 있다는 가능성을 바탕으로 과제에 참여하였다. 특이한 점은 페놀 수지 고분자 제품 생산 과정에서 폐기되는 폐기물을 출발 원료로 사용하였다는 점이다. 일정 수준의 기공률 특성의 고분자 수지에 기술을 적용하여 나노 기공을 생성하고 기공률을 향상했다는 점에서 폐기물의 재활용 및 제품 성능 향상이라는 두 가지 성공적 연구 성과를 달성하였다.



나노 기공을 형성한 연구 결과물을 실 증금속 폐수에 적용하여 실험한 결과 특정 증금속에 대한 우수한 흡착량을 확인하였고 특정 증금속에 대한 선택도를 보다 향상하기 위하여 개발 제품의 특정 증금속과 킬레이트 반응을 유도할 수 있는 성분을 흡착제 표면에 도입하는 표면 개질^{viii)}(surface modification)을 시도하였다. 표면 개질 과정에서 개질 효과를 높이기 위하여 표면 개질과 관련 원천 연구 경험이 많은 이화여대 연구팀과 공동으로 연구를 수행하였다. 이런 과정들이 참된 기술의 융합 과정이 아닌가하는 생각이 들었다. 기업 연구팀 - 한국과학기술연구원 연구팀 - 이화여대연구팀 세 기관이 '제품 양산 - 증금속 폐수 처리 및 자원화 공정 개발 - 표면 개질 및 소재 성능 향상'이라는 틀을 갖추었고 해당 연구 틀을 통하여 '특정 증금속에 고선택 특성을 갖는 나노 기공 기반의 흡착제 적용 증금속 폐수 처리 공정 개발'이라는 성과물을 성공적으로 달성하였다. 해당 체계에서 완성된 기술은 최종적으로 증금속 폐수 처리를 위한 공정으로 환경 기술로 마무리

viii) 고분자 폐기물 탄화 과정을 거친 흡착제 표면에 특정 증금속에 대한 선택도 향상을 위한 반응기(functional group)를 결합시키는 공정

되었고 해당 과정이 참된 환경 융합 사례라고 생각했다. 해당 개발 소재는 안산도금반원조합 폐수처리장에서 KIST에서 제작한 0.5L/일의 소형 중금속 폐수 공정을 설치하고 연속적인 운전을 통하여 특정 금속의 고효율 처리 및 회수에 대한 성공적 연구 결과를 획득하였다.



그림 17. 안산 도금 조합 0.5L/일 규모의 개발 나노 흡착제 적용 연속 운전용 파이롯트 장치

개발 소재는 현재 중국으로 소량 수출되어 굴뚝의 미세 입자 제거 장치로 실지로 적용되어 가동되고 있어 원천기술부터 실용화 단계까지 성공하고 동시에 매출까지 달성한 성공적인 사례로 생각한다.

5-4-5 TiO₂ 입자 효율 향상을 위한 나노 기술 적용 및 신종 TiO₂ (Black TiO₂) 입자 합성 (UNIST 이창하교수)

울산과학기술원 이창하교수 연구팀은 과거부터 환경 기술 개발과 관련된 다양한 연구를 수행해 온 연구팀이다. 따라서 다른 연구팀에 비하여 환경 매체와 환경 기술의 특성을 일정 수준 파악하고 있는 연구팀이다. 해당 연구팀에서는 가시광선에서 효과적으로 활성을 나타내는 TiO₂ 입자 균일도 향상 기술과 Black TiO₂라고 하는 새로운 개념의 나노 TiO₂ 입자를 연구하였다. 지금까지 TiO₂는 광촉매 기능을 집중적으로 활용하여

유기물 산화 분해에 주로 활용되었다. 해당 팀은 산화 분해 반응 이외에도 살균 효과 확인을 수행하였다. 그 결과, 박테리아를 대상으로 효과적인 살균효과가 있다는 결과를 확인하였고 신규 소독 공정으로의 활용 가능성을 확인하였다.

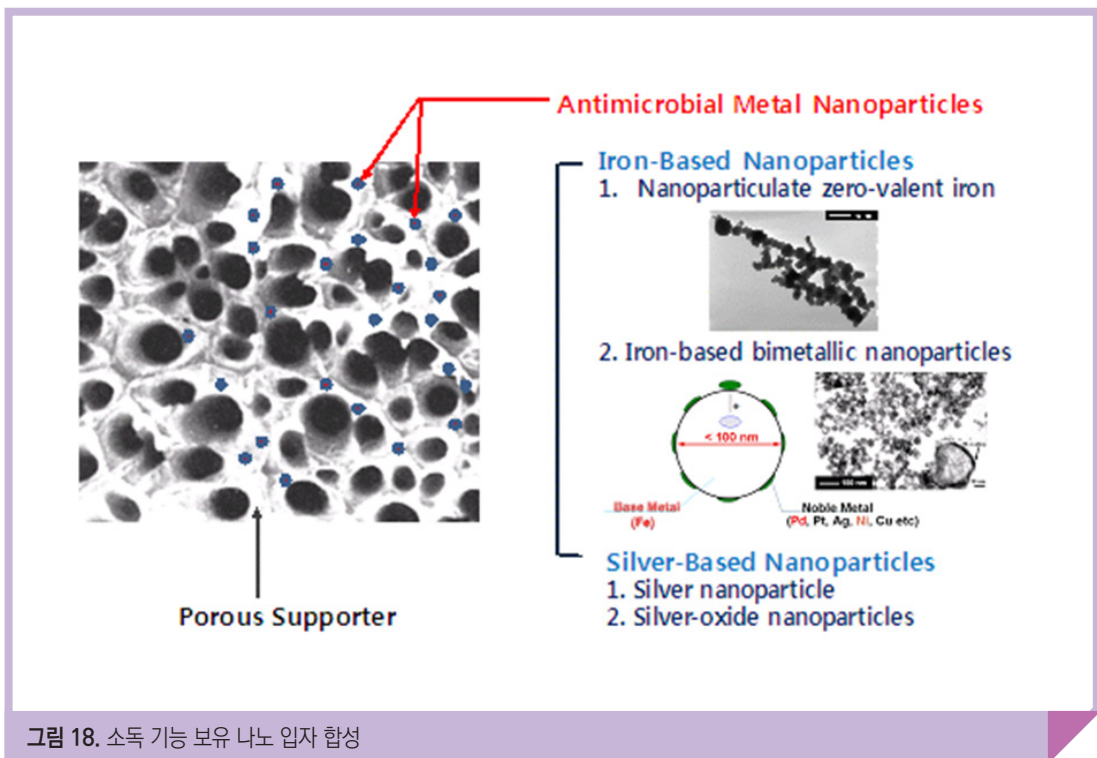
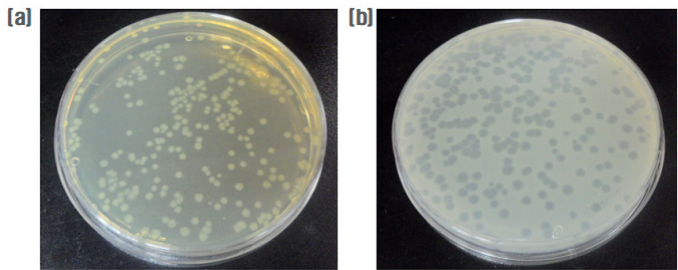


그림 18. 소독 기능 보유 나노 입자 합성

또한 해당 연구팀에서는 신종 TiO₂를 개발하여 가시광선 영역에서도 효과적인 광촉매 기능이 발현될 수 있는 가능성을 확인하였다. 개발된 신종 TiO₂는 가시광선에서도 광활성 특성이 있어 효과적인 미량 유해 물질 분해 결과를 확인할 수 있었다.

미생물(박테리아, 바이러스) 기초분석 방법 확보

- > E.coli
도말 평판법 (Spread plate method)
- > MS2
용균 반점법 (Plaque assay method)

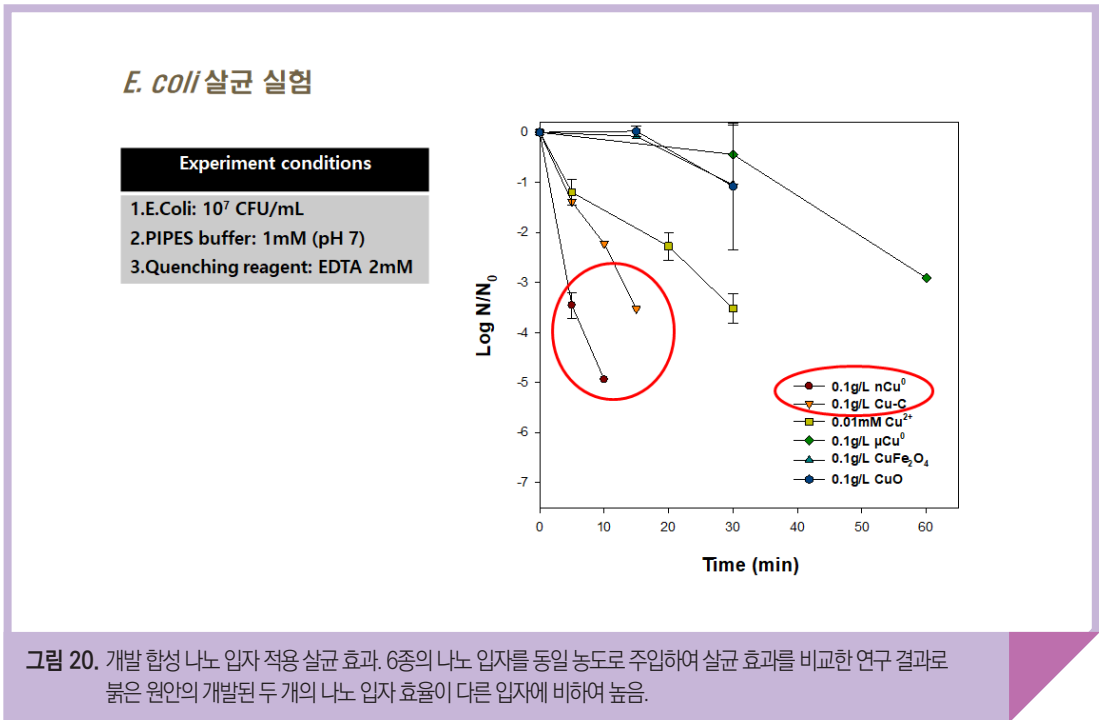


<그림> 배양된 E.coli의 colony(a)와 MS2의 plaque(b)

그림 19. 개발 합성 나노 입자 적용 살균 효과. 대장균(E.Coli)을 대상으로 하여 개발 입자의 살균 효과 검증 실험 결과로 (a)의 경우, 입자를 주입하지 않는 경우이고, (b)의 경우 입자를 주입한 경우로 대장균이 사멸되어 대장균 입자가 사라짐

해당 연구팀 책임자인 이창하교수는 환경 기술에 대한 특징을 파악하고 있어 개발 나노 소재를 기반으로 하여 1톤/일 처리 용량의 실 소독 장치를 기업과 함께 개발하여 실제 하수를 대상으로 연속운전 (continuous operation)을 테스트하였다. 그 결과 99.9% 이상의 대장균 대상 살균 효과를 관찰 할 수 있었다.

해당 연구팀이 나노 소재 합성에서 시작하여 최종적으로 실제 수처리 공정까지 진행 될 수 있었던 이유는 환경에 대한 넓은 지식과 경험이 큰 역할을 한 것으로 생각한다.



5-4-6 나노 입자 수계 환경 유출에 의한 위해성 최소화를 위한 기술 개발 (KIST 홍석원 박사 연구팀)

나노 입자는 넓은 비표면적 특성으로 기존 입자에서는 확보하기 어려운 큰 비표면적 확보 효과를 달성할 수 있다. 그러나 나노 입자가 수계 환경으로 유출되는 경우 나노 입자 크기로 인한 인체의 위해성을 간과할 수 없는 것이 사실이다. 이런 사실을 반영하듯 최근 들어 나노 기술 분야 연구자들 사이에서 가장 많은 주목을 받는 분야가 나노 물질의 위해성 관련 분야이다. 해당 분야에는 나노 물질의 인체에 대한 위해성 평가, 위해성 발현 기작 그리고 위해성 저감 관련 기술 개발로 크게 구성되어 있다.

KIST 연구팀에서는 기술 개발과 관련된 분야에 집중하여 사업 전체 연구팀에서 나노 물질의 위해성 저감을 위한 방안에 대하여 관여하였다. 접근 방법은 나노 입자 자체의 위해성을 저감하는 것이 아니라 개발 소재의 수계 환경 유출을 최소화하는 방법으로, 고정화라는 방법을 활용하였다. 나노 입자의 고정화는 기본적으로 나노 입자의 주요 특징인 넓은 비표면적을 감소하기 때문에 바람직한 접근 방법은 아니라고 알려져 있다. 그러나 유출로 인한 위해성 발현의 심각성을 고민한다면, 인체의 위해성과 나노 입자의 효율 감소 두 가지 측면을 동시에 고려해야 한다.

KIST에서 활용한 방법은 나노 입자를 직접 고정화하는 방법보다 나노 입자를 나노 섬유(nano fiber) 형태로 담체(media)에 적층(lamination) 하는 방법이다. 나노 섬유 제조는 일반적으로 사용되는 전기방사(electro spinning) 방법을 사용하였다. 나노 섬유 원료는 전체 연구팀에서 많은 결과물이 도출되었고 수처리 분야에서 가장 일반적으로 많이 사용되는 소재인 TiO_2 를 사용하였다. TiO_2 기반 나노 섬유 고정화 방안으로 나노 섬유를 담체에 적층 후, 박리를 최소화하기 위하여 열압착을 시행하였다. 그 결과 비표면적인 60% 이상 감소하는 결과가 확인되어 대안을 모색하였다. 그 대안으로 TiO_2 원료 준비 시, 원료에 결합제(binder)를 주입하여 담체에 방사와 동시에 건조함으로써 비표면적 저감도 최소화하고 나노 섬유 박리 현상도 최소화하는 결과를 관찰하였다. 해당 방법으로 적용된 소재는 비표면적 저감율이 약 20% 이내였고, 10회 이상의 반복 적용과 10cm/sec 유속 조건에서도 부착된 나노 섬유 질량 감소가 10% 내로 유지되는 결과를 관찰하였다.

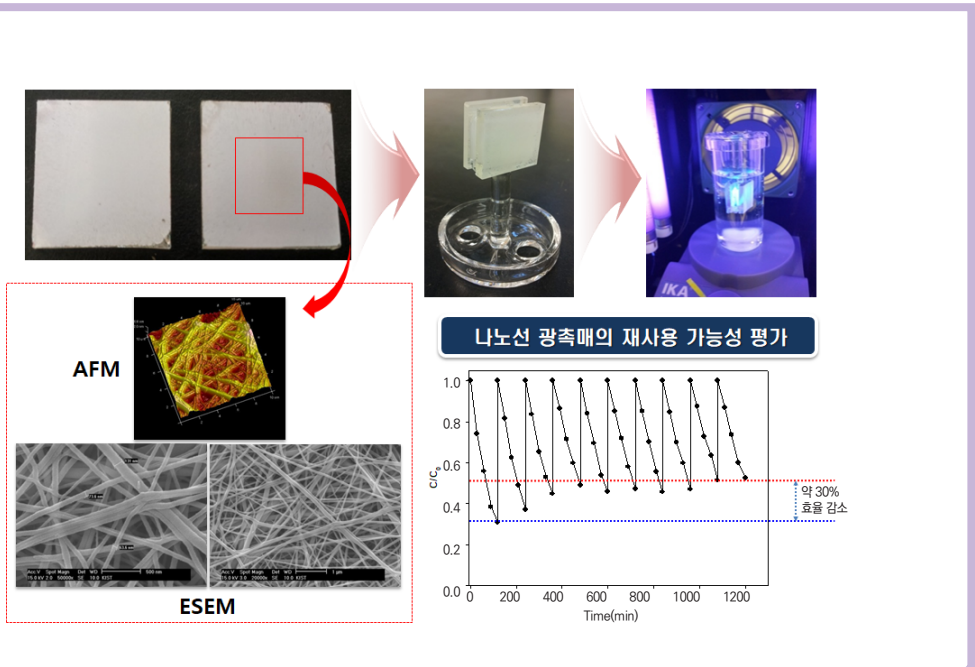
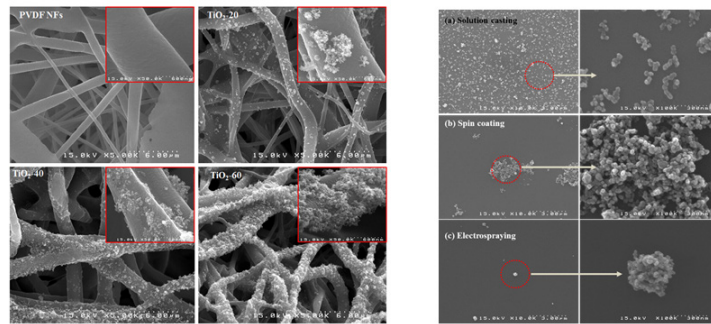


그림 21. 나노 섬유 고정화를 통한 광촉매 특성 및 재사용 효율. 왼쪽 사진은 고분자 표면에 TiO_2 나노선(TiO_2 nano wire)을 코팅한 상태를 나타낸 것이며, 오른쪽 사진은 광촉매 실험 장치로 10회의 반복 실험 결과 30% 이내 감소를 관찰하였음.

PVDF-TiO₂ 하이브리드 광촉매 FE-SEM

- TiO₂-DMF 전기분사 량 증가에 따라 TiO₂ 로딩 량 증가
- 실리콘 웨이퍼 표면에 solution casting, spin coating, electrospraying 방법으로 TiO₂를 고정화시킨 결과, 전기분사에 의해 클러스터 형태로 TiO₂가 고정화된 것으로 관찰



TiO₂-X, where X is the total volume of TiO₂-DMF used in sample preparation

그림 22. PVDF-TiO₂ 하이브리드 광촉매 FE-SEM

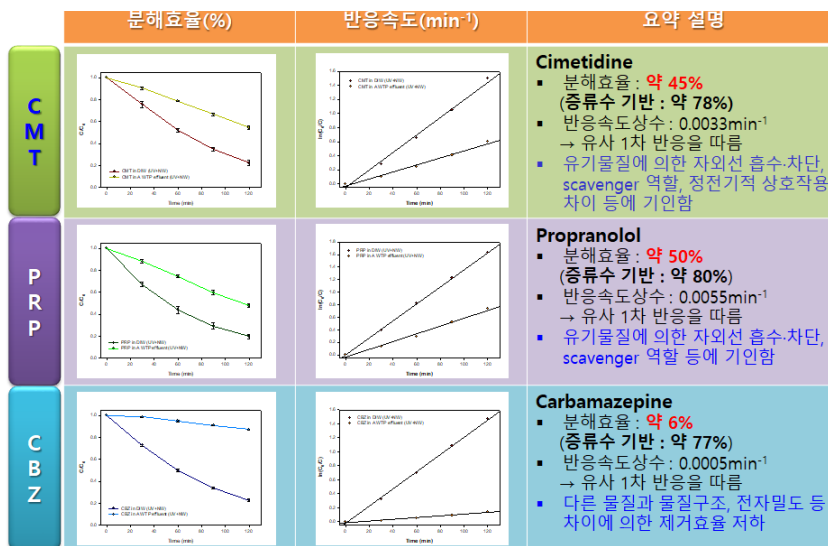


그림 23. PVDF-TiO₂ 하이브리드 광촉매 신종 미량 유해 물질 분해 효율

5-4-7 나노 소재 기반 수처리 공정 개발 기술 (KIST 이상협박사 연구팀)

해당 팀은 총괄 과제 책임자 역할을 수행하면서 기술의 융합이라는 기술 개발 방법론을 세부과제별로 유지하고 동시에 사업 전체가 ‘환경 기술’이라는 방향성을 유지될 수 있도록 하였다.



그림 24. 환경융합신기술개발사업 KIST 주관 연구팀 정기 워크샵

그리고 또 하나 중요한 역할은 세부 연구 그룹에서 개발된 소재가 최종적으로 수처리 공정으로 마무리하는 것이었다. 이를 위하여 세부 연구 그룹의 소재 평가, 수처리 공정이 되기 위한 feed-back, 공정 구성 시 소재의 정확한 특성 활용을 위한 협업 유지 그리고 마지막으로 개발된 수처리 공정의 장기적인 연속 운전을 통한 융합 연구 결과물 완성의 역할을 수행하였다.

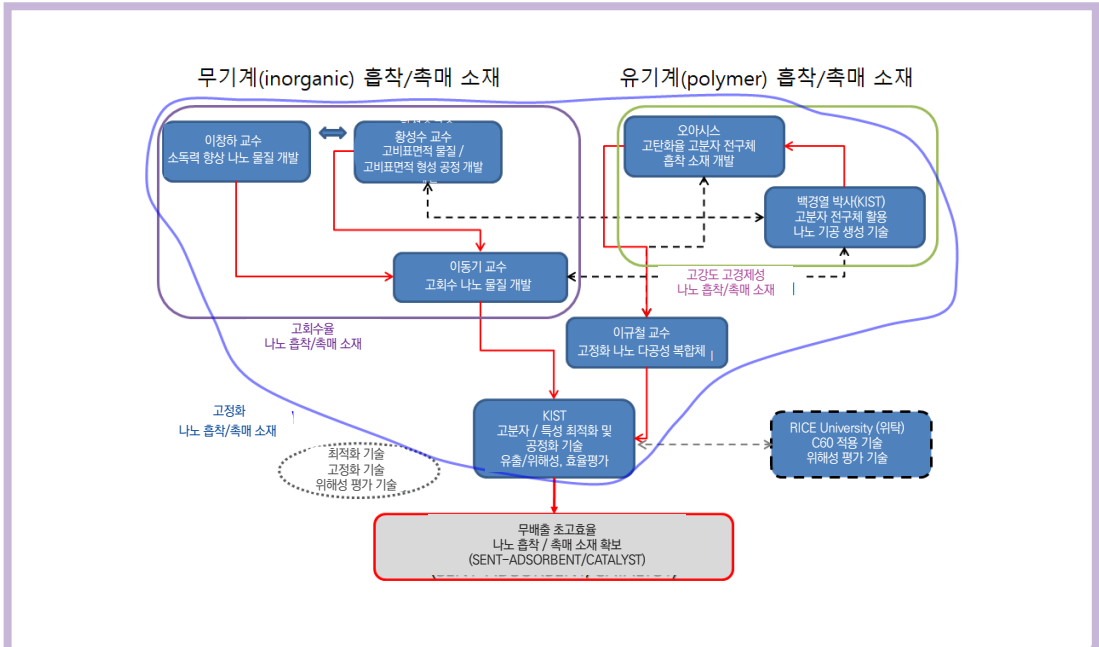


그림 25. 환경융합신기술개발사업 KIST 주관 연구팀에서의 KIST 중심의 연구 성과물 도출 전략

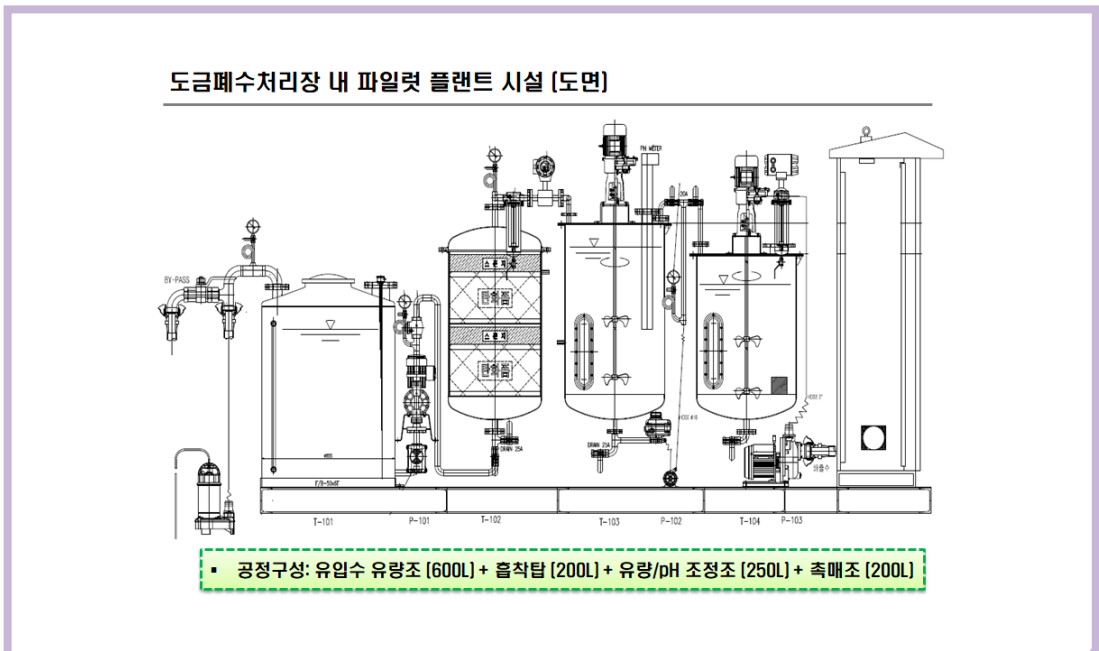


그림 26. 나노기공 탄소폼 적용 실제 도금 폐수 처리공정 적용 연속 수처리 공정 설계도면

① 유리기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지 융합 기술

② 환경분야의 융합 기술 전략 과 주요 사례

도금폐수처리장 내 파일럿 플랜트 시설(사진)

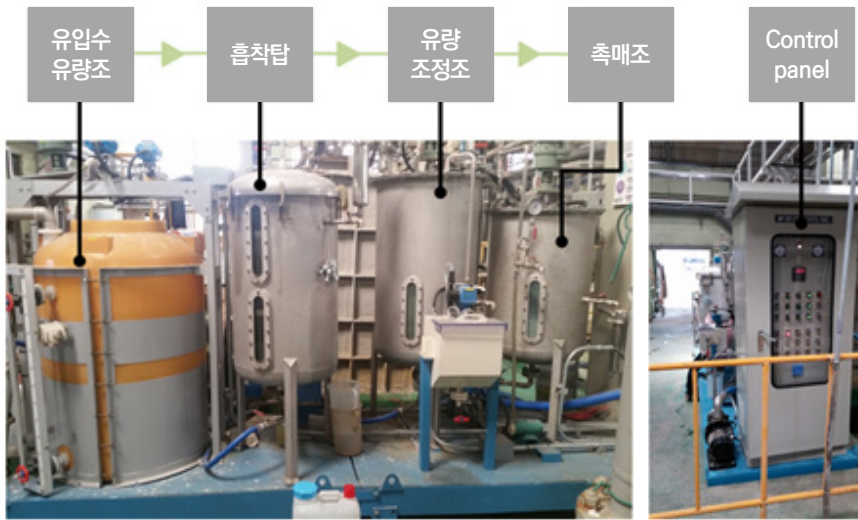


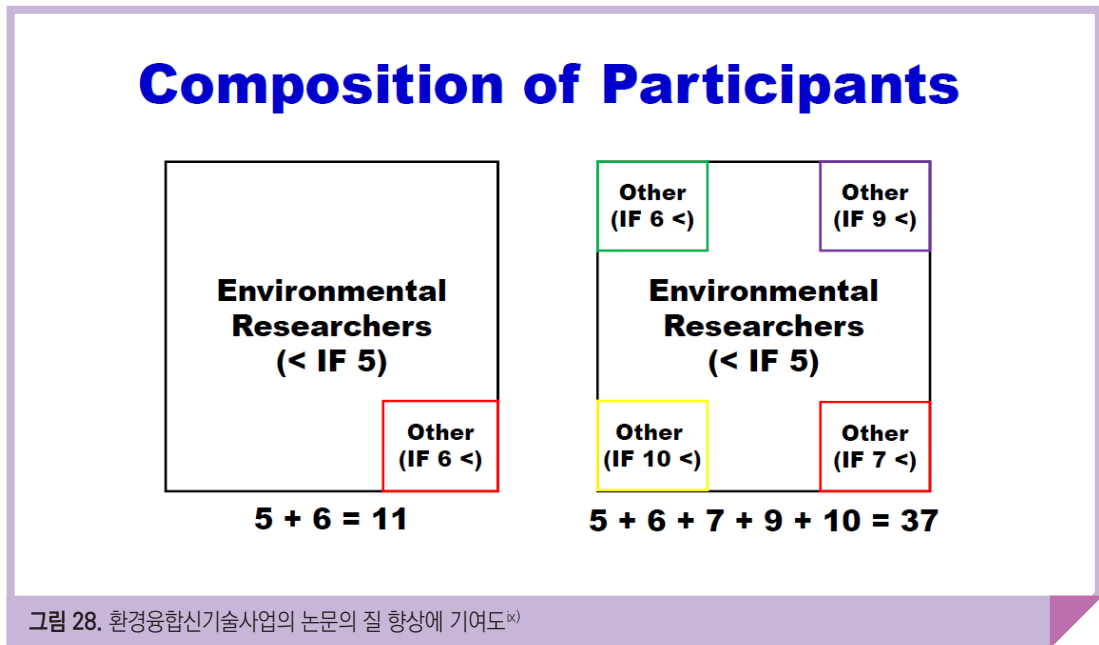
그림 27. 나노기공 탄화품 적용 실제 도금 폐수 처리공정 적용 연속 수처리 완성 장치

KIST에서 개발한 구체적인 연구 결과물이 부족하게 보일 수도 있다고 생각된다. 평가, 소재 개선, 수처리 공정 개발 및 연속 운전은 너무나 평이한 사항이라고 여겨질 수 있지만, 저자는 이것이 정확한 환경 기술 개발을 위한 기술 개발 프레임이고, 기술의 융합 방법론이 환경 기술 개발에서 왜 중요한지를 의미하는 중요한 사항이라고 생각한다.

06 환경부의 환경 융합 기술의 성공을 위한 노력

6.1 Impact Factor = 6.2

환경부는 환경 기술의 효율적인 기술 업그레이드 그리고 고도 원천 기술의 환경 기술과의 접목을 위하여 자체적으로 환경융합신기술 개발 사업을 약 7년 동안 약 600억 원의 연구비를 투자하여 진행했다. 그 결과, 환경부에서 추진 중인 다양한 사업 가운데 해당 사업이 성과 면에서 최우수 과제로 선정되었다. 선정된 가장 큰 원인은 앞에 언급했듯 국가 연구개발 성과 평가 항목 가운데 하나인 투고 논문의 IF (Impact Factor)가 환경부 타 사업에 비하여 높은 것이(평균 IF=6.2, 과거 환경부 사업의 논문 평균 IF=2.1) 가장 큰 이유였다. 환경부 사업을 경험한 연구자들은 융합이라는 기술 개발 방법론의 힘을 실감할 수 있는 사항이었다.

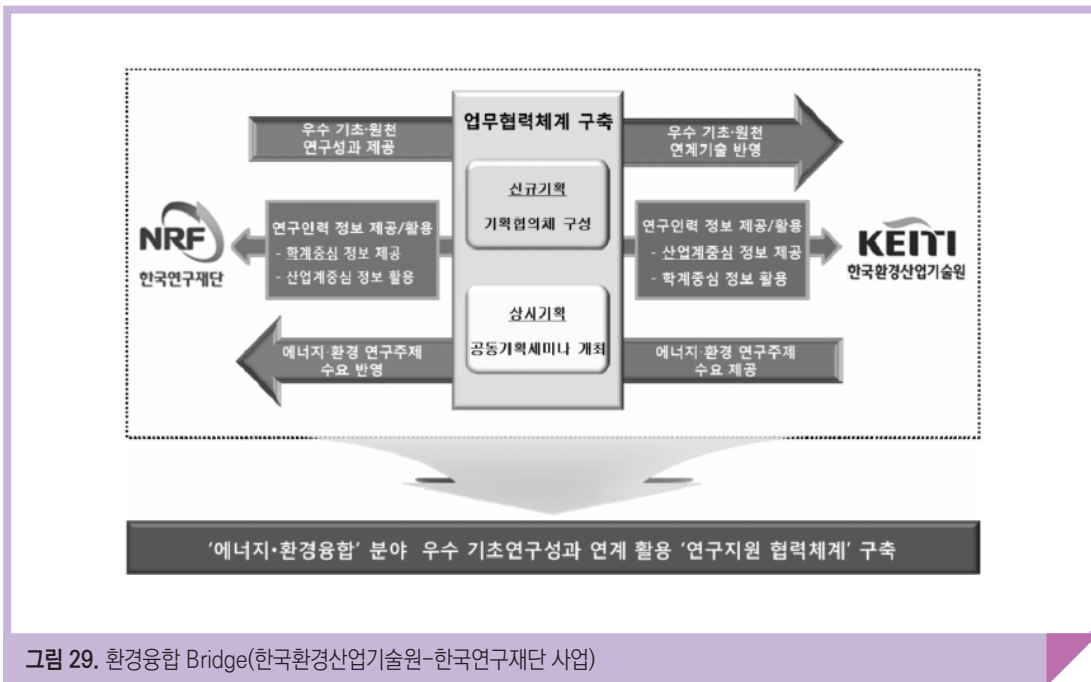


ix) 왼쪽 그림은 환경 공학과 중심으로 진행된 연구 결과 논문 성과물의 구성 체계로 중심 논문이 환경공학 관련 논문이며 오른쪽 그림은 환경 공학과 중심으로 진행되던 과거에 비하여 환경 이외의 연구 분야가 숫적으로 크게 증가함으로써 환경 공학 관련 이외의 소재 등 IF 높은 분야의 논문 성과 도출이 과거에 비하여 용이하였음.

그러나 환경부 R&D의 또 다른 주요 지표인 연구개발비용 투자 대비 기업의 매출 효과 측면에서는 논문 성과만큼 높은 성과는 달성하지 못하였다. 환경 기술과 타 기술과의 가장 큰 차별성은 '환경오염 개선'이라는 공공성이라고 생각한다. 그러나 저자는 논문의 질 향상과 공공성과의 직접적인 관계가 높지 않다고 생각한다. 물론 전체 사업 가운데 성공적으로 기술이전이 되어 기업 매출 발생 및 실제 오염 현장에 적용하여 운영되는 사례도 물론 있었다. 그렇지만 논문의 질 향상성과를 고려한다면 해당 사항은 다소 부족한 면이 있다고 생각한다.

6.2 미래창조과학부와와의 협업

환경부에서는 5년이라는 연구기간동안 자체적으로 원천기술부터 시작하여 실용화 가능한 단계까지 진입하는 것은 다소 어려움이 있다는 것을 파악하였다. 이런 점을 보완하기 위하여 이미 개발 완료되어 학술적으로 충분히 검증된 국내 원천 기술 가운데, 환경 기술로 활용 또는 융합될 수 있는 방법에 대한 검토를 하였다.



다양한 부처에서 추진되고 있는 사업들 가운데 성과물 측면에서 기술의 원천성이 가장 강한 사업은 미래 창조과학부에서 추진되고 있는 R&D 사업이다. 환경부에서 미래창조과학부와 협의를 통하여 미래창조과학부 사업에서 추진된 과제 가운데 환경 기술로 활용 가능성이 높은 원천 기술의 적극적 활용을 위한 사업을 마련하였다. 그 결과 환경부의 R&D 사업을 총괄하는 한국환경산업기술원과 미래창조과학부의 R&D 사업을 총괄하는 한국연구재단과 공동으로 '환경융합 Bridge(한국환경산업기술원-한국연구재단 사업)'을 2013년도 시작하였다. 사업의 공식적인 취지는 '기존 기술의 한계를 극복하고 새로운 환경 시장을 창출하기 위함'이었다. 환경부에서 추진했던 환경융합신기술사업과 유사한 사업 취지를 바탕으로 사업이 시작되었다.

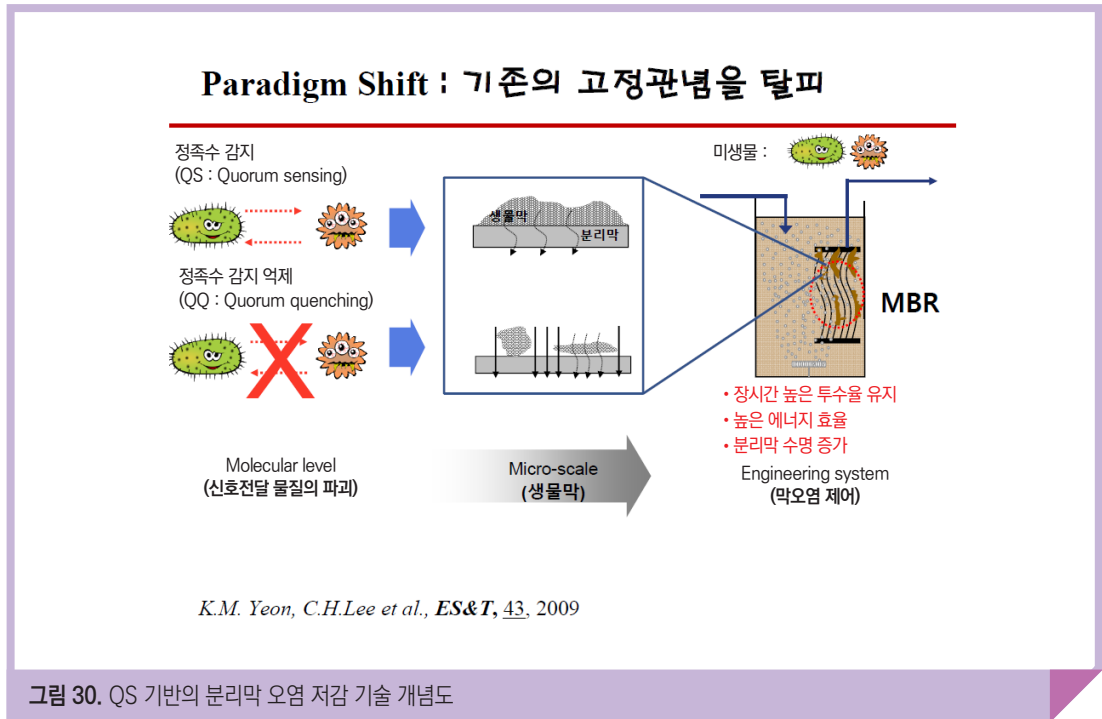


그림 30. QS 기반의 분리막 오염 저감 기술 개념도

그 결과 사업 1차년도에는 서울대학교 이정학 교수 연구팀을 포함한 2개의 사업이 시작되었고 이정학 교수 연구팀의 'QS 기반의 분리막 오염 저감 기술'은 3년간의 환경 기술 융합 기술 결과를 도출하여 NSC(Nature, Science, Cell 등) 급의 논문 성과물, 기술 이전을 통한 기업의 매출 발생 및 실제 현장에 적용하여 실용화 성공 등의 연구 성과를 달성하였다. <그림 30>과 같이 QS 기술은 분리막 표면에 축적된 미생물

층에서 나타나는 생리 물질을 분리막 표면에 새롭게 축적되는 미생물층이 감지함으로써 일정 이상의 미생물층 축적이 억제되는 신기술이다. 해당 사업의 다른 연구팀 역시 양과 질을 만족하는 연구 성과를 달성하였다.

6.3 누가 더? : ‘환경융합신기술개발사업’ vs ‘환경융합Bridge 사업’

환경융합신기술개발사업을 실질적으로 5년간 수행한 입장에서 저자는 자연스럽게 환경융합신기술개발사업과 환경융합 Bridge 사업을 자발적으로 비교해 보았다. 이유는 두 사업 모두 ‘환경 기술 개발’이라는 최종 중차점은 동일하면서 최종 목적에 도달하는 방법에 있어 ‘내부적인 기술 확보 vs outsourcing을 통한 기술 확보’라는 방법적인 측면에서 차별성이 있었다.

먼저 환경융합 Bridge 사업에서도 환경융합신기술사업 수준의 환경 기술 측면에서 성과물이 달성될 수 있는 배경을 살펴보고자 한다. 첫째, 환경융합 Bridge 사업에 참여한 연구자들 가운데 많은 연구자들이 과거 환경부 R&D 사업 경험이 있는 연구자들이라는 점이다. 환경 기술과 환경 매체에 대한 이해도가 많고 적응의 차이는 최종 성과물에서도 그대로 반영되었다고 생각한다. 즉, ‘원천 기술 보유 연구자들이 환경 기술에 충분한 사전 지식을 바탕으로 출발했다’라는 점은 초반 시행착오를 최소화 할 수 있는 가장 큰 배경이었고 이를 통해 동일한 수준의 성과물을 달성 할 수 있었다고 생각한다. 둘째, 원천 기술 보유 연구자들의 사고의 차이도 중요한 배경이라고 생각한다. 즉, 환경융합 Bridge 사업에 참여한 연구자들은 ‘보유 원천 기술을 신속하게 환경 기술 맞춤형으로 변환해야 한다’는 사고의 전환을 신속하게 함으로써 ‘보유 원천 기술’이 ‘보유 환경 원천 기술’로 신속하게 전환되어 기술 개발이 진행될 수 있었다고 생각한다. 환경 기술 맞춤형으로 보유 원천 기술을 신속하게 전환하고 ‘이 기술은 환경 기술’이라는 사고를 밑바탕에 두고 기술 개발을 진행하는 것은 환경 융합 기술 개발을 효율적으로 추진하는 과정에서 매우 중요한 사항이었다. 이런 원천 기술 보유 연구자들이 환경에 대한 사전 지식이 전반적으로 충분했다는 점, 그리고 해당 연구자들이 사고의 전환을 신속하게 하였다라는 점은 향후 환경 융합 기술뿐만 아니라 다른 분야의 융합 기술 개발 전략에서도 중요한 시사점이라고 생각한다.

물론 환경융합신기술개발사업에서도 NSC급 논문, 기술이전 그리고 실제 현장에 성공적 적용 등 눈부신 성과물이 달성되었다. 두 사업 사이에 작은 차이점을 이야기 한다면 ‘사업 시작 초반기에 발생하는 시행착오의 기간’이었다고 생각한다. 새롭게 시작하는 사업에서 초반기에 발생하는 시행착오는 입장에 따라서 많은

차이가 있다고 생각한다. 관리자 입장에서는 바람직하지 않는 사항 또는 준비되지 않는 상황, 반면 직접 연구를 수행하는 입장에서는 필연적인 사항, 새로운 방법론 적용에 따른 자연스러운 상황이다. 이런 관점의 차이로 인해 누가 더 효율적이었는가에 대한 이야기가 나올 수 있다고 생각한다.

07 맺음말 : 환경기술개발과 기술융합전략의 관계 = '부부의 연'

환경 기술은 특정 기술 분야로 한정짓기 보다는, 응용 기술이면서 오염 매체라는 대상을 정확히 파악하고 최적의 기술을 적용하는 기술 개발 방법론이 필요한 기술 개발 분야라고 생각한다. 따라서 저자는 환경 기술에서 융합 방법론은 다른 어느 기술 개발 분야보다 필요하고 활용 시, 효과도 높다고 생각한다.

이때 가장 중요한 사항은 환경 융합 기술이 최종적으로 도달되어야 하는 종착점은 '환경 기술'이라는 사항이다. 환경 융합 기술을 시도하고 참여하는 연구자들은 이 점을 성과물이 도출될 때 까지 잊지 않아야 한다고 생각한다. 또한 환경 공학 이외의 연구자들이 환경 기술에 참여할 때는 보유 기술이 환경 기술로 신속하게 전환할 수 있는 전략과 방법을 사전에 일정 수준 고민하는 것이 필요하다고 생각한다.

앞서 기술했듯이, 다양한 기술 분야는 대부분 각각 대표될 수 있는 기술 이미지가 떠오르지만 환경 기술 분야는 기술 이미지 보다는 오염 매체 이미지가 먼저 생각나는 분야이다. 이 점은 환경 공학 이외의 타 기술 분야의 연구자들에게는 해당 분야에 보다 쉽게 접근하여 융합을 편안하게 할 수 있다는 큰 장점인 동시에 환경 기술 관련 연구자들에게는 너무 광범위의 기술 분야가 참여함으로써 실질적으로 환경 기술로 활용되기 어려운 기술들의 참여로 인해 낭비적 요소가 발생할 수 있다는 우려도 동시에 존재한다.

그렇지만 중금속 폐수 처리 공정에서 기존의 응집-침전 공정을 대체함으로써 대량의 응집제 포함 폐기물을 처리해야하는 부수적인 문제를 해결하고, 자원회수라는 두 가지 목적을 효율적으로 달성할 수 있는 중금



속 폐수처리 공정과 같은 혁신적인 수처리 기술을 개발할 수 있었던 점, 환경 기술 사업에서 NSC급 수준의 우수한 논문 성과를 달성한 점, 미래창조과학부와와의 협업을 통해 성공적 성과물을 도출할 수 있었던 점 모두의 배경에는 ‘융합’이라는 핵심어가 있었기 때문이라고 생각한다.

마지막으로 환경 융합 신기술 개발을 수행한 결과로 2015년 미래창조과학부 우수기술 100선에 선정되는 영광을 받은 연구자로서 환경 융합 뿐만 아니라 융합 기술을 전략을 추진하고자 하는 연구자들에게 드리고 싶은 문구를 적으며 마무리하고자 한다.



“Government of the people, by the people, for the people”



“Environment Convergence Technology of the environment, by the environment, for the environment.”

저자 이상협

Sang-hyup Lee

학력 서울대학교 토목공학과 박사
 서울대학교 토목공학과 석사
 고려대학교 재료공학과 학사

경력 現) 한국과학기술연구원 녹색도시기술연구소
 물자원순환연구단 단장(책임연구원)
 前) 일본문부과학성 국립북해도대학 대학원 연구원
 前) 경기개발연구원 환경정책연구부 책임연구원
 前) 삼성코닝주식회사 중앙연구소 주임연구원

① 유리기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지 융합 기술

② 환경분야의 융합 기술 전략과 주요 사례



참고문헌

1. Sang-hyup LEE(Korea Institute of Science and Technology)Convergence strategy of nano-technology to water treatment technology in KOREA: Nano catalytic adsorbent material development for water treatment ; The 13th Korea-U.S. Forum of Nanotechnology : Neuromorphic Computing and Water & Wastewater Sustainability
2. G.-h. Moon, M. Fujitsuka, S. Kim, T. Majima, X. Wang, W. Choi, "Eco-Friendly Photochemical Production of H₂O₂ through O₂ Reduction over Carbon Nitride Frameworks Incorporated with Multiple Hetero-Elements", ACS Catal. 2017, 7, 2886-2895.
3. H.-i. Kim, S. Weon, H. Kang, A. L. Hagstrom, O. S. Kwon, Y.-S. Lee, W. Choi, J.-H. Kim, Plasmon-Enhanced Sub-Bandgap Photocatalysis via Triplet-Triplet Annihilation Upconversion for ..., Environ. Sci. Technol. 2016, 50, 11184-11192.
4. G. Kim, S.-H. Lee, W. Choi, "Glucose-TiO₂ Charge Transfer Complex-Mediated Photocatalysis under Visible Light", Appl. Catal. B: Environ., 2015, 162, 463-469.
5. W. Kim, T. Tachikawa, D. Monllor-Satoca, H.-i. Kim, T. Majima, W. Choi, "Promoting Water Photooxidation on Transparent WO₃ Thin Films by an Alumina Overlayer",Energy Environ. Science, 2013, 6, 3732-3739.
6. J. M. Lee, E. K. Mok, S. Lee, N. -S. Lee, L. Debbichi, H. Kim, and S. -J. Hwang,* "A conductive hybridization matrix of RuO₂ two-dimensional nanosheets: a hybrid-type photocatalyst", Angew. Chem. Int'l Ed., 55(30), 8546-8550. 발표년월일: 2016/07/18, 발행기관: Wiley VCH.
7. (Pedro. J.J. Alvarez et al 2008 "Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects" Environmental Toxicology and Chemistry, 27(9) 1825-1851)

8. (Pedro. J.J. Alvarez et al 2013 “Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment”Water Research, 47(12) 3931-3946)
9. (Pedro. J.J. Alvarez et al 2013 “Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment”Water Research, 47(12) 3931-3946)
10. 국립국악원 표준국어대사전