



“나노입자 응용 연구... 세계 허브기관으로 발돋움”

기초과학연구원(IBS) 나노입자 연구단

단장 | 현택환 교수

주소 | 서울시 관악구 관악로 1 서울대학교 공과대학 화학생물공학부

전화 | 02)880-7436

홈페이지 | <http://nanomat.ibs.re.kr>

이메일 | thyeon@snu.ac.kr



임인재 객원기자 / mimohhh@naver.com

지난 2011년 설립된 기초과학연구원(IBS)은 국제적인 연구 환경을 갖춘 전문연구기관으로 세계 최고 수준의 연구단들로 구성돼 있다. 총 26개의 연구단이 수학, 물리, 화학, 생명과학 등 기초과학과 이들의 융합연구를 진행하고 있다. 26개 연구단 중 하나인 나노입자연구단(단장 현택환, 서울대 교수)은 서울대 화학생물공학부의 현택환 교수를 단장으로 총 9명의 교수를 포함, 현재 100명이 넘는 연구전문 인력으로 구성돼 있다. 연구단은 다양한 나노입자를 합성하고 생성 메커니즘을 밝히는 연구를 토대로 이를 생명·의학 분야, 에너지·촉매 분야, 웨어러블 전자소자 분야, 유기합성용 촉매 등에 응용하는 연구를 수행 중이다. 구체적으로 연구단은 ‘나노입자 그룹’(제1그룹), ‘전기화학·에너지 그룹’(제2그룹), ‘나노메디신 그룹’(제3그룹)등 총 3개 연구그룹으로 나누어 연구를 진행하고 있다.

‘나노입자 그룹’(제1그룹)에서는 나노입자에 대하여 전반적인 기초연구를 수행한다. 나노입자의 화학적인 합성 및 물리적 성질을 탐구하고 형성기작을 규명한 뒤 이를 촉매와 의료분야에 응용하는 연구를 진행하고 있다. 이 그룹의 구성원은 연구단장인 현택환 교수를 포함해 서울대 화학생물공학부 김대형 교수, 이지화 교수, 정인 교수, 서울대 의대 영상의학과 최승홍 교수, 서울대 화학부 홍순혁 교수, 김명수 교수 등이다.

‘전기화학·에너지 그룹’(제2그룹)은 나노입자를 디자인하고 조립(assemble)하여 연료전지, 2차전지 등의 전극 물질이나 다양한 디바이스에 응용하는 연구를 수행한다. 이 그룹은 서울대 화학생물공학부 성영은 교수와 서울대 재료공학부 강기석 교수로 구성되어 있다.

3그룹인 ‘나노메디신 그룹’은 나노입자 그룹의 재배치 조직으로 이 분야에서는 서울대 의대 최승홍 교수를 중심으로 현택환 단장, 김대형 교수가 공동 연구를 진행하고 있다. 이 세 개 그룹은 나노분야의 기초에 연구 바탕을 두고 다양한 연구 협력체계를 구축해 융합적인 연구를 수행 중이다.

현재 나노입자연구단은 그룹 간 유기적인 연구로 화학, 재료과학, 공학, 생물학 및 의약학을 아우르는 나노과학 분야에서 다양한 성과를 내놓고 있다. 국제적 학술지인 사이언스(Science), 네이처 나노테크놀로지(Nature Nanotech.), 미국 화학회지(J. Am. Chem. Soc.), 앙게반티 케미(Angewandte Chem.), 네이처 커뮤니케이션스(Nature Communications) 등을 포함하는 국제적 SCI 학술지에 200여 편의 논문을 발표한 것은 물론 나노입자 및 나노소재의 합성, 에너지, 의약, 촉매 등 응용 분야에서도 주목할 만한 성과를 얻었다.

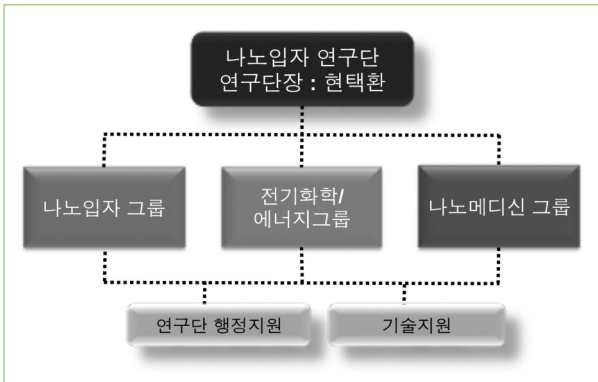


그림 1. 나노입자연구단의 구성

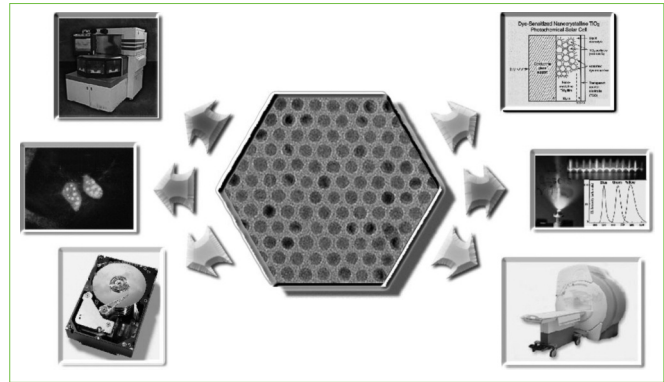


그림 2. 다양한 분야로 이용 가능한 나노입자를 보여주는 모식도

나노입자 특성 연구: 나노입자 그룹(제1그룹)

연구단의 제1그룹인 ‘나노입자그룹’은 투과전자현미경(TEM; transmission electron microscopy)을 이용한 방법뿐만 아니라, 분광학적 방법, MALDI-TOF 질량분석법, 초전도 양자 간섭 장치, 전기화학적 분석법 등 다양한 분석법의

로 나노입자의 특성을 연구하고 있다. 금속 및 금속산화물, 반도체 등 다양한 소재를 사용해 다양한 구조를 가진 나노입자 연구도 진행하고 있다.

생명과학, 의학, 에너지 분야에서 나노입자를 실질적으로 응용하기 위해서는 우선 균일한 크기의 나노입자를 합성할 수 있어야 한다. 나노입자의 물리적, 화학적 성질은 크기에 따라 변하기 때문에 크기 분산도(size distribution)가 넓은 나노입자를 응용 분야에 적용하는 것은 한계가 있다. 이에 나노입자그룹은 균일한 산화물 나노입자를 합성할 수 있는 새로운 합성법인 ‘가열 공정(heat-up process)’을 개발했다. 이 기술은 일정한 크기의 나노입자를 배치(batch)당 킬로그램 단위로 생산할 수 있는 유일한 합성법이다. 특히 연구그룹은 기존 금속-금속에서만 가능하던 갈바닉 치환반응을 산화금속-산화금속 사이에서도 가능하게 해 산화망간 산화철 산화코발트 등으로 나노입자 합성을 성공시키는 성과를 내놓았다.

나노재료를 응용:전기화학 · 에너지 그룹(제2그룹)

제2그룹인 ‘전기화학 · 에너지 그룹’은 나노재료를 전기화학 에너지소자에 응용하는 연구를 추진하고 있다. 나노재료는 에너지저장 및 변환소자에 적합한 특성을 가지고 있다. 첫째, 나노입자 고유의 독특한 촉매성질들(활성이 전혀 없는 벌크 상태의 금이 2-3 nm 나노입자 상태에서는 엄청난 활성을 보인다)이나 반도체 나노입자의 양자제한효과 등 특이한 성질은 에너지변환 효율을 크게 향상시킬 수 있다. 둘째, 아주 넓은 표면적은 적은 양의 재료로 높은 에너지 변환효율과 촉매활성을 확보할 수 있게 한다. 이러한 성질을 토대로 전기화학 · 에너지그룹은 나노입자와 나노구조물질을 제조하고 다양한 에너지 저장 및 변환장치, 촉매에 응용하고 있다.

이 연구그룹은 나노 입자 소재의 표면에서 일어나는 전기 화학적 현상에 관한 고찰과 반도체 나노 입자가 가지는 광 전기화학 특성 연구를 진행하고 있다. 연구그룹은 연료전지(fuel cells), 첨단 배터리(advanced batteries), 나노 태양 전지(nano-solar cells)의 세부분야로 나뉘어 있으며 고효율 · 고용량에너지 저장 물질의 제조, 반도체 나노입자의 태양전지 분야 응용, 나노입자의 열전소자 응용, 나노입자와 나노구조물질을 이용한 촉매 개발 등에 대한 연구를 수행하고 있다. 제일계산(first-principle calculation)을 통한 첨단 배터리 물질 설계 및 특성 분석 연구를 하고 있는 강기석

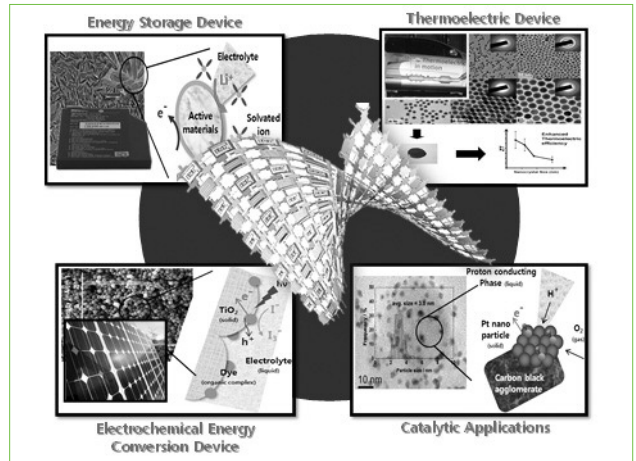


그림 3. 나노입자를 이용한 에너지 촉매 분야의 응용

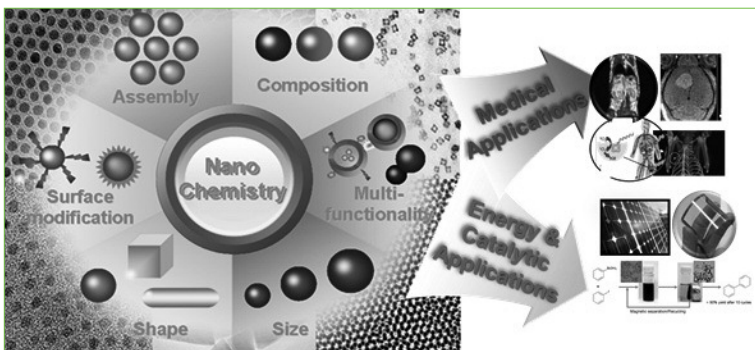


그림 4. 다양한 나노입자의 조립과 적용을 통한 의학 및 에너지 기술로의 응용

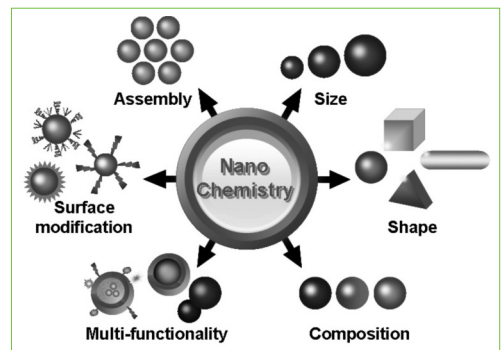


그림 5. 나노 소재 화학의 개요

교수팀과 전기화학적 에너지 변환 및 저장 장치·소자를 개발하고 있는 성영은 교수팀은 전기자동차에 응용이 가능한 고용량, 고출력, 고안정성 배터리 및 연료전지 시스템 구축을 목표로 공동 연구를 진행하고 있다. 이들 연구성과는 ‘나노레터스’ (*Nano Letters*, “Self-Assembled Fe₃O₄ Nanoparticle Clusters as High-Performance Anodes for Lithium Ion Batteries via Geometric Confinement”, 2013.7.31.), ‘미국화학회지’ (*Journal of the American Chemical Society*, “Hybrid Cellular Nanosheets for High-Performance Lithium-Ion Battery Anodes”, 2015.9.1) 등에 다수 게재됐다.

생명의학분야에 나노입자 응용:나노메디신 그룹(제3그룹)

제3그룹인 나노메디신 그룹은 MRI 조영제와 약물전달체 등 다양한 생명 의학 분야에 나노입자들을 응용하고 있다. 나노입자는 생명과학 및 의료 분야에 응용가능성이 높은 것으로 평가받고 있다. 나노입자는 체내를 순환하고 세포에 침투하며 생체분자와 직접 상호작용을 할 수 있는 이상적인 플랫폼이다. 또한 나노입자는 입자 표면 개질을 통해 표적 물질을 부착할 수 있다는 장점으로 인해 약물 전달과 생체 조영 등 다양한 영역에 적용될 수 있다. 이에 나노메디신 그룹은 생체친화적인 나노입자를 제조하기 위한 연구를 진행해왔다. 현재는 암 조직 주변에 형성된 혈관들을 통과할 수 있는 나노입자를 이용해 생체 표지자가 암세포에만 선택적으로 결합할 수 있는 능동 표적(active targeting) 방법을 연구 중이다. 이와 더불어 생체적합성 리간드 및 표면 개질, 나노입자를 이용한 새로운 MRI 조영제 및 광학 이미징 프로브 연구, 난치성 질환의 조기진단 및 치료용 나노메디신에 대한 연구도 진행하고 있다. 특히 MRI 조영제와 나노입자를 이용한 항암제형은 학계에서

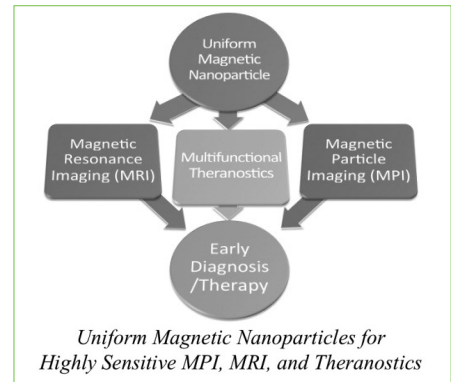


그림 6. 균일한 나노입자를 통한 조기진단과 치료 방법의 개발

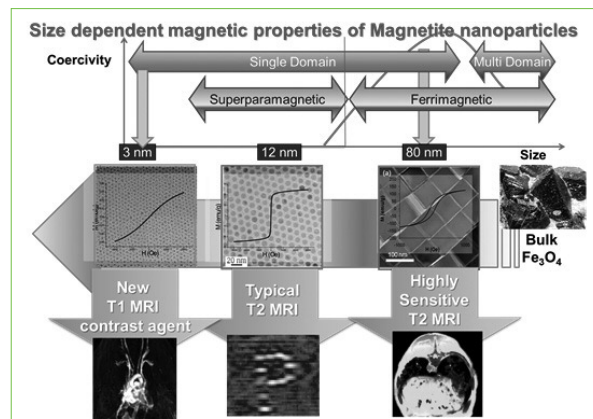


그림 7. 크기범위에 따라 달라지는 산화철 나노입자의 MR 조영효과

많은 주목을 받고 있다. 이 그룹의 연구는 ‘네이처 머터리얼스’ (*Nature Materials*, “High-Resolution Three-Photon Biomedical Imaging using Doped ZnS Nanocrystals”, 2013.2.17), 2014년 ‘미국화학회지’ (*Journal of the American Chemical Society*, “Multifunctional Tumor pH-Sensitive Self-Assembled Nanoparticles for Bimodal Imaging and Treatment of Resistant Heterogeneous Tumors”, 2014.4.1.), ‘ACS Nano’ (“pH-Sensitive Nanoformulated Triptolide as a Targeted Therapeutic Strategy for Hepatocellular Carcinoma”, 2014.8.5) 등 저명 학술지에 게재됐다

다양한 성과 도출... 융합연구도 성공

연구단은 최근 각각의 연구분야에서 다양한 성과를 발표했다. 연구단의 대표적인 연구업적은 ‘금속 산화물 나노결정에서의 갈바닉 치환반응을 이용해 중공형(中空形) 나노입자의 제조에 성공하고 기능성 나노구조체의 리튬이온전지에 응용해 에너지 분야의 응용 가능성’을 연 것(*Science*, 2013)을 꼽을 수 있다. 그리고 연구단은 혈액이 아닌 땀으로 혈당을 측

정하는 기술(*Nature Nanotech.* 2016)을 개발해 세계적인 주목을 받고 있다. 이 기술은 채혈없이 혈당을 측정하는 것으로 상용화될 경우 기존 시장의 판도를 바꿀 수 있는 것으로 평가받고 있다.

바이오메디컬 응용분야에서 기존 이광자 형광 현상을 넘어 삼광자 현상을 확인·적용해 ‘망간 도핑된 황화아연 나노입자를 이용한 고해상도 삼광자 생체 영상’을 얻어 새로운 무독성 양자점 생체영상을 구축했다(*Nature Mater.* 2013). 또한 웨어러블 유비쿼터스 전자 소재 분야에서 ‘금 나노입자와 금·실리카 나노입자 기반의 다기능성 운동장애 진단 및 치료용 전자시스템’을 개발, 실시간 다기능성 운동장애 진단·치료용 전자시스템으로 연결했다(*Nature Nanotech.* 2014).

이어 기초 나노과학 분야에서는 ‘나노입자의 크기에 따른 산화철 나노입자의 도체-부도체 상전이 거동 연구’를 통해 20nm를 기준으로 거동 패턴이 달라짐을 확인해 거동의 입자 크기 의존성을 보고했다(*Nano Lett.* 2015). 그리고 ‘도핑된 반도체로서는 가장 작은, Mn^{2+} 가 도핑된 $(CdSe)_{13}$ 클러스터’를 합성하고 그 특성에 대한 결과도 발표했다(*J. Am. Chem. Soc.* 2015).

그리고 소자 응용분야에서는 ‘양자점 나노입자를 2,460 ppi(pixels per inch)의 초고해상도 삼원색 패턴으로 구현’할 수 있는 음각 전자-인쇄 기술을 개발했다. 연구단은 이 기술을 이용해 양자점 LED로 ‘전자 문신’을 구현, 차세대 웨어러블 발광소자로서의 가능성을 제시했다(*Nature Comm.* 2015).



그림 9. 인공피부를 적용한 의수

의료 응용분야에서는 산화물 재료를 이용하여 휘거나 늘어날 수 있으며 피부에 부착 가능한 ‘변형률 센서·온도 센서를 제작’하고 이들 소자의 민감도를 크게 향상시킬 수 있는 기술을 개발했다. 이를 통해 신체가 불편한 환자들의 상태를 실시간으로 모니터링해 휠체어를 간단한 움직임으로 구동할 수 있는 시스템을 구현했다(*Adv. Healthcare Mater.* 2015). 이외에도 그래핀 나노리본과 금 나노박막을 이용해 세포의 활동을 실시간으로 관찰할 수 있는 다기능 세포배양기판 제작 기술을 개발했으며, 이 기판위에서 제작된 세포시트를 생체조직 위에 전자인쇄하는 기술을 개발함으로써 손상된 근육조직의 재생을 위한 치료법의 새로운 접근 방법을 제시했다(*ACS Nano* 2015).

에너지 분야에서는 다층 멀티스케일방식의 고분자 마이크로 나노 패턴 막을 개발해 전력밀도가 40% 이상 향상되는 결과를 확인했으며(*Nature Comm.* 2015), 1-D 면심정 방향 철-백금 합금 나노 촉매 개발해 활성화와 내구성 면에서 기존 촉매보다 우수함을 확인했다(*Adv. Energy Mater.* 2015). 또한 천연 흑연을 이용한 나트륨(소듐) 저장 특성을 규명해 현실적인 소듐 이차전지로의 적용 가능성을 증명했고(*Adv. Func. Mater.* 2015), 흑연 층간화합물의 박리 메커니즘을 규명했다(*Chem. Mater.* 2015)

영상의학 분야에서는 가성진행과 진성 중양 재발을 감별할 수 있는 영상 기법인 DCE 영상 분석 기법 개발(*Radiology* 2015), IDH 돌연변이(mutation) 유·무 감별 가능한 영상분석기술 개발(*J. Neurooncol.* 2015), 뇌척수액 대사체 분석이 세포검사보다 민감도가 우수함을 규명(*Int. J. Cancer* 2015), 뇌종양 환자의 장기 합병증인 출혈과 뇌백질 변성에 대한 분석(*PLoS One* 2015), 뇌교모세포종 환자에서 핏지교종(oligodendroglial tumor) 성상에 따른 영상 소견 차이 분석(*Neuroradiol.* 2015) 등의 실적을 얻었다.

또, 그룹 간의 융합 연구도 활발히 이루어져 성과가 도출되고 있다. 연구단의 모든 그룹은 ‘웨어러블 기기 관련 소재 기

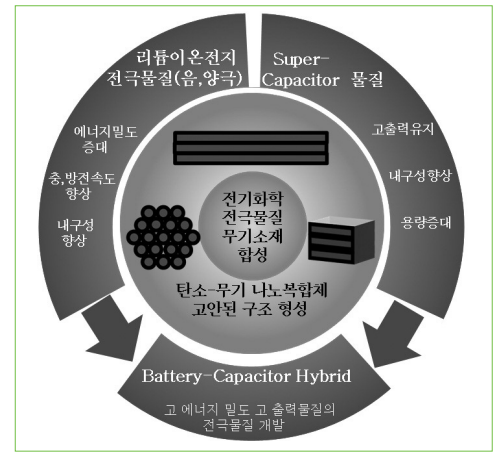



그림 8. 나노 소재를 이용한 에너지 저장 기술의 개발

술과 합성·전환 반응 촉매'에 대한 학제 간 연구를 진행했으며 이 결과는 '네이처 나노테크놀로지' ("Multifunctional-wearable devices for diagnosis and therapy of movement disorders", 2014.3.30.)에 게재됐으며, '네이처 커뮤니케이션스' ("Stretchable Silicon Nanoribbon Electronics for Skin Prosthesis", 2014.12.9.) 등에 실렸다. 연구단은 현재 뇌종양 치료를 위한 생흡수성 능동 전자 패치, 심장 신호 측정·치료를 위한 심장제세동 전극 매시(mesh), 다기능성 소자 제작 기술, 웨어러블 디스플레이 소자, 투명 그래핀 기반 센서 시스템 등 웨어러블 기기에 특화된 소재 개발에 집중하고 있다. 

기초과학연구원(IBS)
나노입자 연구단은...



“연구단의 첫 번째 목표는 나노입자를 제조해 의료분야, 에너지 분야에 응용하는 것입니다.
두 번째는 나노입자분야의 세계적 연구자들을 양성하는 것입니다.
마지막으로 아시아권 나노입자 연구 분야의 허브 역할을 우리 연구단이 수행하는 것입니다.”



현택환 단장

- 서울대 화학생물공학부 교수
- 기초과학연구원 나노입자 연구단 연구단장

나노입자연구단을 이끌고 있는 현택환 단장은 “우리나라가 세계적 수준의 나노과학기술 선도국가로 발돋움하는 데 연구단이 크게 기여할 것”이라고 연구단 목표를 밝혔다. 현 단장은 서울대 화학과를 졸업한 후 미국 일리노이대학에서 박사학위를 취득했으며 노스웨스턴 대학에서 박사후연구원으로 재직했다. 1997년 서울대에 부임한 후 현재까지 화학, 화학공학, 재료과학, 나노분야 세계적 잡지에 230편 이상의 논문을 발표했으며 이 논문들은 2만6000회 이상 인용됐다. 2010년부터 미국화학회지 부편집장을 역임하고 있으며 현재 영국왕립화학회(Royal Society of Chemistry) 석학회원, 미국 재료연구학회(Materials Research Society) 석학회원으로도 활동하고 있다.

그는 젊은과학자상(2002년), 듀폰과학기술상(2005년), 포스코 청암과학상(2008년), 교육과학기술부 대표우수성과 60선(2009년), Top 100 Chemists of 2000-2010 (37위) (UNESCO & IUPAC, 2011년), 호암상(2012년) 등 다양한 상을 수상했다. 이어 오는 8월에는 국제진공과학기술응용연합(International Union for Vacuum Science, Technique and Applications: IUVESTA)이 수여하는 최고권위상인 'IUVESTA 기술상(IUVESTA Prize for Technology)'을 한국인 최초로 수상할 예정이다.

2012년 8월에 출범한 나노입자연구단은 2015년까지 약 200편의 SCI급 논문을 발표했다. 논문인용지수(IF) 10 이상의 학술지에 20편 논문을 게재했으며 이 중 3편은 IF 30 이상의 학술지에 발표했다.

연구단은 9명의 교수와 16명의 박사, 114명의 석박사과정 연구원 그리고 26명의 연구지원인력(기술인력, (보조)연구인력, 행정인력) 총 165명의 인력으로 구성되어 있다.