

산학연 연구실 소개 (1)

고려대학교 Global GET-Future 연구실 (Global Green Energy Technology-Future Laboratory)

세종시 조치원을 고려대학교 세종캠퍼스 과학기술대학 신소재화학과

전 화 : 044)860-1493 FAX: 044)860-1739

홈페이지: <http://www.cslhm.org> & <http://www.koreacapm.org>



연구책임자 | 김환규

고려대학교
신소재화학과 교수

1. 연구실 소개

본 연구실에서는 기존의 기술 한계를 극복하기 위한 신개념의 차세대 박막 태양전지 기술의 핵심 원천 기술(소재, 공정 및 소자)을 개발함으로써, 유기화학, 무기화학, 고분자화학, 나노화학, 계산화학, 전기화학, 분광학, 소자물리학 등의 서로 다른 학문 고유의 특성 영역들을 함께 접목하여 국내 R&D 인프라의 교류 활성화를 통한 제2의 반도체산업으로 지속적인 성장 가능한 신학문/신산업의 창출을 도모하며, 국제공동연구와 산학연 협력을 통하여 기존 기술의 한계 극복형 차세대 박막 태양전지를 선도하는 Top 리더쉽을 갖춘 창의적, 도전적인 통섭형 고급 인력을 양성하여 국가 발전과 사회의 보탬이 되도록 “연구와 교육”에 최선의 노력을 다하고 있다.

본 연구실은 2007년 3월 김환규 교수가 고려대학교 신소재화학과에 특별초빙으로 부임한 이후, 그 동안 “광정보 소재 및 소자 연구 개발”에 다년간 직접 참여와 다양한 연구경험에서 축적된 총괄적인 과학적 지식, 집광 나노 소재의 설계 및 합성 기술, π -전자 제어 기술, 구조 및 형태 제어 기술, 재료 특성 평가 기술, 분광 분석기술 및 다층박막제조 기술 등의 핵심 요소 기술로부터, 새로운 관점에서 기존 물질의 한계를 극복할 수 있는 신개념의 차세대 박막 태양전지 분야의 연구를 수행하고 있다. 본 연구실은 지식경제부와 정보통신연구진흥원이 주관하는 ‘2008년도 대학 IT 연구센터 육성지원(ITRC) 사업’에 선정되어 “태양광 정보소재 연구센터”를 설립하여, 염료감응 태양전지(DSSC)의 핵심 분야 개발을 수행하였으며, 현재는 교과부 주관 “신기술 융합 성장동력사업”의 일환으로 “비실리콘 박막태양전지 융합연구단(고효율 염료감응형 태양전지 신소재개발(세부과제 책임자))”를 수행하고 있으며, 2012년 7월에 지식경제부 및 한국에너지기술평가원 주관 “에너지 미래선도(GET-Future)인력양성사업”에 선정되어 “글로벌 GET-Future 연구실”을 수행하고 있다.

현재 수행중인 염료감응 태양전지는 고가의 실리콘 소재와 웨이퍼 소재가 원재료 비용에 차지하는 비중이 50% 수준으로 원가절감의 핵심이 되고 있는 반도체 접합 태양전지와는 달리, 원재료 비용을



〈차세대 박막 태양에너지의 핵심 원천 기술 개요도〉

상당히 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 염료감응 태양전지의 변환효율 및 성능은 전적으로 구성 핵심소재의 성능 및 효율성에 크게 의존하게 되는 소재중심 기술이 핵심 산업이고, 기술개발에 따른 성능개선 여하에 따라 태양전지 시장 전체에 미치는 영향이 매우 큰 차세대 태양전지 분야이며 특히, 우리나라는 세계 최고의 기술력과 생산인프라를 보유하고 있는 반도체, LCD 및 OLED 디스플레이 강국으로 염료감응 태양전지 기술과 유사한 기반기술을 가지고 있으며, 기술개발 후 산업화 시에 기존의 산업 인프라를 활용할 수 있어 매우 유리한 위치에 있으며 디스플레이, 반도체 강국의 위상을 이어가기 위한 차세대 핵심기술로, 소재/소자/장비기술을 포함한 원천 신기술을 성공적으로 개발하면 고부가 가치의 상품 개발을 선점할 수 있어 염료감응 태양전지는 '09년 17개 신성장동력 산업, 62개 "스타 브랜드" 및 KISTEP 선정 10대 유망 기술 중 으뜸 유망 기술로, 블루오션 시장 전망, 반도체산업에 이어 거대 먹거리 및 일자리의 창출이 전망되고 있다.

이러한 밝은 전망에 힘을 얻어, 본 연구실은 최근 수년간 광전자 나노소재 분야의 연구를 수행하여 확보한 "집광 희토류 나노 소재기술에 대한 원천 소재 합성기술 및 분광 분석기술"을 통하여, 그 동안 연구 환경 구축으로 다소 어려운 시기인데도 불구하고, 최근 5년이라는 짧은 기간 동안에 염료감응 태양전지 분야의 연구를 수행하여 염료감응 태양전지용 원천소재 합성기술과 분광 분석기술 및 공감응 공정 기술 개발 포함 원천소자기술을 이미 상당히 확보한 상태이다(국내특허등록 3건, PCT국제특허 출원 3건 및 국내특허 출원 18건 및 SCI 논문게재 11편).

2. 주요 연구내용

염료감응 태양전지의 원리는 염료에 태양 빛이 흡수되면 전자-정공 쌍을 생성하며, 전자는 반도체 산화물의 전도띠로 주입된다. 반도체 산화물 전극으로 주입된 전자는 나노입자 간 계면을 통하여 투명 전도성 막으로 전달되어 전류를 발생시키게 되며 산화된 염료는 산화-환원 전해질에 의해 전자를 받아 다시 환원되어 작동 과정이 완성된다.

이론적으로 염료감응 태양전지가 구현할 수 있는 최대 광전변환효율은 약 26%로 알려져 있다(H. J. Snaith, *Adv. Funct. Mater.*, **20**, 13 (2010)). 그러나 현재까지 보고된 염료감응 태양전지의 최고 효율은 12.3%이며, 이는 이론치와 비교하여 상당히 동떨어진 수치이다. 이처럼 염료감응 태양전지의 실제 효율이 이론치에 한참 못 미치고 있는 이

유는 염료감응 태양전지를 구성하는 각 소재들의 한계에 의한 것으로 이러한 근본적인 한계를 극복하기 위해서는 (1) 넓은 가시광선 및 근적외선 영역에서의 광흡수능력이 뛰어난 새로운 염료의 개발 (2) 전도띠가 염료의 LUMO 에너지 준위에 최적화된 TiO_2 산화물의 개발 (3) 산화 에너지 준위가 염료의 HOMO 에너지 준위에 최적화되고 이온 및 전하 전도도가 우수한 새로운 전해질 소재의 개발 (4) 광전극과 전해질 계면에서의 전하 재결합을 효과적으로 막아주어 개방전압을 증가시키는 신기능성 소재의 개발이 필요하다. 본 연구실에서는 상용화에 걸림돌이 되고 있는 기존 기술의 한계를 극복하고자, (1) "핵심 소재의 고성능화 및 저가격화 합성 기술 개발", (2) 전색체 광흡수능력을 가지는 "공감응 공정기술 개발", (3) 이를 통한 염료감응 태양전지의 장기 안정성 및 효율 향상 극대화를 위한 "재료 특성 맞춤형 소자 공정 및 소자 기술 개발"을 통하여 공학적으로 접근 가능한 효율 18%를 목표로 기술혁신에 매진하고 있다.



< DSSC 기존 기술의 한계점 및 극복방안 >

가. 고효율 전색체 유기염료의 개발

DSSC용 염료는 크게 유기금속 염료와 유기염료로 분류할 수 있다. 유기금속 염료인 Ru(II)계 염료는 11% 이상의 높은 광변환 효율을 나타내나 자원의 제한이 있고 분자 설계에 제한이 있는 등의 단점을 가지고 있다. 반면에 유기염료는 아직까지는 Ru(II)계 유기금속 염료에 비해 광변환 효율은 낮으나 높은 몰흡광계수, 낮은 가격, 다양한 분자설계 등의 장점을 가지고 있어 활발한 개발이 진행되어지고 있다.

본 연구실에서는 고효율 유기염료 개발을 위해서 다음과 같은 전략을 가지고 염료를 설계·합성하고 있다. 고효율 염료를 개발하기 위해서는 첫째, 염료는 920 nm 이하의 전 가시광선 영역의 빛을 흡수하는 전색체 염료일 것. 둘째, 전해질이나 정공전달체로부터 전자주개가 용이하여

재생이 용이하도록 염료의 oxidation potential을 낮출 것. 셋째, 염료의 LUMO가 TiO_2 의 conduction band보다 높아 전자를 쉽게 전달하도록 할 것. 넷째, 염료가 TiO_2 에 잘 결합하도록 CO_2H 기를 부착할 것, 다섯째, 흡광계수가 높고 열적 안정성이 높아야 한다는 것이다.

본 연구실에서는 이러한 사항을 고려하여 이중채널 시스템을 도입한 고차구조형 염료 및 fluorene, triphenylamine 등의 여러 donor derivative를 도입한 porphyrin, squaraine 과 같은 새로운 고효율 유기 염료들을 개발하고 있다.

나. 정공수송이 가능한 다기능성 공흡착제의 개발

본 연구실에서는 세계 최초로 기존의 염료감응 태양전지에 사용되는 공흡착제처럼 염료간의 응집을 방지하여 염료에서 금속 산화물의 전자주입 효율을 향상시킬 뿐만 아니라 같이 공흡착되는 염료에 따라 (1) 전해질보다 빠르게 산화된 염료를 환원시켜주는 염료의 HOMO 준위에 따른 정공수송형 다기능성 공흡착제(*Chem. Eur. J.* (2011)), (2)유기염료의 부족한 단파장 영역에 빛을 흡수하여 공감응 효과를 낼 수 있는 흡수파장에 따른 공감응형 다기능성 공흡착제(*J. Mater. Chem.* (2012))와 같은 염료 맞춤형 다기능성 공흡착제를 개발 및 원천기술을 확보하였다[국내외 특허 출원 다수]. 본 연구실에서 개발한 정공수송이 가능한 다기능성 공흡착제는 기존의 염료감응 태양전지에 사용되는 공흡착제인 DCA처럼 염료의 응집을 방지하여 염료에서 금속 산화물의 전자주입 효율을 향상시켜 단락 전류(J_{sc}) 및 개방전압(V_{oc})를 향상시켜주는 것뿐만 아니라 기존의 I_3^-/I^- 시스템의 산화-환원 전위 보다 낮은 새로운 산화-환원 전위를 형성하여 염료와의 개방전압손실을 줄이며, 또한 기본 전위 보다 낮아진 산화-환원 전위로 인하여 n형 반도체 전도도의 페르미 레벨과의 전위차를 더욱 크게 형성하여 개방전압(V_{oc})을 높이며 정공수송능력에 의하여 금속 산화물에 전자가 주입되어 산화된 염료의 정공(hole)을 이동시켜 I^- 에 의한 염료의 환원보다 더욱더 빠르게 염료를 환원시켜주어 더 높은 J_{sc} 값을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

다. 유기 p형 반도체 물질(HTM)을 이용한 고효율 고체형 염료감응 태양전지의 개발

1998년 Grätzel 그룹은 Spiro-OMeTAD와 N3 루테늄 염료를 이용하여 유기 저분자 물질을 사용한 최초의 고체형 염료감응 태양전지를 제조하였고, 이후 지속된 연구를 통하여 최근 5%의 에너지 변환 효율을 가지는 소자를 보

고하였다. Spiro-OMeTAD 이외에도 TPD, TMEPA 및 HTM-TEG1 등의 단분자 p-형 반도체 물질들을 사용하는 노력들이 시도 되었으나, 아직 spiro-OMeTAD 보다 우수한 특성을 나타내는 p-형 반도체 물질은 보고되지 않았다. 본 연구실에서는 유기 화합물의 밴드갭 제어 기술을 통하여 HOMO 에너지 준위가 염료의 HOMO 에너지 준위에 최적화 되고 우수한 정공이동도 및 유기 용매에 대한 우수한 용해도를 갖으며 무정형 형태의 화학적 구조를 갖는 계산화물을 통해서 염료감응 태양전지에 최적화된 새로운 유기 p-형 반도체 물질의 개발에 관한 연구를 수행하고 있다.

라. TiO_2 광전극의 도핑효과에 의한 전류 또는 전압 향상 연구 및 탠덤 셀 개발

현재 염료감응 태양전지의 광전극으로 가장 많이 이용되고 있는 TiO_2 광전극은 새로 개발되는 장파장 흡수 염료의 LUMO 에너지와 TiO_2 전도띠 에너지의 차이가 너무 가까워(약 0.3 eV이하) 전류밀도의 감소가 일어나거나, 혹은 전압 상승효과를 극대화 시키는 연구에는 한계가 있다. 이러한 TiO_2 광전극의 단점을 보완하기 위해, 본 연구실에서는 Nb 첨가에 의한 도핑효과로 TiO_2 conduction band를 낮추어 염료의 LUMO와 TiO_2 전도띠 에너지의 차이를 최적화시켜 전류밀도를 상승시키고, 전자수송능력을 높임으로서 전류 및 TiO_2 광전극 내에서 전자의 life time을 증가시키거나 반대로, TiO_2 conduction band를 높여 전해질의 산화-환원전위의 에너지 준위차를 높임으로 전압을 상승시키는 효과를 연구하고 있다. 이 같은 연구로, 페르미 준위를 높여 아이오딘 혹은 코발트 전해질의 산화-환원 전위 에너지 준위차를 높임으로써 전색체 염료감응 태양전지의 전압 향상 및 소자제작 연구 및 유기 염료와의 LUMO와 TiO_2 전도띠 에너지의 차이를 최적화시켜 전류 향상 또는 전압 향상 및 탠덤 셀 신소자 개발 연구를 진행하고 있다.

마. 다기능 그래핀 전극 개발

지난 20여 년간, 광전극(photoanode), 염료, 그리고 전해질에 관한 연구는 많이 진행되었지만, 상대 전극(counter electrode)에 대한 관심은 부족했다. 현재는 주로 백금전극이 포함된 FTO(F-doped SnO_2)를 사용하는데, 백금 전극은 뛰어난 DSSC의 구동을 위한 산화환원반응을 위해 필수적이다. 비록 $10\text{--}100\text{ mg/cm}^2$ 의 소량을 이용하지만, 이를 더욱 저렴한 물질로 대체할 필요가 있다. 따라서 본 연구실은 울산과기대 백종범 교수와의 공동연구를

통하여 그래핀에 다양한 기능기를 도입한 DSSC용 그래핀 전극을 개발 연구하여 우수한 전기촉매 활동을 보여주는 연구결과를 얻었다. 백금을 이용한 제조비용의 90%를 차지하는 투명전극과 상대전극을 그래핀으로 대체하는 기술 개발로 가격 경쟁력 향상 및 전극과 염료의 접착력을 개선할 수 있어 효율성을 높이고 대량 생산 시 큰 시장이 형성될 수 있는 가능성을 열어 줄 것으로 보이며 상용화 될 경우 시장의 반응이 매우 좋을 것으로 기대가 된다.

바. 유기태양전지의 개발

최근 많은 연구와 진전이 이루어지고 있는 유기 태양전지는 저가형 태양전지의 새로운 대안으로 떠오르고 있다. 유기 태양전지는 유기재료의 손쉬운 가공성과 다양성, 낮은 단가로 인해 기존 태양전지와 비교하여 소자 제작과정의 간단하고 값싼 제조단가의 실현이 가능하다.

본 연구실은 유기 용매에 대한 용해성이 우수하고 높고 넓은 광자 흡수능을 가질 뿐만 아니라, 우수한 내열성, 내화화성, 열안정성등과 함께 정공 이동도를 향상시킨 유기 태양 전지용 저 밴드갭 도너 화합물을 연구 중에 있다. 또한 염료감응 태양전지용 유기염료의 전자수용체로 활용 가능한 화합물을 개발함에 따라, 에너지전환효율(power conversion efficiency, PCE)을 개선시킨 유기 태양전지 뿐만 아니라 장기안정성과 에너지변환 효율이 향상된 새로운 고효율 염료감응 태양전지용 유기염료, 유기 태양전지 등의 유기 광전자소자용 재료로 활용될 수 있는 화합물을 개발 중에 있다.

3. 향후 전망

인류에 있어 미래의 에너지 문제는 국운을 결정지을 만큼 중요한 문제이다. 태양전지를 직접 전기에너지로 변환하는 전기화학 장치로, 발전 효율이 높을 뿐만 아니라 환경 문제를 유발하지 않기 때문에 기존의 발전 설비를 대체할 수 있는 미래의 핵심에너지 기술로 기대를 모으고 있다. 따라서, 국가의 신재생 에너지 신기술을 선도하고 국제경쟁력을 확보하여 21세기의 에너지 산업의 선도적 위치를 구축하고, 이를 통한 고부가가치의 첨단 에너지 산업을 창출하기 위해서는, 이 기술을 뒷받침하는 핵심 기초 연구로서, 분자 수준에서 유용한 성질을 가진 물질을 창출하고 기능성을 제어하고 첨단화할 수 있는 에너지 변환 기능성 신소재 화학의 중요성이 부각되고 있다. 기존 과학기술의 한계 극복을 위한 소재화학 분야의 기반 기술 확립에 범국

가적 관심과 역량을 집중한다면 국내 과학기술 수준 향상은 물론, 에너지, 정보 산업 등 대표적 첨단 산업 기술의 국제 경쟁력 확보에 크게 기여할 것이다.

차세대 박막 태양전지는 여러 연구소와 기업이 선진국과 대등한 기술력을 보유하고 있으며 세계적 수준의 디스플레이 기술 및 우수한 나노기술 인프라를 활용할 수 있어 차세대 태양전지 기술로서 인정되고 있으며, 반도체 및 디스플레이 산업에 이어서 우리나라가 세계 시장을 주도할 수 있는 가능성이 있는 태양전지 기술로 인정된다는 점에서, 본 연구실은 “긍정적인 마음으로 self-motivation(스스로 동기 부여)를 가지고, 각자 개인 & 본 연구실의 발전을 위해, 각자의 맡은 주어진 연구업무에 최선을 다하며, 주인의식과 비전을 가지고 온고창신[溫故創新] 하는 마음으로 힘차게 정진하는 마음자세”의 기치 하에서 매우 도전적인 목표를 갖고 연구를 수행하고 있으며, 모든 구성원들이 자긍심과 열정을 가지고 꾸준히 연구에 매진하고 있어 그 결과 역시 기대된다. 향후 10년 이내에 다학제 간의 공동연구로 물질 개발부터 원리규명 연구, 소자 공정 및 소자 개발에 이르기까지 전반적인 모든 연구를 수행하여 연구 결과를 극대함으로서, 단시일 내에 차세대 박막 태양전지분야에서 독보적, 세계적으로 리드하는 그룹으로 성장 및 글로벌 차세대 태양전지를 선도하는 “글로벌 GET-future 연구실”로 발돋움하여 국내 과학기술 수준 향상은 물론 에너지, 정보 산업 등 대표적 첨단 산업 기술의 국제 경쟁력 확보에 크게 기여할 것이며, 또한 반도체 산업에 이어 “거대 먹거리 및 일자리의 창출함”에 일조를 하여 국가 발전과 사회의 보탬이 되도록 최선의 노력을 다하고 있다.

4. 연구실 구성원 소개

본 연구실은 김환규 교수와 Alex K-Y. Jen, J.-C. G. Bünzli WCU 교수, 연구교수 3명, 박사과정 3명, 11명의 석사과정 학생들이 연구에 매진하고 있으며 1명의 행정요원으로 구성되어 있다.

