

# 염료감응 태양전지 기술 및 미래전망



김종복  
(주) 동진씨미켐



이윤근  
(주) 동진씨미켐



이필립  
한국과학기술연구원  
광전하이브리드  
연구센터



고민재  
한양대학교  
화학공학과

## 기술의 개요

광전기화학적 태양전지인 염료감응 태양전지(Dye-Sensitized Solar Cells)는 광합성 원리를 이용하며 이것은 반도체 접합 태양전지에서는 찾아 볼 수 없는 독특한 구조이다.  $\text{TiO}_2$  나노입자를 사용하므로 반투명하면서도 다양한 색상구현이 가능하기 때문에 태양광 발전창호와 같은 BIPV(building integrated photovoltaics) 나 자동차의 선루프로 응용이 가능하다는 뚜렷한 특징이 있다.

염료감응 태양전지의 작동 원리 및 셀 구조를 그림 1에서 보여주고 있다. 표면에 염료 분자가 화학적으로 흡착된 n-형 나노입자 반도체 산화물 전극에 태양 빛(가시광선)이 흡수되면 염료분자는 전자-홀 쌍을 생성하며, 전자는 반도체 산화물의 전도띠로 주입된다. 반도체 산화물 전극으로 주입된 전자는 나노입자 간 계면을 통하여 투명 전도성막으로 전달되어 전류를 발생 시키게 된다. 염료 분자에 생성된 홀은 산화-환원 전해질에 의해 전자를 받아 다시 환원되어 염료감응 태양전지 작동 과정이 완성된다.

염료감응 태양전지의 구조는 다른 전기화학 기기와 마찬가지로 크게 양극(염료가 흡착된 나노구조의 다공성  $\text{TiO}_2$  박막), 음극(Pt), 그리고 그 사이에 위치한 전해질( $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ 의 산화 환원 쌍)로 이루어져있다(그림 1(a)). 표면에 염료 분자가 화학적으로 흡착된 n-형 나노입자 반도체 산화물 전극에 태양 빛(가시광선)이 흡수되면 염료분자는 전자-홀 쌍을 생성하며, 전자는 반도체 산화물의 전도띠로 주입된다. 반도체 산화물 전극으로 주입된 전자는 나노입자간 계면을 통하여 투명 전도성막으로 전달되어 전류를 발생 시키게 된다. 염료 분자에 생성된 홀은 산화-환원 전해질에 의해 전자를 받아 다시 환원되어 염료감응 태양전지 작동 과정이 완성된다.

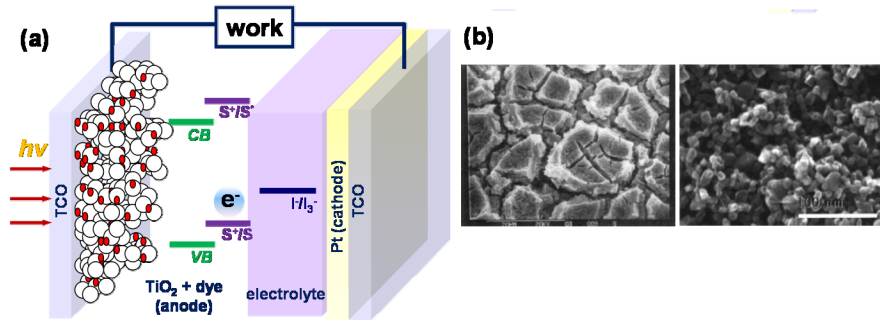


그림 1. (a) 염료감응 태양전지의 일반적 구조, (b) 염료감응 태양전지의 광전극 소재로 초기에 시도되었던 프랙탈(fractal) 구조의 TiO<sub>2</sub> 전극(좌)과 현재 사용되는 나노구조의 TiO<sub>2</sub> 전극(우)

초기의 염료감응 태양전지는 그림 1(b)의 왼쪽 사진에서 보듯이 표면적이 작은 평면적 구조의 TiO<sub>2</sub> 전극을 사용하여 충분한 양의 염료를 흡착하지 못했고 때문에 주목할 만한 효율을 얻을 수 없었다. 이러한 상황에서 전환점이 되었던 것이 나노구조의 다공성 TiO<sub>2</sub> 전극을 도입함으로써 광전류의 큰 증가와 함께 7% 대의 광 변환 효율을 얻은 결과였다. 나노기술의 도입을 통해 염료감응 태양전지의 광전기적 특성이 크게 향상되는 것이 입증되었고 이후 최근 까지 또 다른 전환점을 찾기 위해 각 구성 요소 에서 나노 기술을 이용한 활발한 연구가 이루어져 왔다.

## 기술의 활용분야

기존 Si 태양전지는 주로 발전용으로 사용되고 있으나 경량화, 유연화가 가능한 박막태양전지는 기존 분야이외 에도 건물일체형(BIPV) 및 이동용 전원 보조장치 등 다양한 분야에 활용될 수 있다.

**염료감응 태양전지**는 고분산성의 나노입자 필름과 빛을 흡수할 수 있는 다양한 염료를 선택하여 이용할 수 있고, 반투과 특성 및 디자인 변경이 용이하기 투광성과 심미성을 부각시킬 수 있다. 따라서 유리창호 용도의 전자재 일



한국, 동진씨미켐, 유리난간



한국 오리온, 대형 DSC



한국, 동진씨미켐, 무대 산대



한국 동진씨미켐, 텍시승강장(인천)

그림 2. 국내외 염료감응 태양전지 적용 사례



영국 Caventou, Current table



영국 Caventou, Current window



스위스(G2E), BIPV(Science tower)



스위스(G2E), Facade(밀라노 전시장)



스위스(G2E), 벽 구조물



스위스(G2E), 버스승강장

그림 2. 국내외 염료감응 태양전지 적용 사례

체형(BIPV) 투명 창호로 사용이 가능하며, 태양광 발전 컬러 유리창호에 응용이 가능하다. 따라서 염료감응 태양전지의 특징점을 이용하여 그림 2와 같은 다양한 응용분야로의 접근이 가능하다고 보고하였다.

## 기술개발 현황

### 염료감응 태양전지 주요기술 및 개발동향

염료감응 태양전지는 고효율 셀기술에서는 핵심소재의 고성능화 및 저가격화, 저온소성이 가능하고 내수성, 내화

학성을 가진 봉지재기술, 저가의 촉매전극 소재등이 개발되고 있다. 공정 및 대면적 장비 기술에서는 염료흡착, 전해질 주입, 전극 접합기술과 대면적 양산장비 기술이 개발되고 있다. 또한 발전유리창호 기술등 다양한 응용 기술도 개발되고 있다. 2011년 그린에너지 전략로드맵에서 제시한 염료감응형 태양전지의 핵심 개발 기술은 표 1과 같다.

### 국내외 연구 및 기술 동향

#### 유럽

염료감응 태양전지의 본격적인 연구의 시발점이 된 유럽, 특히 스위스는 지금도 여전히 활발히 연구가 진행되고

**표 1. 염료감응 태양전지 핵심기술**

| 핵심기술               | 세부핵심기술                               | 필요성/중요성   |
|--------------------|--------------------------------------|---|
| 고효율 셀              | 신구조 개발                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>현재 셀 성능 수준(~12%)를 뛰어넘어 공학적으로 달성 가능한 한계 효율 18%를 위한 신 구조 개발을 통한 원천기술 확보 및 기술 선점이 요구됨</li> <li>팬크로매틱, 다중염료 구조, 텐덤 구조 등</li> </ul> |
| 핵심소재 고성능화 및 저가격화   | 염료, TiO <sub>2</sub> , 전해질, 봉지재, TCO | <ul style="list-style-type: none"> <li>염료감응 태양전지 모듈코스트에서 재료비 비중이 높음(모듈코스트의 70% 수준)</li> <li>핵심재료의 고성능화, 저가격화를 통해서 양산시기를 앞당길 수 있음</li> </ul>                           |
| 핵심공정장비 및 대면적 장비 기술 | 양산장비기술                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>염료감응 태양전지의 양산장비는 독일의 SCM Coatema의 플렉서블 타입 외는 전무함</li> <li>국내의 디스플레이 산업 양산설비기술과 경험을 활용할 경우 해당 장비의 국산화 및 기술선도가 가능</li> </ul>     |
| 고효율, 고신뢰성 대면적 모듈기술 | 모듈기술                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>대면적에서 고효율, 고 신뢰성 기술확보가 양산에 필수적 요소임</li> <li>저가격 모듈 공정기술 개발 및 대면적화를 통한 가격경쟁력 확보</li> </ul>                                      |
| 응용기술               | 발전유리창호기술                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>염료감응 태양전지 모듈 array 기술 등 개발 필요</li> <li>염료감응 태양전지의 특징점을 활용한 발전유리창호 기술개발과</li> <li>일체형 PCS의 개발이 요구됨</li> </ul>                   |
| 품질평가기술             | 품질평가기술                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>국내의 소면적 품질평가 시스템에서 대면적 품질평가 시스템 기술개발 필요</li> <li>상용화 위한 국가차원의 품질인증규격 및 시스템 확립이 요구됨</li> </ul>                                  |

**표 2. 유럽의 연구그룹 및 업체**

| 그룹명                          | 기관                     | 연구내용  |
|------------------------------|------------------------|---|
| 그래첼 교수 (Michael Graetzel) 그룹 | EPFL (스위스로잔 연방공대)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>염료감응 태양전지 기술 원천권자                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 염료감응 태양전지 최고 효율 및 다수 특허 보유</li> </ul> </li> <li>Ahmed Zewail Prize in Molecular Sciences 수상 외(2016년 10월)</li> </ul>   |
| G2E(Glass2Energy) (스위스)      |                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>BIPV를 타겟으로 개발 및 양산라인 구축                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 약 0.6㎡크기의 유리기판에서 염료감응 태양전지를 구현(스위스 남부 Villaz-St. Pierre에 위치한 3,500㎡ 면적의 공장에서 2013년 첫 제조 시작)</li> <li>- 오스트리아 Graz 시에 신규로 건립 중인 Science tower라는 건물의 외벽에 적용(공사 진행 중)</li> <li>- 스위스 내 신규 건물의 Facade(입면)이나 도시시설물 등에 적용</li> <li>- 세계 최대 규모의 유리전사회(2016 Glasstec, 뒤셀도르프)에 전시하는 등 활발한 프로모션 진행 중</li> </ul> </li> </ul> |
| Caiventou (영국)               |                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>염료감응 태양전지를 이용한 테이블 디자인/제작                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 창가 혹은 야외용 테라스 향 테이블</li> <li>- 발전된 전기로 아이폰 등 전자기기 충전</li> <li>- 한정판매 및 일반인 대상으로 판매 개시</li> </ul> </li> <li>염료감응 태양전지를 이용한 창호 디자인/제작                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 젊은 신진 디자이너에게 수여하는 Young Swarovski awards 수상(2015년)</li> </ul> </li> </ul>                              |
| Syed Ghufuran Hashmi 박사 그룹   | Aalto University (핀란드) | <ul style="list-style-type: none"> <li>잉크젯 프린터로 염료감응 태양전지 구현                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 5~10분 정도의 짧은 공정 시간 가능성 확인</li> <li>- 1000시간 정도의 내광성, 내열성 평가 진행 (Energy &amp; Environmental Science, 2016)</li> </ul> </li> </ul>  |

있다. 본 기술의 원천권자인 그래첼교수(스위스로잔 연방 공대)는 가장 많은 논문과 다수의 핵심 특허기술을 보유하고 있다. 최근에는 동향은 기초연구보다는 산학이 연계된 실증 및 상용화 기술개발에 주력하고 있으며, 지투이(G2E)라는 업계를 중심으로 진행되고 있다.

또한 영국에서는 신진 디자이너로 구성된 카벤투(Caiventou)라는 업체가 염료감응 태양전지를 이용한 테이블 및 창호를 제작하여 활발한 프로모션을 진행하고 있다. 그 외 핀란드에서 잉크젯 방식으로 구현되는 실험적인 기초연구가 진행되기도 하였다(표 2).

표 3. 기타 국가의 연구그룹 및 업체 동향

| 그룹명   | 기관  | 연구내용  |
|---|---|---|
| Zhong Lin Wang 박사 그룹                          | Georgia Institute of Technology(미)<br>Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems(중국) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hybrid self-charging power textile system                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전력원: 태양전지(섬유형태의 염료감응 태양전지) 사람의 움직임(Kinetics) (Science Advances, 2016)</li> </ul> </li> </ul>  |
| Iran Nanotechnology Initiative Council (INIC) | Hamedan University of Technology(이란)<br>North Carolina State(미)                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>양쪽 조사 빛 활용 가능 모듈 구조 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Metal oxide/polymeric nanostructured films 구조</li> </ul> </li> <li>Nanofiber 형태의 Polyaniline 적용 및 성능 검토                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Network 구조의 Polyaniline 대비 빛 이용률 증대</li> <li>- 효율 증대 확인 (Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015)</li> </ul> </li> </ul> |
|   | Ocean University of China<br>Yunnan Normal University(중국)                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>빛 강우 조건에서 발전 가능한 염료감응 태양전지                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 염료감응 태양전지에 그래핀(Graphene) 적용</li> <li>- 강우의 salt ion 성분이 그래핀(Graphene)과 반응하여 전하 발생시킴(2016년)</li> </ul> </li> </ul>  |

### 기타 국가

중국과 중동에서도 본 기술에 대한 관심은 높다. 유럽에 서와 같이 상용화를 염두에 둔 실증 목적의 연구도 많이 진행이 되고 있으며, 신규 모듈 구조를 개발 목적의 연구도 활발하게 진행되고 있다(표 3).

### 한국

염료감응 태양전지의 시작은 유럽이었지만, 기술의 발전은 한국에서 진행되었다. 산학연에서 공히 고르게 연구가 진행되었으며, 최근에도 신규 소재 및 구조의 적용을 검토하고 있는 연구자들이 활발한 연구 성과를 발표하고 있다. 산업계에서는 이러한 연구를 확대하여 상용화를 위한 모듈 제조공정 기술의 개발, 모듈 대면적화 기술 개발을 진행하고 있으며, 관련 특허 확보 및 해외수출모델 구축에 적극적인 활동을 진행하고 있다.

대표적인 연구그룹은 KIST 광전하이브리드연구센터 외에도 포항공과대학교(Postech), 울산과학기술대학교(UNIST) 등이 있으며, 산업계에서는 세계 최초의 자동화된 유리기판 기반의 염료감응 태양전지 시생산라인 구축을 보유하고 있는 동진씨미켄과 대면적 모듈 기술개발을 진행하고 있는 오리온, 금속기판을 이용한 플렉서블 태양전지 모듈기술을 개발하고 있는 상보 등이 있다(표 4).

### 중장기 기술개발 방향

#### 모듈 제조 기술

한국은 디스플레이 제조기술에 상당한 강점을 가지고 있다. 이러한 제조기술을 기반으로 박막태양전지에서 가장 중요한 극복 기술인 대면적 모듈 제조기술을 개발하는 것이 본 태양전지 기술개발의 중장기 주요한 과제이다.

대면적화를 할 경우 현재 소면적 태양전지에서 일부분 기술개발을 진행한 신뢰성 및 재현성, 고효율화가 극복해야 할 주요 이슈가 된다. 대면적화가 될 경우 수광면을 넓어져서 많은 전자가 발생할 수 있으나, 저항의 증가로 발생한 전자가 외부전극으로 빠져나가는 것이 어려워 이를 극복해야하는 과제가 된다. 기존의 컨셉과는 다른 모듈의 구조 개발과 이에 따른 소재의 변경 및 개발을 통한 상기의 이슈를 극복하는 것이 필요하다. 또한 대면적에서 높은 신뢰성 및 재현성을 확보하는 것이 중요하다.

개발된 기술은 국내에서의 개발 및 보급을 통한 사업화 외에도 친환경 전자재 시장이 잘 발달되어 있는 유럽 쪽이나 혹은 자본을 보유하고 있으나 새로운 동력을 찾고 있는 중동 등에 Trun-key Solution으로 판매하는 비즈니스 모델 개발이 가능하다. 이를 위해서는 본 기술개발을 통해서 확보된 모듈 제조기술 및 적용 가능한 응용까지도 포함하는 특허기술을 확보하는 것이 1차적인 과제라 하겠다.

표 4. 유럽의 연구그룹 및 업체

| 그룹명          | 기관      | 연구내용   |
|--------------|---------|--|
| 광전하이브리드 연구센터 | KIST    | <ul style="list-style-type: none"> <li>유연방식의 염료감응 태양전지 신규 제작 방식                             <ul style="list-style-type: none"> <li>유리기판에서 고온 열처리한 광전극을 플라스틱 기판에 전사방식으로 옮겨 유연기판 염료감응 태양전지를 구현(ACS Nano, 2015)</li> </ul> </li> <li>저온 소성 방법을 적용한 고효율 플라스틱 염료감응 태양전지 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>광학시뮬레이션을 이용하여 광산란효과를 극대화 할 수 있도록 광전극 설계하여 8%의 세계최고수준의 플라스틱 기판을 적용한 플렉서블 염료감응 태양전지 개발 (Energy &amp; Environmental Science, 2016)</li> </ul> </li> </ul>                |
| 동진씨미켄        |         | <ul style="list-style-type: none"> <li>세계 최초 자동화된 Glass 기반의 염료감응 태양전지 시생산라인 구축</li> <li>염료감응 태양전지 관련 특허 200개 이상 보유</li> <li>창호업체와 함께 BIPV용 모듈 및 창호응용 개발 중                             <ul style="list-style-type: none"> <li>기후변화대응 기술혁신 10대 성과에 선정(미래창조과학부, 2015)</li> </ul> </li> <li>BIPV, 유리난간, 공공시설물 등의 다양한 응용 적용                             <ul style="list-style-type: none"> <li>세종시 수질복원센터 적용(난간/주차장, 2016)</li> <li>인천광역시 택시승강장(2015)</li> <li>서울특별시 아리랑페스티벌 적용(무대 산대, 2013)</li> </ul> </li> </ul> |
| 상보           |         | <ul style="list-style-type: none"> <li>SUS 기반의 플렉서블 태양전지 모듈기술 개발 및 파일럿 라인 공정구축</li> </ul>  |
| 박태호 교수팀      | Postech | <ul style="list-style-type: none"> <li>전자재결합 억제 및 전자재생성 촉진을 위한 신규 물질 제안                             <ul style="list-style-type: none"> <li>이종결합 신규물질이 전자의 이동 사다리 역할 (Energy &amp; Environmental Science, 2014)</li> </ul> </li> </ul>  |
| 오리온          |         | <ul style="list-style-type: none"> <li>대형 유리기판 염료감응 태양전지 구현기술 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>920x580mm의 세계 최대 수준의 사이즈 개발 중(기존 시생산 기판크기; 300x300mm의 약 6배)</li> </ul> </li> </ul>   |
| 류도현 교수       | 성균관대학교  | <ul style="list-style-type: none"> <li>인돌린계 염료들을 합성 및 소자 제작                             <ul style="list-style-type: none"> <li>신규 인돌린계 염료 합성</li> <li>얇은 박막(~2um) 염료감응 태양전지에 적용(유기염료 세계 수준 9.1% 광에너지 전환효율) (Advanced Functional Materials, 2016)</li> </ul> </li> </ul>  |
| 권태혁 교수       | UNIST   |  |
| 김태오 교수       | 금오공대    | <ul style="list-style-type: none"> <li>신규 광전극 물질 연구                             <ul style="list-style-type: none"> <li>질소와 구리를 이산화 타이타늄에 도핑</li> <li>광에너지 전환효율 11% 확인 (Journal of Power Source, 2015)</li> </ul> </li> </ul>   |
| 백중범 교수       | UNIST   | <ul style="list-style-type: none"> <li>그래핀을 상대전극에 적용한 연구                             <ul style="list-style-type: none"> <li>이종원소(Se) 도입을 통한 분극화로 그래핀의 전기활성도 향상 (Science Advances, 2016)</li> </ul> </li> </ul>   |

#### 응용발굴 및 실증화 기술 및 표준화 기술 개발

BIPV(건자재일체형 태양전지, Building Integrated Photovoltaics)에서 요구되는 다양한 요구 기술을 개발하는 것이 주요한 과제이다. BIPV 사업 개발을 위해서는 건축회사 혹은 건축설계회사에 당 기술이 건물에 적용되었을 때 예상되는 경제성 및 관련 기본 데이터를 적절하게 제공하는 것이 필요하다. 이를 위해서 전방에서 이해할 수 있는 형태로 DB를 구축하는 것이 필요하다.

본 기술을 실제 적용할 수 있는 창호에서 요구되는 단열, 내풍압, 내수밀성 등의 특성 확보하는 것은 필요한 수순이며, 이 외에도 투광 및 심미적 특성 확보가 가능한 창

호를 위해서 투과도 향상 소재 및 모듈 구조 개발하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 단순히 엔지니어가 아닌 디자이너와 연계한 모듈 디자인 개선이 주요한 접근 방식이라고 하겠다.

또한 BIPV 산업이 확장될 경우 주요한 이슈가 될 염료감응 태양전지 BIPV 표준화에서 좀 더 주도적 목소리를 내기 위해서 위해서 적극적인 국제 표준화 활동을 진행하여야 한다. 이러한 적극적 표준화 활동을 지지하기 위해서 대규모 실증 단지 구축 및 평가 적용 및 국내 및 해외 다양한 실증사이트 적용을 통한 데이터 확보하고 국내외 다양한 협력 파트너를 확보하는 것이 중요한 접근법이다.



## 열화기구 분석 기술

학문적으로는 건물에서 요구되는 수준까지 내구성을 증대하기 위해서는 모듈 및 소재의 열화기구 분석 및 열화 메커니즘 규명하는 것이 중요하다. 이를 통해서 BIPV 응용에 적용을 위한 DB 구축 및 경제성 확보에 더욱 기여할 수 있으며, 향후 발전용으로 확대 가능한 수명 향상 기술 개발에 기여할 수 있다. 또한 학계에서는 관련 데이터를 바탕으로 신규 소재 및 모듈 구조 개발에 이바지할 수 있다.

## 결 언

염료감응 태양전지는 실리콘 태양전지가 가지지 못하는 경량성, 유연성 등의 장점이 있으므로 창호, 이동용 전원 공급장치 등 다양한 응용분야에 적용 될 수 있어서 새로운 시장을 창출할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 경쟁력을 가지기 위하여서는 기존 태양전지와 대등한 성능을 확보하는 것이 중요하다. 이를 위하여 고효율 소재의 개발, 장기안정성 확보, 대면적 공정기술이 무엇보다 시급하다고 본다. 하지만 기존 반도체 공정 기술과 OLED 소재 개발 기술 및 인프리를 활용하면 2-3년내에 상용화된 형태의 염료감응형 및 유기 태양전지 제품을 볼 수 있으리라 기대한다. 아울러 정책적으로 BIPV 향과 같은 차세대 태양전지의 경우 기존의 RPS와는 다른 별도의 지원 보급 규정이 필요하다. 예를 들어 RPS의 차별화된 계수 도입 혹은 FIT 선별적 적용과 같은 정책이 있다고 하겠다. 이를 통해서 국내에서 먼저 해당 기술과 산업이 꽃을 피울 수 있고, 이후 해외로 수출 가능한 모델을 구축할 수 있는 지원 정책이 필요하다. 또한, 본 기술의 상용화를 위해서는 실증 연구를 통한 DB 및 실적을 확보하는 것이 중요하다. 하지만, 대부분의 실증연구는 예산이 모듈 기술 개발 혹은 제조 비용 등에만 한정되어 있어 실제 건물에 적용할 경우 발생할 수 있는 설치, 행정, 이후 퇴거 비용 등은 모듈 제조업체가 자체적으로 부담해야 하는 이슈가 있다. 따라서 실증연구에 맞는 예산 지원책이 필요하다. 또한 대면적화 등의 후


속 R&D 예산도 필요하다. 학문적으로는 열화기구 분석과 같은 연구를 통한 응용 확대와 신뢰성 확장을 위한 연구지원이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 한국산업기술평가관리원의 섬유스트림간헐력기술개발사업(10052064) 「드레이프성이 우수한 텍스타일 염료감응 태양전지 소재 및 아웃도어 응용제품 개발」의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 2016 녹색기후기술백서, 녹색기술센터발간.
- [2] 전자신문 2015. 12. 10 기후변화대응 6대 핵심기술로 에너지 신산업 창출.
- [3] <http://www.g2e.ch>
- [4] <http://www.caventou.com/>
- [5] Min Jae Ko et al. (2015) Completely Transparent Conducting Oxide-Free and Flexible Dye-Sensitized Solar Cells Fabricated on Plastic Substrates ACS Nano, 9, (4), pp 3760-3771; Min Jae Ko et al. (2016) Maximized performance of dye solar cells on plastic: a combined theoretical and experimental optimization approach, Energy & Environmental Science, 9, 2061-2071.
- [6] 헤럴드 경제, 2016. 04. 07 (주)오리온, 염료감응형 태양광전지 개발성공.. 연내 상용화 목표.
- [7] Tae-Hyuk Kwon and Do Hyun Ryu et al. (2016) Photoactive Thin Films: Indoline-Based Molecular Engineering for Optimizing the Performance of Photoactive Thin Films, Advanced Functional Materials, 26, (38), 6876-6887.
- [8] 충북일보, 2016. 10. 23 세종시에 '예쁘고 성능 좋은 태양전지' 설치됐다.
- [9] J Y Park et al. (2016) Copper and Nitrogen Doping on TiO<sub>2</sub> Photoelectrodes and Their Functions in Dye-



Sensitized Solar Cells, DOI information, Journal of Power Source, 306, 764–771.

[10] Jong-Beom Baek et al. (2016) Edge-selenated graphene nanoplatelets as durable metal-free catalysts for iodine reduction reaction in dye-sensitized solar cells, *Science Advances*, 2, (6), e1501459.

[11] Zhong Lin Wang et al. (2016), Self-powered textile for wearable electronics by hybridizing fiber-shaped nanogenerators, solar cells, and supercapacitors, *Science Advance*, 2, (10), e1600097.

[12] Daryoosh Vashaee et al. (2015) Titanium Oxide/ Polyaniline Nanostructure Boosts Efficiency of Solar Cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 143, 284–295.

[13] Peter D. Lunda et al. (2016), Dye-sensitized solar cells with inkjet-printed dyes, *Energy & Environmental Science*, 9, 2453–2462.

[14] Qunwei Tang et al. (2016), A Sun and Rain Bi-Triggering Solar Cell, *Angewandte Chemie*, 55, (17), 5243–5246.