

# 염료감응 태양전지의 기술동향과 과제

한국과학기술정보연구원  
전문연구위원 변선호  
(sonbi@reseat.re.kr)

## 1. 머리말

- 태양전지 시장은 2020년에 ¥10조, 2030년에 ¥30조에 달할 것으로 추정되어 이것이 달성되면 현재의 반도체 시장과 비슷한 규모의 신시장이 출현한다. 이의 달성에는 ① 태양전지 모듈의 발전효율 향상, ② 내구성의 개선, ③ 모듈제작 코스트의 절감 등이 필요하다. 유기계 태양전지는 ③의 효과가 가장 기대되지만 ①의 효과도 장래에는 충분히 기대된다. 유기계 태양전지는 전해액을 갖는 염료감응 태양전지(DSSC)와 고체의 유기박막태양전지로 크게 나뉘고, 이 글에서는 DSSC를 다룬다.
- DSSC의 발전효율은 10.4%가 공인되어, 비정질 실리콘 태양전지 단일셀 효율과 같은 수준이다. 비정질 실리콘 태양전지는 실용화 되었지만 DSSC는 효율적으로 실용화 여부가 검증단계에 있다. 금후 모듈화, 내구성 연구, 고효율 연구 그리고 공정의 저코스트화 등이 연구 초점이 된다.

## 2. DSSC의 작동 메커니즘

- DSSC는 나노 크기  $TiO_2$ (티타니아) 반도체의  $20\mu m$  정도의 집적체, 염료 분자, 요오드 함유 전해액으로 구성된다. 염료는 티타니아 입자 표면에 단분자층으로 결합되어 있다. 염료가 태양광을 흡수하여, 여기된 전자가 티타니아 입자에 주입된다. 여기전자는 n형 반도체인 티타니아의 나노입자 속을 이동하여 투명 전도막에 수집된다.
- 대극으로부터 티타니아/염료층에의 전자이동은 전해액 내 요오드 산화 환원 쌍에 의해 이루어진다. 태양전지 특성은 전압과 전류의 관계를 표시하는 그래프로 나타낸다. 최근은 대형 모듈의 효율향상에 관한 보고가 많고 모듈 최고 효율은 8.6% 이다.

### 3. 변환효율 향상을 위한 연구동향

- DSSC의 효율은 공인기관에서  $1\text{cm}^2$  이상의 면적에서 10.4%이고, 비정질 Si 태양전지와 거의 동일 수준이다.  $1\text{cm}^2$  이하의 셀 효율은 10~12%이고,  $100\text{cm}^2$  정도의 셀, 모듈에서는 6~8%의 효율이 보고되고 있다.
- 결정계, 화합물계 태양전지에 비해 DSSC의 변환효율은 아직 낮다. 고효율화에는 광포집효율, 전하분리효율 및 전하수집효율 향상이 필요하다. 25% 고효율의 결정성 Si은 500~1,100nm 범위의 태양광을 흡수하지만 DSSC의 Ru 염료는 400~800nm의 빛만을 흡수한다. 태양전지의 효율은 태양 광자의 발전효율로 나타난다. 변환효율=단락전류밀도( $J_{sc}$ ) × 개방전압( $V_{oc}$ )×구조인자(FF)로 표시된다. 변환효율 향상에는  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF의 각각의 향상이 필요하다. 광포집성능은  $J_{sc}$  향상에 크게 기여한다.
- 태양광 스펙트럼과 DSSC용 Ru 염료의 광전변환대역을 보면 Ru 염료가 흡수하는 400~800nm의 태양광 스펙트럼의 광자 적산은 약  $24\sim 25\text{ mA/cm}^2$ 이 된다. 일반적으로 DSSC의 개방전압( $V_{oc}$ )을 0.75V, FF를 0.75로 가정하면 14~15%의 효율이 생긴다. 투명전도막의 광투과도, 반사에 의해 태양전지에 실효 입사되는 광은 80~90%가 되므로 효율은 10~12% 정도가 된다. 이는 보고된 DSSC의 최고효율과 일치한다.
- 파장 400~900nm의 광을 광전변환 할 수 있으면  $32\text{ mA/cm}^2$ , 효율 18%가 기대된다. 따라서 이 파장 범위의 광을 흡수할 수 있는 새로운 염료를 찾기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 현재 가시역으로부터 근적외역까지의 넓은 파장영역에서 높은 광전변환효율을 갖는 염료는 보고되지 않고 있다. 이의 개발은 핵심 연구대상이 되고 있다.
- 티타니아에 2종류 이상의 혼합염료 흡착도 연구되고 있다. 400~500nm 파장에서 흡수 극대인 단파장 염료와 약 600nm에서 흡수 극대인 가시광 염료의 조합은 두 염료의 중복으로 고효율이 가능하다. 고효율의 가시광흡수 염료와 근적외역 광전변환 염료의 혼합시 오히려 근적외 염료로 인해 가시광 흡수염료의 효율을 저하시키는 경우가 많다. 저자들은 2종류의 염료를 한 층의 티타니아층에 위치 선택적으로 흡착시키는 방법을 고안하여 혼합흡착법에 비해 고성능을 얻을 수 있음을 보고했다.

- 혼합염료 용액에서 티타니아층을 무작위 흡착시킬 때도 최적화에 의해 2종류 염료의 나노공간에의 확산속도 차이, 티타니아 표면과 염료의 흡착강도 차이에 의한 위치 선택적 2층흡착구조가 가능함을 보고했다. 이들에 의해 2층염료흡착 하이브리드형 DSSC를 혼합용액에서 제작할 수 있다.
- 티타니아와 요오드 산화환원 쌍 구조의 DSSC 전압의 최고 기대치는 티타니아 전도대와 요오드 산화환원 쌍 준위의 차인 0.9V이다. 염료의 HOMO 준위를 요오드 산화환원 쌍 준위에 가깝게 높이고, 염료의 LUMO 준위는 티타니아 전도대에 가깝게 낮춰, 염료의 HOMO-LUMO 에너지 차를 줄이면 초과장화가 기대된다. 이 값이 1,378nm로 되지만 각각의 에너지 주입시의 전자장벽이 있어 염료의 HOMO-LUMO 에너지 차는 1.3V가 된다. 이로부터 가능한 염료의 최대 장파장은 954nm가 된다. 전자주입의 에너지장벽 감소가 고효율화의 중요과제이다.
- 광전변환과장의 광대역화를 위해 탠덤·하이브리드화법이 있다. 여러 염료로 만든 DSSC를 단순히 중복시키는 탠덤·하이브리드화의 실행은 가능하지만 투명 전도막 유리를 3매 이상 사용해야 되므로 비실용적이다. 한 셀 내 2매의 전극을 갖는 여러 개의 탠덤, 하이브리드 보고 예가 있는데 제1전극은 종래와 같고, 제2전극은 대극 상에 만드는 것이다.
  - 저자들의 다른 방법은 제1전극과 제2전극으로 구성되며 전자는 종래 전극과 같으며 단파장 측의 가시광을 변환한다. 제2전극은 부유전극인데 스테인리스 메쉬/다공성 티타니아 염료층의 복합막이고 근적외광을 변환한다. 제1전극과 제2전극의 조합으로 흡수과장이 중복되지 않는 염료를 사용하여 폭넓은 파장영역을 커버하는 탠덤화가 가능하였다.
  - 가시광의 고효율 변환 염료는 이미 있으므로 적외영역만 흡수하여 고효율 변환효율을 발휘하는 염료개발에 집중할 수 있어 개발 중에 있다. 티타니아 염료와 요오드 전해액만의 조합으로는 950nm보다 장파장광의 변환은 어렵다. 제2셀에 전도대 준위가 낮은 산화주석과 같은 산화물반도체와 요오드 산화환원 쌍의 조합을 사용할 수 있어 계산상으로 전자주입장벽을 고려해도 1,500~1,600nm 범위의 광을 변환할 수 있다.

- 효율향상의 다른 한 방법은 개방전압(Voc)을 높이는 것이다. 현 Voc는 티타니아의 전도대와 요오드 산화환원 쌍 준위의 차(0.9V)이므로 음방향으로 티타니아보다 높은 준위의 전도대의 산화물 반도체를 개발하던가, 양방향으로 요오드 산화환원 쌍보다 높은 준위의 산화환원 종을 사용해야 한다. 현재 고효율 Ru 염료는 티타니아에 최적화된 HOMO-LUMO 준위를 가지므로 재료가 바뀌면 이에 최적화된 염료개발이 필요하다.

#### 4. 기타 개발동향

- 고효율화 외에 전고체화가 중요과제이다. 정공수송재료에 의한 4~5% 효율 달성, 염료연구에 의한 연도별 효율향상, 이온성 액체에 의한 전해액의 손실을 방지하는 겔화로 준고체 DSSC가 연구되고 있다.
- 모듈구조 개발 및 이의 재료개발은 대면적화, 내구성 향상에 필수적이다. 투명전도막 기판의 전도성이 낮아 그리드 금속배선이 필요하므로 Ag 등의 금속을 전해액으로부터 보호할 필요가 있다. 요오드 전해액에 대해서 현재 Ti 금속이 내구성이 있으나 장기적 내구성 검토가 필요하다.
- 실내 용도에는 충분한 내구성이 있고 실외 가속시험에서 완전 밀봉에 의해 15년 이상의 내구성이 보고되고 있다. 침투 수분에 대한 대책으로 가수분해가 어려운 소수성 염료개발, Pt 대체의 카본전극 개발, 전해액 성분의 선택 등이 연구되고 있다.

#### 5. 맺음말

- DSSC는 실용화 가능성 검증단계에 있어 대면적화, 내구성 유지, 모듈화, 고효율화, 고체화 등의 연구가 진행되고 있다. DSSC는 많은 소재, 공정이 관련되어 시장출시에는 여러 전문분야의 민관학 연구자의 협력이 필요하다. 기초연구, 응용연구를 분담하여 문제점을 해결하며 개발을 가속화할 필요가 있다.

출처 : Hayase Shuji, “色素増感太陽電池-技術動向と課題”, 「工業材料(日本)」, 58(4), 2010, pp.58~64

## ◁ 전문가 제언 ▷

- 고가의 실리콘 태양전지에 대한 대책으로 경제적인 여러 태양전지가 개발되고 있다. 이중 염료감응 태양전지(DSSC), 화합물 반도체 등을 이용한 박막 태양전지가 개발되고 있다. CdTe 및 CIGS 태양전지는 이미 화석연료계의 발전비용보다 낮아졌거나 근접하고 있으며 고효율을 보이고 있으나 원료의 희귀성이나 환경상의 염려를 떨치지 못하고 있다.
- DSSC는 저렴한 재료비, 용이한 가공성 덕에 발전비용이 다른 태양전지에 비해 크게 유리한 장점이 있어 건물일체형 응용 등에 기대가 크다. DSSC의 변환효율은 기대보다 아직 낮아 실용화 여부가 검증단계에 있다. 1cm<sup>2</sup> 이상에서 변환효율 10.4%를 공인받았고, 현재 100cm<sup>2</sup> 정도에서 모듈 효율이 6~8%로 비정질 Si 태양전지의 단일 셀과 동급이다. 금후 고효율, 내구성 향상, 경제적 대모듈 제작 등이 연구의 초점이 되고 있다.
- 이글에서 일본 Kyushu 공업대학 교수 Hayase Shuji는 DSSC 기술의 기초로부터 염료기술에 의한 고효율 연구 등 기술개발 동향과 금후의 과제를 소개하고 있다. 현재 400~800nm 광흡수대역을 가진 TiO<sub>2</sub>와 요오드 산화환원 쌍의 이론적 광흡수대역 한계 약 954nm를 넓히기 위한 저자들의 탠덤 하이브리드 태양전지 연구소개가 돋보이고 있다. 비실용적 단순 탠덤화가 아닌 한 셀 내 2개의 전극사용에 의한 탠덤화이다.
- 제1전극은 단파장 가시광 변환용 종래 전극과 같고, 제2전극은 부유전극으로 스테인리스 메쉬/다공성 티타니아 염료층의 복합막으로 근적외광 변환용이다. 제2전극용 염료개발이 진행 중이고, 제2셀에 TiO<sub>2</sub> 대신 전도대 준위가 낮은 산화주석 반도체/요오드 산화환원 쌍의 조합 사용을 소개하고 있다. 중복이 없는 폭 넓은 광흡수 파장역이 가능한 것이다. 기타 개방전압의 향상, 내구성 모듈, 열화방지 기술 등이 설명되고 있다.
- 국내 DSSC 연구에서는 국내 최대 특허 보유 한국전자통신연구원, 11% 초과 변환효율을 보유한 한국과학기술연구원 등에서 개발기술을 민간기업에 이전 중에 있다. 이밖에 한국전기연구원, 고려대 등의 연구실적이 돋보이나 핵심인 염료연구에 거국적 지원이 필요하다. 민간기업에선 코오롱, 삼성 SDI, 우리솔라, 다이솔티모, 이견창호 등이 활발하다.