

염료감응 태양전지의 최근 기술 동향

성열문 (경성대학교 교수) · 한치환 (한국에너지기술연구원 박사)

1. 태양전지의 종류 및 특성

태양전지는 1839년 프랑스 물리학자 Edmond Becquerel이 광전효과를 발견하면서 태양전지가 제작되기 시작하였으며 단결정 실리콘으로부터 시작하여 다결정, 비정질 실리콘을 재료로 한 많은 실리콘계 태양전지가 개발되었다. CdTe, CuInSe₂ 등 화합물 반도체, 염료감응 태양전지(Dye-sensitized Solar Cells: DSCs), 유기 태양전지 등 다양한 태양전지가 개발되어 효율 향상을 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 가장 대표적인 단결정 실리콘 태양전지는 태양전지 제조에 맨 처음 사용한 재료로서 광전변환효율이 28(%)로 여타재료에 비해 가장 높은 수준이나 단결정 웨이퍼의 고가 및 가공 시 손실률이 높고(40(%) 수준) 대량생산에 한계 등 어려운 점이 많아 범용으로는 적합하지 않다. 다결정 실리콘 태양전지는 값이 저렴하고 대량생산이 용이하며 최대광전 변환효율이 18(%)로, 최근 상품화하고 있는 태양전지의 85(%)는 다결정 태양전지이다. 독일 뮌헨 기술대에서는 실리콘 표면을 검게 만들어 광 흡수율을 높여(반사광을 줄임) 광전변환효율을 20(%) 수준까지 향상시켰다(2006. 6). 이러한 신기술개발은 결정질 태양전지의 생산원가 및 전력 생산단가를 크게 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 비정질 실리콘 태양전지는 산업적으로 성공한 최초의 박막형 전지로 최대 효율이 11(%)이다. 화합

물 반도체인 CuInSe₂ (CIS)는 p/n 이종 접합구조로 최대효율이 11(%) 수준이며 인듐(In) 매장량한계(총 매장량 5,000톤 추정) 때문에 대량생산용으로는 어려움이 있다. 또 GaAs 태양전지 경우 최대 효율이 28.7(%)로 높으나 우주용과 같은 특수용도에 주로 사용된다. 최근에 각광을 받고 있는 염료감응 태양전지는 최대효율이 10~12(%)로 비교적 높고 재료비가 매우 싸며 대량생산이 용이하여 향후 기존 발전과 경쟁이 가능한 대안으로 부상하고 있으며 이에 대한 많은 연구들이 활발히 이루어지고 있다.

〈표 1-1〉 태양전지의 종류

대분류	중분류	소분류
태양전지	실리콘 태양전지	기판형 단결정, 다결정, 박판
		박막형 비정질, 미정질, 다결정
	화합물반도체 태양전지	I-III-IV족 박막형
		II-VI족 박막형
		III-V족 고효율
	유기 태양전지	염료 감응형
유기 분자형		

※ 자료 : 과학기술부, 한국과학기술정보연구원, 태양광발전에 관한 기술동향분석, 2006.

2. 염료감응 태양전지 기술 개요

1991년 스위스연방기술원(EPFL) 화학과 교수 Michael Gratzel이 발명한 염료감응 태양전지(DSSC)는 값싼 원료와 저가공비 면에서 가장 경쟁력 있는 기술의 하나로 큰 기대를 받고 있다. 염료감응 태양전지(DSSCs)의 특징은 전극기관의 재료나 염료를 바꿈으로써 형상이나 색채에 다양성을 갖도록 할 수 있다. 예를 들면 유리 기판을 플라스틱으로 바꿈으로써 flexible하게 할 수 있으며, 실내와 같이 광이 약한 장소에서도 발전할 수 있어 인테리어 겸용 태양전지로

이용할 수 있다. 일반적인 염료감응 태양전지의 원리는 다음 그림 1에서 보는 바와 같이 태양광이 염료 분자에 흡수, 염료는 여기상태가 되어 전자를 n형 반도체인 TiO_2 의 전도대로 흘리고, 전자는 TCO전극으로 이동하여 외부 부하에 전기 에너지를 전달하고 상대 전극으로 이동, 염료는 TiO_2 에 전달한 전자 수만큼 전해질로부터 전자를 공급 받아 원래의 상태로 돌아가게 되는 원리에 의하여 발전된다.

염료감응 태양전지에 사용되는 염료는 크게 유기금속 착체와 유기염료의 두 가지 형태로 구분되며, 현재까지는 일반적으로 유기금속 착물이 보다 높은 광전

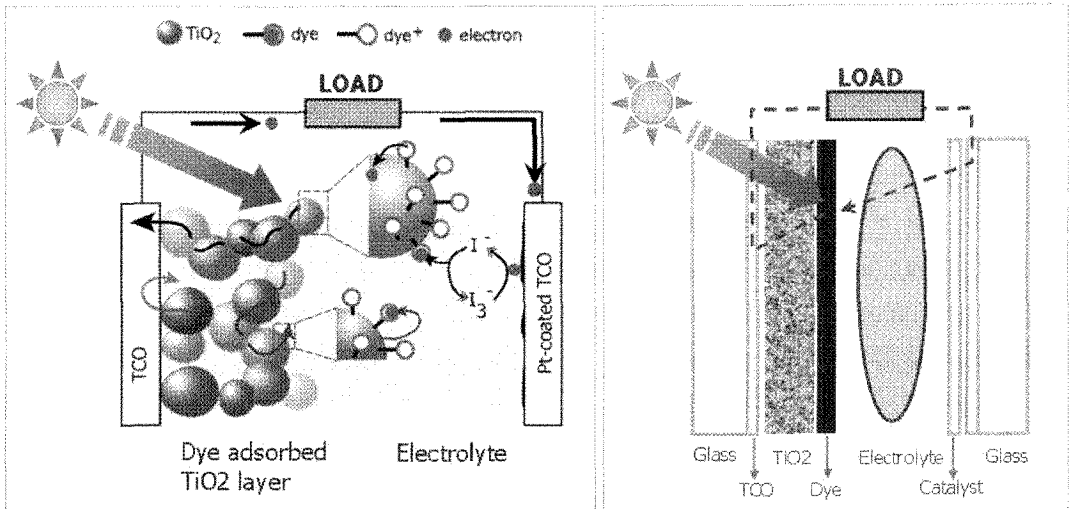


그림 1. 염료감응 태양전지 구동원리(좌) 및 구조(우)

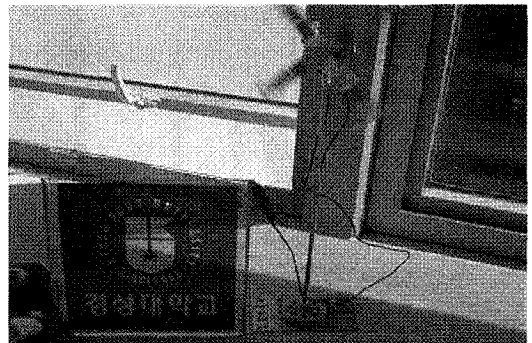
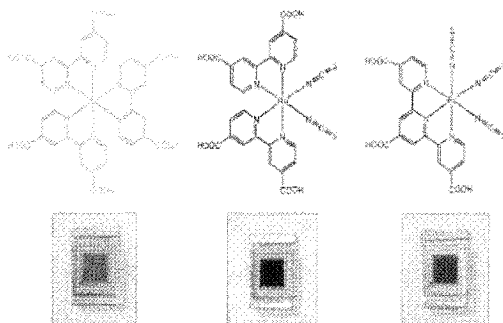


그림 2. 일반적인 염료와 염료감응 태양전지 소자

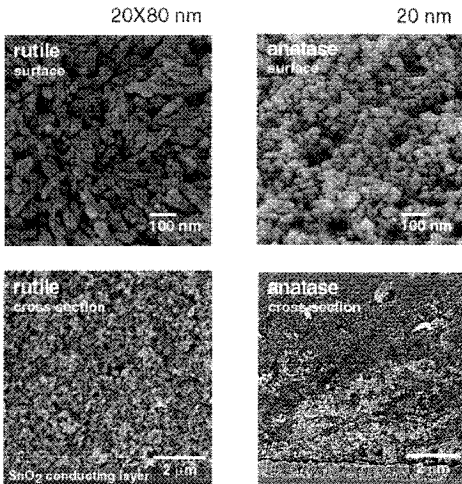
변환효율을 나타내고 있다. 유기염료의 경우 유기 금속 착물에 비하여 효율은 다소 떨어지지만, 다양하게 화학물 구조를 변형할 수 있으며, 값싸게 대량생산할 수 있다는 장점이 있다. 또한 장파장으로 흡광영역을 조절 하거나, 흡광도 계수를 높이는 것이 유기금속착물에 비하여 상대적으로 용이하여 추후 연구 개발에 의한 개선의 여지가 많다. 염료 감응 태양전지 기술은 기존의 실리콘 기판타입 태양전지 및 박막 태양전지와 비교하였을 때 높은 가격경쟁력과 반투명하고 다양한 색구현이 가능한 특장점 때문에 건물에 적용하여 전력생산을 하기가 용이하므로, 차세대 친환경 전력생산 시스템이 될 가능성이 높다.

DSCs의 활성화 관건은 높은 광변환 효율 (Photon-to-current Conversion Efficiency)과 장기안정성(Long-term Stability)의 확보로 현재 효율향상에 대한 연구가 많이 진행되었으나, 상대적으로 장기안정성 확보에 대한 연구가 미비하며, 장기안정성이 확보된다면 큰 시장을 형성하여, 친환경 기술 활성화에 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 현재 가장 효율이 좋은 DSCs (FTO전극/나노TiO₂/염료/전해질/상대전극)는 액체전해질을 사용하는데, pH변화에 의한 염료 이탈현상과 전해액 누수 등의 문제점을 가지고 있으며, 80[°C]이상에서는 성능저하가 현격히 일어나는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하고 DSCs의 신뢰성을 향상시키기 위해서, 겔형 전해질, 이온성 액체전해질, 고체 고분자 전해질 등에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이중 효율저하가 가장 적은 겔형 전해질의 경우 상용화 가능성이 매우 높다. 염료감응 태양전지에서 염료를 흡착할 수 있는 전극 소재는 밴드 갭 에너지가 큰 반도체 나노결정 (직경 15-20[nm]) 산화물을 사용한다. 나노 크기의 물질을 사용하는 이유는 입자 크기 감소에 의한 비표면적 증가로 보다 많은 양의 광 감응 염료분자를 흡착시킬 수 있기 때문이다. 입자의 크기가 수 나노미터 이하로 지나치게 작게 되면 염료 흡착량은 증가하지만, 반면 표면상태 수가 증

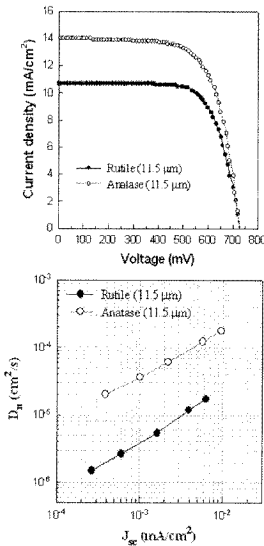
가하여 재결합 자리를 제공하게 되는 단점도 가지고 있다. 따라서 입자크기(size), 형상(morphology), 결정성(crystallinity) 그리고 표면상태(surface state)를 조절하는 기술이 중요하다. 염료 감응 태양전지용 나노 반도체 산화물을 선택할 때 가장 먼저 고려해야 할 부분은 전도대 에너지 값이다. 반도체의 전도대 에너지는 염료의 LUMO 보다 낮아야 하며, 현재 가장 많이 사용되는 산화물은 TiO₂로서 루테늄계 염료 (상업적으로 N3, N719가 가장 많이 사용 됨)의 LUMO 에너지 보다 약 0.2[eV] 낮은 곳에 TiO₂ 전도대 에너지가 위치하고 있다. 따라서 염료감응 태양전지 전극용 산화물을 선택할 경우 산화물의 전도대 에너지 값을 우선적으로 고려하여야 한다. 지금까지 연구되어온 산화물은 주로 TiO₂, SnO₂, ZnO, Nb₂O₅ 등이며, 이들 물질 가운데 지금까지 가장 좋은 효율을 보이는 물질은 TiO₂로 알려져 있다. TiO₂는 세 가지 상 (phase)이 알려져 있는데, 저온에서 안정한 아나타제 (anatase) 상, 고온에서 안정한 루타일 (rutile)상 그리고 브루카이트 (brookite) 상이 존재한다. 전형적인 나노결정 아나타제 TiO₂ 필름과 루타일 TiO₂ 필름의 주사현미경 (SEM)사진을 비교할 경우 그림 3에서 보는 바와 같이 아나타제 TiO₂ 필름은 20(nm) 직경을 갖는 구형의 입자가 매우 조밀하게 채워져 있는 반면 루타일 TiO₂ 필름은 직경 20(nm), 길이 약 80(nm)의 나노 막대형 모양의 입자가 다소 영성하게 채워져 있다.

두 필름의 광전류-전압 특성을 보면 아나타제 TiO₂ 필름이 루타일 필름보다 광전류가 더 많이 생성되는데 이는 구형의 아나타제 필름이 루타일에 비해 비표면적이 더 크기 때문에 염료분자가 단위부피당 더 많이 흡착된 결과이다. 입자가 필름 내부에 채워진 상태는 광전자 전달에도 영향을 미치게 되며, 단락회로 조건에서 빛 세기를 변화시키면서 측정 한 시간상수로부터 구한 전자 확산계수(electron diffusion coefficient)를 비교한 결과에서도 조밀한 구조를 갖는 아나타제 필름에서 전자전달이 더 빠르게 진행된다. 이와 같이

염료감응 태양전지의 나노입자 산화물 전극을 제조할 때 고려해야 할 사항은 입자의 모양(morphology)과 입자가 채워진 필름의 구조를 제어하는 기술도 필요하다.



(a) 표면 및 단면 SEM 사진



(b) 전류-전압 곡선 및 전자 확산계수

3. 염료감응 태양전지의 특징 - 원가 혁신이 가능한 차세대 태양전지

Si-결정계 태양전지는 약 15[%]대의 높은 효율(모듈 기준)을 가지는 장점이 있으나 원 소재인 폴리 실리콘의 수급 불안정 및 고 순도화에 필요한 고온 공정 에너지 문제로 모듈코스트 0.7(\$/Wp)이하로 내리는 것에 한계가 있다.(제2회 한일 염료감응 태양전지 워크샵, Miyasaka 교수, Toin Univ. 2008. 12.19). Si-박막계 태양전지는 Si-원재료 문제에서 자유로우나, 제조공정이 진공증착과 고 정밀 레이저 가공으로 구성되어 공정 및 장비기술의 확립이 필요하고, [MW] 당 초기설비 투자비가 결정계 대비 약 2배 이상으로 감가 상각비에 대한 부담이 매우 크다. 염료감응 태양전지는 투입소재의 자원적 제한이 없으며, 저온 및 비진공 공정으로 모듈제조 원가에 큰 비중을 차지하는 초기 투자비 부담이 적고 기술개발에 따른 원가 혁신이 가능한 미래가치가 높은 저가격 태양전지이다. DSCs 기술은 1991년 스위스 Grätzel 교수 연구 그룹의 최초 개발 이후 상용화 연구를 진행하여 몇몇의 회사에서 파일럿 규모의 생산라인을 운영 중에 있는 기술이다. 현재 미국의 Konarka, 호주의 Dyesol, 이스라엘의 Orion Solar, 영국의 G24i에서 파일럿 라인을 운영 중에 있으며, G24i는 휴대폰 충전용 소형 모듈을 시판 중에 있다. 컨설팅 회사로 유명한 프랑스의 Yole Development사의 분석자료를 보면 2010년부터 염료감응 태양전지의 상용화가 가능할 것으로 파악하고 있으며, 염료감응 태양전지의 장점은 투명한 구조, 다양한 색구현 가능, 플렉시블 기판 사용가능, 창호 적용 가능성 등을 꼽았고, 염료 감응 태양전지의 취약점으로는 장기 안정성 문제, 낮은 효율 등을 꼽았다.

그림 3. 아나타제 및 루타일 TiO₂ 필름의 표면 및 단면 (a) 및 전류-전압 곡선 및 광전류 밀도 세기에 따른 전자 확산계수 (D_n) (b)

4. 염료감응 태양전지 기술연향

4.1 국내 기술 동향 및 수준

국내에서는 삼성 SDI, 동진썬미켄, 이진창호, 티지에너지, 다이졸티모, 세이E&C 등이 모듈 및 창호를 개발 중에 있으며, 특히 티지에너지는 30[cm]×30[cm] 크기의 모듈을 개발하여 장기안정성을 평가 중에 있으며, 10[cm]×10[cm] 크기에서는 약 7[%]의 효율을 갖는 모듈을 개발하였다. 다이졸티모에서도 10[cm]×10[cm] 크기에서는 약 6[%]의 효율의 모듈을 개발하였다. 이진창호에서는 -40[°C]~85[°C] 사이에서 안정한 염료감응 태양전지 모듈을 개발하였으며, 서울시의 공공주택에 시범적으로 설치하는 사업을 추진 중에 있다. 삼성 SDI와 동진썬미켄 등의 대기업에서는 기술개발의 진척사항이 외부에 알려지지 않고 있으며, 삼성 SDI는 공식적인 발표에서 1조 시장이 열려야만 제품개발을 할 계획이라고 한다. 이와 같이 모듈기술 개발 회사 외에도, 이앤비코리아, 나노팩, 하나화인켄, SFC 등에서 관련 소재 기술을 개발 중에 있으며, 특히 이앤비코리아의 나노페이스트는 세계최고 수준으로 알려져 있다. 한편, 염료감응 태양전지에 대한 연구를 진행하는 국가출원연구기관으로는 한국과학기술원, 한국전자통신연구원, 한국에너지기술연구원, 한국전기연구원, 한국화학연구원 등이 있다. 대표적인 예로 한국에너지기술연구원에서는 고온 안정성 전해질 및 자외선 경화형 고분자를 이용한 겔형 전해질을 개발하였으며, 관련 특허를 출원/등록 하였다. 또한 금속망을 이용한 초저가 플렉시블 태양전지를 개발하여 특허를 출원 중에 있으며, 효율 향상 연구를 진행 중에 있다. 대학의 경우 고려대, 서울대, 한양대, 부산대, 인하대, 경성대, 경북대, 전북대, 국민대 등에서도 염료감응 태양전지 관련 연구를 진행 중에 있다.

4.2 국외 기술 동향 및 수준

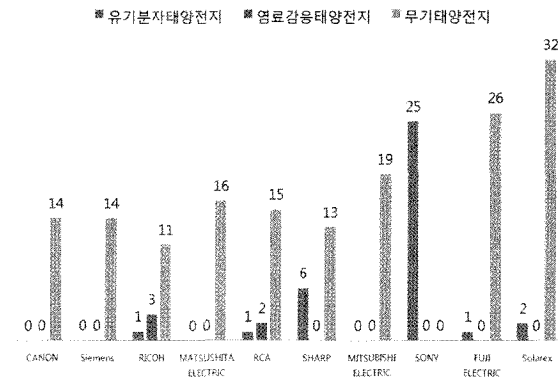
스위스 연방기술원에서 M. Gratzel 박사를 중심으로 고효율 태양전지와 관련하여 11.2[%]의 태양전지를 개발하였다. 현재 염료감응 태양전지 상용화 기술 분야에서 가장 앞선 나라는 일본으로 도요타아이신, 소니, 샤프, 후지쿠라 등의 대기업에서 모듈 및 소재 기술을 개발 중에 있다. 현재 공인인증된 염료감응 태양전지 최고효율은 일본의 샤프와 소니에서 발표한 약 10.2[%] 정도이며, 모듈효율은 약 8[%] 정도이다. 호주의 Dyesol에서 모듈 생산과 관련하여 0.5(MW) 양산공정을 개발하였다. 영국의 G24i에서는 금속기판을 적용한 염료감응 태양전지를 플렉시블 형태로 개발하여 시판 중에 있으며, 인터넷 홈페이지를 통하여 시제품을 판매 중에 있다(<http://www.g24i.com/>). 그리고 유기염료는 일본을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있으며 가시광선 영역에서의 높은 흡광효율을 가진다. 쿠마리케 물질의 유도체를 합성하고 염료감응 태양전지용 염료로 응용한 결과 NKX-2677로 명명된 염료는 약 7.7[%]의 에너지 변환 효율을 보여주고 있다. 인돌계 유기물질을 염료로 사용하여 에너지변환 효율 8[%]를 달성하였다. 현재까지 발표된 고분자 전해질을 이용한 염료감응 태양전지의 효율은 고체고분자의 경우에 최대 5[%] 미만이며, 고분자 겔 전해질의 경우는 최대 7~8[%]이다. 한편, Tennakone 연구팀이 최초로 발표한 CuI를 이용한 고체한 염료태양전지는 과량의 iodine에 의해 광전류가 감소되고, CuI가 산화되는 단점을 가지고 있다. Gratzel 연구팀은 비결정성 유기 홀전도체인 OMeTAD를 이용한 고체상 전해질에 대한 결과를 발표하였지만 광전변환효율이 액체전해질에 비해 크게 떨어진다. Lianos 그룹에서는 Sol-Gel법을 이용하여 고체형의 나노컴포지트 겔전해질을 제조하였고, Ureasil precursor 올리고머(n=3)와 sulfonane을 용매로 사용하여 나노컴포지트 겔 전

해질을 제조 5[%] 효율이 넘는 염료감응 태양전지 개발하였다. Hayase 그룹은 Polyvinylpyridine (PVP)와 tetra bromomethylbenzene을 cross-linker로 사용하고, 전도성분자를 상대전극으로 적용하는 염료감응 태양전지를 개발하였다. 최근 Peng Wang 연구그룹에서 8[%] 이상의 효율을 갖는 이온성 액체 전해질에 대한 연구성과도 발표하고 있다.

5. 태양전지 분야 국내·외 지식재산권 현황

5.1 미국특허 동향

미국 특허의 경우 대부분의 업체가 무기태양전지 분야의 특허에 역점을 두고 있는 가운데 일본 업체인 SONY는 유기분자 태양전지 분야에 중점을 두고 있는 경향이다. 미국 특허에서는 일본, 독일 등록인이 다 등록을 하며 특허 등록을 주도하고 있는 반면 미국 등록인에 의한 특허 등록은 미진한 것으로 나타났다. RICOH, RCA의 경우 기존의 무기 태양전지 관련 기술뿐만 아니라 차세대 기술인 염료감응 태양전지 분야에도 연구·개발을 진행하고 있는 것으로 나타났다.

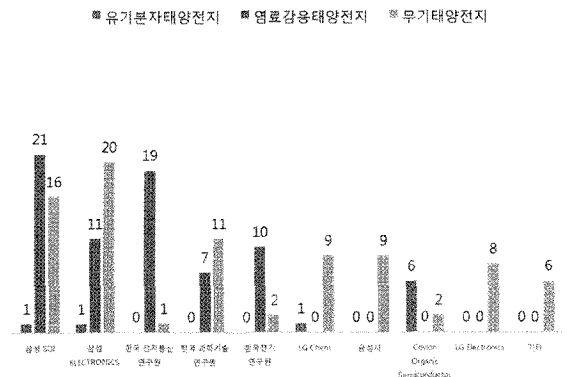


1. 제 1 등록인 기준
2. 분석구간 : ~2008년(등록년도)

그림 4. 세부 기술별 특허권자 분포(미국특허)

5.2 국내특허 동향

한국 특허의 경우 기존부터 연구·개발되어 온 무기 태양전지 분야에 집중되어 있는 상황으로 차세대 태양전지로서 원료수급, 생산단가, 디자인, 경량성을 지닌 염료감응 태양전지에 대한 연구개발 또한 활발한 가운데 한국전기연구원 및 한국전자통신연구원의 경우 이 분야에 역점을 두고 있는 것으로 나타났다. Samsung SDI나 Samsung Electronics 등의 업체들은 세 개 분야 모두에서 연구·개발을 진행하고 있는 가운데 국내 관련 연구기관들은 염료감응 태양전지에 중점을 두고 있는 것으로 나타났다.



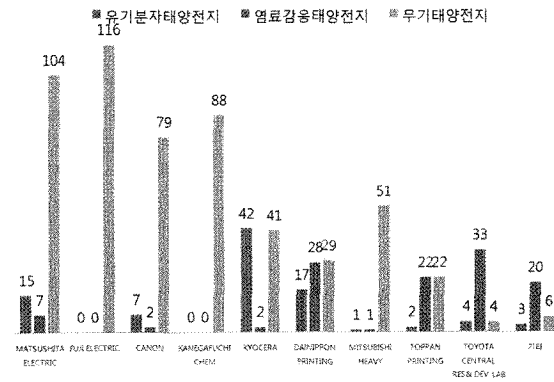
1. 제 1 등록인 기준
2. 분석구간 : ~2006년(출원년도)

그림 5. 세부 기술별 특허권자 분포(한국특허)

5.3 일본특허 동향

일본특허에서는 이미 시장이 형성된 무기태양전지 분야 기술에 많은 특허가 출원된 가운데 FUJI ELECTRIC가 상기 분야의 특허 출원에 역점을 두고 있으며 아직 시장 진입 단계에 있는 염료감응 태양전지 분야에는 TOYOTA CENTRAL RES & DEV LAB 이 활발한 특허출원을 하고 있는 것으로 나타난다.

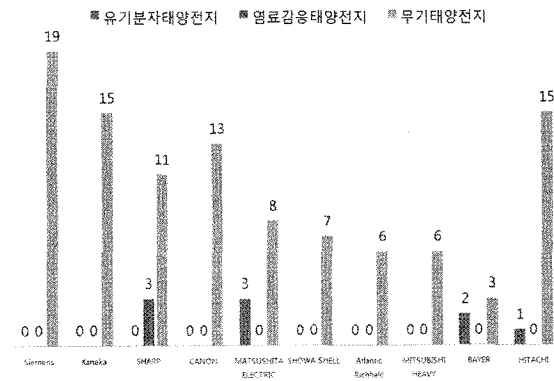
KYOCERA의 경우 무기태양전지 뿐만 아니라 유기분자 태양전지 분야에 역점을 두고 있는 것으로 나타난다.



1. 제 1 출원인 기준
2. 분석구간 : ~2006년(출원년도)

그림 6. 기술별 특허권자 분포(일본특허)

5.4 유럽특허 동향



1. 제 1 출원인 기준
2. 분석구간 : ~2006년(출원년도)

그림 7. 세부 기술별 특허권자 분포(유럽특허)

유럽특허에서 주요 출원인의 경우 무기 태양전지 분야에 특허가 집중되고 있는 것을 볼 수 있다. 다출원인 순위의 기업들이 모두 무기 태양전지 시장에 많은 특허를 보유하고 있는 가운데 Sharp의 경우 염료 감응 태양전지 분야에 특허를 출원하며 기술권리 확보에 힘쓰고 있는 것으로 보인다.

6. 상용화를 위한 기술적 과제

6.1 효율

Graetzel cell 기반의 염료감응 태양전지의 변환 효율을 15[%]로 하는 목표가 2015년경 달성될 가능성이 어느 정도인가, 즉, 변환효율을 12[%]에서 15[%] 이상으로 상승시키기 위해서는 무엇이 Key Point인가 하는 것들을 검토해 보자. 먼저, 태양전지의 에너지 변환효율 η 는 일반적으로 다음과 같다.

$$\eta_{(\text{sun})} = J_{sc} \times V_{oc} \times ff$$

여기서 $\eta_{(\text{sun})}$ =조건 AM 1.5에서의 변환효율, 즉, 입사각 42도에서 지표에 도달하는 태양광 조사 ($100(\text{mW}/\text{cm}^2)$)하에서 측정된 에너지 변환효율이다.

$$J_{sc} = \text{단락전류}$$

$$V_{oc} = \text{개방전압}$$

$$ff = \text{Fill Factor}$$

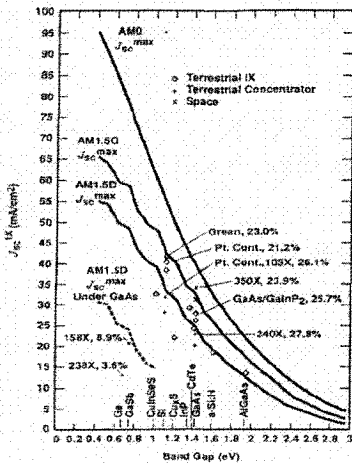
여기서 단락전류 J_{sc} 값을 산출해보자. 먼저 Ru계 색소 (N3색소)의 에너지 갭 1.6[eV] 이상의 에너지를 가진 광자 (Photon)가 전부 전자로서 외부회로에 방출된다고 가정한다면, 단락전류 J_{sc} 값은 그림 8에 나타낸 바와 같이, 태양전지의 Band gap과 이때 얻어지는 J_{sc} 값과의 상관관계에서 구할 수 있다. 그러므로, AM 1.5G의 특성곡선으로부터 $26.4(\text{mA}/\text{cm}^2)$ 로 됨을 알 수 있다. 한편, 태양광은 도전성 Glass를 통해 입사하므로 이때 흡수와 반사에 따른 손실을 약 10[%]로 하면, 도출 가능한 J_{sc} 의 최대치는 $23.8(\text{mA}/\text{cm}^2)$ 가 얻어진다. 그리고 개방전압 V_{oc} 는 광전극인 TiO_2 의 Flat band potential과 I^-/I_3^- Redox의 산화환원 준위차로부터 규정되는 값으로서 최고치 0.9[V]이지만, 약 90[%]정도로 가정하면

0.8(V)로 된다. 그리고 f 는 염료 태양전지의 경우 0.73정도가 되는데, 0.8정도까지는 충분히 개선가능하다고 가정한다면, 변환효율 η 는 다음과 같이 구해진다.

$$\eta_{(sun)} = 23.81 \text{ [mA/cm}^2\text{]} \times 0.8 \text{ [V]} \times 0.8 = 15.2 \text{ [%]}$$

그러므로 염료감응 태양전지의 변환효율로서는 15[%]가 얻어질 수 있다. 이상의 고찰로부터 고려할 수 있는 사항은 다음과 같다.

- ① 태양광으로부터의 입사 Photon을 손실없이 전자로 전환하는 방법
- ② 그 후의 과정에서 전자의 누출이나 저항의 손실을 줄이는 방법



AM0 : 대기권 밖의 태양광강도 (태양정수)
 AM1.5G: 지표에 입사하는 천정각 48도의 태양광강도 (비집광)
 AM1.5D: 지표에 입사하는 천정각 48도의 태양광강도 (집광)

그림 8. 태양전지의 Band gap과 얻어지는 이론 최대의 단락전류(J_{sc})

상기의 두 항을 해결할 수 있으면, N3색소와 TiO_2 광전극의 조합에 의한 염료감응 태양전지의 변환효율 15[%]라고 하는 것은 충분히 달성 가능한 수치가 된

다. 게다가 N3색소보다 광흡수 범위가 넓은 Black Dye를 사용하면, 900[nm] 파장대까지 광을 흡수할 수 있으므로 여기에 상응하는 Energy Gap은 1.37[eV]로 증가하여 그림 8에 의하면, J_{sc} 의 최대치는 33[mA/cm²]로 된다. 따라서 앞의 N3색소의 경우와 동일한 방식으로 계산을 하면 다음과 같은 결과를 얻게 된다.

$$\eta_{(sun)} = 33.0 \text{ [mA/cm}^2\text{]} \times 0.9 \times 0.8 \text{ [V]} \times 0.8 = 19.0 \text{ [%]}$$

즉, 셀의 변환효율은 19.0[%]로서 상당히 큰 수치에 해당된다. 이 수치는 염료감응 태양전지의 변환효율이 아직도 개선가능의 여지가 충분히 있다는 것을 의미하고 있으며, 앞으로 이 부분을 어떻게 해서 달성할 수 있을까가 최대의 당면과제라고 할 수 있다.

6.2 안정성 및 내구성

태양전지의 안정성과 내구성은 당연히 사업 경제성에 큰 변수가 될 것이다. 염료감응 태양전지의 경우 그 수명이 길면 길수록 그 경제성은 높게 평가받을 수 있다. Graetzel cell 기반의 염료감응 태양전지의 안정성은 최근 현저히 향상된 것으로 생각된다. 그 근거를 들면 다음과 같다.

- 1) 먼저 Graetzel 팀의 보고에 의하면, 조사광에 의해 유기된 전자의 이동과정이 선택적으로 진행되어 매우 높은 효율을 나타내고 있다는 점을 들 수 있다.
- 2) 염료감응 태양전지에서 1개의 색소가 전자를 주고받는 사이클은 약 5천만회 이상이면서 안정되게 기능하는 것으로 알려져 있는데, 이는 약 10년간의 광 조사에 필적하는 레벨에 해당한다. 만약 그러하다면, 셀의 기본성능에는 큰 문제가 없다.

- 3) 1998년에는 AM 1.5의 조건하에서 모의 태양 광 조사시험을 행한 결과, 7000시간 이상의 안정적인 동작을 보여줬음을 발표하고 있다.
- 4) 그리고 변환효율 7[%]의 염료 태양전지 셀을 대상으로 AM1.5의 조건하에서 연속 광 조사 시험을 한 결과 14000시간의 안정성을 확인했다고 발표하고 있다.
- 5) 네델란드의 ECN에서는 AM1.5의 조건하에서 실내 광조사 시험을 통하여 약 10000시간 이상의 안정성을 얻었다고 보고하고 있다.
- 6) 스위스의 벤처기업인 Solaronix사는 45[°C]의 환경에서 가시광에 의한 연속조사 시험을 4000시간 이상 행하여 양호한 안정성을 확인했다고 한다.
- 7) 그리고, 자외선광에 대한 내구성에 대해서도 검토를 진행해 왔으며, Solaronix에 의하면, 10[mW/cm²]의 자외선광 조사시험에서 단락전류 J_{sc} 와 개방전압 V_{oc} 가 1400일 이상 거의 안정적으로 유지되고 있음을 확인했다고 한다.
- 8) 일본의 산출연에서도 실내에서 Solaronix와 유사한 실험을 진행하여, 2[cm²]의 태양전지 모듈을 대상으로 4000시간 이상의 안정성을 확인했다고 보고하였다.

이러한 각 연구개발 기관의 검토결과를 보면, 적어도 실내 환경 내에서의 염료감응 태양전지의 안정성에 대해서는 문제점이 없는 것으로 판단된다. 그러나 실외환경 조건에 관한 검토에서는 아직 불분명한 점이 많다. 우선, 내열성, 내구성의 문제가 없지는 않을까 생각된다. 구체적으로는 다음과 같다.

- 1) 염료감응 태양전지가 실용적인 제품이 되기 위해서는, 적어도 90[°C] 정도의 고온에서부터 20[°C]정도의 저온에 이르기까지 외부의 온도 변화에도 불구하고 사용상 문제없어야 한다.
- 2) 내습성, 내수성 등의 검토도 필요하다. 이러한

것들에 대해 네델란드 ECN등에서 연구가 진행된 단계이나, 아직 충분한 데이터가 확보되지 않은 것으로 볼 때 향후의 검토과제가 될 것으로 생각된다.

6.3 집적화 기술

염료감응 태양전지의 실용화를 위해 필수적인 또 하나의 중요한 기술은 집적화 기술이다. 유럽을 중심으로 한 연구기관에서는 염료감응 태양전지의 Scale up이나 집적화 기술에 관한 연구개발에 한창이다. 최근의 조사에 의하면,

- 1) 독일의 INAP사는 염료감응 태양전지 모듈을 대상으로 하는 광 조사 실험을 실시하여, 변환효율 7[%]를 달성하였고, Stripe형 unit 셀 48개를 집적화하여 50×50[cm] 크기의 모듈을 이미 출시한 바 있다.
- 2) 스위스의 벤처기업 Solaronics사에서도 유사한 집적화기술이 구현하고 있다. Solaronics에서 개발한 모듈은 20[cm]×20[cm] 크기의 모듈 내에 37개의 Unit 셀을 집적화한 방식을 발표한 바 있다.
- 3) 네델란드의 국가 에너지 연구소인 ECN에서도 unit 셀을 집적화하는 기술을 확립하였고, 이를 양산화할 경우에 있어서의 여러 가지 문제점들에 대한 검토가 수행되고 있다. 예를 들어, 한번에 500 batch의 셀을 양산하여, 그들의 성능실험을 실시한 결과, 대체로 동일한 성능을 보이고 있음을 확인하였다. 그리고 이러한 Unit 셀에 관한 12000시간의 장기 안정성 테스트에 대해서도 확인한 것으로 보고하고 있다.
- 4) Australia의 벤처기업인 Sustainable Technologies International (STI)사는 DSCs기술은 베이스로 하는 창문패널 (Titania Solar Wall Panels)의 생산 공장을 건설해서, 2001

년부터 공장을 가동하여 현재 DSCs의 창문패널을 판매하고 있다.

7. 결 론

이상에서 소개한 바와 같이, 신규이면서 혁신적이라 할 수 있는 염료감응 태양전지의 실용화 혹은 제품화의 동향은 현재 유럽을 중심으로 매우 활발히 전개되고 있음을 알 수 있다. 이는 염료감응 태양전지가 유럽지역에서 처음으로 제안되어 밀접한 연구교류가 이루어져 왔고, 저가이면서도 고성능의 차세대 태양전지 산업을 리드할 강력한 후보라는 인식을 공감하고 있기 때문인 것으로 보인다. 상업화의 관점에서 염료감응 태양전지는 향후 태양전지 시장을 주도할 매우 전망 있는 기술임을 확신시켜주고 있으나, 이를 실현하기 위해서는 좀 더 기술적 보완과 개선을 필요로 한다. 염료태양 전지의 상용화를 위한 당면과제를 각 부문별로 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 변환효율의 향상

태양광을 효과적으로 이용하는 관점에서 효율향상을 위한 대책으로

- ① 광흡수파장 영역이 넓은 색소
- ② Fermi준위가 높은 금속산화물
- ③ 산화환원 전위가 큰 전해질

등의 연구개발이 필요하다. 그리고 셀의 Tandem화에 관한 연구는 염료감응 태양전지의 변환효율 뿐만 아니라, 용도확대를 위해서도 필요하겠지만, 제조코스트의 상승과 얼마만큼 밸런스를 맞출 수 있는가 하는 것이 관건이다.

(2) 내구성의 개선

내구성에 관해서는, 고체 전해질, 도전성 고분자, Hole운송재 등에 관한 연구가 수행되고 있으나, 그 결과로서의 변환효율은 아직 액상 전해질의 효율을

넘기지 못하고 있는 실정이다. 앞으로 생체계의 전자운송 기구를 참고로 하는 새로운 고성능 재료의 개발이 기대되고 있다.

(3) 제조 코스트

Si계 태양전지의 경우, 제조 코스트 절감을 목표로 그동안 체계적인 연구개발이 진행되어 왔다. 염료감응 태양전지가 여기에 경쟁하기 위해서는 지금보다 더 낮은 제조 코스트의 실현을 검토하는 것이 최선이다. 현재 염료감응 태양전지의 구성에서 가장 코스트가 높은 부분은 도전성 기관유리이다. 예를 들어 TCO-less 구조를 도입하거나 Polymer Film으로 대체하면 초저가의 태양전지 실현이 가능해진다. 최근 Graezel cell방식 외에도 유기재료를 이용한 연구도 적극적으로 진행되고 있다. Fullerene 도전성 고분자를 이용하여 변환효율 3.3[%]가 달성했다는 보고도 있다. 향후, 이러한 유기재료를 이용한 새로운 제조방식이나 기술개발이 가속화되면, 한층 진보된 염료감응 태양전지가 등장할 가능성이 높다.

참 고 문 헌

- [1] B. O' Regan, M. Gratzel, Nature, Vol.353, (1991), p.737-740.
- [2] A. Kay, M. Gratzel, Solar Energy Mater. Solar Cells, Vol.44, (1996), p.99-117.
- [3] Alan E. Delahoy et al., Solar Energy, Vol.77, (2004), p.785-793.
- [4] K. Onoda, S. Ngamsinlapasathian, T. Fujieda, and S. Yoshikawa, Sol. Energy Mat. Sol. IIs, Vol.91, (2007), p.1176-1181.
- [5] J. M. Kroon et al., Prog. Photovolt: Res. Appl., 15, Vol.1, (2007).
- [6] Jong-Hyun Heo et al., IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 37, issue 8, (2009), p.1586-1592.
- [7] Fumi Inakazu, Yusuke Noma, Yuhei Ogomi, and Shuzi Hayase, American Institute of Physics, Vol.93, (2008).
- [8] Yuhei Ogomi, Shohei Sakaguchi, Takashi Kado, Mitsuru Kono, Yoshihiro Yamaguchi, and Shuzi Hayase, Journal of The Electrochemical Society, Vol.153, (2006), p.2294-2297.
- [9] Chi-Hwan Han, Ji-Hoon Kim, Sung-Hwan Paeng, Dong-Joo Kwak, Youl-Moon Sung, Thin Solid Films, Vol.517, (2009) p.4215 - 4217.
- [10] Endrowednes Kuantama, Deok-Woo Han, Youl-Moon Sung, Jae-Eun Song, Chi-Hwan Han, Thin Solid Films, Vol.517, (2009), p.4211 - 4214.
- [11] Toshifumi Yujii, Youl-Moon Sung, IEEE, Vol.35, (2007), p.1010-1013.

◇ 저 자 소 개 ◇



성열문(成烈汶)

1966년 11월 2일생. 1992년 부산대 전기공학과 졸업. 1994년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997~1998년 일본 Kyushu대학(Pos-doc.). 1998~1999년 Kyushu대학 조수. 2000~2006년 Miyazaki 대학 조교수. 2006년부터 현재까지 경성대학교 전기전자공학부 교수. 관심 분야: 광전변환 및 발광소자
Tel : (051)663-4777
Fax : (051)624-5980
E-mail : ymsung@ks.ac.kr



한치환(韓治煥)

1972년 2월 3일생. 1994년 고려대 화학과 졸업. 1996년 고려대 화학과 졸업(석사). 2001년 고려대 화학과 졸업(박사). 2002~2003년 프랑스 보르도 1대학(박사 후과정). 2003년~현재 한국에너지기술연구원 태양광연구단 선임연구원.
Tel : (042)860-3061
Fax : (042)860-3307
E-mail : hanchi@kier.re.kr