

# 염료감응 태양전지 기술

박남규 책임연구원 (KIST 에너지재료연구단) | 김경곤 선임연구원 (KIST 에너지재료연구단) | 고민재 선임연구원 (KIST 에너지재료연구단)

## 1. 재생에너지 (Renewable Energy) 개발의 필요성

우리는 지금까지 석유를 주 에너지원으로 사용하고 있다. 석유가 주 에너지원이 된 이유는 값싸고 사용하기 편리하기 때문이라고 생각된다. 인류문명의 급속한 발전에는 석유와 같은 화석연료가 크게 기여한 것은 부인할 수 없지만, 다음과 같은 두 가지 문제로 인하여 석유를 대체할 수 있는 대체에너지의 개발이 필요하다. 첫째는 석유는 더 이상 값싼 에너지원이 될 수 없을 것이라는 전망이 나오고 있다. 2008년 1월에 원유가격은 배럴당 100불을 넘었다. 1-2년 전만 해도 배럴당 60불 수준이었으며, 3-4년 전에는 30불 정도였다. 이처럼 원유가격이 해마다 무서운 속도로 증가하고 또 매장량의 한계로 인하여 석유생산이 지속적으로 감소한다면 배럴당 200불 수준도 가까운 장래에 현실화 될 수 있다.

유가 상승의 문제와 함께 석유, 석탄과 같은 화석연료는 연소할 때 이산화탄소와 아황산가스와 같은 대기오염 물질을 배출하여 환경을 오염시킬 수 있다. 특히 이산화탄소는 대기 중에 축적될 경우 온실효과에 의한 지구 온난화를 초래하여 평균 온도 상승, 해수면의 상승 등 자연 재앙을 야기하여 인류 미래에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 2000년 한 해 동안 대기에 뿜어진 이산화탄소 배출량은 약  $20 \times 10^{12}$  kg으로 대부분 화석연료의 연소에 기인한 것이다 (<http://www.maps.grida.no/kyoto>; <http://unfccc.int>). 지구온난화의 주범인 이산화탄소 배출을 규제하기 위하여 1997년 12월 교토의정서를 채택하게 되었으며, 2005년 2월 16일 교토의정서가 정식

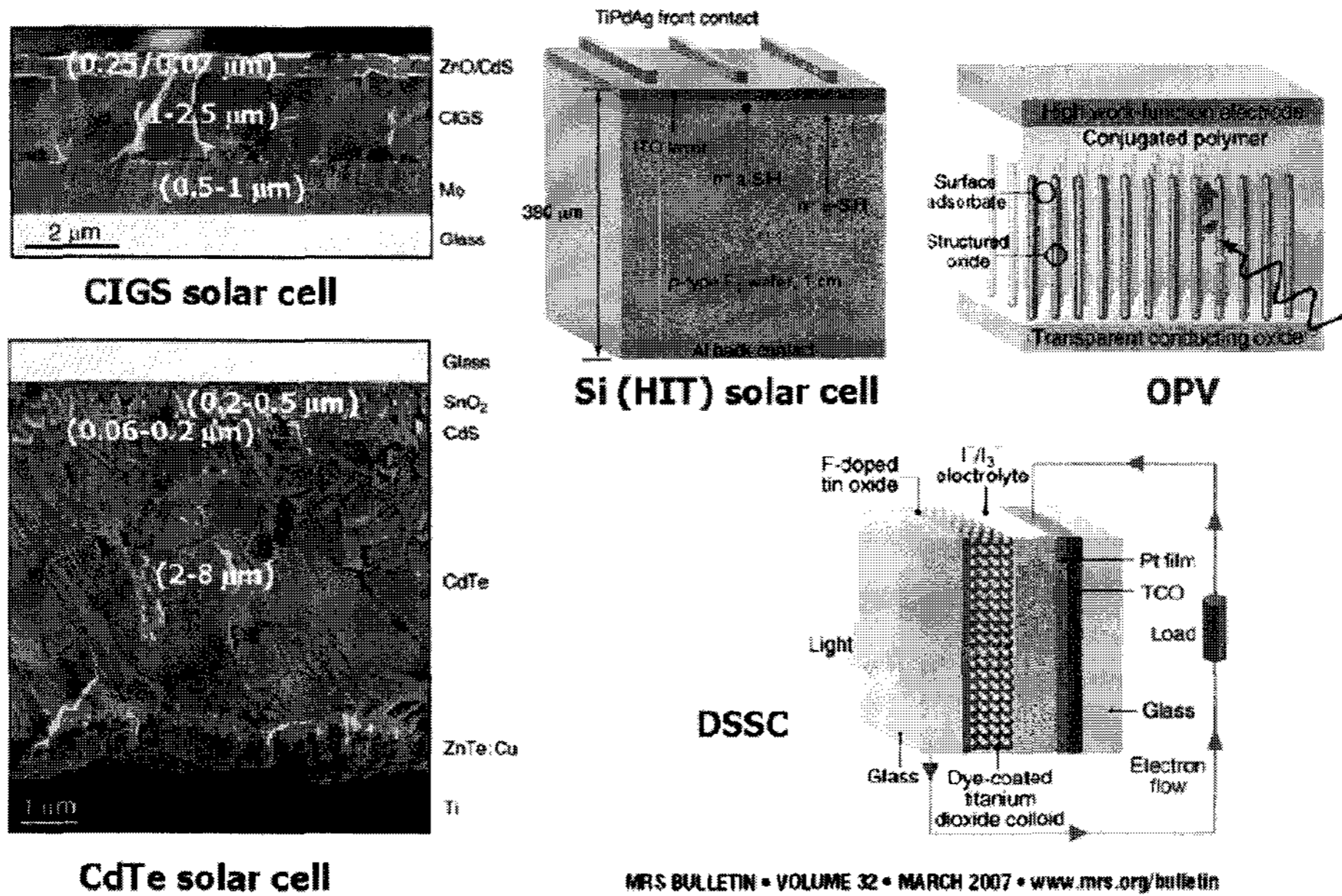
으로 발효되어 이산화탄소 감축 프로그램이 작동하고 있다. 우리나라는 2013년부터 이산화탄소 규제 대상국에 포함된다. 식물의 광합성 작용은 이산화탄소를 자연적으로 제어할 수 있는 방법 중의 하나이지만, 현재 수준의 방대한 이산화탄소 배출량을 조절하기는 어렵다. 따라서 화석연료 사용을 줄여서 이산화탄소 배출량을 감소시켜야 하며, 태양에너지, 풍력, 수력과 같은 재생 가능한 에너지원 (Renewable Energy Sources)으로 대체하는 노력을 기울여야 한다.

## 2. 태양전지의 종류

태양전지는 구성하는 물질에 따라 실리콘, 화합물반도체와 같은 무기소재로 이루어진 태양전지, 유기물질을 포함하고 있는 유기 태양전지 (유기 태양전지는 염료감응형 태양전지 (Dye-sensitized Solar Cell) 와 유기분자접합형 (organic D-A) 태양전지 포함)로 나눌 수 있다. 태양전지를 구성하는 물질에 따른 분류 외에 태양전지 구조에 따른 분류를 할 수 있는데, 이 경우 태양전지는 크게 3가지로 분류될 수 있다: 웨이퍼구조; 박막구조; 광전기화학구조. 그림 1에 다양한 태양전지의 구조를 나타내었다. 특히 염료감응 태양전지는 광전기화학형 구조를 가지며, 특히 나노소재를 이용하여 극대화된 표면적을 갖는 필름에 표면에 광흡수층인 유기염료를 흡착하는 기술을 이용하고 있다.

## 3. 염료감응 태양전지

반도체 접합 태양전지와는 달리 광합성 원리를



MRS BULLETIN • VOLUME 32 • MARCH 2007 • www.mrs.org/bulletin

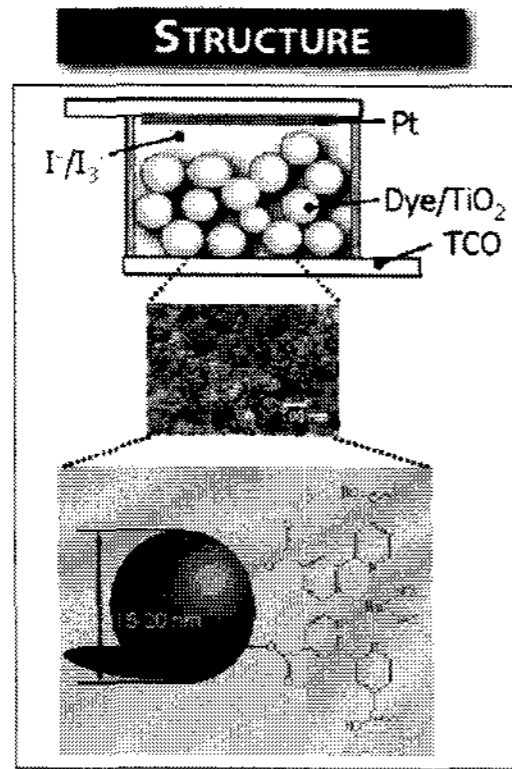
그림 1. 각종 태양전지의 구조 : 박막 (CIGS, CdTe) 태양전지, 실리콘 벌크 HIT 구조 태양전지, 유기폴리머 (OPV) 태양전지 그리고 염료감응 (DSSC) 태양전지.

이용한 고효율의 광전기 화학적 태양전지가 최근 소개되었다. 1991년 스위스 Grätzel 그룹에서 보고한 염료감응 나노입자 산화물 광전기화학 태양전지 [1]는 에너지 변환 효율이 비정질 실리콘 태양전지에 버금가는 높은 에너지 변환 효율과 함께 매우 저렴한 제조단가로 인하여 연구계 및 산업계의 비상한 관심을 모으고 있다.

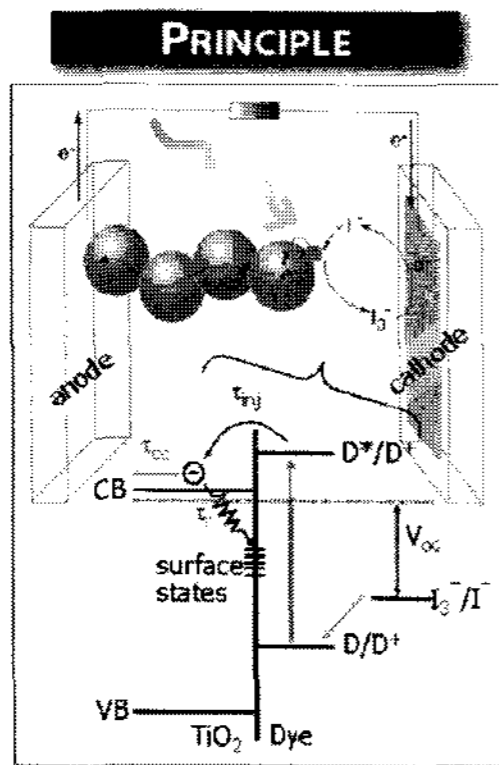
그림 2는 염료감응 태양전지의 작동 원리 및 셀 구조를 보여주고 있다. 표면에 염료 분자가 화학적으로 흡착된 n-형 나노입자 반도체 산화물 전극에 태양빛 (가시광선)이 흡수되면 염료분자는 전자-홀 쌍을 생성하며, 전자는 반도체 산화물의 전도띠로 주입된다. 반도체 산화물 전극으로 주입된 전자는 나노입자간 계면을 통하여 투명 전도성막으로 전달되어 전류를 발생시키게 된다. 염료 분자에 생성된 홀은 산화-환원 전해질에 의해 전자를 받아 다시 환원되어 염료감응 태양전지 작동 과정이 완성 된다 [2].

그림 3은 염료감응 태양전지의 전자전달 및 재결합 경로를 도식적으로 나타내었다. 빛에너지를 흡

수한 루테늄계 염료는 바닥상태 (Ground State)에서 들뜬상태 (Excited State)로 전이 ( $d \rightarrow \pi^*$  Transition)한 후 두 가지 과정을 거쳐 전자주입이 이루어진다 : 열화 되지 않은 단일항 들뜬상태 (Nonthermalized Singlet Excited State  $S^*$ )로 부터 반도체 전도띠로 전자 주입되는 과정과 내부 진동-이완 과정을 거쳐 삼중항 들뜬상태 (Triplet Excited State  $T^*$ )로 이동된 열화전자 (Thermalized Electron)가 주입되는 과정 [3]. 이때 전자주입 ( $\tau_{inj}$ )은 펨토초 내지 피코초의 매우 빠른 속도로 주입되며, 산화된 염료는 수 나노초 내에 재생된다 [4]. 반면 전자가 표면상태 (Surface State)를 거쳐 전해질로 손실되는 재결합 (Recombination 또는 Back Reaction) 속도 ( $\tau_r$ )는 마이크로-밀리 초로 다소 느리기 때문에 대부분의 광전자는 반도체 전도띠로 주입되어 전자전달에 참여하여 광-전기에너지 변환효율이 우수하며, 아울러 장기 안정성 또한 우수함이 실험적으로 증명되었다 [5].



(a)



(b)

그림 2. 염료감응 태양전지 구조 (a) 및 작동원리 (b).

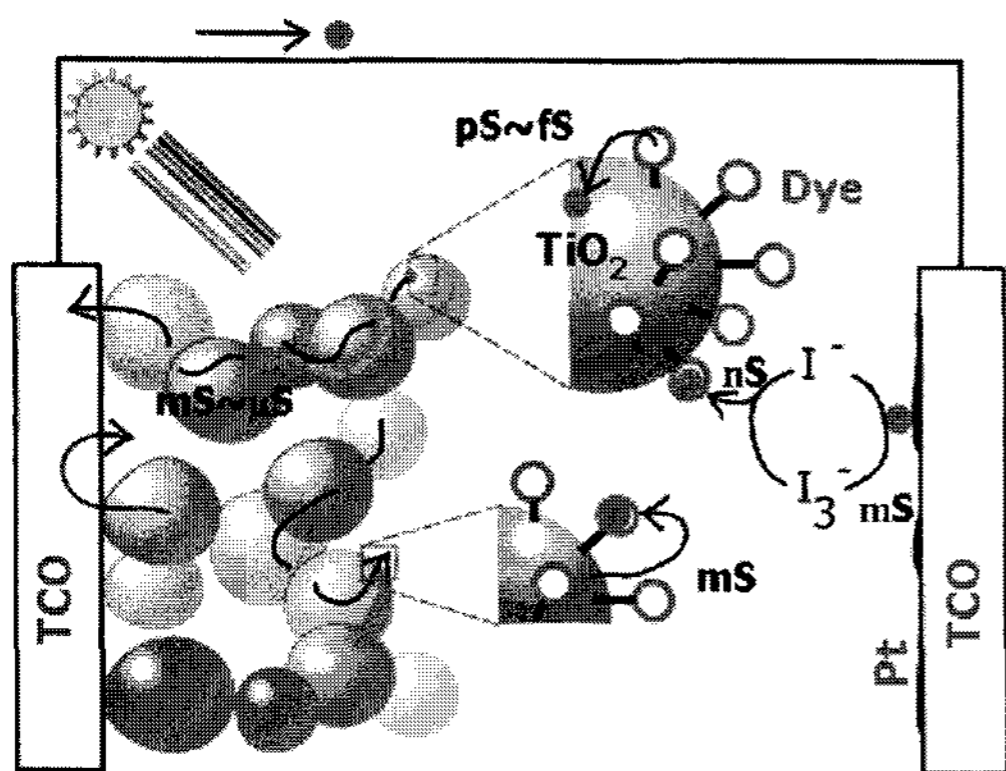


그림 3. 염료감응 태양전지 구조 및 광전자의 전달과정과 속도 (TCO는 투명전도성 기판).

## 4. 염료감응 태양전지를 구성하는 재료

### 4.1 나노결정 반도체 산화물 소재

염료를 흡착할 수 있는 전극 소재는 띠틈격 에너지가 큰 반도체 나노결정 (직경 약 20 nm) 산화물을 주로 사용한다. 나노 크기의 물질을 사용하는 이유는 입자 크기 감소에 의한 비표면적 증가로 보다 많은 양의 광감응 염료분자를 흡착시킬 수 있기 때문이다. 입자의 크기가 수 나노미터 이하로 지나치게 작게 되면 염료 흡착량은 증가하지만, 반면 표면상태 수가 증가하여 재결합 자리를 제공하게 되는 단점도 가지고 있다. 따라서 입자크기 (Size), 형상 (Morphology), 결정성 (Crystallinity) 그리고 표면상태 (Surface State)를 조절하는 기술은 염료감응 태양전지에서 중요한 연구 테마 중의 하나가 될 수 있다.

염료감응형 태양전지용 나노 반도체 산화물을 선택할 때 가장 먼저 고려해야 할 부분은 전도띠 에너지 값이다. 반도체의 전도띠 에너지는 염료의 LUMO보다 낮아야 한다. 현재 가장 많이 사용되는 산화물은  $TiO_2$ 로서 루테늄계 염료 (상업적인 이름으로 N3, N719가 가장 많이 사용 됨)의 LUMO 에너지 보다 약 0.2 eV 낮은 곳에  $TiO_2$  전도띠 에너지가 위치하고 있다. 따라서 염료감응 태양전지 전극용 산화물을 선택할 경우 산화물의 전도띠 에너지 값을 우선적으로 고려하여야 한다. 그림 3에 각종 산화물의 이론 및 실험적 전도띠 에너지를 도시하였으며, 염료감응 태양전지용 전극으로 사용 가능한 산화물의 종류 및 전도띠 에너지도 함께 나타내었다.

지금까지 연구되어온 산화물은 주로  $TiO_2$ ,  $SnO_2$ ,  $ZnO$ ,  $Nb_2O_5$  등이다. 이들 물질 가운데 지금까지 가장 좋은 효율을 보이는 물질은  $TiO_2$ 로 알려져 있다.  $TiO_2$ 는 세 가지 상 (Phase)이 알려져 있는데, 저온에서 안정한 아나타제 (Anatase)상, 고온에서 안정한 루타일 (Rutile)상 그리고 브루카이트 (Brookite) 상이 존재한다. 수십 나노 크기를 갖는 아나타제  $TiO_2$ 는 수열합성법으로 제조 가능하며, 저온에서도 안정한 루타일  $TiO_2$ 는 상온 근처에서 가수분해법에 의해 제조할 수 있다. 그림 4는 전형적인 나노결정 아나타제  $TiO_2$  필름과 루타일  $TiO_2$  필름의 주사현미경

(SEM)사진을 보여주고 있다 [6]. 표면 및 단면 사진을 보면 아나타제  $\text{TiO}_2$  필름은 20 nm 직경을 갖는 구형의 입자가 매우 조밀하게 채워져 있는 반면 루타일  $\text{TiO}_2$  필름은 직경 20 nm, 길이 약 80 nm의 나노막대형 모양의 입자가 다소 엉성하게 채워져 있다. 두 필름의 광전류-전압 특성을 보면 아나타제  $\text{TiO}_2$  필름이 루타일 필름보다 광전류가 더 많이 생성되는데 이는 구형의 아나타제 필름이 루타일에 비해 비표면적이 더 크기 때문에 염료분자가 단위부피당 더 많이 흡착된 결과이다.

전자의 확산속도는 입자크기 및 필름의 모폴로지에 영향을 받는데, 필름의 공극률 (Porosity)을 임의로 조절하여 전자확산 계수를 조사한 결과 공극률이 낮을수록, 즉 나노입자가 조밀하게 채워질 경우 전자의 확산계수가 증가하게 되고 (확산계수의 증가는 전자의 전달이 빠름을 의미함), 공극률이 클수록 확산계수 값이 감소하게 된다는 것이 실험적으로 증명되었다. 이러한 실험으로부터 확산계수 ( $D$ )는 필름의 Porosity ( $P$ )와  $D \propto |P - 0.76|^{0.82}$ 의 상관관계가 있음을 유도하였다 [7].

염료감응 태양전지의 광전극으로서 사용되는

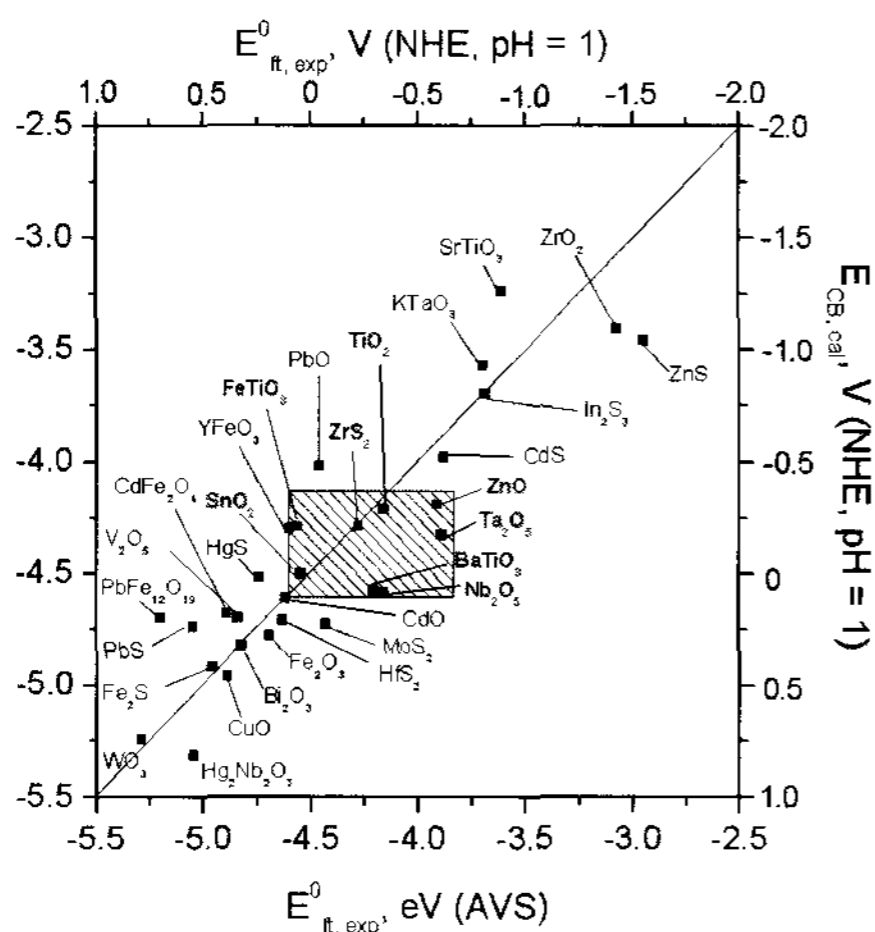
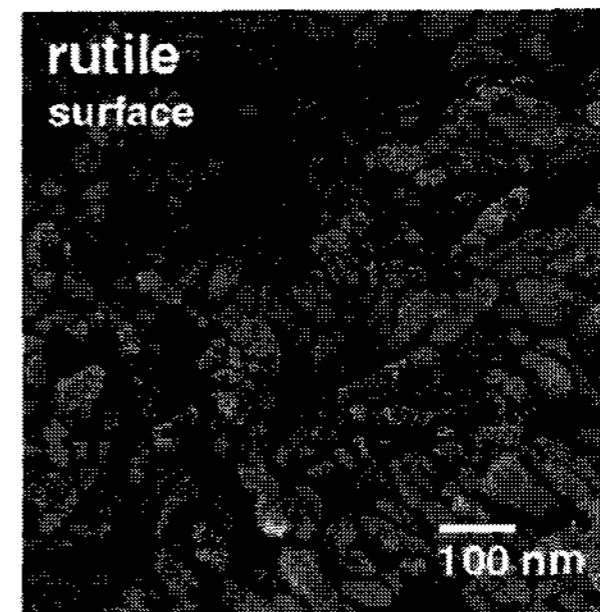
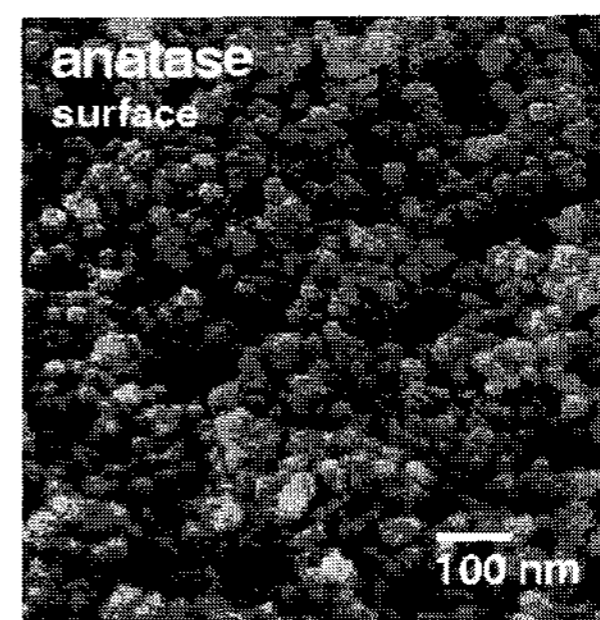


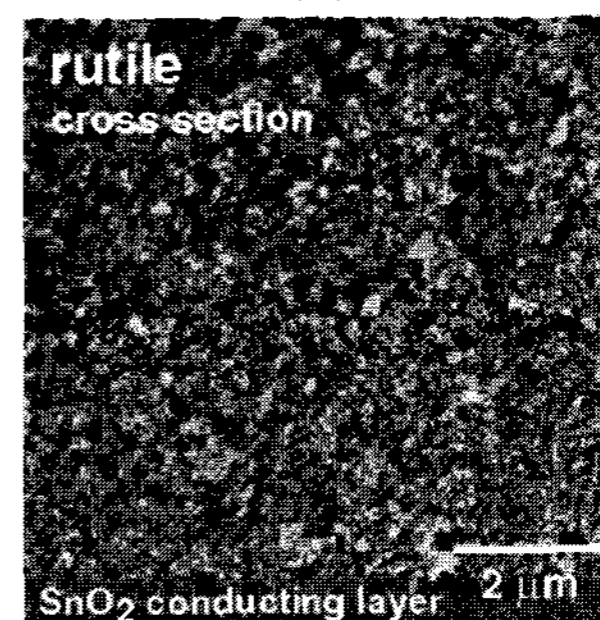
그림 4. 이론적으로 구한 산화물의 전도띠 에너지 (ECB) 및 실험적으로 얻은 Flat Band Potential (Eft)(빛금 친 부분은 염료감응 태양전지용 전극으로 사용 가능한 물질의 전도띠 에너지 영역).



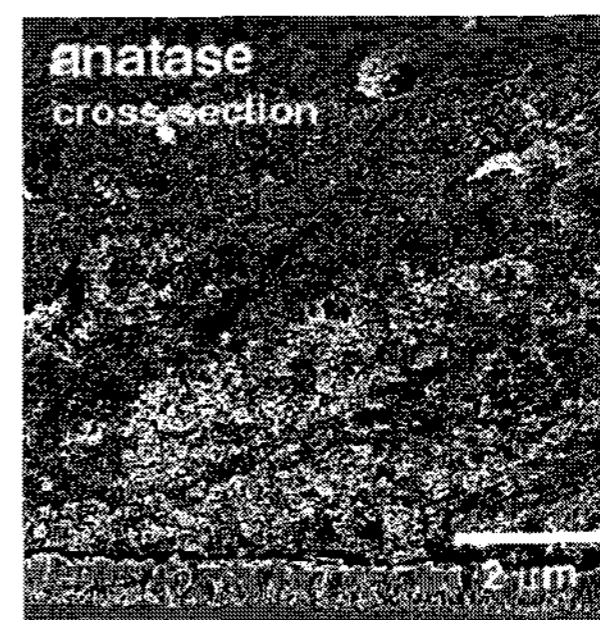
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5. 아나타제 (Anatase) 및 루타일 (Ruile)  $\text{TiO}_2$  필름의 표면 및 단면 SEM 사진.

TiO<sub>2</sub> 입자는 약 20 nm 직경을 가지기 때문에 장파장의 빛은 투과하기 쉽다. 따라서 장파장의 빛을 효과적으로 사용하지 못하기 때문에 변환효율에서 이득을 보기 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 장파장 빛을 산란할 수 있는 방법으로 서브 마이크로 크기의 입자를 사용하여 왔다. 빛 산란 입자의 경우 보통 크기는 0.1-0.5 마이크로미터로서 장파장 산란은 잘 하지만, 반면 줄어든 표면적으로 인하여 산란층에는 염료 흡착이 어렵다. 최근 장파장 빛은 산란하면서 단파장 빛은 전류로 변환하는 기능성 속빈구가 개발되었다 [8]. 그림 6에서 보는 바와 같이 속빈구를 산란층으로 이용할 경우 일반적인 서브 마이크로 크기의 산란입자에 비해 높은 광전류가 생성되는 것이 확인되었다.

#### 4.2 광감응 염료

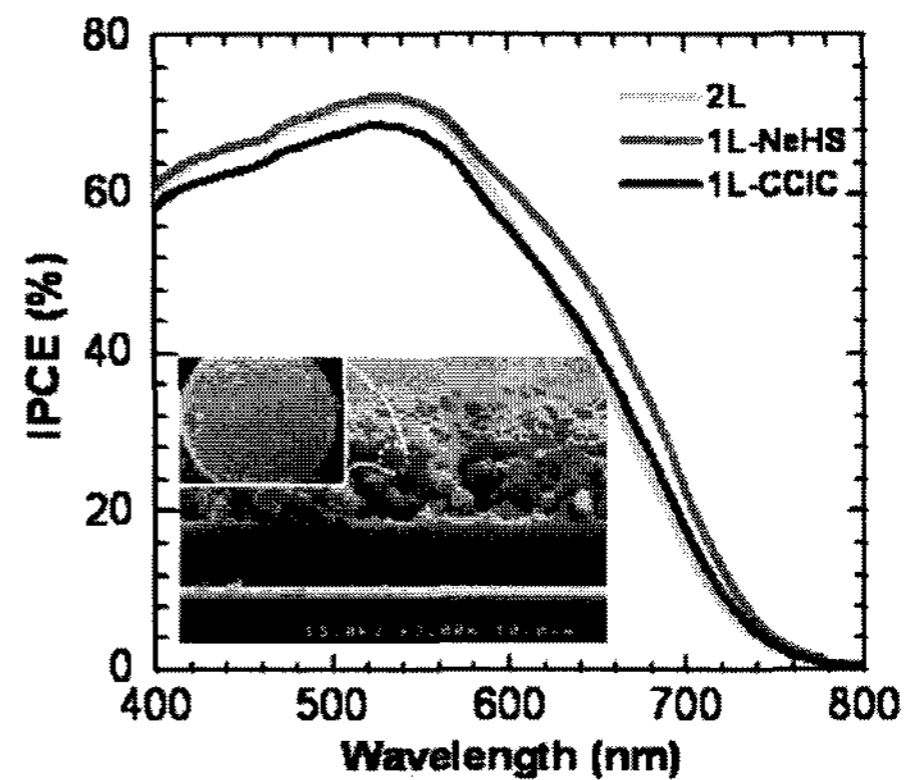
염료감응 태양전지에 사용되는 염료는 루테늄계 유기금속화합물, 유기화합물 그리고 InP, CdSe 등의 양자점 무기화합물이 알려져 있다. 염료감응 태양전지용 염료가 갖추어야 할 조건은 첫째 가시광선 전 영역의 빛을 흡수할 수 있어야 하며, 둘째 나노산화물 표면과 견고한 화학결합을 이루고 있어야 하며, 셋째 열 및 광학적 안정성을 지니고 있어야 한다. 지금까지 알려진 염료 중에는 루테늄계 유기금속화합물이 가장 우수한 것으로 보고되고 있다. 루테늄계 염료는 중심금속 루테늄 주위에 피리딘계 리간드와 SCN 리간드가 배위되어 있다. 피리딘 고리가 2개, 3개, 4개로 증가하면 MLCT (금속에서 리간드로 전하이동)에 해당하는 피크가 장파장으로 이동하고 흡광계수는 감소한다.

이들 루테늄계 염료 중에서 대표적인 것으로 Bipyridine 리간드를 가지는 붉은색을 띠는 N3 (N3 염료는 수소가 4개 있으며, 이중 2개가 Terabutyl Ammonium (TBA) 이온으로 치환된 것을 N719로 명명함)와 Terpyridine 리간드를 갖는 초록색의 N749 염료가 있다.

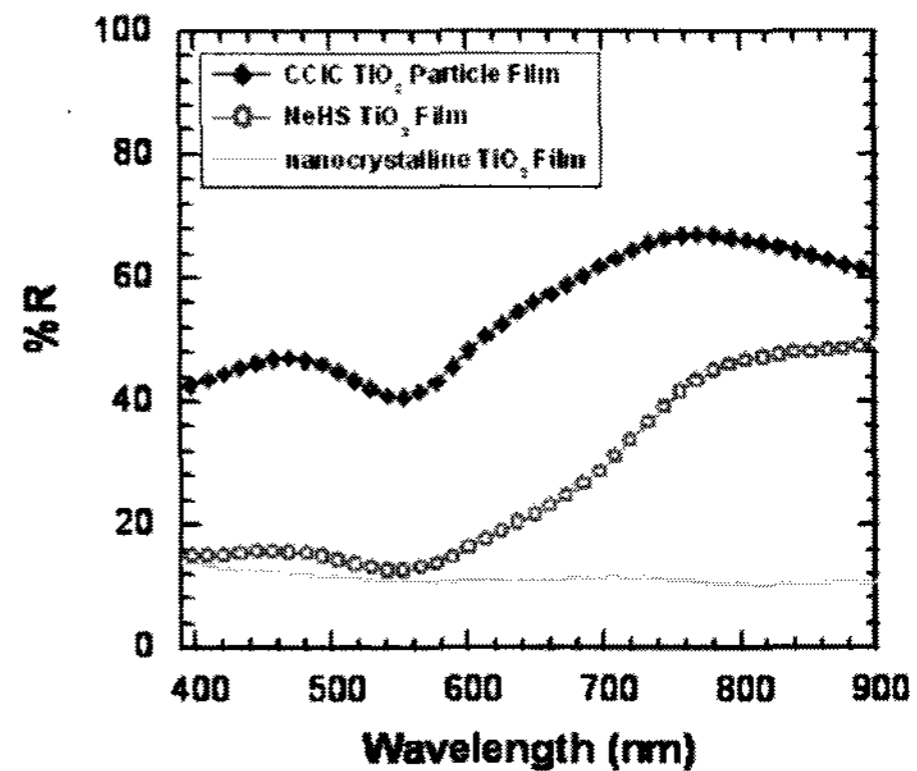
루테늄과 같은 금속이온을 함유하지 않은 순수 유기물 염료에 대한 합성 및 광전변환 특성에 관한 연구를 하고 있으며, 쿠마린계 물질의 유도체를 합성하고 염료감응 태양전지용 염료로 응용한 결과 NKX-2311로 명명된 염료는 약 5.2%의 에너지변환

Samples	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	FF (%)	η (%)	Thickness (μm)	Adsorbed dye (× 10 <sup>-7</sup> mol/cm <sup>2</sup> )
1L-NeHS	15.8	836	71.2	9.43	10.0	1.266
2L	15.3	815	71.3	8.87	11.8	1.401
1L-CCIC	14.6	849	72.1	8.96	11.4	0.805

(a)



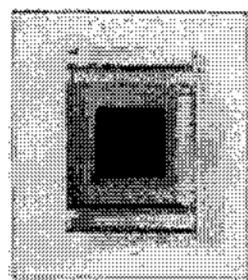
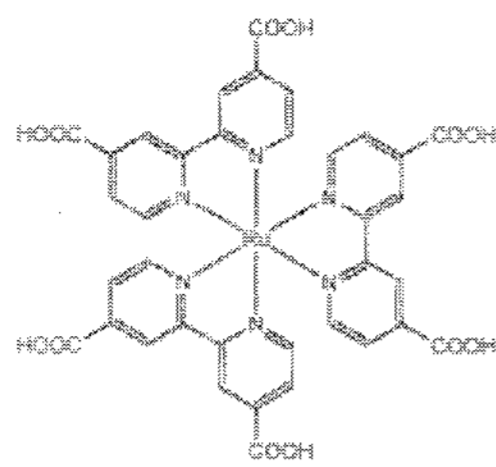
(b)



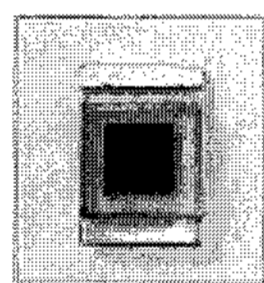
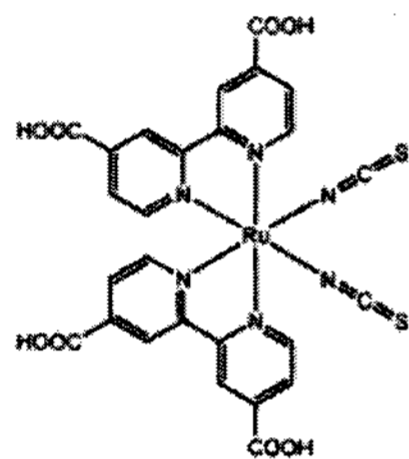
(c)

그림 6. 속빈구를 산란층으로 갖는 TiO<sub>2</sub> 구조 (1L-NeHS ; 붉은색)와 서브마이크로 산란입자 (1L-CCIC ; 파란색)를 산란층으로 갖는 구조, 그리고 나노입자로만 구성된 구조 (2L)의 광전류, 전압, 효율, IPCE 및 반사율 특성 비교.

효율을 보여주고 있으며, 최근에는 인돌계 유기물질을 염료로 사용하여 에너지변환 효율 8%를 달성하였다 [9]. 하지만 순수 유기물의 경우 빛과 열에 불안



(b)



(b)

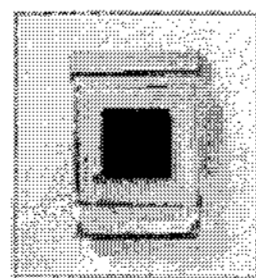
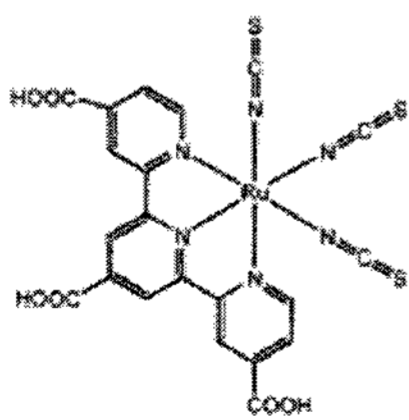


그림 7. 염료의 리간드 구조에 따른 염료색상의 변화.

정한 것이 문제가 된다. 따라서 빛 과 열 안정성이 확보될 경우 가격 측면에서 경쟁력이 우수한 소재가 될 수 있다.

### 4.3 전해질 및 홀 전도체

염료감응 태양전지용 전해질은  $I^-/I_3^-$ 와 같이 산화-환원 종으로 구성되어 있으며,  $I^-$  이온의 Source로는  $LiI$ ,  $NaI$ , 알칼암모늄 요오드 또는 이미다졸리움 요오드 등이 사용되며,  $I_3^-$  이온은  $I_2$ 를 용매에 녹여 생성시킨다. 전해질의 매질은 Acetonitrile과 같은 액체 또는 PVdF와 같은 고분자가 사용될 수 있다.  $I^-$ 는 염료분자에 전자를 제공하는 역할을 하고 산화된  $I_3^-$ 는 대전극에 도달한 전자를 받아 다시  $I^-$ 로 환원된다. 액체형의 경우 산화-환원 이온 종이 매질 내에서 신속하게 움직여 염료의 재생을 원활하게 도와주기 때문에 높은 에너지변환 효율이 가능하지만, 전극간의 접합이 완벽하지 못할 경우 누액의 문제를 가지고 있다. 반면 고분자를 매질로 채택할 경우에는 누액의 염려는 없지만 산화-환원 종의 움직임이 둔화되어 에너지변환 효율에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 따라서 고분자 전해질을 사용할 경우에는 산화-환원 이온 종이 매질 내에서 신속하게 전달될 수 있도록 설계하는 것이 필요하다. 고분자 전해질용 소재로는 Polyacrylonitrile (PAN)계, Poly (Vinylidene Fluoride-co-hexafluoropropylene) (PVdF)계, 아크릴-이온성액체 조합, Pyridine계, Poly (Ethyleneoxide) (PEO) 등이 연구되었다.

나노입자 산화물을 고분자와 혼합한 나노 콤포지트형 전해질이 M. Gratzel 그룹에서 개발되었는데, 15 nm 크기를 갖는 Fumed 실리카 입자를 이미다졸계 이온성 액체와 혼합한 유무기 복합 겔형 전해질을 사용한 염료감응 태양전지는 AM 1.5 (100 mW/cm<sup>2</sup>) 조건에서 7%의 높은 변환 효율을 보여주고 있다 [10]. 나노콤포지트형 고분자 전해질로서 1 태양조건에서 4.5% 변화효율을 갖는 완전 고체형의 고효율 전해질이 개발되었다 [11].

염료감응 태양전지를 고체화 하는 또 한가지 기술은 홀 전도체를 이용하는 방법이다. 홀 전도체를 사용할 경우에는 전해질을 사용하지 않기 때문에 고체화가 더욱 용이하게 된다. 홀 전도체로는  $CuI$ ,  $CuSCN$ 과 같은 무기소재, Polypyrrole과 같은 유기

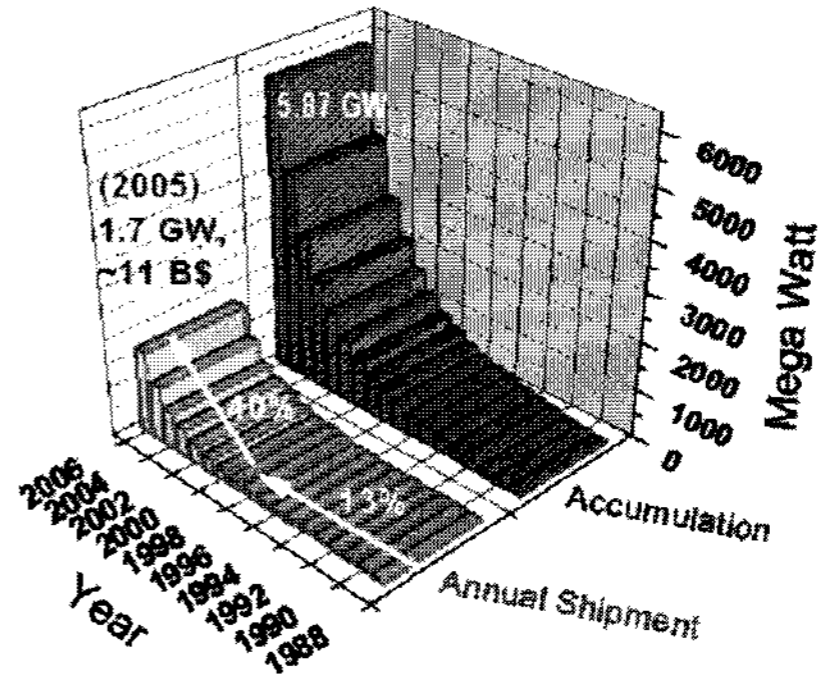


소재가 가능하다. 홀 전도체를 염료감응 태양전지에 적용할 경우 높은 홀 전도도가 구현될 수 있도록 홀 전도층 필름 구조를 설계 및 제작해야 한다. 홀 전도성 물질이 염료분자가 흡착된  $TiO_2$  필름의 나노 동공에 채워 넣는 방법은 습식 또는 전기화학법으로 가능하다. 그러나 나노 동공속에 우수한 홀 전도 특성을 갖는 무기소재 필름을 형성하기는 쉽지 않다. 1998년 M. Gratzel 그룹에서 이러한 문제를 해결하기 위하여 비정질의 Spiro 유도체인 OMeTAD 홀 전도체를 이용한 고체 염료감응 태양전지가 개발되었다 [12].  $TiO_2$  / dye / OMeTAD형 고체 염료감응 태양전지는 IPCE 측정결과 520 nm 가시광 파장에서 33%의 광전변환 양자효율을 보였다. 무기 홀 전도체 CuI를 나노 동공에 채워 넣기 위한 효과적인 방법 중의 하나로 이온성 액체를 이용하는 방법이 보고되었다 [13]. CuI를 순수한 유기용매에 녹인 용액을 사용할 경우는 매우 낮은 광전변환 특성을 보이는 반면, 이온성 액체를 CuI 용액에 첨가한 용액을 사용하여 홀 전도성 필름을 만들 경우, 전류 및 전압이 급격히 향상됨을 알 수 있다. SEM 분석 결과 이온성 액체는 CuI의 결정성장을 억제하여 나노 동공에 효과적으로 채워지도록 도와주는 역할을 하는 것으로 밝혀졌다.

### 5. 결론

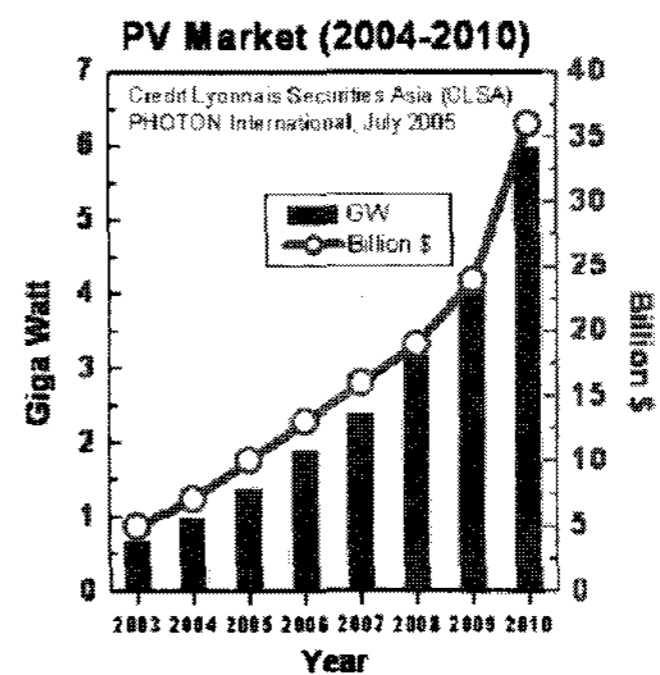
염료감응 태양전지의 상용화 추진은 유럽은 INAP, Fraunhofer 연구소, Soloronix, ECN 등에서, 호주는 Dyesol (구 STI)이 주도하고 있으며, 미국은 Konarka, Dupont, GE 등에서 진행 중이다. 이중 Dyesol은 연간 0.5 MW 규모의 라인을 갖추고 호주 정부 지원 아래 시범설치 단지를 조성하고 있으며, 미국의 Konarka는 플라스틱 모듈을 검토하고 있다. 아시아지역에서는 최근 중국 과학원도 염료감응 태양전지 기술개발에 참여하고 있다. 일본에서는 색소 증감형 태양전지라는 명칭으로 염료감응형 태양전지의 상용화 기술개발이 활발하게 추진되고 있으며, 2010년 이내에 염료감응 태양전지의 실용화가 이루어질 전망이다. 참고로 실리콘 중심의 태양전지 시장규모와 전망은 그림 8을 참조하기 바란다.

### 태양전지 시장규모



(a)

### 태양전지 시장전망



(b)

그림 8. 태양전지 시장규모 및 전망.

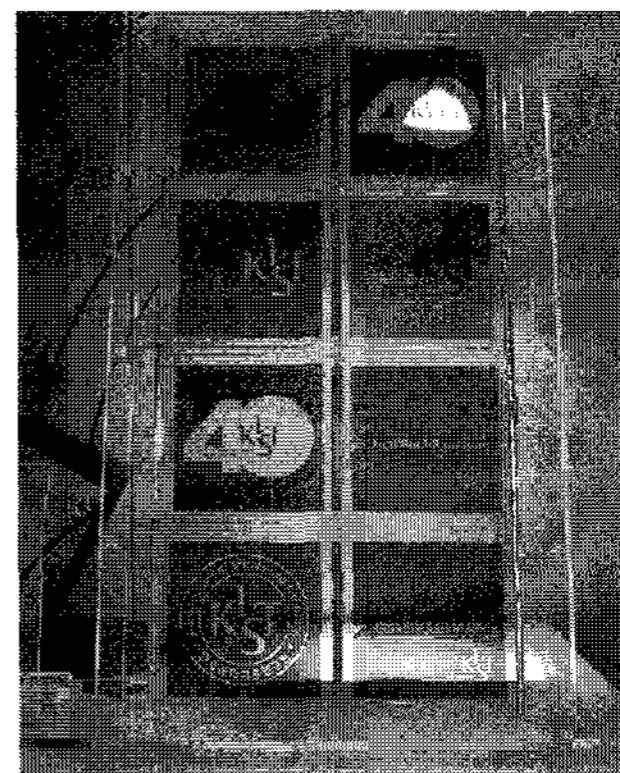


그림 9. 투명 컬러 특성의 염료감응 태양전지 윈도우.

국내의 경우 아직 상품화를 목표로 개발하는 기업은 없으나, 대기업에서 연구개발에 높은 관심을 보이고 있으며, 일부 기업에서는 탐색 연구를 통한 산업화를 모색하고 있다. 국가 출연연구 기관의 경우 KIST (한국과학기술연구원), ETRI (한국전자통신연구원), KRICT (한국화학연구원), KERI (한국전기연구원) 등에서도 활발한 연구개발을 수행하고 있다. 정기적인 유기태양전지 연구회 모임을 통하여 연구의 활성화가 촉진되고 있으며, 대학, 연구소, 기업 등 전문연구 인력 인프라가 확산되고 있다. 염료 감응 태양전지는 기존 실리콘 태양전지에 비하여 가격이 저렴하기 때문에 가격 경쟁력이 우수하며, 그림 9에서와 같이 투명하면서 다양한 색상 구현이 가능하기 때문에 다양한 응용성이 기대되는 기술이다.

## 참고 문헌

[1] B. O'Regan, M. Gratzel, Nature, 353, 737 (1991).  
 [2] M. K. Nazeeruddin, A. Kay, R. Humpbry-Baker, E. Miiller, P. Liska, N. Vlachopoulos, M. Gratzel, J. Am. Chem. Soc., 115, 6382 (1993).  
 [3] (a) G. Benkő, J. Kallioinen, J. E. I. Korppi-Tommola, A. P. Yartsev, V. Sundström, J. Am. Chem. Soc., 124, 489 (2002). (b) J. B. Asbury, R. J. Ellingson, H. N. Ghosh, S. Ferrere, A. J. Nozik, T. Lian, J. Phys. Chem. B, 103, 3110 (1999).  
 [4] Y. Tachibana, J. E. Moser, M. Grätzel, D. R. Klug, J. R. Durrant, J. Phys. Chem., 100, 20056 (1996).  
 [5] A. Hinsch, J. M. Kroon, R. Kern, I. Uhlendorf, J. Holzbock, A. Meyer, J. Ferber, Prog. Photovolt.: Res. Appl., 9, 425 (2001).  
 [6] N.-G. Park, J. van de Lagemaat, A. J. Frank, J. Phys. Chem. B, 104, 8989 (2000).  
 [7] K. D. Benkstein, N. Kopidakis, J. van de Lagemaat, A. J. Frank, J. Phys. Chem. B., 107, 7759 (2003).  
 [8] N.-G. Park et al., Adv. Mater., 20, 195 (2008)  
 [9] N.-G. Park, C. Kim et al., Chem. Commun., 4887 (2007)  
 [10] P. Wang, S. M. Zakeeruddin, P. Comte, I. Exnar, M. Grätzel, J. Am. Chem. Soc., 125, 1166 (2003).  
 [11] J. H. Kim, M.-S. Kang, Y. J. Kim, J. Won, N.-G. Park, Y. S. Kang, Chem. Comm., 1662 (2004).  
 [12] U. Bach, D. Lupo, P. Comte, J. E. Moser, F. Weissortel, J. Salbeck, H. Spreitzer, M. Gratzel,

Nature 395, 583 (1998).

[13] Q.-B. Meng, K. Takahashi, X.-T. Zhang, I. Sutanto, T. N. Rao, O. Sato, A. Fujishima, H. Watanabe, T. Nakamori, M. Uragami, Langmuir, 19, 3572 (2003).

## 저자약력



성명 : 박남규

◆ 학력

- 1988년 서울대 화학교육과 이학사
- 1992년 서울대 대학원 화학과 이학석사
- 1995년 서울대 대학원 화학과 이학박사

◆ 경력

- 1996년 - 1997년 프랑스 ICMCB-CNRS 박사후 과정
- 1997년 - 1999년 미국 NREL 태양전지연구센터 연구원
- 2000년 - 2005년 한국전자통신연구원 책임연구원
- 2005년 - 현재 KIST 에너지재료연구단 책임연구원



성명 : 김경곤

◆ 학력

- 1992년 고려대 화학과 이학사
- 1996년 고려대 대학원 화학과 이학석사
- 2003년 고려대 대학원 화학과 이학박사

◆ 경력

- 2003년 - 2005년 Wake Forest University 박사후 과정
- 2005년 - 2006년 Yale Univ. 박사후 과정
- 2006년 - 현재 KIST 에너지재료연구단 선임연구원



성명 : 고민재

◆ 학력

- 1995년 서울대 섬유고분자공학과 공학사
- 1997년 서울대 대학원 섬유고분자공학과 공학석사
- 2001년 서울대 대학원 재료공학부 공학박사

◆ 경력

- 2001년 - 2004년 MIT 화학공학과 Postdoctoral Associate
- 2005년 - 2008년 삼성전자 LCD 총괄 책임연구원
- 2008년 - 현재 KIST 에너지재료연구단 선임연구원