

인공광합성 태양전지

고려대학교 | 김환규 · 서강득

1. 태양광 발전기술의 필요성

현대 사회의 에너지는 석유 석탄과 같은 화석연료를 주 에너지원으로 하고 있다. 이러한 화석연료는 자원의 매장량이 한정되어있어 있어 지속적으로 가격이 상승하고 있다. 배럴당 30불 정도의 원유가는 2004년을 마지막으로 증가하기 시작하여 2008년에는 100불 수준으로 상승하였으며, 앞으로 계속 오를 전망이다. 또한 10~20년 안에 지금의 생산량이 지속적으로 감소하여 향후 50년 이내에 고갈의 위기에 있다. 화석연료의 또 다른 문제점은 연소시 이산화탄소와 아황산가스와 같은 대기오염 물질을 배출하여 환경을 오염시킬 수 있다. 특히 이산화탄소는 대기 중에 축적될 경우 온실 효과에 의한 지구 온난화를 초래하여 평균 온도 상승, 해수면의 상승 등 자연 재앙을 야기하여 인류 미래에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 이로 인하여 이산화탄소 배출을 규제하기 위하여 1997년 12월 교토의정서를 채택하게 되었고, 2005년 2월 16일 교토의정서가 정식으로 발효되어 이산화탄소 감축 프로그램이 작동하고 있으며 우리나라는 2013년부터 이산화탄소 규제 대상국에 포함된다. 따라서 화석연료 사용을 줄여서 이산화탄소 배출량을 감소시켜야 하며, 태양에너지, 풍력, 수력과 같은 재생 가능한 에너지원(renewable energy sources)으로 대체하는 노력을 기울여야 한다.

지구는 현재 연간 $18,000 \times 10^{12}$ watt-hour(18,000 테라와트시)의 전기를 생산하고 있는데 이는 인류가 사용하는 전체 에너지의 약 40%를 제공한다. 이런 규모의 전기를 생산하면 10 기가톤(gigaton) 이상의 이산화탄소가 매년 만들어지는데, 이는 화석연료를 이용하여 배출하는 이산화탄소 규모 중 가장 큰 부분을 차지하고 있다. 따라서 전 세계적으로 저탄소 전기생산 기술 개발이 절실히 요구되고 있으며, 태양전지는 이와 같

은 요구를 만족하는 대표적인 저탄소 녹색기술에 해당한다.

태양전지(photovoltaic cell 또는 solar cell)는 광기전 효과(photovoltaic effect)에 의해 태양빛을 전기로 직접 변환시키는 전기 발생 장치이다. 이미 우리 생활의 중요한 한 부분을 차지하고 있는 태양전지는 간단하게는 시계, 계산기 등의 전원으로 이용되며 크게는 위성통신과 같은 항공우주 분야와 대규모 전기발전소에 사용된다. 태양전지는 환경오염을 유발하지 않기 때문에 청정 재생 에너지원으로 분류되며, 미래에 화석연료를 대체할 차세대 에너지로 주목받고 있다.

2. 태양전지의 종류와 원리

태양전지는 이용되는 소재에 따라 분류하면 크게 무기태양전지와 유기 태양전지로 분류할 수 있다. 무기 소재 태양전지는 반도체 특성을 가지고 있으며, 보통 p-n 접합 무기 태양전지는 p-형 반도체와 n-형 반도체를 접합하여 제조된 것이며 n-형 반도체는 전자(electron) 전달체 역할을, p-형 반도체는 홀(hole) 전달체 역할을 한다. 무기 태양전지의 작동원리는 태양전지를 구성하는 반도체의 띠틈 에너지(bandgap energy: 전도띠에너지(E_{CB})와 원자가띠에너지(E_{VB})간의 에너지 차이)보다 큰 에너지를 갖는 광자(photon)를 태양전지가 흡수하게 되면 전자(electron)-정공(hole) 쌍이 형성되고, 전자는 구축된 전기장(built-in electric field)에 의해 접합부를 거쳐 n-형 반도체 전극으로 이동하여 합선회로(short-circuit)상에서 전류를 발생하게 된다. 무기 태양전지는 효율이 높아 태양전지 시장에서 가장 높은 점유율을 나타내지만 자원의 제한이 있고 제조단가가 높다는 단점을 가지고 있다.

1990년대 중반부터 주로 연구되기 시작한 유기화합물 태양전지는 전자주개(electron donor)특성과 전자받개(electron acceptor)특성을 갖는 유기물로 구성되어 있다. 유기분자로 이루어진 태양전지가 빛을 흡수하면

* 본 연구는 지식경제부 산하 정보통신산업진흥원 IT연구센터 육성·지원사업(ITRC)의 지원으로 수행되었다(R 0805843).

전자와 홀이 생성되는데 이것은 엑시톤(exciton)으로 불린다. 엑시톤은 전자주계와 전자받계의 계면으로 이동하여 전자가 분리되고 전자는 전자받계로 홀은 전자주계로 이동하여 광전류를 발생하게 된다. 엑시톤이 이동할 수 있는 거리는 10nm 안팎으로 매우 짧기 때문에 광활성 유기(고)분자 물질을 두껍게 쌓을 수 없어 효율은 타 태양전지에 비해 가장 낮지만, 가격이 저렴하고 유연성을 가지고 있다.

3. 인공광합성 태양전지

인공광합성 태양전지(일명: dye-sensitized solar cell: DSSC)는 반도체 접합 태양전지와는 달리 광합성 원리를 이용한 태양전지로서, 1991년에 스위스 Grätzel 그룹에서 광학적으로 투명한 나노입자 크기를 가지는 TiO₂ 금속 산화물에 Ru(II) 계열의 착화합물을 흡착시켜 처음으로 개발하였다. 이는 넓은 표면적을 가지는 금속산화물과 염료의 이상적인 광학적 특성으로 인해 광변환 효율이 비정질 실리콘 태양전지에 버금가는 높은 에너지 변환 효율과 함께 제조단가가 매우 저렴하고 또한 투명성, 유연성, 색상을 가지고 있어 응용성이 매우 넓기 때문에 세계적으로 큰 관심을 모으고 있다. DSSC의 작동 원리는 n-형 나노입자 반도체 산화물 전극의 표면에 화학적으로 흡착된 염료 분자에 태양 빛(가시광선)이 흡수되면 염료분자는 전자-홀 쌍

을 생성하며, 전자는 반도체 산화물의 전도띠로 주입되고 나노입자간 계면을 통하여 투명 전도성 막으로 전달되어 전류를 발생시키게 된다. 염료 분자에 생성된 홀은 산화-환원 전해질에 의해 전자를 받아 다시 환원되어 DSSC 작동 과정이 완성 된다(그림 1).

특히, DSSC의 광변환 효율은 재료의 특성에 따라 크게 의존하고 있으며, 전체 효율에 가장 많은 영향을 미치는 인자를 재료측면에서 살펴보면, 염료(dye), 전해질(electrolyte) 및 반도체 금속 산화물(metal oxide) 이 세 가지를 들 수 있는데 이 요소들 얼마나 잘 조합시키느냐에 따라서 효율의 증대에 크게 좌우되어진다.

3.1 DSSC의 효율 측정

일반적인 태양전지의 효율 및 특성 평가를 위한 대표적인 측정법은 photoelectric current(I-V) measurement와 IPCE(Incident photon to conversion efficiency)가 있다.

I-V measurement: 광변환 효율이란 일정한 조건(25℃, AM1.5)에서 입사된 광자가 전자로 변환되는 효율을 백분율로 표시한 것으로 그림 2에서와 같은 식으로 표현된다. 여기서 I_{sc}는 단락 전류 밀도, V_{oc}는 개방 회로 전압 그리고 FF(fill factor)는 소자로부터 얻을 수 있는 최대 출력을 개방전압과 단락전류의 곱으로 나눈 값이다. 즉 입사된 광 에너지에 대한 출력되는 전

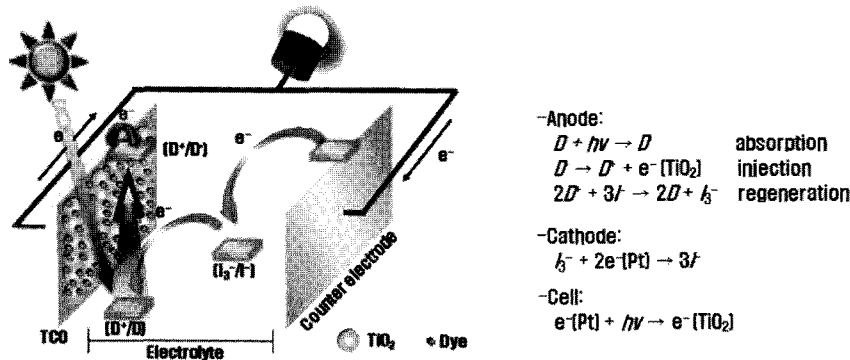


그림 1 DSSC의 구조 및 원리

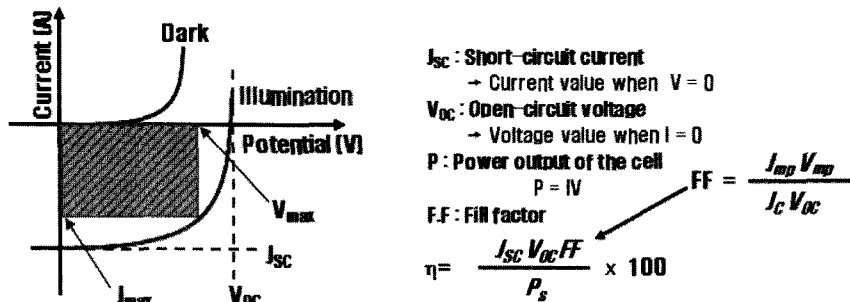


그림 2 DSSC의 I-V 곡선

기 에너지의 크기로 볼 수 있다. DSSC의 효율을 증가시키기 위해서는 그림 2에 보인 것과 같이 I_{sc} , V_{oc} , 그리고 FF를 증가시켜야 한다.

J_{sc} 는 광흡수 영역의 확대(흡수 강도의 증대, 흡수 파장의 장파장화), 전하 수송의 개선, p-n계 접합면적의 증대, 전하 생성의 촉진 등에 의해 향상될 수 있으며, V_{oc} 로 표현되는 최대 기전력은 전해질의 산화-환원 준위와 반도체 전극의 페르미준위와의 차이에 의해 결정된다. 이론적으로 동일한 전해질과 광전극을 사용할 때 최대 기전력은 일정한 상수 값이다. 그러나 염료에서 들뜬 광전자가 TCO까지 이동되는 과정에서 전자가 전해질 및 염료와 재결합 되는 현상, 염료가 흡착된 광전극 표면의 전도띠(conduction band)에너지 준위가 아래로 낮아지는 현상 등에 의해 손실이 나타나게 된다. FF는 소자제작 공정의 우수성을 나타내는 척도이며, 일반적으로 전극의 저항이 작은 값이어야 우수한 값을 나타낸다. I-V 곡선이 사각형에 가까울수록 높은 수치를 나타내게 된다. FF는 전압/전류 곡선에서 내접 직사각형 면적을 외접 직사각형 면적으로 나눈 값으로 정의한다.

IPCE(Incident Photon to Current Efficiency): 조사된 빛의 파장별로 공급한 광자숫자 대비 출력되는 광전자 수의 비율을 퍼센트로 나타낸 값이다. 그림 3과 같은 식으로 표현되며, 이때 $I(\lambda)$ 는 측정된 전류, $P_{in}(\lambda)$ 는 인가된 전력량, λ 는 파장이다.

3.2 염료

DSSC용 염료는 크게 두 가지로 나누어지며, 유기금속 염료와 유기염료의 장·단점을 표 1에 나타내었다.

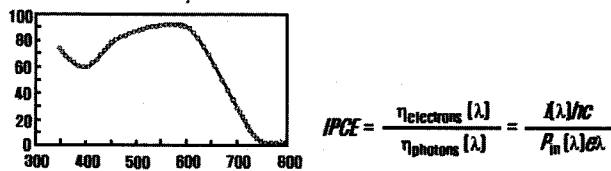


그림 3 DSSC의 IPCE spectrum

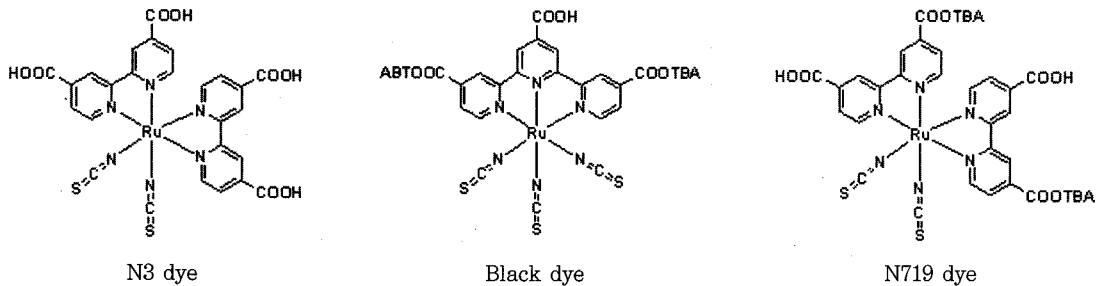


그림 4 DSSC용 염료의 대표적인 예

표 1 유기금속 염료 및 유기염료의 장단점

	유기금속염료	유기염료
장점	<ul style="list-style-type: none"> · 높은 광전변환효율 · 넓은 흡수영역 · 높은 화학적 안정성 	<ul style="list-style-type: none"> · 높은 흡광효율 · 다양한 분자설계 및 합성 용이 · 금속 비사용 · 저가
단점	<ul style="list-style-type: none"> · 분자설계의 제한적 한계 · 제한된 응용성 · 제조 고가 	<ul style="list-style-type: none"> · 낮은 광전변환효율 · p-p stacking에 의한 응집 · 짧은 여기상태 수명 · 좁은 흡수영역

DSSC용 염료가 갖추어야 할 조건은 첫째 가시광선과 근적외선 전영역의 빛을 흡수할 수 있어야 하며, 둘째 금속산화물 표면과 견고한 화학결합을 이루고 있어야 하며, 셋째 열 및 광학적 안정성을 지니고 있어야 한다. 지금까지 알려진 염료 중에는 Ru(II) 유기금속화합물이 가장 우수한 것으로 보고되고 있다. Ru(II) 염료(N3, N719, black dye)와 같은 무기 염료의 광변환 효율이 11% 이상의 고효율을 나타내고 있지만 Ru 금속의 한정된 자원과 최근 전 세계적으로 환경에 대한 관심과 제한적인 응용성을 고려했을 때 높은 몰흡광계수, 낮은 가격, 다양한 응용성을 가진 유기염료의 개발이 더욱 활발히 진행되어지고 있다.

또한 염료의 개발 이외에 부가물을 첨가함으로써 DSSC의 효율을 증가시킬 수 있는데, 그 예로 4-*tert*-butylpyridine(TBP)의 첨가나 공흡착제(co-adsorbent)로서 deoxycholic acid(DCA)의 이용으로 인한 태양전지 효율의 향상을 들 수 있다. DCA는 금속 산화물 표면에서 염료의 응집을 방지하여 염료에서 금속 산화물로의 전자주입 효율을 높인다. 그리고 DCA의 사용으로 인한 금속 산화물 표면에 흡착된 염료량의 감소 또한 광전류와 광전압을 개선시킬 수 있다. 개방회로 전압(V_{oc})의 최고 값은 태양광 시뮬레이터(AM 1.5G, 100mWcm⁻²)로 조명하였을 때 금속 산화물의 페르미준위와 레독스 쌍의 산화환원 퍼텐셜의 차이이다. 전해질에 TBP의 첨가는 금속 산화물의 전도띠 준위를

크게 올리고 DSSC의 V_{oc} 와 FF를 향상시켜 전지의 전체적인 효율을 향상시킨다. V_{oc} 의 향상은 암전류의 감소 즉, 주입된 전자와 전해질에 포함된 triiodide (I_3^-) 사이의 재결합의 감소를 말한다. 하지만 이러한 방법에도 불구하고 주입된 전자와 산화된 염료 및 전해질의 I_3^- 이온간의 재결합 과정은 현재 이론적인 값보다 실제적으로는 낮은 V_{oc} 를 나타나게 하는 주 원인이 된다.

3.3 고효율 DSSC용 염료의 요구 조건

3.3.1 전색채 감응제(Panchromatic Sensitizers)의 필요성

그림 5를 보면 태양으로부터 입사되는 태양 에너지는 약 44%에 해당하는 가시광선 영역과 약 50%의 근적외선 영역에 편중되어 있으므로 이 두 영역 모두의 빛을 흡수 할 수 있는 염료의 합성이 중요하다 할 수 있다.

즉 920nm 이하 파장대 빛의 모든 광자(photon)들을 흡수하여 태양 에너지에서 전기 에너지로 변환시킬 수 있어야 하며 이때 도달 할 수 있는 한계 광변환효율은 단일 접합 태양전지(1.4eV)의 경우 최대 33%까지 낼 수 있다.

3.3.2 금속산화물(TiO_2) 표면과 견고한 화학결합 및 전자 주입 용이성

고효율의 유기금속 염료를 만들기 위해서는 금속산화물(TiO_2) 표면과의 견고한 화학결합과 염료에서 금속산화물(TiO_2) 표면으로의 전자 주입이 효과적으로 이루어 져야 한다. 이러한 과정을 설명하기에 앞서 간단히 Ru(II) 염료를 예로 들어 작동원리에 대해서 살펴보자(그림 6).

빛 에너지를 흡수한 Ru(II) 염료는 바닥상태(ground state)에서 여기상태(excited state)로 전이($d \rightarrow \pi^*$ transition)한 후 두 가지 과정을 거쳐 전자주입이 이루어

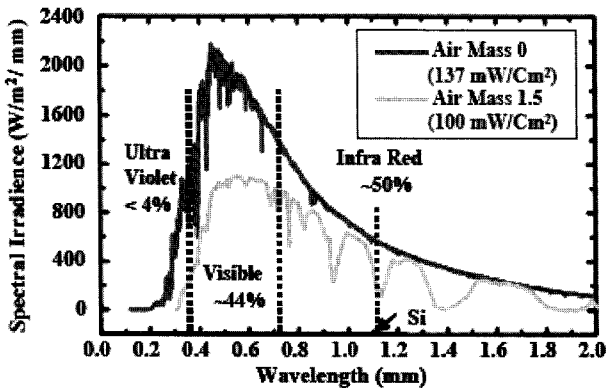


그림 5 태양광 에너지 분포도

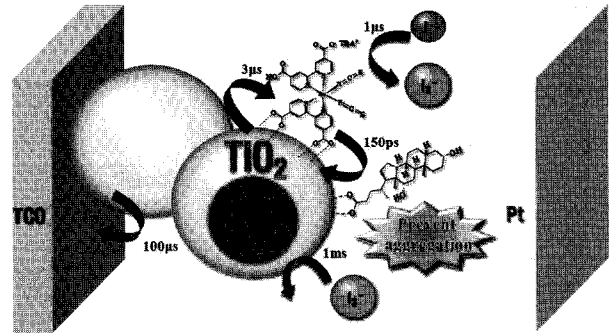


그림 6 DSSC의 작동원리 및 전자이동의 속도론적인 고찰

진다: ① 열화 되지 않은 단일항 여기상태(nonthermalized singlet excited state S^*)로부터 금속 산화물로 전자주입 되는 과정과 ② 내부 진동-이완 과정을 거쳐 삼중항 여기상태(triplet excited state T^*)로 이동된 열화전자(thermalized electron)가 주입되는 과정. 이때 전자주입(τ_{inj})은 펨토초 내지 피코초의 매우 빠른 속도로 주입되며, 정공 전달층 그룹을 갖는 염료의 경우 산화된 염료는 수 나노초 내에 재생된다. 반면 전자가 표면상태(surface state)를 거쳐 전해질로 손실되는 재결합(recombination 또는 back reaction) 속도(τ_r)는 마이크로-밀리초로 다소 느리기 때문에 대부분의 광전자는 금속 산화물로 주입되어 전자전달에 참여하여 광변환 효율이 우수하며, 아울러 장기 안정성 또한 우수함이 실험적으로 증명되었다.

위에서 설명하였듯이 고효율 유기금속 염료를 구현하기 위해서는 금속산화물(TiO_2) 표면에 많은 양의 염료의 흡착과 함께 얼마나 견고히 흡착시키는가에 따라 전체효율에 증대에 많은 영향을 끼치게 된다. 이에 카르복실레이트(carboxylate) 또는 포스페이트(phosphate) 같은 반응성 기를 도입하여 화학적 결합을 이루고 광흡수시 염료의 LUMO(D^*/D^+) 에너지 상태로 여기(excited) 전자가 금속 산화물로 전달될 때 전해질과의 접촉을 통해 손실되는 재결합 전자를 최소화 시켜 금속산화물의 전도띠로 손실없이 주입하는 것 또한 중요하다.

3.3.3 염료의 안정성

고효율 DSSC를 실용화하기 위해서는 무엇보다도 중요한 것은 열 및 광학적 안정성이 우수하여야 한다. 염료는 자연광에서 약 20년에 해당되는 기간인 적어도 10^8 산화-환원의 전환율(turnover)값을 가져야 한다. 최근 연구로는 최대 강도의 빛 조사를 지속적으로 14,000 시간 동안 행한 결과 DSSC는 안정하였으나 비결정질 실리콘 태양전지는 광퇴화(photodegradation)가 이루어진다는 결과가 발표되었고 80°C에서의 1,000시간 열

적 안정성 테스트 역시 초기 광변환 효율의 94%를 유지하는 우수한 특성을 보였다. 그러나 현재 시장에 진입해 있는 실리콘 태양전지는 20~60°C 범위에서 조차 광변환 효율이 20% 이상 급격히 하락함을 보여준다.

4. 전해질

일반적으로 DSSC에 사용되는 전해질은 I_3^-/I^- 레독스 쌍을 포함하는 액체, 젤 또는 고체 상태의 물질이다. 1991년 Grätzel 그룹에 의해 액체 타입의 DSSC가 발표된 이후 현재까지 많은 연구들이 진행되어 왔다. 액체형 DSSC는 전해액 누액 및 휘발, 약한 기계적 물성 등에 따라 나타나는 장기 안정성의 약화등의 단점을 가지고 있어, 현재는 무기 p형 반도체(inorganic p-type semiconductor, 유기 홀 전도체(organic hole transport materials)이나 고분자 전해질, 이온성 액체를 이용한 젤형 전해질 제조 등을 통해 “준고체(quasi-solid state)” 또는 “고체(solid-state)”의 DSSC 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 고체형 DSSC에 대한 연구는 실링(sealing)에 대한 문제와 셀 제작 디자인에 대한 문제를 해결해 주어, 셀 디자인에 대한 자유로운 변형 또는 유연성(flexibility)을 제공해 준다. 그러나 현재 이러한 고체형 DSSC는 고체 전해질의 낮은 이온 전도도와 전해질과 전극과의 불완전한 접촉 등으로 인해 액체형 DSSC보다 낮은 에너지 변환 효율을 나타내고 있다. 또한 젤 고분자 전해질 또는 준고체형 DSSC 역시 전해질 내에 여전히 휘발성을 갖는 물질이 상당량 존재하므로 실링에 대한 문제가 남아있는 것이 큰 이슈이다.

전해질은 이온 전도성 매개체(ionic conductor)로서 전하를 운반하는 이온을 포함하는 물질이다. 일반적으로 용매에 염을 첨가하여 전하운반체(charge carrier)인 자유이온(free ion)을 형성하기 때문에 이온 용액(ionic solution)으로 알려져 있지만, 이온성 액체(ionic liquid)와 같은 용융 전해질(molten electrolyte)도 이에 포함된다. 용매가 액체인 경우 액체 전해질, 무기 화합물 또는 고분자와 같은 고체인 경우에는 고체 전해질이

라 명명한다. 특히 물이나 유기용매 대신 고체 고분자를 사용하는 경우에는 고체 고분자 전해질이라 하며, 이온 전도도 향상을 위해 고체 고분자 전해질에 유기용매가 첨가되는 경우에는 젤 고분자 전해질(gel polymer electrolyte) 또는 준고체 고분자 전해질(quasi solid polymer electrolyte)이라 명명한다. 전해질의 종류와 상(phase)에 따라 이온 전도도 값은 큰 차이를 나타내는데, 상온에서 대략 $10^{-8} \sim 10^{-1}$ S/cm 범위의 이온 전도도를 갖는다. 이는 금속과 같은 전자 전도체(electronic conductor)의 전도도와 비교해볼 때 매우 낮은 값이다.

DSSC에서 전해질의 주요 기능은 광전극에서 산화된 I_3^- 이온을 상대전극으로, 상대전극에서 환원된 I^- 이온을 광전극으로 운반하는 역할이다. 이 때 전해질은 산화환원종(I_3^-/I^-)을 모두 포함하고 있기 때문에 레독스 전해질(redox electrolyte)이라고도 한다. 기본적으로 DSSC의 광특성인 V_{oc} , J_{sc} , FF, 광변환 효율, 장기안정성(long-term stability) 등은 전해질의 선택에 큰 영향을 받게 되며, 따라서 우수한 태양전지 성능과 장기안정성을 확보하기 위해서는 적절한 전해질을 선택하는 것이 무엇보다도 중요하다.

5. 반도체 금속산화물

염료를 흡착할 수 있는 전극 소재는 띠틈 에너지가 큰 반도체 나노결정(직경 15~20 nm) 산화물을 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 DSSC서 중요한 연구 테마 중의 하나이다.

DSSC용 반도체 산화물을 선택할 때 가장 먼저 고려해야 할 부분은 전도띠 에너지 값이다. 반도체의 전도띠 에너지는 염료의 LUMO 보다 낮아야 한다. 따라

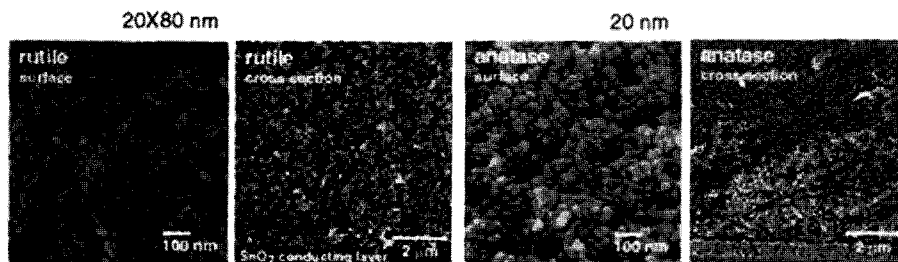


그림 7 Anatase와 rutile TiO_2 박막 표면 및 단면의 SEM 사진

서 DSSC 전극용 산화물을 선택할 경우 산화물의 전도도 에너지 값을 우선적으로 고려하여야 한다. 일반적으로 산화물은 전도대의 에너지 폭이 작아 이동도(mobility)가 다른 반도체 물질에 비해 현저히 낮다. 전자의 이동도 면에서 ZnO가 상대적으로 우수한 특성을 보이지만, 안정성이 좋지 못하므로 주로 TiO₂가 널리 이용되며 ZnO 또는 SnO₂가 이따금 이용되고 있다.

5. DSSC의 개발동향

DSSC는 기존의 높은 제조단가의 비결정 Si 태양전지 보다 1/3~1/5로써 가격 경쟁력이 우수하며 청정, 신재생 에너지의 새로운 형태로 많은 연구 관계자들의 깊은 관심을 받고 있다. 아울러 또한, DSSC는 나노기술이 접목된 태양광 변환 소자로서, 저가이면서 컬러 특성 그리고 투명성 등이 특징으로 디자인에 매우 유리할 뿐만 아니라, 플렉시블형 및 박막형 특징이 가능하여 초박막 소형 전자소자에도 응용이 가능하기에, 네트워크나 컴퓨터를 의식하지 않고 장소에 상관없이 자유롭게 네트워크에 접속할 수 있는 유니쿼터스(ubiquitous) 시대 환경의 요구 조건에 걸맞은 새로운 에너지 공급원으로서 각광을 받고 있다. 이에 따라 세계 각국에서 DSSC의 상용화 추진이 활발히 진행되고 있다. 유럽은 브라운 호퍼 연구소, 솔라토닉스, ECN을 중심으로, 미국은 코나카(Konarka), 듀폰, GE, MIT를 중심으로 진행중이며, 현재 DSSC의 창시자인 Grätzel 교수가 고문으로 있는 호주의 다이솔(Dyesol)사가 주도적으로 상용화를 진행하고 있다. 다이솔은 Grätzel 교수의 기술에 나노기술과 고도 화학기술을 접목시키면서 최초로 상용화된 제품을 출시하였다. 2004년 호주 증권시장에 상장했고, 지적재산권만 23개 이상에 달한다. 한편 아시아에서는 일본이 가장 앞서 있으며 소니, 샤프, 후지필름 후지쿠라 등 대기업을 포함한 50여개 기업이 DSSC의 상용화를 위한 연구를 진행 중이다. 특히 위의 기업들은 5년 이내에 DSSC의 단점을 극복하여 상용화 할것으로 예상된다.

국내에서는 출연연구원인 ETRI, KIST, 한국화학연구원 등에서 연구를 수행중이며, 대학은 고려대, 서울대, 한양대, 인하대, 성균관대 등 여러 대학에서 기초연구를 수행중이며 연구인력 및 연구분야가 점차 확대되고 있다. 대학과 연구소의 경우 요소기술 개발을 통한 DSSC의 효율 향상 및 메카니즘 연구에 주력하고 있으며, 기업중심으로 모듈화 기술개발 분야에서 연구를 수행하고 있다. 특히, 고려대 태양광 정보소재 연구센터(ITRC)에서는 고효율을 가진 유기 및 무기 염료

의 개발, 파장전환 물질과 같은 새로운 기능성 흡착제의 개발과 고체화된 이온전도성이 높은 전해질의 개발에 대한 연구로 통해 염료감응 태양전지의 효율 향상과 안정성의 문제점 개선에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 최근 녹색산업에 대한 관심이 높아지자 삼성 SDI, LG디스플레이 등 대기업에서 DSSC 사업에 참여하고 있다. 국내기업인 티모테크놀로지과 호주 다이솔이 합작해 설립한 다이솔티모가 2009년 상업생산 설비를 갖추고 세계최초로 상용화를 위한 시험생산에 성공하였으며, 2008년 ETRI로부터 플렉서블 DSSC 기술을 이전받아 상용화를 추진 중이다. 또한 이견창호가 2008년 시제품개발에 성공하였고, KIST와 공동 개발하고 있는 동진썬미켈, 우리솔라 등도 상용화를 준비 중이다.

6. 결론

인류에 있어 미래의 에너지 문제는 국운을 결정지을 만큼 중요한 문제이다. 태양전지는 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 과학 기술의 한계 극복을 위한 소재화학 분야의 기반 기술 확립에 범국가적 관심과 역량을 집중한다면 국내 과학 기술 수준 향상은 물론 에너지, 정보 산업 등 대표적 첨단 산업 기술의 국제 경쟁력 확보에 크게 기여할 것이다.

DSSC는 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 인정되고 있다. 무엇보다도 특히, 실리콘 소재와 웨이퍼 소재가 고가의 원재료 비용에 차지하는 비중이 50% 수준을 넘어서 원가절감의 핵심이 되고 있는 반도체 접합 태양전지와는 달리, DSSC는 원재료 비용을 상당히 줄일 수 있을 뿐만 아니라, DSSC의 광발전 효율

및 성능이 전적으로 구성 핵심소재의 성능 및 효율성에 크게 의존하게 되는 소재 중심 기술로서, 소재 핵심 산업으로써의 발전도 가능할 것으로 전망된다.

참고문헌

- [1] B. O'Regan, M. Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", *Nature*, vol. 353, pp. 737-740, 1991.
- [2] J. Ko, J. C. Lee, "A high power conversion efficient photo-sensitizers for dye-sensitized solar cells", *Polymer Science and Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 436-445, 2006.
- [3] 주명중, 김환규, 교재 편찬, "염료감응 및 태양전지의 기초 및 응용기술", 2009.
- [4] M. K. Nazeeruddin, P. Penchy, T. Renouard, S. M. Zakeeruddin, R. Hump-hry-Baker, P. Comte, P. Liska, L. Cevey, E. Costa, V. Shklover, L. Spic-cia, G. B. Deacon, C. A. Bignozzi, M. Grätzel, "Engineering of efficient panchromatic sensitizers for nanocrystalline TiO₂-based solar cells", *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 123, no. 8, pp. 1613-1624, 2001.
- [5] A. F. Haught, "Physics considerations of solar energy conversion", *J. Solar Energy Eng.*, vol. 106, no. 1, pp. 3-13, 1984.
- [6] L. C. T. Shoute and Glen R. Loppnow, "Excited-state metal-to-ligand charge transfer dynamics of a ruthenium(II) dye in solution and adsorbed on TiO₂ nanoparticles from resonance raman spectroscopy", *J. Am. Chem. Soc.*, vol 125, no. 50, pp. 15636-15646, 2003.
- [7] G. Benko, J. Kallioinen, J. E. I. Korppi-Tommola, A. P. Yartsev and V. Sundstrom, "Photoinduced ultrafast dye-to-semiconductor electron injection from nonthermalized and thermalized donor states", *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 124, no. 3, pp. 489-493, 2002.
- [8] Y. Tachibana, J. E. Moser, M. Grätzel, D. R. Klug and J. R. Durrant, "Subpicosecond interfacial charge separation in dye-sensitized nanocrystalline titanium dioxide films", *J. Phys. Chem. B*, vol. 100, no. 51, pp. 20056, 1996.
- [9] A. Hinsch, J. M. Kroon, R. Kern, I. Uhlendorf, J. Holzbock, A. Meyer and A. Ferber, "Long-term stability of dye-sensitised solar cells", *J. Prog. Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, 425-438, 2001.
- [10] P. Wang, S. M. Zakeeruddin, J. E. Moser, M. K. Nazeeruddin, T. Sekiguchi, M. Grätzel, "A stable quasi-solid-state dye-sensitized solar cell with an amphiphilic ruthenium sensitizer and polymer gel electrolyte", *Nat. Mater.*, vol. 2, no. 6, pp. 402-407, 2003.
- [11] J. Kruger, R. Plass, L. Cevey, M. Peccirelli, M. Grätzel, U. Bach, "High efficiency solid-state photovoltaic device due to inhibition of interface charge recombination", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, vol. 13, pp. 2085-2087, 2001.
- [12] B. O'Regan, F. Lenzmann, R. Muis, J. Wienke, "A solid-state dye-sensitized solar cell fabricated with pressure-treated P25 - TiO₂ and CuSCN: Analysis of pore filling and IV characteristics", *Chem.Mater.*, vol. 14, no. 12, pp. 5023-5029, 2002.
- [13] W. Kubo, T. Kitamura, K. Hanabusa, Y. Wada, S. Yanagida, "Quasi-solid-state dye-sensitized solar cells using room temperature molten salts and a low molecular weight gelator", *Chem. Commun.*, pp. 374-375, 2002.
- [14] P. Wang, S. M. Zakeeruddin, I. Exnar, M. Grätzel, "High efficiency dye-sensitized nanocrystalline solar cells based on ionic liquid polymer gel electrolyte", *Chem. Commun.*, pp. 2972-2973, 2002.
- [15] J. V. de Lagemaat, K. D. Benkstein, A. J. Frank, "Relation between particle coordination number and porosity in nanoparticle films: Implications to dye-sensitized solar cells", *J. Phys. Chem. B*, vol. 105, no. 50, pp. 12433-12436, 2001.

약 력



서강득

2007 한남대 화학과 학사
2010 고려대 소재화학 석사
현재 고려대학교 소재화학 박사과정 재학 중
관심분야: 염료감응 태양전지, 고체 전해질
E-mail : kdseo@korea.ac.kr



김 환 규

1980 울산공대(현: 울산대) 공업화학 학사
1982 KAIST 화학 석사
1990 Carnegie Mellon Univ. 화학 박사
현재 고려대학교 소재화학 교수
관심분야: 염료감응 태양전지, 고체 전해질, 유기 광증폭 소재 및 소자 응용
E-mail : hkk777@korea.ac.kr