

응모 분야	노벨화학상
추천 대상자	미하엘 그라첼 (Michael Grätzel)

광합성을 모방한 태양전지

따스한 햇살 아래 하얀 탁자 위로 초록 식물들이 끊임없이 호흡한다. 누군가에게는 저녁 식사에 곁들일 샐러드를 재배하는 풍경이겠지만, 사실 이들의 목적은 샐러드만큼이나 청정한 전기를 생산하는 것이다. 식물들이 그들의 잎과 줄기에 분포한 엽록체를 통해 태양으로부터의 빛 에너지를 화학에너지로 변환시키면, 곧이어 알맞게 설계된 탁자가 식물의 화학에너지를 전기에너지로 전환시켜 저장한다. 해가 지면 이 ‘식물-전지 협동 팀’은 저녁 식사 동안 근사한 무드의 조명을 제공할 것이다. 이는 가까운 미래에 출시될 ‘Biophotovoltaics' Moss Table’의 청사진이다(1). ‘Biophotovoltaic’이라는 이름에서 알 수 있듯, 제품의 핵심 기술은 식물의 광합성을 통하여 얻은 태양에너지를 전기로 바꾸는데 있다.

광합성으로부터 에너지를 얻으려는 과학자들의 염원은 꽤 오랜 역사를 가지고 있다. 1912년 이탈리아의 화학자 지아코모 시아미시안(Giacomo Ciamician)은 *Science*지에 발표한 논문에서 굴뚝과 검은 연기로 대표되는 기존의 화석 연료 기반 에너지 패러다임이 무너지고 식물의 광합성 프로세스로부터 전기를 생산하는 세상이 도래할 것임을 예견하였다(2). 그리고 80년이 지난 1991년, 스위스 로잔공대(Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)의 미하엘 그라첼 교수는 ‘염료 감응형 태양전지(Dye-Sensitized Solar Cell)’를 탄생시켰다.

태양 전지란 광기전 효과(Photovoltaic Effect)에 의해 태양으로부터 오는 빛 에너지를 전기로 변환시키는 장치로, 재료에 따라 크게 무기물 태양 전지와 유기물 태양 전지로 나눌 수 있다. 무기물 태양 전지는 실리콘 등의 반도체 소재가 p-n접합을 이루고 있는 형태로, 통신 위성의 날개 위에서 볼 수 있는 ‘흑요석처럼 검고 반들거리는 직사각형 모양의 판넬’이 이에 해당된다. 이 태양 전지는 20%에 근접하는 높은 에너지변환 효율을 보이지만, 반도체 공정의 특성상 가격이 높게 책정된다는 단점을 가진다. 반면, 유기물 태양전지, 그중에서도 특히, 그라첼 교수가 개발한, 염료 분자를 나노 결정구조의 산화물 표면에 흡착시켜 만드는, ‘염료 감응형 태양전지’는 1991년 처음 발표되었을 당시, 12%(확산 주광 조건에서)라는 비교적 높은 에너지 변환 효율에, 매우 낮은 가격으로 생산이 가능하다는 이점을 가지고 있었다. 뿐만 아니라, 식물의 광합성 메커니즘을 응용하여 전기를 생산하는 ‘생체 모방 기술(Biomimicry)’이라는 점에 있어서 인간과 자연의 공존을 모색하는 ‘지속 가능한 발전(Sustainable Development)’을

지향하기 때문에 화석 연료를 대체할 만한 가장 유력한 차세대 에너지 공급 시스템으로 주목받고 있다.

염료 감응형 태양전지의 선구자, 미하엘 그라첼

1973년 중동 전쟁으로 인하여 발발된 제1차 석유 파동이 일어났을 때, 박사 과정 학생이던 그라첼은 유럽 전역에 걸친 석유부족사태를 지켜보며, 석유가 고갈되어 더 이상 공급되지 않는 미래에 대해 생각하게 되었다고 말한다(3). 그에게 있어서 과학자란 ‘문제를 분석하고, 해결 방안을 찾아가는 자’(3)이었기 때문에, 당시 석유를 대체할 에너지를 찾는 일을 자신의 숙명으로 느꼈으며, 태양으로부터 빛을 받아 에너지를 생산하는 화학반응과정인 광합성에 관심을 가지게 되었다고 한다.

그 후 1977년에 스위스 로잔공대의 물리화학 교수로 취임한 미하엘 그라첼은 태양 에너지를 저장 및 사용이 용이한 다른 형태의 에너지로 변환시키는데 기반이 되는 연구들을 진행하기 시작한다. 1977년부터 1982년 까지 집중적으로 진행된 연구들은 광합성 반응에서의 전자 전달 과정에 대한 연구와 태양 빛 에너지를 받은 물이 수소와 산소로 분해되는 광해리 반응(Photodissociation) 및 산화 환원 광촉매 반응(Redox Photocatalysis)에 대한 것들이었다. 곧이어 그라첼 교수 팀은 광합성 메커니즘에 대한 연구를 거쳐 본격적으로 전지의 재료들을 찾는 연구에 착수한다. 1983년부터 1990년에 이르기까지 그라첼 교수는 뛰어난 광촉매인 TiO_2 에 대한 연구와 전자의 전달과정, 표면으로부터의 전자의 주입(Injection)과정 등 이후 염료 감응형 태양 전지의 핵심 기술에 필수적인 연구들을 진행한다. 그리고 이러한 다년간의 탁월한 연구결과들은 마침내 염료 감응형 태양 전지의 탄생을 가능케 하였다. 그라첼 교수는 1991년 *Nature*지에 실린 그의 논문 “A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films”에서 최초의 염료 감응형 태양 전지를 발표하였고, 이 논문은 현재까지 2만 건이 넘게 인용되었다. 그 후로 2015년 현재에 이르기까지 전지의 효율성을 높이기 위해 계속 진행된 그의 연구들은 그가 받은 Millennium Technology Prize (2010)등의 수많은 상들로 그 가치가 증명되고 있다.

그라첼 교수의 혁명적인 연구의 핵심은 태양으로부터 빛을 모으는 과정과 전자 전달 과정을 효과적으로 분리하는 것이었다. 간단히 요약하자면, 그라첼 교수의 전지는 다공성 물질에 흡착된 염료 분자가 태양 빛을 흡수하여 방출된 전자가 전자 이동 경로를 통하여 전극에 도달하여 전류가 흐르게 되는 원리를 이용하였다. 이 과정은 기본적으로 자연의 광합성 원리를 생체 모방한 것이라 할 수 있다.

어떻게 태양빛으로부터 전기를 생산하는가?

염료 감응형 태양전지는 식물의 광합성 작용과 유사한 메커니즘으로 전기 에너지를 생산한다. 그렇다면, 이 전지의 실질적인 구조와 작동 원리는 어떠한가? 먼저 단면을 살펴보면, 얇고 투명한 두 개의 유리판 사이에 전자의 흐름을 가능케 하는 재료들이 층상 구조를 이루고 있다. ‘유리-투명 전도 필름-TiO₂- 염료 - (I⁻/I₂ 전해질) - 백금- 투명 전도 필름- 유리’의 순서로 겹겹이 쌓인 재료들은 태양빛으로부터 에너지를 받아 안정한 상태에서 들뜬 상태로 전이된 전자를 이동시키는 통로 역할을 한다. 태양으로부터 전지에 도달한 가시광선은 제일 먼저 유리와 투명 전도 필름을 통과한다. 가시광선이 염료에 도달하면, 염료의 전자는 빛에너지인 가시광선을 흡수하여 안정한 상태(Ground State)에서 들뜬 상태(Excited State)로 에너지 준위가 변한다. 이때, 염료는 나노 스케일의 다공성 물질인 광촉매 TiO₂에 흡착되어있는 상태로, 염료의 들뜬 상태의(Excited State) 전자는 TiO₂의 전도대(Conduction Band)로 주입(Injection)된다(4). 전도대(Conduction Band)란 고체의 띠 이론(Band Theory)에서 전자가 비어 있는 에너지 레벨을 의미하는 것으로, 전도대(Conduction Band)에 들어간 전자는 TiO₂의 격자 구조를 따라 움직이게 되고, 마침내 투명한 필름 형태의 전극에 도달한다. 이렇게 전극에 도달한 전자는 외부에 설치된 회로를 통해 상대 전극으로 이동하며, 결론적으로 전류의 흐름으로 인한 전압차가 발생하게 된다. 반면, 전자를 광촉매인 TiO₂에 빼앗긴 염료는 Iodide ion(I⁻)으로 구성된 전해질로부터 전자를 얻어 환원되고, 환원제로 사용된 Iodide ion은 전자를 빼앗겨 Iodine(I₂)으로 산화된다. 그리고 전자를 빼앗긴 Iodine은 상대전극으로부터 전자를 받음으로서 다시 Iodide ion 상태가 되어 전해질 내 확산 작용에 의해 TiO₂에 전자를 전달하는 순환 구조를 반복한다.

특히, 태양 에너지를 받아 들뜬 상태가 된 염료의 전자를 처리하는 과정은 그라첼 그룹이 그들의 연구에 있어서, 가장 심혈을 기울인 부분이었다. 빛 에너지를 흡수한 염료의 전자는 안정한 상태(Ground State)에서 들뜬 상태(Excited State)로 전이(Transition)한 후, 광촉매 TiO₂의 전도대(Conduction Band)로 전자의 주입(Injection)이 이루어진다(4). 이때 전자의 주입(Injection)은 femto second(10⁻¹²초) 이내의 매우 빠른 속도(τ_{inj})로 진행되며, 전자의 주입(Injection)으로 산화된 염료는 수 nano seconds 내로 다시 전자를 얻어 재생된다. 반면, 전자가 TiO₂에 흡착된 상태인 표면 상태(Surface State)를 거쳐 전해질로 손실되는 재결합(Recombination)의 속도(τ_r)는 micro milli second로 비교적 느리게 진행되기 때문에, 대부분의 광전자(Photoelectron)가 전도대(Conduction Band)로 주입되어 전자전달에 참여하게 된다. 즉, 전지로부터 생성

되는 광전류(I_{ph})는 염료로부터 주입(Injection)되는 전자에 의한 전류 I_{inj} 와 재결합에 의해 손실되는 전류 I_r 간의 차이($I_{ph}=I_{inj}-I_r$)에 의해 결정되는 것이다. 따라서, 염료 감응형 태양전지의 독자적인 전류 생성 메커니즘에서, 전지의 에너지 변환 효율에 커다란 영향을 미치는 요소는 전자의 재결합 과정 속도를 최대한 느리게 조절하는 것이었다. 전자의 재결합 과정은 염료가 흡착되어있는 나노 입자의 표면 상태를 경유하여 발생하기 때문에, 염료 감응형 태양전지의 효율을 향상시키기 위한 그라첼 교수의 연구는 나노 입자 표면의 surface state를 제어하는 기술을 주축으로 하며, 그 외 전극의 구조 및 염료, 전해질, 광전자전달, 전도성 기관 등의 연구 또한 활발히 진행되고 있다(5).

과학/기술의 Melting Pot: 염료 감응형 태양전지

현대 과학의 두드러진 특징 중 하나는 그들의 연구가 오직 하나의 학문 안에서만 머무르기 보다는 여러 학문들 간의 협업(co-work)으로 진행된다는 것이다. 염료 감응형 태양전지연구는 다양한 과학과 기술이 혼합되어 있는 종합과학의 면모를 보인다. 먼저, 투명전도 필름의 경우, 재료 과학과 반도체 기술에 대한 연구가 필요하다. 투명 전도 필름은 나노 입자 산화물 고분자 슬러리 코팅을 위한 열처리가 필요하기 때문에 온도 안정성을 갖추어야 한다. 뿐만 아니라, 최근의 연구들은 유연성이 있으며 높은 에너지 효율성, 저온에서 우수한 전도성을 가지는 재료들을 찾아내고 있다. 유기화학과 유기금속화학 또한 전지의 염료를 설계하고 합성하기 위해 필수적이다. 그라첼 교수 연구 팀의 경우, 루테튬계 염료분자의 bipyridyl ligand에 긴 사슬형태의 hydrocarbon을 합성하여 소수성(hydrophobic)의 염료를 개발하였다. 이 염료는 우수한 열 안정성과 상당한 에너지 효율을 가지는 경쟁력 있는 소재로 주목받고 있다. 염료를 흡착하는 나노 결정 산화물의 경우, 전자의 재결합 속도에 영향을 주기 때문에, 입자 크기, 결정성, 표면 상태를 조절하는데 있어 매우 중요한 연구 테마이다. 지금까지 발견된 물질로는, TiO_2 , ZnO , Nb_2O_5 등이 존재하는데, 이들 모두 그라첼 교수가 참여한 연구의 결과이며, 이중 TiO_2 의 효율이 가장 좋은 것으로 알려져 있다. 또한, 그라첼 교수는 전자의 재결합 속도를 감소시키는 표면 처리에 의한 core-shell구조를 연구 중으로, 높은 광전압 상승효과를 얻기 위한 무기화학 및 나노화학에 대한 지속적인 투자가 이루어지고 있다. 전해질의 경우, 전기 화학과 고분자 화학과 밀접한 연관을 가진다. 액체 형태의 전해질을 전지로서의 이용이 용이하도록 겔 형태로 만드는 기술이 그라첼 교수의 지도하에 연구 중이다. 뿐만 아니라, 염료 감응형 태양전지 전반에 걸쳐 나타나는 전자 전달의 메커니즘을 이해하기 위해서는 물리화학과 광화학에 대한 전문적인 지식이 필요하

다. 결론적으로, 염료 감응형 태양전지의 발전은 과학 및 공학 기술의 전반적인 발전을 가능하게 한다(5).

모두에게 전기를!

전 세계의 과학자들이 염료 감응형 태양전지 연구의 치열한 경쟁에 동참하고 있다. 이러한 경쟁에 대하여 이 전지의 창시자 그라첼은 "Welcome to the club, can we help you?"라고 말한다(3). 염료 감응형 태양전지 연구가 여러 과학자들의 참여를 환영하는 이유는 염료 감응형 태양전지가 복합과학적 특징을 갖고 있기 때문이기도 하지만, 이들이 표방하는 목표가 ‘인류 전체에게 전기를 공급하는 것’에 있기 때문이다.

이 전지의 장점을 살펴보면, 먼저 기존의 실리콘 반도체 기반 태양 전지에 비해 제조공정이 간단하여 가격 경쟁력이 우수하다. 실리콘 반도체에 비하여 매우 유연(flexible)하다는 것도 염료 감응형 태양전지의 강점으로, 그라첼 교수는 이러한 특성에 관하여 ‘배낭이나 테니스 가방에도 붙일 수 있을 것’이라고 말한다. 뿐만 아니라 투명하고 다양한 색상 구현이 가능하며 비교적 경량이기 때문에, 창문에 부착하는 건물 일체형 태양광 발전을 가능하게 한다. 또한, 10년 이상 사용하여도 초기의 효율을 거의 잃지 않으며, 실리콘을 사용한 태양 전지와 비교하여 일광량의 영향을 적게 받는다는 점도 염료 감응형 태양전지만의 장점이다.

이러한 다양한 장점들은 태양 전지의 주요시장인 통신(Telecommunications), 가정용 주택(Solar Home System), 용수(Water Pumping), 오지 주거지역(Remote Communities), 오지 산업(Remote Industrial) 및 생활 용품과 같은 기타 주변 기기 등에서의 염료 감응형 태양전지의 가치를 높여준다. 예를 들어, 태양광 핸드폰 충전기나 가로등과 같은 경우 상용화를 목전에 두고 있으며, 조금 더 높은 효율이 보장될 경우, 자동차, 원거리 무선 센서의 전원 등과 같은 기존 시장에서의 실리콘 태양전지의 점유율을 가져올 것으로 예상된다.

그 무엇보다도 염료 감응형 태양전지가 보여줄 미래가 기대되는 가장 큰 이유는 이 전지가 심각한 에너지난에 직면할 미래 인류에게 ‘누구나 쓸 수 있는 전기’라는 희망을 선사하기 때문이다. 낮은 가격과 설치 용이성 및 전기 공급의 안정성은 오지의 원주민들부터 대도시의 시민들에 이르기까지 모두 자신만의 독자적인 발전 시스템을 가질 수 있는 기회를 제공한다. 그라첼 교수와 염료 감응형 태양전지를 연구하는 모든 과학자들은 햇빛아래 있는 사람이라면 누구나 전기를 쓸 권리를 가진 세상을 향해 나아가고 있다. 따라서 알프레드 노벨의 유언에 따라 ‘인류에게 가장 큰 혜택(the greatest benefit on mankind)’(6)을 준 사람에게 수여되는 노벨상의 수상자로 그라첼 교수만큼 어울리는 사람도 없을 것이다.

[참고문헌]

- (1) “Biophotovoltaic Moss Table Generates Electricity Through Photosynthesis”, Theresa Harmanen, (<http://inhabitat.com/moss-table-by-biophotovoltaics-generates-electricity-through-photosynthesis>).
- (2) “THE PHOTOCHEMISTRY OF THE FUTURE”, Giacomo Ciamician *Science* 27 September 1912: 385-394.
- (3) “A Conversation With Michael Graetzel”, (<http://www.haverford.edu/kinsc/boe/dssc/>).
- (4) (a) G. Benkő, J. Kellonen, J. E. I. Korppi-Tommola, A. P. Yartsev, and V. Sundström. Protoinduced Ultrafast Dye-to-Semiconductor Electron Injection from Nonthermalized and Thermalized Donor States, *J. Am. Chem. Soc.*, 124, 489 (2002).
(b) J. B. Asbury, R. J. Ellingson, H. N. Ghosh, S. Ferrere, A. J. Nozik, T. Lian, Femtosecond IR Study of Excited-State Relaxation and Electron-Injection Dynamics of Ru(dcbpy)₂(NCS)₂ in Solution and on Nanocrystalline TiO₂ and Al₂O₃ Thin Films, *J. Phys. Chem. B*, 103, 3110 (1999).
- (5) “염료감응 나노결정 태양전지”, 박남규, *CERAMIST*. 2007-02 : 45-52.
- (6) Full Text of Alfred Nobel’s Will, (http://www.nobelprize.org/alfred_nobel/will/will-full.html).