



THEME 01

나노기반 유기태양전지

김 강 민 | 연세대학교 기계공학부 박사과정 | e-mail : kami@yonsei.ac.kr

정 부 영 | 연세대학교 기계공학부 박사과정 | e-mail : hmmjpy@yonsei.ac.kr

김 우 철 | 연세대학교 기계공학부 부교수 | e-mail : woochul@yonsei.ac.kr

이 글에서는 대체 에너지 소자 중 하나인 유기태양전지의 원리와 광전변환효율 향상을 위해 연구되고 있는 나노구조 기반 기술에 대해서 소개하고자 한다.

계속되는 화석 에너지의 고갈 문제와 환경오염 문제는 더 이상 신문이나 뉴스의 기사 거리나 먼 미래의 이야기가 아닌 실제 우리의 현실로 다가왔다. 실제로 국제기관과 각국 정부, 에너지 연구기관 등에 따르면 지금처럼 화석 연료를 소비할 경우 석유, 석탄, 천연가스의 가채연수는 대략 40년, 230년, 60년에 불과할 것으로 발표되었다. 따라서 화석 연료의 고갈에 따른 대비책의 마련이 중요한 쟁점으로 떠오르고 있다. 또한, 최근 대두되고 있는 지구온난화 문제에 따른 대체 에너지의 개발이 중요한 쟁점으로 떠오르고 있다. 18세기 중엽 영국에서 시작된 산업혁명 이후 석탄, 석유 등의 화석 연료의 과도한 사용으로 인하여 온실가스를 무분별 하게 배출한 것이 온난화의 가장 큰 이유로 판단되고 있다. 이에 국제 사회는 1997년 12월 일본 교토에서 온실가스 감축 목표에 대한 구체적 이행 방안을 담은 교토의정서를 채택하고 2005년 2월 공식 발효 하였다. 선진 38국의 경우 1990년을 기준으로 2008년부터 2012년까지 평균 5.1%의 온실가스를 감축해야 한다. OECD회원국으로는 한국과 멕시코만이 1차 대상국에 지정되지 않았지만, 2013부터 2017년까지 온실 가스를 감축해야 하는 2차 의무 감축 대상국 가능성이 매우 높다. 이에 따라 국내에서도 대체에너지 개발이 중요한 이슈가 되고 있다.

대체에너지 중 주목 받고 있는 태양전지는 빛에너지를 전기에너지로 변환하는 청정 재생 에너지원으로 2010년 700여 억 달러의 시장규모였으며 연평균 성장 속도도 35%로 급성장 추세이다. 2010년의 유기태양전지 시장점유율은 전년과 비교하여 감소하였지만, 2011년에는 13.0%(3.8GW)로 증가세로 돌아서서 2015년에는 20.9%(13.2GW)까지 성장 할 것으로 전망된다(Solar&Energy., “최신 유기 태양전지기술 및 시장 전망(2011)”)

태양전지 연구의 역사는 1839년 프랑스의 베크렐(G. Becquerel)에 의해 광기전력 효과가 발견되면서 부터 시작되었다. 광기전력 효과는 반도체의 p-n접합 부나 정류작용이 있는 금속과 반도체의 경계면에 광 에너지를 입사시키면 반도체 내부에서 만들어진 전자와 정공이 접촉전위차 때문에 분리되어 양쪽 물질에서 서로 다른 종류의 전기가 나타나는 현상을 말한다. 이 때 회로를 구성해 주면 전류가 흐르게 되는데 이러한 현상을 이용하여 전기를 생산하는 것이 태양전지이다. 1954년에 미국의 벨 연구소에서 실리콘(Si)를 이용한 태양전지가 개발되고 1958년부터 인공위성에 태양전지를 적용하기 시작했다. 태양전지가 본격적으로 에너지원으로서 검토되기 시작한 때는 1973년 제1차 오일쇼크 이후인 '70년 중반부터이며, 우주용으로

사용되던 태양전지를 지상에서 사용하고자 하는 대규모 프로젝트로부터 시작되었다.

태양전지는 크게 실리콘 등의 무기물을 기반으로 하는 무기태양전지와 탄소화합물 기반의 유기태양전지로 나눌 수 있다. 태양전지의 시작과 함께한 기존의 실리콘 기반 무기태양전지의 단점으로 지적되고 있는 상대적으로 높은 발전 단가를 해결하기 위한 차세대 박막 태양전지 기술 중 하나로 공정단가가 낮은 유기태양전지가 큰 주목을 받으며 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 유기태양전지가 실리콘태양전지와는 다르게 유기고분자 소재를 기반으로 하기 때문에 유연하고 얇은 박막을 통해서 소자를 구현할 수 있고 이를 통해 롤투롤(roll to roll) 공정 및 저온 공정을 가능하게 함으로써 대량생산을 할 수 있기 때문이다.

또한 유기태양전지는 낮은 생산 단가뿐만 아니라 태양광을 흡수하여 전기를 생산하는 작동층의 두께가 100~200nm로 매우 얇고, 가볍고 유연한 기판을 사용할 수 있는 장점을 가지고 있어서 무기태양전지와는 다른 새로운 시장을 개척할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 이러한 장점을 바탕으로 미국의 코나카(Konarka) 등의 회사에서는 휴대용으로 사용 가능하

유기태양전지는 유기박막을 이용하기 때문에 롤투롤 공정을 통해 생산단가를 낮출 수 있으며, 유연한 특성을 활용하여 새로운 시장을 개척할 수 있는 가능성을 가지고 있다

거나 접거나 구부릴 수 있는 곳에서 사용할 수 있는 형태의 제품과 여러 가지 형태를 지닌 구조물에서 독립적으로 발전을 하는 분산형 발전용 유기태양전지 제품을 개발, 생산하고 있다. 얇고 가벼운 특성을 이용한 유기태양전지는 가방의 표면에 적용하거나 두루마리 형태로 제작하여 제품화되어 있으며, 곡선형 지붕 등에 적용할 수 있는 것을 이용하여 디자인 측면까지 고려한 분산형 발전용 모듈 또한 실제 적용하고 있다. 하지만 이미 상용화 되고 많은 보급률을 보이고 있는 무기태양전지와는 달리 아직은 상대적으로 낮은 광전 변환효율을 보이는 단점을 가지고 있기 때문에 시장형성에 어려움을 겪고 있으며 이를 해결하기 위해 효율 향상을 위한 연구개발이 주를 이루고 있다.(그림 1)

유기태양전지 원리와 구조의 변화

유기태양전지는 태양광이 입사하게 되면 전자와 정공 쌍인 여기자(exciton)가 생성되게 된다. 이렇게 생성된 여기자는 쿨롱 상호작용(Coulombic interaction)에 의해 서로 구속되어 함께 이동하는 특성을 보이게 되는데 이때 실제 전기를 생성하기 위해서는 여기자가 전자와 정공으로 각각 분리되고 이들이 전극으로 이동하여야 한다. 이때 여기자가 분리되기 위해서는 여기자가 생성된 물질과 인접한 다른 물질 사이의 에너지 밴드 차이가 필요하다. 즉, 전자를 받아가는 역할을 하는 물질과의 계면에 여기자가 도달하여야만 전기를 생성할 수 있는 것이다. 이러한 여기자는 생성 이후 다시 재결합하는 데까지 걸리는 시간이 100피코초로 매우 짧으며 이때 이동할 수 있는 거리(exciton diffusion length)는 약 10nm 정



그림 1 유기태양전지 응용-휴대용 충전기, 분산형 발전



도로 알려져 있다. 이러한 특성으로 인하여 1960년대 처음 개발된 단층 박막형 태양전지는 여기자의 분리 효율이 매우 낮아 광전변환 효율이 0.01% 이하로 매우 낮았다. 하지만 1986년 미국 코닥 사의 탕(C. W. Tang) 박사에 의해 여기자가 생성되어 전자를 다른 물질로 주는 역할을 하는 전자주개물질(donor), 그리고 이로부터 전자를 받는 역할을 하는 전자받개물질(acceptor)로 2층 박막구조(bilayer)가 개발되어 광전효율이 약 1% 정도로 향상되게 되었다. 이러한 구조에서는 전자주개/받개 물질의 계면이 1개의 평면으로만 이루어지게 되어 계면 근처 이외의 먼 곳에서 생성된 여기자는 전하 생성에 기여하지 않는 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 구조는 1990년대 미국 산타바바라(UC Santa Barbara) 대학의 히거(A. J. Heeger) 교수팀과 일본 오사카 대학의 요시노(Yoshino) 교수팀에 의해서 구현되었다. 전도성 고분자 즉 전자주개 역할을 하는 물질에 풀러렌(fullerene)을 넣고 빛을 조사하면 피코초 이하의 시간영역에서 여기자에서 전자가 분리되어 풀러렌으로 전달되고, 이때의 풀러렌 이온이 매우 안정적인 것이 발견 되었다. 따라서 전도성 고분자와 풀러렌을 혼합한 박막을 만들면 박막 전체에 계면이 형성되어 여기자의 분리효율이 거의 100%에 가까운 수준으로 향상시킬 수 있게 되었다. 이러한 형태의 구조를 벌크이종접합(bulk heterojunction)이라고 하며, 새로운 전자주개물질의 개발과 풀러렌 유도체를 이용하여 효율을 크게 향상시킬 수 있었다.(그림 2)

나노구조 기반 유기태양전지

유기태양전지의 광전변환효율을 결정하는 요소는

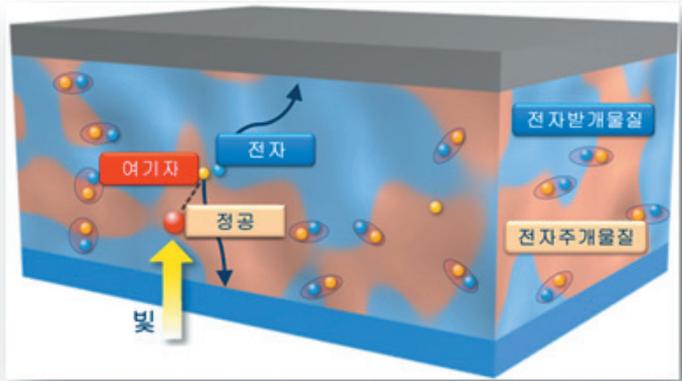


그림 2 유기태양전지 작동 원리(<http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp>)

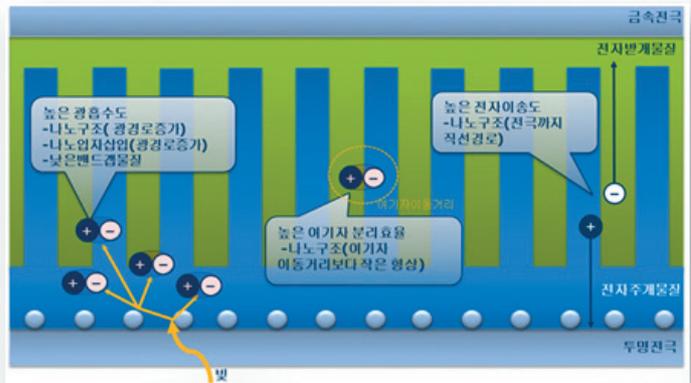


그림 3 유기태양전지 효율 향상을 위한 조건

크게 세 가지가 있다. 첫째는 다량의 광흡수를 통해서 많은 수의 여기자를 만드는 것이고, 둘째는 여기자가 전자주개물질과 전자받개물질 사이의 계면에서 분리되는 양이 많아야 한다. 셋째는 분리된 여기자에서 발생한 전자 혹은 정공이 전극으로 도달하는 양이 많아야 한다. 현재까지는 위의 세 가지 요소를 가장 효율적으로 충족시켜주는 형태가 이종접합 태양전지였다. 이 형태는 다량의 계면을 보유함으로써 여기자 분리효율을 극대화하여 효율을 높였지만, 전자 및 정공의 이동도는 상대적으로 떨어지는 경향을 보인다.

이에 대한 대안으로 2000년대에 제안된 형태가 정형이종접합(ordered bulk-heterojunction)구조이다(그림 3). 본 형태는 나노기둥 형태로써 다량의 계면을 통해서 여기자 분리효율을 극대화하는 것과 동시에 전자 및 정공의 이동효율 또한 향상시킬 수 있는 형태이다. 여기자의 분리효율을 극대화하기 위해서는 최대한 많은 계면이 존재하여야 하며, 이를 실현하기 위해서는 단위체적당 계면의 면적(surface to volume ratio)이 높은 구조가 필요하다. 즉 나노 구조물의 직경이 작고 높이가 높으며 간격이 좁은 형상이 필요하다.

유기태양전지의 경우 실제 모듈에서의 효율이 10%가 되면 시장경쟁력이 있어 상용화 가능한 것으로 알려져 있다. 이러한 효율을 달성하기 위하여 진행되어 온 연구 방법은 앞에서 언급한 나노구조화된 태양전지를 이용하여 여기자의 분리와 전자 정공의 이동성을 둘 다 확보하는 방법을 이론적, 실험적으로 구현하는 방법과 유기태양전지에 사용되는 전자주개물질과 전자받개물질의 보다 나은 성능을 보여주는 새로운 물질을 개발하는 방법, 마지막으로 기존의 태양전지 구조에 추가적인 물질을 삽입하여 효율을 개선하는 방법 등 크게 세 가지로 볼 수 있다.

먼저 정형이종접합 유기태양전지에 관하여 연구된 결과를 살펴보면 나노구조물의 사이즈를 최소 직경 25nm, 길이 80nm를 지닌 P3HT:PCBM 기반의 태양전지가 가장 좋은 결과를 얻고 있으며, 이 경우 벌크형태에서는 3.2%의 효율을 보이지만 정형이종접합형태(직경 25nm)의 경우 3.25%(Adv. Funct. Mater. 21, 139(2011))로 성능이 향상된 것으로 보고되었다. 이것은 동일 조건에서 벌크에 비해 정형이종접합형태가 더 좋은 성능을 보일 수 있다는 것을 실험적으로 보여

정형이종접합 유기태양전지는 넓은 계면을 통해 여기자 분리효율을 극대화하는 것과 동시에 전자 및 정공의 이동효율 또한 향상시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다

준 사례이다. 하지만 일반적으로 벌크형태의 광전변환효율이 4%를 보이고 있는 점을 감안하면 여전히 낮은 성능이기 때문에 향후 더 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다.

두 번째로 새로운 물질개발에서는 2000년대에 가장 많이 사용되던 전자주개물질인 P3HT의 경우 벌크에서 최대 효율이 4.9%로 보고되었는데, 이 물질보다 높은 전압을 얻을 수 있는 전자주개물질이 2011년 초반까지 학계에 보고되고 있다. 2009년에 히거 그룹에서는 PCDTBT를 기반으로 한 태양전지로 6.1% 효율을 보였으며, 솔라머(Solarmer)사와 UCLA 연구팀에서 PBDTTT기반 태양전지의 경우 7.73%의 높은 효율을 보였다. 이 두 가지 논문은 유기태양전지의 상용화 가능성을 보다 높일 수 있었다.

마지막으로 태양전지 내부에 추가적인 물질을 삽입하여 효율을 높이는 방법 또한 많은 연구 결과를 보이고 있는데 그 중 많이 보고된 방법으로는 나노입자를 삽입하여 광흡수량을 증가시키는 방법이 있다. 2011년 히거 그룹에서는 나노입자(40nm)를 삽입하여서 적외선 영역(600nm 파장 이하)의 흡수도를 향상시킴으로써 광전변환효율을 6.3%에서 7.1%로 향상시킨 것을 보고 하였다. 그리고 같은 해 네브래스카(Nebraska-Lincoln) 대학의 후양(Huang) 교수팀은 태양전지 전극에 강유전체를 삽입하여 전하의 이동성과 방향성을 모두 개선하는 연구결과를 네이처 매터리얼즈(Nature Materials)에 보고하였다.

정확한 물질이나 구조를 학계에 보고한 것은 아니나 2011년 와일리 출판사(John Wiley & Sons)의 태양전지 효율 테이블 39판(Solar cell efficiency tables, version 39)에 의하면 일본의 미쯔비시 화학(Mitsubishi Chemical)에서 10.0%의 효율을 보이는 유기태양전지 개발에 성공하였다. 이는 앞에서 언급한



유기태양전지의 상용화 가능 효율에 도달한 것이며 상용화 시점이 가까워지고 있다는 것을 보여준다.

유기태양전지의 성능 향상을 위해서는 최종적으로 높은 전압과 많은 전류를 얻어야 한다. 이를 위해서는 우선 보다 많은 빛을 흡수하여 많은 여기자를 발생시킬 수 있어야 하며, 생성된 여기자를 효율적으로 분리시킬 수 있는 넓은 계면이 필요하다. 마지막으로 분리된 전자와 정공의 이동성을 확보할 수 있는 형태를 가지는 것이 중요하며 이 세 가지를 함께 만족시킬 수 있을 때 가장 높은 효율을 보일 수 있게 되는 것이다. 현재까지는 많은 연구들이 각각의 방법에 대해서 집

중적으로 연구되어온 경향이 있었으나, 앞으로는 태양전지의 물질과 내부 나노 단위의 형상 그리고 추가적인 물질을 삽입하여 효율을 향상시키는 방법과 같은 여러 방법들의 장점을 모두 함께 이룰 수 있는 연구가 진행될 것이다. 또한 미쓰비시 화학에서 달성한 10% 효율은 작은 셀(cell) 하나의 효율이며, 서브 모듈 단계에서의 현재 최대 효율은 스미토모 화학(Sumitomo chemical)의 4.2%인 것을 감안 할 때 이러한 상품화를 위하여 대량 생산을 위한 모듈 개발에 대한 연구도 필요 할 것이다.



기계용어해설

다익송풍기(Multiblade Blower)

날개차는 앞쪽을 향해 있고, 지름 방향으로 짧고 폭이 넓은 다수의 날개가 있어 환기용으로 적합한 원심송풍기의 일종.

다(전)극 점용접기(Multiple Electrode Spot Welding Machine)

용접작업시간을 단축할 목적으로 동시에 많은 스폿 용접을 할 수 있게 한 용접기.

버킷 컨베이어(Bucket Conveyor)

2줄의 무단환상 체인을 순환시키고 그 사이에 버킷을 붙여서, 토사나 광석, 분말 등을 연속적으로 운반하기 적합한 컨베이어.

브라인(Brine)

냉동장치와 냉각되는 물품 사이에서 열의 이동을 촉진시키는 매체인 염화칼슘 수용액, 염화나트륨 수용액, 염화마그네슘 수용액.

브라인 냉각기(Brine Cooler)

냉장고나 제빙장치에서 냉매의 팽창에 의하여 먼저 브

라인을 냉각시킨 후 그것을 순환시켜 냉각시키는 기계 즉, 브라인에 의한 냉각기.

영국열단위(British Thermal Unit)

B.T.U.로 약기. 영국과 미국에서 쓰이고 있는 피트, 파운드 법의 열 단위로, 1파운드의 물을 1°F만큼 높이는 데 필요한 열량.

조립 크랭크축(Built-up Crank Shaft)

크랭크 암, 크랭크 핀, 크랭크 차축 등을 적당히 분할하여 수축 끼워맞춤 혹은 스플라인 등으로 조립하여 만든 크랭크축.

맞댄 용접(Butt Welding)

막대모양의 재료 2개의 끝을 직선 또는 임의의 각도로 맞대고 압력을 가하여 접촉시킨 2편을 용접하는 전기저항용접의 일종.

다듬질(Burnishing)

가공품 표면을 평활하게 하기 위하여, 표면에 공구를 대고 연마하면서 나타나는 작은 블록부분을 없애고 오목부분을 메우는 방법.