

# 멀티스케일 에너지 시스템 기술



**최만수** | 객원편집위원  
기계항공공학부 교수  
멀티스케일  
에너지시스템 연구단장

**깨**끗하고, 풍요롭고, 안전하고, 건강한 삶을 위해서는 현재 우리가 당면하고 있는 에너지 문제를 해결해 줄 청정 미래 에너지 솔루션을 찾아야 한다는 사실은 분명하다. 언젠가 고갈될 화석연료를 절약하고 대체하기 위한 수단으로 신재생에너지를 이용하는 연구가 이미 전 세계적으로 광범위하게 이루어지고 있지만, 현재 신재생에너지 시스템의 기술 수준은 화석연료를 사용하는 기존 에너지시스템에 비하여 경쟁력이 떨어지는 것이 사실이다. 따라서, 혁신적인 신재생 에너지 원천 기술 개발이 시급하며 이를 위해서 기존 기술의 한계를 뛰어 넘는 새로운 패러다임의 기술 개발이 요구되고 있는 것이다.

태양전지와 연료전지를 포함하는 신재생 에너지 시스템 내에서 벌어지는 근원적인 광에너지와 분자에너지의 전달 및 변환 과정에서 나타나는 멀티스케일의 물리/화학 메커니즘에 근거한 새로운 통합적 접근이 필요한 시점이다. 에너지 캐리어인 광자, 전자, 분자 및 에너지 변환에 참여하는 포논과 플라즈몬의 에너지 전달 스케일이 나노 및 마이크로 스케일이고, 에너지 시스템이 매크로 스케일이므로 나노/마이크로/매크로를 통합하는 멀티스케일 아키텍처링을 통해서 새롭게 구현되는 초물성을 실제 에너지 소자에 적용하여 에너지 전달과 변환을 극대화시키는 연구가 필요하다.

이에 멀티스케일 아키텍처링을 에너지 시스템에 적용하여 신개념 태양전지, 신개념 연료전지 등 청정 고효율 멀티스케일 미래 에너지 시스템 원천기술을 확보하고자 교육과학기술부 글로벌프론티어사업의 일환으로 2011년 9월 재단법인 멀티스케일 에너지 시스템 연구단이 출범되었다. 본 연구단은 '화석연료를 대체할 수 있는 광 및 분자에너지를 이용한 혁신적인 청정 고효율 멀티스케일 미래 에너지 시스템 원천기술 개발'을 목표로 연구개발을 추진하고 있다. 실질적인 융합연구가 이루어 질 수 있도록 공학과 자연과학을 망라하는 다양한 전공분야에서 관련 연구를 수행하고 있는 전문가들로 연구팀을 구성하였으며 서울대를 중심으로 KAIST, 연세대, 고려대, 성균관대 등의 9개 대학교와 화학연구원, 기계연구원, KIST, 한국에너지기술연구원, 등 5개 연구소에서 연간 260여명의 연구원이 참여한다.

1단계 (2011. 9 ~ 2013. 8)에서 멀티스케일 미래 에너지시스템 핵심기반 기술 개발을 추진하고 2단계 (2013. 9 ~ 2016. 8)와 3단계 (2016. 9 ~ 2020. 8)를 거쳐 고도화 기술 개발을 추진하여 화석연료 시스템과 경쟁할 수 있는 멀티스케일 미래 에너지시스템 핵심 원천기술을 개발할 계획이다. 본 연구단에서는 멀티스케일 아키텍처링 기술, 광에너지 융합시스템 기술, 분자에너지 융합시스템 기술, 지능형 에너지 소재 기술 등에 대한 네 개의 핵심과제를 두고 연구를 수행하고 있다. 향후 고효율, 저가, 청정 미래 에너지 시스템의 원천기술을 확보하여 세계 과학기술 발전을 선도하고 국가 미래 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

이와 관련하여 본 기획특집호에서는 멀티스케일 기반 미래에너지 관련 핵심기술들에 대해 소개하고자 한다. 본 특집호는 본 연구단에 참여하여 연구를 수행하고 있는 각 분야 전문가들의 기고문으로 구성되었다. 먼저 멀티스케일 에너지기술 기반 차세대 태양전지 기술을 소개한 후 자연모사 기반 멀티스케일 아키텍처링 기술과 에너지 소자에 대해 살펴본다. 다음으로 신 에너지 변환시스템을 이용한 고체산화물 연료전지 기술 개발에 대해 소개하며 마지막으로 유기-나노입자 하이브리드 태양전지 기술에 대해 소개한다.

# 멀티스케일 에너지기술 기반 차세대 태양전지

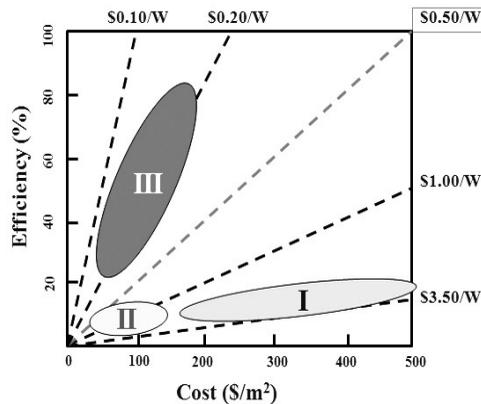
표면의 온도가 약 6000 K인 태양이 표면에서 발산하는 파워는 약  $9.5 \times 10^{25}$  W 정도로 실제로 지구 표면에 1시간 동안 도달하는 태양 에너지 ( $4.3 \times 10^{20}$  J)는 인류가 1년 동안 사용하는 전체 에너지의 양 ( $4.1 \times 10^{20}$  J)과 맞먹는 막대한 양과 같다. 따라서 시간과 공간적으로 넓게 퍼져 에너지 밀도가 낮은 태양광을 얼마나 효율적으로 사용할 수 있는가는 인류가 해결해야 할 중대 과제 중에 하나이다. 또한 화석 연료의 유한한 매장량에 기인한 에너지 공급의 위기로 인하여 대체 에너지 개발이 필수적임은 이제 더 이상의 강조가 필요 없을 만큼 전 세계적인 공감대를 형성하고 있으며, 이러한 관점에서 태양 에너지는 무한정성, 청정성 및 안정성으로 인해 가장 확실한 인류의 일차 에너지원으로 인식되고 있다.

태양 에너지를 효율적으로 이용할 수 있는 방법 중 가장 현실적인 방법은 직접적으로 전기 에너지로 변환할 수 있는 태양전지의 이용이다. 1839년 Becquerel에 의하여 광전압효과 (Photovoltaic effect)가 발견된 이래, 현대적인 태양전지는 1954년 미국 벨랩(Bell Labs)에서 p-n접합형 단결정 Si에 기초하여 개발되어 그 이후로 현재까지 매우 다양한 태양전지가 개발되고 있다.



**정현석** | 성균관대학교  
신소재공학부 교수

서울대학교 무기재료공학과에서 학사 및 석사학위를 취득하고 서울대학교 재료공학부 박사를 취득하였다. 미국 로스앨러모스 국립연구소에서 포스트 닥터를 마치고, 2006년부터 국민대학교 조교수를 역임하였으며, 현재는 성균관대학교 신소재공학부에 부교수로 재직 중이다. 주된 연구분야는 나노소재 합성 및 광에너지 변환소자이다.



- I. 1세대**  
고효율 but 고가
- Single crystal Si, 24.7%
- Polycrystalline Si, 20.3%
- II. 2세대**  
저가 but 저효율
- Amorphous Si, 11.7%
- CIGS, 19.9%
- CdTe, 16.5%
- DSSC, 11.1%
- OPV, 8.3% (small cell)
- III. 3세대**  
저가 and 고효율
- Next generation solar cells

그림 1. 에너지 생산가격과 효율에 따른 태양전지의 분류 (Green 2004에서 발췌)

태양전지를 분류하는 방법은 여러가지가 있지만, 다음의 그림과 같이 효율과 전력생산 가격측면에서 분류될 수 있다. 먼저 1세대 태양전지로는 단결정 및 다결정 Si 태양전지로서 단결정 태양전지 셀의 경우 효율이 약 25% 정도로 단일접합 태양전지의 이론 효율치인 30%대에 거의 근접할 정도로 매우 높은 효율을 보이고 있다. 그러나 태양전지 모듈의 경우 효율이 약 10~15 %이고 에너지 생산단가는 \$ 3.5/Wp (2011년 현재 \$ 2.0/Wp)로 현재 전기 생산단가인 \$ 0.4/Wp에 비해 매우 높은 가격이다. 이후 태양전지 생산단가를 낮추기 위해 다양한 2세대 태양전지 기술이 개발되었으며, 대표적 2세대 태양전지로는 무기 화합물박막 태양전지 (특히  $Cu(In_xGa_{1-x})Se_2$ , CIGS)태양전지, 염료감응형 태양전지 (Dye-sensitized solar cells, DSSC), 유기박막 태양전지 (Organic photovoltaic cell, OPV)가 있다. 이들 태양전지는 흡광계수가 높아 박막화가 가능하고, 유연기판에 제조가능 할 뿐만 아니라 연속적인 생산이 가능하기 때문에 제조단가가 1세대 태양전지에 비해 매우 낮은 강점을 지니고 있으나, 모듈효율이 낮다는 단점이 있어 최종적인 에너지 생산단가는 낮다.

따라서 3세대 태양전지는 제조단가를 저가화함과 동시에 에너지 변환효율을 고효율화할 수 있는 차세대 태양전지가 될 것이나, 현재까지 기술의 단계는 개념정립단계에 와있다. 태양전지의 고효율화를 저해하는 에너지 손실원인은 전하생성 및 분리, 전하이동, 전하수집에서 근원적인 문제점에 기인한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 기존의 태양전지 연구와는 완전히 다른 관점으로부터 출발하여야 한다. 예를 들면, 현재 단일접합 태양전지의 이론 효율은 약 30%로 1개의 광자 (photon)이 1개의 전자 (electron)으로 변환되는 외부양자효율 (external quantum efficiency)가 100%라는 가정하에서 계산되었다. 그러나 생각의 전환을 하여 1개의 광자에서 2개 이상의 전자를 생성시킬 수 있는 이론이 존재한다면 태양전지의 이론효율을 30% 이상으로 끌어올릴 수 있고, 결과적으로 초고효율을 나타내는 태양전지를 제조할 수 있을 것이다. 이러한 이론이 미국의 로스알라모스 국립연구소 (Los Alamos National Lab.)과 신재생 에너지 국립연구소 (National Renewable Energy Lab.)에서 정립되었고, 이를 다중여기자 발생 (Multiple Exciton Generation, MEG) 이론이라 한다. 이 MEG 이론은 양자점 (Quantum



그림 2. 2세대 태양전지 (왼쪽부터 [www.eusolarsystems.com](http://www.eusolarsystems.com), [www.inhabitat.com](http://www.inhabitat.com), [www.pv-tech.org](http://www.pv-tech.org), [www.celsias.com](http://www.celsias.com)에서 발췌)

dot)의 크기가 작아지면 에너지 띠 (Energy band)가 여러 에너지 준위로 갈라지는 현상에 기반한 것으로, 밴드갭의 몇 배에 해당하는 광에너지를 인가해줌에 따라 생성된 뜨거운 전자 (hot electron)가 낮은 에너지 준위로 내려가면서 열화 (thermalization)되지 않고, 광자를 생산하여 다시 또 다른 전자를 여기시킬 수 있다는 것으로, 현재까지 실험적으로 증명단계에 있다.

그러나 이 이론을 태양전지로 구현하기 위해서는 광흡수를 극대화하여 생성된 여기자를 전자와 홀로 각각 분리하여 자유전하 (free carrier)로 변환하여 효율적으로 포집할 수 있는 기술이 필요하다. 이를 위해서 멀티스케일 에너지 연구단 (단장: 서울대 최만수 교수)에서는 멀티스케일 3차원 아키텍처링 기술을 통하여 위의 제시된 문제를 해결하고자 한다. 즉 지능형 나노소재를 개발하고 이를 아키텍처링화 함으로써 기존에 없었던 물성을 구현하여 태양전지의 에너지 변환효율을 획기적으로 증대시키고, 저가화를 달성함으로써 차세대 태양전지 시스템을 구현하는 연구과제이다.

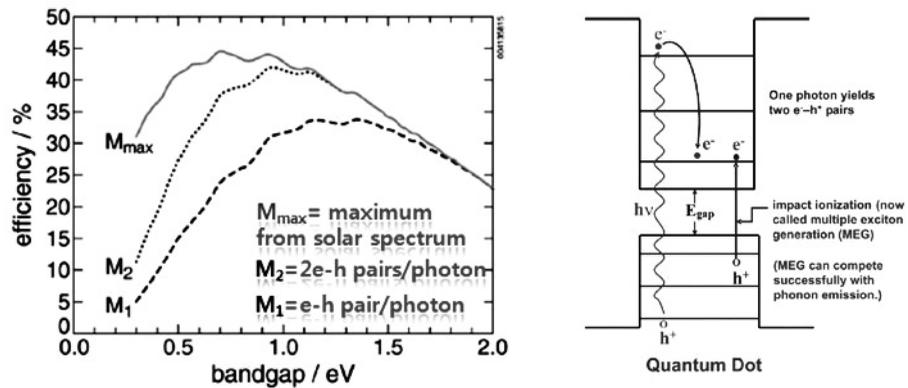


그림 3. MEG효과로 변환 될 수 있는 태양전지의 이론효율 및 MEG 효과 모식도 (Chemical Physics Letters 457, 3 (2008))

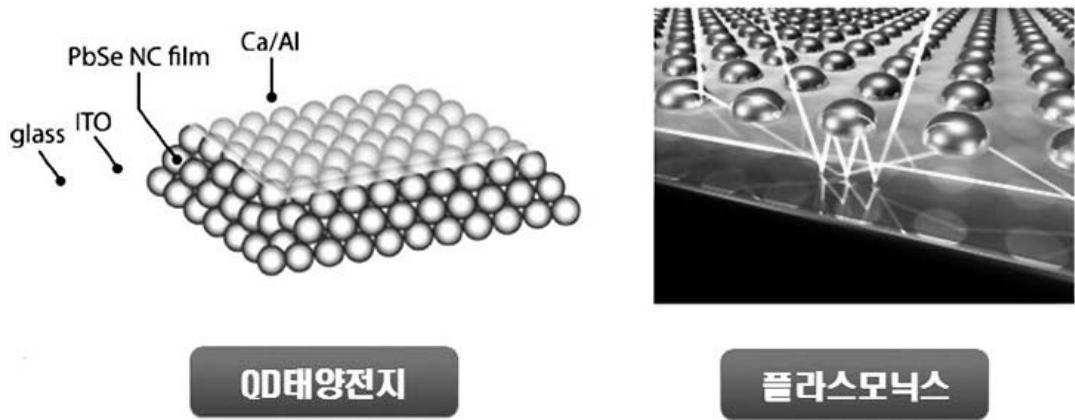


그림 4. 양자점 (QD) 태양전지 모식도 및 플라스모닉스 개념도 (Nozik et. al., Nanoletters (2008)와 Atwater et. al., Nature Materials(2010))

저가 초고효율 3세대 태양전지를 구현하기 위해서는 2세대 태양전지 기술에 기반한 양자점 태양전지 기술개발을 해야하고, 광흡수를 극대화하기 위해 플라즈모닉스 기술을 이용하여야 한다. 양자점은 앞서 언급한 MEG를 구현하는데 핵심소재이며, 플라즈모닉스는 금속 나노입자와 빛과의 상호작용으로 발생하는 플라즈몬 (Plasmon) 효과 (금속나노입자 자유전자의 집단적 진동)로 빛의 흡수량을 증가시킬 수 있다는 이론이다. 즉 플라즈모닉스 기술을 태양전지에 효율적으로 적용하기 위해서는 금속 나노구조를 3차원으로 배열할 수 있는 기술이 중요하다. 또한 MEG 효과를 소자에 구현하기 위해서는 양자점 또는 양자점이 접합된 나노소재가 아키텍처링화되어 빛을 효율적으로 흡수하여 자유전하를 생성하여 포집시켜야 한다. 따라서 멀티스케일 3차원 아키텍처링 기술은 차세대 태양전지를 구현하기 위한 핵심기술이 될 것으로 예상되며, 본 기술의 개발로 기존의 고가의 단결정 Si 태양전지 효율을 뛰어넘는 초저가 3세대 태양전지가 개발될 것으로 예상된다.

본 글에서는 각 세대별 태양전지를 간략히 소개하고, 특히 차세대 태양전지인 다중여기자 및 플라즈모닉스 기반 태양전지 기술을 살펴보았다. 이를 실현하기 위해서 멀티스케일 에너지 기술이 크게 기여할 것이며, 본 기술개발이 완성되는 10년 후 미래 에너지 신기술을 세계적으로 선도할 대한민국을 기대해본다. 서울경제



# 자연모사 기반 멀티스케일 아키텍처링 기술과 에너지 소자

게코도마뱀의 발바닥에는 미세한 지름을 가지면서도 길게 늘어난 섬모들이 뽁뽁하게 존재하는데, 이 긴 섬모 구조물을 모사하기 위해서 공학자들은 지난 10년 동안 다양한 공학적 접근 방법을 제시하였다. 벽면에 척척 붙어서 자유자재로 움직이는 게코도마뱀 발바닥의 뛰어난 탈부착 기능을 모사함으로써 영화 '스파이더맨'의 주인공처럼 인간이나 로봇 등이 건물의 외벽에 붙어 자유롭게 움직일 수 있는 날도 얼마 남지 않아 보인다.

나노-마이크로 공학에서, 큰 스케일에서부터 출발하여 작은 스케일로 차근차근 가공하여 내려가는 방식인 탑-다운(Top-down) 공정과 나노미터 크기의 미세한 입자들을 가지고 크게 조립하여 키워 나가는 방식인 바텀-업(Bottom-up) 공정을 통해, 이제는 수백 마이크로미터 크기에서 수 나노미터 크기의 패턴(pattern)까지 우리가 원하는 형상을 2차원 평면상에 간단하게 구현할 수 있게 되었다. 최근에는 DNA나 바이러스까지 나노 패턴을 위한 새로운 재료들로 사용되면서 단일 디멘전에서의 패턴링 기술은 예술적인 경지에 이르게 되었다. 그와 동시에 공학자들은 새로운 비전통적인 패턴링 기술을 기반으로, 그동안 기술적인 한계 때문에 해결하지 못하였던 여러 가지 공학적 문제들을 하나하나 해결하게 되었으며 자연은 이들에게 훌륭한 모범답안을 제시하여 주었다.

인류의 발전과는 별개로, 자연은 오랜 시간 동안 스스로 최적화된 답을 찾아 내면서 환경에 적응했으며, 공학자들은 자연에 존재하는 여러 가지 기능성 구조물들을 연구하면서 마침내 상어의 표면을 모사한 전신 수영복에서부터 나방 눈에 있는 미세 패턴을 모사한 무반사용 광학필름에 이르기까지 다양한 분야에서 자연 모사 공학이 적용된 제품들이 상용화되었다.

그림 1은 연꽃잎, 게코도마뱀의 발바닥 그리고 나방 눈의 표면에 존재하는 다양한 멀티스케일 계층 구조물들을 보여준다. 연꽃잎에는 약 10마이크로미터 크기의 돌기들이 무수히 나 있는데 이 미세 돌기 위에 1마이크로미터 미만의 초미세 돌기들이 계층적으로 나 있음으로써, 물방울은 연잎의 표면에 젖지 못하고 계층 구조 위에 떠 있는 채로 자유롭게 연꽃잎 표면 위를 굴러다닌다. 그래서 연꽃잎은 먼지에 오염되지 않고 항상 깨끗한 표면을 유지할 수 있는 'self-



서갑양 | 기계항공공학부 교수

서울대학교 응용화학부(현 화학생명공학부)에서 학사, 석사 그리고 박사 학위를 취득하였으며 현재 서울대학교 기계항공공학부에 부교수로 재직 중이다. 2009년에 신양 학술 공학상을 수상하였으며 2010년에는 젊은 과학자상을 수상하였다. 주된 연구 분야는 멀티스케일 자연 모사 시스템 개발과 응용이다.



조해성 | 박사과정 연구원

서울대학교 기계항공공학부에서 학사, 석사 학위를 취득하였으며 현재 서갑양 교수의 연구실에서 박사과정 학위 중에 있다. 주된 연구 분야는 자외선 경화 고분자를 이용한 멀티스케일 아키텍처링 기술 개발과 자연모사 기반의 모션 센서 개발이다.

cleaning' 표면으로서 널리 알려져 있으며, 건물의 외벽이나 창문에 연꽃잎의 계층 구조를 제작하기 위한 연구들이 활발하다. 또한, 게코도마뱀의 발바닥에도 마이크로미터 크기의 미세한 긴 섬모 위에 나노미터 크기의 얇은 섬모가 경사진 채로 뺨뺨하게 위치함으로써 게코도마뱀은 임의의 벽면에 대해 항상 방향성 있게 척척 붙었다가 떨어질 수 있다. 나방 눈의 표면에는 렌즈와 비슷한 형태의 무수한 겹눈 구조가 있는데, 이 구조 표면에는 나노미터 수준의 미세 돌기가 전면적으로 배치되어 있으며, 외부에서 나방의 눈 쪽으로 입사된 빛은 눈의 표면의 나노 돌기 때문에 반사되지 못하고 내부로 진행한다고 알려져 있다. 몇 년 전까지 나방 눈의 독특한 구조적인 무반사 효과를 모사하기 위한 연구들이 널리 진행이 되었으며 이제는 이를 통해 디스플레이 장치에 사용 가능한 무반사 필름이 대면적으로 개발되고 상용화되었다.

앞에서 언급한 것처럼, 자연계에 존재하는 대부분의 기능성 표면은 마이크로-나노의 복합 구조물, 흔히 계층 구조물이라 부르는 멀티스케일 구조물로 되어 있거나 모사하기 매우 어려운 3차원적인 구조물로 되어 있다. 멀티스케일 구조물이란, 2층 이상의 계층적인 미세 구조물이 밀리미터~나노미터 스케일을 넘나들면서 다양한 크기로 이루어진 구조물을 의미하는데, 기존의 나노 혹은 마이크로 공학 기술들은 각각의 단일 디멘전의 패턴을 제작하는데 재료와 장비가 최적화되어 있기 때문에 여러 스케일의 구조물이 동시에 혼재된 패턴을 제작하기란 매우 어려운 일이다. 또한, 이 어려움 외에도 자연계의 기능성 구조물은 그 형상이 각이 진 패턴이 아니라 대부분 부드러운 곡면으로 되어 있거나 아니면 기울어져 있거나 혹은 3차원 적으로 복잡하게 생긴 경우가 많다. 따라서 성공적인 자연 모사를 위해서는 기존의 기술 외에 새로운 접근 방법이 요구된다.

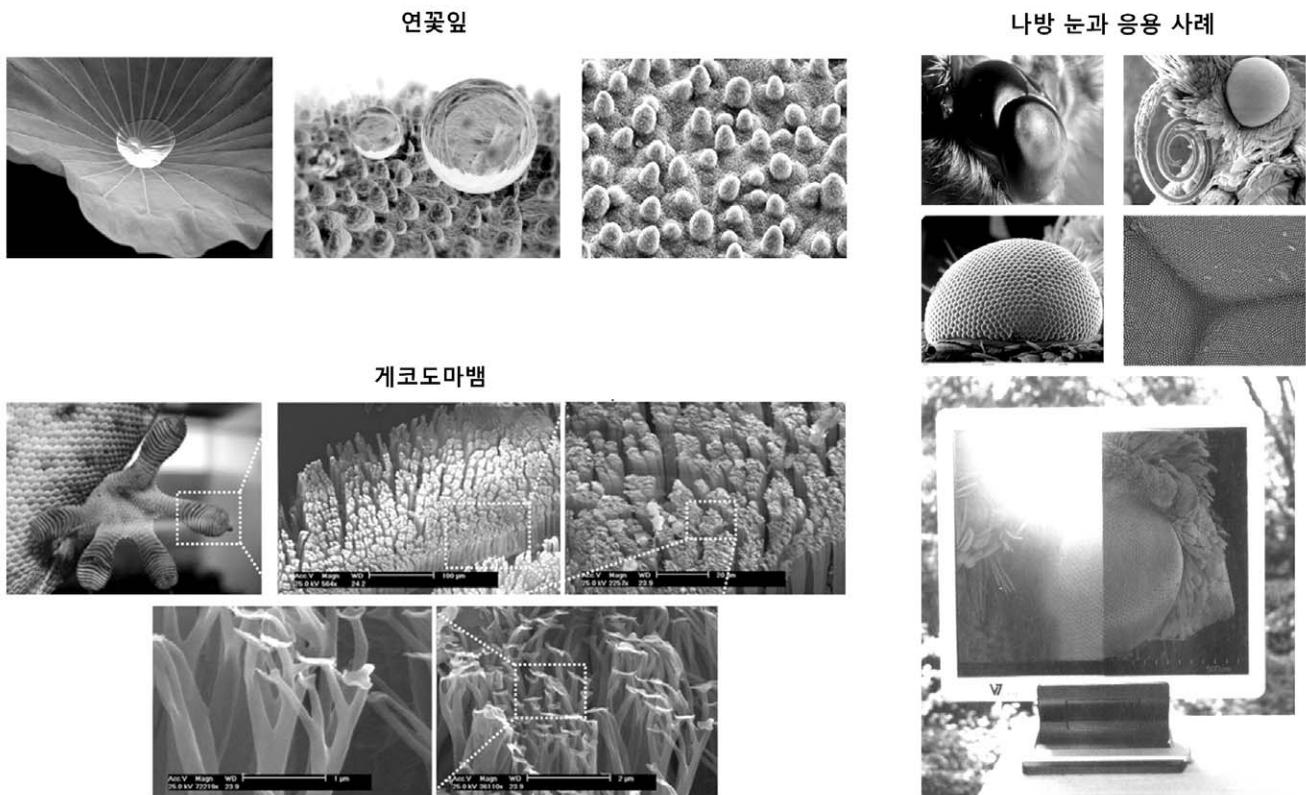


그림 1. 자연계에 존재하는 다양한 멀티스케일 구조물과 응용 사례

본격적인 멀티스케일 자연 모사 공정에 앞서, 나비 날개의 3차원 구조처럼 모사하기 매우 어려운 구조들에 대해서는 자연물 그 자체를 하나의 템플릿(template)으로 사용하여 관련 선행 연구를 진행할 수도 있다. 그림 2와 같이 몰포(Morpho) 나비의 날개는 푸른색의 매우 아름다운 빛을 내는데, 이는 색소의 도움 없이 나비 날개 위에 존재하는 계층 구조물에 의한 색으로써, 전문적으로 구조색이라 지칭한다. 이 아름다운 푸른색 빛깔은 주변의 공기와 나비 날개 사이의 굴절률 차이 때문에 나타나는데, 주변의 공기가 특정한 기체나 증기로 바뀌게 될 때, 날개의 외부로 나타나는 색이 푸른색에서 임의의 다른 색으로 변하게 된다. 이처럼, 자연물 자체를 특별한 가공 없이 바로 사용하는 것만으로도 자연 모사를 통한 특별한 기체 센서의 개발 가능성 여부를 시제품의 제작 없이 미리 확인할 수 있다. 더 나아가 마이크로 나노 공학에서 고분자가 널리 사용됨에 따라 자연물을 템플릿으로 사용하여 고분자 1차 복제물(replica)을 얻고 이로부터 고분자 간의 상호복제를 통해 원판 자연물과 동일한 형상을 지닌 2차 복제물을 얻을 수도 있다. 비록, 밀리미터 크기의 눈 위에 마이크로미터 수준의 겹눈이 존재하고 이 겹눈의 표면에는 미세한 나노 패턴들이 위치하는 복잡한 형태의 멀티스케일 구조물로 이루어져 있지만, 고분자를 사용하여 복제하게 되면 마치 석고를 사용하여 손바닥의 본을 뜨듯이 손쉽게 나방 눈의 반대 형상을 지닌 고분자 복제물을 얻어낼 수 있다. 이렇게 공학적 문제 해결을 위해 자연물을 직접 사용하여 공학적 모범답안을 발견하거나, 혹은 자연물을 일종의 템플릿으로 활용하여 원판과 똑같은 고분자 멀티스케일 구조물을 구현해 내는 연구가 활발하다.

자연물을 직접 이용하는 것보다 그림 3과 같이, 이들의 원리를 적용하여 더욱 뛰어난 구조물을 개발하는 연구도 유행 중이다. 게코도마뱀의 발바닥을 모사하기 위해 도입된 2단계 자외선 임프린트 공정은 마

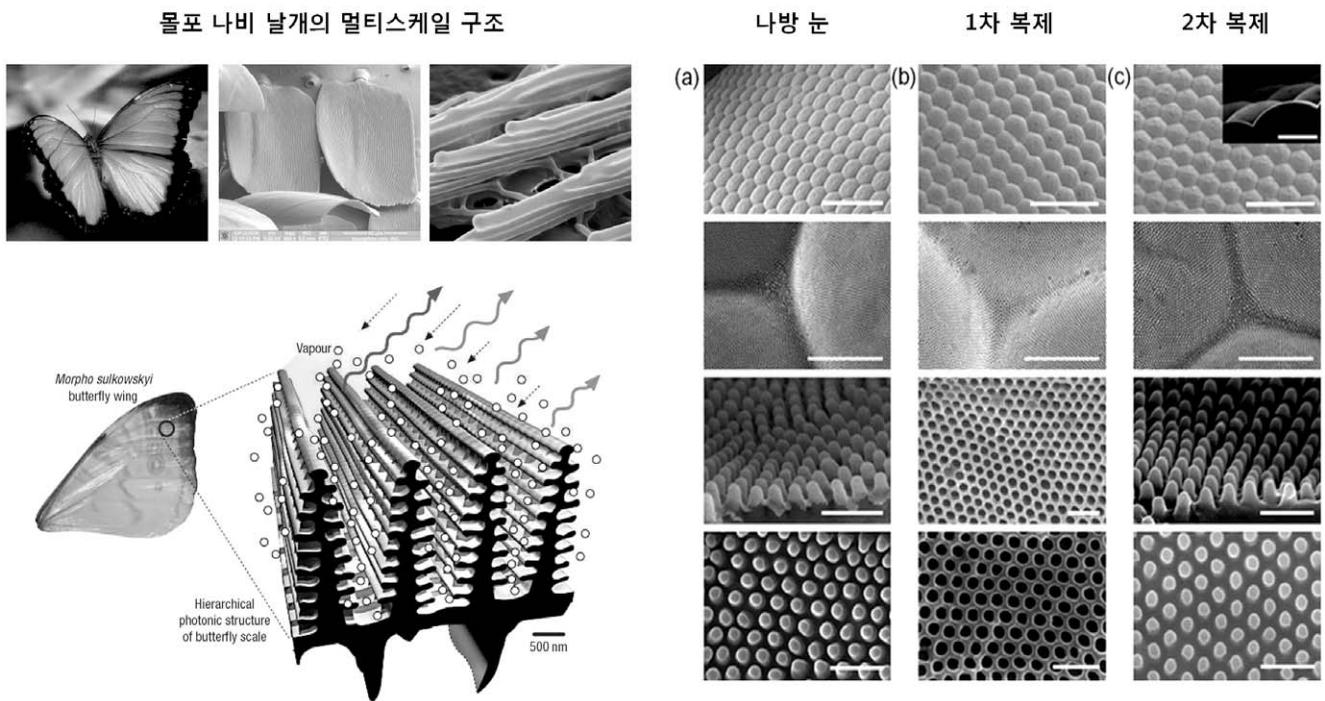
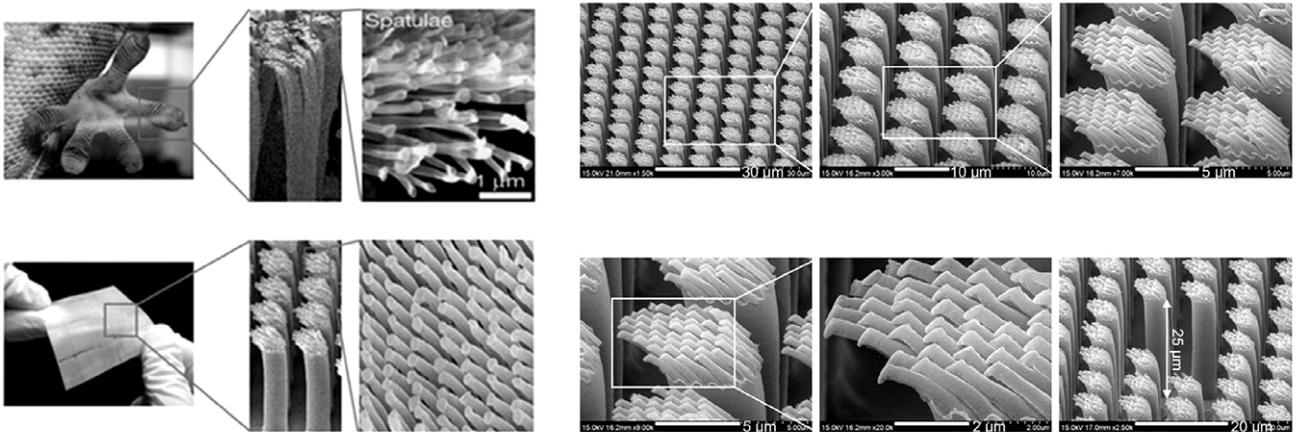


그림 2. 자연물을 템플릿으로 사용하여 직접 이용하거나 이를 복제하는 경우

이크로 섬모 위에 나노 섬모를 계층적으로 제작할 수 있는 기술로써, 비교적 넓은면적으로 게코도마뱀의 방향성 탈부착 기능을 갖는 건식 접착 필름을 제작할 수 있다. 또한, 문어 다리에 존재하는 빨판 구조를 모사함으로써 피부에 자유롭게 탈부착이 가능한 건식 필름도 소개되었는데 이들 멀티스케일 구조물들은 기존의 부착테이프가 갖는 단점인 표면 오염 문제, 예를 들어 의료용으로 사용되는 밴드들을 피부에서 제거할 때 먼지나 때가 피부에 항상 남는다는 문제점을 획기적으로 해결하였다.

기존의 멀티스케일 구조물은 2층 위주로 제작되었는데 아래 그림 4의 콜리플라워처럼 3층 이상으로 비슷한 형상이 프랙탈(fractal) 다층 구조로 반복되는 표면을 제작하기 위해서는 잘 설계된 단위 구조체 간의 병렬적 접합 공정을 이용할 수 있다. 기존의 공정들이 마이크로 구조물을 불완전하게 경화시킨 후 순차적으로 나노 구조물을 마이크로 구조물의 표면 위에 제작하면서 고분자를 완전히 경화시키는 방식으로 이루어졌는데, 이 2단계 임프린트 공정을 통해서서는 3층 이상의 다층 구조물을 얻기가 어렵다. 그러나 구멍이 뚫린 구조물을 설계하고 각 디멘전 별로 차례대로 접합한 후에 고분자 복제공정을 이용하게 되면 손쉽게 4층 이상의 구조물을 넓은 면적으로 제작할 수 있다. 이렇게 제작된 구조물은 단층 구조물보다 표면적이 월등히 높고 보더 넓은 파장대의 빛을 포집할 수 있는 능력이 뛰어날 수 있다. 따라서, 다양한 미래 에

게코 도마뱀의 섬모 구조가 모사된 기능성 부착 필름



문어 다리의 빨판 구조 모사와 피부 접착용 건식 필름

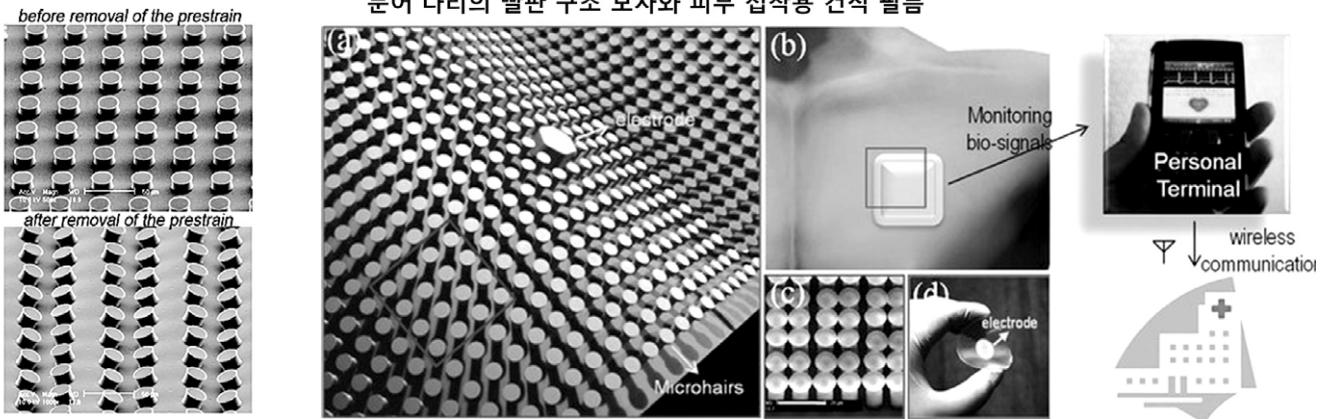
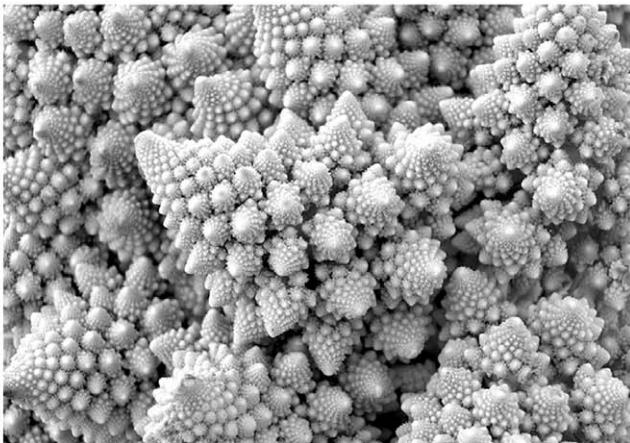


그림 3. 멀티스케일 자연 모사를 통한 기능성, 방향성 부착 필름

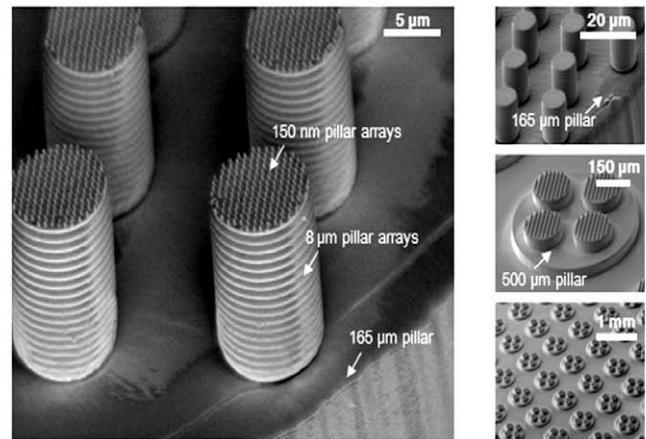
너지 소자 내에 삽입되어 효율을 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다. 멀티스케일 구조물의 에너지 소자 적용 사례의 한가지 예가 멀티스케일 미래에너지 사업단 내 고승환 교수님 연구진을 통해 올해 초 Nano letters 지에 보고된 바 있다. 이 방법에서는 나노스케일의 나무가 뿔뿔이 모여 있는 숲 구조(Nano-forest)를 ZnO 나노 와이어의 선택적인 성장을 통해 만들고 이를 산화물 반도체 기반의 염료감응형 태양 전지에 구현함으로써 에너지 전환효율이 기존 소자 대비 5배 정도 향상될 수 있음을 보고하였다.

지금까지 자연에 존재하는 다양한 기능성 표면의 특징인 다층 멀티스케일 구조에 대하여 간략히 살펴 보았으며 이러한 구조물을 제작하기 위한 고분자 복제 공정과 결과물들을 살펴보았다. 자연이 제시하는 모범답안을 이해하기 위해 자연물을 직접 이용하거나 아니면 이로부터 고분자 복제품을 얻어낼 수도 있으며 최근의 마이크로 나노 공정을 통해 자연물을 초월하는 성능을 갖는 제품들에 대한 상용화 가능성도 기대할 수 있다. 다양한 계층적 멀티스케일 구조물을 미래 에너지 소자로 적용한 예는 아직 많지 않으나, 현재 태양전지 및 연료전지 등이 직면한 열역학적인 에너지 전환 한계에 도전하고 그를 초월하는 새로운 개념의 에너지 소자를 개발하기 위해 앞으로 활발한 연구가 멀티스케일 미래에너지 사업단을 중심으로 일어날 것이다. 물론 아직 자연에는 숨겨진 모범답안들이 많이 남아 있으며 이를 찾아내며 공학문제에 적용하는 것은 자연이 공학자들에게 베푸는 재미있는 보물찾기와 같은 놀이라 생각된다. 서울공대

콜리플라워



멀티스케일 다층 구조물



'Nano-forest' 구조물의 도움을 받아 효율이 증가한 염료감응형 태양전지

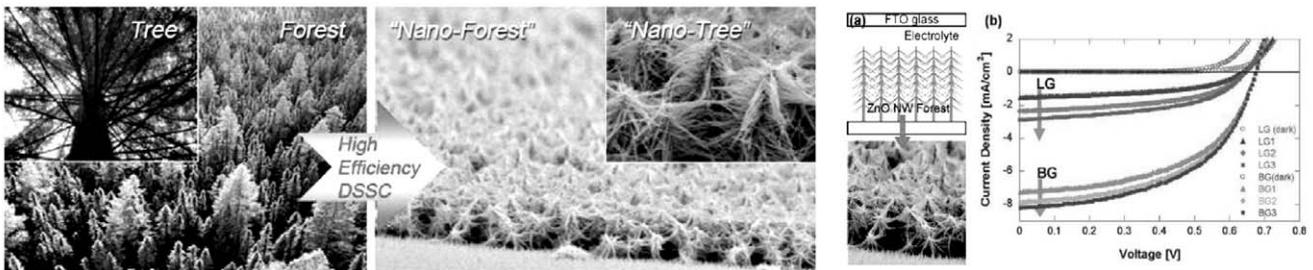


그림 4. 멀티스케일 다층 아키텍처링 기술과 에너지 소자 적용 사례

# 신 에너지 변환 시스템

필자는 SOFC 제조/공정 개발 분야 중 신개념의 고내구성 금속지지체 셀의 제조 공정과 다공성 LSGM 구조체를 이용한 LSGM 기반의 중저온용 고체산화물 연료전지 개발을 수행하고 있다.

이와 더불어 SOFC(Solid oxide fuel cell) 및 PEMFC(Polymer electrolyte membrane fuel cell)과 연동운전이 가능한 탄화수소 연료처리시스템을 개발하고 있다. 또한, 전산해석을 통한 시스템설계, 해석 및 시스템운전 조건 확립에 관한 연구를 수행 중이다.

## 금속지지체 SOFC 셀 대면적화 공정 기술 확보

상대적으로 세라믹 셀은 기계적 강도에 취약하고 또한 스택제작시 가스의 밀봉이 큰 문제로 대두 되어왔다. Joining process가 적용된 금속지지체 셀의 경우 표 1.에서 확인 할 수 있는 것과 같이 기계적 강도가 수십배 향상됨을 확인 할 수 있었다.

필자는 저가의 금속지지체 대면적 joining process를 개발하였으며 또한 10×10 금속지지체 셀 제작 공정을 개발하였다. 이를 바탕으로 스택 제작을 위한 스택 디자인 하였으며 스택 제작을 추진하고 있다.

표 1. 금속지지체 셀과 세라믹지지체 셀의 기계적 강도 비교

	Displacement at yield (mm)	Strain at yield (mm/mm)	Load at yield (kN)	Stress at yield (MPa)	Modulus (MPa)
Ceramic supported cell	0.027	0.024	0.039	0.102	2.857
Metal supported cell	1.109	0.979	0.724	1.895	10.184

## 다공성 LSGM 구조체를 이용한 LSGM 기반의 중저온용 고체산화물 연료전지

현재 안정화 지르코니아를 전해질로 하는 고체산화물 연료전지는 그 구동온도가 1073K~1273K의 고온으로 연료전지의 안정성, 고가의 연결재와 BOP(Balance of Plant)사용 그리고 고가의 시스템 유지비등 SOFC 시스템 상용화에 많은 문제를 갖고 있다.



배중민 | KAIST 기계공학과 교수

1989년에 서울대학교 무기재료공학과에서 학사를 졸업하였다. 동대학교에서 석사를 마치고 1996년에 Imperial College에서 박사학위를 취득하였다. 1996년부터 3년간 일본 전자기술종합연구소에서 재직하였다. 1999년에 미국 Argonne National Laboratory에서 선임연구원으로 거쳐 2002년부터 한국과학기술원 기계공학전공 교수로 재직하고 있다. 신 에너지 변환시스템 연구실을 이끌고 있으며 연료전지 재료개발 및 시스템설계, 연료개질시스템 등의 분야를 연구하고 있다. 현재 나노과학기술연구소 운영위원, 포스코 연구자문위원회, UNITED 산학협력단 부단장, 고체산화물 연료전지 원천기술센터장, KAIST 청정에너지 연구소 소장 등의 활동을 병행하고 있다.

이에 중/저온의 고체산화물 연료전지를 위한 다양한 전해질에 대한 연구되었으며 Sr-과 Mg-을 도핑한 lanthanum gallate는 페로브스카이트 구조를 갖고 있으며 YSZ의 약 5배로 높은 이온전도도를 갖고 있으며 공기극 환경부터 연료극 환경에서 화학적으로 안정한 특성을 갖고 있다. 또한, LSGM 전해질은 넓은 산소 농도 범위에서 안정적인 특성을 갖는 장점을 갖고 있다. 그러나 LSGM은 전극 물질과의 반응성으로 인하여 전극과 LSGM 전해질 사이의 절연성의 이차상 형성으로 인하여 재료의 사용에 큰 어려움을 갖고 있다.

이에 다공성의 LSGM 구조체를 구성하고, 구조체에 전극물질을 infiltration method를 이용하여 전극을 형성하고 이차상이 형성되지 않는 낮은 온도에 전극 촉매의 하소와 형성을 동시에 시킴으로 LSGM 전해질을 이용한 중저온형 셀 연구를 진행 하고 있다.

### SOFC용 1kW급 디젤 개질 시스템 개발

디젤과 같은 액체연료는 에너지 밀도가 높고 기존의 기반시설을 이용해 공급이 용이하기 때문에 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, 이하 SOFC)의 연료로서 각광받고 있다. 하지만 탄소침적이 빠르게 일어나고 기화가 쉽지 않아 공급에 어려움이 있다. 이와 함께 액체연료 개질시 발생하는 에틸렌(Ethylene,  $C_2H_4$ )이 연료극과 반응해 탄소침적을 유발하고, 액체연료에 포함된 소량의 황성분이 연료극을 피독하여 SOFC 성능저감의 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 3단계에 걸쳐 kW급 디젤 개질기를 개발하였다.

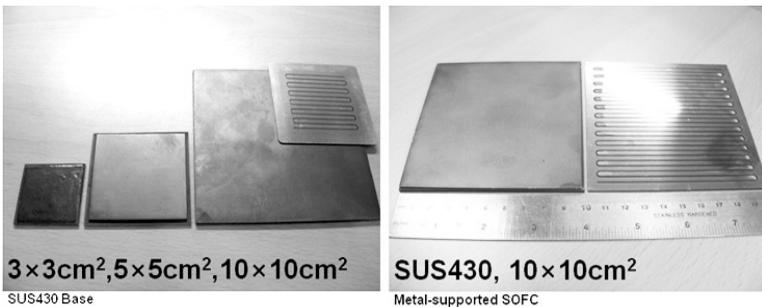


그림 1. 대면적 금속지지체 SOFC 셀

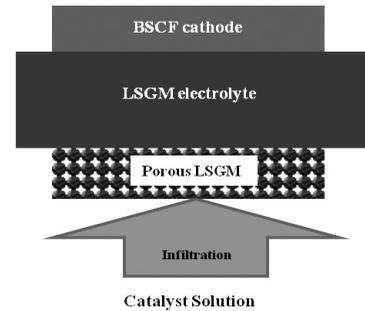
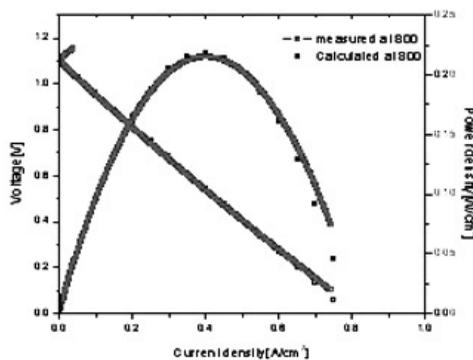
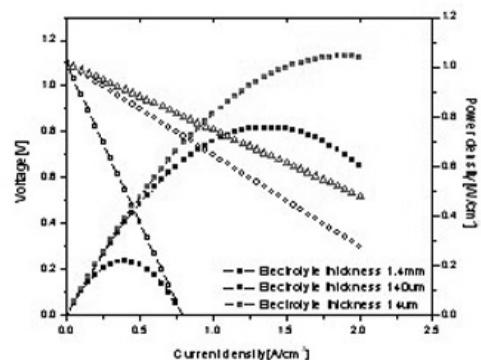


그림 2. 다공성 LSGM 구조체를 이용한 중저온형 고체산화물셀 구조도



(a) 측정치와 계산값의 비교



(b) LSGM 전해질 두께 변화에 따른 특성 변화 계산

그림 3. 다공성의 LSGM 구조체를 이용한 LSGM 기반의 단전지의 특성 및 LSGM 전해질 두께에 따른 특성 변화 계산

1세대 개질 시스템에서는 디젤 미립화를 위해 초음파 노즐을 적용하였다. 이를 통해 액체상인 디젤과 가스상인 산화제의 혼합을 높임으로써, 디젤 개질기의 성능을 향상시켰다. 2세대 개질 시스템에서는 디젤에 포함된 황성분을 제거하기 위해 디젤개질기와 탈황기 연동 시스템을 구축하였다. 3세대 개질 시스템에서는 통합 디젤 개질 반응기를 구성해 개질가스 내 에틸렌과 황성분을 최소화하였고, 이를 통해 양질의 개질가스를 생산할 수 있었다. 통합 개질기는 1,000시간의 장기성능을 평가하였고 한전에서 개발된 1kW급 SOFC시스템과 연동 운전을 수행하였다.

### PEMFC용 DME 개질 시스템 개발

DME는 Dimethyl ether의 약자로서 그 청정성과 높은 열효율로 인해 차세대 연료원으로 주목받고 있다. 특히 기존 LPG와 그 물리적, 화학적 성질이 유사하고, 간단한 연료 공급계의 수정을 통해서 디젤기관에 적용이 가능하여 수송용 대체 연료로써 주목을 받고 있을 뿐만 아니라 탄소대 수소의 비율이 높고 6기압으로 가압하여 쉽게 액화시킬 수 있기 때문에 수소 운반체로써도 역할이 기대된다. 따라서 수송용 보조 전원 장치를 위한 연료원으로 DME가 이용될 경우 매우 큰 파급효과가 기대된다.

필자는 DME를 PEMFC에 적용하기 위한 개질 시스템을 설계하는 연구를 진행하고 있다. 자율개질반응(Autothermal reforming, ATR)을 통해 DME를 고농도 수소 가스를 전환한 뒤, 두 단의 수성가스치환반응(Water Gas Shift reaction, WGS)과 선택적 산화반응(PROX, Preferential Oxidation)을 이용하여 일산화탄소를 제거하는 공정에 대한 연구를 진행하였다.



그림 4. 디젤 개질 시스템 개발 과정

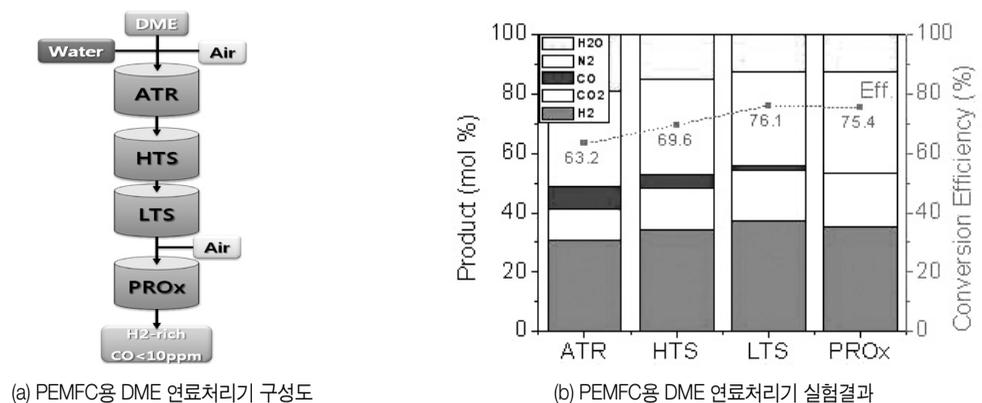


그림 5. PEMFC용 DME 연료처리기 구성도 및 실험결과

### 탄화수소 개질기 소형화

천연가스 및 디젤과 같은 탄화수소 개질기의 상용화를 위해서는 소형화가 중요하다. 개발단계에서는 가루 또는 작은 구 형태의 촉매를 사용하는 것이 일반적이거나, 이러한 경우 개질기의 부피가 커지고 내부 압력이 증가하는 단점이 있다. 만약, 압력 증가로 인해 블로어 대신 컴프레서를 써야 할 경우, 전력소모량 10배, 시스템 크기 5배, 시스템 무게 5배 증가하게 된다. 이는 시스템 상용화에 치명적인 걸림돌이 될 수 있다. 내부 압력 감소를 위해 본 센터에서는 마이크로 채널 형태의 촉매를 개발하고 있다.

### 탄화수소와 산화제의 혼합기술 개발

마이크로 반응기에서와 달리 kW급 탄화수소 개질기에서는 반응물을 균일하게 혼합하는 것이 중요하다. 반응물의 분포가 일정하지 않을 경우, 국부적으로 격한 산화반응이나 열분해가 일어나 개질기 성능 감소의 원인이 된다. 본 연구실에서는 열유체 전산해석을 통해 이러한 문제에 접근하고 있다. 반응기 내 유동 및 반응물의 분포가 반응기의 형상과 운전조건에 따라 크게 달라지기 때문에 전산해석을 통해 최적의 조건을 도출하고자 한다.

### SOFC 시스템 디자인

SOFC 시스템을 구성하기 위해서 스택과 개질기를 비롯하여 펌프, 블로워, 열교환기, 연소기, 제어기 등 다양한 장치가 사용된다. 시스템의 상용화를 위해서는 제한된 공간 안에 장치들을 배치해야 할 뿐만 아니라 최적 온도유지, 압력손실 최소화, 상호간섭 방지 등의 기술이 필요하므로 전문적인 시스템 디자인 기술이 적용되어야 한다. 본 연구실에서는 정치형 SOFC 시스템과 차량 보조동력용 SOFC 시스템을 위한 시스템을 설계비하고 있다.

Packed bed 촉매



마이크로 채널 촉매

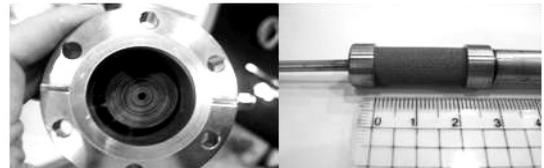


그림 6. 마이크로 채널 촉매 개발

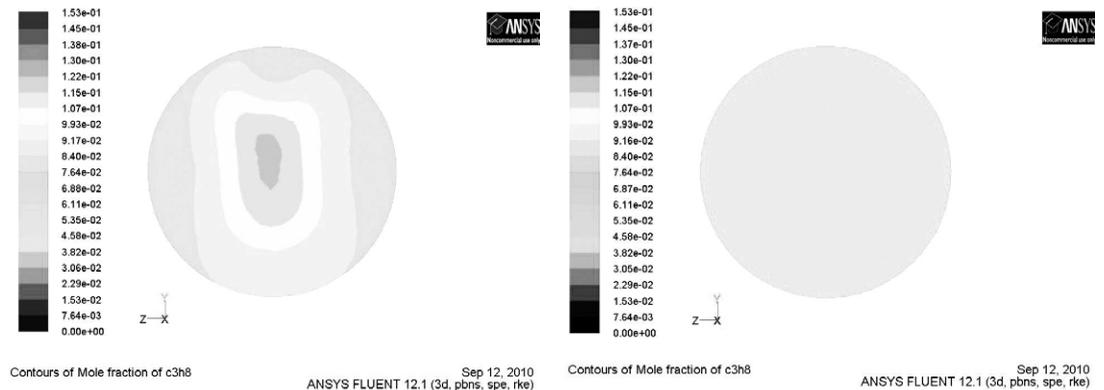
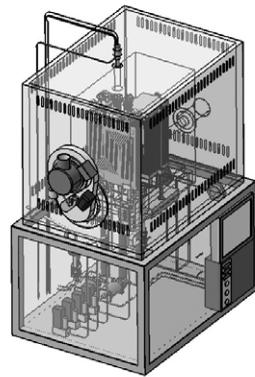


그림 7. 촉매층 입구에서의 연료 농도 분포

고체산화물연료전지 시뮬레이션 기술 개발

고체산화물연료전지는 전기화학반응과 열 및 물질전달이 밀접한 관련을 맺으면서 동작하기 때문에 정확한 시뮬레이션을 위해서 다물리적 통합해석이 필요하다. 필자는 해석코드 개발과 실험을 병행하여 높은 신뢰성을 가지는 전산해석 모델을 개발하고 이를 이용하여 전류밀도 분포, 온도분포, 성능을 예측하였으며 다양한 종류의 단전지 및 스택을 설계하였다. 서울공대

정치형 SOFC 시스템



차량보조동력용 SOFC 시스템

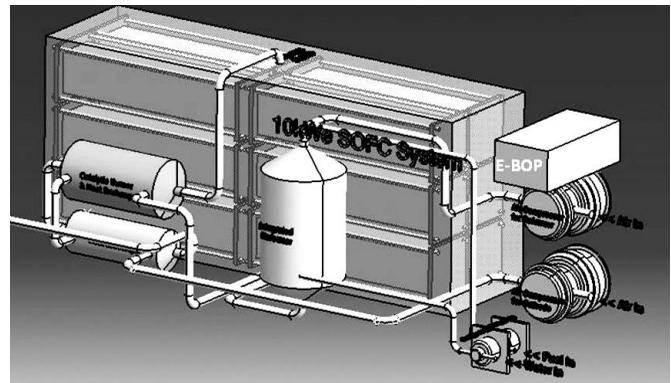


그림 8. SOFC 시스템 디자인

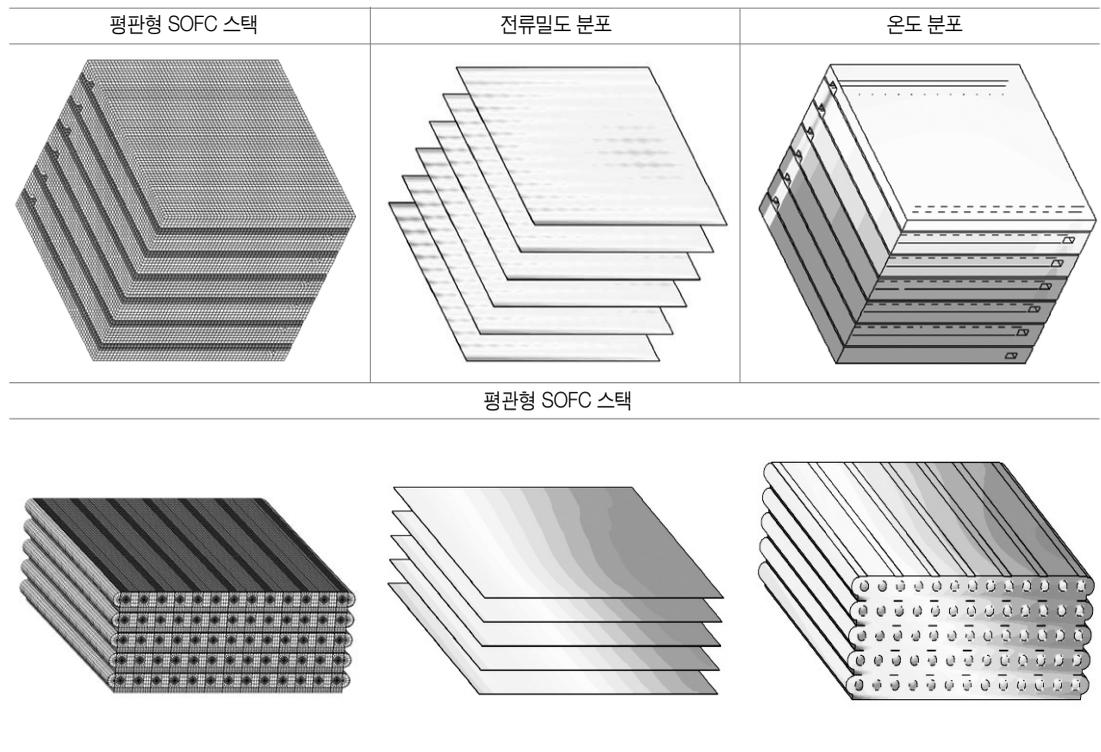


그림 9. 다물리적 고체산화물 연료전지 시뮬레이션

# 유기 및 유기-나노입자 하이브리드 태양전지 기술

태양에너지를 전기에너지로 변환하는 태양전지는 에너지 및 환경 문제를 해결할 수 있는 에너지원으로써 활발하게 연구되고 있다. 그러나 아직 태양광발전 단가가 기존 에너지 단가에 비해 약 5배 정도 비싸기 때문에 태양광발전이 전체 에너지생산에서 차지하는 비중은 아주 작은 실정이다. 따라서 태양광발전의 가격 경쟁력을 높이는 것이 주요한 과제이다. 실리콘태양전지 (제1세대 태양전지)는 효율이 높으나 가격이 비싼 단점이 있고, 현재의 박막태양전지 (제2세대 태양전지)는 가격은 낮으나 효율도 낮은 문제점이 있다. 따라서 획기적인 저가 공정을 이용하면서도 효율을 높일 수 있는대면적 박막 태양전지 (제3세대 태양전지) 개발이 필요하다. 이런 측면에서 유기태양전지 및 유기/나노입자 하이브리드 태양전지가 최근 큰 주목을 받고 있다. 유기태양전지는 대면적 플라스틱 기판에 프린팅 공정 또는 진공증착 방법을 통해 태양전지를 제작할 수 있어서 다른 태양전지 기술보다 가격을 크게 낮출 수 있고, 유연성, 반투명성 등의 장점을 가지고 있어서 응용분야가 훨씬 넓을 것으로 기대되고 있다. 이 글에서는 차세대 태양전지 기술로 활발하게 연구되고 유기태양전지 기술에 대하여 소개한다.



**이창희** | 서울대학교 전기공학부 교수

서울대학교 물리학과에서 학부와 석사를 마친 후, 미국 산타바바라 캘리포니아대학교 (UCSB)에서 박사 학위를 취득하였다. 1994년부터 1997년까지 LG화학기술원에서 유기발광다이오드 개발 연구를 수행했고, 1997년부터 2004년동안 인하대학교 물리학과 조교수, 부교수로 재직 한 후, 2004년에 서울대 전기컴퓨터공학부로 부임하여 현재 전기공학부 연구부학부장을 맡고 있다. 유기발광다이오드, 유기태양전지, 양자점다이오드 및 태양전지, 인쇄전자 기술 등에 대한 연구를 진행하고 있다.

유기태양전지에 대한 연구는 식물의 광합성 과정을 모방하여 효율이 높은 태양전지를 개발해 보려는 시도에서 시작되었다. 1970년대부터 여러 그룹에서 유기박막을 이용한 태양전지를 발표했으나 효율이 0.01% 이하로 아주 낮았다 [그림 1, 소자구조 (1)]. 밴드갭 이상의 빛을 흡수하면 전자와 홀이 여기되는데, 유기반도체에서는 쿨롱 결합 에너지가 큰 엑시톤 (exciton) (E<sub>exciton</sub> > 0.4 eV)을 형성하여 다시 재결합하므로 자유 전하 생성 효율이 아주 낮다. 그런데 1986년에 미국 코닥사의 C. W. Tang 박사가 p-형 유기반도체와 n-형 유기반도체를 접합한 p/n접합형 유기박막태양전지를 개발하여 전력변환효율을 약 1% 수준으로 크게 향상시켰다 [그림 1, 소자구조 (2)]. 이 구조에서는 엑시톤이 p/n 접합 계면에서 자유 전자와 정공으로 쉽게 분리될 수 있었으나, 엑시톤 확산 거리가 아주 짧아서 (L<sub>exciton</sub> ~ 10 nm) 전하 생성이 p/n 접합계

면의 좁은 영역에서만 일어나고, 나머지 영역은 빛을 흡수해도 전하 생성에는 기여하지 않는 문제점이 있었다.

유기반도체에서 전하 생성효율이 낮은 문제점을 해결할 수 있는 구조가 1992년에 미국 산타바바라 캘리포니아대학교 (UCSB)의 A. J. Heeger 교수팀에서 개발되었다. 반도체성 고분자와 플러렌 (C60)을 혼합한 박막에 빛을 조사하면 약 100펨토초 (<math>\langle 10^{-13} \text{ s}</math>)의 시간 영역에서 고분자에서 C60로 전자가 전달되고, C60- 이온이 대단히 안정적이라는 것을 발견하였다. 엑시톤의 재결합 시간이 나노초 (<math>\langle 10^{-9} \text{ s}</math>) 시간 영역이므로, 이와 같은 광여기 상태에서의 전자전달과정은 약 10,000배이상 빠르다. 따라서 고분자에서 여기된 엑시톤의 확산거리 이내에 C60가 있으면 거의 100 %의 확률로 엑시톤이 분리되어 전자와 홀이 생성된다. 그러므로 고분자 (p-형)와 C60(n-형)를 나노미터 영역에서 상분리가 이루어진 박막을 만들면 p/n 이종접합이 박막 전체에 존재하게 되므로 자유 전하 생성효율이 거의 100 % 수준으로 높아진다. 다행히 고분자와 C60를 적절한 용매로 녹여서 혼합한 후 박막을 형성하면 혼합 엔트로피가 낮아서 상분리가 일어난다. 이와 같이 p/n 이종접합이 박막 전체에 걸쳐 3차원적인 네트워크를 형성한 구조를 벌크 이종 접합 (bulk hetero junction, BHJ)이라고 부른다 [그림 1, 소자구조 (3)]. 따라서 BHJ 구조에서는 엑시톤 확산거리 이내에 p/n 이종접합이 있으므로 빛 흡수에 의해 생성된 엑시톤이 효율적으로 분리된다. 그리고 일함수가 다른 두 전극을 연결하면 비대칭적인 포텐셜에 의해 전자와 홀은 각각 n형 유기반도체와 p형 유기반도체 네트워크를 통해서 전극으로 빠져 나와 광전류가 흐르게 된다. 이 구조는 1994년에 발표된 이후 계속 발전하여 최근 미국 Konarka, 독일 Heliatek 등 회사에서 효율이 약 8.3 % 수준인 유기태양전지를 발표했다.

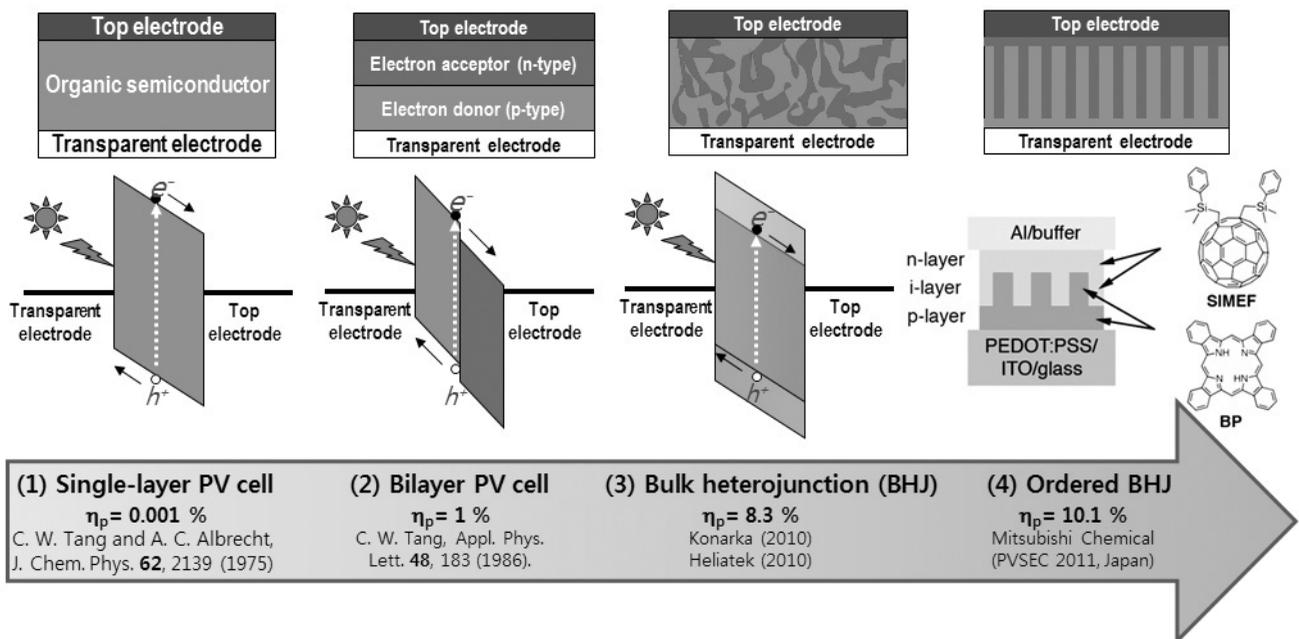


그림 1. 유기 박막 태양전지의 소자 구조 발전 현황

고분자/플러렌 BHJ 구조를 개발하여 효율을 상당히 높일 수 있었으나 여전히 다른 태양전지 기술에 비해서는 효율이 낮은 문제점이 있다. 이에 대한 가장 큰 원인은 p-형과 n-형 물질이 나노미터 스케일에서 무질서하게 분포하므로 전자와 홀 이동도가 낮은 것이다. 이를 해결하기 위해서는 분자들이 규칙적으로 분포하는 결정 구조를 가지면서 나노미터 스케일에서 p/n 이종접합을 형성해야 한다. 이와 같은 구조를 만들기 위해 나노임프린팅 공정으로 고분자를 인쇄하거나, 나노 템플레이트를 형성한 후 고분자 박막을 형성하거나, 나노와이어를 성장시킨 후 고분자를 나노와이어 사이에 채우는 방법 등 다양한 시도가 진행되었으나 아직 효율이 높은 태양전지를 만들지 못했다. 그런데 최근에 일본의 미쓰비시화학에서 결정성이 높은 유기분자 (tetrabenzoporphyrin, BP)와 플러렌유도체 (SIMeF)를 혼합하여 박막을 형성한 후 약 180 °C 에서 열처리를 하면 각 분자가 나노미터 크기의 기둥모양 결정을 형성하는 박막을 만들 수 있다는 것을 보였다. 이와 같이 나노미터 영역에서 정렬된 p/n이종접합을 만들어서 약 10.1 %의 높은 효율을 가지는 유기태양전지를 최근 일본 후쿠오카에서 개최된 PVSEC 2011 학술대회에서 발표했다 [그림 1, 소자구조 (4)]. 이 구조를 사용하여 스핀코팅 또는 롤투롤 코팅 방법으로 대면적 셀을 만들 수 있으므로 대면적 태양전지를 아주 낮은 가격에 생산할 수 있다. 미쓰비시화학은 2015년경에 15% 수준의 유기태양전지 양산을 목표로 연구를 진행하고 있다고 발표했다. 그림 3에 유기 태양전지의 효율의 발전 현황을 다른 박막태양전지와 비교했다.

유기태양전지의 광활성층을 구성하는 p-형 물질은 용액공정으로 대면적 셀 제작이 가능한 고분자를 주로 사용하고 있다. 그런데 최근 유기저분자를 사용한 태양전지에 대한 연구도 크게 증가하고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 10.1 % 효율을 발표한 일본 미쓰비시화학은 용액공정이 가능한 저분자전구체를 사용하

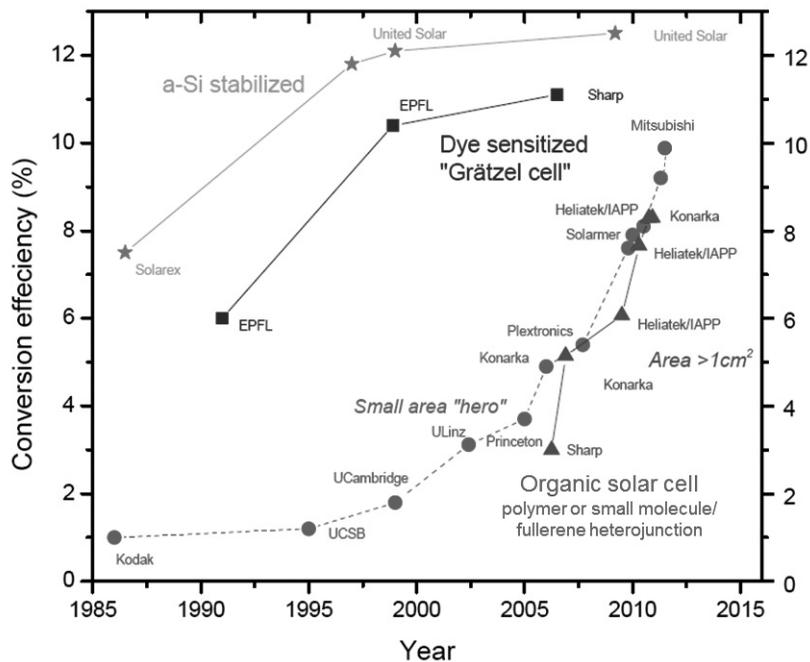


그림 2. 유기태양전지의 효율 발전 현황을 비결정 실리콘 (a-Si)과 염료감응태양전지의 효율과 비교함 [독일 IAPP의 K. Leo 박사 자료 인용]

여 열처리를 통해 박막을 형성하는 방법을 사용하고 있다. 그런데 제작한 태양전지의 성능이 빠르게 향상되고 있다. 특히 독일의 Heliatek과 프라운호퍼 연구소는 유기저분자를 진공 증착하여 고분자 태양전지와 대등한 효율 (8.3 %)를 발표했다. 진공 증착 방법은 용액공정보다는 생산 가격이 증가할 수 있지만 고순도 박막을 제작할 수 있고, 이미 OLED 디스플레이에서 양산에 성공한 방법이라는 장점이 있다.

n-형 물질로는 [그림 3]와 같이 플러렌 유도체([60]PCBM, [70]PCBM), 전자수송성 고분자, 무기반도체 나노입자의 3종류가 있다. 현재 최고 효율을 내는 소자는 낮은 밴드갭을 가지는  $\pi$ -공액 고분자 (P3HT, PCBDTBT 등)를 p-형 반도체로 사용하고, 플러렌 유도체를 n-형 반도체로 사용하는 BHJ 태양전지이다. 그런데 플러렌은 가시광 영역의 흡광도가 낮고, 전자 이동도가  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 낮아서 효율을 높이는데 한계가 있다. N-형 고분자는 가시광 영역의 흡광도는 높으나 전자이동도가 낮다는 단점이 있다. 따라서 전자이동도도 및 광안정성이 높은 무기반도체 나노입자를 n-형 반도체로 사용하려는 연구가 최근 활발하다. 그리고 나노입자는 크기와 모양 조절을 통해 밴드갭을 쉽게 조절할 수 있어서 넓은 태양광 스펙트럼을 활용할 수 있는 장점이 있다.

또한 무기반도체 양자점을 이용하여 [그림 4]에 나타난 것과 같이 기존 열역학적 효율의 한계 (Shockley-Queisser limit ~ 32 %)보다 높은 효율을 내는 태양전지를 개발하는 것이 가능하다. 양자점에서 impact ionization을 통한 다중여기자발생 (multiexciton generation, MEG)을 실현한다면 흡수된 1개의 광자에서 2개 이상의 전자를 발생시킬 수 있으므로 이론효율을 40 % 이상으로 올릴 수 있다. 그러나 hot electron의 빠른 열 소멸과 태양광 영역에서의 낮은 MEG 효율로 지난 10년간 많은 연구에도 불구하고, 실제 태양전지 구현에는 어려움이 많았다. 최근 교육과학부의 글로벌프런티어사업단으로 선정된 멀티스케일 에너지 시스템 연구사업단 (단장: 기계공학부 최만수교수)에서는 이러한 MEG를 활용한 고효율 박막태양전지에 대한 연구를 추진하고 있다.

고분자 박막 태양전지 활성층 구조

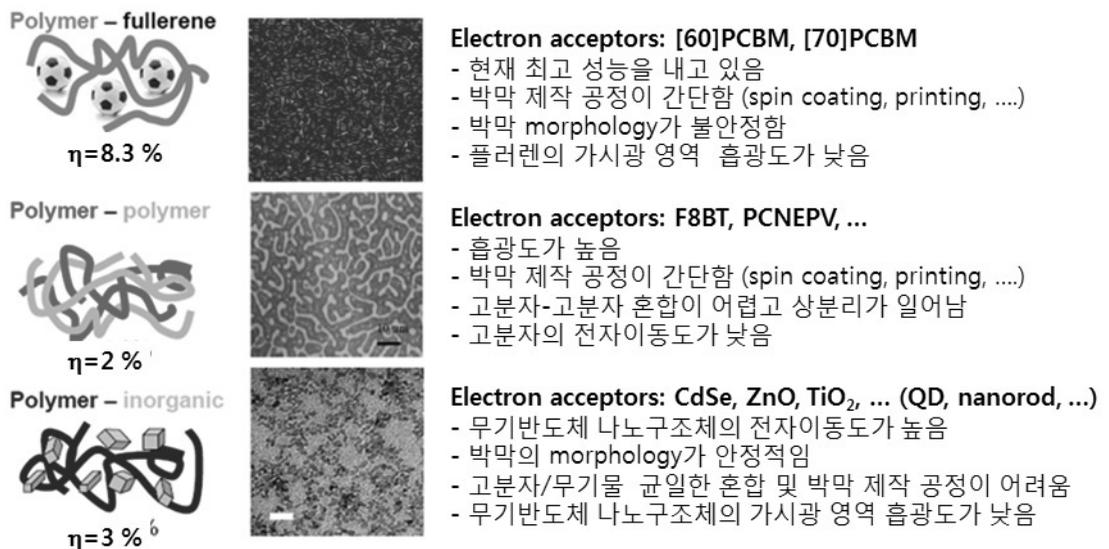


그림 3. 고분자 박막 태양전지의 활성층을 구성하는 n-형 물질에 따른 장단점 비교

이상에서 간단하게 소개한 유기 또는 유기-나노입자 하이브리드 태양전지는 높은 효율과 저가격화를 동시에 달성할 수 있는 차세대 태양전지기술이다. 아직 많은 해결과제가 남아있지만 현재 기술개발 속도가 빠르기때문에 10년 이내에 유기 태양전지가 실용화에 성공할 것으로 예상된다. 유기태양전지다양한 응용 분야를 [그림 5]에 나타냈다. 휴대폰, 노트북 등의 휴대용 전자제품의 충전용 전원에서부터 실용화가 되어, 수명 및 효율이 증가하면 점차적으로 군용 야외 막사, 비닐하우스, 빌딩 (BIPV), 소규모 태양광 발전소 등으로 응용 범위가 확대될 것으로 예상된다.

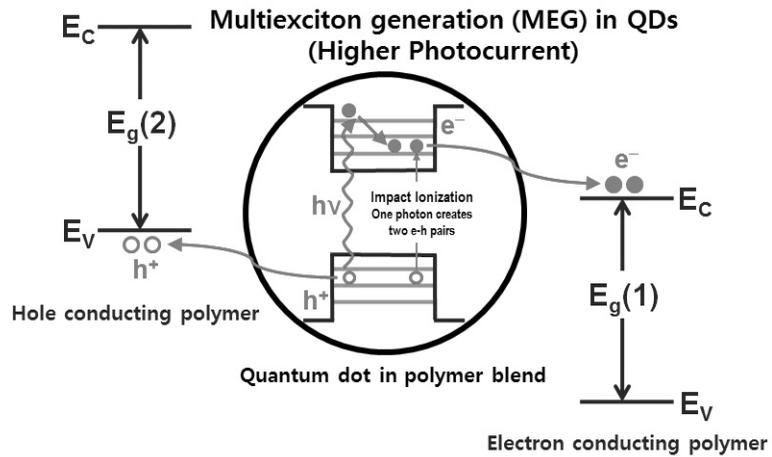


그림4. 양자점에서의 다중여기자발생(MEG)을 통한 고효율 박막 태양전지의 개념도



그림 5. 유기태양전지의 다양한 응용분야의 예