

에너지도 리필이 되나요? 염료감응 태양전지(Dye Sensitized Solar Cells)

박현우 · 이혁재

목차

1. 미래는 에너지 위기
2. “무한 공급” 재생가능 에너지
3. 떠오르는 동력원 태양전지
4. 성능 좋고 저렴한 염료감응 태양전지
5. 태양전지의 미래는 “밝음”

< 요약 >

- 화석연료만으로는 에너지 수요충족에 한계
 - 화석연료 소비증가에 따른 이산화탄소 배출증가는 심각한 환경·기후 문제를 야기 봉착

- 재생가능 에너지는 화석연료 대체 에너지원으로 부각
 - 석유 및 석탄의 세계 에너지 공급 기여도는 점차 감소추세를 보이는 반면, 재생가능 에너지는 전세계 에너지 시장의 10-17%까지 증가

- 급부상하는 태양발전
 - 전력망 연계형(grid-connected) 태양발전은 5년간 60%의 평균 증가율을 보여 재생가능 에너지 중 가장 급격히 성장
 - 독립형(stand-alone) 태양발전의 성장률은 17%로 태양열 난방과 함께 증가율에서 4위를 차지

- 유기계 태양전지 효율 급상승
 - 반도체를 사용하는 1세대 태양전지로부터 박막의 무기물을 사용하는 2세대 태양전지, 그리고 유기물을 사용하는 3세대 태양전지까지 등장
 - 효율 측면에서는 아직까지 반도체 태양전지가 우위를 보이고 있으나 최근 들어 3세대 유기 태양전지의 효율은 급격히 상승하고 있음

- 상업화에 근접한 유기계 태양전지
 - 유기계 태양전지는 유기물이 갖는 제조, 공정, 가격상의 유연성 등이 장점으로 작용하여 기존의 태양전지와 차별되는 미래형 태양전지로 각광
 - 특히 염료감응 태양전지는 최근 급속한 특허 증가를 기록하며 효율 및 수명 또한 크게 개선되어 선진국의 경우 이미 상업화에 가장 근접한 기술로 평가

○ 효율 향상과 안정성 보장이 최대 과제

- 유기계 태양전지는 효율 향상과 함께 안정성 확보가 현안과제이지만 유연성 등 장점을 이용한 롤투롤 연속공정을 통해 저가격화가 가능한 만큼 차세대 에너지원으로서의 충분한 경쟁력을 확보할 것으로 기대

1. 미래는 에너지 위기

□ 화석연료의 소비 급증에 의한 환경·에너지 위기의 도래

- 향후 20-30년간 세계 에너지 수요는 지속적인 증가가 예상(International Energy Agency, 2006)
 - 2030년의 에너지 수요는 현재보다 50% 증가할 것이며, 이 중의 60% 이상은 석유나 천연가스일 것으로 전망
 - 중동 및 아프리카는 향후 25년 이상 세계 에너지 수요를 감당할 수 있을 것으로 예상되나, 투자 지속, 공급량 확대, 수출 물량 확보 등은 미지수(International Energy Agency, 2005)

- 지속적 에너지 소비에 의한 에너지 고갈 및 환경 문제의 등장
 - 세계 에너지 수요는 1.6%의 연평균 증가율로 성장하고 있으며, 중국·인도 등 개발도상국은 향후 에너지 수요 증가분의 70% 정도 차지할 것으로 예상
 - 화석연료가 미래에 적당한 가격의 에너지를 공급할 수 있을 지는 불확실하며, 화석연료 소비 급증에 의한 이산화탄소 방출량의 증가로 세계는 심각한 환경·기후 문제에 봉착

□ 에너지·환경 문제의 해답은 재생가능 에너지

- 미국은 2006년 연두 국정연설을 통해 대체에너지의 개발에 박차를 가하겠다고 천명하였으며, 태양과 풍력 에너지를 가정 또는 산업체에 대한 에너지 공급을 위한 미래기술 중 하나로 지정

- 유럽연합 역시 Strategic Energy Package를 발표하면서 2020년까지 유럽에서 사용하는 에너지의 20%를 재생가능 에너지로 전환할 계획

(Commission of the European Communities, 2006)

- 특히 독일의 '교육 및 연구부'와 BASF, BOSCH, MERCK, SCHOTT사의 최고 책임자들은 3억 6천만 유로의 유기태양전지 R&D 자금지원계획을 발표하였으며, 중소 규모 기업의 참가를 적극적으로 독려
- 재생가능 에너지는 에너지·환경 문제의 해결을 위해 세계적으로 주목받는 대안 중 하나로 대두
 - 최근 Forbes誌에 의하면 태양전지 산업이 대체에너지원 산업 중에서 향후 25년간 가장 빠른 성장을 보일 것으로 예상. 또한 태양전지 관련 기업의 가치는 2007년 8월을 기준으로 100억달러를 넘었으며, 이는 2007년 1월과 비교하여 평균적으로 50% 증가한 수치(Corcoran, 2007)
 - 국내에서도 산업자원부가 선정한 '2007 유망 전자기기 및 부품'에 태양전지가 선정되었으며, 삼성 SDI, 코오롱, 오성 LST, 신성 ENG 등은 태양광에너지 사업에 이미 착수하였거나 높은 관심을 보이고 있음.

2. “무한 공급” 재생가능 에너지

- 재생가능 에너지는 에너지원이 영구적으로 소진되지 않거나 단시간 내에 재생이 가능한 천연 자원으로부터 얻을 수 있는 에너지를 의미
 - 수자원, 지열, 태양, 풍력, 바이오매스 등을 원천으로 하는 에너지가 이에 해당하며, 현재 세계 에너지 소비의 10-17%를 공급¹⁾
- 재생가능 에너지는 온실 가스나 기타 오염 물질을 거의 배출하지 않으며 무제한으로 사용 가능(예를 들어 태양의 향후 수명은 50억년)

1) 재생가능 에너지의 비중은 자료 집계기관에 따라 다소 차이를 보이며 일반적으로 10-17%를 차지함(UNDP·UNDESA·WEC, 2000).

□ 재생가능 에너지의 종류 및 특성

○ 풍력 에너지

- 재생가능 에너지 중 태양광 발전과 함께 가장 급격히 발전하는 기술로서 설치용량은 1990-2003년 기간 동안 20배 증가²⁾
- 현재 유럽을 중심으로 발전하고 있으며 2003년 현재 유럽(EU15)에 설치된 용량이 세계의 70% 이상을 차지

○ 수력 에너지

- 규모·수원 등에 따라 대/소규모 수력 발전(hydroelectric power generation)³⁾, 파력 발전(wave power generation), 조력 발전(tidal power generation) 등으로 구분
- 유지비는 낮으나 시설 건축 초기에 막대한 자금 및 기술력이 필요하며, 파력 발전과 조력 발전의 경우는 아직 초보적 단계

○ 태양 에너지

- 태양을 원천으로 하는 에너지는 태양열(solar thermal energy)과 태양광(photovoltaic energy) 에너지로 구분
- 태양열 발전: 태양 복사열을 열원으로 사용하는 태양열 난방과 증기·공기를 가열하여 터빈을 회전시켜 전기를 생산하는 태양열 발전으로 구분
- 태양광 발전: 특정 물질에 태양광이 조사될 경우 전자가 발생하는 광기전 효과(photovoltaic effect)에 기반을 둔 태양전지로 전기를 생산하는 기술

○ 지열 에너지

- 수 km 지하의 지열을 난방이나 발전에 사용하는 기술로서 대규모 수력발전과 함께 초기 건설비는 매우 높으나 유지비가 저렴한 특징

2) http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/gwec/news_release/050304-Global_Wind_Energy_Markets_-_FINAL.pdf

3) 100 kW 이하의 수력 발전을 소규모 수력 발전으로 간주함.

- 충분한 지열이 존재해야 하는 지리적 조건에 절대적으로 의존하며, 장기간에 걸친 냉각효과 발생 가능

○ 바이오매스 (또는 바이오 연료)

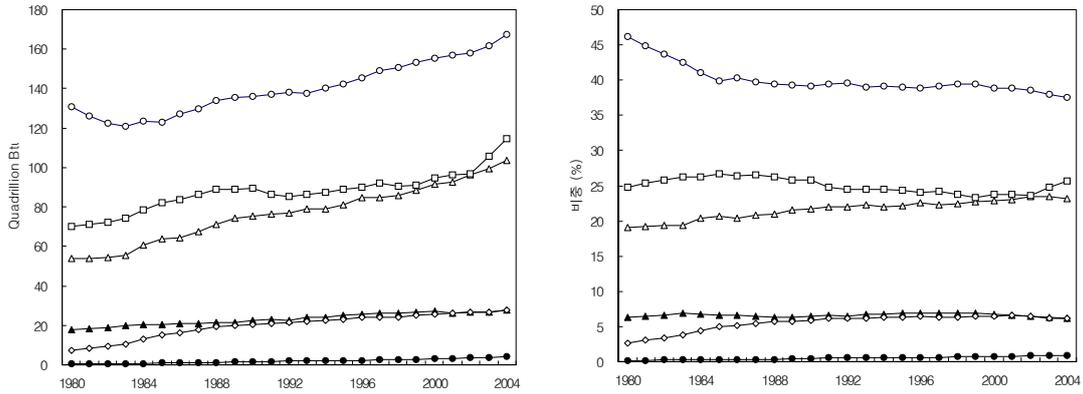
- 바이오매스는 살아 있거나 최근에 죽은 생물학적 물질로서 연료나 산업적으로 이용 가능한 비화석 연료계의 유기물을 의미
- 형태에 따라 건조된 작물, 목재, 동물 배설물 등의 고체 바이오 연료, 바이오알콜, 바이오디젤 등의 액체 바이오 연료, 오·폐수나 쓰레기 등에서 발생하는 기체 바이오 연료로 구분

□ 에너지 시장과 재생가능 에너지

○ 에너지원에 따른 세계 에너지 소비 추이(<그림 1> 참조)

- 2004년 세계 총 에너지 소비는 1980년에 비하여 63.5% 증가한 446.4 Quadrillion Btu이며, 이 중 화석연료가 차지하는 비중이 86.3%로 가장 높으나 연도별 비중에서 석유 및 석탄은 감소, 천연가스는 증가 추세⁴⁾
- 전통적 재생가능 에너지인 수력과 원자력 에너지의 소비량 역시 증가 추세를 보이나, 비중은 1990년대 이후 변화가 거의 없으며 최근에는 오히려 감소하는 추세
- 반면 수력을 제외한 재생가능 에너지의 경우 1980년 이후 에너지 공급량 및 비중에 있어 각각 4.9배와 3배 가량 증가

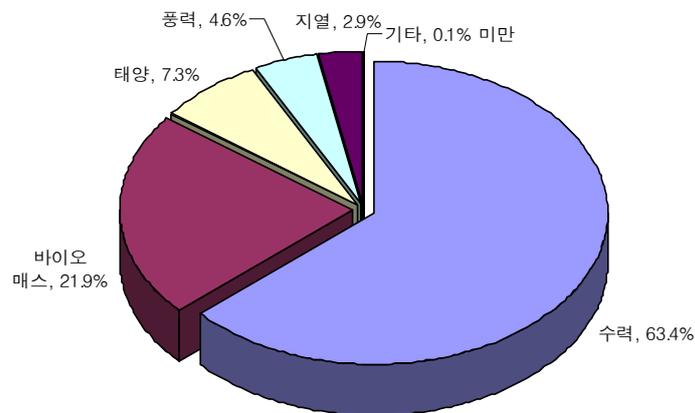
4) Energy Information Administration(2004). BTU는 영국 열량 단위(British Thermal Unit)로 1 파운드의 물의 온도를 화씨 1도 올리는데 필요한 에너지를 의미하며, 1 Quadrillion BTU는 293 GWh 또는 1.055 Exajoule에 해당함.



주: ○ - 석유, △ - 천연가스, □ - 석탄, ▲ - 수력, ◇ - 원자력, ◆ - 재생가능

<그림 1> 에너지원에 따른 세계 에너지 소비 추이

- 아직은 전통적 재생가능 에너지가 주도하는 재생가능 에너지 시장(<그림 2> 참조)5)
- 2005년 현재 재생가능 에너지 중 수력이 가장 큰 비중(63.4%)을 차지하였으며, 21.9%를 차지한 바이오매스 중 고전적 바이오매스가 78.1%를 차지
- 아직까지는 수력과 고체 바이오매스와 같은 전통적 재생가능 에너지가 차지하는 비중이 높으나, 이들의 비중은 점차 감소하고 신 재생가능 에너지인 태양, 풍력, 바이오 연료 등이 증가하는 추세

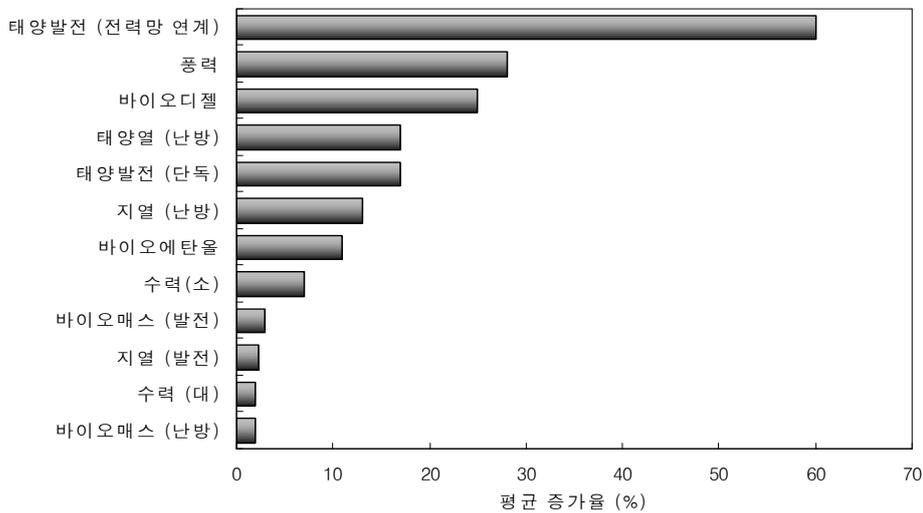


<그림 2> 재생가능 에너지 사용의 2005년 세계 현황

5) REN21(2006)의 내용을 기초로 재구성함.

○ 전통적 재생가능 에너지의 감소와 신재생가능 에너지의 증가(<그림 3> 참조)

- 재생가능 에너지 중 '전력망 연계형' 태양발전이 5년간 60%의 평균 증가율을 보여 가장 급격히 성장하였으며, '독립형' 태양발전의 성장률은 17%로 태양열 난방과 함께 증가율에서 4위를 차지
- 에너지원별 최근의 성장률 측면에서 태양발전이 가장 두드러지는 발전을 보였으며, 이는 태양발전에 대한 관심이 급속도로 증가하고 있음을 의미



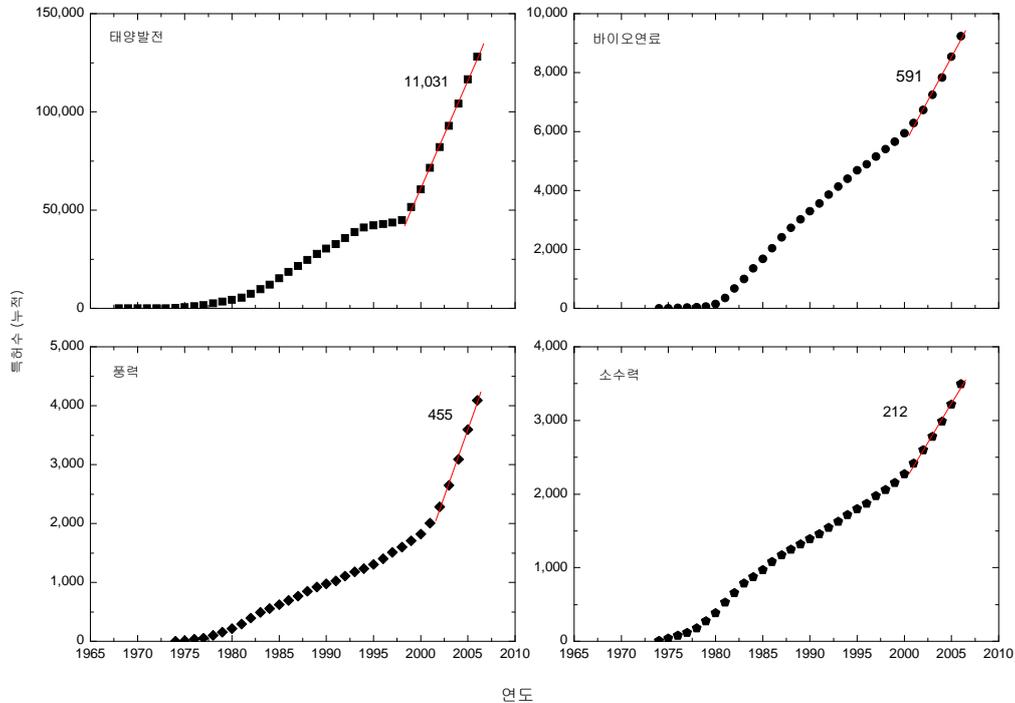
<그림 3> 재생가능 에너지의 에너지원별 평균 성장률 (2000-2004)

○ 재생가능 에너지 관련 특허에 있어서도 태양발전이 두드러짐(<그림 4> 참조).

- 특허청의 재생가능 에너지 분류체계를 사용하여⁶⁾ 세계 특허 데이터베이스 (Derwent World Patent Index)를 분석한 결과 태양 발전 관련 특허 수가 가장 많았으며, 최근 5-10년 기간의 증가율도 최고를 기록
- 이는 재생가능 에너지 중 태양 발전과 관련되어 가장 많은 연구개발이 이

6) 신재생 에너지 분야 특허출원 동향(2000-2005년), 특허청 화학생명공학심사본부, 환경화학심사팀, 2006.

루어져 왔을 뿐만 아니라 그 동안의 연구개발에 의한 성과물 역시 급격히 증가하고 있음을 의미



<실선 옆의 수는 직선의 기울기>

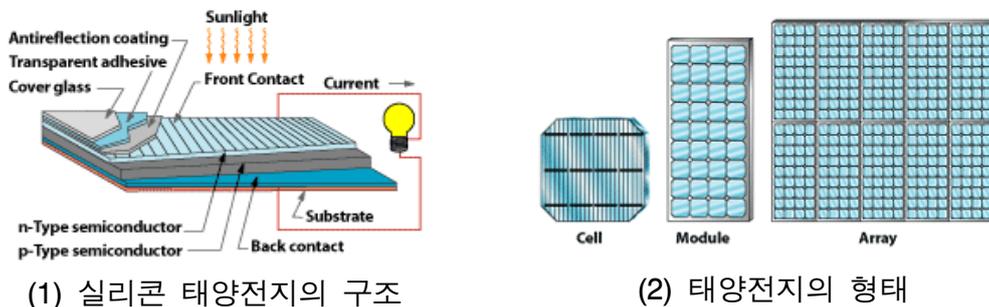
<그림 4> 재생가능 에너지 관련 누적 특허 수의 연도별 추이

3. 떠오르는 동력원 태양전지

□ 태양전지의 원리 및 구조

- 태양전지는 빛 에너지를 전기 에너지로 바꾸는 광기전 효과에 의하여 작동하므로 광기전 전지(photovoltaic cell)로 표현되기도 하는 태양광 발전에 있어서의 핵심기술

- 전통적인 태양전지는 p-n 접합을 이루도록 혼입(doping)된 실리콘 반도체로 이루어져 있음. p-형과 n-형은 각각 잉여 홀(hole)와 전자(electron)를 가지고 있으며, p-n 접합부에는 전기장(electric field)이 존재(<그림 5>의 (1) 참조)⁷⁾
- 태양전지가 빛을 흡수하면 자유로이 이동할 수 있는 전자와 홀과 같은 전하 운반체(charge carrier)가 생성되며, 이들이 전기장에 의하여 반도체 영역을 통하여 전도체(전극)로 이동함으로써 전기를 발생
- 태양전지를 구성하는 가장 작은 단위는 전지 셀(cell)이며, 태양광 발전에는 셀이 집적된 모듈 또는 어레이를 사용(<그림 5>의 (2) 참조)



(1) 실리콘 태양전지의 구조

(2) 태양전지의 형태

<그림 5> 반도체 태양전지의 구조 및 형태

□ 태양전지의 종류

- 태양전지는 발전 단계에 따라 1 - 3세대로 구분이 가능 (<표 1> 참조)
 - 1세대 태양전지 : 반도체 메모리의 제조를 위해 사용되는 고순도의 실리콘을 주원료로 사용하여 상당히 고가(高價)이나 다른 형태의 태양전지에 비

⁷⁾ U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, USA (<http://www.eere.energy.gov>).

- 하여 효율이 높아 현재 시판되고 있는 태양전지의 80-90% 이상을 차지
- 2세대 태양전지 : 지지체 위에 코팅된 반도체 박막으로 구성되며, 고효율의 다층 태양전지 개발을 목적으로 고안되었음. 1세대 태양전지에 비하여 효율은 낮으나 박막의 비정질 실리콘을 사용하므로 제작 단가가 낮으며 제품의 무게가 가볍고 유연성이 우수
 - 3세대 태양전지 : 염료, 고분자, 올리고머, 덴드리머 등의 유기물을 주된 재료로 사용함. 유기물의 박막 형태이므로 가볍고 저렴하며 액상 제조가 가능하여 스프레이, 프린팅 등을 통한 Roll to Roll 연속 제조 공정의 도입으로 제작 형태의 제한이 거의 없음.
- ※ 유기물이 가지는 제조, 공정, 가격상의 유연성이 장점으로 작용하여 기존의 태양전지와 차별되는 미래형 태양전지로 각광 받고 있으며, 휘어지는 태양전지, 착용 가능한 태양전지 등이 좋은 예

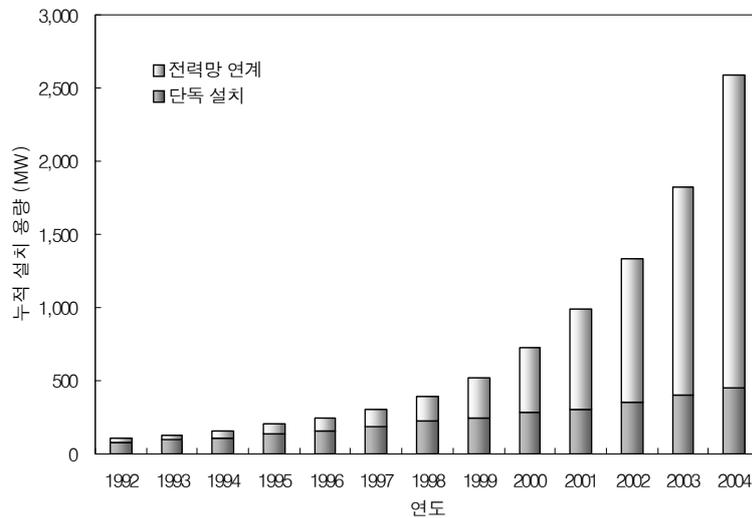
<표 1> 발전 단계에 따른 태양전지의 종류 및 특징

세대	명칭	구조	재료	특징
1세대	실리콘, 반도체, 웨이퍼, 벌크형 태양전지	단층의 p-n 접합 다이오드	실리콘	<ul style="list-style-type: none"> · 상당히 고가 · 고효율 발현 · 현재 시장의 80-90% 차지
2세대	박막 태양전지	반도체 박막의 다층 구조	비정질, 다결정, 미세결정 실리콘, CdTe, CIS 등	<ul style="list-style-type: none"> · 1세대 태양전지에 비해 낮은 효율 및 제작 단가 · 경량 및 고유연성으로 다양한 형태 가능
3세대	유기계 태양전지	유·무기물 박막의 다층 구조	염료, 고분자, 올리고머, 덴드리머 등의 유기물과 무기물	<ul style="list-style-type: none"> · 매우 높은 가격 경쟁력 · 액상기반의 다양한 형태의 제조공정이 가능 · 발전된 경량화 및 유연성으로 형태제한이 거의 없음.

□ 태양전지 시장

- 태양전지 설치 용량은 2000년 이후 급격히 증가하여 2004년 현재 세계 누

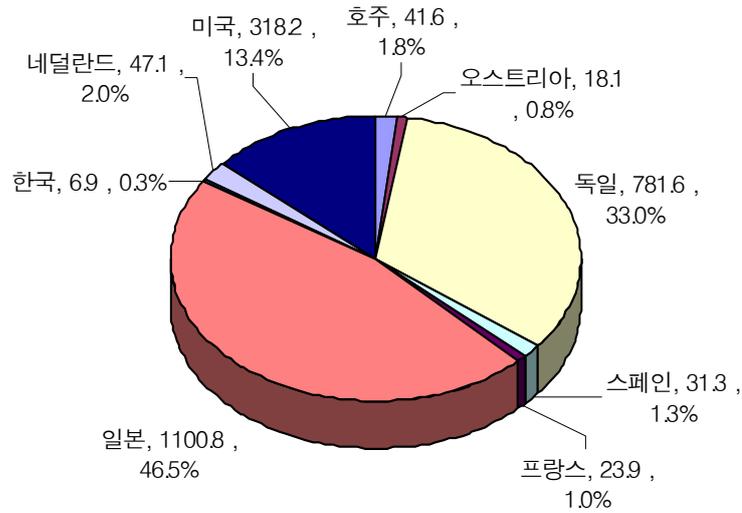
적 설치 용량은 1992년의 25배인 2.6 GW이며, 기존의 전력망과 연계되어 가동되는 경우가 단독 설치에 비해 높은 증가율을 보임(<그림 6> 참조).⁸⁾



<그림 6> 전 세계 태양발전 설치 용량의 연도별 추이

- 1995-2004년 태양전지 관련 시장의 92.9%는 일본, 독일, 미국이 주도(<그림 7> 참조)
 - 일본이 1,100.8 MW의 용량을 보유하여 가장 높은 비중을 차지하며(46.5%), 독일은 781.6 MW(33.0%), 미국은 318.2 MW(13.4%)를 보유
 - 2004년 한 해에만 3개국에서 전력망 연계형 태양전지를 설치한 가구 수는 4백만 호 이상

8) International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (<http://www.iea-pvps.org>)

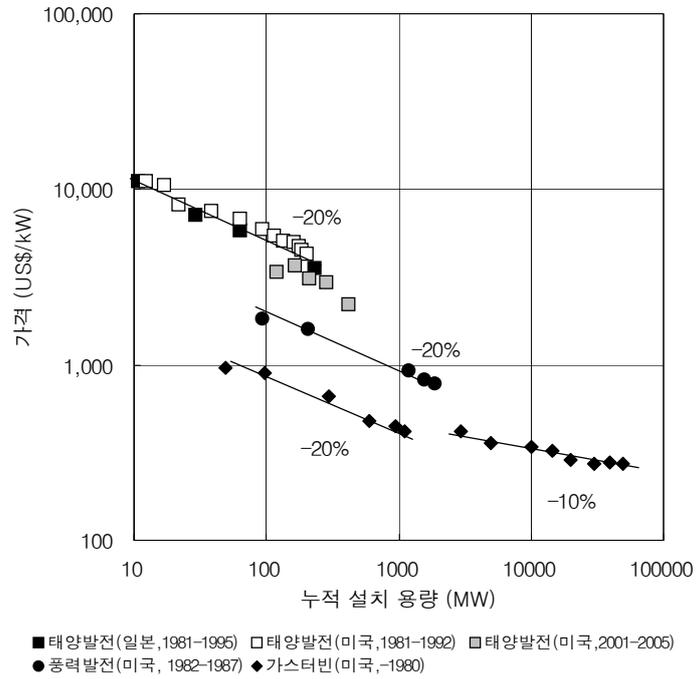


<동일 기간 동안 5MW 이상의 용량 증가를 기록한 국가에 한정>

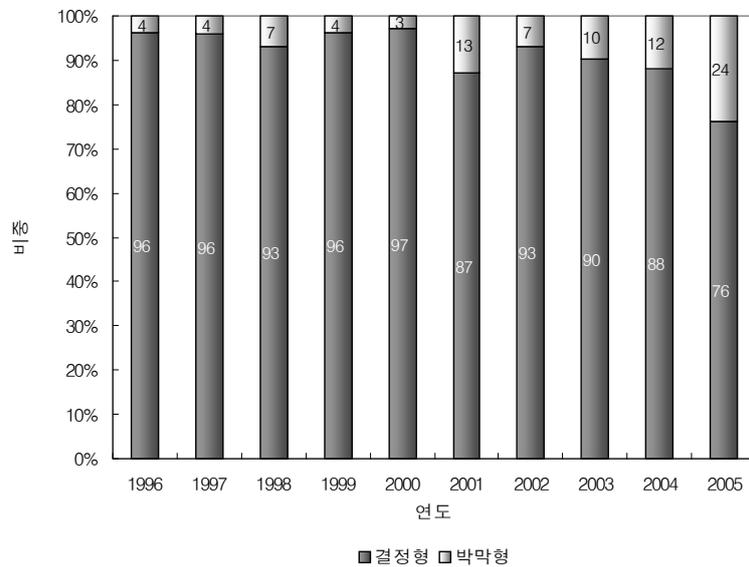
<그림 7> 1995-2004년 국가별 태양전지 누적 설치 용량

- 최근 태양전지가 급격히 부상한 원인은 기술개발에 의한 가격 경쟁력 상승
 - <그림 8>과 같이 태양전지의 최초 효율은 1% 내외였으나 실리콘 태양전지의 경우 현재 40% 이상의 고효율을 달성하였고, 가격은 꾸준히 감소하고 있음.⁹⁾
 - 태양전지의 효율 증가와 가격 하락으로 인하여 태양전지의 가격 경쟁력은 꾸준히 상승하고 있으며, 이는 고가인 결정질 태양전지의 비중이 점차 줄고 있는 데에도 부분적으로 기인함(<그림 9> 참조).

9) UNDP · UNDESA · WEC(2006)



<그림 8> 에너지 관련 기술의 경험곡선



<그림 9> 태양전지 종류별 연도별 미국시장 점유율

□ 태양전지의 현재와 미래

- 현재의 태양전지 가격이 20년 전에 비하여 10% 수준으로 감소하기는 하였으나 아직 다른 재생가능 에너지와 비교하여 비교우위에 있다고 보기는 어려움(풍력 에너지의 경우 태양광 발전의 10% 수준).
- 현재 가장 많이 사용되는 실리콘 태양전지의 경우 고효율 발현을 위해서는 고순도를 유지해야 하므로 재료 및 공정 단가를 낮추는데 한계가 있음.
- 그동안 태양전지의 가격 경쟁력을 높이기 위한 새로운 기술개발 노력을 기울여 왔으며, 지난 10여년 동안 박막형 태양전지가 실리콘 태양전지의 뒤를 이룰 2세대 태양전지로서 각광을 받아왔음.
 - 2005년에는 일본(Sharp)이 다결정질 실리콘을 이용한 15.8% 효율의 태양전지를 선보이기도 하였음(NE-152AR).
- 근래에는 3세대 태양전지로 유기 태양전지가 각광을 받고 있음.
 - 유기 태양전지는 실리콘 등의 무기물이 아닌 값싼 유기물을 재료로 사용하며, 기존의 실리콘 계열의 태양전지에 비하여 월등히 낮은 가격, 공정의 유연성, 응용의 다양성 등 장점임.

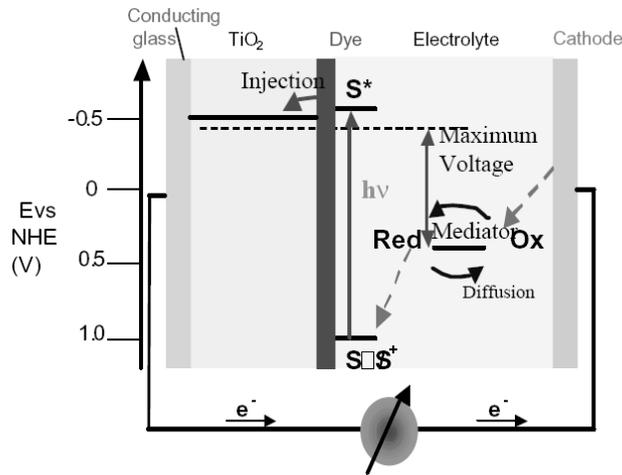
4. 성능 좋고 저렴한 염료감응 태양전지

□ 기존과 다른 작동 원리

- 염료감응 태양전지의 작동 원리(<그림 10> 참조)¹⁰⁾
 - 염료감응 태양전지는 식물의 광합성 원리를 응용한 소자로서 염록체에서 빛에너지를 흡수하는 기능의 염료를 결합시켜 태양전지에 적용
 - 기존 태양전지에서는 빛을 흡수하여 자유 전자와 홀이 생성되는 반면 염료감응 태양전지에서는 전자-홀이 결합된 엑시톤(exciton)이 염료에 형성됨

10) Grätzel(2003)

- 엑시톤은 강한 전기장이 존재하는 상황이나 에너지 준위가 크게 다른 두 물질 사이의 계면에서 자유 전자와 홀로 분리되어 이동이 가능
- 염료감응 태양전지는 염료에서 발생한 엑시톤이 TiO_2 와의 계면에서 전자와 정공으로 분리되어, 전자는 TiO_2 층으로 이동하고 정공은 전해질로 이동하여 전류를 발생시킴.



<그림 10> 대표적 유기 태양전지인 염료감응 태양전지의 구조 및 작동원리

□ 싼 값에 원하는 대로 - 새로운 가능성의 제공

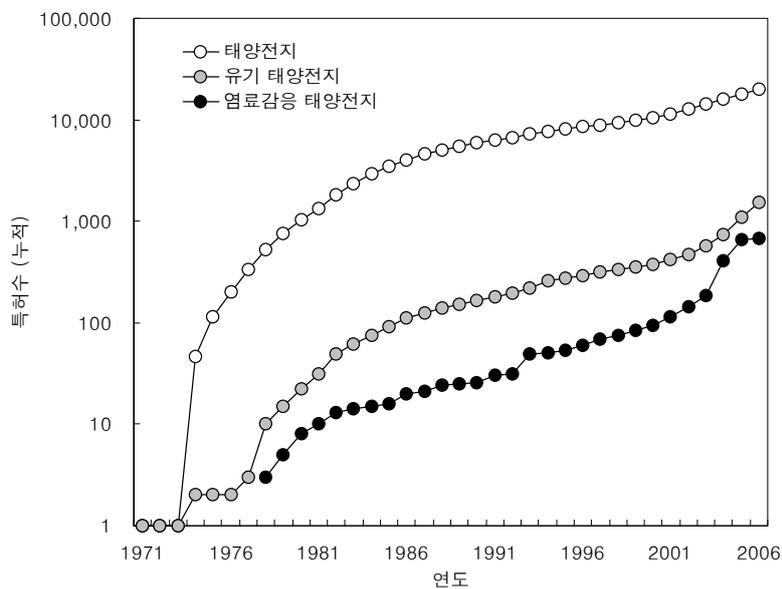
- 염료감응형 태양전지 가장 큰 장점은 높은 가격 경쟁력
 - 염료감응형 태양전지는 매우 적은 양의 염료를 사용하므로, 실리콘이나 박막 태양전지에 사용된 광활성층 재료와 비교하여 가격이 월등히 저렴
 - 염료와 같은 유기 또는 유기금속착물은 대단히 높은 흡광도를 가질 수 있으므로 수백 나노미터 두께의 박막으로도 원하는 성능의 발현이 가능함.
 - 적은 에너지를 필요로 하는 장비인 코팅·프린팅 기술 등을 이용하여 제작 가능하므로 기존의 태양전지 대비 10-20배의 경비 절감을 기대
- 형태의 다양성은 염료감응 태양전지의 또 다른 장점

- 유기물은 액상(용액) 공정으로 처리할 수 있으므로 기존의 건물이나 직물과의 결합 등 어떤 형태로도 제조 가능
 - 예를 들어 건물 유리창에 코팅 하거나 직물형 태양전지를 텐트에 부착하여 2차 전지를 충전할 수도 있음.
 - 염료감응 태양전지는 상업화에 근접해 있으며, 2003년 초에 Sustainable Technologies International(호주)가 세계 최초로 염료감응 태양전지를 출시한 바 있으며(Service, 2004), Dyesol사에서도 상업화 시도 중
 - 유럽의 G24, INAP, Solarmonix, ECN, 3G Solar, 일본의 Sharp, Sony, Taiyo Yuden, TDK, Nippon Oil, Dai Nippon Printing, Fujikura, Toyota, Toshiba, Peccell Technology, 중국의 Institute of Plasma Physics(CAS), 대만의 J Touch 등의 기업에서 상업화 시도 중
 - 국내에서는 동진세미켐, 삼성 SDI, 세아이엔티, 나노팩, 씨엠에스테크놀로지, 이진창호, 티모, 우리솔라 등의 기업에서 상업화 시도 중
- 염료감응 태양전지의 상업화 임박
- 호주 Dyesol사의 발표에 의하면, 염료감응 태양전지의 수명을 지속광하에서 27.4개월 이상으로 향상시켰으며, 유럽의 일사량을 감안할 때 전지수명은 32년 이상을 달성하였음.
 - 지속적 관심 및 연구개발에 힘입어 보다 향상된 효율의 염료감응 태양전지가 저렴한 가격에 제공될 것으로 기대

□ 염료감응 태양전지(Dye-Sensitized Solar Cell)는 급부상 기술

- 염료감응 태양전지 특허는 유기 태양전지 관련 특허의 절반을 차지
- 2006년 현재 염료감응 태양전지 및 유기 태양전지 관련 누적 특허 수는 각각 674건과 1,519건으로 염료감응 태양전지가 유기 태양전지의 44.4%를 차지(<그림 12> 참조)¹¹⁾

- 염료감응 태양전지는 유기 태양전지 관련 기술 중 급부상 기술
 - 1978-2006년의 염료감응 태양전지 관련 특허는 661건이며 이 중에서 최근 6년의 특허 수가 578건(87.4%)으로 최근 들어 급격한 증가를 보임.
 - 2005년에는 전년도 대비 117%의 증가율을 기록하는 등 유기 태양전지 관련 기술 중 염료감응 태양전지는 급부상하는 기술



<그림 12> 태양전지 관련 특허의 연도별 추이

- 염료감응 태양전지 관련 특허 점유율이 높은 출원인으로는 Sharp(3.6%), Bridgestone(2.5%), NKG Spark Plug(2.5%), Sekisui Jushi(2.1%), Dainippon Printing(2.0%) 등이 있음.

11) Derwent World Patent Index의 특허를 대상으로 분석하였으며, 유기 태양전지 및 염료 감응 태양전지 관련 특허의 검색을 위해 검색식 (organic OR dye OR polymer OR oligomer).ti. AND ((photovoltaic OR solar) ADJ cell*).ti. AND @puby<=2006과 (dye AND (photovoltaic OR solar) ADJ cell*).ti. AND @puby<="2006"을 각각 사용하였음.

□ 염료감응 태양전지 관련 핵심 기술

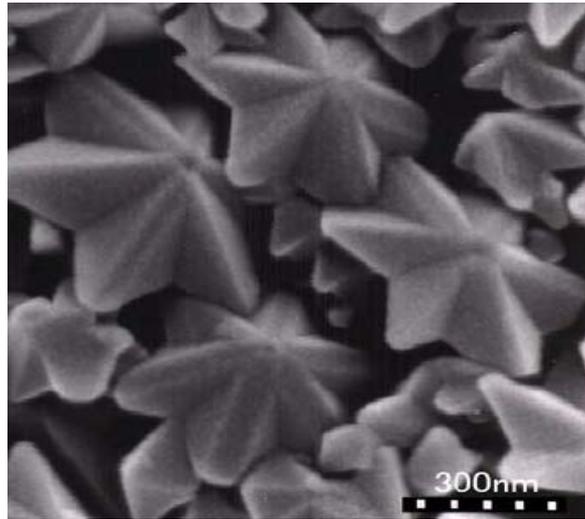
- 염료감응 태양전지는 전도성 기질, 나노결정 반도체 산화물, 광감성 염료, 상대 전극 및 전해질 등으로 구성되며, 여기서는 최근에 유기 태양전지의 성능 향상을 위해 관심을 끌고 있는 기술영역을 보임.¹²⁾

- 전도성 기질
 - 염료감응 태양전지에 사용되는 전도성 기질은 주로 투명 전도성 산화물 (Transparent Conductive Oxide, TCO)이며 대표적인 예로는 ITO(Indium Tin Oxide)와 FTO(Fluorine-doped Tin Oxide)를 들 수 있음.
 - ITO의 경우 투명성과 전기전도성은 우수하지만 300°C 이상의 고온처리를 거치면 전기전도성이 3배 이상 증가하는 단점이 있으며, FTO의 경우는 전기전도도는 낮으나 열적 안정성이 우수함.
 - 최근에는 ITO와 FTO의 장점을 모두 살리기 위하여 이들의 혼합층으로 구성된 기질을 시도하거나(Kawashima, et al., 2004), FTO를 대신할 목적으로 IZO(Indium Zinc Oxide)등의 새로운 TCO 개발을 위한 연구가 진행 중 (Doh, et al., 2004)
 - 유연성 염료감응 태양전지의 기질로 투명 고분자 필름이나 스테인레스 금속박 등을 적용하려는 연구가 진행되고 있음.

- 나노결정 반도체 산화물
 - 유기 태양전지에 가장 널리 사용되는 나노결정 반도체 산화물은 100 nm 이하의 입자 크기를 가지는 티타늄 산화물이며, 이러한 나노결정은 흡광 면적의 급격한 증가와 함께 반도체/전해질 계면의 Schottky 장벽의 형성이 억제되는 효과를 얻을 수 있음.
 - 태양전지의 효율 향상을 위한 반도체 산화물의 형태 및 구조 제어가 반도체 산화물 관련 핵심기술임. 특히 불규칙적 나노결정 대신 메조포러스 채

12) Grätzel(2003, 강문성 · 강용수(2005)

널, 나노막대 배열 형태 등으로 구조를 조절하거나, 입사된 빛이 산란을 일으켜 흡수를 증가시킬 수 있도록 TiO₂ 입자의 형태를 조절하는 기술이 비교적 최근에 등장하였음(그림 13).¹³⁾



<그림 13> 빛의 산란을 돕기 위한 별 모양의 TiO₂ 입자

- 최근에는 100-400 nm 크기의 양자점(Quantum Dot)을 TiO₂와 결합하여 적색광 및 근적외선 영역의 집광능력을 크게 향상시킨 사례도 있음.¹⁴⁾
- 현재까지는 티타늄 나노결정 산화물 입자를 사용한 태양전지가 가장 높은 효율을 보이고 있으나, SnO₂, ZnO, Nb₂O₅ 등의 새로운 소재의 나노결정 산화물 개발도 활발하게 이루어지고 있음.¹⁵⁾

○ 광감응 염료

- 현재까지 광기전 성능이나 안정성 측면에서 가장 높은 평가를 받는 광감응 염료는 루테튬(Ru)이나 오스뮴(Os)의 폴리피리딜(polypyridyl) 착물 계열의

13) "The light scattering TiO₂ particle for the dye-sensitized solar cell", Sumimoto Osaka Cement Co., Ltd. Technical Reports, 36, 2005.

14) McDonald et al.(2005)

15) Grätzel(2001)

유기금속 화합물임.¹⁶⁾ 대표적인 것으로는 “N3 염료”로 불리는 $cis-RuL_2(NCS)_2$ ($L=4,4'$ -COOH-2,2'-bipyridine)와 “black dye”로 불리는 $RuL'(NCS)_3$ ($L'=4,4',4''$ -COOH-2,2':6',2''-terpyridine)가 있음.¹⁷⁾

- 최근에는 염료의 안정성 향상 및 가격 저하를 위해 쿠마린(coumarine)이나 폴리엔(polyene) 계열의 순수 유기염료를 이용하는 시도도 이루어지고 있으며, 루테늄 계열에 가까운 7.7%의 고효율 전지도 보고됨.¹⁸⁾
- Rhodanine계열의 염료를 이용하여 8%의 효율을 달성하였다고 보고됨.¹⁹⁾
- II-IV 또는 III-V족 반도체 입자들로 만들어진 양자점을 이용하면 입자 크기를 조절함에 따라 흡수 스펙트럼을 바꿀 수 있어 고체상 이질접합 (solid-state hetero-junction) 태양전지용 신기술로서 주목을 받고 있음.²⁰⁾

○ 상대 전극

- 백금 박막은 전자전도성이 매우 높으며 광전극에서 산화된 I_3^-/I^- 와 같은 이온쌍에 대한 표준과전압이 낮아 유기 태양전지의 상대전극으로 가장 널리 사용되는 물질임. 그러나 백금은 전해액인 요오드와 장시간 접촉 시 PtI_4 나 H_2PtI_6 등의 착체를 형성하거나 염료 분자가 전극표면에 흡착하는 문제가 있음.²¹⁾
- 최근에는 백금의 사용량을 줄이면서 전지의 효율을 향상시키기 위하여 나노 구조물에 백금을 담지하거나 백금과 무정형 금속 산화물을 함께 증착하는 시도가 보고되고 있음.²²⁾
- 유연성 태양전지의 제작을 위하여 백금 대신 poly(styrene sulfonate)가 혼합된 poly(3,4-ethylenedioxy-thiophene) (PEDOT-PSS) 등의 전도성 고분자를 사용하는 시도도 보고된 바 있음.²³⁾

16) 흔히 $ML_2(X)_2$ 로 나타내며, 여기서 M은 루테늄이나 오스뮴, L은 2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylic acid, X는 halide, cyanide, thiocyanate, acetyl acetate, thiocarbonate 등임.

17) Nazeeruddin et al.(1993, 2001).

18) Hara et al.(2001, 2003)

19) Uchida et al.(2004)

20) Plass et al.(2002)

21) Kay and Grätzel(1996)

22) Park et al.(2005)

○ 전해질

- 유기 태양전지는 주로 액상의 전해질을 사용하는 습식 위주로 개발되어 왔으나, 이는 높은 효율을 가지는 반면 전해액 누출·휘발이나 원치 않는 부반응으로 인하여 전지의 수명을 단축할 수 있음.
- 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 methoxypropionitrile(MPN)과 같은 고극성·비휘발성의 용매나 실온 용융염을 사용하여 안정성의 향상을 실현하기도 함.²⁴⁾
- 최근에는 젤이나 고분자 전해질을 사용하는 시도가 늘고 있으며, 무광 조건 80°C 또는 노광 조건 60°C에서 1,000 시간 시험한 결과 최초 성능의 98%를 유지한 사례도 보고됨.²⁵⁾
- 특히 고분자 전해질은 유연성(flexible) 태양전지의 제작 등에 중요한 기술이며, 기존에 비해 효율이 크게 개선된 고체 고분자 전해질 염료감응 태양전지가 국내 연구진에 의해 발표된 바 있음.²⁶⁾

○ 염료감응 태양전지의 당면 과제

- 염료감응 태양전지의 개발에 있어서 낮은 효율을 높임과 동시에 전지의 장기 안정성을 보장할 수 있는 기술을 개발하여 기존의 태양전지와의 경쟁력을 확보하는 것임.
- 루테늄 계열 물질의 맹독성 및 발암성, 1 nm 이하의 TiO₂ 나노 입자에 대한 섬유증(fibrosis)이나 폐색증 발병 가능성 등 안전성 문제 해결이 병행되어야 함.
- 유기계 용매를 이용하는 전해질은 인체에 유해하여 누설되지 않도록 잘 봉지하여야 하며, 장기적인 안정성을 확보하기 위해 젤형, 고체형, 이온성 액체 등의 비휘발성 전해질로 대체되어야 함.

23) Shibata et al.(2003)

24) Wang et al.(2002, 2003)

25) Wan et al.,(2005)

26) Kim et al.(2005)

- 장기적으로 제조원가를 획기적으로 낮추기 위해서는 유연성 기재를 이용한 롤투롤 연속공정이 도입되어야 하므로, 이를 위해서 TiO₂층의 소결온도를 낮추고 유연성을 증대시키는 기술 개발이 필수적임.

5. 태양전지의 미래는 “밝음”

- 자원 고갈에 의한 에너지 위기 및 온실효과 등 기후 변화에 대한 해결 방안으로 재생가능 에너지원에 대한 개발은 지속될 것으로 전망
 - 재생가능 에너지는 1980년 이후 에너지 공급 및 비중에 있어 지속적으로 증가하여 현재는 세계 에너지 시장의 10-17%가 재생가능 에너지에 의존
 - 수력이나 고체바이오매스 등과 같은 전통적 재생가능 에너지의 비중은 점차 감소하는 반면 태양발전 및 풍력 등의 신재생가능 에너지의 비중은 점차 증가하는 추세
- 신재생가능 에너지 중 가장 높은 성장률을 보이는 것은 태양발전
 - 전력망 연계형 태양발전은 5년간 60%의 평균 증가율을 보여 재생가능 에너지 중 가장 급격히 성장하였으며, 독립형(stand-alone) 태양발전의 성장률은 17%로 태양열 난방과 함께 증가율에서 4위를 차지
- 태양전지는 태양발전의 핵심기술이며, 반도체를 사용하는 1세대 태양전지로부터 유기물을 사용하는 3세대 태양전지까지 등장
 - 효율 측면에서는 아직까지 반도체 태양전지가 우위를 보이고 있으나 최근 들어 유기 태양전지의 효율은 급격히 상승 중
 - 유기물이 제공하는 다양성은 물리·화학적 성질의 조절 및 최적화 가능성을 제공하며, 높은 가격 경쟁력을 가장 큰 무기로 함.
- 염료감응 태양전지는 최근 들어 지대한 관심을 받고 있는 급부상 기술

- 유기물이 가지는 제조, 공정, 가격상의 유연성이 장점으로 작용하여 기존의 태양전지와 차별되는 미래형 태양전지로 각광을 받고 있음.
 - 특히 염료감응 태양전지는 유기 태양전지 관련 특허의 87.4%를 차지하고 2005년에는 전년 대비 117%의 특허 증가율을 기록하는 등 급격히 성장
 - 염료감응 태양전지의 효율은 최근 들어 급격히 상승하여 2세대 박막 태양전지의 효율에 육박하였으며, 선진국의 경우 상업화에 가장 가까워진 기술
 - 염료감응 태양전지 관련 핵심기술로는 전도성 기질의 개발, 나노 결정반도체 산화물의 설계, 형태 및 구조 제어, 새로운 광감응 염료의 개발, 고분자 전해질 소재의 개발 등이 있음.
- 염료감응 태양전지의 향후 당면 과제는 효율의 향상과 안정·안전성 보장
 - 반도체 태양전지와 비교하였을 때 유기 태양전지의 효율은 아직 낮으므로 효율 향상이 급선무
 - 동시에 전지의 안정성 및 안전성을 보장할 수 있는 기술을 개발하여 기존의 태양전지와 경쟁력 확보가 필요
 - 상기 당면 과제에 대한 연구개발이 지속적으로 이루어진다면 낮은 가격과 유연성 등을 무기로 하는 유기계 태양전지 관련 기술은 차세대 에너지원으로서의 충분한 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대됨.

<참고문헌>

1. 강문성 · 강용수, “유기 태양전지 개발 동향 및 전망”, 한국공업화학회지, 16, 2005, 159-168
2. Churg, A. et al., "Induction of fibrogenic mediators by fine and ultrafine titanium dioxide in rat tracheal explants", *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol.* 277, 1999, L975-L82.
3. Clotworthy, A., "Response of Wairakei geothermal reservoir to 40 years of production", Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, 2000. 5.28-6.20.
4. Commission of the European Communities, "A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy," SEC 317, 2006.
5. Corcoran, E., "The Sunshine Economy", *The Forbes*, 2007. 8. 16.
6. Doh, J. G., et al., "Enhancement of photocurrent and photovoltaic of dye-sensitized solar cells with TiO₂ film deposited on indium zinc oxide substrate", *Chemistry of Materials*, 16, 2004, 493-497.
7. Energy Information Administration, Department of Energy, USA (http://www.eia.doe.gov/glossary/glossary_r.htm)
8. Energy Information Administration, *International Energy Annual 2004*, Department of Energy, USA, 2004
9. Energy Information Administration, *Solar Thermal and Photovoltaic Collector Manufacturing Activity*, Office of Coal, Nuclear and Alternate Fuels, U.S. Department of Energy, 2006. 8.
10. Grätzel, M., "Dye-sensitized solar cells", *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Review*, 4, 2003, 145-153.
11. Grätzel, M. “Mesoscopic Solar Cells for Electricity and Hydrogen Production from Sunlight”, *Chem. Lett.*, 34, 2005. 8.
12. Hara, K. et al., "A coumarin-derivative dye sensitized nanocrystalline

- TiO₂ solar cell having a high solar-energy conversion efficiency up to 5.6%", *Chem. Commun.*, 2001, 569-570.
13. Hara, K. et al., "Design of new coumarin dyes having thiophene moieties for highly efficient organic-dye-sensitized solar cells", *New J. Chem.* 27, 2003, 783-785.
 14. International Energy Agency, *World Energy Outlook 2006*, 2005.
 15. International Energy Agency, *World Energy Outlook 2006*, 2006.
 16. Kawashima, T. et al., "FTO/ITO double-layered transparent conductive oxide for dye-sensitized solar cells", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 164, 2004, 199-202.
 17. Kay, A. and M. Grätzel, "Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium oxide and carbon powder", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 44, 1996, 99.
 18. Kim, J. H. et al., "Poly(butyl acrylate)/NaI/I₂ electrolytes for dye-sensitized nanocrystalline TiO₂ solar cells," *Solid State Ionics*, 176, 2005, 579-584.
 19. Kubo, W. et al., *Chem. Commun.*, 2002, 374-375.
 20. McConnel, R. and R. Matson, "Next-Generation Photovoltaic Technologies in the United States", 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 2004.
 21. McDonald, S. A., et al., "Solution-processed PbS quantum dot infrared photodetectors and photovoltaics", *Nature Materials* 4, 2005, 138-142.
 22. Nazeeruddin, et al., "Conversion of light to electricity by cis-X₂bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) charge-transfer sensitizers (X = Cl-, Br-, I-, CN-, and SCN-) on nanocrystalline titanium dioxide electrodes," *J. Am. Chem. Soc.* 115, 1993, 6382-3690.
 23. Nazeeruddin, et al., "Engineering of efficient panchromatic sensitizers for nanocrystalline TiO₂-based solar cells," *J. Am. Chem. Soc.* 123, 2001, 1613-1624.

24. Park, S. S. et al., U.S. Patent, US20050016586 A1, 2005.
25. Philips, G., "Domestic energy use in the UK. Power conversion, transport and use", *Powerwatch*, Spring 2000.
26. Plass, R. et al., "Quantum Dot Sensitization of Organic-Inorganic Hybrid Solar Cells", *J. Phys. Chem. B* 106, 2002, 7578 - 7580.
27. Service, R. F., "Organic solar cells playing catch-up", *Science*, 306, 2004, 2034.1. UNDP · UNDESA · WEC, *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*, New York, 2000.
28. Shibata, Y. et al., "Quasi-solid dye sensitised solar cells filled with ionic liquid—increase in efficiencies by specific interaction between conductive polymers and gelators", *Chem. Commun.*, 2003, 2730-2731.
29. U.S. Department of Energy, *Energy Efficiency and Renewable Energy*, USA, 2007 ([http:// www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov)).
30. Wan, P. et al., "Stable $\geq 8\%$ efficient nanocrystalline dye-sensitized solar cell based on an electrolyte of low volatility", *Applied Physics Letters* 86, 2005, 123508-123510.
31. Wang, P. et al., S.M. Zakeeruddin, I. Exnar, M. Grätzel, *Chem. Commun.*, 2002, 2972-2973
32. Wang, P. et al, *J. Am. Chem. Soc.* 125 (2003) 1166-1167.
33. Uchida, S. et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 2004, 126, 12218.