

태양전지 중요성과 발전 동향

전용석
 한국전자통신연구원 IT-NT 그룹 선임연구원
 yjun@etri.re.kr
 박헌균, 윤호경, 강만구, 김종대
 한국전자통신연구원 IT-NT 그룹

1. 태양에너지의 중요성
2. 태양전지 종류 및 효율
3. 발전 방향

1. 태양에너지의 중요성

수백만년 전 인류의 역사가 시작되던 때부터 태양은 늘 지구의 에너지원으로 사용되어 왔으나, 당시에는 태양이 지구에 주는 역할을 알지 못한 채 숭배의 대상이었다. 지구는 그 전부터 그 오랫동안 태양에너지를 석탄이나 석유 등의 형태로 저장해 왔다. 현재, 우리는 지구가 몇 백만년 동안 축적해 온 에너지를 마구 꺼내 쓰고 있으며, 시간이 갈수록 더 많은 에너지를 요구하고 있다. 지난 몇 백만년 동안 쌓아 온 에너지를 겨우 몇 백년 만에 대부분을 꺼내 쓰고 있는 것이다. 이제 또다시 지구가 태양에너지를 쌓아줄 몇 백만년을 기다릴 수가 없다.

가. 에너지 소비 현황[1]-[2]

보고서별로 10% 정도의 차이는 있지만 DOE(Department of Energy, USA)에 따르면 2004년 세계의 총 에너지 사용량은 약 14~16TW(terawatt = trillion watts)로 추정되고 있고, 이 에너지 사용량의 80% 가량이 화석연료로부터 얻어진 것이다. 미국의 National Energy Policy 보고서에 의하면 이 중 3.5~4TW 정도는 미국이 소비한 것으로 지구 전체의 1/4 정도가 미국 한 나라에서 소모되고 있다. 이 중 신재생 에너지가 차지하는 비율은 2% 이하이다. 다시 신재생 에너지로는 지열, 풍력, 해력, 태양열, 태양전지 등의 순서로 얻어지고 있다.

연도별 총 에너지 사용량 증가를 보면 1980년대 8TW 소비에서 90년에 11TW, 2000년에

* 본 컬럼은 한국전자통신연구원에서 작성한 내용입니다. 본 내용과 관련된 사항은 한국전자통신연구원 IT-NT 그룹 전용석 선임연구원 (☎ 042-860-5554)에게 문의하시기 바랍니다.

**본 내용은 필자의 주관적인 의견이며 IITA의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.

14.5TW, 2004년에는 약 16TW로 10년마다 약 30% 정도 증가하고 있다. 이런 추세로라면 2010년 즈음에 20TW 이상의 에너지가 필요할 것으로 예측 가능하다.

나. 대체 에너지 필요성

현재 에너지 소비의 80%를 차지하는 화석연료의 고갈이 가까워졌다는 보고는 새롭지 않다. 게다가 그런 이유로 화폐와 다르지 않은 석유 가격이 가파르게 오르고 있다. 굳이 따진다면 석유가 에너지원으로만 쓰이는 것은 아니지만, 플라스틱 같은 부산물 때문에 세계가 석유를 놓고 전쟁을 벌인다는 것은 믿기 어렵다. 가까운 시기의 예를 들자면, 근대화 과정에서 석유가 필요했던 일본이 진주만을 습격했다는 설이나 더 가깝게는 미국의 이라크 침공 등, 에너지는 이제 돈과 같이 가진 자와 갖지 못한 자로 나누는 기준이 되어 버렸다. 에너지 없이는 국력을 논할 수조차 없게 되는 현실이 다가오는 것이다. 자신들이 사용할 에너지를 확보해 두지 못한다면, 새로운 시대의 식민지 생활을 받아들일 날이 올지도 모른다.

또 하나의 큰 이유로는 지구 온난화이다. 많은 과학자들이 화석연료 사용의 생산물인 CO₂를 온난화의 주요 원인으로 보고하고 있다. CO₂가 정말 지구 온난화의 범인인지는 알 수 없지만, 그렇다고 믿지 않은 채 결과를 두고 보자고 기다릴 수도 없다. 알아볼 수 있는 유일한 방법은 다시 한 번의 재앙과 빙하기를 맞아 보는 것뿐이기 때문이다. 지구 온난화 과정이 진행중인 것은 명백하다. 예를 들어 남반구에서 가장 큰 빙하인 Upsala 빙하의 얼음밭들이 현재는 거의 모두 호수 상태로 바뀌어 있다.

CO₂가 태양빛 중에서 열선을 흡수하는 것은 과학적으로 이미 상식이 되어 있다. 그러나 열선을 흡수하는 것은 CO₂뿐만이 아니라, 공기 중의 수분도 있다. 그 외에도 대부분의 유기 화합물은 열선을 흡수한다. 따라서 대기 오염 전체가 지구 온난화를 부추기고 있다고 해도 과언이 아니겠다. 게다가, CO₂는 물에 녹으면 물을 산성으로 만든다. 이는 CO₂가 물과 합성되어 H₂CO₃를 형성한 다음 H⁺와 HCO₃⁻로 해리되기 때문이다. CO₂의 공기 중 농도가 짙어 지면서 바다로 녹아 드는 CO₂의 양도 늘고, 바다 표면과 심해와 쉽게 평형이 이루어지지 않는 곳은 산성화되게 된다. 이렇게 산성화된 얇은 바다의 산호들은 이미 표백되고 있다고 한다. 산성비에도 영향을 준다. CO₂는 공기 중에서는 수분을 만나 같은 이치로 산성비를 만들고 다시 강과 바다로 유입된다. 물론 NO_x So_x 등에 의해서도 비슷한 영향으로 산성비를 초래한다.

이런 이유들로 인해 화석 연료를 줄이자는 노력이 있어 왔다. 대표적인 것으로는 2005년 교토 의정서로 CO₂ 감축을 위해 각 나라들이 최선을 다한다는 내용이다. 지구 온난화 위험성을 인류에 경고한 공로로 Al Gore는 노벨평화상을 받았다. 우리 나라는 의무 감축국은 아니지만, 재

양을 피해갈 수 있는 나라도 아니므로 CO₂ 감축에 최선을 다해야 할 것이다.

다. 대체 에너지 종류[2]-[5]

여러 종류의 대체 에너지가 있지만, 가장 강력한 대안으로 언급되고 있는 것은 핵분열을 이용한 원자력 발전으로 현재 우리가 필요로 하는 에너지의 약 3% 정도를 담당하고 있다. 무한청정 깨끗한 에너지를 표명하고 있지만 잠재된 위험성이 너무 크다. 이러한 위험성 때문에 독일, 미국 등 많은 선진국에서는 기존의 원자력 발전소 외에 추가 건설을 보류하고 있다. 독일과 영국 등은 2006년 기준 우리나라보다 적은 수의 원자력 발전소를 가지고 있으며, 우리나라가 현재 건설 중이거나 계획한 것을 고려하면, 곧 우리나라는 독일을 제치고 원자력발전 세계 5위 국가가 된다.

원자력 발전소 한 기의 발전 용량은 평균 1GW(gigawatt = billion watts)로 2005년 기준 핵발전 용량은 약 366GW를 이루고 있다. 이는 1986년 체르노빌 재앙 당시보다 약 100GW 증가한 것으로 이런 속도로 사용한다면 국제적으로 사용 가능한 핵연료는 길어야 50년을 넘지 않는 것을 보고되고 있다[3]. 이러한 데이터를 근거로 하더라도 인류가 1년에 사용하는 약 15 TW에 공헌할 수 있는 비율은 크지 않다.

신재생 에너지로 언급되는 것으로는 바이오, 풍력, 지열, 해양, 파도 등을 이용하는 방법들이 있다. 먼저 바이오 에너지의 경우 브라질의 대규모 에탄올 생산 같은 것을 예로 들 수 있는데, 이 경우 CO₂ 감소에 특별한 영향을 주지 못한다. 석유 생산의 감소에는 영향을 줄 수 있지만, 에탄올 역시 탄소를 주축으로 하는 유기 분자이므로 태우면 CO₂가 발생하게 된다. 그러나 이는 대기의 CO₂를 흡수하여 재생된 에너지로 고려 CO₂의 발생을 무시한다 하더라도 광합성에 의한 식물의 에너지 축적은 그 효율이 0.3% 밖에 안 된다. 이런 계산에 의하면 20 TW의 에너지를 얻기 위해서는 지구 대륙의 30% 이상을 식물을 위한 농장으로 만들어야 한다. 이런 비현실적인 응용을 해결하기 위해 고효율 고성장 식물의 개발에 대한 연구가 진행중이지만, 기대하기 어려운 현실이다.

풍력에 대한 논의는 아직 의견이 분분하다. 현재 풍력 에너지의 생산 가능성에 대한 계산법은 점적 계산법으로 설치점의 전력 생산량을 설치 면적에 비례시켜 계산하는 방식이다. 그러나 풍력 발전기가 설치된 경우, 후방에 설치된 풍력 발전기는 이미 줄어든 풍력을 사용하게 된다. 전방의 발전기가 효율적으로 바람의 에너지를 뽑아낼 경우 선으로 연결된 풍력 발전기가 설치된다면 그 뒤쪽에서는 에너지를 얻을 수 없게 된다. 이런 선적 계산법을 이용하여 재계산할 경우 풍력 에너지는 전체 필요량에 비해 매우 적은 양만 생산하게 된다. 실 계산 예를 보면, 미국의

North Dakota 의 유효 면적에 5%의 공간을 주면서 전 주에 모두 풍력 발전기를 설치할 경우 1년 간 겨우 약 0.5TW 를 얻을 수 있다고 한다. 전세계에 설치한다고 하더라도 2~4TW 이상을 얻기는 힘들 것이라는 계산이다.

해양의 파도에서 에너지를 얻는 경우는 더욱 비현실적이다. 조력 에너지와 파력 에너지, 온도차를 이용한 에너지의 경우도 2030년까지 국내의 확보 예정량도 겨우 2MW(megawatt=million watts)로 원자력 발전소 1기의 1GW 를 비교로 하더라도 형편없다.

라. 태양에너지 필요성[2]

Caltech 의 Lewis 는 이 질문에 대해 ‘Willie Sutton 원리’로 대답하고 있다. Willie Sutton 은 미국의 한 은행강도로 매우 오랫동안 잡히지 않고 많은 은행을 털었다. 그가 법정에서 왜 은행을 털었냐는 질문을 받았을 때, ‘거기에 돈이 있었기 때문에’라고 답했다. 유사하게 ‘왜 태양에너지라야 하는가’라고 묻는다면 그건 바로 가장 큰 에너지원이 거기 있기 때문이라고 하겠다. 태양은 지구에 연간 약 120,000TW 를 제공한다. 시간으로 계산한다면, 지구에 오는 에너지를 1시간만 받으면 현재 우리가 1년간 사용하는 에너지를 얻게 되는 것이다. 앞서 보여준 미국의 에너지 사용량인 3.5~4TW 를 얻기 위해서는 약 10% 효율의 태양전지를 Utah 주의 80% 정도만 설치하면 된다.

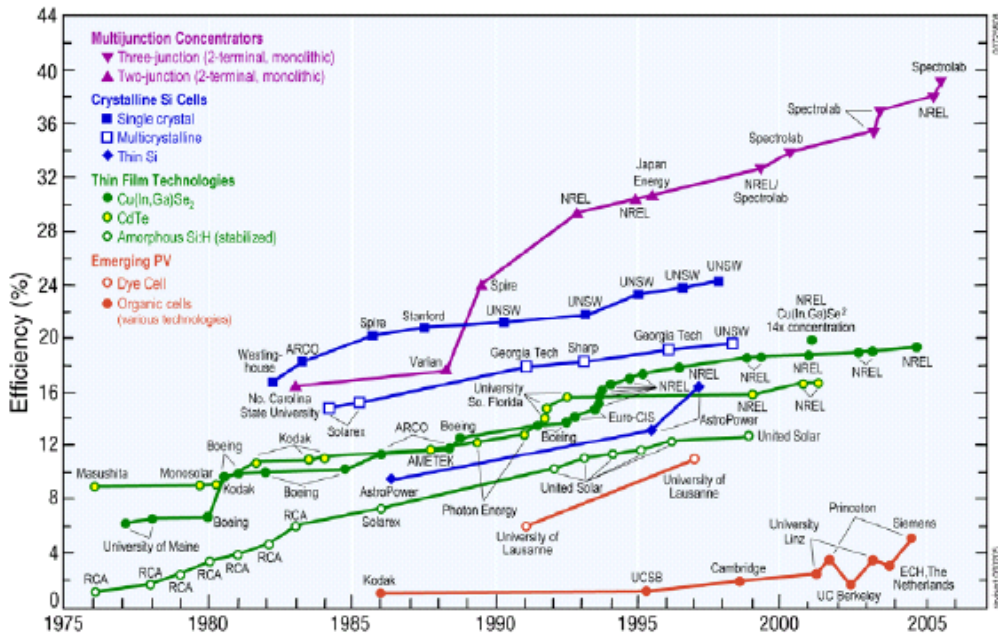
이처럼 재생 에너지 중에서 가장 에너지원의 크기가 크며, 실현성도 가장 높은 것이 태양에너지의 이용이다. 태양전지를 이용하여 전기를 직접 생산할 경우, CO₂의 염려로부터 자유로워짐은 물론 원자력 발전과 같은 위험 요소도 없어서 가장 이상적인 대체 에너지로 여겨지고 있다.

이렇게 모든 것을 해결해 주는 이상적으로 보이는 태양전지가 왜 재생 에너지 중에서도 가장 낮은 0.03%의 생산량만 보여주고 있는가? 전체 에너지 소비량을 고려한다면 태양전지의 발전량은 0.0008%에 불과한 양이다. 그 이유는 현재의 발전 단가이다. 2002년 미국의 보고서에 의하면 kWh 당 발전 단가는 석탄, 석유, 풍력, 원자력 등이 모두 몇 센트에 불과한데 반해, 태양전지의 경우는 최고 50센트까지로 최소한 5배 이상의 비용을 지불해야 한다. 일본의 경우 태양전지의 설치비를 지난 10년간 약 65% 이상 감소시켰지만, 여전히 다른 발전 방법에 비해 매우 비싼 상황이다. 발전 단가를 낮추기 위한 방법으로는 대량 생산과 재료의 저가화 등 다양한 방법이 있지만 가장 효율적인 것은 태양발전 효율을 높이는 것이다. 태양전지의 효율이 10% 증가되면 비용이 그만큼 줄어들게 되는 것이다. 일반적인 폴리실리콘 태양전지 모듈의 경우 현재 약 6% 정도의 효율을 보이는데 이 효율이 7~8%로 증가하면 15~30% 정도의 비용 절감을 이룰 수 있게 되는 것이다. 따라서 효율을 증대시키기 위한 노력이 가장 많이 되고 있다.

2. 태양전지 종류 및 효율

가. 현재 개발 진행중인 태양전지 종류[6]-[7]

(그림 1)에는 대표적인 태양전지의 효율 증대가 연대별로 정리되어 있다. Tandem 의 효율 증가를 제외하면 대부분 획기적인 약진없이 완만한 증가를 보이고 있다. 이 중 현재 발전용을 비롯한 상업화 길에 들어선 것은 실리콘이 대표적이다. 현재 모든 태양전지 시장의 95% 이상을 실리콘이 차지하고 있다. 단결정 및 다결정 Si 의 경우 모듈 효율 12~15% 정도로 높은 것을 장점으로 시장의 80% 이상을 차지하고 있지만, 생산공정이 상대적으로 많이 걸리는 단점 때문에 시장 점유 감소가 예상된다. 실리콘 태양전지의 가장 큰 라이벌로 등장하고 있는 태양전지가 구리, 인듐, 갈륨, 셀레늄을 적절히 조합하여 제조하는 CIGS 이다. CIGS 의 경우 인듐 원소의 공급이 불안정해서 아직 시장 형성은 크지 않다. 최근 미국 최대의 인터넷 검색엔진사인 구글이 투자한 Nanosolar 의 경우 미국 Sandia National Lab.으로부터 기술이전을 받은 후, 프린팅의 방식으로 쉽게 제작이 가능한 CIGS 잉크를 성공적으로 개발하였다. 이로써 구부림이 쉬운 전지 개발은 물론 기존 태양전지 시장에도 진출하였다. 그 외에 큰 시장을 가지고 있는 재료로는 CdTe 가 있다. CdTe 는 독성 때문에 일부 국가에서 규제를 받기도 하지만, 독일 Antec 과 미국 First



(그림 1) 대표적인 태양전지 효율 증대표

Solar 라는 회사가 주력으로 생산 판매하고 있으며, Q-cell 등이 기술 연구 중이다. GaAs 는 단일 태양전지로서는 가장 높은 효율을 내는 태양전지이나, 집광형 태양전지를 사용하지 않으면 가격이 너무 높아서 현재 절대적으로 필요한 우주 산업의 경우 외에는 거의 시장이 형성되어 있지 않다. 그 외, 염료 감응 태양전지는 일반 태양전지와 달리 반투명하고 다양한 색상 접근이 가능하다는 점과 상대적으로 재료면에서 저렴하다는 장점을 들어 시장 형성을 준비 중이나, 액체 전해질을 요구하는 시스템의 특성상의 어려움을 해결이 요구되고 있어 현재 이 부분에 대한 연구개발이 진행중이다.

각 태양전지의 구조는 대부분 p-n 접합 부분을 중심으로 전자와 정공이 생성된 후 분리되고, 회로를 따라 돌면서 일을 하게 된다. 이런 p-n 접합 태양전지는 소수나르개(minority carrier)에 의해 그 전류값이 결정된다. 반면 염료 감응 태양전지의 경우 다수나르개(majority carrier)의 값에 의해 전류값이 결정된다는 점에서 원리부터 조금 다르다. 빛을 흡수하는 것은 염료로, 염료가 들뜬 전자를 TiO_2 의 전도성띠(conduction band)에 전자를 넘겨주고 회로를 돌아 반대 전극에서 전해질로 전자가 넘어가면, 전해질이 전자를 다시 염료에게 넘겨주는 구조를 따르는 것으로 보고되고 있다.

1993년부터 6개월마다 발표되는 ‘progress in Photovoltaics’는 실험실 수준의 단위 태양전지와 모듈의 공인된 효율을 발표하고 있다. 가장 최근에 발표된 2007년 6월 자료에 의하면 실리콘의 경우 여전히 UNSW(University of New South Wales) M. Green 박사팀의 단결정 태양전지가 24.7%의 효율을 보였으며, GaAs의 경우 결정상태의 Kopin사 태양전지가 25.1%를 기록하였다. 최근 다시 관심을 받고 있는 CIGS의 경우 NREL(National Renewable Energy Lab)의 18.8%가 최고 기록이며, 염료 감응 태양전지로는 Sharp의 10.4%가 공인된 최고 기록이다. 실제 상용화 가능한 모듈의 경우 실리콘은 USG solar의 9.8%, CIGS는 Uppsala 대학의 16.6%, 염료 감응 태양전지는 Sharp의 6.3% 등의 기록이 최고로 알려져 있다. 유기 태양전지의 경우, 최근 Allen J. Heeger 그룹에서 10% 내외를 발표하였지만, 아직까지 공식적인 기록은 Sharp의 3%가 전부이다.

나. 현재 운용중인 대표 프로젝트[8]

Tandem 태양전지를 제외하면, 각 태양전지의 한계는 이미 온 것으로 보고 있다. 새로운 이론의 적용보다는 고순도, 고가의 재료를 이용해 효율을 올리는 것으로 상업화를 위해서는 별 의미가 없다는 견해가 강하다. 이런 상황에서 새로운 패러다임을 제시한 것으로는 두 가지 형태가 있다. 다양한 빛을 흡수하는 층을 이용하는 tandem 태양전지가 그 첫 번째로, 비슷한 전류의 생

성을 이루는 각각의 태양전지를 직렬로 연결하는 형태를 이룬다. 이미 높은 효율을 내고 있지만, 더욱 다양한 조합을 이루어 최대한의 태양빛을 이용하려는 노력이 계속되고 있다. 첫 번째 보다 더 파격적인 또 하나의 시도로는 매우 저렴하고 고효율의 양자점을 이용하는 태양전지이다. 양자점을 이용하는 경우는 다양한 크기와 특성의 조합으로 그 동안 불가능으로 여겨졌던 단일 광자로 한 개 이상의 전자와 공정 쌍을 생성함으로써 효율을 높이는 것이다. 이는 Auger 가 발견한 현상을 응용한 것으로 전이금지띠 이상의 빛이 전자를 생성하는데 쓰인 에너지 외에 추가적인 열로 버려지는 에너지도 모두 전기로 바꾸겠다는 것이다. 나노입자들은 다양한 전이금지띠의 에너지가 크기 혹은 모양에 의존하는 현상을 보인다. 이런 대표적인 물질로는 PbSe 가 있다. 이런 응용을 성공적으로 이끌기 위해서는 다양한 나노 입자들을 합성하고, 그것들을 잘 조합하는 일뿐만 아니라, 나노입자들이 빛을 받아 생성해낸 전자나 정공을 효과적으로 뽑아내는 일이 필요하다. 현재 NREL 과 LANL(Los Alamos National Lab.)에서는 이미 다양한 나노 입자들을 제조하여 이 현상을 입증하였지만, 효율적으로 회로까지 뽑아내는 일을 성공시키지는 못하고 있다. 이에 세계 각 석학들은 현재 다양한 방법을 이용하는 시도를 보이고 있으며, 국내에서는 가장 처음 한국화학연구원의 석상일 박사팀이 과학기술부 글로벌 연구실 사업으로 이 일을 시도하고 있고, 고려대학교의 김동환 교수 연구팀 역시 최근 연구를 시작하였다.

각 기관별 에너지 확보에 대한 프로그램도 빠르게 형성되고 있다. 대표적인 곳으로는 LBNL (Lawrence Berkeley National Lab.)으로 UC at Berkeley, Berkeley West Biocenter 등과 파트너를 형성하여 Helios 프로젝트를 2007 년부터 시작하고 있다. 이 프로젝트는 Paul Alivisatos 가 연구책임을 맡고 있으며 인공 광합성과 전기화학 전지를 이용하거나, 식물로부터 직접 수소 및 하이드로카본을 생산하는 것을 연구하게 된다. 또다른 접근으로는 10 년 내에 자연에 매우 풍부한 재료를 이용하여 저효율(약 1%)이더라도 대량 생산이 가능한 물질을 찾아내는 일을 연구하게 된다. 앞서 설명한 것처럼 현재의 식물 광합성은 그 효율이 0.3% 정도에 미치지 않으므로 1% 효율은 매우 큰 발전이라 하겠다. 이런 프로젝트를 성공적으로 수행하기 위해서는 나노 과학의 도움이 절대적이다. 효율적인 양자점 이용을 성공적으로 이끌고, 반도체 기술과 융합 접목시키는 기술, 촉매 기술 등이 조화되면 10 년 내에 가시적인 성과를 볼 수 있을 것으로 예견하고 있다. 우리나라의 경우 이 프로그램에 대한 공동 연구를 고려하고 있으며, 현재 기획 단계에 있다. 확정될 경우 결과의 공동 소유 등의 조건으로 프로그램에 참여하게 된다.

2005 년에 확정된 태양전지의 가장 큰 정부 투자금은 University of Delaware 가 확보하였다. 이 학교는 MIT, Harvard, Yale 등의 대학 연합과 BP 등의 에너지 대기업과 함께 수행하고 있다. 10 년간 효율을 두 배(약 50%)로 증가시키겠다는 목표로 시작된 이 프로젝트는 대부분의

결과물을 군사적으로 이용할 의도로 표명하고 있다.

단결정 실리콘 태양전지의 기록을 계속 경신하고 있는 호주의 UNSW 의 Green 교수팀 역시 새로운 기술의 선두 주자로 나서고 있다. 단결정 실리콘의 최고 효율을 보유하고 있는 이 팀은 현재 나노 입자를 이용한 효율 극대화를 시도중이다. 또한 GaAs 태양전지의 제조 비용을 낮추는 연구도 시작하였다. GaAs의 경우 고가의 GaAs wafer에 증착 방법으로 태양전지를 제조하는데, 'lift-off' 방법을 이용하여 기판의 가격을 낮추고, 만들어진 태양전지에 빛을 효율적으로 가두어 사용할 수 있는 방법을 연구중이다.

3. 발전 방향

태양광 에너지의 확보는 단순한 에너지 공급의 문제를 넘어서, 국가의 안정과 밀접한 관련이 있음을 다시 강조할 필요는 없을 것이다. 21세기 신재생 에너지 시장을 선점하려는 각국은 시장 형성과 연구 개발을 무기로 소리 없는 전쟁을 시작하였다고 할 수 있다. 대부분 태양전지의 원천 기술의 소유권은 이미 소멸되었으나, 효율 증대를 위한 신개념 추가 기술을 먼저 확보하고자 하는 노력이 이제 막 시작되었다. 특히 나노 기술을 접목시키는 태양전지의 경우 그 시작이 미미하여 더 늦기 전에 따라잡지 않으면 NT 강국의 자리를 확보할 수 없게 된다. 이를 위해서는 정부의 절대적 지원과 산·학 협동 연구를 통한 효율 증대와 재료비 감소라는 두 마리 토끼를 모두 잡는 노력이 절실하다.

나노 기술이 접목된 태양전지의 경우, 국제적 시작이 아직 걸음마 수준임과 우리나라의 NT 기술의 우수성을 고려한다면 아직 늦지 않았다. 기존 태양전지의 시장 형성과 더불어 신기술을 통한 효율 혁신을 이룬다면, 상업화 과정은 국가 보조금이 폐지되더라도 어렵지 않을 것으로 확신한다.

<참 고 문 헌>

- [1] U.S. Government Printing Office, "National Energy Policy," 2001. 5.
- [2] MRS Bulletin, "Powering the Planet," 2007. 10.
- [3] JAIF, "원자력 발전 산업 회의"
- [4] WISE/NIRS, "Nuclear Monitor"
- [5] 해양수산부, "해양 한국(Ocean Korea 21)," 2003. 2.
- [6] NREL, "Best Research-cell efficiencies," 2007.
- [7] prog. Photovolt. Res. Appl., "Solar Cell Efficiency Tables(version 30)," 2007. 6.
- [8] PVSEC 17, "17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference," 2007. 12.