

# 결정질 실리콘 태양전지 기술현황 및 시장동향

유진수 선임연구원 (한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부 태양광연구단)

## 1. 서론

전 세계 에너지전망에 따르면, 2007년 기준으로 화석연료는 석유 40%, 천연가스 23%, 석탄 22%로 전체에너지 수요의 85%를 차지하고 있다. 또한 2030년에는 석탄 29%, 석유 30%, 천연가스 22%로 석유의 비중이 줄어드나 석탄의 비중이 늘어남에 따라 큰 감소가 나타나지 않을 것으로 예상된다. 특히, 중국, 인도, 러시아, 브라질 등 신흥 개도국들의 산업화에 따른 전력 사용량 급증은 에너지 자원의 수요 증가로 인한 화석에너지의 사용량 증가로 이어지고 있으며, 수요증가와 더불어 화석에너지를 미리 확보하기 위한 선진국 및 신흥개도국들의 움직임으로 화석에너지 가격의 지속적인 변동이 예상된다. 이러한 화석연료의 의존도가 지속될 경우, 머지않아 고갈될 것이고, 화석연료에 의한 환경오염은 심각한 수준에 이를 것이다. 따라서 2007년 다보스포럼에 참가한 CEO의 38%가 지구온난화 방지를 최우선 의제로 선택하였으며, FT 선정 세계 500대 기업의 70% 이상은 온실가스 증가에 의한 기후변화를 기업 경영의 위기 요인으로 지목할 만큼 선진국들은 적극적인 대내외 전략을 수립하고 있다. 현재 우리나라는 OECD 국가 중 1990년 대비 온실가스 배출증가율 1위 국가로 이산화탄소 배출비중 세계 9위의 온실가스 배출 국가이므로 “포스트 2012” 체제에서는 온실가스의 무 감축 대상국에 포함될 것이 확실 시 되는바, 최근 이명박 대통령도 8.15 경축사에서 우리나라의 미래

60년 에너지 비전으로 ‘저탄소 녹색성장’을 강조하면서 신재생에너지 육성에 따른 환경문제 개선의 필요성을 강조했다. 그 중에서 태양광산업은 고유가시대 화석에너지의 대체, 온실가스 절감효과, 관련 산업의 성장에 따른 이윤창출 측면에서 에너지 수급 안정, 환경보존, 경제성장의 순환 고리를 이어주는 핵심 역할을 할 수 있는 중요한 산업으로 주목 받고 있다. 국내 에너지 발전량 중 신재생에너지가 차지하는 부분이 2.5%로 크지 않으며, 이중 약 90% 정도가 폐기물과 소수력이 차지하고 있기 때문에 국내 태양광발전이 차지하는 비율은 상대적으로 작은 부분임을 알 수 있다. 따라서 반도체, LCD산업 및 정밀 화학부문의 산업인프라를 활용하면 반도체, 디스플레이 이후의 차세대 성장동력산업으로 육성이 가능할 것으로 전망한다.

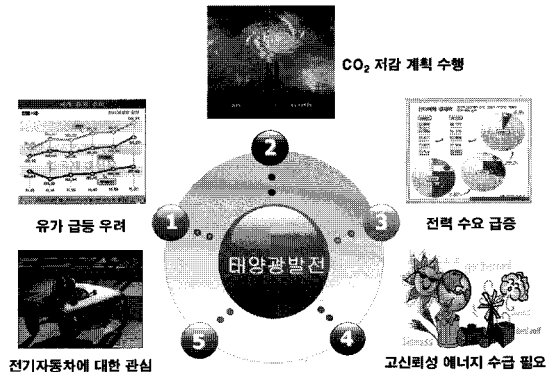


그림 1. 태양광 산업의 필요성.



## 2. 기술의 개요 및 제조 공정

본 장에서는 전 세계에서 가장 산업화가 활발히 진행되고 있는 결정질 실리콘 태양전지 기술 개요 및 제조에 필요한 공정 요소를 설명하였다.

### 2.1 기술의 개요

일광을 태양전지에 의해 전기로 변환해주는 태양광발전 (Photovoltaics, PV) 기술은 심각한 에너지부족에서 유발되는 위협으로부터 인류를 구원할 유망한 차세대 대체에너지인 것이다. 또한 태양광발전시스템은 환경친화성, 신뢰성, 유지보수의 용이성 및 모듈화가 우수하기 때문에 전 세계적으로 관심을 받고 있다. 이러한 이점에도 불구하고, 전 세계 에너지 생산량에 대한 태양광발전의 비율은 상대적으로 높은 가격 때문에 여전히 낮은 수준이다. 태양광발전의 단가를 절감하기 위한 가장 효율적인 방법은 대량 생산을 위해 소형의 수동형 생산라인을 전 공정 자동화가 가능한 생산라인으로 개선하는 것이다. 특히, 결정질 실리콘 태양전지 생산을 위해, 상이한 단계에서 개선을 요구하는데, 태양전지급 (Solar-grade) 재료의 생산, 웨이퍼로 절단되는 실리콘 잉곳 (Ingot), 태양전지 제조를 위한 웨이퍼 가공 및 모듈 조립이 그것이다. 태양전지로 제조되는 웨이퍼 공정 분야는 효율의 개선이 선행적으로 부가적인 태양광 발전에너지 출력으로 나타나기 때문에 중요한 역할을 한다.

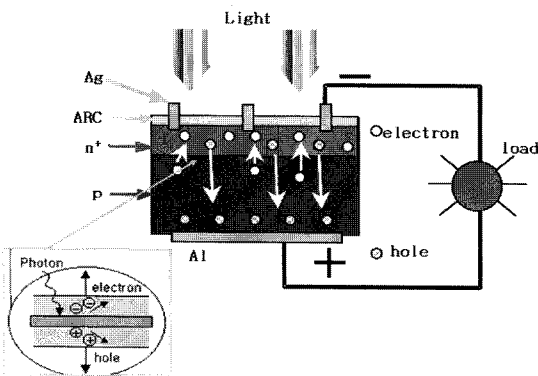


그림 2. 태양전지 원리.

태양광발전의 핵심 소자인 태양전지의 구조는 그림 2와 같이 p-n 접합으로 구성된 반도체 소자에 금지대폭보다 큰 에너지를 가진 파장영역의 태양광이 입사되면 광에너지에 의해 전자-정공쌍이 여기 되고, 내부전계에 의해 분리된 전자와 정공이 이동하여 n층과 p층을 각각 음극과 양극으로 대전시킴으로써 기전력이 발생하며 외부에 접속된 부하에 전류가 흐른다. 즉, 태양전지는 빛을 전기에너지로 변환하는 발전소자이다.

### 2.2 제조 공정

실리콘 기판이 준비되면 기판 절단 시 발생하는 손상제거와 표면에 조직화 (Texturing)를 위한 공정이 필요하다. 표면 조직화에 의한 빛 수집의 목적은 전면에서의 반사율을 감소시키고, 태양전지 내에서 빛의 통과길이를 길게 하며, 후면으로부터의 내부 반사를 이용하여 흡수된 빛의 양을 증가시키는 것이다.

표면 조직화된 웨이퍼는 3족과 5족에 속하는 불순물 원자의 전도성과 불순물 분포를 제어하여 p-n 접합을 형성하는 확산 공정을 수행한다. 불순물 확산 기술은 산화막을 확산 마스크로 사용한 선택 확산 방법으로 반도체 소자뿐만 아니라 고효율 태양전지를 제조하는데도 사용하며, 불순물 농도의 정밀 제어 및 얇은 p-n 접합의 형성 등의 중요한 기술이 요구된다. 그 불순물 주입 기술에 필요한 것은 불순물의 농도 분포 제어뿐만 아니라 불순물 표면 농도와 불순물 주입 깊이 (Junction Depth)의 제어가 있다.

수소를 포함하고 있는 실리콘 질화막 층은 단 한번의 공정으로 반사방지막과 패시베이션 역할을 하기 때문에 결정질 실리콘 태양전지 제작에 널리 사용되고 있다. 수소화된 실리콘 질화막의 증착 방법에 따라서 막의 화학적, 기계적, 광학적, 전기적 특성과 패시베이션의 효과가 달라진다.

일반적으로 산업계에서 후면전극 인쇄 후 건조, 전면 전극 인쇄 후 건조하여 한 번의 고온열처리로 후면전계와 전면 전극접촉을 동시에 달성하는 Co-firing 방법이 주로 사용된다. 전면 전극인 Ag와 후면 전극으로 AgAl 그리고 Al 금속 사용이 가장 일반적이다.

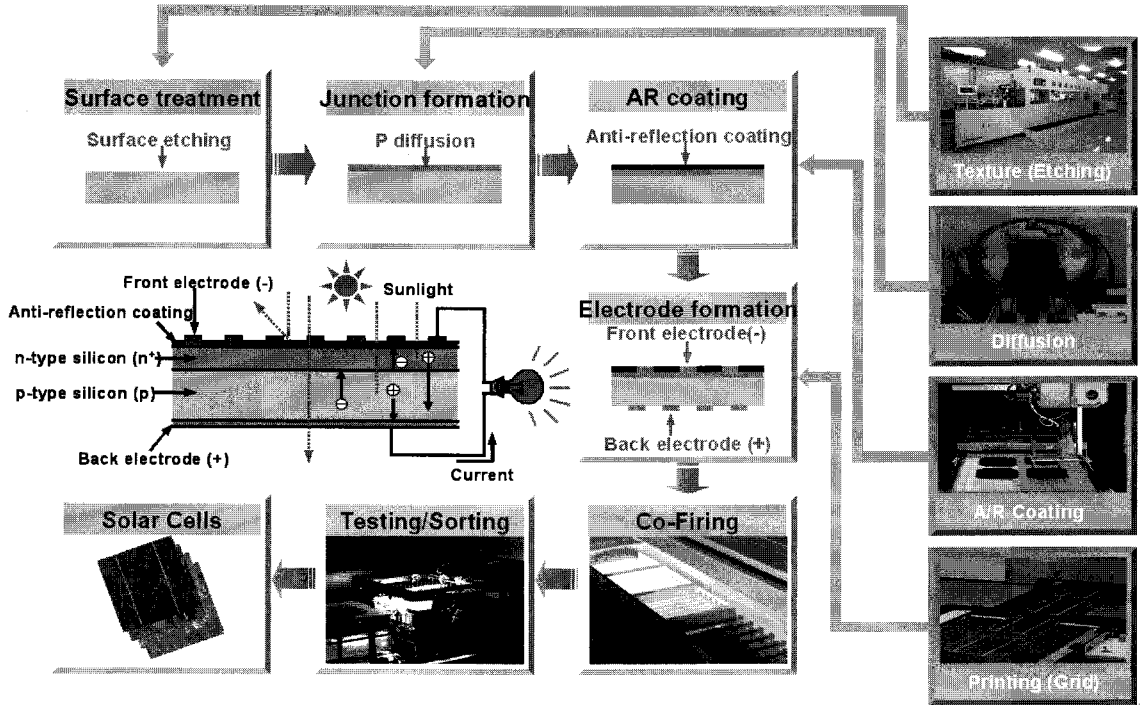


그림 3. 결정질 실리콘 태양전지 제조 공정.

금속전극을 형성하고 나면 후속으로 열처리 과정을 거쳐서 접촉저항 선저항 등을 최소화함과 동시에 후면전계 (Back Surface Field, BSF)를 형성하는 과정을 거치게 된다. 후면전계란 p형 웨이퍼 뒷면에 p+층을 형성하는 것을 말하며, p영역의 전자가 뒷면으로 이동하여 재결합하게 되는 것을 방지하는 역할을 한다. 그 결과 누설전류를 줄이고, 좋은 저항성 접촉 (Ohmic Contact)을 만들어 주는 게 되어 태양전지의 개방전압과 충실도의 향상을 가져오게 되는데, 이러한 저항성 접촉을 형성하기 위한 고온 소결 (Sintering)은 IR 램프에 의해 가열되는 벨트형 노 (Furnace)에서 양면을 동시에 소성하게 된다.

### 3. 기술개발현황

본 장에서는 재료적 특성에 따라 단결정 및 다결정 실리콘 태양전지를 구분하여 현재까지의 국내외 기술개발현황을 설명하였다.

#### 3.1 단결정 실리콘 태양전지

실리콘 태양전지로 PERL (Passivated Emitter Rear Locally-diffused) 구조인 경우 최고 24%의 변환효율을 나타냈다. 이러한 초고효율 태양전지는 공정이 30단계 이상이고 고난도, 고가의 장비와 고비용 제조공정을 사용하고 있어 현재 연구실 수준에서 이루어질 뿐 산업계에 적용하기에는 현실적인 어려움이 있는 실정이다. 산업계에 적용이 가능한 태양전지는 양산화와 대면적화의 요구조건을 만족하는 태양전지 에너지 변환효율은 17% 내외이다.

태양광발전 분야에서 전개되어 생산에 의해 가장 성공한 태양전지구조는 매몰 접촉형 태양전지이다. 이 태양전지구조의 핵심은 웨이퍼 표면 위에 깊고 좁은 홈 (폭 20 μm 이하)을 레이저 또는 기계적으로 구고, 이들 홈에 니켈, 구리, 은 등을 비전해도금 (Electroless Plating) 방식을 이용하여 채워서 형성되는 전면 금속 그리드이다. 스크린 인쇄된 태양전지와 비교하여, 다수의 좁은 폭의 금속 핑거는 약 50%의 그리드 차광 손실감소가 가능하다.



후면전극형 태양전지는 광 조사된 전면의 차광손실을 제거하고 각각의 태양전지의 상호연결을 용이하게 하는 뒷면에 위치한다. 이러한 구조의 Backside-contact 태양전지의 전체 후면은 붕소 또는 인으로 강하게 확산되었고, 강하게 확산된 후면 영역의 넓은 영역은 열산화막에 의해 패시베이션 되었다. n<sup>+</sup>과 p<sup>+</sup>로 확산된 영역을 위한 접촉은 후면 패시베이션 산화막 (피치 약 50 μm)에서 작은 공간을 통해 경유하는 영역이고 Point-contact 태양전지로 언급되기도 한다.

Sanyo 연구소에서는 결정질 실리콘 웨이퍼가 Intrinsic과 비정질 실리콘으로 도핑된 층으로 구성된 이중층으로 매우 효과적으로 패시베이션될 수 있다는 것을 발견했다. n형, 1 Ω-cm, CZ 웨이퍼 (전면에 a-Si BSF와 a-Si/c-Si 이중접합을 형성하는) 양면에 소위 HIT(Heterojunction with Intrinsic Thin layer)의 적용은 20% 이상의 우수한 1-sun 효율을 나타냈고, 접합은 매우 낮은 온도 (200 ℃)에서 형성되었다. 위에서 설명된 대표적인 고효율 단결정 태양전지 특성 및 구조를 표 1에 요약 정리하여 나타내었다.

### 3.2 다결정 실리콘 태양전지

표 2는 대표적인 고효율 다결정 태양전지구조를

설명하였다. 다결정 태양전지의 효율에 대한 발전은 3개의 범주로서 첫째는 소면적(1-4 cm<sup>2</sup>) 연구용 태양전지기술의 발전그룹, 둘째는 양산용 및 연구용 대면적 (≥243 cm<sup>2</sup>) 태양전지기술, 셋째는 양산용 대면적 태양전지기술로서 현재는 양산용의 일반적인 다결정 태양전지 변환효율은 13.5-16% 수준이다.

초기의 연구용 태양전지개발에 있어서는 게더링과 결함 패시베이션을 통한 효율향상이 진행되었으며, 1989년에는 UNSW에서 17.8%의 다결정 실리콘 태양전지를 처음으로 개발하여 양산을 위한 기초가 되는 중요한 밑거름으로 작용하였다.

또한 GIT는 포토리소그래피, 이베퍼레이터와 Forming Gas 열처리를 이용하여 18.6%의 다결정 태양전지를 제작하였고, UNSW는 포토리소그래피와 이베퍼레이터 또한 벌집모양의 텍스처를 이용한 PERL구조를 가진 19.8%의 다결정 태양전지를 개발하였으나, 연구용의 태양전지 기술은 대면적 태양전지의 개발에 쉽게 접목되지는 않았다.

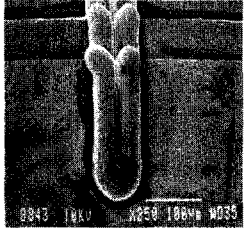
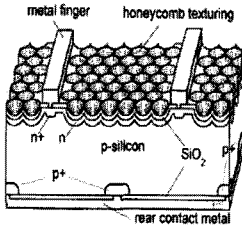
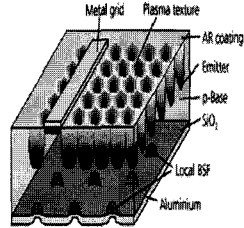
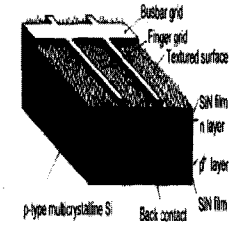
독일 프라운호퍼연구소에서는 20.3%의 효율을 보유한 다결정 실리콘 태양전지를 가능하게 하였고, 후면에 국부적인 금속전극 접촉을 통한 다결정 태양전지 고효율 달성에 신기록을 2006년 달성하였다.

최근에 SiN과 RIE 건식식각을 이용하여 2006년 Kyocera (일본), 2009년 Mitsubishi (일본)에서 각각

표 1. 대표적인 고효율 단결정 태양전지.

PERL(Passivated Emitter and Rear Locally Diffused)	Buried-contact	Backside-contact concentrator	HIT(Hetero-junction with Intrinsic Thin Layer)
<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ 호주의 UNSW 개발</li> <li>☞ 산화층으로 재결합 방지 강화</li> <li>☞ 빛 흡수 극대화를 위한 이중 반사방지막 채택</li> <li>☞ 24% 이상의 광변환효율</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ 호주의 UNSW 개발</li> <li>☞ 웨이퍼 표면에 레이저 홈 가공 후 식각</li> <li>☞ n+층에 더 높은 농도를 갖는 2번째 인 확산 실시</li> <li>☞ 광변환효율 UNSW: 23% BP Solar: 17-18%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ 미국의 Sunpower社</li> <li>☞ 고가의 FZ 실리콘 기판 이용</li> <li>☞ 후면에 모든 전극이 집적화된 태양전지 구조</li> <li>☞ 전면 광 포획 극대화에 따른 고효율화</li> <li>☞ 25% 이상의 고효율 기록</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ 일본의 Sanyo社</li> <li>☞ n-type Cz 실리콘 기판 사용</li> <li>☞ 단결정 실리콘 기판에 비정질 실리콘 박막을 성장시킨 이중접합</li> <li>☞ 21.4%의 광변환효율</li> </ul>

표 2. 대표적인 고효율 다결정 태양전지

V-groove	Honeycomb	LFC (Laser Fired Contact)	RIE (Reactive Ion Etching) Texture
<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ 일본의 Sharp社 개발</li> <li>☞ 표면 재결합을 줄이기 위해 열산화막 성장</li> <li>☞ Multi-blade wheel grinding 방법을 이용하여 표면에 V-형 홈 형성</li> <li>☞ 광변환효율 18.6% (1 cm<sup>2</sup>) 17.2% (100 cm<sup>2</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ 호주의 UNSW 개발</li> <li>☞ 포토리소그래피, 진공 금속 증착 및 벌집모양의 텍스처를 이용한 PERL 구조</li> <li>☞ 많은 공정 장비의 개발과 공정이 필요하여 대면적 태양전지 접목 어려움</li> <li>☞ 19.8%의 광 변환효율</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ 독일의 Fraunhofer 연구소</li> <li>☞ 소면적의 게터링과 패시베이션 기술</li> <li>☞ 2004년 20.3%의 광변환효율 획득</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ 일본의 Kyocera, Mitsubishi社</li> <li>☞ 대면적 고효율 다결정 태양전지 제작이 가능하며, 박형 태양전지 제조에 적합</li> <li>☞ 광변환효율 Kyocera : 18.5% (2006) Mitsubishi : 18.9% (2009)</li> </ul>
			

18.5, 18.9%의 광변환효율을 가진 15.6×15.6 cm<sup>2</sup> 크기의 다결정 실리콘 태양전지를 개발하였고, ECN에서 400 cm<sup>2</sup> 이상의 크기에서 15% 이상의 효율을 나타내는 대면적 다결정 실리콘 태양전지 양산에 성공하였다.

## 4. 전 세계 시장동향

그림 4에서 나타난 바와 같이, 전 세계 태양전지 생산용량은 2007년의 3,436 MW과 대비하여 약 100% 상승한 6,850 MW로써, 그 중에서 결정질 실리콘 태양전지는 5,960 MW (87%), 박막 태양전지의 890 MW (13%)를 나타냈다. 또한 폴리실리콘의 부족에 따른 웨이퍼의 박형화가 지속됨에 따라 최적의 태양전지 제조공정을 위한 장비기술도 발전하고 있는 추세다. 향후 전망에 의해 예측된 생산량은 시장성장 조건과 연관된 재고 변화 및 시장 수요에 많은 영향을 받는다. 생산은 제조 용량과 직접적으로 연관되는 것은 아니지만, 만일 제조용량을 충분히 활용하지 않는다면 수요증가에 따른 생산이 증가하고 점차적으로 가격의 하락압력에 직면할 것이다.

그림 5는 태양전지 생산용량의 지역적인 분포로서, 2007년에 높은 생산량을 나타냈던 유럽, 중국, 일

본이 감소한 반면, 미국과 주요국 이외 국가에서 크게 증가하였다. 일본의 점유율은 4년 전의 약 40%에서 2007년 26%, 2008년에는 16.2%로 지속적인 감소 추세를 나타내고 있다. 이러한 일본의 상대적인 비율감소의 원인은 2008년 25.8%로 생산량이 감소하였으나 여전히 전 세계 시장에서 영향력을 인정받고 있는 중국의 빠른 성장에서 비롯된다. 또한 유럽에서의 태양전지생산은 약 27.4%로 약간 감소하였고, 미국과 그 밖의 생산국에서는 각각 13.7%, 16.9%로 크게 증가하였다.

태양광 설치량은 2003년 이후 지속적인 발전으로 연간 평균 성장률 약 60%를 기록하였고, 누적 태양광설치용량은 전년대비 63% 성장한 15.5 GW에 이른다. 또한 전 세계 2008년 태양광설치량은 전년대비 110% 증가한 5.95 GW를 나타냄으로써, 2007년 2.83 GW에 비해 크게 상승하였다. 따라서 향후 전망(2009년-2013년)은 시장 총액 측면에서 연간 평균 약 17% 성장으로 총 340억 달러 규모의 성장을 예상하였고, 설치량 측면에서는 연간 평균 약 24% 증가하여 2009년 약 6.4 GW에서 2013년 23.4 GW로 상승할 것으로 전망하고 있다. 태양광 시장에서 주요국으로 부상하고 있는 독일과 스페인은 2007년 전 세계 70%로부터 2008년 72%까지 지속적으로 증가 추세이



다. 독일은 2008년 1.86 GW로 전 세계 태양광 설치량의 31%를 점유함으로써 2007년 47%에 비해 크게 감소하는 추세를 나타냈다. 특히 스페인의 경우 2008년 2.46 GW를 설치량은 전 세계 약 41%를 나타내는 수치로써 2007년도에 이어 가장 높은 상승률을 나타내며 태양광시장 확대에 기여하였다. 또한 일본과 미국이 각각 4%, 6%의 점유율을 나타내며 전년도에 비해 감소하였다. 국내시장은 2007년 약 50 MW를 설치하였으나, 2008년도에는 280 MW를 설치하여 전년도 대비 무려 460%의 성장률을 보였고, 전 세계 점유율 면에서도 4.7%를 나타내며 세계 4위의 태양광 설치량을 기록했다.

### 5. 결론

우리가 매일 사용하고 있는 전기는 에너지 변환

과정에서 이산화탄소를 다량 배출하는 높은 가격의 화석연료를 사용한다. 이런 과정에 의해 배출된 이산화탄소는 지구 대기권에 존재하여 마치 지구전체가 비닐하우스를 덮어쓰고 있는 상태와 같은 온실효과의 원인이 된다. 따라서 각국에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 대체에너지 개발노력이 다각도로 진행되고 있는데, 가장 활발히 연구개발이 진행되고 있는 분야 중의 하나가 태양광발전이다.

2003년 이후 지속적으로 높은 성장률을 나타내며 급성장하던 태양광시장은 2008년 하반기부터 시작된 전 세계 경기 불황 및 독일, 스페인 등 주요 태양광시장 국가의 보조금 지원 감소로 인하여 2009년 상반기에는 위축될 것으로 전망하고 있다. 또한 글로벌 시장 점유율을 높이던 중국의 경우 대다수 중

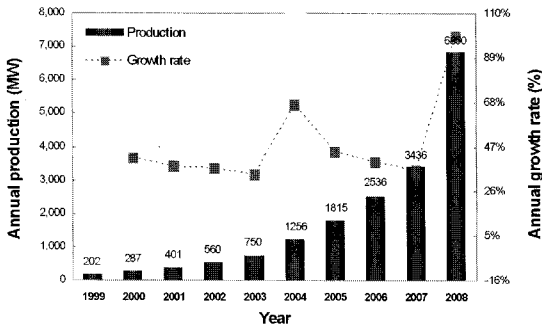


그림 4. 전 세계 태양전지 생산 용량.

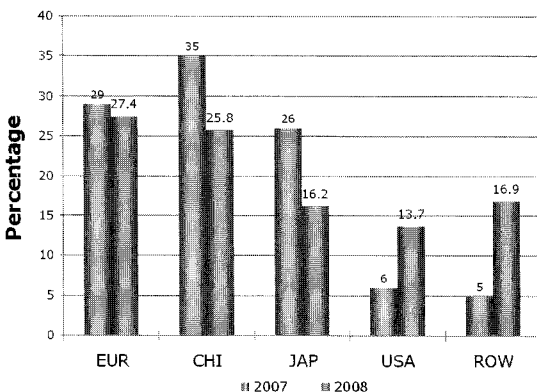
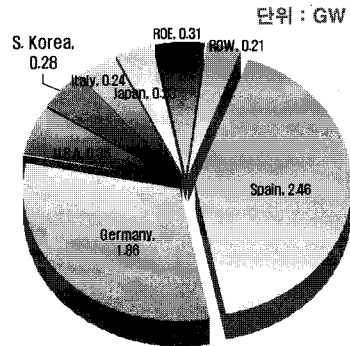
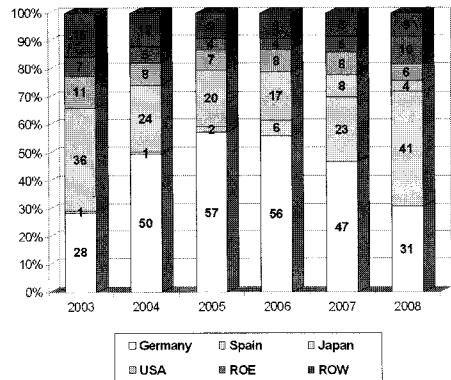


그림 5. 전 세계 태양전지 생산량의 지역별 분포.



Source : Solarbuzz LLC

(a)



(b)

그림 6. 국가별 태양광 설치량 및 점유율.

소기업 규모의 태양광 업체들이 도산 위기에 처해 있으며, 2009년 이후의 시장은 저가의 고품질 제품으로의 기술 선호도가 더욱 확고해 질것으로 예상된다.

하지만, 선진국들의 기후 변화 대응을 위한 적극적인 자세에 힘입어 2009년 후반기부터는 태양광 산업의 재정비가 끝나면서 태양광 산업이 다시 활성화 될 것으로 전망된다. 특히, 그동안 신재생에너지 산업 지원에 소극적인 태도를 보였던 미국의 오바마 행정부 출범 이후 적극적으로 신재생에너지 정책을 펼 것으로 기대되면서 미국의 태양광 시장도 급격히 확대될 것으로 기대된다.

국내의 산업인프라는 태양광산업을 육성하기에 양호한 조건을 보유하고 있음에도 불구하고 관련 기술을 적절하게 시스템화하지 못하여 어려움을 겪고 있어 선진국은 물론이고 최근에는 대만, 중국에까지 도전을 받는 상황에 이르렀다.

따라서 국내 기술개발의 부재로 인한 업체 간의 부조화를 상호협력체계의 재정비를 통한 산업 기반 기술개발 구축이 시급하다. 이러한 노력이 결실을 맺기 위해서는 국내 태양광 산업은 당분간 정부지원에 의존해야 하며, 발전차액 지원이 없다면 사업성이 불투명하기 때문에 초기 시장 안착까지 정부의 지원이 필수적이다. 또한 최근 태양광 분야가 폭발적으로 성장한 여파이긴 하지만 장기적 투자가 요구되는 인력양성부분이 상대적으로 취약함에 따라 산업의 발전가능성에 따른 전문 인력 수급 문제가 당면과제로 부각되고 있다.

## 참고 문헌

[1] 이준신, 김경해, "태양전지공학", 도서출판 그린, 2007.  
 [2] Horányi TS, Pavelka T, TüttőP. In situ bulk lifetime measurement on silicon with a chemically passivated surface. Applied Surface Science 1993; 63: 306.  
 [3] Zhao J, Wang A, Green MA. High efficiency PERL silicon solar cells on FZ, MCZ and CZ substrates. In Technical Digest of the 11th International

Photovoltaic Science and Engineering Conference, Sapporo, 1999; 557-558.

[4] Yablonovitch E, Allara DL, Chang CC, Gmitter T, Bright TB. Unusually low surface recombination velocity on silicon and germanium surface. Physics Review Letters 1986; 57: 249.  
 [5] King RR, Sinton RA, Swanson RM. Front and back surface fields for point-contact solar cells. In Proceedings of the 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas. 1988; 538.  
 [6] Cuevas A, Basore PA, Giroult-Matlakowski G, Dubois C. Surface recombination velocity of highly doped n-type silicon. Journal of Applied Physics 1996; 80: 3370.  
 [7] Green MA. Limiting efficiency of bulk and thin-film silicon solar cells in the presence of surface recombination. Progress in Photovoltaics 1999; 7: 327-330.  
 [8] PV Technology, Production and Cost, 2009 Forecast.  
 [9] Gartner reports, "Photovoltaic market to see 17% growth rate"  
 [10] <http://www.solarbuzz.com/>

## 저자약력



성명 : 유진수

◆ 학력

- 2000년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부 공학사
- 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부 공학석사
- 2007년 성균관대학교 전기전자공학 공학 박사

◆ 경력

- 2003년 - 2006년 (주)케이피이 연구원
- 2007년 - 현재 한국에너지기술연구원 선임연구원