

# 웨어러블 디바이스를 위한 태양전지 기술 및 시장 동향

이정구(KISTI), 김제하(청주대학교)

## 목 차

제 1 장. 웨어러블 디바이스 기술 .....	1
1.1. 웨어러블 디바이스 기술 .....	2
1.2. 플렉시블 태양전지 기술 .....	5
1.3. 플렉시블 태양전지 기술의 필요성 .....	7
1.4. 플렉시블 태양전지의 산업 응용 .....	9
제 2 장. 태양광 산업 및 시장 동향 .....	12
2.1. 태양광 시장 동향 .....	12
2.2. 박막태양전지 시장 현황 및 전망 .....	15
2.3. 박막태양전지의 산업 응용 .....	17
제 3 장. 플렉시블 태양전지 기술 분석 .....	22
3.1. 태양전지 기술 분류 .....	22
3.2. 플렉시블(flexible) 태양전지 기술 .....	34
제 4 장. 플렉시블 태양전지의 웨어러블 디바이스 활용방안 .....	49
제 5 장. 결 론 .....	52

## 제 1 장. 웨어러블 디바이스 기술

### 1.1 웨어러블 디바이스 기술

#### 1.1.1 웨어러블 디바이스(wearable device)

웨어러블 디바이스(wearable device)는 무선 센서 및 통신 기술이 융합된 모바일 기기로서 몸에 착용하거나 몸 가까이 두는 소형 전자 기기들을 지칭한다. 핵심 기술로는 센서, 무선통신, 배터리(에너지 전원) 등 하드웨어와 임베디드 소프트웨어, 디지털 신호 처리 등 소프트웨어 기술이 이용되고 있다, 이 웨어러블 디바이스를 안경, 시계, 액세서리처럼 몸에 착용하거나 부착하여 몸의 일부처럼 지니고 다닐 수 있어 언제 어디서나 사용하기 편리하며 지속적으로 사용자와 소통할 수 있다. 손을 사용하지 않고도 실시간으로 주변 환경에 대한 상세 정보나 개인의 신체 변화를 지속적으로 기록해주기도 한다. 이러한 휴대성은 노트북, 전화, 스마트폰을 직접 사용할 수 없는 상황에서 더욱 빛을 발하게 된다. 이미 웨어러블 기술(wearable Technology)은 미래 첨단기술의 메가트렌드로서 자리매김하고 있다. 2013년 웨어러블 디바이스 시장은 14억 달러 규모에 도달하였으며, 2018년에 약 190억 달러로 10배 이상으로 대폭 성장할 것이라고 전망되고 있다.(출처: Juniper Research). 출하량 또한 2013년 5,400만 대에서 2018년에는 1억 5,000만 대로 3배 가까이 규모가 늘어날 것으로 예측됐다.

웨어러블 디바이스가 일시적인 트렌드가 아닌 지속적인 성장 산업으로 자리매김하기 위해서는 시장형성 및 저변확대를 위한 극복요소로서 안정적인 배터리기술(전원기술)과 광대역 무선 통신이 지원이 되어야 하고, 또한 심미적인 가치를 제공해야 한다. 현재 유통 중인 웨어러블 디바이스의 주요 불만 요소로는 ① 짧은 배터리 수명 ② 스마트폰에 의존할 수밖에 없는 네트워크 범위 ③ 액세서리 제품으로서의 개성을 살릴 수 없는 열악한 디자인이 현재의 성능 및 기술수준이다. 먼저, 적절한 에너지공급 수단이 없으므로, 자체 배터리를 갖고 있는 스마트폰이나 네트워크 기기 등의 주변장치로 그 역할이 제한이 되고 있으며, 짧은 배터리 수명으로 인해 항상 착용(always on)의 가치를 제공 하지 못하고 있다.

전원(배터리) 기술은 모바일 컴퓨팅 기술 중 유일하게 기하급수적인 증가 추이에서 예외가 되고 있다. 무어의 법칙(Moor's law)에 의하면 반도체 속도, 저장 용량, 네트워크 속도는 18개월마다 2배 이상 증가하였으나 배터리는 답보상태에 있다. 그렇기 때문에 소비전력을 절약하기 위해 스마트폰이나 무선 액세스 포인트와 같은 네트워크 허브에 의존해야 하며 디스플레이 또한 화려한 색감을 투영하는 대신 화소를 낮출 수 밖에 없다. 또한, 위치 정보를 제공하는 GPS와 같은 기능도 제한적으로 사용될 수 밖에 없는 것이다.

무엇보다도 웨어러블 디바이스의 모바일 특성을 극대화하고 이를 통한 새로운 서비스의 창출을 위해서는 자체 전원(에너지)기술의 개발이 필수적이다. 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 방안으로서 웨어러블 전원시스템 기술의 개발이 필요하다. 이와 같은 기술적 수요를 충족하기 위하여 차세대 태양전지도 웨어러블 디바이스 기술의 핵심 에너지원으로서 플렉시블 태양전지 기술, 플렉시블 이차전지 기술의 개발 및 이 두 기술을 결합 및 융합하는 통합솔루션을 제공하는 방향으로 발전해 나갈 것으로 전망된다.

### 1.1.2 웨어러블 디바이스의 실례

#### ① 스마트 밴드

휘트니스 밴드는 웨어러블 센서를 이용하여 모바일 앱(App) 통해 가공이나 분석된 건강 데이터를 수집하고, 그 결과들은 사용자에게 전달하여 건강상태를 확인할 수 있다. 휘트니스 트래킹 밴드는 가속도계를 활용해 칼로리 소모량이나 보행거리 등의 데이터를 수집함.



출처: 삼성전자

그림 1-1. 스마트 밴드

#### ② 스마트 텍스타일 (지능형 의복)

스마트 텍스타일은 내장된 센서를 통해 정보를 수집, 분석, 보관 및 전송

이 가능하다. 이로써 착용자의 감각이나 시야를 확장시키고 언제 어디서나 유용한 정보를 제공하는데 주로 의료(건강 파라미터 원격 모니터링)부문과 보안(위험 감지 및 구조요청) 목적으로 활용된다.

### ③ 스마트 안경

스마트 안경은 착용 가능한 작은 컴퓨터로 핸드프리 시각 디스플레이를 통해 웹, 문서작성, 메시지 전송, 사진촬영 등의 기능을 가지고 있다. 현재 개인용 투시 장비 같은 스마트 안경 기기에 컴퓨터로 만든 시각 정보(예, 증강현실)를 반영시키는 방식으로, 실시간 정보를 받을 수 있다. 또한 스마트 안경에는 게임용 헤드업 디스플레이도 포함되어 있는데, 인포테인먼트(Information + Entertainment)와 게임, 내비게이션, 응급상황 조치, 원격의료, 수술 등의 목적으로도 활용이 예상되고 있다.

### ④ 스마트 시계

스마트 시계 시장은 애플, 삼성 등 대기업들이 시장을 주



출처: 타미힐피거  
그림 1-2. 스마트 텍스타일



**GOOGLE GLASSES**  
THE FUTURE OF SMARTPHONES

출처: Google  
그림 1-3. 스마트 안경



출처: 삼성전자  
그림 1-4. 스마트 시계

도하여 최첨단 기술과 세련된 디자인을 결합하여 많은 소비자층을 확보할 것으로 기대된다. 애플은 2014년 iWatch를 발매하였으며, 구글이나 마이크로소프트 기업들도 1~2년 내에 자사의 스마트 시계를 공개할 것으로 예상된다. 향후에는 의료 데이터, 음성 제어 기술, 근거리 자기장 통신(NFC) 칩이 스마트 시계와 접목시켜, 스마트 시계 활용 범위가 더욱 확대될 것으로 예상된다.

### 1.1.3 웨어러블 디바이스의 응용 분야

#### ① 의료 분야

웨어러블 디바이스는 의료 분야에 획기적인 변화를 가져오며 개개인의 삶의 질을 향상시킬 수 있는 잠재력을 갖고 있다. 의료 분야에는 두 가지 종류의 웨어러블 기기들을 적용할 수 있는데, 착용자의 활동만을 측정하는 건강 트래커와 의료 진찰 기기로 착용자의 심박 수, 체온 등의 활력증상을 모니터링하여 원격 건강 모니터링이나 원격 진료에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

#### ② 인포테인먼트 및 게임 분야

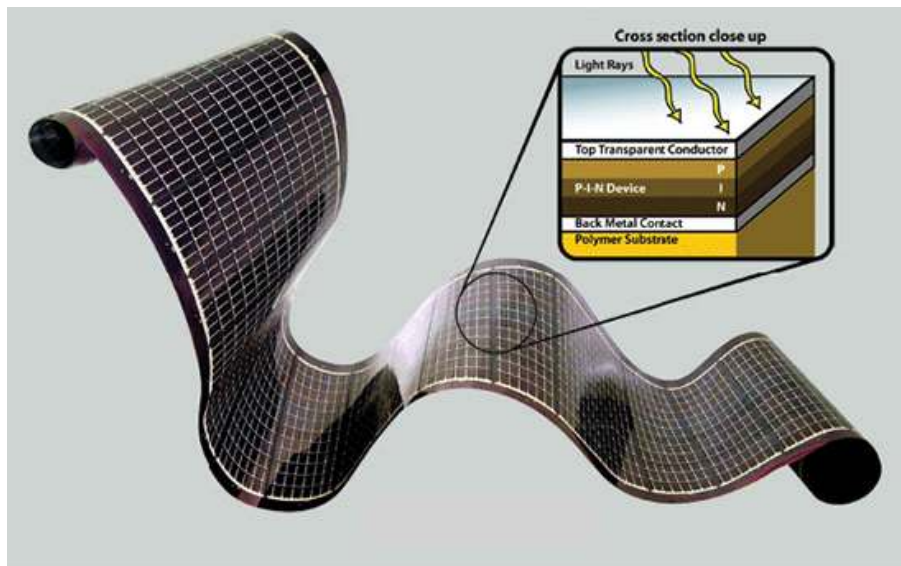
스마트 안경과 스마트 시계는 보다 현실감 넘치는 비디오 게임을 즐길 수 있게 함으로써 인포테인먼트와 게임 환경을 한 단계 진보시킬 수 있을 것이다.

#### ③ 산업 및 군사 분야

스마트 텍스타일로 독성물질을 감지하고 생리 파라미터를 전송하는 등 산업 및 군사용으로 활용 가능할 것 예상되며, 스마트 안경은 핸드프리 디스플레이를 통해 지도나 경로 정보를 제공하여 처해진 상황을 보다 긴밀히 인식할 수 있어 군사용으로 활용하기에 적합하다.

## 1.2. 플렉시블 태양전지 기술

플렉시블 태양전지는 광흡수층인 CIGS; CuInGaSe<sub>2</sub>, CdTe, 비정질 Si 등에 따라 구별되며, 플렉시블 태양전지는 유연(flexible)기판(예, 스테인레스 스틸, 플라스틱, 초박형 유리 등) 위에 박막성장을 함으로써 제조하게 된다 <그림 5>. 이 기술의 특징은 고효율의 광전변환특성을 유지하면서도 경량성(40 W/kg, 결정Si → 260 W/kg, CIGS), 유연성 등이 추가 확보되어 건축물, 자동차 및 웨어러블(wearable) 소자의 전원으로서의 활용성이 기대된다.

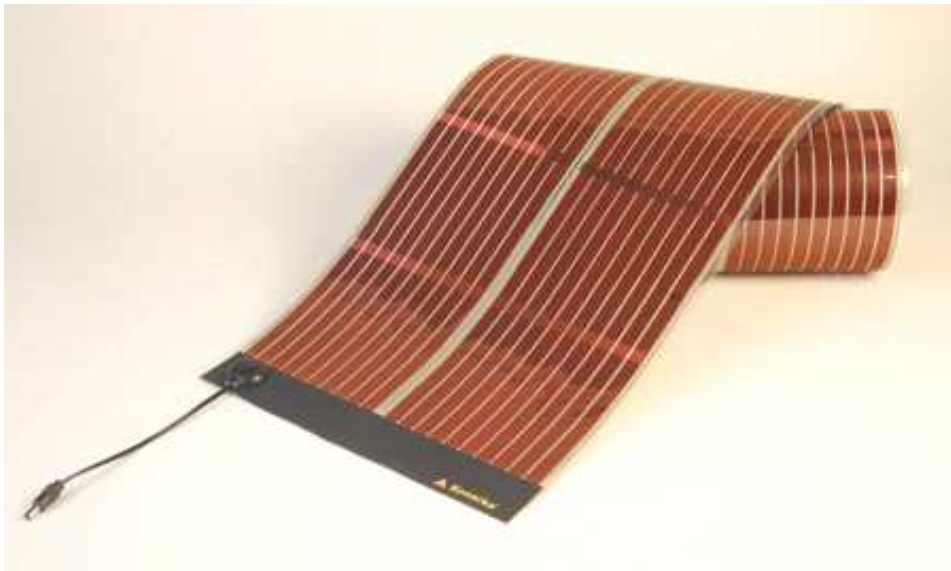


출처: Solar Cells Prezi by Nataly Torres on Prezi

그림 1-5. 플렉시블 CIGS 박막 태양전지

한편, 유기태양전지는 역시 플렉시블 태양전지를 제작할 수 있다.<그림 6> 광 흡수층으로 유기물을 사용하는 태양전지로 기존 실리콘 태양전지와는 다른 구조와 메커니즘을 갖는 특징을 가진다. 염료감응 태양전지와 유기태양전지가 있으며, 특히 염료감응 태양전지는 전기화학적 태양전지로 불리기도 한다. 염료감응 태양전지에서 염료가 광감응의 역할을 하며, 생산된 전자는 TiO<sub>2</sub>를 포함하는 산화물 반도체를 통해 전극으로 모여 회로에 일을 한다. 유기 태양전지는 유기물에 밴드 이론이 적용되기 어려워, 박막 태양전지와 비슷한 개념의 도너(donor)와 억셉터(acceptor)를 적용하는데 반도체에서 사용하는 n-형, p-형과 유사한 개념이다. 유기 태양전지의 장점은 경량이며, 플렉시블 형태의 모듈을 만들 수 있고, 특히 색깔을

쉽게 표현할 수 있으며, 반투명의 특성을 확보할 수 있다. 그러나 태양전지 자체의 광전환효율이 낮으며, 수명이 짧은 것은 기술적으로 극복할 도전 과제가 되고 있다. 최근에는 DSSC 기반 기술로서 페로스카이드 태양전지 역시 플렉시블 형태로 제작이 가능하 연구 결과가 발표되고 있다.



출처: Konarka

그림 1-6. 유기 태양전지

플렉시블 태양전지는 태양광 산업의 주력으로 자리잡고 있는 결정형 실리콘 태양전지에 비교하여 결정형 실리콘 태양전지로는 구현할 수 없는 태양광 활용 분야에서 확실한 차별성을 확보할 수 있는 기술이다. 2010년의 세계 금융위기이후 지금의 태양광 산업은 박막태양전지 산업은 결정형 대비 저가프리미엄을 잃어 버렸다. 그렇기 때문에 유연 (CIGS) 박막 태양전지 기술은 독점적인 신시장 확보가 가능할 수 있다는 전망이다. 그러기 위해서는 현재의 유연기판소재의 개선이 이루어져야 하고 유리기판의 산업화에서 마련된 제조기술 기반들은 플렉시블 환경에 맞도록 전환하여 차별화 신 기술을 개발할 필요가 있다. 얇고 가벼운 플렉시블 CIGS 박막태양전지의 R2R 대량생산에 의한 저가격화는 2015년에 예상하는 전체시장의 20%인 10 GW 그리고 2020년에는 30%인 30 GW의 시장(출처: SNE리서치 보고서, 2013년 6월)에서 새로운 영역을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.



이와 같이 경량이면서 심미적 특성이 우수하기 때문에 건물적용 뿐만 아니라 고효율성과 굴곡 특성을 고려하게 되면 미래의 웨어러블 스마트 디바이스 (IT/컨슈머)와 군사용 또는 항공 및 지상의 교통수단(vehicle)에 폭넓은 활용이 예상 된다. [그림 1-7]

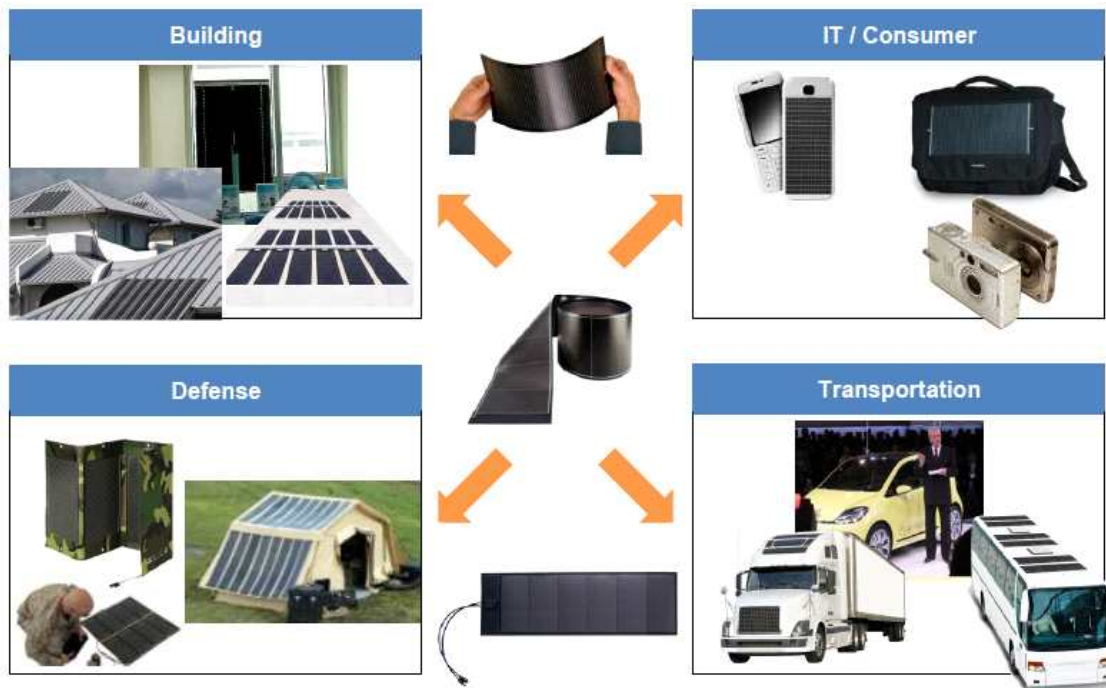


그림 1-7. 플렉시블 CIGS 태양전지의 활용실례

### 1.3. 플렉시블 태양전지 기술의 필요성

CIGS 태양전지는 타 소재의 태양전지 대비 월등한 여러 이점으로 인하여 향후에도 평균 20%를 웃도는 성장세를 보일 것으로 전망되고 있다. 우리나라는 2000년대 중반부터 현대-아반시스, 삼성SDI, LG이노텍, SK에너지, 금호 등 대기업들을 중심으로 CIGS 박막 태양전지에 많은 투자가 이루어져 왔으나, 2014년 말 삼성SDI의 상용화 국책과제는 기술개발까지 수행하고 상용화는 포기하게 되었다. 삼성SDI의 기술은 ‘원익IPS’에 전달되어 turn-key 장치의 상용화를 추진 중에 있다. 즉, 아쉽게도 기술적인 우수성을 달성했음에도 상용 양산으로 이루어지지 못한 것은 현재의 태양전지 산업의 현황을 반영한 것이기는 하지만 매우 아쉽다.

반면에, 중국은 최근의 경제위기를 극복하는 과정에서 전 세계의 기술집약적 박막태양전지 벤처기업들을 집중적으로 M&A해오고 있으며, 2015년까지 2 GW의 생산규모를 갖출 목표로 약진하고 있다. 이와 같은 차세대 CIGS 박막 태양전지 산업에서 중국의 행보에 대응하기 위하여 세계적으로 두각을 나타낼 만한 국내 업체발굴하고 산업화 지원을 하는 것이 절실히 필요한 시점이다.

플렉시블 태양전지의 경량성 및 심미적 특성의 우수성으로 건물에 사용되는 것이 고려되고 있다. 또한, 플렉시블 CIGS박막태양전지의 용도는 크게 휴대용 제품군과 발전용 제품군으로 구분하고 있는데, 고효율성과 굴곡특성을 고려하게 되면 미래의 웨어러블 스마트 디바이스 (IT/consumer)와 군사용 또는 항공 및 지상의 교통수단(vehicle) 응용 등에 폭넓게 활용이 예상되고 있다. [그림 1-7] 이와 같은 활용성에 대한 것 들은 이미 시제품들이 출시되고 있는 현황임. 특히 자동차 지붕에 응용하는 예는 세계적인 자동차 제조사에서 그 적용이 검토되고 있는지 오래된 사안이다.

이상과 같이 융·복합을 통한 다양한 활용성이 예상되는 태양전지 결합 신제품 및 이를 통한 신시장 개척을 위하여 이미 개발되어 확보된 기존의 CIGS 박막태양전지의 기초기술들을 바탕으로 초경량 고효율의 플렉시블 CIGS 박막태양전지 셀 및 모듈의 실용화 기술을 개발할 필요가 있다.

특히, 기존의 보편적인 스테레스 스틸 혹은 폴리이미드(플라스틱) 기판을 이용한 실용화 기술뿐만 아니라 유연유리를 이용한 플렉시블 박막태양전지의 실용화 기술 개발은 세계적으로 거의 전무하다시피 하므로 우리나라가 꾸준한 연구개발을 지속할 수 있다면 태양광분야에 있어서 추격자에서 선도자로서 플렉시블 태양전지를 활용한 새로운 융합산업을 선도할 수 있는 기회가 될 것이다.

- CIGS 박막태양전지가 BI(A)PV, 휴대용, 발전용 등 다양한 목적에 이용되어 한 갈래의 큰 산업군으로 성장하기 위해서는 플렉시블 기판을 기반으로 하는 제품화가 선택이 아닌 필수가 되고 있음.
- 폴리이미드와 스테인레스를 유연기판을 이용한 플렉시블 CIGS 박막 태양전지 제품은 이미 출시되어 판매되고 있음.

- 플렉시블 태양전지의 핵심기술은 R2R(roll-to-roll)공정에 의한 CIGS 광 흡수층 제조기술인데, 진공 증발법, 스퍼터-반응법 및 전기증착법 등 광 흡수층 제조 최적화 및 전,후공정 박막을 위한 R2R 공정제어기술 개발이 요구됨.
- 박막태양전지 산업화는 유럽과 미국에서 보다는 아시아권에서의 기술 경쟁이 본격적으로 이루어지고 있음. 일본 Solar Frontier, 중국의 Hanergy, Ascent solar (미국기업의 중국 현지 생산) 등이 앞서가고 있으나 우리나라의 유일한 삼성SDI가 2014년 12월 상업화를 철회하였으며, 대만의 TSMC는 2015년 8월말 상업생산을 중단하기에 이르렀음. 이로써 박막 태양전지 산업은 일본의 Solar Frontier(CIGS)와 미국의 First Solar(CdTe)가 규모의 양산설비를 확보하고 각 기술기반을 독주하게 되었음.
- 중국은 그동안 Solibro, Miasole, Ascent Solar, Global Solar, Stion과 같은 CIGS 태양전지 기술 선도업체들을 대거 M&A하였음. (중국, Hanergy)
- 차세대 CIGS 박막 태양전지 기술 개발과 이를 산업화하여 세계적으로 두각을 나타낼 만한 국내 업체가 없어 보다 핵심적 기술을 바탕으로 하는 국내업체의 발굴이 절실한 상황임.
- 태양전지의 가장 핵심인 저가화, 기술선도를 위하여 다양한 활용성에 비하여 상대적으로 기술 개발이 늦어지고 있는 플렉시블 CIGS 태양전지의 독자적인 제조 및 장치기술 개발은 우리나라가 반도체이후의 미래 신성장 동력인 태양광 산업의 선도적 위치를 차지 및 지속 발전하는데 가장 시급함.

#### 1.4. 플렉시블 태양전지의 산업 응용

웨어러블 스마트 IT소자의 전력원으로서 기능성, 심미성, 환경 적응성 등 다양한 사양을 요구받게 되는데 이를 만족하는 태양전지로서는 (플렉시블) 박막태양전지가 가장 적절한 해결 방안을 제공할 수 있다.

20년 이상의 내구성이 확보되는 고효율 플렉시블 CIGS 박막 태양전지를 BIPV에 적용할 경우 1일 발전시간 5시간, 연간 발전일 300일, 내용연수 20년

을 가정했을 때 발전단가는 100원/kWh으로서 그리드 패리티를 조기 달성할 수도 있을 것으로 전망된다. 고성능 플렉시블 CI(G)S의 제품화는 박막태양전지 예상시장이 2015년 10 GW(약 1조원), 2020년 30 GW으로 성장하게 되면 수십조 원의 시장을 확보 가능할 것으로 예상된다.

플렉시블태양전지는 여러 형태·디자인의 제품으로 제조가 가능하여 다양한 에너지 융합형 파생상품으로 부가가치를 올릴 수 있어 점차 심화되고 있는 글로벌 태양광시장의 가격하락경쟁을 피해나갈 수 있다. 가볍고 유연성이 좋기 때문에 주택이나 건물의 커튼이나 blind, 시공성/가공성이 필요한 건물 일체형 BIPV 모듈 (주택 및 건물의 외벽), 유희지의 야외 태양광 차양막, 두루말이처럼 말았다가 사용할 때 펼 수 있는 선박이나 우주선의 전원, 가벼운 전원을 필요로 하는 노트북, 존재한다. 실제적으로는 건물 일체형 (BIPV) 태양 전지 대량 설치 보급이 가능하여 새로운 국내 에너지 공급원 확보가 가능해진다. 기존 주택, 아파트, 건물, 유희지의 야외 태양광 차양으로 설치할 경우에 잠재 발전량은 19 GW이며 현재 국내 발전 용량 70 GW의 17%가 된다.



그림 1-8. 웨어러블 디바이스의 다양한 산업 응용

태양광발전은 다른 에너지산업에 비해 노동집약적 측면이 강하여 태양광 1 MW를 보급할 때 35.5명의 고용유발효과가 있다고 알려져 있으며, 생산량 100 MW당 약 150 ~ 200명 정도의 고용이 예상되어 생산이 GW급으로 확대 되면 수천명의 고용창출이 가능한 우리나라 신성장동력으로 자리매김할 수 있을 것으로 전망된다. CIGS 양산화 기술의 성공적 개발로 저비용 태양전지 핵심 기술 확보뿐만 아니라 신소재 및 신장비의 개발을 통한 전 분야의 고부가가치 기술 확보를 가능케 할 것이다.

## 제 2 장. 태양광 산업 및 시장 동향

### 2.1 태양광 시장 동향

국제에너지기구 (IEA)는 2050년에는 태양광이 지구전체 에너지의 50%를 담당하게 될 것으로 예측하고 있다. GTM Research에 따르면 2020년에는 현재의 4배 수준인 528 GW규모의 태양광설비가 들어설 것으로 예측하고 있으며, Morgan Stanley는 2020년까지 매년 47 GW의 태양광발전설비가 증설될 것으로 중국, 일본, 미국, 유럽 등의 기존시장에 더하여 인도, 브라질 등이 가세할 것으로 예상된다.

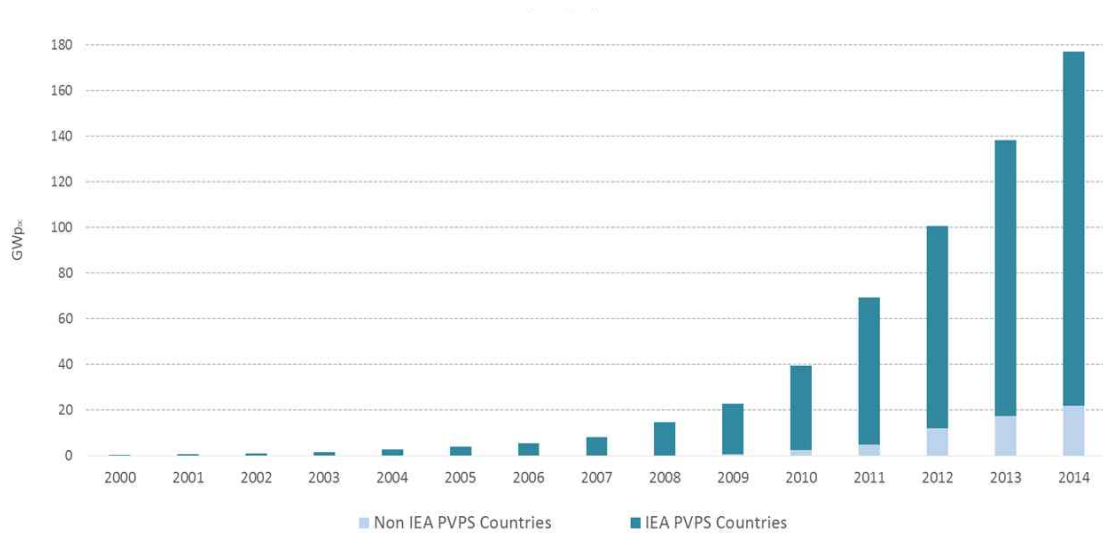
IEA PVPS 2015 보고서에 의하면 2014년 태양광산업은 전 세계적으로 제한적인 확장을 하면서 새로운 개발의 한해를 경험하는 시기였다. 그렇지만 제한적인 성장에는 여러 지역에서 많은 상충되는 상황을 제공하게 되었다.

아시아 시장이 유럽을 제치고 가장 빠른 성장을 보인 시장이 되었다. 2014년 중국은 10 GW 이상이 설치를 통하여 태양광시장의 안정화를 보여주고 있으며, 일본은 9.7 GW 이상의 설치로 급속한 성장을 보여 주었다. 이는 아시아 태양광 시장이 성숙되어 가는 것은 반영하고 있다. 한편, 한국, 호주, 태국 또는 대만은 비로소 태양광 시장을 확립하게 되었으며, 말레이시아 및 필리핀을 비롯한 다른 아시아 국가들에서는 조만간 PV 설치가 급속히 확산될 것이라는 예측을 가능하게 하고 있다. 그렇지만 인도의 600 MW 설치가 이 나라의 PV를 향한 긍정적인 정책에도 불구하고 약간 대비되고 있다.

북미에서는 미국시장이 꾸준히 성장해서 2014년 6.2 GW에 도달했으며, 캐나다와 멕시코 (64 MW) 시장이 커지고 있다. 남아메리카에서는 칠레가 400 MW로 사실상 이 지역의 첫 PV 국가가 되었다.

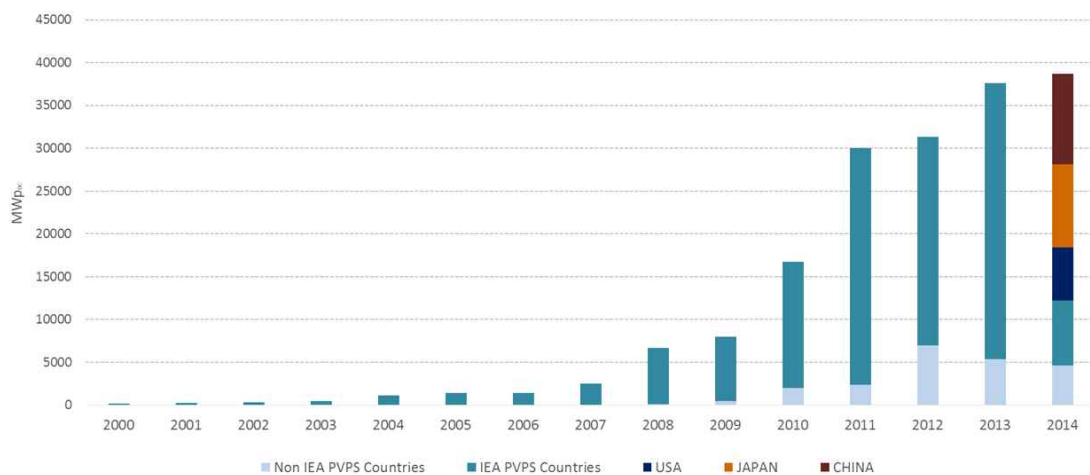
유럽의 태양광시장은 지속적으로 축소되고 있다. 2014년 영국이 2.27 GW로 1위로 부상한 반면, 독일은 1.9 GW 수준으로 감소했다. 프랑스가 다시 1 GW로 성장한 반면 이탈리아는 FIT의 축소로 400 MW 정도가 설치되었다. 중규모의 시장에서는 네덜란드와 스위스가 꾸준히 성장하고 있지만 오스트리아, 덴마크 및 루마니아는 감소는 했지만 일정 수준을 유지하고 있다. 예전에 GW 시장이었던 스페인, 체코, 벨기에, 그리스 및 불가리아는 완전히 소멸하였거나 수 MW 수준으로 전락했다.

아프리카에서는 남아프리카공화국이 2014년 설치 용량 1 GW를 달성한 첫 국가가 되었다. 그 외에는 많은 나라가 PV 프로젝트를 발표는 했지만 실제 설치는 연기 되거나 검토 중인 것으로 알려져 있다.



출처: IEA PVPS T1-26:2015 보고서

그림 2-1. 글로벌 PV 설치(GWp) 추이



출처: IEA PVPS T1-26:2015 보고서

그림 2-2. 연간 PV 설치량(MWp) 추이

2014년 태양광 시장은 약간 성장하였지만 기대치에는 미치지 못했다. 작년에 적어도 38.7 GW의 PV 시스템이 설치되어 글로벌 전력망에 추가되었다 (37.6 GW, 2013). 아시아가 글로벌 신시장의 60%를 차지하며 최근 2년 연속 1위를 유지했다.

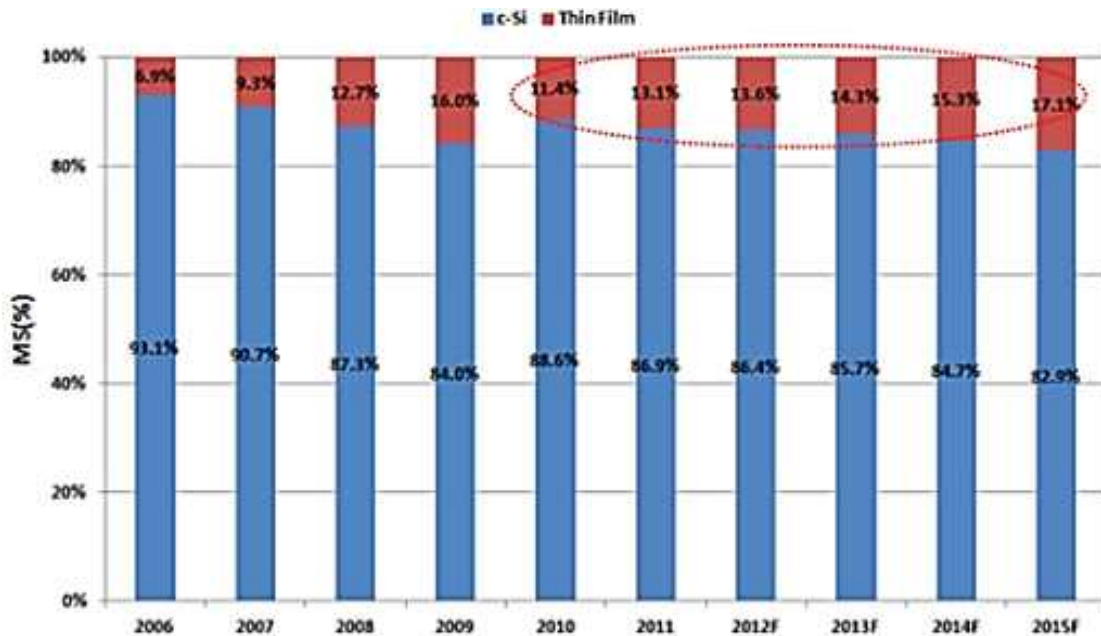
- 중국은 2013년 10.95 GW에서 2014년 10.6 GW로 안정적인 모습을 보였다.
- 일본은 9.7 GW로 2014년에도 PV 붐을 이어갔다.
- 유럽은 2011년 22 GW에서 2014년 7 GW로 대폭 축소되었다.
- 2014년 유럽의 태양광 설치 1위는 영국 (2.27 GW), 2위는 독일 (1.9 GW), 3위는 프랑스 (1 GW) 였다.
- 미국은 대규모 발전단지 조성 및 새로운 비즈니스 모델 출현으로 6.2 GW로 다시 증가추세를 보였다.
- 한국(0.9 GW), 호주 (0.9 GW), 캐나다(0.4 GW), 대만 등 여러 나라에서 시장이 성숙되가는 모습을 보였다.
- 2014년 이머징 마켓으로는 남아프리카공화국 (0.8 GW), 칠레 (0.4 GW), 멕시코 (64 MW) 와 터키가 글로벌 PV 시장에 등장하였다.
- 태양광 누적 설치량에 따른 상위 10위 국가는 아태지역 4 국 (중국, 일본, 인도, 호주), 유럽 3국 (독일, 이탈리아, 프랑스), 북미 2 국 (미국, 캐나다), 아프리카 1 국 (남아프리카공화국)이 되었다.
- 이탈리아, 그리스 및 독일은 연간 전력수요 중 PV의 비율은 각각 7.9%, 7.6%, 7.0%를 담당하고 있음. 그리고 19개 국가에서 각 나라의 전력수요 중 PV 비중이 적어도 1%를 담당하고 있다.
- PV는 유럽에서 전력수요의 3.5%를 차지하고 있으며 칠두 전력수요에서는 7%를 담당하고 있다.
- PV는 글로벌 전력수요 중 적어도 1%를 담당하고 있다.
- 전 세계적으로 20개 국가가 PV 누적설치량이 1 GW를 2014년에 달성하였으며, 스위스, 네덜란드, 태국은 2014년에 이 설치량에 도달하였다. 또한 2014년에 5개 국가 (2013년 9개 국가)가 적어도 1 GW를 설치한 것으로 파악된다.



## 2.2 박막태양전지 시장 현황 및 전망

NPT Solarbuzz는 박막태양전지와 프리미엄 c-Si의 모듈공급이 2014년 5.3 GW에서 2018년에는 14.5 GW로 약 3배가 늘어날 것으로 전망하였다. 박막태양전지는 특성상 BIPV (building integrated photo-voltaic), DIPV (device integrated photo-voltaic) 및 VIPV (vehicle integrated photo-voltaic)와 같은 새로운 시장과 소형 충전기와 같은 다양한 어플리케이션에 적용될 가능성이 높아 향후 다양한 형태의 제품들이 출시되어 시장이 확대될 것으로 예상된다.

전 세계적으로 태양광산업은 결정질 (단결정, 다결정) 실리콘을 기반으로 한 산업을 중심으로 태양전지 효율 향상, 제조 및 발전단가 저감을 지향하고 있다. 2006년 이후 박막 태양전지가 상용화되면서 시장 점유율을 높이고 있으며, 2015F에 전체 시장의 17% 이상을 점유할 것으로 전망된다. [그림 2-3]



출처: 세계 태양광 시장 현황 및 한국 태양광 시장의 생존 전략, SNE Research, 2012.

그림 2-3. 태양전지 기술별 Market Share (2006~2015).

2세대 박막 태양전지는 가격적인 장점을 가지고는 있지만 1세대 실리콘 태양전지가 폴리실리콘 가격 하락 및 대량생산을 통한 원가절감을 빠르게

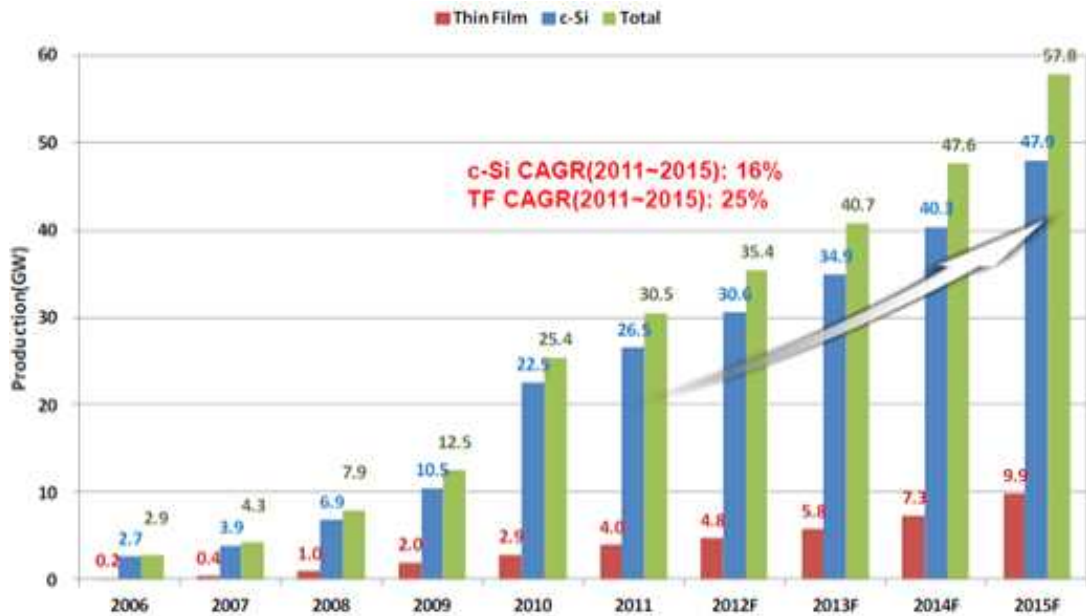
이루고 있어 박막 전지의 성능이 크게 개선되지 않으면 박막 태양전지 시장은 축소될 가능성이 상존한다.

- 폴리실리콘 가격 하락이 결정질 실리콘 태양광 모듈의 높은 시장 점유율을 지속적으로 유지시켜 주었다.
- 2010년은 First Solar의 생산 설비용량 증설 지연 및 결정질 실리콘 태양전지 업체들의 공격적인 생산 설비용량 증설로 박막 태양전지의 시장점유율은 11.4%까지 감소하였다.
- 일사량이 많고 면적이 넓은 미국, 중국, 인도 등의 설치 시장이 확대되면서 박막 태양전지의 성장 전망은 매우 높다.

태양광산업은 주거용 및 상업용 Rooftop(BAPV, Building Applied Photovoltaic) 태양광발전 시장이 독일, 일본 등에서 확대되면서 이에 따라 결정질 실리콘 태양전지 시장이 매년 급성장하였으며, Utility 시스템 태양광발전 시장이 급성장하면서 박막 태양전지 시장도 동반성장할 것으로 기대되어, 향후 박막 태양전지의 연평균 성장률은 더 높을 것으로 예상된다. [그림 2-4]

다양한 소재를 사용하고 있는 박막태양전지의 최근 10여 년간 생산량의 대부분은 CdTe가 차지하고 있으며, 비정질 실리콘 태양전지와 CIGS계 태양전지가 그 뒤를 따르고 있음. 특히 최근 CIGS계 태양전지의 비중이 급증하고 있다. 박막태양전지 중에서 현재 가장 경쟁력을 갖고 있는 First Solar(美)의 CdTe가 모듈 효율 16%라는 한계를 극복하지 못하는 상황에서 이를 극복하기 위한 박막 태양전지 개발 연구가 활발하게 진행 중이며, 그 중 CIGS 박막 태양전지가 가장 유력한 후보로 자리매김하고 있다.

결정질 실리콘 태양전지 시장을 잠식할 수 있는 박막 태양전지에 대해 EU, 미국 및 아시아 국가에서는 각 국의 연구개발 역량 및 기존 산업 인프라를 고려하여 상업화를 달성하기 위한 연구개발을 진행하고 있으며 일부 상업화도 진행 중이다.



출처: 세계 태양광 시장 현황 및 한국 태양광 시장의 생존 전략, SNE Research, 2012.  
 그림 2-4. 태양전지 기술별 생산량 (2006~2015).

### 2.3 박막태양전지의 산업 응용

국내 태양광산업은 시장의 크기가 제한되어 있으며 가용할 수 있는 면적 또한 제한되어 있기 때문에 향후 국내의 태양광산업의 활성화를 위해서는 태양전지를 적용할 수 있는 유효면적의 확대가 매우 중요함. 이를 위하여 고려될 수 있는 곳은 건물옥상 (Roof-top)이나 건물전면 (Facade)을 활용하는 방법이 제시되고 있다. 이와 같이 건물에 적용하는 태양전지는 단순히 지붕에 설치하는 것이 아니라 건물 설계 때부터 건자재의 일부로서 태양전지를 활용하는 건물일체형 태양전지 (BIPV)를 의미한다.

건물일체형 태양전지 (BIPV; building integrated photo-voltaic)는 기능성, 심미성, 환경 적응성 등 다양한 사양을 요구받게 되는데 이를 만족하는 태양전지로서는 박막태양전지가 가장 적절한 해결 방안을 제공하고 있다. 또한, 태양전지 자체 무게의 영향을 최소화하기 위해서는 플렉시블 (Flexible) 태양전지가 매력적인 대안이다. [그림 2-5]



그림 2-5. 플렉시블 태양전지의 BIPV 활용

국내 여건에 맞는 플렉시블태양전지 제품으로 Field Test를 통하여 국내에서 시장경쟁력을 기른 후 품질·성능·가격 면에서 차별화된 제품으로 세계적인 제품들과 경쟁을 통하여 세계시장을 선도해 나아가는 것이 보다 성공가능성이 높은 태양광산업 진흥방안이 될 것이다.

태양전지를 건물에 적용하기 위해서는 \$/W으로 표현되는 가격대 성능비보다 건물과 조화된 심미적인 측면, 다양한 형태와 규격 또는 경량화나 설치상의 용이성 등의 건축재로서의 특성이 더욱 중요하다고 볼 수 있다. 10 kg/m<sup>2</sup>이상 무게 태양전지 모듈의 지붕설치 시 별도의 지지를 위한 설비가 필요하나, 플렉시블태양전지는 경량으로 설치가 간단하고 저렴하며, 기존 주거용·상업용·공공건물에 별도의 지지설비 없이 부착이 가능하며, 지붕 등에 구멍을 뚫지 않고 굴곡면 설치가 가능하고, 태풍과 같은 재해에 높은 저항성을 가진다. [그림 2-5] 또한, 플렉시블 CIGS 박막태양전지 여러 형태·디자인의 제품으로 제조가 가능하여 다양한 파생상품으로 부가가치를 올릴 수 있어 점차 심화되고 있는 글로벌 태양광시장의 가격하락경쟁을 피해나갈 수 있다.

이러한 잠재력을 가진 플렉시블 CIGS 박막태양전지의 산업화가 지연되고 있는 원인은 적합한 유연기판의 부재와 이와 더불어 저가에 만족할 만한 성능을 갖춘 봉지재 (Encapsulation Material)가 없는 까닭으로 생각된다. 선진국들에서는 다양한 유연기판소재들을 이용하여 플렉시블 CIGS박막태양전지 제품들을 출시하고 있으나 아직까지 그 성능에 한계가 있는 한편, 국내의 제한된 기술, 인력, 자본으로 선진국의 선행기술들을 답습해 나아가는 방식으로는 어느 정도까지 기술격차를 줄일 수 있을 수는 있겠으나 궁극적으로 그들의 기술을 추월하기는 쉽지 않을 것이므로 주체적인 패러다임을 전환을 통하여 새로운 시각에서 접근해야할 필요가 있다.

얇고 가벼운 박막태양전지는 Grid Parity를 앞당기는 저원가 기술로서 결정질실리콘 태양전지에 비견할만한 효율, 생산공정의 단순화, 밸류체인의 일관화, 그리고 R2R 대량생산 가능성 등에 힘입어 2015년에는 전체시장의 20%인 10 GW 그리고 2020년에는 30%인 30 GW의 시장이 예측되고 있다. [그림 2-6]

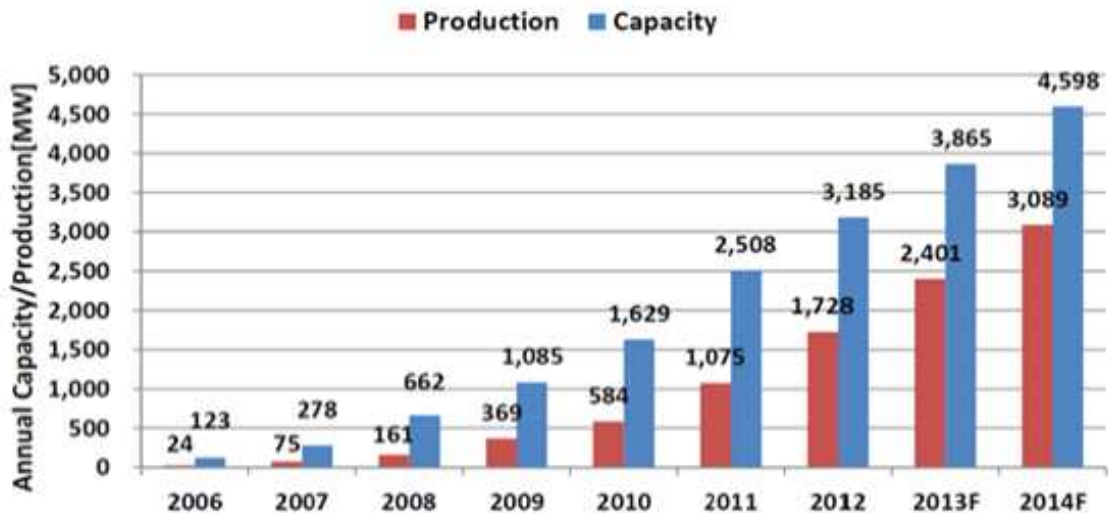


출처: SNE 리서치

그림 2-6. 박막태양전지 생산전망

First Solar의 13.9%효율 CdTe박막태양전지모듈의 생산단가는 \$0.59/W로 결정질실리콘과 대등한 가격경쟁력을 가지고 있으며, 2012년 3분기에 비하여 2013년 3분기에는 4억2천7백만불을 더한 13억달러의 매출을 기록하여 점차 증가추세에 있다. 한편, Solar Frontier는 1257 × 977 mm<sup>2</sup> 크기 모듈에서 14.6%의 효율을 달성하였으며, 300 × 300 mm<sup>2</sup> 서브모듈에서 17.8% 그리고 0.5 cm<sup>2</sup> 셀에서 19.7%의 Cd-free CIGS박막태양전지 최고효율을 기록하고 있으며 이러한 기술을 기반으로 1 GW급의 생산능력을 갖추고 후쿠시마원전

특수와 Buy Japan의 정서에 힘입어 일본 내수에서 2013년도 매출의 90%이상을 올릴 것으로 예상된다.



출처 : SNE Research, June. 2013.

그림 2-7. CIGS박막태양전지 생산량 전망

향후 박막태양전지와 결정질실리콘과의 모듈 가격의 격차는 점차 좁혀질 것이며, CdTe의 경우 Cd를 제한하는 국가들이 많은 제약이 있으며, DSSC나 OPV의 상용화는 시간이 더 필요한 점을 고려한다면 CIGS박막태양전지의 시장전망은 밝은 편이라고 할 수 있다. 따라서 박막태양전지 중에서 산업화를 위하여 세계적으로 수많은 업체들이 상용화 준비중에 있는 것이 CIGS박막태양전지로서 2013년의 생산용량은 3.3 GW정도에 그칠 것이나 2015년에는 40%가량 성장한 4.6 GW에 이를 것으로 전망되고 있다. [그림 2-7]

CIGS 박막태양전지 업체들은 극히 일부를 제외하고는 파일럿라인 개념의 소량만을 생산하고 있으며 저마다 제조기술이 다르기 때문에 시장확대에 따라 상당한 각축전이 벌어질 것이 예상된다. 이러한 시장경쟁에 있어서 저마다 차별화된 상품을 제조하게 될 것으로 예상되며 다양한 용도 및 목적에 적합한 플렉시블 CIGS 박막태양전지 제품들의 시장출시가 점차 증가할 것으로 전망된다.

플렉시블 CIGS 박막태양전지는 BI(A)PV시장에서 특히 선전할 것으로 생각되며 BIPV 및 BAPV 시장은 2015년에 각각 2.1 GW와 5.3 GW에 달해 매우 높은 시장잠재력을 가지고 있다. 표 2-1은 플렉시블 박막 태양전지(CIGS)의 산업 응용 분야를 요약이다. 그렇지만 지금까지의 유연기판소재들은 이러한 장기수명에 대한 내구연수를 충족시키지 못하고 있기 때문에 새로운 산업군으로 성장하기에 장애요소를 가지고 있다.

표 2-1. 플렉시블 CIGS 박막태양전지의 응용분야

구분	용도	설명
휴대용	휴대·레저형	핸드폰·노트북 등 휴대기기 및 등산·캠핑시의 전원
	군사용	경량·플렉시블 태양전지를 응용한 작전용 비상전원
	차량용	트럭, 버스, 기차 등의 지붕에 설치가 가능한 태양전지
발전용	건물일체형	커튼홀, Roof-top, 스펀드럴에 적용 가능한 BIPV/ BAPV
	사막형	고온저습지역에 적합한 초저가 태양광발전 설비
	도시형	뛰어난 외관(의장성)을 가진 가로등, 버스정류장, 공원 등 시설

## 제 3 장. 플렉시블 태양전지 기술 분석

### 3.1 태양전지 기술 분류

태양전지 기술은 그림 3-1과 같이 1세대(결정질 실리콘), 2세대(실리콘박막, CIGS 및 CdTe 박막), 3세대(염료감응, 유기박막) 및 차세대(양자점, 플라즈몬 등) 등 상용화 순서로 분류하거나 표 3-1과 같이 Si계, 화합물반도체계, 유기계 등 사용되는 소재의 종류로 분류하며, 현재 다양한 형태의 기술이 개발되어 있다.

세대 구분	1세대			2세대				3세대	
구분	결정형			박막형					
	단결정 Si	다결정 Si	III-V	박막 Si	CdTe	CIGS	DSSC	유기	나노
시장 점유율	41%	42%	<0.1%	2.4%	10%	3%	<0.1%	<0.1%	
모듈 효율	15%	12%	35%	8%	10%	12%	7%	<5%	
특징	신뢰성 확보 안정된 생산공정			고효율	생산단가 저렴			생산단가 매우 저렴	
	고비용 공정, 소재 가격인하 한계			고비용 소재	저효율/ 내구성	독성 소재	고비용 소재	내구성 미확보	저효율

출처 : EPIA, 2011.

그림 3-1. 태양전지의 세대 및 소재별 분류

#### 3.1.1. 실리콘계 태양전지

##### ① 단결정 Si 태양전지

단결정 Si 태양전지, 그림 3-2 (a)는 다양한 태양전지 중 가장 역사가 오래된 태양전지이며, 씨드(Seed) 결정을 바탕으로 고온에서 만들어진 원주상의 단결정 Si 잉곳(Si 덩어리)을 두께 200  $\mu\text{m}$  정도로 절단하여 제작한다. Si 원자가 규칙적으로 배열된 단결정을 이용하기 때문에 실용화되고 있는 태양전지 중 가장 변환효율이 높고(모듈 효율 14~20%, 이론 효율 25~28%), 내구성 및



신뢰성에서도 우수함. 향후 모듈 단가를 더욱 더 떨어뜨릴 여지가 있어, 효율을 높이고 저가공정을 통해 태양전지의 생산비용 단가를 낮추기 위한 연구개발이 꾸준히 진행되고 있다.

표 3-1. 소재별 태양전지 분류 및 특징

종류		특징	변환 효율	국내외 주요업체	
실리콘계	결정계	단결정	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 200 <math>\mu\text{m}</math> 정도의 얇은 단결정 Si 기판 이용</li> <li>• 장점 : 성능, 신뢰성</li> <li>• 과제 : 저가격화</li> </ul>	~20%	(한국) 현대중공업, LG전자, 신성솔라, STX솔라 등 (해외) Sharp, Sunpower, Suntech, Yingli 등
		다결정	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작은 결정이 집합된 다결정 기판 이용</li> <li>• 장점 : 단결정보다 저렴</li> <li>• 과제 : 단결정보다 낮은 효율</li> </ul>	~16%	(한국) 한화큐셀, LG전자, 신성솔라, STX 솔라 등 (해외) Sharp, Kyocera 등
	박막 Si	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a-Si이나 미세결정 박막을 기판 위에 형성</li> <li>• 장점 : 대면적 양산 가능</li> <li>• 과제 : 효율 낮음</li> </ul>	~10% (비정질)	(한국) LG전자 등 (해외) Sharp, Kaneka, Oerlikon 등	
화합물계	CIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cu, In, Ga, Se 이용, 박막형</li> <li>• 장점 : 자원절약, 고효율</li> <li>• 과제 : In의 자원 부족량</li> </ul>	~16%	(한국) LG이노텍, 삼성SDI, 현대아반시스 등 (해외) Solar-Frontier, Solibro, TSMC, Würth Solar 등	
	CdTe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cd, Te 이용, 박막형</li> <li>• 장점 : 자원절약, 저가격</li> <li>• 과제 : Cd의 독성</li> </ul>	~16%	(해외) First Solar	
	III-V	<ul style="list-style-type: none"> <li>• III족과 V족 화합물 다중접합, 집광기술</li> <li>• 장점 : 초고성능</li> <li>• 과제 : 저가격화</li> </ul>	~43% (집광)	(한국) 비제이파워, 애니캐스팀 (해외) Sharp, Amonix, SolFocus, Concentrix 등	
유기계	염료 감응	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\text{TiO}_2</math>에 흡착된 염료가 광을 흡수하여 발전</li> <li>• 장점 : 저가격화 가능성</li> <li>• 과제 : 고효율화, 내구성</li> </ul>	~10%	(한국) 동진쎄미켐, 티모테크놀로지, 이진창호 등 (해외) Dyesol, AISIN Seiki, Fujikura 등	
	유기 박막	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유기물 반도체 이용하는 박막형</li> <li>• 장점 : 저가격화 가능성</li> <li>• 과제 : 고효율화, 내구성</li> </ul>	<10%	(한국) 코오롱, LG화학 등 (해외) Mitsubishi, Konarka, Plextronics, Solarmer Energy 등	

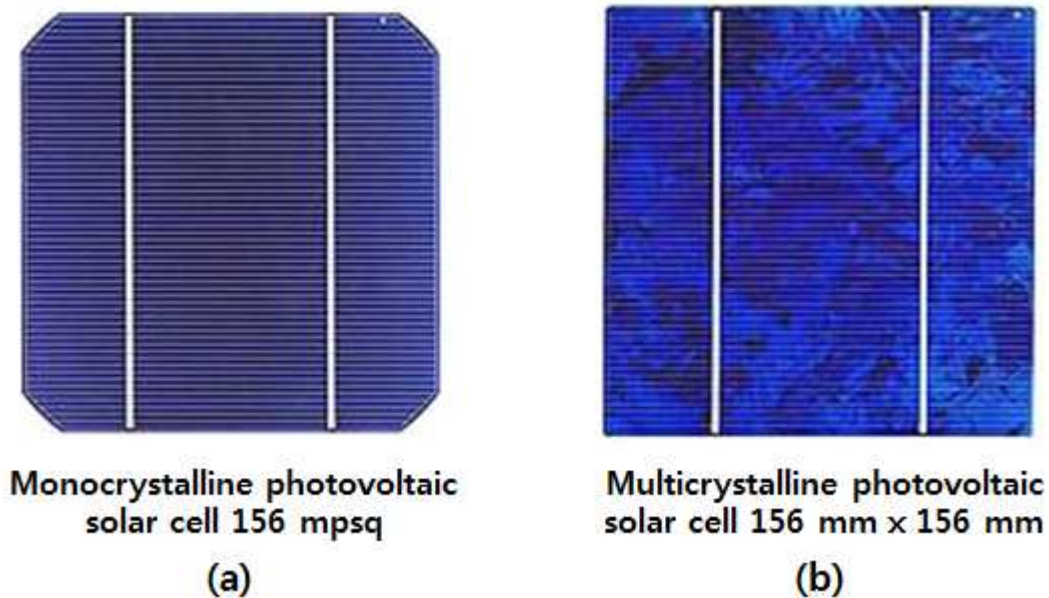


그림 3-2. 결정질 실리콘 태양전지 : (a) 단결정 Si, (b) 다결정 Si

결정질 실리콘 태양전지의 효율을 획기적으로 높이기 위해 개발되고 있는 셀 기술로는 HIT(Heterojunction with Intrinsic Thin-layer), IBC(Interdigitated Back Contact), BC(Buried Contact), PERL(Passivated Emitter and Rear Locally Diffused) 등이 있으며, 한 예로 HIT 셀은 단결정 Si와 비정질 Si(a-Si)을 Hetero 접합<sup>2)</sup>에 의해 적층한 하이브리드형의 태양전지로서, Sanyo 전기에 의해 개발, 제조 및 판매되고 있다. 특징으로 모듈 변환 효율이 약 17%로 높고, 단결정 Si 태양전지와 비교하여 고온에서의 특성 저하가 작다.

## ② 다결정 Si 태양전지

다결정 Si 태양전지, 그림 3-2 (b)는 단결정 Si처럼 하나의 커다란 결정이 아니고 다른 면방위(Miller Index<sup>3)</sup> : 면 지수를 가진 비교적 작은 결정이 조합된 잉곳을 두께 200  $\mu\text{m}$  정도로 절단하여 제작하며, 단결정에 비해 효율은

1) Si 원자의 배열이 불규칙적인 Si, 전자의 흐름이 나쁘고 단결정 Si 등과 비교하면 효율이 떨어짐.  
 2) 이종 재료로 형성한 반도체의 적층 구조  
 3) 결정면이나 격자면을 표시하는 기호로 x, y, z축의 어떤 면의 절편을 원자 간격으로 측정한 수의 역수 정수비를 (hkl)이라 하는 지수

떨어지지만 저렴하며 제조가 쉽고 효율과 단가 밸런스가 좋은 장점을 가지고 있다. 변환 효율은 13~15% 정도이다.

### ③ 실리콘 박막 태양전지

실리콘 박막 태양전지 그림 3-3은 Si의 필요량을 크게 삭감할 수 있어 저가형 태양전지로 알려져 있다. 결정질 실리콘 태양전지처럼 Si 잉곳을 절단하여 사용하는 것이 아니고 실란( $\text{SiH}_4$ ) 등의 원료 가스로부터 플라즈마 CVD 법<sup>4)</sup>에 의해 기판(유리, 플라스틱 등) 위에 수백 nm 두께로 박막을 적층하여 제작하는 태양전지이다. Si의 사용량은 결정계의 1/100 정도까지 삭감할 수 있고 200°C 이하의 저온 공정으로 제작할 수 있기 때문에 제조 에너지의 저감 및 저가형 생산을 실현할 수 있다.

Si 원자의 배열이 불규칙적인 상태(비정질, Amorphous)로 되어 있어 전자의 이동이 나쁘기 때문에 결정질 실리콘(14~20%)과 비교하면 효율이 떨어져 현재 모듈 효율은 약 10% 수준이다. 그러나 여름과 같은 고온 환경 하에서도 효율의 저하가 작은 특성이 결정질 실리콘 태양전지에 대해서 상대적인 강점으로 작용하고 있어 현재 국내외에서 상용화를 시도하였으며 국내 LG전자는 비정질 박막태양전지 모듈에서 세계 최고효율의 기술을 개발했다. 고효율화 방안으로서 결정입자가 50~100 nm 정도인 미세 결정(Micro-crystal) Si을 이용하여 비정질과 미세 결정 Si을 적층한 다중접합(Multi-junction) 태양전지<sup>5)</sup>가 실용화 되고 있고 모듈 효율은 최고 12%<sup>6)</sup> 정도로 단일접합 a-Si 태양전지에 비해 높다.

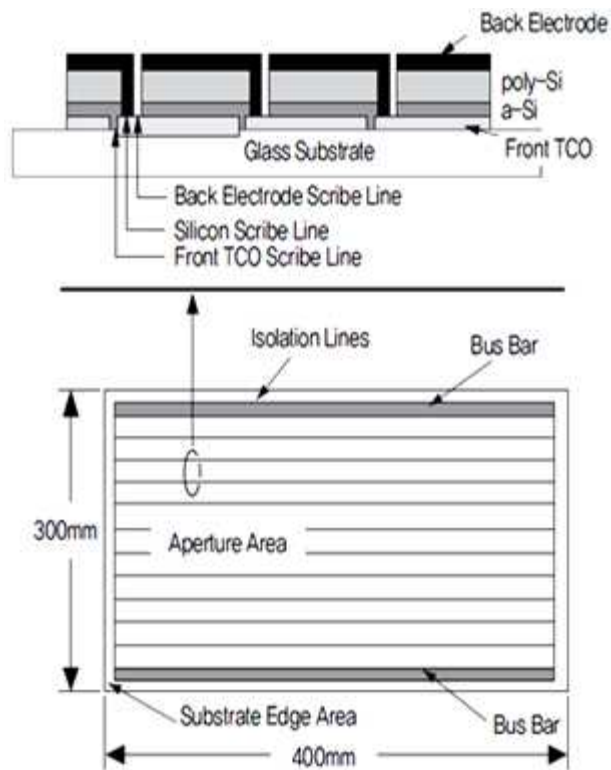
박막이기 때문에 기판으로 스테인레스(SUS) 강판이나 플라스틱 필름 등을 이용하여 Flexible한 태양전지도 제조할 수 있는 것이 큰 특징 중의 하나이다.

#### 3.1.2 화합물계 태양전지

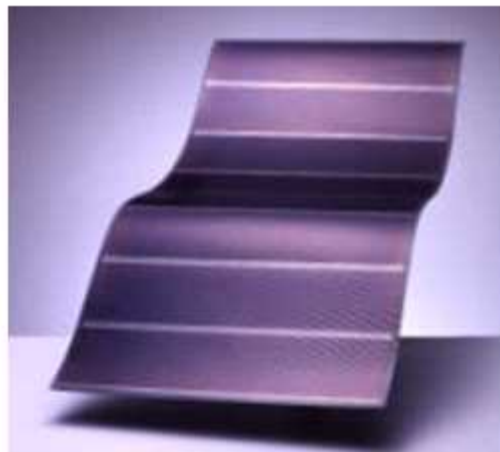
4) CVD법은 Chemical Vapor Deposition의 약어로 화학 기상 성장법. 직류전압 등을 인가하는 것에 의해서 플라즈마화된 원료 가스가 화학반응에 의해 기판 위에 퇴적하여 박막 형성

5) 다중접합 태양전의 원리에 대해서는 집광형 태양전지의 항(p. 8)을 참조한 것.

6) (주)Kaneka 2010년 6월 7일 News Release([Http://www.kaneka.co.jp/news/n100607.html](http://www.kaneka.co.jp/news/n100607.html))



(a)



(b)

그림 3-3. 실리콘 박막 태양전지; (a) 구조, (b) 플렉시블 박막태양전지

### ① CdTe 박막 태양전지

독성이 높은 카드뮴(Cd)을 원료로 사용하기 때문에 국내에서는 보급되지 않고 거의 연구도 되고 있지 않았지만, 유럽·미국에서는 대규모발전소 및 BIPV용으로 도입이 진행되고 있으며 First Solar사(美)가 세계 최대 회사로 생산·판매량을 급격히 확장하여 박막 태양전지를 대표하는 세계적인 회사가 되었다.

이 태양전지는 박막화가 가능하고 유리 기판 위에 비교적 저온에서 양질의 다결정 막을 형성할 수 있기 때문에 저비용, 고효율 태양전지로 최근 셀 변환 효율은 19%에 도달해 있다. SUS, 필름 등 Flexible 기판을 사용할 수 있어 Roll to Roll(R2R) 공정을 적용할 수 있는 장점도 가지고 있다. 그림 3-4는 CdTe 박막 태양전지를 나타낸 것이다.

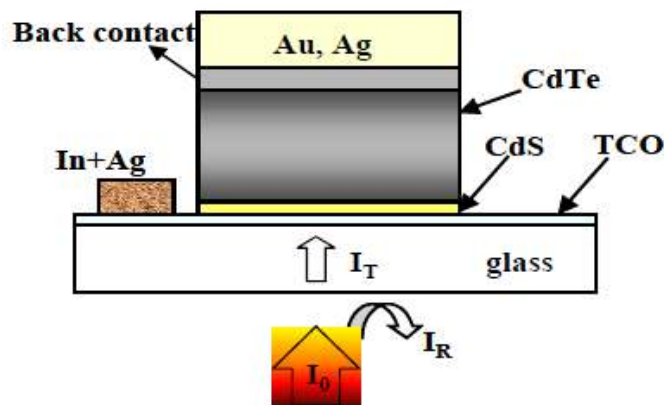


그림 3-4. CdTe 박막 태양전지

### ② CIGS 박막 태양전지

CIGS 박막 태양전지는 구리(Cu), 인듐(In), 갈륨(Ga), 셀레늄(Se) 등으로 구성된 화합물 반도체를 사용하며, 실용화 역사가 아직 매우 짧지만 박막, 경량, 자원절약, 저가격 등 많은 장점을 갖고 있다. 결정질 실리콘에 비해서 광 흡수율이 높아 불과 1~2  $\mu\text{m}$  두께만으로도 충분한 양의 빛을 흡수할 수 있으

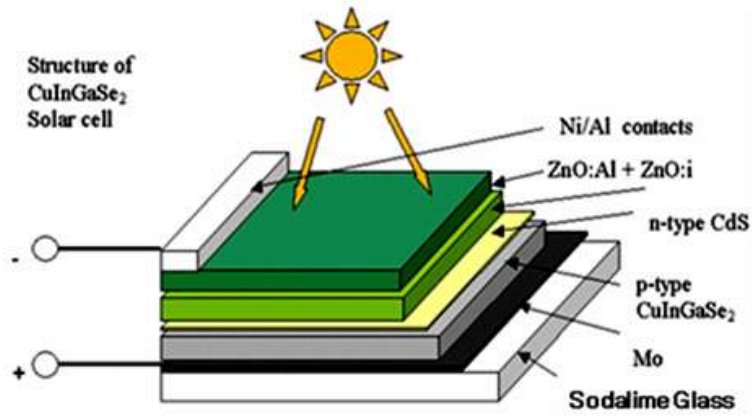


그림 3-5. CIGS 박막 태양전지

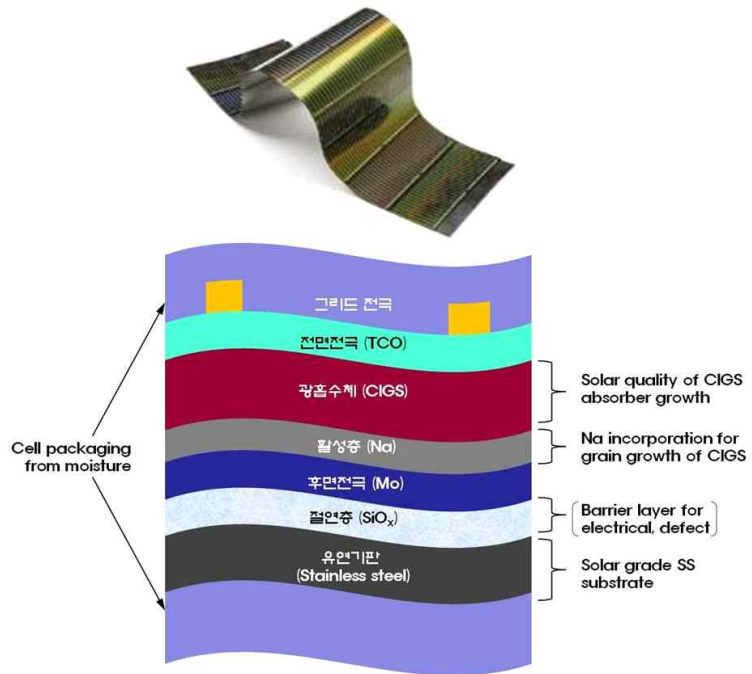


그림 3-6. 플렉시블 CIGS 태양전지 구조도 및 제조된 셀 사진

며 현재 판매되고 있는 CIGS 박막 태양전지의 셀/모듈 광변환 효율은 21%/16% 수준이다. 그림 3-6에서 보듯이 결정질 실리콘 태양전지보다 제조

공정과정의 간단(절반 수준)하여 제조단가를 저감할 수 있으며 1 m<sup>2</sup> 이상의 대면적 태양전지를 연속적으로 생산할 수 있고 내방사선(耐放射線)성도 매우 우수해 인공위성에 전기를 공급하는 태양전지으로도 적합하다. 또한 SUS, 플라스틱 기판을 이용해 경량으로 플렉시블 박막 태양전지를 제조할 수 있다. 플렉시블 CIGS 태양전지에서도 기본 구조인 Mo 후면전극, 광흡수층 (CIGS), CdS 버퍼층, ZnO 투명창층, 무반사층과 그리드 전극 (Al/Ni)을 순차적으로 형성하여 제작하게 된다. 그렇지만 유리기판을 사용하지 않기 때문에 SiOx Na-doped Mo와 같은 박막 층들이 기판과 Mo 후면전극 사이에 추가적으로 필요하게 된다. 그림 3-6은 플렉시블 CIGS 태양전지의 구조도와 제작된 셀의 모습이다.

한편, 희토류 금속인 인듐(In)이나 갈륨(Ga)을 사용하기 때문에 소재가격의 급등으로 인해 제조단가가 상승할 수 있으므로 희토류 금속의 사용량을 줄이거나, 자원 Recycle 등을 통해 희유 자원을 재활용할 필요가 있다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 희토류 금속을 사용하지 않는 CZTS (구리(Cu), 아연(Zn), 주석(Sn), 황(S)) 태양전지의 상용화 연구도 활발히 진행 중이다.

### 3.1.3 유기계 태양전지

#### ① 염료감응형(DSSC, Dye Sensitized Solar Cell) 태양전지

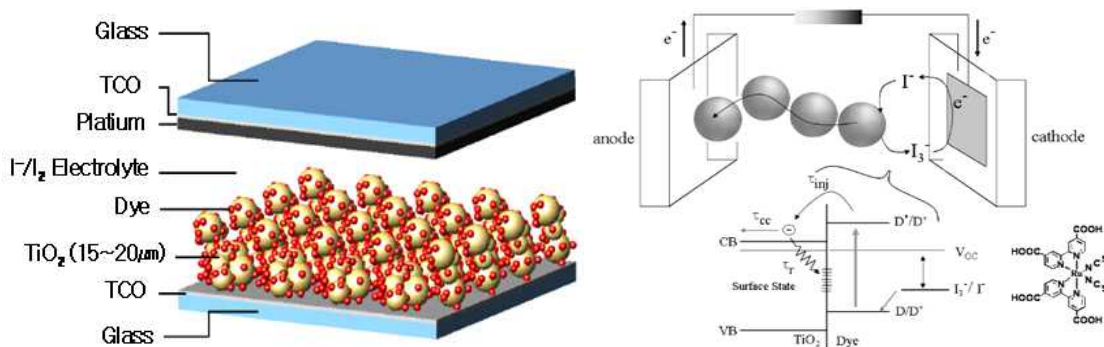


그림 3-7. 염료감응형 태양전지(DSSC)

이 태양전지는  $\text{TiO}_2$  표면에 흡착된 염료가 가시광선 등의 광을 흡수하여 여기한 전자가  $\text{TiO}_2$ 의 방향으로 이동하는 원리로 발전하는 태양전지이다.  $\text{TiO}_2$  자신은 가시광선을 흡수하지 않고 염료가 대신하여 가시광선을 흡수하기 때문에 염료감응형 태양전지 또는 광합성형 태양전지로 불리며, 염료의 종류를 바꾸면 염료의 색상에 따라 염료감응형 태양전지의 색상도 달라지기 때문에 건물일체형 태양광발전 시스템(BIPV, Building Integrated Photovoltaic)으로 사용하기에 유리하고(부가적인 효과로서 차양, 단열, 전자파 차폐 등 포함) 연구 수준의 소면적 셀에서 12.3%<sup>7)</sup>, 모듈에서 효율 9.9%<sup>8)</sup>가 발표되었다. 제조과정이 간단하고 구성 재료의 가격도 저렴하기 때문에 염료감응형 태양전지가 제조단가를 현재 주류인 결정질 실리콘(특히, 다결정 실리콘) 태양전지의 1/5 정도로 낮출 수 있을 것으로 기대되지만, 전해질에 사용되는 용매로 증발하기 쉬운 유기 용매를 이용하고 있기 때문에 내구성이 확보되지 않아 이를 해결하기 위해 액체 전해질을 고체 또는 준고체 전해질로 대체하는 연구가 진행 중이다.

## ② 유기 박막(OPV, Organic Photovoltaics) 태양전지

유기 박막 태양전지는 p형의 유기반도체와 n형의 유기반도체의 접합구조를 사용하여 제작되며, p형 유기반도체로는 전도성 폴리머가 주로 사용되고 n형 유기반도체로는 플로렌( $\text{C}_{60}$ )이 주로 사용된다. 이들 두 종류의 유기반도체를 혼합하여 녹인 용액을 전극이 부착된 기판 위에 도포하여 박막을 형성한 후, 그 위에 전극을 형성하는 매우 간단한 제조 방법을 채택하고 있다. 현재 연구 수준의 셀 변환효율은 최고 10.6%<sup>9)</sup> 정도이다.

재료가 저렴하고 인쇄법이나 잉크젯법 등의 도포 공정으로 간단하게 대면적 태양전지를 제조할 수 있기 때문에 제조단가를 줄일 수 있고 플라스틱 필름 위에도 막을 형성할 수 있으며 색상이나 형태를 다양하게 할 수 있어 휴대형(portable) 전자기기용 전원이나 웨어러블 (Wearable) 전원 등에도 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

7) Science, Vol 334, pp. 629-634, 2011.

8) Solar Cell Efficiency Tables Version 38, Progress in Photovoltaics : Research and Applications, Vol 19, pp 565-572, 2011.

9) US-Korea Workshop for Joint PV R&D Project Development, UKC 2012, 2012.



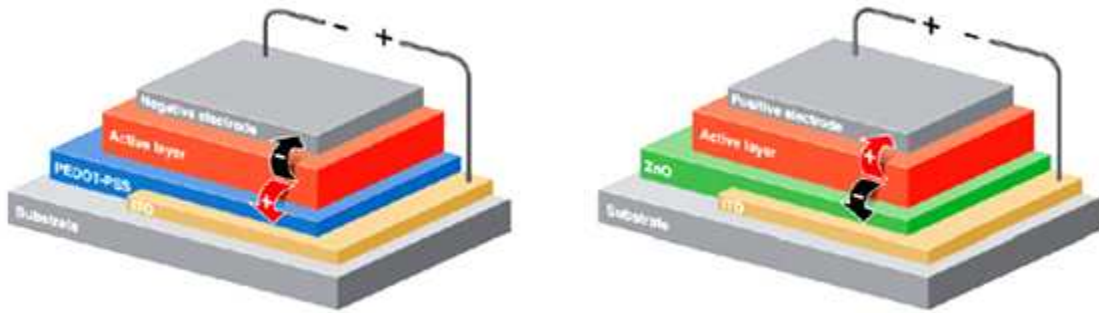


그림 3-8. 유기태양전지 (OPV); (좌) 전통적인 구조, (우) 역전 구조

### 3.1.4. 차세대(Emerging) 태양전지:

#### ① 양자점(QD, Quantum Dot) 태양전지

양자점이 만들어 내는 양자효과를 이용하는 것이 양자점 태양전지로서 현재까지는 기초연구 단계이지만 그림 3-9을 보면 이론 변환효율이 60% 이상으로 매우 높다. 광이 투과하는 손실과 열에너지 손실이라는 결정질 Si 태양전지가 갖고 있는 두 가지 단점은 양자점을 이용하면 해결할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

양자점이란 직경이 수 nm 크기로 작은 반도체 나노 결정을 말한다. 그 주위는 충분히 두껍고 높은 전위 장벽으로 둘러싸여 있으며<sup>10)</sup>, 이런 양자점은 「양자 크기효과」, 「중간 밴드」, 「캐리어 에너지 완화시간 증대」인 양자효과를 만들어낸다.

양자점 태양전지는 이 양자효과에 따라 그림 3-10과 같이 분류된다.

- 양자점 사이즈 효과를 활용한 탠덤(tandem) 방식
- 중간 밴드를 활용한 중간 밴드 방식
- 캐리어의 에너지 완화 시간 증대를 활용한 MEG(Multiple Exciton Generation) 방식과 Hot 캐리어 방식

10) 나노 입자가 충분히 두껍고 높은 전위장벽에서 3차원적으로 둘러싸여 있는 경우에 양자점으로 되고 장벽에 둘러싸여 있지 않은 나노 입자는 단지 작은 입자임. 양자점은 현재까지 반도체 레이저나 초고속 광스위치, 양자 컴퓨터 소자 등에 적용되고 있음.

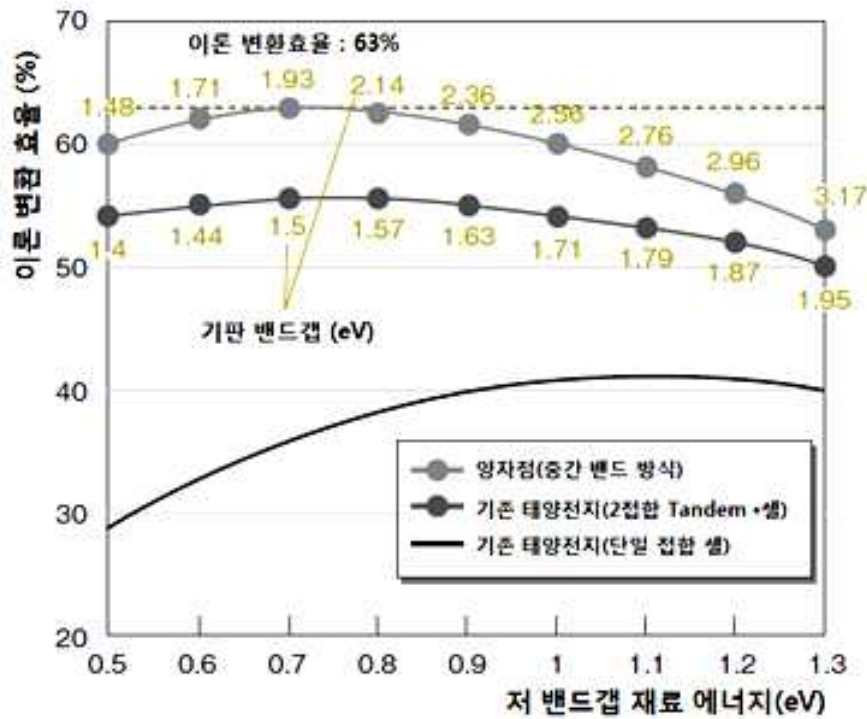


그림 3-9. 양자점 태양전지의 이론적 광변환효율

1) Tandem 방식과 (2) 중간 밴드 방식은 폭넓은 파장의 광 흡수를 이용하고, 단일접합 태양전지에서 태양광이 투과해버리는 손실을 줄이는 한편 (3) MEG·Hot 캐리어 방식은 높은 에너지의 광을 활용하며, 열에너지의 손실을 줄이기 위한 양자효과를 이용한다.

## ② 플라즈몬(Plasmon) 태양전지

플라즈몬은 광학적 두께를 일정하게 유지하면서 PV 흡수층의 물리적 두께를 줄이는 방법으로 제안된 차세대 태양전지 기술로서, 태양전지로 입사된 광을 광흡수층에서 잘 분산, 집중 또는 공명현상 등을 통하여 박막 태양전지의 흡수층의 역할을 극대화하기 위한 방법으로 제시되고 있다. 현재까지 검토되고 있는 박막 태양전지에 대한 플라즈몬 광 트랩 방법은 [표 3]과 같고 플라즈몬 태양전지는 태양에너지의 특성 중 파장을 이용하여 결정구조의 격자 공명, 금속과 결정질 실리콘 계면 Violation 등을 이용하여 박막 태양전지

광흡수층의 특성을 높이는 것이다.

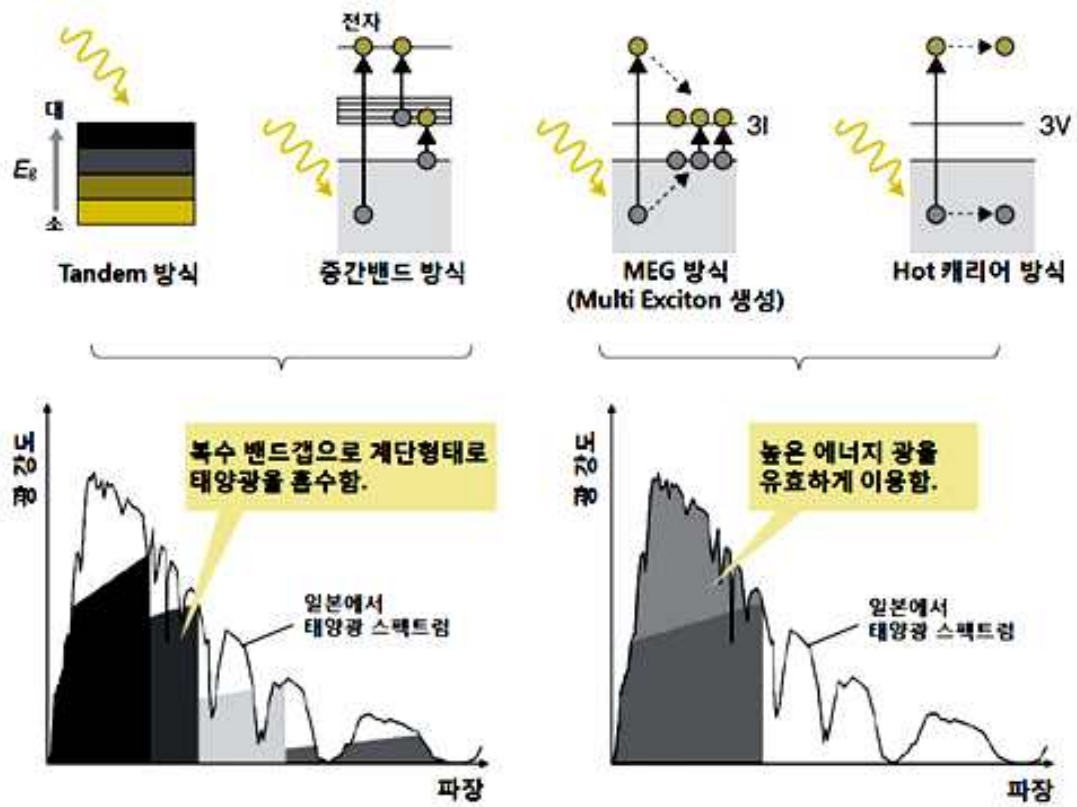


그림 3-10. 양자점 태양전지의 폭넓은 광과 높은 에너지 광 이용

표 3-2. 박막 태양전지의 플라즈몬 광 트랩

방식	그림	특징
광 분산		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 슬라 셀 표면에서 금속 나노입자의 산란에 의한 광 트랩</li> <li>• 셀에서 유효 광학 경로 증가</li> </ul>
광 집중		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 반도체 내부에 있는 국지화된 표면 플라즈몬의 여기에 의한 광 트랩</li> <li>• 반도체 내부에서 전자-정공쌍 생성</li> </ul>
SPP적용 광트랩		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 금소/반도체 계면에서 표면 플라즈몬 분극의 여기에 의한 광 트랩</li> <li>• 셀에서 유효 광학 경로 증가</li> </ul>

\* SPP : Surface Plasmon Polariton

## 3.2 플렉시블(flexible) 태양전지 기술

### 3.2.1. 플렉시블 태양전지 기술 동향

두께 150  $\mu\text{m}$ 이상의 결정질실리콘과 Superstrate구조의 CdTe박막태양전지는 플렉시블화 하는데 난점이 있는 반면 Substrate구조의 CIGS박막태양전지는 플렉시블태양전지에 가장 적합하다. [그림 3-11] 2013년 1월 EMPA (스)의 Tiwari 박사그룹은 폴리이미드 (Polyimide)를 유연기판으로 한 플렉시블 CIGS 박막태양전지로 20.4%의 고효율 기록하였고, 이 기술을 바탕으로 Flisom (스)에서 서브모듈효율 14.8%를 달성하여 CIGS박막태양전지의 플렉시블화 적합성을 보여준 바 있다. 플렉시블 CIGS박막태양전지 제조를 위하여 폴리이미드나 세라믹과 같은 비금속 및 티탄, 스테인레스스틸, 알루미늄과 같은 금속과 같은 다양한 유연기판소재들이 시도되고 있다. [그림 3-12]



그림 3-11. 박막태양전지의 구조; (좌) Superstrate구조, (우) Substrate구조

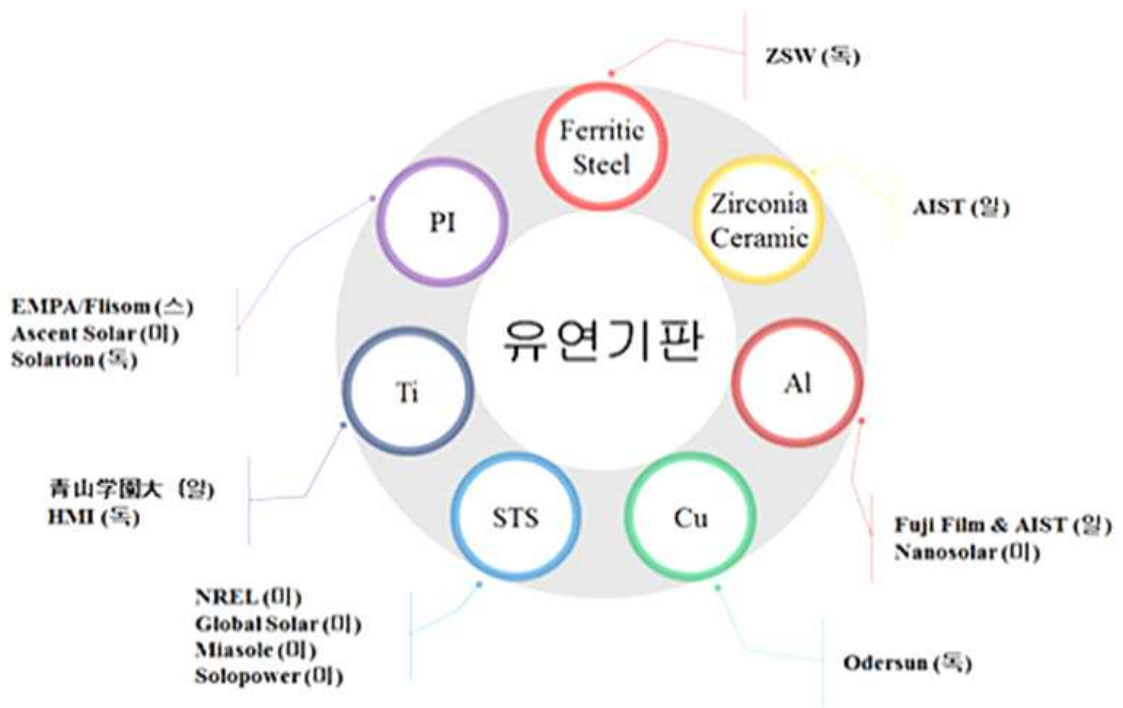


그림 3-12. 플렉시블 CIGS 박막태양전지용 유연기판 소재

플렉시블 CIGS박막태양전지는 일관된 외형으로 인하여 심미적으로 우수한 특성을 보이며, 결정질실리콘 태양전지와 달리 간접광이나 경사광에 대해서도 안정된 발전성능을 보이므로 건물이나 포터블 용도에 적용시에 매우

유리할 것으로 생각된다.



그림 3-13. 플렉시블 CIGS박막태양전지 공정기계; (좌) Solopower, (우) Global Solar

표 3-3. 플렉시블 CIGS 박막태양전지 제조현황.

업체	국가	증착법	유연기판	셀	모듈	비고
Ascent Solar (TFG Radiant)	미국 (중국)		폴리이미드	-	11.7%	-
Flisom	독일	동시증발법	폴리이미드	-	14.8%	서브모듈 EMPA
Fujifilm	일본	동시증발법	알루미늄	-	15.9%	서브모듈 AIST
Global Solar (Hanergy)	미국 (중국)	동시증발법	스테인레스스틸	15.5%	13.2%	서브모듈 R2R
Solarion	독일	동시증발법	폴리이미드	15.7%	-	-
XsunX	미국	동시증발법	스테인레스스틸	16.4%	-	Si셀 크기
NuvoSun (DOW)	미국	스퍼터링	스테인레스스틸	13.0%	-	지붕
Midsummer	스웨덴	스퍼터링	스테인레스스틸	15.8%	14.1%	Cd-free
Miasole (Hanergy)	미국 (중국)	스퍼터링	스테인레스스틸	17.3%	15.7%	All Sputter
Solopower	미국	전착법	스테인레스스틸	15.36%	13.4%	Certified
Nanosolar	미국	프린팅	알루미늄	17.1%	-	-

플렉시블 CIGS박막태양전지의 제조에 있어서 해외의 선진업체들은 이미 스테인인레스와 폴리이미드로 크게 양분되는 금속과 고분자를 기반으로 한 플렉시블태양전지 제조기술을 크게 선도하고 있다.

최근 플렉시블 CIGS박막태양전지의 산업화추세는 기술을 바탕으로 하는 미국과 유럽 그리고 자본 이용하여 기술적 핸디캡을 극복하고자 하는 중국으로 나눌 수 있다.

Global Solar (미국)는 2008년부터 스테인레스 스틸을 기반으로 한 플렉시블 CIGS박막태양전지를 생산하기 시작했으며 2010년부터 11%효율의 휴대형 충전모듈과 PowerFlex BIPV모듈의 지붕설치 등으로 시장을 넓혀가고 있었으나 2013년 7월 Hanergy(중국)에 인수되었다. [그림 3-14(a)]

Ascent Solar (미국)는 폴리이미드를 기반으로 한 플렉시블 CIGS박막태양전지를 생산하고 있으며 핸드폰 충전용 EnerPlex제품을 생산하여 2013년 3분기에는 2분기에 비하여 22%의 매출신장을 달성했으며, 2013년 7월 중국 숙천시 (Suqian)와 조인트벤처를 협약하고 다양한 소비자용품 제조를 위한 공장을 건설 중에 있다. [그림 3-14(b)]

SoloPower (미국)는 진공방식이 아닌 비진공 전착법에 의해 스테인레스를 이용하여 플렉시블 CIGS박막태양전지를 생산하는데, 2006년 캘리포니아 산호세에서 파일럿라인 가동을 시작한 이래 2010년 11%의 효율로 UL1703 및 IEC61646과 61730을 획득하였다, 2012년 10월 오레건주 포틀랜드에 400 MW 규모를 목표로 한 공장을 신설하였다. [그림 3-14(c)]

Flisom(스위스)은 인도의 Tada그룹을 포함한 투자자들의 지원을 받아 2013년 2월 취리히에 생산규모를 15 MW급의 설비를 갖추고 EMPA의 폴리이미드 기판의 고효율 플렉시블 CIGS박막태양전지 기술을 이전받아 R2R공정을 통한 저가 플렉시블 태양전지모듈의 대량생산을 위한 양산공정을 개발 중이다. [그림 3-14(d)]

Solarion(독일)은 R2R (roll-to-roll)공정으로 평균 10%효율의 플렉시블 CIGS 박막태양전지를 생산하는 기업으로서 20 MW규모의 공장을 라이프찌히에 세우고 2012년 7월부터 생산을 시작했으며 시장진입을 위하여 2012년 말에 IEC/EN 61646 및 61730-1과 61730-2의 인증을 획득하였다. [그림 3-14(e)]



(a)



(b)



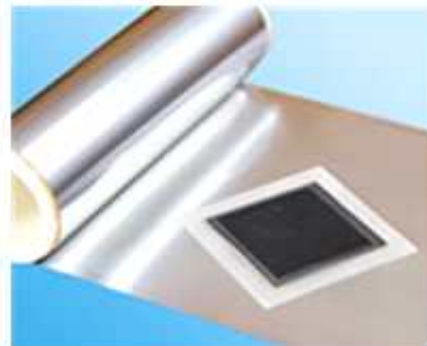
(c)



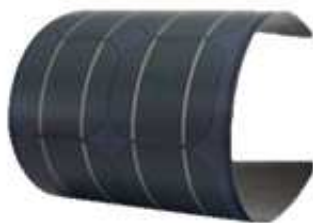
(d)



(e)



(f)



(g)

그림 3-14. 플렉시블 CIGS 박막태양전지; (a) Global Solar PowerFlex, (b) Ascent Solar EnerPlex, (c) SoloPower Solar SP3S, (d) Flisom Flexible CIGS., (e) Solarion Flexible CIGS, (f) Fujifilm Flexible CIGS, (g) Midsummer Flexible CIGS.



Fujifilm (일본)은 AIST와 공동개발을 진행하여 알루미늄기판을 Anodization 하여 표면에  $Al_2O_3$ 를 형성한 유연기판을 이용하여 2010년 10월에  $0.486\text{ cm}^2$  와  $72\text{ cm}^2$  크기의 셀에서 각각 17.6%와 12.5%을 얻고, 2011년 6월에는  $0.488\text{ cm}^2$  크기의 셀에서 각각 18.1% 그리고  $72\text{ cm}^2$  서브모듈에서 15.0% 효율을 기록하였다. [그림 3-14(f)]

Midsummer (스웨덴)는  $300\ \mu\text{m}$ 두께의 스테인레스스틸 유연기판 위에 버퍼층을 포함한 전공정을 All Dry & All Vacuum 고속 스퍼터링 증착하는  $225\text{ cm}^2$ 크기 Cd-free 모듈에서 15%의 효율을 내고 있으며, 이 업체의 5 MW용량의 DUO 턴키 시스템은 콤팩트하고 증설이 용이한 제조설비로서 CIGS 화합물 타겟을 이용하여 생산시간을 단축하는 동시에 제조단가도 낮추고 있다. [그림 3-14(g)]

Hanergy (중국)은 최근 CIGS박막태양전지 업계에 있어 가장 적극적인 움직임을 보이고 있는데, 2012년 독일의 Solibro와 미국의 Miasole를 인수한 이후 2013년 7월에는 미국의 Global Solar를 인수하여 CIGS 박막태양전지 기술장벽을 자본으로 극복하고 Global사업화를 위해 싱가포르로 Headquarter를 옮기고 첫 번째 사업으로 그리스에 15억유로를 투자하여 1 GW급 생산설비를 갖출 예정으로 알려졌다.

이와 같이 플렉시블 CIGS 박막태양전지 시장에 폴리이미드와 스테인레스를 유연기판으로 한 제품들은 출시되어 판매되고 있거나 계획 중에 있으나 태양전지의 성능과 내구성면에서는 유리 기판을 이용한 Rigid형에 비해 아직 많은 개선이 필요하며 이러한 점에서 양쪽 기판의 특성들을 모두 지니고 있는 유연 유리 기판의 이용도 적절한 선택일 수 있다.

### 3.2.2. 플렉시블 CIGS 박막태양전지 기술이슈

#### ① 롤투롤(R2R) 공정

동시증발법, 스퍼터링, 전착법, 프린팅법 등을 망라하여 R2R 공정에 적합한 초저가 CI(G)S 광흡수층 제조기술 개발함에 있어서 폭 방향 그리고 길이 방향의  $Cu/(Ga+In)$  및  $Ga/(Ga+In)$ 의 공정 목표값을 설정하고 그에 대한

Operation Window 를 3% 이내로 제어할 수 있도록 하며 플렉시블 용도에 적합하기 위해서는 광흡수층의 두께를 1  $\mu\text{m}$  내외로 최소화할 수 있는 기술이 요구된다. 그림 3-15 와 그림 3-16 은 각각 롤투롤(R2R) 공정도와 활용 실례를 보이고 있다. 스텐레스스틸, 폴리이미드 및 박형 유리기판 등의 사용기판의 종류와 두께에 따라 굽힘 곡률반경이 달라지므로 플렉시블 CIS 박막태양 전지 적용 시에 적합한 기판의 유연성, 열팽창 등의 특성에 대한 고려가 필요하다.

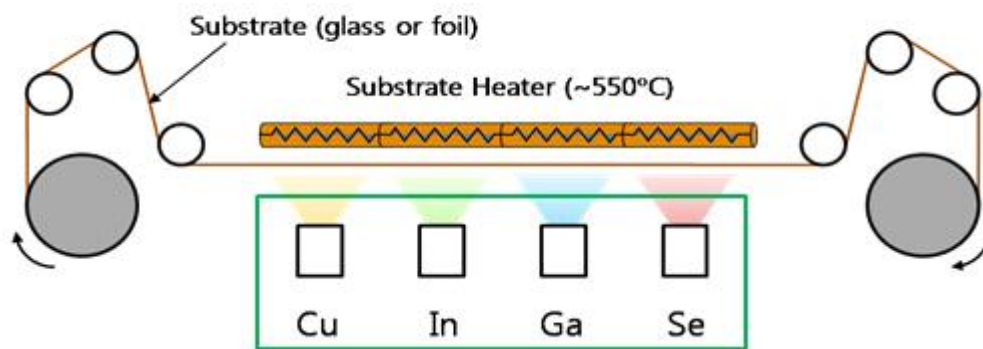
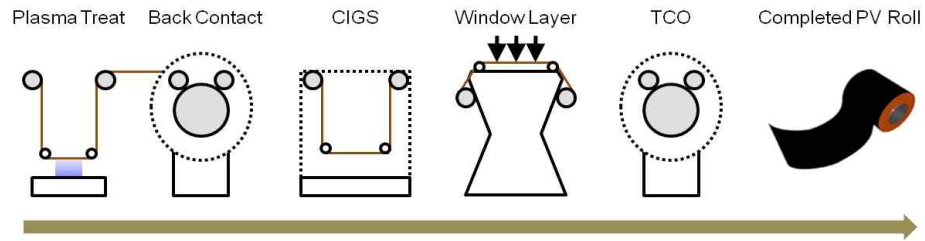


그림 3-15. 플렉시블 CIS 인라인(in-line) 증발법에 의한 롤투롤(R2R) 공정도 실례

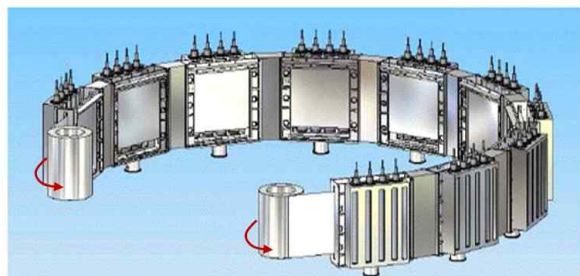


그림 3-16. SoloPower Roll-to-Roll 제조장치

롤투롤(R2R) 플렉시블 태양전지의 저가화 기대감은 높은 전환효율을 유지하면서도 스루풋(throughput)의 향상과 소재 사용의 효율화에 기인한다. 그림 3-16 에서 보듯이 고효율을 흡수층의 제조가 유리기판의 경우와 동일하게 유지하면서도 포일(foil) 기판소재를 풀고(unwind) 되감(wind)으면서 끊임없이 연속적으로 양산을 할 수 있을 것으로 기대가 되기 때문이다. 이를 롤투롤(roll-to-roll) 공정이라고 부른다. 현재 산업화가 이루어 지고 있는 롤투롤은 두가지 방법으로 진행되고 있다. 그림 3-17 은 롤투롤 양산화 공정방식에 대한 도식도이다. 먼저, 기판 롤을 CIGS 박막 제조공정 때마다 풀기-되감기(unwind-wind)를 되풀이 하면서 진행하는 방식이다. [그림 3-17(가)]



(가)



(나)

그림 3-17. 롤투롤(R2R) 공정방식; (가) 장비별(Ascent Solar),  
(나) 전공정별(Miasole)

대부분 이 방법을 채택하고 있는데 그 이유는 증착속도, 진공 및 비진공 환경 등 각단위 공정의 최적화된 증착조건에 따라 박막제조를 수행할 수 있기 때문이며, 따라서 전 공정은 롤을 각 박막층의 공정마다 옮겨가면서 전 과정을 마치게 된다. 이 방법은 박막제조의 편리성 때문에 Ascent Solar,

Solopower 및 Solarion 등 대부분 기업에서 활용하고 있다. 한편, 직물공장의 옷감을 짜듯 모든 과정을 하나의 롤을 공급하여 태양전지 제조를 마치는 방법이 있다. [그림 3-17(가)] 각 단위공정의 박막제조 특성이 다르기 때문에 한 롤의 포일(foil)기판을 공급하여 태양전지를 제작하는 것은 상당한 기술적인 어려움이 있는 공정방식이다.

## ② 플렉시블 박막태양전지 기판

플렉시블 CIGS 박막 태양전지용 기판 소재의 선정은 CIGS 제작 공정을 고려할 때, 다음과 같이 여러 가지 점을 만족해야 한다.

첫째, 기판의 진공 적합성이다. 특히, 고온에서의 진공 특성에 부합되어야 한다.

둘째, 열적 안정성이 필요하다. CIGS 흡수층은 기판온도가 최대 500~600°C 정도로 유지되어야 한다. 고온 공정 특성 때문에 사용되는 기판 열팽창계수가 CIGS 흡수층과 유사하지 않으면 급격한 온도 변화에 따른 스트레스로 인하여 박막의 박리 및 균열 현상이 나타날 수 있으므로, 기판 소재의 열팽창계수를 함께 고려해야 한다.

셋째, 기판의 내화학성이 필요하다. 구성요소인 Cu, In, Ga, Se 중 Se 원소는 강한 반응성을 갖고 있으며, 고온 공정이 진행되므로 이런 환경에서 기판 소재가 손상되지 않아야 한다. 또한 버퍼층으로 사용되는 CdS 황화합물 용 화학 약품 및 물질 특성으로 인한 부식에 강한 기판 소재가 고려되어야 한다.

넷째, 내습성이 필요하다. CIGS 태양전지는 강렬한 태양광이 쬐이는 실외에서 사용되는 부품인데 습기에 취약한 모듈은 단 시간 내에 급격한 성능 저하가 나타나게 된다. 마지막으로 표면 거칠기의 영향을 고려해야 한다. 기판 표면에서 돌기나 공동 등과 같은 표면형상의 급격한 변화가 있을 경우 상하부 전극 사이에 분로를 형성할 우려가 높다. 또한, 불순물에 대한 확산 방지막이나 전기적인 절연막을 형성할 때도 표면의 거칠기는 소자 특성에 많은 영향을 미치게 된다. 소다석회유리 (soda-lime glass; SLG)는 위에 기술한 모든 요구조건들을 만족하기 때문에, CIGS 박막 태양전지 제작에 가장 많

이 사용되고 있다. 또한, 유리 기판에 포함되어 있는 나트륨(Na) 성분은 CIGS의 박막 특성을 향상시키는 효과도 얻을 수 있는 장점도 있다. 그러나, 유리는 깨지기 쉽고, 구부림에 취약한 단점이 있다.

### ③ 플렉시블 모듈 패키징

플렉시블 태양전지 모듈 패키징에는 위의 셀 집적화 방식에 따라서 두 가지로 제작된다. 먼저, 구부릴 수 없는(rigid) 유리판-유리판 (glass-to-glass) 모듈이다. 그림 3-18은 유리판 모듈과 플렉시블 모듈의 개략도이다. 개별 소자를 집적한 태양전지 모듈을 두 유리판 사이에 봉입하는 방법이다. 기타의 모듈화 과정은 결정질 실리콘 태양전지와 동일하다. 다음은 유연성을 유지하기 위하여 유리판 대신에 플라스틱 시트 (sheet)사이에 봉입하는 플렉시블 모듈이다. 이 두 모듈의 차이점은 장시간 사용에 대한 신뢰성이다. CIGS는 소재의 특성상 습기에 약하기 때문에 습기로부터의 완벽한 차단이 되어야 한다. 이와 같은 습기방지 특성은 유리판이 완벽하게 제공하고 있는 반면, 이런 용도에 맞는 고분자 플라스틱 소재가 아직 만족할 만한 특성을 보여주고 있지 못하고 있으며, 일부 기업에서 시제품으로 제공을 하고 있으나 유리판에 비하여 수 배의 고가에 그것도 제한적으로 출시되고 있는 실정이다. 이런 이유 때문에 플렉시블 모듈은 유리판 모듈과 달리 봉지 (encapsulation) 소재로 유리를 사용할 수 없는데, 이를 위한 저가의 플렉서블 인캡슐레이션 소재가 필요하다. 이에 요구되는 습기투과도 특성과 산소투과도 특성을 만족시키는 소재 개발 연구가 진행되고 있다. 그렇게 때문에 이 플렉시블 CIGS 모듈의 수명이 유리판 모듈에 비하여 수명이 대단히 짧다.

플렉시블 CI(G)S 박막태양전지의 내구성문제는 시장의 확대에 커다란 걸림돌이 되어 왔으며 이러한 문제를 발생시키는 가장 큰 원인으로서는 윈도우층으로 사용되는 ZnO가 수분에 매우 취약하기 때문이며 이 때문에 a-Si 박막 태양전지의 경우  $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ g/m}^2/\text{day}$  정도의 수분투과도를 가지는 재료이면 충분하므로 대부분의 단일층 구조의 폴리머재료를 이용할 수 있었지만 CI(G)S 박막태양전지의 경우에는  $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ g/m}^2/\text{day}$  정도로 한층 더 높은 수준의 수분차단을 요구되고 있다.

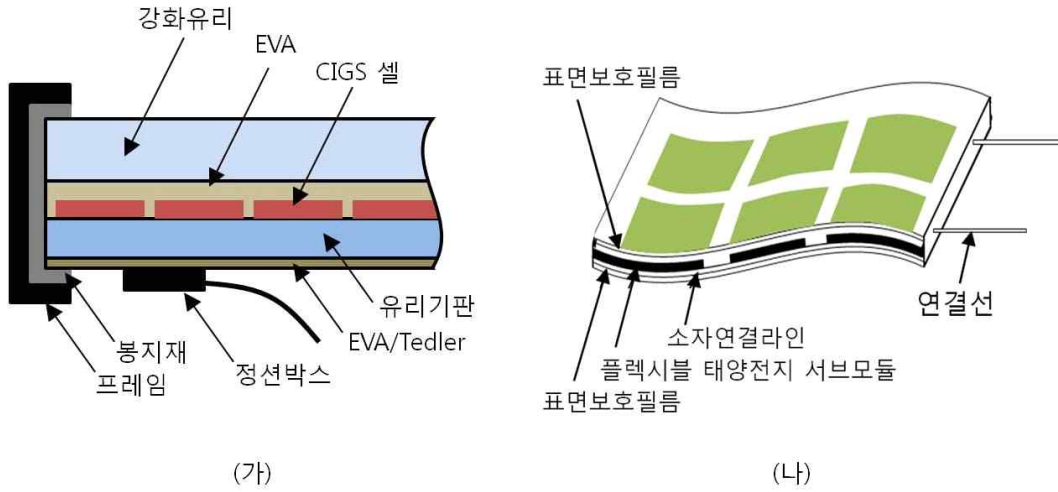


그림 3-18. 플렉시블 태양전지 모듈 구성 : (가) 유리기판 모듈 (나) 플렉시블 모듈

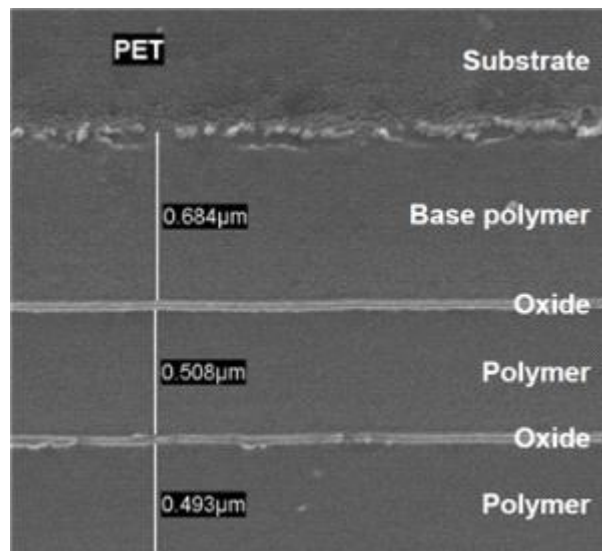


그림 3-19. Dyad 플렉시블 박막태양전지 모듈 구조

기존 세라믹과 폴리머로 이루어지는 다층의 Dyad 구조는 그림 3-19 에 예시하였다. 플렉시블 CI(G)S 박막태양전지 가격이 상승하는 원인이 되어 왔으며, 수분과 산소의 투과를 차단하면서 투명한 저가의 플렉시블 Encapsulation 을 위하여 Dyad 기반 또는 ALD 기반의 재료들이 3M, Tera-Barrier

Films, Beneq, Cambridge NanoTech, DuPont 등에서 개발되고 있으나 앞으로 개발에는 다소의 시간이 소요될 것으로 예상되므로, 이러한 기존의 Encapsulation 소재들을 대신하여 유연유리를 상판과 하판에 각각 적용하여 융접할 수 있는 기술이 개발된다면 일체화된 구조로 유리 기판에 상응하는 내구성을 기대할 수 있다.

#### ④ 플렉시블 모듈 장기내구성 테스트

초기 태양광시장에서의 태양광 패널은 무조건 가격이 싼 제품이 경쟁력을 가지는 경향을 보였으나 근래에는 시장이 성숙해지기 시작하면서 태양광모듈은 장시간 사용해야하는 제품이라는 인식이 확대되어 가격적인 요소와 더불어 내구성 및 품질안정성을 중시하는 쪽으로 변화되고 있다. 태양전지는 최소 20년 이상, 옥외 환경에 노출된 상태에서 무리 없이 작동되어야하기 때문에 어느 산업 품목보다도 신뢰성의 확보가 중요하며, 이 신뢰성 평가기술은 제품 사용 중의 고장발생이나 사용수명 등에 대한 평가를 실시해 신뢰성을 입증하는 기술로서, 플렉시블 CI(G)S 태양전지가 상업화 진입하기 위해서는 반드시 신뢰성시험의 표준화가 마련될 필요가 있다.

환경열화에 상대적으로 안정적인 결정질실리콘 태양전지에 대한 현재의 신뢰성기준을 유기 및 무기의 박막태양전지에 바로 적용이 될 경우 잠재적 문제점을 안고 갈 소지가 있기 때문에 플렉시블 CI(G)S 태양전지에 특화된 작동성능 및 내구성 검출이 가능한 가속시험법이 새로이 개발되어야 한다.

- 내구성가속실험 - Damp Heat 테스트(85°C/85%상대습도; >1000 시간)
- Light Soaking에 대한 플렉시블 CI(G)S태양전지의 초기 특성과악 및 옥외설치를 통한 내환경성 및 열화평가 모니터링

#### 3.2.3. 국내 박막태양전지 기술 개발 동향

국내 박막 태양전지 기술은 그동안 국가의 연구개발 지원 사업에 힘입어 2014년 12월 시점에 세계 최고수준에 도달해 있다 (CIGS 태양전지: 삼성

SDI, 실리콘 박막 태양전지: LG 전자). 그러나 태양광시장의 불안한 상황은 국내 대기업의 사업철회로 이어져 매우 아쉽다. 태양광산업의 기술수준은 태양광 기술 선도국과 비교해보면 아직도 분야별로 격차가 분명히 존재하며, 이미 개발된 독자기술이나 핵심 원천기술도 지속적인 연구개발이 이루어지지 않을 경우 기술의 우월성을 유지하기 어려울 뿐만 아니라 산업으로 연결되지 않을 경우 기술을 선도하기는 불가능한 상황에 이를 것으로 판단된다. 국내에는 세계적인 태양전지 기술에 더불어 소재, 부품 및 장비 분야에 있어서 세계적으로 큰 잠재력을 보유하고 있다고 자부하고 있으며 실제 태양광 산업과 연계하게 되면 태양전지 산업을 선도할 기회가 아직도 많다.

2008년 이후, 정부의 태양광 R&D 지원이 본격적으로 확대되면서 결정질 실리콘태양전지가 극복해야 할 문제인 ‘온도 상승에 따른 효율저감 및 가격저감’을 위하여 다양한 박막 태양전지 연구가 진행되어 왔다.

- (실리콘 박막태양전지) 실리콘의 사용량을 줄이면 가격을 저감하기 위한 필요성이 대두됨에 따라 대면적 실리콘 박막 태양전지 기술개발 과제 (LG전자)들이 진행된다. 또한 Flexible 실리콘 박막 태양광 모듈 양산을 위한 핵심 부품소재를 개발하기 위한 연구 (한국철강)도 진행하였다.
- (CIGS 박막태양전지) 유리 기판 CIGS계 박막 태양전지 모듈의 제조기술 개발이 완료되었으나 (LG이노텍, 삼성SDI, 금호전기) 양산 라인 구축으로 이루어지지 못하였다. 플렉시블 CIGS 박막 태양전지도 대양금속, 일진 등에서 개발을 하였으나 아직 상용화에는 이르지 못하고 있다.
- (염료감응태양전지) 소재 및 부품 등을 개발하기 위한 연구가 국내에서 활발히 진행되었으며, 고신뢰성 염료감응 태양전지 모듈 제조 및 상용화 기술도 동진세미켐에서 개발 중이다. 염료감응 태양전지를 양산하는 업체는 아직 없으나, 동진세미켐, 이견창호, 상보 등의 기업들이 상용화 개발을 추진하고 있다.
- (유기 박막태양전지) 3세대 태양전지의 대표 주자로서 원천기술을 확보하기 위한 기술개발이 진행 되었으나 다른 여타의 박막태양전지와 같



이 상용화에 근접한 개발이 보고 된바는 없다. 국가 전략사업으로 고안 정성 폴리머 태양전지 모듈제조 기술 개발 과제(코오롱인더스트리)와 유기 단분자 태양전지 서브모듈 제조 기술 개발(LG화학)을 진행 하였다. 한국화학연구원도 2011년 7.35%의 신규 광활성 소재 개발을 발표한 바가 있다.

그동안 2000년대 중반부터 현대-아반시스, 삼성 SDI, LG 이노텍, SK 에너지, 금호 등 대기업들을 중심으로 CIGS 박막 태양전지에 많은 투자가 이루어져 왔다. 2013년 4월 현대-아반시스의 사업 중단을 포함하여 대기업 중심의 CIGS 상용화 계획도 취소 또는 보류상태에 있음. 현재, 국책과제를 수행하고 있는 삼성 SDI가 파일롯 생산 상용화 연구를 수행하였다.

- 삼성SDI는 2011년부터 조기성과형 국가과제를 수행중이며 2014년말 5G급 모듈에서 16%대의 세계 최고수준의 기술을 개발하였다.
- 현대중공업은 독일 Avancis의 지주회사인 프랑스 Saint Gobain과 합작 투자로 충청북도 오창에 현대아반시스 100 MW급 공장을 세우고 사업화를 진행 중에 2013년 5월 돌연 사업을 중단하였다.
- LG이노텍은 한국에너지기술연구원의 기술을 이전받는 동시에 2008년부터 시작된 동시증발법을 이용한 “유리기판 CIGS계 박막태양전지 모듈 제조기술 개발” 과제를 마치고 2013년 사업화를 철회하였다.
- SK이노베이션은 미국의 Startup중의 하나인 Heliovolt에 총 8천만불을 투자하고 적극적인 CIGS박막태양전지 사업을 계획하였으나 추가 투자를 포기하고 사업화를 철회하였다.
- 아바코 (평판디스플레이 장비업체)는 2009년부터 국책과제를 통하여 CIGS개발을 해왔으며 제조장비 판매를 위해 2011년 미국 Stion에 346억 8500만원을 전략적으로 투자하며 장비개발에 집중 해왔다. 2012년에는 Stion이 한국법인을 설립 대구시와 협력하여 3억2천만불을 투자해 300 MW급 생산설비를 갖출 계획을 마련하였으나, 2013년 10월 Stion이 청산절차를 밟게 됨에 따라 사업방향이 불투명해졌다.

- GS칼텍스는 금호전기와 2011년말부터 “비진공 프린팅법을 적용한 CIGS 박막 태양광 서브 모듈 개발” 과제를 진행하고 있으며 프린팅법의 경우 플렉시블에 적용하기 매우 적합한 기술로서 판단된다.
- 대양금속은 국내에서 처음으로 스테인레스 기판을 이용한 플렉시블 CIGS 박막태양전지 개발을 목표로 한 회사로서 2009년 “고효율 장수명 Flexible CIGS박막태양전지 및 모듈 양산기술개발” 국가과제를 시작하고 2010년 미국 Veeco로부터 Evaporator와 Sputter를 들여와 2011년 3월 25 MW급 파일럿라인을 설비 후 셀효율 7.74% 및 모듈효율 5%를 달성한 바 있다.
- 2015년 6월 한국에너지기술평가원은 플렉시블 CIGS 장비 개발과제를 지원하게 되었으며, 이 플렉시블 태양전지 기술 및 장비 개발은 (주)야스, (주)다쓰테크, 한국전자통신연구원, 청주대 등 4개 전문기업 및 연구기관이 공동으로 국내의 플렉시블 박막태양전지 기술개발을 수행하고 있다.

## 제 4 장. 플렉시블 태양전지의 웨어러블 디바이스 활용방안

플렉시블 태양전지는 다음과 같은 특징이 있다. 높은 기계적 유연성으로 다양한 형태로 쉽게 변형될 수 있으며 혁신적인 크기와 모양으로 제작될 수 있다. 다양한 길이와 폭의 모듈을 제작할 수 있어서 건축물 외장과 같은 거대한 크기에도 적용이 가능하다. 유리와 같이 무거운 기판을 사용하지 않기 때문에 모듈의 두께가 얇고, 무게가 혁신적으로 가볍다. 상용 모듈 기준으로 결정질 실리콘 모듈 또는 유리기판 박막 태양전지는 단위무게(kg) 당 10 W 내외의 에너지 밀도를 갖는 반면 플렉서블 CIGS 박막 태양전지는 단위 무게 당 최고 80 W 이상의 에너지 밀도를 확보할 수 있는 것으로 알려졌다. 또한, 플렉시블 모듈은 부서질 수 있는 유리기판 모듈에 비하여 파손에 강한 장점이 있다. 플렉시블 태양전지 모듈은 기본적으로 저가의 롤투롤(roll-to-roll) 공정을 이용하게 되는데, 이 공정은 낮은 생산 에너지가 투입되기 때문에 에너지 회수기간이 짧은 장점이 있다.

물론 플렉시블 태양전지가 대용량의 전력생산용으로도 충분한 경쟁력을 확보해 가고 있지만 타 기술과 융합을 통한 응용 산업분야로 신시장 창출에 더 유리한 점이 있다. 플렉시블 모듈의 형태가 제한적이지 않기 때문에 직물에도 적용 가능하며, 대규모 건물의 곡면에도 설치 응용이 쉽다. 또한 가벼운 기판 소재를 활용하기 때문에, 자동차 및 비행기와 같은 곳에도 적용할 수 있다. 활용 예로는 건물응용(BIPV), 솔라 충전기, 태양전지 충전 핸드폰과 같은 IT 부품 독립전원, 군용 에너지 텐트와 같은 국방응용 및 차량 탑재형 태양전지 교통수단과의 융합등 새로운 산업을 확장해 나가고 있다. 이들 대부분은 구부림이 자유로운 플렉시블 박막태양전지의 활용이 유리한 응용 분야들이다.

유연성이 확보된 태양전지는 곡면이 많은 기존의 외부 모양에 맞게 변형이 가능하므로, 향후 태양광발전 시장의 블루오션 분야인 건물용 BAPV(BIPV), 차량용 VIPV 또는 군사용, 노트북, 휴대폰 등 Portable Devices의 전원 등에 적극적으로 활용할 수 있으며, 타 박막 태양전지 분야 등에 적용 가능한 양산 기술 확보도 가능하다. 유연기판을 적용할 수 있는 장비기술을 확

보하게 되면, 기술적 우위 선점뿐만 아니라, 관련 장비 산업 인프라를 선진국에 비해 단기간에 확보할 수 있게 됨으로써 산업 경쟁력 제고에도 기여할 수 있다.

웨어러블 스마트 IT 소자의 전력원으로서 기능성, 심미성, 환경적응성 등 다양한 사양을 요구받게 되는데 이를 만족하는 태양전지로서는 플렉시블 박막태양전지가 가장 적절한 해결방안을 제공할 수 있다.

플렉시블 태양전지는 경량으로 설치가 간단하고 저렴하고 다양한 형태·디자인의 제품으로 제조가 가능하여 다양한 에너지 융합형 파생상품으로 부가가치를 올릴 수 있어 점차 심화되고 있는 글로벌 태양광시장의 가격하락 경쟁을 회피할 수 있다.

플렉시블 박막태양전지 상용화 기술은 국내 태양광기술 인력육성의 동기 부여를 주는 동시에 이들 인력을 흡수하여 활발한 고용창출로 이어지게 될 것으로 전망된다. 생산량 100 MW당 대략 150~200명 정도의 고용이 예상되며 생산이 GW급으로 확대되면 수천명의 고용창출이 가능하며 이와 연계한 밸류체인 산업의 고용효과를 포함하게 되면 약 일만명의 신규 고용창출이 기대되는 산업이다.

- 신재생에너지는 다른 에너지산업에 비해 노동집약적 측면이 강하여 태양광 1 MW를 보급할 때 35.5명의 고용유발효과가 있다고 알려져 있으며, 1 GW의 설치를 가정했을 때 전체적으로 35,000명의 고용이 유발될 것으로 보여 지역의 경제 활성화에 상당한 역할을 할 것으로 기대된다.
- 현재 구축되어 있는 국내의 태양광기반을 바탕으로 세계 태양광 시장 추이를 적시에 읽어 발 빠르게 기술우위 경쟁력 있는 산업을 육성하며, 향후 ESS 및 EV 등과 연계한 융복합산업으로 키워나갈 수 있는 기반을 마련될 것으로 보인다.
- 우리나라는 반도체 및 LCD를 비롯한 디스플레이 산업에 이용되는 정밀세정이나 웨이퍼가공과 그리고 부품·장비 제조 기업이 다수 포진해 있어 유연유리산업은 기존산업의 기술적 기반을 이어 받을 수 있는 장점이 있어 관련산업에 대한 활성화효과를 기대할 수 있다.

- 다량의 유해성 원소를 포함하고 있는 폐액을 처리하는 비용 또한 실제 모듈 제조비용의 급격한 상승요인으로 작용하고 있다. 따라서, Cd-free 버퍼층 물질을 건식공정으로 제조할 경우, 상기 언급한 폐액 처리비용 뿐만 아니라, 연속공정 진행이 가능하므로 모듈 제조시간을 대폭 단축할 수 있으므로 최종적으로 모듈제조단가를 낮추는 데 크게 기여할 것으로 판단된다.

## 제 5 장. 결론

웨어러블 디바이스(wearable device)는 무선 센서 및 통신 기술이 융합된 모바일 기기로서 핵심 기술로는 센서, 무선통신, 배터리(에너지 전원) 등 하드웨어와 임베디드 소프트웨어, 디지털 신호 처리 등 소프트웨어 등이 있다. 안경, 시계, 액세서리처럼 몸에 착용하거나 부착하여 몸의 일부처럼 지니고 다니게 될 웨어러블 디바이스는 언제 어디서나 지속적으로 사용자와 소통할 수 있다. 이러한 웨어러블 기술(wearable Technology)은 이미 미래 첨단기술의 메가트렌드로서 자리매김하고 있다.

웨어러블 디바이스가 일시적인 트렌드가 아닌 지속적인 성장 산업으로 자리매김하기 위해서는 극복해야 하는 문제점이 많이 존재한다. 이 분야 신시장형성 및 저변확대를 위한 극복요소로서 안정적인 배터리기술(전원기술)과 광대역 무선 통신이 지원이 되어야 하고, 또한 심미적인 가치도 개발되어야 한다. 특히, 적절한 에너지공급 수단이 없으므로, 자체 배터리를 갖고 있는 스마트폰이나 네트워크 기기 등의 주변장치로 그 역할이 제한이 되고 있는 점은 아쉬운 부분이다. 즉, 웨어러블 디바이스의 짧은 배터리 수명으로 인해 항상 착용(always on)의 가치를 제공 받지 못하고 있는 것이다.

결론적으로 웨어러블 디바이스의 모바일 특성을 극대화하고 이를 통한 새로운 서비스의 창출을 위해서는 자체 전원(에너지)기술의 개발이 필수적이다. 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 방안으로서 웨어러블 전원시스템 기술의 개발이 필요하다. 이와 같은 기술적 수요를 충족하기 위하여 차세대 태양전지도 웨어러블 디바이스 기술의 핵심 에너지원으로서 플렉시블 태양전지 기술, 플렉시블 이차전지 기술의 개발 및 이 두 기술을 결합 및 융합하는 통합솔루션을 제공하는 방향으로 발전해 나갈 것으로 전망된다. 플렉시블 태양전지의 원천 및 응용기술은 웨어러블 디바이스는 핵심 독립전원으로서 신산업을 위한 차세대 킬러 앱으로 성장할 수 있다. 이 기술 개발을 통하여 얻을 수 있는 효과는 다음과 같다.

#### 4.1.1. 경제적 기대효과

Juniper Research 에 따르면 2013 년 웨어러블 디바이스 시장은 14 억 달러 규모에 도달하였으며, 2018 년에 약 190 억 달러로 10 배 이상으로 대폭 성장할 것이라고 전망되고 있다. 출하량 또한 2013 년 5,400 만대에서 2018 년에는 1 억 5,000 만 대로 3 배 가까이 규모가 늘어날 것으로 예측된다.

플렉시블 CIGS 박막 태양전지 상용화 기술은 기존의 규격화되고 무겁고 딱딱한 태양전지로 인한 제한된 시장응용성을 탈피하여 BI(A)PV, 휴대형, 군사용 등과 같은 다양한 형태의 시장창출이 가능하게 한다. 해외시장 공략의 주된 목표는 높은 내구성을 발판으로 하여 국제적 대도시의 BI(A)PV 용 그리고 미국, 중동, 중국, 호주 사막지역의 발전용이 될 것이다.

- 고성능 플렉시블 CIGS의 제품화는 박막태양전지 예상시장이 2015년 10 GW, 2020년 30 GW으로 성장하게 되면 수십조 원의 시장 확보가 가능하다.
- 태양광산업은 매우 노동집약적으로서 향후 GW급으로 생산이 확대되면 수천명의 고용창출이 가능하여 우리나라 신성장 동력의 초석을 마련하게 될 것이다.
- 2015년의 박막태양전지 시장의 예상규모는 10 GW로 모듈로만 1조원의 시장이며 BOS 및 시스템 설치까지를 포함하게 되면 수조원의 시장이 예상되며, 2020년까지 30 GW의 시장으로 성장하게 되면 수십조원의 시장형성이 가능할 것으로 보여 시장적 잠재력은 충분하기 때문에 고성능 플렉시블 CI(G)S의 제품화가 관건이라고 할 수 있다.
- 연평균 18%의 성장률을 보이고 있는 태양광시장은 2020년에는 100 GW의 시장으로 증가할 것으로 예측되며 이렇게 고속으로 성장하는 시장에서 대량·고속생산을 통한 고품질 플렉시블 CI(G)S박막태양전지는 시장지배력을 가지게 될 것이다.
- 2015년부터 국내 박막태양전지의 시장이 점차 증가할 것으로 예상되는데 현재로서는 수요가 주로 수입에 의존하게 될 우려가 있으며, 유연

기관 플렉시블 CI(G)S박막태양전지는 수입대체효과의 선봉이 될 수 있을 것이다.

#### 4.1.2. 기술적 기대효과

플렉시블 박막태양전지 양산기술의 성공적 개발로 저비용 태양전지 핵심 기술 확보뿐만 아니라 신소재 및 신장비의 개발을 통한 전 분야의 고부가가치 기술 확보를 가능하게 한다. 윈도우층 진공증착기술 개발로 투명전극을 이용하는 반도체·디스플레이산업을 촉진시킬 수 있다. 또한, 나노레벨의 Fine Plating 기술개발로 칩연결용 다마센기술, 확산방지층 제어기술과 같은 마이크로일렉트로닉스산업 그리고 3D 마스크, 스탠트, 바이오센서와 같은 바이오시스템산업으로 확대시킬 수 있을 것으로 전망된다.

플렉시블 박막태양전지는 경량으로 설치가 간단하고 저렴하고 다양한 형태·디자인의 제품으로 제조가 가능하여 다양한 에너지 융합형 파생상품으로 부가가치를 올릴 수 있어 점차 심화되고 있는 글로벌 태양광시장의 가격 하락경쟁을 회피할 수 있다. 여러 요소기술을 융복합시키는 하이브리드기술은 다양한 응용제품개발의 플랫폼 역할을 하게 될 것이다.

##### 플렉시블 CIGS 박막 태양전지 상용화 기술

- CIGS 양산화 기술이 성공적으로 개발된다면 저비용 태양전지 양산 핵심 요소 기술 확보가 가능하며 신공정에 따른 새로운 공정장비의 개발을 통해 turn-key방식의 고부가가치 장비기술 확보가 가능하다.
- 요소기술 개발로 OPV, OLED, RFID, OTFT등의 관련분야 기술이 동반 발전할 것이며, 산업재산권 다수 확보가 가능하다.
- CIGS박막태양전지의 산업화를 위해서는 플렉시블화가 선택이 아닌 필수가 되어가고 있으며 이러한 흐름에 있어서 유연유리를 기반으로 한 기술개발이 이루어진다면 지금까지의 유연기관들이 갖던 한계를 뛰어넘는 고성능의 플렉시블 CIGS 박막 태양전지 구현이 가능하다.



- 개발된 건식장비 및 건식 공정기술은 현재 CIGS 박막태양전지 모듈을 제조할 수 있는 기관들이 채택하고 있는 상이한 흡수층 제조기술을 가진 기업들이 공통적으로 사용할 수 있는 핵심기술로서, 국내 모든 박막태양전지 제조업체에 제공될 수 있는 공통기술로서 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

결론적으로 몸에 착용하거나 부착하여 몸의 일부처럼 지니고 다니게 될 웨어러블 디바이스 기술은 미래 첨단산업 메가트렌드로서 자리매김하였다. 이러한 기술 추세에 맞추어 플렉시블 박막태양전지 기술은 차세대 에너지원으로서 고유의 저가, 고효율, 유연성 및 경량성 등의 여러 이점 때문에 웨어러블 디바이스 기술과 다양한 형태의 융합형 에너지 기술로 파생 발전해 나갈 수 있을 것으로 전망되며, 이로써 새로운 시장도 창출할 수 있을 것으로 예상된다.