

최신기술동향 - 태양광

2018. 8. 16.

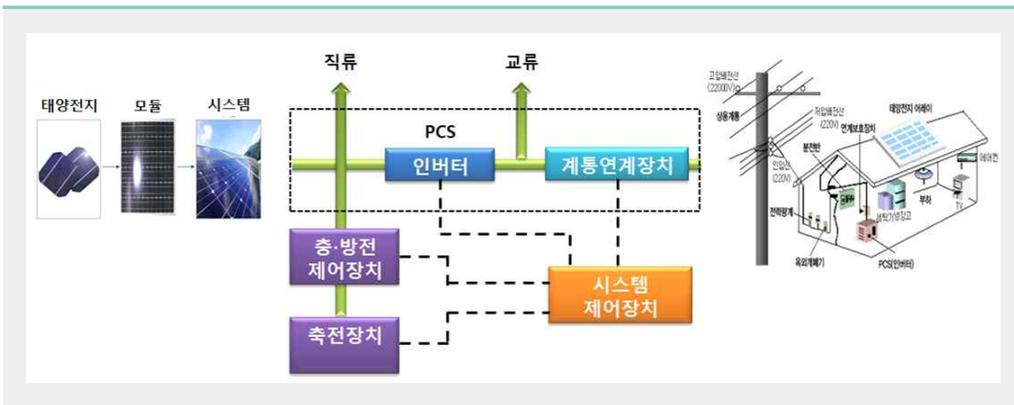


I. 기술개요

01 기술정의

- 반도체 혹은 염료, 고분자 등의 물질로 이루어진 태양전지에 빛 에너지를 받으면 반도체가 갖는 광전효과에 의해 전기에너지가 발생하는 신재생에너지 기술
- 태양전지는 전기적 성질이 다른 N형 반도체와 P형 반도체를 접합시킨 구조
- 태양전지에 빛을 비추면 반도체 내의 전자(-)는 N형 반도체로, 정공(+)은 P형 반도체로 이동함에 따라 N극과 P극과 사이에 전위차(광기전력)가 발생하게 되고, 이때 태양전지에 전구나 모터와 같은 부하를 연결하면 전류가 흐르게 되는 원리

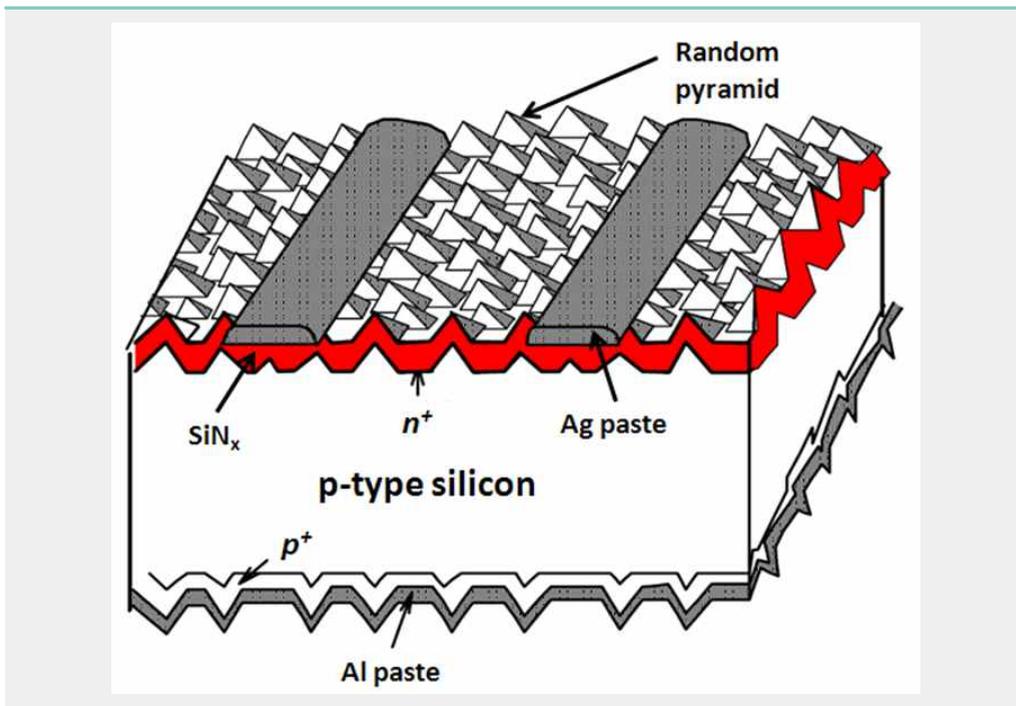
태양광 발전 시스템



02 기술종류 및 장단점

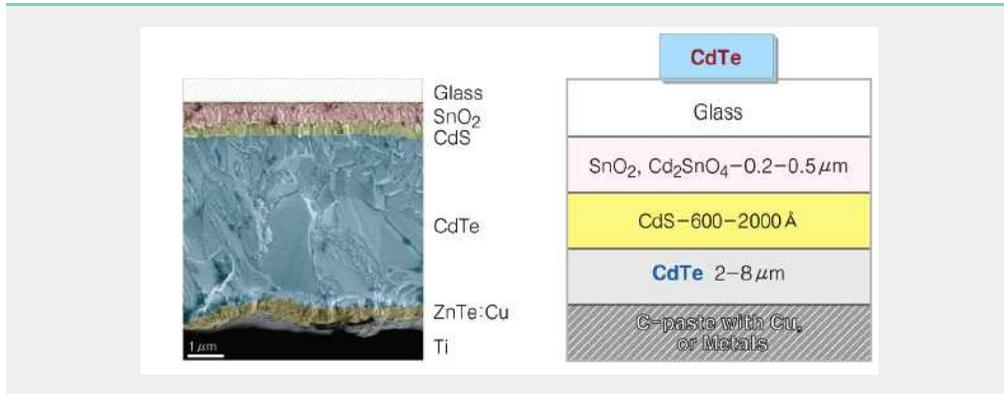
- (실리콘 태양전지) 결정질 실리콘 태양전지, 비결정질 실리콘 태양전지를 포함하며, 결정질은 에너지 효율이 높은 반면 제조 단가가 높고 비결정질의 경우 장비의존적이며 공정기술이 어려움
- 현재 Rooftop/Utility 발전시장은 결정질(단결정/다결정) 실리콘 태양전지 모듈이 점유하고 있으며, 20년 동안 초기출력 대비 80% 이상 출력발생 보증
- 최근 효율 상승 및 제조 공정 개발로 인해 모듈단가(0.5USD/W) 하락하여 박막 태양전지 모듈과 동일 단가를 형성

단결정 실리콘 태양전지 구조



- (박막 태양전지) 실리콘 대신 유리, 스테인리스 스틸 등 저가의 기판을 소재로 한 박막 형태의 태양전지로 원료에 따라 실리콘 박막 태양전지, CdTe, CIGS 박막 태양전지, 염료감응, 유기 태양전지 등을 포함하며, 실리콘 태양전지에 비해 단가가 저렴하나 제조 공정이 복잡하고 에너지 효율이 낮음

CdTe 태양전지의 기본 구조



- (차세대 태양전지) 실리콘 태양전지를 1세대, 박막 태양전지를 2세대로 분류할 때, 고효율 화합물 반도체와 페로브스카이트를 3세대 태양전지로 구분할 수 있으며, 고효율, 저가, 친환경이 장점

태양전지 기술별 장단점

구분	단계	장점	단점
실리콘 태양전지	결정질	높은 산업 점유율 생산기술 안정성 낮은 제조 단가 기관 소재 비용이 저렴	높은 제조 단가 복잡한 제조공정
	비결정질	기관 소재 비용이 저렴 대량생산에 적합 제조시 에너지 소비량이 적음	장비 의존적 공정기술 어려움 높은 장비 비용
박막 태양전지	실리콘 박막	대면적 양산 가능	낮은 효율 응용 산업 부족
	CdTe	양산 가능 가격경쟁력 확보	독성 물질 사용 원소 부존량 부족
	CIGS	높은 효율	제조공정 복잡 고가의 원소 사용
	염료감응	친환경성 낮은 제조 단가 경사각과 저광량에서도 효율 유지 반투명 및 다양한 형태 제작 가능 롤투롤 공정 이용한 양산 가능	낮은 효율 누액 가능성 타 기술과의 텐덤화 어려움
	유기	저가 공정 가능 가격경쟁력	낮은 효율 신뢰성 확보 어려움
차세대 태양전지	고효율 화합물	높은 효율	갈륨비소의 원재료비 높음 고가격 증착장비 필요
	페로브스카이트	저가의 소재 높은 효율 초박막 가능, 플렉시블화 용이	수분 취약성 납에 대한 독성

03 제조공정

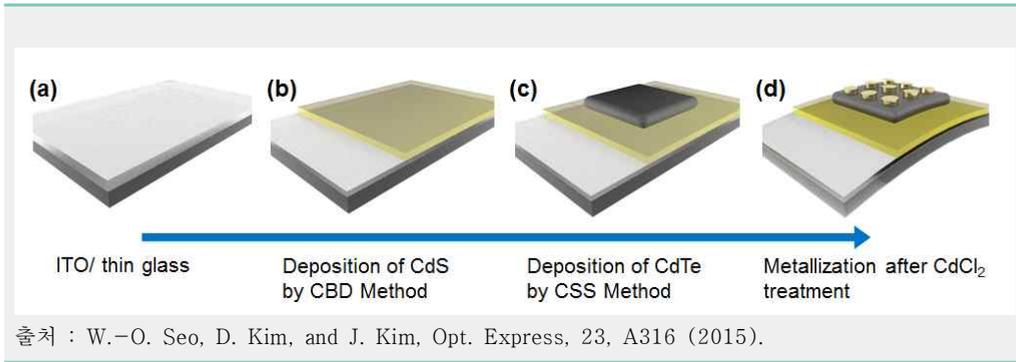
- (실리콘 태양전지) 폴리실리콘을 가공하여 잉곳, 웨이퍼를 만들고, 웨이퍼를 투입해 셀을, 셀을 어레이하여 모듈을 만들어 전력제어장치를 활용하여 최종적으로 태양광 시스템을 설치하는 과정을 따름

실리콘 태양전지 제조 공정



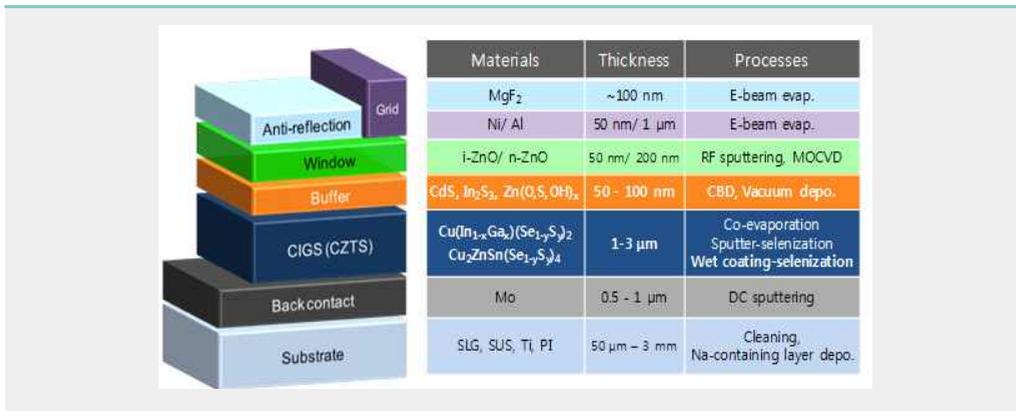
- (박막 태양전지) 투명전도성 또는 금속 기판 위에 실리콘 박막, 화합물 박막, 염료감응 박막 및 유기물 박막을 증착시켜 광흡수층으로 사용하며, 화합물을 광흡수층 물질로 사용한 태양전지
- (실리콘 박막 태양전지) 투명전극을 포함한 기판 준비, 실리콘 박막 증착 및 패턴 형성 과정을 통한 소자 제조, 유리기판에 증착하고 표면조직화(texturing)하는 패키징으로 구성
- (CdTe) CdTe와의 접합(동종접합, 이종접합)을 바탕으로 전면 투명전극과 배면전극으로 구성되며, CdTe는 진공증착법, 근접승화법, 스퍼터링, 화학기상증착법, 열분해법 등을 통해 증착

CdTe 유연 태양전지 제조 공정



- (CIGS) 유리기판 위에 후면전극 소재, 광흡수층(CIGS), CdS 버퍼층, ZnO 투명창층, 무반사층과 그리드 전극을 형성하여 제작하며, CIGS 흡수층의 제조방법으로는 동시진공증발법(coevaporation)과 스퍼터링((Sputtering) + 셀렌화법(selenization), 화학기상증착법(Chemical Vapour Deposition, CVD), 비진공방식(non-vacuum method) 등이 있음
 - 셀렌화법은 간단한 증착 방법으로 금속 전구체를 형성하고 Se, S 등과 같은 칼코지나이드 원소와 반응시키는 공정으로, 넓은 면적의 균일한 박막을 얻을 수 있으면서도 공정 온도가 낮아 에너지 회수시간(Energy Pay Back Time, EPBT) 단축 가능
 - 화학기상증착법은 다양하게 적용되는 증착 기술로 대면적 공정에 적합

CIGS 박막 태양전지의 기본구조 및 제조 공정



- (염료감응 태양전지) 염료감응 태양전지의 기본 구성은 광전극(photoelectrode, PE), 상대 전극(counter electrode, CE) 및 전해질로 이루어져 있으며, 광전극층에 염료를 흡착하여 제조

염료감응 태양전지 제조 공정 개략도

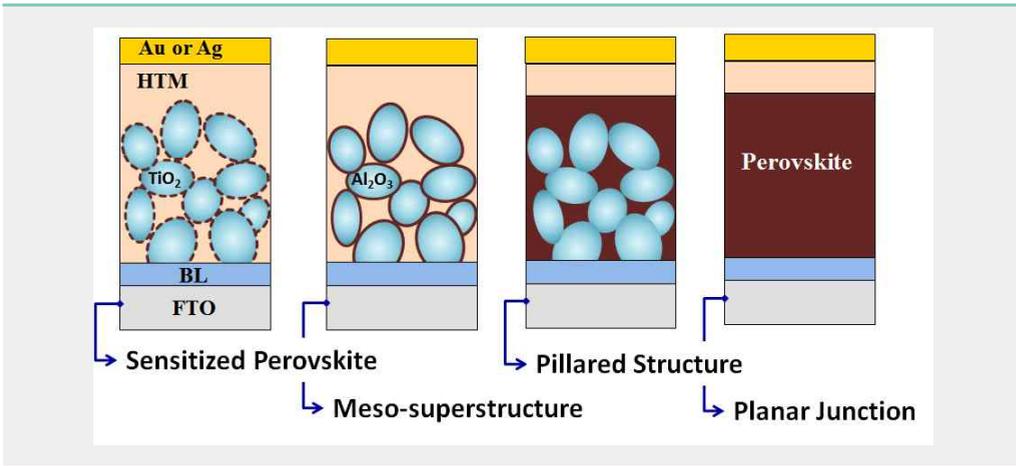


- (유기 태양전지) 롤투롤(Roll-to-Roll) 공정, 그라비아 인쇄(gravure printing), 스크린 프린팅(screen printing), 슬롯 다이 코팅(slot-die coating) 또는 스프레이 코팅(spray coating) 공정으로 구성

● 차세대 태양전지

- (고효율 화합물 반도체) 화합물 반도체층과 분리층을 각각 번갈아 연속적으로 성장시켜 한 장의 웨이퍼 위에 여러 층의 박막을 다층 구조로 증착
 - III-V족 화합물 반도체로 다중접합 태양전지를 제작할 경우 태양광 파장대역을 몇 개 대역으로 나누어 흡수할 수 있는 서로 다른 에너지 밴드갭 Eg1, Eg2, Eg3... 의 물질로 구성되는 다수 개 p-n 접합의 적층 구조
 - 에너지 밴드갭이 서로 다른 물질에서 태양광 파장을 각각 흡수함으로써 태양광 파장대역의 대부분을 손실 없이 흡수 가능
- (페로브스카이트) 페로브스카이트는 ABX₃ 화학식의 결정구조를 가지는 모든 물질을 말하며, 페로브스카이트 태양전지는 12배위를 하는 A자리에 메틸암모늄과 같은 유기 양이온을 갖는 할로젠화 금속계 페로브스카이트 광흡수체를 스펀코팅, thermal evaporation 또는 doctor blade 등을 이용하여 코팅

페로브스카이트 구조를 이용한 태양전지 소자 형태



04 Value Chain

실리콘계 태양전지의 고효율 저가화 기술



구분		Value Chain				
		원료	중간재	셀	모듈	시공
결정질 실리콘 태양전지	품목	- 폴리실리콘 - Metal Powder - 기타 원부재료	- 실리콘 잉곳 - 실리콘웨이퍼 - Metal Paste - Target	- 공정단계	- 패키징	- 설치 - 점검 - 유지보수
	국외 기업	- GCL - Wacker - Hemlock	- GCL - Renesolar - Yingli Solar	- Yingli Solar - Trina Solar - JA Solar - Suntech - 한화큐셀	- Yingli Solar - Trina Solar - Suntech - 한화큐셀	
	국내 기업	- OCI - 한국실리콘 - 한화케미칼	- 넥솔론 - 용진에너지 - 오성LST - 회성소재 - 나노시스 - 삼성SDI - 대주전자 - 동진세미캡 - LS-Nikko	- 현대중공업 - 신성솔라 - LG전자 - 한화큐셀 - GS E&R - DCT	- 현대중공업 - 에스에너지 - LG전자 - 신성솔라 - 한화큐셀 - 한솔테크닉스 - JSPV - LS산전	- LG CNS - KD파워 - 에스에너지 - 서브윈 - KC코트렐 - 신성솔라 - 한화 S&C

비실리콘계 태양전지 양산 및 핵심 원천 기술



구분		Value Chain				
		원료	중간재	셀/모듈		시공
CdTe	품목		- 기관	- CdTe 셀/모듈		
	국외 기업			- First Solar	- First Solar - Calyxo GmbH	
	국내 기업					
구분	원료	중간재	셀/모듈		시공	
CIGS	품목	- CIGS 원료분말	- 기관 - Target	- CIGS 셀/모듈		
	국외 기업	- Solar Frontier	- Hanergy	- Nanosolar		
	국내 기업	- 희성소재	- 삼성코닝 - 코오롱 - 한국쓰리엠 - KCC	- LG이노텍 - 태양금속 - 현대아반시스		
구분	원료	중간재	셀	모듈	시공	
업료감응	품목	- TiO ₂ 광전극 - 염료 - 전해질 - 상대전극 - TCO 기판 - 실링재	- TiO ₂ paste		- 스크린프린터 - 열처리로 - 염료흡착장치 - 전해질 주입기 - 실링 - 어셈블리 장치	

	국외 기업	- Dyesol - Solaronix			- Dyesol - SONY	
	국내 기업	- 동진세미켵 - 이앤비코리아		- 동진세미켵	- 동진세미켵 - 상보 - 이켵창호	- 이켵창호
	구분	원료	중간재	셀	모듈	시공
	품목	- 광활성층재료 - 기판 - 투명전극용 소재 - Cathod 전극 소재	- 광활성 분산액 - 기판 - 투명전극 - Cathod 전극	- 단일층 - 이층 - heterojunction - Tandum - Inverted	- R2R printing	
유기	국외 기업	- Konarka	- Solamer	- Sumitomo	- Haliatek	
	국외 기업	- CDT - Merck	- Tejiin - Toray		- Mitsubishi - Risce DTU - CDT	
	국내 기업				- 코오롱	

II. 기술개발동

차

01 국외 기술개발 현황

● 국외 R&D 투자 현황

● 국가별 전체 R&D 대비 태양전지 부문 R&D 투자 현황

- (미국) 2014년 기준 전체 국가 R&D 투자액은 6,315.524백만 달러이며, 이 중 태양전지 부문 R&D 투자액은 129.449백만 달러로 8%를 차지
- (일본) 2014년 기준 전체 국가 R&D 투자액은 3,271.232백만 달러로, 태양전지 부문 R&D 투자액은 115.176백만 달러로 4%를 차지
- (독일) 2014년 기준 전체 국가 R&D 투자액은 1,117.962백만 달러이며, 이 중 태양전지 부문 R&D 투자액은 111.292백만 달러로 3% 차지

2011-2014년도 태양전지 부문 R&D 예산 투입 현황

(단위 : 백만달러)

연도	미국	영국	호주	일본	독일	캐나다
2012	202.903	15.326	90.448	142.575	109.114	19.74
2013	225.406	17.456	245.445	120.665	97.306	21.329
2014	129.449	0	27.684	115.176	111.292	27.13

● 산업 동향 및 연구 동향

● 실리콘 태양전지

- (결정질 실리콘 태양전지) Panasonic(日)에서 144mm²의 면적에서 HBC(Heterojunction Back Contact) 구조로 세계 최고 효율인 25.6% 효율



의 결정질 태양전지를 개발하였고, 현재 Yingli Solar(中), Trina Solar(中) 등 중국 업체가 강세

- Trina Solar(中)는 P형 HP-multi 기판을 사용하여 18.6% 이상 효율의 태양 전지를 생산하였고, 2015년 11월 P형 HP-multi 기판을 사용하여 25.15%의 변환 효율 기술 달성, P형 mono 기판에 PERC 기술을 적용하여 21.4% 효율 달성(2014년), PERC 기술 적용 20.3% 양산
- Sunpower(美)는 IBC(Interdigitate Back Contact) 셀 구조를 개발하여 N형 mono 기판에 23% 대 효율의 태양전지를 생산하여 고효율 모듈 제품 개발
- Yingli Solar(中)는 N형 mono 기판을 사용하여 20% 이상 효율의 태양전지로 600MW 이상의 전력을 생산하였으며, HP-multi 기판을 적용하여 19% 효율 기술 개발
- NSP(대만)는 P형 mono 기판에 PERC 기술을 적용하여 21.1% 효율 제품 생산
- JA solar(中)는 HP-multi 기판을 적용하여 18.6% 이상 효율의 태양전지를 생산하였으며, PERC 기술을 적용하여 HP-multi에서 20% 효율 기술 개발
- Jinko Solar(中)는 HP-multi 기판을 사용하여 18.2% 효율, P형 mono 기판을 사용하여 19.6% 효율의 태양전지를 생산하였고, PERC 기술을 적용하여 20% 이상 효율 기술 개발
- Fraunhofer(獨)은 N형 mono 기판에 TOPCon(Tunnel Oxide Passivated Contact) 구조로 25.13% 효율을 기록하였으나, 생산성 향상을 위해 연구 개발 진행 중
- UNSW(호)는 24.8% 효율의 PERL(Passivated Emitter Rear and Locally Diffused) 셀을 개발하였으나, 경제성 및 생산성 문제로 상용화 어려움
- (비결정질 실리콘 태양전지) Panasonic(日)에서 HIT 기술로 22% 이상의 Bifacial 구조의 태양전지를 생산하고 있으며, 2015년 Silevo(美), Kaneka(日), Sunprime(中), Choshu(日) 등에서 투자를 발표하고 있으나, Silevo(美) 이외에는 직접 투자가 보류되고 있음
- Choshu(日)은 HIT 태양전지 연구 개발을 통해 23% 변환 효율 기술 개발
- IMEC(벨)는 Hybrid SHJ 구조를 적용하여 20.8% 효율 기술 개발
- TEL Solar(日)는 2014년 탠덤형 대면적 모듈로 12.24%의 효율을 달성하

기도 하였으나 현재는 시장상황 등을 고려하여 기술개발이 중지된 상태

- HyET Solar(네)는 AI 기관위에 제작된 태양전지를 값싼 고분자 필름에 전사시키는 방식을 이용한 롤투롤 공정을 통하여 플렉서블 실리콘 박막 태양전지 모듈을 제작하고 있으며, 비정질실리콘을 기반으로 한 단일접합에서 약 7% 효율을, 비정질/미세결정질의 탠덤구조에서 약 10% 효율을 달성
- Power film(美)는 비정질 실리콘을 사용한 플렉서블 박막 태양전지 패넬을 제작·공급하고 있으며, 고분자 기관을 사용하고 monolithic integration을 통한 모듈화를 진행하여 5% 내외의 모듈 효율 달성

● 박막 태양전지

- (실리콘계 박막 태양전지) 유리기관 형태의 실리콘 박막으로는 Sharp(日), Kaneka(日), 플렉시블 기관으로는 Fuji Electric(日) 등이 고효율화를 위한 다중접합기술, 광 포획 기술 및 생산성 향상을 위한 고속 증착, 대면적 양산화 기술 등이 개발되었으나, 폴리실리콘 가격 하락으로 상용화 되지 못함
- Kaneka(日)는 비정질 및 탠덤구조 실리콘 박막 태양전지 양산모듈을 생산하고 있으며, 최근에는 실리콘 박막 기술을 결정질 실리콘 태양전지에 접목한 HIT 태양전지 개발에 집중하여 25.1%(aperture area 기준, 150cm²)의 효율을 달성하였고 BIPV 및 창호용으로 사용되는 see-through 모듈을 개발하여 공급 중
- (CdTe 태양전지) 1990년대 중반부터 효율 측면에서의 기술적 정체 상태이나 First Solar(美), GE 등 글로벌 기업들 주도 하에 급격한 효율 향상이 보고되고 있으며,¹⁾ 최근에는 재료과학 및 물리학적 측면의 연구는 물론 나노 소자 및 유연 소자로의 응용까지 연구범위 확대
- First Solar(美)는 Vapor Transport Deposition을 이용하여 성장시킨 CdTe 박막 태양전지를 제조하고 있으며, 21.5% 효율(소면적)과 모듈 효율 17.0%를 달성하고 2017년까지 모듈 효율을 18.9%까지 향상시킬 계획²⁾
- NREL(美)에서는 sputtering 공정을 이용하여 증착한 CdS:O와 저온 co-evaporation 공정을 이용한 ZnTe:Cu 후면 전극을 도입하여 CdTe 유연 태양전지의 효율을 14.05%에서 16.4%로 향상³⁾

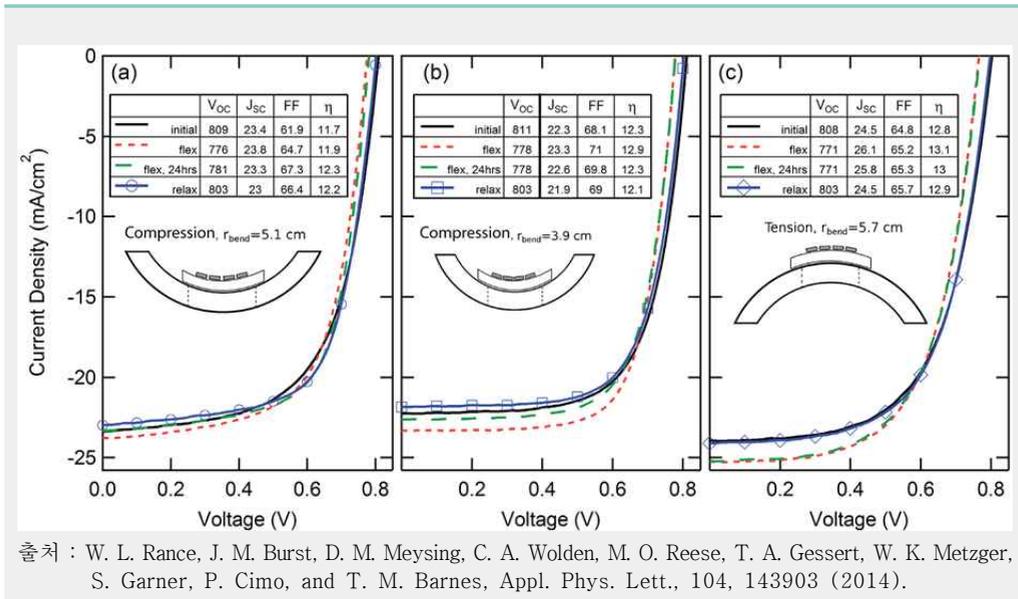
1) http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg

2) M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, Prog. Photovolt: Res. App 1. 23, 805 (2015); <http://investor.firstsolar.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=833971>

3) W. L. Rance, J. M. Burst, D. M. Meysing, C. A. Wolden, M. O. Reese, T. A. Gessert, W. K.



NREL의 CdTe 유연 태양전지 전류-전압 곡선



- 베로나 대학(이)의 Alessandro Romeo 그룹은 CdCl₂ 처리 공정에 FREON 처리 공정을 추가하여 15.3% 효율 달성⁴⁾
- Calyxo GmbH(獨)은 CdTe 모듈 및 턴키(turnkey) 업체로 2014년 12월 14.3%의 모듈(0.72m², 13.5% full area) 효율을 보고⁵⁾
- 리버풀 대학(英)의 Ken Durose 그룹은 CdTe 나노선을 이용하여 core-shell 구조의 CdTe 태양전지를 제작하여 2.49% 효율을 달성하였고, 독성이 높은 CdCl₂ 처리 공정을 개선하기 위해 MgCl₂를 이용한 신공정을 도입하여 13.50% 효율 달성⁶⁾
- 톨레도 대학(美)의 Randy J. Ellingson 그룹은 FeS₂ 나노결정으로 Cu 후면전

Metzger, S. Garner, P. Cimo, and T. M. Barnes, Appl. Phys. Lett., 104, 143903 (2014); H. P. Mahabaduge, W. L. Rance, J. M. Burst, M. O. Reese, D. M. Meysing, C. A. Wolden, J. Li, J. D. Beach, T. A. Gessert, W. K. Metzger, S. Garner, and T. M. Barnes, Appl. Phys. Lett., 106, 133501 (2015).

4) A. Salavei, I. Rimmaudo, F. Piccinelli, D. Menossi, A. Bosio, N. Romeo, and A. Romeo, Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, pp2140-2412 (2013).

5) <http://www.calyxo.com/en/newsreader-en/items/calyxo-presents-new-product-generation.html>

6) J. D. Major, R. E. Treharne, L. J. Phillips, and K. Durose, Nature, 511, 334 (2014).

극을 대체하여 10.6% 효율 달성⁷⁾

- Oak Ridge National Laboratory(美)와 테네시 대학(美)에서는 CdTe 태양전지 제조 공정에서 핵심적인 역할을 하는 CdCl₂ 처리와 Cu 확산이 효율에 미치는 영향을 연구⁸⁾
- BP Solar(英)는 모듈 효율 10.9%(0.49m²)를 발표하였으나 2000년대 초반 사업을 종료하였고, Matsushita Battery(日)은 근접승화법을 이용하여 모듈 효율 11.0%를 달성하였으나, BP Solar와 유사한 시기에 사업 종료⁹⁾
- (CIGS 박막 태양전지) Solar Frontier(日), Hanergy(中), TSMC(대만)에서 상용화 제품을 생산하고 있으며 박막에 사용되는 원소 대체, 단일 접합의 효율 향상 등의 연구가 시도되고 있음
- Solar Frontier(日)는 2015년 CiSe Single cell 기준 20.9% 효율을 달성하였고, 2015년 4월 150MW급 설비를 구축하여 15% 이상 효율의 모듈 생산¹⁰⁾
- Hanergy(中)은 Miasole(美), Solibro(獨), Global Solar Energy(美) 등을 인수한 후 동시증착법과 셀렌화법을 활용할 수 있는 설비를 구축하였으며,¹¹⁾ 2013년 7월 CIGSe 태양전지 효율 20.5% 달성¹²⁾
- 셀 효율은 Solibro(獨)에서 고효율 셀 제작 기술을 개발하여 20.5% 효율을 달성하였고, 모듈 효율은 Miasole(美)에서 15.7% 보유
- ZSW(獨)에서 0.503cm²에서 20.3% 효율 보고
- 3단계 동시증착법으로 제작된 CIGS 박막은 NREL(美)이 최고 효율인 20.1%를 보유하고 있으며, AGUT(18.0%), TIT(17.6%) 순임
- In, Ga은 고가이면서 부존량이 적어 수급 문제가 발생할 수 있으므로, IBM(美)은 Solar Frontier(日)와 공동으로 Zn, Sn으로 대체하는 CZTSeS 박막 태양전지를 개발하여 2013년 12.6% 효율 보고
- Cu를 Ag로, In을 Al로 대체하여 넓은 밴드갭을 갖는 광흡수층 제조가 시도

7) K. P. Bhandari, P. Koirala, N. R. Paudel, R. R. Khanal, A. B. Phillips, Y. Yan, R. W. Collins, M. J. Heben, and R. J. Ellingson, Sol. Energy Mat. Sol. Cells, 140, 108 (2015).

8) J. D. Poplawsky, N. R. Paudel, C. Li, C. M. Parish, D. Leonard, Y. Yan, and S. J. Pennycook, Adv. Energy Mat., 4, 1400454 (2014).

9) R. A. Meyers, Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, in Carbon Dioxide Sequestration, Weathering Approaches to (Springer, 2012)

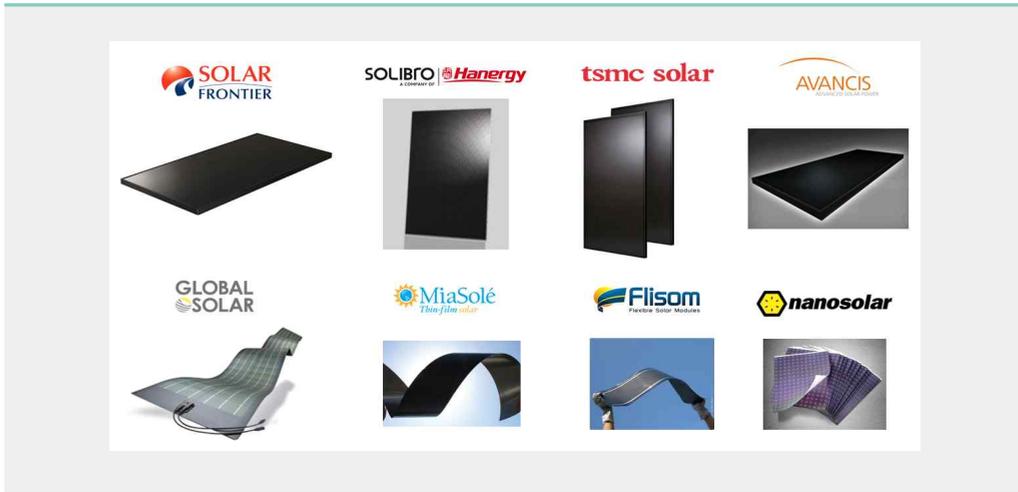
10) <http://www.solar-frontier.com/eng/news/2015/C044372.html>

11) <http://www.hanergyamerica.com/newsSolibro.html>

12) http://www.hanergy.com/en/content/details_38_1359.html

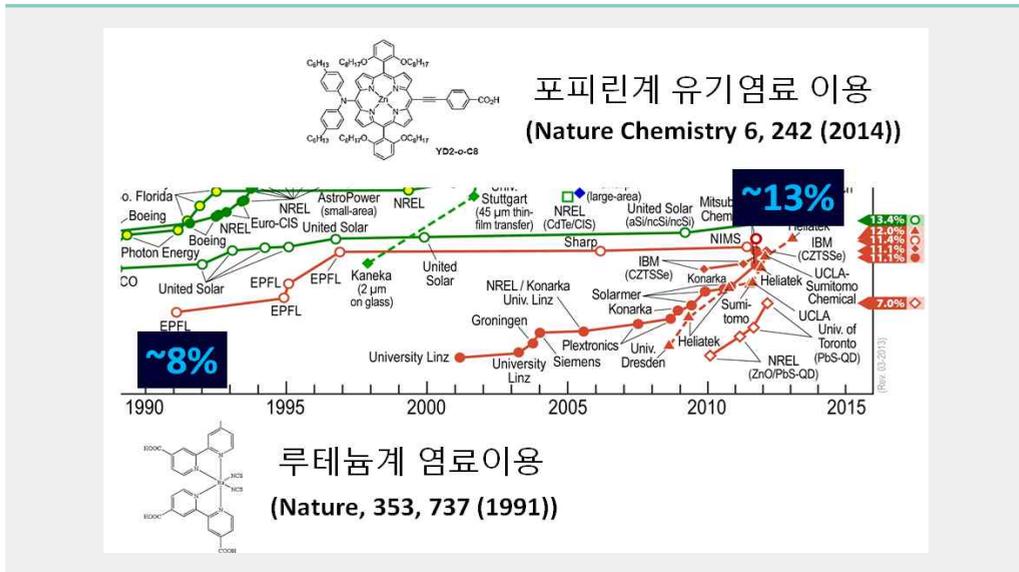
되고 있으며, NREL(美)에서는 4단자형 CGS/CIS 탠덤 구조를 이용하여 개방 전압 1.32V, 효율 10.7% 달성

CIGS 박막 태양전지 상용화 제품 및 회사



- (염료감응 태양전지) 일본, 미국에서는 상용화를 위한 투자보다는 시장 추이를 지켜보고 있으며 연구도 축소되는 경향이지만, 최근에는 역오팔 구조나 나노선 구조와 같이 나노티타니아 전극의 구조 개선, 새로운 고효율 장수명 유기 염료의 개발, 고체전해질 연구를 중심으로 진행
- EPFL(스)의 M. Grätzel 교수가 원천기술을 보유하고 있으며, G24i(英)에서 최초로 휴대용 전자기기 충전용으로 염료감응 태양전지 양산
- Sony(日)에서는 유연기판 염료감응형 태양전지를 개발하여 8% 효율을 달성
- 일본산업기술종합연구소(AIST)에서는 17.7% 효율의 CIGS 기반 유연 태양전지를 개발하였고, 상온에서 변환 효율 8%인 필름형 염료감응 태양전지 개발
- Fujikura(日)에서 비휘발성의 유사 고체 전해질을 적용하여 고내구성 모듈 기술을 확보하였고, 모듈 효율 8.3%(20×20cm²)를 달성
- Sharp(日)에서 셀 효율 1.9%, 모듈 효율 8.8% 보유

염료감응 태양전지 효율 현황



- (유기 태양전지) Hailatek(獨), Solarmer(美)와 Mitsubishi Chemicals(日)가 대표적인 개발 업체로 10%에 근접한 효율 달성 이후 수명 개선이 되지 않고 효율 증대가 미미하여 정체 상태이나, DIPV, 레이저 용품, 의류 등에 응용 가능
- 2014년 TOSHIBA(日)는 1cm 각 단층셀로 11.2%, 5cm 각 모듈에서 9.9%의 효율을 달성하여 세계 최고 효율을 갱신
- Hailatek(獨)은 2008년 ZnPc와 C60을 P-I-N 구조로 진공증착하여 탠덤 셀 구조로 6.5% 효율, 2010년 1,087cm² 면적에서 8.3% 효율을 달성하였으며, 증착 방식으로 유기 단분자 탠덤 태양전지를 개발하여 12% 변환 효율 달성
- Solarmer(美)은 소자나 모듈보다는 광활성층에 PTB 또는 PBD, P3HT 적용을 시도하는 등 광활성층 재료 개발 및 판매에 주력하고 있으며, Cathod 전극으로 ITO나 AI 진공증착 공정을 적용
- Mitsubishi Chemicals(日)는 셀 효율 10.7%, 모듈 효율 6.8%를 달성하였고, 두께 1mm 이하의 폴리메스터 필름기판에 유기반도체 화합물을 용액 공정으로 코팅하는 방식으로 생산성 향상 및 원가 절감 노력
- UC-Berkeley(美) Frechet 교수는 BDT-TPD계 고분자 소재를 적용하여 8.5%의 변환 효율을 달성하였다고 발표하였으나 공인되지 않음



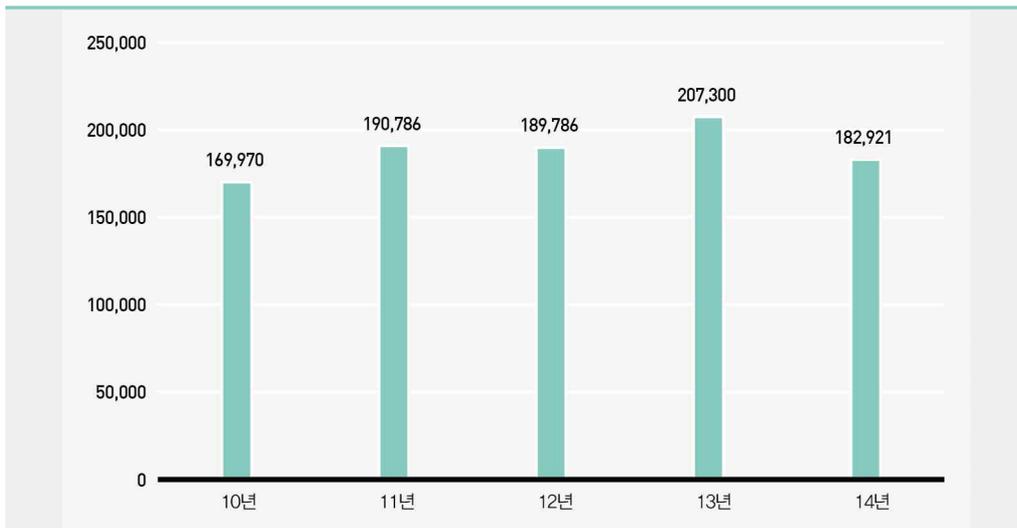
- Plextronics(美)는 인쇄 유기태양전지 및 조명용 OLED 등 유기전자소자 분야에 특화되어 있었으나 유기 태양전지 부문 철수 후 Solvey에 인수되었고, Konarka(美)는 Siemens의 유기 태양전지 부문을 인수하여 Power Plastic을 출시하였으나 상업화 실패로 파산
- 차세대 태양전지
 - (고효율 화합물 반도체) Fraunhofer(獨)에서는 InGaP/InGaAs/Ge 4중 접합 태양전지로 세계 최고 효율 46.0% 달성
 - (페로브스카이트) 2009년 토인대학(日)의 미야자카 그룹에서 효율 3.8%의 소자를 개발한 후 영국, 스위스, 미국 등의 대학에서 관련 연구 수행 중
 - Oxford University(英)의 H. Snaith 교수 그룹에서 부도체 알루미늄을 이용하여 고체형 페로브스카이트 태양전지, 진공증착 기법으로 planar 구조의 페로브스카이트 태양전지를 개발하여 15% 효율 달성
 - EPFL(스)의 M. Grätzel 교수 그룹에서 2-step 공정기법을 개발하여 15% 효율의 페로브스카이트 태양전지 개발
 - UCLA(美) Yang 교수 그룹에서 OPV 공정기법을 활용하여 19% 효율의 페로브스카이트 태양전지 개발

02 국내 기술개발 현황

● 국내 국가R&D 투자 현황

- '14년 태양전지 분야에 대한 국가 R&D 투자액은 182,921백만 원으로 2013년 대비 24,379백만 원이 감소

태양전지 분야 국가R&D 투자 추이





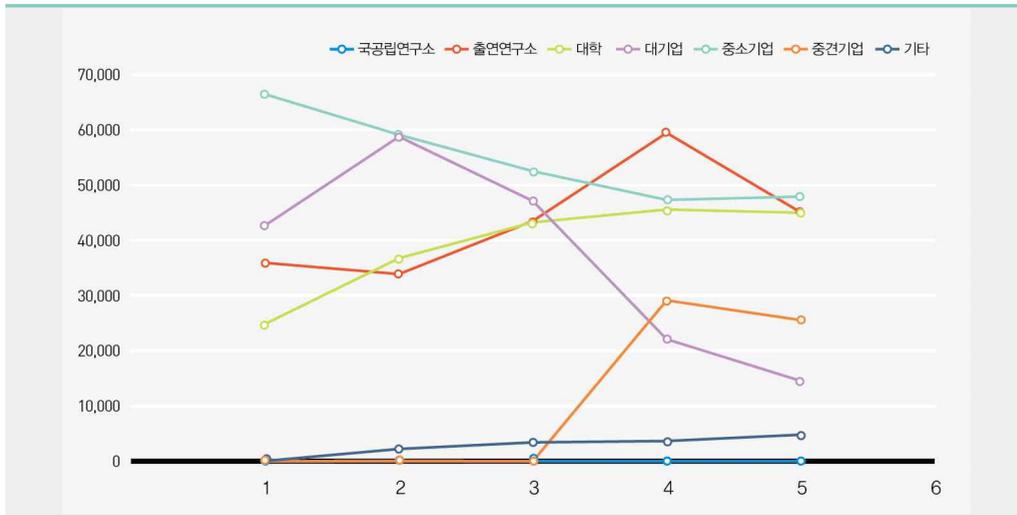
- 연구개발단계별 투자 현황을 살펴보면, '14년 개발연구의 투자액이 82,984백만 원으로 가장 높으며, 전체 단계에서 2013년 대비 투자액은 감소함
 - '14년 연구개발단계별 투자액은 개발연구 82,984백만 원, 기초연구 55,785백만 원, 응용연구 36,949백만 원, 기타 7,203백만 원 순임

태양전지 분야 연구개발단계별 투자 현황



- 연구수행주체별 투자 현황을 살펴보면, 전체 태양전지 R&D 투자의 72.8%를 차지하는 중소기업, 출연연구소, 대학이 주요 연구수행주체이며, 중소기업의 투자액이 높은 것이 특징임
 - 연구수행주체별로는 중소기업 273,299백만원(29%), 출연연구소 217,902백만원(23.1%), 대학 195,453백만원(20.7%), 대기업 185,316백만원(19.6%), 중견기업 54,689백만원(5.81%), 기타 14,065백만원(1.49%), 국공립연구소 40백만 원(0.004%) 순임

태양전지 분야 연구수행주체별 투자 현황



- '14년 부처별 투자 현황을 살펴보면, 산업통상자원부가 차지하는 비중이 53.8%(98,531백만 원), 미래창조과학부가 36.2%(66,303백만 원)로 상위 2개 부처가 전체 태양전지 R&D 투자액의 90%를 차지
 - 산업통상자원부 98,531백만 원(53.8%), 미래창조과학부 66,303백만 원(36.2%), 중소기업청 9,272백만 원(5%), 교육부 7,295백만 원(3.9%), 범부처 사업 1,060백만 원(0.5%), 국토교통부 460백만 원(0.2%)순임
- 부처/연구단계별로 보면, 산업통상자원부의 개발연구 투자 비중이 가장 높게 나타났으며, 미래창조과학부의 경우 기초연구 투자 비중이 가장 높았음
 - 주요 부처의 연구단계별 투자 현황을 살펴보면, 산업통상자원부는 61,276백만 원으로 개발연구 투자액이 가장 높으며, 응용연구(21,313백만 원), 기초연구(11,312백만 원)의 순으로, 미래창조과학부는 기초연구(38,440백만 원), 응용연구(14,497백만 원), 개발연구(10,816백만 원) 순으로 투자됨
 - 연구개발단계별로 보면, 기초연구는 미래창조과학부, 개발연구는 산업통상자원부가 가장 많은 투자를 하였음



태양전지 분야 부처별 연구개발단계별 투자 현황

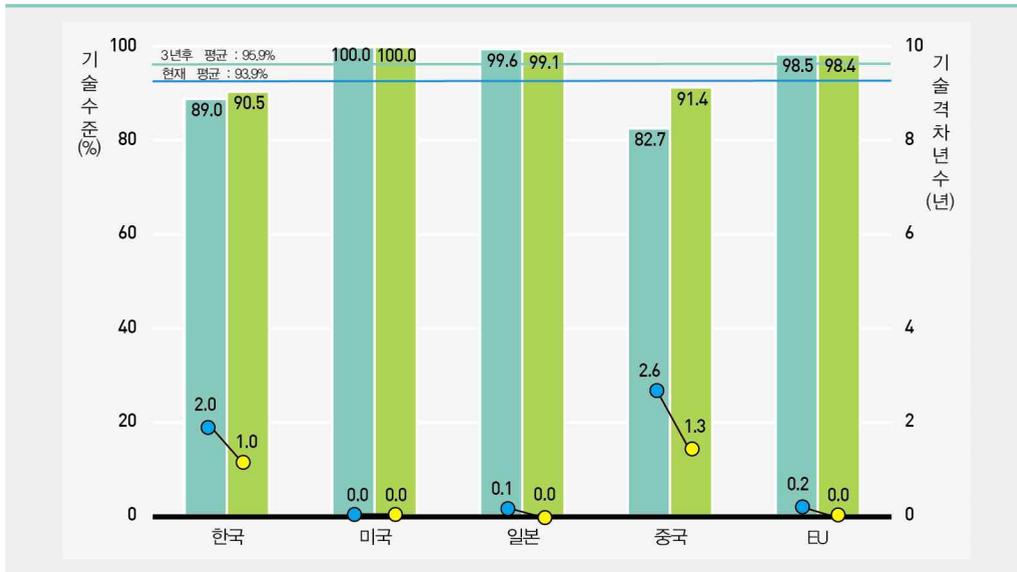


● 국내 기술 수준

● 실리콘계 태양전지

- (전체 기술수준) '15년 현재 한국의 실리콘계 태양전지 기술수준은 최고기술보유국(미국) 대비 89.0%로 주요 5개국(한국, 미국, 일본, 중국, EU) 중 4위이며, 한국의 중점녹색기술수준 평균(79.1%)보다 9.9%p 높음
- 주요 5개국의 기술수준은 세계최고기술보유국(미국) 대비 일본(99.6%), EU(98.5%), 한국(89.0%), 중국(82.7%) 순으로 나타남
- 현재 한국은 주요 5개국의 평균기술수준(93.9)%보다 4.9%p 낮은 것으로 나타남
- 한국은 미국(100.0%), 일본(99.6%), EU(98.5%)에 비해 기술수준이 낮은 반면, 중국(82.7%) 보다는 매우 근소한 우위를 유지하고 있음

실리콘계 태양전지 분야 주요 5개국별 '15년도 기술수준 및 기술격차 비교



- (전략제품·서비스별 기술수준) 3개의 전략 제품·서비스 기술별 한국의 기술수준은 82.5%~92.6% 사이에 분포(평균 89.0%)

- 기술수준이 상대적으로 높은 전략 제품·서비스 기술은 '단결정 실리콘 태양전지 (92.6%)'인 반면, 기술수준이 상대적으로 낮은 기술은 '비결정 실리콘 태양전지 (82.5%)'로 나타남

※ 단결정 실리콘 태양전지 분야 주요 5개국별 기술수준 순위: EU(100.0%)>일본(98.9%)>미국(98.5%) > 한국(92.6%) > 중국(88.4%)



실리콘계 태양전지 분야 전략제품·서비스별 주요 국가의 기술수준 비교

(단위 : %)

전략 제품 서비스	최고 기술 보유국 ('15)	최고 기술 보유국 ('18)	한국			미국			일본			중국			EU		
			15년 (A)	18년 (B)	B-A	15년 (A)	18년 (B)	B-A	15년 (A)	18년 (B)	B-A	15년 (A)	18년 (B)	B-A	15년 (A)	18년 (B)	B-A
단결정 실리콘 태양전지	EU	미국	92.6	94.6	2.0	98.5	100.0	1.5	98.9	98.3	△0.6	88.4	93.2	4.7	100.0	99.2	△0.8
다결정 실리콘 태양전지	EU	EU	89.5	91.2	1.7	98.8	98.0	△0.8	97.7	97.3	△0.4	85.4	92.2	6.8	100.0	100.0	0.0
비결정 실리콘 태양전지	미국	미국	82.5	83.8	1.4	100.0	100.0	0.0	99.4	99.6	0.2	72.2	86.9	14.7	92.8	94.1	1.3
평균	미국	미국	89.0	90.5	1.5	100.0	100.0	0.0	99.6	99.1	△0.5	82.7	91.4	8.7	98.5	98.4	△0.1

※ 상기 평균 수치는 전략 제품·서비스 기술별 중요도를 반영하여 가중평균한 결과임

- (요소기술별 기술진입장벽에 대한 전문가 응답 현황) ‘단결정 실리콘 태양전지 분야 원료’, ‘다결정 실리콘 태양전지 분야 원료’ 기술분야에 대한 기술장벽이 높은 것으로 인식되고 있음
- 반면, ‘단결정 실리콘 태양전지 분야 모듈’ 기술, ‘다결정 실리콘 태양전지 분야 모듈’ 기술은 상대적으로 기술장벽이 낮은 것으로 평가됨

실리콘계 태양전지 분야 요소기술별 기술장벽 응답률

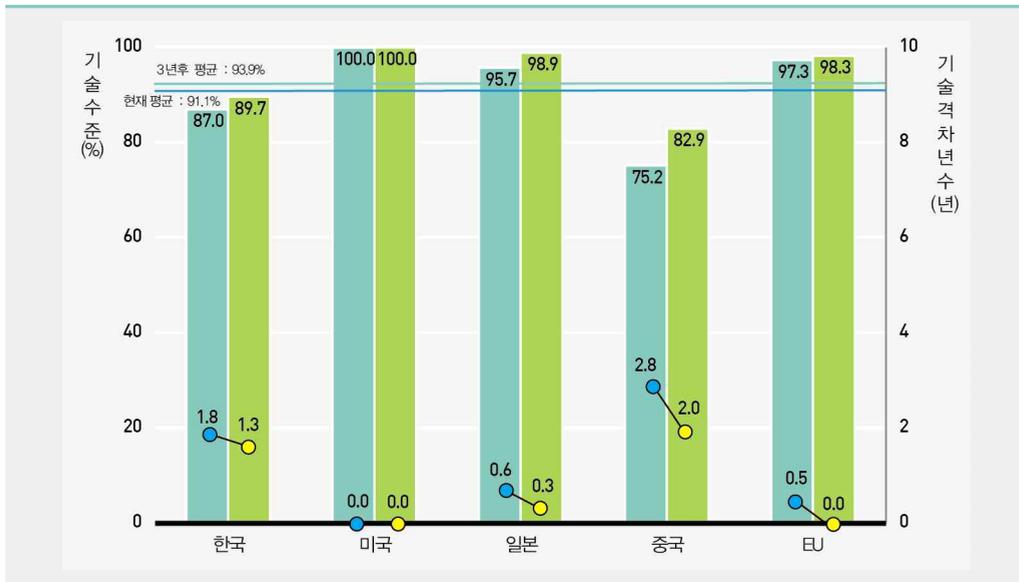
(단위 : %)

요소기술		낮은 편	보통	높은 편
단결정 실리콘 태양전지	단결정 실리콘 태양전지 분야 원료 기술	1.8	46.4	51.8
	단결정 실리콘 태양전지 분야 소재 기술	0.0	29.0	71.0
	고효율 셀 제조 공정(장비 제조 기술 포함)	7.2	21.6	71.2
	단결정 실리콘 태양전지 분야 모듈 기술	5.5	76.8	17.7
	시스템 설계 기술	3.8	79.0	17.3
다결정 실리콘 태양전지	다결정 실리콘 태양전지 분야 원료 기술	0.0	13.4	86.6
	다결정 실리콘 태양전지 분야 소재 기술	0.0	32.3	67.7
	고효율 셀 제조 공정(장비 제조 기술 포함)	4.1	57.3	38.6
	다결정 실리콘 태양전지 분야 모듈 기술	19.3	69.7	10.9
	시스템 설계 기술	18.3	40.1	41.5
비결정 실리콘 태양전지	비결정 실리콘 태양전지 분야 원료 기술	1.5	62.2	36.3
	비결정 실리콘 태양전지 분야 소재 기술	1.4	84.3	14.3
	고효율 셀 제조 공정(장비 제조 기술 포함)	8.1	0.0	91.9
	비결정 실리콘 태양전지 분야 모듈 기술	16.5	24.5	59.0
	시스템 설계 기술	14.7	57.4	27.9

● 비실리콘계 태양전지

- (전체 기술수준) '15년 현재 우리나라의 기술 수준은 중 세계 최고 기술 보유국(미국) 대비 87.0%로 주요 5개국(한국, 미국, 일본, 중국, EU) 중 4위를 차지하며, 한국의 중점녹색기술수준 평균(79.1%)보다 7.9%p 높음
- 주요 5개국의 기술수준은 세계최고기술보유국(미국) 대비 EU(97.3%), 일본(95.7%), 한국(87.0%), 중국(75.2%) 순으로 나타남
- 현재 한국은 주요 5개국의 평균기술수준(91.1)%보다 4.1%p 낮은 것으로 나타남
- 한국은 미국(100.0%), EU(97.3%), 일본(95.7%)에 비해 기술수준이 낮은 반면, 중국(75.2%) 보다는 매우 근소한 우위를 유지하고 있음

비실리콘계 태양전지 분야 주요 5개국별 '15년도 기술수준 및 기술격차 비교



- (전략제품·서비스 기술 수준) 5개의 전략 제품·서비스 기술별 한국의 기술수준은 67.5%~100.0% 사이에 분포(평균87.0%)
- 기술수준이 상대적으로 높은 전략 제품·서비스 기술은 '페로브스카이트(100.0%)' 기술인 반면, 기술수준이 상대적으로 낮은 기술은 'CdTe(67.5%)' 기술로 나타남
- ※ 페로브스카이트 분야 주요 5개국별 기술수준 순위: 한국(100.0%)> EU(92.3%)> 미국(91.0%)> 일본(84.6%)> 중국(71.8%)



비실리콘계 태양전지 분야 전략제품·서비스별 주요 국가의 기술수준 비교

(단위 : %)

전략제품 서비스	최고 기술 보유국 (15)	최고 기술 보유국 (18)	한국			미국			일본			중국			EU		
			15년 (A)	18년 (B)	B-A	15년 (A)	18년 (B)	B-A	15년 (A)	18년 (B)	B-A	15년 (A)	18년 (B)	B-A	15년 (A)	18년 (B)	B-A
CIGS	미국	미국	85.1	86.0	0.8	100.0	100.0	0.0	95.6	98.5	2.8	79.5	85.5	6.0	96.2	98.0	1.8
DSSC	일본	일본	79.3	83.8	4.4	84.4	83.8	△0.6	100.0	100.0	0.0	68.0	72.5	4.5	93.2	95.0	1.8
OPV	미국	미국	82.3	89.9	7.6	100.0	100.0	0.0	91.1	92.4	1.3	70.9	81.0	10.1	91.1	92.4	1.3
CdTe	미국	미국	67.5	67.5	0.0	100.0	100.0	0.0	83.8	87.5	3.8	67.5	73.8	6.3	90.0	90.0	0.0
페로브 스카이트	한국	한국	100.0	100.0	0.0	91.0	92.4	1.4	84.6	92.4	7.8	71.8	82.3	10.5	92.3	92.4	0.1
평균	미국	미국	87.0	89.7	2.6	100.0	100.0	0.0	95.7	98.9	3.2	75.2	82.9	7.7	97.3	98.3	0.9

- (요소기술별 기술진입장벽에 대한 전문가 응답 현황) 요소기술 단위로 기술장벽 수준을 살펴보면, ‘CdTe 분야 원료 및 소재’(91.4%), ‘CIGS 분야 원료 및 소재’(81.5%), ‘DSSC 분야 원료 및 소재’(96.7%), ‘OPV 분야 원료 및 소재’(84.1%), ‘페로브스카이트 분야 원료 및 소재’(79.8%) 기술분야에 대한 기술장벽이 높은 것으로 인식되고 있음
- 반면, CdTe 분야, CIGS 분야, DSSC 분야, 페로브스카이트 분야 ‘시스템 설계’ 기술은 상대적으로 기술장벽이 낮은 것으로 평가됨
- ‘OPV 분야 모듈’ 기술 및 ‘시스템 설계’ 기술은 상대적으로 기술장벽이 낮은 것으로 평가됨

비실리콘계 태양전지 분야 요소기술별 기술장벽 응답률

(단위 : %)

요소기술		낮은 편	보통	높은 편
CdTe	CdTe 분야 원료 및 소재 기술	2.9	5.7	91.4
	CdTe 분야 셀 기술	5.9	53.7	40.5
	CdTe 분야 모듈 기술	9.4	53.1	37.5
	시스템 설계 기술	34.3	55.6	10.2
CIGS	CIGS 분야 원료 및 소재 기술	2.3	16.2	81.5
	저가화/대면적화 공정기술 (장비 제조 기술 포함)	2.7	45.4	51.8
	CIGS 분야 모듈 기술	22.5	53.7	23.9
	시스템 설계 기술	40.1	52.3	7.6
DSSC	DSSC 분야 원료 및 소재 기술	2.4	0.8	96.7
	저가화/대면적화 공정기술 (장비 제조 기술 포함)	2.1	55.9	42.0
	DSSC 분야 모듈 기술	17.3	79.4	3.3
	시스템 설계 기술	33.8	57.0	9.2
OPV	OPV 분야 원료 및 소재 기술	8.2	7.7	84.1
	저가화/대면적화 공정기술 (장비 제조 기술 포함)	5.1	50.9	44.0
	OPV 분야 모듈 기술	25.5	63.0	11.5
	시스템 설계 기술	24.5	58.6	16.9
페로브스카이트	페로브스카이트 분야 원료 및 소재 기술	8.6	11.5	79.8
	저가화/대면적화 공정기술 (장비 제조 기술 포함)	11.3	37.7	51.0
	페로브스카이트 분야 모듈 기술	11.6	29.9	58.4
	시스템 설계 기술	16.2	80.0	3.8



● 산업 동향 및 연구 동향

● 실리콘 태양전지

- (결정질 실리콘 태양전지) LG전자, 현대중공업, GS E&R, 한화큐셀, 신성솔라에너지 등에서 효율 향상과 원가 경쟁력 극복을 위해 고효율화 기술 개발 중
 - LG전자는 2015년 태양광 모듈 최적화 기술과 단결정 웨이퍼 기반의 고효율 셀 기술을 적용하여 250MW 출력 모듈 기준 국내 최고 효율인 16.89% 효율을 달성하였고, 전기의 이동 통로를 분산해 손실을 최소화 하는 기술을 통해 6형(15.67cm대 크기의 N형 웨이퍼 기준) 세계 최고의 모듈 효율인 19.5% 달성
 - 현대중공업은 P형 mono 기판에 PERC 구조를 적용하여 19.8% 이상 효율의 태양 전지를 생산하였으며, 22% 이상 효율 달성을 위한 N형 박형 태양전지 기술 개발 진행
 - 신성솔라에너지는 P형 mono 기판의 태양전지로 19.3% 이상의 효율 달성
 - 한화큐셀은 P형 HP-multi 기판에 PERC 기술을 적용하여 19.2% 변환 효율 태양 전지를 생산하고 있으며, '16년까지 1.5GW 규모의 투자 진행 중
- (비결정질 실리콘 태양전지) 국내에서는 관련기업을 통한 개발연구나 상용화는 거의 이루어지고 있지 않으며 출연연, 대학을 중심으로 한 다중접합 연구 및 HIT 태양 전지 응용연구가 진행되고 있는 수준임
 - LG전자에서는 정부지원 개발사업을 통하여 a-Si/nc-Si/nc-Si 3중접합 구조로 13.4%의 세계최고 수준의 안정화 효율을 달성하였으며, 5세대급 파일렛 모듈에서는 3중접합을 이용하여 11% 효율을 달성
 - 주성엔지니어링에서는 5세대급 단일접합 및 탠덤형 태양전지 모듈생산을 위한 Turn-key 제조장비를 판매하였고, 폴리이미드 기판을 이용한 접이식 플렉서블 모듈을 개발하여 8~10%의 효율을 달성
 - 한국전자통신연구원은 단일 접합으로 9.8% 효율을 달성하였으며, Si/SiGe 탠덤셀 기술 등을 통해 광캡처 기술을 개발 중
 - 한국철강, 알티솔라 등에서 비정질 실리콘 박막 기반의 대면적 모듈을 생산하였으나 2014년 시장상황 악화 등의 이유로 생산이 중지된 상황

● 박막 태양전지

- (실리콘계 박막 태양전지) 삼성전자, LG전자, KAIST에서 연구 수행 중
 - 삼성전자에서는 2010년 $200 \times 200 \text{mm}^2$ 에서 안정화 평균 효율 11.2% 달성
 - LG전자는 2011년까지 대면적의 삼중접합 박막 태양전지 개발을 위해 필요한 장비 소재 재료 원료 부품의 국산화를 완료하고, 2013년에는 GW급 양산체제를 갖추는 것을 목표로 함
 - KAIST에서는 Photo CVD를 이용하여 실리콘계 박막 태양전지 연구를 수행 중
- (CdTe 태양전지) 국내 CdTe 태양전지 연구는 소수의 대학 및 연구소에서 진행 중이며, Cd에 대한 이슈로 산업 발전 또한 미비한 실정이나 태양광 시장 개방시 First Solar 등 해외 기업의 국내 진출에 대한 대비책 필요
 - KAIST의 안병태 교수 그룹에서는 n-CdS/p-CdTe 구조 사이에 Cd 박막을 이용해 성장시킨 i-CdTe 층을 첨가하여 13.3% 효율 달성¹³⁾
 - 고려대 김동환, 김지현 교수 그룹에서는 n-CdS/p-CdTe 셀을 제작하고 후처리 공정 및 배면전극 특성을 연구하여 13.76% 효율 달성
 - 고려대 김지현 교수 그룹에서는 $200 \mu\text{m}$ 두께의 얇은 유리 기판을 이용하여 10.9% 효율의 유연 태양전지 제작¹⁴⁾
- (CIGS 박막 태양전지) 원익IPS, LG이노텍, 대양금속, GS 칼텍스, 한국에너지기술연구원, KAIST 등에서 기술 개발을 진행하고 있으나, 중국 기업들의 저가 공세로 인한 가격경쟁력 저하, 수요 부진으로 인해 삼성, SK이노베이션, 현대 아반시스는 자산 매각 등 사업 정리 수순
 - 원익IPS는 Zn(O, S) 버퍼층을 이용하여 $902 \times 1602 \text{mm}^2$ 대면적의 CIGSe 모듈로 16.0% 효율을 달성하였으며, 세계 최고 기록의 231W 전력 모듈을 생산
 - LG이노텍은 다원 동시증착방식을 사용하여 2012년 $30 \times 30 \text{cm}^2$ 에서 16.1%, $60 \times 120 \text{cm}^2$ 에서 13.6% 효율 발표
 - 대양금속은 다원 동시증착방식으로 금속 유연기판을 사용하여 변환 효율 12% 목표로 개발 중
 - 삼성전자는 2010년 태양전지 사업에 대규모 투자 계획을 발표한 이후 2013년 CIGS 박막 태양전지 기술 개발로 TUV로부터 1.44m^2 면적 기준 15.7% 효율을 인정

13) J. H. Yun, E. S. Cha, B. T. Ahn, H. Kwon, and E. A. Al-Ammar, *Curr. Appl. Phys.*, 14, 630 (2014).

14) W.-O. Seo, D. Kim, and J. Kim, *Opt. Express*, 23, A316 (2015).



받았으나,¹⁵⁾ 2014년 4분기 1288억 원의 순손실액을 기록하고 2015년 현재 사업 정리 중임¹⁶⁾

- SK이노베이션은 2011년 HelioVolt사의 CIGS 태양전지 제조 공법이 타사 대비 효율이 높고 대량생산을 통한 원가 절감이 가능하다는 이유로 상업화를 위한 투자계획을 발표하고 828억 원을 투자하였으나,¹⁷⁾ 자산 매각 등 수백억 원의 손실이 불가피함¹⁸⁾
- 한국에너지기술연구원에서는 국내 최고 셀 변환 효율인 19.0%(0.5cm²)을 달성하였고, 한국전자통신연구원에서도 발표 효율 18%(소면적) 이상 달성
- KAIST 안병태 박사팀에서는 Three-stage Co-evaporation CIGSe 박막과 CBD 공정으로 증착한 Zn(S, O, OH) 버퍼층을 이용하여 14.2% 효율 달성
- 한국에너지기술연구원 안세진 박사팀에서는 Ga의 균일한 분포를 형성하는 스퍼터링 + 셀렌화 공정을 이용하여 single cell 기준 13.16%의 CIGSe 박막 제조
- 그 밖에도 한국광기술원, 대구경북과학기술원, 중앙대, 성균관대, UNIST 등에서 CIGS 흡수층 제조 핵심 기술 개발 중
- (염료감응 태양전지) 동진썬미켄과 상보, 솔라이엔에스에서 염료감응 태양전지의 상용화를 추진하고 있으며, 한국과학기술연구원, 한국전자통신연구원, 한국전기연구원, 고려대 등 관련 연구 진행 중
 - 동진썬미켄은 세계 최고 수준 대면적 고효율 모듈 및 공정 기술을 확보하였고, 지상 설치용 박막 태양전지 모듈에 대한 설계 적격성 확인 및 형식 승인 요구 사항인 IEC 61646의 주요 성능 지표를 만족하는 결과를 보고
 - 상보는 유연성 있는 금속 기판 태양전지를 롤투롤 방식으로 개발 중이며, 스테인레스 기판을 활용한 플렉서블 염료감응 태양전지 개발 과제를 수행 중
 - KAIST 고민재 박사 그룹은 저온 광전극 소결 기술을 개발하고 플라스틱 태양전지로 세계 최고 효율인 8% 달성
 - 한국전자통신연구원 강만구 박사 그룹은 SUS 금속 기판을 이용 유연기판 태양전지 모듈 기술 개발
 - 고려대학교 김환규 교수 그룹은 염료감응 태양전지 상대전극으로 사용 가능한 질소 도핑 그래핀을 대량 생산할 수 있는 기술을 개발하여 ACS 나노에 게재하였으며 태양전지 상용화에 활용 기대

15) <http://www.greendaily.co.kr/news/articleView.html?idxno=25131>

16) <http://www.sisaweek.com/news/articleView.html?idxno=36187>

17) <http://www.asiae.co.kr/news/view.htm?idxno=2011091914041165269>

18) <http://www.asiatoday.co.kr/view.php?key=20150121010011250>

- (유기 태양전지) 코오롱 인더스트리, GIST 이광희 교수 그룹, 광주과학기술연구원 등에서 연구를 진행하고 있으며, 2012년 이후 일부 소재 및 기관 재료, 전극 소재를 개발하고 있으나 상용화에 근접하지 못함
 - 코오롱 인더스트리는 한국화학연구원과 공동 연구 진행 중이며, 필름 생산 및 제어 기술과 롤투롤 공정 기술을 통한 모듈 개발로 2013년 최고 효율 11.3% 달성
 - GIST 이광희 교수 그룹에서 유기 태양전지 효율 저하 원인 규명 및 신규 모듈 제작 기술 개발 중
 - 광주과학기술연구원은 UC Santa Barbara(美)의 Heeger 교수 그룹과 공동 연구를 통해 6.5% 효율의 일렬배치형 유기태양전지를 개발

● 차세대 태양전지

- (고효율 화합물 반도체) 한양대 백운규 교수 그룹 포함 한·미 공동연구진이 세계 최초로 다층 성장기술을 이용한 화합물 태양전지 기술을 개발하였고, 한국나노기술원과 아주대는 화합물 반도체 3중접합 태양전지를 개발하여 40.46% 효율 달성
 - 한양대 백운규 교수 그룹과 Illinois University(美) John A. Rogers 교수 그룹은 글로벌 연구실사업의 지원으로 다층 성장기술을 이용한 화합물 태양전지 기술을 개발하여 Nature에 게재
 - 한국나노기술원 강호관, 박원규 박사 그룹과 아주대 이재진 교수 그룹은 InGaP-GaAs-Ge 기반 화합물반도체 3중접합 태양전지를 개발하여 당시 국내 최고 태양전지 변환 효율인 40.46% 달성
- (페로브스카이트) 우리나라에서 페로브스카이트 태양전지 관련 원천 특허를 보유하고 있으며 세계 최고 효율인 20.1% 달성하였으나, 수분 취약성과 납 사용의 한계 극복 필요
 - 2012년 성균관대 박남규 교수 그룹에서 장기 안정성을 가지면서 10%에 근접하는 효율의 페로브스카이트 태양전지를 개발하고 원천 특허를 취득
 - 한국화학연구원 석상일 박사팀은 미국 NREL로부터 20.1% 효율을 공인 받았으며, 관련 연구 결과를 Nature, Science에 발표



III.

시장현황

01 세계시장 현황 및 전망

- 2015년 예상 세계 태양광 시장은 '13년 대비 약 9.8% 증가하여 26,726 M\$로 추정

※ ('13년) 24,339 M\$ → ('15년) 26,726 M\$

- 태양전지 산업은 공급 과잉 및 판가 인하로 인해 상당한 어려움을 겪고 있으며, '19년까지 지속될 것으로 전망

※ '13년부터 '19년까지 연평균성장률(Compound Annual Growth Rate, CAGR): 2.9%

- 특히, 폴리실리콘의 공급 과잉과 가격 하락으로 인해, 실리콘 태양전지가 전체 태양전지의 비중의 대부분을 차지하고 있으며, '19년까지 92% 이상으로 지속세를 유지할 것으로 예상

- 실리콘 태양전지 전망치는 ('13년) 22,320 M\$ → ('15년) 24,070 M\$ → ('17년) 24,436 M\$ → ('19년) 26,023 M\$

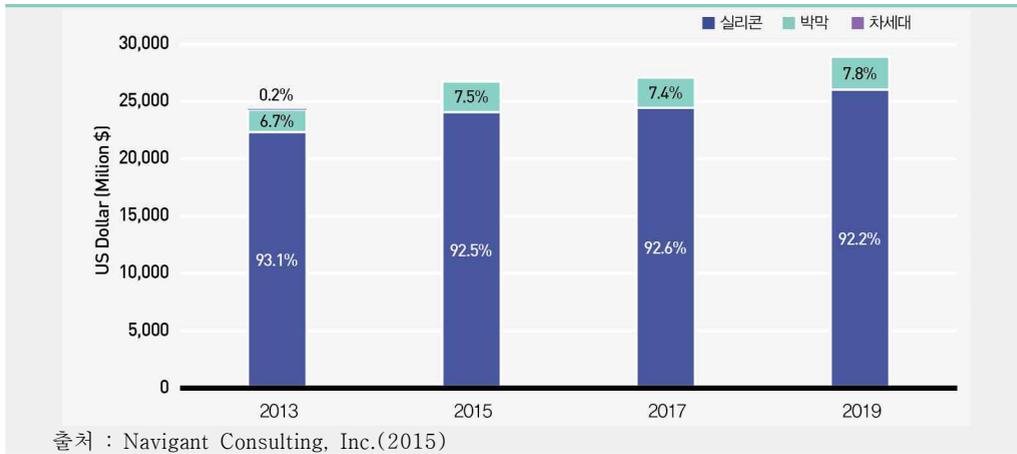
- 박막 태양전지 점유율은 '13년 대비 '15년도에 0.8% 상승할 것으로 전망되나, 이후 정체되어 '19년에는 '15년 대비 0.3% 증가하는 수준에 머물게 될 것으로 예상

- 박막 태양전지 전망치는 ('13년) 1,956 M\$ → ('15년) 2,656 M\$ → ('17년) 2,633 M\$ → ('19년) 2,863 M\$

- 차세대 태양전지는 '13년 전체시장 대비 0.2%의 점유율을 차지하고 있으나, 대부분의 차세대 기술들이 기초개발연구 수준으로 '19년까지 상용화에 도달하지 못할 것으로 전망

- Navigant에 의하면, 차세대 태양전지 시장은 ('13년) 62.1 M\$ → ('15년) 0 M\$ → ('16년) 0 M\$로 전망되나, Semiconductor Today(15.7.15.)에서는 집광형 태양전지의

시장 전망치를 '19년 2.4GW로 예측
태양전지 전체 세계시장 규모



- (실리콘 태양전지) 비결정질 태양전지의 경우 '13년 실리콘 태양전지 시장에서 3.7%의 시장 점유율을 차지하였으나, 이후 결정질 실리콘 태양전지의 지속적인 원가 절감 및 효율 향상으로 인해, 초기 예상과는 달리 '15년에 시장 점유율이 급격히 감소한 후 '19년까지 하락세를 이어갈 것으로 전망 (CAGR: 2.6%)

 - CAGR은 결정질 실리콘 태양전지 3.2%, 비결정질 실리콘 태양전지 -27.1%로 예상



실리콘 태양전지 세계시장 규모



- (박막 태양전지) CdTe 박막 태양전지는 '13년 박막 태양전지의 46.1% 점유율을 차지하였으나, '15년에는 점유율이 7.4% 증가할 것으로 예상
- 이에 반해, DSSC 및 OPV의 경우 '19년까지 기술개발 단계에 머물 것으로 전망되며, CAGR은 CdTe 10.2%, CIGS 6.9%로 예상

박막 태양전지 세계시장 규모



- (차세대 태양전지) 고효율 반도체 화합물 태양전지가 대부분의 시장을 형성하고 있으나, 향후 성장 가능성이 불투명한 상황
- 고효율 화합물 반도체 태양전지의 가격 경쟁력 확보를 위해서는 기술 혁신 및 단가의 추가 하락 및 투자 유치를 위한 신뢰성 확보 필요
- 차세대 태양전지로 각광 받고 있는 페로브스카이트 태양전지는 연구가 활발히 진행되고 있으나, 아직 기초 개발 단계 수준으로 '19년까지 시장에 진입하기 힘들 것으로 예상

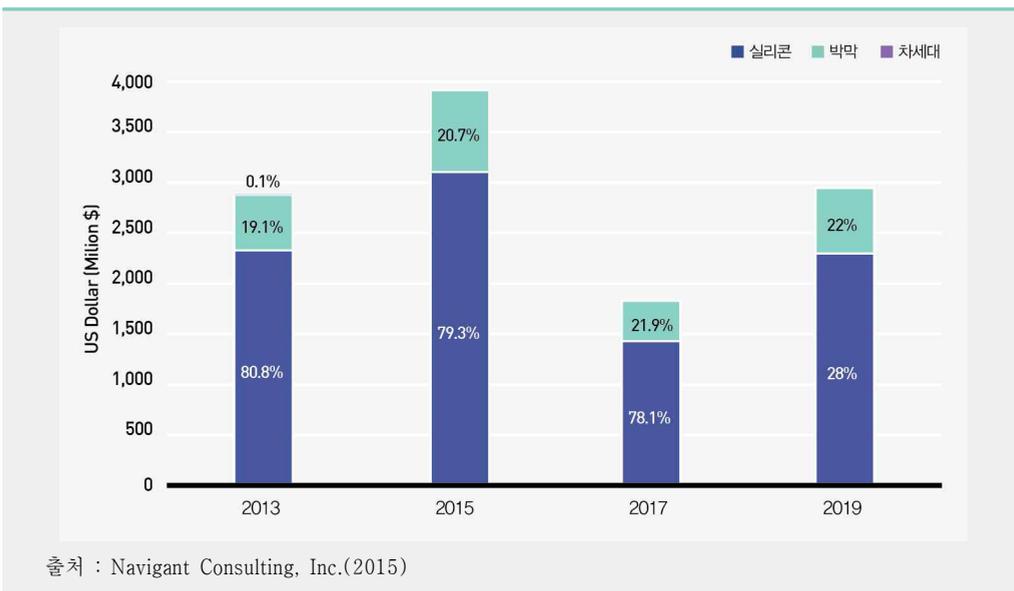


02 국외시장 현황 및 전망

● 미국

- 미국의 내수 시장은 '15년 기준으로 3,912 M\$로 예상되며, 이는 세계시장의 15% 규모에 해당되나, '15년 이후 시장 규모가 점차 축소될 것으로 전망
 - '15년 미국 태양전지 시장 규모는 '13년 대비 약 35.9% 증가하여 3,912 M\$로 전망되며, 이후 '17년에는 약 53.2%로 급격히 감소하다, '19년에는 일부 회복세로 전환될 것으로 예상
 - ※ ('13년) 2,879 M\$ → ('15년) 3,912 M\$ → ('16년) 1,830 M\$ → ('19년) 2,945 M\$
 - 미국 내 박막 태양전지의 수요는 '19년까지 일부 상승하지만, 여전히 78%의 실리콘 태양전지가 미국 내수 시장을 장악할 것으로 전망

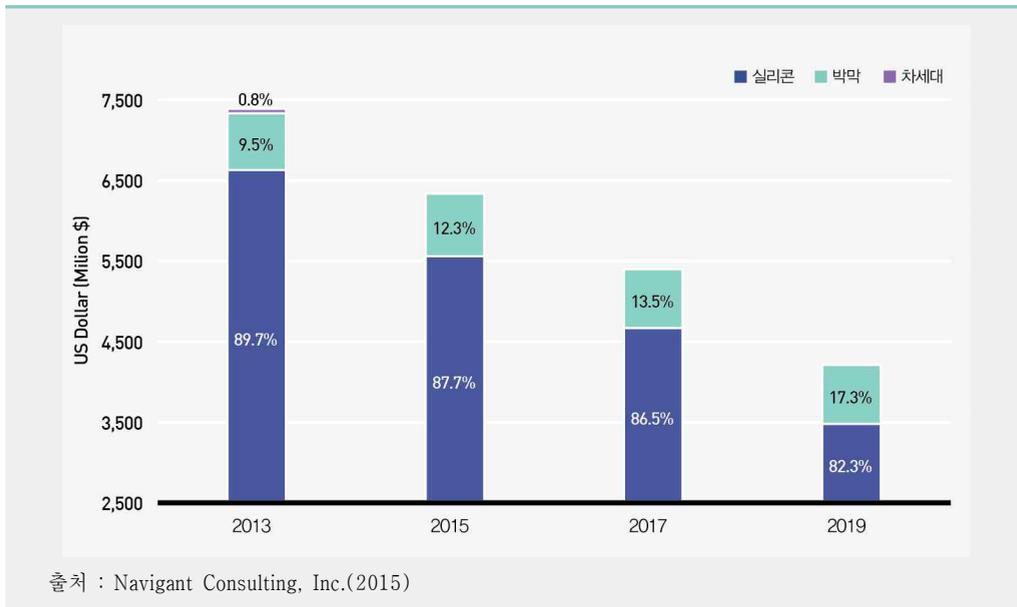
미국 태양전지 시장 규모



● 중국

- 중국의 내수 시장은 '13년 기준으로 7,389 M\$ 규모로 예상되며, 이는 세계 시장의 28.5% 규모에 해당되나, 이후 시장 규모가 지속적으로 감소하여 '19년에는 세계시장에서 중국시장이 차지하는 비중이 16.2%로 대폭 축소될 것으로 전망
 - 특히, 실리콘 태양전지의 수요가 급격히 감소하다 '19년 4,209 M\$ 수준에 도달할 것으로 예상되며, 실리콘 태양전지 CAGR은 -10.2%의 감소 추세임
 - 이에 반해, 박막 태양전지의 CAGR은 꾸준한 지속세를 보일 것으로 예상됨
- 중국의 태양전지 내수 시장 규모가 급격히 하락하는 이유는 중국 내 태양광 설치용량의 증가폭 감소 및 원가 절감과 공급 과잉에 의한 모듈 가격 하락에 기인한 것으로 추정

중국 태양전지 시장 규모



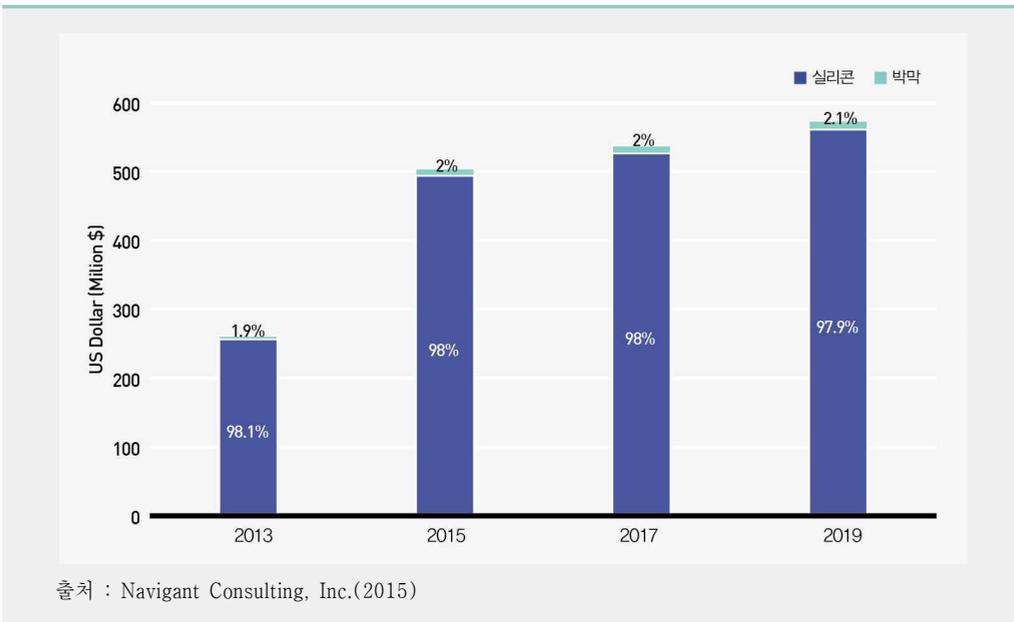


03 국내시장 현황 및 전망

- '15년 국내 태양전지 시장은 '13년 대비 92.8%로 대폭 성장하여 504.2 M\$의 시장 규모로 예상되며, '15년 세계시장 규모의 약 1.9%를 차지
- 이후 국내 태양전지 시장의 성장률이 대폭 감소하여, '19년에는 573 M\$ 규모가 될 것으로 추정

※ ('15년) 504.2 M\$ → ('17년) 537.5 M\$ → ('19년) 573.6 M\$

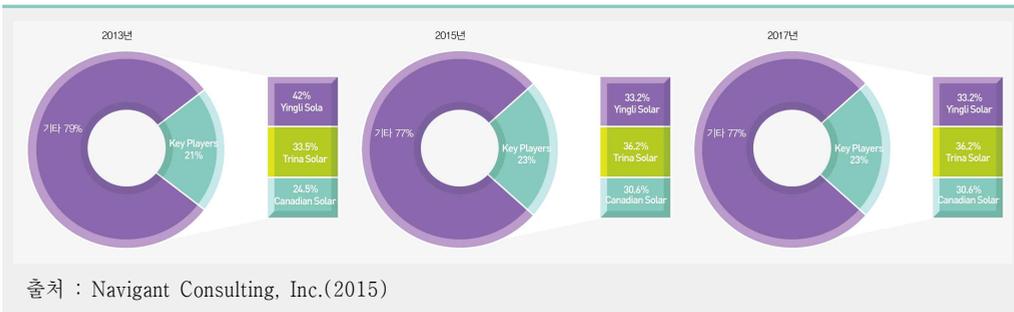
우리나라 태양전지 시장 규모



04 주요 Key Player 시장 점유율

- (실리콘 태양전지) 세계 3대 실리콘 태양전지 Major 업체가 세계 태양전지 시장의 약 20%를 점유
- '13년 기준으로 Yingli Solar(中)가 세계 시장의 약 8%를 장악하고 세계 시장을 선점하였으나, '15년에는 Trina Solar(中)가 세계 시장의 약 7.7%를 점유하여 세계 1위 기업으로 부상할 것으로 전망
 - '13년 기준 전체 실리콘 태양전지 시장 점유율 순위는 Yingli Solar (8.7%), Trina Solar (6.9%), Canadian Solar (5.1%) 순이며, '15년 기준 순위는 Trina Solar (8.4%), Yingli Solar (7.7%), Canadian Solar (7.1%) 순임

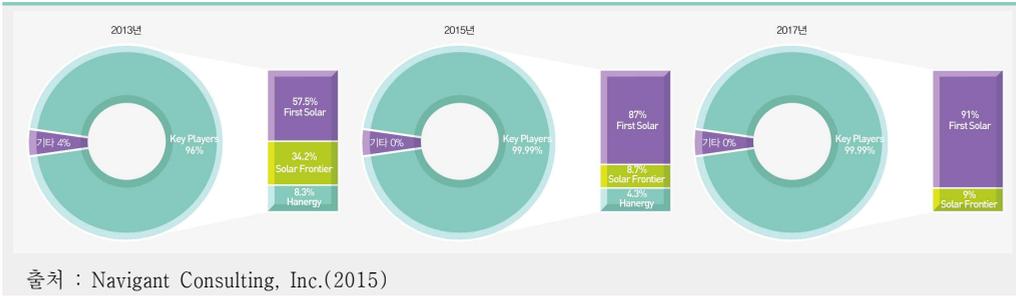
실리콘 태양전지 key Player 시장 점유율



- (박막 태양전지) 박막 태양전지 전체 시장은 3개의 Major 업체가 96% 이상을 점유
- CdTe 박막 태양전지를 생산하는 First Solar(美)가 박막 태양전지 시장의 55%를 점유하여 세계 1위이며, CIS 박막 태양전지를 생산하는 Solar Frontier(日)가 32.6%로 2위임
- '15년에는 Solar Frontier(日)의 매출이 급격히 증가하여, CdTe, CIGS 생산 업체 중심으로 박막 태양전지의 시장이 형성될 것으로 전망

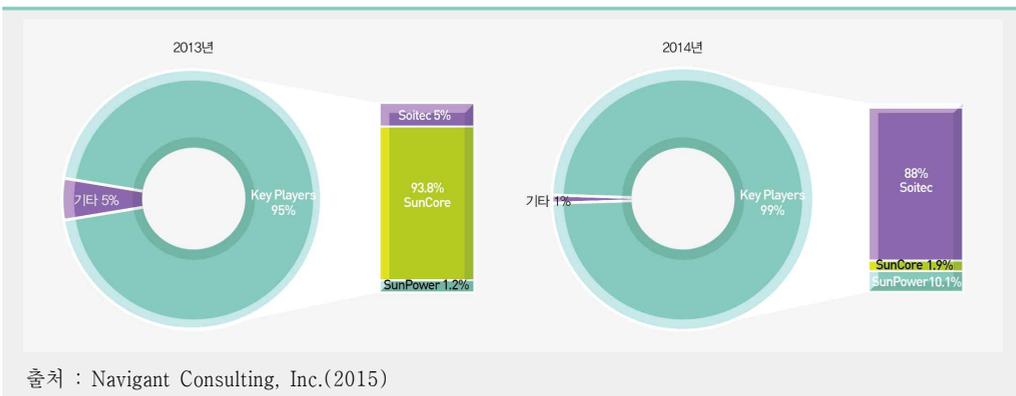


박막 태양전지 Key Player 시장 점유율



- (차세대 태양전지) 차세대 태양전지 전체 시장은 고효율 화합물 반도체 태양전지 업체(집광형)인 SunCore(中)가 시장을 선점하고 있으나, 시장 상황은 예측 불가능한 상태
- SunCore(中)가 '13년 기준 차세대 태양전지 시장의 89%를 점유하고 있으나, 세계 전체 태양전지 시장의 0.2%를 차지하는 수치로 매우 미약한 수준이며 주로 중국 내수 시장임
- '14년에는 고효율 화합물 반도체 태양전지 업체인 Soitec(프)의 매출이 급격히 증가하여 차세대 태양전지 시장의 87%를 점유하였으나, 일반 PV 시스템의 가격 하락으로 가격 경쟁력이 급속히 하락

차세대 태양전지 Key Player 시장 점유율



- 이후 전체 차세대 태양전지시장의 불투명성으로 인해 '15년 이후의 고효율 화합물 반도체 태양전지 시장 또한 예측 불가능한 상황

IV.

저채널화

01 국외 정책

- (R&D 지원) 정부 주도의 대규모 R&D 투자
- (미국) 에너지부에서는 Photovoltaic Beyond the Horizon 사업, SunShot Initiative Program을 추진하여 소재 및 공정 기술 개발 지원하며, 기술 수준에 따라 프로그램 구분
 - Photovoltaic Beyond the Horizon에서는 태양전지와 모듈 등 요소 기술의 저가격, 고효율화를 중심으로 소재 및 공정에 대한 연구개발 추진
 - SunShot Initiative Program에서는 2020년까지 태양광 원가와 시스템 비용을 75%까지 감소시켜 그리드패리티 도달을, 2030년까지 미국 내 전력의 15%, 이상을 태양광 발전으로 공급하는 것을 목표로 함

미국의 태양광 연구개발 프로그램

프로그램명	주요 내용
Technology Pathway Partnerships	기업 주도로 대학 및 연구소가 참여
Photovoltaic Technology Incubator Selections	신공정 및 제품의 상용화 지원 대상 기술: 박막 제조기술, 집광형 태양전지 등
Future Generation Photovoltaic Devices and Processes selections	잠재성 있는 기술에 대한 지원 대상 기술: 나노, MEG, Plasmonics, Tandem



- (일본) Cool Earth 에너지 혁신기술 계획, All Japan Project와 Advanced PV Generation Program을 통해 태양광 원가 절감 및 효율 향상 기술 개발을 지원하고 있으며, 2009년 PV 로드맵을 수정하여 2050년을 목표로 PV2030+를 설정
 - Cool Earth 에너지 혁신기술 계획은 온실가스 감축 관련 21개 기술을 선정하여 개발하는 것을 목표로 하며, 혁신적 태양광 발전으로서 2세대 초박막 결정질 실리콘, 초고효율 박막 태양전지, 유기계 태양전지 발전단가 감축, 발전 효율 40% 달성, 3세대 양자 나노구조의 태양전지 등 개발로 2050년까지 발전 효율 40% 이상 달성이 목표
 - APVG 프로그램은 차세대 기술 개발을 위한 R&D 사업으로 태양광 발전 시스템에서의 원가 절감 및 효율 향상이 목표
 - All Japan Project는 산·학·연 공동 연구를 통해 자국 기업간 불필요한 경쟁을 줄이고 글로벌 태양광 시장 점유율 확대가 목표

일본 로드맵 PV2030+

구분	2010		2017		2025				
	모듈 (%)	셀 (%)	모듈 (%)	셀 (%)	모듈 (%)	셀 (%)	제조비용 (엔/W)	수명 (년)	모듈(%)
결정질	16	20	20	25	25	(30)	50	30(40)	40%의 초고효율 태양전지 추가개발
박막	12	15	14	18	18	20	40	30(40)	
CIG계	15	20	18	25	25	30	50	30(40)	
화합물계	28	40	35	45	40	50	40	30(40)	
염료감응	8	12	10	15	15	18	<40	-	
유기	-	7	10	12	15	15	<40	-	

- (보급 촉진) 발전차액지원제도(FIT), 공급의무화 제도(RPS)를 통해 신재생에너지를 이용한 발전을 지원하고 있으며, 태양광 기업에게 세제 혜택 등을 부여

- (미국) 현재 38개 주에서 RPS를, 일부 주(캘리포니아, 루이지애나, 하와이, 오리건, 버몬트 등 5개주, '11년 기준)에서는 FIT를 보조 수단으로 활용하고 있으며, 전력소비자가 태양광을 통해 생산된 잔여 전력을 판매할 수 있는 Net Metering 제도 실시
- (일본) 후쿠시마 원전 사고 이후 FIT를 재도입하고 적용 대상을 10kW 이상 주택용 태양전지 발전설비로 확대
 - 후쿠시마 원전 사고 이후 '05년부터 시행된 RPS를 폐지하고 FIT를 재도입하였고, 태양광의 경우 10kW 이상은 20년간 42엔/kWh, 10kW 미만은 10년간 42엔/kWh로 우리나라 기준 가격보다 높은 수준
 - FIT 재도입으로 태양전지 생산량과 태양광 설치율이 급격히 증가

일본 신재생에너지법상 태양광 발전 전기 매입 가격 및 기간

구분	주택용	주택 이외 사업장, 발전 사업용 등
매입 가격	초기에는 높은 매입 가격을 설정하고 발전시스템의 가격하락에 따라 감소	
매입 기간	10년	15-20년 범위 이내

출처 : 에너지관리공단 신재생에너지센터

- (유럽연합) FIT와 RPS를 병행하고 있으며, 2020년까지 태양광 발전으로만 EU 발전 전력량의 12%를 조달하는 유럽에너지 기술전략 계획 발표
 - (독일) FIT는 누적용량 52GW에 도달하는 2018-2020년에 폐지되고, 입찰 시장으로 전환될 예정
 - (영국) 2020년까지 태양광 발전용량 20GW(발전비중 15%) 확대 계획
 - (이탈리아) 잉여전력 확보 위해 FIT 지급기간 확대
- (중국) 전력구매를 의무화 하는 한편 자국 태양광 업체에 부가세 50% 환급, Golden Sun Model Project를 통해 보조금 지급
 - 시스템 연계형 태양광 발전에 50%의 예산을 지원하고, 계통 연계가 되지 않는 지역에는 설치비용의 70% 보조



중국의 새로운 보조금 시스템

태양에너지 자원에 따른 지역 분류	대형 태양광	분산형 태양광	
	FIT (Yuan/kWh)	자가용 (Yuan/kWh)	사용 후 잉여전력 (Yuan/kWh)
I	0.90	전력소매요금+0.42	화력발전 도매가격+0.42
II	0.95		
III	1.00		

출처 SNEIA (2013)

- (보호 정책) 중국산 태양광 부품으로 인한 무역 분쟁이 확대되면서 반덤핑, 반보조금 관세 등 자국 산업을 보호하기 위한 정책을 실행
- (미국) 2011년 10월 SolarWorld는 美 상무부(Department of Commerce, DOC)에 중국의 불공정 무역 관행(unfair trade practice)을 고발하였고, 美 정부는 중국산 태양광 부품에 20-255%의 수입관세 부과
- (일본) 캐나다 온타리오 주의 지역자원 사용 요건이 캐나다 태양전지 제조업체에게 보조금과 같은 혜택을 부여한다고 항의하였고, WTO는 지역자원 사용 요건을 폐지하고 규정 재조정을 명령

02 국내 정책

- (R&D 지원) 실리콘 태양전지(성숙시장)의 경우 효율 증대 및 가격경쟁력 강화를 지원하며, 차세대 태양전지는 요소기술 개발 지원
- 그린에너지 전략로드맵 2011에서는 글로벌 시장 진입을 위한 전략적 기술 개발 방향, R&D 이후 상용화 실행 방안을 도출

그린에너지 전략로드맵 2011 (태양광)



- 실리콘 태양전지 시장은 그리드 패리티에 도달된 성숙시장이므로, 중국의 저가·대량생산에 대응하기 위한 발전 효율 증대 및 가격경쟁력 강화(단위 생산 전력 당 모듈 제조비용 35% 절감) 지원



- 차세대 태양전지는 기술발전 속도가 빠르고 응용 가능성이 높은 분야이므로 민간 수행이 어려운 핵심기술의 조기상용화를 집중 지원
- (보급 촉진) 신재생에너지 공급의무화 제도는 태양광 발전 보급 정책의 핵심으로 태양광의 의무이행비율은 100%에 달하며, 공공 건물의 신재생에너지 설치 의무화를 통해 공공부문의 신재생에너지 보급을 확대하는 한편, 태양광 렌탈 사업, 그린홈 사업 등을 통해 가정용 등 소규모 태양광 발전 지원
- 신재생에너지 공급의무화 제도에서는 설치 유형 및 규모에 따라 공급인증서 (Renewable Energy Certificate, REC) 가중치를 차등 부여
 - 신재생에너지 공급의무화 제도는 일정 규모의 발전사업자에게 총 발전량의 일정 비율 이상을 신재생에너지를 이용하여 공급하도록 의무화 하는 제도
 - 공급의무자는 공급인증서를 공급인증기관에 제출하여 의무이행 사실을 증명하여야 하고 미이행분에 대해 과징금을 부과하며, 시장에서 인증서 거래 가능
 - 제4차 신재생에너지 기본계획에 따라 태양광과 비태양광 시장 통합 예정이며, 발전사와 장기 계약이 가능한 태양광 판매사업자 지원 확대 예정
 - 태양광의 경우 산업 육성을 위해 별도로 의무 공급량을 정하고 있음

신재생에너지 중 태양광 연도별 공급의무량

연도	2012	2013	2014	2015 이후
의무공급량(GWh)	276	723	1,353	1,971

출처 : 에너지관리공단 신재생에너지센터

- 기존에는 설치 유형, 지목에 따라 가중치를 부여하였으나, 설치 유형, 설치 규모에 따라 0.7 ~ 1.5의 가중치 부여하는 내용으로 개정

태양광 REC 가중치(2015. 3. 13. 시행)

REC 가중치	대상에너지 및 기준	
	설치 유형	세부 기준
1.2	일반 부지에 설치하는 경우	100kW 미만
1.0		100kW부터
0.7		3,000kW 초과부터
1.5	건축물 등 기존 시설물을 이용하는 경우	3,000kW 이하
1.0		3,000kW 초과부터
1.5	유지의 수면에 부유하여 설치하는 경우	

- 국가 및 지방자치단체, 공공기관이 신축·증축 또는 개축하는 건축물에 신재생 에너지 설비의 설치 의무화
 - 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 제12조에 근거하여 설계시 산출된 예상 에너지사용량의 일정 비율 이상을 신재생에너지를 이용하여 공급되는 에너지를 사용하도록 함
- 태양광 렌탈 사업 및 그린홈 사업을 통해 보급 지원
 - 태양광 렌탈 사업은 태양광 설비를 가정에 대여하여 절약한 전기요금을 통해 수익을 창출하도록 하는 사업으로, 100% 사업자 부담인 점에서 자부담과 보조금이 6:4 비율이었던 기존 사업과 차이가 있으며, 대여업자에게 대여료 및 신재생에너지 공급인증서로 투자비 등 회수할 수 있도록 지원
 - 그린홈 사업에서는 가정용 태양광 발전 설치 시공비의 40%를 지원하며, '13년부터 1,150천원/kW의 정액을 지원
- 용적률 및 보조금 단계적 삭제, 신축 건축물에 대한 신재생에너지 설비 의무화를 통해 제로에너지 빌딩 활성화



V. 요약 및 시사점

- 국내 태양전지 산업은 공급과잉 및 판가인하의 어려움 속에서 일부 회복세를 보이고 있으며, 원가 절감 등 가격경쟁력 및 기술 신뢰성 확보를 위한 정책적 지원 필요
- (기술동향) '15년 실리콘계 및 비실리콘계 태양전지 기술수준은 주요 5개국 중 4위이나, 실리콘계 태양전지의 효율 향상 및 원가 경쟁력 극복, 비실리콘계 태양전지 대체를 목표로 기술 개발이 진행 중이며, 페로브스카이트 태양전지의 경우 세계 최고 수준의 기술 보유
- (시장동향) '15년 국내 태양전지 시장은 '13년 대비 92.8%로 대폭 성장하였으나 세계 시장 규모의 1.9%에 불과하며, 이후 성장률이 감소하여 '19년 573 M\$ 규모로 예상
- (정책동향) 세계 각국은 R&D 지원, 보급 촉진 정책을 통해 글로벌 태양광 시장 점유율 확대를 꾀하고 있으며, 우리나라에서도 정부 차원에서 기술 개발을 지원하는 한편 신재생에너지 공급의무화 제도 등을 통해 시장 확대 모색
- 최근 기술 개발의 트렌드는 사업성 확보를 중심으로 변화하고 있으므로 시장확보형/미래비전형으로 구분·육성하는 R&D 패러다임 전환이 요구되며, 전 공정 Value Chain 기업의 컨소시엄 지원을 통한 소재 및 양산형 장비 개발 필요
- 결정질 실리콘 태양전지의 경우 중국의 대규모 투자와 규모의 경제에 대응하기 위한 저원가 기술이 확보되어야 하고, 원료 및 소재에 대한 기술 개발 지원 필요
- 비결정질 실리콘 태양전지의 경우 결정질에 비해 공정이 단순하고 22% 이상의 높은 에너지 변환 효율이 나타나고 있으나 장비 및 소재 기술 개발이

동반되어야만 안정적 성장 가능

- 고효율 화합물 반도체 태양전지의 경우, 일반 실리콘 태양광 발전 대비 가격 경쟁력 확보를 위해 집광용 광학계 및 추적기의 기술 혁신과 원가 절감을 위한 기술 확보 필요
- 현재 우리나라의 태양전지 관련 업체는 외산 설비에 의존하고 있으므로, 소규모 소재업체와 장비업체의 컨소시엄 지원이 요구됨
- 향후 발전 가능성과 잠재성이 높은 페로브스카이트, 집광형, 습식공정을 이용한 CIGS 태양전지에 대한 심층 동향 분석 등 지속적 모니터링 및 육성이 필요
- 우리나라가 원천기술과 세계 최고 효율을 보유하고 있는 페로브스카이트 태양전지 기술은 수분취약성 등 안정성 문제 극복시 실리콘 태양전지의 대체 가능성이 높으므로 장기적 관점에서 지원 필요
- 고효율 화합물 반도체 태양전지 시장은 일반 PV 시스템의 가격 하락으로 가격 경쟁력이 급속히 하락하였으나, LCOE 측면에서 일조 조건에 따라 획기적인 원가 절감 예상
- 기존의 CIGS 박막 제조공정을 비진공 공정으로 대체할 경우 재료의 사용 효율과 생산성이 향상되며 대량생산이 가능

VI.

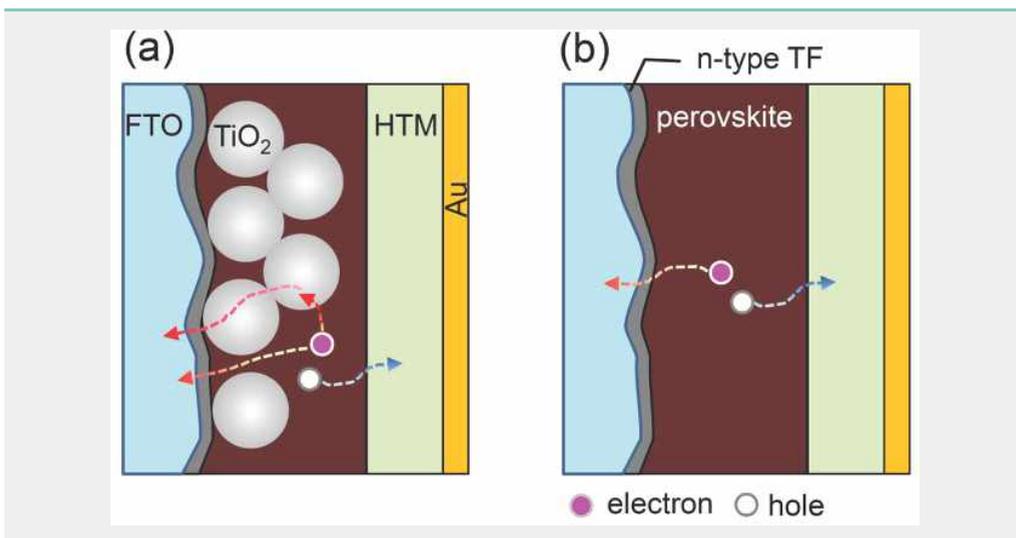
심층동향

01 페로브스카이트 태양전지

세부기술개요

- (정의) 매우 높은 흡광계수(물질이 빛을 흡수하는 정도를 나타내는 계수)를 가지는 광흡수체인 페로브스카이트 물질을 활용한 저가형·고효율 태양전지 기술
 - 페로브스카이트 태양전지의 에너지 회수시간(Energy Payback Time, EPBT)은 2-3개월로 기존 태양전지의 EPBT(1-2년) 보다 짧아 결정질, 박막 태양전지와 경쟁이 가능

페로브스카이트 태양전지의 일반적 구조



- (장단점) 기존 반도체 기반 태양전지에 가까운 고효율 달성 및 타 태양전지 기술과의 텐덤화가 가능하여 고효율화가 용이하지만, 수분에 취약하고 납에 대한 안정성 및 실리콘 태양전지와의 경쟁을 위한 수명 연장이 상용화에 필수적인 요건
- (제조공정) 페로브스카이트 형성, 페로브스카이트 코팅, 홀전도물질층 형성, 나노 포러스 산화물막 형성, 대면적 모듈화 등의 공정

하이브리드 페로브스카이트 박막 제조 공정도

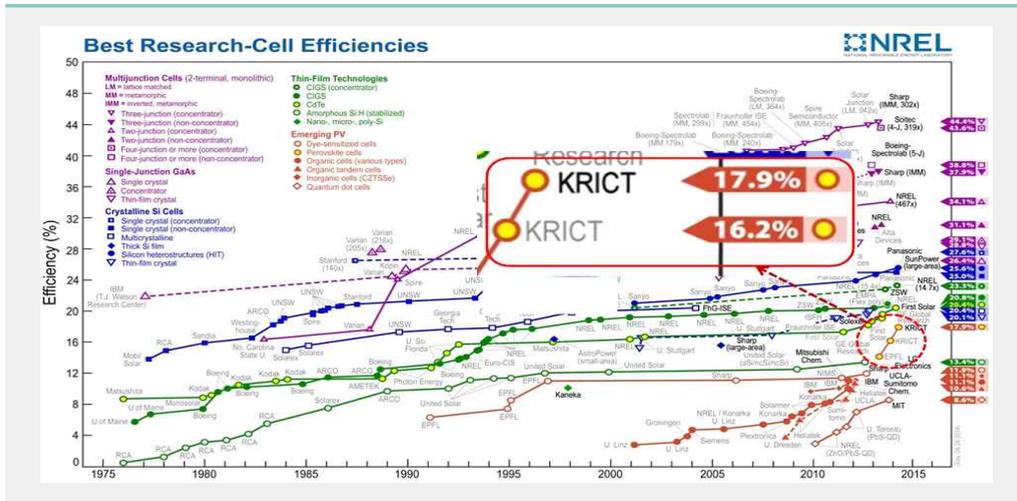


● 세부기술동향

- 성균관대 박남규 교수 그룹이 세계 최초로 페로브스카이트 소재를 흡광물질로 개발하여 원천 특허 취득(Sci. Reports (2012) 2, 591.)
 - 최근 adduct를 이용하여 평균 18.3%, 최고 19.7% 효율의 태양전지 개발(*J. Am. Chem. Soc.* (2015) 137, 8696)
 - 일본 카네카와 공동 연구를 통해 페로브스카이트 태양전지와 실리콘 태양전지의 하이브리드 기술로 28% 효율을 보고
 - 페로브스카이트 결정 성장 제어기술을 이용하여 17.01% 효율 달성
- 한국화학연구원 석상일 박사 그룹은 용액엔지니어링 기법을 이용하여 미국 NREL로부터 20.1% 효율을 공인 받았으며, 관련 연구 결과를 Nature, Science에 발표



페로브스카이트 태양전지 효율 현황



- 국내 · 외에서 페로브스카이트 태양전지 수명 및 납 대체 물질 관련 연구 수행 중
 - 경희대 임상혁 교수 그룹에서는 히스테리시스가 거의 없는 페로브스카이트 태양전지 기술을 개발하였으며, 성균관대 정현석 교수 그룹에서 천 번 구부려도 성능이 변하지 않는 플렉시블 페로브스카이트 태양전지 기술 개발
 - 광주과학기술원 김동유 교수와 호주국립과학원 박두진 박사는 슬롯 다이 코팅 공법과 롤투롤 공정을 통해 저가격 · 대면적 페로브스카이트 태양전지 개발
 - 염료감응 태양전지 최고 효율을 보유하고 있는 EPFL의 Grätzel 교수 그룹에서 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 기반 페로브스카이트 태양전지를 개발하여 15% 효율 달성 (*Science* 2013, 499, 316)
 - Stanford University(美) McGehee 교수 그룹에서 CIGS와 페로브스카이트 텐덤화 기술로 18.6% 효율 달성
 - UCLA(美) Yang 교수 그룹에서 OPV 공정 기법을 활용하여 19.3% 효율 달성 (*Science* 2014, 345, 6196)
 - Oxford University(英)의 Snaith 교수 그룹에서 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ -XCIX기반 태양전지로 5.73% 효율 발표 (*Nature Photonics* 2014, 8, 289)
 - KAIST 정인 교수 그룹은 Sn 기반 페로브스카이트 소재를 홀전도체로 사용하여

8.5% 변환 효율 달성 (*Nature* 2012, 485, 486)

- Northwestern University's Institute for Sustainability and Energy(美)는 미국 에너지부(DOE)의 지원으로 페로브스카이트 태양전지 수명 및 납 대체 물질 연구를 진행 중임

- 향후 5년 이후 30% 이상 고효율이 실현되고 무연/플렉시블 페로브스카이트 태양전지 개발이 예상되나, 상용화를 위해서는 소재의 안정성 확보, 대면적 코팅 기술 등의 개발이 필요

- 밴드갭 튜닝과 구조 및 계면 제어 기술 개발로 25% 이상 고효율 실현이 가능하며, 실리콘, CIGS 태양전지와 페로브스카이트 태양전지의 하이브리드 또는 탠덤화로 30% 이상 초저가 초고효율 태양전지를 개발할 것으로 기대
- 수분에 안정한 신기술 개발로 상업화 가능한 수준에 도달할 것으로 예상
- 납을 대체하는 신물질 개발로 무연 페로브스카이트 태양전지와 만 번 이상 구부려도 성능이 변하지 않는 플렉시블 페로브스카이트 태양전지 개발이 예상

● 시장전망

- (세계시장 전망) 페로브스카이트 태양전지는 기초개발연구 수준에서 상용화를 위한 응용 단계로 접어드는 시점

- 페로브스카이트 태양전지 모듈의 가격은 2015년 기준 전 세계 모듈 가격인 \$0.50/W- \$0.60/W, 2021년 예측 가격인 \$0.30-\$0.40/W 범위 내여야만 시장 경쟁력이 있을 것으로 예측

● 정책동향

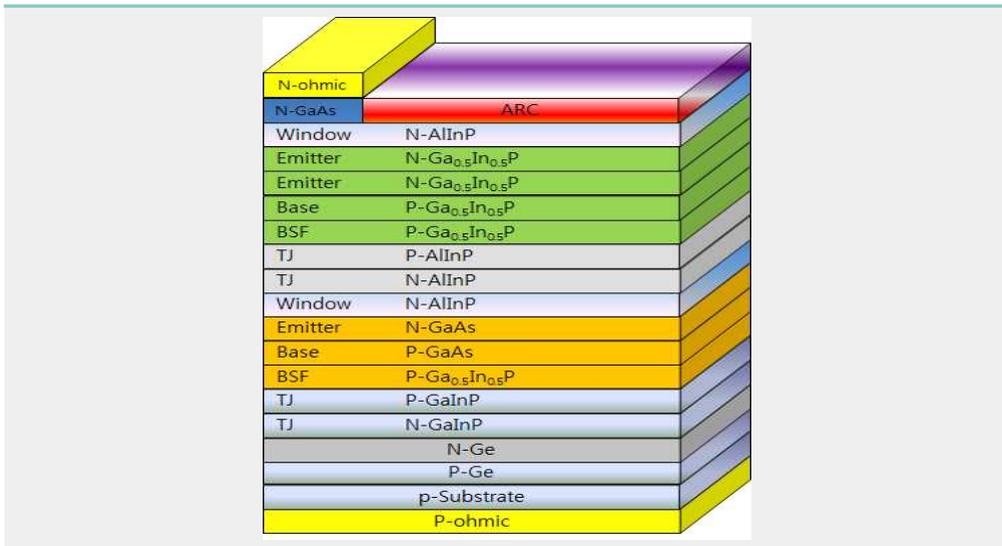
- (국내) 미래창조과학부에서 글로벌 프론티어 사업, 기후변화대응기술개발사업 등을 통해 페로브스카이트 원천기술 개발을 지원

02 집광형 태양전지

세부기술개요

- (정의) 태양에너지를 전기에너지로 바꾸는 기본 원리는 기존의 태양전지와 동일하지만, 고효율 다중접합 태양광 셀 또는 결정질 실리콘 소재 태양전지 셀을 사용하고 집광장치로서 굴절형 렌즈, 반사형 거울, 복합 렌즈 또는 광가이드형 집광기를 조립하여 태양광을 저배율에서 고배율로 집광하여 발전하는 시스템

III-V족 화합물반도체 층을 이용한 집광형 태양전지 소자 형태



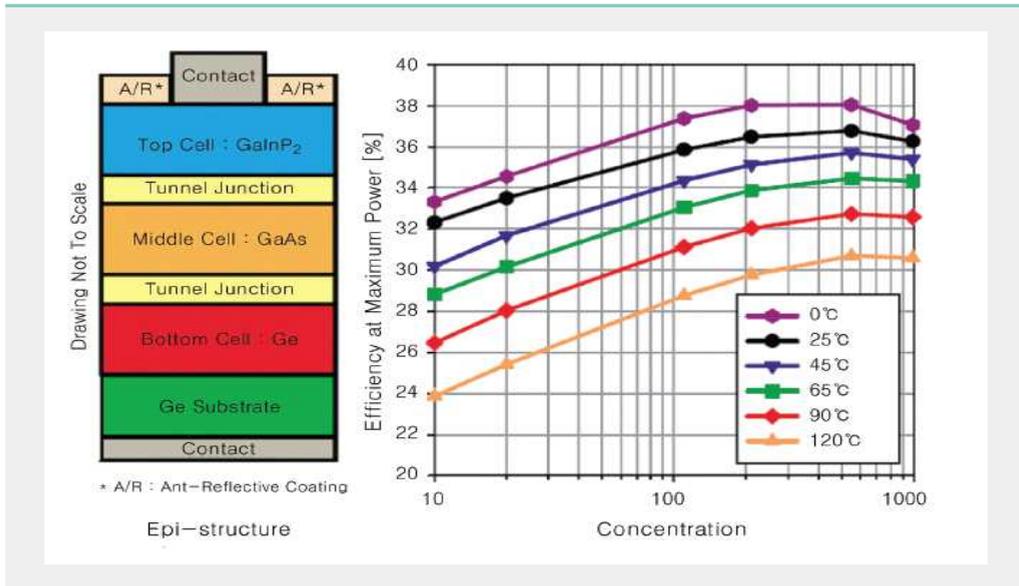
- (종류) 고 집광형 광발전(High Concentration PhotoVoltaic, HCPV)과 저 집광형 광발전(Low Concentration PhotoVoltaic, LCPV)으로 구분되며, 고 집광형 광발전 모듈이 90%를 차지
 - HCPV는 III-V족 화합물 반도체로 다중접합 집광형 태양전지(multi-junction concentrator cell)를 사용하며,¹⁹⁾ 에너지 출력과 효율 극대화를 위해 이축 추적장치(dual-axis-tracking)를

19) "Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry" Sarah Kurtz, National Renewable Energy Laboratory. Nov. 2012. <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/43208.pdf>

사용

- LCPV는 결정질 실리콘 태양전지와 단방향 추적장치(single-axis tracking)를 사용하며, 전통적인 평판(flat-plate) PV 시스템에 비해 변환 효율에서 장점을 가지나, 법선면 직달일사량(Direct Normal Insolation, DNI)이 2000kWh/m²a를 초과해야만 고효율 실현 가능

고효율 화합물 태양전지 3중 접합 탠덤 셀의 각 층별 구조 및 집광율과 온도 변화에 따른 변환 효율



- 중집광 태양전지(MCPV)는 다른 CPV 기술에 비해 경쟁력이 낮은 편임²⁰⁾

- (장단점) 효율이 높고 발전소 설립시 소요되는 대지 면적이 적어서 친환경적이거나 고가의 게르마늄 등 원재료를 사용하여 제조 단가가 높음

20) "Current Status of Concentrator Photovoltaic Technology" S.P. Philipps, A.W. Bett, K. Horowitz, S. K ertz. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Sept. 2015. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/current-status-of-concentrator-photovoltaic-cpv-technology-in-englischer-s-prache.pdf>



● 세부기술동향

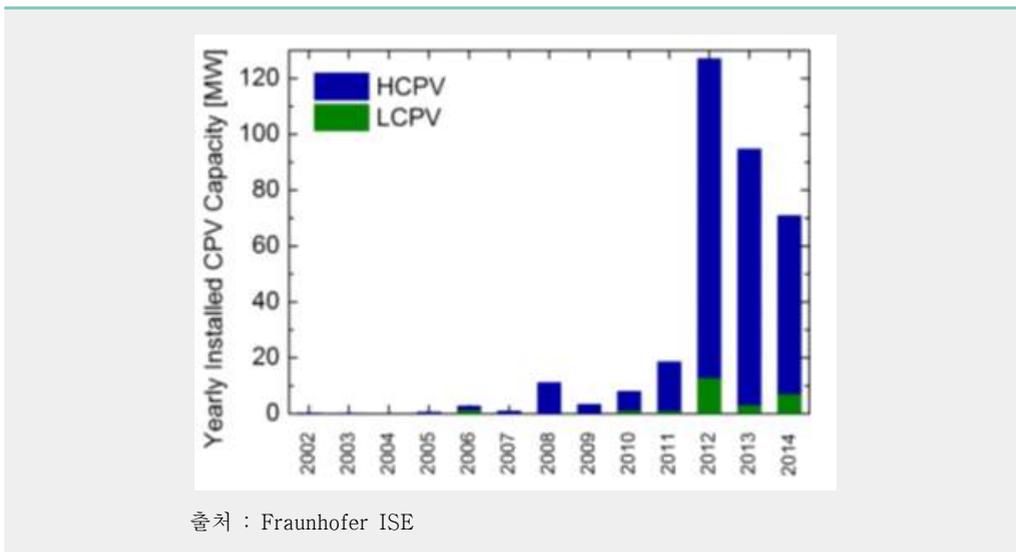
- 세계 최고 효율은 46.0%으로 Fraunhofer(獨)와 Soitec(프)이 공동으로 개발한 4중 접합 구조이며, Sharp(日), Toyota Technology(日)이 개발 진행 중
 - NREL(美)에서 다중접합 태양전지를 개발하여 45.7% 효율 달성 발표
 - Sharp(日)는 InGaP/InGaAs/Ge 3중 접합 셀에서 최대 변환 효율 44.4%에 도달
 - Soitec(프)은 2015년 집광형 광발전 모듈로 38.9% 효율 달성²¹⁾
 - Spectrolab이 개발한 InGaP/InGaAlAs/Ge 3중 접합 탠덤구조의 화합물 반도체 태양전지가 40.7%(AM1.5d) 효율이며, 제품 효율은 집광시 35-37%
 - Fraunhofer Solar Systems ISE(獨)와 Concentrix(獨)사가 개발한 FLATCON(Fresnel lens all-glass tandem cell concentrator) 모듈은 InGaP/InGaAs/Ge 셀에서 35.2% 변환 효율 달성
 - Emcore(美)는 InGaP/InGaAs/Ge 셀을 이용한 520배 집광형 시스템을 개발하여 옥외 테스트에서 최고 28.2% 변환효율(750W/m²) 달성
- Soitec(프), Suncore(中), Arzon Solar, Foton HC, Solar Systems/Silex System은 CPV 시스템을 설치하고 있으며, 누적 설치 용량 기준 Suncore(中)이 1위를 고수하고 있음
- 국내 집광형 변환 효율은 40.46%로, 효율 개선을 위한 연구 진행 중
 - 한국나노기술원 강호관 박사 그룹은 Ge-GaAs-InGaP 3중 접합 화합물 반도체 집광형 태양전지를 개발하여 집광시 변환효율 40.46% 달성
 - 한국나노기술원에서는 GaAs 단일접합으로 변환효율 24.9% 달성, 2중 접합으로 1sun에서 28.0% 변환 효율 달성
 - 한국전자통신연구원에서는 2006년 GaAs 단일 접합 태양전지로 20.23% 효율을 달성하였고, 2007년 변환 효율 23.7%의 이중접합 태양전지 셀 개발

21) "Four-junction solar cell developed using Soitec's expertise in semiconductor materials sets new efficiency record of 38.9% for CPV module" Soitec Press Release, Jun 24, 2015.
<http://www.soitec.com/en/news/press-releases/article-1737/>

● 시장전망

- (세계시장 현황 및 전망) 국제에너지기구에서는 2014년 말 태양전지 전체 설치 용량은 177GW 이상이라고 보고하였으나, 누적 설치 용량 중 CPV는 0.34GW를 차지하며, 이는 전체 용량의 0.2%에 불과
 - 집광형 태양전지가 차세대 태양전지 시장의 89%를 점유하고 있으나, 전체 시장의 불투명성으로 인해, '15년 이후의 시장은 예측이 어려움

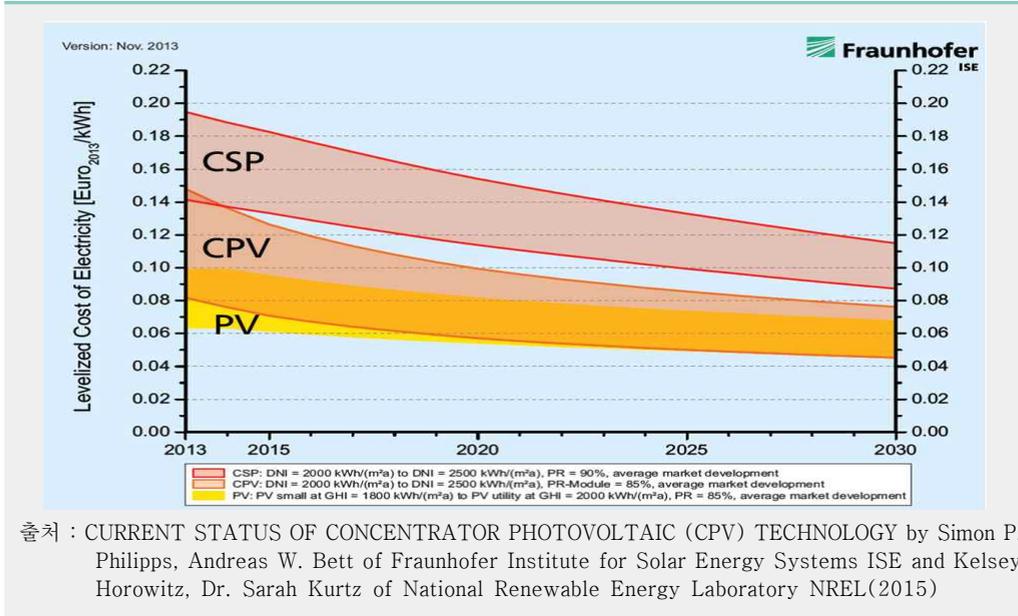
연도별 집광형 광전지 설치용량



- 장기적으로는 LCOE 측면에서 일조 조건에 따라 경제성이 있을 것으로 전망



집광형 태양광 발전(CPV)과 일반 PV, 태양열 발전(CSP)의 LCOE 경제성 추이



- (주요 Key Player 시장 점유율) Soitec, Suncore(中), Arzon Solar, Foton HC, Silex System은 CPV 시스템을 설치하고 있으며, 누적 설치 용량 기준은 Suncore(中)이 가장 크나 태양광 발전과 태양열의 복합형 공급 시스템 업체임
 - '15년 현재 Suncore(中)가 누적 설치 용량 144MW로 1위이며, Soitec(78MW), Arzon Solar(38.4MW), Foton HC(호), Silex Systems 순임
 - 세계 3대 생산업체인 Suncore(中), Soitec, Arzon Solar가 CPV 모듈의 수요 대비 과잉 공급이 예상되어 추가적인 생산을 잠시 중단한 바 있음
- 정책동향
 - (국외) 집광형 태양전지에 대한 R&D 투자 확대
 - (미국) SunShot Initiative에서는 전력 가격을 인하하기 위한 기술 개발을 지원하며, High-Performance(HiPerf) PV Project에서 기존의 태양전지보다 2배 이상의 성능 향상 및 태양전지 시장의 활성화 등을 목적으로 고효율 다중접합 태양전지 개발 지원
 - (일본) 2011년 EU-Japan Energy Technology Cooperation Agreement를 체결하여 45% 고효율 다중 접합 태양전지 개발을 지원하고, Technical University of Madrid,

Fraunhofer 등과 협력 진행

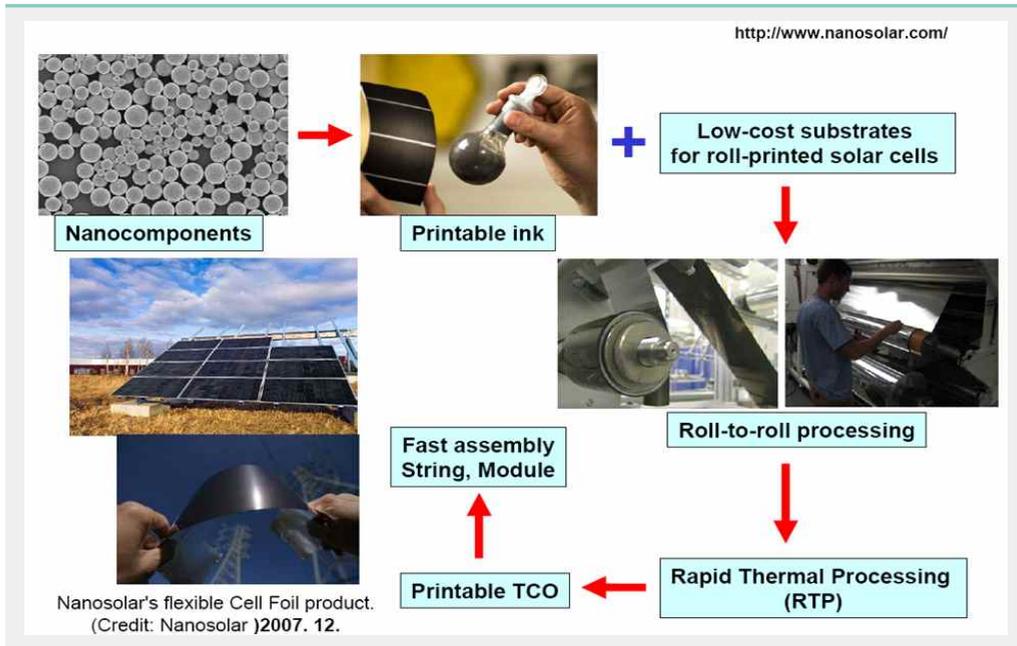


03 습식공정을 이용한 CIGS

● 세부기술개요

- (정의) 기존의 진공증착 기반의 CIGS 광흡수층 박막을 프린팅과 같은 비진공 용액공정으로 제조하여 박막 태양전지에 적용하는 기술
- (장단점) 기존 CIGS 박막 제조공정을 비진공 공정으로 대체할 경우 재료의 사용 효율과 생산성이 크게 향상됨은 물론 롤투롤 공정과 연계가 쉬워 대량생산화 과정이 용이하다는 장점이 있으나, 현재까지는 진공공정 대비 낮은 효율이 한계점으로 작용(단위셀 최고효율 : 진공증착법 21.7% > 습식법 15.2%)
- (제조공정) CIGS 광흡수층의 제조 방법으로는 용액 속에 기판을 장입하고 화학 반응을 통하여 CIGS 박막을 형성하는 전기 혹은 무전해 도금방식, 용매에 포함된 입자를 이용하여 잉크를 만들고 프린팅하는 입자 전구체 기반 프린팅 방식, 용액전구체를 스프레이 혹은 스핀 코팅을 이용하여 박막을 형성하는 방식이 있음
 - 전기도금을 이용한 CIGS 박막 증착은 물질 간 표준 전위가 다르고 차이가 큰 전기 화학적 한계가 있으며, 단일 electrolyte를 이용한 동시 전기 도금방법, 단위막을 적층하는 방법, 무전해 도금 방법을 사용
 - 입자형 전구체로는 Cu(InGa)Se₂ 4원 화합물 입자, CuIn 또는 Ga 산화물 입자, Cu-In 합금 입자 등 다양한 물질이 사용되며, 나노크기의 CIGS입자의 특성으로 높은 밀도의 박막을 얻을 수 있고, 전구체 박막의 조성과 셀렌화 후 박막의 조성이 일치하여 조성 제어가 수월한 장점이 있음
 - 용액 전구체 이용 방법은 전구체 물질 제조가 입자형 전구체 제조에 비해 매우 간단하고, 전구체 물질 내 구성원소의 원자비를 쉽게 조절할 수 있다는 것이 장점

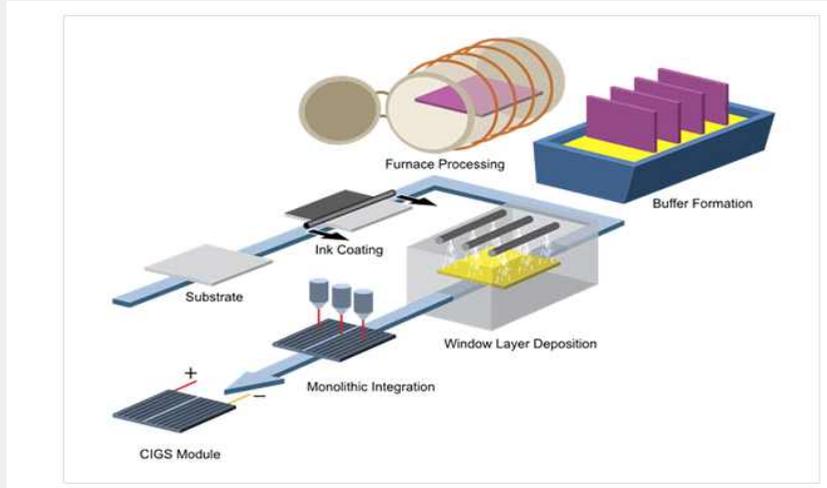
비진공방식의 CIGS 박막 태양전지 제조공정



● 세부기술동향

- 2015년 현재 Solopower(美)를 제외하고 습식공정을 이용한 CIGS 박막을 제조하는 업체는 존재하지 않으며, 국외 대학 및 연구소에서 관련 연구를 진행 중임
 - Solopower(美)는 비진공 습식공정인 롤투롤 공정 방식으로 제조
 - ISET(美)은 잉크 코팅 방식으로 CIGS 흡수층을 제조하였으나, 현재는 R&D에 주력

ISET의 CIGS Printing 공정 방법



출처 : <http://www.isetinc.com/technology-overview/>

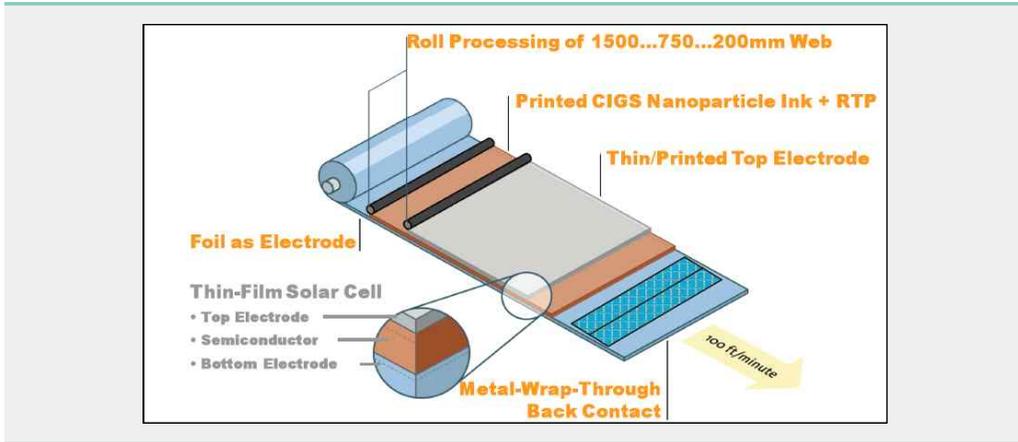
- IBM Thomas J. Watson Research Center에서는 2008년 하이드라진 기반의 용액 공정에 대한 연구 결과를 발표하였으며, 2013년 15.2%의 효율 달성²²⁾
- 하이드라진 기반의 CIGS 공정 후 CdS, ZnO 층을 용액공정으로 진행하는 방법은 13.8%의 효율 보고²³⁾
- Nanosolar(美)는 기판을 나노입자 잉크 또는 용액전구체와 접촉시켜 코팅함으로써 진공 장비 기반의 공정 대비 생산비용을 감소시켰으며, 2009년 15.3%, 2011년 17.1%의 효율 보고²⁴⁾

22) Prog. Photovolt: Res. Appl. 2013; 21:82-87 (<http://dx.doi.org/10.1002/pip.1253>)

23) <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.201402288/abstract>

24) <https://en.wikipedia.org/wiki/Nanosolar>

Nanosolar의 비진공 CIGS 박막 태양전지 구조



- 나노입자를 이용해서는 Texas Austin 대학의 Brian A. Korgel, Purdue University의 Rakesh Agrawal, Washington University의 Hugh W. Hillhouse 등이 연구하여 2015년 15% 효율 달성
- 국내에서는 한국과학기술연구원, 한국에너지기술연구원, 한국화학연구원 등에서 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 습식공정을 이용한 CIGS 기술 관련 특허 55건 중 한국과학기술연구원이 9건, 한국에너지기술연구원이 6건 보유
 - 한국과학기술연구원 민병권 박사 그룹에서는 전구체 용액 기반 연구를 진행하여 11.7% 효율을 달성하였고, 이도권 박사 그룹에서는 Cu, In precursor로 나노입자 합성 후 불밀을 이용하여 슬러리를 만들어 코팅하는 기술로 11.4% 효율 보고
 - 한국에너지기술연구원에서는 나노입자 및 전구체 용액, 하이브리드 용액에 대한 연구를 진행 중이며, 비공식적으로 10%대의 효율 달성²⁵⁾
 - 한국화학연구원에서는 Multiphase CIGS 나노입자를 microwave-assisted solvothermal 방법으로 합성하여 8.2%의 효율 보고²⁶⁾
 - GS 칼텍스는 2011년부터 비진공 프린팅법을 적용한 CIGS 개발을 연구하였으나 2014년 특허 출원 이후 연구 결과는 발표된 바 없으며, 일신소재는 전기화학증착 방식으로 연구하였으나 2013년 이후 공식적인 연구결과는 없음

25) <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cssc.201200096/pdf>

26) <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2012/EE/C2EE21269B#!divAbstract>

태양전지 분과위원

이름	소속
김 영 국	디씨티
민 병 권	한국과학기술연구원
박 남 규	성균관대학교
박 원 규	한국나노기술원
윤 재 호	한국에너지기술연구원
이 동 윤	한국전기연구원
이 병 철	동진세미켄
이 영 실	금오공과대학교
이 해 석	고려대학교
홍 근 기	신성솔라에너지