

에너지원 통합형 태양전지·열전 융합소자 기술 개발

송희은, 박성은, 이정인, 강민구, 송형준
한국에너지기술연구원 태양광연구실

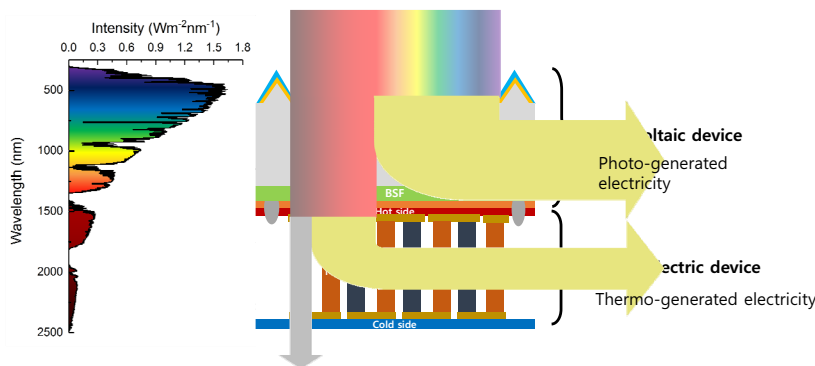
개 요

최근 기존의 화석연료와 원자력에 의존하는 에너지 공급 체계에서 벗어나 친환경적 청정에너지의 개발 및 보급으로의 전환이 시급한 상황 속에서 ‘세계의 시장’으로 부상하고 있는 중국을 비롯해 일본, 미국, 유럽 등 많은 국가에서는 신재생에너지인 태양광 산업의 중요성을 인식하고 적극적인 지원 정책, 환경 규제 강화 등을 통해 빠른 성장을 이끌고 있다. 태양전지의 경우 이미 기술적으로 많은 발전을 이루었으며 특히 90% 이상의 태양광 발전 시장 점유율을 차지하고 있는 실리콘 태양전지는 이론적 효율 한계인 29.4%를 뛰어 넘기 위한 융합 형태의 연구개발이 필요한 실정이다. 한편 태양전지의

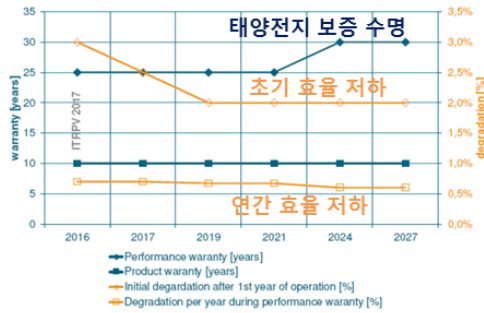
발전과정에서 발생하는 열은 태양전지 소자의 성능을 저하시키고 이는 발전량의 감소로 이어지기 때문에 태양전지의 발전 과정에서 발생한 열원을 열전소자에 사용함으로써 오히려 발전량을 증가시키는 효과를 기대할 수 있고, 이를 위해서는 태양전지와 열전 소자를 융합한 태양전지·열전 융합소자의 개발이 필요하다.

융합소자를 위한 실리콘 태양전지

실리콘 태양전지의 경우 이미 기술적으로 많은 진보가 이루어졌고 생산 효율 면에서 다른 비실리콘계 태양전지 군에 비해 안정적으로 대면적화가 가능하다. 다양

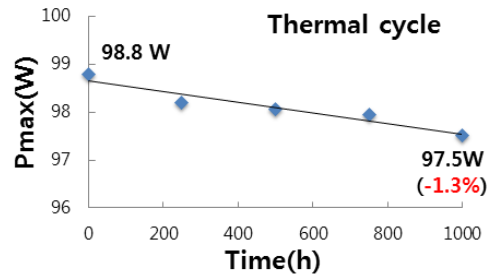
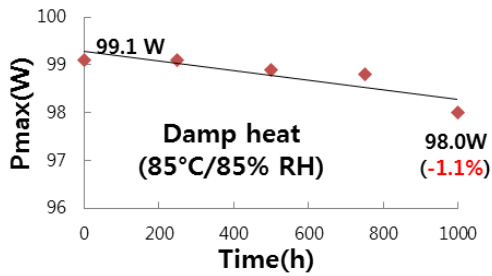


융합소자의 에너지 활용 개념도



degradation: Initial / linear/year
 2016: 3.0% / 0.7%
 2017: 2.5% / 0.68%
 2019+: 2.0% / 0.68%
 2021+: 2.0% / 0.60%

Product warranty will remain 10 years
 Performance warranty 2024+: 30 years



실리콘 태양전지 신뢰성 데이터(출처: ITRPV 2017 Technical Reports)

한 종류의 태양전지 중 태양전지 시장의 90% 이상을 차지하는 실리콘 태양전지는 온도가 60도 이상인 여름철에도 안정적인 소자 성능을 보이며, 가혹한 환경에서도 성능저하가 매우 적은 것으로 알려져 있다. 실리콘 태양전지의 경우 고온, 고습 환경에서의 신뢰성이 검증(표준 신뢰성 테스트 이후 효율 저하 1%이내) 되어 있어 융합 디바이스 제작 시 안정성 측면에서 상당한 장점이 있다. 또한, 본 기술 개발에서 다루고자 하는 열전소자 기술은 무 기판 형태의 소자 제작이 가능하다는 장점이 있어 다른 소재와 달리 결정질 실리콘 태양전지를 기판으로 제작할 경우 공정 자유도 측면에서 많은 장점이 있을 것으로 판단된다. 한편, 실리콘 태양전지에 열전소자를 적용하면 대면적에서 안정적으로 태양광의 열과 빛을 동시에 에너지로 전환할 수 있을 뿐만 아니라, 실리콘 태양전지 시장 규모가 다른 박막 태양전지 대비 10배 이상이기 때문에 실리콘 기반 태양전지와 열전 소자의 융합 연구의 파급 효과는 매우 클 것으로 예상할 수 있다.

이러한 예상을 바탕으로, 본 연구팀에서는 효율적인 태양전지·열전 융합소자의 제작을 위해 후면 적외선 투과형 실리콘 태양전지를 개발하고자 한다. 기존의 실리

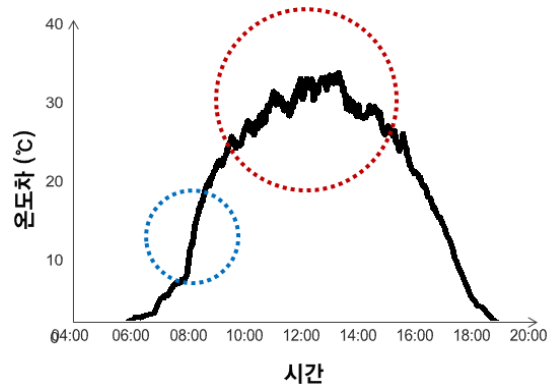
콘 태양전지는 온도의 변화에 따라 출력이 바뀌는 소자이며 특히 온도가 1도 상승함에 따라 태양전지 상대 효율이 약 0.4% 감소하는 특성이 있다. 따라서 태양전지의 temperature coefficient의 최소화 방안 및 온도상승에 따른 출력 감소를 억제하기 위한 태양전지의 재결합 감소에 관해 연구를 수행하고, 후면의 물질이나 구조 또는 특성에 따른 적외선 흡수나 투과 정도를 고려하여 적외선 투과형 태양전지를 위한 후면의 특성 제어를 고려하고 있다. 후면 도핑은 전계 효과로 태양전지의 특성을 향상시키는 기술이므로 실리콘 태양전지의 효율 향상을 위해 중요하나, 후면을 과도핑할 경우 free carrier absorption에 의해 빛 손실이 발생하며 태양전지 전류를 감소시키고 후면의 포화전류를 증가시켜 효율에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 적외선 투과와 태양전지의 효율을 위해 도핑층을 최적화 하는 연구가 매우 중요하다. 후면의 도핑과 더불어 후면의 패시베이션을 위한 유전막의 개발과 최적화 또한 중요한데 보통의 태양전지의 경우 빛의 내부반사를 최대화하여 효율을 높이는 연구가 주를 이루지만 본 연구에서는 적외선 투과를 위한 패시베이션 막의 설계에 중점을 두고자 한다.

태양전지 · 열전 융합소자의

Technical Barrier

온도차가 필요한 소자 vs 온도차가 독이 되는 소자
 열전소자는 온도 차이를 이용하여 발전하는 소자이고 온도차가 많이 날수록 그 출력이 높아지게 된다. 태양전지와 열전소자의 융합은 빛을 이용하여 발전을 하는 태양전지와 그 빛에 의해 만들어지는 잉여 열에너지를 사용한다는데 컨셉의 차이가 있고 이러한 컨셉의 차이를 어떻게 극복하고 융합하는가에 기술적 요소를 가미시켜야 한다. 일반적으로 태양전지는 기판의 온도가 높아짐에 따라 효율이 0.45%/°C가 떨어진다고 보고되어 있는데 최근에는 이러한 차이를 줄이기 위해 다양한 기술 개발이 진행되고 있다. 이러한 컨셉을 잘 이용한다면 태양전지의 발전에 있어 열전소자를 이용하여 열을 배출함으로써 태양전지의 효율을 보존하면서 열전소자를 통해 추가적인 출력을 기대할 수 있다.

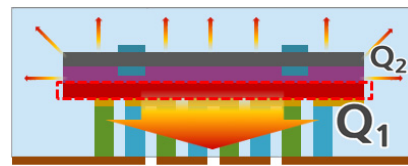
다음절의 그림은 태양광 모듈의 안과 밖의 온도차를 나타낸 그래프이다. 현재 상용화되어 있는 태양광 모듈의 경우 한낮의 발전을 기준으로 모듈 온도가 50도에 달하고 그 온도만큼 성능이 저하되게 된다. 계절별로 태양광 발전 모듈의 온도를 측정해 보면 봄과 가을 외부 평균 온도를 20도로 가정하는 경우 태양광 모듈의 온도는 약 50도로 온도차는 30도 가량이 발생한다. 여름의 경우도 온도 차이는 비슷한 경향을 보이는데 태양광 모듈의 한 여름 온도는 약 60도 가량이고 외부 평균온도를 30도로 가정할 경우 역시 온도 차이는 30도 가량을 보인다. 겨울의 경우는 순수한 융합소자가(이 경우 다른 기술적 최적화 없이) 발전하기 가장 좋은 조건을 가지고 있는데 한겨울 외부온도를 약 0도로 가정하고 한겨울의 피크타임 태양광 모듈의 온도는 약 50도이므로 온도 차이는 태양광 모듈의 온도를 따라 50도 가량을 보이게 된다. 문제는 이러한 온도차이가 계절별로 다르게 나타난다는 점 외에도 태양광 모듈의 온도가 가장 높은 여름의 경우



태양광 모듈의 시각에 따른 내외 온도차



열전달 계수가 높은 봉지재 & 낮은 HGE (Q1, Q2)
 → 열전소자 성능 저하

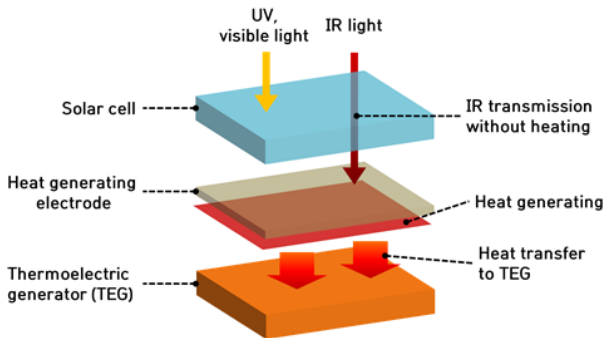


열전달 계수가 낮은 봉지재 & 높은 HGE (Q1, Q2)
 → 열전소자의 성능 극대화

태양광 모듈의 봉지재에 따른 융합소자의 성능변화

융합소자, 특히 열전소자가 제대로 된 발전을 하기 쉽지 않다는데 있다. 물론 겨울의 경우도 태양광 모듈의 온도가 50도에 육박하므로 역시 태양광 소자의 성능저하가 큰 문제가 된다. 이러한 경우 태양광 모듈의 온도 계수를 낮추기 위해 기술개발이 필요하고 태양광·열전 융합소자의 온도 차이를 가능한 많이 두기 위해 기술적으로 풀어가야 할 문제들이 적지 않다.

한편, 태양광 모듈 측면에서는 열전달계수가 낮은 봉지재를 통해 열전소자를 둘러싸는 외부의 온도를 차단하고 태양전지를 통해 전달되는 열과 열전소자의 cold side간의 열차이를 최대화하기 위한 방법 등이 고안되어야 할 것으로 판단된다. 그 동안 태양광 소자의 온도 계수를 낮추기 위해서는 주로 좋은 박막을 이용한 패시베이션을 적용하는 것이 가장 좋은 방법으로 대두되어



중간층(Heat generating electrode)을 통한 효과적인 열흡수 및 전달

왔다. 태양광 소자의 온도에 따른 효율 저감은 주로 개방 전압의 문제가 가장 큰데 이는 개방전압과 밀접한 관련이 있는 포화전류의 값에 따라 좌우되고 이 포화전류는 온도에 따라 변화하는 캐리어 농도(carrier concentration, 온도가 올라감에 따라 증가함)에 밀접한 관련이 있다. 현재의 태양광 모듈의 온도에 따른 효율 저감율은 일반 알루미늄을 후면에 도핑하는 태양전지의 경우 약 0.45%/도 정도 이지만, 최근 구조개선, 높은 수준의 패시베이션 기술 등을 통해 효율 저감율을 약 0.38%/도까지 성능을 끌어 올리고 있다.

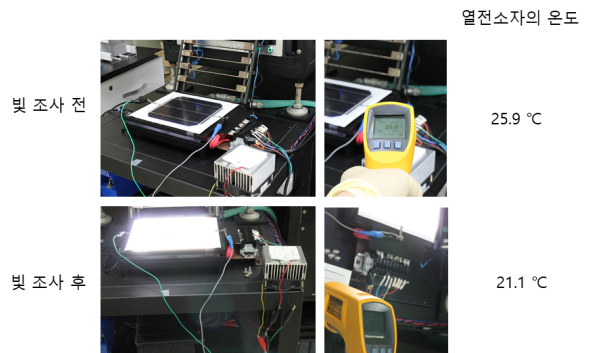
한국에너지기술연구원, KAIST, 고려대, 구미전자정보기술원을 컨소시엄으로 하는 연구진은 이에 대한 연구를 진행하고 있으며, 태양광모듈의 온도를 낮추고 열전소자의 온도 차이를 효과적으로 만들기 위해 융합소자의 중간에 heat generating electrode를 삽입하는 구조를 제안하고자 한다. 이를 통해 태양전지 소자의 열을 효과적으로 흡수하여 열전소자의 hot side로 쓰러는 노력을 하고 있으며, 이러한 시도가 성공한다면 태양광·열전 융합소자의 실현 가능성을 더욱 높이는 데 기여할 것으로 판단된다.

융합소자의 전류 및 저항 매칭

먼저 열전소자의 단독발전을 살펴보면, 열전소자는 소자 양단에 형성되는 온도차에 비례하는 전압(seebeck

voltage)을 출력하는 voltage source이다. 열전소자 고유의 내부저항이 존재하므로 short circuit을 구성하면 voltage source와 resistor로 구성되는 회로에서 전류(I_{sc})가 흐르게 된다. 이 때 이 전류는 current source인 태양전지소자에서의 전류와는 달리, 열전소자가 생산하는 seebeck voltage가(내부)저항에 가해지면서 자연스럽게 흐르게 되는 전류가 된다. 열전소자가 단독으로 사용되더라도 이 전류에 의한 펠티에(Peltier) 효과(두 가지의 다른 물질들 간의 접합을 거쳐 전류가 흐를 때 일어나는 열의 방출과 흡수를 의미)는 나타나게 된다. 다시 말해, TEG 자체가 발생시킨 voltage에 의해 전류가 흐르게 되고, 바로 이 전류는 다시 열전소자 내부를 흐르며 캐리어를 이동시키게 되고 이는 온도차를 감소시키는 방향이 되어 펠티에 효과를 고려하지 않았을 때의 전력 출력 값 예상치에 못 미치는 실제 출력이 측정되게 된다. 이 현상은 TEG 성능 평가에서 반드시 고려되는 요인 중 하나라서 열전 분야에서는 당연히 고려해야 할 현상이다.

다음으로 태양광소자와 열전소자의 융합을 살펴보면, 열전소자가 current source인 태양광소자와 결합되었을 때 열전소자는 저항체로 볼 수 있기 때문에 전류가 저항을 지나면서 voltage drop이 발생하게 된다.(TEG의 전기저항을 줄이는 것이 중요하다.) 융합 소자에서 열전소자가 열에너지를 이용하여 V_1 의 개방전압을 발생시키고 이를 통해 열전소자 단독으로 단락전류를 구성했을 때 흐르는 전류가 I_1 이라고 가정하면,



서로 다른 전류를 가진 태양전지, 열전소자의 단순융합에서 오는 펠티에 효과

a) 태양전지의 전류와 I_1 이 비슷할 때의 경우는

태양전지에서 발생한 전류는 회로에 공급 가능한 current source이기 때문에 융합 소자 전체 회로에는 태양전지 소자에서 나오는 전류가 흐르게 되고 이 전류는 열전소자가 해당 환경에서 발전을 할 때 흐르는 전류와 동일하기 때문에 아무 변화 없이 열전소자도 동일하게 발전을 하게 된다. 다만 이 때 열전소자 단독에서 발생하는 Peltier 효과에 따른 발전 출력량 감소 효과는 반드시 고려되어야 한다. 다시 말해 원래 열전소자 내부로 흐르던 전류와 크기가 같은 전류가 그냥 저항을 통과에 흐르는 것과 같이 변화 없이 구동되게 된다. 그러나 문제는 다음에 있다.

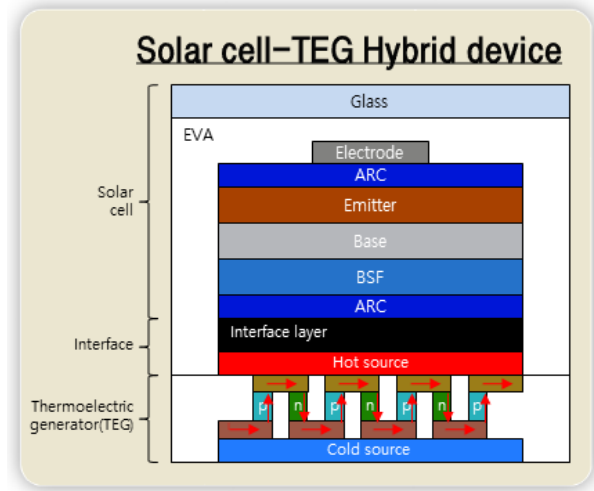
b) 태양전지의 전류가 I_1 보다 현저히 클 때,

이 때는 열전소자 단독 사용의 경우 열전소자 내부로 흐르던 전류보다 큰 전류가 흐르기 때문에 당연히 열전소자는 구동점이 옮겨지게 되고 I_1 보다 큰 전류가 흐르는 구동점에서 열전소자는 발전 작용을 하지 못하고 오히려 전력을 소모하게 된다. 이 때 본격적으로 열전소자는 heat pumping(thermoelectric cooler, TEC)을 시작하게 되고 PV의 전력 효율을 떨어뜨리며 series resistance를 높이는 역할만 하게 된다.

위의 설명을 토대로 생각을 다시 해보면, 태양전지소자와 열전소자간의 current matching은 반드시 필요하게 된다. 다만, 태양광의 파워에 따른(한낮 vs. 오후) 태양전지소자의 전류 그래프 및 그 때 형성되는 온도차를 통해 계산한 열전소자의 전류를 함께 고려해야 할 것이다.

태양전지 · 열전 융합소자의 구조

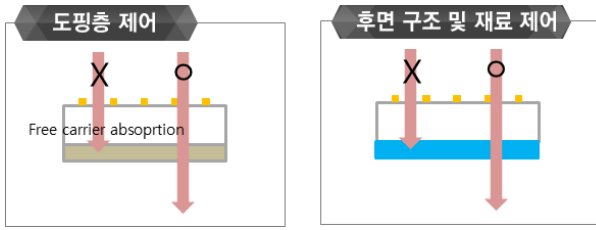
위의 그림은 태양전지와 열전 융합소자의 모식도이다. 태양전지가 상부에 존재하고 열전소자가 하부에 존재



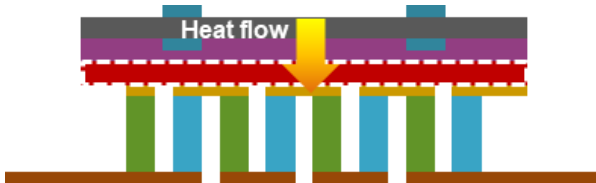
태양전지 열전 융합소자 모식도

재하며 그 사이를 융합하고 기술에 따라 중간층을 삽입할 수도 있다. 태양광 발전을 하는 태양전지와 온도차를 이용하는 열전소자의 융합을 위해서는 구조적으로도 많은 기술개발이 필요하다. 두 소자의 융합에서 주로 초점을 맞추는 부분은 태양전지소자 측면에서는 온도제어를 할 수 있는 소자구조, 적외선 빛을 잘 투과시킬 수 있는 후면구조 그리고 열을 열전소자의 방향으로 집중시킬 수 있는 모듈구조가 있을 수 있고 열전소자의 측면에서는 태양광과의 전류, 저항 매칭을 할 수 있는 구조, 태양전지 기판에 접착 또는 공정이 가능한 구조설계, multi-stage 구조 설계 등이 있을 수 있다.

태양전지의 경우 주로 적외선 빛에 영향을 주는 후면도핑층이나 후면 표면구조 패시베이션 박막 등의 제어를 통해 열전소자로의 열전달을 효과적으로 하거나 투과하는 빛을 이용하여 태양전지와 융합소자의 발전을 적절하게 컨트롤 할 수 있다. 태양전지의 후면이 과도핑될 경우 free carrier absorption이 일어나 효과적인 발전소스의 분배가 일어나지 못할 수도 있으며 후면 구조나 박막의 재료 등에 의해서도 이러한 현상이 일어날 수 있다. 따라서 태양전지 효율과의 관계 열전소자와 태양전지의 전류, 저항 매칭, 열전소자로의 열전달 등을 같이 고려하여 태양전지 소자와 융합소자의 구조를 설계



태양광 소자의 구조적 고려점

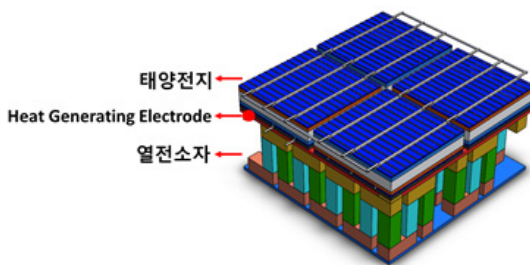


융합소자의 중간층과 heat flow 개념도 및 구조

할 필요가 있다.

앞서 융합소자의 기술적 장벽에서 설명한 바와 같이 융합소자의 구조에서 기술적 한계의 극복을 위해 중간층을 삽입할 수 있다. 이때 태양광소자로부터 열을 전달 받아 열전소자로 전달하거나 또는 열전소자의 hot side 로써 쓰기 위해서는 기존의 solar absorber(태양전지의 적외선을 받아 열로 변환하는 중간층을 가정한 경우)가 가지고 있던 문제점들을 해결해야만 하며 이를 융합소자에 부착하기 용이한 물질로 고려되어야 한다. 이러한 융합소자는 간단한 공정은 물론이고 high thermal conductivity, low specific heat 특성을 갖추어야 한다.

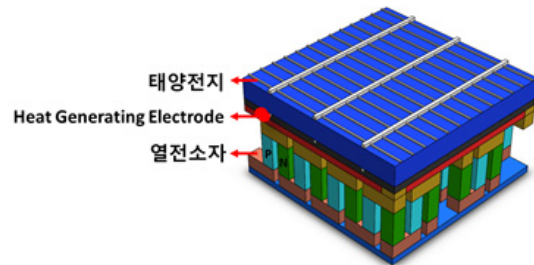
한편, 융합소자의 구조는 전류 및 저항의 매칭을 위해 태양전지와 열전소자를 직병렬 배치하여 융합소자를 구성할 수 있다. 아래의 그림과 같이 태양전지가 분할된 경우 아래 그림의 왼쪽, 열전소자가 분할된 경우 오른쪽



과 같이 설계할 수 있으며 열전소자를 분할할 경우 상대적으로 큰 면적의 태양전지 소자로부터 나오는 전류를 어떻게 열전소자와 매칭할 것인가가 관건이 된다. 이 경우 multi-stage 열전소자를 만들거나 궁극적으로는 온도차를 많이 줄 수 있는 방법을 찾아야 하므로, 이러한 측면이 기술적으로 어려운 경우에는 4-terminal 소자로 융합소자로 설계하고 이를 통해 융합소자의 발전을 이끌어내는 방법도 고려하고 있다.

한국에너지기술연구원의 실리콘 태양전지 플랫폼 센터

오랜 시간 태양광 및 융합연구에 대한 고민을 계속해 온 한국에너지기술연구원은 최근 결정질 실리콘 태양전지 플랫폼 구축이라는 한 가지 방향을 제시하였다. 현재 대부분의 국내 태양광 기업은 글로벌 시장으로의 수출에 집중하는 대기업 몇 곳을 제외하면 원천기술 개발이 어려운 중소·중견기업들이다. 본 연구팀은 기업들에게 결정질 실리콘 태양전지 플랫폼 센터의 필요성과 기대하는 바에 대한 설문조사를 시행하여 현재 국내 태양광 중소 중견기업의 경쟁력 제고를 위해서는 플랫폼 센터 구축이 절실한 상황이며, 소재공정지원, 성능평가, 신뢰성 검증 및 애로기술해결 등 다방면에 대한 요구가 있음을 확인하였다. 뿐만 아니라, 플랫폼 이용을 통해 기업이 생산하는 제품의 신뢰성을 향상시키고 신제품 개



태양전지-열전소자 전류 및 저항 매칭을 위한 융합소자 모식도



한국에너지기술연구원의 결정질 실리콘 태양전지 플랫폼 전경

발에 대한 어려움을 해결한다면 전 세계 시장에서 국내 태양광 중소·중견기업의 위상이 한 단계 높아질 수 있을 것이라는 확신을 갖게 되었다.

그리하여 산업통상자원부의 지원을 받아 2016년 5월부터 ‘태양광산업 원천기술 개발 및 중소·중견기업 경쟁력 제고를 위한 통합형기술개발 플랫폼 구축 및 운영’ 사업을 시작하게 되었고, 현재 대전에 위치한 한국에너지기술연구원 내에 결정질 실리콘 태양전지 플랫폼을 구축하여 운영 중에 있다. 본 플랫폼 센터에서는 full back surface field(BSF) 구조와 passivated emitter and rear contact(PERC) 구조의 태양전지 제조에 대한 공정 지원 서비스가 가능하며, 시간당 100장 이상의 throughput을 가지는 장비를 구축하여 기업에서 필요로 하는 서비스를 지원하고자 한다. 한국에너지기술연구원에서는 실리콘 태양전지 플랫폼 센터 구축을 위해 성균관대학교, 구미전자정보기술원, 충남대학교와 함께 초고효율 실리콘 태양전지 제작, 교육 프로그램 운영, 공정 지원 서비스 분야에서 협업하여 태양광 산업에 종사하는 기업에 대한 기술지원뿐만 아니라 제품 사업화에 대한 컨설팅까지 수행할 수 있도록 노력하고 있다.

산업에서 결정질 실리콘 태양전지의 구조는 full BSF

구조에서 PERC 구조로 변화하고 있으며, ITRPV 보고서에 따르면 PERC 구조의 점유율은 2027년에는 60% 정도로 예측되고 있다. 이런 변화와 함께 관련 소재 및 장비 개발이 시급하다. 한국에너지기술연구원의 플랫폼 센터에서는 이런 개발을 모색하고 있는 기업들을 지원할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

다양한 태양전지 기술에 대응하고 높은 품질의 서비스를 제공하기 위해 실리콘 태양전지 플랫폼 센터에서는 태양전지의 단위 공정 서비스뿐만 아니라, 한 번의 신청으로 태양전지 제조부터 모듈 제조, 성능평가, 특성 분석 및 컨설팅까지 모두 가능한 one-click solution, 태양전지 제조공정에서 모듈, 인버터 및 시스템까지 아우르는 total solution 및 중소중견기업 기술지도의 일환인 태양광 에너지닥터에 이르기까지 고객사의 편의를 위해 다양한 솔루션을 제공하고 있으며, 공공기관의 특성을 최대한 살려 사용료를 낮추어 고객사의 부담을 줄이고 서비스 이용률 및 장비 가동률을 높이고자 노력하고 있다. 아울러, 본 플랫폼 센터운영을 통한 수익금을 최대한 신규장비 등의 고도화에 재투자하여 센터 운영이 곧 플랫폼 센터의 고도화를 유발하고 기술력을 향상에 기여하는 선순환의 구조를 이루고자 한다.