



결정질 실리콘 태양전지 모듈 규격평가와 가속평가, 그리고 표준화의 역사



백도현 수석연구원 (삼성SDI)



1. 서론

초기 태양전지 발전은 벨 연구소 (Bell Laboratories)에서 실리콘을 이용하여 솔라셀을 만들었다 [1]. 이 실리콘 솔라셀을 직렬구조로 처음으로 납땜으로 연결하여 태양빛으로부터 발전을 할 수 있도록 만들어 졌고 이를 모듈이라 명했다 [2]. 태양전지 모듈이 만들어 지면서 두 가지 중요한 질문이 생겨났다. 첫 번째 질문은 이 연결된 스트링이 얼마나 오랫동안 유지하면서 발전할 수 있을까? 두 번째 질문은 과연 가속평가를 이용하여 첫 번째 질문에 대한 답을 구할 수 있을 까였다. 지난 30년 이상 동안 태양전지 모듈에 대한 신뢰성 평가가 정부 연구소 및 사설기관 또는 모듈 제조업체에서 이루어 졌다. 이러한 결과로 태양전지 모듈 테스트 순서 및 방법에 국제 표준화로 발전되었고 이는 형식 승인으로 이루어지게 되었다. 이 테스트들은 상대적으로 기간이 3~4개월 정도가 되고, 이 평가 방법에는 온도 및 습도 가속평가가 포함되어 있다. 각 국가와 국제 표준이 이 평가를 적용하게 되고, 이 때문에 새로운 제품을 개발하는데 반드시 통과해야 할 승인평가가 되어 짐에 따라, 새로운 디자인 연구 관점에서는 하나의 뛰어 넘어야 필수 조건이 되어 버렸다.

2006년도에 모듈 내부의 정선박스 (Junction box)에서 전기 발화 및 화재로 인하여 수많은 태양전지 시스템에서 문제가 발생된 것이 PHOTON International [3] 잡지에 보고되었다. 이 모듈들은 30년의 경험을 가지고 있는 태양전지 제조업체에서 만들어진 모듈로 모두 국제 표준 승인 및 안전 승인을 받은 모듈이었고, 추후에 보고된 바로는 이 제조업체만의 문제는 아니라는 것이 밝혀졌다. 여기서 의문이 생기게 된다. 어떻게 잘 설계되고 승인 평가가 통과된 모듈에서 이런 문제가 발생되었을까? 일련의 조사를 통하여 문제점을 발견하게 되었는데, 전기 발화의 원인은 모듈 제조 과정에서 셀을 직렬연결 하는 납땜 과정에서 작업자의 부적절한 납땜이 결함을 만들게 되었다. 하지만, 이 결함은 정선박스에 불이 나기 전까지는 알 수 없었기 때문에 이 표준 승인평가 방법은 이런 문제점에 대한 평가로 설계되어 있지 않아서 본 문제를 조기에 발견하지 못하게 된 것이다. 따라서, 이 표준 평가 방법은 모든 모듈의 문제점을 찾아내기를 기대할 수 없다.

본고에서는 30년 이상 걸쳐서 발전되어온 결정질 실리콘 태양전지 규격평가 방법에 대한 내용을 소개 하고, 각 평가 방법에 대한 모듈의 스트레스 방법, 그리고 불량원인 규명에 대한 소개를 하려고 한다.



2. 태양전지 모듈 (Photovoltaic Module)

태양전지 모듈은 개별 솔라셀을 집적하여 패키지로 만들어서 지역에 설치하여 오랜 시간 동안 전력을 발생시킬 수 있도록 할 수 있게 디자인 된 것을 정의한다. 모듈은 가능하면 싸게 제조해야 하는데 그 이유는 전기를 발생시키는 시스템의 가장 큰 비중을 차지하게 때문이다.

그림 1은 태양전지 모듈에 포함 되어 있는 대표적인 구성 또는 재료이며 현재 가장 많이 사용되는 대표적인 결정질 모듈을 나타낸 것이다. 그림 1에 나타나 있는 것 중 대표적인 재료 또는 구성에 대한 설명은 다음과 같다. 첫 번째, 정면 표면 재료 (Front Sheet, Glass)로 사용되는 유리는 태양전지 모듈에 사용되는 특정파장을 높게 투과 할 수 있는 고투과율로 사용되어야 한다. 실리콘 솔라셀의 경우는 태양광 파장 중에서 350 nm부터 1,200 nm까지 투과 할 수 있는 유리를 사용해야 하고, 반사율이 낮으면 낮을수록 좋다. 최근에는 반사가 잘 일어나지 않는 물질을 코팅하여 반사율을 더욱 낮게 하는 유리도 많이 사용되고 있다. 고투과율과 저반사율의 특징뿐만 아니라 정면 유리는 물 또는 수분 침투를 막아야 하고, 외부의 충격에 잘 견딜 수 있고, 눈 또는 바람에 영향을 저항이 강해야 한다. 태양전지에 사용되고 있는 대표적인 유리로는 저철분 강화 유리로 표준에 패턴이 형성되어 있는 유리가 가장 많이 사용되고 있다. 두 번째, 봉지제 (Encapsulant)는 솔라셀과 정면 유리와 후면 재료를 동시에 접착하는 물질이다. 이 재료는 접합뿐만 아니라, 고온과 단파장 UV 파장영역에서 안정성을 유지할 수 있어야 하며, 투과율 또한 중요한 요소이다. 대표적인 물질로는 EVA, PVB, Silicone 등인 고분자 물질로 대부분이 박막 시트 형태로 제공되며 특정 온도 이

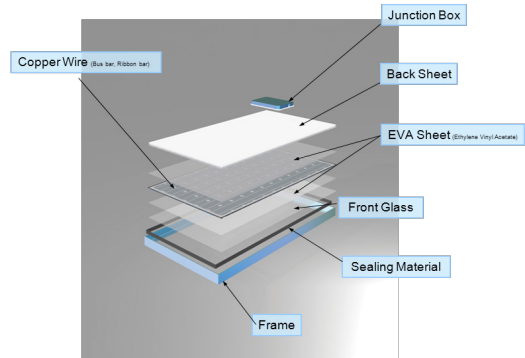


그림 1. 태양전지 모듈 구성도.

상 공정 조건에서 모듈을 접합한다. 세 번째, 후면 재료 (back sheet)의 가장 중요한 특징인 물 또는 수분 침투를 막는 것과 동시에 열에 대한 안정성이 중요하다. 현재 대부분의 재료는 테들라 (Tedlar)인 박막 고분자 시트를 사용한다. 네 번째, 정선박스 (Junction Box)는 셀의 양쪽 끝에서 나오는 연결선을 최종적으로 보호하여 케이블에 연결할 수 있는 기능을 가지고 있다. 이 박스 내부에는 바이패스 다이오드 (Bypass Diode)를 포함한다. 이 박스는 전기적인 연결에 중요한 역할도 하지만, 전선이 나오는 부위에 절연을 위한 목적이 더욱 중요하다. 따라서, 고온 및 물과 습기 침투에 강해야 하고 불에도 강한 특성을 가지고 있어야 한다. 박스의 재료로는 플라스틱을 사용하고, 내부에는 충전재를 채워서 물, 습기 침투를 막는 용도로 사용한다. 마지막으로 프레임 (Frame)은 모듈의 끝부분을 보호하는 기능으로 알루미늄으로 주로 사용된다. 프레임은 설하 중과 풍하 중에 견딜 수 있도록 설계되어야 하며, 물 또는 먼지 등이 모듈의 끝부분으로 침투되는 것을 막는 기능을 한다 [4].

위에 설명된 재료 및 부품으로 만들어진 모듈은 다양한 지역, 예를 들어 해양성 기후, 열대성 기후, 고온, 고일사량 사막, 또는 먼지가 많은 도시 지붕에서 제 기능을 다 해야 한다. 태양전지 셀은 반드시 아래와 같은 스



트레스와 영향에 대해서 보호되어야 한다.

- (1) 재료의 부식, 특히 금속성 재료
- (2) 수분 침투
- (3) 고분자 물질과 같은 봉지제의 박리 현상
- (4) 바람, 해일, 모듈 설치에 따른 물리적인 손상
- (5) 열적 팽창 및 불균일에 의한 열적 손상
- (6) 자외선 영향
- (7) 정선박스, 전선, 그리고 프레임과 같은 외부 부품의 손상

모듈 제작비용의 최소화를 위해서는 위에 언급된 영향에 대해서 보호를 해야 하지만, 반드시 완벽할 필요는 없다. 따라서 모듈 제작비용과 보호에 대해서는 균형을 유지해야 한다. 전형적으로 내부 솔라셀을 보호하기 위한 비용으로 전체 재료 비용의 50% 정도를 사용한다.

모듈 디자인은 지속적으로 변화되고 진화하기 때문에 평가 방법도 지속적으로 변해야 한다. 결정질 실리콘 셀은 점점 더 얇아지고, 새로운 박막 소자를 이용한 태양전지 소자와 특이한 재료가 같이 개발되고, 건물에 직접 연결된 태양전지 구조물 (BIPV)에 대한 모듈 구조에 대한 도전적인 아이디어가 필요하다. 새로운 스트레스와 불량에 필요한 충분한 승인평가 계획에 지속적인 연구가 실내 가속평가와 옥외 실시간 평가가 필요하다.

3. 규격평가 (Qualification Testing)

1970년대 후반부터 다양한 태양전지 평가방법이 생겨났고, 처음으로 정부산하 연구소에서 발표되었다. 그리고 그 이후로 국가별 국제 표준기구에서 모듈 디자인 수준을 평가하는 목적으로 사용되었다. 태양전

지 산업이 점점 커지고 성장함에 따라서, 국제적인 상품화가 되었고, International Electrotechnical Commission (IEC로 명함)의 평가 표준이 현재 유일하게 모듈 제조업체와 구매자들에게 수용된다.

테스트 순서는 상대적으로 짧은 기간 (수개월 이내)에 이루어지고, 이것들은 몇 가지 'legs'으로 각 다른 모듈로 나뉘어져서 수행할 수 있고, 동시에 진행할 수 있다. 최종 평가 후의 모듈은 합격/불합격 여부를 판단하기 위하여 초기 모듈의 출력 대비 일정 수준으로 파워가 유지되어야 한다.

그림 2는 결정질 실리콘 태양전지 평가 방법의 예를 나타낸 그림이다. 일반적으로 실제 옥외의 태양전지 시스템에서 모듈이 동작할 때 받는 스트레스와 위 평가 방법은 서로 같지는 않다. 이 테스트들은 이미 기존에 발견되었던 문제점에 대하여 모듈 디자인에 민감한 부분을 찾아내어 밝히기 위해 고안된 것이고, 이 평가는 최소한의 시간으로 수행되어 지기 위한 목적이지만 수명 테스트를 위한 평가는 아니다. 그럼에도 불구하고, 몇몇 태양전지 산업에서는 상대적으로 짧은 테스트 기간 동안의 평가를 통하여 모듈 또는 시스템의 수명을 수치화하여 제공하거나, 시스템이 최소 몇 년 이상은 유지할 수 있다고 자신있게 보여 준다.

또 하나 이 규격평가의 제약사항은 아직 적은 수량인 10개 이하로 모듈을 평가한다는 것이다. 하나의 태양전지 생산라인에서 1년에 수천 개의 모듈을 생산하는 것에 대비하여, 10개는 통계적으로 충분하지 않다. 그리고 이 규격평가에서 합격으로 생산된 모든 모듈이 합격이라고 의미하는 것은 아니다. 그러나, 앞에서 언급한 말의 정반대도 사실은 아니다. 규격평가 중 심지어 하나의 모듈이 불량이 발생한다면 이는 중요한 사안으로 모듈 디자인을 재조사해야 하고, 수정해야 한다.

모듈평가에 사용되는 환경챔버는 온/습도



를 조절할 있도록 설계되어 있어서 평가에 비용이 많이 드는 경향이 있다. 그리고, 출력 측정을 위한 전류-전압 측정을 위해서는 태양전지 시뮬레이터가 필요한데 이 역시 비용이 많이 든다. 이렇게 크고 최고급의 설비들은 구입하거나, 운영하거나 유지하는데 비용이 많이 든다.

그림 2와 본고에서 지속적으로 사용되는 평가에 대한 용어는 다음과 같고, 앞으로 약어를 사용하여 표현할 것이다.

- (1) 옥외평가 (Outdoor Exposure, OE): 옥외에서 자연광에 모듈을 노출시키는 평가
- (2) 자외선 평가 (Ultra Violet preconditioning, UV): 자외선 파장을 일정량 모듈에 노출시키는 평가
- (3) 온도 사이클 평가 (Temperature Cycling, TC): 저온과 고온 변화하면서 모듈을 평가 하는 방법
- (4) 습도, 냉각 사이클 평가 (Humidity Freeze cycling, HF): 저온에서 고온/고습으로 변화 하면서 모듈을 평가하는 방법
- (5) 고온 다습 평가 (Damp Heat, DH): 고온 다습의 조건으로 모듈을 평가하는 방법
- (6) 기계 하중 평가 (Mechanical Load

Test, MLT): 눈, 또는 바람 등의 영향을 무게로 바꾸어 평가하는 방법

- (7) 우박 평가 (Hail Impact Test, Hail): 우박이 떨어질 조건에서의 평가
- (8) Hot spot Endurance (HS): 모듈에 그림자가 졌을 조건의 평가
- (9) 다이오드 온도 테스트 (Bypass Diode Thermal Test): 바이패스 다이오드의 온도 평가

4. 모듈 수명 (Module Lifetime)

태양전지 모듈 수명의 정의는 모듈이 더 이상 허용되지 않을 조건, 예를 들어, 안전 불량, 외관불량, 총 전력 손실 또는 출력 전력이 최소 허용수준 이하 수준이 되었을 때의 시점을 기준으로 한다. 마지막 조건 기준은 모듈 수명을 정량화하기에는 어렵다. 태양전지 제조사의 입장에서는 수명은 15년, 20년 또는 25년으로 제한을 두고 모듈을 보증하고 모듈 출력이 초기 출력 대비 80% 정도 까지를 보증한다. 보증 기간이 끝날 시점, 모듈 제조사가 더 이상 모듈에 대한 재정적 책임을 지지 않는다.

모듈 사용자 입장에서 보면, 이런 조건은 명확하지가 않다. 대부분의 태양전지 시스템 소유자들은 태양전지 모듈이 더 제 기능을 하지 않을지에 대한 정확한 기준이 없다. 태양전지 시스템에서 직류 전류 출력의 정확한 측정을 하지 않고서는 많은 사용자들에게 있어서 시스템의 성능을 추적

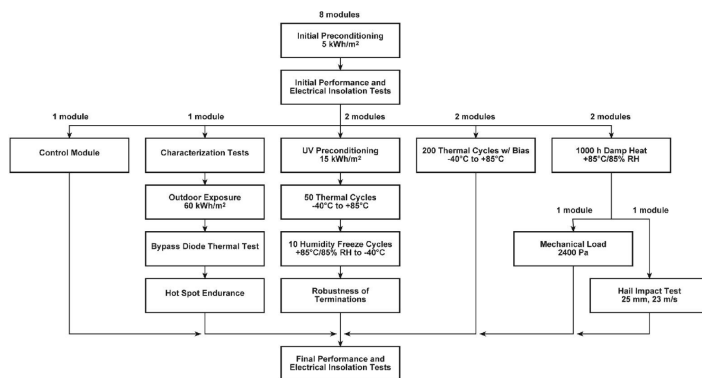


그림 2. 전형적인 품질 평가 순서도 (IEC 61215 2nd Edition)[5].



할 수 없다. 지속적으로 성능에 대한 측정을 하면 태양전지 모듈과 시스템의 출력 전력의 열화를 알 수 있고, 이 열화 경향은 시간에 따라 선형적으로 변화한다. 만약 열화율을 알 수 있고, 모듈 전체 수명에 대하여 선형으로 유지가 된다면 단순한 계산으로 모듈의 수명을 예측할 수 있다. 다음 수식은 수명을 계산하는 수식이다.

$$t_L = \frac{100\% - L_D}{R_D} \quad (1)$$

여기서, t_L 은 단위가 년인 수명을 나타내고, R_D 는 연간 퍼센트 열화율 그리고 L_D 는 퍼센트 열화 제한조건을 나타낸다.

5. 인증 (Certification)

용어 인증 (certification)은 태양전지 산업 내부에서의 의미는 다른 많은 제조업체와는 크게 다른 의미로 사용된다. 인증된 표준화라는 정의는 제3자가 인증된 프로그램을 통하여 승인된 것이고, 이 프로그램에는 다음과 같은 항목이 포함된다.

- (1) 승인된 연구소에서 제품을 평가하는 것
- (2) 제조사에서 무작위로 선별된 제품을 테스트 하는 것
- (3) 제조사의 품질 시스템을 평가하는 것
- (4) 제품의 디자인, 주기적인 재평가
- (5) 제품에 인증 프로그램 관련 인증마크를 적용시킬 수 있는 면허의 발행

태양전지 산업에서 제3자 인증마크의 대표적인 예는 Underwriters Laboratories (UL) 마크로 태양전지 모듈의 안정성 관련 인증 마크이다. 이 마크는 미국 내에서 태양전지 시스템에 반드시 필요한 것이고, 미국

국내 전기 규격에 준수한다. 또 하나의 예는 Global Approval Program for Photovoltaic (PV GAP) 인증 마크이다. 이는 IEC 조직의 Worldwide System for Conformity Testing and Certification of Electrotechnical Equipment and Components (IECEE)에 의해서 운영된다.

정규적인 인증 프로세스와는 대조적으로, 태양전지 산업에서의 일반적인 인증 'certified' 모듈이라는 뜻은 단지 표준 규격 시험을 통과했다는 의미일 뿐이다. 이 인증은 제조사가 평가 모듈들을 평가 실험실로 보내면서 시작이 되고 규격 시험을 수행하게 된다. 만약 모듈들이 표준 평가의 필수요소를 통과한다면, 이 결과 보고서를 'certification'이라고 부른다. 태양전지 산업에서의 통상적인 이런 용어는 모듈이 'IEC certificate' 또는 'IEC certification'되었다고 칭한다. 많은 모듈의 라벨에는 제조에 의해서 'IEC 61215 Certified'라는 문구가 붙어 있다. 이는 잘못 사용법으로 이 이유는 두 가지로 다음과 같다.

- (1) IEC 자체는 어떠한 제품도 인증을 해주는 것이 없다. 이는 표준화 조직으로 테스트 방법 및 절차에 대한 문서를 발행하고 유지 관리하는 것이다.
- (2) 비록 평가는 인증된 실험실에서 수행되었지만, 제3자 인증 프로세스는 정형화되어 있지 않기 때문이다.

6. 가속 수명평가

가속 수명평가의 한 가지 예는 평가 샘플이 불량에 날 때까지 평가하는 방법이다. 이는 제한된 기간 또는 시간 동안 스트레스를 인가하는 규격 시험과는 가장 큰 차이점이라 할 수 있다. 태양전지 전문가들은 규격시험은 제품의 수명에 대한 예측을 할 수 없다고



인급한다.

태양전지 분야에서는 제한된 조건과 스트레스 인자를 가속화시키는데 다음과 같다.

- (1) 일정 주기의 태양광 조사
- (2) 총 일사량
- (3) UV 조사량
- (4) 온도와 습도 또는 두 가지의 조합

스트레스 요소 중에서 온도 또는 온도를 상승시킬 수 있는 요소, 예를 들어 광 조사와 같은 것들에 대한 사용은 일반적으로 모듈에 사용되는 고분자 물질이 낮은 녹는점 또는 변형점을 가지고 있기 때문에 조심해서 사용해야 한다. 모듈에 스트레스를 인가하는데 온도가 90도 이상으로 올라가게 된다면 실제 환경에서는 발생할 수 없는 조건에서 스트레스를 인가하게 되는 것이다. 이와 비슷한 예로 UV 조사량에서도 볼 수 있다. UV는 높은 에너지의 포톤을 가지는 파장대역을 가지게 되는데 지구 대기 내에서는 존재하지 않는 영역이 있을 수 있기에 모듈의 손상이 실제 상황에서는 발생되지 않는 관련 없는 불량이 발생할 수 있다. 온도와 습도에 대한 태양전지 가속 인자들도 명확하게 결정하기 어렵고 이 주제에 대한 것은 JPL에서 아주 조금 언급하고 있다. 일부 조건, 예를 들어 비정질 실리콘 태양전지 (a-Si) 소자는 온도 인자가 가속평가로 사용될 수 없다. 왜냐하면, 이 소자는 열적 어닐링 특성이 높은 온도에서 향상될 수 있기 때문이다.

실제 태양전지 가속 수명평가에 대한 예를 들어 보면, 일정 광량으로 지속적으로 태양광을 조사하는 방법을 들 수 있다. 이 방법은 실제 노출되는 시간과 특정 지역에서 하루 평균 일사량 특성과의 관계를 직접적으로 연관 지어서 평가할 수 있다. 이 결과는 보통 3배 또는 5배 정도의 가속 요소를 가지게 되는데, 이는 지역의 특성에 따라 달라지게 된다. 따라서, 특정 지역에서의 일사량에 영

향을 미치는 태양전지의 수명을 얻을 수 있다.

7. 태양전지 모듈 불량현상 요약

1970년대 초기 설치된 모듈의 불량은 총상에 의한 모듈 불량이 대부분이었다. 그 이유는 흰색 배경에 검은색 또는 파란색 태양전지 셀로 모듈이 만들어져 있어서 사격 연습에 적합한 타겟으로 보이는 것 때문에 사격 연습용으로 많이 도용되었으며, 이를 해결하기 위한 대책으로 흰색 배경의 back sheet를 사용하지 않게 되자 문제 발생 빈도가 줄어들었다. 그 이외의 실제 모듈의 불량은 대부분이 셀 파손에 의한 불량이 주된 원인 이었으며, 예전 모듈 디자인은 하나의 셀 파손에도 총 출력 손실이 발생하는 구조로 되어 있었다. 또 다른 불량은 앞면 재료가 유리로 되어 있지 않았기 때문에 흙 또는 먼지에 의한 오염 (soiling)과 UV에 의한 박리 현상이 주된 불량의 원인이었다.

아래의 리스트는 대표적인 모듈의 불량현상과 평가 방법으로 불량 현상을 재현할 수 있는 것들에 대한 내용을 요약한 것이다.

- (1) 대표적인 모듈 불량현상
 - ① 태양전지 셀과 셀 연결 와이어 파손 (Broken Interconnect)
 - ② 태양전지 셀 파손 (Cell Crack, Broken)
 - ③ 부식 (Corrosion)
 - ④ 박리 (Delamination)
 - ⑤ 봉지제 변색 (Encapsulant discoloration)
 - ⑥ 납땀 불량 (Solder Joint Crack)
 - ⑦ 유리 파손 (Broken glass)
 - ⑧ Hot spot
 - ⑨ 접지 불량 (Junction Box Failure)
 - ⑩ 정선 박스와 모듈 연결 불량



표 1. JPL Block Qualification Tests.

Test	I	II	III	IV	V
TC	100 -40 to +90	50 -40 to +90	50 -40 to +90	50 -40 to +90	200 -40 to +90
Humidity	70°C, 90% 68hrs	5 cycles 40 to 23°C 90%	5 cycles 40 to 23°C 90%	5 cycles 40 to 23°C 90%	10 cycles 85 to -40°C 85%
HS					3 cells 100 hrs
MLT		100 cycles 2,400 Pa	100 cycles 2,400 Pa	100 cycles 2,400 Pa	100 cycles 2,400 Pa
Hail				9 impacts 3/4" - 45 mph	10 impacts 1" - 52 mph
Hi-Pot		< 15 μ A 1,500 V	< 50 μ A 1,500 V	< 50 μ A 1,500 V	< 50 μ A 2xVs+1,000 V

(Junction Box and Module Joint Failure)

⑪ 구조적 불량 (Structure Damage)

(2) 테스트별 재현 가능한 불량 현상

① Thermal cycling (TC)

- 셀간 연결 와이어 파손
- 셀 파손
- 납땀 불량
- 정션박스와 모듈 연결부위 파손

② Damp Heat Exposure & Humidity

- Freeze
- 부식
- 박리
- 정션박스와 모듈 연결부위 파손

③ Ultra Violet Test

- 박리
- 봉지제 변색

④ Mechanical Load

- 셀간 연결 와이어 파손
- 셀 파손
- 유리 파손
- 구조적 파손

⑤ Dry and Wet Insulation Resistance

- 박리
- 접지 불량
- 전기적 부식

⑥ Hot Spots

⑦ Hail Test

- 셀 파손
- 유리 파손

8. 모듈 품질 규격 및 가속평가 연구 조직 및 프로젝트 정리

현재 태양전지 모듈 규격평가가 나오기까지 다른 정부 및 국가에서 진행되어 온 대표적인 두 연구 조직으로 하나는 미국이고, 또 다른 하나는 유럽연합으로 구성된 연구 조직으로 명칭 및 관련 프로젝트 명은 아래와 같다.

(1) Jet Pollution Laboratory (JPL), United States

- Flat-Plate Solar Array Project (FSA)

(2) Joint Research Center (JRC), European Commission

- CEC 201 ~ 503

Block I ~ V 구성 조건은 모듈 면적, 효율, 최종 출력 기준으로 8 W 부터 117 W로 구성되어 모듈을 제작하고 평가를 시작하였다.

Block I 평가 방법은 TC 100 cycle과 70/90 DH 스트레스로 평가를 하였는데, 그 이유는 NASA가 우주에서 사용되는 모듈에



대한 평가를 기반으로 평가가 적용되었다. 그 이후로 Block II 부터 V까지 꾸준히 변화와 품질 규격평가에 대한 방법이 추가되었다. 모든 평가는 순차적으로 진행되었고, 많은 Block II와 II 모듈은 사막 환경에 설치되었다. TC 50 cycle에 문제가 없던 모듈은 사막에서 약 5년 후부터 셀간 연결 와이어의 파손과 셀 파손에 의한 모든 출력 손실이 발생되었다. 이로 인해, 모듈 제조업체들은 셀간 연결 와이어를 추가로 연결하여 문제를 해결하려고 디자인 하였고, 스트레스를 완화 시키려는 루프를 만들었다. 또한, Block V 평가에서는 TC를 200 cycle로 증가시켜서 모듈 성능평가를 하였다. 이런 문제를 해소하기 위한 방법으로 JPL에서는 셀을 직결연결 보다 병렬연결로 추천하기 시작하였으나, 이로 인해 병렬 연결로 인한 출력 손실과 hot spot에 대한 문제가 발생되었다. 우박으로 인하여 강화 유리를 사용하지 않은 모듈은 셀 파손 및 유리 파손에 치명적인 영향을 미치게 되었고, 이로 인해 평가 방법이 Block IV에 추가 되었다. 바이패스 다이오드가 없는 모듈들이 연결되어 고전압 태양전지 시스템으로 구축되었는데, 이 시스템에 연결된 모듈에서 hot spot이 발생되면 모듈에 불량이 발생되었다. 이로 인해 hot spot 테스트가 Block V에 추가로 포함되었다. Block I, II, III 모듈들은 silicone을 봉지제로 사용하고 앞면에 유리가 없이 제작되었고, 일부 Block II, III 모듈과 많은 Block IV 모듈들은 PVB를 봉지제로 사용하였고, 앞면에 유리를 사용하여 모듈을 제작하였다. PVB를 사용한 모듈에서는 금속 스크린 프린트의 부식이 발생하였는데 이 문제가 대부분의 출력 저하로 나타났다. 이 부분의 평가에 대한 정확도를 높이기 위해서 습도 cycling 평가를 습도와 저온을 포함하는 평가로 변화되었고, 현재 사용하고 있는 평가인 HF 평가가 이 방법이다. 그 후의 Block V 모듈들은 모두 EVA 봉지제를 사용

하여 모듈을 제작하였다.

Block V는 1981년에 발표되었는데 사실상 미국의 모듈 품질 규격과 모듈 안정성 평가의 표준이 되었다. Block V 통과라는 의미는 일반적으로 모듈 디자인이 JPL 평가를 통과하는 것을 의미한다. 이는 모듈의 성능 열화가 5%이상을 초과 하면 안 되고, 외관 변화와 전기적 절연에 대한 일정한 표준이 같이 포함되었다. Block V 평가 종류는 두 가지로 나뉘어 지게 된다. 하나는 TC 200 cycle로 진행되는 평가이고, 다른 하나는 TC 50, HF 10, 10,000 cycle Dynamic MLT, Twist 평가와 hail 평가로 구성되었다.

Block VI에서 몇 가지 새로운 규격평가가 제안되었지만, 실제 Block VI는 적용되지 않았다. 여기서 제안된 평가에는 UV exposure 평가와 바이패스 다이오드 온도 테스트, 그리고 85/58 DH에 500 V 전압을 인가하는 전기화학적 스트레스 평가이다.

JRC CEC specification은 아래와 같이 CEC 201부터 503까지 평가 종류에 대한 내용을 요약한 것이다.

- (1) CEC 201
 - ① Hail impact
 - ② UV exposure
 - ③ Wind pressure
 - ④ TC: -40°C to 85°C
 - ⑤ Smog
 - ⑥ DH cycling: +20°C to 40°C, 10% to 100% RH
 - ⑦ Cold-water spray와 온도 shock을 이용한 온도 열화
- (2) CEC 501
 - ① Twist test
 - ② NOCT (Normal Operating Cell Temperature)
 - ③ Hail Test
 - ④ TC: -40°C to +40°C + NOCT, 50



cycle

- ⑤ HF: 40/93 DH, 48 hours, then -40°C for 1 hour, 1 cycle
- ⑥ MLT: 2,400 Pa
- ⑦ DH: 40/93, 720 hours
- ⑧ High-temperature exposure: NOCT + 50°C, 2,880 hours
- ⑨ UV: NOCT + 30°C, 40 MJ/m²
- ⑩ Ozone test: 40°C, 55% RH, 120 hours, 0.5 vpm O₃
- ⑪ SO₂ test: 25°C, 75% RH, 120 hours, 50 ppm SO₂
- ⑫ Ice formation: +20°C to -10°C 와 물 스프레이, 1 hour
- ⑬ Hot-spot Heating: Complex 1 hour cyclic test를 반복해서 50회

(3) CEC 502

- ① CEC 501을 기초로 하여 일부가 첨삭 됨
- ② OE (Outdoor exposure) 설명 추가됨
- ③ Ozone, SO₂ 환경공해 관련 평가 제거
- ④ High-temperature storage: 90°C, 20 days
- ⑤ High temperature/humidity: 90/95 DH, 20 days
- ⑥ DH 40°C 평가 제거
- ⑦ TC: 10 cycle, -20°C to 80°C로 수정
- ⑧ Hot spot 평가: 1 hour, JPL Block V 평가와 유사함

(4) CEC 503

- ① CEC 502를 기초로 일부 평가가 추가됨
- ② 저광량에서의 모듈 성능평가
- ③ HF 평가 (CEC 501로 부터 포함, CEC 502에는 없던 평가)

④ 단자 강도 (Robustness of Terminations)

9. 결정질 실리콘 모듈 IEC 국제 표준 요약

IEC 규격평가는 최소한 20년 이상 모듈의 수명이 보장 될 수 있는 평가 조건을 만들어야 하고, 대기에 설치된 조건 중에서 최소 20년 이상의 수명을 보장하기 위한 평가 방법으로 실험실에서 단일 가속 환경평가는 불가능하다. 그리고, 초기 목표는 해양성 기후와 적도지역 기후를 포함하는 규격 표준을 시도 했지만 이후에 취소되었다. 따라서, 규격평가는 네 갈래의 가지로 나뉘어졌고, 아래와 같은 주요 평가로 구성이 되었다.

- (1) 60 kWh/m² (216 MJ/m²) OE와 HS 평가
- (2) 15 kWh/m² (54 MJ/m²) UV exposure, 50 TC, 그리고 10 HF
- (3) 200 TC
- (4) 1,000 시간의 85/85 DH

위 언급된 네 가지는 JPL Block V 규격과 CEC 502 규격의 조합으로 구성되었다. 한 가지 Block V 규격평가 중에서 주요한 변화는 고온 조건에서의 온도가 90°C에서 85°C 제한되었는데, 이는 일반적으로 사용되는 봉지제인 EVA의 녹는점에 대한 우려 때문이다.

이후 IEC 규격은 CEC 503 규격의 일부를 추가로 포함을 시켰는데, 가장 큰 변화는 TC/HF 평가 이전에 UV 평가를 진행하는 것으로 위의 언급된 나 항목을 수정하였다.

최종적으로 1993년에 IEC 1215로 명명된 IEC 결정질 실리콘 모듈 규격 표준이 발표되었다. 이로써 이 규격은 정부 또는 정부 기관에서 발행되지 않은 최초의 공식적인 표준



규격이 되었고, 이 규격에는 wet hi-pot 평가가 포함되지 않았고, CEC 501에서 사용되었던 5,400 Pa MLT 평가가 추가되었고, HS 평가는 CEC 502의 방법과 유사하게 포함되었다.

IEC 1215는 IEC 61215로 명칭이 변경되었고, IEC 61215 2nd 개정판 결정질 실리콘 규격 표준이 만들어졌고, 이 개정판에는 수정된 부분이 있는데 아래와 같다.

- (1) Twist test와 dynamic MLT 평가 제거
- (2) Wet insulation resistance 평가와 bypass diode thermal 평가 추가
- (3) TC 200 조건에서 1 sun에 해당하는 조건에서의 전류인가 조건으로 변경
- (4) UV평가는 UV preconditioning Test로 바뀌어서 평가 포함

10. 요약

1975년 이후로 태양전지 평가 실험실과 제조업체들이 직접적으로 많은 노력을 하여 태양전지 모듈에 대한 가속 스트레스 평가를 개발하고 평가하였다. 이 노력들은 이미 알려진 불량 메커니즘을 토대로 모듈 디자인의 민감한 취약 부분을 발견하기 위한 평가를 목적으로 평가 순서/방법 표준화에 많은 기여를 하였다. 이러한 평가 순서/방법은 국가와 국제 모듈 규격 표준화에 적용되었다. 그리고, 실제 외부에서 설치되어 한 번도 문제가 발생되지 않은 평가들은 중간에 제거되기도 하였다. 가장 대표적인 예로 twist test는 모듈 설치 후 발생하는 불량에 대한 평가이지만, 실제로 불량은 한번도 발견되지 않았다. 덧붙여서, 표준 평가들은 많은 특화된 가속평가를 사용하게 되는데, 이는 문제점들을 조사하거나 특정 모듈 디자인에 대한 잠재적인 불량을 조사하기 위함이다.

실제 수명예측을 위한 가속평가는 가속 인

자의 지식이 반드시 필요하지만, 태양전지 분야에서는 문헌이 많이 부족하다. 많은 연구자들이 85/85 DH 평가시간과 습한 지역에서 수년 간 사용된 모듈과의 상관관계를 만들기 위해 시도 하였다. 그리고 이 모델은 DH 평가 표준시간인 1,000시간으로 정의하는데 많은 영향을 미치기도 했다. 하지만, 이 모델은 단지 단일 모드 불량일 경우에만 적용이 되는 것이다. 다른 불량에 대한 가속인자들은 여전히 잘 알려져 있지 않다. 따라서, 모듈이 비록 표준 규격시험을 통과했다고 하더라도 제품이 특정 기간 동안 전력을 생산할 수 있다고 말할 수 없다. 또한, 이 표준 평가가 모든 불량 메커니즘에 대한 평가가 되지 않기 때문에 제품의 수명을 결정하는데 사용될 수 없다.

참고 문헌

- [1] Chapin DM, Fuller CS, Pearson GL, A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. J. Appl. Phys. 1954; 561.
- [2] Green MA, Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years. Progress in Photovoltaics: Research Applications 2005; 13: 447-455, DOI: 10.1002/pip.612.
- [3] Schlumberger A. A burning problem, in PHOTON International, Aug. 2006; 14.
- [4] <http://www.pvcdrom.org>
- [5] International Electrotechnical Commission. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - design qualification and type approval. CEI/IEC 61215:2005, Geneva, Switzerland, 2005.
- [6] C.R. Osterwald and T.J. McMahon, History of Accelerated and Qualification Testing of Terrestrial Photovoltaic Modules: A Literature Review, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2009; 17:11-33.

저자약력



성명 : 백도현

◆ 학력

- 1999년
동의대학교 공과대학
전자공학과 공학사
- 2001년
동의대학교 대학원
전자공학과 공학석사
- 2004년
Electrical Engineering,
Arizona State University,
USA, Ph.D.

◆ 경력

- 2005년 - 2008년 Senior Engineer,
Intel Corporation
- 2008년 - 2011년 삼성전자 메모리 사업부
책임연구원
- 2012년 - 현재 삼성SDI PV 개발팀
수석연구원

