

## 결정계 PV 모듈에 대한 고장 메커니즘 검토

김정연<sup>1</sup>, 김주희<sup>1</sup>, 천성일<sup>1,a</sup>, 임동건<sup>2</sup>, 김양섭<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 전자부품연구원 부품소재물리연구센터

<sup>2</sup> 한국교통대학교 전자공학과

<sup>3</sup> 전자부품연구원 소프트웨어디바이스연구센터

### A Review on the Failure Mechanism for Crystalline Silicon PV Module

Jeong-Yeon Kim<sup>1</sup>, Ju-Hee Kim<sup>1</sup>, Sung-Il Chan<sup>1,a</sup>, Dong-gun Lim<sup>2</sup>, and Yang-seob Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Component & Materials Physics Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI),  
Seongnam 463-816, Korea

<sup>2</sup> Department of Electronic Engineering, Korea National University of Transportation,  
Chungju 380-702, Korea

<sup>3</sup> Managerial Researcher/Software Device Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI),  
Seongnam 463-816, Korea

(Received April 17, 2014; Revised May 7, 2014; Accepted May 8, 2014)

**Abstract:** It is summarized that potential causes of performance degradations and failure mechanisms of crystalline silicon photovoltaic (PV) modules installed in Middle East area. In addition, we also reviewed current PV module qualification test (IEC 61215) and the methods for detection of wear-out fault. The failure of PV modules in the extreme environmental conditions such as deserts is mainly due to high temperature, humidity, and dust storms. In particular, cementation phenomenon caused by combination of sand and moisture leads to rapid degradation in the performance of PV modules. In order to evaluate and guarantee the long term reliability of PV modules, specific qualification tests such as sand dust test, salt mist test and potential induce degradation test considering operating environment of PV module should be carried out.

**Keywords:** Crystalline PV module, Failure mechanism, Reliability assurance, Middle east

#### 1. 서 론

PV 모듈이 30년 이상 정상 기능을 유지하면 태양 광발전 시스템에서 생성된 전기는 매우 경제적이다.

a. Corresponding author; chansi@keti.re.kr

Copyright ©2014 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

PV 모듈 사용 수명 보증방법으로는 실험실에서의 시험 보증방법과 필드시험 보증방법으로 구분할 수 있다. 그리고 필드시험 보증방법은 PV 모듈 수명 검증에 위한 가장 정확한 방법이다. 그러나 30년 이상의 옥외 시험을 진행하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 PV 모듈의 수명 평가를 위한 가속열화 시험 방법들이 많이 파생되었다.

특히 국제 전기기술위원회 (IEC)에서 제정된 가속 시험 프로토콜은 PV 모듈의 품질 및 신뢰성 기준을

평가하는 공식시험으로 인정되었다 [1]. 그러나 이러한 기준들은 PV 모듈의 재료 또는 공정 등의 초기결함 (infant defects)을 검출하기 위한 시험으로 마모고장 메커니즘 (wear-out failure mechanism)을 반영하여 설계되지 않았다 [2]. 그러므로 현재 IEC 기준에 의한 PV 모듈의 수명보증은 장기 사용수명 보증방법으로 충분하지 않다.

옥외 필드에서의 PV 모듈의 수명과 신뢰성은 일사량, 온도, 습도, 바람, 그리고 동작 전압 등의 환경에 의해 결정된다. 특히 중동지역의 경우 고온다습한 기후와 모래 폭풍의 영향을 많이 받는다. 따라서 PV 모듈의 사용지역 환경을 고려한 PV모듈 성능열화와 고장 메커니즘에 대한 정확한 이해가 필요하다.

본 논문에서는 중동지역 환경을 고려하여 결정계 PV 모듈의 필드 고장모드와 메커니즘에 대한 논문을 분석하고 정리하였다. 특히 오염 (pollution) 의한 PV 모듈의 효율저하 메커니즘을 정리하였다. 또한 기존 결정질 PV 모듈 품질자격시험 (IEC 61215)과 마모(wear-out) 고장 검출방법 등에 대해 검토하였다. 그리고 고장 메커니즘에 기초하여 중동지역에서 PV 모듈 장기 사용수명 보증을 위한 시험 방법 등을 제안하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 중동지역의 PV 사용 환경

중동지역에 넓게 분포되어 있는 사막의 기후 특성은 매우 극한 환경 조건을 가지고 있다. 사우디아라비아의 경우 4월 중순부터 10월 중순까지의 낮 온도는 45°C 이상을 기록한다. 또한 사막의 기후는 밤이 되면 지표의 열이 급격히 방출되면서 기온이 급강하하고, 낮에는 지표의 열이 최대를 올라간다. 바람은 낮 동안에 계속 불어오며, 종종 모래나 먼지를 동반하기도 한다. 홍해 연안에 위치하고 있는 사우디아라비아 제다 (Jeddah) 도시의 경우 모래에 염분 (salt) 성분을 포함하고 있어 PV 모듈 부식에 영향을 준다.

그림 1은 사우디아라비아와 국내의 온도와 습도 비교 검토 결과이다. 중동지역 사우디아라비아 (제다)의 온도는 국내 (김포)와 비교하여 평균 13°C 이상 높게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 습도는 국내 습도 분포와 비슷한 수준인 것을 알 수 있다.

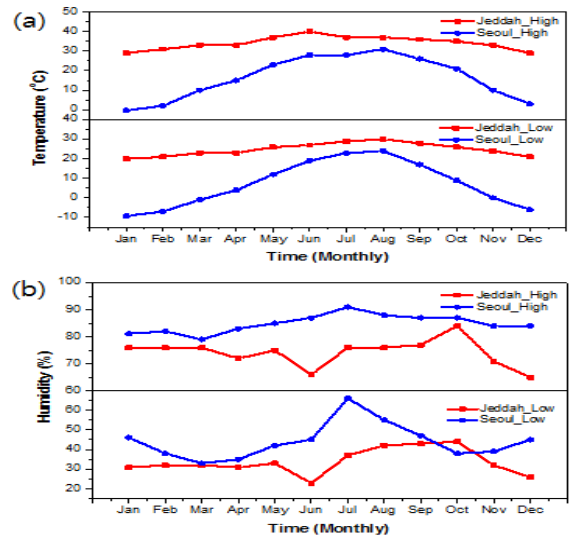


Fig. 1. Comparison of (a) temperature and (b) relative humidity in Saudi Arabia and Korea from Ref. [3].

### 2.2 결정계 PV 모듈의 고장 모드와 메커니즘

태양광발전 시스템에 장착된 PV 모듈은 장기간의 환경에 노출되면서 자외선, 온도, 오염 물질, 그리고 계절 변화 등의 복합적인 환경 인자들로 인해 성능 열화가 발생되고 있다. 특히 비, 우박, 결로, 눈, 바람, 모래 (먼지), 그리고 염분 등의 계절 변화는 PV 모듈을 구성하는 재료들 간의 열팽창 계수의 불일치, 수분 침투에 의한 박리 (delamination) 등을 유발하여 PV 모듈의 성능 열화가 발생한다.

일반적으로 발생하는 결정질 PV 모듈의 고장모드와 메커니즘은 표 1과 같다.

Table 1. Failure mode and mechanism of c-si PV module. from Ref. [2].

Cell	Package		System
	encapsulant and back sheet	interconnection	
crack, hotspot	delamination, discoloration	loss of adhesion, elasticity	PID junction box adhesion
		broken, corrosion solder joint or ribbon interface failure, oxidation of busbar	

일사량이 높은 중동지역은 온도, 습도, 그리고 모래 (흙) 등과 같은 환경 요소에 의해 PV 모듈의 열화가 빠르게 발생할 수 있다.

### 2.3 온도 변화에 의한 성능열화

중동지역은 대부분이 사막지역으로 일사량이 많다. 따라서 태양광 산업에 큰 이점을 가지고 있다. 그러나 연중 높은 온도는 PV 모듈의 출력과 효율을 감소시킨다. PV 모듈의 온도가 상승하면 밴드 갭 (band gap) 에너지가 낮아진다. 따라서 전자가 가전자대에서 전도대로의 이동이 증가되어 개방전압이 감소한다. 그리고 캐리어 농도가 증가되어 내부 캐리어의 재결합 (recombination) 비율을 높이는 효과가 발생한다 [4,5]. 사막지역은 강수량이 매우 적기 때문에 수분의 증발량이 많다. 수분함량이 낮은 대기와 토양은 비열이 낮아지므로 외부의 변화에 따라 쉽게 온도가 올라가고 내려가는 특징을 가지게 된다. 따라서 열대 사막지역은 낮과 밤의 기온 일교차가 매우 크다. PV 모듈은 일교차로 인한 열팽창과 수축에 의한 지속적인 스트레스의 발생으로 여러 재료들의 성능을 저하시킨다. 특히 온도 스트레스 (thermal stress)는 솔더 접합부의 크랙 (solder interconnect crack)을 유발한다. PV 모듈의 재료와 리본와이어 솔더의 열팽창 계수의 차이에 의해 발생하는 고장이다. 이러한 금속재료들의 스트레스는 칩의 마이크로 크랙 (micro crack)을 발생할 수 있다 [6,7].

그림 2는 PV 발전 시스템에서 25년 사용된 PV 모듈의 솔더 접합부 고장분석 결과이다. 리본 와이어와 셀 간의 크랙 발생을 확인할 수 있다.

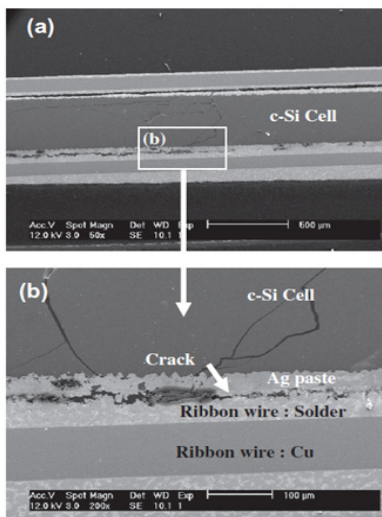


Fig. 2. Solder-joints failure analysis from 25-year-old c-Si PV module. (a) X-section view of c-Si PV module, (b) solder to Ag paste crack from Ref. [7].

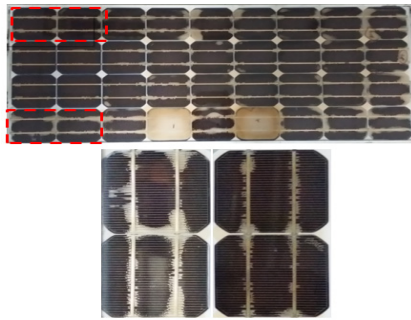
### 2.4 습도의 영향에 의한 성능열화

사하라 사막 또는 멕시코 사막과 같은 열대지방에서의 온도는 매우 높다. 그리고 그 주변의 공기는 보이지 않는 수증기의 형태로 엄청난 양의 습도 (humidity)를 갖는다. 높은 온도의 공기는 포화수증기량이 크기 때문에 상대습도는 낮고, 절대습도는 매우 높다. 습도에 의한 PV모듈의 고장 발생은 백시트 또는 프레임 가장자리를 통한 수분 침투에 의해서 발생된다. PV 모듈 내부의 수분은 이온의 전기 전도성을 증가시킨다. 그리고 최종적으로 누설전류 증가로 인한 PV 모듈성능 저하를 발생한다. 또한 접합 계면의 접착강도 손실, 박리, 그리고 부식을 발생한다 [5,7,8].

접착강도의 손실은 유리와 봉지재 (encapsulant), 셀 (cell)과 봉지재 (encapsulant) 등과 같이 앞면에서 많이 발생한다. 일반적인 봉지재 소재로 EVA (ethylene vinyl acetate)가 주로 사용된다.

유리와 봉지재, 셀과 봉지재 사이에서의 접착 강도 손실은 외부환경 변화에 의한 EVA의 지속적인 수축과 팽창에 의한 접착 능력 손실에 의해 발생한다. 보호 유리 (cover glass)로 사용되는 soda-lime glass에서 형성된 Na과 N-type dopant에서 형성된 In 및 그 밖의 여러 가지 화합물들의 침전반응과 같은 불순물의 활동이 확산되어 접착 강도의 손실이 발생된다. 그리고 이로 인해 셀과 항반사성 (antireflecting) 코팅 층의 산화와 부식을 용이하게 한다 [6,7,10].

박리는 접착손실에 영향에 의한 2차 현상으로 리본 내부접합 (ribbon interconnection)과 근접하여 발생한다. 또는 셀 가장자리와 finger 부분에서 쉽게 발견할 수 있다 [10]. 박리의 현상 중 하나로 접착물질 사이에 공기층이 형성되는 버블 (bubble) 형태로 나타난다. 버블이 표면에 생기는 경우 보호 유리와 셀 사이에 발생하며 이 공기층으로 인해 실제 태양전지에 도달하는 빛의 양이 감소된다. 만약 후면에 버블이 발생하는 경우 셀과 백시트 사이에 발생한다. 후면에 생기는 버블은 외부온도 및 일사량으로 인해 증가된 내부 열의 순환을 방해한다. 따라서 셀과 셀 사이의 온도 차를 발생하며 모듈 전체 효율에 영향을 미친다 [8,9]. 추가로 EVA가 고온의 기후에서 오랫동안 자외선 (UV)에 노출되거나 수분이 침투되면 복합적인 스트레스의 결합으로 그림 3과 같은 변색 (discoloration) 현상이 발생한다. 이는 태양으로부터 입사되는 광의 양을 감소시켜 성능의 손실을 발생한다 [11].



**Fig. 3.** Visual image of a 25-year-old c-Si PV module. (a) image of sectional, (b) front image of a PV module from Ref. [11].

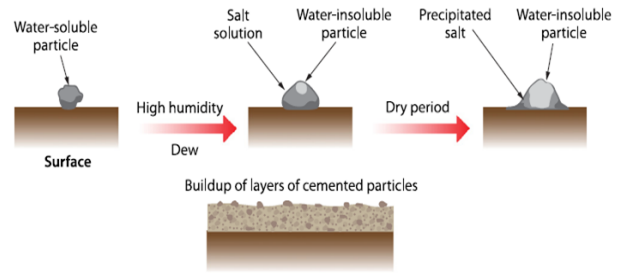
**2.5 오염 (pollution)에 의한 성능열화**

사막지역의 기후는 강한 북동풍이 불고 많은 먼지와 모래바람을 동반하는 경우가 많은 특징이 있다. 이러한 먼지와 모래는 PV 모듈 표면을 오염시켜 PV 모듈로 들어오는 일사량을 차단한다.

El-Shobokshy *et al.* [12]는 미세한 먼지 입자가 지름이 짧은 입자보다 표면위에 더욱 촘촘하게 축적되어 PV 모듈효율에 나쁜 영향을 주는 것을 보고하였다. Mohamed *et al.* [13]의 먼지 밀도에 따른 투과도에 대한 연구 결과 먼지 밀도가 증가함에 따라 투과도가 급격하게 감소되는 것을 확인하였다. 그리고 먼지제거 (cleaning)를 실시한 모듈과 먼지 제거를 하지 않은 (uncleaning) 모듈의 출력을 비교한 결과 1년 동안 최대 5 W까지 출력 차이 확인할 수 있었다.

대기 중 먼지에는 수용성 염과 불수용성 염이 함유되어 있고, 그리고 유기물과 무기물 입자의 분포가 포함되어 있다. 시멘테이션 (cementation)은 많은 먼지와 높은 습도를 가지고 있는 지역에서 발생된다. 먼지-습기에 의한 시멘테이션은 그림 4의 절차에 의해 발생된다.

표면 위에 수용성 먼지 입자는 높은 습도와 이슬이 결합되면 입자의 불수용성 입자를 유지하는 염 용액의 미세한 작은 물방울을 형성한다. 이러한 입자가 오후의 높은 기온에 의해 마르게 되면 석출된 염은 표면 위에 용해되지 않은 입자의 정착으로 시멘트처럼 기능을 한다. 유기증착의 아주 얇은 유기층은 다른 증착이 발생하기 전에 표면을 덮는 경향이 있다. 이것은 증착된 염을 제거하기 어렵게 만들고, 더 많은 먼지제거 시간과 절차를 만든다 [13]. 유리오염은



**Fig. 4.** Dust-moisture cementation process from Ref. [13].

모듈 내부에서 발생된 문제가 아니라 외부의 영향으로 발생되어진 문제이기 때문에 PV 모듈설치 위치의 환경에 따라 주기적으로 제거한다면 성능 손실을 완화시킬 수 있다. PV 모듈은 장기적인 환경 노출에 의해 복합적인 열화가 발생할 수 있다 [14]. 특히, 사막지역의 환경과 같은 고온 고습한 지역에서 PV 모듈의 장기 신뢰성 보장은 매우 어렵다.

**2.6 결정질 PV 모듈의 품질보증**

**2.6.1 결정질 PV 모듈 품질자격시험 (IEC61215) 기준**

결정질 PV 모듈은 결정질 실리콘 태양광 모듈 성능검사 (IEC 61215)를 통한 품질자격시험으로 평가된다 [1].

품질자격시험은 신뢰성 시험 프로그램을 기초한 환경 스트레스 시험으로 의도된 환경에서 발생하는 고장 및 성능 저하의 현상을 찾기 위한 시험이다.

그림 5는 IEC61215의 인증 시험 절차를 나타내고 있다. 품질자격시험은 기준에 따라 무작위로 8개의 모듈을 선택한다. 그리고 순서에 따라 총 18개의 항목 시험을 진행한다. 고장 판정기준은 시험 후 모든 시험시료가 초기 출력치 대비 8% 이상의 출력저하가 발생하지 않아야 한다. 만약 2개 이상의 PV 모듈이 고장판정 기준을 만족하지 못하면 품질자격시험을 만족하지 않은 것으로 판단한다. 시험은 무작위로 선택된 8개의 시료의 육안검사, 최대전력 결정, 절연시험, 습윤 누설 전류 시험을 시작으로 각각의 영향력 있는 시험들이 순차적으로 진행된다. 먼저, 1개의 모듈은 기준모듈로 남겨두고, 총 8개의 모듈을 가지고 항목별 시험을 진행한다.

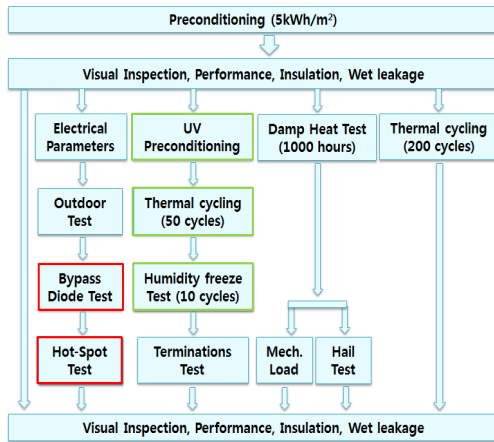


Fig. 5. Certification test procedures of IEC61215.

Table 2. Test condition of IEC 61215.

Verification test details	Test conditions
UV Test	IEC 61215 requires to subject the module to a total UV irradiation of 15 kWh/m <sup>2</sup> in the (UVA + UVB) regions (280 nm – 400 nm), with at least 5 kWh/m <sup>2</sup> , i.e. 33% in the UVB region (280 nm – 320 nm), while maintaining the module at 60 °C ± 5 °C.
Thermal Cycle Test	The module is subjected to the cycling temperature limits of -40°C ± 2°C and +85°C ± 2°C with the below profile. (respectively 50 cycle and 100 cycle)
Humidity Freeze Test	The module is subjected to 10 complete cycles as condition. Relative humidity requirement RH=85% ± 5% applies only at -40 °C ~ 85 °C.
Terminations Test	The terminations undergo a stress test that simulates normal assembly and handling through various cycles and levels of tensile strength, bending and torque tests as referenced in another standard, IEC 60068-2-21.
Damp Heat Test	The purpose is to determine the ability of the module to withstand long-term exposure to penetration of humidity by applying 85°C ± 2°C with a relative humidity of 85% ± 5% for 1000 hours.
Mechanical Load Test	2,400 Pa is applied (which equates to a wind pressure of 130 km/hour) for 1 hour on each face of the module. (2 Cycle). If the module is to be qualified to withstand heavy accumulations of snow and ice, the load applied to the front of the module during the last cycle of this test is increased from 2 400 Pa to 5 400 Pa.
Hail Test	The test equipment is a unique launcher capable of propelling various weights of ice balls at the specified velocities so as to hit the module at 11 specified impact locations +/- 10 mm distance variation. It is quite common practice to use 25 mm / 7.53 g ice balls.

두 번째 모듈은 단자강도 시험 진행 후 다양한 방사 조건에서 성능을 결정하는 전기적 특성을 시험한다. 성능평가가 완료되면 PV 모듈의 기능을 결정하는 바이패스 다이오드 시험과 핫스팟 내구 시험을 진행하여 PV 모듈의 전지적인 특성을 확인한다.

나머지 6개의 모듈은 각 2개씩 시험에 이용되며 3개의 그룹으로 나뉘어져 환경 조건에서의 성능 평가를 진행한다. 환경시험은 장기적으로 환경에 노출되었을 때 PV 모듈의 신뢰성 보증을 위한 중요한 요소로 작용된다. 따라서 각각의 시험이 끝날 때마다 전기적 성능평가를 반복하여 합격 여부를 확인한다. 환경시험의 모든 항목의 합격 기준은 표준시험 상태

(STC) 조건에서 최대 출력전력의 저하가 시험 전에 측정된 값의 5%를 초과하지 않아야 한다. 시험 조건을 아래 표 2와 같다 [14].

결정질 PV모듈 품질자격시험 기준을 만족한 PV 모듈은 25년 이상의 장기수명을 보증한다고 할 수 있다. 그러나 PV 발전 시스템에 사용 중인 PV 모듈은 다양한 기후 조건과 환경에 따라 많은 결함과 성능저하가 발생되고 있다 [1]. 이러한 원인은 기존 IEC 61215 품질자격시험의 목적이 PV 모듈의 초기 결함 (early defect) 검출에 있기 때문이다. 따라서 품질자격시험기준은 제품의 수명 예측, PV 모듈의 내구성 (endurance), 그리고 필드에서 얼마나 빠르게 성능 열화가 발생하는지에 대해 알 수 없다 [15].

### 2.7 TÜV 인증기관의 장기 신뢰성 확보 방법

일부 인증기관에서는 장기적인 신뢰성을 확보하기 위해 독립적인 평가를 진행하여 발표하였다. 여러 기후 조건에서 PV 모듈의 장기 사용 중에 발생하는 성능열화 메커니즘을 이해하기 위해 옥외 조건과 실험실 가속시험 조건과의 연관성 실험을 진행하였다. 실험은 IEC61215 환경시험 항목에서 일부를 선택하여 기준 조건 이상으로 확장시켜 진행되었다. 온도 사이클 시험 (thermal cycle test)은 IEC61215기준의 200회 시험의 4배인 800회를 진행하였다. 시험 결과 온도 사이클 200회 시험에서는 모듈의 마모 고장을 확인할 수 없었다. 그러나 400회~600회 사이에서 마이크로 크랙과 finger 결함과 같은 마모 고장을 확인할 수 있었다. EL분석 결과 뿔수가 증가됨에 따라 크랙 발생률도 증가되었으며, 이러한 몇몇 균열의 결과로 활성영역이 busbar로부터 셀 부분의 분리를 유도하는 것을 확인하였다. 그 결과 단락전류와 fill-factor가 저하되어 급격한 출력 저하를 발생시켰다.

고온고습 (damp heat) 시험 결과 표준시험 시간 1,000시간까지 모듈의 고장을 확인할 수 없었다. 그리고 2,000시간 미만까지도 미미한 정도 (1%)의 출력저하만 보였다. 그러나 시험 시간이 2,000시간이 경과함에 따라 부식의 영향이 발생하였다. PV 모듈의 출력은 5% 이상의 감소하였다. 고장 원인 분석 결과 고온고습환경 조건에 의해 수분이 백시트로 침투되어 크랙을 유발한 것으로 확인되었다. 또 다른 고장으로는 항반사성 코팅이 변질되거나 박리 현상이 일어난 것을 확인하였다. 이로 인해 fill-factor의 손실이 발생되어 빠른 출력저하가 발생되었다 [16-18].



### 3. 결과 및 고찰

결정계 PV 모듈은 온도와 습도, 일사량, 오염 등과 같은 환경 조건에 의해 신뢰성과 성능열화가 발생한다. 특히 중동지역 등과 같은 극한 환경에 의한 PV 모듈의 고장메커니즘과 품질, 신뢰성 보증을 위한 방법론은 다음과 같다.

- 중동지역의 사막의 45°C 이상 높은 온도가 발생한다. 특히 낮과 밤의 높은 온도 차 발생에 의해 PV 모듈 재료들의 성능 열화가 발생한다.
- 수분은 백시트 또는 프레임 가장자리를 통해 침투되며 PV 모듈 내의 수분은 접착강도 손실과 누설 전류를 증가한다.
- 결정질 실리콘 PV 모듈 품질자격시험 (IEC 61215)는 중동지역 등과 같은 극한 환경에서의 환경시험 기준 조건으로 활용하기에 충분하지 않다.
- TÜV 등과 같은 인증기관에서는 장기적인 신뢰성 확보를 위해 IEC 61215 일부 환경시험 항목에서 기준 이상의 시험을 실시하였다. 그 결과 IEC61215의 환경시험 기준 조건 및 시간이 불충분하다는 것을 확인할 수 있었다.
- 중동지역의 특성은 모래바람 등이 발생하는 것이다. 먼지와 모래는 PV 모듈을 오염시켜 광 투과도를 감소한다. 특히 먼지와 습기의 결합은 시멘테이션 (cementation) 현상이 발생되어 제거하기가 어렵다.
- 중동지역 환경에서의 PV 모듈 성능검사 기준은 IEC 61215 시험과 중동지역 환경 특성을 고려한 모래 먼지 (sand & dust) 시험, 염수 분무 (salt mist) 시험, 그리고 PID (potential induced degradation) 시험 등이 필요하다.
  - 중동지역은 모래와 먼지를 동반한 모래바람 등에 의해 PV 모듈 표면이 오염된다. 따라서 모래 먼지 등에 의한 성능열화 평가가 필요하다. 이 시험은 실제 환경에서 발생하는 먼지 조성을 날려 모듈에 침투시키는 시험이다.
  - 중동지역은 대부분 해안가 주변으로 인구가 밀집되어 있다. 해안가 지역의 PV 모듈은 염분에 의해 제품 신뢰성이 떨어진다. 염수분무시험은 소금 성분을 대기에 노출하여 PV 모듈의 부식에 대한 내구성을 평가한다.
  - 최근 노후 태양광 패널의 성능저하가 주요 문제점으로 발생하고 있다. 따라서 PID 현상에 대한 PV 모듈의 내구성 시험 결과가 주요 이슈로 부상하고 있다. PID 시험은 가혹한 환경에서 발생하는 잠재적 성능저하를 평가하기 위한 시험이다. 시험은 60°C, 상대습도 85% 환경에서 PV 모듈에 1,000 V를 인가한다. 시험 시간은 96시간 유지한다.

### 4. 결론

본 연구에서는 중동지역 환경에서 발생할 수 있는 결정계 PV 모듈 성능저하 원인과 고장 메커니즘에 대하여 정리하였다. 또한 중동지역 등과 같은 특수 환경에서의 PV 모듈 장기 수명보증을 위한 새로운 품질보증시험의 필요성을 확인하였다.

향후 중동지역에서의 결정질 PV 모듈 성능과 장기 사용수명 보증을 위한 PV 모듈 신뢰성과 필드 검증에 대한 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통사자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (No.2013T100200126).

### REFERENCES

- [1] C. R. Osterwald and T. J. McMahon, *Prog. in Photovoltaics: Research and Applications*, **17**, 11 (2009).
- [2] J. H. Wohlgemuth and S. Kurtz, *In Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 37th IEEE*, 003601 (2011).
- [3] <http://www.wunderground.com> (2013).

- [4] V. V. Tyagi, N. A. A. Rahim, N. A. Rahim, and J. A. Selvaraj, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **20**, 443 (2013).
- [5] D. S. Dubey, J. N. Sarvaiya, B. Seshadri, and B. Seshadri, *Energy Procedia*, **33**, 311 (2013).
- [6] Hadagali and V. Vinaykumar, *Thesis*, p. 5-10, University of Central Florida Orlando, Florida (2005).
- [7] J. S. Jeong, N. C. Park, and C. W. Han, *Microelectronics Reliability*, **52**, 2326 (2012).
- [8] M. A. Quintana, D. L. King, and T. J. McMahon, *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE*, 1436 (2002).
- [9] M. A. Muñoz-García, O. Marina, M. C. Alonso-Garciab, and F. Chenlob, *Solar Energy*, **85**, 2264 (2011).
- [10] S. Frieria and Paula, *Prog. in Photovoltaics: Research and Applications*, **19**, 658 (2011).
- [11] N. C. Pack and J. S. Jeong, *Microelectronics Reliability*, **53**, 1818 (2013).
- [12] M. S. El-Shobokshy, S. Mohammad, and F. M. Hussein, *Solar Energy*, **51**, 505 (1993).
- [13] A. O. Mohamed and A. Hasan, *J. Basic Appl. Sci. Res.*, **2**, 11030 (2012).
- [14] E. F. Cuddihy, *Solar Energy Materials*, **3**, 21 (1980).
- [15] W. Herrmann and N. Bogdanski, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 37th IEEE*, 002305 (2011).
- [16] R. Khatri, S. Agarwal, I. Saha, S. K. Singh, and B. Kumar, *Energy Procedia*, **8**, 396 (2011).
- [17] A. Zielnik, *Validating Photovoltaic Module Durability Tests*, www.solarABCs.org (2013).
- [18] G. Tamizhmani and J. Kuitche, *Accelerated Lifetime Testing of Photovoltaic Modules*, www.solarABCs.org (2013).