

PV 모듈에서 온도 영향에 의한 micro-crack 성장과 전기적 특성 분석

송영훈^{a1}, 강기환^a, 유권중^a, 안형근¹, 한득영¹
 건국대학교¹, 한국에너지기술연구원^a

The analysis of growth and electrical characteristics of micro-crack with thermal effect in PV module

Young-Hun Song^{a1}, Gi-Hwan Kang^a, Gwon-Jong Yu^a, Hyung-Gun Ahn¹, Deuk-Young Han¹
 KonKuk University¹, Korea Institute of Energy Research^a

Abstract - In this paper, we analyzed of growth and electrical characteristics of micro-cracks with thermal effect in PV module. The micro-cracks are increasing the breakage risk over the whole value chine from the wafer to the finished module, because the wafer or cell is exposed to mechanical stress. we experimentally analyze the direct impact of micro-cracks on the module power and the consequences after artificial aging. The first step, we made micro-cracks in PV module by mechanical load test according to IEC 61215. Next, PV modules applied the thermal cycling test, because micro-cracks accelerated aging by thermal cycling test. according to IEC61215. Before every test, we checked output and EL image of PV module.

1. 서 론

태양광 발전의 핵심 소자는 광전효과(Photovoltaic effect)를 이용하여 태양의 광 에너지를 전기 에너지로 변환하는 태양전지이다. 태양전지는 소재와 제작 방식에 따라 여러 종류가 있지만, 전체 태양광 발전의 90% 이상은 결정질 실리콘 태양전지가 차지하고 있다.

결정질 실리콘 태양전지는 200 μ m 내외의 얇은 기판으로 여러 단계의 공정을 거쳐 제작되어지며, 다시 모듈화 공정을 거쳐 비로소 옥외에 노출되어 태양광 발전을 수행 하게 된다. 이렇게 하나의 모듈로 만들어지기까지의 수많은 공정을 거치게 되는 태양전지는 기계적 스트레스로 인한 crack의 위험에 노출되게 된다.

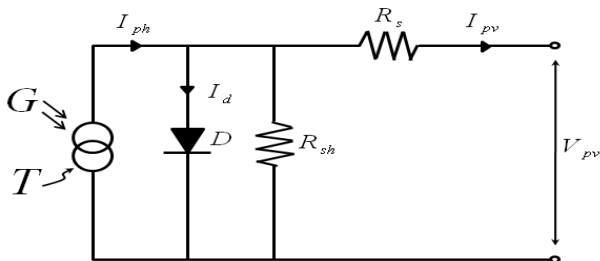
태양전지 모듈에 micro-crack을 내포하고 있다면 출력 부정합(mismatch)으로 인해 단일 모듈은 물론 시스템 전체적으로 출력 저하를 가져오며, crack이 있는 태양전지는 열화 현상으로 모듈 노화 현상이 가속되어 모듈 수명을 단축시키는 원인이 될 수도 있다.

본 논문에서는 인위적으로 태양전지 모듈에 crack을 발생시킨 후 온도 사이클 시험(thermal cycling test)을 추가적으로 진행하여 노화 가속에 따른 전기적 출력과 crack의 성장을 분석하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 태양전지 등가회로

빛이 조사될 때 태양전지의 등가회로는 아래 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 이상적인 경우 I_{sh} (I_{ph})의 정전류원과 다이오드로 구성되어 있지만 실제로는 직렬저항(R_s)과 병렬저항(R_{sh})이 존재하게 된다.



〈그림 1〉 태양전지의 등가회로

이상적인 태양전지의 등가회로는 저항성분을 배제한 형태로 표현하지만 실제의 태양전지에서는 직·병렬저항이 존재하기 때문에 그림 1의 등가회로에서 나타난 바와 같이 출력 전류식은 아래 식 1로 나타낼 수 있다.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \frac{q(V + R_s I)}{nkT} - 1 \right] - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}} \quad (\text{식 1})$$

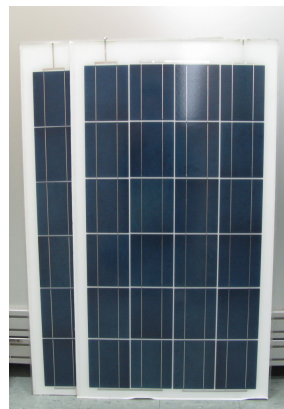
I_{ph} : Photo generated current k : Boltzmann's constant
 R_s : Cell series resistance R_{sh} : Cell shunt resistance
 q : Electronic charge n : Diode quality factor

2.2 실험

본 연구에서는 결정질 태양전지 모듈 제조 공정에서 발생할 수 있는 태양전지 crack에 대해 온도 사이클 시험을 통하여 노화 가속으로 인한 전기적 출력 변화를 분석하고 EL(Electroluminescence) Image를 측정하여 crack의 성장 과정을 관찰하고자 하였다.

2.2.1 실험 시료 제작

실험을 위해 제작된 모듈은 그림 2와 같이 2장이며, 표 1 사양의 6 inch 다결정 태양전지를 6 \times 4 배열 회로로 구성 후 3.2T 저철분 강화유리를 사용하여 제작하였다.



〈그림 2〉 실험 시료

〈표 1〉 태양전지 및 모듈 사양

Cell Size	6 inch(156 \times 156)
Type	Multi
Eff.	16.4 %
Wp	3.992 W
Uniformity	2 %
Module Size	713 \times 1041[mm] (6 \times 4 arrange)
Pmax	95.0[W]
Voc	14.9 [V]
Isc	8.5 [A]
Eff.	15.5 [%]

2.2.2 실험 방법

① Output Measurement

모듈 제조 공정에서 발생된 태양전지의 crack이 급격한 온도 변화로 스트레스가 증가하였을 경우, crack의 성장에 따른 전기적 출력 변화를 분석하기 위해 태양광 시뮬레이터 Pasan IIIb sun simulator를 사용하여, STC(Standard Test Condition) 조건(AM 1.5, 온도 25 $^{\circ}$ C, 조사강도 1,000 [W/m²])하에서 시료들의 출력을 측정 하였다.

② Mechanical load test

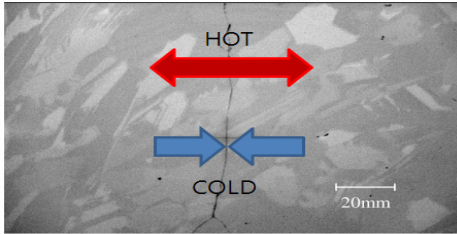
태양전지에 crack을 생성하기 위해 모듈 전·후 면에 기계적 하중 실험을 진행 하였으며, 모듈에 가해지는 하중은 crack을 보다 많이 생성하고자 IEC 61215에서의 허용 하중인 2400Pa 보다 600Pa 많은 3000Pa의 하중을 인가하였다.

③ Thermal cycling test

태양전지에 생성된 crack은 환경 챔버에서 온도 사이클 시험(50, 100, 200 cycle)이 진행되는 동안 125 $^{\circ}$ C의 급격한 온도 변화 (+85 \sim -40 $^{\circ}$ C)를 통해 열적 스트레스로 인한 crack의 성장을 촉진 하였다.

2.2.3 이론적 고찰

태양전지 모듈은 물성이 다른 재료들이 적층되어 라미네이션 공정을 통해 하나의 복합체로 완성된다. 이렇게 제작되어진 태양전지 모듈은 옥외에 노출되어 발전을 수행하는 동안 극심한 온도의 영향을 받게 되고, 태양전지를 감싸고 있는 재료의 각기 다른 열팽창 계수로 인하여 아래 그림 3과같이 micro-crack이 있는 태양전지는 열적 스트레스로 인해 crack이 성장하게 될 것이다.



〈그림 3〉 온도 변화에 따른 crack의 성장

모든 물질은 단위 길이(1m)에 대해 1°C 온도 상승 시 길이가 팽창하는 정도의 크기를 정해놓은 고유 선팽창 계수를 갖고 있다.

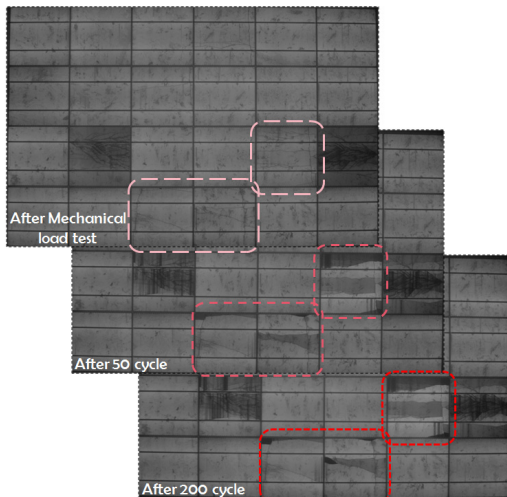
- 길이 팽창 : $L = L_0(1 + \alpha \Delta T)$
(L_0 팽창 전 길이, α 선 팽창 계수, ΔT 온도 변화량)
- 면 팽창 : $S = S_0(1 + 2\alpha \Delta T)$
(S_0 팽창 전 면적, 2α 면 팽창 계수, ΔT 온도 변화량)

2.3 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 결정질 태양전지 모듈에 생성된 micro-crack이 옥외에 노출되어 열적스트레스로 인한 crack의 성장을 EL (Electroluminescence) Image를 통하여 관찰하였으며, cracks의 성장에 따른 전기적 출력을 분석하고자 하였다.

2.3.1 EL(Electroluminescence) Image

아래 그림 4는 기계 하중 시험을 인가하여 발생한 초기 crack의 Image에서부터 온도 사이클 시험(50, 100, 200 cycle)이 각각 진행 되면서 발생하는 열 스트레스로 인해 crack이 성장해 가는 과정을 EL Image를 통해 관찰한 것이다.

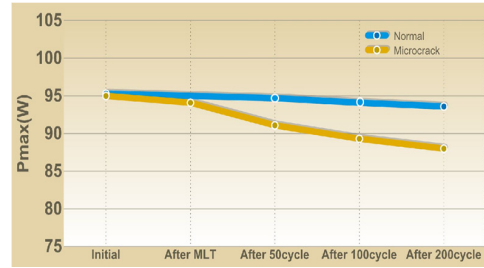


〈그림 4〉 온도 사이클 시험에 의한 crack 성장에 따른 EL Image

태양전지 모듈에 발생한 Micro-crack은 온도의 영향에 의해 열적 스트레스가 가중되어 crack이 성장함을 EL Image를 통해 관찰 할 수 있었다. 태양전지의 리본 전극과 접해 있는 crack에서는 정상적으로 출력을 발생 할 것으로 보이지만, 리본 전극과 접하고 있지 않은 crack은 열 스트레스로 인해 crack이 성장하여 본래의 전지 면에서 떨어져 나가 정상 출력보다 낮은 출력 값을 갖게 될 것이다. 그러나 지속적인 열적 스트레스는 결국 crack의 대부분에 영향을 주어 시간이 지날수록 본래의 전지에서 분리 되어 모듈 전체 출력 저하로 이어지고 더욱이 열점현상이 심화되어 모듈의 노화 및 파손으로 이어질 것이다.

2.3.2 Performance Test

그림 5는 2개의 95W급 태양전지 모듈 시험 중 하나의 모듈에는 crack을 적용시키고 다른 모듈은 정상 상태로 각각 온도 사이클(50, 100, 200cycle)시험을 진행하며 전·후의 출력을 비교한 그래프이다.



〈그림 5〉 정상 모듈과 crack이 적용된 모듈의 전기적 출력

위의 그래프에서 알 수 있듯이 정상 모듈은 온도 200사이클 시험 동안 1.78%의 낮은 출력 저하를 보이는데 반해, crack이 존재 하는 모듈에서는 7.36%의 큰 출력 저하를 보인다. crack이 발생된 모듈이 큰 출력 저하를 나타내는 것은 표 2에서와 같이 일정한 값을 갖는 전압 보다 온도 사이클 횟수에 따라 감소 경향을 갖는 전류에 의한 영향으로 보인다. 이것은 태양전지에 발생한 micro-crack이 온도 사이클 시험이 진행되는 동안 crack으로 성장하여 전자의 흐름을 방해하고 더욱이 전지의 리본 전극과 완전히 분리되어 태양전지 발전에 따른 전자의 수집이 단절되었기 때문이라 사료된다.

〈표 2〉 정상 모듈과 crack이 적용된 모듈의 전기적 출력 비교

	normal module				cracks module				
	initial	after 50 cycle	after 100 cycle	after 200 cycle	initial	after mech anical load test	after 50 cycle	after 100 cycle	after 200 cycle
Pmax(W)	95.3	94.7	94.1	93.6	95.0	94.1	91.1	89.3	88.0
Voc(V)	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	15.0	14.9	14.9	14.8
Isc(A)	8.64	8.56	8.51	8.40	8.50	8.50	8.42	8.35	8.27

3. 결 론

본 논문에서는 PV모듈 제작 공정 중 발생할 수 있는 태양전지의 micro-crack이 모듈로서 옥외에 노출되어 발전을 수행하는 동안 급격한 온도 변화로 crack이 성장하는 것을 EL Image로서 관찰하였고 그에 따른 전기적 출력을 분석하고자 하였다.

micro-crack를 내포하고 있는 태양전지 모듈은 옥외에 노출되어 발전 수행 시 온도 영향에 의해 crack으로 지속 성장할 것이며, 결국 본래의 전지에서 완전히 분리 되어 전지의 파손 면적만큼 출력 감소가 예상된다. 이렇게 crack로 이어진 태양전지의 파손은 출력 부정합(mismatch)으로 인해 단일 모듈은 물론 시스템 전체적으로 출력 저하를 가져오며, crack이 있는 태양전지 모듈은 열점 현상으로 모듈 노화 현상이 가속되어 모듈 수명을 단축시키는 원인이 될 것이다.

향후 연구에서는 태양전지에 발생한 crack로 인해 단절된 면적, 위치와 출력 관계에 대해 분석하고, crack의 발생 및 성장을 줄일 수 있는 방안 에 대한 연구를 지속 수행 하도록 하겠다.

[참 고 문 헌]

[1] 이준신, 임동건, 이재형, “태양전지 원론”, 홍릉과학 출판사 2005
 [2] International Electrotechnical Commission(IEC), Crystalline silicon terrestrial PV modules: design qualification and type approval, PV standard IEC 61215.
 [3] John H.W, “Long Term Photovoltaic Module Reliability”, PV and Solar Program Review Meeting 2003.
 [4] M.Kontges, I.Kunze, S.Kajari-Schröder, X.Breitenmoser, B. Bjørneklett “The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic module due to micro-cracks”, Solar Energy Materials & Solar cell, 2010.