

기계적 스트레스에 의한 태양전지모듈의 전기적 특성변화

공지현*, 지양근, 강기환, 김경수, 유권종, 안형근, 한득영

The Variation of Electrical Characteristics of PV Module due to Mechanical Stress

Ji-Hyun Kong*, Yang-Geun Ji, Gi-Hwan Kang, Kyung-Su Kim, Gwon-Jong Yu, Hyung-Kuen Ahn and Deuk-Young Han

Abstract

Under the physical stress on photovoltaic (PV) module, it will be warped according to elongation of the front glass and then micro-crack will be occurred in the thermally sealed solar cell. This micro-crack leads to drop of short circuit current of the PV module. This is because of increase of resistance component by micro-crack. Micro-crack at specific solar cell in the module lessens the durability of PV module with reduced output, hot-spot caused by solar cell output mismatch and increased resistance component. This study shows the relation between electrical characteristics and micro-cracks due to mechanical stress on PV module.

Key words

Photovoltaic module(태양전지모듈), Mechanical stress(기계적 스트레스), Micro-crack(미세균열), Tempered glass(강화유리), Shunt resistance(병렬저항), Hot-spot(열점)

(접수일 2010. 3. 10, 수정일 2010. 3. 17, 게재확정일 2010. 3. 18)

* 건국대학교 전기공학과, 한국에너지기술연구원

■ E-mail : kkongchi@kier.re.kr ■ Tel : (042)860-3658 ■ Fax : (042)860-3692

1. 서론

기존 태양광시스템의 경우 500kW 미만의 중용량 발전소가 주를 이루었다면 2008년 이후에는 1MW이상의 대규모 태양광시스템이 증가함에 따라 시스템에 사용되는 태양전지모듈의 숫자가 점점 늘어나고 있다. 일본, 독일 등은 20년 전부터 태양전지모듈의 내구성에 대하여 다양한 실증단지를 통해 그 신뢰성을 평가하고 있으며 그 기반을 바탕으로 다양한 환경에서의 태양전지모듈의 수명 및 신뢰성에 대한 평가가 이루어지고 있다.

우리나라는 2008년에만 274MW의 발전보급량으로 2007년 대비 5.8배 이상의 성장을 하였으며 전 세계시장 규모면에서도 4위에 오르는 등 급속한 성장에 힘입어 누적설치량 360.5MW에 달하고 있다.

태양전지모듈이 옥외에서 발전을 하는 경우 다양한 외부 스트레스를 주기적으로 받게 되는데, 기상조건에 의한 온도 변화, UV(Ultra-violet), 풍압, 우박 등과 같은 외부 환경적 스트레스에 장시간 노출되어 동작하게 된다.

특히 주기적인 온도변화나 바람 등은 태양전지모듈에 직접적인 기계적 스트레스로 작용한다. 이러한 스트레스에 장시

간 노출된 상태에서 발전하는 동안 기계·물리적 스트레스에 의해 눈에 보이지 않는 미세한 균열이 태양전지 표면에 야기될 수 있다. 시스템의 면적이 넓어질수록 각 모듈이 받는 스트레스는 균일하지 않기 때문에 저마다 다른 속도로 노화가 진행되고 이러한 태양전지모듈은 다양한 노화현상이 수반되어 그 수명과 출력이 저하된다고 보고되고 있다.

시스템의 용량이 커질수록 각 모듈 간에 출력 부정합(mismatch)에 의한 불균일은 시스템 전체의 발전량을 상당부분 저하시키고 더불어 노화현상을 빠르게 가속화시켜 태양전지모듈의 수명을 단축하는 한 요소로서 작용한다. 보고된 연구에 따르면 시스템에서 출력의 감소를 발생시키는 원인에는 다양한 요소가 존재한다. 태양전지모듈의 오염에 따른 손실이 2.5%, 온도상승 3.5%, 그림자영향 2%, 부정합 3.5%, 인버터에서의 손실 7.5%등 다양한 내·외부 요인에 의해 발전량의 손실을 가져올 수 있다⁽¹⁾. 실제로 Field에 설치되는 모듈은 다양한 기계적 스트레스 환경에 노출되어 있지만 그 내구성이 아직 충분히 재고되지 않아 그 영향에 대한 연구가 필요하다.

현재 시행되고 있는 IEC 61215 결정질 태양전지모듈 인증 규격에는 기계적 하중시험⁽²⁾을 시험항목으로 포함하고 있으나, 실제로 Field에 설치되는 모듈은 다양한 기계적 스트레스에 그 내구성이 재고되지 않았다.

본 연구에서는 태양전지모듈이 옥외에 노출되어 받을 수 있는 다양한 외부환경 요인 중에 기계적 하중이 태양전지모듈의 전·후면에 가해질 때 Dark I-V 특성변화에 따른 미세균열(Micro-crack)의 발생여부를 고찰하고, 그에 따른 전기적 특성변화를 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 태양전지

태양전지는 빛을 전기로 바꾸어 주는 전력변환소자이다. 태양전지는 에미터(emitter)인 n층과 베이스(base)인 p층을 접합한 구조(p-n junction)로 만들어 진다.

태양전지에 빛이 입사되면 그림 1과 같이 전지 내에 전자·정공쌍(electron-hole pair)이 생성되고 이는 보다 높은 에너지 상태로 이동한다. 이렇게 여기(exciting)된 전자가 태양

전지 내부에서 외부회로로 이동하여 전력소자를 구동할 수 있게 한다. 입사되는 에너지는 반도체 물질의 밴드갭 에너지(Eg)보다 큰 에너지를 가지고 있을 때 동작한다. 일반적으로 실리콘(Si)의 경우 1.12[eV]의 밴드갭 에너지를 가지고 있으며, 이보다 높은 에너지를 가지고 있는 태양광 스펙트럼 영역에서 전자는 밴드갭을 뛰어 넘어 전력을 생산할 수 있게 된다.

이상적인 p-n접합의 전류식은 식 (1)과 같다.

$$I = I_0 \left[\exp \frac{qV}{nkT} - 1 \right] \quad (1)$$

여기서,

k : 볼츠만상수(1.38×10⁻²³)

T : 절대온도[°C]

n : 다이오드 지수

q : 전하량(1.6×10⁻¹⁹[C])

I₀ : 역포화전류

식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며 태양전지를 다이오드로 보면 빛에 의해 생성된 전류를 I_L로 정의하고, p-n 접합 다이오드의 전류·전압 특성에 중첩시켜 보면 그림 2와 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다⁽²⁾.

$$I = I_d - I_L \quad (2)$$

$$I = I_0 \left[\exp \frac{qV}{nkT} - 1 \right] - I_L \quad (3)$$

여기서, I_L : 광전류 I_d : 다이오드전류

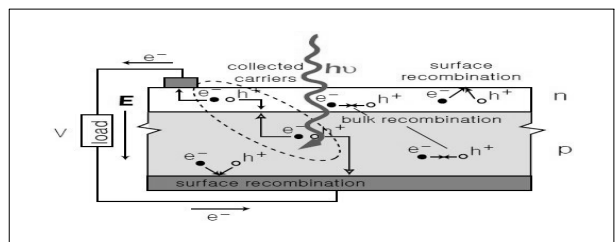


Fig. 1 Generation of electron-hole pair.

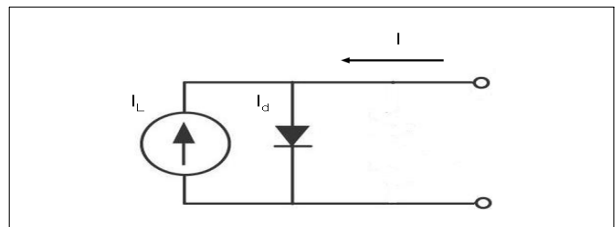


Fig. 2 Equivalent circuit of solar cell of dark current.

암상태에서 광생성 전류는 역방향이 되지만 태양전지에서 이를 순방향으로 생각하여 태양전지 등가회로로 나타낸다.

2.2 태양전지 등가회로

광원이 조사될 때 태양전지의 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이상적인 경우 I_L 의 정전류원과 다이오드로만 구성되지만 실제로는 결합요소인 직렬저항과 병렬저항 성분이 존재한다.

이상적인 태양전지의 등가회로는 저항성분을 무시한 형태로 나타내지만 실제의 태양전지에서는 내부에 직·병렬저항 성분이 존재하기 때문에 내부에 저항성분을 도시하고 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

여기서, R_s : 직렬저항[Ω] R_{sh} : 병렬저항[Ω]

$$I = I_L - I_o \left[\exp \frac{q(V + R_s I)}{nkT} - 1 \right] - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}} \quad (4)$$

2.2.1 태양전지 병렬저항

태양전지의 병렬저항(shunt resistance : R_{sh}) 값은 무한대일수록 가장 이상적이나 실제모델은 무한대 값이 아니므로 이로 인한 누설 전류로 인해 그림 3과 같이 태양전지의 p-n 접합을 가로 질러 흐르는 광생성 전류 및 전압을 감소시킨다.

병렬저항은 이상적인 다이오드 특성이 아닌 일정한 저항으로 존재하는 누설저항을 나타낸다. 이는 전지의 표면을 따라 형성되는 표면 누설 및 접합의 결함에 의한 누설전류에 기인하거나, 전위 또는 결정입계(grain boundary)를 따라서 형성되는 확산 스파이크, 그리고 전극 형성 후 미세균열, 결정입계, 적층결합과 같은 결정결합을 따라서 형성되는 미세한 금속 브리지들에 의해 나타난다⁽³⁾.

장시간 외부환경에 의한 기계적 스트레스에 노출된 태양전지 모듈은 병렬저항의 다양한 결함요소 가운데 미세균열이 야

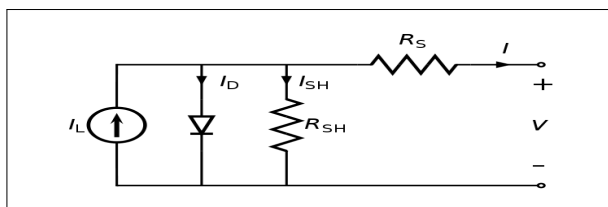


Fig. 3 equivalent circuit of solar cell.

기되어 그림 4와 같이 생성되는 광전류의 생성을 방해하여, 이는 태양전지모듈의 출력을 저하시키고, 각기 다른 분포의 태양전지모듈이 시스템에 존재한다면 출력 불균형에 의한 Hot-Spot 현상으로 특정모듈만 온도가 높아져 결국 내구성에 영향을 미치게 된다.

2.3 실험

본 연구에서 기계적 스트레스에 의한 전기적 특성을 분석하기 위해, 신뢰도가 높은 결정질 태양전지를 선택한 후 태양전지모듈을 제작하였으며, 시험시료의 사양은 표 1과 같다.

2.3.1 시료 제작 및 장치사양

실험에 사용된 태양전지모듈은 그림 5, 표 1과 같이 6inch 다결정(poly crystalline) 태양전지 24장을 직렬연결하고 3T 엠보싱 강화유리를 이용해 EVA와 Back sheet로 lamination(적층) 후 열봉합하여 76W급 다결정 태양전지모듈(가로 : 70cm 세로 : 100cm)을 제작하였다.

열봉합은 N사의 LM1222S 라미네이터를 이용하여 fast-cure type으로 제작하였다.

위와 같은 방법으로 태양전지 24장 이용하여 56W급 단결정(Single crystalline) 태양전지모듈(가로 : 59.5cm, 세로 :

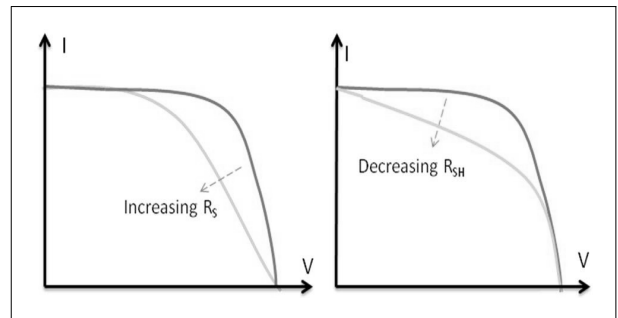


Fig. 4 P_{out} decrease by resistance factor in solar cell.

Table 1. Specifications of PV module

Type	Inter-connection	glass	dimension (cm ²)
P24	24series	3T 엠보싱 강화유리	70 × 100
S24	24series	3T 엠보싱 강화유리	59.5 × 89.5

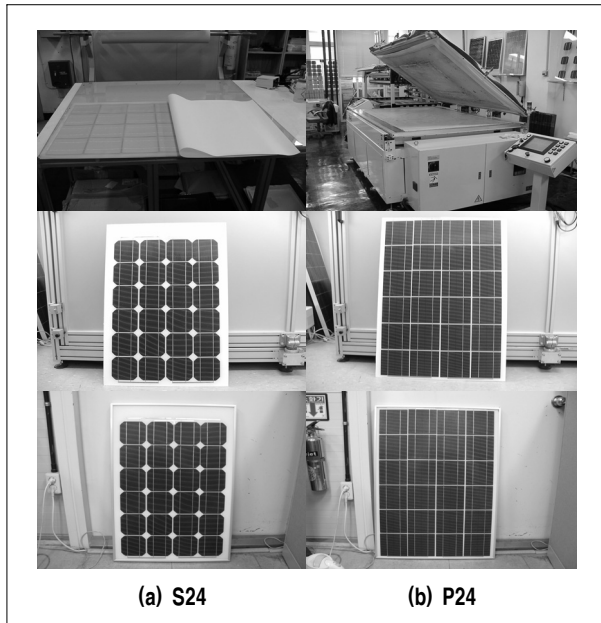


Fig. 5 Manufacturing process of PV module.

89.5cm)을 제작하였다. 여기에 두 모듈 모두 기계적 강도를 더하기 위해 알루미늄 프레임을 부착하였다.

2.3.2 기계하중시험 모델

태양전지모듈에 가해지는 기계적 하중에 의해전면의 유리가 그림 6과 같이 하중의 반대방향으로 휘어지게 되고 태양전지모듈의 내부에 열봉합된 태양전지 또한 휘어지게 된다. 태양전지는 방향성이 존재하는 물질로서 충격이나 외력에 아주 취약한 특성을 지녀 이에 따른 미세균열이 쉽게 야기될 수 있다.

일반적인 유리의 경우 표면에 보이지 않는 미세한 균열이 인장응력에 의해 성장해 파손이 일어나지만 강화유리(tempered glass)의 경우 보통의 판유리를 가열한 후 급랭시켜 유리의

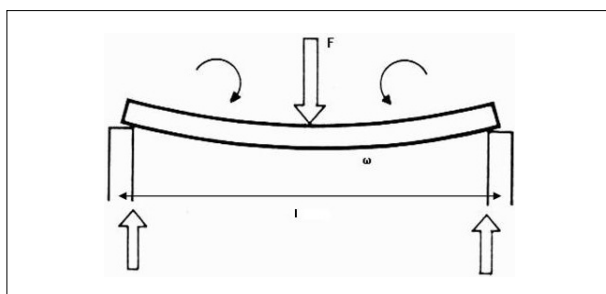


Fig. 6 Stress according to mechanical load.

결정을 치밀하게 만들어 강도를 증가 시킨 유리이다. 이러한 강화유리는 균열 주위에 압축응력을 작용시켜 균열의 성장을 방해하는 응력분포의 변화를 유도한다. 강화유리의 표면 압축응력을 유도하는 방법은 전체를 유리의 전이온도(Tg) 이상으로 가열하여 이를 빠르게 air jet이나 liquid jet을 이용하여 표면만 냉각시키는 방법을 사용한다.

유리의 표면은 급랭되어 온도가 빠르게 유리 전이온도 아래로 떨어지게 되어 강성체로 되지만 유리 내부는 서서히 냉각됨으로 유리전이온도 이상이 되어 점탄성 변형이 가능하여 수축 시 표면에 의한 저항을 받게 된다. 이 때 표면은 내외부의 온도차가 평형화되면서 압축상태에 놓이게 되고 이와 균형을 이루는 내부는 자연스럽게 인장상태에 놓이게 된다. 응력분포는 그림 7과 같이 두께방향으로 포물선 형태가 되고 표면 압축응력은 내부의 인장응력의 두 배로, 응력 층의 두께는 유리 자체 두께의 약 20-25%에 이른다⁽⁴⁾.

아래 수식은 모듈 표면에 기계적 하중이 가해졌을 때 모듈 표면이 변형되어 굴곡을 이루는 원의 반지름을 나타낸 것으로 지지대의 거리의 제곱에 비례하여 모듈의 변형에 반비례하는 특징을 갖고 있다⁽⁵⁾.

$$R = \frac{l^2}{12 \cdot \omega_{\max}} \quad (5)$$

여기서, ω = 유리의 최대 연신율(%)

l = 지지대 사이의 거리(m)

2.3.3 기계하중시험 모델

시료로 제작된 태양전지모듈에 기계 하중장치를 통해 모듈의 표면에 기계적 스트레스를 인가하였다. IEC 61215 태양전지모듈 인증 기준⁽²⁾인 2400Pa의 압력으로 그림 8과 같이 전

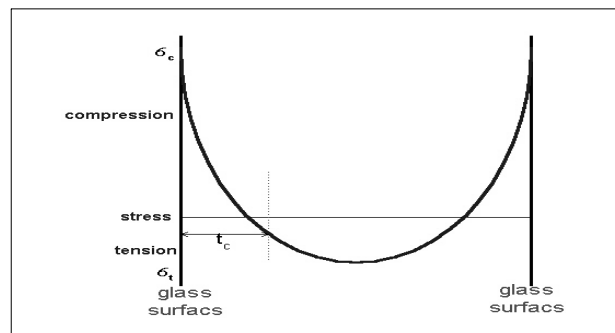


Fig. 7 Stress distribution of tempered glass.

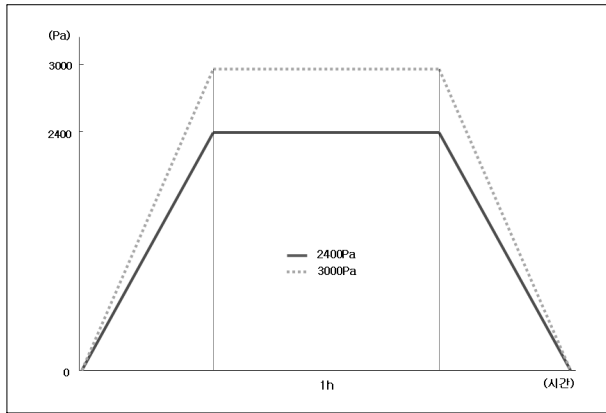


Fig. 8 Variation of load with time.

면과 후면을 각 각 1시간씩 3회 반복하여 이후의 변화를 관찰하였고 보다 더 가혹한 시험환경을 위하여 3000Pa의 압력으로 같은 시간동안 하중을 가하여 변화를 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 기계적 하중에 따른 암전류 특성

기계적 하중이 태양전지 표면에 가해질 때 나타나는 전기적 특성변화를 알아보기 위해 Dark I-V(암전류) 특성을 통해 알아보았다. 기계하중시험이 끝난 태양전지모듈을 암실에서 양 극에 K사 2430 1kW PULSE Source Meter를 이용해 Dark I-V를 forward bias하여 다이오드 특성을 알아보았으며 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 이 때 실내온도 및 측정되는 실내 환경 및 조건은 STC조건⁽²⁾(일사강도:1000W/m², 온도:25℃, AM 1.5; Standard Test Condition)에 준하도록 25℃에서 측정하였다.

태양전지모듈 전면에 기계적 하중에 의한 압력이 각각 2400Pa과 3000Pa로 증가함에 따라 기율기가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 2400Pa까지는 큰 변화가 나타나지 않았지만 3000Pa로 하중이 높아지자 기율기의 변화가 나타났다. 초기 값에 비해 다결정 모듈이 -2.5% 감소한 반면, 단결정 모듈은 -16%의 저항 감소를 나타냈다. 이는 기계적 하중에 의해 태양전지 표면에 미세한 결함이 야기되어 병렬저항 성분이 줄어드는 것으로 추계할 수 있으며 결정 방향이 고른 단결정 태양전지가 스트레스에 더 민감한 것으로 사료된다.

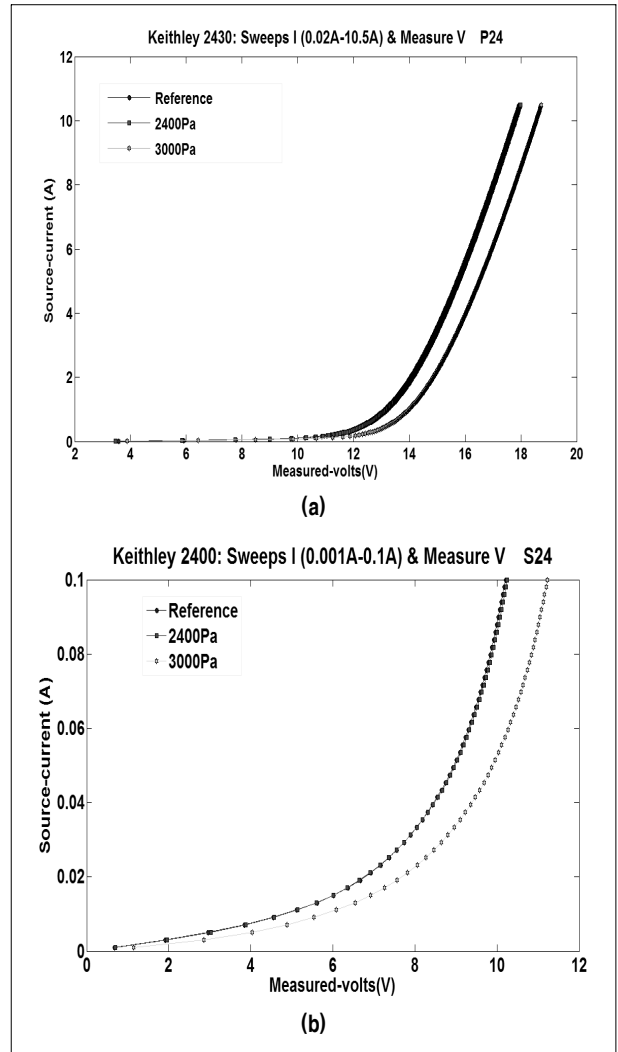


Fig. 9 Dark I-V Curve according to mechanical load (a) P24 (b) S24.

병렬저항성분이 줄어들면 태양전지에서 생성된 광전류가 전극에 수집되지 못하고 누설되어 내부에 머물면서 외부회로로 나가지 못해 전자·정공쌍은 내부에서 재결합되고 소멸되어 출력의 저하와 내구성의 감소로 이어질 것이라 사료된다.

3.2 태양전지모듈의 출력변화

그림 10은 기계적 하중의 증가가 태양전지모듈의 출력에 미치는 영향을 알아보기 위해 솔라 시뮬레이터를 이용하여 측정한 I-V curve이다. 측정 시에는 STC조건에 준하여 엄격한 실내 환경에서 측정하였다. MPP(Maximum Power Point)

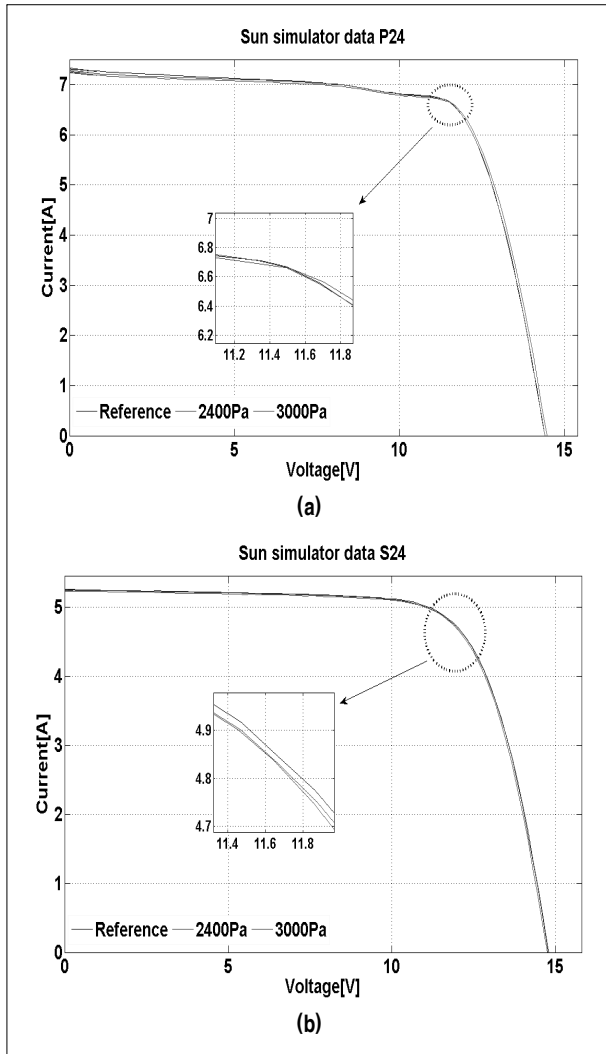


Fig. 10 P_{out} of PV Module according to mechanical load (a) P24 (b) S24.

구간에서 초기 값에 비해 출력의 감소는 $-0.2 \sim 0.3\%$ 감소함을 보여 각 하중의 변화에 따른 출력의 변화가 두드러지게 나타나지 않음을 확인 하였다. 이는 기계적 스트레스에 의한 미세균열이 단기간 내에는 모듈의 출력에 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

그림 11은 기계하중 시험 후 각 모듈의 출력의 변화와 병렬저항 성분 변화의 변화를 나타내었다. 출력은 초기 값에서 2400Pa 시험 이후 다결정모듈은 76.87W에서 76.37W로 감소하였고, 단결정 모듈은 56.65W에서 56.33W로 각각 출력이 감소하였다. 이후 3000Pa로 하중을 높이자 출력은 76.66W와 56.45W로 다소 출력이 상승하는 경향을 나타냈다. 병렬저항은 2400Pa 시험

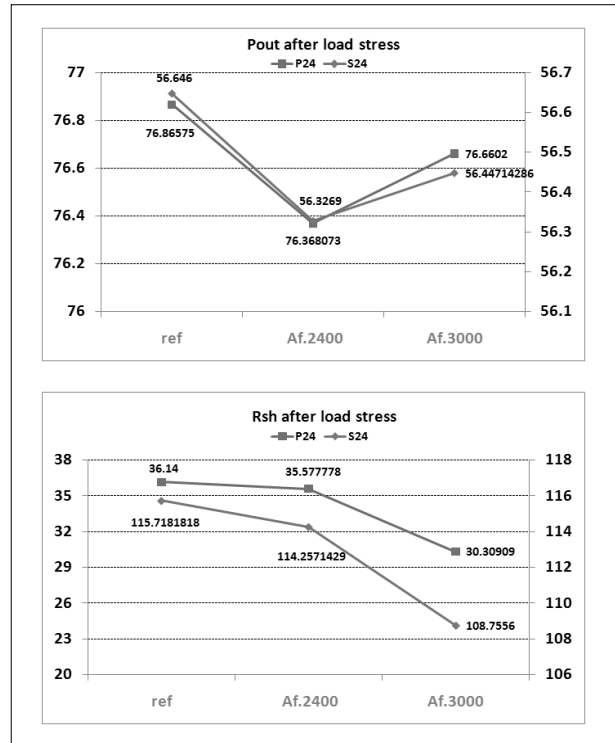


Fig. 11 P_{out} and shunt resistance after load test.

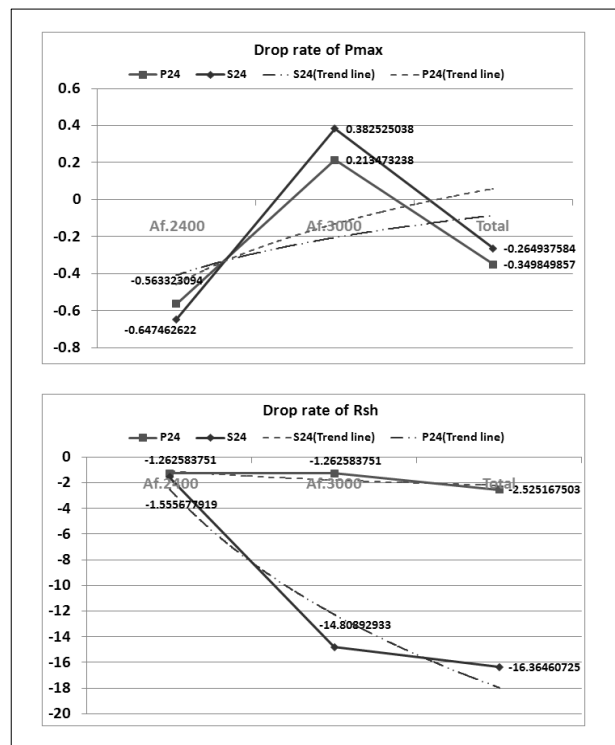


Fig. 12 Drop rate of P_{out} and Rsh after load test.

Table 2. Variation of each parameter according to mechanical load

Type	Parameter	Ref.	2400Pa	3000Pa
P24	Pmax(W)	76,86575	76,68073	76,6602
	Rsh(Ω)	36,14	35,57778	30,30909
S24	Pmax(W)	56,646	56,3269	56,44714
	Rsh(Ω)	115,7182	114,2571	108,7556

Table 3. Drop rate of Pout and Rsh after load test

Type	Parameter	2400Pa	3000Pa	Total
P24	Pmax(%)	-0,56332	0,213473	-0,34985
	Rsh(%)	-1,26258	-1,26258	-2,52517
S24	Pmax(%)	-0,64746	-14,8089	-0,26494
	Rsh(%)	-1,55568	0,279411	-16,3646

이후 다결정모듈은 36,14 Ω 에서 35,58 Ω 으로 단결정 모듈은 115,72 Ω 에서 114,26 Ω 으로 감소하였고 3000Pa 이후에는 30,31 Ω , 108,76 Ω 으로 각각 감소하는 경향을 나타내었다.

이는 앞선 Dark I-V curve 시험에서 특성곡선의 기울기 감소가 병렬저항의 감소로 이어진다고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 결정질 태양전지모듈의 표면에 기계적 하중에 의한 스트레스를 인가하였을 때 전기적 특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

태양전지모듈의 표면에 하중을 0Pa에서 2400Pa, 3000Pa 씩 단계적으로 증가시켰을 때 전기적 특성에 대한 영향을 Dark I-V를 이용하여 추계하였고 이를 솔라 시뮬레이터를 통해 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

태양전지모듈에 기계적 하중이 가해졌을 때 미세균열의 발생 유무를 병렬저항성분의 변화에 의해 관찰할 수 있었으며, Dark I-V의 기울기 변화에 의한 저항성분의 변화와 솔라 시뮬레이터의 측정값으로 초기상태에서 하중이 단계적으로 증가함에 따라 병렬저항성분이 작아짐을 확인하였다. 출력의 변화는 다결정, 단결정 모듈의 경우 각각 최종적으로 -0,26%, -0,35%씩 감소하였고 저항의 변화는 -0,26%, -16,36%씩 감소하였다.

기계적 하중이 병렬저항성분의 변화에는 영향을 미치지 않지만 단기적인 모듈의 출력에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 이

변 실험을 통해서 알 수 있었다.

결론적으로 태양전지모듈에 기계적 하중이 인가되면 단기간 전기적 출력에 크게 영향을 미치지 않지만 태양전지의 병렬저항성분이 감소하여 모듈이 장기간 외부에 노출될 경우 내구성에 영향을 미칠 것이라 사료되며, 본 연구 결과물을 토대로 향후 지속적인 Field Test를 실시하여 태양전지 미세균열이 태양전지모듈의 수명에 미치는 영향을 증명하고자 한다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 연구비지원으로 수행되었습니다 (과제번호 : 2007-N-PV12-P01).

References

- [1] Deutsche Gesellschaft Fur Sonnen-energie, 2007, "Planing and installing photovoltaic systems", Earth scan Publications.
- [2] IEC 61215 2nd Edition, 2005, "Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic(PV) Modules - Design Qualification and Type Approval", International Standard.
- [3] G. Walker, M. A. Green, M. E. Watt and R. Corkish, 2007, "Applied Photovoltaics", Earthscan Publications.
- [4] 이재형, 임동건, 이준신, 2005, "태양전지원론(Principle of Solar Cell)", 흥릉과학출판사.
- [5] D. B. MARSHALL, B. R. LAWN, 1978, "Strength Degradation of Thermally Tempered Glass Plates", Journal of the American Ceramic Society, vol. 61, issue.1~2, pp. 21-27.
- [6] K. S. Kim, G. H. Kang, G. j. Yu, 2008, "The Analysis of Electrical Characteristics of PV Module according to Mechanical Load Test", Proceedings of the Korean Solar Energy Society Spring Annual Conference, pp. 247-251.
- [7] G.H.Kang, K.S.Kim, C.H.Park, G.J.Yu, H.K.Ahn, D.Y.Han, 2007, "Analysis on Maximum Output Power Characteristics of Crystalline Silicon Photovoltaic Module by Change of Environmental Effects", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 27, No. 3, pp. 23-28.
- [8] A. Skoczek, T. Sample, E. D. Duniop, 2009, "The Result of Performance Measurements of Field-aged Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", Vol. 17, No. 4, pp. 227-240.

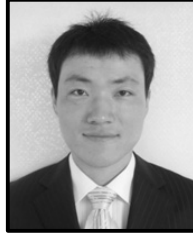
공 지 현



2008년 한밭대학교 전기공학과 공학사

현재 건국대학교 전기공학과 전기전자재료 및 센서 석사과정(2차)
(E-mail : kkongchi@konkuk.ac.kr)

지 양 근



2006년 우송대학교 컴퓨터전자정보공학부 공학사

현재 건국대학교 전기공학과 전기전자재료 및 센서 석사과정(2차)
(E-mail : ygji@kier.re.kr)

강 기 환



1993년 건국대학교 전기공학과 공학석사
2009년 건국대학교 전기공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 태양광연구단 선임연구원
(E-mail : ghkang@kier.re.kr)

김 경 수



2002년 GIST 신소재공학부 공학석사
2009년 충남대학교 신소재공학부 박사과정

현재 한국에너지기술연구원 태양광연구단 연구원
(E-mail : kskim@kier.re.kr)

유 권 종



1982년 조선대학교 전기공학과 공학사
1985년 일본 KOBE대학교 전기공학과 공학석사
1989년 일본 KOBE대학교 전기공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 태양광연구단 책임연구원
(E-mail : y-gj@kier.re.kr)

안 형 근



1985년 연세대학교 전기공학과 공학석사
1993년 Dept. of EE, University of Pittsburgh
공학박사

현재 건국대학교 전기공학과 교수
(E-mail : hkahn@konkuk.ac.kr)

한 득 영



1974년 연세대학교 전기공학과 공학석사
1984년 연세대학교 전기공학과 공학박사

현재 건국대학교 전기공학과 교수
(E-mail : dyhan@konkuk.ac.kr)