

기계적 하중에 따른 스트레스로 인한 PV 모듈의 전기적 특성

공지현*, 지양근*, 강기환**, 유권중** 안형근*, 한득영*

*건국대학교 대학원 전기공학과(kkongchi@konkuk.ac.kr),

**한국에너지기술연구원 태양광연구단(ghkang@kier.re.kr),

The Electrical Characteristics of PV Module by the Stress in accordance with Mechanical Weight Load

Kong, Ji-Hyun*, Ji, Yang-Geun*, Kang, Gi-Hwan**,
Yu, Gwon-Jong**, Ahn, Hyung-Geun*, Han, Deuk-Young*

*Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University(kkongchi@konkuk.ac.kr),

**Photovoltaic Research Group, Korea Institute of Energy Research(ghkang@kier.re.kr),

Abstract

If the Photovoltaic(PV) Module should get physical load, the PV module will be warped according to elongation of the front glass and then micro-crack will be occurred in the heat sealed Solar Cell. This micro-crack drops output of the short circuit current and the open circuit voltage of the PV Module. This is because of increase of resistance component by micro-crack. Micro-crack at specific Solar Cell in the module reduces the durability of PV Module such as less output, Hot-Spot in the PV module caused by Solar Cell output mismatch, heat generating as resistance component caused by micro-crack.

In this study, among some factors which effect to the output of crystalline PV Module, we will see how the micro-crack caused by mechanical stress effects to the electrical output of PV Module.

Keywords : 태양전지모듈(Photovoltaic(PV) module), 기계적 스트레스(Mechanical stress), 미세균열(Micro-crack),

1. 서 론

태양전지모듈(PV module)은 발전을 담당하는 태양전지를 외부의 기계·환경적 스트레스로부터 안전하게 보호하고 장기간 옥외에

서 수명을 다할 수 있도록 하기 위해 사용한다.

결정질 태양전지모듈을 구성 재료별로 살펴보면 지상용 모듈인 경우 전면유리(Front glass), 태양전지(Solar cell), EVA(Ethylene Vinyl Acetate), 후면 sheet 그리고 외장 알

루미늄 프레임(Frame)으로 나눌 수 있다. 전면유리는 투과율과 강도를 높이기 위해 저철분 열강화유리(Low iron tempered glass)를 사용하고, 적정용량에 맞춰 직·병렬로 연결시킨 태양전지를 EVA, 후면sheet와 함께 열봉합하여 제작한다. 지상용 태양전지 모듈은 전면유리와 후면 sheet만으로는 옥외에서 사용하기 부적합하므로 기계적으로 강도를 높이기 위해 알루미늄 프레임으로 측면을 보호하여 옥외에서 장기간 사용할 수 있도록 제작한다.

이렇게 제작된 태양전지모듈이 옥외에 노출된 경우 다양한 외부 스트레스를 주기적으로 받게 되는데 날씨별 계절 별 기온변화, 자외선, 바람, 우박 등의 복합적 스트레스에 장기간 노출되어진다.

태양전지모듈은 그 수명을 20년 이상으로 보고 한번 설치 이후 유지보수비용이 많이 들지 않는 것을 장점으로 한다. 그러나 옥외 발전을 하는 동안 결정질 태양전지의 경우 방향성을 지니고 있어 깨지기 쉬운 특성을 가지고 있기 때문에 기계·물리적 스트레스에 의해 눈에 보이지 않는 미세한 균열이 야기될 수 있다. 또한 시공과정 중에 설치자의 부주의로 인한 충격으로 위와 같은 현상이 나타날 수 있다. 그러한 이유로 다양한 환경에 노출된 태양전지모듈에서 많은 노화현상이 나타나고 그 수명과 출력이 저하된다고 보고되고 있다.

2. 연구 배경 및 목적

최근 들어 태양광시스템의 경우 대규모 태양광시스템이 증가함에 따라 전체 시스템에 사용되는 모듈의 양이 많아지고 있다. 시스템의 용량이 커질수록 각 모듈 간에 출력 부정합(mismatch)에 의한 불균일은 시스템 전체의 발전량을 많은 부분 떨어뜨리고 게다가 노화현상을 가속화시키기 때문에 태양전지 모듈의 수명을 단축하는 큰 요소로서 작용한

다. IEC 61215 결정질 태양전지모듈 인증규격에 기계적 하중시험을 시험항목을 포함하고 있으나, 실제로 Field에 설치되는 모듈은 다양한 기계적 스트레스에 노출되어 그 내구성이 재고되지 않았다.

본 논문에서는 태양전지모듈이 옥외에 노출되어 받을 수 있는 다양한 외부환경 요인 중에 기계적 하중을 태양전지모듈의 전·후면에 가해 미세균열(Micro-crack)의 발생여부, 이에 따른 전기적 출력변화와 노화의 가속에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

3. 본 론

3.1 태양전지

태양전지는 빛을 전기로 바꾸어 주는 전력 변환소자이다. 태양전지는 에미터(emitter)인 n층과 베이스(base)인 p층을 접합한 구조(p-n junction)로 만들어진다.

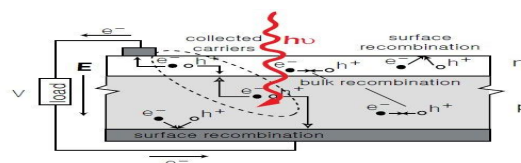


그림 1. 전자·정공 쌍의 생성

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 태양전지에서 외부회로로 이동하여 전력소자를 구동할 수 있게 한다. 입사되는 에너지는 반도체 물질의 밴드갭 에너지(E_g)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

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

k : 볼츠만상수(1.38×10⁻²³)
T : 절대온도[°C] n : 다이오드 지수
q : 전하량(1.6×10⁻¹⁹C) I_o : 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 같이 나타낼 수 있다. [1]

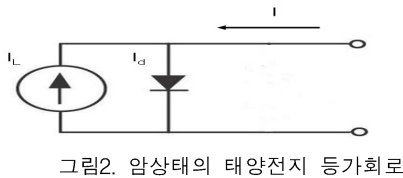


그림2. 암상태의 태양전지 등가회로

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

$$I = I_o \left[\exp \frac{qV}{nkT} - 1 \right] - I_L$$

여기서 I_L : 광전류 I_d : 다이오드전류

이를 수식으로 나타내면 식 (3)과 같이 표현하고 Dark상태에서 광생성 전류는 역방향이 되지만 태양전지에서는 이를 순방향으로 생각하여 태양전지 등가회로로 나타낸다.

3.2 태양전지 등가회로

빛이 조사될 때 태양전지의 등가회로는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 이상적인 경우 I_{PH}의 정전류원과 다이오드로만 구성되지만 실제로는 결함요소인 직렬저항과 병렬저항 성분이 존재한다.

이상적인 태양전지의 등가회로는 저항성분을 제외한 형태로 표현하지만 실제의 태양전지에서는 직·병렬저항 성분이 존재하기 때문에 내부에 저항성분을 표현하고 식 (4)과 같

이 나타낼 수 있다.

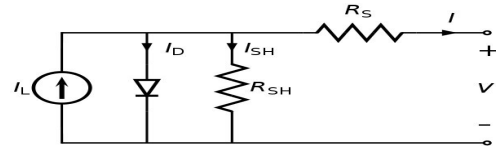


그림 3. 태양전지 등가회로

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

(4)

여기서 R_s : 직렬저항[Ω] R_{sh} : 병렬저항[Ω]

3.2.1 태양전지 병렬저항

태양전지의 병렬저항(shunt resistance : R_{sh}) 값은 무한대일수록 가장 이상적이거나 실제모델은 무한대 값이 아니므로 이로 인한 누설 전류로 인해 그림 3과 같이 태양전지의 p-n접합을 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 결정결함을 따라서 형성되는 미세한 금속 브리지들에 의해 나타난다.[2]

병렬저항의 다양한 결함요소 가운데 미세균열이 태양전지모듈에 나타난다면 병렬저항의 감소로 이어질 수 있고, 이는 태양전지모듈의 출력 및 내구성에 영향을 미치게 된다.

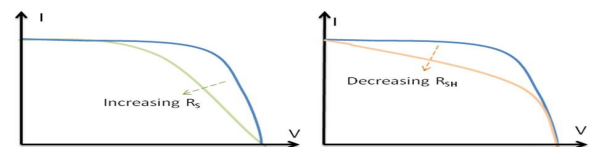


그림 4. 태양전지 저항성분에 의한 출력감소

3.3 실험

본 연구에서 결정질 태양전지모듈이 기계적 스트레스에 의한 전기적 출력의 영향을 파악하기 제작된 시료의 사양과 실험방법은 다음과 같다.

표 1. 각 모듈 제작사양

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

3.3.1 시료 제작 및 장치 사양

실험에 사용된 태양전지모듈은 표 1과 같이 다결정 모듈(P24) 경우 6inch 다결정(poly crystalline) 태양전지 24장을 series interconnection하고 3T 엠보싱 강화유리를 이용해 EVA와 Back sheet로 열봉합(lamination) 후 76W급 태양전지모듈(가로 : 70cm 세로 : 100cm)을 제작하였다.

그리고 laminator를 이용하여 fast cure type으로 열봉합 제작하였다.

단결정 모듈(S24)은 다결정 모듈과 같은 방법 및 열봉합 재료를 사용하였고 5inch 단결정(single crystalline) 태양전지 24장을 series interconnection하여 56W급 태양전지모듈(가로 : 59.5cm 세로 : 89.5cm)을 제작하였다. 여기에 두 사양 모듈 모두 기계적 강도를 더하기 위해 알루미늄 프레임을 각각 장착하였다.

3.3.2 기계 하중 시험 모델

태양전지모듈에 가해지는 기계적 스트레스 가운데 하중에 의한 무게로 인해 전면의 유리가 그림 6과 같이 휘어지게 되고 내부에 열봉합된 태양전지 또한 휘어지게 된다. 태양전지는 방향성이 존재하는 물질로서 충격이나 외력에 아주 취약한 특성을 지녀 이에 따른 미세균열이 야기될 수 있다.

일반적인 유리의 경우 표면에 보이지 않는 미세한 균열이 인장응력에 의해 성장해 파손이 일어나지만 강화유리(tempered glass)의

경우 보통의 판유리를 가열한 뒤 급랭시켜 유리의 결정을 치밀하게 만들어 강도를 증가시킨 유리이다. 이러한 강화유리는 균열 주위에 압축응력을 작용시켜 균열의 성장을 방해하는 응력분포의 변화를 유도한다. 강화유리의 표면 압축응력을 유도하는 방법은 전체를 유리의 전이온도(T_g) 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 유리 전이온도 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. [3]

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. [4]

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

ω = 유리의 최대 연신율(%)

l = 지지대 사이의 거리(m)

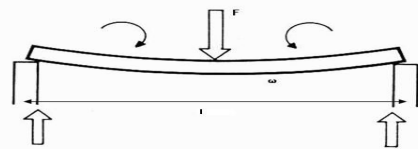


그림5. 기계적 하중에 의한 응력 발생

3.3.3 기계 하중 시험

태양전지모듈 시료에 기계 하중장치를 통

해 모듈표면에 일정한 기계적 스트레스를 인가하였다. IEC 61215 태양전지모듈 인증 기준인 2400Pa의 압력으로 전면과 후면을 각각 1시간씩 3회 반복하여 이후의 변화를 관찰하였고 보다 더 가혹한 시험환경을 위하여 3000Pa의 압력으로 같은 시간동안 하중을 가하여 변화를 관찰하였다.

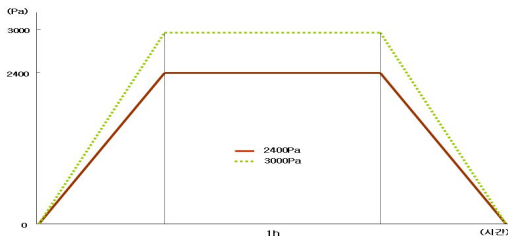
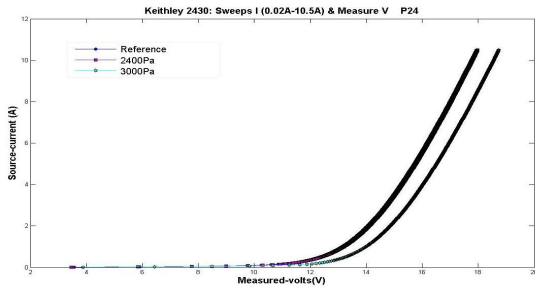
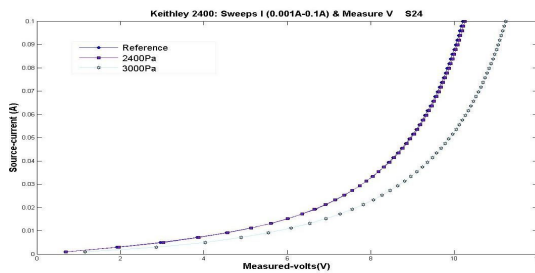


그림 6. 기계 하중시험



(a) P24



(b) S24

그림 7. 기계하중에 따른 Dark I-V Curve

3.3.4 기계적 하중에 따른 Dark I-V의 변화
그림 7에서와 같이 태양전지모듈 전면에 기계적 하중이 2400Pa, 3000Pa로 점차 증가함에 따라 저항성분이 줄어들어 기울기가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 2400Pa까

지는 큰 변화가 나타나지 않았지만 3000Pa로 하중이 높아지자 기울기의 변화가 나타났다. 이는 기계적 하중에 의해 태양전지 표면에 결함이 야기되어 병렬저항성분이 줄어드는 것을 유추할 수 있었다.

이 결함은 태양전지 표면의 미세한 균열이 발생했음을 나타낸다고 예상할 수 있다.

병렬저항성분의 감소는 태양전지에서 생성된 광전류의 미세한 양이 누설되어 내부에 머물면서 외부회로로 나가지 못하기 때문에 생성된 전자 정공 쌍은 내부에서 재결합되고 소멸되어 Fill factor와 내구성 감소에 영향을 끼칠 것이라 사료된다.

그림 7은 기계하중 시험 후 병렬저항성분의 변화를 나타낸다. 기계하중을 2400Pa로 시험 후 나타나는 각 파라미터 값은 뚜렷한 변화를 나타내지 않았다. 이후 3000Pa로 압력을 높여 시험한 파라미터 값에서는 태양전지모듈의 출력의 변화는 크게 영향을 끼치지 않았으나 Dark I-V curve 시험에서의 기울기의 변화와 같이 병렬저항의 성분은 감소함을 확인할 수 있었다.

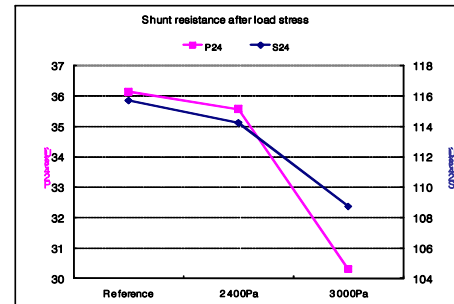
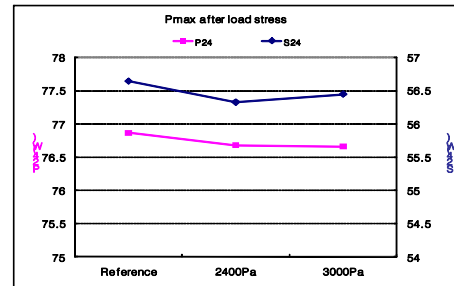


그림 8. 기계적 하중 시험 후의 출력변화 및 병렬저항의 변화

3. 결 론

이번 실험에서는 결정질 태양전지모듈 표면에 기계적 스트레스인 일정한 하중을 가하였을 때 전기적 특성의 변화에 대하여 분석코자 하였다. 태양전지모듈 전면에 하중을 단계적으로 증가시켜 태양전지모듈의 전기적 특성에 대한 영향을 Dark I-V를 이용하여 확인하였다.

본 실험을 통하여 태양전지모듈에 기계적 스트레스가 가해졌을 때 미세균열의 발생 유무를 병렬저항 성분을 통하여 예상하였으며 초기상태에서 하중이 0에서 2400, 3000Pa로 단계적인 증가에 따라 병렬저항성분이 작아짐을 확인할 수 있었다. 또한 Dark I-V에서도 기울기의 변화가 나타나 기계적 스트레스가 병렬저항성분의 변화에 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

향후 기계적 스트레스에 의한 미세균열이 장기적으로 모듈에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고 옥외노출시험에서 태양전지모듈의 노화에 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술 개발사업의 일환(2007-N-PV12-P-01)으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. G. Walker, M. A. Green, M. E. Watt and R. Corkish, "Applied PHOTOVOLTAICS", EARTHSCAN, 2007
2. 이재형, 임동건, 이준신, "태양전지원론 (Principle of Solar Cell)", 홍릉과학출판사, 2005
3. D. B. MARSHALL, B. R. LAWN, "Strength Degradation of Thermally Tempered Glass

- Plates", Journal of the American Ceramic Society vol 61 issue 1~2 pp 21~27, 1978
4. K. S. Kim, G. H. Kang, G. j. Yu, "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(5pages), 2008
5. Atmaram. G.H, Ventre, G.G, Maytrott. C.W, Dunlop. J.P, Swamy. R, "Long-term performance and reliability of crystalline silicon photovoltaic modules", Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, 13-17 May Page(s):1279 - 1282, 1996