

대면적 양면 태양광 모듈의 기계적 신뢰성 연구

노요한 · 유장원 · 이재형*

전기전자컴퓨터공학부, 성균관대학교, 수원, 16419

A Study on the Mechanical Reliability of Large-area Bi-facial Glass-to-glass Photovoltaic Modules

Yohan Noh · Jangwon Yoo · Jaehyeong Lee*

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

Received November 9, 2022; Revised December 8, 2022; Accepted December 16, 2022

ABSTRACT: For the high efficiency of the photovoltaic module, a high-output solar cell, which is the basis of photovoltaic power generation, is required. As the light receiving area of the solar cell increases, the light receiving area of the photovoltaic module also increases. Accordingly, recent trend is to use large-area solar cells such as M6 and M8 instead of M2-based solar cells for manufacturing the photovoltaic module and a study on the mechanical stiffness of the module with increased size is required. In this study, a mechanical load test corresponding to IEC-61215 was performed among the reliability tests of large-area photovoltaic modules. In order to confirm the degree to which the mechanical load test affects the photovoltaic module, the output and EL images were checked by sequentially increasing the pressure by 600 Pa at a pressure of 2400 Pa. Also, factors such as output and efficiency of large-area photovoltaic modules were verified through mechanical load testing of actual large-area photovoltaic modules and the rate of change was very small at 1%.

Key words: Bi-facial PV module, Mechanical load test, Electro luminescence

Nomenclature

P_c : 공압 실린더의 하중, N

A : 모듈의 면적, mm^2

S : 시험 압력, Pa

n : 공압 실린더의 수

I_{sc} : 단락전류, A

J_{sc} : 단락전류 밀도, mA/mm^2

V_{oc} : 개방 전압, V

FF: fill factor, %

Eff: efficiency, %

V_{pm} : 최대출력전압, V

I_{pm} : 최대출력전류, A

P_m : 출력, W

ISC: I. short circuit, A

VOC: open circuit voltage, V

Eff: efficiency, %

P_m : maximum power, W

PV: Photovoltaic

MLT: Mechanical load test

1. 서론

국내 통계에 따르면 온실가스 배출량은 COVID-19에 의해 2020년 가장 낮은 배출량을 보여주었지만, 2021년 온실가스 배출량은 다시 증가하는 추세를 보인다. 이러한 온실가스 배출량을 줄이기 위해서는 신재생 에너지의 개발 및 활용이 불가피한 상황이며 많은 관련 연구들이 진행되고 있다. 특히, 신재생 에너지 중에서 가장 지속적이고 현실적인 발전이 이루어지는 태양광 발전에 대한 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 이에 따라 태양광 모듈의 출력 및 발전량 또한 점진적으로 상승하는 추세다¹⁻³⁾.

Subscript

S : test pressure, Pa

*Corresponding author: Jaehyeong@skku.edu

태양광 모듈의 전력에 가장 많은 영향을 끼치는 것은 태양광 모듈 내부에 있는 태양전지이다. 전력 생산의 기초가 되는 태양전지의 고효율화는 태양광 모듈 출력의 감소 요인을 줄이는 것보다 커다란 영향을 끼친다^{4,5)}. 태양광 모듈의 효율을 높이기 위해 기존의 단결정 실리콘 웨이퍼의 M2 사이즈(156.75 mm * 156.75 mm)가 아닌 M6 사이즈(166 mm * 166 mm), 혹은 M10 사이즈(200 mm * 200 mm)의 실리콘 웨이퍼 기반의 대면적 태양전지 등을 이용한 대면적 태양광 모듈의 개발이 많이 진행되고 있으며, 면적이 증가함과 동시에 태양전지 자체의 기술이 발전하면서 고출력/대면적 태양전지가 개발되었다. 이러한 고출력/대면적 태양전지를 사용하여 태양광 모듈의 전체 전력이 상승하게 되었지만, 태양광 모듈을 구성하는 구성요소들의 대면적화가 이루어지고, 특히 강화유리의 내부응력 분포의 불균형이 더욱 심화된 형태를 띄게된다. 이러한 변화는 대면적 태양광 모듈의 기계적 특성에 큰 영향을 미치며 기계적 신뢰성 확보를 위한 연구가 필요하다⁶⁻⁸⁾.

본 연구는 대면적 양면 수광형 태양광 모듈(glass-to-glass)의 기계적 하중 시험(Mechanical load test)을 IEC-16215의 시험 조건에 준하여 진행했다. 규격에는 2400, 5400 Pa에서 만의 기계적 하중 시험을 요구하지만 최근 BIPV 시장의 확대와 고출력 태양광 모듈을 위한 대면적화에 대한 개발 및 연구가 심화되고 있으며, 단순 2400, 5400 Pa에서 만의 기계적 하중시험으로는 정확한 기계적 신뢰성 평가가 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 2400 Pa에서 600 Pa씩 증가시켜 태양광 모듈의 파손이 일어날 때까지 순서대로 진행하고, 시험 전/후의 대면적 태양광 모듈의 출력을 측정하고 대면적 양면형 태양광 모듈 내부의 태양전지의 상태를 전계발광(Electro-Luminescence) 측정을 통해 조사하였다. 이를 통해 대면적 양면형 태양광 모듈에 점진적인 기계적 하중이 태양광 모듈의 전기적 출력 및 태양전지에 미치는 영향을 확인했다.

2. 실험 방법

본 연구에서 태양광 모듈의 기계적인 특성을 확인하기 위해 IEC-61215의 기준에 따른 MLT 실험을 진행하였다. 본 연구에서 사용된 태양광 모듈(Q.PEAK DUO XL-G11.7 570-585, 한화큐셀, Korea)은 2mm 반사방지 유리(전면부)와 2mm 반강화 유리(후면부)에 사용되었고 양극 처리 알루미늄을 사용한 프레임 사용하였다. 태양광 모듈에 사용된 태양전지는 하프 컷 셀(166 mm × 85.5 mm)로 M6 사이즈의 태양전지를 반으로 분할된 셀을 사용하였다. 태양광 모듈의 출력변화를 확인하기 위해 STC(standard test condition, AM 1.5 G, 온도 25°C, 광량 1,000 W/m²)에서 솔라 시뮬레이터(DKSMT-1520SUL, DENKEN, Japan)를 사용하여 태양광 모듈의 기계적 시험 전/후의 출력을 파악하였다.

IEC-61215의 규격에 따르면, 모듈의 전면에 일정한 하중을 2400 Pa이 될 때까지 천천히 가하고 1시간 유지한다. 그 후, 후면에도 동일한 절차를 적용하고, 총 3 cycle을 진행한다. 2400 Pa은 돌풍에 대한 안전 계수 3을 더한 130 km·h⁻¹의 풍압에 해당하며, 설하중에 대한 하중은 5400 Pa로 증가시켜 시험해야 하며, 시험 후 모듈의 최대 출력 전력의 저하가 시험 이전에 측정된 값의 5%를 초과해서는 안 된다.

기계적 하중을 태양광 모듈의 전/후면에 균일하게 적용하기 위해 태양광 모듈의 면적에 따라 아래 식 (1)에 해당하는 하중 값을 Fig. 1과 같이 적용하였다. 본 MLT 시험은 2400 Pa 부터 600 Pa의 주기마다 대면적 태양광 모듈의 출력을 측정하여 기계적 하중을 가하기 전/후의 상태를 분석하였다.

$$P_c = \frac{A \times S}{9.8n} \text{ [Pa]} \quad (1)$$

P_c : 공압 실린더의 하중, N

A : 모듈의 면적, mm²

S : 시험 압력, Pa

n : 공압 실린더의 수

또한, 기계적 하중에 의한 내부 태양전지의 파손 양상 확인과 태양광 모듈의 출력에 변화를 확인하기 위하여 600 Pa의 주기마다 EL 검사를 진행하였다.



Fig. 1. Mechanical load test system in this study

3. 결과 및 고찰

전형적인 기계적 하중 시험의 경우 대면적 태양광 모듈의 임계 압력 이상 가해지면 내부의 태양전지가 파손되어 태양광 모듈의 출력 등의 성능인자들이 저하된다.

본 연구에서는 태양광 모듈에 기계적 하중을 2400 Pa 부터 600 Pa 마다 상승시켜가며 순차적으로 가했으나, 대면적 태양

광 모듈의 출력 및 성능 인자들의 감소는 미미했는데 이는 사용된 대면적 태양광 모듈에 기계적 하중을 점진적으로 증가시켜가며 시험을 진행했으나, 태양광 모듈 내의 태양 전지의 파손이 거의 일어나지 않았기 때문이다. 9000 Pa까지 기계적 하중을 태양광 모듈에 가했을 때, EL로 확인되는 태양전지의 파손 또는 태양광 모듈의 출력저하는 나타나지 않았으며, 9600 Pa의 기계적 하중을 가했을 때 태양광 모듈의 파손이 일어났다. Fig. 2는 기계적 하중 시험으로 9600 Pa의 힘을 가했을 때 파괴된 전면부의 태양광 모듈의 사진이다. 파괴된 태양광 모듈은 전면부 및 후면부의 유리가 모두 파손되어 출력 및 electro-luminescence를 측정하기 위한 모듈의 형태가 유지되지 못했으며, 유리의 파손은 알루미늄 프레임의 주변부에서 나타났다.

Table 1은 MLT 시험 전의 태양광 모듈 출력 및 각 성능 인자의 값을 나타내며, Fig. 3은 태양광 모듈의 기계적 하중을 가하기 전의 EL 사진이다. 태양광 모듈 제조사에서 제공하는 최대 출력

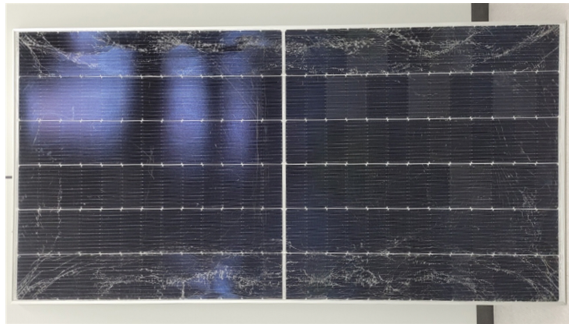


Fig. 2. Damaged PV module at applied pressure of 9600 Pa

Table 1. Bi-facial PV module parameter

Specification	Measured values (STC, Front)
Size (w×l×h)	2416 × 1134 × 35 (mm)
Pm [W]	565.82
Isc [A]	13.53
Voc [V]	52.88
Vpm [V]	44.02
Ipm [A]	12.85
FF [%]	79.06
Eff [%]	20.65
Jsc [mA/cm ²]	0.49

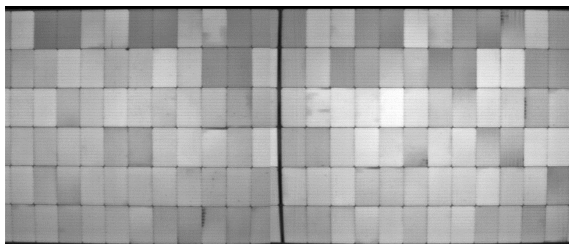


Fig. 3. EL image of bi-facial PV module

570 W에 가까운 565 W의 출력을 나타내었기 때문에, Fig. 3에서는 기계적 시험 전의 태양광 모듈이 약간 음영으로 표시된 태양전지가 있으나, 기계적 하중 시험 전의 태양광 모듈의 성능에는 이상이 없다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 2400 Pa부터 9000 Pa까지의 기계적 하중 시험 후의 EL 사진을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 2400 Pa의 힘이 가해진 태양광 모듈 내부의 태양전지가 9000 Pa의 힘이 가해진 모듈 내부의 태양전지와 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 기계적 하중 시험 이후의 태양광 모듈의 최대 출력(PM)을 나타낸 표이다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 태양광 모듈의 출력은 기계적 하중 시험 이후에도 데이터의 변화가 거의 일어나지 않았다. 또한, 2400 Pa의 기계적 하중을 가했을 때 태양광 모듈 전면부의 출력 측정값은 572.70 W이며, 9000 Pa의 기계적 하중을 가했을 때의 태양광 모듈 전면부의 출력 측정값은 572.81 W이다. 이는 기계적 하중이 2400-9000 Pa의 기계적 하중이 태양광 모듈에 가해져도 성능 차이가 거의 없음을 나타내며 그 변화율은 1% 이내로 상당히 미미함을 보인다.

본 연구에서 태양광 모듈의 기계적 특성에 가장 영향을 많이 끼친 것은 태양광 모듈 전면과 후면에 사용된 커버 글라스와 알루미늄 프레임으로 추정된다. 전면부와 후면부에 커버 글라스를 사용하는 방식은 기존의 태양광 모듈의 전면부에 커버글라스를 사용하고 후면부에 back sheet를 사용하는 것보다 기계적 특성이 좋기 때문이다. 기존의(glass-to-back sheet) 태양광 모듈은 전면부의 커버 글라스가 대부분의 기계적 하중을 받게 되기 때문에 태양전지에도 미치는 영향이 크다. 그러나 전면부와 후면부에 커버글라스를 사용하는 방식은 기계적 하중이 전면 커버 글라스뿐만 아니라 후면의 커버 글라스에도 가해지기 때문에 커버글라스를 단면에 사용하는 방식보다 양면에 사용되는 것이 기계적 특성이 높다.

4. 결론

본 논문에서 대면적 양면 수광형 태양광 모듈에 기계적 하중 시험을 2400-9600 Pa까지 600 Pa씩 증가시켜가며 진행하면서

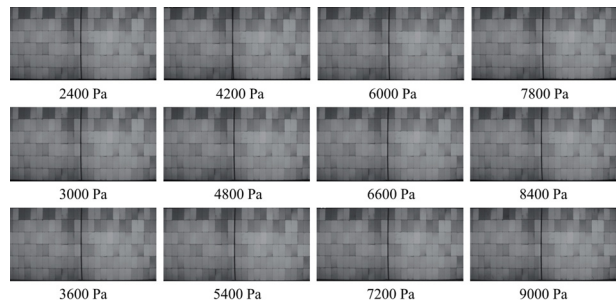


Fig. 4. EL images of bi-facial PV module after mechanical load test (2400 Pa - 9000 Pa)

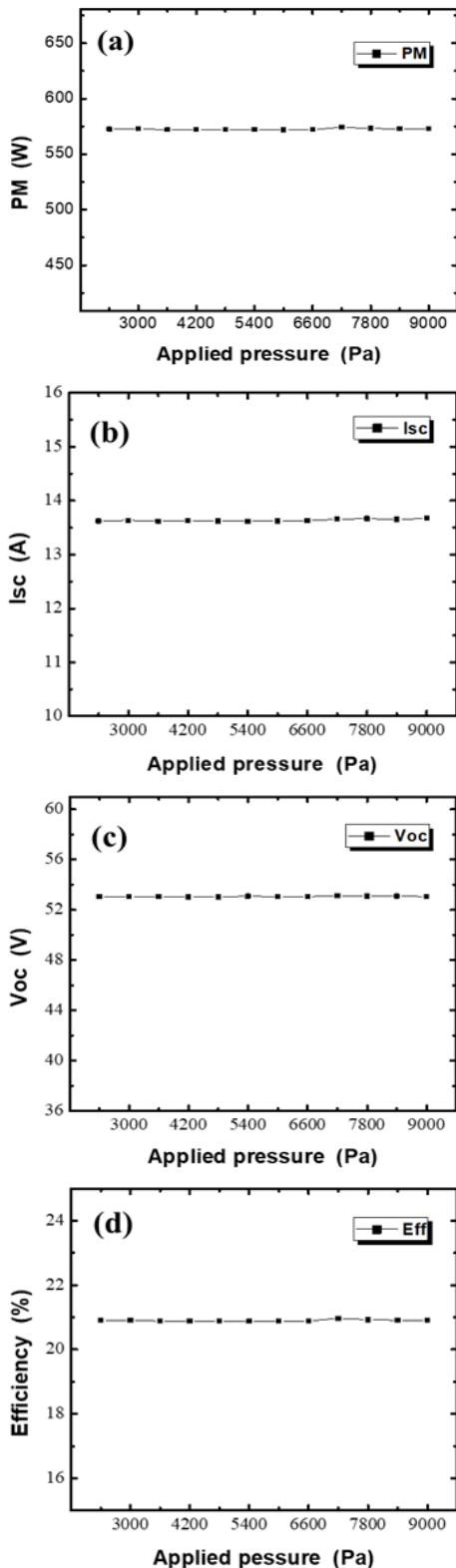


Fig. 5. Performance of bi-facial PV module according to mechanical load (a) PM, (b) Isc, (c) Voc, (d) Efficiency

태양광 모듈 내의 태양전지 파손양상 및 태양광 모듈의 출력에 대해 측정했다.

한화 큐셀에서 제작한 대면적 양면형 태양광 모듈(Q.PEAK

DUO XL-G11.7 570-585, 한화큐셀, Korea)을 사용하여 2400 Pa - 9000 Pa의 범위에서 기계적 하중 시험을 진행하였고 기계적 하중 적용 전과 후를 태양광 모듈의 출력 측정 및 EL 이미지를 통해 태양광 모듈의 출력 및 성능 인자의 변화를 분석한 결과 그 차이는 1% 이내로 거의 변화가 없었으며, 태양광 모듈 내의 태양전지에도 거의 파손이 일어나지 않음을 확인했다. 또한 9600 Pa의 기계적 하중을 태양광 모듈의 전면부에 적용 후 30분 진행 중 태양광 모듈의 커버글라스 부분이 파손됨을 확인했다.

Glass-to-glass 구조를 갖는 양면형 태양광 모듈은 glass-to-back sheet 구조를 갖는 양면형 태양광 모듈에 비해 기계적 강도가 매우 우수하고, back sheet에 비해 내화학성이 우수한 glass를 후면부로 사용하기 때문에 태양전지를 보호하는 역할도 잘 수행된다⁸⁾. 하지만 태양광 모듈 전체의 중량이 증가하여 시공 및 유지보수에 어려움이 발생할 수 있다. 따라서 고출력 태양광 모듈의 개발을 위한 대면적 양면형 태양광 모듈의 개발은 매우 중요하지만 경량화 기술 등 추가적인 연구 및 개발들도 병행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 ‘태양광 설치단가와 LOCE 경쟁력 확보를 위한 700W+ 고출력 모듈 개발 및 양산성 검증’(과제번호: 2022303001 0180)의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. C. H. Huang, L. D. Chih and S.J. Ho, “Assessing the reliability and degradation of ribbon in photovoltaic module,” PVSC IEEE 37th (2011).
2. J. Campbell, Y. Zemen, B. Richardson and B. Striner, “Photovoltaic module performance and degradation as compared in distinct climatic regions,” PVSC IEEE 38th (2012).
3. M. Aßmus, J. Steffen, K. A. Weiss and K. Michael, “Measurement and simulation of vibrations of PV-modules induced by dynamic mechanical loads,” Progress in photovoltaics research and applications, 19(6), 688 (2011).
4. S. K. Schröder, I. Kunze, U. Eitner and M. Köntges, “Spatial and orientational distribution of cracks in crystalline photovoltaic modules generated by mechanical load tests,” Solar energy materials and solar cells, 95(11), 3054 (2011).
5. M. Köntges, I. Kunze, S. K. Schröder, X. Breitmoser and B. Bjørneklett, “The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks,” Solar energy materials and solar cells, 95(4), 1137 (2010).
6. J. S. Park, W. J. Oh, J. H. Joo, J. S. Yi, B. Y. Hong and J. H. Lee,

- “Design of High-Power and High-Density Photovoltaic Modules Based on a Shingled Cell String,” *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 20(11), 6996 (2020).
7. W. J. Oh, J. S. Park, C. H. Jeong, J. H. Park, J. S. Yi and J. H. Lee, “Design of a solar cell electrode for a shingled photovoltaic module application,” *applied surface science*, 510, 145420 (2020).
8. Y. H. Noh, J. H. Jeong and J. H. Lee, “Structural analysis model to evaluate the mechanical reliability of large-area photovoltaic modules,” *Current Photovoltaic Research*, 10(2), 56 (2022).