태양전지 모듈의 신뢰성 평가

H. Tanaka¹ · 김근수^{2,*}

Reliability Evaluation for Photovoltaic Modules

Hirokazu Tanaka¹ and Keun-Soo Kim^{2,*}

(2012년 6월 5일 접수: 2012년 6월 9일 수정: 2012년 6월 11일 게재확정)

Abstract: Long-term reliability of Si photovoltaic modules is a crucial issue for the cost-reduction on the power-supply system. To elevate this reliability, several environmental tests have been created as qualification and certification procedures. This paper gives an overview about recent researches of reliability tests for Si photovoltaic modules.

Keywords: PV module, acceleration test, module performance, solder failure

1. 서 론

태양광 발전의 잉여전력 매입제도나 설치보조금 등을 제도적으로 시행하는 국가들이 늘어나면서 태양전지시스템의 세계시장이 크게 확대되고 있다. 주택 또는 건물용 태양전지시스템의 경우, 실외에 설치하여 20여 년간 사용하게 되므로, 태양전지 모듈은 높은 신뢰성과 긴 수명이 요구되고 있으며, 이를 뒷받침하기 위한 다양한 신뢰성 평가방법이 개발되고 있다. 본고에서는 실리콘(Si)계 태양전지 모듈의 신뢰성 평가 방법에 대해 살펴보고자 한다.

2. Si계 태양전지 모듈의 구조

하나의 태양전지(셀, cell)를 여러 개 연결한 것을 태양전지 모듈(module)이라고 하고, 일정의 전압과 전류를 얻는데 필요한 수만큼 모듈을 직렬 또는 병렬로 접속하여 배열한 것을 태양전지 어레이(array) 또는 패널(panel)이라고 한다. 전력용 결정 실리콘 태양전지 모듈의 구조는 일반적으로 슈퍼스트레이트(superstrate)로, 빛을 받는 면은 글라스 등의 투명기판을 지지기판으로 하고, 그 아래에 투명한 충전재료와 백 시트(back sheet)를 이용하여 태양전지를 봉입한 후, 주위에 틀을 만든다. Fig. 1에 범용 실리콘 태양전지 모듈의 구조를 모식적으로 나타내었다. 투명기판으로는 장파장 광을 활용하는 결정 실리콘 태양전지에 적절한 열강화 백색 글라스 등이 이용된다. 충전재료로는 내습성이 뛰어난 EVA(Ethylene Vinyl Acetate) 등이 이용되며, 방습접연을 위한 백 시트로는 알루미늄(Al)을 PVF(Poly-Vinyl Fluoride) 사이에 집어 넣은 샌드위치 구

Fig. 1. Interconnection structure of photovoltaic modules.

조의 시트가 이용된다. 모듈의 조립공정은 먼저 태양전지 셀들을 직렬병렬로 접속하고 백색 강화 글라스 상에 EVA 시트, 태양전지 셀, EVA 시트, 백 시트 순으로 쌓은 후, 라미네이트(laminate) 장비에 넣는다. 이 장비는 내부를 진공상태로 하여 가열하는 것으로, 가열에 의해 EVA 시트가 녹아 태양전지가 글라스에 붙게 된다.¹⁾ 이렇게 조립된 모듈은 전기전자 기기에서와 유사한 방식으로 수명 예측을 위한 신뢰성 시험을 거치게 된다.

3. Si계 태양전지 모듈의 신뢰성

Table 1은 태양전지 모듈의 환경 스트레스와 그로 인한 고장현상 및 고장 메커니즘에 대해 정리한 내용이다.²⁾ 태양전지 모듈은 주로 실외에서 사용하기 때문에 온도, 습

^{*}Corresponding author
E-mail: keunsookim@hoseo.edu

Table 1. Failure factors of photovoltaic modules.²⁾

열화인자(스트레스)	고장 매커니즘	주요 고장현상
- 열적 (온도, 습도) - 기계적 (열응력, 충격) - 전기적 (전압, 전류) - 광조사(자외선)	- 열피로 - 클립 - 산화 · 환원 (이온마이그레이션) - 전기분해 - 가수분해 - 용해 - 흡착 · 탈습 - 확산 - 마모 - 팽창 · 수축 · Swelling - 발열	- 직렬저항 증가 (전극박리) - 전극부식 - 백탁(봉지제-셀 간 박리) - 봉지(EVA) 변색 - 글라스, 셀 깨짐 - 쇼트 · 리크

Fig. 2. Test methods for photovoltaic modules.

도 뿐만 아니라 자외선에 의한 열화에 견뎌야 할 필요가 있다. 또한 모듈을 구성하는 각종 패키지, 충전재, 백 시트, 배선 등에 다양한 소재가 사용되고 있고, 각 소재가 모듈 전체의 신뢰성에 미치는 영향을 고려해야 한다. 사용 환경에서 스트레스에 의해 발생하는 고장현상 중에서 직렬저항 증가는 태양전지 모듈의 수명과 직결되는 현상이다. Fig. 2에 고장현상의 검토를 통해 적용할 수 있는 태양전지 모듈 시험법의 일례를 나타내었다. 직렬저항 증가에 의한 고장은 접합불량이 주 원인으로, 시험방법은 기계적 시험과 시장에서의 고장수명, 잠재적 결함 등의 문제점을 확인하는 열적 시험법으로 나눌 수 있다. 또한 열적, 습열적 시험과 광조사를 조합한 시험법도 이용되고 있다. 최근에는 보다 효과적인 신뢰성 시험방법을 개발하기 위한 다양한 접근이 이루어지고 있다.

일본 AIST(The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)의 태양광발전 연구센터는 민간 기업 31개사와 공동으로 “고신뢰성 태양전지 모듈의 개발 및 평가 컨소시엄”을 2009년 10월에 발족시켰다.³⁾ 태양광발전 기술연구조합과 9개의 단체가 협력기관으로 참

가하여 1년 6개월에 걸쳐 의견교환을 진행하였다. 태양전지 모듈의 신뢰성 향상과 장수명화를 위해, 화학업체, 부재업체를 중심으로 태양전지 모듈의 신뢰성, 수명의 지배적 요인인 모듈 주변 부재에 대해 검토하여 새로운 모듈 부재 및 구조의 유용성을 검증하였다. 특히 이 컨소시엄에서는 태양전지 모듈을 수년~수십 년간 실외에 노출시켜 태양전지 성능의 변화, 태양전지 모듈의 외관 및 사용 부재의 열화, 손상 등의 상태를 관찰하는 장기 실외노출 시험과 태양전지 모듈을 온도, 습도, 광조사 강도 등 인공적인 일정 조건에 노출시켜 태양전지의 성능 및 부재의 변화를 측정하는 가속열화 시험의 결과를 비교, 검토하였다.

가속열화 시험의 경우, 장기적인 실외노출 시험에 비해 단기간에 결과를 얻을 수 있어, 이미 국제전기표준회의(IEC: International Electrotechnical Commission)의 IEC-61215⁴⁾로 규격화 되어 있다. 이 규격에 의한 합격불합격 판정이 일반적인 인증시험 방법으로 시행되고 있으나, 열 사이클 시험조건이 -40~85°C 구간에서 50~200사이클로 규정되어 있어, 이 조건만으로는 장기간 사용 중에 발생하는 시장고장의 검출이 어려운 실정이다. 태양전지 모듈의 시장고장 중에서도 온도변화에 기인하는 열사이클 피로는 모듈의 직렬저항 증가를 일으켜 모듈의 발전출력에 현저한 영향을 미치는 중요한 고장모드이다. 한편, 평가방법의 관점에서 보면 시장에서의 열화와의 상관성으로부터 종래의 온도사이클 시험으로는 400~1500 사이클 정도가 필요하다고 보고되고⁵⁾ 있어, 3개월 이상의 시험기간이 필요하여, 제품개발이 단기화되고 있는 경향을 반영하면 현실적이지 못한 시험법이라고 할 수 있다.

4. Si계 태양전지 모듈의 고장현상과 평가방법

전고⁶⁾에서 전자패키지의 다양한 신뢰성 평가기술에 대해 소개하였다. 본고에서는 고 신뢰성 태양전지 모듈의 개발 및 평가 컨소시엄 활동³⁾의 일환으로 진행된, 태양전

Table 2. Test conditions of photovoltaic modules.

평가샘플	셀	다결정 Si 셀 (100 mm×100 mm)
	모듈	셀 수: 9 셀간 접속: Sn-Pb solder
스트레스	시험방법	열사이클 시험: -40~+85°C 온도변화율 = 약 400°C/h, 500 사이클
고장검출	측정방법	전기저항치 측정, 전류-전압 특성측정
	해석방법	열 카메라에 의한 열해석, 단면관찰

Fig. 3. Four-terminal resistance measurement system.^{7,10)}

지 모듈의 고장현상 및 시험방법과 단기간에 열피로 수명을 평가하는 방법에 대한 연구 중에서, 스트레스 강도를 높인 열 사이클 시험 (급속 온도사이클 시험)에 의한 태양전지 모듈의 가속시험 평가사례⁷⁻⁹⁾를 간략히 소개하고자 한다.

Table 2에 본 연구에 사용한 시험편과 시험조건을 나타내었다. 시험편은 다결정 실리콘 태양전지 셀 9개를 접속한 태양전지 모듈을 이용하였다. 솔더는 Sn-Pb, 봉지재는 EVA, T/P/T(Tedlar®/Polyester/Tedlar®) 백 시트를 이용하였다. 태양전지 모듈의 열사이클 시험은 급속 열사이클 챔버(ESPEC, TSA-101S)를 이용하였으며, 시험온도 구간은 봉지재의 변성온도를 고려하여 90°C 이하로 하여, IEC-61215와 같은 -40~85°C로 설정하였다. 스트레스 강도는 IEC-61215에 설정된 온도변화율(100°C/h 이하)과 비교하여 급속한 온도변화율(약 400°C/h)를 적용하여 높게 설정하였다. 또한 시험사이클 수는 500 사이클로 실시하였다. 시험 중의 전기저항의 측정은 4단자법^{7,10)}을 이용하여 태양전지 모듈의 직렬저항치를 1분당 1회로 연속측정(ESPEC, AMR-040-PA)하여 열화거동을 확인하였다(Fig. 3). 시험 전후의 태양광 발전성능을 비교하기 위해 솔라 시뮬레이터(solar simulator: SPI-SUN Simulator, Spire, 1116N)로 전류전압 특성(I-V 특성)을 측정하였다. 또한 고장원인을 조사하기 위해 서모 카메라(thermo camera: Thermo Tracer, NEC Avio, TVS-500)를 이용하여 발열 부분의 위치를 탐색하였다.

Fig. 4에 열사이클 시험 중의 전기저항의 변화를 나타내었다. 전기저항의 증가는 200 사이클 전후에서 나타나, 300 사이클 부근에서 완전히 오픈 상태가 되었다. Fig. 5에 솔라 시뮬레이터로 측정한 열사이클 시험 전후의 전류전압 특성을 비교하여 나타내었다. 전기저항치가 증가한 500 사이클 후는 시험 전과 비교하여 최대출력 (Pmax)

Fig. 4. Impedance change during rapid thermal cycle test.⁷⁾ **Fig. 5.** Module performance change.⁷⁾ **Fig. 6.** Infrared imaging of defected module.⁷⁾

이 37% 저하했음을 알 수 있다. IEC-61215에 설정된 온도변화율(100°C/h 이하)로 시험한 경우, 4%(500~1500사이클)¹¹⁻¹²⁾ 또는 8%(400 사이클)¹³⁾ 저하된다는 보고가 있어, 급속 온도사이클 시험이 더 가혹한 시험법임을 알 수 있다.

고장원인을 조사하기 위해 서모 카메라를 이용하여 발열부위를 탐색하였다. 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 셀을 연결하고 있는 인터커넥터의 솔더 접합부에서 발열이 검출되었다(Fig. 6에서 흰색으로 나타난 부분). 발열의 원

Fig. 7. Cross sectional image of defected module after thermal cycle test.

Fig. 8. Enlarged images of Fig. 7.

인을 찾기 위해 온도상승부위의 단면 조직 관찰을 실시하였다. Fig. 7과 8에 그 결과를 나타내었다. 셀과 인터커넥터 사이의 솔더 접합부에서 부분적인 박리가 관찰되었다. 자세히 살펴보면(Fig. 8), Ag 전극층과 솔더 계면 부근에서 박리되었음을 알 수 있다. 따라서 열사이클 시험에서 발생하는 열화의 주 요인은 솔더 접합부의 열피로 파괴로 추정된다. 이 결과는 열사이클 시험을 이용하는 경우에 시공장고장과 연관되는 가속시험 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 급속 온도사이클 시험법은 종래의 시험에 비해 태양전지 모듈의 열피로 수명을 단기간에 평가할 수 있는 새로운 방법으로 제안되었다.

5. 결 론

그린 에너지 확보에 대한 인식이 높아지면서 태양광발전 산업은 큰 폭의 성장세를 이어가고 있다. 태양광발전 시스템에 대한 수요가 늘어나면서 제품개발의 단기화가 요구되고 있어 높은 신뢰성을 확보하기 위해서는 고장을 초기에 판단하여 미연에 방지하는 기술이 중요하다. 본 고에서는 태양전지 모듈의 신뢰성 평가사례로 시험 중의 전기적 특성을 연속 모니터링 함으로서 셀과 인터커넥터의 솔더 접합부 고장을 판단하고, 스트레스 강도를 높여 종래의 규격시험에 비해 단기간에 열피로 수명을 평가할 수 있는 방법에 대해 소개하였다. 태양광 모듈의 장기 신뢰성 확보와 보다 정확한 수명예측을 위해서는 신뢰성 평가를 위한 다양한 접근이 필요한 시기이다.

감사의 글

본 연구의 일부는 방위사업청의 민군규격통일화사업 “일본 무연솔더 적용실태 및 대응방안” 연구과제 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Economic and Social Research Institute, Cabinet Office, Government of Japan, “総合的な経済・エネルギー・環境分析に資する技術情報の整備のための研究 (In Japanese), from <http://www.esri.go.jp/jp/archive/hou/hou040/hou031.html> (2007).
2. S. Igari and K. Morita, “Reliability of Photovoltaic Modules” (In Japanese), J. Reliability Engineering Association of Japan, 30(1), 16 (2008).
3. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), “高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」を設立” (In Japanese), from http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20091021/pr20091021.html, (2009).
4. IEC 61215, “Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules –Design qualification and type approval”, International Electro-technical Commission, (2005).
5. C. R. Osterwald and T. J. McMahon, “History of Accelerated and Qualification Testing of Terrestrial Photovoltaic Modules: A Literature Review”, Prog. Photovoltaics: Research and Applications, 17(1), 11 (2009).
6. H. Tanaka and K. S. Kim, “Introduction of Reliability Test Technology for Electronics Package” (In Korean), J. Microelectron. Packag. Soc., 19(1), 1 (2012).
7. Y. Aoki, M. Okamoto, A. Masuda and T. Doi, “Module Performance Degradation with Rapid Thermal-Cycling”, Proc. Renewable Energy 2010, Yokohama, Japan, International Solar Energy Society (2010).
8. Y. Aoki, M. Okamoto, A. Masuda, T. Doi and T. Tanahashi, “Early Failure Detection of Interconnection with Rapid Thermal-Cycling in Photovoltaic Modules”, Proc. 2012 NREL PV Module Reliability Workshop, Golden, USA, National Renewable Energy Laboratory (2012).
9. Y. Aoki, M. Okamoto, A. Masuda, T. Doi, “Performance Degradation of Photovoltaic Modules with Rapid Thermal-Cycling”, IEICE Technical Report. R, 110(298), 5 (2010).
10. K. S. Kim, K. J. Lee, K. Suganuma and S. H. Huh, “Effect of Cl Content on Interface Characteristics of Isotropic Conductive Adhesives/Sn Plating Interface” (In Korean), J. Microelectron. Packag. Soc., 18(3), 33 (2011).
11. J. H. Wohlgemuth *et al.*, “Long term reliability of photovoltaic modules”, Proc. 4th World Conference on PV Energy Conversion, Hawaii, 2050-2053, IEEE Electron Devices Society (USA) (2006).
12. J. H. Wohlgemuth *et al.*, “Using accelerated tests and field data to predict module reliability and lifetime”, Proc. 23rd European PVSEC, Valencia, 2663-2669, (2008).
13. C. R. Osterwald *et al.*, “Forward-biased thermal cycling: a new module qualification test”, Proc. NCPV Program Review Meeting 2000, Denver, 65-66, National Renewable Energy Laboratory (2000).

- Horikazu Tanaka (田中浩和)
- ESPEC CORP.
- 신뢰성공학, 금속부식공학, 전기화학공학
- E-mail: h-tanaka@espec.co.jp

- 김근수 (金謹錫)
  - 호서대학교 융합기술연구소
  - 무연 패키징, 인쇄전자
  - E-mail: keunsookim@hoseo.edu
-