ARTICLE

ETFE 필름을 적용한 태양광 모듈의 전기적 출력 및 신뢰성에 관한 연구

신우균* · 임종록 · 고석환*** · 강기환*** · 주영철** · 황혜미***†**

*한국에너지기술연구원 신재생에너지 연구소 태양광연구단, 연구원
**한국에너지기술연구원 신재생에너지 연구소 태양광연구단, 선임연구원
***한국에너지기술연구원 신재생에너지 연구소 태양광연구단, 책임연구원

Electrical Output and Reliability of Photovoltaic Module Using Ethylene Tetrafluoroethylene Film

Shin Woogyun* · Lim Jongrok · Ko Sukwhan*** · Kang Gihwan*** · Ju Youngchul** · Hwang Heymi***†**

*Researcher, Photovoltaics Research Department, New and Renewable Energy Institute, Korea Institute of Energy Research
**Senior Researcher, Photovoltaics Research Department, New and Renewable Energy Institute, Korea Institute of Energy Research
***Principal Researcher, Photovoltaics Research Department, New and Renewable Energy Institute, Korea Institute of Energy Research

†Corresponding author: hyemi@kier.re.kr

Abstract

As the supply of photovoltaic (PV) increases worldwide, the cumulative installations in 2018 were 7.9 and 560 GW in Korea and the world, respectively. Typically, when the ground on commercial PV modules is installed, the area is limited; hence, new designs of PV modules are required to install additional PVs. Among the new design of PV modules, lightweight PV modules can be utilized in PV systems, such as buildings, farmlands, and floating PV. Concerning the investigation of lightweight PV modules, several studies on materials for replacing low-iron tempered glass, which comprises approximately 65% of the PV module weight, have been conducted. However, materials that are used as substitutes for glass should possess similar lightweight properties and reliability as glass. In this study, experimental tests were performed to evaluate the applicability of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) film with excellent resistance to water and aging as a front material of PV modules. The transmittance and ultraviolet properties of the ETFE film were determined and compared with those of glass. A 1-cell module and laboratory-scale 24-cell module were manufactured using the ETFE film and glass, and the electrical output was measured and analyzed. Furthermore, damp heat and thermal cycle tests were conducted to evaluate the reliability of the ETFE film module. Based on the experimental results, the electrical output and reliability of the ETFE film module were similar to those of the glass module, and the ETFE film could be used as the front material of PV modules.

Keywords: 결정질 태양광 모듈(c-Si PV module), 경량화 태양광 모듈(Lightweight PV module), ETFE 필름(ETFE film), 전기적 출력(Electrical Output), 신뢰성(Reliability)

OPEN ACCESS

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.40, No.4, pp.13-22, August 2020
https://doi.org/10.7836/kses.2020.40.4.013

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 10 July 2020

Revised: 20 August 2020

Accepted: 21 August 2020

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

국내 태양광 설치량은 정부의 신재생에너지 3020 정책에 힘입어 2018년에 약 2 GW가 설치되었으며, 누적 설치 량은 7.9 GW로 전 세계에서 10번째로 태양광이 많이 설치되었다. 국내뿐만 아니라 전 세계 누적 태양광 설치 량도 2018년 말 약 560 GW가 설치되었다[1]. 하지만 지상에 설치되는 태양광은 면적에 한계가 있어 건물, 수상, 영농 등 다양한 형태의 태양광 시스템이 개발 및 설치되고 있다. 일반적으로 지상에 설치되는 태양광 모듈은 전면에 저철분 강화 유리를 사용하여 제작된다. 저철분 강화 유리는 모듈의 전면 재료가 가져야하는 높은 투과율 및 신뢰성을 가지고 있지만 무게가 무겁다는 단점이 있어 건물, 영농, 수상 등 다른 형태의 태양광 시스템에 널리 적용되기에는 어려움이 있다. 태양광 모듈의 무게가 줄어들면 기존에 설치가 불가능한 지붕에도 설치가 가능하여 태양광의 설치와 보급이 확대될 것으로 예측되므로 태양광 모듈의 경량화는 반드시 필요하다[2].

태양광 시스템의 경량화는 박막형 태양광 모듈을 이용한 연구가 주로 수행되었으며[3-6], 무게가 가볍기 때문에 다양한 접착 방법도 함께 연구되었다[7,8]. 하지만 최근에는 신뢰성과 전기적 출력이 우수한 결정질 태양광 시스템에서 유리를 제외한 경량화 태양광 모듈을 적용하는 태양광 시스템이 연구 개발 되고 있다[9,10]. 경량 태양광 시스템은 무게가 가볍기 때문에 설치 시간 및 노동력이 줄어들어 설치 단가가 줄어드는 효과가 있다[11,12]. 이러한 장점 때문에 기존의 무거운 태양광 시스템의 구조물과 고정 축 대신 이를 가볍게 만들고자 하는 연구가 진행되고 있다. 또한 결정질 태양광 모듈의 전면 유리를 사용하지 않게 되면 기계강도를 확보하기 어려워 모듈의 후면에 샌드위치 판넬, GFRP (Glass Fiber Reinforce Polymer) 등을 적용한 태양광 모듈에 대한 연구가 진행 중이다. 하지만 이러한 연구들은 태양광 시스템의 구조물과 후면에 기계강도 보강을 위한 연구일 뿐 전면 재료에 대한 특성과 신뢰성 확보에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다. 일반적으로 결정질 태양광 모듈의 전면 재료는 저철분 강화유리를 사용한다. 하지만 경량화를 위해서는 유리가 아닌 다른 물질이 적용되어야 하므로 전면 재료에 대한 특성 분석은 반드시 필요하다. 태양광 모듈의 전면 재료는 투과율이 높을수록 모듈의 전기적 출력이 높아지게 된다. 투과율이 낮을 경우에는 빛을 대부분 흡수하기 때문에 광 생성 전류가 낮아지게 되는 것이다. 또한 태양광 모듈의 수명인 약 20년 동안의 정상적인 발전을 위해서는 옥외의 급변하는 온도(여름철과 겨울철), 높은 자외선 및 습도 등을 견뎌내야 한다. 따라서 신뢰성이 확보되지 않은 태양광 모듈은 가혹한 옥외 환경에서 출력이 급격히 떨어지므로 모듈의 전면 재료는 투과율뿐만 아니라 UV, 투습성 등과 같은 우수한 신뢰성 확보가 필요하다.

이에 본 논문에서는 다양한 필름 계열 소재 중 ETFE (Ethylene Tetrafluoroethylene) 필름의 태양광 모듈 전면 소재로서의 적용 가능성 여부를 확인하기 위한 필름의 신뢰성 평가 실험 및 소재특성 분석을 수행하였다.

일반적으로 ETFE 필름은 부식과 온도 변화에 대해 강한 저항력과 비교적 높은 용융점을 가지고 있으며 가볍고 유연하다는 특징이 있다[13,14]. 하지만 태양광 모듈의 전면 재료로써 적용을 위해서는 유리와 동등한 수준의 투과율, UV 특성, 신뢰성이 필요하다. 이를 확인하기 위해 ETFE 필름과 저철분 강화 유리의 소재 특성과 전기적 출력 및 신뢰성을 비교하는 실험을 수행하였다. 먼저, ETFE 필름과 저철분 강화유리의 투과율 및 UV 특성을 분석하여 전면 소재로써의 소재 특성을 분석하였다. 다음으로 1 cell 및 lab scale의 24 cell 모듈을 제작하여 유

리 모듈과 ETFE 모듈의 전기적 출력을 측정하였으며, Damp Heat 및 Thermal Cycle 시험을 실시하여 신뢰성을 평가하였다.

2. ETFE 필름의 광학적 특성 분석

2.1 EFTE 필름의 투과율 분석

태양광 모듈은 유리, 봉지재, 태양전지, 백시트 등을 하나의 모듈로 제작한 것으로써, 빛 에너지를 이용해 전기 에너지를 생산한다. 따라서 태양광 모듈의 전면 물질은 최대한 많은 빛을 손실 없이 투과시키는 특성이 있어야 한다. 일반적으로 모듈의 전면 재료는 투과율이 우수한 저철분 강화유리를 사용하고 있다. 하지만, 태양광 모듈의 경량화를 위해서는 모듈 무게의 약 65%를 차지하는 유리를 대체할 수 있는 물질이 필요하다. 대체 물질은 유리보다 가벼우며, 유리와 동등한 수준의 투과율을 가지고 있어야 한다. ETFE 필름은 유리를 대체할 수 있는 필름 계열 소재로써 태양광 모듈에 적용하기 전 소재의 특성을 분석하였다. Table 1은 유리와 ETFE 필름의 무게, 두께, 투과율을 나타낸다. 실험에 사용된 ETFE 필름은 S사 제품이며, 투과율 측정 장비는 J사의 V-670 UV-spectrometer를 사용하였다. 그리고 무게와 두께는 각각 정밀 저울과 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다. 실험의 재현성을 확보하기 위해 각 시료는 5회 이상 측정을 하였으며, 측정 재현성은 0.1% 미만으로 매우 우수하였다.

Table 1 Characteristic of Low ion tempered glass and ETFE film

	Weight[g/cm^2]	Product Thickness[mm]	Transmittance average[%] (300-1200 nm)
Glass	0.875	3.2	95.4
ETFE Film	0.009	0.5	94.1

실험 결과 ETFE 필름의 투과율은 94.1%로 저철분 강화 유리에 비해 1.3% 낮았지만 동등한 수준임을 확인하였다. 하지만 무게는 약 97배 가벼우며 두께는 약 6배 정도로 얇아 태양광 모듈의 경량화에 적용 가능할 것으로 판단된다.

2.2 ETFE 필름의 UV 특성 분석

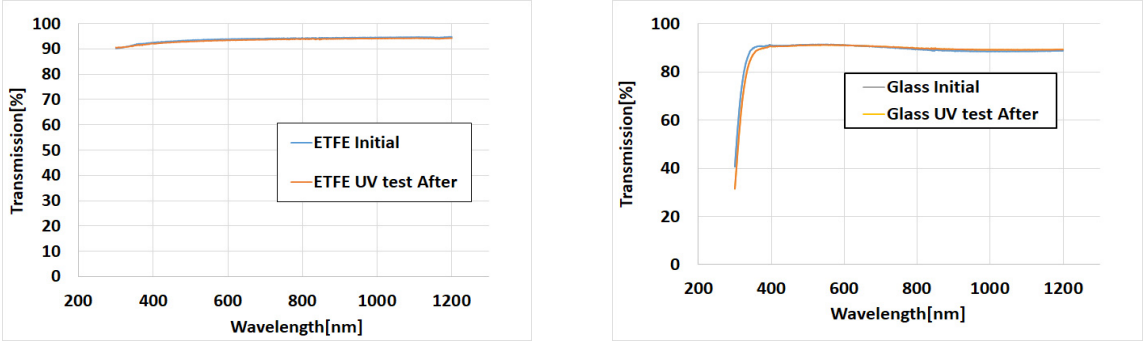
옥외에 설치되는 태양광 모듈은 태양에서 나오는 모든 파장의 빛에 영향을 받게 된다. 결정질 실리콘 태양전지의 경우, 300 nm ~ 1100 nm의 파장의 빛 에너지만 전기 에너지로 전환되며, UV (Ultra Violet) 파장(280 nm ~ 400 nm)은 발전에 기여하지 못하고 태양광 모듈의 전면 재료의 특성을 변화를 발생시켜 출력 및 신뢰성을 저하시킨다[15]. 그러므로 태양광 모듈의 전면 재료로 사용되기 위해서는 UV 시험이 수행되어야 한다. KS C 8561의

UV 시험 기준(280 nm ~ 385 nm, 15 kWh/m^2)에 의거하여 유리와 ETFE 필름의 UV 시험 전, 후 특성을 측정 및 분석하였다. Fig. 1은 UV 시험 이후의 각 시료이며, UV 시험 이후에도 ETFE 필름은 유리와 같이 변색이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다.

(a) ETFE film (b) Glass

Fig. 1 ETFE film and glass after UV test

Fig. 2는 UV 시험 전, 후의 유리와 ETFE 필름의 투과율을 측정한 결과이다. 400 nm ~ 1200 nm에서 ETFE 필름의 투과율은 1% 미만으로 변화가 거의 발생하지 않았으며, 유리 또한 차이가 거의 발생하지 않았다. UV 실험 결과, ETFE 필름은 UV에 대한 특성이 유리와 동등 수준임을 확인하였다.



(a) Transmittance of ETFE film before and after UV Testing (b) Transmittance of Glass before and after UV Testing

Fig. 2 Transmittance of ETFE film & Glass before and after UV Testing

3. ETFE 필름 태양광 모듈의 전기적 출력 및 신뢰성 분석 실험

3.1 ETFE 필름 태양광 모듈의 전기적 출력 분석

앞 장에서는 ETFE 필름을 적용한 태양광 모듈을 제작하기 전에 ETFE 필름의 소재 및 UV 특성을 측정 및 분석하였다. 실험 결과, ETFE 필름은 유리보다 매우 가벼우며 투과율 및 UV 특성이 유리와 동등한 수준임을 확인하였다. 본 장에서는 ETFE 필름을 적용한 태양광 모듈을 제작하여 전기적 출력 및 신뢰성 실험을 하였다. 먼저, 1 cell 모듈을 제작하여 ETFE 필름이 일반적으로 태양광 모듈의 봉지재로 사용되는 EVA (Ethylene-vinyl

Acetate)와 접착여부를 확인하고, 1 cell 유리 모듈과 출력을 비교하였다. 다음으로, lab scale의 24 cell 모듈을 제작하여 신뢰성 시험(Thermal Cycle 200, Damp Heat 1000 h)을 실시하여, ETFE 필름의 전면 소재로의 적용 가능성을 최종 분석하였다. 실험에 사용된 태양전지는 S사의 Aluminum Back Surface Field (Al-BSF) 구조의 3 Bus Bar 다결정 태양전지이다. 태양전지의 전기적 출력은 class AAA의 솔라 시뮬레이터, 온도는 25℃, Reference Cell의 전류 값 변화는 0.05 A 이내의 환경에서 측정하였다. 측정된 태양전지 간 출력 차이를 최소화하기 위해 Sorting을 실시하였으며, 출력 편차는 1%미만이었으며, 전기적 파라미터의 평균값은 Table 2와 같다.

Table 2 Electrical output of measured solar cell

P_{max}[W]	V_{oc}[V]	V_{mp}[V]	I_{sc}[A]	I_{mp}[A]	FF[%]	Eff[%]
4.41	0.635	0.540	8.6	8.2	80.2	17.95

ETFE 필름을 적용한 모듈은 일반 태양광 모듈의 구조인 유리/EVA/태양전지/EVA/Bach sheet 구조에서 전면만 다르게 하여 제작하였다. 모듈 제작에 사용된 EVA, Back Sheet는 동일한 제품을 사용하였으며, Lamination 공정도 동일하게 진행하였다. Fig. 3은 제작된 1 cell 모듈을 나타낸다.

(a) Glass 1 cell PV module (b) ETFE Film 1 cell PV module

Fig. 3 1 cell PV module according to front material

출력 측정 결과, 저철분 강화유리를 사용한 태양광 모듈의 단락 전류는 9.2 A였으며, ETFE 필름을 사용한 태양광 모듈의 단락 전류는 8.9 A로 ETFE 필름 모듈의 단락전류가 0.3 A 낮았다. 앞 장에서 ETFE 필름의 투과율은 유리에 비해 1.3% 낮았는데 이와 같은 투과율 차이로 인해 ETFE 필름 모듈의 출력이 낮아진 것이다. 개방 전압은 0.635 V로 두 모듈이 같았으며, 충진율(FF)은 0.3% 차이로 유사하였으며, 출력은 0.1 W 차이였다. 이로부터 ETFE 필름을 적용하여도 유리 모듈과 동일한 수준의 출력 특성을 확보할 수 있음을 확인하였다. Table 3은 측정된 1 cell 모듈의 전기적 출력 특성을 나타낸다.

Table 3 Electrical output of 1 cell PV module according to Glass and ETFE film

	V_{oc}[V]	I_{sc}[A]	P_{max}[W]	FF[%]	R_S[Ω]
Glass	0.635	9.2	4.3	73.9	0.01
ETFE Film	0.635	8.9	4.2	74.2	0.01

태양광 발전소에 설치되는 모듈은 태양전지의 낮은 전압을 높이기 위해 60 또는 72개의 태양전지를 직렬로 연결하여 제작된다. 따라서, 실제 태양광 모듈로써의 평가를 위해서는 ETFE 필름을 적용한 태양광 모듈을 대면적화하여 출력 및 신뢰성을 확인하여야 한다. 본 논문에서는 유리 및 ETFE 필름 모듈을 Lab-scale 크기인 24 cell 모듈로 제작하였다. 하지만, 전면 소재로 필름 계열을 사용하는 경우 모듈 제작 이후 처짐 현상이 발생하여 크랙이 발생하게 된다[16]. 이러한 이유로 제작된 모듈의 전기적 출력 및 신뢰성 비교가 어렵기 때문에 24 cell ETFE 필름 모듈은 후면에 유리를 붙여 처짐 현상을 방지하였다. Fig. 4는 제작된 24 cell 유리 모듈과 ETFE 필름 모듈을 나타낸다.

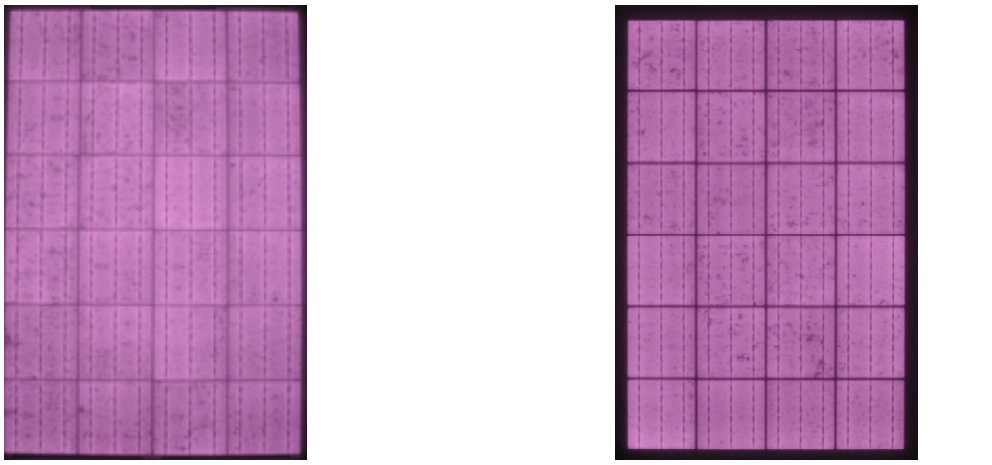
(a) Glass 24 cell PV module (b) ETFE film 24 cell PV module

Fig. 4 24 cell PV module according to Glass and ETFE film

제작된 24 cell 유리 및 ETFE 필름 모듈의 전기적 출력은 Table 4와 같다. ETFE 필름 모듈과 유리 모듈의 출력 차이는 0.2 W 차이로 1 cell 모듈에서 출력 차이와 유사한 결과를 나타냈다. 다른 전기적 파라미터도 유사한 값으로 측정되어 ETFE 필름을 적용하여 모듈을 대면적화 하여도 모듈의 출력은 유리와 동등한 수준임을 확인하였다. Fig. 5는 유리 모듈과 ETFE 모듈의 EL을 측정한 결과로, 두 모듈 다 태양전지 파손이 없음을 확인하였다.

Table 4 Electrical output of 24 cell PV module according to Glass and ETFE film

	V_{oc}[V]	I_{sc}[A]	P_{max}[W]	FF[%]
Glass 24 cell PV module	15.3	9.13	105.9	75.87
ETFE Film 24 cell PV module	15.3	8.94	101.5	74.2



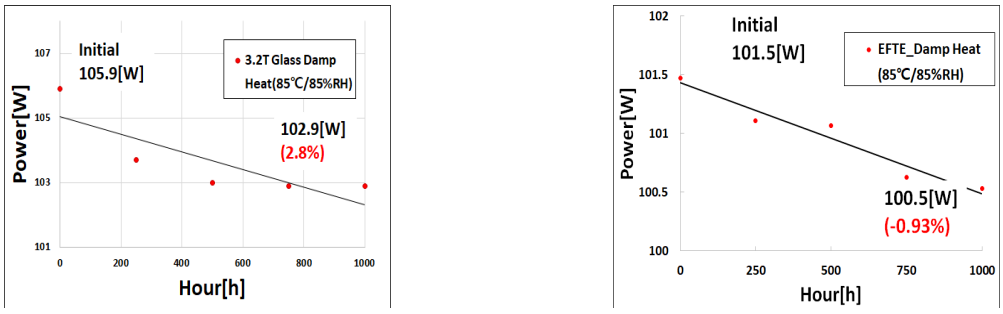
(a) EL image of glass 24 cell PV module (b) EL image of ETFE Film 24 cell PV module

Fig. 5 EL image of 24 cell PV module according to Glass and ETFE film

3.2 ETFE 필름 태양광 모듈의 신뢰성 실험 결과

ETFE 필름을 적용한 태양광 모듈의 전기적 출력은 단위 모듈(1 cell)과 대면적 모듈(24 cell)에서 큰 차이가 없음을 확인하였다. 하지만, 초기 출력이 동등한 수준이어도 실제 태양광 발전소에 사용되기 위해서는 신뢰성 평가가 수행되어야 한다. 태양광 모듈에서 신뢰성 시험은 옥외의 가혹한 환경에서 태양광 모듈의 정상적인 발전을 위한 최소한의 기준으로써, 옥외에 설치되는 모듈은 신뢰성 시험을 통과해야 한다. 본 장에서는 ETFE 필름이 결정질 실리콘 태양광 모듈의 전면 재료로써의 적용을 최종 평가하기 위해 신뢰성 시험을 수행하였다. 시험은 일반적인 양산 모듈에서 사용되는 신뢰성이 우수한 저철분 강화 유리와 ETFE 필름이 적용된 태양광 모듈의 신뢰성 시험 전, 후 전기적 출력 특성을 비교 분석하였다.

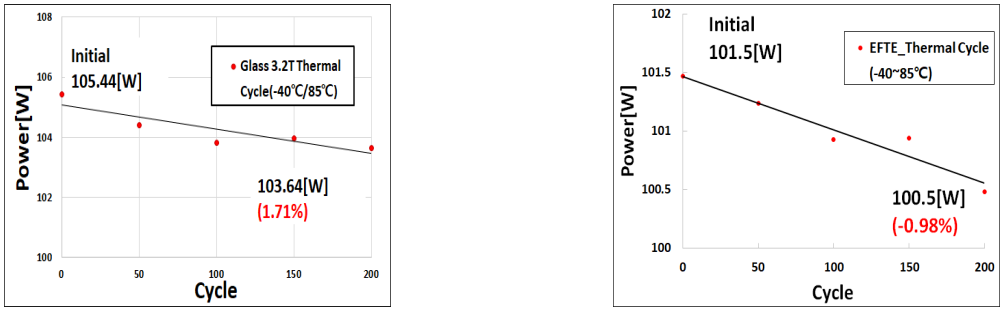
본 시험에서는 태양광 모듈의 신뢰성 시험 중 Damp Heat과 Thermal Cycle 시험을 진행하였으며, KS C 8561 기준의 시험 방법으로 신뢰성 평가를 수행하였다. Damp Heat 시험은 고온, 고습 상태에서 태양전지와 리본의 접합부위에서 발생되는 열적 스트레스로 인한 출력 저하를 평가하는 시험하는 것으로 온도(85 ± 2℃), 상대 습도(85 ± 5%RH)하에서 1000시간 시험한다. Thermal Cycle 시험은 옥외 온도의 변화에 따른 모듈의 열적 스트레스와 내구성을 시험하는 것으로 −40℃ ~ 85℃구간을 1 cycle로 하여 200회를 시험한다. 전면 유리 태양광 모듈의 신뢰성 시험 결과는 Fig. 6과 같으며, Damp Heat 시험 후 출력 변화는 약 2.8%, Thermal Cycle 시험 후 출력 변화는 1.71%로 인증 시험 기준인 5% 이하의 범위였다.



(a) Result of damp heat test of PV module using textured glass (b) Result of thermal cycle test of PV module using textured glass

Fig. 6 Result of reliability test of PV module using textured glass

ETFE 필름이 적용된 24 cell 모듈의 Damp Heat과 Thermal Cycle 시험의 결과는 Fig. 7과 같다. Damp Heat 시험 후 출력변화는 0.93%, Thermal Cycle 시험 출력 변화는 0.98%였다. ETFE 필름 역시 인증기준인 출력 저하 5%이내를 통과하였다. 신뢰성 시험 결과로부터, ETFE 필름을 적용하여 태양광 모듈을 제작하여도 전면 유리와 동등한 수준 이상의 신뢰성을 확보할 수 있음을 확인하였다.



(a) Result of damp heat test of PV module using ETFE film (b) Result of thermal cycle test of PV module using ETFE film

Fig. 7 Result of reliability test of PV module using ETFE film

4. 결 론

본 논문에서는 ETFE 필름의 태양광 모듈 적용 가능성을 확인하기 위해 필름 소재의 투과율 및 UV특성 분석을 수행하고, 이를 모듈화 하여 신뢰성 및 전기적 출력을 분석하였다. 저철분 강화 유리와 ETFE 필름의 소재 특성을 비교한 결과, ETFE 필름이 유리보다 투과율은 1.3% 낮았지만, 무게는 약 97배 가벼우며 두께는 약 6배 얇았으며, UV 특성 시험 후에도 외관의 변형이 없었으며, 투과율도 저하되지 않음을 확인할 수 있었다. ETFE 필름을 적용하여 1 cell 및 24 cell 모듈을 제작하여 전기적 출력을 분석한 결과, 유리 모듈 대비 출력 차이는 0.1 ~ 0.2 W로 태양광 모듈에 ETFE 모듈을 전면 재료로 적용하여도 유리와 동등 수준의 출력을 확보할 수 있음을 확인하였다. 마지막으로, ETFE 필름 태양광 모듈의 신뢰성을 평가하기 위해 신뢰성 시험 중 Damp Heat과

Thermal Cycle 시험을 실시한 결과, ETFE 필름 모듈의 Damp Heat 시험 이후 출력 저하는 몇 0.93%, Thermal Cycle 시험 이후 출력 저하는 몇 0.98%로 유리 모듈에 비해 우수한 신뢰성 특성을 확인 할 수 있었다. 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) ETFE 필름을 태양광 모듈의 전면재료로 적용하기 위한 소재 특성 분석을 실시하였으며, 1 cell 모듈과 24 cell 모듈로 제작하여 전기적 출력 및 신뢰성 시험을 실시하였다.

(2) ETFE 필름의 UV 시험 전후 투과율은 변화가 거의 없었으며, 1 cell 모듈 및 24 cell 모듈의 전기적 출력은 유리 모듈 대비 0.1 ~ 0.2 W 차이로 출력 수준이 동등한 수준이었다.

(3) Damp Heat과 Thermal cycle 신뢰성 시험 결과, ETFE 필름 모듈은 인증 기준 이내의 출력 저하로 시험을 통과하였으며 유리 기반 대비 동등 이상의 신뢰성 확보가 가능 하였다.

(4) ETFE 필름을 전면 재료로 사용 시, 처짐 현상을 방지하기 위해 후면 보강재로 유리를 사용하였는데 다른 소재의 보강재를 사용하여 기계적 강도 보완을 한다면 태양광 모듈의 전면 소재로 활용 가능할 것으로 판단된다.

본 논문에서 분석한 ETFE 필름의 소재 특성과 이를 적용한 태양광 모듈의 전기적 출력 및 신뢰성 시험 결과가 향후 태양광 모듈의 경량화와 새로운 종류의 태양광 모듈의 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호: 20183010013960).

REFERENCES

1. PVPS, I. (2018). Snapshot of global photovoltaic markets. Report IEA PVPS T1-33, 2018.
2. https://solarpowermanagement.net/article/106810/Glass_free_lightweight_solar_module
3. Kaltenbrunner, M., White, M. S., Głowacki, E. D., Sekitani, T., Someya, T., Sariciftci, N. S., and Bauer, S., Ultrathin and Lightweight Organic Solar Cells with High Flexibility. Nature Communications, Vol. 3, No. 1, pp. 1-7, 2012.
4. Housser, G., Halbe, A., Sharpe, K., Haldar, P., and Babineau, F., Lightweight, Zero-Penetration, Pre-Formed Support Molds Adapted for Rigid Thin-Film Solar Modules. In 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), pp. 1-4, IEEE, 2015.
5. Vygranenko, Y., Khosropour, A., Yang, R., Sazonov, A., Kosarev, A., Abramov, A., and Terukov, E., “Lightweight Amorphous Silicon Photovoltaic Modules on Flexible Plastic Substrate.” Canadian Journal of Physics, Vol. 92, No. 7/8, pp. 871-874, 2014.
6. Izu, M., Ovshinsky, H. C., Whelan, K., Fatalski, L., Ovshinsky, S. R., Glatfelter, T., and Guha, S., Lightweight flexible rooftop PV module. In Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC), Vol. 1, pp. 990-993. IEEE, 1994.

7. Halbe, A., Novak, J., Sharpe, K., Housser, G., and Haldars, P., Evaluation of Mounting Mechanisms for the Installation of Lightweight PV Systems on Commercial Rooftops. In 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), pp. 3539-3542, IEEE, 2014.
8. Honeker, C., Fuller, E., Watts, A., Booth, D., Flaherty, B., and Mao, E., Reducing Installed Costs of Residential Solar by the use of Adhesive Mounted Lightweight Solar Modules. In 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 3135-3140, IEEE, 2016.
9. Martins, A. C., Chapuis, V., Virtuani, A., and Ballif, C., Robust Glass-Free Lightweight Photovoltaic Modules With Improved Resistance to Mechanical Loads and Impact. IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 9, No. 1, pp. 245-251, 2018.
10. Martins, A. C., Chapuis, V., Virtuani, A., Li, H. Y., Perret-Aebi, L. E., and Ballif, C., Thermo-Mechanical Stability of Lightweight Glass-Free Photovoltaic Modules Based on a Composite Substrate. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 187, pp. 82-90, 2018.
11. Holton, E., Halbe, A., Garney, A., Whitbeck, J., Sharpe, K., Metacarpa, D., and Haldar, P., Cost and Market Analysis of Integrative Lightweight PV Systems for Low-Slope Commercial Rooftops. In 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), pp. 2740-2742, IEEE, 2014.
12. Metacarpa, D., Fobare , D., Garney, A., Yan, F., Dwyer, D., Holton, E., and Haldar, P., “Reduced Balance of System Costs using Lightweight Photovoltaics Integrated with Roofing Material Membranes.” 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). IEEE, 2015.
13. Cremers, J. and Marx, H., Comparative Study of a New Ir-Absorbing Film to Improve Solar Shading and Thermal Comfort for ETFE structures. Procedia Engineering, Vol. 155, pp. 113-120, 2016.
14. Menéndez, A., Martínez, A., Santos, A., Ruiz, B., Moritz, K., Klein, I., and Gómez, D., A Multifunctional ETFE Module for Sustainable Façade Lighting: Design, Manufacturing and Monitoring. Energy and Buildings, Vol. 161, pp. 10-21, 2018.
15. Kang, G. H. and Kim, G. H., “Photovoltaic Module”, Sungandang.
16. Lim, J. R., Shin, W. G., Yoon, H. S., Kim, Y. S., Ju, Y. C., Ko, S. W., Kang, G. H., and Hwang, H. M., A Study on the Output and Reliability Characteristics of Ultra Barrier Film PV Module. Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 39, No. 5, pp. 1-10, 2019.