유연 박막 태양전지에 적용하기 위한 전기 전도성 접착제의 열 안정성 평가

김다정¹ · 김진철²⁺ · 박노창³⁺

¹한국전자기술연구원 신재생에너지연구센터, 연구원

²한국전자기술연구원 신재생에너지연구센터, 선임연구원

³한국전자기술연구원 신재생에너지연구센터, 책임연구원

Evaluation of Thermal Stability of Electrically Conductive Adhesives for Flexible Thin-Film Solar Cells

Kim Dajeong¹ · Kim Jincheol²⁺ · Park Nochang³⁺

¹Researcher, New&Renewable Energy Research Center, Korea Technology Institute

²Managerial Researcher, New&Renewable Energy Research Center, Korea Technology Institute

³Principal Researcher, New&Renewable Energy Research Center, Korea Technology Institute

⁺Corresponding author: ncpark@keti.re.kr

Abstract

In recent years, pre-cut thin strips of solar cells have been assembled into gapless solar modules in a shingle-like manner, one on top of the other. This technique is called shingling technology, and is gaining increasing market attention. In particular, efficient packing that leaves no space between cells is preferred since it yields an economic gain. One of the biggest market opportunities is the use of electrically conductive adhesives (ECA), which act as a glue between pre-cut cells. Although there are many studies on ECA with a silicon solar cell area, research needs to be expanded in the area of a flexible solar cell that is more sensitive to heat stress. This study explores two types of silver-based ECA materials. The curing time varied from 30 to 60 s, and the curing temperature from 130 to 170°C. The assembled flexible solar cells were evaluated using temperature cycling tests.

Keywords: 전도성접착제(Electrically Conductive Adhesives), 태양전지(Solar Cells), 유연(Flexible), 효율(Efficiency), 온도사이클시험(Temperature Cycling Test)

1. 서론

현재 시장에 나와 있는 대부분의 태양광 모듈은 구리 도선(Cu wire)을 이용하여 셀과 셀을 연결하는 구조로 되어 있다. 이 방법의 장점은 저렴한 비용으로 셀 간 상호 연결이 가능하다는 것이지만, 높은 저항 손실과 매우 얇은 웨이퍼와의 낮은 호환성을 가지며 셀과 셀 사이에 빈 공간이 생겨 해당 영역에서 전력을 생산하지 못한다는 단점이 있다¹⁻³⁾. 이러

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.6, pp.31-37, December 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.6.031>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 18 October 2021

Revised: 2 November 2021

Accepted: 5 November 2021

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.

한 단점을 극복하기 위한 방안으로 사전에 컷팅된 태양전지 스트립을 기와처럼 겹쳐 배치하는 Shingling 기술을 들 수 있다^{4,5)}. 해당 기술의 경우, 각각의 셀을 전도성 접착제(ECA)를 통해 직렬로 연결함으로써 기존의 모듈 디자인이 가지는 높은 저항 손실을 줄이는 것이 가능하다. 또한, 기존의 구리 도선(Cu wire)을 이용하여 연결하는 방식은 전력이 생산되지 않는 빈 공간을 발생시키지만, Shingling 기술을 적용한 태양전지 모듈의 경우에는 빈 공간 없이 셀 간 연결이 가능하다는 측면에서 단위면적당 발전 출력이 비교적 우수하다. 이 방식에서 모듈의 효율과 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 전도성 접착제(ECA)의 성능이며, 대부분 150도 이상의 높은 경화 온도에서 낮은 비저항 특성을 가진다. 기존의 실리콘 태양전지의 경우 이처럼 높은 경화 온도를 적용해도 큰 무리가 없지만, 박막 태양전지 및 유연 태양전지와 같은 차세대 태양전지에 해당 기술을 적용하기 위해서는 ECA의 저온 경화가 필수적이다⁶⁾.

따라서 본 논문에서는 박막 유연 태양전지와 2가지 타입의 ECA를 사용하여 Shingled 구조의 태양전지를 제작한 뒤 평가를 진행하였다. 실험에 사용된 ECA는 비교적 낮은 점도를 가지고 있는 2가지 타입의 ECA를 선정한다. 점도가 낮을수록 헤이즈 현상(Haze effect)이 관찰될 수 있으나 저온 경화가 수월한 장점이 있다. 따라서 각각의 ECA를 사용하여 셀 접합 전후 태양전지의 성능을 비교하고 최적화된 소재 접착 조건을 확인하였으며, 이를 바탕으로 제작된 모듈에 대하여 열 안정성 평가를 통해 유연 태양전지에 적용 가능한 ECA 소재 및 공정조건을 분석하였다.

2. 실험방법

유연 태양전지는 봉지재(encapsulation)로 코팅된 Alta device사의 GaAs 태양전지를 사용하였고, 이를 아래의 표와 같이 2가지 타입의 전도성 접착제(ECA)를 사용하여 도포 및 경화하였다(Table 1).

Table 1 Details of ECA materials

Classification	ICP-8311	DS-0860
Volumetric Resistance ($\Omega \cdot \text{cm}$)	3.9×10^{-04} (15 mins @ 150°C)	1.2×10^{-04} (2 mins @ 160°C)
Ingredient	Silver	Silver
Viscosity (cP)	14,600	25,000
Thawing method	1 hr at room temperature	1 hr at room temperature

공정 조건별 비저항 실험값의 경우 $R = \rho \cdot l / A$ 수식을 활용하여 구하였다. 여기에서 R은 저항, ρ 는 비저항, l은 길이, A는 단면적을 의미한다. 공초점 현미경(Confocal Laser Scanning Microscope) 측정의 경우 Hirox사의 MXB-5000REZ를 사용하여 측정하였다.

모듈 접합을 위한 공정은 다음과 같다. 공압식 디지털 디스펜서를 사용한 분사 장치를 이용하여 상기 2가지의 ECA를 각각 다른 분할 셀에 분사하여 접합하였다. Table 1은 각 ECA에 대한 제원을 나타내고 있다. ECA를 경

화하기 위해 접합된 셀을 39.6 cm^2 면적의 5 kg 무게 추를 활용하여 압력을 준 상태에서 경화 시간 30 ~ 60초, 경화 온도 $130 \sim 170^\circ\text{C}$ 로 가변하며 공정을 진행하였다. 이후 제작된 모듈의 효율을 측정하고 환경 챔버 시험(온도 사이클 시험)을 IEC61215 규격에 맞게 진행 후 열 안정성에 대해 비교 분석하였다.

3. 실험결과

이상의 자료를 바탕으로 ECA 경화 온도 및 경화 시간을 가변하여 실험을 진행하였다. 경화 온도의 경우 130°C , 150°C , 170°C 로 가변하였으며, 경화 시간은 30초, 60초로 가변하여 실험 후 각각의 조건에 대해 ECA 단면 프로파일 및 비저항 측정을 통해 특성을 분석하였다.

3.1 ICP-8311 경화온도 및 시간 가변 실험

(1) ECA 단면 프로파일

ECA 단면 프로파일을 진행하기 위해 ICP-8311를 200 Mesh 선경 $40 \mu\text{m}$ 의 제판을 사용하여 실리콘 기판에 도포하였다. 경화 온도 및 시간에 따른 ECA 도포 특성을 확인하기 위해 공초점 현미경을 사용하여 각 공정조건에서 경화된 ECA를 살펴보았다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯, ICP-8311의 경우 낮은 점도로 인해 낮은 경화 온도(130°C) 및 시간(30초)에서 완전한 경화가 일어나지 않아 경계면이 매끄럽지 못한 것을 확인할 수 있다. 경화 시간 60초에서는 이러한 Ag 탈리 현상이 확인되지 않았으며, 경화 온도 150°C 이상에서는 경화 시간이 30초로 짧아도 특별한 Ag 탈리 현상 없이 ECA 패턴이 잘 형성되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 1 Confocal image for printed ICP-8311 on Si substrate with various curing temperature and time condition

(2) 비저항 측정

앞서 준비한 다양한 온도 및 경화 시간 조건을 바탕으로 경화된 ICP-8311의 전기적 특성을 확인하기 위해 Fig. 2와 같이 비저항 측정을 진행하였다. 앞서 분석한 공초점 현미경 결과를 통해 낮은 경화 온도(130°C) 및 시간(30초)에서는 접합이 좋지 못하여 상대적으로 저항이 증가함을 알 수 있는데, 측정 결과 $2.93 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 높은 비저항 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 경화 시간을 60초로 늘렸을 경우, $2.41 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 정도로 비저항 값이 약 10배 개선되었음을 확인할 수 있으며, 경화 온도가 150°C 이상일 경우에는 경화 시간과 거의 무관하게 약 $2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 내외의 비저항 값을 얻을 수 있었다. 즉, 해당 조건에서는 충분히 경화가 이루어짐을 확인하였다.

Fig. 2 Resistivity for printed ICP-8311 on Si substrate with various curing temperature and time condition

3.2 DS-0860 경화 온도 및 시간 가변 실험

(1) ECA 단면 프로파일

ECA 단면 프로파일을 진행하기 위해 DS-0860를 Mesh 선경 40 μm 의 제판을 사용하여 실리콘 기판에 도포하였다. 경화 온도 및 시간에 따른 ECA 도포 특성을 확인하기 위해, 공초점 현미경을 사용하여 각 공정조건에서 경화된 ECA를 살펴보았다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯, ICP-8311와는 다르게 DS-0860는 낮은 경화 온도(130°C) 및 시간(30초)에서도 형성된 ECA의 경계면이 매끄러운 것을 알 수 있다. 이는 ICP-8311 대비 상대적으로 높은 점도에 의한 결과로 예상되며, 저온에서도 경화가 잘 진행됨을 확인할 수 있었다.

(2) 비저항 측정

앞서 준비한 다양한 온도 및 경화 시간 조건을 바탕으로 경화된 DS-0860의 전기적 특성을 확인하기 위해 비저항 측정을 진행하였다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯, DS-0860의 경우 앞서 분석한 공초점 현미경 결과를 통해 낮은 경화 온도(130°C) 및 시간(30초)에서도 접합이 우수함을 알 수 있는데, 측정 결과 저온 및 짧은 경화 시간을 포함한 모든 조건에서 약 $6 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 매우 우수한 비저항 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3 Confocal image for printed DS-0860 on Si substrate with various curing temperature and time condition

Fig. 4 Resistivity for printed DS-0860 on Si substrate with various curing temperature and time condition

3.3 ECA 경화 조건별 모듈 출력 변화

(1) 모듈화 손실률(Cell to Module loss, CTM)

앞서 진행한 다양한 온도 및 경화 시간 조건을 바탕으로 Shingling 기술을 활용하여 GaAs 셀을 접합한 뒤 CTM 손실률을 확인하였다. 접합의 경우 상기 실험방법을 바탕으로 일정하게 진행하였으며, ‘CTM 손실률(%) = 100 * (1 - 접합 후 모듈 출력 / 개별 셀 출력의 합)’ 수식을 활용하여 계산하였다. 각 소재 및 경화 조건에 따른 결과는 아래 Table 2에 정리하였다. 실험결과를 통해 재료와 관계없이 경화 온도가 올라갈수록 CTM 손실이 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 비저항 측정 결과와는 반대되는 경향이다. 본 논문에서는 이러한 결과를 GaAs 태양전지를 보호하고 있는 봉지재가 ECA를 경화하는 단계에서 열에 의해 손상을 입은 결과라고 분석하였다. 이를 확인하고자 PET 필름을 이용하여 열 스트레스 전후 빛 투과도를 확인하였다. PET 필름 단독으로 170°C 조건에서 가열한 결과, 약 2.25%의 투과도 손실이 발생하였으며 온도가 낮을수록 빛 투과도 손실도 감소

하였다. 즉, 약 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 정도의 비저항은 CTM 손실에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

한 가지 주목할 만한 점은 ICP-8311의 경우, 130°C, 60초 조건에서의 비저항 값이 130°C, 30초에서의 비저항 값보다 우수하지만, 아래 Table 2에서는 130°C, 60초 조건에서 더 높은 CTM 손실률을 보인다. 비저항이 우수함에도 CTM 손실률이 높은 이유는 비저항 측정 때와는 다르게, ECA가 셀들 사이에 둘러싸여 있어 추가적인 열에 노출되었기 때문이다. 즉, ICP-8311의 경우 경화 시간이 증가함에 따라 접착되어 있던 부위의 접착력이 감소하는 Rework 현상이 발생한 것으로 예상된다.

Table 2 Cell to module loss (unit: %). Temperature and time represent curing temperature and time

ICP-8311	130°C	150°C	170°C
30 secs	0.48	0.67	1.05
60 secs	1.19	1.51	1.93
DS-0860	130°C	150°C	170°C
30 secs	0.51	2.24	2.35
60 secs	0.60	1.53	1.28

(2) 온도 사이클 시험(Temperature Cycling Test)

각 소재의 종류 및 다양한 경화 조건에서 제작한 모듈의 접합 안정성을 확인하기 위해 온도 사이클 시험을 IEC61215 규격(-40°C ~ 85°C, 1 cycle 6시간)에 맞추어 진행하였다. 총 150 사이클을 900시간 동안 진행하였고, 각 소재 및 경화 조건에 따른 안정성 시험 결과는 아래 Table 3에 정리하였으며, ‘효율감소 (%) = 100 * (1 - 시험 후 모듈 출력 / 초기 모듈 출력)’ 수식을 활용하여 계산하였다. 모든 조건에서 Temperature cycle 시험 이후 5% 미만의 효율 저하가 나타났다. ECA에 의한 열화 여부를 확인하기 위해 ECA를 사용하지 않은 GaAs 태양전지 1 cell의 Temperature cycle 시험을 진행하였다. 그 결과 평균적으로 약 4.7%의 효율 저하가 발생하였음을 확인하였고, 이를 바탕으로 Temperature cycle 시험 후 발생한 효율 저하는 ECA와 무관함을 알 수 있었다.

Table 3 Efficiency drop after thermal cycling test (unit: %). Temperature and time represent curing temperature and time

ICP-8311	130°C	150°C	170°C
30 secs	3.00	4.37	4.17
60 secs	3.46	4.69	4.09
DS-0860	130°C	150°C	170°C
30 secs	2.60	3.31	4.47
60 secs	3.3	4.51	2.29

4. 결론

본 논문에서는 박막 유연 태양전지와 2가지 타입의 ECA를 사용하여 Shingled 구조의 태양전지를 제작한 뒤

평가를 진행하였다. 우선 ECA의 소재, 경화 온도 및 경화 시간을 변화시켜 단면 프로파일 및 비저항 측정을 진행하였고, 이를 바탕으로 저온 공정에서의 ECA 특성을 분석하였다. ICP-8311의 경우, 낮은 온도(130°C) 및 시간(30초)에서 경화를 진행했을 때 약 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 정도의 비저항을 얻을 수 있었으나 그 외의 고온 및 긴 경화 시간의 조건에서는 모두 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 향상된 비저항 값을 얻을 수 있었다. DS-0860의 경우, 모든 조건에서 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 급의 우수한 비저항 값을 얻을 수 있었다. 각 소재의 종류 및 다양한 경화 조건에서 Shingled 구조의 태양 전지 모듈을 구현한 결과, $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 정도의 비저항은 CTM 손실 측면에서 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 최종적으로 본 논문에서 진행된 모든 공정조건에서 온도 사이클 시험을 900시간(총 150 사이클) 진행한 결과, 5% 미만의 모듈 효율 열화를 보임을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 DS-0860가 저온 공정이 필요한 유연 태양전지 모듈 제작에 최적화된 ECA임을 확인하였고, CTM 손실이 가장 낮은 130°C와 30초 공정조건이 가장 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

후기

This research was supported by the Technology Development Program to Solve Climate Changes of the National Research Foundation (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (no. 2017M1A2A2048905); Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE) [20193091010460, Development of Super Solar cells for overcoming the theoretical limit of silicon solar cell efficiency (> 30%)].

REFERENCES

1. Jee, H. S., Choi, W. Y., Lee, J. H., and Jeong, C. H., Characterization of Electrically Conductive Adhesives for Shingled Array Photovoltaic Cells, *Current Photovoltaic Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 95-99, 2017.
2. Jee, H. S., Moon, D. H., Song, J. H., and Jeong, C. H., Shingled String for the High Performance Photovoltaic Module, *Current Photovoltaic Research*, Vol. 6, No. 4, pp. 119-123, 2018.
3. Beaucarnen, G., Filipek, I. K., Campeol, F., Young, X., Wei, J., Yu, Y., Russell, R., and Duerinckx, F., Innovative Cell Interconnection Based on Ribbon Bonding of Busbarless Cells Using Silicone-based Electrically Conductive Adhesives, *Energy Procedia*, Vol. 67, pp. 185-193, 2015.
4. Tonini, D., Cellere, G., Bertazzo, M., Fecchio, A., Cerasti, L., and Galiazzo, M., Shingling Technology For Cell Interconnection: Technological Aspects And Process Integration, *Energy Procedia*, Vol. 150, pp. 36-43, 2018.
5. Schulte-Huxel, H., Blankemeyer, S., Morlier, A., Brendel, R., and Köntges, M., Interconnect-shingling: Maximizing the active module area with conventional module processes, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 200, pp. 109991, 2019.
6. Wang, X. Q., Gan, W. P., Xiang, F., and Li, B. Y., Effect of Curing Agent and Curing Substrate on Low Temperature Curable Silver Conductive Adhesive, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 30, No. 3, pp. 2829-2836, 2019.