

# 고온고습시험에 의한 멀티 와이어 PV 모듈의 금속 간 화합물 층의 성장에 관한 연구

문지연 · 조성현 · 손형진 · 전다영 · 김성현\*  
신재생에너지연구센터, 한국전자기술연구원, 성남, 13509

## A Study on Growth of Intermetallic Compounds Layer of Photovoltaic Module Interconnected by Multi-wires under Damp-heat Conditions

Ji Yeon Moon · Seong Hyeon Cho · Hyoung Jin Son · Da Yeong Jun · Sung Hyun Kim\*  
New & Renewable Energy Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Seongnam 13509, Korea

Received October 14, 2020; Revised November 24, 2020; Accepted November 24, 2020

**ABSTRACT:** Output power of photovoltaic (PV) modules installed outdoors decreases every year due to environmental conditions such as temperature, humidity, and ultraviolet irradiations. In order to promote the installation of PV modules, the reliability must be guaranteed. One of the important factors affecting reliability is intermetallic compounds (IMC) layer formed in ribbon solder joint. For this reason, various studies on soldering properties between the ribbon and cell have been performed to solve the reliability deterioration caused by excessive growth of the IMC layer. However, the IMC layer of the PV module interconnected by multi-wires has been studied less than using the ribbon. It is necessary to study soldering characteristics of the multi-wire module for improvement of its reliability. In this study, we analyzed the growth of IMC layer of the PV module with multi-wire and the degradation of output power through damp-heat test. The fabricated modules were exposed to damp-heat conditions (85 °C and 85 % relative humidity) for 1000 hours and the output powers of the modules before and after the damp-heat test were measured. Then, the process of dissolving ethylene vinyl acetate (EVA) as an encapsulant of the modules was performed to observe the IMC layer. The growth of IMC layer was evaluated using OM and FE-SEM for cross-sectional analysis and EDS for elemental mapping. Based on these results, we investigated the correlation between the IMC layer and output power of modules.

**Key words:** PV module, Multi-wires, Intermetallic compounds layer, Reliability

### Subscript

PV : photovoltaic  
IR : infrared  
OM : optical microscope  
FE-SEM : field emission scanning electron microscope  
EDS : energy dispersive X-ray spectrometer  
PERC : passivated emitter and rear contact  
EVA : ethylene vinyl acetate

### 1. 서론

최근, 화석 연료의 급속한 고갈과 이산화탄소 배출에 의한 환경 오염을 줄이고자 대체에너지 개발에 관한 연구가 가속화되고 있다. 다양한 신재생에너지 중에서도 태양광은 자원의 무한함, 소음, 유지비, 자동화와 같은 다양한 장점이 있어 수요가 증가하고 있다<sup>1)</sup>. 그러나, 아직도 높은 제조 단가의 문제가 있기 때문에 신재생에너지 산업에서 경쟁력을 갖기 위해서는 장기신뢰성이 보장되어야 한다. 일반적으로, 태양광 모듈의 신뢰성을 저하시키는 원인으로는 구성품의 부식, 변색, 균열, 연결 부위의 문제 등이 있다<sup>2)</sup>. 이를 해결하고자 다양한 구조의 모듈 및 공정 조건에 관한 연구가 진행되고 있다<sup>3-6)</sup>.

그 중에서 멀티 와이어 PV 모듈은 lamination 공정 중에 발생

\*Corresponding author: shkim@keti.re.kr

하는 물리적 스트레스를 여러 와이어를 통해 cell 전체에 균일하게 분포시킴에 따라 미세 균열 발생을 줄일 수 있고, 균열이 있어도 다른 전류 이동 경로가 있기 때문에 신뢰성을 보장할 수 있다고 알려져 있다<sup>7)</sup>. 또한, 폭이 넓은 리본이 아닌 원형의 얇은 와이어를 사용하기 때문에 수광 면적을 늘릴 수 있으며, 산란된 광까지 수집할 수 있어 입사 광량을 증대된다는 장점이 있다<sup>8)</sup>. 그리고 전극으로 사용되는 은의 사용량을 줄일 수 있기 때문에 비용 절감에도 매우 탁월하기 때문에 각광받고 있는 기술이다<sup>9)</sup>.

그러나 고온, 고습 가속시험 등의 다양한 장기신뢰성 평가가 진행된 기존의 PV 모듈에 비해 멀티 와이어 PV 모듈에 대한 장기 신뢰성에 대한 평가는 부족하다. 기존의 모듈은 고온, 고습 환경에서 금속 간 화합물 층의 과도한 성장에 의해 출력 저하가 발생한다고 알려져 있다<sup>10,11)</sup>. Soldering 공정에서 형성되는 금속 간 화합물 층은 접합 강도 측면에서 필수적인 요소이지만 강한 취성 때문에 두께가 증가할수록 접합 강도를 저하시키고 균열이 발생하여 출력 손실을 일으킬 수 있다<sup>12)</sup>. 멀티 와이어 PV 모듈도 와이어를 접합시키는 soldering 공정이 모듈 제작의 주요 공정이기 때문에 고온고습 환경에서의 신뢰성 평가가 필수적이다.

본 연구에서는, 멀티 와이어 PV 모듈의 장기신뢰성 평가를 위해 모듈을 제작하여 고온고습시험을 진행하였고, 모듈의 금속 간 화합물 층의 변화와 이로 인한 모듈의 성능 차이를 확인하였다. 멀티 와이어 PV 모듈은 IR 램프를 이용한 soldering 공정과 lamination 공정을 통해 하나의 cell 크기로 제작되었다. 준비된 모듈의 출력을 고온고습시험 전후로 측정 한 후, 각 모듈은 광학현미경(OM), 주사전자현미경(FE-SEM), 에너지 분산 X-선 분광법(EDS)를 이용하여 금속 간 화합물 층의 형성 및 성장에 대해 분석하였다. 고온고습시험 전후의 금속 간 화합물 층의 화학적 변화가 모듈 출력에 주는 영향에 대해 평가하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 재료

PV 모듈 제작에는 12 busbar 전극의 half cut cell (PERC cell, (주)신성이엔지)을 사용하였고 cell의 전극은 각 와이어 당 6개의 전면 패드와 3개의 후면 패드를 가진다. 와이어와 리본은 300 um 지름의 Cu 와이어와 폭 5 mm, 두께 300 um인 Cu 리본에 각각 60Sn40Pb가 40 um의 두께로 solder가 코팅된 고려특수소재사의 제품을 사용하였다. Solder의 표면장력을 억제시켜 퍼짐을 증가시키고 cell 표면의 산화막을 제거하기 위해 flux(920CXF, Kester)를 이용하였다. 에틸렌 비닐 아세테이트(EVA, EF2N-UVC, SKC), back sheet (TPE-36, (주)에스에프씨)와 glass (저철분 PV용 유리, (주)누리코퍼레이션)는 lamination 공정에 사용되었다. 단면 분석을 위해 PV 모듈의 EVA를 녹이는 유기용매로는 toluene (99.5%, 삼진순약공업(주))을 사용하였다.

### 2.2 멀티 와이어 PV 모듈 제작 및 고온고습시험

PV 모듈은 soldering 공정과 lamination 공정을 통해 제작되었다. Soldering 공정은 cell을 IR 램프가 장착된 tabber 장비(자체 제작)에 올려놓고, 와이어에 flux를 도포하고 85°C에서 10 초간 건조한 뒤 tabber 장비에 올려진 cell에 접합시켜 준비하였다. Tabber 장비의 상부에 위치한 IR 램프는 210°C, 하부에 위치한 hot plate는 100°C로 설정한 후, 공정 시간은 3 초로 하여 진행하였다. Soldering 공정을 통해 half cut cell 두 장을 와이어로 연결하였고, 납땀기(FX-888D, Hakko Corporation)를 이용하여 12개의 와이어를 리본으로 연결하여 soldered cell을 준비하였다. Lamination 공정을 위하여 laminator (자체 제작)에 glass, EVA, soldered cell, EVA, back sheet를 순서대로 올려놓았다. Laminator의 상부 온도는 75°C, 하부 온도는 160°C, 압력은 0.04 MPa로 설정하여 18 분 동안 공정을 진행하여 멀티 와이어 PV 모듈을 제작하였다.

제작된 멀티 와이어 PV 모듈의 장기신뢰성 평가를 위해 온도와 습도가 85°C와 85%로 설정된 항온습습기(DS-8054S, 대원과학)에 제작된 모듈을 1000 시간 동안 넣어두어 고온고습시험을 실행하였다.

### 2.3 봉지재 용해 및 분석용 시료 채취

고온고습시험 전, 후의 모듈은 solder 접합부에 형성된 금속 간 화합물 층의 분석을 위하여 봉지재인 EVA를 녹이는 실험을 실시하였다. 환류냉각기가 장착된 stainless steel 소재의 챔버(30×30×13 cm<sup>3</sup>)에 900 ml의 toluene을 담아 초음파 처리가 되는 water bath에서 95°C가 되도록 준비한다. 고온고습시험 전, 후의 모듈을 준비된 챔버에 넣고 450 W의 초음파를 4 시간 동안 가하였다. 분리가 된 cell을 채취하여 단면 분석용 샘플을 준비하였다.

### 2.4 분석

제작된 멀티 와이어 PV 모듈은 고온고습시험 전후로 solar simulator (K201 Lab 200, McScience Inc.)를 이용하여 출력을 측정하였다. Cell의 전극과 와이어 사이의 solder 접합부에 형성된 금속 간 화합물 층의 분석을 위하여 OM (BX60F5, Olympus Corporation), FE-SEM (JSM-7000F, Jeol Ltd.)과 EDS (INCA Energy, Oxford Instruments)를 사용하여 단면 분석과 원소 분석을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Soldering 공정과 lamination 공정을 통해 제작된 멀티 와이어 PV 모듈의 모습은 Fig. 1에 나타내었다. Half cut cell 두 장을 연결하여 하나의 cell 크기로 제작되었으며, 12개의 와이어를 리본으로 연결하였다. 제작된 모듈은 고온고습시험을 진행하였

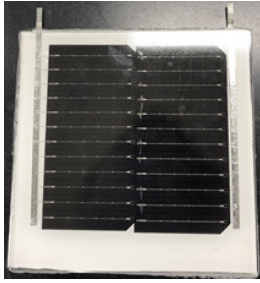


Fig. 1. Photograph of fabricated PV module

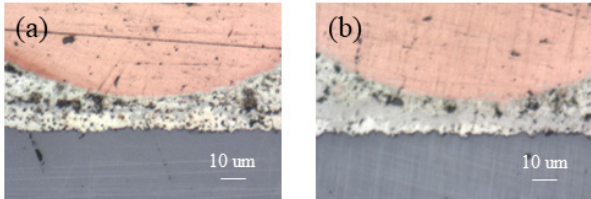


Fig. 2. OM images of solder joints (a) before damp-heat test and (b) after damp-heat test

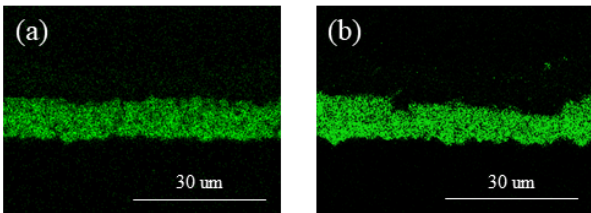


Fig. 3. EDS elemental mapping for Ag of PV module (a) before damp-heat test and (b) after damp-heat test

고, 고온고습시험 전후로 출력을 측정하였다. Solder 접합부의 금속 간 화합물 층을 분석하기 위해서 모듈의 봉지재인 EVA를 용해시킨 후 분석 샘플을 준비하여 OM, FE-SEM, EDS로 분석하였다.

Fig. 2는 cell과 와이어의 접합부에 대한 OM 이미지이다. 3개의 층으로 구분이 되며, 위에서부터 순서대로, 열은 주황색 영역은 Cu 와이어, 밝은 회색은 Cu 와이어의 solder와 Ag 전극이 접합된 solder 접합부, 짙은 회색은 cell이다. OM 이미지에는 고온고습시험에 의해 변화된 부분이 보이지 않으며, 금속 간 화합물 층에 대한 분석은 단면 이미지 분석과 동시에 성분 분석이 필요함을 시사한다.

성분 분석을 위해 EDS를 이용하여 solder 접합부의 원소 mapping을 하였고, Ag에 대한 원소 분석 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 고온고습시험 전후로 Ag 원소는 두께 변화나 차이점이 없는 것으로 보인다. Fig. 4는 Pb에 대한 원소 분석 결과로, 고온고습시험 전에는 Pb가 solder에 고르게 퍼져있었지만, 고온고습시험 후에는 Pb가 응집된 것을 볼 수 있다. 그리고 Ag와 Pb의 분석 결과를 통해 전극과 solder의 위치를 구분할 수 있음을 확인하였다. Fig. 5는 Sn에 대한 원소 분석 결과로, Pb와 마찬가지로 solder에 고르게 퍼져있으며, 고온고습시험 후에는 Pb와는 다르

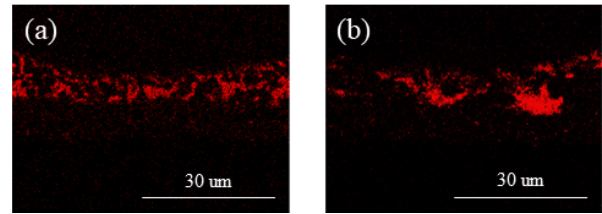


Fig. 4. EDS elemental mapping for Pb of PV module (a) before damp-heat test and (b) after damp-heat test

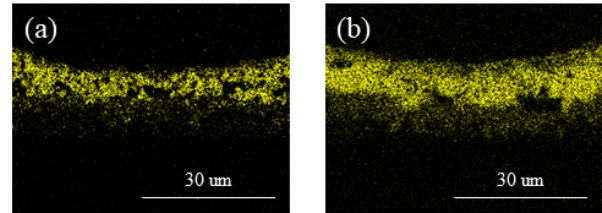


Fig. 5. EDS elemental mapping for Sn of PV module (a) before damp-heat test and (b) after damp-heat test

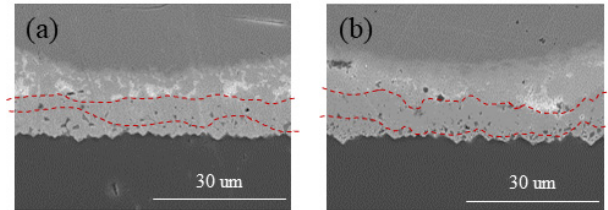
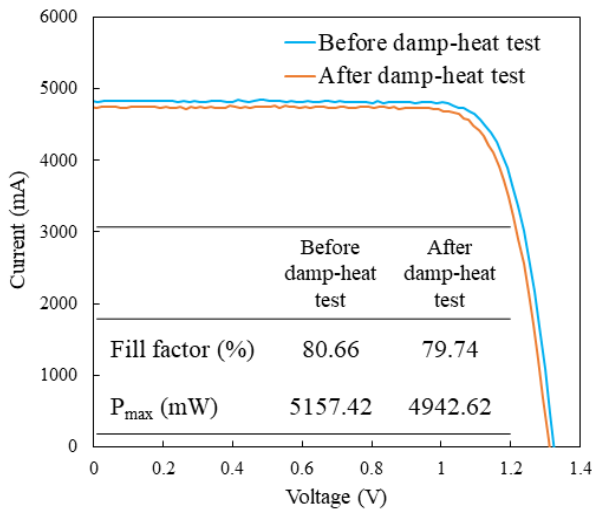


Fig. 6. FE-SEM images for comparison between (a) IMC layer before damp-heat test and (b) IMC layer after damp-heat test

게 응집된 부분 없이 고르게 퍼져있는 것으로 분석되었다. 그러나, 고온고습시험 전에는 Sn이 solder 아래의 Ag 전극에 확산된 층이 얇게 나타났지만 고온고습시험 후에는 확산된 Sn 층이 두껍게 나타났다. EDS 분석 결과를 통해 Sn이 Ag 전극에 확산되어 Ag와 Sn이 결합된 금속 간 화합물 층이 형성된 것으로 보인다<sup>13)</sup>. 형성된 금속 간 화합물 층은 열과 온도와 같은 주변 환경에 의해 더욱 성장한 것으로 판단된다. 또한, Sn이 Ag로 확산되며 생긴 빈 공간을 Pb가 채우면서 Pb의 응집이 발생한 것 보인다.

Fig. 6은 EDS 분석에서 나타난 Ag 전극과 solder의 계면과 Sn 확산층을 바탕으로 금속 간 화합물 층을 FE-SEM 이미지에 나타낸 것이다. 금속 간 화합물 층은 고온고습시험 전후로 모두 형성되어 있는 상태였으며, 한 샘플 내에서의 금속 간 화합물 층의 두께가 일정하지 않은 것으로 나타났다. 금속 간 화합물 층의 가장 두꺼운 부분을 측정한 결과, 고온고습시험 전은 5.90 μm, 고온고습시험 후에는 8.08 μm로 측정되었다. 그리고 금속 간 화합물 층의 특정 부분만 성장한 것이 아니라 전체적으로 두께가 증가한 것으로 확인하였다. 이를 통해, 고온고습 환경에 의해 금속 간 화합물 층의 과도한 성장이 이루어진 것으로 보여진다.

고온고습시험에 의한 금속 간 화합물 층의 성장과 모듈 성능의 관계를 확인하기 위하여 출력을 측정하였다. Fig. 7은 고온고



**Fig. 7.** I-V curves with fill factor and  $P_{max}$  values of PV module before and after damp-heat test

습시험 전후의 멀티 와이어 PV 모듈의 출력 측정 결과이다. I-V curve로 모듈의 성능을 비교하였을 때,  $I_{sc}$ 가 감소한 것은 봉지재인 EVA의 변색에 의해 광 투과도 감소로 인한 것으로 보여진다<sup>14)</sup>.  $V_{oc}$ 의 감소는 cell 접합부의 균열이나 연결된 와이어와 리본의 부식에 의해 발생한 것으로 보인다<sup>15)</sup>. 고온고습시험 후에 fill factor는 80.66%에서 79.74%로 감소한 것으로 보아, 고온고습의 환경에서 금속 간 화합물 층이 과도하게 성장하여 직렬 저항을 증가시켰고, 이에 따라 fill factor가 감소한 것으로 판단된다. 또한, 고온고습시험 후의 출력도 5157.42 mW에서 4942.62 mW로 214.80 mW가 감소하였다. 이는 금속 간 화합물 층의 과도한 성장, 직렬 저항 증가와 fill factor 감소로 인해 발생한 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

멀티 와이어 PV 모듈을 제작하여 고온고습시험을 진행하였고, solder 접합부에서의 화학적 변화를 분석하여 모듈의 출력 저하에 대해 평가하였다. Half cut cell 두 장과 12개의 와이어를 연결하여 제작된 멀티 와이어 PV 모듈에 대해 고온고습시험 전후로 모듈 성능을 측정하였고, 와이어와 셀의 접합부에 대한 단면 이미지 분석과 성분 분석을 진행하였다.

단면 이미지 분석은 OM과 FE-SEM으로 진행하였으며, 이미지 분석만으로는 금속 간 화합물 층의 형성과 성장에 대한 평가를 할 수 없었기 때문에 EDS를 이용한 단면의 원소 mapping 분석을 동시에 진행하였다. 원소 분석 결과를 통해 solder에 고르게 분포되어 있던 Sn이 고온고습 환경에 의해 Ag 전극으로 확산된 것을 확인하였다. Sn이 Ag 전극으로 확산되며 Ag와 결합하여 금속 간 화합물 층이 형성되었고, 고온고습시험 후에 두꺼워진 금속 간 화합물 층을 확인하였다. 금속 간 화합물 층의 성장에

의해 solder와 Ag 전극의 계면에서 void 형성 및 미세 균열 발생 등의 문제가 발생했을 것이라 판단된다. 이와 같은 금속 간 화합물 층의 변화로 인해 발생된 문제는 모듈 성능에 영향을 주었으며, fill factor와 출력의 변화로 알 수 있었다. Fill factor와 출력 모두 감소하였고, 이는 금속 간 화합물 층의 과도한 성장에 의해 직렬 저항이 증가하였기 때문이라고 판단된다. 따라서, 멀티 와이어 PV 모듈의 와이어와 cell의 접합부에 형성된 금속 간 화합물 층은 고온고습 환경에 의해 성장하여 직렬 저항을 증가시키기 때문에 모듈의 성능을 저하시키는 주요 원인이 된다고 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 신재생에너지기술개발사업(2017-3010013740, 20193010014530)의 일환으로 수행되었습니다.

#### References

- Ajayan, J., Nirmal, D., Mohankumar, P., Saravanan, M., Jagadesh, M., Arivazhagan, L., "A review of photovoltaic performance of organic/inorganic solar cells for future renewable and sustainable energy technologies," *Superlattices and Microstructures*, Vol. 143, 106549, 2020.
- Chandel, T. A., Mallick, M. A., Yasin, M. Y., "Oxidation: A dominant source for reduced efficiency of silicon solar photovoltaic modules," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 27, pp. 1092-1098, 2020.
- Oh, W. Park, J., Jeong, C., Park, J., Yi, J., Lee, J., "Design of a solar cell electrode for a shingled photovoltaic module application," *Applied Surface Science*, Vol. 510, 15420, 2020.
- Walter, J., Tranitz, M., Volk, M., Ebert, C., Eitner, U., "Multi-wire interconnection of busbar-free solar cells," *Energy Procedia*, Vol. 55, pp. 380-388, 2014.
- Zhang, Y., Xu, J., Mao, J., Tao, J., Shen, H., Chen, Y., Feng, Z., Verlinden, P. J., Yang, P., Chu, J., "Long-term reliability of silicon wafer-based traditional backsheet modules and double glass modules," *RSC Advances*, Vol. 5, pp. 65768-65774, 2015.
- Omazic, A., Oreski, G., Halwachs, M., Eder, G. C., Hirschl, C., Neumaier, L., Pinter, G., Erceg, M., "Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 192, pp. 123-133, 2019.
- Walter, J., Rendler, L. C., Ebert, C., Kraft, A., Eitner, U., "Solder joint stability study of wire-based interconnection compared to ribbon interconnection," *Energy Procedia*, Vol. 124, pp. 515-525, 2017.
- Braun, S., Micard, G., Hahn, G., "Solar cell improvement by using a multi busbar design as front electrode," *Energy Procedia*, Vol. 27, pp. 227-233, 2012.

9. Yao, Y., Papet, P., Hermans, J., Söderström, T., Mehlich, H., König, M., Waltinger, A., Habemann, D., Richter, A., "Module integration of solar cells with diverse metallization schemes enabled by smartwire connection technology," IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, 2015.
10. Tummala, A., Oh, J., Tatapudi, S., Tamizhmani, G., "Degradation of solder bonds in field aged PV modules: Correlation with series resistance increase," IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, 2017.
11. Jeon, Y. J., Kang, M. S., Shin, Y. E., "Growth of an Ag<sub>3</sub>Sn intermetallic compound layer within photovoltaic module ribbon solder joints," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 7, pp. 89-96, 2020.
12. Chen, K. J., Hung, F. Y., Lui, T. S., Chen, L. H., Chen, Y. W., "Characterizations of Cu/Sn-Zn solder/Ag interfaces on photovoltaic ribbon for silicon solar cells," IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 5, No. 1, pp. 202-205, 2015.
13. Kim, J. H., Son, H. J., Kim, S. H., "A study on the relationship between factors affecting soldering characteristics and efficiency of half-cell soldering process with multi-wires," Current Photovoltaic Research, Vol. 7, No. 3, pp. 65-70, 2019.
14. Son, H. J., Kim, S. H., "Degradation characteristics according to encapsulant materials combining with transparent backsheet on the mini shingled Si photovoltaic modules," Current Photovoltaic Research, Vol. 8, No. 1, pp. 12-16, 2020.
15. Lee, K. H., Choi, S. S., Kim B. K., Kim, C. H., Jung, J. Y., Rho, D. S., "Development of aging diagnosis algorithm for photovoltaic modules by considering electric characteristics and environment factors," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 64, No. 10, pp. 1411-1417, 2015.