

태양전지 Ribbon 두께와 조성에 따른 Ribbon접합부의 장기 신뢰성 특성에 관한 연구

전유재[†] · 강민수 · 소경준 · 이재준 · 신영의
중앙대학교 기계공학부

(2014년 10월 24일 접수, 2014년 12월 2일 수정, 2014년 12월 5일 채택)

The Study on the Long-term Reliability Characteristics of Ribbon Joint: Solar Cell Ribbon Thickness and Solder Compositions

Jeon Yu-Jae · Kang Min-Soo · So Kyung-Jun · Lee Jae-June · Shin Young-Eui

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received 24 October 2014, Revised 2 December 2014, Accepted 5 December 2014)

요약

본 논문에서는 실리콘 태양전지의 Ribbon 접합부에 대한 장기 신뢰성 평가를 위해 Ribbon 두께와 솔더 조성을 달리하여 (A-type:0.2mm/SnPb, B-type:0.25mm/SnPb, C-type:0.2/SnAgPb, D-type:0.25mm/SnAgPb) 열충격 시험을 수행하였다. 열충격 시험 조건은 -40℃에서 85℃로 각각 15분씩 30분을 1 cycle로 하여 600 cycle을 수행하였다. 그 결과 초기효율은 A-type이 15.0%, B-type이 15.4% 및 C, D-type이 15.8%를 나타냈으며, 열충격 시험 후 초기효율 대비 효율감소율은 A-Type이 13.8%, B-Type이 15.4%, C-Type이 15.3% 및 D-Type이 16.2%을 나타냈다. I-V 특성곡선 및 표면변화를 비교한 결과, 표면의 변화는 큰 차이가 없었으나, A, C-Type의 시편에서는 직렬저항이 증가하였고, C-Type의 I-V 특성곡선 Current 저하 시작점이 A-Type보다 0.05(V)빠르게 나타났다. B, D-Type에서는 직렬저항 증가 및 병렬저항 감소의 복합적인 효율 저하 특성이 나타났으며, Cell 손상도 확인할 수 있었다. SnAgPb계열 솔더를 사용한 시편이 초기 접합성 및 효율 측면에서 우수하였으나, 장기신뢰성에서 취약하였으며, Ribbon 두께가 두꺼울수록 장기신뢰성이 저하되는 것을 확인 할 수 있었다.

주요어 : 실리콘 태양전지, PV모듈, 신뢰성평가, 열충격 시험

Abstract - In this paper, Thermal Shock tests were performed varying the composition of the solder and ribbon thickness (A-type:0.2mm/60Sn40Pb, B-type:0.25mm/60Sn40Pb, C-type:0.2 /62Sn36Ag2Pb, D-type:0.25mm/62Sn36Ag2Pb) for evaluating the long-term reliability about Ribbon junction of Silicon solar cells. Thermal Shock test condition was performed during the 600cycles having -40℃~85℃ temperature range each 15 minutes; One cycle time was 30min. As a result, the initial efficiency of the A-type, B-type, and C, D-type were showed 15.0%, 15.4% and 15.8% respectively. After thermal shock test, the efficiency decreasing-rate of each type were as follow that A-type was 13.8%, B-Type was 15.4%. C-Type and D-Type was 15.3% and 16.2%, respectively. Also, degradation of surface changes and I-V characteristic curves were showed that the series resistance of the A, C-type was increased. Also, current lowering starting point of C-type shown 0.05volt[v] earlier than that of A-type. And B, D-type shown characteristics of composite lowering efficiency such as increase of series resistance, decrease of parallel resistance and cell damage. Therefore Initial solderability and efficiency of

[†]To whom corresponding should be addressed.

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University,
Seoul 756-756, Korea
Tel : 02-820-5315 E-mail : shinyoun@cau.ac.kr

specimens using the solder with SnAgPb were superior. But, It has inferior the long-term reliability. The test was confirmed that as the ribbon thickness increases, long-term reliability of solar cell will decrease.

Key words : Silicon Solar Cell, PV module, Reliability, Thermal Shock Test

1. 서 론

최근 들어 전 세계적으로 환경을 보호하기 위해 탄소 배출권 규제와 원자력 발전소의 사고로 인하여 대체 에너지원인 신재생에너지의 중요도와 관심이 날로 증가하는 추세이다.[1] 현재 가장 주 에너지로 사용되는 석탄, 석유, 천연가스와 같은 화석 연료는 지구 온난화 문제를 야기 시키고, 매장량에도 한계가 있기 때문에 최근 정부의 시책과 함께 전 세계적으로 신재생에너지에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[2] 그 중에서도 지구에 입사되는 태양에너지를 이용하는 것에 대해 이목이 집중되고 있으며, 광전효과를 이용하여 태양광을 전기에너지로 전환하기위해 Photovoltaic module(PV모듈)을 제작하여 높은 효율과 높은 신뢰성을 가진 지속가능한 에너지원으로 개발하고자 노력중이다.

PV모듈은 장시간 옥외에 노출되어 사용되기 때문에 모듈의 수명에 영향을 미치는 온도변화, 습도, 자외선, 바람, 적설, 결빙, 우박 등에 의한 환경변화에 내구성을 가져야하며 설치 지역에 따른 부식성 가스, 모래, 분진 등의 지형적 환경에도 적합해야 한다. Table 1과 같이 주변 환경에 의한 내구성의 저하와 전기적 손실요인 및 열에 의한 노화가 대표적이다.[3]

PV모듈은 제작 및 설치 시 품질인증을 수행하고 있으며, 10년의 품질보증 및 25년의 내구성을 갖도록 설계되지만, PV모듈이 결정질 실리콘 Cell, Ethylene

Table 1. Case of PV module Degradations[3]

노화현상	비율(%)
부식현상	45.3%
셀 또는 연결부위 문제	40.7%
출력선 문제	3.9%
단자박스 문제	3.5%
EVA Sheet박리	3.4%
전선, 다이오드, 터미널, 단자 등의 과열문제	1.5%
기계적, 물리적 파손	1.4%
바이패스 다이오드 결함	0.2%
합 계	100%

Vinyl Acetate(EVA), Backsheet, Glass등의 다양한 재료로 구성되어 있어, 정확한 수명예측이 어려운 실정이다.[4] 옥외에 설치된 PV모듈은 매년 외부요인에 의해 효율 감소가 나타나며, 태양광 모듈 실증 테스트 보고서에 따르면 해마다 태양광 모듈은 0.5%/year의 속도로 효율이 감소하는 것으로 보고되고 있다.[5] 이와 같이 매년 발생하는 효율 저하를 예방하고, 고신뢰성을 확보하기 위해 태양광 Ribbon 접합부의 장기 신뢰성을 분석하며, 태양광 모듈이 받는 내·외적인 요인에 대한 신뢰성 평가 데이터베이스를 구축하여, 정확한 신뢰성 평가방법이 정립 되어야 한다.[6]

본 연구에서는 실리콘 태양전지의 Ribbon 접합부의 장기 신뢰성 확보를 위해 Ribbon의 두께와 솔더 조성에 따른 신뢰성 평가를 수행하였다.

2. 실험방법

태양광 모듈의 신뢰성 평가를 위해 태양광 모듈을 모사하여 시편을 제작하였으며, 반복적인 연간 온도의 변화 및 일교차에 의한 열 부하를 가하기 위해 열 충격 시험을 수행하였다.

2-1. 실험시편

본 시험에 사용된 시편은 단결정(Single-crystalline) Solar Cell을 이용하여 3-line의 Ag전면전극과 Gridfinger가 형성된 Solar cell을 준비하였다. Fig. 1과 같이, 전면전극 위에 Solar Ribbon을 Tabbing공정을 통해 부착하고 후면에 Backsheet와 전면에 Glass사이에 EVA를 Laminate공정을 통해 진공 압착하여 제작하였다. 실제 PV 모듈은 6×10(60장) 또는 6×12(72장)의 배열로 규모가 크지만, 본 실험에서는 열 부하에 의한 Ribbon 접합부 파괴에 따른 성능저하를 정확하게 파악하기 위해 낱장 단위의 PV 모듈을 제작하여 실험을 수행하였다. 또한, 태양광 Ribbon의 두께 및 조성에 따른 영향성을 비교 분석하기 위해 4가지 Type의 Ribbon을 준비하였다. Table 2에 나타낸 것과 같이 실험에 사용된 Ribbon

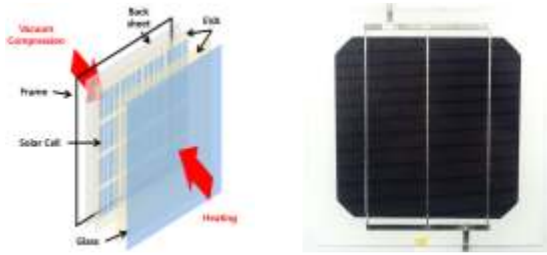


Fig. 1. Shape of Specimens[6]

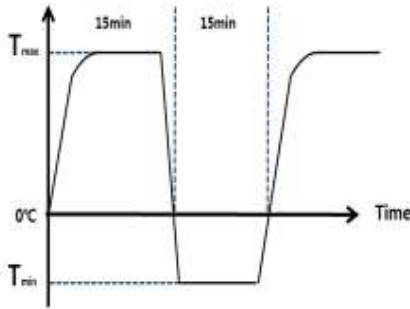


Fig. 2. Temperature profile of Thermal Shock Test

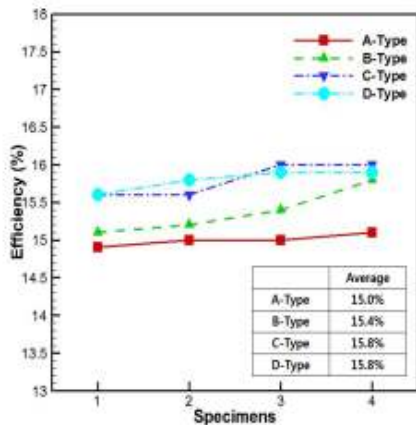


Fig. 3. Efficiency of Specimens

의 조성은 SnPb(60:40)와 SnAgPb(62:2:36)이며, 두께는 0.2mm와 0.25mm의 두 가지 조건으로 각각 시편 4개씩 총 16개를 제작하였다. 제작된 시편의 초기 효율은 Fig. 3과 같이 A-type이 15.0%, B-type은 15.4% C, D-Type은 15.8%의 측정값을 확인하였다.

2-2. 열충격 시험

태양전지 Ribbon 접합부에 열 이력을 모사하기 위해 열충격 시험을 수행하였다. 온도조건은 현재 PV 모듈의 성능시험 규격인 KS C 61215의 규격을 인용하여 고온(T_{max}) 85°C 15분, 저온(T_{min}) -40°C 15

Table 2. Specification of Solar Ribbon

	Solder Composition (wt%)	Thickness	Quantity
A-type	60Sn40Pb	0.2mm	4
B-type	60Sn40Pb	0.25mm	4
C-type	62Sn2Ag36Pb	0.2mm	4
D-type	62Sn2Ag36Pb	0.25mm	4

분, 총 30분을 1 cycle로 하여 600 cycle을 수행하였다. 열충격 시험 온도 프로파일은 Fig 2와 같다.

2-3. EL 및 I-V 특성곡선

열충격 시험 후 효율 변화를 비교 분석하기 위해 태양광 시뮬레이터를 이용하여 I-V 특성곡선을 측정하였으며, Electro Luminescence(EL)촬영을 통해 표면의 변화를 관찰하였다. 여기서, 태양광 시뮬레이터는 태양광과 비슷한 파장을 형성한 후 STC(표준시험 조건 : 수직복사 $E=1000 W/m^2$, 전지온도 $T=25°C \pm 2°C$, 공기질량 $AM=1.5$)의 일사량을 주어 발생하는 개방전압(V_{oc}), 단락전류(I_s), 최대출력전압(V_{max}) 및 전류(I_{max}), 최대출력전력(P_{max}), 효율(%), 곡선율(Fill Factor :FF)을 측정하는 장비이며, EL촬영은 PV모듈에 전기적 신호를 인가할 때 실리콘이 발광하는 특성을 이용하여 암실에서 촬영한 표면사진을 통해 표면의 통전여부를 확인 하는 측정방법이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 초기 시편의 효율

초기시편의 효율은 Fig. 3과 같이 C, D-Type에서 더 높게 나타났다. 이는 태양광 Ribbon을 Ag paste위에 Soldering할 때 190~215의 온도에서 작업을 하게 되는데, 이때 SnAgPb solder가 SnPb solder CA(Contact angle)보다 더 작게 형성되어 접합성이 향상되게 된다.[7] 따라서, 초기시편 효율의 차이는 solder 접합성에 따른 Tabbing 공정의 신뢰성이 향상되어, SnPb solder를 이용한 시편보다 SnAgPb solder를 이용한 시편의 초기 효율이 크게 측정된 것으로 판단된다.

3-2. 효율 변화

열충격 시험 후 효율 변화는 Table 3에 나타내었다. 열충격 시험 600Cycle 후 A-Type 시편은 초기 1

Table 3. Efficiency Degradation of Specimens

	0 Cycle average eff.	600 Cycle average eff.	Drop Rate(%)
A-Type	15.0%	13.8%	8.0
B-Type	15.4%	13.0%	15.4
C-Type	15.8%	12.9%	15.3
D-Type	15.8%	13.2%	16.2

5.0%에서 시험 후 13.8%로 측정되었으며, 초기 효율 대비 8.0%의 효율 감소율을 확인하였다. B-Type 시편에서는 15.4%의 효율 감소율을 C-Type에서는 15.3%, D-Type에서는 16.2%의 효율 감소율을 확인하였다. D-Type의 시편이 열충격 시험 후 효율 감소율이 가장 크게 나타났다.

3-3. I-V 특성곡선 및 EL Image

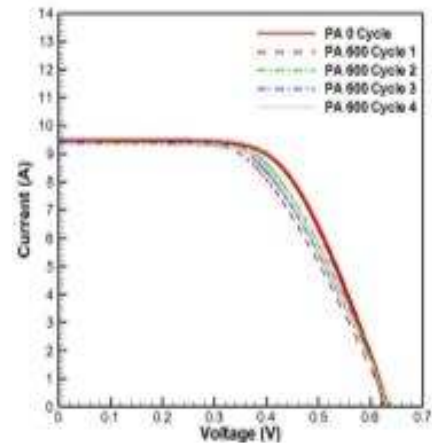
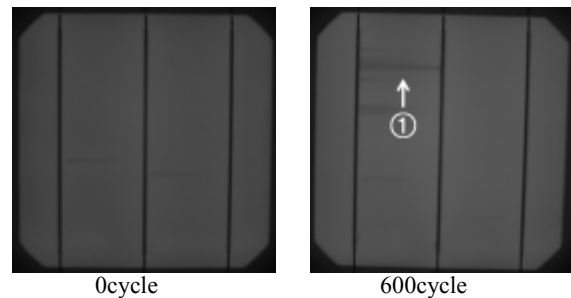
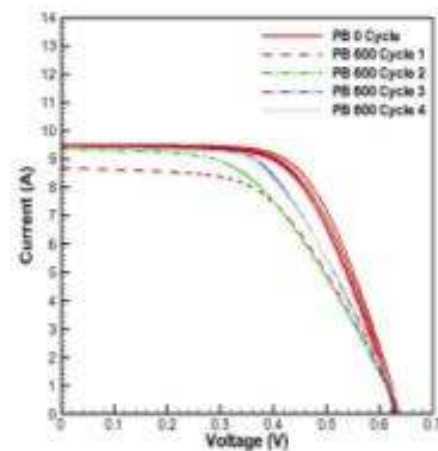
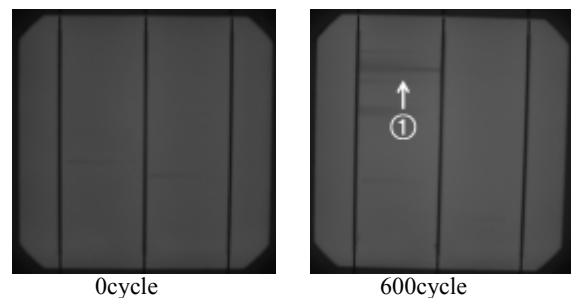
열충격 시험 후 효율 감소율이 발생한 원인을 분석하기 위해 I-V 특성곡선을 측정하여, PV 모듈의 전기적 특성변화를 관찰하였다. 또한, EL Image를 통하여 표면의 변화를 비교 분석하였다.

(1) A-Type

A-Type 시편의 열충격 시험 전·후 I-V 특성곡선을 취합하여 도식화하여 Fig. 4에 나타내었다. 열충격 시험 후 Current값이 감소되는 시점이 빨라지는 곡선의 특성은 직렬저항이 증가할 경우 나타나는 현상[4]으로 A-Type 시편의 효율 감소율은 직렬저항이 증가하여 나타난 현상으로 분석할 수 있다. EL촬영을 통해 표면의 이상유·무를 관찰한 결과, Fig. 5와 같이 외관상 큰 변화는 확인 할 수 없었으며, Fig. 5(a)①과 같이 Gridfinger의 부분적 손상으로 인한 음영 변화와 저항이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

(2) B-Type

B-type의 I-V 특성 곡선은 A-type의 I-V 특성 곡선 보다 상대적으로 다양한 경향성을 보였다. Fig. 6의 PB 600 Cycle 2와 같이 Current의 저하 시점이 빠르게 나타나는 직렬저항의 증가 및 PB 600 Cycle 1과 같이 Current의 초기 값이 저하된 병렬저항의 감소를 확인 할 수 있었다.[4] 여기서, 직렬저항의 증가는 Fig 7,②와 같이 Ribbon 접합부 손상에 의해 Ribbon이 박리되는 시점으로 전류의 흐름이 원활하지 못한 결과이며, 병렬저항의 감소는 Fig 7,③과 같이 Ribbon 접

**Fig. 4.** I-V Characteristic curve of A-type**Fig. 5.** EL Image of A-Type**Fig. 6.** I-V Characteristic curve of B-type**Fig. 7.** EL Image of B-Type

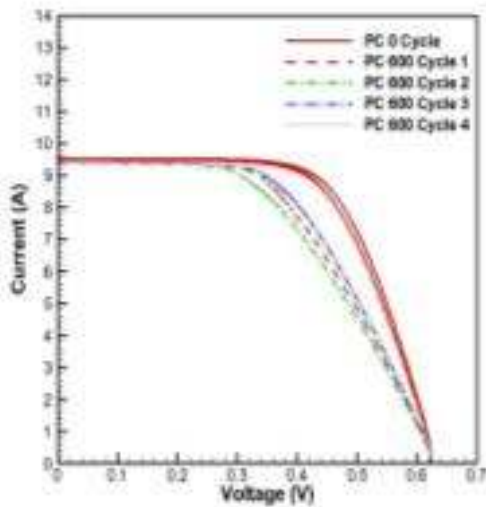


Fig. 8. I-V Characteristic curve of C-type

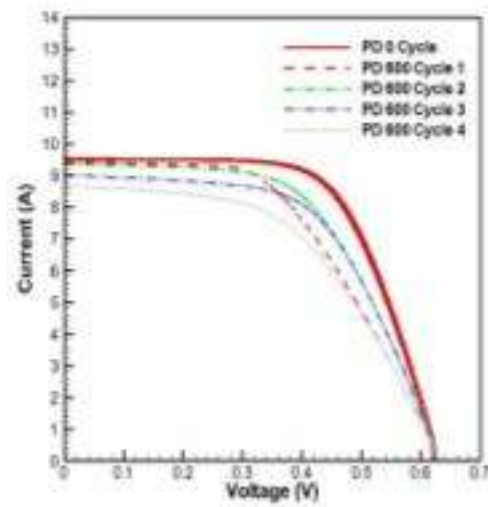


Fig. 10. I-V Characteristic curve of C-type

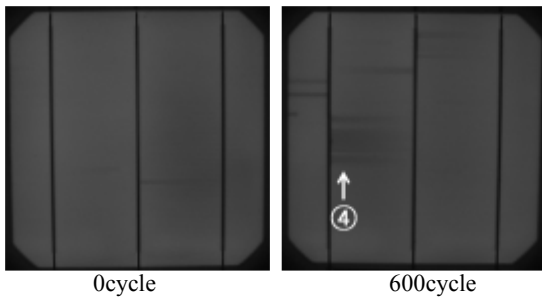


Fig. 9. EL Image of C-Type

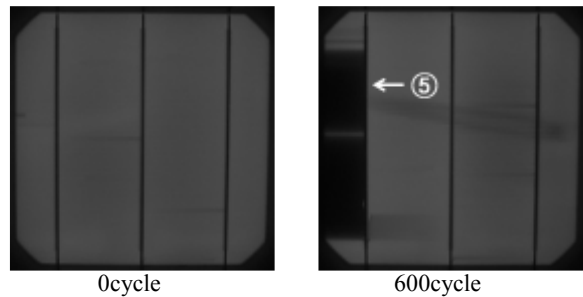


Fig. 11. EL Image of C-Type

합부의 단락으로 Silicon pn층이 손상되어 전류 생산이 불가능하게 되어 나타난 결과로 분석 할 수 있다.

(3) C-Type

C-Type 시편의 열충격 시험 후 I-V 특성곡선은 Fig 8과 같다. Fig 4의 A-Type과 같은 경향성을 보였으며, Current의 저하시점이 A-Type의 0.35(V) 보다 낮은 0.3(V)이하로 측정되는 것을 확인 할 수 있었다. 효율감소를 또한, 열충격 시험 후 A-Type의 8% 보다 큰 15.3%의 효율 감소율을 나타내었다. 하지만, Fig 9,④의 표면 변화는 Fig. 5,①과 같은 Gridfinger의 부분적 손상과 같으며, 음영 변화 및 저항이 증가하였다. 따라서, Ribbon의 두께는 동일하지만, Ribbon 접합부의 solder 조성에 따라 열충격 시험 후 접합계면에서의 저항 변화에 차이가 있다는 것을 확인할 수 있었다.

(4) D-Type

D-Type 시편의 열충격 시험 후 I-V 특성곡선의 변

화를 Fig. 10에 나타내었다. I-V특성곡선 분석결과, B-Type에서 보였던 경향성과 비슷한 병렬저항의 감소 및 직렬저항 증가에 따른 I-V특성곡선 변화가 모두 나타났다. 표면의 변화 또한, B-Type의 Fig 7,③과 같이 Ribbon 접합부의 단락으로 Silicon pn층이 손상된 것을 확인할 수 있었다.

열 충격 시험 후 각각의 시편을 비교 분석한 결과, Ribbon의 두께가 0.2mm로 같으며, solder 조성이 다른 A, C-Type 시편모두 Fig 4, 8에 나타낸 것과 같이 직렬저항이 증가한 I-V 특성곡선의 변화를 보였다. 또한, C-Type I-V 특성곡선의 Current 저하 시작점이 A-Type보다 0.05(V)빠르게 나타났으며, 효율감소율도 큰 것으로 나타났다. 하지만, Fig 5, 9를 통해 표면변화를 분석한 결과 열충격 시험 전·후 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Cell에서의 Crack이 없는 것으로 확인 되었으며, 직렬저항의 증가 원인은 Ribbon 접합부 및 Output Busbar에서의 저항이 증가하여 나타난 결과로 판단된다.

solder 조성이 같은A, B-Type(60Sn40Pb)과 C,

D-Type(62Sn2Ag36Pb)의 Ribbon 두께에 따른 I-V 특성곡선 및 EL Image를 비교하였다. Ribbon두께 0.2mm의 A, C-Type(Fig. 5, 9)의 시편보다 0.25mm인 B, D-Type(Fig. 7, 11) 시편의 표면에서 더 많은 부분의 음영변화 및 큰 효율 감소율을 확인 할 수 있었다. 또한, I-V 특성곡선 Fig. 6, 10을 통하여 Ribbon 접합부의 손상으로 인한 직렬저항 증가 및 병렬저항 감소의 복합적인 특성을 확인 할 수 있었다. 이는 같은 조성의 solder에서도 Ribbon 두께에 따라 효율감소율에 큰 차이를 가지며, Ribbon 두께가 두꺼울수록 반복적인 열응력에 의해 큰 응력집중이 발생하여 접합부에서 박리 손상이 발생되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

태양광 Ribbon의 두께와 사용된 solder 조성을 달리하여 A-Type(60Sn40Pb, 2.0mm), B-type(60Sn40Pb, 2.5mm), C-Type(62Sn2Ag36Pb, 2.0mm), D-Type(62Sn2Ag36Pb, 2.5mm)으로 시편을 제작 한 후 장기적 신뢰성 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시편의 초기효율을 측정한 결과, A-Type이 15.0%, B-Type이 15.4%, C, D-Type이 15.8%을 나타내었으며, 62Sn2Ag36Pb solder를 사용한 C, D-Type 시편의 초기효율이 더 높게 측정되었다.
- (2) 열충격 시험 후 A-Type은 초기효율 15.0%에서 13.8%로 감소하여 초기효율대비 8.0%의 효율감소율을 확인하였다. B-Type은 15.4%에서 13.0%로 15.4%의 효율감소율, C-Type은 15.8%에서 12.9%로 15.3%의 효율감소율, D-Type은 15.8%에서 13.2%로 16.2%의 효율감소율을 확인하였다.
- (3) Ribbon 두께가 각각 0.2mm, 0.25mm 시편의 I-V 특성곡선 및 표면을 분석한 결과, Ribbon 두께 0.2mm인 A, C-Type의 시편에서는 직렬저항이 증가하였고, 표면 변화는 열충격 시험 전·후 큰 차이가 없는 것으로 확인 되었다. Ribbon 두께 0.25mm B, D-Type에서는 직렬저항 증가 및 병렬저항 감소의 복합적인 효율

저하 특성이 나타났으며, Ribbon접합부의 단락에 의한 Cell 손상도 확인할 수 있었다.

- (4) Ribbon의 두께가 0.2mm로 같고 조성이 다른 A, C-Type의 시편을 비교 분석한 결과, C-Type의 I-V 특성곡선 Current 저하 시작점이 A-Type보다 0.05(V)빠르며, Ribbon 접합부 및 Output Busbar에서의 저항 증가로 인하여 효율감소율도 크게 나타난 것을 확인하였다. 또한, Ribbon 두께가 0.25mm인 시편 B, D-Type에서도 C-Type과 같은 조성의 D-Type 시편이 B-Type 시편보다 효율감소율이 큰 것을 확인 할 수 있었다.
- (5) SnAgPb계열 솔더를 사용한 시편이 초기 접합성 및 효율 측면에서 우수하였으나, 장기신뢰성에서 취약한 것을 확인 할 수 있었으며, Ribbon 두께가 두꺼울수록 Ribbon 접합부의 손상이 가속되어 장기적 관점에서의 성능이 저하되는 것을 확인 할 수 있었다. 향후 수치해석 및 시뮬레이션을 통하여 Ribbon두께에 따른 열응력 차를 분석하고, Ribbon 조성에 따른 태양전지 전면전극 Ag Paste의 접합 계면에서의 금속간화합물 생성 영향성에 대한 원인 규명 및 DB를 확보해야 할 것이다.

References

1. Kang Min-Soo, Kim Do-Seok, Jeon Yu-Jae and Shin Young-Eui, "The Study on Thermal Shock Test Characteristics of Solar Cell for Long-term Reliability Test", Journal of Energy Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 26~32 (2012)
2. Tae-Kyu Chun, Young-Chull Ahn, " Study on Analysis and Evaluation of Performance for Evacuated Tubular Solar Collector System", Journal of Energy Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 112~119 (2013)
3. S-J Kim, J-Y Choi, J-H Kong, J-H Moon, S-H Lee, W-H Shim, E-H Lee, E-J Lee, H-S Lee, "Soldering Process of PV Module manufacturing and Reliability", VOL.31, Journal of Energy Engineering, Vol. 23, No. 4 (2014)

NO.2, 2011.11.24.

4. Kang, Min-Soo, Jeon Yu-Jae, Kim Do-Seok, Shin Young-Eui, "Study on the Long-term Reliability of Solar Cell by High Temperature & Humidity Test", Journal of Energy Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 243~248 (2012)
5. D. C. Jordan, S. R. Kurtz, "Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review" Progress in Photovoltaics: Research and Applications, prog. Photovolt: Res. Appl.(2011)
6. Kang Min-Soo, Jeon Yu-Jae, Shin Young-Eui, "The Study on the Long- term Reliability Characteristics by Solar Cell Ribbon Thickness", Journal of Energy Engineering, Vol. 22, No. 4 pp. 7~11 (2013)
7. Hsin-Hsin Hsieh, Fu-Ming Lin, Fang-YaoYeh, Mei-HsiuLin, "The effects of temperature and solders on the wettability between ribbon and solar cell", Solar Energy Materials & Solar Cells 93(2009)