

박형 태양전지모듈 제작을 위한 저온 CP 공정 최적화에 관한 연구

진가언^{*,**} · 송형준^{**} · 고석환^{**} · 주영철^{**} · 송희은^{**} · 장효식^{**} · 강기환^{***}

^{*}충남대학교 에너지과학기술대학원

^{**}한국에너지기술연구원 태양광연구실

A Study on the Optimization of CP Based Low-temperature Tabbing Process for Fabrication of Thin c-Si Solar Cell Module

Jin Ga-Eon^{*,**} · Song Hyung-Jun^{**} · Go Seok-Whan^{**} · Ju Young-Chul^{**} · Song Hee-eun^{**} · Chang Hyo-Sik^{**} · Kang Gi-Hwan^{***}

^{*}Graduate School of Energy Science & Technology, Chungnam National University

^{**}Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research

[†]Corresponding author: hschang@cnu.ac.kr, ghkang@kier.re.kr

Abstract

Thin crystalline silicon (C-Si) solar cell is expected to be a low price energy source by decreasing the consumption of Si. However, thin c-Si solar cell entails the bowing and crack issues in high temperature manufacturing process. Thus, the conventional tabbing process, based on high temperature soldering ($> 250^{\circ}\text{C}$), has difficulties for applying to thin c-Si solar cell modules. In this paper, a conductive paste (CP) based interconnection process has been proposed to fabricate thin c-Si solar cell modules with high production yield, instead of existing soldering materials. To optimize the process condition for CP based interconnection, we compared the performance and stability of modules fabricated under various lamination temperature (120, 150, and 175°C). The power from CP based module is similar to that with conventional tabbing process, as modules are fabricated. However, the output of CP based module laminated at 120°C decreases significantly (14.1% for Damp heat and 6.1% for thermal cycle) in harsh condition, while the output drops only in 3% in the samples process at 150°C , 175°C . The peel test indicates that the unstable performance of sample laminated at 120°C is attributed to weak adhesion strength (1.7 N) between cell and ribbon compared to other cases (2.7 N). As a result, optimized lamination temperature for CP based module process is 150°C , considering stability and energy consumption during the fabrication.

Keywords: 박형 결정질 실리콘 태양전지모듈(Thin Si solar cell), 전도성 페이스트(Conductive Paste), 접합력 실험(Peel test), 환경시험(Environmental test), 저온 태빙 공정(Low temperature tabbing process)

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.37, No.2, pp.77-85, April 2017
<https://doi.org/10.7836/kjes.2017.37.2.077>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 05 April 2017

Revised: 18 April 2017

Accepted: 26 April 2017

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. 서론

최근 태양광 산업은 빠르게 성장하고 있으며, 그에 따라 생산량 증가와 함께 제조단가의 하락이 동시에 이루어지고 있다. 현재 태양광 산업에서 실리콘 및 wafer의 가격 점유율이 40%로 가장 높으며, 따라서 원가 절감을 위해서는 실리콘 웨이퍼의 양을 줄여 박형 결정질 실리콘(c-Si) 태양전지를 제작하고 상용화시키는 것이 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 박형 태양전지($< 100 \mu\text{m}$)는 기존 태양전지($\sim 180 \mu\text{m}$)에 비해 웨이퍼의 두께가 얇아짐에 따라 태양전지의 bowing 현상에 의한 파손이 자주 발생한다. 이러한 결함을 해결하기 위해 박형 태양전지의 제조 기술에 대해 다양한 연구가 진행되고 있으며^{1,2)}, 그에 따른 박형 태양전지의 모듈화에 대한 연구도 함께 진행되어야 한다. 일반적인 태양전지모듈의 공정 중 태양전지와 ribbon의 tabbing 공정은 전, 후면에 전기적인 열을 가하여 이루어진다. Ribbon의 납땜 시 리본 전극의 온도는 약 250°C 이상의 고온에서 tabbing이 이루어지는 것을 알 수 있다. 열팽창 계수가 다른 태양전지와 ribbon은 고온에서 tabbing 공정을 한 후 상온으로 냉각되는 과정에서 두 물질의 열팽창 계수 차이에 의해 물리적인 힘이 가해져 태양전지의 bowing 현상이나 파손이 발생할 수 있다^{3,4,5)}. 따라서 박형 태양전지는 기존 tabbing 공정의 높은 온도에서 더 손쉽게 파손이 일어날 수 있으므로 저온 tabbing 공정을 해야만 하며, 녹는점이 낮은 전도성 물질을 사용하여 태양전지와 ribbon의 전기적 접합을 이루어야 한다. 이를 위해 반도체 분야에서 사용되고 있는 저온 전도성 필름 및 페이스트 등이 기존 전도성 물질의 대안으로 제안되었고^{6,7)} 이를 적용하면 박형 태양전지를 모듈화 하는 과정에서 저온 tabbing으로 인해 파손을 최소화하여 박형 태양전지모듈을 제작할 수 있을 것이라고 판단된다. 또한, 고온 tabbing 공정을 저온 공정으로 변경하여 모듈 생산에 사용되는 에너지 및 제작 비용을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 박형 태양전지의 모듈화를 위한 저온 tabbing 공정에서 전도성 페이스트(CP, Conductive Paste)를 사용하였다. CP는 기존 tabbing 과정에서 사용하던 솔더링 물질보다 낮은 온도에서도 전기적 결함이 이루어지기 때문에 저온으로 tabbing이 가능할 것으로 예상된다. 저온 CP 공정은 전도성 페이스트를 태양전지 전극에 인쇄한 후 lamination 과정에서 tabbing 및 스트링이 동시에 수행되는 공정으로 태양전지모듈의 내구성을 고려한다면 lamination 온도 조건 또한 최적화하지 않으면 안 된다.

따라서 본 연구에서는 저온 CP 공정으로 제작한 모듈의 초기 출력 측정 및 환경시험 평가(damp heat test와 thermal cycle test)를 진행하였다. 환경시험을 통해 CP 공정 시 온도에 따른 소자 특성과 모듈의 신뢰성을 확인하였으며 최적의 lamination 온도 조건을 결정할 수 있었다. 마지막으로 90° peel test를 통해 CP 공정 온도에 따른 태양전지와 ribbon 사이의 접합 정도를 분석하여 공정 온도에 따른 소자 특성과의 상관성을 보았다. 이를 통해 저온 CP 공정의 실현 가능성을 확인하고 안정적인 태양전지 구현이 가능한 공정 조건을 도출하였다.

2. 본론

2.1 CP 기반 공정에 의한 태양전지모듈 제작

박형 태양전지는 기존의 태양전지에 비해 유연한 특성을 가지지만 외부의 열이나 압력에 의해 손쉬운 변형이 발생된다. 이는 모듈 제작 과정에서 태양전지가 파손될 가능성이 더 높다는 것을 보여준다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 실제로 모듈 제작 중 tabbing 과정에서 박형 태양전지의 bowing 현상이나 파손이 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위해 박형 태양전지 모듈을 제작하기 위한 적절한 방법이 제시될 필요가 있으며 특히, tabbing 과정의 변화가 불가피할 것으로 보인다.



Fig. 1 (a) Bowing and (b) crack issues in thin c-Si solar cells

본 논문에서는 박형 태양전지모듈의 제작을 위해 기존 공정의 전도성 물질을 대체하여 CP를 사용하였으며, 저온 tabbing 공정으로 진행하였다. 이 실험에서 사용한 CP의 물성표를 Table 1에 나타내었다. CP를 사용한 tabbing 방식은 Fig. 2와 같이 진행되어진다. 본 연구에서는 저온 CP 공정을 박형 태양전지($< 100 \mu\text{m}$)에 적용하기 위해, 기존 태양전지($180 \mu\text{m}$, 6 inch PERC c-Si cell, Sunrise)를 사용하여 실험을 진행하였다. 태양전지의 전극 위에 dispenser 장비(MUSASHI, SM200SX-3A)를 사용하여 일정한 속도로 태양전지 busbar 전극 위에 CP를 도포하였고, ribbon이 올려진 전극 양 끝단에 약 250°C 의 열을 3초간 가하여 ribbon을 고정시켜 tabbing 과정을 간단하게 마무리하였다. 이를 통해, 박형 태양전지에 열적인 stress를 최소화하여 태양전지의 파손을 줄일 수 있었다. 또한, ribbon을 고정시키는 것으로 lay-up 과정에서 ribbon의 틀어짐이 발생하지 않도록 하였다. 마지막 lamination 과정에서 CP가 녹으면서 태양전지와 ribbon의 접합이 완전히 이루어진다. 따라서 CP 기반 공정은 기존 tabbing 방식에서 태양전지 전극에 전체적으로 열이 가해지는 것과 달리 접착성이 있는 CP를 사용함으로써 tabbing 과정에서 양 끝단에 최소한의 열만 가하여 태양전지가 받는 열의 영향을 줄임과 동시에 ribbon을 고정시킬 수 있었으며, lamination 과정에서 전기적 접합이 이루어지게 되는 것이다. 이러한 과정으로 모듈을 제작하여 저온 CP 공정을 통해 모듈의 제작이 가능하다는 것을 제안하였다.

Table 1 Properties of conductive paste

Spec.	Unit	Value
Metal Alloy	-	Sn57.6Bi0.4Ag
Thixotropic Index (TI)	-	0.52
Tg	°C	72

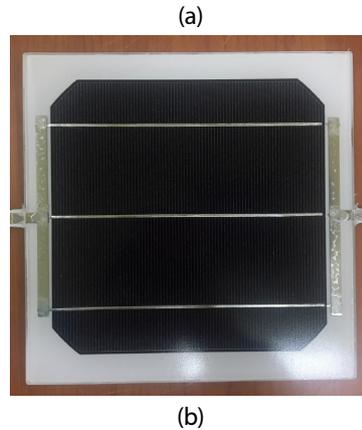
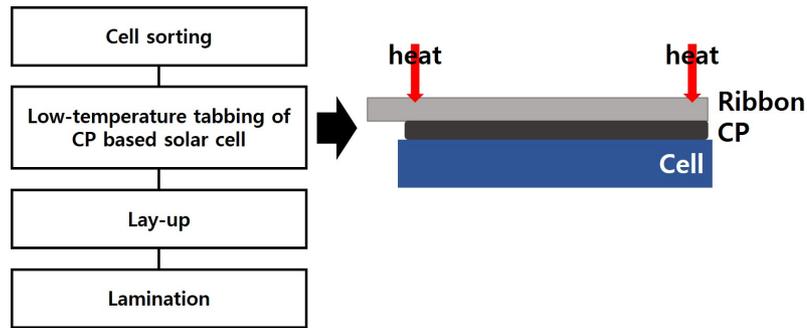


Fig. 2 CP based low-temperature interconnection process for c-Si solar cell module and (b) fabricated module through CP based low-temperature process

2.2 CP모듈의 신뢰성 평가

앞의 CP를 사용한 공정을 이용한다면 tabbing 공정만 수정하고, 나머지 기존 장비를 이용하여 박형 태양전지의 모듈화가 가능할 것으로 생각된다. 하지만 CP 기반 공정에서는 ribbon의 접합이 lamination 과정에서 이루어지므로 어떠한 온도 조건에서 CP가 녹아 ribbon과의 접합이 잘 되었는지 확인할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 다양한 lamination 온도로 CP 기반 공정에서 제작된 태양전지모듈의 환경 평가를 진행하였으며, 85°C와 상대습도 85%의 조건에서 damp heat 평가를 500시간 동안 진행하여 모듈 특성을 분석하였고, -40°C ~ +85°C의 온도 변화 조건에서 100 cycle 동안 thermal cycle test (1 cycle : 5시간)를 진행하였다. Lamination 과정 중 curing 공정 시 온도 조건에 따른 CP의 특성을 파악하기 위하여 각각 120°C, 150°C, 175°C의 조건에서 CP를 적용한 모듈을 제작하였다. 본 실험에서는 공정 온도에 따른 CP 기반 모듈의 장기 신뢰성 특성을 단시간에 확인하고자 하여 전면 유리와의 후

면 backsheet가 생략된 EVA / cell / EVA 구조로 모듈을 구성하였다. 환경시험 평가를 통해 CP 기반 공정으로 제작된 모듈의 신뢰성을 판단할 수 있으며, 이를 통해 CP 기반 공정 중 lamination의 온도 조건을 최적화할 수 있다.

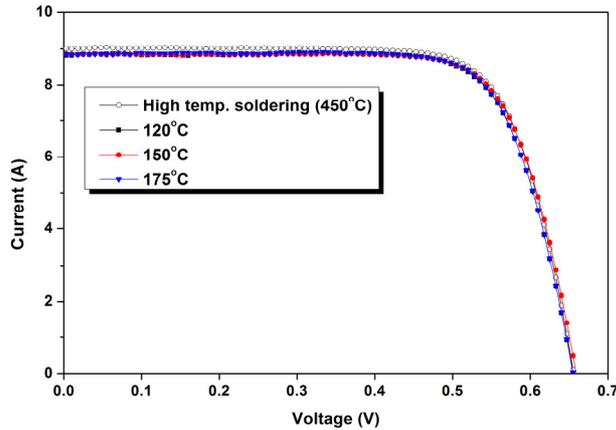


Fig. 3 The initial I-V curve of the photovoltaic modules

우선, 기존 공정으로 제작한 고온 솔더링(450°C) 모듈과 CP 공정으로 제작한 모듈의 초기 출력을 측정하여 비교하였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 고온 솔더링 모듈과 CP 공정으로 제작된 모듈의 I-V curve는 거의 동일하다. 이는 CP 기반 저온 공정이 기존 고온 tabbing 공정 대비 동등한 수준이기에 태양전지에 적용 시 동등한 효율 확보가 가능하다는 것을 보여주는 결과이다. 또한 lamination 공정 시 온도 변화에 상관없이 비슷한 소자 효율 특성이 나타난다. 이는 낮은 온도에서도 CP의 용융이 잘 되어 ribbon과의 접합이 잘 이루어졌거나 또는 태양전지와 ribbon을 눌러주는 EVA와 같은 원부자재의 압력에 의한 접합으로 설명될 수 있다. 따라서, 이의 정확한 판단을 위해 환경시험을 진행하고 분석하였다.

환경시험 진행 후의 출력 감소율을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 damp heat 500시간 진행 과정 중 모듈의 출력 감소를 나타낸 그래프이며, 125시간마다 출력을 측정하였다. 150°C와 175°C 모듈에서는 출력 감소율이 각각 3.2%와 3.6%로 나타났으며, 출력 감소가 크게 나타나지 않았다. 두 모듈의 효율 감소 수준은 기존 고온 tabbing 공정의 안정성과 매우 유사한 수준이다. 하지만 120°C 모듈에서는 14.1%로 큰 출력 감소율을 보였으며, 다른 두 모듈과 비교하였을 때 큰 차이를 나타내었다. 또한, 100 cycle의 thermal cycle 진행 과정 중 모듈의 출력 감소 그래프를 Fig. 4(b)에 나타내었으며, 위의 Fig. 4(a)와 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 이 그래프에서도 120°C 모듈이 150°C, 175°C 모듈 보다 출력 감소가 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며, 120°C 모듈의 출력 감소율은 6.0%로 각각 2.2%와 3.3%의 출력 감소율을 보이는 150°C, 175°C 모듈에 비해 더 떨어지는 것을 확인하였다. 위의 결과로 lamination 온도 조건에 따른 모듈의 신뢰성을 판단할 수 있었으며, CP 기반 공정에서의 적절한 lamination 온도 조건을 결정할 수 있었다. Fig. 5의 I-V curve에서 보이는 바와 같이 120°C 모듈의 전류가 크게 떨어지고 접촉 저항 증가로 인한 직렬 저항이 증가 되는 것을 확인하였다. 이는 lamination의 낮은 온도 조건으로 인해 CP의 용융이 제대

로 되지 않아 ribbon의 접합이 이루어지지 않았으며, 이로 인해 접촉 저항이 발생한 것으로 예상된다. Table 2에 모듈의 직렬저항을 나타내었으며, 120°C에서 damp heat test와 thermal cycle test 후의 직렬저항 값이 각각 19%, 8% 증가한 것을 보이고 150°C와 175°C에서는 damp heat에서 각각 5%, 8%의 증가, thermal cycle에서는 두 온도조건에서 약 2%의 증가를 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해 직렬저항의 증가로 인해 출력이 감소함을 확인할 수 있었으며, 120°C에서 직렬저항이 가장 증가하고 150°C에서 가장 안정적인 값을 보이는 것을 확인하였다. CP 모듈의 출력 값은 Table 3에 표로 나타내었다.

Table 2 Series resistance of CP modules

Time (h)	Damp heat			Cylce	Thermal cycle		
	Rs (Ω)				Rs (Ω)		
	120°C	150°C	175°C		120°C	150°C	175°C
0	8.34	8.00	8.01	0	8.38	8.25	8.26
500	9.92	8.44	8.61	100	9.05	8.41	8.406

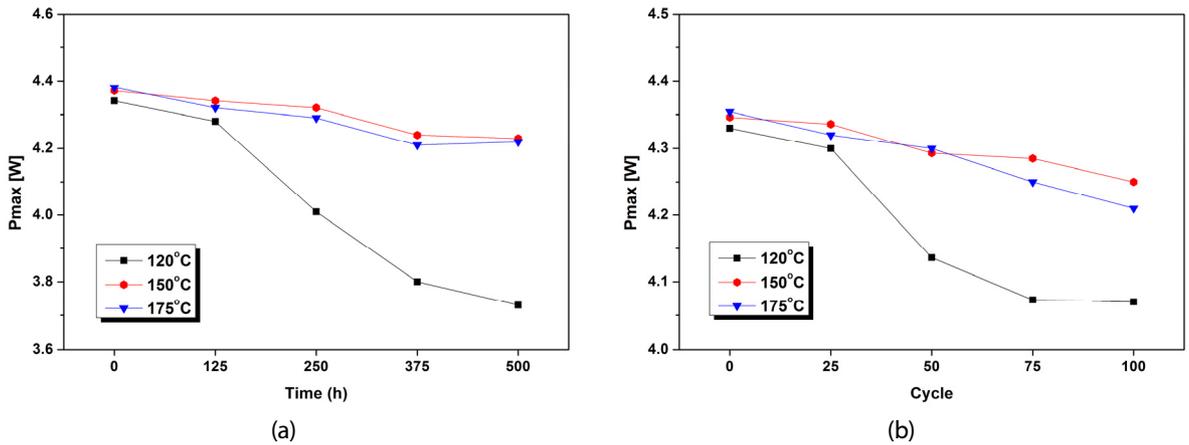


Fig. 4 The power output of CP modules after (a) damp heat and (b) thermal cycle tests

Table 3 Power output of the CP modules

Time (h)	Damp heat			Cycle	Thermal cycle		
	Pamx [W]				Pmax [W]		
	120°C	150°C	175°C		120°C	150°C	175°C
0	4.34	4.37	4.38	0	4.33	4.35	4.35
125	4.28	4.34	4.32	25	4.30	4.34	4.32
250	4.01	4.32	4.29	50	4.14	4.29	4.30
375	3.80	4.24	4.32	75	4.07	4.29	4.25
500	3.73	4.23	4.22	100	4.07	4.25	4.21

CP 공정으로 제작된 모듈의 환경시험 결과, 120°C의 lamination 조건에서는 CP 모듈의 신뢰성에 문제가 있으나, 150°C 이상에서 CP를 사용한 모듈에서는 안정적인 성능 확보가 가능할 것으로 예상된다. 그러나 lamination의 너

무 높은 온도 조건에서 제작된 모듈은 너무 높은 가교도로 인해 후에 결합이 발생할 수 있으므로^{8,9)} 150°C의 온도 조건이 가장 적절한 조건이라고 판단된다.

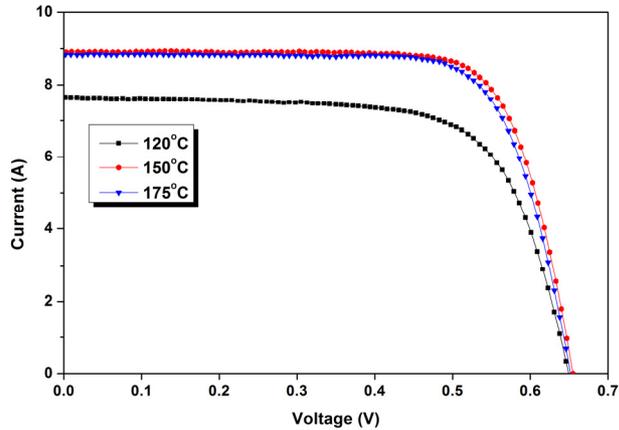


Fig. 5 I-V curve of the photovoltaic modules after damp heat test

2.3 Peel test 평가

앞에서 제시된 CP 기반 태양전지모듈의 공정 온도에 따른 특성 변화의 원인을 알아보기 위해 태양전지와 ribbon 사이의 결합력을 90° peel test를 통해 분석하였다.

시료는 위의 환경시험 평가와 동일한 lamination 온도 조건으로 제작하였으며, 원활한 실험을 위해 EVA 없이 cell과 ribbon의 결합만으로 제작하였다. Lamination 진행 직후의 시료와 damp heat test를 진행한 시료를 각각 측정하고 비교하였다. 측정한 peel test 그래프를 Fig. 6(a), (b)에 나타내었다. Lamination 직후 측정한 시료 중 150°C와 175°C 모듈의 경우 peel force의 값이 2.7 N 정도로 나타나며, 이는 기존 고온 공정으로 제작된 모듈과 비슷한 값(2 ~ 2.5 N)을 가진다. 그에 반해 120°C 모듈의 경우 peel force의 값이 1.7 N으로 앞의 두 개의 모듈 보다 낮은 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 하지만 기존 고온 tabbing 공정 결과 대비 큰 저하가 나타나지 않기에 소자의 성능은 비슷한 수준에서 유지된 것으로 예상된다. 한편, Fig. 6(b)에서는 환경시험 진행 후 측정하여 peel force가 전체적으로 떨어지는 경향을 보이거나 150°C, 175°C 모듈 같은 경우는 1.9 N의 peel force를 나타내 초기와 비교하여 약 0.8 N의 힘이 감소하였고, 그에 반해 120°C 모듈은 0.7 N으로 초기 보다 약 1.0 N 감소하였다. 이러한 이유로 500시간 이상 환경 시험을 진행한 120°C 조건의 모듈에서 태양전지와 ribbon 사이의 delamination이 관찰되었다. 위 결과로 CP는 120°C의 조건에서 녹지 않아 태양전지와 ribbon 사이의 접합을 이루지 못하며, 150°C 이상에서 접합이 이루어짐을 확인하였다. 이를 통해 초기에는 비슷한 출력이 나오는 모듈들의 신뢰성에 문제가 발생하는 원인들을 규명할 수 있었다.

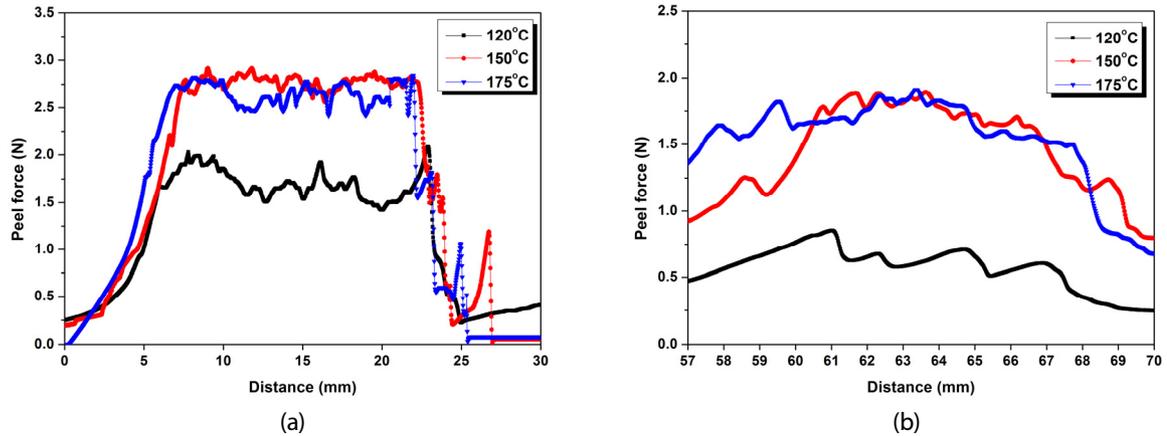


Fig. 6 Peel force of CP modules (a) before, and (b) after damp heat test

3. 결론

박형 태양전지의 모듈화를 위해 CP를 사용한 새로운 공정을 제안하였고, CP 공정으로 제작한 모듈의 신뢰성 평가와 peel test를 통하여 알아본 CP의 온도 특성과 태양전지와 ribbon 사이의 접합 특성으로 CP 공정을 최적화하고자 한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 열에 약한 박형 태양전지의 bowing 현상이나 파손을 줄여 모듈화하기 위한 방법으로 CP를 사용한 저온 tabbing 기술을 제안하였으며, 이를 통해 기존 tabbing 방식 보다 훨씬 적은 파손율로 박형 태양전지모듈을 제작할 수 있을 것으로 보이며, 태양전지와 ribbon 사이의 접합은 lamination 과정을 통하여 이루어진다고 가정하였다.
- (2) Lamination의 온도 조건에 따른 CP의 신뢰성을 확인하기 위하여 damp heat test와 thermal cycle test를 진행하였다. 실험 결과, 120°C 모듈에서의 출력감소율이 damp heat, thermal cycle test에서 각각 14.1%, 6.0%로 나타났으며 평균 약 3%의 출력감소율을 보인 150°C, 175°C에 비해 큰 감소율을 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해 CP 모듈은 150°C의 lamination 조건에서 제작되는 것이 가장 적절하다고 판단하였다.
- (3) Peel test를 진행하여 태양전지와 ribbon 사이의 접합과 CP의 온도 특성을 확인하였다. 실험 결과, 150°C 이상에서 peel force의 값이 ~2.7 N으로 나타나 태양전지와 ribbon의 접합이 적절하게 이루어지는 것을 보았고 120°C에서는 1 N 낮은 1.7 N의 peel force 값을 나타내어 접합이 잘 이루어지지 않은 것을 확인하였다. 또한 장기 신뢰성 실험 후 120°C 공정에서 제작된 CP 기반 모듈은 결합력이 0.7 N 이하로 급감하기에 delamination 과 같은 문제가 발생되어 소자의 특성이 저하되는 것으로 예상된다.

위의 결과, 박형 태양전지의 모듈화를 위해 CP를 사용한 저온 tabbing 방식을 적용할 수 있었으며 환경시험과 peel test를 통하여 적절한 lamination 온도 조건 또한 확인할 수 있었다. 이를 통해 저온 CP 공정을 최적화 하였으며, 후에 박형 태양전지모듈에도 또한 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 결과입니다(과제번호: 20143010011820, 20163020010890, 20163010012230).

REFERENCES

1. Kang, M. G., Choi, S. H., Jang, B. Y., Kang, G. H., Lee, J. I., and Song, H. E., Thin c-Si Solar Cell Technology Trends, Bulletin of the Korea Photovoltaic Society, Vol. 2, No. 1, pp. 6-17, 2016.
2. Baek, T. H., Hong, J. H., Lim, K. J., Kang, G. H., Yu, G. J., and Song, H. E., Bow Reduction in Thin Crystalline Silicon Solar Cell with Control of Rear Aluminum Layer Thickness, The Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 1, pp. 108-112, 2012.
3. Zemen, Y., Prewitz, T., Geipel, T., Pingel, S., and Berghold, J., The Impact of Yield Strength of the Interconnector on the Internal Stress of the Solar Cell Within a Module, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 4073-4078, 2010.
4. Lalaguna, B., Sanchez-Friera, P., Mackel, H., Sanchez, D., and Alonso, J., Evaluation of Stress on Cells During Different Interconnection Processes, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 2705-2708, 2008.
5. Gabor, A. M., Ralli, M., Montminy, S., Alegria, L., Bordenaro, C., Woods, J., and Felton, L., Soldering Induced Damage to Thin Si Solar Cells and Detection of Cracked Cells in Modules, 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 2042-2047, 2006.
6. Shimizu, S., Izawa, H., Ookubo, K., Funyu, S., Okada, Y., Funyu, K., and Tanaka, N., U.S. Patent Application 13/217,666.
7. Sakamoto, T., Hisamoto, K., and Etou, H., U.S. Patent Application 12/725,289.
8. Kang, K. C., Kang, G. H., Kim, K. S., Huh, C. S., and Yu, G. J., The Optimimum Gel Content Characteristics for Cell Cracks Prevention in PV Module, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1108-1109, 2007.
9. Kim, B. M., Lee, K. S., Kim, M. K., Kang, G. H., Lee, Y. H., and Lee, M. S., A Study on Manufacturing Process of PV Module According to EVA Sheet Type, The Korean Solar Energy Society, Vol. 30, No. 2, pp. 183-188, 2010.