

저온 전도성 필름으로 본딩된 태양광 모듈의 특성 평가 및 실증 연구

백수웅^{1,2}, 최광일¹, 이석호¹, 전찬혁³, 홍승민³, 이길송⁴, 신현우⁴, 양연원⁴, 임철현^{1,a}

¹ 녹색에너지연구원 기술사업실

² 전북대학교 화학공학과

³ ㈜아론 태양광사업부

⁴ 솔라테크(주) 연구개발부

Characterization of Low-temperature Conductive Films Bonded PV Modules and Its Field Test

Su-Wung Baek^{1,2}, Kwang-Il Choi¹, Suk-Ho Lee¹, Chan-Hyuk Cheon³, Seung-Min Hong³, Kil-Song Lee⁴, Hyun-Woo Shin⁴, Yeon-Won Yang⁴, and Cheol-Hyun Lim^{1,a}

¹ Renewable Energy R&D Team, Green Energy Institute, Mokpo 530-400, Korea

² Department of Chemical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

³ PV Division, Aaron Co., Ltd., Hwaseong 103-022, Korea

⁴ R&D Division, Solar Tech Co., Ltd., Anyang 403-817, Korea

(Received January 13, 2014; Revised February 22, 2014; Accepted February 24, 2014)

Abstract: In this paper, PV modules using a low-temperature conductive film(LT-CF) as a bonding material between a cell and a solder free ribbon were produced and chracterized, which is more environmental-friendly, cost effective and high efficient. Mainly, filed electrical performance of PV modules using three different types of bonding material; a convetional solder ribbon(SR), a LT-CF and a light-capturing Ribbon(LCR) were compared to comfirm the feasibility of LT-CF as a bonding material. The filed test were conducted for 3 months and results were discussed in terms of amount of output energy production and efficiency.

Keywords: PV module, Low-temperature conductive film (LT-CF), Silicon solar cell, Modulation

1. 서 론

태양광 시장의 치열한 경쟁에서 비롯한 태양광 발전 시스템의 저가화의 압박은 태양전지 박형화를 통한 재료

절감을 요구하고 있으며 [1] 이를 위해 기존 200 um 이상의 두께에 최적화되어 있는 모듈화 공정에 대한 검토 또한 필요한 시점이다.

일반적인 결정질 실리콘 태양전지의 모듈화 공정 중 솔더링에 의한 셀의 본딩 과정에서 200~300℃ 고온 압착을 하는데, 조건에 따라서는 잔류 열응력 및 열전도율의 차에 의해 발생하는 미세 균열 (micro crack)이나 휨 (bow) 현상은 모듈의 효율저하로 이어질 수 있다 [2,3]. 즉, 이를 박형 태양전지에 적용 시 당연한 수율 저하로

a. Corresponding author; chlim@gei.re.kr

이어질 것이 명백하므로 저온 본딩 기술에 대한 개발이 절실하다. 이를 위해 반도체 패키징 분야에서 사용되고 있는 저온 전도성 필름 (conductive film, CF) 및 페이스트 등이 기존 솔더링 기술의 대안으로 제안되었다 [4,5]. 모듈화 공정에 이 본딩 기술을 적용한다면 태양전지에 잔류 열응력을 최소화할 수 있을 뿐 아니라 솔더 물질 (납이나 플럭스)을 사용하지 않으므로 친환경적인 이점이 있다.

본 논문에서는 180°C의 저온에서 셀과 리본의 본딩재료 CF를 적용한 저온 본딩공정으로 태양전지 모듈을 제작하여 250°C의 고온에서 기존의 솔더링 공정으로 제작된 태양전지 모듈의 전기적, 물리적 특성의 비교를 통해 저온 CF 본딩 공정의 기존 솔더링 공정에 대체 가능 여부를 검토하고자 하였다. 또한, 실의 실증 연구를 통해 모듈의 효율 손실 여부 및 신뢰성 또한 검토되었다. 이를 위해 먼저 CF를 적용한 저온 본딩과 기존의 솔더링 본딩으로 200 μm 두께의 셀에 각각 Pb-free 리본 (PFR)과 솔더리본 (SR)을 본딩하여 셀에 발생하는 휨과 크랙등을 검토하였다. 또한, 표 1과 같은 3종류의 250 Wp급 모듈을 제작하여 3개월간의 실증실험을 통한 모니터링 데이터를 확보하여 출력특성을 비교하였다. 특히 저온본딩 공정을 시행할 경우 도입할 수 있는 광 캡처 리본 (light capturing ribbon)은 광산란 효과로 수광 효율을 향상시키고자 하였다.

2. 실험 방법

태양전지의 스트링 형성을 위한 공정중 기존 솔더링 공정과 CF를 적용한 저온 본딩의 공정의 모식도를 그림 1에 나타 내었다. 두 공정의 가장 큰 차이는 저온 공정의 경우 열과 함께 압력을 가한다는 것이다. 따라서 기존 솔더링 공정에 동등 수준 이상의 전기적 물리적 접합을 얻기 위해서는 공정 중 열과 압력의 최적화가 필요하다.

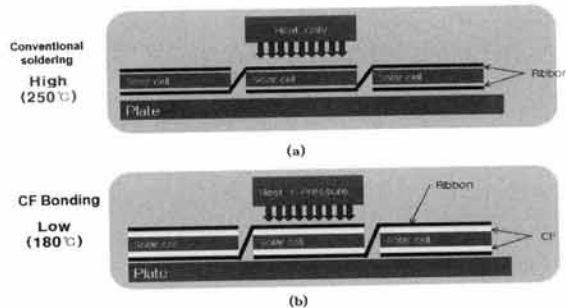


Fig. 1. Schematic illustrations of the bonding process with different bonding materials: (a) conventional soldering (SR) and (b) low-temperature CF bonding (CF-PFR, LCR).

Table 1. Comparison of electrical characteristic between the conventional and low-temperature process.

Sample	Bonding process	Ribbon	Temp. (°C)
SR	Soldering	Solder	250
CF-PFR	CF	Pb-free	180
CF-LCR	CF	Light capturing	180

2.1 저온 CF 본딩 모듈제작 공정

그림 2는 온도, 압력, 본딩 시간 등 본딩 조건의 예비실험을 통해 최적화된 CF를 적용한 저온 본딩의 세부 공정 과정을 나타내었다. 스트링 형성을 위해 셀 (6인치, 3버스바, 단결정 실리콘) 상단 및 하단의 전극에 CF (히타치케미칼, CF-SX)를 정렬하고, 1 MPa의 압력과 70°C 온도에서 1 sec 동안 CF를 가본딩하여 실온에서 CF가 접착된 전지에 PFR 혹은 광 LCR을 정렬한 후 2 MPa의 압력과 185°C 온도에서 7.5 sec 동안 접합시켰다. 대조군으로 기존 솔더링 공정에 의해 제작된 모듈은 동일한 셀을 이용하여 Sn과 Pb의 함유량이 각각 60%, 40%인 솔더리본으로 250°C온도에서 솔더링되었다.

본 CF 저온 모듈 제작에 사용된 공정장비는 (주)아론에서 자체 개발되었다. (Model: ARCF-700, 생산 속도 700 cell/hr, 열원: HOT BAR, 공정 범위 ~190°C, ~2 MPa)

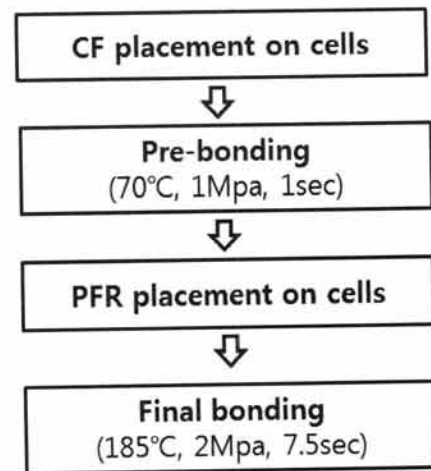


Fig. 2. Sequence of the low-temperature CF bonding process.

2.2 분석 및 평가

열적 용융에 의해 분딩되는 기존의 Tabbing & Stringer 공정상에서는 crack, 틀어짐, 간격, 휨 현상, Flux의 잔사에 의한 void formation, 박리현상 등 공정상 여러 가지 불량이 존재한다 [7,8].

따라서 분딩 공정 후에 셀에 발생하는 불량 현상을 평가하기 위하여 분딩 전후의 셀의 휨 정도인 bow를 측정하였으며, 모듈의 micro-crack 유무를 확인하기 위하여 각각의 모듈공정을 통해 제작한 250 W급 모듈에 대하여 EL (electro luminescence) 측정을 실시하였다.

2.3 필드 테스트

표 1에서 언급한바와 같이 기존 솔더링 공법으로 제조된 SR 모듈과 CF에 의하여 제조된 CF-PFR 및 CF-LCR 모듈을 그림 3과 같이 태양광 모니터링 구조물에 부착하여 실증 실험을 진행하였다. 구조물의 위치는 위도 34° 81', 경도 126°, 25'이며 모듈 위치에 따른 오차를 최소화하기 위하여 45°로 고정하였다.

모듈의 발전량 및 전기적 특성은 EKO사의 I-V Curve Tracer (Model : MP-160)를 통해 얻었고, 단락전류 (Isc), 개방전압 (Voc), 최대출력 (Pmax), 정격전류 (Ipm), 정격전압 (Vpm), 충전율 (fill factor), 광전변환효율 (Eff.)과 같은 실측된 정보를 모니터링 PC에 매 10분 간격으로 저장하여 데이터를 수집하였다.

실증 실험은 2013년 7월부터 2013년 10월까지 진행되었고, 시간은 오전 6시부터 오후 7시까지 측정하였다. 또한, 적외선 열화상 카메라 (FLIR, T335)를 이용하여 핫스팟 생성 유무 관찰을 통해 신뢰성 평가를 하였다.



Fig. 3. Field test with different types PV modules with conventional soldering (SR) and low-temperature CF bonding (CF-LCR, CF-PFR).

3. 결과 및 고찰

그림 4에서는 저온 CF 분딩 및 기존 솔더링 공정을 통해 PFR 및 SR을 각각 셀에 부착한 10개의 샘플을 제작하여 셀의 휨 정도를 실측하였다. 기존 솔더링 공정 (SR)은 평균 3.15 mm의 휨현상을 보였으며 이 값은 기존 보고된 일반적인 3~4 mm 범위에 해당된다 [9]. 이에 반해 저온 CF 공정은 1.42 mm로서 54.9%의 휨 억제 현상이 확인되었다.

셀의 휨현상은 셀의 두께가 얇을수록, 분딩 온도가 높을수록 증가되며 일반적인 솔더링 공정 범위인 250~400°C 범위에서 3~4 mm의 휨현상이 관찰되었고, 이는 100 Mpa에 해당하는 잔류응력이 발생했음이 보고된 바 있다 [9]. 따라서 저온 CF 분딩은 셀에 발생하는 잔류응력을 효과적으로 줄였다고 할 수 있다.

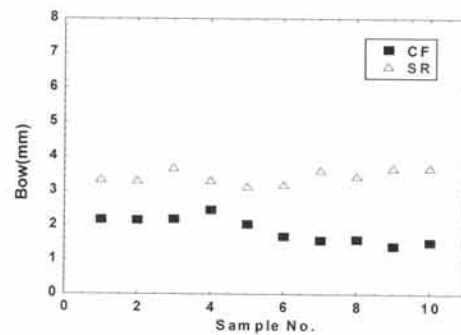


Fig. 4. Bow reduction in low-temperature CF bonding process compare to conventional soldering.

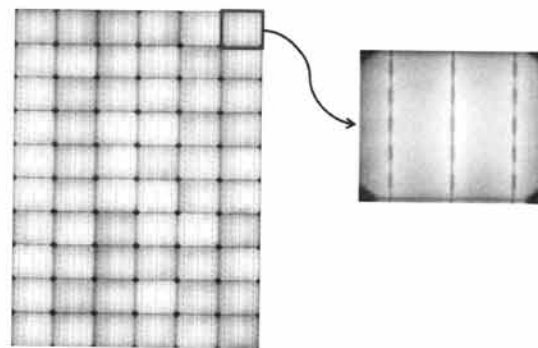


Fig. 5. Electroluminescence image of a PV module using low-temperature CF bonding process.

그림 5에서는 저온 CF 분딩 공정에 의해 제작된 250 W급 모듈의 micro-crack 유무를 확인하기 위한

Table 2. PV characteristics of different types of PV modules.

Name	Isc (A)	Voc (V)	Pm (W)	FF (%)	Eff (%)
SR	8.85	37.84	253.10	75.54	15.97
CF-PFR	8.82	37.47	253.41	76.81	15.94
CF-LCR	8.76	37.56	252.67	76.69	15.99

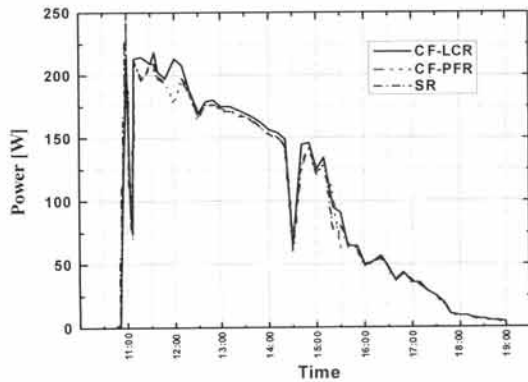


Fig. 6. Daytime power generation of different types of PV modules.

EL 측정 결과를 나타내었다. 이 EL 신호는 퀴시 페르미준위에서는 전자와 홀의 분리와 내부 전압에 의해서 결정이 되는데, 명도가 높은 곳은 내부전압이 높은 곳, 어두운 곳은 내부 전압이 낮은 곳을 의미한다 [10]. 즉, 어두운 곳은 측정하는 곳에 저항이 높음을 의미하며 이는 크랙이나 마이크로 크랙들의 셀의 불량률 의미한다. 그림에서 확인할 수 있듯이 CF 저온 분당으로 제조된 모듈에서는 EL 측정 결과 비교적 균일한 형태의 EL 신호가 측정되었다. 따라서 최적화된 공정을 통해 제작된 저온 CF 모듈의 경우 열적 혹은 물리적 잔류 응력에 의한 불량 요소들이 검출되지 않았다고 판단할 수 있다.

표 1에서 언급한 바와 같이 250 W급 모듈을 기존 솔더링 공법으로 제조된 SR 모듈과 CF에 의하여 제조된 CF-PFR 및 CF-LCR 모듈을 제조하여 솔라 시뮬레이터를 통해 전기적 특성을 측정하였다.

표 2에 나타난 결과와 같이 먼저 SR과 CF-PFR을 비교해 보면 기존 솔더링 방식과 전도성 필름을 이용한 저온 분당으로 제조된 모듈간의 전기적 특성 차이는 대동소이함을 알 수 있다. 즉, 이는 저온 공정임에도 기존 솔더링 방식을 대체할 수 있으며 납이나 플

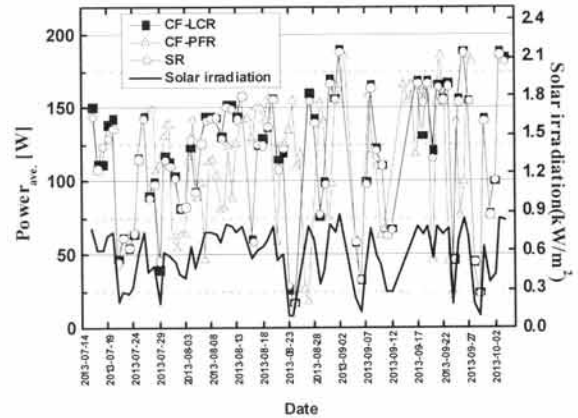


Fig. 7. Average power generation of different types of PV modules and its corresponding solar irradiation during summer.

릭스와 같은 솔더 물질을 사용하지 않을 수 있으므로 환경 친화적임을 의미한다.

여기에 빛의 ~5% 내외의 광산란 증진 효과 [11]로 효율 증진이 예상되는 LCR을 이용한 CF-LCR의 경우 본 특성 평가에서는 오차 범위 내의 결과를 보여 향후 LCR 공정에 대한 최적화 및 세부적인 평가가 필요할 것으로 사료된다. 이와 같이 측정된 모듈을 그림 3과 같이 실외에 설치하여 2013년 7월부터 2013년 10월까지 실증 실험을 실시하였다.

그림 6은 하계기간 중 발전이 우수한 날인 2013년 7월 16일에 수집된 일일 측정 결과를 비교한 그래프이다. SR과 CF-PFR의 경우 전반적으로 발전량은 차이가 크지 않으나 CF-LCR의 경우는 일조량이 좋은 11:00~14:00 사이에 발전량이 우수함을 알 수 있다. 이는 저온 CF분당 법으로 기존 솔더링 방식이 대체 가능하며 솔라시뮬레이터 결과에서는 보이지 않았으나 LCR에 의한 광산란 증진 효과가 입증되었다고 할 수 있다.

그림 7에 나타난 데이터는 EKO사의 I-V Curve Tracer (Model: MP-160)에 의해 매 10분 간격으로 측정된 출력값 중 11:00~16:00의 출력값 (36개)을 평균하여 일일 평균 출력값 [W]으로 계산하였다.

따라서 실제 정량적 발전량 데이터는 아니나 각각의 모듈에 대한 발전 역량을 이해하기에는 충분할 것으로 사료된다. 일일 평균 출력값은 그날의 평균 일조량과 같은 경향으로 움직이고 있음을 알 수 있으며 CF-LCR의 출력값이 가장 높았으며, CF-PFR, SR은

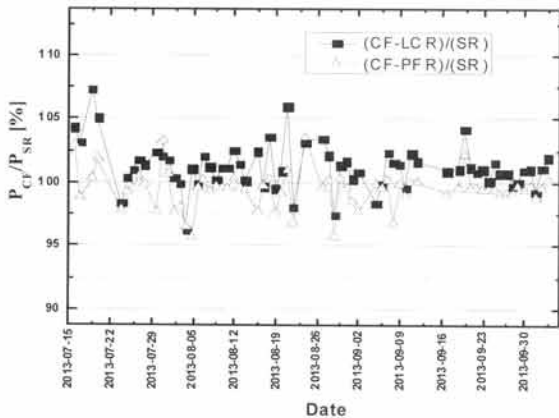


Fig. 8. The ratio of power generation of low-temperature CF modules (CF-LCR, CF-PFR) vs conventional soldering module.

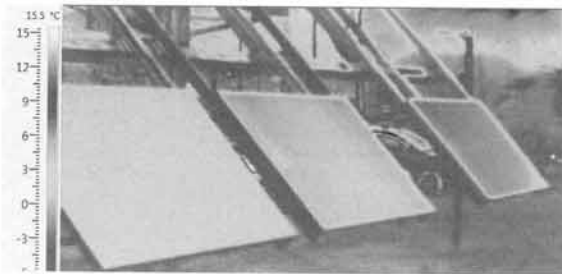


Fig. 9. Thermal analysis for different types of PV modules during field test.

유사하였다. 이때 LCR 모듈의 최고 발전량은 상용화 모듈의 발전량에 비해 최고 9.5 W 향상된 결과를 확인할 수 있었다. 이를 보다 명확한 비교를 위해, 그림 8에 저온 분당된 모듈의 일일 평균 출력값과 일반 솔더링된 모듈의 출력값의 비를 나타내었다. 즉, $P(\text{CF-LCR})/\text{SR}$ 은 LCR의 광산란 증진 효과, $P(\text{CF-LCR})/\text{SR}$ 은 CF 저온 분당의 효과를 볼 수 있다.

일반 솔더링으로 제조된 모듈을 기준으로 볼 때 CF 저온 분당된 모듈의 경우 평균 99.5%, LCR 모듈은 평균 101.2%의 일일 평균 출력값 비를 보였다. CF 저온 분당된 모듈은 일반 솔더 모듈과 거의 유사한 출력 특성이 필드에서도 확인되었으며, LCR 모듈의 광산란 증진 효과는 특히 일조량이 뛰어난 날에 그 효과가 높음이 확인되었다.

2013년 7월부터 2013년 10월까지 실증 실험이 진행된 후 적외선 열화상 카메라를 이용하여 핫 스팟 생

성 유무 관찰을 위한 열화상 이미지를 그림 9에 나타내었다.

촬영 위치 및 거리에 따른 온도 의존성으로 절대 온도의 신뢰성은 낮으나, 모듈 내의 표면 온도가 상대적으로 균일한 것으로 보여진다.

즉, 저온으로 CF 분당된 모듈의 셀과 리본간 형성된 전기적, 물리적 접촉이 3개월간의 옥외테스트 중에 발생할 수 있는 온도 차, 수분, 자외선 등에 의해 훼손되지 않고, 제조 당시 형성된 물성을 유지하고 있다고 할 수 있겠다. 또한, EL에는 측정되지 않았으나 공정 중에 발생하였을 수 있는 잠재적 결함 등도 진행되지 않았음을 의미한다.

4. 결론

기존 솔더링 방식의 대안으로 저온 CF로 분당된 태양광 모듈을 제조하여 태양전지에 발생하는 불량, 전기적 특성 및 필드테스트를 진행하였다. 그 결과, 셀에 발생하는 휨 현상은 54.9% 억제 가능하였으며, EL 검사에서도 미세 크랙이 검출되지 않았다. 솔더 물질이 사용되지 않은 리본 (PFR)을 사용하여 180°C의 저온에서 분당을 하였음에도 불구하고, 동등 수준의 전기적 특성을 얻을 수 있었으며, 수광 증진 효과가 있는 리본 (LCR)을 사용할 경우 필드 테스트에서 1.2%의 출력 증진 효과를 확인하였다. 적외선 열화상 카메라 검사를 통해 3개월간의 옥외 테스트 후에도 제조 당시 모듈 특성을 유지하고 있음을 확인할 수 있었다.

따라서, 저온 CF 공정은 셀에 발생하는 잔류응력을 줄여 불량을 효과적으로 억제 가능하여 향후 수요가 증가될 것으로 예상되는 박형셀에 적용 시에도 기존 솔더링 공정 대비 생산성 향상이 기대된다. 또한, 솔더 물질을 사용하지 않으므로 친환경적인 차세대 공정기술로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 신재생에너지융합원천기술개발사업 연구 과제입니다. (No. 2011T100100367)(No. 20133030011020)

REFERENCES

- [1] D. Nikolic, M. Bojic, J. Skerlic, J. Radulovic, and M. Miletic, *A Review of Silicon Solar Cells in Photovoltaics Technology* (Center for Quality, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, 2013)
- [2] A. M. Gabor, M. Ralli, S. Montminy, L. Alegia, C. Bordonaro, J. Woods, and L. Felton, *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Dresden, 2006)
- [3] M. Kontges, I. Kunze, S. Kajari-Schroder, X. Breitenmoster, and B. Bjorneklett, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **95**, 1131 (2011).
- [4] Sakamoto, Tomonari, K. Hisamoto, and E. T. O. U. Hirotohi, U.S. Patent Application 12/725,289.
- [5] Shimizu, Shigenori, U.S. Patent Application 13/217,666.
- [6] G. H. Kang, G. J. Yu, H. K. Ahn, and D. Y. Han *J. KIEEME*, **17**, 1289 (2004).
- [7] M. Kontges, *Origin and Consequences of (Micro)-Cracks in Crystalline silicon Solar modules* (PV Module Reliability Workshop, 2011)
- [8] S. J. Kim, J. Y. Choi, J. H. Kong, J. H. Moon, S. H. Lee, W. H. Shim, E. H. Lee, E. J. Lee, and H. S. Lee, *The Korean Solar Energy Society*, **31**, 303 (2011).
- [9] Chen and C. Hung, *International Symposium on Solar Cell Technologies* (Taipei, Taiwan, 2008)
- [10] Chaturvedi, Pooja, B. Hoex, and T. M. Walsh, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **108**, 78 (2013).
- [11] Wootton and R. Gerald, U.S. Patent No. 20,120,247,554. 4 Oct. 2012.