

# 고효율 태양광 모듈 제작을 위한 스트링 공정 최적화

지홍섭 · 문대한 · 송진호 · 정채환\*  
광에너지융합그룹, 한국생산기술연구원, 광주, 61012

## Shingled String for the High Performance Photovoltaic Module

Hongsub Jee · Daehan Moon · Jinho Song · Chaehwan Jeong\*

Applied Optics And Energy Research Group, Korea Institute Of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

Received July 23, 2018; Revised December 10, 2018; Accepted December 19, 2018

**ABSTRACT:** The High Performance Module With The Shingled String Has Several Advantages Such As The Larger Active Area, Higher Open-Circuit Voltage And Smaller Cell To Module (Ctm) Loss. To Obtain Increase Of Power In Pv Shingled Module, The Detailed Condition Of Various Parameters Related To Cutting And Bonding Process Were Investigated In This Study. We Searched The Optimized Cutting Conditions Of Laser Scan Speed, The Number Of Laser-Scribing And Also Bonding Conditions Of Electrically Conductive Adhesives (Eca) By Varying Amount Of Eca, Curing Time And Curing Temperature. The Shingled Pv Module Showed 25.4W of Maximum Power At 60 Rpm Of Dipensing Motor Speed, 30 Seconds Of Curing Time And 140 °C Of Curing Temperature, Respectively.

**Key words:** Shingled, Photovoltaic, Laser Scribing, Singulation, String

### Subscript

ECA : electrical conductive adhesives

PV : photovoltaic

Voc : open-circuit voltage

CTM : cell-to-module

Pmax : maximum output power

UV : ultra violet

RPM : revolutions per minute

Ag : silver

식중 최근 주목을 받고 있는 것은 쉐들드 구조를 사용하여 태양 전지 스트링을 만드는 것인데, 이 방식은 태양전지를 레이저를 사용하여 절단한 뒤 전도성 접착제를 사용하여 직렬로 연결된 태양광 스트링을 제작한 후, 이 스트링을 이용하여 태양광 모듈을 만드는 방식이다. 이 방식의 장점은, 모듈 설치면적 대비 설치된 셀의 수량과 active area를 증가시킴으로써 더 큰 출력을 갖게 된다는 것인데, 이러한 특징때문에 도심과 같은 한정된 설치면적을 갖는 곳에서 효과적으로 발전할 수 있다는 장점이 있다.<sup>3,4)</sup> Fig. 1은 이 방식으로 태양전지 스트링이 제작되는 것을 보여주고 있는데 먼저 6인치 태양전지 셀을 레이저로 분할한 뒤에, 전도성 접착제인 electrical conductive adhesives (ECA)를 사용하

### 1. 서론

실리콘 태양전지를 사용한 태양광 모듈의 제작은 친환경적이며 무제한적인 에너지를 생산하는 태양 에너지를 사용하는 가장 일반적이면서 적극적인 방법이라고 할 수 있으며<sup>1,2)</sup> 이 방법의 가장 큰 특징은 태양광을 에너지로 사용하기 위해 다른 발전소와 같이 큰 비용을 필요로 하지 않으며 집 지붕과 같이 작은 면적에도 설치가 가능하다는 장점이 있다. 태양광 모듈 제작 방

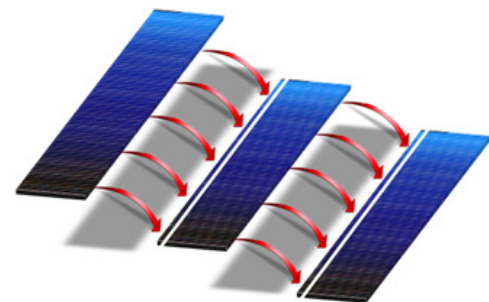


Fig. 1. Schematics of string array

\*Corresponding author: chjeong@kpvac.or.kr

여 분할된 개별의 셀을 직렬로 연결한다.

본 연구에서, 직렬로 연결된 스트링을 사용하여 60셀 태양광 모듈을 만들기 위해 길이 약 80 cm의 스트링을 사용하였으며 이를 위해 폭 3.01 cm로 분할된 태양전지 27개가 직렬로 연결되었다.

## 2. 실험

싱글드 구조의 태양전지 스트링을 만들기 위해 먼저, 6인치 태양전지 셀을 ultraviolet (UV) 레이저(wavelength: 355 nm, frequency : 150 KHz from Coherent)를 사용하여 분할하였다. 최적의 레이저 분할 조건을 찾기 위해서 레이저의 스캔 속도와 스크라이빙 횟수를 변경하며 실험을 진행하였고 분할된 셀은 광학 현미경(MF-A101D from Mitutoyo)에 의해 분석되었다. 최적의 스캔 속도를 찾기 위해서 먼저 레이저의 스캔 속도를 500 mm/s에서 6000 mm/s 까지 500 mm/s 씩 증가시키며 레이저 스크라이빙을 1회 실시하였고, 광학 현미경을 통해 top view를 분석하여 스캔 속도의 변화에 따른 셀 표면에 조사된 레이저 폭의 변화를 분석하였다. 레이저 스캔 속도에 따른 절단면 분석을 위해, 스크라이빙 횟수를 35회로 고정하채, 이전과 동일하게 스캔 속도를 500 mm/s에서 6000 mm/s 까지 500 mm/s씩 증가시켰고, 분할된 셀은 광학 현미경을 통하여 절단면 분석을 하였다. 최적의 스크라이빙 횟수를 찾기 위해서 스캔 속도를 3000 mm/s로 고정하채 스크라이빙 횟수를 5회에서 50회까지, 5회씩 증가시킨 후 셀을 분할하였고 광학 현미경으로 절단면 분석을 하였다. 위의 실험을 통해 찾은 최적의 조건으로 분할된 셀은 스트링 제작을 위해서 ECA (CA-3556HF from Henkel)를 사용하여 직렬로 연결되었는데, 실험에 사용된 ECA는 약 35,000 mPa·s의 점도와 0.0025 Ω·cm의 전기 저항 값을 갖고 있으며 태양광 모듈의 양산을 고려했을 때 시장에 존재하는 여러 ECA들에 비해 빠른 경화시간과 낮은 전기 저항 값을 갖는 등, 매우 우수한 광학적 특성을 갖고 있어 스트링 제작에 사용하게 되었다.<sup>5)</sup> CA-3556HF는 컴퓨터에 의해 제어되는 ECA dispenser에 의해 분사되며 직렬로 연결되어 제작된 스트링은 ECA의 경화 조건에 따라 출력 특성이 달라지게 된다. 일반적으로 태양광 모듈 제조시 솔더링 공정은 모듈의 신뢰도에 큰 영향을 끼치는<sup>6)</sup> 공정인데 기존의 접촉식 인두나 열풍 가열방식은 얇은 셀을 사용할 경우 공정중 파손 위험이 크지만<sup>7)</sup> ECA를 사용하는 본 방식은 위와 같은 위험에서 상대적으로 자유롭다는 장점이 있다. 최적화된 접합 조건을 찾기 위해 ECA를 분사하는 모터의 속도에 의해 결정되는 ECA의 양, 분사 후 ECA를 경화시키는 온도 및 경화 시간에 따른 분석을 하였다. 이를 위해 dispenser 모터의 속도를 40 revolutions per minutes (RPM), 60 RPM, 90 RPM, 120 RPM으로 바꿔가며 스트링을 제작하여 출력을 측정하였고 경화 조건에 따른 변화 분석을 위해 경화 시간을 5초, 30초, 60초,

120초로 증가시킨 후 스트링의 출력을 측정하였다. 마지막으로 경화 온도에 따른 스트링의 출력 변화를 분석하기 위해 경화 온도를 100, 120, 140, 160로 바꿔가며 스트링을 제작하였다. 스트링의 분석은 태양광 시뮬레이터(Long pulse solar simulator from WACOM)를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 UV 레이저의 스캔 속도를 변화 시키며 스크라이빙을 1회 실시한 태양전지의 top view이다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 스캔 속도가 500 mm/s, 1000 mm/s일 때는 burn in 현상이 일어나며 이는 너무 느린 스캔 속도 때문에 태양 전지 표면에 과다한 열에너지가 전달 되기 때문이다.

스크라이빙 폭은 500 mm/s일 때 42.48 μm이며 스캔 속도가 증가함에 따라 스크라이빙 폭도 34.86 μm (1000 mm/s), 27.23 μm (1500 mm/s), 24.51 μm (2000 mm/s)로 점점 줄어들다가 3000 mm/s 이상에서는 약 18~20 μm의 폭으로 스크라이빙 된다. 스캔 속도가 3500 mm/s 이상일 때는 지나치게 빠른 스캔 속도 때문에 레이저에 조사된 영역이 스팟 형태로 나타나기 때문에 레이저 분할 조건에 적합하지 않다는 것을 알 수 있으며 최대 스캔 속도는 3000 mm/s를 넘지 말아야 한다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3은 스크라이빙 횟수를 35회로 고정한 뒤, 레이저 스캔 속도를 500 mm/s에서 6000 mm/s 까지 500 mm/s 씩 증가시키며 셀을 분할하여, 절단된 측면을 분석한 사진이다. 스캔 속도가 500 mm/s~1500 mm/s일 때는 느린 스캔 속도 때문에 셀의 측면이 burn in 되고 damage를 받은 것을 볼 수 있다. 2000 mm/s 이상부터 잘린 측면이 매끄러워 지는 것을 알 수 있는데 이상적으로 셀을 커팅하기 위해서는 셀 두께의 약 60%에 해당하는 깊이로 잘리는 것이 좋으며, 스캔 속도 2500 mm/s ~ 3000 mm/s일

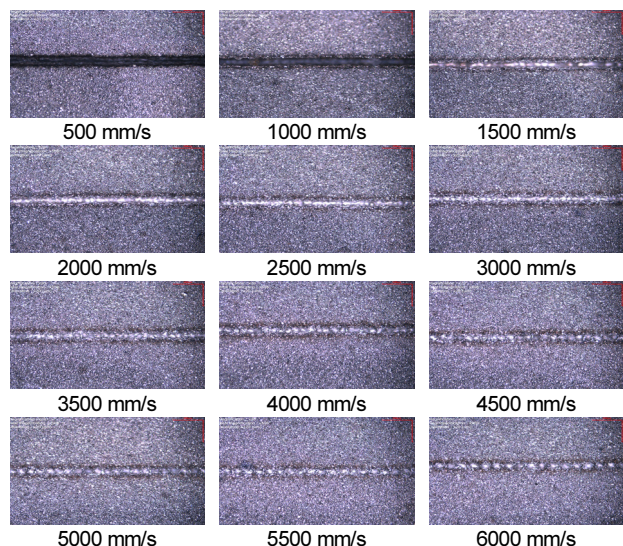
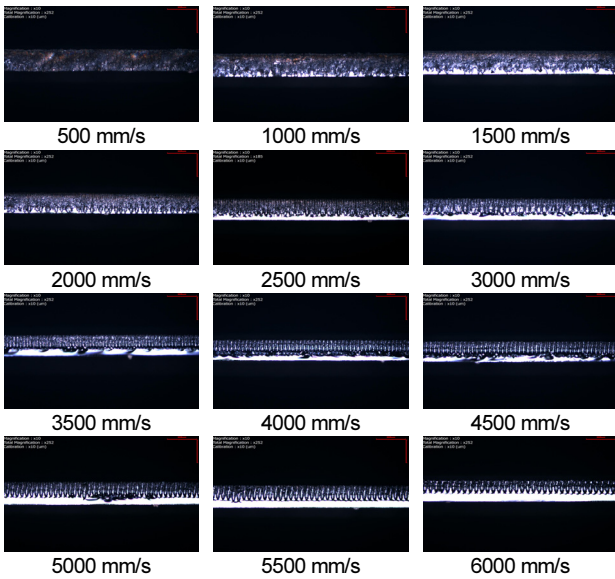


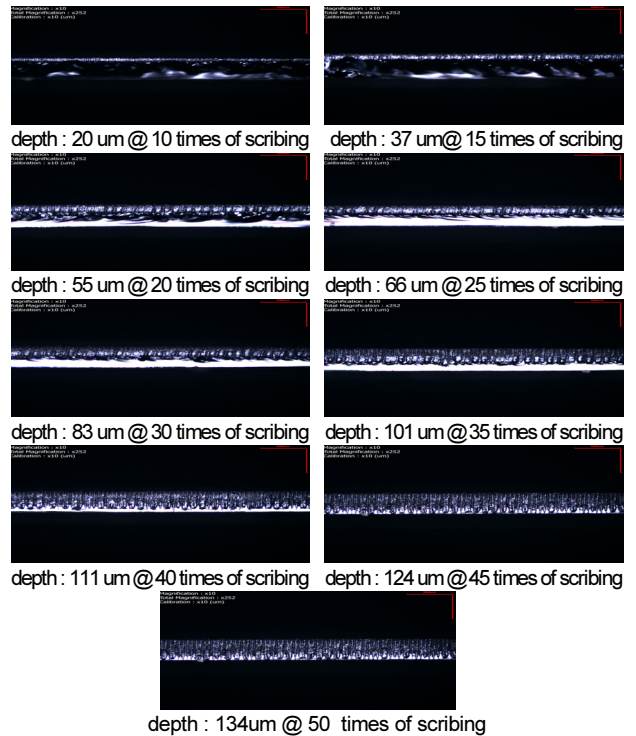
Fig. 2. Top view of laser-scribed cells with scan speed



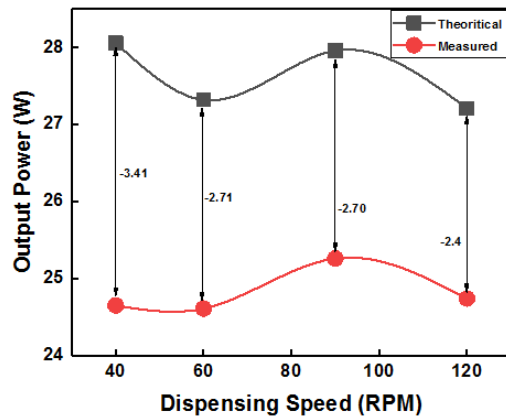
**Fig. 3.** Cross-sectional views of laser-scribed cells with scan speed

때 약 110  $\mu\text{m}$ 의 깊이로 셀이 잘리는 것을 확인할 수 있었다. 스캔 속도가 3500 mm/s 이상일 때는 레이저에 의해 잘린 깊이가 100  $\mu\text{m}$  이하로 점점 얕아지다가 6000 mm/s일 때는 잘린 깊이가 62  $\mu\text{m}$ 가 되는 것을 확인할 수 있다. 실험에서 확인한 바와 같이, 셀에 무리를 주지 않으면서 셀 분할에 필요한 스크라이빙 깊이를 갖기 위해서는 스캔 속도가 2500 mm/s에서 3000 mm/s일 때 가장 적합함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 스캔 속도를 3000 mm/s로 고정하고 스크라이빙 횟수를 5회에서 50회까지 증가시킨 후 셀을 절단하여 측면을 분석한 것이다. 스크라이빙 횟수가 15회 이하일 때는 스크라이빙 된 깊이가 셀을 분할하기에 충분하지 않아 정상적으로 셀을 분할할 수 없었다. 스크라이빙 횟수가 20회 이상일 때 셀을 분할할 수 있었는데, 스크라이빙 깊이는 20회일 때 55  $\mu\text{m}$ , 25회일 때 66  $\mu\text{m}$ 로 점점 깊어지다가 35회일 때 셀 두께의 약 60%인 101  $\mu\text{m}$ 가 되는 것을 알 수 있었다. 스크라이빙 횟수가 35회 이상일 때 셀이 자연스럽게 분할이 되기 때문에 35회보다 큰 스크라이빙 횟수는 전체 공정시간의 지연을 초래하기 때문에 셀 분할에 최적화된 횟수는 35회를 알 수 있다. 위의 방법에 의해 분할된 셀은, 싱글드 구조의 고효율 태양광 모듈 제작에 사용되는 스트링을 만들기 위해 ECA에 의해 직렬로 연결된다. ECA는 약 80%의 silver (Ag)와 20%의 resin 및 solvent등으로 구성되어 있기 때문에 있는데 물질 구성의 대부분을 차지하는 Ag 때문에 가격이 비싸다는 단점이 있으며 경화 조건에 의해 전기적 특성이 변화한다는 특징이 있다. 때문에 최소한의 ECA를 사용하면서도 적절한 전기적 특성을 갖는 조건을 찾는 것이 높은 모듈 출력을 유지하면서 공정비용을 감소시키는 데에 매우 중요하다. 이러한 접합 조건을 찾기 위해 먼저 분사되는 ECA의 양에 따른 스트링 출력 특성을 분석해보았다. 각각의 스트링은 개별적으로 분할된



**Fig. 4.** Cross-sectional views of laser scribed cells with the repetition number of scan



**Fig. 5.** Output power difference between theoretical and measured samples with dispensing speed

27개의 셀이 직렬로 연결된 형태이며 theoretical Pmax는 분할된 개별 셀의 출력을 측정하여 산술적으로 모두 더했을 때 나올 수 있는 이론상의 최대 출력 값이며 measured Pmax는 ECA를 사용하여 스트링을 제작한 후에 출력을 측정, 제작되어진 스트링의 실제 출력 값이다. Gain은 이론상 출력 값과 실제 출력 값의 차를 나타낸 것이며 이 값이 클수록 접합 조건이 최적화된 것임을 나타낸다. Fig. 5는 변화하는 ECA의 양에 따른 스트링 출력 특성을 나타낸 것이다.

RPM이 커질수록, 즉 분사되는 ECA의 양이 많아질수록 gain 값이 커지는 것을 알 수 있다. 주목할 만한 것은 60 RPM과 90 RPM의 gain은 각각 -2.71과 -2.7로 거의 동일한데 반해 120



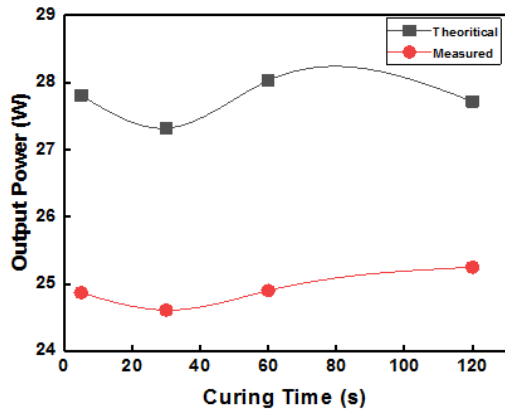


Fig. 6. Output power difference between theoretical and measured samples with curing time

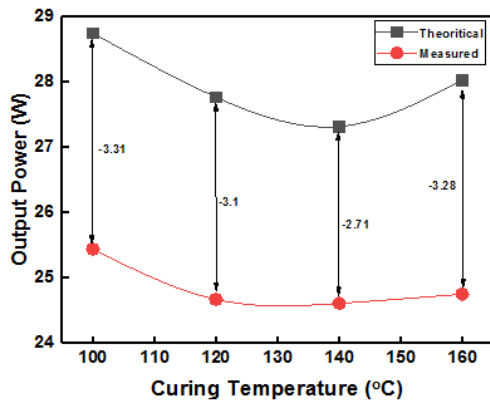


Fig. 7. Output power difference between theoretical and measured samples with curing temperature

RPM일 때는 -2.47로 증가함을 알 수 있다. 60 RPM (ECA 0.0129 g)일 때와 비교해서 120 RPM (ECA 0.0265 g)은 약 2배의 ECA를 사용하게 되는데 측정된 스트링의 출력 값은 크게 차이가 나지 않지만 공정비용을 생각할 때 절반의 사용량으로 비슷한 출력 값을 갖는 60 RPM이 최적화된 분사 조건임을 알 수 있었다. Fig. 6은 경화 시간 변화에 따른 이론과 실제 측정값의 차이를 분석한 것이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 경화 시간이 5초에서 30초로 증가할 때는 gain이 커지다가 30초를 초과하여 120초까지 증가시키면 오히려 gain이 작아지는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 경화 온도에 따른 gain 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 온도가 100°C에서 140°C로 증가함에 따라 gain도 상승하다가 140°C보다 증가하면 오히려 gain이 하락하는 것을 볼 수 있다.

그림에서 보이는 바와 같이, 경화 시간과 온도가 증가할 때 분석된 gain의 값이 특정 시점부터 하락하는 것을 볼 수 있는데 이와 같은 현상은 ECA의 주 성분 중 하나인 solvent와 resin의 특성 때문이라고 분석된다. 좋은 접합 특성을 나타내기 위해 최적화된 상태로 ECA가 존재해야 하는데 지나치게 긴 경화 시간이나 높은 온도에서<sup>8,9)</sup> 접합 공정을 하면 solvent가 증발하는 속도와

그에 따른 resin의 경화 상태가 변하게 되고 결국 접합에 적합하지 않은 상태로 ECA로 존재하게 되며 이는 스트링 제작시 출력 저하로 이어지게 되는 것이다.

#### 4. 결론

싱글드 방식을 사용한 태양광 모듈은 기존의 방식에 비해 동일한 설치면적에서 더 많은 active area를 확보할 수 있으며 상대적으로 작은 CTM loss를 갖기에 높은 출력의 모듈 제작에 유리한 장점이 있다. 모듈 제작에 사용되는 스트링을 제작하기 위해서는 먼저 6인치 태양전지를 분할하고 ECA를 사용하여 접합하게 되는데 이때 최적화된 분할/접합 조건을 찾는 것은 결과적으로 높은 출력의 모듈 제작을 가능하게 한다. 분할에 사용된 레이저는 355 nm의 UV 레이저이며 스캔 속도 3000 mm/s, 스크라이빙 횟수 35회일 때 가장 이상적으로 6인치 태양전지를 분할할 수 있었다. 이렇게 분할된 태양전지는 dispenser에 의해 분사된 ECA에 의해 직렬로 접합되게 되는데 dispenser RPM이 60일 때 적은 분사량에 비해 좋은 출력 특성을 나타냈다. 경화 온도가 140°C일 때 경화 시간은 30초에서 가장 좋은 출력 특성을 나타냈으며, 경화 온도가 100°C에서 증가하면 출력 특성이 점점 좋아지다가 140°C에서 가장 좋은 특성을 나타냈으며 140°C 이상이 되면 오히려 출력 특성이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 ECA의 주 성분인 Ag, solvent, resin이 경화 조건에 따라 셀과 접합될 때의 물리적 특성이 변하게 되며 이에 따라 전기적 특성이 바뀌기 때문이다.

#### 후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원 과제인 「저원가 고효율 모듈용 셀 분할 및 연결접합 기술개발」(No.20163030014070)을 통해 수행한 연구과제입니다.

#### References

1. Y. Chu, P. Meisen, "Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies," Report of Global Energy Network Institute (GENI), Diego, 2011.
2. P.C. Choubey, A. Oudhia, R. Dewangan, "A Review: Solar Cell Current Scenario and Future Trends," Recent Research in Science and Technology, Vol. 4, pp. 99-101, 2012.
3. A. McEvoy, L. Castaner, T. Markvart. Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation. 2nd Edition, Elsevier Ltd., Oxford, pp. 3-25, 2012.
4. A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube, Fundamentals of Solar Cells. Academic Press Inc., New York, 1983.

5. H. Jee, W. Choi, J. Lee, C. Jeong, "Characterization of Electrically Conductive Adhesives for Shingled Array Photovoltaic Cells," *Current Photovoltaic Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 95-99, 2017.
6. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 27, No. 5-6, 1 June 2000, pp. 95-141, 2000.
7. G.H. Kang, G.J. Yu, H.K. Ahn, D.Y. Han, "Development of PV Module Process Using Automatic Arrangement Tool," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 23, No. 4, pp. 1-9, 2003.
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, H.S. Lee, "Soldering Process of PV Module Manufacturing and Reliability," *Proc. of 2011 KSES Fall Conference*, pp. 303-306, 2011.
9. T.J. Lho, J.H. Lee, "A Study on deformation and electrical efficiency of PV cell according to hot-air temperature at soldering process," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 7, pp. 4065-4071, 2014.