

# 전도성 접착제 물성에 따른 쉥글드 어레이 태양전지 특성 평가

지홍섭<sup>1)</sup> · 최원용<sup>2)</sup> · 이재형<sup>3)</sup> · 정재환<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>광에너지융합그룹, 한국생산기술연구원, 광주, 61012

<sup>2)</sup>R&D센터, (주) 제너셈, 인천, 21984

<sup>3)</sup>정보통신공학부, 성균관대학교, 수원, 16419

## Characterization of Electrically Conductive Adhesives for Shingled Array Photovoltaic Cells

Hongsub Jee<sup>1)</sup> · Wongyong Choi<sup>2)</sup> · Jaehyeong Lee<sup>3)</sup> · Chaehwan Jeong<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Applied Optics and Energy Research Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

<sup>2)</sup>R&D Center, Genesem Inc. Incheon 21984, Korea

<sup>3)</sup>School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

**ABSTRACT:** The interconnecting shingled solar cells method shows extremely high ratio active area per total area and has the excellent potential for high power PV (photovoltaic). Compared to the conventional module, it can have much more active area due to busbar-free structure. The properties of ECA (electrically conductive adhesives) are significant to fabricate the shingled array PV since it should be used in terms of electric and structural connection. Various ECA were tried and characterized to optimize the soldering conditions. The open circuit voltage of shingled array cells showed a three-fold increase and efficiency was also increased by 1.63%. The shingled array cells used in CE3103WLV showed the highest power and in CA3556HF the lowest curing temperature and very fast curing time.

**Key words:** Conductive adhesive, Shingled array, Photovoltaic, Solar cells, Scribing, Singulation

### Subscript

Isc : short circuit current

Jsc : current density

Voc : open circuit voltage

FF : fill factor

mPa·s : millipascal-second

RPM : revolutions per minute

### 1. 서론

태양은 열과 방사선의 형태로 매순간 막대한 양의 에너지를 생산하고 있으며 이 에너지는 친환경적이며 무제한적이고 비용이 들지 않는다.<sup>1,2)</sup> 기존의 일반적인 에너지 생산기술과 달리 태양광을 에너지로 사용하기 위해서는 큰 비용이 필요한 발전소

를 만들지 않아도 작은 크기의 태양전지를 사용하는 것만으로 태양광을 직접 에너지의 형태로 변환할 수 있다는 점에서 큰 장점을 갖는다.<sup>3,4)</sup> 태양전지를 사용한 태양광 모듈을 제조하는데 있어서 일반적으로 대규모 증설을 통한 고정비의 절감, 실리콘 웨이퍼의 비용을 줄이기 위해 셀의 두께를 줄이는 것<sup>5)</sup>과 같은 원재료 사용량을 줄이거나 공정상의 loss를 줄이는 방법 등으로 모듈 원가를 절감하는 것이 유효했지만 더 이상 대규모 증설과 원재료 사용량 감축은 쉽지 않아지고 있다.

이러한 상황에서 기업들은 단위당 효율이나 출력을 높이는 것에 주력하고 있는 상황이며 셀 단위의 효율을 높이는 작업이 아닌 모듈 단위의 구조 변경을 통한 효율 및 출력 증가에 대해 연구를 하고 있다. 최근 미국의 Cogenra Solar, Solaria 및 Sunpower에서 사용하는 쉥글링 구조를 통한 모듈 제조방식이 제안되었는데 각각의 셀을 절단하여 직렬로 연결시켜 줌으로써 모듈 사이즈 대비 셀의 수량과 기존의 버스바로 인한 저항을 줄이는 방식으로 효율을 증가시킬 수 있는 방법이다. 이 방식에서 가장 중요한 요소인 솔더링 프로세스는 완성된 모듈의 신뢰도와 효율에 영향을 미치는 중요한 요소인데<sup>6)</sup> 기존의 접촉식 인두 및 열풍 가열방식은 미세균열 때문에 셀이 얇을수록 파손될 위험이 매

\*Corresponding author: chjeong@kitech.re.kr

Received August 14, 2017; Revised August 31, 2017;

Accepted August 31, 2017

우 높으며 이와 같은 이유 때문에 모듈 제작시 셀의 종류에 있어서 제한을 받는다.<sup>7)</sup>

이 논문에서 우리는 싱글드 어레이 공정을 통한 태양전지 모듈 제작에 있어서 핵심이 되는 기술인 솔더링 프로세스에 대해 연구하였다. 6인치 태양전지 셀의 분할전 성능과 분할후 솔더링 프로세스를 통해 접합한 태양전지의 성능을 비교하였으며 솔더링 프로세스에서 다양한 전도성 접착제를 사용하여 비교 분석함으로써 싱글드 어레이 구조에서의 효율을 높이기 위한 최적화된 접착 조건을 찾는 것에 주력하였다.

### 2. 실험

나노 세컨드 레이저(532 nm, 20 ns, 30-100 KHz from Coherent)가 6인치 태양전지 셀을 스크라이빙 하기 위해 사용되었다. 최적의 스크라이빙 조건을 찾기 위해서 평균 파워는 10W로 고정한 후레이저의 주파수(30-70 KHz)와 절단횟수(10-40회) 및 레이저 스캔 속도(100-2,500 mm/s)를 바꿔가며 분석하였고 태양전지 셀의 스크라이빙된 깊이 및 폭은 광학 현미경(MF-A101D from Mitutoyo)에 의해 분석되었다. 레이저에 의해 분할된 셀은 컴퓨터로 제어 되는 디스펜서에 의해 전면 전극에 전도성 접착제가 분사 된 후 싱글드 어레이 형태로 접합되었다. Fig. 1은 분할된 셀이 전도성 접착제에 의해 싱글드 어레이 형태로 접합되는 모습을 보여준다. 어레이를 만들기 위해 총 6종류의 전도성 접착제를 사용 하였는데(EL-3012, EL-3556, EL-3653, EL-3655 from SKC Panacol; CE3103WLV, CA3556HF from Henkel) 시장에 나와 있는 전도성 접착제중에 본 용도에 사용하기에 알맞은 높은 전도성과 알맞은 점도를 가진 제품을 선별하였다.

각 전도성 접착제는 서로 다른 물질 특성을 갖고 있으며 싱글드 어레이 태양전지 셀을 만들었을 때 가장 좋은 특성을 나타내는 접착제를찾기 위해 접합 후 출력을 비교 분석하였다. 이를 위해 6인치 태양전지 셀은 나노 세컨드 레이저에 의해 3분할 되었고 태양전지 셀 전면 전극에 전도성 접착제를 분사한 후 접합하였다. 싱글드 어레이 형태로 접합된 태양전지 셀은 솔라 시뮬레이터(WXS-155S-L2, AM1.5GMM from WACOM)와 전류-전압 분석기(DKSCT-3T from DENKEN)에 의해 분석되었다.

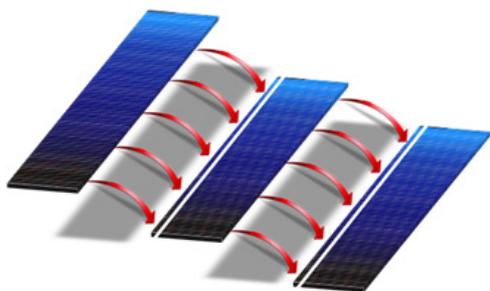


Fig. 1. A schematic of shingled array PV cells

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 레이저에 의해 스크라이빙 된 셀의 top view이다. 레이저의 평균 파워는 10 W, 주파수는 50 KHz로 고정한 후 스캔 속도를 100 mm/s에서 2,500 mm/s 로 바꿔가면서 스크라이빙을 하였다. Fig. 2 (a)는 스캔 속도가 100 mm/s 일때의 top view 사진인데 스크라이빙 된 셀의 폭이 일정하지 않으며 표면이 타는 현상이 나타났다. 스캔 속도를 200 mm/s 이상으로 올릴 때 이러한 현상은 점점 줄어들면서 스크라이빙 폭도 균일해지기 시작하며 1,300 mm/s에서 24.67 μm의 폭으로 스크라이빙 된다. 1,700 mm/s 이상으로 속도를 올리면 Fig. 2 (c)에서 보이는 것처럼 오버랩 되는 레이저 스팟의 간격이 벌어져 스크라이빙 후에 셀 분할시 제대로 분할되지 않게 된다.

Fig. 3은 레이저 절단 횟수에 따른 측면 분석 사진이다. 실험에 사용된 셀의 두께는 217.58 μm이며 레이저 반복 횟수를 10~40 회로 증가시키며 스크라이빙 된 셀의 측면 깊이를 분석하였고 레이저의 평균 파워는 10W, 주파수 50 KHz, 스캔 스피드는 1,300 mm/s로 고정을 하였다. 스크라이빙 횟수가 10회 미만일 때는 스크라이빙 후 셀 분할시 제대로 분할되지 않고 셀이 깨지는 현상이 발생했으며 스크라이빙 횟수를 증가시킴에 따라 절단면의 깊이가 깊어졌는데 50 μm 이상일 때부터 셀 분할이 가능해지지만 분할선을 잘 맞추지 않으면 스크라이빙 된 셀 분할시 셀에 크랙이 생기게 된다. 스크라이빙 횟수 30회가 되면 절단면 깊이가 108.78 μm가 되는데 이는 전체 셀 두께 대비 50%의 깊이이며 50% 이상의 깊이로 스크라이빙시 셀에 무리를 주지 않고 분할이 쉽게 된다. 이 반복횟수는 모듈 생산시 중요한 요소가 되는데 스크라이빙 반복횟수가 늘어날수록 전체 공정시간이 길어지게 되며 이는 가격 상승의 요인이 되기 때문이다. 결국 분할시

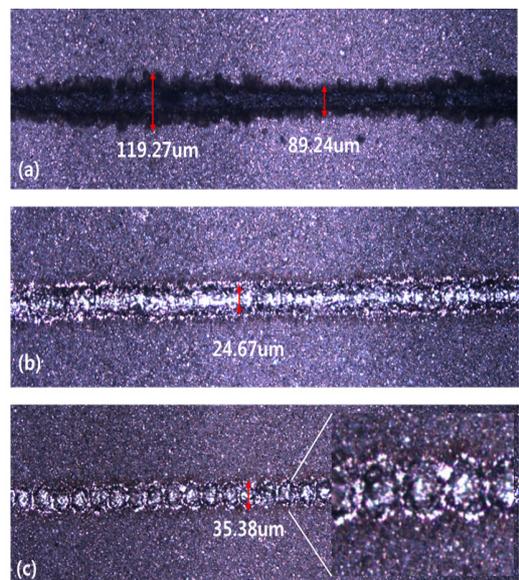


Fig. 2. Top views of laser-scribed solar cells ; scan speed 100 mm/s (a), 1,300 mm/s (b), 2,500 mm/s

셀에 무리를 주지 않으면서 최소화 된 스크라이빙 횟수를 찾아야 하는데, 절단면의 깊이가 50% 일 때 이 조건을 만족하는 것으로 실험적으로 알게 되었다. 위의 결과에 근거하여, 이 연구에서 싱글드 어레이 구조를 이용한 태양전지 셀을 만들기 위해 사용한 셀의 레이저 스크라이빙 조건은 532 nm 파장을 사용하는 20 ns 레이저에서 평균 파워 10 W, 주파수 50 KHz, 스캔 속도 1,300 mm/s, 스크라이빙 반복횟수 30회의 조건으로 선택하였다. Table 1은 분할하지 않은 6인치 태양전지 셀과, 3분할 후 전도성 접착제를 사용하여 최적화된 솔더링 조건으로 싱글드 어레이 구조로 만든 셀을 비교한 것이다.

Table 1에 보이는 바와 같이 6인치 태양전지 셀을 3분할 후 직렬로 연결했기 때문에  $V_{oc}$ 가 3배 가량 증가하고  $I_{sc}$ 와  $J_{sc}$ 는 3분의 1로 감소한 것을 알 수 있다. 상기할만한 것은 싱글드 셀의 구조에서 효율이 약 9% 증가한 것을 알 수 있는데 기존의 방식인 접촉식 인두 및 열풍을 이용한 방법과 비교했을 때 셀의 연결을 위해 전도성 접착제를 사용하며 상대적으로 저온인 110~150도의

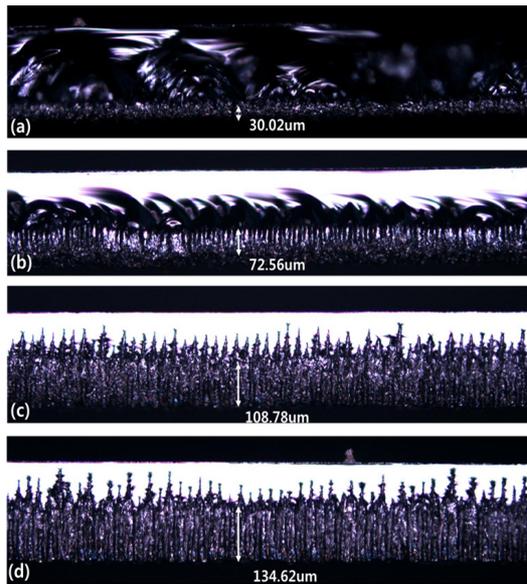


Fig. 3. Cross-section views of laser-scribed solar cells ; the number of scribing process 10 times (a), 20 times (b), 30 times (c), 40 times (d)

Table 1. Comparison between cell performances of the conventional cell (6 inch) and shingled array cell (6 inch)

Classification	Conventional cell (6 inch)	Shingled array cell (6 inch)
Short circuit current ( $I_{sc}$ , A)	9.7758	3.1188
Short circuit current density ( $J_{sc}$ , A/cm <sup>2</sup> )	39.9827	13.2287
Open circuit voltage ( $V_{oc}$ , V)	0.6529	1.978
Fill Factor (%)	69.5281	75.6212
Efficiency (%)	18.15	19.78

경화 온도를 사용하기 때문에 모듈 공정시 많은 불량률 발생시키는 솔더링 프로세스에서 불량률을 감소시킬 뿐 아니라 저온 공정을 통해 기존 방식으로는 사용하지 못했던 셀도 손쉬운 모듈화가 가능하게 하였다.

또한 효율이 소폭 증가함은 물론, 같은 크기의 모듈을 제작할 시 싱글드 방식을 통해 더 많은 개수의 셀을 사용함으로써 모듈 출력도 증가시키는 장점을 갖는다. 접합을 위해 사용한 전도성 접착제는 총 여섯 종류인데 그 중 Panacol사의 EL-3012는 점도가 너무 높아서 스트링거에서 접착제의 디스펜싱이 제대로 되지 않아 사용할 수가 없었으며 본 용도에는 적합하지 않은 것으로 결론지어졌다. 또한 EL-3661과 EL-3655는 스트링거에서 디스펜싱은 가능했지만 분사가 일정하게 이루어지지 않아 접합 후 불량률이 현저하게 높았다. Table 2에 5종의 전도성 접착제의 점도를 비교하였는데 점도가 35,000 mPa·s 보다 큰 접착제는 싱글드 어레이 구조를 만드는 공정에 적합하지 않다는 것을 알게 되었다.

Fig. 4에서 보는 것과 같이 CE3103WLV의 경우 30초 이후 셀 효율에 큰 변화를 보이지 않았으며 전반적으로 가장 높은 효율을 보여주었다. EL-3653은 60초 이후 효율이 소폭 상승하는 특성을 보여주었으며 CA3556HF는 가장 짧은 경화시간에도 불구하고 떨어지지 않는 측정결과를 나타내어서 대량으로 모듈을 생산할 경우 비용 측면에서 장점을 가질 것이라고 예상할 수 있다.

Fig. 5는 경화온도에 변화를 주었을 때 셀 효율의 변화를 보여준

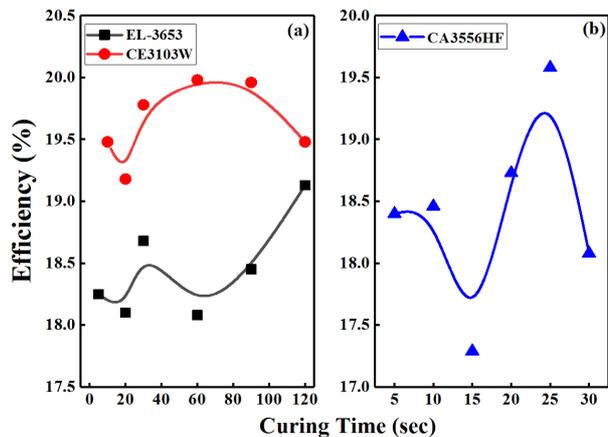


Fig. 4. Efficiency variation of shingled array cells with increase of curing time. Curing temperature and RPM was fixed at 150°C and 60, respectively

Table 2. Viscosity-comparison between ECAs

Classification	Viscosity	Unit
EL-3653	~13,000	mPa·s
CE3103	~20,000	
CA3556	~35,000	
EL-3653	~40,000	
CE3103	~45,000	

다. 경화시간은EL-3653과CE3103WLV의 경우2분, CA3556HF는 5초로 고정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 EL-3653은 경화 온도가 증가함에 따라 셀 효율이 증가하는 특성을 보였으며 CE3103WLV는 흔들리긴 하지만 경화 온도에 크게 영향을 받지 않고 평균적으로 높은 효율을 보여주었으며 짧은 경화 시간이 특징인 CA3556HF는 140도에서 가장 높은 효율을 나타내다가 그 이상의 온도에서는 차츰 효율이 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 6에서는 분사량에 따른 셀 효율의 특성은 CA3556HF와 CE3103WLV의 경우 비교적 안정적인 모습을 보여줬지만 EL-3653의 경우 측정 결과가 증가했다가 감소하고 다시 증가하고 감소하는 불안정한 모습을 보여줬다. 흥미로운 사실은 CE3103WLV와 EL-3653 모두 70 RPM에서 가장 좋은 효율을 나타내다가 분사량이 80 RPM으로 증가하자 효율이 크게 하락한 모습을 보인 것이다. 경화온도와 시간, 그리고 전도성 접착제의 분사량에 따른 싱글드 어레이 셀 효율 특성을 여러 종류의 접착제에서 분석해 본 결과, CE3103WLV가 가장 좋은 특성을 보여주었다.

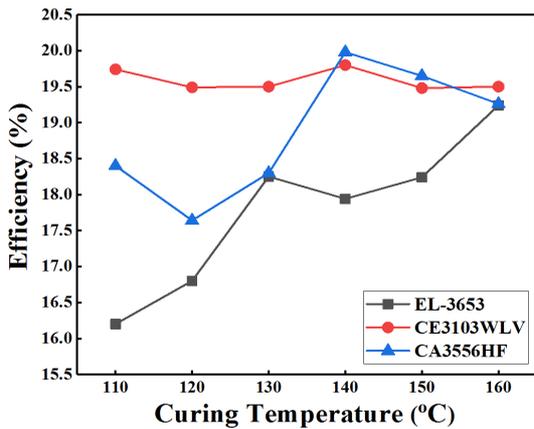


Fig. 5. Efficiency variation of shingled array cells with the increasing curing-temperature. Curing time and RPM was fixed at 2 min and 60, respectively

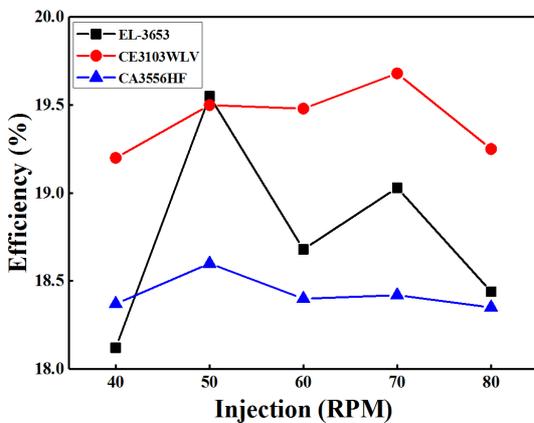


Fig. 6. Efficiency variation of shingled array cells with the increasing injection-rate. Curing temperature and time was fixed at 150°C and 2 min, respectively

경화온도와 시간, 그리고 전도성 접착제의 분사량에 따른 싱글드 어레이 셀 효율 특성을 여러 종류의 접착제에서 분석해 본 결과, CE3103WLV가 가장 좋은 특성을 보여주었다. 이는 물질 자체가 상대적으로 가장 좋은 체적저항값(EL-3653: 0.0005 Ω·cm, CE3103WLV: 0.0009 Ω·cm, CA3556HF: 0.0025 Ω·cm)을 갖고 있기 때문인 것으로 생각할 수 있다.

여기서 주요하게 분석된 세 종류의 전도성 접착제는 110°C라는 낮은 온도에서부터 경화가 되었고 경화 후에도 기계적으로 안정적인 접착성을 보여주었다. 기존 방식의 경우, 솔더링 공정 온도는 뿔납의 녹는점(180~300°C)보다 50°C정도 높게 공정하는 것이 일반적이는데<sup>7)</sup> 높은 온도에서의 솔더링은 태양전지 셀에 변형을 가져올 수 있으며 전기적 특성을 떨어뜨릴 수 있다<sup>8-9)</sup>. 솔더링 프로세스에 기존 방식과는 달리 전도성 접착제를 사용하여, 인두의 물리적인 접촉과 높은 솔더링 온도가 필요하지 않은 싱글드 구조 셀은 기존의 모듈 방식을 크게 개선할 수 있다는 점에서 앞으로의 전망이 매우 희망적이다. 또한 CA3556HF를 사용할 경우 5초라는 빠른 경화시간으로 대량생산의 효율을 높일 수 있으며 성능이 우선시 되는 모듈 제작의 경우 좋은 체적저항 값을 갖고 있는 전도성 접착제를 사용하면 출력에서 이득을 얻을 수 있다.

#### 4. 결론

기존의 태양전지 모듈 제작 방법에서 사용되던 뿔납과 와이어를 사용하지 않고, 레이저 스크라이빙 프로세스로 태양전지 셀을 분할하여 전도성 접착제를 분할된 셀 전면전극에 분사하여 싱글드 어레이 구조 셀을 만들었다. 이 방식은 버스바 free 구조로 동일한 설치면적에서 더 많은 셀을 사용할 수 있어 단위면적당 높은 출력을 가져올 수 있다. 3분할후 만들어진 싱글드 어레이 셀은 3배의 V<sub>oc</sub>와 약 9% 증가한 셀 효율을 나타냈으며 분석된 여러종류의 전도성 접착제중 CE3103WLV가 가장 좋은 출력특성을 보여주었으며 CA3556HF는 낮은 경화온도와 매우 빠른 경화시간으로 대량생산에 유리한 특성을 보여주었다.

#### 후 기

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

#### References

1. Chu, Y. and Meisen, P., Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies. Report of Global Energy Network Institute

- (GENI), Diego, 2011.
2. Choubey, P.C., Oudhia, A., and Dewangan, R., A Review: Solar Cell Current Scenario and Future Trends. *Recent Research in Science and Technology*, 4, 99-101, 2012.
  3. McEvoy, A., Castaner, L., and Markvart, T., *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation*. 2nd Edition, Elsevier Ltd., Oxford, 3-25, 2012.
  4. Fahrenbruch, A.L. and Bube, R.H., *Fundamentals of Solar Cells*. Academic Press Inc., New York, 1983.
  5. J. Song, Y. Nam, M. Park, B. Yoo, J. Cho, and R. B. Wehrspohn, Toward a planar black silicon technology for 50  $\mu\text{m}$ -thin crystalline silicon solar cells, *Opt. Express* 24, A1224-A1233, 2016.
  6. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Volume 27, Issues 5-6, 1 June 2000, pp. 95-141, 2000.
  7. G. H. Kang, G. J. Yu, H. K. Ahn, and D. Y. Han, "Development of PV Module Process Using Automatic Arrangement Tool", Vol. 23, No. 4, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 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, and 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 and 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.