

솔더링 공정에서 열풍온도에 따른 PV셀의 변형량 및 전기효율에 관한 연구

이종환¹, 노태정^{*}

¹동명대학교 메카트로닉스공학과

A Study on deformation and electrical efficiency of PV cell according to hot-air temperature at soldering process

Tae-Jung Lho¹, Jong-Hwan Lee^{*}

¹Dept. of Mechatronics Eng., Tongmyong University

요 약 PV셀과 리본의 솔더링 공정에서 열풍온도에 따른 200 μ m 두께의 PV셀의 온도분포와 변형량의 해석 결과는 실험 측정치와 거의 일치함을 알 수 있었다. 또한 전기효율은 설정온도 390 $^{\circ}$ C로 PV셀을 솔더링한 모듈에서 가장 좋은 결과가 나타났다. 열풍온도를 350 $^{\circ}$ C로 설정하고 150 μ m 두께의 PV셀을 솔더링 해석한 결과, 최대 변형량이 약 5.9mm로서 상당히 큰 값을 확인할 수 있었으며, 열풍온도를 보다 낮은 온도로 설정해야 변형량이 감소하고 전기효율이 향상될 것을 예측하였다.

Abstract The analysis results of the temperature distribution and deformation at the PV cell with a thickness of 200 μ m according to hot-air temperature at the soldering process of a PV cell and ribbon tend to agree somewhat with the experimental measured values. The best result of the electrical efficiency appears in the module soldered at a hot-air temperature of 390 $^{\circ}$ C. An analysis of the soldering PV cell with a thickness of 150 μ m at a hot-air temperature of 350 $^{\circ}$ C confirmed that the maximum deformation was approximately 5.9mm. As the temperature of hot air is set to decrease, the deformation is reduced and it is predicted that the electrical efficiency can be improved.

Key Words : Deformation, Electrical Efficiency, Hot-Air, PV Cells, Soldering, Temperature Distribution

1. 서론

지구 온난화와 CO₂ 문제에 대한 관심의 증가와 석유 자원 고갈, 그리고 에너지 소비증가 등으로 전 세계 신재생에너지 시장이 급성장을 하고 있다. 신재생에너지 가운데 태양광발전 관련 시장의 경우 매년 20% 넘는 시장 성장률을 보이고 있음에도 태양광발전의 높은 전기 생산 단가는 시장 성장의 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 특히, 태양전지(photovoltaic: PV) 셀(cell)의 제조단가는 전체 태양광 발전 시스템 단가의 30% 이상을 차지하고 있어 태양전지 모듈(module)의 제조방법 개선 및 재료의 개선은 태양광발전시스템의 발전 단가를 낮출 수 있는 효과

를 얻을 수 있다.

원가절감을 위한 기술개발 추세에 따라 결정질 실리콘 태양전지 셀은 원재료인 실리콘의 소비를 줄이기 위해 두께가 점차 얇아지는 추세를 보이고 있으며, 현재 양산되는 결정질 태양전지 셀의 경우 160~200 μ m 수준으로서 2000년의 두께가 300 μ m 정도였던 것을 감안할 때 매우 빠른 변화 양상으로 이러한 박형화 추세는 앞으로도 더욱 가속화될 것으로 전망된다.

N. R. Yoon 등은 a-Si 태양전지 모듈의 hot spot에 의한 열화현상 연구를 하였고[1], Y. H. Song 등은 결정질 태양전지 크랙 패턴에 따른 전기적 특성 모델링을 연구 하였다[2]. T. H. Jung 등은 태빙(tabbing)시 결정질 태양

이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임.(NRF-2012R1A1A2002701)

^{*}Corresponding Author : Tae-Jung Lho(Tongmyong Univ.)

Tel: +82-51-629-1533 email: tjlho@tu.ac.kr

Received April 9, 2014

Revised June 9, 2014

Accepted July 10, 2014

전지의 휨현상(bowing)에 관하여 분석하였으며[3]. Y. J. Jo 등은 열해석을 이용한 나비형밸브(butterfly valve)의 초저온 환경에서의 구조안전성 평가를 제시하였다[4]. 그리고 P. Y. Yoon 등의 3D 스캔을 이용한 실리콘 태양전지의 bowing 측정 연구에서 곡률이 있고 곡면과 수직한 방향으로서는 변화가 거의 없다는 점을 알 수 있었고[5], T. H. Baek 등은 박형 결정질 실리콘 태양전지에서의 bowing 감소를 위한 알루미늄 층두께 조절을 연구하였다[6]. 그리고 T. J. Lho 등은 적외선 램프를 이용한 비접촉식 태양전지 셀 솔더링(soldering) 장치의 개발에 관한 연구를 하였다[7].

이에 대하여 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 Ansys 13.0을 이용하여 PV셀에 대하여 온도 변화에 따른 PV셀의 변형해석을 하였고, PV셀을 솔더링한 후에 모듈을 제작하여 PV셀의 전기효율 실험과 변형량 측정 실험을 하였다.

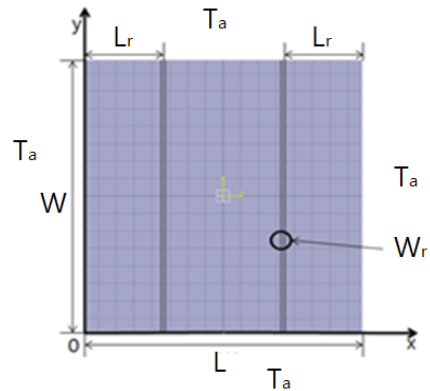
2. Formulation

솔더링 공정은 먼저 태양전지셀을 예열하고 (preheating), 다음으로 플럭스(flux) 용융 및 건조가 이루어지고, 젖음(wetting) 구간에서 리본의 납 성분이 용융되면서 PV셀과 리본이 접합되고, 마지막으로 냉각이 이루어진다.

특히 열풍(hot air) 방식의 솔더링은 설정된 온도의 열풍을 위아래로 솔더(solder)가 코팅되어 있는 리본이 부착된 PV셀에 주사하여 솔더가 녹아서 리본과 PV셀이 접합된다.

Fig. 1은 PV셀에 대한 해석 모델을 나타내며, 해석 과정은 1차적으로 열풍방식의 가열온도 조건에 대한 정상상태 열전달 해석을 수행하여 PV셀의 온도 분포를 구한 뒤, 그 결과를 구조해석의 열응력 하중으로 적용하여 열에 의한 변형과 응력에 대한 해석결과를 도출하였다.

PV셀이 솔더링 공정될 때의 열풍온도는 350℃, 390℃, 430℃로 정하였다. PV셀의 열해석을 진행할 때 열풍의 온도가 솔더로 전도되고 솔더에서 PV셀로 전도되는 온도는 각각 210℃, 250℃, 290℃으로 측정되어 해석에서는 이 값들을 적용하였다.



[Fig. 1] Analysis model of PV cells

PV셀의 두께는 얇은 관계로 2차원 평면으로 가정하고, 임의 위치(x,y)에서 PV셀의 온도 $T(x,y)$ 에 대한 2차원 열전도의 지배방정식은 (1)과 같다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

그리고 경계조건은 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} T &= T_s \text{ for } L_r - \frac{W_r}{2} \leq x \leq L_r + \frac{W_r}{2} \\ &\text{and } L - L_r - \frac{W_r}{2} \leq x \leq L - L_r + \frac{W_r}{2} \\ -k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) &= h(T - T_a) \text{ for } x = 0, L \\ -k\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right) &= h(T - T_a) \text{ for } y = 0, W \end{aligned} \quad (2)$$

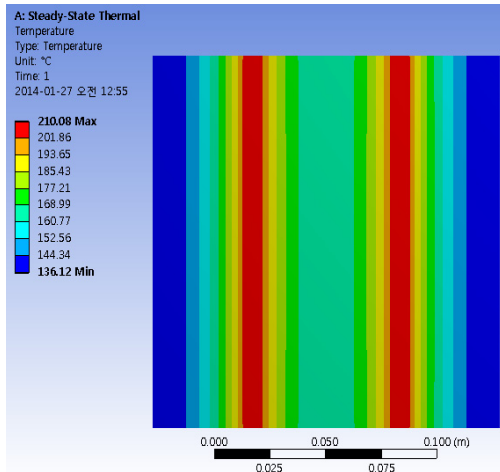
여기서 T_s 는 솔더에서 PV셀로 전도되는 온도, L_r 는 PV셀 끝단에서 리본이 위치한 거리, W_r 는 리본의 폭, L 은 PV셀의 길이, W 는 PV셀의 폭, k 는 열전도계수, h 는 대류 열전달계수, T_a 는 주변온도이다. 그리고 열응력 변화에 의해서 PV셀의 두께 방향으로 변형이 발생한다.

3. 온도에 따른 셀의 변형량 해석

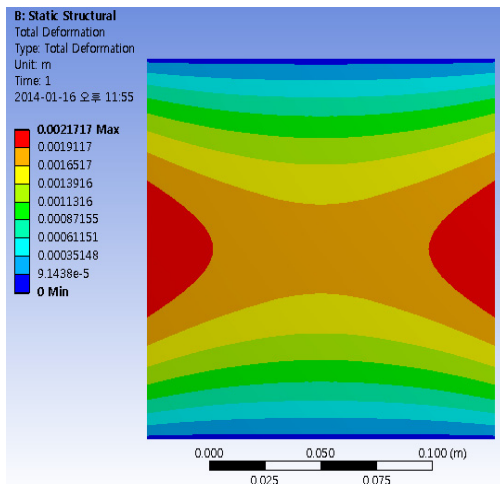
PV셀의 모델링은 CATIA V5R20을 이용하였고, 해석은 Ansys 13.0을 이용하여 진행하였다. 해석에서 사용된 PV셀의 두께는 200 μm 이며, L과 W는 각각 156 μm 이며,

L_r 는 $43.5\mu\text{m}$ 이며, W_r 은 2mm 이다. 해석의 경계조건은 $T_a = 23^\circ\text{C}$, 대류조건은 Ansys 프로그램에서 제공하는 대류 열전달계수인 'stagnant air-simplified case'를 사용하였다.

Fig. 2는 tabbing 장비의 열풍 온도를 350°C 로 설정하여 PV셀을 솔더링하였을 때 온도분포 해석 결과이다. 이 때 리본이 솔더링되는 위치에서 최고온도이며 PV셀의 끝단이 최저온도로서 그 온도차는 73.96°C 이다.



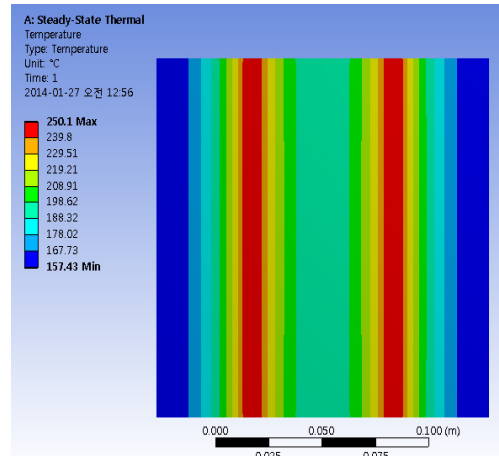
[Fig. 2] Temperature analysis for hot air 350°C



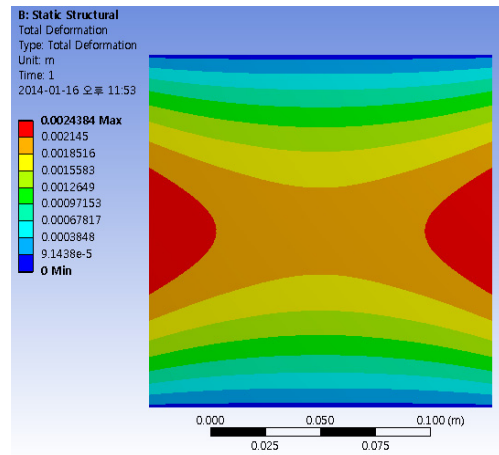
[Fig. 3] Deformation analysis for hot air 350°C

Fig. 3은 변형에 해석 결과로서 리본 길이 방향으로 휨 현상이 발생됨을 알 수 있고, 그 변형량은 최대 2.17mm 로 나타났다.

Fig. 4와 Fig. 5는 열풍 온도를 390°C 로 설정하여 PV셀을 솔더링하였을 때 온도분포와 변형량의 해석 결과이다. 이 때 최고온도와 최저온도의 온도차는 92.67°C 이며, 그 변형량은 최대 2.41mm 로 나타났다.

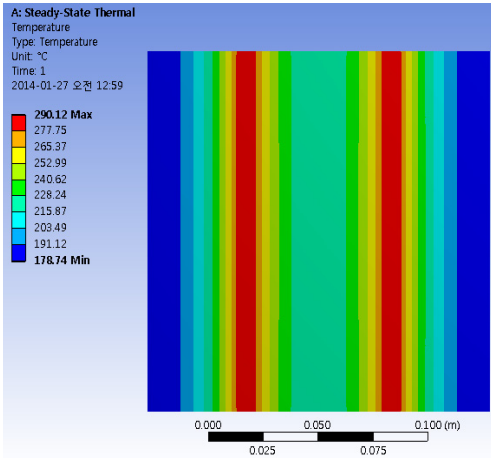


[Fig. 4] Temperature analysis for hot air 390°C

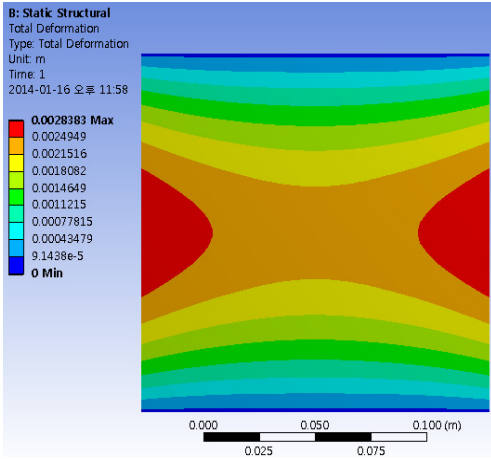


[Fig. 5] Deformation analysis for hot air 390°C

Fig. 6과 Fig. 7은 열풍 온도를 430°C 로 설정하여 PV셀을 솔더링하였을 때 온도분포와 변형량의 해석 결과이다. 이 때 최고온도와 최저온도의 온도차는 111.38°C 이며, 그 변형량은 최대 2.83mm 로 나타났다.



[Fig. 6] Temperature analysis for hot air 430°C



[Fig. 7] Deformation analysis for hot air 430°C

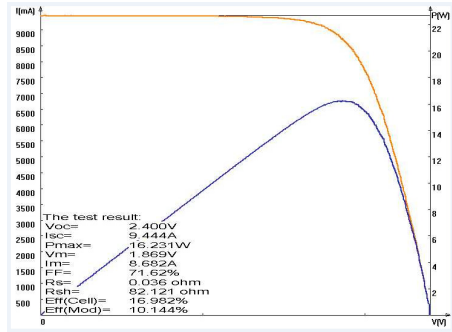
4. PV셀의 전기효율 및 변형량 실험

전기효율 실험은 열풍온도에 따른 출력전력을 알아보기 위해 200 μ m 두께의 PV셀을 솔더링 시에 열풍온도를 350°C, 390°C, 430°C로 실험을 하였고, 전기효율을 측정하였다.

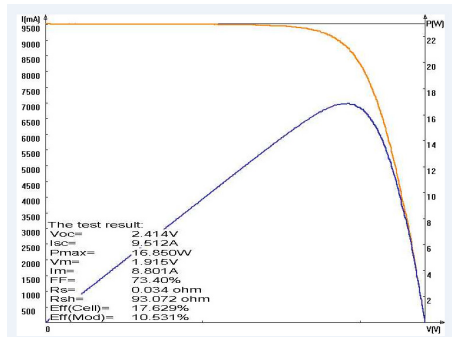
시뮬레이터(simulator) 장비를 사용하여 전력 그래프를 얻을 수 있으며 개방전압, 단락전류, 출력, 최대전압, 최대전류를 이용하여 해석함으로써 PV셀의 가장 효율적인 전기효율을 측정할 수가 있었다.

Fig. 8부터 Fig. 10까지는 열풍온도를 350°C, 390°C, 430°C 총 3가지의 온도로 PV셀을 공정한 후에 모듈로

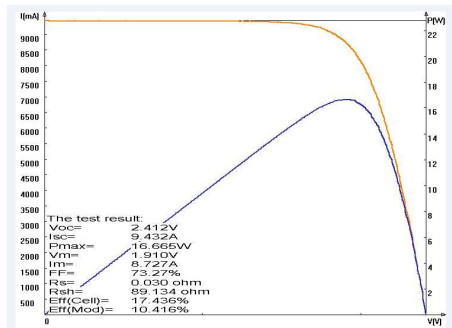
제작하여 3개의 모듈을 출력한 값들을 그래프로 나타내었다. 그래프에서 위쪽의 선은 최대 전압, 최대 전류의 전력을 나타낸 것이며, 아래쪽의 선은 개방전압과 단락전류의 전력을 나타낸다.



[Fig. 8] Graph of hot air 350°C



[Fig. 9] Graph of hot air 390°C



[Fig. 10] Graph of hot air 430°C

3개의 PV셀 모듈을 총 5번씩 전기효율 측정값들의 평균치로서 Table 1에 나타내었으며, 여기서 열풍온도를 390°C로 솔더링하였을 때 출력 전력(P_{max})이 가장 높은

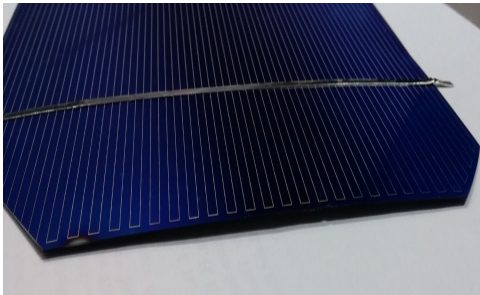
것으로서 가장 효율적인 모듈인 것을 알 수 있었다.

[Table 1] Electrical efficiency for PV cells soldered

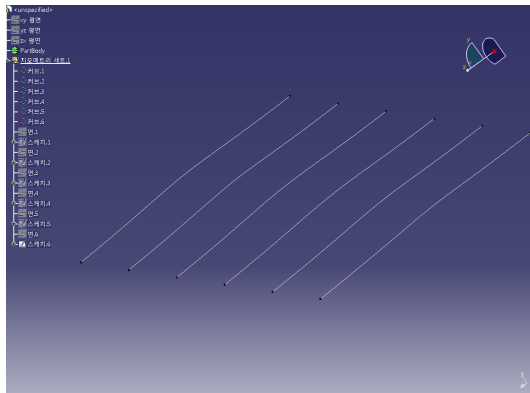
	Hot air temp	V_{oc}	I_{sc}	P_{max}	V_m	I_m
1	350℃	2.382	9.429	16.401	1.878	8.73
2	390℃	2.413	9.511	16.850	1.914	8.801
3	430℃	2.409	9.439	16.723	1.917	8.723

V_{oc} : Open-circuit voltage, I_{sc} : Short-circuit current,
 P_{max} : output of power, V_m : maximum voltage,
 I_m : maximum current

Fig. 11은 PV셀을 솔더링 공정을 진행한 후에 리본 길 이 방향으로 휨현상을 보여주는 사진이다.



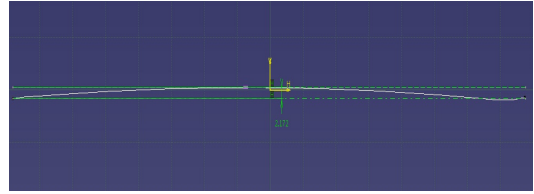
[Fig. 11] Bowing of the PV cell after soldering



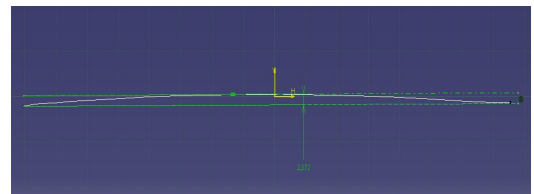
[Fig. 12] spline extractor of PV cell soldered

변형량 측정 실험은 열풍온도별 솔더링한 PV셀에 대 하여 3차원 광학식 스캐너로 스캐닝하고, Fig. 12와 같이 CATIA V5R20를 사용하여 PV셀의 스플라인(spline)을 추출하여 변형량을 측정하였다.

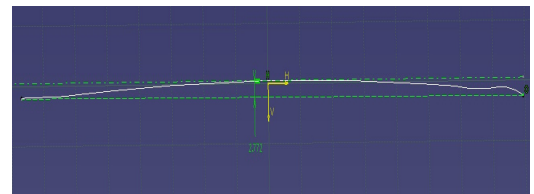
Fig. 13부터 Fig. 15까지는 열풍온도가 350℃, 390℃, 430℃일 때의 PV셀 단면 spline을 측정한 사진이다.



[Fig. 13] Spline cross section on PV cell at 350℃



[Fig. 14] Spline cross section on PV cell at 390℃



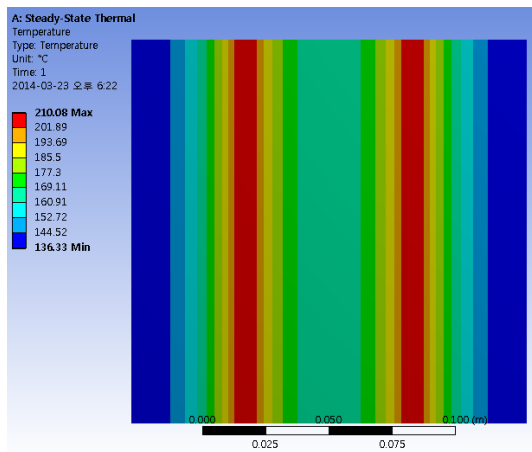
[Fig. 15] Spline cross section on PV cell at 430℃

Table 2는 열풍온도에 따라 PV셀 단면 spline 측정결 과이다.

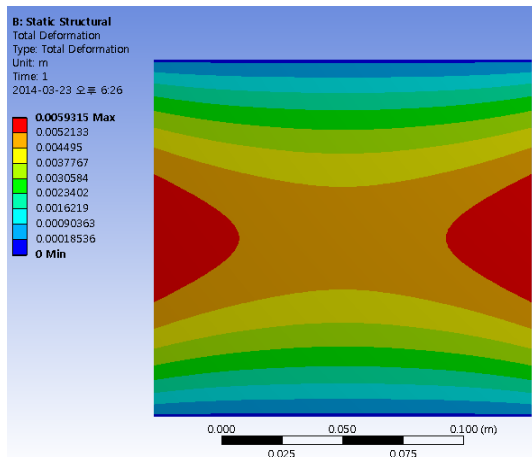
[Table 2] Spline cross section measurements of the PV cell

Hot air temp(℃)	Maximum deformation (mm)
350	2.1
390	2.3
430	2.7

150 μ m 두께의 PV셀을 열풍의 설정온도를 390℃로 설 정하고 솔더링하였을 때의 온도분포와 변형량을 해석한 결과로서, 최대 온도차는 103.24℃, 최대 변형량은 6.8mm 로 나왔다. 열풍의 설정온도를 350℃로 설정하고 솔더링 하였을 때의 온도분포와 변형량을 해석한 결과로서, Fig. 16, Fig. 17과 같이 최대 온도차는 73.75℃, 최대 변형량은 5.9mm로 나왔다.



[Fig. 16] Temperature analysis on 150µm PV cell at 350°C



[Fig. 17] Deformation analysis on 150µm PV cell at 350°C

이 결과를 통해 추후에 150µm 두께의 PV셀을 솔더링 공정 시에는 열풍온도를 350°C보다 낮게 설정하여 최대 변형량을 낮추는 방법이 PV셀의 효능을 향상 시킬 수 있다.

5. 결론

PV셀의 리본 솔더링 공정에서 열풍온도에 따른 PV셀의 변형량 및 전기효율에 관한 연구에 관한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 200µm 두께의 PV셀을 열풍온도 350°C, 390°C, 430°C로 설정하여 솔더링하였을 때 온도분포와 변형량의

해석 결과는 측정치와 거의 일치함을 알 수 있었다.

2. 200µm 두께의 PV셀의 전기효율 실험을 통해 열풍온도 390°C로 솔더링 공정을 진행하였을 때 전기효율이 가장 높다는 것을 알 수 있었다.
3. 150µm 두께의 PV셀을 열풍온도 350°C로 솔더링할 때 해석한 결과 최대 온도차는 73.75°C, 최대 변형량은 5.9mm로 예측되었으며, 추후에 150µm PV셀을 솔더링할 때 열풍온도를 350°C보다 낮은 온도로 설정해야함을 예측하였다.

References

- [1] N. R. Yoon, T. H. Jung, Y. K. Min, K. H. Kang, H. K. Ahn, D. Y. Han, "Analysis of degradation by hotspot heating in amorphous silicon PV module", *Proc. of KSES Spring Conference 2011*, pp. 17~22, 2011.
- [2] Y. H. Song, G. H. Kang, G. J. Yu, H. G. Ahn, D. Y. Han, "The modeling of electrical characteristics with crack pattern in crystalline solar cell", *Proc. of KSES Spring Conference 2011*, pp. 239~244, 2011.
- [3] T. H. Jung, T. B. Kim, J. O. Shin, N. R. Yoon, S. C. Woo, G. H. Kang, H. K. Ahn and D. Y. Han, "A Study on bowing of poly crystalline Si Solar cell in the process of tabbing", *Proc. of KSES Fall Conference 2010*, pp. 421~426, 2010.
- [4] Y. J. Jo, H. S. Park, S. H. Kim, J. H. Kang, Y. C. Park, "Structural safety evaluation in cryogenic of butterfly valve using thermal analysis.", *Proc. of KSME Spring Conference 2008*, pp. 170~174, 2008.
- [5] P. Y. Yoon, T. H. Baek, H. E. Song, H. S. Chung, S. W. Shin, "Measurement of Bow in Silicon Solar Cell Using 3D Image Scanner", *Trans. KSME. B*, Vol. 37, No. 9, pp. 823~828, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.9.823>
- [6] T. H. Baek, J. H. Hong, K. J. Lim, G. H. Kang, G. J. Yu, H. E. Song, "Bow Reduction in Thin Crystalline Silicon Solar Cell with Control of Rear Aluminum Layer Thickness", *Proc. of KSES Spring Conference 2012*, pp. 108~112, 2012.
- [7] T. J. Lho, S. J. Kim, M. Y. Park, "A Study on the Development of Noncontact Soldering Device of PV Cells Using Infrared Lamp", *J. of KAIS*, Vol.14, No.1, pp.45~50, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.1.45>

노 태 정(Tae-Jung Lho)

[정회원]



- 1984년 2월 : 부산대 기계설계학과 (공학학사)
- 1986년 2월 : KAIST 생산공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : KAIST 정밀기계공학과 (공학박사)
- 1986년 2월 ~ 1999년 2월 : 삼성중공업 기전연구소 (수석연구원)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 교수

<관심분야>

Mechatronics, Robotics, 기계 제어, 자동화 등

이 종 환(Jong-Hwan Lee)

[준회원]



- 2006년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 (공학학사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 기계시스템공학과 (석사과정)

<관심분야>

Mechatronics, 열해석, 구조해석 등