실리콘 박막 태양전지 레이저 스크라이빙 공정의 열해석
Thermal Analysis of Laser Scribing Process for Silicon Thin-film Solar cell

*강정우 [1], #박성준 [1], 김기순 [2], 류정식 [2]
*J. W. Kang[1], #S. J. Park(park@cjnu.ac.kr)[1] , K. S. Kim[2] , J. S. Lyu[2]
[1] 충주대학교 기계공학과, [2] 에버테크노(주) 개발기획팀

Key words : Silicon Thin-film Solar cell, Laser Scribing, Heat Affected Zone(HAZ)

1. 서론

레이저 공정은 실리콘 박막 태양전지 제작과정에서 중요한 역할을 한다. 일반적으로 레이저 공정은 세정시킨 유리층 위에 TCO(Transparent Conductive Oxide)층을 입혀 1 차 스크라이빙 공정(P1)을 하고 그 위에 silicon 층을 입혀 2 차 스크라이빙 공정(P2)을 하고 마지막으로 Al, Ag 와 같은 금속층을 입혀 3 차 스크라이빙 공정(P3)을 한다. 스크라이빙 공정을 하는 근본적인 이유는 태양전지를 직렬형태의 전극으로 만드는 것이 주된 목적이며, 선택적 어블레이션(ablation)을 요구하는 공정으로 다른 층과 절연이 잘되었는가도 중요하며, 스크라이빙 폭이 좁을수록 활성영역이 넓기 때문에 태양전지의 효율을 증가 시킬 수 있다. 최근에는 레이저빔을 직접 재료에 조사하는 공정을 하지 않고, 유리층에 투과하여 재료를 제거하는 백스크라이빙(back-scribing)방식의 공정이 많이 이루어지고 있다 [1-2].

레이저 공정은 재료표면상에 빔을 조사하여 발생한 에너지가 재료에 흡수되고 에너지는 표면열원이 되어 가열, 용융현상들로 인하여 가공이 이루어진다. 따라서 조사된 주변에는 열변형이 일어나고 이러한 영역을 열변형층(Heat Affected Zone : HAZ)이라고 하며, 열손상이나 구조변화를 일으키지 않게 재료를 제거하기 위해 최소한의 에너지를 찾아 공정하는 것이 중요하다 [1].

재료 주변에 열을 발생 시키는 지배적인 요소는 레이저 펄스에너지이다. 일반적으로 펄스에너지는 레이저의 여러 가지 요소들과 상관관계가 있기 때문에 레이저의 각 요소들의 의미를 잘 파악해야 하며, 그 외에도 펄스주파수, 기판의 예열 온도 등을 잘 고려해서 제작해야 한다. 앞서 언급한 것처럼 최소한의 에너지로 재료를 제거하기 위해서는 재료의 속성을 잘 파악하고 레이저빔에 의해 전달되는 열분포를 잘 파악해야 한다. 열분포는 수학적으로 상황에 따라 변수분리법, 에러-감마 함수, 라플라스변환법 등으로 구할 수 있다 [2]. 하지만 해를 구하는데 상당한 시간이 걸리기 때문에 컴퓨터연산을 통해 파악하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 재료의 물성과 레이저의 요소를 고려하여 P1, P2, P3 공정 시 발생하는 열분포를 유한요소법으로 파악하여 재료제거에 요구되는 최소한의 에너지밀도를 결정하고자 연구하였다.

2. 레이저 가공요소 분석과 열해석 모델링

레이저 스크라이빙 공정은 레이저뿐만 아니라, 광학계, 주변 환경 등의 영향으로 가공조건이 결정된다. 레이저 빔의 일반적인 출력형태는 Fig. 1 과 같이 가우시안(Gaussian) 형태로 식 (1)과 같은 에너지분포를 갖는다.

$$I(r) = I_0 \exp\left\{-\left(\frac{r}{w}\right)^2\right\} \qquad (1)$$

여기서 r 은 빔의 중심으로부터 원주방향의 거리이고 w 는 집속된 빔의 반경(출력강도가 중심의 $1/e^2$ 되는 거리)이고 I_0 는 빔의 중심에서의 최고 출력밀도이며, 식 (2)와 같이 정의된다. 또한 P_t 는 식 (3)과 같이 정의되며, 재료표면에 조사될 경우에 빔의 전체 출력을 의미한다 [3].

$$I_0 = \frac{2P_t}{\pi w^2} \quad (\mathrm{W/cm^2}) \qquad (2)$$

$$P_t = \int_0^\infty I(r) 2\pi r dr \qquad (3)$$

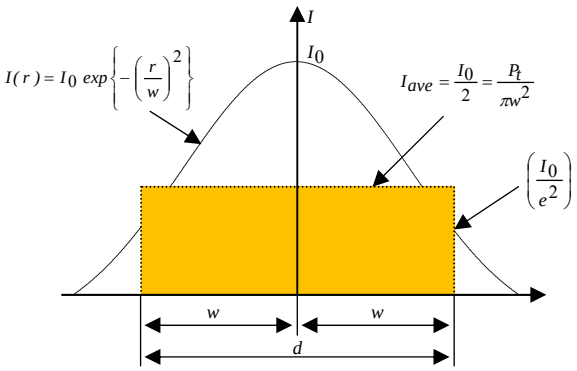

Fig. 1 TEM_{00} 모드의 거리에 따른 레이저 강도분포 [3]

Fig. 1 과 같은 가우시안 빔은 품질인수(M^2)에 의해 형태가 그 값이 1 에 가까울수록 날카로운 가우시안 형태를 나타낸다. 또한 집속된 레이저빔의 점크기는 식 (4)과 같이 정의되고 에너지밀도는 식(5)과 같이 표현할 수 있다.

$$d_0 = \frac{4}{\pi}\lambda\frac{f}{d}M^2 \qquad (4)$$

$$E = \frac{2P}{\pi d_0 F} \qquad (5)$$

여기서 λ 는 파장, f 는 초점거리, P 는 평균출력, F 는 주파수를 의미한다 [3].

레이저 조사에 의한 열해석은 레이저의 가공요소에 따른 표면에서의 열유속 분포를 알아야 하며, 에너지 값은 가우시안 분포로 가정하여 식 (6)과 같이 정의된다 [4].

$$q(x,y) = \frac{2\alpha P}{\pi r^2}\exp\left[\frac{-2(x^2+y^2)}{r^2}\right] \qquad (6)$$

여기서 α 는 재료표면에 대한 레이저빔의 흡수율, P 는 레이저빔의 출력, r 은 레이저빔의 반경을 의미한다.

Fourier 법칙에 따른 열 방정식은 식 (7)와 같이 정의되며, 이때 재료의 표면온도에 따른 식을 정리하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k_d \nabla^2 T + \frac{q(x)}{\rho C_P} \qquad (7)$$

$$T = \frac{2(1-r)\rho}{k}\sqrt{\frac{k_d t}{\pi}} \qquad (8)$$

여기서 $(1-r)$ 은 재료의 흡수율, ρ 는 레이저의 밀도, T 는 가공면의 표면온도를 의미한다 [4].

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션을 하기 위해 먼저 가공대상의 크기 및 두께는 Fig. 2 와 같이 선정하였다. 열전달에 의한 온도분포를 구하려면 재료의 열전도율, 비열, 밀도값이 필요하며, Table 1 에서 확인할 수 있다. 레이저 공정 방식은 백스크라이빙 공정으로 가정하였고, 레이저의 형상은 이상적인 가우시안 모드(TEM_{00})로 가정하였다. 가열 도중 열에 의한 복사를 무시하며, 잠열 발생이 없고, 상 변화가 없도록 하였다 [4-5].

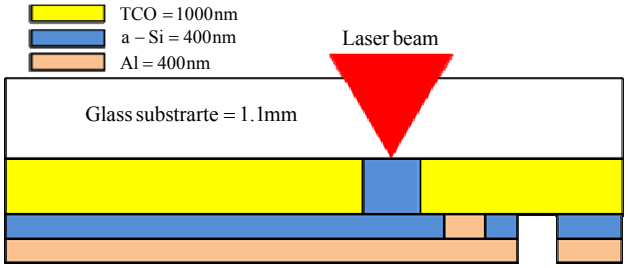

Fig. 2 1mm × 1mm 크기 태양전지의 구조 및 재료두께

Table 1 Thermophysical properties [5]

Material	Properties		
	k[W/mK]	c[J/kgK]	ρ[kg/m^3]
Glass	1.4	1200	2200
TCO	39.54	376	6640
a-Si	0.77	1025.89	2330
Al	270.18	753.15	2660

최소한의 에너지로 재료제거를 위해서는 에너지밀도를 결정해야 한다. Fig. 3 은 집속되는 레이저 빔직경에 따라 다른 에너지 밀도로 레이저를 조사시켜 표면의 온도분포를 나타낸 것이다. 레이저조건으로 지속시간 500ns, 품질인수(M^2)는 1.5 이며, 가공속도와 레이저 평균출력 값을 고정시키고 빔직경을 달리했을 때 분석한 결과이다. TCO 층의 용융점은 약 1900K 이기 때문에 빔직경이 0.5mm 일 때 표면에 발생하는 온도는 너무 높고, 1.5mm 는 용융점에 도달하지 못한다. 따라서 1.0mm 일 때의 에너지밀도에서 스크라이빙이 가능하다. Fig. 4 에서는 a-Si 의 녹는점이 약 1200K 이기 때문에 1.0mm 일 때의 에너지밀도에서 스크라이빙이 가능하다. Fig. 5 의 경우 Al 용융점은 약 930K 이므로 0.35mm 일 때의 에너지밀도에서 스크라이빙이 가능하다. 즉, 레이저 스크라이빙은 가공대상과 에너지밀도에 따라 스크라이빙이 가능한지 결정된다.

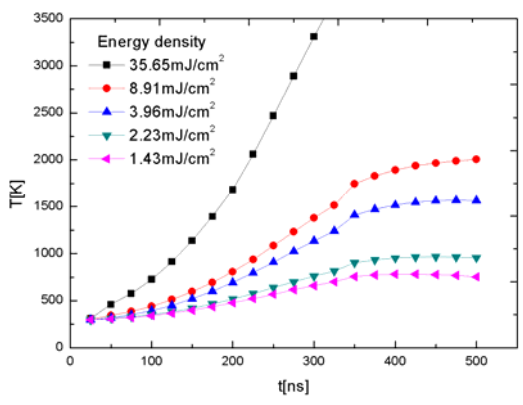

Fig. 3 Glass/TCO 공정(P1)시 시간에 따른 표면 온도변화(입사된 빔직경 0.5/1.0/1.5/2.0/2.5mm)

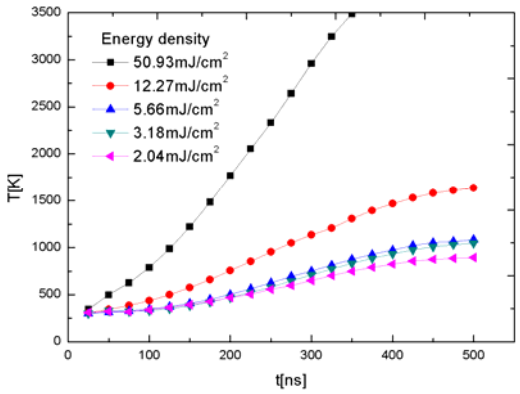

Fig. 4 Glass/TCO/a-Si 공정(P2)시 시간에 따른 재료표면 온도변화(입사된 빔직경 0.1/0.2/0.3/0.4/0.5mm)

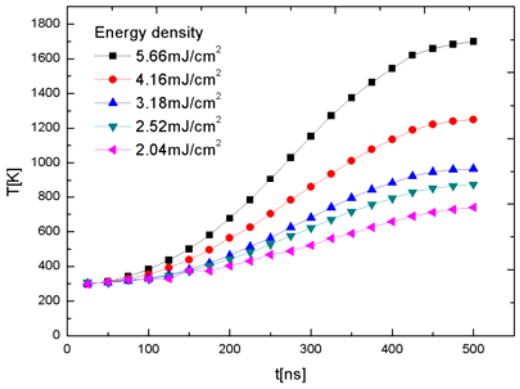

Fig. 5 Glass/TCO/a-Si/Al 공정(P3)시 시간에 따른 재료표면 온도변화(입사된 빔직경 0.3/0.35/0.4/0.45/0.5mm)

4. 결론

유한요소법을 이용하여 P1, P2, P3 공정 시 가공재질과 레이저 요소에 따른 재료표면의 온도변화를 분석하였다. 이 논문에서는 종래의 가공기술과 달리 표준화가 되어 있지 못한 레이저 가공에 대해 재료의 물성과 레이저 특성을 고려한 최소한의 에너지로 재료를 제거할 수 있는 에너지 밀도를 예상할 수 있는 방법을 제시하였다.

후기

본 연구는 충청권 광역선도사업의 지원에 의해 연구가 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jim, B., Ashwini, T., Raj, P., Nadezhda M., B., and Jörn, B., “Effects of pulse duration on the ns-laser pulse induced removal of thin film materials used in photovoltaics,” Progress in Biomedical Optics and Imaging, 1-13, 2009..
2. Wang, W., Jiang, G., Mei, X., Wang, K., Shao, J., and Yang, C., “Damage mechanism and morphology characteristics of chromium film in femtosecond laser rear-side ablation” Applied Surface Science, 3612-3617, 2010.
3. D. H, Kim., “Laser processing Technology,” 162-182, 2009.
4. Ming-Fei, C., Yu-Sen, H., Wen-Tse, H., Kuo-Cheng, H., and Yu-Pin, C., “Analysis of thermal effect on transparent conductive oxide thin films ablated by UV laser,” Thin Solid Films, 1067-1071, 2009.
5. Salvatore, A., Nicola, B., Oronzio, M., and Vincenzo, Z., “Combined thermal and optical analysis of laser back-scribing for amorphous-silicon photovoltaic cells processing,” International Journal of Heat, 646-656, 1999.