

◆ 특집 ◆ 최신 레이저 가공 및 해석 기술

레이저 어블레이션 기반 가공 및 계측에서 공정변수의 영향

Effects of Process Parameters on Laser Ablation Based Machining and Measurements

정성호^{1,✉}, 이석희¹
Sungho Jeong^{1,✉} and Seok Hee Lee¹

¹ 광주과학기술원 기전공학부 (School of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology)
✉ Corresponding author: shjeong@gist.ac.kr, Tel: 062-715-2393

Manuscript received: 2011.10.17 / Accepted: 2011.10.24

The changes of ablation characteristics with respect to laser parameters and material parameters during pulsed laser ablation of solids were discussed with experimental results. Although laser wavelength, laser pulse width, and laser pulse energy are the primary factors to be considered, it is shown that other parameters such as laser spot size and material properties also critically influence on the ablation results. It is further demonstrated that the microstructural characteristics of the target can lead to completely different ablation rate and surface morphology.

Key Words: Laser Ablation (레이저 어블레이션), Laser Parameter (레이저변수), Absorption Coefficient (흡수계수), Laser-Material Interaction (레이저-소재 상호작용)

1. 서론

레이저를 이용한 정밀한 구조물 가공은 최근 마이크로 및 나노가공 응용과 관련하여 크게 관심을 받고 있다.^{1,2} 그 중에서도 레이저 어블레이션에 기반한 가공의 경우 고출력 레이저와 소재간의 상호작용은 다양한 변수에 의해 영향을 받는데, 레이저-소재 상호작용에 영향을 미치는 핵심 변수는 크게 레이저 변수와 소재변수로 구분해 볼 수 있다. 레이저 변수로는 사용되는 레이저가 연속빔 레이저인지 펄스 레이저인지 여부, 레이저 빛의 파장, 에너지 강도, 펄스레이저인 경우 펄스폭 등이 가장 중요한 변수에 포함된다. 한편, 레이저 가공시 거의 대부분의 경우 레이저 빔은 렌즈를 통해 집속된 형태로 소재에 조사되는데 이때 소재 표면에서의 레이저 빔의 크기 역시 매우 중요한 변수이다. 소재변수의 경우 소재 표면

에서의 반사율과 소재 내부에서의 흡수계수 및 산란계수와 같은 광학적 물성과 소재내의 온도변화를 결정짓는 열물성이 가장 중요한 인자라고 볼 수 있다.

레이저 가공에 사용되는 레이저가 연속빔 레이저인지 펄스 레이저인지 여부는 크게 두가지 측면에서 중요한 의미를 갖는데, 첫째는 레이저빔의 방출형태에 따라 소재표면에서 도달할 수 있는 레이저빔의 에너지강도가 크게 차이가 난다는 점이다. 예를 들어 레이저빔의 초점직경이 100 μm 일 경우 1 kW의 출력을 내는 연속빔 레이저의 경우 초점에서의 에너지강도(=출력/초점면적, W/cm^2)가 약 $1.3 \times 10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 인데 비해, 펄스에너지가 0.1 J이고 펄스폭이 10 나노초(1 나노초 = 10^{-9} 초)인 펄스 레이저의 경우 초점에서의 에너지강도(=펄스에너지/초점면적·펄스폭, W/cm^2)가 약 $1.3 \times 10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$ 으로 연속빔 레이저에 비해 훨씬 높은 순간 에너지

강도를 얻을 수 있다. 한편, 레이저에 의해 소재에 공급되는 전체 에너지의 양은 위의 연속빔 레이저의 경우 초당 1 kJ의 에너지를 소재에 공급하는데 비해, 펄스 레이저의 경우 펄스 반복율이 10 Hz라고 가정하면 초당 공급할 수 있는 에너지는 1 J로 연속빔 레이저에 비해 월등히 작게 된다. 따라서 레이저 가공시 연속빔 레이저를 사용할 것인지 펄스 레이저를 사용할 지 여부는 응용분야에 따라 크게 달라지게 되는데, 레이저 용접이나 레이저 절단과 같이 상당한 양의 소재를 지속적으로 용융 혹은 증발시켜야 하는 공정의 경우 가공에 소요되는 충분한 에너지의 공급이 가능한 연속빔 레이저를 주로 사용하며, 레이저 드릴링이나 미세가공과 같이 특정 영역의 재료를 효과적으로 제거하면서도 주변 재료에는 최소한의 열적 영향을 미치도록 하기 위해서는 순간 에너지 강도가 높은 펄스 레이저를 사용하는 것이 유리하다. 고출력의 레이저가 조사된 소재에서는 연속빔 및 펄스 레이저 모두 소재의 가열, 상변화, 플라즈마 생성 등의 현상이 발생할 수 있으며 레이저 어블레이션은 이러한 현상들을 포괄적으로 일컫는 용어이다. Fig. 1은 고출력 펄스 레이저에 의한 고체 소재의 어블레이션을 개략적으로 나타낸 그림이다. 레이저가 조사된 소재는 표면온도가 급격하게 상승하면서 표면에서부터 용융 및 증발이 일어나는데, 레이저 조사가 공기 중에서 이루어질 경우 그림에서와 같이 급격히 팽창하는 증기가 주변의 공기를 압축함으로 인해 주변 공기에 충격파가 발생하기도 한다. 또한, 입사되는 레이저 빔의 일부가 증기에 흡수되면서 레이저 플라즈마가 생성되는데 레이저 에너지 강도가 약 0.5 GW/cm² 이상이 되면 플라즈마에 의한 레이저빔 흡수로 인해 소재에 전달되는 레이저 에너지가 현저히 감소하게 되는 레이저빔 차단현상이 일어나는 것으로 알려져 있다.³

본 논문에서는 펄스 레이저 어블레이션을 기반으로 한 레이저 가공시 주요 레이저변수에 따른 가공성의 변화를 검토한다. 특히 소재표면에서의 레이저빔 크기 및 소재표면의 반사율이 전체적인 레이저-소재 상호작용에 미치는 영향을 파악하고, 재료의 열물성에 따른 어블레이션 결과의 변화를 실험결과를 중심으로 검토한다. 아울러 최근 큰 관심을 받고 있는 박막형 태양에너지 소재에서 소재의 재료적 특성에 따른 어블레이션 결과의 차이를 보고한다.

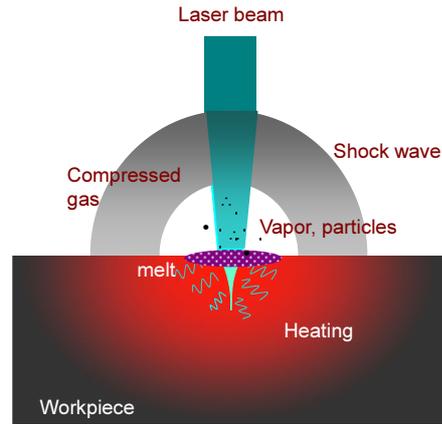


Fig. 1 Schematic diagram of pulsed laser ablation of solids

2. 레이저 변수의 영향

2.1 초점크기

레이저 가공시 소재표면에서의 레이저빔 크기는 가공결과에 크게 영향을 미치는데, 우선 가공부의 정밀도가 레이저빔의 크기에 의해 결정된다. 또한 소재표면에서의 레이저 에너지강도는 초점크기에 의해 결정되므로 레이저빔의 크기가 작을수록 같은 펄스에너지에서도 높은 에너지강도를 얻을 수 있다. 특히 에너지 강도는 초점크기의 제곱에 반비례하므로 초점크기가 커질수록 에너지강도는 급격히 떨어지게 되어 가공에 매우 불리한 영향을 미친다. 레이저 가공시 대부분의 경우 레이저빔의 초점위치가 가공되는 소재의 표면과 일치하도록 설정하는데 그 이유는 초점위치에서 레이저빔의 크기가 가장 작고 따라서 가장 높은 에너지강도를 얻을 수 있기 때문이다. 가우시안(Gaussian) 형태의 에너지 분포를 갖는 레이저빔의 경우 초점에서 레이저빔의 크기는 아래식으로 표시할 수 있는데⁴

$$d = \frac{4\lambda f}{\pi D} = 0.64 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

여기서 λ 는 레이저빔의 파장, f 는 집속렌즈의 초점 길이, D 는 집속전 가우시안 레이저빔의 직경, $NA(=2f/D)$ 는 렌즈 수차(numerical aperture)를 나타낸다. 그러나 실제 초점에서의 레이저빔의 크기는 위의 식에 의해 계산된 크기와 차이를 나타내는데

그 이유는 대부분의 고출력 레이저빔의 에너지 분포가 정확한 가우시안 빔과는 상당히 차이가 있기 때문이다. 한편, 레이저빔의 에너지 분포가 가우시안에 가까운 경우라 하더라도 실제 레이저 가공시 소재 표면을 정확히 렌즈의 초점위치에 일치시키는 것이 매우 어렵는데 그 이유는 초점부근에서 레이저빔의 직경이 급속히 변하기 때문이다. 초점의 앞뒤로 레이저빔의 직경이 초점에서의 크기와 거의 유사하다고 인정되는 범위를 초점길이라고 하는데, 초점길이는 렌즈의 수차에 따라 아래식과 같이 표현된다.⁵

$$S = C \frac{\lambda}{NA^2} \quad (2)$$

여기서 C 는 1 이하의 상수로 보통 0.7 정도의 값을 갖는다. 예를 들어 파장이 1064 nm 인 Nd:YAG 레이저인 경우 $NA=0.26$ 이라고 하면 ($C=0.7$ 로 가정) 초점길이는 약 11 μm 로 매우 작은 값을 갖는다. 따라서 작은 정렬오차에 의해서도 소재표면은 렌즈초점을 벗어날 수 있으며 초점직경이 작으면 작을수록 초점길이도 줄어들게 되므로 렌즈 초점에 소재표면을 위치시키는 것은 실제로 매우 어렵다. 반대로, 레이저 초점과 소재표면을 정확히 일치시키지 않을 경우 소재표면에서의 실제 에너지강도와 식(1)의 레이저빔 직경을 이용하여 계산한 에너지강도 사이에 상당한 차이가 발생할 수 있으며 원하는 레이저 가공결과를 얻지 못하게 되고, 또한 가공의 반복성이 현저히 저하되는 결과를 낳게 된다.

이로 인해 실제 레이저 가공시에는 소재표면에서의 레이저빔 크기를 측정을 한 후 측정값을 바탕으로 에너지강도를 계산하는 경우가 대부분이다. 실험적으로 레이저빔 크기를 측정하기 위해서는 표면이 매끈한 재료에 레이저를 조사한 후 재료표면에 생긴 어블레이션 크레이터(crater)의 크기를 측정하는 것이 보통이다. 이때 레이저 에너지는 재료의 어블레이션 임계값, 즉 어블레이션이 일어나기 시작하는 에너지 값을 사용해야 실제 레이저빔 크기에 가까운 값을 얻을 수 있다. 만약 레이저 에너지강도가 너무 크면 재료의 어블레이션이 레이저빔 보다 훨씬 넓은 영역에서 일어나게 되며 또한 주변 재료의 용융으로 인해 크레이터 크기를 정확히 측정하기가 힘들다. 특히 가우시안 레이저

빔의 경우 펄스에너지가 증가할 경우 Fig. 2 에서와 같이 레이저빔의 가장자리 에너지강도가 임계값 이상으로 증가하게 되므로 $1/e^2$ 로 정의되는 레이저빔의 크기는 동일하더라도 실제로 어블레이션 되는 영역의 크기는 증가하게 되어 레이저빔의 크기와 크레이터 직경 사이의 차이가 점점 커지게 된다.

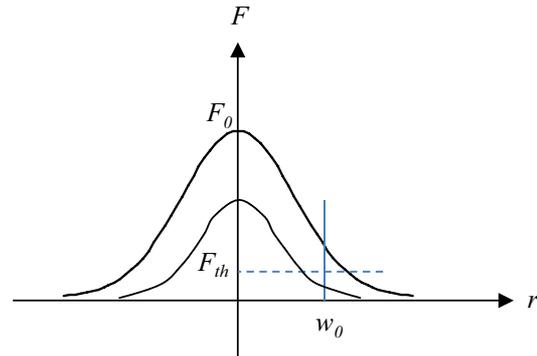


Fig. 2 Variation of laser energy distribution depending on the peak value

실제 레이저 가공에서는 임계값보다 훨씬 높은 에너지강도를 사용하는 경우가 많으며 따라서 레이저 에너지강도에 따른 소재 표면에서의 레이저빔 크기의 변화를 보상해주기 위해 아래와 같은 방법을 사용한다. 가우시안 레이저빔의 에너지밀도(=에너지/단위면적, J/cm^2)를 다음 식으로 표현할 수 있다.⁶⁻⁸

$$F(r) = F_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right), F_0 = \frac{2E_p}{\pi w_0^2} \quad (3)$$

여기서 r 은 레이저빔의 중앙에서 반경방향으로의 거리, w_0 는 에너지밀도가 중앙에서의 값 F_0 의 $1/e^2$ 로 떨어지는 위치까지의 반경, E_p 는 레이저 펄스 에너지를 나타낸다. 어블레이션 임계조건에서의 에너지밀도를 F_{th} 라고 하면 어블레이션 크레이터의 직경은 아래와 같이 F_0 와 w_0 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$D^2 = 2w_0^2 \ln(F_0/F_{th}) \quad (4)$$

레이저 펄스에너지를 증가시키면서 크레이터의

크기를 측정한 후 Fig. 3 과 같이 $\ln F_0$ 에 대한 D^2 의 그래프를 그리게 되면 식(4)에 의해 그래프의 기울기로부터 입사되는 레이저빔의 반경 w_0 를 구할 수 있다. Fig. 3 은 AIN 세라믹의 레이저 어블레이션을 통해 얻어진 결과로 시편에 단일 레이저 펄스를 조사한 경우 및 같은 위치에 여러 펄스를 조사한 경우에 기울기가 거의 같게 나오는 것을 알 수 있으며, 따라서 실제로 시편에 형성된 크레이터의 크기가 펄스 수 및 펄스에너지에 따라 달라짐에도 불구하고 비교적 정확한 레이저빔 크기를 구할 수 있는 장점이 있다. 식(4)를 적용함에 있어서 한가지 주의할 점은 레이저 펄스에너지가 지나치게 높을 경우 플라즈마 영향 등으로 인해 크레이터 크기가 펄스에너지에 대해 비선형적으로 증가하게 되므로 식(4)는 크레이터 크기가 비교적 선형적으로 증가하는 구간의 데이터에만 적용해야 한다는 것이다.

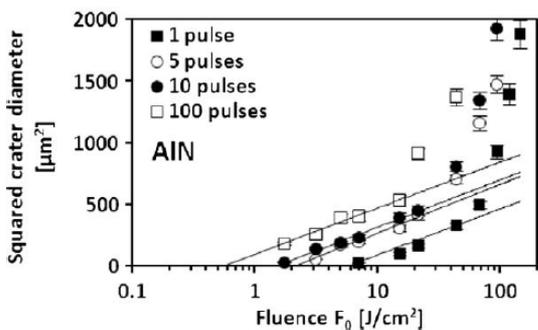


Fig. 3 Variation of crater diameter as a function of laser fluence

2.2 표면의 흡수 및 반사

소재표면의 반사율이 R 인 경우 입사되는 레이저 에너지(I_0)는 소재표면에서 $R \times I_0$ 만큼 반사에 의해 소실되며 나머지 $(1-R)I_0$ 만큼의 에너지만 가공에 사용된다. 따라서 실제 레이저 가공에서는 반사에 의한 에너지 손실을 최소화하기 위한 다양한 방법이 사용된다. 우선, 소재의 반사율은 레이저빔의 파장에 따라 달라지므로 가능한 한 반사율이 낮은 파장대의 레이저빔을 활용하는 것이 유리하다. 그러나 레이저빔 파장의 선택은 레이저의 펄스에너지 및 가격 등의 요인에 의해 크게 제한을 받게 되므로 소재표면의 반사율을 낮추어 에너지 손실을 줄이려는 시도가 이루어진다. 금속의 경우

적외선 파장대에서 표면 반사율이 거의 90%에 가까우므로 표면에 흡수율이 높은 재료를 도포하여 에너지 효율을 높이기도 한다. 주어진 레이저 파장에서의 소재의 흡수계수(absorption coefficient) 및 반사율은 소재와 레이저간의 에너지전달(energy coupling)을 결정짓는 가장 중요한 변수로 레이저 가공시 반드시 고려해야 한다.

한편, 금속 표면경도, 내마모성, 내부식성과 같은 기계화학적 특성 향상 및 피로균열 등의 방지에 특히 효과가 있는 것으로 알려져 최근 많은 관심을 받고 있는 레이저피닝의 경우 어블레이션에 의한 표면품질 저하 방지 및 레이저 에너지의 효과적 흡수를 위해 표면에 얇은 보호층을 추가한 후 어블레이션을 하는 경우가 대부분인데, 보호층으로는 수십에서 약 백 마이크로미터 두께의 금속 박막이나 검은색의 페인트가 주로 사용된다. Fig. 4 는 AISI 304 스테인레스강에 동일한 레이저 어블레이션 조건에서 다른 종류의 보호층을 사용하여 피닝을 실시한 후 표면의 경도를 측정한 결과이다. 그림에서 상대적으로 높은 경도는 실제 시편에 더 높은 플라즈마 압력이 작용한 것과 동일하게 볼 수 있는데, 서로 다른 종류의 보호층 하에서 매우 다른 플라즈마 압력이 생성되었음을 알 수 있다. Fig. 4 에서와 같이 레이저 피닝의 경우에는 플라즈마 압력이 보호층을 통과하여 소재에 보다 효과적으로 전달되는지 여부가 재료의 음향 임피던스(acoustic impedance)에 의해서도 영향을 받으므로 플라즈마 압력과 재료의 물성을 동시에 고려해야 한다.^{9,10}

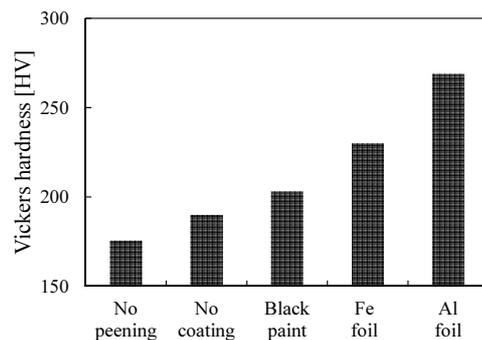


Fig. 4 Variation of surface hardness depending on the coating material on sample surface and plasma conditions

3. 소재 변수의 영향

3.1 열물성

레이저가 조사된 재료는 급격한 온도변화와 함께 용융, 증발이 일어나게 되는데 이때 재료가 어블레이션되는 양상은 재료의 열물성치에 의해서도 크게 영향을 받는다. 일반적으로 펄스폭이 피코초 이상으로 긴 경우에는 재료의 어블레이션은 열적 현상에 의한 영향을 크게 받으며 레이저 빔의 크기보다 훨씬 큰 영역의 열영향부가 생기는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 열영향에 의한 주변 재료의 용융 및 용융된 재료가 다시 응고되면서 크레이터 주변에 용기를 형성하거나 액체방울(droplet) 상태에서 그대로 응고되는 현상 등에 의한 가공정밀도 저하 및 열에 의한 재료의 기계적 특성 변화를 최소화하기 위해서는 펨토초레이저와 같이 펄스폭이 짧은 레이저를 사용하는 것이 유리하다. 최근에는 펨토초레이저의 경우에도 반복율이 높은 경우에는 열영향부가 생길 수 있는 것으로 보고되고 있다.¹¹

Fig. 5 는 Al₂O₃ 세라믹과 AlN 세라믹에 파장 785 nm, 펄스폭 184 fs 의 펨토초레이저를 조사하여 생성한 크레이터를 보여주고 있으며, 각각의 샘플에 200 개의 펄스가 조사되었다. 그림에서 알 수 있듯이 두 종류의 세라믹은 전혀 다른 크레이터 표면형상을 보여주고 있다. Al₂O₃ 의 경우 크레이터 벽면에 원래의 재료가 파단에 의해 떨어져 나간 듯한 형상을 보여주는 반면 AlN 의 경우 전체적으로 매끄러운 표면을 보여주고 있는데 용융 후 재응고로 인해 생성된 표면인 것으로 추정된다. 이와 같이 동일한 레이저 조건에서 전혀 다른 크레이터 표면형상을 나타내는 이유는 재료의 열물성이 큰 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 먼저 Al₂O₃ 의 경우 열전도도가 24 W/mK 로 낮은 반면 AlN 은 170 W/mK 로 매우 높다. 한편, Al₂O₃ 의 열팽창율은 7.7x10⁻⁶ K⁻¹로 AlN 의 4.2x10⁻⁶ K⁻¹에 비해 상대적으로 더 크다. 따라서 Al₂O₃ 는 낮은 열전도도로 인해 열이 국소영역에 집중되면서 매우 높은 온도까지 도달하게 됨과 동시에 큰 열팽창율로 인해 상당히 큰 열응력이 레이저가 조사된 영역에 발생할 것으로 예상된다. Fig. 5(a)에서 관찰된 파손된 것처럼 보이는 벽면형상은 이와 같이 생성된 높은 열응력에 기인한 재료의 기계적 파손이 그 원인인 것으로 판단된다. 한편, AlN 의 경우 열전도도가 높아 열의 집중이 훨씬 작으며, 아울러 상대적으로

낮은 열팽창율로 인해 열응력은 훨씬 낮을 것으로 추정되며, 대신 주변 재료로의 열전달에 따른 전체적인 용융의 결과가 Fig. 5(b)와 같은 표면형상을 가져온 것으로 판단된다.¹²

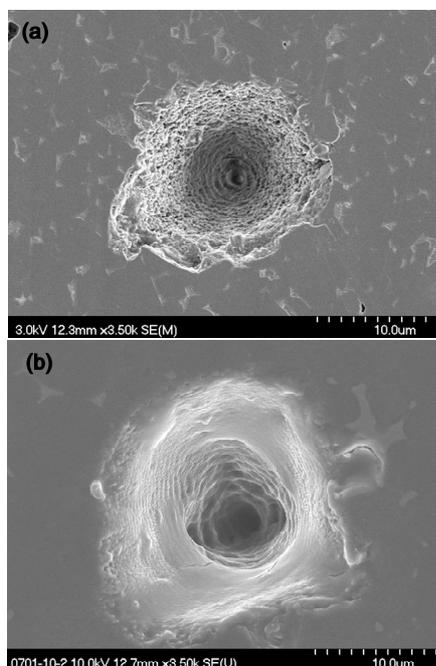


Fig. 5 Scanning electron microscope images of the (a) Al₂O₃ and (b) AlN craters produced by femtosecond laser ablation

3.2 박막재료의 구조적 특성

Fig. 6 은 두 가지의 다른 방법으로 제작된 박막형 태양전지용 박막을 나노초 레이저로 어블레이션 한 결과이다. Fig. 6(a)의 박막은 스퍼터링(sputtering) 공정으로 제작되었으며 Fig. 6(b)의 박막은 동시증발법(co-evaporation) 공정으로 제작되었다. 두 박막의 두께는 1.23μm 로 동일하며 각 박막의 성분조성은 Table 1 과 같다. 비록 두 박막의 성분조성이 약간의 차이가 있기는 하지만 크게 차이가 난다고 보기는 힘들다. 위의 두 공정으로 제작된 박막을 레이저로 어블레이션 했을 때 펄스당 평균 어블레이션 두께가 스퍼터링으로 제작된 박막의 경우 약 0.4 μm 인데 반해 동시증발법으로 제작된 박막의 경우 약 0.2 μm 으로 거의 절반 밖에 되지 않는 것을 알 수 있었다. Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 어블레이션이 끝난 재료 표면의 형상 역시 현격한 차이를 나타내는데, 스퍼터링 공정으로 제작된 박

막은 어블레이션 후 다공성의 표면을 보이는데 반해 동시증발법으로 제작된 박은 거의 기공이 생성되지 않고 비교적 균일하게 용융이 일어난 것으로 보인다. 이와 같이 유사한 성분에 두께가 같은 재료인 경우에도 어블레이션 결과가 현저히 달라지는 이유는 각각의 공정으로 생산된 박막의 재료적 특성이 다르기 때문이다. 실제 동시증발법으로 제작된 박막의 경우 다결정(polycrystalline) 구조를 갖는데 스퍼터링으로 제작된 박막보다 결정의 크기가 훨씬 크고 균일하다.

Table 1 Concentration of the thin films fabricated by two different methods for solar cell applications

Fabrication Process	Concentration (%)			
	Cu	In	Ga	Se
Sputtering	28.2	21.4	7.3	43.2
Co-evaporation	21.6	23.8	4.2	50.4

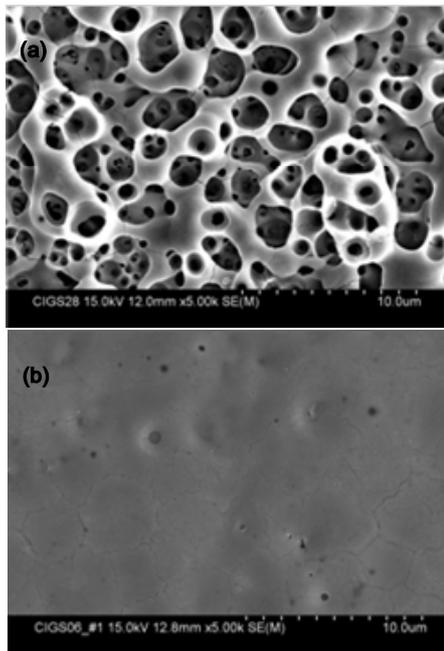


Fig. 6 Differences in surface morphology of the thin films prepared by (a) sputtering and (b) co-evaporation methods after nanosecond laser ablation

4. 결론

고체소재의 펄스 레이저 어블레이션은 다양한 레이저 가공 및 계측에 활용이 되고 있다. 본 논

문에서는 펄스 레이저에 의한 고체소재의 어블레이션 가공시 어블레이션 결과에 영향을 미칠 수 있는 다양한 변수 가운데 레이저 초점크기, 소재 표면의 흡수 및 반사, 소재의 열물성, 소재의 재료적 특성 등이 어블레이션 결과에 미치는 영향을 실험결과를 중심으로 검토하였다. 이상에서 이미 잘 알려진 레이저의 파장, 펄스폭, 레이저 에너지 등과 같은 변수 이외에도 정확한 어블레이션 결과의 예측 및 원하는 가공결과의 확보를 위해서는 위에서 언급한 바와 같은 광학적, 열적, 재료적 특성들이 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2010-0028271).

참고문헌

1. Oh, K. H., Lee, M. K. and Jeong, S. H., "Design and fabrication of a micro-heat pipe with high-aspect-ratio microchannels," *Journal of the KSPE*, Vol. 23, No. 9, pp. 164-173, 2006.
2. Kim, S. H., Chung, D. K., Kim, B. H., Oh, K. H., Jeong, S. H. and Chu, C. N., "Micromachining using Hybrid of Laser Beam and Electrical Discharge Machining," *Journal of the KSPE*, Vol. 26, No. 10, pp. 108-115, 2009.
3. Mao, X. L. and Russo, R. E., "Observation of plasma shielding by measuring transmitted and reflected laser pulse temporal profiles," *App. Phys. A*, Vol. 64, No. 1, pp. 1-6, 1997.
4. Kuhn, K. J., "Laser Engineering," Prentice Hall, 1997.
5. Crafer, R. and Oakley, P. J., "Laser Processing in Manufacturing," Springer, 1992.
6. Liu, J. M., "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes," *Opt. Lett.*, Vol. 7, No. 5, pp. 196-198, 1982.
7. Bonse, J., Wrobel, J. M., Krüger, J. and Kautek, W., "Ultrashort-pulse laser ablation of indium phosphide in air," *Appl. Phys. A*, Vol. 72, No. 1, pp. 89-94, 2001.
8. Borowiec, H. and Haugen, H. K., "Femtosecond laser micromachining of grooves in indium phosphide," *Appl. Phys. A*, Vol. 79, No. 3, pp. 521-529, 2004.
9. Marsh, S. P., "LASL Shock Hugoniot Data,"

- University of California Press, 1980.
10. Shukla, M., Kashyap, Y., Sarkar, P. S., Sinha, A., Pant, H. C., Rao, R. S., Gupta, N. K., Senecha, V. K. and Godwal, B. K., "Laser induced shock pressure multiplication in multi layer thin foil targets," Nucl. Fusion, Vol. 46, No. 4, pp. 419-431, 2006.
 11. Eaton, S. M., Zhang, H., Ng, M. L., Li, J., Chen, W. J., Ho, S. and Herman, P. R., "Transition from thermal diffusion to heat accumulation in high repetition rate femtosecond laser writing of buried optical waveguides," Opt. Express, Vol. 16, No. 13, pp. 9443-9458, 2008.
 12. Kim, S. H., Sohn, I. B. and Jeong, S. H., "Ablation characteristics of aluminum oxide and nitride ceramics during femtosecond laser micromachining," Appl. Surf. Sci., Vol. 255, No. 24, pp. 9717-9720, 2009.