

355nm 펄스 레이저를 이용한 구리 박막의 레이저 어블레이션에 대한 연구

오재용(부산대 대학원 ERC/NSDM), 신보성*(부산대 ERC/NSDM)

A study on the laser ablation of the copper metal foil by 355nm pulse laser

J. Y. OH(ERC/NSDM, PNU), B. S. Shin(ERC/NSDM, PNU)

ABSTRACT

Usually nanosecond pulsing laser ablation of metal is under thermal effect. Many studies of the theoretical analysis and modeling to predict a result of laser ablation of metal are suggested on the basis of the photothermal mechanism. In this paper, we investigate the etching depth and laser fluence of laser ablation of copper films. We proposed the simplified SSB Model(Srinivasan-Smrtic-Babudp model) to study the photothermal effect of nanosecond pulsing laser ablation of copper thin metal. The experimental results were obtained by using the 355nm DPSS Nd:YVO₄ laser.

Key Words : laser ablation (레이저 어블레이션), 355nm pulse laser (355nm 펄스 레이저), ablation modeling(어블레이션 모델링), metal(금속)

1. 서론

재료의 표면에 레이저가 조사되면 흡수된 에너지는 표면 에너지로서 작용하여 열전도에 의해 재료 내부로 전달되어 용융되며 에너지의 양이 증가할수록 재료의 일부는 폭발적인 화학적, 물리적인 분해를 동반한 증발에 의해 제거되는데 이 과정이 광열적 메커니즘이다.¹ 일반적으로 금속 재료의 레이저 어블레이션은 광열적 영향이 지배적이라고 알려져 있으며, 따라서 이론적 해석도 광열적 메커니즘을 중심으로 이루어져 왔다. 금속 재료의 이론적 모델링은 시간에 따른 표면 및 내부의 온도 분포 해석을 기초로 하고 있으며, 가공 깊이(etching depth) 및 가공 홀의 크기(crater diameter)를 예측하기 위한 많은 이론적/실험적 접근이 레이저 종류 및 금속 재료에 따라 이루어지고 있다.

본 논문에서는 관계식이 비교적 간단하며 파라미터를 실험결과를 이용한 곡선 맞춤에 의해 쉽게 계산할 수 있는 Srinivasan-Smrtic-Babudp 의해 제안된 모델(이하 SSB 모델로 표기함)² 을 사용하여 355nm 나노초 UV laser 에 대한 구리(Cu)의 어블레이션 해석을 이론적/실험적으로 수행하였다. SSB 모델은 폴리머 재료에 대해 적용되는 가공 깊이와 레이저 플루언스와의 관계식이지만 광화학적 효과뿐만 아니라 광열적 효과에 대한 항을 포함하고 있기 때문에 금속 재료에도 적용이 가능함을 보였다. 그리고 실제 가공 결과와 모델링 결과를 비교하여 타당함을 입증하였다.

2. 금속 재료에 SSB 모델의 적용

본 논문에서는 SSB 모델을 사용하여 금속 재료의 어블레이션을 간략하게 표현하였다. SSB 모델은 다음과 같다.³

$$\begin{aligned}
 l_{f,total} &= l_{f,photochemi} + l_{f,photothermi} \quad (1) \\
 &\cong \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{H}{H_{TR}} \right) + A_1 e^{\left[\frac{-E^* \ln(H/H_{TR})}{H} \right]} \\
 &\cong A_1 e^{\left[\frac{-E^* \ln(H/H_{TR})}{H} \right]}
 \end{aligned}$$

식 (1) SSB 모델은 레이저 조사량에 따른 에칭 깊이의 관계를 나타내는 식으로써 두 개의 항으로 구성되어 있다. 첫째항은 광화학적 메커니즘에 의해 가공되는 깊이를 나타내는 것으로, 본 연구는 광열적인 영향이 지배적인 Cu 의 가공을 모델링하기때문에 첫째항을 무시하고 광열적인 영향에 의한 가공 깊이를 나타내는 두번째 항만을 고려하였다. 지수함수 형태의 두번째 항은 β , H_{TR} , A_1 , E^* 의 네 가지 파라미터를 포함하고 있는데, β 는 Cu 의 광학적 물성치로서 이미 알려진 값이며 H_{TR} , A_1 , E^* 는 실험결과로부터 곡선 맞춤으로 계산하여야 한다. 폴리머에 대해 SSB 모델이 적용될 경우에도 같은 절차에 의해 파라미터값이 결정된다. Fig. 1(a)는 355nm UV 레이저에 의한 Cu 가공시 플루언스와 가공깊이의 관계를 실험적으로 규명하여 나타낸 그래프이다.¹ 수학적으로 분석해보면 A_1 은 비례 상수으로써 가공깊이의 증가율에 관계하고 H_{TR} , E^* 는 곡선의 굴곡 형상을 조절하는 역할을 하기 때문에

Fig. 1(a)와 같이 지수함수 형태의 금속 재료에 대해서도 SSB 모델의 적용이 곡선 맞춤에 의해 가능함을 알 수 있다. Fig. 1(a)로부터 곡선 맞춤에 의해 계산된 파라미터 값들은 Table 1 과 같다.

Table 1. Ablation parameters for Cu processed by 355nm UV laser

Parameters	Cu
H_{TR} : Threshold fluence (J/cm^2)	0.5
β : Absorption coefficient(cm^{-1})	7.31×10^5
A_1 : Effective frequency factor($um/pulse$)	100
E^* : Effective activation energy(kJ/cm^3)	21000×10^3

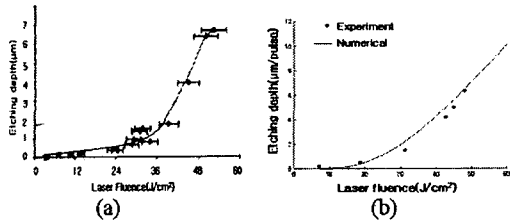


Fig. 1 Relationship between laser fluence and etching depth for Cu treated by 355nm UV laser, the results of (a)experiments¹ and (b)modeling

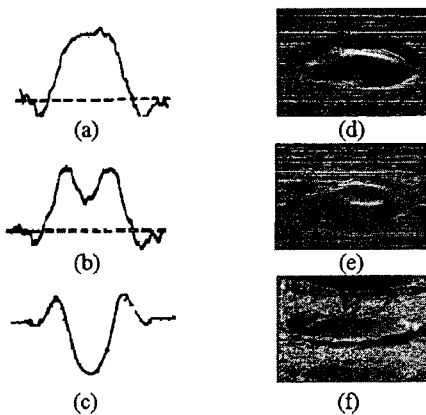


Fig. 2 Surface morphologies of theoretical modeling when laser treated (a)at lower fluence than threshold energy (b) at threshold energy and (c) higher fluence than threshold energy, and SEM photos of Cu processed by 355nm UV laser, (d)laser fluence $0.23J/cm^2$ with 30 shots (e)laser fluence $0.8J/cm^2$ with 30 shots, (f)laser fluence $13.56J/cm^2$ with 30 shots

3. 금속 재료의 레이저 어블레이션

본 실험에 사용된 레이저는 펄스폭 20ns, 펄스 반복율 30.30303kHz, 출력 2.5 W, TEM₀₀ 모드로 에너지 분포가 가우시안 빔인 Q-switched 355nm UV

Laser 를 사용하였으며 대기중에서 실온 상태로 가공하였고 전자현미경(SEM)을 사용하여 가공 상태를 관찰하였다.

일반적으로 알려진 레이저 가공 시 플루언스의 크기에 따른 가공 형태는 Fig. 2 와 같다.⁴ Fig. 2(a)는 임계값보다 낮은 플루언스에서 가공했을 때를 나타낸 것으로 팽창되어 부풀어 오르는 것을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 임계값 근처의 플루언스로 가공했을 때로 중앙부에 분화구 모양의 홀(hole)이 생기지만 표면보다 올라와 있다. Fig. 2(c)는 임계값보다 높은 플루언스에서 가공했을 때를 나타낸 것으로 홀이 정상적으로 가공된 것을 볼 수 있다. 일반적으로 임계값(threshold energy) 전후의 낮은 플루언스 영역에서의 광열적 가공은 표면 재료의 팽창을 유발하며, 높은 에너지 영역에서는 용융물의 재응고와 증발된 재료의 재응축에 의해 산화된 입자로 구성되는 버(burr)가 홀 주위에 남는다.⁴

4. 결론

본 연구는 레이저 파장 355 nm DPSS UV 레이저를 이용하여 Cu 가공 시 어블레이션의 이론적인 해석결과로부터 구리 소재의 광열적 어블레이션 매개변수들을 계산하였으며, 실험결과와 비교하여 이의 타당성을 검증하였다. 향후 보다 다양한 소재에 대한 레이저 어블레이션 현상을 레이저 파장에 따라 규명함으로써 레이저가공 모델링의 기준을 마련하는 연구가 추가되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원사업인 “첨단레이저 응용 미세가공기술 개발” 과제의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. L. Tunna, A. Kearns, W. O'Neill, C.J. Sutcliffe, "Micromachining of copper using Nd:YAG laser radiation at 1064, 532, and 355 nm wavelengths", Optics & Laser Technology, Vol. 33, pp. 135-143, 2001.
2. Srinivasan, V., Smrtic, M. A. and Babu, S. V., "Excimer Laser Etching of Polymers", J. Appl. Phys., Vol. 59, No. 11, pp. 3861-3867, 1986.
3. 윤경구, 방세윤, "폴리머 미세가공을 위한 레이저 어블레이션 모델링", 한국정밀공학회지, Vol. 22, No. 9, pp. 60-68, 2005.
4. D.W. Zeng, K.C. Yung, C.S. Xie, "UV Nd:YAG laser ablation of copper: chemical states in both crater and halo studied by XPS", Applied Surface Science, Vol. 217, pp. 170-180, 2003.