

355nm UV 레이저를 이용한 구리 박판 가공 시 어블레이션에 관한 연구

오재용*, 신보성#

A Study on Laser Ablation of Copper Thin Foil by 355nm UV Laser Processing

Jae Yong Oh* and Bo Sung Shin#

ABSTRACT

Usually nanosecond pulsed laser processing of metal is mainly affected by the thermal ablation. Many studies of the theoretical analysis and modeling to predict the laser ablation of metal are suggested on the basis of the photothermal mechanism at higher laser fluence. In this paper, we investigate the etching depth and laser fluence of laser ablation of copper foils and propose the simplified SSB Model(Srinivasan-Smrtic-Babu model) to study the photothermal effect of nanosecond pulsed laser ablation. The experimental results show that the photothermal ablation of the 355nm DPSS Nd:YVO₄ laser is useful to process the copper thin foils.

Key Words : UV laser(자외선 레이저), laser ablation(레이저 어블레이션), photothermal effect(광열적 효과), copper foil(구리 박판)

1. 서론

레이저를 이용한 재료의 가공 현상은 레이저와 가공 재료의 종류에 따라 다르기 때문에 각각에 대하여 이론적 모델링 및 실험적 현상 규명 등 다양한 연구가 이루어져 왔다.¹⁻⁴ 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(photothermal) 메커니즘이다.⁵ 반면 광화학적(photochemical) 메커

니즘은 분자고리의 분해이다. 즉 한 개의 광자가 가진 에너지가 분자의 결합에너지 보다 큰 경우에 해당되며 이때 분자고리가 절단된다.⁶ 일반적으로 금속 재료의 레이저 어블레이션은 열적 메커니즘이 지배적이며 폴리머 재료의 가공에서는 광화학적 반응이 지배적이라고 알려져 있다.⁷ 따라서 금속 재료에 대한 어블레이션의 이론적 해석은 열적 메커니즘으로, 폴리머 재료에 대한 어블레이션의 이론적 모델링은 광화학적 메커니즘을 중심으로 해석이 이루어져 왔다.

금속 재료의 이론적 모델링은 시간에 따른 표

* 접수일: 2006년 8월 22일, 게재승인일: 2006년 12월 5일

* 부산대학교 대학원

교신저자: 부산 대학교 ERC/NSDM

E-mail bosung@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2787

면 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. 하지만 대부분의 금속 재료의 어블레이션 모델링들이 펄스초 레이저를 이용한 가공에 관한 것이며⁸⁻¹⁰ 나노초 레이저의 경우 온도 해석에 국한되어 있다. 나노초 레이저에 의한 금속 가공은 광열적 메커니즘이 지배적이므로 용융 금속의 거동 및 온도 분포 해석이 복잡하고 가공 변수가 많기 때문에 모델링 결과와 실험결과와의 오차가 커서 정확한 예측이 어렵다.

본 논문에서는 관계식이 비교적 간단하며 파라미터를 실험결과를 이용한 곡선 맞춤에 의해 쉽게 계산할 수 있는 Srinivasan-Smrtic-Babu¹¹에 의해 제안된 모델(이하 SSB 모델로 표기함)을 사용하여 355 nm 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 있고, 특히 금속 재료의 경우 광화학적 효과가 광열적 어블레이션 효과에 비해 미비한 경우 상대적으로 무시할 수 있기 때문에 금속 재료에도 적용이 가능함을 보였다. 그리고 실제 가공 결과와 모델링 결과를 비교하여 타당함을 입증하였다.

2. 기술적 배경

2.1 금속 어블레이션 메커니즘

금속 재료의 레이저 가공은 광열적 메커니즘이 지배적이다. 따라서 용융 및 재응고에 의한 버(burr)의 발생과 가공부의 화학적 변화 및 정밀도 저하 등의 문제점을 가지고 있다. 하지만 최근 열전달 속도 보다 빠른 펄스초 레이저의 등장으로 이러한 단점을 극복하고 레이저 가공의 장점이 특히 주목받고 있기도 하다. 나노초 레이저에 의한 금속의 어블레이션은 일반적으로 광열적 영향이 매우 지배적이기 때문에 광화학적인 영향이 잘 무시되지만 금속 재료에 대해서도 광화학적 영향에 의한 가공이 이루어지며 그 메커니즘은 승화(sublimation)와 이온화(ionization)이다.^{8, 12}

승화는 높은 광자(photon) 에너지에 의해 결합이 바로 끊어져 제거되는 현상으로 펄스초 레이저

가공처럼 레이저 플루언스가 매우 클 때 나타난다.⁹ 하지만 레이저의 펄스폭이 나노초 이상이거나 열용량이 크고 결합 에너지가 낮은 금속 가공에서는 대부분 발생하지 않는다. 이것은 에너지가 결합을 끊을 만큼 높아지기 전에 이미 가열되어 열적 메커니즘으로 가공되기 때문이다. 이온화는 광자에 의해 튀어나온 전자가 주위의 다른 원소와 결합하여 양이온으로 대전된 금속 원소가 떨어져 나가는 현상이다. 이온화 현상을 이용하여 은-나노막대(silver-nanorod)를 물속에서 레이저로 가공한 실험은 금속 가공에 광화학적 메커니즘을 이용한 대표적 사례이다.⁸ 광자에 의해 은입자는 전자를 잃고 양이온으로 대전되고 전자는 물의 수소 이온과 결합하여 수소 기체로 날라가게 된다. 이 광화학적 메커니즘에 의한 가공은 가공량이 매우 작기 때문에 가공 속도가 느린 단점이 있지만 정확하고 깨끗한 가공이 가능하다.

Table 1에는 금속 Cu와 폴리머 PI의 열적, 물리적 물성치를 나타내었다. Cu의 경우 PI보다 열용량이 크고 열전도율이 높기 때문에 대기중 상온에서 나노초 레이저 가공시 열에 의한 영향이 클 것임을 예상할 수 있다.

Table 1 Thermal-physical properties of copper

		PI	Cu
Thermal conductivity	K (W/mK)	0.14	401
Specific heat	c (kJ/kgK)	1.09	385
Glass transition temp.(PI) Melting point(Cu)	T_b ($^{\circ}$ C)	385	2567
Density	ρ (g/cm ³)	1.42	8.96

2.2 구리 금속 재료에 대한 SSB 모델의 적용

본 논문에서는 SSB 모델을 사용하여 금속 재료의 어블레이션을 간략하게 표현하였다. SSB 모델은 식 (1)과 같다.^{7, 11} 식 (1)은 레이저 조사량에 따른 에칭 깊이의 관계를 나타내는 식으로써 두 개의 항으로 구성되어 있다. 첫째항은 광화학적

메커니즘에 의해 가공되는 깊이를 나타내는 것으로 펄스초 레이저의 금속 재료 어블레이션 깊이를 나타내는 식 (2)와 같은 구조이다.^{9,10}

$$l_{f,total} = l_{f,photochemical} + l_{f,photothermal}$$

$$\cong \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{H}{H_{TR}} \right) + A_1 e^{\left[\frac{-E^* \ln(H/H_{TR})}{H} \right]} \quad (1)$$

- H : Laser fluence per pulse(J/cm²)
- H_{TR} : Threshold fluence(J/cm²)
- β : Absorption coefficient
- A_1 : Effective frequency factor($\mu\text{m}/\text{pulse}$)
- E^* : Effective activation energy (kJ/cm³)

$$L = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{F}{F_{Th}} \right) \quad (2)$$

- α : optical absorption or heat penetration coefficient
- F_{Th} : ablation threshold

이것은 이러한 로그 함수 형식의 항이, 조사된 레이저 에너지가 가공부 주위의 온도 상승 및 열 전달 등의 손실없이 전부 재료의 제거에 이용될 때 사용되는 것임을 의미한다. 즉 폴리머의 광화학적 반응은 광자 에너지가 바로 분자 고리를 끊는 현상이고, 펄스초 레이저의 가공은 열전달이 일어나기 이전에 재료의 제거가 일어나는 현상이므로 모델링 결과가 똑같은 함수의 형태를 지니게 되는 것이다.

반면 본 연구는 광열적인 영향이 지배적인 Cu의 가공을 모델링하므로 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 Cu의 광학적 물성치로서 이미 알려진 값이며 H_{TR} , A_1 , E^* 는 실험결과로부터 곡선 맞춤으로 계산하여야 한다. Fig. 1은 355nm UV 레이저에 의한 Cu 가공시 플루언스와 가공깊이의 관계를 실험적으로 규명한 그래프이다.¹³ 가공 깊이는 다펄스(multiple pulses) 가공 후 가공 깊이를 펄스수로 나눈 펄스당 평균 가공 깊이이다. A_1 은 비례 상수로써 가공깊이의 증가율에 관계하고

H_{TR} , E^* 는 곡선의 굴곡 형상을 조절하는 역할을 하기 때문에 Fig. 1과 같이 지수함수 형태의 금속 재료에 대해서도 SSB 모델의 적용이 곡선 맞춤에 의해 가능함을 알 수 있다.

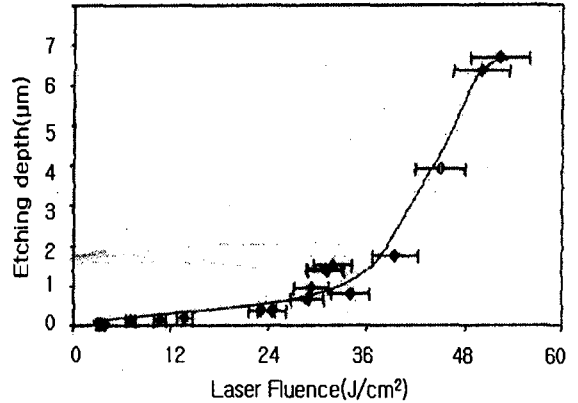


Fig. 1 Relationship between laser fluence and etching depth for Cu treated by 355 nm UV laser¹³

Table 2 Ablation parameters for PI and Cu when treated by 355nm UV laser

	PI	Cu
H_{TR} (J/cm ²)	0.1	0.5
β (cm ⁻¹)	1.73×10^5	7.31×10^5
A_1 ($\mu\text{m}/\text{pulse}$)	8.86	100
E^* (J/cm ³)	207.6×10^3	21000×10^3

Fig. 1로부터 곡선 맞춤에 의해 계산된 파라미터 값들은 Table 2와 같다. 폴리머에 대해 SSB 모델이 적용될 경우에도 같은 절차에 의해 파라미터 값이 결정된다. 선행 연구에서 규명된 폴리이미드(polyimide)에 대한 값들과 비교해보면 금속의 경우 H_{TR} 와 E^* 가 크기 때문에 가공시 폴리머보다 더 많은 에너지가 필요하므로 약 30 J/cm² 이하에서 가공 깊이가 매우 작다. 반면 A_1 이 크기 때문에 약 30 J/cm² 이상에서 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

3. 실험 및 검증

수치적으로 계산된 결과와 실제 가공 결과를 비교분석하였다. 본 실험에 사용된 레이저는 펄스 폭 20ns, 펄스 반복율 30 kHz, 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. 2와 같다.^{10,14} 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 때이며 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,¹⁰ 높은 에너지 영역에서는 용융물의 재응고와 증발된 재료의 재응축에 의해 산화된 입자로 구성되는 버가 홀 주위에 남는다.¹⁵

Fig. 3 은 355 nm UV 레이저로 Cu 를 가공한 결과를 SEM 촬영한 것이다. Fig. 3(a)는 0.23 J/cm²로 가공한 것으로 중앙부가 올라왔음을 알 수 있다.

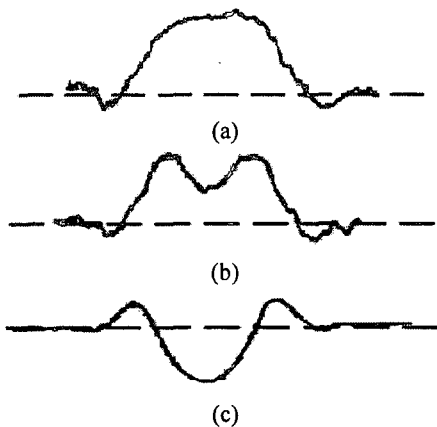


Fig. 2 Surface morphologies when laser treated (a)at lower fluence than threshold energy (b)at threshold energy and (c)at higher fluence than threshold energy

Fig. 3(b)는 0.8 J/cm²의 에너지로 가공한 결과로 레이저가 조사된 부분이 용융된 흔적이 남아있으며 중앙부위가 약간 솟아 올랐음을 알 수 있다. 즉 임계값이 0.8 J/cm² 보다 낮지만 그 근처값임을 유추할 수 있다. Fig. 3(c)는 13.56 J/cm²의 높은 플루언스로 가공한 것으로 용융된 구리가 밀려나가면서 응고되어 분화구 형상을 하고 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 SEM photos of Cu processed by 355nm UV laser, (a)laser fluence 0.23 J/cm² with 30 shots (b)laser fluence 0.8 J/cm² with 30 shots, (c)laser fluence 13.56 J/cm² with 30 shots

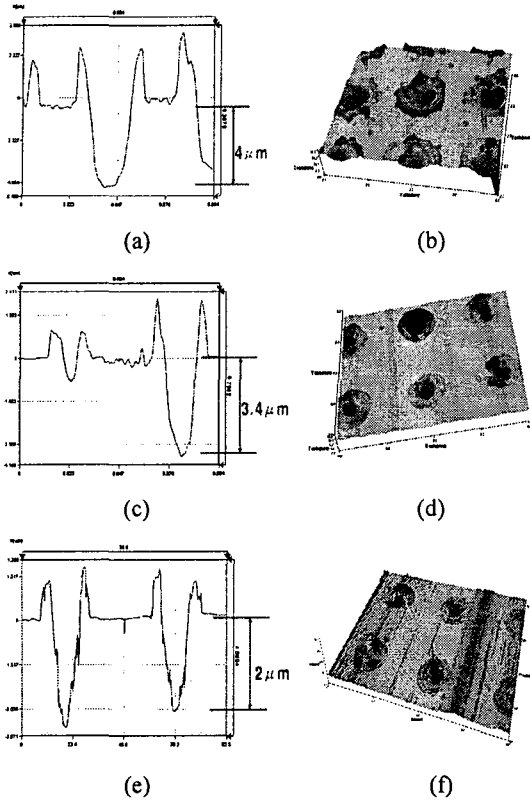


Fig. 4 Surface profile (a),(b)14.5 J/cm² with 30 shots (c),(d)13.56 J/cm² with 30 shots (e),(f)8.5 J/cm² with 30 shots

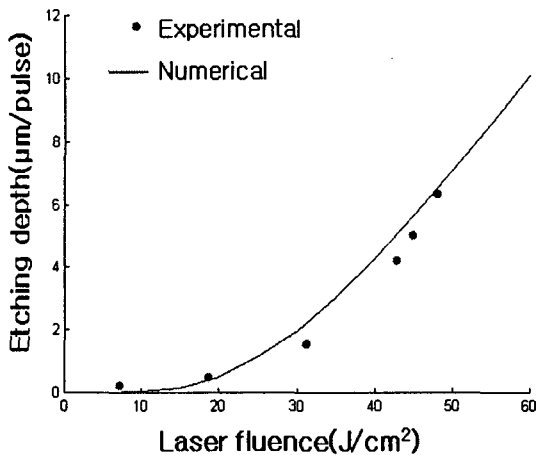


Fig. 5 Modeling graphs between ablation depth and laser fluence by 355nm UV laser for Cu and comparison between the results of modeling and experiments

표면 프로파일 측정 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 14.56 J/cm²의 플루언스로 30 펄스 조사되었을 때 2차원 표면 형상이고 (b)는 3차원 형상이다. 측정된 에칭 깊이가 4 μm이므로 30 펄스로 나누면 펄스당 에칭 깊이는 0.13 μm가 된다. Fig. 4(c),(d)는 13.56 J/cm²으로 30펄스 조사했을 때, (e),(f)는 8.56 J/cm²으로 30 펄스 조사했을 때의 표면 형상이다. 각각 펄스당 에칭 깊이는 0.1 μm, 0.067 μm이다. Fig. 5는 Table 2에서 계산된 파라미터를 SSB 모델에 대입하여 얻어진 수치적 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 수치적 결과가 실험 결과보다 완만한 증가율을 가지고 있지만 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 하지만 3 J/cm² 이하에서는 일치하지 않았다. 그 이유는 두 가지로 분석된다. 첫째는 본 논문에서 제안한 간략화된 모델링 식이 0~1 J/cm² 근처의 매우 낮은 영역에서 적용이 되지 않는 구조를 가진다. 지수함수는 증가함수이지만 식 (1)이 지수에 ln(H/H_{TR})/H의 증가와 감소를 반복하는 항을 가지고 있기 때문에 0~1 J/cm² 구간에서 매우 미소하게 증감이 반복된다. 둘째는 3 J/cm² 이하에서 실제 가공 형상의 문제이다. Fig. 2(a),(b)에서 보듯이 낮은 플루언스 영역에서는 정확한 홀의 형상을 지닌 가공이 되지 않기 때문에 구리의 경우 약 3 J/cm² 이상에서 모델링이 가능하다.

4. 결론

본 연구는 레이저 파장 355 nm DPSS UV 레이저를 이용하여 Cu 가공 시 어블레이션의 수치적 해석을 수행하고 실험적으로 검증하였다. 이를 통한 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 간략화된 SSB 모델을 광범위한 영향이 지배적인 나노초 레이저를 이용한 금속 가공에 대하여 적용이 가능함을 보였다.

둘째, 355nm 나노초 UV 레이저에 대한 Cu의 어블레이션 파라미터를 계산하여 SSB 모델에 대입한 결과, 수치적으로 예측된 에칭 깊이와 실제 가공 깊이는 거의 일치하였다.

셋째, 레이저 플루언스에 따른 Cu의 가공 형상을 실험적으로 분석하여 정확한 홀 형상이 가공되지 않는 영역을 구명하였다.

향후 보다 다양한 소재에 대해 레이저 파장과 상호 관계를 규명함으로써 레이저 미세가공 및 수치적 모델링의 기준을 마련하는 연구가 계속적

으로 추가되어야 할 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 산업자원부 지원 핵심기술개발사업인 “첨단레이저 응용 미세가공기술 개발” 과제의 지원으로 수행된 것입니다.

참고문헌

1. Kim, J. G., Chang, W. S., Shin, B. S., Chang, J. W. and Whang, K. H., “Blind via hole drilling using DPSS UV laser,” *Journal of Korean Society of Laser Processing*, Vol. 6, No. 1, pp. 9-16, 2003.
2. Shin, B. S., Kim, J. G., Chang, W. S. and Whang, K. H., “Rapid manufacturing of 3D micro products by UV laser ablation and phase change filling,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No.11, pp. 196-201, 2005.
3. Yoon, K. K., Lee, S. K., Kim, J. G., Shin, B. S., Choi, D. S., Whang, K. H. and Park, J. Y., “Laser beam application and technology in micro machining,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 28-35, 2000.
4. Shin, B. S., Yang, S. B., Chang, W. S., Kim, J. G. and Kim, J. M., “Rapid manufacturing of 3D-shaped microstructures by UV laser ablation,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22 No. 7, pp. 30-36, 2004.
5. Oh, B. K. and Kim, D. S., “Numerical simulation of nanosecond pulsed laser ablation in air,” *Journal of Korean Society of Laser Processing*, Vol. 6, No. 3, pp. 37-45, 2003.
6. Shin, D. S., Lee, J. H., Suh, J. and Kim, T. H., “Excimer laser induced ablation of PMMA and PET,” *Journal of Korean Society of Laser Processing*, Vol. 6, No. 1, pp. 33-40, 2003.
7. Yoon, K. K. and Bang, S. Y., “Modeling of polymer ablation with excimer lasers,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No. 9, pp. 60-68, 2005.
8. Liu, Z. G., Song, H. W., Zheng, Z. H., Lu, S. Z., Yu, L. X. and Yang, L. M., “Femtosecond laser induced photochemical reaction and configuration change of silver nanorod clusters in aqueous solution,” *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 275, pp. 69-72, 2006.
9. Hashida, M., Semerok, A. F., Gobert, O., Petite, G., Izawa, Y. and Wagner, J. F. “Ablation threshold dependence on pulse duration for copper,” *Applied Surface Science*, Vol. 197-198, pp. 862-867, 2002.
10. Mannion, P. T., Magee, J., Coyne, E., O’Connor, G. M. and Glynn, T. J., “The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micromachining of common metals in air,” *Applied Surface Science*, Vol. 233, pp. 275-287, 2004.
11. Srinivasan, V., Smrtic, M. A. and Babu, S. V., “Excimer Laser Etching of Polymers,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 59, No. 11, pp. 3861-3867, 1986.
12. Chen, T. C. and Darling, R. B., “Parametric studies on pulsed near ultraviolet frequency tripled Nd:YAG laser micromachining of sapphire and silicon,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.169, pp. 214-218, 2005.
13. Tunna, L., Kearns, A., O’Neill, W. and Sutcliffe, C. J., “Micromachining of copper using Nd:YAG laser radiation at 1064, 532, and 355 nm wavelengths,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 33, pp. 135-143, 2001.
14. Bäuerle, D., Himmelbauer, M. and Arenholz, E., “Pulsed laser ablation of polyimide: fundamental aspects,” *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 106, pp. 27-30, 1997.
15. Zeng, D. W., Yung, K. C. and Xie, C. S., “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.