

515 nm 피코초 레이저를 이용한 구리 어블레이션 공정의 최적 에너지밀도에 대한 이론적 분석

Theoretical Analysis on the Optimum Fluence for Copper Ablation with a 515 nm Picosecond Laser

신동식^{1,✉}, 조용권¹, 손현기¹
Dongsig Shin^{1,✉}, Yongkwon Cho¹, and Hyonkee Sohn¹

¹ 한국기계연구원 광응용기계연구실 (Department of Laser & Electron-beam Application, KIMM)
✉ Corresponding author: dsshin@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7484

Manuscript received: 2013.6.5 / Revised: 2013.8.22 / Accepted: 2013.8.29

Ultra-short laser pulses are effective, when high requirements concerning accuracy, surface roughness and heat affected zone are demanded for surface structuring. In particular, picosecond laser systems that are suited to be operated in industrial environments are of great interest for many practical applications. This paper focused on inducing optimum process parameters for higher volume ablation rate by analyzing a relationship between crater diameter and optical spot size. In detail, the dependency of the volume ablation rate, penetration depth and threshold fluence on the pulse duration 8 ps and wavelength of 515 nm was discussed. The experimental results showed that wavelength of 515 nm resulted in less threshold fluence (0.075 J/cm²) on copper than IR wavelength (0.3 J/cm²). As a result, it was possible that optimum fluence for higher volume ablation rate was achieved with 0.28 J/cm².

Key Words: Threshold fluence(임계에너지밀도), Optical penetration depth(광학적 투과깊이), Pulse repetition rate(펄스반복률), Ablation (어블레이션), Copper(구리)

기호설명

F = Fluence
F_{th} = Threshold fluence
w₀ = Beam radius at focus
r_d = Crater radius
L = Ablation depth per pulse
δ(1/α) = Penetration depth
V = Volume
P_{av} = Average power
λ = Wavelength
Rep = Repetition rate

1. 서론

최근 극초단 펄스 레이저는 고출력화 추세에 힘입어 산업현장으로의 접근성이 더욱 향상되고 있다. 특히 극초단 펄스 레이저는 고출력 특성과 비열적 가공특성을 동시에 구현할 수 있어 생산성과 정밀가공성을 요구하는 분야에 효과적으로 적용되기 시작했다.¹⁻³ 이의 대표적인 분야가 구리를 주성분으로 하는 프린팅 롤 가공분야인데 이의 이론적 해석을 위한 연구 및 실용화를 위한 연구가 스위스 및 독일에서 활발히 진행되고 있다.⁴⁻⁶

그렇지만 상당수의 연구가 근적외선 영역대의

극초단 펄스 레이저를 기반으로 진행하고 있다. 구리는 700 nm 이하의 파장부터 흡수율이 상승되는데⁷ 이는 근적외선 파장의 2차 고조파인 500 nm 대의 파장을 사용한다면 더욱 가공성을 높일 수 있다는 것을 의미하고 있어 이에 대한 추가적인 연구를 필요로 하고 있다.

본 논문은 스위스 Bern 대학의 Neuenschwander 교수팀에서 진행하였던 1064 nm 기반의 이론적 고찰을^{4,5,8-12} 바탕으로 515 nm 파장의 극초단 펄스 레이저 빔에 의한 구리의 가공성을 검증하고 최적의 펄스에너지 및 펄스반복율을 유도하는 과정 및 가공실험을 통한 검증을 다루고 있다. 이해를 돕기 위한 설명에 있어 기존의 한국기계연구원에서 진행된 사전연구¹³ 내용을 포함하고 있으며 실험 및 이론적으로 유도된 펄스에너지는 문헌^{4,5,14}과의 비교를 통하여 근적외선 파장을 적용했을 경우에 비한 상대적인 특성비교에 적용되었다.

본 연구는 515 nm 파장의 극초단 펄스 레이저를 이용한 구리의 가공을 포함하여 다양한 금속의 미세가공에 있어 가공변수 선정을 위한 지표가 될 것으로 판단된다.

2. 실험방법

극초단 펄스 레이저를 이용한 프린팅 롤 가공 시 주요 가공재료는 구리이다. 구리는 기존의 연구에서 주로 사용했던^{4,5,15} 근적외선 파장 보다는 Green 파장(515 nm)에서 반사율이 절반 이하로 낮아지는 특징을 갖고 있다.⁷ 이는 흡수율이 두 배 이상 상승된다는 논리와 상통되는데 Green 파장의 레이저 빔이 사용된다면 가공성을 더욱 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다(Fig. 1 참조).

실험에 사용된 레이저는 515 nm의 파장 및 8ps의 펄스폭을 가지는 피코초 레이저 (Trumicro5X50, Trumpf, Germany)로서 방출된 빔은 광학계 및 스캐너를 거쳐 스테이지 상의 구리시편으로 전달되었다(Fig. 2 참조).

본 논문에서는 상기 레이저 빔을 이용한 구리의 가공에서 최적의 펄스에너지를 구하기 위해 이론적인 접근과 실험적인 접근을 병행하였다.

이론적 접근시 레이저 빔의 에너지밀도(F)와 단위시간당 어블레이션양(dV/dt)의 상관관계를 구하기 위해서는 레이저 빔의 광학적 초점크기와 가공 후 크레이터의 반경(r_d) 및 깊이에 대한 실험적 고찰이 중요하다.

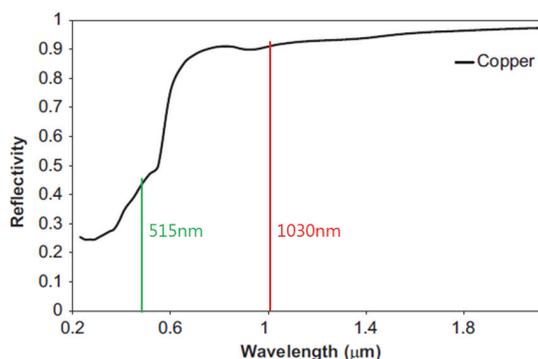


Fig. 1 Reflectivity of copper as a function of wavelength

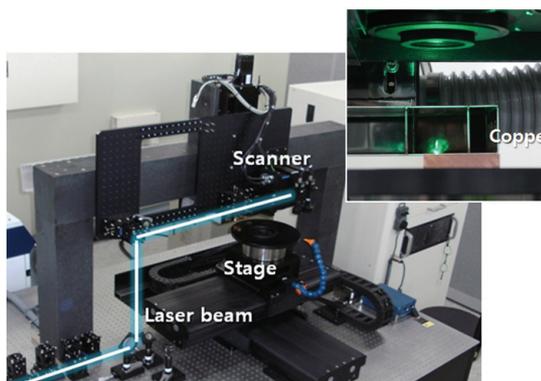


Fig. 2 Experimental setup for ablation of copper using a picosecond laser

이를 위해 가공된 크레이터의 직경 및 깊이는 비접촉 3차원 미세 형상 측정기(Nanosystem, NV-E1000, 한국)를 이용하여 측정되었으며 측정값과 광학적 초점크기의 상관관계에서 임계 에너지밀도(threshold fluence) 및 투과깊이(penetration depth)를 유도하고자 한다.

3. 실험결과 고찰

3.1 레이저 빔과 단위시간당 어블레이션 양의 상관관계

극초단 펄스 레이저의 고출력화와 함께 떠오른 이슈로서 생산성을 높이기 위한 최적의 펄스에너지를 구하기 위한 시도가 진행되고 있다^{4,5}. 이 과정에서 도출된 식(1)은 단위시간당 어블레이션양(dV/dt)과 평균출력(P_{av}), 투과깊이(δ), 펄스반복율(Rep.) 및 임계에너지밀도(F_{th})의 상관관계를 설명하고 있다. 중요 변수는 임계에너지밀도(F_{th})와 투

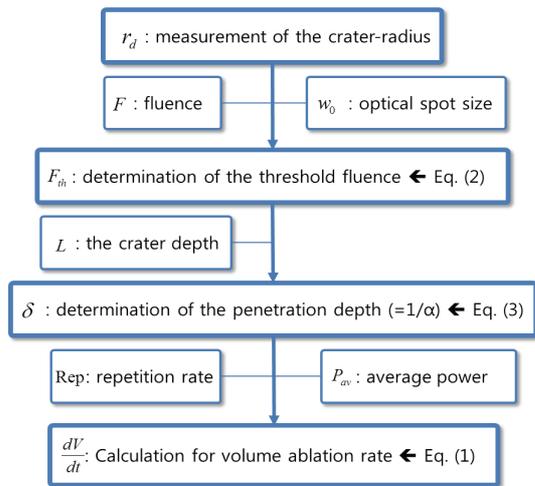


Fig. 3 Experimental design based on the equation (1)-(3)

과깊이(δ)로서 문헌조사에 의해 임계에너지밀도^{8,15}는 식(2), 그리고 흡수계수의 역수(1/α)로 정의되는 투과깊이(δ)⁹는 식(3)과 같이 정의될 수 있다. 이들은 실험과 측정 데이터를 기반으로 하여 도출되는 변수로서 Fig. 3에 도식적으로 표현한 바와 같은 순서로 전개하고자 한다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot w_0^2 \cdot \delta \cdot \text{Rep} \cdot \ln^2 \left(\frac{2 \cdot P_{av}}{\text{Rep} \cdot \pi \cdot w_0^2 \cdot F_{th}} \right) \quad (1)$$

$$F_{th} = F \exp \left(-\frac{r_d^2}{2w_0^2} \right) \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{F}{F_{th}} \right) = \delta \ln \left(\frac{F}{F_{th}} \right) \quad (3)$$

3.2 가공부의 크레이터 반경 측정

식(2)에 따르면 임계에너지밀도(F_{th})를 구하기 위해서는 가공시 크레이터의 반경(r_d) 및 광학적 초점반경(w₀)를 알아야 한다. 여기서 광학적 초점반경은 사전연구¹³를 통해서 도출된 결과인 14.56 μm를 적용하였다. 또한 크레이터의 직경은 광학현미경 및 비접촉 3차원 미세형상측정기를 이용하여 측정하였다.

Fig. 4는 레이저 빔의 조사 후 구리 표면을 나타내고 있는데 이는 에너지밀도 및 펄스 수에 따라 실험이 진행되었다. Fig. 5는 구리에 조사되는 단위면적당 총 주입에너지에 따른 크레이터의 직

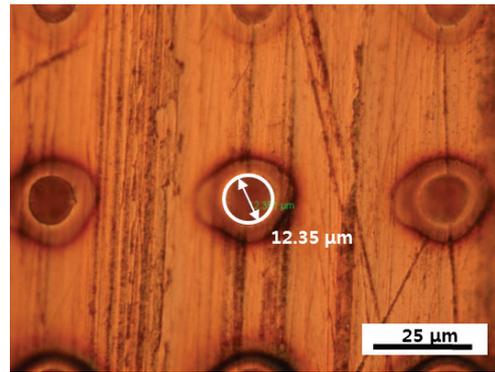


Fig. 4 Optical microscope image of the copper surface patterned under the following conditions: F = 0.28J/cm², N = 200pulses

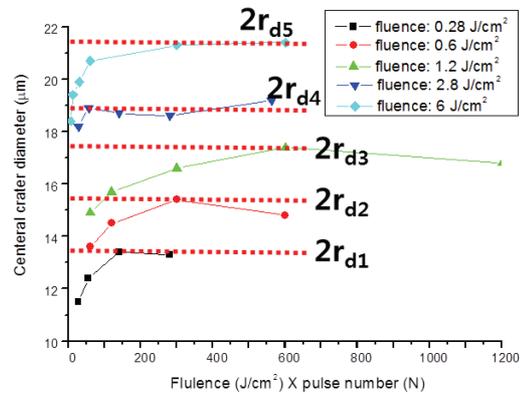


Fig. 5 Change in the central diameters of craters of copper according to the total input energy (i.e., fluence × number of pulses)

경에 대한 측정값이다. 전체적으로 총주입 에너지에 따라 크레이터의 직경은 초기에는 커지다가 수렴한다는 것을 보여주고 있다. 또한 펄스당 에너지밀도가 높아짐에 따라 각각의 수렴하는 직경값은 높아진다는 것을 보여주는데 이는 광학적인 초점크기와 재료에 가공되는 크레이터의 직경은 펄스에너지에 따라 차이를 보인다는 것을 의미하고 있다. 이에 대한 관계식은 식(2)에 나타나 있으며 광학적 초점크기와 가공된 크레이터 직경과의 관계식을 이용하면 임계 에너지밀도를 도출할 수 있다.

3.3 임계에너지밀도 및 투과깊이 환산

앞절에서는 임계에너지밀도(F_{th})를 구하기 위한 식(2)의 구성요소인 크레이터의 반경(r_d)을 다루었다.

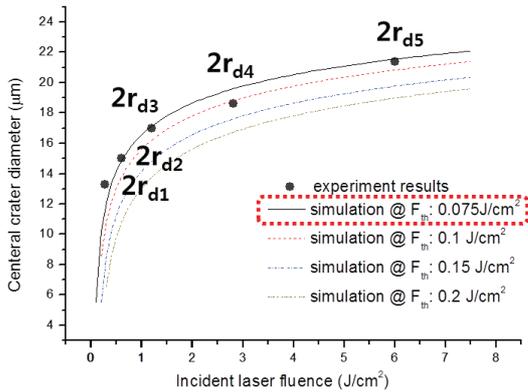


Fig. 6 Comparison of the saturated central crater diameters of copper obtained from experiments and simulations

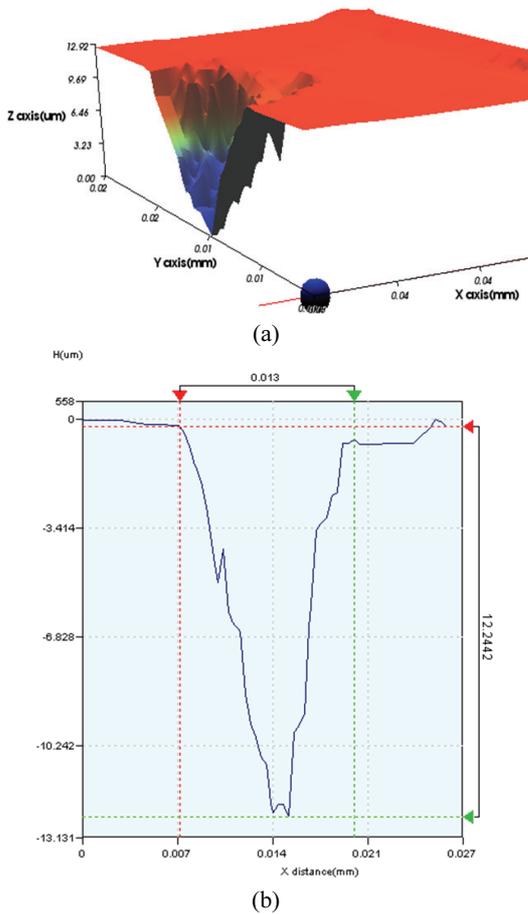


Fig. 7 (a) 3D and (b) 2D profiles of the crater of copper ablated under the following conditions: $F = 0.28 \text{ J/cm}^2$, $N = 200$ pulses

Fig. 6은 임계 에너지밀도(F_{th})별 에너지밀도(F)에 크레이터의 직경으로서 식(2)를 이용한 시뮬레이션 값과 Fig. 5에서 $2r$ 로 표시되는 수렴된 크레이터 직경값을 비교하고 있다.

여기서 점선으로 표기한 임계에너지밀도(F_{th})가 0.075 J/cm^2 이 실험값과 근사적으로 일치한다는 것을 알 수 있는데 스위스 Bern 대학의 Neuenschwander 교수팀이 1064 nm 파장에서 구한¹⁴ 임계에너지밀도(F_{th}) 0.3 J/cm^2 에 비해서는 1/4수준으로 낮아진다는 것을 알 수 있었다.

식(1)로 표현된 단위시간당 어블레이션 양 (dV/dt)은 앞서 유도 되었던 임계에너지밀도(F_{th}) 및 투과깊이($\delta = 1/\alpha$)의 함수로서 투과 깊이는 식(3)을 이용하면 유도 될 수 있다. 즉 펄스당 가공깊이 및 주입에너지의 함수를 대입하여 투과깊이를 얻을 수 있다. Fig. 7은 에너지밀도(F) 0.28 J/cm^2 및 펄스 수 200인 조건에서 가공된 크레이터의 형상을 나타내고 있다. 이때 가공깊이는 $12.2 \mu\text{m}$ 이므로 펄스당 가공깊이(L)는 61 nm 인 것을 알 수 있다. 여기서 에너지밀도(F), 펄스당 가공깊이(L)와 앞절에서 도출된 임계에너지밀도(F_{th})를 식(3)에 대입하면 투과 깊이(δ)를 구할 수 있다.

결과 투과깊이는 46 nm 라는 것을 알 수 있었으며 기존 문헌상¹⁴에서 1064 nm 의 파장에서 구한 투과깊이인 30 nm 에 비해서는 50% 이상 깊다는 것을 말해준다. 일반적으로 파장이 짧아지면 투과깊이가 짧아지지만 본 실험에서는 515 nm 의 파장이 1064 nm 인 파장에 비해 구리에 대해서 흡수율이 두배 이상 높아서 생긴 현상으로 판단된다.

3.4 최대의 어블레이션 양을 위한 조건 도출

지금까지 식(1)의 단위시간당 어블레이션 양 (dV/dt)을 구하기 위하여 투과깊이(δ) 및 임계에너지밀도(F_{th})를 구하는 과정을 거쳤다. Fig. 8은 펄스 반복율(Rep) 및 평균출력에 따른 단위시간당 어블레이션 양을 식(1)에 따라 구한 그래프로서 펄스 반복율에 따라 단위시간당 어블레이션 양은 적정점까지 상승하다가 이후 하강한다는 것을 알 수 있다. 여기서 최고로 상승한 지점이 어블레이션 양을 최대화 할 수 있는 지점으로서 평균출력이 1 W 인 조건에서 $2,168 \text{ kHz}$ 의 적정 펄스반복율을 나타내고 있다. 이때 평균출력에 펄스반복율을 나누어 산출되는 펄스에너지는 0.46 mJ 이며 단위면적당 펄스에너지로 정의되는 에너지밀도는 초점크기 $14.56 \mu\text{m}$ 를 대입하여 0.28 J/cm^2 인 것을 알 수 있다.

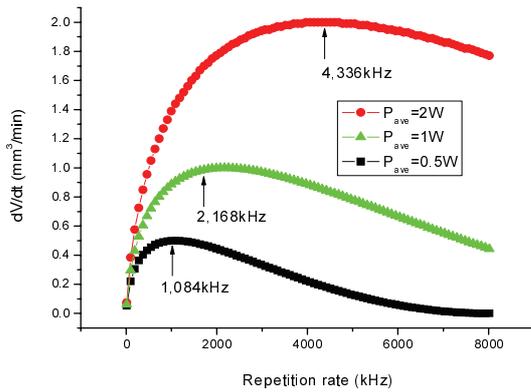


Fig. 8 Variation in the volume ablation rate of copper as a function of the repetition rate under the condition of a pulse duration of 8 ps and a fluence of 0.28 J/cm²

이는 기존 문헌상¹⁴에서 1064 nm의 파장에서 구한 적정 에너지밀도 1.17 J/cm²에 비해서는 1/4수준이라는 것을 알 수 있다. 이는 8 ps의 극초단 펄스 레이저를 이용한 가공 시 515 nm의 파장을 이용한 가공결과가 10 ps의 1064 nm의 파장을 이용한 가공결과¹⁴에 비해 50 % 깊은 투과깊이 그리고 25 % 수준에 불과한 임계에너지밀도를 가진 결과이다.

임계에너지밀도는 낮을수록 재료의 정밀가공특성이 뛰어나므로 구리의 가공 시 515 nm의 파장을 가진 극초단 펄스 레이저를 이용한 가공공정이 근적외선 영역인 1064 nm를 이용한 가공에 비해 정밀가공성에 있어 유리하다는 결론을 얻을 수 있었다.

3.5 구리가공을 통한 공정조건 검증

앞서 진행된 공정실험 및 시뮬레이션결과 도출된 공정조건은 최대의 어블레이션 양을 위한 가공조건으로서 515nm파장의 피코초 레이저를 이용한 구리가공을 위한 적정 펄스에너지를 의미하고 있다. 이와 같은 펄스에너지는 평균출력에서 펄스반복율을 나누어 도출되는 변수로서 펄스에너지가 고정된다면 적정 가공을 위해서는 평균출력의 증가와 함께 펄스반복율이 동반하여 증가하여야 한다는 것을 의미한다.

즉 앞절에서 도출된 공정조건인 경우 1 W의 평균출력을 사용하였을 경우 2.168 kHz의 펄스반복율을 가진 레이저가 필요하다는 의미로서 보통 파이버 기반의 극초단 펄스 레이저에 해당된다. 본 절에서는 가능성 테스트 단계에서 구리의 가공을

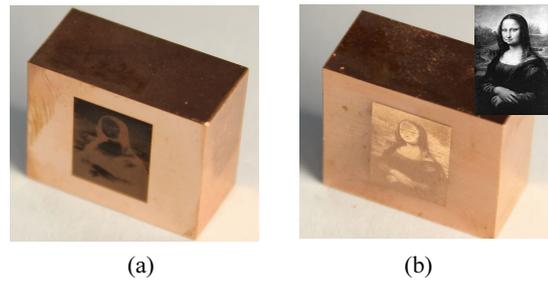


Fig. 9 The patterned copper specimen with images of the Mona Lisa by the Italian artist Leonardo da Vinci KIMM logo under the following conditions: (a) F: 30 J/cm² and (b) F: 0.28 J/cm², Rep: 100 kHz, λ: 515 nm

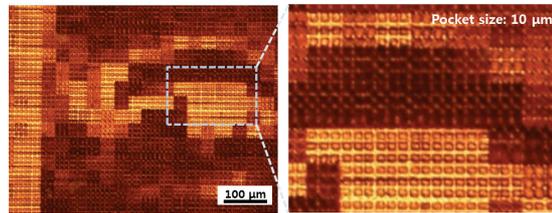


Fig. 10 The microscopic pictures of an eye patterned copper surface under the following conditions: F: 0.28 J/cm², Rep: 100 kHz, λ: 515 nm

진행하였으며 시스템 세팅상의 한계로 인하여 펄스반복율 100 kHz, 평균출력 50 mW, 초점크기 14.56 μm 그리고 에너지밀도 0.28 J/cm²의 조건을 이용하여 구리 블럭에 패터닝을 진행하였다.

Fig. 9는 구리 블럭표면에 모나리자 그림을 비트맵이미지로 변환하여 가공한 결과로서 적용된 에너지밀도는 Fig. 9(a)의 경우 30 J/cm² 그리고 Fig. 9(b)는 상기조건에서 도출된 0.28 J/cm²를 적용하였다.

가공결과 상대적으로 높은 에너지밀도인 Fig. 9(a)의 경우는 표면산화물의 영향으로 검은색으로 변색된다는 것을 알 수 있었으며 본 논문에서 도출된 조건에서 가공한 구리의 경우는 산화물이 거의 발생되지 않았다는 것을 알 수 있다. 이론적검증을 통해 도출된 최적의 에너지밀도를 이용한 가공은 열적 반응에 의한 산화물이 생기지 않는다는 것을 의미하고 있으며 이는 정밀가공성을 더욱 높일 수 있다는 의미이기도 하다.

또한 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 10 μm직경의 망점이 균일하게 형성되어 정밀가공의 가능성을 확인할 수 있었다. Fig. 9 및 Fig. 10의 가공결과

는 최대의 어블레이션 양을 위한 가능성을 보여주는 실험으로서 100 kHz의 펄스반복율에서는 양산성에 있어 한계를 보여주고 있다. 즉 1 MHz이상의 고반복율 피코초 레이저를 사용하는 경우 생산성에 있어 경쟁력이 있을 것으로 판단되며 이에 관련된 실험은 진행 중에 있으며 추후 논의될 예정이다.

4. 결론

본 연구는 8 ps의 펄스폭 및 515 nm의 파장을 가지는 극초단 펄스 레이저 빔이 구리의 가공에 있어 단위시간당 어블레이션 양을 최대로 할 수 있는 가공조건을 도출하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해서 상기 조건에서 임계에너지밀도 및 투과깊이를 이론적 배경 하에 실험값과의 비교를 통하여 구할 수 있었으며 실험결과 515 nm 파장의 피코초 레이저는 1064 nm의 파장을 사용한 경우에 비해 1.5배 깊은 투과깊이 및 1/4수준의 임계에너지밀도를 가진다는 것을 알 수 있었다. 이때 최대의 어블레이션 양을 위한 적정 에너지밀도는 0.28 J/cm^2 였다. 본 조건을 이용하여 구리를 가공한 결과 $10 \mu\text{m}$ 크기의 패던도 쉽게 가공이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 그렇지만 펄스반복율의 한계로 인하여 양산성을 크게 높일 수는 없었다. 이의 개선을 위해서는 1 MHz이상의 높은 펄스반복율로 빔을 조사해야 한다는 결론을 얻을 수 있었다. 그렇지만 이는 열이 주변으로 전도되기 전에 레이저 빔의 조사가 이루어져 열축적현상을 야기할 우려가 있기 때문에 10 m/s 이상의 속도로 빔을 이송시키는 방법 또는 빔을 분기시켜 가공하는 방법에 대한 고려가 있어야 한다. 이는 현재 연구 중에 있으며 추후 별도의 논문을 통하여 발표할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업기술연구회 주요사업의 일환인 “그린에너지 기기 양산화 기술지원센터 구축사업” 및 “차세대 롤기반 마이크로 생산장비 핵심기술개발”과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Hennig, G., Selbmann, K. H., and Brüning, S., “Large

Scale Laser Microstructuring in the Printing Industry,” *Laser Technik Journal*, Vol. 5, No. 3, pp. 52-56, 2008.

2. Hennig, G., Selbmann, K. H., Brüning, S., Pfinninger, S., and Brendel, J., “Large Scale Laser Microstructuring of Gravure Printforms,” *Photon Processing in Microelectronics and Photonics VII*, Vol. 6879, 2008.
3. Bruening, S., Hennig, G., Eifel, S., and Gillner, A., “Ultrafast Scan Techniques for 3D- μm Structuring of Metal Surfaces with High Repetitive Ps-Laser Pulses,” *Physics Procedia*, Vol. 12, Part B, pp. 105-115, 2011.
4. Neuenschwander, B., Bucher, G. F., Nussbaum, C., Joss, B., Murali, M., Hunziker, U. W., and Schuetz, P., “Processing of Metals and Dielectric Materials with Ps-Laserpulses: Results, Strategies, Limitations and Needs,” *Proc. of SPIE, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing XV*, Vol. 7584, Paper No. 75814, 2010.
5. Schmid, M., Neuenschwander, B., Romano, V., Jaeggi, B., and Hunziker, W., “Processing of Metals with Ps-laser Pulses in the Range between 10ps and 100ps,” *Proc. of SPIE, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVI*, Vol. 7920, Paper No. 792007, 2011.
6. Eifel, S., “Process Development for High-Power Laser Ablation Basics and New Developments in Ultra Short Pulse Laser Technology,” *AKL - International Laser Technology Congress*, 2012.
7. Oztoprak, G., Akman, E., Hanon, M. M., Gnes, M., Gümüs, S., Kacar, E., and Gundogdu, O., “Laser Welding of Copper with Stellite 6 Powder and Investigation using LIBS Technique,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 45, pp. 748-755, 2012.
8. Jandeleit, J., Urbasch, G., Hoffmann, H. D., Treusch, H.-G., and Kreutz, E. W., “Picosecond Laser Ablation of Thin Copper Films,” *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol. 63, No. 2, pp. 117-121, 1996.
9. Hashida, M., Semerok, A. F., Gobert, O., Petite, G., Iazwa, Y., and Wagner, J. F., “Ablation Threshold Dependence on Pulse Duration for Copper,” *Applied Surface Science*, Vol. 197-198, pp. 862-867, 2002.
10. Breitling, D., Ruf, A., and Dausinger, F.,

- “Fundamental Aspects in Machining of Metals with Short and Ultrashort Laser Pulses,” Proc. of SPIE, Photon Processing in Microelectronics and Photonics III, Vol. 5339, pp. 49-63, 2004.
11. Harzic, R. L., Breitling, D., Weikert, M., Sommer, S., Föhl, C., Valette, S., Donnet, C., Audouard, E., and Dausinger, F., “Pulse Width and Energy Influence on Laser Micromachining of Metals in a Range of 100fs to 5ps,” Applied Surface Science, Vol. 249, No. 1, pp. 322-331, 2005.
 12. Jaeggi, B., Neuenschwander, B., Schmid, M., Muralt, M., Zuercher, J., and Hunziker, U., “Influence of the Pulse Duration in the ps-Regime on the Ablation Efficiency of Metals,” Physics Procedia, Vol. 12, Part. B, pp. 164-171, 2011.
 13. Shin, D. S., Cho, Y. G., Sohn, H. K., and Suh, J., “Theoretical Analysis on the Maximum Volume Ablation Rate for Copper Ablation with a 515nm Picosecond Laser,” KSLP, Vol. 16, No. 2, pp. 1-6, 2013.
 14. Neuenschwander, B., Jaeggi, B., and Schmid, M., “Micro Structuring with Ultra Short Pulses – Ways to Optimize Process Efficiency and Quality,” AKL - International Laser Technology Congress, 2012.
 15. Raciukaitis, G., Brikas, M., Gecys, P., and Gedvilas, M., “Accumulation Effects in Laser Ablation of Metals with High-Repetition-Rate Lasers,” Proc. of SPIE, High-Power Laser Ablation VII, Vol. 7005, Paper No. 70011, 2008.