

## 515nm 피코초 레이저를 이용한 구리 어블레이션 공정의 최대 가공율에 대한 이론적 분석

신동식<sup>✉,\*</sup>, 조용권<sup>\*</sup>, 손현기<sup>\*</sup>, 서정<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>한국기계연구원 광응용기계연구실

<sup>\*\*</sup>한국기계연구원 부산레이저기술지원센터

### Theoretical analysis on the maximum volume ablation rate for copper ablation with a 515nm picosecond laser

Dongsig Shin<sup>\*</sup>, Yongkwon Cho<sup>\*</sup>, Hyonkee Sohn<sup>\*</sup> and Jeong Suh<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Laser & Electron-beam Application, KIMM

<sup>\*\*</sup>Busan Laser Application Support Center, KIMM

#### Abstract

Picosecond lasers are a very effective tool for micromachining metals, especially when high accuracy, high surface roughness and no heat affected zone are required. However, low productivity has been a limit to broadening the spectrum of their industrial applications. Recently it was reported that in the micromachining of copper with a 1064nm picosecond laser, there exist the optimal pulse energy and repetition rate to achieve the maximum volume ablation rate. In this paper, we used a 515nm picosecond laser, which is more efficient for micromachining copper in terms of laser energy absorption, to obtain its optimal pulse energy and repetition rate. Theoretical analysis based on the experimental data on copper ablation showed that using a 515nm picosecond laser instead of a 1064nm picosecond laser is more favorable in that the calculated threshold fluence is 75% lower and optical penetration depth is 50% deeper.

**Keywords:** Threshold fluence(임계에너지밀도), optical penetration depth(광학적 투과깊이), pulse repetition rate(펄스반복율), gaussian beam propagation(가우시안 빔 전파)

#### NOMENCLATURE

F = fluence(에너지밀도)  
 $F_{th}$  = threshold fluence(임계에너지밀도)  
 $w_0$  = beam radius at focus(초점반경)  
 $w_i$  = beam radius at input(입사빔반경)  
 $r_d$  = crater radius(크레이터 반경)  
 L = ablation depth per pulse  
 (펄스당 어블레이션 깊이)  
 $\delta$  ( $1/\alpha$ ) = penetration depth(투과깊이)  
 V = volume(부피)  
 $P_{av}$  = average power(평균출력)  
 $\lambda$  = wavelength(파장)  
 f = focal length(초점길이)  
 Rep = repetition rate(펄스반복율)  
 R = curvature of gaussian beam  
 (가우시안 빔의 곡률)

#### 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<sup>1-3</sup>. 이의 대표적인 분야가 구리를 주성분으로 하는 프린팅 롤 가공분야인데 이의 이론적 해석을 위한 연구 및 실용화를 위한 연구가 스위스 및 독일에서 활발히 진행되고 있다<sup>4,6</sup>.

그렇지만 상당수의 연구결과는 근적외선 영역대의 극초단 펄스 레이저를 기반으로 진행하고

투고일 : 2013년 5월 25일 심사완료일 : 2013년 6월 26일

계재승인일 : 2013년 6월 26일

교신저자 : 신동식 ✉ dsshin@kimm.re.kr

있다. 구리는 700nm이하의 파장부터 흡수율이 상승되는데<sup>7</sup> 이는 근적외선 파장의 2차 고조파인 500nm대의 파장을 사용할 경우 더욱 가공성을 높일 수 있다는 것을 의미하고 있다.

본 논문은 스위스 Bern대학의 Neuenschwander 교수팀에서 진행하였던 1064nm기반의 이론적 고찰을<sup>4,5,8-12</sup> 바탕으로 515nm파장의 극초단 펄스 레이저 빔에 의한 구리의 가공성을 검증하고 최적의 펄스에너지 및 펄스반복율을 유도하는 과정을 담고 있다. 이는 515nm 파장의 극초단 펄스 레이저를 이용한 구리의 가공을 포함하여 다양한 금속의 미세가공에 있어 가공변수 선정에 위한 지표가 될 것으로 판단된다.

## 2. 실험방법

극초단 펄스 레이저를 이용한 프린팅 롤 가공 시 주요 가공재료는 구리이다. 구리는 기존의 연구에서 주로 사용했던<sup>4,5,13</sup> 근적외선 파장 보다는 Green 파장(515nm)에서 반사율이 절반 이하로 낮아지는 특징을 갖고 있다<sup>7</sup>. 이는 흡수율이 두 배 이상 상승된다는 논리와 상통되는데 Green 파장의 레이저 빔이 사용된다면 가공성이 더욱 높아진다는 것을 의미한다(Fig. 1 참조).

본 논문에서는 상기 레이저 빔을 이용한 구리의 가공에서 최적의 펄스에너지를 구하기 위해 이론적인 접근과 실험적인 접근을 병행하여 진행하였다. 실험에 사용된 레이저는 515nm의 파장 및 8ps의 펄스폭을 가지는 피코초 레이저(Trumicro5X50, Trumpf, Germany)로서 방출된 빔은 광학계 및 스캐너를 거쳐 스테이지 상의 구리시편으로 전달되었다.

이론적 고찰로서 레이저 빔의 에너지 밀도( $F$ )와 단위시간당 어블레이션 양( $dV/dt$ )의 상관관계를 구하기 위해서는 레이저 빔의 광학적 초점크기와 가공 후 크레이터의 반경( $r_d$ ) 및 깊이가 중요하다. 본 실험에서는 광학적인 초점크기를 구하기 위하여 디포커스(defocused) 지점에서의 빔프로파일러(BeamStar FX50, OPHIR, Israel)를 이용한 빔형상과 gaussian beam propagation 이론을 이용한 시뮬레이션을 병행하여 구할 수 있었다.

또한 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)가 유도될 수 있었다.

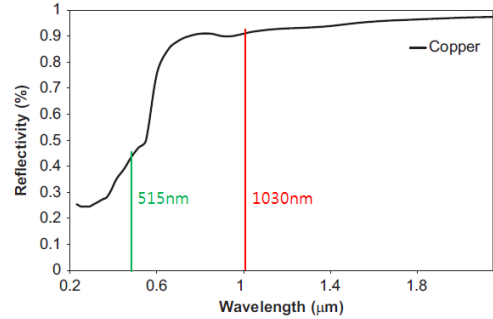


Fig. 1 Reflectivity of copper as a function of wavelength.

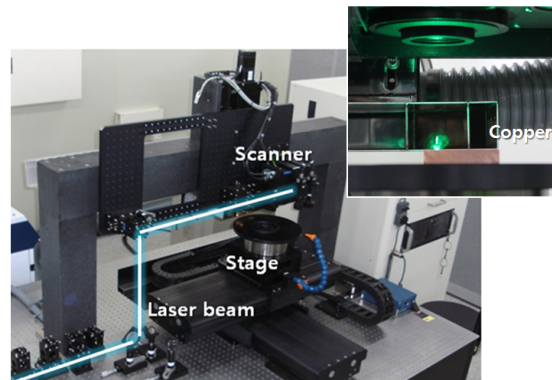


Fig. 2 Experimental setup for ablation of copper using a picosecond laser.

## 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<sup>4,5</sup>. 이 과정에서 도출된 식 (1)은 단위시간당 어블레이션양( $dV/dt$ )과 평균출력( $P_{av}$ ), 투과깊이( $\delta$ ), 펄스반복율( $Rep.$ ) 및 임계에너지밀도( $F_{th}$ )의 상관관계를 설명하고 있다. 중요 변수는 임계에너지밀도( $F_{th}$ )와 투과깊이( $\delta$ )로서 문헌조사에 의해 임계에너지밀도<sup>8,14</sup>는 식 (2) 그리고 투과깊이<sup>9</sup>는 식 (3)과 같이 정의될 수 있었다. 이는 실험과 측정 데이터를 기반으로 하여 도출되는 변수로서 본 논문에서는 이들을 구하기 위한 실험적 접근과정을 전개하고 있다.

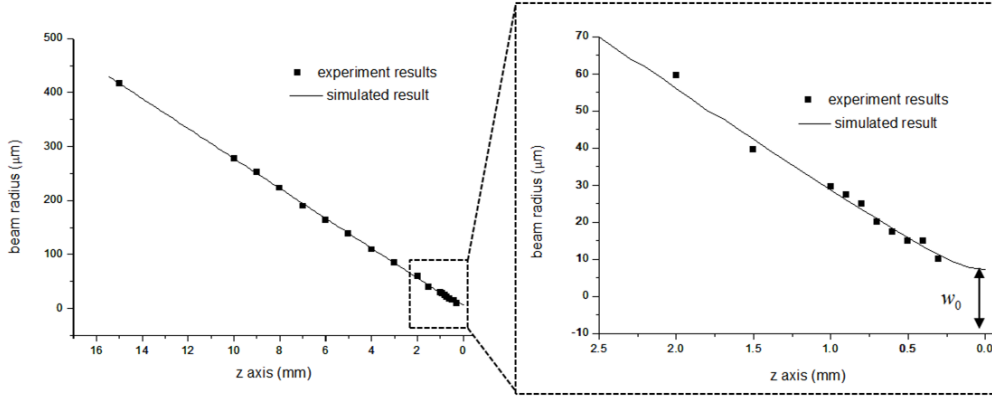


Fig. 3 Comparison between the measured beam diameter and the simulated beam diameter obtained from the gaussian beam propagation theory.

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

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

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

### 3.2 광학적 초점크기의 측정

임계에너지밀도는 식 (2)와 같이 정의될 수 있는데 이를 구하기 위해서는 가공 시 크레이터의 반경( $r_d$ ) 및 광학적 초점반경( $w_0$ )이 우선적으로 구해져야 한다. 여기서 실험에 사용된 초점반경은  $10\mu\text{m}$  이내로서  $5\mu\text{m}$ 급의 CCD셀을 이용하는 빔프로파일러를 이용하기에는 측정의 신뢰도가 낮은 문제가 있다. 이에 따라 반경이  $10\mu\text{m}$ 이상인 영역에서는 빔프로파일러를 이용한 측정값을 사용하였으며 gaussian beam propagation<sup>15</sup> 이론에 의한 전개값과 일치시킨 후  $10\mu\text{m}$  이내의 영역에 있는 초점 반경( $w_0$ )을 예측하여 구하고자 하였다. 즉  $z$ 축에 따른 반경  $w(z)$ 에 관한 식을 구한 후  $z$  값을 초점위치에 두었을 경우 초점 반경( $w_0$ )을 유추하는 방법이다. 이는 식 (4)와 식 (5)로 표현되는 빔 파라미터 및 ABCD법칙<sup>15</sup>에 의해 전개될 수 있는데 이의 조합된 형태는 식 (6)으로 표현된다. 식 (7)은 식 (5)에서 렌즈에 해당되는 A, B, C, D값을 식 (6)에 대입하여 유도된 결과이다. 여기서 렌즈를 지난 직후의 빔파라미터 값인  $\frac{1}{q_2}$ 는 무한대의 R과 렌즈에서의 빔 직경( $w_i$ )이 조합된 식 (8)로 표현이 가능하다. 식 (9)는 식 (7)과 식 (8)의 조합으로서 광축에 따른 레이저 빔의 반경

( $w(z)$ )은 식 (4) 및 식 (9)의 복소수 항에 해당되며 이는 식 (10)과 같이 정의될 수 있다.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi w(z)^2} \quad (4)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - z/f & z \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{C + D \left( \frac{1}{q_1} \right)}{A + B \left( \frac{1}{q_1} \right)} \quad (6)$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{-1/f + 1/q_1}{1 - z/f + z \left( \frac{1}{q_1} \right)} \quad (7)$$

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{\infty} - i \frac{\lambda}{\pi w_i^2} \quad (8)$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{-1/f + z \left\{ \frac{1}{f^2} + \left( \frac{\lambda}{\pi w_i^2} \right)^2 \right\} - i \left( \frac{\lambda}{\pi w_i^2} \right)}{\left( 1 - z/f \right)^2 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_i^2} \right)^2} \quad (9)$$

$$w(z) = w_i \left\{ \left( 1 - z/f \right)^2 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_i^2} \right)^2 \right\}^{0.5} \quad (10)$$

식 (10)에  $M^2$ 를 곱하면 실제 빔의 반경이 되는데 빔프로파일러로 측정된 렌즈에서의 빔 반경( $w_i$ )인  $2.625\text{mm}$ 를 입력하면 식 (10)은 Fig. 3에서 실선부로 표현될 수 있다. 이때 적용된  $M^2$ 값은 1.11일 경우 점으로 표현한 측정값과 일치된다는

것을 알 수 있었다. 또한 반경이  $10\mu\text{m}$  이내의 영역인 초점반경은 측정값이 아닌 실험값과 일치한 식 (10)에 의해 구할 수 있었는데 식 (10)에  $z$ 에 초점거리인  $105\text{mm}$  입력한 결과 초점반경( $w_0$ )은  $7.28\mu\text{m}$ 로 결론을 낼 수 있었다.

### 3.3 가공부의 크레이터 반경 측정

식 (2)에 따르면 임계에너지밀도( $F_{th}$ )를 구하기 위해서는 가공시 크레이터의 반경( $r_d$ ) 및 앞 절에서 구한 광학적 초점반경( $w_0$ )을 알아야 한다. 본 실험에서는 에너지 밀도 및 펄스 수의 곱인 총 주입 에너지 밀도에 따른 가공시 크레이터의 직경을 광학현미경 및 비접촉 3차원 미세형상측정기를 이용하여 측정하였다.

Fig. 4는 레이저 빔의 조사 후 구리 표면을 나타내고 있다. 이는 에너지 밀도 및 펄스 수에 따라 실험이 진행되었다. Fig. 5는 크레이터의 직경의 측정값으로서 전체적으로 주입 에너지에 따라 크레이터의 직경은 초기에는 커지다가 에너지 밀도의 증가에 따라 수렴한다는 것을 보여주고 있다.

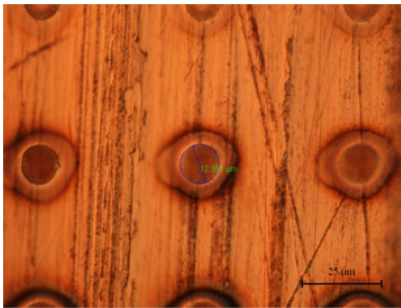


Fig. 4 Optical microscope image of the copper surface patterned under the following conditions:  $F = 0.28\text{J}/\text{cm}^2$ ,  $N = 200$  pulses.

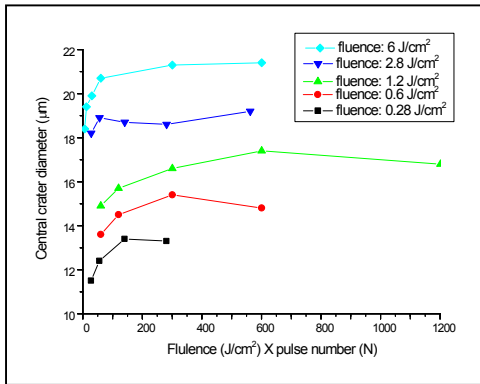


Fig. 5 Change in the central diameters of craters of copper according to the total input energy (i.e., fluence × number of pulses).

### 3.4 임계에너지밀도 및 투과깊이 환산

앞선 두절에서 임계에너지밀도( $F_{th}$ )를 구하기 위한 식 (2)의 구성요소인 크레이터의 반경( $r_d$ ) 및 광학적 초점반경( $w_0$ )을 구했다. Fig. 6은 임계 에너지밀도( $F_{th}$ )별 에너지밀도( $F$ )에 따른 크레이터의 직경으로서 식 (2)를 이용한 시뮬레이션 값과 앞 절에서 구한 측정값을 비교하고 있다. 여기서 임계에너지밀도( $F_{th}$ )가  $0.075\text{J}/\text{cm}^2$ 이 실험값과 근사적으로 일치한다는 것을 알 수 있는데 스위스 Bern대학의 Neuenschwander 교수팀이 10ps의 펄스폭, 1064nm 파장에서 구리에 대한<sup>13</sup> 임계에너지밀도( $F_{th}$ )  $0.3\text{J}/\text{cm}^2$ 에 비해서는 1/4수준으로 낮아진다는 것을 알 수 있었다.

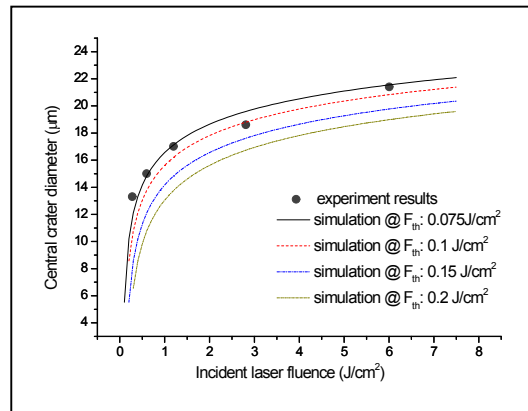


Fig. 6 Comparison of the central crater diameters of copper obtained from experiments and simulations.

식 (1)로 표현된 단위시간당 어블레이션 양( $dV/dt$ )은 앞서 유도되었던 임계에너지밀도( $F_{th}$ ) 및 투과 깊이( $\delta = 1/\alpha$ )의 함수로서 투과 깊이는 식 (3)을 이용하면 유도될 수 있다. 즉 펄스당 어블레이션 깊이 및 주입에너지의 함수를 대입하여 투과 깊이를 얻을 수 있다. Fig. 7은 에너지 밀도( $F$ )  $0.28\text{J}/\text{cm}^2$  및 펄스 수 200인 조건에서 가공된 크레이터의 형상을 나타내고 있다. 이때 가공깊이는  $12.2\mu\text{m}$ 이므로 펄스당 가공깊이( $L$ )는  $61\text{nm}$ 인 것을 알 수 있다. 여기서 식 (3)을 이용하면 투과 깊이( $\delta$ )를 구할 수 있는데 실험적으로 측정된 펄스당 가공깊이를 임계에너지밀도( $F_{th}$ ) 및 에너지 밀도( $F$ )를 대입한 결과 투과깊이는  $46\text{nm}$ 라는 것을 알 수 있었다. 이는 기존 문헌상<sup>13</sup>에서 1064nm의 파장에서 구한 투과깊이인  $30\text{nm}$ 에 비해서는 50% 이상 깊다는 것을 말해준다.

일반적으로 파장이 짧은 경우 광학적 투과깊이

가 짧아지는 것이 원칙이다. 그러나 본 실험에서는 파장이 짧은 515nm에서 1064nm보다 50%이상 깊은 투과깊이가 도출되었다. 이는 515nm의 파장에서 1064nm의 파장에 비해 2배이상의 높은 흡수율이 작용되어 나타나는 결과로서 주입에너지의 1/e이 되는 위치로 정의되는 투과깊이가 높은 흡수율로 인해 더욱 깊어진 것으로 판단된다.

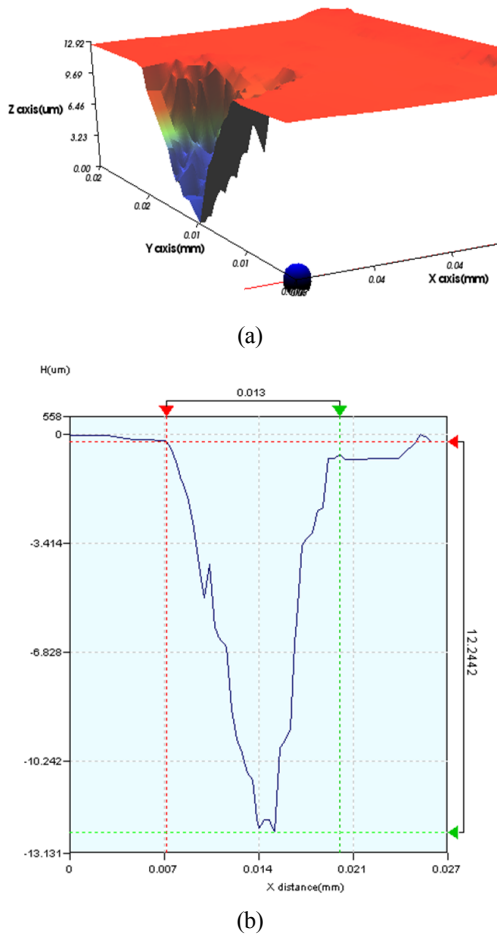


Fig. 7 (a) 3D and (b) 2D profiles of the crater of copper ablated under the following conditions:  $F = 0.28\text{J}/\text{cm}^2$ ,  $N = 200$  pulses.

### 3.5 최대의 어블레이션 양을 위한 조건 도출

지금까지 식 (1)의 단위시간당 어블레이션 양 ( $dV/dt$ )을 구하기 위하여 투과깊이( $\delta$ ) 및 임계에너지밀도( $F_{th}$ )를 구하는 과정을 거쳤다. Fig. 8은 펄스반복율(Rep) 및 평균출력에 따른 단위시간당 어블레이션 양을 식 (1)에 따라 구한 그래프로써 펄스반복율에 따라 단위시간당 어블레이션 양은 적정지점까지 상승하다가 이후 하강한다는 것을 알 수 있다. 여기서 최고로 상승한 지점이 어블

레이션 양을 최대화 할 수 있는 지점으로서 평균출력이 1W인 조건에서 2,168kHz의 적정 펄스반복율을 나타내고 있다. 이때의 펄스에너지는 0.46mJ이며 초점크기 14.56um를 대입하면 에너지 밀도는  $0.28\text{J}/\text{cm}^2$ 인 것을 알 수 있다. 또한 평균출력의 증가에 따라 최적의 펄스반복율도 비례해서 증가되는 것을 알 수 있는데 최적 에너지 밀도인  $0.28\text{J}/\text{cm}^2$ 는 항상 유지된다는 것을 의미하고 있다. 기존 문헌상의<sup>13</sup> 실험결과에서 도출된 1064nm의 파장에 대한 적정 에너지밀도  $1.17\text{J}/\text{cm}^2$ 에 비해서는 1/4수준으로 낮다는 것을 보여준다.

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

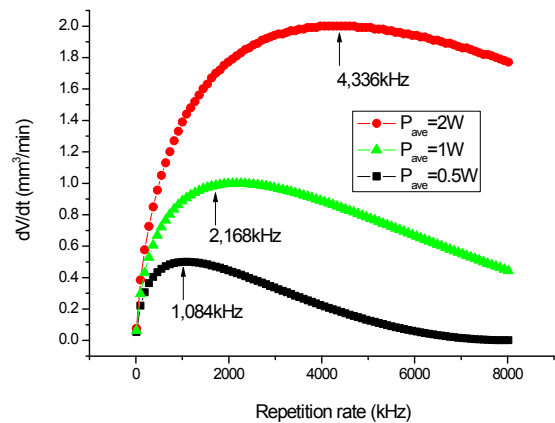


Fig. 8 Variation in the volume ablation rate of copper as a function of the repetition rate and average power under the condition of a pulse duration of 8ps and wavelength of 515nm.

## 4. 결론

본 연구는 8ps의 펄스폭 및 515nm의 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 임계에너지 밀도 및 투과깊이를 이론적 배경 하에 실험값과의 비교를 통하여 구할 수 있었으며 실험결과 515nm 파장의 피코초 레이저는 1064nm의 파장을 사용한 경우에 비해 1.5배 깊은 투과깊이 및 1/4수준

의 임계에너지밀도를 가진다는 것을 알 수 있었다. 이때 최대의 어블레이션 양을 위한 적정 에너지 밀도는  $0.28\text{J}/\text{cm}^2$ 인데 이를 위해서는 1MHz 이상의 높은 펄스반복율로 빔을 조사해야 한다. 이는 열이 주변으로 전도되기 전에 레이저 빔의 조사가 이루어져 열축적현상을 야기할 우려가 있다는 것을 의미한다. 이에 대한 해결책으로서는 10m/s 이상의 속도로 빔을 이송시키는 방법 또는 빔을 분기시켜 가공하는 방법을 사용할 수 있는데 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 핵심기술 개발”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., and Brüning, S., “Brüning, Large Scale Laser Microstructuring of Gravure Printforms,” in *AILU* 2008.
- 3) Bruening, S., Hennig, G, Eifel, S and Gillner, A., “Ultrafast Scan Techniques for 3D- $\mu\text{m}$  Structuring of Metal Surfaces with high repetitive ps-laser pulses,” *Physics Procedia*, Vol. 12, pp. 105-115, 2011.
- 4) Neuenschwander, B., Guido, F., Nussbaum, C. and Joss, B., “Processing of metals and dielectric materials with ps-laserpulses: results, strategies, limitations and needs,” *Proc. SPIE*. Vol. 7584, 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. SPIE*. Vol. 7920, 2011.
- 6) Eifel, S., “Process Development for High-Power Laser Ablation Basics and New Developments in Ultra short Pulse Laser Technology,” in *AKL* 2012.
- 7) Oztoprak, G., Akman, E., Hanon, M.M., Gnes, M., Gümüş, 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. SPIE*. Vol. 5339, 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, pp. 164-171, 2011.
- 13) Neuenschwander, B., Jaeggi, B., and Schmid, M., “Micro Structuring with Ultra Short Pulses - Ways to Optimize Process Efficiency and Quality,” in *AKL* 2012.
- 14) Raciukaitis, G., Brikas, M., Gecys, P., Gedvilas, M., “Accumulation effects in laser ablation of metals with high-repetition-rate lasers,” *Proc. SPIE*. Vol. 7005, 2008.
- 15) Goldsmith, P.F., “Quasioptical Systems,” *IEEE Press*, pp. 39-57, 1998.