

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.8.759>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

초음파 원용 레이저 가공에서 재료의 열적 물성이 표면상태에 미치는 영향에 관한 연구

이후승* · 김건우* · 박종은* · 양민양** · 조성학** · 박종권***

* 한국과학기술원 기계공학과, ** 한국기계연구원 나노공정연구실, *** 한국기계연구원 초정밀시스템연구실

Study on the Effect of Thermal Property of Metals in Ultrasonic-Assisted Laser Machining

Hu Seung Lee*, Gun Woo Kim*, Jong Eun Park*, Min Yang Yang**, Sung Hak Cho** and Jong Kweon Park***

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,

** Div. of Nano-Convergence Manufacturing Systems Research, Korea Institute of Machinery and Materials

*** Dev. of Ultra-Precision Machines and Systems Advanced Manufacturing System Research, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received November 6, 2014 ; Revised June 8, 2015 ; Accepted June 10, 2015)

Key Words: Heat Affected Zone(열영향부), Recast Layer(재용착층), Thermal Conductivity(열전도도), Boiling Point(끓는점), Ultrasonic Vibration(초음파 가진), Thermal Diffusivity(열확산계수)

초록: 레이저 가공 공정은 마스크 없이 전극을 가공할 수 있다는 장점 때문에 우수한 공정들 중의 하나로 제안되고 있다. 본 논문에서는, 서로 다른 열적 물성을 가지는 금속들에 레이저 가공을 수행하였다. 이 금속들은 서로 다른 표면형상, 열영향부, 그리고 재용착층을 나타내었고 이는 열전도도, 끓는점, 그리고 열확산계수에 의존하였다. 또한 재용착층을 제거하기 위하여 초음파 원용 레이저 가공을 적용, 높은 열확산계수를 가지는 재료에서 그 초음파 가진에 의한 표면 품질의 향상을 발견하였다.

Abstract: The laser machining process has been proposed as an advanced process for the selective fabrication of electrodes without a mask. In this study, we adapt laser machining to metals that have different thermal properties. Based on the results, the metals exhibit a different surface morphology, heat-affected zone (HAZ), and a recast layer around the machined surface according to their thermal conductivity, boiling point, and thermal diffusivity. Then, we apply ultrasonic-assisted laser machining to remove the recast layer. The ultrasonic-assisted laser machining exhibits a better surface quality in metals with higher diffusivity than those having lower diffusivity.

- 기호설명 -

H : 엔탈피 (J)
 v : 가공속도 ($m \cdot s^{-1}$)
 $\kappa, K(t)$: 열전도도 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
 T : 온도 (K)
 I_s : 조사되는 광학적 에너지 (W)
 α : 광흡수계수

t : 시간 (s)
 z : 이동거리 (m)
 r_{HAZ} : 열영향부 반경 (μm)
 C : 비열상수 (μW)
 T_V : 끓는점 (K)

1. 서 론

† Corresponding Author, myyang@kaist.ac.kr
© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

전자산업의 발전과 더불어 그 생산방식인 포토 리소그래피와 진공증착 방식은 나날이 그 기술이

진보하고 있다. 이러한 방식들은 그 품질이나 생산성 측면에서 매우 우수하여 거의 독보적인 생산방식으로 간주되고 있으나, 최근 이들이 유해한 시약을 사용하고, 공정이 복잡하며, 또한 고가의 유지비용이 필요하다는 단점을 극복하기 위한 여러 가지 대체공정이 제안되고 있는 실정이다. 이러한 여러 가지 대체공정들 중, 레이저를 이용한 공정은 장비의 설치가 간편하고 마스크 없이 선택적으로 에너지를 가하여 가공할 수 있다는 점에서 기존의 포토리소그래피 공정을 대체할 수 있을 뿐만 아니라 리페어 공정 등에의 적용을 통하여 포토리소그래피 공정을 보조할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 레이저 공정에 있어서, 가공 표면에 열영향부나 재용착층이 잔류하게 되는데, 이는 레이저를 이용한 전극 가공의 상용화를 위해 해결해야하는 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 이와 같은 표면품질을 악화시키는 현상들은 전극의 단선이나 합선 등의 문제로 이어질 가능성이 크기 때문에 그 해결이 중요하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 표면상태와 금속의 열적물성과의 관계를 파악하고 이를 개선하기 위하여 그 관계를 분석하였다. 더불어 초음파 원용 레이저 가공을 적용, 표면상태를 개선하는 연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경 및 실험방법

레이저 가공에 있어서, 레이저의 광에너지가 재료에 조사되면, 식 (1)과 같은 관계에 의해서 그 에너지가 변환이 된다.⁽¹⁾

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(t) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = I_s \alpha \exp(-\alpha z) \quad (1)$$

위 식에서 알 수 있듯이, 조사된 에너지 중 반사되는 에너지를 제외한 나머지를 재료가 흡수하고 열전달 및 레이저 초점이동에 의해 손실되는 에너지를 제외한 나머지 에너지가 재료의 용발에 관여하게 되는데, 위 식에서 알 수 있듯이, 이는 재료의 열전도도가 관련되어 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 수식을 바탕으로, 금속재료의 물성에 따른 차이를 확인하기 위하여 금속재료를 열전달계수에 따라 위의 Table 1과 같이 선정, 이에 대한 레이저 가공을 수행하였다.

이와 같은 금속재료의 레이저 가공에 있어서

Table 1 Selection of Metals according to thermal conductivity

Element	Thermal Conductivity [10 ² W/mK]
Copper	3.9
Aluminum	2.2
Tungsten	1.7
Zinc	1.1
Nickel	0.7

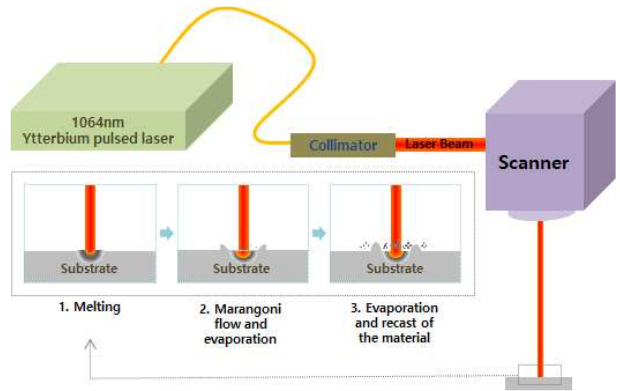


Fig. 1 Mechanism of laser machining on metal substrate

그 재료가 가공되는 과정은 Fig. 1과 같이 크게 3 단계로 나눌 수 있다. 하나는 재료의 용융이고, 두 번째는 용융에 의한 마랑고니 유동 및 증발, 그리고 마지막은 증발된 재료에 의한 플라즈마 생성 및 그에 의한 버와 재용착 층의 생성이다. 이러한 과정에 있어서, 각 금속재료의 열전도도의 영향을 보다 크게 하기 위하여 식 (1)에서 금속재료의 상변화 및 내부에너지 증가에 관여하는 좌변 끝항과 재료의 고유물성인 열전도도가 포함되어 있는 좌변 세 번째 항을 제외하고 나머지 항들을 각 재료마다 동일하게 유지한 후 공정을 수행하였다. 이를 위하여 금속재료들의 반사율을 Fig. 2와 같이 측정, 각 재료가 같은 에너지를 흡수하도록 하였고, 더불어 모든 시편을 동일한 가공속도로 가공하여 면적당 입사되는 에너지를 동일하게 0.037[J/cm²]로 유지하였다. 이 때 반사되는 에너지를 제외한 나머지는 흡수된다고 가정하였다. 재료의 흡수 및 반사율은 그 재료의 상변화에 따라 변화가 발생하지만 이는 고상상태에서의 값의 경향을 유지하므로 고상상태에서의 값을

측정하여 비교, 이를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 레이저 가공 및 표면특성 분석

앞서 기술한 재료의 레이저 가공에 있어서 버나 재용착층의 생성은 광에너지에 의한 플라즈마 생성 및 이에 의한 가공에 주요하게 영향을 받는다.⁽²⁾ 이러한 플라즈마 생성은 재료의 온도를 끓는점(또는 녹는점)까지 가열하고 남은 잔류에너지에 의하여 생성되므로 결국 재료의 끓는점이 표면상태에 큰 영향을 주게 된다고 할 수 있다.⁽³⁾ 이러한 점을 식 (1)과 연계하여 고려해볼 때, 열영향부의 크기는 열전도도와 끓는점에 반비례하여 생성된다고 할 수 있으며, 그 식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$r_{HAZ} = \frac{C}{\kappa \times T_V} \quad (2)$$

이러한 관계를 보다 정성적으로 비교해보기 위하여 Fig. 3과 같이 각 재료에 대하여 레이저의 펄스 에너지를 조사, 위 식의 관계를 유지하는지 여부를 분석해 보았다. 그 결과, Fig. 4와 같이, 열영향부의 크기가 열전도도와 끓는점에 반비례하게 나타나는 것을 볼 수 있었으며 이는 위 식 (2)에서 예측한 내용과 잘 부합하는 결과임을 알 수 있었다.

3.2 초음파 원용 레이저 가공

일반적인 레이저 가공에 있어서 그 레이저의 펄스 간격이 수 피코초 이하로 낮게 발진되지 않으면, 재료의 용발 과정에서 과도한 열확산과 플라즈마가 발생하게 되고, 이로 인하여 폭발적인 반응을 일으키게 된다. 이는 재료의 표면에 버(burr)뿐만이 아니라 재용착층을 형성하게 되는 가장 큰 이유가 된다. 이러한 일반적인 나노초 레이저 가공에서 부득이 하게 발생하는 재용착층을 제거하기 위하여 본 논문에서는 레이저 가공 중 재료에 초음파 가진을 통하여 이를 해결하고자, Fig. 5와 같은 시스템을 구성하였다. 이는 초음파 가진 장치인 BLT(Bolt-clamped Langevin Vibrator) 소자위에 재료를 두고 가진하는 상태에서 레이저를 조사하는 방식으로, 그 자세한 조건은 Fig. 5에 표시된 바와 같다. 재료별 초음파 원

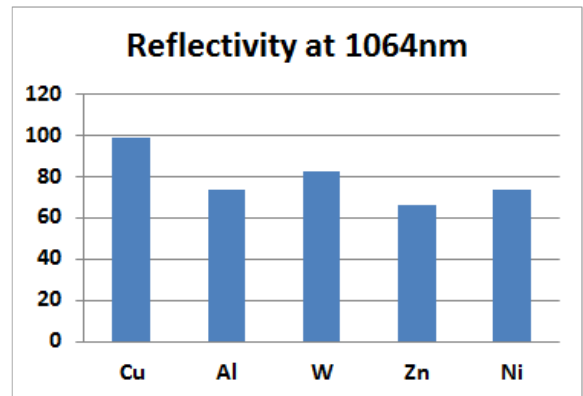


Fig. 2 Reflectivity of metals at the wavelength of irradiated laser source

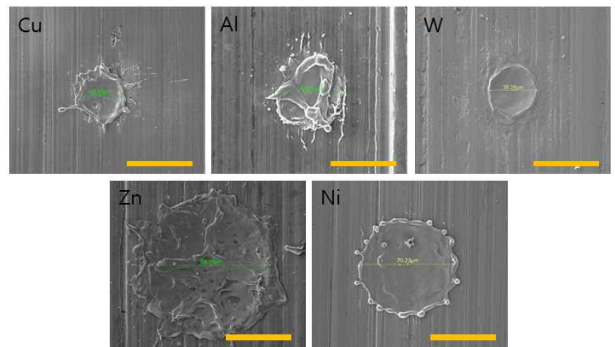


Fig. 3 Laser ablation using an IR pulsed laser according to conductivity of metal. (Scale bar: 50 μm)

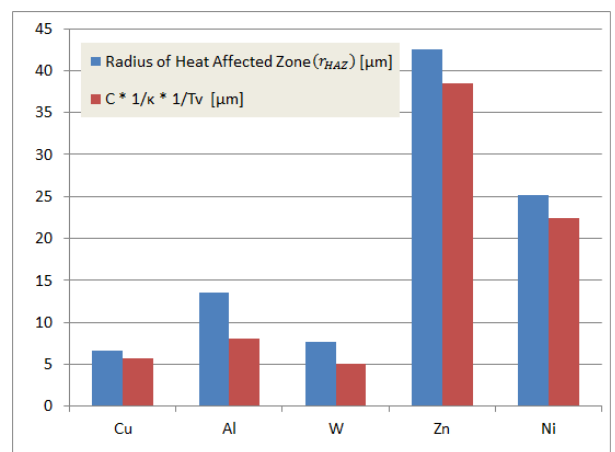


Fig. 4 A comparison of HAZ of metals according to thermal conductivity

용 실험을 통한 비교에 앞서, 레이저 가공에서 초음파 가진의 효과를 검증하기 위하여, BLT모듈의 공진주파수 영역에서의 초음파 유무에 따른

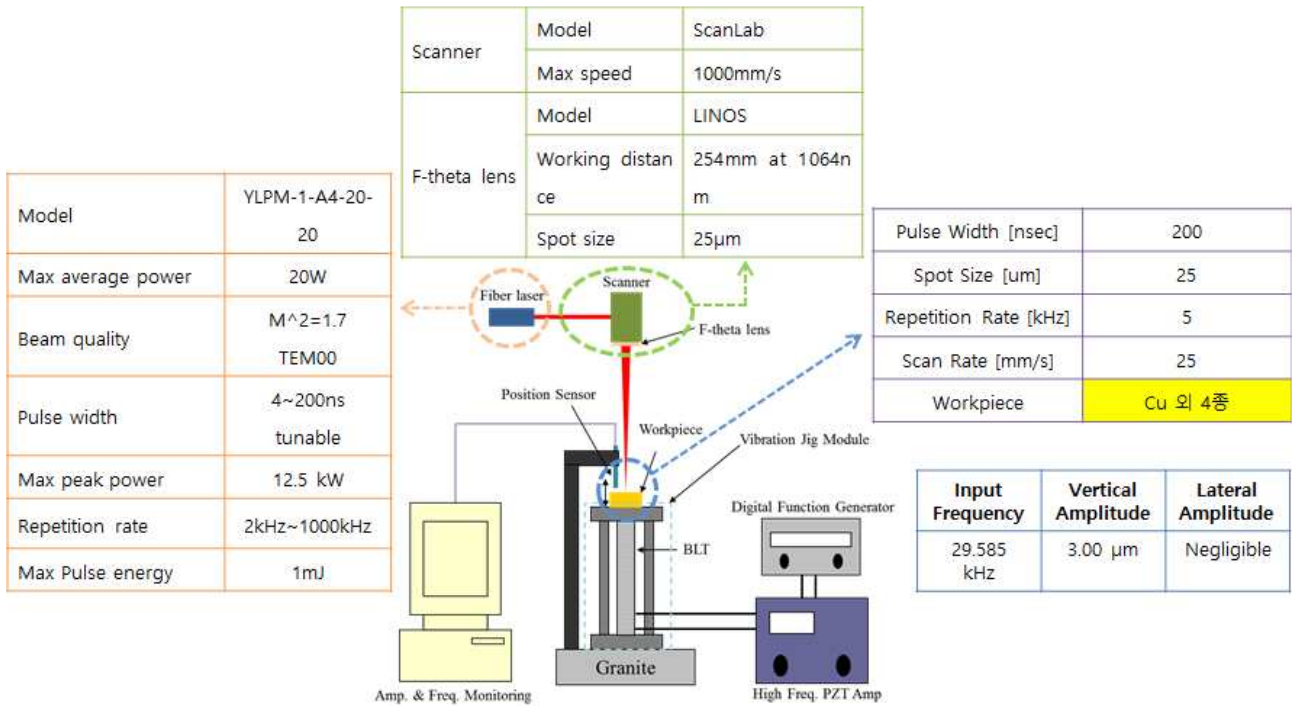
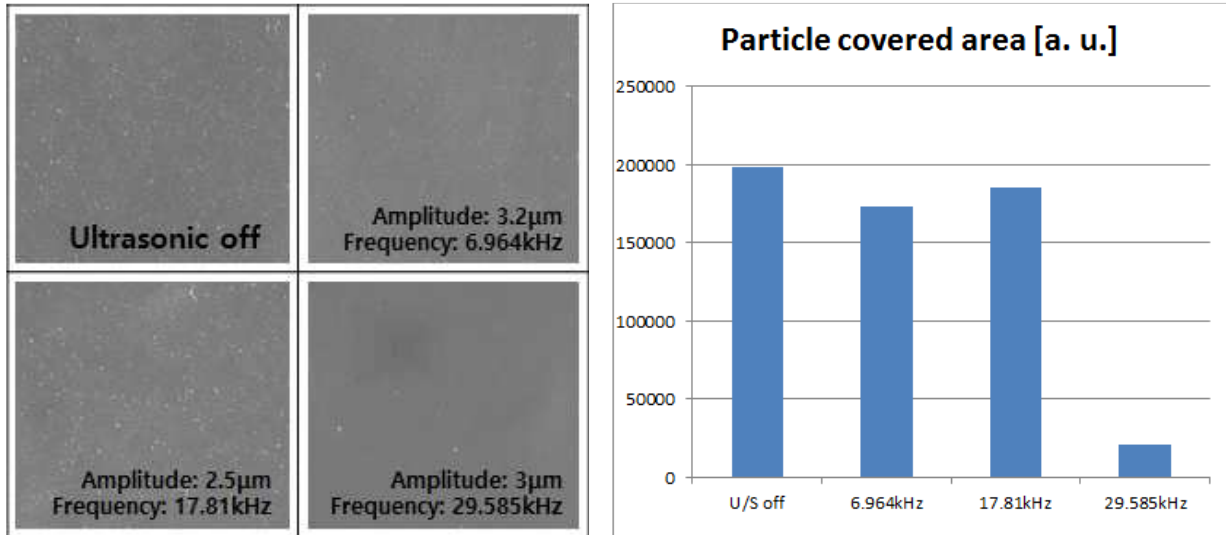


Fig. 5 Experimental system setup for ultrasonic assisted laser machining



(a) SEM images of peripheral surface of laser machined copper

(b) Measurement of particle covered area according to vibration frequency using an image processing program

Fig. 6 Effect of vibration frequency in ultrasonic assisted laser machining on bulk copper substrate.

가공특성을 비교하였다. 그 결과, Fig. 6(a)와 같이 29.585kHz에서 초음파 가진에 의한 재용착층의 표면제거가 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 정량적으로 비교하기 위하여 Fig. 6(b)와 같이 이미지 프로세싱 프로그램을 이용하

여 각 조건별 재용착층에 의하여 덮여진 표면의 면적을 계산해 본 결과, 29.585kHz에서 재용착층을 가장 적게 발견할 수 있었다. 이러한 가진 장비를 이용하여 레이저 가공 중 재료들을 가진 한 결과, Fig. 7과 같이 열확산계수가 비교적 높은

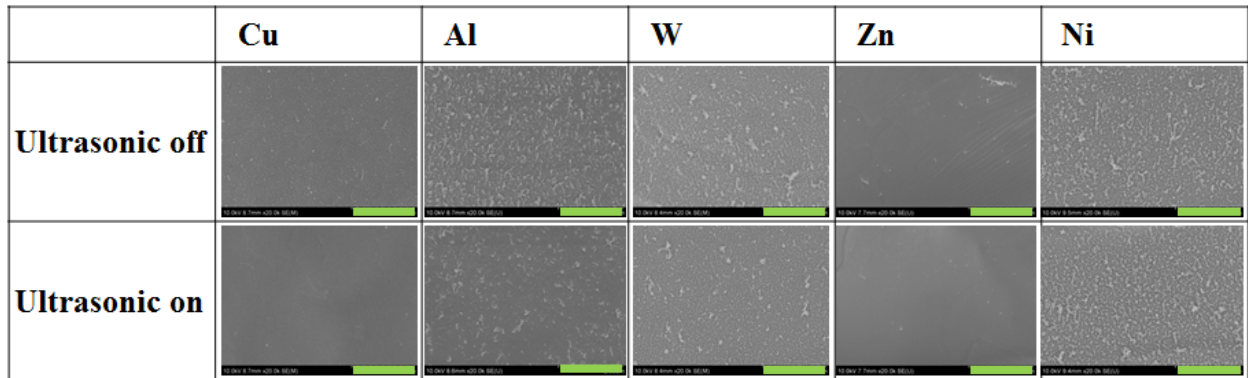


Fig. 7 Effect of ultrasonic assisted laser machining on recast layer of metal(■: 2 μm)

구리, 알루미늄, 그리고 텅스텐에서는 초음파 가진의 효과가 나타나는 반면, 열확산계수가 낮은 아연이나 니켈은 초음파 가진의 효과가 거의 없었다. 특히 재료의 열확산계수가 높을수록 초음파 가진의 효과가 명확히 나타났다. 이는 초음파가 가진 고유한 성질에 의한 것으로, 초음파 가진에 의해 재료표면에서는 대류현상을 촉진하게 되고⁽⁴⁾ 재료내부에서는 내부마찰로 인한 열이 발생하게 됨에⁽⁵⁾ 따라서, 열확산계수가 높은 재료일수록 내부마찰에 의해 발생한 열이 더 빠르게 배출됨과 동시에 표면에서의 대류현상이 활발하여 재용착층의 제거효과가 비교적 두드러지는 것이라고 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전자소자 제조공정용으로의 레이저 가공공정의 적용을 목적으로 초음파 원용 레이저 가공이 재료의 표면상태에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그 결과, 가공된 재료의 열영향부는 재료의 열전달계수와 끓는점 (또는 녹는점)에 반비례하여 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 재용착층의 경우, 열확산계수가 높은 재료일수록 초음파 가진에 의한 재용착층의 제거가 두드러지는 것을 알 수 있었다. 이는 재료에의 초음파 가진 시 내부에서는 마찰에 의한 열이 발생하고 표면에서는 가진에 의한 대류가 일어나게 되는데, 이 때, 재료의 열 확산계수가 클수록 내부의 마찰열이 원활하게 방출됨과 동시에 표면에서는 대류가 활발해진다. 이러한 현상으로 인하여 재용착되는 불순물들이 쉽게 입자화 되면서 표면에서의 접촉각이 작아짐에 따라 물리적인 가

진에 의해 쉽게 제거되는 현상이라고 할 수 있다. 추후 이러한 원리를 바탕으로 실제 전자소자 시스템에의 적용을 도모할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업지원으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌 (References)

- (1) Pyatenko, A., Wang, H., Koshizaki, N. and Tsuji, T., 2013, "Mechanism of Pulse Laser Interaction with Colloidal Nanoparticles," *Laser Photonics Rev.*, Vol. 7, No. 4, pp. 596-604.
- (2) Chang, J. J., Warner, B. E., Dragon, E. P. and Martinez, M. W., 1998, "Precision Micromachining with Pulsed Green Lasers," *J. Laser. Appl.*, Vol.10, No.6, pp. 285-291.
- (3) Knowles, M. R. H., Rutterford, G., Karnakis, D. and Ferguson, A., 2007, "Micro-machining of Metals, Ceramics and Polymers Using Nanosecond Lasers," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol.33, No.1, pp. 95-102.
- (4) Kang, B., Kim, G. W., Yang, M., Cho, S.-H. and Park, J.-K., 2012, "A Study on the Effect of Ultrasonic Vibration in Nanosecond Laser Machining," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.50, No.12, pp. 1817-1822.
- (5) Tolunay, M. N., Dawson, P. R. and Wang, K. K., 1983, "Heating and Bonding Mechanisms in Ultrasonic Welding of Thermoplastics," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 23, No. 13, pp.726-733.