금과 니켈이 코팅된 베릴륨 구리에 다른 반복율을 적용한 레이저 드릴링 공정의 실험적 연구

손 승 익* · 이 동 경*,†

*공주대학교 기계자동차공학부

Experimental Investigation of Infrared Laser Drilling Process Applied with Different Repetition Rate on Ni-Au Coated BeCu

Seungik Son*, and Dongkyoung Lee*,†

*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan, 31080, Korea

†Corresponding author : ldkinka@kongju.ac.kr

(Received April 30, 2019 ; Revised May 30, 2019 ; Accepted June 19, 2019)

Abstract

Due to the development of technology and high-tech industrialization, various processing technologies requiring precision are developed and the high degree of precision is further required. Therefore, laser-aided manufacturing has been applied in many engineering fields due to many advantages. However, without understanding fundamental interaction characteristics, its advantages cannot be fully utilized. In this study, the interaction between laser and material is investigated by laser process applied with the different repetition. The wavelength of IR laser used in this experiment is 1064nm. the parameters of IR laser are laser power (20 W), repetition rate (105 kHz, 200 kHz), pulse duration (20 ns) and these parameters are constant during the laser drilling. In addition, the experiment is performed by increasing the laser total energy. For the component analysis of specimen and result of experiment, we use scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive X-ray (EDX). And then the result of the Heat affected zone, Material removal zone and Burr is measured. Through this study, it seems that the interaction characteristic is controlled by repetition rate.

Key Words : Infrared laser, Laser drilling, Beryllium copper, Nickel coating, Interaction characteristics

1. 서 론

기술의 발달과 첨단 산업화에 따라 여러 가지 부품과 그에 따른 다양한 가공 기술이 있고 고도의 정밀도를 요구하는 가공 기술이 개발되고 있다. 정밀 구성 부품을 대량 가공 및 절단하는데 있어 기계적인 절단 가공이 사용되었다. 부품의 소형화로 크기가 Micro scale로 작아지면서 기계식 절단 가공에는 한계가 있다. 본 연구에 사용되는 BeCu는 높은 고강도, 내피로성, 및 내식성이 우수한 재료이다. 또한, Au 과 Ni 이 코팅됨으로써 열전도율 및 전기적 성능이 향상되어 첨단 산업

계에서 많이 사용되고 주로 스탬핑(stamping) 공정을 통해 가공된다. 하지만 기계적인 응력이 작용하면서 생산된 제품이 과도하게 손상될 수 있으며 시간이 지남에 따라 절삭 공구가 마모되어 제품의 품질을 저하시키기 때문에 이를 보완하기 위해 laser 가공을 도입하였다¹⁻⁴⁾. laser 가공의 장점은 직접적인 접촉이 없고 유연성을 지니고 높은 에너지 집중이 가능하며 가공과정(Processing speed)이 빠르고 대부분의 모든 재료에 적용 가능하다는 것이다. 또한 높은 안정성 및 출력이 가능하고 빔 직경이 작아서 미세 가공하기에 적합한 장점 있어 기존의 기계적 가공방법의 한계를 보완한다. 선행된 연구에서는 재료 제거 및 각 laser 조사 후 발생하는 특정 물

질의 영향에 대해 언급되고 집중 되어있다⁵⁻¹³⁾. 하지만, 첨단 산업계에서 사용되는 Au 과 Ni이 코팅된 BeCu 의 시편에 IR laser를 사용한 상호 작용 및 반응특성을 직접적으로 비교 분석한 선행된 연구의 정보는 부족하다. 따라서, 본 논문에서는 IR laser (1064nm)를 조사한 후, Au 과 Ni이 코팅 되어있는 BeCu에서 laser와 시편의 기본적인 상호 작용 및 반응 특성을 비교 분석하였다.

2. 실험 및 분석 방법

2.1 샘플 준비

정확한 실험을 위해 시편 분석이 필요하기 때문에 주사 전자 현미경(SEM)을 통해 시편의 두께를 관찰한 후 EDX 성분 분석을 진행하였다. Fig. 1 (a)는 시편을 SEM으로 촬영한 사진이고 Fig. 1 (b)는 SEM을 통해 두께를 측정하였다 또한, EDX 성분 분석기를 통해 Fig. 1 (c)의 성분 분포도를 확인할 수 있었다. Fig. 1 (c)의 성분 분포도에서 대부분의 Ni성분과 소량의 Au 성분이 관찰되었다. 따라서, 본 실험에 사용된 시편의 총 두께는 95 μ m 이고 시편의 앞, 뒤로 1 μ m 정도의 코팅이 되었다는 것을 확인하였다.

Fig. 1 Analysis of the specimen used in the experiment (a) The specimen used in experiment (b) SEM image of the specimen (c) EDX component analysis of the specimen

2.2 Experimental set up

IR laser(IPG-YLPM, IPG-Photonics, Southbridge, USA)의 장비특징으로써 Wavelength는 1064nm에 평균 최대 출력(Average power)은 20W이다. 또한 Pulse duration은 4ns에서 200ns까지 조절 가능하며 본 실험에서는 20ns을 고정하여 실험을 진행하였다. laser 빔은 가공물 위쪽 표면 부에 초점이 맞춰지는데 이때의 Working distance(WD)는 184mm 이며, Focal point의 Spot size는 30 μ m으로 적용하였다. laser 빔은 Gaussain 형상을 띄며 본 연구에 사용되는 IR lasers는 2D galvo-scanner에 연결되어 있어 laser를 원하는 패턴으로 고속 전사할 수 있게 컴퓨터에 의해 제어된다.

2.3 레이저 매개변수

Table 1은 실험에 적용한 Laser Parameter이다. 각각의 장비에 적용되는 Repetition rate는 105 kHz, 200 kHz이며 동일한 Average power (20W)를 적용하였다. Pulse duration (Δt) 또한, 20ns로 고정시키고 Total laser Energy (E_{total})는 같은 값을 유지하도록 Number of Pulses를 변경하였다. 펄스 에너지는 다음 (1) 식 과 같이 계산할 수 있다. E는 1펄스당 발생하는 펄스 에너지이고, P_{avg} 는 Laser Average Power, Δt 는 Pulse duration, P_{peak} 는 피크파워, f 는 Repetition rate이다. 기본적으로 펄스 에너지는 Repetition rate와 반비례한다. 총 방사된 Total laser energy (E_{total})는 (2)식 와 같이 계산할 수 있다. 여기서 N 은 Number of Pulse이고, 총 에너지를 같게 설정하기 위해 Number of Pulse 값을 조정해야 한다.

Fig. 2 Schematic of the IR laser

Table 1 Laser parameter

P_{avg} [W]	Δt [ns]	f [kHz]	Pulse E [μ J]	Total energy [mJ]						
				50	20	10	8	5	2	1
				Number of pulses [#]						
20	20	105	190.5	263	105	53	42	26	11	5
20	20	200	100	500	200	100	80	50	20	10

Fig. 3 Measurement of results in heat affected zone, material removal zone, burr

$$E = P_{peak} \Delta t = \frac{P_{avg}}{f} [mJ] \quad (1)$$

$$E_{total} = E * N [mJ] \quad (2)$$

2.4 Analysis method

Fig. 3는 laser 방사 후 HAZ와 MRZ, Burr를 나타낸 것이고 실험 결과를 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 촬영 후 시편에서 관찰된 Heat affect zone(HAZ)와 Material removal zone(MRZ)의 크기를 측정하였다. 열 영향 부(HAZ)는 laser 조사에 의해 발생하는 열로 영향을 받아 생기는 흔적이다. 재료 제거 부(MRZ)는 laser 조사 시, laser-재료의 상호작용으로 용융과 증발이 발생함과 동시에 재료가 제거되어 생기는 구멍을 나타낸다. Burr는 laser와 재료 간의 상호작용 시, 용융과 증발 과정 중 반발 압력(Recoil Pressure)에 의해 용융 지(Melting zone)가 MRZ 주위로 밀려난 뒤 재 응고된 분화구 형태의 층이다. 위와 같은 현상들은 Δt , E_{total} , Rep.rate, Number of Pulse 등 변수들의 상관관계에 의해 영향을 받는다.

3. 결과 및 토의

3.1 열 영향 부

Fig. 4는 시편에 IR laser를 조사하여 반응 특성으로 나타난 HAZ 측정값 그래프이다. 실험결과는 repetition rate에 따라 분류했으며, 측정 값은 Total laser energy (E_{total}) 변화에 따른 결과 값으로 설정하여 작성하였다. 105 kHz를 적용한 IR laser를 조사한 HAZ는 Total laser energy가 증가함에 따라 증가하는 경향이 나타나지만 $E_{total}=10mJ$ 이후로는 HAZ의 변화가 거의 없었다. 200 kHz의 IR laser를 조사한 시편의 경우 105 kHz와 비슷한 그래프 경향을 관찰할 수 있지만 HAZ의 크기는 105 kHz에 비해 작은

Fig. 4 Comparison of HAZ with different repetition rate (105 kHz, 200 kHz)

크기가 관찰되었다. 이는 laser에 적용하는 repetition rate에 따라 HAZ의 조절할 수 있다는 것을 알려준다. 일반적으로 repetition rate이 감소하면 laser pulse의 주기가 길어지고 laser가 조사될 때, pulse energy와 Peak power가 증가하게 된다. 따라서, 105 kHz를 적용한 laser를 시편에 조사하면, 높은 pulse energy와 Peak power로 인해 열영향을 더 많이 받게 되어 HAZ가 커진다. 따라서, 본실험의 결과를 통해 repetition rate를 조절하여 HAZ를 조절할 수 있다는 것을 보여준다.

3.2 재료 제거 상단 부

Fig. 5은 repetition rate를 다르게 적용하여 조사한 시편의 MRZ_{top} 이다. 105 kHz를 적용한 실험은 시편이 $E_{total}=2mJ$ 에서 제거되기 시작하였고, $E_{total}=10mJ$ 까지 MRZ_{top} 이 증가하는 경향이 나타난다. 또한, $E_{total}=20mJ$ 에서 MRZ_{top} 의 크기가 최대이고 이후 $E_{total}=50mJ$ 까지 작아지는 것을 관찰하였다. 200 kHz를 적용한 laser로 시편을 조사했을 때는 105 kHz와 전반적으로

Fig. 5 Comparison of MRZ with different repetition rate (105 kHz, 200 kHz)

비슷한 그래프 경향이 나타난다. 하지만, MRZ_{top} 의 크기는 105kHz 보다는 비교적 작은 크기로 관찰되었다. 이는 HAZ의 그래프 경향과 비슷한 결과가 나타나며, repetition rate를 다르게 적용함으로써 시편의 MRZ_{top} 도 달라지는 것을 확인하였다. 앞서 언급한 laser의 repetition rate의 영향에서 repetition rate가 낮을수록 laser에 적용되는 pulse energy 및 Peak power가 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 증가한 pulse energy 와 Peak power가 시편에 조사되면 시편은 더 많은 열충격을 받게 되고, 이에 따라 고체상태의 시편이 액화 및 기화의 상변형으로 인해 재료제거가 200 kHz 보다 활발히 일어난다. 따라서, 200kHz를 적용한 laser를 조사했을 때 보다 105 kHz를 적용한 실험의 MRZ_{top} 크기가 더 크고 repetition rate에 따라 MRZ_{top} 를 조절할 수 있다.

3.3 재료 제거 하단 부

Fig. 6은 repetition rate 다르게 적용한 laser를 시편에 조사한 후 시편 바닥에 생기는 MRZ_{bottom} 의 크기 변화를 나타낸 것이다. 또한, laser 조사 후 시편이 관통되지 않는 경우에는 측정이 불가능 하여 생략하였다. 105 kHz를 적용한 laser를 시편에 조사했을 때 $E_{total} = 20mJ$ 에서 첫 관통되었으며 이후 $E_{total} = 50mJ$ 까지 일정한 크기의 MRZ_{bottom} 가 나타났다. 하지만, 200 kHz를 적용한 경우에는 105 kHz를 적용한 실험보다 낮은 $E_{total} = 10mJ$ 에서 첫 관통되었으며 이후 $E_{total} = 50mJ$ 까지 일정한 크기의 MRZ_{bottom} 가 관찰되었다. 앞서 언급한 것과 같이 repetition rate를 조절하면 pulse energy와 Peak power를 조절할 수 있고 그에 따라 시편과 laser의 직접적인 상호작용이 조절

Fig. 6 Comparison of MRZ_{bottom} with different repetition rate (105 kHz, 200 kHz)

가능하다. 또한, 높은 pulse energy 와 Peak power로 인해 시편 내부에 온도가 급격히 증가하여 기존의 고체의 시편이 용융과 기화의 상태변화로 인해 재료의 제거가 더 활발하게 발생한다. 따라서, 105 kHz를 적용한 MRZ_{bottom} 의 크기가 더 크다는 것을 실험을 통해 확인하였다. 하지만, 200 kHz에서는 더 낮은 에너지에서 시편이 제거가 되는데, 이는 repetition rate이 증가하면서 시편에 laser가 조사되는 laser pulse 횟수가 증가하기 때문이다. 따라서, 200 kHz를 적용한 laser로 조사한 시편은 105 kHz를 적용한 laser 보다 많은 횟수의 laser pulse를 조사하기 때문에 시편이 먼저 관통되어 MRZ_{bottom} 이 나타난다.

Fig. 7은 서로 다른 repetition rate를 적용한 laser를 시편에 조사한 후 시편을 SEM으로 촬영한 사진이다. 각각의 repetition rate이 적용된 laser와 시편의 상호작용이 달라지기 때문에 시편이 제거된 정도와 Burr의 정도가 달라짐을 확인할 수 있다. 앞서 언급한 MRZ와 같이 repetition rate가 줄어들면 pulse energy 와 Peak power가 증가한다. 또한, 시편 내부의 반발압력이 더 증가하면서 용융된 재료가 드릴링 된 시편의 상단 주위로 재결정화가 많이 되기 때문에 repetition rate가 작아지면 더 많은 Burr가 생성되었다. 따라서, 105kHz를 적용하면 증가한 pulse energy 와 Peak power로 인해 200kHz를 적용할 때보다 많은 양의 Burr가 생성되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

현재 제품의 소형화 및 정밀함이 요구되는 첨단산업에서 기계적 가공방법에 한계를 해결하고 보완하기 위해 laser 가공이 도입되고 있다. 기본적인 laser와 재

Fig. 7 SEM image of the specimen irradiated by laser (MAG:800X) (a) $f=105$ kHz (b) $f=200$ kHz

료의 상호 작용을 이해함으로써 laser 드릴링 가공의 장점을 최대한 활용하고 그 중에서도 흔히 사용되고 있는 IR laser의 기본적인 특징을 이해하기 위해 본 실험을 진행하였다. 또한, 실험에 사용된 laser와 시편 간의 상호 작용으로 나타난 HAZ, MRZ_{top} , MRZ_{bottom} , 그리고 Burr를 비교 분석한 결과들은 아래와 같이 요약하였다.

1) Repetition rate 변화 따른 HAZ 결과 분석으로 105 kHz를 적용함으로써 pulse energy와 Peak power가 증가되고, 또한, 증가한 pulse energy와 Peak power로 인해 재료가 받는 열 축적이 증가하여 E_{total} 이 증가할수록 HAZ가 커지는 것을 알 수 있다

2) Repetition rate 변화에 따른 MRZ_{top} 결과를 요약하면 105 kHz를 적용하면 200 kHz 보다 pulse energy와 Peak power가 증가하여 열 축적과 반발압력에 의해 시편의 더 많은 재료가 제거됨을 확인하였다. MRZ_{bottom} 의 경우 200 kHz를 적용한 laser가 105 kHz를 적용했을 때에 비해 더 많은 laser pulse로 인하여 105 kHz보다 낮은 에너지에서 시편이 관통되었음을 확인하였다.

3) 105 kHz를 적용한 실험에서는 200 kHz를 적용한 실험보다 시편내부에 높은 반발압력이 생성되어 용융된 재료가 시편 상단부로 올라와 재고형과 되어 많은 Burr가 나타나는 것을 SEM 사진을 통해 확인하였다.

4) IR laser에 서로 다른 repetition rate를 적용함으로써 실험을 진행한 결과로써 repetition rate를 조절하여 laser와 재료 간의 상호작용(HAZ, MRZ, Burr)을 조절할 수 있으며 laser 가공 시 repetition rate를 조절함에 따라 효율적인 laser 드릴링 가공을 진행할 수 있다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2019년도 미래창조과학부의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1C1B5017916)

ORCID: Seungik Son: <https://orcid.org/0000-0003-0092-8397>

ORCID: Dongkyoung Lee: <https://orcid.org/0000-0001-9404-2321>

Reference

1. Lee, D., et al., Application of laser spot cutting on spring contact probe for semiconductor package inspection, *Optics & Laser Technology*, 97 (2017), 90-96
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.06.005>
2. Lee, D., Experimental investigation of laser ablation characteristics on nickel-coated beryllium copper, *Metals*, 8(4) (2018), 211
<https://doi.org/10.3390/met8040211>
3. Lee, D., Understanding of BeCu Interaction Characteristics with a Variation of ns Laser-Pulse Duration, *Materials*, 11(8) (2018), 1423
<https://doi.org/10.3390/ma11081423>
4. Lee, D., Picosecond IR pulsed laser drilling of copper-coated glass/epoxy composite, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7(12) (2017), 2066-2072
<https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2763127>
5. Dubey, A.K., et al., Laser beam machining-A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(6) (2008), 609-628
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.017>
6. Kolar, J., et al., Near-UV, visible and IR pulsed laser light interaction with cellulose, *Applied Physics A*, 71(1) (2000),

- 87-90
<https://doi.org/10.1007/PL00021097>
7. Geertsen, C., et al., Comparison between infrared and ultraviolet laser ablation at atmospheric pressure-implications for solid sampling inductively coupled plasma spectrometry, *Journal of analytical atomic spectrometry*, 9(1) (1994), 17-22
<https://doi.org/10.1039/JA9940900017>
8. Bharatish, A., et al., Characterization of hole circularity and heat affected zone in pulsed CO₂ laser drilling of alumina ceramics, *Optics & Laser Technology*, 53 (2013), 22-32
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.04.010>
9. Vladoiu, I., et al., The dependence of the ablation rate of metals on nanosecond laser fluence and wavelength, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 10(12) (2008), 3177-3181
10. Torrisi, L., et al., Pulsed laser ablation of gold at 1064 nm and 532 nm, *Czechoslovak Journal of Physics*, 54(3) (2004), C421-C430
<https://doi.org/10.1007/BF03166435>
11. Yilbas, B., Parametric study to improve laser hole drilling process, *Journal of Materials Processing Technology*, 70(1-3) (1997), 264-273
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00076-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00076-9)
12. Yeo, C., et al., A technical review of the laser drilling of aerospace materials, *Journal of materials processing technology*, 42(1) (1994), 15-49
[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90073-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90073-6)
13. Kuar, A., et al., Modelling and analysis of pulsed Nd: YAG laser machining characteristics during micro-drilling of zirconia (ZrO₂), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13) (2006), 1301-1310
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.10.016>