

나노초 레이저 가공에서 초음파 진동이 가공표면에 미치는 영향

강봉철*, 김건우⁺, 조성학⁺⁺, 박종권⁺⁺, 양민양⁺⁺⁺

(논문접수일 2010. 03. 25, 심사완료일 2010. 06. 01)

The Effects of Ultrasonic Vibration on Surface Finish in Nano-second Laser Machining

Bong Chul Kang*, Gun Woo Kim⁺, Sung Hak Cho⁺⁺, Jong Kweon Park⁺⁺, Min Yang Yang⁺⁺⁺

Abstract

Conventionally, the machined surface roughness in nano-second(ns) laser machining is damaged and rough due to thermal effects. To obtain the improved surface finish, the ultrasonic vibration is applied to ns-laser machining. The ultrasonic vibration jig is developed to apply the ultrasonic high precision motion to workpieces. And then the ns-laser machining is conducted to compare the effects of the ultrasonic vibration. The results show that the surface roughness with ultrasonic vibration is smoother than that without the vibration. The phenomenon could be explained as enhancement of heat transfer by ultrasonic vibration.

Key Words : Laser machining(레이저 가공), Ultrasonic vibration(초음파 진동), Surface roughness(표면 조도), High precision (고정밀), Heat transfer(열전달), Nano particle(나노 입자)

1. 서론

레이저 가공은 비접촉 방식의 가공법으로서 기계 가공에 비해 가공 속도가 빠르고 생산 효율이 높다는 장점이 있다. 대부분의 레이저 가공은 빛을 집속하여 높은 Intensity (10^8 W/cm² 이상)로 재료에 주사하여 Ablation이라는 박리 현상

을 이용하여 재료를 가공한다. 하지만 레이저 가공 시에 박리 영역 주위와 가공 표면에 열영향 부위가 발생하게 된다. 이로 인해서 가공주위에 잔류응력이 발생하고 가공 표면에 수 μ m ~ 수백nm 크기의 Ripple이 발생하고 표면이 거칠어지는 현상이 발생한다. 그럼에도 불구하고 전통적인 기계 가공 방법만으론 다양한 초정밀, 초미세 가공의 요구 조건에 응하

* 한국과학기술원 기계공학과
+ 한국과학기술원 기계공학과
++ 한국기계연구원
+++ 교신저자, 한국과학기술원 기계공학과 (myyang@kaist.ac.kr)
주소: 305-701 대전시 유성구 과학로 335 한국과학기술원

기가 쉽지 않기 때문에, 레이저를 이용한 가공은 여전히 많은 분야에서 적용 가능한 방법으로 각광받고 있다.

이러한 레이저 가공이 보다 널리 적용되어 쓰이기 위해선, 고정밀, 고품질의 가공표면을 얻을 수 있는 방법을 새롭게 고안할 필요가 있다. Drilling, Turning, Milling, EDM 등 기존의 다양한 가공 분야에서 가공 시 발생하는 열영향을 최소화하고 표면 조도를 개선하며 가공속도를 향상시키기 위해서, 초음파 진동을 응용하고자 하는 노력들을 꾸준히 시도해왔다.^(1~7) 위의 가공에 초음파를 적용했을 때, 일반적으로 가공정밀도가 향상되고, 초음파 진동으로 인해서 열의 집중을 분산시킴으로 인해서 열영향 영역이 줄어드는 효과가 있다는 것이 이미 밝혀졌다. 또한, 그로 인해서 가공표면의 잔류응력이 줄어들고, 재료의 미세구조에 변형이 생기지 않으며, 가공 표면이 향상된다.

이에 본 연구에서는, 나노초 레이저 가공 중에 시편에 초음파 진동을 가하여 표면 냉각을 촉진시킴으로서 가공표면을 향상시키는 방법을 제안한다. 그래서 레이저 가공 정밀도와 가공속도를 고려해서 초음파 진동 장치를 개발하였고 실제 레이저 가공을 수행하여서 초음파로 인한 가공표면의 특징을 비교 분석 하였다.

2. 초음파 진동 구조물 설계 및 제작

2.1 초음파 진동 구조물의 설계 사양

나노초 레이저 가공 시스템은 최소 가공 선폭이 30 μm 이고 분해능이 100nm의 가공 성능을 갖는다. 그러므로 가공정밀도의 저하를 막기 위해서 초음파 구조물의 진동시의 횡축 진폭을 100nm 이하로 선정하였다. 그리고 가공 시에 생기는 가공표면의 거칠기, 레이저의 초점심도, 초음파 구동 한계를 고려하여 3 μm 이상의 가공 깊이 방향의 진폭을 선정하였다. 또한, 레이저의 발진속도가 최소 2kHz이기 때문에 초음파 진동이 이보다 빠른 초음파 영역(20kHz 이상)으로 선정 하였다.

2.2 초음파 진동 구조물의 기본 개념

이상의 설계 요구 조건을 만족하는 초음파 진동을 구현하기 위해서는 실제 PZT의 구동으로는 초음파 영역에서 진폭 감소 현상이 발생하기 때문에 공진영역에서 작동해야 할 필요가 있다. 그러나 일반적으로 구조물이 공진이 발생할 때에는 진동 방향성이 저하되기 때문에 공진 시 진동의 방향성을 갖게 할 수 있는 가이드가 필요하다. 이러한 설계 개념을 바탕으로 Fig. 1과 같이 공진을 할 수 있는 진동 구조물을 BLT

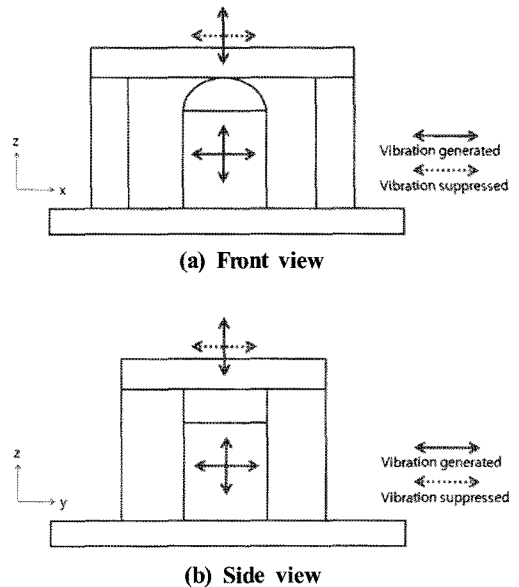


Fig. 1 Conceptual design of ultrasonic vibration structure

진동자를 사용하기로 하였다.

BLT는 (주)듀라스닉의 IBL 4535D-28HB로서, 28kHz의 공진주파수를 갖고 있으며, 이때 끝단에서의 진폭은 축방향으로 10 μm 이고 수평방향으로는 4 μm 이다. 수평방향의 진폭을 감소시키기 위해서 BLT에 판스프링 형태의 가이드를 결합하여 예압을 주는 구조로 설계하였으며, 두 구조물 사이의 수평방향 상대운동을 용이 하게 하기위해서 선 접촉을 하도록 설계하였다. Fig. 2와 같이 중앙에 BLT 공진 구조물을 장착하고 BLT 상단에 반원기둥 형상의 구조물을 제작하여 판스프링 가이드와 선 접촉을 할 수 있게 하였으며, 판스프링 가이드 좌우에 지지 구조물을 설치하여 예압을 줄 수 있도록 제작하였다.

2.3 초음파 진동 구조물의 성능 시험

Fig. 2과 같이 제작된 초음파 진동 구조물을 정반에 장착하고 공진주파수와 진폭을 측정하기 위해서 비접촉 방식의 정전 용량 센서를 이용해서 측정 하였다. Table 1의 측정 결과와 같이 29.585kHz에서 최대 진폭은 3 μm 로 측정되었고 수평방향 진폭은 센서의 노이즈 신호만 측정되었는데 센서 노이즈가 100nm인 것을 고려할 때 수평방향 진폭은 100nm 이하로 판단하였다. 그리고 BLT 자체의 공진 주파수와 비교 했을 때 전체 진동 구조의 공진 주파수와 약 3kHz 정도

차이가 있는 것은 판스프링 가이드와 선접촉에 의한 것으로 판단된다. 이로서 요구 되는 설계 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

3. 실험

제작된 초음파 진동 지그를 Nano second laser system에 장착 할 때, 일반적인 2축 스테이지에 장착하면 스테이지의 낮은 강성으로 인해서 초음파 구동시 진동 전파 때문에 시편의 진폭이 감소하는 현상이 발생하였다. 그러므로 지그를 정반에 고정하였고 직선 가공을 하기 위해서 레이저 스캐너를 이용하였다. 레이저는 IPG사의 20W pulsed fiber laser를 사용하였고, 스캐너는 ScanLab사의 SCANGINE을 사용하였다. 그리고 LINOS사의 F-theta lens를 이용하여 작업거리 256mm의 초점크기 30 μ m 조건에서 실험을 수행하였다.

레이저 가공 조건은 Table 2와 같이 선정 하였는데, 각

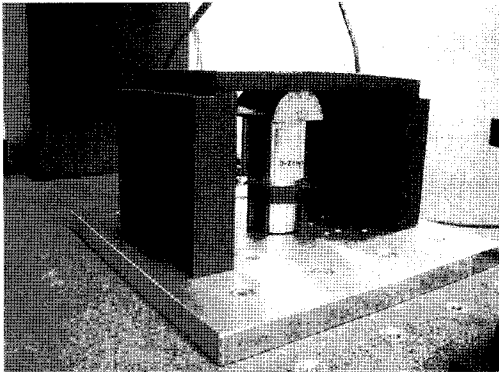


Fig. 2 Prototype of ultrasonic vibration structure

Table 1 Test result of ultrasonic vibration structure

Resonant frequency [kHz]	29.585
Vertical amplitude [μ m]	3.0
Lateral amplitude [μ m]	< 0.1

Table 2 Laser set-up condition

Pulse energy [mJ]	0.3, 0.5, 1.0
Pulse width [nm]	200
Spot size [μ m]	25
Repetition rate [kHz]	5, 10
Scan rate [mm/s]	25, 50

조건에 따른 영향을 관찰하기 위해서 레이저의 발전속도는 5kHz, 10kHz로 선정 하였고 출력은 0.3, 0.5, 1.0mJ에서 실험 하였다. 레이저 가공을 위한 시편은 KS규격에서 STC-3로 구분되는 탄소공구강 재질의 300 μ m 판재를 10mm \times 20mm의 크기로 절단해 사용하였으며, 초음파 진동 구조물의 상판에 접촉시켜서 고정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 Pulse energy 1mJ, Scan rate 25mm/s조건에서의 가공 형상을 전자주사현미경(SEM)으로 촬영한 사진이다. Fig. 3의 (a)에서 보는 바와 같이, 300배 이미지에서 가공 형상은 동일하다. 하지만 20,000배의 고배율로 확대한 그림에서는 초음파 진동을 가했을 때와 가하지 않았을 때의 표면 조도의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 초음파를 가하면 표면 입자의 크기가 일반 레이저 가공 때보다 작아지고 균일해 지는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 전체 가공표면에서 동일하게 나타난다.

일반적으로 나노초 레이저에 의한 Ablation이 발생하면 순간적으로 표면입자가 증발온도까지 증가하고 Plasma에 의한 Shock wave의 형성으로 나노미터급의 입자 형태로 박리가 일어난다. 그러나 시편 상부에 생기는 Plasma에 의해서 표면에 광이온화 현상에 의해서 2차 가열이 일어나고 박리된 액상의 입자가 표면에 재차 부착되어서 Re-cast layer를 형성한다.⁽⁸⁾ 이때 표면에 부착된 수 ~ 수십nm의 입자는 순간적으로 높은 열을 갖고 있기 때문에 액상으로 존재하고, 고온 액상의 나노 입자는 표면적을 작게 하여 서로 에너지 안정화 상태를 유지하려는 성질에 의해서 서로 결합을 하게 되어 표면에 더 큰 크기의 입자가 생기게 된다. 이러한 현상으로 인해 가공 표면에는 결합으로 성장한 수백nm ~ 수 μ m 크기의 입자가 형성되고 표면 거칠기가 증가하게 된다. 이때, 시편에 초음파 진동을 가하면 재료 표면 부근의 공기 유동의 증가로 인해 열전달이 증가하게 되어 고온의 나노 입자가 서로 결합을 하기 전 응고되어 결합이 이루어지지 않게 된다. 결국, 나노 입자 결합의 저하로 인해 Ablation으로 생기는 나노미터 입자의 크기가 전체적으로 감소함에 따라 가공 시편의 표면 조도는 향상된다.⁽⁹⁾ 그러므로 Fig. 3의 (b)에서 보는 것처럼 초음파 진동이 가해진 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 크기가 보다 작은 나노 입자가 표면에 분포하게 된다.

나노 입자의 성장과 가장 큰 연관성이 있는 공정 변수는 Pulse energy이기 때문에 이들의 상관관계를 분석하기 위하

여 Fig. 4와 같이 Pulse energy만 다르게 한 조건에서 실험을 수행하였다. Fig. 4의 (a)와 같이 레이저 출력이 높은 경우, 초음파 진동의 효과가 두드러지지 않는 것을 확인할 수 있다. 즉, Pulse energy가 높은 조건에선 용융 상태에 있는 나노 입자 간의 결합이 저하시켜 표면 조도를 향상시키는 효과가 크지 않았다.

일반적으로 Pulse energy가 높은 경우는 낮은 경우에 비

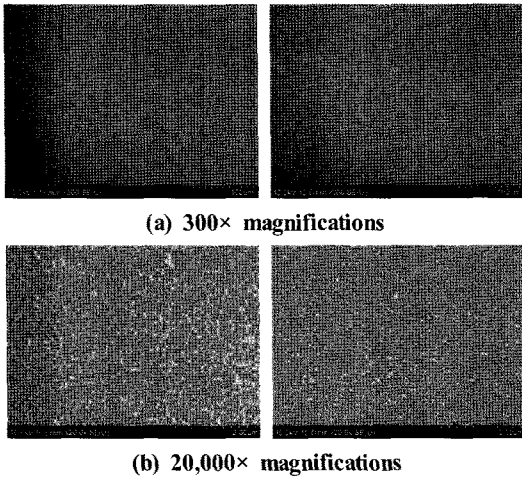


Fig. 3 SEM images at the machined surface without and with vibration (repetition rate = 5kHz; scan rate = 25mm/s; pulse energy = 1.0mJ)

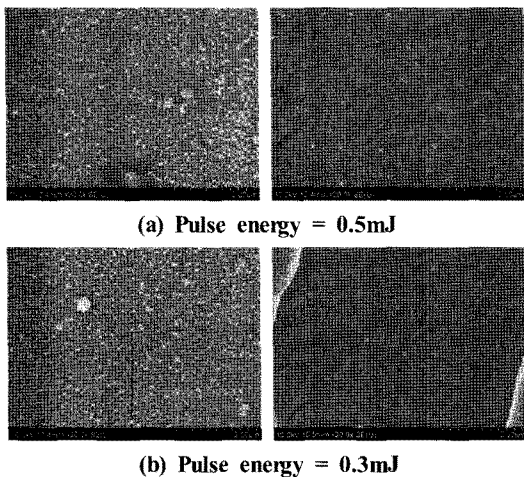


Fig. 4 SEM images of 20,000× magnifications at the machined surface without and with vibration (repetition rate = 10kHz; scan rate = 50mm/s)

해 Plasma가 더 강하게 형성되어, 개별 나노 입자들은 보다 높은 온도를 갖게 된다. 따라서 나노 입자가 냉각되는데 필요한 시간이 길어진 만큼, 입자 간에 재결합 할 수 있는 시간도 늘어나 입자 간의 재결합율이 증가하게 되고, 궁극적으로는 초음파 진동을 가해주었음에도 불구하고 표면 조도의 향상이 거의 나타나지 않게 된다.

그러나 Fig. 4의 (b)와 같이 출력이 낮을 때는 Plasma에 의해 발생하는 박리 현상이 약하기 때문에, 가공 표면에서 형성되는 나노 입자의 절대량이 감소하게 된다. 그에 따라 나노 입자가 재결합되거나 표면에 남아 있을 확률이 줄어들어 표면에 잔류하는 단위 면적당 입자의 수도 줄어든다. 그러므로 상대적으로 높은 Pulse energy로 가공할 때는 그에 알맞게 열전달을 향상시켜 주어야 한다. 결론적으로, Pulse energy가 큰 조건일수록 초음파의 진폭과 주파수를 증가해야 한다.

5. 결론

나노초 레이저 가공에 있어서 가공면의 표면조도 향상을 위해서 레이저 주사 중인 시편에 초음파 진동을 가하는 가공법을 제안하였다. 실험을 통하여 확인한 결과, 본 초음파 응용 가공법은 나노초 레이저 가공에 있어서 나노 입자 형성 억제 및 표면 조도 향상에 효과가 있었다. SEM으로 촬영하여 미세 표면을 관찰한 결과 초음파 진동을 가한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 입자의 크기도 작고, 단위 면적당 입자의 수도 작은 것을 알 수 있었다.

이 같은 현상은 초음파 진동이 가공 표면의 열집중을 분산시키기 때문에 Plasma에 의해 발생하는 Shock wave를 감소시켜 Re-cast layer가 잘 형성되지 못하고, 또한 대류에 의한 열전달이 가공 표면에서 순간적으로 증대되기 때문에 용융 상태의 나노 입자를 빠르게 응고시켜서 발생한다.

특히, 레이저 가공 중 Plasma 형성에서 가장 절대적인 영향을 미치는 인자는 레이저의 Pulse energy이기 때문에 다양한 출력 조건에 따른 가공 표면의 상태를 비교해 보았다. 그 결과, 레이저의 출력이 높을수록 초음파 진동을 가해준 효과가 저하되었고, 이를 극복하기 위해선 보다 큰 진폭과 보다 높은 진동수를 만족하는 초음파 진동이 요구될 것이다.

후기

본 연구는 지식경제부 주관의 “나노기반 초정밀/초미세

Hybrid 가공시스템 개발” 연구 기획 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

참 고 문 헌

- (1) Ahn, D. G., Jung, K. W., Yoo, Y. T., and Shin, H. J., 2007, “Preliminary Study on Micro-Drilling of Al 1050 Using the Pulsed Nd:YAG Laser,” *Proceedings of Korean Society of Mach. Tool. Eng. Spring Conference 2007*, Vol. 10, No. 1, pp. 339~345.
- (2) Azarhoushang, B. and Akbari, J., 2008, “Ultrasonic-Assisted Drilling of Inconel 738-LC,” *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, Vol. 47, pp. 1027~1033.
- (3) Neugebauer, R. and Stoll, A., 2004, “Ultrasonic Application in Drilling,” *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 192~193, pp. 306~311.
- (4) Zhang, D., Feng, X., Wang, L., and D. Chen, 1994, “Study on the Drill Skidding Motioning Ultrasonic Vibration Microdrilling,” *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, Vol. 34, No. 6, pp. 847~857.
- (5) Suzuki, H. and Yagishita, H., 2005, “Burrless Drilling by Vibration Cutting Applying Ultrasonic Torsional Mode Vibration,” *Proceedings of the 33rd North American Manuf. Research Conference*, New York.
- (6) Guo, Z. N., Lee, T. C., Yue, T. M., and Lee, W. S., 2003, “A Study of Ultrasonic-Added Wire Electrical Discharge Machining,” *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 139, pp. 226~228.
- (7) Kuo, K. L., 2007, “Experimental Investigation of Ultrasonic Vibration-Assisted Tapping,” *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 192~193, pp. 306~311.
- (8) Jackson, M. J., 2007, *Micro and Nanomanufacturing*, Springer, New York.
- (9) Kim, H. J. and Jeong, J. H., 2006, “Numerical Analysis of Experimental Observations for Heat Transfer Augmentation by Ultrasonic Vibration,” *Heat Transfer Eng.*, Vol. 27, No. 2, pp. 14~22.