

# 나노초 펄스 레이저를 이용한 미세 구멍 가공시 입구 테이퍼 제거 Taper Removal of Hole Entrance in Micro Drilling Using a Nanosecond Pulsed Laser

\*김산하<sup>1</sup>, #정도관<sup>1</sup>, 오영탁<sup>2</sup>, 주종남<sup>1</sup>

\*San H. Kim<sup>1</sup>, #D. K. Chung(dogani04@snu.ac.kr)<sup>1</sup>, Y. T. Oh<sup>2</sup>, C. N. Chu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 기계항공공학부, <sup>2</sup> 안산공과대학 기계과

Key words : Micro drilling, Laser drilling, Nanosecond pulsed laser

## 1. 서론

최근 광전자공학 분야, 반도체 제조 분야 및 자동차 엔진 분야 등 다양한 산업 분야에서 세장비가 높은 미세 구멍에 대한 수요가 증가하고 있다. 미세 구멍, 특히 강도가 강한 금속 재료들에 대해서는 일반적인 절삭가공이 불가능하기 때문에 여러 가지 특수가공법을 이용하여 가공한다.<sup>1</sup> 이러한 특수가공법 중 비접촉 가공 방식으로써 직경 40 μm 이상의 형상 정밀도가 높은 구멍을 가공할 수 있는 방전가공(electrical discharge machining)이 널리 알려져 있지만, 가공 속도가 낮고 전극 마모가 발생한다는 문제점들이 있다.<sup>2</sup> 이에 반해 레이저를 이용한 미세 구멍의 가공법은 비접촉 방법으로 수 μm 정도의 작은 직경크기의 천공이 가능하고 거의 모든 재료를 가공할 수 있어 미세 구멍 가공법으로 적절하다. 하지만 레이저 드릴링은 오랜 기간 동안 두 가지 원인으로 인하여 아직까지 근본적인 해결책으로서의 한계를 갖고 있다. 높은 에너지의 펄스를 사용한 레이저의 경우 빠른 가공속도로 깊은 미세 구멍을 가공할 수 있지만 주변 넓은 영역에 열적 손상을 야기하기 때문에 정밀한 미세 구멍을 얻기 힘들다. 최근 활발하게 연구되고 있는 피코 또는 펨토초 펄스 레이저(pico/femto second pulsed laser)는 이러한 열적 손상을 극소화할 수 있어 주목 받고 있지만, 가공 속도가 낮고 장비가 고가이며, 가공 깊이에 한계가 있다.<sup>3</sup>

이러한 점에서 미세 구멍 가공에 있어 나노초 펄스 레이저(nanosecond pulsed laser)를 이용한 접근은 열영향부(heat affected zone)를 최소화하면서도 효과적인 가공법이 될 수 있다. Reiner Witte<sup>4</sup> 등은 나노초 펄스 레이저를 이용한 트리패닝(trepanning) 방식으로 구멍의 테이퍼를 줄여 직진성이 우수한 직경 100 μm, 깊이 1 mm의 미세 구멍을 20 초만에 가공할 수 있음을 보였다. 하지만 트리패닝 방식 등의 이동 펄스방식은 집속빔을 고속으로 회전시킬 수 있는 광학기구를 필요로 하며, 구멍의 크기가 집속빔의 점크기(spot size)보다 커진다는 단점이 있다. 반면, 한 위치에 펄스빔을 수차례 반복하여 조사시키는 반복펄스천공(percussion drilling) 방식은 가장 간단한 레이저 가공법으로써 작은 직경으로 깊은 구멍을 가공할 수 있지만, 입출구 직경 차이가 큰 테이퍼가 형성된다. 본 연구에서는 cover plate를 사용하여 미세 구멍의 입구에 발생하는 테이퍼를 제거하여 직진성이 우수하고 세장비가 높은 미세 구멍을 가공하고, 입구 정밀도를 향상시킬 수 있는 방안을 제안한다.

## 2. 실험 방법

Fig 1(a)와 같이 레이저 빔의 반복펄스방식에 의해 가공된 구멍의 형상은 펄스 빔의 품질(beam quality,  $M^2$ )에 크게 의존하며, 빔의 중심에서 가장 큰 레이저 강도(laser intensity)를 갖는 가우시안(Gaussian) 분포의 특성상 Fig. 1(a)와 같이 가공 깊이가 방향으로 점점 폭이 좁아지는 경사진 단면 구조를 갖고, 특히 구멍 상단에 큰 테이퍼가 형성된다. 또한 가공 도중 천공된 깊이 내부의 용융금속이 증기압에 의하여 입구 측으로 계속 배출되면서 가공 후 입구 표면에 30 ~ 50 μm 정도의 높은 재응고층(recast layer)이 형성된다. 따라서 Fig. 1(b)와 같이 가공하고자 하는 시편

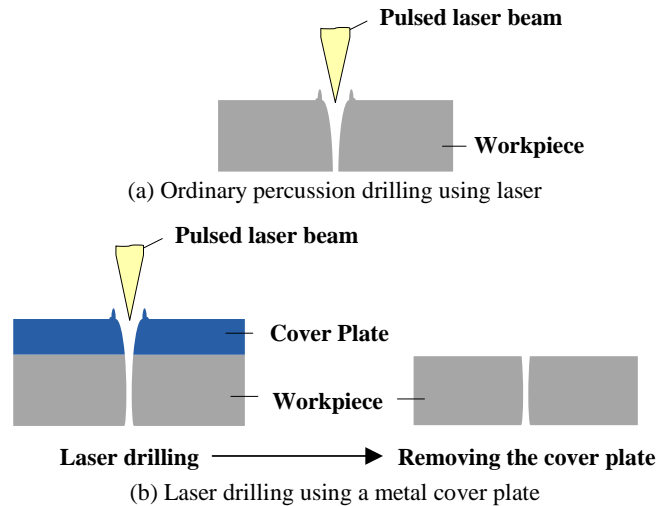


Fig. 1 Percussion drilling using nanosecond pulsed laser

위에 cover plate를 희생층으로써 사용하면, 구멍 입구의 테이퍼와 재응고층을 효과적으로 제거하고 보다 작은 크기로 직진성이 우수한 미세 구멍을 가공할 수 있다.

Fig. 2는 본 실험에서 이용된 레이저 가공 시스템의 개략도를 나타낸다. 가공 재료는 500 μm 두께의 스테인리스강(STS 304)이며, 15 × 15 mm<sup>2</sup> 크기로 절단된 가공물 위에 같은 크기의 금속 cover plate를 위치시켜 지그 안에 충분한 압력으로 고정된 후, 펄스 빔을 구멍이 관통될 때까지 한 점에 반복적으로 조사하여 가공하였다. Cover plate로는 100, 200 μm 두께의 가공물과 같은 종류의 금속인 스테인리스강과 200 μm 두께의 구리가 사용되었다. 가공에 이용된 레이저는 IPG Photonics사의 Yb-doped fiber laser로 주요 사양은 Table 1과 같다.

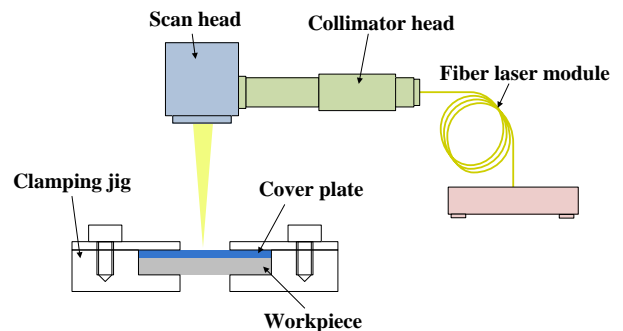
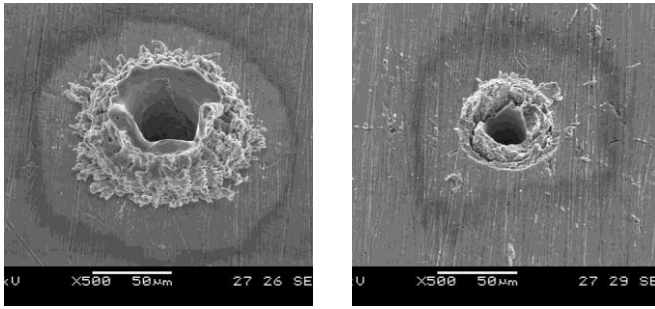


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system

Table 1 Specification of the laser system

Yb-doped fiber laser (IPG Photonics Corp.)	
Wave length	1064 nm
Pulse duration	100 ns
Maximum average power	20 W
Repetition rate	20 ~ 80 kHz
Beam quality	$M^2 < 1.5$



(a) Without cover plate (b) Using STS cover plate

Fig. 3 Hole entrance of the micro holes fabricated by laser drilling

### 3. 실험 결과

Fig. 3 은 cover plate 없이 가공한 구멍과 100  $\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 STS plate를 가공물 위에 덮어 가공한 구멍의 입구를 비교한 SEM 사진이다. 일반 레이저 드릴링의 경우 입구 직경이 약 50  $\mu\text{m}$ 로 집속빔의 점크기와 일치하며, 직경 약 100  $\mu\text{m}$ 의 주변 영역에 재용고층이 두텁게 형성된다. 출구의 직경은 약 20  $\mu\text{m}$ 로 미세 구멍은 깊이가 깊어질수록 폭이 좁아지는 테이퍼가 형성된다. 따라서 가공되는 금속 위에 cover plate를 위치시킨 다음 레이저를 조사하여 가공한 후 plate를 떼어내면 입출구 직경이 20 ~ 25  $\mu\text{m}$ , 세장비(aspect ratio)가 20 이상인 우수한 직진성의 미세 구멍을 얻을 수 있다(Fig. 4). 하지만 cover plate를 떼어내면 입구 주변 약 50  $\mu\text{m}$  직경의 영역에 재용고층 대신 파손된 형상이 형성된 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 5와 같이 가공 도중 입구로 배출되지 못한 용융금속이 구멍의 내부에 응고하여 cover plate와 가공물을 결합시키는 용접 현상이 발생하기 때문이다. 이러한 재료 사이의 용접 현상은 결합 부위가 미세 영역이므로 결합력이 약해 초음파 세척시 쉽게 파손되지만 구멍의 형상 정밀도를 해치는 원인이 된다.

용접 현상으로 인한 입구 주변의 재료 파손 영역을 줄이기 위해서는 cover plate의 두께  $d$ 를 늘리거나 집속빔의 펄스 에너지를 감소시켜 구멍 내부에서 용융되는 금속의 층(Molten layer)을 얇게 하는 방법이 이용될 수 있다. 이러한 방법은 파손 영역을 줄여 입구 형상을 개선시킬 수 있지만, 출구의 크기 역시 감소하게 되며 가공 시간이 증가한다는 단점이 있다. 입구 형상을 개선시키는 또 다른 방법으로 스테인리스 강 대신 가공물과 다른 종류의 금속인 구리 cover plate가 사용될 수 있다. Fig. 6은 200  $\mu\text{m}$  두께의 스테인리스 강과 구리를 cover plate로 사용하여 30초 동안 가공한 구멍의 입구를 나타낸다. 구리를 사용할 경우 스테인리스 강을 사용했을 때보다 입구 주변의 파손 영역이 개선된 것을 확인할 수 있다.

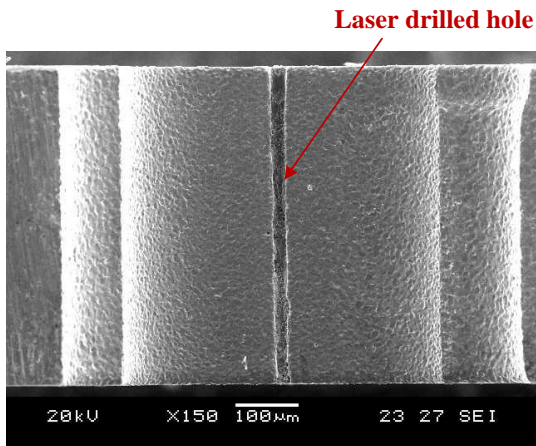


Fig. 4 Cross section of the laser drilled hole using a STS cover plate

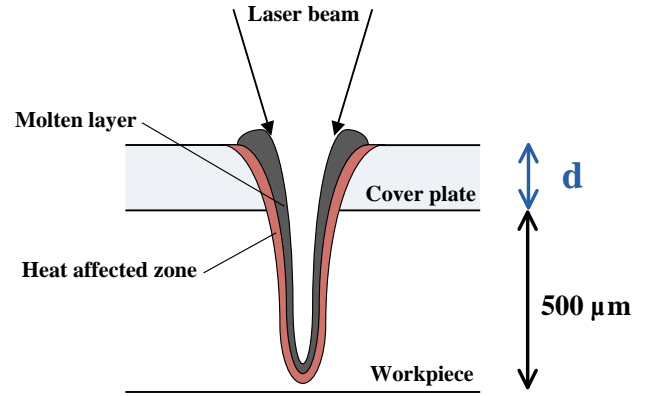
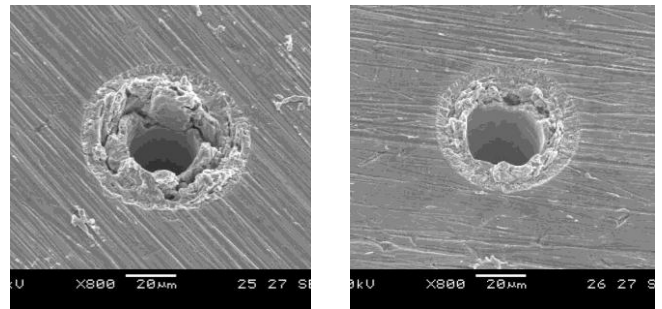


Fig. 5 Formation of molten layer during the drilling process



(a) Using STS cover plate (b) Using Cu cover plate

Fig. 6 Hole entrance of the micro holes fabricated by laser drilling using the cover plate of different materials

### 4. 결론

본 연구에서는 나노초 펄스 레이저를 이용한 미세 구멍 가공시 발생하는 입구 테이퍼를 제거하기 위해 금속 cover plate를 사용하였다. Cover plate를 가공물 위에 희생층으로써 사용하면, 입구에 형성되는 재용고층과 테이퍼 형상을 효과적으로 제거할 수 있어 약 20 ~ 25  $\mu\text{m}$ 의 입출구 직경과 20 이상의 세장비를 갖는 미세 구멍을 얻을 수 있다. 가공시 cover plate와 가공물 사이의 용접 현상으로 인한 파손 영역은 cover plate의 두께를 늘리거나 집속빔의 펄스 에너지를 감소시키는 방법, 또는 구리 cover plate를 사용하여 효과적으로 개선시킬 수 있다.

### 후기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0000441).

### 참고문헌

1. Kim, J. H., Kim, B. H., Ryu, S. H. and Chu, C. N., "Micro-Hole Machining Using MEDM According to Machining Depth," Journal of the KSPE, Vol. 20, No.7, pp. 227 - 232, 2003.
2. Pham, D. T., Dimov, S. S., Bigot, S., Inanov, A. and Popov, K., "Micro-EDM - Recent Development and Research Issues," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, No. 1 - 3, pp. 50 - 57, 2004.
3. Kim, S. H., Chung, D. K., Kim, B. H., Oh, K. H., Chung, S. H. and Chu, C. N., "Micromachining Using Hybrid of Laser Beam and Electrical Discharge Machining," Journal of the KSPE, Vol. 26, No.10, pp. 108 - 115, 2009.
4. Witte R., Moser T., Liebers R. and Holtz R., "Laser micro-drilling with nanoseconds - parametrical influences and results," Proc. of SPIE, Vol.7022, 702208, 2008.