# Pulsed Nd:YAG 레이저를 이용한 Al 1050 재료 천공시 노즐 핀 홀 직경과 펄스 투사 시간이 천공 품질에 미치는 영향

# The Effect of Nozzle Diameters and Pulse duration on the Hole Quality for the case of Drilling of Al 1050 Using the Pulsed Nd:YAG Laser

#안동규[1](smart@chosun.ac.kr), *정광운[2], 유영태[3], 신호준[4]
#D. G. Ahn[1], *K. W. Jung[2], Y. T. Yoo[3], H. J. Shin[4]
[1] 조선대학교 기계공학과, [2]조선대학교 일반대학원 기계공학과, [3]조선대학교 메카트로닉스공학과,
[4]조선대학교 일반대학원 메카트로닉스공학과

Key words : Pulsed Nd:YAG laser, Nozzle diameters, Pulse Duration, Hole diameter, Al 1050 sheet

## 1. 서론

레이저 가공 기술은 항공기 터빈 블레이드의 냉각용 구멍, 마이크로 광인쇄 회로 기판, 소형 전자제품의 외장용 유리 케이스 등 다양한 부품의 미세 구멍 가공 분야에서 산업적 활용도가 높아지고 있다[1]. 펄스형 레이저를 이용한 재료 천공시 고려하여야 할 주요 품질 척도로는 천공된 구멍 직경, 열영향부의 크기, 천공된 구멍 표면의 형상 등을 들 수가 있다. 이들 주요 품질 척도에 영향을 미치는 레이저 변수로는 레이저 파장, 레이저 출력, 펄스 투사 시간, 공간 모드 형태 등이 있으며, 가공 변수로는 취입가스 종류와 압력, 초점거리, 펄스 반복 횟수 등이 있다[2]. 펄스형 레이저의 가공 공정으로는 짧은 조사 시간 동안에 고첨두 출력을 발생시켜 레이저 빔이 재료에 집속되어 순간적으로 재료는 고온으로 되며, 용융과 증발을 거친 후, 펄스 반속 횟수로 인하여 제거된 재료의 홈 안에서 다중 반사 효과로부터 레이저 빔의 흡수율이 증가하여 천공된 구멍을 얻는다. 또 하나의 중요한 변수로는 재료의 열적 성질을 고려하여야만 한다. 본 연구에서 사용되어지는 Al 1050(순도 99.9%) 재료는 레이저 빔의 높은 반사율과 높은 열전도율 그리고, 높은 용융점에서 알루미늄 산화물을 형성하는 자기소화성 산화반응 등의 특성을 가지고 있다. 이러한 결점으로 인하여 Al 재료를 가공하기 위해서는 공정 변수의 조합으로 이들 문제점을 해결해야만 한다. 본 연구에서는 천공 품질을 평가 할 수 있는 척도로써 천공된 구멍 직경과 열영향부, 천공된 구멍 표면 형상 등으로 결정하였다. 선행연구 예로써는 Ng and Li 등은 레이저 첨두 출력과 펄스 투사 시간이 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였다. 이 논문에서는 첨두 출력과 펄스 투사 시간이 클수록 천공된 구멍 직경이 더 커진다고 보고하였다[3]. Khan 등은 노즐 핀 홀 직경이 천공 품질에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였으며, 핀 홀 직경이 작을수록 천공된 구멍 직경이 작고, 구멍의 입구부 표면에서의 스패터 발생이 적게 나타났으며, 입구부 표면 반경쪽으로 전단 응력이 커지면서 크레이터 높이가 작아진다고 보고하였다[4].

본 논문에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 두께의 Al 1050 박판 천공에서 노즐 핀 홀 직경 및 펄스 투사 시간이 천공된 구멍 품질에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

## 2. 실험 및 분석방법

본 연구에서는 Fig.1 과 같은 최대출력 150 W 의 펄스형 Nd:YAG 레이저와 가스분사 장치가 장착된 3자유도 레이저 천공 시스템을 이용하였다. 레이저 파장은 1,064 nm 이고 레이저 빔 직경은 0.4 mm 이며, 레이저 빔 공간모드는 $TEM_{00}$ 모드를 사용하였다. 레이저 펄스 생성을 위한 입력 변수는 Fig.1 의 레이저 제어기에서 제어 된다. 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수에 대한 레이저 출력값은 독일 COHERENT 사의 PM 150 출력 측정기 (POWER METER) 로 측정하였다. 천공용 취입 가스는 불활성 기체인 헬륨(He) 가스를 사용하였다. 또한, 레이저 가공을 하는 동안 각 조건별 가스 압력은 0.05 MPa 로 선정하였다. 미세 천공을 위한 레이저 이동 제어는 Fig.1 의 PC-NC 기반의 마이크로 모션 제어기를 통하여 제어된다. 레이저 초점거리는 천공 노즐의 첨단과 재료의 상면 사이 거리로 산출하였고, 시편의 두께는 0.2 mm 였다.

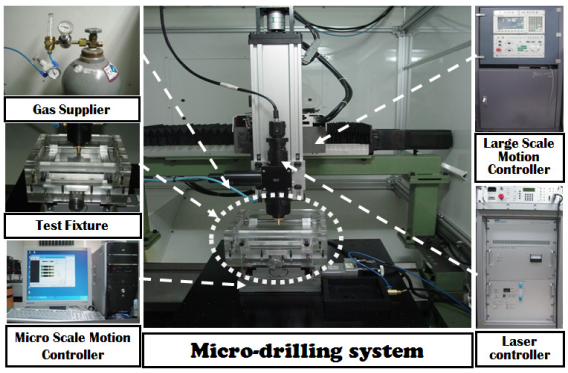


Fig.1 Experimental set-up

본 실험에 사용된 공정변수들은 노즐 핀 홀 직경 ($N_d$), 펄스 투사 시간 ($P_d$), 펄스 반복 횟수 ($P_f$) 이다. 실험조건은 Table 1 과 같다.

Table 1 Experimental conditions

| $P_v$ (V) | $P_d$ (ms) | $P_f$ (Hz) | $N_d$ (mm) |
|---|---|---|---|
| 400 | 0.5 | 4, 8, 12 | 2.2, 1.0, 0.7, 0.5 |
| | 1.0 | | |
| | 2.0 | | |

본 연구에서는 실험 조건별 천공 여부와 천공 영역에 대한 직경 범위만 측정하였다. 그리고 천공 영역에서의 열영향부 크기를 측정하였다. 본 천공 실험에서는 실험 조건에 따라 천공 실험을 한 후, 광학 현미경으로 천공 여부를 확인하고 천공 조건에 대해서만 천공된 구멍 직경을 측정하였다. 천공된 구멍 직경의 크기는 다섯 번의 반복적인 실험을 통하여 평균값으로 산출하였다. 열영향부의 크기는 전체 열영향부에서 천공된 구멍 직경을 뺀 후 2 로 나눈 값이다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 Table 1 과 같은 실험 조건에 대하여 각 노즐 핀 홀 직경 및 펄스 투사 시간별로 펄스 반복 횟수를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 본 실험 결과에서는 Fig. 2 (a) 와 같이 노즐 핀 홀 직경이 1.0 과 2.2 mm 일 경우, 펄스 투사 시간이 감소할수록 구멍의 입구부 직경이 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 펄스 투사 시간이 0.5 ms 이고 펄스 반복 속도가 4 Hz 인 경우 노즐 핀 홀 직경에 관계없이 판재가 천공이 되지 않음을 알 수 있었다. 노즐 핀 홀 직경이 1.0 와 2.2 mm 인 경우에 천공 직경이 0.25-0.44 mm 범위 내에서 형성됨을 알 수 있었다. 그리고 동일 펄스 투사 시간 조건에서 펄스 반복 횟수 증가시 구멍 입구부 직경이 증가됨을 알 수 있었다. 또한 노즐 핀 홀 직경이 2.2 mm 인 경우 1.0 mm 일 때보다 구멍 입구부 직경이 작다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 노즐 핀 홀 직경이 작을수록 노즐 출구부 압력이 크게 상승하여 용융된 재료를 빨리 분출 시킴으로써 구멍 직경이

크게 될 것으로 사료된다. 또한 Fig. 2 (b) 와 같이 동일 펄스 반복 횟수에서 노즐 핀 홀 직경이 0.5, 0.7 mm 경우가 1.0, 2.2 mm 인 경우보다 구멍 입구부 직경이 더 크게 나타났다. 그리고 노즐 핀 홀 직경이 0.5, 0.7 mm 경우에는 펄스 반복 횟수가 4, 8 Hz 일 때, 천공이 불가능 하였다. 이 현상은 노즐 핀 홀 직경이 0.7 mm 이하일 경우에는 레이저 빔이 노즐을 지나면서 미세한 회절이 일어나 레이저 출력값이 감소하기 때문으로 사료된다.

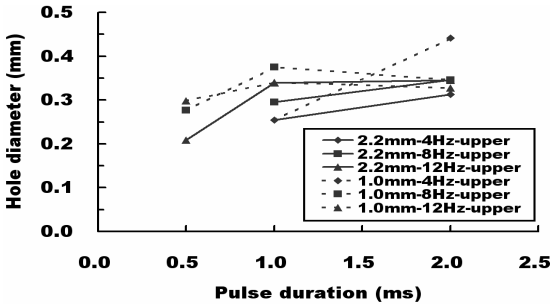


Fig. 2 (a) The influence of the pulse duration on the hole diameter

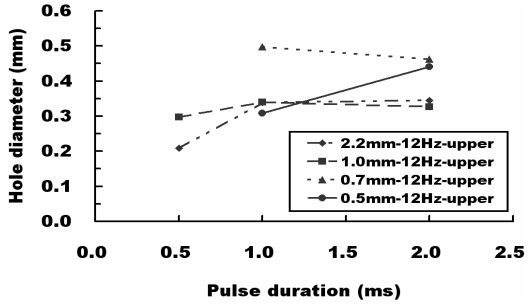


Fig. 2 (b) The influence of the nozzle diameter on the hole diameter

Fig. 3 은 노즐 핀 홀 직경에 따라 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수를 변화시켜 열영향부 크기를 측정한 결과이다. 본 실험에서 노즐 핀 홀 직경이 0.5-1.0 mm 일 경우 열영향부 크기는 구멍 입구부가 0.05-0.12 mm 범위이며, 구멍 출구부에서는 0.10-0.15 mm 범위를 나타내었다. 그러나 노즐 핀 홀 직경이 2.2 mm 일 경우에는 열영향부 크기가 구멍 입구부에서 0.17-0.18 mm 정도이며, 출구부에서 0.25-0.27 mm 범위를 형성함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 천공된 구멍 입구부 열영향부 크기가 출구부 열영향부 크기보다 더 적게 형성됨을 알 수 있었고, 노즐 핀 홀 직경이 2.2 mm 일 경우에 열영향부 크기가 가장 크게 형성됨을 알 수 있었다.

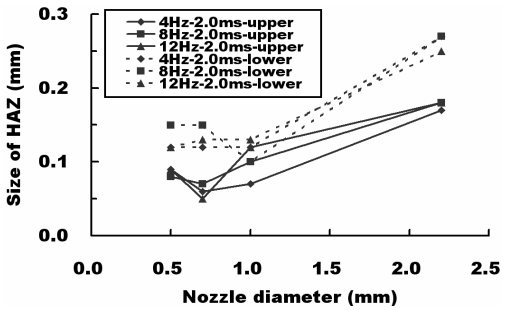


Fig. 3 The influence of process parameters on the size of HAZ

Fig. 4, 5 은 실험 조건별 시편의 천공 상태를 나타낸다. Fig. 4를 고찰한 결과 펄스 투사 시간 및 펄스 반속 횟수가 각각 1.0 ms 및 8 Hz 일때, 노즐 핀 홀 직경이 1.0 mm 일 경우가 노즐 핀 홀 직경 2.2 mm 보다 크레이터와 열영향부가 현저히 적게 형성되는 양호한 품질의 구멍이 생성됨을 알 수 있었다. 또한 펄스 투사 시간, 펄스 반속 횟수 및 노즐 핀 홀 직경이 각각 1.0 ms, 8 Hz 및 0.7 mm 일 때 천공이 불가능함을 알 수 있었다. Fig. 5 와 같이 펄스 투사 시간 및 펄스 반속 횟수가 각각 2.0 ms 및 8 Hz 에서 천공 품질이 가장 양호하였다. 또한 노즐 핀 홀 직경이 1.0 mm 인 경우에 구멍 직경과 열영향부 크기가 가장 작으며, 구멍 입구부 표면의 형상이 양호하고 주위 표면에 스패터가 거의 생성되지 않는 우수한 품질의 천공품을 제작할 수 있음을 알 수 있었다.

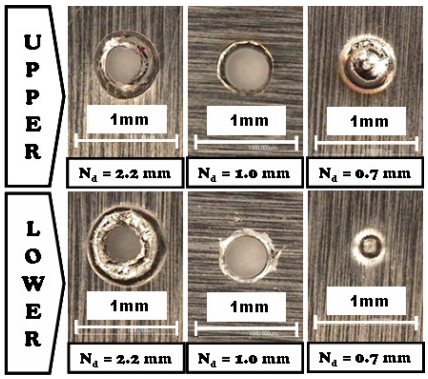


Fig. 4 Formation of micro-holes ($P_d$ = 1.0 ms, $P_f$ = 8 Hz)

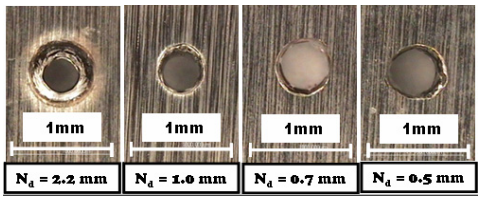


Fig. 5 Formation of micro-holes at the entrance surface ($P_d$ = 2.0 ms, $P_f$ = 8 Hz)

## 4. 결론

본 논문에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Al 1050 알루미늄 박판 천공에서 노즐 핀 홀 직경 및 펄스 투사 시간이 천공 품질에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Al 1050 재료 천공시 노즐 핀 홀 직경 및 펄스 투사 시간과 천공 품질의 상관 관계를 정량적으로 도출하였다.

둘째, 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Al 1050 재료 천공시 펄스 투사 시간이 증가할수록 구멍 직경과 열영향부 크기가 증가하는 것과 펄스 투사 시간이 작을 경우에는 충분한 펄스 반복 횟수를 부과하여야 시편의 천공이 가능함을 알 수가 있었다.

셋째, 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Al 1050 재료 천공시 노즐 핀 홀 직경 1.0 mm에서 천공 구멍 직경, 열영향부 크기 및 크래이터와 스패터가 최소화되는 우수한 품질의 구멍을 가공할 수 있음을 알 수 있었다.

## 후기

본 연구는 산업자원부 지정 지역혁신센터(RIC) 조선대학교 레이저응용 신기술개발 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

1.Tunna, L., O'Neil, W., Khan, A. and Sutcliffe, C., "Analysis of Laser Micro Drilled holes through Aluminium for Micro-manufacturing Applications," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 43, pp. 937-950, 2005

2.김도훈, "레이저 가공학," 문경사, pp. 298-300

3. Ng, G.K.L. and Li, L., "Repeatability characteristics of laser percussion drilling of stainless-steel sheets," Optics and Lasers in Engineerig, Vol. 39, pp. 25-33, 2003

4. Khan, A.H., Celotto, S., Tunna, L., O'Neill, W. and Sutcliffe, C.J., "Influence of microsupersonic gas jets on nanosecond laser percussion drilling," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 45, pp. 709-718, 2007