



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2009년 2월

석사학위논문

Pulsed Nd:YAG 레이저를 이용한 초박판용
금속 재료의 미세 천공 기술 개발에 관한
연구

조선대학교 대학원

기계공학과

정 광 운

Pulsed Nd:YAG 레이저를 이용한 초박판용
금속 재료의 미세 천공 기술 개발에 관한
연구

Investigation into development of the micro drilling
technology for ultra-thin metallic sheet using
pulsed Nd:YAG laser

2009 년 2 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

정 광 운

Pulsed Nd:YAG 레이저를 이용한 초박판용
금속 재료의 미세 천공 기술 개발에 관한
연구

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.




2008 년 10 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

정 광 운

정광운의 석사학위 논문을 인준함.

위원장	조선대학교	교수	한	길	영	
위 원	조선대학교	교수	유	영	태	
위 원	조선대학교	교수	안	동	규	

2008 년 11 월 일

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
ABSTRACT	
제 1 장 서 론	1
1.1 연구동향 및 배경	1
1.2 연구목적	9
제 2 장 레이저 천공시편 및 실험방법	11
2.1 레이저 천공시편 및 파장별 흡수율	11
2.2 레이저 출력 측정	14
2.3 시편 고정형 지그 및 분사 노즐 설계	16
2.4 노즐 직경별 동압 측정	17
2.5 실험방법	18
2.5.1 레이저 천공 시스템	19

2.5.2 AI 재료 천공 실험	20
2.6 천공 품질 특성 및 평가 방법	23
제 3 장 실험 결과 및 고찰	26
3.1 초점거리 및 천공 가능 영역	26
3.2 다구찌 기법을 이용한 천공 품질 특성 분석	29
3.3 공정변수에 따른 천공 품질 특성 분석	33
3.3.1 천공된 구멍 직경	33
3.3.2 구멍 직경의 표준 편차	40
3.3.3 천공단면폭	41
3.3.4 시편 하부 용융물 두께	43
3.3.5 최대 테이퍼 각도	45
제 4 장 3차원 비정상 열전달 해석	47
4.1 3차원 유한요소 모델링	47
4.1.1 유한요소 지배방정식	47
4.1.2 펄스형 표면열원 모델링 도출	48
4.1.3 유한요소해석 방법 및 경계조건	51
4.2 최적 유한요소 모델링 도출	57

4.3 재료 내부의 열전달 특성 및 온도분포 고찰	59
제 5 장 결론 및 향후과제	66
REFERENCES	70
감사의 글	

LIST OF TABLES

Table 1	Experimental conditions of laser drilling	18
Table 2	Experimental conditions of preliminary experiment	20
Table 3	Process parameters and their levels for Taguchi's method ..	21
Table 4	Combination of experimental conditions according to $L_9(3^4)$ orthogonal array	22
Table 5	Experimental conditions of laser drilling experiments	22
Table 6	Results of preliminary drilling tests	27
Table 7	Results of drilled hole diameters for each experimental conditions	29
Table 8	Variation of dynamic pressure according to nozzle diameter ...	34
Table 9	Meshes of transient heat transfer analysis	52
Table 10	Coefficient of forced convection for different nozzle diameters	55

LIST OF FIGURES

Fig. 1 The effect of each peak power on entrance hole diameter at 1.5 ms of the pulse duration	2
Fig. 2 A typical morphology of the laser drilled hole; (a) incident side (b) effluent side	3
Fig. 3 Taper types of the laser drilled hole; (a) zero taper (b) negative taper (c) positive taper	4
Fig. 4 SEM images of entrance of the laser drilled hole; (a) nozzle diameter = 0.2 mm and no gas, (b) nozzle diameter = 0.2 mm, (c) nozzle diameter = 0.3 mm, (d) nozzle diameter = 0.5 mm (laser fluence = 328.5 J/cm ² , gas pressure of O ₂ = 8 bar)	5
Fig. 5 Relationship between process parameters and S/N ratio (Laser : CO ₂ , the material : PVC and the thickness : 0.2 mm)	6
Fig. 6 Specimen of laser drilling experiment (The material : Al 1050 and the thickness : 0.2 mm)	11
Fig. 7 Separation of the incident laser beam on the workpiece	12
Fig. 8 Absorptivity of Al 1050 according to each wavelength	13
Fig. 9 Principle of measurement methodology of laser power in the power meter	14
Fig. 10 Correlation between control parameters of laser and the laser power	15
Fig. 11 Test fixture for laser drilling experiment	16
Fig. 12 Design of ejection nozzle jig for laser drilling experiment	16
Fig. 13 Jig design and devices for the measurement of dynamic pressure according to nozzle diameters	17
Fig. 14 Experimental set-up	19

Fig. 15 Specimen and methodology for the drilling experiment 21

Fig. 16 Definition of the sectional width (Ψ) in the drilled section 24

Fig. 17 Definition of the dross height (ζ) in the drilled section 24

Fig. 18 Definition of the maximum taper angle (θ) in the drilled section ·
..... 25

Fig. 19 Variation of entrance formation of the drilled hole according to
preliminary experimental condition 28

Fig. 20 Variation of S/N ratio according to process parameters 31

Fig. 21 SEM images of formation of the drilled hole ($P_g = 0.02$ MPa, $Z_n =$
6.0 mm, $P = 72.5$ W) 32

Fig. 22 SEM images of formation of the drilled hole ($P_g = 0.00$ MPa, $Z_n =$
5.0 mm, $P = 72.5$ W) 32

Fig. 23 Effects of process parameters on hole formation 34

Fig. 24 Influence of pulse frequency and pulse duration on hole diameter
for different nozzle diameters 37

Fig. 25 Variation of the hole diameter according to nozzle diameter and
pulse duration 39

Fig. 26 Effects of process parameters on normalized deviation of hole
diameter (η) for different nozzle diameters 40

Fig. 27 Influence of process parameters on the formation of cross section
in the drilled hole 41

Fig. 28 Variation of sectional width (Ψ) according to nozzle diameters for
different pulse durations and frequencies 42

Fig. 29 Effects of nozzle diameter and pulse duration on the dross height
(ζ) for different pulse frequency 44

Fig. 30 Effects of process parameters on the maximum taper angle (θ)
for different pulse frequencies 45

Fig. 31 Laser intensity distribution of TEM₀₀ mode 48

Fig. 32 Subroutine programme to represent surface heat source model in
FE analysis 50

Fig. 33 Finite element meshes of transient heat transfer analysis 51

Fig. 34 Thermal properties of Al 1050 with temperature dependency ... 53

Fig. 35 Boundary conditions for transient heat transfer analysis 55

Fig. 36 Comparison of the results of experiments and those of analyses
from the viewpoint of the drilled diameter 57

Fig. 37 Flowchart of FEA procedure for three dimensional transient heat
transfer analysis 58

Fig. 38 Results of finite element analysis for each nozzle diameter ($P_d =$
1.0 ms, $P_f = 8$ Hz) 60

Fig. 39 Results of finite element analysis for each nozzle diameter ($P_d =$
1.0 ms, $P_f = 12$ Hz) 62

Fig. 40 Results of finite element analysis for each nozzle diameter ($P_d =$
2.0 ms, $P_f = 1$ Hz) 64

Fig. 41 Relationship between process parameters and hole diameters (P_d
 $= 1.0$ ms) 65

Fig. 42 Temperature distribution in the vicinity of the drilled hole ($N_d =$
0.7 mm, $P_d = 1.0$ ms, $P_f = 12$ Hz) 65

ABSTRACT

Investigation into development of the micro drilling technology for ultra-thin metallic sheet using pulsed Nd:YAG laser

Jung, Kwang-Woon

Advisor : Prof. Ahn, Dong-Gyu, Ph. D.

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Laser drilling process has been widely used in various industrial areas, including automotive, aerospace and electronics, for the rapid fabrication of small holes. The aluminum sheet has been used as the material of mobile phone board and printed circuit board with various small holes. However, the aluminum sheet has several inherent limitations in terms of laser material processing such as the high reflectivity, the high thermal conductivity and the distinguished oxidation reaction. Hence, in order to manufacture rapidly precise micro-holes, a proper combination of process parameters for the laser drilling of the aluminum should be estimated.

The objective of this research work is to investigate into the influence

of process parameters, such as the focal distance, the pulse duration, the pulse frequency, and the nozzle diameter, on the quality of the drilled micro-hole in the laser drilling of a thin Al 1050 sheet using high-power pulsed Nd:YAG laser.

In order to investigate the effects of process parameters on qualities of the drilled hole quantitatively, laser drilling experiments were carried out using PC-NC controlled laser drilling apparatus. The maximum peak power, the wavelength, the spot size, and the transverse mode were 150 Watt, 1,064 nm, 0.4 mm, and TEM₀₀ mode, respectively. In order to minimize the oxidation reaction, He gas was used as the assisted gas. Through the preliminary experiments, it was shown that the focal distance of the practical drilling region lies in the range of 4–6 mm. In the main drilling experiments, the sectional width, the dross height, the normalized deviation of hole diameter and the taper angle were chosen as measures to estimate the quality of the drilled hole. The results of the main experiments showed that the normalized deviation of the hole diameter and the dross height area are minimized, but on the other hand, taper angle and the sectional width are maximized when the nozzle diameter, the pulse frequency and the pulse duration are 0.7 mm, 1.0 ms and 12 Hz, respectively. Hence, the optimum drilling condition was chosen as 0.7 mm of the nozzle diameter, 1.0 ms of the pulse frequency and 12 Hz of the pulse duration. In addition, it was shown that the mean hole diameter at the optimum drilling condition is nearly 586 μm .

In order to simulate the heat transfer characteristics during the laser drilling, three-dimensional transient heat transfer analysis was performed using a commercial code ABAQUS V6.5. Laser beam was assumed as

surface heat source model with Gaussian heat distribution in a plane. Time variation of the heat intensity was reflected in the FE analysis through the User subroutine program supported by ABAQUS. Through the comparison of the results of the experiments and those of analyses, it was shown that FE model can properly simulate the heat transfer phenomenon during the laser drilling of Al 1050 sheet using the pulsed Nd:YAG laser. From the results of the FE analyses, it was shown that the heat affected area creates within 1.0 mm from the center of the heat source and the rapid temperature variation takes place within 0.25 mm from the center of the heat source. In addition, it was found that the difference of the melted radius of the top surface and that of the bottom surface are minimized when the nozzle diameter, the pulse frequency and the pulse duration are 0.7 mm, 1.0 ms and 12 Hz, respectively.

Based on the above results, the optimum laser drilling condition of Al 1050 sheet with 0.2 mm of thickness was obtained.

제 1 장 서 론

1.1 연구동향 및 배경

레이저 천공 기술은 시계와 터빈 블레이드, 전자부품, 광 인쇄 회로 기판 등 다양한 구성품의 미세구멍 가공을 할 수 있는 분야에서 산업적 활용도가 매우 높다.⁽¹⁻²⁾ 레이저에 의한 재료의 천공은 비접촉식 가공방법으로 수 μm 정도의 작은 크기의 미세 천공이 가능하고, 다이아몬드와 같이 매우 단단한 재료는 물론 고무류와 같이 매우 연하여 기계적인 방법으로 가공하기 힘든 재료의 천공도 용이하다. 또한, 가공시간이 짧아 생산성이 크며, 증발에 의하여 재료가 제거되는 기구에 비해 칩의 발생이 없어 가공 경로를 모니터링 하여 천공과정을 관찰할 수 있다.⁽³⁾ 레이저 천공은 원칙적으로 재료의 증발에 크게 의존하므로 용접 혹은 절단에 비하여 보다 큰 에너지를 요하게 된다. 재료의 천공에서 고려하여야 할 중요한 천공 품질 척도로써는 천공된 구멍 직경과 깊이 및 천공된 표면의 형상과 천공단면의 직진도이다. 천공 품질 척도에 영향을 미치는 레이저 변수들은 레이저 파장, 레이저 출력, 펄스 투사 시간 및 빔 모드 형태가 있고, 부수적으로는 펄스 반복 횟수, 천공 가스 종류 및 압력 그리고 초점거리 등이다. 반면 고출력 지속과 레이저를 이용한 레이저 천공 공정은 펄스형 레이저와 달리 계속적인 증발 및 레이저 빔 조사 중 플라즈마의 불꽃형성이 발생하여 에너지 효율이 다소 떨어진다. 그러므로 레이저 천공에서는 일반적으로 큰 에너지의 반복 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저 또는 펄스형태의 CO₂ 레이저를 사용한다. 이러한 특성 때문에 짧은 조사시간 동안에 재료가 증발되기 시작하고, 이 때 용융물이 외부로 분출 및 확산된 후에 다시 레이저 빔이 조사됨으로써 펄스 반복 횟수에 비례하여 천공 깊이가 증가하게 된다.⁽⁴⁻⁸⁾ 또한 이온화되기 힘든 불활성가스를 사용하여 증발된 입자와 플라즈마를 제거시켜줘 가공 효율을 높일 수가 있다.⁽⁹⁻¹⁰⁾

한편 본 연구에서 사용된 Al 1050 금속 박판 재료는 현대인의 필수품인 핸드폰의 외장용 케이스, 전기용 도체, 인쇄회로기판, 열교환기 부품 등 다양한 산업적 분

야에서 사용되어지고 있다. 그러나 알루미늄 재료를 이용한 레이저 가공시 발생하는 선천적인 재료상의 문제점이 있는데, 이것은 빛에 대한 높은 반사율과 높은 열전도율 그리고 높은 용융점에서 알루미늄 산화물을 형성하는 자기산화성 산화반응을 들 수 있다. 이러한 결점으로 인하여 알루미늄 재료를 레이저로 가공하기 위해서는 이들 문제점을 해결해야만 한다.⁽¹¹⁾ 이러한 이유 때문에 펄스형 레이저를 이용한 알루미늄 재료 천공 공정에서는 레이저 공정 변수인 레이저 출력, 펄스 투사 시간, 펄스 반복 횟수, 초점거리, 노즐 직경 및 천공 가스 종류와 압력 등과 재료 상호간의 상관관계에 대한 연구가 필요하고, 또한 레이저 천공시 공정변수와 천공 품질 평가 특성에 관한 연구가 필요하다.

이와 관련된 선행 연구로써는 다음과 같다. Ng 와 Li 는 400 W 고출력 Nd:YAG 레이저를 이용한 두께 2 mm 인 스테인리스강 박판 천공시 레이저 공정 변수인 레이저 침투 출력 및 펄스 투사 시간과 구멍 직경의 반복성 특성에 관한 상관관계를 연구하였다.⁽¹²⁾ 그 결과 Fig.1 과 같이 높은 침투 출력에서는 입구부 구멍 직경이 균일하였고, 가스 유동에 의한 영향은 다소 적었다. 또한, 펄스 투사 시간이 짧을수록 재료와의 상호작용 시간이 작아 입구부 구멍 주위로의 열영향부가 거의 발생되지 않음을 확인하였다.

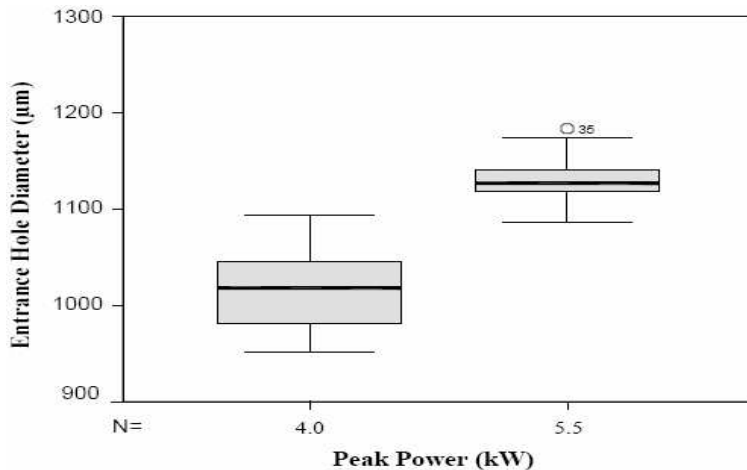


Fig. 1 The effect of each peak power on entrance hole diameter at 1.5 ms of the pulse duration

Wang 은 Fig. 2와 같이 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Au-coated Fe-Ni 합금 금속 판재 천공시 레이저 공정변수가 구멍 직경, 재료 표면위의 크레이터 직경 및 구멍의 진원도에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다.⁽¹³⁾ 그 결과 레이저 출력과 펄스 반복 횟수가 동일한 조건에서 펄스 투사 시간이 증가할수록 천공된 구멍 직경이 커지게 됨을 알 수 있었고, 마찬가지로 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수가 고정된 조건에서도 레이저 출력이 증가할수록 천공된 구멍 직경은 증가하였다. 또한, 펄스 투사 시간이 가장 짧을 경우, 입구부와 출구부의 구멍 직경 차이가 적고 진원도가 좋은 품질의 구멍을 얻을 수 있었다.

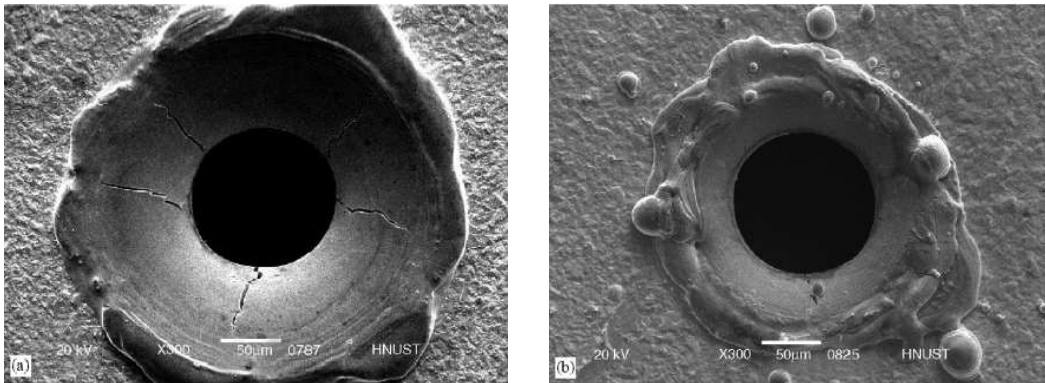


Fig. 2 A typical morphology of the laser drilled hole; (a) incident side (b) effluent side

Li 와 Low 는 Nd:YAG 레이저를 이용한 구멍 직경 1 mm 이하 재료 천공시 구멍 테이퍼 특성 및 테이퍼 제어 기술 개발에 관한 연구를 수행하였다.⁽¹⁴⁾ 그 결과 Fig. 3 과 같이 회귀분석에 의해 만들어진 통계적 모델링을 통하여 공정변수와 구멍 테이퍼와의 상관관계를 규명하였다. 특히 초점거리 변화에 가장 크게 영향을 받음을 확인하였다.

Low⁽¹⁵⁾ 는 400 W 고출력 레이저를 이용한 Nimonic 263 합금 재료 천공시 레이저 공정변수가 스파터 형성에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과 초기 펄스 조사시 스파터의 70 % 이상이 재료 표면위에서 발생됨을 확인하였고,

펄스 투사 시간이 짧고, 침투 출력이 낮으며, 펄스 반복 횟수가 높은 경우에 스페터의 용착 면적이 가장 작게 나타남을 확인하였다.

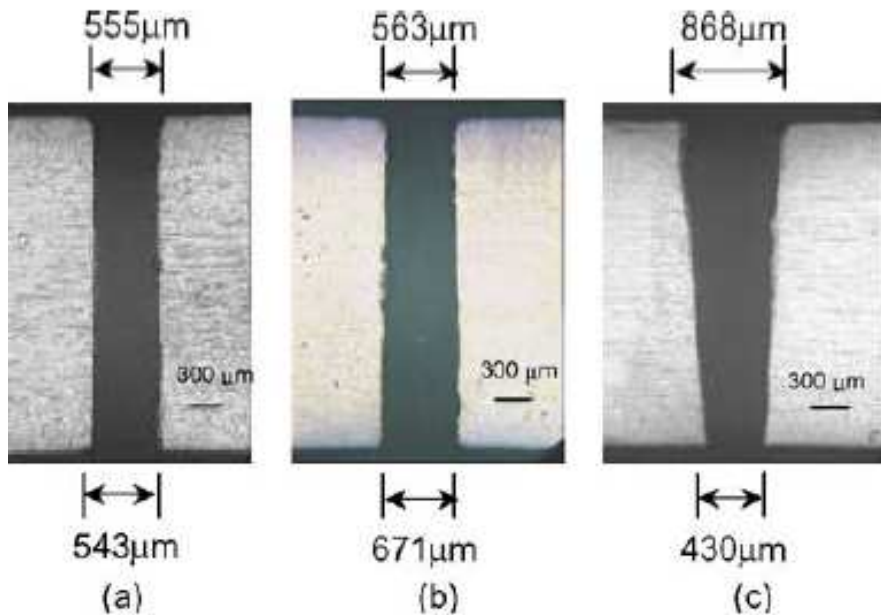


Fig. 3 Taper types of the laser drilled hole; (a) zero taper (b) negative taper (c) positive taper

Tunna 와 O'Neil 은 355-1,064 nm 의 파장 영역을 가지는 DPSS Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 순수 알루미늄 재료 천공시 제한 요소인 레이저 파장과 유효 입열량이 펄스 당 천공 깊이에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다.⁽¹⁶⁾ 그 결과 355 nm 파장 영역에서 다른 파장 영역에 비하여 펄스 당 최대 50 μm 정도의 천공율이 높게 나타났으며, 마찬가지로 유효입열량이 4000 J/cm^2 에서 최대 값이 확인되었다. 그러나 1,064 nm 파장 영역에서는 펄스 당 최대 10 μm 정도의 천공율이 나타남을 알 수 있었다. 이 결과로부터 레이저 파장이 재료의 침투 깊이에 상당한 영향을 미치게 됨을 확인하였다.

Khan 과 Celotto⁽¹⁷⁾ 는 Fig. 4 과 같이 nanosecond 펄스형 고체 레이저를 이

용한 0.2 mm 316L 스테인리스강 재료 천공시 0.2 - 0.5 mm 의 노즐 직경과 가스 종류가 천공 품질에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과 노즐 직경이 증가할수록 에칭율은 감소하고, 천공된 구멍 직경은 커짐을 확인하였다. 또한, 천공 가스로 산소를 사용하였을 때, 공기와 비교하여 에칭율이 감소되며 천공된 구멍 직경이 증가하였다. 그리고 노즐 직경이 0.2 mm 일 경우 작은 열영향부와 최대의 에칭율이 나타남을 확인하였다.

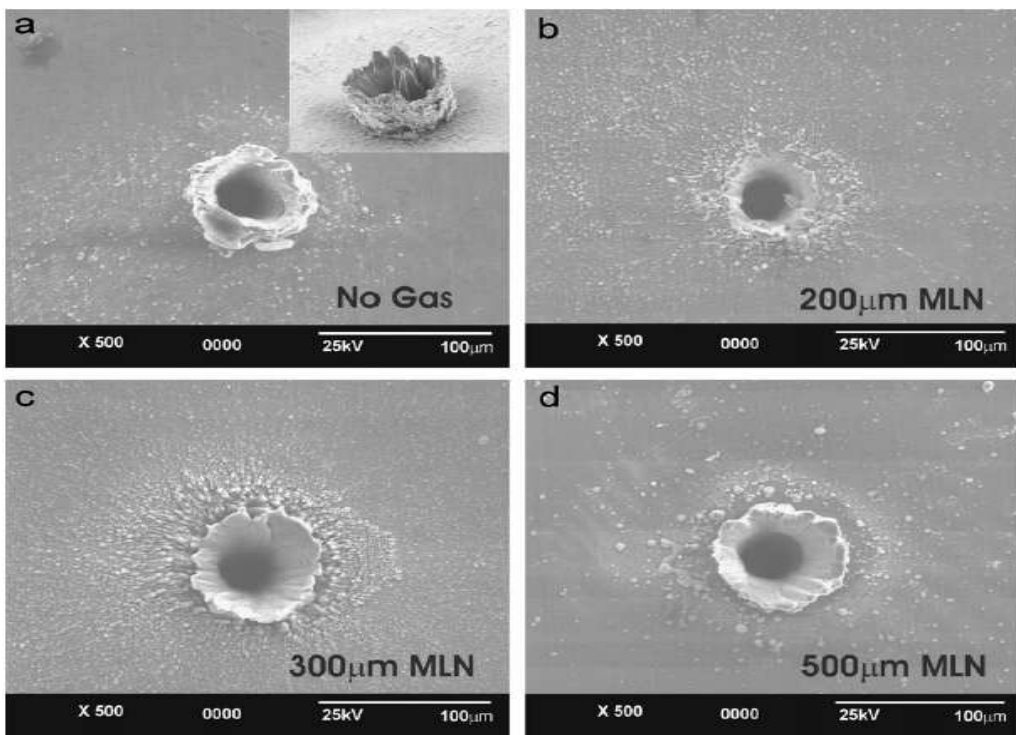


Fig. 4 SEM images of entrance of the laser drilled hole; (a) nozzle diameter = 0.2 mm and no gas, (b) nozzle diameter = 0.2 mm, (c) nozzle diameter = 0.3 mm, (d) nozzle diameter = 0.5 mm (laser fluence = 328.5 J/cm^2 , gas pressure of $\text{O}_2 = 8 \text{ bar}$)

Salonitis 와 Stournaras 는 CO_2 펄스형 레이저를 이용한 스테인리스강 재료의

레이저 천공시 공정변수가 천공 깊이에 어떠한 영향을 미치는지 이론적 및 실험적 방법을 통한 연구를 수행하였다.⁽¹⁸⁾ 그 결과 재료 표면이 용융 온도에 도달하는 작용시간이 펄스 반복 횟수에 크게 의존적임을 확인하였으나, 최대 천공 깊이는 중저의 에너지 밀도 값으로 재료 가공시 펄스 반복 횟수에 좌우되지 않음을 알 수 있었다. 그러나 이론적 모델에서는 높은 에너지 밀도 일 경우 최대 천공 깊이를 초과하는 현상이 나타났으며, 이론적 모델의 한계성을 확인하였다.

Masmiati 와 Philip 은 500 W CO₂ 레이저를 이용한 2 mm 두께의 PVC 와 Polypropylene 재료 천공시 다구찌 기법을 이용하여 공정변수가 천공 품질에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다.⁽¹⁹⁾ 그 결과 Fig. 5 과 같이 실험횟수를 최소화하면서 천공 품질 척도인 스패터 두께, 테이퍼 및 진원도가 가장 좋게 나타나는 최적 공정 조건을 얻을 수 있었다.

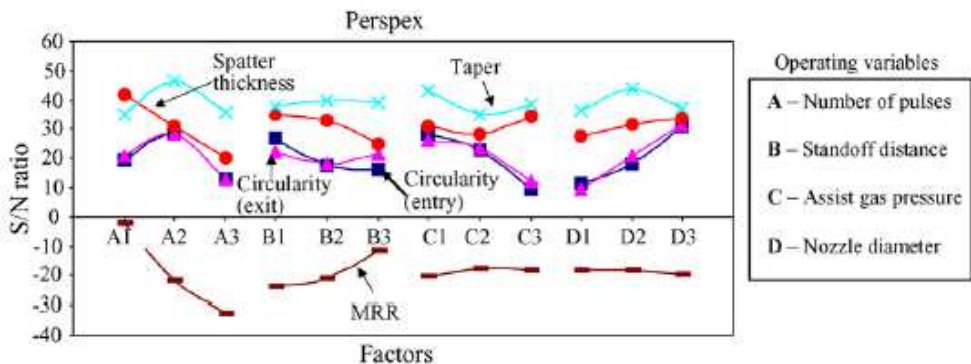


Fig. 5 Relationship between process parameters and S/N ratio (Laser : CO₂, the material : PVC and the thickness : 0.2 mm)

Tarn⁽²⁰⁾ 은 천공 시간을 최소화하기 위해 다구찌 기법의 L₁₈ 직교배열표를 사용하여 Inconel 718 재료의 레이저 천공 실험을 수행하였다. Yilbas⁽²¹⁾ 는 레이저 공정 변수와 재료 물성이 천공 품질에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하기 위하여 요소 설계인 통계적 접근 방법을 이용하여 펄스 투사 시간, 초점거리, 펄스 에너지 및 시편 두께를 공정 변수로 선정하여 천공 품질 특성을 비교 분석하였다.

Ghoreishi 와 Low 는 레이저 천공시 레이저 공정변수인 레이저 침투 출력, 펄스 투사 시간, 펄스 반복 횟수, 천공 가스 압력, 초점거리 등이 구멍 테이터와 진원도 사이에 어떠한 상관관계가 있는지 연구하고자 실험 횟수를 줄이기 위한 방법인 central composite design (CCD)를 적용하여 연구를 수행하였다.⁽²²⁾ 그 결과 천공 품질에 영향을 미치는 공정변수에 대한 평가는 분산분석표 (ANOVA)을 이용하였으며, 이 논문에서 사용된 스테인리스강 재료 천공시 연강과 달리 펄스 반복 횟수가 구멍 직경과 진원도에 상당한 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

Yilbas 와 Sahin 은 레이저 조사시 초기 천공 공정을 정상상태의 증발 과정으로 가정하여 레이저 가열 메카니즘에 대한 수학적 연구를 수행하였다. 이 논문에서는 Fourier 이론에 기초한 모델을 사용하여 재료내부의 최대 온도와 천공 효율성 및 증발 과정을 예측하였다. 또한, 레이저 천공시 표면 증발 과정을 모니터링하여 이론적 결과와의 상관관계를 비교 분석하였다.⁽²³⁾

Yue 와 Chan 은 초음파 레이저 (UAL) 천공시 유한요소해석을 이용한 이론적 모델로 재료 내의 구멍 형상과 용융부의 두께를 결정할 수 있는 수학적 모델링에 대한 연구를 수행하였다.⁽²⁴⁾ 또한, 천공부의 온도 분포와 용융부의 크기에 대해 실험결과에 상응하는 이론적 예측을 확인하였다. Ahn⁽²⁵⁾은 SYSWELD V6.10 를 이용하여 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 냉연강판 절단공정의 준정상상태 (Quasi steady-state) 3차원 열전달 유한요소 모델링을 통하여 레이저 절단 공정중 발생하는 3차원 온도분포 특성에 관한 연구를 수행하였다. Gospavic⁽²⁶⁾은 원통형 형상을 가지는 재료에 대한 레이저 가공시 레이저 공정변수가 재료 내에서 시간적 또는 공간적으로 온도 분포 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 알루미늄 재료는 최대 530 K 까지 도달하였으나, 알루미늄 재료의 높은 열전도율 때문에 레이저 빔 반경 이상에서는 온도가 급격히 떨어지는 것을 확인하였다.

Guoming 과 Jian 은 ANSYS 해석 프로그램을 이용하여 stainless steel 304 재료 레이저 용접시 재료 내의 온도 분포 특성에 관한 해석을 수행하였다.⁽²⁷⁾ 그 결과 레이저 열원이 이동하면서 온도 분포가 변화하는 것을 볼 수 있었으며, 마찬가지로 용융풀 역시 움직인다는 것을 확인하였다. 재료의 중간 부분에서는 재료 표

면 위의 온도 분포가 준안정 상태로 변화하면서 균형을 이룬다는 것을 확인하였다.

본 논문에서 언급한 수많은 선행 연구를 통하여 레이저 천공 공정에서 양질의 천공 품질의 제품을 얻기 위해서는 레이저 공정변수와 재료 상호간의 상관관계에 대해 알아야 하며, 산업적으로 활용되기 위한 정략적인 데이터 베이스 구축이 필요하다고 판단된다. 특히, 알루미늄은 산업적으로 많이 활용되고 있지만 레이저 천공에 관한 실험적 결과 및 유한요소 해석 모델 개발에 관한 선행연구는 거의 찾기보기 어려웠다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 최대 출력 150 W 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 순수 알루미늄 금속 박판 재료 천공시 공정변수인 레이저 출력, 펄스 투사 시간, 펄스 반복 횟수 및 노즐 직경 등이 천공된 구멍 직경과 천공단면 형상 그리고 재료 내부의 열전달 분포 특성에 미치는 영향에 대하여 분석/고찰하고자 한다. 이러한 연구를 통하여 펄스형 Nd:YAG 레이저 이용한 재료 천공시 공정변수 조합에 의해 좌우되는 천공 품질을 정량적으로 평가하고, 최적 공정 조건을 도출하고자 한다. 또한, 재료 내부에 발생하는 열전달 현상을 예측하기 위한 3차원 비정상 열전달 해석을 수행하기 위해 도출된 유한요소 해석 모델을 바탕으로 공정변수가 재료 내부의 열전달 특성과 천공부 온도 분포에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하고자 한다.

본 실험에서는 최대 출력 150 W 의 펄스형 Nd:YAG 레이저와 가스 분사 장치가 장착된 3자유도 레이저 천공 시스템을 이용하였다. 초기 실험에 사용된 공정변수들은 레이저 출력 (P), 레이저 초점거리 (Z_n) 이며, 이때의 초점거리는 천공 노즐의 침단과 재료의 상면 사이의 거리로 산출하였다. 초기 실험에서는 실험 조건별 천공 여부 및 천공 가능 영역에 대해서만 광학현미경 및 전자현미경 (SEM) 으로 천공여부를 확인하고 초점거리와 천공 가능 영역을 도출하였다. 도출된 초점거리와 천공 가능 영역으로부터 공정 변수인 레이저 출력 (P), 레이저 초점거리 (Z_n) 및 가스 압력 (P_g) 에 대하여 실험 횟수를 최소화하면서 양질의 천공 품질을 가지는 공정 조건을 도출할 수 있는 다구찌 기법을 적용하여 세부 실험 조건을 설계하고, $L_9(3^4)$ 직교 배열표를 생성한 다음 반복적인 실험을 통하여 천공 구멍 직경 크기를 산출하였다. 또한, 측정된 구멍 직경을 바탕으로 양질 천공 특성을 가진 공정변수 조건을 도출하기 위하여 S/N 비를 산출하였다. 그 때의 특성치는 작을수록 좋은 값을 가지는 망소 특성 (Smaller-The-Better)을 사용하였다. 또한, 다구찌 기법을 이용하여 얻은 결과로부터 천공된 구멍 직경이 최소화되며, 천공단면 형상이 양호한 천공 품질을 얻기 위해 레이저 공정 변수인 노즐 직경, 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수를 선정하여 천공 품질 특성에 미치는 영향에 관한 실험을 수행

하였다. 이러한 실험 결과로부터 얻은 양질 천공 품질 평가 척도로는 천공된 재료 입구부와 출구부의 구멍 직경 및 천공된 구멍 직경의 표준 편차 그리고, 천공된 시편의 중앙부를 절단 후 폴리싱 처리하여 광학현미경 및 전자현미경 (SEM)을 이용하여 평가 분석된 천공단면폭, 시편 하부의 용융물 두께, 천공단면 최대 테이퍼 각도 등을 측정하여 공정변수와 의 상관관계를 규명하고자 한다. 본 연구에서는 이러한 실험 결과로부터 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 알루미늄 판재 천공시 공정 변수의 조합이 양질 천공 품질에 미치는 영향성을 정량적으로 평가하고, 산업적으로 활용될 수 있는 최적 공정 변수 조건을 도출하고자 한다.

또한, 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 알루미늄 금속 박판 재료 천공시 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.5 를 사용하여 가우시안 분포를 가지는 3차원 표면 열원모델링을 바탕으로 3차원 비정상 열전달 유한요소해석 모델을 이용하여 레이저 천공공정 중 발생하는 재료 내부의 열전달과 천공부 온도 분포 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

제 2 장 레이저 천공시편 및 실험방법

본 장에서는 본 연구에 사용된 0.2 mm Al 1050 시편의 규격 및 파장별 재료의 흡수율 특성과 레이저 출력 측정 원리 및 측정기를 설명하였고, 본 실험에 사용된 시편 고정형 지그 및 천공용 분사 노즐 설계에 관하여 설명하였다. 천공 품질에 상당한 영향을 미칠 수 있는 노즐 직경에 대하여 각 노즐 직경의 동압과 유속을 측정하였다. 또한, 레이저 실험 방법 및 전자현미경(SEM) 및 광학현미경을 이용한 천공 품질 평가 특성 방법에 관하여 서술하였다.

2.1 레이저 천공시편 및 파장별 흡수율

본 실험에 사용한 시편은 알루미늄 순수 계열 금속으로 강도는 떨어지나 내식성, 열전도성 및 전기전도성이 우수하여 전기용도체, 열교환기부품, 인쇄판, 반사판, 화학성 공업용 탱크로 많이 사용되고 있다.

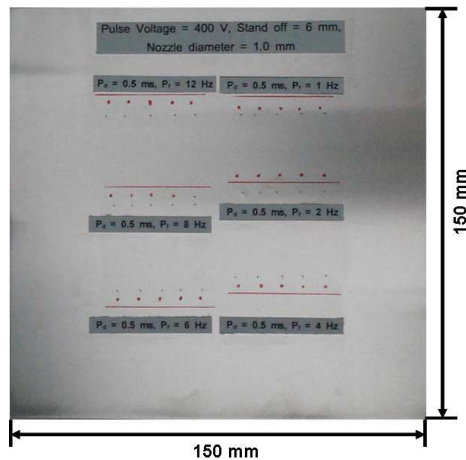


Fig. 6 Specimen of laser drilling experiment (The material : Al 1050 and the thickness : 0.2 mm)

시편의 크기는 Fig. 6 과 같이 정사각형의 150 mm × 150 mm 크기로 제작하였다. 실험에 사용된 Al 1050 판재의 재료 성분비는 99.5% Al 로 구성되어 있다.

레이저빔을 재료에 조사시키면 입사된 레이저빔은 Fig. 7 과 같이 세 부분으로 나뉘어져서 일부는 재료 상에서 반사되고, 일부는 투과되며, 나머지는 흡수된다. 식 (1) 은 레이저빔의 입사, 반사, 투과 및 흡수의 상관관계를 나타낸다.⁽²⁸⁾

$$E_I = E_R + E_T + E_A \quad (1)$$

여기서, E_I , E_R , E_T , E_A 는 각각 입사, 반사, 투과 및 흡수를 의미한다. 만일 재료가 금속이라면 레이저빔이 투과되지 못하므로 E_T 값은 0이 되고 반사과 흡수만 존재하게 된다.

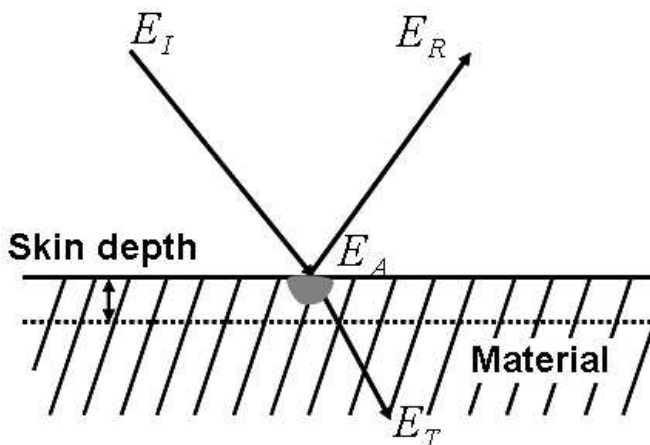


Fig. 7 Separation of the incident laser beam on the workpiece

Fig. 8 는 각 파장에 따른 알루미늄 재료의 흡수율을 나타낸다. Fig. 8 에서 Nd:YAG 레이저의 파장대인 1,064 nm 에 대한 Al 1050 재료의 흡수율이 약 9% 정도임을 알 수 있다. 일반적으로 탄소강의 경우 Nd:YAG 레이저의 파장대인 1,064 nm에서 약 35% 정도의 흡수율을 가지는 것에 비하여 Al 1050 재료의 경우 약 26% 정도의 빔 흡수율이 작은 값을 나타내어 레이저 천공시 알루미늄 재료

의 고에너지 강도의 집적이 어려워 가공이 쉽지 않아 가공 효율을 높이기 위해서는 고 침투 (peak) 출력 에너지가 필요함을 알 수 있다.

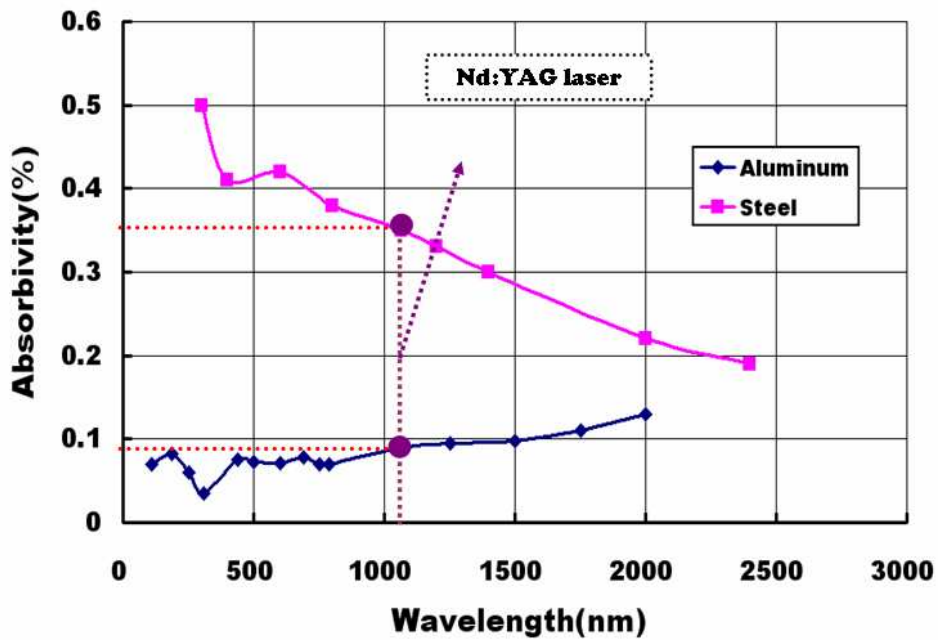


Fig. 8 Absorptivity of Al 1050 according to each wavelength

2.2 레이저 출력 측정

본 실험에 사용된 펄스형 레이저는 레이저빔의 주파수와 방출시간을 조절하는 방법으로 출력펄스의 형태와 시간을 변화시킴과 동시에 보통의 동작조건보다 매우 큰 고 첨두 (peak) 출력에너지를 얻을 수 있다. 특히 레이저에 의한 재료가공에서는 펄스 투사 시간과 그에 따른 출력수준이 매우 중요한 인자가 된다. 이에 따라 본 연구에서는 레이저 제어기의 설정변수인 펄스 전압 (pulse voltage), 펄스 투사 시간 (pulse duration) 및 펄스 반복 횟수 (pulse frequency)을 COHERENT사의 PM 150 출력 측정기 (power meter)를 이용하여 레이저 출력값을 측정하였다. Fig. 9 은 레이저 출력 측정 원리 및 측정기 사진이다.

Fig. 10 은 본 실험에서 사용하는 레이저를 이용한 공정변수와 레이저 출력과의 상관관계를 나타내었다. 이 때의 펄스 전압, 펄스 투사 시간, 펄스 반복 횟수는 각각 400 V, 0.5 - 10 ms, 1 - 20 Hz로 선정하였다.

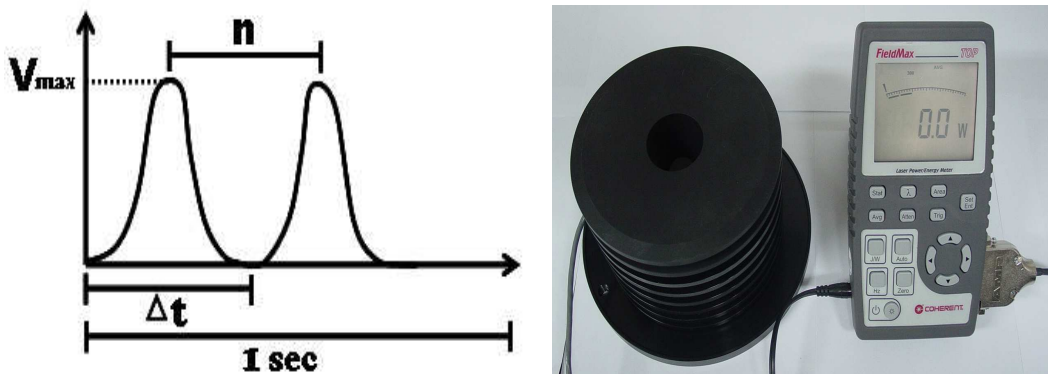


Fig. 9 Principle of measurement methodology of laser power in the power meter

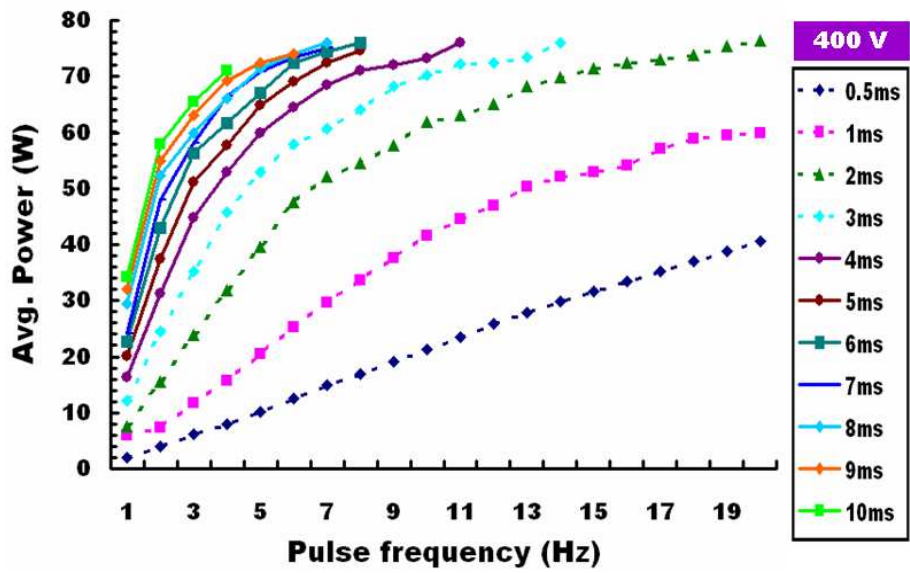


Fig. 10 Correlation between control parameters of laser and the laser power

2.3 시편 고정형 지그 및 분사 노즐 설계

본 실험에서 사용된 Al 1050 재료는 두께 0.2 mm 얇은 박판으로 레이저 빔 조사시 반복된 펄스 수와 천공 가스 압력으로 인하여 미세한 떨림을 방지하기 위하여 다음 Fig. 11 와 같이 CATIA 프로그램을 이용한 지그 설계 후 제작하였다.

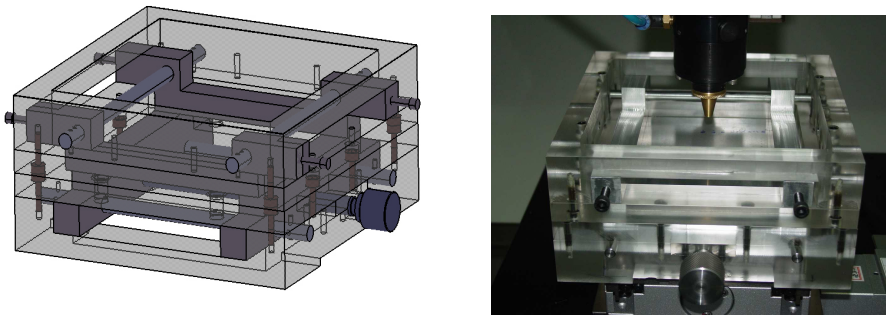


Fig. 11 Test fixture for laser drilling experiment

Fig. 12 은 본 실험에서 사용된 천공용 분사 노즐이다. 본 실험에서는 노즐 핀홀 직경이 천공 품질 향상에 상당한 영향을 미치는 것으로 사료가 되어 Fig. 12 같이 노즐 직경을 4 가지로 설계 제작하였다. 이 때의 노즐 직경은 각각 0.5, 0.7, 1.0, 2.2 mm 로 선정하였다.



Fig. 12 Design of ejection nozzle jig for laser drilling experiment

2.4 노즐 직경별 동압 측정

본 실험에서는 천공 가스 압력으로 인하여 노즐 직경에 따라 동압 (dynamic pressure) 이 천공 품질에 큰 영향을 미칠 것으로 사료되어 다음 Fig. 13 과 같이 동압 측정기를 이용하여 각 노즐 직경에 대한 동압을 측정하였다. 본 실험에서 사용된 가스와 가스 압력은 He 이며, 0.05 MPa 이다. 또한, 측정 위치는 본 실험에서의 초점거리인 6 mm 지점에서 동일조건으로 하여 측정을 수행하였다. 그 결과로부터 측정된 노즐 직경 2.2, 1.0, 0.7, 0.5 mm 의 동압은 각각 6,000, 12,200, 9,900 및 10,200 Pa 이었다.

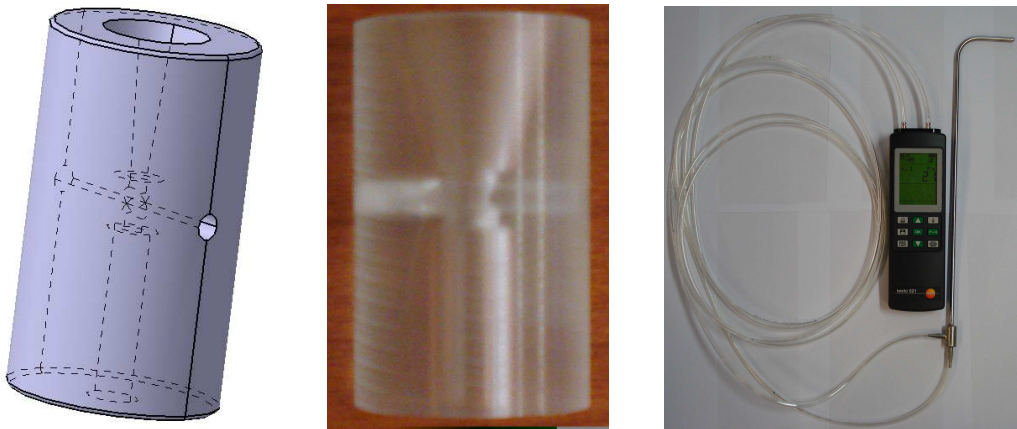


Fig. 13 Jig design and devices for the measurement of dynamic pressure according to nozzle diameters

2.5 실험 방법

본 연구에 사용된 펄스형 Nd:YAG 레이저의 공정변수는 레이저 출력 (P) 과 펄스 투사 시간 (P_d), 펄스 반복 횟수 (P_f), 노즐 직경 (N_d) 로 선정하였다. 실험에 사용된 공정변수와 재료두께는 Table 1 과 같으며, 레이저 초점거리와 천공 가스 압력은 각각 6 mm, 0.05 MPa 로 고정하였다. 특히, 본 실험에서는 레이저빔과 재료 사이의 상호 작용 시 공기 중의 산소와 산화 반응을 억제하기 위하여 헬륨 (He) 가스를 사용하였다.

Table 1. Experimental conditions of laser drilling

Process parameters	Ranges of each condition
Laser power (W)	1.6 - 76
Pulse duration (ms)	0.5 - 10
Pulse frequency (Hz)	1 - 20
Nozzle diameter (mm)	0.5 - 2.2
Thickness of Al 1050 (mm)	0.2
focal distance (mm)	6
gas pressure (MPa)	0.05

2.5.1 레이저 천공 시스템

본 연구에 사용된 레이저 천공 시스템은 최대출력 150 W 의 펄스형 Nd:YAG 레이저와 가스 분사 장치가 장착된 3자유도 레이저 천공 시스템을 이용하였다. 펄스형 Nd:YAG 레이저의 파장은 적외선 영역인 1,064 nm 이며, 초점크기는 0.4 mm 이고, 레이저 빔의 공간 모드는 TEM_{00} 모드를 사용하였다. 레이저 빔의 에너지 분포는 가우시안 분포로 이루어져 있다. 레이저 펄스 생성을 위한 입력 변수는 레이저 제어기에서 제어가 되며, 미세 천공을 위한 레이저 이동제어는 PC-NC 기반의 마이크로 모션 제어기를 통하여 제어된다. Fig. 14 은 레이저 천공 시스템의 실험 장치 사진이다.

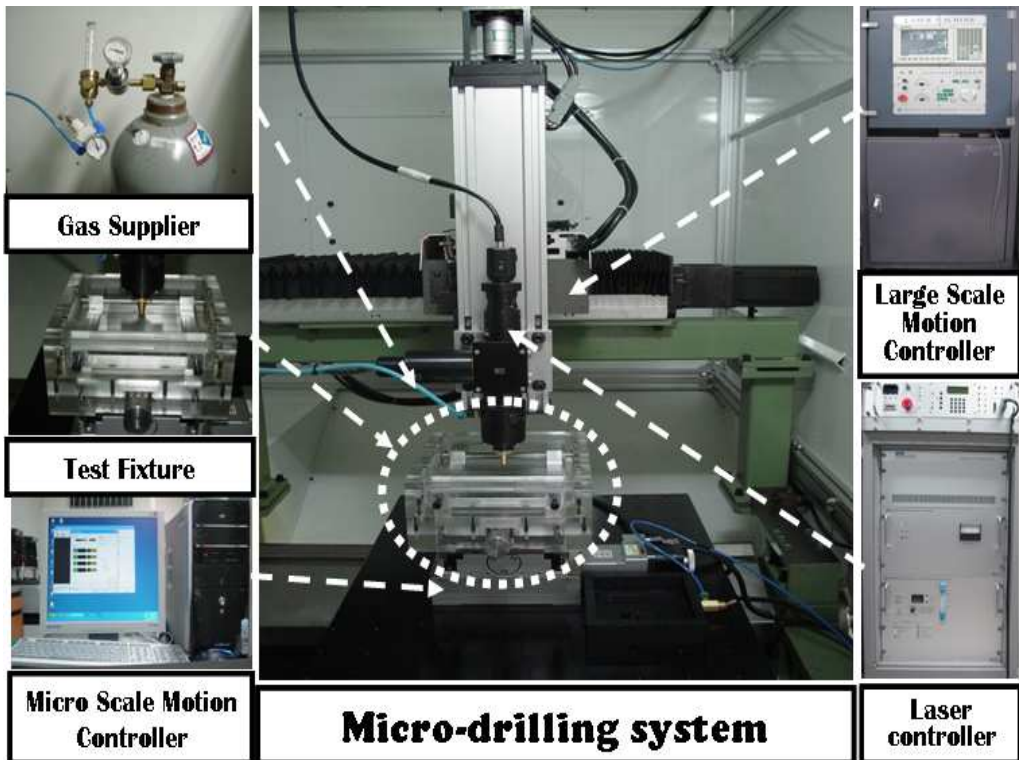


Fig. 14 Experimental set-up

2.5.2 Al 재료 천공 실험

본 연구에서의 초기 실험에서는 초점거리와 천공 가능 영역을 도출하기 위하여 Table 2 와 같이 실험을 수행하였으며, 이 때 노즐 직경은 2.2 mm 이며, 가스 압력은 고려하지 않았다. 도출된 초점거리와 천공 가능 영역에 대하여 실험 횟수를 최소화하면서 양호한 천공 품질을 예측할 수 있는 다구찌 기법을 적용하여 세부 수준의 실험을 Table 3 과 같이 선정하였다. 이 때 레이저 공정변수는 레이저 출력 (P), 초점거리 (Z_n) 및 천공 가스 압력 (P_g) 이다.

Table 2. Experimental conditions of preliminary experiment

Pulse voltage (V)	Pulse duration (ms)	Pulse frequency (Hz)	Laser power (W)	focal distance (mm)
400	2	1	7.5	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
		4	31.8	
		8	54.5	
		12	65.0	
		16	72.5	
		20	76.5	

세부 실험 조건을 바탕으로 실험을 수행하기 위해 Table 4 와 같은 $L_9(3^4)$ 직교 배열표를 생성하였다. 이 실험에서는 세 번의 반복적인 실험을 통하여 천공된 구멍 직경을 측정하였다. 측정된 값을 바탕으로 양질의 천공 특성을 가진 공정 변수 조건을 도출하기 위하여 S/N 비를 산출하였다. S/N 비 평가 방법으로는 천공된 구멍 직경이 작으면 작을수록 더 좋은 식 (2) 와 같은 S/N 비 값의 망소특성 (Smaller-The-Better)을 이용하여 분석하였다. 식 (2) 는 이 실험에서 적용되는

망소 특성 S/N 비 관계식이다.⁽²⁹⁾

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

여기서 n, i 및 y_i 는 각각 수준별 실험 횟수, 수준수 및 실험 조합별 측정값이다.

Table 3. Process parameters and their levels for Taguchi's method

Factors	Levels		
	1	2	3
P _g (MPa)	0.00	0.01	0.02
Z _n (mm)	4.0	5.0	6.0
P (W)	54.5	65.0	72.5

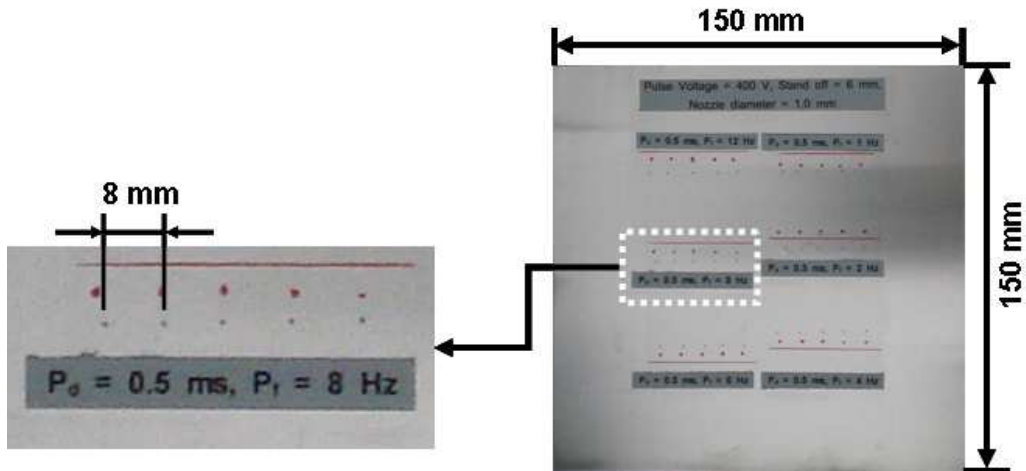


Fig. 15 Specimen and methodology for the drilling experiment

Table 4. Combination of experimental conditions according to $L_9(3^4)$ orthogonal array

Exp. No.	Columns and levels assigned			
	e	P_g	Z_n	P
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

또한, 다구찌 기법을 이용한 실험결과로부터 도출된 공정 조건을 바탕으로 천공된 구멍 직경이 최소화되며, 천공단면 형상이 더 좋은 천공 품질을 얻기 위해 공정 변수인 노즐 직경, 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수 등을 고려하여 Fig. 15 과 같이 레이저 천공시 실험간 간격은 열영향을 거의 받지 않는 범위의 조건에서 8 mm 간격으로 5회의 반복적인 천공 실험을 실시하였다. 이 때 사용된 공정변수들은 노즐 직경 (N_d), 펄스 투사 시간 (P_d), 펄스 반복 횟수 (P_f) 이며, 실험 조건은 Table 5 와 같다.

Table 5. Experimental conditions of laser drilling experiments

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

2.6. 천공 품질 특성 및 평가 방법

초기 실험에서는 실험 조건별 초점거리와 천공 가능 영역만을 판단하였다. 천공 여부는 Table 2 의 실험 조건에 대하여 천공 실험 후, 광학현미경으로 천공여부를 확인하였다. 초기 실험 결과 도출된 초점거리와 천공 가능 영역에 대하여 다구찌 기법을 이용한 Table 4 와 같은 실험 조건으로 실험을 실시한 후 천공된 구멍 직경에 대해서 평가 분석하였다. 또한, 양질의 천공 품질을 얻기 위해 Table 5 와 같이 추가 실험을 실시한 후 천공 품질 평가 방법으로 천공된 구멍 직경, 구멍 직경의 표준 편차, 천공단면폭, 시편 하부의 용융물 두께 및 천공 단면 최대 테이퍼 각도 등을 측정하였다. 먼저, 천공된 구멍 직경의 경우 광학현미경과 전자현미경 (SEM) 을 이용하여 입구부와 출구부의 구멍 직경을 측정하였고, 그리고 천공된 구멍의 입구부와 출구부의 직경의 차에 대한 표준 편차 (η) 를 식 (3) 과 같이 정의하였고, 이 때 표준 편차 (η) 값이 작으면 작을수록 천공 품질이 양호하다고 평가하였다.

$$\eta = \frac{D_{ENT} - D_{EXIT}}{T} \quad (3)$$

여기서, D_{ENT} , D_{EXIT} , T 는 각각 천공된 입구부와 출구부 구멍 직경이며, 재료의 두께이다. 또한, 천공된 시편의 중앙부 천공 단면 형상을 관찰하기 위하여 천공된 재료 입구부 표면의 끝부분을 절단하여 중앙부 쪽으로 폴리싱 처리하여 천공 단면 형상을 관찰하였으며, 이 때, Fig. 16 과 같이 천공 단면의 좌우 끝부분의 지름을 천공 단면폭 (ψ) 이라 정의하여 천공 품질을 평가하였다.

Fig. 17 에서는 시편 하부에 생성되는 용융물의 특성을 파악하기 위해 시편 하부 좌우에 생성되는 용융물의 두께 (ζ) 를 그림과 같이 측정하였고, 천공단면 최대 테이퍼 각도 특성을 파악하기 위해 Fig. 18 과 같이 천공단면 최대 테이퍼 각도 (θ) 를 식 (4) 를 도입하여 천공 품질을 평가하였다.

$$\tan\theta = \frac{2H}{\phi_{ent} - \phi_{min}} \quad (4)$$

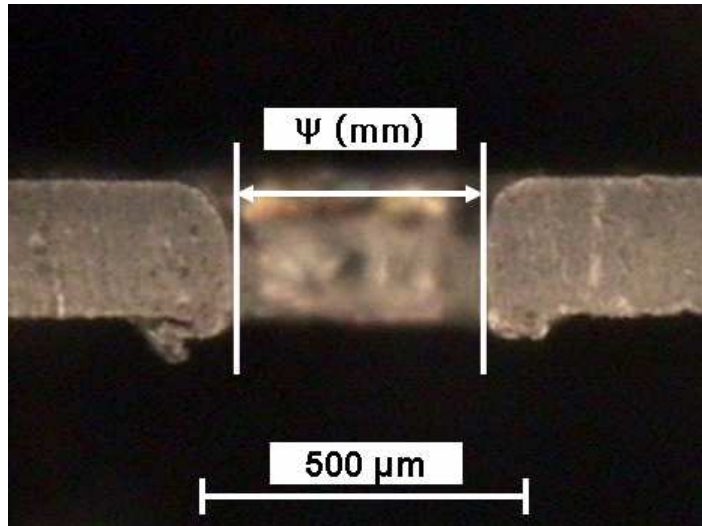


Fig. 16 Definition of the sectional width (Ψ) in the drilled section

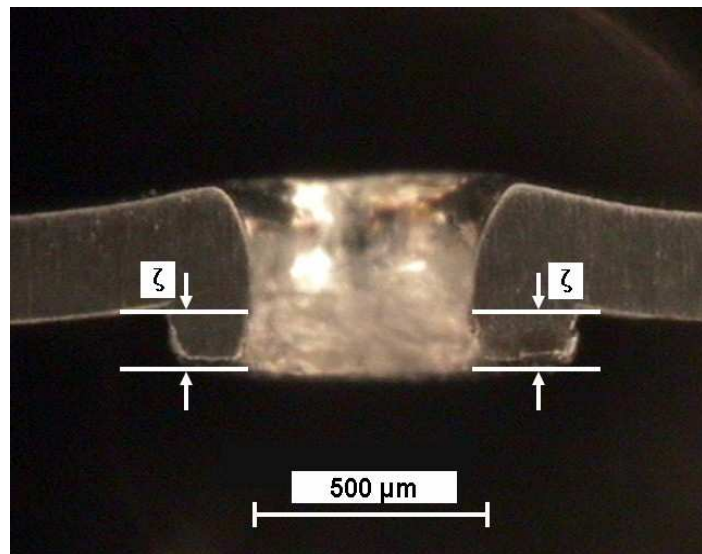


Fig. 17 Definition of the dross height (ζ) in the drilled section

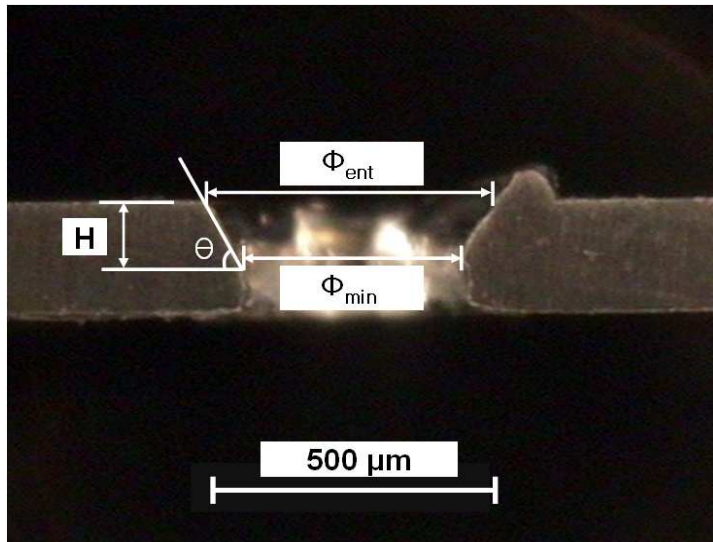


Fig. 18 Definition of the maximum taper angle (θ) in the drilled section

제 3 장 실험 결과 및 고찰

본 장에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 순수 알루미늄 금속 판재 천공시 초기 실험을 통한 초점거리 및 천공 가능 영역을 도출하였고, 도출된 천공 가능 영역에 대하여 세부 수준의 실험을 수행하고 대구찌 기법을 적용하여 천공 품질을 평가 분석하였다. 또한, 추가 실험에서는 공정 변수인 노즐 직경, 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수가 천공 품질 평가 척도인 천공된 구멍 직경, 구멍 직경의 표준 편차, 천공단면폭, 시편 하부의 용융물 두께 및 천공단면 최대 테이퍼 각도에 미치는 영향에 관하여 분석 및 고찰하였다.

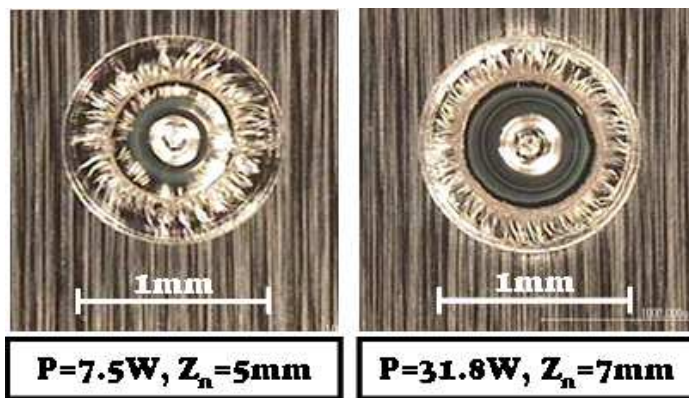
3.1 초점거리 및 천공 가능 영역

본 초기 실험 결과에서 초점거리 도출 및 공정변수의 천공 가능 영역에 대한 영향성 분석은 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 알루미늄 금속 판재 천공시 각 레이저 출력별로 초점거리를 변화시키면서 실험을 수행한 후, 광학현미경을 이용한 천공 여부를 판단하였다.⁽²⁹⁾ 이 때 분사 노즐 직경은 2.2 mm 이며, 천공 가스의 압력은 제외를 하였다. Table 6 과 Fig. 19 는 레이저 출력과 초점거리에 따라 실험을 수행한 후 얻어진 결과이다. 실험 결과에서는 레이저 출력이 7.5 W 인 경우 초점거리에 관계없이 천공이 불가능하였으며, 레이저 출력이 31.8 W 일 경우에는 초점거리 2 - 3 mm 와 6 - 8 mm 영역에서 미천공이 발생하였다. Fig. 19 (b) 와 같은 공정 조건에서는 천공은 가능하나 구멍의 진원도가 나빠며, 재료가 한쪽으로 용융되어 크레이터가 높게 생성되는 것을 알 수 있었고, 이러한 원인은 초점거리의 높낮이 크기 때문으로 사료된다. 반면 레이저 출력이 54.5 - 72.5 W 범위에 있고, 레이저 초점거리가 4 - 6 mm 범위인 경우에는 Table 6 및 Fig. 19 (c) 와 같이 천공된 구멍의 진원도가 좋았으며, 천공부 표면의 상태가 양호한 품질의 천공 제품이 취득됨을 알 수 있었다. 또한, 레이저 출력이 76.5 W 인 경우는 초점거리가 5 - 6 mm 범위에 존재할 때 양호한 품질의 천공이 가능함

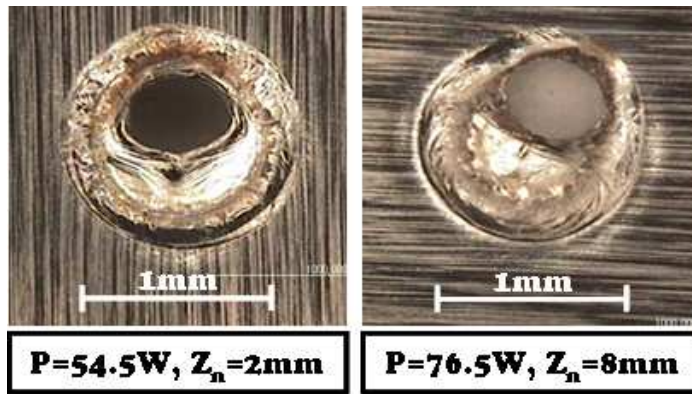
을 알 수 있었다.

Table 6. Results of preliminary drilling tests

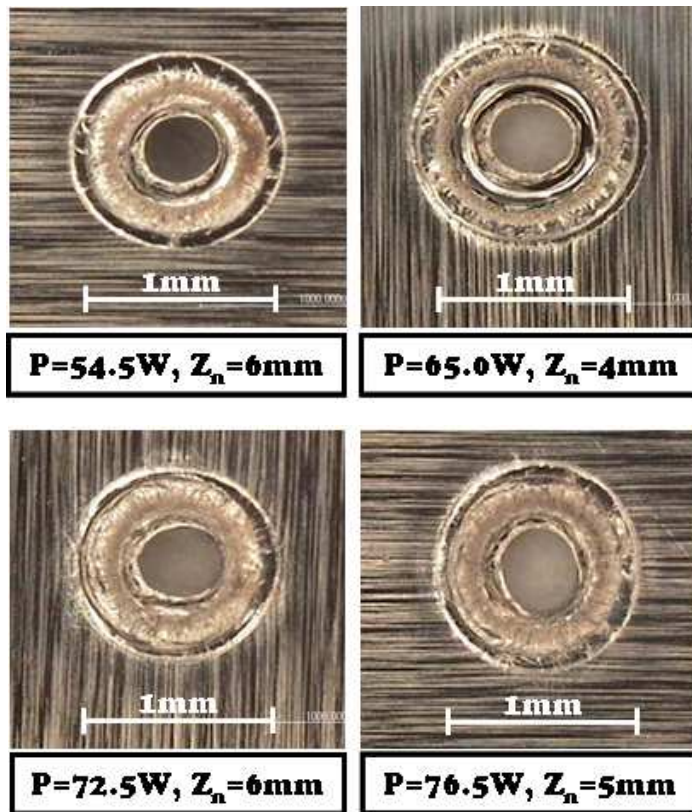
Drilling Quality		P (W)	P _f (Hz)	Z _n (mm)
Not drilled		7.5	1	All ranges
		31.8	4	2-3 and 6-8
Drilled	Good	54.5	8	4-6
		65.0	12	4-6
		72.5	16	4-6
		76.5	20	5-6
	Bad	31.8	4	4-5
		54.5	8	2-3 and 8
		65.0	12	2-3 and 7-8
		72.5	16	2-3 and 7-8
		76.5	20	2-3 and 6-8



(a) Not drilled conditions



(b) Bad drilled conditions



(c) Good drilled conditions

Fig. 19 Variation of entrance formation of the drilled hole according to preliminary experimental condition

3.2 다구찌 기법을 이용한 천공 품질 특성 분석

초기 실험에서 도출된 초점거리와 천공 가능 영역에 대하여 세부 수준의 실험에 대한 다구찌 기법을 이용한 실험을 수행한 결과 Table 7 과 같이 각 실험 조건별 재료의 입구부와 출구부의 구멍 직경 크기를 측정하였다. 각 실험 조건별 측정된 실험 결과로부터 천공 구멍 직경이 최소화되는 공정 변수 조건을 도출하기 위하여 공정변수별 각 수준에 대한 S/N 비를 Fig. 20 과 같이 산출하였다.

Table 7. Results of drilled hole diameters for each experimental condition

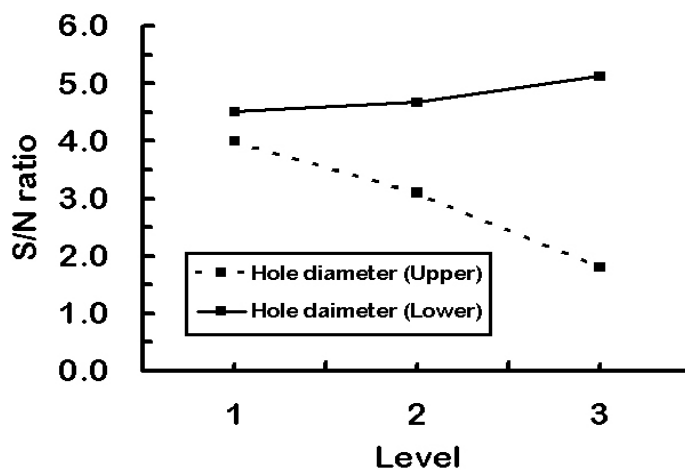
Experimental conditions	Hole diameter (mm)	
	Upper Avg.	Lower Avg.
$P_g=0.00\text{MPa}$, $Z_n=4\text{mm}$, $P=54.5\text{W}$	0.762	0.755
$P_g=0.01\text{MPa}$, $Z_n=5\text{mm}$, $P=65.0\text{W}$	0.788	0.674
$P_g=0.02\text{MPa}$, $Z_n=6\text{mm}$, $P=72.5\text{W}$	0.976	0.591
$P_g=0.00\text{MPa}$, $Z_n=5\text{mm}$, $P=72.5\text{W}$	0.711	0.660
$P_g=0.01\text{MPa}$, $Z_n=6\text{mm}$, $P=54.5\text{W}$	0.886	0.647
$P_g=0.02\text{MPa}$, $Z_n=4\text{mm}$, $P=65.0\text{W}$	0.885	0.652
$P_g=0.00\text{MPa}$, $Z_n=6\text{mm}$, $P=65.0\text{W}$	0.697	0.634
$P_g=0.01\text{MPa}$, $Z_n=4\text{mm}$, $P=72.5\text{W}$	0.736	0.682
$P_g=0.02\text{MPa}$, $Z_n=5\text{mm}$, $P=54.5\text{W}$	0.931	0.663

측정된 S/N 비 값의 경우 식(2) 와 같이 망소 특성 (Smaller-The-Better)을 가지고 있으므로, 실험 범위 중 최대의 S/N 비를 나타내는 것이 최소의 직경을 가지는 천공 조건임을 나타낸다. Fig. 20 (a) 와 (b)에서 천공 가스 압력과 레이저 초점거리의 경우 3수준으로 갈수록 S/N 비가 커지게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 20 (a) 의 경우 천공된 시편의 입구부 구멍 직경에 대한 S/N 비 값이 천

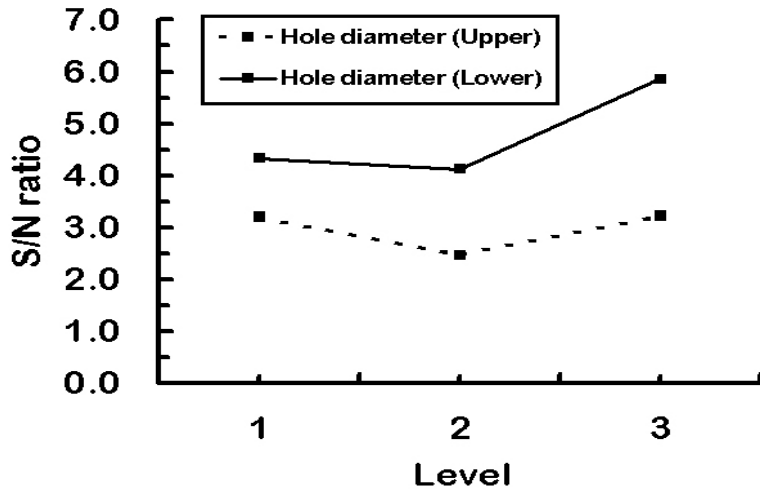
공 가스 압력 0.00 MPa 에서 가장 높은 값이 나타났는데, 이러한 원인은 레이저 빔 조사시 시편 표면의 용융물이 빨리 외부로 분출되지 못하여 구멍 직경 크기가 더 작게 형성되는 것으로 사료된다. Fig. 20 (c)에서 레이저 출력의 경우 3수준 실험 조건에서 최대의 S/N 비 값이 나타남을 알 수 있었다.

위 결과로부터 양질의 천공 품질을 가지는 공정 변수 조건은 천공된 시편의 출구부 측면에서는 가스 압력, 초점거리 및 레이저 출력의 경우 각각 0.02 MPa, 6.0 mm, 72.5 W 이지만, 입구부 측면에서는 0.00 MPa, 6.0 mm, 72.5 W 일 경우에 최소의 직경을 가지는 천공이 가능함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 20에서 천공된 입구부 직경이 출구부 직경보다 S/N 비가 적게 나타남을 알 수 있으며, 이러한 결과로부터 천공된 구멍의 입구부 직경이 출구부 직경보다 비교적 더 크게 형성된다는 사실을 알 수 있었다.

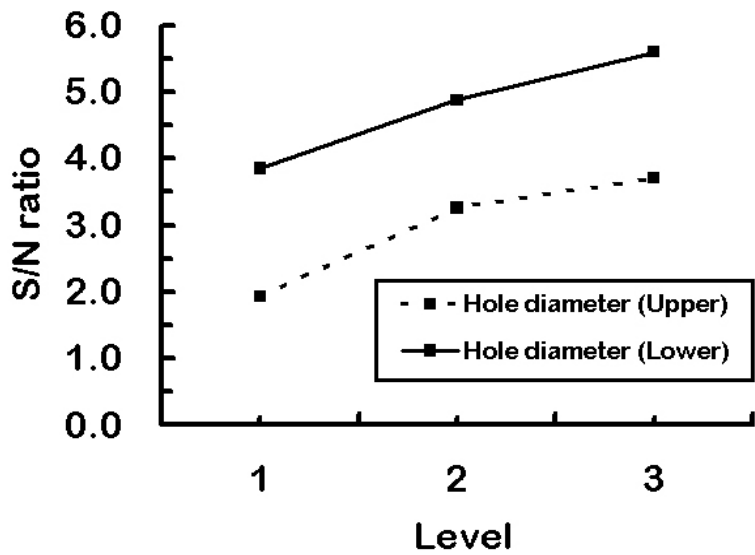
Fig. 21 와 22 은 각 실험 조건별 천공 표면 상태를 나타낸다. Fig. 21 와 22 에서 천공 가스 압력, 레이저 초점거리 및 레이저 출력이 각각 0.02 MPa, 6.0 mm 및 72.5 W 일 때와 0.00 MPa, 5.0 mm 및 72.5 W 일 때 천공된 구멍의 형상은 거의 비슷함을 알 수 있었으나, 천공 가스 압력이 0.00 MPa 인 조건인 경우는 천공된 구멍의 입구부와 출구부의 모재가 용융되어 솟아오르는 량이 현저히 증가하여 천공 후 모재 후가공량이 증가하는 것을 알 수 있었다.



(a) Effects of a gas pressure

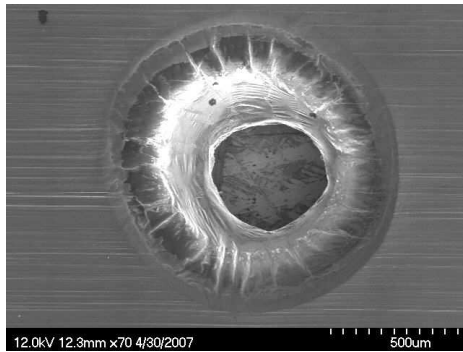


(b) Effects of a focal distance

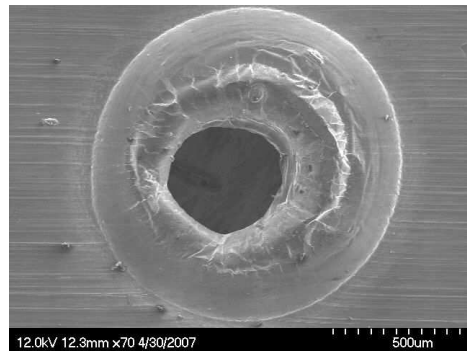


(c) Effects of a laser power

Fig. 20 Variation of S/N ratio according to process parameters

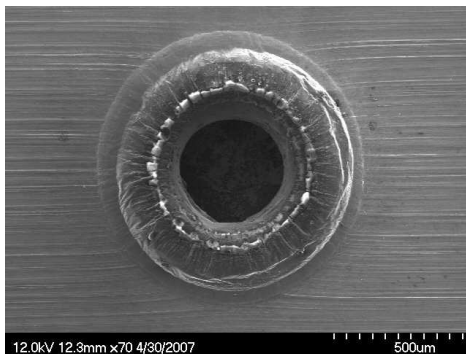


(a) Upper side

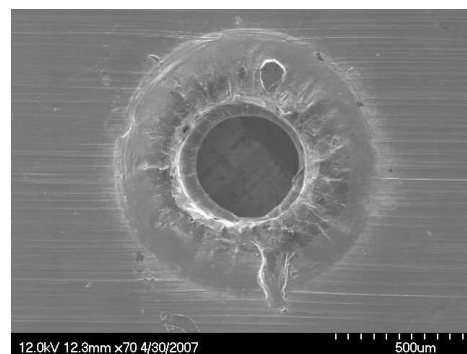


(b) Lower side

Fig. 21 SEM images of formation of the drilled hole ($P_g = 0.02$ MPa, $Z_n = 6.0$ mm, $P = 72.5$ W)



(a) Upper side



(b) Lower side

Fig. 22 SEM images of formation of the drilled hole ($P_g = 0.00$ MPa, $Z_n = 5.0$ mm, $P = 72.5$ W)

3.3 공정변수에 따른 천공 품질 특성 분석

본 연구에서는 앞선 실험에서 도출된 공정 조건에 대한 천공된 가공 품질보다 천공된 구멍 직경이 최소화되며, 천공단면 형상 등 양질의 천공된 가공품을 얻기 위하여 공정변수인 노즐 직경, 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수가 천공 품질 평가 척도에 미치는 영향성을 분석 및 고찰하였다.

3.3.1 천공된 구멍 직경

본 연구를 통하여 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 알루미늄 판재 재료 천공시 공정변수와 천공된 구멍 직경의 상관관계를 규명하고, 이러한 결과를 바탕으로 양질의 천공 품질을 정량적으로 얻고자 한다.

Fig. 23 는 노즐 직경별 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수에 따른 재료 입구부와 출구부의 천공된 구멍 형상을 나타내었다. 펄스 투사 시간이 0.5 ms 일 경우 노즐 직경 0.5, 0.7 그리고 2.2 mm 에서는 천공이 불가능 하였으며, 노즐 직경 1.0 mm 에서만 천공이 가능하였다. 이러한 결과는 분사 노즐 직경에 따라 재료 표면 위에 충돌되어 나오는 천공 가스의 동압 차이 때문으로 미천공이 나타나는 것으로 사료된다. Table 8 는 가스 압력 0.05 MPa 동일 조건에서 각 노즐 직경별 동압을 측정한 결과이다. 또한, 노즐 직경 0.7 mm 경우 다른 노즐 직경에 비해 양호한 천공 품질이 나타남을 알 수 있었으며, 그 중에서도 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수가 1.0 ms 와 12 Hz 경우에 가장 우수한 천공 품질 상태를 나타내었다. 반면, 노즐 직경이 1.0 mm 의 경우에는 재료 표면 위의 천공 상태를 확인한 결과 용융물이 한쪽 방향으로 분출되어 크레이터가 생성되었으며, 노즐 직경 2.2 mm 경우에는 재료 입구부의 천공된 구멍 직경이 가장 크게 나타났으며, 출구부에서는 용융물이 크게 생성됨을 알 수 있었다.

Fig. 24 (a) - (d) 는 노즐 직경별 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수에 따른 재료 입구부와 출구부의 천공된 구멍 직경을 측정한 결과이다. Fig. 24 (a) 에서는 펄스 투사 시간이 1.0 ms 일 경우 펄스 반복 횟수 증가에 따른 천공된 입구부

		$N_d = 0.5$		$N_d = 0.7$		$N_d = 1.0$		$N_d = 2.2$	
P_d (ms)	P_f (Hz)	Upper side	Lower side	Upper side	Lower side	Upper side	Lower side	Upper side	Lower side
0.5	4,8,12	미천공		미천공		천공 (모두)		천공 (12Hz)	
1.0	4	미천공		미천공					
1.0	8								
1.0	12								
2.0	4								
2.0	8								
2.0	12								

Fig. 23 Effects of process parameters on hole formation

Table 8. Variation of dynamic pressure according to nozzle diameter

Nozzle diameter (mm)	Dynamic pressure (Pa)
2.2	6,000
1.0	12,200
0.7	9,900
0.5	10,200

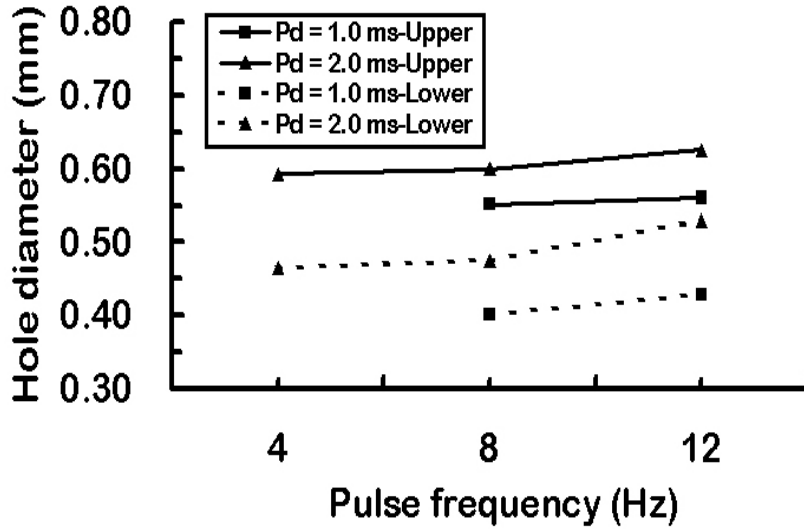
와 출구부 구멍 직경은 각각 0.552 - 0.561 mm 와 0.401 - 0.429 mm 로 나 타났으며, 펄스 투사 시간이 2.0 ms 일 경우에는 0.593 - 0.626 mm 와 0.465 - 0.530 mm 로 펄스 투사 시간이 1.0 ms 에 비해 천공된 구멍 직경이 크게 생성됨을 알 수 있었다. 또한 펄스 반복 횟수가 증가할수록 천공된 구멍 직경 이 0.01 - 0.02 mm 범위 내에서 조금씩 증가하였다.

마찬가지로 Fig. 24 (b) 에서도 펄스 투사 시간이 1.0 ms 에서 2.0 ms 로 증가시 천공된 구멍 직경이 0.01 - 0.03 mm 범위 내에서 증가함을 알 수 있었다. 동일 펄스 투사 시간에서 펄스 반복 횟수가 4 Hz 에서 12 Hz 로 증가시 천공된 구멍 직경이 약 0.01 mm 내외 정도씩 증가하였다. 그리고, 펄스 투사 시간 1.0 ms 와 펄스 반복 횟수 12 Hz 일 경우 천공된 입구부와 출구부 직경 차이는 0.05 mm 정도로 가장 작았으며, 그 때 평균 직경은 0.586 mm 를 나타내었다.

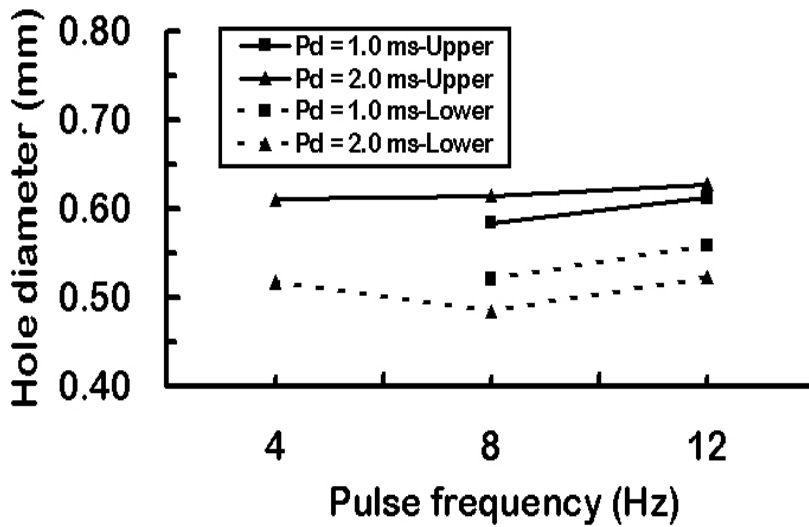
Fig. 24 (c) 인 노즐 직경이 1.0 mm 일 경우 모든 공정 조건에서 천공이 가능하였으며, 펄스 투사 시간이 0.5 ms 에서 펄스 반복 횟수가 4 - 12 Hz 일 경우 천공된 구멍 직경 크기는 0.475 - 0.487 mm 범위로 나타났으며, 펄스 투사 시간이 1.0 ms 일 경우 펄스 투사 시간이 0.5 ms 일 때와 천공된 구멍 직경이 비교적 비슷한 범위를 나타내었다. 반면, 펄스 투사 시간이 2.0 ms 일 경우는 펄스 투사 시간이 0.5 ms 와 1.0 ms 에 비해 천공된 구멍 직경은 0.05 mm 내외 정도의 증가 폭이 나타남을 알 수 있었다. 마찬가지로 펄스 반복 횟수가 증가할수록 천공된 구멍 직경은 약 0.01 mm 내외 정도로 증가하였다.

Fig. 24 (d) 의 노즐 직경이 2.2 mm 일 경우 천공된 입구부 구멍 직경 크기가 0.633 - 0.747 mm 의 범위로 가장 크게 형성됨을 알 수 있었으며, 반면 출구부 구멍 직경 크기는 0.201 - 0.360 mm 의 범위로 가장 작게 형성되어 천공단면 직진도가 좋지 않음을 확인할 수 있었다. 마찬가지로 펄스 반복 횟수가 동일한 조건에서 펄스 투사 시간이 1.0 ms 에서 2.0 ms 로 증가할수록 천공된 구멍 직경이 약 0.04 mm 정도 증가하였다.

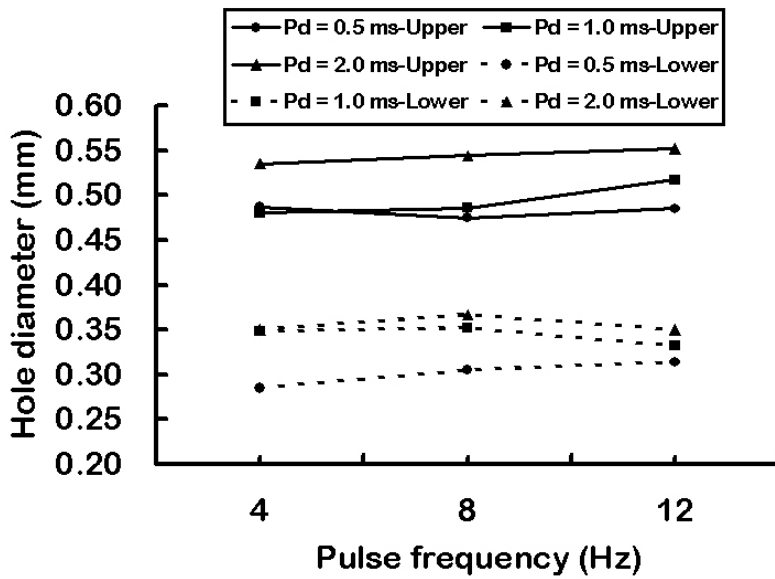
Fig. 25 (a) 와 (b) 는 펄스 투사 시간에 따른 공정변수와 천공된 구멍 직경의 상관관계를 나타낸다. 펄스 투사 시간이 1.0 ms 일 경우 노즐 직경이 0.5 과 0.7 mm 에서는 재료 입구부의 천공된 구멍 직경이 비슷하게 나타났으며, 노즐 직경이 1.0 mm 에서 입구부 구멍 직경이 작아지다가 노즐 직경이 2.2 mm 에서 다시 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 노즐 직경이 0.7 mm 에서 입구부와 출구부의 천공된 구멍 직경 차이가 0.05 - 0.06 mm 로 가장 작게 나타나는 것을 확인하였다. 반면, 노즐 직경 1.0 mm 경우 천공된 구멍 직경은 작지만 재료 상부 표면에서 용융물이 한쪽 방향으로 크레이터가 생성되는 것을 알 수 있었는데, 이러한 이



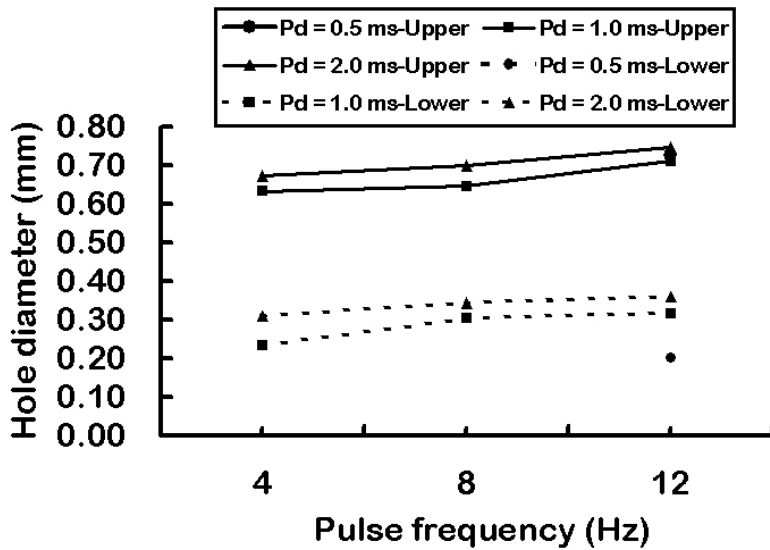
(a) 0.5 mm of nozzle diameter



(b) 0.7 mm of nozzle diameter



(c) 1.0 mm of nozzle diameter

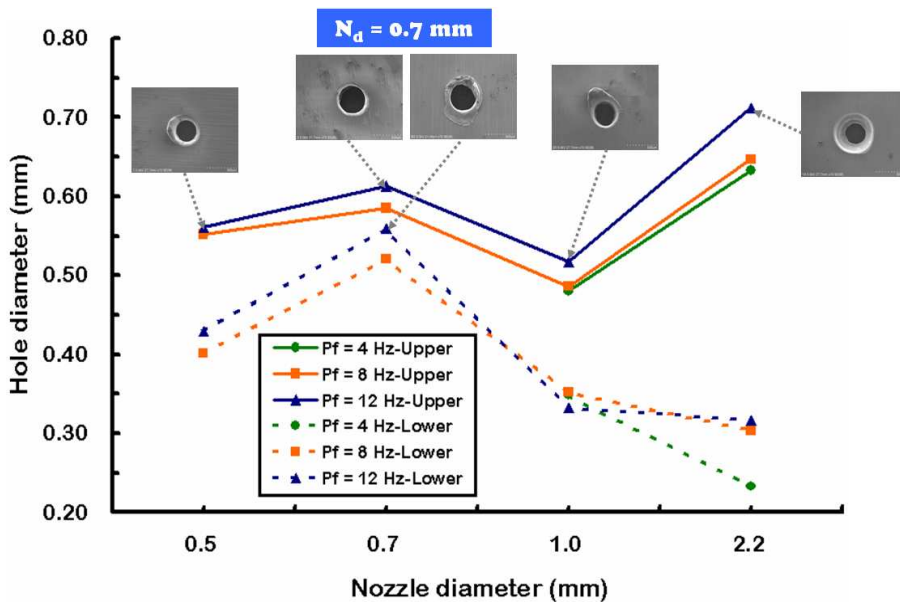


(d) 2.2 mm of nozzle diameter

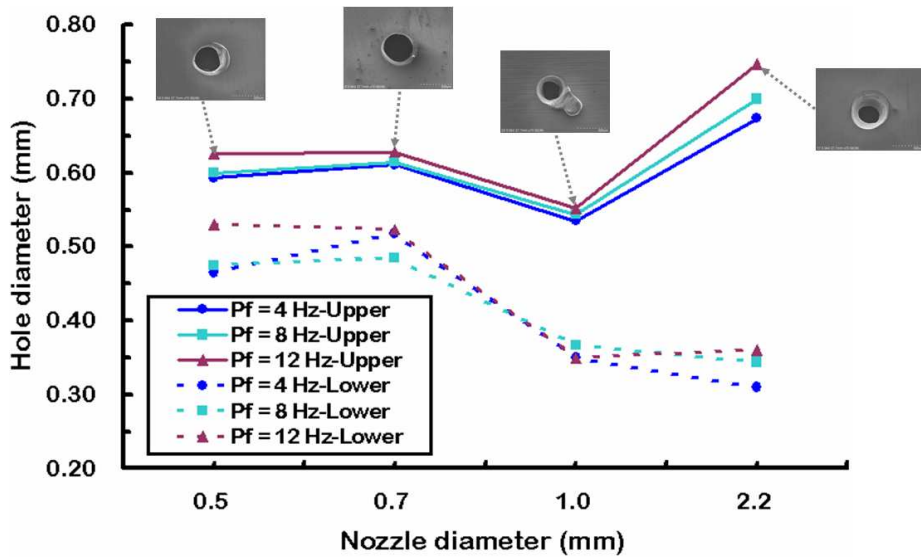
Fig. 24 Influence of pulse frequency and pulse duration on hole diameter for different nozzle diameters

유는 레이저 빔과 재료와의 상호 작용 시간 동안 용융물이 재료 하부 쪽으로 분출되지 못하고 이 때 노즐 출구부에서 빠져 나오는 천공 가스의 동압이 높아 재료 상부 쪽으로 용융물이 다시 흘러나오는 것으로 사료된다.

또한, 노즐 직경이 2.2 mm 일 경우 입구부 구멍 직경은 가장 크며, 출구부 구멍 직경은 가장 작게 나타났는데, 이러한 이유는 노즐 출구부로부터 빠져 나오는 천공 가스가 재료와의 접촉 면적이 많아 재료 입구부의 천공된 구멍 직경이 크게 형성되는 것으로 판단되며, 출구부 천공된 구멍 직경에 대해서는 재료가 두께 방향으로 용융되어가면서 분사 노즐에서 나오는 천공 가스 동압이 길이 방향에 반비례하여 줄어들어 구멍 직경이 작아진다고 사료된다.



(a) 1.0 ms of pulse duration



(b) 2.0 ms of pulse duration

Fig. 25 Variation of the hole diameter according to nozzle diameter and pulse duration

3.3.2 구멍 직경의 표준 편차 (η)

Fig. 26 은 천공된 구멍의 입구부와 출구부의 직경 차에 대한 표준 편차 (η) 를 측정된 결과이다. 그 결과, 노즐 직경이 0.7 mm 일 경우 표준 편차 (η) 값이 0.27 - 0.65 범위로 작게 나타났으며, 그 중에서도 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수가 각각 1.0 ms 와 12 Hz 에서 가장 작게 나타남을 알 수 있었다. 반면 노즐 직경이 증가할수록 표준 편차 (η) 값이 증가함을 알 수 있었으며, 특히 노즐 직경 2.2 mm 일 경우 표준 편차 (η) 값이 1.72 - 2.0 범위로 가장 높게 나타나 천공 품질이 가장 좋지 않음을 확인 할 수 있었다.

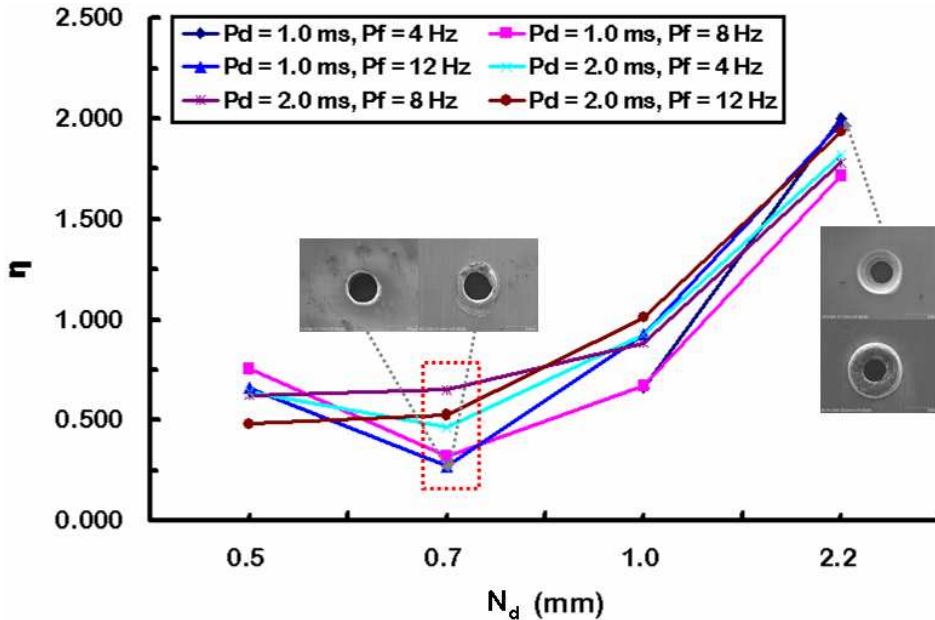


Fig. 26 Effects of process parameters on normalized deviation of hole diameter (η) for different nozzle diameters

3.3.3 천공 단면폭 (ψ)

Fig. 27 은 노즐 직경별 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수에 따른 천공 단면 형상 사진이다. 이 결과로부터 노즐 직경 0.7 mm 일 경우 천공 단면의 직진도가 다른 노즐 직경에 비해 좋은 품질은 나타냈고, 그 중에서도 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수가 각각 1.0 ms 와 12 Hz 에서 우수한 천공 품질을 얻을 수 있었다. 반면 노즐 직경이 0.5 mm, 1.0 mm, 2.2 mm 일 경우 천공 단면폭의 직진도가 전체적으로 좋지 않았으며, 특히 노즐 직경 1.0 mm 에서는 재료 표면 상부에서 크

P_d (ms)	P_f (Hz)	$N_d = 0.5$	$N_d = 0.7$	$N_d = 1.0$	$N_d = 2.2$
0.5	4,8,12	미천공	미천공	천공 (모두)	천공 (12Hz)
1.0	4	미천공	미천공		
1.0	8				
1.0	12				
2.0	4				
2.0	8				
2.0	12				

Fig. 27 Influence of process parameters on the formation of cross section in the drilled hole

레이터가 생성되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 28 는 공정 변수와 천공 단면폭의 상관관계를 나타내었다. 측정 결과 펄스 투사 시간이 증가할수록 천공 단면폭이 증가함을 알 수 있었고, 특히 노즐 직경 0.7 mm 경우 펄스 반복 횟수와 펄스 투사

시간이 각각 12 Hz 와 2.0 ms 에서 천공 단면폭이 0.48 mm 로 가장 크게 나타났지만, 시편 하부의 용융물이 생성됨을 확인하였다. 반면 펄스 투사 시간이 1.0 ms 이며, 펄스반복 횟수가 12 Hz 일 경우 천공 단면폭은 0.38 mm 이었지만, 천공 품질이 더 양호함을 확인 할 수 있었다. 그리고 노즐 직경 1.0 mm 와 2.2 mm 에서는 천공 단면폭이 비교적 작게 나타났고, 천공부 상하면의 구멍 직경 차이가 많이 남을 확인 할 수 있었으며, 천공 단면의 직진도 역시 좋지 않음을 확인하였다. 또한, 노즐 직경 0.5 mm 일 경우 동일 펄스 반복 횟수에서 펄스 투사 시간이 증가시 천공 단면폭이 약 62 % 정도 크게 증가함을 알 수 있었다.

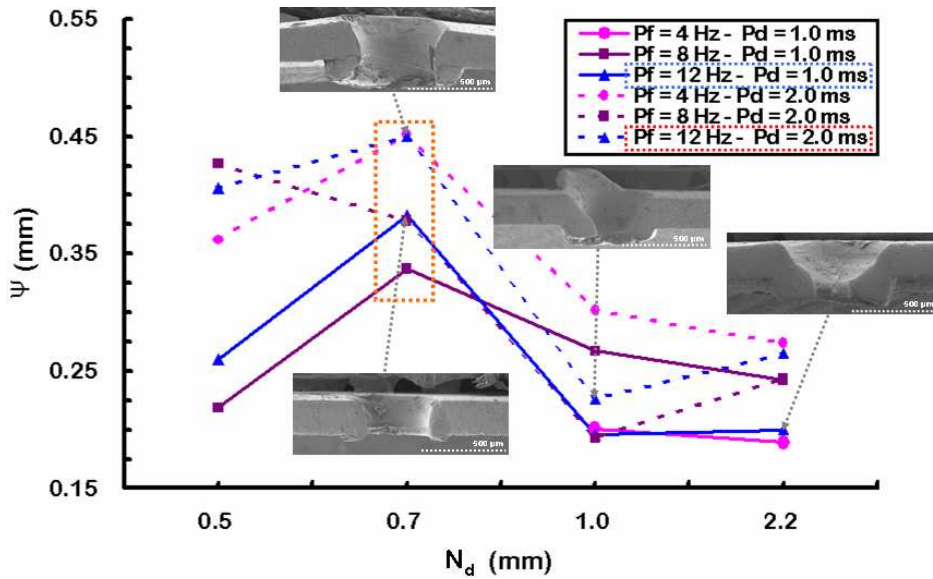
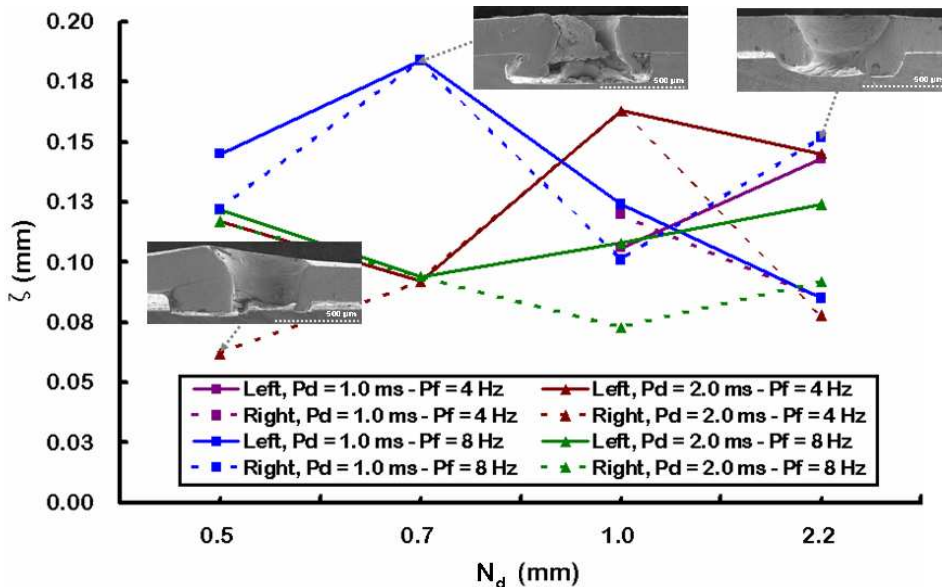


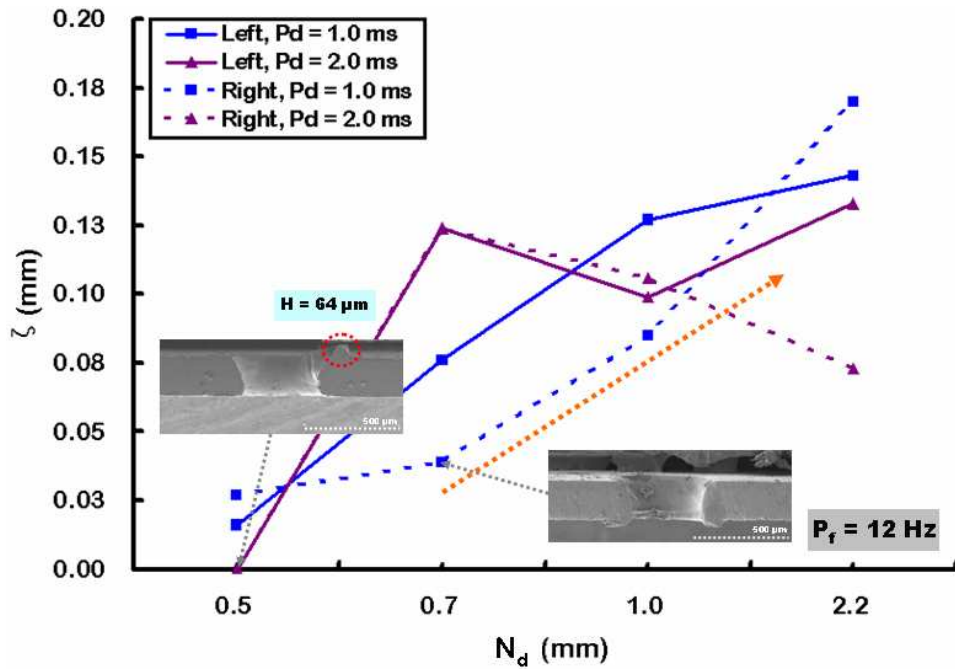
Fig. 28 Variation of sectional width (Ψ) according to nozzle diameter for different pulse durations and frequencies

3.3.4 시편 하부 용융물 두께 (ζ)

Fig. 29 (a) 와 (b) 는 레이저 공정변수와 시편 하부 용융물 두께 (ζ) 의 상관 관계를 나타내었다. 측정된 결과 Fig. 29 (a) 에서 노즐 직경별 펄스 반복 횟수 4 와 8 Hz 일 경우 시편 하부의 용융물 두께가 0.06 - 0.18 mm 범위로 나타났으며, 전체적으로 모든 공정 조건에서 천공 단면 품질이 좋지 않음을 확인 할 수 있었다. 반면 Fig. 29 (b) 에서는 펄스 반복 횟수 12 Hz 일 경우 노즐 직경 0.5 mm 이며, 펄스 반복 횟수가 2.0 ms 에서 시편 하부 용융물 두께가 거의 나타나지 않음을 확인하였지만, 재료 상부면에 높이 64 μm 정도의 크레이터가 생성되는 것을 확인하였다. 반면 시편 하부 용융물 두께가 작으며, 천공 단면 상태가 가장 양호한 공정 조건으로는 노즐 직경과 펄스 투사 시간이 각각 0.7 mm 와 1.0 ms 로 나타났다. 그리고 펄스 반복 횟수가 12 Hz 일 경우 노즐 직경이 증가할수록 시편 하부 용융물 두께가 비교적 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.



(a) 4 and 8 Hz of pulse frequency



(b) 12 Hz of pulse frequency

Fig. 29 Effects of nozzle diameter and pulse duration on the dross height (ζ) for different pulse frequencies

3.3.5 최대 테이퍼 각도 (θ)

Fig. 30 는 공정변수와 천공단면 최대 테이퍼 각도와의 상관관계를 나타낸다. 펄스 투사 시간 1.0 ms 일 경우 펄스 반복 횟수가 증가할수록 천공 단면 최대 테이퍼 각도가 증가함을 알 수 있으며, 또한 노즐 직경 0.5 - 0.7 mm 일 경우 노즐 직경 1.0 - 2.2 mm 에 비해 천공 단면 최대 테이퍼 각도가 비교적 크게 형성됨을 알 수 있었다. 특히 최대 테이퍼 각도가 가장 큰 공정 조건은 노즐 직경, 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수가 각각 0.7 mm, 1.0 ms 그리고 12 Hz 이었다. 그러나 펄스 투사 시간이 2.0 ms 일 경우에는 다소 차이가 있음이 확인되었다. 노즐 직경 1.0 mm 일 경우 펄스 반복 횟수에 따라 테이퍼 각도 크기가 63 - 75° 범위로 가장 크게 형성되었으며, 노즐 직경 0.5 mm 와 0.7 mm 경우는 펄스 반복 횟수별로 테이퍼 각도가 거의 비슷한 값이 나타남을 알 수 있었다.

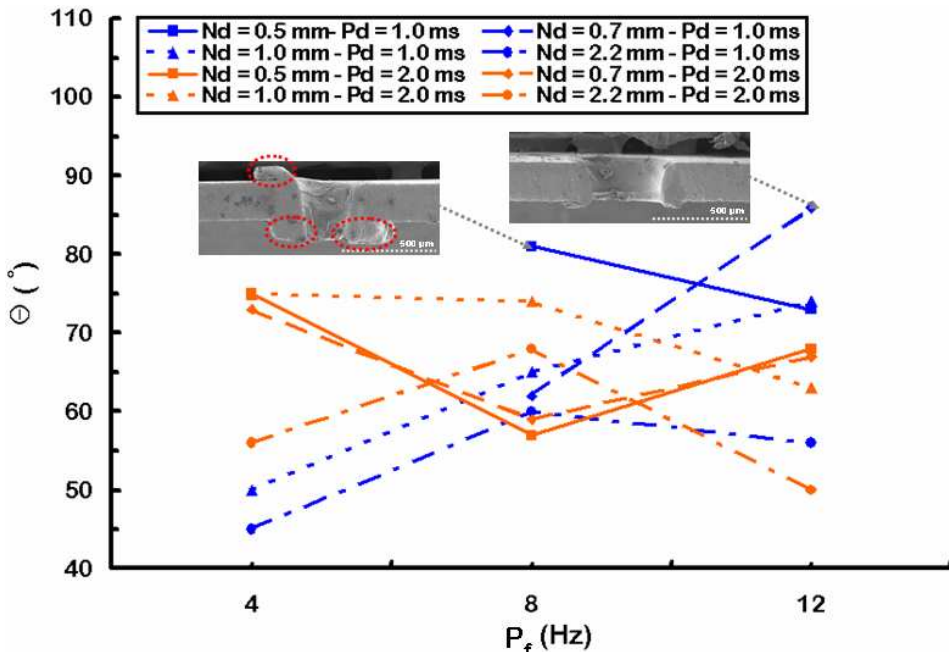


Fig. 30 Effects of process parameters on the maximum taper angle (θ) for different pulse frequencies

반면 노즐 직경 2.2 mm 일 경우에는 펄스 반복 횟수 4 Hz 와 12 Hz 범위에서 최대 테이퍼 각도가 가장 작은 50 - 56° 값을 나타내었다. 이 결과부터 천공단면 최대 테이퍼 각도는 펄스 투사 시간과 노즐 직경에 상당한 영향을 받음을 알 수 있었다.

제 4 장 3차원 비정상 열전달 해석

4.1 3차원 유한요소 모델링

본 장에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 순수 알루미늄 금속 박판 레이저 천공시 3차원 비정상 열전달 해석을 수행하기 위한 유한요소 모델을 도출하고, 도출된 유한요소 모델을 이용하여 공정변수가 재료 내부의 열전달 특성과 천공부 온도 분포에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하고자 하였다.

4.1.1 유한요소 지배방정식

레이저 천공 공정에서 가공 재료 내부의 온도 $T(x, y, z, t)$ 는 식 (5) 와 (6) 의 3차원 비정상 열전도 방정식을 만족시켜야 한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \dot{q} = \rho c_p \dot{T} \quad (6)$$

여기서, κ , \dot{q} , ρ 및 c_p 는 각각 재료의 열전도도, 단위시간당 투입열량, 재료의 밀도 및 재료의 정압비열이다. 본 연구에서는 레이저 천공 공정 중 재료 내부에 발생하는 3차원 열전달 특성을 분석하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS 6.5을 사용하였다.

4.1.2 펄스형 표면열원 모델링 도출

본 연구에서 레이저 열원은 Fig. 31 과 같은 가장 높은 에너지 밀도를 가지는 TEM₀₀ 모드의 펄스형 Nd:YAG 레이저를 모델링하기 적합한 가우시안 분포의 3차원 표면 열원으로 가정하였다.

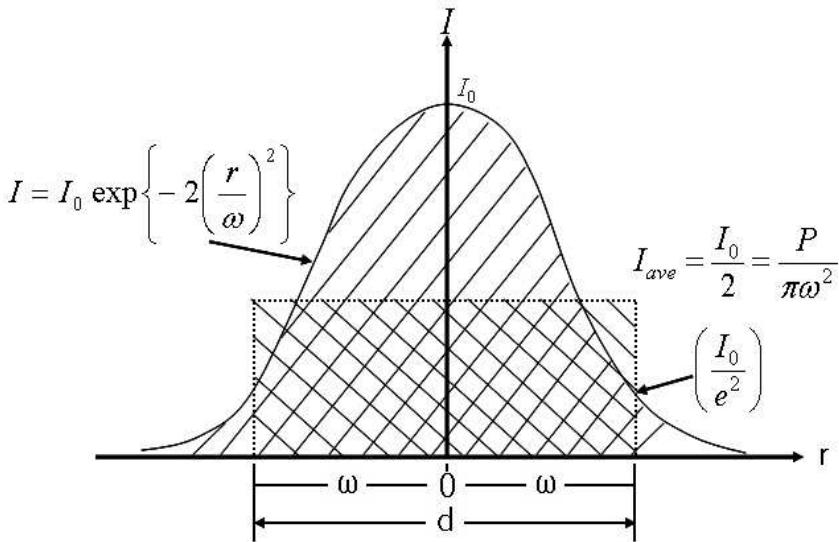


Fig. 31 Laser intensity distribution of TEM₀₀ mode

본 연구에서 사용된 레이저 에너지 강도는 레이저가 연속파로 동작하는 경우와는 달리 펄스 형태로 가공이 진행됨으로 그 때의 레이저 에너지는 평균출력, 첨두출력 및 펄스 투사 시간 등으로 결정된다.⁽³⁰⁾ 본 해석에서 사용된 레이저 에너지의 공간 분포와 열원 강도는 식 (7) 과 (8) 같이 산출하여 적용하였다.

$$I(r) = (1 - R_f) I_0 \exp\left\{-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^2\right\} = (1 - R_f) \frac{2P_P}{\pi\omega^2} \exp\left\{-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^2\right\} \quad (7)$$

$$P_P \cdot t_{FWHM} = \int_0^t P dt \quad (8)$$

여기서, I_0 , r , ω , P_p , R_f 및 t_{FWHM} 는 각각 최고 출력 밀도, 빔의 중심으로부터 원주 방향 거리, 초점에서의 레이저 빔 반경, 레이저 펄스의 첨두 출력, 재료의 반사율 및 펄스 투사 시간이다. 본 연구에서 유한요소 해석을 위한 레이저 열원 분포, 레이저 강도 및 열원 강도의 시간 변화는 ABAQUS 6.5에서 제공하는 User Subroutine 기능을 이용하여 구현하였다.⁽³¹⁾ Fig. 32 는 노즐 직경 1.0 mm, 펄스 투사 시간 1.0 ms 및 펄스 반복 횟수 4 Hz 일 때 표면열원 모델링이다.


```

SUBROUTINE DFLUX(FLUX,SOL,JSTEP,JINC,TIME,NOEL,NPT,COORDS,JLTYP,
1              TEMP,PRESS,SNAME)
C
C   INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
C   DIMENSION FLUX(2),TIME(2),COORDS(3)
C   CHARACTER*80 SNAME
C
RB=0.2
RB2=RB**2
Q=5200000
X_CENTER=0.0
Y_CENTER=0.0
Z_CENTER=0.2
R1=SQRT((COORDS(1)-X_CENTER)**2+(COORDS(2)-Y_CENTER)**2+
1      (COORDS(3)-Z_CENTER)**2)
QR=Q*EXP(-2*R1**2/RB2)
C
IF(TIME(1).LE.0.001.AND.COORDS(3).GE.0.2.AND.R1.LE.RB) THEN
FLUX(1)=QR
ELSE
FLUX(1)=0
END IF

IF(TIME(1).GE.0.025.AND.TIME(1).LE.0.026) THEN
FLUX(1)=QR
END IF

IF(TIME(1).GE.0.05.AND.TIME(1).LE.0.051) THEN
FLUX(1)=QR
END IF

IF(TIME(1).GE.0.075.AND.TIME(1).LE.0.076) THEN
FLUX(1)=QR
END IF

```

Fig. 32 Subroutine programme to represent surface heat source model in FE analysis

4.1.3 유한요소 해석 방법 및 경계조건

본 연구에서는 유한요소 해석을 위한 모델링 부분의 치수는 Fig. 33 과 같이 천공부 유한 요소 격자를 레이저 천공 열전달 해석에 알맞게 모델링 하기 위해 원형의 지름 6 mm 와 두께 0.2 mm 로 설계하였다. 유한 요소 모델 생성시 레이저 열원 중심부에서 외부로 이동하는 급격한 온도 변화 예측과 해석 시간을 단축하기 위하여 중심부 방향으로 점점 조밀한 격자가 생성되도록 바이어스 (Bias) 격자 생성법을 이용하였다. 두께 방향으로로는 5개의 유한 요소 격자를 생성하였다.⁽³²⁾

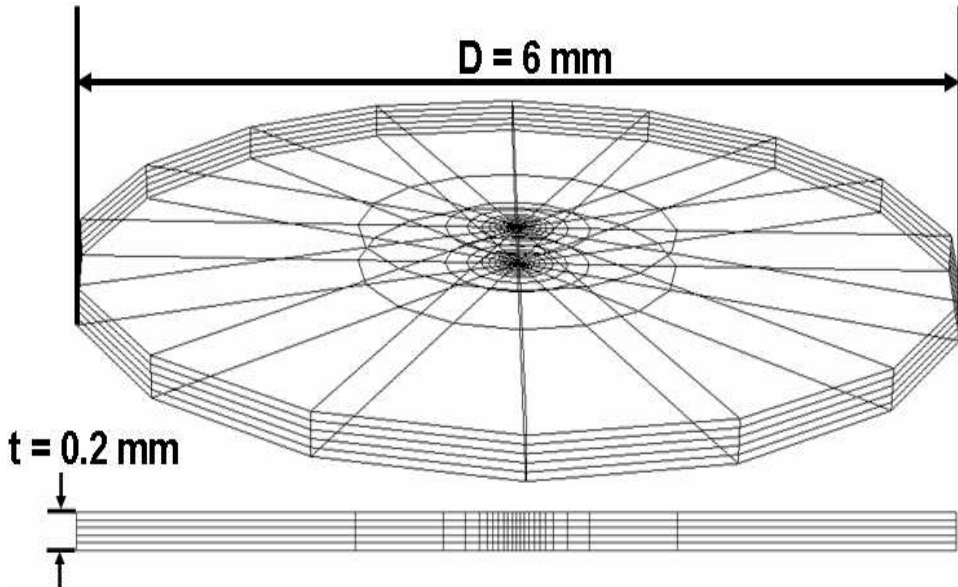
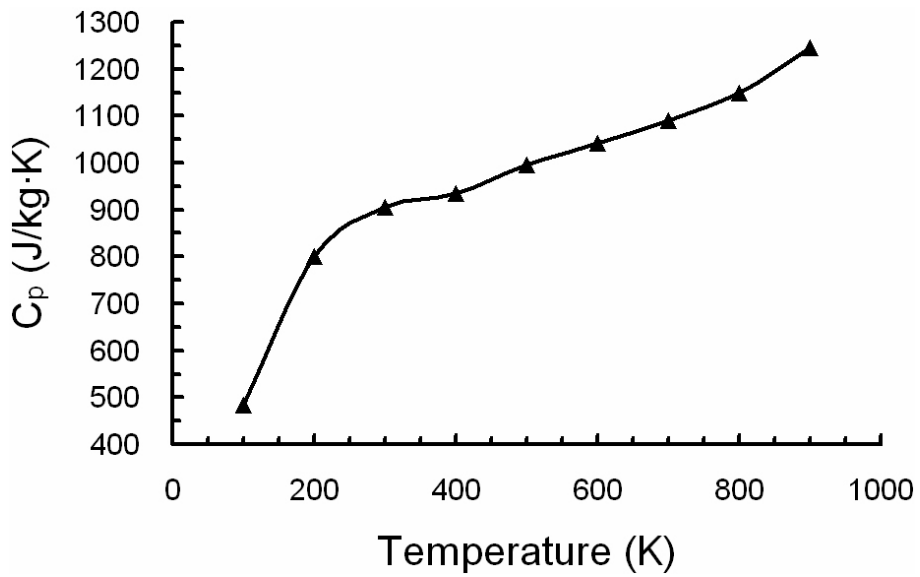


Fig. 33 Finite element meshes of transient heat transfer analysis

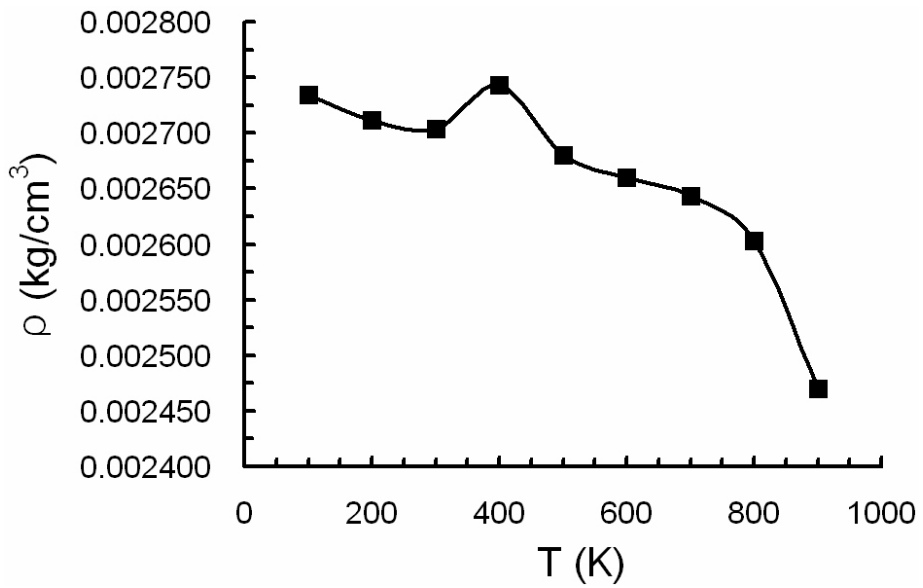
또한, 유한요소 해석에 사용된 유한 요소 격자 형태, 격자수 및 절점수는 Table 9 에 나타내었다. 해석에 사용된 순수 알루미늄 재료의 온도에 따른 열물성 데이터인 열전도도, 밀도 및 정압 비열은 Fig. 34 과 같이 온도 의존성 물성 데이터를 사용하였다.⁽³³⁾ 또한, 초점에서의 레이저 빔의 직경은 0.4 mm 이다.

Table 9. Meshes of transient heat transfer analysis

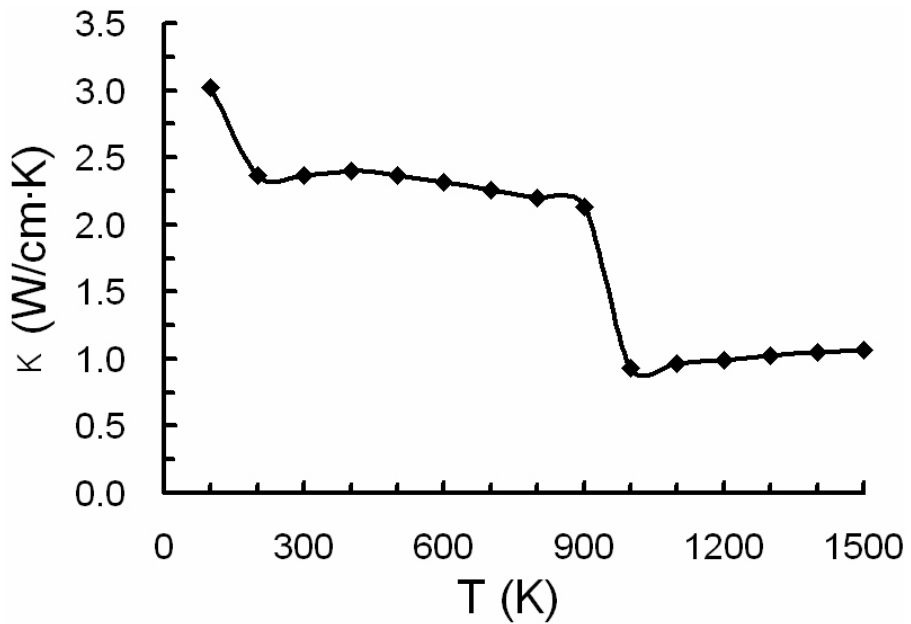
Geometric Order	Linear
Number of nodes (EA)	1,062
Number of elements (EA)	840
Element type	C3D8T



(a) Specific heat



(b) Density



(c) Thermal conductivity

Fig. 34 thermal properties of Al 1050 with temperature dependency

본 해석에서 사용된 레이저 천공 공정 해석을 위한 경계조건은 대류와 복사에 의한 열전달이 고려되었다. Fig. 35 와 같이 노즐 직경 0.5 - 2.2 mm 에 따라 강제 대류를 적용하였으며, 상면의 나머지 부분과 하면 전체는 자연 대류 값으로 계산하였다. 시편의 두께 부분에 대해서는 단열 조건으로 가정하였고, 대류에 의한 열손실은 식 (9) 과 같이 계산하였다.

$$q_{conv} = \bar{h} (T_{\infty} - T) \quad (9)$$

여기서, \bar{h} , T_{∞} , T 는 각각 자연 대류 계수, 시편의 초기온도, 대기 온도 이다. 이 때, 시편의 초기 온도와 대기 온도는 각각 26 °C 와 20 °C 이다. 자연 대류 계수는 재료의 상면이 뜨거운 판이라고 가정하였으며, 공기 1기압의 조건에서 온도 조건에 따라 다음 식 (10) - (12) 로 계산을 하였다.⁽³⁴⁾

$$h = \frac{\kappa}{\delta} N_u \quad (10)$$

$$N_u = 0.54 R_a^{1/4} \quad (11)$$

$$R_a = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})\delta^3}{\nu^2} P_r \quad (12)$$

여기서, κ , N_u , δ , R_a , g , β , P_r , ν 는 각각 열전도도, 너셀 수, 특성 길이, 레이 수, $2/T_s + T_{\infty}$, 프란틀 수, 동점성 계수 이다. 그리고 Fig. 35 와 같이 자연 대류 계수는 노즐 직경별 모든 조건에서 10 W/m² · °C 로 적용하였다.

반면 헬륨 1기압 조건에서 강제 대류 계수는 노즐 직경별로 따라 식 (13) - (15) 의 계산식을 적용하였다.

$$h = \frac{\kappa}{D} N_u \quad (13)$$

$$N_u = 0.193R_e^{0.618}P_r^{1/3} \quad (14)$$

$$R_e = \frac{V_\infty D}{\nu} \quad (15)$$

여기서, D , R_e , V_∞ 는 각각 노즐 직경, 레이놀즈 수, 노즐 직경별 가스 속도 이다. Table 10 은 강제 대류의 노즐 직경별 각각의 변수의 측정값이며, 본 연구의 유한요소 해석에 적용하였다.⁽³⁵⁾

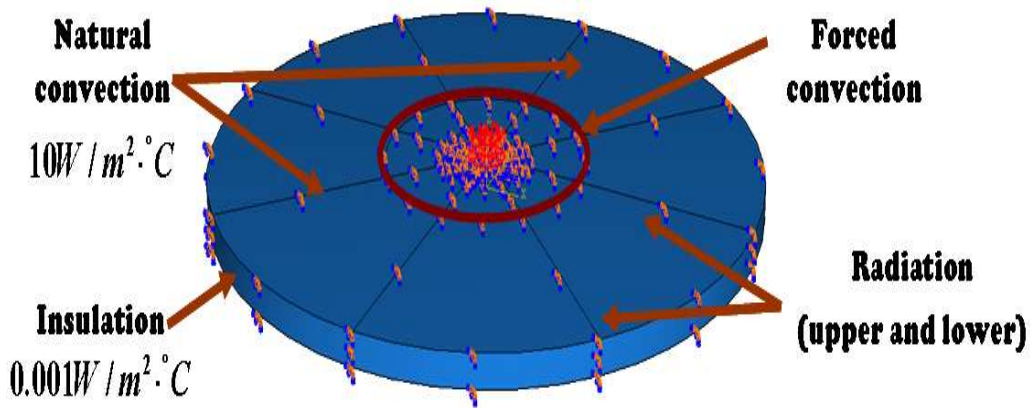


Fig. 35 Boundary conditions for transient heat transfer analysis

Table 10. Coefficient of forced convection for different nozzle diameters

N_d (mm)	V (m/s)	R_e	N_u	h ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
0.5	350	1,470	18.051	5,379
0.7	345	2,029	20.976	4,464
1.0	383	3,218	26.006	3,874
2.2	268	4,954	32.746	2,217

본 연구에서 복사에 의한 열전달은 Stefan-Boltzmann 법칙으로부터 구한 식 (16) 을 통해 계산하였다.

$$q_{rad} = \epsilon \cdot A \cdot \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (16)$$

여기서, ϵ , A , σ 은 각각 재료의 방사율, 표면 면적, Stefan-Boltzmann 상수이다. 또한, 해석을 위한 재료 방사율은 0.09 이다.

4.2 최적 유한요소 모델링 도출

본 연구에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 순수 알루미늄 금속 박판 재료 천공시 3차원 비정상 열전달 해석을 통해 천공된 구멍 직경을 예측하기 위하여 해석 모델링 수정을 반복적으로 함으로써 최적 유한요소 모델링을 도출하였다. Fig. 36 및 37 과 같이 천공 실험에 의해 취득한 결과와 해석을 통해 얻은 천공된 구멍 직경의 크기 차이를 비교하여 해석 값과 실험값의 오차 범위가 $\pm 3\%$ 내외가 될 때까지 반복적인 수정 절차를 걸쳐 최적 유한요소 모델링을 얻고자 하였다. 또한, 해석상에서 천공 유무는 재료의 온도가 순수 알루미늄의 용융점인 934 K 이상일 경우 재료가 증발하였다고 가정하고, 이것을 천공된 구멍 직경 크기로 판단하였다.

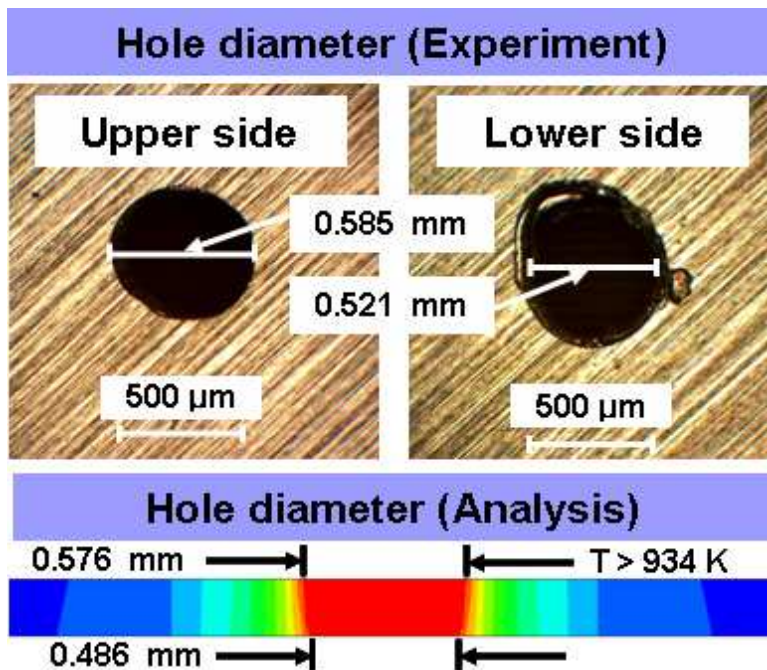


Fig. 36 Comparison of the results of experiments and those of analyses from the viewpoint of the drilled diameter

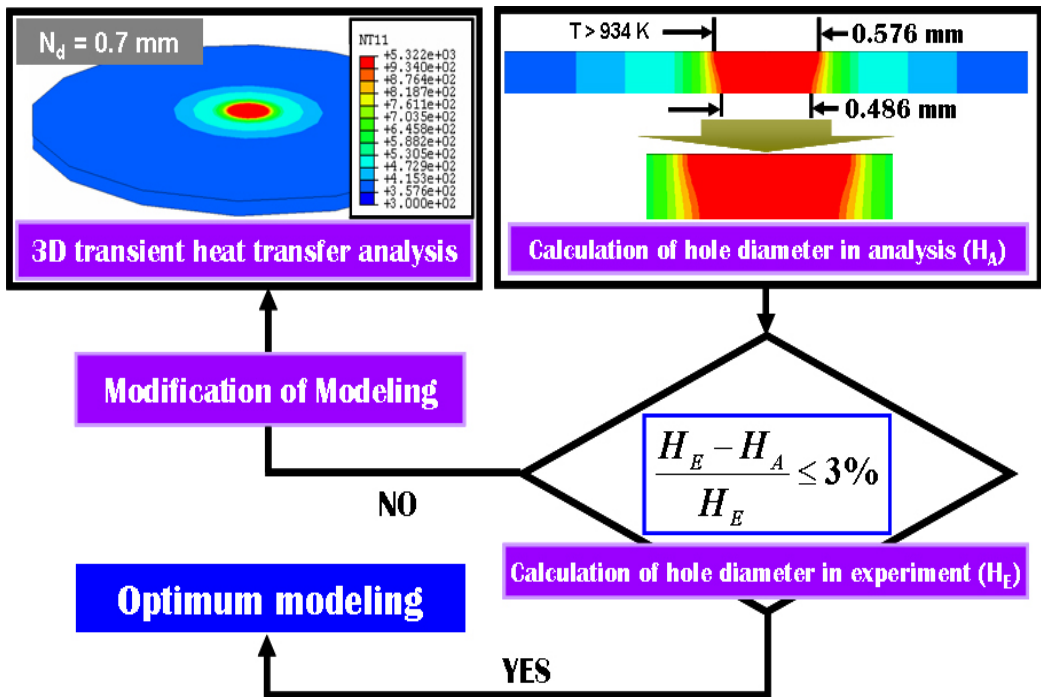
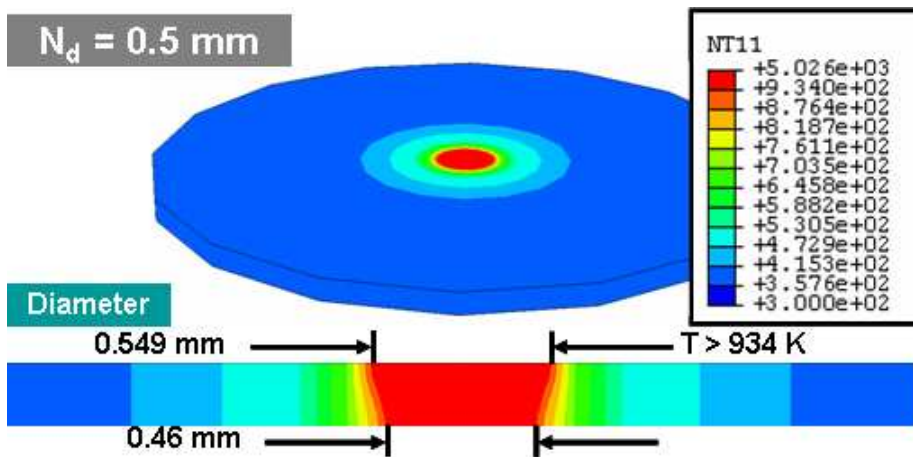


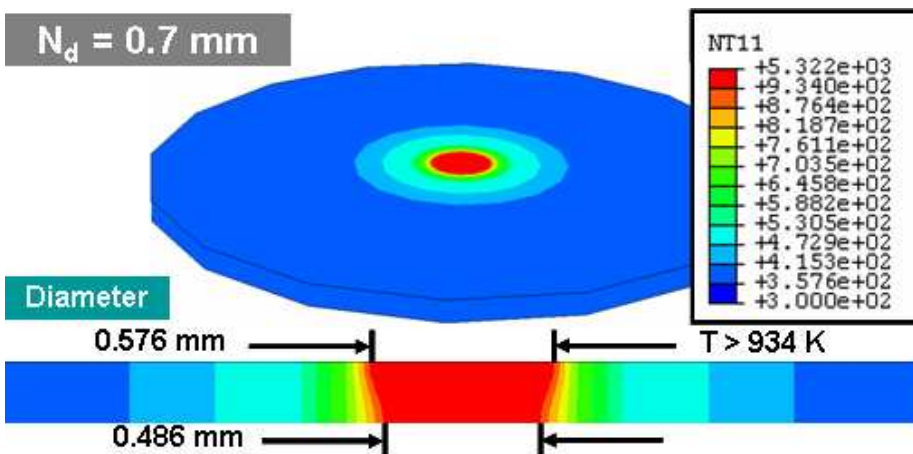
Fig. 37 Flowchart of FEA procedure for three dimensional transient heat transfer analysis

4.3 재료 내부의 열전달 특성 및 온도분포 고찰

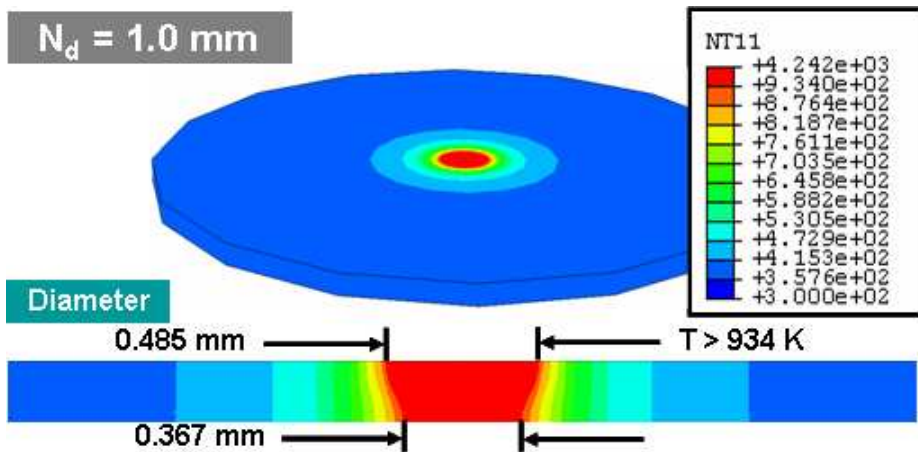
본 장에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 순수 알루미늄 금속 박판 재료 천공시 3차원 비정상 열전달 해석을 통하여 공정 변수가 재료 내부의 열전달 특성과 온도 분포 특성에 관하여 고찰하였다.⁽³⁶⁻³⁷⁾



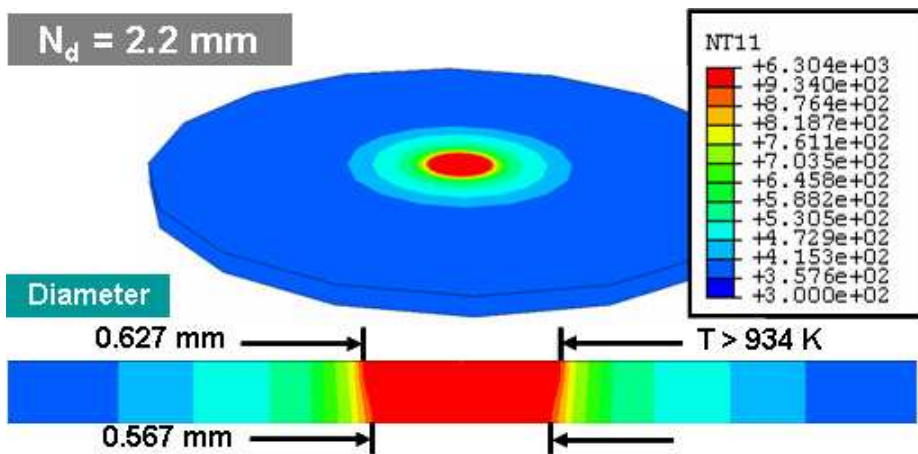
(a) 0.5 mm of nozzle diameter



(b) 0.7 mm of nozzle diameter



(c) 1.0 mm of nozzle diameter

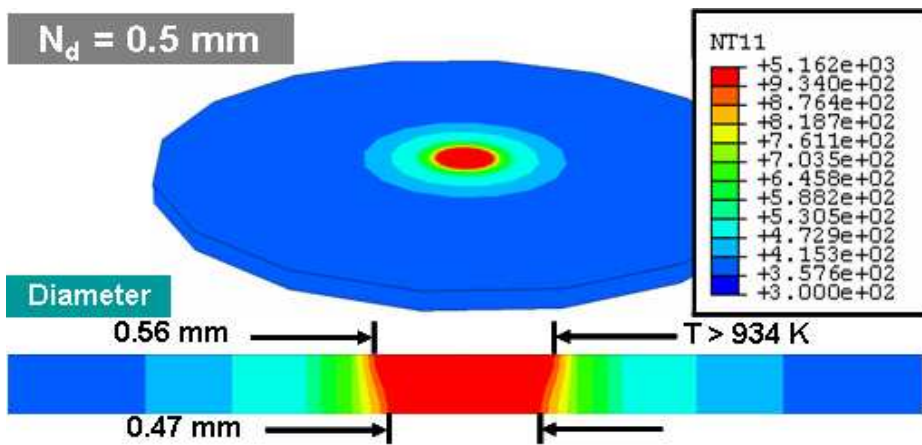


(d) 2.2 mm of nozzle diameter

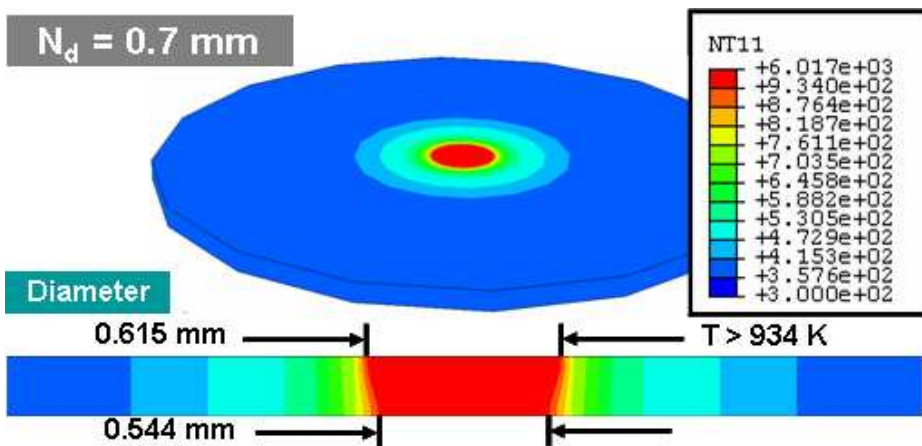
Fig. 38 Results of finite element analysis for each nozzle diameter ($P_d = 1.0$ ms, $P_f = 8$ Hz)

Fig. 38 - 41 는 3차원 비정상 열전달 해석 결과 취득된 3차원 온도 분포와 노즐 직경별 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수와 천공된 구멍 직경의 상관관계 결과이다. Fig. 38 와 39 를 비교하였을 때, 노즐 직경별 펄스 반복 횟수가 증가

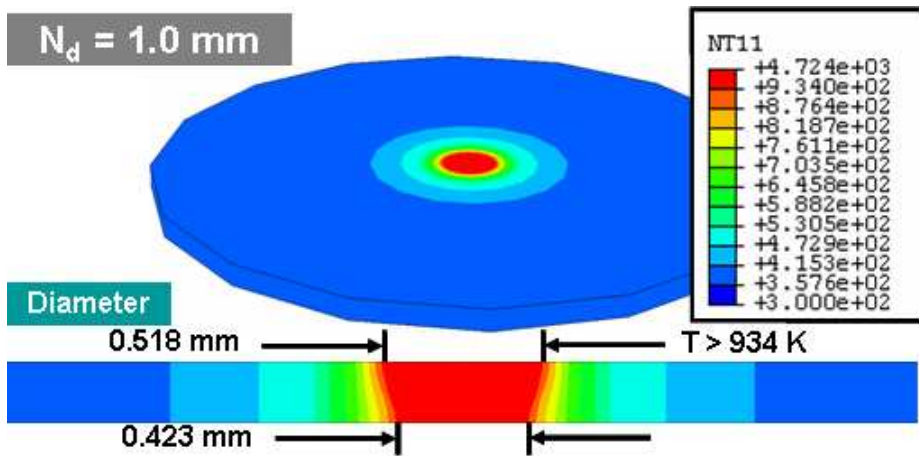
하였을 경우 천공된 구멍 직경이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 노즐 직경 1.0 mm 에서는 천공된 구멍 직경이 가장 작게 나타났으나, 실제 천공 실험에서 얻은 결과와 해석 값을 비교하였을 경우 거의 비슷한 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.⁽³⁸⁾ 반면 노즐 직경 2.2 mm 에서 도출된 해석 값은 실제 실험값과 비교하였을 때, 천공된 입구부의 직경은 작게 출구부 직경은 크게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 원인은 실험상에서의 가스 압력의 영향으로 판단된다.



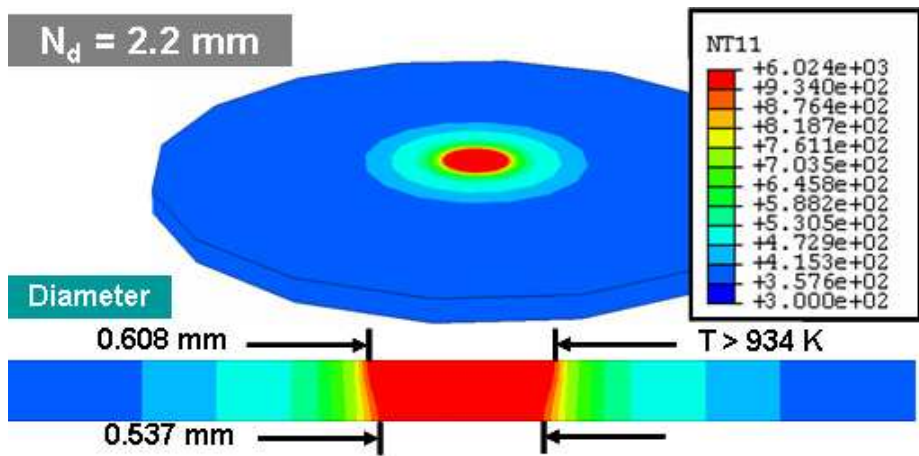
(a) 0.5 mm of nozzle diameter



(b) 0.7 mm of nozzle diameter



(c) 1.0 mm of nozzle diameter

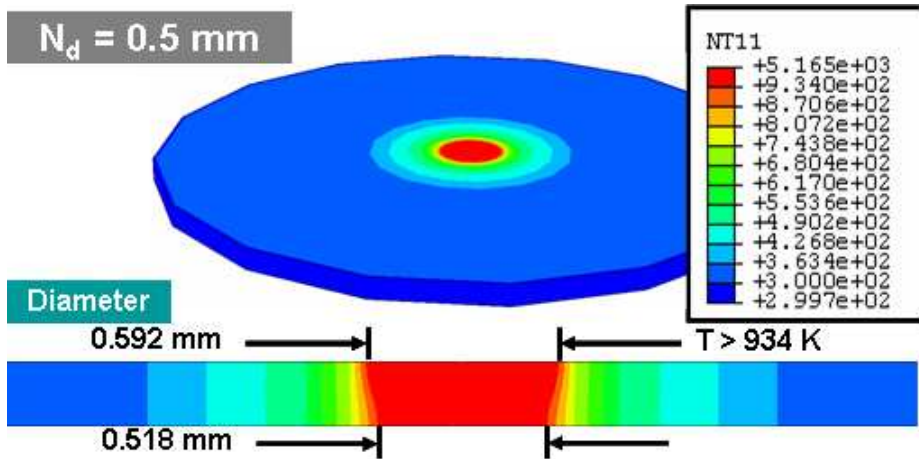


(d) 2.2 mm of nozzle diameter

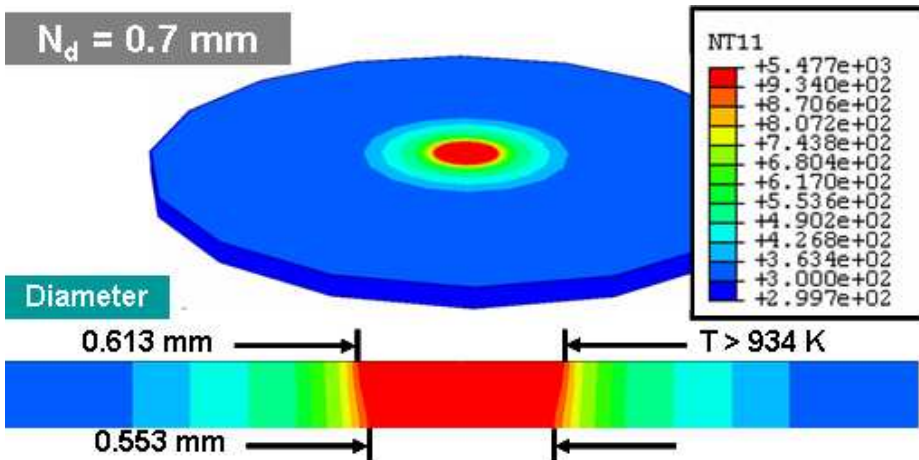
Fig. 39 Results of finite element analysis for each nozzle diameter ($P_d = 1.0 \text{ ms}$, $P_f = 12 \text{ Hz}$)

또한, 노즐 직경이 0.7 mm 에서 0.5 mm 로 감소할 때 약 0.04 mm 정도의 미세한 천공 구멍 직경 차이가 발생함을 알 수 있었다. Fig. 40 에서는 펄스 투사 시간이 2.0 msec 인 경우 노즐 직경의 크기에 상관없이 1회의 펄스 투사에도 재료

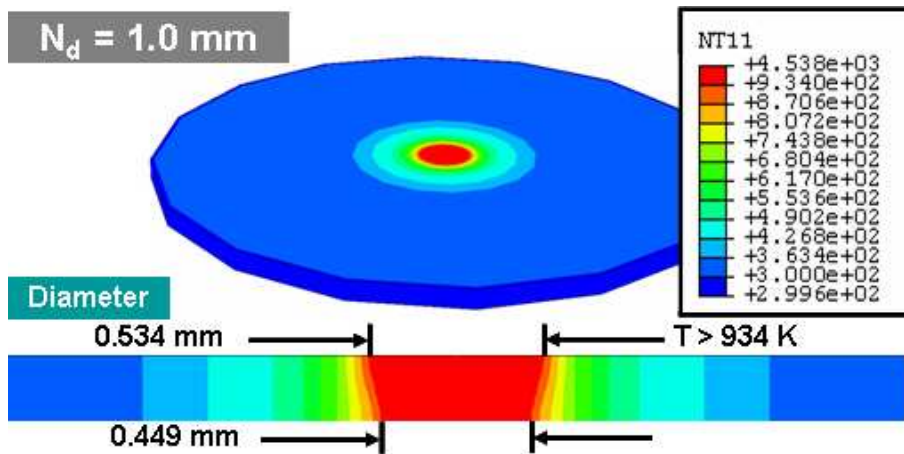
의 바닥면이 용융점에 도달하여 천공이 되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 펄스 반복 횟수보다 펄스 투사 시간에 의하여 천공 구멍 지름이 더 크게 영향을 받음을 해석을 통하여 알 수 있었다.



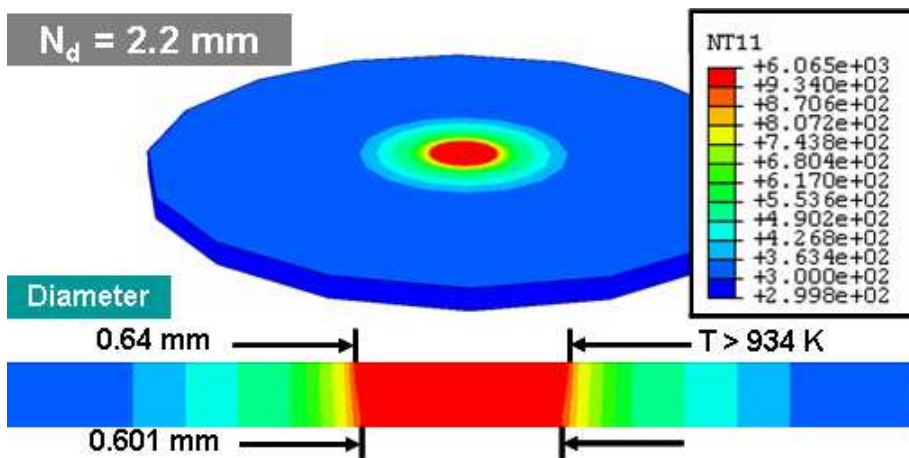
(a) 0.5 mm of nozzle diameter



(b) 0.7 mm of nozzle diameter



(c) 1.0 mm of nozzle diameter



(d) 2.2 mm of nozzle diameter

Fig. 40 Results of finite element analysis for each nozzle diameter ($P_d = 2.0 \text{ ms}$, $P_f = 1 \text{ Hz}$)

Fig. 42 는 노즐 직경 0.7 mm, 펄스 투사 시간 1.0 ms, 펄스 반복 횟수 12 Hz 일 때 해석 결과로 얻어진 온도 분포 변화이다. 이 결과로부터 레이저 빔이 재료 표면에 조사되었을 경우 레이저 열원의 중심부로부터 반경 1.0 mm에서 열영향부

가 형성되며, 열원의 중심부로부터 반경 0.25 mm 내에서 급격한 온도 변화가 발생하는 것을 알 수 있었다.

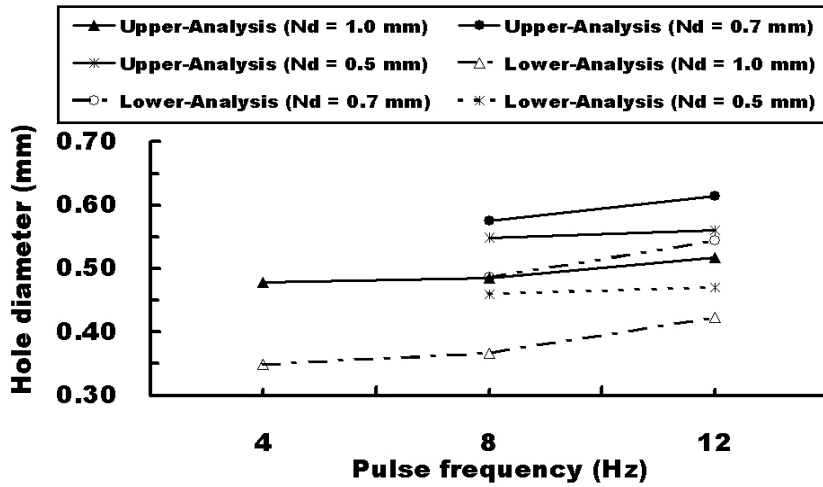


Fig. 41 Relationship between process parameters and hole diameters ($P_d = 1.0$ ms)

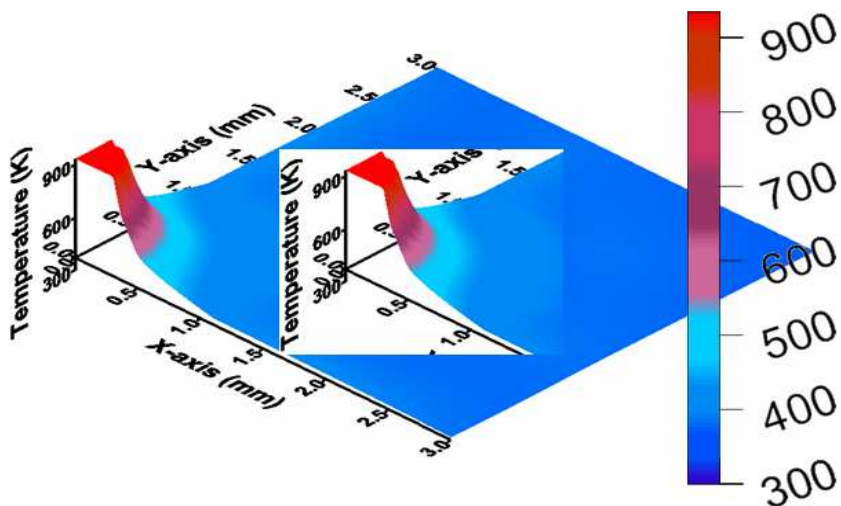


Fig. 42 Temperature distributions in the vicinity of the drilled hole ($N_d = 0.7$ mm, $P_d = 1.0$ ms, $P_f = 12$ Hz)

제 5 장 결론 및 향후과제

본 연구에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 순수 알루미늄 금속 박판 재료 천공시 공정변수인 레이저 출력, 초점거리, 천공 가스 압력, 노즐 직경, 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수가 각 실험조건별 초점거리 도출과 천공 가능 영역 및 천공된 구멍 직경, 천공단면폭, 시편 하부 용융물 두께 및 천공단면 최대 테이퍼 각도 등에 미치는 영향과 3차원 비정상 열전달 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 순수 알루미늄 금속 박판 천공시 노즐 직경 2.2 mm 일 경우 레이저 출력별 초점거리 및 천공 가능 영역을 도출할 수 있었다. 레이저 출력이 작은 경우에는 초점 거리에 관계없이 천공이 불가능하거나 천공 구멍 품질이 좋지 않음을 알 수 있었다. 반면 레이저 출력이 큰 경우에는 레이저 초점거리가 4- 6 mm 범위에서 양호한 품질의 천공 제품이 취득됨을 알 수 있었다.

둘째, 도출된 초점거리와 천공 가능 영역으로부터 천공 품질 척도인 천공 구멍 직경이 최소화되는 공정 조건을 도출하기 위하여 다구찌 기법을 도입하였다. 레이저 출력, 초점거리 및 천공 가스 압력이 각각 72.5 W, 6 mm, 0.02 MPa 일 경우 천공 구멍 직경을 최소화시키는 공정 조건임을 알 수 있었다.

셋째, 레이저 공정변수인 노즐 직경별 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수의 천공 구멍 직경에 관한 상관관계를 도출하였다. 펄스 투사 시간이 0.5 ms 일 경우 노즐 직경 0.5, 0.7, 2.2 mm에서는 천공이 불가능 하였으며, 노즐 직경 1.0 mm 에서만 천공이 가능하였다. 또한, 노즐 직경 0.7 mm 에서 천공된 구멍의 진원도가 좋고, 열영향부가 거의 없으며 표면 상태가 좋은 품질을 얻을 수 있었으며, 그 중에서도 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수가 각각 1.0 ms 와 12 Hz 에서 가장 우수한 천공 품질을 얻을 수 있었으며, 그 때 평균 구멍 직경은 0.586 mm 이었다. 반

면 노즐 직경 1.0 mm 에서는 천공된 구멍 지경은 가장 작게 나타났지만, 천공된 표면 상부에서는 한쪽 방향으로 크레이터가 생성되었다. 노즐 직경 2.2 mm 에서는 천공된 입구부 직경이 가장 크게 나타났으며, 출구부 역시 용융물이 가장 크게 형성됨을 알 수 있었다. 또한, 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수가 증가할수록 천공된 구멍 직경이 커짐을 알 수 있었다.

넷째, 레이저 공정 변수 조건과 천공된 구멍 직경의 표준 편차에 관한 상관관계를 도출하였다. 노즐 직경이 0.7 mm 일 경우 표준 편차 값이 0.27 - 0.65 범위로 작게 나타났으며, 그 중에서도 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수가 각각 1.0 ms 와 12 Hz 에서 가장 작게 나타남을 알 수 있었다. 반면 노즐 직경이 증가할수록 표준 편차 값이 증가함을 알 수 있었으며, 특히 노즐 직경 2.2 mm 일 경우 표준 편차 값이 1.72 - 2.0 범위로 가장 높게 나타나 천공 품질이 가장 좋지 않음을 확인 할 수 있었다.

다섯째, 레이저 공정변수인 노즐 직경별 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수의 천공 단면폭에 관한 상관관계를 도출하였다. 노즐 직경 0.7 mm 에서 천공 단면의 직진도가 양호하였고, 그 중에서도 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수가 1.0 ms 와 12 Hz 일 때 천공 단면폭은 0.38 mm 이며, 천공 단면의 직진도가 좋고 상태가 가장 우수한 품질을 얻을 수 있었다. 반면 노즐 직경이 1.0 mm 일 경우 천공 단면의 직진도는 좋지 않았으며, 천공 표면 상부에서 크레이터가 생성되었으며, 노즐 직경 2.2 mm 에서는 천공 단면의 직진도가 가장 좋지 않았으며, 천공된 입구부와 출구부의 구멍 직경 차이가 가장 크게 나타남을 알 수 있었다.

여섯째, 레이저 공정변수인 노즐 직경별 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수의 시편 하부 용융물 두께에 관한 상관관계를 도출하였다. 펄스 투사 시간별 펄스 반복 횟수가 4 와 8 Hz 일 경우 시편 하부 용융물 두께는 0.06 - 0.18 mm 범위로 나타났으며, 천공 단면 품질이 좋지 않음을 알 수 있었다. 반면, 펄스 반복 횟수가 12 Hz 일 경우 노즐 직경과 펄스 투사 시간이 각각 0.7 mm 와 1.0 ms 에서 용

용물 두께가 0.02 mm 로 아주 작고 품질이 우수한 제품을 얻을 수 있었다.

일곱째, 레이저 공정변수인 노즐 직경별 펄스 투사 시간과 펄스 반복 횟수의 천공단면 최대 테이퍼 각도에 관한 상관관계를 도출하였다. 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수가 증가할수록 천공단면 최대 테이퍼 각도가 증가함을 알 수 있었다. 특히 노즐 직경, 펄스 투사 시간 및 펄스 반복 횟수가 각각 0.7 mm, 1.0 ms, 그리고 12 Hz 일 경우 최대 테이퍼 각도값이 86 ° 로 가장 크게 나타났으며, 노즐 직경이 증가할수록 천공 단면 최대 테이퍼 각도가 현저히 작아짐을 알 수 있었다. 천공단면 최대 테이퍼 각도는 펄스 투사 시간과 노즐 직경에 상당한 영향을 받음을 알 수 있었다.

여덟째, 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 순수 알루미늄 금속 박판 재료 천공시 3차원 비정상 열전달 해석을 위한 반복적 해석 기법을 이용하여 실험 결과에서 얻은 천공된 구멍 직경과 거의 일치하는 3차원 비정상 열전달 해석 모델을 수립할 수 있었다. 또한, 레이저 천공 공정 중 발생하는 재료 내부의 열전달 특성과 온도 분포 변화를 알 수 있었다. 특히 레이저 열원의 중심부로부터 반경 1.0 mm 에서 열영향부가 형성되며, 열원의 중심부로부터 반경 0.25 mm 내에서 급격한 온도 변화가 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 펄스 투사 시간이 2.0 msec 인 경우 노즐 직경의 크기에 상관없이 1회의 펄스 투사에도 재료의 바닥면이 용융점에 도달하여 천공이 되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통하여 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 0.2 mm 알루미늄 금속 박판 재료 천공시 레이저 천공 공정의 데이터 베이스 구축 및 가공 경로 생성을 위한 천공 특성 분석과 3차원 비정상 열전달 해석에 관한 부분적인 연구가 수행되었다. 따라서 다양하고 풍부한 데이터 베이스 구축 및 가공 경로 생성을 위한 추가적인 연구가 필요하다.

첫째, 노즐 직경별 천공 가스 압력의 변화가 레이저 천공 품질 특성에 미치는 영

향 및 천공 가스 종류별 연구를 통한 데이터 베이스가 구축되어야 한다.

둘째, 레이저 천공시 알루미늄 재료의 두께에 따른 공정 변수가 천공 품질 평가 척도에 미치는 영향에 관한 연구가 필요하다.

셋째, 3차원 유한요소 모델링을 이용한 레이저 천공 공정 해석을 통해 재료의 열변형 및 잔류 응력 분포에 관한 연구가 필요하다.

REFERENCES

1. Sezer, H. K., Schmidt, Li. M., Pinkerton, A. J., Anderson, B., Williamms, P., "Effect of Beam Angle on HAZ, Recast Layer and Oxide Layer Characteristics in Laser Drilling of TBC Nickel Superalloys," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No.15, pp. 1972~1982, 2006
2. Ion, John C., "Laser Processing of Engineering Materials," Great Britain by Biddles Ltd, 2005
3. Kim. D. H., "레이저 가공학 “, 경문사 출판, Korea, pp.295~297, 2002
4. Petkovsek, Rok., Panjan, Igor., Babnik, Ales., Mozina, Janez., "Optodynamic study of multiple pulses micro drilling," Ultrasonics, Vol. 44, pp. 1191–1194, 2006
5. Solana, Pablo., Kapadia, Phiroze., Dowden, John., Rodden, William S.O., Kudesia, Sean S., Hand, Duncan P., Jones, Julian D.C., "Time dependent ablation and liquid ejection processes during the laser drilling of metals," Optics Communications, Vol. 191, pp. 97–112, 2001
6. Voisey, K.T., Kudesia, S.S., Rodden, W.S.O., Hand, D.P., Jones, J.D.C., "Melt ejection during laser drilling of metals," Materials Science and Engineering, Vol. 356, pp. 414–424, 2003
7. Zhang, Yuwen., Faghri, A., "Vaporization, melting and heat conduction in the laser drilling process," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 1775–1790, 1999
8. Dubey, Avanish Kr., Yadava, Vinod., "Experimental study of Nd:YAG laser beam machining—an overview," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 195, pp. 15–26, 2008
9. Low, D.K.Y., Li, L., Corfe, A.G., "Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NIMONIC 263

- alloy," *Applied Surface Science*, Vol. 154–155, pp. 689–695, 2000
10. Khan, A.H., O'Neill, W., Tunna, L., Sutcliffe, C.J., "Numerical analysis of gas–dynamic stabilities during the laser drilling process," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, pp. 826–841, 2006
 11. Pierron, Nicolas., Sallamand, Pierre., Mattei, Simone., "Study of magnesium and aluminium alloys absorption coefficient during Nd:YAG laser interaction," *Applied Surface Science*, Vol. 253, pp. 3208–3214, 2007
 12. Ng, G.K.L., Li, L., "Repeatability characteristics of laser percussion drilling of stainless–steel sheets," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 39, pp. 25–33, 2003
 13. Wang, A. H., Wang, W. Y., Bai, Z. K., Xie, C. S., Zeng, D. W., Song, W. L., "YAG Laser Percussion Drilling of a Functional Multi–layer Thin Plate," *Optics and Laser Technology*, Vol. 39, pp. 840~845, 2007
 14. Li, L., Low, D.K.Y., Ghoreishi, M., "Hole taper characterisation and control in laser percussion drilling," *CIRP annals; Manufacturing Technology*, Vol. 51, pp. 153–156, 2002
 15. Low, D.K.Y., Li, L., Byrd, P.J., "The effects of process parameters on spatter deposition in laser percussion drilling," *Optics and Laser Technology*, Vol. 32, pp. 347–354, 2000
 16. Tunna, L., O'Neill, W., Khan, A., 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
 17. Khan, A.H., Celotto, S., Tunna, L., O'Neill, W., Sutcliffe, C.J., "Influence of microsupersonic gas jets on nanosecond laser percussion drilling," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 45, pp. 709–718, 2007
 18. Salonitis, Konstantinos., Stournaras, Aristidis., Tsoukantas, George.,

- Stavropoulos, Panagiotis., Chryssolouris, George., "A theoretical and experimental investigation on limitations of pulsed laser drilling," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, pp. 96–103, 2007
19. Masmiahi, N., Philip, P.K., "Investigations on laser percussion drilling of some thermoplastic polymers," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, pp. 198–203, 2007
 20. Tarn, S.C., Yeo, C.Y., Lau, M.W.S., Lim, E.N., Yang, L.J., Noor, Y., "Optimization of laser deep-hole drilling of Inconel 718 using Taguchi method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, pp. 741–757, 1993
 21. Yilbas, B.S., "Study of affecting parameters in laser hole drilling of sheet metals," *Journal of Engineering Materials and Technology* Vol. 109, pp. 282–287, 1987
 22. Ghoreishi, M., Low, D.K.Y., Li, L., "Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, pp. 985–995, 2002
 23. Yilbas, B.S., Sahin, A.Z., Davies, R., "Laser heating mechanism including evaporation process initiating laser drilling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture.*, Vol. 35, pp. 1047–1062, 1995
 24. Yue, T.M., Chan, T.W., Man, H.C., Lau, W.S., "Analysis of ultrasonic-aided laser drilling using finite element method," *CIRP*

- annals; Manufacturing Technology, Vol. 45, 1996
25. 안동규, 김민수, “ 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 냉연 강판 절단공정의 3차원 열전달 해석,” 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 162-165, 2005
 26. Gospavic, Radovan., Sreckovic, Milesa., Popov, Viktor., Todorovic, Goran., "3D modeling of material heating with the laser beam for cylindrical geometry," Mathematical and Computer Modeling, Vol. 43, pp. 620-631, 2006
 27. GuoMing, Han., Jian, Zhao., JianQang, Li., "Dynamic simulation of the temperature field of stainless steel laser welding," Materials and Design, Vol. 28, pp. 240-245, 2007
 28. Kim. D., H., "레이저 가공학 “, 경문사 출판, Korea, pp.187~189, 2002
 29. 안동규, 정광운, 유영태, 신호준, “Pulsed Nd:YAG 레이저를 이용한 Al 1050 재료의 미세 천공에 대한 기초 연구,” 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 339-345, 2007
 30. Kim. D., H., "레이저 가공학 “, 경문사 출판, Korea, pp.161~163, 2002
 31. ABAQUS/Analysis User's Manual, Version 6.5, Vol. 6, 2004
 32. Bathe, Klaus., Jurgen., "Finite element procedures in engineering analysis," Prentice-Hall Inc., pp. 407-429, 1982
 33. Thermophysical properties of matter the TPRC data series, IFI/PLENUM:NEW YORK-WASHINGTON, Vol. 1-13, 1977
 34. Gengel, Yunus A., "THERMODYNAMICS AND HEAT TRANSFER," WCB-McGraw-Hill, pp. 580-590, 2002
 35. Gengel, Yunus A., "THERMODYNAMICS AND HEAT TRANSFER," WCB-McGraw-Hill, pp. 513-534, 2002

36. 안동규, 변경원, “고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 Inconel 718 박판 절단공정의 3차원 열전달 특성 분석,” 한국기계가공학회 추계학술대회논문집, pp. 36-42, 2007
37. Kim, Kyunghan., Guo, Zhixiong., "Multi-time-scale heat transfer of turbid tissues exposed to short-pulsed irradiations," Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 86, pp. 112-123, 2007
38. 안동규, 정광운, “펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Al 1050 재료 천공에 대한 3차원 비정상 열전달 해석,” 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 395-396 , 2008

감사의 글

한편의 논문을 완성하기까지 연구자로서 목적 달성을 할 수 있도록 도움을 주신 여러분들께 감사의 마음을 전합니다. 대학원 2년여 동안의 시간이 저에게는 자기 개발을 할 수 있는 인생의 전환점이 된 것 같습니다. 석사 학위를 얻기까지 매순간 맡은 바 임무에 최선을 다하였던 시기였으며, 향후 나의 진로에 대해서 큰 꿈을 가지게 하였던 시기였던 것 같습니다.

대학원 2년의 시간 동안을 저희를 위해서 물심양면으로 희생하시고, 이 논문이 완성되기까지 세심한 배려와 적극적인 지도를 해주신 안동규 지도교수님께 진심어린 마음으로 감사에 말씀을 드립니다. 또한 우물안 개구리가 아닌 밖을 내다보며 진정한 프로가 되라고 하신 말씀 꼭 명심하겠습니다. 그리고 언제나 전산설계실험실과 함께 하며 든든한 후원자가 되어주시고 논문 교정 및 심사를 하시느라 고생하신 한길영 교수님, 학위논문의 실험에 있어서 장비 관련하여 많은 도움을 주시고 논문의 세심한 내용까지 조언을 해주신 유영태 교수님, 레이저라는 학문에 대해 많은 가르침과 조언 및 지도를 아낌없이 해주셨던 한국해양대학교 김종도 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

학부생 동기지만 전산설계실험실의 선배이자 항상 같이 동거동락하며 실험과 모든 업무를 같이하면서 서로 의견 충돌도 많았지만, 언제나 나에게 많은 조언과 격려를 해주었던 변경원, 실험실 전실장이며 모든 일에 대해서 열정적이고 최선을 다하며 어려울 때 작은 격려의 한마디를 해주었던 문경제, 실험실 동기이며 실험실 온갖 굵은일을 도맡아 하며 자신보다는 남을 먼저 생각하고 성격이 차분한 김대원, 항상 자기가 맡은 일에는 날을 세우며 끝을 보고 교회에 열심히 다니지만 술자리에서 사이다만 마시는 김현우, 항상 밝은 모습으로 생활하며 선배들의 비위를 잘 맞추고 술자리를 같이하면서 자신이 부족하다고 생각하는 박승화, 공부 욕심 많고 맡은 바 일은 잘하지만 제2의 변경원을 보고 있는 느낌이 드는 남경흠, 항상 보고 있으면 윤종신이 생각나고 성격이 나와 같아 모든 일을 긍정적으로 생각하는 송동한, 실험실 원으로 만들기 위해 5번의 전화를 해서 들어오게 한 서순철, 그리고 실험실 막내동이 김세훈 에게 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

전산설계실험실 1기 이며 멀리 있지만 언제나 후배들의 생각하시는 이상훈 선배님, 레이저 전공 선배이며 홈커밍데이 때 후배들에게 좋은 말씀과 삶의 방향을 제시해주시는 김민수 선배님, 항상 보고 있으면 든든하고 언제든지 술한잔 사주라고 졸을 수 있는 김진석 선배님, 그리고 바쁘신 와중에도 레이저 실험을 해주시며 많은 조언과 지식을 주었고 무섭지만 든든한 큰형 같은 신호준 선배님, 언제나 당당한 모습 보이며 자신의 능력을 보여주었던 신병헌 이하 레이저 가공 실험실원에도 감사드립니다.

대학원 생활하면서 많은 격려와 조언을 해주신 최병희형, 메일보내게 하며 내려오라고 말씀하신 이승철형, 김광호형, 이상희형, 기계공학과와의 유일한 홍일점 김미애 여박사, 김미애의 문제아 박주홍, 주홍이의 유일한 술친구 민관웅, 손재경, 문제의 공학인증 전조교인 윤재원, 그의 실험실원 정현철형, 제어실험실의 대학원 동기인 서호진, 김태호 이하 기계공학과 원우회 선·후배님들께 감사드립니다.

대학생활을 항상 같이 하며 도서관에서 같이 살았던 진정한 나의 상담자들 이영래, 김일균, 허참, 그리고 언제나 나를 지켜보며 좋은 말도 해주었던 고등학교 동창 김정신, 전용일, 김보승, 임수열, 김정기, 김남두, 문성근, 야옹이 김현석 이하 모두에게 감사의 마음을 전합니다.

함께 프로젝트를 수행하며 많은 조언을 주신 정창균형, 성대용형 이하 한국과학기술원의 정형가공 실험실원 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로 언제나 든든한 후원자이며, 자식을 위해서 뭐든 들어주시고 희생하신 아버지와 어머님께 깊이 감사드리며 항상 사랑한다고 말씀 드리고 싶습니다. 그리고 부족한 형을 위해 자신이 먼저 희생하고 언제나 나를 지지해주는 막내 정광욱, 늘 옆에서 오빠를 챙겨주면 이해해주는 여자친구 신지현와 함께 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

2008년 12월
정 광 운

저작물 이용 허락서

학 과	기계공학과	학 번	20077080	과 정	석사과정
성 명	한글 : 정 광 운 한문 : 鄭 光 云 영문: JUNG KWANG WOON				
주 소	광주광역시 동구 동명동 137번지 대주원룸 207호				
연락처	E-MAIL : jkwpc@hanmail.net				
논문제목	한글 : Pulsed Nd:YAG 레이저를 이용한 초박판용 금속 재료의 미세 천공 기술 개발에 관한 연구 영어 : Investigation into development of the micro drilling technology for ultra-thin metallic sheet using pulsed Nd:YAG laser				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대()

2009 년 2 월 일

저작자: 정 광 운 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하