

세라믹 미세 구멍가공에서의 레이저 초점위치가 미치는 가공특성 연구

김병용*·이건상*

A study of machining chracteristics effecting on laser focusing position in the ceramics microhole machining

Kim Byoung Yong, Lee Kun Sang

Key Words: Al₂O₃ ceramic(알루미나 세라믹), microhole machining(미세구멍 가공), pulse energy(펄스 에너지), pulse frequency(펄스 주파수), pulse duration(펄스 폭), power intensity(과워 밀도)

Abstract

Al₂O₃ ceramics are generally used as components in processing equipment, devices or machinery. But it's difficult to machining as being mechanical because Al₂O₃ ceramics are brittle materials. This study described a basic study of the input parameters effect on the dimension of the microhole at the Al₂O₃ ceramics using Nd:YAG laser. Major input parameters are peak power, pulse frequency and pulse duration in the laser microhole machining of Al₂O₃ ceramics

We will get a smaller microhole and diameter rate by an appropriate peak power, pulse duration.

1. 서 론

오늘날 첨단과학기술의 발달과 함께 새로운 소재에 대한 요구가 날로 증대됨에 따라 새로운 물리적·화학적 성질을 갖는 재료, 새로운 고기능성 재료의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 이런 추세 속에서 세라믹(ceramic)은 기존의 금속이나 고분자 재료 등과는 다른 독특하고 우수한 특성과 다양한 기능성으로 인해 산업전반에 걸쳐 이들을 대체할 중요한 신소재로 각광 받고 있다. 특히 알루미나 세라믹(Al₂O₃ ceramic)은 기계적 강도, 내열성, 내마모성, 내식성 등이 우수하기 때문에 세라믹스, 전기, 전자, 광학, 기계,

화학 등 여러분야 및 항공우주산업은 물론 환경, 에너지, 의료, 생체 재료에 이르기까지 현대첨단 기술의 핵심적인 신소재로 널리 이용되고 있다.

하지만 세라믹은 기계적, 물리적 특성의 우수하고 다양한 기능성에도 불구하고 높은 경도와 취성으로 인한 가공상의 어려움으로 실제 산업분야의 응용에는 많은 제약을 받고 있다. 특히 최근 들어 전자산업계에서 수 μ m대의 초정밀 미세구멍 가공이 요구되고 있는 가운데, 업계에서는 최근 까지도 드릴을 이용한 집축식 방법으로 작업을 수행해 왔으나, 가공정밀도가 떨어지고 작업시간이 오래 걸리며 공구가 파손되어 가공이 실패하는 등의 한계에 부딪히게 되었다. 이를 대체할 새로운 가공기술은 현재 산업전반에 걸쳐서 응용범위가 확대되고 있는 레이저(laser)를 이용한 가공방법이다. 레이저는 고밀도로 집속된 에너지를 열원으로 하며, 가공이 어려운 형상이나 재료도 가능하게 하는 유연성을 가지고 있다. 또한 용접 및 열처리 등의 여러 작업을 할 수 있는 특성으로 인하여 산업고도화에 따라 점차 그 응용이 확

* 국민대학교 자동차전문대학원

대되고 있으며, 이에 따라 일반용접뿐만 아니라 전자, 정밀기계, 자동차, 항공등 첨단분야에서 이용이 증가되고 있고 레이저의 고출력화, 가공시스템의 안정화로 더욱 응용이 확대 될 것으로 기대가 된다. 레이저를 이용한 재료가공은 레이저 광을 열원(heat source)으로 사용하는 것으로서 다른 방법에 비해 매우 높은 에너지 밀도의 레이저를 재료에 공급할 수 있는 것이 특징이고 가공을 정확하게 할 수 있고 공정을 단순화 할 수 있어 비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 출력제어가 용이하여 반사체를 이용한 원거리 전송이 가능하다. 이러한 레이저 가공은 가공의 정밀성과 원격조정의 편의성 때문에 방사선에 의해 접근이 어렵고 오염이 문제가 되는 원자력 분야에서도 그 응용이 증대되고 있다.^(1,2,3,5,6)

그러나 레이저를 이용한 가공도 열을 이용한 가공이므로 필연적으로 재료의 열변형 문제를 수반한다. 따라서 실제 가공 후 구멍주위의 열변형 상태 해석과 구멍 형상 및 크기의 정밀도 향상이 가장 큰 문제로 남아 있으나, 현재까지 가공조건들에 대한 상세한 데이터들이 정형화되어 있지 않다.

또한 레이저에 의한 가공변수도 많고 변수들간의 상호작용도 복잡하기 때문에 최적을 찾는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 세라믹의 미세구멍 가공 실험을 통해 첨두출력(peak power), 펄스 폭(pulse duration), 펄스 주파수(pulse frequency) 등의 가공변수들이 미세구멍의 형상과 크기에 미치는 영향을 연구함으로써, 미세구멍 가공에 적합한 가공조건들을 제시하여 궁극적으로는 더 정밀하고 우수한 품질의 미세구멍 가공을 가능하게 하고자 한다.

2. 실험 방법, 재료 및 시스템 구성

2.1 실험방법

레이저에 의한 세라믹의 미세구멍 가공은 고밀도의 집속된 레이저빔을 재료에 조사시켜 그 구역의 재료를 증발, 제거하여 가공을 수행하는 비접촉식 가공방법이다. 레이저를 이용한 가공은 깊은 구멍을 뚫을 수 있고, 임의의 지름과 형상의 가공이 가능하며, 다양한 재료의 가공이 가능하지만 에너지 효율이 낮고, 정밀한 규격을 요할

경우 후처리 가공을 해야 하는 단점도 가지고 있다.

Fig.1에서는 본 논문에서 세라믹 미세구멍 가공 후 데이터로 활용할 구멍상부 직경(D_u), 구멍하부 직경(D_l) 그리고 직경비(R)를 나타내고 있다.⁽⁴⁾ 여기서 초점위치는 알루미늄 세라믹 기판의 표면을 초점위치를 $Z=0$ 으로하고, 기판중간은 $Z=-0.3$, 기판 밑은 $Z=-0.6$ 으로 한다.

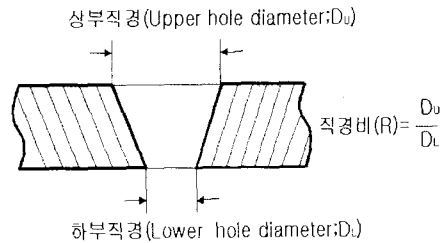


Fig.1 The schematic illustration of microhole machining

2.2 재료

실험에 사용된 시편을 미국 Coors Ceramics Company에서 제조한 알루미늄 세라믹 소재로 크기는 $50 \times 50 \text{ mm}^2$, 두께는 0.6 mm 이며, 모델 AD0-90, 순도 92%, 물성치는 Table 1과 같다

Table 1 The physical properties of Al_2O_3 ceramic

Characteristics(Unit)	AD0-90
Alumina Content(%)	92
Density-Nominal(g/cm^3)	3.78
Density-Range(g/cm^3)	(3.75 ~ 3.80)
Water Absorption(%)	0
Gas Permeability	0
Hardness	75
Poisson's Ratio@20°C(Kpsi)	0.24
Flexural Strength@20°C(Kpsi)	53
Elastic Modulus@20°C(10 ⁹ psi)	45
Coefficient of Thermal Expansion(10 ⁻⁶ /°C)	7.8
Thermal Conductivity(W/m ^o K)	11.3

2.3 시스템 구성

본 실험에 사용된 레이저 장비는 영국 Lumonics사에서 제작한 최대 평균 출력 50W, 최대 펄스

에너지 25J인 펄스형 Nd:YAG 레이저이며, 가공 헤드는 Z축방향으로, 베이스 테이블은 X, Y축 방향으로 이송되며, CNC Controller에 의해 제어되는 3축 레이저 가공기이다. Table 2에 실험 장비의 명세를 나타내었으며, Fig.2는 레이저 시스템의 외관을 보여주고 있다.⁽³⁾

Table 2 The specifications of Nd:YAG Laser

제조 회사	Lumonics LuxStar™
모델명	LX-50
파장(λ)	1.06μm
최대 평균 출력	50W
최대 첨두 출력	3.0kW
초점거리	60mm
작업거리	47mm
렌즈 하우징 직경	30mm
레이저 빔 모드	TEM ₀₀
펄스 주파수	0~100 Hz
펄스 폭	0.5~20.0ms
최대 펄스 에너지	25J

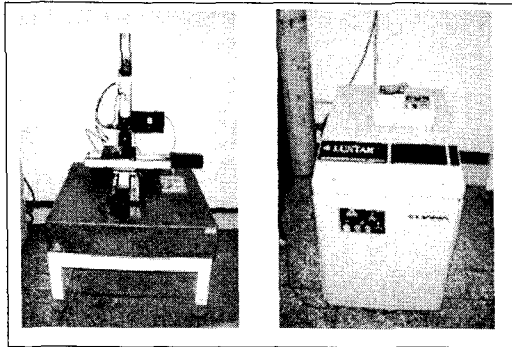


Fig. 2 The external shape of Nd:YAG laser

3. 결과 및 고찰

3.1 실험조건

Nd-YAG 레이저는 연속모드 혹은 펄스모드로 동작한다. 연속적으로 1 kW 이상의 출력을 내지만 펄스모드에서 직렬로 몇 개의 레이저를 작동시켜 3~4kW의 높은 파워출력을 낼 수도 있지만, 본 실험에 사용된 Nd:YAG 레이저는 최고 평균 출력 50W의 펄스형 고체레이저이며, 최대 펄스 주파수는 100Hz이고, 최대 펄스 에너지는 25J이다. 이 레이저는 광 섬유를 이용해 레이저빔을

전송함으로써 공정의 자동화가 용이하며, 한 펄스의 에너지와 펄스 주파수의 조절이 가능하고, 펄스형태 즉 단일 모드(single pulse), 다중 모드(multi pulse), burst mode로 변환함으로써 그에 대한 가공특성도 관찰할 수 있다.

우선, Nd:YAG 레이저의 펄스 형태인 단일 모드, 멀티 모드, burst 모드 중에서 단일 모드만으로 실험을 행하였다. 실험범위는 첨두 출력(peak power)은 0.5kW~3kW(step 0.5kW)사이에서 변화시켰으며, 펄스 폭(pulse duration)은 1ms~10ms(step 1ms)로 증가시키면서 실험을 행하였다. 여기서 첨두 출력 3kW에서는 레이저 장비 시스템의 최대 평균 출력 한계로 인하여 0.5ms, 1.0ms, 1.5ms만 실험을 행하였다.

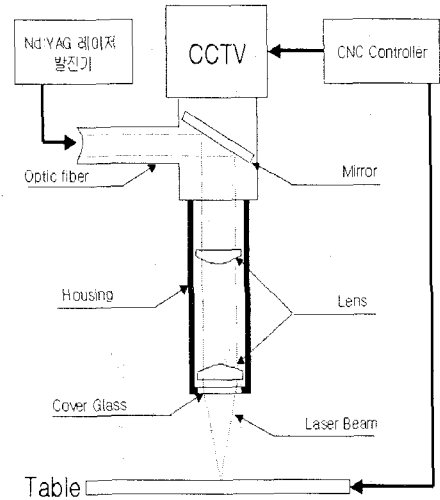


Fig.3 The Nd:YAG laser system schematic with no Mask

3.2 Nd:YAG laser에 의한 세라믹 미세구멍 가공

3.1.1 조리개(Mask) 미부착시 미세구멍 가공

알루미나 세라믹 미세구멍에 사용된 Nd:YAG 레이저의 시스템은 Fig.3에 나타난 바와 같이 레이저 발전기, 레이저빔 이송장치, 전송장치, 제어장치, 가공테이블 등으로 구성되어 있다.

실험은 실험 조건에 따라 각각 20회씩 실시하였으며, 단일 모드(single pulse)만을 사용하였고, 레이저빔의 초점위치는 세라믹 표면, 세라믹 중간, 세라믹 밑에 위치시켰으며 보조가스는 사용하지 않았다. 조리개를 부착한 실험에 앞서 예비

실험으로써 조리개를 부착하지 않은 상태에서 첨두출력과(E_p) 펄스 폭(τ_p)의 변화가 미세구멍의 상부 직경(upper hole diameter)과 하부직경(lower hole diameter), 그리고 직경비(R)의 크기에 어떠한 영향을 미치는지 알기 위해 실험을 하였다. 실험범위는 실험조건에서 언급한 것처럼 펄스 폭(τ_p) 각 step 1ms마다 첨두출력(E_p)을 0.5kW~3.0kW 변화시켰다. 2kW, 7ms에서 기관 표면(Z=0)에서 가장 많이 가공이 되었으며, 이곳에서의 상부직경(Du)은 510~540 μ m, 하부직경(Dl)은 400~430 μ m이고, 직경비(R)은 1.25~1.28이 된다. 그리고 천공 구멍수는 기관 중심, 기관 표면, 기관 밑 순으로 증가하였다. 천공 구멍수는 펄스 폭이 4ms이하에서는 50%이하로 가공이 되었으며, 첨두 출력이 0.5kW, 1.0kW, 1.5kW, 3kW에서도 천공 구멍수가 50%이하로 가공이 되어 조리개를 장착하고 실험을 할 때에는 실험대상에서 제외시켰다.

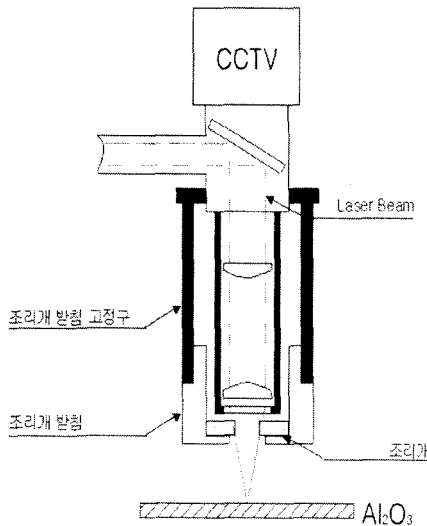


Fig.4 The Nd:YAG laser system schematic with Mask

3.2 조리개(Mask) 부착시 세라믹 미세구멍 가공

본 실험에서는 Nd:YAG레이저의 에너지 분포 중에서 파워 밀도(power intensity)가 높은 부분만을 이용하여 알루미늄 세라믹 미세구멍 가공을 하기 위해 조리개를 제작, 부착하여 실험을 행하였다. Fig.4는 조리개를 부착한 상태에서의 Nd:YAG레이저의 시스템의 개략도를 보여준다.

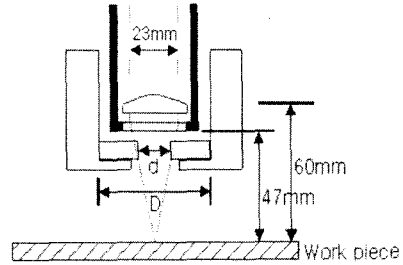


Fig.5 The mask diameter calculation method

여기서 조리개는 전체 직경(D)은 35mm이며, 빛이 통과할 수 있는 직경(d)는 Fig.5에 나타난 바와 같이 초점거리는 60mm, 작업거리는 47mm, 실제로 레이저빔이 렌즈를 통과하는 거리는 23mm이므로, 비례식에 의해 약 $\phi 16$ mm가 이론적으로 계산되지만 실험에 필요한 파워밀도를 얻기 위해 $\phi 7$ mm, $\phi 9$ mm, $\phi 11$ mm를 제작하여 실험을 하였다. 그리고 이 조리개를 가지고 Ophir Optronics (주)의 NOVA laser power/energy monitor기로 실에너지를 측정해 보았다. 여기서 실에너지는 조리개가 없을 때는 레이저 teaching box에서 나타나는 에너지와 비교해서 약 86%, $\phi 7$ mm 조리개는 약 26%, $\phi 9$ mm 조리개는 약 43%, $\phi 11$ mm 조리개는 58%수준이었다. 따라서 실에너지 차에 의해서 $\phi 7$ mm 조리개에서는 구멍가공이 거의 되지 않아서 본 실험에서는 제외를 시켰다. 실험은 예비실험에서 얻은 결과를 바탕으로 최대 첨두 출력(peak power)은 2.0kW, 2.5kW, 펄스 폭(pulse duration)은 1ms~10ms(step 1.0ms)로 변화시키면서 각 초점위치마다 20회씩 실험을 하였다.

첨두 출력 2kW에서 $\phi 9$ mm, $\phi 11$ mm 조리개 부착시 기관표면과 기관 중심에서, 첨두 출력 2.5kW에서 $\phi 9$ mm 조리개 부착시 기관 중심에서는 구멍 가공이 되지 않았다. 가공된 전체 구멍수를 비교해 보면, 첨두 출력 2kW에서는 $\phi 9$ mm, $\phi 11$ mm 조리개 모두 기관 밑에서 가공된 구멍수가 많았으며, 첨두 출력 2.5kW, $\phi 9$ mm 조리개 부착시는 기관 밑에서, $\phi 11$ mm 조리개에서는 기관 표면에서 가공된 구멍수가 많았다. 첨두 출력 2kW에서는 기관표면과 중심에서, 첨두 출력 2.5kW에서는 기관 중심에서 구멍 가공이 되

지 않았기 때문에 $\phi 9\text{mm}$, $\phi 11\text{mm}$ 조리개 모두 기판 밑을 기준으로 비교하였다.

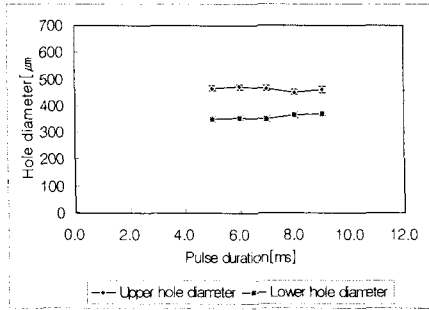


Fig.6 Relationship between upper hole and lower hole diameter

(a) $E_p=2.0\text{kW}$, $\phi 9\text{mm}$ mask, $Z=-0.6$

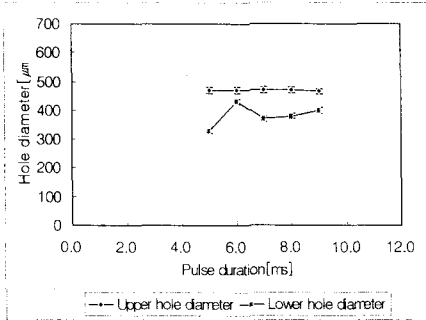


Fig. 6 (b) $E_p=2.5\text{kW}$, $\phi 9\text{mm}$ mask, $Z=-0.6$

Fig.6(a), (b)는 $\phi 9\text{mm}$ 조리개를 부착하고 침두 출력 2kW와 2.5kW에서 나타난 상부 직경과 하부 직경의 크기를 보여주고 있다. 침두 출력 2kW에서는 펄스 폭이 8ms, 9ms일 때 직경비(R)가 약 1.24로 가장 작으며, 이 때의 상부 직경은 450~470 μm , 하부 직경은 360~380 μm 이다. 그리고 침두 출력 2.5kW에서는 펄스 폭이 6ms에서 직경비(R)이 약 1.10으로 가장 작으며, 이 때의 상부 직경은 460~470 μm , 하부 직경은 420~430 μm 이다.

Fig.7(a), (b)는 $\phi 11\text{mm}$ 조리개를 부착하고 침두 출력 2kW와 2.5kW에서 가공하여 측정된 상부 직경과 하부 직경의 크기를 보여주고 있다. 침두 출력 2kW에서는 펄스 폭 10ms일 때 상부 직경은 590~600 μm , 하부 직경은 480~500 μm 이며, 직경비(R)은 1.22수준이다. 또한 침두 출력 2.5kW에서는 7ms인 펄스 폭에서 상부 직경이 540~550 μm , 하부 직경이 440~470 μm 이며, 여기서 직경비(R)은 1.21로 가장 작다.

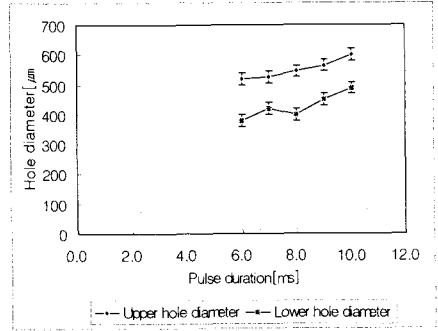


Fig.7 Relationship between upper hole and lower hole diameter

(a) $E_p=2.0\text{kW}$, $\phi 11\text{mm}$ mask, $Z=-0.6$

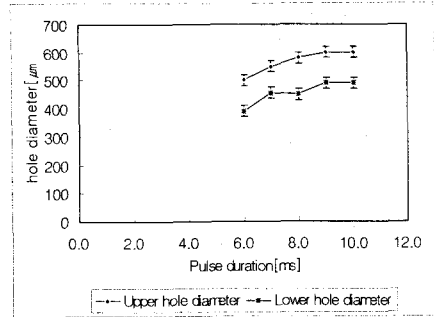


Fig.7 (b) $E_p=2.5\text{kW}$, $\phi 11\text{mm}$ mask, $Z=-0.6$

Fig.6과 Fig.7에서 알 수 있듯이 같은 크기의 조리개를 부착 시에는 상부 직경과 하부 직경의 크기는 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

실험결과 동일한 에너지($E = E_p \times \tau_p$)를 조사하여 가공을 하여도 구멍 직경의 크기나 직경비(R)가 변화하는 것으로 나타났다. 전체 에너지(E)를 20[J]로 고정시키고, 초점 위치는 기판 밑에, $\phi 11\text{mm}$ 조리개를 부착하여 침두 출력(E_p)을 2.0kW(펄스 폭:10ms)와 2.5kW(펄스 폭:8ms)로 변화시키면서 기판 표면에 빔을 조사하였을 때 구멍 직경비(R)는 각각 1.23과 1.29로 다르게 나타나는 데, 이것은 미세 구멍 가공 시 구멍의 크기를 결정하는 것은 전체 에너지 보다 각각의 침두 출력(E_p)과 펄스 폭(τ_p)의 적절한 조합이 더 중요하다는 것을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 전체 에너지가(E) 너무 낮으면 미 가공 구멍이 생기는데 이것은 전체 에너지(E)가 너무 낮을 경우 재료를 용융 및 기화 상태로 만들 수 있는 최저 출

력밀도(power intensity)에 도달하지 못하므로 재료의 제거율이 감소하여 미 가공 구멍이 생기게 된다.

Fig.8의 형상들은 Nikon eclipse Me600광학 현미경과 Nikon coolpix 990 digital 카메라를 연결하여 현미경 배율 100배로 하여 같은 비율로 찍은 것이며, 치수는 버어니어 캘리퍼스를 사용하여 비례식에 의해 계산을 하였다. Fig.6과 Fig.7에 나타난 것처럼 직경비(R)가 가장 작은 형상만을 표시하였다.

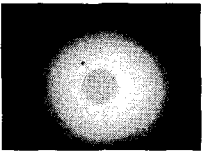
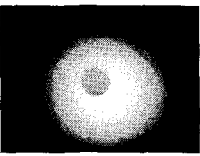
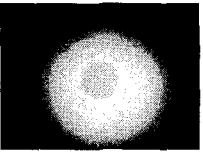
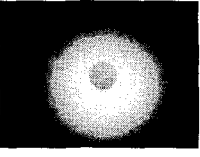
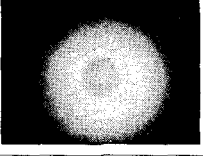
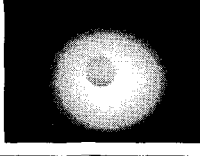
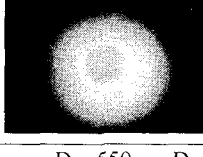
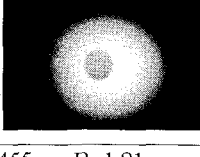
$E_p =$ 2.0kW, $\phi 9$ mm mask		
$D_U = 460\mu m, D_L = 370\mu m, R = 1.24$		
$E_p =$ 2.5kW, $\phi 9$ mm mask		
$D_U = 470\mu m, D_L = 430\mu m, R = 1.09$		
$E_p =$ 2.0kW, $\phi 11$ mm mask		
$D_U = 600\mu m, D_L = 490\mu m, R = 1.22$		
$E_p =$ 2.5kW, $\phi 11$ mm mask		
$D_U = 550\mu m, D_L = 455\mu m, R = 1.21$		

Fig.8 The shape of machining holes with the smallest diameter rate

4. 결론

Al_2O_3 세라믹의 초점위치에 따른 미세 구멍 가공에 있어서 실험한 결과는 다음과 같다.

1. 조리개를 미 부착시는 기판표면(Z=0)에서 첨두 출력(E_p) 2kW와 펄스 폭(τ_p) 7ms인 곳에서 가공된 구멍 직경비(R)가 1.24로 가장 작았다.
2. $\phi 9$ mm 조리개를 부착했을 때에는 첨두 출력

(E_p) 2kW에서는 펄스 폭(τ_p) 8ms, 2.5kW에서는 6ms인 곳에서 가공된 구멍 직경비(R)가 각각 1.24, 1.09로 가장 작았다.

3. $\phi 11$ mm 조리개를 부착했을 때에는 첨두 출력(E_p) 2kW에서는 펄스 폭(τ_p) 10ms, 2.5kW에서는 7ms인 곳에서 가공된 구멍 직경비(R)가 각각 1.22, 1.21로 가장 작았다.

참고문헌

- (1)박성두, 1997, "레이저가공", 대광서림, pp.85~86, pp100~107
- (2)김도훈, 1990, "레이저가공학", 경문사, pp.295~304
- (3)김유진, 1999, "Nd:YAG laser를 이용한 Al_2O_3 세라믹의 미세구멍 가공특성에 대한 연구", 국민대학교 석사학위논문
- (4)Kanaoka Masaru, 2000, "레이저가공기술", (주)한국산업정보센터 pp.11~15
- (5)김희봉, 이 창희, 정진만, 김철중, 1997, "펄스 형태에 따른 Nd:YAG laser 용접특성에 대한 관한 연구", 제8회 레이저 가공기술 심포지움, p66~88,
- (6)윤혁중, 임순재, 이동주, 한홍삼, 1999, " Al_2O_3 세라믹의 온도별 미세구멍 가공특성", 한국 레이저가공학회지 제2권 제3호, p32~41