

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 미세구멍 가공 시 레이저빔 특성에 관한 연구

백병만\*(국민대 자동차공학 전문대학원), 이건상(국민대 자동차공학 전문대학원)

A Study on the Laser Beam Characteristics during Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Microhole Machining

B. M. Paik(G.S of Automotive Eng. KMU), K. S. Lee(G.S of Automotive Eng. KMU)

## ABSTRACT

These days, As dynamic function and special properties to compare traditional material, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic use all over the industry. But it is very difficult to process because of high hardness and brittleness.

Therefor, in this paper, it was investigated that laser process parameter which can produce appropriate quality of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic microhole machining

**Key Words** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (알루미나), Nd YAG laser (Nd:YAG 레이저), hole diameter ratio (구멍직경비), microhoic (미세구멍), peak power (첨두 출력), pulse width (펄스 폭), single pulse (단일펄스), multi pulse (다중펄스)

### 1. 서론

금속과 비금속원소들의 화합물인 세라믹(ceramic)은 기존의 금속이나 고분자 재료 등과는 다른 독특하고 우수한 특성과 다양한 기능으로 산업전반에 걸쳐 중요한 신소재로 각광 받고 있다 최근에는 천연 원료의 정제 혹은 합성에 의한 인공원료의 제조를 통해 뛰어난 특성을 가진 새로운 세라믹(new ceramic, fine ceramic)이 개발되어 현대 첨단기술산업의 핵심적인 신소재로 널리 이용되고 있다.

이러한 새로운 세라믹 중 하나인 알루미나(alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)는 산화물 세라믹(oxide ceramics)으로서 기존의 재료들보다 내열성, 절연성이 뛰어나고 물리적, 기계적 특성이 우수하여 열, 전기의 절연재, 절삭공구, 연마재 등에 사용할 뿐만 아니라 최근에는 전자산업의 발달로 고도의 기능을 가진 새로운 소재에 적합한 재료 중 하나로 각광을 받고 있다. 그러나 알루미나는 높은 경도와 취성으로 전자산업계에서 요구하는 수  $\mu\text{m}$ 대의 초정밀 미세구멍(micro hole) 가공에는 많은 제약을 받고 있다.

산업계에서는 세라믹 미세구멍 가공을 드릴을 이용한 전통적인 접촉식 방법으로 하였으나, 이 방법

은 가공정밀도가 떨어지고 작업시간이 오래 걸리며 공구가 피손되어 가공이 실패하는 등의 한계를 가지고 있다 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법중인 하나가 레이저(laser)를 이용한 비 접촉식 가공방법이나, 레이저를 이용한 가공은 열을 이용한 가공이므로 필연적으로 재료의 열변형 문제를 수반하기 때문에 실제 가공 후 구멍 주위의 열변형 상태 해석과 구멍 형상 및 크기의 정밀도 향상이 가장 큰 문제로 남아 있으며, 가공조건들에 대한 자료들도 거의 없는 상황이다<sup>(1,2,3)</sup>

따라서 본 논문에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 세라믹의 미세구멍 가공 실험을 통해 첨두출력(peak power), 펄스 폭(pulse width), 펄스 횟수(pulse count) 등의 레이저 가공변수들이 구멍 형상과 크기, 구멍직경비(hole diameter ratio), 주변부의 상태 등의 공정출력 변수에 미치는 영향을 연구하여, 미세구멍 가공에 적합한 품질을 가질 수 있는 레이저 가공변수들의 조건에 대하여 연구하였다.

### 2. 실험재료 및 방법

레이저에 의한 세라믹의 미세구멍 가공은 접촉된 레이저빔을 재료에 조사시켜 고온으로 재료를 증발

제거하여 가공을 수행하는 비접촉식 특수가공(nontraditional machining)방법이다.

레이저를 이용한 가공법의 장점은 가공시간이 짧고, 인공의 지류와 형상 가공이 가능하고, 정사방향의 구멍 가공이 가능하다는 것이다. 그러나 에너지 효율이 낮고, 열에 의한 구멍 주변의 손상이 발생되며, 용융된 재료가 구멍 주변에서 응고되어 구멍의 정밀도를 떨어뜨리고 성밀한 규격을 요구할 경우 후처리가 요구된다는 단점을 가지고 있다.<sup>13)</sup>

본 실험에서는 세라믹 미세구멍 가공 시 요구되는 가공 품질평가 방법으로 구멍의 크기, 형상 그리고 구멍직경비(d)로 정하였다. 구멍직경비(R)는 가공구멍의 위 직경( $D_U$ )을 아래 직경( $D_L$ )으로 나눈 값으로 이것은 미세구멍 가공 시 구멍의 직적도(straightness)를 보여 준다. Fig. 1은 레이저빔으로 미세구멍을 가공하였을 때 구멍 위의 직경( $D_U$ )과 구멍 아래의 직경( $D_L$ )과의 구멍직경비(R)의 관계를 도식적으로 나타내고 있다.

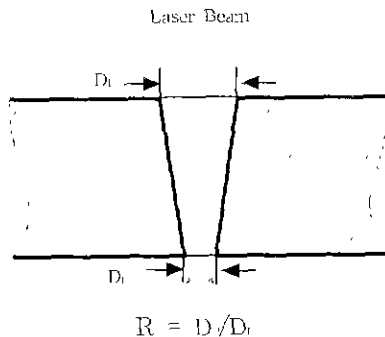


Fig. 1 Schematic illustration of microhole machining

실험에 사용된 레이저 장비는 Nd:YAG laser system (Lumonics LuxStar™)과 3축 CNC table이며 레이저의 특성은 파장 1.06 $\mu$ m, 초점거리 60mm, 평균 출력 최대 50W 이다. 실험재료는 미국 Coors Ceramics Company사에서 제조한 알루미늄 세라믹으로 모델은 AD0-90, 순도는 92%이며, 재료의 크기는 50 $\times$ 50mm, 두께 0.6mm의 크기이며 물성치는 Table 1과 같다.

미세구멍 가공은 먼저 예비실험을 통해 레이저 가공 변수인 첨두출력( $E_p$ )과 펄스 폭( $\tau_p$ )의 영역을 설정하고 본 실험을 수행하였다. 예비실험 결과 레이저빔의 초점을 재료 표면 위에 조사하고 단일펄스일 때 첨두 출력은 1~2.5kW(step 0.5kW), 펄스 폭은 4~10ms(step 1.0ms)의 영역에서 가공되었다. 본 실험에서는 예비실험의 결과를 가지고 단일펄스(single pulse)일 때 구멍의 품질이 가장 양호한 조건을 찾아

내고, 같은 조건에서 다중펄스(multi pulse)의 펄스 횟수를 변화하여 단일펄스와 다중펄스와 비교하였다.

Table 1 Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic

Characteristics(Unit)	AD0-90
Alumina Content(%)	92
Density-Nominal(g/cm <sup>3</sup> )	3.78
Density-Range(g/cm <sup>3</sup> )	(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 <sup>6</sup> psi)	45
Coefficient of Thermal Expansion(10 <sup>-6</sup> /°C)	7.8
Thermal Conductivity(W/m <sup>2</sup> ·K)	11.3

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 단일 펄스에 의한 미세구멍 가공

실험은 예비실험의 조건에 따라 각각 10회씩 실시하였으며 레이저빔의 초점위치는 재료 표면에 조사하였고 보조가스는 사용하지 않았다.

Fig. 2(a)와 (b)는 첨두출력과( $E_p$ ) 펄스 폭( $\tau_p$ )의 변화가 미세구멍의 크기에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 펄스 폭( $\tau_p$ )은 7ms로 하고 첨두출력( $E_p$ )을 1~2.5kW 변화시켰을 때 구멍 위의 직경은 0.466~0.492mm로 변화하였으며 구멍 아래의 직경은 0.286~0.374mm로 변화하였다. 첨두출력( $E_p$ )을 2kW로 하고 펄스 폭( $\tau_p$ )을 4.0~10.0ms로 변화하였을 때 구멍 위의 직경은 0.460~0.504mm, 구멍 아래의 직경은 0.162~0.396mm로 변화하였다.

실험결과 동일한 전체 에너지(E)를 조사하여 가공을 하여도 구멍의 크기나 구멍직경비(R)가 변화하였다. 전체 에너지(E)는 14J로 고정하고 첨두출력( $E_p$ )을 1.5kW와 2kW로 변화시키면 구멍직경비(R)는 각각 1.56과 1.32로 나옴에 이것은 미세구멍 가공 시 구멍의 품질을 결정하는 것은 전체 에너지(E)보다 각각의 첨두출력( $E_p$ )과 펄스 폭( $\tau_p$ )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 기화상태로 만들 수 있는 최저 출력

밀도(power intensity,  $W/cm^2$ )에 도달하지 못하므로 재료의 제거율이 감소하여 미가공 구멍이 생기게 된다. 단일 펄스의 실험결과 구멍의 직경과 형상 그리고 구멍직경비(R)를 고려했을 경우 침투출력( $E_p$ ) 2kW, 펄스 폭( $\tau_p$ ) 6~10ms에서 평균 구멍직경비(R)가 1.284로 가장 좋은 것으로 나타났다. Fig 3은 침투출력( $E_p$ ) 2kW, 펄스 폭( $\tau_p$ ) 4~10ms에서 전체 에너지(E)변화에 따른 구멍직경비(R)를 나타내고 있다

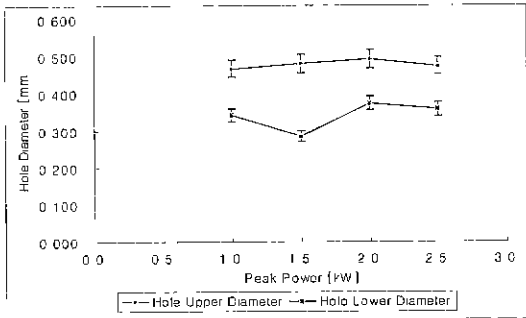


Fig. 2(a) Relationship between hole diameter and peak power (pulse width = 7ms)

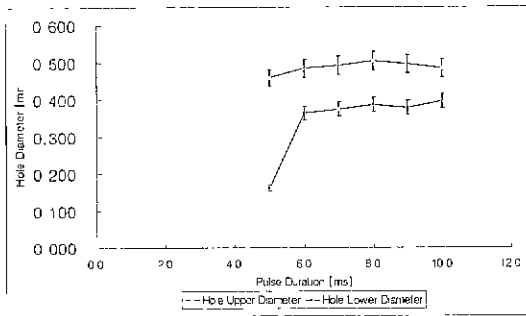


Fig. 2(b) Relationship between hole diameter and pulse width (peak power = 2kW)

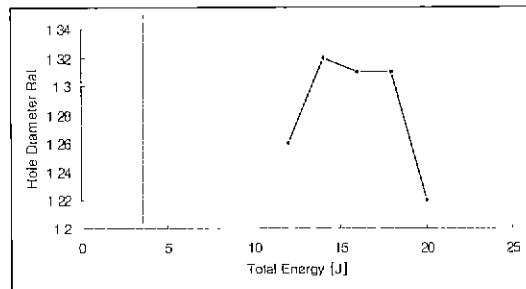


Fig 3 Hole diameter ratio by changing total energy (peak power = 2kW pulse width = 7ms)

### 3.2 멀티 펄스에 의한 미세구멍 가공

멀티 펄스 실험에서는 펄스 횟수를 각각 2, 4Hz로 나누어 단일 펄스 실험에서 구멍직경비가 가공품질에 가장 좋은 영역(침투출력( $E_p$ ) 2kW, 펄스 폭( $\tau_p$ ) 6~10ms)을 사용하여 멀티 펄스 실험을 하였다. 펄스 횟수가 2Hz인 경우 펄스 폭( $\tau_p$ ) 7ms에서 구멍 위 직경은 0.498mm, 구멍 아래 직경은 0.396mm이고 펄스 횟수가 4Hz인 경우 구멍 위의 직경은 0.480mm, 구멍 아래 직경은 0.388mm이다. 단일 펄스에 비해 전체 에너지[J]가 2회인 경우는 2배, 4회인 경우 4개의 에너지가 공급되나 구멍의 직경에는 커다란 변화가 없다 오히려 구멍직경비(R)를 보면 펄스 횟수가 2회인 경우 1.26, 4회인 경우 1.24로 가공품질이 더 좋아졌다 이런 이유는 구멍 가공시 미 가공된 부분을 후속 빔이 제거를 해서 구멍직경비(R)가 개선된 것이라고 이해 할 수 있다. Fig. 4는 펄스 횟수에 따른 구멍 위의 직경과 구멍 아래의 직경의 변화를 나타낸 것이고, Fig 5는 펄스 횟수 변화에 따른 구멍직경비(R)를 나타낸 것이다 Fig. 6은 침투출력( $E_p$ ) 2kW, 펄스 폭( $\tau_p$ ) 7ms에서 펄스 횟수 변화에 따른 미세구멍 가공형상을 보여주고 있다.

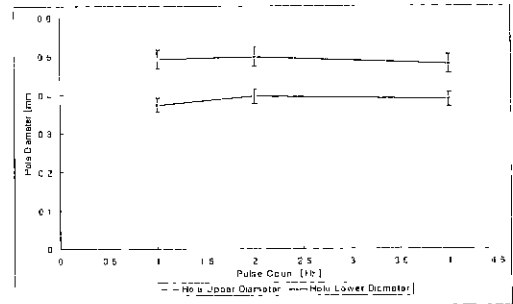


Fig. 4 Relationship between hole diameter and pulse count (peak power = 2kW pulse width = 7ms)

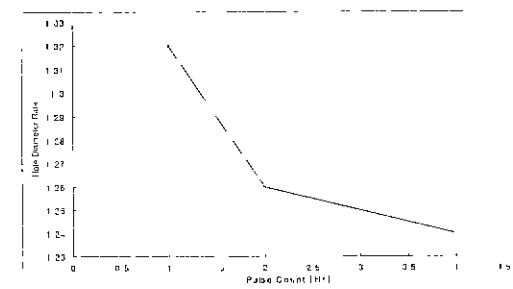


Fig. 5 Relationship between hole diameter ratio and pulse count (peak power = 2kW pulse width = 7ms)

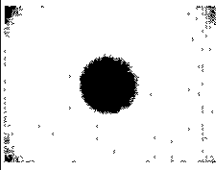
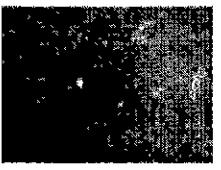
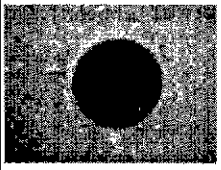
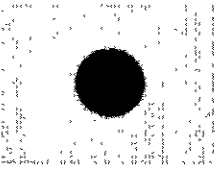
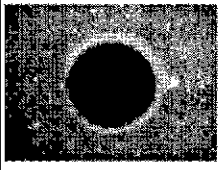
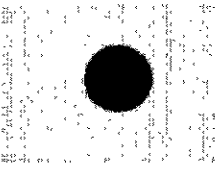
Hole Upper	Hole Lower
	
single pulse hole dia. = 0.492mm	single pulse hole dia. = 0.374mm
	
pulse count : 2Hz hole dia. = 0.498mm	pulse count : 2Hz hole dia. = 0.396mm
	
pulse count : 4Hz hole dia. = 0.480mm	pulse count : 4Hz hole dia. = 0.388mm

Fig 6 Micrograph of hole diameter  
(peak power = 2kW, pulse width = 7ms)

#### 4. 결론

본 논문에서는 Nd:YAG 레이저를 이용한  $Al_2O_3$  세라믹 미세구멍 가공에 대한 레이저 가공변수에 대하여 조사하였다

1. 단일 펄스인 경우 빔 초점을 재료표면에 위치시킨 경우, 레이저 빔의 영역은 첨두출력( $E_p$ ) 2kW, 펄스 폭( $\tau_p$ ) 6~10ms로 구멍 위면의 크기는 0.484~0.504mm 이고 아래면의 크기는 0.364~0.369mm이고 구멍직경비(R)가 1.284로 다른 영역에서 보다 우수하였다
2. 다중펄스인 경우 첨두출력( $E_p$ ) 2kW, 펄스 폭( $\tau_p$ ) 6~10ms 에서 펄스 횟수를 각각 2, 4Hz로 조사할 경우 펄스 횟수가 2Hz인 경우 펄스 폭( $\tau_p$ ) 7ms에서 구멍 위 직경은 0.498mm, 구멍 아래 직경은 0.396mm 이고 펄스 횟수가

4Hz인 경우 구멍 위의 직경은 0.480mm, 구멍 아래 직경은 0.388mm이며 구멍직경비(R)는 각각 1.26과 1.24로 구멍직경비(R)가 1.284인 단일펄스의 경우 보다 가공품질이 개선되었다.

#### 참고문헌

1. 김낙수, 임용택, 진종태, "공업재료가공학", 피어슨 에듀케이션 코리아 pp.365-376, 2000
2. 김유진 "Nd:YAG laser를 이용한  $Al_2O_3$  세라믹 미세구멍 가공특성에 관한 연구", 국민대학교 석사학위논문, 1997
3. 윤혁중, 임순제, 이등주, 한홍삼, " $Al_2O_3$  세라믹의 순도별 미세구멍 가공 특성", 한국 레이저가공학회 제2권, 제3호, pp 32-34, 1999