

# Excimer laser를 이용한 알루미나( $Al_2O_3$ ) 세라믹의 미세구멍 가공 특성에 대한 연구

김병용\*(국민대 자동차공학전문대학원), 이건상(국민대 자동차공학전문대학원)

A study on the Microhole Machining Characteristics of the  $Al_2O_3$  Ceramics using Excimer Laser

B. Y. Kim(G.S of Automotive Eng, KMU), K. S. Lee(G.S of Automotive Eng. KMU)

## ABSTRACT

$Al_2O_3$  ceramics are generally used as components in processing equipment, devices or machinery because it can perform some functions better than competing metals or polymers. Many of these applications rely on  $Al_2O_3$  ceramics special electromagnetic properties, its relative chemical inertness, hardness, strength and its temperature capabilities. But  $Al_2O_3$  ceramics are brittle materials, a fact that may cause problems and at the same time be helpful while machining with laser.

This study described a basic study of the input parameters effect on the dimension of the microhole at the  $Al_2O_3$  ceramics using Excimer laser. In the laser microhole machining of  $Al_2O_3$  ceramics, major input parameters are pulse energy, pulse power, pulse frequency and pulse numbers

In conclusion, we can get a smaller microhole and diameter rate by an appropriate pulse energy, pulse frequency and pulse number.

**Key Words**  $Al_2O_3$  ceramic(알루미나 세라믹), microhole machining(미세구멍 가공), pulse energy(펄스에너지), pulse frequency(펄스 주파수), pulse number(펄스 수)

## 1. 서론

최근 첨단과학기술의 발달과 함께 고도의 기능을 가진 새로운 소재에 대한 요구가 날로 증대됨에 따라 광범위한 물성의 실현과 응용이 가능한 재료, 새로운 물리적·화학적 성질을 갖는 재료, 새로운 고기능성 재료의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 현실 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<sup>1)~3)</sup>

세라믹의 주로 천연의 광물원료를 이용해 제조되었으나, 최근 천연원료의 정제 혹은 합성에 의한 인공원료의 제도를 통해 뛰어난 특성을 가진 새로운 세라믹이 개발되었다. 이들은 기계, 전자, 항공우주 산업은 물론 환경, 에너지, 의료, 생체 재료에 이르기 까지 현대첨단기술의 핵심적인 신소재로 널리 이용

되고 있다.

이러한 새로운 세라믹들 중 하나인 알루미나(alumina,  $Al_2O_3$ )는 기존의 재료들보다 내열성, 절연성이 뛰어나고 물리적, 기계적 특성이 우수하여 최근 전자산업의 발달과 함께 대두되고 있는 고도의 기능을 가진 새로운 소재의 요구에 적합한, 가장 중요한 전자재료들 중 하나로 각광받고 있다.

그러나 알루미나는 기계적, 물리적 특성의 우수함과 다양한 기능성을 가지고 있음에도 불구하고 높은 경도와 취성으로 인한 가공상의 어려움으로 실제 사용에는 많은 제약을 받고 있다. 특히 최근 들어 전자산업계에서 수  $\mu m$ 대의 초정밀 미세구멍 가공이 요구되고 있는 가운데, 업계에서는 최근까지도 전통적인 가공방식인 드릴을 이용한 접촉식 방법으로 작업을 수행해 왔으나, 가공정밀도가 떨어지고 작업시간이 오래 걸리며 공구가 파손되어 가공이 실패하는 등의 한계를 드러내면서, 이를 대체할 새로운 가공

기술의 개발을 요구하게 되었다. 이러한 요구에 따라 개발된 것이 특수가공인데, 이 가공방식에서 가장 유망한 것 중 하나가 바로 레이저(laser)를 이용한 가공방식이다. 그러나 레이저를 이용한 가공은 일을 이용한 가공이므로 필연적으로 재료의 열변형 분체를 수반하기 때문에 실제 가공 후 구멍주위의 열변형 상태, 헤시오 구멍 형상 및 크기의 정밀도 향상이 가장 큰 문제로 남아 있으며, 가공조건들에 대한 상세한 자료들도 거의 없는 상황이다.<sup>[1~3]</sup>

본 논문에서는 레이저를 이용한 세라믹의 미세구멍 가공 실험을 통해 펄스 에너지, 펄스 수, 펄스 주파수 등의 가공변수들이 미세구멍의 형상과 크기에 미치는 영향을 연구함으로써, 미세구멍 가공에 적합한 가공조건들을 제시하여 궁극적으로는 더 정밀하고 우수한 품질의 미세구멍 가공을 가능하게 하고자 한다.

## 2. 실험방법 및 재료, 레이저의 특징

### 2.1 레이저를 이용한 세라믹 미세구멍 가공

레이저에 의한 세라믹의 미세구멍 가공은 집속된 레이저빔을 소재에 조사시켜 고온으로 그 구역의 재료를 증발, 제거하여 가공을 수행하는 비접촉식 가공방식이다. 레이저를 이용한 미세구멍 가공법의 특징을 간략하게 나타내면 Table 2.1과 같다.<sup>[1~3]</sup>

Fig. 1.1에서는 구멍위 직경( $D_u$ ), 구멍아래 직경( $D_l$ ) 그리고 직경비( $d$ )를 나타내고 있다.<sup>[4]</sup>

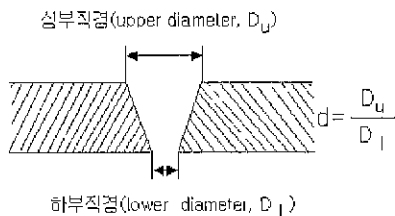


Fig. 1.1 Schematic illustration of microhole machining

실험에 사용된 시편을 미국 Coors Ceramics Company에서 제조한 알루미나 세라믹 소재로 모델 AD0-90. 순도 92%이며, 물성치는 Table 2.2와 같다.

본 논문에서는 엑사이머 레이저와 Nd:YAG 레이저를 이용하여 펄스 수, 펄스 에너지, 펄스 주파수 그리고 펄스 폭(pulse duration)의 변수를 변화시켜 세라믹 미세구멍 가공을 실험하였다. 발생원리와 메커니즘이 다른 두 레이저를 직접적으로 비교하는데는 한계가 있으므로, 본 논문에서는 엑사이머 레이저와 Nd:YAG 레이저에 의한 세라믹 미세구멍 가공의 결

Table 2.1 The microhole machining characteristics of the  $Al_2O_3$  ceramics using laser

장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 가공시간이 짧아 생산성이 큼</li> <li>· 깊은 구멍을 뚫을 수 있음</li> <li>· 임의의 지름과 형상의 가공이 가능</li> <li>· 경사방향의 구멍 가공가능</li> <li>· 소음, 진동 및 공해 발생이 적음</li> <li>· 다양한 재료의 가공 가능</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 에너지 효율이 낮음</li> <li>· 열에 의한 구멍 주변의 손상발생</li> <li>· 용융된 재료가 구멍 주변에서 응고되어 구멍의 정밀도가 떨어짐</li> <li>· 정밀한 규격을 요할 경우 후가공 처리가 요구됨</li> </ul>

Table 2.2 The physical properties of  $Al_2O_3$  ceramic

Characteristics(Unit)	Test Method	AD0-90
Alumina Content(%)	ASTM D2442	92
Density-Nominal( $g/cm^3$ )	ASTM C20	3.78
Density-Range( $g/cm^3$ )		(3.75~3.80)
Water Absorption(%)	ASTM C373	0
Gas Permeability		0
Hardness	ASTM E18, R45N	75
Poisson's Ratio@20°C(Kpsi)	ASTM C848	0.24
Flexural Strength@20°C(Kpsi)	ASTM F417	53
Elastic Modulus@20°C( $10^6$ psi)	ASTM C848	45
Coefficient of Thermal Expansion( $10^{-6}/°C$ )	ASTM C372	7.8
Thermal Conductivity( $W/m^°K$ )	ASTM C408	11.3

과를 비교하였다

#### 2.1.1 Excimer 레이저를 이용한 미세가공

오늘날 엑사이머 레이저 응용기술은 반도체 공정에서부터 인간의 시력보정에 이르기까지 많은 분야에 적용이 되고 있다. 또한 긴 가스수명, 신뢰성 있는 작동, 출력 안정성, 균일한 공간적 세기분포를 갖는 엑사이머 레이저가 상업적으로 제공되고 있으므로 그 활용은 더욱 확대될 전망이다.<sup>[5]</sup>

엑사이머 레이저의 다양한 기체 할로젠 화합물인

ArF(193nm), KrF(248nm), XeCl(308nm), XeF(351nm) 중에서, 본 논문에서는 KrF를 사용한 엑사이머 레이저를 이용하여 실험을 수행하였다. 이 엑사이머 레이저는 펄스 에너지(pulse energy) 1.0~20.0mJ, 펄스 폭(pulse duration) 3~7ns, 평균파워는 펄스주파수(pulse frequency) 300Hz에서 200~3000mW이다

우선 펄스 수와 펄스 주파수는 일정하게 고정한 후 펄스 에너지를 10mJ~16mJ까지 2mJ씩 증가시키면서 10회씩 초점위치를 변화하여 실험하였다. 실험에 사용된 변수로서 펄스 수는 8000회, 펄스 주파수는 250Hz로 지정하였으며, 펄스 수가 매우 높은 이유는 펄스 에너지와 펄스 폭이 낮은데서 기인한다. 가공 상태를 살펴보면, 초점이 기판표면(Z=0)에 위치 할 때에 사용된 펄스 에너지구간에서는 모두 구멍가공이 되었으나, 초점위치가 아래로 이동할수록 가공수는 점점 줄어 들었고, 기판밑에서는 거의 가공이 이루어지지 않았다. 또한 직경비(d)의 차이도 점점 증가함을 알 수 있다.

### 2.1.2 Nd:YAG레이저를 이용한 미세구멍 가공

본 실험에 사용된 Nd:YAG 레이저는 최고 평균 파워 50W의 펄스형 고체레이저이며, 최대 펄스 주파수는 100Hz이고, 최대 펄스 에너지는 25J이다. 이 레이저는 광 화이버를 이용해 레이저빔을 전달함으로써 공정의 자동화가 용이하며, 한 펄스의 에너지와 펄스 주파수의 조절이 가능하고, 펄스형태를 변환함으로써 그에 대한 가공특성도 관찰할 수 있다.

본 실험에서는 엑사이머 레이저의 경우와 동일한 알루미나 시편을 가지고 실험을 행하였다.

우선 펄스 주파수는 고정된 후 펄스 파워를 0.5kW~3.0kW, 각 파워당 펄스 폭을 1ms~10ms로 변화시키고, 초점위치도 변화시키면서 각 20회씩 실험을 하였다. 단일 펄스모드로 고정하였다. 이 실험에서는 초점위치가 아래에 위치할수록 구멍 가공수가 증가하였고, 특히 2kW와 2.5kW의 4ms~9ms에서 구멍가공이 잘 되었다. 그러나 고에너지로 인한 열영향부(HAZ)가 형성되었으며, 구멍의 직경이 증가한 반면에 직경비는 오히려 엑사이머 레이저에 비해서 낮은 값을 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 Excimer 레이저 미세가공의 특성

엑사이머 레이저는 펄스당 에너지가 매우 낮기 때문에 펄스 주파수가 높은 상태에서 실험을 했을 때 구멍가공이 되었다. 그리고 0.1mm의 마스크를 통과한 에너지밀도가 높은 에너지만을 사용하였으며, 마스크의 크기에 의해 구멍 상부직경(upper diameter;  $D_u$ )도 대략 100 $\mu$ m에서 가공이 이루어졌으며, 구멍

$E_p=10$ [mJ]		
	$D_u = \phi 115\mu\text{m}, D_l = \phi 29\mu\text{m} \quad d=3.97$	
$E_p=12$ [mJ]		
	$D_u = \phi 115\mu\text{m}, D_l = \phi 31\mu\text{m} \quad d=3.71$	
$E_p=14$ [mJ]		
	$D_u = \phi 117\mu\text{m}, D_l = \phi 30\mu\text{m} \quad d=3.90$	
$E_p=16$ [mJ]		
	$D_u = \phi 117\mu\text{m}, D_l = \phi 30\mu\text{m} \quad d=3.90$	

Fig.3.1 The photo micrograph of the microhole on the  $Al_2O_3$  surface machined by excimer laser

하부 직경(lower diameter;  $D_l$ )은 매우 낮은 펄스 에너지로 인하여 대략 20~30 $\mu$ m에서 가공이 되었다. 그 결과 상부직경과 하부직경의 비(d)는 3~4정도이다. 이 값들은 초점위치가 기판표면에 위치할 때 가공하여 측정된 데이터들이며, 초점이 기판중심에 위치할 때에는 대략 70%가 구멍가공이 되었지만, 기판밑에서는 거의 가공이 이루어지지 않았다. 이런 실험 결과들을 Fig 3.1에 나타내었다.

Fig.3.1에서 알 수 있듯이 펄스 에너지의 높고 낮음에 관계없이 직경비는 비슷하였으며 이것은 펄스 에너지가 매우 낮고, 사용된 시편의 반사율이 매우 높는데서 기인한다고 할 수 있다.

### 3.2 Nd:YAG레이저 미세가공의 특성

본 실험에서는 Nd:YAG레이저의 펄스모드중 단일펄스 모드를 가지고 실험을 행하였다. 최대 펄스 에너지가 25J이므로 펄스당 파워를 3kW까지 내기 위해서는 펄스 주파수를 2Hz로 제한을 두었다. 그리고 고 에너지 밀도가 높은 빔을 사용하기 위해서 직경이 11mm인 조리개를 사용하여 실험을 하였으며, 이는 예비실험을 통하여 얻은 데이터를 이용하였다.

또한 펄스 에너지가 2kW보다는 2.5kW에서 가공된 구멍의 수가 더 많았다. 엑사이머 레이저에 비해 펄스 에너지가 높으므로 가공된 구멍의 수는 증가한 반면에 구멍직경도 동시에 증가하는 경향을 보인다. 조리개를 미 부착시에는 구멍 상부직경( $D_u$ )은 대략 500 $\mu\text{m}$ 에서 가공이 되며, 하부직경( $D_l$ )은 대략 400 $\mu\text{m}$ 에서 가공이 되었다. 따라서, 직경비는 대략 1.3으로 측정이 되었다. 그러나 조리개를 부착시 구멍 상부직경은 약 400 $\mu\text{m}$ , 구멍 하부직경은 300 $\mu\text{m}$ 로 조리개 비부착보다 크기는 줄어들었으나, 직경비의 값은 동일한 값을 얻었다. 그림3.2는 기관표면에서 조리개를 부착하고, 펄스 파워가 2.5kW이고, 펄스 폭(pulse duration:  $\tau_p$ )을 5ms~8ms로 변화시키면서 가공한 형상을 나타내고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서 엑사이머 레이저와 Nd:YAG레이저의 실험상의 큰 차이는 펄스 에너지이다. 엑사이머

레이저는 80~128J의 에너지가, Nd:YAG레이저는 12.5~20J에너지가 사용되었다. 그러나, 가공된 구멍의 직경은 엑사이머 레이저가 상부직경이 115~117 $\mu\text{m}$ , 하부직경은 29~31 $\mu\text{m}$ 이고, 직경비는 3.71~3.97이었다. Nd:YAG레이저에서는 상부직경은 470~480 $\mu\text{m}$ , 하부직경은 350~370 $\mu\text{m}$ 이며, 직경비는 1.30~1.34이었다. 따라서 상부직경, 하부직경은 엑사이머 레이저가 레이저가 Nd:YAG레이저에 비해 각각 1/4, 1/10정도 작았으며, 직경비율도 엑사이머 레이저가 Nd:YAG레이저에 비해 1/3수준이었다.

#### 참고문헌

1. 김정규, 최삼락, "기계재료학", 문운당 pp.359-363, pp.365-376, 1996
2. 박성두, "레이저가공", 대광서림 pp.85-86, pp.100-107, 1997
3. 김도훈, "레이저가공학", 경문사, pp.156-158, pp.201-209, pp.285-301, 1990
4. Kanaoka Masaru, "레이저가공기술", (주)한국산업정보센터 pp.11-15, 2000
5. 윤경구의 6명, "레이저 빔 응용 기술", 한국정밀공학회지 제17권 제7호, 2000.7

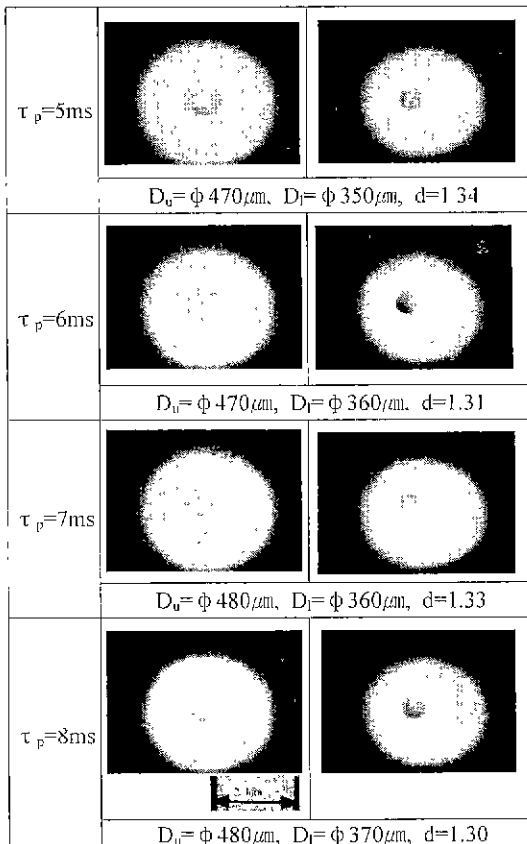


Fig 3.2 The photo micrograph of the microhole on the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  surface machined by Nd:YAG laser