

Excimer laser를 이용한 세라믹 미세구멍 가공

백 병 만*·이 건 상*

Ceramic Microhole Machining using Excimer Laser

Byoung-Man Paik, Kun-Sang Lee

Key Words: Microhole (미세구멍), Al_2O_3 (알루미나), hole diameter ratio (구멍직경비), peck power (첨두 출력), pulse width (펄스 폭), pulse count (펄스 수), pulse frequency (펄스 주파수)

Abstract

These days, Al_2O_3 ceramic use all over the industry because dynamic function and special properties to compare traditional material. But Al_2O_3 ceramic is high hardness and brittleness materials. For this reason, it is very difficult to process

Therefore, In this paper, it was investigated that laser process parameter, which can produce appropriate quality of Al_2O_3 ceramic microhole machining utilized Nd:YAG laser and Excimer laser.

1. 서 론

세라믹(ceramic)은 기존의 금속이나 고분자 재료 등과는 다른 독특하고 우수한 특성으로 산업 전반에 걸쳐 많은 각광을 받고 있다. 최근에는 천연원료의 정제 혹은 합성에 의한 인공원료의 제조를 통해 뛰어난 특성을 가진 새로운 세라믹(fine ceramic)이 개발되어 첨단기술산업의 핵심적 소재로 사용되고 있다.

이런 새로운 세라믹 중 산화물 세라믹(oxide ceramic)인 알루미나(alumina, Al_2O_3)는 기존의 재료들보다 내열성, 절연성이 뛰어나고 물리적, 기계적 특성이 우수하여 열, 전기의 절연재, 절삭공구, 연마재 등에 사용될 뿐만 아니라 전자산업의 발달로 고도의 기능을 가진 새로운 재료로 적용되고 있다¹⁾.

대표적인 예로 반도체 검사장치(probe card)에서

적용이 되고 있는데, 기존의 probe card 제조 방식은 폴리머(polymer) film에 펀칭하여 가이드를 만들고, 여기에 probe를 wiring하는 방법을 사용하고 있으나 폴리머는 열에 약하며, 여러 겹으로 층층이 쌓아 매 층마다 접착제에 의해 물딩을 하는데, 물딩 후 응고과정에서 수축으로 probe가 변위되고, 검사 시 잦은 probe의 위치조정으로 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 이 문제점을 보완하고자 알루미나에 미세구멍을 가공하여 가이드 핀 wiring시 사용하는 지그(jig)로 적용하고자 한다²⁾. 그러나 알루미나는 높은 경도와 취성으로 가공상의 난삭재로 알려져 있어 전통적 구멍가공 방법인 드릴링(drilling)으로는 장시간의 가공시간과 드릴의 파손으로 실패할 위험이 있다. 따라서 현재는 방전가공, 초음파가공, 레이저가공 등 특수가공법(nontraditional)으로 알루미나 가공을 시도하고 있다.

방전가공의 경우 스테인리스강(stainless steel)과 같은 전도성 물질에 대해서는 최적의 미세구멍 가공법이나 비전도성 취성 재료에는 적합하지 않다. 초음파 가공은 세라믹과 같은 비전도성 취성

* 국민대학교 자동차공학 전문대학원

재료의 미세구멍 가공에는 효과적이거나 방전가공과 초음파가공 모두 가공에 앞서 가공형상의 공구를 먼저 제작해야 하는 단점을 가지고 있다. 그러나 레이저를 이용한 미세구멍 가공은 가공시간이 짧고, 임의의 지름과 형상 가공이 가능하고, 경사방향의 구멍 가공이 가능하다는 특징을 가지고 있다³⁾.

따라서 본 논문에서는 Nd:YAG 레이저와 Excimer 레이저를 이용하여 각각 첨두출력(peak power, E_p), 펄스 폭(pulse duration, τ_p), 펄스 수(pulse count, C_p), 펄스 주파수(pulse frequency, F_p) 등의 레이저 가공변수들이 구멍 형상과 크기, 구멍직경비(hole diameter ratio, R), 주변부의 상태 등의 공정출력 변수에 미치는 영향을 연구하여, 미세구멍 가공에 적합한 품질을 가질 수 있는 레이저 가공변수들의 조건에 대하여 연구하였다.

2. 레이저 미세구멍 가공

기존의 고출력 CO_2 레이저와 Nd:YAG 레이저는 재료가공에서 절단, 용접, 드릴링, 마킹, 스크라이빙 등에 많이 적용되어 왔다. 그러나 이런 가공들은 모두 레이저빔이 재료에 조사되어 재료를 용융하고 증발시키는 열적 과정을 가진다. 이러한 열적 과정은 궁극적으로 절단과정에서 용융물로 인한 가공면의 정밀도를 떨어뜨리거나 가공 가능한 최소 두께를 제한하는 등 미세가공 분야에 이들 레이저의 이용을 제한하게 된다. 그러나 1975년에 개발된 Excimer 레이저는 두 개의 다른 전자준위들 사이의 전이에 의하여 광자가 방출되는 분자 레이저로 자외선구역의 높은 에너지 펄스를 수 10^{-9} 초 정도 방출시킬 수 있어 광화학가공이나 또는 대형 집적회로 등의 정밀가공에 이용되고 있다.

CO_2 레이저와 Nd:YAG 레이저에 비해서 Excimer 레이저가 미세가공에서 갖는 장점은 다음의 세 가지 특성 때문이라고 할 수 있다. 첫째, 모든 금속이 적외선 영역의 레이저에 대해서 높은 반사율을 보이는 것과는 달리 자외선 영역에 대해서는 높은 흡수율을 갖는다. 따라서 레이저빔은 재료의 내부로 효율적으로 흡수되어 얇은 표면층에서는 완전히 흡수되므로 재료의 고정밀 가공을 가능하게 된다. 둘째, Excimer 레이저는 짧은 펄스 폭 동안 높은 펄스 에너지를 가지기

때문에 높은 에너지 밀도의 실현이 가능하므로 레이저 조사동안 재료는 증발에 의해서 제거가 일어나며, 매우 짧은 펄스 폭으로 인해 열에너지의 전도는 매우 적으므로 열적으로 민감한 재료의 경우 크랙이나 구조 변형과 같은 열적 손상이 적은 가공이 가능하다. 셋째, Excimer 레이저는 파장이 짧기 때문에 미세한 정밀가공이 가능하다. 일반적으로 레이저 가공현상에는 열적 프로세스와 비열적 프로세스가 있다. 열적 프로세스는 재료의 표면을 급속히 가열시키는 높은 출력밀도의 레이저 펄스에 의존하며, 고체의 용융 영역으로부터 팽창과 증발을 일으킨다. 비열적 프로세스는 원칙적으로 가열에 의존하는 것이 아니라 레이저의 광자가 재료를 여기 상태로 만들고, 그 결과 결합을 끊어 재료의 제거를 일으키는 것이다. 그러나 재료의 가공현상은 열적 및 비열적 프로세스를 모두 포함할 수도 있다. 이것은 재료의 열적, 광학적 및 기계적 성질에 의존하며 이들 중에서 가장 중요한 성질은 흡수율과 열확산도이다.

Excimer 레이저에 의한 재료의 제거는 고출력 레이저 펄스와 재료의 단순한 상호작용의 결과이며, 주로 증발, 파쇄, 벗겨짐 또는 충격 효과와 같은 작용에서 일어난다. Fig.1은 Excimer 레이저를 이용한 미세구멍 가공의 메카니즘을 개략적으로 나타낸 것이다⁴⁻⁵⁾.

3. 실험재료 및 방법

3.1 실험재료

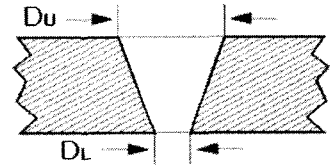
실험에 사용된 재료는 미국 Coors Ceramics Company사의 알루미늄 세라믹으로 모델은 AD0-90, 순도는 92%이며, 재료의 크기는 50×50 mm², 두께 0.6mm이며 물성치는 Table 1과 같다.

3.2 실험방법

본 실험은 빔 파장에 따른 가공 구멍 형상의 차이점을 알아보기 위해 Nd:YAG 레이저와 Excimer 레이저를 이용하여 미세구멍 가공 실험을 수행하였다. 알루미늄 미세구멍 가공 시 요구되는 가공 품질평가 방법으로 본 논문에서는 구멍의 크기, 형상 그리고 구멍직경비로 정하였다. 구멍직경비는 가공구멍의 위 직경(D_U)을 아래

직경(D_L)으로 나눈값으로 이것은 미세구멍의 평행도(parallelism)를 보여준다. Fig.2는 레이저빔으로 미세구멍을 가공하였을 때 구멍 위의 직경과 구멍 아래의 직경과의 구멍직경비의 관계를 도식적으로 나타내고 있다.

Nd:YAG 레이저와 Excimer 레이저는 레이저의 발생원리와 매질이 서로 다르므로, 이 두 레이저에 의한 가공결과를 직접적으로 비교하는대는 한계가 있어서 대략적인 경향만을 비교하였다.



$$R = D_u / D_L$$

Fig. 2 Schematic illustration of machining

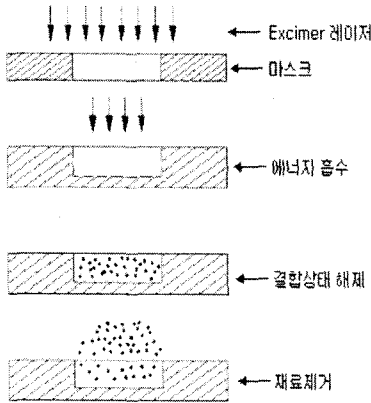


Fig. 1 Schematic illustration of microhole machining mechanism using excimer laser⁴⁾

Table 1 Properties of Al₂O₃ 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 ² K)	11.3

4. 실험 및 결과

4.1 Nd:YAG 레이저를 이용한 가공

실험에 사용된 레이저 장비는 Nd:YAG laser system (LumonicsLuxStarTM)과 3축 CNC table 이며 레이저의 특성은 Table 2와 같다.

레이저빔의 초점을 재료 표면 위에 위치하고 단일펄스(single pulse)로 각각 10회씩 조사하였다. Fig. 3(a)와 (b)는 첨두출력과 펄스 폭의 변화가 미세구멍의 크기에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 펄스 폭은 7ms로 하고 첨두출력을 1~2.5kW 변화시켰을 때 구멍 위의 직경은 0.466~0.492mm로 변화하였으며 구멍 아래의 직경은 0.286~0.374mm로 변화하였다. 첨두출력을 2kW로 하고 펄스 폭을 4.0~10.0ms로 변화하였을 때 구멍 위의 직경은 0.460~0.504mm, 구멍 아래의 직경은 0.162~0.396mm로 변화하였다.

실험결과 동일한 전체 에너지를 사용할 경우에도 구멍의 크기와 구멍직경비는 변화하였다. 전체 에너지는 14J로 고정하고 첨두출력을 1.5kW와 2kW로 변화시키면, 구멍직경비는 각각 1.56과 1.32로 다르게 나타나는데 이것은 미세구멍 가공시 구멍의 품질을 결정하는 것은 전체 에너지 보다 각각의 첨두출력과 펄스 폭의 적절한 조합이 더 결정적 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 전체 에너지가 너무 낮으면 미가공 구멍이 생기는데 이것은 레이저빔이 재료에 흡수되어 재료를 분해시키고 제거할 수 있는 출력밀도(power intensity, W/cm^2)에 도달하지 못하므로 재료의 제거율이 감소하여 미가공 구멍이

생기게 된다. 단일 펄스의 실험결과 구멍의 직경과 형상 그리고 구멍직경비를 고려했을 경우 첨두출력 2kW, 펄스 폭 6~10ms에서 평균 구멍직경비가 1.284로 가장 양호한 것으로 나타났다. Fig. 4는 첨두출력 2kW, 펄스 폭 4~10ms에서 전체 에너지 변화에 따른 구멍직경비를 나타내고 있다.

Table 2 The specifications of Nd:YAG laser

Wavelength	1.06 μm
Average Power	50 W
Peak Power	3.0 kW
Focus Length	60 mm
Working Distance	47 mm
Laser Beam Mode	TEM_{00}
Pulse Frequency	0~100 Hz
Pulse Duration	0.5~20.0 ms

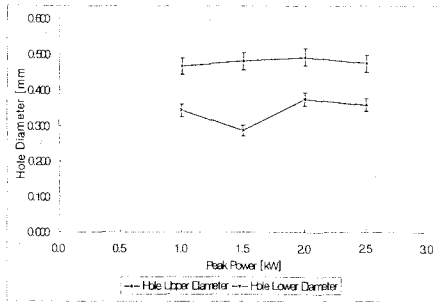


Fig. 3(a) Relationship between hole diameter and peak power (pulse duration = 7ms)

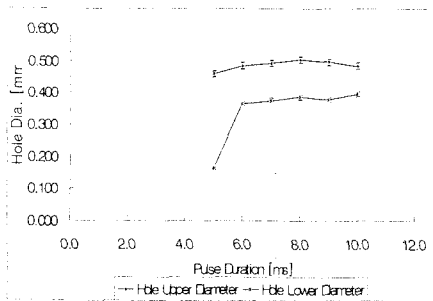


Fig. 3(b) Relationship between hole diameter and pulse duration (peak power= 2kW)

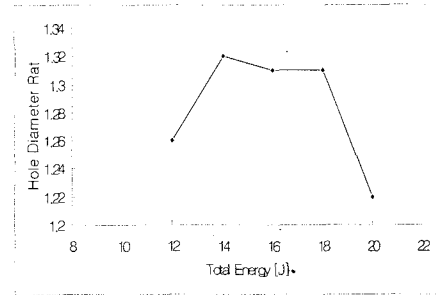


Fig. 4 Relationship between hole diameter ratio and total energy (peak power = 2kW, pulse duration = 7ms)

4.2 Excimer 레이저를 이용한 가공

Excimer 레이저의 파장은 능동매질에 따라 다르며, 일반적으로 기체 할로젠 화합물인 ArF(193nm), KrF(248nm), XeCl(308nm), XeF(351nm)을 사용한다. 본 실험에 사용된 레이저 장비는 KrF를 사용한 Excimer 레이저로 ATL LASERTECHNIK GMBH사에서 제작한 ATLEX-200i이다. 레이저의 특성은 Table 3과 같다.

실험은 직경 0.1mm의 구멍을 가진 마스크(mask)를 사용하여 에너지 밀도를 높이고 펄스 에너지가 낮기 때문에 높은 펄스 주파수 상태에서 실험을 하였다. 먼저 펄스 수와 펄스 주파수는 일정하게 고정한 후 펄스 에너지를 10mJ~16mJ까지 2mJ씩 증가시키면서 실험을 하였다.

Fig. 5는 펄스 에너지의 변화가 미세구멍의 크기에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 레이저빔의 초점을 재료 표면 위에 조사하고 펄스 수를 8000회, 펄스 주파수를 250Hz로 각각 10회씩 실시하였다. 구멍의 직경변화는 구멍 위의 직경은 0.116~0.118mm, 구멍 아래의 직경은 0.030~0.035mm로 변화하였다. 실험 결과 마스크의 영향으로 구멍 위의 직경은 대략 0.1mm에서 가공이 되었다.

구멍직경비는 펄스 에너지를 10mJ~16mJ까지 2mJ씩 증가시켰을 때 3.496~4.000으로 변화하였다.

Table 3 The specifications of Excimer laser

Wavelength	248nm
Pulse Energy	1.0~20.0 mJ
Pulse Duration	3~7ns
Average Power	200~3000mW

Fig. 6은 펄스에너지의 변화에 따른 구멍직경비의 변화를 나타낸 것이다.

Nd:YAG 레이저를 사용하여 미세구멍 가공을 했을 경우 구멍 위의 직경은 0.492mm, 구멍 아래의 직경은 0.380mm, 구멍직경비는 1.284이며 Excimer 레이저는 사용하여 미세구멍 가공을 했을 경우 구멍 위의 직경은 0.117mm, 구멍 아래의 직경은 0.032mm, 구멍직경비는 3.521이었다.

Fig. 7은 Nd:YAG 레이저와 Excimer 레이저를 사용하여 각각 미세구멍 가공형상을 보여준 것이다. 파장의 길이가 다르고 재료의 레이저빔의 흡수율이 다르기 때문에 직접적으로 비교하는 것을 어렵다. 그러나 Excimer 레이저를 이용했을 경우 Nd:YAG 레이저 보다 재료가 빔에 대해 높은 흡수율을 가지기 때문에 미세구멍 가공이 용이하며, 매우 짧은 펄스 폭으로 인해 열의 전도가 작아 열적 변형이 적음을 알 수 있다.

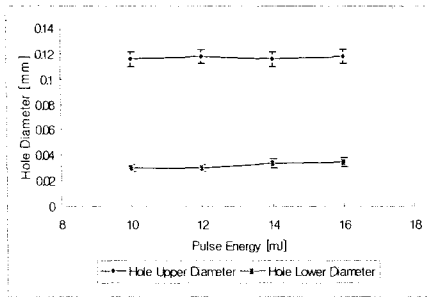


Fig. 5 Relationship between hole diameter and pulse energy (pulse count =8000, pulse frequency=250Hz)

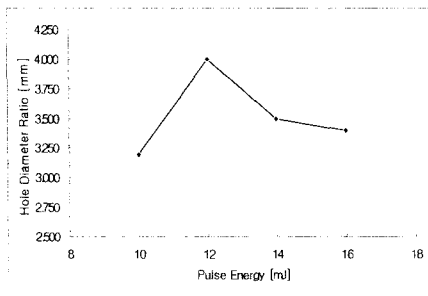


Fig. 6 Hole diameter ratio by changing pulse energy (pulse count=8000, pulse frequency=250Hz)

Nd:YAG Laser		
	Hole Upper dia. $\phi=0.492\text{mm}$	Hole Lower dia. $\phi=0.374\text{mm}$
	peak power=2kW, pulse width=7ms	
Excimer Laser		
	Hole Upper dia. $\phi=0.118\text{mm}$	Hole Lower dia. $\phi=0.030\text{mm}$
	pulse energy=12mJ, pulse count=8000 pulse frequency = 250Hz	

Fig. 7 Micrograph of hole. diameter

5 결론

본 논문에서는 Nd:YAG 레이저와 Excimer 레이저를 이용하여 Al_2O_3 세라믹 미세구멍 가공에 대한 레이저 가공변수에 대하여 조사하였다.

1. 빔 초점을 재료표면에 위치시켜 Nd:YAG 레이저를 사용하여 미세구멍 가공을 한 경우, 8J~20J의 펄스 에너지에서 구멍 위 면의 크기는 0.484~0.504mm, 아래 면의 크기는 0.364~0.369mm으로 구멍직경비가 1.284인 미세구멍 가공이 가능하였다.
2. 빔 초점을 재료표면에 위치시켜 Excimer 레이저를 사용하여 미세구멍 가공을 한 경우, 80J~120J의 펄스 에너지에서 구멍 위 면의 크기는 0.116~0.118mm 아래 면의 크기는 0.030~0.035mm으로 구멍직경비가 3.251인 미세구멍 가공이 가능하였다.
3. Nd:YAG 레이저에 비해 Excimer 레이저는 재료가 빔에 대한 높은 흡수율을 가지기 때문에 미세구멍 가공을 할 수 있고, 매우 짧은 펄스 폭으로 인해 열의 전도가 매우 작아 열적 변형이 적은 미세구멍 가공을 할 수 있다.

참고문헌

- (1) 김유진, 1999, “Nd:YAG laser를 이용한 Al_2O_3 세라믹의 미세구멍 가공특성에 대한 연구” 국민대학교 석사학위논문.
- (2) 윤혁중, 임순재, 이동주, 한홍삼, 1999, “ Al_2O_3 세라믹 순도별 미세구멍 가공 특성”, 한국레이저가공학회지, 제2권, 제3호, pp.32~34.
- (3) 주종남, 김규만, 김성윤, 2000, “미세형상가공을 위한 방전·초음파 가공기술”, 한국정밀공학회지, 제17권, 제7호, pp.20~26.
- (4) 박성두, 1994, “레이저 가공”, 대광서림, pp.31~34, 85~107.
- (5) 윤경구, 이성국, 김재구, 신보성, 최두선, 황정현, 박진용, 2000, “레이저 빔 응용 기술”, 한국정밀공학회지, 제17권, 제7호, pp.20~26.