세라믹(Al_2O_3)의 미세구멍 가공특성에 대한 연구

A study on the microhole machining characteristics of the Al_2O_3 ceramics

국민대학교 자동차공학전문대학원 백병만, 김병용, 이건상

Ⅰ. 서론

Al_2O_3 세라믹(알루미나, alumina)은 기존의 금속이나 polymer 재료 등과 비교하여 내열성, 절연성이 뛰어나고 물리적, 기계적 특성이 우수하여 전기의 절연재, 절삭공구, 연마재 등에 사용할 뿐만 아니라 최근에는 전자산업의 발달로 고도의 기능을 가진 새로운 재료로 각광을 받고 있다. 또한 전자산업에서는 수 μm대의 초정밀 미세구멍을 요구하고 있어 재료의 개발과 함께 보다 낳은 미세구멍 가공기술 개발의 필요성이 증가하고 있다. 그러나 Al_2O_3 세라믹 가공은 높은 경도, 내마모성 등과 같은 기계적 특성으로 인하여, 절삭과 드릴링과 같은 전통적인 가공방법으로는 작업시간이 오래 걸리며, 가공 정밀도가 떨어지고 공구가 파손되는 등 한계성을 가지고 있다. 따라서 현재는 방전가공, 초음파가공, 레이저가공 등의 특수가공법으로 세라믹 미세구멍 가공을 시도하고 있다[1].

그러나 이러한 특수가공법도 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 방전가공의 경우는 스테인리스강(stainless steel)과 같은 전도성 물질에 대해서는 최적의 미세구멍 가공법이나 비전도성 취성 재료에는 접합하지 않고, 초음파가공은 세라믹과 같은 비전도성 취성재료의 미세구멍 가공에는 효과적이나 방전가공과 초음파가공 모두 가공에 앞서 가공형상의 공구를 먼저 제작해야 하는 문제점을 가지고 있다[2].

따라서 본 논문에서는 Nd:YAG 레이저를 이용하여 각각 첨두출력(peak power, E_P), 펄스폭(pulse duration, τ_P), 펄스 횟수(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 연구하였고, Excimer 레이저를 이용한 미세구멍 가공과의 경향을 대략적으로 비교하였다.

Ⅱ. 실험재료 및 방법

레이저에 의한 세라믹의 미세구멍 가공은 집속된 레이저빔을 재료에 조사시켜 고온으로 재료를 증발, 제거하여 가공을 수행하는 방법이다. 레이저를 이용한 가공법의 장점으로는 가공시간이 짧고, 임의의 지름과 형상 가공이 가능하고, 경사방향의 구멍 가공이 가능하다는 것이다. 그러나 에너지 효율이 낮고, 열에 의한 구멍 주변의 손상이 발생되며, 용융된 재료가 구멍 주변에서 응고되어 구멍의 정밀도를 떨어뜨리고 정밀한 규격을 요구할 경우 후 처리가 요구된다

는 단점을 가지고 있다[3].

본 실험에서는 Al_2O_3 세라믹 미세구멍 가공 시 요구되는 가공 품질평가 방법으로 구멍의 크기, 형상 그리고 구멍직경비(R)로 정하였다. 구멍직경비는 가공구멍의 위 직경(D_U)을 아래 직경(D_L)으로 나눈 값으로 이것은 미세구멍 가공 시 구멍의 평행도(parallelism)를 보여 준다.

Fig. 1은 레이저빔으로 미세구멍을 가공하였을 때 구멍 위의 직경과 구멍 아래의 직경과의 구멍직경비의 관계를 도식적으로 나타내고 있다. 실험에 사용된 레이저 장비는 Nd:YAG laser system (*LumonicsLuxStar*^{TM})과 ATL LASERTECHNIK GMBH사에서 제작한 Excimer 레이저이다. 실험 재료는 미국 Coors Ceramics Company사의 Al_2O_3 세라믹으로 순도는 92%이며, 재료의 크기는 50×50㎟, 두께 0.6mm이며 물성치는 Table 1과 같다.

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

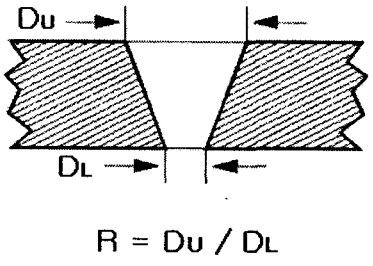

Fig. 1 Schematic illustration of machining

Table 1 Properties of Al_2O_3 ceramic

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

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

3.1 Nd:YAG 레이저를 이용한 미세구멍 가공

먼저 레이저빔의 초점을 재료 표면 위에 위치하고 단일펄스로 각각 10회씩 조사하였다. Fig. 2(a)와 (b)는 첨두출력과 펄스 폭의 변화가 미세구멍의 크기에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 펄스 폭은 7ms로 하고 첨두출력을 1~2.5㎾ 변화 시켰을 때 구멍 위의 직경은 0.466~0.492mm로 변화하였으며 구멍 아래의 직경은 0.286~0.374mm로 변화하였다. 첨두출력을 2㎾로 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 동일하게 고정하고 첨두출력을 1.5kW와 2kW로 변화시키면, 구멍직경비는 각각 1.56과 1.32로 다르게 나타나는데 이것은 미세

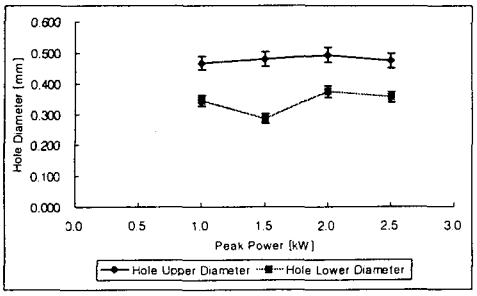

Fig. 2(a) Relationship between hole diameter and peak power (pulse duration = 7ms)

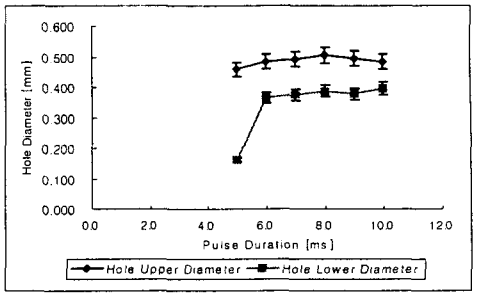

Fig. 2(b) Relationship between hole diameter and pulse duration (peak power= 2kW)

구멍 가공 시 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 미 가공 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.

멀티 펄스 실험에서는 펄스 횟수를 각각 2, 4Hz로 나누어 단일 펄스 실험에서 구멍직경비가 가공품질에 가장 좋은 영역을 사용하여 멀티 펄스 실험을 하였다. 펄스 횟수가 2Hz인 경우 펄스 폭 7ms에서 구멍 위 직경은 0.498mm, 구멍 아래 직경은 0.396mm이고 펄스 횟수가 4Hz인 경우 구멍 위의 직경은 0.480mm, 구멍 아래 직경은 0.388mm 이다. 단일 펄스에 비해 전체 에너지가 이론적으로 2, 4배가 더 공급되나 구멍의 직경에는 커다란 변화가 없다. 오히려 구멍 직경비를 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 구멍직경비가 개선된 것이라고 이해 할 수 있다. Fig. 3는 펄스 횟수에 따른 구멍 위의 직경과 구멍 아래의 직경의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 4는 펄스 횟수 변화에 따른 구멍직경비를 나타낸 것이다.

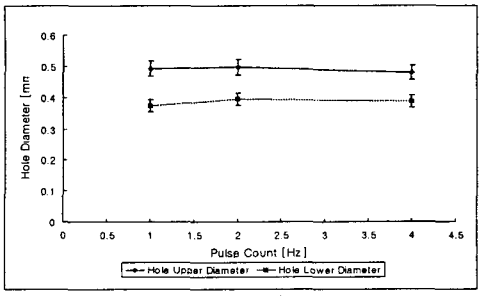

Fig. 3 Relationship between hole diameter and pulse count (peak power = 2kW pulse width = 7ms)

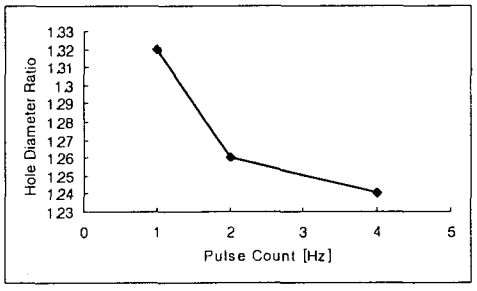

Fig. 4 Relationship between hole diameter and pulse count (peak power = 2kW pulse width = 7ms)

3.2 Excimer 레이저를 이용한 미세구멍 가공

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 펄스에너지를 10~16mJ까지 2mJ씩 증가시키면서 실험을 하였다.
Fig. 5는 펄스에너지의 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 펄스에너지를 10~16mJ까지 2mJ씩 증가시켰을 때 3.496~4.000으로 변화하였다. Fig. 6은 펄스에너지의 변화에 따른 구멍직경비의 변화를 나타낸 것이다.

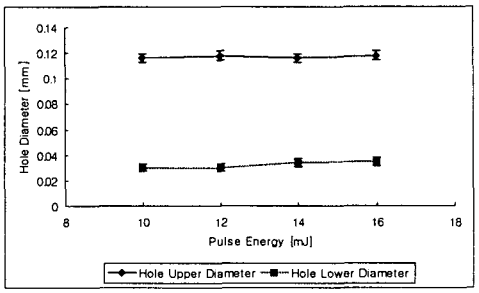

Fig. 5 Relationship between hole diameter and pulse energy (pulse count=8000, pulse frequency=250Hz)

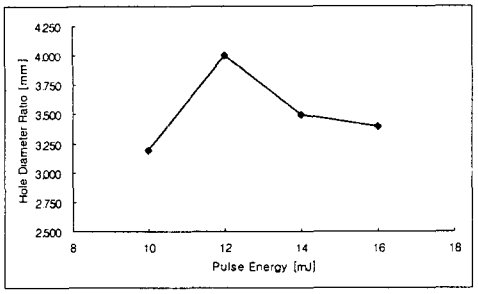

Fig. 6 Hole diameter ratio by changing pulse energy (pulse count=8000, pulse frequency=250Hz)

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 열적변형이 적음을 알 수 있다.

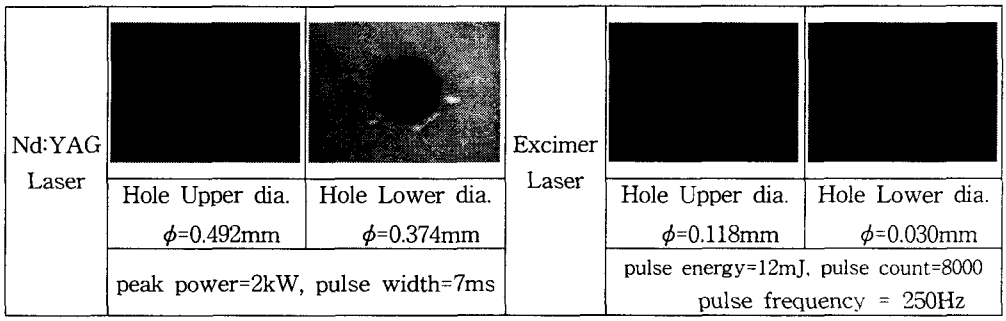

Fig. 7 Micrograph of hole diameter

Ⅳ. 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, 단일펄스에서는 8J~20J의 펄스 에너지에서 구멍 위 면의 크기는 0.484~0.504mm, 아래 면의 크기는 0.364~0.369mm으로 구멍직경비가 1.284인 미세구멍 가공이 가능하였고, 멀티펄스에서는 펄스 횟수를 각각 2, 4Hz 로 조사할 경우 펄스 횟수가 2Hz인 경우 펄스 폭 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 구멍직경비는 각각 1.26과 1.24로 구멍직경비가1.284인 단일펄스의 경우 보다 가공품질이 개선되었다.

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 더 작은 미세구멍 가공을 할 수 있고, 또한 매우 짧은 펄스 폭으로 인해 열의 전도가 매우 작아 열적변형이 적은 미세구멍 가공이 가능하였다.

Ⅴ. 참고문헌

1. 윤혁중, 임순재, 이동주, 한홍삼, "Al2O3 세라믹 순도별 미세구멍 가공 특성", 한국레이저가공학회지, 제2권, 제3호, pp.32~34, (1999)
2. 주종남, 김규만, 김성윤, 미세형상가공을 위한 방전·초음파 가공기술", 한국정밀공학회지, 제17권, 제7호, pp.20~26, (2000)
3. 박성두, "레이저 가공", 대광서림, pp.31~34, 85~107, (1994)