# 알루미나 세라믹 소재의 초단파 레이저 어블레이션량 연구

김경한✉, 박진호
한국기계연구원 광응용기계연구실

# Ablation rate study using short pulsed laser subjected to Alumina medium

**Kyunghan Kim✉, Jinho Park**

Department of Laser & Electron-beam Application, Korea Institute of Machinery & Materials

## Abstract

In this paper, ablation rate of $Al_2O_3$ ceramics by femtosecond laser fluence is derived with experimental method. The automatic three axis linear stage makes laser optics to move with high spatial resolution. With 10 times objective lens, minimal pattern width of $Al_2O_3$ is measured in the focal plane. Ablated surface area is shown as linear tendency increasing number of machining times with various laser power conditions. Machining times is most sensitive condition to control $Al_2O_3$ pattern width. Also, the linear increment of pattern width with laser power change is investigated. In high machining speed, the ablation volume rate is more linear with fluence because pulse overlap is minimized in this condition. Thermal effect to surrounding medium can be minimized and clean laser process without melting zone is possible in high machining speed. Ablation volume rate decelerates as increasing machining times and multiple machining times should be considered to achieve proper ablation width and depth.

**Keywords:** $Al_2O_3$(알루미나), femtosecond laser(팸토초레이저), ablation rate(제거량), ceramic(세라믹)

## 1. 서 론

세라믹은 금속이나 플라스틱에 비해서 뛰어난 특성을 가지고 있어서 많은 산업분야에서 사용되고 있다. 가장 보편화된 파인세라믹스인 알루미나($Al_2O_3$)는 전자기기의 직접 회로기판(PCB)에 널리 사용되고 내열성이 좋아 고온에서의 강도도 우수하여 열 분사노즐, 열교환기에 많이 사용된다.[1,2] 또한 최근에는 전자기기의 소형화로 인하여 더 높은 밀도의 패턴을 구현하는 기술을 필요로 하고 있다. 전통적으로 세라믹 가공은 대부분 기계적인 방법으로 수행했지만 기계 가공 시 발생하는 공구의 마모 및 세라믹의 단점 중 하나인 깨지는 문제가 자주 발생한다. 최근 이러한 기계적인 단점을 극복하고자 레이저 가공이 사용되고 있다. 레이저 가공의 경우 비접촉 가공 방식으로써 공구의 마모가 없으며 기계가공의 깨지는 문제를 보완할 수 있음이 알려졌다.[3-5]

최근 초미세 패턴 및 난가공 소재 가공을 위하여 기존의 연속 빔(CW, Continuous Wave)레이저에 비하여 초단파 레이저가 사용되고 있다. 초단파 레이저는 피코초이하의 짧은 시간에서 고밀도 에너지를 집중하여, 주변 영역으로 열확산을 최소화 가능하며 비 열적 반응으로 제거하는 공정으로써 높은 첨두 출력(peak power)을 활용한다.[6,7]

단위 면적당 레이저 에너지 밀도와 물질 제거량(ablation rate)은 레이저 반응시 제거 공정의 효율을 나타내는 것으로써, 레이저 공정 연구의 시작이다. 알루미나의 물질 제거량에 관한 연구는 20W급 파이버 레이저를 활용하여 30J/cm$^2$ 의 임계 물질 제거량을 도출하고, 플루언스와 제거 단면적 사이의 선형 관계를 도출하였다.[8] 또한, 수치해석 열전달 모델를 통하여 10ns 1064nm의 레이저 펄스의 100J/cm$^2$의 플루언스에서 약 1μm의 임계 제거량 및 제거 깊이와의 선형 관계를 도출하였다.[9]

본 연구는 초단파 레이저를 활용하여 난가공 소

투고일 : 2015년 12월 14일 심사완료일 : 2015년 12월 22일
게재승인일 : 2015년 12월 28일
교신저자 : 김경한 ✉ khkim@kimm.re.kr

재인 세라믹 재료를 수십 마이크로미터급으로 패터닝 공정 개발이 목적으로써, 단위 펄스당 볼륨 제거량을 고려하였다. 이를 위하여, 레이저 초점 위치에 따른 최소 스팟(spot)를 도출하고, 레이저 출력, 가공속도, 가공횟수에 따른 패턴의 크기 및 깊이를 고찰하였다.[10] 특히, 본 연구는 가공속도 및 가공횟수에 따른 중첩률을 계산하여, 고속 가공을 위한 물질 제거량을 도출한 것이 핵심이다. 다양한 공정 조건을 균일한 기준에 적용하기 위하여, 단일 펄스 수준에서 레이저 에너지 주입량인 플루언스(fluence)와 가공량인 제거량의 관계를 도출하였다. 이를 바탕으로, 최소한의 레이저 에너지로 주변 조직의 열영향을 최소화 가능한 공정 조건을 확립하는 것이 본 연구의 목적이다.[11,12]

## 2. 극초단 레이저 어블레이션을 이용한 가공

### 2.1 실험 방법

레이저를 이용한 난가공성 소재를 가공하기 위한 구성은 Fig. 1과 같다. 실험 장비의 광학계는 피코초(picosecond) - 펨토초(femtosecond) 발진이 가능한 Yb:KGW 레이저를 사용하였으며, 파장은 1030nm 주로 상용하였다. 레이저 출력 조절장치(laser power controller)에 의하여 레이저 빔의 편광을 제어하여 실시간으로 레이저의 출력을 조절하였으며, 미러를 통하여 빔이 이송하도록 하였다. 레이저 빔의 조건은 237.8fs의 펄스폭과 200kHz의 반복률로 설정하였으며, 5.1W의 평균출력을 가공 시편의 앞에서 측정하였다. 평균 출력이 5.1W일 때, 한 펄스당 가지고 있는 에너지는 51μJ 이고 레이저 출력 조절장치로 반복률과 한 펄스 당 에너지를 조절 할 수 있다. 에너지가 조절된 빔을 광학계를 이용하여 세라믹 시편으로 보내고 마지막에 10배율 objective lens를 사용하여 레이저 빔을 집속시켰다. 3축 스테이지를 이용하여 가공 시편을 이송하면서 레이저 가공을 실행하였고 스테이지 제어는 UMAC을 기반으로 한 PC에서 제어하였다. 레이저 빔의 초점을 맞추기 위해 objective lens는 z축 이송장치에 부착되었고 이 때 사용된 세라믹 시편으로는 Fig. 2와 같이 20mm × 20mm × 5mm 의 알루미나이다.

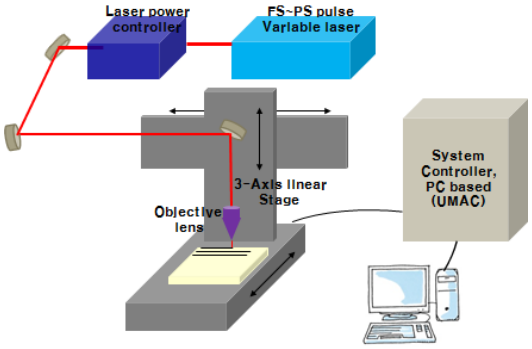



**Fig. 1** Experiment set-up for pulse laser ablation.

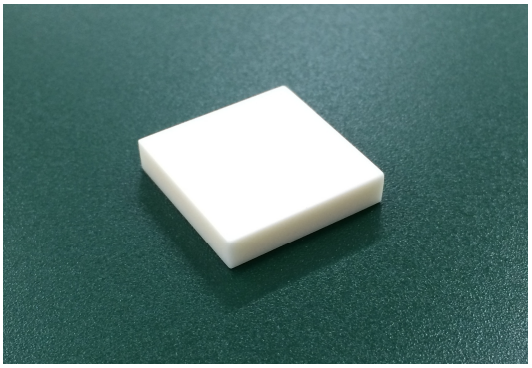


**Fig. 2** 20mm × 20mm × 5mm Alumina specimen.

## 3. 레이저 어블레이션 및 세라믹 가공

### 3.1 초점 위치(focal plane)선정

최소선폭을 통한 초정 위치를 찾기를 통하여 동일한 에너지 주입량에서 단위면적당 주입량인 플루언스를 최대화 시키는 실험을 수행하였다. 최소 패터닝 가능한 초점의 위치를 찾기 위하여 Fig. 3의 방법처럼 스테이지 z축을 ±방향으로 4.6μm만큼 점차적으로 이동시키면서, 가공되는 선폭을 측정하였다. Z = + 80μm 지점에서 부터 Z = 0 까지 선폭은 점차 감소하는 경향을 보이며, 이는 레이저 빔이 가우시안 형태로 전파되는 현상과 일치함을 알 수 있다. 최소 선폭의 경우 약 8μm 정도로 측정됨을 알 수 있다. 또한, 초점면(focal plane) 에서 음의 방향으로 이동시켰을 때, 레이저 빔은 다시 발산하게 되며, 이에 따른 빔 직경은 증가하고 가공선폭 또한 증가하게 됨을 알 수 있다.

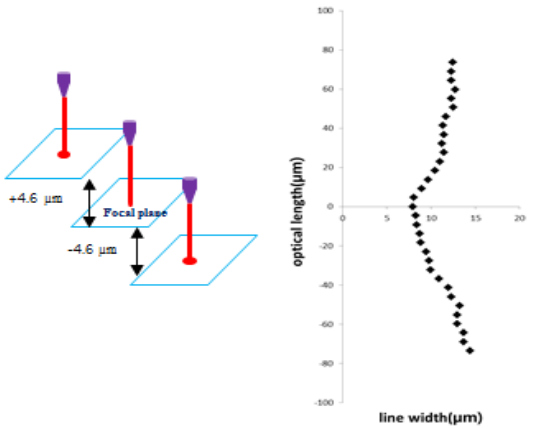
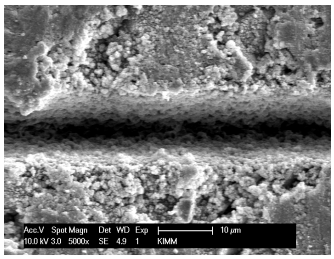
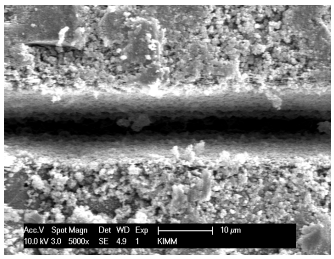


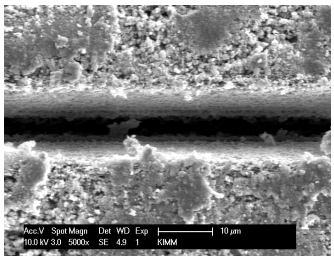

**Fig. 3** Line with different optical position.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 4** SEM images of line on Alumina (a) 10 times, (b) 30 times, and (c) 50 times.

### 3.2 가공 조건에 따른 어블레이션 현상

가공 횟수에 따른 알루미나의 어블레이션 현상을 관찰하기 위하여 3W, 50mm/s조건에서 가공횟수를 10회, 30회, 50회로 증가시켰다. Fig. 4에서는 SEM으로 촬영한 결과를 나타내었는데, 10회 가공에서는 가공부분 안쪽에 레이저 조사 후의 잔해가 많이 있어 균일하지 못한 모양이 나타나는 것을 확인할 수 있었는데 더 많은 횟수를 가공한 30회 에서는 가공부위 안쪽에 잔해가 10회 보다 적게 있는 선폭 가공이 된 것을 발견할 수 있었다. 50회에서는 30회 보다 더 잔해가 없는 모습을 관찰할 수 있었다. 현미경으로 선폭을 측정하였는데, 3W 출력조건에서는 가공횟수가 증가함에 따라 어블레이션에 의한 제거 부위의 조도가 증대됨을 알 수 있으며, 선폭과 깊이의 변화가 미미하게 증대되는 것을 알 수 있었다. 이는 레이저 가공시 선폭의 변화와 선깊이를 미세하게 제어할 수 있는 인자이다.

Fig. 5와 Fig. 6에서는 레이저 출력에 따른 레이저 어블레이션 현상에 대하여 나타내었다. 가공속도는 100mm/s 로 10회, 30회, 50 회 반복하여, 출력을 1W에서 5W까지 평균출력을 증가하면서 관찰한 결과 중 1W, 3W, 5W의 경우를 도시하였다. 모든 가공 횟수에서, 출력이 증가함에 따라 선폭은 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 선깊이인 경우 선형적 증가가 1-3W 사이에서 큰 변화 없이 5W 조건에서는 증가함을 알 수 있다. 이는 상대적으로 깊이의 변화가 선폭의 변화에 비하여 크지 않음을 알 수 있으며, 출력변화 구간이 충분히 크지 않음이 예측된다.

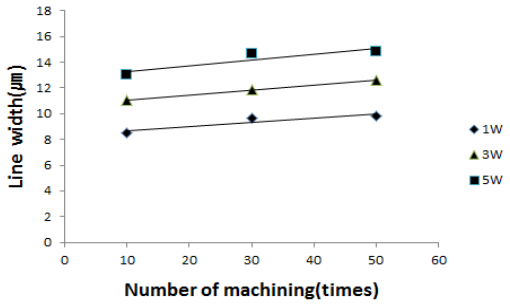



**Fig. 5** Change of pattern width by increment of machining number.

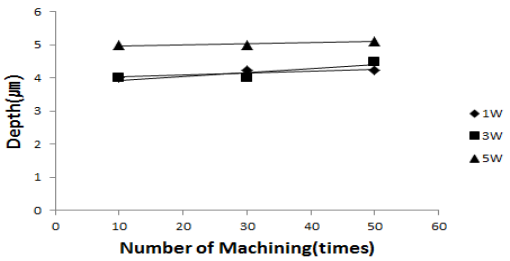
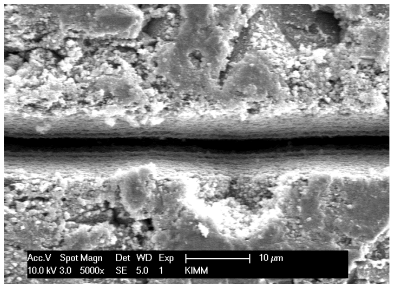
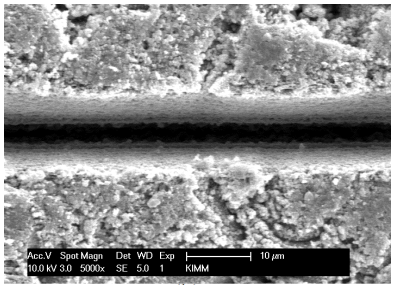



**Fig. 6** Change of pattern width by increment of machining number.

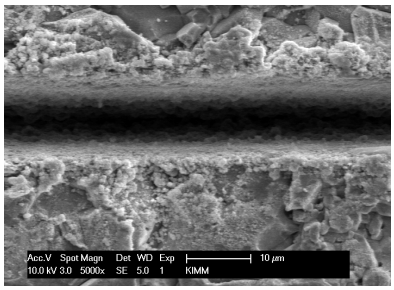
출력이 증가함에 따라, 선폭과 선깊이가 동시에 증가함을 알 수 있으며, Fig. 7에서는 레이저 출력이 증가함에 따른 패턴의 선폭을 도시하였는데, 이는 에너지 주입량이 증가에 따라서, 선폭이 거의 선형적으로 증대함을 알 수 있었다. 또한, 가공 횟수가 증가함에 따라 유사한 현상을 알 수 있다.




(a)




(b)




(c)

**Fig. 7** SEM images of line on Alumina: (a) 1W, (b) 3W, and (b) 5W.

### **3.3** 가공조건에 따른 어블레이션량 측정

이전의 결과에 알 수 있듯이, 레이저 가공 횟수 및 출력에 따른 선폭, 선깊이를 포함하는 제거량이 달라짐을 알 수 있었다. 다양한 가공조건에 대한 동일 조건을 정하기 위하여, 단위 펄스당 제거량을 고려하였다. 이를 위하여 식 (1)과 같이 단일 펄스를 구하였다.

$$N_p = \left( \frac{Rep \times L}{v} \right) \times t \tag{1}$$

이 식에서 $N_p$는 가공에 주입된 전체 펄스 갯수, $Rep$는 레이저의 펄스 반복률, $L$은 가공길이, $v$는 가공 속도 및 $t$는 가공횟수이다. 본 식을 바탕으로 20mm × 20mm × 5mm의 알루미나에 주입된 전체 펄스 갯수를 구하였다. 예를 들어 50mm/s의 속도로 한면이 20mm 인 알루미나를 10회 가공했을 때, 가공시 사용된 200kHz 반복율의 총 펄스 갯수는 800,000개가 된다.

어블레이션량은 알루미나의 제거된 선폭을 기반으로 가공된 부분이 삼각기둥 모양을 나타낸다고 보고 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$A = \left( \frac{R \times d}{2} \right) \times L \tag{2}$$

레이저 어블레이션 형태가 삼각형으로 된다고 하면 이 식에서 A는 어블레이션량이고 R은 제거된 선폭, d는 가공부분의 깊이, L은 식 (1)에서와 같이 가공길이를 나타낸다.

식 (2)에서 세라믹에 어블레이션 된 부피를 이용해서 식 (2)를 식 (1)로 나누면 단위 펄스당 어블레이션량을 구할 수 있으며 이 결과를 Fig. 8에서 도시하였다. 단위면적당 에너지 주입량이 증가함에 따라, 단위 펄스당 어블레이션량은 선형성이 유지됨을 알 수 있으며, 가공속도가 증가함에 따라 펄스 개수가 적어서 중첩률이 낮아지는데 50mm/s일 때 96.875%의 중첩률, 100mm/s 일 때 93.75%, 150mm/s 일 때 90.625%의 중첩률을 보이는데 가공속도가 증가함에 따라 중첩률은 낮아지지만 중첩률에 큰 변화폭이 없어 가공속도가 높을수록 어블레이션 효율이 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 8에서는 평균출력을 1W부터 1W 씩 증가하면서 어블레이션량을 측정하였는데, 플루언스가 증가함에 따라 단위 펄스당 어블레이션량이 선형적으로 증가하는 것을 관찰 할 수 있었다. 또한, 가공횟수가 증가함에 따라 펄스당 중첩이 반복됨으로 단위 펄스당 어블레이션량은 감소함을 알 수 있었다. 본 그래프의 선형식이 도출되면 원하는 어블레이션량을 얻기 위한 에너지 주입량을 역으로 계산이 가능할 것으로 예측된다. 비록 반복가공이 물질제거량에는 효율적이지 않을 수 없지만, 작은 출력으로 반복하여 가공할 때는 가공 부위의 조도가 깨끗하고, 열축적이 국한 될 것으로 기대되어진다. 이는 원하는 가공 조건에 따라 선택 가능한 문제이다.

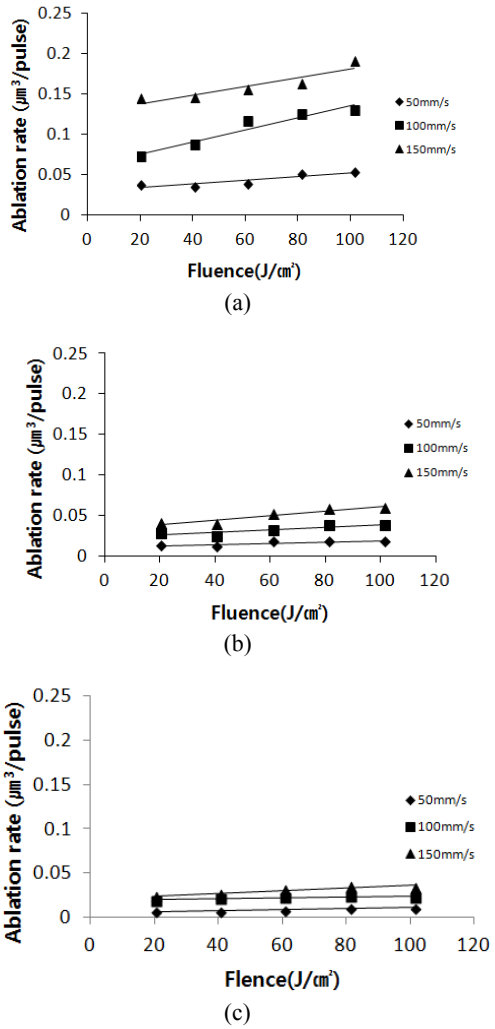



**Fig. 8** Ablation rate by increasing fluence with various machining speed and machining times (a) 10 times, (b) 30 times, (c) 50 times.

## 4. 결 론

본 논문에서는 펨토초 레이저를 이용한 세라믹 물질제거율을 연구하였으며 출력별, 가공횟수별 가공을 통해 세라믹의 적정 가공 조건도 연구해 볼 수 있었다. 평균 출력이 약 4W 이상이 되면 내열성이 좋은 세라믹도 용융되어 주변에 잔해가 생기는 것을 볼 수 있었다. 또한 논문내의 그래프에서 본 것과 같이 플루언스가 커짐에 따라 세라믹 제거량이 선형적으로 증대되는 걸 알 수 있었다. 난가공성 소재인 세라믹은 큰 출력, 적은 횟수로 가공하는 방법보다 작은 출력 이지만 많은 횟수로 가공하는 방법, 즉 조사되는 펄스 개수가 많은 방법이 가공부위 주변에 변화와 잔해 없이 균일한 결과를 얻을 수 있다는 것을 보았다. 추후에는 레이저 가공속도, 반복률에 따른 펄스 중첩률에 대한 난가공성 소재 가공에 대한 연구를 진행할 예정이다.

## References


1) Cho, Sung. Hak., Park, Jung. Kyu., Kim, Jae. Gu., Chang, Won. Seok., Choi, Doo. Sun, “Ultra-precision Machining using a Femtosecond laser,” Journal of the Korean Society for Presision Engineering, Vol. 27, pp. 17-23, 2010.
2) X.C. Wang, H.Y. Zheng, P.L. Chu, F.L. Tan, K.M. The, T. Liu, Bryden C.Y. Ang, G.H. Tay, “High quality femtosecond laser cutting of alumina substrates,” Optics and Laser in Engineering, Vol. 48, pp. 657-663, 2010.
3) Shin, Bo. Sung., Lee, Jung. Han, “Basic Experimental Investigations to UV Micro-Machining of Nano-Porous Alumina Ceramic Material,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, pp. 62-67, 2012.
4) Chengde Li, Seongkuk Lee, Suwas Nikumb, “Femtosecond Laser Drilling of Alumina Wafers,” Laser Phys. Lett.,Vol. 3, pp. 573-577, 2009.
5) Kim, Sunghoon., Son, Ik. Bu., Jeong, Sungho., “Precision microprocessing of ceramic by using femtosecond laser,” Journal of the Korean Society for Presision Engineering, Vol. 28, pp. 1359-1365, 2011.
6) M. Mendes, V. Oliveira, R. Vilar, F. Beinhorn, J. Ihlemann, O. Conde, “Femtosecond ultraviolet laser micromachining of $Al_2O_3$-TiC ceramics,” Vol. 11, pp.211-215, 1999.
7) Jeong, Sung. Ho., Lee, Seok. Hee, “Effects of Process Parameters on Laser Ablation Based Machining and Measurements,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 28, pp. 1359-1365, 2011.
8) F. Preusch, B. Adelmann, and R. Hellmann,

"Micromachining of AIN and $Al_2O_3$ using fiber laser," Micromachines, Vol. 5, pp. 1051-1060, 2014.

9) P. A. Atanasov, E.D. Eugenieva, and N. N. Nedialkov, "Laser drilling of silicon nitride and alumnia ceramics: A numerical and experimental study," J. Appl. Phys., Vol. 89, pp. 2013-2016, 2001.
10) Jeppe Byskov-Nielsen, Juha-Matti Savolainen, Martin Snogdahl Christensen, Peter Balling, "Ultra-short pulse laser ablation of metals: threshold fluence, incubation coefficient and ablation rates," Appl. Phys. A., Vol. 101, pp. 97-101, 2010.
11) A. E. Wynne, B. C. Stuart, "Rate dependence of short-pulse laser ablation of metals in air and vacuum," Appl. Phys. A Vol. 76, pp. 373-378, 2003.
12) P.T. Mannion, J. Magee, E. Coyne, G.M. O'Connor, T.J. Glynn, "The effect of damage accumulation beheviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metal in air," Applied Surface Science Vol. 233, pp. 275-287, 2004.