

# 질화규소 세라믹스의 레이저 보조가공

## Laser assisted machining of silicon nitride ceramics

한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 \*김선원, 이제훈, 서정, 신동식  
충북대학교 기계공학부 조해용

### 1. 서론

세라믹스(Ceramics)란 고대 그리스어의 Keramos(흙으로 만들어진, 또는 불에 태워서 만든 물건)란 말에서 나온 것으로서 인위적으로 열을 가해서 만든 비금속 무기재료라는 말이다. 금속, 플라스틱과 함께 산업전반에 사용되는 주요 재료인 동시에 인류가 사용한 가장 오랜 재료의 하나이다. 즉, 도자기, 시멘트, 유리를 포함하여 파인세라믹스 등이 이 범주에 속한다.<sup>1)~2)</sup>

파인세라믹스 중에서도 특히 주목받고 있는 것은 자동차 기관과 산업용 가스터빈 등 산업분야 전반에 사용되는 엔지니어링 세라믹스이다. 대표적으로 알루미나( $Al_2O_3$ , alumina), 질화규소( $Si_3N_4$ , silicon nitride), 탄화규소( $SiC$ , silicon carbide) 등이 있다. 이런 종류의 세라믹스는 취성재료로서 기계·구조용 재료에는 치명적인 결점을 가지고 있지만 고강도와 고경도 및 높은 내열충격성, 내마모성 등을 장점으로 가지고 있어 적용 분야가 다양하다.<sup>2)</sup>

반면 이들 재료는 경도가 높아 일반적인 기계가공이 어려워, 시간과 비용이 많이 소요되는 연삭가공을 하고 있다. 현재 자동차와 반도체, 항공 산업 등에 두루 사용되고 있지만, 가공시간과 비용 때문에 적용되지 못하는 경우가 많다. 또한 현재 새로운 가공 방법에 대한 연구가 미비한 실정이다. 따라서 시간과 비용을 줄일 수 있는 가공법 개발이 대두되었다.

세라믹스는 난삭재이지만  $1000^{\circ}C$  정도에서 경도가 감소하기 시작하여 그 이상의 고온에서는 급격한 경도 감소가 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>2)~3)</sup> 레이저 보조 가공(Laser assisted machining, LAM)은 이러한 특성을 이용한 것으로 레이저로 예열하여 재료의 경도가 감소되었을 때 절삭 가공 하는 것을 말한다.

Y. C. Shin 등<sup>3)~7)</sup>은 질화규소, 지르코니아, 몰라이트 등의 재료에 대해 레이저보조가공에 대한 연구를 하였다. 이는 LAM 가공 원리와 기초 자료를 확립하여, 현장에 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

본 논문에서는 질화규소의 고온 특성을 이용하여 가공 속도를 증대 시키고자 레이저 보조 가공에 대해 연구하였다. 여러 조건에서 최대 절삭 깊이를 측정하여 재료제거율을 알고, 가공 후 표면 품질과 칩의 분석을 통해 가공 적정 조건을 찾고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 소재 및 실험장치

실험에 사용된 질화규소 시편은 직경 16mm, 길이 150mm이며, Fig. 1과 같이 검은 색을 띄어, CO<sub>2</sub> laser 파장인 10.64 $\mu$ m에 대한 흡수율이 0.9로 상당히 높다. 따라서 레이저 예열이 상당히 유리하다.<sup>8)</sup>

독일 Rofin Sinar의 4kW급 RS-840 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용했고, 직경 3mm의 가우시안 형태의 빔을 사용했다. 회전테이블은 화천 HL-380을 사용했고, 레이저 헤드 및 냉각장치를 부착하여 실험이 용이하도록 하였다. 렌즈 보호를 위해 공기 사용했으며, 유량은 30L/min였다. 공구는 고온에서 유리하고 경도가 높은 CBN(Cubic Boron Nitride)를 사용하였다. 경사각은 공구형상 중에서 가장 중요한 역할을 하는 것으로 공구의 성능과 수명을 위해 가공 조건에 맞게 선택해야 한다. 본 연구에서는 고경도 소재 가공에 적합하고, 또한 절삭날이 양의 경사각보다 강하고 칩핑의 염려가 적은 -6°의 음의 경사각으로 실험하였다.<sup>9)</sup>

### 2.2 실험방법

Fig. 2는 레이저 보조 가공 장면을 보여준다. 수직으로 레이저 조사하며 적정 온도에 도달하도록 한다. 그 다음 이송을 시작하고 공구는 레이저 조사부와 90° 지점에서 가공을 하게 된다. 시편 위 레이저 스폿 중심과 공구의 거리는 1.5mm였고, Table. 1은 레이저 보조 가공 조건을 보여주고 있다. 가공 후 현미경을 이용하여 가공면 및 칩의 형태를 관찰하였다.



Fig. 1 Silicon nitride rods

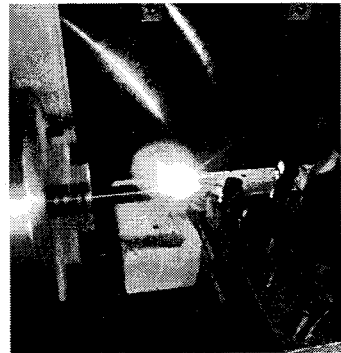


Fig. 2 LAM of silicon nitride

Table. 1 Operating condition of LAM

Beam traveling speed = 520mm/s (620RPM) Spot size = Φ3mm								
	1	2	3	4	5	6	7	8
Power(W)	280	320	400	500	620	280	320	400
Intensity (W/cm <sup>2</sup> )	4.0×10 <sup>3</sup>	4.5×10 <sup>3</sup>	5.7×10 <sup>3</sup>	7.1×10 <sup>3</sup>	8.8×10 <sup>3</sup>	4.0×10 <sup>3</sup>	4.5×10 <sup>3</sup>	5.7×10 <sup>3</sup>
Feed rate (mm/rev)	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.024	0.024	0.024

	9	10	11	12	13	14	15	
Power(W)	500	620	280	320	400	500	620	
Intensity (W/cm <sup>2</sup> )	7.1×10 <sup>3</sup>	8.8×10 <sup>3</sup>	4.0×10 <sup>3</sup>	4.5×10 <sup>3</sup>	5.7×10 <sup>3</sup>	7.1×10 <sup>3</sup>	8.8×10 <sup>3</sup>	
Feed rate (mm/rev)	0.024	0.024	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 최대 절삭 깊이 및 각 조건별 재료 제거율

Fig. 3은 Table. 2의 최대 절삭 깊이를 나타낸 것이다. 가공 속도(v)와 이송 속도(f) 및 절삭 깊이(d)로 재료제거율(MRR, Material Removal Rate)을 구할 수 있다.

$$MRR = vfd[\text{mm}^3/\text{sec}] \quad (1)$$

Table. 1의 10번, 15번 실험 조건에서 재료제거율은 8.0으로 최대였으며, 이는 기존 연삭의 1.8<sup>10)</sup>보다 약 4.5배 빠르다.

Table. 2 Maximum depth of cut and MRR for Table 1

	1	2	3	4	5	6	7	8
Max Depth of Cut(mm)	0.89	0.96	1.05	1.1	1.14	0.28	0.42	0.53
MRR (mm <sup>3</sup> /sec)	6.0	6.5	7.1	7.4	7.7	3.5	5.2	6.6

	9	10	11	12	13	14	15	
Max Depth of Cut(mm)	0.62	0.64	0.08	0.27	0.43	0.50	0.51	
MRR (mm <sup>3</sup> /sec)	7.7	8.0	1.2	4.2	6.7	7.8	8.0	

Fig. 3에서 가공 효율에 따라 A, B 그리고 가공면 품질에 따라 B, C 나누어 볼 수 있다. A구간은 낮은 파워로 예열 시간이 길고, 적은 절삭 깊이로 재료 제거율이 작다. 따라서 적절한 가공 조건이 되지 못한다. B는 가공 적정 영역으로 생각 되는데, 이 구간에서는 가공 후 표면 결함도 없고, 재료 제거율도 A에 비하여 크다. C는 재료 제거율은 크지만 과도한 에너지 투입으로 인하여 가공 후에도 Fig. 5 (a)에서 보듯이 열영향부가 남게 된다. 따라서 열영향부도 없고, 재료제거율이 7.8로 가장 큰 Table. 1의 14번이 가장 효율적인 가공 조건으로 판단된다. C영역의 조건으로 가공 후 B영역의 조건으로 가공하면 남았던 열영향부를 제거 할 수 있다. 요구 되는 가공 깊이가 클 경우 이용 할 수 있는 방법이다.

각 조건별 최대 절삭 깊이를 아는 것은 중요하다. 적정 영역보다 절삭 깊이를 깊게 하면 소음과 채터(Chatter)가 발생하고, Fig. 5 (b)과 같은 가공 표면이 결함이 발생한다. 또한 공구의 수명에 큰 영향을 미친다. CBN 공구는 경도가 크고 인성이 적어 칩핑이 발생할 수 있다. 따라서 여러 가공 조건에서 얻어 낸 최대 절삭 깊이는 세라믹의 LAM 가공에 기초 자료로 활용 할 수 있을 것이다.

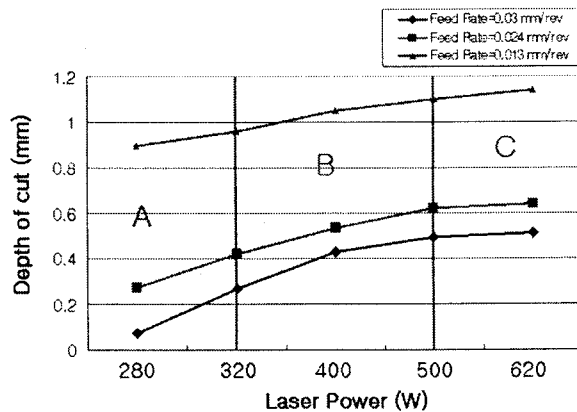


Fig. 3 Maximum depth of cut in each condition

### 3.2 가공부 표면 변화 및 칩의 관찰

Fig. 4는 레이저 보조 가공 전 후의 표면 상태를 보여준다. 가공이 잘된 (b)의 표면에서는 열영향에 의한 표면 변화가 보이지 않는다. 선삭 가공이 잘 되는 스틸, 탄소강 등과 같은 표면 상태를 보인다. 이는 취성 재료인 세라믹이 레이저 예열에 의해 연화되어 선삭 가공 후에도 좋은 표면 품질을 얻을 수 있다는 것을 보여준다. 하지만 Fig. 5 (a)에서 보듯이 과도한 온도 상승은 가공 표면에 결함을 유발 할 수 있다. 이러한 결함은 일정 온도 이상 상승한 부분이 절삭되지 못하고 남아 있는 열영향부를 보여주는 것이다. 열영향부가 남게 되면 표면 경도 감소가 발생한다.

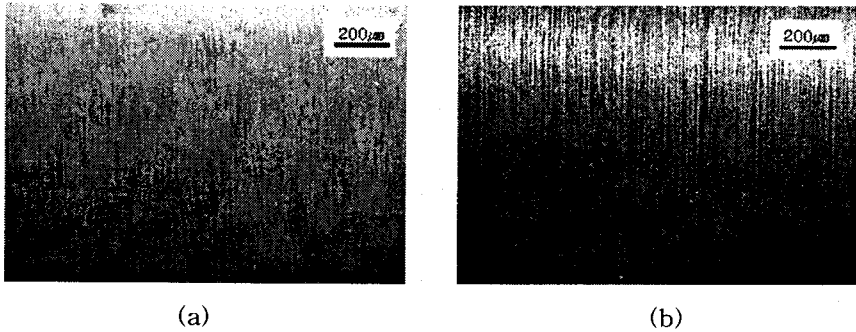


Fig. 4 Microscopy images of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  surface : (a) Before LAM  
(b) After LAM (test 4 of Table. 3)

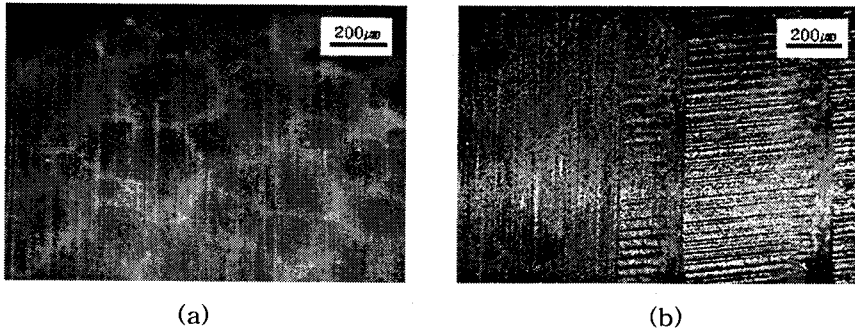


Fig. 5 Defect of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  surface after LAM : (a) Damage by excessive energy on processed surface(test 5) (b) Surface defect by chatter

LAM 가공으로 발생한 칩은 전단형과 연속형으로 이송속도가 커짐에 따라 그리고 예열 온도가 높을수록 크기가 커진다.<sup>3)</sup> 예열 온도가 상승함에 따라 칩의 크기가 커지는 이유는 점성의 감소로 전단형이 아닌 연속형에 가까워지기 때문이다. Fig. 6 (a)는 Table. 1의 10번 조건에서 가공한 칩의 형상이고, (b)는 6번의 가공 결과이다. 가공 속도 및 이송 속도가 같은 조건에서 투입되는 파워의 차이로 인해 칩의 크기는 현격한 차이를 보인다. 이것은 높은 파워로 예열 온도가 높았기 때문이다.<sup>6)</sup> Fig. 6 (c)는 칩이 발생 될 때 공구와 맞닿은 부분의 현미경 사진이다. 칩의 표면에 공구에 의해 밀려나간 모습이 보인다. 점성이 감소하며  $\text{YSiAlON}$ 이 소성 변형을 일으켜 나타나는 현상이다. (d)는 공구와 닿지 않은 부분으로 질화규소 결정의 모습을 보여주고 있다.  $1800^\circ\text{C}$  이상의 고온에서도 강도를 유지하는 질화규소 결정은 공구가 맞닿은 부분에서 가공 방향을 따라 재배열 되었으며, 그 과정에서 표면에 보이지 않게 되었다.<sup>3)</sup> 연속형에 가까운 칩이 생성 될수록 공구 수명이 증대 될 것으로 판단된다. 하지만 공구가 견딜 수 있는 온도 이상의 예열은 오히려 수명 감소로 이어질 것이다.

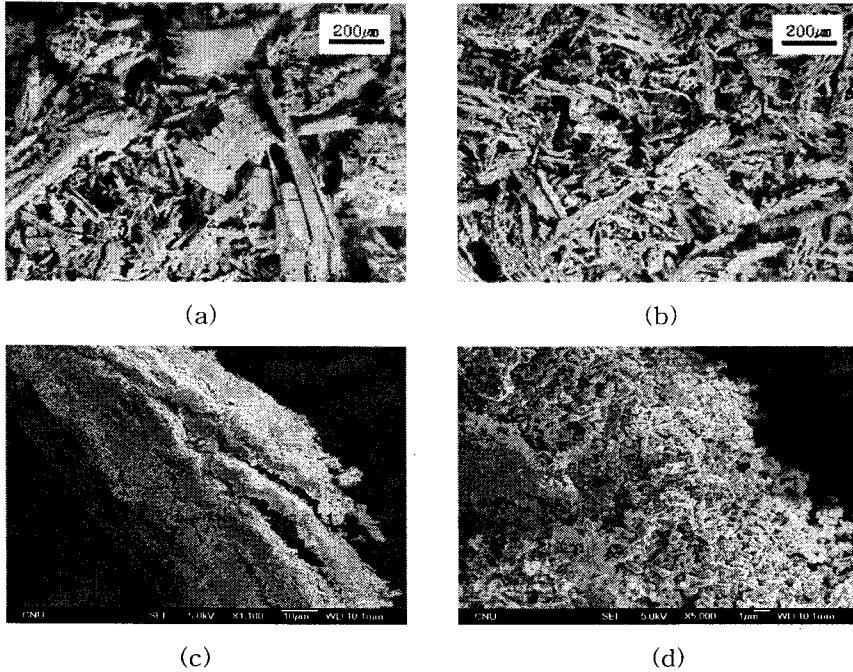


Fig. 6 Micrographs of chips for LAM : (a) No. 10 test condition (b) No. 6 test condition (c) Slid of chip which slides over the rake face and (d)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  grains on surface of chip

#### 4. 결론

본 연구에서는 질화규소의 레이저 보조 가공에 대하여 연구하였다. 최대 절삭 깊이로 재료 제거율을 알 수 있었으며, 가공 면의 관찰과 칩의 분석을 통한 결론은 다음과 같다.

1. 각 조건별 최대 절삭 깊이와 재료 제거율을 알 수 있었다. 최대 재료 제거율은  $8.0\text{mm}^3/\text{s}$ 였으며, 적정 가공 영역에서는  $7.8\text{mm}^3/\text{s}$ 였다. 이는 기존 연삭 가공 대비 4배 이상 빠른 속도이며, 실제 산업에 적용이 되면 가공에 드는 시간과 비용을 절감 할 수 있을 것이다.
2. 가공면의 관찰로 과도한 절삭 깊이와 파워는 표면에 결함을 유발 한다는 것을 알았다. 본 연구에서는 적정 조건을 제시하였고, 실제 세라믹스 가공에 적용되어 가공 품질을 높일 수 있을 것이다.
2. YSiAlON의 점성 감소로 취성 재료인 질화규소에 소성 변형이 일어났으며, 연속형 칩의 생성이 가능하였다. 절삭 온도 및 이송속도 조절로 전단형 칩이 아닌 연속형 칩의 생성을 유도하면 공구 수명 증대 및 가공 품질을 향상 시킬 수 있을 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지원 지역산업기술개발사업인 “레이저 복합가공기용 핵심 광학 모듈 개발: 10024308” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 5. 참고문헌

1. <http://www.kcers.or.kr/home/kor/ceramic/intro.asp?globalmenu=10&localmenu=1>
2. H. L. Lee, "Engineering ceramics," 1986
3. Shuting Lei, Yung C. Shin, Frank P. Incropera, "Deformation mechanisms and constitutive modeling for silicon nitride undergoing laser-assisted machining," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 40, pp 2213-2233, 2000
4. Frank E. Pfefferkorn, Y. C. Shin, Yinggang Tian, Frank P. Incropera, "Laser-Assisted Machining of Magnesia-Partially-Stabilized Zirconia," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, pp 42-51, 2004
5. Jay C. Rozzi, Frank E. Pfefferkorn, Y. C. Shin, Frank P. Incropera, "Experimental Evaluation of the Laser Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 122, pp 666-671, 2000
6. Patrick A. rebro, Yung C. Shin, Frank P. Incropera, "Design of operating conditions for crackfree laser-assisted machining mullite," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 44 pp. 677-694, 2004
7. Frank E. Pfefferkorn, Frank P. Incropera, Y. C. Shin, "Surface Temperature Measurement of Semi-Transparent Ceramics By Long-Wavelength Pyrometry," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 125, pp 48-56, 2003
8. John F. Ready, "LIA Handbook of laser materials processing," pp. 182-183, 2001
9. 양민양, "절삭가공," 2001
10. <http://widget.ecn.purdue.edu/~lampl>