

## CW 및 Pulsed 레이저를 이용한 세라믹 절단

### 방 세 윤

동국대학교 공과대학 기계공학과

### ABSTRACT

Use of engineering ceramics has been increasing due to the outstanding physical and chemical properties. Conventional machining processes, however, are not applicable due to their hardness and brittleness. Laser cutting is a promising alternative for these ceramics. In this study, experimental data of CO<sub>2</sub> laser cutting of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> are obtained to give a guide in the industry. Results of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cutting showed extreme weakness to thermal crack and it was found that pulsed beam has to be used for thick Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> specimen. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> showed good results for both CW and pulsed beams. Using pulsed beam resulted narrower kerf width with increased surface roughness and reduced cutting speed. It was also found that a parameter called path energy is useful for representing minimum threshold value for possible cutting range with pulsed beam.

### 1. 서 론

세라믹은 금속에 비해 화학적으로 안정도가 높고, 고온에서의 압축강도 및 경도가 높으며 내마모/내부식성이 좋고 전기전도도가 낮은 장점이 있다. 단점으로는 인장강도가 낮고 금속에 비해 특성값의 재현성이 저조하며 깨지기 쉬운 점을 들 수 있다. 따라서 통상의 기계가공으로는 가공이 곤란하며, 주로 diamond 공구로 연마하거나 초음파 또는 방전가공 등을 이용하지만 매우 시간이 많이 걸리고 소요 경비가 고가이다. 경우에 따라서는 세라믹부품의 가공비가 총생산가의 90%까지를 차지하는 경우도 있다.

세라믹의 레이저절단은 가공중의 기계적 하중이 없고 특히 복잡한 형상의 부품 제작의 유연성으로 인해 경제적이면서도 효과적인 가공방법으로 주목을 받고 있다[1-3]. 최근 각광을 받고 있는 engineering ceramics로는 Oxide 계통과 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>등), Non-oxide 계통 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, B<sub>4</sub>C, AlN 등)이 있다. 이들의 레이저 절단에는 주로 CO<sub>2</sub> 레이저와 Nd:YAG 레이저가 사용된다.

세라믹의 레이저절단에서는 thermal crack에 의한 파괴가 가장 큰 약점이다. 이를 줄이기 위해서는 예열이나 펄스형태의 빔을 사용하는 방법이 제시되고 있다. 본 연구에서는 아직 국내에서 체계적으로 연

구되고 있지 않은 대표적인 engineering ceramics-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 대상으로 CW 및 pulsed 레이저에 의한 절단 실험을 수행하고 결과를 검토함으로써 유사한 절단시의 guideline을 제시하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 재료

일반적으로 레이저로 세라믹을 절단시에는 재질에 따라 CW mode, pulsed mode(PM) 또는 super pulse mode(SPM) 등을 선택하며, 가공속도와 절단 품질에 큰 영향을 미친다. 본 연구의 실험에 주로 사용된 레이저는 Rofin-Sinar사의 CO<sub>2</sub> 레이저로 모델 RS1500이며, CW/PM/SPM의 가공이 가능하다. 사용렌즈는 ZnSe 재질로 촛점거리 f=5"이다. 사용가스는 주로 1기압의 산소 또는 공기였으며, 절단 노즐의 hole은 직경 2mm이다.

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 절단시 한 가지 경우에 대해 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 사용 레이저는 Lumonics사의 JK702 모델이며, 최대 평균출력 250W로 0.2-200Hz, 0.5-20ms의 필스가 가능하다. 촛점거리는 80mm이고, 보조가스로는 역시 1기압의 공기를 사용하였다.

사용시편은 국내 (쌍용중앙연구소)에서 제작되었으며, 실험에 사용된 시편은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 0.635mm, 2.0mm, 6.0mm 와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> - 5.5mm이다. 시편의 제

조공정 및 특성값은 참고문헌[4]에 정리되어 있다.

### 3. 실험결과 및 검토

실험초기의 idea는 반도체산업에 특히 활용도가 높은  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 주대상으로  $\text{CO}_2$  레이저- 특히 CW mode-를 위주로 실험을 수행하고 차후 모델링의 기초자료로 활용하는 것이었다. 그러나 아래에 정리해 보이듯이  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 두께가 2mm 이상의 경우 CW mode하에서는 thermal crack에 의해 부서져 나감을 알 수 있다. 즉 알루미나의 경우에는 두께가 커질수록 pulsed mode를 사용해야 한다. 이에 비해  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 는 CW 와 PM 두 경우 모두에 대해 가공성이 좋으며, 특히 PM의 경우에는 절단폭도 작게 나타난다. 단 이때 가공속도는 CW에 비해 다소 늦어지고 절단면의 표면조도 역시 증가한다. 표 1에 사용 레이저의 조건에 따른  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 실험결과를, 표 2에  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 실험결과와 절단면의 표면조도 Ra, Rz를 정리해 보인다.

Pulsed mode 절단시에는 CW 절단에 비해 가공변수가 증가해 pulse의 duty, frequency, shape 등이 중요하게 된다. Tonshoff[1]의 실험결과를 참고해 기준조건을  $t_i=100\text{ms}$ ,  $t_o=250\text{ms}$ 로 설정하고,  $\text{duty}=\text{const}$ (즉  $\frac{t_i}{t_i+t_o}$ -일정)의 조건에서 frequency와 power를 변화하며 실험을 수행하였다.

각 절단조건에서의 절단폭을 그림 1- 그림 3에 나타낸다. CW 의 레이저빔일 경우에는 x-축을 절단속도로 나타내었지만, PM일 경우에는 보다 적절한 변수를 찾기 위해 path energy 값은 이용하였다[5]. 이 path energy는 가해진 power를 이송속도로 나눈 값으로, 물리적으로는 절단선 단위 길이당 조사되는 에너지값을 의미한다. Pulse path energy  $E_{ss}$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다. 즉, 절단속도를  $V[\text{m}/\text{min}]$ , 평균 레이저출력을  $P_t [\text{W}]$ , 펄스빔의 첨두출력을  $P_{LP} [\text{kW}]$  라 하면;

$$E_{ss} = \frac{P_{LP}}{V} = \frac{P_{LP} \times 10^3 [\text{J}/\text{s}]}{V/60 [\text{m}/\text{s}]} = P_{LP} \times \frac{60}{V} [\text{J}/\text{mm}]$$

그럼에서 종축의 절단폭값은 광학사진에서 판독한 값으로 절대값이라기보다는 상대적인 크기를 비교하는 쪽으로 제시되었다.

그림 1에 나타낸  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 경우  $E_{ss}$  값이 약 300J/mm 이상에서 절단이 가능하였으며 주어진 실험조건 이내에서는 절단폭이 큰 변화를 보이지는 않는다. 평균출력값이 클 때에는 절단폭이 다소 커지는 듯 하지만 실험 data의 부족으로 확실한 단정을 내리기는 곤란하다.

그림 2에는  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 를 CW 로 절단할 때의 결과를 보이고 있는데, 평균출력이 600W에서 1200W로 증가할수록 절단폭이 증가함을 확인할 수 있으며, 같은 출력하에서는 절단속도에 따른 변화는 크지 않다. 1200W의 출력에서 낮은 절단속도에서는 시편이 지나치게 가열됨을 실험시 관찰할 수 있었다. 그럼의 각 출력범위에서 나타낸 절단속도보다 큰 값에서는 절단이 이루어지지 않았다.

한편 그림 3에  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 를 PM로 절단할 때의 결과를 보이고 있는데,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 경우와 유사하게  $E_{ss}$  값이 어느 한도미만 (약 1600J/mm)에서는 양호한 절단이 불가능하였으며, 평균출력이 일정할 때 주어진 실험조건 이내에서는 절단폭이 큰 변화를 보이지는 않는다. 평균출력이 300W에서 400W로 증가할때는 전반적으로 절단폭이 증가하는 경향을 볼 수 있다.

절단면의 품질을 판단하는 중요한 인자로 표면조도를 들 수 있는데,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 경우에 한해 그림 4와 그림 5에 Ra 및 Rz 의 분포를 나타내었다.

그림 4는 CW 절단시의 절단속도에 따른 표면조도를 보이고 있는데, 주어진 실험조건 이내에서는 Ra 값은 3μm 이하로 상당히 매끄러운 형태를 갖는다. 실험시 용융된 재질이 보조가스 제트의 영향으로 절단하부로 흘러내려 떨어지는 형태를 볼 수 있으며, 용고되어 dross가 나타남을 확인할 수 있다. 즉 용액액체의 유동으로 절단부 표면은 전반적으로 매끄럽게 됨을 짐작할 수 있다. 이에 비해 Rz의 값은 특별한 경향성을 언급하기는 곤란한 분포를 보이고 있다.

그림 5에 보이는 PM 절단시의 표면조도 분포는 일정한 경향성을 나타낸다. 즉 (i)같은 평균 출력하에서는 펄스 주파수가 높을수록 표면조도가 작아지며, (ii)같은 출력, 일정한 펄스조건에서는 절단속도가 느릴수록 표면조도가 작아진다. 이것은 펄스작용에 의해 주기적으로 절단부 표면에 금속절단시와 유사한 striation pattern이 생기며, 이 striation pattern의 주기는 속도가 느릴수록, 펄스주파수가 높을수록 작아지게 되므로 결국 표면조도값도 작아지는 것으로 이해할 수 있다. 전반적으로 Ra와 Rz 분포는 동일한 경향을 보이고 있다. 평균출력 증가에 따른 표면조도 변화는 확실하지 않다.

한편 CW 절단시 일정한 절단속도에서 출력이 증가할 때의 절단면을 그림 6에 보인다. 출력=600W의 경우에는 절단면의 상태로 보아 절단속도가 다소 빠른 것으로 보인다. 사진에서 절단부 표면이 매끄럽고 육안으로 절단면 하부에서 melt flow의 흔적을 볼 수 있다. 일정출력에서는 절단속도가 증가할수록 dross 부착이 심해지고 melt flow흔적이 뚜렷이 남는다.

그림 7에  $u=0.02\text{m/min}$ ,  $t_i/t_o=100/250\text{ms}$ 의 조건에서 출력이 증가할 때의 절단면을 보인다. CW 모드와는 달리 펄스에 의해 금속절단의 줄무늬 pattern과 같은 형상을 절단면 상부에서 볼 수 있으며, 출력이 커짐에 따라 이 줄무늬가 더욱 뚜렷하고 길게 나타남을 볼 수 있다. 한편 동일한 출력(300W)과 속도( $0.02\text{m/min}$ )에서 펄스 duty를 일정하게 ( $=28.6\%$ ) 고정하고 frequency만 변화시킬 때의 절단면 관찰시, 절단면에 큰 차이는 없으나 상부의 줄무늬 pattern의 frequency의 함수이므로 frequency가  $2.86\text{Hz}$ 에서  $28.6\text{Hz}$ 로 증가할 수록 줄무늬는 감소한다.

그림 8에 동일한 출력과 펄스조건에서 절단속도의 영향을 보인다. Pulse frequency가 낮은 경우 줄무늬가 뚜렷하며 속도가 증가할 수록 절단면의 조도는 증가한다. 이러한 경향은 앞에서 표면조도의 분포 결과에서 얻어진 결론과 일치하고 있다.

실험결과를 종합해보면, CW mode로 절단시에는 절단면 하부에 melt flow의 흔적이 관찰되고 dross가 부착되어 있다. 또한 가공시 과도한 입열조건에서는 시편이 빨갛게 가열되는 것을 볼 수 있어 가공후의 시편에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있을 것으로 보인다. 이에 비해 pulsed mode로 절단시에는 가공속도가 다소 늦어지고 절단면의 표면조도가 약간 증가하지만, 절단폭이 작아지고 pulse frequency, duty cycle에 의해 적당히 입열량을 조절할 수 있어 시편의 재료적 특성이 손상될 가능성을 줄일 수 있다.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 경우 절단중 시편의 파단이 일어나지 않았으나,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 경우에는 두께 2mm 이상에서는 thermal crack에 의한 파단때문에 CW mode로는 절단이 불가능하고 pulsed mode로만 가능하다. 따라서 일반적으로 세라믹의 레이저절단에는 CW mode보다는 pulsed mode의 절단이 안전할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

레이저 절단 가공의 기본 mechanism을 이해하고 현장에서 대략적인 가공범위를 도출하는데 도움이 되고자 하는 목표하에 대표적 engineering ceramics인  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 절단실험을 수행하고 결과를 검토해 보았다. 결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) CW mode로 절단시에는 절단면 하부에 melt flow의 흔적이 관찰되고 dross가 부착되어 있다. 또한 가공시 과도한 입열조건에서는 시편이 빨갛게 가열되는 것을 볼 수 있어 가공후의 시편에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있을 것으로 보인다.

(2) Pulsed mode로 절단시에는 가공속도가 다소 늦어지고 절단면의 표면조도가 약간 증가하지만, 절단

폭이 작아지고 pulse frequency, duty cycle에 의해 적당히 입열량을 조절할 수 있어 시편의 재료적 특성이 손상될 가능성을 줄일 수 있다.

(3)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 경우 절단중 시편의 파단이 일어나지 않았으나,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 경우에는 두께 2mm 이상에서는 thermal crack에 의한 파단때문에 CW mode로는 절단이 불가능하고 pulsed mode로만 가능하다. 따라서 일반적으로 세라믹의 레이저절단에는 CW 보다는 pm의 절단이 안전할 것으로 판단된다.

(4) PM 절단시 pulse path energy  $E_{ss}$  값이 어느 한도보다 작아지면 절단이 불가능하다. 즉 절단이 가능한 threshold 값으로  $E_{ss}$  값을 사용할 수 있다.

향후 연구과제로는 (i) 절단 가능 영역을 모델에 위한 이론적 예측과 비교해 보고, (ii) 품질판단에 중요한 인자가 되는 절단후의 시편의 재료적 강도 및 crack을 실험적으로 조사해 보는 것을 들 수 있다.

#### 참고문현

- [1] Tonshoff, H. K. and Gonschior, M., "High Quality Laser Cutting of Ceramics through Adapted Process Techniques", SPIE Vol. 2062, 1993
- [2] Ramanathan, S. and Modest, M. F., "CW Laser Cutting of Composite Ceramics", Proceedings of LAMP'92, Nagaoka, pp625-632, 1992
- [3] Chryssolouris, G., *Laser Machining: Theory and Practice*, Springer-Verlag, 1991
- [4] Fine Ceramics Catalog, 쌍용 Cement
- [5] 변철웅, "고출력 레이저를 이용한 세라믹 재료의 용접 실험", 대한용접학회지, 12권, 2호, pp39-48, 1994. 6

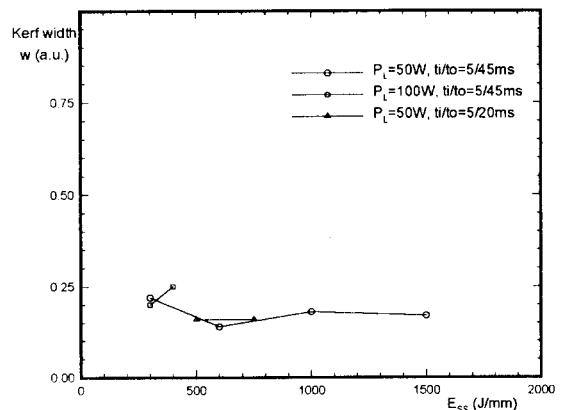


그림 1.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 PM 레이저 절단시의 절단폭

표 1.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 레이저가공 실험 결과

두께 <i>t</i> (mm)	레이저	가공조건 <sup>1,2,3</sup>	가공속도 <i>u</i> (m/min)	결과 <sup>4</sup>
0.635	$\text{CO}_2$ CW	100W	0.3-1.0	○
		산소(1기압)	1.2	X crack
		100W	0.2-1.2	○
		150W	0.2-1.4	○
			1.6	X crack
2.0	$\text{CO}_2$ CW	100-300W	0.4-0.6	X crack
		50W(A)	0.02-0.1	○
			0.15	X no cut
		100W(A)	0.15-0.2	△(절단폭/dross 증가)
		50W(B)	0.02-0.05	○
			0.1	X
		100W(B)	0.1	X crack
		120W(A)	0.01	○ dross
공기(2기압)				

\*1. 츄점은 재료 표면; 노즐-재료 사이 거리=1mm

2. 보조가스: 1기압의 공기 (특별히 명기하지 않은 경우)

3. PM 조건: A(20Hz,  $t_i/t_o=5/45ms$ ) B(40Hz,  $t_i/t_o=5/20ms$ ) C(91Hz,  $t_i/t_o=2.9ms$ )

4. 결과 - ○: Good △: Fair X: Bad

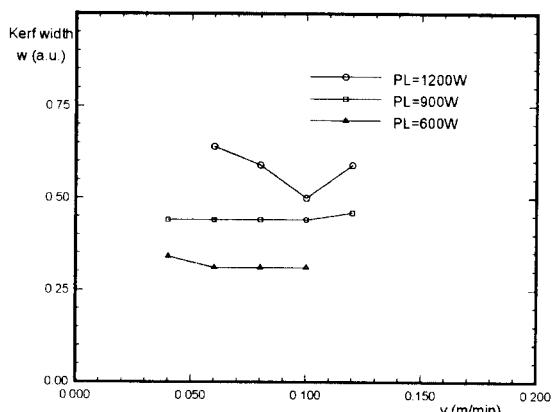


그림 2.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 CW 레이저 절단시의 절단폭

표 2.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 레이저가공 실험 결과

레이저	가공조건	가공속도 <i>u</i> (m/min)	결과	R <sub>a</sub> ( $\mu\text{m}$ )	R <sub>z</sub> ( $\mu\text{m}$ )
$\text{CO}_2$ CW	600W	0.04	○	1.9	10
		0.06	○	0.9	6
		0.08	○	2.0	10
		0.10	○	2.5	16
		0.12	X no cut	-	-
	900W	0.04	○	1.2	10
		0.06	○	1.4	8
		0.08	○	1.2	10
		0.10	○	1.1	10
		0.12	○ (no spatter)	2.0	12
	1200W	0.06	○ (식판 과열)	2.1	16
		0.08	○ ( * )	2.2	16
		0.10	○	1.7	12
		0.12	○	2.0	12
		0.15	X no cut	-	-
$\text{CO}_2$ PM	300W(A)	0.015	○	3.4	26
		0.02	○	7.3	42
		0.03	○	8.1	44
		0.02	○	4.7	32
		0.04	○	10.0	61
	300W(B)	0.06	△ (위로 spatter)	14.3	60
		0.02	○	2.9	21
		0.04	○	8	43
		0.06	△ (위로 spatter)	12	62
		0.02	○	2.0	13
$\text{Nd}: \text{YAG}$ PM	217W(E)	0.01-0.012	○(보유 가중의 최고속도)	-	-
		PM	-	-	-
		-	-	-	-

\*1. 두께 5.5mm, 츄점은 재료 표면

노즐-재료 사이 거리=1mm

2. 보조가스: 1기압의 공기 (특별히 명기하지 않은 경우)

3. PM 조건: A( $t_i/t_o=100/250ms$ ) B( $t_i/t_o=50/130ms$ )

C( $t_i/t_o=25/63ms$ ) D( $t_i/t_o=10/25ms$ ) E( $t_i/t_o=1/11.5ms$ ) 4. 결과 -

○: Good △: Fair X: Bad

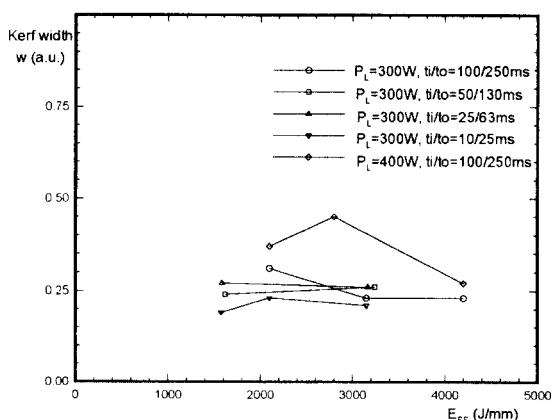


그림 3.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 PM 레이저 절단시의 절단폭

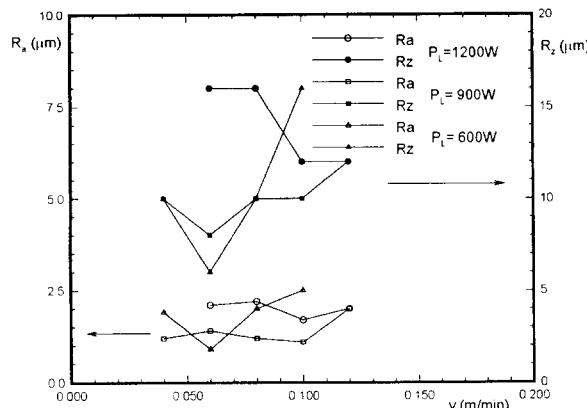


그림 4.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 CW 레이저 절단시의 표면조도

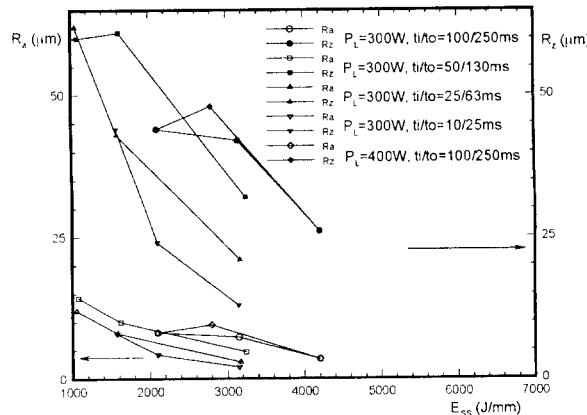


그림 5.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 PM 레이저 절단시의 표면조도

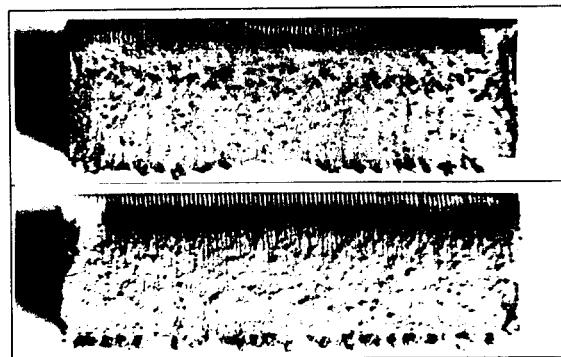


그림 7.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 PM 절단시 레이저출력의 영향  
( $u=0.02\text{m}/\text{min}$ ,  $t_i/t_o=100/250\text{ms}$ : 위부터 300, 400W)

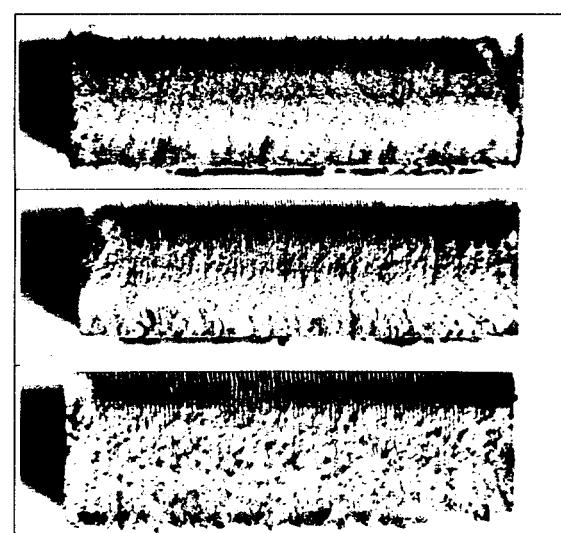


그림 8.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 PM 절단시 절단속도의 영향  
(300W,  $t_i/t_o=100/250\text{ms}$ , 위로부터  
 $u=0.015, 0.02, 0.03\text{m}/\text{min}$ )

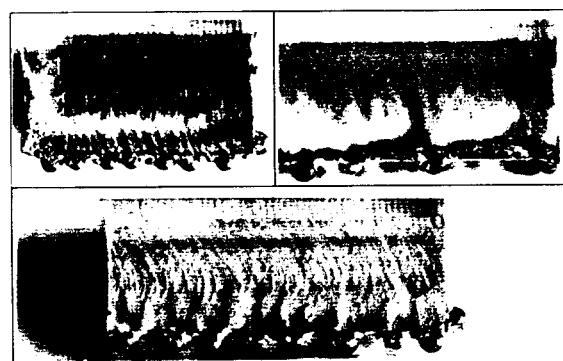


그림 6.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 CW 절단시 레이저출력의 영향  
( $u=0.10\text{m}/\text{min}$ , 왼쪽위부터 시계방향으로  
600, 900, 1200W)