

질화규소의 레이저선삭가공시 경사각에 따른 절삭특성

Cutting Characteristics on Rake Angle in Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride

신동식¹, 이재훈^{1,✉}, 임세환¹, 김종도², 이수진³
Dongsig Shin¹, Jaehoon Lee^{1,✉}, Sehwan Lim¹, Jongdo Kim² and Sujin Lee³

¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 (Intelligent Manufacturing Systems Research Division, KIMM)

² 한국해양대학교 기관시스템공학부 (Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University)

³ 한국해양대학교 대학원 (Graduate School, Korea Maritime University)

✉ Corresponding author: jaholee@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7471

Manuscript received: 2008.9.5 / Revised: 2008.12.12 / Accepted: 2008.1.19

In the last few years, lasers have found new applications as tools for ceramic machining which is laser-assisted machining(LAM). LAM process for the machining of difficult-to-machine materials such as structural ceramics, has recently been studied on silicon nitride workpiece for a wide range of operating condition. However, there have been few studies on rake angle in LAM process. In this paper we analyzed difference of machinability between positive and negative rake angle in tools. We have obtained interesting results that we could eliminate chattering, lower specific cutting and cutting ratio in case of positive rake angle. The results suggest that positive rake angled tools can make more plastic deformation and stable cutting of silicon nitride in comparison with negative rake angled one.

Key Words: LAM (Laser-Assisted Machining: 레이저예열선삭), Silicon Nitride (질화규소), Rake Angle (경사각), HPDL (High Power Diode Laser: 고풍력다이오드레이저), Cutting Force (절삭력)

기호설명

P_L = laser power (W)

$L_{\ell t}$ = Laser-tool lead (mm)

$\Phi_{\ell t}$ = Laser-tool angle ($^{\circ}$)

$\Phi_{\ell p}$ = Laser-pyrometer angle ($^{\circ}$)

T_{mr} = Surface temperature ($^{\circ}C$)

T_p = Preheating time (sec)

Ra = Average surface roughness (μm)

MRR = Material removal rate (mm^3/s)

F_c = Main cutting force (N)

F_{c_CLA} = Center line average main cutting force

F_f = Feed force (N)

F_t = Thrust force (N)

d = Cutting depth (mm)

f = Feed rate (mm/rev)

N = Rotational speed (rpm)

α_b = Back rake angle ($^{\circ}$)

α_s = Side rake angle ($^{\circ}$)

α_{ecq} = Equivalent effective rake angle ($^{\circ}$)

C_e = End cutting edge angle ($^{\circ}$)

C_s = Side cutting edge angle ($^{\circ}$)

C_{seq} = Equivalent side cutting edge angle ($^{\circ}$)

r_n = Nose radius (mm)

D_j = Spot size (mm)

1. 서론

세라믹스는 금속, 플라스틱과 함께 산업전반에 사용되는 주요 재료인 동시에 인류가 사용한 가장 오랜 재료의 하나이다. 산업재료로써 도자기, 유리, 내화물, 시멘트, 석고, 연삭재 등 다양한 제품으로 사용되고 있다. 세라믹스 중에서도 비산화물계 재료인 질화규소(Si_3N_4 , silicon nitride), 탄화규소(SiC , silicon carbide) 등은 엔지니어링 세라믹스(engineering ceramics)라 불린다. 본 세라믹스는 취성재료로서 기계구조용 재료에는 치명적인 결점을 가지고 있지만 고강도와 고경도 및 높은 내열충격성, 내마모성 등을 장점으로 가지고 있어 적용 분야가 다양하다.

이들 재료는 일반적으로 경도가 높아 선삭 및 밀링 등과 같은 기계가공이 어렵다. 이와 같은 이유로 시간과 비용이 많이 소요되는 연마가공을 하고 있다. 세라믹 재료는 현재 자동차와 반도체 산업 등에 두루 사용되고 있지만, 연마가공시간과 비용으로 인하여 적용에 많은 한계가 따르고 있다.

이를 개선하기 위해 많은 연구가 진행되고 있는데 가장 대표적으로 미국 Purdue 대학의 신영철 교수팀에서 연구되기 시작한 LAM(Laser-Assisted Machining)이 있다. LAM 이란 기존의 공정에서 불가능하던 세라믹을 레이저 예열을 통하여 선삭하는 공정으로서 레이저 예열선삭이라고도 한다.

레이저 예열선삭은 Purdue 대학을 중심으로 현재 질화규소,^{1,9} 몰라이트(mullite)^{10,11} 및 지르코니아(zirconia)^{12,13} 등의 소재를 주로 하여 온도 및 응력 해석 시뮬레이션^{6,9} 을 기반으로 메커니즘 분석 및 공정개발을 수행해왔다.

이러한 연구결과를 통해서 예열선삭은 온도상승에 따른 세라믹의 소성변형(plastic deformation)에 의해 선삭이 된다는 메커니즘이 밝혀졌고^{6,9,12} 이와 더불어 열에 의한 미세균열을 최소화 하여 열적손상에 대한 우려를 해소할 수도 있었다.^{2,3}

그렇지만 상기 결과들은 대부분 CO_2 레이저를 이용하여 도출된 성과로서 시스템 측면에서 광화이버의 사용이 불가능하여 기존의 공작기계에 접목하기 어려운 문제점이 있다. 또한 공구의 선택 역시 한정된 공구만 사용하였으며 시편의 직경이 대부분 10mm 이내라는 한계가 있었다.

이러한 한계점을 개선하고자 한국기계연구원에서도 세라믹의 예열선삭을 위한 시스템을 구축하였고^{14,15} 공정실험을 시작할 수 있었다. 본 논문에서는 광화이버를 통하여 빔을 전송할 수 있어 실용화에 용이한 HPDL(High Power Diode Laser: 고풍

력다이오드레이저)를 사용하여 실험을 수행하였으며 사용된 공구는 양의 경사각 및 음의 경사각 두 종류를 사용하였고 실험재료는 16mm의 직경을 가지는 질화규소를 이용하였다. 이로서 본 실험은 기존 실험의 한계성을 극복함과 동시에 공정의 실용화에 더욱더 다가갈 수 있는 계기를 마련할 것으로 기대된다.

2. 실험방법

2.1 실험의 구성

본 실험은 크게 레이저, 절삭공구, 시편, 공구동력계 및 고온계로 구성된 세팅에서 수행되었다. Fig. 1은 실험에 사용된 구성요소를 도식화한 개념도로서 수직방향으로 레이저를 조사하였으며 45° (ϕ_{lp})의 위치에 고온계를 설치하였다. 또한 90° (ϕ_{lt})의 위치에 공구를 삽입하여 절삭과 동시에 절삭력 및 재료의 온도를 측정하였다. 이때 측정된 온도는 레이저 조사부 중심에서 2.3mm(L_{et})떨어진 위치로서 절삭공구에 의해 가공되기 직전에 온도를 측정하였다.

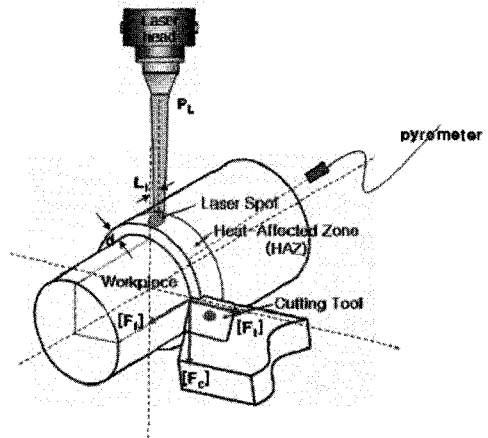


Fig. 1 Sketch of the laser-assisted machining of a cylindrical workpiece

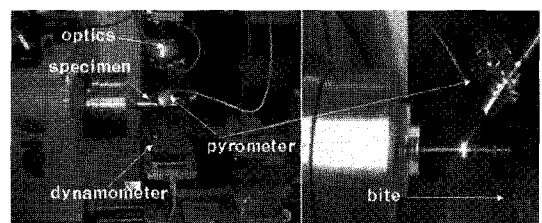


Fig. 2 Experimental setup for LAM of silicon nitride

Fig. 2 는 실험에 사용된 세팅으로서 사용된 레이저는 HPDL(LASERLINE, LDF1000-2500)이다. 본 레이저는 910nm 와 980nm 의 파장을 가지는 빔을 커플링하여 사용하고 있으며 최대출력은 2.5kW 으로서 열처리 및 클래딩 등에 적용이 많이 되고 있다.

Table 1 Tool and insert specification

		type A	type B
Model	Insert	CNMA120408 (Taegutec)	SCG422 (Kennametal)
	holder	PCLNR-2525	CSRPR-164D
Back rake angle (α_b)		-5	0
Side rake angle (α_s)		-5	5
End cutting edge angle (C_e)		5	15
Side cutting edge angle (C_s)		5	15
Nose radius (r_n)		0.8	0.8

절삭력 측정을 위하여 공구동력계(dynamometer: KISTLER, 9257B)를 사용하였으며, 주분력(F_c), 이송력(F_f), 배분력(F_t)을 1 초에 5 회 샘플링하여 실시간으로 계측하였다. 한편 세라믹의 표면 온도 측정을 위해서 사용된 고온계(Pyrometer: Kleiber, KGAF 730)는 적외선 타입으로써 측정범위는 300~2300℃ 이며 사용되는 파장은 1.58~2.2 μ m 이고, 60mm 의 측정거리를 두고 있다.

공구의 재료는 대기압에서 약 2000℃까지 안정하면서도 경도가 높은 CBN(Cubic Boron Nitride)을 사용하였다. Table 1 에는 공구의 형상과 각도를 나타내었다. 경사각은 공구형상 중에서 가장 중요한 역할을 하는 것으로 공구의 성능과 수명을 위해 가공 조건에 맞게 선택해야 한다. Type A 의 경우는 음의 경사각을 갖는 인서트로서 Taegutec 사 CNMA120408 을 사용하였으며 홀더는 PCLNR-2525 이다. 한편 Type B 의 경우에는 양의 경사각을 갖는 대표적 인서트로서 Kennametal 사 SCG422 를 사용하였으며 홀더는 CSRPR-164D 이다.

2.2 실험재료

실험에 사용된 질화규소 시편은 (주)맥테크에

Table 2 Compositions of silicon nitride specimen

	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	AlN
wt%	86	3	6	5

Table 3 Properties of silicon nitride

Material		Si ₃ N ₄ (Black)
Vickers Hardness (load 500g)	GPa	14
Flexural strength	MPa	880
Young's modulus of elasticity	GPa	300
Poisson's ratio	-	0.28
Thermal conductivity (20℃)	W/(m.k)	30
Heat shock resistance (Put in water)	ΔT_c ℃	750
Fracture toughness	MPa	6
Specific heat	J/(kg.k)	0.66×103

서 제조하였으며 직경 16mm 와 길이 150mm 로서 무게비는 Table 2 와 같으며 혼합 후 정수압 성형을 하고 이후 HIP 공정을 통하여 완성되었다. 이런 공정을 통해 생산된 질화규소는 육각기둥 모양인 90wt%의 Si₃N₄ 입자들과 그 주변을 채우고 있는 10wt%의 YSiAlON 로 구성된다. Table 3 은 질화규소 봉재의 물성치를 나타내며 또한, HPDL 의 파장인 910 및 980nm 에 대한 흡수율은 0.7 로 알려져 있다.

2.3 실험조건

일반적으로 질화규소는 900~1,000℃에서는 굽힘강도가 저하되고, 1,000℃ 이상에서는 소결체인 YSiAlON 점도(η)의 감소로 인하여 연화되어 소성변형에 의한 예열선삭이 가능하게 된다. 실험에 사용된 질화규소는 β -Si₃N₄와 YSiAlON 으로 구성되며 YSiAlON 이 연화되기 이전에는 β -Si₃N₄ 정결정의 입내파괴(transgranular fracture)가 주로 일어나고, 1000℃ 이상의 고온에서는 β -Si₃N₄ 결정 주변의 YSiAlON 이 연화되어 소성변형을 일으키는 입계파괴(intergranular fracture)가 주로 일어나므로 온

도를 상승시켜 낮은 점도에서 선삭 가공을 함으로써 절삭력을 감소시킬 수 있다. 하지만 온도가 너무 높을 경우 공구의 연화로 오히려 공구 수명을 감소시킬 수 있으므로 적절한 예열조건 선정이 중요하다.

질화규소의 경우, 예열선삭시 1151°C 이하에서는 취성파괴, 1151°C에서 1305°C 사이는 임계영역, 1330°C 이상에서는 소성변형에 의한 유동형 칩이 나오며 자세하게는 1380~1490°C 에서 공구의 수명이 최대가 된다는 연구결과가 제시된바 있었다. 1,2,5,8,12 이에 따라 예열온도는 1400°C 영역으로 결정하였으며 이를 위해 레이저의 출력은 600W 로 설정하였고 공구의 마모에 의한 영향을 배제하기 위하여 각각의 실험에서 인서트를 교환하여 실험을 진행하였다. 본 실험에서는 상기 레이저 설정하에 공구의 경사각, 절입깊이, 이송속도 등을 변

경하여 실험하였으며 이에 따른 영향을 평가하였다. Table 4 에서의 α_{eq} 란 등가 유효경사각으로서 노즈를 갖는 공구에서 절입깊이 및 이송속도에 따라 유효한 경사각을 계산한 값으로서¹⁶ 다른 공구 회사의 제품을 사용하게 되면서 인서트의 형상에 대한 객관적 변수가 필요하게 되는데 이를 위하여 등가 유효경사각의 개념을 도입하였다.

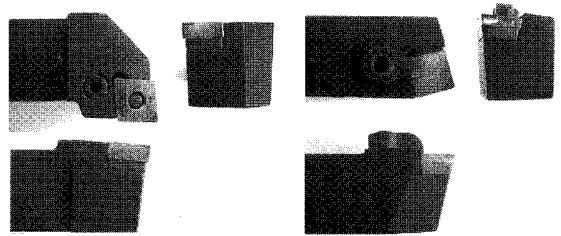
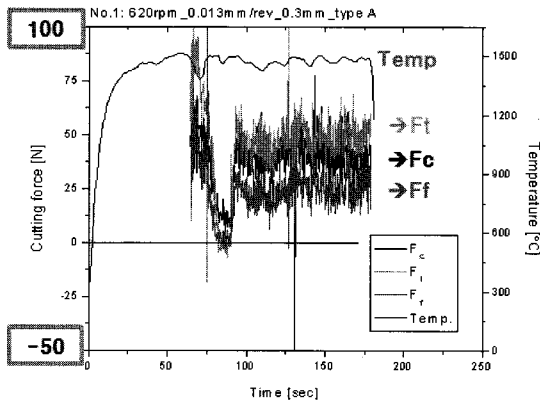
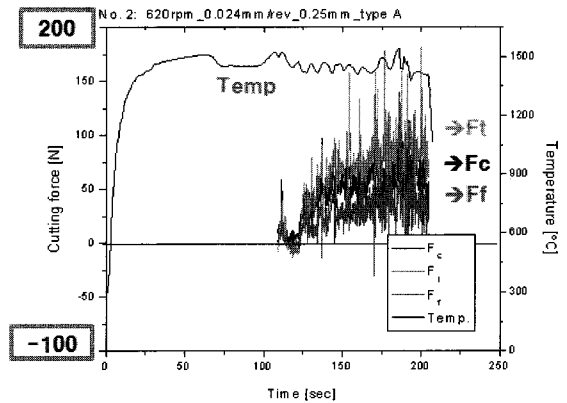


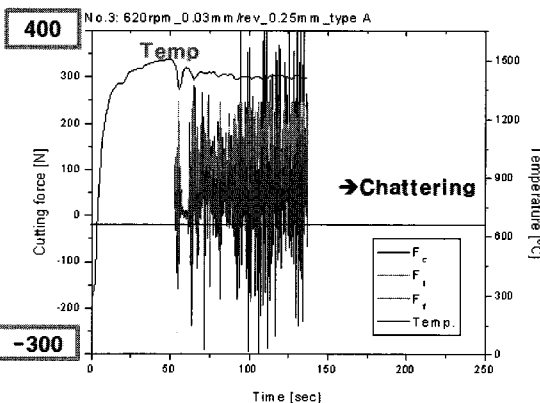
Fig. 3 Pictures of tool and insert: (a) type A and (b) type B



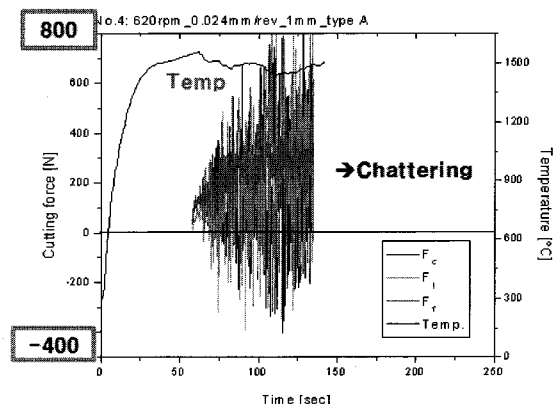
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4 Graphs for temperature and cutting forces on the experiment: (a) No. 1, (b) No. 2, (c) No. 3 and (d) No. 4 of table 4

Table 4 Experimental conditions for laser assisted machining

	Exp. No	α_b	α_s	C_{seq}	α_{ecq}	f	d
A type	1	-5	-5	57.27	-6.85	0.013	0.3
	2	-5	-5	62.58	-6.63	0.024	0.25
	3	-5	-5	63.54	-6.59	0.03	0.25
	4	-5	-5	27.64	-6.64	0.024	1
B type	5	0	5	54.28	3.19	0.013	0.37
	6	0	5	58.15	2.94	0.024	0.3
	7	0	5	54.66	3.17	0.03	0.34
	8	0	5	30.19	4.42	0.03	1
	9	0	5	29.24	4.46	0.024	1

@ laser power (P_L): 600 W, laser-tool lead (L_{lt}): 2.3mm, laser-tool angle (ϕ_{lt}): 90°, laser-pyrometer angle (ϕ_{lp}): 45°, surface temperature (T_s): >1400°C rotational speed (N): 620 RPM, diameter of specimen: 16mm, spot size: 4X4mm

3. 본론

3.1 경사각에 따른 채터링 특성

공구의 경사각은 절삭력 및 공구수명을 결정하는 중요한 인자로 알려져 있는데, 일반적으로 경사각이 증가하면 절삭열의 발생이 적어져 공구수명이 증가하나 경사각이 큰 경우 절삭날의 강도가 저하되고 칩핑(chipping)이 발생하는 문제점이 있다. 또한 양(+)의 경사각일 경우에는 칩을 위로 올리는 형상이 되어 절삭저항 및 채터링(chattering)이 감소하고 절삭열의 발생을 억제할 수 있으나 표면 조도가 좋지 않다는 결점이 있다. 이에 반해 음(-)의 경사각에서는 공구가 피삭재를 누르는 형태가 되어 절삭저항이 커지고 채터링이 증가하나 표면 조도가 향상된다. 본 내용은 일반적인 경향이므로 세라믹의 예열선삭에 적합한 경사각은 실험을 통해서 증명해 나가고자 한다. Fig. 4 는 음의 경사각 즉 Type A 를 사용하여 세라믹을 예열선삭한 경우

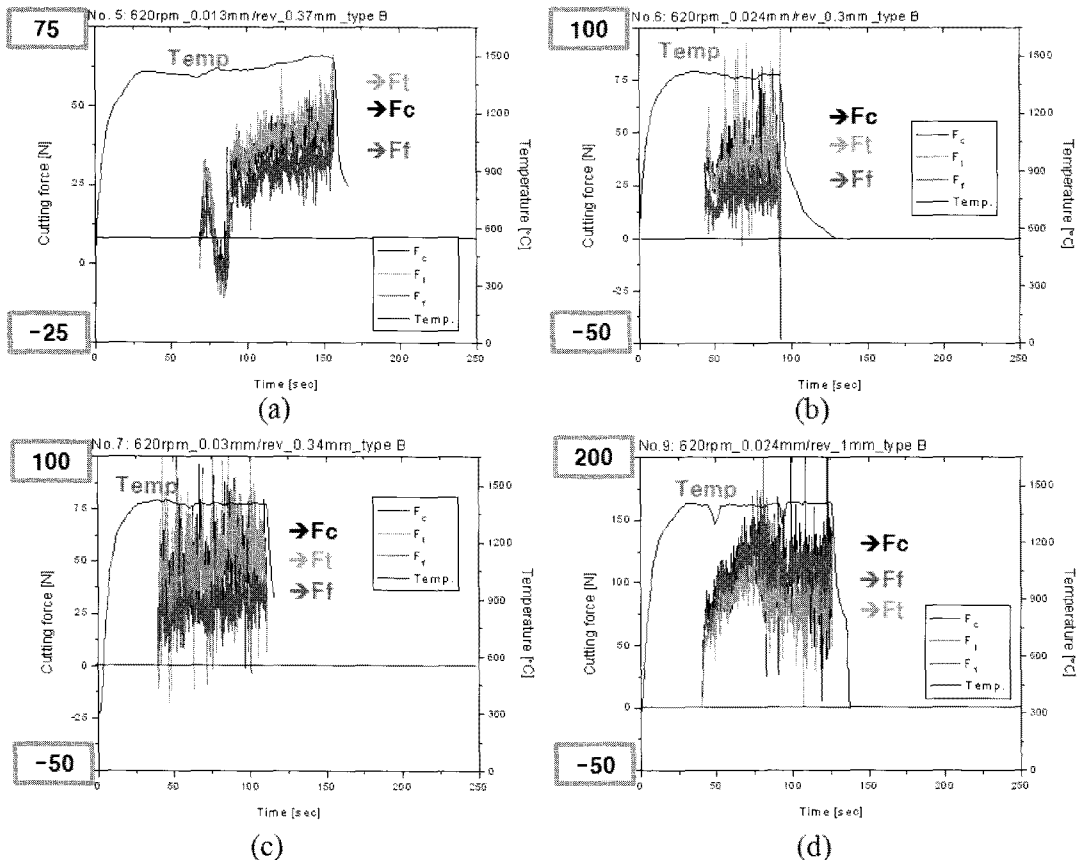


Fig. 5 Graphs for temperature and cutting forces on the experiment: (a) No. 5, (b) No. 6, (c) No. 7 and (d) No. 9 of table 4

의 절삭력(F_c , F_b , F_t) 및 가 시간에 따른 가공물의 온도를 나타내고 있다. 절삭의 시작점은 예열이 충분히 이루어진 시점 즉 1400℃였으며 이송속도가 빨라지고 절입깊이가 깊어질수록 절삭력이 커지며 chatter링이 발생한다는 것을 보여주고 있다.

반면 Fig. 5 는 양의 경사각(Type B)을 사용한 공구를 이용하여 절삭한후 측정된 온도, 절삭력으로서 음의 경사각(Type A)에 비해 낮은 절삭력이 필요하며 chatter링의 발생도 줄어든다는 것을 보여주고 있다. 양의 경사각을 가지는 인서트를 사용한 경우 음의 경사각을 사용한 경우에 비해 배분력이 감소되는 현상이 발견되었다.

이외에도 Fig. 4 및 Fig. 5 에서 가장 큰 차이는 chatter링의 발생유무를 들수 있는데 정량적으로 표현하기 위해 식(1)에 나타난 중심점 평균 절삭력(F_{c_CLA})의 개념을 도입하였고 Fig. 6 과 같이 결과를 표현할 수 있었다.

Fig. 6 은 재료제거율(MRR)에 따른 중심점 평균 절삭력으로서 음의 경사각인 경우 재료제거율이 높아짐에 따라 급격히 chatter링이 늘어난 반면 양의 경사각인 경우 chatter링의 변화가 적어서 비교적 안정적인 가공이 이루어졌다. 이와 같은 chatter링 현상은 표면조도에도 영향을 미치는데 Fig. 7(a) 시편의 경우 표면조도(Ra)가 4 μ m 인 반면 Fig. 7(b)의 경우 표면조도는 1 μ m 로써 양의 경사각을 가질 때 상대적으로 정밀한 가공이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

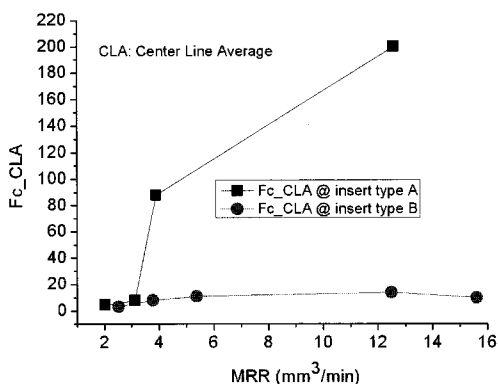


Fig. 6 Center line average main cutting force as a function of MRR and insert type

3.2 재료제거율(MRR)에 따른 절삭특성

재료제거율은 단위시간당 제거된 재료의 부피로 정의할 수 있으며 절삭속도, 이송속도 및 절입

$$F_{c_CLA} = \frac{1}{t} \int F_c - h | dt$$

t : time(sec) (1)

h : center line of F_c

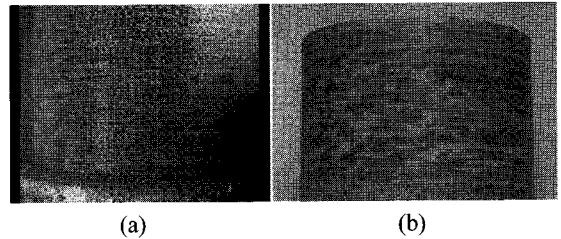


Fig. 7 Surface of silicon nitride after LAM under the experiment (a) No.4 and (b) No. 9 of table 4

깊이의 곱으로 이루어진다. Fig. 8 은 재료제거율에 따른 주절삭력 및 비절삭에너지를 나타내고 있다. 주절삭력은 재료제거율과 비례해서 커지며 비절삭에너지의 경우 재료제거율이 커지면 전체적으로 낮아진다는 것을 알 수 있다. 또한, 음의 경사각을 갖는 Type A 의 경우보다 양의 경사각을 가지는 Type B 의 경우가 chatter링 뿐만 아니라 주절삭력 과 비절삭에너지도 낮다는 것을 보여주고 있다.

일반적으로 탄소강의 비절삭에너지는 1.9~2.4 J/mm³ 인데 Type B 를 사용하였을 경우에는 세라믹 선삭시 3.5J/mm³ 까지 낮출 수 있다는 의미로서 금속선삭에 준하는 가공이 가능하였다고 할 수 있다. 세라믹의 선삭 메커니즘은 취성과파괴가 주가 될 것이라는 예상과는 달리 소성변형에 의해 정상적인 선삭가공도 가능하다는 것을 보여준다.

Fig. 9 는 재료제거율에 따른 절삭력비를 나타낸 그림으로서 Fig. 9(a)는 배분력/주분력의 비율, Fig. 9(b)는 이송분력/주분력의 비율을 나타내고 있다. 미국 Purdue 대학의 신영철 교수^{9,11,12}에 의하면 일반적으로 절삭력비(F_t/F_c , F_f/F_c)는 가공물의 온도 증가에 따라 줄어들며, 1 이하에서 소성변형을 한다는 연구결과를 제시하였다.

본 실험조건하에서는 양의 경사각을 가지는 TypeB 의 경우 대부분 1 이하의 값을 지니는 반면 음의 경사각을 가지는 Type A 의 공구는 전체적으로 F_t/F_c 가 1 이상의 값을 가졌고 절입깊이가 깊어 재료제거율이 높은 영역에서는 F_t/F_c 가 1 을 초과 하였다. 특히 높은 F_t/F_c 값은 공구하단의 응력발생 으로부터 기인되는데 배분력의 증가로 인하여 채

터링이 발생되는 원인이기도 하다. 본 실험은 상기 실험을 통해서 세라믹의 예열선삭시 양의경사각을 갖는 공구가 음의 경사각을 갖는 공구에 비해 절삭특성이 우수하다는 것을 보여주었다. 또한 가공물의 온도를 높임으로써 재료의 연성이 높아지며 이에 따라 연성 재료의 가공이 유리한 양의 경사각의 공구가 바람직하다는 것을 알 수 있었다.

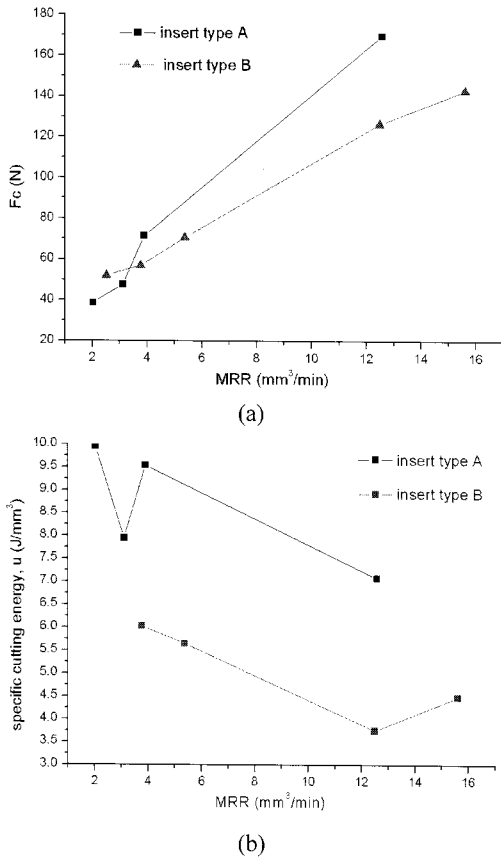


Fig. 8 Experimental measured (a) main cutting forces and (b) specific cutting energy as a function of MRR and insert type

4. 결론

본 연구에서는 기존의 Purdue 대학의 연구결과를 기반으로 하여 예열온도, 절삭속도 및 초점크기 등의 초기변수를 선정하였고 레이저(HPDL), 공구의 경사각 및 초점모양(4X4mm)의 변수를 차별화하여 실험하였다.

실험결과 양의 경사각인 경우 음의 경사각에

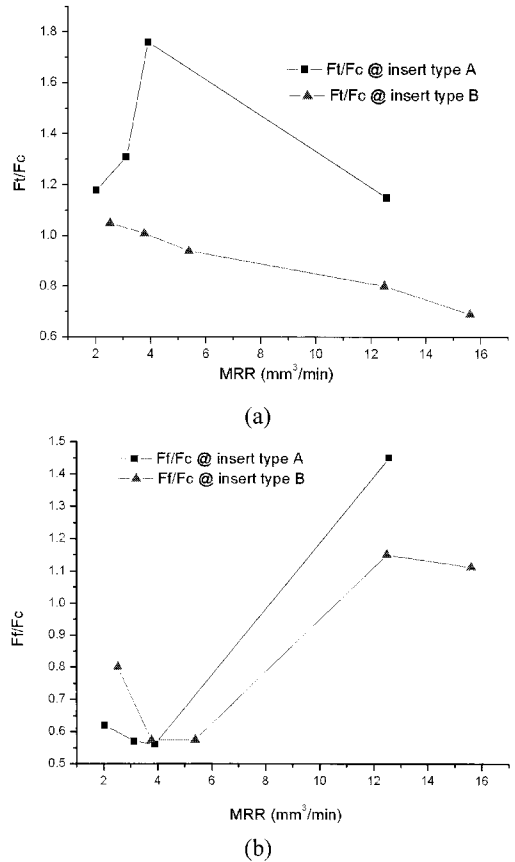


Fig. 9 Ratio of main cutting forces and (a) thrust forces and (b) feed forces as a function of MRR and insert type

비해 채터링이 발생할 확율은 낮았으며 전체적으로 절삭력이 낮고 안정적으로 가공이 이루어졌다. 특히 재료제거율(MRR)에 따른 주분력의 경우 양의 경사각이 음의 경사각에 비해 현저히 낮은 값을 가진다는 것을 알 수 있었다. 즉 비절삭에너지가 최소 $3.5\text{J}/\text{mm}^3$ 까지 낮아져 유동형칩생성에 유리한 조건을 가진다는 것을 알 수 있었다.

한편 절삭력비(F_t/F_c , F_f/F_c)의 경우 가공온도의 증가에 따라 줄어든다는 기존 연구결과에 추가하여, 경사각의 증가에 따라 낮아져서 칩성파괴현상을 최소화 할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

본 실험에서 사용된 범용선반기계는 기어비를 통한 한정적인 변수의 선정만이 가능하므로 좀더 다양한 가공조건을 제시 못하였다. 추후에는 이 한계를 극복한 CNC 를 이용하여 절삭조건을 더욱 다양화하여 실험할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지역산업기술 개발 사업인 “레이저 복합가공기 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Rozzi, J. C., Pfefferkorn, F. E., Shin, Y. C. and Incropera, F. P., “Experimental Evaluation of the Laser Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 122, No. 4, pp. 666-670, 2000.
2. Lei, S., Shin, Y. C. and Incropera, F. P., “Experimental Investigation of Thermo-Mechanical Characteristics in Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 123, No. 4, pp. 639-646, 2001.
3. Yinggang, T. and Shin, Y. C., “Laser-Assisted Machining of Damage-Free Silicon Nitride Parts with Complex Geometric Features via In-Process Control of Laser Power,” *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 89, No. 11, pp. 3397-3405, 2006.
4. Lei, S., Shin, Y. C. and Incropera, F. P., “Deformation mechanisms and constitutive modeling for silicon nitride undergoing laser-assisted machining,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, No. 15, pp. 2213-2233, 2000.
5. Jankowiak, M. and Bartkowiak, K., “Machinability of Laser Heated Silicon Nitride Ceramics during a Turning,” *Proceedings of ICALEO 2006*, pp. 311-315, 2006.
6. Rozzi, J. C., Pfefferkorn, F. E., Incropera, F. P. and Shin, Y. C., “Transient, three dimensional heat transfer model for the laser assisted machining of silicon nitride I,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 8, pp. 1409-1424, 2000.
7. Rozzi, J. C., Incropera, F. P. and Shin, Y. C., “Transient, three dimensional heat transfer model for the laser assisted machining of silicon nitride II,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 8, pp. 1425-1437, 2000.
8. Yinggang, T. and Yung, C. S., “Thermal Modeling for Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics With Complex Features,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, No. 2, pp. 425-434, 2006.
9. Tian, Y. and Shin, Y. C., “Multiscale Finite Element Modeling of Silicon Nitride Ceramics Undergoing Laser-Assisted Machining,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 129, No. 2, pp. 287-295, 2007.
10. Rebro, P. A., Shin, Y. C. and Incropera, F. P., “Design of operating conditions for crack free laser-assisted machining of mullite,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 7-8, pp. 667-694, 2004.
11. Rebro, P. A., Shin, Y. C. and Incropera, F. P., “Laser-Assisted Machining of Reaction Sintered Mullite Ceramics,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, No. 4, pp. 875-885, 2002.
12. Pfefferkorn, F. E., Shin, Y. C., Tian, Y. and Incropera, F. P., “Laser-Assisted Machining of Magnesia-Partially Stabilized Zirconia,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, No. 1, pp. 42-51, 2004.
13. Pfefferkorn, F. E., Incropera, F. P. and Shin, Y. C., “Heat transfer model of semi-transparent ceramics undergoing laser-assisted machining,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 10, pp. 1999-2012, 2005.
14. Lee, J. H., Suh, J., Shin, D. S. and Kim, S. W., “Trends of Laser Integrated Machining,” *Journal of Korea Society of Laser Processing*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-10, 2007.
15. Lee, J. H., Shin, D. S., Suh, J., Cho, H. Y. and Kim, K. W., “Trends of Laser Integrated Machine,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 9, pp. 20-26, 2008.
16. Lee, Y. M. and Lee, J. C., “Mechanics of Precision Machining Process,” *DaeGa Press*, pp. 79-95, 2008.