

질화규소의 Laser-Assisted Machining 공정에 관한 연구

A Study on Laser-Assisted Machining Process of Silicon Nitride

임세환¹, 이재훈^{1,✉}, 신동식¹, 김종도², 김주현³
Se Hwan Lim¹, Jae Hoon Lee^{1,✉}, Dong Sig Shin¹, Jong Do Kim² and Joo Hyun Kim³

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

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

3 국민대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University)

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

Manuscript received: 2008.11.19 / Accepted: 2009.2.9

In this paper, laser-assisted machining (LAM) has been employed to machine hot isostatically pressed (HIPed) Si₃N₄ workpieces. Due to little residual flaws and porosity, HIPed Si₃N₄ workpieces are more difficult to machine compared to normally sintered Si₃N₄ workpieces. In LAM, the intense energy of laser was used to enhance machinability by locally heating the workpiece and thus reducing yield strength. In experiments, the laser power ranges from 200W to 800W and the diameter of workpieces is 16mm. While machining, the surface temperature was kept nearly constant by laser heating except for a short period of rise time of max. 58 seconds. Results showed as feed rate increases the surface temperature of Si₃N₄ workpieces decreases slightly, whereas the effect of depth of cut is disregardable. With a laser power of 800W, achievable maximal depth of cut was 0.7mm and feed rate was 0.03mm/rev.

Key Words: Laser integrated Machining Center (레이저 복합가공기), Laser-assisted Machining (레이저 예열선삭), Silicon Nitride (질화규소), Cutting Force (절삭력), Flank Wear (플랭크 마멸)

기호설명

d = depth of cut(mm)

f = feed rate(mm/rev)

F_c = principal force(N)

F_f = feed force(N)

F_t = thrust force(N)

P_l = laser power(W)

T_s = measured surface temperature(°C)

u_c = specific cutting energy(J/mm³)

ϕ_{lp} = circumferential laser-pyrometer angle(°)

ϕ_{lt} = circumferential laser-tool angle(°)

1. 서론

최근 자동차, 가전제품 등의 생산업계에서는 빈번한 모델 변경으로 인해 다품종소량생산, 변종 변량생산, 단납기, 원가절감 등이 요구되고 있다. 이에 대응하여 하나의 가공 공간 내에서 다양한 가공공정을 수행할 수 있는 복합가공기의 개발이 이루어지고 있다. 특히 레이저는 정밀성, 공정의 유연성, 비접촉 가공 그리고 최소의 열영향부를 가지는 장점을 가지고 있어 기존의 기계 가공기술과의 상호 융합 보완된 형태로 발전하고 있다.¹

현재 개발중인 레이저 복합가공기는 터팅형 CNC 선반에 레이저 광학모듈을 장착하여 공정에 따라 절삭공구와 레이저 광학계를 수시로 변경할 수 있기 때문에 선삭, 드릴링 등의 절삭가공과 열처리, 마킹, 드릴링, 용접, 절단, 디버링 등의 레이

저가공을 동시 또는 순차적으로 처리함으로써 세팅시간이 단축되고 정밀도를 향상시킬 수 있다.

또한 선삭가공 시 레이저 빔으로 가공물의 절삭부위를 가열함으로써 세라믹과 같은 취성재료를 연화시켜 취성파괴를 억제하고 소성변형에 의한 절삭가공이 이루어지도록 할 수 있다. 이러한 가공법을 Laser-Assisted Machining (LAM) 이라 한다.

일반적으로 세라믹 재료는 경도가 높아 연삭이나 다이아몬드 가공 공정을 통해 생산되어 왔다.^{3,6} 이러한 공정은 높은 강성을 갖는 공작기계가 요구될 뿐만 아니라 공구마멸율이 높고 재료제거율이 (MRR, Material Removal Rate) 낮아 생산단가가 높아지는 문제를 갖기 때문에 대체공정으로 LAM에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Rozzi, J.C. 등^{9,11} 은 질화규소의 LAM 실험을 통해 가공조건에 대한 영향분석, 칩과 가공표면 특성에 대해 연구하였고, 3 차원 열전달 시뮬레이션을 통해 가공부위의 온도를 예측하였다. Lei, S. 등^{7,8} 은 SEM 을 이용하여 가공 메커니즘을 규명하고 온도에 따른 질화규소의 거동을 수학적으로 모델링하였으며, 실험을 통해 공구수명에 대한 연구를 수행하였다. Tian, Y. 등^{12,13} 은 3 차원 열전달 시뮬레이션을 통해 절삭깊이에 따른 온도를 예측하여 복잡한 형상을 가공하였고, multiscale FEM 을 통해 질화규소의 절삭공정 중 칩생성과 파괴거동에 대해 연구하였다. 이러한 많은 연구들은 기존의 세라믹 가공법인 연삭공정에 비해 높은 MRR 과 우수한 표면 품질을 얻을 수 있으며, 가공비용 역시 감소됨을 보였다.

기존의 실험⁷⁻¹³ 에 사용된 가공기는 레이저와 선삭용 인서트가 이루는 각도(ϕ_{in})가 55°로 한정되어 있어 개발중인 레이저 복합가공기와는 구조적인 차이를 가지고 있다. 실험에 사용된 질화규소 시편 또한 직경이 8.5mm 이하인 소결품으로 제한적이며, 실험 테이더 또한 한정적이어서 가공조건에 따른 온도와 절삭특성을 파악하기 어렵다.

본 연구에서는 레이저 복합가공기를 이용하여 직경이 16mm 이고 Hot Isostatic Pressing(HIP) 처리된 질화규소 시편의 LAM 실험을 수행하였고, 이를 통해 레이저와 선삭의 공정 파라미터가 시편온도와 절삭특성에 미치는 영향을 분석하였다. 레이저는 5mm x 5mm 의 사각빔을 사용하였고, 가공 전 58 초 동안 레이저를 조사하여 가공부위를 충분히 예열하였다. 총 이송거리는 20mm 로 하여 가공조건에 따른 온도, 절삭력, 공구의 마멸과 파손 유무

등을 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 레이저는 HPDL(LASERLINE, LDF1000-2500)로 910nm 와 980nm 의 파장을 가지는 연속파로 발진되는 다이오드 레이저빔을 커플링 하였으며 최대 출력은 2.5kW 이다. 레이저 빔은 광파이버를 통해 복합가공기의 광학모듈로 이송된다. Fig. 1 은 리볼버형 광학모듈로서 ① 리볼버, ② 동적초점거리 조절장치, ③ Tilting 구동부의 세가지 모듈로 구성된다. 리볼버 모듈을 통해 공정에 따라 사각빔(rectangular beam), 원형빔(circular beam), 선형빔(line beam) 등의 다양한 빔형상을 구현할 수 있는 광학계를 교체할 수 있다. 동적초점거리 조절장치는 콜리메이팅 렌즈(collimating lens)와 집속 렌즈(focusing lens)로 구성되며 두 렌즈의 거리를 통해 빔의 크기와 초점거리를 조절하는 기능을 한다. Tilting 구동부는 웜기어를 통해 광학모듈 본체를 회전시켜 레이저빔의 입사각을 제어하기 위해 사용된다.

복합 공정을 개별/연속적으로 수행하기 위해서 레이저 광학모듈과 터릿의 좌표계가 독립적으로 갖추어져 있다. 또한, 공작물, 레이저, 절삭공구 등의 세팅작업을 용이하게 하고, 공정의 이상유무를 즉시 관찰할 수 있어야 하며, 안전성이 확보하기 위해서는 광학헤드와 선반용 터릿 간의 간섭이 발생되지 않아야 한다. 이러한 요구사항들을 만족시키기 위해서 광학헤드의 위치는 공작물의 상단에, 절삭공구가 장착될 터릿의 위치는 공작물의 하단에 각각 배치되어 레이저빔과 선삭용 인서트가 이

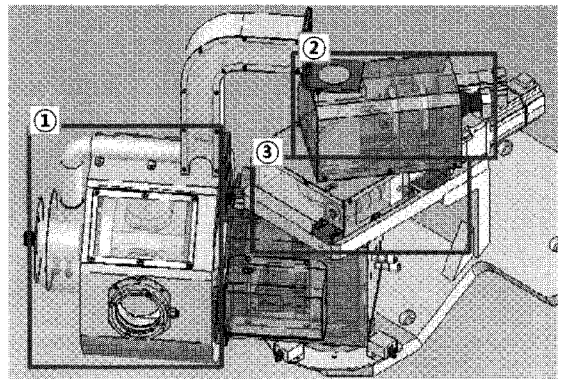


Fig. 1 Optic module for laser integrated machining center

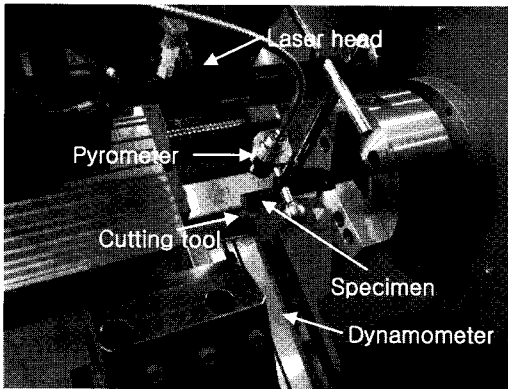


Fig. 2 Experimental system for laser-assisted machining of silicon nitride

루는 각도(ϕ_{fl})는 180° 가 되며, 레이저빔과 고온계 측정부가 이루는 각도(ϕ_{ip})는 90° 이다.

Fig. 2 는 실험을 위해 세팅된 복합가공기 내부 구조이다. 절삭력 측정에는 Kistler 사의 9257B type 공구동력계(dynamometer)가 사용되었으며, 주분력(F_c), 배분력(F_f), 이송분력(F_f)을 1 초에 5 회 샘플링 하여 실시간 계측하였다. 시편표면의 온도측정에 사용된 고온계(pyrometer)는 Kleiber 사의 KGAF 730 모델로 사용되는 파장은 $1.58\sim 2.2 \mu\text{m}$ 이며 측정범위는 $300\sim 2300^\circ\text{C}$ 이다.

2.2 절삭공구 및 피삭재

실험에 사용된 절삭공구는 Taegutec 사의 CNMA 120408 LN TB650 모델로 외경가공에 널리 사용되는 선삭용 인서트로서 음의 경사각을 가지며 재료는 CBN(Cubic Boron Nitride)이고 노즈반경은

Table 1 Mechanical and thermal properties of silicon nitride

Vickers hardness (GPa)	14
Flexural strength (MPa)	610-880
Compressive strength (MPa)	3820
Young's modulus (GPa)	290-300
Poisson's ratio	0.28
Fracture toughness ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	5-6
Coefficient of linear thermal expansion ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	2.6-3.2
Thermal conductivity (W/mK)	20-30
Specific heat (J/kgK)	660
Density (kg/m^3)	3200

0.8mm 이다. 공구홀더는 PCLNR-2525 모델을 사용하였다.

질화규소 시편의 크기는 직경 $\Phi 16\text{mm}$, 길이 150mm 이며 정수압 성형후 HIP 공정을 통해 제작되었으며 육각기둥 형상을 갖는 90wt%의 Si_3N_4 입자와 10wt%의 YSiAlON glass 로 구성된다. HIP의 장점은 균일하고 미세한 입자를 얻을 수 있고, 내부 결함이나 공극이 적기 때문에 소결품에 비해 높은 강도를 얻을 수 있다.¹⁴ 실험에 사용된 HPDL의 파장(910, 980nm)에 대한 질화규소의 흡수율은 0.7 로 알려져 있으며, 제조사에서 제공한 질화규소의 물성치는 Table 1 과 같다.

3. 예열실험

기존의 연구⁷⁻¹³ 에서의 절삭속도가 약 24~40m/min 이었던 점을 감안하여, 본 실험에서의 회전속도를 620rpm(절삭속도=31.16m/min)으로 결정하였다. 가공이 시작되는 시편 끝단을 레이저빔으로 58 초 동안 예열한 후 70mm 이송하였다. 고온계는 레이저빔과의 각도($\phi_{ip}=90^\circ$)를 유지한 상태에서 동시에 이송하였다.

Table 2 와 같이 레이저빔의 출력을 200W 에서 800W 까지 200W 간격으로 증가시키고, 각각의 레이저 출력에 대하여 이송속도를 0.013, 0.024, 0.03 mm/rev 로 증가시켰다. Fig. 3 과 같이 레이저 조사가 시작되면서 시편 표면의 온도가 급격하게 증가하다가 그 기울기가 점차 감소하였고 일정온도에서 수렴하는 경향을 보였다.

Table 2 Experimental conditions for preheat test and measured surface temperatures($\phi_{ip}=90^\circ$)

No.	P_l (W)	f (mm/rev)	T_s ($^\circ\text{C}$)
1	800	0.013	1632
2	800	0.024	1620
3	800	0.03	1562
4	600	0.013	1485
5	600	0.024	1420
6	600	0.03	1394
7	400	0.013	1286
8	400	0.024	1230
9	400	0.03	1147
10	200	0.013	888
11	200	0.024	812
12	200	0.03	781

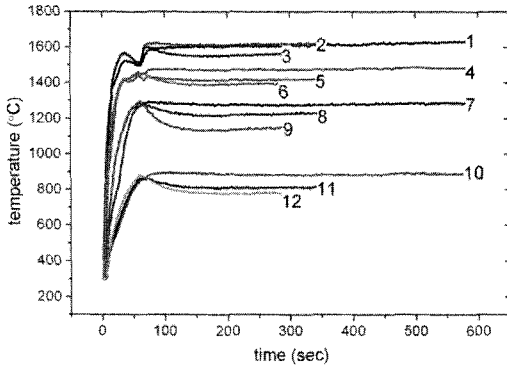


Fig. 3 Surface temperature histories during the preheat tests ($\phi_p=90^\circ$)

58 초간 시편의 끝단을 예열한 후 20mm 의 이송을 시작하였다. 이송속도가 0.013mm/rev 인 조건에서는 이송이 진행되는 동안 그 온도를 유지하였다. 이송속도가 증가함에 따라 시편에 축적되는 열에너지가 감소하기 때문에 온도가 점차 감소하는 경향을 보였으나 90 초 후부터는 일정 온도를 유지하였다. 이를 통해 레이저빔 출력과 이송속도에 따라 각각의 수렴온도를 가지고 있음을 알 수 있다. 그래프 우측의 번호에 대한 실험조건은 Table 2 와 같으며 수렴온도는 T_s 값이다.

Table 3 Experimental conditions for laser-assisted machining

No.	P_l (W)	d (mm)	f (mm/rev)
13	200	0.3	0.013
14	400	0.3	0.013
15	600	0.3	0.013
16	600	0.5	0.013
17	600	0.7	0.013
18	600	0.9	0.013
19	800	0.3	0.013
20	800	0.5	0.013
21	800	0.7	0.013
22	800	0.9	0.013
23	600	0.5	0.024
24	600	0.5	0.03
25	800	0.3	0.024
26	800	0.3	0.03
27	800	0.7	0.024
28	800	0.7	0.03

4. 가공조건에 따른 표면온도 및 절삭특성

Table 3 과 같이 13 번부터 28 번까지 16 개의 조건에 대하여 절삭실험을 수행하였다. 시편의 회전 속도는 예열실험과 마찬가지로 620rpm 이며, 총 이송거리는 20mm 이다. 절삭력과 온도측정을 통해 레이저 출력, 절삭깊이, 이송속도가 표면온도, 절삭력, 공구마멸 등에 미치는 영향을 분석하였다.

4.1 레이저 출력의 영향

Fig. 4 는 58 초 동안의 예열과 20mm 의 선삭가공 동안 온도를 측정된 결과이다. 예열실험에서의 결과와 마찬가지로 레이저 출력이 증가함에 따라 표면온도가 상승하였다.

절삭력은 Fig. 5(a)와 같이 온도가 가장 높은 800W 에서 가장 낮았으며 3 가지 절삭분력 중에서는 배분력이 가장 높았다. 온도가 감소함에 따라 절삭력이 점차 증가하였으며 400W 이하에서 배분력이 급격하게 상승하였다. Fig. 6, 7 과 같이 레이저 출력이 감소함에 따라 플랭크마멸 역시 증가하였으며 200W 에서는 공구가 파손되었다.

Lei, S. 등⁷은 레이저 LAM 에서의 절삭 메커니즘을 다음과 같이 설명하였다. 시편이 레이저에 의해 가열되어 온도가 YSiAlON 의 유리 전이온도 (glass transition temperature)인 920~970°C 를 초과하게 되면 Si_3N_4 입자 사이에 존재하는 YSiAlON glass 의 점성(viscosity) 유동으로 인해 봉(rod) 형상의 Si_3N_4 입자는 슬립(slip)이 발생되어 칩의 유동 방향으로 재배열되지만, 입자 자체의 변형은 발생하지 않는다. 이러한 강체(rigid body) 거동을 하는 Si_3N_4 입자들로 인해 CBN 인서트의 플랭크면과 가공면 사이에 높은 접착력이 발생하게 된다.

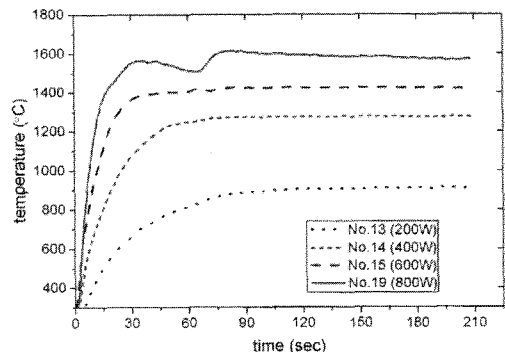
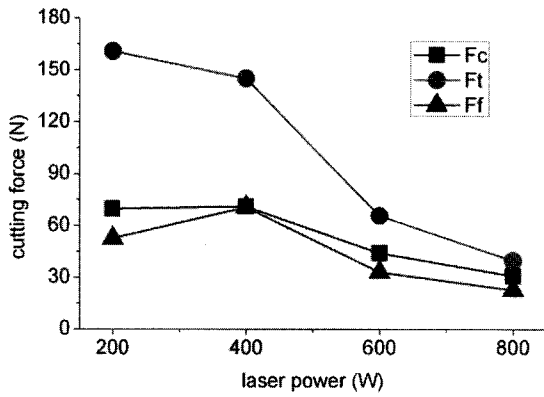
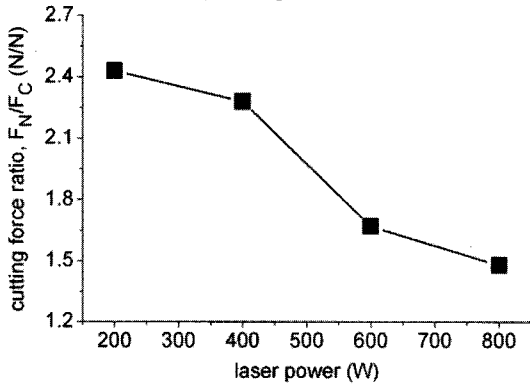


Fig. 4 Surface temperature histories for different laser power ($\phi_p=90^\circ$)



(a) cutting forces



(b) cutting force ratio

Fig. 5 Effect of laser power on the cutting force components ($d=0.3\text{mm}$, $f=0.013\text{mm/rev}$)

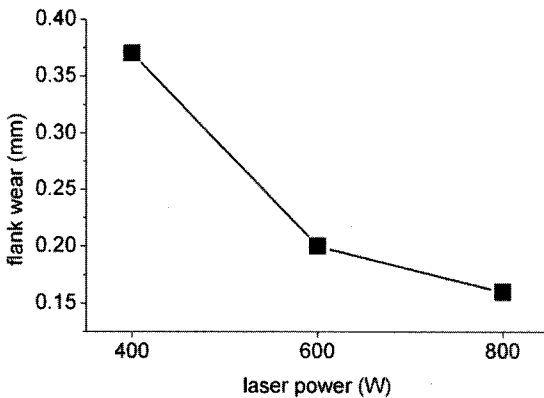
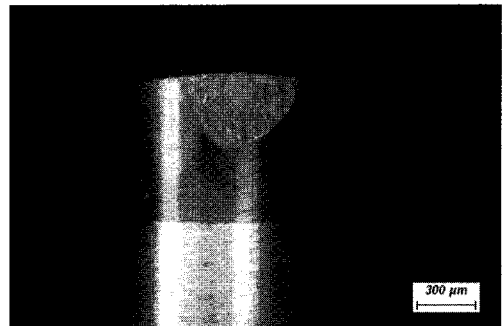


Fig. 6 Effect of laser power on the flank wear ($d=0.3\text{mm}$, $f=0.013\text{mm/rev}$)

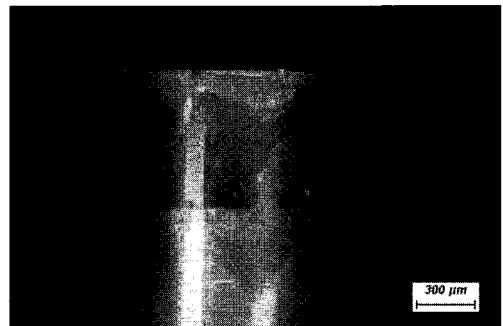
Fig. 5(b)는 주분력 F_C 에 대한 수직분력(배분력과 이송분력의 합력) F_N 의 비율인 절삭분력 비율 (cutting force ratio)을 비교한 것이다.



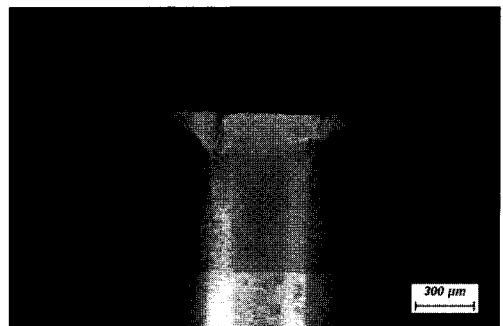
(a) 200W



(b) 400W



(c) 600W



(d) 800W

Fig. 7 Optical micrographs of tool flank wear or fracture

출력이 증가함에 따라 온도가 증가로 인해 YSiAlON glass 의 점성이 감소하게 되어 Si₃N₄ 입자의 재배열이 활발히 일어나게 되므로 절삭분력 비율(F_N/F_C)이 감소한 것으로 사료된다.

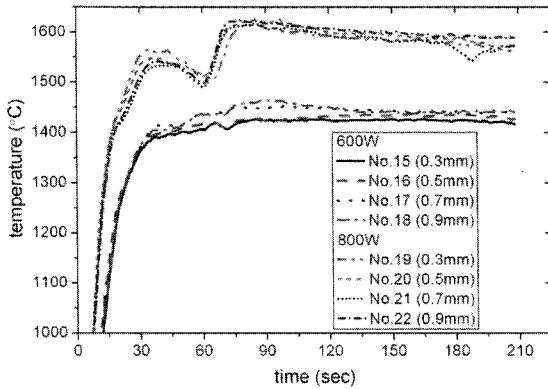


Fig. 8 Surface temperature histories for different depth of cut ($\phi_{ip}=90^\circ$)

4.2 절삭깊이의 영향

레이저빔의 출력이 600W, 800W 일 때 절삭깊이를 0.3mm 에서 0.9mm 까지 증가시켜 절삭실험을 실시하였다. Fig. 8 과 같이 각각의 레이저 출력에 대하여 절삭깊이에 따른 표면온도의 차이는 약 25°C 이내로 매우 적었다.

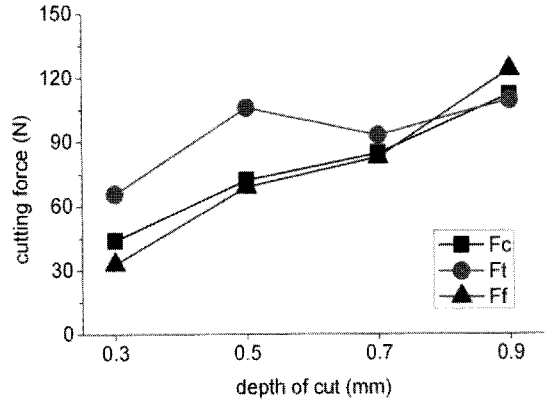
Fig. 9 의 (a), (b)와 같이 절삭깊이가 증가함에 따라 절삭력이 증가하는 경향을 보였으며, 절삭깊이가 공구의 노즈반경(0.8mm)보다 낮은 조건에서는 배분력이 가장 높았으나 0.9mm 조건에서는 배분력의 비중이 줄어들고 이송분력의 비중이 커졌다. 이는 절삭깊이의 증가함에 따라 수직력의 방향이 배분력 방향에서 이송분력 방향으로 변화되기 때문으로 사료된다.

Fig. 9(c)의 절삭분력 비율(F_N/F_C)은 절삭깊이가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 절삭깊이의 증가로 인해 절삭력이 증가하게 되는데, 이때 주분력의 증가율이 수직분력에 비해 더 높기 때문으로 사료된다.

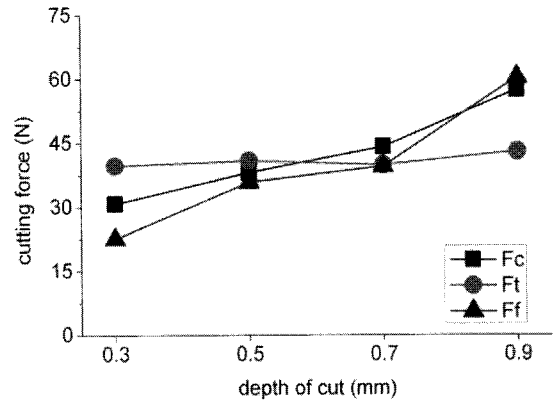
Fig. 10 과 같이 절삭깊이가 증가할수록 비절삭 에너지는 점차 감소하였다. 이는 절삭깊이가 증가할 경우 절삭력이 증가하지만 절삭력의 증가율이 절삭깊이의 증가율보다 낮기 때문으로 절삭가공에서 일반적으로 나타나는 현상이다.

Fig. 11 과 같이 절삭깊이가 증가함에 따라 공구

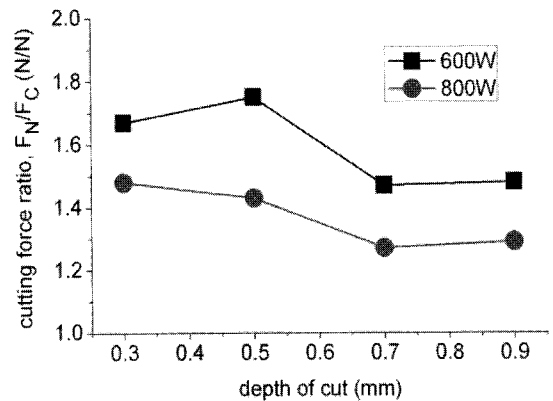
마멸이 증가하는 경향을 보였으며, 절삭깊이가 0.9mm 인 조건에서 모든 공구가 파손되었다.



(a) P₁=600W



(b) P₁=800W



(c) cutting force ratio

Fig. 9 Effect of depth of cut on the cutting force components ($f=0.013\text{mm/rev}$)

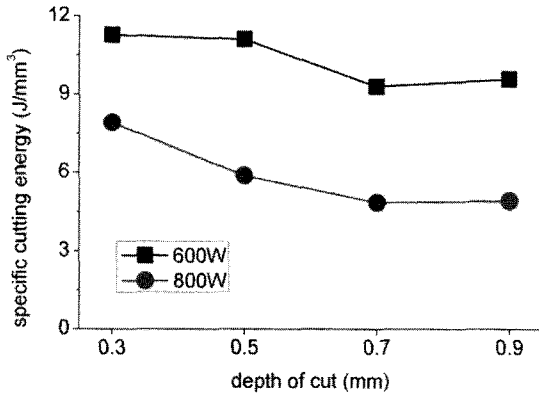


Fig. 10 Effect of depth of cut on the specific cutting energy ($f=0.013\text{mm/rev}$)

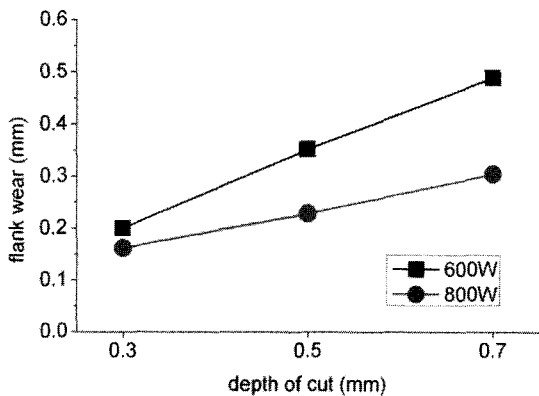


Fig. 11 Effect of depth of cut on the tool flank wear ($f=0.013\text{mm/rev}$)

4.3 이송속도의 영향

레이저빔의 출력이 600W 일 때 절삭깊이를 0.5mm 로 하고 800W 인 경우는 절삭깊이를 0.3mm, 0.7mm 로 설정하여 각각의 조건에서 이송속도를 0.013, 0.024, 0.03mm/rev 로 증가할 때의 표면온도를 비교하였다. 이송속도가 0.013mm/rev 에서 0.024, 0.03mm/rev 로 증가함에 따라 이송 중 시편에 축적 되는 열에너지는 54, 43%로 각각 감소하게 된다. 그 결과로 인해 Fig. 12 와 같이 이송속도가 증가함에 따라 온도가 점차 감소하였으며, 20mm 의 이송이 끝나는 지점에서의 온도는 600W 의 조건에서 약 37°C, 800W 의 조건에서 약 80°C의 차이를 보였다.

Fig. 13 의 (a) ~ (c)와 같이 이송속도가 증가함에 따라 온도의 감소와 미분형칩두께의 증가로 인해

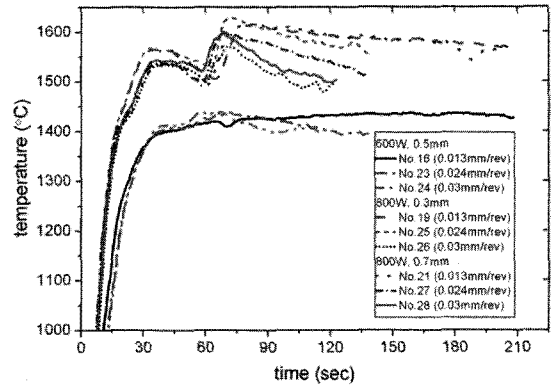
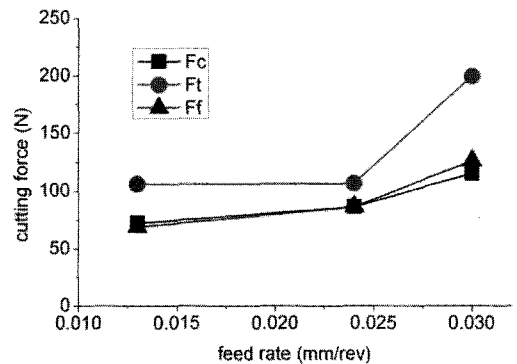
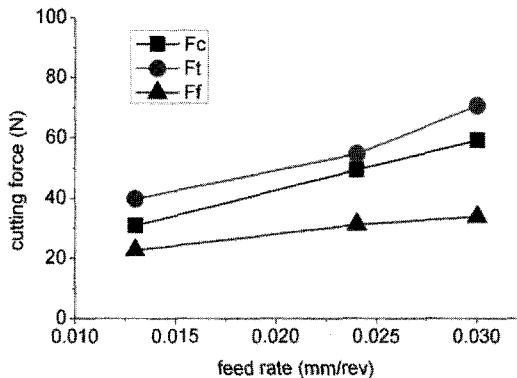


Fig. 12 Surface temperature histories for different feed rate ($\phi_p=90^\circ$)

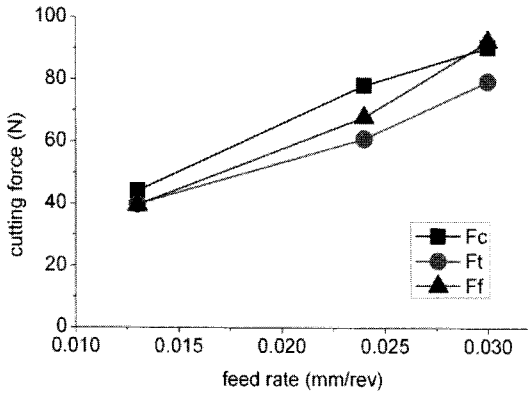
절삭력이 증가하는 경향을 보였다. 두 조건의 복합적인 영향으로 Fig. 13(d)의 절삭분력 비율(F_N/F_C)은 이송속도가 0.024mm/rev 일 때 가장 낮았다. Fig. 13 의 (b) 와 (c)의 비교에서도 Fig. 9 의 결과와 마찬가지로 절삭깊이가 증가함에 따라 배분력에 비해 이송분력의 비율이 증가하고 절삭분력 비율은



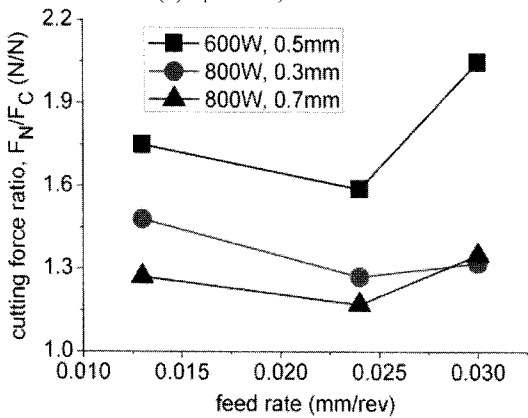
(a) $P_1=600\text{W}$, $d=0.5\text{mm}$



(b) $P_1=800\text{W}$, $d=0.3\text{mm}$



(c) P₁=800W, d=0.7mm



(d) cutting force ratio

Fig. 13 Effect of feed rate on the cutting force components (f=0.013mm/rev)

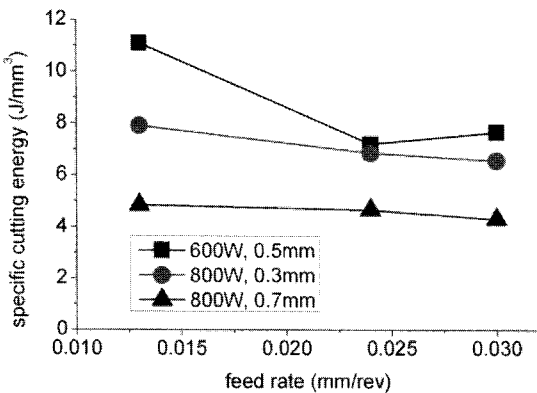


Fig. 14 Effect of feed rate on the specific cutting energy

감소하는 경향을 보였다.

Fig. 14 와 같이 이송속도가 0.013mm/rev 에서 0.03mm/rev 로 증가하는 경우 비절삭에너지는 약

70~90%로 감소하였다. 레이저 출력이 600W, 이송속도가 0.03mm/rev 인 조건에서 배분력이 증가함에 따라 Fig. 15 의 플랭크 마멸 역시 급격하게 상승하였다. 그 외의 조건에서는 이송속도가 증가할 경우 절삭시간은 감소하기 때문에 공구마멸에 큰 영향을 미치지 않았고, 800W 의 조건에서의 플랭크 마멸은 0.3mm 이내로 안정적인 경향을 보였다.

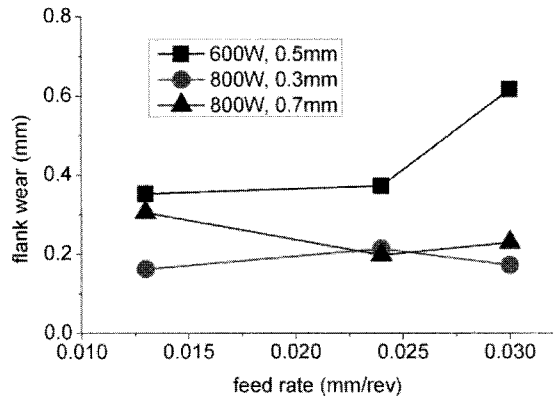


Fig. 15 Effect of feed rate on the tool flank wear

4. 결론

레이저 복합가공기를 이용한 질화규소의 LAM 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 예열실험 결과 레이저 출력이 증가하는 경우 고온계 측정부($\phi_p=90^\circ$) 에서의 표면온도가 점차 증가하였고, 이송속도가 증가하는 경우 약간 감소하였다. 레이저 출력과 이송속도가 변화함에 따라 각각의 수렴온도를 가지고 있으며 본 실험의 경우 이송이 시작된 후 온도가 수렴하는데 소요되는 시간은 최대 90 초이다.

(2) 레이저 출력의 감소로 인해 시편의 온도가 낮아지고, 그 결과로 절삭력과 플랭크 마멸이 증가하였다. 400W 이하의 조건에서 배분력 또는 이송분력이 급격하게 상승하였고 200W 의 조건에서 CBN 인서트 가 파손되었다.

(3) 절삭깊이가 증가함에 따라 절삭력과 플랭크 마멸이 증가하였으나 비절삭저항은 감소하였다. 절삭깊이가 노즈반경(0.8mm) 이하인 조건에서는 3 가지 절삭분력 중 배분력이 가장 높았으나 노즈반경보다 큰 경우 배분력의 비중이 줄어든 대신 이송분력이 커지는 경향을 보였다.

(4) 이송속도가 증가되면 측정온도가 약간 감

소하는 경향을 보였으며 절삭력은 상승하였으나, 비절삭에너지는 대체로 감소하는 경향을 보였다.

(5) 전반적으로 시편의 직경이 16mm 인 경우 레이저 출력이 800W 일 때 조건의 변화에 큰 영향을 받지 않고 안정적인 절삭이 가능하였으며, 레이저 출력이 낮을수록 조건의 변화에 민감하여 절삭력이 급격하게 상승하거나 CBN 인서트 파손될 우려가 있다.

후 기

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

참고문헌

- 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.
- Lee, J. H., “Trends of Laser Multi-Tasking Machine,” *Machine Tool, KOMMA*, Vol. 193, pp. 19-23, 2008.
- Jung, Y. G. and Kang, J. H., “Grinding Characteristic of Advanced Ceramics,” *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 105-112, 1990.
- Kwak, T. S. and Ohmori, H., “Nano-Level Mirror Surface Machining Technology for SiC Ceramics Mirror,” *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 29-36, 2006.
- Lee, E. S., Lee, S. K., Whang, K. H., Chung, M. Y. and Choy, T. G., “Development of Manufacturing Technology of Ceramics Ferrule for Optical Fiber Connector,” *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 67-72, 1992.
- Yan, J., Syoji, K., Kuriyagawa, T. and Suzuki, H., “Ductile Regime Turning at Large Tool Feed,” *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 121, Issues 2-3, pp. 363-372, 2002.
- 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.
- 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.
- Rozzi, J. C., Pfefferkorn, F. E. and Shin, Y. C., “Experimental Evaluation of the Laser Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics,” *Transactions of the ASME*, Vol. 122, No. 4, pp. 666-670, 2000.
- 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. Comparison of Predictions with Measured Surface Temperature Histories,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 8, pp. 1409-1424, 2000.
- 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: II. Assessment of Parametric Effects,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 8, pp. 1425-1437, 2000.
- Tian, Y. 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 American Ceramic Society*, Vol. 89, No. 11, pp. 3397-3405, 2006.
- 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.
- Schwartz, M. M., “Handbook of Structural Ceramics,” McGraw-Hill, Inc., pp. 6.1-6.26, 1992.