

Laser-assisted machining에서 질화규소 시편의 표면온도와 절삭특성에 관한 연구

임세환*, 이제훈*, 신동식*, 김종도**, 김주현***

*한국기계연구원 지능형생산시스템본부,

한국해양대학교 기관시스템공학부, *국민대학교 기계자동차공학부

Investigation of the Surface Temperature and Cutting Characteristics of Silicon Nitride in Laser-Assisted Machining

Se Hwan Lim*, Jae Hoon Lee*, Dong Sig Shin*, Jong Do Kim** and Joo Hyun Kim***

*Intelligent Manufacturing Systems Research Division, KIMM,

**Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University,

***School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University

ABSTRACT

In laser-assisted machining (LAM), laser beam is used to locally increase the temperature of a workpiece and thus to enhance the machinability. In order to set the temperature of the material removal area of a workpiece at an optimal value, process parameters, such as laser power, feed rate, and rotational velocity, have to be carefully controlled. In this work, the effects of laser power and feed rate on the temperature distribution of a silicon nitride rotating at a constant velocity were experimentally investigated. Using a pyrometer, temperatures at various locations of the silicon nitride were measured both in circumferential and axial directions. The measured temperatures were fitted to a quadratic equation to approximate the temperature at the cutting location. The machining results showed that cutting force and tool wear were decreased when the temperature at the cutting location was increased.

Key Words : Laser-assisted machining, silicon nitride, cutting force, pyrometer

1. 서 론

Laser-Assisted Machining(LAM)은 세라믹(ceramic)과 같이 기계적 성질이 우수한 취성재료를 레이저 열원으로 가열함으로써 재료의 파괴강도를 항복강도 이하로 감소시켜 취성파괴를 억제하고 소성변형(plastic deformation)에 의해 칩(chip)을 형성하는 절삭가공법이다. Purdue 대학¹⁶의 자료에 의하면 질화규소의 LAM을 통해 $9\text{mm}^3/\text{s}$ 의 소재제거율(material removal rate, MRR)을 얻을 수 있고, $1.8\text{mm}^3/\text{s}$ 인 연삭(grinding)에 비해 가공시간과 비용을 절감할 수 있는 장점을 얻을 수 있다.

LAM 공정은 주로 질화규소(silicon nitride),^{1,2} 지르코니아(zirconia),⁵ 물라이트(mullite),⁶ 알루미나(alumina),⁷ CGI (Compacted Graphite Iron),⁸ Inconel 718,⁹ 등의 다양한 난삭재 가공에 적용되

어 왔다.

이와 같이 적용되는 재료들은 세라믹스 재료가 주를 이루고 있기 때문에, 세라믹의 흡수율이 높은 파장을 갖는 CO₂ 레이저가 주로 사용되어 왔다. 그러나 파장이 $10.6\mu\text{m}$ 인 CO₂ 레이저에 대해서는 광파이버(optical fiber)의 투과율이 높지 못하기 때문에 미러(mirror)를 통해서 빔 전송을 해야 하므로 상용화에 어려움이 따른다. 파장이 $0.8-1\mu\text{m}$ 인 다이오드 레이저의 경우 광파이버에 의한 빔 전송이 가능하기 때문에 동작기계에 접목하기 좋은 장점을 갖는다.¹⁰

Table 1과 같이 다이오드 레이저의 파장에 대한 질화규소의 흡수율이 0.7 정도로 비교적 높다. 또한 열전도율과 파괴강도가 우수하여 열응력에 의한 파손 가능성이 적기 때문에 다이오드 레이저를 이용한 LAM 공정에 매우 유리한 재료이다.^{5,6}

LAM 공정의 파라미터(parameter) 제어를 위해서는 절삭부(material removal area) 온도 데이터가 요구되지만 칩과의 간섭, 고온계 초점조절 등 구조적인 문제로 직접적인 측정이 매우 어렵다. 이와 같은 이유로 임의의 한 지점에서 온도를 측정하여 절삭부의 온도를 예측하는 방법을 고려했다.^{11,12}

Table 1 Spectral absorptivity of silicon nitride ceramic.¹⁴

wavelength (μm)	absorptivity
0.3-0.6	0.6-0.7
1.06	0.6-0.8
10.6	0.9

본 연구에서는 질화규소의 LAM 공정에서 임의의 측정부 온도와 실제 절삭부 온도의 상관관계를 분석하였다. 절삭가공을 하지 않은 상태에서 레이저의 예열과 축방향 이송 동안 회전하는 시편의 원호방향과 이송방향의 온도분포를 측정하였다. 이를 통해 측정부 온도를 통해 절삭부의 온도를 예측하기 위한 기초를 마련하였고, 절삭부 온도가 질화규소의 절삭성(machinability)에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 LAM 실험장치의 기본 구조이다. 레이저 빔 열원으로 회전하는 공작물 상단의 온도를 증가시켜 재료를 연화시킨 후 좌측의 CBN 인서트(insert)의 축방향 이송을 통해 선삭가공이 이루어진다.

레이저빔과 절삭공구가 이루는 각도 ϕ_{lt} 는 90° 이며 이송방향 거리 L_{lt} 는 2.3mm이다. 온도 측정을 위한 고온계가 레이저빔과 이루는 각도 ϕ_{lp} 는 45° 이며 이송방향 거리 L_{lp} 는 0mm이다. 실험에 사용된 선반은 화천기공(주)사의 WL-380B 모델로 레이저빔과 절삭공구는 하나의 이송장치에 의해 동시에 이송되며 거리 L_{lt} 는 수동으로 설정할 수 있다.

질화규소의 LAM 공정에서 알려진 적정 이송속도는 $0.01 \sim 0.04\text{mm/rev}$ 이다.^{1,2} 이는 일반적인 절삭가공 조건의 1/10 정도로 매우 느리기 때문에 선반의 이송축 기어비를 개조하여 0.013, 0.024, 0.03mm/rev으로 세팅이 가능하도록 하였다.

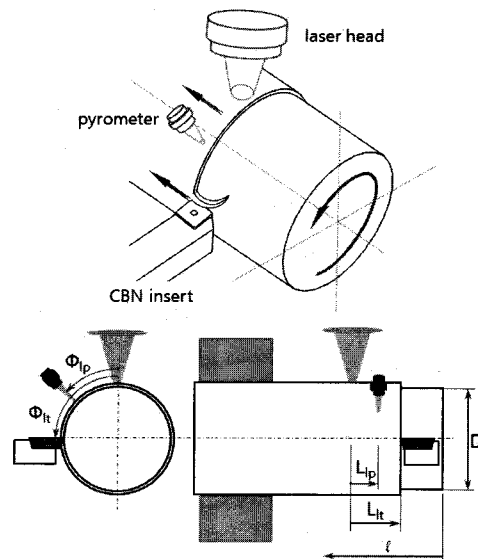


Fig. 1 Schematic diagram for laser-assisted machining experiment.

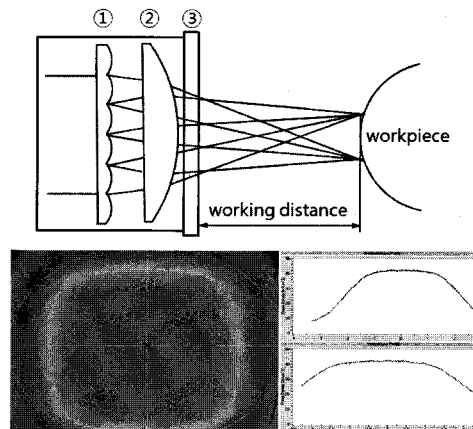


Fig. 2 Beam profile of the fiber coupled high power diode laser (working distance = 158mm).

레이저는 LASERLINE사의 LDF 1000-2500 모델로 910nm와 980nm의 파장을 가지는 연속파로 발진되는 다이오드 레이저빔을 커플링 하였으며 최대 출력은 2.5kW이다. Fig. 2와 같이 광파이버를 통해 전송된 레이저 빔은 ①호모지나이저(homogenizer)를 통해 레이저빔을 분할한 후 ②집속렌즈(focusing lens)와 ③윈도우(window)를 거쳐 균일한 출력밀도(power intensity)를 갖는 4각형 빔을 얻게 된다. 4각빔 중앙의 약 3mm는 균일한 출력밀도를 가지며 그 외부의 영역에서는 출력밀도가 선형적으로 감소하는 형상을 갖는다.

본 연구의 작업거리(working distance)는 광학계의 윈도우에서 시편의 표면까지의 158mm이다. 시편표면에서의 빔폭은 최대출력밀도의 50%를

기준으로 X축 4.67mm, Y축 4.52mm이며, 거리가 10mm 감소할 경우 출력밀도가 빔의 중심으로 밀집되어 빔폭이 약 10% 감소한다. 시편의 표면이 원통형이므로 레이저빔의 중심에서 멀어질수록 작업거리가 증가하게 된다. 균일한 출력분포를 갖는 3mm 영역에서는 약 0.14mm, 최대출력밀도의 50% 영역에서는 약 0.3mm의 거리차이가 발생하게 된다. 이 영역에서는 빔의 형상의 차이가 0.5% 이내로 매우 적을 것으로 예상되며, 레이저빔의 조사부에서 절삭부까지 시편이 회전하는 동안 열전달이 발생되기 때문에 곡면으로 인한 초점거리의 변화는 절삭부 온도에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

절삭력 측정에 사용된 공구동력계(dynamometer)는 Kistler사의 9257B type으로 공구홀더에 장착되며 주분력(F_c), 배분력(F_t), 이송분력(F_f)을 1초에 5회 샘플링하여 실시간 계측하였다. 시편표면의 온도측정에 사용된 고온계는 Kleiber사의 KGAF 730 모델로 사용과장은 1.58-2.2 μm 이며 측정범위는 300-2300 $^{\circ}\text{C}$ 이다.

2.2 절삭공구 및 피삭재

실험에 사용된 절삭공구는 Taegutec사의 CNMA 120408로 외경가공에 널리 사용되는 선삭용 인서트로서 음의 경사각을 가지며 재료는 CBN(Cubic Boron Nitride)이고 노즈반경은 0.8mm이다. 공구홀더로는 PCLNR-2020모델을 사용하였다.

질화규소 시편의 크기는 직경 16mm, 길이 150mm이며 정수압 성형후 Hot Isostatic Pressing (HIP) 공정을 통해 제작되어 육각기둥 형상을 갖는 90wt%의 Si_3N_4 입자와 10wt%의 YSiAlON glass로 구성된다. HIP 공정의 장점은 균일하고 미세한 입자를 얻을 수 있으며, 내부 결함이나 공극이 적기 때문에 일반 소결공정에 비해 높은 강도를 얻을 수 있다.¹³ 제조사에서 제공한 질화규소의 물성치는 Table 2와 같다.

2.3 실험방법

질화규소의 LAM을 수행하기 위해서는 절삭가공을 시작하기 전에 레이저 예열이 필요하다. 이는 시편이 회전하는 상태에서 가공이 시작되는 끝단을 가열하여 일정수준의 온도에 도달시켜 안정적으로 절삭가공을 진행하기 위한 것이다. 예열하

는 동안 시편 끝단에서 레이저빔의 중심까지의 거리(Fig. 1의 l)를 2mm로 세팅하였고, 직경이 16mm인 질화규소 시편의 경우 58초 예열 후 포화온도(saturation temperature)에 도달하였다.

다양한 레이저 출력과 이송속도에 대하여 다음과 같이 온도측정 실험을 수행하였다. 원호방향 온도분포 측정에서는 예열과 이송동안 레이저빔과의 상대위치(ϕ_p, L_p)를 유지한 상태에서 온도변화를 측정하였고, 축방향 온도분포 측정에서는 레이저빔의 이송과 관계없이 고정된 위치(시편 끝단에서의 거리, $l = 12\text{mm}$)를 측정하는 고온계를 통해 레이저빔이 지나가는 시점의 축방향 온도분포를 측정하였다. 또한, 절삭실험을 통해 온도에 따른 절삭력과 플랭크 마모(flank wear)의 변화를 분석하였다.

Table 2 Thermal and mechanical properties of silicon nitride.

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

절삭가공시 채터링을 예방하기 위해서 시편길이 짧을수록 유리하지만 이 경우 동작기계로의 열전달이 우려된다. 이를 고려하여 시편 끝단에서 척(chuck)까지의 길이는 80mm로 세팅하였고 총 절삭이송 거리는 20mm로 하였다.

기존의 연구에서 절삭속도가 약 24-40m/min 이었던 점을 감안하여 시편의 회전속도를 620rpm (절삭속도 31.16m/min)로 선정하였으며, 반경방향으로의 절삭깊이는 시편의 깊이방향 온도차에 따른 절삭특성 차이가 발생하지 않도록 0.3mm으로 선정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 레이저 출력과 이송속도에 따른 온도비교

레이저빔의 출력이 400, 500, 600W인 조건과 이송속도가 0.013, 0.024, 0.03mm/rev인 조건에 대하여 예열 후 20mm 이송하는 동안 측정부(Φ_p

= 45°, $L_{ip} = 0\text{mm}$)의 온도변화를 측정하였다. Fig. 3과 같이 예열이 시작되면서 온도가 급격히 증가하였고 그 기울기는 점차 감소하였고, 58초 예열 후 이송을 시작하였다.

이송속도가 0.013mm/rev인 조건에서는 이송하는 동안 그 온도를 유지하였으나 이송속도가 증가함에 따라 온도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 동일한 이송거리 20mm에 대하여 이송속도가 0.013mm/rev에서 0.024, 0.03mm/rev로 증가하는 동안 시편에 축적되는 에너지는 54, 43%로 각각 감소하기 때문이다.

20mm의 이송이 끝나는 시점에서의 온도는 400, 500, 600W의 출력에 대하여 각각 1352, 1483, 1600°C이며 500W에 대해 이송속도가 0.013mm/rev에서 0.024, 0.03mm/rev로 증가함에 따라 각각 60, 100°C 감소하였다.

3.2 원호방향 온도분포

레이저 출력 500W, 이송속도 0.013mm/rev인 조건에서 고온계 측정부의 각도 Φ_{ip} 의 변화에 따른 온도를 측정하였다.

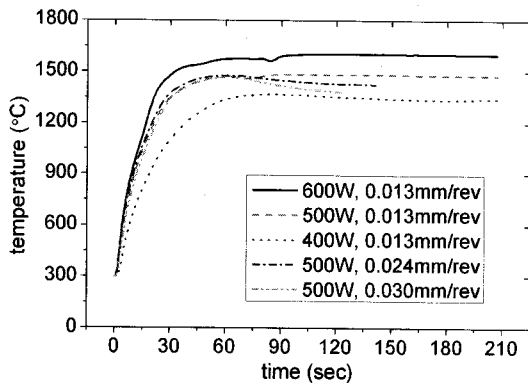


Fig. 3 Surface temperature histories for different laser power.

Fig. 4와 같이 다양한 각도에서 공통적으로 58초 예열동안 표면온도가 일정수준에 도달하였고 이송 동안 그 온도를 유지하였다. Fig. 5는 레이저빔이 10mm 이송한 시점(Fig. 4의 약 130초)의 온도를 비교한 것이다.

레이저빔 조사부($\Phi_{ip} = 0^\circ$)에 비해 레이저빔이 끝나는 지점($\Phi_{ip} = 14.25^\circ$)에서의 온도가 높고 그 이후에 온도가 점차 감소하였으며 그 감소율 역시 감소하였다.

본 연구에 사용된 레이저빔은 사각형상의 균일

한 출력분포를 갖기 때문에 -14.25° 에서 14.25° 까지 회전하는 동안 시편 표면에 동일한 에너지를 받게 된다. 이로 인해 레이저빔이 끝나는 지점까지 온도가 지속적으로 상승한 것으로 사료된다.

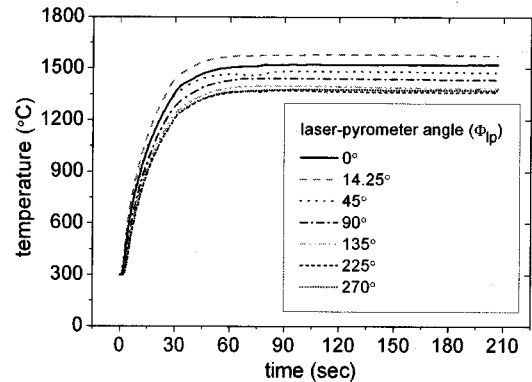


Fig. 4 Surface temperature histories for different laser-pyrometer angle(Φ_{ip}).

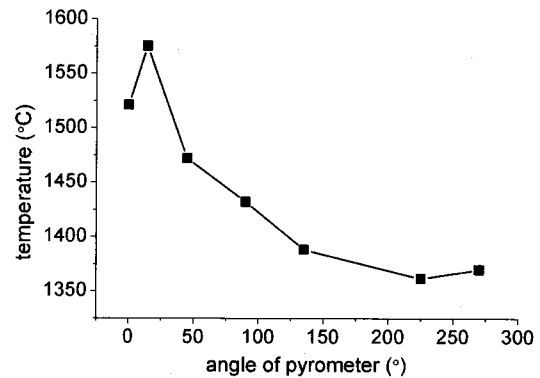


Fig. 5 Variation of surface temperature with laser-pyrometer angle (Φ_{ip}).

3.3 절삭공구 위치에서의 온도

레이저출력과 이송속도에 따른 각도별($\Phi_{ip} = 45, 90, 270^\circ$), 거리별($L_{ip} = -2.3, 0, 2.3\text{mm}$) 온도를 측정하였다. 레이저빔을 기준으로 공구방향(이송 반대방향)일 때 L_{ip} 가 양의 값을 갖는다.

Table 3은 10mm 이송한 시점에서의 측정온도이며, 각도 Φ_{ip} 와 거리 L_{ip} 가 증가함에 따라 온도가 감소하였다. $L_{ip} = -2.3\text{mm}$ 일 때의 측정온도가 2.3mm 지점의 온도 보다 낮은 것은 레이저빔의 중심과 절삭공구 사이의 한 지점에 축방향 최대 온도가 위치함을 의미한다. T/T_{45° 는 각각의 조건에 대한 측정부의 위치($\Phi_{ip} = 45^\circ, L_{ip} = 0\text{mm}$)에서의 온도를 기준으로 하는 각도별, 거리별 온도차를 나타낸 것이다. 절삭부($\Phi_{it} = 90^\circ, L_{it} = 2.3\text{mm}$)의 온도는 측정부 온도의 약 91%이며, 레

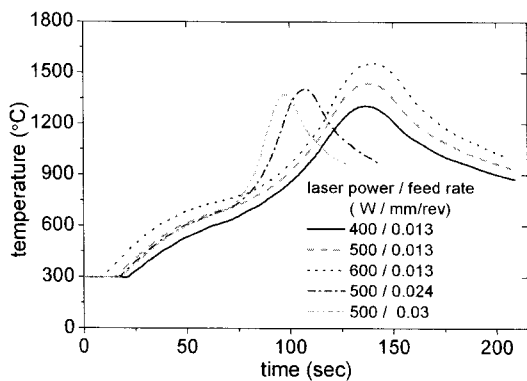
Table 3 Temperatures with laser-pyrometer angle (Φ_{lp}) and laser-pyrometer lead distance (L_{lp}).

Φ_{lp} (°)	L_{lp} (mm)	laser power (W) / feed rate (mm/rev)					T/T_{45°	error (%)
		500/0.013	600/0.013	400/0.013	500/0.024	500/0.03		
45	0	1483	1604	1349	1442	1417	1.0000	-
90	0	1439	1552	1294	1398	1365	0.9660	1.12
	2.3	1314	1442	1229	1326	1302	0.9069	3.36
	-2.3	1225	-	-	-	-	0.8260	-
270	0	1377	1487	1245	1342	1299	0.9252	1.47
	2.3	1310	1402	1197	1287	1284	0.8887	3.20

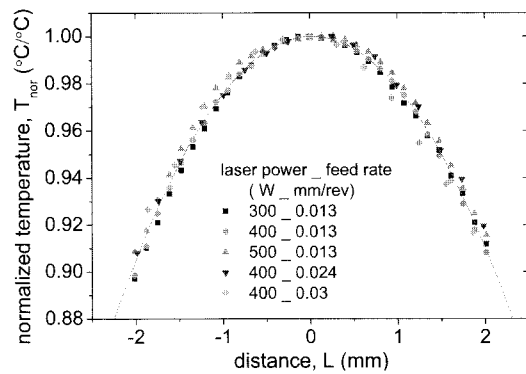
이저빔의 출력과 이송속도의 변화에 따른 오차는 약 3%이다.

3.4 축방향 온도분포

Fig. 6(a)는 10mm 이송지점(시편 끝단에서의 거리 $l=12mm$)이고 각도 Φ_{lp} 가 90° 인 지점에 고온계를 고정한 상태에서 예열 후 20mm를 이송하는 동안의 온도를 측정된 결과이다. 레이저빔이 이송하면서 온도가 점차 상승하였고 고온계의 측정위치를 지나간 후에 감소하였다. Fig. 6(b)의 세로축은 온도데이터를 각각의 조건에 대한 최대온도로 나눈 값(T_{nor})이며, 그래프의 가로축은 최대온도로부터의 거리(L)로 환산한 값이다.



(a) surface temperature histories



(b) normalized temperature distribution

Fig. 6 Surface temperature histories at fixed location ($\Phi_{lp} = 90^\circ$).

모든 조건에 대해 최대온도를 기준으로 $\pm 2mm$ 의 거리에서 유사한 온도분포를 갖는다. Fig. 6(b)에 대한 다항식 피팅(polynomial fitting) 결과는 다음과 같다.

$$T_{nor} = -0.02305L^2 + 0.00137L + 1.00014 \quad (1)$$

최대온도를 기준으로 하는 거리 L을 레이저빔의 위치를 기준으로 하는 거리 L_{lp} 로 환산하기 위하여 Table 3의 측정치($\Phi_{lp} = 90^\circ$, $L_{lp} = 0, 2.3mm$)를 Fig. 6(b)의 각 조건에 대한 최대값으로 나누었고 그 값을 Table 4 와 같다. 이를 통해 다음과 같은 두개의 좌표를 얻을 수 있다.

Table 4 Temperatures with laser-pyrometer lead distance (L_{lp}) at $\Phi_{lp} = 90^\circ$.

	laser power (W) / feed rate (mm/rev)					average
	500 / 0.013	600 / 0.013	400 / 0.013	300 / 0.024	300 / 0.03	
T_{max}	1437	1554	1304	1403	1372	-
T_{0mm}	1439	1552	1294	1398	1365	-
$T_{2.3mm}$	1314	1442	1229	1326	1302	-
T_{0mm}/T_{max}	1.00139	0.99871	0.99233	0.99644	0.99490	0.99675
$T_{2.3mm}/T_{max}$	0.91441	0.92793	0.94248	0.94512	0.94898	0.93578

$$(L_{ip}, T_{nor}) = (0, 0.99675), (2.3, 0.93578) \quad (2)$$

(2)의 두 좌표를 통해 레이저빔 중심($L_{ip} = 0\text{mm}$)으로부터의 축방향 온도분포를 (3)식과 같이 구할 수 있다. 이때 온도가 최대($dT_{nor}/dL_{ip} = 0$)가 되는 위치는 $L_{ip} \approx 0.575\text{mm}$ 이다.

$$T_{nor} = -0.02305L_{ip}^2 + 0.02651L_{ip} + 0.99675 \quad (3)$$

Table 3의 ($\Phi_{ip} = 90^\circ, L_{ip} = 0\text{mm}$)에서의 $T/T_{45^\circ} = 0.9660$ 은 시편이 45° 에서 90° 로 회전하는 동안의 온도감소율이며, Table 4의 $T_{0\text{mm}}/T_{\text{max}} = 0.99675$ 는 축방향 최대온도와 레이저빔의 중앙과의 온도차를 의미한다. 이 두 값을 통해 절삭실험의 기준이 되는 측정부의 온도가 T_{REF} 일 때의 절삭부의 온도 T_{MR} 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_{MR} = T_{REF} (T/T_{45^\circ} \times T_{0\text{mm}}/T_{\text{max}} \times T_{nor}) \quad (4)$$

LAM 공정에 있어서 원호방향과 축방향 온도분포는 다른 의미를 갖는다. 레이저와 절삭공구가 이루는 각도(Φ_{it})가 감소할 경우 Fig. 5와 같이 절삭부의 온도가 증가하기 때문에 효율을 높일 수 있지만, 레이저와 칩의 간섭, 사용자의 편의성, 동작기계의 구조에 제한을 받기 때문에 사용자가 제어할 수 없다. 반면 레이저와 절삭공구의 축방향 거리(L_{it})는 제어가 가능하다. 다만 최대온도 지점(0.575mm)에서 절삭을 수행하기 위해서는 본 연구의 실험장비와는 다르게 레이저와 절삭공구의 이송이 개별적으로 진행되어야 한다. 이를 대신하여 절삭실험에서는 L_{it} 의 증가할 경우 온도감소로 인한 절삭특성의 변화에 대하여 분석하였다.

3.5 절삭실험

온도에 따른 절삭특성의 분석을 위해 레이저빔의 출력이 400, 500, 600W인 조건과 공구의 이송방향 거리 L_{it} 가 2.3, 4, 6mm인 조건에 대한 절삭실험을 수행하였다. 58초간 시편 끝단을 예열하였고 절삭 이송거리는 20mm이다. 이송속도 0.013mm/rev과 절삭깊이 0.3mm는 동일한 조건에서 진행되었다.

Fig. 7은 예열실험에서 측정된 레이저빔의 출력별 온도와 절삭실험에서의 온도를 비교한 그래프이다. 레이저빔의 출력이 600W인 조건의 경우 레이

저빔과 칩의 간섭으로 인해 이송 중 온도가 약 37°C 감소하였으나, 그 외의 조건에서는 절삭가공에 의한 온도변화는 거의 없었다.

Rozzi, J.C. 등은^{3,4} 시편의 직경이 8.46mm 일 때 절삭속도 27m/min, 절삭깊이 1mm, 이송속도 0.01mm/rev의 조건에서 소성변형과 마찰에 의해 각각 11W와 4W의 열이 발생하고, 발생된 열에너지의 대부분이 칩을 통해 외부로 방출될 것으로 예측하였다. 이러한 가정 하에서 3차원 열전달 모델을 통해 절삭부의 국부적인 온도는 약 400°C 증가하고 칩과 시편 내부로의 열전달로 인해 절삭부 주변의 온도는 전반적으로 $50\sim 80^\circ\text{C}$ 증가함을 보였다.

본 논문에서는 시편의 직경이 16mm으로 참고 문헌^{3,4}의 2배에 가까운 크기이다. 시편의 직경이 2배 증가할 경우 동일한 절삭속도에서 시편의 회전속도는 1/2로 감소하게 되어 시편이 회전하는 동안의 열전달이 증가하게 된다. 뿐만 아니라 반경방향으로의 온도차 역시 증가하게 되므로 소성변형과 마찰에 의한 열이 시편의 온도분포에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 사료된다.

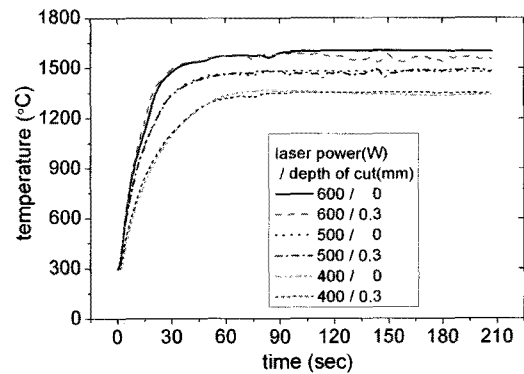


Fig. 7 Surface temperature histories for different laser power and depth of cut.

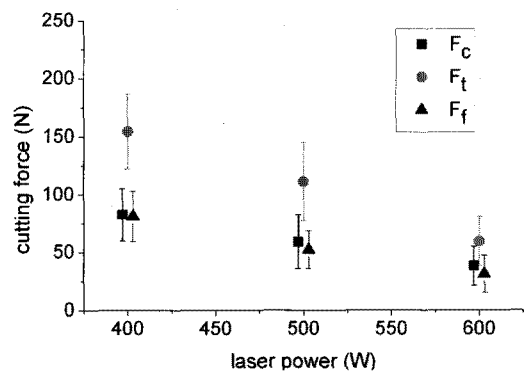


Fig. 8 Variation of cutting forces with laser power.

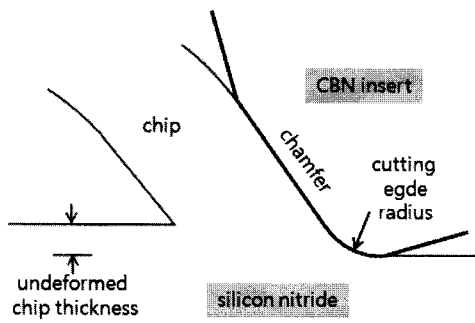


Fig. 9 Geometry of cutting edge and chip formation.

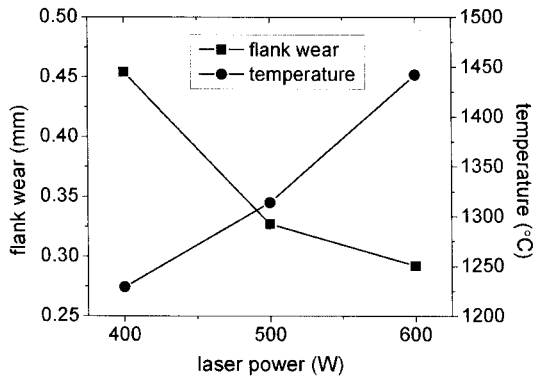


Fig. 10 Variation of flank wear with laser power.

Fig. 8은 레이저빔의 출력에 따른 절삭력을 비교한 것이다. 정상적인 절삭이 진행된 상태에서 공구의 플랭크 마모와 파손에 의한 절삭력 상승 효과를 배제하기 위하여 총 149초의 절삭시간 중 10~30초 구간에서의 절삭력 평균값으로 나타내었다. 절삭력의 변동폭(fluctuation)에 대해서는 에러바(error bar)로 표시하였다.

Fig. 9는 CBN 인서트의 절삭날(cutting edge)의 형상을 대략적으로 나타낸 그림이다. CBN 인서트와 같은 세라믹 공구는 절삭날 끝에 집중된 수직응력을 재분배하기 위해 챔퍼(chamfer)가 형성되어 있다. 또한 챔퍼 하단에는 호닝(honing)에 의해 절삭날 반경을 갖는다.¹⁵ 3차원 측정기(Coordinate Measurement Machine, CMM)를 이용해 측정된 결과 본 연구에 사용된 CBN 인서트의 챔퍼와 절삭날 반경(cutting edge radius)은 각각 100 μ m과 16 μ m이다. 미변형칩두께(undeformed chip thickness)는 이송속도에 의해 결정되며 본 연구에서는 약 10~30 μ m이다. 따라서 절삭시 챔퍼와 절삭날 반경의 영향으로 절삭부에 높은 압축응력이 발생하여 배분력(F_t)이 상승한 것으로 사료된다.

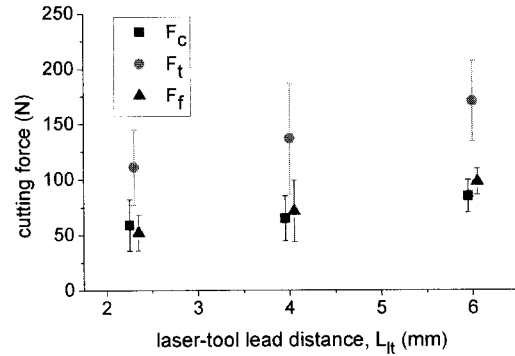


Fig. 11 Variation of cutting forces with laser-tool lead distance.

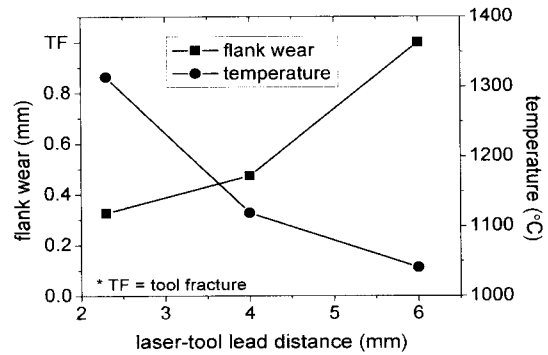


Fig. 12 Variation of flank wear with laser-tool lead distance.

Fig. 10은 Table 4의 절삭부 온도와 20mm 절삭이송 후 플랭크 마모를 비교한 결과이다. 레이저빔의 출력이 증가함에 따라 시편의 온도가 증가하게 되어 재료의 연성이 증가하므로 절삭력과 플랭크 마모가 감소하였다.

Fig. 11은 레이저빔의 출력이 500W일 때 거리 L_t 가 기준조건인 2.3mm에서 4, 6mm로 증가함에 따른 절삭력을 비교한 결과이다. Fig. 12는 Fig. 6에서 측정된 절삭부 온도와 20mm 절삭이송 후의 플랭크 마모를 비교한 것이다. 거리 L_t 가 2.3mm에서 4, 6mm로 증가함에 따라 온도는 1314 $^{\circ}$ C에서 1119, 1041 $^{\circ}$ C로 각각 감소하였다. 이로 인해 질화규소의 연성이 감소하여 절삭력과 플랭크 마모가 증가하였고 $L_t = 6$ mm의 조건에서는 공구가 파손되었다.

Fig. 13과 같이 L_t 가 2.3m와 6mm인 조건에서 공구의 마모와 파손을 관찰한 결과 경사면(rake face)에서의 크레이터 마모(crater wear)는 발생하지 않았다.

식 (4)를 이용해 계산된 온도는 2.3, 4, 6mm인 조건에 대하여 각각 1336, 1048, 466 $^{\circ}$ C로 측정값

의 102, 94, 45%의 값을 각각 예측하였다. 이는 식 (4)가 최고온도를 기준으로 2mm (레이저빔의 중심을 기준으로 2.575mm) 이내에서 유도되었기 때문이다. 레이저빔의 폭이 약 4.5mm 인 것을 감안하면 식 (4)는 레이저빔 조사부 이내에서 적용이 가능하다.

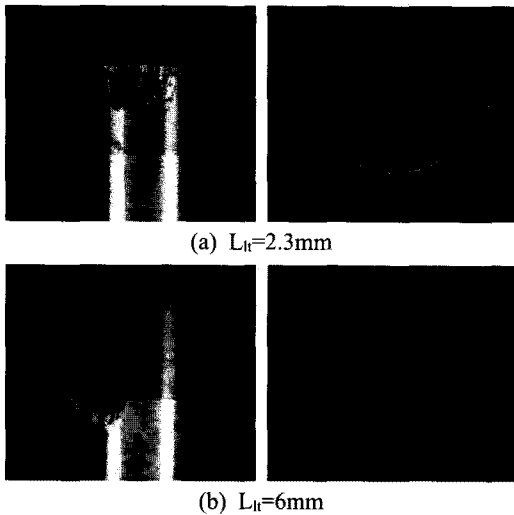


Fig. 13 Optical micrographs of tool wear or fracture.

질화규소의 LAM에서 절삭부의 온도는 절삭특성에 큰 영향을 미치게 된다. 레이저 출력이 증가하거나 레이저와 공구의 축방향 거리가 감소할수록 절삭부의 온도는 증가하게 된다. 이로 인해 질화규소의 열연화가 증가하게 되어 절삭력과 공구마모를 감소할 수 있다. 다만 레이저 출력이 필요 이상으로 증가할 경우 CBN 공구의 연화로 인해 공구마모가 급격히 상승할 수 있음을 유의해야 한다.¹

4. 결론

LAM 공정에서 시편의 온도분포 측정과 절삭부 온도에 따른 절삭특성 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 안정적인 절삭가공을 위해서는 시편의 끝단 예열이 필요하다. 직경이 16mm인 질화규소 시편의 경우 예열시간은 약 58초이며, 이송속도가 0.013mm/rev인 조건에서 20mm 이송동안 그 온도를 유지하였으나, 그 이상의 이송속도에서는

이송 중 온도가 감소하였다.

(2) 원호방향으로의 온도측정 실험에서 레이저빔이 끝나는 지점($\Phi_p = 14.25^\circ$)에서 표면온도가 최대가 되고 회전하는 동안 온도가 점차 감소하였다.

(3) 이송방향으로의 온도측정 실험에서 최대온도를 기준으로 ± 2 mm의 거리에서는 다양한 레이저빔의 출력과 이송속도에 대하여 유사한 온도분포를 갖는다. 이송방향으로 최대온도를 갖는 위치는 레이저빔의 중앙에서 약 0.575mm 떨어진 지점이다

(4) 절삭부($\Phi_{it} = 90^\circ$, $L_{it} = 2.3$ mm)의 온도는 측정부($\Phi_p = 45^\circ$, $L_p = 0$ mm) 온도의 약 91%가 되며 레이저빔의 출력과 이송속도에 따른 오차는 약 3%이다.

(5) 절삭부의 온도에 영향을 미치는 인자는 레이저빔의 출력, 이송속도, 절삭공구와의 축방향 거리(L_{it})이며 절삭가공에 의한 열발생은 시편표면의 온도분포에 영향을 미치지 않는다. 절삭부의 온도가 증가함에 따라 시편의 연성이 증가하여 절삭력과 플랭크 마모가 감소하였다.

후기

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

참고문헌

- 1) 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, pp. 639-646, 2000.
- 2) 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, pp. 666-670, 2000.
- 3) 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, pp. 1409-1424, 2000.
- 4) 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. Assessment of Parametric Effect," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 1425-1437, 2000
 - 5) Pfefferkorn, F. E., Shin, Y. C., Tian, Y. and Incropera, F. P., "Laser-Assisted Machining of Magnesia-Partially-Stabilized Zirconia," *Transactions of the ASME*, Vol. 126, pp. 42-51, 2004.
 - 6) 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, pp. 875-885, 2002.
 - 7) Chang, C. W., Kuo, C. P., "An Investigation of Laser-Assisted Machining of Al_2O_3 Ceramics Planing, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*," Vol. 47, pp. 452-461, 2007.
 - 8) Skvarenina, S. and Shin, Y. C., "Laser-Assisted Machining of Compacted Graphite Iron," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 7-17, 2006.
 - 9) Anderson, M., Patwa, R and Shin, Y. C., Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1879-1891, 2006.
 - 10) 신동식, 이제훈, 서정, 김선원, "레이저 복합 가공기용 핵심 광학모듈의 설계 및 제작," *한국레이저가공학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 3-7, 2007. 6.
 - 11) 이제훈, 서정, 신동식, 김선원, "레이저 응용 복합가공기술 동향," *한국레이저가공학회지*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-10, 2007.
 - 12) 임세환, 이제훈, 신동식, 김종도, 김주현, "질화규소의 Laser-Assisted Machining 공정에 관한 연구," *한국정밀공학학회지*, Vol. 26, No. 5, In Press, 2009.
 - 13) Schwartz, M. M., "Handbook of Structural Ceramics," McGraw-Hill, Inc., pp. 6.1-6.26, 1992.
 - 14) Ready, J. F., "LIA Handbook of Laser Material Processing," pp. 182-183, 2001.
 - 15) Trent, E. M. and Wright, P. K., "Metal cutting 4th Edition," pp. 227-249, 2000.
 - 16) <https://engineering.purdue.edu/CLM/projects.htm>