

레이저 출력에 따른 레이저에열선삭된 질화규소의 기계적 특성

김종도*, 이수진**, 신동식†, 서정†, 이제훈†

*한국해양대학교 기관시스템 공학부, jdkim@hhu.ac.kr

**한국해양대학교 대학원, †한국기계연구원 광응용생산기계연구실

Mechanical Properties of Silicon Nitride Laser-Assisted Machined by Laser Power

Jong-Do Kim*, Su-Jin Lee**, Ding-Sig Shin†, Jeong Suh† and Jae-Hoon Lee†

*Division of Marine Engineering System, Korea Marine University, jdkim@hhu.ac.kr

**Graduated school, Korea Marine University

†Department of High Density Energy Beam Processing and System, KIMM

Abstract

The engineering ceramic is one of the materials advantageous in various conditions with high strength, endurance at high temperature, abrasion resistance and corrosion resistance, etc. However, due to high strength and high brittleness, ceramic incurs high costs and long time on finishing process required after sintering. So a process for obtaining wanted measurements of them has been studied using the high temperature which makes ceramics softened and heat affected recently. This study makes an estimate of laser-assisted machining (LAM) if an economically practical process for manufacturing precision silicon nitride ceramic parts using laser beam. In this study, mechanical properties of silicon nitride at high temperature were observed. And during the LAM, it was observed that cutting force and tool wear were reduced and oxidation of machined surface was increased according to a increase of laser power.

Key Words: Laser-assisted machining(LAM), Si₃N₄, Laser power, Mechanical property, YSiAlON

1. 서 론

최근 급속하게 발전한 과학기술의 영향으로 기기의 수명 및 관리에 대한 관심이 높아져 세라믹, 플라스틱 및 신소재와 같은 재료에 관한 연구가 지속되어 오고 있다.¹ 특히, 세라믹 분말을 치밀하게 소결한 공업용 세라믹 재료는 중량 대비하여 고강도, 우수한 내마모성, 화학적 안정성 및 고온에서 고강도 유지 등의 뛰어난 특성으로 고온 및 가혹한 조건에서의 적용 등에서 주목을 받고 있다. 하지만 세라믹의 고경도 및 취성이 큰 특성으로 인하여 가공이 어려워 그 사용에 제약을 받고 있다.^{2,3}

고강도의 고품질 세라믹을 얻기 위해서 필수적인 소결공정은 부품의 치수나 형상의 정밀도를 저하시키므로 정밀한 세라믹 부품을 얻기 위하여 정삭공정이 요구된다. 그러나 세라믹 재료가 가지는 고강도 및 취성의 특성으로 가공하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연

구는 레이저를 이용하여 세라믹을 국부적으로 가열하고 연화된 부분을 선삭하여 제거하는 레이저 에열선삭(LAM; Laser-Assisted Machining)기술의 개발을 위한 자료를 제공하고 주요한 가공 파라메타 중 하나인 출력에 따른 시편의 기계적 특성을 분석하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료 및 실험장치

본 연구에서는 고강도와 내마모성 및 높은 열충격 저항을 가지고 있는 공업용 세라믹 중 하나인 질화규소(Si₃N₄)를 사용하였으며 SSN(pressureless sintered silicon nitride) 소결법으로 길이 150 mm 및 직경(D) 16 mm인 환봉상의 시험편을 제작하여 사용하였다.

2.5 kW급 고출력 다이오드 레이저(HPDL)를 열원으로 사용하였으며, 고온계(pyrometer)와 공구동력계

(dynamometer)를 사용하여 실시간으로 온도 및 절삭력을 측정하면서 실험을 실시하였다. 광학계는 5 mm × 5 mm의 사각빔을 사용할 수 있도록 특수 제작하여 사용하였고, 절삭공구는 날끝반경(nose radius)이 0.8 mm, 두께 4.76 mm, 음의 경사각 -6°을 가지는 CBN(cubic boron nitride) 인서트틀 사용하였다.

2.2 실험방법

온도변화에 따른 질화규소의 조직적 변화를 알아보기 위하여 소결된 시편을 파단시켜 작은 칩으로 제작한 후 가열로에 넣고 대기분위기에서 100°C/min으로 온도를 상승시켜 일정한 온도에서 1분간 유지하여 온도변화에 따른 질화규소 세라믹의 조직적 변화를 SEM 및 EDS 분석을 이용하여 관찰하였다. 또한, 레이저 예열선삭을 위해 환봉형 시험편을 척에 고정시킨 후 620 rpm으로 회전시키면서 레이저빔을 조사하고 레이저 조사부에서 180° 위치에 공구가 레이저빔에 조사되지 않도록 리드거리를 2.3 mm두어 공구를 설치하였으며, 레이저빔 및 공구의 이송속도를 0.013 mm/rev으로 하여 예열 및 예열선삭을 진행하였다. 가공된 시편의 표면은 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였으며 절삭력 및 경도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 질화규소의 예열선삭 메커니즘

질화규소 세라믹은 β -Si₃N₄와 10%이하의 YSiAlON 비정질상으로 구성되어 있으며 고온 및 고압에서 압축 소결된다. 질화규소는 일반적으로 900-1000°C에서 굽힘강도가 저하하고 1000°C 이상에서는 비정질상인 YSiAlON 점도의 감소로 인하여 연화되기 때문에 소성변형이 일어날 수 있게 되어 예열선삭이 이루어진다. YSiAlON이 연화되기 전에는 β -Si₃N₄ 결정의 입내파괴(transgranular fracture)가 주로 일어나고, 1000°C 이상의 고온에서는 β -Si₃N₄ 주변의 연화된 YSiAlON의 소성변형에 의하여 입계파괴(intergranular fracture)가 주로 일어나므로 온도를 상승시켜 낮은 점도에서 선삭가공을 행함으로써 질화규소를 효율적으로 절삭할 수 있다.^{4,7}

3.2 온도에 따른 질화규소 세라믹의 조직변화

Fig. 1에서 나타내듯이 파단시켜 칩으로 제작한 시편을 가열하기 전 모재조직과 1,200, 1,300, 1,400 및 1,500°C로 가열된 조직의 변화를 살펴보았다. 1,200°C의 온도까지는 조직적 변화가 없었으나, 1,300°C부터 산화의 영향이 관찰 되었으며, 1,400°C에서는 내부에서 열분해 되어 가스로 방출되는 N₂가스에 의해 형성된 발포(bloating)가 나타나고 있다. 이는 가열 시 산화 및 N₂가스 생성에 의한 결합발생이 일어난 것이다

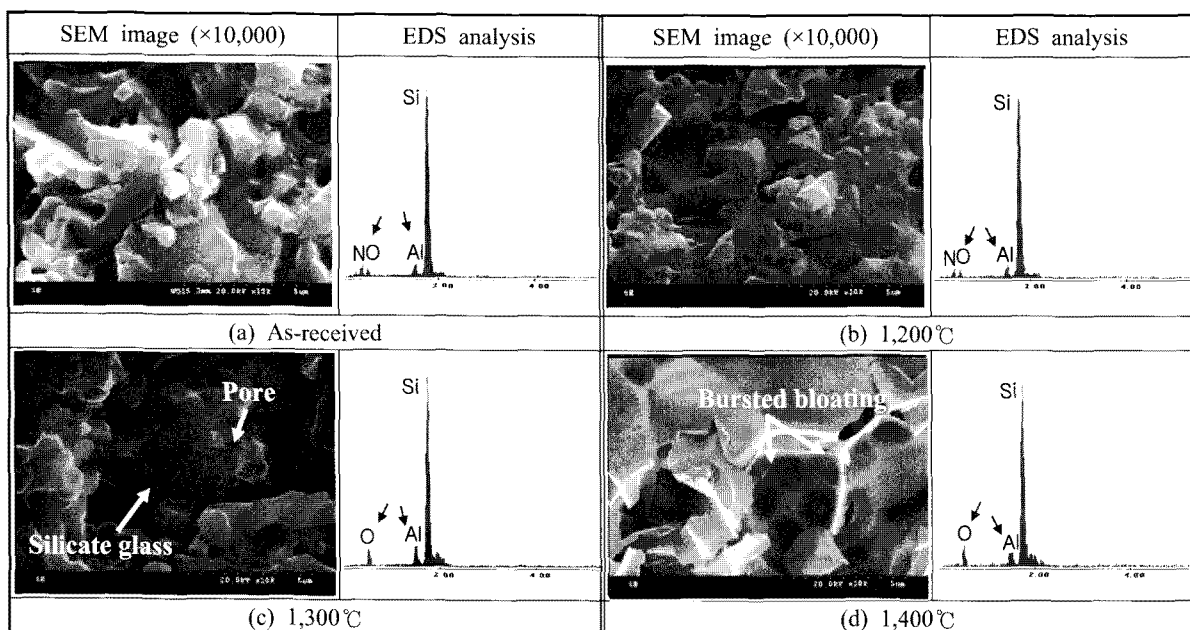


Fig. 1 SEM and EDS analysis for variation of silicon nitride microstructure by increasing temperature.

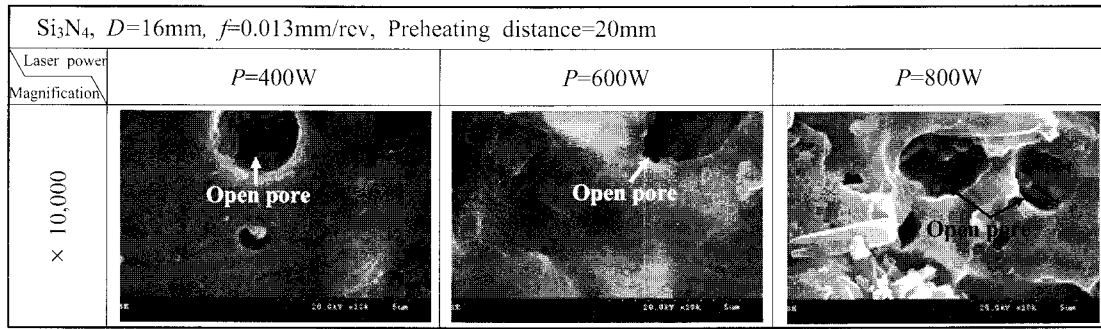


Fig. 2 Variation of silicon nitride surface preheated by laser power.

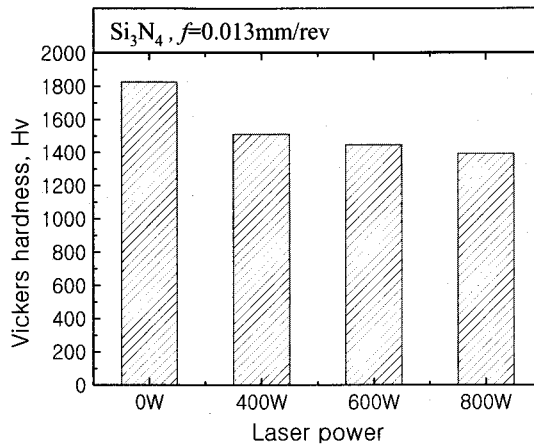


Fig. 3 Hardness of silicon nitride surface preheated by laser power.

질화규소 세라믹의 온도상승에 따른 조직적 변화를 EDS 분석을 통하여 확인한 결과 1,200℃까지는 EDS 분석결과 큰 변화가 없었으나 1,300℃의 조직 사진에 규산염 유리층이 나타난 시점에서 O의 피크가 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 N의 값도 점차 감소한다. 따라서 표면의 산화와 질소가스의 생성 및 분출을 증명하였다. 1,400℃이상에서는 N₂ 가스의 발생 및 분출에 의한 발포가 관찰되었다.

3.3 출력에 따른 예열된 질화규소의 기계적 특성

Fig. 2에서 나타내듯이 레이저이송속도 0.013 mm/rev에서 레이저출력을 400, 600 및 800 W로 변화시켰을 때의 질화규소 세라믹의 예열된 표면을 SEM으로 관찰하였다. 레이저출력 400 W에서 표면온도는 약 1,300℃이고 개기공(open pore)이 형성되기 시작하여 600 W의 약 1,500℃에서 개기공의 발생이 더욱 증가하고 표면이 변질되었다. 이때 발생한 개기공은 앞서 기술하였듯이 내부의 질소가 질소가스로 결합하여 분출되는 과정에 생성되었다. 800 W의 표면온도 약 1,600℃의 경우 표면의 대부분의 부위에서 이러한 개기공이 다량 형성

되어 있으며 표면 내부까지 다공질로 이루어져 있는 것으로 보인다. 예열전 시편 및 각 출력에서의 시편표면의 경도를 실온에서 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 출력이 증가함에 따라 표면의 산화도가 심해지며, 이러한 표면의 변화가 재료의 경도감소를 수반하는 것을 알 수 있다.

3.4 출력에 따른 예열선삭된 질화규소의 기계적 특성

회전속도 620 rpm, 레이저 및 공구의 이송속도 0.013 mm/rev 그리고 절삭깊이(d)를 1 mm로 고정하고 레이저 출력을 400, 600 및 800 W로 변화시켜 예열선삭한 질화규소 세라믹 표면의 SEM 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 레이저 출력 400 W의 경우, 육안으로 관찰 시 미려한 표면을 가지고 있으며, 10,000배의 SEM사진으로 관찰하여 보면 소성유동에 의한 유동형 표면이 확인된다. 그러나 출력이 증가할수록 가공면이 열화되는 것을 확인 할 수 있는데, 600 W 부터는 산화층이 절삭되어 제거되어도 400 W보다 입열량이 크기 때문에 절삭전 예열에 의해 받은 열과 절삭후 절삭면 선단에 있는 레이저 빔 조

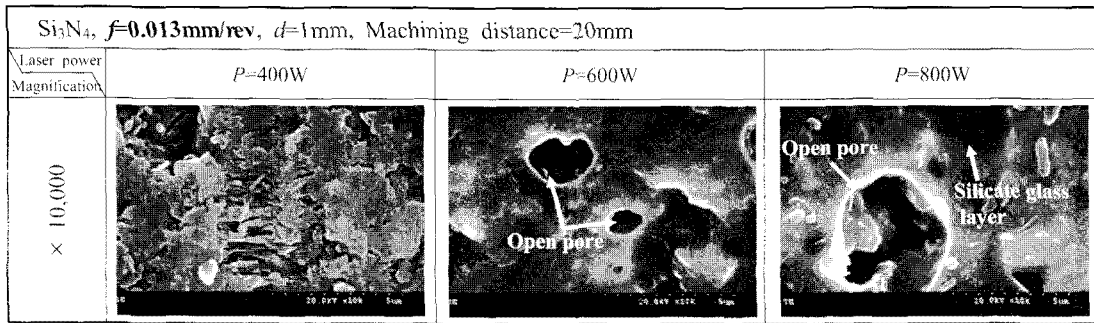


Fig. 4 Variation of silicon nitride surface laser-assisted machined by laser power.

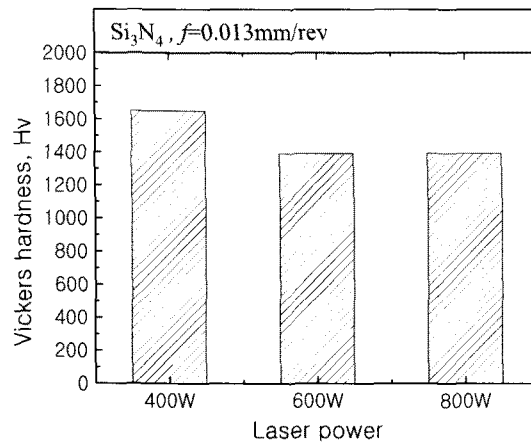


Fig. 5 Hardness of silicon nitride surface laser-assisted machined by laser power.

사부의 열전달에 의해 형성된 후열로 가공부에 질화규소가 열분해 되면서 형성된 개기공이 관찰되며, 800 W에서는 개기공 뿐만 아니라 규산염 유라층도 관찰되었다. 즉, 질화규소 세라믹의 예열선삭 시 레이저 출력이 증가할수록 표면온도가 높아져 시편의 연화가 촉진되므로 절삭에 필요한 에너지가 줄어들게 된다. 하지만 과도한 입열에 의한 절삭부 표면이나 내부의 질화규소 열분해는 N₂가스를 발생시켜 개기공이나 산화물을 남기므로 표면조도를 떨어뜨릴 수 있다. 또한 레이저 출력이 증가할수록 주절삭력은 감소하는데 레이저 출력 200 W의 경우, 절삭력을 실시간으로 측정된 결과 주절삭력과 채터링의 편차가 급격하게 증가하였으며, 이때는 절삭날의 일부가 단락되는 현상이 발생하였다. 400 W 이상의 출력에서는 출력이 증가함에 따라 절삭력이 감소하는 경향을 보였으나 그 차이는 크지 않았다. 또한 출력이 상승하면 공구의 마모정도가 줄어들어 공구의 수명이 길어지는 것을 알 수 있었다.

위와 같은 조건으로 가공된 시편표면의 경도의 변화를 Fig. 5의 그래프에 나타내었다. 그래프에서 보

이듯이 출력이 증가할수록 경도가 저하되는 것을 알 수 있는데, 이는 앞서 기술한 바와 같이 과입열에 의한 시편표면의 열화 및 연화가 그 이유이다. 이러한 연구결과를 바탕으로 본 연구에서 사용된 환봉형 질화규소 세라믹의 경우 레이저출력 400 W에서 600 W사이가 적당한 가공조건으로 판단된다.

4. 결 론

세라믹 가공에 있어서 비용의 절감 및 활발한 적용을 위해 개발된 레이저 예열선삭에 대한 출력변화의 영향을 재료적인 측면으로 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 본 연구에서 사용된 질화규소 세라믹은 1,300℃에서 산화되기 시작하고, 1,400℃에서는 N₂가스가 발생하여 분출되면서 표면에 발포를 형성한다. EDS 결과 온도상승에 따라 산화도가 증가하는 것을 알 수 있으며 이러한 재료의

- 열화가 절삭에 긍정적인 영향을 미친다.
- 2) 질화규소를 레이저빔을 이용하여 국부적으로 예열하면 표면이 산화되고 재료 내에서 N₂가스가 생성되어 밖으로 분출하므로 표면이 열화된다. 또한 YSiAlON의 연화온도이상 국부적으로 가열하면 CBN공구를 이용한 효과적인 절삭이 가능하다.
 - 3) 레이저를 이용하여 질화규소를 예열하는 경우 출력이 증가하면 입열량이 상승하여 재료의 표면온도가 상승한다. 따라서 표면의 연화 및 열화가 일어나기 쉬워져 표면의 경도가 저하되었다. 따라서 출력이 증가함에 따라 보다 유리한 절삭이 가능하다.
 - 4) 질화규소의 예열선삭 시 레이저 출력이 낮으면 절삭력이 상승하고 가공면의 산화가 적은 반면, 출력이 높으면 절삭력이 줄어들고 유동형 칩이 생성되거나 과도한 출력은 가공면의 산화를 발생하여 표면의 경도를 저하시켰다. 따라서 절삭에 유리하나 표면의 경도를 저하시키지 않는 레이저 출력을 선정하여야 한다.
- Cutting Speed,” the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing Lamp 2009.
- 7) A. Kelly, “Laser Assisted Machining of Hard to Wear Materials,” Master Thesis, Swinburne University of Technology, Aug. 2006.

참고문헌

- 1) 박정현, “뉴세라믹스”, 반도출판사, 1979.
- 2) 소재연구회, “21세기를 뒤받침할 신소재 · 신재료”, 겸지사, 2002.
- 3) 백영남, 신영의, 정남용, 정승부, 정재필, 이성희, “신소재공학”, 삼성북스, 2008.
- 4) S. Lei, Y. C. Shin and F. P. Incropera, “Experimental Investigation of Thermo-Mechanical Characteristics in Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics,” Journal of Manufacturing Science and Engineering, NOV, Vol. 123, 2001.
- 5) S. Lei, Y. C. Shin and F. P. Incropera, “Deformation mechanisms and constitutive modeling for silicon nitride undergoing laser-assisted machining,” International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, pp. 2213-2233, 2000.
- 6) J. D. Kim, S. J. Lee, J. H. Lee, D. S. Shin, S. J. Park, “Characteristics Si₃N₄ Laser Assisted Machining according to Laser Power and