

질화규소 세라믹의 레이저 예열선삭에 관한 연구 (II)

- 예열선삭된 SSN 및 HIPSN 질화규소 세라믹의 표면특성 -

김종도^{*,†} · 이수진^{**} · 강태영^{***} · 서 정^{****} · 이제훈^{****}

^{*}한국해양대학교 기관시스템공학부

^{**}한국해양대학교 대학원

^{***}유니온스틸 기술연구소

^{****}한국기계연구원 광응용생산기계연구실

A Study on Laser Assisted Machining for Silicon Nitride Ceramics (II)

- Surface Characteristics of LAM Machined SSN and HIPSN -

Jong-Do Kim^{*,†}, Su-Jin Lee^{**}, Tae-Young Kang^{***}, Jeong Suh^{****} and Jae-Hoon Lee^{****}

^{*}Division of Marine System Engineering, College of Maritime Sciences, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

^{**}Graduate School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

^{***}Union steel R&D Center, Busan 613-010, Korea

^{****}Korea Institute of Machinery & Materials, Laser Application Team, Daejeon 305-343, Korea

[†]Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received March 24, 2010 ; Revised April 13, 2010 ; Accepted June 7, 2010)

Abstract

This study focused on laser assisted machining (LAM) of silicon nitride ceramic that efficiently removes the material through machining of the softened zone by local heating. The effects of laser-assisted machining parameters were studied for cost reduction, and active application in processing of silicon nitride ceramics in this study. Laser assisted machining of silicon nitride allows effective cutting using CBN tool by local heating of the cutting part to the softening temperature of YSiAlON using by the laser beam. When silicon nitride is sufficiently preheated, the surface is oxidized and decomposed and then forms bloating, micro crack and silicate layer, thereby making the cutting process more advantageous. HIPSN and SSN specimens were used to study the machining characteristics. Higher laser power makes severer oxidation and decomposition of both materials. Therefore, HIPSN and SSN specimens were machined more effectively at higher power.

Key Words : SSN, HIPSN, HPDL, LAM, Surface variation, Vickers hardness

1. 서 론

최근 신소재로써 주목을 받고 있는 엔지니어링 세라믹 중 질화규소(Si_3N_4) 세라믹은 고온에서 높은 강도를 유지하는 특성과 내마모성 및 내부식성의 장점을 가지고 있어 고온 및 가혹한 환경조건에서 적용이 가능하

다. 소결된 질화규소 세라믹은 육각붕상의 β - Si_3N_4 입자와 육각 입자 사이에 새로이 형성되는 결정질의 2차상(secondary phase) 그리고 결정립계 주변의 YSiAlON 비정질로 구성되어 있다¹⁻⁵⁾.

이와 같은 세라믹은 상온에서 고강도의 특징을 지니고 있어서 일반적인 기계가공이 매우 어렵다고 알려져 왔다. 그러나 질화규소의 경우에는 1,000°C 이상에서

소결제와 반응하여 생성된 비정질 YSiAlON의 점도감소로 인한 연화로 소성변형이 일어날 수 있게 되고, 고온에 의해 열영향부가 산화되고 크랙이 발생하여 강도가 저하 된다³⁻⁷⁾. 레이저 예열선삭은 절삭공정과 레이저 예열이 복합된 공정이기 때문에 가공변수가 많고 복잡하다. 예열 선삭을 성공적으로 이끌기 위해서는 공구의 측면에서 뿐만 아니라 레이저조사, 선반에 의한 회전속도 및 이송속도, 시험편의 종류 및 형상, 그리고 이들의 복합적인 관계를 파악하고 최적의 매개변수를 도출하여야 한다. 본 연구는 레이저보조가공(Laser assisted machining)의 주요 공정변수에 따른 질화규소 시편의 표면변화특성을 중심으로 최적 공정조건을 도출하기 위하여 진행되었다. 특별히 1보에서 사용된 HIPSN 세라믹 가공특성과 더불어 소결방법이 다른 SSN 세라믹의 가공특성을 가공된 표면을 중심으로 비교 및 분석하였다.

2. 사용 재료 및 실험방법

2.1 사용 재료

본 실험에서는 산업계에 많이 사용되고 있는 질화규소를 선삭가공에 적합한 길이 150mm 및 직경 16mm의 환봉형상으로 제작하여 사용하였다. 본 논문에서는 고온정수압소결 질화규소 (HIPSN ; Hot isostatic pressing silicon nitride) 및 상압소결 질화규소(SSN ; Sintering(pressureless) silicon nitride) 두 종류의 재료를 사용하여 비교하며 실험 하였다.

본 연구에 사용된 HIPSN 및 SSN시편의 파단면을 SEM으로 관찰하여 Fig. 1에 비교하였다. 사진에서 확인할 수 있듯이 두 세라믹의 육각봉 형태의 질화규소 결정입자 크기가 다르다. SSN시편의 질화규소봉 길이는 약 7 μ m 정도이고 HIPSN시편의 질화규소봉 길이는 약 1.5 μ m로 SSN시편의 입자크기가 HIPSN시편에 비하여 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 입자의 크기가 가공 후 표면 조도에 큰 영향을 미치기도 한다. 또한 두 종류의 질화규소 세라믹의 밀도가 다른 것을 알 수 있다. HIPSN의 조직이 SSN에 비하여 더 치밀하다.

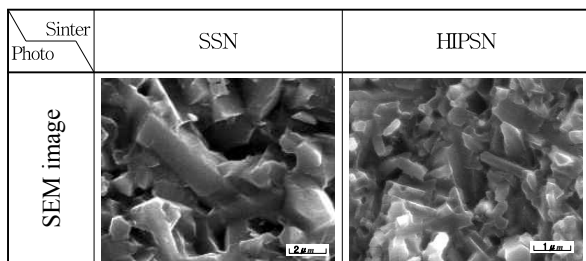


Fig. 1 Fracture SEM image of SSN and HIPSN

두 시편의 무게를 비교한 결과, HIPSN시편이 SSN시편에 비하여 약 1.04배 무거웠다. 즉, HIPSN이 밀도가 높고 조직이 치밀한 것을 알 수 있다. 따라서 예열선삭시 HIPSN의 가공에서 절삭력이 더 크고 공구마모가 심한 이유도 이러한 조직적 특성이 일부 기여한 것으로 판단된다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 2.5kW급 고출력다이오드레이저(HPDL)를 열원으로 사용하였으며, 시편의 표면온도를 실시간으로 측정하기위하여 적외선 타입의 고온계(pyrometer)와 절삭력 측정을 위한 공구동력계(dynamometer)를 이용하였다.

본 실험에서 사용된 공구는 질화붕소를 변형시켜 금속과 소결하여 제작한 CBN(cubic boron nitride) 공구로써 노즈반경(nose radius)이 0.8mm, 두께 4.76mm 및 -6°의 음의 경사각을 가지는 인서트를 사용하였다.

레이저 예열선삭을 위해 설치한 실험장치의 모식도를 Fig. 2에 나타낸다. 시험편을 척에 고정시키고, 레이저의 조사부로부터 90° 지점에 고온계를 180° 위치에 공구 및 공구동력계를 설치하여 선삭을 행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공정변수에 따른 HIPSN시편의 표면변화

시편의 회전속도(N)를 620 rpm으로 고정하고 레이저출력(P), 이송속도(f) 및 절삭깊이(a)를 각각 변화시키면서 예열선삭한 HIPSN시편 표면의 SEM사진을 Fig. 3에 나타내었다. 이송속도를 0.013mm/rev 절삭깊이를 0.3mm로 고정하고 레이저 출력에 변화를 준 경우 400 W에서는 0.3mm의 깊이까지 충분히 예열되

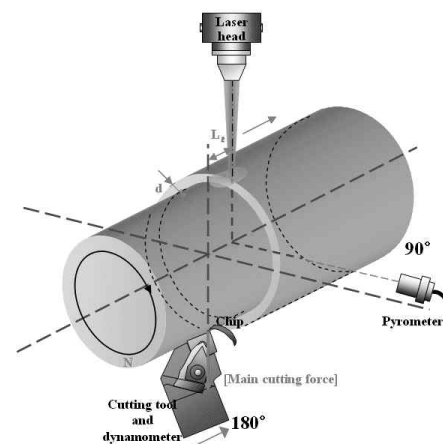


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

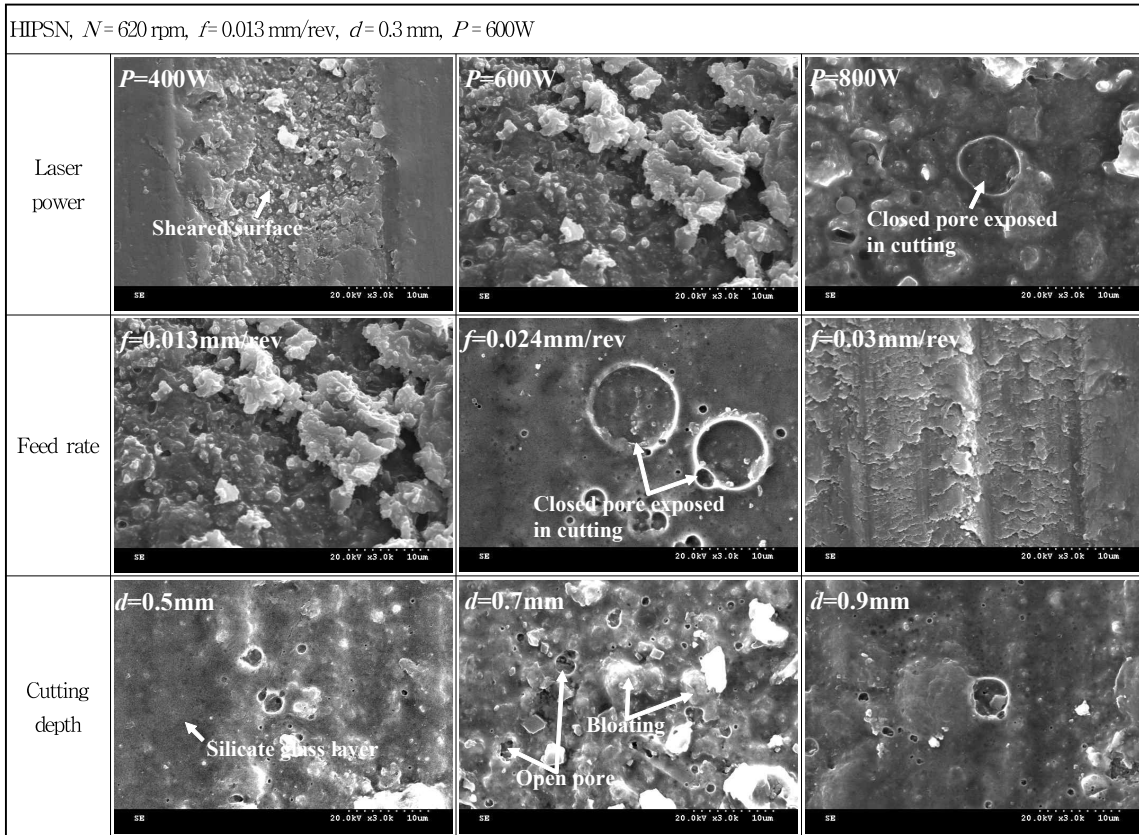


Fig. 3 SEM images of machined HIPSN surface with machining parameter

지 못해 소성가공이 되지 못하고 전단된 표면을 볼 수 있다. 600W의 경우 전단된 부위가 줄어들고 규산염 유리층(silicate glass)이 형성되기 시작하며 발포 및 산화반응이 생성되기 시작한다. 800W로 출력이 증가하면 가공전단의 레이저 열원으로부터 가공면에 입열이 전달되는 후열(post-heating)효과에 의해 가공면이 산화되면서 개기공이 형성되어 절삭후 표면에 노출되어 잔류하기도 한다. 즉, 레이저출력이 증가할수록 시편 표면의 온도가 높아져 시편의 연화 및 열화가 가속화 되는데, 이는 1보에서 기술하였듯이 높은 가열온도는 질화규소의 열분해 및 입계의 유리상을 연화시키므로 공구수명이 증가할 수 있다.

시편의 회전속도 620 rpm, 레이저 출력 600 W, 그리고 절삭깊이를 0.3mm로 설정하고 이송속도를 변화시키면, 0.013 mm/rev에서 표면이 심하게 산화된 것을 알 수 있다. 이송속도 0.024 mm/rev에서는 가공표면에서 내부의 폐기공이 노출된 것이 보이며, 마지막으로 이송속도 0.03 mm/rev에서는 열화에 의한 영향은 관찰되지 않았으나 상대적으로 빠른 가공속도에 의해 가공표면에 전단가공의 영향이 나타나기 시작했다.

회전속도 620 rpm, 레이저 출력 600 W 그리고 이송속도를 0.013 mm/rev으로 고정하고 절삭깊이를 변

화시키는 경우 절삭깊이 0.5mm에서는 절삭전 예열에 의해 받은 열과 절삭후 절삭면 선단에서 레이저 조사부의 열전달에 의한 후열에 의해 표면의 질화규소와 입계의 유리질이 열분해 및 열화되어 규산염 유리막층을 형성하고 있는 것이 관찰되며, 0.9mm에 이르러서는 절삭깊이에 따른 열전달 정도가 감소하여 상대적으로 열화 및 산화의 영향이 적었다. 따라서 절삭깊이가 깊어짐에 따라 열영향을 받은 부위가 더욱 깊이 제거되므로 표면의 열화정도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 0.9mm를 초과하는 절삭깊이에서는 절삭부 내부의 연화부족으로 공구가 깨어져 절삭이 불가능하였다.

3.2 공정변수에 따른 SSN시편의 표면변화

SSN을 회전속도 620rpm, 이송속도 0.13mm/rev 및 절삭깊이 1mm로 고정하고 출력에 변화를 주었을 때의 절삭된 시편표면을 관찰한 SEM 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 레이저 출력 400 W의 경우 소성유동에 의한 유동형 표면이 확인되고 규산염 유리층이 거의 관찰되지 않았다. 레이저 출력이 증가할수록 가공면이 열화되는 것을 확인 할 수 있는데, 600 W 부터는 산화층이 절삭시 제거되어도 400 W보다 입열량이 크기 때문에

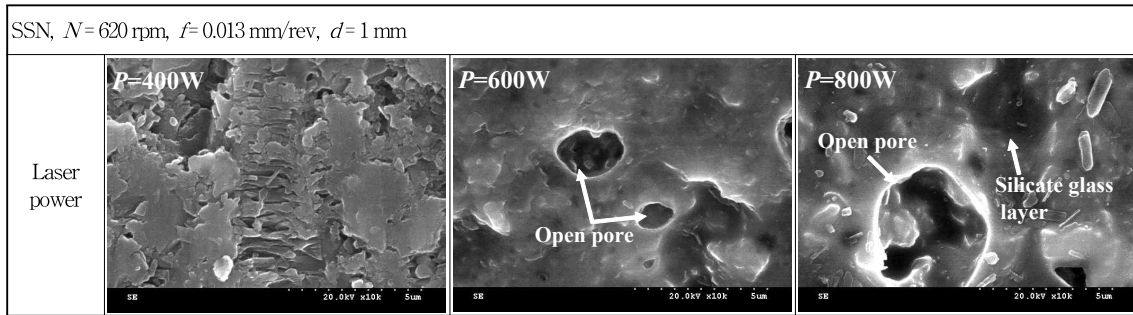


Fig. 4 SEM images of machined SSN surface with laser power

절삭전 예열에 의해 받은 열과 절삭후 절삭면 선단에 있는 레이저 빔 조사부의 열전달에 의해 형성된 후열로 가공부에 질화규소가 열분해 되면서 형성된 규산염 유리질 및 개기공이 관찰되며, 800 W에서는 개기공의 크기 및 수량뿐만 아니라 규산염 유리층의 두께도 증가하는 것이 관찰되었다. 즉, SSN의 예열선삭 시에도 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. 그러나 600 W 이상의 출력에서도 절삭깊이 0.9mm이상의 절삭이 행해지지 않았던 HIPSN에 비하여 비교적 저출력에서 1mm까지 절삭이 가능하였다. 또한 이송속도 및 절삭깊이에 따른 SSN 표면의 변화는 재료의 차이에 따른 정도의 차이는 있으나 HIPSN과 비슷한 양상을 가지고 있었으므로 가장 큰 변화를 보이는 출력을 중심

으로 비교하였다.

HIPSN 및 SSN 시편의 표면을 Fig.5에 출력변화를 중심으로 비교하여 나타내었다. 시편의 색상은 HIPSN의 경우 흑색이고 SSN의 경우 베이지색을 가지는 시편을 사용하였다. 같은 출력에서 절삭깊이에 차이를 두었는데 이는 HIPSN의 경우 절삭되는 깊이가 SSN보다 얇아 각각 재료의 양호한 절삭깊이로 생각되는 조건으로 비교를 하였다. 육안으로 관찰하여 보면 HIPSN의 경우 출력이 증가함에 따라 시편표면이 하얗게 산화하는 것을 확인할 수 있으며 SSN의 경우 출력별 변화를 육안으로 관찰하기는 쉽지 않았다. 또한 표면의 가공정도는 SSN이 HIPSN보다 깊은 절삭깊이로 가공하였으나 양호한 표면을 가진다. SEM사진으로 관찰하였을 때 레이저 출력 800W에서 SSN시편의 표면이 급격하게 산화한 것을 알 수 있었으나 본래 시편의 색이 베이지로 산화에 의해 표면이 하얗게 변화하는 것이 육안으로는 관찰이 어려웠기 때문이기도 하다.

N = 620 rpm, f = 0.013 mm/rev			
Laser power	P=400W	P=600W	P=800W
Material			
HIPSN d = 0.3 mm			
SSN d = 1 mm			

Fig. 5 Photograph of surface for HIPSN and SSN machined by laser power

3.3 공정변수에 따른 시편의 표면경도변화

600 W 및 800 W의 레이저 출력 조건에서 이송속도를 0.024 mm/rev과 0.03 mm/rev으로 변화시켰을 때의 절삭된 시편표면의 경도를 비커스 경도기를 사용하여 측정하여 Fig. 6에 나타낸다. 그림에서 보듯이 800 W의 경우가 600 W의 경우에 비하여 경도값이 저하하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 예열에 의해 열화된 부분이 절삭되어도 예열에 의한 열과 절삭후 레이저 빔 조사부의 열전달에 의한 후열의 영향으로 다시 열화되기 때문이다. 이송속도가 증가함에 따라 경도는 레이저 출력 600 W에서는 약 200 Hv 그리고 800 W의 경우 약 10 Hv 증가하였다. 즉, 측정된 경도값은 앞서 관찰한 표면의 열화정도를 입증하는 하나의 척도로 사용될 수 있을 것이다.

출력변화에 따른 SSN 시편의 표면 경도변화를 Fig. 7 그래프에 나타내었다. 레이저출력이 증가할수록 시편 표면의 경도가 저하하는 것을 알 수 있다. 이는 앞서

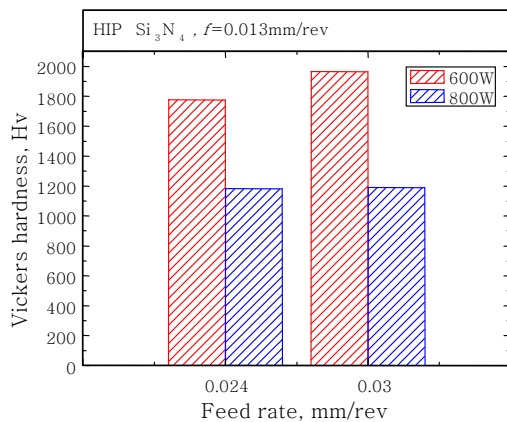


Fig. 6 Variation of vickers hardness of machined HIPSIN with laser power and feed rate

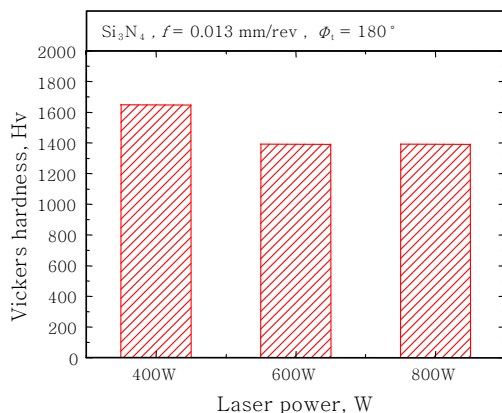


Fig. 7 Variation of vickers hardness for machined SSN surface with laser power

HIPSIN을 관찰한 바와 같이 과도한 시편의 예열이 표면산화를 유발하여 경도를 저하시켰기 때문이다. 따라서 열영향을 비교적 많이 받은 깊이까지 재료를 최대한 제거하는 것이 제품의 표면품질을 향상시키는 방법이라는 것을 알 수 있다. HIPSIN은 가공전 시편의 경도가 약 1800HV이고 SSN은 1750HV로 HIPSIN의 경도가 더 높았으나 전반적으로 경도 저하는 HIPSIN에 비하여 SSN이 편차가 적었다.

4. 결 론

HIPSIN 및 SSN 세라믹의 공정변수에 따른 절삭특성을 시편표면, 칩, 절삭력 및 공구의 수명을 중심으로 연구하여 비교하였으며 그 결과를 다음에 정리한다.

- 1) 레이저 출력이 증가함에 따라 시편표면의 온도가 상승하여 세라믹의 조직적 변화가 커 절삭이 양호하였으나 시편표면이 산화되었다.
- 2) 이송속도 및 절삭깊이가 증가함에 따라 시편표면의 산화도는 저하하였다.
- 3) 상대적으로 절화규소 입자가 크고 기공이 많은 SSN시편이 HIPSIN시편보다 쉽게 산화 및 연화되어 HIPSIN은 최대 0.9mm 깊이까지 절삭이 행해졌지만 SSN은 3mm이상의 깊이까지 가공이 가능하였다.
- 4) SSN 및 HIPSIN시편은 산화도 및 최대절삭깊이는 다르지만 레이저출력, 이송속도 및 절삭깊이의 상승에 따른 시편표면의 산화정도는 유사한 경향을 보였으며, 두 시편 모두 레이저출력 400W에서 600W 사이가 가장 좋은 출력조건이었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지역산업기술 개발 산업인 “레이저 복합가공기 개발”과제와 지식경제부 및 정보통신진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2010-C1090-1021-0015)

참 고 문 헌

1. 신소재연구회 : 21세기를 뒤받침할 신소재·신재료, 겸지사, 2002 (in Korean)
2. 백영남, 신영의, 정남용, 정승부, 정재필, 이성희 : 공학도를 위한 신소재공학, 삼성북스, 2008 (in Korean)
3. Somya, Shigeyuki, Mitomo, Mamoru, Yoshimura, Masahiro : 1990, Silicon nitride-1, Elsevier Applied Science
4. W. D. Kingery, H. K. Bowen, D. R. Uhlmann :

- Introduction to Ceramics, JOHN WILEY & SONS, 1975, 448-515
5. Michael J. Hoffmann, Günter Petzow : Tailoring of mechanical properties of Si_3N_4 Ceramics, Kluwer Academic Publishers, 1994
 6. Jong-Do Kim, Su-Jin Lee, Seo-Jeong Park : The Basic Study on machinability of ceramics in CO_2 laser assisted machining, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 33-2 (2009), 322-329
 7. Jong-Do Kim, Su-Jin Lee, Jae-Hoon Lee, Yuji Sano, "A Study on the Microstructural, Thermal and Mechanical Properties of Silicon Nitride Ceramic", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 33-7 (2009)