

# 질화규소의 레이저 예열선삭 가공공정 연구

## A Study on Laser-Assisted Machining Process of Silicon Nitride

\*임세환<sup>1</sup>, #이제훈<sup>1</sup>, 신동식<sup>1</sup>, 김주현<sup>2</sup>

\* S. H. Lim<sup>1</sup>, # J. H. Lee(jaholee@kimm.re.kr)<sup>1</sup>, D. S. Shin<sup>1</sup>, J. H. Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 나노융합생산시스템연구본부, <sup>2</sup> 국민대학교 기계자동차공학부

Key words : Laser-assisted machining, Silicon nitride, Laser integrated machining center, Face turning, Groove turning

### 1. 서론

Laser-Assisted Machining(LAM)은 레이저빔을 통해 세라믹과 같이 기계적 성질이 우수한 취성재료를 국부적으로 가열함으로써 재료의 파괴강도를 항복강도 이하로 감소시켜 취성파괴를 억제하고 소성변형(plastic deformation)에 의해 칩(chip)을 형성하는 절삭가공법이다. LAM은 가공시간과 비용을 감소시킬 뿐만 아니라 높은 표면품질을 얻을 수 있다는 장점 때문에 기존의 세라믹 가공법인 연삭(grinding)의 대체 공정으로 많은 관심을 받고 있다.

많은 연구자들은 질화규소(silicon nitride, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), 지르코니아(zirconia, ZrO<sub>2</sub>), 물라이트(mullite, 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2SiO<sub>2</sub>), 알루미나(alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 등의 다양한 엔지니어링 세라믹에 대한 LAM 연구를 수행하여 왔다. 그 중에서도 질화규소는 낮은 열팽창율, 높은 열전도율과 파괴인성으로 열충격 저항(thermal shock resistance)이 뛰어나기 때문에 LAM 연구에서 가장 많은 시도가 이루어지고 있다.

질화규소의 LAM에 대한 실험을 통해 가공조건의 영향분석, 칩과 가공표면 특성, 온도에 따른 공구수명 등의 다양한 분석이 이루어졌을 뿐만 아니라, 2,3,6,7 3차원 열전달 시뮬레이션을 통한 가공부위의 온도를 예측,<sup>1</sup> 온도에 따른 질화규소 물성의 수학적 모델링,<sup>2</sup> multiscale FEM을 통한 질화규소의 칩 형성 메커니즘 분석,<sup>4</sup> 등 다양한 해석적 연구가 이루어지고 있으며, 이러한 결과들을 바탕으로 질화규소의 복잡한 형상의 외경가공이 가능함을 보였다.<sup>5</sup> 이와 같이 많은 연구를 통해 질화규소의 LAM 공정이 가지고 있는 많은 가능성들을 제시하였지만 외경가공으로 한정적일 뿐, 선삭가공에서 이루어지고 있는 다양한 공정에 적용되지는 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 레이저 복합가공기의 실시간 출력제어 시스템을 이용해 질화규소의 외경가공뿐만 아니라 단면가공, 홈가공 등을 통해 복잡한 형상가공을 구현함으로써 LAM의 실용화를 위한 기반을 마련하고자 한다.

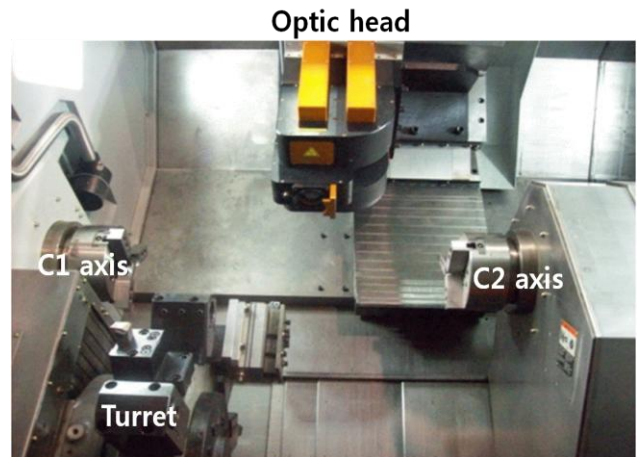
### 2. 실험장치 및 재료

레이저 복합가공기는 Fig. 1과 같이 터릿형 CNC 선반에 레이저 광학모듈이 장착된 구조이다. 광학모듈은 리볼버(revolver)를 통해 공정에 따라 레이저 광학계를 변경할 수 있으며, 동적초점거리 조절장치(D/F module)를 통해 초점거리와 빔크기를 수시로 제어할 수 있다. 이를 통해 LAM 공정 이외에도 선삭, 드릴링 등의 절삭가공과 열처리, 마킹, 드릴링, 용접, 절단, 디버링 등의 레이저 가공을 동시 또는 순차적으로 처리할 수 있다. 또한, Fig. 1(b)와 같이 광학모듈 상단에 고온계(pyrometer)가 장착되어 있어 레이저 조사부의 표면온도를 측정할 수 있다. 레이저는 HPDL(LASERLINE, LDF1000-2500)로 910nm와 980nm의 파장을 가지는 연속파로 발진되는 다이오드 레이저빔을 커플링 하였으며 최대 출력은 2.5kW이다. Fig. 1(c)과 같이 질화규소의 LAM에는 균일한 출력밀도를 가지며 가공형태에 따라 광학계를 변경하여, 외경가공과

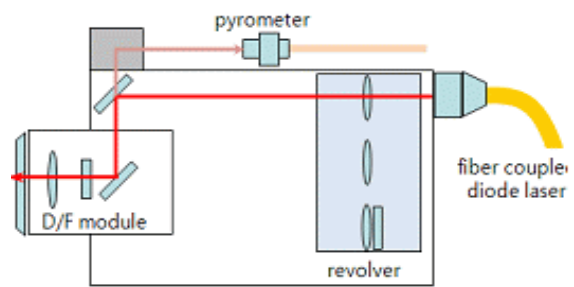
홈가공에는 직경 6mm, 단면가공에는 직경 2.3mm인 원형빔을 각각 사용하였다.

본 연구에 질화규소 시편은 상압소결(pressureless sintering) 공정을 통해 제작되었으며 알루미나(alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)와 이트리아(yttria, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)가 소결조제로 첨가되어, 결과적으로 육각기둥 형상을 갖는 90wt%의 β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 입자와 10wt%의 YSiAlON glass로 구성된다. HPDL의 파장(910, 980nm)에 대한 질화규소의 흡수율은 상온에서 약 0.7이다.

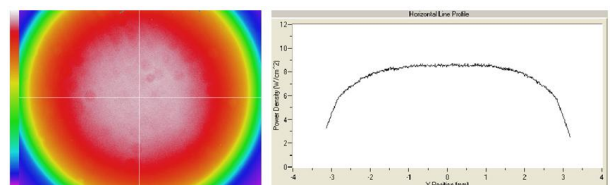
질화규소의 LAM에 사용된 절삭공구의 재료는 Cubic Boron Nitride (CBN)이며 외경가공과 단면가공에는 Taegutec사의 CNMA 120408의 인서트와 PCLNR-2525 공구홀더가 사용되었고, 홈가공에는 BECKER사의 BFSV-5,0LF PBC-10 인서트와 BSAFL 2525-12 공구홀더가 사용되었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Experimental system for LAM (a) Laser integrated machining center, (b) Optic module, (c) Beam profile

### 3. 실험결과

Fig. 2는 질화규소의 LAM에서 단면가공에 대한 모식도이다. Fig. 2(a)와 같이 레이저 광학모듈 틸팅 시스템을 이용해 시편의 단면에 레이저빔을 조사하여 가공부를 예열한 후 레이저빔과 CBN 인서트와 동일한 이송속도로 시편 단면의 중심을 향해 이송하면서 가공이 이루어진다. Fig. 2(b)와 같이 레이저빔의 중심이 시편 단면의 중심과 일치하는 시점에 CBN 인서트는 레이저빔의 끝단에 접하게 된다. 이 경우 시편 중심에는 많은 열에너지가 축적되어 있기 때문에 더 이상 가열하지 않고도 고온에서 가공이 이루어지게 된다.

Fig. 3은 예열과 단면가공이 이루어지는 동안 레이저빔의 출력과 조사부 표면온도의 변화를 나타낸 것이다.

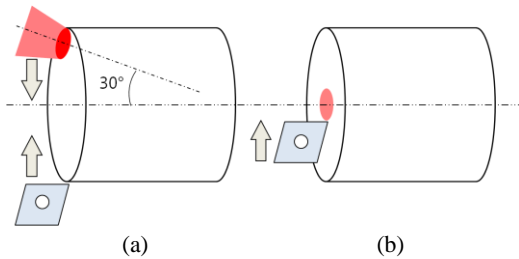


Fig. 2 Schematic diagram for laser-assisted face turning

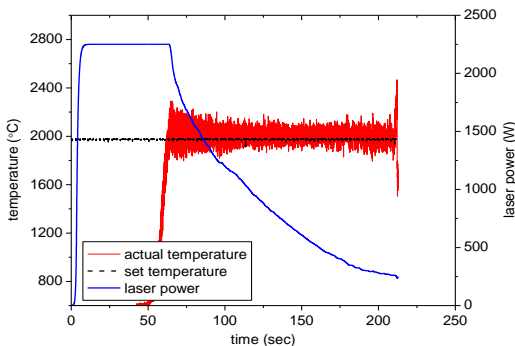


Fig. 3 Temperature and laser power histories for power controlled laser-assisted face turning

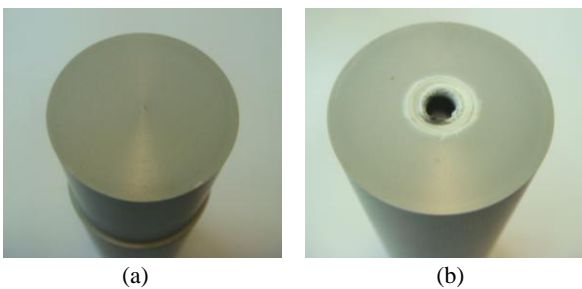


Fig. 4 Photographs of face cut surfaces (a) laser power control, (b) constant laser power

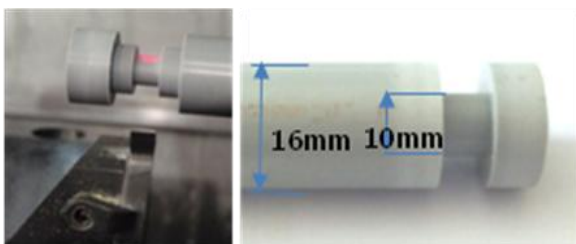


Fig. 5 Photographs of laser-assisted groove turning tool and workpiece

70초의 예열시간 동안 설정된 2000℃의 온도에 도달하였고, 절삭이송이 진행되면서 시편의 직경이 감소되기 때문에 레이저빔의 출력을 점차 감소시킴으로써 설정온도를 유지할 수 있었다. Fig. 4는 단면가공 시편의 가공면 사진이다. Fig. 4(a)는 레이저빔의 출력을 감소시켜 안정적으로 가공되었지만, Fig. 4(b)과 같이 레이저빔의 출력을 일정하게 유지할 경우 시편 중심에 과도한 에너지가 공급되어 열적 손상이 발생하였다.

Fig. 5는 홈가공 실험에 사용된 절삭공구와 가공시편을 보여준다. 홈가공용 인서트의 폭이 5mm 이므로 Fig. 1(c)와 같이 직경 6mm의 원형빔을 사용하여 가공부를 충분히 가열하였고 예열 후 레이저빔과 CBN 인서트가 동시에 시편 중심을 향해 이송하였다. Fig. 3의 단면가공과 유사하게 예열 후 이송이 진행되는 동안 시편의 직경 감소로 인해 레이저빔의 출력을 점차 감소시킴으로써 안정적인 홈가공이 가능하였다.

### 4. 결론

리플버형 광학모듈이 장착된 레이저 복합가공기를 이용한 단면가공과 홈가공 실험을 통해 복잡한 형상에 대한 LAM 공정의 적용 가능성을 제시하였다. 특히, 광학모듈 상단에 장착된 표면온도 모니터링 장치를 기반으로 하는 실시간 출력제어 시스템을 이용함으로써 시편의 직경의 변화에도 가공부의 온도를 일정하게 유지하여 안정적인 가공이 가능함을 보였다.

### 후기

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

### 참고문헌

1. Rozzi, J. C., Pfefferkom, 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*, **43**, 1409-1424, 2000.
2. 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*, **40**, 2213-2233, 2000.
3. 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*, **123**, 639-646, 2001.
4. Tian, Y. and Shin, Y. C., “Multiscale Finite Element Modeling of Silicon Nitride Ceramics Undergoing Laser-Assisted Machining,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **129**, 287-295, 2007.
5. 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*, **89**, 3397-3405, 2006.
6. 임세환, 이제훈, 신동식, 김종도, 김주현, “질화규소의 Laser-Assisted Machining 공정에 관한 연구,” *한국정밀공학회지*, **26**, 48-56, 2009.
7. 임세환, 이제훈, 신동식, 김종도, 김주현, “Laser-assisted machining 에서 질화규소 시편의 표면온도와 절삭특성에 관한 연구,” *한국레이저가공학회지*, **12**, 25-33, 2009.