한국마린엔지니어링학회지 제33권 제2호, pp. 322~329, 2009. 3 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

CO_2 레이저 보조가공에 의한 세라믹재료의 가공성에 관한 기초 연구

김종도† · 이수진* · 박서정**

(원고접수일 : 2009년 1월 7일, 원고수정일 : 2009년 3월 9일, 심사완료일 : 2009년 3월 16일)

The Basic Study on Machinability of Ceramics in CO_2 Laser Assisted Machining

Jong-Do Kim† · Su-Jin Lee* and Seo-Jeong Park**

Abstract : Machinability of LAM(Laser Assisted Machining) has been studied for ceramics such as Al_2O_3, Si_3N_4 and ZrO_2 by CO_2 laser. It was possible to remove ceramics by PCBN tool because material became softening and deterioration by local laser beam irradiation. The advantage of LAM is the ability to produce larger material removal rates and tool life. But, for cutting of Al_2O_3 and ZrO_2, stage of laser power control was needed owing to thermal shock with high temperature of workpiece by laser power. And when Si_3N_4 was machined by LAM, N_2 gas spouted from surface of one cause of high temperature.

Characteristics of LAM were analyzed using pyrometer, dynamometer, SEM and EDS to measure temperature of workpiece surface, cutting force, variation of machining surface and structure of lattice respectively.

As the result of this study, it was found that machinability of LAM for ceramics in CO_2 laser and mechanism of LAM was different according to the kind of ceramics because of properties of materials.

Key words : Laser assisted machining(레이저보조가공), Ceramics(세라믹), CO_2 laser(CO_2 레이저), Al_2O_3(알루미나), Si_3N_4(질화규소), Softening(연화), Deterioration(열화)

1. 서 론

세라믹(ceramics)은 금속, 플라스틱 등과 함께 산업전반에 사용되는 주요 재료 중 하나이다. 파인세라믹은 중량대비 고강도, 우수한 내마모성, 화학적 안정성 및 고온에서의 고강도 유지 등과 같은 뛰어난 특성으로 인하여 기계, 건축 공학계통 및 의료분야 등에서 널리 사용되고 있다[1]-[3]. 하지만 파인세라믹의 고강도 및 높은 취성으로 인해 재료를 제품으로 형상화하는 것이 어렵고, 가공비용이 높아 폭넓은 적용에서 크게 제약받고 있다. 일반적으로 압축·소결된 세라믹재료의 치수와 형상의 정밀도를 위한 마무리 공정으로써 다이아몬드를 이용한 연삭이 행해지고 있는데 이 연삭비용이 세라믹

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail:jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253)
* 한국해양대학교 대학원
** 포항산업과학연구원 용접센터

재료 가격의 약 60~90%를 차지하고 있다[4]-[6]. 이 연삭공정에서 가격을 낮출 수 있다면 좀더 손쉽게 많은 분야에서 세라믹재료의 적용이 가능할 것이다.

따라서 본 논문은 레이저를 이용하여 세라믹재료를 국부적으로 가열하고 연화된 부분을 CBN (Cubic Boron Nitride) 공구로 절삭하는 레이저 보조가공 시스템 구축의 필요성 및 가능성을 규명하기 위하여 실시되었다.

2. 사용재료 및 실험방법

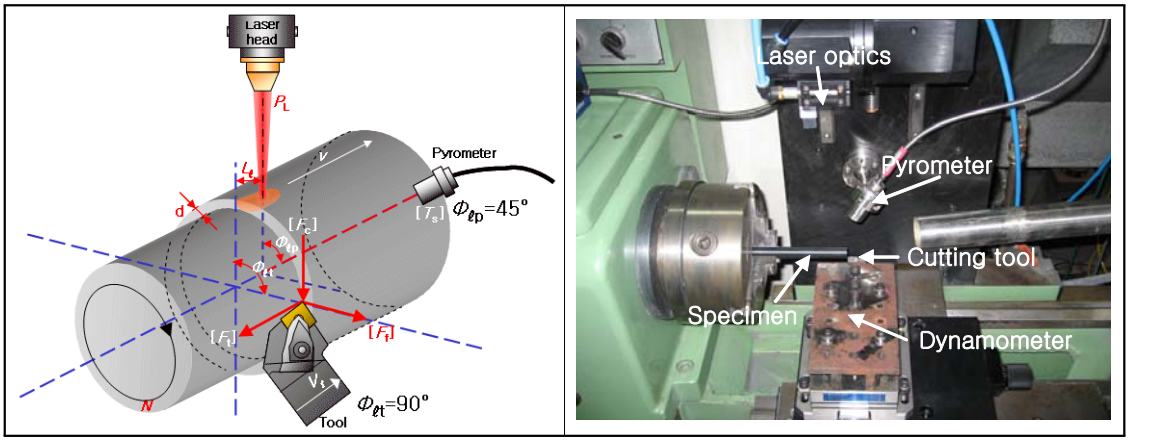
2.1 사용재료

실험에는 세라믹재료로써 산업계에 많이 사용되고 있는 알루미나(Al_2O_3)를 중심으로 질화규소(Si_3N_4) 및 지르코니아(ZrO_2)를 사용하였으며 선삭가공을 위하여 시험편은 환봉상으로 하였다. 시험편의 사이즈는 길이 150mm, 직경 8mm, 14mm 및 16mm이다.

세라믹의 종류에 따라 기계적 성질이 다르므로 레이저를 조사하여 예열할 때에 재료에 따라 영향을 받는다. 그 주요 특성으로는 열전도성, 굽힘강도, 파단인성, 열충격저항 및 열팽창률 등이 있으며 이를 Table. 1에서 나타낸다. 굽힘강도가 작은 경우 레이저 가열시 열적인 파단, 균열 또는 응력유도가 쉽고, 열전도율이 낮으면 가열시 열구배가 커서 급열, 급랭에 의한 내부응력의 변화를 받기 쉬우며, 열팽창률이 클 경우 온도증가에 따른 균열발생이 쉽다. 따라서 알루미나와 지르코니아는 질

Table 1 Mechanical properties of ceramics

Mechanical property \ Material		Al_2O_3	ZrO_2	Si_3N_4
Vickers hardness (Load 500g)	GPa	17.2	13.2	14
Flexural strength	MPa	380	1,000	880
Young's Modulus of Elasticity	GPa	380	200	300
Thermal conductivity (20℃)	W/(m*k)	32	3	30
Heat shock resistance(Put in water)	ΔT_c℃	250	300	750
Coefficient of linear thermal Expansion(40~800℃)	x10^{-6}/℃	8.0	11	3.0
Specific heat	J/(kg*k)	0.79x10^3	0.46x10^3	0.66x10^3



(a) Schematic illustration (b) Photograph

Fig. 1 Schematic illustration and photograph of CO_2 laser-assisted machining system

화규소에 비하여 열충격에 민감하다는 것을 알 수 있다.

2.2 실험장치

본 논문에서는 500W급 CO_2 레이저를 열원으로 사용하였으며, 온도측정을 위하여 적외선 타입의 고온계(pyrometer)와 절삭력 측정을 위한 공구동력계(dynamometer)를 이용하였다. CO_2 레이저는 최대 사용가능 출력이 350W이고 스폿사이즈는 사용한 초점범위에서 약 2~3mm였으며 가우시안 빔을 사용하였다. 레이저 헤드는 반자동 범용선반인 HWACHEON WL-380B에 설치하였고 사용된 선반은 기어식으로 회전속도는 최소 330rpm에서 최대 1,800rpm, 이송속도는 0.013mm/rev, 0.024mm/rev 및 0.03mm/rev로 한정적으로 변환이 가능하다.

공구는 날끝반경(nose radius)이 0.8mm, 두께4.76mm, 음의 경사각 -6°의 CNMA 120408 CBN 인서트를 사용하였다.

2.3 실험방법

레이저 예열선삭을 위해 설치한 실험장치의 모식도와 사진을 Fig. 1에 나타낸다. 시험편의 편심에 의해 가공 중 채터링이 발생하는 것을 막기 위하여 시험편을 척에 고정시키고 다이얼게이지(dial gauge)를 이용하여 편심 여부를 확인했다. 레이저의 조사부로부터 45° 지점에 고온계를 설치하고 90° 위치에 공구 및 공구동력계를 설치하여 선삭을 행하였다. 세라믹의 산화를 막기 위하여 노즐을 추가로 설치하고 Ar 가스를 레이저 조사지점에 분사하였다. 또한, 선삭시 발생하는 세라믹 분진의 배출을 위하여 흡진기를 설치하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 알루미나(Al_2O_3)의 가공성

3.1.1 모재와 레이저 예열부의 특성비교

예열하기 전 열영향을 받지 않은 본래의 알루미나와 예열 이송한 시험편 표면의 특성을 알아보기 위하여 SEM사진 관찰과 EDS 분석을 하였다. Fig. 2는 가공하기 전 알루미나 모재의 분석결과를 Fig. 3에는 레이저 출력 350W에서 예열이송시 온도에 따른 알루미나의 표면 상태 및 EDS 분석결과를 각각 나타낸다. Fig. 2의 가공 전 모재의 SEM 사진을 보면 연삭에 의해 표면이 매끄럽지 못하고 다소 거친 것을 알 수 있다. 실험에 사용한 알루미나는 순도가 99.7%이기 때문에 EDS 분석에서는 거의 O와 Al의 성분만이 동정되었다. Fig. 3의 레이저 예열 후의 시편의 표면 사진을 보면 균열이 발생 한 것을 볼 수 있다. 예열된 시편은 산화작용이 일어났을 것으로 예상 되었으나 알루미나는 이미 산화된 Al물질이므로 예열을 하여도 특별히 산화가 더욱 진전되지 않는다는 것을 EDS 분석 별과로부터 알 수 있다.

미세한 입자로 이루어진 시편을 어떠한 높은 온도에서 가열하면 재결정화의 발생여부와 상관없이 그 평균입자크기가 커지게 된다. 평균입자크기가 커지기 위해서는 일부입자들이 작아져서 완전히 없어지는 현상이 일어나게 되는데, 입자성장에 있어서 그 원동력은 미세입자들로 이루어진 시편이 대형입자로 바뀔 때 입계면적의 감소에 따른 계면에너지의 감소이다. 계면의 구조를 생각해 보면 원자

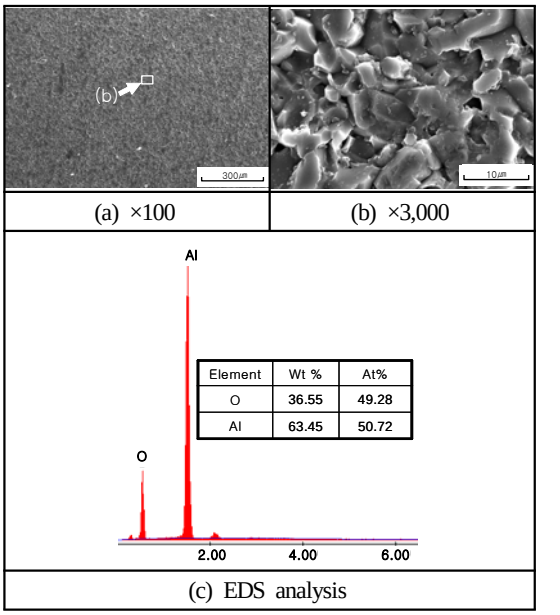


Fig. 2 Properties of as-received Al_2O_3

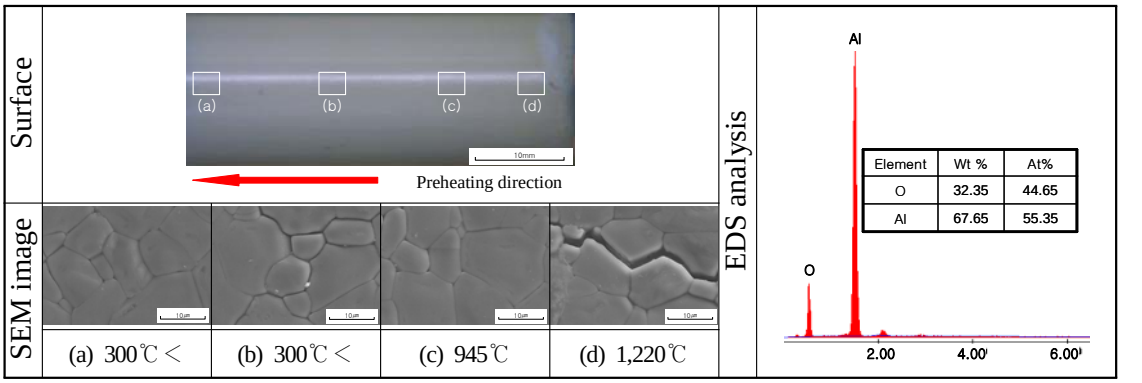


Fig. 3 Surface characteristics of Al_2O_3 with preheating during traveling

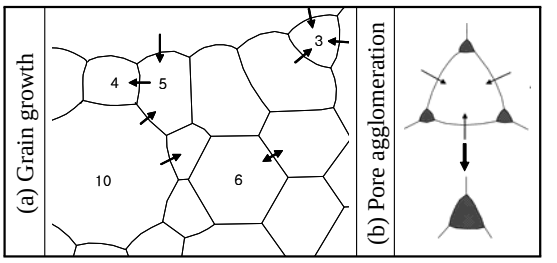


Fig. 4 Schematic of mechanism of grain growth and pore agglomeration for Al_2O_3

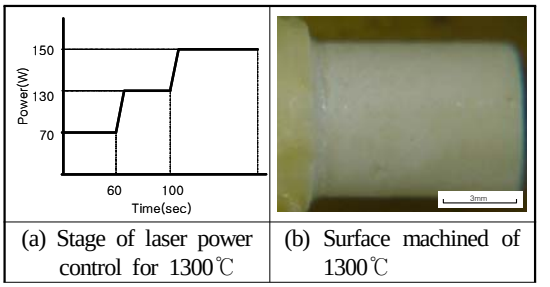
가 계면을 넘어 점프하는 것으로, 활성화 에너지는 입계확산에서의 활성화 에너지와 비슷해야 할 것이다. 만일 모든 입계가 똑같은 에너지를 가지고 있다고 가정하면, 입자들은 서로 120°의 각을 이루며 만나게 된다. 이를 2차원적으로 나타내면 직선의 입계가 서로 120°의 각도를 이루는 것은 6면을 가지는 입자들 간에서만 가능하다. 6면보다 적은 면을 가지는 입자들은 그 입자의 중심에서 봤을 때 오목한 계면을 가지게 된다.

Fig. 4(a)에 나타내듯이 입계는 곡률의 중심을 향해 이동함으로 6면 이하의 입자들은 점점 작아지게 되고 6면 이상의 입자들은 점점 커지게 된다. 이러한 입자 성장에 의하여 완전한 순도의 재료라 할지라도 입계에 원자결함에 의한 스페이스 차아지(space-charge) 분위기가 형성되게 되고 용질석출도 일어나게 된다. Fig. 4(b)에서 보이듯이 원자결함이나 불순물이 입계에 모여 입자성장을 저지하고 계면에 결함을 가져오기 쉽다[7]. 따라서 고온으로 처리된 표면은 입자가 성장하고 그로 인하여 입계의 균열이 발생하여 효과적인 절삭을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

이 실험에서 직경 16mm 시험편의 경우 출력이 부족하여 이송을 실시하는 즉시 온도가 저하된 것을 알 수 있다. 따라서 절삭에 필요한 온도까지 예열이 불가능 하다는 결론을 얻었으며, 상대적으로 입열양이 적어도 되는 직경 8mm의 알루미나 시험편을 이용하여 추가실험을 진행하였다.

3.1.2 단계적 예열선삭

앞서 실험한 조건과 유사한 방법으로 직경 8mm의 알루미나를 예열선삭 한 결과 예열온도가 충분히 올라가고 선삭이 가능하였으나 선삭 중에 파단되거나 선삭 후 작은 충격에도 쉽게 깨어졌다. 이는 알루미나의 열충격저항이 약 250ΔT℃이므로 급격한 온도상승에 열충격을 받아 시편에 균열이 생기면서 깨어지거나 작은 충격에도 파괴되기 쉽기 때문이다[8]. 이를 최소화하기 위하여 레이저 출력을 단계적으로 변화시켜 절삭을 실행하였다. 단계적으로 예열절삭을 실시한 시험편은 그렇지 않은 시험편에 비하여 충격에 깨어지는 현상이 현저히 저하하였는데, 이것은 단계적 예열이 시험편의 급격한 열충격을 완화시켰기 때문이다. Fig. 5는 목표 온도를 1,300℃로 했을 경우의 단계적 예열절삭을 실시한 시간에 따른 출력변화의 그래프와 선삭 후 시편의 표면사진이다.



(a) Stage of laser power control for 1300℃ (b) Surface machined of 1300℃

Fig. 5 Graph of power control and surface photo for Al_2O_3

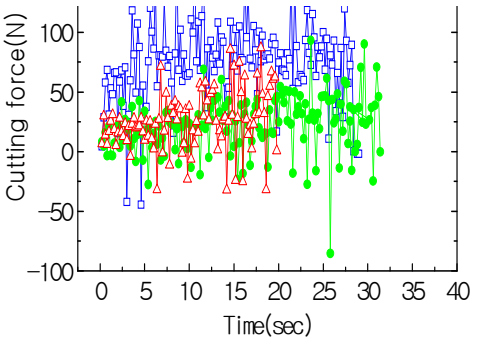


Fig. 6 Cutting force by surface temperature

예열온도 1,300℃, 1,500℃ 및 1,700℃로 변화시켜 절삭력을 관찰하였고 그 결과를 Fig. 6에 보여준다. 레이저 출력을 변화시킬 때 수동으로 슬롭업(slope up)을 하였기 때문에 선삭 중 온도가 일정하게 유지되지 않은 경우도 있었으나 전체적인 예열선삭의 경향을 파악하는 데는 문제점이 없을 것으로 판단된다.

예열온도가 상승함에 따라 알루미나가 연화되어 절삭저항이 줄어들기 때문에 절삭력은 전체적으로 낮아졌다. 예열온도 1,500℃ 이상에서는 표면에 뜯어져 나가는 듯한 양상을 나타내었다 따라서 절삭력 측면에서는 높은 예열온도가 유리하나 표면조도를 고려한다면 1,300℃이하로 예열하여 절삭하는 것이 유리하였다.

3.1.3 구조의 변화

모재와 예열선삭한 시험편의 격자구조 변화를 알아보기 위하여 XRD 시험을 행하고 그 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 측정된 시험편의 패턴은 모재

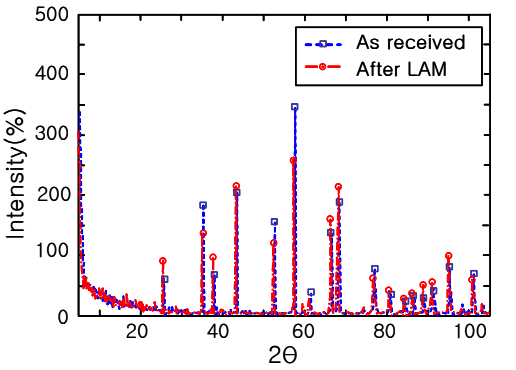
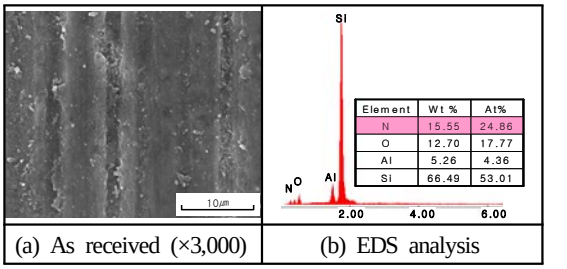


Fig. 7 XRD analysis of as-received and LAMed Al_2O_3



(a) As received (×3,000) (b) EDS analysis

Fig. 8 Properties of as-received Si_3N_4

와 거의 유사하고 피크값의 차이만 조금 보이고 있다. 이는 예열선삭 후의 표면조도의 불균일에 의한 X선 산란과 알루미나의 재방향성에 의한 가능성을 생각할 수 있다.

3.2 질화규소(Si_3N_4)의 가공성

3.2.1 질화규소(Si_3N_4)의 가공특성

일반적으로 질화규소는 1,000℃ 이상에서 소결제인 YSiAlON의 점도(η)감소로 인하여 연화되고 소성 변형이 일어날 수 있게 되어 예열선삭이 가능하게 된다[9].

실험에 사용된 질화규소는 육각봉 모양의 β-Si_3N_4와 10%이하의 YSiAlON 비정질재로 구성되며 1,000℃ 이상의 고온에서는 β-Si_3N_4 결정 주변의 YSiAlON이 연화되어 소성변형이 주로 일어나므로 온도를 상승시켜 낮은 점도에서 선삭 가공을 함으로써 절삭력을 감소시킬 수 있다[10],[11].

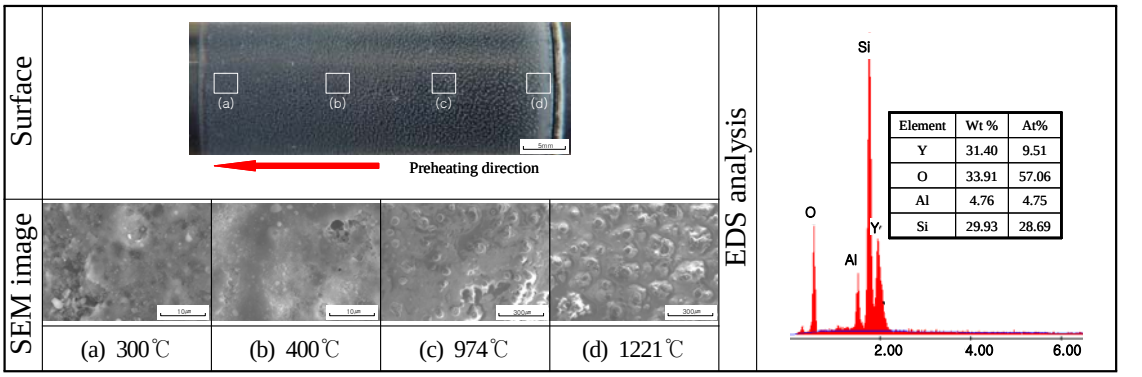


Fig. 9 Surface characteristics of Si_3N_4 with preheating during traveling

3.2.2 모재와 레이저 예열부의 특성비교

예열하기 전 수급상태의 질화규소를 Fig. 8에, 회전속도 1,260rpm, 이송속도 0.013mm/rev, 출력 350W의 조건으로 예열하면서 이송한 시험편의 표면특성을 알아보기 위하여 SEM과 EDS분석을 행하여 Fig. 9에 각각 나타내었다. 모재는 육안으로 관찰하면 매끄러운 표면을 가지고 있으나 3,000배로 확대하여 살펴보면 연삭에 의한 흔적이 남아있다. EDS 분석결과, 모재에서는 N원소가 검출되었으나 예열을 진행한 후에 N이 검출되지 않았다. 이는 고온에서 N이 결합하여 질소가스(N_2)의 형태로 빠져 나갔기 때문이다. 또한 산소의 함유량이 많아진 것으로 산화되었음을 알 수 있다. 문헌[4],[9],[10],[11]에 따라 절삭부 온도가 최소 1,200 ℃가 되어야 할 것으로 예상하였기 때문에 시험편의 온도가 1,200℃로 상승할 때 까지 초반에는 이송하지 않고 예열하여 온도를 상승시킨 후 이송하였다. 그 결과 예열 초반부에 애블레이션이 일어났다. 이송을 시작하자마자 낮은 출력으로 인하여 온도가 급격히 하강하였으며 각각의 온도 계측결과와 시편표면을 Fig. 9에 나타내었다. 예열온도가 높아질수록 표면에 크레이터 현상이 많이 일어났다. 이는 N가 N_2로 결합하여 분출하면서 발생한 것이다. 이 크레이터의 생성이 결과적으로 고강도의 세라믹을 절삭하는데 있어서 표면강도를 저하시키고 균열을 일으켜, 소결제의 연화에 의한 절삭 메커니즘과 더불어 효과적인 절삭에 크게 기여할 것으로 판단된다. 이에 차후에는 출력을 증가시켜 필요온도 이상 유지가 가능한 조건에서 절삭공정을 실험할 예정이다.

3.2.3 격자구조의 변화 검증

모재와 예열선삭한 시험편의 XRD분석한 결과를 Fig. 10에 나타낸다. 방사선원은 CuKα X-ray를 사용하였다. 측정된 예열선삭한 시험편의 XRD 패턴은 알루미나의 결과와 동일하게 모재와 유사하나 피크값이 조금 낮았다. 그 이유는 예열선삭후 시험편의 표면조도가 일정하지 않아서 X선이 산란되었을 가능성과 β-Si_3N_4의 재방향성에 의한 가능성을 생각할 수 있으며 결과적으로 예열선삭 후 격자구조의 변화는 없는 것으로 판단된다.

3.3 지르코니아(ZrO_2)의 가공특성

일반적으로 많이 사용되는 파인세라믹의 하나로써 절삭가능성을 검토하기 위하여 직경이 14mm인 아이보리색의 지르코니아를 예열선삭 하였다.

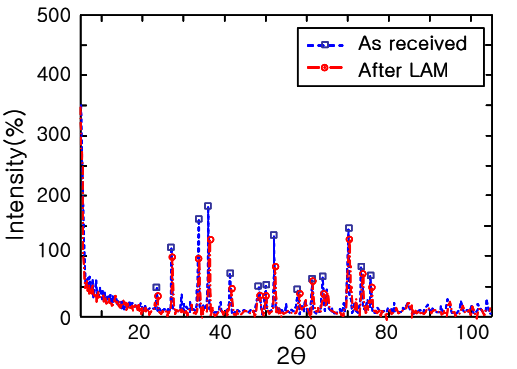
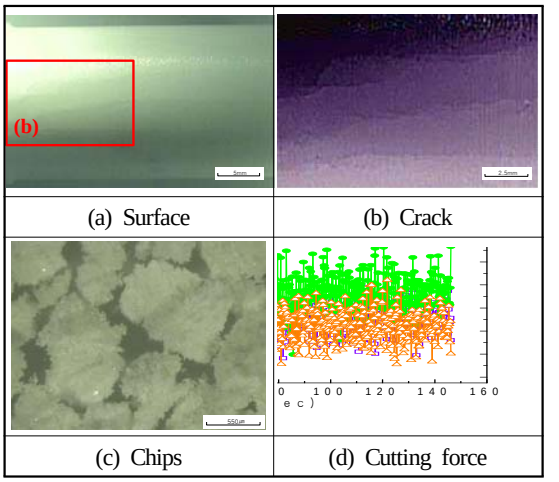


Fig. 10 XRD analysis of as-received and LAMed Si_3N_4



(a) Surface (b) Crack

(c) Chips (d) Cutting force

Fig. 11 Characteristics of ZrO_2 machined

지르코니아 또한 알루미나와 마찬가지로 열충격에 민감하기 때문에 1,200℃까지 단계적으로 예열하였다. Fig. 11(a)의 시편 표면사진을 관찰하여 보면, 절삭된 표면의 조도상태는 알루미나의 경우보다 양호하였다. 하지만 Fig. 11(b)에서 보이듯이 표면을 자세히 관찰해 보면 미세한 균열이 관찰된다. 이는 지르코니아가 열충격저항이 낮고 높은 열팽창률의 물성을 가지기 때문에 쉽게 균열이 일어난 것으로 사료된다. Fig. 11(c)는 절삭공정 중에 발생하는 칩의 형상이다. 전단형 칩의 형상을 하고 있어 좋은 가공조건이라고 판단하기는 어렵다[12]. Fig. 11(d)는 절삭력 그래프를 나타내고 있다. 절삭력은 주절삭력(F_c), 이송분력(F_f), 배분력(F_t)의 세 절삭력을 공구동력계를 사용하여 실시간으로 측정하였고, 그 중 주절삭력이 실제 절삭에 가장 큰 영향을 미친다. 그래프에 보이는 것처럼 알루미나의 경우와 비교하여 절삭력이 높았으나 절삭가능성은 충분하다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

고강도, 내부식성 및 내마모성 등의 특성을 가지고 있는 파인세라믹은 경도가 높고 취성이 강하기 때문에 가공하기가 어렵고 높은 비용이 요구되는 재료이다. 레이저 예열선삭은 집광된 레이저빔을 세라믹에 조사하여 국부적으로 예열하고 연화된 부분을 절삭하므로 공구의 수명을 늘리고 생산성을 향상시킬 수 있는 이점이 있다. 본 연구에서는 CO_2 레이저를 사용하여 각종 공업용 세라믹의 레이저 예열선삭에 대한 가능성에 대하여 기초적인 검토를 행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 알루미나는 고온으로 가열하면 미세 입자가 성장을 하게 되는데 이 성장에 의하여 입계면에 결함을 가져오기 쉽다. 따라서 고온으로 처리된 표면은 연화 뿐 아니라 입자성장에 의한 입계의 균열로 효과적인 절삭을 유도할 수 있었다.

2) 질화규소는 고온으로 가열하게 되면 β-Si_3N_4 결정 주변의 소결재가 YSiAlON의 비교적 낮은 연화온도로 인하여 먼저 연화됨으로써 소성변형되어 절삭이 가능함을 확인하였다. 또한 N가 N_2가스로 결합되어 분출하면서 표면에 결함을 발생시켜 더욱 효과적인 절삭을 유도하였다. 차후에 출력을 증가시킨 조건에서 더 깊은 연구가 필요하다.

3) 지르코니아는 알루미나와 마찬가지로 열충격저항이 낮아 단계적 예열선삭이 필요했으며 선삭결과 절삭력은 비교적 높게 측정되었고 표면상태는 알루미나의 경우 보다 양호한 절삭특성을 보였다. 이로써 지르코니아의 레이저예열선삭 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지원 지역산업기술개발사업인 "레이저 복합가공기용 핵심 광학모듈 개발 : 10024308" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 박정현, 뉴세라믹스, 반도출판사, 1979.
[2] 이준근, 송종택, 김병훈, 한상목, 김환, 박정현, 김철영, 세라믹공학, 반도출판사, 1979.
[3] Sakai Katsuhiko and Suzuki Yasuo, "Laser asisted turing of hardened steel", Laser Material Processing Conference, pp.719-722, 2005.

[4] 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(2000) 2213-2233.

[5] Chryssolouris, G., Anifantis, N., and Karagiannis, S., "Laser assisted machining: an overview", Journal of Manufacturing Science & Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 119, Iss. 4(B), p.766-769, 1997.

[6] Armitage Kelly, "Laser assisted machining of hard to wear materials", master Thesis, Swinburne University of Technology, Aug. 2006.

[7] W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, Introduction to Ceramics, JOHN WILEY & SONS, 1975.

[8] P.A.Rebro, Y.C.Shin and F.P.Incropera, "Laser-assisted machining of reaction sintered mullite ceramics", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.124, pp. 875-p885, 2002.

[9] 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, Vol. 40, pp. 2213-2233, 2000.

[10] Y. Tian, and Y. C. Shin, "Laser-assisted machining of damage-free silicon Nitride parts with complex geometric features via in-process control of laser power", Journal of the American Ceramics Society, Vol. 89, No. 11C, 2006.

[11] 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, Vol. 123, pp. 639-646, NOV, 2001.

[12] 김동열, 박정보, "절삭이론과 실제", 기전연구사, 1992.

저 자 소 개

김종도(金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산가공공학과 응용고온공학 코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 편집위원겸 사업이사, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 2008년 10월~대한기계학회 학술이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 연구이사, 관심분야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 해석

이수진 (李修眞)

1980년 4월생, 2003년 목포해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 2003~2006, 현대상선 근무, 2008~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학과 석사과정, 관심분야 : 레이저용접, 레이저예열선삭, 난삭재가공

박서정 (朴曙叮)

1969년 12월생, 2003년 오사카대학교 생산과학전공 박사 졸업, 2004년 노스캐롤라이나주립대학교 POST DOC 과정 이수, 2005년~현재,포항산업과학연구원, 용접센터 책임연구원, 관심분야: 레이저 용접, 레이저 가공, 측정 및 분석