

초음파 진동을 이용한 세라믹스의 미세 구멍 가공 기술

이봉구*, 최헌중, 이석우(한국생산기술연구원)

A Study on Micro-hole machining for Ceramics(Al_2O_3) Using Ultrasonic vibration

Lee Bong-Gu, Choi Hon-Zong, Lee Seok-Woo

(Korea Institute of Industrial Technology)

ABSTRACT

Ultrasonic machining technology has been developed over recent years for the manufacture of and quality-assured precision parts for several industrial application such as optics, semiconductors, aerospace, and automobile application. The past decade has seen a tremendous in the use of ceramics in structural application. The excellent thermal, chemical and wear resistance of these material can be realized because of recent improvements in the overall strength and uniformity of advanced ceramics. Ultrasonic machining, in which abrasive particles in slurry with water are presented to the work surface in the presence of an ultrasonic-vibrating tool, is process which should be of considerable interest, as its potential is not limited by the electrical or chemical characteristics of the work material, making it suitable for application to ceramics.

This paper intends to further the understanding of the basic mechanism of ultrasonic machining for brittle material and ultrasonic machining of ceramics based in the fracture-mechanic concept has been analyzed.

Key Words : Ultrasonic micro-hole machining(초음파 미세구멍가공), Resonant frequency(공진 주파수), Horn(혼), Abrasive(지립), Amplitude(진폭), Machining pressure(가공압), Tool wear(공구 마모)

1. 서 론

최근 각종 기계의 경량화, 고정밀화, 고성능화가 요구되는 전자 및 통신기기, 반도체 부품, 항공기 및 자동차 분야등 미래지향적인 첨단 산업 전반에서 고인성, 고내열성, 고강도의 특성을 가진 난삭재의 정밀가공 기술의 필요성이 대두되고 있다. 현재 고부가가치 부품소재로 사용되고 있는 세라믹스는 우수한 특성과 다양한 기능성으로 각광을 받고 있는 신소재이나 고정도, 취성 재질로 난삭재에 속한다. 현재 세라믹스는 제조방법상 소결공정을 필수로 하여 그 수축현상을 피 할 수 없는 바, 고정도의 요소 부품화를 위해선 후가공을 필요로 한다.

세라믹스는 고강성, 고정도를 갖는 재료의 특성

때문에 기존의 절삭공구를 사용하여 칩을 발생시키는 범용절삭 방법으로 가공이 어려운 재료이다. 세라믹스에 대한 가공법들중 기계가공법인 다이아몬드 연삭 슷들을 사용한 연삭 가공, 광학적 제거 가공인 laser 가공, 그리고 일부 도전성 세라믹스에 대해 방전 가공등이 사용되고 있다. 그러나 세라믹스는 일부를 제외하고 대부분이 절연체이므로 3차원적이 복잡 형상이나 특수형상의 구멍 및 홈가공 등에는 초음파 가공이 가장 효과적인 가공법이라 할 수 있다.

초음파 가공법은 복합재료, 세라믹스, 수정과 같은 취성재료에 가장 일반적으로 사용되는 가공법이다. 초음파 가공법은 공구의 상·하 진동을 이용하여 공구와 가공물 사이에 공급되는 지립(SiC, 다이아몬

드) 등을 가공물에 충돌시켜, 고경도 취성 재료에 구멍 또는 형상을 가공하는 방법이다. 초음파 가공법은 충격파쇄 가공법이기에 때문에 단단하고 부서지기 쉬운 재료 등 비전도성 취성 재료의 가공법으로 가장 일반적으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 세라믹스와 같은 비전도성 취성 재료의 미세 크랙에 의한 초음파 가공 메커니즘을 이해하고, 실험을 통하여 선정된 최적의 가공조건을 바탕으로 공구직경이 30 μ m 초경 공구를 사용하여 순도 99.8% Al₂O₃ 세라믹스를 판통 가공하여 초음파 가공의 한계를 극복하고자 하였다.

2. 초음파 가공 메커니즘

2.1 미세 크랙에 의한 초음파 가공 메커니즘

초음파가공은 세라믹스와 같은 비전도성 재료의 정밀 가공에 효율적인 가공법으로서 공구와 가공물 사이에 있는 지립이 공구의 진동에 의한 피삭재의 표면에 부딪힘으로써 미세 크랙이 발생하는데 이러한 현상이 반복됨으로써 가공이 이루어진다.

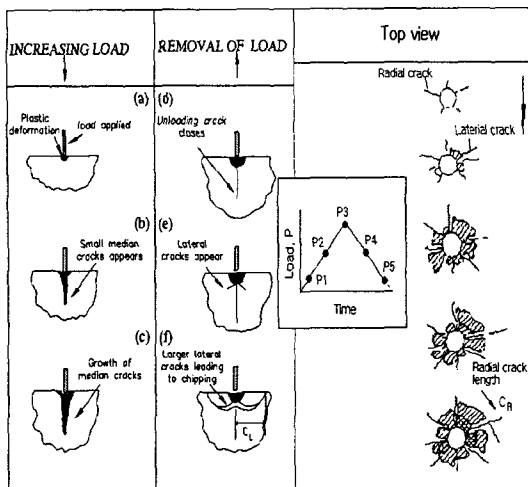


Fig. 1 Localized deformation and fracture of brittle material due to indentation

지립을 공구와 가공물 사이에 공급하여 공구 진동에 의한 충격으로 가공물을 가공하는 방법이다. 초음파 가공시 지립 1회의 충격력에 의한 파쇄량이 미소하기 때문에 형상정밀도와 표면 거칠기를 향상시키며, 가공물에 큰 변형을 주지도 않는다. 한번의 충격으로 가공되어지는 양은 미소하지만 매초 수 만 번이라는 주기로 충격이 반복되는 결과 충분히 실용적인 가공속도를 얻을 수 있기 때문에 단단하고 부서지기 쉬운 취성 재료들의 가공방법으로 적합하다.

그러나 초음파 가공법은 가공중에 가공압을 항상 일정하도록 유지하여야 하며 또한 공구와 가공물간에는 지립의 평균 입경에 해당하는 가공 Clearance(공작물과 가공물사이)가 생기는 가공특성을 갖고 있다. 초음파 가공은 가공물뿐만 아니라 공구의 마모, 지립의 순환에 의한 공구 측면부의 가공량도 발생하기 때문에 정확한 가공 형상을 얻기 위해서는 가공하고자 하는 구멍의 크기에 따른 적절한 지립의 크기와 공구의 직경의 선정과 가공 중에 발생한 공구의 마모등을 고려한 최적의 가공공정의 선정이 요구된다.

2.2 실험 장치

본 실험에 사용된 초음파 가공기는 회전진동자 및 냉각장치, 이송 및 제어장치, 등으로 구성되어 있는데 그림 2에 제작된 초음파 복합 가공 시스템의 구성도를 나타내었다.

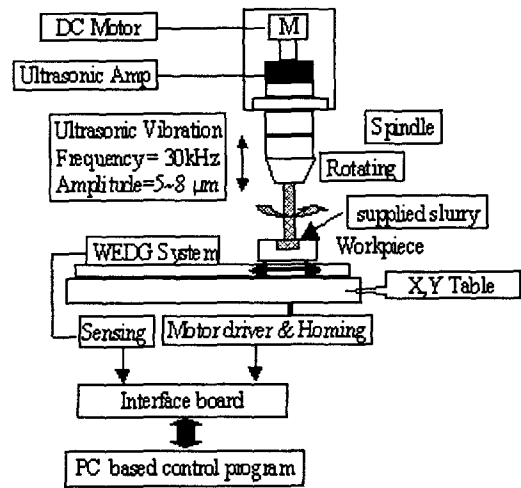


Fig. 2 Schematic diagram of the USM system

회전 진동자를 채택하여 단순한 초음파 가공뿐만 아니라 공구의 회전에 의한 복합 가공이 가능하도록 하였으며 제어장치(Controller)는 PC를 기반으로 하여 3축 제어를 하였으며, 이송 정밀도를 위하여 스텝핑 모터(Stepping Motor)를 이용하였다. Z축에는 백래쉬가 없는 볼스크류(리드 5mm)와 하모닉 드라이버를 이용하여 축의 이송을 1 μ m로 정밀 구동이 가능하도록 하였다. 초음파 가공 실험은 분해능이 0.01g 인 로드셀을 사용하여 일정한 가압력을 제어하면서 실험하였으며, 진동자의 냉각을 위하여 압축공기를 진동자에 공급하였다.

2.3 실험 방법

본 실험에 사용된 초음파 진동자는 압전 진동자와 혼이 볼트로 체결된 볼트 량지방형 진동자(BLT)이고 공구의 교환시 항상 동일한 조건을 만족할 수 있으며 공구의 착탈이 쉬운 콜릿형의 진동자 혼을 설계, 제작하였다. 회전 진동자의 공진 주파수는 30 kHz이고 출력 300W인 PZT 진동자를 사용하여 실험하였으며 공구의 재질로는 텅스텐 카바이드를 사용하였다. 가공물로는 순도가 99.8%인 세라믹스, 지립은 SiC와 다이아몬드를 이용하였다. 초음파 가공 실험 조건을 Table. 1에 나타냈다. 가공실험은 공구의 형상과 가공압력을 실험변수로 하였고 이러한 변수들이 가공 특성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하여 이러한 실험에서 나오는 가공결과들을 비교 분석함으로써 가공시 발생하는 결함들을 찾아내고 그 결함들의 원인을 규명하여 최적의 가공조건을 제시하고자 하였다.

Table 1. Experiment Conditions

Machine spec	Precision ultrasonic machine	
	Stroke	140×120×100
	Feed	Step motor
	Spindle speed	Max : 300 rpm
Ultrasonic unit	Frequency	30kHz, 300W
	Amplitude	5 ~ 8 μ m
	Cooling	Air cooling
Abrasive	SiC#320(40 μ m),#800(14 μ m),#8000(1 μ m) Diamond #3000(4~8 μ m),#8000(1 μ m)	
	Workpiece	Alumina ceramics(Al_2O_3):0.3t HRV 1,500 Kg/mm ²
Slurry	50wt % (water : abrasive)	
Machining conditions	Tool dia.	30, 50, 100 μ m

3 실험 결과 및 분석

3.1 재료 제거율(Material removal rate)

초음파 가공법은 물과 지립이 혼합된 슬러리가 가공영역 내에 유입되어, 슬러리속의 지립들이 공구의 상하진동에 의해 가공면에 미세 크랙을 발생시키면서 가공이 이루어지는 방법이다. 세라믹스(Al_2O_3)을 가공시 지립의 크기에 따른 재료 제거율의 관계를 그림 3에서 나타내고 있는데, 지립의 직경이 크면 늘수록, 가공속도가 증가됨을 알 수 있다. 일반적으로 초음파 가공에서 재료 제거율에 영향을 미치는 인자들은 가공력과 지립의 종류 및 크기등이라 할 수 있다.

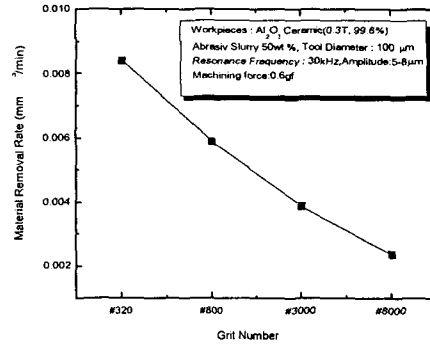


Fig. 3 Relation between grit number and MRR(Material Removal Rate)

3.2 초음파 가공 특성

초음파 가공중에 발생하는 미세 크랙으로 인한 가공 표면특성과 재료 제거율을 분석하는 방법으로는 아직까지 정량적인 측정 방법이 개발되지 않아 미세 가공 특성을 파악하는 어려움이 많이 있다. 미세 구조물이나 가공특성을 파악하기 위해서는 아직도 많은 측정 기술이 필요한데 되며 현재 일반적으로 사용하는 방법은 SEM 사진을 통해서 측정하는 방법이다.

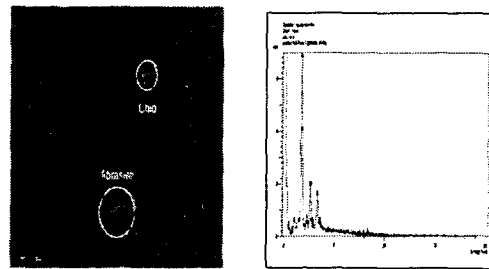


Fig. 4 SEM photographs of the abrasive particle chip

본 연구에서도 SEM 사진을 통해서 가공중에 일어나는 재료 제거율에 대한 가공특성과 가공표면을 관찰하였다. 그림 4는 초음파 가공법을 이용하여 세라믹스에 미세 구멍을 가공한 경우의 가공면을 촬영한 사진으로 미세구멍을 홈 내벽에 칩과 지립이 묻어 있음을 알 수 있다. 사진을 통해서 내벽의 표면의 거칠기와 초음파 가공시 미세칩에 의한 재료 제거율에 대한 특성을 알 수 있다.

3.3 공구 마모의 영향

공구 마모에 영향을 미치는 인자는 끝단에서의 진폭, 가공압과 공작물의 경도와 인성 가공깊이 등이다. 그림 5는 초음파 가공후의 공구 마모영향으로 나타난 관통 구멍의 단면형상을 나타낸 것이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 공구마모와 지립의 순환에 의하여 구멍 입구부와 출구부 사이의 직경의 차이가 발생하였음을 알 수 있다.

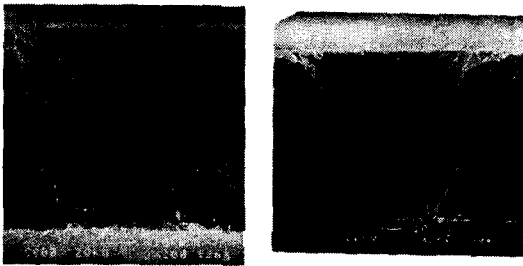


Fig. 5 SEM photographs of cross section inside micro-hole

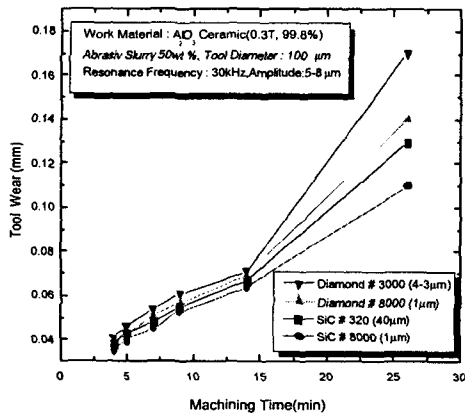
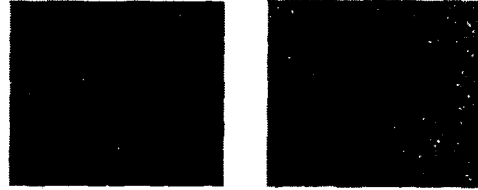


Fig. 6 influence of abrasive grit size on tool wear

그림 6은 지립의 크기와 종류에 따른 공구 마모를 나타낸 그림으로 지립의 직경이 커짐에 따라 공구의 마모가 증가하였고, SiC의 지립을 사용했을 때 보다 다이아몬드 지립을 사용했을 경우 공구의 마모가 심하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 공구 마모에 대한 영향은, 지립의 종류와 크기에 따라 영향을 받게 되므로 초음파 가공시 적절한 지립의 선정이 중요하다.

3.4 지립에 의한 가공 표면 특성



(a) diamond(4~8μm) (b) diamond(1μm)
Fig.7 SEM photographs of the ultrasonic machined surface with diamond particle

다이아몬드 지립 #3000(4~8μm), #8000(1μm)을 사용 하였을때 지립 크기에 따른 구멍 가공후의 가공면 내벽을 관찰한 사진이다. 사진을 통해서 알 수 있듯이 지립의 평균 직경이 커짐에 따라 가공표면의 거칠기가 나빠짐을 알 수 있다. 사진에 검게 나타나 있는 흔적은 지립에 의해 가공면에 흠이 발생한 것이다.

3.4 가공끝단의 취성 파괴 현상

취성 재료의 관통 가공시 가공 끝면 부위에서의 취성 파괴현상이 나타나는데 이러한 현상은 초음파 가공이 진동충격력에 의해 가공이 이루어지기 때문에 발생하는 것이다. 공작물의 취성파괴 현상을 방지하기 위해서 그림 8과 같이 공작물과 고정판과 밀착을 위한 지그를 설계하여 초음파 가공실험을 하였다. 그림 8에서 처럼 공작물이 테이블위에 유리판과 공작물의 밀착을 글루건과 크리스탈 왁스를 사용하여 고정시킨 후 가공 실험한 결과를 그림 9에 나타내었다.

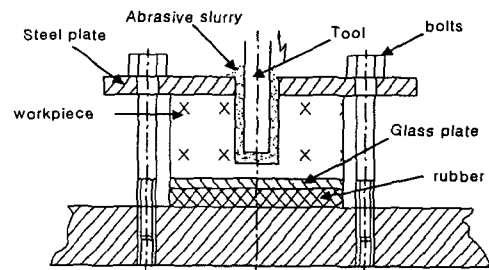


Fig. 8 Influence of abrasive grit size on tool wear

실험 결과 공작물을 글루건을 사용하여 공작물을 밀착 시킨 경우 보다 크리스탈 왁스로 고정시킨 시편이 취성 파괴 현상이 적게 나타났다. 가공물 아래에 설치한 고무판은 초기 충격력의 의한 공구의 파

파괴를 방지하기 위한 것이다.

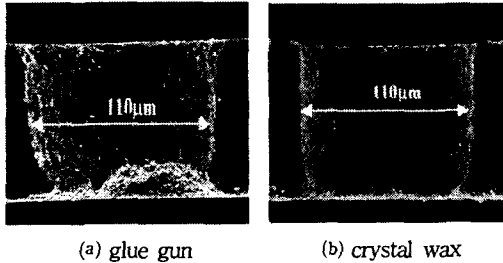


Fig. 9. Photographs of machined holes

새로이 제안한 방법에 의하여 가공 끝면의 취성 파괴 현상과 공구의 파손을 줄임으로써 가공 정밀도를 향상시키고, 가공결함을 줄일 수 있다. 실험을 통해서 축적된 초음파 가공기술을 이용하여 직경 $30\mu\text{m}$ 의 공구로 두께 $300\mu\text{m}$ 의 세라믹스를 관통 가공하였다. 일반적으로 초음파 가공의 경우 세장비(aspect ratio)가 5이상의 경우 지립의 순환이 원활하지 못하여 가공속도가 현저히 떨어지고 공구의 마모가 심하게 발생하게 된다.

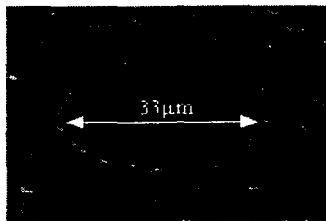


Fig. 9. Micro-hole Al_2O_3 Ceramics (Diamond#8000, 50wt%, depth: $300\mu\text{m}$, aspect ratio:10)

가공속도를 향상시키고 공구의 마모를 줄이기 위해서는 가공면으로 지립의 순환이 원활하여야 되므로 깊은 구멍 가공 시에는 지립의 순환을 위하여 일정 깊이 가공후 공구 요동하여 지립의 순환을 하게 하고 슬러리에 일정한 흡입력의 발생을 일으켜 공구를 통한 가공액 배출을 피하는 방법이 필요하다.

4. 결론

초음파를 이용한 미세 구멍 가공기술 개발을 위하여 본 실험을 통해서 고경도, 난삭재 취성 재료인 세라믹스의 미세 구멍 가공을 위한 가공기술 및 가공특성, 가공시 고려해야 할 점을 얻을 수 있었다. 본 실험적 연구를 통해서 취성 재료인 세라믹스 가공을 위한 초음파 가공기 제작과 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 초음파 혼에 공구 설치시 편심이 발생하는데 편심량을 줄이고 착탈이 가능하도록 공구를 콜릿척 방식으로 체결하는 진동자를 설계 제작하였다.

2) 취성 재료인 세라믹스(0.3mm)의 관통 가공시 가공 끝단에서의 파괴 현상이 나타나는데 이는 가공물과 지지 하판과의 밀착을 위한 장치를 설치하여 파괴현상을 줄일 수 있었다.

3) 최적의 가공조건 선정 및 적정 가공압 제어를 통하여 공구 $30\mu\text{m}$ 를 이용하여, 순도 99.8% 세라믹스(0.3mm)를 관통 가공(세장비:10)하여 $33\mu\text{m}$ 의 미세 구멍을 가공하였다.

후 기

본 연구는 2001년도 차세대 신기술 개발사업의 연구비에 의하여 지원되었으며 이에 감사합니다

참고문헌

1. Maruyama, Y, Kamo, S and Uno, M, "Rolling of FRP Threaded with Ultrasonic Vibration" JSPE, 1988.
2. T. C. LEE, C. W. CHAN "Mechanism of the ultrasonic machining of ceramic composites", Journal of Materials Science, Vol.71, PP.195-201, 1999.
3. K. P. Rajurkar, Z. Y. Wang, A. Kuppattan "Micro removal of ceramic material (Al_2O_3) in the Precision" engineering. PP. 73-78. 1997.
4. Q. H. Zhang, J. H. Zhang, Z. X. Jia, "Material-removal-rate analysis in the ultrasonic machining of engineering ceramics ", Journal of material processing technology, PP.180-184, 1999,
5. B. Ghahramani, Z. Y. wang, "Precision ultrasonic machining process: a case study of stress analysis of ceramic (Al_2O_3)", CIRP, Vol.41, PP.1189-1208, 2001,
6. H. Hocheng, N. H. Tai, C. S. Liu, "Assessment of ultrasonic drilling of C/SiC composite material", 2000
7. T. C. Lee, C. W. Chan "Mechanism of the ultrasonic machining of ceramic composites "Journal of Materials Science, Vol. 71, pp 195-201, 1997
8. H. Hocheng., K. L. Kuo, "Fundamental study of ultrasonic polishing of mold steel", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, pp 7~13, 2001.