

초음파 진동을 이용한 취성재료의 가공기술에 관한 연구

이석우, 최현종, 이봉구

A Study on Micro Ultrasonic machining for Brittle Material Using Ultrasonic vibration

Lee Seok-Woo, Lee Seok-Woo, Yi Bong-Gu
(Korea Institute of Industrial Technology)

Abstract

Ultrasonic machining technology has been developed over recent years for the manufacture of cost-effective and quality-assured precision parts for several industrial application such as optics, semiconductors, aerospace, and automobile. Ultrasonic machining process is an efficient and economical means of precision machining of ceramic materials. The process is non-thermal, non-chemical and non-electric and hardly creates changes to the mechanical properties of the brittle materials machined. This paper describes the characteristics of the micro-hole of Al_2O_3 by ultrasonic machining with tungsten carbide tool. The effects of various parameters of ultrasonic machining, including abrasives, machining force and pressure, on the material removal rate, hole quality, and tool wear presented and discussed. The ultrasonic Machining of micro-holes in ceramics has been under taken and the machining mechanism in the ultrasonic machining of ceramics based on the fracture-mechanics concept has been analyzed.

Key Words : Ultrasonic machining, Ultrasonic vibration, Resonant frequency, Tool wear, Material removal rate.

1. 서 론

최근 전자 및 통신기기, 반도체 부품, 항공기 및 자동차 분야 등 저비용, 고품질이 요구되는 과학기술분야의 급속한 발전을 하고 있다. 이와

같은 미래 지향적인 첨단 산업전반에 걸친 고부가가치 부품 소재인 높은 강성, 고경도를 갖는 재료들이 개발되었는데 이러한 재료들은 기존의 공구를 사용하여 칩을 발생시키는 범용절삭 방법으로 가공하기 어려운 난삭재 들이다. 현재 이러한 난삭재를 가공하기 위하여 다른 형태의 에

너지를 사용하는 가공법(USM, EDM, EBM, ECM)등이 연구가 진행되고 있다. 초음파 진동을 이용하는 가공기술은 높은 형상 정밀도와 우수한 표면 거칠기를 얻을수 있기 때문에 고정밀 가공에 이용된다.

본 연구에서는 세라믹스와 같은 비전도성 취성 재료의 초음파 가공 메커니즘을 심도 있게 이해하고, 재료 제거율에 영향을 미치는 인자를 이론적으로 증명하였다. 재료 제거율에 관한 이론적 배경을 바탕으로 가공물에 미치는 영향을 분석함으로써 초음파 가공의 타당성을 확인 하였고, 가공 품위에 미치는 영향을 SEM 사진을 통하여 검증하였다. 실험을 통하여 선정된 최적의 가공조건을 바탕으로 공구직경이 30 μ m 초경 공구를 사용하여 순도 99.8% Al₂O₃ 세라믹스를 관통 가공하여 초음파 가공의 한계를 극복하였다.

2. 초음파 가공 메커니즘

2.1 초음파 가공 원리

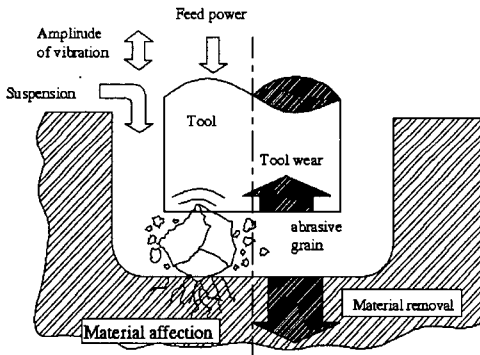


Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic machining

초음파 발전기에서 진동자에 고주파 전기 에너지를 공급 시켜주면 진동자에 의해 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환되어 기계진동을 발생시킨다. 초음파 진동자는 약 3~5 μ m의 작은 진폭을 갖게 되어 가공효율이 나쁘지만 콘과 혼에 의해 진폭이 확대되어 초음파 공구혼 끝단에서 가공에 충분한 진폭을 얻게 되어 가공을 수행하게 된다. 콘과 혼의 설계는 재질과 형상에 따라 초음파 진동 특성이 다르기 때문에 초음파 진동을 이용할 경우에는 항상 콘과 혼을 적절히 설계하여 사용하여야 한다. 특히 진동 시스템의 공진 설계가 잘못되면 저항이 증가하여 출력이 감소되며 발열이 크게 발생한다. 초음파 가공은 공구에 초음파 진동을 주어 지립을 물과 혼합하여 만든 슬러리를

공구와 가공물 사이에 넣어 공구 진동에 의한 충격으로 가공하는 방법으로 매초 수 만 번이라는 주기로 충격이 반복되는 결과 충분히 실용적인 가공속도를 얻을 수 있기 때문에 단단하고 부서지기 쉬운 취성 재료들의 가공방법으로 적합하다. 초음파 가공법은 지립 1회의 충격력에 의한 파쇄량이 미소하기 때문에 고정밀도를 얻을 수 있으며 표면 거칠기도 좋고, 가공물에 큰 변형을 주지도 않는다. 또한 초음파 가공법은 공구형상이 가공물에 그대로 전사되는 가공방법이기 때문에 공구에 의해 가공면에 작용하는 가공압은 항상 일정하도록 유지해야 한다. 또한 공구와 가공물간에는 지립의 평균 입경에 해당하는 가공 Clearance(공작물과 가공물사이)가 생기게 된다. 초음파 가공은 가공물뿐만 아니라 공구의 마모, 지립의 순환에 의한 공구 측면부의 가공량도 발생하기 때문에 정확한 가공형상을 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 가공 메커니즘

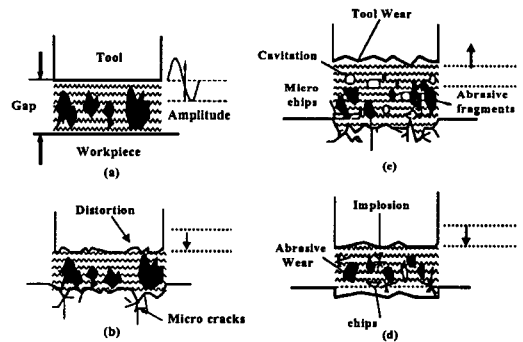


Fig. 2. Material removal mechanism in ultrasonic machining process

초음파 가공은 세라믹과 같은 고정도 취성 난삭재의 고능률적 가공 방법이며 그림 2 에 초음파 가공에 의한 가공물의 제거 메커니즘에 대한 개략도를 나타내고 있다. 지립과 물을 혼합하여 만든 슬러리를 가공물과 공구 사이에 유입되어 공구의 상하 진동에 의한 충격력으로 공구와 가공물 사이에 슬러리가 일정하게 공급되면서 가공이 일어나기 시작한다. 미세 가공 영역에서 슬러리는 가공이 이루어지면서 동시에 소재의 과열이나 비틀림을 방지하는 역할을 하게 된다. 공구와 지립의 동적 거동을 그림 3 에서 나타내었다. 초음파 가공 공정에서 지립에 의해 발생하는

크랙은 재료 제거율에 커다란 영향을 미치는데 것으로 간주된다. 가공의 진행 과정은 다음과 같다.

- (a) 초기 공구는 대략 30kHz의 공진 주파수로 수 마이크로의 진폭으로 진동한다. 초기 지립이 침식하는 동안 공구와 가공물 표면에서의 기계적 거동에 의해 지립들이 움직이게 된다.
- (b) 공구와 공작물 표면에 탄성 특성이 다르기 때문에 지립이 공작물의 표면에 충격을 가하게 된다.
- (c) 공구와 공작물과의 틈(Gap)이 증가할수록 캐비테이션이 일어나고 지립은 그림과 같이 가속이 된다.
- (d) 공구와 공작물의 틈(Gap)이 주기적으로 확대 및 축소됨에 따라 그림에서처럼 유체의 유입이 증가하고 가공된 표면의 마무리 가공이 이루어진다.

2.3 미세 크랙에 의한 초음파 가공공정

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

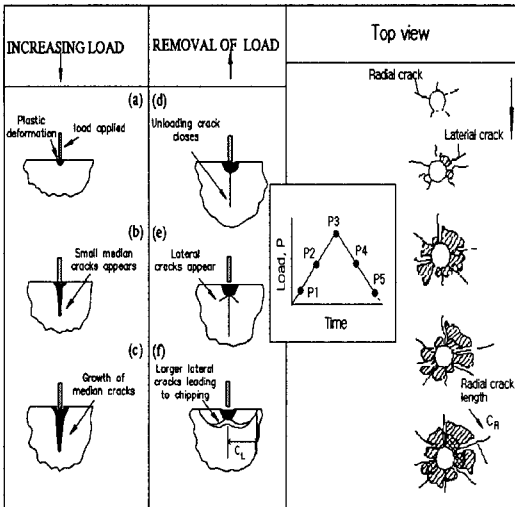


Fig. 3. Localized deformation and fracture of brittle material due to indentation

공구 끝단의 진동 변위를 나타내면 식(1)과 같다.

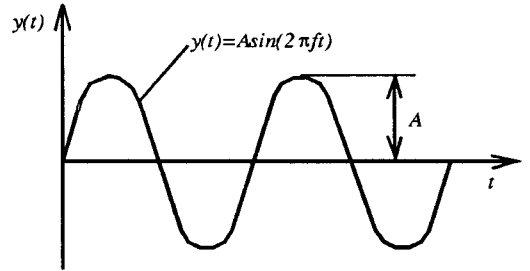


Fig. 4. Vibration of the tool tip

$$y(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

여기서 A는 공구 선단진폭, f는 공구선단의 진동주파수이며 공구선단의 변위는 y(t)이다. 식(1)에서 진동시스템의 등가 질량을 M, 평균 충격력은 F_t 라 가정하면 주어진 평균 충격력은 식(2)과 같다.

$$F_t = \frac{M}{\Delta T} \cdot y(t) = \frac{M}{\Delta T} \cdot 2\pi f A \cdot \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

여기서 T는 공구 끝단에서 지립이 공작물에 충격을 가하는 시간으로 일정한 값을 갖는다. 초음파 가공중에 공작물에 작용하는 충격력 F_t , 정하중 W이 동시에 작용할 때의 힘은 식(3)과 같다.

$$F = W + F_t = W + \frac{M}{\Delta T} \cdot 2\pi f A \cdot \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

공구 끝단과 공작물 사이의 가공영역 내에서 가공에 이용되는 유효 지립의 수가 N 이라고 하면 하나의 지립이 공작물에 작용하는 최대 충격력은 식(4)과 같다.

$$P = \frac{Fm}{N} = \frac{1}{N} \left(W + \frac{2\pi f A M}{\Delta T} \right) \quad (4)$$

윗 식에서 미세 취성 파괴는 $P > P_c$ 일 경우 일어나며, 초음파 진동자의 상하운동은 칩제거와 취성 파괴를 일으키게 된다.

4. 실험 장치 및 실험 방법

4.1 실험 장치

본 실험에 사용된 초음파 가공기는 회전진동자 및 냉각장치, 이송 및 제어장치, 등으로 구성 되어 있는데 그림 5 에 제작된 초음파 가공기의 구성도를 나타내었다.

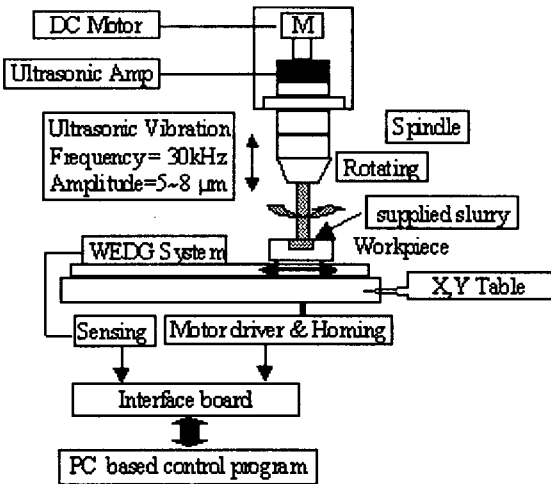


Fig. 5. Schematic diagram of the USM system

회전 진동자를 채택하여 단순한 초음파 가공뿐만 아니라 공구의 회전에 의한 복합 가공이 가능하도록 하였으며 제어기(Controller)는 PC를 기반으로 하여 모션보드(Motion Board)를 이용하여 3축 제어를 하였으며, 이송 정밀도를 위하여 스텝 모터(Stepping Motor)를 이용하였으며 Z축에는 백래쉬가 없는 볼스크류(리드 5mm)와 하모닉 드라이버를 이용하여 축의 이송을 1 μ m로 정밀 구동이 가능하도록 하였다. 또한 LM Guide를 이용하여 이송 중 발생하는 진동 등의 외란을 최소화하였으며 3축에 리니어 스케일을 설치하여 페루프로 위치제어를 하였다. 초음파 가공은 초음파 발진부, 진동자, 공구혼과 분해능이 0.01g 인 로드셀을 사용하여 일정한 가압력을 제어하면서 실험하였으며, 진동자의 냉각을 압축공기를 진동자에 공급하였다.

4.2 실험 방법

본 실험에 사용된 초음파 진동자는 압전 진동자와 혼이 볼트로 체결된 볼트 랑지방형 진동자(BLT)를 사용하였으며 공구는 항상 동일한 조건을 만족할 수 있도록 필

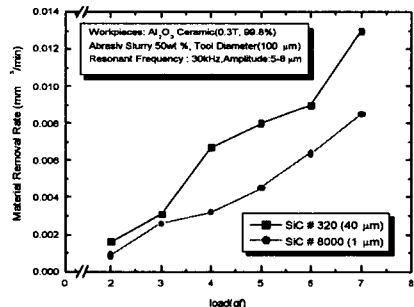
요할 때마다 공구의 교환이 가능한 콜릿형의 진동자 혼을 제작하였다. 회전 진동자의 공진 주파수는 30kHz이고 출력 300W인 티타늄 진동자를 사용하여 실험하였으며 공구의 재질로는 텅스텐 카바이드를 사용하였다. 가공물로는 순도가 99%인 세라믹스, 지립은 SiC와 다이아몬드를 이용하였다. 가공방법은 연속 가압법을 사용하였다. 초음파 가공 실험조건을 Table. 1 에 나타냈다. 가공실험은 공구의 형상과 가공압력을 실험변수로 하였고 이러한 변수들이 가공 특성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하여 이러한 실험에서 나오는 가공결과들을 비교 분석함으로써 가공시 발생하는 결함들을 찾아내고 그 결함들의 원인을 규명하여 최적의 가공조건을 제시하고자 하였다..

Table 1. Experiment Conditions

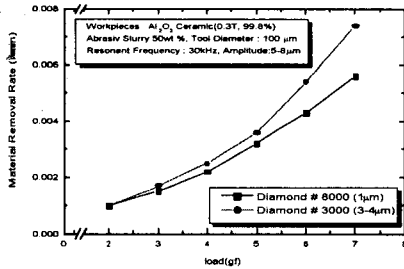
Machine spec	Precision ultrasonic machine	
	Stroke	140×120×100
	Feed	Step motor
Ultrasonic unit	Spindle speed	Max : 300 rpm
	Frequency	30kHz, 300W
	Amplitude	5 ~ 8 μ m
Abrasive	Cooling	Air cooling
		SiC#320(40 μ m), #800(14 μ m), #8000(1 μ m) Diamond #3000(4~8 μ m), #8000(1 μ m)
Workpiece	Alumina ceramics(Al_2O_3):0.3t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

5. 실험 결과 및 분석

5.1 재료 제거율(Material removal rate)



(a) Abrasive : SiC#320(40 μ m), SiC#8000(1 μ m)



(b) Abrasive : Diamond #3000(3~4µm),
Diamond #8000(1µm)

Fig. 6. Relation between machining force and material removal rate

공구와 공작물 사이에 물과 지립이 혼합된 슬러리가 가공영역 내에 유입되고, 슬러리속의 지립들이 공작물의 취약해진 표면을 파괴시키므로 재료의 제거가 일어나기 시작한다. 실험에서는 세라믹스(Al_2O_3)를 사용하여 가공력과 지립의 크기에 따른 재료 제거율의 관계를 실험을 통하여 얻은 결과는 그림 6 에서 나타내고 있는데 가공력이 크면 클수록, 지립의 크기가 크면 클수록 재료 제거율이 증가됨을 알 수 있다. 일반적으로 초음파 가공에서 재료 제거율에 영향을 미치는 인자들은 가공력과 지립의 종류 및 크기에 따라 크게 좌우된다. 그림 7 에서는 100µm의 공구를 사용하여 두께300µm인 세라믹스를 관통 가공을 했을 때 지립의 크기가 작아질수록 재료 제거율이 감소됨을 알 수 있다.

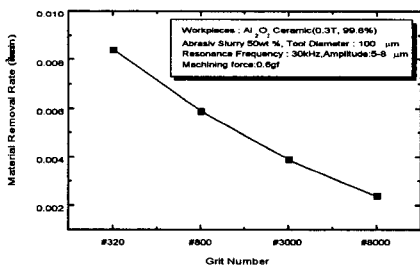


Fig. 7. Relation between grit number and material removal rate

5.2 공구 마모(tool wear)

고능률 초음파 가공을 위해서는 가공이 진행함에 따른 공구의 마멸도 고려하여야 한다. 이러한 공구의 마모는 가공물의 가공비(가공 깊이/공구 마모량)를 평가 할 때 중요한 관건이 된다.

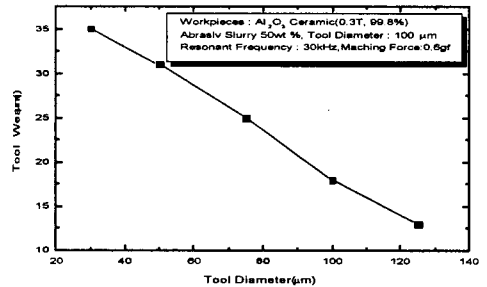


Fig. 8. Longitudinal tool wear

그림 8 은 공구 직경에 따른 깊이300µm의 세라믹스를 관통 가공 할 때 길이방향의 공구 마모율을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 공구의 직경이 감소함에 따라 공구 마모는 공구의 직경이 감소함에 따라 공구의 길이 방향의 마모가 증가하는 것을 알 수 있다.

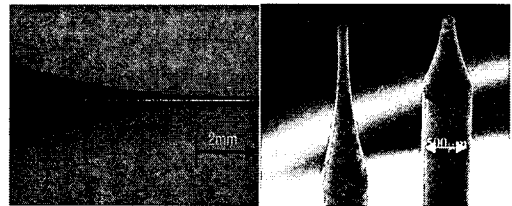


Fig. 9. Micro-tool After USM (tungsten carbide 30µm)

공구 마모에 영향을 미치는 인자는 혼의 끝단에서의 진폭, 가공력과 공작물의 경도와 인성 및 가공깊이 등이다. 그림 9 는 초음파 가공후의 공구의 마모형상을 나타낸 것으로 길이방향의 마모를 알 수 있다.

그림 10 은 지립의 크기와 종류에 따른 공구 마모를 나타낸 결과로 지립의 직경이 커짐에 따라 공구의 마모가 증가하였고, SiC의 지립을 사용했을 때 보다 다이아몬드 지립을 사용했을 경우 공구의 마모가 심했다.

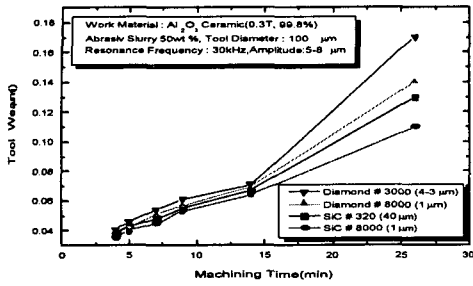
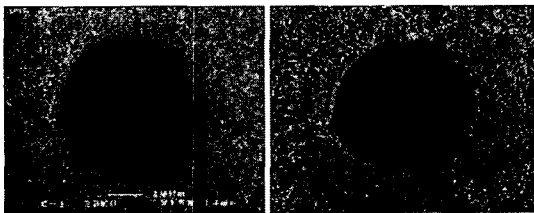


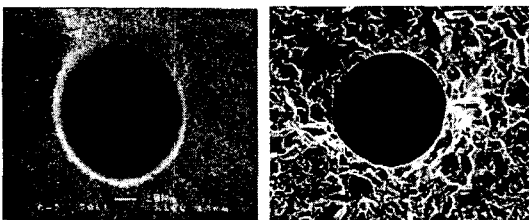
Fig. 10. Influence of grit size on tool wear

초음파 가공 실험의 결과에서 알 수 있듯이 공구 마모에 대한 영향은, 지립의 종류와 크기에 따라 영향을 받게 되므로 초음파 가공시 적절한 지립의 선정이 중요하다.



(a) Dia: 60μm(Entrance) (b) Dia: 60μm(exit)

Fig. 11. Micro-hole on Ceramic(Al_2O_3), Depth:300μm



(a) Dia: 50μm(Entrance) (b) Dia: 50μm(exit)

Fig. 12. Micro-hole on Al_2O_3 , Depth:300μm

취성 재료의 관통 가공시 가공 끝면 부위에서의 취성 파괴 현상이 나타나는데 이러한 현상은 초음파 가공이 진동 충격력에 의해 가공이 이루어지기 때문에 발생하는 것이다. 이와 같이 초음파 가공에 영향을 미치는 인자는 많이 있으므로 가공정밀도를 향상시키기 위해서는 가공 조건의 선정이 중요하다. 세라믹스와 같은 취성재료의 관통 가공시 가공 끝면에서 취성 파괴 현상이 그림 11,12 과 같이 발생하였는데 이런 취성 파괴 현상은 가공 결함의 원인이므로 발생하지 않도록 하여야 한다. 취성 파괴 현상을 방

지하기 위해서는 공작물 지지용 고정판과 공작물면이 완전히 밀착해야 된다.

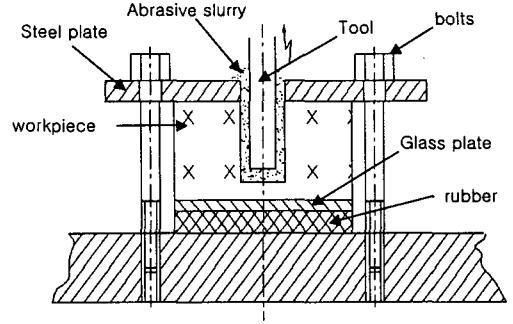
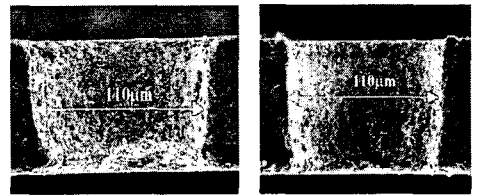


Fig. 13. Schematic of the device to avoid fracture



(a) glue gun

(b) crystal wax

Fig. 14. Photographs of machined holes

공작물의 취성 파괴 현상을 방지하기 위해서 그림 12 와 같이 공작물과 고정판과 밀착을 위한 지그를 설계하여 초음파 가공 실험을 하였다. 그림 13 처럼 공작물이 테이블 위에 유리판과 공작물의 밀착을 글루건 과 크리스탈 왁스를 사용하여 고정시킨 후 가공 실험한 결과가 그림 14이다. 실험 결과 공작물을 글루건을 사용하여 공작물을 밀착 시킨 경우 보다 크리스탈 왁스로 고정시킨 시편이 취성 파괴 현상이 발생하지 않는다는 실험을 통해 알 수 있었고, 테이블 아래 고무판은 초기 충격력의 의한 공구의 파괴를 방지 할 수 있었다.

이렇게 취성 재료의 가공 끝면의 취성 파괴 현상과 공구의 파손을 방지함으로써 초음파 가공의 가공 정밀도 및 최적의 가공 조건의 선정으로 원하는 여러 형태의 공구형상이나 관통 가공을 할 수 있다. 그림 15, 16 는 앞의 실험을 통해서 선정된 가공 조건을 토대로 30μm의 공구를 이용하여 두께 300μm의 세라믹스를 관통 가공하였다. 일반적으로 초음파 가공의 경우 aspect ratio가 5이상의 경우 지립의 순환이 원활하지 못하여 깊은 홀 가공의 경우 일정 깊이 이상 가공이 이루어지면 더 이상 가공이 이루어지지 않고 공구의 마모가 심하게 발생하게 된다. 앞의 실험 결과에서 깊은 홀 가공, 관통 가공시 가공액의 원활한 유동성이

점차 둔화되어지기 때문에 일정 임계점에 이르게 되면 가공부의 슬러리의 순환이 불가능하게 되어지는 현상이 발생한다.

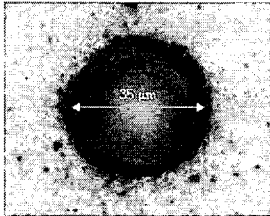


Fig. 15. Micro-hole Al_2O_3 ceramics (SiC#8000, 50wt%, depth:300 μ m, aspect ratio:9)

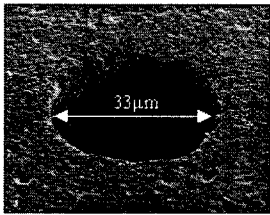


Fig. 16. Micro-hole Al_2O_3 Ceramics (Diamond#8000, 50wt%, depth:300 μ m, aspect ratio:10)

이러한 문제를 해결하기 위해서는 가공액의 흐름을 일원화 하고 일정한 흡입력의 발생을 일으켜 공구를 통한 가공액 배출을 꾀하는 방법이 필요하다. 이처럼 가공 실험상 발생하는 문제점을 해결하고 고정도 형상정밀도를 얻기 위해서는 공구의 최적 설계와 제작, 가공매커니즘의 개선이 전제로 되어야겠다.

6. 결 론

초음파를 이용한 미세 금형 가공기술 개발을 위하여 본 실험을 통해서 고정도, 난삭채 취성 재료인 세라믹스의 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) 취성재료인 Ceramics(0.3mm)의 관통 가공시 가공 끝면에서의 파괴 현상이 나타나는데 이는 가공물과 지

하판관의 밀착을 위한 지그를 설치하여 파괴현상을 줄일 수 있었다.

- 3) 구멍 관통형 가공등에 있어 발생하는 가공 완료 부위의 파괴 발생을 억제하기 위한 단차적 가공 및 초음파 출력의 조정이 필요하다.
- 4) 공구의 마모는 세라믹스를 관통 가공 할 때 공구 마모율은 공구의 직경이 감소함에 따라 공구 마모가 증가하였다.

현재 제작되어진 가공기의 성능은 향후 가공 실험을 통하여 수정 보완하여, $\varnothing 30\mu$ m 이하의 미세홀을 정밀 가공하여 미세 금형의 구멍을 정밀 가공할 수 있는 기술을 개발하고자 한다. 향후 초음파 가공기술의 최적 가공 기술을 정립하기 위해서는 다양한 형태의 공구와 끊임없이 개발되어 나오는 신소재 및 복합재료에 대한 가공실험과 가공액의 순환의 최적화를 위한 장치개발 등이 되는 등 여러 가지 문제가 선결되어야 한다..

후 기

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

참 고 문 헌

- (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", 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.