

초음파 진동을 이용한 미세구멍 가공기술

이석우*, 최현중, 이봉구, 최영재(한국생산기술연구원)

A Study on Micro-hole Machining Technology using Ultrasonic vibration

S. W. Lee*, H. Z. Choi, B. G. Yi, Y. J. Choi (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 micro-hole machining(초음파 미세구멍가공), Resonance frequency(공진주파수), Horn(혼) Ultrasonic vibration(초음파진동), Abrasive(지립), Machining pressure(가공압), Tool wear(공구마모)

1. 서론

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 강성과 고 경도를 갖는 재료들이 개발되었다. 이러한 재료들은 기존의 공구를 사용하여 칩을 발생시키는 범용절삭 방법으로 가공하기 어려운 난삭재들이다. 현재 이러한 난삭재를 가공하기 위하여 다른 형태의 에너지를 사용하는 가공법(USM, EDM, EBW, ECM)들의 연구가 진행되고 있다. 이러한 특수 가공법들 중에 초음파 진동을 이용하는 가공기술은 높은 형상 정밀도와 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있기 때문에 고 정밀 가공에 이용된다.

본 연구에서는 세라믹스와 같은 비전도성 취성 재료인 알루미늄과 SUS304 재료의 박판에 미세구멍 가공을 하기 위한 초음파 가공 메커니즘을 분석하고 최적의 가공 메커니즘을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 가공물의 종류와 지립의 종류 및 가공 방법

등을 변수로 하여 가공 실험을 통해 미세구멍의 가공 형상과 공구의 마모 등을 관찰하였다.

또한 미세 구멍을 가공하기 위한 공구로 초경 재질로 직경 21~30 μ m 정도의 초음파 가공용 공구를 제작하였으며, 이를 이용하여 알루미늄 박판과 SUS 304 박판에 미세구멍 가공 실험을 하면서 최적의 초음파 가공공정 기술을 구축하고자 하였다.

2. 본론

2.1 초음파 가공원리

초음파 가공법은 충격파쇄 가공법이기 때문에 단단하고 부서지기 쉬운 재료인 복합재료, 세라믹스, 수정과 같은 취성재료에 가장 일반적으로 사용되는 가공법이다.

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 초음파 가공법은 공구의 상하 진동을 이용하여 공구와 가공물 사이에 공급되는 지립(SiC, 다이아몬드 등)을 가공물에 충돌시켜, 고경도 취성 재료에 구멍 또는 형상을 가공

하는 방법이다.

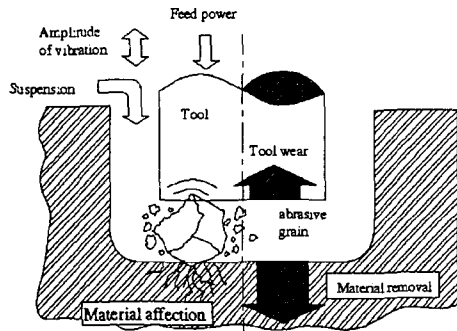


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic machining

초음파 가공법은 지립 1회의 충격력에 의한 파쇄량이 미소하지만 초당 20,000번의 상·하 운동을 하기 때문에 충분한 가공속도도 얻을 수 있다. 또한 1회당 가공량이 적기 때문에 고정밀도를 얻을 수 있으며 좋은 표면 거칠기도 얻을 수 있다. 초음파 가공법은 공구형상이 가공물에 그대로 전사되는 가공방법이기 때문에 공구에 의해 가공면에 작용하는 가공압은 항상 일정하도록 유지해야 한다. 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 선정 및 가공 중에 발생한 공구의 마모 등을 고려한 최적의 가공공정의 선정이 요구된다.

2.2 초음파 실험장치

본 실험에 사용된 초음파 가공기는 회전진동자 및 냉각장치, 이송 및 제어장치 등으로 구성 되어 있는데 Fig. 2에 제작된 초음파 가공기를 나타내었다.

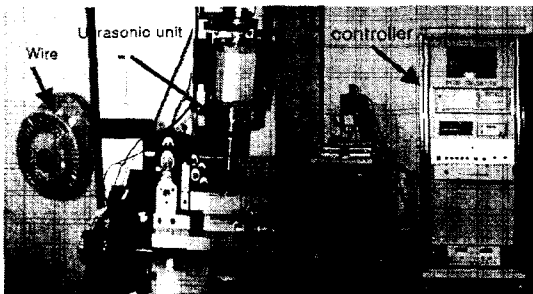


Fig. 2 Photograph of the ultrasonic machining

system

제어기(Controller)는 PC를 기반으로 하여 모션 보드(Motion Board)를 이용하여 3축 제어를 하였으며, 이송 정밀도를 위하여 스텝핑 모터(Stepping Motor)를 이용하였으며 Z축에는 백래쉬가 없는 볼스크류와 하모닉 드라이버를 이용하여 축의 이송을 1 μ m로 정밀 구동이 가능하도록 하였으며 3축에 리니어 스케일을 설치하여 폐 루프로 위치제어를 하였다. 테이블에 분해능이 0.01g인 로드셀을 사용하여 제어기와 연결함으로써 가공 중에 항상 일정한 가압력이 유지될 수 있도록 하였으며, 진동자의 냉각을 위하여 압축공기를 진동자에 공급하였다. 또한 공구가 마모되었을 경우에 공구 형상을 보정하여 주기 위하여 WEDG(wire electrical discharge grinding) 시스템도 탑재하였다.

2.3 실험방법

본 실험에 사용된 초음파 진동자는 공진 주파수가 30kHz(출력 300W)와 40kHz(출력 700W)인 티타늄 진동자이며 공구는 텅스텐 카바이드로 제작하여 사용하였다. 가공물로는 순도가 99%인 세라믹스와 SUS304의 박판을 이용하였으며, 초음파 가공에 사용되는 지립은 SiC와 다이아몬드를 이용하였다. 초음파 가공 실험조건을 Table 1에 나타냈다.

Table 1 Experiment Conditions

| | | Precision ultrasonic machine | |
|-----------------------|--|------------------------------|-----------|
| Machine specification | Stroke | 140×120×100 | |
| | Feed | Step motor | |
| | Spindle speed | Max : 300 rpm | |
| Ultrasonic unit | Frequency | 30kHz | 40kHz |
| | Amplitude | 5~8 μ m | 2 μ m |
| | Power | 300W | 700W |
| | Cooling | Air cooling | |
| Abrasive | SiC : #320(40 μ m), #800(14 μ m), #8000(1 μ m) | | |
| | Diamond : #5000(4~8 μ m), #8000(1 μ m) | | |
| Workpiece | Alumina ceramics(Al ₂ O ₃) : 0.2, 0.3mm | | |
| | SUS304 : 0.03mm | | |
| Slurry | 50wt % (water : abrasive) | | |
| | | | |
| Machining conditions | Tool diameter | 23, 29, 30, 100 μ m | |
| | Pressure | 1g/mm ² | |

실험은 가공물의 재질과 지립의 종류와 입자의 크기 등을 실험 변수로 하였으며, 압력제어를 하여 가공 중에 항상 일정한 압력이 가공면에 작용할 수 있도록 하였다. 또한 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 미세구멍을 가공할 때 지립의 순환을 원활히 하기 위

하여 가공 중에 공구를 상·하로 이동하면서 가공을 하였다. 이러한 가공 메커니즘의 분석을 통하여 직경 30 μm 이하의 미세구멍을 가공하고자 하였다.

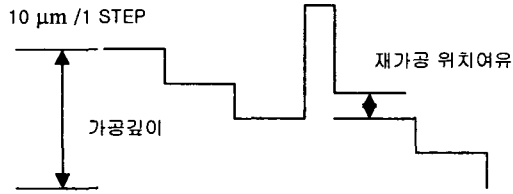
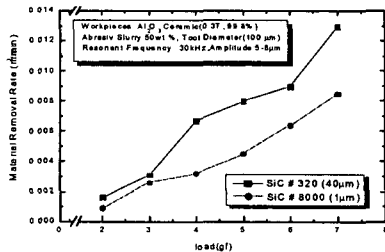


Fig. 3 Ultrasonic machining mechanism

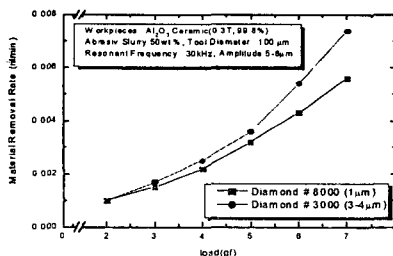
2.4 실험결과

2.4.1 재료 제거율(Material removal rate)

공구와 공작물 사이에 물과 지립이 혼합된 슬러리가 가공영역 내에 유입되면 지립에 의해 가공이 이루어지는데 Fig. 4에 알루미늄나 세라믹스를 가공할 때 가공력에 따른 가공물의 제거량을 나타내었다



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



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

Fig. 4 Relation between machining force and material removal rate

Fig. 4에서 알 수 있듯이 가공력이 크고 지립 입자의 크기가 클수록 가공물의 제거율이 증가됨을 알

수 있다. 일반적으로 초음파 가공에서 가공물의 제거율에 영향을 미치는 인자들은 가공력과 지립의 종류 및 크기 등이다.

2.4.2 공구 마멸(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. 5는 공구 직경에 따른 깊이 300 μm 의 세라믹스를 관통 가공할 때 길이방향의 공구 마멸량을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 공구의 직경이 감소함에 따라 공구 마모는 공구의 직경이 감소함에 따라 공구의 길이 방향의 마모가 증가하는 것을 알 수 있다.

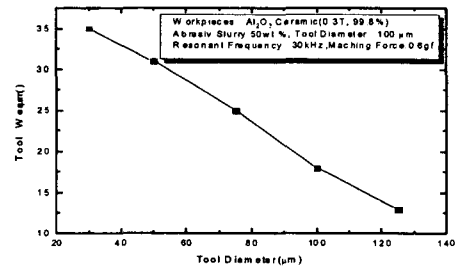


Fig. 5. Longitudinal tool wear

Fig. 6은 가공전의 직경 30 μm 인 공구형상과 가공 후에 마멸이 발생한 공구의 형상을 찍은 사진이다. 초음파 가공후의 공구의 형상을 살펴보면 직경방향의 마멸보다는 길이방향의 마멸이 큰 것을 알 수 있다. 그리고 가공 시 발생하는 가공력에 의해 공구 끝단이 초기 가공 시 보다 형상이 변한 것을 알 수 있다. 일반적으로 공구 마멸에 영향을 미치는 인자는 혼의 끝단에서의 진폭, 가공력과 공작물의 경도와 가공깊이 및 지립의 종류와 크기 등이다.

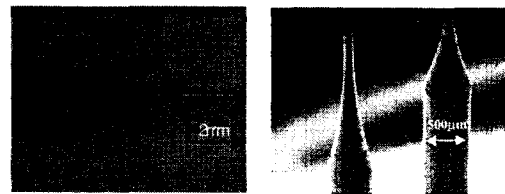


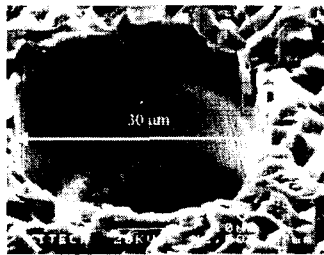
Fig. 6 Micro-tool after ultrasonic machining (Tungsten carbide tool : ϕ 30 μm)

2.4.3 미세구멍 가공결과

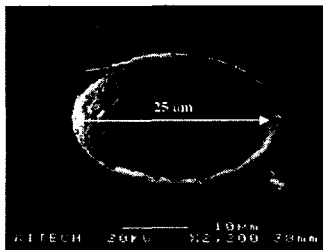
Fig. 7은 공구 끝단의 직경이 2 μ m인 초경 공구와 직경 0.1 μ m인 다이아몬드 지립과 물을 50% 중량비로 혼합한 슬러리를 이용하여 알루미늄 세라믹스와 SUS304에 미세구멍 가공을 한 예이다.

Fig. 7(a)는 직경 29 μ m의 초경 공구로 가공압을 350gf/mm²으로 설정하여 0.2mm 두께의 알루미늄 세라믹스 관통 가공 한 예이다. 가공시간은 약 6분 정도 걸렸으며, 가공되어진 구멍의 세장비(aspect ratio)는 약 7 정도이다. 사용한 공구의 직경이 29 μ m 인데 가공되어진 구멍의 크기가 30 μ m정도가 되는 것은 앞에서 설명하였듯이 사용한 지립의 크기와 가공 시간 때문에 나타나는 현상이다. 이와같이 초음파 진동을 이용한 가공에는 실제 가공하고자 하는 구멍의 크기에 따라 공구의 직경과 지립의 종류 등이 선정되어야 한다.

Fig. 7(b)는 직경 23 μ m의 초경 공구로 가공압을 300gf/mm²으로 설정하여 0.03mm 두께의 알루미늄 세라믹스 관통 가공 한 예이다. 가공시간은 약 8분 정도 걸렸으며, 가공되어진 구멍의 세장비는 약 1 정도이다. 공구의 직경이 작아지면 가공 시 걸리는 가공력에 의해 공구가 약간 휘어지기 때문에 동일한 직경의 지립을 사용하여도 가공되어진 구멍의 크기와 사용한 공구 직경과의 차이가 다르게 나타나게 된다.



(a) Alumina ceramics(t=0.2mm, aspect ratio \approx 7)



(b) SUS304(t=0.03mm, aspect ratio \approx 1)

Fig. 7 Micro-hole machining using ultrasonic vibration

3. 결론

초음파 진동을 이용한 미세구멍 가공기술 개발을 위하여 초경 공구를 이용하여 알루미늄 세라믹스와 SUS304 재질을 가공하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 초음파 가공에 사용하는 지립의 직경과 가공력이 클수록 가공 중에 발생하는 초음파 공구의 마멸은 증가함을 알 수 있었다.

2) 또한, 공구의 직경이 적을수록 공구의 마멸이 증가하였는데 이는 공구의 직경이 작을수록 가공에 사용되는 공구 끝단의 물리적 저항력이 떨어지기 때문으로 생각되어진다.

3) 공진주파수가 40kHz이고 공구 끝단의 직경이 2 μ m인 초음파 진동 시스템을 이용하여 최적의 가공조건 선정과 적정 가공압 제어를 통하여 직경이 29 μ m인 공구를 이용하여 알루미늄 세라믹스(0.2mm)에 직경 30 μ m인 미세구멍을 세장비가 약 7 정도로 가공하였으며, 직경이 23 μ m인 공구로 SUS304(0.03mm)에 직경 25 μ m인 미세구멍을 세장비 약 1정도로 관통 가공하였다.

후 기

본 연구는 2001년도 차세대 신기술 개발사업의 연구비에 의하여 지원되어졌으며 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 (Al₂O₃) 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 (Al₂O₃)", 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