

초음파 진동을 이용한 취성재료 가공기술에 관한 연구

이석우*, 최현종, 이봉구(한국생산기술연구원)

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

Lee Seok-Woo, Choi Hon-Zong, Lee 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 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. In order to improve the currently used ultrasonic machining using ultrasonic energy, technical accumulation is needed steadily through development of exciting device of ultrasonic machine composed of piezoelectric vibrator and horn.

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 machining(초음파 가공), WEDG(Wire Electro-Discharge Grinding), Horn(혼), Abrasive(지립)
Ultrasonic vibration(초음파 진동), Tool wear(공구마모), Resonance frequency(공진주파수)

1. 서론

최근 전자 및 통신기기, 반도체 부품, 항공기 및 자동차 분야 등 저비용, 고품질이 요구되는 과학기술분야의 급속한 발전에 따라 신소재, 세라믹류 등 비전도성인 난삭재의 정밀 가공 기술의 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라 최근 선진국에서는 초음파 진동을 이용하는 가공방법을 개발하기 위하여 많은 연구와 노력을 기울이고 있다. 초음파 진동을 이용하는 가공기술은 높은 형상 정밀도와 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있기 때문에 고정밀 가공에 이용된다. 초음파 가공 기술은 광학, 기계 및 전자 부품의 제조에 있어 높은 정밀도와 높은 생산성 때문에 80년대 이후로 급속한 발전을 하게 되었다.

현재 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 난삭재들이다. 현재 이러한 난삭재를 가공하기 위하여 다른 형태의 에너지를 사용하는 가공법(USM, EDM, EBM, ECM)등이 연구되고 있다.

초음파 가공법은 복합재료, 세라믹스, 수정 및 흑연과 같은 취성 재료에 가장 일반적으로 적용되는 가공법이다. 초음파 가공법은 공구의 상하 진동을 이용하여 공구와 가공물 사이에 공급되는 지립(SiC, B₄C, 다이아몬드) 등을 가공물에 충돌시켜, 단단한 재료에 구멍 또는 형상을 가공하는 방법이다. 초음파 가공법은 충격파쇄 가공법이기 때문에 단단하고 부서지기 쉬운 세라믹스 재료 등 비전도성 취성 재료의 가공법으로서 적합하다.

본 연구에서는 초음파 진동을 이용하여 비전도성 취성 재료를 가공하기 위한 초음파 가공기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 WEDG 시스템과 회전진동자를 장착한 초음파 가공기를 설계, 제작하였으며 직경이 50 μ m 인 텅스텐 카바이드 공구를 이용하여 유리 와 세라믹스의 구멍가공실험을 하여 초음파

가공시 발생하는 문제점과 해결책을 제시하고자 한다.

2. 초음파 가공 메커니즘

2.1 초음파 가공 원리

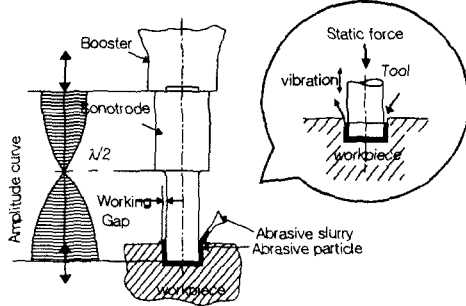


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic machining

초음파 가공은 공구에 초음파 진동을 주어 지립을 물과 혼합하여 만든 슬러리를 가공물 사이에 넣어 공구 진동에 의한 충격으로 가공하는 방법이다. 때로 수 만번이라는 주기로 충격이 반복되는 결과 충분히 실용적인 가공속도를 얻을 수 있으므로 단단하고 부서지기 쉬운 취성재료들의 가공법으로 적합하다. 이 초음파가공법은 지립 1 회의 충격에 의한 파쇄량이 미소하기 때문에 고정밀도를 얻을 수 있으며 표면거칠기도 좋고, 가공물에 큰 변형을 주지도 않는다. 초음파 가공법은 공구형상이 가공물에 그대로 전사되는 가공방법이기 때문에 가공중 발생하는 공구마모에 의한 형상의 변화가 가공물의 형상오차에 중요한 요소로 작용하게 된다. 공구에 의해 가공면에 작용하는 가공압은 항상 일정하도록 유지해야 한다. 또한 공구와 가공물간에는 지립의 평균입径에 해당하는 가공 Clearance(공작물과 가공물사이)가 생기게 된다. 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 마모등 적절한 가공공정의 적용이 필요하다.

2.2 초음파 가공의 가공압 분석

초음파가공은 세라믹과 같은 비전도성 재료의 정밀 가공에 효율적인 가공법으로 적용되고 있으며 공구와 가공물사이에서 공구의 진동에 의한 파삭재의 표면에서 미세크랙에 의한 가공 진행공정을 파

괴 역학적인 관점에서 Fig. 2 에 나타내었다. 공구 선단의 진동 변위를 나타내면

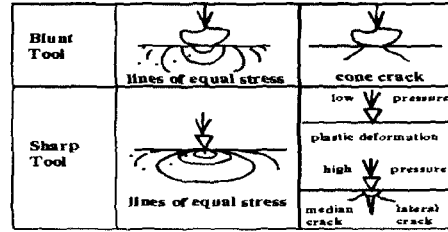


Fig. 2 Localized deformation and fracture of brittle material due to indentation

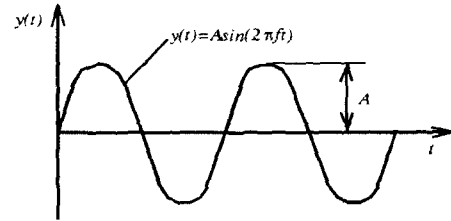


Fig. 3 Vibration of the tool tip

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

식(1)과 같다. 여기서 A 는 공구 선단진폭, f 는 공구선단의 진동주파수이며 공구선단의 변위는 y(t) 이다.

식(1)에서 진동시스템의 등가 질량을 M, 평균 충격력은 Ft 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 ΔT 는 시간이 일정하다고 가정하고 공구 선단이 지립을 통하여 공작물에 충격을 가하는 시간이다.

초음파 가공중에 공작물에 작용하는 충격력 Ft, 정하중 W 이 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 선단과 공작물 사이의 가공영역 내에서 가공에 이용되는 유효 지립의 수가 N 이라고 가정하면 하나의 지립이 공작물에 작용하는 최대 충격력은 식(4)과 같다.

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

미세 취성 파괴는 $P > P_c$ 일 경우 일어나며, 초음파의 발진운동은 칩제거와 취성파괴를 일으키게 된다.

2.3 실험 장치 및 방법

본 실험에 사용된 초음파 가공기는 회전 진동자 및 냉각장치, 이송 및 가공압 제어장치 등으로 구성 되어 있으며 Fig. 4 에 제작된 초음파 가공기의 개략도를 나타내었다.

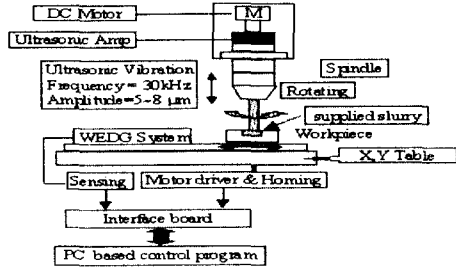


Fig. 4 Schematic illustration of the USM system

본 실험에 사용된 진동자는 회전 진동자와 혼이 볼트로 체결 되도록 하였으며 미세 초음파공구의 탈착을 용이하게 하기 위하여 콜릿척 방식으로 진동자를 제작하였다. 진동자의 공진주파수는 30 kHz 이고 출력 300W 이며 공구 끝단의 진폭이 5 ~ 8 μm 이 되도록 제작 하였다. 티타늄 진동자를 사용하여 실험하였다. 공구의 재질로는 텅스텐 카바이드를 사용하였으며 피삭재로는 순도가 99%인 세라믹스와 유리, 지립은 SiC#8000 (Dia:1 μm)을 사용하였다. 가공방법은 연속 가압법을 사용하였다. Table.1 은 초음파 가공실험 조건을 나타내었다.

Table.1 Experiment conditions

Machine spec	Precision ultrasonic machine	
	Stroke(X×Y×Z)	140×120×100
Feed controller	Step motor(lead :5mm)	
Spindle speed	Max : 300 rpm	
WEDG	Output power	300W(Variable), 1A
	Wire	φ0.2mm(coated by zinc)
	Tension	Tension controller
Ultrasonic unit	frequency	30kHz, 300W
	Amplitude	5 ~ 8 μm
	Cooling	Air cooling
Particle Size	Sic # 8000 (Dia :1 μm)	
Workpieces	Al ₂ O ₃ :0.3t, H _{Rv} 1,500 Kg/mm ²	
slurry	50%wt(water : abrasive)	
Machining conditions	Tool diameter	50 μm
	Machining pressure	1g/mm ²
	Feed rate	2 μm/sec

가공실험은 가공압, 지립의 종류, 공구의 형상에

따라 실험하였고 이러한 변수들이 가공 특성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하여 실험에서 나오는 가공 결과들을 비교 분석 함으로서 가공시 발생되는 문제점을 찾아내고 그 원인을 규명하여 최적의 가공조건을 제시하고자 한다.

2.3 실험 결과

비전도성 취성재료의 고정밀 가공을 추구하고자 물과 지립을 혼합하여 유리와 세라믹스에 대한 가공실험을 하였다

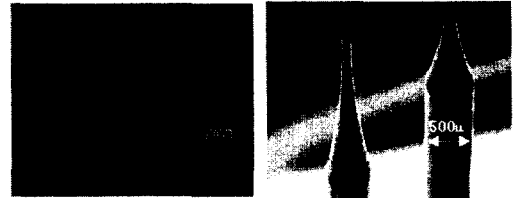


Fig. 5 Tool Wear

깊은 홈 가공이나 관통 가공일 경우 지립의 원활한 순환이 어려워 공구 마모를 초래하는 현상이 Fig.5 에 나타났으며 공구자체의 휨의 영향으로 구멍입구에 비해 깊이가 깊어질수록 Taper 가 심하게 형성되었다. 관통가공시 Fig. 6 처럼 가공 끝단에서 취성파괴 현상이 눈에 띄게 나타났다. 피삭재의 두께를 정확히 측정 한 후 실험하더라도 구멍 관통완료 시점을 추정할 수 있으나 그 정확한 시점을 찾아 가공을 멈추게 하기란 거의 불가능한 것이 사실이다. 그리고 공작물 지지용 강재 고정판의 면과 피삭재 가공끝면에 접촉하고 있는 면의 완전한 밀착이 어려워 취성파괴 현상이 나타났다. 그래서 유리를 피삭재와 순간 접촉체로 고정시킨 후 실험했으나 파괴현상은 여전히 발견할 수 있었다.

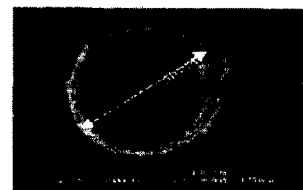
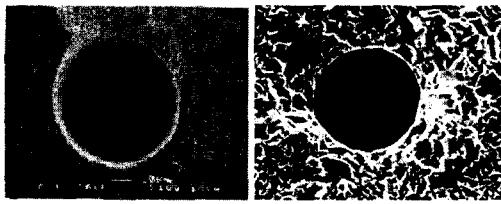


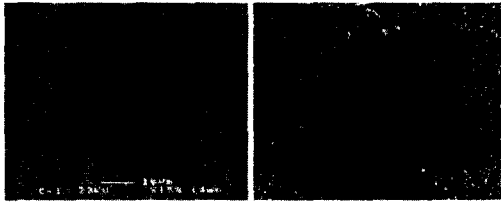
Fig.6 Work material fracture(glass, Depth:150 μm)

이는 아무리 작은 크기의 두께의 판재라 할지라도 변형이 전혀없는 이상적인 평탄도를 지닐 수 없기 때문이라 생각되며 결국 고능률 가공을 위해 고출력으로서 가공을 하는 것보다는 출력을 단계적

으로 조작하는 방식으로 즉 가공이 거의 완료되는 시점부터는 출력이 현저히 낮추어 가공하는 것이 가공 결함을 방지할 수 있으리라 본다



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



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

Fig.7 Microhole on Al₂O₃, Depth:300 μm

Fig.6로부터 알 수 있듯이 동일한 조건으로 가공시 취성이 높고 가공이 용이한 일반 유리의 경우 가공면의 품질이 떨어지는 것으로 나타났다. 반면 Fig.7 과 같은 세라믹스등 가공성이 낮은 재질은 동일한 지립을 사용한 경우에도 몇배 우수한 가공결과를 얻을 수 있었다. 앞 실험결과에서 처럼 깊은 홀가공, 관통가공시 가공액의 원활한 유동성이 점차 둔화되어지기 때문에 일정 임계점에 이르게 되면 가공부의 지립의 혼합액이 순환이 불가능하게 되어지는 현상이 발생한다. 지립과 가공칩을 제거한후 가공을 재시도 해보아도 자주 이런 현상이 반복되어 일어난다. 이는 가공부위가 깊어지면 슬러리의 원활한 유동성이 둔화되기 때문에 가공 임계점이 이르러서는 가공 부위에 대한 유입이 불가능하게 되는 일이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 가공액의 흐름을 일원화 하고 일정한 흡입력의 발생을 일으켜 공구를 통한 가공액 배출을 꾀하는 것이다

다시말해 지립제거나 가공특유의 평활한 가공면을 얻을 수 있으며 가공에 따른 변형이 적고 재료 깊이에 대한 변질층도 적게된다. 이처럼 가공 실험상 발생되는 문제점을 해결하고 고정도 형상정밀도를 얻기 위해서는 공구의 최적 설계 와 제작, 가공 메커니즘의 개선이 전제로 되어야겠다.

4. 결론

본 실험적 연구를 통해서 취성 재료인 유리와 세라믹스에 대한 다음과 같은 사항들의 초음파 가공성향 및 가공의 고능률화, 고정도화 추구시 필수적으로 고려해야 할점등 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 공구 설치 시 편심량을 줄이고 착탈이 가능하도록 초음파 진동자를 설계하여 티타늄으로 제작(두랄루민은 강성이 미약함)

2) 취성재료인 유리(0.15mm), Ceramics(0.3mm) 의 관통 가공시 가공 끝 부위에서의 파괴 현상이 현저하게 나타나며 적정 가공압 제어 및 지립의 원활한 유동이 이루어 지지않으면 구멍의 출구부와 끝단의 진직도와 직경의 차가 발생.

3) 구멍관통형 가공등에 있어 발생되는 가공 완료 부위의 파괴 발생을 억제하기 위한 단차적 가공 및 초음파 출력이 필요하다

4) 공작물 지지용 강재 고정판의 면과 피삭재 가공면이 완전히 밀착하지 않아서 가공후에 역시 같은 파괴 현상이 발생.

후 기

본 연구는 2001 년도 차세대 신기술 개발사업의 연구비에 의하여 연구되었으며 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", 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