

# 초음파 가공에 의한 미세 에어홀 가공 기술

김병희\*, 전성건+, 남권선+, 김현영++, 전병희+++

## Micro-machining of Glass Air Hole using Ultrasonic Machining

B. H. KIM\*, S. K. JEON+, K. S. NAM+, H. Y. KIM++, B. H. JEON+++

### Abstract

Ultrasonic machining is effective for machining of extreme hard and brittle materials, including glass, ceramic, carbide, graphite. The major machining principle involves the direct hammering as well as the impact of abrasive particles on the workpiece. Also, it involve cavitation erosion. The general workpiece is flat side. This study attempted micro hole machining of a curved surface of glass tube. Ultrasonic machining is fault of the slow machining speed. An experiment does and got 16 seconds validity machining time as increasing the processing speed. Moreover, entrance crack and sur face roughness was similar both machining speed is slow and fast. Several micro hole of glass tube machined using one micro tool, but tool wear is infinitesimal.

**Key Words** : Ultrasonic Machining, Micro hole, Glass tube, Micro tool

## 1. 서 론

초음파 가공은 유리, 세라믹, 실리콘, 카바이드, 코발트 합금, 최첨단 소재 가공에 기술 혁명을 이룩하였다.

초음파 가진의 가공입자의 충격운동에 의해 경취 재료가 가공되어진다. 유리의 초음파 가공에서 소재 제거율은 주파수공구의 가진 진폭, 가공력, 가공입자의 크기등에 의해 결정 되어 진다[1][2][3].

일반적으로 초음파 가공은 형상 정밀도 및 고에스펙트가 공이 가능하지만 가공 속도가 느리고 심한 공구 마모의 발생으로 인한 가공비가 비싸다. 또한 평평한 면에 대한 가공이 주를 이루었다.

본 연구에서는 초음파 가공 기술을 이용하여 둥근 면을 갖는 유리관을 가공 하였으며, 한 개의 공구를 사용하여 여러 홀을 가공 하였다. 또한, 가공 속도의 변화에 따른 가물의 초기 입구의 크랙과 출구의 크랙을 관찰하였다.

\* 발표자, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부  
(kbh@kangwon.ac.kr)

주소: 200-701 강원도 춘천시 강원대학교

+ 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학부

++ 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

+++인덕대 컴퓨터 응용 설계 전공

## 2. 초음파 가공원리

초음파 가공이란 공구의 한 진동 주기 안에 가공입자의 운동에 의한 재료의 중앙 및 측면 균열 파괴의 진전에 따른 칩핑 현상의 결과로 알려져 있다[4][5].

충격력과 가공속도는 주로 정하중과 가공입자의 수 및 혼의 가공 진폭의 지배를 받는다. 초음파 가공특성을 결정하는 가공변수로는 가공물의 화학적 조성, 가공입자의 크기, 가공 속도, 공구의 주파수 등이 있다[6]. 또한, 초음파 가진에 의한 가공입자의 충격은 공구의 이송 속도가 일정하게 유지 되면서 일정한 간극(gap)이 존재할 때이고, 공구 끝단이 직접 타격을 주는 경우는 강제 이송으로 인한 경우로 공구 이송 속도가 빨라 일정한 간격이 없을 때이다.

Fig. 1은 초음파가공 메커니즘으로 Fig. 1(a)는 초음파 가진에 의한 가공입자(abrasive)의 충격(impact)이고, Fig. 1(b)는 공구 끝단이 직접 가공물을 타격(hammering)하는 것이다.

초음파 가공에 있어서 소재 제거율 MRR(material removal rate)의 특성은 여러 환경의 지배를 받는데, 공구 이송 속도( $V_f$ )와 공구 마모( $W_t$ ), 공구 끝단과 가공물 간극( $L_g$ )로 표현 하면,

$$MRR_{fg} = k(aV_f + bW_t)/L_g \quad (1)$$

로 표현 할 수 있다. 여기서, a, b, k 는 가공 조건에 의해 달라지는 변수이다.

초음파 가진에 의한 가공입자의 가공보다 공구 끝단의 직접적인 타격에 의한 크랙이 더 많이 발생하여 공구 끝단의 직접적인 타격이 가공 속도가 빠르다. Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)의 가공 속도와 공구 마모를 각각  $V_{f1}$ 과  $V_{f2}$ ,  $W_{t1}$ 와  $W_{t2}$ 라고 하면,

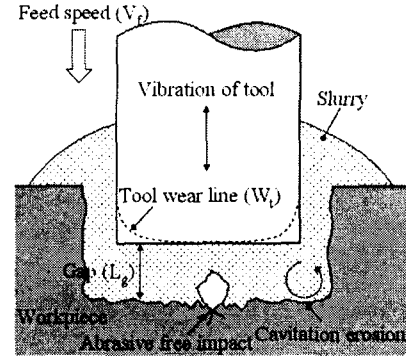
$$V_{f1} < V_{f2} \quad (2)$$

일 때,

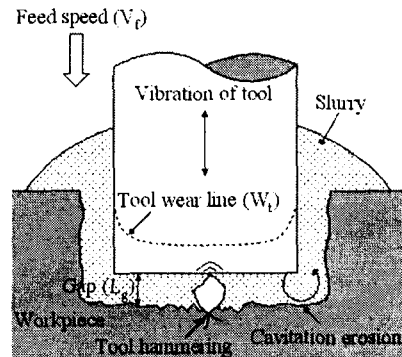
$$W_{t1} < W_{t2} \quad (3)$$

라고 정의 할 수 있다.

초음파 가진으로 공구가 진동하여 가공 입자에 의해 가공되기 위해서는 일정한 간극이 유지되어야 한다.



(a) Abrasive free impact



(b) Tool direct hammering

Fig. 1 Mechanism of ultrasonic machining

그러나 Fig. 1(b)에서와 같이 공구 끝단의 직접적인 타격의 경우, 일정한 간격을 유지하지 못하여 심한 공구 마모가 일어난다.

초음파 가공에서는 공구의 초음파 진동으로 가공액 중에 있는 가공입자가 가속되어 가공면의 충격에 의한 가공 (impacting), 초음파 진동을 하는 공구가 직접 가공 입자에 충격을 주어 가공물 속으로 밀어 넣는 작용에 의한 가공 (hammering), 공구의 초음파 진동에 의하여 생기는 공동 현상(cavitation)에 의한 침식 가공, 화학적인 침식(chemical erosion)에 의한 가공이 있지만 Fig.1(b)처럼 hammering이 가장 큰 가공력을 보이고 공구 마모도 심하게 된다.

식(2)과 (3)에서 보듯이 공구 이송 속도와 공구 마모는 비례관계로 초음파 가공을 동일한 시간동안 했을 경우, 공구 마모는 공구 이송 속도가 빠른 쪽이 심하며 가공 속도 또한 빠르다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 초음파 가공기 설계 및 제작

본 연구에서 설계, 제작한 마이크로 초음파 가공기는 초음파 발생 가진 장치, xyz축 이송부 및 모니터링 시스템, 수직 수평 보정 장치, 후드장치 부분으로 구성되어 있다.

Fig. 2는 USM시스템에 후드가 장착된 시스템으로 CUSM(chemical-assisted ultrasonic machining) 실험도 가능한 장비이다. 구체적인 사양은 Table 1과 같다. 0.01g까지 측정할 수 있는 전자저울에서 측정된 가공력은 RS232C 시리얼 통신으로 전송되며 비교 수치값으로 변환하여 PC의 정압제어 프로그램의 가공력 비교를 해서 실제적인 공구 이송 데이터로 사용된다.

Table 1 Features/Specification of CUSM system

Item	Specification	Comment
Horn	US processor	Output 1450W 28KHz, 10-50 μm
	Horn	Ti, Length: 117mm
Z axis accuracy	3 μm/100mm	BLT type
X-Y axis accuracy	5 μm/150mm	Step type
Electronic scale	resolution: 0.0001g	AND
Safety	Fume hood	
Goniometer	Tilt : ±15°	GN2



Fig. 3 Photograph of CUSM

Table 2 Experimental conditions

Abrasive	GC #600 (20 μm)
Tool	Tungsten carbide
Tool size	∅ 200 μm
Slurry	Abrasive : DI water (50wt% : 50wt%)
Workpiece	Glass tube

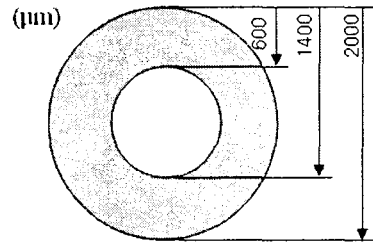


Fig. 3 Glass tube

본 장비의 구동은 입력한 가공력에 대하여 시리얼통신에서 들어온 가공력과 비교해서 클 경우, AC모터의 방향이 역방향, 작을 경우, AC모터가 순방향으로 회전하도록 구성되어 있다. 공구와 가공물의 수직과 수평을 잡기위해 고니오미터(goniometer)를 사용하여 X-Y축 이동시에 발생하는 수평 오차를 최소화 하였다.

#### 3.2 실험 방법

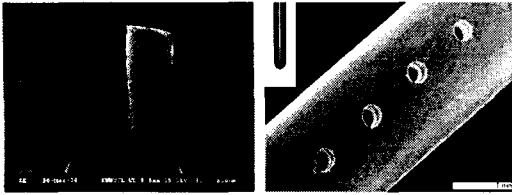
Fig. 3과 같은 직경 2mm의 유리관에 수직으로 직경 200μm의 에어홀을 유리관 내부까지 가공하였으며 에어홀과 에어홀 사이의 간격은 1mm로 하여 다수의 홀을 가공하였다. 이 때 가공 속도에 따른 가공력의 변화, 가공물의 입구 크랙과 출구 크랙을 관찰하였다.

가공 조건은 Table 2와 같으며 라운드 된 유리관을 고정하기 위한 가공물 고정용 척 제작의 어려움이 있었다. 가공면의 측정은 FESEM으로 촬영하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

#### 4.1 미세 에어홀 가공

Fig. 4은 직경 200μm의 초경공구로 유리관(직경 2000μm, 두께 600μm)에 공기배출용 구멍을 USM으로 연속가공한 결과를 보여주고 있다. 한 개의 공구로 1mm 간격으로



(a) Cross section (b) Hole array

Fig. 4 Machined air holes of glass tube

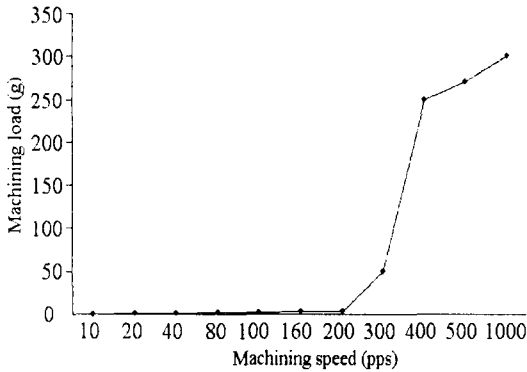


Fig. 5 Machining load w.r.t. feed speed

4개의 홀을 가공하였다.

가공입자는 GC #600을 사용하였으며, 직경 200 $\mu$ m 공구로 구멍 하나를 가공하는 데 약 4분 50초 정도 시간이 경과하였다. 가공단면의 관찰 결과 진직도와 표면거칠기가 양호하고 출구 측의 콘 크랙이 발생도 적음을 알 수 있었다. 또한 공구의 교체 없이 여러 홀을 가공 했음에도 불구하고 형상정밀도가 유지되었으며, 4개의 홀 가공 시 약 50 $\mu$ m 정도의 공구마모가 발생하였다. 이는 약 2mm 정도 길이의 공구를 사용할 경우 160개의 구멍을 연속으로 가공할 수 있다는 것을 보여주며 이에 따라 마이크로 초음파가공 비용을 최소화할 수 있는 가능성을 보여주었다.

#### 4.2 가공속도에 따른 가공력 비교

Fig. 5는 에어홀 간의 간격을 1mm로 하여 가공속도의 변화에 따라 가공특성을 실험한 것으로 가공속도를 증가시키기에 따라 가공면에 가해지는 가공력(machining load)이 커지는 것을 관찰할 수 있다. 특히 가공 속도가 200pps 이하인 경우에는 가공력이 크게 증가하지 않으며 매우 안정적으로 가공되나, 가공 속도가 200pps를 넘게 되면 급격하게 가공력이 증가함을 볼 수 있다.

이는 가공속도가 200pps 이상이 되면 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 공구 끝단과 가공면 사이가 좁아져서 입자에 의한 충격가공보다 공구 끝단과 입자에 의한 직접타격이 많이 이루어지므로 가공력이 급격히 상승하는 것으로 보여 진다. 가공속도가 200pps 이하인 경우에는 초음파 가진에 의한 가공입자들 충격메커니즘이 가공에 많은 영향을 미친다.

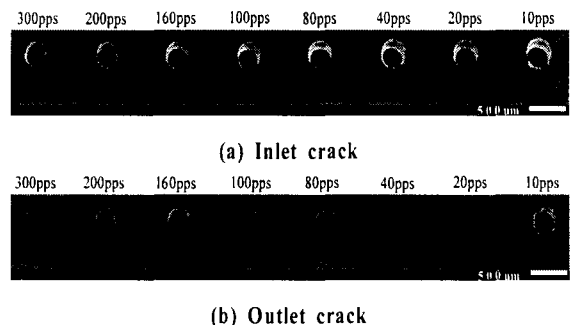
한편 가공 입자들이 가공면 뿐만 아니라 공구의 끝단에까지 힘을 가하게 되는 직접타격이 주된 초음파가공기구가 되면 공구의 마모 또한 빨라지게 된다.

공구 끝단의 마모를 최소화하기 위해서는 가공입자보다 경도가 큰 공구를 사용해야 한다. 대표적으로 다이아몬드를 공구로 만들어 사용하면 되나 고가이므로 지금의 공구 끝단에 다이아몬드 팁을 부착하여 사용하는 것이 경제적이다.

#### 4.3 가공속도에 따른 입구 크랙 과 출구 크랙 비교

Fig. 6은 한 개의 공구로 여러 홀을 가공한 것으로 입구 크랙은 모두 비슷하게 형성되었지만 출구의 경우 160pps에서부터 일부 콘 크랙이 발생하여 300pps 이상이 되면 콘 크랙이 크게 발생함을 알 수 있다.

출구 쪽은 마지막 관통 가공 시 초음파 가진 운동에너지에 반발하는 요소가 줄어들어 출구 쪽에 콘 크랙이 발생할 수밖에 없다. 공구 이송속도가 빠른 300pps인 경우에는 가공력이 급격히 증가하는 직접타격 방식으로 가공기구가 전환되므로(Fig. 5 참조) 콘 크랙의 발생이 심해지게 된다. 따라서 과도한 콘 크랙이 발생하지 않고 가공기구가 복합적으로 작용하는 200pps 정도의 가공속도가 시험에 사용한 유리재료의 초음파 가공 유효 가공속도로 볼 수가 있다. 200pps는 대략 16초 가공한 것으로 200 $\mu$ m 공구로 600 $\mu$ m를 에스펙트 비 3을 가공한 시간이다.



(a) Inlet crack (b) Outlet crack

Fig. 6 Micro crack on air hole

한편 Fig. 6에서 알 수 있듯이 가공 속도가 빨라질수록 미세 홀의 직경이 작아진다. 이유는 슬러리가 순환하면서 홀의 측면이 가공되어지는데, 가공속도가 빨라지면 옆면이 가공되어질 충분한 시간이 없기 때문이다. 따라서 직경 치수정밀도의 관리를 위해서는 공구-가공속도간의 관계를 주의하여 가공조건을 선정해야 한다.

#### 4. 결론

초음파 가공을 이용하여 유리관에 에어 홀을 가공 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일반 초음파 가공으로 유리관에 수직 방향으로 미세 에어 홀을 가공하여 비교적 안정된 형상 정밀도와 표면거칠기를 얻었다.
- (2) 한 개의 초경공구로 표면 거칠기나 형상 정밀도의 저하 없이 다수의 홀을 가공할 수 있었으며, 다축의 가공시스템을 구축할 경우 경제성이 높은 가공 결과를 얻을 수 있다.
- (3) 200 $\mu$ m 초경 공구를 사용하여 600 $\mu$ m 깊이 가공 시 16sec/hole의 최적가공속도를 도출하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 "고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술개발 사업"의 세부과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) X. Q. Sun, T. Masuzawa, M. Fujino, 1996, "Micro ultrasonic machining and its applications in MEMS", *Sensors and Actuators*, Vol. 57, pp. 159~164.
- (2) Chong Nam Chu, Gyu Man Kim and Seong Yune Kim, 2000, "Fabrication of Micro-Shapes Using EDM and Ultrasonic Machining", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 20~27.
- (3) Q. H. Zhang, J. H. Zhang, Z. X. Jia and J. L.

Sun, 1999, "Material-removal-rate analysis in the ultrasonic machining of engineering ceramics", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, pp. 180~184.

- (4) H. Ming, S. Wang, Louis Plebani, and G. Sathyanarayanan, 1997, "Ultrasonic machining", *Manufacturing Science and Technology*, Trans. Of ASME, Vol. 2, pp. 169~176.
- (5) T. C. Lee and C. W. Chan, 1997, "Mechanism of the ultrasonic machining of ceramic composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 71, pp. 195~201.
- (6) B. H. Kim, Y. J. Shin, S. B. Lee, I. B. Chang, H. Y. Kim and B. H. Jeon, 2002, "Characteristics of Ultrasonic Glass Machining", *Transaction of Material Processing*, Vol. 11, pp. 334~338.