

## 화학적 초음파가공을 이용한 유리의 미세가공

전성건\*·신용주\*·김병희\*\*·김현영\*\*·전병희\*\*\*

(2003년 5월 28일 접수, 2003년 9월 25일 심사완료)

### Micro-machining of Glasses using Chemical-assisted Ultrasonic Machining

Seong Keon Jeon, Yong Joo Shin,  
Byeong Hee Kim, Heon Young Kim, Byung Hee Jeon

**Key Words:** Chemical-assisted Ultrasonic Machining(화학적 초음파가공), Glass(유리), Hydrofluoric acid(불산), Material Removal Rate(소재제거율)

#### Abstract

An ultrasonic machining process has been known as efficient and economical means for precision machining of glass or ceramic materials. However, because of its complexity, the mechanism of the machining process is still not well understood. Therefore, it is hard to optimize the process parameters effectively. The conventional ultrasonic machining which uses the abrasive slurry only, furthermore, is time-consuming and gives the relatively rough surface. In order to increase the material removal rate and improve the integrity of the machined surface, we have introduced the novel ultrasonic machining technique, *Chemical-assisted UltraSonic Machining(CUSM)*. The desktop-style micro ultrasonic machine has been developed and the z-axis feed is controlled by the constant load control algorithm. To obtain the chemical effects, the low concentration *HF(hydrofluoric acid)* solution, which erodes glass, added to alumina slurry. Through various experiments and comparison with conventional results, the superiority of CUSM is verified. MRR increases over 200%, the surface roughness is improved and the machining load decreases dramatically.

#### 1. 서론

광, 열, 유체 기능성 재료로는 대표적으로 유리가 있으며, 유리는 고강도, 고경도, 뛰어난 내열성, 내식성, 내마모성, 경량성 등 많은 장점을 갖고 있으나 가공하기 어려운 난삭재에 속한다. 이러한 유리의 가공법으로는 다이아몬드 절삭가공, ECDM, 초음파가공(ultrasonic machining), 불산에

의한 에칭, 엑시머 레이저 가공 등이 널리 사용되고 있다.<sup>(1)</sup> 이 중 초음파가공은 공구의 형상이 직접 가공물에 전사된다는 특징을 가지고 있으며 형상정밀도와 고 애스펙트비(aspect ratio)를 얻을 수 있는 장점이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 수십 $\mu\text{m}$ 이하 패턴을 가공할 경우에는 공구 제작 및 장착의 어려움이 있어 왔다. 또한 심한 공구마모의 발생으로 인해 가공비가 고가이고 대부분의 연구가 알루미늄 등 세라믹에 한정되어 보고되고 있다.<sup>(2,3)</sup>

초음파가공에서 소재제거율(material removal rate)은 공구의 진폭, 가공력, 가공입자의 크기 등에 의해 결정되어 진다고 알려져 있으나 대부분 실험을 통한 접근방법에 그치고 있다.<sup>(4)</sup> 전통적인 초음파가공법은 가공기구에 대한 정확한 규명이 부족하여 가공조건의 최적화가 어려울 뿐만 아니

† 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부

E-mail : kbh@kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6374 FAX : (033)257-4190

\* 강원대학교 기계메카트로닉스 대학원

\*\* 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부

\*\*\* 인덕대학교 컴퓨터 응용설계 전공

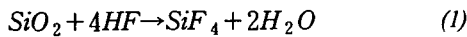
라, 가공속도가 느리고 가공면의 거칠기에 한계가 있다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 초음파가공기의 단점인 가공속도의 저하와 표면거칠기의 악화를 극복하기 위한 새로운 형식의 화학적 초음파 가공기법(chemical-assisted ultrasonic machining, 이하 CUSM)을 개발하였다. 화학적인 효과를 얻기 위하여 저농도의 불산을 슬러리에 첨가하여 가공입자에 의한 충격과 화학적 침식을 동시에 작용시킴으로써 가공속도의 증가와 표면거칠기의 향상을 도모하였다. 마이크로 초음파가공기를 자체 설계 및 제작하여 유리의 미세 가공 특성을 분석하였으며, 가공조건에 따른 소재제거율 및 표면거칠기를 고찰하였다.

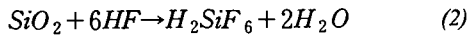
## 2. 화학적 초음파 가공원리

### 2.1 유리의 침식작용

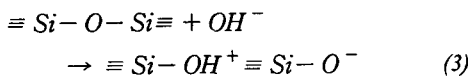
유리는 불산(HF), 염기성 물질 등에 침식된다. 유리의 SiO<sub>2</sub>와 불산의 직접적인 반응식은 아래와 같다.



한편, SiO<sub>2</sub>와 불산의 수용액 간의 반응식은,



이며, 일반적인 유리가공에는 불산을 순수에 희석시킨 용액을 사용한다. 염기성 물질에 의한 유리침식의 경우 pH가 9이상인 용액에서는 Si-O 결합의 절단이 현저해진다.<sup>(5)</sup> 반응식은



이며, 유리로부터 SiO<sub>2</sub> 용출속도는 pH 의존성이 크다.

### 2.2 화학적 초음파가공원리

일반 초음파 가공(USM) 기구 및 화학적 초음파가공(CUSM) 기구는 Fig. 1에서와 같이 가공입자의 운동에너지를 재료에 전달되어 수직방향이나 수평방향의 균열 파괴에너지로 전환되는 기구

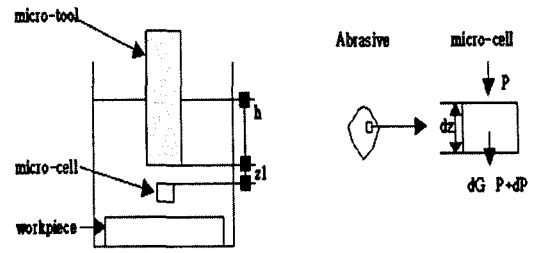


Fig. 1 Single abrasive model of USM

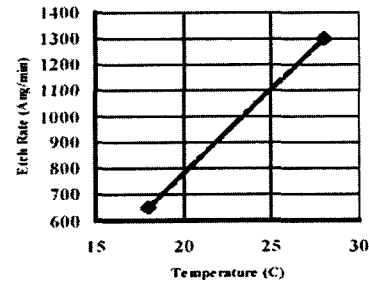


Fig. 2 HF etch rate of silicon dioxide

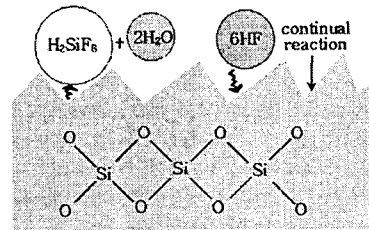


Fig. 3 Reaction model of HF and glass

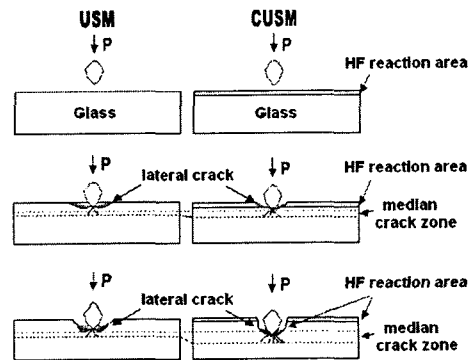


Fig. 4 Machining mechanisms of USM and CUSM

로 가정할 수 있다.<sup>(6)</sup> 초음파가공은 가공입자의 운동에 의한 재료의 중앙 및 측면 균열 파괴의

진전에 따른 침핑 현상의 결과로 알려져 있다.<sup>(7,8)</sup> 화학적 가공원리는 일반 초음파가공원리에 화학적 작용을 추가한 것으로, 본 논문에서는 유리의 침식에 효과적인 불산을 사용하였다.

한편 Fig. 2의 결과에서 알 수 있듯이 HF에 의한 SiO<sub>2</sub>의 가공속도는 온도에 비례하는 것으로 알려져 있다. 따라서 초음파가진에 의한 공구 끝단의 국부적인 온도상승은 전체적인 가공속도를 증가시키는 효과를 가지고 오게 된다.

Fig. 3은 불산에 의한 지속적인 유리 침식을 보여 주고 있다. 매끄러운 유리 표면(R<sub>a</sub> < 10Å)이 불산과의 반응으로 거친 면을 형성하고 지속적인 반응으로 가공면 전면에 걸쳐 불산반응영역(HF reaction area)이 형성된다.

이 불산반응영역은 확산을 통해 제거되어 나갈 뿐만 아니라, 가공입자의 충격에너지가 측면으로 분산되는 것으로 막아주는 효과를 준다.

이러한 화학적인 가공원리를 에너지 차원에서 살펴보면, 수직방향 에너지 소모량을 E<sub>n</sub>, 수평방향 에너지 소모량을 E<sub>s</sub>, 기타 에너지 소모량을 E<sub>a</sub>라고 할 때

$$\Sigma E_{usm} = E_{n(usm)} + E_{s(usm)} + E_a \quad (4)$$

$$\Sigma E_{cusm} = E_{n(cusm)} + E_{s(cusm)} + E_a \quad (5)$$

가정할 수 있으며, 불산반응영역의 효과로

$$\begin{aligned} E_{n(usm)} &< E_{n(cusm)} \\ E_{s(usm)} &> E_{s(cusm)} \end{aligned} \quad (6)$$

인 현상이 발생한다.

Fig. 4에 보는 바와 같이 가공입자의 충격에너지는 유리 표면에 전달되어 수직방향과 수평방향의 미소크랙을 발생시킨다. 이 때 식 (6)에 나타난 바와 같이 일반적인 USM은 측면으로의 에너지 소모가 많지만 CUSM의 경우에는 불산으로 인한 반응영역의 영향으로 인해 측면방향의 에너지 분산으로 최소화되어 수직방향의 크랙 발생이 많아지는 것으로 판단된다. 또한, 가공입자의 가공표면 도달에 방해가 되는 미소유리 칩을 불산이 침식시켜 가공표면 전달에너지를 극대화한 것으로 생각된다. 한편 보다 정확한 기구의 해석을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 초음파 가공기 설계 및 제작

본 연구에서 설계/제작한 마이크로 초음파 가공기는 크게 초음파가진부, z축 이송부 및 모니터링 시스템, 화학적 안전장치 부분으로 구성되어 있다. 구성된 마이크로 초음파 가공기는 Fig. 5와 같으며 자세한 사양은 Table 1에 나타내었다. 전자저울에서 측정된 가공력은 시리얼 통신으로 전송되며 A/D컨버터를 통해 디지털의 수치값으로 변환하여 PC의 정압제어 프로그램의 가공력 비교와 Z축이송의 데이터로 사용된다.

PID제어를 통해 모터의 과도응답 특성을 개선하였으며, 서보 드라이버는 고속 및 고정도 제어 성능을 위해 32비트 DSP를 채용한 위치/속도/토크 제어 겸용 디지털 AC서보 드라이버를 사용하였다. Fig. 6는 정압제어를 위한 시스템의 플로우 차트를 보여주고 있다. 정해진 값에 대하여 시리얼통신에서 들어온 데이터가 일치하면 AC모터의 정지, 클 경우 AC모터의 방향이 역방향, 작을 경우 AC모터가 순방향으로 회전하도록 되어 있다.

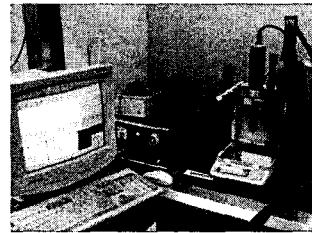


Fig. 5 Photograph of CUSM system

Table 1 Features/Specification of CUSM

Item	Features/Specification	Comment
Horn	US processor	Output 1450W 28kHz, 10-50μm BLT type
	Horn	Ti, Length: 117mm Step type
Power supply	220V, 60Hz	
Z-axis servo	AC servo motor, 100W	
Z-axis accuracy	3μm/100mm	HKS
Electronic scale	resolution: 0.0001g	AND
Dimension	50mm×50mm 250×310×455mm	lead screw
Safety	Fume hood	

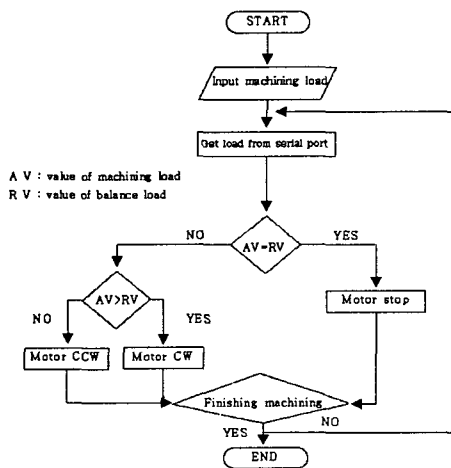


Fig. 6 Flow chart of load monitoring system

Table 2 Experimental conditions

Abrasive	WA #600(20μm), #2500(5μm)
Tool material	Tungsten Carbide
Tool diameter	1500μm (20μm)
(Abrasive size)	300μm (5μm)
	200μm (5μm)
	100μm (5μm)
Slurry	48wt% : 48wt% : 4 wt % ( water : abrasive : HF )
Workpiece	Slides glasses (1mm)

3.2 실험 방법

본 연구에서는 유리의 화학적 초음파가공의 특성을 알아보기 위해 입자크기 및 가공조건에 따른 비교실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 2와 같으며, 불산의 화학적 반응이 유리에만 작용하도록 가공입자는 WA입자로 실험하였다. 가공면의 측정은 광학현미경과 SEM을 통해 수행되었고 Z축의 이송량을 측정하여 가공깊이를 측정하였다. 입자의 크기에 따라서 0.5-2.5μm/s 씩 이송하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 일반초음파가공과 화학적초음파가공 비교

실험은 불산의 위험성과 반응성 등을 고려하여 4wt% 정도의 저농도의 불산용액을 슬러리에 혼합하여 후드 안에서 실험하였다. Fig. 7은 직경 1500μm, 300μm, 200μm, 100μm 공구를 사용하여 USM과 CUSM 가공결과를 SEM으로 비교

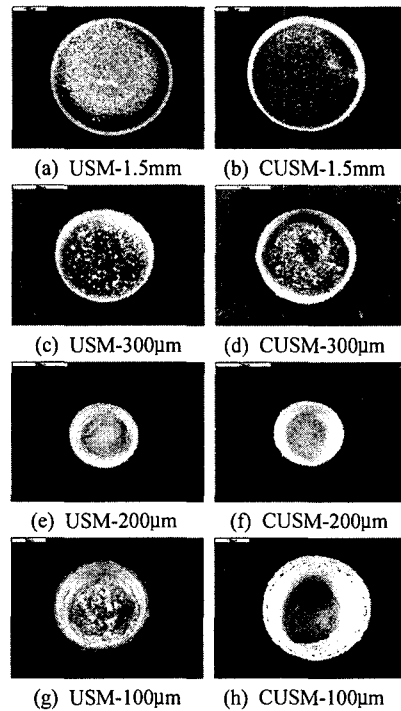


Fig. 7 Effect of tool diameter variation

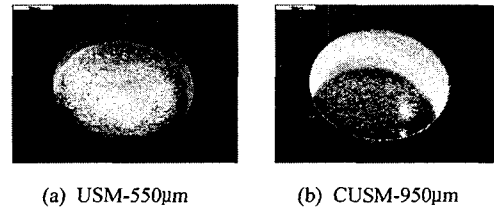


Fig. 8 Comparison of MRR (tool dia. = 1500μm)

촬영한 것이다. 비교적 CUSM이 가공면의 상태가 좋은 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 8은 직경 1500μm의 공구로 유리를 10분간 가공하였을 경우 USM 결과와 CUSM 결과를 비교한 것이며, Fig. 9은 직경의 변화에 따른 가공깊이 변화를 정리한 것이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 CUSM의 경우 MRR이 USM에 비하여 1.3 - 2배 정도 향상되었음을 알 수 있으며 표면거칠기도 상당히 개선되었음을 관찰할 수 있다. 일반적으로 가공입자가 크면 가공속도는 증가하는 반면에 표면거칠기는 나빠지게 된다.<sup>(9,10)</sup> 그러나 불산용액을 이용한 화학적인 초음파가공은 가공입자가 커도 표면거칠기의 저하가 적은 것을 알 수 있다. 이는 불산에 의해 가공계

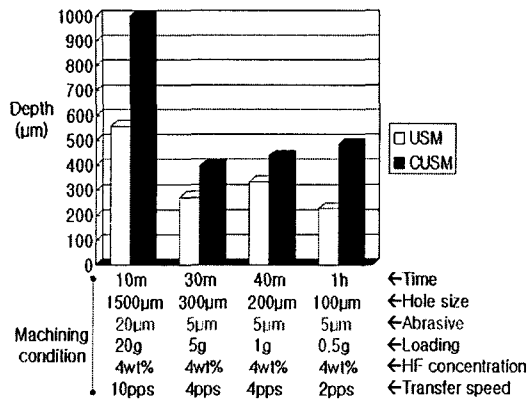
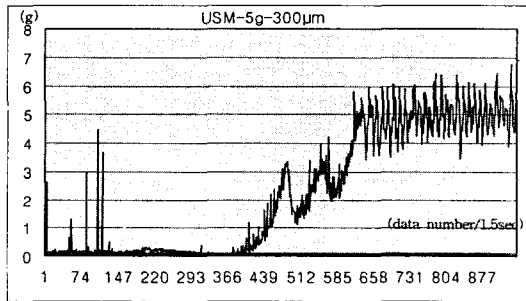
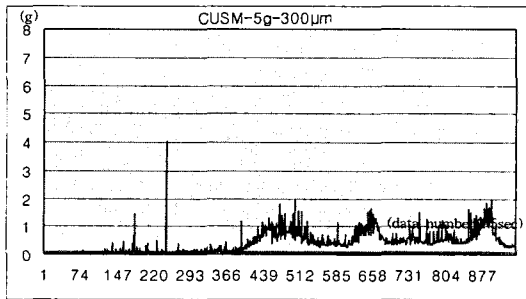


Fig. 9 MRR of USM and CUSM



(a) USM



(b) CUSM

Fig. 10 Load monitoring results

면이 침식됨에 따라 측면크랙이 감소하고 가공에너지가 주로 수직방향의 크랙에 집중됨으로써 가공입자의 단발충격으로 발생하는 가공흔의 크기가 상대적으로 작아지기 때문인 것으로 보여진다.

한편 공구직경이 작아지면 CUSM의 가공속도가 감소하고 그 경향도 약간 불규칙적인 것을 볼 수가 있다. 이는 구멍의 직경이 작아질 경우 슬

러리의 가공부진입이 어렵고 슬러리가 증발하여 균일한 가공조건을 유지하기 어렵기 때문에 발생한 것으로 여겨진다. 보다 정밀한 슬러리 공급장치를 이용하고 주기적인 공구의 전후진 운동을 부가하면 이러한 문제는 해결될 것으로 기대하고 있다.

4.2 CUSM과 USM의 가공력 비교

Fig. 10는 CUSM과 USM의 가공력의 모니터링 결과를 보여주고 있다. 초기 정압 입력값은 5g으로 주었으며 공구의 직경은 300μm이다. Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 USM의 경우에는 가공깊이가 증가함에 따라 가공력이 급격히 증가하고 공구의 전후진 진폭이 증대하여 가공효율이 급격히 떨어지게 된다. 그러나 CUSM은 정해진 가공력의 1/4 -1/5 정도의 가공력을 보이고 전후진 진폭도 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이는 불산에 의하여 가공칩들의 크기가 상대적으로 작아지고 구멍의 측면과 공구사이의 간격이 넓어져 가공액의 순환이 원활해진 것이 원인이라고 볼 수 있다. 한편 정압제어 알고리즘을 개선하여 CUSM의 가공력을 초기 정압 입력값을 유지하도록 할 경우 가공속도의 증가를 기대할 수가 있다. 이론적으로는 정압제어의 개선을 통해 기존 USM에 비하여 10배 정도 빠른 속도의 가공결과를 얻을 것으로 기대하고 있다.

4.3 화학적인 초음파가공 메커니즘 고찰

Fig. 11은 USM과 CUSM가공 시 진입부의 가공면을 보여주고 있다. USM의 경우 진입부 측면에 크랙의 발생이 심한 것을 볼 수 있으나, CUSM의 경우에는 크랙의 발생이 적어 상대적으로 매끄러운 프로파일을 보여주고 있다. 이는 불산용액에 의한 반응으로 진입부 가공면의 경도가 약화되고 식 (6)이 의미하는 바와 같이 미소 크랙현상이 측면보다 수직방향에 집중된 결과로부터 기인하는 것으로 보인다.

한편 Fig. 11에서 보는 바와 같이 동일한 직경의 공구를 사용하더라도 불산용액의 작용에 의해 CUSM 쪽이 구멍의 확대량이 좀 더 큰 것을 볼 수가 있다. 이는 도리어 가공입자의 배출을 원활히 하고, 가공입자나 슬러리에 의한 측면의 금힘을 줄이는 효과를 가지고 온다.

그러나 가공시간이 길어지면 구멍의 직경이 과다하게 확장되고 유리의 표면이 침식되는 현상이

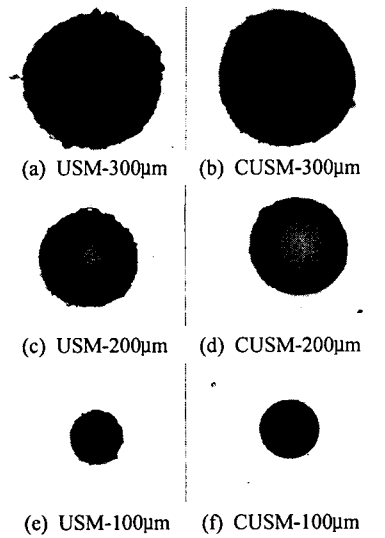


Fig. 11 Micro crack on hole entrance

나타난다. 이런 단점을 보완하기 위해서는 가공 속도를 빠르게 하고 폴리머 등에 의한 유리표면의 코팅을 통해 가공부위 외에는 불산으로부터 보호하는 기법이 필요하다.

한편 불산뿐만 아니라 질산, 황산, 암모늄 등 또 다른 화학적인 요소를 첨가할 경우 보다 효과적인 가공이 이루어질 것으로 기대하고 연구를 수행 중에 있다.

## 5. 결론

화학적 초음파 가공에 의한 유리의 가공 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 에너지 보존과 초기 진입 시 홀의 미소크랙 현상을 관찰하여 화학적 초음파가공 기구를 규명하였다.
- (2) 공구 끝단의 국부적인 온도상승은 불산의 화학반응을 활성화하여 화학작용이 이 공구끝단에 집중되는 효과를 가져온다.
- (3) 저농도의 불산을 가공슬러리에 첨가하여 표면거칠기와 가공속도를 크게 향상시켰다.
- (4) CUSM의 경우 가공력을 획기적으로 감소시킬 수 있었다.
- (5) 정밀슬러리 공급장치의 도입과 공구에 주기적인 전후진 운동을 부여하여 직경감소에 따른 가공속도 저하를 최소화할 필요가 있다.

## 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.

## 참고문헌

- (1) Ghahramani, B. and Wang, Z. Y., 2001, "Precision Ultrasonic Machining Process: a Case Study of Stress Analysis of Ceramic ( $Al_2O_3$ )," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, Issue 8, pp. 1189~1208.
- (2) Sun, X. Q., Masuzawa, T., Fujino, M., 1996, "Micro Ultrasonic Machining and Its Applications in MEMS," *Sensors and Actuators*, Vol. 57, pp. 159~164.
- (3) 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.
- (4) Zhang, Q. H., Zhang, J. H., Jia, Z. X. and Sun, J. L., 1999, "Material-Removal-Rate Analysis in the Ultrasonic Machining of Engineering Ceramics," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, pp. 180~184.
- (5) Clark, D. E., Pantano C. G., Jr. and Hench, L. L., 1979, "Corrosion of Glass," *Books for Industry and The Glass Industry*, p. 1.
- (6) Zhao Wansheng, Wang Zhenlong, "Ultrasonic and Electric Discharge Machining to Deep and Small Hole on Titanium Alloy" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, pp. 101~106.
- (7) Ming, H., Wang, S., Louis Plebani, and Sathyanarayanan, G., 1997, "Ultrasonic Machining," *Manufacturing Science and Technology, Trans. Of ASME*, Vol. 2, pp. 169~176.
- (8) Lee, T. C. and Chan, C. W., 1997, "Mechanism of the Ultrasonic Machining of Ceramic Composites," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 71, pp. 195~201.

(9) Pei, Z. J. and Ferreira, P. M., 1998, "Modeling of Ductile-Mode Material Removal in Rotary Ultrasonic Machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, pp. 1399~1418.

(10) Thoe, T. B., Aspinwall, D. K. and Wise, M. L. H., 1998, "Review on Ultrasonic Machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, Issue 4, pp. 239~255.