

불산대체용액을 이용한 유리의 초음파 가공

전성건* · 남권선* · 김병희** · 김현영** · 전병희***

(2004년 2월 10일 접수)

Chemical-assisted Ultrasonic Machining of Glass by Using HF Substitute Solution

S. K. Jeon, K. S. Nam, B. H. Kim, H. Y. Kim and B. H. Jeon

Abstract

Ultrasonic machining has been known as one of the conventional machining methods in the glass fabrication processes. In ultrasonic machining, typically, glass is removed by the impulse energy of the abrasive generated by the ultrasonic power. However, when the machining feature decrease under hundreds of micrometers, as conventional ultrasonic machining uses only the impulse energy of the abrasive, the speed of ultrasonic machining decreases significantly and the surface roughness becomes deteriorated. To overcome this size effect, the chemicals which can erode glasses, such as HF, XF, etc, are added to the slurry. The chemical-assisted ultrasonic machining method, so called, is another alternating effective way for micro machining of glasses. In previous work, we used the hydrofluoric acid (HF) as an additive chemical. But, as the HF solution is too poisonous to be used as a ultrasonic process additive, it is needed to be substituted by other safe chemicals. As results of the machinability comparison of several chemicals, the GST-500F was selected to replace the HF. The GST-500F (pH 4.0± 1.0) is non-volatile, odorless. During experimental works, it was shown that the machining rate increases 1.5 times faster than the conventional ultrasonic machining. The machining load also decreases. However, the enlargement of the hole diameter and significant tool wear are still the problems to be solved.

Key Words : Chemical-Assisted Ultrasonic Machining, Glass, HF Substitution, Micro Holes

1. 서 론

바이오, 광, 반도체, 열, 유체등에 효율적으로 사용되는 세라믹, 알루미늄, 실리콘, 석영, 유리등 경취재료가 널리 이용되고 있다. 이런 경취재료의 비전기적 비열가공으로 비도전체의 고에스펙트(HAR, high aspect ratio) 마이크로 가공에는 초음파 가공이 용이하다.⁽¹⁻²⁾

경취재료인 유리의 초음파 가공에서 소재제거

율은 가진 주파수, 공구의 가진 진폭, 가공력, 가공입자의 크기 등에 의해 결정 되어 진다.⁽³⁾

일반적인 초음파 가공은 고에스펙트비 가공 시 슬러리(slurry) 순환의 어려움이 있어 가공시간이 많이 걸리고 표면 거칠기가 가공입자(abrasive)에 대한 의존도가 크다.

따라서 본 연구에서는 기존의 초음파가공의 단점인 가공속도의 저하와 표면거칠기의 악화를 극복하기 위하여 새로운 형식의 화학적 초음파 가공

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

*** 인덕대학교 컴퓨터 응용설계 전공

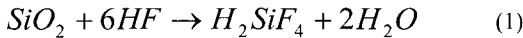
기법을 개발하였다. 일반적으로 유리의 침식은 불산(hydrofluoric acid, 이하 HF)을 이용하는데, 안전성 및 후처리에 문제점이 있어 본 연구에서는 불산대체용액을 화학침가불로 사용하였다.

즉, 불산대체용액을 슬러리에 첨가함으로써 가공입자에 의한 충격력과 화학적 침식을 동시에 작용시킴으로써 가공속도의 증가와 표면 거칠기의 향상을 도모하였다. 마이크로 초음파가공기를 자체 설계 및 제작하여 유리의 미세 가공특성을 분석하였으며, 대체용액 및 가공법에 따른 소재 제거율 및 가공력, 공구마모 등을 고찰하였다.

2. 화학적 초음파 가공원리

2.1 화학적가공의 원리 및 불산대체물질

유리는 불산, 염기성 물질 등에 침식된다. 유리의 SiO_2 와 불산 수용액의 직접적인 반응식은 아래와 같다.



일반적인 유리가공에는 불산을 순수에 희석시킨 용액을 사용한다.

불산대체용액으로는 물질안전보건자료(MSDS)에 등록되어 있는 ALT-AB, Semitron-GT, GST-500P, GST-500F(이상 상품명) 등이 개발되어 판매되고 있다.

Fig. 1은 불산 대체 용액들을 비교 실험한 것이다. 불산은 4wt%, 불산대체용액들은 100wt%를 사용하였고, 가공입자는 WA # 600이며 초경공구의 직경은 1.5mm 이다. 총 가공시간은 5분으로 공정하였다.

네 가지 용액 모두 불산과 비슷한 가공 특성을 가졌으며 순수를 사용한 일반적인 초음파가공에 비하여 화학적인 초음파가공이 전반적으로 효율이 좋음을 알 수 있다. 특히 GST-500F는 다른 용액에 비해 가공속도도 빠른 편이고 다른 용액과는 달리 에칭 흔적이 거의 없었다. 이런 점을 고려하여 본 연구에서는 GST-500F를 불산 대체 용액으로 선정하여 실험하였다.

일반적으로 유리의 funnel dag의 제거에 사용되는 것으로 알려진 GST-500F은 유리 침식의 경우 식 (2)와 같은 화학식으로 반응하며 불산과는 달리 유해 증기를 발생시키지 않아 비교적 안전한 것으로 알려져 있다. Table 1은 사용된 불산과

GST-500F의 특성을 나타내고 있다

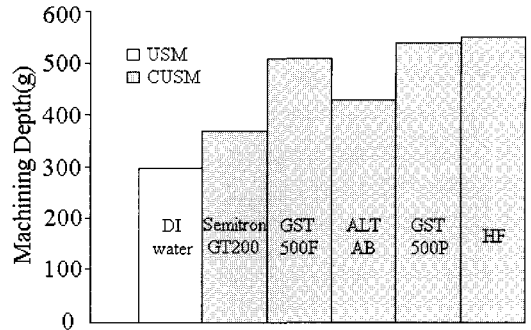
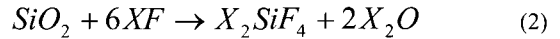


Fig. 1 Removal rate w.r.t chemicals

Table 1 Comparison between HF and GST-500F

MSDS	HF	GST-500F
Ingredient	Hydrogen Fluoride	Surfactant Inhibitor Fluoride salt C ₂ H ₂ O ₄ D.I.W
pH	1.0	4.0
Evaporation Point	108° C	102° C
Harmfulness	Poisonousness	NEPA: 3,0,0

2.2 화학적 초음파가공의 원리

일반적인 초음파가공(USM)은 가공입자의 운동에 의한 재료의 중앙 및 측면 균열 파괴의 진전에 따른 칩핑 현상의 결과로 알려져 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

화학적 초음파가공(CUSM) 원리는 이미 언급한 바와 같이 일반 초음파가공 원리에 화학적인 작용을 추가한 것이다. 그런데 Fig. 2에서 보는 바와 같이 본 초음파가공 시스템은 혼(horn)과 공구가 볼트 연결 방식을 사용하여 초음파 가진의 마찰력에 의한 혼의 헤드(head) 부분에 극부적인 온도 상승이 일어난다. 따라서 초음파 가진에 의한 공구 끝단의 국부적인 온도상승은 전체적인 화학적 가공효과를 증가시키는 효과를 가져 오게 된다.

Fig. 3은 GST-500F에 의한 지속적인 유리 침식 기구를 보여 주고 있다. 매끄러운 유리 표면(Ra

< 10 Å)이 GST-500F과의 반응으로 거친 면을 형성하고 계속적인 반응으로 가공면 전면에 걸쳐 화학반응영역(chemical reaction area)이 형성된다.

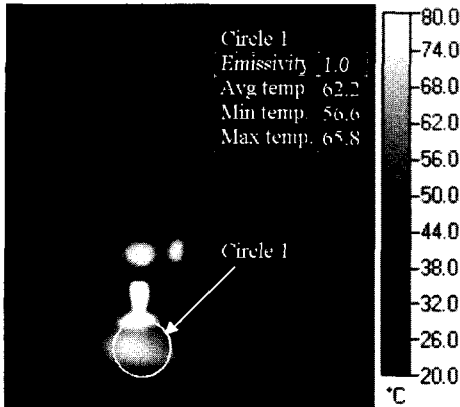


Fig. 2 Temperature distribution of horn head

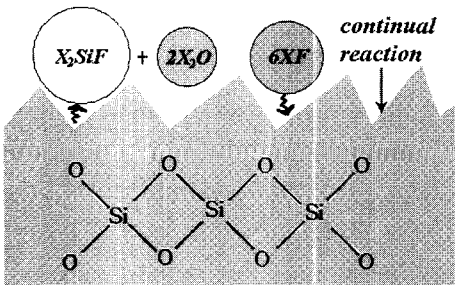


Fig. 3 Reaction model of GST-500F and glass

이러한 화학적인 가공원리를 에너지 차원에서 살펴보면, 수직방향 에너지 소모량을 E_n , 수평 방향 에너지 소모량을 E_s , 기타 에너지 소모량을 E_a 라고 할 때, 화학 반응 영역의 효과로

$$\begin{aligned} E_{n(usm)} &< E_{n(cusm)} \\ E_{s(usm)} &> E_{s(cusm)} \end{aligned} \quad (3)$$

인 현상이 발생한다.⁽⁷⁾

식 (3)에 나타난 바와 같이 일반적인 USM은 측면으로의 에너지 소모가 많지만 CUSM의 경우에는 GST-500F으로 인한 반응영역의 영향으로 인해 측면방향의 에너지 분산으로 최소화되어 수직방향의 크랙 발생이 많아지는 것으로 판단된다. 또한, 가공입자의 가공표면 도달에 방해가 되는 미소유리 칩을 GST-500F이 칩식시켜 가공표면에 전

달에너지를 극대화한 것으로 생각된다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 초음파 가공기 설계 및 제작

본 연구에서 설계/제작한 마이크로 초음파 가공기는 크게 초음파 가진부, z축 이송부 및 모니터링 시스템, 화학적 안전장치 부분으로 구성되어 있다.

Fig. 4는 CUSM 시스템을 보여주고 있다. USM에 후드가 장착된 시스템으로 실험을 안전하게 할 수 있다.

자세한 사양은 Table 2에 나타내었다. 전자저울에서 측정된 가공력은 시리얼 통신으로 전송되며 A/D 컨버터를 통해 디지털의 수치값으로 변환하여 PC의 정압제어 프로그램의 가공력 비교와 Z축 이송의 데이터로 사용된다.

본 시스템의 모션은 정해진 값에 대하여 시리얼통신에서 들어온 데이터가 일치하면 AC 모터의 정지, 클 경우 AC 모터의 방향이 역방향, 작을 경우 AC 모터가 순방향으로 회전하도록 되어 있다.

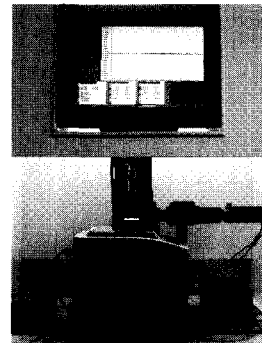


Fig. 4 CUSM system

Table 2 Features/Specification of CUSM system

Item		Features/Specification	Commet
Horn	US processor	Output 1450W 28kHz, 10-50μ m	BLT type
	Horn	Ti, Length: 117mm	Step type
Z-axis accuracy		3μ m/100mm	
X-Yaxis accuracy		5μ m/150mm	
Electronic scale		resolution: 0.0001g	AND
Safety		Fume hood	

Table 3 Experimental conditions

Type	USM & CUSM			
Tool Size(μm)	300	200	100	50
Machining Time(min)	20	20	10	10
Abrasive	GC 5 μm	GC 5 μm	GC 3 μm	GC 3 μm
Loading(g)	10	1	0.5	0.1
GST-500F(%)	100	100	100	100
Transfer Speed(pps)	10	10	1	1

3.2 실험 방법

본 연구에서는 유리의 화학적 초음파가공의 특성을 알아보기 위해 입자크기 및 가공조건에 따른 비교실험을 수행하였다. 실험은 화학적 반응 등을 고려하여 후드 안에서 실험하였다. 실험조건은 Table 3과 같으며 Z축의 이송량을 측정하여 가공깊이를 측정하였다.

입자의 크기에 따라서 0.2-2 $\mu\text{m/s}$ 씩 이송하였다. 50 μm 공구사용시 공구의 파단을 막기 위하여 0.1g의 작은 가공력을 취했다.

4. 실험 결과 및 고찰

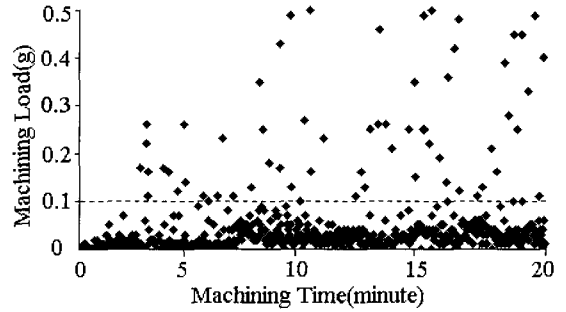
4.1 가공력과 가공속도의 비교

본 시스템은 정해진 가공력보다 높으면 Z축의 가공방향으로 움직이고 가공력보다 낮으면 뒤로 후진하는 형태로 작동된다. 가공력 변화를 관찰하여 USM과 CUSM 특성을 파악 하였다.

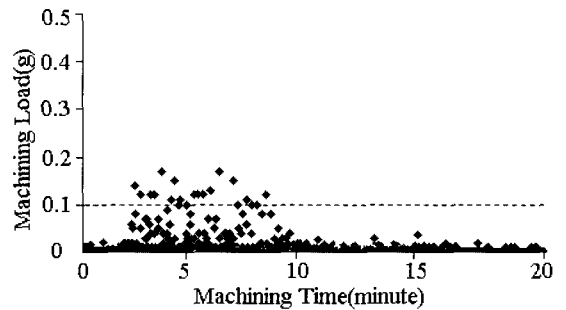
Fig. 5는 공구 직경 50 μm , 가공력 0.1g의 가공 조건으로 20분간 가공하였을 때의 USM과 CUSM의 가공력 측정결과를보여주고 있다..

Fig. 5(a)의 USM의 경우, 초기 가공 시작부터 끝날때까지의 가공력이 주어진 가공력 0.1g 이상인 경우가 CUSM보다 현저하게 많은 것을 알 수 있다. 이 경우 가공력이 주어진 최대가공력을 넘는 경우가 자주 발생하게 되고, 결국 공구의 후진이 많아 CUSM에 비해 전체적인 가공효율이 낮아지는 결과를 낳게 된다.

반면 Fig. 5(b)의 CUSM의 경우로 초기 가공물의 가공 진입 시에는 표면의 초기 저항에 의해 가공력이 올라가지만 이후에는 가공이 진행됨에 따라



(a) USM



(b) CUSM

Fig. 5 Comparison of machining load

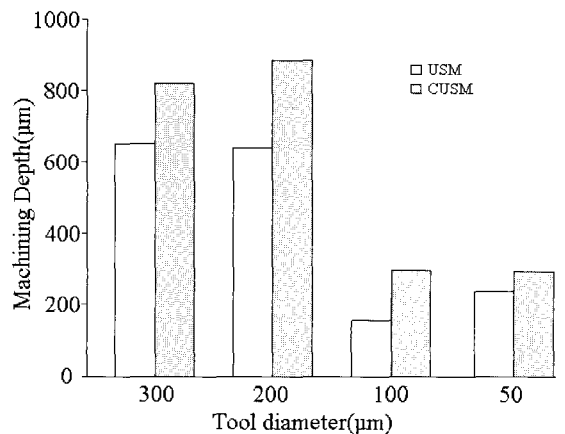


Fig. 6 Machining depth between USM and CUSM

낮은 가공력을 유지하며 안정된 상태로 가공을 수행하고 있음을 알 수 있다. 이는 CUSM이 가공 속도 면에서 뿐만 아니라 고 에스펙트비의 가공에 있어서도 기존의 USM에 비하여 유리함을 나

타내는 것이다.

Fig. 6은 직경의 변화에 따른 가공깊이 변화를 나타낸 것이다. CUSM의 경우 MRR이 USM에 비하여 1.3 - 2배 정도 향상되었음을 알 수 있으며 고에스펙트비로 갈수록 가공속도는 상대적으로 빨라지게 된다.

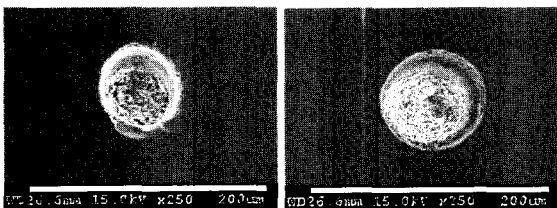
4.2 가공정밀도 및 직경확대

Fig. 7과 Fig. 8는 직경 50 μ m 공구로 가공한 것을 광학 현미경과 SEM으로 촬영한 것이다.

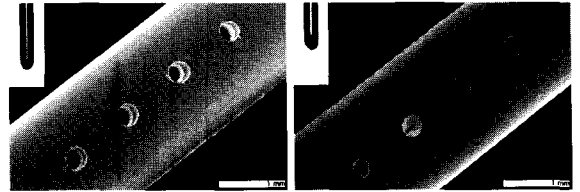
가공 입자의 표면은 비교적 CUSM이 좋은 것을 알 수 있으며 일반적으로 매끄러운 프로파일을 형성한다. 그러나 CUSM의 경우에는 직경의 확대가 발생함을 알 수 있다. 이것은 화학적 반응에 의한 침식 작용과 슬러리의 순환에 의한 2차 가공에 의한 결과로 보여진다. 이러한 슬러리의 순환에 의해 Fig. 5(b)처럼 깊은 구멍 가공 시에도 가공력 변화가 일정하게 유지되는 것으로 보인다. 그러나 장시간 가공 시 화학적 반응에 의한 침식으로 인해서 구멍 크기의 과도한 확대가 초래될 수 있으며 가공 부위 외에도 화학적 침식이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 불산 대체 용액의 시간에 따른 적절한 농도를 파악하여 실험 조건의 개선이 필요하며 가공부위에 화학적으로 반응이 없는 물질을 코팅하여 가공부위 외에는 화학적 침식에서 보호하는 기법이 필요하다.



(a) USM (b) CUSM
Fig. 7 Profile of micro hole entrance



(a) USM (b) CUSM
Fig. 8 Enlargement of micro hole diameter



(a) USM (b) CUSM
Fig. 9 Machining of glass air pin hole

4.3 공구 마모

Fig. 9는 직경 200 μ m의 초경공구로 유리관(직경 2000 μ m, 두께 600 μ m)에 공기배출용 구멍을 USM과 CUSM으로 연속가공한 결과를 보여주고 있다. 가공입자로는 GC# 600을 사용하였으며 공구의 후진 없이 가공방향으로 일정한 속도로 700 μ m를 진행시켰으며, 1mm 간격으로 4개의 홀을 가공하였다.

Fig. 9(a)는 USM 가공 결과로 네 개의 홀 모두 문제 없이 관통되었으나 부분적으로 입구 미소 크랙이 관찰되었다.

Fig. 9(b)는 CUSM 가공 결과로 네 개의 홀 중 두 개만 관통되었으며 나머지 두 개의 홀은 부분적으로 가공되었다. 입구 측의 미소 크랙은 USM에 비하여 적게 관찰되었다.

가공을 마친 공구 끝단을 광학현미경으로 측정한 결과 CUSM이 USM보다 약 3배정도 공구마모가 심한 것을 알 수 있었다. 이는 장시간 가공 시 공구 끝단이 화학적인 영향으로 심하게 마모되는 것으로 추측된다. 또한 가공입자가 커서 공구 마모의 차이가 상대적으로 크게 나타난 것으로 보여진다. 한편 가공입자 #2500 이하를 사용한 Fig. 6의 실험에서는 CUSM의 공구마모가 USM보다 약간 큰 정도로 관찰되었다.

공구마모를 막기 위해서는 가공입자의 크기와 가공시간을 적절히 선택하여 가공할 필요가 있으며 궁극적으로 하거나 공구의 재질을 변경 및 불산대체용액의 농도 변화 등이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

불산대체용액을 이용한 화학적 초음파가공에 의한 유리의 가공 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 최적의 불산대체용액으로 비교적 안전하게 화학적 초음파가공을 수행하였다.
- (2) 일반 초음파가공에 화학적 작용을 추가하여 가공속도를 크게 향상시켰다.
- (3) 가공력의 비교를 통해 화학적 초음파 가공이 가공속도와 고에스펙트비 면에서 유리함을 밝혔다.
- (4) 공구 하나로 유리관면의 여러 개의 같은 홀을 관통할 수 있었으나 장시간 화학적 초음파 가공시 공구 마모율 문제가 발생한다.

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) D. E. Clark, C. G. Pantano Jr. & L. L. Hench, 1979, "Corrosion of Glass", Books for Industry and The Glass Industry, p. 1.
- (5) 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.
- (6) H. Ming, S. Wang, Louis Plebani, and G. Sathyanarayanan, 1997, "Ultrasonic machining", Manufacturing Science and Technology, Trans. Of ASME, Vol. 2, pp. 169~176.
- (7) Seong Keon Jeon, Yong Joo Shin, Byeong Hee Kim, Heon Young Kim and Byung Hee Jeon, 2003, "Micro-machining of Glasses using Chemical-assisted Ultrasonic Machining", Journal of KSME, No27, pp. 2085~2091.