

화학적기법을 이용한 유리의 초음파가공 특성

김병희[†]·전성건^{*}·김현영^{**}·전병희^{***}

Characteristics of Chemical-assisted Ultrasonic Machining of Glass

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

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

Abstract

Ultrasonic Machining process is an efficient and economical means of precision machining on glass and ceramic materials. However, the mechanics of the process with respect to crack initiation and propagation, and stress development in the ceramic workpiece subsurface are still not well understood. In this research, we investigate the basic mechanism of chemical assisted ultrasonic machining(CUSM) of glass through the experimental approach. For the purpose of this study, we designed and fabricated the desktop micro ultrasonic machine. The feed is controlled precisely by using the constant load control system. During the machining experiment, the effects of HF(hydrofluoric acid) characteristics and machining condition on the surface roughness and the material removal rate are measured and compared.

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[1]. 이중 초음파 가공은 공구의 형상이 직접 가공물에 전사된다는 특징을 가지고 있으며 형상 정밀도와 애스펙트 비(aspect ratio)를 얻을

수 있는 장점이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 수십 μm 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[2][3].

초음파 가공에서 소재제거율(material removal rate)은 공구 진폭, 가공력, 가공입자의 크기 등에 의해 결정되어 진다[4]. 소재제거율에 미치는 가공인자로, 유리의 화학적인 반응을 일으키는 물질을 포함한 화학적 초음파 가공(chemical assisted ultrasonic machining) 메커니즘을 규명하려 한다.

본 연구에서는 미세 초음파 가공기를 자체 설계 및 제작하여 유리의 미세 가공 특성을 분석하였으며, 화학적 초음파 가공에서 불산 반응을 도입하여 소재제거율 및 표면 거칠기를 고찰하였다.

[†]강원대학교 기계메카트로닉스 공학부

E-mail : kbh@kangwon.ac.kr

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

* 강원대학교 기계메카트로닉스 대학원

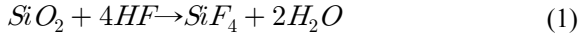
** 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부

*** 인덕대학교 컴퓨터 응용설계 전공

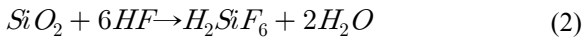
2. 화학적 초음파 가공원리

2.1 유리의 침식작용

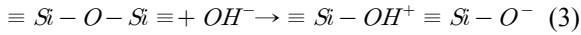
유리는 불산(HF), 염기성 물질 등에 침식작용을 일으킨다. 첫 번째, 불산에 의한 유리침식이다. 유리의 SiO₂와 플루오르화수소 HF의 반응은,



유리의 SiO₂와 플루오르화수소 HF의 수용액(플루오르화수소산) 반응은,



일반적인 HF반응은 플루오르화수소산을 사용한다. 두 번째, 염기성 물질에 의한 유리침식이다. pH가 9이상인 용액에서는, Si-O 결합의 절단이 현저해진다[5].



유리로부터 SiO₂ 용출속도는 pH 의존성이 크다. 본 연구에서는 HF에 관한 초음파 가공 메커니즘을 규명하였다.

2.2 화학적 초음파 가공원리

일반 초음파 가공(USM) 메커니즘과 화학적 초음파 가공(CUSM) 메커니즘은, Fig. 3에서와 같이, 가공입자의 운동에너지가 재료에 전달되어 수직 방향이나 수평방향의 균열 파괴에너지로 전환되는 차이를 보여 주고 있다. 초음파가진으로 전달된 압력 P는[6],

$$P = \rho g(h + z) + \omega A c_p \cos \omega(t - \frac{z}{c}) + P_0 \quad (4)$$

Eq. (4)이고, 이 식에서 s는 공구의 초음파 가진 거리, c는 매질 속의 음속, z는 마이크로 셀의 미소 이동 거리, A는 가진 진폭, ω는 각속도이다. 초음파가공은 가공입자의 운동에 의한 재료의 중앙 및 측면 균열 파괴의 진전에 따른 칩핑 현상의 결과로 알려져 있다[7][8]. 화학적 가공원리는 일반 초음파 가공원리에 화학적인 기법을 이용한 것으로, 여기서는 유리의 침식에 효과적인 HF를

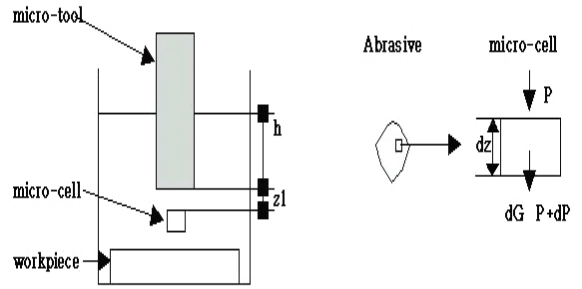


Fig. 1 Stress of micro cell

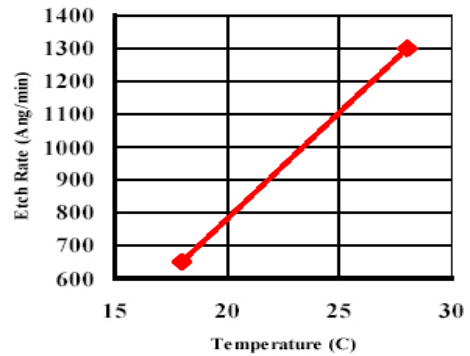


Fig. 2 Silicon dioxide HF etch rate

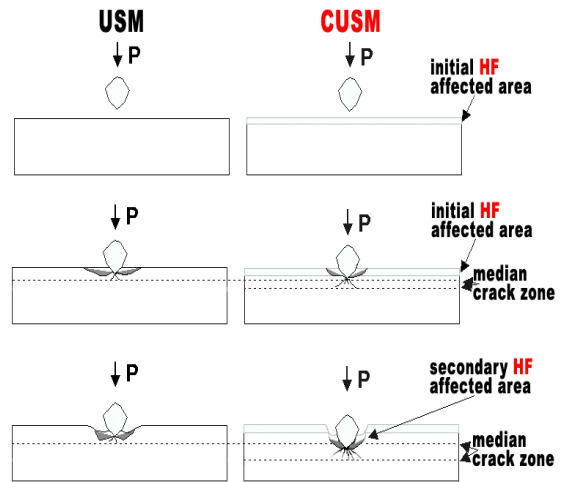


Fig. 3 USM and CUSM machining mechanism

사용하였다. Fig. 2에서 보면 HF에 의한 SiO₂ 침식은 온도에 밀접한 관련이 있다. 초음파가진으로 인하여 공구 끝단의 국부적인 온도상승은 HF에 의한 초음파가공에 영향을 미친다. 화학적인 가공원리를 에너지 차원에서 살펴보면, 수직 방향 에너지 소모량을 E_n, 수평방향 에너지 소모량을 E_s, 기타 에너지 소모량을 E_α 라 하면,

$$\Sigma E_{usm} = E_n(usm) + E_s(usm) + E_{\alpha}$$

$$\Sigma E_{cusm} = E_n(cusm) + E_s(cusm) + E_{\alpha} \quad (5)$$

$$E_n(usm) < E_n(cusm), E_s(usm) > E_s(cusm)$$

Eq. (4)의 P는 Fig. 3처럼 유리 표면에 전달되어 수직방향 부위와 수평방향 부위의 에너지소모, 즉 미소크랙으로 작용된다. 일반적인 USM은 측면의 에너지 소모가 뚜렷하고, 화학적인 CUSM은 활성화된 유리표면의 에너지전달이 쉬워 수직방향의 화학적으로 활성화가 안 된 부위의 크랙에 에너지소모가 많아진다. 또한, 가공입자의 가공표면 도달에 방해가 되는 가공되어 나온 미소유리 입자를 HF가 침식시켜 가공표면 전달에너지를 극대화 한 것으로 보여진다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 초음파 가공기 설계 및 제작

본 연구에서 설계/제작한 마이크로 초음파 가공기는 크게 ultrasonic processor, z축 이송부 및 모니터링, 화학적 안전장치 부분으로 구성되어 있다. 구성된 마이크로 초음파 가공기는 Fig. 4과 같으며 자세한 사양은 Table 1과 같다.



Fig. 4 Photograph of system

전자저울에서 측정된 가공력은 시리얼 통신(RS232C)으로 전송되며 A/D컨버터를 통해 디지털의 수치값으로 변환하여 PC의 정압제어 프로그램의 가공력 비교와 Z축이송의 데이터로 사용된다. PC의 정압명령을 받은 데이터는 다시 D/A 컨버터를 통해 AC서보모터를 구동하여 마이크로 이송을 한다. 또한 화학물질로부터의 안전을 위한 보호 장비로, 방독면 및 시스템을 Fume hood 내부에 설치하였다. Fig. 5는 정압제어를 위한

Table 1. Features/Specification of USM

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

AC서보시스템의 플로우차트를 보여주고 있다. 정해진 값과 시리얼통신에서 들어온 데이터가 일치하면 스텝모터의 정지, 정해진 값보다 클 경우 스텝모터의 방향이 역방향, 정해진 값보다 작을 경우 스텝모터의 방향이 순방향으로 움직이게 되어 있다.

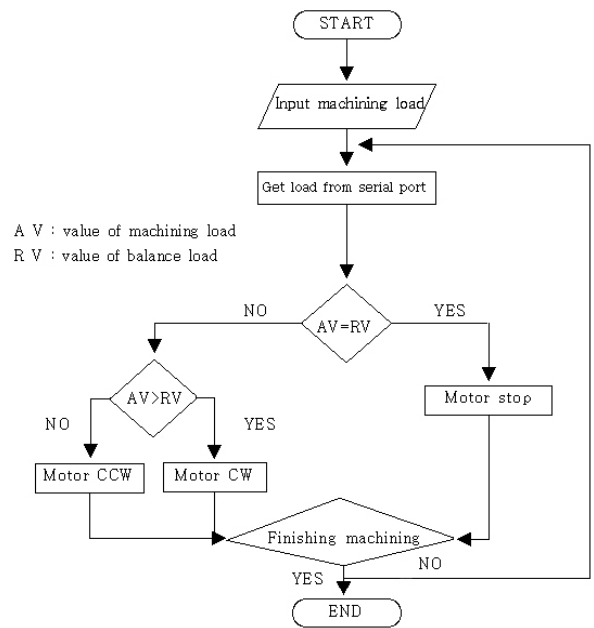


Fig. 5 Flow chart of load monitoring system

3.2 실험 방법

본 연구에서는 유리의 화학적 초음파가공의 특성을 알아보기 위해 입자크기 및 가공조건에 따른 비교실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 2와 같으며, HF의 화학적 반응이 유리에만 작용하도록 가공입자는 WA입자로 실험하였다. 가공면의 측정은 광학현미경과 SEM을 통해 수행되었고 Z

Table 2 Experimental conditions

Abrasive	WA #600(20 μ m), #2500(5 μ m)
Tool dia (Abrasive size)	1.5mm (20 μ m)
	300 μ m (5 μ m)
	200 μ m (5 μ m)
	100 μ m (5 μ m)
Slurry	48wt% : 48wt% : 4 wt % (water : abrasive : HF)
Workpiece	Slides glasses (1mm)

축의 이송량을 측정하여 가공깊이를 측정하였다. 입자의 크기에 따라서 0.5-2.5 μ m/s씩 이송하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 일반초음파가공과 화학적초음파가공 비교
실험은 불산의 위험성과 반응성 등을 고려하여 4wt%정도의 저 농도를 슬러리에 혼합하여 Fume Hood 안에서 실험하였다. Fig. 6은 공구직경에 따라 USM과 CUSM을 SEM으로 비교 촬영한 것이다.

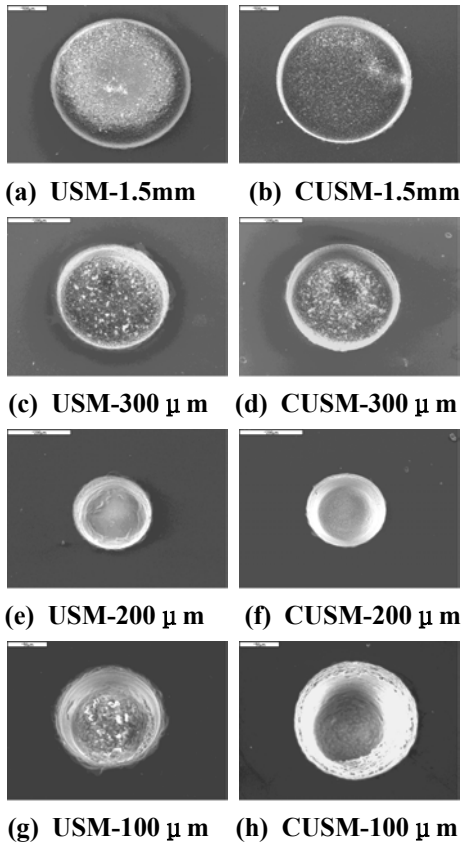
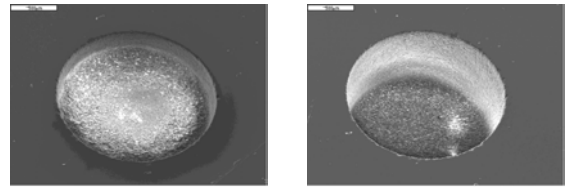


Fig. 6 Hole pictures of USM and CUSM



USM-1.5mm-550μ | CUSM-1.5mm-950μ

Fig. 7 SEM picture of USM and CUSM

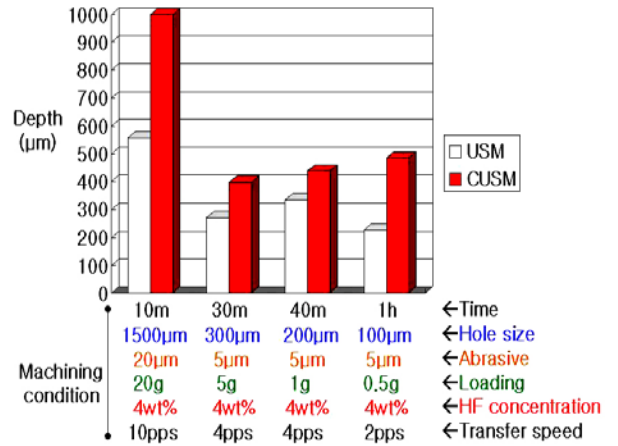


Fig. 8 Comparison Data of USM and CUSM

비교적 CUSM이 가공 상태가 좋은 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 7, 8에서 보듯이 MRR은 CUSM이 1.5배이상, 표면 거칠기가 향상되었다. 일반적으로 가공입자가 크면 가공속도는 증가하는 반면에 표면 거칠기는 나빠지게 된다[9][10]. 그러나 Fig. 6(a),(b)에서 보듯이 HF를 이용한 화학적인 초음파가공은 가공입자가 커도 표면 거칠기가 좋음을 알 수 있다.

4.2 화학적인 초음파가공 메커니즘 실험고찰

Fig. 8에서 보여진 것처럼 CUSM의 가공된 상태가 좋음을 알 수 있다. 이런 실험 결과가 나온 이유는 Eq. (5)에서 제시한 것 같이 초기 입구 진입 시 미소 크랙현상이 측면보다 중앙, 즉 수직방향으로 많이 발생한 듯하다. Fig. 9에서 보여는 것은 홀 입구주위의 미소크랙으로 초기 진입 시 CUSM이 더욱 효과적으로 진입한 것을 알 수 있다. 그리고 HF반응은 초음파의 캐비테이션 및 공구의 공진, 기타가공조건에 의해 생기는 공구 끝단의 국부적인 온도 상승으로 HF반응이 효과적으로 발생을 한 것으로 보여진다. 초기 유리 표면의 진입 시 HF에 의한 반응으로 쉽게 가

공되고, 가공되어 홀이 생성되면서부터, 유리 표면보다 홀 내부에서의 HF반응이 공구 끝단 온도 상승, 미소 크랙으로 간극이 생성되어 HF 침투가 원활하여 더욱 더 활발해진 듯하다. 또한 가공되어 나온 미소 유리입자는 가공입자의 운동에 방해가 되는데, 이 방해요소를 HF가 침식 시켜 없어지게 하거나 더 작은 미소 유리 입자로 만들어 원활한 운동을 할 수 있게 한 듯하다. 그러나 가공 시간이 길어지면 유리 표면의 침식, 홀 사이즈의 증대의 단점을 보이고 있다. 이런 현상을 보완하기 위해 유리표면의 코팅, 가공시간 조절 등, 앞으로 HF에 의한 최적의 가공 조건을 마련해야 한다. 더 나아가 HF뿐 아니라 다른 화학적인 요소를 적용하여 보다 효과적인 가공 특성을 파악해야 할 것이다.

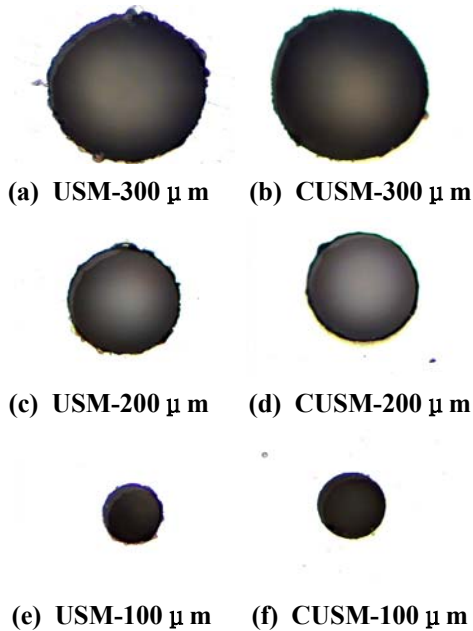


Fig. 9 The glass entrance pictures of optical microscope

5. 결 론

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

1. 에너지 보존과 초기 진입 시 홀의 미소크랙현상을 관찰하여 화학적 초음파 가공 메커니즘을 규명하였다.
2. HF를 이용하여 가공면 거칠기와 가공속도를 크게 향상되었다.

3. 공구 끝단의 국부적인 온도 상승 HF반응을 더욱 더 활성화 하였다.
4. 화학적인 초음파 가공이 리트렉션 없이 좋은 가공을 보인다.

6. 후 기

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

참고문헌

- (1) B. Ghahramani and Z. Y. Wang, 2001, "Precision ultrasonic machining process: a case study of stress analysis of ceramic (Al₂O₃)," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 41, Issue 8, pp. 1189-1208
- (2) X. Q. Sun, T. Masuzawa, M. Fujino, 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) 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
- (5) D. E. Clark, C. G. Pantano Jr. & L. L. Hench 1979, "Corrosion of Glass" Books for Industry and The Glass Industry. pp. 1
- (6) Zhao Wansheng, Wang Zhenlong, "Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy"
- (7) H. Ming, S. Wang, Louis Plebani, and G. Sathyanarayanan, 1997, "Ultrasonic machining," Manufacturing Science and Technology,

Trans. Of ASME, Vol. 2, pp. 169-176

- (8) 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.
- (9) Z. J. Pei and P. M. Ferreira, 1998, "Modeling of ductile-mode material removal in rotary ultrasonic machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, pp. 1399-1418.
- (10) T. B. Thoe, D. K. Aspinwall and M. L. H. Wise, 1998, "Review on ultrasonic machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 38, Issue 4, pp. 239-255,