

초음파에 의한 고 세장비 유리가공 특성

신용주* · 김현영** · 장인배** · 김병희** · 전병희***

Characteristics of High-Aspect-Ratio Ultrasonic Machining of Glass

Y. J. Shin, H. Y. Kim, I. B. Chang, B. H. Kim and B. H. Jeon

Abstract

An ultrasonic machining process is efficient and economical means for precision machining of glass and ceramic materials. However, the mechanism of the process with respect to the crack initiation and propagation and the stress development in the ceramic workpiece subsurface are still not well understood. In this research, we have investigated the basic mechanism of ultrasonic machining of glass by the experimental approach. For this purpose, we designed and fabricated the desktop micro ultrasonic machine. The feed is controlled precisely by using the constant load control system. During machining experiments, the effects of abrasive characteristics and machining conditions on the surface roughness and the material removal rate are measured and compared.

Key Words : Ultrasonic Machining, Micro Hole, Glass, Machining Characteristics

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, 초음파가공(ultrasonic machining), 불산에 의한 에칭, ECDM, 엑시머 레이저 가공 등이 널리 사용되고 있다.

이 중 초음파 가공은 공구의 형상이 직접 가공물에 전

사된다는 특징을 가지고 있으며 높은 형상정밀도와 세장비(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.^{1)~3)}

본 연구에서는 미세 초음파 가공기를 자체 설계 및 제작하여 유리의 미세 가공 특성을 분석하였으며, 유리가공 시 가공입자의 종류와 크기, 정하중 등 가공인자의 변

* 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 대학원

** 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부

*** 인덕대학교 컴퓨터응용 기계계열

화에 따른 가공속도와 표면 거칠기의 변화 등에 관하여 고찰하였다.

2. 초음파 가공원리

2.1 가공원리

초음파가공의 가공 메커니즘은 Fig. 1에서와 같이 공구의 한 진동 주기 안에 가공입자의 운동에 의한 재료의 중앙 및 측면 균열 파괴의 진전에 따른 칩핑 현상의 결과로 알려져 있다.⁽³⁻⁴⁾ 하지만 가공단위가 0.1 μ m 이하인 마이크로 초음파가공에서는 위의 세 가지 가공기구 외에 화학적인 현상도 발생하는 것으로 여겨지고 있으나 이에 대해 정확히 보고된 바는 없다.

Lee⁽⁴⁾ 등에 의하면 단일 가공입자에 의한 충격력 P ($> P_c$)는

$$P = (aW+bA)/N \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있으며, 가공속도 MRR(material removal rate)은

$$MRR = k'(aW+bA)2/N \quad (2)$$

로 표현된다. 단, a, b, k' 는 가공조건에 의하여 달라지는 상수이며 P_c 는 균열발생한계하중, W 는 정하중(static load), N 은 유효가공입자의 수이며 A 는 혼의 가공진폭이다.

식 (1), (2)로부터 충격력과 가공속도는 주로 정하중과 가공입자의 수 및 혼의 가공 진폭의 지배를 받는 함수임을 알 수 있다. 한편 초음파 가공특성을 결정하는 또 다른 가공변수로는 가공물의 화학적 조성, 가공입자의 크기, 가공속도, 공구의 주파수 등이 있다.

일반적으로 가공입자가 크면 가공속도는 증가하는 반면에 표면 거칠기는 나빠지게 된다.⁽⁵⁻⁷⁾ 또한 공구의 주파수가 높아질 경우 단위시간 당의 가공빈도가 높아지므로 가공속도가 증가하는 것으로 알려져 있으나, 기존의 연구결과에 의하면 20kHz 진후에서 가공효율이 높은 것으로 보고되고 있다.^(4,8)

미세 초음파 가공 시에는 이송 및 간극의 크기에 따라 가공기구의 변화가 매우 다르게 나타난다. 하지만 초음파 가공의 특성상 직접적인 간극 제어나 이송 제어가 어려우므로, 본 연구에서는 가공력이 일정한 값을 유지하도록 정압제어 시스템을 이용하였다.

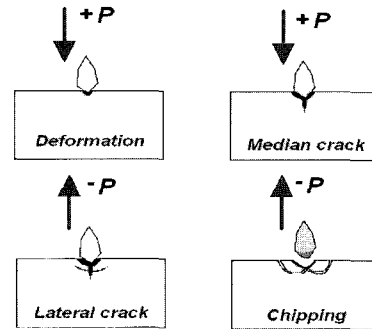


Fig. 1 Mechanism of ultrasonic machining

3. 실험 장치 및 방법

3.1 초음파 가공기 설계 및 제작

본 연구에서 설계/제작한 마이크로 초음파 가공기는 크게 초음파가진 프로세서, z축 이송부 및 모니터링 부분으로 구성되어 있다. 구성된 마이크로 초음파 가공기는 Fig. 2와 같으며 자세한 사양은 Table 1과 같다.

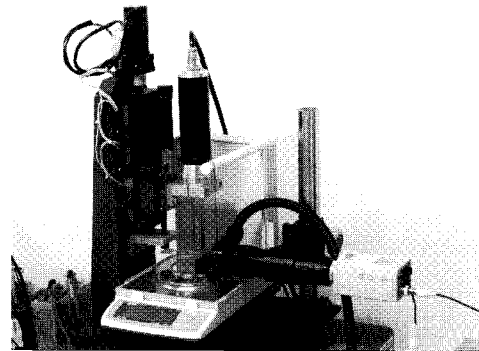


Fig. 2 Photograph of system

초음파 프로세서에서 진동자는 랑지방형 진동자를 사용하였으며, 진동자의 진폭이 3~5 μ m로 너무 작으므로 진폭을 증폭하기 위해 진동자의 끝단에 볼트 결합형으로 혼을 장착하여 10~50 μ m으로 진폭을 증폭시켰다. 진동자의 공진 주파수는 20kHz, 출력 1450W 이며 혼의 진폭은 약 40 μ m이다. 혼의 재질은 티타늄 합금으로 conical type을 사용하였다.

마이크로이송 및 정압제어를 위해 AC 서보모터와 정밀전자 저울을 사용하였으며 나노위치제어 및 공구마모 보정을 위해 자왜소자 구동이송기구가 추가된 복합이송 형태로 구성되었다.

본 연구에 사용된 자왜소자 구동기의 최소분해능은 40nm이다.

직경이 100 μ m인 초경공구의 초기 공구 세팅 시 공구의 파손 및 진입과정을 육안으로 확인하기 위하여 광학현미경을 이용하였다. 광학현미경 설치로 초기 공구 세팅의 시간 절약과 초기 공구 진입 시간을 줄일 수 있었다.

Table 1 Features/Specification of ultrasonic system

| Item | Features/Specification | Comment | |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------|
| Horn | US processor | Output 1450W 20kHz, 10~50 μ m | BLT type |
| | Horn | Ti, Length: 117mm | Conical type |
| Power supply | 220V, 60Hz | | |
| Z-axis servo | AC servo motor, 100W | | |
| Z-axis accuracy | 3 μ m/100mm | HKS | |
| X-Y table workspace | 50mm \times 50mm | lead screw | |
| Dimension | 250 \times 310 \times 455mm | | |

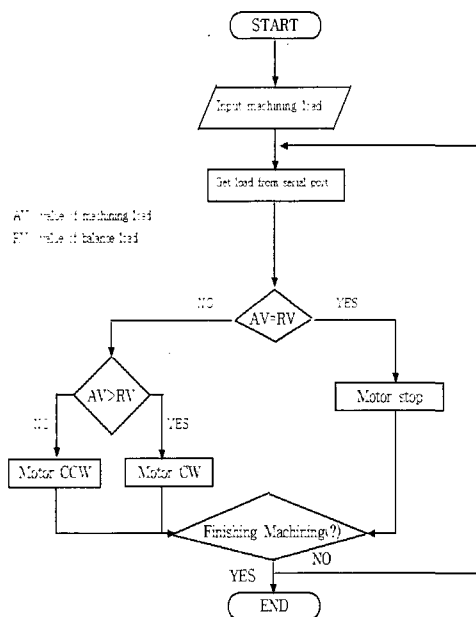


Fig. 3 Flow chart of load monitoring system

Fig. 3은 정압제어를 위한 AC서보 시스템의 흐름도를 보여주고 있다.

전자저울에 의해 계측된 가공력은 초음파 가공기가 부착된 주축 이송의 가장 핵심적인 데이터로 사용된다. 전자저울의 분해능은 0.1mg 으로 고정밀 측정 저울이다. 전자저울에서 측정된 가공력은 시리얼통신(RS232C)으로 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 드라이버, 전용 보드를 사용하였다. PC의 정압명령을 받은 데이터는 다시 D/A컨버터를 통해 AC서보 모터를 구동하여 마이크로 이송을 한다.

3.2 실험 방법

본 연구에서는 유리의 초음파 가공 특성을 알아보기 위해 입자 종류와 입자크기 및 가공조건에 따른 가공특성을 알아보기 위한 기초 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 2와 같으며, 가공면의 측정은 광학현미경과 SEM을 통해 수행되었고 정밀 전자저울을 이용하여 하중과 MRR을 측정하였다.

Z축은 입자의 크기에 따라서 0.25 μ m/s~1 μ m/s씩 이송하며 가공하였다.

Table 2 Experimental conditions

| | |
|-----------|---|
| Abrasive | GC #320(40 μ m), #4000(3 μ m), #8000(1 μ m) |
| | C #320(40 μ m), |
| | WA #320(40 μ m), #4000(3 μ m) |
| | Ceria (3 μ m, soft : hard), Ceria (0.05 μ m) Diamond (0.25 μ m) |
| Tool dia | 3mm, 1.5mm, 100 μ m |
| Slurry | 50 wt % (water : abrasive) |
| Workpiece | Slides glasses(1mm) |

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 가공력의 차이에 따른 특성

Fig. 4는 직경 3mm인 공구를 사용하여 유리를 가공하였을 때의 입자의 종류와 가공력의 변화에 따른 가공

속도의 변화를 나타내고 있다. 가공력이 동일한 경우에는 GC를 사용하였을 가공속도가 가장 큰 것으로 나타나고 있다. 가공력이 20g 이상이 되면 가공속도가 급격히 증가하는 특성이 나타나는 것은 가공 출구 측에 콘크랙이 발생하였기 때문이다. Fig. 5와 같이 가공력이 어느 이상 증가하게 되면 출구부에 과도한 균열이 발생하므로 특정 가공력 이하로 가공력을 제어할 필요가 있다.

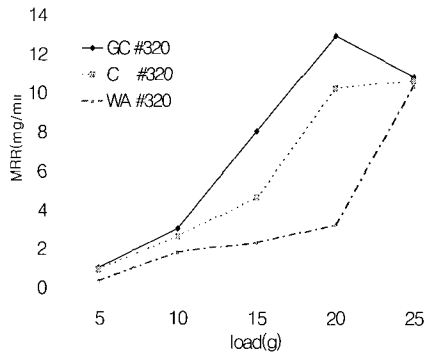


Fig. 4 Effect of static load on MRR

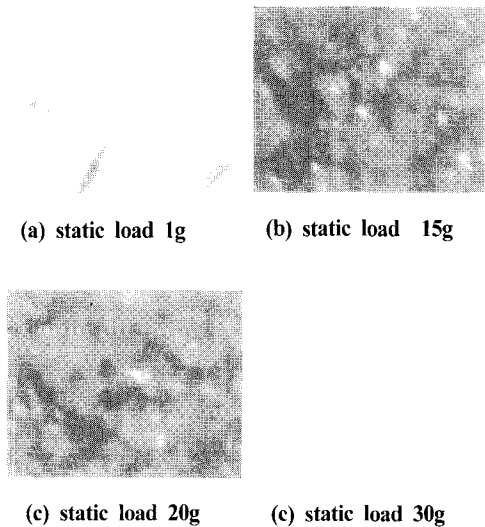


Fig. 5 Machined surfaces with respect to machining load

Fig. 6는 가공력의 증가에 따른 가공속도의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보여지듯이 가공력과 입자 크기가 증가할 수록 가공속도는 증가한다. 한편 입자크기가 #320일 때에는 달리 #4000, #8000에서는 20g이상 가공력을 증가시켜도 콘크랙이 발생하지 않았다. 이는 입자 크기의 감소에 따른 최적의 가공력이 존재함을 의미한다.

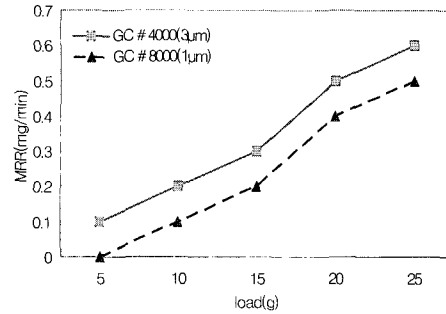


Fig. 6 Effect of load/grit size on MRR

Fig. 7은 가공력에 따른 유리 표면을 광학현미경으로 100배 확대하여 관찰한 사진이다. 같은 입자라도 최적인 가공조건을 만족하면 표면이 더 우수함을 알 수 있다. (b), (d)가 (a), (b)보다 상대적으로 더 좋은 것으로 보인다.

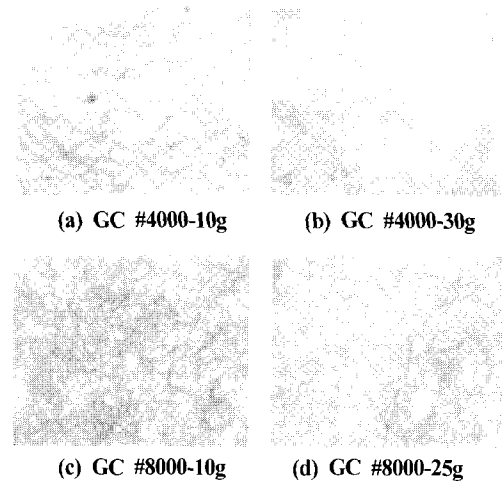


Fig. 7 SEM image of machined surface

4.2 입자 크기, 종류에 따른 가공 특성

Fig. 8은 가공입자의 크기변화에 따른 가공속도를 비교하고 있다. 입자가 커질 수록 가공속도가 증가하는 것을 볼 수 있으나, 가공면 거칠기는 Fig. 9의 광학현미경 사진 결과에서처럼 거칠어짐을 알 수 있다.

초음파 가공에 있어서 중요한 가공인자의 하나인 입자 크기는 가공 조건에 따라서 적절한 것을 선택하는 것이 중요하다. Fig. 10은 20g의 가공력을 유지하고 입자의 종류를 변화시키면서 가공한 유리 가공면을 100배 확대한 광학현미경 사진들을 보여주고 있다.

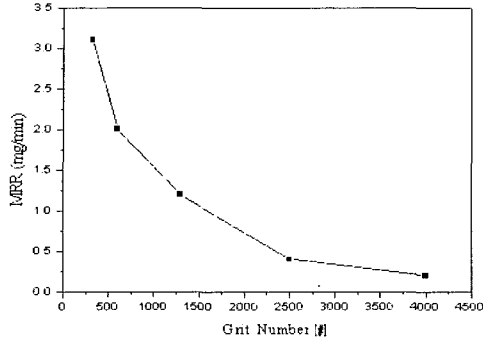


Fig. 8 Effect of the grit size on the MRR

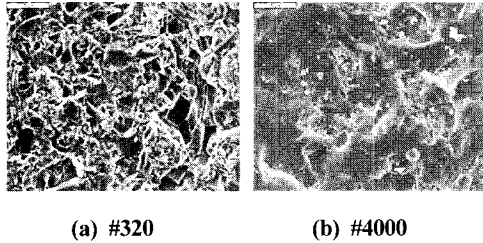


Fig. 9 Machined surface with respect to grit size

동일한 입자 크기에 있어서는 알루미나(Fig. 10(a))에 비하여 세리아의 연결입자의 경우가 가공속도는 느리지만 가공면의(Fig. 10(b)) 거칠기가 우수함을 알 수 있다.

Fig. 10(c)는 다이아몬드 나노입자에 의한 가공결과로 입자의 크기가 작아짐에 따라 가공면 거칠기는 향상되어 세리아 3 μ m 연결입자 정도의 가공면을 얻을 수 있으나 가공속도는 매우 저하되는 것으로 관찰되었다.

삼성코닝주에서 개발한 약 50nm 정도의 나노 세리아 입자에 의한 가공 결과(Fig. 10(d)), 양호한 가공 결과를 얻었으나 가공속도는 극도로 저하되는 단점을 보였다. 따라서 보다 효율적이고 정밀한 가공을 위해서는 가공입자의 변화에 따른 기계화학적 가공기구에 대한 보다 엄밀한 해석이 뒤따라야 할 것이다.

Fig. 11은 직경이 1.5mm인 초경공구를 이용하여 슬라이드 글래스에 깊이 약 50 μ m를 가공한 사진이다. 입자 종류에 따른 형상을 보여주고 있다.

4.3 공구 마모

Fig. 12는 Fig. 13(d)에서 유리가공에 사용된 직경이 100 μ m인 초경공구로 유리 가공 수행 전과 후의 형상이다. 유리의 고 세장비 가공 시 공구 끝단에서 테이퍼 형상의 심한 마모현상이 나타나는 것을 알 수 있다.

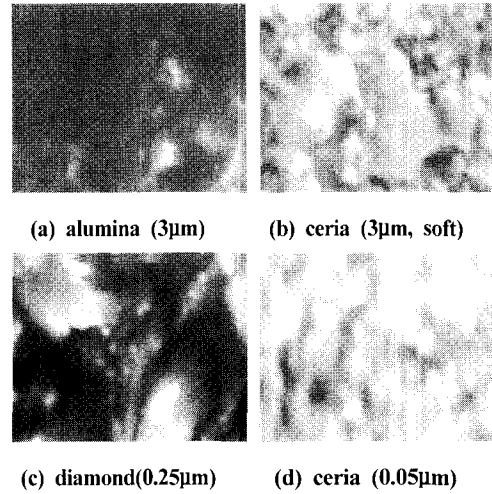


Fig. 10 Machined surface with respect to grit types

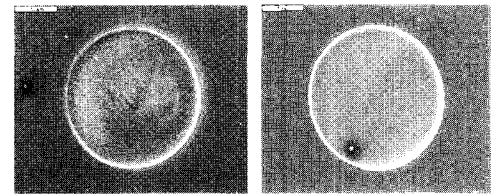


Fig. 11 Machined shape with respect to grit types

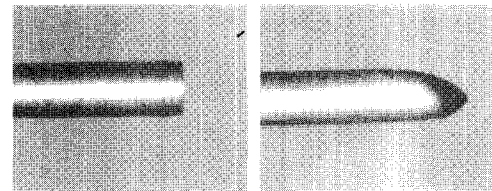


Fig. 12 Tool wear after USM

4.4 마이크로 홀 가공 예

Fig. 13은 직경이 100 μ m인 초경공구에 의해 가공된 사진이다. 입구 측에 버가 잔존하고 국부적인 크랙이 발생함을 알 수 있으며 공구마모로 인한 테이퍼 현상이 발생하였다. 또한 Fig. 13(d)와 같이 고 세장비 가공 시 일정 깊이 이상에서 슬러리의 순환이 둔해지는 현상이 발생하며, 공구마모가 크게 발생하였다.

이러한 현상을 극복하기 위해서는 가공공정의 관리형 제어(supervisory control) 도입과 절삭조건 최적화 작업이 필요할 것으로 판단된다.

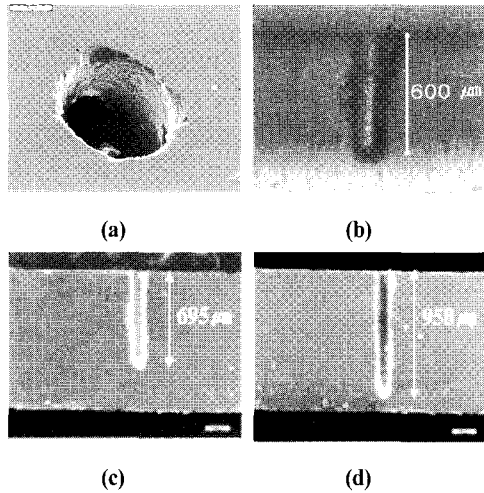


Fig. 13 Examples of micro holl

5. 결 론

마이크로 초음파 가공기에 의한 유리의 가공 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가공력이 커지면 가공속도는 증가하지만 과도한 가공력을 가할 경우 출구부에 균열이 크게 발생하게 된다.

(2) 가공입자의 크기가 증가함에 따라 가공속도는 증가하였으나 가공면 거칠기가 나빠지고 미소 균열의 잔류가 심해진다.

(3) 가공입자의 변화에 따라 가공면 거칠기와 가공속도는 큰 차이를 보였으며 이는 입자의 경도의 차이뿐만 아니라 화학적인 작용도 큰 것으로 추측된다.

(4) 고 세장비 가공 시 일정 깊이 이상에서 슬러리의 순환이 둔화되는 현상으로 가공시간 상승과 공구의 마모가 발생하였다. 위 현상을 극복하기 위해 retraction 등 공정변의 변화가 요구되어진다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 “고기

능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술개발 사업”의 세 부과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분께 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) 주종남, 김규만, 김성운, 2000, “미세 형상가공을위한 방전·초음파 가공기술”, 한국 정밀공학회지, 제17권, 제7호, pp. 20~27.
- (3) H. Ming, S. Wang, Louis Plebani, and G. Sathyanarayanan, 1997, “Ultrasonic machining”, Manufacturing Science and Technology, Trans. Of ASME, Vol. 2, pp. 169~176.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.