

# 실험용 초음파 가공기의 제작 및 가공실험에 관한 연구

김종광\*(인제대 대학원 기계공학과), 서용위(인제대 기계공학과)

## A Study on the Fabrication of Prototype Ultrasonic Machine Tool and It's Experimental Machining

J. K. Kim(Graduate School, INJE Univ.), Y. W. Seo(Mech. Eng. Dept., INJE Univ.)

### ABSTRACT

In this report experimental ultrasonic machine system has been fabricated and experimental machining has been performed using glass as a workpiece material. As grit size increases, material removal rate(MRR) was observed to be increased at decreased applied tool pressure on the workpiece, however at the higher applied pressure above 2~4 kg/cm<sup>2</sup> for smaller grit size, the MRR was not increased. Also better surface roughness was obtained for smaller grit size. Microchipping was observed from the microscopic examination and the pattern is similar to the iso-stress field where cracking is considered to be initiated near the surface.

**Key Words :** Ultrasonic machining (초음파 가공), Microchipping (미소치핑)

### 1. 서론

산업의 발전에 따라 가혹한 사용환경이나 고성능의 소재 개발이 요구되어 지고, 이에 따라 '어제의 공구재료가 오늘의 가공소재'라고 할만큼 경도·인성·내열성·내식성·내마모성 등의 성질이 증대된 고급 소재들이 다수 개발되고 있으며, 이에 따라 이들 재료에 대한 효과적이고도 다양한 가공방법의 개발이 요구된다.

단삭재로 불려지는 재료의 가공은 기존의 전통적인 가공방법으로는 가공이 어렵고, 또 가공이 가능하다 하여도 원하는 형상이나 표면 품질을 얻기 어렵다. 따라서 이들 재료의 가공은 Laser 가공, Ion-Beam 가공, 방전 가공, Water-Jet 가공, Plasma 가공, 화학적 가공 등의 전기적, 화학적, 광학적 에너지를 이용한 특수가공법에 의존하고 있다. 그러나 이러한 특수가공법들도 각각의 특성에 따라 모든 재료에 적용되어지지 못하는 제한점과 가공을 위해서는 고비용이 투자되어야 하는 문제점 등을 가지고 있다.

초음파가공은 취성을 가진 고경도 재료의 가공에 효과적인 가공방법 중 하나로 여타의 특수가공법에 비해 상대적으로 저비용이며, 특히 고경도 취성 재

질에 대해 정숙하고 청결한 가공이 가능하다.

초음파가공은 공구와 공작물 사이에 연삭입자(Abrasive)를 넣고 공구에 초음파진동을 주어 공구의 진동에 의한 미소치핑(Microchipping)을 이용하여 공작물을 가공하는 방법으로 연삭입자의 1회 충격에 의한 소재제거량이 미소하기 때문에 양호한 표면정밀도를 얻을 수 있으며, 또한 공작물에 변형을 주지 않는 장점이 있다.<sup>1)</sup>

특히, 공작물과 공구가 직접 접촉하지 않으므로 열 및 Burr의 발생이 없고, 저에너지(400~800 Watts) 사용으로 공정이 안전하며, 산화층의 발생이 없는 등의 특징을 가지고 있다.

따라서 고경도 취성재료 중 비전도체이거나 고반사율 등의 기계적 성질로 인해 여타의 가공법으로는 가공이 곤란한 재료의 가공에 이상적인 대안이 될 수 있으며,<sup>1,2)</sup> 특히 일부를 제외하고는 대부분의 Ceramics가 절연 및 고경도 취성 재료이므로 3차원의 복잡한 형상 가공에서 가장 효과적인 가공방법으로 사용되고 있고, 또 많은 경우에는 유일한 가공방법이 되기도 한다.<sup>3)</sup>

그러나 초음파가공은 공구마모가 크고, 공구마모에 의해 진폭이 변화하여 가공성능이 저하되므로 공구의 Tuning이 필요하다.<sup>2)</sup> 또한, 연성소재에서는

특히 공구마모가 크고, 소재제거율(Material Removal Rate; MRR)이 낮아 적용이 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 실험용 초음파 가공기를 설계·제작하고, 고취성 재료인 유리(glass)를 가공재료로 한 가공실험을 통해 초음파가공의 소재제거기구(Mechanism of Material Removal)를 규명하고, 가공효율을 제고할 수 있는 가공조건을 분석하였다.

## 2. 초음파 가공기의 제작 및 소재제거 기구

### 2.1 초음파 가공기의 제작

초음파 가공기는 Fig. 1에서 보인 것과 같이 초음파 발전에 필요한 고주파 전원과 Transducer 및 Concentrator로 이루어지며, Concentrator의 선단에 공구를 부착하여 공작물을 가공한다.

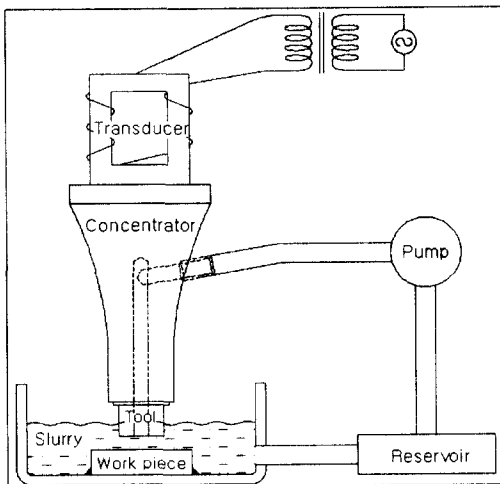


Fig. 1. Schematic diagram of Ultrasonic machine tool

본 연구에서는 주파수 27kHz, 출력 400Watts의 초음파 발전기를 사용해서 초음파 가공기 시스템을 제작하였고, 연속발전시의 과열을 방지하기 위해 Transducer에 Air Cooling Fan을 사용하여 작동 중 발생하는 열을 냉각하도록 하였다.

Concentrator는 Al 7075를 사용하여 진폭확대율이 가장 높은 것으로 알려진<sup>1)</sup> Conical type으로 가공했으며, 공구의 재질로는 SUS 304를 적용하였고, 공구의 단면은 지름이 8mm인 원형의 중심에 지름 2mm의 Hole이 뚫려있는 도넛 형상을 사용하였다.

또, Pump를 이용하여 공구의 중앙으로부터 연삭입자와 물을 혼합한 Slurry를 강제 공급하도록 제작하였다. 이는 Concentrator의 중앙부를 통하여 Slurry를 공급함으로써 새로운 연삭입자가 가공부위에 효율적으로 공급되도록 하기 위함이다.

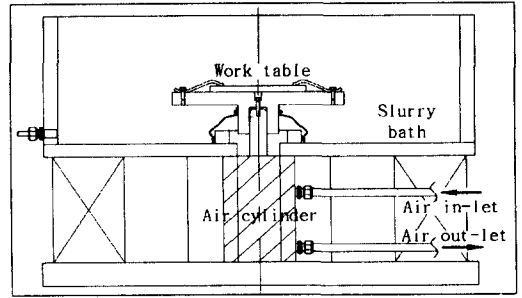


Fig. 2. Sketch of the machine fixture

Fig. 2.는 초음파 가공기 전체 시스템을 보인 것으로 Slurry의 원활한 공급과 순환을 위해 Slurry bath 안에 Work table을 설치하였으며, Work table을 수직이송하고, 그 하단에서 상향으로 정하중(가공 중의 공구압력)을 가할 수 있도록 Air Cylinder를 부착한 치구를 나타내고 있다.

### 2.2 초음파가공의 소재제거 기구

초음파가공의 형식은 Transducer에서 발생한 초음파 진동의 진폭은 초음파가공에 충분하지 않으므로 Fig. 1에서 보인 것과 같이 Transducer에서 발생한 초음파 진동을 Concentrator에서 증폭하고, 증폭된 진동에 의해 공구와 Slurry에 포함된 연삭입자(Abrasive)간의 상호작용에 의해 소재를 제거한다.

이때 공구와 공작물간에 적절한 간극을 유지하도록 하여 가공효율을 향상시키기 위해 Air Cylinder의 공기압에 의해 일정한 하중을 가해준다.

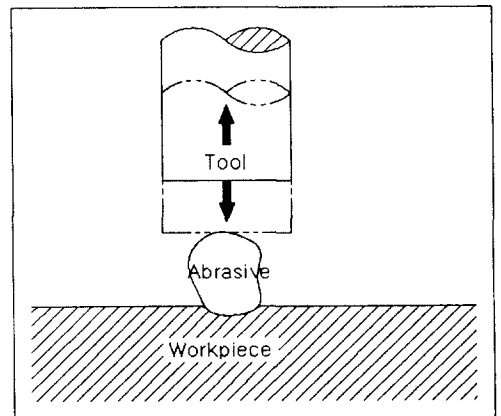


Fig. 3. Material removal by Hammering

초음파가공에서의 소재제거 기구는 Fig. 3.에 보인 것과 같이 연삭입자를 사이에 두고 소재표면에 대한 공구의 직접적인 충격에 의한 Hammering(or Pressing)과 공구에 의해 가속된 연삭입자가 간접적으로 가공표면에 충돌하여 발생하는 Throwing (or

Impact), 공구의 초음파 진동에 의해 발생하는 공동현상(Cavitation)과 부식(Erosion), 그리고, 화학적인 반응(Chemical reaction) 등이 있으나, Throwing에 의한 소재제거는 전체 소재 제거량의 4~20% 정도이고, 공동현상과 부식, 화학적인 반응 등에 의한 소재 제거량은 모두 합해서 전체의 약 5% 정도로 극히 제한적인 것으로 알려져 있다.<sup>2,4)</sup>

### 3. 실험 결과

본 실험에서는 Workpiece로 Glass를, SiC 연삭입자와 물을 1:1로 혼합한 Slurry를 Concentrator의 중앙으로부터 하향공급하면서 초음파가공을 실시하였다. Fig. 4.는 Mesh number와 공구압력에 따른 소재제거율의 변화를 나타낸다.

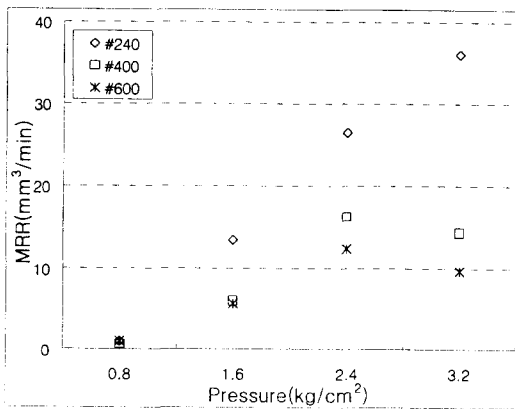


Fig. 4. Material removal rate with pressure

그림에 나타난 것과 같이 연삭입자의 입자크기와 공구압력이 증가할수록 소재제거율은 증가하는 것으로 나타났다. 또 입자크기에 따라 차이는 있으나 공구압력이 일정수준 이상 높아지면(2~4kg/cm<sup>2</sup> 이상) 소재제거율이 오히려 감소하였으며, 이 현상은 입자크기가 작을수록 낮은 공구압력에서 나타났다.

이때 Slurry 공급구에는 연삭입자가 적층되고, 공작물이 손상되는 현상이 관찰되었다.

이는 공구압력이 적정수준 이상 증가하면 공구와 공작물 사이의 간극이 연삭입자의 입자크기보다 작아지면서 연삭입자의 공급이 억제되어 공구와 공작물이 직접 맞닿게 됨에 따라 초음파 진동이 공작물에 곧바로 전해져서 생기는 현상으로<sup>1)</sup> 입자크기가 작을수록 가공이 효율적이지 못함을 보여주는 것으로 소재제거 목적으로는 연삭입자의 크기가 큰 것을 사용해야 함을 의미하는 것으로 판단된다.

Fig. 5.는 유리를 0.8kg/cm<sup>2</sup>의 공구압력과 진폭(Amplitude) 약 20 $\mu$ m의 실험 조건에서 입자크기가 서로 다른 SiC 연삭입자를 사용하여 1분간 초음파가공

한 표면의 현미경 사진을 나타낸 것이다.

그림에서는 연삭입자의 입자크기가 커짐에 따라 표면거칠기가 저하하는 것을 보여주고 있다.

이는 동일 가공조건하에서는 연삭입자의 크기가 작을수록 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있음을 보여주는 것이다.

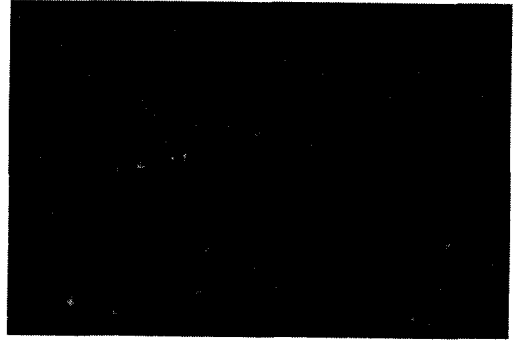


Fig. 5(a). Photograph of workpiece according to grit size(SiC, #600, 1.4 $\mu$ mRa, 20X)

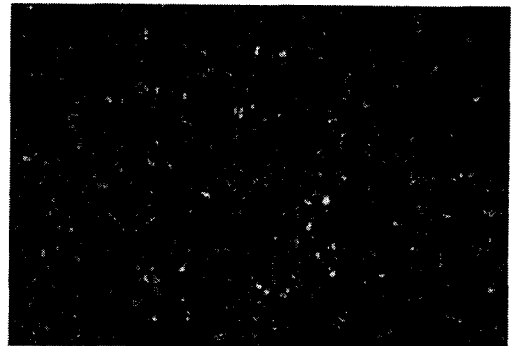


Fig. 5(b). Photograph of workpiece according to grit size(SiC, #400, 2.4 $\mu$ mRa, 20X)



Fig. 5(c). Photograph of workpiece according to grit size(SiC, #240, 4.0 $\mu$ mRa, 20X)

Fig. 6.과 Fig. 7.은 Glass의 표면에 입자크기가 #240인 SiC 연삭입자에 0.8kg/cm<sup>2</sup>의 공구압력과 약 20

mm의 진폭을 가한 가공조건에서 1초 이하의 극히 짧은 시간동안 초음파를 발진하여 가공한 후, 이 부위를 관찰한 사진이다.

Fig. 6.에서 원 내부는 연삭입자가 충돌한 흔적이고 주변의 흰부분이 공작물에서 분리되어 제거되는 소재부분으로 Hammering에 의해 소재가 제거되는 양상을 보여준다.



Fig. 6. Photograph of material removal by Hammering(Glass, Top view, 50X)

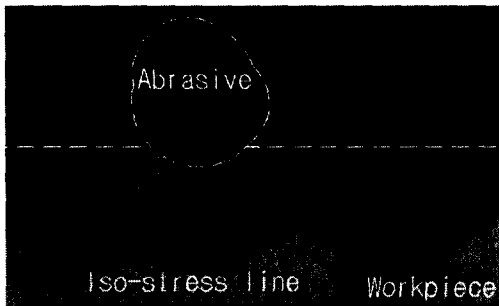


Fig. 7. Photograph of material removal by Hammering(Glass, Side view, 50X)

Fig. 7.에서 보인 것과 같이 연삭입자가 충돌한 부분에는 미소 Crack이 발생하며 그 주위로 취성 파괴에 의한 것으로 보이는 미소치핑이 형성되었는데, 이는 반무한체에서 표면하중의 작용에 따라 재료내부에 등응력(Iso-stress)곡선을 따라 소재가 유동하는 Slip-line<sup>5)</sup>과 유사한 양상이다.

Fig. 8.은 초음파가공에서 연삭입자의 표면하중에 의한 공작물 내부의 등가응력 분포를 이론적으로 해석한 결과로, 표면중양은 등가응력이 파괴강도를 초과하는 영역이다.

취성재료의 초음파가공에서는 공작물에 연삭입자가 충돌하여 등가응력이 파괴강도를 초과하는 영역이 생성되고, 이 부분에 발생한 Crack이 주위로 전파 성장하여 소재가 미세하게 파쇄되는 것으로 Fig. 7의 사진과 유사함을 나타낸다.

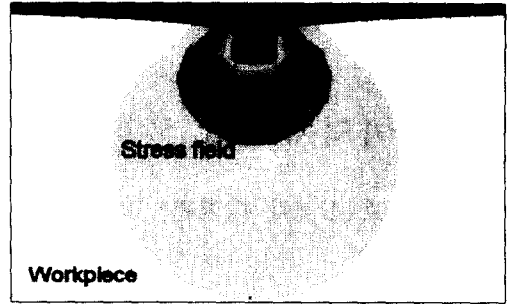


Fig. 8. Internal Equivalent Stress Field due to Surface Loading simulating microchipping

#### 4. 결론

본 연구에서는 고경도 재료의 가공에 효과적인 초음파가공을 위해 27kHz-400W급의 실험용 초음파 가공기를 제작하고, 이를 이용하여 난삭재인 Glass를 대상으로 가공실험을 행하였다.

실험결과 입자크기의 증가는 표면조도를 저하시키는 경향을 보였다. 또한 입자크기가 클수록 MRR이 증가하였고, 공구압력이 약 2~4kg/cm<sup>2</sup>까지는 공구압력이 높을수록 MRR이 증가하였으나, 그 이상에서는 MRR이 더 이상 증가하지 않았다.

가공초기의 미소치핑이 주된 소재제거의 요인으로 보이며 그 형태는 반무한체의 표면하중에 의한 이론응력의 양태와 유사함을 보였다.

#### 참고문헌

1. 이성일, "초음파 가공기 개발", 생산기술, 제3권 12호, pp. 35-44, 1992.
2. V. Soundararajan, and V. Radhakrishnan, "An Experimental Investigation on the Basic Mechanism Involved in Ultrasonic Machining," *International Journal of Machine Tool & Research*, Vol. 26 Issue 3, pp. 307-321, 1986.
3. 이재경, 강재훈, "신소재 형상 가공의 고능률화를 위한 초음파 가공기술", 기계와 재료, 제2권 4호, pp. 142-148, 1990.
4. 佐藤敏一 著, 林永顯 譯, "特殊加工" 機電研究社, pp. 153-175, 1990.
5. William F. Hosford, and Robert M. Caddell, "Metal Forming Mechanics and Metallurgy" Second Edition, pp. 173-219 1999.
6. Q.H. Zhang, J.H. Zhang, Z.X. Jia, and J.L. Sun, "Material-removal-rate Analysis in the Ultrasonic Machining of Engineering Ceramics" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, pp. 180-184, 1999.