

<기술논문>

유리의 미세 초음파 가공 시 입구 진원도 향상 및 출구 크랙방지

홍지훈* · 김보현† · 김덕환** · 주종남*

(2007년 4월 2일 접수, 2007년 9월 4일 심사완료)

Roundness Improvement and Exit Crack Prevention in Micro-USM of Soda-Lime Glass

Ji Hoon Hong, Bo Hyun Kim, Duck Hwan Kim and Chong Nam Chu

Key Words : Micro Machining(미세가공), Ultrasonic Machining(초음파가공), Glass(유리)

Abstract

Ultrasonic machining (USM) is suitable for machining hard, brittle and non-conductive materials such as silicon, glass and ceramics. Usually, when micro holes are machined on glass by USM, roundness of hole entrance is poor and cracks appear around the hole exit. In this paper the machining characteristics were studied for roundness improvement and exit crack prevention. From experiments, the tool bending and the shape of tool tip affect hole roundness. When the tool tip is hemispherical, good roundness of holes was obtained. The feedrate and the rotational speed of the tool affect the exit crack. With the machining conditions of 150 rpm in spindle speed and 0.5 μm/s in feedrate, micro holes with less than 100 μm in diameter were machined without an exit crack.

기호설명

- δ : 보의 처짐 양(deflection)
- P : 하중 (force)
- L : 보의 길이(length of cantilever)
- E : 영률(young's modulus)
- I : 관성모멘트(moment of inertia)

1. 서론

최근 반도체, 전자 부품 및 항공기나 자동차 산업 분야 등에서 보다 정밀하고 미세한 부품의

수요가 증대되고 있다. 특히 고강도, 고경도를 가진 소재의 미세 가공의 필요성이 많아지고 있다. 미세 형상 가공 중에서는 미세 구멍 가공이 많은 부분을 차지하고 있으며 미세 구멍을 가공하기 위한 방법으로는 방전 가공, 전해 가공, 미세 드릴링, 레이저 가공, 초음파 가공 등의 방법이 있다. 이 중 초음파 가공법은 실리콘, 유리, 세라믹 등과 같이 취성 재료나 비전도성 재료들을 가공하는데 적합한 방법이다.

최근까지 초음파 가공에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다.⁽¹⁻⁵⁾ Masuzawa^(1,2)는 가공물에 진동을 가하는 미세 초음파 가공법을 통해 유리에 미세 구멍을 가공하였으며, Komaraiah⁽³⁾는 초음파 가공에서 가공물 특성의 영향에 대해 연구 하였고, Yu⁽⁴⁾는 초음파 가공을 통하여 미세 입체 형상을 가공하는 연구를 하였다.

† 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학부
E-mail : kimbh@andong.ac.kr
TEL : (054)820-6301 FAX : (054)823-5495

* 서울대학교 기계항공공학부

** (주)현대자동차

Yan⁽⁵⁾은 파이프 라인, 조명용 유리, 자동차 헤드램프용 유리, 실험기구 등에 사용되고 열 충격이나 온도의 급격한 변화에 높은 저항력을 가진 보로실리케이트(borosilicate) 유리에 초음파 진동을 이용한 미세 구멍을 가공하였다. 이 연구에서는 초음파 진동을 이용하여 유리 가공시 초음파 진폭의 크기, 공구의 회전 속도, 공구의 이송 속도, 슬러리의 농도, 지립 크기에 따른 가공 특성을 살펴보았다.

한편 초음파를 이용한 미세 구멍 가공에서는 구멍 입구 부분에서의 찌그러짐 현상과 출구 부분에서 크랙이 빈번하게 발생하는 현상이 나타난다. 따라서 본 논문에서는 가공물에 초음파 가진하는 미세 초음파 가공기를 이용하여 유리에 미세 구멍을 가공할 때 구멍의 찌그러짐 현상과 크랙 발생에 영향을 미치는 가공 조건들을 살펴보고 이를 통해 구멍 입구의 진원도를 향상시키고 출구에서 발생하는 크랙 현상을 방지하는 가공 조건에 대해 연구하였다.

2. 초음파 가공

2.1 초음파 가공 원리

초음파 가공에서는 높은 진동수의 전기적 에너지가 진동자와 증폭기에 의해 기계적 진동으로 변환된다. 가공을 위해 정적 하중이 공구를 통해 가공물에 가해지고, 액체에 지립(abrasive)을 함유시킨 슬러리가 가공 영역 즉, 공구의 진동면과 가공물의 가공면 사이에 공급된다. 지립은 진동에 의하여 가공면에 충격을 가하며, 가공은 주로 지립의 충격력에 의하여 행해진다. 지립의 1회 충돌에 의해 가공에서 깎여 나가는 것은 재료의 미소 부분이지만, 지립의 충돌 회수가 많으므로 가공조건이 적당히 유지되면 가공 속도는 상당히 크게 된다. 지립으로는 실리콘 카바이드, 보론 카바이드, 공업용 다이아몬드 등이 많이 쓰인다.^(6~8)

2.2 실험 장치 및 방법

기존의 연구에서는 공구에 초음파 진동을 인가하여 공구가 진동과 동시에 회전 및 이송을 하는 초음파 가공기를 사용하였다.⁽¹⁾ 하지만 공구 진동을 이용한 초음파 가공기는 공구 회전축에 진동자를 고정시켜야 하기 때문에 제작에 어려움이

있다. 한편, 미세 초음파 가공에서는 공작물에 가해지는 하중을 실시간으로 측정하여 신속한 공구 이송 제어를 하는 것이 매우 중요하다. 하지만, 공구축에 진동자를 부착하게 되면 상대적으로 공구 이송부의 크기와 관성이 증가하고 시스템의 반응이 느려지는 문제점이 있다.⁽²⁾ 따라서 본 연구에서는 공구 진동을 이용한 초음파 가공기의 문제점을 해결하기 위해 공구 대신 가공물이 진동하는 방식의 초음파 가공기를 제작하였다. 가공물 진동을 이용한 초음파 가공기는 공구의 진동이 없고 Z 축에 큰 하중이 걸리지 않기 때문에 공구의 신속한 제어가 가능해진다.

실험에 사용된 실험 장치의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 초음파 발진기(ultrasonic vibration generator)에서 초음파를 발생시켜 진동자(transducer)에 전기적 신호를 전달한다. 전기적 신호는 진동자에 의해 기계적인 진동으로 변환하였다. 진동자를 가공물 부분에 연결하여 가공물이 진동할 수 있도록 구성하였다. 공구의 이송은 가공물에 미치는 가공 하중을 측정하여 제어하였다. 가공 하중을 측정하기 위한 장비로는 길이 변형에 의해 하중을 측정하는 스트레인 게이지(strain gage)형태의 로드셀을 사용하였고, 이는 1 mN의 정밀도를 가지고 있다. 신호 전달 장치(signal transmitter)는 로드셀에서 측정된 값을 변환, 증폭한다. 신호 전달 장치를 거친 신호는 A/D 컨버터를 통해 컴퓨터로 전달되고, 컴퓨터는 전달된 신호를 통하여 공구의 이송을 제어하게 된다. 실험에 이용된 미세 공구는 초경 합금을 미세 와이어 방전 가공으로 가공하여 사용하였다.

2.3 가공조건

실험의 가공 조건은 Table 1과 같다. 주파수 40 kHz로 진동하는 가공용 진동자를 사용하였고 진폭의 크기는 5 μm 이다. 진폭의 측정 방법은

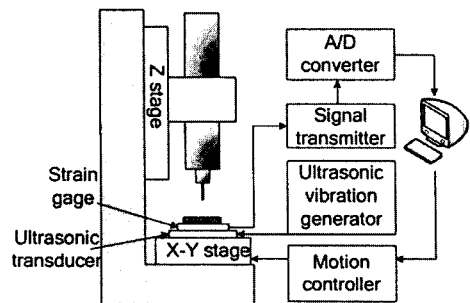


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic machine

공구를 진동자 발진 없이 가공물에 접촉시킬 때와 진동자를 발진시켜 가공물에 접촉시킬 때의 위치 차이를 진폭으로 하였다. 공구는 0.1 μm 씩 이송하였으며, 피드백된 가공력의 변화로 접촉 여부를 결정하였다. 실험에 사용된 공구는 직경 65 μm 의 초경합금 붕을 이용하였다. 가공 후 가공 간극(gap)을 최소화 하기 위해 지립의 크기는 0 ~ 2 μm 인 것을 사용하였고 슬러리의 농도는 30 %로 고정하였다. 공구의 이송은 시편과 공구 사이에 발생하는 가공력을 피드백 받아서 제어하였다. 기준 가공력을 50 mN 으로 설정하여 가공력이 50 mN 이하인 경우 공구를 전진시켰으며 그 이상인 경우 5 μm/s 의 속도로 1 μm 씩 역방향으로 이송하도록 하였다.

초음파를 이용하여 유리를 가공하는 경우 입구가 찌그러지는 경우가 발생하고 출구에서는 크랙이 빈번하게 발생한다. 구멍 입구가 찌그러지는 현상은 가공 초기 공구가 가공물에 진입을 못하고 휘기 때문이다. 이는 공구의 길이와 공구 끝의 형상에 영향을 받는다. 공구의 끝이 평평할 경우 공구가 가공물 표면에서 미끄러지면서 구멍 입구가 찌그러지는 경우가 발생한다. 크랙에 관련된 가공 조건으로 공구의 이송 속도와 회전속도를 들 수 있다. 만약 공구의 이송 속도가 너무 빠르면 가공물에 미치는 가공력이 커져 가공 도중 크랙을 발생시킬 수 있다. 또한 공구의 회전이 없거나 회전 속도가 너무 빠를 경우 지립이 가공면에 들어가는 것이 방해받게 된다. 이로 인해 가공력이 커지게 되고 크랙이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 구멍의 찌그러짐과 크랙을 방지하기 위해 공구의 길이, 형상, 이송 속도 및 회전 속도를 변화시켜가면서 그 영향을 살펴보았다.

3. 구멍 입구의 진원도

3.1 공구 길이의 영향

구멍 입구 부분이 찌그러지는 현상은 진동자가 수직 방향으로 진동하지 않고 임의의 방향으로 진동하면서 발생할 수 있는 횡방향의 힘에 의해 공구가 휘어지기 때문이다. 실험에서 사용한 공구는 외팔보의 형태를 나타낸다. 외팔보 끝에 집중 하중이 가해질 경우 처짐 양은 식 (1)에서 보는 바와 같이 외팔보 길이의 세제곱에 비례한다.

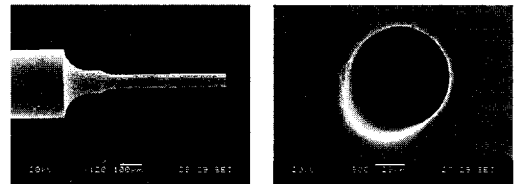
$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad (1)$$

따라서 공구의 길이를 짧게 하면 공구가 휘는 양을 줄일 수 있기 때문에 구멍 입구의 진원도가 향상될 수 있다. 공구의 이송 속도와 회전 속도를 각각 0.5 μm/s, 150 rpm 으로 고정한 가공 조건에서 공구의 길이를 다르게 하여 실험하였다.

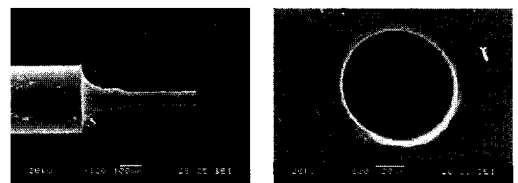
Fig. 2 는 공구의 길이를 달리 하여 가공한 구멍 입구의 사진이다. 공구의 길이가 짧으면 진원도가 향상되는 결과를 보여준다. Fig. 2(a)는 공구의 길이를 500 μm 로 하였을 때의 구멍 사진이며 가공 초기에 공구가 휘어짐으로 인해 입구가 많이 찌그러지는 것을 볼 수 있다. Fig. 2(b)는 길이가 300 μm 인 공구로 가공한 구멍 사진이다. 상대적으로 500 μm 길이의 공구를 사용한 경우 보다 찌그러짐의 정도가 줄어든 것을 알 수 있다.

Table 1 Experimental conditions

Ultrasonic vibration spec.	Frequency	40kHz
	Amplitude	5 μm
Tool	WC	Ø 65 ± 2 μm
Workpiece	Soda-lime glass	130 μm in thick
Abrasive	Diamond	0~2 μm in dia.
Concentration of slurry		wt 30 %
Feedrate (μm/s)		0.5, 1, 5
Rotational speed of the tool (rpm)		0, 150, 1200



(a) Tool length: 500 μm



(b) Tool length: 300 μm

Fig. 2 The effect of tool length on the hole roundness

하지만, 공구의 길이를 줄여도 입구부의 찌그러짐을 완전히 막기 힘들었으며, 공구의 길이가 짧아지면 공구 마모로 인해 그만큼 가공할 수 있는 구멍의 갯수도 줄어드는 단점이 있다. 따라서 공구의 끝형상이 구멍의 진원도에 미치는 영향을 살펴보았다.

3.2 공구 형상에 의한 영향

실험에서 사용한 공구는 공구의 끝 부분이 평평할 때 항상 구멍 입구 부분에서 찌그러지는 현상이 나타난다. 하지만 공구의 끝 부분이 반구 형상이 되면 공구 끝에 초음파 진동에 의한 하중이 집중이 되어 공구가 가공물 표면에 진입하기가 쉽고, 공구가 가공 구멍의 가운데에 위치하기 때문에 원형의 구멍을 가공할 수 있다. 또한 가공 후 공구의 끝 부분 형상이 마모에 의해 둥근 형상으로 변화한다. 따라서 공구의 끝 부분을 처음부터 반구 형상으로 제작하면 공구의 길이와 상관없이 원형의 입구 가공이 가능하다. 이러한 영향을 보기 위해 반구 형상의 공구를 이용하여 이송 속도는 0.5 $\mu\text{m/s}$, 회전 속도 150 rpm 으로 일정한 가공 조건에서 실험을 하였다.

Fig. 3 은 공구 형상을 변화해가면서 실험한 결과이다. Fig. 3(a)는 공구의 끝이 평평한 형태일 때 입구 부분이 찌그러지는 현상을 나타내고 Fig. 3(b)는 공구의 끝을 반구 형상으로 하였을 때 원형의 구멍이 가공되는 것을 나타낸다. 따라서 처음부터 공구의 끝 부분을 반구 형상으로 제작하여 가공을 하면 진원도가 높은 구멍 가공이 가능하다.

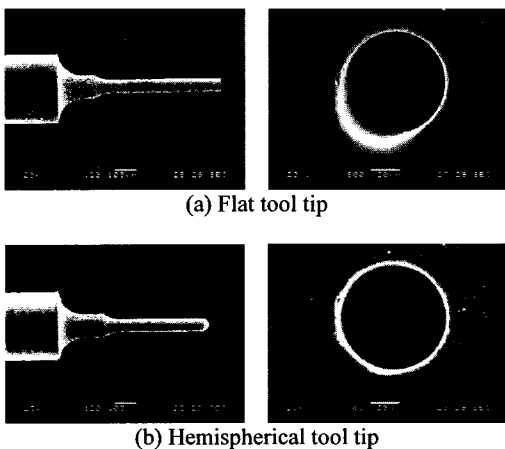


Fig. 3 The effect of tool shape

4. 크랙 방지

4.1 공구의 이송 속도

Fig. 4 는 공구의 이송 속도를 달리 하였을 때 가공물에 미치는 가공력을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 이송 속도가 빠를수록 공구가 가공물을 누르는 힘이 증가하며 크랙이 발생할 가능성이 크다. Fig. 5 는 공구 이송 속도가 0.5 $\mu\text{m/s}$ 일 때 가공 전체 구간에서 가공력이 작게 유지되면서 원활히 가공되는 현상을 나타내며 5 $\mu\text{m/s}$ 에서는 가공 시간을 줄여들지만 전반적으로 가공력이 커지는 현상을 보여주고 있다. 또한 Fig. 6 은 5 $\mu\text{m/s}$ 와 1 $\mu\text{m/s}$ 의 이송 속도로 가공할 경우에는 가공력이 기준 가공력보다 크게 가해져 공구가 역이송되는 경우가 빈번하게 발생하는 것을 보여주고 있다. 이에 반하여 0.5 $\mu\text{m/s}$ 의 이송 속도로 가공할 경우 가공 시간은 다른 조건에 비하여 2 배 이상 걸리지만 공구의 역이송없이 작은 가공력으로 유리에 크랙을 발생시키지 않고 가공을 할 수 있다.

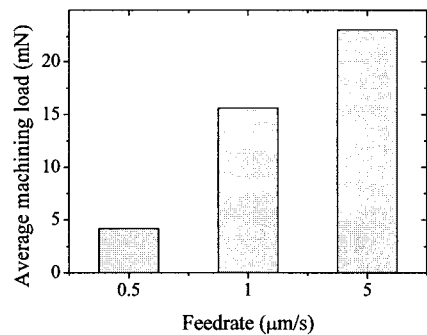


Fig. 4 Average machining load according to feedrate

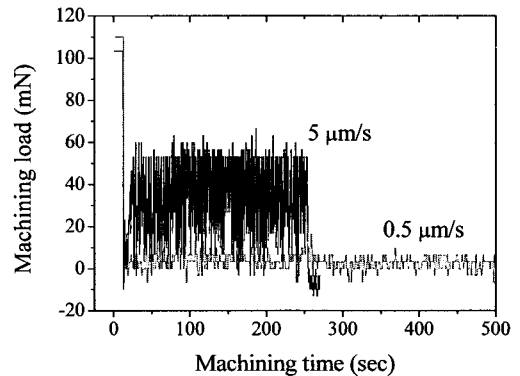


Fig. 5 Machining load according to feedrate (0.5 $\mu\text{m/s}$, 5 $\mu\text{m/s}$)

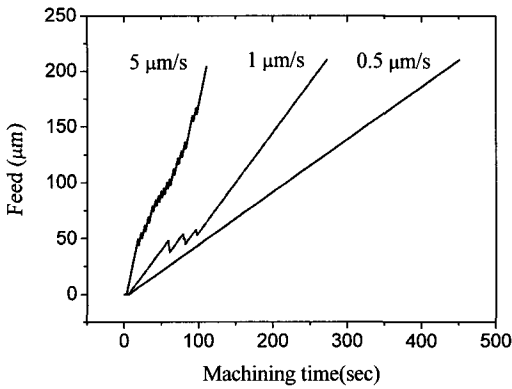


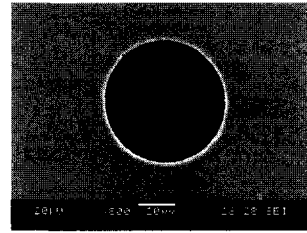
Fig. 6 Tool feed according to different feedrates

Fig. 7은 공구의 이송 속도가 0.5, 1, 5 µm/s 인 경우 가공된 구멍의 사진이다. 공구의 회전 속도는 150 rpm 으로 설정하였다. 구멍 출구 부분을 살펴보면 공구의 이송 속도가 0.5 µm/s 일 때 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 크랙이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 7(b)와 (c)와 같이 공구의 이송 속도가 빠른 조건, 즉 1 µm/s 와 5 µm/s 에서는 구멍 출구에 크랙이 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 가공 속도가 클수록 가공물에 걸리는 가공력이 커지므로 크랙이 보다 더 쉽게 발생하는 것을 알 수 있다.

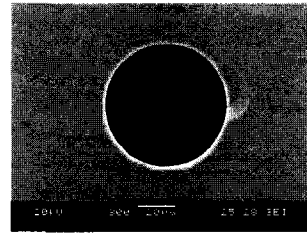
4.2 가변 공구 이송 속도를 이용한 가공

앞의 실험 결과로부터 크랙을 방지하기 위해 공구의 이송 속도를 0.5 µm/s 로 설정하는 것이 최적 조건이라는 것을 알 수 있다. 하지만 구멍 가공 초기부터 이송 속도를 낮게 설정하면 그만큼 가공 시간이 증가하는 문제가 있다. 대부분의 크랙은 구멍의 출구에서 발생한다. 따라서 출구 측 가공에서만 이송 속도를 낮게 하면 이러한 문제를 피할 수 있다.

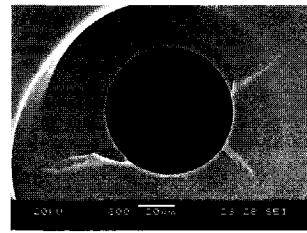
본 논문에서는 가공 중에 공구의 이송 속도를 변화시켜 크랙을 방지하면서 가공 시간도 단축하는 알고리즘을 고안하였다. 즉 공구의 마모를 고려하여 90 ~ 100 µm 까지는 5 µm/s 의 이송 속도로 가공을 하였으며 그 이상의 깊이에서는 크랙을 방지하기 위해 공구의 이송 속도를 0.5 µm/s 로 낮춰 가공을 하였다. 여기서 가공 깊이가 100 µm 이상인 구간에서 공구의 이송 속도를 늦추면 크랙 발생 빈도수가 많아졌다. 따라서 90 ~ 100 µm 에서 공구 이송 속도를 낮추는 것이 효과적이었다. Fig. 8 은 두께 130 µm 의 유리



(a) 0.5 µm/s



(b) 1 µm/s



(c) 5 µm/s

Fig. 7 Micro holes machined with different feedrates

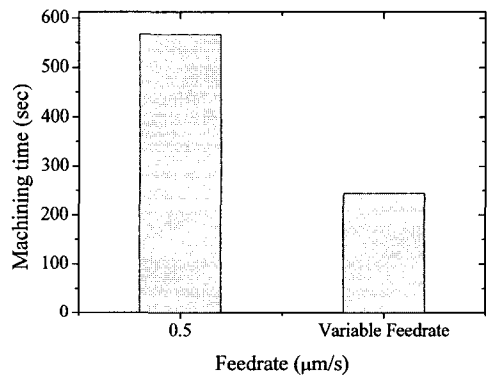


Fig. 8 Comparison of machining time according to feedrates

가공에서 0.5 µm/s 의 이송 속도를 사용했을 때와 가변 이송 속도를 사용했을 때 구멍 가공 시간을 비교한 그래프이다. 가변 이송 속도를 사용하면 0.5 µm/s 일 때보다 가공 시간을 약 50%정도 감소시킬 수 있었다. Fig. 9 는 가변 이송 속도를 이용하여 구멍 가공한 예이다. 가변 이송 속도를 사용하여 가공 시간을 단축하면서 효과적으로 크랙을 방지할 수 있다.

4.3 공구의 회전 속도

초음파 가공에서 공구의 회전 속도가 크랙 발생에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 10 은 공구의 이송 속도를 0.5 $\mu\text{m/s}$ 로 일정하게 하고 공구의 회전 속도를 변화시키면서 구멍 가공한 결과이다. 공구를 회전시키지 않는 경우와 1200 rpm 으로 회전한 경우 크랙이 발생한 것을 볼 수 있다. 공구의 회전은 슬러리에 포함된 지립이 가공면으로 원활히 들어가도록 도와주는 역할을 하므로 공구를 회전 시킬 필요가 있다. 그러나 공구의 회전 속도가 너무 빠르면 원심력에 의해 지립이 가공면으로 들어가는 것이 방해받는다. 따라서 가공이 일어나지 않고, 공구가 가공물에 직접 접촉하여 가공력이 증가하고 크랙이 발생한다.

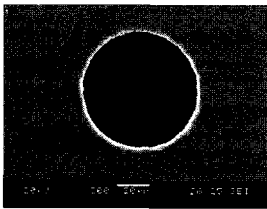
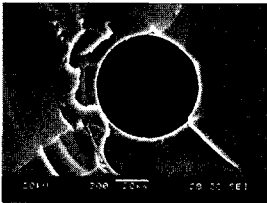
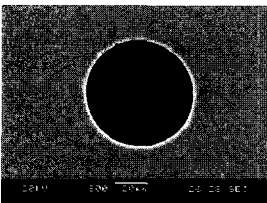


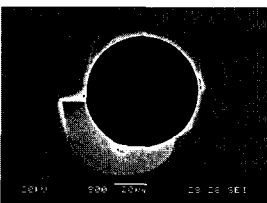
Fig. 9 Hole exit machined with variable feedrates



(a) 0 rpm



(b) 150 rpm



(c) 1200 rpm

Fig. 10 Hole exits with different rotational speeds

Fig. 11 은 0.5 $\mu\text{m/s}$ 의 공구의 이송 속도 조건에서 0, 150, 1200 rpm 일 때, 발생하는 평균 가공력을 비교한 그래프이다. 공구의 회전이 없거나 빠르게 회전을 하는 경우에는 슬러리가 들어가기 쉽지 않으므로 150 rpm 일 때보다 약 3 ~ 4 배 정도의 가공력이 가해지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12 는 공구 회전 속도를 150 rpm 으로 설정하고 반구 형상의 공구와 가변 이송 속도 알고리즘을 이용하여 초음파 가공으로 유리를 가공한 결과이다. 사진과 같이 반구 형상의 공구와 가변 이송 속도 알고리즘을 적용하면 초음파를 이용하여 유리를 가공할 때 입구 부분과 출구 부분을 깨끗한 형상으로 가공할 수 있다.

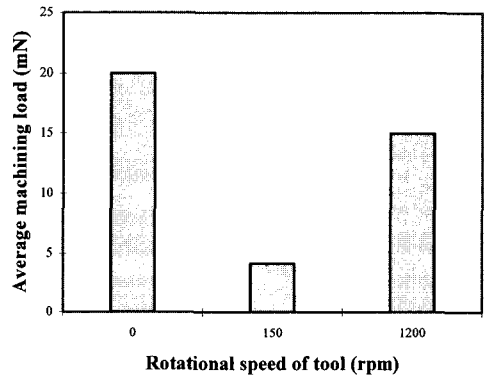
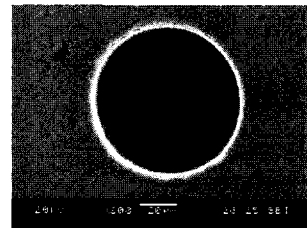
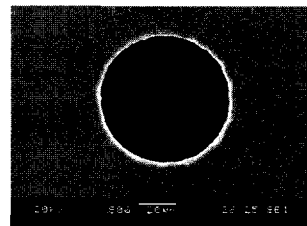


Fig. 11 Average machining load according to the rotational speed of tool



(a) Entrance



(b) Exit

Fig. 12 Micro hole machined with a hemispherical tool and variable feedrate

5. 결 론

기존의 공구 진동을 이용한 초음파 가공기에서 제어의 문제점을 해결하기 위해 가공물이 진동하는 초음파 가공기를 구성하였다. 초음파를 이용한 유리 가공의 경우 입구 부분의 찌그러짐 현상과 출구 부분에 크랙이 발생하는 문제점이 있다. 본 논문에서는 구멍의 찌그러짐과 크랙을 방지하기 위해 공구의 형상, 공구의 이송 속도, 회전 속도에 따른 가공 특성을 연구하였다. 실험을 통하여 공구의 이송 속도를 $0.5 \mu\text{m/s}$, 회전 속도를 150 rpm 의 조건에서 출구 크랙을 방지할 수 있었으며 가공 시간을 줄이기 위해 가공 초기에는 빠른 이송 속도로 가공을 하고 구멍 출구 부분에서 이송 속도를 늦추는 알고리즘을 적용하였다.

참고문헌

- (1) Egashira, K., Masuzawa, T., Fujino, M. and Sun, X. Q., 1997, "Application of USM to Micromachining by on-the-machine Tool Fabrication," *International Journal of Electrical Machining*, No. 2, pp. 31~36.
- (2) Egashira, K., Masuzawa, T., 1999, "Microultrasonic Machining by the Application of Workpiece Vibration," *Annals of the CIRP*, Vol. 48, No. 1, pp. 131~134.
- (3) Komaraiah, M., Reddy and P. N., 1993, "A Study on the Influence of Workpiece Properties in Ultrasonic Machining," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 33, No. 3, pp. 495~505.
- (4) Yu, Z. Y., Rajurkar, K. P. and Tandon, A., 2004, "Study of 3D Micro-ultrasonic Machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, pp. 727~732.
- (5) Yan, B. H., Wang, A. C., Huang, C. Y. and Huang, F. Y., 2002, "Study of Precision Micro-holes in Borosilicate Glass using Micro EDM Combined with Micro Ultrasonic Vibration Machining," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1105~1112.
- (6) Thoe, T. B., Aspinwall, D. K. and Wise, M. L. H., 1998, "Review on Ultrasonic Machining," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, No. 4, pp. 239~255.
- (7) Kainth, G. S., Nandy, A. and Singh, K., 1979, "On the Mechanics of Material Removal in Ultrasonic Machining," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 19, pp. 33~41.
- (8) Masuzawa, T., 2000, "State of the Art of Micromachining," *Annals of the CIRP*, Vol. 49, No. 2, pp. 473~487.
- (9) Gorham, D. A., Salman, A. D., 1999, "Indentation Fracture of Glass and Mechanisms of Material Removal," *Wear*, Vol. 233-235, pp. 151~156.