

# 초음파 진동과 레이저 후면 에칭을 통한 유리 구멍 가공

## Glass Drilling using Laser-induced Backside Wet Etching with Ultrasonic Vibration

김혜미<sup>1</sup>, 박민수<sup>1,✉</sup>  
Hye Mi Kim<sup>1</sup> and Min Soo Park<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Eng., Seoul National Univ. of Science & Technology)  
✉ Corresponding author: pminsoo@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6356

Manuscript received: 2013.7.16 / Revised: 2013.8.2 / Accepted: 2013.12.4

*Laser beam machining has been known as efficient for glass micromachining. It is usually used the ultra-short pulsed laser which is time-consuming and uneconomic process. In order to use economic and powerful long pulsed laser, indirect processing called laser-induced backside wet etching (LIBWE) is good alternative method. In this paper, micromachining of glass using Nd:YAG laser with nanosecond pulsed beam has been attempted. In order to improve shape accuracy, combined processing with magnetic stirrer has been widely used. Magnetic stirrer acts to circulate the solution and remove the bubble but it is not suitable for deep hole machining. To get better effect, ultrasonic vibration was applied for improving shape accuracy*

Key Words: Laser beam machining (레이저 빔 가공), LIBWE (레이저 습식 후면 식각기법), Ultrasonic vibration (초음파 진동), Glass drilling (유리 구멍가공)

### 1. 서론

최근 소형화 되어가는 전자 부품, 반도체 등의 분야에서는 정밀하고 미세한 부품의 수요가 급증하고 있다. 특히 유리는 일반 금속과는 다른 화학적, 물리적, 광학적 특징을 나타내기 때문에 디스플레이, 바이오 칩, 통신, 광학 장비 등의 분야에서 널리 사용되고 있다. 하지만 유리는 경도가 대단히 높은 재료이므로 일반적인 범용가공으로는 정밀 형상가공이 매우 어렵다. 이에 현재까지 연구된 유리의 미세가공 방법들로는 화학적 에칭,<sup>1</sup> 초음파 가공,<sup>2</sup> 전해방전 가공,<sup>3</sup> 레이저 가공<sup>4</sup> 등이 있다.

그 중 레이저 가공은 특정 파장의 빛을 조사하여 가공하기 때문에 공구가 불필요하며, 타 가공 기법에 비해 속도도 빠른 편이다. 레이저를 이용한 유리가공법 중 많은 연구들이 초단펄스 단파장

레이저를 이용하고 있다. 이와 같은 극초단펄스 폭은 유리와 같이 선형 흡수가 거의 없는 매질에서도 비선형 광학흡수를 일으켜 가공을 가능하게 한다. 그리고 좁은 영역에 에너지를 효과적으로 전달할 수 있기 때문에 열적 손상을 일으키지 않고 가공 품질을 향상시킬 수 있다.<sup>4</sup> 그래서 형상정밀도는 좋지만, 가공량이 매우 작아 속도가 느려지기 때문에 생산성이 떨어진다. 또한 높은 장비 가격으로 고가의 가공이 된다는 단점을 갖고 있다.

그런데 최근 연구 중, 간접가공법인 레이저 습식 후면 식각기법 (LIBWE)을 이용하면, 펄스 폭이 길어 시간당 에너지 밀도가 낮은 경우에도 가공이 가능하다는 연구결과가 있었다. 레이저 빔이 유리에 흡수되어 직접 가공하는 것이 아닌, 유리 후면의 액체를 폭발시킨 힘으로 유리를 가공하기 때문이다.<sup>5-7</sup> 기존 연구된 논문들에서 사용한 레이저는 주로 단파장 나노초 레이저로, 이는 유리 가공에

적용될 수 있는 흡수율과 빔 사이즈의 한계 때문이다.<sup>8,9</sup> 하지만 단파장 레이저는 출력에 비해 고가의 장비비용으로 인해 가공비와 가공 시간 측면에서 경쟁력이 떨어진다.

이에 본 논문에서는 나노초 펄스레이저 중, 1064 nm의 파장 레이저를 유리가공에 사용해 보았다. 1064 nm 파장의 레이저는 일반적으로 금속 가공에 쓰이는 레이저로 미세형상, 고세장비 구멍, 절단 등 다양한 가공에 많이 쓰이는 장비이다. 흡수율이 떨어져 유리 가공에서는 잘 사용되지 않지만, 극초단 펄스레이저에 비해 장비 가격이 훨씬 저렴하기 때문에 가공비가 낮아지며, 가격대비 출력이 높아서 가공 속도가 빨라지는 장점을 갖고 있다. 하지만 레이저 빔 사이즈 및 파장 등의 한계로 미세 가공의 정밀도는 낮은 편이다. 가공 시 발생하는 버와 재응고층, 열영향층 또한 정밀도를 저하시키는 원인이 된다. 이러한 이유로 1064 nm 파장의 레이저로 유리에 정밀 형상을 가공하는 것은 불가능하였다. 이를 개선하기 위해 레이저 습식 후면 식각기법에 스테러(Stirrer)와 초음파를 적용해 기포 제거와 용액 순환의 효과를 기대해 보았다. 특히 초음파는 기존에 적용한 사례가 전무하므로 이전 공정들과 가공 형상을 비교 분석하여 복합가공의 가공 성능과 효율 향상 여부를 살펴 보았다.

## 2. 실험 구성

### 2.1 가공 원리

레이저 습식 후면 식각기법은 레이저 광선이 유리에 거의 흡수되지 않고 그대로 통과하여, 후면의 용액에서 반응을 일으킴으로서 가공이 이루어지는 간접가공법이다. 레이저 광선이 유리 후면의 용액과 접촉하면 부분적으로 빠르게 가열이 되며, 고온의 열에너지를 지니게 된 용액은 순간적으로 기화하여 급격히 팽창하면서 유리 표면을 용융시킨다. 또한 이때 발생하는 기포 및 충격파는 용융된 유리를 물리적으로 제거하여 식각 가공을 원활하게 한다. 이를 위해 사용되는 대표적인 용액은 레이저 빛을 흡수하는 흡광 용액 또는 금속 파우더를 섞은 용액 등이다. 금속파우더를 쓰는 경우, 가공성 향상을 위하여 주로 마그네틱 스테러로 파우더를 강제 순환시킨다.<sup>5</sup> Fig. 1은 레이저 습식 후면 식각기법의 개념을 나타내고 있다. 유리 밑면의 레이저와 용액이 맞는 부분이 입구로,

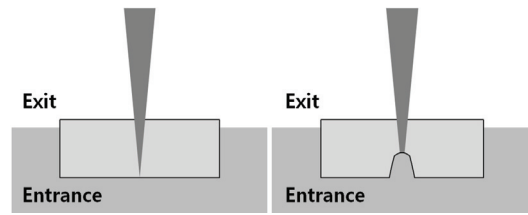


Fig. 1 Conceptual diagram of Laser-induced backside wet etching

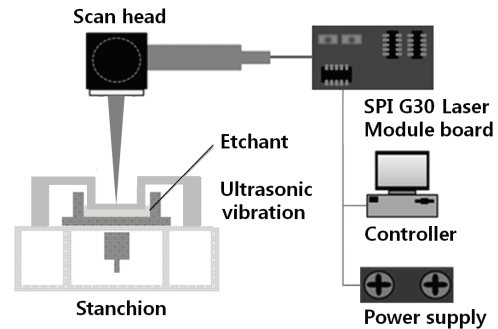


Fig. 2 Schematic diagram of hybrid machining system

공기와 접촉하는 면이 출구가 되어 상향으로 가공이 진행된다.

### 2.2 실험 장치

실험에 사용된 주 장비는 Nd:YAG 레이저, 마그네틱 스테러, 초음파이다. Nd:YAG 레이저는 SPI Lasers사의 Pulsed Fiber Laser로, 1064 nm의 파장과 최대출력 20 W, 최고 펄스반복율 500 kHz의 특성을 지닌다. F-theta 렌즈를 통해 최종적으로 만들어지는 빔의 스팟사이즈는 60~70  $\mu\text{m}$ 이며 레이저 펄스 폭은 200 ns를 사용하였다. 마그네틱 스테러는 최대 1500 rpm 까지의 용액 순환이 가능한 장비로, 이전 연구와 본 논문의 연구 결과를 비교하기 위해 사용되었다. 이와 함께 순환을 돕는 마그네틱 스핀 바는  $\text{\O} 10 \text{ mm}$  X 길이 5 mm의 cross 형을 사용하였다. 초음파 가진기는 28 kHz 주파수를 지닌 장치로 깊은 구멍 가공시 기포제거 및 용액순환을 효과적으로 수행할 목적으로 적용하였다. 시편은 25 mm X 25 mm, 두께 0.7 mm의 파이렉스 유리(Pyrex)를 사용하였다. 식각 용액으로는 순환이 원활하면서 흡수율도 좋은  $\text{NiSO}_4$  1.5 M 수용액을 적용하였다.

Fig. 2는 복합 가공 시스템을 보여준다. 시편 지지대는 스테러 또는 초음파에서 직접적인 영향을

받지 않도록 외부에 고정하여 설치하였다. 가공 지지대는 상황에 따라 초음파, 스테러, 또는 일반 수조를 유연하게 교체할 수 있도록 구조물을 제작하여 사용하였다. 가공할 유리는 시편 지지대 아래 측에 고정하여 쉽게 기포제거가 가능하도록 하였을 뿐만 아니라, 충분한 용액이 공급되도록 지지대의 중심선 이상으로 수위를 유지하며 실험하였다. 그리고 정밀한 가공을 위해 레이저 컨트롤 소프트웨어가 설치된 컴퓨터를 통해서 실험을 진행하였다.

### 2.3 실험 방법

레이저 습식 후면 식각기법만으로 유리를 가공할 경우, 기포로 인해 가공형상에 문제가 생긴다. 가공 부위에 위치한 기포는 용액 공급을 어렵게 만들어 가공 주변부에서 불필요한 폭발이 일어날 수 있으며, 가공 찌꺼기의 원활한 배출도 방해하게 된다. 또한 이 기포가 점점 발달하게 되면 유리 시편에 가해지는 반발력이 커지기 때문에, 유리의 얇은 부분이 깨질 수 있다.<sup>6</sup> 그래서 보통 스테러가 레이저 후면 식각기법 연구 논문들에서 많이 사용되고 있다. 스테러는 용액을 순환시킴으로써 가공 시 발생하는 기포를 제거해준다. 특히 금속속파우더를 섞은 용액을 사용할 경우에는 스테러가 기포 제거뿐만 아니라 용액 전체를 유동시켜 금속 입자를 가공 부위에 지속적으로 공급해주는 역할도 하였다. 하지만, 스테러는 가공 표면의 기포제거에는 효과가 좋지만, 미세 홈을 가공하는 경우에는 깊이가 깊어질수록 내부에 영향을 미치지 못해 효과가 반감된다.

따라서 본 연구에서는 용액에 미세 진동을 가하여 기포를 제거하고 용액 순환을 도울 수 있는 초음파를 레이저 습식 후면 식각기법에 적용해 보았다. 초음파는 깊은 구멍의 내부까지도 미세진동을 효과적으로 전달할 수 있기 때문에 내부 기포 제거에 효과적이다. 특히 본 실험에서는 수용액 상태의 식각 용액을 사용하였으므로 진동이 적고 출력이 낮은 초음파로도 충분한 기포 제거 및 용액순환, 찌꺼기 배출 등의 효과가 기대된다.

본 실험에서는 0.7 mm 두께의 파이렉스 유리 시편에 직경 200  $\mu\text{m}$  이하의 미세 구멍을 가공하여 복합가공의 특성을 살펴보았다. 이를 위해 스팟사이즈를 고려하여 갈바노 스캐너 프로그램에서 직경 130  $\mu\text{m}$ 의 원형 형상을 스캔하였다. 우선 레이저 습식 후면 식각기법만을 이용하여 모든 실험의

기준이 되는 가공조건을 찾는 실험을 진행하였다. 기준조건으로, 이전 연구에서 용액 순환을 위해 사용되었던 마그네틱 스테러도 적용해 그 효과를 살펴보았다. 또한 초음파를 적용한 실험도 진행하여 두 결과에 대해 비교 분석하였으며, 이 후 형상을 개선하기 위한 실험으로 1064 nm 레이저 장비가 유리가공에 있어 어느 정도까지의 품질 효과를 가질 수 있는지 확인하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 레이저 조건에 따른 가공 형상

유리가공에 1064 nm의 장파장 레이저를 적용한 사례가 거의 없었으므로, 우선 기본적인 레이저 가공 조건을 정하기 위한 실험을 진행하였다. 레이저 출력은 빠른 가공속도를 확보하기 위해 본 연구에서 사용된 장비의 최대 출력인 20 W로 고정하였으며, 레이저 조사 주기는 에너지를 최대한 분산시킴으로써 유리 시편의 손상 및 흡광 액체의 기포 생성을 최소화하기 위해 장비의 최대 주파수인 500 kHz로 고정하였다. 즉, 주기 500 kHz 를 쓰게 되면 20 W의 경우 레이저 1 shot 당 에너지가 0.04 mJ로 최소화되어, 보다 더 정밀한 가공형상을 얻는 것이 유리해진다. 두 가지 인자를 고정된 후, 갈바노 스캐너의 스캔 속도(Scan speed)를 변경하면서 실험을 진행하였다. 사용된 시편인 두께 0.7 mm의 파이렉스 유리를 최대한 깨끗하게 관통하기 위한 조건을 선정하기 위하여 속도별 가공형상을 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 유리 가공시 비교적 가공 속도가 빠른 기계적 가공법을 활용할 경우 0.7 mm 관통에 약 3~10분 정도가 소요되므로 목표 가공시간을 5분 내외로 선정하였다.<sup>1,2</sup>

Fig. 3은 스캔 속도에 따른 입출구의 가공형상을 나타낸다. Fig. 3(a), (b)는 스캔 속도 10 mm/s, (c), (d)는 25 mm/s, (e), (f)는 50 mm/s, (g), (h)는 100 mm/s에서의 입출구 형상을 보여주고 있다. 레이저 습식 후면 식각기법만을 사용하였기에 가공 부위의 기포 및 찌꺼기 제거가 원활하지 않아, 전체적으로 크랙과 과도한 영역에서의 가공이 관찰되었다. 특히 스캔 속도가 낮은 경우에는 레이저 1 shot에 대한 단위 면적당 에너지가 높아서 식각 용액의 폭발이 커져 과도하게 가공되었음을 볼 수 있다. 반면 스캔 속도가 높은 경우에는 식각 용액의 폭발이 분산되어 가공부위에서의 과도한 파손이 억제되었다. 그 결과 형상은 개선되었지만 여전히

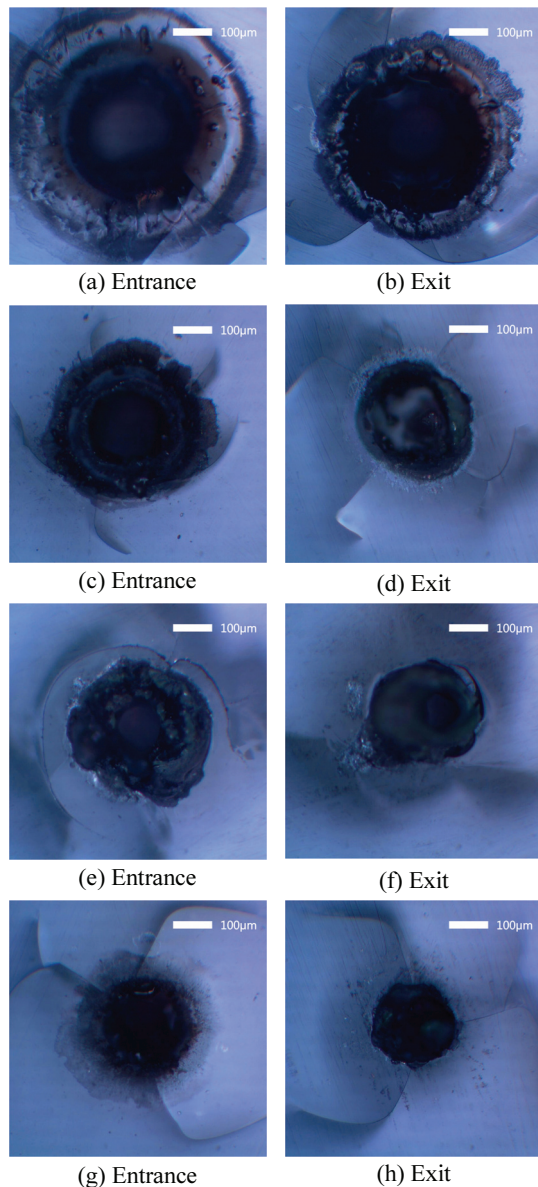


Fig. 3 Processing results from pulse width (a), (b) 10 mm/s, (c), (d) 25 mm/s, (e), (f) 50 mm/s, (g), (h) 100 mm/s

기포 및 찌꺼기 배출이 원활하지 않아 불규칙적으로 발생된 기포에 의한 모서리 깨짐 현상과 찌꺼기의 재응고 현상 등이 관찰되었다. 또한, 각각 반복 실험을 거친 결과 10 mm/s의 경우 평균 49초, 25 mm/s는 1분 14초, 50 mm/s는 2분 20초로 목표인 5분 이내 가공이 가능하였다. 하지만 100 mm/s 인

경우에는 평균 6분 18초로 가공시간이 급격히 증가하였다. 즉, 스캔 속도가 높아질수록 가공율이 저하되어 관통되기까지의 시간이 크게 증가하는 양상을 보였다. 이에 본 실험에서는 과도한 형태의 가공을 억제하며 가공시간이 길지 않은 20 W, 500 kHz, 50 mm/s의 조건을 기준으로 선정하여 후 실험들에 적용하였다.

### 3.2 스테러와 초음파의 적용

앞서 언급한 바와 같이 레이저 습식 후면 식각 기법은 식각 용액의 폭발을 이용한 간접가공이므로 가공 형상 개선을 위해서는 기포제거와 찌꺼기 배출이 매우 중요하다. 이에 앞선 실험에서 선정된 레이저 기준 조건인 20 W, 500 kHz와 스캔 속도 50 mm/s에서 가공 중 발생하는 기포 및 찌꺼기 제거를 위해 스테러와 초음파를 부가한 복합공정을 진행하였다.

스테러를 이용한 용액 순환은 기존 자외선이나 가시광선을 이용한 습식 후면 식각기법 연구들에서 흔히 사용되어진 방법으로 마그네틱 바의 회전 속도가 효과에 큰 영향을 미친다. 마그네틱 바의 회전 속도가 낮은 경우에는 효과적인 용액 순환이 발생하지 못하여 찌꺼기 및 기포 제거 등이 원활하지 못한 반면, 1000 rpm 이상으로 올라가게 되면 빠른 회전속도로 인해 소형의 마그네틱 바가 떠오르면서 시편 유리에 부딪히는 경우가 발생하였다. 이에 마그네틱 바가 빠른 속도로 회전하여 유동을 효과적으로 발생시키면서도 떠오르지 않고 바닥에서 안정적으로 회전하는 조건인 700 rpm의 조건으로 실험을 진행하였다.

Fig. 4(a), (b)는 스테러를 적용한 경우의 입출구 형상을 보여주고 있다. 용액 순환의 효과로 구멍 내부의 가공 찌꺼기는 비교적 많이 제거된 것으로 관찰되지만, 입구의 경우 여전히 유리가 불규칙적으로 깨지며 가공된 모습이 보인다. 이렇게 스테러의 용액 순환 효과는 밀링이나 평면 형상 가공과 같이 용액의 유동효과가 쉽게 나타날 수 있는 경우에는 충분한 효과를 낼 수 있지만, 구멍과 같이 세장비가 높은 형상의 가공에서는 가공 깊이가 깊어질 수록 가공부위의 기포가 원활한 제거가 이루어지지 않아 큰 효과를 볼 수 없음을 알 수 있다.

이에 고주파 미세 진동으로 기포 및 찌꺼기를 분산시킬 수 있으며 좁은 틈새로도 진동을 전달시키기 용이한 초음파 가진기를 실험에 적용해 보았다. Fig. 4(c), (d)는 동일한 조건상에서 초음파를 적

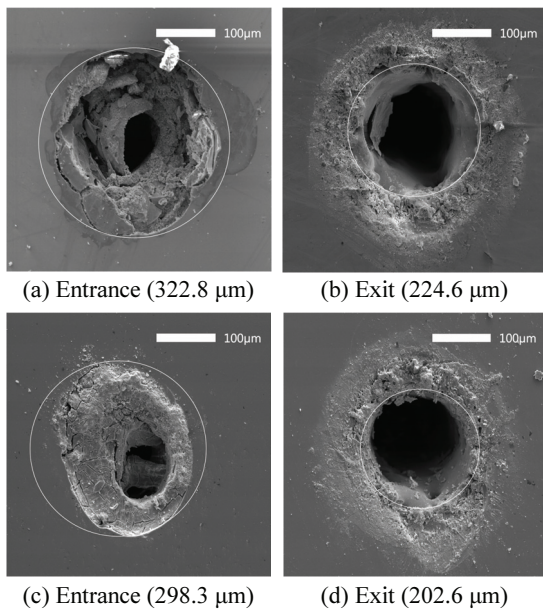


Fig. 4 Using (a), (b) magnetic stirrer (c), (d) Ultrasonic vibration

용한 복합가공의 결과이다. 시편의 입구 부분에서 나타난 불규칙적인 가공 및 형상 왜곡이 많이 개선되었으며, 출구 부분에서도 깨져 나간듯한 변형층의 크기가 줄었다. 그 결과 입출구 모두 직경이 감소하였다. 즉, 목표로 한 깨끗한 형상가공으로 보기는 어렵지만 전체적으로는 기존 결과들에 비해서는 크게 개선된 결과를 보여준다. 또한 가장자리가 살아있는 원형 형상가공의 가능성을 볼 수 있었기 때문에, 초음파 복합가공의 추가 실험을 진행하여 가공성능 향상 여부를 살펴보았다.

### 3.3 미세 구멍 형상 개선

선행된 실험에서 볼 때, 식각 용액이 금속성 입자 없이 본 실험에서 사용된 것처럼 이온형태로만 존재하는 경우에는 기포 제거 및 용액 순환 등을 위해서는 초음파가 스테러보다 더 효과적이었다. 하지만 선행된 실험에서 사용한 조건으로는 양호한 형상을 가공하기 어렵기 때문에 스캔 속도 조건에 변화를 주어 실험하였다. 스캔 속도를 조절할 이유는 동일한 출력 하에 레이저 1 shot에 대한 면적당 에너지를 변화시키기 위해서이다. 즉, 앞선 기초실험에서와는 달리 초음파 진동으로 인해 기포 및 찌꺼기의 원활한 제거가 이루어지면서 불필요한 가공에 의한 에너지 손실을 최소화할 수

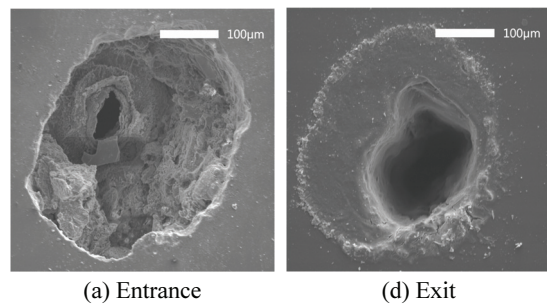


Fig. 5 Additional experiment of magnetic stirrer in the high-speed

있게 되어 더 작은 크기의 면적당 에너지로도 효과적인 가공이 가능하기 때문이다. 또한, 스캔 속도가 빠를수록 에너지가 줄어 과도한 폭발에 의한 크랙도 줄어들게 된다. 하지만 스캔 속도를 과하게 증가시킬 경우 가공 시간이 오래 걸리거나 가공 자체가 발생하지 않을 수도 있으므로 초기 가공 목표 시간인 5분에서 크게 벗어나지 않는 한도 내에서 실험을 진행하였다.

우선 초음파를 사용하지 않은 경우에도 스캔 속도를 크게 높인 조건이 가공 개선 효과를 가져오는 지 확인해보는 대조군 실험을 진행하였다. 스캔 속도 250 mm/s에서 단순히 레이저 습식 후면 식각 기법만 적용했을 시에는 30분이 지나도 구멍 가공이 불가하였으며, 스테러를 적용한 경우에는 Fig. 5에서 보인 바와 같이 0.7 mm 두께의 파이렉스 유리의 관통 구멍 가공은 가능하였지만 20분 이상의 많은 가공 시간이 소요되었다. 형상 또한 기포와 찌꺼기 배출이 원활하지 않아 가공이 불안정해짐에 따라 많이 왜곡되고 불규칙적으로 가공되었다. 즉, 깊은 형상 가공에서 찌꺼기 및 기포 제거 등이 효과적으로 뒷받침되지 않은 상태에서는 스캔 속도를 높여서 가공할 경우 가공 자체가 원활하지 않음을 알 수 있다.

이에 Fig. 6은 초음파의 적용 하에 스캔 속도를 높여 형상을 개선시킨 모습이다. 초음파 사용으로 인해 가공성이 좋아지는 것을 확인하였으므로, 기준 속도인 50 mm/s 이상으로 증가시키며 실험해보았다. 스캔 속도 100 - 250 mm/s 까지는 가공시간 7분 이하에서 가공형상을 얻을 수 있었지만, 300 mm/s에서는 12분 이상의 시간이 소요되며 관통이 원활하지 않거나 관통되더라도 Fig. 6(e), (f)에서 보듯이 의도했던 크기의 원형 형상이 완전하게 가공되지 않는 경우가 빈번하였다. 또한 Fig. 6(a), (b)와

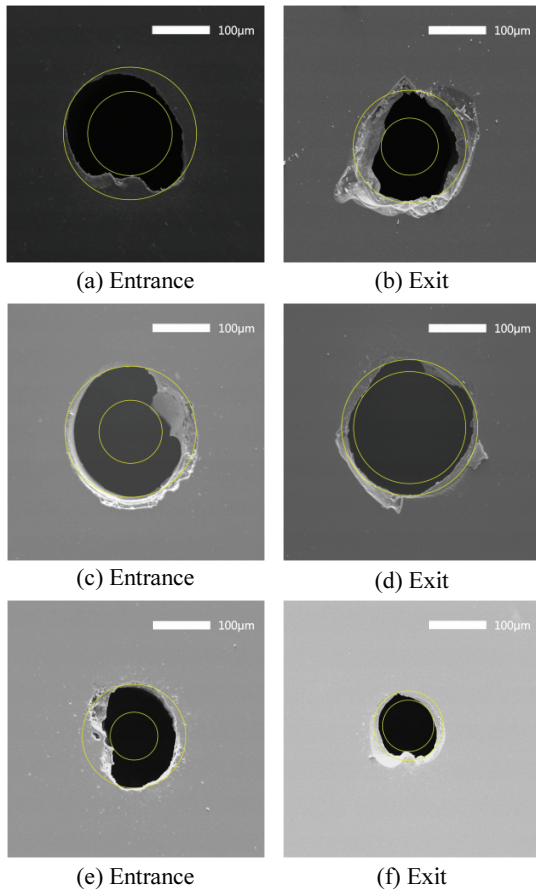


Fig. 6 Using ultrasonic vibration in the high-speed processing (a), (b) 200 mm/s, (c), (d) 250 mm/s, (e), (f) 300 mm/s

Table 1 Machining results according to scan speed

Figure No.	6(a)	6(b)	6(c)	6(d)	6(e)	6(f)
Dia. (μm)	231	197	228	237	181	121
Circularity	42	49	58	20	49	15

Fig. 6(c), (d)를 비교해 볼 때, 스캔 속도가 증가할수록 가공 에너지가 분산되어 입출구 형상이 개선되는 것을 확인할 수 있었으며 특히 출구 부의 형상이 크게 개선되었다. Table 1은 Fig. 6에서 보인 형상의 직경과 진원도를 각각 측정하는 것이다. 진원도는 최소 외접원 방식을 이용하여 μm단위로 계산하였다. 스캔속도 250 mm/s일때가 200 mm/s에 비해서 입구부는 직경이나 진원도 측면에서 큰 개선이 없었지만 출구부는 크게 개선되었음을 볼 수 있다. 이에 초음파를 부가하면서 습식 후면 식각

기법을 수행하는 경우 스캔속도 250 mm/s에서 비교적 깨끗한 관통 구멍을 얻을 수 있었다.

가공 프로그램 상에서 의도한 스캔 직경은 130 μm이며, 레이저빔의 스팟 사이즈가 지름 60~70 μm 이므로 최종적으로는 지름이 200 μm 가 되는 관통 구멍을 목표로 하였다. 그리고 실제 가공결과, 입구 Fig. 6(c)에서 지름은 약 228 μm, 출구 Fig. 6(d)에서는 약 237 μm가 측정되었다. 입구의 크기는 목표에 근접한 값으로 얻을 수 있었지만, 입출구의 측정값을 보면 입구부가 출구부보다 크기가 작았다. 이렇게 출구가 더 크게 나온 이유는 입구 부분에 레이저의 초점이 맞춰졌기 때문에, 입구에서 멀어질수록 초점의 사이즈가 커지면서 테이퍼가 발생한 것으로 보인다. 앞선 실험결과들과 전체적인 형상을 비교해보면 과도한 크랙 뿐만 아니라 재응고층 및 버가 줄어들어 이전보다 훨씬 깨끗하게 가공되었음을 관찰할 수 있다. 이를 통해 근적외선 파장의 레이저에서도 유리의 미세 형상가공이 가능하다는 점을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

유리의 미세 형상 가공시 가공비 및 생산성을 개선하기 위해 본 논문에서는 레이저 습식 후면 식각기법에 비교적 저렴한 장비인 1064 nm의 장파장 레이저를 이용하였다. 이를 통해 지름200 μm 전후의 크기를 가진 미세 구멍의 관통가공을 목표로 하여, 가능한 빠르고 양호한 형상이 나오는 조건을 찾기 위해 펄스폭과 갈바노 스캔속도에 따른 가공양상을 관찰하였다. 우선 기존에 수행되던 방법과 동일하게 레이저 습식 후면 식각기법을 수행하여 기준되는 조건을 잡았으나, 미세 구멍가공시 내부의 가공 찌꺼기와 기포 배출이 원활하지 못하여 가공 입구 부분이 크게 깨져 형상이 일그러지는 문제점을 확인하였다. 그래서 형상정밀도를 낮추는 원인인 기포와 가공 찌꺼기 제거를 원활히 하기 위하여, 스테리과 초음파를 각각 적용하여 형상 개선 효과를 비교해 보았다. 기존 연구들에서 많이 사용된 스테리의 경우, 용액을 큰 유동으로 움직이기 때문에 밀링이나 평면 형상 가공에는 적합하지만 미세 구멍 내부의 기포를 제거하는 것에는 효과가 미미하였다. 반면 초음파는 용액의 미세 진동으로 좁은 틈새에서도 기포가 잘 제거되어, 기포로 인해 생기는 불규칙적인 큰 폭발을 막아 입구 부분이 깨지는 현상을 개선할 수 있었다.

또한 구멍 내부에서 발생된 찌꺼기를 원활하게 배출함으로써 좀 더 정확한 형상의 미세가공을 가능하게 하였다. 결과적으로 적외선 레이저를 이용한 유리가공 기술에 있어서 고속, 저비용으로 생산성을 높일 수 있다는 가능성을 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부)지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Jeon, S. K., Shin, Y. J., Kim, B. H., Kim, H. Y., and Jeon, B. H., "Micro-machining of Glasses using Chemical-assisted Ultrasonic Machining," The Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 27, No. 12, pp. 2085-2091, 2003.
2. Liu, J. W., Jin, J., Baek, D. K., and Kim, T. J., "Hole Fabrication for Glass using Ultrasonic Machining," Proc. of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Autumn Conference, Paper No. 249, 2012.
3. Han, M. S., Min, B. K., and Lee, S. J., "Geometric Improvement of Glass Microstructuring using Electrochemical Discharge Machining Process," Proc. of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Autumn Conference, pp. 65-69, 2009.
4. Choi, J. Y., Cho, S. H., Suh, J., and Lee, J. H., "Micromachining of Glasses using an Ultrashort Pulse Laser," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 151-152, 2011.
5. Mitxuisi, M., Sugita, N., Kono, I., and Warisawa, S., "Analysis of Laser Micromachining in Silica Glass with an Absorbent Slurry," Annals of the CIRP, Vol. 57, No. 1, pp. 217-222, 2008.
6. Lee, T. H., Jang, D. S., and Kim, D. S., "Analysis of Glass Micromachining by Laser-induced Backside Wet Etching," Proc. of The Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference, pp. 290-291, 2009.
7. Zimmer, K., Bohme, R., Pissadakis, S., Hartwig, L., Reisse, G., and Rauschenbach, B., "Backside Etching of Fused Silica with Nd:YAG Laser," Applied Surface Science, Vol. 253, No. 5, pp. 2796-2800, 2006.
8. Kawaguchi, Y., Sato, T., Narazaki, A., Kurosaki, R., and Niino, H., "Rapid Prototyping of Silica Glass Microstructures by the LIBWE Method: Fabrication of Deep Microtrenches," Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol. 182, No. 3, pp. 319-324, 2006.
9. Sato, T., Kurosaki, R., Narazaki, A., Kawaguchi, Y., and Niino, H., "Flexible 3D Deep Microstructures of Silica Glass by Laser-Induced Backside Wet Etching," Applied Physics A, Vol. 101, No. 2, pp. 319-323, 2010.