

## 레이저 습식 후면 식각공정을 이용한 미세 유리 구조물 제작

김 보 성\* · 박 민 수\*\*

\* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

### Fabrication of Glass Microstructure Using Laser-Induced Backside Wet Etching

Bo Sung Kim\* and Min Soo Park\*\*†

\* Dept. of Mechanical System Design Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received April 21, 2014 ; Revised June 24, 2014 ; Accepted July 8, 2014)

**Key Words:** Laser Machining(레이저 가공), LIBWE(레이저 습식 후면 식각공정), Glass Micro Structure(유리 미세 구조물), Ultrasonic Vibration(초음파 진동)

**초록:** 우수한 광투과성 및 경도를 지닌 유리는 바이오, 전자, 광학 등의 분야에서 널리 활용되고 있다. 하지만, 유리는 경도가 높고 깨지기 쉬워 일반적으로 특수가공법을 이용하여 가공이 이루어진다. 그 중 레이저는 공구가 불필요하며 가공 속도가 빠르다는 장점을 지니고 있지만 유리의 높은 광투과성 때문에 가공에 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 이에 저출력의 나노초 펄스 레이저로 유리 가공을 하기 위하여 간접가공법인 레이저 습식 후면 식각공정을 활용하고자 한다. 기존의 연구들에서는 흡수율이 뛰어난 고가의 단파장 레이저 장비를 주로 사용하였으나 본 연구에서는 범용적인 근적외선 레이저 장비를 활용하여 유리 구조물 제작의 가능성을 실험하였다. 특히 깊은 구조물 제작시 발생하는 문제점을 확인하고 이를 해결하기 위해 초음파 부가 공정을 통한 미세 구조물 제작을 수행하였다.

**Abstract:** The good light permeability and hardness of glass allow it to be used in various fields. Non-conventional machining methods have been used for glass machining because of its brittle properties. As one non-contact machining method, a laser has advantages that include a high machining speed and the fact that no tool making is required. However, glass has light permeability. Thus, the use of a laser to machine glass has limitations. A nanosecond pulse laser can be used at low power for laser-induced backside wet etching, which is an indirect method. In previous studies, a short-wave laser that had good light absorption but a high price was used. In this study, a near-infrared laser was used to test the possibility of glass micro-machining. In particular, when deeper machining was conducted on a glass structure, more problems could result. To solve these problems, microstructure manufacturing was conducted using ultrasonic vibration.

#### 1. 서 론

미세 가공 공정에 대한 연구는 최근 미세 정밀 부품들에 대한 수요가 증가함에 따라 그 중요성이 크게 대두되고 있다. 특히 유리는 투명성, 낮은 전기 전도성, 높은 경도 등 여러 가지 우수한 특성을 지니고 있어 통신, 디스플레이, 바이오, 광학 등 여러 분야에서 미세 부품으로 활용되고 있다. 하지만 유리의 높은 경도와 취성은 절삭 공정

중 공구 및 공작물 파손을 유발하여 미세 정밀 가공을 어렵게 만든다. 이에 유리 가공 시에는 주로 비 접촉 특수 가공법인 화학적 에칭,<sup>(1)</sup> 초음파 가공,<sup>(2)</sup> 전해방전가공,<sup>(3)</sup> 미립분사 가공,<sup>(4)</sup> 레이저 가공<sup>(5)</sup> 등이 사용된다. 그 중 레이저 가공법은 공구가 필요 없고, 타 특수가공법에 비해 가공속도가 비교적 높아 널리 활용되고 있다. 기존에는 유리가 지닌 광 투과성 성질 때문에 대부분의 연구들에서 극 초단 펄스 레이저를 사용하고 있다. 이와 같은 극 초단 펄스 레이저는 짧은 시간 내에 고 에너지를 방출하여 유리에 순간적으로 비선형 광학흡수 현상을 일으켜 투명 유리의 가공을 가능케

† Corresponding Author, [pminsoo@seoultech.ac.kr](mailto:pminsoo@seoultech.ac.kr)

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

한다. 또한 짧은 시간 동안 고 에너지를 조사하므로 열 전달을 최소화하여 열에 의한 유리 파손을 방지할 수 있다.<sup>(5)</sup> 그래서 형상 정밀도 및 가공 품질은 매우 우수하지만 고출력 레이저 제작에 많은 어려움이 있어 가공 속도가 비교적 느린 편이며 높은 장비 비용이 요구된다는 단점을 지니고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 몇몇 연구에서 간접가공인 레이저 습식 후면 식각공정 (LIBWE)을 제안하였다. 레이저 습식 후면 식각공정은 레이저 빛이 가공물인 유리를 투과해 유리 뒷면에 있는 흡광성 용액과 반응하여 폭발을 일으키고 그 에너지를 이용하여 간접적으로 가공하는 방법이다. 이 경우 직접적인 가공 열에 의한 재료 손상 및 광 흡수율 문제를 해결할 수 있어서 많은 장점을 지니고 있다. 이에 기존 연구들에서는 주로 재료에 대한 반사율이 낮고 빔 사이즈 축소가 용이한 단파장 나노초 레이저가 사용되었다.<sup>(6,7)</sup> 최근 연구에서는 가공 장비가 비교적 저렴하면서 고출력 발진이 용이한 근적외선 영역의 장파장 나노초 레이저를 활용한 습식 후면 식각공정 드릴링에 대한 사례도 있었다.<sup>(8)</sup> 하지만 기존의 드릴링에 대한 연구 사례는 구조물을 제작하는 것이 아닌 단지 관통구멍을 만드는 것에 대한 연구였기 때문에 밀링 가공과는 달리 가공되는 표면에 대해 고려하지 않은 실험이었다.

이에 본 논문에서는 나노초 펄스레이저 중에서 비교적 장비 가격이 저렴한 근적외선 파장의 1064 nm 레이저를 이용해 레이저 습식 후면 식각공정으로 유리에 미세 밀링 3D 구조물 제작을 시도해보았다. 또한 기존 드릴링 연구에서도 지적한 바와 같이 열에 기반한 적외선 가공 시 가장 문제시 되는 기포 문제를 최소화하기 위한 가공 조건 선정 및 초음파 부가를 통한 밀링 가공 시, 형상 개선 가능성을 확인해 보았다.

## 2. 실험 구성

본 연구에서는 레이저 습식 후면 식각공정 (LIBWE)을 이용해 미세 밀링 구조물을 가공하였다. 레이저 습식 후면 식각공정의 원리는 Fig. 1에 보인바와 같이 유리에 조사된 레이저가 그대로 광 투과성 재료를 통과하여 유리후면에 있는 광 흡수성이 우수한 흡광용액과 반응을 일으켜 간접적으로 유리를 가공하는 방법이다. 즉, 레이저가 유리 뒷면에 있는 흡광용액과 만나는 순간 용액이 국부적으로 가열되고, 그 결과 고온의 열에너지를 지니게 된 용액은 순간적으로 기화하여 급격히 팽

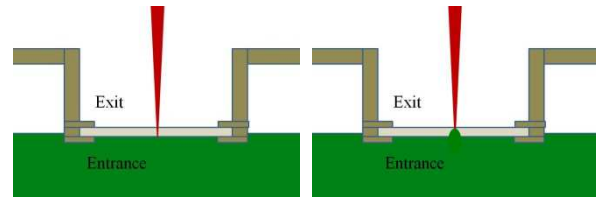


Fig. 1 Conceptual diagram of Laser-induced backside wet etching

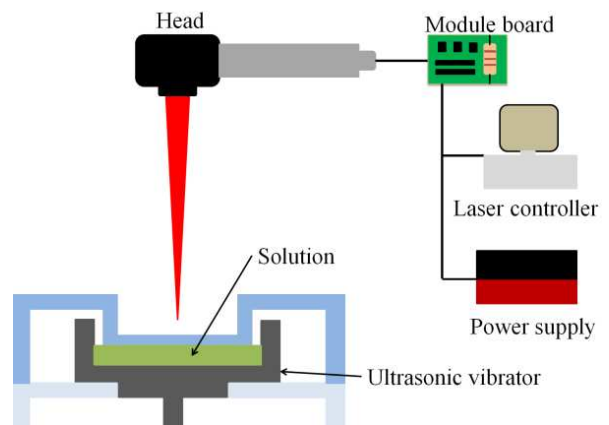


Fig. 2 Schematic diagram of laser machining system

창하면서 유리표면을 용융시킨다. 이때 발생하는 기포 및 충격파는 용융된 유리를 물리적으로 제거하여 식각공정을 원활하게 한다. 이러한 과정이 반복적으로 발생하면서 상당히 많은 양의 기포가 서로 뭉쳐져서 점차 발달하게 되고 이렇게 커진 기포는 가공이 진행될수록 가공을 방해하게 된다. 이에 본 연구에서는 깊은 형상 가공을 위해 초음파를 사용하는 것으로 기포성장을 방지하며 유리 식각공정을 원활하게 하려 한다.

연구에 사용되는 장비는 크게 레이저와 초음파로 나뉘어 볼 수 있다. 레이저는 SPI Lasers 사의 Pulsed Fiber Laser로 발진 매질은 Nd:YAG를 사용한다. 레이저의 파장은 1064nm 이고, 최대출력은 20W, 최고 펄스 반복율은 500kHz, 펄스 폭은 200ns 이다. 갈바노미터를 활용하여 밀링 구조물을 제작하므로 렌즈는 초점거리 163mm 를 지닌 F-theta 렌즈를 사용하였다. 그 결과 최종 공작물에 맺히는 스팟 사이즈는 60~70 $\mu$ m 이다. 기포발생 억제 및 용액의 원활한 순환 목적으로 사용하는 초음파 가진기는 28kHz, 40W 제품을 사용하였다. 실험에 사용될 시편으로는 0.7mm 두께의 파이렉스 25mm $\times$ 25mm 를 사용하였다. Fig. 2 는 전체적인 실험 장치의 구성도를 보여준다. 실험 시, 초음파로 인해 용액 외 다른 장치들이 진동되지

얇게 용액 수조와 시편 지지대를 MC Nylon 재질의 브릿지 구조로 분리시켰다. 가공 형상은 Ez CAD 프로그램을 사용하여 갈바노 미터가 적절히 레이저 빔을 이송시키도록 하였으며 가공 조건 선정을 위해 가로 1mm 세로 0.4mm 크기의 사각형상을 가공하여 특성을 살펴보았다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 레이저 조건에 따른 가공형상

장파장 레이저를 이용한 습식 후면 식각공정에서 밀링 가공을 수행한 사례가 전무하므로 우선 기초 가공 조건을 선정하기 위해 레이저 변수들을 변화하여 실험하였다. 빠른 가공속도를 유지하기 위해서 레이저의 평균 출력은 최대치인 20W 로 고정하여 실험하였으며 가공 시 중요한 변수인 펄스당 에너지와 중첩률을 변화시켜 가공양상을 살펴보았다.

##### 3.1.1 펄스당 에너지에 따른 가공형상

펄스당 에너지는 레이저가 1 회 조사 시 가해주는 에너지 양이다. 즉, 펄스당 에너지는 레이저를 이용하여 가공 시 재료의 단위 제거량에 큰 영향을 끼치므로 가공속도, 표면 거칠기, 정밀도 등에 큰 영향을 미친다. 펄스당 에너지를 변화시키기 위해서는 레이저의 평균 출력이나 주파수를 변화하면 된다. 하지만 재료 제거율을 최대한 높이면서 가공하기 위하여 평균 출력은 최대치인 20W 로 고정하기로 하였으므로 본 실험에서는 주파수를 변화하여 펄스당 에너지를 조절하였다. 기타 가공에 큰 영향을 미치는 레이저 빔 중첩률, 가공 시간 등을 일정하게 고정시키기 위하여 Table. 1 에 보인 바와 같이 사용된 주파수에 따라 갈바노 스캐너의 이송 속도와 가공 반복 횟수를 변화시켜 주었다. Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 비교적 펄스당 에너지가 큰 (a), (b)에서는 간헐적으로 과도한 기포 폭발 및 재료 제거가 발생하여 형상의 가장자리 부분에서 깨짐 현상이 일부 관찰되었다. 이보다 펄스당 에너지가 낮은 (c)와 (d)의 경우에는 테두리 부분에서 큰 파손없이 비교적 깨끗하게 가공이 이루어 졌음을 확인할 수 있었다. 가공깊이는 (c), (d) 모두 약 40~50 $\mu\text{m}$  정도로 비슷한 수준이다. 하지만 펄스당 에너지가 이보다 더 작은 (e)의 경우 가공은 이루어졌으나 1 회 가공시 에너지가 너무 낮아 불안정한 가공이 발생하였다. 그 결과 위치에 따라 좌측은 10 $\mu\text{m}$ , 우측은 35 $\mu\text{m}$  의 깊이만큼 가공이 이루어졌으며 이는 불균일한 가공이 발

Table 1 Conditions of each energy per pulse

Number	Freq. (kHz)	Scan speed (mm/sec)	Energy per pulse (mJ)	Loop
(a)	25	150	0.8	1429
(b)	30	180	0.66	1715
(c)	40	240	0.5	2287
(d)	50	300	0.4	2858
(e)	60	360	0.33	3430

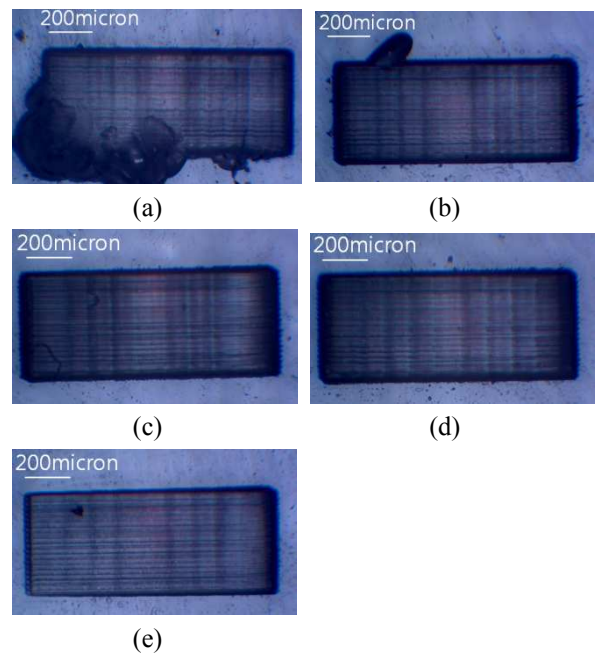


Fig. 3 Laser milling according to the energy conditions; (a) 0.8mJ, (b) 0.66mJ, (c) 0.5mJ, (d) 0.4mJ, (e) 0.33mJ

생하였다는 것을 의미한다. 또한, 이보다 더 펄스당 에너지를 낮춘 경우에는 아예 가공이 관찰되지 않음을 확인하였다.

##### 3.1.2 중첩률에 따른 가공형상

레이저 가공 시, 펄스당 에너지 외에 또 하나의 중요한 변수는 빔 스팟의 중첩률이다. 중첩률은 레이저가 조사될 때, 펄스형태로 조사되는 레이저 빔이 스팟 사이즈로 인해 겹쳐지는 비율을 의미한다. 중첩률은 에너지의 집중 또는 분산과 밀접한 관련이 있기 때문에 가공에 큰 영향을 미치는 요인이다. 실험에 사용된 중첩률은 식 (1)과 같이 정의되므로 스팟 사이즈, 주파수, 빔 이송 속도에도 영향을 받는다는 것을 볼 수 있다. 스팟 사이즈는 렌즈 스펙에 의해 결정되는 상수이며 주파수는 앞

$$O = 1 - \left(\frac{S}{D \times F}\right) \times 100(\%) \quad (1)$$

O : Overlapping rate  
 S : Scan speed  
 D : Diameter of spot  
 F : Frequency

선 실험에서 펄스당 에너지 변화를 위해 조건별 실험을 진행하였으므로 이를 통해 얻어진 값을 사용하였다. 이에 중첩률 변화를 위해서는 갈바노스캐너의 이송 속도를 조절하였다.

Table 2 에 보인 바와 같이 스캐너의 이송속도에 따라 중첩률을 변화시켰으며 이때 총 레이저 조사 시간을 동일하게 맞추기 위하여 가공 반복 횟수도 함께 변화시켜 주었다. 그 결과 Fig. 4 (a)나 (b)에 보인 바와 같이 비교적 중첩률이 높은 경우에는 가공 부위에 과도한 에너지 집중으로 인해 탄 자국 및 미세 크랙이 발생하며 불규칙적인 손상이 발생함을 볼 수 있다. 중첩률이 90% 정도인 경우에는 비교적 깨끗한 형상으로 가공이 이루어졌으나 이보다 낮은 (d) 조건과 같은 86%인 경우에는 에너지가 과도하게 분산되어 가공이 전혀 발생하지 않았다.

Table 2 Conditions of each overlapping rate

Number	Freq. (kHz)	Scan speed (mm/sec)	Overlapping rate (%)	Loop
(a)	50	100	97	953
(b)	50	210	93	2000
(c)	50	300	90	2858
(d)	50	400	86	3811

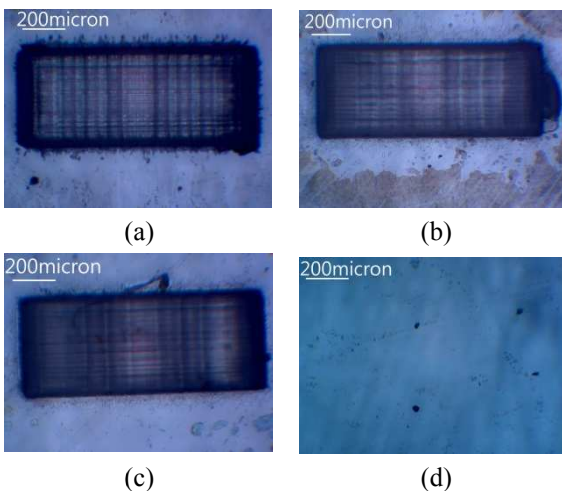


Fig. 4 Laser milling according to overlapping rate conditions; (a) 97%, (b) 93%, (c) 90%, (d) 86%

3.1.3 고세장비 구조물

앞선 실험을 토대로 레이저 습식 후면 식각공정 시 가공 조건에 따른 형상 변화를 살펴 볼 수 있었다. 이를 통해 얻어진 가공 조건을 이용하여 가공 반복 횟수 증대를 통한 밀링가공의 깊이를 증가시키는 실험을 진행해 보았다. 가공 조건은 펄스당 에너지는 0.4mJ, 중첩률은 90% 가 되도록 설정하였으며 기존 반복 가공 횟수를 3 배 정도 증가시켜 10,000 회로 변경하여 실험하였다.

하지만, 가공횟수를 증가시킬 경우 가공이 진행됨에 따라 가공 중 발생한 미세 기포가 점점 발달하여 Fig. 5(a)에 보인 바와 같이 매우 커지는 현상이 관찰되었다. 그 결과 Fig. 5(b)에 보인 바와 같이 가공 중 기포가 생겼던 부분 주위에 가공 찌꺼기와 탄 자국이 발견되었고, 불규칙적인 가공이 발생한 것을 볼 수 있었다. 이는 Fig. 5(c)의 전자현미경 사진에서 더욱 확연히 관찰되었다. 즉, 가공 모서리 부위로 전체적으로 미세 크랙과 불규칙 가공이 관찰되며 일부분에서는 찌꺼기가 용착된 모습도 관찰되었다. 이는 습식 후면 식각공정은 Fig. 6 과 같은 과정의 반복으로 진행되므로, 그 과정에서 가공 중 발생한 가공 찌꺼기와 용액 결정이 지속적으로 흡광 용액 순환에 의해 제거되어야만 한다. 하지만 가공되는 부분이 크게 발달된 기포 내부에 갇히게 되면 거대 기포가 가공부위의 용액 순환과 찌꺼기 배출을 방해하여 불규칙적인 가공과 파손을 유발하는 것이다.

3.2 초음파 부가가공

기포에 의한 문제를 해결하기 위해 스테러 등으

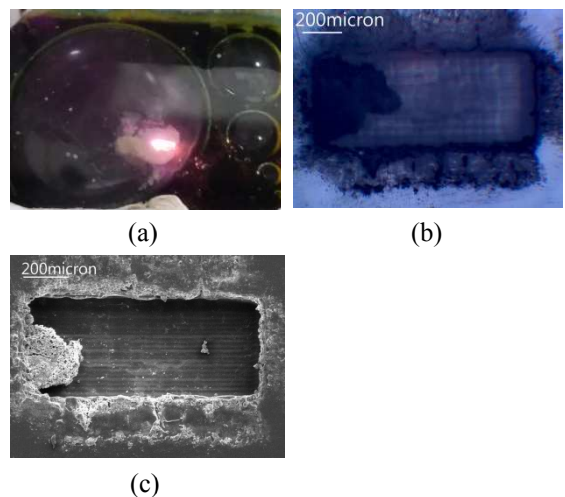


Fig. 5 Advanced laser milling; (a) during machining, (b) machined result, (c) SEM picture



Fig. 6 Process of Laser-induced backside wet etching

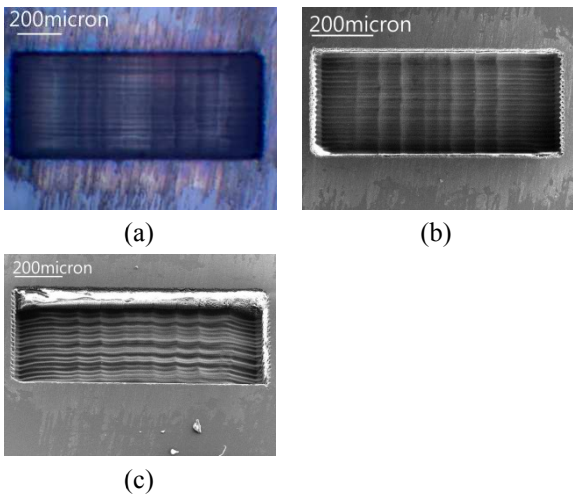


Fig. 7 LIBWE milling with ultrasonic vibration (Depth 250µm); (a) tool microscope, (b) SEM picture, (c) tilted image

로 용액을 지속적으로 순환시켜 가공 중에 기포를 제거할 수도 있다. 하지만 미세 형상에서 가공 깊이가 깊어지면 스테러의 효과는 급격히 줄어들기 때문에 깊은 형상의 가공에는 한계를 갖고 있다. 이에 본 연구에서는 스테러 대신 기존 드릴링 가공에서 사용되었던 초음파장비를 이용해 밀링 가공을 진행하였다. 초음파 진동에 의해 발생하는 미세 진동은 기포가 뭉쳐지는 것을 방지하고 분산시켜 기포 성장을 억제할 수 있으며 또한, 초음파 진동은 미세 형상 내부에도 효과적으로 침투할 수 있어서 유리 표면에 깊은 형상을 지닌 밀링가공을 가능하게 할 것이다.

모든 가공 조건은 앞선 실험과 동일하게 유지한 채로 초음파 가진만 추가적으로 부여하였다. 진동에 의한 형상왜곡을 최소화하기 위하여 용액에만 진동을 주도록 브릿지 형태로 시편을 설치하였다.

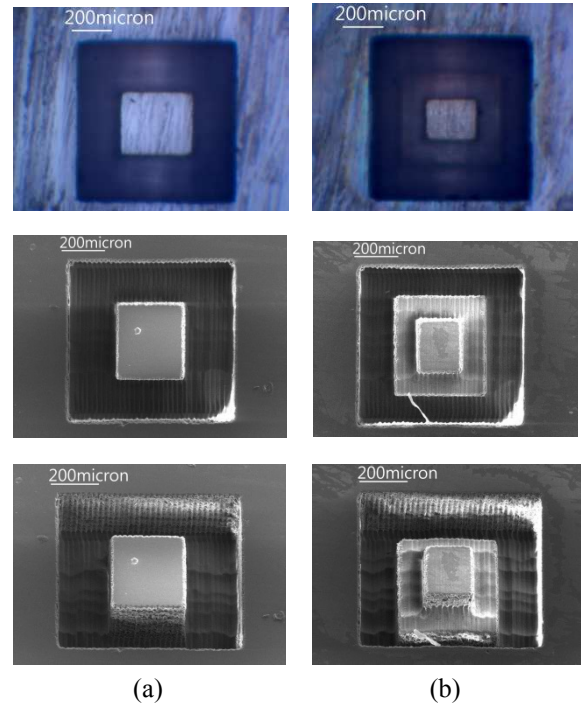


Fig. 8 Advanced structure laser milling; (a) square pillar, (b) multi-layered structure

가공 반복횟수는 앞선 실험에서 거대 기포에 의해 유리 손상이 발생한 10,000 회를 동일하게 사용하였다. 그 결과 Fig. 7 에 보인 바와 같이 총 가공 깊이 250µm 구조물 밀링 가공이 가능하였다. Fig. 5(a)와는 달리 가공 중 발생하는 기포들을 초음파 진동이 빠르게 비산시키고 캐트러 용액 순환 및 찌꺼기 배출에 도움을 줄 수 있었다. 즉, 얇은 깊이의 구조물을 가공할 시에는 초음파 유무가 결과에 큰 영향을 미치지 않지만 기포가 크게 발달하는 깊은 형상 가공 시에는 초음파 유무에 따라 가공 결과가 크게 달라짐을 확인할 수 있다.

### 3.3 다양한 형상 가공

초음파 가진이 깊은 형상의 밀링 가공이 가능하도록 해준다는 것을 확인하였기에 좀 더 다양한 마이크로 형상 구조물 제작을 통해 제안된 공정의 범용적인 적용 가능성을 확인해 보았다.

우선은 0.7mm×0.7mm 사각구조물 안에 0.3mm×0.3mm 크기의 사각기둥을 남김으로써 레이저를 이용한 습식 후면 식각방법으로 입체적인 구조물도 가공이 가능한지 살펴 보았다. Fig. 8(a)에 보인 바와 같이 가공된 구조물의 깊이는 280µm 가공되었으며 모서리 경계 부분도 깔끔하게 가공이 되었음을 볼 수 있다.

또한 가공 깊이 제어를 통해 다단 구조의 가공이 가능한지 살펴 보았다. 0.7mm×0.7 mm 크기의

사각형상 내부에  $0.4\text{mm} \times 0.4\text{mm}$  크기의 사각기둥 형상을 가공하고 가운데 부위에 다시  $0.2\text{mm} \times 0.2\text{mm}$  크기의 사각기둥이 있는 형태로 구조물을 가공하였다. 구조물의 총 깊이는  $280\mu\text{m}$  이며 각 기둥의 높이는 각각  $140\mu\text{m}$  이다. 즉, Fig. 8(b)에 보인 바와 같이 다층의 형상가공에서도 구조물의 모서리 및 깊이가 뚜렷하게 가공됨을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 레이저 습식후면 식각공정과  $1064\text{nm}$  나노초 레이저를 이용하여 유리에 밀링가공을 수행하였다. 기존 실험결과가 거의 전무하였기 때문에 펄스당 에너지와 중첩률을 변화시키면서 가공 양상의 변화를 관찰하였으며 이를 토대로 적절한 가공 조건을 선정하였다. 과도하게 높은 에너지나 중첩률은 재료의 손상과 정밀도 저하를 유발한 반면에 낮은 에너지와 중첩률은 원활한 가공이 불가능하여 가공 자체가 발생하지 않았다. 실험을 통해 얻어진 가공 조건을 기반으로 가공 깊이 증대를 위해 반복 가공횟수를 증가시켰다. 하지만 가공 깊이가 깊어질수록 발생된 기포가 가공 부위 바깥으로 배출되기 어려워 서로 뭉쳐져서 큰 기포로 발달됨을 관찰할 수 있었다. 이렇게 발생된 대형 기포는 가공 부위 전체를 뒤덮어서 용액 순환 및 가공 찌꺼기 배출을 저해하여 가공 진행을 방해하고 불규칙적인 가공을 유발함으로써 재료 파손 및 형상 정밀도 저하를 야기하였다. 이에 용액에 미세 초음파 진동을 적용하여 발생하는 기포 및 찌꺼기를 빠르게 외부로 배출하고 기포의 뭉쳐짐에 의한 성장을 억제하였다. 이를 통해  $250\mu\text{m}$  이상의 깊은 형상을 지닌 구조물의 미세 가공이 가능하였으며 더 나아가 다양한 형상을 지닌 다단 구조물 등에 대한 미세 가공도 가능성을 보였다.

결과적으로, 적외선 레이저와 초음파 진동 장치를 이용한 습식 후면 식각공정으로 유리에 밀링가공이 가능하다는 것을 확인할 수 있었으며 이를 통해 낮은 장비비를 투입하여 비교적 높은 형상정밀도를 지닌 미세 유리 구조물을 고속으로 가공하여 생산성을 높일 수 있다는 가능성을 확인하였다.

#### 후 기

이 논문은 2014 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (NRF-2013R1A1A1010468)

#### 참고문헌 (References)

- (1) Jeon, S. K., Shin, Y. J., Kim, B. H., Kim, H. Y. and Jeon, B. H., 2003, "Micro-Machining of Glasses Using Chemical-Assisted Ultrasonic Machining," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 27, No. 12, pp. 2085~2091.
- (2) Chu, C. N., Kim, G. M., 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.
- (3) Hong, J. H., Kim, B. H., Kim, D. H. and Chu, C. N., 2007, "Roundness Improvement and Exit Crack Prevention in Micro-USM of Soda Lime Glass," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 10, pp. 1039~1045.
- (4) Kim, K. H., Choi, J. S. and Park, D. S., 2002, "Effect of Nozzle Scanning in Micro Grooving of Glass by Powder Blasting," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 26, No. 7, pp. 1280~1287.
- (5) Kim, J. G., Nam, K. G., Cho, S. H., Chang, W. S., Na, S. J. and Whang, K. H., 2006, "Micromachining Characteristics Inside Transparent Materials Using Femtosecond Laser Pulses," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 190~196.
- (6) Cheng, J. Y., Mousavi, M. Z., Wu, C. Y. and Tsai, H. F., 2012, "Blue Light Plasma Emission During LIBWE Using 532 nm Q-switched Nanosecond Laser," *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 87~92.
- (7) Mitsuishi, M., Sugita, N., Kono, I. and Warisawa, S., 2008, "Analysis of Laser Micromachining in Silica Glass with an Absorbent Slurry," *CIRP Annals*, Vol. 57, pp. 217~222.
- (8) Kim, H. M. and Park, M. S., 2014, "Glass Drilling Using Laser-Induced Backside Wet Etching with Ultrasonic Vibration," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 75~81.