광섬유 전송 시스템을 이용한 새로운 레이저 마이크로 제조기술 개발

Development of a new laser microfabrication technique using the fiber-delivery system

*오광환, 임현덕, #정성호

*Kwang H. Oh, H. D. Im, #S. H. Jeong (shjeong@gist.ac.kr)

광주과학기술원, 정보기전공학부

Key words : Laser material processing, laser micromachining, laser-induced etching, microchannel, microhole, microdevice

1. 서론

레이저를 이용한 수 ~ 수십 μm 크기의 마이크로 구조물 제조기술은 정밀가공 분야에서 현재 주목 받고 있는 첨단 기술이다. 특히, 최근 들어 펨토초 레이저를 이용한 마이크로 가공(laser micromachining)은 재료에 상관없이 정밀하고 열변형이 없는 깨끗한 형상의 구조물을 형성할 수 있다는 이유로 마이크로채널(microchannel) 또는 구멍 구조를 가지는 마이크로 열소자 및 유체소자 제조에 많이 응용되고 있다.[1] 더 나아가 마이크로 소자(microdevice)를 기반으로 한 마이크로 시스템 제조와 그 응용 분야에까지 활용되므로 마이크로채널 및 마이크로구멍(microhole) 가공을 위한 초정밀 가공기술은 관련기술 및 산업화의 발전에 크게 기여할 것으로 기대된다. 그러나 펨토초 레이저가공은 복잡한 광학계 구성의 기반에서 이루어지며 작업자가 쉽게 다룰 수 없다. 뿐만 아니라 시스템 자체가 고가이며 가공 생산성 향상 및 고속 가공을 위하여 스캐너(scanner) 혹은 주파수 변조기(frequency modulator)를 추가해야 하므로 가격 경쟁력이 많이 떨어진다.

이에 반하여 조사된 레이저빔에 의해 소재가 에칭 반응이 일어날 수 있는 온도까지 유도됨으로써 에칭용액과 소재 사이에 일어나는 열화학반응으로 레이저빔의 조사 영역에서만 선택적인 소재의 제거가 가능한 레이저유도 에칭(laser-induced etching)은 낮은 레이저강도로 구조물 가공이 가능할 뿐만 아니라 에칭용액의 대류 냉각에 의한 적은 열변형 등의 장점 때문에 마이크로채널 및 구멍 가공을 비롯한 레이저 재료가공(laser material processing) 분야에서 많이 응용되고 있다.[2, 3] 일반적인 레이저유도 에칭시스템의 경우, 다른 레이저가공 시스템과 유사하게 레이저로부터 나온 빔을 소재 표면까지 가져가기 위해 비교적 많은 광학계를 필요로 하고 있기 때문에 잦은 광정렬이 요구될 뿐만 아니라 작업자가 쉽게 레이저빔에 노출될 수 있다. 또한, 마이크로 구조물 제조를 위해 하나의 집광 렌즈를 이용하기 때문에 가공 생산성 향상을 기대하기도 어렵다. 따라서, 복잡한 광정렬의 문제를 극복함과 동시에 가공 생산성 향상까지 도모할 수 있으며 산업 현장에서 쉽게 적용될 수 있는 새로운 레이저 마이크로 가공기술 개발이 필요하다.

본 연구에서는 기존의 레이저유도 에칭시스템이 가지는 문제점인 광정렬의 어려움과 작업자의 레이저빔에 대한 노출을 간단히 해결하고 더 나아가 가공 생산성 향상까지 기대할 수 있는 광섬유 전송 시스템을 이용한 마이크로 구조물 제조기술을 제안하였다. 제안된 기술에서 광섬유는 레이저빔을 거의 손실 없이 소재의 표면까지 전송할 수 있는 광도파로와 직접 가공에 이용되는 도구로서의 역할을 한다. 높은 열전달율과 우수한 성형성을 가지는 스테인레스 강(STS-304) 박판 상에 본 가공기술을 적용하여 마이크로채널과 마이크로구멍을 가공하는 방법을 제시한다. 레이저출력, 레이저빔의 이송속도 등과 같이 다양한 공정변수들이 제조되는 마이크로 구조물의 특성에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서 자세히 보고된다. 또한, 마이크로 소자 제작에 본 기술의 적용 가능성 여부를 위해 유기 LED(OLED)용 인바(Invar^R) 세도우 마스크 제조방법에 대해서도 보고된다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1 은 본 연구에서 제안된 광섬유 전송 시스템을 이용한 레이저유도 에칭 실험장치를 나타낸다. 에칭용액과 소재 사이의 화학반응을 유도하기 위한 열원으로 532 nm pulsed Nd:YAG 레이저(P_{max}=60 W, f_{max}=10 KHz)와 532 nm CW Nd:YVO_4 레이저(P_{max}=8 W, M^2<1.1)가 각각 마이크로채널과 구멍 가공에 이용되었다. 광섬유 코어에 레이저빔의 원활한 입사를 위해 5 배 대물렌즈를 이용하여 빔을 집속하였으며 입사된 레이저빔은 광섬유를 통해 어떠한 광학계도 거치지 않고 손실 없이 소재 표면까지 전송된다. 광섬유는 코어 직경이 각각 50 μm 와 105 μm 인 다중모드 광섬유이며 직접 가공 도구로 이용하기 위해 한쪽 끝은 페룰(ferrule)에서 2 ~ 3 mm 정도 돌출되었다. 페룰은 광섬유 홀더에 고정이 되고 광섬유 홀더는 정밀 이송을 위한 모터 구동형 X-Y-Z 스테이지에 고정된 지그(jig)에 장착되었다. 에칭용액은 정량 펌프(peristaltic pump)를 통해 챔버 내부로 순환되며 챔버는 화학반응의 방지를 위해 테플론(Teflon^R) 재료를 이용하여 직접 설계 및 제작되었다. 마이크로 구조물 제조실험을 위해 1×1 cm^2, 두께 500 μm 의 STS-304 박판이 이용되었으며 유기 LED 용 세도우 마스크 제작을 위해서는 0.8×0.8 cm^2, 두께 50 μm 의 Invar^R 박판이 사용되었다. 에칭용액은 각각 증류수에 희석된 인산(H_3PO_4, 85%)과 황산(H_2SO_4, 98%) 수용액이며 에칭 공정의 전 과정은 CCD 카메라를 통해 실시간으로 관찰되었다.

3. 결과 및 논의

레이저유도 에칭 가공 시 피할 수 없는 현상 중의 하나가 미세기포의 발생이며 이러한 기포는 생성, 성장, 터짐을 반복하며 Fig. 2 에서와 같이 광섬유를 용융 또는 파손시킨다. 따라서, 레이저출력(P)에 따라 시편과 광섬유 사이를 적당히 이격 시켜 생성된 기포가 원활하게 빠져 나갈 수 있도록 하는 것이 본 시스템을 이용한 마이크로 구조물 제조 시 가장 중요한 요인이 된다. 광섬유와 시편 사이의 최소 이격 거리를 본 논문에서는 'D_{th}'로 정의하였으며 Fig. 3 은

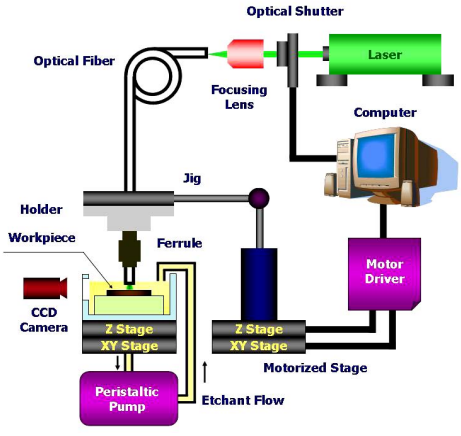
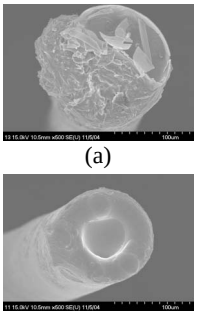


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed experimental setup for laser-induced etching with an optical fiber



(a) (b)

Fig. 2 Fiber damage; (a) fracture and (b) melting

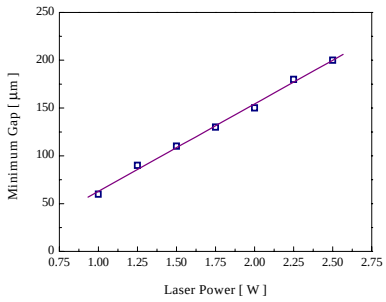
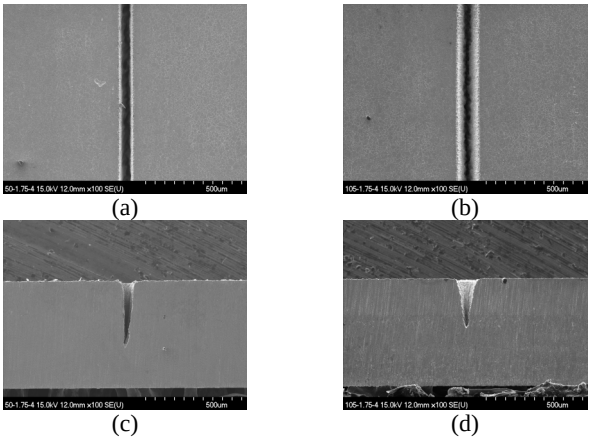


Fig. 3 Minimum gap between the fiber tip and the workpiece to prevent the fiber damage due to bubbles

각각의 레이저출력에 따른 D_{th} 의 변화를 보여주고 있다.

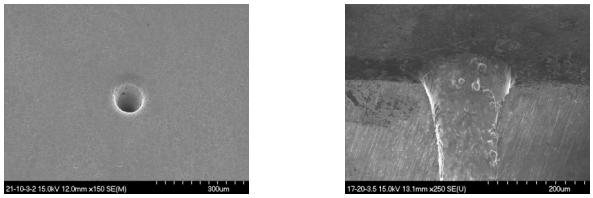
Fig. 4 는 50 μm 와 105 μm 의 코어 직경(D_{core})을 가지는 광섬유로 전송된 pulse Nd:YAG 레이저빔의 1 회 조사로 가공된 마이크로채널의 표면과 단면을 각각 보여준다. 마이크로채널의 표면은 광섬유 코어의 크기에 상관없이 깨끗한 형상을 가지며 50 μm 코어의 광섬유일 때 좁은 선폭의 채널이 제조됨을 Fig. 4(a)와 4(b)에서 알 수 있다. 그러나 Fig. 4(c)와 4(d)에서와 같이 단면의 경우, 같은 레이저출력에 대하여 광섬유의 코어 직경이 작은 50 μm 일 때 깊이가 훨씬 깊은 채널이 제조되는데 이것은 시편 표면에 조사되는 레이저빔의 단면적 감소에 의한 레이저 강도의 증가에 따른 결과이다. 또한, 광섬유의 이송속도(V)가 증가함에 따라 제조된 채널의 선폭은 거의 변화가 없으나 깊이는 지수 함수적으로 감소됨을 실험적으로 알 수 있었다. 그 이유는 빠른 이송속도에 의해 시편에 조사되는 레이저 에너지가 상대적으로 감소할 뿐만 아니라 채널 벽면에 흡수 및 산란되는 에너지 손실에 의해 채널의 바닥 면까지 충분한 다중반사(multi-reflection)를 일으키지 못하여 에칭이 원활하게 일어나지 않기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 레이저유도 에칭으로 좁고 깊은 채널을 제조하기 위해서는 코어 직경이 작은 광섬유를 이용하는 것이 유리하며 레이저출력과 이송속도를 적절히 조절함으로써 원하는 세장비(aspect ratio)의 채널을 쉽게 제조할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5 는 본 실험으로 제조된 마이크로구멍의 표면과 단면을 나타낸다. 마이크로구멍 제조의 경우 CW Nd:YVO_4 레이저와 105 μm 의 코어를 가지는 광섬유가 이용되었다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 마이크로구멍의 경우도 마이크로채널과 마찬가지로 열변형이 거의 없는 우수한 표면 형상을 가짐을 알 수 있다. 일반적으로 레이저를 이용해 가공



(a) (b) (c) (d)

Fig. 4 SEM images for the (a), (b) surface morphology and (c), (d) cross-sectional profile of the microchannels fabricated in H_3PO_4 with 50 μm and 105 μm core fibers. Other process variables are P=1.75 W, V=4 μm/s and D_{th}=130 μm



(a) (b)

Fig. 5 SEM images for the (a) surface morphology and (b) cross-sectional profile of the microhole processed in 30% H_3PO_4. Other process variables are P=2.5→3.5 W, D_{core}=105 μm and D_{th}=200 μm

된 구멍은 상, 하부의 직경이 다르기 때문에 직벽의 단면 구조를 가지기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결함과 동시에 가공 시간을 단축시키기 위하여 본 연구에서는 광섬유를 직접 가공부(key hole)로 삽입한 후 주기적으로 진동하여 가공하고 가공 중에 레이저출력을 증가시켜 시편의 바닥까지 충분한 에너지를 공급할 수 있는 방법을 제안하였다. 결과적으로 Fig. 5(b)에서와 같이 거의 직벽의 단면을 가지는 구멍을 제조할 수 있었으며 광섬유를 고정시키고 가공할 때와 비교해 볼 때 가공 시간을 약 1/3 정도로 감소시킬 수 있었다. 제조된 마이크로구멍의 상, 하부 직경은 각각 130 μm 와 125 μm 로 측정되었다.

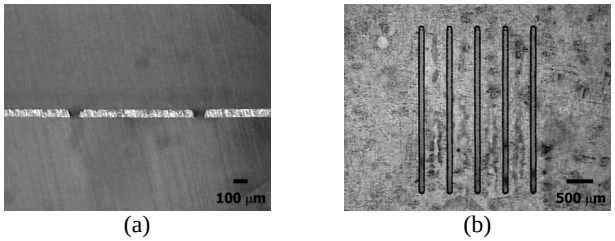
본 연구에서 제안된 레이저유도 에칭기술의 마이크로소자 제조에의 응용 가능성을 조사하기 위해 Fig. 6 에서와 같이 OLED 용 Invar^R 세도우 마스크를 제작하였다. 금속마스크의 단면은 Fig. 6(a)에서와 같이 역사다리꼴의 형태를 가지며 제조된 마이크로채널은 균일한 수치와 우수한 표면 형상을 보임을 Fig. 6(b)에서 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 제안된 광섬유 전송 시스템을 이용한 레이저유도 에칭기술은 낮은 레이저출력 및 짧은 가공 시간으로 우수한 형상의 마이크로 구조물을 제조하는데 효과적으로 이용될 수 있을 뿐만 아니라 마이크로채널 및 구멍을 기반으로 하는 마이크로 열소자 및 유체소자 제작에도 유용하게 응용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Rizvi, Nadeem H., “Femtosecond laser micromachining: current status and applications,” RIKEN Rev. **50**, 107-112, 2003.
2. 오광환, 이민규, 정성호, “고세장비 미세채널 기반의 마이크로 히트파이프 설계 및 제조,” 한국 정밀공학회지, **23**, 164-173, 2006.
3. Oh, Kwang H., Lee, M. K., and Jeong, S. H., “Laser micromachining of high-aspect-ratio metallic grooves for application to microthermal devices,” J. Micromech. Microeng. **16**, 1958-1966, 2006.



(a) (b)

Fig. 6 Photographs for (a) the cross-sectional profile of Invar^R microchannels fabricated in 10% H_2SO_4 and (b) a prototype Invar^R shadow mask for an OLED. Process variables are P=2.25 W, V=12.5 μm/s, D_{core}=105 μm and D_{th}=180 μm