

# 레이저유도 습식에칭에 의한 고세장비 마이크로채널 제조

## Fabrication of high-aspect ratio micro-channels with laser-induced wet etching

광주과학기술원 기전공학과 오광환, 이민규, 정성호

### I. 서론

급속도로 초소형화 및 고밀도화 되어가고 있는 첨단제품(기계, 전기, 전자, 화학, 의료 및 통신 분야)의 핵심적인 부품 및 소재에서 발생하는 열의 효율적인 제거를 위해 마이크로 열교환기(micro heat pipe)와 같은 열소자가 활용되고 있으며 효율적인 마이크로 열소자의 제조를 위해서는 특히 열전달계수가 큰 금속 재료에 수십~수백 마이크로미터 크기의 채널 구조를 정밀하게 가공할 수 있는 기술이 요구된다 현재 산업분야에서 이용되고 있는 초정밀 가공기술은 기계가공, 반도체공정, 레이저 어블레이션, 전자빔가공 등 다양하게 활용이 가능하나 각 기술별로 장단점이 다르며 이에 따라 활용대상도 달라진다 기존의 반도체 공정으로는 수 마이크로미터 이하의 크기는 매우 정밀하게 가공할 수 있으나 오히려 수십~수백 마이크로미터 두께의 금속과 같은 재료의 가공에는 불리하며 초정밀 기계가공의 경우, 수십 마이크로미터 이하의 크기로 가공하기에는 많은 기술적 제약이 있다 이외에 초미세 가공으로 전자빔가공이나 X선을 이용한 LIGA공정 등이 있으나 진공에서 가공해야 하던지 X선 발생장치가 필요하다는 공정상 어려움뿐만 아니라 장비가 매우 비싼 단점이 있다

반면, 레이저유도 습식에칭(Laser-induced wet etching, 이하 레이저에칭)을 이용한 초정밀 가공의 경우, 금속과 에칭용액 사이에서 일어나는 화학반응에 레이저를 열원으로 이용하여 원활한 반응이 일어나게 유도하므로 레이저 어블레이션 기술에 의한 가공에 비해 열영향부가 없는 깨끗한 형상의 마이크로채널 구조를 제작할 수 있으며, 기계가공으로는 힘든 작은 크기의 구조도 가공할 수 있을 뿐만 아니라 비교적 단순한 장치를 이용하는 공정이므로 가격 경쟁력에서도 우수한 면을 보인다[1-3]

본 연구에서는 시·공간적으로 균일한 에너지 분포와 안정적인 출력 특성을 가지는 DPSS 레이저를 이용하여 크롬(Cr)이 18% 함유되어 내식성, 우수한 성형성 및 높은 열전달계수를 가지는 스테인레스 스틸(stainless steel, STS-304, 이하 STS-304) 박편 상에 레이저에칭 기술로 원하는 형상을 따라 레이저 초점을 이동시키면서 조사영역에서 직접적인 소재의 제거와 구조 형성이 동시에 일어나게 하는 직접묘화(direct writing) 방식을 적용하여 비교적 간단한 공정으로 마이크로채널 구조를 가공하였다 또한, 레이저출력, 이송속도, 반속이송횟수, 에칭용액의 농도 등을 공정 변수로 하여 가공된 금속 시편의 표면 및 단면을 분석하고 최적의 공정 조건을 도출하였다 끝으로, 이러한 최적의 공정 값을 STS-304 시편에 직접 적용하여 마이크로 열시스템의 하나인 마이크로 열교환기 제작의 가능성을 제시하였다

### II. 실험방법

마이크로채널 구조물의 제작을 위한 레이저에칭 실험 장치를 Fig 1에 나타내었다 실험에 사

용된 레이저 광원은 532nm의 중심 파장을 갖는 DPSS Nd:YVO<sub>4</sub>(Coherent, Verdi V8, P<sub>max</sub>=8W) 레이저이다 DPSS 레이저빔은 시편 표면에서 집속 효율을 높이고 빔 경로상의 다른 광학계를 보호하기 위하여 5배 빔확대기를 거친 후, 선형편광기(polarizing beam splitter)와 1/4파장판(quarter wave plate)을 거쳐 원형편광(circularly polarization)으로 변환된다 선형편광 된 레이저빔을 원형편광으로 만드는 이유는 시편 표면에서 반사된 레이저빔이 레이저 시스템으로 다시 들어가서 장치를 손상시키는 것을 방지함과 아울러 편광 방향에 따른 가공 결과의 변화를 최소화하기 위함이다 이렇게 1/4파장판을 지난 빔을 현미경용 5배 대물렌즈(Mitutoyo, NIR 5X, NA=0.14, DOF=14μm)를 이용하여 시편 표면에 집속하였다 에칭용액과 시편이 담겨진 챔버는 X-Y-Z 미세 이송계(Suruga Seiki, K701-20LMS) 위에 고정되어 있으며, 화학반응을 방지하기 위해 테플론(Teflon<sup>®</sup>) 재질을 이용하여 제작하였다 미세 이송계는 정밀도가 1μm인 스텝모터(steping motor)로 구동되며 PC에 장착된 이송계 제어장치(Delta Tau, Turbo PMAC2)를 이용하여 시편의 이송 경로를 제어하였다 에칭 가공 중 충분한 에칭용액의 공급과 가공 중에 발생하는 미세기포를 레이저 초점 주위에서 효과적으로 제거하기 위해 연동펌프(peristaltic pump)를 이용하여 100mL 부피의 에칭용액 저장소(reservoir)로부터 용액을 챔버 내부로 순환시켰으며, 레이저빔이 조사되는 챔버의 윗부분은 석영(quartz)으로 제작하였다 그리고 시편이 에칭되는 모든 과정을 CCD를 이용하여 관찰하였다 또한 실험에 사용된 시편은 두께 500μm의 STS-304(Goodfellow, AISI 304, Fe72/Cr18/Ni10) 박편으로서 가로, 세로 1cm 크기로 절단 후 표면을 연마하여 사용하였으며, 에칭용액은 인산(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 85%)을 증류수와 혼합하여 농도를 조절하며 실험하였다

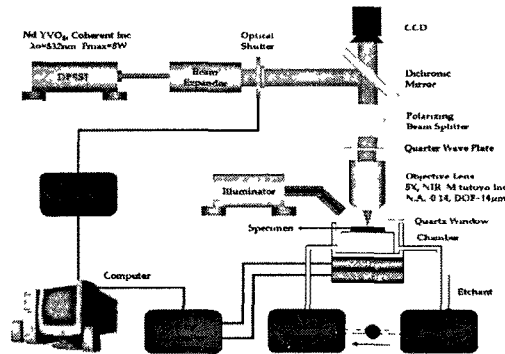


Fig 1 Schematic diagram of experimental setup for laser-induced wet etching

### III. 결과 및 고찰

레이저출력(P), 반복이송횟수(N), 이송속도(V), 에칭용액의 농도(C) 등과 같은 공정 변수에 따른 레이저에칭 실험에 앞서 가장 먼저 해야 할 일은 STS-304를 원활하게 에칭하기 위한 에칭용액을 결정하는 것이다 실험 초기에는 선행되었던 여러 연구 결과[4-5]에서 제안한 황산수용액(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 10~40%)을 이용하여 실험하였다 Fig 2는 P=15W, N=5, V=10μm/sec, C=10%(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)에서 에칭된 결과이다 황산수용액에서 에칭한 경우, 깊이 방향으로의 에칭은 잘되지만 폭 방향(FWHM) 역시 넓게 에칭이 되어 전체적으로 낮은 세장비를 가지는 채널을 만들 수 있었다 또

한, Fig 2의 (c)와 같이 이송속도가 증가할 경우 깨끗하지 못한 표면 형상을 얻었다

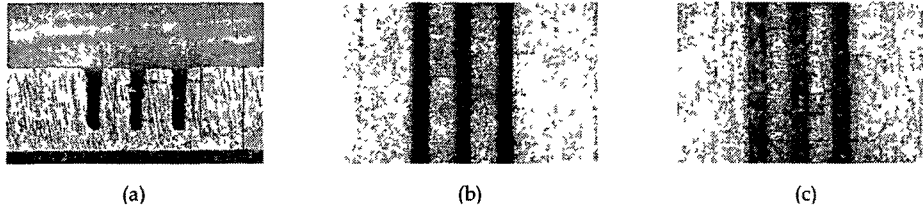


Fig 2 Etched cross-sectional and surface profiles at P=1.5W, C=10%(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), N=5 and (a), (b) V=10μm/sec, (c) V=20μm/sec

20% 이상의 농도를 가지는 황산수용액에서는 에칭이 일어나는 도중, 너무 빠른 부식율, 높은 레이저에너지 강도에 의한 고온 환경, 빠른 에칭용액의 유속을 견디지 못하고 채널과 채널 사이의 핀(fin)이 떨어져 나가는 현상도 관찰되었다 이와 같은 문제점을 해결하고 좀 더 안정적으로 고세장비의 마이크로채널 구조물을 제조하기 위하여 에칭용액을 인산수용액으로 바꾸어 실험을 진행하였다

Fig 3은 P=1.75W, C=10% 또는 C=40%(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), V=10μm/sec, N=5의 공정 조건으로 가공된 마이크로채널의 표면과 단면 형상을 나타내고 있다 Fig 3 (a)에서 보는 바와 같이 인산수용액에서 에칭된 채널은 전체 폭이 좁고 시편 표면에서부터 바닥면까지 거의 일정한 넓이인 "U" 형상을 하고 있다 이와 같은 형상은 주로 낮은 에칭용액의 농도에서 나타나는데 그 이유는 에칭용액의 점성도가 낮아서 에칭이 진행되는 동안 채널 사이에서 화학반응에 의한 수소가스와 에칭용액의 상변화에 의해 생성되는 미세기포가 에칭부산물(etched by-product)을 효과적으로 제거하고 새로운 에칭용액이 원활하게 공급되기 때문이다 반면 시편 표면에 전달되는 레이저출력이 낮거나 Fig 3 (b)에서와 같이 에칭용액의 농도가 높은 경우, 바닥이 뾰족한 "V" 형상의 단면을 가지는 채널이 형성되는데 그 이유로서 레이저출력이 낮은 경우는 레이저빔의 중심부만이 문턱값(threshold) 이상의 에너지를 가지게 되기 때문이며 에칭용액의 농도가 높은 경우는 높은 점성으로 인해 신선한 용액이 채널 내부로 원활하게 공급되지 못하고 bleaching 현상이 일어나기 때문인 것으로 판단된다

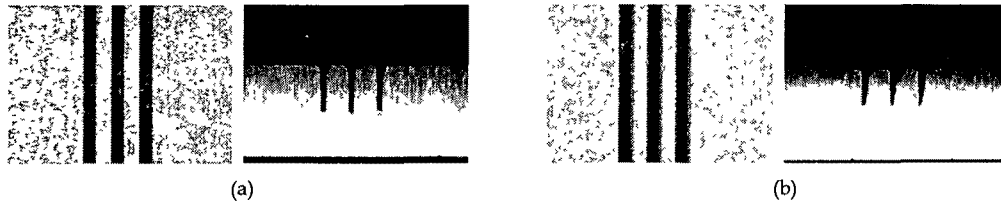
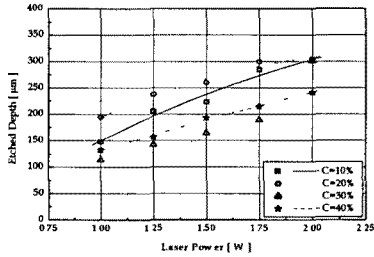


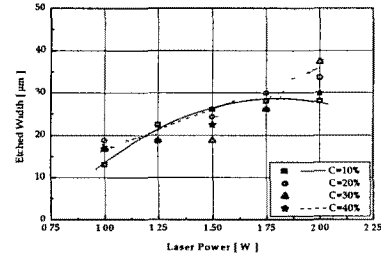
Fig 3 Etched surface and cross-sectional profile at P=1.75W, N=5, V=10μm/sec and (a) C=10%(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), (b) C=40%(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)

Fig 4는 10μm/sec의 이송속도로 1~2W까지 0.25W 간격으로 증가시킨 레이저출력과 10~40% 까지 10% 간격으로 농도를 증가시킨 인산수용액에 대해 5회 반복 에칭된 채널의 깊이 및 폭의 변화를 나타낸 결과이다 채널의 깊이와 폭은 Fig 4에서와 같이 레이저출력이 증가할수록 거의

선형적으로 비례해서 증가한다. 에칭된 깊이는 Fig 4 (a)에서 볼 때 낮은 농도에서 전체적으로 깊이 방향으로 균일하게 에칭되어 Fig 3 (a)와 같이 "U" 형상을 가질 때가 깊으며, 에칭용액의 농도가 높아짐에 따라 깊이 방향으로 에칭이 잘 되지 않음을 알 수 있다. 그러나 에칭된 폭의 경우, 높은 농도에서 "V" 형상으로 가공되었을 때 더 좁게 됨을 Fig 4 (b)에서 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig 4 Variation of (a) etched depth and (b) width for various laser power and etchant concentration,  $V=10\mu\text{m}/\text{sec}$

이와 같이 레이저출력, 반송이송횟수 그리고 에칭용액의 농도의 변화는 채널의 폭과 깊이 및 단면 형상을 다르게 하고 이에 따라 채널의 세장비 변화에도 영향을 미친다. Fig 5와 6은 각각의 레이저출력과 농도의 변화에 따른 세장비의 변화를 보여준다. 전체적으로 낮은 농도의 에칭용액에서 낮은 레이저출력으로 가공될 때 10 이상의 고세장비를 가지며 레이저출력이 증가할수록 깊이 방향으로 에칭되는 비율보다 폭 방향으로 에칭되는 비율이 더욱 커져서 오히려 세장비는 감소하는 것으로 나타난다.

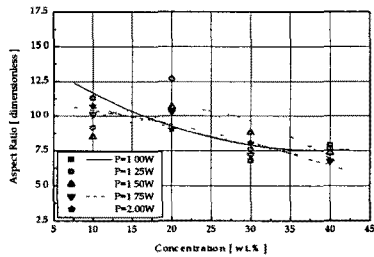


Fig 5 Aspect ratio of micro-channels for various laser power and concentration,  $V=10\mu\text{m}/\text{sec}$

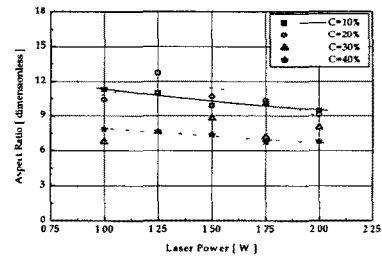


Fig 6 Aspect ratio of micro-channels for various concentration and laser power,  $V=10\mu\text{m}/\text{sec}$

Fig 7은  $P=1.75\text{W}$ ,  $V=10\mu\text{m}/\text{sec}$ ,  $N=5$ 의 공정 조건에 대해 에칭용액의 농도만을 다르게 하여 가공한 채널의 단면이다. 앞서 설명된 바와 같이 낮은 농도로 가공된 "U" 형상의 채널은 에칭용액의 농도가 증가할수록 점점 "V" 형상으로 변화한다는 것을 알 수 있다. 이러한 단면의 형상 변화는 많은 공정 변수들 중에서 점성과 관계가 깊은 에칭용액의 농도에 거의 의존한다는 것을 실험적으로 알 수 있었다. Fig 8의 (a)는 Fig 7에 보이는 각각의 단면들에 대한 에칭 폭과 깊이를 나타낸 것이며 Fig 8 (b)는 각각의 단면들에 대한 세장비의 변화를 표현한 것이다. Fig 8의 (a)에서와 같이 농도가 증가함에 따라 가공된 채널의 에칭 폭의 변화는 별로 없으나 깊이는 상

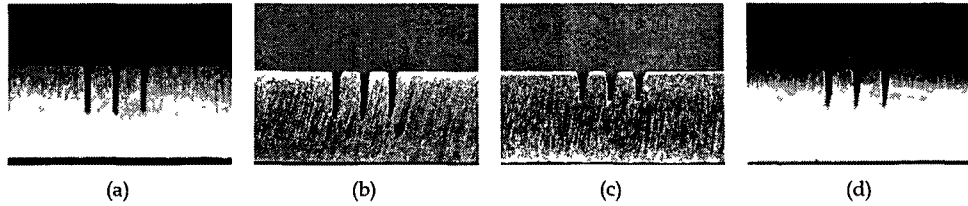


Fig 7 Cross-sectional profile with respect to  $P=175W$ ,  $V=10\mu\text{m}/\text{sec}$ ,  $N=5$  and each concentration, (a)  $C=10\%$ , (b)  $C=20\%$ , (c)  $C=30\%$  and (d)  $C=40\%$

대적으로 큰 영향을 받으며 따라서 높은 농도에서는 세장비가 8 이하의 낮은 값을 가지는 것으로 확인된다

결론적으로 "U" 형상의 단면을 가지는 마이크로채널 구조물을 제작하기 위해서는 낮은 농도의 에칭용액에서 높은 레이저출력으로 가공하는 것이 유리하며 "V" 형상의 단면을 가지는 구조물은 높은 농도의 에칭용액에서 가공하거나 낮은 레이저출력으로 가공해야 한다 또한 이러한 결과를 바탕으로 마이크로 열시스템에 이용될 소자를 제작할 경우, 낮은 농도에서 높은 레이저출력으로 가공하여 10 이상의 고세장비를 얻을 수 있는 조건으로 가공하는 것이 더욱 효과적이라고 판단된다

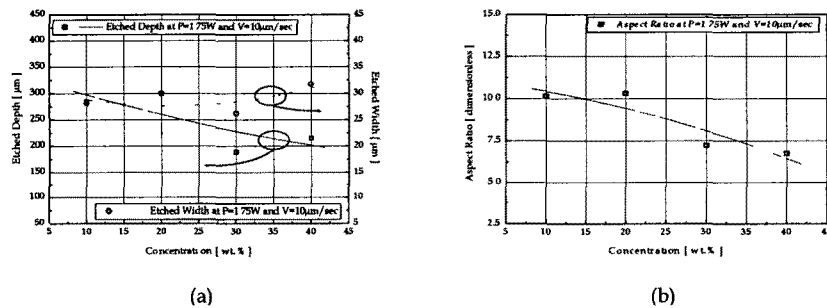


Fig 8 (a) Etched width and depth of micro-channels fabricated at  $P=175W$ ,  $V=10\mu\text{m}/\text{sec}$ ,  $N=5$  and  $C=10\sim 40\%(\text{H}_3\text{PO}_4)$ , (b) their aspect ratio

#### IV. 결론

본 연구에서는 STS-304 박편 상에 레이저에칭 기술과 여러 가지 제어 가능한 공정 변수들을 통하여 마이크로채널 구조물을 제작하고 각 채널에 대한 표면과 단면의 형상을 분석하였다 가공 후 나타나는 단면의 형상은 크게 "U"와 "V" 형상으로 구분되며 이러한 단면 형상은 에칭용액의 농도와 레이저의 출력에 큰 영향을 받는다는 것을 파악하였다 또한 고세장비의 금속 채널 구조물을 만들 수 있는 최적의 조건을 제시하였으며, 이러한 결과는 STS-304 소재를 이용한 마이크로 열시스템 응용소자의 제작에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 생각된다

#### V. 참고문헌

- 1 Y -F Lu and K -D Ye, "Laser-induced etching of polycrystalline  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$  in KOH aqueous solution", Appl Phys A, Vol 62, pp 43-49, 1996

- 2 B W Hussey, B Haba and A Gupta, "Role of bubbles in laser-assisted wet etching", *Appl Phys Lett*, Vol 58, No 24, pp 2851-2853
- 3 Y S Shun and S H Jeong, "Laser-assisted etching of titanium foil in phosphoric acid for direct fabrication of microstructures", *J Laser Applications*, Vol 15, pp 240-245, 2003
- 4 R Nowak, S Metev and G Sepold, "Nd YAG-laser-induced wet chemical etching of titanium and stainless steel", *Sensors Actuators A* Vol 51, pp 41-45, 1995
- 5 R Nowak and S Metev, "Thermochemical laser etching of stainless steel and titanium in liquids", *Appl Phys A*, Vol 63, pp 133-138, 1996