레이저 유도에칭을 이용한 티타늄 미세채널 제조

손승우(광주과학기술원 기전공학과), 이민규*(광주과학기술원 기전공학과),
정성호(광주과학기술원 기전공학과)

Fabrication of Titanium Microchannels by using Ar^+Laser-assited Wet Etching

S.W. Son(Dept. of Mechatronics, GIST), M.K. Lee(Dept. of Mechatronics, GIST),
S.H. Jeong(Dept. of Mechatronics, GIST)

ABSTRACT

Characteristics of laser-assisted wet etching of titanium in phosphoric acid were investigated to examine the feasibility of this method for fabrication of high aspect ratio microchannels. Laser power, number of scans, etchant concentration, position of beam waist and scanning speed were taken into consideration as the major process parameters exerting the temperature distribution and the cross sectional profile of etched channels. Experimental results indicated that laser power influences on both etch width and depth while number of scans and scanning speed mainly affect on the etch depth. At a low etchant concentration, the cross sectional profile of an etched channel becomes a U-shape but it gradually turns into a V-shape as the concentration increases. On the other hand, surface of the laser beam focus with respect to the sample surface is found to be a key factor determining the bubble dynamics and thus the process stability. It is demonstrated that metallic microchannels with different cross sectional profiles can be fabricated by properly controlling the process parameters. Microchannels of aspect ratio up to 8 with the width and depth ranges of 8~32 μm and 50~300 μm, respectively, were fabricated.

Key Words : Laser-induced wet etching(레이저 유도 습식에칭), Micromachining(미세가공), Microfabrication(미세제조), Laser etching(레이저 식각), Titanium(티타늄)

1. 서론

마이크로미세 채널은 마이크로화학분석시스템(micro total analysis system)이나 마이크로유체소자와 같이 미세유동이 필요한 소자나 미세히트파이프와 같은 마이크로 열시스템의 제조에 유용한 구조이다. 미세히트파이프는 동력이 필요 없고, 모세관현상을 일으킬 수 있는 미세한 채널(channel)만 있으면 되므로 구조가 매우 간단한 이점이 있다. 이때 중력과 같은 외력에 비교적 영향을 받지 않으면서 임의의 방향으로 모세관현상으로 액체가 이동하기 위해서는 미세채널의 크기가 수십마이크로미터 정도로 작아야하며, 표면적을 늘려 열효율을 높이기 위해서는 세장비(aspect ratio)가 큰 채널이 필요하다. 레이저에칭을 이용한 미세채널제조는 가공하고자 하는 시편을 액체상태의 에칭용액에 담근 후 렌즈를 통해 집속된 레이저빔을 시편 표면에 조사해 시편과 에칭용액과의 화학반응을 통해 가공하는 방법으로서, 이는 에칭용액없이 시편을 레이저로 직접 가공하는 레이저 어블레이션(ablation)에 비해 낮은 에너지에서 가공이 가능하고, 시편이 액상의 에칭용액에 담겨 있으므로 열변형이나 영향부가 매우 적다는 장점이 있다.

본 논문에서는 티타늄 레이저에칭시 발생하는 여러 가지 현상을 관찰하고 레이저출력, 반복이송, 에칭용액의 농도 등이 에칭결과에 어떻게 영향을 미치는지를 보이고, 이를 이용하여 단순한 모양의 고세장비의 금속채널을 제조하여 이의 활용 가능성을 제시하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 1 은 레이저에칭 실험장치의 개략도로서 전체적으로 레이저, 광학계, 이송계, 제어부로 구성되어 있다. 실험에 사용된 레이저는 파장 514.5nm, 최고출력 3.2W, 빔직경 1.8mm 의 아르곤이온레이저(Ar^+, Coherent, Innova 308)이며, 5 배로 빔을 확대한 후 현미경용 5 배 대물렌즈(Mitsutoyo, NIR 5X, NA=0.14, DOF=14 μm)를 이용하여 시편에 집속하였다. 이송계(Suruga Seiki, K701-20LMS)는 정밀도(resolution) 1 μm 의 스테핑모터(stepping motor)로 구동이되며, 이를 PC 에 장착된 모션컨트롤러(Delta Tau, Turbo PMAC2)를 이용하여 제어하였다. 에칭용기는 x-y-z 미세이송계 위에 고정되어 있으며, 화학반응을 방지하기 위해 테플론을 이용하여 제작하엿다. 에칭가공중 충분한 에칭용액의 공급과 가공중 발생하는 미세기포를 레이저초점주위에서 효과적으로 제거하기위해 연동펌프(peristaltic pump)를 이용하여 에칭용액을 에칭용기로 순환시켰으며, 레이저빔이 조사되는 에칭용기의 창은 석영(Quartz)으로 제작하였다. 그리고 실험과정을 CCD 를 이용하여 관찰하였다.

실험에 사용된 시편은 두께 500μm, 순도 99.0%의 티타늄(Titanium)을 가로, 세로 약 1cm 크기로 절단 후 표면을 연마하여 사용하였으며, 에칭용액은 인산(H_3PO_4, 80%)을 증류수와 혼합하여 농도를 조절하며 실험하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2 는 레이저빔의 출력변화와 레이저빔을 같은 위치에 반복해서 조사하여 가공하는 반복이송(multiple scans)에 따른 에칭형상의 변화를 보여준다. 반복이송의 장점은 에칭폭의 변화는 거의 없이 깊이 방향으로만 에칭이 되어 높은 세장비의 구조물을 얻을 수 있다는 점이다.[1] Fig. 2(a)와 같이 낮은 레이저출력에서는 에칭된 단면의 형상이 V 이며, 이송횟수가 증가하여도 에칭된 폭 및 깊이의 변화가 거의 없다. 하지만 출력이 증가함에 따라서 에칭된 단면의 형상이 U 로 바뀌며 이송횟수가 늘어남에 따라 에칭된 폭은 변화가 없으나 깊이는 증가함을 볼 수 있다. 이는 가우시안(Gaussian)분포의 레이저빔이 낮은 출력에서는 시편의 깊이방향으로 에칭이 진행됨에 따라 채널벽면에서의 흡수, 퍼짐(defocusing), 에칭 중 발생하는 미세기포에 의한 산란 등으로 인해 빔의 가운데 부분에서는 에칭을 일으킬 수 있는 문턱값(threshold)보다 출력강도(power intensity, 단위면적당 레이저출력)가 높지만 바깥부분에서는 이보다 낮아 에칭이 일어나지 않아서 V 형상을 갖는 반면, 높은 출력에서는 시편의 깊이방향으로 에칭이 진행되어도 가우시안빔 단면의 바깥부분에서도 에칭을 유발할 수 있는 문턱값보다 높아서 Fig. 2(b)와 같이 U 형상을 갖는 것으로 생각된다. 그러나 높은 레이저출력(예를 들면 1.5W)에서도 반복이송횟수가 증가함에 따라 많은 에너지가 바닥까지 미치지 못하고 소실되어 Fig. 3(a)에서 보듯이 깊이증가 정도가 둔화되며 바닥면이 뾰족하게 가공되는 경향이 나타난다. 이를 그래프로 표현하기위해 무차원 폭(dimensionless width)을 정의하였다. 무차원폭은 시편의 표면에서부터 깊이의 80%되는 위치의 폭을 깊이의 20%되는 폭으로 나눈 것으로 다음과 같다.

$$W = \frac{W_{D80}}{W_{D20}}$$

W 가 1 에 가까울수록 에칭된 단면의 형상은 수직에 가깝다. Fig. 3(b)와 (c)에서 보듯이 반복이송횟수가 늘어날수록 레이저출력이 낮을수록 W 값이 작아짐을 알 수 있다.

에칭용액의 농도가 증가함에 따라 에칭폭은 표

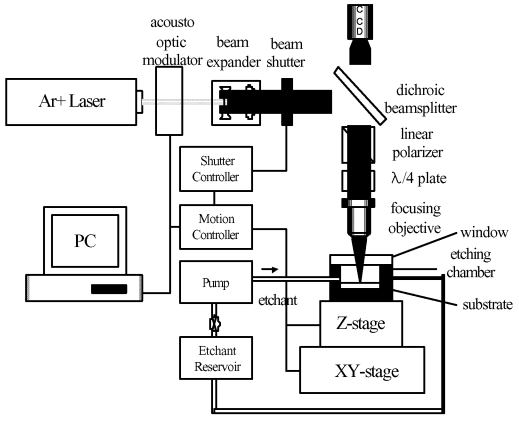


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

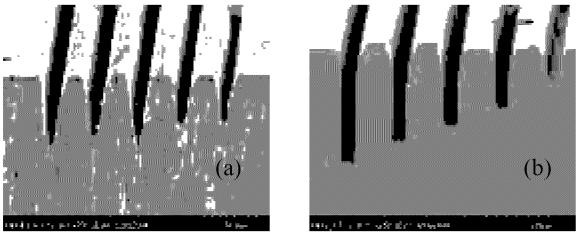
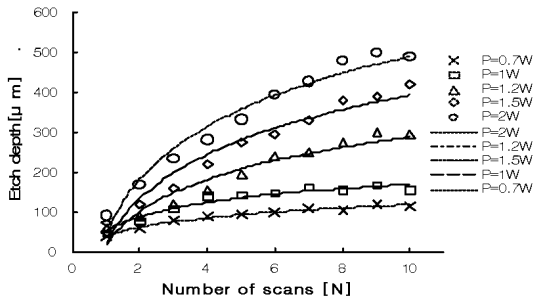
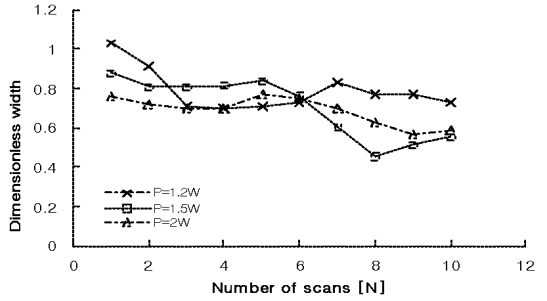


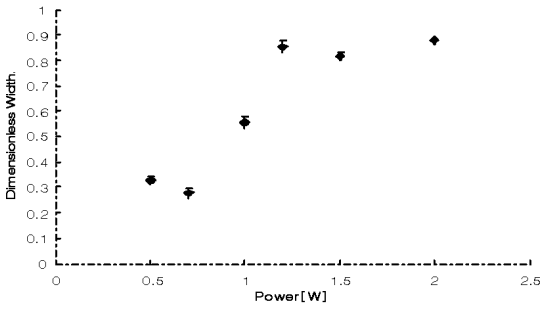
Fig. 2 SEM micrograph of etched channels with respect to laser power and number of scans, V=10 μm/sec, C=20%, N=1(right)~5(left), (a)P=0.5W, (b)P=1.5W



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Etched depth, width and shape variation with respect to number of scans and laser power, C=20%, V=10μm/sec, (c)N=5

면에서는 크게 변화가 없으나 표면 아래로 에칭이 진행됨에 따라서 농도에 크게 영향을 받는다. Fig. 4 에서 보듯이 농도가 낮을 때에는 에칭된 표면은 거칠지만 깊이 방향으로 에칭이 진행되어도 단면의 형상이 일정하게 수직으로 유지되는 반면, 농도가 높을 때는 에칭된 표면은 매끄럽지만 깊이 방향으로 에칭이 진행됨에 따라 에칭폭이 줄어든다. 이는 농도가 증가함에 따라 점성계수(Kinematic viscosity)가 크게 증가하는데 이로 인해 표면에서의 에칭에는 별로 영향이 없지만 채널의 깊이가 깊어짐에 따라서 원활히 에칭용액이 공급되지 못해 상대적으로 에너지밀도가 높은 가우시안빔의 가운데 부분에서

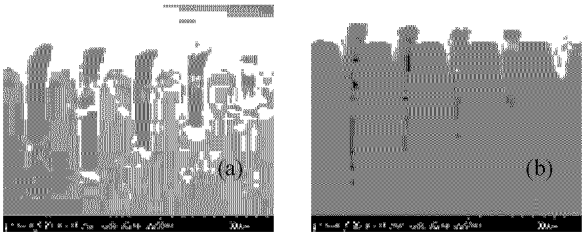
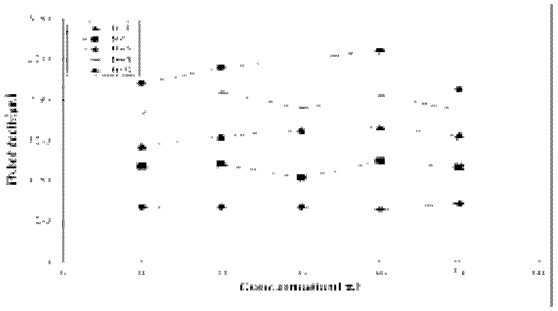
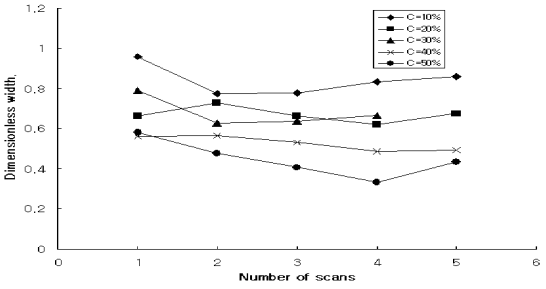


Fig. 4 Etched shape variation with respect to etchant concentration, P=1.5, V=10μm/sec, N=1(right)~5(left), (a)C=10%, (b)C=40%



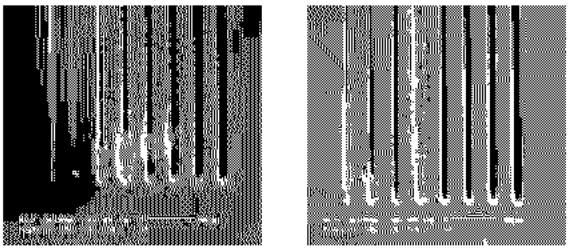
(a)



(b)

Fig. 5 Etched depth and dimensionless width with respect to concentration, P=1.5W, V=10μm/sec

만 에칭이 일어나서 뾰족하게 에칭되는 것으로 생각된다.[2] 또한 점성이 낮을 때는 화학반응으로 발생한 수소가스와 에칭용액의 상변화로 생긴 미세기포가 점성이 높을 때 보다 쉽게 채널을 빠져나가는데 이때 에칭부산물(etched by-product)을 효과적으로 제거해 전체적으로 채널의 폭이 균일하게 가공된 것으로 생각된다.[3] Fig. 5(a)와 (b)에서 보듯이 농도와 반복이송횟수가 증가할수록 W 가 작아짐을 알 수 있다. CCD 를 통해 실험 중 일어나는 현상을 관찰해 보면 에칭용액의 농도가 낮을 때는 미세기포가 많이 발생하고 그 크기가 크며 시편의 표면에서 빠른 속도로 제거됨을 볼 수 있다. 반면 에칭용액의 농도가 높을 경우에는 에칭이 깊게 진행됨에 따라



(a) (b)

Fig. 6 Bubble and ripple formation with respect to power intensity, V=10μm/sec, C=20%, N=1, P=0.5W, (a)F=+40 μm, (b)F=0

서 미세기포 또한 채널의 바닥에서 빨리 배출되지 않는다.

레이저에칭의 중요한 특징 중 하나는 진행되는 동안 레이저초점 주위의 에칭수용액의 기화 및 에칭 화학반응 과정의 부산물로 미세기포가 발생한다는 점이다. 이는 에칭형상에 크게 영향을 준다. Fig. 6 은 동일 가공면에서 레이저출력을 변화시키며 에칭했을 때 표면의 모습이다. Fig. 6(a)는 시편의 표면이 레이저초점보다 40 μm 위쪽에 있을 때, Fig. 6(b)는 레이저초점과 동일평면상에 있을 때 레이저출력을 0.5W 에서 2.25W 까지 0.25W 간격으로 증가시키며 에칭했을 때이다.

가공면이 레이저초점에서 멀 경우 주기적인 물결무늬(periodic ripple)를 볼 수 있는데, 이는 고체상태 티타늄의 용융이 일어나는 조건에서 특정 이송속도와 레이저출력 범위에서 발생한다. 고체상태의 티타늄은 액체상태에 비해서 높은 흡수율과 낮은 반사율을 갖는데, 이로 인해 고체상태에서 레이저에너지를 많이 흡수해서 용융이 발생하면 낮아진 흡수율과 높아진 반사율 때문에 에너지 흡수가 줄어들고 결과적으로 에칭깊이와 폭이 줄어든다. 그러면 다시 흡수율의 증가와 반사율의 감소로 깊고 넓게 에칭이 된다. 이런 주기적인 시편에 흡수되는 레이저출력강도 차이로 인해 에칭과정 중 주기적인 물결무늬가 생기는 것으로 생각된다.[4] 이를 없애기 위해서는 레이저출력을 낮추거나 이송속도를 빠르게 해서 시편의 녹는점 아래에서 가공을 하거나, 출력을 높이거나 이송속도를 낮추어 충분한 에너지를 공급해줘야 한다.

에칭을 시작하는 부분에서 넓고 얇게 불규칙한 형상으로 에칭된 것을 볼 수 있는데 이는 높은 에너지밀도를 갖는 레이저빔이 시편표면에 조사될 때 레이저초점주변의 시편표면온도가 순간적으로 상승하게 되고 이로 인해 시편표면의 에칭수용액이 기화되며 기포를 형성하는데 이 때문에 레이저빔이

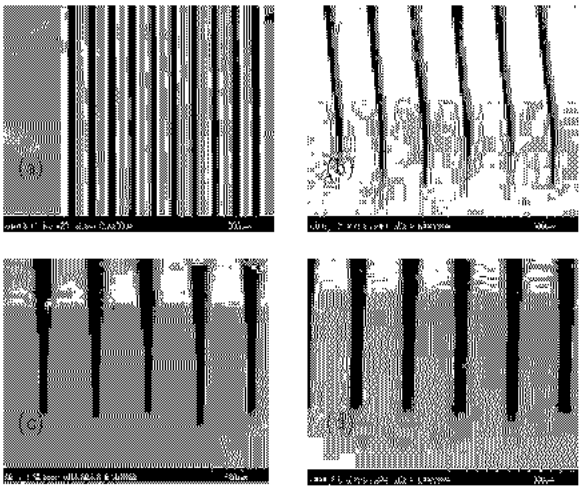


Fig. 7 Various channel shape etched at different condition. V=10μm/sec, C=20%, N=5, (a)P=1W, top view (b)P=0.7W, (c)P=1W, (d)P=1.5W

산란되어 초점크기보다 훨씬 큰 영역에 조사된다. 이때 산란된 레이저빔의 출력강도가 에칭을 일으킬 수 있는 문턱값보다 높으면 기포의 아래쪽에서 에칭이 일어나 계속되는 미세기포와 에칭부산물의 공급으로 기포가 어느 정도 성장하다가 터지면서 안정된 에칭이 시작된다. 그런데 산란된 레이저빔의 출력강도가 문턱값보다 낮을 때는 기포가 형성된 후 기포 아래쪽에서 에칭이 일어나지 않아 더 이상 미세기포와 에칭부산물의 공급이 없어 Fig. 6(a)의 좌측 두 번째 선처럼 기포가 성장해서 터지지 못하고 레이저빔을 따라 오며 에칭을 방해해 에칭이 일어나지 않게 된다. 레이저빔강도가 충분히 높으면 초기에 기포가 발생하자마자 시편표면에서 제거되므로 큰 기포의 발생이 없이 곧바로 안정적인 에칭이 시작된다(Fig. 6(b)의 좌측에서 다섯 번째부터 우측으로, P=1.5W 이상의 경우). 하지만 곧바로 안정적인 에칭이 일어나는 영역과 초기에 기포가 성장 후 터진 다음부터 안정된 에칭이 시작되는 영역 사이에서는 기포가 생성, 성장, 터짐을 반복하며 레이저빔을 따라오며 산란시켜 불규칙하게 에칭이 되고 공정제어가 매우 힘들다(Fig. 6(b)의 좌측 네 번째, P=1.25W). 아직 이에 대한 정확한 원인은 파악되지 않고 있으며 좀더 연구가 필요하다.

Fig. 7 은 히트파이프나 미세유체소자(micro fluidics)로의 응용가능성을 보이기 위해 여러 조건에서 에칭한 채널의 모습을 보여 준다. Fig. 7(d)의 경우 에칭폭(FWHM) 27 μm, 깊이 214 μm 로 세장비가 약 8 정도 이다.

4. 결론

레이저에칭을 통해서 비교적 단순한 공정으로 고세장비의 미세 티타늄채널구조를 제조할 수 있음을 보였다. 레이저출력과 에칭용액의 농도는 단면의 형상을 결정하는 중요한 변수이며, 레이저에칭 과정 중 발생하는 미세기포로 인해 시편표면의 상태 및 단면형상이 크게 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 레이저에칭을 통해 세장비 약 8 정도의 금속채널구조물을 제조할 수 있음을 보였으며, 이를 이용하여 홈구조를 갖는 초소형 히트파이프 등에 응용이 가능할 것으로 기대 된다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 젊은과학자연구활동 지원사업의지원을 받아 연구되었음.(R08-2003-00010267-0).

참고문헌

1. R. Nowak, S. Metev, G. Sepold, "Nd:YAG-laser-induced wet chemical etching of titanium stainless steel", Sensor and Actuators Vol. 51, pp.41-45, 1995
2. Y. S. Shin and S. H. Jeong, "Laser-assisted etching of titanium foil in phosphoric acid for direct fabrication of microstructures", Journal of Laser Applications, Vol. 15, pp.240-245, 2003
3. Junji Ohara, Masao Nagakubo, Nobuaki Kawahara, Tadashi Hattori, "High aspect ratio etching by infrared laser induced micro bubbles", IEEE, pp.175-179, 1997
4. Yong Feng. Lu, M. Takai, S. Nagatomo, S. Namba, "Wet-chemical Etching of Mn-Zn Ferrite by Focused Ar+-Laser Irradiation in H3PO4", Appl. Phys. Vol. 47, pp.319-325, 1988