

레이저 유도에칭에 의한 티타늄 박막 미세구조물 제조

Laser-induced thermochemical wet etching of titanium foil for fabrication of microstructures

광주과학기술원 기전공학과 정성호, 손승우
삼성전기주식회사 정보디바이스사업부 신용산

I. 서론

최근 미소기계시스템의 발전과 함께 다양한 재료를 이용하여 미소구조물을 가공하는 새로운 기술들에 대한 연구가 활발하다. 현재까지는 실리콘을 중심으로 반도체가공기술을 이용한 미소구조물 제조가 주류를 이루고 있지만 금속재료의 경우 높은 강도와 재료의 유연성으로 인해 미소구조물 제조에 있어서 반도체 재료에서는 얻기 힘든 장점을 갖고 있다. 타이타늄은 내부식성과 강도가 우수할 뿐 아니라 생체에 적용이 가능한 재료로 의료용 이식에 활용되고 있어[1] 인체적용을 대상으로 한 의생명공학미소기기, 랩온칩(Lab-on-a-chip), 미소그립퍼 및 센서 등에 활용이 가능할 것으로 기대되고 있다. 미세금속구조물의 가공기술로는 초정밀기계가공, 전해방전가공(electro discharge machining), 레이저가공, LIGA 등이 있다[2]. 이 중에서 레이저가공은 비접촉식 가공기술로 가공방법이 비교적 간단하고 다른 기술에 비해 상대적으로 가공시스템이 단순한 장점이 있다. 한편 레이저 어블레이션에 의한 미세구조물의 직접가공은 넓은 열영향부의 형성과 함께 열변형의 우려가 높고 가공중에 발생하는 용융 및 입자 발생 등으로 인해 표면품질이 떨어지고 가공의 정밀도가 저하된다. 레이저열화학습식에칭 (이하에서는 간단히 레이저에칭이라 함)을 이용하면 레이저 직접가공에서 발생하는 이와 같은 문제를 극복하면서 매우 정밀한 가공이 가능하다. 레이저에칭에서 레이저빔은 단순히 에칭용액과 소재간의 화학적 반응을 유도하기 위한 에너지 공급원의 역할만하므로 열부하를 감소시키며 우수한 표면으로 미세한 가공이 가능하다[3].

본 연구에서는 타이타늄 소재의 레이저에칭시 발생하는 여러 가지 현상을 관찰하고 레이저출력, 에칭용액의 농도, 레이저빔 이송속도 등에 따른 실제 에칭결과의 변화를 조사하였다. 또 레이저에칭기술을 이용하여 미소구조물을 제조하여 제안된 기술을 이용한 미세가공 가능성을 제시하였다.

II. 실험방법

Fig. 1은 레이저 유도 에칭 실험장치의 개략도로 레이저시스템, 광학계, 반응용기, 이송계, 이송계 제어부 등으로 구성되어 있다. 실험에 사용된 레이저는 파장 514.5nm, 최대출력 3.2W, 빔 직경 1.8mm의 아르곤 이온 레이저(Coherent, Innova 308)이다. 레이저 빔은 렌즈($f=50\text{mm}$)를 통해 소재의 표면에 집속되며 이때 소재표면에서 초점부 직경은 칼날(knife-edge)방법을 이용해 측정된 결과 약 20 μm 이었다. 시편이 놓여지는 반응용기는 에칭용액과의 화학반응을 방지하기 위해 테프론으로 제작되었으며 x, y, z방향으로 운동하는 미세 이송계 위에 고정되었다. 미세 이송계는 컨트롤러를 이용하여 운동방향, 속도, 분해능 등을 제어하며 원하는 경로를 따라 움직임으로써 레이저 빔이 시편 위에 원하는 형상을 따라 조사되도록 하였다. 실험에 사용된 소재는 두께 50 μm 과 127 μm 의 티타늄(titanium)이며 에칭용액은 인산(H₃PO₄, 85%)용액으로 증류수로 농도를 조절하며 실험하였다. Table 1은 농도 변화에 따른 인산용액의 물성치 변화를 농도가 0%인 증류수를 기준으로 비교한 값이다[4]. 에칭용액의 농도가 증가할수록 밀도나 굴절율의 변화에 비해 점성의 변화가 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 밀도와 굴절율 변화에 따른 레이저 빔의 흡수, 초점 직경 변화는 상대적으로 무시할 수 있는 반면 점성변화는 초점부

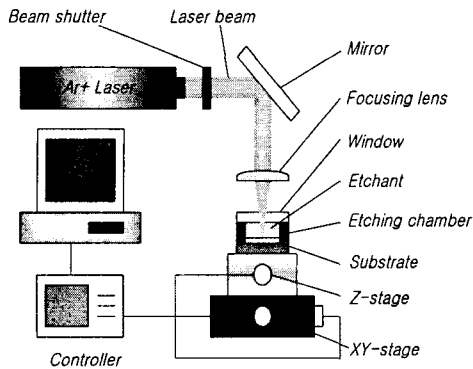


Fig.1 Schematic of the experimental system

Table1. Normalized properties of liquid H₃PO₄

Concentration [%]	Density	Refractive index	Kinetic viscosity
0	1	1	1
1	1.0038	1.0007	1.0180
5	1.0254	1.0035	1.1357
10	1.0531	1.0069	1.3004
20	1.1135	1.0143	1.7844
30	1.1804	1.0221	2.5480
40	1.2536	1.0304	3.8438

근에서 용액의 미세 유동과 확산에 영향을 미쳐 결과적으로 에칭율과 에칭형상을 변화시킬 것으로 예상된다.

III. 결과 및 고찰

레이저에칭시 티타늄과 인산용액의 화학반응은 아래식으로 표현된다.



반응 후 생성물질은 2TiPO₄와 3H₂로 TiPO₄는 물에 용해되며 H₂는 가열된 용액이 상변화 할 때 발생하는 기체와 함께 미세기포 발생의 원인이 된다. 레이저출력 및 에칭용액의 농도에 따른 에칭너비 및 깊이 변화는 이미 참고문헌[5]에 발표한 바 있다. 에칭너비는 에칭용액 농도 약 10% 이상에서는 거의 변화가 없는 반면 에칭깊이는 초기에는 농도에 따라 증가하다가 약 20% 이상에서는 오히려 감소하는 경향을 보이는데 이것은 에칭용액의 농도가 증가할 때 Table1에 나타난 것처럼 점성이 크게 증가하여 에칭이 일어나고 있는 레이저초점 부근에서 용액의 공급이 원활하지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 레이저출력에 따라 에칭너비는 거의 선형적으로 증가하지만 에칭깊이는 Fig.2(a)에서와 같이 비선형적으로 변화한다. 에칭깊이는 실제 에칭율과 밀접한 관련이 있으므로 위의 레이저 에너지에 따른 에칭깊이 변화를 Fig.2(b)와 같이 표시하면 에칭깊이의 변화가 레이저출력에 대해 일반적으로 화학반응을 나타내는 Arrhenius식으로 표현되는 $A \exp(-E/RT)$ 의 관계를 따르는 것을 알 수 있다.

에칭용액의 농도에 따라 에칭홈의 형상은 매우 크게 달라진다. Fig.3에서는 농도 40%와 20%에서 생성된 홈의 단면형상을 보여주는데 에칭용액의 농도가 높으면 홈은 역삼각형의 비교적 뾰족한 단면을 갖게 되며 이러한 형상은 레이저빔의 이송속도가 증가하여도 거의 동일하게 유지된다(Fig.3(a),(b)). 한편

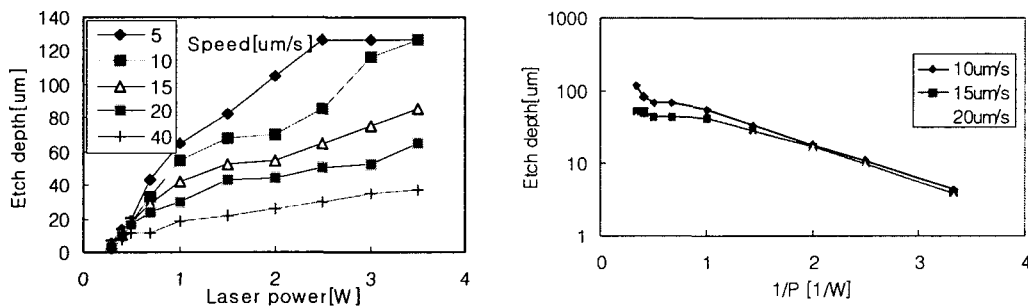


Fig. 2 (a) Variation of etch depth with respect to laser power: C=40%, t=127mm. (b) Redrawing of the data in (a) with respect to the indicated coordinates

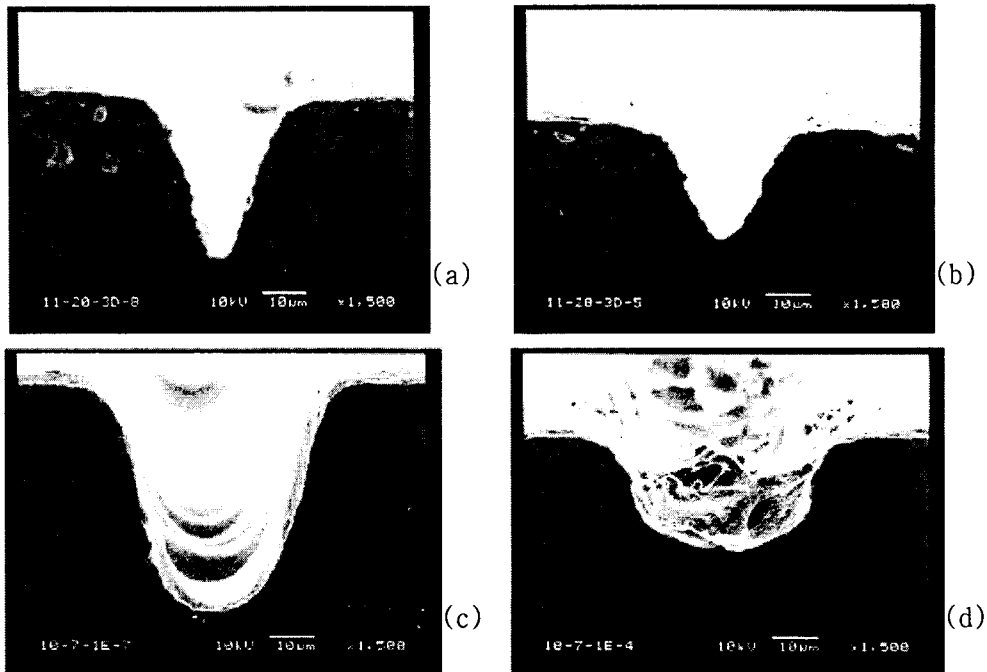


Fig. 3 Scanning electron microscopies of the cross section of the workpiece etched at different conditions: (a) $v=5\text{mm/sec}$, $C=40\%$ and $P=0.7\text{W}$, (b) $v=20\text{mm/sec}$ $C=40\%$ and $P=0.7\text{W}$, (c) $v=5\text{mm/sec}$, $C=20\%$ and $P=1.0\text{W}$, (d) $v=20\text{mm/sec}$ at $C=20\%$ and $P=1.0\text{W}$

용액의 농도가 낮은 경우에는 단면형상은 훨씬 둥근 모양을 가지며 홈의 폭은 깊이 방향으로 서서히 감소한다(Fig.3(c),(d)). 낮은 농도에서는 또한 에칭홈의 바닥이 용융 후 응고되었거나 불균일하게 에칭된 듯한 양상을 보이며 이러한 경향은 레이저빔의 이송속도가 증가할수록 더 심하게 나타나며 일반적으로 낮은 이송속도에서 상대적으로 균일한 형상을 얻을 수 있다.

레이저에칭의 미세구조물 가공에의 응용가능성을 확인하기 위해 티타늄 박판의 절단, 드릴링, 밀링가공을 아래와 같이 실시하였다. 먼저 레이저 절단에 있어 $50\mu\text{m}$ 의 티타늄 박판을 이용하여 외팔보형상을 가공하였을 때 절단선의 균일성은 레이저출력이 증가할수록 향상되었다. 그러나 레이저출력을 고정시킨 상태에서 직선가공을 할 경우 직선의 방향이 바뀌는 영역에서 거의 대부분 파에칭이 일어나므로 레이저빔 방향전환시 파에칭을 방지하기 위한 빔경로의 최적화 및 레이저출력의 실시간 제어 등이 필요한 것으로 나타났다.

Fig.4는 레이저에칭을 이용한 드릴링 결과를 보여준다. 실험을 통해 레이저에칭을 이용해 정확한 크기와 형상의 구멍을 드릴링 하는 것이 간단하지 않으며 특히 레이저출력이 작을 경우 더 힘든 것으로 드러났다. 레이저에칭 동안에는 식(1)에서 나타난 것과 같이 화학반응에 따른 수소발생과 용액의 증발에 의한 증기 발생이 매우 활발한데 여기서 발생된 기포들의 유동이 드릴링 결과에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 레이저출력이 낮으면 에칭이 일어나는 초점부에서 기포가 발생하여 꾸불꾸불하게 요동을 하면서 표면으로 빠져나온다. 이때 기포는 입사되는 레이저빔을 산란하여 빔의 방향을 불규칙하게 변화시키고 이에 따라 드릴링 된 구멍의 최종형상도 Fig.4(a)나 (c)와 같이 불균일하게 되는 것으로 보인다. 레이저출력을 증가시키면 에칭이 일어나는 초점 부근에서 매우 많은 양의 기포가 고르게 발생하며 입사되는 레이저빔을 보다 균일하게 산란시키게 되어 비교적 원형에 가까운 형태의 구멍을 드릴링하는 것이 가능하지만 산란에 의해 초점크기 보다 넓은 영역으로 레이저빔이 퍼지게 되므로 구멍의 직경 역시 Fig.4(b)나 (d)에서처럼 증가하게 된다.

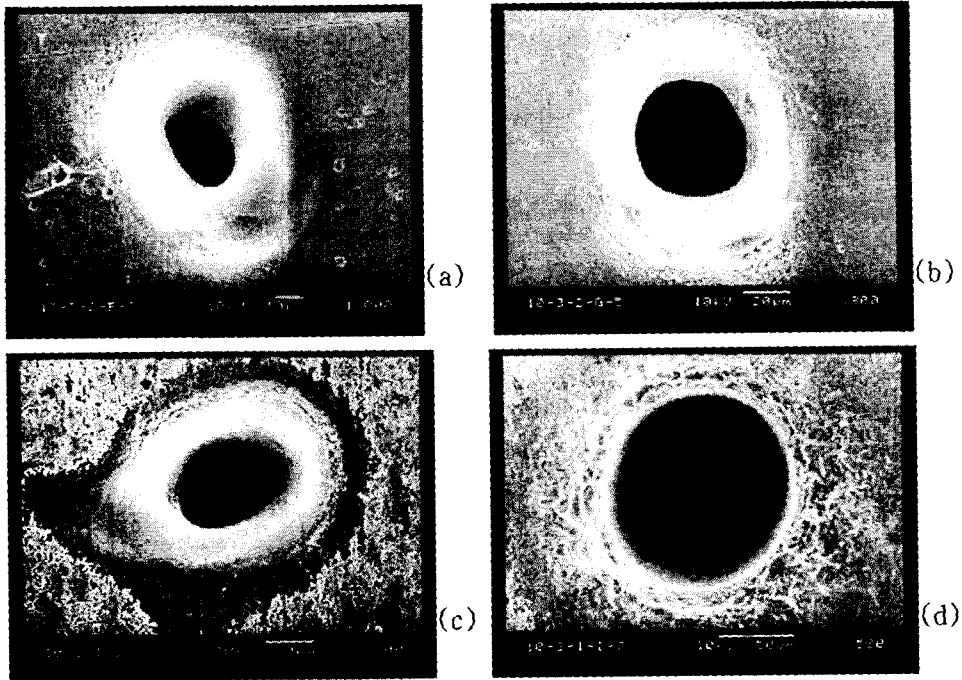
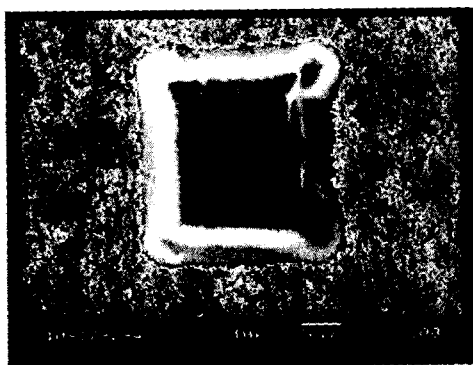
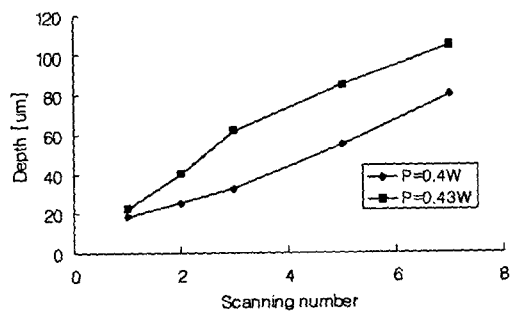


Fig. 4 Holes etched at different conditions. C=40% : (a)t= 50mm, P=0.7W, T=20sec, (b)t=50mm, P=0.9W, T=40sec, (c)t=127mm, P=0.7W, T=90sec, (d)t=127mmP=1.5W, T=60sec

Fig.5(a)는 레이저에칭을 이용한 사각형 모양의 3차원 밀링가공 예를 보여준다. 밀링가공은 레이저빔을 $70 \times 70 \mu\text{m}^2$ 의 영역에서 $5 \mu\text{m}$ 간격으로 반복적으로 평행하게 이송하면서 실시하였다. 가공된 구조물의 바닥면은 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 매끈하고 비교적 편평한 것으로 나타났다. 구조물의 에칭 깊이는 Fig.5(b)에서처럼 에칭반복횟수에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 그러나 절단의 경우와 마찬가지로 레이저빔이 방향을 전환하는 모서리 및 가장자리 부근에서는 과에칭이 일어나고 또 에칭반복횟수가 증가하면서 바닥의 편평도가 떨어지는 것이 관찰되었다.



(a)



(b)

Fig.5 (a) Rectangular-shape structure etched from single scanning at P=4.0W, V=20mm/s, C=20%, and t=127mm. (b) Variation of etch depth in milling with respect to the number of scanning, V=20mm/sec

IV. 결론

레이저에칭을 이용한 티타늄 박판의 미세가공을 통해 레이저에칭 기술을 이용하여 반도체가공공정을 활용하지 않고도 간단히 2차원 혹은 단순한 3차원 금속 미세구조물 제조가 가능하다는 것을 보였다. 레이저에칭에 있어서 에칭용액의 농도는 에칭을 및 에칭부의 단면형상을 결정하는 중요한 변수이며 이는 주로 농도에 따른 에칭용액의 점성변화에 기인한 것으로 판단된다. 레이저출력 또한 중요한 공정변수로 에칭부의 너비는 출력에 대해 선형적으로 증가하나 깊이는 $\exp(-E/RT)$ 의 관계에 따라 변하는 것으로 나타났다. 레이저에칭을 통해 수십마이크로미터 크기의 미세구조물 제조기술 특히 금속재료의 가공이 가능하다는 것을 보였으며 보다 작은 크기의 구조물 가공기술로의 개발도 가능할 것으로 기대된다.

V. 참고문헌

1. K. Wang, The use of titanium for medical applications in the USA , Materials Science and Engineering, A213 (1996) 134-1371.
2. M.C. Carrozza, A. Eisinberg, A. Menciassi, D. Campolo, S. Micera, and P. Dario, Towards a force-controlled microgripper for assembling biomedical microdevices , J. Micromech. Microeng. 10(2000) 271-276
3. Dieter Bauerle, Laser Processing and Chemistry, 3rd Ed., Springer, 2000, p.285
4. David R. Lide, Handbook of chemistry and physics, 80th Ed., CRC Press, 1999
5. 신용산, 정성호, '레이저 유도 습식에칭을 이용한 티타늄의 3차원 미세가공', 한국레이저가공학회 2001년도 추계학술발표대회 논문집, p.35