

레이저 유도 열화학 습식에칭을 이용한 티타늄 미세구조물 제조

신용산*, 손승우*, 정성호#

Laser-induced Thermochemical Wet Etching of Titanium for Fabrication of Microstructures

Youngsan Shin*, Seungwoo Son* and Sungho Jeong#

ABSTRACT

Laser-induced thermochemical wet etching of titanium in phosphoric acid has been investigated to examine the feasibility of this method for fabrication of microstructures. Cutting, drilling, and milling of titanium foil were carried out while examining the influence of process parameters on etch width, etch depth, and edge straightness. Laser power, scanning speed of workpiece, and etchant concentration were chosen as major process parameters influencing on temperature distribution and reaction rate. Etch width increased almost linearly with laser power showing little dependence on scanning speed while etch depth showed wide variation with both laser power and scanning speed. A well-defined etch profile with good surface quality was obtained at high concentration condition. Fabrication of a hole, micro cantilever beam, and rectangular slot with dimension of less than 100 μ m has been demonstrated.

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

1. 서론

접촉식 기계가공은 진동, 채터, 버 등에 의해 가공정도가 저하되고 공구수명이 단축되며 고경도의 취성재료를 가공하기 어렵다. 이에 반해 레이저 가공은 대표적인 비접촉식 가공방법으로 고밀도의 빛을 이용하므로 세라믹, 유리 등의 취성재료와 매우 얇은 박판을 공구의 마모 없이 가공할 수 있다^{1,2}.

한편 금속 재료의 레이저 어블레이션을 이용한 직접가공은 레이저로부터 흡수된 열에너지에

의해 가공이 이루어지므로 열변형과 열응력, 열영향부에서의 변태, 용착 등에 의해 가공정도를 얻는데 한계가 있다³.

레이저 유도 열화학 습식에칭(이하 간단히 레이저에칭으로 칭함)은 레이저 빔에 의해 국소적으로 가열된 부분에서 발생하는 소재와 에칭용액과의 화학반응을 이용하여 소재를 부분적으로 제거하는 가공방법으로, 용액속에서 가공이 진행되므로 열영향부가 작으며 화학반응이 미소영역내에서만 일어나므로 미세가공이 가능하고 가공표면이 깨끗하다⁴⁻⁶.

* 접수일: 2003년 8월 18일; 게재승인일: 2004년 1월 9일
* 광주과학기술원 대학원 기전공학과
교신저자: 광주과학기술원 기전공학과
Email: shjeong@kjst.ac.kr, Tel. (062) 970-2393

티타늄은 내부식성(corrosion resistance), 비강도(strength-to-weight ratio), 유연성이 우수(low modulus of elasticity)하여 고강도 구조물이나 의료용 부품에 많이 쓰이며, 마이크로 유체소자(microfluidics)나 MEMS 수동소자 등의 제조에 응용될 수 있을 것으로 기대되는 금속재료이다^{7,8}. 향후 지능형 마이크로 시스템 구현에 있어서 고기능성 금속재료의 고정밀 미세가공은 부품의 소형화에 기여할 것으로 예상된다.

본 논문에서는 레이저에칭으로 티타늄을 미세 가공하는데 있어서 레이저 출력(P), 에칭용액의 농도(C), 레이저 빔 이송 속도(V) 등의 공정변수가 가공형상의 너비와 깊이, 에칭률등에 미치는 영향을 분석하여 각 공정변수의 특성을 파악하고 절단 가공과 밀링가공을 이용하여 간단한 외팔보 형 구조물과 사각형 미세 홈을 가공하여 레이저에칭을 이용한 미세형상 구조물 제조의 가능성을 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 1 은 레이저에칭 실험장치의 개략도로 레이저시스템, 광학계, 반응용기, 이송계, 이송계 제어부 등으로 구성되어 있다. 실험에 사용된 레이저는 파장 514.5nm, 최대출력 3.8W, 빔 직경 1.8mm 의 아르곤 이온 레이저(Coherent, Innova

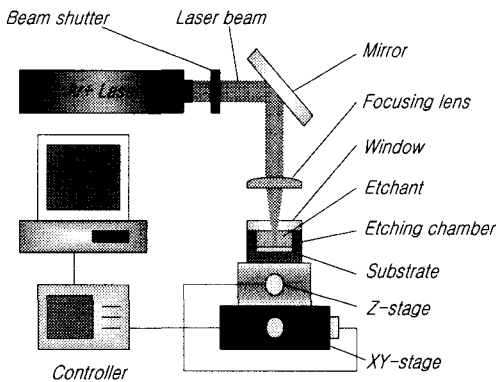


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

308)이다. 레이저 빔은 렌즈(f=50mm)를 통해 소

재의 표면에 집속되며 소재표면에서의 직경은 칼날(knife-edge)방법을 이용해 측정된 결과 약 20 μ m 이었다. 시편이 놓여지는 반응용기는 에칭 용액과의 화학반응을 방지하기 위해 테프론(Teflon)으로 제작되었으며 x, y, z 방향으로 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 조사 되도록 하였다.

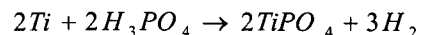
실험에 사용된 소재는 두께 50 μ m 와 127 μ m 의 티타늄(titanium)박판이며 에칭용액은 인산(H₃PO₄, 85%)수용액으로 증류수로 농도를 조절하며 실험하였다. Table 1 은 농도 변화에 따른 인산수용액의 물성치 변화를 농도가 0%인 증류수를 기준으로 비교한 값이다⁹. 에칭용액의 농도가 증가할수록 밀도나 굴절률의 변화에 비해 점성의 변화가 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 밀도와 굴절률 변화에 따른 레이저 빔의 흡수 및 초점 직경 변화는 상대적으로 무시할 수 있는 반면 점성변화는 초점부근에서 용액의 미세 유동과 확산에 영향을 미쳐 결과적으로 에칭률과 에칭형상을 변화시킬 것으로 예상된다.

Table 1 Normalized properties of liquid H₃PO₄

| Concentration [%] | Density | Refractive index | Kinetic viscosity |
|-------------------|---------|------------------|-------------------|
| 0 (pure water) | 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 |

3. 실험결과 및 고찰

레이저에칭시 티타늄과 인산수용액의 화학반응은 아래식으로 표현된다.



반응 후 생성된 물질은 2TiPO₄와 3H₂로 2TiPO₄는 물에 용해되며 수소가스 3H₂는 가열된 용액이 상변화 할 때 발생하는 기체와 함께 미세 기포발생

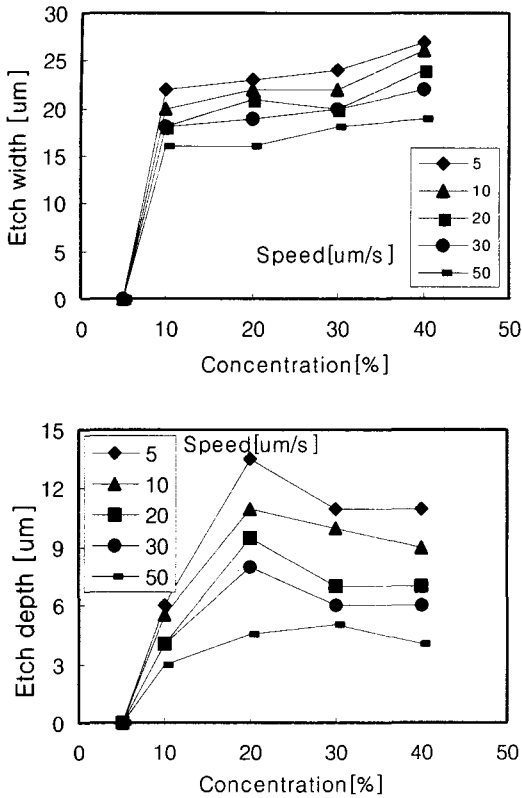


Fig. 2 Variation of etch width and depth with respect to etchant concentration: P=0.4W, t=127μm

의 원인이 된다.

Fig. 2는 에칭용액의 농도를 40%까지 변화시키며 127μm 두께의 박판을 0.4W의 출력으로 레이저에칭했을 때 에칭깊이와 너비의 변화를 보여준다. 에칭용액의 농도가 10%미만일 때는 에칭률이 너무 낮아 에칭이 거의 되지 않았다. 임계값 이상의 농도에서는 에칭용액의 농도가 증가할수록 에칭너비가 조금씩 증가함을 볼 수 있는데, 이는 에칭용액의 농도가 높을 때는 화학반응성이 높아 가우시안빔의 바깥쪽 부분에서도 화학반응이 일어나기 때문이다. 반면, 에칭깊이는 에칭용액의 농도가 20%일때 까지는 농도가 증가함에 따라 증가하다가 더 높은 농도에서는 점점 감소함을 볼 수 있다. 이는 Table 1에서 보듯이 농도가 증가할 때 점성도 크게 증가하여 에칭용액이 화학반응이 일어나는 레이저초점 부근에 원활히 공급되지 못하기 때문인 것으로 생각된다.

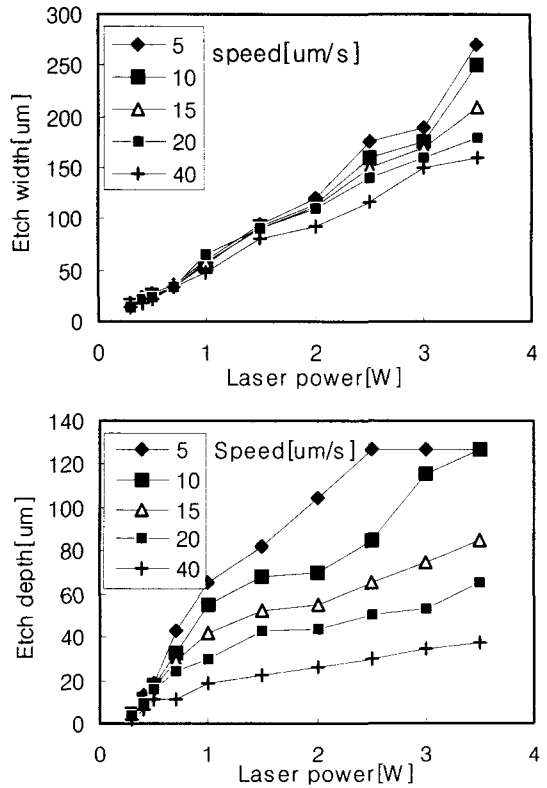


Fig. 3 Variation of etch width and depth with respect to laser power: C=40%, t=127μm

레이저출력은 에칭너비와 깊이를 결정하는 또 하나의 중요한 공정변수이다. Fig. 3에서 보듯이 에칭너비와 깊이는 레이저출력에 비례한다. 레이저출력이 일정할 때는 에칭너비와 깊이 모두 이송속도가 느릴수록 커지는데, 그 변화폭에는 상당한 차이가 있다. 레이저에칭시 화학반응은 대부분 레이저초점 부근에서 일어나는데, 시편표면에 평행한 방향으로의 에칭은 주로 표면방향으로의 열전도에 의해 일어난다. 반면, 표면에 수직인 방향으로의 에칭은 레이저빔의 조사시간에 크게 좌우되며, 따라서 에칭깊이는 이송속도변화에 의해 민감하게 변한다. 낮은 레이저 출력에서는 이송속도가 증가함에 따라 에칭깊이가 선형적으로 감소하지만, 높은 출력에서는 거의 지수적으로 감소한다. 에칭깊이는 실제 에칭률과 밀접한 관련이 있으므로 Fig. 3의 레이저출력에 따른 에칭깊이 변화를 Fig. 4와 같이 레이저출력에 대해 나타낼 경우 일반적

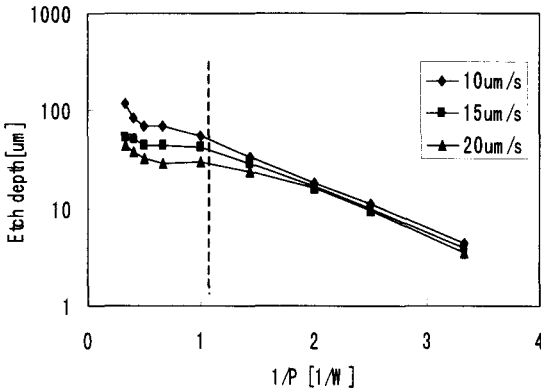


Fig. 4 Etch depth vs. inverse laser power. The variation of depth closely follows the Arrhenius relation

으로 화학반응률을 나타내는 Arrhenius 식, $R \propto \exp(-E_a/k_B T)$ 의 관계를 따르는 것을 알 수 있다. 여기서 R은 화학반응률, E_a 는 활성화에너지, k_B 는 Boltzmann 상수이다.

에칭홈의 단면형상은 에칭용액의 농도에 따라 매우 크게 변한다. Fig. 5는 각각 40%와 20%의 에칭용액에서 이송속도를 증가시키며 가공한 에칭홈의 단면형상을 보여준다. 높은 농도에서는 에칭홈이 역삼각형의 비교적 뾰족한 단면을 갖게 되며 이러한 형상은 레이저빔의 이송속도가 증가하여도 거의 동일하게 유지된다. 한편 용액의 농도가 낮은 경우에는 단면형상은 훨씬 둥근 모양을 가지며 홈의 폭은 깊이 방향으로 서서히 감소한다. 또한 홈 바닥면의 경우 높은 농도에서는 평평한 반면 낮은 농도에서는 울퉁불퉁한 형상을 보여준다. 높은 농도에서 홈모양의 일관성은 레이저에칭 반응이 아주 안정적임을 의미하며, 이는 주기적인 모양의 미세홈구조나 미세유체기구 제작에 응용될 수 있음을 의미한다. 농도에 따른 에칭홈형상의 차이는 Table 1에서 나타난 바와 같은 농도에 따른 점성변화에 기인한다. 점성이 높을 때는 에칭용액이 좁은 홈으로 빨리 공급 되지 못하므로 반응부에서 에칭용액이 부족하게 된다. 따라서 에칭반응은 에너지가 가장 높은 레이저빔의 가운데 부분에 한정해서 일어난다. 아울러 화학반응으로 발생한 수소gas와 레이저초점 주변의 가열된 용액의 상변화로 발생 하는 기체도 형상의 차이에 기여했을 것으로 생각된다¹⁰. 에칭용액의 농도가 낮

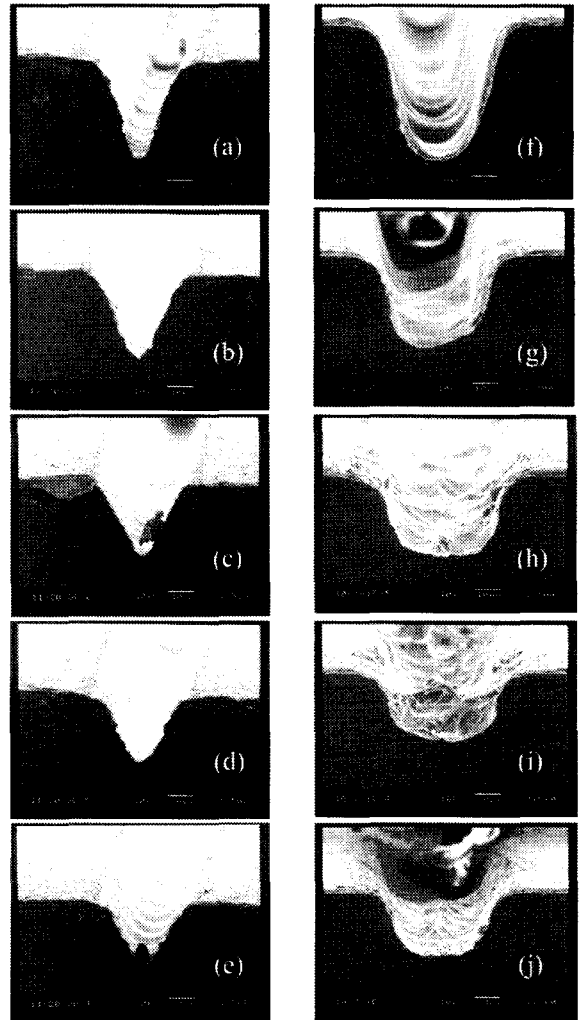


Fig. 5 Scanning electron microscopies of the cross section of workpieces etched at different conditions. (a)-(e):C=40% and P=0.7W, scanning velocity increase from 5μm/sec, (a), to 25μm/sec, (e), with 5μm/sec step and (f)-(j): C=20% and P=1.0W, scanning velocity increase from 5μm/sec, (f), to 25μm/sec, (j), with 5μm/sec step.

을 때는 홈에서 배출되는 기포가 쉽게 팽창하며 에칭용액의 활발한 교류를 유도하면서 표면으로 빠져나온다. 이때 배출되는 기포들이 입사되는 레이저빔을 넓은 영역에 걸쳐 산란시켜 결과적으로

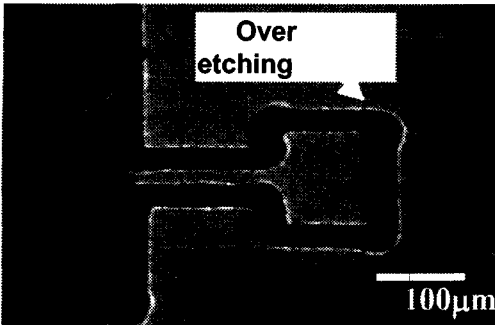


Fig. 6 Cantilever-shape structure etched at C=40%, P=1200mW, V=6μm/s, t=50μm

넓은 에칭홈과 울퉁불퉁한 바닥을 야기했을 것으로 추정된다.

레이저에칭의 미세구조물 가공에의 응용가능성을 살펴보기 위해 티타늄 박판의 절단, 드릴링, 밀링가공을 실시하였다. Fig. 6 은 레이저빔을 1 회 조사하여 50μm 두께의 박판을 절단을 통해 외팔보형 빔을 가공한 사진이다. 높은 레이저출력에서는 절단의 균일성과 직진도가 우수하였으나 낮은 출력에서는 다소 불안정하였다. Fig. 6 의 경우 레이저출력을 고정시킨 상태에서 이송계를 이용하여 시편을 x-y 방향으로 이동하면서 가공하였으며, 직

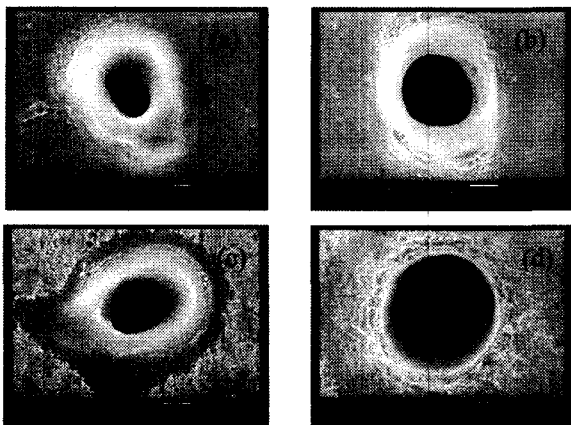
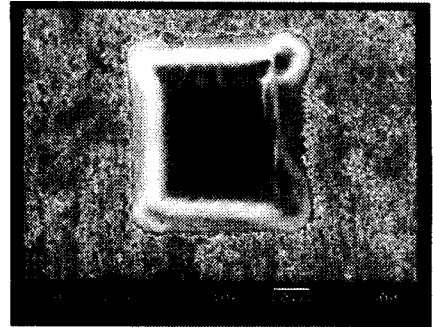
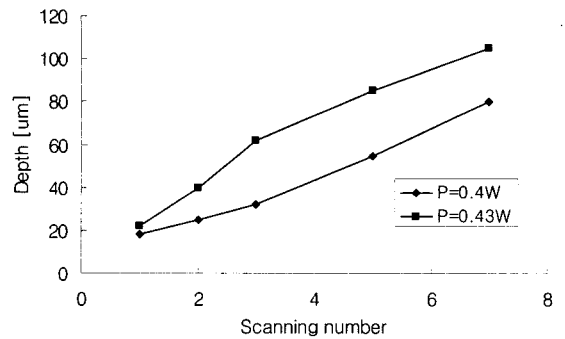


Fig. 7 Holes etched at different conditions. C=40% : (a)t=50μm, P=0.7W, T=20sec, (b)t=50μm, P=0.9W, T=40sec, (c)t=127μm, P=0.7W, T=90sec, (d)t=127μm, P=1.5W, T=60sec



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Rectangular-shape structure etched from single scanning at P=4.0W, V=20μm/s, C=20%, and t=127μm. (b) Variation of etch depth in milling with respect to the number of scanning, V=20μm/sec

선의 방향이 바뀌는 모서리 부분에서 상대적으로 레이저빔 조사시간이 길어져 과에칭이 발생했다. 과에칭을 방지하기 위해서는 레이저출력의 실시간 제어나 빔경로의 최적화 등이 필요한 것으로 나타났다.

Fig. 7 은 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 나타났다. 레이저에칭동안 발생한 수소가스와 수증기의 유동이 드릴링 결과에 크게 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 드릴링된 구멍의 최종형상도 Fig. 7 (a)나 (c)와 같이 불균일하게 되는 것으로 보인다^{11,12}. 레이저출력을 증가시키면 에칭이 일어나는 초점 부근에서 매우 많은 양의 기포가 고르게 발생하며 이들 기포는 입사되는 레이저빔을 보다 균일하게 산란시키게 되어 비교적 원형에 가까운 형태의 구멍을 드릴링하는 것이 가능하였다. 그러나 산란에 의해 초점크기 보다 넓은 영역으로 레이저빔이 퍼지게 되므로 구멍의 직경 역시 Fig. 7 (b)나 (d)에서처럼 증가하게 된다.

Fig. 8 (a)는 레이저에칭을 이용한 사각형 모양의 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 비교적 매끈하고 편평한 것으로 나타났다. 구조물의 에칭깊이는 Fig. 8(b)에서처럼 에칭반복횟수에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 그러나 절단의 경우와 마찬가지로 레이저빔이 방향을 전환하는 모서리 및 가장자리 부근에서는 과에칭이 일어나고, 또한 반복횟수가 증가하면서 바닥의 편평도가 떨어지는 것이 관찰되었다.

레이저에칭을 이용한 미세홈가공, 절단, 드릴링, 밀링등의 공정은 금속재료의 정밀가공에 유용하게 활용될 수 있다. 금속의 경우 기존의 반도체 공정으로는 두께나 깊이가 큰 경우 가공이 곤란하고 시간이 너무 오래 걸리는 어려움이 있었으나 본 연구에서와 같이 레이저를 이용하여 손쉽게 원하는 가공을 할 수 있다. 아울러 마이크로열시스 템이나 반응기등과 같이 미세금속구조물이 요구되는 분야에 응용이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

레이저에칭을 이용한 티타늄 박판의 미세가공을 통해 레이저에칭을 이용하여 반도체가공공정을 활용하지 않고도 2차원 혹은 간단한 3차원 금속 미세구조물 제조가 가능하다는 것을 보였다. 레이저에칭에 있어서 에칭용액의 농도는 에칭률 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 Arrhenius 관계식인 $R \propto \exp(-E_a/k_B T)$ 에 따라 변하는 것으로 나타났다. 가공점 부근에서의 에칭용액의 미세유동과 가공중 발생하는 미세한 기포에 의해 레이저빔이 산란되거나 미세기포가 빠져나가는 양상에 따라 가공형상이 영향을 받으므로, 기포 발생을 억제하거나 기포 배출을 조절하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 레이저에칭을 통해 수십마이크로미터 크기의 미세구조물 제조기술 특히 금속재료의 가공이 가능하다는 것을 보였으며 보다 작은 크기의 구조물 가공기술로의 개발도 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Kanaoka, M., 레이저 가공기술, 한국산업정보센타, pp. 13-14, 2000
2. Ready, J. F., Industrial applications of lasers, 2nd ed, Academic Press, pp. 335, 1997
3. Luft, A., Franz, U., Emsermann, A. and Kaspar, J., "A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling," App. Phys. A, Vol. 63, pp. 93-101, 1996
4. Bauerle, D., Laser processing and chemistry, 3rd ed, Springer, pp. 285, 2000
5. Metev, S., Laser-assisted microtechnology, 2nd ed, Springer, pp. 210, 1998
6. Park, J. M. and Jeong, H. D., "A study on the argon laser assisted thermochemical micro etching," KSPE, pp. 844-847, 2001
7. International Titanium Association webpage (www.titanium.net)
8. Kim, S. H., "A study on the grinding of titanium alloy, part 2: Grinding characteristics by using superabrasives," KSPE, pp.1076-1079, 2001
9. Lide, D. R., Handbook of chemistry and physics, 80th ed, CRC Press, pp. 8-70, 1999
10. Hussey, B.W., Haba, B. and Gupta, A., "Role of bubbles in laser-assisted wet etching," Appl. Phys. Lett., Vol. 58, pp. 2851-2853, 1991
11. Nowak, R. and Metev, S., "Thermochemical laser etching of stainless steel and titanium in liquids," Appl. Phys. A, Vol.63, pp. 133-138, 1996
12. Lu, Y. F., "Wet- chemical etching of Mn-Zn Ferrite

by focused Ar⁺-laser irradiation in H₃PO₄,” Appl.
Phys. A, Vol. 47, pp. 319-325, 1988