고세장비 미세홈 가공 및 마이크로 히트파이프에의 응용

Micromachining of high-aspect-ratio grooves and their application for micro heat pipe

광주과학기술원 기전공학과 오광환, 이민규, 정성호

Ⅰ. 서론

현재, 산업 현장에서 생산 중인 전자 소자들은 MEMS 및 NEMS 기술의 발전과 함께 점점 소형화 및 고밀도화 되어가고 있으며 이러한 소자들의 구동 시스템 또한 고집적화 되고 있다. 특히, 노트북 컴퓨터, 휴대용 소형 발전기 등 개인 휴대용 시스템의 발전이 급성장하면서 이에 수반되는 많은 문제점도 발생한다. 그 중, 소자 내부에서 발생하는 열은 전체 시스템의 성능 저하를 가져올 뿐만 아니라 시스템의 오동작을 유발하며 소자 파손 및 파괴의 원인이 되기도 한다. 이러한 열 발생에 대한 해결책으로 소자 제조 시, 저전력 구동 소자로 만드는 회로설계 기술이 있으나 아직은 기술 개발의 단계에 머물러 있으며 고밀도, 고집적화가 어렵다는 난관을 극복해야 한다. 반면, 마이크로 열시스템의 요소 기술을 바탕으로 한 마이크로 히트파이프(micro heat pipe)는 간단한 구조와 쉬운 조작 및 외부에서 공급되는 동력 없이 작동이 가능하다는 장점을 지닌 열전달 소자로서 최근 들어 소형화, 고집적화 된 각종 응용 소자 내부의 열 제거원으로서 많이 이용되고 있다. 일반적으로 마이크로 히트파이프는 그 내부에 심지 역할을 하는 '윅(wick)'을 가지고 있으며 구조가 간단하여 쉽게 제조될 수 있다 [1]. 그러나 이러한 형태의 윅은 그 직경을 3~4mm 이하로 가져갈 수 없으며 이에 따라 제조될 수 있는 히트파이프의 최소 크기에 제한을 가진다 [2]. 이러한 단점을 해결할 수 있는 윅이 미세홈 구조이며 히트파이프의 소형화를 위해서는 미세홈을 가지는 구조로의 제작이 요구된다 [3-4]. 미세홈 구조를 가지는 마이크로 히트파이프의 열전달 특성은 내부의 모세관력에 의해 결정되며 따라서 고효율 및 고성능의 히트파이프를 제작하기 위해서는 열전달계수가 큰 금속 재료에 폭이 좁고 깊이가 깊은 고세장비의 미세홈을 제조할 수 있는 초정밀 가공기술이 필요하다.

최근 들어 펨토초 레이저(femtosecond laser)를 이용한 초정밀 가공에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 이를 이용한 열변형이 없는 우수한 품질의 미세홈 및 미세구멍 등과 같은 구조물이 많이 제조되고 있다 [5-6]. 그러나 최적의 가공 조건을 단시간에 설정하기 어려우며 복잡한 장치와 고가의 시스템 등의 이유로 아직도 보편화되지 못하고 있다. 금속의 정밀 가공에서 가장 일반적으로 이용되고 있는 방전 가공(electro-discharge-machining)의 경우, 현재 수십 μm 이하까지의 초정밀 가공이 가능하나 가공 수치에 맞는 공구 제작 및 마모라는 단점과 가공 시간이 느리다는 취약점을 가진다. 또한, 수 μm의 가공 정밀도를 갖는 전자빔 공정 및 LIGA 공정을 이용하면 초미세 가공이 가능하지만 각각 진공장치나 X-선 발생장치와 같은 고가의 특별한 시설을 요구하므로 설비비 측면에서 경쟁력이 떨어진다.

반면, 레이저 가공의 한 분야인 레이저유도 습식에칭(laser-induced wet etching, 이하 '레이저 에칭') 공정의 경우, 금속 시편과 에칭 용액 사이에서 일어나는 화학 반응을 레이저가 더욱 원활히 일어나게끔 유도하므로서 국부적으로 시편의 원하는 부분을 제거할 수 있다는 장점을 가진다. 또한, 에칭 용액의 대류열전달에 의한 시편의 냉각 효과가 있어서 공기 중에서 직접적

으로 소재를 제거하는 레이저 어블레이션(laser ablation) 가공에 비해 열영향부(heat affected zone)가 없는 깨끗한 형상의 구조물을 제작할 수 있으며, 원하는 형상을 따라 레이저 초점을 이동시키면서 조사 영역에서 직접적인 소재의 제거와 구조 형성이 동시에 일어나게 하는 직접 묘화(direct writing) 기술의 적용으로 비교적 간단하게 초정밀 가공을 할 수 있다.

본 연구에서는 안정적인 출력 특성과 균일한 에너지 분포 특성을 지닌 DPSS 레이저를 이용하여 내부식성, 우수한 가공성 및 높은 열전달계수를 가지는 스테인레스 스틸(이하 'STS-304') 박편 상에 레이저 에칭 공정으로 고세장비를 갖는 미세홈 구조를 형성하였다. 그리고 다양한 공정 조건으로 가공된 구조물을 분석하고 고세장비 미세홈을 제조할 수 있는 최적의 조건을 도출하였다. 또한, 히트파이프 제작을 위한 설계를 바탕으로 최적의 공정 조건을 이용하여 고세장비 미세홈 구조의 마이크로 히트파이프를 제작하고 그 특성을 분석하였다.

Ⅱ. 실험방법

고세장비 미세홈 제조를 위한 레이저 에칭 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 532nm의 중심파장 및 8W의 최대 출력을 갖는 diode-pumped solid-state(DPSS) CW 레이저가 시편과 에칭 용액 사이의 원활한 화학 반응을 유도하는 열원으로 사용되었다. DPSS 레이저빔은 시편 표면에서 집속 효율을 높이고 빔 경로 상에 놓여 있는 광학계들의 보호를 위해 5배 빔확대기를 거친 후 선형편광기와 1/4파장판을 통과하여 원형편광으로 변환된다. 선형편광 된 레이저빔을 원형편광으로 만드는 이유는 시편 표면으로부터 반사되는 빔에 의한 레이저 시스템의 손상을 방지함과 동시에 편광 상태에 따른 가공 결과의 변화를 최소화하기 위해서이다 [7]. 1/4파장판을 통과한 레이저빔은 대물렌즈(NIR, 5×, N.A.=0.14, DOF=14μm)를 통해 시편 표면에 집속된다. 에칭 용액과 시편이 담긴 챔버는 X-Y-Z 미세 이송계 위에 장착되어 있으며 화학 반응을 방지하기 위하여 테플론(Teflon®) 재질로 제작되었다. 미세 이송계는 정밀도가 1μm인 모터로 구동되며 PC에 장착된 미세 이송계 제어장치를 이용하여 시편의 이송 경로를 제어하였다. 에칭 가공 중, 원활한 에칭 용액의 공급과 가공 중에 발생하는 미세기포를 레이저 초점 주위에서 효과적으로 제거하기 위하여 연동 펌프를 이용하여 에칭 용액을 정량적으로 순환시켰으며 챔버의 덮개 부분은 석영(quartz)으로 제작하여 에칭 용액의 유출을 방지하였다. 그리고 시편이

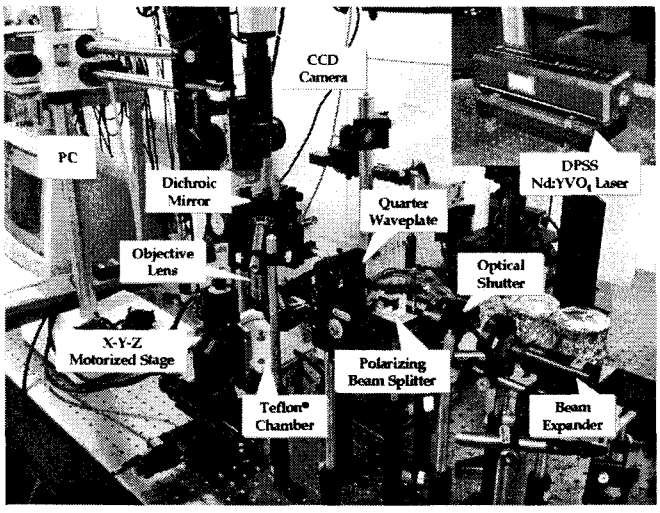
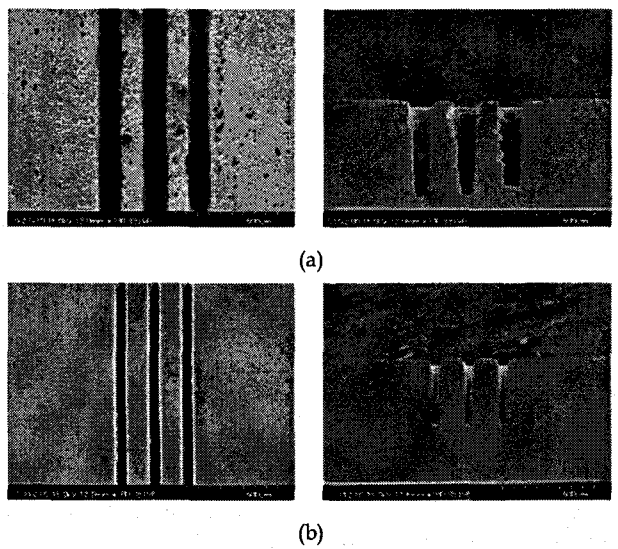


Fig. 1 Photograph of the experimental setup for laser-induced etching

에칭되는 전 과정은 charge-coupled-device(CCD) 카메라를 통하여 실시간으로 관찰되었다. 또한, 실험에 사용된 시편은 STS-304(AISI 304, Fe72/Cr18/Ni10, t=500μm) 박편으로 가로, 세로를 각각 1cm 크기로 가공한 후 표면을 연마하여 사용하였으며, 에칭 용액은 인산(H_3PO_4, 85%)으로서 증류수와 혼합하여 농도를 조절해가면서 실험하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

우수한 가공품질을 가지는 미세홈 구조물 제조를 위해서는 금속 시편 상에서 레이저빔이 국부적으로 조사되는 부분만 원활한 반응을 일으키는 반면 레이저빔이 조사되지 않는 부분에서는 쉽게 가공이 되지 않는 에칭 용액을 선택하는 것이 무엇보다도 중요하다. 그 이유는 미세홈 구조를 갖는 마이크로 히트파이프의 경우, 제한된 외형 수치 내에서의 미세홈 개수가 소자의 성능을 결정짓는데 높은 에칭율을 갖는 에칭 용액에서 시편이 가공되면 미세홈 제조 시, 홈의 폭이 상대적으로 넓어지므로 홈과 홈 사이의 간격을 최소화하기 어렵고, 결과적으로 홈의 개수를 많게 가져갈 수 없기 때문이다. 선행된 연구에 의하면 STS-304의 에칭을 위하여 황산수용액(H_2SO_4)이 많이 이용되었기 때문에 [8-9] 본 연구에서는 황산수용액(H_2SO_4)과 아울러 결과 비교를 위하여 인산수용액(H_3PO_4)에서도 실험을 병행하였다. Figure 2는 10% H_2SO_4와 10% H_3PO_4에서 각각 제조된 미세홈의 표면과 단면을 나타내고 있다. H_2SO_4에서 제조된 미세홈의 경우, Fig. 2 (a)에서와 같이 높은 에칭율에 의하여 홈의 폭이 넓고 불규칙적인 단면의 구조를 가짐을 알 수 있다. 또한, 레이저 초점 주위에서 반사 혹은 산란된 레이저빔에 의해 표면이 우수하지 못한 현상을 보인다. 반면, Fig. 2 (b)에서와 같이 H_3PO_4에서 제조된 미세홈은 깊이 방향으로 균일하게 가공될 뿐만 아니라 깨끗한 형상의 표면을 가진다. 더욱 중요한 것은 Fig. 2 (a)에서는 200μm 홈 간격을 가지는 반면 Fig. 2 (b)에서와 같이 H_3PO_4에서는 150μm의 홈 간격으로 가공되었다는 것이다. 즉, H_3PO_4에서는 훨씬 좁은 간격으로 미세홈의 제조가 가능하므로 마이크로 히트파이프 제조 시, 더 많은 홈 구조를 형성할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 고세장비 미세홈 구조를 제조하기 위하여 H_3PO_4를 에칭 용액으로 이용하였다.



(a)

(b)

Fig. 2 SEM photographs for etch width and depth of microgrooves fabricated in the conditions of P=2W, V=10μm/s, N=5, and two different etchants; (a) 10% H_2SO_4 and (b) 10% H_3PO_4

Figure 3은 10%와 40%의 각각 다른 두 농도의 H_3PO_4에서 레이저 출력의 변화에 따라 제조된 미세홈의 폭, 깊이 그리고 세장비의 변화를 나타낸 그래프이다. 미세홈의 폭과 깊이의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 공정 변수는 레이저 출력(P)으로서 가우시안(Gaussian) 분포를 갖는 레이저빔의 특성으로 설명이 가능하다. 즉, 레이저 출력이 낮은 경우, 가우시안 분포의 중심 부분 근처에서만 에너지 강도가 가공이 가능한 문턱값(threshold) 이상이 되므로 바닥부분으로 갈수록 뾰족한 V 형상의 홈이 가공되고 그 결과 Fig. 3 (a)에서와 같이 20μm 이하의 폭을 가진다. 한편, 출력이 증가하여 가우시안 분포의 전 영역이 에칭 문턱값 이상이 되더라도 미세홈의 폭 변화는 크게 증가되지 않는데 그 이유는 가우시안 형태의 가장자리 부분은 에칭 용액의 대류에 의해 냉각되어 시편과 에칭 용액의 화학반응을 유도할 수 없기 때문으로 판단된다. 본 실험에서는 또한, 깊이 방향으로 깊은 홈 구조를 형성하기 위하여 한번 가공이 된 부분을 다시 가공하는 반복 에칭을 시도하였다. 최적의 반복 횟수(N)를 설정하기 위하여 N=1에서 10까지 실험을 수행하였고 그 결과 최적의 반복 횟수는 N=5 임을 실험적으로 파악하였다. 5회 이상의 경우에는 레이저 에너지가 이미 깊게 형성된 홈의 바닥부분까지 도달하지 못하고 홈의 벽면으로 흡수 또는 산란되어 깊이 방향으로의 에칭이 더 이상 진행되지 못했다. 따라서 레이저 에칭 공정을 이용하면 일정한 레이저 출력에 대하여 반복 에칭을 적절히 수행하므로서 Fig. 3 (b)에서와 같이 10 이상의 고세장비를 갖는 미세홈을 제조할 수 있음을 알 수 있다.

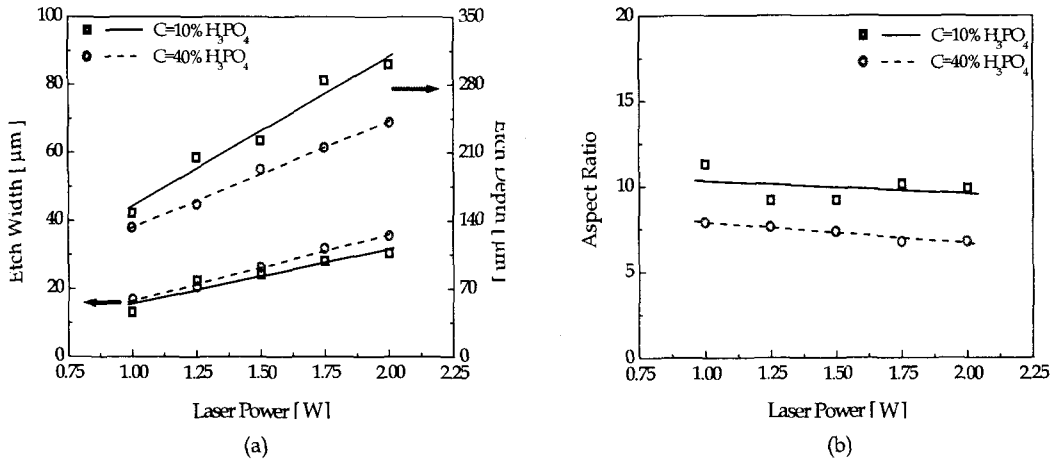
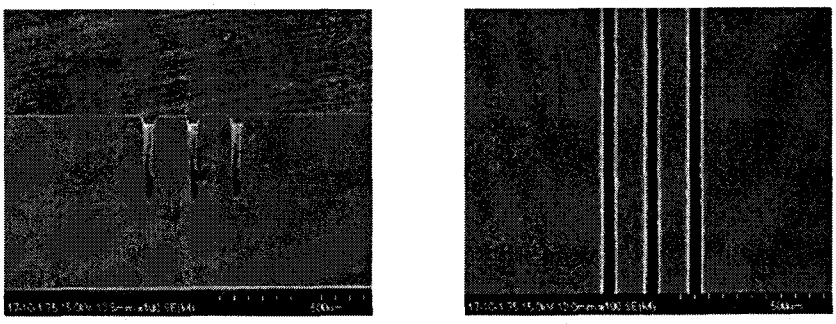


Fig. 3 (a) Etch width and depth variations of microchannels fabricated at different etchant concentrations. Other process parameters are V=10μm/s and N=5, and (b) the corresponding aspect ratio

Figure 4는 고세장비 미세홈 구조의 마이크로 히트파이프 제조를 위해 설정된 최적의 공정 조건으로 가공된 미세홈의 표면과 단면을 보여준다. 미세홈을 가공하기 위한 공정 변수로 P=1.75W, V=10μm/sec, N=5 그리고 10% H_3PO_4가 이용되었다. Figure 4 (a)에서 보는 바와 같이 10%의 낮은 농도에서 가공된 홈은 시편 표면에서부터 바닥면까지 전체적으로 좁고 깊은 U 형상의 단면 구조를 가지며 [10], 그 결과 10 이상의 높은 세장비를 가진다는 것을 Fig. 3 (b)에서 확인할 수 있다. 또한, Fig. 4 (b)와 같이 우수한 품질의 가공 표면과 균일한 폭을 가지는 고세장비의 미세홈 제조가 가능하다.

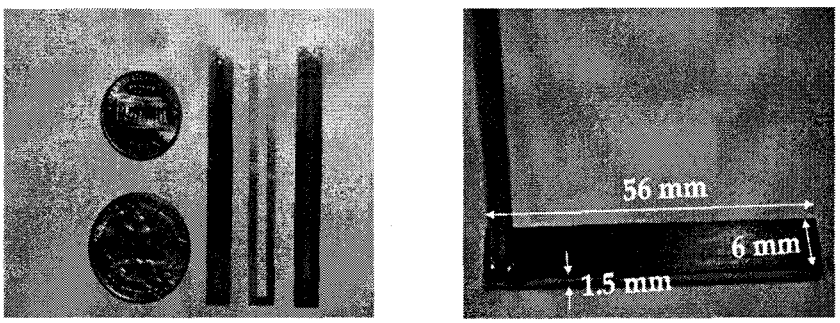
위에서와 같이 미세홈 제조를 위해 설정된 최적의 공정 조건으로 본 연구에서는 고세장비 미세홈 구조의 판형 마이크로 히트파이프를 STS-304 재질을 이용하여 제작하였다. Figure 4에



(a) (b)

Fig. 4 Etch (a) depth and (b) depth of the microgroove fabricated in the conditions of P=1.75W, V=10μm/s, N=5, and 10% H_3PO_4

서 제조된 조건으로 500μm 두께의 STS-304 박판에 50mm 길이의 미세홈을 각각 15개씩 상판과 하판에 가공하였다. 또한, 외부에서 전도되는 열에 의해 기화되는 작동 유체가 통과할 수 있는 증기 통로구를 위하여 중간판을 상·하판과 똑같은 크기로 방전 가공을 이용하여 제작하였다. 증기 통로구의 단면적은 1mm^2 (2mm × 0.5mm)이다. Figure 5 (a)는 레이저 에칭 공정으로 형성된 고세장비 미세홈을 갖는 마이크로 히트파이프용 상판과 하판 그리고 중간판을 나타낸다. 작동 유체의 원활한 주입을 위하여 상판의 일부분에 직경 1mm 정도의 미세구멍을 방전 가공으로 형성하였다. 이렇게 제작된 상판, 중간판, 하판을 적층한 후 레이저 용접하여 완성한 판형 마이크로 히트파이프를 Fig. 5 (b)에서 보여준다. 작동 유체의 주입을 위해 가공된 상판의 미세구멍에 내경 1mm의 얇은 STS-304 관을 용접하고 최종 완성된 판형 마이크로 히트파이프의 크기는 56mm(L) × 6mm(W) × 1.5mm(H)이며 열전달 특성 평가를 위해 작동 유체로서 증류수를 이용하였다.



(a) (b)

Fig. 5 Photographs for (a) the top, middle, and bottom plates before laser-welding for packaging, and (b) the completed flat micro heat pipe with a STS-304 tube for the supply of working fluid

Figure 6은 제작된 마이크로 히트파이프의 축방향 열전달 특성을 보여준다. 증류수로 작동되는 STS-304 마이크로 히트파이프는 약 3.5W까지 dry-out 없이 정상적으로 작동되는 것을 확인하였다. 현재, 제작된 마이크로 히트파이프의 좀 더 정확한 특성 평가를 위한 실험이 진행중이다.

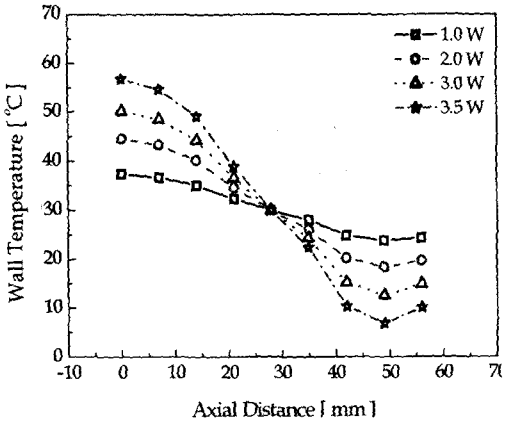


Fig. 6 Wall temperature distribution along the axial direction of micro heat pipe

Ⅳ. 결론

본 연구에서는 레이저 에칭 공정을 이용하여 금속의 고세장비 미세홈을 제조하고 그 기술의 유용성을 제시하였다. 레이저 에칭 공정으로 30μm 이하의 폭에서 300~350μm의 깊이를 가지는 홈 가공을 실현하였다. 또한, 최소 15μm의 폭에서도 10 이상의 높은 세장비를 가지는 미세홈 제조가 가능하다. 레이저 에칭 공정을 통하여 정밀하고 균일한 형상의 단면 구조 제조가 가능할 뿐만 아니라 열변형이나 열영향부가 거의 없는 우수한 품질의 가공 표면을 가진다. 결론적으로 레이저 에칭 기술은 미세홈 구조를 갖는 마이크로 히트파이프 제작에 효과적일 뿐만 아니라 더 나아가 마이크로 반응기(micro reactor)나 마이크로 연료전지(micro fuel cell) 등과 같은 미세홈 구조 기반의 마이크로 소자 제작에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 핵심기술개발사업인 '첨단레이저 응용 미세가공기술 개발' 과제의 지원으로 수행된 것입니다.

참고문헌

1. R. Ponnappan, "Novel groove-shaped screen-wick miniature heat pipe," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, **16**(1), pp. 17-21, (2002)

2. S. H. Moon, G. Hwang, S. C. Ko and Y. T. Kim, "Experimental study on the thermal performance of micro-heat pipe with cross-section of polygon," Microelectronics Reliability, **44**, pp. 315-321, (2004)

3. T. P. Cotter, "Principle and prospects for micro heat pipes," Proceeding of the 5th International Heat Pipe Conference, **4**, pp. 328-334, (1984)

4. R. Hopkins, A. Faghri and D. Khrustalev, "Flat miniature heat pipes with micro capillary grooves," Journal of Heat Transfer, **121**, pp. 102-109, (1999)

5. Y. Bellouard, A. Said, M. Dugan and P. Bado, "Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching," Optics Express, 12(10), pp. 2120-2129, (2004)

6. D. J. Hwang, T. Y. Choi and C. P. Grigoropoulos, "Liquid-assisted femtosecond laser

drilling of straight and three-dimensional microchannels in glass," Applied Physics A, 79, pp. 605-612, (2004)

7. Y. -F. Lu and K. -D. Ye, "Laser-induced etching of polycrystalline Al_2O_3TiC in KOH aqueous solution," Applied Physics A, **63**, pp. 43-49, (1996)

8. R. Nowak, S. Metev and G. Sepold, "Nd:YAG-laser-induced wet chemical etching of titanium and stainless steel," Sensors and Actuators A, **51**, pp. 41-45, (1995)

9. R. Nowak and S. Metev, "Thermochemical laser etching of stainless steel and titanium in liquids," Applied Physics A, **63**, pp. 133-138, (1996)

10. Kwang H. Oh, M. K. Lee and S. H. Jeong, "Fabrication of high-aspect ratio micro-channels with laser-induced wet etching," Autumn Annual Meeting Proceedings of KSLP 2005, pp. 122-127, (2005)