

마이크로 열소자 제작을 위한 고세장비 금속채널의 레이저 가공

오광환 · 이민규 · 정성호[†]

광주과학기술원 기전공학과

Ⓣ 500-712 광주광역시 북구 오룡동 1번지

(2006년 7월 11일 받음, 2006년 10월 18일 수정본 받음)

본 연구에서는 레이저유도 에칭기술을 이용한 스테인레스강의 고세장비 미세채널 제조에 대하여 기술한다. 공정 변수 최적화와 반복에칭을 통하여 높은 세장비를 갖는 미세채널을 제조하였으며 제조된 미세채널은 레이저출력과 에칭용액의 농도를 적절하게 조절함으로써 U 형상과 V 형상 사이의 단면 구조를 가지며 열변형이 없는 우수한 표면 형상을 보였다. 채널과 채널 사이의 간격은 150 μm 또는 그 이하이며 15 ~ 50 μm 범위의 폭을 갖는 10 이상의 고세장비 미세채널이 제조되었다. 레이저출력, 레이저초점의 이송속도, 에칭용액의 농도 등의 공정 변수들이 제조된 채널의 폭, 깊이 그리고 단면 형상에 미치는 영향에 대하여 자세히 보고한다.

주제어 : Laser-assisted etching, Laser micromachining, Microchannel, Micro heat pipe, Microthermal device.

I. 서 론

국소증착(laser-assisted chemical vapor deposition), 마킹(marking), 스크라이빙(scribing), 트리밍(trimming), 폴리머 광조형(photo polymerization), 에칭(etching), 어블레이션(ablation) 등과 같은 레이저 미세가공(laser micromachining)은 비교적 간단한 공정으로 다양한 소재에 응용이 가능하다는 장점 때문에 최근 들어 마이크로 소자 또는 나노 소자 제작에 활발하게 적용되고 있다. 현재, 레이저 및 광학 기술의 발전과 함께 마이크로미터 이하의 정밀도를 갖는 구조물을 레이저로 직접 제작이 가능하게 되었다^[1]. 이러한 마이크로미터 이하 크기의 구조물 제작에 있어서는 레이저 미세가공 기술의 적용이 아직 일반적이지 않으나 수 마이크로미터 크기의 구조물 제조는 적절한 레이저 시스템과 공정 변수들을 선택함으로써 레이저 가공을 통해 손쉽게 달성될 수 있다. 레이저 미세가공에 의해 제조될 수 있는 다양한 구조물 가운데 미세채널(microchannel)은 비교적 가공이 쉽고 형상이 간단하기 때문에 마이크로 히트파이프(micro heat pipe)^[2,3], 마이크로 반응기(micro reactor)^[4,5], 마이크로 펌프(micro pump)^[6], 마이크로 연료전지(micro fuel cell)^[7,8] 등과 같은 마이크로 소자 제작에 많이 응용되고 있는 구조이며 이에 따라 미세채널을 제작할 수 있는 미세가공 기술에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

레이저 가공기술의 하나인 레이저유도 습식에칭(laser-assisted thermochemical wet etching, 이하 ‘레이저에칭’)은 조사된 레이저빔이 액상의 에칭용액과 그 속에 담겨 있는 시편 사이에 열화학반응을 유도하여 선택적으로 시편을 제거함으로써 원하는 형상을 얻어낼 수 있는 레이저 미세가공 기술이다. 이 때, 레이저는 원활한 화학반응을 유도하는 열원으로 이용되며 과잉의 열은 상대적으로 온도가 낮은 에칭용액의

대류에 의해 효과적으로 제거되기 때문에 열변형이 거의 없는 가공이 가능하며 결과적으로 우수한 표면 및 단면 형상을 가지는 마이크로 구조물이 제조될 수 있다. 또한, 레이저에칭은 마스크 패턴이 필요 없는 직접 묘화(direct writing) 방식을 적용할 수 있기 때문에 원하는 형상을 비교적 간단히 바꿀 수 있다. 또한, 방전가공(electro-discharge-machining) 또는 LIGA 공정 등과 비교해 볼 때 비교적 적은 비용으로 시스템을 구성할 수 있으며 이러한 장점들 때문에 1980년대 초반부터 레이저에칭의 응용에 대한 다양한 연구들이 진행되어 오고 있다.

레이저에칭을 이용한 미세채널 제조에 관한 연구들 중, Haynes 등^[9]은 브롬(bromine)과 요오드(iodine) 수용액을 에칭용액으로 하여 각각 n-GaAs과 Cr이 도핑된 GaAs 상에 균일한 미세채널을 제조하여 레이저에칭의 미세채널 제조에의 응용 가능성을 보고하였다. Lu 등^[10]은 자기기록장치에 적용 가능성 여부를 조사하기 위하여 수산화칼륨(KOH) 수용액을 이용하여 다결정(polycrystalline) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 상에 제조된 미세채널의 폭 및 깊이에 대해 연구하였다. 또한, Hussey 등^[11]은 KOH를 이용하여 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 상에 미세채널을 제조한 후 레이저출력과 이송속도에 따른 채널 형상에 대해 조사하였다. 이와 같이 레이저에칭 기술로 다양한 소재에 미세채널을 제작할 수 있다는 가능성에 대한 연구들이 보고되었음에도 불구하고, 제조된 채널의 표면 및 단면 형상이 우수하지 못하거나 채널 깊이가 얇기 때문에 실제 마이크로 소자 제작에의 적용에는 한계가 있었다. 또한, 반도체 및 비금속 재료와 같은 시편의 경우, 낮은 열전달계수 때문에 효과적으로 열을 전달할 수 없으므로 마이크로 열소자(microthermal device) 제작에 쉽게 적용될 수 없다. 따라서, 효율적인 열전달 및 열제거를 위한 마이크로 열소자 제작을 위해서는 열저항이 작은 금속 소재에 균일하고 우수한 형상을 갖는 미세채널을 제조하는 것이 필요하다.

[†] E-mail: shjeong@gist.ac.kr

미세금속채널 제조의 경우, Nowak 등^[12,13]은 H₃PO₄와 H₂SO₄에서 각각 티타늄(titanium)과 스테인레스강(stainless steel)에 레이저에칭 기술로 채널을 가공하였다. Nowak 등은 에칭된 구조물 근처의 레이저빔이 조사되지 않는 영역에서도 열 확산에 의해 에칭이 유도되어 에칭 경계면이 둥글게 가공될 수밖에 없으며 에칭용액의 비등(boiling) 또는 수소 가스의 발생에 의해 생성되는 기포 때문에 정교한 구조물의 제조가 어렵다는 등 금속의 습식에칭에 대한 몇 가지 문제점을 제시하였다.

또 다른 방법으로 기체 환경에서 레이저에칭 기술의 적용이 가능하다. 예를 들어, Piglmayer 등^[14]은 WF₆에서 70 nm 두께로 스퍼터된(sputtered) 텅스텐 박막 상에 레이저에칭 기술로 미세채널을 제조한 연구에 대해 보고하였다. 그러나 채널의 깊이가 얇고 낮은 세장비를 가질 뿐만 아니라 텅스텐 박막 자체의 두께가 너무 얇기 때문에 마이크로 소자 제작에 적용하기에는 곤란하다.

고세장비의 미세채널은 마이크로 히트파이프와 같은 소자에 대해서는 높은 모세관력(capillary pressure)을 생성시키고 마이크로 반응기와 같은 소자에 대해서는 넓은 표면적을 제공해 주는 매우 효율적인 구조라고 할 수 있다. 예를 들어, Cao 등^[3]은 방전가공으로 구리에 폭 × 깊이가 100 μm × 250 μm의 정밀한 미세채널을 형성하였으며, Lin 등^[15]은 구리 박판에 203 μm × 890 μm의 미세채널을 방전가공으로 제작하였다. 한편, 반도체 공정을 이용한 실리콘 기반의 미세채널 구조의 경우, Berre 등^[16]은 실리콘 웨이퍼 상에 이방성 에칭을 통하여 폭 × 깊이가 각각 230 μm × 170 μm와 500 μm × 340 μm인 삼각형 형태의 미세채널을 제작하였으며 Gillot 등^[17]은 90 μm × 300 μm인 미세채널을 플라즈마 에칭을 이용하여 형성하였다. 그러나 위의 예시에서 제조된 금속 또는 반도체 미세채널은 최소 폭이 100 μm 이상이며 최대 세장비 역시 4.4 정도로 낮은 값을 가진다.

본 연구에서는 레이저에칭 기술을 이용하여 고세장비 미세채널을 제조하는 방법에 대해 보고한다. 레이저에칭 실험을 위해서는 우수한 열전달 특성과 성형성으로 인해 마이크로 히트파이프나 마이크로 반응기와 같은 마이크로 열소자 제작에 자주 활용되는 소재인 500 μm 두께의 스테인레스강(이하 'STS-304') 박판이 이용되었다. 레이저출력, 에칭용액의 농도, 이송속도와 같은 다양한 공정 변수들의 조절을 통해 고세장비의 미세채널을 제조하는 방법과 공정 조건에 따른 미세채널의 표면 및 단면 형상의 변화를 조사하였다. 또한, 레이저에칭을 통해 제조된 10 이상의 높은 세장비를 갖는 미세채널을 이용하여 관형 마이크로 히트파이프를 제작하고 그 특성을 분석하였다.

II. 실험장치 및 방법

그림 1은 고세장비 금속채널을 제작하기 위한 레이저에칭 실험장치를 나타낸다. 실험에 사용된 레이저는 532 nm의 중

심 파장과 8 W의 최대 출력을 갖는 다이오드펌핑 고체(diode-pumped solid-state, DPSS) CW 레이저로 시편과 에칭용액 사이의 화학반응을 유도하는 열원으로 이용되었다. DPSS 레이저빔은 시편 표면에서 집속 효율을 높이고 빔 경로상에 놓여 있는 다른 광학계들을 보호하기 위하여 5배 빔확대기를 거친 후 선형편광기와 1/4 파장판을 통과하여 원형편광으로 변환된다. 선형편광 된 레이저빔을 원형편광으로 만드는 이유는 시편 표면으로부터 반사되어 나온 빔이 레이저 시스템으로 다시 들어가서 시스템을 손상시키는 것을 방지함과 동시에 편광 상태에 따른 가공 결과의 변화를 최소화 하기 위해서이다^[18]. 1/4 파장판을 통과한 레이저빔은 대물렌즈(NIR, 5×, N.A.=0.14, f=40 mm, D.O.F.=14 μm, W.D.=37.5 mm)를 통해 시편 표면에 집속된다. 에칭용액과 시편이 담긴 챔버는 X-Y-Z 미세 이송계 위에 장착되어 있으며 화학반응을 방지하기 위하여 테플론(Teflon®) 재료를 이용하여 제작

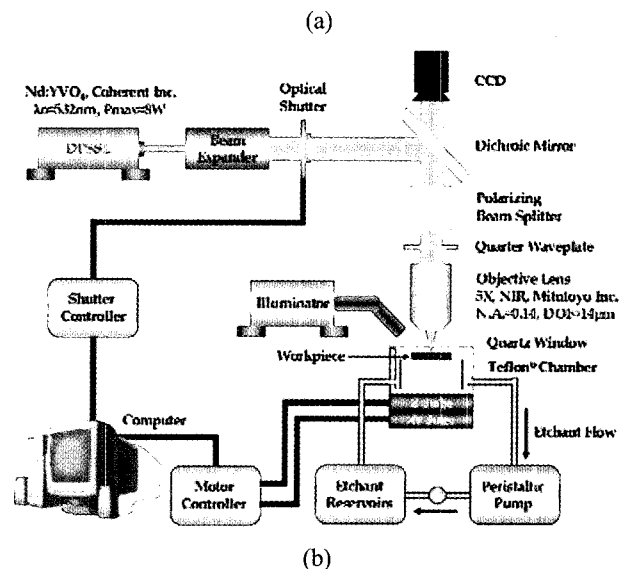
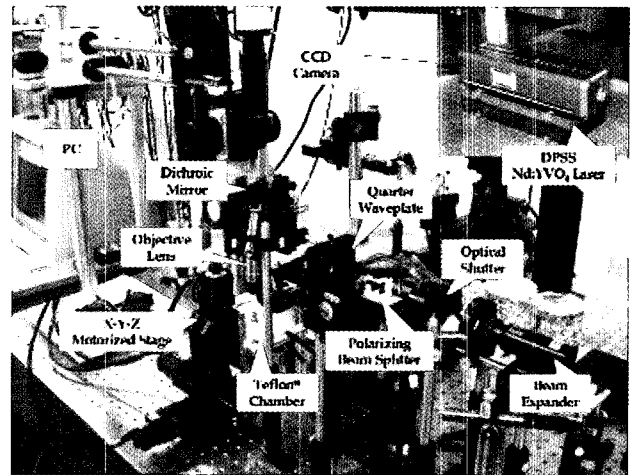


그림 1. 고세장비 미세채널 제조를 위한 레이저에칭 실험장치의 (a) 사진 및 (b) 개략도.

되었다. 미세 이송계는 정밀도가 1 μm 인 스테핑 모터로 구동되며 PC에 장착된 미세 이송계 제어장치를 이용하여 시편의 이송 경로를 제어하였다. 에칭 가공 중, 원활한 에칭용액의 공급과 가공 중에 발생하는 미세기포(micro bubble)를 레이저 초점 주위에서 효과적으로 제거하기 위하여 연동 펌프를 이용하여 100 mL의 에칭용액 저장소로부터 용액을 챔버 내부로 순환시켰으며 레이저빔이 조사되는 챔버의 윗부분은 석영(quartz)으로 제작하여 에칭용액의 유출을 방지하였다. 그리고 시편이 에칭되는 모든 과정은 CCD(charge-coupled- device) 카메라를 통하여 실시간으로 관찰되었다. 실험에 사용된 시편은 500 μm 두께의 STS-304 (AISI 304, Fe72/ Cr18/Ni10) 박판으로서 가로, 세로를 1 cm \times 1 cm 크기로 방전가공을 이용하여 절단 후 표면을 연마하여 사용하였으며 에칭용액은 황산(H_2SO_4 , 98%)과 인산(H_3PO_4 , 85%)으로서 증류수와 혼합하여 농도를 조절하며 실험하였다. 또한, 에칭된 구조물은 초음파 세척 후 각각 광학 현미경(optical microscope)과 전자 현미경(scanning electron microscope)으로 측정되었다.

III. 실험결과 및 고찰

레이저에칭 기술을 이용하여 균일한 단면 형상과 우수한 표면 형상을 갖는 미세채널의 제조를 위해서는 레이저출력(P), 이송속도(V), 반복에칭횟수(N), 에칭용액의 농도(C)와 같은 공정 변수들이 적절하게 조절되어야 한다. 특히, 에칭이 진행되는 동안 깊이 방향 뿐만 아니라 폭 방향의 에칭도 동시에 진행되기 때문에 고세장비를 갖는 채널 제조의 경우, 채널의 폭을 작게 유지시키는 것이 필수적이다. 따라서, 본 실험에서는 좁은 채널 폭을 갖는 고세장비 미세채널을 제조하기 위하여 비교적 긴 초점 심도(depth of focus)와 작은 개구수(numerical aperture)를 가지는 5배 대물렌즈를 이용하여 시편 표면에 레이저빔을 집속하였다. 이러한 대물렌즈를 이용하면 처음 에칭 시 시편 표면에서 측정된 폭이 약 15 ~ 50

μm , 깊이가 약 100 ~ 200 μm 정도되는 채널이 형성된다. 깊이가 깊은 채널을 얻기 위하여 집속된 레이저의 초점 위치의 변경 없이 이미 형성된 채널을 따라 시편은 반복적으로 에칭된다. 이 때, 채널의 벽면은 광도파로(optical waveguide) 같은 역할을 함으로서 입사되는 레이저빔은 바닥 부분까지 전달되기 때문에 점점 깊은 채널이 생성된다. 초점 심도가 너무 짧은 집속렌즈를 사용할 경우, 가공 중에 시편 표면에 초점을 지속적으로 위치시키는 것이 어렵고 이에 따라 형성된 채널의 표면 및 단면 형상이 균일하지 못함을 실험적으로 알 수 있었다.

그림 2 (a)와 2 (b)는 N을 1회부터 10회까지 변화시키면서 각각 10%와 40%의 H_3PO_4 에서 P=1.75 W, V=10 $\mu\text{m}/\text{s}$ 의 조건에서 제조된 채널의 폭과 깊이 변화를 보여준다. 본 논문에서 채널의 폭은 제조된 채널의 반치선폭(full width at half maximum depth, FWHM)으로 정의한다. 그림 2 (a)에서와 같이 N이 증가함에 따라 에칭된 채널의 폭은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그 이유는 채널의 폭을 결정하는 중요한 요인이 레이저빔의 초점 크기이기 때문에 반복에칭을 하더라도 폭 방향으로의 에칭은 크게 영향을 받지 않는다. 그림 2 (a)에서 보면 에칭용액의 농도가 높은 40%에서 채널의 폭이 약간 넓어지는 것을 알 수 있는데 이것은 에칭용액의 점성(viscosity)과 관계가 있다. 즉, 40% H_3PO_4 는 10%일 때보다 점성이 약 3배 정도 높는데 이 경우 레이저빔이 조사되는 영역 부근에서 대류에 의한 냉각효과가 떨어지기 때문에 채널의 폭이 조금 더 넓게 에칭이 되는 것으로 판단된다. 그림 2 (b)에서와 같이 채널 깊이의 경우, 반복에칭횟수가 5회까지는 깊이가 거의 직선적으로 증가되지만 그 이상의 횟수에서는 더 이상 깊이 방향으로 에칭이 진행되지 않고 일정하게 유지됨을 알 수 있다. N=6 이상에서 깊이가 증가하지 않는 이유는 레이저 에너지가 채널 바닥부분까지 전달되기 전에 채널의 벽면에 흡수되어 광 손실이 발생하기 때문인 것으로 보인다. 채널 깊이의 이러한 변화는 에칭용액의 농도에 상관 없이 10%와 40%에서 같은 양상을 띤다. 채널 깊이는 그림 2

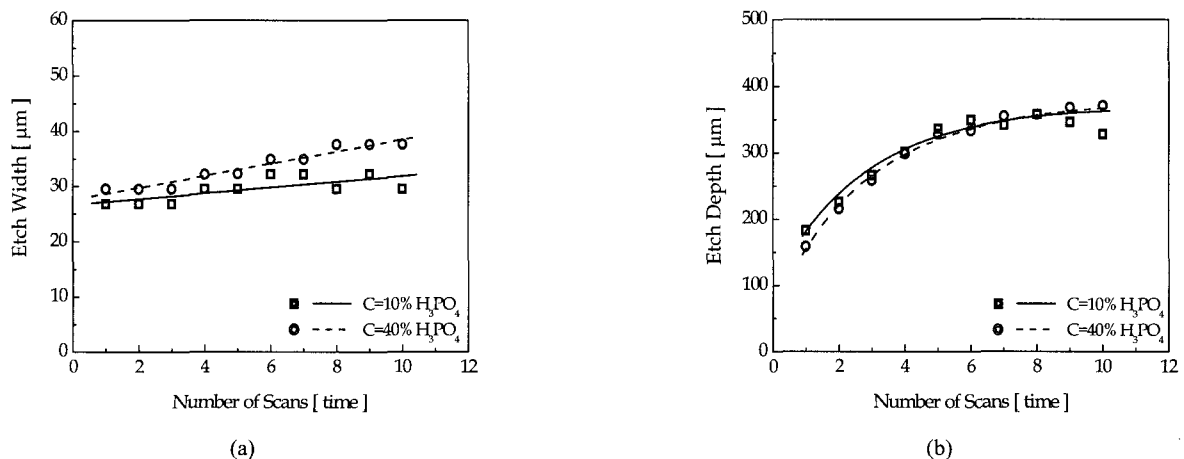


그림 2. 반복에칭횟수(N)의 변화에 따른 채널의 (a) 폭과 (b) 깊이 변화. 다른 공정 변수들은 P=1.75 W, V=10 $\mu\text{m}/\text{s}$, C=10%와 40% H_3PO_4 .

(b)에서와 같이 N=1일 때 약 200 μm 에서 N=5일 때 약 350 μm 까지 증가한다. 에칭용액의 농도에 따라서 단면 형상은 약간 다르게 가공되는데 그 이유는 이후에 자세히 논의될 것이다. 이러한 결과를 바탕으로 본 실험에서는 반복에칭횟수를 5회로 고정하고 실험하였다.

에칭 공정이 진행되는 동안 레이저초점의 이송속도 또한 제조되는 채널의 폭과 깊이에 많은 영향을 미친다. 그림 3은 이송속도를 변화시키면서 P=1.75 W, N=5, C=10% H₃PO₄의 공정 조건으로 제조된 채널의 단면 형상을 보여주고 있다. 반복에칭을 통하여 채널을 제조한 후, V=10 $\mu\text{m/s}$ 일 때 폭이 좁고 깊이가 깊은 채널을 형성할 수 있는 최적의 이송속도임을 알 수 있었다. 본 실험에서 이송속도가 10 $\mu\text{m/s}$ 이하로 너무 느린 경우, 채널 주변으로의 열 확산에 의해 오히려 폭이 넓어지는 경향이 있으며 그와 반대로 이송속도가 빠른 경우에는 충분한 레이저 에너지가 공급되지 못하여 깊이가 얇은 채널이 형성되었다. 따라서 고세장비를 갖는 채널을 제조하기 위하여 본 연구에서는 레이저초점의 이송속도를 10 $\mu\text{m/s}$ 로 고정하고 실험하였다.

m/s로 고정하고 실험하였다.

금속의 레이저에칭을 위해서는 H₃PO₄, H₂SO₄, HNO₃ 또는 이들이 혼합된 에칭용액이 적절하게 이용되고 있는데^[13], 이 중에서 특히 H₃PO₄ 수용액은 낮은 배경에칭율(background etch rate)^[12]을 가지고 있기 때문에 이를 이용하여 티타늄과 같은 금속을 레이저에칭 한 연구들이 보고되었다^[12,13,19]. Nowak 등^[12]은 티타늄과 STS-304를 에칭 할 수 있는 에칭용액으로 H₂SO₄도 가능함을 보였다. 따라서 본 연구에서도 선행된 연구를 바탕으로 H₂SO₄와 함께 H₃PO₄를 이용하여 실험하였다.

그림 4 (a)와 4 (b)은 10% H₂SO₄에서 P=1.75 W, V=10 $\mu\text{m/s}$, N=5의 조건으로 제조된 미세채널의 표면과 단면 형상을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 레이저빔이 직접적으로 조사되지 않은 표면에서의 부식과 채널 벽면에서의 불규칙한 에칭이 일어남이 관찰되었다. 즉, H₂SO₄ 수용액에서 STS-304 시편은 강한 반응을 일으키기 때문에 레이저빔이 조사되지 않은 부분에서도 전도된 열에 의하여 에칭이

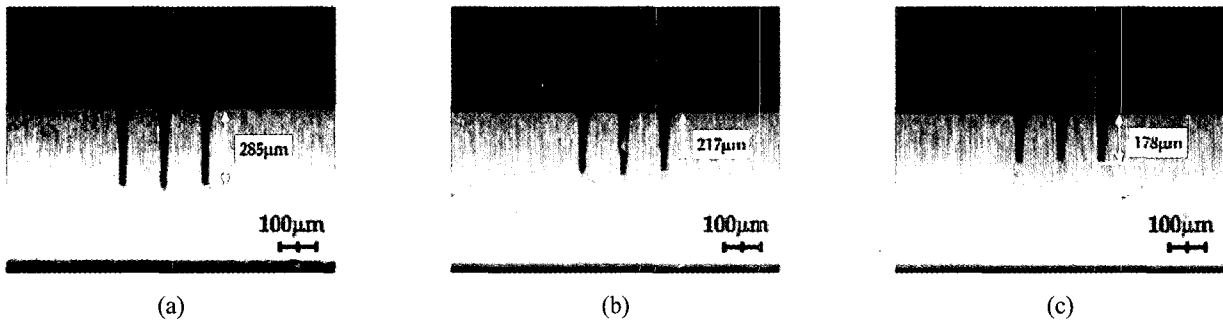


그림 3. 레이저초점의 이송속도 변화에 따른 채널의 단면 형상. 공정 변수들은 P=1.75 W, N=5, C=10% H₃PO₄이며 V는 (a) 10 $\mu\text{m/s}$, (b) 15 $\mu\text{m/s}$, (c) 20 $\mu\text{m/s}$.

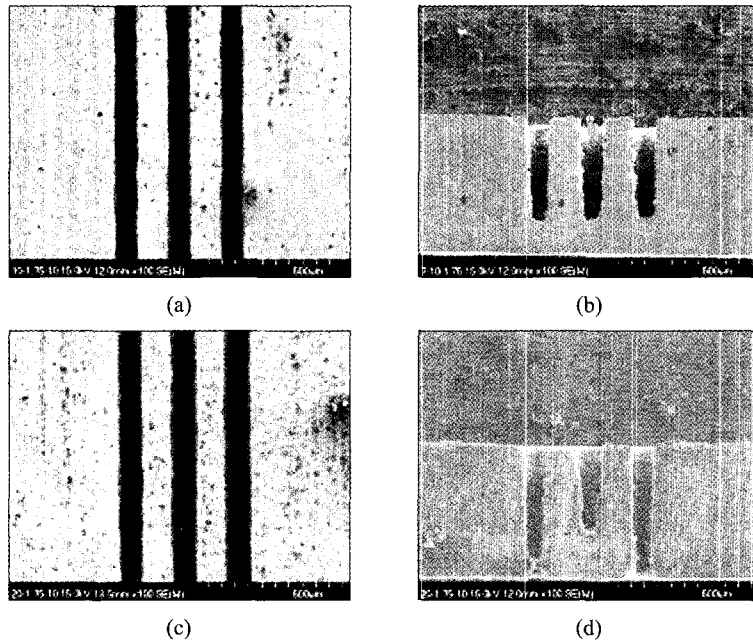
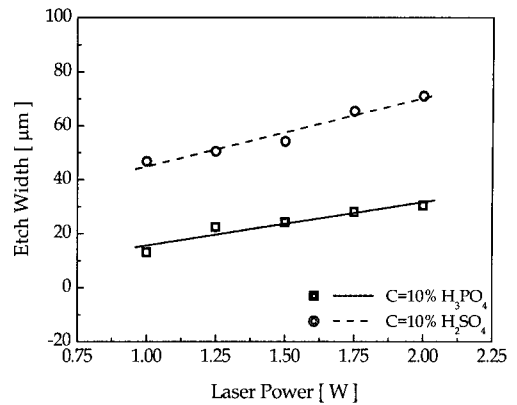


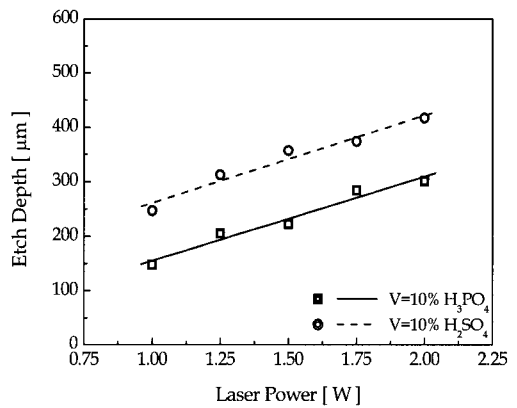
그림 4. P=1.75 W, V=10 $\mu\text{m/s}$, N=5와 다른 농도의 H₂SO₄ (a), (b) 10%, (c), (d) 20%의 조건으로 제조된 채널의 표면과 단면 형상.

일어난다. 시편 표면으로부터 일단 채널이 형성되면 레이저 에너지는 채널 벽면을 따라 다중 반사(multi-reflection)를 일으키며 채널 바닥까지 전달되는데 H₃PO₄에서는 STS-304 시편이 낮은 에칭율을 가지기 때문에 반사 혹은 산란된 빔에 의해서는 에칭이 일어나지 못하며 따라서 그림 3에서와 같이 벽면이 균일한 채널이 제조된다. 그러나 그림 4 (b)에서와 같이 H₂SO₄에서는 반사 혹은 산란된 빔에 의해서도 STS-304 시편의 높은 에칭율에 의해 국부적 에칭이 일어나기 때문에 채널 벽면이 불규칙한 것으로 판단된다. 또한, H₂SO₄에서는 약 400 μm 이상의 깊이를 갖는 채널이 제조되지만 동시에 폭 방향으로 많은 에칭이 되기 때문에 결과적으로 좁은 폭을 갖는 고세장비의 미세채널을 형성하기는 어려우며 표면 형상은 에칭용액의 농도가 증가할수록 더욱 나빠짐을 그림 4 (C)에서 알 수 있다. 앞서 언급된 바와 같이 시편 표면에 집속된 빔을 조사하기 위해 이용된 대물렌즈의 초점 심도는 14 μm 이나 레이저강도가 가장 높은 초점 심도의 가운데 부분이 시편 표면과 일치되기 때문에 레이저초점의 위치가 시편 표면으로부터 상·하로 7 μm만 벗어나도 가공되는 깊이에는 차이가 있다. 따라서 그림 4 (d)에서와 같이 20% H₂SO₄에서는 높은 배경에칭율 때문에 가공부 근처의 두께는 초기 시편 두께와 차이가 나게 되어 시편 표면에 놓여 있던 레이저초점의 위치가 변하게 되므로 불균일한 깊이를 가지는 채널이 형성되는 것으로 보인다.

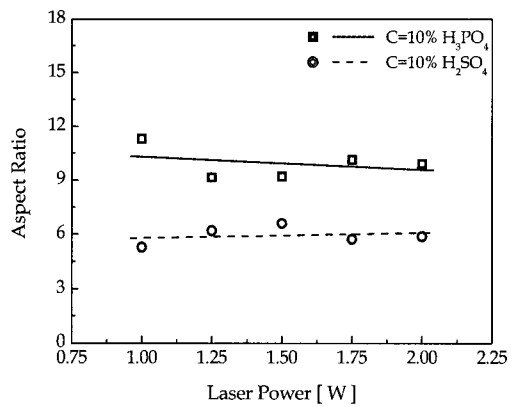
그림 5는 두 종류의 에칭용액 즉, 10% H₃PO₄와 10% H₂SO₄에서 제조된 미세채널의 폭과 깊이 그리고 세장비의 변화를 나타내고 있다. 그림 5 (a)에서 볼 때 폭이 좁은 채널을 형성하는데 있어서 H₃PO₄ 수용액이 훨씬 유리함을 쉽게 알 수 있다. 10% H₂SO₄에서 제조된 채널의 폭은 각각의 레이저출력에 대해 10% H₃PO₄에서 형성된 채널에 비해 약 2배 정도 넓게 가공이 된다는 것을 본 실험을 통해 확인하였다. 그림 5 (b)에서 보는 바와 같이 H₃PO₄에서는 동일한 레이저출력에 대하여 H₂SO₄에서보다 조금 얇은 채널이 형성되는데 그 이유는 앞서 설명한 바와 같이 H₂SO₄의 높은 에칭율 때문이다. 그러나 H₃PO₄에서는 훨씬 좁은 폭을 가지는 채널이 제조되기 때문에 H₂SO₄에서 형성된 채널에 비하여 더욱 높은 세장비를 가진다. 예를 들면, 그림 5 (a)에서 볼 때 H₃PO₄ 수용액에서 제조된 최소 폭은 P=1 W일 때 약 15 μm이며 그 때의 채널 깊이는 약 150 μm임을 그림 5 (b)에서 확인할 수 있다. 따라서 이 조건에서 가공된 채널의 세장비는 10 정도이다. 그와 반면에 같은 조건으로 H₂SO₄에서 제조된 채널의 세장비는 6 이하의 값을 가진다. 그림 5 (c)는 각각 H₃PO₄와 H₂SO₄에서 레이저출력의 변화에 따라 형성된 채널의 세장비 변화를 나타내고 있다. 전체적으로 볼 때 H₃PO₄에서 제조된 채널은 약 10 정도의 세장비를 가지나 H₂SO₄에서의 경우에는 H₃PO₄에서 형성된 채널의 세장비의 약 60% 정도 밖에 되지 않는다. 여기서 주목할 만한 것은 레이저출력의 증가에 대하여 깊이 방향으로 에칭이 진행되더라도 세장비는 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 그 이유로서 레이저출력이



(a)



(b)



(c)

그림 5. 두 종류의 에칭용액 H₃PO₄와 H₂SO₄에서 V=10 μm/s, N=5의 조건으로 레이저출력의 변화에 따라 제조된 채널의 (a) 폭과 (b) 깊이 및 (c) 세장비의 변화.

낮은 경우, 깊이 방향으로의 에칭은 많이 진행되지 못하여 비교적 얇은 깊이를 가지지만 가우시안(Gaussian) 분포를 갖는 레이저빔의 중심 부분에서만 레이저강도가 에칭을 유도할 수 있는 문턱값(threshold) 이상이 되므로 폭이 15 μm 정도로 아주 좁은 채널이 제조되어 높은 세장비의 채널이 제조될 수 있으며, 반면 출력이 증가하면 문턱값에 해당하는 부

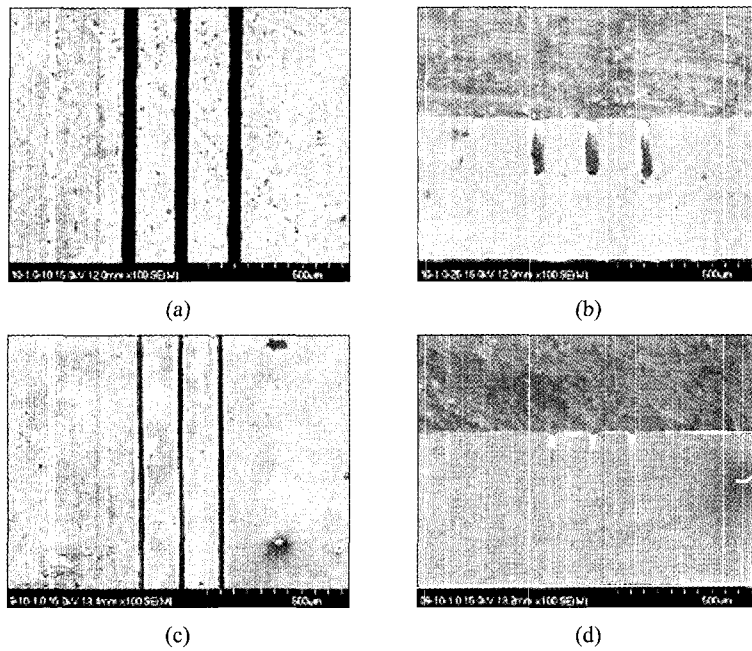


그림 6. P=1 W, V=10 $\mu\text{m/s}$, N=5와 다른 두 종류의 에칭용액 (a), (b) 10% H_2SO_4 와 (c), (d) 10% H_3PO_4 의 조건에서 형성된 미세채널의 표면 및 단면 형상.

분이 확장되므로 깊이 방향으로 뿐만 아니라 동시에 폭 방향으로도 에칭이 되기 때문에 세장비는 크게 변화되지 않는 것으로 판단된다.

두 가지 다른 종류의 에칭용액에서 P=1 W, V=10 $\mu\text{m/s}$ 그리고 N=5의 공정 조건으로 형성된 미세채널의 표면 및 단면 형상을 그림 6에서 보여준다. 채널과 채널 사이의 간격은 마이크로 열소자의 설계 시, 매우 중요한 요소로 작용할 수 있는데 그 이유는 제한된 소자의 크기 내에서 제조되는 미세채널의 개수는 전달할 수 있는 열용량과 직접적으로 관련되기 때문이다. 따라서 우수한 열전달 효율을 갖는 마이크로 열소자 제작을 위해서는 H_3PO_4 수용액을 이용하여 미세채널을 제조하는 것이 훨씬 유리하다는 것을 그림 6에서 확인할 수 있다. 본 실험을 통하여 H_3PO_4 에서는 30 ~ 50 μm 정도의 폭을 갖는 여러 개의 채널이 150 μm 간격을 유지하며 제조 가능하였으며 채널 사이의 간격을 더욱 줄일 수 있다는 것도 그림 6을 보면 알 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 본 실험에서는 고세장비의 미세채널을 제조하기 위한 에칭용액으로 H_3PO_4 수용액을 선택하였으며 아래에서는 H_3PO_4 에서 다른 공정 변수들을 변화시켜가면서 형성된 채널의 특성에 대해서 논의하고자 한다.

앞에서도 언급되었듯이 레이저출력과 이송속도가 제조되는 채널의 폭과 깊이에 많은 영향을 미치는 공정 변수라면 에칭용액의 농도는 채널의 단면 형상을 직접적으로 결정짓는 공정 변수이다. 그림 7 (a)에서 7 (d)는 H_3PO_4 를 사용하여 P=1.75 W, V=10 $\mu\text{m/s}$, N=5의 조건에서 에칭용액의 농도 변화에 따라 형성된 채널의 단면 형상을 나타내고 있다. 에칭용액의 농도가 변하더라도 시편 표면에서 측정된 채널의 폭

은 거의 30 μm 정도로 일정하게 유지된다. 그러나 단면에서 측정된 채널의 폭(FWHM)은 에칭용액의 농도 변화에 많은 영향을 받는다. 즉, 10%의 낮은 농도에서는 시편 표면에서부터 바닥 부분까지 채널 전체에 대해 폭이 일정한 이른바 U형상의 채널이 형성된다. 그러나 농도가 점점 증가함에 따라 채널의 바닥 부분이 점점 좁아지는 V형상의 채널이 제조된다. 이렇게 에칭용액의 농도에 따라 채널의 단면이 다르게 제조되는 이유는 첫째로 용액의 유동의 차이 때문인 것으로 판단되는데 앞서 설명했듯이 에칭용액의 농도가 10%에서 40%까지 증가될 때 용액의 점성도 약 3배 정도 증가되며 이것은 채널의 바닥 부분까지 신선한 에칭용액을 공급하는데 있어서 많은 영향을 줄 수 있다. 만약 높은 점성에 의해 신선한 에칭용액의 공급이 원활하지 못하면 채널 내부에 있는 에칭용액은 라디칼(radical)의 부족으로 인하여 표백(bleached)되고 레이저빔의 강도가 가장 높은 중심부만이 에칭을 유도하므로 바닥 부분이 뾰족한 채널이 형성된다^[20]. 또 다른 가능한 이유로는 에칭 시, 에칭용액의 비등 또는 부산물(by-product)인 수소 가스에 의해 생성되는 미세기포의 거동에 의한 영향이다. 즉, 낮은 점성을 갖는 낮은 에칭용액의 농도에서는 채널 내부에서 미세기포들이 빠져나갈 때 에칭 생성물을 효과적으로 제거함으로써 신선한 에칭용액의 공급을 원활하게 하여 결과적으로 U형상의 단면을 가지는 채널이 제조될 수 있는 것이다. 그와 반대로 높은 에칭용액의 농도에서는 미세기포의 유동이 원활하지 못하여 V형상의 단면을 가지는 채널이 제조되는 것으로 판단된다. 그림 7 (e)와 7 (f)에서는 각각 10%와 40%의 농도에서 형성된 채널의 표면 형상을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 에칭용액의 농

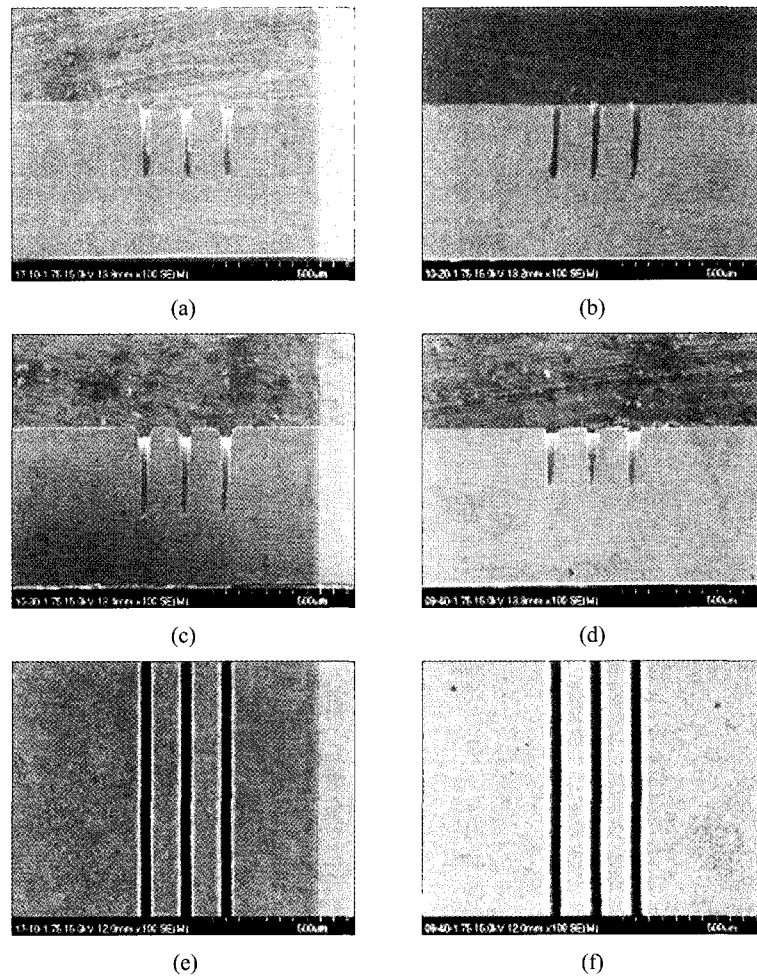
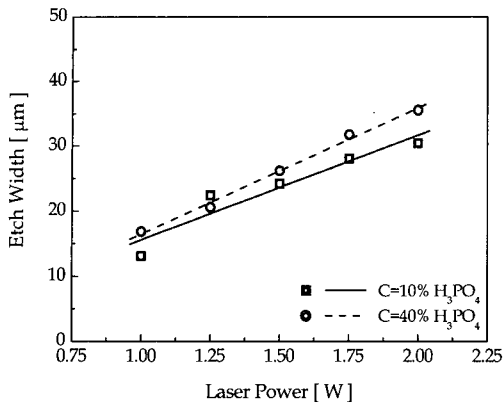


그림 7. 다양한 에칭용액의 농도 (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40%에서 제조된 채널의 단면 형상의 변화와 (e) 10%, (f) 40%의 농도에서 형성된 채널의 표면 형상. 다른 공정 변수들은 P=1.75 W, V=10 μ m/s 그리고 N=5.

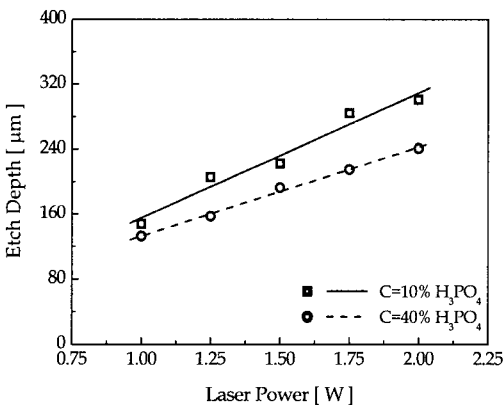
도와는 상관없이 채널 전체에 대하여 열영향부(heat affected zone)나 열변형이 없는 깨끗한 표면 형상을 갖는 채널이 제조된다. 따라서 본 연구에서 이용된 레이저에칭은 균일하고 우수한 품질의 고세장비 미세채널을 효과적으로 제조할 수 있는 레이저 미세가공 기술임을 확인할 수 있다.

그림 8은 레이저출력의 변화에 따라 10%와 40% H₃PO₄에서 형성된 채널의 폭과 깊이 그리고 세장비의 변화를 나타낸다. 그림 8 (c)에서 알 수 있듯이 높은 에칭용액의 농도에서 제조된 채널이 상대적으로 낮은 세장비를 가지므로 고세장비의 미세채널을 제조하기 위해서는 U 형상의 채널이 형성되는 10%의 낮은 농도를 갖는 H₃PO₄가 유리하다. 그러나 보다 중요한 것은 에칭용액의 농도를 적절히 조절하므로서 U 형상과 V 형상 사이에서 임의의 형상을 갖는 채널 제조가 가능하다는 것이다. 그 이유는 마이크로 소자 제조 시, 사각 구조 뿐만 아니라 삼각 구조나 사다리꼴 구조의 단면이 자주 이용되는데 레이저에칭 기술을 적용하여 다양한 공정 변수들을 적절히 조절하면 이러한 단면 구조에 7 ~ 10 정도의 세장비를 갖는 채널을 효과적으로 제조할 수 있기 때문이다.

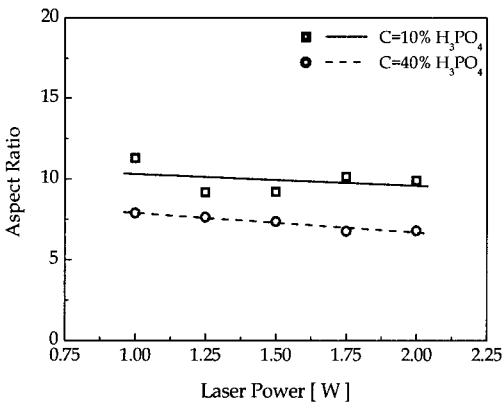
본 연구에서 제안된 레이저에칭 기술이 마이크로 소자의 제작에 적용 가능한지를 조사하기 위하여 그림 9에서와 같이 고세장비 미세채널 기반의 마이크로 히트파이프를 실제 제작하였다. 히트파이프용 상판과 하판은 500 μ m 두께의 STS-304 박판으로서 P=1.75 W, V=10 μ m/s, N=5, C=10% H₃PO₄의 공정 조건으로 형성된 50 mm 길이의 미세채널이 각각 15개씩 제조되어 있다. 중간판은 상판 및 하판과 같은 두께, 같은 소재로서 증기 통과구(vapor passage) 역할을 위하여 단면적이 1 mm² (2 mm × 0.5 mm)가 되도록 방전가공하였다. 그림 9 (a)는 레이저 용접으로 완성되기 전의 마이크로 히트파이프용 상판, 중간판, 하판을 나타내고 있다. 상판에는 히트파이프의 동작을 위한 작동유체(working fluid) 주입용 스테인레스 관을 부착하기 위하여 직경 1 mm 정도의 미세구멍이 가공되어 있다. 그림 9 (b)에서는 상판, 중간판, 하판을 적층하고 레이저 용접한 후 스테인레스 관을 결합하여 최종 완성된 STS-304 관형 마이크로 히트파이프를 보여 주고 있다. 고세장비 미세채널을 가진 마이크로 히트파이프의 외형 수치는 그림 9 (b)에서 보는 바와 같이 56 mm(L) ×



(a)



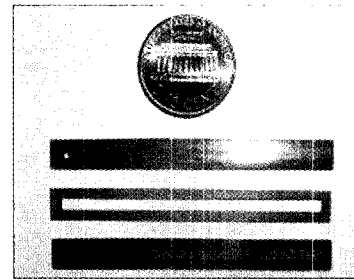
(b)



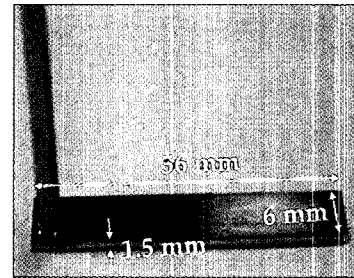
(c)

그림 8. 두 종류의 에칭용액 H₃PO₄와 H₂SO₄에서 V=10 μm/s, N=5의 조건으로 레이저출력의 변화에 따라 제조된 채널의 (a) 폭과 (b) 깊이 및 (c) 세장비의 변화.

6.0 mm(W) × 1.5 mm(H)이다. 증류수(pure water)를 작동유체로 하여 동작하는 STS-304 마이크로 히트파이프는 30°C에서 약 3.5 W까지 소자의 오동작 없이 정상적인 열전달 특성을 나타내고 있으며 현재 보다 더 정확한 특성 평가를 위해 계속 연구가 진행 중이다.



(a)



(b)

그림 9. (a) 레이저 용접 되기 전의 히트파이프용 상판, 중간판, 하판 사진, (b) 작동유체 주입을 위한 스테인레스 관이 결합되어 최종 완성된 STS-304 마이크로 히트파이프.

IV. 결 론

본 연구에서는 레이저에칭 기술을 통하여 균일한 수치와 우수한 표면 형상을 갖는 고세장비 미세금속채널의 제조에 대하여 설명하였다. 다양한 공정 변수들을 적절하게 조절함으로써 H₃PO₄ 수용액에서 15 μm의 최소 폭으로 10 이상의 세장비를 가지는 미세채널을 제조할 수 있었다. 그러나 H₂SO₄ 수용액에서 제조된 미세채널의 경우, 불균일한 표면 및 단면 형상을 가질 뿐만 아니라 상대적으로 낮은 6 이하의 세장비를 가진다는 것을 확인하였다. 또한, 레이저출력과 에칭용액의 농도를 조절하면 U 형상과 V 형상의 사이의 임의의 단면을 가지는 미세채널의 제조가 가능하였다. 본 연구에서 이용된 레이저에칭 기술은 마이크로 히트파이프를 비롯한 마이크로 반응기 또는 마이크로 연료전지와 같은 고세장비 미세채널을 기반으로 한 고효율 마이크로 소자 제작에 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (MOEHRD) (D00033)

참고문헌

[1] S. Kawata, H. -B. Sun, T. Tanaka and K. Takada, "Finer features for functional microdevices." *Nature*. Vol. 412.

- No. 6848, pp. 697-698, 2001.
- [2] R. Hopkins, A. Faghri and D. Khurstalev, "Flat miniature heat pipes with micro capillary grooves," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 102-109, 1999.
- [3] Y. Cao, M. Gao, J. E. Beam and B. Donovan, "Experiments and analyses of flat miniature heat pipes," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 11, No. 2, pp. 158-164, 1997.
- [4] A. V. Pattekar and M. V. Kothare, "A microreactor for hydrogen production in micro fuel cell applications," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 13, No. 1, pp. 7-18, 2004.
- [5] A. V. Pattekar and M. V. Kothare, "Novel microfluidic interconnectors for high temperature and pressure applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 337-345, 2003.
- [6] H. Takagi, R. Maeda, K. Ozaki, M. Parameswaran and M. Mehta, "Phase transformation type micro pump," *Proceeding of the 5th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 199-202, 1994.
- [7] S. J. Lee, A. Chang-Chien, S. W. Cha, R. O'Hayre, Y. I. Park, Y. Saito and F. B. Prinz, "Design and fabrication of a micro fuel cell array with 'flip-flop' interconnection," *Journal of Power Sources*, Vol. 112, No. 2, pp. 410-418, 2002.
- [8] W. Shi and S. J. Lee, "Design concepts for directed exit flow in micro fuel cells," *Fuel Cell Science, Engineering and Technology* 2004, pp. 243-249, 2004.
- [9] R. W. Haynes, G. M. Metze, V. G. Kreismanis and L. F. Eastman, "Laser-photoinduced etching of semiconductors and metals," *Applied Physics Letters*, Vol. 37, No. 4, pp. 344-346, 1980.
- [10] Y. -F. Lu, K. -D. Ye, "Laser-induced etching of polycrystalline $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ in KOH aqueous solution," *Applied Physics*, A, Vol. 62, pp. 43-49, 1996.
- [11] B. W. Hussey and A. Gupta, "Laser-assisted etching of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$," *Applied Physics Letters*, Vol. 54, No. 13, pp. 1272-1274, 1989.
- [12] R. Nowak, S. Metev and G. Sepold, "Nd:YAG-laser-induced wet chemical etching of titanium and stainless steel," *Sensors and Actuators A*, Vol. 51, pp. 41-45, 1995.
- [13] R. Nowak and S. Metev, "Thermochemical laser etching of stainless steel and titanium in liquids," *Applied Physics*, A, Vol. 63, pp. 133-138, 1996.
- [14] K. Piglmayer and H. Schieche, "Laser-induced etching of tungsten," *Applied Surface Science*, Vol. 109, No. 110, pp. 184-188, 1997.
- [15] L. Lin, R. Ponnappan and J. Leland, "High performance miniature heat pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3131-3142, 2002.
- [16] M. L. Berre, S. Launay, V. Sartre and M. Lallemand, "Fabrication and experimental investigation of silicon micro heat pipes for cooling electronics," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, pp. 436-441, 2003.
- [17] C. Gillot, Y. Avenas, N. Cezac, G. Poupon, C. Schaeffer and E. Fournier, "Silicon heat pipes used as thermal spreaders," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 26, No. 2, pp. 332-339, 2003.
- [18] G. V. Treyz, R. Beach and R. M. Osgood, Jr., "Rapid direct writing of high-aspect-ratio trenches in silicon," *Applied Physics Letters*, Vol. 50, No. 8, pp. 475-477, 1987.
- [19] S. W. Son, M. K. Lee, K. H. Oh and S. H. Jeong, "Fabrication of titanium microchannels using laser-assisted thermochemical wet etching," *Journal of Laser Applications*, Vol. 18, No. 2, pp. 131-137, 2006.
- [20] B. W. Hussey, B. Haba and A. Gupta, "Role of bubbles in laser-assisted wet etching," *Applied Physics Letters*, Vol. 58, No. 24, pp. 2851-2853, 1991.

Laser micromachining of high-aspect-ratio metallic channels for the application to microthermal devices

Kwang Hwan Oh, Min Kyu Lee and Sungho Jeong

*Department of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology
1 Oryong-dong Buk-gu Gwangju, 500-712, Republic of Korea*

[†]*E-mail: shjeong@gist.ac.kr*

(Received July 11, 2006, Revised manuscript October 18, 2006)

A fabrication method for high-aspect-ratio microchannels in stainless steel using laser-assisted thermochemical wet etching is reported in this paper. The fabrication of deep microchannels with an aspect ratio over ten is realized by applying a multiple etching process with an optimization of process conditions. The cross-sectional profile of the microchannels can be adjusted between rectangular and triangular shapes by properly controlling laser power and etchant concentration. Excellent dimensional uniformity is achieved among the channels with little heat-affected area. Microchannels with a width ranging from 15 to 50 μm can be fabricated with an aspect ratio of ten and a pitch of 150 μm or smaller. The effects of process variables such as laser power, scan speed, and etchant concentration on the fabrication results, including etch width, depth, and cross-sectional profile are closely examined.

OCIS code : 140.0140, 140.3390.