

# 고세장비 미세채널 기반의 마이크로 히트파이프 설계 및 제조

오광환\*, 이민규\*, 정성호#

## Design and Fabrication of a Micro-Heat Pipe with High-Aspect-Ratio Microchannels

Kwang Hwan Oh\*, Minkyu Lee\* and Sungho Jeong#

### ABSTRACT

The cooling capacity of a micro-heat pipe is mainly governed by the magnitude of capillary pressure induced in the wick structure. For microchannel wicks, a higher capillary pressure is achievable for narrower and deeper channels. In this study, a metallic micro-heat pipe adopting high-aspect-ratio microchannel wicks is fabricated. Micromachining of high-aspect-ratio microchannels is done using the laser-induced wet etching technique in which a focused laser beam irradiates the workpiece placed in a liquid etchant along a desired channel pattern. Because of the direct writing characteristic of the laser-induced wet etching method, no mask is necessary and the fabrication procedure is relatively simple. Deep microchannels of an aspect ratio close to 10 can be readily fabricated with little heat damage of the workpiece. The laser-induced wet etching process for the fabrication of high-aspect-ratio microchannels in 0.5mm thick stainless steel foil is presented in detail. The shape and size variations of microchannels with respect to the process variables, such as laser power, scanning speed, number of scans, and etchant concentration are closely examined. Also, the fabrication of a flat micro-heat pipe based on the high-aspect-ratio microchannels is demonstrated.

**Key Words** : Cooling component (냉각 소자), Micro-heat pipe (마이크로 히트파이프), Micro thermal device (마이크로 열소자), Microchannel (미세채널), High-aspect-ratio (고세장비), Laser etching (레이저 에칭), Laser micromachining (레이저 미세가공)

### 1. 서론

첨단 전자 부품들의 효율적인 열 제거를 위한 냉각 소자들은 최근 들어 고집적화, 초소형화가 되어가는 부품들의 성향과 함께 그 크기가 점점 작

아지고 있다. 마이크로 히트파이프(Micro-heat pipe, MHP)는 소형화가 가능한 핵심 냉각 소자로서 그 크기에 비해 우수한 열전달 특성을 가질 뿐만 아니라 구조가 간단하고 동작이 용이하며 별도의 구동회로 없이도 작동할 수 있기 때문에 많은 연구

접수일: 2006년 3월 24일; 게재승인일: 2006년 7월 24일

\* 광주과학기술원 기전공학과

# 교신저자: 광주과학기술원 기전공학과

E-mail [shieong@gist.ac.kr](mailto:shieong@gist.ac.kr) Tel: (062) 970-2393

가 되어오고 있다. 기존에 이용되던 전형적인 히트파이프는 그 내벽에 심지 역할을 하는 wire-mesh 형태의 워(wick)이 부착된 구조로 제작되었다.<sup>1</sup> 이러한 구조의 히트파이프는 제조가 쉬운 장점이 있으나 워의 삼입으로 인해 히트파이프의 직경을 3~4 mm 이하로 줄이기는 곤란하기 때문에 초소형 히트파이프의 제조에는 불리한 측면이 있다.<sup>2</sup> 이러한 단점을 극복하면서 초소형 히트파이프에 응용 가능한 워 구조로 미세채널 구조가 활용되고 있다. 미세채널 구조의 워를 가진 히트파이프는 내부에서 큰 모세관력을 일으킬 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 Cotter<sup>3</sup> 가 1984 년에 처음으로 미세채널 기반의 마이크로 히트파이프에 대한 연구를 발표한 이후로 지금까지 여러 가지 형태의 미세채널 구조 기반의 마이크로 히트파이프에 대한 이론적, 실험적인 연구 보고가 이루어지고 있다.<sup>4,9</sup>

미세채널 기반의 마이크로 히트파이프의 냉각 성능은 채널 내 모세관력의 크기에 의해 결정되는데 채널의 모세관력은 폭이 좁을수록 깊이가 깊을수록 커진다. 여기서 채널의 깊이 대 폭의 비를 세장비(aspect-ratio)라고 정의하며 채널의 세장비(high-aspect-ratio)가 클수록 마이크로 히트파이프는 고효율 및 고성능을 지닐 수 있다. 따라서 높은 세장비를 갖는 미세채널을 제작할 수 있는 초정밀 가공 기술이 요구되며, 기존의 가공기술로는 5 이상의 세장비를 갖는 미세채널을 제작하기에 많은 어려움이 있다.

Hopkins<sup>5</sup> 등은 압연 방법과 고속 다이싱톱(dicing saw)를 이용하여 폭 × 깊이가 각각 150 μm × 240 μm 와 200 μm × 420 μm 인 미세채널 기반의 소형 히트파이프를 제작하였다. 방전가공(Electro-discharge-machining, EDM)을 이용하면 좀 더 우수한 형상의 미세채널을 만들 수 있는데 Cao<sup>4</sup> 등은 방전가공을 통하여 구리에 폭 × 깊이가 100 μm × 250 μm 의 정밀한 미세채널을 형성하였으며 Lin<sup>6</sup> 등은 구리 박판에 203 μm × 890 μm 의 미세채널을 방전가공으로 제작하였다. 한편, 반도체 공정을 이용한 실리콘 기반의 미세채널 구조의 경우, Berre<sup>7</sup> 등은 실리콘 웨이퍼 상에 이방성 에칭을 통하여 폭 × 깊이가 각각 230 μm × 170 μm 와 500 μm × 340 μm 인 삼각형 형태의 미세채널을 제작하였으며 Gillot<sup>10</sup> 등은 90 μm × 300 μm 인 미세채널을 플라즈마 에칭을 이용하여 형성하였다. 이상에서 제조된 미세채널은 최소 폭이 100 μm 이상이며 최대

세장비 역시 4.4 정도로 낮은 값을 가진다.

레이저유도 습식에칭(이하 '레이저 에칭')은 시편을 에칭용액 속에 잠기게 한 상태에서 가공하고자 하는 위치에 집속된 레이저빔을 조사할 때 레이저빔이 조사된 시편 표면의 온도가 상승하게 되고 주변의 에칭용액과 시편 사이에 화학반응이 일어나면서 반응의 결과로 시편에서 소재가 제거되는 원리를 이용한다. 본 연구에서는 레이저 에칭 기술을 이용하여 폭 50 μm 이하, 세장비 10 정도인 미세채널을 금속 박판 상에 가공하는 기술을 제시한다. 구체적으로는 다양한 공정 변수들의 조절을 통해 고세장비의 미세채널을 제조하는 방법과 가공조건에 따른 미세채널의 표면과 단면 형상 및 크기 변화를 조사하였다. 또한, 미세채널 기반의 마이크로 히트파이프를 설계하고 레이저 에칭을 통해 제조된 미세채널을 이용하여 판형 마이크로 히트파이프를 제작하고 그 특성을 분석하였다.

## 2. 마이크로 히트파이프 설계

마이크로 히트파이프의 워에 발생하는 최대 모세관력을  $P_c$  라고 할 때,  $P_c$  는 식 (1)과 같이 나타내어 진다.<sup>11</sup>

$$P_c = 2\sigma / r_c \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ 는 작동유체의 표면장력,  $r_c$ 는 유효모세관 반경으로 직사각형 구조의 채널에서는 그 채널 폭과 일치한다. 따라서, 식 (1)에서 나타나듯이 채널의 폭이 좁을수록 모세관력은 높아짐을 알 수 있다.

세장비가 마이크로 히트파이프의 열전달율에 미치는 영향은 모델링을 통해 분석하였다. 마이크로 히트파이프는 비교적 간단한 구조이나 설계 시에 고려되어야 할 열전달 한계들로 모세관 한계, 음속 한계, 비산 한계 및 비등 한계 등이 있으며 이 중에서 특히 모세관 한계는 마이크로 히트파이프의 설계 시 가장 중요하게 고려해야 되는 인자이다. 따라서, 이러한 열전달 한계들의 영향을 조사하고 미세채널의 세장비가 마이크로 히트파이프의 열전달율에 얼마나 영향을 미치는가를 분석하기 위해 Table 1 에 나타난 바와 같은 세장비가 다른 두 가지 경우에 대해 히트파이프 이론을 바탕으로 수치 계산을 수행하였다.<sup>11</sup>

Table 1 Overall dimension of MHPs

	MHP1	MHP2
Vapor space width ( $\mu\text{m}$ )	690	690
Vapor space depth ( $\mu\text{m}$ )	500	500
Channel width ( $\mu\text{m}$ )	50	50
Channel depth ( $\mu\text{m}$ )	100	200
Channel pitch ( $\mu\text{m}$ )	150	150
Number of channels	5	5
Aspect ratio	2	4

Fig. 1 은 Table 1 의 MHP1 및 MHP2 에 대한 계산된 결과를 보여준다. Fig. 1 에서 마이크로 히트파이프의 최대 열전달율을 결정짓는 열전달 한계들 중에서 음속 한계(sonic limit), 비산 한계(entrainment limit), 비등 한계(boiling limit) 값이 모세관 한계(capillary limit)보다 월등히 크며 따라서 마이크로 히트파이프의 최대 열전달율은 궁극적으로 모세관 한계에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 또한 모세관 한계는 채널의 세장비가 클수록 증가하며 따라서 마이크로 히트파이프의 열전달율도 증가함을 알 수 있다. 위의 수치 해석을 통하여 높은 모세관력 또는 높은 열전달율을 가지는 마이크로 히트파이프를 제작하기 위해서는 폭이 좁고 세장비가 높은 미세채널을 형성해야 된다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 레이저 에칭 기술을 이용하여 기존의 마이크로 히트파이프에 사용된 미세채널보다 훨씬 좁은 폭과 높은 세장비를 가지는 채널

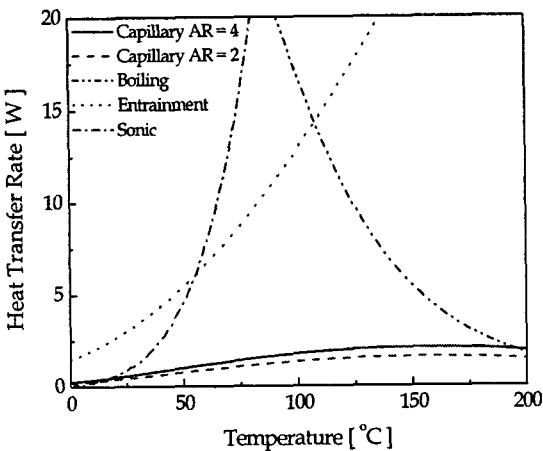


Fig. 1 Calculated heat transfer limit of the MHPs in Table 1 as a function of operation temperature

가공이 가능함을 제시하고 이를 기반으로 제조한 마이크로 히트파이프를 소개한다.

### 3. 실험장치

#### 3.1 레이저 에칭 실험장치

Fig. 2 는 고세장비 미세채널을 제작하기 위한 레이저 에칭 실험장치를 나타낸다. 실험에 사용된 레이저는 532 nm 의 중심 파장과 8 W 의 최대 출력을 갖는 Diode-pumped solid-state (DPSS) CW 레이저로 시편과 에칭용액 사이의 화학반응을 유도하는 열원으로 이용되었다. 이 때, 레이저빔은 시편의 온도를 화학반응이 일어날 수 있는 문턱값(threshold) 이상으로 상승시키는 역할을 하므로 사용되는 레이저의 파장에 크게 영향을 받지 않으나 본 연구에서는 금속 표면에서의 반사율이 적외선 파장에 비해 낮고 빔의 에너지분포 특성이 우수한 가시광선 영역의 DPSS 레이저를 이용하였다. DPSS 레이저빔은 시편 표면에서 집속 효율을 높이고 빔 경로상에 놓여 있는 다른 광학계들을 보호하기 위하여 5 배 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.<sup>12</sup> 1/4 파장판을 통과한 레이저빔은 현미경용 대물렌즈(NIR, 5×, N.A.=0.14, DOF=14  $\mu\text{m}$ , W.D.=37.5  $\mu\text{m}$ )를 통해 시편 표면에 집속 된다. 에칭용액과 시편이 담긴 챔버는 X-Y-Z 미세 이송계 위에 장착되어 있으며 화학반응을 방지하기 위하여 테플론(Teflon<sup>®</sup>) 재료를 이용하여 제작되었다. 미세 이송계는 정밀도가 1  $\mu\text{m}$  인 스테핑 모터로 구동되며 PC 에 장착된 미세 이송계 제어장치를 이용하여 시편의 이송 경로를 제어하였다. 에칭 가공 중, 원활한 에칭용액의 공급과 가공 중에 발생하는 미세 기포를 레이저 초점 주위에서 효과적으로 제거하기 위하여 연동 펌프를 이용하여 100 mL 의 에칭용액 저장소로부터 용액을 챔버 내부로 순환시켰으며 레이저빔이 조사되는 챔버의 윗부분은 석영(quartz)으로 제작하여 에칭용액의 유출을 방지하였다. 그리고 시편이 에칭되는 모든 과정은 CCD 카메라를 통하여 실시간으로 관찰되었다. 실험에

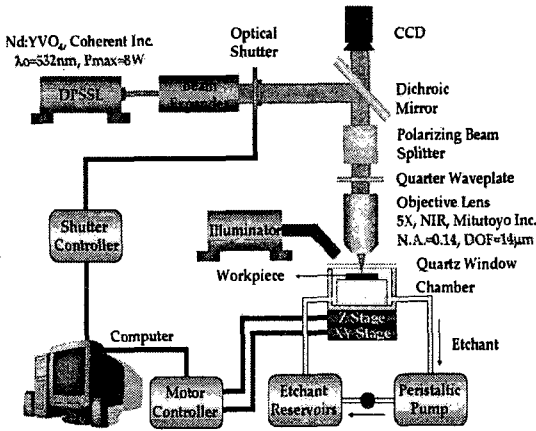


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

사용된 시편은 500  $\mu\text{m}$  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 인산( $\text{H}_3\text{PO}_4$ , 85%)으로서 증류수와 혼합하여 농도를 조절하며 실험하였다.<sup>13, 14</sup>

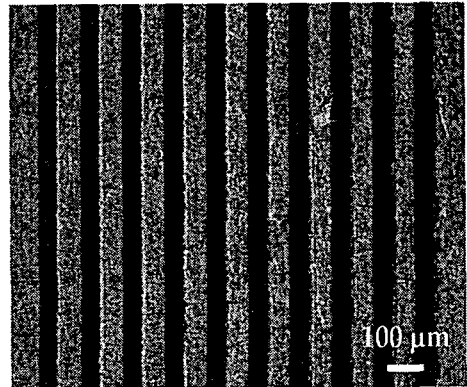
#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 레이저 에칭을 이용한 미세채널 제작

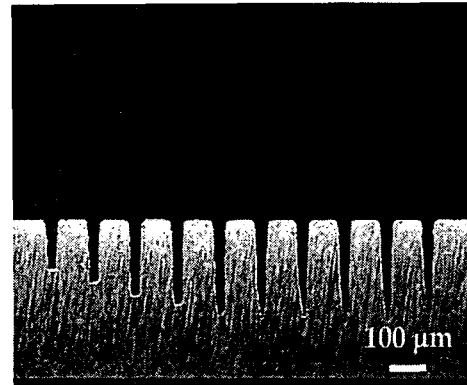
###### 4.1.1 반복에칭횟수에 따른 채널의 영향

우수한 채널 단면 및 표면 형상을 갖는 고세장 비 미세채널을 제작하기 위해서는 레이저 출력(P), 레이저 초점의 이송속도(V), 반복에칭횟수(N), 에칭용액의 농도(C) 등과 같은 공정 변수들이 적절하게 조절되어야 한다. 본 절에서는 이러한 공정 변수들이 에칭 결과에 미치는 영향들에 대해서 자세하게 설명한다.

Fig. 3(a)와 3(b)는  $P=1.75\text{ W}$ ,  $C=10\%$ ,  $V=10\ \mu\text{m}/\text{sec}$ 의 조건에서 제작된 미세채널의 표면 및 단면 형상을 보여준다. 여기에 반복에칭횟수는 Fig 3(a)의 좌측에서 우측으로 진행해 가면서 1 회에서 10 회로 증가된다. 본 논문에서 나타난 모든 채널의 폭은 시편 표면에서부터 채널의 최대 깊이의 절반이 되는 지점인 반치폭(Full width at half maximum, FWHM)으로 정의된다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 다른 공정 변수들이 고정되어 있으면 반복에칭횟



(a)

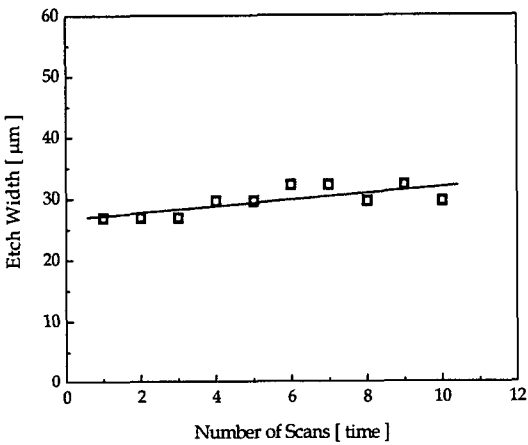


(b)

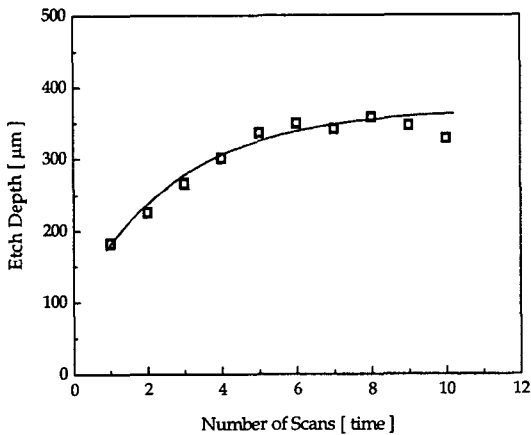
Fig. 3 (a) Top view and (b) the cross-sectional profile of the microchannels fabricated at  $P=1.75\text{ W}$ ,  $V=10\ \mu\text{m}/\text{sec}$ ,  $C=10\%$ , and  $N=1$  (left) ~ 10 (right)

수가 증가하더라도 채널의 폭에는 거의 변화가 없는데 그 이유는 기본적으로 채널의 폭을 결정짓는 변수는 집속된 레이저빔의 초점 크기 및 레이저 출력이므로 반복에칭횟수(N)를 증가시키더라도 채널 폭에는 그다지 영향을 주지 않기 때문이다. 그러나 Fig. 3(b)에 나타나듯이 반복에칭횟수가 5 회까지는 채널의 깊이가 직선적으로 증가하나 6 회 이상에서부터는 깊이 방향으로 더 이상 에칭이 진행 되지 않음을 알 수 있다. 이와 같이, 에칭을 반복하더라도 채널 깊이가 증가하지 않는 이유는 채널이 어느 깊이 이상으로 깊을 경우 시편 표면에서부터 전달되어 온 레이저 에너지는 레이저빔의 확산 및 벽면에서의 흡수에 따른 손실로 인하여 채널의 바닥에서 에칭이 일어날 수 있을 만큼 충분히 공급되지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4(a)와 4(b)는 각각 Fig. 3 에서 측정된 채널의 폭과 깊이를 나타낸다. 채널의 폭은 약 30  $\mu\text{m}$  정도로 일정하며 반복에칭횟수에 대해 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 같은 조건에서 채널 깊이의 경우, N=1 일 때 170  $\mu\text{m}$  정도이나 N=5 까지 증가함에 따라 최대 깊이가 약 330  $\mu\text{m}$  로 증가한다. 그러나 N=6~10 에서는 깊이 방향으로의 증가가 더 이상 일어나지 않고 불규칙한 양상을 보인다. 이러한 결과는 미세채널 가공에서 적절한 반복에칭횟수가 5 회임을 나타내며 따라서, 이하의 연구에서는 반복에칭횟수를 5 회로 고정하고 실험하였다.



(a)



(b)

Fig. 4 Variations of the etch (a) width and (b) depth with respect to the number of scans; P=1.75 W, V=10  $\mu\text{m}/\text{sec}$ , and C=10%

#### 4.1.2 초점의 이송속도에 따른 채널의 영향

미세채널의 폭과 깊이에 많은 영향을 미치는 또 다른 변수가 레이저 초점의 이송속도이다. 본 연구에서는 반복에칭 실험을 통하여 폭이 좁고 깊이가 깊은 미세채널을 형성할 수 있는 가장 적절한 이송속도가 10  $\mu\text{m}/\text{sec}$  임을 확인하였다. 10  $\mu\text{m}/\text{sec}$  보다 느린 이송속도에서는 레이저 초점 주위에서 시편 표면으로 많은 열 확산이 발생하여 오히려 폭이 넓은 채널이 형성되며, 10  $\mu\text{m}/\text{sec}$  보다 빠른 이송속도에서는 충분한 에너지가 공급되지 못하여 깊은 채널이 형성되지 못한다. 그러므로 반복에칭횟수와 마찬가지로 본 연구에서는 레이저 초점의 이송속도를 10  $\mu\text{m}/\text{sec}$  로 고정하고 모든 실험을 진행하였다.

#### 4.1.3 레이저 출력에 대한 채널의 특성

레이저 출력은 레이저초점의 이송속도와 함께 채널의 폭과 깊이를 결정짓는 중요한 공정 변수이다. Fig. 5는 V=10  $\mu\text{m}/\text{sec}$ , C=10%, N=5의 공정 조건에서 레이저 출력을 변화시켜 가며 제작된 미세채널의 폭과 깊이 및 그에 따른 세장비의 변화를 보여주고 있다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 레이저 출력의 증가에 대하여 채널 폭이 증가하지만 증가율은 서서히 감소함을 알 수 있다. 이 조건에서 제작된 미세채널의 최소 폭은 15  $\mu\text{m}$  이며 그때의 채널 깊이는 약 150  $\mu\text{m}$  정도임을 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있다. 따라서, 세장비 10 또는 그 이상인 미세채널이 제작된다. 본 연구에서 이와 같이 좁은 폭의 미세채널 가공이 가능한 것은 본 연구에 사용한 레이저빔의 특성으로 설명할 수 있다. 실험에 사용된 레이저 시스템은 가우시안(Gaussian) 분포의 레이저빔을 갖고 있으며 레이저 출력이 낮을 경우, 레이저빔의 중심 근처 부분만이 시편과 에칭용액 사이의 화학반응을 유도할 수 있는 문턱값 이상의 에너지 강도를 가지게 되므로 낮은 출력에서는 매우 좁은 폭의 미세채널 가공이 가능하게 된다. 같은 이유로 레이저 출력이 증가하면 문턱값 이상의 강도를 가지게 되는 영역이 확대되면서 Fig. 5(a)에서처럼 채널 폭이 증가한다. 그러나, 레이저 출력이 계속 증가하더라도 채널의 폭이 같은 비율로 증가하지 않고 오히려 증가율이 서서히 감소하는데 그 이유는 에너지가 증가하면서 문턱값 이상에 해당하는 영역이 가우시안 빔의 최대 직경에 점점 가까워지지만 그 이상으로는 커

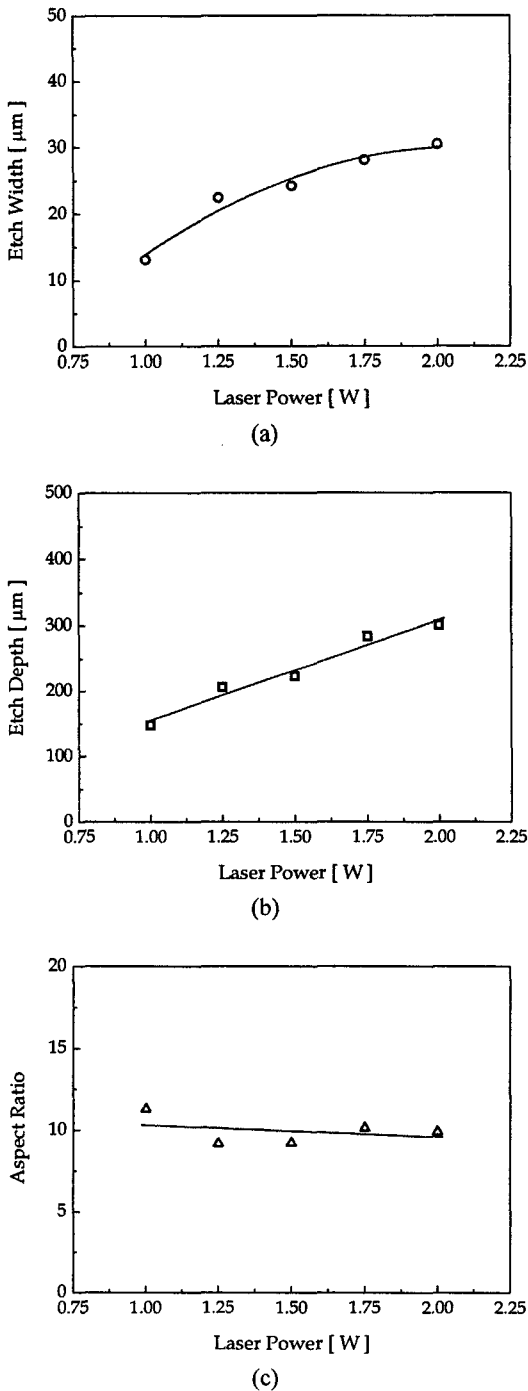


Fig. 5 Variations of the etch (a) width, (b) depth, and (c) aspect-ratio of the microchannels for varying laser power;  $V=10 \mu\text{m}/\text{sec}$ ,  $C=10\%$ , and  $N=5$

지지 않고 일정한 값에 도달하기 때문이다. 본 실험에 이용된 레이저 출력의 범위는 1~2 W 이며 채널의 깊이 역시 레이저 출력에 따라 폭과 유사한 경향성을 가지며 증가한다.

위의 결과를 종합적으로 판단해 볼 때, 임의의 폭을 가지는 채널에 대해 레이저 출력을 적절하게 조절함으로써 세장비 10 이상의 미세채널 가공이 가능함을 알 수 있다.

#### 4.1.4 에칭용액의 농도에 따른 단면형상 변화

Fig. 6(a)에서 6(d)는  $P=1.75 \text{ W}$ ,  $V=10 \mu\text{m}/\text{sec}$ ,  $N=5$ 의 조건으로 다양한 에칭용액의 농도에서 제작된 미세채널의 단면을 보여주고 있다. 시편의 표면에서 측정된 채널의 폭은 에칭용액의 농도에 관계없이  $30 \mu\text{m}$  로 거의 일정한 값을 보인다. 그러나 채널의 단면에서 측정된 폭은 에칭용액의 농도에 상당히 많은 영향을 받는다. 먼저, 가장 낮은 10%의 농도에서는 시편 표면에서부터 전체적으로 균일하게 에칭되는 이른바 U 형상의 채널이 형성된다. 그러나 에칭용액의 농도가 점점 증가함에 따라 바닥 부분이 뾰족한 V 형상의 채널이 만들어지는데 이러한 현상은 농도가 높을수록 더욱 두드러진다. 이렇게 단면 형상이 다른 채널이 형성되는 이유는 농도 차에 따른 에칭용액의 흐름이 다르기 때문인데 40%의 높은 농도의 경우, 에칭용액의 점성이 10%일 때보다 약 3 배 정도 높아서 채널의 바닥 부분까지 신선한 용액의 공급이 원활하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 신선한 에칭용액이 원활하게 공급되지 못하면 채널 속에 있는 에칭용액이 부분적으로 표백되고 (bleached) 결국 반응은 레이저 강도가 가장 강한 가운데 부분에서만 일어나므로 바닥으로 갈수록 좁아지는 채널이 형성되는 것이다.<sup>15</sup> 또한, 에칭 시에 발생하는 미세기포 (microbubbles)의 영향도 에칭용액의 농도와 관련되어 단면의 형상을 결정짓는 요인이 된다.<sup>16</sup> 일반적으로 습식 에칭의 경우에 에칭이 진행되는 동안 많은 미세기포들이 생성된다. 이러한 미세기포들은 에칭 부산물 (by-product)을 효과적으로 제거할 뿐만 아니라 채널 속으로 신선한 에칭용액이 원활하게 공급될 수 있게 한다. 농도가 높은 경우, 미세기포에 의한 용액의 혼합 작용 및 유동이 상대적으로 덜 활발하므로 실험 결과와 같이 깊이에 따라 폭이 좁아지는 현상이 일어나는 것으로 추정된다. 이상에서 점성이 낮은 농도일수록 전체

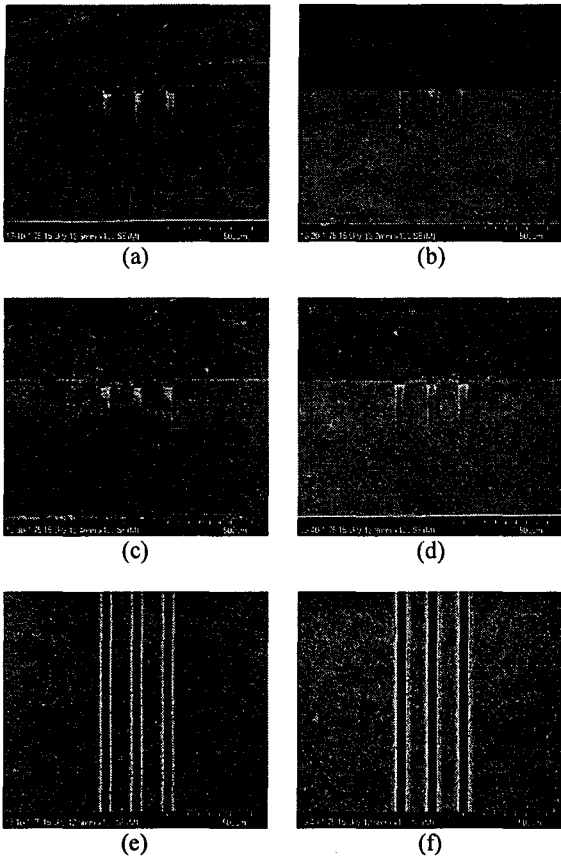


Fig. 6 Cross-sectional profiles of the microchannels fabricated at the different etchant concentrations; (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, and (d) 40%. Top views of the microchannels produced (e) 10% and (f) 40% conditions. Other process variables are  $P=1.75$  W,  $V=10$   $\mu\text{m}/\text{sec}$ , and  $N=5$

적으로 균일하게 에칭된 U 형상의 단면을 가지는 채널이 쉽게 형성됨을 짐작할 수 있다. 또한, Fig. 6(e)와 6(f)는 10%와 40%의 에칭용액에서 제작된 채널의 표면 형상을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 시편의 표면은 에칭용액의 농도와 관계없이 우수한 가공성을 보이며 채널 전체에 대하여 균일하고 정밀하게 가공될 뿐만 아니라 열에 의한 변형이나 열영향부가 거의 없는 깨끗한 형상을 가진다. 여기서 주목할 것은 채널 사이의 간격이 불과 150  $\mu\text{m}$  밖에 안 된다는 점인데 이와 같은 결과는 레이저 에칭 방법이 깨끗한 표면과 정밀하고 균일한 단면을 갖는 고세장비의 미세채널을 제작할 수

있는 매우 효과적인 초정밀 가공기술임을 보여주고 있다.

#### 4.1.5 에칭용액의 농도에 따른 세장비 변화

Fig. 7(a)와 7(b)는 Fig. 6(a)~6(d)에 해당하는 각각의 에칭농도에서 제작된 채널의 폭과 깊이 그리고 세장비의 변화를 나타낸 그래프이다. 앞서도 살펴본 바와 같이 에칭용액의 농도는 채널의 폭보다는 깊이 및 단면 형상의 변화와 밀접한 관계가 있으며, 에칭용액의 농도가 증가하면 할수록 상대적으로 낮은 세장비의 채널이 형성된다.

지금까지의 결과들을 종합해 볼 때, U 형상을 갖는 고세장비의 미세채널을 제작하기 위해서는

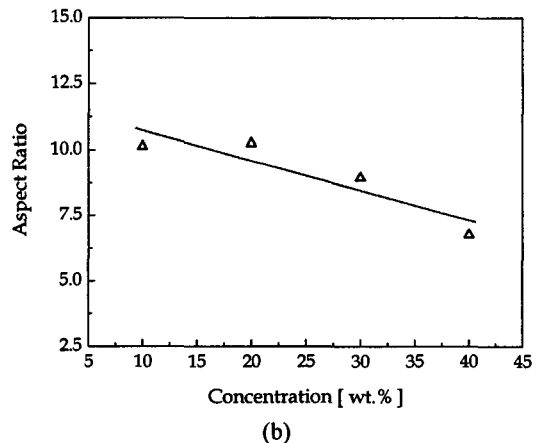
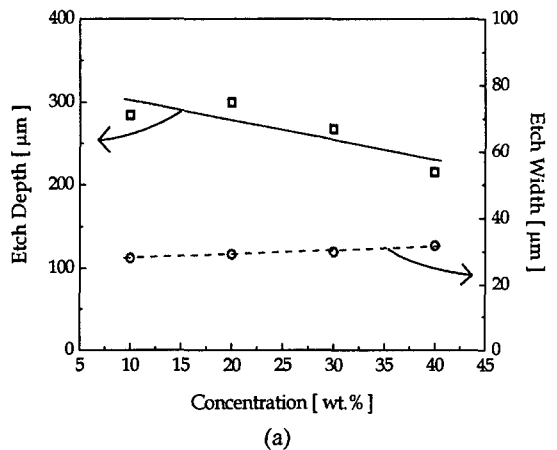


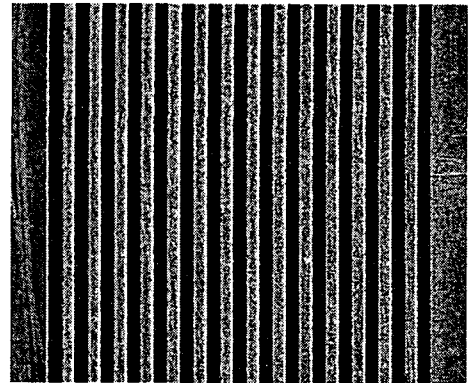
Fig. 7 (a) Etch width and depth of the microchannels shown in Figs. 6(a) to 6(d) and (b) the corresponding aspect-ratio

10~20%의 낮은 에칭용액에서 에칭을 하기 것이 유리하다는 것을 알 수 있다. 하지만 더욱 중요한 것은 에칭용액의 농도를 적절히 조절함으로써 U 형상과 V 형상 사이에서 원하는 단면 형상의 미세채널 가공이 가능하다는 사실이다. 마이크로 히트파이프를 설계할 때 워 구조로서 사각형 뿐만 아니라 삼각형이나 사다리꼴의 채널 단면 구조도 자주 이용되는데 이러한 형태의 단면을 가지면서 7~10 정도의 높은 세장비를 갖는 미세채널의 가공에 있어서 본 연구에서 제안된 레이저 에칭 기술이 효과적으로 적용될 수 있음을 확인할 수 있다.

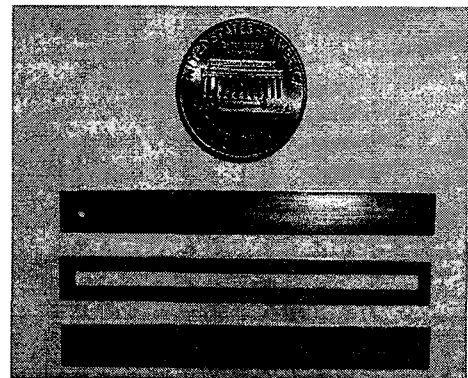
#### 4.2 마이크로 히트파이프 제작

앞 절에서 나타낸 결과들을 바탕으로 최적의 공정 조건을 구하고 레이저 에칭을 이용하여 고세장비 미세채널구조 기반의 판형 마이크로 히트파이프를 실제 제작하였다. 제작된 마이크로 히트파이프는 56 mm (L) × 6.0 mm (W) × 1.5 mm (H)의 외형 수치를 가지며 상판과 하판에는 각각 50 mm 길이의 미세채널이 15 개씩 형성되어 있다. 또한, 상·하판의 제작을 위해 각각 500 μm 두께의 STS-304 박판이 이용되었다. Fig. 8(a)는 P=1.75 W, V=10 μm/sec, C=10%, N=5의 공정 조건에서 상·하판에 제작된 고세장비 미세채널을 보여준다. 시편 표면에서 측정된 채널의 폭은 약 50 μm 이고 채널 간의 간격은 150 μm 이다. 제작된 채널은 그림에서 보여지는 바와 같이 아주 정밀하고 균일한 간격을 가지며 우수한 표면과 가공 형상을 나타낸다. 또한, 상판과 하판 사이에 동일한 소재로 두께 500 μm의 중간판을 방전가공으로 제작하였으며, 중간판은 외부에서 전달되어 온 열에 의해 기화된 작동유체의 증기가 지나는 통로구 역할을 한다. 증기 통로구(vapor passage)의 단면적은 1 mm<sup>2</sup> (2 mm × 0.5 mm)이다. Fig. 8(b)는 마이크로 히트파이프의 제작을 위해 형성된 상판, 중간판, 하판의 사진으로 여기서 상판의 일부분에 작동유체(working fluid)의 주입을 위하여 직경이 약 1 mm 정도인 구멍이 가공되었다. 또한, 세 개의 제작된 판을 적층하여 레이저 용접한 후 내경이 1 mm 인 스테인레스 관을 상판에 가공된 구멍과 용접하였으며 최종적으로 완성한 스테인레스 스틸 마이크로 히트파이프를 Fig. 8(c)에 나타내었다.

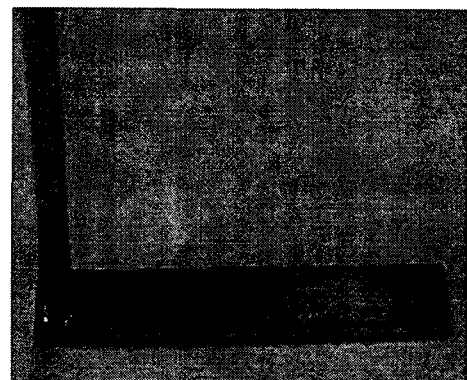
Fig. 9 는 제작된 히트파이프의 열전달 특성을



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 (a) Photograph of the microchannels produced on the top and bottom plates of the prototype MHP at P=1.75 W, V=10 μm/sec, C=10%, and N=5, (b) top, middle, and bottom plates before packaging, and (c) the completed MHP with a stainless steel tube for the supply of working fluid



보여준다. 성능 평가를 위해 작동유체로 증류수가 이용되었으며, 그 열전달 특성은 약 3.5 W 까지 정상적으로 작동되는 것을 확인하였다. 현재, 제작된 마이크로 히트파이프의 좀 더 정확한 특성 평가를 위한 실험이 진행 중이다.

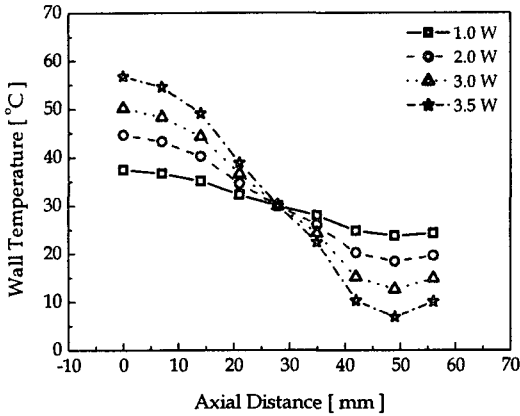


Fig. 9 Wall temperature distribution along the axial direction of micro heat pipe

### 5. 결론

본 연구에서는 고세장비의 미세채널 제조를 위한 레이저 에칭 기술을 제안하고 그 유용성을 제시하였다. 레이저 에칭을 이용하여 최소 15 μm의 폭과 10 이상의 높은 세장비를 가지는 미세채널의 제작이 가능하며, 30 μm 이하의 폭에 300~350 μm의 깊이를 가지는 채널 가공을 실현하였다. 레이저 에칭을 통하여 제작된 채널은 열변형이나 열영향부가 없는 우수한 표면 형상을 나타내며 정밀하고 균일한 단면 형상을 가진다. 또한 에칭용액의 농도 조절을 통해 삼각형과 사각형 사이에서 단면 형상의 적절한 제어가 가능하다. 채널 간격은 약 150 μm 이하로 줄이는 것이 가능할 뿐만 아니라 폭이 30 μm 이하인 채널에 대해서는 간격을 더욱 작게 하는 것도 가능할 것으로 기대된다. 결론적으로 레이저 에칭 기술은 미세채널구조 기반의 마이크로 히트파이프 제작에 효과적인 뿐만 아니라 더 나아가 마이크로 반응기(micro reactor)나 마이크로 연료 전지(micro fuel cell)과 같은 미세채널구조를 바탕으로 한 마이크로 소자(micro devices) 제작에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 후 기

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

### 참고문헌

- Ponnappan, R., "Novel groove-shaped screen-wick miniature heat pipe," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 16, No. 1, pp. 17-21, 2002.
- Moon, S. H., Hwang, G, Ko, S. C. and Kim, Y. T., "Experimental study on the thermal performance of micro-heat pipe with cross-section of polygon," *Microelectronics Reliability*, Vol. 44, pp. 315-321, 2004.
- Cotter, T. P., "Principle and prospects for micro heat pipes," *Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Heat Pipe Conference*, Vol. 4, pp. 328-334, 1984.
- Cao, Y., Gao, M., Beam, J. E. and Donovan, B., "Experiments and analyses of flat miniature heat pipes," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 11, No. 2, pp. 158-164, 1997.
- Hopkins, R., Faghri, A. and Khrustalev, D., "Flat miniature heat pipes with micro capillary grooves," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 102-109, 1999.
- Lin, L., Ponnappan, R. and Leland, J., "High performance miniature heat pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3131-3142, 2002.
- Berre, M. L., Launay, S., Sartre, V. and Lallemand, M., "Fabrication and experimental investigation of silicon micro heat pipes for cooling electronics," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, pp. 436-441, 2003.
- Suh, J. S., Greif, R. and Grigoropoulos, C. P., "Friction in micro-channel flows of a liquid and vapor in trapezoidal and sinusoidal grooves," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 3103-3109, 2001.
- Kim, S. J., Seo, J. K. and Do, K. H., "Analytical and experimental investigation on the operational characteristics and the thermal optimization of a miniature heat pipe with a grooved wick structure,"

- International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 2051-2063, 2003.
10. Gillot, C., Avenas, Y., Cezac, N., Poupon, G., Schaeffer, C. and Fournier, E., "Silicon heat pipes used as thermal spreaders," IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 26, No. 2, pp. 332-339, 2003.
  11. Chi, S. W., "Heat Pipe Theory and Practice, A Sourcebook," Hemisphere Publishing Corporation, Chap. 1-2, 1976.
  12. Lu, Y. F. and Ye, K. D., "Laser-induced etching of polycrystalline  $Al_2O_3TiC$  in KOH aqueous solution," Applied Physics A, Vol. 63, pp. 43-49, 1996.
  13. Nowak, R. and Metev, S., "Thermochemical laser etching of stainless steel and titanium in liquids," Applied Physics A, Vol. 63, pp. 133-138, 1996.
  14. Shin, Y. S., Son, S. W. and Jeong, S. H., "Laser-induced thermochemical wet etching of titanium foil for fabrication of microstructures," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 32-38, 2004.
  15. Hussey, B. W., Haba, B. and Gupta, A., "Role of bubbles in laser-assisted wet etching," Applied Physics Letters, Vol. 58, No. 24, pp. 2851-2853, 1991.
  16. Son, S. W. and Jeong, S. H., "Fabrication of metallic micro channels of high aspect ratio using laser-assisted thermochemical wet etching," Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2004), Paper M303, 2004.