

< 논문 >

## 모세관 단면 형상에 따른 계면 및 증발 특성

최충효\* · 진송완\* · 유정열†

(2006년 6월 29일 접수, 2007년 2월 17일 심사완료)

### Geometry Effects of Capillary on the Evaporation from the Meniscus

Choonghyo Choi, Songwan Jin and Jung Yul Yoo

**Key Words :** Evaporation(증발), Meniscus(메니스커스), Corner Meniscus(모서리 메니스커스)

#### Abstract

The effect of capillary cross-section geometry on evaporation is investigated in terms of the meniscus shape, evaporation rate and evaporation-induced flow for circular, square and rectangular cross-sectional capillaries. The shapes of water and ethanol menisci are not much different from each other in square and rectangular capillaries even though the surface tension of water is much larger than that of ethanol. On the other hand, the shapes of water and ethanol menisci are very different from each other in circular capillary. The averaged evaporation fluxes in circular and rectangular capillaries are measured by tracking the meniscus position. At a given position, the averaged evaporation flux in rectangular capillaries is much larger than that in circular capillary with comparable hydraulic diameter. The flow near the evaporating meniscus is also measured using micro-PIV, so that the rotating vortex motion is observed near the evaporating ethanol and methanol menisci except for the case of methanol meniscus in rectangular capillary. This difference is considered to be due to the existence of corner menisci at the four corners.

#### 기호설명

$x_m$	: 채널 입구에서 메니스커스까지의 거리
$\dot{V}$	: 단위시간당 증발량
A	: 마이크로 채널 단면적
S	: 메니스커스 표면적
u	: 유체 속도
$u_m$	: 메니스커스 이동 속도

#### 1. 서론

최근 많은 전자제품들의 고성능화, 소형화에 따라 제품 내부에서 발생하는 열을 효과적으로 냉각시키는 문제가 대두되고 있다. 최근의 제품들은

30 W - 100 W 정도의 많은 양의 열을 발생하고 있으며 이러한 열은 현재 팬을 사용한 강제 대류의 방식으로 냉각하기에는 그 한계가 있다. 뿐만 아니라 팬을 사용한 냉각 방식은 그 크기와 소음, 진동 면에 있어서도 점점 더 고성능, 소형화 되고 있는 전자 제품에 커다란 문제가 된다. 유체의 상변화 열전달을 이용한 모세관력 순환 시스템(Capillary Pumped Loop, CPL)이나 마이크로 히트파이프 등의 냉각기는 그 효율이 높고 유체를 순환시키기 위한 구동부가 없어 외부 에너지가 전혀 필요 없을 뿐만 아니라 그에 따른 소음과 진동도 없어 당면한 냉각 장치의 문제점을 해결할 수 있는 대안으로 여겨지고 있다. 특히 이러한 냉각장치에서 유체의 상변화가 직접적으로 일어나고 있는 메니스커스에서 발생하는 물리적 현상은 그 효율과 성능에 지대한 역할을 할 것으로 예상되므로 증발과 메니스커스에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 메니스커스는 매크로 영역(macro

† 책임저자, 회원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소  
E-mail : jyyoo@snu.ac.kr  
TEL : (02)880-7112 FAX : (02)883-0179

\* 서울대학교 기계항공공학부

region), 마이크로 영역(micro region, interline region), 흡착 필름 영역(adsorbed film region)으로 나누어지고 전체 증발량의 상당한 부분이 고체 벽면과 유체, 기체가 만나는 마이크로 영역에서 일어난다고 알려져 있다.<sup>(1-4)</sup> 또한 이러한 비 균일한 냉각으로 발생하는 온도차는 메니스커스 주변의 유동 현상에 지대한 영향을 미친다고 알려져 있다.

최근에는 미세 유동 가시화와 MEMS 기술이 발전함에 따라 마이크로 채널 내 증발의 열전달 현상뿐만 아니라 유동 현상에도 관심을 가지게 되었고 다양한 유동 가시화 기술들이 메니스커스 주변의 유동측정에 적용되기도 하였다.<sup>(5-7)</sup> 특히 원형 모세관내에서 휘발성 유체가 증발할 때의 메니스커스 주변의 유동에 관하여 Micro-PIV 기법과 적외선 카메라를 이용한 연구와 이론적인 모형 연구가 활발히 일어나고 있다.<sup>(8,9)</sup>

그러나 많은 연구가 원형 모세관이나 미소 액적의 증발에 관해 이루어지고 있으며 다른 단면을 가진 마이크로 채널 내에서의 연구는 많이 진행되지 않고 있다. 물론 지금까지는 원형 단면의 모세관이 가장 기본적이고 가장 중요한 연구대상이었다. 하지만 최근 MEMS 공정을 이용한 마이크로 채널 제작이 활발해짐에 따라 원형보다는 3 각형과 4 각형과 같이 각이 있는 단면을 가진 채널에 관한 연구가 새롭게 집중되고 있다. 3 각형 및 4 각형과 같은 채널에서는 두 면이 만나는 모서리로 인하여 원형 채널과 다른 메커니즘을 가지고 증발 현상이 일어날 것으로 예상할 수 있다. 따라서 마이크로 채널의 단면이 메니스커스 주위에서 나타나는 물리적 현상에 미치는 영향에 관한 연구가 매우 중요하다 할 수 있다.

본 연구에서는 원형 채널과 사각 채널을 이용하여 다른 단면을 가지는 모세관 내에서의 메니스커스의 모양, 증발률, 증발이 일어날 때 발생하는 메니스커스 주변의 유동현상 등에 관하여 연구하고자 한다.

## 2. 실험 장치

본 실험에서 사용된 모세관은 borosilicate 로 만들어졌으며 실험을 하기 전 RCA-1 용액 ( $H_2O + H_2O_2 + NH_4OH$ , 5:1:1)으로 세척한 후 마지막으로 질소를 사용하여 모세관 내부에 이물질이 남아있지 않도록 하여 표면 조건을 동일하게 유지하였다. 또한 증발은 모세관 한 쪽에서만 증발되도록 다른

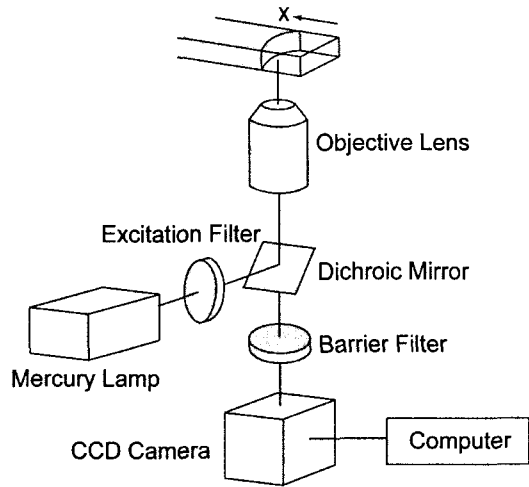


Fig. 1 Schematic of experimental setup

한 쪽은 고분자 고점성의 물질로 막았으며 실험시 온도는 광원에 의한 온도상승이 없음을 확인한 후  $22 \pm 1^\circ C$  로 유지하며 자연 증발로 실험하였다. 10X 대물렌즈와 Olympus IX50 형광 현미경을 사용하였으며, 메니스커스 모양을 관찰하고 증발량을 측정하기 위한 실험에서는 광원으로 할로겐 램프를 채택하였고 최대해상도  $1376 \times 1040$  pixels 를 가진 cooled CCD 카메라를 사용하였다.

Fig. 1 에 메니스커스 주변의 유동을 측정하기 위한 마이크로 영상 입자 유속계(Micro-PIV) 장치의 개략도를 나타내었다. 광원으로는 수은등을 별도의 셔터 없이 사용하였고 노출시간을  $1/60$  s 이하로 조절하여 유막선이 얻어지는 것을 방지하였다. 영상을 얻기 위해 Olympus U-MWG 형광 필터 세트를 사용했으며 추적입자로는 직경이  $1 \mu m$  인 형광 입자(Molecular Probes, F-8819)를 사용하였다.

실험에 사용된 4 각 모세관은 모서리 메니스커스의 영향을 일정하게 하기 위하여 동일한 형상비(aspect ratio)를 갖는 채널을 사용하였으며 빛의 굴절을 최소화하기 위하여 10:1 이라는 큰 비를 갖는  $200 \times 20, 400 \times 40 \mu m$  의 마이크로 채널을 사용하였다. 원형 모세관의 직경은 50, 200, 300,  $400 \mu m$  이다. 또한 메니스커스의 모양을 비교해보기 위하여  $400 \times 400 \mu m$  의 정사각 채널을 추가적으로 사용하였다.

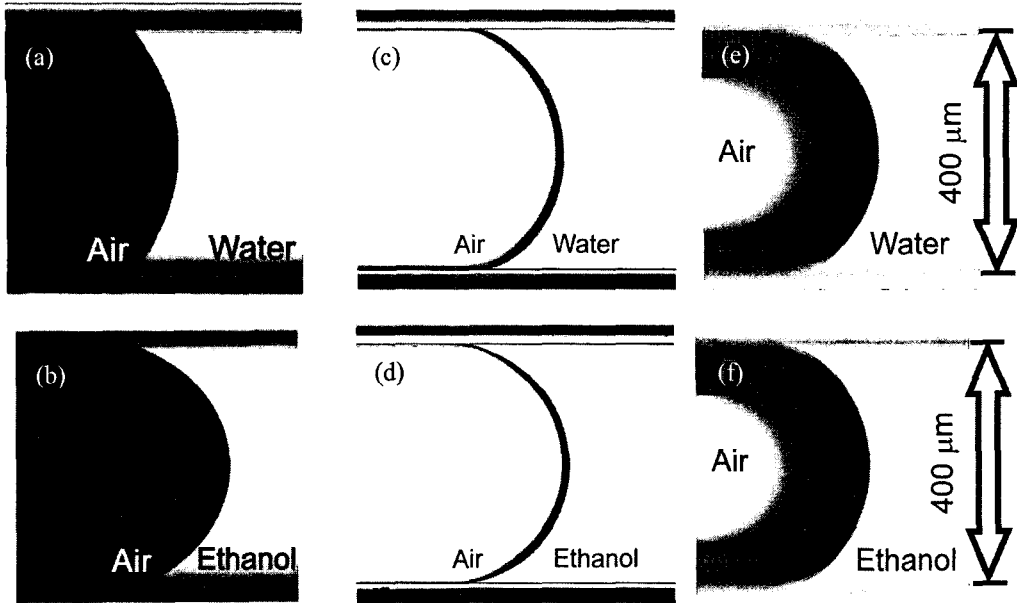


Fig. 2 Meniscus shape in the capillaries: (a) Circular ( $D = 400 \mu\text{m}$ ) - water, (b) Circular ( $D = 400 \mu\text{m}$ ) - ethanol, (c) Rectangular ( $400 \times 40 \mu\text{m}$ ) - water, (d) Rectangular ( $400 \times 40 \mu\text{m}$ ) - Ethanol, (e) Square ( $400 \times 400 \mu\text{m}$ ) - water, (f) Square ( $400 \times 400 \mu\text{m}$ ) - ethanol

### 3. 메니스커스 모양

모세관내 유체의 메니스커스는 유체의 표면 장력에 따라 접촉각이 결정되고 그에 따른 형상이 형성된다. 즉 유체의 표면장력이 메니스커스의 형상을 결정짓는 가장 큰 요소라고 할 수 있다. 본 실험에서 메니스커스는 증발 시작 초기에는 불안정한 형상을 하고 있다가 수 s 이내에 일정한 곡률의 메니스커스를 형성하고 측정 시간 내내 그 형상을 일정하게 유지하면서 증발하는 것을 관찰할 수 있었다. 초기 불안정한 모양을 갖는 시간이 전체 관찰 시간에 비하여 매우 짧은 과도기에 해당하므로 이러한 기간은 관찰 기간에 포함하지 않았다.

Fig. 2 는 여러 모세관 내의 메니스커스 모양을 보여준다. 우선 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 직경이  $400 \mu\text{m}$  인 원형 채널 안에서 증발하는 물과 에탄올의 메니스커스를 나타낸 것이다. 두 그림에서 알 수 있듯이 명백히 메니스커스의 모양이 다를 수 있다. 이것은 물의 표면장력( $7.28 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ )이 에탄올의 표면장력( $2.25 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ )보다 크기 때문에 나타나는 당연한 결과라고 할 수 있다. 그러나 Fig. 2(c)와 Fig. 2(d)에서와 같이 직 4 각 채널에서의

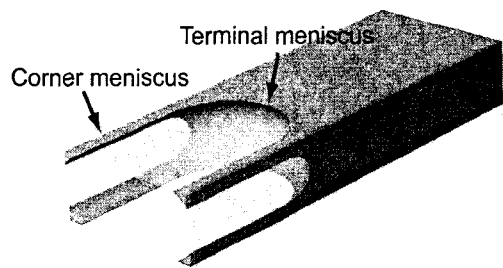


Fig. 3 Schematic of meniscus in rectangular channel

메니스커스 모양 차이는 원형 채널에서와 같이 뚜렷하지 않다. 본 실험에서 사용한 두 채널의 가장 큰 차이점은 직 4 각 채널의 경우 종횡비가 크다는 것과 두 벽면이 만나는 모서리가 존재한다는 것이다. 하지만 종횡비가 1 인 정 4 각 채널인 경우에도 Fig. 2(e), (f)와 같이 두 액체의 메니스커스가 크게 다르지 않으므로 이 현상은 4 각 채널의 모서리에 형성되는 모서리 메니스커스(corner meniscus)의 영향이라 생각할 수 있다. 4 각 채널에서는 원형채널에서와는 달리 각 코너에 모서리 메니스커스를 형성하게 된다(Fig. 3). Fig. 2(c), 2(d), 2(e), 2(f)에서 보이는 메니스커스 형상은 이러한 모서리 메니스커

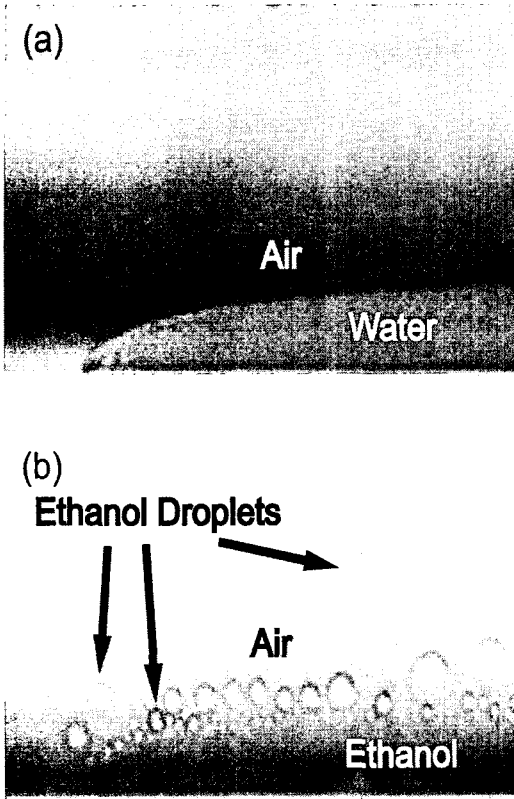


Fig. 4 Tip of corner meniscus in the rectangular capillary: (a) Water, (b) Ethanol

스를 형성하기 위한 최적화된 형상이라고 할 수 있다. 이러한 모서리 메니스커스는 증발로 인하여 터미널 메니스커스(*terminal meniscus*)가 안쪽으로 이동해 들어가게 되어도 소멸하지 않고 일정한 길이를 가진 채로 남아있게 된다. 이와 관련하여 최근 원형 채널과 비교하여 사각 채널에서 형성되는 모서리 메니스커스의 두께와 증발과의 관계를 이론적으로 설명하는 연구가 이루어지고 있다.<sup>(10)</sup>

Fig. 4(a)와 4(b)는  $1000 \times 100\text{-}\mu\text{m}$  채널에서 물과 에탄올의 모서리 메니스커스의 끝부분을 나타낸 그림이다. 물의 경우 증발이 일어남에 따라 끝부분의 움직임은 터미널 메니스커스와 같이 연속적으로 이동해 가지 않고 한 지점에 고정되었다가 순간적으로 안쪽으로 이동해 가는 모습을 관찰할 수 있었다. 이것은 실험을 하기 전에 RCA-1 세척을 통해 표면을 깨끗하게 하였으나 표면에 남아있는 이물질이 메니스커스를 잡고 있다가 증발이 더 일어나면 순간적으로 안쪽으로 이동해 나가는 것

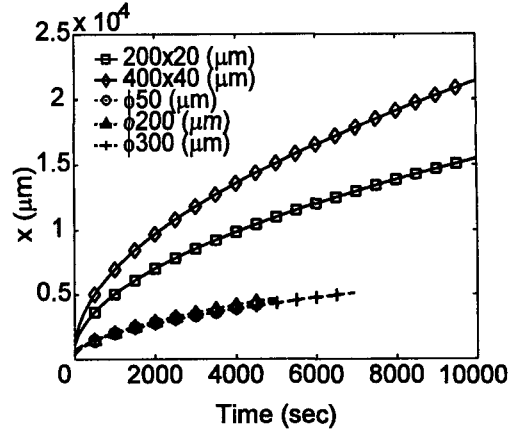


Fig. 5 Meniscus position of ethanol from the entrance

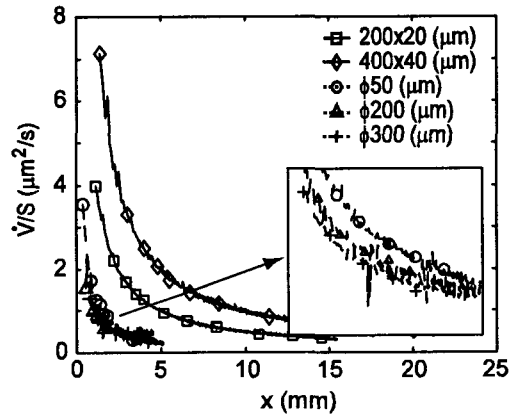


Fig. 6 Volume flux of ethanol per unit area of meniscus surface

으로 생각된다. 반면 에탄올의 경우에는 끝부분에 유체와 벽면의 경계면이 명확하지 않고 빠른 증발로 인하여 액적이 채널 벽면에 맺히는 현상을 볼 수 있었다.

#### 4. 증발률

모세관 내에서의 증발량은 터미널 메니스커스의 위치를 추적함으로써 알 수 있다. 에탄올이 모세관 내에서 증발할 때 시간에 따른 메니스커스 위치의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 증발 초기, 메니스커스의 위치가 채널 입구로부터 가까이에 있어 빠른 증발로 인해 빠른 이동속도를 보이다가 시간이 지난 후 일정한 길이의 모서리 메니스커스가 형성되면서부터 안정화된 이동 속도를 가진다. 반면 원형채널인 경우 보다 짧은 시간이 지난 후에 메니스커스의 이동속도가 안정화되고 있는 것

을 볼 수 있다. 이는 원형채널에서는 긴 모서리 메니스커스가 형성되지 않으므로 이동속도의 안정화 시간이 4 각에 비해 짧게 소요되기 때문인 것으로 생각된다. 4 각 채널의 경우 초기 메니스커스의 이동으로 인하여 소멸하는 액체의 양은 증발에 의해 채널 밖으로 이동하는 것 이외에 일정한 길이의 모서리 메니스커스를 형성하기 위하여 사용된다고 생각할 수 있다.

Fig. 5로부터 계산할 수 있는 터미널 메니스커스의 이동속도와 모세관의 단면적을 곱함으로써 단위

시간당 증발되는 양을 알 수 있고 ( $\dot{V} = A \frac{dx_m}{dt}$ ), 메니

스커스의 표면적(S)으로 단위시간당 증발량을 나누어 줌으로써 단위 면적당 증발률을 알 수 있다. 4 각 채널인 경우 메니스커스 표면적은 획득한 이미지로부터 넓은 면에 생기는 메니스커스의 길이를 구한 후 폭이 1/10 인 좁은 면에 생기는 메니스커스의 길이는 넓은 면 메니스커스 길이의 1/10 이라고 가정하고 두 메니스커스의 길이를 곱함으로써 계산하였다. 이와 같은 방법으로 계산한 채널 입구로부터의 거리에 따른 에탄올의 증발률을 Fig. 6에 나타내었다. 원형 채널인 경우 채널의 직경이 커질수록 단위면적당 증발률이 감소한다는 것을 알 수 있었다. 이는 증발은 메니스커스와 벽이 만나는 마이크로 영역의 면적에 비례하고 마이크로 영역은 원주를 따라 분포하기 때문에 증발률이 직경에 따라 선형적으로 감소한다는 Buffone 과 Sefiane의 연구 결과와 일치한다.<sup>9)</sup> 반면 4 각 채널인 경우 단위면적당 증발률이 원형 채널의 경우보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있고 채널의 크기와 증발률이 비례하여 증가한다고 일반화할 수는 없으나 원형 채널과는 분명 상반되는 경향을 나타내는 것을 관찰할 수 있었다. 이것 역시 모서리 메니스커스의 형성에 의한 결과라고 판단된다. 서론에서 밝힌 바와 같이 증발은 마이크로 영역에서 가장 활발하게 일어난다. 4 각 채널의 네 모서리를 따라 길게 형성된 모서리 메니스커스는 분명 마이크로 영역의 확대를 가져오고 그만큼 증발이 활발하게 일어나는 영역을 확대시킨다 할 수 있다. 모서리 메니스커스는 또한 터미널 메니스커스로부터 입구 쪽으로 길게 늘어져 있기 때문에 보다 마이크로 영역을 입구 쪽에 가깝게 이동시켜 증발이 더 잘 일어날 수 있도록 도와주게 된다. Fig. 4(b)에서 모서리 메니스커스의 끝부분 작은 액적들이 입구와 가까운 모서리 메니스커스에서 강한 증발이 일어나고 있다는 사실을 뒷받침 해줄 수 있다.

**Table 1** Classification of capillary evaporation according to the existence of rotating vortex near the meniscus: ○-vortex motion is observed; ×-vortex motion is not observed

	Water	Ethanol	Methanol
Circular	×	○	○
Rectangular 200 × 20 μm	×	○	×
Rectangular 400 × 40 μm	×	○	○

### 5. 메니스커스 주변 유동

Micro-PIV를 통하여 메니스커스 주변 유동을 관찰하기 위해서는 속도를 계산하기 전 증발로 인해 안쪽으로 이동해가는 메니스커스의 위치를 모든 이미지 안에서 일정한 위치에 고정시켜야 한다. 일반적으로 메니스커스에서 주변의 공기와 액체의 굴절률 차이로 인하여 메니스커스 부분에서는 빛이 분산되기 때문에 이미지상에서 가장 밝게 나타난다. 이러한 현상은 micro-PIV를 적용하는데 오차의 요인으로 작용할 수 있지만, 반면에 메니스커스의 위치를 찾는 데 큰 도움이 된다. 이를 이용하여 각 이미지에서 밝게 나타나는 메니스커스의 위치를 찾을 수 있었고 그 메니스커스가 전체 이미지의 같은 위치에 있도록 이동시켜 메니스커스의 위치를 고정시켰다. 또한 이렇게 처리된 이미지를 모두 합하고 평균을 내어 고정되어있는 메니스커스 부분만 밝게 나타나는 이미지를 얻을 수 있고, 개별 이미지에서 평균 이미지를 뺀으로써 밝은 메니스커스 부분을 제거하여 메니스커스에서 일어나는 빛의 분산으로 인한 오차를 줄이고 메니스커스에 아주 근접한 영역의 속도까지 계산할 수 있었다.

Fig. 7에 200 × 20-μm 사각 채널에서 물, 에탄올 그리고 메탄올이 증발할 때 메니스커스 주변의 유동을 나타내었다. 증발로 인한 메니스커스의 이동속도는 각각 2.1 ± 0.2 μm/s로 모두 비슷한 증발량을 가질 때이며 약 20 s 동안 1200여 개의 속도장을 평균한 결과이다.

우선 에탄올의 경우 메니스커스 중심을 기준으로 대칭적인 소용돌이 유동이 관찰됨을 Fig. 7(b)를 통하여 알 수 있다. Buffone 과 Sefiane은 휘발성 유체가 원형 채널에서 증발할 때 메니스커스 주변에서 Fig. 7(b)와 같은 유동이 형성되는 것을 이미 관찰한 바가 있다.<sup>9)</sup> 그들은 이 소용돌이 유동은

마랑고니 대류 효과로 설명하고 있다. 마이크로 영역의 강한 증발이 국부적인 온도차를 발생시키고 온도 함수인 표면 장력의 구배가 표면을 따라 형성된다. 이렇게 형성된 표면 장력의 구배가 소용돌이 유동을 발생시킨다.

Table 1 에 물, 에탄올 그리고 메탄올이 원형 채널 및 사각 채널 안에서 증발할 때 소용돌이 유동의 생성 여부를 나타내었다. 물의 경우에는 어떠한 채널 안에서도 소용돌이 유동이 관찰되지 않는다. 이것은 물의 표면에 존재하는 온도차가 소용돌이 유동을 형성할 만큼의 표면 장력 구배를 발생시키지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 에탄올과 메탄올과 같은 휘발성 유체의 경우에는 대부분의 모세관 내에서 소용돌이 유동이 발생되었다.

그러나 특이하게도  $200 \times 20\text{-}\mu\text{m}$  모세관 내에서 증발하는 메탄올의 경우에만 소용돌이 유동을 관찰할 수 없었다. 이러한 현상을 통하여 사각 채널의 경우에는 매니스커스 주위의 유동에 영향을 미치는 인자가 마랑고니 대류만이 아니라는 것을 예측할 수 있다. 이 결과로부터 모든  $200 \times 20\text{-}\mu\text{m}$  직 4 각 채널 안에서 메탄올이 증발할 때 소용돌이 유동을 관찰할 수 없다고 일반화하기는 힘들 것이다. 특히 모세관의 크기가 같다고 할 지라도 제작 방법을 달리하거나 모세관 재질이 달라진다면 결과가 달라질 수도 있을 것이다. 하지만 위와 같은 결과로부터 우리는 모세관 단면의 형상이 매니스커스 주위의 유동에 중요한 영향을 미칠 수 있다는 사실을 알 수 있다. 여전히 본 연구의 결과만으로는 관찰된 현상의 원인을 정확하게 알아내는 것은 불가능 하다. 하지만 앞선 연구를 통하여 모서리 매니스커스가 4 각 채널의 증발 현상을 원형 채널의 증발 현상과 다르게 만드는 중요한 인자 중 하나라는 것을 알 수 있었으므로 모서리 매니스커스가 증발로 인하여 발생하는 유동에도 영향을 미치는 인자 중 하나일 것이라 추측할 수 있다. 특히, 4 각 채널에서는 증발이 터미널 매니스커스 뿐만 아니라 모서리 매니스커스를 따라서도 일어나기 때문에 모서리 매니스커스를 유지하기 위해 터미널 매니스커스로부터 모서리 매니스커스로 유체가 공급 된다고 할 수 있다. 이때 발생하는 유동에 의하여 매니스커스 주변의 유동이 영향을 받을 것이라 추측할 수 있다. 이러한 차이의 원인을 정확하게 분석하고 이해하기 위해서는 매니스커스의 온도 측정, 4 각 채널 안에서 형성되는 매니스커스의 정확한 형상 분석 뿐만 아니라 채널의 중심으로부터 모서리 매니스커스 쪽으로 이동하는

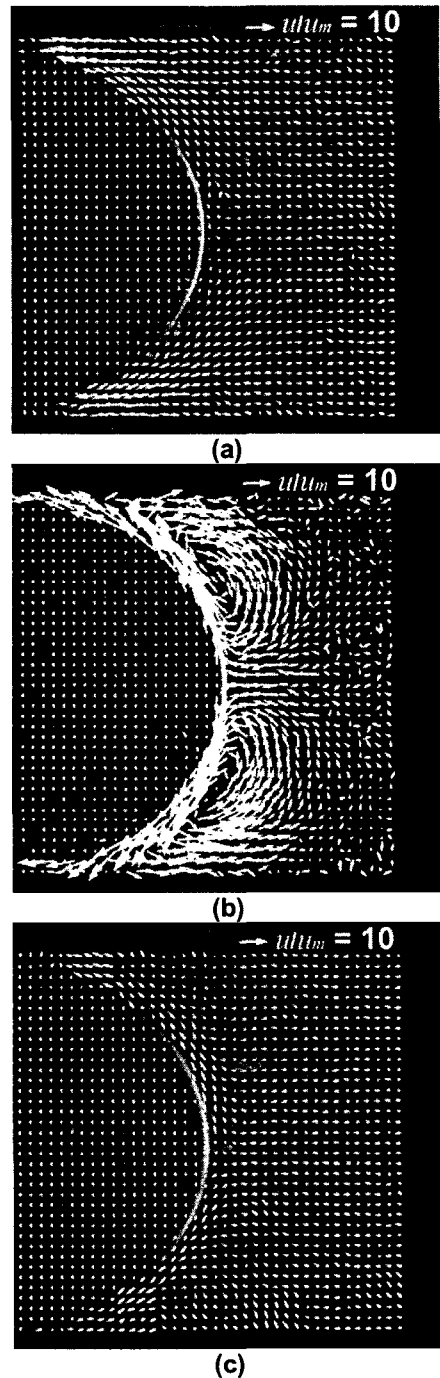


Fig. 7 Flow fields near the meniscus: (a) Water, (b) Ethanol, (c) Methanol

유량 측정 및 모서리 매니스커스 내의 유동 측정과 같은 보다 다각적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

## 6. 결론

마이크로 채널의 단면 형상이 채널 내 유체의 증발에 미치는 영향을 알아보기 위하여 원형 채널, 정 4 각형 채널, 직 4 각형 채널을 이용하여 메니스커스 형상, 증발률 변화, 메니스커스 주변의 유동 현상 등을 관찰하였다. 원형 채널 안에서 물과 에탄올의 메니스커스 모양은 표면장력의 차이로 인해 그 모양이 다르게 나타났다. 그러나 4 각 채널 안에서 메니스커스 모양은 표면 장력의 큰 차이를 가지고 있음에도 불구하고 큰 차이를 보이지 않았다. 이것은 네 모서리에 형성된 모서리 메니스커스가 터미널 메니스커스를 잡아 당기고 있어 표면장력이 다름에도 불구하고 그 모양이 크게 다르지 않기 때문이라고 생각된다.

메니스커스 위치를 이용하여 증발량을 측정할 결과 원형 채널에 비해 4 각 채널에서 단위 표면적당 증발률이 더 크게 나타났다. 이것은 모서리 메니스커스가 증발이 잘 일어나는 마이크로 영역을 크게 확장시키고 그 위치를 입구 영역으로 이동시킨 결과로 나타난 것이라 할 수 있다.

또한 증발이 일어날 때 메니스커스 주변의 유동을 Micro-PIV 기법을 이용하여 관찰하였다. 메탄올이  $200 \times 20\text{-}\mu\text{m}$  채널 안에서 증발할 때를 제외하고 소용돌이 유동이 관찰되었다. 그것은 원형 채널인 경우에는 마이크로 영역의 강한 증발로 인해 발생한 온도차가 마랑고니 대류 효과를 일으키기 때문인 것으로 여겨지나 4 각 채널인 경우 마랑고니 대류뿐만 아니라 네 모서리에 형성된 모서리 메니스커스가 유동 형태에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 마이크로 채널 내의 증발현상은 채널 단면의 형상에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었으며 특히 원형 채널과 모서리가 존재하는 4 각 채널의 차이점이 큰 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 차이의 주된 원인은 4 각 채널의 모서리에 존재하는 모서리 메니스커스의 영향이라 예측된다. 그러므로 원형 채널과 사각 채널의 증발 현상은 서로 매우 다른 물리적 현상이라 생각되며 공학 응용의 관점에서 매우 흥미로운 후속 연구가 이루어져야 하는 주제라 할 수 있다.

## 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지정 마이크로열시스템 연구센터의 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Renk, F.J. and Wayner Jr., P.C., 1979, "An Evaporating Ethanol Meniscus: Part I, Experimental Studies," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 101, pp. 55-58.
- (2) Renk, F.J. and Wayner Jr., P.C., 1979, "An Evaporating Ethanol Meniscus: Part II, Analytical Studies," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 101, pp. 59-62.
- (3) Moosman, S. and Homsy, G.M., 1980, "Evaporating Menisci of Wetting Fluids," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 73, pp.212-223.
- (4) Höhmann, C. and Stephan, P.C., 2002, "Microscale Temperature Measurement at an Evaporating Liquid Meniscus," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, pp. 157-162.
- (5) Park, J.S., Kim, H.J. and Kihm, K.D., 2001, "Molecular Tagging Fluorescence Velocimetry (MTFV) for Lagrangian Flow Field Mapping Inside Evaporating Meniscus: Potential Use for Microscale Applications," *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, Vol. 8, pp. 177-187.
- (6) Kim, S., Jin, S. and Yoo, J.Y., 2006, "Fluid Near the Meniscus of a Pressure-Driven Water Slug in Microchannels," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, pp. 710-716.
- (7) Park, J.S., Kim, H.J., Kihm, K.D. and Allen, J.S., 2003, "Optically-Sectioned Micro PIV Measurements Using CLSM," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 542.
- (8) Buffone, C. and Sefiane, K., 2004, "IR Measurement of Interfacial Temperature during Phase Change in a Confined Environment," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 29, pp. 65-74.
- (9) Buffone, C. and Sefiane, K., 2004, "Investigation of Thermocapillary Convection Patterns and Their Role in the Enhancement of Evaporation from Pores," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 30, pp. 1071-1091.
- (10) Camassel, B., Sghaier, N., Part, M. and Ben Nasrallah, S., 2005, "Evaporation in a Capillary Tube of Square Cross-section: Application to Ion Transport," *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 815-826.