

# 좁아지는 유로에서의 유동 특성

강상우<sup>†</sup> · 김진호\* · 이윤표\*\*

## Flow Characteristics in the Converging Mini-Channels

Sarng Woo Karng, Jin-Ho Kim, and Yoon Pyo Lee

**Key Words :** converging mini-channel(좁아지는 소형유로), CPL heat pipe(모관루프 히트파이프), MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems), volume fraction (부피분율), wick(심지)

### Abstract

Recently mini-channels or micro-channels are widely used for cooling the high density power electronic devices. Especially, the channels are used in small and high efficient equipments such as heat pipes and heat exchangers. Interfacial velocities between liquid and gas phases are very important in mini or micro-channels. In this paper, an experiment and a numerical analysis on the interfacial velocities were performed. In the experiment, the interfacial velocities which were measured by the high-speed CCD camera were about 26~33 cm/s and the velocities increased as the inclination angle did. In the numerical experiment, CFD-ACE+, a commercial program, was used, the velocities had similar values with experimental results. As the inclination angle and the contact angle increased, the interfacial velocities did because of the surface tension which causes to move the interface. The effect of inclination angle was larger in the converging channels than in straight channels.

### 기호설명

#### Alphabets

$f$	체력
$F$	부피분율
$P$	압력
$t$	시간
$u$	$X$ 방향 속도 성분
$v$	$Y$ 방향 속도 성분
$w$	$Z$ 방향 속도 성분
$X$	$x$ 축
$Y$	$y$ 축
$Z$	$z$ 축

#### Greek Letters

$\mu$	유체의 점성계수
$\rho$	유체 밀도

#### Subscripts

$x$	$x$ 방향
$y$	$y$ 방향
$z$	$z$ 방향

### 1. 서론

최근 전자산업의 눈부신 발달로 칩의 집적 기술은 나날이 발전하여 PC 나 노트북의 중앙처리장치(CPU)의 열유속은  $10^6 \text{ W/m}^2$  에 다다르고 있다. 이러한 고발열 칩들이 적절히 작동하기 위해서는 이에 상응하는 열전달 기술의 발전이 필수적이다.

고발열 칩들을 적절하게 냉각시키기 위한 방법 중 하나로 미세유로(microchannel, 폭  $100 \mu\text{m}$  이하)<sup>(1-3)</sup>를 형성하거나 다공성 물질(기공  $100 \mu\text{m}$  이

<sup>†</sup> 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터  
E-mail : libra@kist.re.kr  
TEL : (02)958-5680 FAX : (02)958-5689

\* 경원테크 연구소 AR 팀

\*\* 한국과학기술연구원

하)<sup>(4,5)</sup> 삽입을 이용한 열전달에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 다공성 물질의 예로서 폴리에틸렌(polyethylene)과 PVA(Poly Vinyl Alcohol)가 모관 루프 히트 파이프(CPL<Capillary Pumped Loop> heat pipe)의 증발부에서 심지로 사용되고 있다. 현재 미세유로 및 다공성 물질을 이용한 열전달 연구는 상변화를 이용하여 칩으로부터의 발열을 제거하는 쪽에 초점을 맞추고 있으며, 증발된 열을 응축시키는 방법으로는 모관 루프 히트파이프의 형태로 진행되고 있다<sup>(4,6)</sup>. 여기서 미세유로나 다공성 물질은 모관 루프 히트 파이프 내부의 작동유체의 순환을 위한 모세관힘을 발생시키는 역할을 하고 있다. 모관 루프 히트 파이프의 작동에 있어서 중요시 되는 여러 가지 점들이 있지만 모관 루프 히트 파이프의 특성상, 작동유체(증기상태)의 응축부로의 방향성이 중요한 요건 중의 하나가 된다. CPL 에서 이러한 방향성을 갖게 하는 방법 중 하나가 응축부에 좁아지는 유로를 설치하는 것이다. 이 좁아지는 채널은 좁아지는 쪽으로 모세관힘을 발생시켜 응축부에서 응축된 작동유체가 좁아지는 채널을 따라 방향성을 가지며 증발부로 잘 돌아갈 수 있도록 하는 역할을 하며, 증발부에서 증발된 증기가 응축된 작동유체가 증발부로 유입되는 통로로 나가려 하는 것을 방지하는 역할도 하게 된다.

미세유로, 밸브, 펌프, 혼합기, 분리기, 반응기 등과 같은 비교적 작은 장치 내에서 기-액 경계면을 가지는 유체를 취급하는 것은 결코 쉽지 않은 공학적인 문제들을 내포하고 있다. 미세유체역학이 적용되는 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 기술을 응용한 설계의 주요한 문제점들 중 하나는 표면장력이나 진공을 이용하여 미세유로 내에서 유체를 어떻게 조절하는가이다. 작동유체는 유로 벽면과 유체의 특성에 따라 소수성 또는 친수성을 띠게 된다. 폭 100  $\mu\text{m}$  이하의 미세유로에서는 압력이 표면장력에 비하여 유체에 미치는 영향이 매우 작아지므로 상압에서의 압력차로는 미세유로에 유체를 밀어 넣을 수 없게 된다. 이러한 미세유로에서는 표면장력의 영향이 압력에 비하여 훨씬 크기 때문이다. 이러한 현상에 대한 수치 모델은 Yang 과 Przekwas<sup>(7)</sup>에 의해 취급되었다.

본 연구에서는 채널 내에서의 유동 특성만을 살펴보았다. 응축부에서 응축된 작동유체의 유동에 방향성을 주기 위하여 좁아지는 유로를 제작하여 실험 및 수치적으로 비교하였다. 각각 5 가지의 경사각, 접촉각과 중력효과가 없는 경우에 대하여, 상용 프로그램인 CFD-ACE+를 이용하여 좁아지는 유로와 곧은 유로에서의 모세관힘의 효과를 수치적으로 비교하였다. 좁아지는 유로를 지나가는 작동유체의 속도를 3 가지의 경사각에 대하여 측정하여 수치결과와 비교하였다.

## 2. 지배방정식과 수치해석 방법

표면장력을 포함한 다유체(multi-fluid)의 수치적 해석을 위한 방법은 SIMPLE(Semi-Implicit Pressure-Linked Equation) 알고리즘에 기반을 두고 있다. 이 알고리즘은 식 (1)~(4)의 연속방정식과 운동방정식을 푸는데 이용된다.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \rho f_x \quad (1)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + \rho f_y \quad (2)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + \rho f_z \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

이 방정식의 해를 얻는 과정은 Patankar<sup>(8)</sup>가 자세히 언급하였다. SIMPLE 알고리즘은 정상, 비압축성유동에 적합하다고 알려져 있지만, 경계면을 가진 유동의 경우, 경계면을 예측하기 위한 추가적인 장치가 필요하다. 추가적인 장치로는 Hirt 와 Nichols<sup>(9)</sup>가 최초로 제안하였고, 최근에는 Rider 등<sup>(10)</sup>이 확장한 방법, 흔히 VOF(Volume of Fluid)로 알려진 방법이 많이 사용되고 있다. 그리고, Yang 과 Przekwas<sup>(7)</sup>은 이 방법을 MEMS 분야에 적용하였다. VOF 기술은 식 (5)와 같은  $F$  를 지배하는 방정식을 SIMPLE 알고리즘에 추가하여 해를 찾고,  $F$  가 0.5 를 갖는 면을 추적하여, 이를 경계면으로 가정하는 방법이다. 여기서  $F$  는 스칼라로서 부피분율(volume fraction)이다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

본 연구에서는 상용프로그램인 CFD-ACE+를 이용하였으며, 경계면을 추적하는 기법으로는 PLIC 방법을 채택하였다.

## 3. 실험

### 3.1 실험장치

#### 3.1.1 응축부 설계

모관 루프 히트파이프는 증발부, 응축부, 증기관 및 액체관으로 구성되어 있다. 모관 루프 히트파이프에서 작동유체의 보다 효과적인 순환을 위하여 Fig. 1 에 보여지는 것처럼 응축부 내에 두랄루민으로 제작된 좁아지는 유로를 설치하였다. 입구

폭, 출구 폭, 깊이가 각각 3 mm, 1 mm, 2.5 mm 인 좁아지는 유로에 관찰이 용이한 0.1 mm 두께의 투명한 필름을 덮고 순간접착제(Aron Alpha, TOAGOSEI CO., LTD)로 붙여 유로의 덮개를 만들었다. 고속 CCD 카메라를 이용하여 기-액 경계면의 영상을 얻기 위하여, 응축부를 투명한 PC (polycarbonate)로 덮어 나사체결하였다. Fig. 1 에 응축부의 앞면에 좁아지는 유로의 모습과 뒷면에 냉각수가 지나가는 유로의 모습이 각각 나타나 있다. 응축부의 앞뒷면은 viton 재질의 오링을 사용하여 진공 및 방수를 유지시켰다. 응축부에서 작동유체와 냉각수 각각의 입출구는 스테인레스 재질의 1/8" 관을 연결시킬 수 있는 커넥터를 장착시켰다. 이 좁아지는 채널은 다른 것으로 교체할 수 있도록 장탈착이 가능하도록 설계되었다.

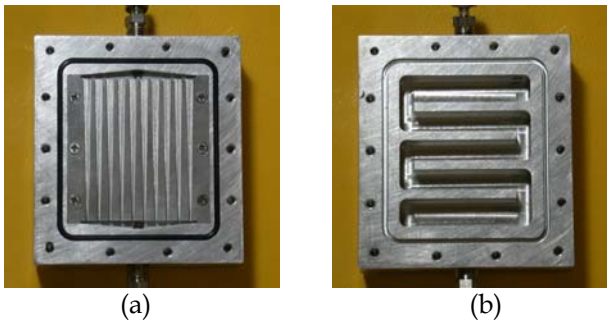


Fig. 1 Photographs of (a) the funnel-shaped mini-channels at the front side and (b) the cooling water passage at the back side in the condenser.

3.1.2 경사각에 따른 소형유로 내 유속 측정

응축부내 좁아지는 유로의 경사도가 유로를 통과하는 작동유체의 속도에 미치는 영향을 살펴보기 위한 실험 및 측정장치의 개략도가 Fig. 2(a)에 나타나 있고, 그 측면도가 Fig. 2(b)에 나타나 있다. 유로의 경사도에 따라 작동유체가 유로를 통과하는 것을 고속 CCD 카메라(250 fps, MotionScope, PCI 2000S, Redlake Imaging Corp.)로 기록하여 작동유체가 유로를 완전히 지날 때까지의 프레임의 개수를 세어 좁아지는 유로를 통과하는 작동유체의 속도를 측정하였다. 경사각은 유로가 수직일 때를 90°로 정하였다.

3.2 실험 방법

각각 30°, 60° 및 90°의 경사각에 대하여 고속 CCD 카메라와 좁아지는 유로를 평행하게 맞추고, CCD 카메라의 초점과 프레임에 알맞은 광량을 조절한다. 작동유체인 물을 저장용기에 채운 후, 밸브를 열어 좁아지는 유로로 흐르게 하였다. 밸

브를 여는 순간 CCD 카메라를 켜서 유로를 작동유체가 통과하는 동안 CCD 카메라를 작동시켰다. CCD 카메라로 작동유체의 유동 영상을 250 fps 로 기록한 후, 작동유체가 유로를 통과하는 프레임의 개수를 세어 유로를 통과하는 속도를 계산하였다.

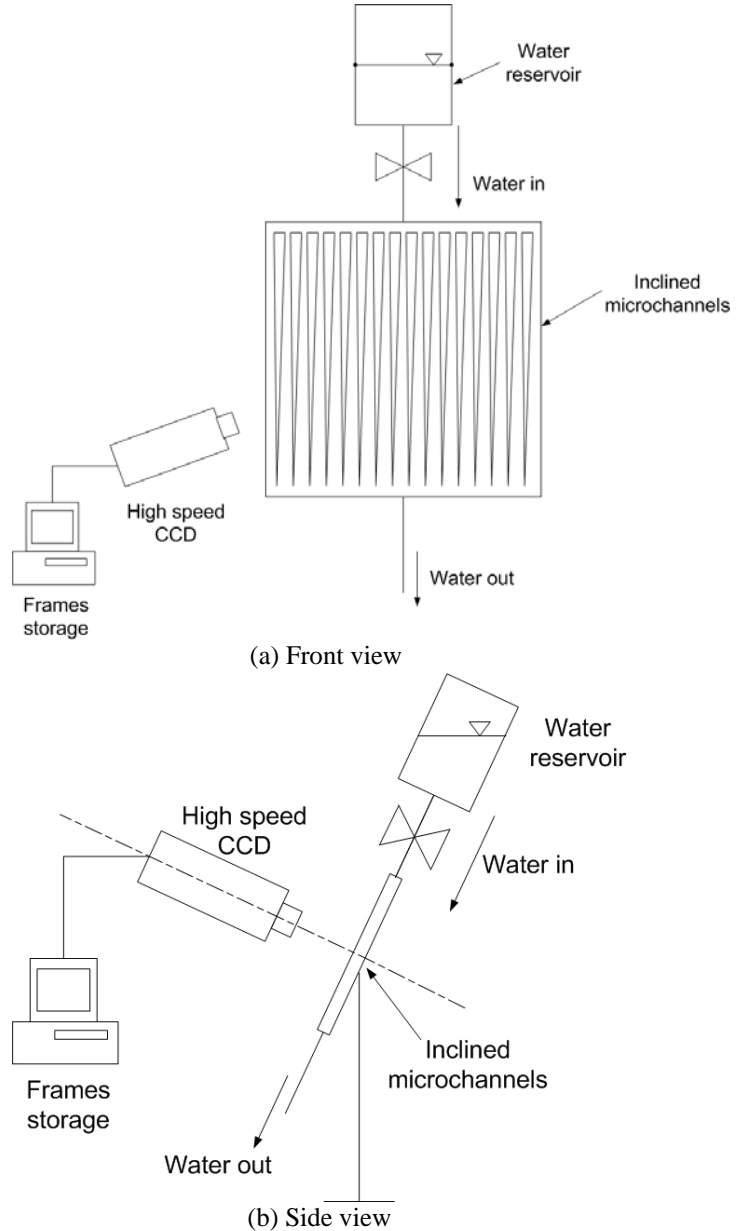


Fig. 2 (a) The front view and (b) the side view of experimental apparatus for velocity measurement through the mini-channels.

3.3 실험 결과

좁아지는 유로의 경사각이 감소함에 따라 좁아지는 유로를 통과하는 작동유체의 측정된 유속을 Table 1 에 정리하여 나타내었다. 유로의 경사각이 각각 60°와 90°일 때, 작동유체의 유속은 같은 것

으로 측정되었다. 그러나 경사각이 30°일 때는 작동유체의 유속이 60°, 90°일 때의 경우보다 21 %나 감소하였다. 이는 중력효과에 기인하며, 60°, 90°일 때 작동유체의 유속이 같게 측정된 이유는 경사각이 90°에서 60°로 감소하였지만 중력효과는 90°인 경우에 비하여 약 0.866 배 밖에 줄어들지 않았으며, 본 연구에서 사용된 고속 CCD 카메라의 성능이 약 13 % 정도의 중력감소 효과를 감지할 수 있을 정도로 정밀하지 못하기 때문이다. 그러나 경사각이 30°인 경우에는 중력효과가 반으로 줄어들게 되며, 작동유체의 유속은 경사각 90° 경우의 80 %인 26.0 cm/s 으로 줄어들게 된다.

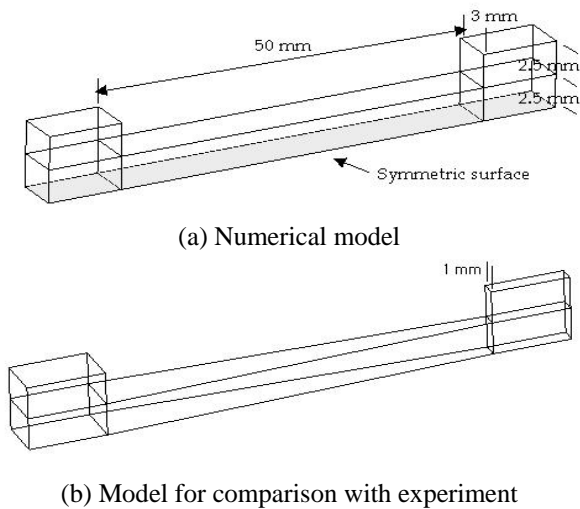
**Table 1** The experimental results of the velocities through the mini-channels.

Inclination angle [°]	Velocity [cm/s]
90	32.9
60	32.9
30	26.0

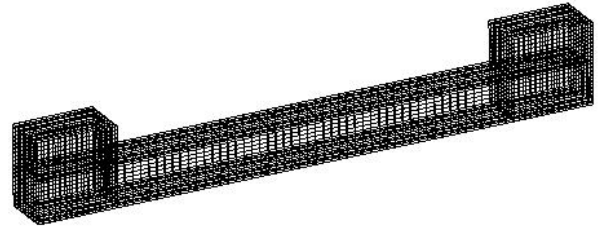
#### 4. 수치해석

##### 4.1 격자

수치적인 모델로 폭이 일정한 유로의 개략도를 Fig. 3(a)에, 좁아지는 유로의 개략도를 Fig. 3(b)에 각각 나타내었다. Fig. 3(a)에 보여지는 것처럼 소형 유로의 길이, 너비, 높이는 각각 50, 3, 5 mm 이다. 소형유로의 양쪽 끝부분에는 작동유체의 저장소를 위치시켰다. 격자는 Fig. 4 에 나타내었으며, 각각 91×11×21 의 격자점을 가지고 있다. 모든 그림은 알아보기 쉽게 하기 위하여 길이방향을 반으로 줄인 것이다.



**Fig. 3** Schematics of (a) numerical model and (b) model for comparison with experiment



**Fig. 4** Grid system

##### 4.2 기준 조건과 실험결과와의 비교

각각 유로의 경사각과 접촉각이 좁아지는 유로를 통과하는 작동유체의 속도에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 기준조건을 Table 2 에 나타내었다.

VOF 모델과 CFD-ACE+를 시험하기 위하여, 두랄루민으로 제작된 좁아지는 유로와 같은 체원으로 수치 모델화하여 계산하였다. 결과로 유로를 통과하는 작동유체의 유속은 여러 조건에 따라 9.996~60.35 cm/s 로 측정된 값 32.9 cm/s 이 그 범위 안에 들어있음을 알 수 있다. 따라서 VOF 모델과 CFD-ACE+이 MEMS 시스템과 그 계면의 특성을 파악하는데 적절함을 알 수 있다.

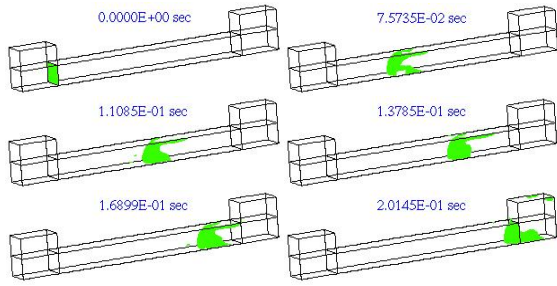
**Table 2** Reference conditions and parameters

Condition	Reference value	Parametric study
Inclination angle	Not considered	30°, 45°, 60°, and 90°
Contact angle	Not considered	Full wetting, 45°, 60°, and 75°

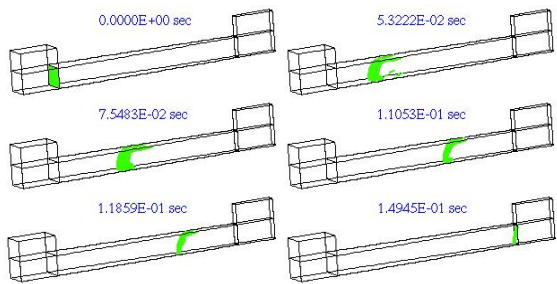
#### 5. 수치 결과 및 토론

##### 5.1 기준 조건에서 계면의 이동

폭이 일정한 유로와 좁아지는 유로에서 작동유체의 유동특성을 수치계산으로 각각 비교하였다. 기준조건에서 시간에 따른 기-액 경계면의 이동 변화를 폭이 일정한 유로의 경우는 Fig. 5 에, 좁아지는 유로의 경우는 Fig. 6 에 각각 나타내었다. 두 가지 경우 모두 왼쪽의 유체 저장소에 유체가 가득 차있는 것을 초기조건으로 하였다. 기-액 경계면은 왼쪽에서 오른쪽으로 이동한다. 계면이 오른쪽 저장소까지 이동하는데 걸리는 시간은 폭이 일정한 유로에서는 약 0.207 sec, 좁아지는 유로에서는 0.132 sec 로 속도로 환산하면 각각 24.06 cm/s, 37.78 cm/s 이다.



**Fig. 5** Temporary interface's movings at reference conditions through the straight channel



**Fig. 6** Temporary interface's movings at reference conditions through the converging channels

5.2 계면의 속도에 미치는 경사각의 영향

계면의 속도에 미치는 경사각의 영향에 대하여 계산하였고, 그 결과를 Table 3 에 나타내었다. 경사각이 90°(수직)에서 60°로 줄어들어도 계면이 오른쪽 끝까지 이동하는데 걸리는 시간은 약 7 % 정도 증가하여 90°의 경우의 계면속도와 큰 차이를 보이고 있지 않다. 이는 실험결과에서도 같은 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 경사각이 감소할수록 중력효과도 감소하겠지만 90°~60°까지의 중력감소는 크지 않기 때문이다. 경사각 60°의 경우에도 중력효과는 약 13 % 정도 감소될 뿐이다. 따라서 이 정도의 중력감소로는 계면의 속도에 별 영향을 주지 않게 된다. 그러나 경사각의 감소가 더욱 커지게 되면 중력감소 효과가 커져서 계면의 이동시간은 늘어나게 된다.

**Table 3** Effects of the inclination angles on the interfacial velocities through the straight channel.

Inclination angle [°]	Consumption time [sec]	Interfacial velocity [cm/s]
No gravity	0.20145	24.82
90 (vertical)	0.09876	50.63
60	0.10583	47.25
45	0.11296	44.26
30	0.12545	39.86

5.3 계면의 속도에 미치는 접촉각의 영향

계면의 속도에 미치는 접촉각의 영향을 계산하였고, 그 결과를 Table 4 에 나타내었다. 계산된 접촉각의 범위는 15°~75°이다. 접촉각이 90°이면 계면은 움직이지 않게 되며, 90°보다 크면 계면은 반대방향으로 움직이게 된다. 접촉각이 증가할수록 계면이 오른쪽 끝까지 이동하는데 걸리는 시간은 증가한다. 즉, 계면의 속도는 감소한다. 접촉각의 영향은 중력의 영향에 비하여 계면에 커다란 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 계면의 이동에 표면장력이 매우 중요한 역할을 하고 있음을 나타내고 있다. 즉, 접촉각이 모세관힘을 결정 짓는 주요한 인자임을 알 수 있다.

**Table 4** Effects of the contact angles on the interfacial velocities

Contact angle [°]	Consumption time [sec]	Interfacial velocity [cm/s]
15	0.20435	24.47
30	0.22457	22.26
45	0.24638	20.29
60	0.32819	15.24
75	0.50021	9.996

5.4 좁아지는 소형유로를 통과하는 계면의 속도에 미치는 경사각의 영향

좁아지는 유로를 통과하는 계면의 속도에 미치는 경사각의 영향에 대하여 계산하였고, 그 결과를 Table 5 에 나타내었다. 경사각이 증가할수록 계면의 속도 또한 증가하였다. 계면 이동 속도가 폭이 일정한 유로의 경우보다 좁아지는 유로의 경우에서 더 빠른 것으로 나타났다. 경사각이 증가할수록 폭이 일정한 유로의 경우보다 좁아지는 유로의 경우에서 계면 이동 속도의 증가 폭이 더욱 크게 나타났다. 이는 계면에 작용하는 중력이 좁아지는 유로의 경우에 더욱 크게 영향을 미치기 때문이다.

**Table 5** Effects of the inclination angles on the interfacial velocities through the converging channels.

Inclination angle [°]	Consumption time [sec]	Interfacial velocity [cm/s]	Velocity improvement by converging channels [%]
No gravity	0.14945	33.45	34.77
90 (vertical)	0.082846	60.35	19.20
60	0.086715	57.66	22.03
45	0.092773	53.89	21.75
30	0.10205	49.00	22.93

## 6. 결 론

본 연구에서 유로 내에서 계면의 이동 속도에 대하여 실험 및 수치적으로 수행하였다. 응축부 내에 좁아지는 소형유로를 제작하여 계면의 이동에 특별한 방향성을 주었고, 이를 모델링하였다. 각각 5 가지의 경사각, 접촉각과 증력효과가 없는 경우에 대하여 CFD-ACE+를 이용하여 좁아지는 유로의 모세관 효과에 의한 작동유체의 유동을 폭이 일정한 유로에서의 작동유체의 유동과 수치적으로 비교하였다. 또한 좁아지는 유로에서 측정된 계면의 속도를 수치계산과 비교하였다.

고속 CCD 카메라로 측정된 계면의 이동 속도는 경사각의 변화에 따라 약 26~33 cm/s 였고, 경사각이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

CFD-ACE+를 이용하여 수치해석을 수행한 결과, 계면의 이동 속도가 실험결과와 근사함을 알 수 있었다. 경사각과 접촉각이 증가할수록 계면의 이동 속도 또한 증가하였다. 경사각에 대한 영향은 폭이 일정한 유로보다 좁아지는 유로의 경우에 더 크게 작용하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정목적기초연구비 지원(과제번호 1999-1-304-002-5)으로 행해진 연구임.

## 참고문헌

- (1) Koo, J., Im, S., Cho, E.S., Prasher, R.S., Wang, E., Jiang, L., Bari, A., Campion, D., Fogg, D., Kim, M.S., Kenny, T.W., Santiago, J.G., and Goodson, K.E., "VLSI Hotspot Cooling Using Two-phase Microchannel Convection", Proceed. of IMECE 2002, ASME Int. Mech. Eng. Cong. Exposition, Nov. 17-22, 2002, IMECE2002-39585, pp. 1-7, 2002.
- (2) Jiang, L., Mikkelsen, J, Koo, J., Huber, D., Yao, S., Zhang, L., Zhou, P., Maveety, J.G., Prasher, R., Santiago, H.G., Kenny, T.W., and Goodson, K.E., "Closed-Loop Electroosmotic Microchannel Cooling System for VLSI Circuits", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 25, No. 3, Sep. 2002, pp. 347-355, 2002.
- (3) Zhang, L., Koo, J., Jiang, L., Asheghi, M., Goodson, K.E., Santiago, H.G., and Kenny, T.W., "Measurements and Modeling of Two-phase Flow in Microchannels with Nearly Constant Heat Flux Boundary Conditions", J. Microelectromechanical Systems, Vol. 11, No. 1, Feb. 2002, pp. 12-19, 2002.
- (4) Muraoka, I, Ramos, F.M., and Vlassov, V.V., "Experimental and Theoretical Investigation of a Capillary Pumped Loop with a Porous Element in The Condenser", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 25, No. 8, pp. 1085-1094, 1998.
- (5) Chen, P and Lin W., "The application of capillary pumped loop for cooling of electric components", Applied Thermal Engineering 21 (2001), pp. 1739-1754, 2001
- (6) Faghri A., "Heat Pipe Science and Technology", Taylor & Francis, 1995.
- (7) Yang, H. Q. and Przekwas, A. J., "Computational Modeling of Micro Devices with Free Surface Liquid Handling," Technical Proc. of the 1998 Int. Conf. on Modeling and Simulation of Microsystems (MSM 98), pp. 498 - 505.
- (8) Patankar, S., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., NewYork: McGraw Hill, 1980.
- (9) Hirt, C. and Nichols, B., "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," J. Comp. Physics, vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- (10) Rider, W. J., Kothe, D. B. Mosso, S. J., Cerutti, J. H. and Hochstein, J. I., "Accurate Solution Algorithms for Incompressible Multiphase Flows," AIAA-95-0699, 1995.