

## 확장 면적을 이용한 안정된 증발 마이크로채널 시스템의 설계

이 희 준<sup>\*†</sup> · Shi-chune Yao<sup>\*\*</sup>

\* 국민대학교 기계시스템공학부, \*\* 카네기멜론대학교 기계공학과

### Design of Stable Evaporative Micro-channel Systems Using Expanding Area

Hee Joon Lee<sup>\*†</sup> and Shi-chune Yao<sup>\*\*</sup>

\* School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon Univ.

(Received April 18, 2011 ; Revised June 7, 2011 ; Accepted June 8, 2011)

**Key Words** : Flow Instability(유동불안정성), Expanding Area(확장 면적), Evaporation(증발), Micro-channel(마이크로채널), Stable Design(안정적 설계)

**초록**: 마이크로채널 표면의 핵에서 생성된 기포는 물을 작동유체로 이용하는 경우 채널의 좁은 단면적에 의해 압착되어 유동불안정성을 유발한다. 직관 마이크로채널에서 압착된 기포는 관성 유동의 역방향인 채널 상류로 진행한다. 마이크로채널에서 역방향 유동을 없애기 위해 채널 하류의 단면적을 확장시키는 것이 효과적이다. 그 이유는 압착된 기포의 전후단 계면의 표면장력에 의한 압력차이가 계면의 반지름에 역비례해서 자연적으로 기포가 채널 하류로 이동하려는 힘이 발생하기 때문이다. 확장 증발 마이크로채널에서 정적 유동불안정성 모델이 제시되었으며, 실험으로 모델을 검증하였다. 또한, 안정된 확장 시스템을 설계하기 위해 국부 설계 개념을 도입하였다. 검증된 모델과 개념을 바탕으로 안정된 확장 증발 마이크로채널 설계를 성공적으로 수행하였다.

**Abstract**: A growing bubble can be squeezed for water, and it will then encounter flow instability, which reverses toward upstream in straight micro-channels. To reduce the flow instability, a micro-channel that expands at the downstream end has been found to be effective. In the expanding area, a growing bubble will tend to move downstream because the net surface tension force of a vapor-liquid interface is inversely proportional to the local radius of curvature. We propose a static flow instability model and validate it experimentally. Moreover, we apply the local-instability parameter concept to the real design of a stable evaporative micro-channel with an expanding area. Based on the local-instability model, we establish a static design for stable expanding evaporative micro-channels.

- 기호설명 -

$A$  : 면적 [m<sup>2</sup>]

$B$  : Boiling 수

$Bo$  : Bond 수

$F$  : 힘 [N]

$G$  : 질유속 [kg/m<sup>2</sup>/s]

$L$  : 길이 [m]

$\dot{Q}$  : 열량 [W]

$R$  : 유동불안정성 계수

$W$  : 폭 [m]

$We$  : Weber 수

$X$  : Martinelli 수

$d_h$  : 수력학적 지름 [m]

$g$  : 중력 가속도 [m/s<sup>2</sup>]

$h$  : 열전달 계수 [W/m<sup>2</sup>/K]

$i_{fg}$  : 잠열 [J/kg]

$q''$  : 열유속 [W/cm<sup>2</sup>]

$x$  : 건도

$\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  : 표면장력 [N/m]

첨자

*back* : 역방향

*ep* : 확장

$f$	: 액체
$forward$	: 순방향
$g$	: 증기
$SAT$	: 포화
$sp$	: 단상유체
$tp$	: 이상유체
$w$	: 표면

## 1. 서 론

마이크로채널 시스템은 단위 부피당 표면적이 크기 때문에 작고 가벼운 시스템에 효율 높은 열전달 및 화학반응을 일으킬 수 있다. 따라서, 높은 열부하가 존재하는 컴퓨터 CPU 냉각 및 고효율 연료전지, 정유산업 등에 적합한 시스템이다. 또한, 채널에서 상변화가 일어날 때 증발(evaporation)을 이용하면 현열(sensible heat)보다는 잠열(latent heat)로 인하여 작은 유량으로도 큰 대류열전달 효과를 얻을 수 있으며, 채널에서 작동유체의 포화 상태로 인하여 균일한 온도를 유지할 수 있는 시스템을 설계할 수 있다.

하지만, 마이크로채널에서 증발이 발생할 때 작동유체가 물인 경우 냉매보다 높은 표면장력에 의해 생성된 기포가 좁은 채널 벽면에 의해 압착된다. 압착된 기포에 열이 더 가해지면서 채널 입출구 양쪽방향으로 팽창하게 되며 관성에 의해 진행되는 유동을 거슬러 역방향으로 진행하게 된다. 따라서, 이는 마이크로채널에서의 유동불안정성의 원인이 된다.

최근 증발 마이크로채널에서 유동불안정성을 줄이기 위해 채널 입구에 오리피스를 설치하거나 채널을 확장시키는 방법들이 많이 제시되고 있다. 오리피스를 장착하면 작은 오리피스 채널에 생성된 높은 압력 강하로 압착된 기포가 역으로 진행되는 힘을 저지할 수 있지만, 큰 압력 강하를 극복하기 위하여 상대적으로 큰 용량의 펌프가 필요한 단점이 있다. 반면, 채널의 단면적을 유동방향으로 확장시키면 압착 기포의 양쪽 압력 차이로 인하여 기포가 자연적으로 하류로 이동하게 된다. 따라서, 확장 증발 마이크로채널은 시스템에서 유동불안정성을 줄이면서 열전달 성능을 증대시키는데 효과적인 설계 방법이다.

Mukherjee와 Kandlikar<sup>(1)</sup>는 마이크로채널에서 생성된 기포의 단방향 확장 촉진 및 역류를 막기 위해 단면적이 확장되는 채널이 효과적임을 직관적으로 제안하였다. Lee와 Pan<sup>(2)</sup>은 단일 확장 증발 마이크로

채널에서 유동불안정성이 확연히 개선되는 것을 실험으로 증명하였으며, 동등한 수력학적 지름을 가진 채널일 때 확장 채널이 더 높은 열전달 성능을 가짐을 보였다. Lee 등<sup>(3)</sup>은 다양한 마이크로채널 형상에서 사용 가능한 정적 유동불안정성 모델을 제시하였다. 마이크로채널 입구에 오리피스를 장착한 경우와 마이크로채널을 확장시킨 경우 유동불안정성을 효율적으로 줄이는 것을 정량적으로 계산하였으며, 이를 실험으로 검증하였다. 또한, 유동불안정성을 줄일 수 있는 다양한 증발 마이크로채널 형상 설계들을 제안하였다. Lu와 Pan<sup>(4)</sup>은 증발 마이크로채널을 확장시켰고 채널 표면에 핵(nucleus)을 인공적으로 가공하였다. 핵으로 인한 기포의 생성이 증대되어 비등열전달의 성능이 증가하는 것을 실험적으로 규명하였다. 이상의 연구들에서 알 수 있듯이 확장 증발 마이크로채널을 에너지 변환 열유체 시스템에 이용하면 유동불안정성을 극복할 수 있고, 더 높은 에너지 변환 효율을 가질 수 있는 시스템을 설계할 수 있다.

본 논문에서는 확장 증발 마이크로채널의 정적 유동불안정성 모델을 제시하였고, 실험을 통하여 제시된 모델을 검증하였다. 검증된 모델을 이용하여 안정된 확장 증발 마이크로채널 형상을 설계할 수 있는 방법론을 제시하였고, 직접 시스템 설계를 수행하였다.

## 2. 정적 유동불안정성 모델

직관 증발 마이크로채널에서 정적 유동불안정성 모델이 Kandlikar<sup>(5)</sup>에 의해 처음 제시되었다. Kandlikar 모델은 압축 기포의 기액계면에서 유동의 관성력, 계면의 표면장력에 의한 압력 차이 그리고 기포의 증발 모멘텀의 평형을 이용하였다. 하지만, Kandlikar 모델은 압축 기포의 상류 계면만 고려하였고, 증발 모멘텀을 계산할 때 마이크로채널의 표면적이 아닌 채널 단면적을 이용하였기 때문에 설계에 적용되기에는 부적합하다. Lee 등<sup>(3)</sup>은 Fig. 1(a)와 같이 압축 기포의 양쪽 계면과 증발 모멘텀에서 마이크로채널의 표면적을 고려하여 직관 마이크로채널에서 정적 유동불안정성 모델을 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$R = \sqrt{\frac{F_{back}}{F_{forward}}} = \frac{\dot{Q}}{2A i_{fg} G} \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_g}} \quad (1)$$

식 (1)은 마이크로채널에서 생성된 기포가 채널의 표면에 의해 압착되어야 하므로 기포의 대략적인 크기가 마이크로채널의 크기보다 클 때만 적용

할 수 있다. 식 (2)에서와 같이 Bond 수는 채널에서 생성된 기포의 대략적인 크기와 채널의 크기의 비율을 의미하므로 Bond 수가 1 보다 작을 때 기포가 채널에 의해 압착되는 것을 의미한다.

$$Bo = \frac{g(\rho_f - \rho_g)d_h^2}{\sigma} \quad (2)$$

유동불안정성 계수,  $R$  이 1 보다 크면 마이크로 채널에서 압착된 기포의 증발 모멘텀이 유동의 관성력보다 크기 때문에 유동은 정적으로 불안정하다. 따라서, 안정된 증발 마이크로채널 시스템을 설계하기 위해서는  $R$  이 1 보다 작아야 한다.

확장 증발 마이크로채널에서는 Fig. 1(b)와 같이 하류 계면의 반지름이 상류 계면의 반지름보다 커지게 된다. 채널 단면적이 사각형인 경우 계면에서의 표면장력은 식 (3)의 Young-Laplace 식에 의해 계면의 폭의 크기에 반비례 한다.

$$F_{ep} = \Delta p A_1 = \sigma \left( \frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2} \right) A_1 \quad (3)$$

따라서, 계면에서 기포 표면장력의 압력 차이로 기포가 채널 하류로 자연스럽게 이동하려는 힘이 발생한다.

확장 증발 마이크로채널에서 유동불안정성 계수,  $R$  을 구하기 위해 식 (1)에 식 (3)를 대입하면 식 (4)와 같이 확장 채널에서 정적 유동불안정성 계수가 전개될 수 있다.

$$R = \sqrt{\frac{F_{back}}{F_{forward} + F_{ep}}} = \sqrt{\frac{\rho_g \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_g i_{fg}} \frac{1}{A_1 + A_2} \right)^2 A_1}{\rho_f \left( \frac{G}{\rho_f} \right)^2 A_1 + F_{ep}}} \quad (4)$$

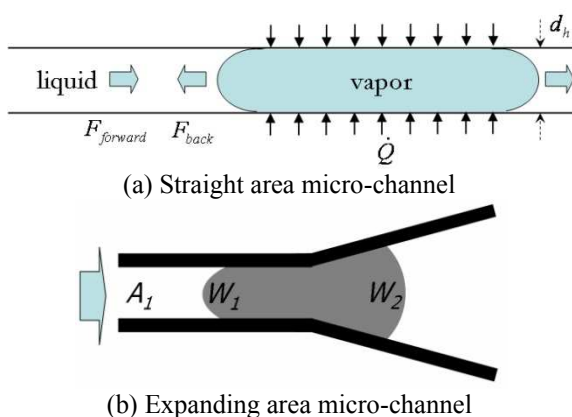


Fig. 1 Schematic of a squeezed bubble in a micro-channel

확장 증발 마이크로채널에서는 유동이 흐르는 채널 길이에 대한 영향이 반드시 고려되어야 하지만, 식 (3)은 마이크로채널의 길이에 대한 변수가 존재하지 않는다.

Fig. 2 는 마이크로채널에서 확장이 전체 채널 길이 24 mm 의 25%, 50%, 75%일 경우를 보여준다. 정적 유동불안정성 계수,  $R$  을 계산하기 위하여 유동조건은 41.8 kg/m<sup>2</sup>/s 질량유속, 20 W/cm<sup>2</sup> 열유속, 110 kPa 입구압력, 90°C 입구온도로 설정하였다. 에너지 평형에 의해 채널 입구 3.4 mm 지점에서 처음 기포가 생성되기 시작하며, 생성된 기포는 채널 하류로 압착되기 시작한다. 채널 길이의 25%에서 확장이 일어난 경우는 기포가 압착되는 시점에서 유동불안정성이 발생하지 않는다. 하지만, 채널 길이의 50%, 75%에서 확장된 경우는 기포가 압착되면서 채널 입구 9.7 mm 지점에서 유동불안정성이 발생하게 된다. 만약 기포가 압착되어 전개되는 과정을 생각하지 않는다면, 채널 내부에서 확장 위치에 상관없이 유동불안정성 계수,  $R$  은 0.21 로 식 (4)에 의해서는 유동불안정성이 존재하지 않는 상태가 된다.

따라서, 안정적인 확장 증발 마이크로채널을 설계하기 위해서는 압착된 기포의 진행에 따른 국부적인 유동불안정성 계수,  $R$  을 고려해야 한다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장치

정적 유동불안정성 계수,  $R$  을 검증하기 위하여 마이크로채널에서 물을 이용한 비등 실험을 수행하였다. Fig. 3 은 실험 장치의 개념도이다. 최대

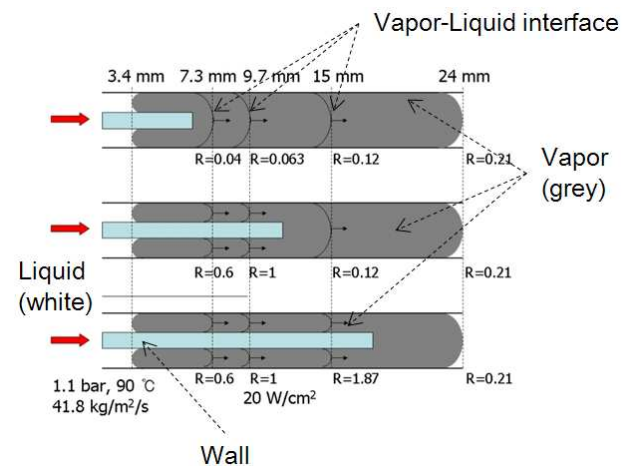


Fig. 2 Channel length effect of expanding micro-channels in the instability parameter

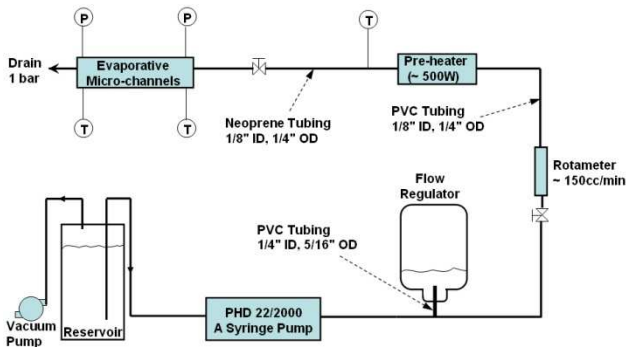


Fig. 3 System diagram of experimental setup

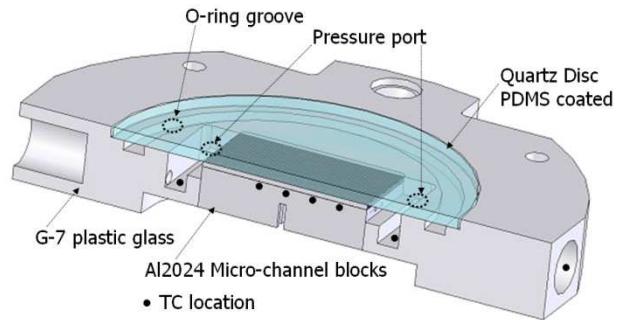


Fig. 5 Cut view of test section



(a) Straight area (b) Expanding area

Fig. 4 Tested micro-channel blocks

140 cm<sup>3</sup>/min 의 유량을 공급할 수 있는 양방향 주사기 펌프(Harvard Apparatus PHD 22/2000)로 마이크로채널에 물을 주입하였다. 실험에는 정제된 물을 사용하였다. 정제된 물에 녹아있는 기체를 제거하기 위해 물을 끓였고, 실험 직전에 진공 펌프를 이용하여 물에 녹아있는 기체를 완전히 제거하였다. 주사기 펌프의 구동방향이 바뀔 때 불연속성에 의한 유량을 보존하고 실험 장치에 일정한 압력을 유지하기 위해 펌프 후단에 버퍼탱크(buffer tank)를 부착하였다. 마이크로채널에 주입되는 물의 입구온도를 변화시키기 위해 최대 500 W의 열부하를 공급할 수 있는 예열기를 마이크로채널 전단에 설치하였다.

Fig. 4 는 실험에 사용된 직관 및 확장 마이크로채널을 보여준다. Fig. 4(a)의 직관 마이크로채널은 방전가공(Electro Discharge Machining)을 이용하여 제작되었으며, 길이 24 m, 폭 24 mm 의 알루미늄 2024 블록에 너비 235 μm, 높이 710 μm 의 직사각형 단면적을 가지는 48 개의 마이크로채널을 가진다. 마이크로채널들을 구분하는 벽의 두께는 228 μm 이다. Fig. 4(b)의 확장 마이크로채널은 직관 마이크로채널에서 길이의 50%, 67%, 83%에서 채널들을 2:1 비율로 병합시켜 제작되었다. 마이크로채널 블록 아래에 카트리지 히터를 이용하여 열에너

지를 공급하였다. 건도 및 온도를 정확히 측정하기 위해 마이크로채널 케이스(case)는 가공 가능한 단열재인 G-7 fiber glass 로 제작되었고, 카트리지히터 케이스는 Marinat-P ceramic fiber board 를 이용하여 제작하였다. 조립된 실험장치는 섬유유리울 단열재를 이용하여 더 단열시켰다. 그 결과 마이크로채널 블록에서의 열손실은 5% 이내로 유지되었다.

마이크로채널 입출구 및 채널 표면 온도를 측정하기 위하여 OMEGA 사의 508 μm 직경인 K 타입 열전대를 사용하였다. 마이크로채널 표면 온도를 측정하기 위해 Fig. 5 와 같이 열전대를 채널 입구에서 16 mm 지점에 마이크로채널 바닥면(블록 윗면에서 710 μm 깊이 지점에서 890 μm 깊이로 장착하였다. 열전대는 마이크로채널 블록 출구면에 8 mm 깊이, 600 μm 직경을 가지는 구멍을 뚫어 설치가 되었다. 계측기는 National Instrument 사의 SCXI-1102 모듈이 장착된 SCXI-1000 을 이용하였다. 계측기와 열전대의 불확실성은 root-sum-square 방법에 의해 ±2℃로 계산되었다. 실험에서 채널 표면 온도의 요동이 ±2℃이내이면 마이크로채널을 흐르는 유동은 안정하다고 결정하였다.

3.2 검증

직관 및 확장 증발 마이크로채널의 유동불안정성을 비교하기 위해 채널에 90℃로 예열된 41.8 kg/m<sup>2</sup>/s 의 질량유속을 가지는 물을 주입하였다.

마이크로채널 블록에 공급된 열유속은 12 W/cm<sup>2</sup> 이다. Fig. 6 은 직관 및 확장 마이크로채널에서 채널 표면 온도 변화를 보여준다. 직관 채널의 경우 Fig. 6(a)에 계측된 온도의 변화가 ±2℃를 초과한다. 반면, 확장 채널의 경우 Fig. 6(b)와 같이 요동치는 온도의 크기가 ±0.5℃ 이내로 직관 마이크로채널에 비해 안정된 경향을 보여준다. 따라서, 직관 마이크로채널에서 유동불안정성이 확장 마이크로채널을 이용하면 안정화되는 것을 검증하였다.

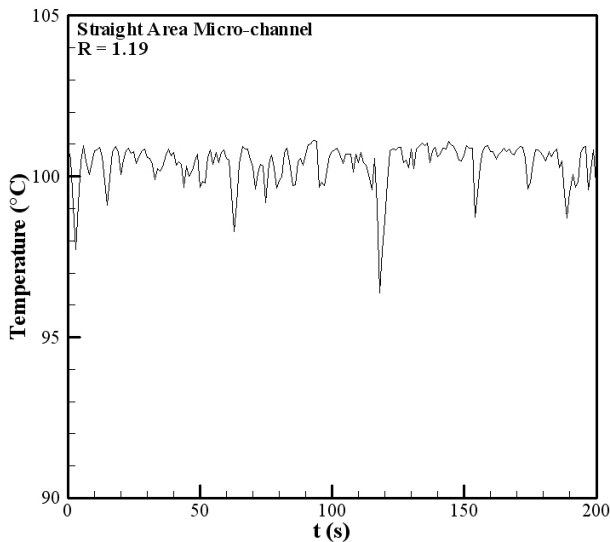
주어진 유동 조건에서 정적 유동불안정성 계수, R

을 식 (1)과 식 (4)를 이용하여 계산하였다. 직관 마이크로채널의 경우  $R=1.19$  이며, 확장 마이크로채널의 경우  $R=0.47$ 이다. 정적 유동불안정성 모델이 실험 데이터를 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 따라서, 정적 유동불안정성 계수,  $R$ 이 본 실험을 통해 검증되었다.

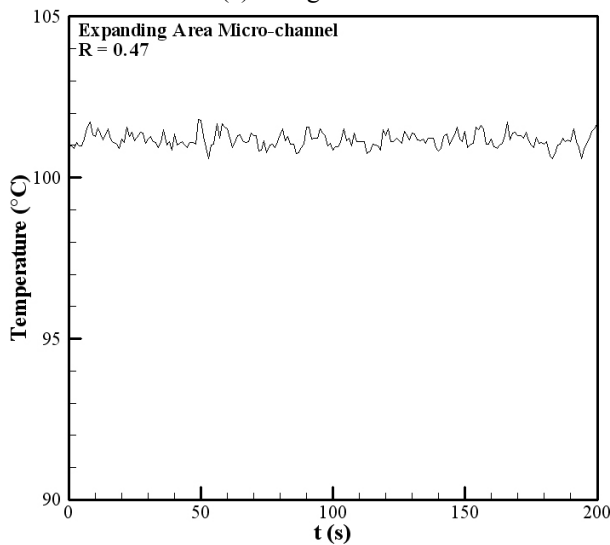
#### 4. 확장 채널 형상 설계

확장 증발 마이크로채널의 정적 유동불안정성 계수를 정량화할 수 있는 식 (4)와 국부적인 유동 불안정성 이론을 바탕으로 안정된 확장 증발 마이크로채널 형상을 본 절에서 설계하였다.

증발 마이크로채널은 Fig. 4 와 같이 알루미늄블록



(a) Straight area



(b) Expanding area

Fig. 6 Comparison of surface temperature at 16 mm for straight ( $R=1.19$ ) and expanding ( $R=0.47$ ) micro-channels( $41.8 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ ,  $12 \text{ W/cm}^2$ ,  $10^\circ\text{C}$  subcooling)

열싱크(heat sink)에 평행하게 가공한다. 마이크로채널의 단면적은 직사각형 모양이다. 직사각형 마이크로채널의 높이는 본 설계에서  $700 \mu\text{m}$ 로 고정하며, 채널 너비의 변화를 통해 확장 채널의 형상을 결정한다. 마이크로채널들을 격리하는 벽의 두께는  $200 \mu\text{m}$ 로 고정하였다. 마이크로채널 가공 시 방전가공에 사용되는 와이어(wire) 크기 제한으로 채널 입구를 최소로 만들 수 있는 폭은  $170 \mu\text{m}$ 이다. 냉각에 사용된 작동 유체는 물이며 펌프에서 공급되는 질량유량은  $0.27 \text{ g/s}$ , 마이크로채널 입구 온도는  $91^\circ\text{C}$ 로 고정하였다. 열싱크 블록 하단에 공급되는 열유속은  $14.5 \text{ W/cm}^2$ 이다. 마이크로채널의 폭이 변화함에 따라 마이크로채널 표면의 면적이 변하고, 마이크로채널 표면적이 열싱크 블록 하단의 면적보다 크기 때문에 마이크로채널 표

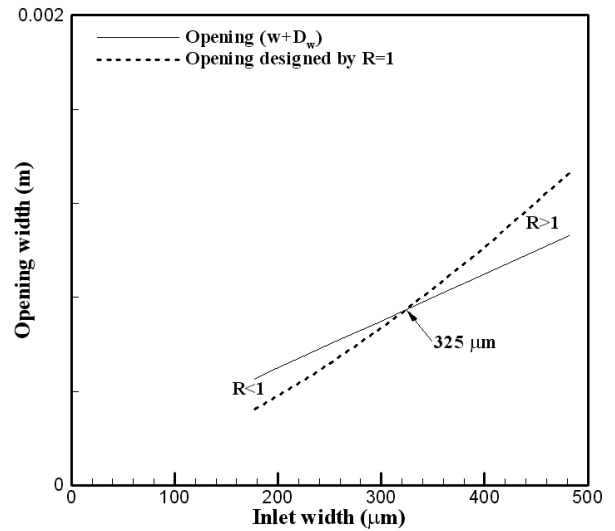


Fig. 7 Geometric constraint of expanding area micro-channel

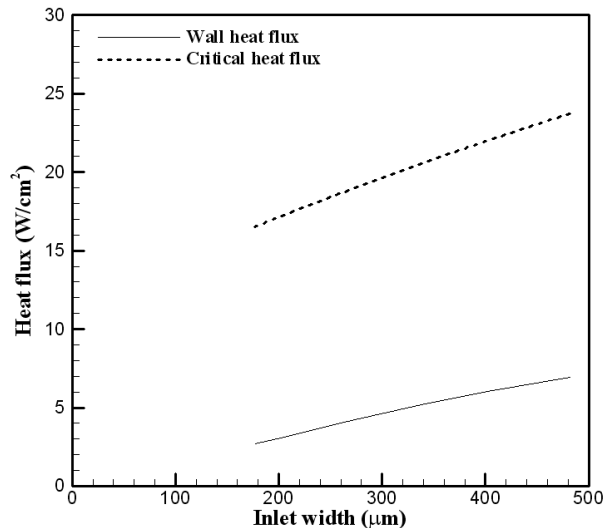


Fig. 8 Constraint of the critical heat flux (CHF)

면에서의 유효 열유속은  $14.5 \text{ W/cm}^2$  보다 더 작아지게 된다. Fig. 7에서 채널 입구의 폭에 따른 실선은 채널 출구에서 확장 폭 그리고 점선은  $R=1$  인 확장 폭의 결과를 보여준다. 형상 제한조건으로 인하여 채널 입구의 최대폭은  $325 \mu\text{m}$  까지 확장 채널을 가공할 수 있다.

Fig. 8은 직관 증발 마이크로채널 입구 폭에 따른 마이크로채널 표면에서 유효 열유속과 임계 열유속(CHF)을 비교한 결과이다. 유효 열유속이 임계 열유속보다 크게 되면 마이크로채널 내부에서 드라이아웃(dryout)이 발생한다. 따라서, 비등 열전달보다 매우 낮은 과열 증기의 열전달로 열싱크의 온도는 매우 높아지게 된다. 드라이아웃 현상은 증발 마이크로채널 시스템에 존재해서는 안되며, 이를 위해 유효 열유속이 임계 열유속보다 반드시 작아야 한다. 마이크로채널에서 물의 임계 열유속을 계산하기 위하여, Qu와 Mudawar<sup>(6)</sup>의 임계 열유속 상관식을 식 (5)와 같이 적용하였다.

$$\frac{q''}{Gi_{fg}} = 33.43 \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{1.11} We^{-0.21} \left( \frac{L}{d_h} \right)^{-0.36} \quad (5)$$

Fig. 8에서 직관 마이크로채널 입구 폭에 따른 채널 표면의 유효 열유속이 임계 열유속보다 항상 작음을 알 수 있다. 따라서, 본 설계에서는 드라이아웃 현상이 발생하지 않는다. 확장 마이크로채널은 직관 마이크로채널보다 채널 표면적이 커 유효 열유속이 더 작아진다. 직관 마이크로채널에서 드라이아웃이 발생하지 않으면, 확장 마이크로채널에서도 드라이아웃이 발생하지 않는다.

Fig. 9는 유체의 작동 및 형상 제한조건에 따른 국부적인 유동불안정성 이론으로 확장 증발 마이크로채널 형상을 설계한 결과를 보여준다. 채널 입구에서  $4 \text{ mm}$  떨어진 지점에서 에너지 균형에 의해 물이 포화액체로 존재하게 된다. 핵비등 시발점(onset of nucleate boiling)은 포화액체로 존재하는 지점인  $4 \text{ mm}$  라고 가정하였을 때, 기포가 생성되기 시작한다. 생성된 기포가 압착되어 마이크로채널 하류로 진행하게 된다. Fig. 10은 식 (4)를 국부적인 유동불안정성 이론으로 계산한 정적 유동불안정성 계수,  $R$ 의 결과를 보여준다. 채널 입구  $4 \text{ mm}$  지점에서  $R$ 이 처음 존재하기 시작하며, 압착된 기포는 채널 입구  $13.8 \text{ mm}$  지점에서 유동의 관성력과 압착된 기포의 증발 모멘텀이 평형을 이루는 상태가 된다. 만약 채널을 확장하지 않으면  $R$ 이 1보다 커지게 되어 불안정하며, 기포는 요동치게 된다. 하지만, 식 (4)에 의한 구속조건에 의해  $R=1$ 을 항상 만족

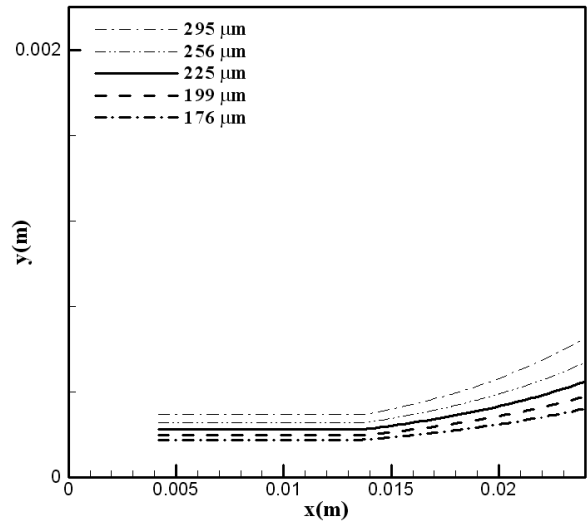


Fig. 9 Expanding width along the flow direction

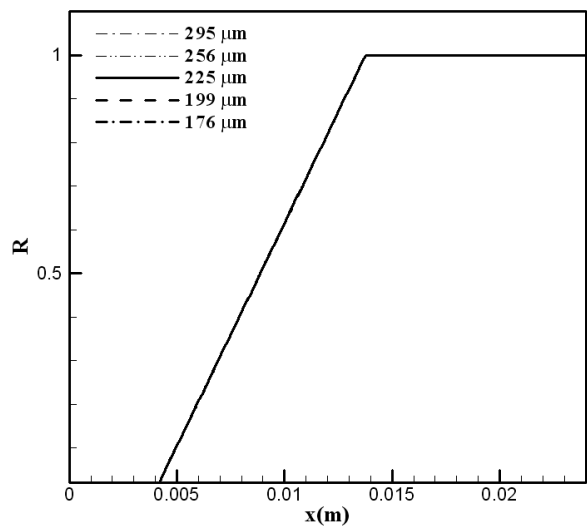


Fig. 10 Instability parameter along the flow direction

하는 확장 채널 폭을 계산하면, Fig. 9와 같이 안정된 확장 증발 마이크로채널의 형상을 설계할 수 있다.

설계 조건에서 마이크로채널들의 격리하는 벽의 두께는  $200 \mu\text{m}$ 로 주어졌으므로, 평행으로 채널을 확장시킬 수 있는 한계는 채널 양쪽 면으로 최대  $100 \mu\text{m}$ 까지이다. Fig. 9에서 채널 입구 폭이  $176 \mu\text{m}$ 과  $199 \mu\text{m}$ 일 때 최대 출구 확장 폭은 각각  $321 \mu\text{m}$ 과  $377 \mu\text{m}$ 로 격리 벽의 두께를  $\pm 100 \mu\text{m}$  범위 내에서 이용할 수 있다. 하지만, 채널 입구 폭이  $225 \mu\text{m}$ 에서  $295 \mu\text{m}$ 인 경우 채널 출구의 폭이  $447 \mu\text{m}$ 에서  $653 \mu\text{m}$ 까지 확장되므로 마이크로채널을 평행하게 배치하기 위해서는 채널 입구 방향을 하나씩 반대로 배치하여야 한다.

Fig. 11은 채널 길이에 따른 마이크로채널의 비

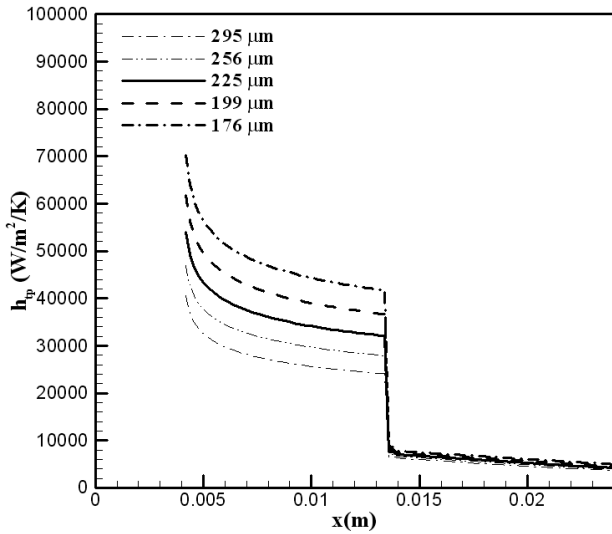


Fig. 11 Heat transfer coefficient along the flow direction

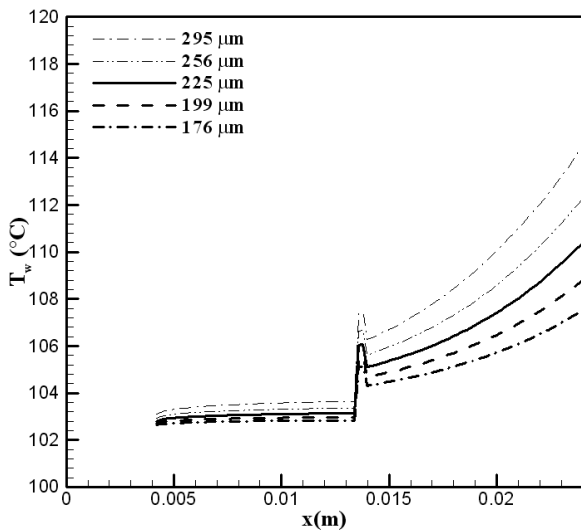


Fig. 12 Surface temperature along the flow direction

등열전달 계수를 보여준다. 마이크로채널 비등 열전달 계수는 물과 R134a 를 기반으로 만들어진 Lee 와 Mudawar<sup>(7)</sup>의 경험 상관식, 식 (7)을 Lee 등<sup>(8)</sup>이 모든 유체에서 마이크로채널 영향을 고려하여 제시한 범용 열전달 계수 상관식, 식 (6)을 이용하여 계산하였다.

$$h_{sp} = \frac{h}{0.958(-Bo/1.537) + 0.126} \quad (6)$$

where

$$\begin{cases} h = 3.856X^{0.267}h_{sp,f} & 0 \leq x < 0.05 \\ h = 436.48B^{0.522}We_{fo}^{0.351}X^{0.665}h_{sp,f} & 0.05 \leq x < 0.55 \\ h = \max\left\{\left(108.6X^{1.665}h_{sp,g}\right), h_{sp,g}\right\} & 0.55 \leq x < 1 \end{cases} \quad (7)$$

Fig. 11 을 보면 대략 13.5 mm 지점에서 열전달 계수의 불연속이 발생하는데, 그 이유는 Lee 와 Mudawar<sup>(7)</sup>의 열전달 계수 상관식이 식 (7)과 같이 건도 0.05 에서 불연속성을 나타내기 때문이다. 물리적으로는 연속이지만, 경험 상관식에 의해 발생하는 불연속성이다. 채널 입구의 폭이 작아질수록 단위 부피당 면적이 커져 높은 비등 열전달 계수를 가진다. 또한, 채널이 확장하게 되면 질량유속 (mass flux)이 줄어들어 열전달 계수가 점점 감소하게 된다.

Fig. 12 는 채널 길이에 따른 마이크로채널 표면 온도 분포를 보여준다. 채널 표면 온도,  $T_w$  은 식 (8)에 의해 구할 수 있다.

$$q'' = h_p A (T_w - T_{SAT}) \quad (8)$$

채널 입구가 설계의 최소 폭인 176 μm 인 경우 열싱크의 최대 온도 차이가 4°C인 반면, 설계의 최대 폭인 295 μm 인 경우 최대 온도 차이가 12°C가 된다. 따라서, 채널 입구의 폭이 작아질수록 열전달 면적이 커 채널 표면 온도가 낮아지며, 열싱크의 온도 분포도 더 균일해지는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 9 에서 보듯이 입출구 확장비가 작을 경우 열싱크에 더 많은 확장 증발 마이크로채널을 가공할 수 있어 확장부 증발 마이크로채널 시스템의 온도를 낮추는데 효과적이다.

## 5. 결론

안정된 확장 증발 마이크로채널 설계를 위해 국부적인 정적 유동불안정성 이론을 제시하였다. 정적 유동불안정성 모델을 실험으로 검증하였으며, 검증된 모델을 바탕으로 안정된 확장 채널 형상 설계를 성공적으로 수행하였다. 증발 마이크로채널 형상 설계시 임계 열유속 구속조건을 반드시 만족하여야 채널에서 드라이아웃이 발생하지 않는다. 또한, 채널 입구 폭의 크기가 작아질수록 더 많은 확장 채널을 가공할 수 있어, 마이크로채널의 열전달 면적이 높아지게 된다. 그 결과 채널 표면 온도가 더 낮고 균일한 온도 분포를 가지는 안정된 확장 증발 마이크로채널을 설계할 수 있다.

## 후 기

이 연구는 2011 년도 국민대학교 교내연구비를 지원 받아 수행된 연구임. 이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의

지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0012700). 이 연구는 미국 Pennsylvania 주정부의 Pennsylvania Infrastructure Technology Alliance (PITA) 연구지원금을 지원 받아 수행된 연구임.

### 참고문헌

- (1) Mukherjee, A. and Kandlikar, S. G., 2005, "Numerical Study of the Effect of Inlet Constriction on Bubble Growth During Flow Boiling in Microchannels," *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Microchannels and Minichannels*, Toronto, CANADA, ICMM2005-75143.
- (2) Lee, P. C. and Pan, C., 2008, "Boiling Heat Transfer and Two-phase Flow of Water in a Single Shallow Microchannel With a Uniform or Diverging Cross Section," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 18, 025005.
- (3) Lee, H. J., Liu, D. Y. and Yao, S. C., 2010, "Flow Instability in Evaporative Micro-channels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, No. 9-10, pp. 1740~1749.
- (4) Lu, C. T. and Pan, C., 2010, "Convective Boiling in a Parallel Microchannel Heat Sink With a Diverging Cross Section and Artificial Nucleation Sites," *Exp. Ther. Fluid Sci.*, Article in Press.
- (5) Kandlikar, S. G., 2005, "Heat Transfer Mechanisms During Flow Boiling in Microchannels," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 126, No. 1, pp. 8~16.
- (6) Qu, W. and Mudawar, I., 2004, "Measurement and Correlation of Critical Heat Flux in Two-phase Micro-channel Heat Sinks," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, No. 10-11, pp. 2045~2059.
- (7) Lee, J. and Mudawar, I., 2005, "Two-phase Flow in High-heat-flux Micro-channel Heat Sink for Refrigeration Cooling Applications: Part II—Heat Transfer Characteristics," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, No. 5, pp. 941~955.
- (8) Lee, H. J., Liu, D. Y., Alyousef, Y. and Yao, S. C., 2010, "Generalized Two-Phase Pressure Drop and Heat Transfer Correlations in Evaporative Micro/Minichannels," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 132, No. 4, pp. 041004-1~9.