

사다리꼴 미세유로의 대류비등 2상유동 : 1부-압력강하 특성

김 병 주[†], 김 건 일^{*}

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과, [†]LG전자

Convective Boiling Two-phase Flow in Trapezoidal Microchannels : Part 1-Pressure Drop Characteristics

Byong Joo Kim[†], Geonil Kim^{*}

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul, 121-791, Korea

^{*}LG Electronics, Changwon, Kyongsangnamdo, 642-711, Korea

(Received August 12, 2010; revision received December 30, 2010)

ABSTRACT: Characteristics of two-phase pressure drop in microchannels were investigated experimentally. The microchannels consisted of 9 parallel trapezoidal channels with each channel having 205 μm of bottom width, 800 μm of depth, 3.6° of sidewall angle, and 7 cm of length. Pressure drops in convective boiling of Refrigerant 113 were measured in the range of inlet pressure 105~195 kPa, mass velocity 150~920 $\text{kg/m}^2\text{s}$, and heat flux 10~100 kW/m^2 . The total pressure drop generally increased with increasing mass velocity and/or heat flux. Two-phase frictional pressure drop across the microchannels increased rapidly with exit quality and showed bigger gradient at higher mass velocity. A critical review of correlations in the literature suggested that existing correlations were not able to match the experimental results obtained for two-phase pressure drop associated with convective boiling in microchannels. A new correlation suitable for predicting two-phase friction multiplier was developed based on the separated flow model and showed good agreement with the experimental data.

Key words: Two-phase flow pressure drop(2상유동 압력강하), Microchannels(미세유로), Two-phase friction multiplier(2상 마찰배수), Martinelli parameter(마티넬리 변수), Chisholm parameter(치솔름 변수)

기 호 설 명

<p>A : 면적 [m^2] C : 치솔름 변수 d_h : 수력직경 [m] f : 마찰계수 G : 질량유속 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]</p>	<p>i : 엔탈피 [kJ/kg] i_{fg} : 증발열 [kJ/kg] K : 손실계수 L : 길이 P : 압력 [kPa] q' : 유로 단위 길이당의 열전달율 [W/m] Re : 레이놀즈 수 We : 웨버 수 X : 마티넬리 변수 x : 건도 z : 유동방향 좌표</p>
---	---

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-320-1611; fax: +82-2-322-7003

E-mail address: bjkim@wow.hongik.ac.kr

그리스 문자

α	: 기공률
β	: 유동 단면적 비
μ	: 점도 [Ns/m^2]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
σ	: 표면 장력 [N/m]
v	: 비체적 [m^3/kg]
ϕ_f^2	: 2상 마찰배수

하첨자

A	: 가속항
e	: 출구
exp	: 실험
F	: 마찰항
f	: 액상
fo	: 전체 유량을 액상으로 가정한 경우
G	: 중력항
g	: 기상
i	: 입구
e	: 출구
pre	: 예측
sat	: 포화
SC	: 단면 급축소
SE	: 단면 급확대
TP	: 2상
vv	: 층류 액상-층류 기상
vt	: 층류 액상-난류 기상

1. 서 론

미세유로에서의 대류비등 열전달은 매우 효율적인 열확산 방법 중의 하나이다. 미세유로의 작은 유동단면적과 대류비등의 조합을 통하여 질량유량을 최소화하면서 높은 열전달계수를 실현할 수 있으며 상대적으로 균일한 방열기(heat sink)의 온도를 보장할 수 있다. 그러나 높은 압력강하와 동력소비가 필연적으로 발생하므로 미세유로의 압력강하-유량-열유속 사이의 관계 정립이 미세유로 열심의 설계를 위하여 아주 중요하다.

미세유로에 대류비등을 적용하기 위하여 미세유로에서의 2상유동 특성에 대한 이해가 필수적이다. 주어진 기하학적 형상과 운전조건에서 압력강하특성을 정확히 예측할 수 있어야 미세유로 열심의 성능평가가 가능하다. 미세유로에서 기포의 성장은 대

형/소형유로(macro/mini channel)의 유동과는 달리 유로의 크기로 매우 제한되므로 2상유동양식은 열유속이나 질량유속의 크기에 따라 다양한 형태로 나타날 것이다.

대형유로의 2상유동 압력강하에 대한 모델과 상관식의 대부분은 2상 마찰배수에 대하여 Lockhart and Martinelli형 상관식⁽¹⁾을 수정하여 그 정확도를 향상하는 방향으로 개선되어 왔다. 그러나 최근의 연구결과는 대형유로에 대하여 개발된 2상 마찰배수 상관식의 치슬름 변수⁽²⁾를 소형유로나 미세유로에 적용하는 데에 한계가 있음을 발견하고 작은 유로의 특성을 반영하기 위한 새로운 상관 기법을 제안하고 있다.

Mishima and Hibiki⁽³⁾는 치슬름 변수를 사각유로 수력직경의 직접적인 함수로 제안하였으나 이후 Zhang et al.⁽⁴⁾은 무차원 라프라스 상수의 함수로 수정하였다. Lee and Lee⁽⁵⁾는 간극이 0.4~4.0 mm인 사각유로에 대한 실험적 연구를 통하여 치슬름 변수를 액상-기상의 층류-난류의 4유동영역에 대하여 수력직경, 표면장력, 액상의 물리적 상태량 그리고 액상 슬러그 속도의 함수로 제안하였다. Lee and Mudawar⁽⁶⁾는 53개의 미세 다유로에 대한 유동 비등 실험을 수행하였으며 층류 액상-층류 기상과 층류 액상-난류 기상의 2영역에 대하여 치슬름 변수를 레이놀즈 수와 웨버 수의 함수로 제시하였다. Lee and Garimella⁽⁷⁾는 10~60개의 미세 다유로에 대한 포화 대류비등 실험을 통하여 층류 액상-층류 기상 영역에 한하여 치슬름 변수를 질량유속과 수력직경 수정항의 함수로 제시하였다.

단상 층류유동의 경우 미세유로의 마찰 특성은 대형유로에 대한 상관식으로 정확히 예측 가능한 것으로 받아들여지고 있다.⁽⁸⁾ 그러나 2상유동의 경우 미세유로 내 유동특성에 대한 이론적 기초는 아직 정립되지 못하고 있는 실정이므로 수력직경의 영향에 대한 실험결과들 간의 차이를 명확히 규명하고 종래 이론의 적용 가능성을 밝히기 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 미세유로에서 비등유동 2상 압력강하 특성을 실험적으로 연구하였다. 본 연구의 결과는 미세유로 열심의 설계와 성능평가를 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다

2. 실험 장치 및 방법

미세유로에서 대류비등 2상유동 압력강하 특성을

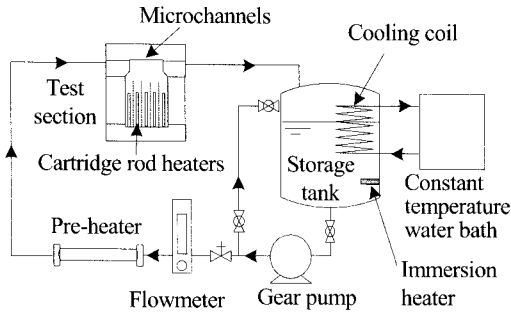
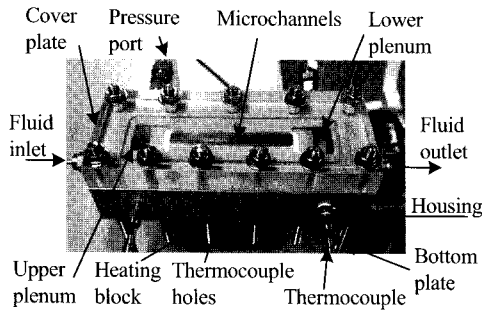
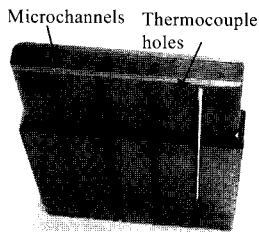


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.



(a) Test section



(b) Heating block

Fig. 2 Photographs of test section and heating block.

해석하기 위한 실험장치의 개략도가 Fig. 1에 도시되어 있다. 실험 장치는 크게 시험부, 유체 저장조, 유체 공급부와 자료처리 장치로 구성된다. 작동유체로 열·물리적 상태량이 우수하고, 대기압에서 포화온도가 상대적으로 낮으며, 전기적 절연성이 우수하여 전자기기의 냉각에 용이하게 적용할 수 있는 R113을 사용하였다. 작동유체는 유체 저장조로부터 필터, 마이크로 환상기어 펌프(0.012~72 ml/min), 부자식 유량계, 예열기(40 W)를 지나 시험부인 미세유로에 공급된다. 시험부에 공급하는 유체의 온도는

유체 저장조에 설치된 냉각 코일과 가열기(1 kW)로 일차적으로 조정하며 시험부 상류에 설치된 예열기로 정밀하게 조절한다. 수냉식 냉각 코일에 공급되는 냉각수는 항온냉각기(150 W)로부터 공급된다. 예열기로는 실리콘 밴드 히터가 장착된 길이 70 cm, 직경 6 mm의 STS 304관을 사용하였다.

시험부는 Fig. 2(a)와 같이 바닥판, 가열 블록, 가열 블록 하우징, 그리고 덮개판으로 구성하였다. 바닥판은 시험부 전체를 지지하고 있으며 가열 블록의 하부와 결합된다. Fig. 2(b)의 가열 블록의 상부 표면에는 미세유로가 가공되어 있으며 몸체에는 미세유로에 열을 공급하기 위하여 5개의 봉형 가열기를 삽입하였다. 가열 블록은 구리로 제작하였으며 9개의 미세유로를 상부표면에 가공하였다. 가공의 용이성과 경제성이 우수한 습식 식각 공정을 사용하여 실리콘 계열의 전자 칩 방열기나 미세 연료 전지의 유로로 일반적으로 가공되는 사다리꼴 미세유로를 본 연구에서는 채택하였다. 미세유로의 바닥 폭은 205 μm , 윗 폭은 305 μm , 깊이는 800 μm , 측벽 각은 3.6°, 그리고 길이는 7 cm이다.

가열 블록은 하우징과 끼워 맞춤 형태로 체결된다. 작동유체는 하우징에 가공된 상류 집수조(plenum)로 유입한 후 가열 블록의 미세유로에 공급되며 하류 집수조에 모인 후 외부의 유체 저장조로 배출되도록 하였다. 가열 블록 하우징은 강도와 내열성을 고려하여 엔지니어링 플라스틱으로 제작하였다. 덮개판은 가열 블록 상부 표면과 밀착하여 미세유로를 완성하며 유체유동을 확인할 수 있도록 투명 아크릴 판으로 제작하였다.

미세유로가 가공된 가열 블록에 유로의 길이 방향으로 5곳에 대하여 상부 표면으로부터 7.5 mm와 17.5 mm인 지점에 총 10개의 K형 열전대를 설치하였다. 또한 미세유로에 유입하고 배출되는 유체의 온도를 측정하기 위하여 집수조 2곳에도 열전대를 설치하였다. 하류 집수조에 절대압 변환기(0~10 bar)를 설치하여 압력을 측정하고 상류 집수조와 하류 집수조 사이에 차압 변환기(0~1 bar)를 설치하여 압력강하를 측정하였다. 실험 중 측정되는 온도와 압력 자료들은 자료처리 장치로 표시되며 컴퓨터에 연결하여 저장하였다. 미세유로에서 유체의 입구 온도와 출구 온도, 출구에서 유체의 절대 압력과 상·하류 집수조 간의 압력차, 가열 블록의 온도가 정상 상태에 도달하였을 때 자료를 수집하였다.

Kline⁽¹⁰⁾이 제안한 방법에 따라 실험 자료의 불확

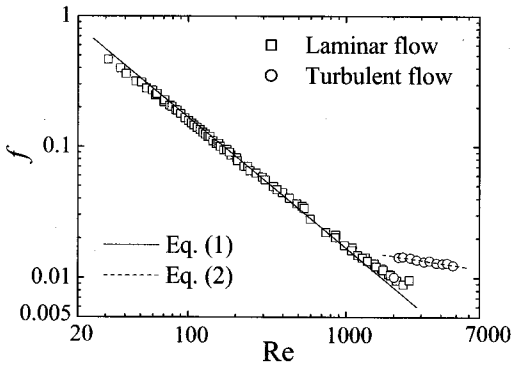


Fig. 3 Friction factors as a function of Reynolds number in single phase flow.

실성 해석을 수행하였으며 2상 마찰배수의 불확실성은 $\pm 12.5\%$ 로 산정되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 단상유동 압력강하

미세유로에서 단상유동 마찰계수에 대한 Kim and Kim⁽⁹⁾의 실험 결과를 층류유동과 난류유동에 대하여 식(1)과 식(2)로 상관하였으며 실험치와 상관식의 예측치를 Fig. 3에 비교하였다.

$$f = 16.8Re^{-1} \quad (1)$$

$$f = 0.058Re^{-0.18} \quad (2)$$

레이놀즈 수 2000~2500의 영역에서 천이영역이 존재하는 것으로 판단되며 상관식은 $\pm 20\%$ 의 오차 범위에서 실험치와 잘 일치하고 있다.

미세유로 입구에서 단면 급축소 압력손실은

$$\Delta P_{SC} = \left[1 - \beta_i^2 + K\right] \frac{1}{2} G^2 v_f \quad (3)$$

로 주어지며 여기서 β 는 유로 단면적과 집수조 단면적의 비, K 는 손실계수, G 는 질량유속, 그리고 v 는 비체적이다. 하첨자 i 는 유로 입구이고 f 는 액상이다. 층류유동 손실계수는 다시 유동 단면적 비의 함수로 다음과 같이 계산된다.⁽¹¹⁾

$$K = 0.0088\beta_i^2 - 0.1785\beta_i + 1.6027 \quad (4)$$

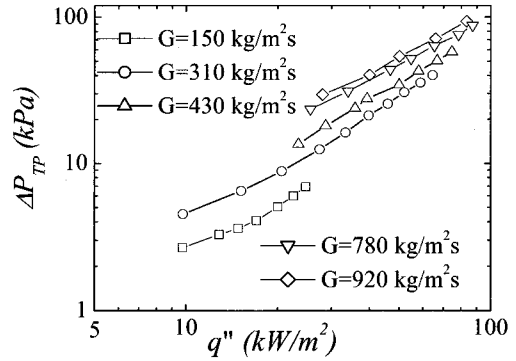


Fig. 4 Two-phase pressure drop in micro-channels as a function of heat flux.

3.2 2상유동 압력강하

대류비등 2상유동에 의해 미세유로에서 발생하는 압력강하는 상류와 하류 집수조 사이의 측정 압력차에서 미세유로 입구에서의 단면 급축소에 의한 손실과 미세유로 출구에서의 단면 급확대에 의한 손실을 제외한 값으로 산정하였다.

단면 급확대에 의한 압력손실은 2상유동의 경우 Chisholm and Sutherland⁽¹²⁾에 의해

$$\Delta P_{SE} = G^2 [\beta_e (\beta_e - 1)] v_f (1 - x_e)^2 \phi_f^2 \quad (5)$$

로 제안되었다. 식(5)에서 x 는 건도이고 ϕ_f^2 는 액상 유량만을 기준으로 정의한 마티넬리 변수이며 하첨자 e 는 유로 출구를 의미한다.

미세유로에서 대류비등에 의한 작동유체의 국부 건도는 국부 엔탈피로부터 계산되며

$$x(z) = (i(z) - i_f) / i_{fg} = (i_i + q'z/m - i_f) / i_{fg} \quad (6)$$

q' 는 유로 단위 길이당의 열전달율, z 는 유로 입구로부터의 거리, m 은 질량유량, i_{fg} 는 증발열이다. 열전달율은 가열 블록에서 측정되는 온도로부터 계산되는 전도 열전달율에서 주위로의 열손실을 제외한 값으로 산정되었다.

Fig. 4에 대류비등 2상유동에 의해 미세유로에서 발생하는 2상유동 압력강하를 작동유체의 질량유속과 열유속의 함수로 도시하였다. 열유속이 증가하면 증기 발생율이 증가하여 기상의 유속이 증가하므로 2상유동 압력강하는 급격히 증가한다.

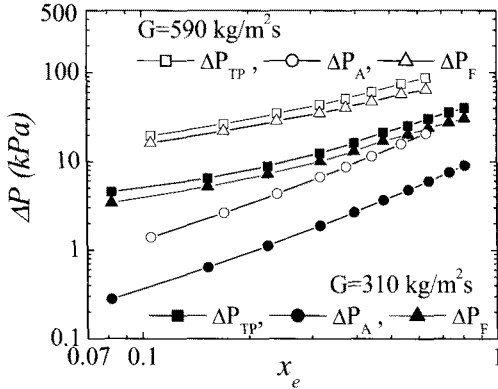


Fig. 5 Two-phase pressure drop in micro-channels as a function of exit quality.

미세유로의 2상유동 압력강하는 마찰(F), 중력(G), 가속(A)에 의한 압력강하의 합이다.

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_F + \Delta P_A + \Delta P_G \quad (7)$$

수평 미세유로의 경우 중력에 의한 압력강하는 없다. 가속 압력강하는 유로 출구의 건도와 기공율(α)의 함수로 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta P_A = G^2 v_f \left[\frac{x_e^2 v_f}{\alpha_e v_g} + \frac{1-x_e^2}{1-\alpha_e} - 1 \right] \quad (8)$$

본 연구에서는 Zivi의 상관식⁽¹³⁾을 사용하여 기공율을 계산하였다.

$$\alpha = 1 / \left[1 + (1-x) / x (v_f / v_g)^{2/3} \right] \quad (9)$$

마찰 압력강하는 2상유동 압력강하에서 가속 압력강하를 제외한 값으로 계산된다. 미세유로의 2상유동 압력강하와 가속 및 마찰 압력강하를 출구 건도의 함수로 Fig. 5에 도시하였다. 출구 건도가 증가함에 따라 미세유로의 가속과 마찰 압력강하는 모두 증가하며 질량유속의 증가는 동일한 출구 건도에서 마찰 압력강하를 급격히 증가시키는 것을 볼 수 있다.

2상유동 마찰 압력강하는 전 유량을 액상으로 가정하여 계산되는 단상유동 압력강하에 2상 마찰배수 (ϕ_{fo}^2)를 포함하여 표현하고 있다.

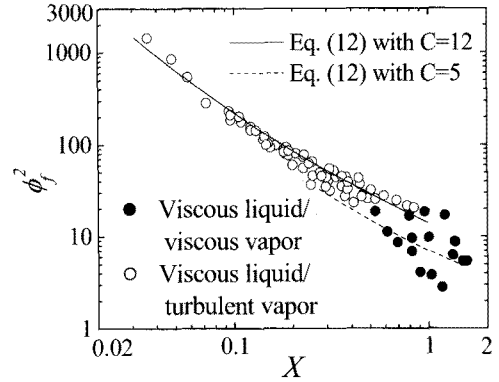


Fig. 6 Two-phase friction multiplier as a function of Martinelli parameter.

$$\Delta P_F = \frac{2f_{fo} G^2 v_f L_{sat}}{d_h} \frac{1}{x} \int_0^x \phi_{fo}^2 dx \quad (10)$$

여기서 f_{fo} 는 마찰계수, L 은 유로 길이, d_h 는 수력직경이며 하첨자 sat 는 포화상태이고 f_o 는 전 유량을 액상으로 가정한 경우이다. 액상 유량만을 고려하는 경우의 2상 마찰배수(ϕ_f^2)와의 관계는 다음과 같다.

$$\phi_{fo}^2 = \phi_f^2 (1-x)^2 \frac{f_f}{f_{fo}} \quad (11)$$

Lockhart and Martinelli⁽¹⁾는 마티넬리 변수(X)를 도입하여 2상 마찰배수를 다음과 같이 표현하였으며

$$\phi_f^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (12)$$

$$X^2 = \frac{dp}{dz} \Big|_{F,f} / \frac{dp}{dz} \Big|_{F,g} \quad (13)$$

여기서 치수less 변수 C 는 액상-기상의 유동이 층류와 난류의 어느 유동 영역에 속하는가에 따라 그 값이 결정되는 상수이다. Fig. 6에 사다리꼴 미세유로의 대류비동 2상유동 실험 결과의 2상 마찰배수를 식(12)의 예측치와 함께 마티넬리 변수의 함수로 도시하였다. 예측치와 실험결과는 주로 층류액상-층류 기상 유동 영역에서 큰 차이를 보여주고 있다.

2상 마찰배수의 실험치를 기존의 연구자들이 제안한 상관식의 예측치와 함께 Fig. 7에 비교하였다.

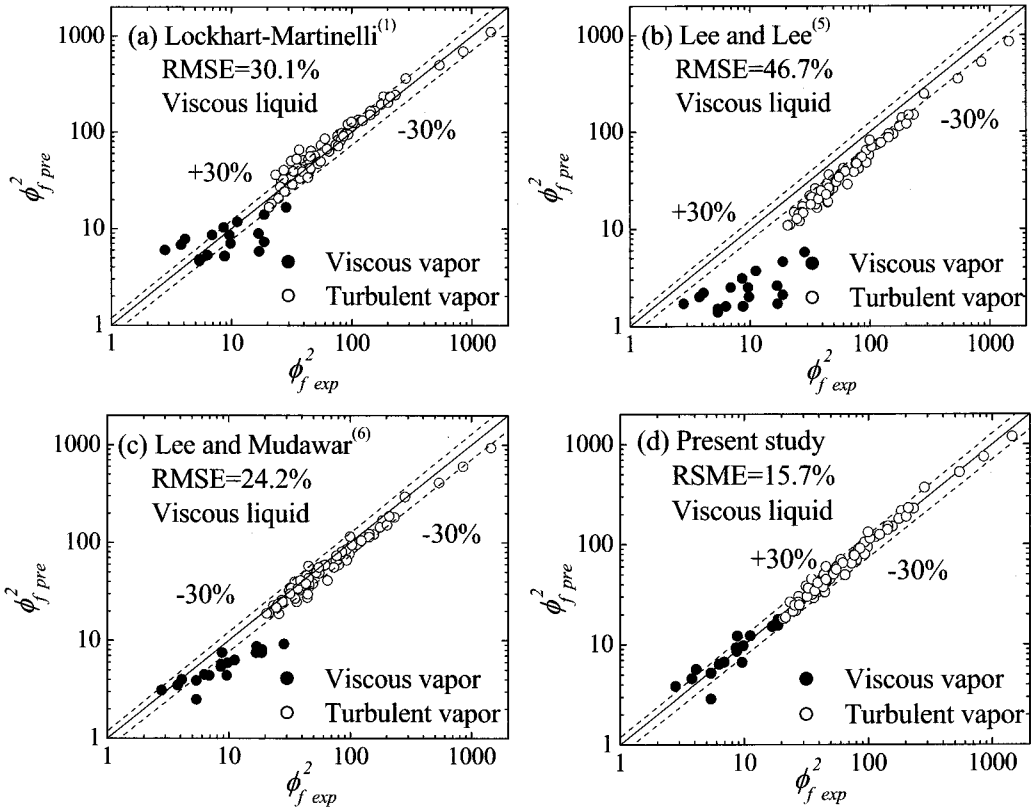


Fig. 7 Comparison of two-phase friction multiplier with predictions based on correlations by (a) Lockhart and Martinelli, (b) Lee and Lee, (c) Lee and Mudawar, and (d) the present study.

총 80개의 실험치에 대하여 Lockhart and Martinelli⁽¹⁾ 상관식의 예측치와 실험치의 오차(RMSE, root-mean-square error)는 30.1%로 확인되었으며 층류 액상-층류 기상 유동 영역에서의 오차가 두드러짐을 알 수 있다. 유로의 수력직경이 감소함에 따라 기포의 유동 특성이 크게 제한되므로 Lee and Lee⁽⁵⁾는 전단력과 표면장력의 비로 표시되는 무차원 변수로 치슬름 변수에 대한 상관식을 개발하였다. 그러나 상관식의 예측 능력은 치슬름 변수가 상수로 표현된 Lockhart and Martinelli⁽¹⁾의 상관식보다 도리어 열악한 것으로 판단되며 특히 층류 액상-층류 기상 유동영역에서 매우 심각하다. Lee and Mudawar⁽⁶⁾는 관성력과 표면장력의 비인 웨버 수(We_{fo})를 사용하여 치슬름 변수에 대한 상관식을 개발하였다.

$$C_{vv} = 2.16Re_{fo}^{0.047}We_{fo}^{0.6} \quad (14)$$

$$C_{vt} = 1.45Re_{fo}^{0.25}We_{fo}^{0.23} \quad (15)$$

$$We_{fo} = \frac{G^2 d_h}{\rho_f \sigma} \quad (16)$$

여기서 σ 는 표면장력이며 하첨자 vv 와 vt 는 층류 액상-층류 기상 유동과 층류 액상-난류 기상 유동을 각각 의미한다. Lee and Mudawar⁽⁶⁾의 상관식은 Lockhart and Martinelli⁽¹⁾의 상관식과 같이 층류 액상-난류 기상 유동영역에서 실험결과를 잘 예측하고 있으나 층류 액상-층류 기상 유동영역에서는 실험 결과와 큰 오차를 보여주고 있다. 그러나 Fig. 7(c)는 층류 액상-층류 기상 유동영역에서도 가시적으로 구별할 수 있는 일관된 구배를 보여주고 있다.

층류 액상-층류 기상 유동영역에서 2상유동 양식은 기포류나 슬러그류이며 액상의 관성력과 점성력, 그리고 표면장력이 2상유동 특성을 결정하는 지배력이다. 미세유로 내 대류비등 2상유동의 경우 기상 레이놀즈 수는 일반 대형관의 경우처럼 크지 않을 것이다. 기상 레이놀즈 수의 증가에 따라 층류

액상-난류 기상 유동영역에서 유동양식은 환상류로 변화하여도 액막의 두께는 상대적으로 두껍게 유지되며 지배력은 액상의 관성력과 점성력, 그리고 표면장력일 것으로 예상된다. 본 연구에서는 치솔름 변수를 다음과 같이 액상 레이놀즈 수와 웨버 수의 함수로 상관하였다.

$$C_{vv} = 5.57x10^5 Re_f^{-2.32} We_{fo}^{1.87} \quad (17)$$

$$C_{vt} = 21.2 Re_f^{-0.23} We_{fo}^{0.38} \quad (18)$$

식(17)과 식(18)은 층류 액상-난류 기상 유동영역에 비하여 층류 액상-층류 기상 유동영역에서 액상의 관성력과 표면장력의 영향을 크게 반영하고 있다.

Fig. 7(d)에 마티넬리 변수에 대한 식(17)과 식(18)의 예측치를 실험 결과와 비교하였다. RSME는 15.7%로 타 상관식에 비교하여 매우 우수하다. 모든 실험치가 오차 범위 $\pm 45\%$ 이내에 존재하며 오차 범위 $\pm 30\%$ 를 벗어나는 실험치는 전 실험치의 8.8%로 그 대부분은 층류 액상-층류 기상 유동영역에서 발생하였다. 결국 층류-기상 유동영역에 대한 추가적인 연구를 통하여 상관식의 정확도를 높이기 위한 노력이 필요하다.

4. 결 론

미세유로에서의 대류비동 2상유동 압력강하 특성에 대하여 실험적으로 연구하였다. 9개의 사다리꼴 평행 유로로 미세유로를 구성하였으며 각 유로의 바닥 폭은 $205 \mu\text{m}$, 길이는 $800 \mu\text{m}$, 측벽각은 3.6° , 그리고 길이는 7 cm 이다. R113의 대류비동에서 발생하는 압력강하를 입구압력 $105 \sim 195 \text{ kPa}$, 질량유속 $150 \sim 920 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 그리고 열유속 $10 \sim 100 \text{ kW/m}^2$ 의 범위에서 측정하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 질량유속과 열유속이 증가하면 미세유로의 총 압력강하는 증가한다.
- 2) 미세유로의 2상 마찰 압력강하는 출구의 건도가 증가할 때 급격히 증가하며 질량유속이 높을수록 그 증가율은 더욱 커진다.
- 3) 미세유로의 2상 압력강하를 예측하기 위한 기존 상관식들은 본 실험 결과를 정확히 예측하기에 부족한 것으로 판명되었다.
- 4) 2상 마찰배수의 치솔름 변수에 대한 새로운 상관식을 액상 레이놀즈 수와 웨버 수의 함수로 개

발하였으며 그 예측치는 실험 결과와 양호한 일치성을 보여주었다.

후 기

이 논문은 2009학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Lockhart, R. W. and Martinelli, R. C., 1949, Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes, Chem. Eng. Prog., Vol. 45, pp. 39-48.
2. Chisholm, D. and Laird, A. D. K., 1958, Two-phase flow in rough tubes, Trans. ASME, Vol. 80, pp. 276-286.
3. Mishima, K. and Hibiki, T., 1996, Some characteristics of air-water two-phase flows in small diameter tubes, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 22, pp. 703-712.
4. Zhang, W., Hibiki, T. and Mishima, K., 2010, Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in mini-channel, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 53, pp. 453-465.
5. Lee, H. J. and Lee, S. Y., 2001, Pressure drop correlations for two-phase flow within horizontal rectangular channels with small heights, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 27, pp. 783-796.
6. Lee, J. and Mudawar, I., 2005, Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications : Part I-pressure drop characteristics, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 48, pp. 928-940.
7. Lee, P. and Garimella, S. V., 2008, Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 51, pp. 789-806.
8. Steinke, M. E. and Kandlikar, S. G., 2006, Single-phase liquid friction factors in microchannels, Int. J. of Thermal Sciences, Vol. 45, pp. 1073-1083.
9. Kim, B. and Kim, G., 2008, Experimental studies on single phase flow and heat transfer in

- microchannels, J. SAREK, Vol. 12, No. 12, pp. 795-801.
10. Kline, S. J., 1985, The Purposes of Uncertainty Analysis, J. Fluids Eng., Vol. 107, pp. 153-160.
 11. Blevins, R. D., 1992. Applied Fluid Dynamics Handbook, Krieger Pub. Co., pp. 77-78.
 12. Chisholm, D. and Sutherland, L. A., 1969. Prediction of pressure gradients in pipeline systems during two-phase flow, Symposium in Two-phase Flow Systems, University of Leeds.
 13. Zivi, S. M., 1964, Estimation of steady-state steam void fraction by means of the principle of minimum entropy production, Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 86, pp. 247-252.