

미소 사각 채널에서의 마찰 압력 강하

임태우* · 최재혁**† · 김준효*** · 최용석****

* 한국해양대학교 기관공학부, ** 한국해양대학교 기관시스템공학부

*** 목포해양대학교 기관시스템공학부, **** 한국해양대학교 기관공학부 대학원

Pressure Drop due to Friction in Small Rectangular Channel

Tae-Woo Lim* · Jae-Hyuk Choi**† · Jun-Hyo Kim*** · Yong-Suk Choi****

* Division of Marine Engineering, Korea Maritime University, Pusan, 606-791, Korea

** Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Pusan, 606-791, Korea

*** Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

**** Graduate School, Division of Marine Engineering, Korea Maritime University, Pusan, 606-791, Korea

요 약 : 500 μm 의 수력직경을 가진 마이크로 채널에서 유동 비등 시 물에 대한 마찰 압력 강하를 측정하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 실험은 열 유속 100-400 kW/m^2 , 증기건도 0-0.2 그리고 질량 유속 200-600 $\text{kg/m}^2\text{s}$ 의 범위에서 이루어졌다. 유동 비등 시 마찰 압력 강하는 두 가지 모델을 사용하여 예측된다. 즉, 두 상의 속도가 동일하다고 가정한 균질 모델과 두 상 사이에 서로 다른 속도를 가지는 분리류 모델로 분류된다. 실험결과 이상 마찰 승수는 질량 유속이 증가함에 따라 감소한다는 것을 알 수 있었다. 측정된 압력 강하 데이터는 매크로 스케일과 미니/마이크로 스케일에서 제안된 기존의 여러 상관식들과 비교하였다. 균질 모델은 본 연구에서 고려한 실험 조건에서 29.4%의 평균 오차내에서 마찰 압력 강하를 예측하였다.

핵심용어 : 균질 모델, 분리류 모델, 마찰 압력 강하, 이상 마찰 승수, 증기 건도

Abstract : An experimental study was carried out to measure frictional pressure drop in flow boiling to deionized water in a microchannel having a hydraulic diameter of 500 μm . Tests were performed in the ranges of heat fluxes from 100 to 400 kW/m^2 , vapor qualities from 0 to 0.2 and mass fluxes of 200, 400 and 600 $\text{kg/m}^2\text{s}$. The frictional pressure drop during flow boiling is predicted by using two models; the homogeneous model that assumes equal phase velocity and the separate flow model that allows a slip velocity between two phases. From the experimental results, it is found that the two phase multiplier decreases with an increase in mass flux. Measured data of pressure drop are compared to a few available correlations proposed for macroscale and mini/microscale. The homogeneous model well predicted frictional pressure drop within MAE of 29.4% for the test conditions considered in this work.

Key Words : Homogeneous model, Separate flow model, Frictional pressure drop, Two-phase multiplier, Vapor quality

1. 서론

이상 유동 비등시 측정된 압력 강하는 두 가지 성분의 합으로 구성된다. 즉, 마찰 압력 강하와 가속에 의한 압력 강하이다. 마찰 압력 강하는 예측하기 가장 어려운 성분으로 총 압력 강하에 큰 영향을 미친다. 반대로, 상변화에 따른 운동량 유속의 변화에 의해 기인되는 가속에 의한 압력 강

하는 마찰 압력 강하에 비해 일반적으로 작은 값을 가진다. 유동 비등시 마찰 압력 강하는 두 가지 방법에 의해 예측되는데, 즉 각 상의 속도가 똑같다고 가정하는 균질 모델 (Collier, 1994)과 슬립류 모델로 언급되는 분리 모델이다. 균질 모델은 액상과 기상이 충분히 잘 섞여 각 상의 평균 물 성치를 가지고 같은 속도로 움직인다고 가정한 것이다. 분리 모델은 2개의 상을 따로 고려하는데, 즉 2개의 상이 일정하게 되지만 기상과 액상이 반드시 같은 속력일 필요가 없다고 가정한 것이다. 큰 압력 구배가 존재한다고 할 때 각 상의 밀도가 완전히 다를 때 이러한 서로 다른 속도의

* 대표저자 : 정희원, kyunlim@hhu.ac.kr, 051-410-4256

† 교신저자 : 정희원, choi_jh@hhu.ac.kr, 051-410-4257

가정은 중요하게 된다. 각 상사이의 상당한 슬립 때문에 마이크로 채널내에서의 압력 강하 예측에는 분리 모델이 균질 모델보다 더 적절하다고 할 수 있다. 균질 모델은 마이크로 채널에서 거의 찾아보기 어려운 기포류나 천(Churn)류 양식을 포함하는 경우의 압력 강하를 예측하는 데 사용될 수 있다. 그러나 마이크로 채널에서는 슬러그, 플러그 그리고 환상 유동 양식이 지배적인데, 이들 유동 양식에서는 2개의 유동 상이 서로 분리된다. 그 동안 다수의 압력강하 상관식들이 제안되어 왔으며, 대부분 실험 데이터를 토대로 하고 있다. 계산 방법은 분리 유동 모델인 Lockhart and Martinelli(1949) 해석을 기초로 하고 있다. Lockhart and Martinelli 상관식은 기존 식의 개선이 이루어지고 있음에도 불구하고 현재 문헌에서 찾아볼 수 있는 가장 일반적인 모델이라 할 수 있다.

어떤 연구자들은 마찰 계수와 열전달 특성이 기존의 매크로 채널 흐름과 아주 다르다고 보고하였다. Wang and Peng(1994)은 311-747 μm 범위의 수력직경을 가진 마이크로 채널을 사용하여 물과 메탄올의 열전달 특성을 연구하였으며, 그들의 결과는 기존의 대류 특성과 아주 다르게 나타났다. Peng et al.(1994)은 0.133-0.367 mm의 사각 채널에서 물에 대한 열전달과 마찰 계수를 조사하였으며, 마찰 계수를 $f = C/Re^{1.98}$ 로 상관하였다. 또한 Reynolds 수가 200-700 범위에서 층류에서 난류로 변한다는 것을 알았으며, 이것은 기존의 이론과 아주 다른 결과였다. Tran et al.(2000)은 하나의 사각 채널(4.06×1.7 mm)과 2개의 미소 관(2.46, 2.92 mm)에서 3개의 냉매를 가지고 유동 비등시 2상 유동 압력 강하를 해석하였다. 실험 결과를 매크로 스케일에서 얻어진 상관식과 비교하였으나, 기존의 상관식에 비해 높게 나타났다. 이러한 차이는 미소 채널에서 존재할 수 있는 유동 양식의 차이 때문이다. 즉 미소 채널에서의 기포들은 성장하여 좁은 통로를 채우게 된다. 그들은 2상 마찰 압력 강하를 예측하기 위해 Chisholm(1983)에 개발된 B-계수법을 토대로 새로운 상관식을 개발하였다.

Zhang and Webb(2001) 수력 직경이 2.13 mm를 가지는 다중포트와 내경이 6.25와 3.25 mm를 가지는 2개의 동관에서 냉매 R134a, R22 그리고 R404a에 대한 단상류와 2상유동 압력강하를 조사하였다. 단상에서의 압력강하는 Blasius 식에 의해 $\pm 10\%$ 이내에서 예측되었으며, 미소 채널에서의 2상 마찰 압력 강하는 Friedel(1979) 상관식에서 높게 예측되었다. 그들은 Friedel 상관식을 수정함으로써 2상 마찰 압력 강하에 대한 새로운 상관식을 개발하였다.

반면, 또 다른 연구자들은 마이크로 채널에서의 열전달 특성과 압력 강하가 기존의 이론과 잘 일치한다고 보고하고 있다. Lee et al.(2005)은 사각 채널을 통해 흐르는 물의 열적

특성에 관한 실험과 수치적 해석을 수행하였다. 수치해석에 의한 예측은 실험 데이터와 잘 일치하였으며, 그들이 사용한 마이크로 채널의 치수 내에서는 기존의 해석적 접근이 열전달 거동을 예측할 수 있다고 제안하고 있다. Mishan et al.(2007)은 440 μm 의 수력 직경을 가진 사각 마이크로 채널 내를 흐르는 물에 대한 열전달과 압력 강하를 연구하였으며, 실험 결과를 통해 기존의 이론으로 마이크로 채널을 통해 흐르는 물에 적용할 수 있다는 것을 확인하였다. Steinke and Kandlikar(2006)은 마이크로 채널에서 액체의 단상 마찰 계수에 관한 문헌들을 검토하여 8-990 μm 의 수력 직경을 가지는 마이크로 채널 내 마찰 계수에 대한 새로운 실험 결과를 제시하였으며, 층류 유동의 경우 기존의 이론으로부터 얻어진 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Kawahara et al.(2002)는 직경이 100 μm 인 원형 관에서 물과 질소 가스를 사용하여 2상 유동 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 압력 강하 실험으로부터 단상 마찰 인자와 2상 마찰 승수에 관한 데이터를 얻었다. 단상 마찰 인자는 기존의 층류 상관식과 잘 일치 하는 것으로 나타났다. 2상 마찰 승수에 관한 데이터는 균질류 모델에 의해 높게 예측되었으나, Lockhart and Martinelli의 분리 모델에서는 잘 일치($\pm 10\%$ 이내)하였다.

본 연구의 목적은 마이크로 채널내에서 작동 유체의 유동 비등시 마찰 압력 강하에 대한 실험 데이터를 얻는 것이며, 본 연구에서 얻어진 결과를 토대로 이상 마찰 승수를 사용하여 증기 건조와 질량 유속에 따른 압력 강하 특성을 고찰하는 것이다. 실험에서 측정된 데이터를 기존의 매크로 관과 미니/마이크로 관에서 얻어진 여러 상관식들과 비교·검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 유동 비등 열전달과 압력강하 측정을 위한 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 입구 저장탱크(Reservoir tank), 핫플레이트(Hot plate), 시린지 펌프(Syringe pump), 필터(Filter), 예열기(Preheater), 시험구간(Test section), 출구 저장탱크(Reservoir tank) 그리고 전자저울(Electronic balance)로 구성되어 있다. 모든 실험에서 작동유체(De-ionised water)는 핫플레이트에서 일정온도로 가열된 후 시린지 펌프에 의해 필터를 거쳐 예열기로 공급되며, 예열기에서 시험구간 입구의 주어진 엔탈피까지 예열된 후 시험구간으로 들어가 다시 가열되게 되어 있다. 그리고 시험부의 상부는 유동 양상을 관찰할 수 있도록 투명판(Polycarbonate)으로 덮여 있다. 이 투명판은 입·출구의 작동 유체온도와 압력강하 측정을 위해 사용된다.

미소 사각 채널에서의 마찰 압력 강하

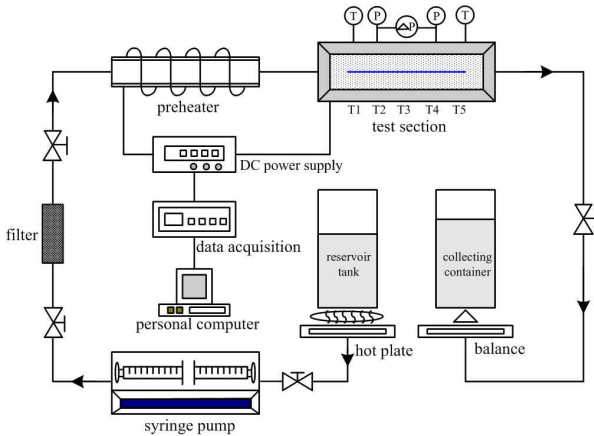


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 2는 시험부를 나타내며, 마이크로채널은 동판의 상부 표면에 와이어 커팅법(Wire cutting method)을 이용하여 깊이와 폭이 각각 0.5 mm인 사각 채널로 가공하였다. 채널 길이는 40 mm의 가열길이를 포함하여 약 80 mm이다. 동판의 하부에는 시간에 따라 일정한 열을 공급하기 위해 필름 히터가 부착되며, 이 히터는 0-50 V와 0-3 A의 범위에서 조절되는 DC power supply에 의해 원하는 전류를 공급받는다. 또한 동판의 하부 표면에 8 mm 간격으로 5개의 T-type 열전대가 부착된다. 열손실을 방지하기 위해 필름 히터 아래 단열층(Thermal-insulating layer)을 둔다.

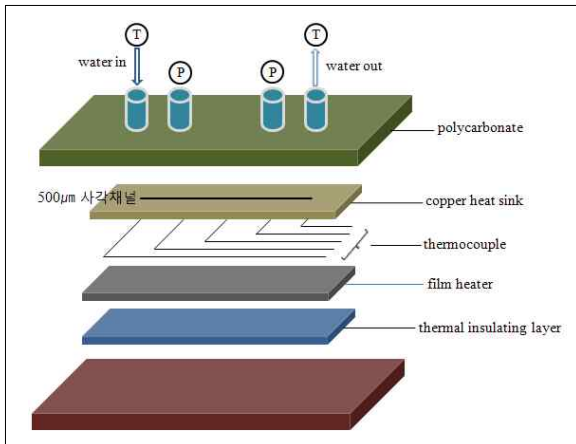


Fig. 2. Test section.

실험을 시작하기 전에 저장조의 작동유체를 약 1시간 동안 가열시켜 증발시킴으로써 가스제거(Degassing) 작업을 수행한다. 작동유체는 시린지 펌프로 순환되며 전자저울로 유량을 측정하여 원하는 값으로 시린지 펌프를 조절하였다. 마이크로 채널내의 유동 비등 실험은 일정한 유량에서 열

유속을 증가시킴으로써 수행되었다. 본 연구에서 작동유체의 유량은 2.35~7 ml/min이며, 열유속은 100~400 kW/m²이고, 질량 유속은 200~600 kg/m²s이다.

작동유체의 입·출구 온도는 입구와 출구에 절대 압력계와 T-type 열전대를 설치하여 측정하였으며, 시험부 입·출구의 압력 강하는 차압계를 사용하여 측정하였다.

실험에서 직접 측정된 양은 유량, 압력 강하, 입·출구 압력, 그리고 열 유속 등이다. 이들 측정량의 불확실성은 유량의 경우 ±3~5%였으며, 압력 강하 측정은 풀 스케일에서 0.25%의 정확성을 가지는 차압계(Differential pressure drop transducer)를 사용하였다. 온도 측정의 불확실성은 T 타입 열전대에서 ±0.3 °C였다. 그리고 열유속은 전압과 전류계로 계산하였고, 그 때의 불확실성은 2~4%의 범위에 있었다. 열전달계수에서의 불확실성은 마이크로채널로 일어나는 열전달률을 결정할 때의 불확실성과 벽면온도 측정으로부터 유발되며, 본 연구에서는 6~12%의 범위에 있는 것으로 평가되었으며, 그 보다 더 큰 불확실성은 낮은 열유속에서 일어났다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰 압력 강하

Fig. 3은 실험 장치의 신뢰성을 확보하기 위해 2상 유동 실험 전 단상 유동에서의 마찰 압력 강하 실험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 층류 유동의 경우 포이쉴리(Poiseuille) 수, $Po=f Re$ 는 상수가 된다. 즉 원형관에서는 $f Re$ 는 16이며, 사각 채널의 경우는 종횡비의 함수로 나타나며, Shah and London(1978)이 다음과 같이 제시하였다.

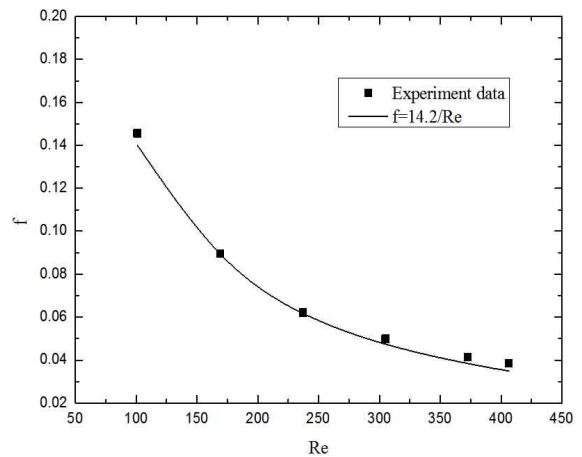


Fig. 3. Friction factor vs. Reynolds number.

여기서 β 는 채널의 종횡비를 나타내며, 본 연구에서는 1

이 되어 $f Re$ 는 14.2가 된다. 그림으로부터 알 수 있듯이 본 실험 결과는 식(1)과 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

$$f Re = 24(1 - 1.3553\beta + 1.9467\beta^2 - 1.7012\beta^3 + 0.9564\beta^4 - 0.2537\beta^5) \quad (1)$$

수평관내 유동 비등시 총 압력 강하는 두 가지 성분의 합으로 식(2)와 같이 주어진다.

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_a \quad (2)$$

여기서, ΔP_f 는 마찰 압력 강하를 나타내고, ΔP_a 는 가속으로 인한 압력 강하를 나타낸다.

본 연구에서 가속 압력 강하는 식(3)을 사용하여 계산하였다.

$$\Delta P_a = G^2 \left[\left\{ \frac{\beta^2}{\alpha \rho_v} + \frac{(1-\beta)^2}{(1-\alpha)\rho_l} \right\}_{out} - \left\{ \frac{\beta^2}{\alpha \rho_v} + \frac{(1-\beta)^2}{(1-\alpha)\rho_l} \right\}_{in} \right] \quad (3)$$

여기서 α 는 기공률을 나타내며, Zivi의 상관식으로 식(4)와 같이 제시된다.

$$\alpha = \left[1 + \frac{(1-x)}{x} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{2/3} \right]^{-1} \quad (4)$$

마찰 압력 강하는 예측하기에 가장 어려운 성분이며, 총 압력 강하에 가장 중요한 기여를 한다. 반면, 가속으로 인한 압력 강하는 일반적으로 마찰 압력 강하와 비교해서 작은 값을 가진다.

(1) 균질 모델(Homogeneous model)

$$\Delta P_{TP} = \frac{2f_{TP}G^2L}{D\rho_{TP}} \quad (5)$$

$$f_{TP} = \frac{16}{Re_{TP}} \quad \text{for } Re_{TP} < 2000,$$

$$f_{TP} = 0.079 \times Re_{TP}^{-0.25} \quad \text{for } Re_{TP} > 2000,$$

$$Re_{TP} = \frac{GD}{\mu_{TP}}$$

여기서 첨자 TP는 이상(Two-Phase)를 나타내며, 이상 밀도와 점성계수는 각각 식(6), 식(7)과 같다.

$$\rho_{TP} = \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$\mu_{TP} = \left(\frac{x}{\mu_g} + \frac{(1-x)}{\mu_l} \right)^{-1} \quad (7)$$

(2) 분리류 모델(Separate flow model)

1) Lockhart and Martinelli correlation(1949)

이상마찰 압력 구배를 예측하기 위해 흔히 사용하는 상관식으로는 이상마찰 승수(보정계수)의 형태를 취한다. 마찰 승수라는 개념은 Lockhart and Martinelli(1949)에 의해 처음 도입되었으며, 그들은 이상 마찰압력강하를 계산하기 위해 식(8)과 같은 유동 상관식을 제시하였다.

$$\left(\frac{dP}{dL} \right)_{TP} = \phi_l^2 \left(\frac{dP}{dL} \right)_l \quad (8)$$

여기서 Chisholm(1967)은 액상 압력 강하를 토대로 이상 마찰 승수를 계산하기 위해 식(9)를 제시하였다.

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (9)$$

여기서 C는 액상과 기상이 층류와 난류 흐름이냐에 따라 다른 값들을 가지며, Martinelli 변수 X는 식(10)과 같이 주어진다.

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dl} \right)_l}{\left(\frac{dp}{dl} \right)_g} \quad \text{with} \quad \left(\frac{dp}{dl} \right)_l = f_l \frac{2G^2(1-x)^2}{d\rho_l} \quad (10)$$

$$\text{and} \quad \left(\frac{dp}{dl} \right)_g = f_g \frac{2G^2x^2}{d} \rho_g$$

여기서 f , ρ , x , G 그리고 D 는 마찰 계수(Friction factor), 밀도, 건도, 질량 유속 그리고 수력 직경을 나타내며, 첨자 g 와 l 은 각각 가스상과 액상을 나타낸다. 마찰계수 f_l 과 f_g 는 각각 식(11), 식(12)와 같다.

$$f_l Re_l = 24(1 - 1.355\beta + 1.947\beta^2 - 1.701\beta^3 + 0.956\beta^4 - 0.254\beta^5) \quad (11)$$

$$Re_l = \frac{G(1-x)d_h}{\mu_l}$$

$$f_g Re_g = 24(1 - 1.355\beta + 1.947\beta^2 - 1.701\beta^3 + 0.956\beta^4 - 0.254\beta^5) \quad (12)$$

$$Re_g = \frac{Gxd_h}{\mu_g}$$

2) Lee and Garimella correlation(2008)

$$C = 2566 G^{0.5466} d_h^{0.8819} (1 - e^{-319d_h}) \quad (13)$$

3.2 결과 분석

일반적으로, 측정된 마찰 압력 강하는 이상 마찰 승수를 사용하여 식(14)와 같이 표현될 수 있다

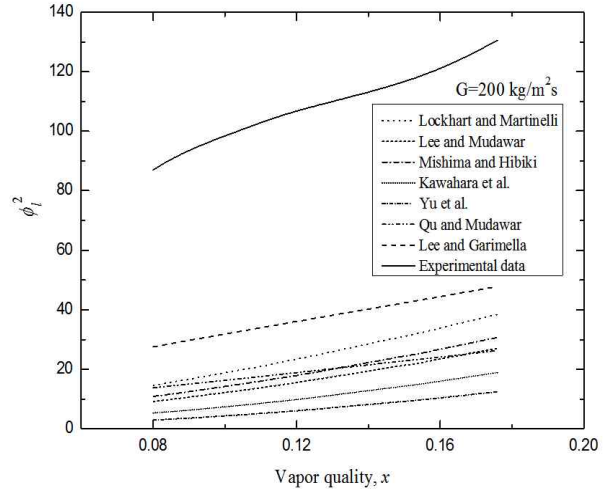
$$\phi_l^2 = \frac{\Delta P_{tp,f}}{\Delta P_l} \quad (14)$$

여기서, $\Delta P_{tp,f}$ 는 이상 마찰 압력 강하이며, ΔP_l 는 이상 유동이 액체 단상으로 흐른다고 가정했을 때의 단상 마찰 압력 강하를 나타내는 것으로 식(15)와 같다.

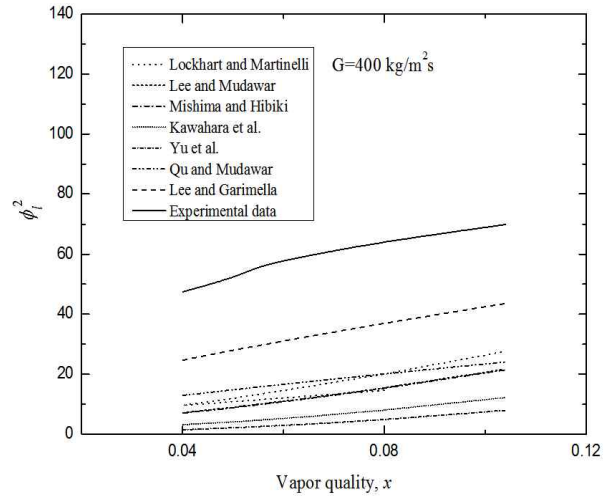
$$\Delta P_l = \frac{2f_l G^2(1-x)^2 L}{d_h \rho_l} \quad (15)$$

Fig. 4(a), (b) 그리고 (c)는 측정된 마찰 압력 강하로부터 식(11)을 이용하여 계산된 이상 마찰 승수와 기존의 매크로 관과 미니/마이크로 관에서 얻어진 상관식과의 비교를 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 질량 유속에 대하여 얻어진 이상 마찰 승수는 건도가 증가함에 따라 증가하나, 질량 유속이 증가함에 따라 이상 마찰 승수는 감소한다는 것을 알 수 있다. 그리고 실험에서 얻어진 이상 마찰 승수는 기존의 매크로 관이나 미니/마이크로 관에서 얻어진 상관식보다 훨씬 큰 값을 나타내었다.

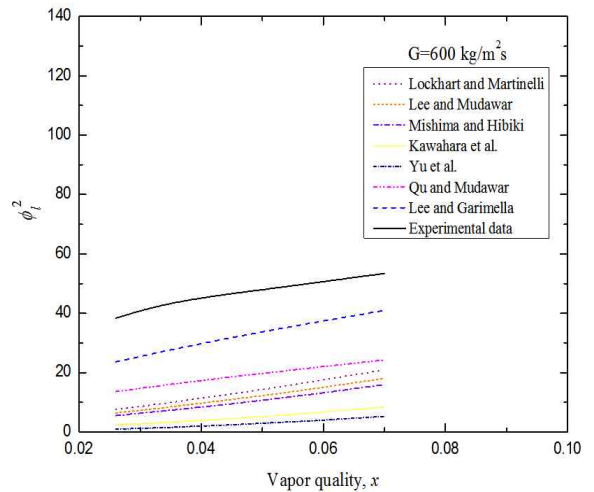
이러한 차이는 기존의 매크로 관에서 액상과 기상 둘 다 난류 흐름으로 가정하여 개발되었기 때문으로 사료된다. 그리고 미니/마이크로 관에서 얻어진 상관식들은 주로 냉매에 대하여 얻어진 것으로 물성치의 차이로 인해 이러한 오차가 발생한 것으로 생각된다. 따라서 기존의 매크로 관이나 미니 관에서 얻어진 상관식으로는 본 연구의 결과를 예측할 수 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 마이크로 채널에서 물에 대한 새로운 상관식 개발이 요구된다.



(a) $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$



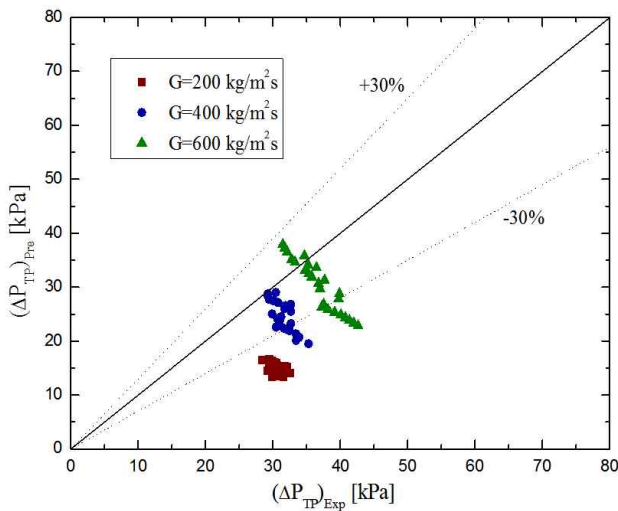
(b) $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$



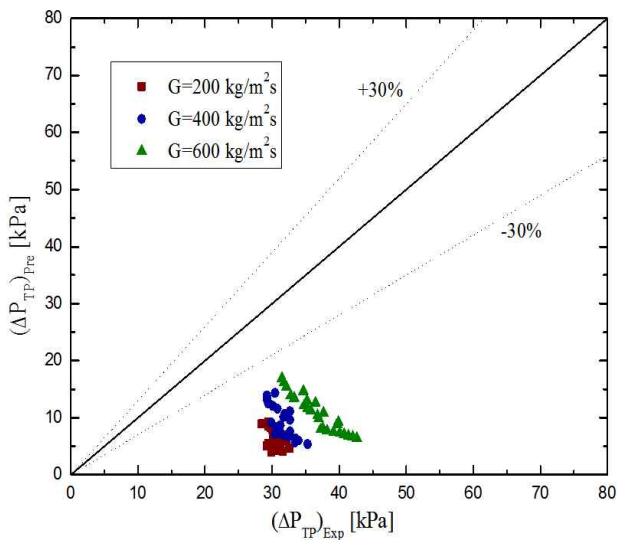
(c) $G=600 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Fig. 4. Comparison between the measured frictional multipliers and several correlations.

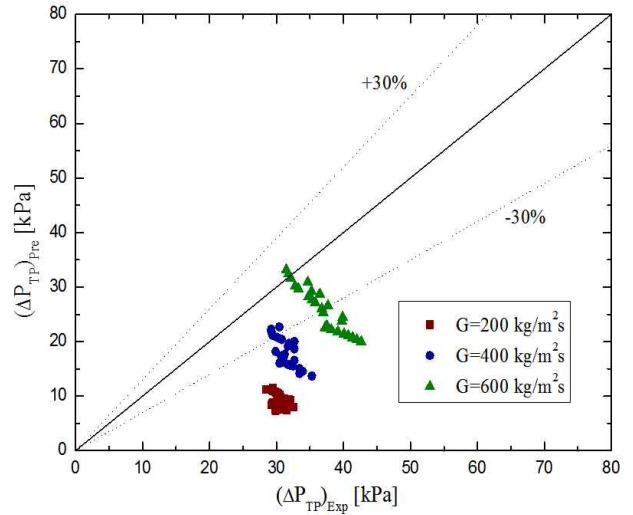
Fig. 5는 측정된 마찰 압력 강하와 균질 모델(Homogeneous model), Lockhart and Martinelli 상관식, 그리고 Lee and Garimella 상관식과의 비교를 나타낸 것이다. 균질모델의 경우 저질량 유속에서는 본 연구의 결과를 다소 낮게 예측하고 있으나 질량 유속이 증가함에 따라 좋은 예측결과를 나타내었다. 그 외 대부분의 상관식들이 본 실험 결과를 낮게 예측하고 있다는 것을 알 수 있다. Table 1은 몇몇 상관식에 대한 MAE가 나타나 있다.



(a) Homogeneous model



(b) Lockhart and Martinelli



(c) Lee and Garimella

Fig. 5. Comparison of experimental and predicted frictional pressure drop.

Table 1. Mean absolute error of some correlations

Correlation	MAE(%)
Homogeneous model	29.4
Lockhart and Martinelli	73.8
Lee and Garimella	46.9
Qu and Mudawar	70.3

4. 결 론

본 연구에서는 500 μm 를 가지는 수평 사각 채널에서 유동 비등시 마찰 압력 강하에 관한 실험적인 연구가 수행되었으며, 측정된 데이터를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2상 유동 실험의 신뢰성을 확보하기 위해 수행된 단상 유동 실험에서 얻어진 마찰 압력 강하의 사각 채널에 대하여 Shah and London에 의하여 제시된 결과와 잘 일치하였다.
2. 2상 유동 실험으로부터 얻어진 이상 마찰 승수는 증기 건도가 증가함에 따라 증가하나 질량 유속이 증가함에 따라 감소하였다. 본 연구에서 얻어진 이상 마찰 승수는 기존의 매크로 관과 미니/마이크로 관에서 얻어진 상관식보다 훨씬 큰 값을 나타내었다. 이러한 오차는 매크로 관에서 얻어진 상관식이 주로 난류 유동을 토대로 개발되었기 때문

이며, 미니/마이크로 관에서는 주로 냉매를 사용하여 개발되었기 때문에 물성치의 차이로 인해 발생한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 국토해양부의 지원으로 수행한 해양 에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Chisholm, D.(1967), A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two-Phase Flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 10, pp. 1767-1778.
- [2] Chisholm, D.(1983), *Two-phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers*, Longman, New York, pp. 26-113.
- [3] Collier, J. G. and J. R. Thome(1994), *Convective Boiling and Condensation*, 3rd Edition. Oxford University Press, London, pp. 34-130.
- [4] Friedel, L.(1979), Improved Friction Pressure Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two-Phase Pipe Flow, Presented at the European Two-phase Flow Group Meeting, Ispra, Italy, Paper E2, June, Vol.18, pp. 485-492.
- [5] Kawahara, A., P. M. Y. Chung and M. Kawaji(2002), Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel, *International Journal of Multiphase Flow* 28, pp. 1411-1435.
- [6] Lee, P. S. and S. V. Garimella(2008), Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51, pp. 789-806.
- [7] Lee, P. S., S. V. Garimella and D. Liu(2005), Investigation of heat transfer in rectangular microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, pp. 1688-704.
- [8] Lockhart, R. W., and R. C. Martinelli(1949), Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes, *Chem. Engng. Prog.* Vol. 45, pp. 39-48.
- [9] Mishan, Y., A. Mosyak, E. Pogrebnyak and G. Hetsroni(2007), Effect of developing flow and thermal regime on momentum and heat transfer in micro-scale heat sink, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, pp. 3100-3114.
- [10] Peng, X. F., G. P. Peterson and B. X. Wang(1994), Frictional flow characteristics of water flowing through rectangular microchannels, *Experimental Heat Transfer* 7, pp. 249-264.
- [11] Shah, R. K. and A. L. London(1978), *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*, Adv. Heat Transfer, Supplement 1, Academic Press, New York, pp. 196-247.
- [12] Steinke, M. E. and S. G. Kandlikar(2006), Single-phase liquid friction factors in microchannels, *International Journal of Thermal Sciences* 45, pp. 1073-1083.
- [13] Tran, T. N., M. C. Chyu, M. W. Wambsganss and D. M. France(2000), Two-phase pressure drop of refrigerants during flow boiling in small channels: and experimental investigation and correlation development, *International Journal of Multiphase Flow* 26, pp. 1739-1754.
- [14] Wang, B. X. and X. F. Peng(1994), Experimental investigation on liquid forced convection heat transfer through microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 37(suppl.1), pp. 73-82.
- [15] Zhang, M. and R. L. Webb(2001), Correlation of two-phase friction for refrigerants in small-diameter tubes. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 25, pp. 131-139.

원고접수일 : 2012년 06월 15일

원고수정일 : 2012년 07월 23일

게재확정일 : 2012년 10월 26일