◎ 논 문
◎ Original Paper

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2018.21.2.005
ISSN (Print): 2287-9706

미니채널에서 공기-물 혼합물의 마찰압력강하에 관한 실험적 연구

신홍철* · 김성민**†

An Experimental Study on the Frictional Pressure Drop of Air-Water Mixture in a Mini-Channel

Hong-Cheol Shin*, Sung-Min Kim**†

Key Words : Frictional Pressure Drop(마찰압력강하), Mini-channel(미니채널), Two-phase Flow(이상유동)

ABSTRACT

This study explores the frictional pressure gradient of air-water mixture in a horizontal rectangular mini-channel with a height of 2 mm and a width of 1 mm. Two absolute pressure transducers are used to measure the frictional pressure drop of two-phase flow. Six representative photos of two-phase flow pattern including elongated bubbly, slug, semi-annular, annular, slug/dispersed and annular/dispersed flows are obtained with the aid of high speed camera. The measured frictional pressure gradients increased with increasing the superficial gas velocity, and were also compared with predictions of previous correlations for two-phase frictional pressure gradient. Predictive capability of previous correlations for two-phase frictional pressure gradient showed dependence on flow patterns of two-phase flow. Among all previous correlations, the correlation of Kim and Mudawar showed the best predictions for the present data.

1. 서 론

슈퍼컴퓨터를 비롯한 자동차, 우주항공, 군수, 발전, 의료 등의 다양한 산업분야에서 사용되는 장비는 기술이 발달함에 따라 그 성능이 증가하였다. 하지만 동시에 장비의 집적화 및 소형화로 단위면적당 높은 발열량이 야기되었으며, 효과적인 열관리가 중요한 문제로 대두되었다. 1980년대 초기에는 주로 칩의 냉각을 위해 단상의 기체와 액체를 이용한 열전달로 열관리 문제를 해결하고자 하는 시도가 이어졌다. 하지만 지속적인 기술의 발전으로 뛰어난 냉각기술이 곧 다양한 산업분야에서 요구되었고, 상변화를 통한 냉각기술이 제안되면서 차세대 열관리 기법으로 각광을 받기 시작했다. 특히 이상유동 강제대류 열전달을 활용한 멀티포트 미니/마이크로채널 히트싱크는 단상유동 열전달을 활용한 경우보다 적은 작동유체의 유량으로도 우수한 냉각성능을 보이면서 동시에 전자장비의 표면온도를 전자장비 작동온도에 맞는 범위에서 일정하게 유지할 수 있어 소형화된 전자장비의 냉각에 적합하다고 할 수 있다.[1,2]

하지만 이상유동 열전달은 채널 직경이 작아질수록 냉각성능이 증가함과 동시에 관내의 압력강하가 급격히 증가하는 현상을 보이기 때문에 마찰압력구배를 정확히 예측하기 위한 연구들이 진행되었다.[3,4] 초창기 연구단계에서는 매크로채널의 이상유동 마찰압력강하를 예측하기 위한 연구들이 발표되었다. Chisholm[5]은 Lockhart-Martinelli parameter[6]와 이상유동 계수(Two-phase multiplier)를 이용하여 기체와 액체의 유동 상태를 고려한 상관식을 제안하였다. Friedel[7]은 기존의 공기-물 혼합물, 공기-기름 혼합물, 그리고 냉매에 대한 이상유동 마찰압력강하 실험 데이터를 수집하여 건도, 기체와 액체의 비체적 비, 기체와 액체의 점성 비, 그리고 이상유동에 대한 Froude 수와 Weber 수를 반영한 상관식을 제안하였다. Muller-Steinhagen과 Heck[8]도 매크로채널에서 물-공기 혼합물, 물-수증기 혼합물, 그리고 탄화

* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)
** 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)
† 교신저자, E-mail : smkim@skku.edu

The KSFM Journal of Fluid Machinery: Vol. 21, No. 2, April 2018, pp.05~10(Received 28 Feb. 2017; revised 12 Mar. 2018; accepted for publication 12 Mar. 2018)
한국유체기계학회 논문집: 제21권, 제2호, pp.05~10, 2018(논문접수일자: 2017.02.28, 논문수정일자: 2018.03.12, 심사완료일자: 2018.03.12)

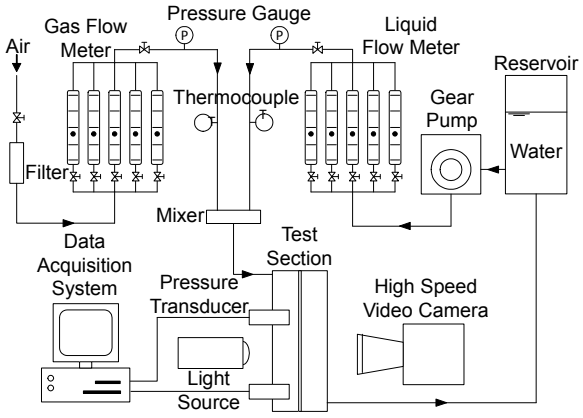

Fig. 1 Schematics of the experiment loop

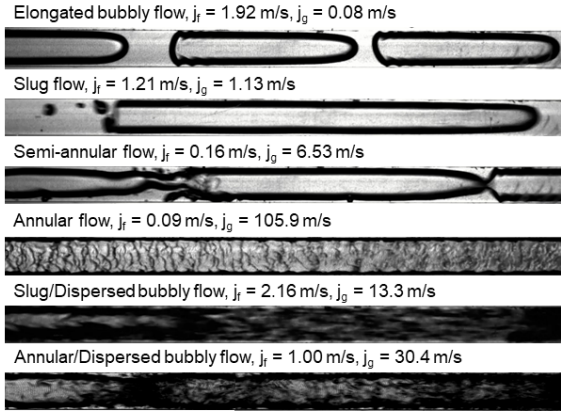

Fig. 2 Representative photo of flow regimes observed in present study

수소 및 여러 냉매를 포함한 다양한 유체에 대해 진행된 실험의 결과데이터를 수집하여 건도와 단상 유체의 마찰압력구배를 이용한 상관식을 제안하였다. Wang 등[9]은 R-22, R-134a, R-407C 등의 냉매에 대해 직경 6.5 mm인 채널에서의 실험을 진행하였고 이상유동 마찰압력구배에 대한 상관식을 질량유량의 범위에 따라 나누어 제안하였다.

한편 앞서 언급되었듯이, 미니/마이크로채널의 활용이 대두되면서 미니/마이크로채널 내 이상유동의 마찰압력강하에 대한 연구 사례도 보고되었다. Mishima와 Hibiki[10]는 수력직경 1.05-4.08 mm인 원형관과 직사각관에 대해 물과 공기를 혼합하여 이상유동의 마찰압력강하에 대한 실험을 진행하였고, 이를 예측하기 위한 상관식을 제안하였다. 그들이 제안한 상관식은 Chisholm[5]이 제안한 상관식을 수정한 것으로 채널의 수력직경을 주요 인자로 갖는다. Lee와 Lee[11]는 수력직경이 0.78-6.67 mm 사이인 원형관에서 공기-물 혼합물을 이용하여 실험을 진행하였다. 그들은 π-이론을 이용하여 두 개의 주요 파라미터를 선별하고, 이를 사용한 상관식을 제안하였다. Li와 Wu[12]는 기존에 발표되었던 단열조건의 미니/마이크로 채널 내 이상유동의 압력강하 데이터를 수집하고, Bond 수와 액체 겉보기 Reynolds 수를 포함하는 일반화된 상관식을 제안하였다. Kim과 Mudawar[13]는 기존에 발표되었던 단열, 비등 및 응축 조건의 미니/마이크로 채널 내 이상유동 압력강하 데이터를 넓은 범위의 작동조건에 대해 수집하고, Suratman 수, 액체와 기체의 밀도 비를 반영하여 마찰압력강하를 예측하기 위한 일반화된 상관식을 제안하였으며, 수집된 데이터에 대해 해당 상관식이 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE) 25 % 이내의 정확도를 보였다고 발표하였다.

본 연구에서는 미니 채널 내 이상유동의 유동양식(Flow pattern)과 압력강하 특성을 파악하기 위해 수력직경이 1.33 mm인 직사각관에서 물-공기 혼합물의 유동양식을 관찰하고 마찰압력강하를 측정하는 실험을 진행하였으며, 그 결과를 기존에 발표된 상관식들의 예측값과 비교하고 이에 대해 논의하고자 한다.

2. 실험장비

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험 장비의 개략도이다. 물은 기어펌프를 통해 공급되고 공기는 불순물 제거를 위해 필터를 거쳐 공급된다. 공기와 물의 유량은 그 범위에 맞는 유량계로 각각 측정하며, 두 유체가 혼합되기 전에 T타입 열전대와 데이터로거를 통해 각 유체의 온도를 실시간으로 측정하고, 정확도가 높은 유량계를 통해 각 상의 유량을 측정한다. 이후 T자 형의 믹서를 통해 혼합된 물과 공기는 실험채널을 지난다. 초고속 카메라를 통해 유동양식을 관찰하고, 압력센서를 통해 마찰압력강하를 측정한다. 미니 채널 내 공기-물 혼합물의 기포율(Void fraction)은 공기와 물의 유량을 통해 제어된다.

초고속 카메라는 유량에 따라 초당 8,000-10,000 프레임을 촬영하며 셔터 속도는 1/16,000초이다. 측정된 기체와 액체의 온도범위는 22.4-27.5℃이고, 공기와 물의 유량 범위는 각각 8-4,238 ml/min, 24-140 ml/min이다. 실험 채널은 폭 1 mm, 높이 2 mm, 길이 270.15 mm의 사각채널로 유동양식의 관찰을 위해 투광성이 좋은 폴리카보네이트에 머신가공을 하여 제작하였다. 충분히 발달된 유동의 압력을 측정하기 위해 압력센서는 채널입구로부터 134 mm, 244 mm인 지점에 설비하여 1,000 Hz로 압력을 측정하였다. 유량, 압력, 온도의 측정 오차는 각각 ±2%, ±0.5%, ±0.2℃이다.

3. 유동양식과 마찰압력강하

3.1 유동양식

이상유동은 단상유동보다 복잡한 운동량, 열 및 물질의 전달현상을 수반하기 때문에 다양한 유동양식을 보이며, 유동양식에 따라 관내 이상유동의 마찰압력강항 경향이 달라진다.[15] 이에 따라 본 연구의 실험에서는 마찰압력강하의 측정

뿐만 아니라 초고속카메라를 이용하여 유동양식을 함께 관찰하였다. Fig. 2는 초고속 카메라를 통해 관찰된 유동양식의 대표 사진으로 관찰된 8개의 유동양식 중 긴 기포유동(Elongated bubbly flow), 슬러그유동(Slug flow), 반환형유동(Semi-annular flow), 환형유동(Annular flow), 슬러그/분산기포유동(Slug/Dispersed bubbly flow), 환형/분산기포유동(Annular/Dispersed bubbly flow)을 포함한 6개의 유동양식의 대표사진이며, 각 유동양식이 관찰된 겉보기 속도(Superficial velocity)를 함께 표기하였다. 겉보기 속도는 각 상의 유량을 채널의 전체 단면적으로 나눈 값으로 정의된다. 긴 기포유동은 채널의 수력직경보다 큰 기포와 그 사이의 액체 슬러그가 함께 지나는 유동으로 액체와 기체의 겉보기 속도가 비교적 낮을 때 관찰되었다. 슬러그유동은 긴 기포의 끝단에서 작은 기포들이 떨어져 나와 액체 슬러그에 부유하는 경우로 액체와 기체의 겉보기 속도가 비교적 클 때 관찰되었다. 반환형유동은 슬러그유동과 환형유동 사이에서 발생한 천이유동의 형태로 위쪽 액막과 아래쪽 액막에서 형성된 파형이 만났다 떨어지기를 반복하고, 낮은 액체 겉보기 속도에 비해 기체 겉보기 속도가 클 때 관찰되었다. 환형유동은 채널의 벽면에 액막이 형성되고 채널의 중심으로 기체가 지나는 유동으로 낮은 액체 겉보기 속도에 비해 기체의 겉보기 속도가 매우 클 때 관찰되었다. 슬러그/분산기포유동과 환형/분산기포유동은 슬러그유동 또는 환형유동과 분산기포유동이 함께 관찰된 유동양식이며, 액체와 기체의 겉보기 속도가 모두 높을 때 관찰되었다. 액체/긴 기포유동(Liquid/Elongated bubbly flow)은 긴 기포 사이에 매우 긴 액체 슬러그가 존재하여 대부분의 측정 시간동안 액체만 가득 찬 모습으로 관찰되어 긴 기포유동과는 다른 양상을 보였다. 긴 기포/슬러그유동(Elongated bubbly/Slug flow)은 긴 기포유동과 슬러그유동, 2개의 대표유동이 번갈아가며 나타나는 천이유동이다.

3.2 마찰압력강하

이상유동의 마찰압력강하 측정 실험에 앞서 단상유동의 마찰압력강하 측정 실험이 먼저 수행되었다. 측정된 단상유동 마찰압력강하를 Fanning의 마찰계수와 비교하였으며, 그 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE)는 10.85%로 나타났다. 이때, 평균절대오차는 다음과 같이 정의된다.

$$MAE(\%) = \frac{1}{N}\sum \frac{|(pred)-(exp)|}{(exp)} \times 100 \quad (1)$$

N은 각각 데이터의 개수를 나타내며, $(pred)$와 (exp)는 각각 방정식의 예측값과 본 연구의 실험값을 의미한다. Lockhart와 Martinelli[6]는 이상유동의 마찰압력구배를 각 상에 대한 마찰압력구배와 그 상의 이상유동계수의 곱으로 나타내었으며 그 정의는 다음과 같다.

Table 1 Previous correlations of two-phase frictional pressure gradient

Author(s)	Equation
Chisholm[5]	$(dP/dz)_F = (dP/dz)_f \phi_f^2,\ \phi_f^2 = 1 + C/X + 1/X^2$ $C_{vv} = 5,\ C_{tv} = 10,\ C_{vt} = 12,\ C_{tt} = 20$
Friedel[7]	$(dP/dz)_F = (dP/dz)_f \phi_{fo}^2$ $\phi_{fo}^2 = (1-x)^2 + x^2(\rho_f/\rho_g)(f_{go}/f_{fo}) + 3.24x^{0.78}$ $(\rho_f/\rho_g)^{0.91}(\mu_g/\mu_f)^{0.19}(1-\mu_g/\mu_f)^{0.7} Fr_{tp}^{-0.045}$ $We_{tp}^{-0.035}$ $Fr_{tp} = G^2/(gD_h\rho_H^2),\ We_{tp} = G^2 D_h/(\sigma\rho_H),$ $\rho_H = [x/\rho_g + (1-x)/\rho_f]^{-1}$
Muller-Steinhagen and Heck[8]	$(dP/dz)_F = \{(dP/dz)_{fo} + 2[(dP/dz)_{go} - (dP/dz)_{fo}]x\}$ $(1-x)^{1/3} + (dP/dz)_{go} x^3$
Wang et al.[9]	For $G \geq 200$ kg/m2s, $(dP/dz)_F = (dP/dz)_g \phi_g^2$, $\phi_g^2 = 1 + 9.4X^{0.62} + 0.564X^{2.45}$ For $G < 200$ kg/m2s, $(dP/dz)_F = (dP/dz)_f \phi_f^2$, $\phi_f^2 = 1 + C/X + 1/X^2$ $C = 4.566\times10^{-6} X^{0.128} Re_{fo}^{0.938} (\rho_g/\rho_f)^{2.15} (\mu_f/\mu_g)^{5.1}$
Mishima and Hibiki[10]	$(dP/dz)_F = (dP/dz)_f \phi_f^2,\ \phi_f^2 = 1 + C/X + 1/X^2$ For rectangular channels, $C = 21[1 - \exp(-0.319 D_h)],\ D_h$ [mm]
Lee and Lee[11]	$(dP/dz)_F = (dP/dz)_f \phi_f^2,\ \phi_f^2 = 1 + C/X + 1/X^2$ $C_{vv} = 6.833\times10^{-8} \lambda^{-1.317} \psi^{0.719} Re_{fo}^{0.557},$ $C_{tv} = 3.627 Re_{fo}^{0.174},\ C_{vt} = 6.185\times10^{-2} Re_{fo}^{0.726},$ $C_{tt} = 0.048 Re_{fo}^{0.451},\ \psi = \mu_f j_f/\sigma,\ \lambda = \mu_f^2/(\rho_f \sigma D_h)$
Li and Wu[12]	$(dP/dz)_F = (dP/dz)_f \phi_f^2,\ \phi_f^2 = 1 + C/X + 1/X^2,$ $Bl = g(\rho_f - \rho_g) D_h^2/\sigma$ For $Bl \leq 1.5,\ C = 11.9 Bl^{0.45}$ For $1.5 < Bl \leq 11,\ C = 109.4 (Bl\, Re_f^{0.5})^{-0.56}$ For $Bl > 11$, Beattie and Whalley(13) correlation is recommended.
Kim and Mudawar[14]	$(dP/dz)_F = (dP/dz)_f \phi_f^2,\ \phi_f^2 = 1 + C/X + 1/X^2,$ $C_{vv} = 3.5\times10^{-5} Re_{fo}^{0.44} Su_{go}^{0.50} (\rho_f/\rho_g)^{0.48},$ $C_{tv} = 8.7\times10^{-4} Re_{fo}^{0.17} Su_{go}^{0.50} (\rho_f/\rho_g)^{0.14},$ $C_{vt} = 0.0015 Re_{fo}^{0.59} Su_{go}^{0.19} (\rho_f/\rho_g)^{0.36},$ $C_{tt} = 0.39 Re_{fo}^{0.03} Su_{go}^{0.10} (\rho_f/\rho_g)^{0.35},\ Su_{go} = \rho_g \sigma D_h/\mu_g^2$

$$(dP/dz)_F = (dP/dz)_f \phi_f^2 = (dP/dz)_g \phi_g^2 \quad (2)$$

이때 z는 유동의 방향에 따른 좌표를 나타내며, 하첨자 f와 g는 각각 액체와 기체를 의미한다. f, G, v, x를 각각 Fanning의 마찰계수, 질량유속, 비체적, 건도라고 하였을 때, 각 상의 마찰압력구배는 다음의 식 (3), (4)와 같이 정의된다.

$$-(dP/dz)_f = 2 f_f v_f G^2 (1-x)^2 / D_h \quad (3)$$

$$-(dP/dz)_g = 2 f_g v_g G^2 x^2 / D_h \quad (4)$$

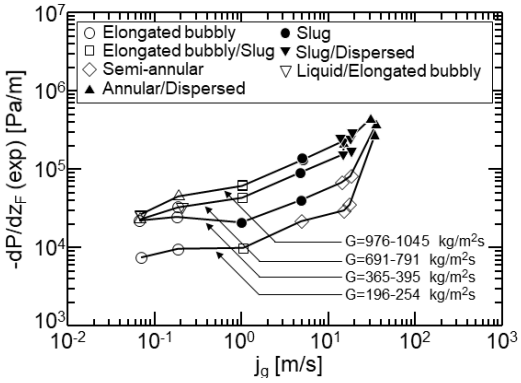

Fig. 3 Result of frictional pressure gradient measured in present study and observed flow patterns

ϕ는 이상유동계수이며 Lockhart-Martinelli 파라미터, X, 로 계산된다. X의 정의는 식 (5)와 같다.

$$X^2 = (dP/dz)_f / (dP/dz)_g \tag{5}$$

Table 1은 본 연구에서 마찰압력구배의 비교를 위해 사용된 기존의 상관식들을 정리한 표이다. ρ, μ, σ, j는 각각 밀도, 점성, 표면장력, 겉보기 속도를 나타낸다. 하첨자 t와 v는 각 상의 난류와 층류를 의미하며 하첨자 fo, go, tp는 각각 액상만 존재하는 경우, 기상만 존재하는 경우, 액상과 기상이 모두 존재하는 경우를 의미한다. 나열된 모든 식들이 Lockhart-Martinelli의 분리유동모델(Separated Flow Model)을 기반으로 수정되어 각 저자에 의해 제안되었으며, 처음 4개의 식은 매크로 채널 내 이상유동의 마찰압력구배를 예측하는 식이고 나머지 4개의 식은 미니/마이크로 채널 내이상유동의 마찰압력구배를 예측하는 식이다.

Fig. 3은 측정된 마찰압력구배를 기체겉보기 속도에 따라 나타낸 것으로 질량유속(Mass velocity) 범위를 함께 표기하였다. 모든 질량유속에서 기체 겉보기 속도가 증가함에 따라 마찰압력구배가 증가하는 경향을 보였으며, 기체 겉보기 속도에 따라 다른 유동양식이 관찰되었다. 기체겉보기 속도 1 m/s 이하의 구간에서는 긴 기포유동과 액체/긴 기포유동이 주로 관찰되었는데, 이는 유체의 관성이 작아 표면장력의 영향이 상대적으로 크게 작용하였기 때문인 것으로 보인다. 반면 기체겉보기 속도가 10 m/s 보다 큰 구간에서는 반환형유동, 슬러그/분산기포유동, 환형/분산기포유동이 관찰되었으며, 상대적으로 큰 작동유체의 관성력에 의해 경계면의 전단응력이 증가하여 큰 마찰압력강하를 보인 것으로 판단된다.

Fig. 4는 본 연구의 실험에서 측정된 마찰압력구배를 매크로채널의 마찰압력구배 상관식이 예측한 값과 비교하여 유동양식에 따라 나타낸 그래프이다. 4개의 상관식들 중 Muller-Steinhagen과 Heck[8]의 상관식은 평균절대오차가 40.89%로 가장 낮은 반면, Friedel[7]의 상관식은 평균절대

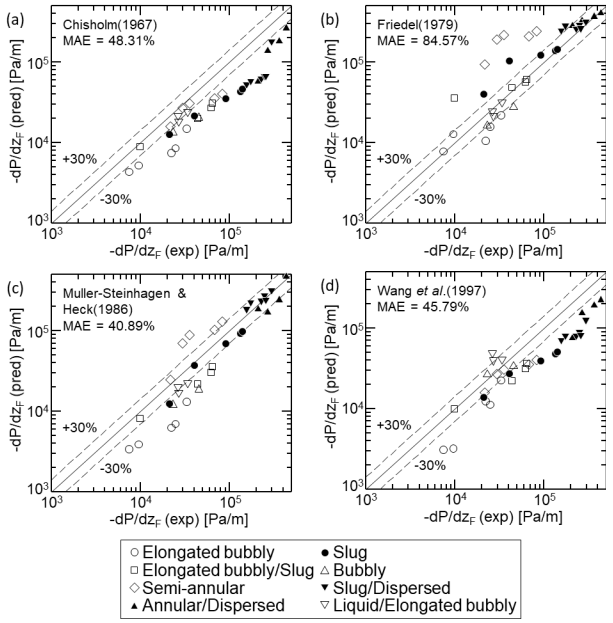

Fig. 4 Comparison of measured fictional pressure gradient with correlations for macro-channels: (a) Chisholm[5], (b) Friede[7], (c) Muller-Steinhagen and Heck[8], and (d) Wang *et al.*[9]

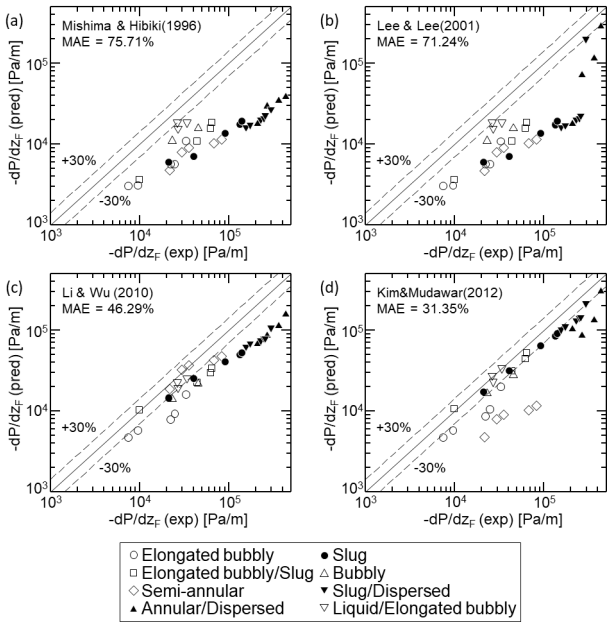

Fig. 5 Comparison of measured fictional pressure gradient with correlations for mini/micro-channels: (a) Mishima and Hibiki[10], (b) Lee and Lee[11], (c) Li and Wu[12], and (d) Kim and Mudawar[14].

오차가 84.57%로 가장 높게 나타났다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(d)에서 슬러그/분산기포유동과 환형/분산기포유동일 때 상관식의 예측값이 실험값과 큰 오차를 보였다. 반면 Fig. 4(b)에서는 반환형유동일 때 상관식의 예측값과 실험값이 큰 오차를 보였고, Fig. 4(c)에서는 긴 기포유동 일 때 상관식의 예측값과 실험값이 비교적 큰 오차를 보였다.

Fig. 5는 본 연구의 실험에서 측정된 마찰압력구배와 미

니/마이크로채널의 마찰압력구배에 대한 상관식의 예측값을 비교하여 유동양식에 따라 나타낸 그래프이다. Fig. 5(a), (b), (c)에서 슬러그/분산기포유동과 환형/분산기포유동이 나타날 때 예측값과 실험값이 큰 오차를 갖는 반면 액체/긴 기포유동의 마찰압력강하는 비교적 잘 예측하고 있음이 확인되었다. Fig. 5(d)에서 Kim과 Mudawar[14] 상관식의 예측값은 실험값 대비 31.35%의 평균절대오차를 보였으며, 비교한 8개의 상관식 중 가장 좋은 예측성능을 보였다. Kim과 Mudawar의 상관식을 제외한 매크로 채널과 미니/마이크로 채널 내 이상유동의 마찰압력에 관한 상관식들의 평균절대오차는 모두 40% 이상이었는데, 이는 각 상관식의 개발에 사용한 데이터의 범위가 본 연구에서 측정한 데이터의 범위와 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 한편, Kim과 Mudawar[14]의 상관식은 가장 넓은 범위의 데이터를 반영하여 만들어진 예측식이기 때문에 가장 낮은 평균절대오차를 보인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 폭 1 mm, 높이 2 mm인 직사각 수평관을 지나는 물-공기 혼합물의 유동양식과 마찰압력구배를 실험을 통해 관찰 및 측정하였다. 관찰된 대표 유동양식은 6가지로 긴기포유동, 슬러그유동, 반환형유동, 환형유동, 슬러그/분산기포유동, 환형/분산기포유동이며, 질량유량과 기체겉보기속도에 따라 나타나는 유동양식이 달라짐을 확인하였다. 또한, 본 연구에서 측정한 미니 채널 내 마찰압력구배를 기존에 발표된 상관식들의 예측값과 비교하였다. 비교에 사용된 8개의 상관식들의 예측정확도가 유동양식에 영향을 받음을 확인하였으며, Kim과 Mudawar[14]의 마찰압력구배 상관식이 본 연구에서 측정한 마찰압력구배를 가장 잘 예측하고 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2015R1C1A1A01055439).

References

(1) Mudawar, I., 2001, “Assessment of High-Heat-Flux Thermal Management Schemes,” IEEE Transactions on Component and Packaging Technologies, Vol. 24, No. 2, pp. 122~141.

(2) Mudawar, I., 2013, “Recent Advances in High-Flux, Two-Phase Thermal Management,” Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol. 5, No. 2, pp. 021012.

(3) Bowers, M. B. and Mudawar, I., 1994, “High Flux Boiling in Low Flow Rate, Low Pressure Drop Mini-Channel and Micro-Channel Heat Sinks,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 37, No. 2, pp. 321~332.

(4) Kim, S. M. and Mudawar, I., 2014, “Review of Database and Predictive Methods for Pressure Drop in Adiabatic, Condensing and Boiling Mini/Micro-Channel Flow,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 77, pp. 74~97.

(5) Chisholm, D., 1967, “A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two-Phase Flow,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 10, No. 12, pp. 1767~1778.

(6) 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, No. 1, pp. 39~48.

(7) Friedel, L., 1979, “Improved Friction Pressure Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two-Phase Pipe Flow,” European Two-Phase Group Meeting, Paper E, Vol. 2, pp. 1979.

(8) Muller-Steinhagen, H. and Heck, K., 1986, “A Simple Friction Pressure Drop Correlation for Two-Phase Flow in Pipes,” Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 20, No. 6, pp. 297~308.

(9) Wang, C. C., Chiang, C. S., and Lu, D. C., 1997, “Visual Observation of Two-Phase Flow Pattern of R-22, R-134a, and R-407C in a 6.5-mm Smooth Tube,” Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 15, No. 4, pp. 395~405.

(10) Mishima, K. and Hibiki, T., 1996, “Some Characteristics of Air-Water Two-Phase Flow in Small Diameter Vertical Tubes,” International Journal of Multiphase Flow, Vol. 22, No. 4, pp. 703~712.

(11) Lee, H. J. and Lee, S. Y., 2001, “Pressure Drop Correlations for Two-Phase Flow within Horizontal Rectangular Channels with Small Heights,” International Journal of Multiphase Flow, Vol. 27, No. 5, pp. 783~796.

(12) Li, W. and Wu, Z., 2011, “A General Correlation for Adiabatic Two-phase Pressure Drop in Micro/mini-channels,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, No. 13-14, pp. 2732~2739.

(13) Beattie, D. R. H. and Whalley, P.B., 1982, “A Simple Two-phase Frictional Pressure Drop Calculation Method,” International Journal of Multiphase Flow, Vol. 8, No. 1, pp. 83~87.

(14) Kim, S. M. and Mudawar, I., 2012, “Universal Approach

to Predicting Two-Phase Frictional Pressure Drop for Adiabatic and Condensing Mini/Micro-Channel Flows," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, No. 11, pp. 3246~3261.

(15) Ullmann, A. and Brauner, N., 2007, "The Prediction of Flow Pattern Maps in Minichannels," Multiphase Science and Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 49~73.