

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.1.9

사각 마이크로채널 내의 2 상 유동 압력강하 상관식의 검증 및 개발

최치웅*† · 유동인* · 김무환*

* 포항공과대학교 기계공학과

Development of New Correlation and Assessment of Correlations for Two-Phase Pressure Drop in Rectangular Microchannels

Chi-woong Choi*†, Dong In Yu* and Moo Hwan Kim*

* POSTECH(Pohang University of Science and Technology)

(Received August 26, 2009 ; Revised December 2, 2009 ; Accepted December 2, 2009)

Key Words : Microchannel(마이크로채널), Pressure Drop(압력강하), Homogenous Flow(균질 유동), Separated Flow(분리 유동), Correlation(상관식)

초록: 2 상 유동 압력강하에 대한 모델은 균질유동모델과 분리유동모델 두 가지가 있다. 많은 선행 연구자들은 마이크로채널에서의 2 상 유동 압력강하에 대한 상관식을 제시하였고, 대부분은 분리유동모델에 해당하는 Lockhart-Martinelli⁽²⁷⁾의 수정된 상관식에 기초하고 있다. 본 연구에서는 사각 마이크로채널에서의 압력강하에 대한 연구를 위해서 액상의 물과 기상의 질소를 사용하여 사각 마이크로채널에서의 실험을 수행하였다. 2 상 마찰 압력강하는 2 상 유동양식에 큰 연관성을 가지고 있는 결과를 확인할 수 있었다. 6 가지의 2 상 점성 모델을 포함한 균질유동 모델 (Owen⁽²¹⁾'s, MacAdams⁽²²⁾'s, Cicchitti et al.⁽²³⁾'s, Dukler et al.⁽²⁴⁾, Beattie and Whalley,⁽²⁵⁾ Lin et al.⁽²⁶⁾)과 6 가지의 분리유동 모델 (Lockhart and Martinelli,⁽²⁷⁾ Chisholm,⁽³¹⁾ Zhang et al.,⁽¹⁵⁾ Lee and Lee,⁽⁵⁾ Moriyama and Inue,⁽⁴⁾ Qu and Mudawar⁽⁸⁾)에 대한 평가를 실험결과와 비교를 통해 수행하였다. 가장 우수한 2 상 점성 모델은 Beattie and Whalley 의 모델이었고, 가장 우수한 분리유동 모델은 Qu and Mudawar 의 상관식이였다. 균질유동모델과 분리유동모델 모두에 대해서 2 상 유동양식에 종속성을 나타내었다. 그러므로, 본 연구에서는 2 상 유동 양식에 기초한 새로운 상관식을 균질유동모델과 분리유동모델에 대해 각각을 제시하였다.

Abstract: There are two kinds of models in two-phase pressured drop; homogeneous flow model and separated flow model. Many previous researchers have developed correlations for two-phase pressure drop in a microchannel. Most correlations were modified Lockhart and Martinelli's correlation, which was based on the separated flow model. In this study, experiments for adiabatic liquid water and nitrogen gas flow in rectangular microchannels were conducted to investigate two-phase pressure drop in the rectangular microchannels. Two-phase frictional pressure drop in the rectangular microchannels is highly related with flow regime. Homogeneous model with six two-phase viscosity models: Owen⁽²¹⁾'s, MacAdams⁽²²⁾'s, Cicchitti et al.⁽²³⁾'s, Dukler et al.⁽²⁴⁾'s, Beattie and Whalley⁽²⁵⁾'s, Lin et al.⁽²⁶⁾'s models and six separated flow models: Lockhart and Martinelli⁽²⁷⁾'s, Chisholm⁽³¹⁾'s, Zhang et al.⁽¹⁵⁾'s, Lee and Lee⁽⁵⁾'s, Moriyama and Inue⁽⁴⁾'s, Qu and Mudawar⁽⁸⁾'s models were assessed with our experimental data. The best two-phase viscosity model is Beattie and Whalley's model. The best separated flow model is Qu and Mudawar's correlation. Flow regime dependency in both homogeneous and separated flow models was observed. Therefore, new flow pattern based correlations for both homogeneous and separated flow models were individually proposed.

- 기호설명 -

AR : 종횡비
 D_h : 수력 직경 [m]
 f_{TP} : 2 상 마찰 계수
 G_L : 액체상의 질량 유속 [kg/m²s]

G_G : 기체상의 질량 유속 [kg/m²s]
 G : 2 상의 질량 유속 [kg/m²s]
 H_{ch} : 마이크로채널의 높이 [m]
 j : 전체 겉보기 속도 [m/s]
 j_L : 액체상의 겉보기 속도 [m/s]
 j_G : 기체상의 겉보기 속도 [m/s]
 MAE : 평균 절대 백분율 오차 [%]

* Corresponding Author, chiwoong@postech.ac.kr

- N_{Conf} : Confinement 수
- Re_{TP} : 2 상 레이놀즈 수
- Re_L : 액상 레이놀즈 수
- W_{ch} : 마이크로채널의 폭 [m]
- x : 건도
- X_{vv} : Martinelli 변수
- Y : Chisholm Y 변수
- ΔP_{exp} : 측정된 압력강하 [Pa]
- ΔP_{pred} : 예측한 압력강하 [Pa]
- Δz : 유동 방향의 거리 [m]
- α : 기공률
- β : 부피적 건도
- σ : 표면장력 계수 [N/m]
- μ_L : 점성 계수 [kg/ms]
- μ_{TP} : 2 상 점성 계수 [kg/ms]
- ρ_L : 액상 밀도 [kg/m³]
- ρ_{TP} : 2 상 액상 밀도 [kg/m³]
- ϕ_L : 액상 압력강하 보정 계수
- ϕ_{LO} : 2 상 압력강하 보정 계수

1. 서론

마이크로채널 내의 2 상 유동에 관한 연구는 고 열유속의 발열에 대한 히트싱크나 PEM 연료전지 내의 물 관리 그리고, 다양한 마이크로칩과 관련된 응용분야의 필요에 의해 광범위하게 연구가 되어 왔다.⁽¹⁻³⁾ 그 중에서도 압력강하에 대한 연구는 마이크로채널을 기본 구조로 하는 열수력 시스템에서 기초적인 디자인 변수에 해당하므로, 많은 연구가 진행되었고, 이에 따라 압력강하에 대한 상관식들이 다양하게 제시되었지만,⁽⁴⁻¹⁶⁾ 여전히 상관식 간에 차이를 나타내고 있다. 마이크로채널의 제작의 문제나 연구의 관점에 따라 다양한 마이크로채널이 사용되어왔다는 점, 작은 크기로 인해 상대적인 불확실성이 크다는 점에 그 원인이 있었다.⁽¹⁷⁾

기존에 연구에 사용되어온 많은 마이크로채널은 크게 두 가지로 분류해 볼 수 있다. 첫 번째는 압출 성형으로 제작된 원형 마이크로채널로 주 재료는 테프론이나 유리이다. 이런 채널은 주로 유동 가시화를 위해서 사용되었다. 그러나, 이러한 채널의 경우 채널 형상이나 크기의 불균일성이 문제가 되고 있다. 두 번째는 다중 사각 마이크로채널이다. 이것은 응용분야에 기초하여 헤더를 가지는 여러 개의 마이크로채널을 사용하는 경우이다. 일반적으로 MEMS (Micro-electro mechanical system) 제작 기술을 사용하는 경우 대부분이 사각 마이크로채널을 사용하게 된다는 점에서 적절한 접근 방법이라 할 수 있으나, 여러 개의 채널로 인해 채널간의 불균일한 분배와 채널간의 상호 영향이 존재하는 시스템적인 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 사각 마이크로채널의 가시화가 가능하도록 감광성유리를 사용하여 MEMS 제작

방법을 사용하여 시험부를 제작하였다. 액체의 물과 기체의 질소를 사용하여 사각 마이크로채널 내의 2 상 유동 실험을 수행하였다. 채널 내의 압력강하를 압력 포트를 통해 직접 측정하였다. 사각 마이크로채널에서의 2 상 유동 압력강하를 기존의 균질 유동 모델과 분리 유동 모델의 상관식들과 비교하였다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 시험부

제작 공정에 대한 자세한 사항은 선행 연구⁽¹⁸⁾에 자세히 기술하였다. 단, 본 연구에 사용된 마이크로 채널은 바닥에 전극이 없기 때문에, 감광유리로 바닥면을 접합하여 채널을 구성하였다. 마이크로채널 폭은 대략 500 μm 를 유지하면서 높이를 CMP (Chemical Mechanical polishing) 공정을 사용하여 조절함으로써 다른 종횡비의 사각 마이크로채널을 제작하였다. Fig. 1 은 사각 마이크로채널의 시험부의 마스크(Mask) 이미지이다. 두 개의 입구부를 통해 액상의 물과 기상의 질소를 주입할 수 있도록 하였고, T-junction 형태의 Mixer 부를 통해 2 상 유동을 형성하였다. 채널 내에 3 개의 압력

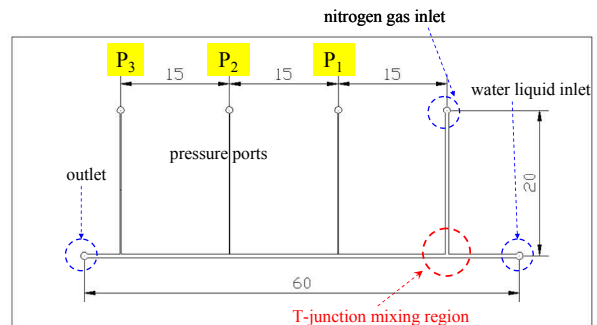


Fig. 1 Test section (top view).

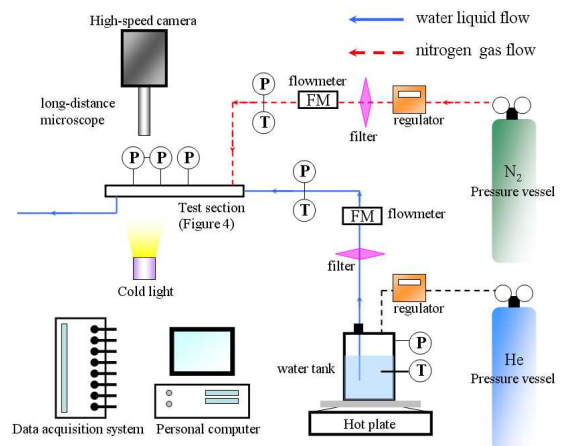


Fig. 2 Experimental apparatus

포트를 제작하여, 사각 마이크로채널 내에서 압력을 직접 측정할 수 있도록 하였다. 사각 마이크로채널의 전체 길이는 60 mm 이고 압력 포트 간의 거리는 15 mm 이다.

2.2 실험 장치

Fig. 2 는 실험 루프 및 실험 장치들의 개략도이다. 물과 질소의 유량은 공압 펌프(pneumatic pump)에 기초하여 정공 레귤레이터(regulator)를 통해 조절 하였다. 공압 가스로는 물과 질소의 루프에 대해서 각각 헬륨 가스와 질소 가스를 사용하였다. 각 상의 유량은 다른 유량 영역의 유량계들(OMEGA-FLR1602A, FLR1603A, FMA1604A, FMA1619A)로 측정하였다. 오염을 방지하기 위하여, 0.5 μm 기공 크기를 가지는 필터(HyLok-F1SE)를 각 상의 루프의 입구에 설치하였다. 압력 포트를 통해 차압계 및 압력계(Druck-LPM900 과 Setra-230, 270)를 사용하여 압력을 측정하였다. 본 실험을 실행하기 전에, 압력 챔버 내의 물을 섞어 주면서 가열하여 물 내부의 용존 가스를 제거하였다. 그리고 전체 연결 튜브들 사이에 존재하는 용존 가스를 제거하기 위해서 약 30 분 가량 물을 빼내었다. 모든 측정기의 데이터는 데이터 획득 장치(Agilent 34970A)를 통해서 2 초마다 PC 에 저장하였다. 또한, 고속 카메라(Redlake MotionXtra HG-100K)와 원거리 현미경(Infinity InFocus™ Model KC) 을 사용하여 마이크로채널 내의 2 상 유동을 가시화 하였다.

2.3 실험 조건

물과 질소의 유량을 Table 1 에 표시한 범위에서 조절을 하였다. 즉, 사각 마이크로채널 전체의 면적을 기준으로 물의 겉보기 속도 (j_L)를 0.06 – 1.0 m/s, 질소의 겉보기 속도 (j_G)를 0.06 – 72 m/s 의 영역에서 실험을 수행하였다. 물의 유량을 일정하게 한 상태에서 질소의 유량을 증가시키면서 실험 조건을 변경하였다. 물칭치는 www.matweb.com 에서 제시된 자료를 사용하였다. Table 2 에 본 실험의 불확실성에 대해서 정리하였다.

3. 2 상 유동 양식

같은 j_L 에서 j_G 가 증가함에 따라 기포의 크기는 커졌다. 또한 j_L 이 작아 짐에 따라 역시 기포의 크기는 커지는 것을 확인할 수 있었다. 다시 말해서, 기포는 기포(bubbly)류에서 늘어진 기포(elongated bubble)류까지 발달하였다. 특정한 j_G 이 상에서는 늘어진 기포가 합쳐지기 시작하면서 액상의 덩어리를 만드는 부위가 생기는데, 이러한 유동 패턴은 이전 연구자들에서 의해서도 관찰이 되었다.^(6,10,12,19) 본 연구에서는 이러한 유동 패턴을

Table 1 Experimental conditions

Variables	Ranges
Diameters of Microchannels, D_h ($W_{ch} \times H_{ch}$) [μm]	490 (510×470) 322 (501×237) 143 (503×83)
Liquid mass flux, G [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]	66 – 1000
Vapor mass flux, G [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]	0.075 – 80
Liquid Reynolds number, Re_L	32 – 477
Gas Reynolds number, Re_G	2 – 2134
Liquid superficial velocity, j_L [m/s]	0.06 – 1
Gas superficial velocity, j_G [m/s]	0.06 – 72

Table 2 Experimental uncertainties

variables	uncertainty
Diameter [μm]	± 17 (4.5 %)
Area [μm^2]	± 6311 (3.8 %)
Pressure [kPa]	$\pm 0.01, \pm 0.005,$ $\pm 0.034, \pm 0.085$
Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	$\pm 0.1 - 0.5$
Mass flux, G [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]	$\pm 0.1 - 2 \%$
Friction factor	$\pm 9 \%$
Superficial velocities [m/s]	$\pm 10 \%$

액상 고리(liquid ring)류로 정의하였다. 또한, 늘어난 기포류와 액상 고리류 사이에 과도기 영역을 확인하였고, 이 영역에서는 늘어난 기포류와 액상 고리류가 순차적으로 반복되는 현상을 확인하였다. 본 연구에서는 이러한 유동패턴을 복합(multiple flow)로 정의하였다. 결과적으로, 본 연구에서 관찰된 2 상 유동의 양식을 다음과 같이 분류하였다 (Fig. 3).

- (a) 기포류: 기포류에서부터 늘어진 기포류까지 기포가 존재하는 유동 패턴.
- (b) 액상 고리류: 기포가 합쳐지면서 액상의 띠를 만드는 유동 패턴.
- (c) 복합류: 늘어진 기포류에서부터 액상 고리류까지 반복적으로 나타나는 천이 영역의 유동 패턴.

4. 2 상 유동 압력강하

4.1 압력강하

기존의 마이크로채널 내의 압력강하 측정은 마이크로채널의 공간적인 제약으로 인해 채널 외부에서 측정하여 마이크로채널에서의 압력강하만을 추출해내는 방법 사용하여왔다. 그러나 이러한 방법에는 추가적인 불확실도가 존재하기 때문에 적절한 방법이라 할 수 없다. 그러나 본 연구에서는 MEMS 제작에 기초하여 마이크로채널 내에 압력 포트를 제작하여 직접 압력을 측정하였다. 또한, 단상 압력강하 실험을 수행하였고, 측정 결과를

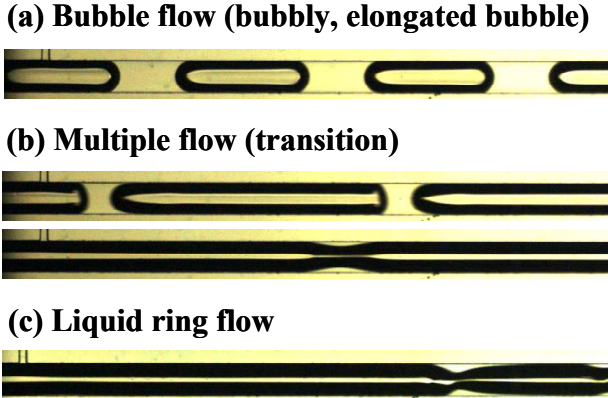


Fig. 3 Classification of flow regime in rectangular microchannel: (a) bubble flow, (b) multiple flow, (c) liquid ring flow

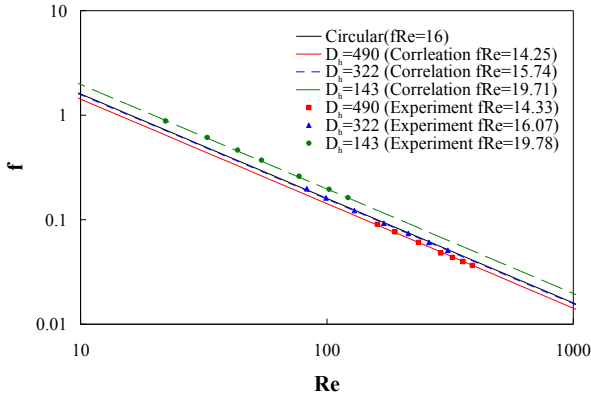


Fig. 4 Friction factor and Reynolds number for single phase water flow in rectangular microchannels

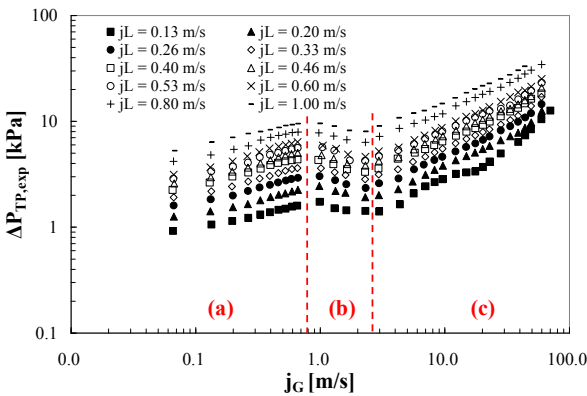


Fig. 5 Classification of flow regime in rectangular microchannel: (a) bubble flow, (b) multiple flow, (c) liquid ring flow

Fig. 4 에 나타내었다. 사각채널에서의 마찰계수에 대한 상관식을 잘 따르는 결과를 나타내었다.⁽²⁰⁾ 이를 통해 본 측정 방법에 대한 검증은 할 수 있었다. Fig. 5 는 수력 직경이 322 μm 인 사각 마이크로채널에서 측정된 2 상 유동 압력강하를 나타낸다.

j_L 과 j_G 가 증가함에 따라 2 상 압력강하는 증가하는 경향을 나타내었으며, 복합류 영역에서는 j_G 에 대해서 반대의 경향을 나타내었다. 다른 모든 수력 직경의 사각 마이크로채널에서도 유사한 결과를 나타내었다. 압력강하의 영역을 크게 3 개의 영역으로 구분할 수 있음을 알 수 있으며, 각 영역은 유동 패턴의 구분과 정확히 일치하는 것을 확인하였다. 이로부터 압력강하의 경향은 유동 패턴과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

4.2 균질 유동 모델 (Homogeneous flow model)

2 상 유동의 압력강하 모델은 크게 두가지로 구분할 수 있다. 첫번째는 균질 유동(homogeneous flow, HFM)모델로, 2 상 유동이 균질하게 분포되어 있다고 가정하여, 2 상 유동을 2 상의 평균 물성치를 가지는 단상과 같이 간주하는 것이다. 그러므로, 균질 유동 모델에서 압력강하는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{TP} = \frac{2f_{TP}G^2}{\rho_{TP}D_h} \quad (1)$$

여기서, f_{TP} 와 ρ_{TP} 는 각각 2 상 유동 마찰 계수와 밀도이다. G 는 질량 유속이고, D_h 는 수력 직경이다. 2 상의 밀도는 식 (2)를 사용하여 계산할 수 있다.

$$\rho_{TP} = \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L}\right)^{-1} \quad (2)$$

ρ_L 와 ρ_G 는 각각 액상과 기상의 밀도이고, x 는 건도이다. 식 (1)에서의 마찰 계수는 단상에서의 식 (3)을 사용하여 정의하고, 2 상 레이놀즈수(Re_{TP})의 함수가 된다. 그리고 2 상 레이놀즈수는 식 (4)와 같이 질량유속(G), 수력 직경(D_h)과 2 상 점성계수(μ_{TP})로 정의된다.

$$f_{TP} = m \text{Re}_{TP}^{-n} \quad (3)$$

$$\text{Re}_{TP} = \frac{GD_h}{\mu_{TP}} \quad (4)$$

원형관에서 층류의 경우, 계수 m 은 16 이고, n 은 1 이다. 그러나, 사각관의 경우는 m 은 종횡비(AR)

의 함수가 된다. Fig. 4 의 결과에서 알 수 있듯이, 사각채널 내의 단상 압력강하는 Shih 의 상관식⁽²⁰⁾ 과 잘 일치함을 알 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 m 은 Shih 의 상관식, 식 (5)를 사용하여 구하였다.

$$m = 24 \left(\begin{aligned} &1 - 1.3553AR + 1.9467AR^2 \\ &- 1.7012AR^3 + 0.9564AR^4 - 0.2537AR^5 \end{aligned} \right) \quad (5)$$

2 상 점성계수에 대한 모델은 다양하게 제시 되어왔다. 그러므로, 본 연구에서는 6 가지: Owen,⁽²¹⁾ MacAdams,⁽²²⁾ Cicchitti et al.,⁽²³⁾ Dukler et al.,⁽²⁴⁾ Beattie and Whalley,⁽²⁵⁾ Lin et al.⁽²⁶⁾의 2 상 점성 계수를 균질 유동 모델로 검증하였다. 각 모델의 식을 Table 3 에 정리하였다. β 는 부피적 건도 (volumetric quality)로 겉보기 속도의 비율로 정의할 수 있다. 각 모델의 검증 기준으로 식 (6)을 사용하여 계산한 평균 절대 백분율 오차를 사용하였다.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum \left[\frac{|\Delta P_{TP,pred} - \Delta P_{TP,exp}|}{\Delta P_{TP,exp}} \times 100 \right] \quad (6)$$

Fig. 6 는 각 모델과 실험 결과를 비교한 것이다. 가장 잘 예측한 모델은 Beattie and Whalley 와 Dukler et al.의 모델로 각각 MAE 값을 22.72(%)와 51.76(%)를 나타내었다. Fig 7 은 수력 직경 322 μm 인 사각 마이크로채널에서 각 점성 모델에 대한 실험에서의 마찰계수 값과 2 상 레이놀즈수를 나타낸다. 또한 실선은 단상 층류 유동에 대한 결과이다. Beattie and Whalley 모델이 기존 균질 유동 모델과 가장 근사한 값을 나타내는 것을 알 수 있으며, Dukler et al.의 모델을 제외한 다른 모델들은 낮은 2 상 레이놀즈 수를 나타냄을 알 수 있다. Fig.

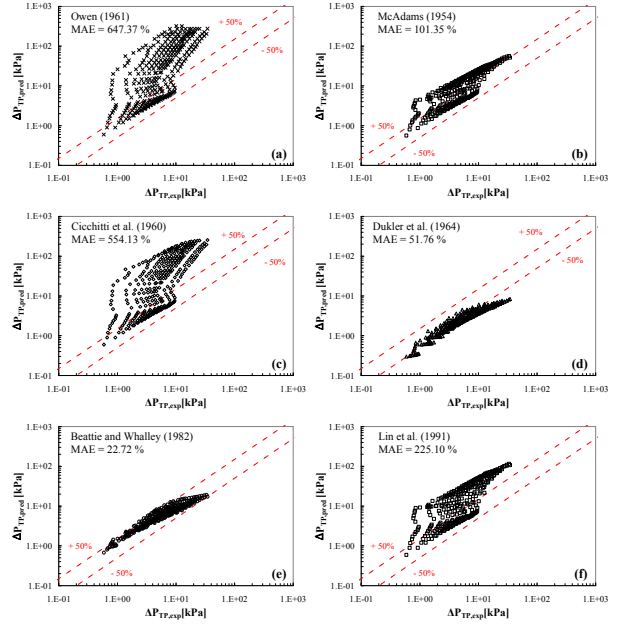


Fig. 6 Comparison of homogeneous flow model with six two-phase viscosity models: (a) Owen,⁽²¹⁾ (b) McAdams,⁽²²⁾ (c) Cicchitti et al.,⁽²³⁾ (d) Dukler et al.,⁽²⁴⁾ (e) Beattie and Whalley⁽²⁵⁾, (f) Lin et al.⁽²⁶⁾

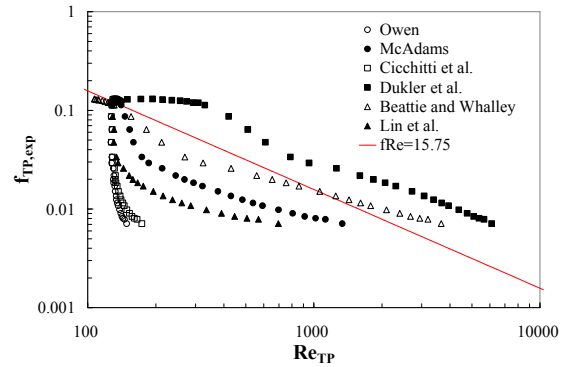


Fig. 7 Experimental two-phase friction factor and Reynolds number based on two-phase viscosity models

Table 3 Two-phase viscosity models

Authors (Ref.)	Two-phase viscosity model
Owen ⁽²⁰⁾	$\mu_{TP} = \mu_L$
McAdams ⁽²¹⁾	$\mu_{TP} = \left(\frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L} \right)^{-1}$
Cicchitti et al. ⁽²²⁾	$\mu_{TP} = x\mu_G + (1-x)\mu_L$
Dukler et al. ⁽²³⁾	$\mu_{TP} = \beta\mu_G + (1-\beta)\mu_L$
Beattie and Whalley ⁽²⁴⁾	$\mu_{TP} = \beta\mu_G + (1-\beta)(1+2.5\beta)\mu_L$
Lin et al. ⁽²⁵⁾	$\mu_{TP} = \frac{\mu_G\mu_L}{\mu_G + x^{1.4}(\mu_L - \mu_G)}$

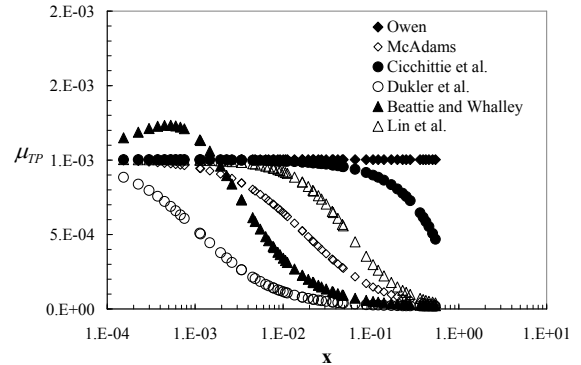


Fig. 8 Two-phase viscosity and quality for six two-phase viscosity models

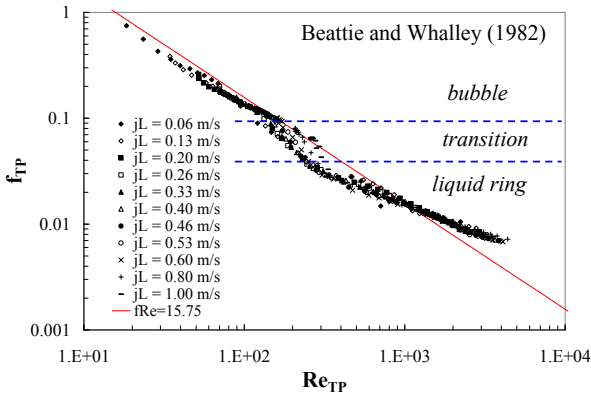


Fig. 9 Two-phase friction factor and Reynolds number for Beattie and Whalley's model

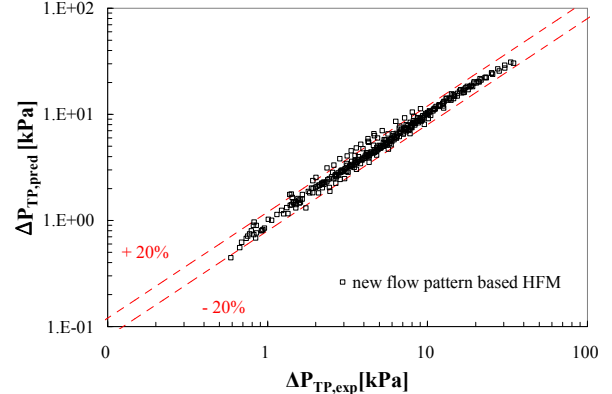


Fig. 11 Comparison of new correlation based on homogeneous flow model with Beattie and Whalley's two-phase viscosity model

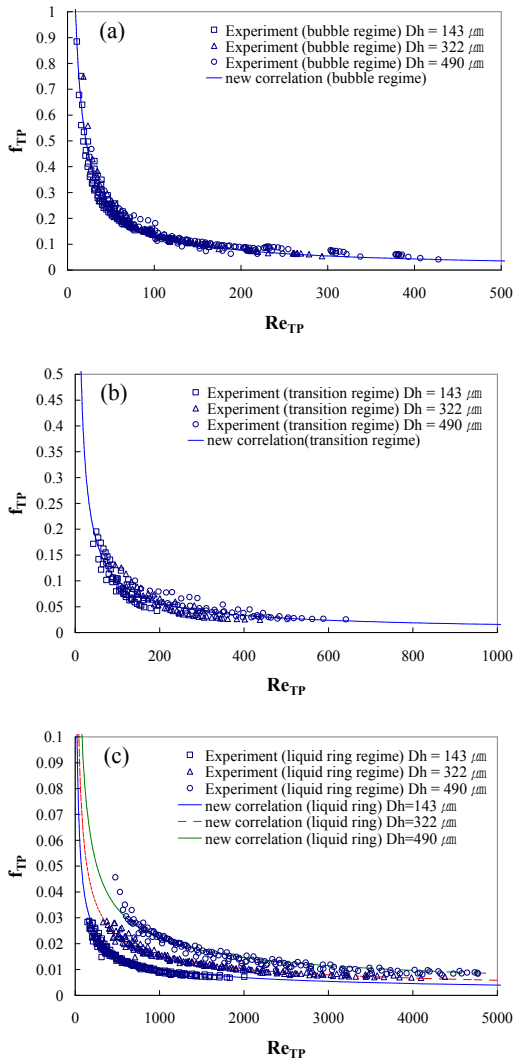


Fig. 10 Two-phase friction factor and Reynolds number for different diameters: (a) bubble flow, (b) multiple flow(transition), (c) liquid ring flow

8 은 각 모델의 점성계수값을 건도에 대해 나타낸 것이다. Fig. 8 에 나타낸 것처럼 Beattie and Whalley 와 Dukler et al.의 모델을 제외하고는 높은 점성계수를 나타낸다. 식 (4)에서 알 수 있듯이, 높은 점성계수가 2 상 레이놀즈수를 낮게 예측한 것을 알 수 있다. 또한, Beattie and Whalley 의 모델은 유동 패턴에 기초한 모델로 기포(bubble)류와 환상(annular)류에 대해 다른 점성계수를 나타낸다. 이는 유동 가시화 결과와 정성적으로 일치하는 것이라 할 수 있다.

Fig. 9 는 Beattie and Whalley 의 모델에 대한 마찰계수와 2 상 레이놀즈 수를 나타낸다. 유동 패턴과 일치하는 경향을 나타냄을 알 수 있으며, 유동 패턴에 따라서 식 (3)의 지수, n 이 다름을 알 수 있다. 이는 기존의 균질 유동 모델에서 층류와 난류에 따라 지수 n 이 달라지는 것처럼 2 상 유동에 대해서 유동패턴에 따라 다른 지수를 적용해야 함을 나타내는 결과라 할 수 있다. Fig. 10 은 유동 패턴에 따라 다른 수력 직경의 사각 마이크로채널에 대한 마찰계수와 2 상 레이놀즈 수를 나타낸 결과이다. Beattie and Whalley 의 모델을 사용한 새로운 상관식을 식 (7)-(11)에 나타내었다. 수력 직경에 대한 영향은 기포류나 복합류에서는 나타나지 않았지만, 액상 고리류에서는 분명한 차이를 나타내었다. 수력 직경이 작아짐에 따라 높은 마찰계수 값을 나타내었다. 새로운 상관식에 대한 MAE 값은 $D_h = 490 \mu\text{m}$, $322 \mu\text{m}$, $143 \mu\text{m}$ 에 대해 각각 10.37(%), 6.58(%), 11.47(%)를 나타내었고, Fig.11 에 것처럼 전체적인 오차가 20% 미만으로 향상되었다.

• Bubble regime: $f_{TP} = 6.51 Re_{TP}^{-0.838}$ (7)

• Transition regime: $f_{TP} = 4.17 \text{Re}_{TP}^{-0.807}$ (8)

• Liquid ring regime:

$D_h = 490 \mu\text{m}$ $f_{TP} = 1.40 \text{Re}_{TP}^{-0.6}$ (9)

$D_h = 322 \mu\text{m}$ $f_{TP} = 0.97 \text{Re}_{TP}^{-0.6}$ (10)

$D_h = 143 \mu\text{m}$ $f_{TP} = 0.60 \text{Re}_{TP}^{-0.6}$ (11)

4.3 분리 유동 모델 (Separated flow model)

분리 유동 모델은 2 상 유동 압력강하 보정계수 (two-phase multiplier, ϕ)에 기초한다. 압력강하 보정 계수는 식 (12)와 같이 액상과 2 상의 압력강하의 비로 정의한다.

$$\phi_L^2 = \left(\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_{TP} / \left(\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_L \quad (12)$$

기준에 제시된 2 상 유동 압력강하 상관식 중에 가장 많은 비중을 차지하는 것이 Lockhart and Martinelli의 모델이다.⁽²⁷⁾ Lockhart and Martinelli는 식 (13)과 같이 보정계수를 Martinelli parameter, X의 함수로 제시하였다.

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X_{vv}} + \frac{1}{X_{vv}^2} \quad (13)$$

여기서, 계수 C는 각상의 유동이 층류 또는 난류에 따라 다른 값을 제시하고 있다(Table 4). 그리고 기존 마이크로채널에서 제시된 상관식들은 식 (13)의 계수 C를 모델링 하는 방법을 취하고 있다. 물리적으로 계수 C는 각 상의 상호작용에 의해 발생하는 압력강하 요소를 나타낸다.⁽²⁸⁾ Awad and Muzychka는 계수 C가 기존 마이크로채널에서의 상관식들에 기초해서 그 값이 0에서 5 사이의 값을 가진다는 것을 보고하였다.⁽²⁹⁾ 그 상위와 하위 경계로는 Lockhart and Martinelli의 액상 층류와 기상 층류에 대한 계수와 Ali et al.⁽³⁰⁾의 상관식을 제시하였다. 본 연구에서는 분리 유동 모델 중 6개의 상관식: Lockhart and Martinelli,⁽²⁷⁾ Chisholm,⁽³¹⁾ Zhang et al.,⁽¹⁵⁾ Lee and Lee,⁽⁵⁾ Moriyama and Inoue,⁽⁴⁾ Qu and Mudawar⁽⁸⁾을 비교 평가하였다. 각 상관식에 대해서 Table 4에 정리하였다.

Table 4 Correlations based on separated flow model

Author (ref.)	Two-phase multiplier, ϕ
Lockhart and Martinelli ⁽²⁷⁾	$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$ C=5 (laminar liquid-laminar vapor), C=10 (turbulent liquid-laminar vapor), C=12 (laminar liquid-turbulent vapor), C=20 (turbulent liquid-turbulent vapor)
Chisholm ⁽³¹⁾	$\phi_{LO}^2 = 1 + (Y^2 - 1) [Bx^{0.875}(1-x)^{0.875} + x^{1.75}]$ $Y^2 = \left(\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_{GO} / \left(\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_{LO}$ B is defined for different range of G and Y.
Zhang et al. ⁽¹⁵⁾	$\phi_{LO}^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$ $C = 21 \left(1 - e^{-0.358/N_{conf}} \right)$ 0.014 mm < D_h < 6.25 mm, They recommend the coefficient -0.358 was changed to -0.674 for adiabatic flow and -0.142 for diabatic flow.
Lee and Lee ⁽⁵⁾	$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$ $C = A \left(\frac{\mu_L^2}{\rho_L \sigma D_h} \right)^q \left(\frac{j\mu_L}{\sigma} \right)^r \left(\frac{\rho_L j D_h}{\mu_L} \right)^s$
Moriyama and Inoue ⁽⁴⁾	$\phi_L^2 = 1 + \frac{K}{X_{vv}^2}$ $K = 0.9 \text{Re}_L^{0.3} (\text{Re}_L > 1.3)$ $K = 1 (\text{Re}_L < 1.3)$
Qu and Mudawar ⁽⁸⁾	$\phi_{LO}^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$ $C = 21(1 - e^{-3.19 \times 10^7 D_h})(aG + b)$ $a = 0.00418$ $b = 0.0613$

Fig. 12는 각 상관식의 비교 결과이다. 가장 잘 예측한 상관식은 Qu and Mudawar와 Zhang et al.의 상관식으로 MAE 값이 각각 19.75(%)과 30.52(%)이었다. Qu and Mudawar의 상관식은 Mishima and Hibiki^(13,14)의 상관식에 질량유속의 영향을 고려한 상관식이다. Mishima and Hibiki는 C 값을 수력 직경의 함수로 제시하였고, 수력 직경이 감소함에 따라 C 값이 작아지는 경향을 나타낸다. 또한 Zhang et al.의 상관식은 Mishima and Hibiki의 상관식을 마이크로채널의 실험 결과들을 사용하여 확장한 것이다. Fig. 13은 수력직경에 따른 C 값의 경향을 나타낸다. Zhang et al.의 상관식이 낮은 C 값

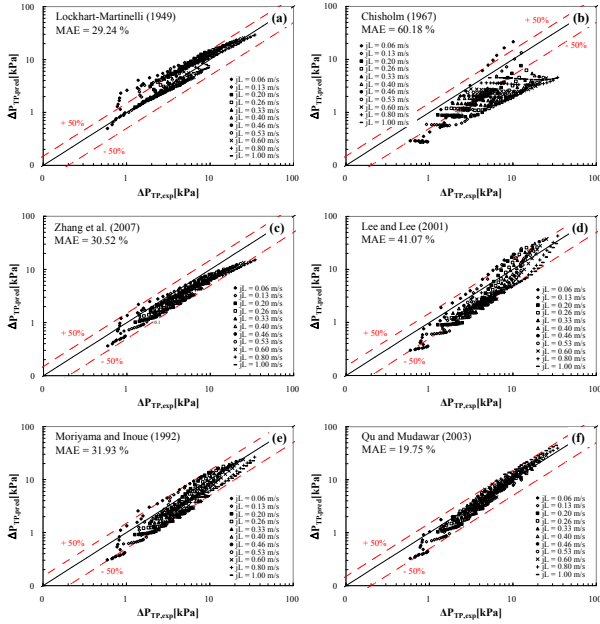


Fig. 12 Comparison of correlations based on separated flow model: (a) Lockhart and Martinelli,⁽²⁷⁾ (b) Chisholm,⁽³¹⁾ (c) Zhang et al.,⁽¹⁵⁾ (d) Lee and Lee,⁽⁵⁾ (e) Moriyama and Inoue,⁽⁴⁾ (f) Qu and Mudawar⁽⁸⁾

을 예측하였지만, Mishima and Hibiki의 결과와 같이 수력 직경이 작아짐에 따라 C 값이 작아지는 경향을 나타내었다. 이는 수력 직경이 작아짐에 따라 2 상의 상호 작용에 의한 압력강하가 작아지는 것을 의미한다. Fig. 14는 수력 직경이 322 μm 인 사각 마이크로 채널에서의 실험 조건에 따른 C 값을 나타낸 결과이다. 압력강하의 경향에서처럼 유동패턴에 따라 C 값이 다른 영역을 가짐을 알 수 있다. 기포류의 C 값이 액상 고리류에서의 것보다 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 또한, Qu and Mudawar의 상관식과 같이 질량유속에 비례한 경향을 확인하였다. 그러므로, 분리 유동 모델에 대해서도 유동 패턴에 기초한 수정된 Qu and Mudawar의 상관식을 식(14)-(18)과 같이 제시하였다.

$$\bullet \text{ Bubble flow: } C/C_{Zhang} = 0.0027G + 2.767 \quad (14)$$

$$\bullet \text{ Multiple flow: } C/C_{Zhang} = 0.0027G + 1.199 \quad (15)$$

$$\bullet \text{ Liquid ring flow: } \\ D_h = 490 \mu\text{m: } C/C_{Zhang} = 0.0042G + 1.3509 \quad (16)$$

$$D_h = 322 \mu\text{m: } C/C_{Zhang} = 0.0027G + 0.8075 \quad (17)$$

$$D_h = 143 \mu\text{m: } C/C_{Zhang} = 0.0014G + 0.3664 \quad (18)$$

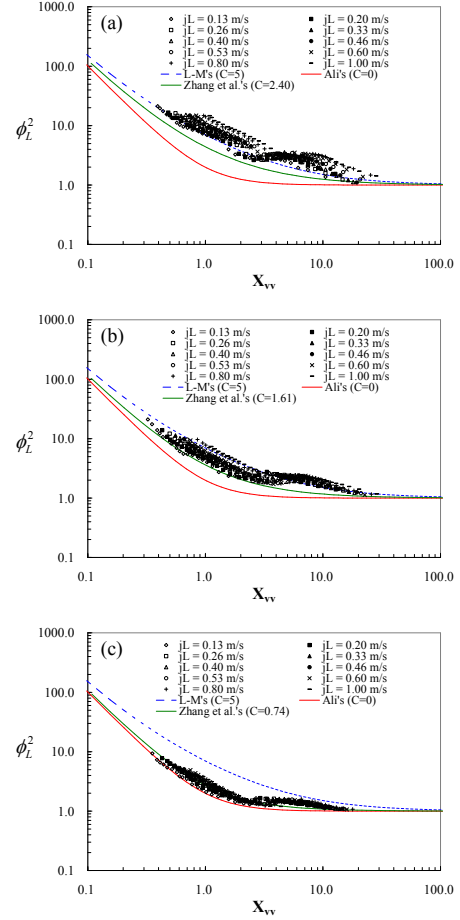


Fig. 13 Two-phase multiplier and Martinelli parameter for different hydraulic diameters: (a) $D_h = 490 \mu\text{m}$, (b) $D_h = 322 \mu\text{m}$, (c) $D_h = 143 \mu\text{m}$

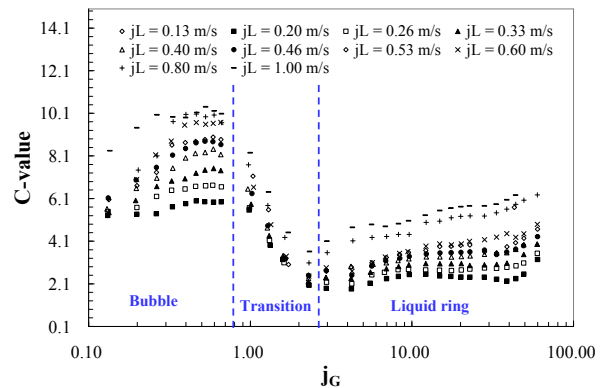


Fig. 14 C-value in rectangular microchannel with $D_h = 322 \mu\text{m}$ for different flow condition

본 연구에서는 Qu and Mudawar의 상관식과 달리 Zhang et al.의 C 값을 사용하였다. 균질 유동 모델에서와 같이 액상 고리류에서는 수력 직경에 종속성을 확인하였고, 수력 직경이 작아짐에 따라 C 값이 작아지는 경향을 나타내었다. 새롭게 제시된

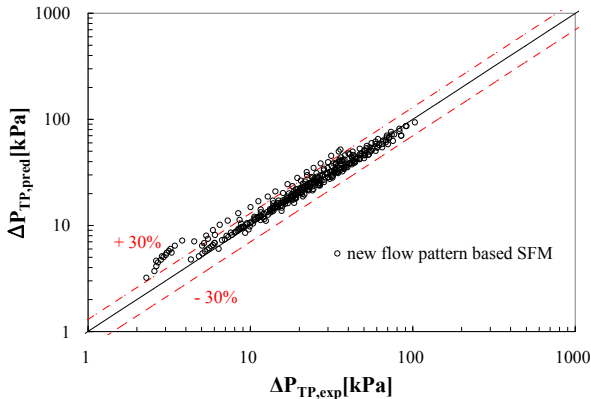


Fig. 15 Comparison with new flow pattern based correlation based on separated flow model.

상관식의 MAE 값은 수력 직경 $D_h = 490 \mu\text{m}$, $D_h = 322 \mu\text{m}$, $D_h = 143 \mu\text{m}$ 에 대해서 각각 13.33(%), 23.12(%), 20.84(%의 값을 나타내었고, Fig. 15 에 비교 결과를 나타내었다.

5. 결론

사각 마이크로채널 내의 2 상 압력강하를 보다 정확히 측정하고, 동시에 유동 패턴을 관찰하기 위해서, 감광 유리로 제작된 다른 수력 직경의 사각 마이크로채널을 제작하였다. 액체 물과 질소 기체를 사용하여 단일 상태에서의 사각 마이크로채널 내의 2 상 유동의 실험을 수행하였고, 가시화 정보와 압력강하 정보를 획득하였다. 균질 유동 모델에 기초한 6 가지의 2 상 점성계수 모델들과 분리 유동 모델에 기초한 6 개의 상관식들을 평가하였다. 그리고 최종적으로 유동 패턴에 근거한 상관식을 균질 유동 모델과 분리 유동 모델에 대해 각각 제시하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 사각 마이크로채널 내에서 유동 패턴으로 기포류와 액상 고리류, 그리고 과도류 구간인 복합류를 관찰하였고, 압력강하와 유동 패턴이 밀접한 관련이 있음을 확인하였다.

(2) 6 가지의 점성계수 모델을 균질 유동 모델에 대해 평가한 결과, Beattie and Whalley 의 모델이 MAE 값이 22.72 로 가장 정확한 예측을 하였다. 이는 그들의 모델이 유동패턴에 기초한 모델이기 때문에 판단된다. 그러나, 여전히 편차가 약 50% 정도인 예측 결과를 나타내었다. 이에 따라, 새로운 유동패턴에 기초한 상관식을 제시하였고, 편차가 약 20% 정도로 보다 정확한 예측이 가능하였다.

(3) 6 가지의 분리 유동 모델에 기초한 상관식에

대한 평가 결과, Qu and Mudawar 의 상관식이 MAE 값이 19.75 로 가장 정확한 예측을 하였다. 이는 그들의 모델이 수력 직경과 질량유속의 영향을 고려한 상관식이기 때문에 판단된다. 그러나, 그들의 상관식 역시 편차가 약 50% 정도인 예측 결과를 나타내었다. 이에 따라, 새로운 유동패턴에 기초한 상관식을 제시하였고, 편차가 약 30% 정도로 보다 정확한 예측이 가능하였다.

(4) 균질유동 모델과 분리유동 모델에 대해서 각각 상관식을 제시하였다. 균질유동 모델이 보다 정확한 예측을 함을 알 수 있었고, 상관식의 적용이 상대적으로 간단하다는 점을 감안할 때 보다 적절한 상관식으로 판단된다. 본 연구에서 제시된 상관식은 유동패턴에 기초한 것이다. 이의 적절한 적용을 위해서는 마이크로채널 내의 2 상 유동 양식에 대한 정확한 예측 또한 필요하다. 그러므로, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Gunther, A., Khan, S. A., Thalmann, M., Trachsel, F. and Jensen, K. F., 2004, "Transport and Reaction in Microscale Segmented Gas Liquid Flow," *Lab on a Chip*, Vol. 4, pp. 278-286.
- (2) Squires, T. M. and Quake, S. R., 2005, "Microfluidics: Fluid Physics at the Nanoliter Scale," *Reviews of Modern Physics*, Vol. 77, pp. 977-1026.
- (3) Hidrovo, C. H., Kramer, T. A., Wang, E. N., Vigneron, S., Steinbrenner, J. E., Koo, J. M., Wang, F., Fogg, D. W., Flynn, R. D., Lee, E. S., Cheng, C., Kenny, T. W., Eaton, J. K. and Goodson, K. E., 2006, "Two-Phase Microfluidics for Semiconductor Circuits and Fuel Cells," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 27, pp. 53-63.
- (4) Moriyama, K. and Inoue, A., 1992, "The Thermal-Hydraulic Characteristics of Two-Phase Flow in Extremely Narrow Channels (The Frictional Pressure Drop and Heat Transfer of Boiling Two-Phase Flow, Analytical Model)," *Heat Transfer-Japanese Research*, Vol. 21, pp. 838-856.
- (5) Lee, H. J. and Lee, S. Y., 2001, "Pressure Drop Correlations for Two-Phase Flow Within Horizontal Rectangular Channels with Small Heights," *Int. Multiphase Flow*, Vol. 27, pp. 783-796.
- (6) Kawahara, A., Chung, P. M.-Y. and Kawaji, M., 2002, "Investigation of Two-Phase Flow Pattern, Void Fraction and Pressure Drop in a Microchannel," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 28, pp. 1411-1435.
- (7) Warriar, G. R., Dhir, V. K. and Momoda, L. A., 2002, "Heat Transfer and Pressure Drop in Narrow Rectangular Channels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, pp. 53-64.

- (8) Qu, W. and Mudawar, I., 2003, "Measurement and Prediction of Pressure Drop in Two-Phase Microchannel Heat Sinks," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2737~2753.
- (9) Lee, J. and Mudawar, I., 2005, "Two-Phase Flow in High-Heat-Flux Microchannel Heat Sink for Refrigeration Cooling Applications: Part I-pressure Drop Characteristics," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 928~940.
- (10) Chung, P. M. -Y. and Kawaji, M., 2004, "The Effect of Channel Diameter on Adiabatic Two-Phase Flow Characteristics in Microchannels," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 30, pp. 735~761.
- (11) Revellin, R. and Thome, J. R., 2007, "Adiabatic Two-Phase Frictional Pressure Drops in Microchannels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, pp. 673~685.
- (12) Saisorn, S. and Wongwises, S., 2008, "Flow Pattern, Void Fraction and Pressure Drop of Two-Phase Air-Water Flow in Horizontal Circular Microchannel," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 748~760.
- (13) Mishima, K., Hibiki, T. and Nishihara, H., 1993, "Some Characteristics of Gas-Liquid Flow in Narrow Rectangular Ducts," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 19, pp. 115~124.
- (14) Mishima, K. and Hibiki, T., 1996, "Some Characteristics of Air-Water Two-Phase Flow in Small Diameter Vertical Tubes," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, pp. 703~712.
- (15) Zhang, W., Hibiki, T. and Mishima, K., 2007, "Two-Phase Frictional Pressure Drop in Mini-channel," *6th Int. Conf. on Multiphase Flow*, Leipzig, Germany, S7_Wed_C_38.
- (16) Tran, T. N., Chyu, M.-C., Wambsganss, M. W. and France, D. M., 2000, "Two-Phase Pressure Drop of Refrigerants During Flow Boiling in Small Channels: An Experimental Investigation and Correlation Development", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 26, pp. 1739~1754.
- (17) Kandlikar, S. G. and Grande, W. J., 2003, "Evolution of Microchannel Flow Passages - Thermo-Hydraulic Performance and Fabrication Technology," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 24, pp. 3~17.
- (18) Choi, C. W. and Kim, M. H., 2008, "The Fabrication of a Single Glass Microchannel to Study the Hydrophobicity Effect on Two-Phase Flow Boiling of Water," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 18, 105016.
- (19) Serizawa, A., Feng, Z. and Kawara, Z., 2002, "Two-Phase Flow in Microchannels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, pp. 703~714.
- (20) Shih, F. S., 1967, "Laminar Flow in Axisymmetric Conduits by a Rational Approach," *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 45, pp. 285~294.
- (21) Owens, W. L., 1961, "Two-Phase Pressure Gradient," *Int. Dev. in Heat Transfer*, Pt II, ASME, New York, U.S.
- (22) MacAdams, W. H., Woods, W. K. and Bryan, R. L., 1942, "Vaporization Inside Horizontal Tubes in Benzene-Oil Mixture," *Trans. ASME*, Vol. 64, p. 193.
- (23) Cicchitti, A., Lombardi, C., Silvestri, M., Soldaini, G. and Zavalluilli, R., 1960, "Two-Phase Cooling Experiments-Pressure Drop, Heat Transfer, and Burnout Measurement," *Energia Nucl.*, Vol. 7, pp. 407~425.
- (24) Dukler, A. E., Wicks, M. and Cleveland, 1964, "Pressure Drop and Hold-up in Two-Phase Flow Part A-A Comparison of Existing Correlations and Part B-An Approach Through Similarity Analysis," *AICHE Journal*, Vol. 10, No. 1, pp. 38~51.
- (25) Beattie, D. R. H. and Whalley, P. B., 1982, "A Simple Two-Phase Flow Frictional Pressure Drop Calculation Method," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 8, pp. 83~87.
- (26) Lin, S., Kwok, C. C. K., Li, R. Y., Chen, Z. H. and Chen, Z. Y., 1991, "Local Frictional Pressure Drop During Vaporization for R-12 Through Capillary Tubes," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 17, pp. 95~102.
- (27) 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.
- (28) Carey, V. P., 1992, *Liquid-Vapor Phase Change Phenomena*, Taylor & Francis.
- (29) Awad, M. M. and Muzychka, Y. S., 2006, "Bounds on Two-Phase Frictional Pressure Drop Gradient in Minichannels and Microchannels," *4th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels*, Limerick, Ireland.
- (30) Ali, M., Sadatomi, M. and Kawaji, M., 1993, "Adiabatic Two-Phase Flow in Narrow Channels Between Two Flat Plates," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 71, pp. 657~666.
- (31) Chisholm, D., 1967, "A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two-Phase Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 10, pp. 1767~1778.