

< 논문 >

## 수평 사각 마이크로채널 내에서의 2 상 유동 압력강하

허 철<sup>†</sup> · 김 무 환<sup>\*</sup>

(2006년 4월 17일 접수, 2006년 8월 31일 심사완료)

### Two-phase Pressure Drop in a Horizontal Rectangular Microchannel

Cheol Huh and Moo Hwan Kim

**Key Words :** Two-phase Pressure Drop(2 상 유동 압력강하), Microchannel(마이크로채널), Two-phase Flow(2 상 유동), Heat Transfer(열전달)

#### Abstract

An experimental investigation was performed to study two-phase pressure drop of deionized water in a microchannel. Measurement and evaluation of two-phase frictional pressure gradient were carried out using a single horizontal rectangular microchannel having a hydraulic diameter of 100  $\mu\text{m}$ . Tests were performed for mass fluxes of 90, 169, and 267  $\text{kg/m}^2\text{s}$  and heat fluxes of 200-700  $\text{kW/m}^2$ . Test results showed that the measured two-phase frictional pressure gradient increased with the mass flux and vapor quality. Most macro-channel correlations of two-phase frictional pressure gradient did not provide reliable predictions except under certain limited conditions.

#### 기호설명

A : 면적 [ $\text{m}^2$ ]  
 $D_h$  : 수력직경 [m]  
 $dz$  : 유동방향으로의 길이 변화량 [m]  
 $f$  : 마찰 압력강하계수 [-]  
 $G$  : 질량유속 [ $\text{kg/m}^2\text{s}$ ]  
 $K$  : 손실계수 [-]  
 $L$  : 길이 [m]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [ $\text{kg/s}$ ]  
 $P$  : 압력 [kPa]  
 $\Delta P$  : 압력강하 (=dP) [kPa]  
 $q''$  : 열유속 [ $\text{kW/m}^2$ ]  
 $Re$  : 레이놀즈 수 [-]  
 $T$  : 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\rho$  : 비체적 [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$x$  : 건도 [-]  
 $\beta$  : 채널 단면의 폭 대 높이비 [-]  
 $\mu$  : 점도 [ $\text{Ns/m}^2$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $\text{kg/m}^3$ ]

#### 하첨자

acc : 유체의 가속속  
 cross : 채널의 단면  
 eff : 유효(총량으로부터 손실 량을 제외)  
 $f$  : 액상  
 $g$  : 기상  
 $h$  : 마이크로 히터  
 in : 입구 (in, inlet)  
 loss : 열손실  
 out : 출구 (out, outlet)  
 sat : 포화상태  
 sp : 단상 유동  
 sub : 과냉상태  
 TP,f : 2 상 유동 마찰 압력강하  
 tp : 2 상 유동  
 $n$  : 단위 마이크로 히터/마이크로채널 구간

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : dratom@postech.ac.kr

TEL : (054)279-5911 FAX : (054)279-3199

<sup>\*</sup> 회원, 포항공과대학교 기계공학과

## 1. 서론

마이크로 스케일에서의 유동과 열전달 현상은 마이크로채널 열교환기와 초소형 유체 소자 등과 같은 분야에서 최근 많이 이용되고 있다. 그러나 수력 직경 0.2 mm 미만의 마이크로채널에서의 유동 특성을 파악하는 것은 매우 어려운 작업이다. 더욱이 마이크로 스케일에서는 펌프 동력 등과 같은 유체의 이송 능력이 제한되므로 마이크로 채널 내에서의 단상 및 2 상 유동 압력강하 특성을 정확히 예측하는 것은 공학적으로 매우 중요하다.

작은 유로에서의 2 상 유동 압력강하에 대한 그간의 연구는 주로 1 mm 내외의 직경을 갖는 미니 원형 관과 미세 사각 유로에 대하여 수행되어 왔다. 이는 실험의 정량적 제어 및 측정이 매우 어렵다는데 기인한 것이다. 이에 기존 연구자들은 다채널 시스템을 적용함으로써 작동 유체인 냉각재의 유량을 증폭시키는 방법을 취해왔다.

Mishima 와 Hibiki<sup>(1)</sup> 그리고 Mishima 등<sup>(2)</sup>은 내경 1.0 mm 이상 4.0 mm 이하의 모세관에서 물-공기 혼합물의 기공율과 마찰압력강하를 측정하였다. 측정결과를 이용하여 Chisholm<sup>(3)</sup>의 C 변수를 미세 관 수력직경의 함수로 표현하였으며, 그들의 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 보였다. 그러나 제시된 Chisholm 의 C 변수는 수력직경이 0.2mm 이하로 작아짐에 따라 0 에 접근하는 값을 가지므로 그 사용영역이 매우 제한적이다.

Tran 등<sup>(4)</sup>은 R-12, R-134a, 그리고 R-113 을 이용하여 2 상 유동 압력강하 량을 측정하였다. 실험은 내경 2.46, 2.92 mm 의 두 가지 원형 관과 폭 4.06 mm, 높이 2.92 mm 의 사각 채널을 이용하여 수행되었다. 실험결과로부터 구해진 2 상 유동 압력강하를 기존 거시 스케일의 상관식이 잘 예측하지 못함을 밝혔다. 그들은 무차원 물성치 계수와 Kew 와 Cornwell<sup>(5)</sup>에 제시된 Confinement 수를 이용하여 새로운 상관식을 제안하였다.

Lee 와 Lee<sup>(6,7)</sup>는 물-공기 혼합물과 R-113 의 2 상 유동 압력강하 실험을 폭 20 mm, 채널 높이 0.4 ~ 4mm 의 미세 사각 유로에서 수행하였다. 실험 결과로부터 Lockhart-Martinelli<sup>(8)</sup> 2 상 유동 마찰 손실배수의 C 변수를 유동전체를 액체유 동으로 가정했을 경우의 레이놀즈 수의 함수로 수정 제안하였다. 제시된 상관식은 실험 결과를  $\pm 15\sim 20\%$ 의 오차 범위에서 예측하였다.

Yu 등<sup>(9)</sup>은 내경 2.98 mm, 길이 0.91 mm 의 미세 관을 이용하여 압력강하 측정을 위한 유동비동

실험을 수행하였다. 실험조건으로 시스템 압력은 200 kPa 이며, 질량유속의 범위는 50-150 kg/m<sup>2</sup>s 이다. 실험결과로부터 높은 건도 영역에서 슬러그류가 발생함에 따라 압력강하구배가 매크로 채널에서의 환상류보다 감소함을 보였다.

Qu 와 Mudawar<sup>(10)</sup>는 물을 작동유체로 선정하여 폭 0.231 mm, 높이 0.712 mm 의 단면을 가지는 총 21 개의 유로로 이루어진 다채널 유동 비동 시의 압력강하 측정 실험을 수행하였다. 실험조건으로 시스템 출구 압력은 1.17 bar 이며, 질량유속의 범위는 135-400 kg/m<sup>2</sup>s 이다. 실험으로부터 예측된 압력강하 량을 기존의 상관식이 잘 예측하지 못함을 보였으며, 질량유속의 영향을 고려하여 Mishima 와 Hibiki 상관식을 수정 제안하였다.

본 연구에서는 단일 마이크로채널 내에서의 유동과 열전달 실험을 위한 새로운 측정 기법과 장치를 제작하였다. 이를 이용하여 마이크로채널 내에서의 유동 비동 시 2 상 유동 압력강하 량에 대한 측정 및 분석을 수행하였다. 또한, 실험 결과와 기존 상관식을 비교 분석함으로써 마이크로채널 내에서의 2 상 유동 압력강하를 정성적, 정량적으로 연구하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 실험장치는 크게 작동유체인 증류수의 순환 계통, 유동 가시화 장치, 그리고 데이터 취득 시스템으로 구성되어 있다. 그 중 작동유체 순환계통의 구성도를 Fig. 1 에 나타내었는데 이는 입구 저장조, 핫플레이트, 시린지 펌프(syringe pump), 인라인 필터(inline filter), 체크 밸브, 시험부, 출구 저장조, 그리고 전자 저울로 구성되어 있다.

작동유체 순환계통에는 작동 유체인 3 차 증류수를 보관하며 degassing 작업을 수행할 수 있도록 입구 저장조를 일정 온도 조절용 핫플레이트 위에 설치하였다. 시린지 펌프와 같은 정량 펌프(positive displacement pump)는 그 운전 특성으로 인하여 유동에 맥동(pulsation)을 유발시킬 수 있으며 시린지 펌프는 그 특성상 실린더 용적만큼의 유체만을 이송시킬 수 있는 단점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위하여 본 실험에서는 작동유체를 이송시키기 위한 방법으로 양방향 운전 시린지 펌프를 적용하였다. 즉, 한 방향의 시린지 펌프가 유체를 밀어내는 토출 작동(discharge operation)을 하는 동안 동일 이송축의 반대편에 설치되어 있는 시린지 펌프는 입구 저장조로부터 유체를 흡입하는 작동

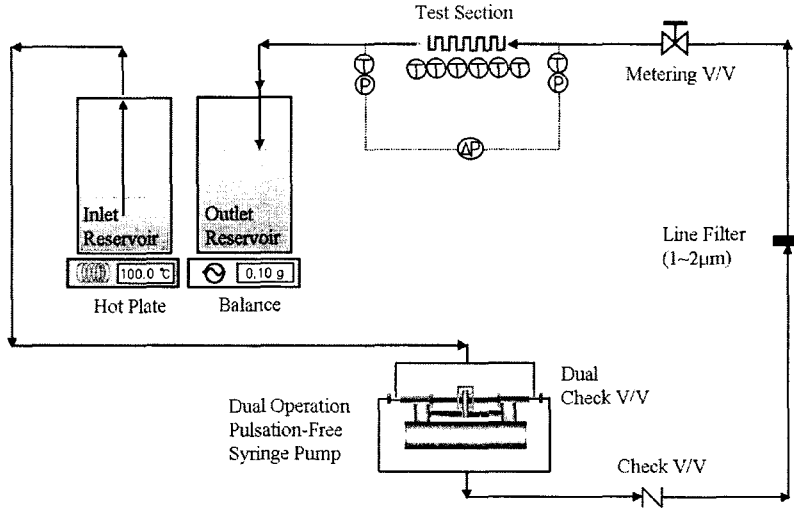


Fig. 1 Schematic of the test apparatus

(suction operation)을 수행하게끔 하였다. 또한 시린지 펌프(Harvard PHD2000)를 RS-232 인터페이스를 통하여 PC로 제어 및 모니터링 함으로써 실험의 편리성을 도모하였다.

시린지 펌프로부터 토출된 증류수는 1~2  $\mu\text{m}$  이상의 오염 물질을 제거할 수 있도록 스테인리스스틸 프리트(frit)를 내장하고 있는 인라인 필터를 통과하여 시험부로 유입된다. 시험부로부터 나온 액상과 기상의 2상 혼합물은 출구 저장조에 보관되며, 출구 저장조는 시린지 펌프 제어부와 더불어 유량을 이중으로 검증할 수 있도록 전자 저울 위에 설치하였다.

마이크로채널 내에서의 유동과 열전달 특성을 파악하기 위해서 시험부 입구와 출구에 각각 절대 압력계 (Setra, 280E)와 T-type 열전대를 설치하였으며, 시험부 입, 출구에 걸쳐 차압계(Setra, 230)를 설치하였다. 모든 압력계와 차압계는 각각 압력계 보정 장치인 deadweight tester를 이용하여 보정하였다. 또한, 상변화를 수반하는 2상 유동 실험 시의 열손실을 평가하기 위하여 미세 K-type 열전대를 유동의 흐름 방향에 따라 각각의 마이크로 히터 바로 아랫부분에 해당하는 위치의 마이크로 히터와 채널 외부 표면에 설치하였다.

## 2.2 시험부

시험부는 마이크로 히터, 리드 라인, 그리고 마이크로채널로 구성되어 있다. 마이크로채널 내에서의 유동 및 열전달 실험을 수행하기 위하여 본 실험에서 제작된 히터와 채널은 Fig. 2와 같다.

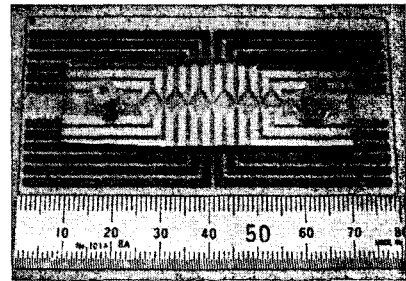


Fig. 2 Microheater (6 heaters)

마이크로 히터는 백금 (Pt)으로 이루어진 금속 패턴이 전류 입력을 받아 발열하는 주울 히팅 (Joule effect) 현상을 이용하였다. 본 연구에서는 이러한 마이크로 히터를 제작하기 위하여 Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) 가공 기술을 이용하였다. 마이크로채널의 바닥면 역할을 수행하게 될 파이렉스 기판 위에 표면 미세 가공 기법 중 하나인 lift-off 공정을 이용하여 마이크로 히터로 작용하게 될 백금 패턴을 20  $\mu\text{m}$ 의 선 폭과 간격으로 제작하였다. Fig. 3은 마이크로 히터 제작 과정에 대한 공정도이다. 본 연구에서는 작동유체로 물을 사용하므로 마이크로 히터와 작동유체와의 전기적 절연을 위하여 SOG(spin on glass)를 히터 표면 위에 3000 Å 두께로 코팅하였다.

본 실험에서 제작한 마이크로채널은 폭 100  $\mu\text{m}$ , 높이 100  $\mu\text{m}$ 의 사각 단면을 갖는 사각 채널로서 100  $\mu\text{m}$ 의 수력직경을 갖는다. 이러한 채널을 제작하기 위하여 본 연구에서는 polydimethyl-

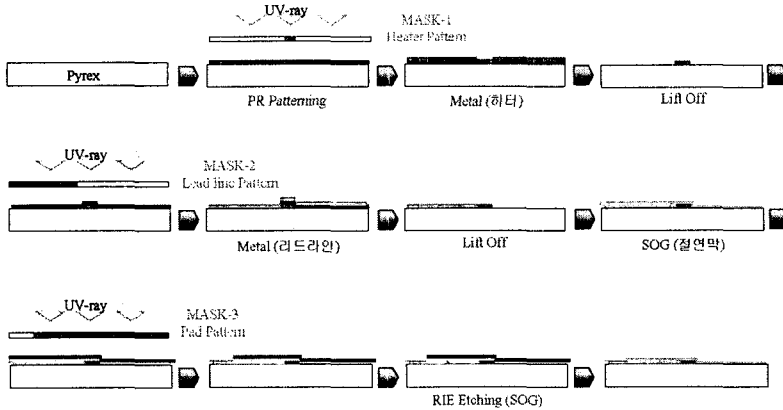


Fig. 3 Fabrication process of the microheater

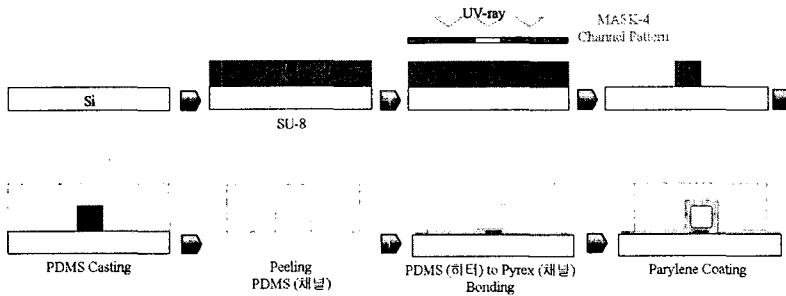


Fig. 4 Fabrication process of the microchannel

siloxane (PDMS)와 음 감광 수지 (negative photoresist)인 SU-8 을 이용 하였다. 즉, 실리콘 웨이퍼 위에 SU-8 을 채널 높이에 해당하는 두께로 스핀 코팅하고 석판인쇄(lithography) 공정을 통하여 마이크로채널 물드를 만든 후, PDMS 를 이용하여 최종 마이크로채널을 만드는 복제물딩(replica molding) 기법을 이용하였다. 마지막으로, PDMS 의 다공성 성질과 특정 성분 기체에 대한 투과성 특성<sup>(11)</sup>을 제거하기 위하여 마이크로채널의 내부와 외부를 페릴린(Parylene)<sup>(12)</sup>으로 코팅 처리하였다.

실험에 사용된 PDMS 는 열전도계수가 0.17 W/mK 로서 매우 낮은 값을 가지며, 이는 채널 구조물 자체가 외부로의 열 누설에 대한 단연 특성을 가짐을 의미한다. Fig. 4 는 마이크로채널을 제작하기 위한 공정 순서도이며, Fig. 5 는 이와 같은 방법으로 제작한 마이크로채널의 단면을 주사 전자 현미경(SEM)을 이용하여 촬영한 이미지이다. 그림에서 보이는 바와 같이 채널 면이 매우 매끄럽고, 단면의 형상이 매우

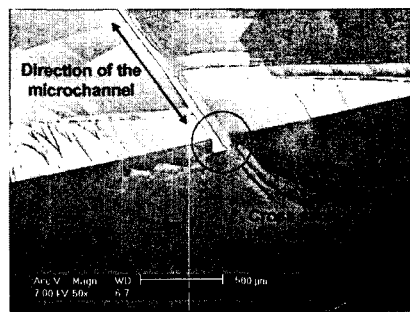


Fig. 5 Cross section of the microchannel

일정함을 확인할 수 있다. 제작된 마이크로채널의 전체 길이는 40 mm 이며, 실제 열량이 인가되는 유효 발열구간의 길이는 30 mm 이다.

2.3 실험 조건 및 방법

시험부에서의 열량은 각각의 마이크로 히터로 인가되는 전압과 전류를 각각 측정하고, 이를 이용하여 도출한다.

시험부의 유량 제어는 시린지 펌프를 RS-232 인터페이스를 통하여 제어함으로써 정량의 체적유량을 조절하였다. 또한, 시험부 하류의 출구 저장조를 전자저울 위에 설치하고 실험 과정 동안 저울로부터 읽은 질량 변화의 기울기를 RS-232 인터페이스를 통하여 실시간으로 구함으로써 질량유량을 측정 및 검증하였다. 본 연구에서 작동유체의 유량범위는 체적유량 0.05-0.15 ml/min 이며, 이는 질량유속 90-267 kg/m<sup>2</sup>s 에 해당한다. 시험부의 입구 압력은 절대압력으로 106-160 kPa 이며, 시험부의 출구 압력은 대기압이다.

시험부가 설정된 유량 조건에 도달한 후 측정된 압력과 차압으로부터 유동이 안정되었다고 판단되면, 히터로 공급되는 열량을 서서히 증가시켜 시험 조건을 얻었다. 본 연구에서 적용한 시험부의 열유속의 범위는 200-700 kW/m<sup>2</sup> 이며, 시험부 출구 건도는 0-0.4 이다.

실험 시 측정된 온도, 압력, 전압, 그리고 전류 등은 데이터 로거, GPIB to USB 인터페이스, 컴퓨터 등으로 구성된 데이터 취득 장치를 이용하여 수집 및 분석하였다. 물의 열역학적 물성치는 NIST chemistry webbook<sup>(13)</sup>에서 제공하는 NIST standard reference database 의 값들을 이용하였다.

실험에 사용한 변수들에 대한 불확실성 해석을 Holman<sup>(14)</sup>이 제안한 방법을 이용하여 수행하였다. 작동유체의 체적유량과 질량유속에 대한 불확실성은 각각 ±0.1%, ±1.09% 이다. 또한, 시험부 입, 출구의 온도, 압력, 그리고 압력강하에 대한 불확실성은 각각 ±0.1℃, ±0.76 kPa, ±0.34 kPa 에 해당한다.

2.4 실험 데이터 처리 및 오차 분석

시험부가 총 6 개의 마이크로 히터와 단일 마이크로채널로 구성되어 있으므로, 실험 데이터 처리를 위하여 시험부를 유동 방향에 따라 6 개의 구간으로 분할하여 각각 분석하였다. 각각의 마이크로 히터와 마이크로채널 구간에서의 발열열량, 열손실량, 열유속, 그리고 열역학적 건도는 Huh 와 Kim<sup>(15)</sup>에 기술한 바와 같이 단위 마이크로 히터 및 마이크로채널 구간에서의 유효 열전달 면적과 에너지 교환량을 고려하여 구하였다.

시험부에서의 압력강하는 시험부 입, 출구에서 측정되므로, 전체 측정 압력강하는 다음과 같은 5 개의 항으로 이루어져 있다: 시험부 입구에서 급격한 유로 변화로 인한 단상 압력강하( $\Delta p_{inlet}$ ),

단상 마찰 압력강하( $\Delta p_{f,sp}$ ), 2 상 유동 마찰 압력강하( $\Delta p_{f,tp}$ ), 상변화 시 가감속에 의한 압력강하( $\Delta p_{acc}$ ), 2 상 유동 중력 압력강하, 그리고 시험부 출구에서 급격한 유로 변화로 인한 2 상 압력강하( $\Delta p_{outlet}$ ). 본 연구에서는 마이크로채널이 가지는 작은 유로에서의 유동 특성으로 인하여 중력에 의한 2 상 압력강하는 무시하였다.

$$\Delta p_{exp} = \Delta p_{inlet} + \Delta p_{f,sp} + \Delta p_{f,tp} + \Delta p_{acc} + \Delta p_{outlet} \tag{1}$$

시험부 입, 출구에서 급격한 유로 변화로 인한 단상과 2 상의 압력강하는 식 (2)와 (3)과 같이 Blevin<sup>(16)</sup>의 결과와 Collier 와 Thome<sup>(17)</sup>의 결과를 이용하여 각각 구하였다.

$$\Delta p_{inlet} = \frac{G_{out}^2 v_f}{2} \left[ 1 - \left( \frac{A_{cross,out}}{A_{cross,in}} \right)^2 + K_{inlet} \right] \tag{2}$$

$$-\Delta p_{outlet} = G_{in}^2 \left( \frac{A_{cross,in}}{A_{cross,out}} \right) \left[ 1 - \left( \frac{A_{cross,in}}{A_{cross,out}} \right) \right] \cdot v_f \left[ \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)} + \left( \frac{v_g}{v_f} \right) \frac{x^2}{\alpha} \right] \tag{3}$$

상변화 시 가감속에 의한 압력강하는 아래와 같다.

$$\Delta p_{acc} = -G^2 (v_{out} - v_{in}) = -G^2 v_{fg} \Delta x \tag{4}$$

상기 식들과 실험으로부터 구해진 전체 압력강하 량을 이용하여 2 상 유동에서의 마찰 압력강하를 구하였다.

3. 단상 유동 마찰 압력강하

마이크로채널 내에서의 2 상 유동 압력강하 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하기에 앞서 실험 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 단상 압력강하 실험을 수행하였다. 또한, 식 (1)을 이용하기 위해서도 단상 마찰 압력강하계수에 대한 검증이 필요하다. 이를 위해 2 상 유동 실험과 동일한 유량 범위에 대하여 동일 마이크로채널을 이용하여 단상 압력강하 실험을 수행하였다. 단상 실험으로부터 얻어진 실험 압력강하계수와 기존 거시 스케일에서의 해석해로부터 구한 압력강하계수를 Fig. 6 에 보였다.

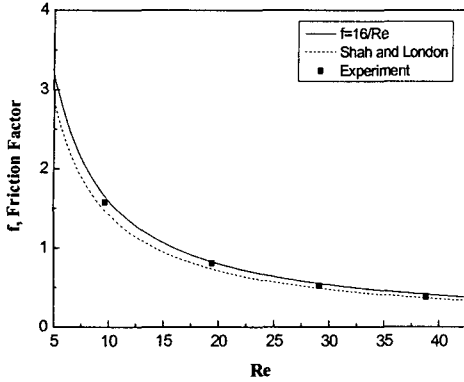


Fig. 6 Total pressure drop

기존 결과들은 단상 층류에 대한 일반적인 이론 값  $fRe=16$  와 Shah 와 London<sup>(18)</sup>이 사각채널에 대하여 제시한 다음과 같은 관계식을 이용하였다.

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

여기서 레이놀즈 수는  $Re = \frac{GD_h}{\mu}$  이다.

Fig. 6 에 보이는 바와 같이 마이크로채널 내 층류 유동에서 기존 해석해 ( $fRe=16$ ) 와 식 (5) 로 구해진 단상 마찰계수가 실험결과를 유사하게 표현할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 2 상 유동 마찰 압력강하

Fig. 7 은 시험부에 인가되는 열유속의 변화에 따른 2 상 유동 마찰 압력강하 량을 나타낸 것이다. 측정된 전체 압력 강하 량과 식 (1)~(5)를 이용하여 2 상 유동에 의한 마찰 압력강하를 구하였다. 질량 유속이 증가할수록 상변화에 필요한 열유속이 증가하게 되고, 동일 질량 유속에서 열유속이 증가함에 따라 전체 유량 대 기상 of 비인 건도가 증가하고 마찰에 의한 2 상 유동 압력강하 량이 증가함을 알 수 있다. 질량유속과 건도에 따른 2 상 유동 마찰 압력강하구배는 Fig. 8 에 보이는 바와 같으며, 이는 2 상 유동 마찰 압력 강하량 대 2 상 유동 구간의 길이의 비  $dP_{TP,i}/dz$  로 표현된다. 질량유속과 건도가 증가할수록 2 상 유동의 마찰에 의한 압력강하는 증가함을 알 수 있다.

마이크로채널에서의 2 상 유동 마찰 압력강하

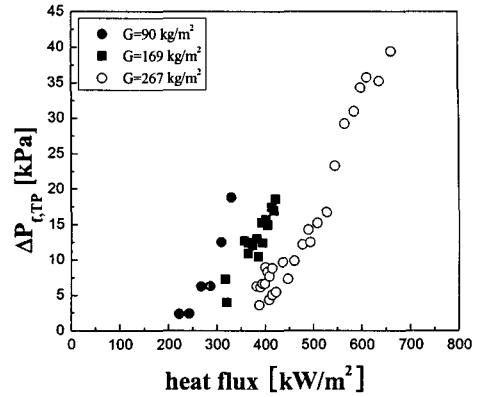


Fig. 7 Total pressure drop

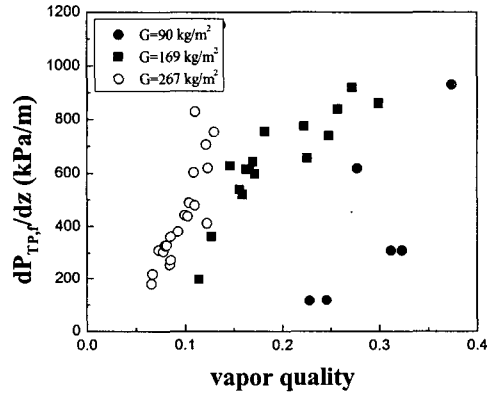


Fig. 8 Two-phase frictional pressure gradient

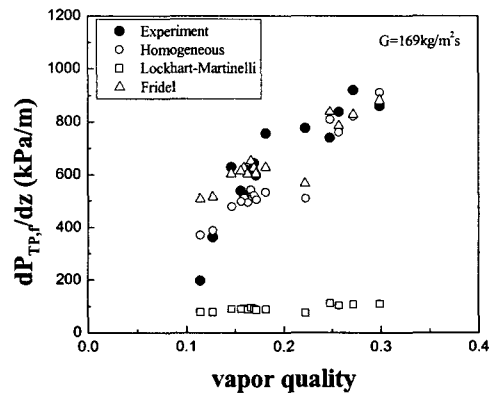


Fig. 9 Two-phase frictional pressure gradient at  $G=169\text{kg/m}^2\text{s}$

특성을 검토하기 위하여 거시 스케일에서 수행된 실험 데이터베이스를 통해 구축된 기존 상관식과의 예측치를 비교, 분석하였다.

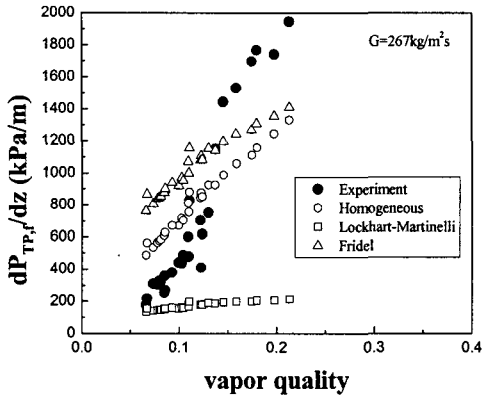


Fig. 10 Two-phase frictional pressure gradient at  $G=267\text{kg/m}^2\text{s}$

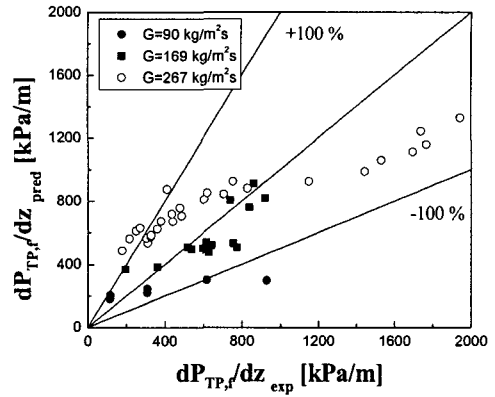
본 연구에서는 세가지 거시 스케일 상관식과 실험적으로 구한 마이크로채널에서의 2상 유동 마찰 압력강하 특성을 비교하였다: 균질 유동 모델,<sup>(15)</sup> Lockhart와 Martinelli<sup>(3,8)</sup> 그리고 Friedel<sup>(19,20)</sup> 상관식.

Fig. 9와 Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 균질 유동 모델과 Friedel 상관식은 특정 영역에서 실험치를 비교적 유사하게 예측하나, 고유량 영역에서는 예측치와 실험치 사이에 차이가 존재함을 알 수 있다. Lockhart와 Martinelli 상관식은 전 유량범위에 걸쳐 2상 유동 마찰 압력강하를 크게 낮게 예측함을 알 수 있다. 이와 같은 차이는 다음 두 가지의 원인에 기인한 것으로 판단된다. 첫째, 기존 상관식은 매크로 스케일의 수력직경을 이용한 실험 결과를 이용하여 구축되었다. 둘째, 기존 상관식의 유동 영역은 기상과 액상 모두 난류영역에 해당하나, 본 연구에서 수행된 마이크로채널 내에서의 유동 실험은 기상과 액상 모두 층류영역에 해당한다. 이와 같은 원인에 의한 실험 치와 예측 치와의 차이는 Fig. 11를 통해서 명확히 표현된다.

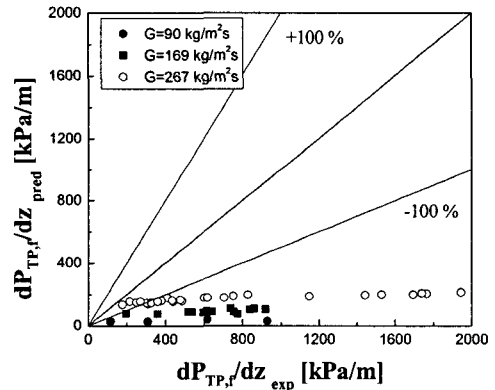
5. 결론

본 연구에서는 수력직경  $100\ \mu\text{m}$ 의 수평 사각 마이크로채널 내에서 단상유동과 유동 비등을 실험적으로 조사 및 분석하였다. 실험 조건은 질량 유속  $90\text{-}267\ \text{kg/m}^2\text{s}$ , 열유속  $200\text{-}700\ \text{kW/m}^2$  이었으며, 마이크로채널 내에서의 유동 압력강하에 대한 그 중요한 결론은 다음과 같다.

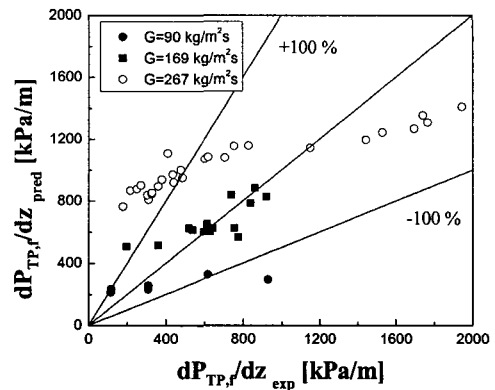
(1) 단상 액체 유동에 의한 마찰 압력강하는 기존 해석해 ( $f_{Re}=16$ )와 Shah 와 London 의 모델에 의해 비교적 정확히 예측된다.



(a) Homogeneous flow model



(b) Lockhart and Martinelli Correlation



(c) Friedel Correlation

Fig. 11 Comparisons of experimental and predicted two-phase frictional pressure gradient

(2) 유동 비등 중 2 상 유동 마찰에 의한 압력

강하는 질량유속과 전도가 증가함에 따라 증가한다.

(3) 균질 유동 모델과 Friedel 상관식이  $\pm 100\%$ 의 오차 범위에서 마이크로채널에서의 2 상 유동 마찰 압력강하를 예측함을 확인하였다. 그러나 Lockhart 와 Martinelli 상관식은 실험치를 1/10의 값으로 매우 낮게 예측한다.

(4) 기존 상관식의 예측치와 실험치와 차이는 채널의 수력직경과 유동양식의 차이에 기인한다. 즉, 기존 상관식은 수력직경 10 mm 이상의 매크로채널과 난류영역에서 수행된 결과들을 이용하여 작성되었으나, 마이크로채널에서의 유동양식은 작은 수력직경과 적은 유량으로 인하여 층류영역에 해당한다.

(5) 마이크로채널에서의 2 상 유동 마찰 압력강하를 정확히 예측하기 위하여 수력직경 100  $\mu\text{m}$  내외의 마이크로채널과 기상과 액상 각각 레이놀즈 수 1000 미만의 층류영역에 대한 새로운 상관식의 개발이 요구된다.

## 후 기

이 논문은 지역혁신인력양성사업의 재정적 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Chisholm, D., 1973, "Pressure Gradients Due to Friction During the Flow of Evaporation Two-phase Mixtures in Smooth Tubes and Channels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 347~358.
- (4) 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.
- (5) Kew, P.A. and Cornwell, K., 1997, "Correlation for the Prediction of Boiling Heat Transfer in Small-diameter Channels," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, pp. 705~715.
- (6) Lee, H.J. and Lee, S.Y., 1999, "An Experimental Study on the Two-phase Flow Pressure Drop Within Horizontal Rectangular Channels with the Small Gap Heights," *Transactions of the KSME B*, Vol. 23, No. 5, pp. 637~645.
- (7) Lee, H.J. and Lee, S.Y., 2001, "An Experimental Study on Pressure Drop of Boiling Flow Within Horizontal Rectangular Channels with the Small Gap Heights," *Transactions of the KSME B*, Vol. 25, No. 9, pp. 1219~1226.
- (8) Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C., 1949, "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-phase, Two-component Flow in Pipes," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 45, No. 1, pp. 39~48.
- (9) Yu, W., France, D.M., Wambsganss, M.W. and Hull, J.R., 2002, "Twophase Pressure Drop, Boiling Heat Transfer, and Critical Heat Flux to Water in a Small-diameter Horizontal Tube," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 28, pp. 927~941.
- (10) Qu, W. and Mudawar, I., 2003, "Measurement and Prediction of Pressure Drop in Two-phase Micro-channel Heat Sinks," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2737~2753.
- (11) Merkel, T.C., Bondar, V.I., Nagai, K., Freeman, B.D. and Pinnau, I., 2000, "Gas Sorption, Diffusion and Permeation in Poly(dimethylsiloxane)," *J. Polymer Science*, Vol. 38, pp. 415~434.
- (12) Shin, Y.S., Cho, K., Lim, S.H., Chung, S., Park, S., Chung, C., Han, D. and Chang, J.K., 2003, "PDMS-based Miro PCR Chip with Parylene Coating," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, pp. 768~774.
- (13) NIST Chemistry WebBook, <http://webbook.nist.gov/>.
- (14) Holman, J.P., 2001, *Experimental Methods for Engineers*, 7th Edition, McGraw-Hill.
- (15) Huh, C. and Kim, M.H., 2006, "Flow Boiling Heat Transfer in a Horizontal Rectangular Microchannel," *Transactions of the KSME B*, Vol. 30, No. 11, pp. 1043~1050.
- (16) Blevins, R.D., 1984, *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- (17) Collier, J.G. and Thome, J.R., 1994, *Convective Boiling and Condensation (3rd Ed.)*, Oxford University Press, Oxford, U.K., pp. 67~68.
- (18) Shah, R.K. and London, A.L., 1978, *Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data*, Supl. 1, Academic press, New York.
- (19) Friedel, L., 1979, "Improved Frictional Pressure Drop Correlation for Horizontal and Vertical Two-phase Pipe Flow," *European Two-phase Flow Group Meeting*, Paper No. 2, Ispra, Italy (quoted by Whalley, 1987).
- (20) Whalley, P.B., 1987, *Boiling, Condensation, and Gas-liquid Flow*, Clarendon Press, Oxford.