

# 미세 수평 사각 유로에서의 2상 유동 압력강하에 관한 실험적 연구

이한주\* · 이상용\*\*  
(1998년 11월 30일 접수)

## An Experimental Study on the Two-Phase Flow Pressure Drop within Horizontal Rectangular Channels with the Small Gap Heights

Han Ju Lee and Sang Yong Lee

**Key Words:** Two-Phase Flow(2상 유동), Rectangular Channel(사각 유로), Aspect Ratio(종횡비), Frictional Pressure Drop(마찰 압력강하), Frictional Multiplier(마찰손실배수), Martinelli Parameter(마티넬리 변수), Flow Pattern(유동양식)

### Abstract

Horizontal two-phase flow pressure drop within rectangular channels with small gap heights have been examined experimentally. The gap heights range from 0.4mm to 4mm corresponding to aspect ratios(the channel height divided by the width) from 0.02 to 0.2. Water and air were used as the test fluids with the superficial velocity ranges being 0.03-2.39m/s and 0.05-18.7m/s, respectively. The experimental results in rectangular channels were compared with the Lockhart-Martinelli correlation, which are widely used for conventional round tube. The Lockhart-Martinelli correlation turned out to be inappropriate to represent the present experimental data. In this respect, considering the aspect ratio and gap-height effects, an empirical correlation on two-phase slug flow pressure drop was proposed. The proposed correlation successfully covers the bubbly, plug, slug and annular flow regimes.

————— 기호설명 —————		$Q$	체적 유량( $m^3/s$ )
$a, b, c$	실험상수	$T$	온도( $^{\circ}C$ )
$C$	Lockhart-Martinelli 관계식의 상수	$w$	사각 유로 폭(m)
$D_h$	수력직경(m)	$X$	마티넬리(Martinelli) 변수
$f$	마찰계수	$z$	유동방향의 좌표
$F$	마찰손실		
$h$	사각 유로 높이(m)		그리스문자
$i$	침자(index)	$\mu$	점도( $N \cdot s/m^2$ )
$j$	겉보기 속도(m/s)	$\phi$	2상유동 마찰손실배수
$L$	액체 유입부와 압력공사이의 거리(m)	$\phi^*$	단면 종횡비 합수
$n$	침자(index)	$\rho$	밀도( $kg/m^3$ )
$p$	압력(Pa)		
			하첨자
		$f$	액상
		$g$	기상
		$TP$	2상(액상과 기상)

\* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

## 1. 서론

2상 유동에 대한 그 간의 연구는 주로 10mm 이상의 큰 직경을 갖는 원형 관에 대해 이루어져 왔다. 그러나 최근 들어 5mm미만의 미세 원형 관과 미세 사각 유로로 연구 범위가 확대되고 있다. 이러한 미세 유로에서의 2상 유동 압력강하에 대한 연구는 밀집형 열교환기의 설계에 유용하게 사용될 수 있다. 열전달을 향상시키기 위한 여러 노력들 중 2세대 기술이라 할 수 있는 삽입물 설치물 통한 열전달 향상 방안은 비록 높은 열전달 계수를 얻는 데는 성공하였지만, 그와 동시에 큰 압력강하를 수반하게 된다.<sup>(1)</sup> 이러한 압력강하의 증가는 송출 동력(pumping power)의 증가를 가져오고 따라서 운전 비용도 증가하게 된다. 점점 더 소형화 되고 있는 판형 밀집형 열교환기의 기본 구조가 되는 미세 사각 유로에서의 2상 유동 압력강하에 대한 연구는 열교환기의 성능향상에 지대한 영향을 줄 수 있으리라 생각된다. 그러나 아직까지 미세 유로에서의 2상 유동 및 압력강하에 대한 연구는 많이 이루어져 있지 않다.<sup>(2)</sup> 미세 사각 유로에서의 2상 유동 마찰 압력강하와 관련된 연구로는 Mishima와 Hibiki,<sup>(3)</sup> Mishima 등,<sup>(4)</sup> Lowry와 Kawaji,<sup>(5)</sup> Fujita 등,<sup>(6)</sup> Wambsganss 등,<sup>(7)</sup> Ide와 Matsumura<sup>(8)</sup> 등의 결과를 들 수 있다. Mishima와 Hibiki<sup>(3)</sup>와 Mishima 등<sup>(4)</sup>은 5mm 이하의 미세 수직관의 경우에는 Lockhart-Martinelli 관계식의 상수  $C$ 가 관 직경에 따라 크게 변화하므로 직경 변화를 고려한 식을 사용해야 됨을 주장하였다. 또한 Lowry와 Kawaji<sup>(5)</sup>는 무차원 기체 겹보기 속도를 이용하여 미세 수직관에서의 2상 유동 압력강하를 표현할 것을 제안하였다. Fujita 등<sup>(6)</sup>은 단면중형비가 1보다 큰 미세 사각 유로에서의 실험 결과를 바탕으로 낮은 액체 겹보기 속도 영역에서는 2상 유동 압력강하를 Lockhart-Martinelli 관계식으로는 잘 표현할 수 없음을 지적하였다. Wambsganss 등<sup>(7)</sup>은  $19.05 \times 3.18\text{mm}^2$ 의 단면을 갖는 미세 수평 사각유로에서 단면 중형비 0.17과 6인 조건에 대해서 2상 유동 압력강하에 대한 실험을 수행하였으며, Lockhart-Martinelli 관계식의 상수  $C$ 를 액체 레이놀즈 수와 마티벨리 변수의 함수로 표현하였다. Ide와 Matsumura<sup>(8)</sup>는 비원형관에서의 2

상 유동 압력강하에 대한 상관식이 부재함을 지적하고 사각 유로의 단면중형비와 경사각을 고려하여 10개의 서로 다른 사각유로에 대하여 실험을 수행하였다. 또한 경사각이 크고 액체 겹보기 속도가 작은 조건에서는 Lockhart-Martinelli 관계식으로는 실험치를 잘 표현할 수 없음을 지적하였다. 아울러 그들은 분리유동 모델을 사용하여 단면 중형비, 경사각, 액체 레이놀즈 수, 기공률의 함수로서 비교적 큰 수력직경 범위(7.3-21.4mm)에 적용할 수 있는 상관식을 개발하였다. 위의 미세 사각 유로에 대한 2상 유동 압력강하 연구 결과들은 대부분 수직 유동과 단면 중형비가 1보다 큰 경우에 편중되어 있으며, 단면 중형비가 1보다 작으면서, 수력직경이 5mm 이하인 미세 수평 사각 유로에 대한 체계적인 연구 결과들은 그리 많지 않다. 본 연구에서는 단면 중형비가 1보다 작은 수평 사각 유로에 대하여 유로의 높이(gap height)를 각각 0.4, 1, 2, 4mm (이 경우에 유로 폭은 2cm로 고정시켰으므로 단면 중형비 범위는 0.02-0.2임.)로 변화시켜 가며 물과 공기의 겹보기 속도가 각각 0.03-2.39m/s와 0.05-18.7m/s인 조건에서 2상 유동 압력강하 특성을 파악하고, 단면중형비 0.02-0.2 범위의 미세 수평 사각 유로에 적용할 수 있는 압력강하에 대한 실험식을 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치

미세 수평 사각유로에 대한 공기와 물의 단열 2상 유동 특성 파악을 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 크게 공기 공급계통과 물 공급계통, 그리고 각각의 유량을 조절할 수 있는 유량계와 시험부로 구성되어 있다. 기체상으로 사용되는 공기는 실험실로 공급되는 압축공기를 사용하였다. 압축공기는 먼지와 수분을 제거하기 위한 필터와 압력조정기를 거쳐 유량계로 유입된다. 이 때 유량계 전단의 니이틀 밸브를 통해 원하는 유량을 조절한다. 균일한 크기의 기포를 시험부로 공급하기 위해  $40\ \mu\text{m}$ 의 공극률(porosity)을 갖는 Mott사의 원판형 다공급속관을 시험부 입구에 설치한다. 실험에 사용된 공기용 유량계는 각각 0.5, 5, 50 l/min의 유량 범위까지 측정할 수 있는 3종류로서 Dwyer사의 float형 유량계이며, 병렬로 연결되어 있다. 유량

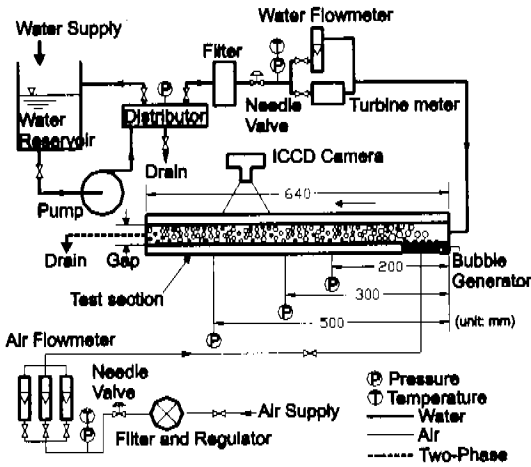


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

계는 버블미터를 사용하여 보정하였다. 실험에 사용된 물은 물 탱크로부터 펌프를 통해 분배기로 공급된다. 분배기에서 일부는 물탱크로 순환시키고, 일부는 이물질들을 제거하기 위한 필터를 통과시킨 후 원하는 유량 범위에 해당하는 유량계로 공급된다. 액체 유량 측정을 위하여 사용된 유량계는 각각 0.7과 25 l/min의 유량 범위까지 측정할 수 있는 2종류이다. 0.7 l/min까지 측정할 수 있는 유량계는 Dwyer사의 float형 유량계이며, 25 l/min까지 측정할 수 있는 유량계로는 터빈미터(turbine meter, Magnetoflow사, Vision 2008)를 사용하였다. 물의 경우는 질량측정법에 의해 보정하였다. 시험부는 아크릴로 제작하였으며, 가시화를 위해 표면을 고은 다듬질하였다. 유로 폭은 2cm로 일정하게 유지한 상태에서 시험부 상부의 흡음 조절함으로써 유로의 높이들 0.4, 1, 2, 4mm로 변화시킬 수 있도록 하였다. 시험부의 전체 길이는 640mm이고, Fig. 1에 나타난 것과 같이 시험부 하부의 유로 폭 중앙 위치에 흐름 방향을 따라서 3군데에 압력공(pressure-tap)을 설치하였다. 시험부 입구로부터 각각 300mm와 500mm 떨어진 위치에서 2상 유동 압력강하를 측정하였으며, Fig. 1의 다공성 금속판을 통과하여 기포의 형태로 공급된 공기는 물과 혼합되어 압력 측정 위치 전에 각 상의 길보기속도 조건에 해당하는 일정한 유동양식을 나타냄을 확인하였다. 시험부에서의 압력강하를 측정하기 위하여 측정 범위가 각각  $\pm 14, 35, 55\text{kPa}$ 인 차압계(Validyne, P300D)를 사용하였으며, 정수두압을

Table 1 Ranges of superficial velocities studied.

Gap, mm	0.4	1.0	2.0	4.0
$J_f$ [m/s]	0.17-1.44	0.1-2.39	0.05-2.03	0.03-2.05
$J_g$ [m/s]	0.36-18.7	0.1-16.3	0.05-12.6	0.06-7.39

Table 2 Summary of estimated uncertainties.

Primary quantities		Derived quantities		
Parameters	Uncertainties	Parameters	Uncertainties	
			$J_f=0.5\text{m/s}$	$J_f=1.56\text{m/s}$
		$J_g=0.1\text{m/s}$	$J_g=16.3\text{m/s}$	
$Q_x$	$\pm 4\%$	$J_f$	$\pm 4\%$	$\pm 1.5\%$
$Q_f$	$\pm 1.5\text{--}4\%$	$J_g$	$\pm 4.03\%$	$\pm 4.03\%$
$\Delta p$	$\pm 0.25\text{--}0.5\%$	$Re_f$	$\pm 4\%$	$\pm 1.5\%$
$T$	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	$Re_g$	$\pm 4.06\%$	$\pm 4.06\%$
		$X$	$\pm 2.84\%$	$\pm 3.77\%$
		$\phi_f$	$\pm 2\%$	$\pm 1.32\%$

이용한 보정 방법을 사용해 보정하였다. 차압계에서 나온 신호는 증폭기를 사용하여 증폭한 후 데이터 획득 장치(Data Translation, DT3001PGL)를 통해 200Hz의 신호 채집률(sampling rate)로 20초 동안 수집된다. 이 과정을 통해 수집된 데이터를 평균하여 앞으로의 데이터 처리과정에 사용한다. 각 유로 높이 별 실험 범위를 길보기 속도를 기준으로 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타난 모든 실험 조건 중에서 유로높이가 0.4mm이며 기체와 액체의 길보기속도가 각각 8.78m/s와 1.44m/s인 조건에서 3.83kPa의 최대 압력손실 진동폭을 나타내었다. 기체와 액체의 물성치를 환산하기 위하여 유량계 전단에 열전대를 설치하였으며, 2채널 온도계(Tektronix, DTM520)를 사용하여 온도를 측정하였다. 기체의 경우 유량계로 유입되는 공기의 밀도를 환산하기 위하여 유량계 전단에  $\pm 50\text{psi}$ 까지 측정할 수 있는 차압계(P22AB, Transmetrics)를 설치하였다. 실험에 사용한 변수들에 대한 불확실성 해석을 Kline<sup>(9)</sup>이 제안한 방법을 사용하여 수행하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

### 3. 마찰압력강하

기체와 액체의 유량을 변화시켜 가며, Table 3

Table 3 Location of pressure-taps.

Gap, mm	Location of pressure measurement from the liquid inlet $[L/D_h]$	Maximum measuring range [kPa]
0.4	382.7, 637.8	55
1.0	157.5, 262.5	55
2.0	82.5, 137.5	35
4.0	45.0, 75.0	14

에 나타난 위치에서 2상 유동 압력강하를 측정하였다. Fig. 2에 유로 높이 별로 압력강하 기울기의 측정치를 액체와 기체의 겉보기 속도를 이용하여 도시하였다. 액체의 겉보기 속도를 증가시키거나, 기체의 겉보기 속도를 증가시킬수록 2상 유동 압력강하 기울기가 증가함을 알 수 있다. 또한 기체와 액체의 겉보기 속도를 일정하게 유지한 조건에서는 유로 높이가 작아질수록 단위 길이당 압력강하는 증가함을 알 수 있다. 2상 유

동 마찰 압력강하를 예측하기 위하여 Lockhart-Martinelli는 낮은 압력 상태에서의 2상 유동에 대하여 다음과 같은 경험식을 제시하고 있다.<sup>(10)</sup>

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

여기서,

$$\phi_f^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{TP}}{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f} \quad (2)$$

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f}{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_g} \quad (3)$$

이 때 식(1)에서 상수 C는 유동의 상태에 따라 주로 결정되는 것으로 알려져 있으며, Table 4와 같이 표현된다.<sup>(10)</sup> 그러나 미세 사각유로에서의

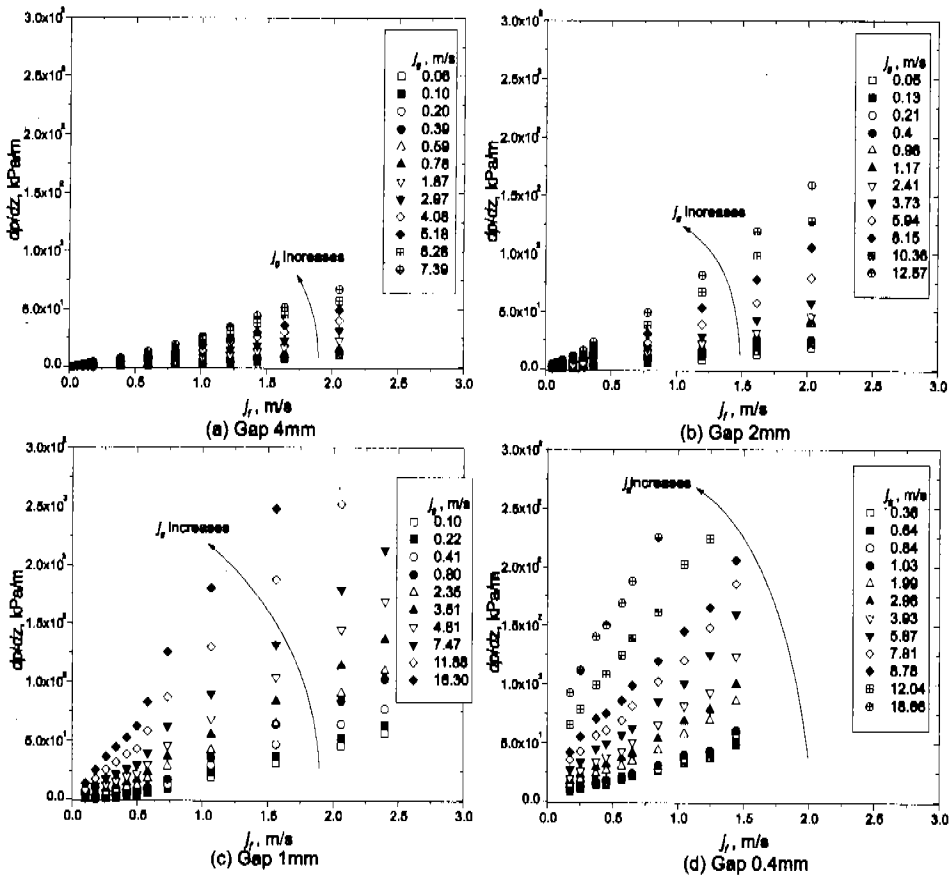
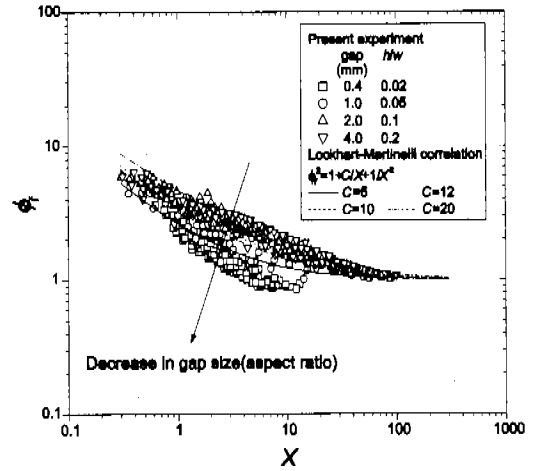


Fig. 2 Two-phase pressure drops.

**Table 4** Parameter *C* in Lockhart-Martinelli model.<sup>(10)</sup>

Liquid phase	Gas phase	<i>C</i>
turbulent	turbulent	20
laminar	turbulent	12
turbulent	laminar	10
laminar	laminar	5

최근 결과를 살펴보면, *C*는 유동 상태만의 함수가 아니라는 것을 알 수 있다. 수직 미세 사각유로의 경우에 대해서 Mishima와 Hibiki,<sup>(3)</sup> Mishima 등<sup>(4)</sup>은 유동 상태와 유동양식 변화에 따른 *C*값의 변화율 평균하여 수력직경만의 함수로서 Lockhart-Martinelli 모델의 *C*를 표현하였다. 수평 미세 사각유로의 경우에도 식(1)과 같은 Lockhart-Martinelli 관계식으로는 2상 유동 압력강하를 잘 표현할 수 없음이 Fujita 등,<sup>(6)</sup> Wambsganss 등,<sup>(7)</sup> Ide와 Matsumura,<sup>(8)</sup> 그리고 Yang 등<sup>(11)</sup>의 결과에 제시되어 있다. Wambsganss 등<sup>(7)</sup>은 19.05×3.18mm<sup>2</sup>의 단면을 갖는 수평 사각유로에서 단면중형비 0.17과 6인 조건에서의 실험 결과로부터 식(1)의 상수 *C*를 액체 레이놀즈 수와 마티넬리 변수를 이용하여 수정한 실험식을 사용할 것을 제안하였다. Yang 등<sup>(11)</sup>은 수평 편평관에서의 응축이 수반된 경우의 2상 유동 압력강하를 5-20사이의 상수 *C*를 사용한 Lockhart-Martinelli 관계식으로는 표현할 수 없음을 지적하고, 마찰계수와 동가(equivalent) 레이놀즈 수를 사용하여 압력강하를 표현하였다. 한편 Ide와 Matsumura<sup>(8)</sup>는 경사각이 크고 액체 겹보기 속도가 작은 조건에서는 Lockhart-Martinelli 관계식으로는 실험치를 잘 표현할 수 없음을 지적하고, 경사각과 사각 유로의 단면 중형비, 마티넬리 변수, 그리고 기공률을 변수로 한 관계식을 제시하였다. Ide와 Matsumura<sup>(8)</sup>의 결과는 비교적 넓은 단면중형비와 경사각에 적용할 수 있는 실험식이나, 실제 사용 시에는 기공률을 측정하여야 하는 난점을 가지고 있으며, 사각 유로의 수력직경이 7.3~21.4mm로 본 연구에서 사용한 사각유로의 수력직경(0.78~6.67mm)과 비교할 경우 상대적으로 큼을 알 수 있다. Fig. 3에 실험 결과와 Lockhart-Martinelli 관계식을 함께 도시하였다. 마찰손실배수를 구하기 위해 필요한 액체(또



**Fig. 3** Comparison of experimental data with Lockhart-Martinelli correlation.

는 기체)상만의 유량이 사각유로 내부를 채우면서 흐르는 가상적인 경우의 마찰 압력강하 기울기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_i = \frac{2f_i \rho_i j_i^2}{D_h}, \quad i = f, g \quad (4)$$

여기서, *f*는 마찰계수로 다음과 같다.

$$f = \frac{16}{(Re_{D_h})_i} \quad (\text{층류}) \quad (5)$$

$$f = 0.079 (Re_{D_h})_i^{-0.25} \quad (\text{난류}) \quad (6)$$

이 때

$$(Re_{D_h})_i = \frac{\rho_i j_i D_h}{\mu_i}, \quad i = f, g \quad (7)$$

이다. 식(5)와 식(6)이 본 실험에서와 같은 미세 사각유로에도 적용 가능한 지를 확인하기 위하여 물을 사용한 단상 유동에서의 마찰계수 결과를 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에서 볼 수 있는 것과 같이 층류와 난류의 천이는 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈수가 약 2000에서 발생함을 알 수 있으며, 모든 유로높이에서의 단상 유동 마찰 압력강하를 비교적 잘 표현하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Wambsganss 등<sup>(7)</sup>의 19.05×3.18mm<sup>2</sup>의 단면을 갖는 수평 미세 사각유로에서의 단상 유동 마찰 압력강하 결과에서도 확인할 수 있다. Fig. 3에서 볼 수 있는 것과 같이 유로

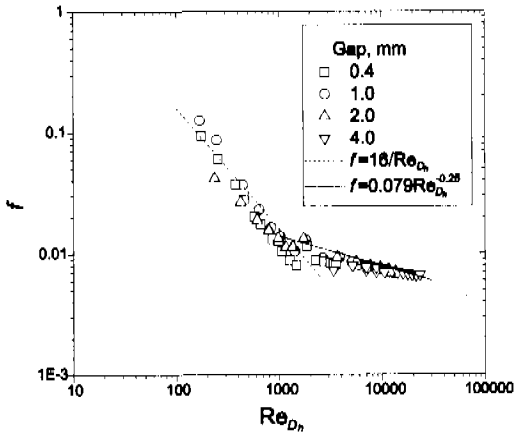


Fig. 4 Single phase flow friction factor.

높이가 4mm에서 0.4mm로 변화하는 경우, 5-20 사이의 상수 C를 갖는 Lockhart-Martinelli 관계식으로는 압력강하 결과를 표현할 수 없으며, 유로 높이에 의한 차이가 있음을 확인할 수 있다. 특히 유로높이가 0.4mm인 경우는 식(1)과는 기울기가 풀리기 때문에 상수 C를 변화시켜서는 실험치를 예측할 수 없다. 동일한 유로 폭 조건(2cm)에서 유로의 높이가 변화하는 것은 결국, 유로의 단면 중횡비가 변화하는 것이므로 2상 유동 마찰 압력강하를 예측하기 위해서는 사각 유로의 단면중횡비를 고려해야 함을 알 수 있다. Fig. 5에는 단면중횡비를 고려하여 실험치를 다음과 같이 정규화한 마찰손실배수  $\overline{\phi}_f$  와 마티넬

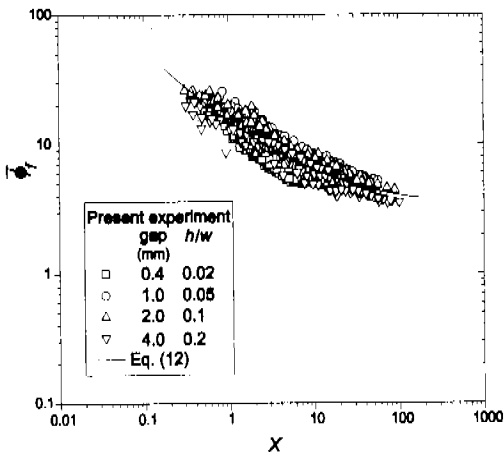


Fig. 5 Modified two-phase frictional multiplier with Martinelli parameter.

리 변수를 이용하여 도시하였다.

$$\overline{\phi}_f = \phi_f / [(h/D_h)^n \phi^*(h/w)] \quad (8)$$

여기서  $\phi^*(h/w)$ 는 Jones<sup>(12)</sup>에 의해 다음과 같이 제시된 단면중횡비 함수로서 사각유로의 경우, 층류 유동에서의 마찰 계수가 원관의 경우와 같아지도록 구성되어 있다.

$$\phi^*\left(\frac{h}{w}\right) = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{h}{w}\right)^2 \left\{ 1 - \frac{192h}{\pi^2 w} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5 \tanh \frac{(2n+1)\pi w}{2h}} \right\} \quad (9)$$

마찰손실배수 식(8)과 같이 정규화한 것은 Fig. 3의 단면 중횡비의 영향을 포함하여 단일 곡선으로 나타내고자 함이며, 이는 유로의 높이가 작을수록  $h/D_h$ 의 효과(결국  $h$ 의 효과)가 상대적으로 커짐을 의미한다. 식(8)의 지수  $n$ 은 모든 유로높이에 대한 실험치의 표준편차가 최소가 되도록 결정하였으며, 그 결과  $n=2$ 임을 알 수 있다. 또한 식(8)의  $h/D_h$ 는 수력직경을 유로의 높이고 폭을 이용하여 표시하면  $\frac{1}{2}(1 + \frac{h}{w})$ 와 같이 나타낼 수 있다. 그러므로 식(8)을 이용하여 정규화한 마찰손실배수는 다음과 같이 단면중횡비  $h/w$ 의 함수로 바꾸어 표현할 수 있다.

$$\overline{\phi}_f = \phi_f / \left[ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{h}{w}\right) \right]^2 \phi^*\left(\frac{h}{w}\right) \quad (10)$$

본 실험에서 단면 중횡비의 범위가 0.2 이하이므로 식(9)는 다음과 같은 2차 함수 형태로 근사시킬 수 있다.

$$\phi^* \cong 0.664 + 0.975 \left(\frac{h}{w}\right) - 0.482 \left(\frac{h}{w}\right)^2 \quad (11)$$

이상과 같이 마티넬리 변수와 식(10)을 이용하면, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 모든 유로높이에 대해 실험치를 잘 표현할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 5의 실험치로부터 최소자승법을 이용하여 얻은 곡선은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{\phi_f} = aX^b 10^{c(\log X)^2}, \quad (0.02 \leq \frac{h}{w} \leq 0.2) \quad (12)$$

여기서,  $a, b, c$  는 실험상수로 다음과 같다.

$$a = 15.21, \quad b = -0.46, \quad c = 0.088 \quad (13)$$

식(12)를 사용하여 모든 단면중평비에 대한 마찰손실배수를 나타낼 경우의 표준편차는 9.9%이다. 미세 유로의 단면 크기 변화를 고려한 기존의 연구는 Mishima와 Hibiki<sup>(3)</sup>와 Ide와 Matsumura<sup>(8)</sup>의 결과를 들 수 있다. 전술한 바와 같이, Ide와 Matsumura<sup>(8)</sup>의 상관식은 비교적 넓은 단면중평비와 경사각에 적용할 수 있는 실험식이나, 기공률을 알아야만 적용할 수 있기 때문에 본 연구에서는 Mishima와 Hibiki<sup>(3)</sup>의 결과와 비교하고자 한다. Mishima와 Hibiki<sup>(3)</sup>는 식(1)의 Lockhart-Martinelli 모델에서의  $C$ 를 미세 원형관의 직경 변화를 고려하여 수력직경의 함수로서 다음과 같이 제안하였다.

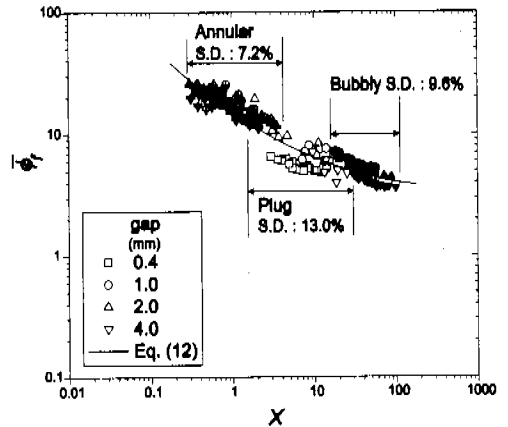
$$C = 21(1 - \exp(-0.319D_h)) \quad (14)$$

각 유로높이에 대한 실험치들 식(12)로 표현할 경우와 Mishima와 Hibiki<sup>(3)</sup>의 실험식(식(1)과 식(14))을 이용할 경우에 대한 표준편차를 Table 5에 나타내었으며, 식(12)를 사용하여 실험치들 나타낼 경우가 보다 잘 예측함을 알 수 있다.

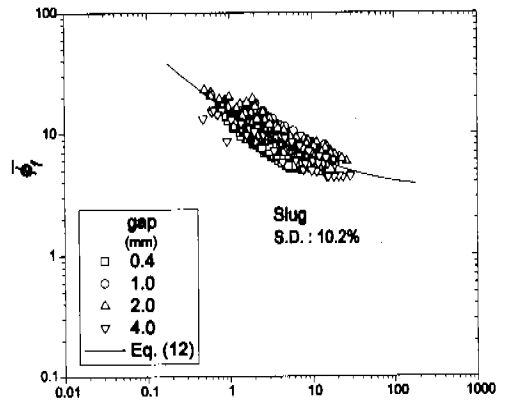
Fig. 6에는 각 유동양식 별 정규 마찰손실배수와 식(12)에 대한 표준편차를 도시하였다. 유동양식은 본 연구에서의 기하학적 형상과 동일한 미세 사각유로에서의 유동양식 선도를 제시한 이한주와 이상용<sup>(13)</sup>의 결과를 이용하여 구분하였다.

**Table 5** Standard deviations of Eq. (12) and Eq. (1) with Eq. (14) for various aspect ratios.

Gap (mm)	Aspect ratio ( $h/w$ )	Standard deviation (%)		Number of data
		Eq. (12)	Eq. (1) with Eq. (14)	
4.0	0.2	7.9	22.9	111
2.0	0.1	9.2	24.3	107
1.0	0.05	10.8	31.3	90
0.4	0.02	11.5	74.6	116



(a) Bubbly, Plug, Annular flow



(b) Slug flow

**Fig. 6** Modified two-phase frictional multiplier with respect to flow patterns(S.D. means standard deviation).

그 결과, 본 실험 조건에서의 유동양식은 기포류, 플러그류, 슬러그류, 환상류이다. 대부분의 실험 영역이 슬러그류에 해당하며, 마티넬리 변수를 사용하여 마찰손실배수를 표현할 경우의 슬러그류 영역은 환상류, 플러그류, 기포류의 영역과 겹치게 된다. 따라서 각 유동양식에 따른 마찰손실배수와 마티넬리 변수와의 관계를 도시하기 위하여 Fig. 6(a)에는 환상류, 플러그류, 기포류에 대한 마찰손실배수, Fig. 6(b)에는 슬러그류에 대한 값을 도시하였다. Fig. 6으로부터 식(12)를 이용하면 모든 유동양식에 대한 실험치들 보편적으로 잘 표현할 수 있음을 알 수 있다. Wambsganss 등<sup>(14)</sup>의 미세유로(2.9mm 원형관)에서의 중압 열전달 실험으로부터 넓은 건도 범위까지 슬러그류가

나타남이 알려져 있으며, 본 연구에서의 유동양식 역시 많은 부분이 슬러그류에 해당함을 알 수 있다. 따라서 식(12)와 같은 단일 미세유로에서의 마찰손실배수 관계식은 상변화가 수반된 미세유로에서의 마찰 압력강하에 대한 비교 자료로서도 활용될 수 있으리라 생각된다.

식(12)를 사용하여 구한 마찰손실배수와 실험치를 이용한 마찰손실배수와의 Fig. 7에서 볼 수 있는 것과 같이 모든 실험치(424개)의 86%가 ± 30% 내에 해당한다. 또한 Table 5와 Fig. 6으로부터 식(12)는 사각유로의 단면종횡비(0.02~0.2 범위)와 대부분의 유동양식에 무관하게 수평 미세사각유로에서의 2상 유동 압력강하를 잘 표현하는 것으로 결론지을 수 있다. 또한 표면장력의 영향을 크게 받는 미세 유로에 있어서 냉매와 같이 표면장력이 작은 유체로 추후 연구의 범위를 넓힌다면 밀집형 열교환기의 마찰 압력강하를 예측하는 데 활용될 수 있으리라 생각된다.

4. 결 론

단면 종횡비가 1보다 작은 미세 수평 사각 유로에서의 공기-물 2상 유동 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2상 유동 압력강하 실험을 통해 액체 및 기체의 걸보기 속도가 각각 증가할 수록, 그리고 유로 높이가 낮아질수록 단위길이 당 2상 유동

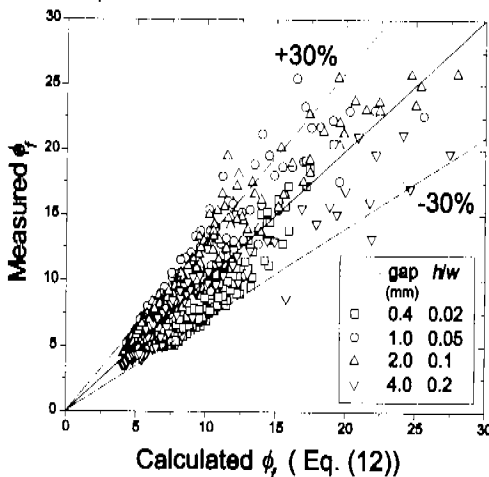


Fig. 7 Comparison between measured and calculated two-phase frictional multipliers.

압력강하는 증가함을 알 수 있다.

- (2) 2상 유동 압력강하 실험치를 마티넬리 변수와 단면 종횡비를 고려한 정규 마찰손실배수물 사용하여 단면 종횡비 0.02~0.2 범위와 기포류, 슬러그류, 플러그류 및 환상류 등 유동양식에 대하여 적용할 수 있는 실험식(식(12))을 제시하였다.

후 기

본 연구는 1998년도 과학기술처 대형기계설비 핵심요소 기술개발과제 "밀집형 열교환기에서의 열전달 성능향상기술개발( 97-NG-01-02-A-02 )" 의 연구비 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Bergles, A. E., 1997, "Heat Transfer Enhancement — The Encouragement and Accommodation of High Heat Fluxes," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 119, pp. 8~19.
- (2) 이한주, 이상용, 1998, "작은 수력직경을 갖는 유로 내에서의 2상 유동양식과 열전달 특성에 대한 연구 동향," *공기조화 냉동공학회 98 하계학술발표회 논문집(II)*, pp. 842~847.
- (3) 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, No. 4, pp. 703~712.
- (4) Mishima, K., Hibiki, T. and Nishihara, H., 1993, "Some Characteristics of Gas-Liquid Flow in Narrow Rectangular Ducts," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 19, No. 1, pp. 115~124.
- (5) Lowry, B. and Kawaji, M., 1988, "Adiabatic Vertical Two-Phase Flow in Narrow Flow Channels," *AIChE Symposium series*, Vol. 84, No. 263, pp. 133~139.
- (6) Fujita, H., Ohara, T., Hirota, M. and Furuta, H., 1995, "Gas-Liquid Flows in Flat Channels with Small Channel Clearance," *Proc. of 2nd Int. Conf. on Multiphase Flow 95-Kyoto, Japan*, pp. IA3-37~IA3-44.
- (7) Wambsganss, M. W., Jendrzeczyk, J. A.,



- France, D. M. and Obot, N. T., 1992, "Frictional Pressure Gradients in Two-Phase Flow in a Small Horizontal Rectangular Channel," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 5, pp. 40~56.
- (8) Ide, H. and Matsumura, H., 1990, "Frictional Pressure Drops of Two-Phase Gas-Liquid Flow in Rectangular Channel," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 3, pp. 362~372.
- (9) Kline, S. J., 1985, "The Purposes of Uncertainty Analysis," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 153~160.
- (10) 이상용, 김병주, 김무환, 1993, 二相流動熱傳達, 대영사.
- (11) Yang, C. Y. and Webb, R. L., 1996, "Friction Pressure Drop of R-12 in Small Hydraulic Diameter Extruded Aluminum Tubes with and without Micro-fins," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 4, pp. 801~809.
- (12) Jones, O. C., 1976, "An Improvement in the Calculation of Turbulent Friction in Rectangular Ducts," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 6, pp. 173~181.
- (13) 이한주, 이상용, 1999, "미세 수평 사각유로에서의 2상 유동 양식에 관한 실험적 연구," *대한기계학회 논문집 게재 예정*.
- (14) Wambsganss, M. W., France, D. M., Jendrzejczyk, J. A. and Tran, T. N., 1993, "Boiling Heat Transfer in a Horizontal Small-Diameter Tube," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 963~972.