

## 협소 사각유로에서 대향류 2상유동의 기공률과 압력구배

김 병 주\*, 정 은 수, 손 병 후\*

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과, \*홍익대학교 대학원

### Void Fraction and Pressure Gradient of Countercurrent Two-Phase Flow in Narrow Rectangular Channels

Byong Joo Kim\*, Eun Soo Jeong, Byong Hu Sohn\*

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

\*Graduate School, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received December 14, 2000; revision received March 15, 2001)

**ABSTRACT:** An experimental study on the countercurrent two-phase flow in narrow rectangular channels has been performed. The void fraction and the pressure gradient were investigated using air and water in 760 mm long, 100 mm wide, vertical test sections with 2, 3 and 5 mm channel gaps. Tests were systematically performed with downward liquid superficial velocities and upward gas velocities covering 0 to 0.08 and 0 to 2.5 m/s ranges, respectively. The experimental results were compared with the previous correlations, which were mainly for round tubes, and the qualitative trends were found to be in good agreements. However the quantitative discrepancies were hardly neglected. As the superficial gas velocities increased, the void fraction increased and the pressure gradient decreased, where the effects of the liquid superficial velocities were infinitesimal. As the gap width of the rectangular channel increased the void fraction and the 2-phase frictional pressure gradient approached those values for the round tubes. Equi-periphery diameter, rather than the hydraulic diameter, seemed to be more effective in the analysis of two-phase flow behavior.

**Key words:** Countercurrent two-phase flow(대향류 2상유동), Narrow channel(협소 유로), Void fraction(기공률), Pressure gradient(압력구배)

#### 기 호 설 명

$B$  : 식(13)의 상수  
 $C$  : 상수  
 $D$  : 직경 [m]  
 $D_H$  : 수력직경 [m]

$D_e$  : 등가 원주직경 [m]  
 $f$  : 마찰계수  
 $g$  : 중력가속도 [ $m/s^2$ ]  
 $j$  : 겉보기속도 [m/s]  
 $K$  : 식(1)의 상수  
 $l$  : 유로 단면적 기준의 등가 기포길이 [m]  
 $l_g$  : 기포 길이 [m]  
 $n$  : 식(1)의 지수  
 $P$  : 압력 [kPa]  
 $p$  : 식(13)의 지수

\* Corresponding author

Tel.: +82-2-320-1611; fax: +82-2-322-7003

E-mail address: bjkim@wow.hongik.ac.kr

- $q$  : 식 (13)의 지수
- Re : 레이놀즈수,  $\rho u D / \mu$
- $u$  : 속도 [m/s]
- $s$  : 사각유로의 간극 [m]
- $X$  : 식 (1)의 변수
- $Y$  : 식 (1)의 변수
- $Z$  : 식 (7)의 변수
- $z$  : 축 방향 좌표
- $w$  : 사각유로의 폭 [m]

그리스 문자

- $\alpha$  : 기공률
- $\alpha_0$  : 정체상태의 액상에서의 기공률
- $\delta$  : 액막두께 [m]
- $\mu$  : 점성계수 [ $Ns/m^2$ ]
- $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]
- $\sigma$  : 표면장력 [N/m]
- $\tau$  : 전단응력 [ $N/m^2$ ]

하첨자

- $A$  : 가속
- $F$  : 마찰
- $f$  : 액상
- film : 액막
- $G$  : 중력
- $g$  : 기상
- $i$  : 기/액 계면
- $v$  : 층류
- $t$  : 난류
- TP : 2상

1. 서 론

암모니아/물 흡수식 시스템에서 암모니아 수용액의 재생과정을 통해 생성되는 암모니아-물 2성분 혼합증기의 암모니아 농도는 시스템의 냉동능력과 성능계수를 결정하는 주요 인자이다. 발생기에서 생산되는 혼합증기의 암모니아 농도를 증

가시키기 위하여 대향류 재생과정을 채택할 수 있다. 발생기의 상부에서 암모니아 수용액을 공급하여 자중에 의해 하부로 유동하도록 하고 외부 열원에 의한 비등과정으로 생성된 기포는 상향 유동하면서 하향 유동하는 수용액과 접촉하도록 유도하여 기/액 2상 대향류 유동을 형성한다. 이때 혼합증기는 상향 유동하면서 암모니아 수용액의 온도상승(temperature glide) 효과로 물 성분이 응축되므로 발생기 출구에서 혼합증기의 암모니아 농도는 증가한다. 결국 상향 유동하는 냉매증기와 하향 유동하는 높은 농도의 암모니아 수용액 사이의 접촉에 의한 효율적인 열 및 물질 전달을 유도하고 상향 유동하는 냉매증기에 의한 기수공발(carryover)을 방지할 수 있는 발생기의 설계기법이 요구된다. 또한 시스템의 소형화를 위하여 판-heat 열교환기와 같은 밀집형 열교환기가 발생기로 채택될 수 있을 것이며, 이를 위하여 협소 사각유로(narrow rectangular channel)에서의 대향류 2상유동에 대한 기초 연구가 선행되어야 한다.

협소 사각유로에 대한 정의는 명확하지 않으나 일반적으로 간극이 0.5-5 mm인 사각유로로 그 폭이 간극에 비하여 훨씬 큰 유로를 의미한다. 협소 유로의 제한된 공간 내를 유동하는 기/액 혼합물의 거동은 표면장력에 의한 표면력의 증가 및 마찰 압력 강하의 증가로 인해 원관의 경우와는 상이하다. 협소 유로에서 동향류 2상유동 양식에 대한 연구는 다양하게 수행되었다.<sup>(1-3)</sup> Mishima et al.<sup>(4)</sup>과 Mishima and Hibiki<sup>(5)</sup>는 큰 형상비(aspect ratio)의 협소 사각유로에서 수직 동향류 2상유동에 대한 실험적 연구를 통하여 유동양식, 기공률, 그리고 2상 압력손실을 해석하였다. 이한주와 이상용<sup>(6)</sup>은 미세 수평 사각유로의 동향류 2상유동에 대하여 압력손실을 실험적으로 측정하고, 2상유동 마찰배수(two-phase frictional multiplier)를 유도하였다.

Taitel and Barnea<sup>(7)</sup>는 수직관 내의 대향류 2상유동에 대하여 각 유동양식 간의 천이 및 압력 강하 모델을 제안하였다. Yamaguchi and Yamazaki<sup>(8)</sup>는 원관 내에서 2상 상향류, 대향류 그리고 하향류 각각에 대한 유동 양식 선도를 제시하였다. Ohnuki<sup>(9)</sup>는 수평관에서의 대향류에 대하여 대향 유동한계(counter-current flow limitation) 조건을 제시하였다. Ghiaasiaan et al.<sup>(10-11)</sup>

은 원관 내에서 대향류 유동 양식을 관찰하고 유로 평균 기공률을 측정하였다. Osakabe and Kawasaki<sup>(12)</sup>는 높은 형상비의 사각유로에서 플러딩 현상을 이해하기 위한 상부 플러딩을 실험하였다. 그러나 협소 사각유로에서 대향류 2상유동에 대하여 수력학적 측면과 전달현상적 측면에 중점을 둔 연구는 쉽게 발견할 수 없다.

본 연구에서는 유로의 간극이 각각 2 mm, 3 mm 그리고 5 mm인 협소 수직 사각유로에서 공기/물 2상 혼합물의 대향류 유동에 대하여 유로 평균 기공률 및 2상유동 압력구배를 실험적으로 연구하고, 실험결과를 기존에 발표된 경험식과 비교하고 분석하였다. 본 연구의 결과는 암모니아/물 흡수식 시스템을 위한 소형, 고효율 발생기의 기본 설계자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험장치 및 방법

협소 사각유로에 대한 기/액 혼합물의 단열 2상유동 특성을 해석하기 위한 실험장치의 개략도가 Fig. 1에 주어져 있다. 사각유로를 구성하는 두 개의 판은 가시화를 위하여 투명 아크릴 판을 사용하였으며, 유로의 폭과 길이는 각각 100 mm와 760 mm로 일정하게 하였다. 유로의 간극은 아크릴 판 사이에 설치된 금속 띠의 두께를 변화시켜, 유동 단면의 중첩비를 0.02~0.05의 범위에서 조정하였다. 유로를 구성하는 두 개의 판 중 하나에 직경 10 mm의 구멍을 판의 상단과 하단에서 15 mm 떨어진 지점에 각각 가공하여 액상의 유입구와 유출구로 사용하였다. 다른 판의 상단으로부터 25 mm 지점에 직경 20 mm의 구멍을 가공하여 유로 내를 유동한 기/액 혼합물이 기/액 분리기로 유출될 수 있도록 하였다. 분리기에

서 공기는 대기 중으로 방출되고 물은 범람공을 통하여 물탱크로 재순환한다. 유로 내부를 실제로 유동한 물의 유량은 시험부 출구에서 일정 시간 동안 채집된 물의 양을 측정하여 환산하였다.

협소 사각유로에 공기를 공급하기 위하여 내경 0.25 mm, 외경 0.3 mm의 모세관 48개를 유로를 형성하는 각 아크릴 판의 하단으로부터 50 mm인 곳에 3열로 설치하였다. 시험부의 상단으로부터 210 mm인 지점과 하단으로부터 350 mm인 지점의 유로 폭 중앙에 압력공을 설치하여 실험 중 발생하는 2상유동 압력구배를 측정하였다. 이때 측정범위가  $\pm 1.99$  kPa인 디지털마노미터(Furness Controls 사, FCO12)를 사용하였다. 물은 물탱크로부터 펌프에 의해 가압되어 유로에 공급되며, 입구에서 물의 유량을 측정하기 위해 부자식 유량계(float-type flow meter)를 병렬로 연결하여 사용하였다. 공기는 압축기에 의해 가압된 후 필터와 압력조절기를 거친 다음 부자식 유량계가 병렬로 연결되어 있는 유량 측정부를 통과하고, 유로 측면의 공기 챔버에 유입된다. 공기 챔버는 유로를 구성하는 아크릴 판에 설치되어 있으며 모세관을 통하여 공기를 유로 내로 공급한다. 매 실험에 앞서 유로와 분리가 물로 가득 채워진 상태에서 시험부 출구의 밸브를 조절하여 시험부에 공급되는 물의 유량을 일정하게 유지하였다. 그 다음 공기 챔버에 원하는 유량의 공기를 공급한 후, 정상상태가 실현되면 2상유동 압력구배를 측정하였다. 그리고 정상상태에서 시험부에 설치된 순간 폐쇄 밸브(quick closing valve)를 이용하여 물과 공기의 유입, 유출을 차단하여 순간적으로 시험부를 분리한 후, 밀도 차이에 의해 공기와 물이 분리되었을 때, 물의 수위인 붕괴수위(collapsed height)와 시험부의 길이의 비로 평균 기공률(channel average void fraction)을 산정하였다.

상온의 공기와 물이 사용되었으며 실험의 반복성은 매우 우수한 것으로 확인되었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 기공률

협소 사각유로 내에서 정체상태의 액상에 대한 유로 평균 기공률의 결과를 Fig. 2에 도시하였으

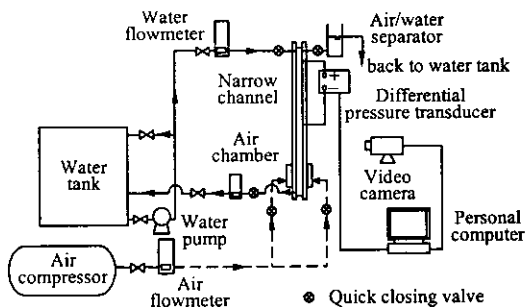


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

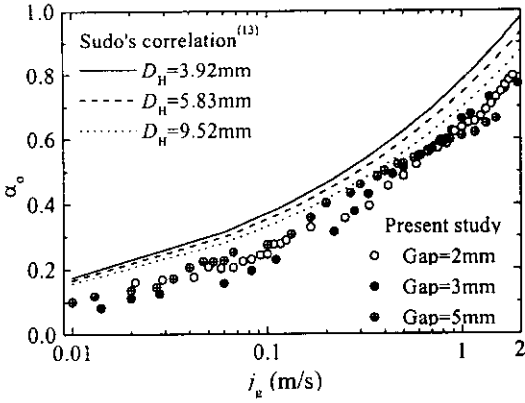


Fig. 2 Void fraction in narrow rectangular channels with zero liquid flow.

며, 원관의 경우에 대한 Sudo<sup>(13)</sup>의 상관식에 사각유로의 수력직경을 적용한 결과와 본 실험의 결과를 비교하였다.

$$\alpha_0 = \frac{Y}{KX^n} \quad (1)$$

여기서

$$Y = \left( \frac{\sigma}{g\rho_f D^2} \right)^{0.064} \left( \frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.125} \quad (2)$$

$$X = \left[ \left( \frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0.82} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.2} \right] \left( \frac{\mu_g j_g}{\sigma} \right) \quad (3)$$

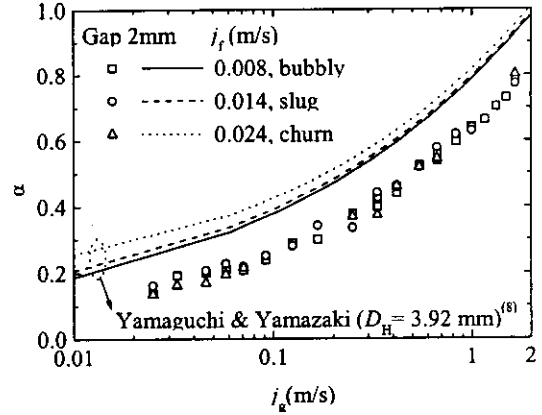
$$X < 0.0005, K = 0.00523, n = -0.704 \quad (4)$$

$$0.0005 \leq X \leq 0.004, K = 0.093, n = -0.325 \quad (5)$$

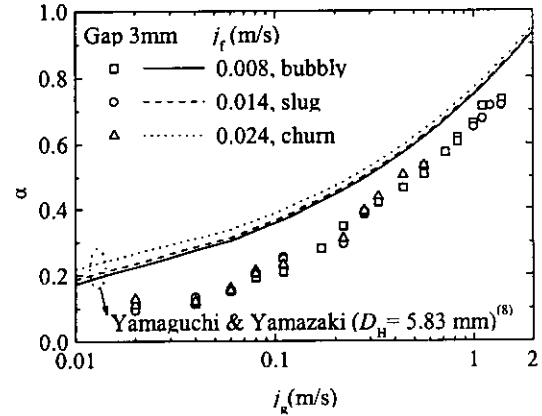
$$X > 0.004, K = 0.54, n = 0 \quad (6)$$

이며,  $\sigma$ 는 액상의 표면장력,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho$ 는 밀도,  $\mu$ 는 점도,  $j$ 는 결보기 속도이며 하첨자  $f$ 와  $g$ 는 액상과 기상을 의미한다.

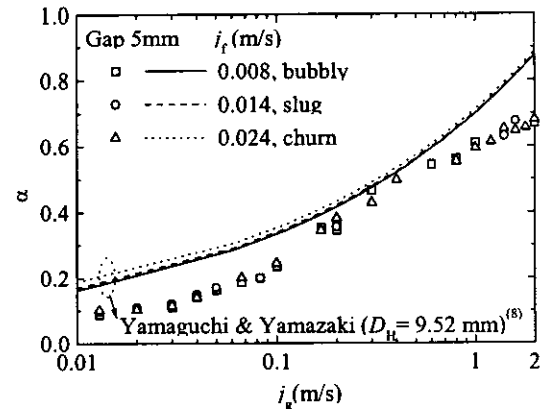
기상의 결보기 속도가 증가함에 따라 기공률이 증가하는 일반적인 특성은 본 실험의 결과와 Sudo의 상관식 모두에서 확인할 수 있다. 그러나 상관식의 경우 수력직경이 증가함에 따라 기공률이 미소하나마 감소하는 것으로 제시하였으나, 본 실험의 경우 수력직경의 기공률에 대한 영향은 기상의 결보기속도의 영향과 함께 복합적으로



(a) Gap 2 mm



(b) Gap 3 mm



(c) Gap 5 mm

Fig. 3 Channel average void fraction at different channel gaps.

나타나므로 정량적으로 비교하기가 쉽지 않다. 본 실험의 결과와 상관식으로부터 알 수 있듯이 기공률에 대한 수력직경의 영향은 상대적으로 미약하였다. Sudo의 상관식은 원관 내의 2상유동에 대한 결과로 협소 사각유로의 경우보다 기공률을 다소 크게 예측하고 있으며, 이는 협소유로의 좁은 간극에서 형성되는 2상유동의 경우 인접한 판에 의하여 기상이 차지할 수 있는 체적이 원관에 비하여 제한받기 때문으로 고려된다.

Fig. 3에 협소 사각유로에서 기상의 유량 변화에 따른 유로 평균 기공률의 변화를 액상의 겔보기 속도 및 유로 간극의 함수로 도시하였다. 대항류 기/액 2상유동에서 기공률을 예측하기 위하여 Yamaguchi and Yamazaki<sup>(8)</sup>는 액상의 유량이 0인 경우의 Sudo<sup>(13)</sup>의 상관식을 기초로 하여 다음과 같은 상관식을 제시하였다.

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1 + (1.6 \times 10^4)Z \quad (7)$$

여기서

$$Z = \left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)^{-0.4} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f}\right)^{0.7} \left(\sqrt{\frac{\rho_f D^2}{\sigma}}\right)^{-0.9} \times \left(\frac{\mu_f j_g}{\sigma}\right)^{1.3} \left(\frac{-j_f}{j_g}\right)^{1.8} \quad (8)$$

이다.

기상의 겔보기 속도가 증가함에 따라 유로 평균 기공률은 증가하지만, 본 실험의 운전 범위 내에서 액상의 수직 하향 겔보기속도는 증가하여도 기공률의 정성적인 변화는 발견되지 않았다. 기공률과 기상의 겔보기속도의 관계에 대한 액상의 겔보기속도, 혹은 유동양식의 영향은 무시하여도 큰 오차가 없을 것으로 판단된다. 이는 대항류 2상유동 한계(CCFL)의 범위 내에서 액상의 유량을 기상의 경우와 비교할 수 있을 정도로 증가시킬 수 없으므로 액상의 운동량속은 상대적으로 낮고, 상향 유동하는 기상의 겔보기속도 및 운동량속에 의하여 기상과 액상의 구조가 결정되기 때문으로 고려된다. 본 실험의 결과는 Yamaguchi and Yamazaki<sup>(6)</sup>가 제시한 상관식에 비하여 기공률을 낮게 보여주고 있으나, 협소유로의 간극이 증가함에 따라 실험결과와 상관식의 차이

가 감소함을 알 수 있으며 이는 Fig. 2에서 제시한 동일한 물리적 이유로 이해할 수 있다.

Sudo<sup>(13)</sup>가 제시한 상관식(1)에서 유로의 기하학적 구조를 대변하는 직경을 새로이 정의하거나 혹은 수력직경을 포함한 항의 지수를 변화시킨다면 본 연구에서 수행한 협소 사각유로에서 대항류 2상유동의 기공률에 대한 실험적 결과를 정확히 예측할 수 있는 상관관계식의 개발이 가능할 것이다. 그러나 협소유로의 형상비의 영향이나 기/액 2상 유체의 상태량의 영향 등도 함께 고려되어야 하므로 이는 향후의 과제로 남겨 두고자 한다.

### 3.2 압력구배

단상유동의 경우 협소 사각유로에서의 마찰계수는 원관의 경우와 다르므로 본 실험의 신뢰도를 확인하고 마찰 압력 강하에 대한 기준으로 삼기 위하여 단상유동의 압력손실을 먼저 측정하여 기존의 결과와 비교하였다. 일반적으로 단상유동의 마찰계수는 층류유동의 경우 식(9)로, 난류유동의 경우 식(10)으로 표현된다.

$$f = C_v Re_{D_h}^{-1} \quad (9)$$

$$f = C_t Re_{D_h}^{-0.25} \quad (10)$$

Fig. 4는 마찰계수에 대한 실험결과와 상관식이 층류 및 난류 유동의 모든 경우에 대하여 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 층류유동의 경우 상수  $C_v$ 는 유로의 폭에 대한 간극의 비의 함수이나, 본 실험에서 고려한 간극의 경우 폭에

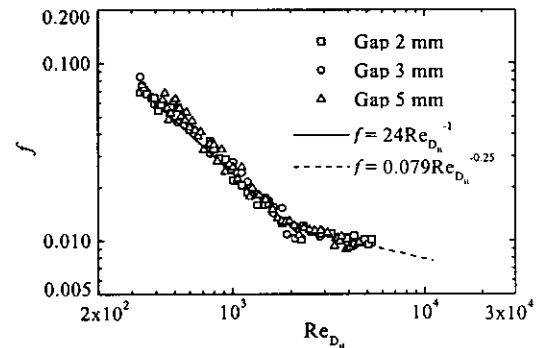
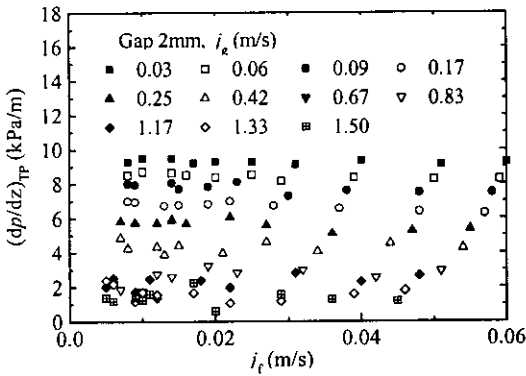
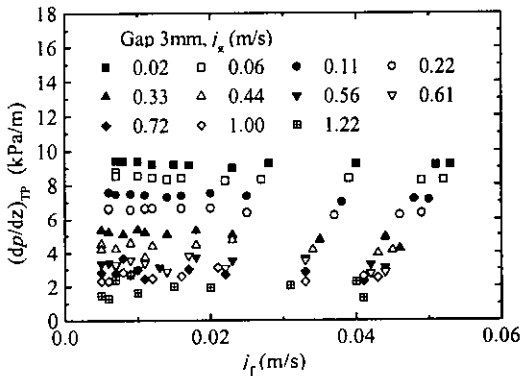


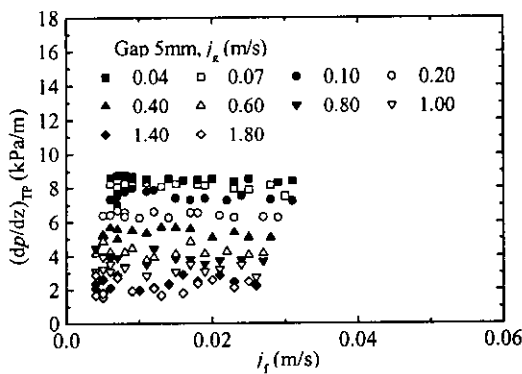
Fig. 4 Single-phase friction factor.



(a) Gap 2 mm



(b) Gap 3 mm



(c) Gap 5 mm

Fig. 5 Two-phase flow pressure gradient in rectangular narrow channels.

비하여 아주 작으므로 동일한 값이 사용될 수 있다.

협소 사각유로에서 2상유동 압력구배를 기상과 액상의 겉보기속도의 함수로 Fig. 5에 제시하였

다. 협소유로의 간극이 증가함에 따라 2상유동 압력구배는 감소한다. 기상의 겉보기속도를 증가 시킬수록 대향류 2상유동의 압력구배가 크게 감소하나 2상유동 압력구배에 대한 액상의 겉보기속도의 영향은 거의 미미한 것을 확인할 수 있다. 2상유동 압력구배는 기본적으로 마찰, 가속 그리고 중력에 의한 3가지 항으로 구성된다.

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP} = -\left(\frac{dP}{dz}\right)_F - \left(\frac{dP}{dz}\right)_A - \left(\frac{dP}{dz}\right)_G \quad (11)$$

본 연구의 경우 단열유동으로, 가속의 영향이 없기 때문에 대향류 2상유동의 마찰 압력구배는 Fig. 5의 2상유동 압력구배로부터 Fig. 3의 기공률로부터 산정되는 중력 압력구배를 고려하여 계산할 수 있다. 대향류 2상유동 압력구배에 대한 많지 않은 연구 중에서 Taitel and Barnea<sup>(7)</sup>가 제시한 압력강하 모델을 본 실험의 결과와 비교하였다. 기포류, 슬러그류 그리고 환상류 각각의 경우에 대해 2상유동 압력강하 관계식을 제시하였으며, 기포류의 경우 2상유동 압력구배는 중력 압력구배에 의해 지배되고 마찰 압력구배의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작다고 제시하였다. 슬러그류의 경우 2상유동 압력구배는 다음과 같이 제시되었다.

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP} = \left[ -\rho_f g - \frac{2}{D} f_f \rho_f |u_f| u_f \right] \left(1 - \frac{l_g}{l}\right) + \left[ -\rho_g g - \frac{4\tau_i}{D(1-2\frac{\delta}{D})} \right] \frac{l_g}{l} \quad (12)$$

여기서  $\tau_i$ 는 기/액 계면에서의 전단응력,  $u_g$ 는 테일러 기포의 상승속도,  $u_f$ 는 액상의 속도,  $l$ 은 기포의 체적을 유로의 단면적으로 나누어 산정한 기포의 등가길이, 그리고  $l_g$ 는 기포의 실제 길이이다.

$$u_g = 1.2u_f + 0.35\sqrt{gD} \quad (13)$$

$$u_f = j_g - j_f \quad (14)$$

$$\frac{l_g}{l} = \frac{j_g}{4\frac{\delta}{D}u_f + (j_g - j_f)} \quad (15)$$

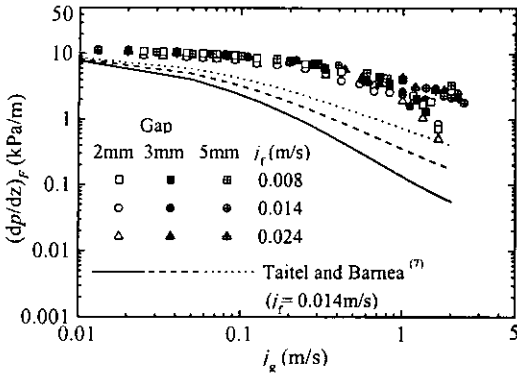


Fig. 6 Two-phase frictional pressure gradient in rectangular narrow channels.

유하액막의 두께  $\delta$ 는 Wallis<sup>(15)</sup>가 제시한 다음의 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\frac{\delta}{D} = B \left[ \frac{\mu_f^2}{D^3 g (\rho_f - \rho_g) \rho_f} \right]^p \left[ \frac{4 \rho_f u_{film} D}{\mu_f} \right]^q \quad (16)$$

식(16)에서 하첨자 *film*은 유하액막을 의미하며, 상수 *B* 그리고 지수 *p*와 *q*는 난류유동인 경우 0.0048, 5/6, 3/2 그리고 층류유동인 경우 0.8667, 1/2, 1/2이다.

Fig. 6에 2상유동 마찰 압력구배에 대한 Taitel and Barnea<sup>(7)</sup>의 상관식과 본 실험의 결과를 비교하였다. 이 상관식은 수직 원관 내의 2상유동에 관한 것으로 본 실험의 경우와 기하학적 조건이 상이하어 본 실험의 결과보다 2상유동 마찰 압력구배를 낮게 예측하고 있다. 사각유로의 수력직경을 사용한 상관식의 경우 유로 간극의 영향을 뚜렷이 볼 수 있다. 간극이 증가함에 따라 수력직경은 비례적으로 증가한다. 본 실험의 결과도 동일한 정성적인 경향을 보여주고 있으나, 특히 낮은 기상의 겉보기속도 영역에서 유로간극의 영향은 상대적으로 미약한 것으로 판단된다. 결국 현재 제시된 상관식의 적용에 있어 협소 사각유로의 특성 길이로 수력직경을 채택하는 것보다 Sadatomi et al.<sup>(14)</sup>이 제시한 등가 원주직경(equi-periphery diameter)을 사용하는 것이 사각유로 간극의 영향을 둔화시키는 효과를 유도할 수 있을 것이다.

$$D_e = \frac{2(s+w)}{\pi} \quad (17)$$

여기서 *s*는 사각유로의 간극이며, *w*는 사각유로의 폭이다. 그러나 등가 원주직경을 사용할 경우, 기포의 상대길이와 유하액막의 두께 등에 대한 물리적 모델도 함께 수정되어야 하므로 사각유로에서 유로의 간극과 폭, 그리고 작동유체의 상태량 등이 2상유동 거동에 미치는 영향을 폭넓게 해석하는 것이 필요하다.

#### 4. 결 론

협소 사각유로에서 대향류 2상유동 거동을 실험적으로 해석하였다. 공기/물 2상 혼합물을 사용하여 유로의 간극을 변화시키면서 유로 평균 기공률과 2상유동 압력구배를 측정하여 기존의 원관에 대한 상관식과 비교·분석하였다. 원관 내의 2상유동에 대한 기공률과 압력강하의 상관식과 협소 사각유로에 대한 본 연구의 실험결과는 정성적으로 동일한 경향을 보여주었으나, 정량적으로 무시할 수 없는 차이가 존재함을 확인하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 기상의 유량이 증가할수록 유로 평균 기공률은 증가하고 대향류 2상유동 압력구배는 감소한다. 그러나 액상 유량의 영향은 매우 미약하다.
- 2) 사각유로의 간극이 증가하면 2상유동 마찰 압력구배와 기공률은 동일한 액상 및 기상 유동 조건하의 원관의 경우에 근접한다.
- 3) 협소 사각유로의 경우, 2상유동 거동의 해석을 위한 특성 길이로 수력직경보다 등가 원주직경을 사용하는 것이 효과적이다.

협소 사각유로에서 대향류 2상유동의 수력학적 거동을 이해하기 위하여 다양한 단면 형상비의 협소 사각유로에 대한 체계적인 실험적 연구를 통하여 유동양식, 기공률 그리고 압력구배에 대한 해석이 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-304-007-3) 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Lowry, B. and Kawaji, M., 1988, Adiabatic vertical two-phase flow in narrow flow

- channels, AIChE Symp. Series, Vol. 84, pp. 133-139.
2. Wilmarth, T. and Ishii, M., 1994, Two-phase flow regimes in narrow rectangular vertical and horizontal channels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1749-1758.
  3. Xu, J. L., Cheng, P. and Zhao, T. S., 1999, Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, pp. 411-432.
  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, pp. 115-124.
  5. 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.
  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, *Transaction of KSME*, Vol. 23, No. 5, pp. 637-645.
  7. Taitel, Y. and Barnea, D., 1983, Counter-current gas-liquid vertical flow, model for flow pattern and pressure drop, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 9, pp. 637-647.
  8. Yamaguchi, K. and Yamazaki, Y., 1982, Characteristics of countercurrent gas-liquid two-phase flow in vertical tubes, *J. Nucl. Sci. Technol*, Vol. 19, pp. 985-996.
  9. Ohnuki, A., 1986, Experimental study of counter-current two-phase flow in horizontal tube connected to inclined riser, *J. of Nuclear Science and Technology*, Vol. 23, No. 3, pp. 219-232.
  10. Ghiaasiaan, S. M., Taylor, K. E., Kamboj, B. K. and Abdel-Khalik, S. I., 1995, Countercurrent two-phase flow regimes and void fraction in vertical and inclined channels, *Nucl. Sci. Engng.*, Vol. 119, pp. 182-194.
  11. Ghiaasiaan, S. M., Wu, X., Sandowski, D. L. and Abdel-Khalik, S. I., 1997, Hydrodynamic characteristics of counter-current two-phase flow in vertical and inclined channels: effects of liquid properties, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 23, No. 6, pp. 1063-1083.
  12. Osakabe, M. and Kawasaki, Y., 1989, Top flooding in thin rectangular and annular passages, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 15, No. 5, pp. 747-754.
  13. Sudo, Y., 1980, Estimation of average void fraction in vertical two-phase flow channel under low liquid velocity, *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 17, No. 1.
  14. Sadatomi, Y., Sato, Y. and Saruwatari, S., 1982, Two-phase flow in vertical noncircular channels, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 8, pp. 641-655.
  15. Wallis, G. B., 1969, *One-dimensional two-phase flow*, McGraw-Hill, New York.