

협소 사각 유로에서 대향류 기/액 2상 유동양식

손 병후* · 김 병주** · 정 시영***

Counter-Current Gas-Liquid Two-Phase Flow Regimes in Narrow Rectangular Channels

B.H. Sohn, B.J. Kim and S. Jeong

Key Words : Flow regime (유동양식), Counter-current two-phase flow (대향류 2상 유동), Narrow channel (협소유로), Flow regime transition (유동양식 천이)

Abstract

A study of counter-current two-phase flow in narrow rectangular channels has been performed. Two-phase flow regimes were experimentally studied in 760 mm long and 100 mm wide test sections with 2.0 and 3.0mm gaps. The resulting data have been compared to previous transition models. For the transition from bubbly to slug flow the superficial velocity of gas increased as the gap width increased. The comparison of experimental data to the transition model developed by Taitel and Barnea showed relatively good agreement for the bubbly-to-slug transition in the case of 2mm gap width. For the criteria of Mishima and Ishii to be applicable to the slug-to-churn transition the distribution parameter should be well defined for narrow channels. Even though the gap width of narrow channels increased the superficial gas velocity did not change for the transition from churn to annular flow regime. For the churn-to-annular transition the model of Taitel and Barnea showed discrepancies with experimental data, especially in the channel with larger gap.

기호설명

B : 식(11)의 상수
 C : 식(10)의 상수
 C_o : 2상유동 분포변수
 D : 수력 직경 [m]
 g : 중력가속도 [m/s^2]
 j : 길보기 속도 [m/s]
 u : 속도 [m/s]
 m : 식(10)의 상수
 p : 식(11)의 지수
 q : 식(11)의 지수
 u_{gj} : 드리프트 속도 [m/s]

δ : 액막 두께 [m]
 μ : 점성계수 [Ns/m^2]
 ν : 동점성 계수 [m^2/s]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 σ : 표면장력 [N/m]

하첨자

b : 기포
 f : 액상
 $film$: 액막
 g : 기상

그리스문자

α : 기공률

1. 서론

암모니아/물 흡수식 냉·난방 시스템의 재생과정
 을 통해 생성된 혼합증기의 암모니아 농도는 시
 스템의 효율과 용량을 결정하는 주요 변수로서 이
 를 최대한 증가시키는 방법으로 대향류 재생과정
 을 들 수 있다. 암모니아 수용액을 재생기의 상부
 에서 공급하여 자중에 의해 하부로 유동하도록 하

* 홍익대학교 기계공학과 대학원
 ** 정희원, 홍익대학교 기계공학과 교수
 *** 정희원, 서강대학교 기계공학과 교수

고 비등과정으로 생성된 기포는 상향 유동하면서 하향 유동하는 수용액과 접촉 및 혼합하도록 유도함으로써 기/액 2상 사이에 대향류 유동을 형성할 수 있다. 대향류 유동에 의한 액상과 기상 사이의 열 및 물질 교환과정은 정류과정과 유사하며 재생기 출구에서 암모니아/물 혼합증기의 농도는 동향류의 경우보다 높게 유지될 수 있다. 암모니아/물 흡수식 시스템의 소형화를 위하여 판-원 열교환기와 같은 밀집형 열교환기를 재생기로 사용하려면 우선 협소 사각 유로에서의 대향류 2상유동에 대한 기초 연구가 선행되어야 한다.

협소 유로의 제한된 공간 내를 유동하는 기/액 혼합물의 거동은 표면력의 증가 및 마찰 압력 강하의 증가로 인해 원관의 경우와는 상이하다. 사각 유로에서 동향류 2상유동 양식에 대한 연구는 다양하게 수행되었다. 2상유동 양식, 기공률, 압력강하와 이들에 대한 유로의 간격 및 유로 기율기의 영향에 대하여 Hosler⁽¹⁾, Jones 와 Zuber⁽²⁾, Troniewski 와 Ulbrich⁽³⁾, Lowry 와 Kawaji⁽⁴⁾, Ali 와 Kawaji⁽⁵⁾, Mishima 등⁽⁶⁾, Wilmarth 와 Ishii⁽⁷⁾ 그리고 Xu 등⁽⁸⁾이 실험 및 이론적 연구를 수행하였다. 그러나 협소 유로에서 대향류 2상유동에 대하여 수력학적 측면과 전달현상적 측면에 중점을 둔 연구는 쉽게 발견할 수 없다. Taitel 과 Barnea⁽⁹⁾는 수직관 내의 대향류 2상유동 양식에 대하여 각 양식 간의 천이 및 압력강하 모델을 제안하였다. Yamaguchi 와 Yamazaki⁽¹⁰⁾는 원관 내에서 2상 상향류, 대향류 그리고 하향류 각각에 대한 유동 양식 선도를 제시하였다. Ghiaasiaan 등⁽¹¹⁾은 원관 내에서 대향류 유동 양식을 관찰하고 유로 평균 기공률을 측정하였다.

본 연구에서는 유로의 간격이 각각 2mm 와 3mm 인 협소 수직 사각 유로에서 공기/물 2상 혼합물의 대향류 유동에 대하여 2상유동 양식을 실험적으로 연구하였다. 또한 각 유동양식 사이의 천이특성을 기존에 발표된 천이조건과 비교, 분석하였다.

2. 실험장치

사각 협소 유로에 대한 기/액 혼합물의 단일 2상유동 특성을 해석하기 위한 실험장치의 개략도가 Fig. 1 에 주어져 있다. 협소 유로를 구성하는 두 개의 판은 가시화를 위하여 투명 아크릴 판을 사용하였다. 시험부 유로의 폭과 길이는 각각 100mm 와 760mm 로 일정하게 하였다. 시험부의 간격은 아크릴 판 사이에 금속 띠를 설치하여 일

정하게 유지하였으며, 금속 띠의 두께를 변화시켜 유로의 간격을 2mm, 3mm 로 변화시킬 수 있도록 하였다. 유로를 구성하는 두 개의 판 중 하나에 직경 10mm 의 구멍을 판의 상단과 하단에서 15mm 떨어진 지점에 각각 가공하여 액상의 유입구와 유출구로 사용하였다. 다른 판의 상단으로부터 25mm 지점에 직경 20mm 의 구멍을 가공하여 유로 내를 유동한 기/액 혼합물이 기/액 분리기로 유출될 수 있도록 하였다. 기/액 분리기는 가로와 세로가 각각 50mm 와 100mm 그리고 높이가 600mm 인 사각 상자이다. 기/액 분리기의 측면에는 하단으로부터 250mm 지점에 직경 20mm 의 구멍을 가공하여 분리기에 유입되는 액상을 범람 시킴으로써 실험 중 분리기의 수위를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 협소 유로에 기상을 공급하기 위하여 내경 0.25mm, 외경 0.3mm 의 모세관 48 개를 유로를 형성하는 각 아크릴판의 하단으로부터 50mm 인 곳에 3 열로 설치하였다. 시험부의 유로 상단으로부터 210mm 인 지점과 유로 하단으로부터 350mm 인 지점의 유로 폭 중앙에 두 개의 압력공을 설치하여 실험 중 발생하는 2상유동 압력강하를 측정하였다. 측정 범위가 $\pm 1.99\text{kPa}$ 인 디지털마노미터 (Furness Controls 사, FCO12)를 사용하였으며 출력 신호는 A/D 변환기를 거쳐 개인용 컴퓨터에 저장된다. 기상과 액상의 시험부 입구와 출구에 전기적으로 작동하는 순간 폐쇄 밸브 (quick closing valve)를 설치하여 시험부 내에서의 유로-평균 기공률 (channel-average void fraction)을 측정하였다.

실험에서 액상으로 물을 사용하였으며 물탱크로부터 펌프에 의해 가압되어 필터와 유량계를 통과한 후 유로에 공급된다. 시험부 입구에서 물의 유량을 측정하기 위해 여러 유량 범위의 부자식 유량계 (float-type flow meter)를 병렬로 연결하여 사용하였다. 기상인 공기는 압축기에 의해 가압된 후 필터와 압력조절기를 거친 다음 여러 유량 범위의 부자식 유량계가 병렬로 연결되어 있는 유량

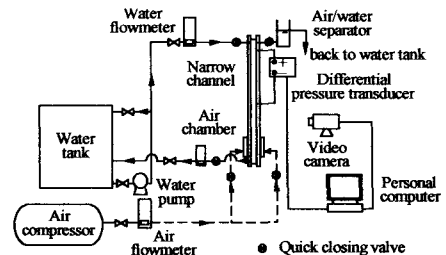


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus.

측정부를 통과하고 유로 측면의 공기 챔버에 유입된다. 공기 챔버는 유로를 구성하는 아크릴 판에 설치되어 있으며 48 개의 모세관을 통하여 공기를 유로 내로 공급한다. 모세관에 의해 시험부로 공급된 균일한 크기의 기포는 하향 유동하는 물과 혼합되고, 공급된 물의 일부는 유로 하단의 물 출구로 배출되며 나머지 공기/물의 2 상 혼합물은 사각 유로를 유동 한 후 공기/물 분리기로 유입한다. 분리기에서 공기는 대기중으로 방출되고 물은 범람공을 통하여 물탱크로 재순환한다. 시험부를 실제로 유동한 물의 유량은 시험부 출구에서 일정 시간 동안 채집된 물의 양을 측정하여 환산하였다. 매 실험에 앞서 유로와 분리기가 물로 가득 채워진 상태에서 시험부의 출구에 설치된 니들밸브 (needle valve)를 조절하여 시험부에 공급되는 물의 유량을 일정하게 유지하였다. 그 다음 공기 챔버에 원하는 유량의 공기를 공급하고 이는 모세관을 통하여 시험부로 기포의 형태로 유입된다. 정상상태가 실현되면, 2 상유동 압력강하를 측정하고 시험부에 설치된 순간 폐쇄 밸브를 이용하여 시험부를 순간적으로 주위로부터 분리한 후 시험부에서 물의 붕괴 수위 (collapsed height)를 측정하여 유로 평균 기공률을 산정한다. 실험 중 1/1000의 셔터 속도를 갖는 카메라를 사용하여 기/액 2 상의 유동형상을 기록하였으며 실험 후 2 상유동 양식을 판별하는 데 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

2 상유동 양식은 그 유동 특성을 정의함에 있어 연구자에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 가시화로부터 기포류 (bubbly flow), 슬러그류 (slug flow), 처언류 (churn-turbulent flow) 그리고 환상류 (annular flow)가 관찰되었다. 크기가 작은 기포들이나 캡 기포 (cap bubble) 그리고 슬러그 기포 (slug bubble)들이 유로의 간극을 채우며 납작하게 존재하는 것이 관찰되었다. 협소 유로에서 관찰된 각 유동양식에 대한 대표적인 가시화 사진을 Fig. 2에 나타내었다.

본 연구에서 가시화를 통해 관찰된 각 유동양식은 다음의 특성에 근거하여 분류하였다.

기포류. 기포류는 액상이 연속적인 상으로 유로 내를 유동하며, 반면에 기상은 작은 기포들의 형태로 분산되어 연속적인 액상 내에서 고르게 분포한다. 기상의 유량이 증가할 경우 유로를 제한하는 벽면에 의해 성장하는 기포들은 그 형상이 납작하게 변형되어 작은 모자 (cap)의 형태를 보이기도 한다. 또한 작은 기포들간의 충돌 및 합착에

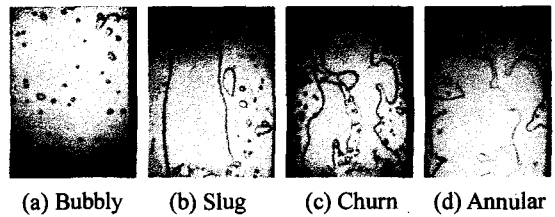


Fig. 2 Sample images of two-phase flow regimes in narrow rectangular channels.

의해 좀더 큰 캡기포가 형성되기도 하며 그 폭은 유로의 50%에 달하는 경우도 있다.

슬러그류. 슬러그류에서는 큰 테일러 기포 (Taylor bubble)가 관찰되었다. 이 경우 기포의 앞부분(nose)은 타원형이며 몸체의 길이는 기포 폭의 수배에 달하는 납작한 형상을 나타내었다. 액체 슬러그는 시험부 유로의 폭을 가로지르면서 연속적으로 생성되는 테일러 기포들을 분리한다. 일반적인 관에서의 2 상유동과는 달리 본 연구에서 사용된 사각 유로는 그 유로의 폭이 간극에 비해 매우 넓기 때문에 슬러그 기포가 유로의 폭을 가득 채우는 경우는 관찰되지 않았으며, 폭의 약 50~60% 정도를 채우는 것이 일반적이다. 각각의 슬러그 기포 사이에는 특별한 간섭작용이 없으며 슬러그 기포의 매끄러운 계면이 비교적 잘 유지되었다.

처언류. 처언류는 슬러그류와 부분적으로 유사하나 큰 슬러그 기포들이 변형되고 파괴되어 슬러그류와는 달리 불규칙적이며 무질서한 형태를 이루게 된다. 공기의 유량이 증가함에 따라 슬러그류에서 발생하는 앞부분이 둥근 탄환 모양의 슬러그 기포는 그 폭이 얇아지고 변형되어 더 이상 그 모양을 식별할 수 없을 정도로 다양한 형태로 굴곡되어 나타난다. 전형적인 처언류에서 액상의 유동은 그 방향성이 요동하는 특성을 나타낸다.

환상류. 환상류에서 기상은 유로의 축 방향으로 그 중심부를 연속적인 상으로 유동하며 액상은 액막의 형태로 하향 유동한다. 또한 유하액막 (falling film)의 표면에는 큰 진폭의 파동 (wave)이 발생하며 이들은 기상 유동에 의해 연속적으로 파괴되어 유로 중심부의 기상 유동에 작은 액적의 형태로 유입되기도 한다.

실험의 결과를 대향류의 유동 한계(CCFL, counter-current flow limitation)와 함께 Fig. 3의 유동양식 선도에 도시하였다. 여기서 j_f 와 j_g 는 각각 액상과 기상의 겉보기속도 (superficial velocity)를 의미한다. 협소 유로의 간극이 2mm에서 3mm로 증가할 때 유동양식의 근본적인 변화는 발견할 수

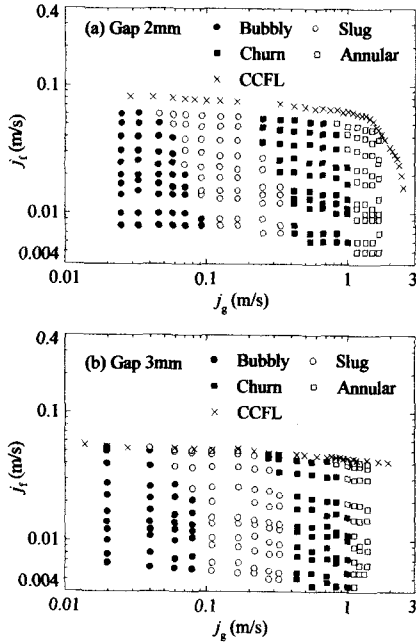


Fig. 3 Counter-current two-phase flow regimes for narrow rectangular channels.

없으나 유동양식의 천이조건이 일부 변화하는 것을 볼 수 있다. 실제 수직 사각 유로에서 발생하는 대향류 2 상유동의 경우 각 유동양식 간의 천이조건은 상대적으로 넓은 폭으로 존재하나 단순화를 위해 Fig. 4 에서와 같이 단선으로 표시하였다.

본 연구와 유사한 기하학적 조건에서 공기/물 대향류 2 상유동 양식에 대한 기존의 실험결과를 발견할 수 없으므로 본 연구의 결과를 직접 비교하는 것은 불가능하였다. 대신 대향류 2 상 유동양식의 천이조건에 대하여 발표된 모델을 적용하여 본 연구의 실험결과와 비교하였다.

기포류-슬러그류 천이: Taitel 과 Barnea⁽⁹⁾는 대향류 기/액 수직 유동에서 전체 유동양식을 기포류, 슬러그류 그리고 환상류로 분류하고 각 유동양식 간의 천이 모델을 제안하였다. 모델에 의하면 기포류로부터 슬러그류로의 천이조건을 다음과 같이 정의하였다.

$$j_f \leq j_g + u_b - (4j_g u_b)^{1/2} \quad (1)$$

$$0.3j_f + 0.7j_g < 0.21u_b \quad (2)$$

여기서 u_b 는 대향류에서 기포의 상대적인 상승 속

도를 의미한다. 기포의 상승 속도는 기포의 직경, 유로의 기하학적 형상 그리고 기공률 등으로 구성되는 복잡한 함수이지만 기포의 크기가 크고 기공률이 낮은 경우 거의 일정한 것으로 고려되며 Harmathy⁽¹²⁾에 의해 다음과 같이 표현되었다.

$$u_b = 1.53 \left[\frac{g \Delta \rho \sigma}{\rho_f^2} \right]^{1/4} \quad (3)$$

식(1)과 (2)를 동시에 만족하는 천이조건과 실험 결과를 Fig. 4 에 비교하였다. 실험의 경우 간극이 증가함에 따라 기포류-슬러그류의 천이조건에서 기상의 겉보기속도는 증가하는 것으로 나타났다. 도시된 모델의 천이경계는 식(1)이며 실험결과보다 기상의 겉보기 속도를 낮게 예측하고 있으나 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

슬러그류-처연류 천이: 공기의 유량이 증가함에 따라 슬러그류에서 처연류로의 천이가 발생한다. 그러나 슬러그류로부터 처연류로의 천이를 명확하게 구분하는 데에는 상당한 어려움이 있으며 이는 처연류의 정의 방법에 혼동이 있기 때문이다. Mishima 와 Ishii⁽¹³⁾는 평균 기공률이 슬러그류에서의 기공률보다 큰 조건을 이용하여 슬러그류로부터 처연류로의 천이 조건을 다음과 같이 정의하고 있다.

$$\alpha \geq 1 - 0.813 \left\{ \frac{(C_o - 1)j + 0.35 \left(\frac{g \Delta \rho D}{\rho_f} \right)^{1/2}}{j + 0.75 \left(\frac{g \Delta \rho D}{\rho_f} \right)^{1/2} \left(\frac{g \Delta \rho D^3}{\rho_f v_f^2} \right)^{1/18}} \right\}^{0.75} \quad (4)$$

여기서 v_f 는 액상의 동점성 계수이며, j 는 2 상 혼합물의 체적유속 (volumetric flux)으로 대향류의 경우 다음과 같이 정의된다.

$$j = j_g - j_f \quad (5)$$

드리프트 플럭스 모델 (drift flux model)로부터 유로-평균 기공률의 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{j_g}{C_o j + u_{gj}} \quad (6)$$

여기서 C_o 는 2 상유동 분포변수 (two-phase flow

distribution parameter)로 사각 유로의 경우 다음과 같다⁽¹⁴⁾.

$$C_o = 1.35 - 0.35\sqrt{\rho_g / \rho_f} \quad (7)$$

Nicklin 등⁽¹⁵⁾은 사각 유로에 대해 기상의 드리프트 속도 (drift velocity) u_{gf} 를 다음과 같이 정의하였다.

$$u_{gf} = 0.35(g\Delta\rho D / \rho_f)^{1/2} \quad (8)$$

슬러그류로부터 처연류로의 천이에 대한 비교가 Fig. 4에 도시되어 있다. Mishima와 Ishii⁽¹³⁾가 제시한 모델의 조건과 본 실험의 결과는 간극이 2 mm 일 때 유사하나 3 mm 일 때 약간의 차이를 보여주고 있다. Wilmarth와 Ishii⁽⁷⁾는 유로의 간극이 변함에 따라 천이경계가 서로 일치하지 않는 것을 2 상유동 분포변수의 차이로 설명하고 있다. 또한 Mishima 등⁽⁶⁾은 유로의 간극이 감소하면 분포변수도 감소하여 약 1.0~1.11이 된다고 제시하였다. 이에 의하면 이론적인 천이경계가 다소 왼쪽으로 이동하여 본 실험결과와의 일치성은 향상될 수 있을 것이다.

처연류-환상류 천이: 기상의 유량이 계속 증가하면 유동양식은 환상류로 천이한다. 유로의 벽면에 액막이 형성되고 작은 액적들을 포함한 기상은 유로의 중심부를 유동한다. 유로의 하부에서 발생하는 간헐적인 플러딩 (flooding) 형태의 파동이 상부로 유동하면서 기상 내에 액상의 덩어리가 유입하여 실려가는 유동구조가 형성되기도 한다. 처연류에서 환상류로의 천이 경계에 대해 본 실험결과와 Taitel과 Barnea⁽⁹⁾의 모델을 비교하였다. 모델에 의하면, 테일러 기포와 그 주위 액막의 상대속도가 플러딩 조건에 도달할 경우 환상류로의 천이가 발생하며 그 조건은 다음과 같다.

$$j_g - j_f \leq -0.292\sqrt{gD} + \frac{\left\{ C[gD(\rho_f - \rho_g)]^{1/4} - m \left[4 \frac{\delta}{D} u_{film} \rho_f^{1/2} \right]^{1/2} \right\}^2}{1.2 \left(1 - 4 \frac{\delta}{D} \right) \rho_g^{1/2}} \quad (9)$$

여기서 유하액막의 속도는 $u_{film} = j_f D / 4\delta$ 로 정의되며, m 과 C 는 다음과 같이 Wallis⁽¹⁶⁾의 플러딩 관계

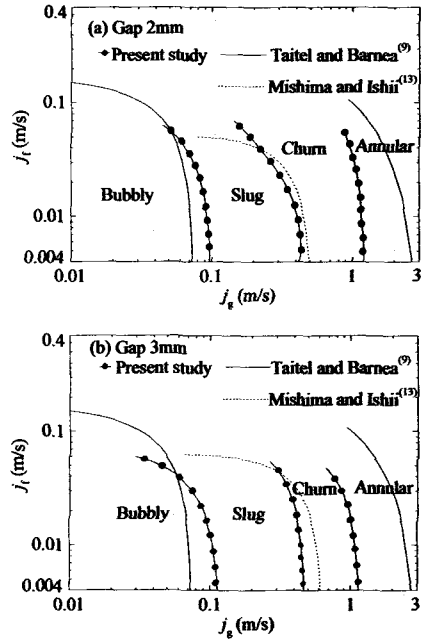


Fig. 4 Flow regime transition comparison with various models.

식에 포함되는 상수들이다.

$$\left[\frac{j_g \rho_g^{1/2}}{(gD\Delta\rho)^{1/2}} \right]^{1/2} + m \left[\frac{j_f \rho_f^{1/2}}{(gD\Delta\rho)^{1/2}} \right]^{1/2} = C \quad (10)$$

단순한 수직 유로에 대해 $m=0.8\sim 1.0$ 그리고 $C=0.7\sim 1.0$ 의 값들이 제시되고 있으나 유로의 입구 및 출구 조건에 따라 이들은 크게 달라질 수도 있다.

식(9)에서 액막 두께 δ 는 정상상태에서 유하액막의 운동량 보존방정식으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\delta}{D} = B \left[\frac{\mu_f^2}{D^3 g (\rho_f - \rho_g) \rho_f} \right]^p \left[\frac{\rho_f j_f D}{\mu_f} \right]^q \quad (11)$$

층류 유하액막의 경우 상수와 지수 B , p 그리고 q 는 각각 0.909, 0.33, 0.33이다.

처연류로부터 환상류로의 천이경계에 대한 실험결과가 Fig. 4에 비교되어 있다. Taitel과 Barnea⁽⁹⁾의 천이 경계 조건인 식(9)에서 2mm 간극의 경우 플러딩 한계에 대한 실험결과로부터 $C=0.87$, $m=0.67$ 을 사용하였으나 3mm 간극의 경우

실험자료가 부족하여 2mm 의 경우와 동일한 값을 사용하였다. 본 실험결과와 비교하였을 때 간극에 관계없이 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 협소 사각 유로의 경우 C 와 m 이 일반적인 원관의 경우보다 작을 것으로 예상되며 상수 C 와 m 의 값이 감소하면 천이경계는 낮은 기상의 겉보기 속도에서 발생한다. 결국 처연류에서 환상류로의 천이경계를 정확하게 예측하기 위해서는 주어진 형상의 유로에 대한 대향류 유동한계 즉, 플러딩 한계를 정확하게 산정하기 위한 체계적인 연구가 필수적이라고 할 수 있다.

4. 결 론

길이 760mm, 폭 100mm 그리고 간극이 2mm 와 3mm 인 협소 사각 유로에서 대향류 2 상유동 특성을 해석하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 2 상유동양식과 각 유동양식 간의 천이경계에 대하여 본 실험결과를 선행 연구결과와 비교하였다.

간극의 변화에 따른 유동양식의 근본적인 변화는 발견되지 않았다. 기포류로부터 슬러그류로의 천이경계에서 기상의 겉보기속도는 간극과 함께 증가하였으며 본 실험결과와 Taitel 과 Barnea 가 제시한 천이 모델은 간극이 2mm 인 경우 상대적으로 잘 일치하였다. 슬러그류로부터 처연류로의 천이에 대하여 Mishima 와 Ishii 의 모델과 본 실험 결과는 특히 간극이 클 때 큰 차이를 나타냈다. 처연류에서 환상류로의 천이조건에서 간극에 관계없이 기상의 겉보기속도는 거의 일정하였다. Taitel 과 Barnea 의 천이조건은 간극이 클 때 본 실험의 결과와 큰 차이를 보여주었다.

수직 유로의 다양한 단면 종횡비가 유동양식 및 각 유동양식 간의 천이경계에 미치는 영향을 해석하기 위해서 2 상유동 분포변수와 플러딩 한계에 대한 체계적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Hosler, E. M., Flow Patterns in High Pressure Two-phase (Steam-water) Flow with Heat Addition, AIChE Symp. Series, Vol.64 (1968), pp.54-66.
- (2) Jones, O.C. Jr and Zuber, N., Slug-annular Transition with Particular Reference to Narrow Rectangular Ducts, In Two-Phase Momentum, Heat

and Mass Transfer in Chemical, Process and Energy Engineering Systems, Edited by Durst, T., Tsiklauri, G. V. and Afgan, N. H., Hemisphere, Washington, DC. Vol.1 (1979), pp. 345-355.

- (3) Troniewski, L. and Ulbrich, R., Two-phase Gas-liquid Flow in Rectangular Channels, Chem. Engng. Sci., Vol.39 (1984), pp.751-765.
- (4) Lowry, B. and Kawaji, M., Adiabatic Vertical Two-phase Flow in Narrow Flow Channels, AIChE Symp. Series, Vol.84 (1988), pp.133-139.
- (5) Ali, M. and Kawaji, M., The Effect of Flow Channel Orientation on Two-phase Flow in a Narrow Passage between Flat Plates, ASME/JSME Thermal Engng. Proc. Vol.2 (1991), pp.183-190.
- (6) Mishima, K., Hibiki, T. and Nishihara, H., Some Characteristics of Gas-liquid Flow in Narrow Rectangular Ducts, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 19 (1993), pp.115-124.
- (7) Wilmarth, T. and Ishii, M., Two-phase Flow Regimes in Narrow Rectangular Vertical and Horizontal Channels, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.37 (1994), pp.1749-1758.
- (8) Xu, J. L., Cheng, P. and Zhao, T. S., Gas-liquid Two-phase Flow Regimes in Rectangular Channels with Mini/Micro Gaps, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.25 (1999), pp.411-432.
- (9) Taitel, Y. and Barnea, D., Countercurrent Gas-liquid Vertical Flow, Model for Flow Pattern and Pressure Drop, Int. J. Multiphase Flow, Vol.9 (1983), pp.637-647.
- (10) Yamaguchi, K. and Yamazaki, Y., Characteristics of Countercurrent Gas-liquid Two-phase Flow in Vertical Tubes, J. Nucl. Sci. Technol. Vol.19 (1982), pp.985-996.
- (11) Ghiaasiaan, S. M., Taylor, K. E., Kamboj, B. K. and Abdel-Khalik, S. I., Countercurrent Two-phase Flow Regimes and Void Fraction in Vertical and Inclined Channels, Nucl. Sci. Engng. Vol.119 (1995), pp.182-194.
- (12) Harmathy, Z., Velocity of Large Drops and Bubbles in Media of Infinite or Restricted Extent, AIChE, Vol.6 (1960), pp.281-288.
- (13) Mishima, K. and Ishii, I., Flow Regime Transition Criteria for Two-phase Flow in Vertical Tubes, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.27 (1984), pp.723-734.
- (14) Ishii, M., One-dimensional Drift Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion between Phases in Various Two-phase Flow Regimes, ANL Report 77-47 (1977).
- (15) Nicklin, D. J., Wilkes, J. O. and Davidson, J. F., Two-phase Flow in Vertical Tubes, Trans. Inst. Chem. Engrs, Vol.40 (1962), pp.61-68.
- (16) Wallis, G. B., One Dimensional Two-phase Flow, McGraw-Hill, (1969), New York.