

회이 있는 협소 사각 유로에서 대향류 기/액 2 상유동

손 병후* · 김 병주** · 정 시영***

Counter-Current Gas-Liquid Two-Phase Flow in Narrow Rectangular Channels with Offset Strip Fins

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

Key Words : Counter-current two-phase flow (대향류 2 상유동), Narrow channel (협소유로), Flow regime (유동양식), Void fraction (기공률), Offset strip fin (오프셋 스트립 힌)

Abstract

An adiabatic counter-current vertical two-phase flow of air and water in narrow rectangular channels with offset strip fin was investigated experimentally. Tests were systematically performed with downward liquid superficial velocities and upward gas velocities covering 0 to 0.06 m/s and 0 to 2.5 m/s ranges, respectively. Two-phase flow regimes were classified by examining the video images of flow patterns in transparent test sections of 760 mm long and 100 mm wide channel with gaps of 3.0 and 5.0 mm. The channel average void fraction was measured by the quick-closing valve method. Unlike the flow regimes in the channels without fin, where bubbly, slug, churn, and annular flow were identified, only bubbly and churn flow regimes were found for the channels with offset strip fin. However the existence of fin in the channels showed negligible effects on the void fraction. Instead counter-current flow limitations were found to happen at lower air superficial velocity once offset strip fin was introduced in narrow rectangular channels.

기호설명

C : 식(9)의 상수
 D_h : 수력 직경 [m]
 $D_{h,fin}$: 힌 수력 직경 [m]
 g : 중력가속도 [m/s^2]
 H : 힌 높이 [m]
 j : 길보기 속도 [m/s]
 K : 식(1)의 상수
 L : 힌 길이 [m]
 m : 식(9)의 상수
 n : 식(1)의 지수
 s : 횡방향 힌 간격 [m]
 s_{ch} : 협소 유로 간극 [m]
 t : 힌 두께 [m]

w : 협소 유로 폭 [m]
 X : 식(1)의 상수
 Y : 식(1)의 상수

그리스문자

α_0 : 기공률
 μ : 점성계수 [Ns/m^2]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 σ : 표면장력 [N/m]

하첨자

f : 액상
 g : 기상

1. 서론

* 홍익대학교 기계공학과 대학원

** 정희원, 홍익대학교 기계-시스템디자인공학과 교수

*** 정희원, 서강대학교 기계공학과 교수

암모니아/물 흡수식 냉·난방 시스템의 발생기에
 서 발생과정으로부터 생성되는 암모니아/물 혼합

증기 내의 암모니아 성분의 농도는 시스템의 효율과 용량을 결정하는 주요 변수로서, 이를 최대한 증가시키는 방법으로 대향류 발생과정을 들 수 있다. 흡수과정을 거친 암모니아 수용액을 발생기의 상부에서 공급하여 자중에 의해 하부로 유동하도록 하고, 비등과정으로 생성된 암모니아 증기는 상향 유동하면서 하향 유동하는 수용액과 접촉 및 혼합하도록 유도함으로써 기/액 2 상 사이에 대향류 유동을 형성할 수 있다. 대향류 유동에 의한 액상과 기상 사이의 열 및 물질 교환과정은 정류과정과 유사하며, 발생기 출구에서 암모니아/물 혼합증기의 농도는 동향류의 경우보다 높게 유지될 수 있다.

암모니아/물 흡수식 시스템의 소형화 및 저온의 미활용 에너지 이용의 측면에서 판-회 열교환기와 같은 밀집형 열교환기 (compact heat exchangers)를 발생기로 사용할 수 있다. 이때 열교환기 내부에 삽입된 열전달 고양체에 의한 열 및 물질전달 특성의 변화를 나타내기 위한 상관식의 개발과 더불어 협소 사각 유로에서의 대향류 2 상유동에 대한 기초 연구가 선행되어야 한다.

협소 유로의 제한된 공간 내를 유동하는 기/액 혼합물의 거동은 표면력의 증가 및 마찰 압력구배의 증가로 인해 원관의 경우와는 상이하다. 사각 유로에서 동향류 2 상유동인 경우, 2 상유동 양식, 기공률, 압력강하와 이들에 대한 유로의 간격 및 유로 기울기의 영향에 대한 연구는 다양하게 수행되었다⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾. Taitel 과 Barnea⁽⁷⁾는 수직관 내의 대향류 2 상유동 양식에 대하여 각 양식 간의 천이 및 압력강하 모델을 제안하였다. Yamaguchi 와 Yamazaki⁽⁸⁾는 원관 내에서 2 상 상향류, 대향류 그리고 하향류 각각에 대한 유동 양식 선도를 제시하였다. Ghiaasiaan 등⁽⁹⁾은 원관 내에서 대향류 유동 양식을 관찰하고, 유로 평균 기공률을 측정하였다. 반면에 다양한 종류의 회이 설치된 판-회 열교환기에 대한 연구는 주로 상변화와 관련된 열전달 특성 및 협소 유로에서 발생하는 압력강하 특성을 해석하기 위하여 수행되었다.

Carey⁽¹⁰⁾는 오프셋 스트립 회이를 갖는 밀집형 열교환기에서 표면 장력 효과를 고려하여 강제 대류 열전달계수를 예측하기 위한 모델을 제시하였다. Robertson 과 Lovegrove⁽¹¹⁾ 그리고 Feldman 등⁽¹²⁾은 오프셋 스트립 회이 설치된 유로에서 냉매의 비등 열전달 계수를 산정하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 또한 Manglik 과 Bergles⁽¹³⁾는 기존에 제시된 실험결과를 이용하여 사각 오프셋 스트립 회이 유로에서 열전달계수 및 마찰계수를 산정하기 위

한 상관식을 제시하였다. 그러나 회이 내장된 협소 사각 유로에서 대향류 2 상유동 특성을 수력학적 측면에서 연구한 예는 쉽게 발견할 수 없다.

본 연구에서는 유로의 간극이 각각 3mm 와 5mm 이고 유로 내부에 회이 장착된 협소 수직 사각 유로에서 공기/물 2 상 혼합물의 대향류 유동특성을 실험적으로 연구하였으며 2 상유동 양식, 기공률, 그리고 대향류 유동한계 등을 회이 없는 유로의 경우와 비교, 분석 하였다.

2. 실험장치

사각 협소 유로에 대한 기/액 혼합물의 단일 2 상유동 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 100 mm 와 760 mm 로 일정하게 하였다. 시험부의 간극은 아크릴 판 사이에 금속 띠를 설치하여 일정하게 유지하였으며, 금속 띠의 두께를 변화시켜 유로의 간극을 3 mm 와 5 mm 로 변화시킬 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 회이는 재질이 SUS304 이며 유로의 간극과 그 높이가 같다. 일반적으로 회이의 형상은 회이의 길이 (L), 높이 (H), 횡방향 회이 간격 (s) 그리고 두께 (t)로 표현할 수 있으며, Fig. 2 와 Table 1 에 형상과 치수가 주어져 있다.

유로를 구성하는 두 개의 판 중 하나에 직경 10 mm 의 구멍을 판의 상단과 하단에서 15 mm 떨어진 지점에 각각 가공하여 액상의 유입구와 유출구로 사용하였다. 다른 판의 상단으로부터 25 mm 지점에 직경 20 mm 의 구멍을 가공하여 유로 내를 유동한 기/액 혼합물이 기/액 분리기로 유출될 수 있도록 하였다. 기/액 분리기에서 공기는 대기중으로 방출되고, 물은 범람공을 통하여 물탱크로 재순환한다. 유로 내부를 실제로 유동한 물의 유량은 유로 출구에서 일정 시간 동안 채집된 물의 양을 측정하여 환산하였다. 유로에 기상을 공급하

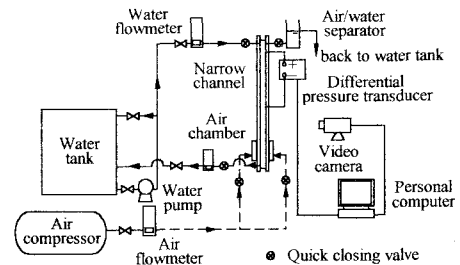


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus.

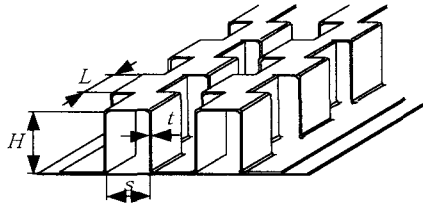


Fig. 2 Geometrical description of an offset strip fin.

기 위하여 내경 0.25 mm, 외경 0.3 mm 의 모세관 24 개를 유로를 형성하는 각 아크릴판의 하단으로부터 50 mm 인 곳에 각각 3 열로 설치하였다. 이때 공급되는 공기는 환에 의해 방해 받지 않는 열린 부분으로 공급하였다. 시험부 상단으로부터 210 mm 인 지점과 하단으로부터 350 mm 인 지점의 유로 폭 중앙에 두 개의 압력공을 설치하여 실험 중 발생하는 2 상유동 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. 측정되는 압력차는 2 상유동 마찰 손실특성의 해석에 기본적으로 사용되며 압력차의 유동특성은 확률밀도함수로 변환되어 2 상유동 양식의 판별에도 사용할 수 있다.

물은 물탱크로부터 펌프에 의해 가압되어 유로에 공급되며, 시험부 입구에서 물의 유량을 측정하기 위해 부자식 유량계 (float-type flow meter)를 병렬로 연결하여 사용하였다. 기상인 공기는 압축기에 의해 가압된 후 필터와 압력조절기를 거친 다음 부자식 유량계가 병렬로 연결되어 있는 유량 측정부를 지나 유로 측면의 공기 챔버에 유입된다. 공기 챔버는 유로를 구성하는 아크릴 판에 설치되어 있으며, 모세관을 통하여 공기는 유로 내로 공급된다.

매 실험에 앞서 유로와 분리가 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 공급한 후 정상상태가 실현되면, 2 상유동 압력강하를 측정하고, 시험부에 설치된 순간 폐쇄 밸브 (quick closing valve)를 이용하여 시험부를 순간적으로 주위로부터 분리한 후, 물의 붕괴 수위 (collapsed height)를 측정하여 유로 평균 기공률 (channel-average void fraction)을 산정하였다. 실험 중 1/2000 의 셔터 속도를 갖는 카메라를 사용하여 2 상유동 형상을 기록하였으며, 실험 후 2 상유동 양식을 판별하는 데 사용하였다.

Table 1 Experimental conditions and fin dimensions.

Parameters	Ranges
Liquid velocity, j_f (m/s)	0~0.06
Gas velocity, j_g (m/s)	0~2.5
Offset strip fin	
Fin height, H (mm)	2.8 / 4.8
Fin length, L (mm)	1.5 / 5.0
Lateral fin spacing, s (mm)	3.5 / 4.6
Fin thickness, t (mm)	0.2 / 0.2
Fin density, N	28 / 20.5
Hydraulic diameter, $D_{h,fin}$ (mm)	2.84 / 4.56

3. 결과 및 고찰

3.1 유동양식

환이 없는 유로의 경우 2 상유동 양식은 크게 기포류 (bubbly flow), 슬러그류 (slug flow), 처연류 (churn-turbulent flow) 그리고 환상류 (annular flow)로 구분할 수 있다. 그러나 유로 내부에 환이 장착되면 간극에 상관없이 슬러그류는 관찰할 수 없었으며, 환상류 역시 거의 관찰되지 않았다. 협소 유로에서 관찰된 각 유동양식에 대한 대표적인 가시화 결과를 Fig. 3 에 나타내었다.

본 연구에서 가시화를 통해 관찰된 각 유동양식의 특성은 다음과 같다.

기포류 : 연속적인 상으로 존재하는 액상이 유로 내를 유동하며, 기상은 작은 기포들의 형태로 분산되어 연속적인 액상 내에서 고르게 분포한다. 환 유로 (finned channel)의 경우 환이 없는 유로와는 달리 기포들이 환과 환에 의해 형성되는 골을 따라 수직으로 상향 유동하는 양식을 보였다. 특히, 기상의 유량이 비교적 작은 경우, 간극 5 mm 의 유로에서는 환이 형성하는 환 사이의 정방형 공간에 작은 구형 기포들이 갇히는 양식을 관찰할

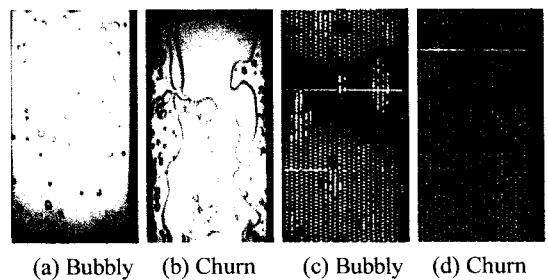


Fig. 3 Counter-current two-phase flow images in narrow rectangular channels: (a), (b) without fin; (c), (d) with offset strip fin.

수 있었으며, 이는 기/액 계면이 흰 표면과 접촉하면서 표면장력에 의해 기포유동이 억제되는 것으로 이해할 수 있다. 흰이 없는 유로의 경우, 기상의 유량을 증가시키면 유로를 제한하는 벽면에 의해 성장하는 기포들은 그 형상이 납작하게 변형되는 형태를 보이며, 또한 작은 기포들 간의 지속적인 충돌 및 합착에 의해 좀 더 큰 캡기포가 형성되기도 한다. 반면에 흰 유로의 경우, 여러 개의 긴 타원형의 기포가 2~3 개의 골에 걸쳐 형성되어 상향 유동하는 것을 볼 수 있으며, 이는 기포들이 유로의 불연속적인 구조에 의해 유로의 폭 방향으로의 성장에 제한을 받기 때문으로 판단된다.

슬러그류 : 본 연구에서 2 상유동 양식에 대한 흰의 영향은 슬러그류에서 가장 크게 나타난다. 흰이 없는 유로의 경우 기포들간의 합착으로 인해 큰 테일러 기포 (Taylor bubble)가 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. 테일러 기포는 그 폭이 유로의 60 % 정도에 달하며 기포의 앞부분 (nose)은 타원형이고 몸체의 길이는 기포 폭의 수배에 달하는 납작한 형상을 나타내었다. 일반적인 원관에서 2 상유동과는 달리 본 연구에서 사용된 사각 유로는 그 유로의 폭이 간극에 비해 매우 넓기 때문에 슬러그 기포가 유로의 폭을 가득 채우는 경우는 관찰되지 않았다. 각각의 슬러그 기포 사이에는 특별한 간섭작용이 없으며 슬러그 기포의 매끄러운 계면이 비교적 잘 유지되었다. 그러나 흰 유로에서는 유로 폭의 1/3 정도에 달하는 폭을 가진 테일러형 기포는 관찰할 수 없었다.

치연류 : 흰이 없는 유로의 경우, 큰 슬러그 기포들이 변형되고 지속적으로 파괴되어 유동양식이 매우 불규칙적이며 무질서한 형태를 보이며 전형적인 치연류에서 액상의 유동은 그 방향성이 요동하는 특성을 나타낸다. 흰 유로에서는 비교적 큰 타원형의 기포들이 흰에 의해 파괴되며, 이로부터 발생하는 불규칙한 형상의 기포들이 유로 전체를 채우며 포말류 (frothy flow)로 유동하였다. 이 경우에도 작은 구형의 기포들이 흰 사이에 간헐 산재해 있는 것을 관찰할 수 있었다.

환상류 : 일반적인 환상류에서 기상은 유로 내를 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. 흰 유로의 경우 기상의 유량이 증가함에 따라 치연류에서 환상류로 전이가 발생하기도 전에 대향류 유동 한계에 도달하며, 흰 표면

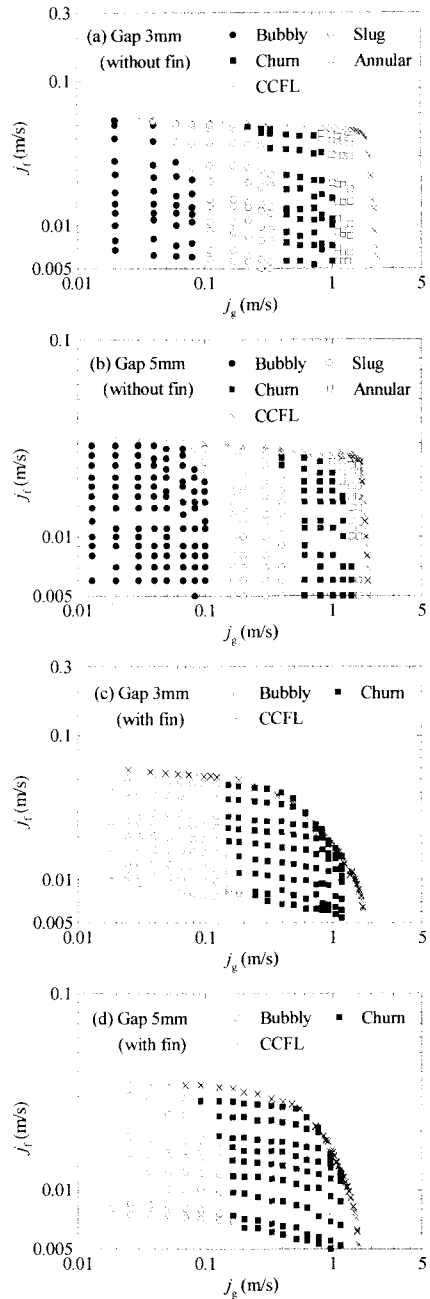


Fig. 4 Counter-current two-phase flow regimes for narrow rectangular channels with and without offset strip fin.

을 따라 액상이 불규칙하게 존재하는 것을 관찰할 수 있었다.

이상의 2 상유동 양식에 대한 결과를 대향류 유동 한계 (CCFL, counter-current flow limitation)와 합

계 Fig. 4의 유동양식 선도에 도시하였다. 여기서 j_f 와 j_g 는 각각 액상과 기상의 겉보기속도를 의미한다. 협소 유로의 간극이 3 mm에서 5 mm로 증가할 때 유동양식 자체의 근본적인 변화는 발견할 수 없으나, 유동양식의 천이조건이 일부 변화하는 것을 볼 수 있다. 실제 원관 및 사각 유로에서 발생하는 대향류 2상유동의 경우 각 유동양식 간의 천이는 넓은 영역에 걸쳐 나타난다.

3.2 기공률 및 대향류 유동 한계 (CCFL)

협소 사각 유로 내에서 정체 상태의 액상에 대한 유로 평균 기공률을 Fig. 5에 도시하였다. 흰이 없는 유로와 흰 유로의 경우에 대하여 간극의 함수로 실험결과를 제시하였으며, 원관의 경우에 대한 Sudo⁽¹⁴⁾의 상관식에 수력직경을 적용한 결과를 함께 비교하였다.

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

여기서,

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

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

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

$$0.000 \leq X \leq 0.004, K = 0.093, n = -0.325 \quad (5)$$

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

이며, σ 는 액상의 표면장력, g 는 중력가속도, ρ 는 밀도, μ 는 점도, j 는 겉보기 속도, 그리고 하첨자 f 와 g 는 액상과 기상을 각각 의미한다. 또한 식(2)에 적용되는 사각 유로의 수력직경 (D_h)은 식(7)과 같이 그리고 흰 유로의 수력직경 ($D_{h,fin}$)은 식(8)과 같이 정의되었다⁽¹⁵⁾.

$$D_h = \frac{4(s_{ch}w)}{2(s_{ch} + w)} \quad (7)$$

$$D_{h,fin} = \frac{4sHL}{\{2(sL + HL + tH) + ts\}} \quad (8)$$

기상의 겉보기 속도가 증가함에 따라 기공률이

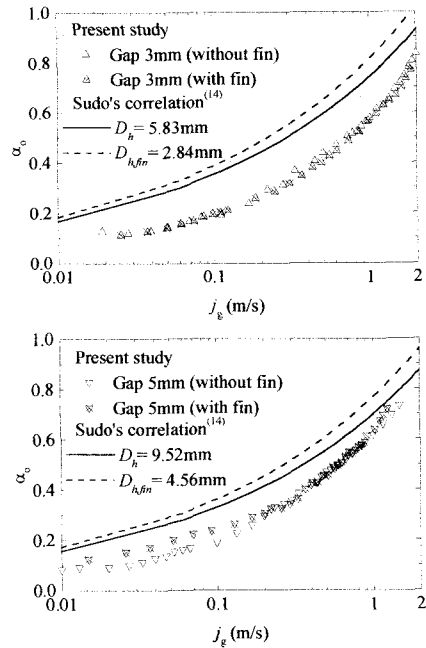


Fig. 5 Void fraction in narrow rectangular channels with zero liquid flow.

증가하는 정성적인 경향은 본 연구의 결과와 Sudo⁽¹⁴⁾의 상관식 모두에서 볼 수 있다. 흰이 2상 유동 양식에 미치는 영향을 고려할 때 기공률에 대한 흰의 영향은 아주 미약하다. 5 mm 유로의 경우 흰이 장착된 유로의 기공률이 흰이 없는 경우에 비하여 다소 높은 값을 보여주나 그 차이는 아주 작다. 본 실험의 경우 기공률에 대한 수력직경의 영향은 미약하게 나타나고 있으나, 상관식이 유로의 수력직경이 증가함에 따라 기공률이 다소 감소하는 것으로 제시하고 있다. 이는 Sudo⁽¹⁴⁾의 상관식이 수직 원관 내 2상유동에 대한 결과이므로 유로의 기하학적 형상의 차이에 기인하는 것으로 이해할 수 있다.

협소 사각 유로에서 대향류 유동 한계를 각 상의 겉보기 속도, 물성치 그리고 수력직경으로 무차원화 하여 Fig. 6에 도시하였다. 여기서 m 과 C 는 다음의 Wallis⁽¹⁶⁾ 플러딩 관계식에 포함되는 상수들이다.

$$\left[\frac{j_g \rho_g^{1/2}}{(gD\Delta\rho)^{1/2}} \right]^{1/2} + m \left[\frac{j_f \rho_f^{1/2}}{(gD\Delta\rho)^{1/2}} \right]^{1/2} = C \quad (9)$$

기공률에 대한 흰의 영향과는 달리 대향류 유

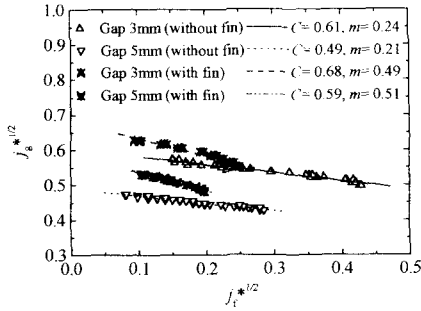


Fig. 6 Flooding velocities for air-water counter-current two-phase flow in narrow rectangular channels.

동한계에 대한 흰의 영향은 플러딩 관계식의 기울기 (m) 값에서 크게 나타나고 있다. Taitel 과 Barnea⁽⁷⁾의 모델에 의하면 상수 m 과 C 가 증가할 때 슬러그류에서 환상류로의 천이가 낮은 기상의 결보기 속도에서 발생한다. 그러나 흰 유로의 경우 대향류 유동한계에서 기상의 속도도 낮아지므로 환상류의 형성은 불가능할 수도 있을 것이다.

4. 결론

길이 760 mm, 폭 100 mm, 그리고 간극이 3 mm 와 5 mm 인 흰이 있는 협소 사각 유로에서 대향류 2 상유동 특성을 실험적으로 해석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 흰이 설치된 사각 협소유로의 경우 기포류와 처연류 (포말류)만이 관찰되었으며 2 상유동 양식에 대한 유로 간극의 영향은 미약하였다
- 2) 유로의 평균 기공률은 흰의 유무에 관계없이 거의 유사하였다.
- 3) 흰 유로의 경우 대향류 유동한계를 유도하는 기상유속은 크게 감소하므로 환상류의 형성이 불가능할 수도 있다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Troniewski, L. and Ulbrich, R., 1984, "Two-phase Gas-liquid Flow in Rectangular Channels," Chem. Engng. Sci., Vol.39, pp.751~765.
- (2) Lowry, B. and Kawaji, M., 1988, "Adiabatic Vertical Two-phase Flow in Narrow Flow Channels," AIChE Symp. Series, Vol.84, pp.133~139.

- (3) Ali, M. and Kawaji, M., 1991, "The Effect of Flow Channel Orientation on Two-phase Flow in a Narrow Passage between Flat Plates," ASME/JSME Thermal Engng. Proc. Vol.2, pp.183~190.
- (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) 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.
- (6) 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.
- (7) Taitel, Y. and Barnea, D., 1983, "Countercurrent 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) 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.
- (10) Carey, V. P., 1985, "Surface Tension Effects on Convective Boiling Heat Transfer in Compact Heat Exchangers with Offset Strip Fins," Trans. ASME, Vol.107, pp.970~974.
- (11) Robertson, J. M. and Lovegrove, P. C., 1983, "Boiling Heat Transfer with Freon11(R11) in Brazed Aluminum Plate-Fin Heat Exchangers," ASME J. Heat Transfer, Vol.105, pp.605~610.
- (12) Feldman, A., Marvillet, C. and Lebouche, M., 2000, "Nucleate and Convective Boiling in Plate Fin Heat Exchangers," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.43, pp.3433~3442.
- (13) Manglik, R. M. and Bergles, A. E., 1995, "Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for the Rectangular Offset Strip Fin Compact Heat Exchangers," Exp. Thermal Fluid Sci., Vol.10, pp.171~180.
- (14) Sudo, Y., 1980, "Estimation of average void fraction in vertical two-phase flow channel under low liquid velocity," J. Nucl. Sci. Technol. Vol.17.
- (15) Kays, W. M. and London, A. L., 1984, "Compact Heat Exchangers," 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
- (16) Wallis, G. B., 1969, "One Dimensional Two-phase Flow," McGraw-Hill, New York.