

협소 사각유로에서 공기-물 대향류 유동한계

김 병 주[†]

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

Air-water Countercurrent Flow Limitation in Narrow Rectangular Channels

Byong Joo Kim[†]

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

(Received January 31, 2007; revision received April 17, 2007)

ABSTRACT: An experimental study on the countercurrent two-phase flow in narrow rectangular channels has been performed. Countercurrent flow limitation (CCFL) was investigated using air and water in 760 mm long, 100 mm wide, vertical test sections with 1 and 3 mm channel gaps. Tests were systematically performed with downward liquid superficial velocities and upward gas velocities covering 0 to 0.125 and 0 to 3.5 m/s ranges, respectively. As the gap width of rectangular channel increased the CCFL water superficial velocity decreased for the given air superficial velocity. Slight increase of the air superficial velocity resulted in the abrupt decrease of water velocity when $j_{g,c} = 2 \sim 4$ m/s. The critical superficial velocity of air, at which the downward flow of water was no longer allowed, also decreased with the increase of gap width. The experimental results were compared with the previous correlations, which were mainly for round tubes, and the qualitative trends were found to be partially acceptable. However the quantitative discrepancies were hardly neglected. New correlation of CCFL was developed and showed good agreement with the experimental data.

Key words: Countercurrent two-phase flow(대향류 2상유동), Flow limitation(유동한계) Narrow rectangular channel(협소사각유로)

기 호 설 명

B_o : 본드수
 C : 식(1)의 상수
 D : 직경 [m]
 g : 중력가속도 [m/s^2]
 j : 결보기속도 [m/s]
 j^* : 무차원 결보기속도
 m : 식(1)의 상수
 s : 사각유로의 간극 [m]

X : 무차원 변수
 Y : 무차원 변수
 w : 사각유로의 폭 [m]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]
 σ : 표면장력 [N/m]

하첨자

f : 액상
 g : 기상

[†] Corresponding author

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

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

1. 서 론

암모니아-물 흡수식 시스템에서 암모니아-물 2 성분 혼합증기의 암모니아 농도는 시스템의 냉동 능력과 성능계수를 결정하는 주요인자이다. 발생기(generator)에서 혼합증기의 암모니아 농도를 증가시키기 위하여 수용액-증기의 대향류 재생과정을 고려할 수 있다. 발생기의 상부에서 공급된 암모니아 수용액은 자중에 의해 하향 유동하고 외부 열원에 의한 비등과정으로 생성된 혼합증기는 상향 유동하면서 수용액과 접촉하여 열 및 물질교환에 의해 물 성분이 응축하므로 혼합증기의 암모니아 농도는 증가한다. 이 때 상향 유동하는 증기에 의한 플러딩(flooding)이 발생하여 안정적인 수용액의 유동이 방해될 수 있다. 결국 시스템의 소형화를 위하여 판-휀 열교환기와 같은 밀집형 열교환기를 발생기로 채택하려면 협소 사각유로에서의 대향류 유동한계(CCFL)에 대한 기초연구가 필요하다.

협소 사각유로에 대한 정의는 명확하지 않으나 일반적으로 간극이 0.5~5 mm인 사각유로로 그 간극이 폭에 비하여 매우 작은 유로를 의미한다. 협소 유로의 제한된 공간 내를 유동하는 기상과 액상 혼합물의 거동은 표면장력에 의한 표면력과 마찰 압력강하의 증가로 인해 원관의 경우와는 매우 상이하다. 관의 직경, 길이와 기울기, 액상 및 기상 입출구의 기하학적 형상, 그리고 유체의 물리적 상태량 등이 플러딩에 영향을 미치며 Bankoff and Lee⁽¹⁾는 수직 원관내 대향류 2상유동의 플러딩에 대한 실험적 해석, 수학적 모델, 그리고 경험적 상관식에 대한 선행 연구결과⁽²⁻⁴⁾들을 총체적으로 분석하였다. 특히 Ousaka et al.⁽⁴⁾은 액상의 표면장력의 영향을 실험적으로 해석하였으며 경사진 관내 플러딩 기상 속도에 대한 상관식을 액상의 레이놀즈수와 프루이드(Froude)수, 그리고 웨버(Weber)수의 함수로 제시하였다.

원관내 플러딩에 대한 연구에 비하여 사각 협소유로에 대한 연구내용은 극히 제한되어 있다. 판형(flat-plate-type) 핵연료사이의 유로에 대한 냉각재 침투 및 핵연료 냉각과정에 대한 적용을 위하여 Sudo and Kaminaga⁽⁵⁾는 임계열유속 실험의 선행실험으로 간극이 2.3, 5.3, 8.3 그리고 12.3 mm인 수직 사각 유로에서의 대향류 유동한계에 대한 실험을 수행하였다. 유동한계에 대한 유로

중형비(간극/폭, 0.03~0.2)의 지배적인 영향을 확인하였으며 유동한계에 대한 상관식을 제안하였다. Osakabe and Kawasaki⁽⁶⁾는 폭이 100 mm이고 간극이 2, 5, 10 mm인 사각유로에서 상부(top) 플러딩 실험을 수행하고 환상유로 경우와의 유사성을 연구하였다. Larson et al.⁽⁷⁾은 1.1과 2.2 mm 간극의 유로에서 공기 주입구의 형상과 위치가 플러딩에 미치는 영향을 연구하였다 Kim et al.⁽⁸⁾은 암모니아-물 흡수식시스템의 판형발생기 개발을 위하여 중형비가 0.02~0.05인 협소사각유로에서 공기-물 대향류 2상 유동한계에 대한 실험 결과를 제시하였다. Vlachos et al.⁽⁹⁾은 밀집형 응축기에 대한 적용을 위하여 간극이 5와 10 mm인 사각유로에 대한 플러딩 현상을 가시화하였으며 유로 간극의 절대적인 역할을 강조하였다. 또한 원관내 플러딩에 대한 Wallis⁽¹⁰⁾의 관계식을 사각유로의 경우에 대하여 적용하는 것은 적절치 않다고 제안하였다. Drosos et al.⁽¹¹⁾은 간극 10 mm의 사각유로에 대한 플러딩 실험을 통하여 액막 두께, 유하액막의 파동특성, 그리고 계면 전단응력 등에 대한 실험결과를 제시하였다. 그러나 유로의 폭이 밀집형 열 및 물질교환기로 사용될 수 있을 정도로 크면서 중형비가 매우 작은 영역의 사각유로에서 유동한계에 대한 체계적인 실험적 연구나 상관식은 쉽게 발견할 수 없다.

본 연구에서는 유로의 간극이 각각 1 mm와 3 mm인 협소 수직 사각유로에서 공기-물 2상 혼합물의 대향류 유동한계를 실험적으로 연구하여 기존에 발표된 경험식과 비교하였다. 또한 앞서 Kim et al.⁽⁸⁾이 발표한 실험결과(간극 2 mm와 5 mm)를 포함하여 대향류 유동한계에 대한 포괄적인 상관식을 새로이 개발하였다.

2. 실험장치 및 방법

협소 사각유로에 대한 기상-액상 혼합물의 대향류 2상 유동한계 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 중형비를 0.01~0.03의 범위에서 조정하였다. 유로를 구성하는 두 개의

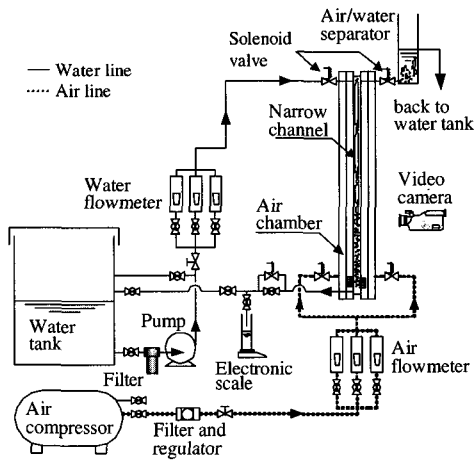


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

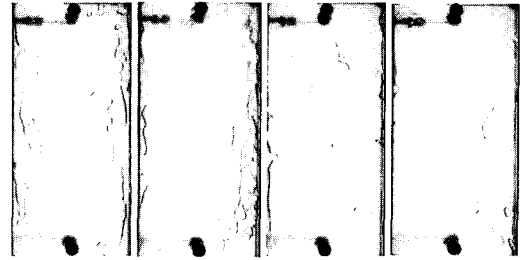
Table 1 Range of superficial velocities of air and water in counter-current two-phase flow

Gap width (mm)	1	3
Water velocity, $-j_w$ (m/s)	0~0.125	0~0.053
Air velocity, j_a (m/s)	0.02~3.5	0.02~2.5

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 공기-물 분리기(air-water separator)로 유출할 수 있도록 하였다.

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. 물은 물탱크로부터 펌프에 의해 가압되어 유로의 상부에 공급되며, 공급되는 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 실험 초기에 유로와 분리기가 물로 가득 채



$j_a = 2.08$ m/s $j_a = 2.50$ m/s $j_a = 3.33$ m/s $j_a = 3.50$ m/s

Fig. 2 Visual observations of counter-current air-water flow in narrow rectangular channels.

워진 상태에서 시험부 출구의 밸브를 조절하여 사각유로의 상부에 주입되는 물의 유량을 일정하게 유지하였다. 그 다음 공기 챔버에 원하는 유량의 공기를 공급하여 협소사각유로에 공기가 유입되도록 하였다. 공기의 유량이 아주 작을 경우 공급된 물은 모두 유로를 통과하여 유로의 하부에서 배출된다. 플러딩이 발생할 경우 유로의 상부에서 공급된 물의 일부는 사각유로 내를 하향 유동하여 유로의 하부에서 배출되지만 나머지는 유로에 침투하지 못하고 공기에 의해 공기-물 분리로 배출되는 정상상태가 형성된다. 분리기에서 공기는 대기 중으로 방출되고 물은 범람공(overflow hole)을 통하여 배출되어 물탱크로 재순환하며 이로써 분리기에서 물의 수위는 항상 일정하게 유지된다. 유로 내부를 실제로 하향 유동한 물의 유량은 시험부 출구에서 일정 시간 동안 채집된 물의 체적을 측정하여 환산하였다.

본 실험에서 협소사각유로의 간극에 대한 공기와 물의 실험범위는 Table 1과 같다. 상온의 공기와 물이 사용되었으며 공기유량의 오차범위는 6%, 물은 2%로 실험의 반복성은 매우 우수한 것으로 확인되었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2에 간극 2 mm의 유로에서 대향류 공기-물 2상 유동양식에 대한 대표적인 가시화 결과를 나타내었다. 기상의 겉보기 속도가 증가함에 따라 액상은 액막의 형태로 흘러내리며, 기상은 유로의 중심부를 연속적인 상으로 상향 유동한다. 본 실험에 사용한 협소 유로는 폭에 비해 간극이 매

우 작기 때문에 유로 측면의 액막이 전, 후면보다 상대적으로 두꺼우며, 큰 진폭의 파동이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 기상의 속도가 증가함에 따라 액막의 두께는 감소하며, 액막에서 분리된 액적들이 간헐적으로 유로 중심부로 유입되기도 한다. 특히 Fig. 2에서 기상의 겉보기 속도가 3.5 m/s인 경우 유로의 전면과 후면에 형성된 액적 혹은 세류(rivulet)가 상향 유동하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3(a)는 주어진 공기의 겉보기속도에 대하여 유동가능한 물의 최대 겉보기속도를 보여주고 있다. 공기의 겉보기 속도가 작을 때 물의 유동한계 겉보기속도는 거의 일정하나 공기의 겉보기속도가 2~4 m/s 영역에서 공기의 미소 증가에 대하여 물의 유동 가능한 겉보기 속도는 급격히 감소하고 있다. 또한 협소사각 유로내에서 물의 하향

유동이 더 이상 허용되지 않는 공기의 겉보기 속도가 간극이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

Wallis⁽¹⁰⁾는 공기와 물의 2상 대향류 유동한계를 원관내 유동의 경우에 대하여 다음과 같이 제시하였다.

$$j_g^{*1/2} + m j_f^{*1/2} = C \tag{1}$$

하첨자 f 와 g 는 액상과 기상을 각각 의미하며 각 상에 대한 무차원 겉보기속도는 다음과 같이 정의되었다.

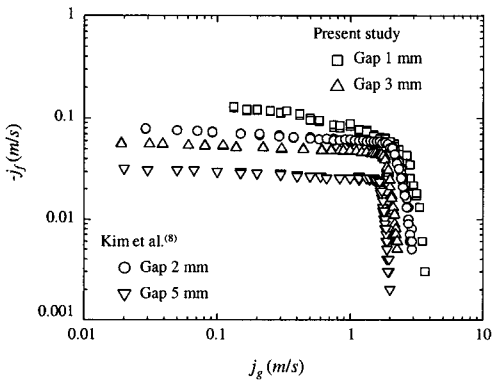
$$j_k^* = \frac{j_k \rho_k^{1/2}}{(g D \Delta \rho)^{1/2}} \quad (k = f, g) \tag{2}$$

여기서 ρ 는 밀도, g 는 중력가속도, 그리고 D 는 유로의 직경이다. Wallis⁽¹¹⁾는 상수 C 에 대하여 관의 입구 및 출구의 형상과 유체의 주입방법의 함수로 $0.725 < C < 1.0$ 의 값을 제시하였으며, 중력의 영향이 점성력보다 클 경우 $m = 1$ 을 제안하였다. 그러나 협소사각유로의 경우 유로의 간극비에 따라 C 와 m 은 원관의 경우에 비하여 매우 다르게 나타났다. Fig. 3(b)는 협소사각유로에서 공기-물 2상 대향류 유동한계조건을 협소사각유로의 수력직경을 이용한 무차원 겉보기속도의 함수로 보여주고 있다. 간극이 증가할수록 기울기 m 과 상수 C 는 감소하였으며 특히 간극이 작을수록 간극이 m 과 C 에 미치는 영향은 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 협소사각유로의 경우 상수 C 는 원관의 경우와 유사한 값을 보여주었으나 기울기 m 은 원관에 비하여 매우 작은 값을 나타내고 있다. 이는 유로의 간극이 폭에 비해 매우 작은 협소사각유로의 기하학적 형상의 영향으로 플러딩은 주로 간극을 사이에 두고 마주 보는 두 판상에서 액막 파동이 성장하여 서로 연결(bridging)되면서 발생하기 때문으로 고려된다.⁽⁹⁾

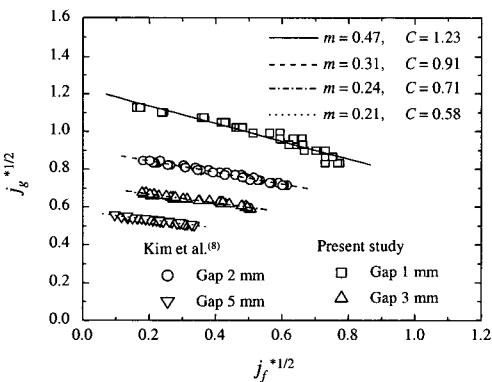
Fig. 4에 유로의 중형비와 본드수(Bond number, Bo)가 대향류 유동한계 상관식의 기울기와 상수에 미치는 영향을 나타내었다. 본드 수는 유로의 간극과 폭의 영향을 고려하여 다음과 같이 정의하였다.

$$Bo = \frac{w s (\rho_f - \rho_g) g}{\sigma} \tag{3}$$

여기서 w 는 유로의 폭, s 는 유로의 간극이며 σ 는 표면장력이다.

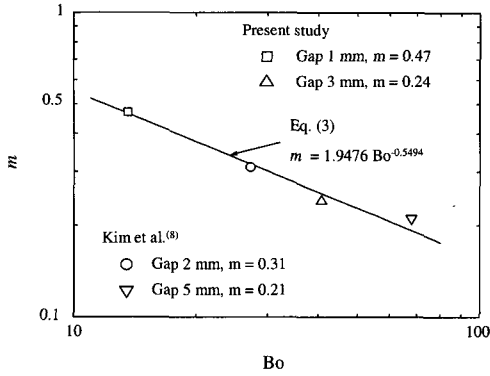


(a) j_f and j_g at CCFL

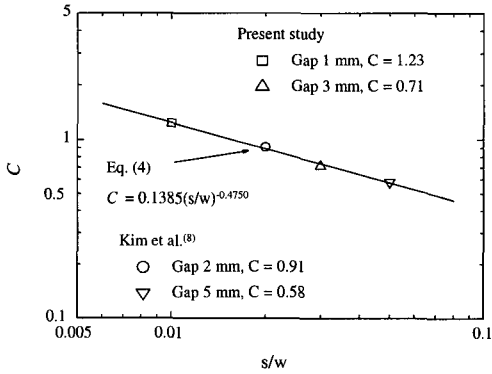


(b) m and C of Eq. (1)

Fig. 3 Countercurrent flow limitation in narrow rectangular channels.



(a) Effect of bond number on m .



(b) Effect of aspect ratio on C .

Fig. 4 Effects of Bond number and aspect ratio on CCFL correlation.

실험으로부터 구한 기울기 m 은 본드수의 함수로서, 또한 상수 C 는 유로의 종횡비의 함수로서 식(4)와 식(5)의 상관식으로 예측할 수 있다.

$$m = 1.9476(Bo)^{-0.5494} \quad (4)$$

$$C = 0.1385\left(\frac{s}{w}\right)^{-0.4750} \quad (5)$$

Sudo and Kaminaga⁽⁴⁾는 식(2)의 무차원 결보 기속도, 상수 m 과 C 를 새로운 무차원 변수 X 와 Y 로 재조합한 후 협소사각유로에 대한 대향류 유동한계에 대한 상관식을 식(8)과 같이 제시하였다.

$$X = \frac{m}{C} J_f^{*1/2} \quad (6)$$

$$Y = \frac{1}{C} J_g^{*1/2} \quad (7)$$

$$X^{0.7} + Y^{0.7} = 1.3^{0.7} \quad (8)$$

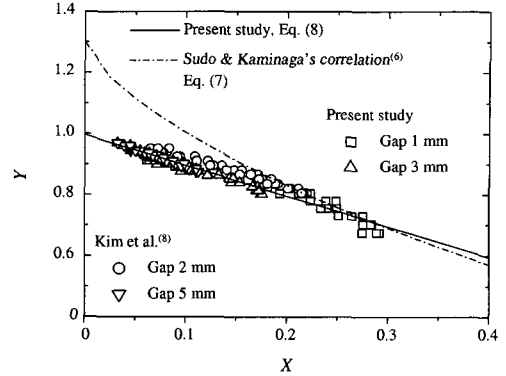


Fig. 5 Y as a function of X .

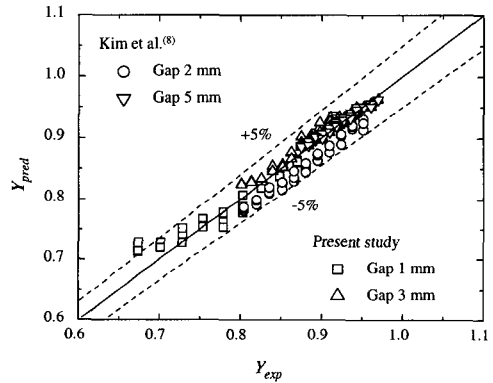


Fig. 6 Comparison of experimental data with the prediction of Eq. (9).

그러나 Sudo and Kaminaga의 관계식은 Fig. 5와 같이 본 실험의 결과와 정량 및 정성적으로 차이를 보이고 있다. 특히 협소사각유로의 간극이 클수록 더 큰 차이를 보여주고 있다. 이는 Sudo and Kaminaga의 경우 유로의 상부에 일정 체적의 공간을 설치하여 이 공간에 공급된 물은 자중에 의해 유로로 하향 유동하고 정해진 수위 이상의 물은 외부로 배출되도록 하는 등 액상의 주입방법이 다르기 때문으로 추정된다.

Kim et al.⁽⁸⁾이 발표한 실험결과와 본 연구의 결과를 모두 포함하여 종횡비가 0.01~0.05인 협소사각유로의 대향류 유동한계에 대한 상관식을 식(9)와 같이 개발하였다.

$$0.968X + Y = 0.994 \quad (9)$$

식(9)는 Fig. 6과 같이 본 실험의 결과와 $\pm 5\%$

오차 범위내에서 잘 일치하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유로의 간극이 각각 1mm와 3mm인 협소 수직 사각유로에서 공기-물 2상 혼합물의 대향류 유동에 대하여 대향류 유동한계를 실험적으로 연구하였다. 주어진 기상의 결보기속도에 대하여 협소 수직 사각유로의 간극이 증가함에 따라 물의 유동한계 결보기속도는 감소하였다. 또한 간극이 증가함에 따라 액상의 유동이 허용되지 않는 기상의 임계결보기 속도도 감소하였다. 협소사각유로의 대향류 유동한계에 대한 상관식을 개발하였으며 이는 본 연구의 실험결과를 오차 범위 5%이내에서 잘 예측하고 있다.

후 기

이 논문은 2006학년도 홍익대학교 학술연구진 흥비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- Bankoff, S.G. and Lee, S.C., 1986, A critical review of the flooding literature, *Multiphase Science and Technology*, Hemisphere, New York, pp.95-180.
- Ghiaasiaan, S.M., Wu, X., Sadowski, 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, 1997, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 23, No. 6, pp. 1063-1083.
- Zapke, A. and Kroger, D.G., 2000, Counter-current gas-liquid flow in inclined and vertical ducts - II: The validity of the Froude-Ohnesorge number correlation for flooding, 2000, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 26, pp. 1457-1468.
- Ousaka, A., Deendarlianto, Kariyasaki, A. and Fukano, T., 2006, Prediction of flooding gas velocity in gas-liquid counter-current two-phase flow in inclined pipes, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, pp. 1282-1292.
- Sudo, Y. and Kaminaga, M., 1989, A CHF characteristic for downward flow in a narrow vertical rectangular channel heated from both sides, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 15, No. 5, pp. 755-766.
- 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.
- Larson, T.K., Oh, C.H. and Chapman, J.C., 1994, Flooding in a thin rectangular slit geometry representative of ATR fuel assembly side-plate flow channels, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 152, pp. 277-285.
- Kim, B. J., Sohn, B. H. and Jeong, S., 2001, Two-phase flow regimes for counter-current air-water flows in narrow rectangular channels, *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 7, pp. 941-950.
- Vlachos, N.A., Paras, S.V., Mouza, A.A. and Karabelas, A.J., 2001, Visual observation of flooding in narrow rectangular channels, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 27, pp. 1415-1430.
- Wallis, G.B., 1969, *One-dimensional two-phase flow*, McGraw-Hill, New York.
- Drosos, E.I.P., Paras, S.V. and Karabelas, A.J., 2006, Counter-current gas-liquid flow in a vertical narrow channel-Liquid film characteristics and flooding phenomena, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 32, pp. 51-81.