

수평 T형 분지관 내 냉매 이상유동 분배특성에 미치는 변수들의 영향

태 상 진, 조 금 남*

성균관대학교 대학원, *성균관대학교 기계공학부

Effect of Parameters on the Two-Phase Flow Distribution Characteristics of Refrigerants in a Horizontal T-Junction

Sang-Jin Tae, Keumnam Cho**

Graduate School, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

(Received August 30, 2005; revision received November 16, 2005)

ABSTRACT: The present study has been experimentally investigated the effect of geometric and operating parameters on the two-phase flow distribution of refrigerants in a horizontal T-junction. The operating parameters were the kind of refrigerants (R-22, R-134a, and R-410A), saturated temperature, and the inlet mass flux and quality. The geometric parameters were the tube diameter and the tube diameter ratio. The measured data of refrigerants were compared with the values predicted using the models developed by several researchers for air/water or steam/water two-phase flow. Among the operating parameters, the inlet quality was the most sensitive to the mass flow rate ratio. Between the geometric parameters, the tube diameter ratio was more sensitive than tube diameter.

Key words: Two-phase flow(이상유동), Flow distribution(유동분배), Horizontal T-junction(수평 T형 분지관), Refrigerant(냉매)

기 호 설 명

a : 유량분배선의 거리 [mm]
 D : 관 내경 [mm]
 F : 유량분배비, M_3/M_1
 G : 냉매 질량유속 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
 M : 질량유량 [kg/s]
 u : 유동속도 [m/s]
 x : 냉매 건도

그리스 문자

ρ : 밀도

하첨자

1 : 입구관
2 : 출구관
3 : 분지관
 G : 기상
 L : 액상

† Corresponding author

Tel.: +82-31-290-7445; fax: +82-31-290-7923

E-mail address: keumnamcho@skku.edu

1. 서론

T형 분지관은 유체의 분배기구로서 최근 들어 그 적용범위가 확대되고 있다. 단상의 경우, 다분지 시스템 내에서 각 유로를 통해 발생하는 압력강하를 예측하여 각각의 합지점에서의 절대압력이 같아지는 해를 구함으로써 각 유로의 유량을 예측해 낼 수 있으나, 다분지 열교환기와 같이 이상의 냉매가 분배되는 경우, 각 유로의 압력강하 특성은 각 유로의 유량뿐만 아니라 건도에 의해서도 변화하기 때문에 이에 대한 예측이 매우 복잡하고 어려운 실정이다. 이러한 T형 분지관에서의 기상과 액상의 유량분배 특성은 입구관에서의 냉매 물성치, 질량유속, 건도 등에 따라 달라질 수 있으며, 관경이나 입구관과 분지관의 관경비, 관의 방향 등에 따라서는도 영향을 받게 되므로 이러한 변수들의 영향도 및 특성에 대한 체계적 연구가 필요하다. 그러나, 이러한 T형 분지관 내 이상유동 분배특성에 대한 기존의 연구들은 주로 물-공기를 작동유체로 하여 진행되어져 왔다.

수평 T형 분지관 내 이상유동 분배에 대한 연

구로는 공기-물을 작동유체로 한 Azzopardi and Whalley,⁽¹⁾ Shoham et al.,⁽²⁾ Hwang et al.,⁽³⁾ Hart et al.,⁽⁴⁾ Roberts et al.⁽⁵⁾ 과 그밖에 수증기-물을 작동유체로 한 Ballyk et al.,⁽⁶⁾ Seeger et al.,⁽⁷⁾ Reimann and Seeger⁽⁸⁾ 등이 있다. 그러나 이들 연구의 실험조건들은 냉동시스템의 일반적 운전조건을 고려한 본 연구의 냉매 실험조건과 많은 차이를 나타내고 있으며, 그 결과의 냉매에 대한 적용 가능성도 검증되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 수평 T형 분지관 내에서의 냉매종류 및 입구관 유동조건에 따른 이상유동 분배특성을 실험적으로 비교 조사하였으며, 이를 기존의 예측모델과 비교하여 이러한 모델들의 냉매에 대한 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 실험장치 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 실험장치는 수평 T형 분지관 시험부, 기액분리기, 기체 및 액체 질량유량계, 판형 열교환기, 냉매액 펌프, 예열기 등으로 구성되었다. 넓은 분배비의 범위에 대해 실험하기 위해 분지관과 출

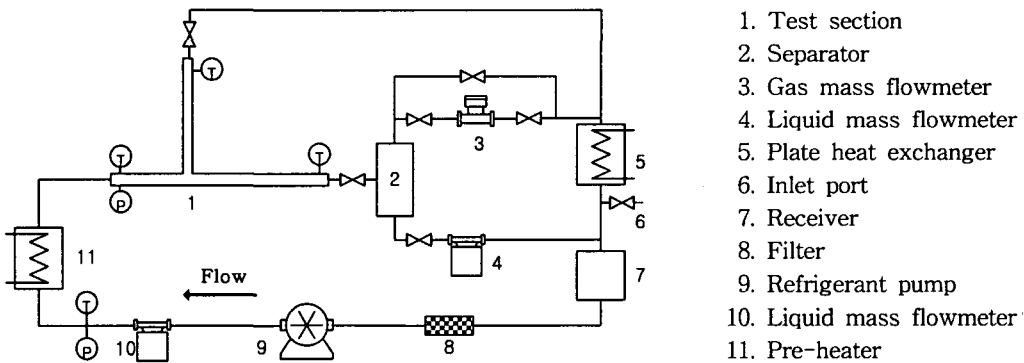


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system.

Table 1 Experimental parameters and ranges

| Parameter | Unit | Range |
|---|-------------------------|----------------------|
| Fluid | - | R-22, R-134a, R-410A |
| Inlet mass flux (G_1) | $\text{kg/m}^2\text{s}$ | 100, 300, 500, 700 |
| Inlet quality (x_1) | - | 0.1~0.9 |
| Sat. temp. ($T_{sat.}$) | $^{\circ}\text{C}$ | 3.5, 6.0, 8.5, 11.0 |
| Tube diameter (when $D_1 = D_3$) | mm | 4.95, 8.12, 11.3 |
| Diameter ratio (D_3/D_1 , $D_1=11.3$) | - | 1, 0.72, 0.44 |

구관의 출구지점에 밸브를 설치하여 분배비를 조절하여 실험하였으며, 시험부 입구에는 가시화부를 설치하여 유동양식을 관찰하였다.

본 연구에서의 실험 변수 및 범위를 Table 1에 나타냈다. 작동유체로서 냉매는 R-22와 R-134a, R-410A를 사용하였으며, 각 냉매의 포화온도를 변화시켜 포화온도 변화에 따른 영향을 관찰하였다. 시험부 입구에서의 질량유속은 일반적 중소형 냉동기의 증발기 내 유량조건을 고려하여 100, 300, 500, 700 kg/m²s로 변화시켰으며, 입구건도는 0.1~0.9 범위에서 조절하였다. 수평 T형 분지관의 관 내경은 냉매 종류 및 포화온도, 질량유속 및 건도변화 실험에 대하여 입구관과 분지관 모두 8.12 mm였으며, 관경변화 영향을 관찰하기 위하여 입구관과 분지관 관경이 같은 경우 11.3 mm, 8.12 mm, 4.95 mm로 각각 변화시켰다. 또한, 입구관에 대한 분지관의 관경비 변화에 대한 실험을 위해 관경비를 1, 0.72, 0.44로 각각 변화시켜 실험하였다.

Moffat⁽⁹⁾이 제시한 오차 해석방법을 통한 기상과 액상의 유량분배비 계측값의 오차범위는 각각 $\pm 2.3 \sim 5.1\%$, $\pm 1.5 \sim 4.8\%$ 였다.

3. 유량분배모델

본 연구에서는 기상과 액상의 유량분배비를 다음과 같이 정의하였다.

$$F_G = \frac{M_{G3}}{M_{G1}} \quad (1)$$

$$F_L = \frac{M_{L3}}{M_{L1}} \quad (2)$$

본 연구에서는 원형 단면의 수평 T형 분지관에 대하여 기존의 연구자들로부터 도입된 분배영역(Zone of influence) 개념을 이용하여 기존 여러 연구자들의 공기-물에 대한 분배모델을 본 연구의 냉매 실험결과와 비교하여 보았다. Fig. 2에서는 이러한 분배영역을 도식화하였다. 그림과 같이 분지관측 관 표면에서부터 거리 a_G 또는 a_L 만큼 떨어진 유량분배선(Dividing streamline)을 정의하였으며 이 유량분배선 안쪽의 액상 또는 기상의 냉매는 모두 분지관 측으로 유입된다고 가정하였다. 이 유량분배선의 위치 a_G , a_L 은 각

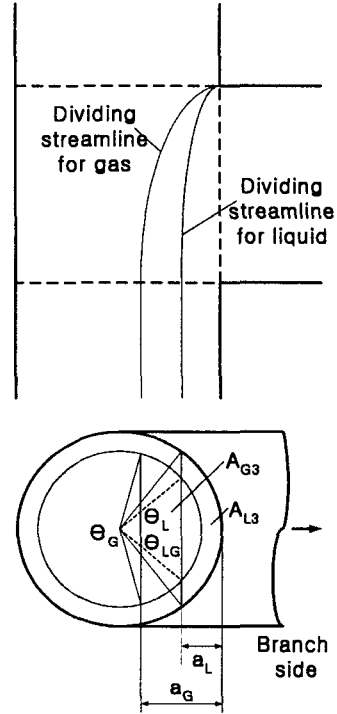


Fig. 2 Concept of the dividing streamlines.

상에 작용하는 작용력에 의하여 달라진다. 실제적인 현상은 그림과 같이 직선의 유량분배선을 따라 유동이 명확히 분리되지는 않을 것으로 예상되나 분지관 쪽으로 유입되는 냉매는 물리적으로도 기상과 액상 모두 분지관 쪽과 가까운 일정 영역 내에서 분리될 것으로 판단되므로 각 상의 유량분배 정도를 나타내는 척도로서 유량분배선의 도입은 물리적으로도 타당한 것으로 판단되었다.

Fig. 3은 본 연구의 대표 실험조건인 R-22 냉매의 8.12 mm 수평 T형 분지관 내 입구 질량유속 300 kg/m²s, 입구건도 0.3에 대해 기존 연구자들의 모델을 적용 비교해 본 결과이다. 그림에서와 같이 동일조건에 대해서도 모델에 따라 예측값의 큰 차이를 나타냈다.

Azzopardi and Whalley⁽¹⁾의 모델과 Roberts et al.⁽⁵⁾의 모델은 Fig. 2에서 설명한 유량분배선이 기상과 액상에 대하여 동일하다는 가정 하에 개발된 모델이다. 따라서, 기상과 액상의 분배비가 입구조건에 따라서도 크게 변화하지 않으며 그 영향을 반영하지 못하는 것으로 판단된다.

Shoham et al.⁽²⁾과 Hwang et al.,⁽³⁾ Hart et

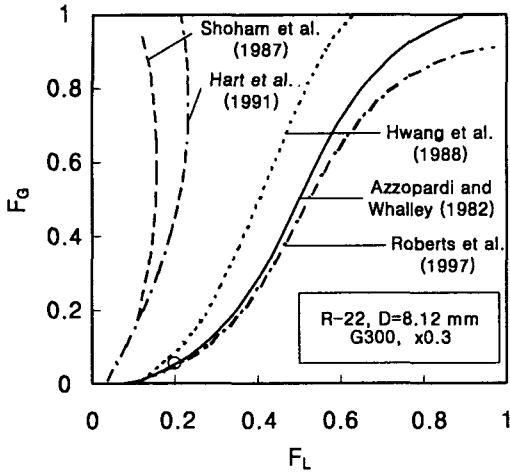


Fig. 3 Comparison of models developed for air/water.

al.⁽⁴⁾의 모델은 이러한 기존 모델의 단점을 보완하여 기상과 액상 각각에 대한 유량분배선을 설정하고 이들의 관계를 모델로 제시하였다. 특히, Hwang et al.⁽³⁾은 기상과 액상의 유량분배선의 관계를 환상류와 같은 분리 유동양식에 대하여 다음과 같은 상관식으로 제시하였다.

$$\frac{\left(\frac{a_L}{D_1}\right)^{n_L}}{\left(\frac{a_G}{D_1}\right)^{n_G}} = \frac{\rho_G u_G^2}{\rho_L u_L^2} \quad (3)$$

$$n_k = 5 + 20 \exp\left\{-53\left(\frac{a_k}{D_1}\right)\right\} \quad (4)$$

k 는 각각 기상과 액상에 대해 G, L 의 하첨자를 표시한다. Hwang et al.⁽³⁾은 n 값에 대하여 실험적 상관식을 제시하였으나, 전체적으로 기상과 액상의 유량분배선의 관계가 기상과 액상의 운동량의 비에 따라 달라진다는 이론적 배경에서 모델을 제시하였다.

4. 결과 및 고찰

앞서 Fig.3에서 알 수 있는 바와 같이 기존 공기-물 모델들은 냉매조건에 적용시 같은 조건에서도 예측값의 큰 차이를 나타냈다. 이중 냉매에

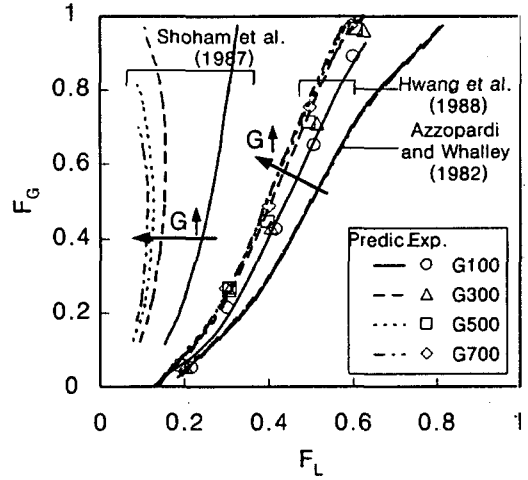


Fig. 4 Effect of inlet mass flux (R-22, $x_1=0.3$).

적용 가능한 모델을 검토키 위해 본 연구의 실험 결과와 비교하였다. Fig. 4는 입구 질량유속에 따른 기상과 액상의 유량분배비의 실험결과를 기존 모델과 비교한 것이다. 기존 모델 중 Hwang et al.⁽³⁾의 모델이 실험값과 가장 잘 일치하였으며, 입구 질량유속의 변화에 따른 경향도 잘 예측하였다. 반면, Shoham et al.⁽²⁾과 Hart et al.⁽⁴⁾의 모델은 실험값을 과대 예측하였고 질량유속의 영향도 더 크게 예측하여 실험값과의 오차가 매우 크게 나타났다.

Fig.5는 입구 건도의 영향을 기존 모델들과 비

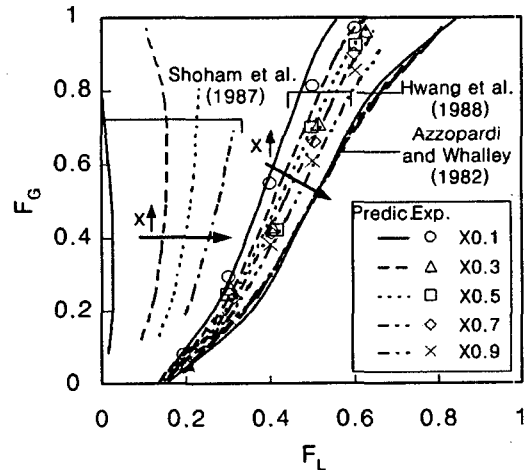


Fig. 5 Effect of inlet quality (R-22, $G_1=300$).

교한 것이다. 역시 Hwang et al.⁽³⁾의 모델이 실험값과 가장 잘 일치하였으며, 예측값의 최대오차범위는 17%였다. 입구관 건도가 증가함에 따라 기상의 유량분배비는 연속적으로 감소하였다. 이는 건도의 증가에 따라 기공률이 증가하면서 입구관에서의 기상과 액상의 운동량비가 연속적으로 증가하기 때문이다.

Fig. 6과 Fig. 7은 냉매 종류 및 포화온도의 영향을 Hwang et al.⁽³⁾의 모델과 비교하여 나타냈다. 건도 및 질량유속의 영향에 비하여 냉매의 종류 및 포화온도 변화에 따른 냉매 물성치의 변화는 본 연구의 실험범위 내에서 수평 T형 분지

관 내 이상유동 분배특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. 이는 각 변수 변화에 따른 운동량비의 계산을 통해서도 확인할 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 입구관과 분지관의 관경이 같을 때의 관경의 변화와 입구관 관경이 11.3mm 일 때의 관경비 변화의 영향을 나타낸 것이다. 관경이 같은 때는 관경 변화의 영향이 크게 나타나지 않았으나 상대적으로 관경비가 감소함에 따라서는 기상의 유량분배비가 연속적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나, Hwang et al.⁽³⁾의 모델은 이러한 관경비의 영향을 예측할 수 없는 한계점을 가지고 있으므로, 본 연구에서는 본 연구의

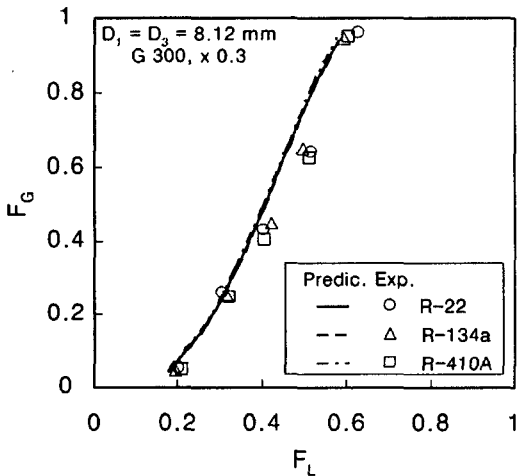


Fig. 6 Effect of kind of refrigerants.

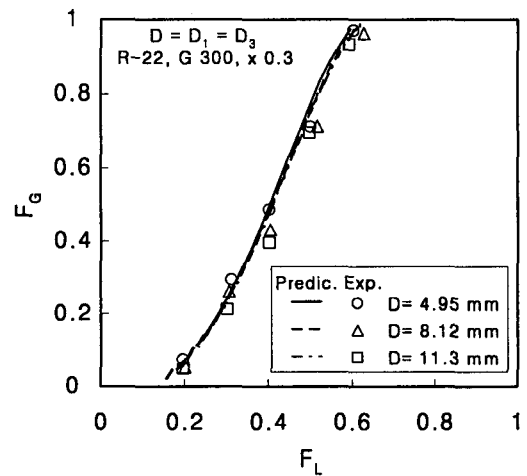


Fig. 8 Effect of tube diameter.

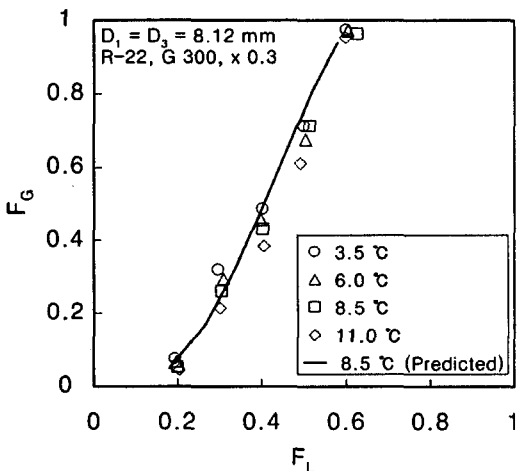


Fig. 7 Effect of saturated temperature.

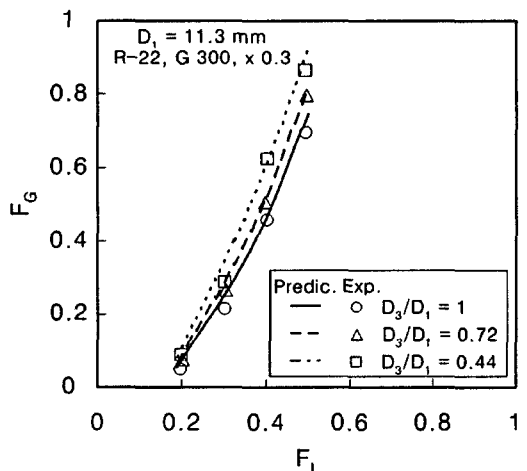


Fig. 9 Effect of diameter ratio.

Table 2 Sensitivity of parameters

| Parameter | Sensitivity |
|---|-------------|
| Fluid (R-22, R-134a, R-410A) | 2.5% |
| Inlet mass flux (100~700 kg/m ² s) | 23.4% |
| Inlet quality (0.1~0.9) | 43.6% |
| Saturated temp. (3.5~11.0°C) | 1.8% |
| Tube diameter (4.95~11.3 mm) | 4.4% |
| Diameter ratio (1, 0.72, 0.44) | 26.5% |

냉매 실험결과를 토대로 다음과 같은 수정된 상관식을 제시하였다.

$$\left(\frac{a_L}{D_1}\right)^{n_L} = \frac{\rho_G u_G^2 \left(\frac{D_3}{D_1}\right)^{1.25}}{\rho_L u_L^2 \left(\frac{D_3}{D_1}\right)} \quad (5)$$

따라서, Fig. 9는 위 식(5)에 의한 예측값과 계측값을 비교한 것이다. Fig. 9과 같이 본 연구의 실험범위에서는 식(5)가 계측값과 비교적 잘 일치하고 있으나, 더 넓은 범위에 대한 적용 가능성은 향후 추가적인 실험 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Table 2는 본 연구에서의 각 변수의 민감도를 수치적으로 비교하기 위해 액상 유량분배비가 0.5인 경우 기상 유량분배비의 변화율을 민감도로 정의하여 표시한 것이다. 기상 유량분배비의 변수 민감도는 기준조건(R-22, $G=300$, $x=0.3$, $T_{sat.}=8.5^\circ\text{C}$, $D=8.12$ mm, $D_3/D_1=1$)의 기상 유량분배비값에 대한 각 변수의 변화 범위 내 기상 유량분배비의 최대 변화값의 비율로 정의하였다. 표에서와 같이 입구 건도의 영향, 관경비, 입구 질량유속의 순서로 민감도가 크게 나타났으며, 관경 및 냉매 종류, 포화온도의 민감도는 매우 미소하게 나타났다.

5. 결 론

(1) 본 연구에서는 수평 T형 분지관 내 냉매 이상유동 분배특성에 미치는 변수들의 영향을 실험적으로 조사하고 이를 기존 모델들과 비교하였다.

(2) 기존의 모델 중 Hwang et al.⁽³⁾의 모델이 본 연구의 냉매 실험결과를 가장 잘 예측하였으

며, 예측오차는 약 20% 이내로 나타났다.

(3) Hwang et al.⁽³⁾의 모델은 입구관의 유동조건, 특히 기상과 액상의 운동량비를 고려한 모델로서 입구관과 분지관의 관경비에 따른 영향을 고려하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 냉매 실험결과를 토대로 관경비에 대한 수정된 모델을 제안하였다.

(4) 본 연구의 실험변수들 중에서 입구 건도가 가장 큰 변수 민감도를 나타냈으며, 관경비, 입구 질량유속의 순으로 민감도가 크게 나타났고, 냉매 종류, 포화온도, 관경 등의 민감도는 매우 작게 나타났다.

후 기

본 연구는 성균관대학교 미래가전연구센터 및 두뇌한국21 사업비에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. Azzopardi, B. J. and Whalley, P. B., 1982, The effect of flow patterns on two-phase flow in a T-junction, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 8, pp. 491-507.
2. Shoham, O., Brill, J. P. and Taitel, Y., 1987, Two-phase flow splitting in a tee junction - Experiment and modelling, *Chemical Engineering Science*, Vol. 42, No. 11, pp. 2667-2676.
3. Hwang, S. T., Soliman, H. M. and Lahey, Jr., R. T., 1988, Phase separation in dividing two-phase flows, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 14, No. 4, pp. 439-458.
4. Hart, J., Hamersma, P. J. and Fortuin, J. M. H., 1991, Phase distribution during gas-liquid flow through horizontal dividing junctions, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 126, pp. 293-312.
5. Roberts, P. A., Azzopardi, B. J. and Hibberd, S., 1997, The split of horizontal annular flow at a T-junction, *Chemical Engineering Science*, Vol. 52, No. 20, pp. 3441-3453.
6. Ballyk, J. D., Shoukri, M. and Chan, A. M. C., 1988, Steam-water annular flow in a

- horizontal dividing T-junction, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 14, No. 3, pp. 265-285.
7. Seeger, W., Reimann, J. and Muller, U., 1986, Two-phase flow in a T-junction with a horizontal inlet Part 1: Phase separation, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 12, No. 4, pp. 575-585.
 8. Reimann, J. and Seeger, W., 1986, Two-phase flow in a T-junction with a horizontal inlet Part 2: Pressure Differences, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 12, No. 4, pp. 587-608.
 9. Moffat, R. J., 1985, Using uncertainty analysis in the planning of an experiment, *Trans. of the ASME: J. of Fluid Engineering*, Vol. 107, pp. 173-182.