

단열 수평관내 이상류의 유동특성 Two-Phase Flow Characteristics in an Adiabatic Horizontal Tube

최 부 흥
B. H. Choi

Key Words : Two-Phase Flow(이상류), Flow Pattern(유동양식), Void Fraction(보이드율), Frictional Pressure Loss(마찰압력손실), Superficial velocity(겉보기속도)

Abstract : Two-phase loop systems using the latent heat capacity of their working fluids can meet the increasing power requirements and are well suited to thermal management systems of future large applications, due to its abilities to handle large heat loads and to provide them at uniform temperatures regardless of the changes in the heat loads. Therefore some experiments on the effect of the gas and liquid superficial velocities, j_G , j_L on flow pattern transition, void fraction and frictional pressure loss were performed on a co-current air-water flow in an adiabatic horizontal tube. The flow patterns were depended on the superficial velocity of each phase. It showed that the increasing j_L resulted in a significant increase in the frictional pressure loss for all flow patterns, at a constant j_G . The experimental results were also evaluated with some of existing models and correlations.

기호 설명

- j : Superficial velocity [m/s]
- ΔP_f : Frictional pressure loss [Pa/m]
- ΔP_{LO} : Single-phase liquid frictional pressure loss [Pa/m]
- S : Slip ratio [-]
- α : Void fraction [-]
- β : Volumetric fraction [-]
- ρ : Density [kg/m³]

Subscripts

- a : Accelerational
- f : Frictional
- g : Gravitational
- G : Gas-phase
- L : Liquid-phase

1. 서 론

기액 이상류는 가정용 보일러를 비롯한 화력·원

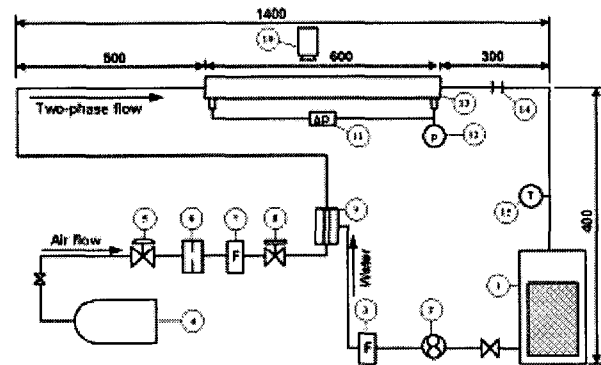
자력 발전소, 화학공정, 냉동기의 증발·응축관 및 각종 배관 구조에서 쉽게 관찰되는 유동형태이다. 또한 기액 이상류를 응용하는 시스템은 작동유체의 증발, 응축시 잠열을 이용하기 때문에 액체 단상의 현열만을 이용하는 시스템 보다 순환 펌프 동력 및 시스템 전체 중량을 감소시킬 수 있는 장점을 갖고 있다¹⁾. 이러한 장점 때문에 대용량의 열처리, 열수송 및 저장 시스템에 기액 이상류를 채택하는 시스템이 증가하고 있으며, 이 분야에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 더욱이 최근 우주 공간내 구조물의 대형화 복잡화에 따른 대용량의 열원 확보 및 열처리 시스템이 요구되고 있으며, 그러한 우주용 열처리 시스템에도 기액 이상류의 응용이 확대될 전망이다. 그러나 수평관내의 기액 이상류의 흐름에서는 기체, 액체 양상의 밀도차에 의한 상분리, 슬러깅 현상 및 불균일한 두께의 환상 액막 흐름과 같은 불규칙적이고 불안정한 현상 등이 발생할 수 있다. 이러한 현상들은 보일러와 같은 고온의 열교환 시스템에서는 열전도도가 낮은 공기나 증기가 관벽에 접촉할 우려가 있으며, 시스템의 안전운전에 심각한 문제를 발생시킬 수도 있다²⁾. 또한 각종 기기들로부터 심한 진동이 발생하는 일약한 운전조건에서는 기존의 모세관력을 구동력으로 하는 이상 유체 시스템 보다는 기계 구동 펌프를 채용하는 것이 보다 유리할 것으로 판단된다. 따라서 고도의 안전성 및

접수일 : 2003년 10월 25일
최부흥(책임저자) : 목포해양대학교 기관시스템공학부
E-mail : bhchoi@mmu.ac.kr, Tel : 061-240-7311

신뢰성이 요구되는 기계 펌프 구동 기액 이상류 시스템을 설계하기 위해서는 수평관내를 흐르는 기액 이상류의 유동특성^{3,4)}을 명확히 파악하는 것이 대단히 중요하다. 따라서 본 연구는 기계 펌프 구동 이상 유체 루프 시스템의 개발 및 실용화에 앞서 수평관내 이상류의 유동특성을 명확히 규명하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

기액 이상 유체 루프의 개략을 Fig. 1에 보인다. 작동유체는 공기와 물을 사용하였다. 기액 분리탱크①내의 물은 기어펌프②에 의해 액유량계③를 거쳐 혼합부⑨에 보내진다. 한편 고압 가스탱크④내의 공기는 압력조절밸브⑤에서 임계 오리피스⑥ 전후의 압력비가 임계압력 이하로 설정되도록 조절되고 가스유량계⑦, 솔레노이드밸브⑧를 거쳐 혼합부⑨에서 물과 혼합된다. 혼합부⑨의 기액 이상류는 500mm의 발달구간, 600mm의 시험부(10mm i.d.)⑬, 300mm의 보이드율 측정부⑭를 거쳐 분리탱크①로 되돌아 가고, 여기서 공기는 대기에 방출되고 물은 계속 순환된다. 유동거동은 고속도 비디오 카메라(HSV-500C3)에 의해 촬영되고, S-VHS 비디오 레코더에 기록된다. 보이드율은 4개의 구리제 원형 전극으로 구성된 보이드율 측정부⑭에 직류



- ① Separator tank
- ② Gear pump
- ③ Water flow
- ④ Air tank
- ⑤ Regulator valve
- ⑥ Sonic orifice
- ⑦ Air flow meter
- ⑧ Solenoid valve
- ⑨ Mixing section
- ⑩ HSV camera
- ⑪ AP transducer
- ⑫ Pressure gauge
- ⑬ Test section
- ⑭ Void fraction probe
- ⑮ Thermocouple

Fig. 1 Schematic of test flow loop system

정전압(DC5V)를 인가하는 직류 정전압 방식으로 측정된다. 다차압력손실은 2개의 차압계(P7D, 0~500mmH₂O, 0~3500mmH₂O, 오차:±1%FS)에 의해 측정되며, 측정 간격은 600mm이다. 또한 실험에 사용된 작동유체의 물성치는 Table 1과 같으며, 실험은 Table 2에 나타난 실험범위에 대해 공기유량과 가스유량을 파라미터로 하여 실시하였다.

Table 1 Properties of working fluids

Working fluids	Temperature t (°C)	Density ρ(kg/m ³)	Kinematic viscosity ν(μm ² /s)	Surface tension σ (mN/m)
Air	20	1.16	15.6	-
Water	20	998.28	1.003	72

Table 2 Experimental ranges

Working fluids	Superficial velocity(m/s)	Reynolds number(-)
Air	$j_G=0.03\sim 21$	$21\sim 1.4\times 10^4$
Water	$j_L=0.1\sim 2.6$	$1\times 10^3\sim 2.8\times 10^4$

3. 유동양식 및 천이 메카니즘

수평관내의 유동거동은 실험중 육안 관찰과 고속도 카메라에 촬영된 영상 데이터 및 보이드율 측정부의 시계열 데이터를 종합적으로 면밀히 분석한 후, 소정의 유동양식 정의⁵⁾에 따라 분류된다. 그 정의에 따라 분류된 수평관내 유동양식은 6종류 즉, 층상류(STRatified flow, ST), 기포류(Bubble flow, B), 플러그류(Plug flow, P), 슬러그류(Slug flow, S), 준환상류(Semi-Annular flow, SA) 및 환상류(Annular flow, A)로 분류되었다. Fig. 2(a)는 액상의 겉보기속도 $j_L=0.5\text{m/s}$ 일정의 조건에서 가스유량의 증가가 유동양식 천이에 미치는 효과를 보여 준다. 관 직경 보다 작고 유동방향으로 약간 긴 기포는 관 상부를 따라 흐르지만, 기상의 겉보기속도 j_G 가 증가함에 따라 기포는 성장하며 비교적 부드러운 기액 계면의 가스플러그로 천이해 간다. j_G 를 보다 증가시키면 가스상의 난류력에 의해 가스플러그의 형태는 일그러질 뿐만 아니라 가스플러그가 더 이상 성장하지 못하며, 액슬러그내에 다수의 작은 기포가 포함된 슬러그류로 천이하게 된다. 더욱더 j_G 를 증가시키면 기상의 중심부가 관심부로 이동하고, 기상에 의해 액상 슬러그가 관통된 후 크고 작은 다수의 파의 집단이 빈번히 출현하는 대단히 불

규칙적인 흐름으로 되며, 액막은 작은 기포가 포함된 상태로 흐르는 경우도 있다. 결국에는 액슬러그가 j_G 의 증가에 의해 완전히 관통되고 기액 양상이 완전히 분리된 즉, 기상은 관 중심부로, 액상은 환상액막 형태로 흐르는 환상류 유동거동을 보이며, 환상액막에 미치는 중력의 효과 때문에, 관 하부의 액막이 약간 두껍다.

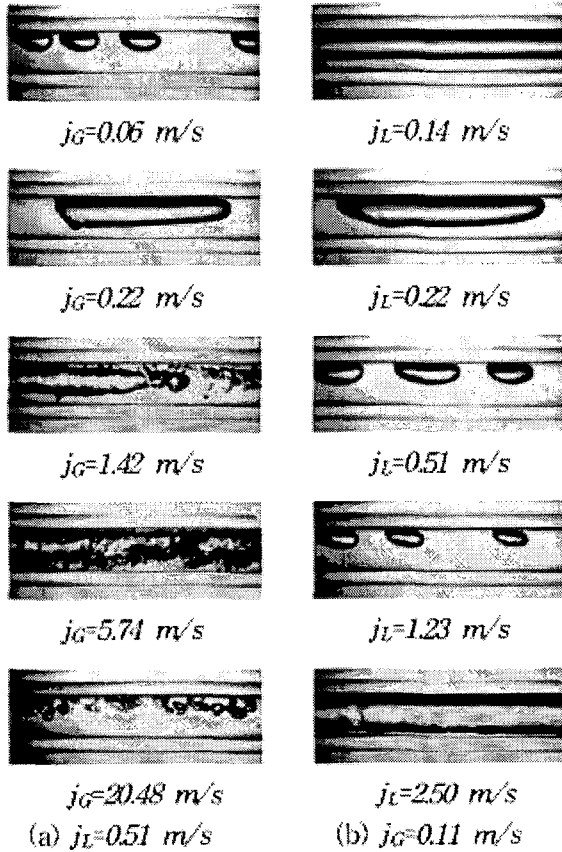


Fig. 2 Effect of gas and liquid phase superficial velocities j_G, j_L on flow behaviors

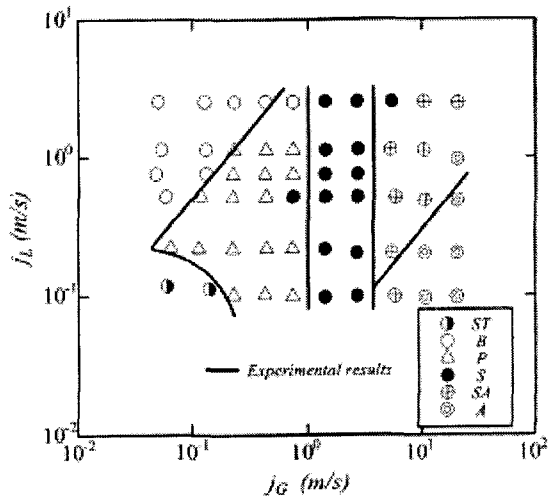


Fig 3. Flow pattern map

Fig. 2(b)는 기상의 겉보기속도 $j_G=0.11m/s$ 일정한 조건에서 액유량의 증가가 유동양식 천이에 미치는 효과를 보여준다. 기액 양상이 부력의 효과에 의해 상하로 층상화된 흐름은 j_L 의 증가에 의해 긴 기포(가스플러그)로 되고, 기포는 부력에 의해 관 상부를 따라 흐르기 때문에 기포와 벽간의 액막은 대단히 얇게 된다. 액상의 유량을 보다 증가시키면 커다란 기포는 액상의 난류력에 의해 점점 작은 기포로 분열되며, $j_L=2.50m/s$ 의 조건에서는 매우 작은 기포가 관 중심부 이하까지 분포된 분산기포류 형태로 흐르는 경향을 보인다.

실험을 통하여 얻은 57개의 유동양식 데이터를 기상, 액상의 겉보기속도 j_G, j_L 를 축으로 한 유동양식 선도에 나타낸 결과를 Fig. 3에 보인다. 그림중의 굵은선은 실험결과로부터 얻은 각 유동양식간의 천이경계선이다. 층상류와 플러그류간의 천이는 $j_L=-0.77j_G+0.25$ 선으로, 기포류와 플러그류간은 j_G 증가에 따라 j_L 도 증가하는 $j_L=5j_G$ 로 나타나며, 보이 드올이 일정한 값에서 유동양식 천이가 일어나는 것을 알 수 있다. 플러그류와 슬러그류간의 천이는 j_L 의 변화에 관계없이 $j_G=1.0m/s$ 부근에서 발생하며, 슬러그류와 준환상류간은 $j_G=3.7m/s$ 에서 일어난다. 또한 준환상류와 환상류간은 $j_L=0.03j_G$ 의 선에서 천이가 발생함을 알 수 있다.

4. 보이드올과 슬립비

보이드올 측정부의 구리제 원형 전극에 접촉하는 액상의 비율에 따라 변화하는 출력신호를 이용하여 계산한 시간평균 보이드올 α 와 용적유량비 $\beta=(j_G/(j_L+j_G))$ 간의 관계를 양상간의 속도비를 의미하는 슬립비 S를 파라미터로 하여 Fig. 4에 보인다. 그림중의 실선은 다음식으로 구해진 보이드올이다.

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)S} \quad (1)$$

그림으로부터, 용적유량비 β 의 증가와 더불어 보이드올 α 도 증가하고, $0 < \beta < 0.15$ 의 범위에서는 슬립비 S가 거의 1에 가까움을 알 수 있다. 이 영역은 기포류 영역이며, 기상과 액상이 거의 같은 속도로 흐름을 의미한다. 그러나 $\beta > 0.15$ 의 범위에서는 슬립비가 $S > 1$ 즉, $\beta > \alpha$ 로 되며, 환상류 유동양식에서는 $S=29.26 \left[(\rho_L/\rho_G)^{0.5}, \text{Smith}^{21} \right]$ 까지 증가하는데, 이 범위에서는 기상의 속도가 액상의 속도보다 항상 큼을 나타낸다.

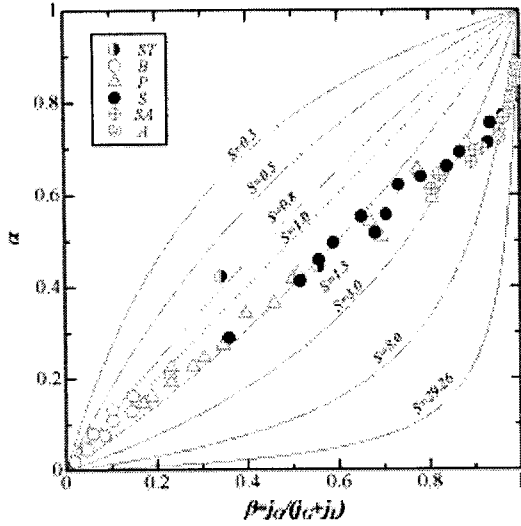


Fig. 4 Correlation of void fraction α with volumetric fraction β related to slip ratio S

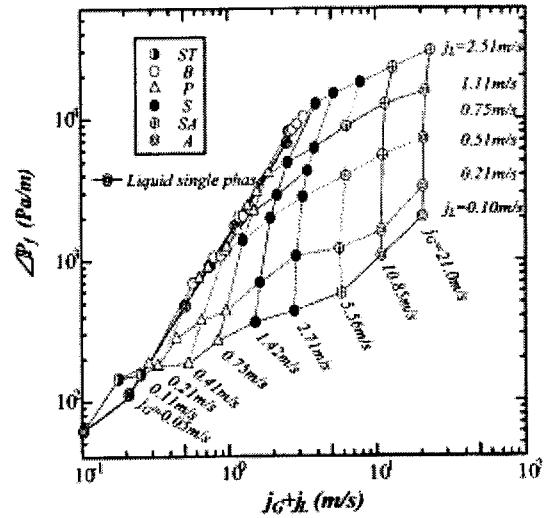


Fig. 5 Frictional pressure loss

5. 마찰압력손실과 보이드율

일반적으로 기액 이상류의 전압력손실은 마찰, 가속 및 중력에 의한 압력손실의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{total} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_f + \left(\frac{dp}{dz}\right)_a + \left(\frac{dp}{dz}\right)_g \quad (2)$$

그러나 충분히 발달된 수평단열 이성분계 기액 이상류에서는 가속 및 중력에 의한 압력손실을 무시할 수 있기 때문에, 실험중 측정된 압력손실은 마찰압력손실로 간주할 수 있다.

Fig. 5는 수평관내의 마찰압력손실 측정결과를 보인다. 일정한 j_k 조건에서 j_c 가 증가함에 따라 유동양식은 층상류 혹은 기포류에서 플러그류, 슬러그류를 거쳐 환상류 양식으로 천이됨을 알 수 있다. 그러나 마찰압력손실은 $j_k \leq 0.21 \text{ m/s}$ 범위에서, 기포류 영역까지는 점점 증가해 가고, 플러그류 영역에서는 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이지만, $j_k \geq 0.51 \text{ m/s}$ 범위에서는 j_c 의 증가에 따라 마찰압력손실도 점점 증가함을 알 수 있다. 또한 일정한 j_c 조건에서 j_k 의 증가는 유동양식에 관계없이 마찰압력손실에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

한편, Lockhart-Martinelli의 분리류 모델⁶⁾을 이용하여 마찰압력손실을 정리할 경우, 기상 및 액상이 모두 난류이면 마찰압력손실과 보이드율간의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

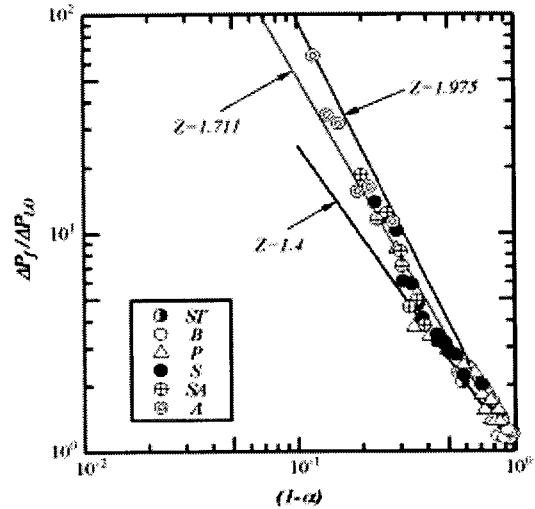


Fig. 6 Relation between frictional pressure loss and void fraction

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta P_{LO}} = (1-\alpha)^{-1.75} k_l^{-1.25} \quad (3)$$

여기서 ΔP_f 는 기액 이상류의 마찰압력손실, ΔP_{LO} 는 관내를 액단상이 단독으로 흐른 경우의 마찰압력손실, k_l 은 보정계수이다. 그러나 k_l 은 일반적으로 1에 가까운 값이기 때문에 마찰압력손실과 보이드율간의 관계를 다음과 같이 간단한 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta P_{LO}} = (1-\alpha)^{-2} \quad (4)$$

赤川²⁾은 식(4)를 보이드율 $\alpha \leq 0.2$ 인 경우의 수평관, 경사관, 수직관에 대해 적용할 수 있다고 기술

하고 있다. Fig. 6은 측정된 마찰압력손실을 식(4)을 이용하여 정리한 결과이다. 그림에서 $Z=1.4$ 의 값은 매끄러운 수평관에 대한 값이고, $Z=1.711$ 값은 실험결과를 최소자승법으로 근사해서 구한 값이다. 그림으로부터, 실험결과는 보이드율 $\alpha \leq 0.2$ 의 범위에서는 $Z=1.4$ 의 선과 잘 일치하며, 전 실험범위에서의 마찰압력손실비 ($\Delta P / \Delta P_{L0}$)의 값은 $Z=1.4 \sim 1.975$ 의 범위내에 존재하는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

수평관내 단열 이성분 기액 이상류의 유동특성을 명확히 하기 위해, 공기와 물을 작동유체로 한 실험적 연구를 행하였다. 또 유동양식, 보이드율 및 마찰압력손실에 관한 실험결과를 종래의 실험식과 모델을 이용하여 정리하고 상호간의 적합성에 대해서도 비교 검토하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 관찰된 수평관내 기액 이상류의 유동거동은, 증상류, 기포류, 플러그류, 슬러그류, 준환상류 및 환상류로 분류되었다.
2. 준환상류와 환상류간의 유동양식 전이는, 보이드율 일정인 $j_L=0.03j_G$ 의 선에서 일어났다.
3. 보이드율 α , 용적유량비 β 와 슬립비 S 간의 관계에 있어서, $\beta > 0.15$ 의 범위에서는 슬립비가 $S > 1$ 즉, $\beta > \alpha$ 로 되었다.
4. j_G 일정조건에서, j_L 의 증가는 유동양식에 관계없이 마찰압력손실에 큰 영향을 미친다.
5. 마찰압력손실비 ($\Delta P / \Delta P_{L0}$)와 보이드율 α 를 ($\Delta P / \Delta P_{L0}) = (1 - \alpha)^{-Z}$ 의 식으로 정리한 결과, $Z=1.711$ 로 평가되었다.

참고 문헌

1. A. A. M. Delil, 1998, "On Thermal-Gravitational Modeling, Scaling and Flow Pattern Mapping Issues of Two-Phase Heat Transport Systems", NLR-TP-98268, pp. 1~14.
2. 赤川浩爾, 1974, "氣液二相流", コロナ社, pp. 8~81.
3. S. Badie, C. P. Hale, C. J. Laurence and G. F. Hewitt, 2000, "Pressure Gradient and Holdup in Horizontal Two-Phase Gas-Liquid Flows

with Low Liquid Loading", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 26, pp. 1525~1543.

4. T. Fujii et al., 2000, "A Study of Flow Characteristics in Gas-Liquid Two-Phase Flows under Microgravity (Effect of Gravity and Liquid Surface Tension on Liquid-Film Structure)", Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 66-652-B, pp. 3085-3091.
5. 崔美洪, 2002, "氣-液二相流の流動特性に及ぼす重力の影響に関する研究", 博士論文, pp. 11~36.
6. R. W. Lockhart and R. C. Martinelli, 1949, "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes", Chem. Eng. Progress, Vol. 45-1, pp. 39~48.