

## 수직상향 기액이상류의 유동특성

최부홍\*

(원고접수일 : 2004년 11월 12일, 심사완료일 : 2005년 5월 6일)

### Flow Characteristics of Vertical Upward Gas-Liquid Two-Phase Flow

Bu-Hong Choi\*

**Abstract :** This paper deals with the flow characteristics of air-water two-phase flow in a vertical tube of 10mm I.D. and 600mm in length at an adiabatic condition. The obtained experimental data were covered with the liquid superficial velocity ranging from 0.095m/s to 2.56m/s, and the gas superficial velocity ranging from 0.032m/s to 21.08m/s. The effects of the gas and liquid superficial velocity on the flow pattern transitions, frictional pressure drop, and film thickness and gas-liquid interface roughness were also examined. It was found that the film thickness increased and the liquid film wave length was more longer with the liquid superficial velocity  $j_L$  increasing at  $j_G$  constant. It was also showed that the frictional pressure drops were experienced in three regions, namely increasing region(bubbly flow), decreasing region(Taylor bubble and slug flows) and re-increasing region(annular flow).

**Key words :** Two-phase flow(이상류), Vertical upward flow(수직상향류), Flow pattern(유동양식), Film thickness(액막 두께), Void fraction(보이드율), Frictional pressure drop(마찰압력손실)

#### 기호설명

$j_G$  기체상의 겉보기속도(=  $Q_G/A$ ) [ $m/s$ ], 여  
기서  $Q_G$ 는 기체상의 용적유량 [ $m^3/s$ ],  $A$   
는 유로 단면적 [ $m^2$ ].  
 $j_L$  액체상의 겉보기속도( $Q_L/A$ ) [ $m/s$ ]  
 $kl$  마찰압력손실 보정계수 [-]  
 $\alpha$  시간평균 보이드율 [-]

$\Delta P_f$  기액이상류의 마찰압력손실 [ $kPa/m$ ]

$\Delta P_{LO}$  관내를 액체상이 단독으로 흐르는 경우의  
마찰압력손실 [ $kPa/m$ ]

#### 1. 서 론

기상과 액상이 공존하여 흐르는 기액이상류는  
우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 유동형태이다. 공

\* 책임저자(목포해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : bhchoi@mmu.ac.kr, Tel : 061)240-7311

기와 물과 같은 이성분계 기액이상류는 기액 양상의 유량비에 따라 다양한 유동거동을 보인다<sup>(1)-(3)</sup>. 증발이나 응축을 수반하는 이성분계 기액이상류는 화학공정, 원자로, 냉동·공기조화 장치 및 열교환기 등에 널리 응용되고 있다. 이러한 작동매체의 상변화시 잠열을 이용하는 이성분계 기액이상류 시스템은, 액체 단상의 현열만을 이용하는 시스템 보다 펌프 동력 및 시스템 전체 중량을 감소시킬 수 있는 장점이 있기 때문에 대용량의 열처리, 열수송 및 열저장 시스템에 폭넓게 응용될 전망이다<sup>(4)</sup>.

한편, 수직관은 열적 시스템의 배관구조에서 수평관과 함께 많이 사용된다. 수직관 내의 기액이상류의 최대 특징은, 수평관 내에서 발생하는 층상류, 파상류 등의 층상화가 일어나지 않고, 축대칭 형상으로 기액 양상이 흐른다는 점이다<sup>(5)</sup>. 또한 유동과 전열은 상호 밀접한 관계, 즉 기상과 액상의 시간적, 공간적 분포 특성이 전열특성과 압력손실에 결정적 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한 수직관 내의 기액이상류의 유동양식은 무중력하의 것과 흡사한 점이 많기 때문에 무중력하의 유동·전열특성의 연구에 대해서도 유용한 정보를 제공하기도 한다.

따라서 본 연구는 기액이상류 시스템을 사용하는 대용량, 대규모의 열적 시스템의 설계에 필요한 수직관 내의 기액이상류의 유동특성-유동양식, 기액계면구조, 보이드율 및 압력손실-자료를 확보함과 동시에 유동특성간의 상호관련성과 의존성을 규명하는데 그 목적이 있다.

## 2. 실험장치 및 조건

수직상향 기액이상류의 유동특성을 조사하기 위한 실험장치의 개략을 Fig.1에 나타내었다. 작동유체는 공기와 물을 사용하였다. 기액 분리탱크① 내의 물은 기어펌프②에 의해 실험조건에 따라 선택된 액유량계(0.3~3 l/min, 1.5~20 l/min)③을 거쳐 혼합부④에 보내진다. 한편 고압 가스탱크④내의 공기는 압력조절밸브⑤에서 임계 오리피스⑥ 전후의 압력비가 임계압력 이하로 설정되

도록 조절되고 실험조건에 따라 선택된 가스유량계(0.2~2 l/min, 2~20 l/min, 20~200 l/min)⑦, 솔레노이드밸브⑧를 거쳐 혼합부④에서 물과 혼합된다. 혼합부④의 기액이상류는 300mm의 발달구간과 600mm의 시험부(10mm I.D.)⑬, 252mm의 액막 측정부⑭ 및 300mm의 보이드율 측정부⑮를 거쳐 분리탱크①로 되돌아가며, 여기서 공기는 대기에 방출되고 물은 계속 순환된다. 유동거동은 고속도 비디오 카메라(HSV-500C3)에 의해 촬영되고, S-VHS 비디오 레코더에 기록된다. 보이드율은 액막 측정부 및 보이드율 측정부에서 동시에 측정되지만, 여기서는 두개의 탐침과 브릿지회로로 구성된 액막측정부⑭에서 얻은 출력신호를 이용하여 계산되며, 그 상세를 Fig. 2에 보인다. 마찰압력손실은 측정 범위가 다른 두개의 차압계(P7D, 0~500mmH<sub>2</sub>O, 0~3500mmH<sub>2</sub>O, 오차:±1%FS)에 의해 측정되며, 측정 간격은 600mm이다. 또한 실험은 우선 실험조건에 해당하는 물 순환계통상의 각종 밸브, 차압계 밸브 및 혼합부의 밸브를 개방한다. 그 다음 기어펌프의 속도제어용 인버터를 사용하여 액유량을 실험조건에 맞도록 설정하고, 기체상의 실험조건에 해당하는 솔레노이드밸브를 개방한 후, 압력조절밸브로 미세 조정하여 기액 양상의 실험조건을 설정한다. 이와 같은 방법으로 설정된 실험조건하에서 정상흐름이 형성될 때까지 실험장치를 충분히 작동시킨 후, 30초간의 유동특성 데이터를 수집하며, 이 후의 실험은 위의 실험절차를 반복한다. 또한 본 실험의 범위와 사용된 작동유체의 물성치는 Table 1과 같다.

**Table 1 Experimental ranges and properties of working fluids.**

Working fluids	Air	Water
Superficial velocity(m/s)	$j_G=0.03\sim 21$	$j_L=0.1\sim 2.6$
Reynolds number(-)	$21\sim 1.4\times 10^4$	$1\times 10^3\sim 2.8\times 10^4$
Temperature(°C)	29±2	
Density(kg/m <sup>3</sup> )	1.16	998.28
Surface tension(mN/m)	-	72

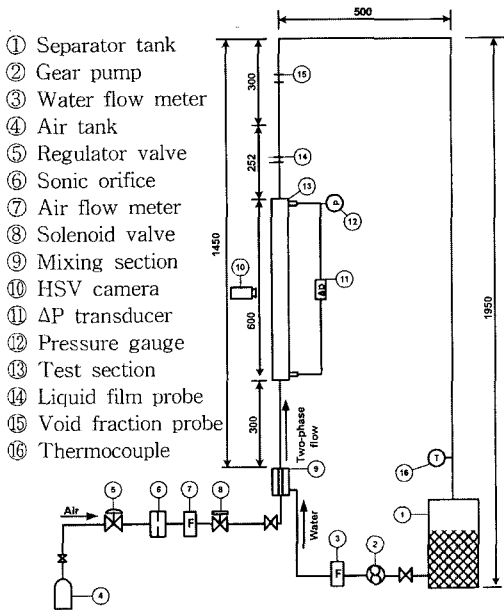


Fig. 1 Schematic of experimental test loop with a vertical test section of 10mm I.D.

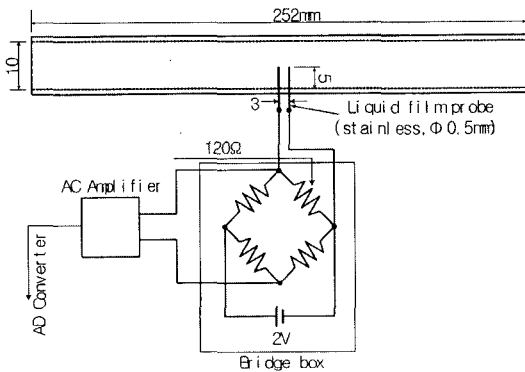


Fig. 2 Details of liquid film thickness measurements with a bridge circuit

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 유동양식의 정의와 선도

수직관 내의 유동거동은 고속카메라로 촬영한 영상데이터와 액막센서의 시계열 데이터를 면밀히 분석하여 판정하였다. 또한 유동거동은 다음의 정의에 따라 5종류의 유동양식으로 분류할 수 있었다.

- 기포류(Bubbly Flow, B): 연속적인 액체 흐름 중에 작은 기포가 흐르는 흐름.
- 테일러기포류(Taylor Bubble Flow, TB): 포탄형 가스플러그의 길이가 관경 보다 크고, 액체 슬러그 중에 작은 기포가 없는 흐름.
- 슬러그류(Slug Flow, S): 관 직경 보다 긴 기포와 다수의 작은 기포를 포함하고 있는 액체슬러그가 반복 되는 흐름.
- 준환상류(Semi-Annular Flow, SA): 기포가 유로단면을 거의 차지하지만, 다수의 작은 기포를 포함하고 있는 액체슬러그에 의해 기포가 분리되고 그 형태가 대단히 흐트러진 흐름.
- 환상류(Annular Flow, A): 액상은 환상액막 형태로 관벽을 따라 흐르고, 연속한 기상은 관 중심을 따라 흐르는, 즉 액상과 기상이 완전히 분리된 흐름.

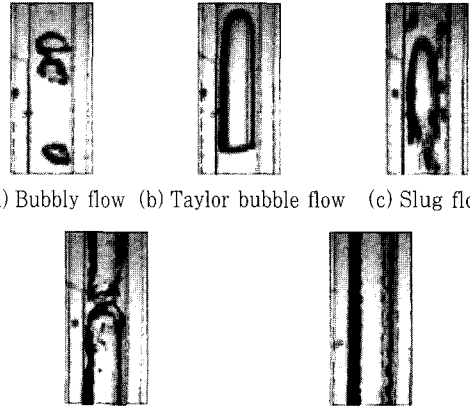


Fig. 3 Two-phase flow patterns observed in vertical upward flow.

위의 정의에 따라 분류된 전형적인 유동양식을 Fig. 3에 보인다. 또한 유동양식을 면밀히 관찰한 결과, 기포류는 본 실험범위 내에서는 어떠한 유량조건에서도 액상과 기상이 모두 상향 흐름이었다. 그러나 테일러기포류와 슬러그류는 액상의 길 보기속도  $j_L = 0.74m/s$ , 준환상류는  $j_L = 0.51m/s$ , 환상류는  $j_L = 0.22m/s$ 이내의 유량조건에서 액상이 벽면을 따라 흘러내리는 현상이 발생하기도 하였다.

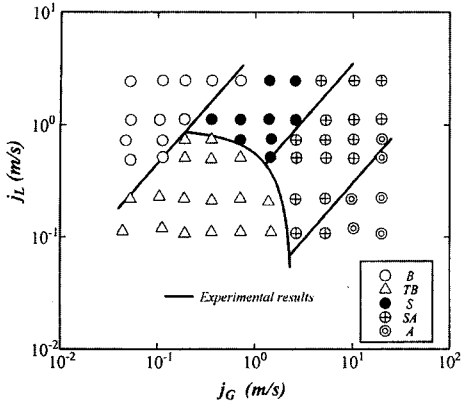


Fig. 4 Flow pattern map for vertical upward flow

또한 본 실험으로부터 얻어진 60개의 유동양식 데이터를 기상, 액상의 겉보기 속도  $j_G, j_L$ 를 각 축으로 하는 유동양식선도에 나타낸 것을 Fig. 4에 보인다. 그림 중의 굵은 실선은 실험에서 얻은 각 유동양식 간의 천이경계를 나타내고, 기포류와 테일러기포류(혹은 슬러그류)간의 유동양식 천이는  $j_L=4.5j_G$ 선에서 발생함을 알 수 있다. 또한 테일러기포류와 슬러그류(혹은 준환상류)간의 유동양식 천이는  $j_L=-0.38j_G+0.94$ 에서, 슬러그류와 준환상류간의 천이와 준환상류와 환상류간은 각각  $j_L=0.35j_G, j_L=0.03j_G$ 에서 발생하는 즉, 각각 일정한 보이드율에서 천이가 발생함을 알 수

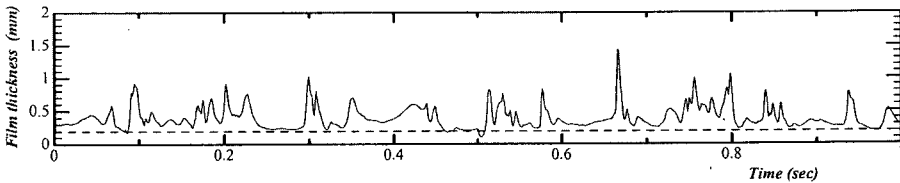
있다.

3.2 환상류 유동양식의 액막구조

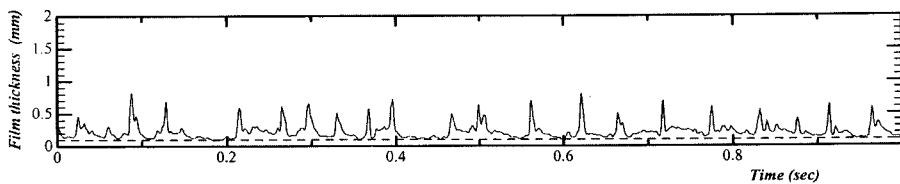
액막두께와 기액계면의 상태는 압력손실 및 보이드율에 큰 영향을 주고, 열교환기와 같은 열적 시스템을 설계할 때에 열전달율을 계산하는데 고려되어야할 중요 인자이다. 따라서 여기서는 액막 센서에서 측정된 환상류 유동양식의 액막구조와 기액계면에 대해 기술한다.

환상류 유동양식에서 액상은 대부분 환상액막 형태로 관벽을 따라 흐르지만, 그 일부는 관중심부를 흐르는 기상 흐름 중에 액적형태로 흐른다. 또한 그 액막의 표면에는 다양한 크기의 파가 존재한다. 따라서 환상액막의 유동은 벽면 근방의 기저층(substrate layer)과 기액계면의 파동층(wave amplitude layer)으로 나눌 수 있다.

Fig. 5는 액상의 겉보기속도  $j_L=0.113$ 인 조건에서 기상의 겉보기속도  $j_G$ 을 증가시킨 경우, 환상액막의 두께와 계면상태의 변화를 보여준다. 또한 그림 중의 파선은 기저층의 두께를 나타낸다. 그림으로부터  $j_G$ 가 증가하게 되면 최대 액막두께 및 기저층의 두께는 감소하지만, 기액계면의 작은 파의 수는 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 기상유량이 증가함에 따라, 기상의 관성력도

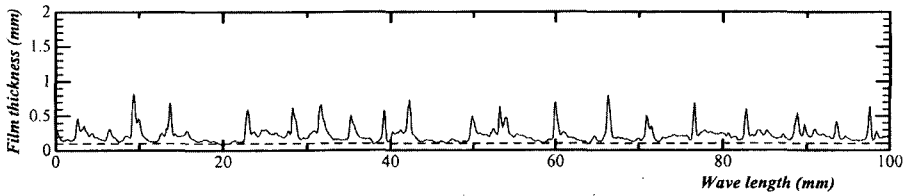
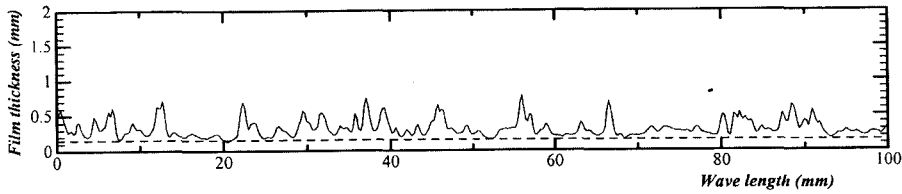
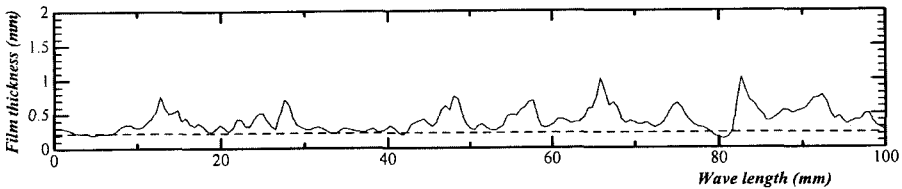


(a)  $j_G=10.318m/s, j_L=0.119m/s$



(b)  $j_G=19.976m/s, j_L=0.107m/s$

Fig. 5 Effect of gas superficial velocity  $j_G$  on the thickness and surfaces of annular liquid film.

(a)  $j_G = 19.976 \text{ m/s}, j_L = 0.107 \text{ m/s}$ (b)  $j_G = 20.032 \text{ m/s}, j_L = 0.223 \text{ m/s}$ (c)  $j_G = 20.038 \text{ m/s}, j_L = 0.510 \text{ m/s}$ **Fig. 6 Effect of liquid superficial velocity  $j_L$  on the wave length of annular liquid film.**

증가하게 되고, 증가된 관성력은 액막파의 성장을 저지하고 액막을 얇게 펼치려는 힘으로 작용하기 때문이다. 또한 액막이 얇게 되면, 기액계면의 진동이 벽면에 접하고 있는 기저층까지 영향을 미쳐 액막이 요동하게 되지만, 액막이 얇게 될수록 점성력 효과가 두드러지게 되어 기액계면에 다수의 작은 파가 형성된다고 생각된다.

한편, Fig. 6은  $j_G \approx 20.015$ 인 조건에서  $j_L$ 의 변화가 환상액막의 두께와 파의 길이에 미치는 효과를 보인다. 또한 Fig. 6(a), (b)는 액막흐름이 정역 양방향으로 발생하는 경우이고 Fig. 6(c)는 정방향(유동방향 즉, 상향흐름)으로만 흐르는 경우이다. 그림으로부터  $j_G$ 가 일정한 상태에서  $j_L$ 을 증가시켜 가면 기저층의 두께가 증가하지만, 파의 출현 빈도수는 감소하고 파의 길이가 길어지는 것을 알 수 있다. 또한  $j_L$ 이 증가함에 따라 예리한

고 급격히 변하는 파의 형태에서 완만한 경사의 파의 형태로 변해가는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 6(a), (b)과 같이 액유량이 적은 조건에서는 주로 정방향과 역방향의 액막흐름이 충돌하여 예리한 파가 발생하게 되지만, Fig. 6(c)와 같이 액유량이 많은 조건에서는 기상의 관성력에 기인한 원주방향의 양력에 의해 큰 파 즉, 요란파(disturbance wave)가 발생한다고 생각되지만, 요란파는 기액계면에서의 열전달, 압력손실 및 물질전달에 큰 영향을 미치므로 앞으로 보다 면밀한 검토가 요구된다.

### 3.3 마찰압력손실과 보이드율

#### 3.3.1 마찰압력손실

기액이상류의 전압력 손실은 마찰, 가속도 및

중력에 의한 압력손실의 합으로서 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{total} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_f + \left(\frac{dp}{dz}\right)_a + \left(\frac{dp}{dz}\right)_g \quad (1)$$

그러나 충분히 발달한 수직단열 이성분계 기액 이상류에서는 가속에 의한 압력손실 성분은 무시할 수 있지만, 중력에 의한 압력손실은 무시할 수 없다. 따라서 수직상향 기액이상류의 마찰압력손실은 다음 식으로 구할 수 있다.

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

Fig. 7은 각 상의 겉보기속도 비 ( $j_G/j_L$ )에 대한 단위길이 당의 마찰압력손실을 나타내고, 그림 중의 각 기호는 유동양식을 의미한다. 그림으로부터  $j_L$  일정조건에서  $j_G$ 을 증가시켜 가면 마찰압력손실이 증가하는 영역(기포류양식: B), 감소하는 영역(테일러기포류, 슬러그류: TB, S) 및 다시 증가하는 영역(준환상류, 환상류: SA, A)이 존재하는 것을 알 수 있다. 그러나  $j_L=0.11m/s$  조건에서는 기포류를 제외한 모든 유동양식에서 마찰압력손실이 부(-)값을 보인다. 그러나 액유량이 증가할수록 부(-)값의 영역은 감소하고  $j_L \geq 1.1m/s$ 이 되어야 비로소 모두 양(+)의 값을 갖는다. 이는 수직상승류의 마찰압력손실은 유동양식에 따라 다르고, 특히 액유량에 크게 좌우

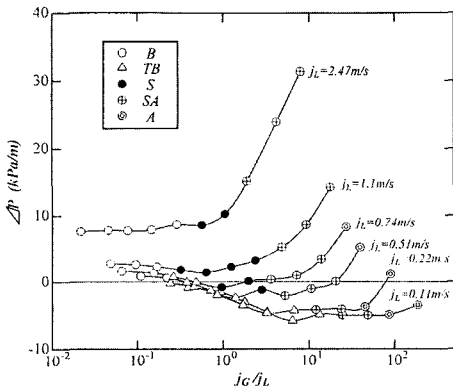


Fig. 7 Frictional pressure drop measured in vertical upward two-phase flows.

됨을 의미한다. 특히,  $j_L \leq 0.22m/s$ 의 영역에서는 환상류 유동양식에서도조차 마찰압력손실이 부(-)의 값을 보이고 있는데, 이는 액막에 미치는 관성력에 비해 중력의 영향이 보다 지배적으로 작용하여 액막이 벽면을 따라 흘러내리기 때문이다.

3.3.2 마찰압력손실과 보이드율의 관계

Lockhart-Martinelli의 분리류 모델<sup>(6)</sup>을 이용하여 마찰압력손실을 정리할 때, 기상과 액상이 모두 난류인 경우에는 마찰압력손실과 보이드율의 관계를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서  $\Delta P_f$ 는 기액이상류의 마찰압력손실,  $\Delta P_{LO}$ 는 관내를 액상이 단독으로 흐를 경우의 마찰압력손실,  $\alpha$ 는 시간평균 보이드율,  $k_f$ 은 보정계수이다. 그러나  $k_f$ 은 일반적으로 1에 가까운 값이기 때문에 식(3)은 다음과 같이 간단한 관계식으로 나타낼 수 있다.

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

赤川<sup>(7)</sup>은 식(4)을 보이드율  $\alpha \leq 0.2$ 인 경우의 수평관, 경사관 및 수직관에 대해서도 적용할 수 있다고 기술하고 있다. Fig.8은 측정된 마찰압력손실과 보이드율을 식(4)을 이용하여 정리한 결과이다. 그림에서  $Z=1.4$ 의 값은 매끄러운 수평관에 대한 것이고,  $Z=1.975$ 의 값은 Lockhart-Martinelli 곡선에 대한 것이다. 또한 그림중의 파선과 일점쇄선은 각각  $j_L=0.11m/s$ ,  $j_L=0.22m/s$ 인 경우의 실험결과를 최소자승법으로 근사해서 구한 값들이다. 즉,  $j_L=0.11m/s$ 인 경우의 마찰압력손실과 보이드율간의 관계는  $\Delta P_f/\Delta P_{LO} = -221.5(1-\alpha) + 205.4$ ,  $j_L=0.22m/s$ 의 경우는  $\Delta P_f/\Delta P_{LO} = -46.3(1-\alpha) + 46.2$  선으로 근사되며, 환상류 유동양식은  $Z=1.975$ 의 선 부근에 위치하는 것을 알 수 있다. 그러나  $j_L=0.51m/s$ 의 경우에는 비교적 주기적인 변화를

보이고, 극대점이  $Z=1.4$  혹은  $Z=1.975$  부근에 존재하며,  $j_L \geq 1.1m/s$ 의 영역에서는  $Z=1.4$ 의 값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

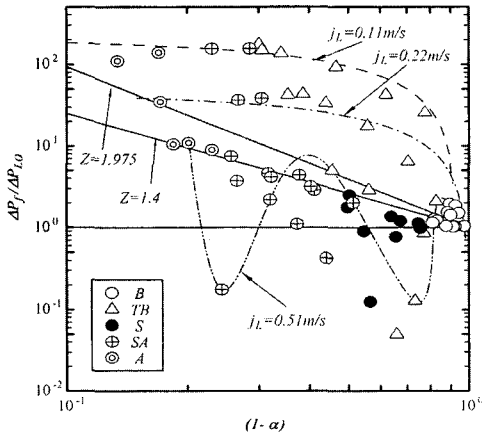


Fig. 8 Correlation between frictional pressure drop and void fraction.

#### 4. 결 론

단열 수직원관 내를 흐르는 공기-물 기액이상류의 유동양식 천이, 환상액막의 두께와 계면상태, 보이드율 및 마찰압력손실과 같은 유동특성에 관한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수직상향 기액이상류의 유동거동은 기포류, 테일러기포류, 슬러그류, 준환상류 및 환상류 유동양식으로 분류되었다.
2. 준환상류에서 환상류로의 유동양식 천이는  $j_L = 0.03j_G$ 에서 발생하였다.
3. 액상의 걸보기속도  $j_L$ 이 일정한 조건에서 기상의 걸보기속도  $j_G$ 을 증가시키면, 환상액막의 최대두께 및 기저층의 두께는 감소하지만 기액 계면의 작은 파는 증가했다.
4.  $j_G = 20m/s$ 인 조건에서  $j_L$ 을 증가시키면, 환상액막 기저층의 두께는 증가하고 파장은 길어지지만, 파의 출현 빈도수는 감소했다.

5. 환상류 유동양식에서 액유량이 상대적으로 적은 경우에는 정역 양방향의 액막흐름이 충돌하여 예리한 파가 발생하지만, 액유량이 많은 조건에서는 양력에 의해 요란파(disturbance wave)가 발생하는 것으로 추정된다.
6. 환상류 유동양식에서도 초차 마찰압력손실이 부(-)의 값을 보이는데, 이는 액막에 미치는 관성력에 비해 중력의 영향이 보다 지배적으로 작용하여 액막이 벽면을 따라 흘러내리기 때문이다.

#### 참고문헌

- [1] 藤井照重, 赤川浩爾, 伊藤裕, 氣液二相流의動的配管計畫, 日刊工業新聞社, pp5-9, 1999.
- [2] 植田辰洋著, 金京根譯, 氣液二相流, 太和出版社, pp7-22, 1986.
- [3] 赤川浩爾, 氣液二相流, 코로나, pp9-35, 1974.
- [4] Delil, A.A.M., Microgravity two-phase flow and heat transfer, NLR-TP-99429, pp3-23, 1999.
- [5] Barnea, D. Shoham, O. and Taitel, Y., "Gas-liquid flow in inclined tubes: flow pattern transitions for upward flow," Chem. Eng. Sci. 37, pp131-136, 1985.
- [6] Lockhart, R W. and Martinelli, R. C., "Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes," Chem. Eng. Progress, 45-1, pp39-48, 1949.
- [7] 赤川浩爾, 氣液二相流, 코로나, pp73-84, 1974.

#### 저 자 소 개



#### 최부홍 (崔美洪)

1970년 1월29일생, 1994년 한국해양학교 기관공학과 졸업(공학사), 1999년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2002년 일본 고베대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 목포해양대학교 전임강사.