

2중판 오리피스를 이용한 기액 2상유량계의 개발

Development of a gas-liquid two-phase flowmeter using double orifice plates

이 상 천*, 이 상 무**, 남 상 철***
S. C. Lee, S. M. Lee, S. C. Nam

Key words : Gas-liquid two-phase(기액 2상유동), Flow pattern(유동양식), Double-plate orifice (2중판 오리피스), Probability density function(확률밀도함수), Power spectral density function(파워스펙트럼밀도함수)

Abstract

An experimental work was conducted to investigate a feasibility of simultaneous measurement of gas-liquid two-phase flowrates with double orifice plates using air and water. The tests were carried out under the atmospheric pressure and at the ambient temperature using two different tube sizes. Qualities of an air-water flow in the present study have values less than 0.1 and thus the mixed flow showed bubbly, plug, slug flow regimes. The probability density function (PDF) and the power spectral density function (PSDF) of the instantaneous pressure drop traces for the flow regimes were obtained. It is found that some distinctive features exist in the distribution of these functions, depending upon the two-phase flow pattern. The time-averaged value of the instantaneous pressure drop increases with increasing gas and liquid flowrates, showing a single-valued function for the total mass flowrate and the quality. It is also found that the two-phase discharge coefficient exhibits a consistent trend for variation of dimensionless parameters such as the superficial velocity ratio and the gas Reynolds number. The results indicate that simultaneous measurement of two-phase flowrate may be possible based upon a statistical analysis of the instantaneous pressure drop curves monitored using double orifice plates.

기 호 설 명

* 정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학부
** 큐슈대학교 대학원 기계공학과
*** 영남대학교 대학원 기계공학과

A_o : 오리피스 단면적
 C_d : 송출계수
 C_c : 확산계수

C_v	: 속도계수
d	: 오리피스 직경(m)
D	: 관내경(m)
f	: 주파수(Hz)
j	: 결보기 속도(m/s)
l	: 압력공사이 거리(m)
L	: 노즐로부터의 거리(m)
\dot{m}	: 질량유량(kg/s)
Re	: 레이놀즈수
t	: 오리피스 판두께(m)
T	: 측정시간(sec)
We	: 웨버수
$\overline{\Delta P}$: 평균압력강하(N/m ²)
ΔP^*	: 무차원 순간압력강하

그리이스문자

α	: 기공율
β	: 오리피스 목직경비

하첨자

f	: 액체
g	: 기체

1. 서 론

기액 2상유동은 동력발생장치, 열교환장치, 석유수송장치, 공기조화·냉동장치, 화학공정장치 등에서 관찰될 수 있으며, 열 및 물질전달과 관련하여 광범위하게 연구되고 있다. 이 유동에서는 유동양식, 압력강하, 기공율, 전도, 액막두께, 계면전단응력, 계면파 구조, 난류강도, entrainment량, 응축 및 증발 열전달계수 등이 관심의 대상이 되는 유동인자들이다. 이러한 유동인자에 대한 값을 예측 또는 평가하기 위해서는 각 상(phase)의 유량을 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다. 현재 실험실 규모에서 수행되는 연구에서는 2상 유동의 유량상상이 혼합되기 전, 각 상에 대하여 독립적으로 측정하고 있다. 그러나, 현장에서 다루는 2상유동에서는 상을 분리할 수 없으므로 각 상의 유량을 동시

에 측정하는 기술이 필요하므로, 2상유량계의 개발이 중요한 과제이다.

기액 2상유동에서 각 상의 유량을 결정하는 방법은 일반적으로 총질량유량과 전도의 측정 또는 평가를 통하여 이루어진다. 현재까지 널리 이용되는 방법은 차압기구 측정법(differential pressure device technique), 다중감지기 측정법(multiple sensing technique), 트레이서 기법(tracer technique), 진질량유량 측정법(true mass flow technique)등 네 가지 방법⁽¹⁾이 있다. 이 가운데 차압기구 측정법은 벤츨리관 또는 오리피스판을 이용하여 차압을 발생시키는 방법인데 타 방법에 비해 취급이 용이하고 경제적이기 때문에 현재 가장 많이 이용되고 있다.

오리피스를 통한 2상유동의 차압에 관한 연구는 1960년대부터 이루어져 왔다. 이 들 연구의 주된 관심사는 2상유동의 압력강하에 대한 상관식의 개발이었으며, 이 상관식을 통하여 2상유동의 총유량을 산정하는 것이다. 오리피스를 통한 2상유동의 차압에 관한 예측 모델은 크게 균질유동모델(homogeneous flow model)과 분리유동모델(separated flow model)로 나눌 수 있다. 먼저 균질유동모델에서는 2상유동을 균질한 밀도를 갖는 단상유동으로 생각하여 기상과 액상의 속도가 동일하며 각 상간에 열역학적 평형을 이룬다는 가정하에 유도된 것이다. 이러한 모델에는 Hoopes 상관식⁽²⁾, James 상관식⁽³⁾ 등이 포함된다. 분리유동모델에서는 기상과 액상의 속도가 동일하지 않으나 각 상간에 열역학적 평형을 이룬다고 가정하여 각 상에 관한 운동방정식을 독립적으로 세워 2상유동 압력강하를 유도한다. 이 방법을 이용하여 Murdock⁽⁴⁾, Chisholm⁽⁵⁾ 등이 2상유동 압력강하와 각 상의 단상 압력강하와의 상관식을 제시하였다. 이 상관식들은 액상 및 기상의 압력강하비인 Martinelli parameter로 표현되어 있으며 실험상수를 포함하고 있다. 국내의 연구로는 Lee et al.⁽⁶⁾이 세 개의 관직경에 공기와 물을 이용한 2상유동 실험을 통하여 전도가 0.1 이하일 경우, Murdock 상관식⁽⁴⁾을 수정한 상관식을 제시하였으며 2상유동의 압력강하치가 $\pm 10\%$ 내에 잘 일치한다는 결과를 발표한 바 있다.

이러한 모델들은 근본적으로 2상유동에서 발생

측 모델로는 완성된 형태가 아님을 알 수 있다.

이와는 달리 Sekoguchi et al.⁽⁷⁾는 2개의 상이 한 판 모양을 갖는 오리피스를 직렬로 연결하여 이 들의 차압치로 2상질량유량 측정을 시도하였다. 이 연구에서 각 상 유량사이의 상관관계를 $\Delta P_1 + \Delta P_2$ 와 $\Delta P_1/\Delta P_2$ 를 좌표축으로 하는 그림으로 도 시하였는데 그 오차가 $\pm 30\%$ 에 이르고 있다. Me-dvejev et al.⁽⁸⁾은 체적유량계와 오리피스등 2개의 유량계측기구를 이용하여 체적유량과 차압을 측정 하는 방법으로 각 상의 질량유량을 결정하려는 연 구를 시도하였다. Chen et al.⁽⁹⁾은 Medvejev et al.⁽⁸⁾와 유사한 방법으로 2상유량을 결정하였는데 체적유량계 대신에 oval gear meter를 사용하였 다. 이러한 방법은 2개의 유량계를 사용한 것으로 단일 기구로 2상유량을 결정하는 본 연구의 방식 과는 차이가 있다.

본 연구에서는 현재 사용되고 있는 기액 2상유 량의 측정법의 문제점을 해결하기 위하여 2중 오리피스판을 이용한 기액 2상유량계를 개발하고 이 의 유체역학적 특성을 규명하고자 한다. 이 2상유 량계는 가격이 저렴하고 조작이 용이하며 작동이 간단하며 정확도가 높다는 장점이 있다. 이 기구는 기본적으로 차압측정을 이용한 방식이나 기존의 것과는 달리 2중판 오리피스를 이용하여 2개의 압 력강하를 측정하여 기액 2상유동의 각 상의 유량 을 결정하는 방법을 제시하였다. 2상유동양식에 따 른 순간압력강하치의 통계적 해석을 통하여 확률 밀도함수와 파워스펙트럼밀도함수의 특성을 규명하 였다. 그리고 단상유동에 대한 2중오리피스판의 송 출계수의 특성을 분석하였으며, 2상유동일 경우 평 균압력강하치가 총유량과 건도의 단일치함수라는 사실을 확인하였으며 마지막으로 2상유동 송출계 수에 미치는 무차원인자의 영향을 분석하였다.

2. 이론적 배경

본 연구에서 사용한 2중판 오리피스의 개략도가 Fig.1에 나타냈으며, 주요 치수와 압력공의 위치가 표 시되어 있다. 압력공 1과 2에서의 압력차이를 ΔP_1 , 압력공 2와 3에서의 압력차이를 ΔP_2 로 표기하면, 이 값들은 다음과 같은 함수관계로 표현된다.

$$\Delta P_1 = \Delta P_1(\alpha_1, \dot{m}_f, \dot{m}_g, \text{fluid properties}) \quad (1)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_2(\alpha_2, \dot{m}_f, \dot{m}_g, \text{fluid properties}) \quad (2)$$

여기에서 α , \dot{m}_f , \dot{m}_g 는 기공율, 액상질량유량, 기 상질량유량을 각각 나타낸다. 이 등⁽¹⁰⁾이 발표한 실험결과에 의하면 오리피스판을 통과하기 전과 후의 기공율이 달라지므로 일반적으로 지점 1-2 사이의 기공율, α_1 과 지점 2-3 사이의 기공율, α_2 는 서로 다른 값을 가지며 식 (3)과 (4)와 같은 상관관계를 되는 압력강하를, 단상유동에서 사용되는 방법에 따 라 해석하여 이를 2상유동인자들의 함수로 나타내 고 있다. 따라서, 2상유량의 예측은 이 식만으로는 불가능하며, 다만 총질량유량 또는 건도중에 하나 의 값이 주어질 때 나머지 값을 계산할 수 있다. 그러므로 이러한 시도는 2상유동의 질량유량의 예 잣는다.

$$\alpha_1 = f(\dot{m}_f, \dot{m}_g, D, d, \text{fluid properties}) \quad (3)$$

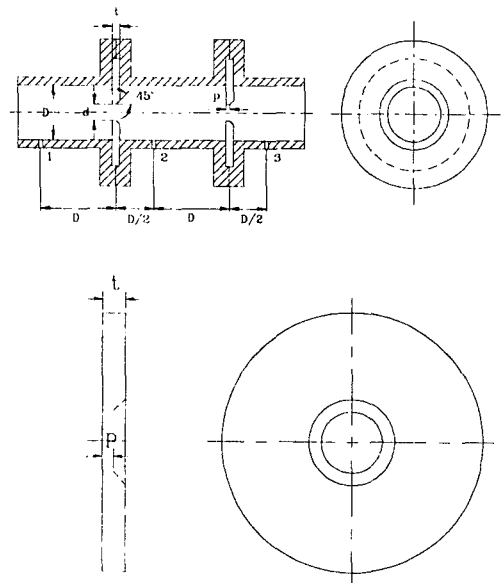


Fig.1 Schematic diagram of double orifice plates

$$\alpha_2 = f(\alpha_1, \dot{m}_f, \dot{m}_g, D, d, \text{fluid properties}) \quad (4)$$

식(1)~(4)를 살펴 보면, 미지수의 수와 식의 수가 동일하므로 수학적으로 닫힌 형태(closed form)를 이루므로 해를 구할 수 있다. 따라서 유체의 물성치와 관직경(D)과 오리피스 목직경(d)이 주어질 때 식 (1), (2), (3) 및 (4)에서 차압 ΔP_1 과 ΔP_2 의 측정을 통하여 기상과 액상의 질량유량을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 실험

본 연구에서는 시험용 2중판 오리피스가 장착된 기상-액상의 2상유동 순환시스템을 제작하여 압력강하의 특성을 분석하였으며, Fig.2는 그 개략도를 도시한 그림이다. 본 실험에서 측정된 주요인자는 공기 및 액상유량, 시험관에서의 유체의 온도 및 압력, 2중판 오리피스를 통한 차압 등이다. 이 실험장치는 공기 공급부, 물 공급 및 저장부, 공기와 물 혼합부, 2중판 오리피스가 부착된 시험부, 온도 및 압력측정장치, 마이크로 컴퓨터 및 자료처리장치로 구성되어 있다.

공기공급부는 시험부에 공기를 공급하는 장치이며, 공기는 압력 10bar 탱크용량 200 l, 마력이 5HP 인 공기압축기에서 압축되어 필터(filter)와 레귤레이터(regulator)를 거쳐 물-공기혼합부내 직경이 4mm

인 공기노즐을 통해 시험관에 유입된다.

물공급부는 시험부에 물을 공급하는 장치로 물은 저장탱크(2,000 l)에서 원심식 펌프를 통해 시험관에 공급된다. 원심펌프의 사용으로 인해 진동이 발생할 수 있기 때문에 서어지탱크를 설치하여 진동으로 인한 유동교란현상을 방지하였다. 물과 공기의 혼합은 직경이 4mm인 공기노즐을 통해 이루어지고, 노즐의 설치위치는 관의 중심이며 물의 유동방향과 평행하게 설치하였다.

시험관은 2개로 내경이 각각 16mm, 19mm인 투명한 아크릴수지관이며 시험관의 총길이는 각각 4.5m, 5.5m이다. 2중판 오리피스는 시험관의 물-공기혼합부로부터 3.1m(L/D=194)와 4.1m(L/D=216)떨어진 지점에 설치되어 있다. 이 지점은 Griffith and Wallis⁽¹¹⁾의 실험결과로 부터 유동이 완전히 확립된 영역으로 볼 수 있다. 본 실험에 사용된 2중판 오리피스는 이⁽¹²⁾가 특허출원중인 오리피스를 사용하였다. Fig.1은 2중판 오리피스의 단면도를 나타내고 있으며 Table 1에 자세한 사양을 나타냈다.

온도는 공기 및 물의 물성치 계산을 위하여 각각의 입구에서 측정하였는데 이를 위하여 구리-콘스탄탄 열전대를 사용하였다. 물과 공기의 온도 측정의 불확실성(uncertainty)은 각각 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이다.

Table 1 Dimensions of test orifice unit

	Orifice A (mm)	Orifice B (mm)
Diameter of Test Section (D)	16	19
Throat Diameter (d)	6.4, 7.2, 8.0, 8.8, 11.2	7.6, 8.6, 9.5, 10.5, 13.3
Throat Diameter ratio (d/D)	0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.7	0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.7
Pressure Hole Distance (l)	24.0	28.5
Thickness of Orifice (t)	2.0	2.4
Standard	ASME	

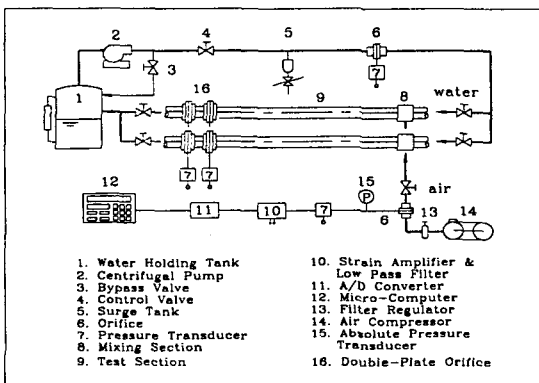


Fig.2 Schematic diagram of the two-phase flow loop

압력은 오리피스판에 의해 발생된 차압을 압력 변환기를 이용하여 측정하였고, 이 차압을 이용하여 물과 공기에 대한 각각의 유량을 계산하였다. 순수 물유량은 관직경 31mm의 오리피스와 연결된 압력 변환기로 측정하였고, 공기유량은 관직경 16.7mm의 오리피스와 연결된 압력변환기로 측정된다. 물과 공기의 유량 측정에 대한 불확실성(uncertainty)은 각각 $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$ 이다.

본 실험의 측정시스템은 압력변환기, 증폭기, A/D변환기, 마이크로 컴퓨터로 구성되어 있다. 차압식 압력변환기는 스트레인 게이지(strain gauge) 형식으로 0.05, 0.2MPa까지 측정할 수 있으며 고유진동수는 200Hz이다. 압력측정의 불확실성은 $\pm 0.5\%$ 이다. 고주파의 잡음을 포함할 수 있는 랜덤신호는 샘플링하기 전에 30~100Hz의 저역필터를 이용하여 처리하였다. 본 실험의 표본회수는 초당 200개이며 측정시간은 15초이다.

실험은 상온의 대기압하에서 수평관내 기액 2상유동을 직경이 16mm와 19mm인 경우에 대해 수행되었다. 본 실험의 액체유량은 겉보기속도(superficial velocity)로 0.2~1.5(m/s)이며, 기체유량은 0~3.7(m/s)의 범위 내에서 조절하였으며 이 유량 범위에서 관찰된 유동양식은 기포유동, 플러그유동, 슬러그유동이다.

Fig.3는 본 연구에서 수행한 실험범위를 나타낸 그림으로 시험관의 직경이 16mm인 경우이다. 2중판 오리피스의 직경비에 관한 영향을 분석하기 위하여 상류쪽의 목직경비를 0.7로 고정시키고 하류쪽의 목직경비를 0.55, 0.50, 0.45, 0.40으로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 직경이 19mm인 경

우에도 동일한 방법을 적용하여 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 순간압력강하치의 통계적 해석

2상유동에서 유동인자들이 시간 또는 공간에 대하여 변화하므로, 이에 대한 평균치를 구하여 해석에 사용하는 경향이 있어 왔다. 그러나 최근에 이러한 평균화 과정 중에 유동현상에 관한 중요한 정보가 상실될 수 있다는 지적이 있었으며 이러한 문제점을 인식하여 순간 변화치에 대한 통계적 해석법이 대두되었다.

관내 유로의 단면적을 갑작스럽게 축소시킬 때 유동양식의 변화가 초래되나 압력강하의 특성은 유동양식과 독자적인 상관관계를 가질 것으로 판단되는데 Lee et al.⁽¹³⁾, Lee and Bankoff⁽¹⁴⁾ 및 이⁽¹⁵⁾는 수평 및 경사관의 기액 2상유동에서 관내 유로에 설치된 오리피스를 통한 순간차압의 통계적 해석법을 이용하여 압력강하 특성과 유동양식의 연관성에 관하여 고찰하였다. 이들은 순간 차압치의 확률밀도함수(PDF), 파워스펙트럼밀도함수(PSDF), 평균 진폭 및 확률밀도함수의 비대칭계수 등을 구하여 기포, 플러그, 슬러그, 성층, 파상 및 환상유동에서의 압력강하치의 통계적 특성을 규명하였다. 이들이 사용한 통계적 처리기법은 2중판 오리피스의 순간압력강하치의 해석에 활용될 수 있다고 판단되어 유동양식을 판별하는데 오리피스의 순간압력강하치를 이용하였다.

본 실험에서 얻은 각 유동형태에 대한 대표적인 순간압력곡선의 확률밀도함수와 파워스펙트럼밀도함수가 Fig.4과 Fig.5에 도시되어 있다. 이 그림에서 왼쪽에 나타난 결과는 직경이 16mm, 하류 영역의 목직경비(α)가 0.55, 오른쪽에 도시되어 있는 결과는 직경이 16mm, 하류 영역의 직경비가 0.5에 대한 것이다. 여기서 ΔP^* 는 순간압력치, ΔP 를 액체정압 $\rho_L g l$ 로 무차원화한 값이다.

기포유동(bubbly flow)은 기공율이 매우 작으며 작은 기포가 연속적으로 흐르는 유동으로 교란 성분이 작으므로 좁은 폭의 높은 확률밀도를 가지는 단일정점으로 나타난다. 본 연구에서는 기포유동의 확률밀도함수(PDF)가 정규분포에 근접한다는

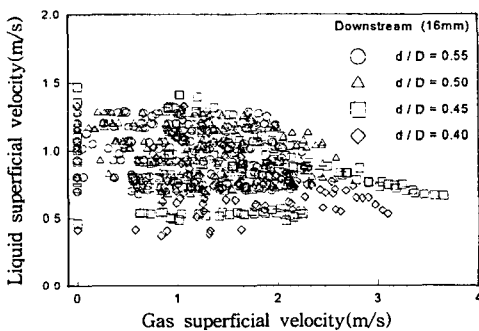


Fig.3 Range of tests

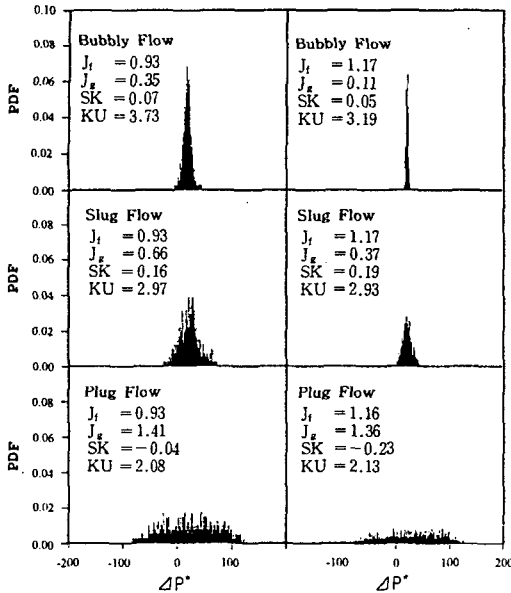


Fig.4 Typical PDFs for various flow patterns

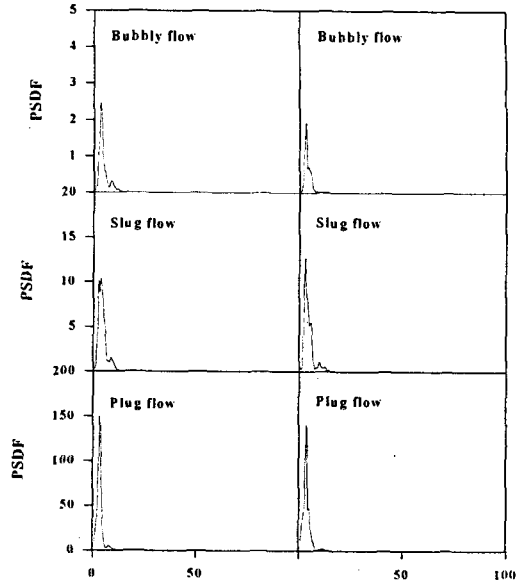


Fig.5 Typical PSDFs for various flow patterns

사실을 확인할 수 있었는데 이 결과는 Lee and Bankoff⁽¹⁴⁾의 결과와 잘 일치하고 있다. 비대칭계수(SK)는 낮은 값을 나타냈으며 Kurtosis 계수는 매우 큰 값을 나타냈다. 순간차압치의 주파수 특성을 나타낸 파워스펙트럼밀도함수(PSDF)를 도시한 그림에서 기포유동의 경우 주파수 범위는 10Hz 이하이며, 2.5~3Hz 부근에서 피크스펙트럼을 가진다는 사실을 확인할 수 있다. 슬러그유동(slug flow)은 액체덩어리와 기포간의 상호작용이 활발하므로 진폭이 크고 비교적 규칙적인 순간압력강하곡선을 가진다. 따라서 확률밀도함수의 분포폭은 매우 넓으며 밀도의 변화는 비교적 완만하다. 파워스펙트럼밀도함수(PSDF)의 특성은 플러그유동의 것과 비슷하나 순간차압곡선이 매우 큰 진폭과 주기성을 가지므로 피크치의 파워는 매우 크고 날카롭게 나타난다. 플러그유동(plug flow)은 비교적 길이가 긴 기포와 이것을 둘러싼 액체덩어리가 교대로 나타나는 유동이며 기포간의 결합과 이산이 비교적 활발하므로 순간압력강하의 진폭이 커지며, 따라서 파워스펙트럼밀도함수(PSDF)의 분포폭이 비교적 넓다. 이 유동에서 액체덩어리가 지나갈 때는 교란 성분이 거의 없는 높은 압력강하치를 가지므로 정

점을 중심으로 비대칭성의 모양이 나타난다. 따라서 플러그유동의 경우 비대칭계수(SK)는 항상 음의 값을 가지는 사실을 확인할 수 있다. PSDF는 근본적으로 기포유동의 경우와 유사하나 그 밀도치는 높은것으로 나타났다. 이것은 기포유동에 비하여 기상유량이 크므로 순간차압치의 평균자승치가 증가하였기 때문이다.

이상의 결과에서 각 유동형태에 따라 독특한 확률밀도함수(PDF)와 파워스펙트럼밀도함수(PSDF)를 가지며 동일한 유동양식의 경우 관직경비가 달라도 거의 일관된 통계치를 나타내고 있다는 사실을 알 수 있다. 따라서 2중판 오리피스에서 측정된 순간압력강하의 통계함수는 단일 오리피스의 결과치⁽¹⁴⁾와 매우 유사하며, 또한 유동형태를 판별하는데 신뢰할 만한 방법으로 사료된다.

4.2 기액 2상유량계의 보정실험

본 연구에서는 조작이 용이하며 작동이 간단하며 정확도가 높은 기액 2상유량계를 개발함을 목적으로 하므로 본 실험에 앞서 2중판 오리피스를 이용한 기액 2상유량계에 대한 보정실험을 수행하였다. 보정실험은 상류에 설치되어 있는 오리피스

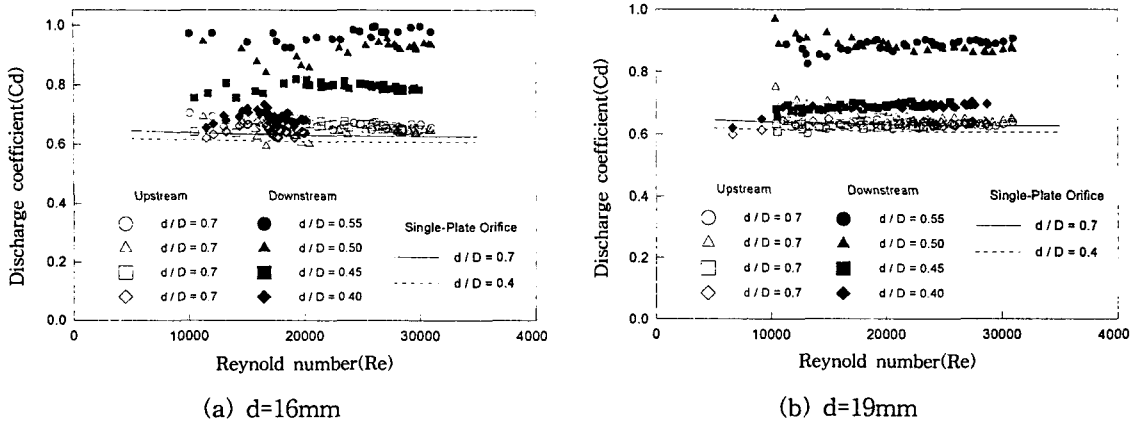


Fig.6 Calibration curve of double plates for the water

판의 목직경비를 고정한 상태에서 하류에 있는 오리피스판의 목직경비를 변화시켜 가면서 물과 공기에 대해 보정실험을 수행하였다. 하류에 설치되어 있는 오리피스판의 직경비를 0.55이하로 택한 것은 직경비가 0.55이상일 경우 하류에 있는 오리피스판에서 부압현상이 나타나기 때문이다.

Fig.6은 하류영역의 목직경비를 변화시킴에 따른 기액 2상유량계의 보정실험 결과로써 물 유량변화에 따른 송출계수(discharge coefficient)를 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 상류영역에서의 목직경비가 0.7이고 하류영역에 설치되어 있는 오리피스판의 목직경비가 상류영역에서의 목직경비보다 작을때 하류영역의 송출계수(discharge coefficient)는 상류영역의 송출계수보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 오리피스에서 일어나는 유동현상으로 설명이 가능한데, 수평관내에서의 유체는 상류영역에 있는 오리피스를 통과한 후 Vena contracta 지점에서 유체의 단면적이 한번 축소된 상태에서 하류영역에 있는 오리피스판을 통과하므로 하류영역 근처에서 단면적의 차이가 거의 없을 것이다. 일반적으로 송출계수(C_d)는 속도계수, C_v 와 축소계수, C_c 의 곱으로 정의되는데 오리피스는 노즐 또는 벤츨리관과는 달리 축소계수항이 송출계수에 크게 영향을 미치므로 하류영역의 송출계수가 상류영역의 송출계수보다 크게 나타나고 있다. 그리고 하류영역의 목직경비가 작아짐에 따라 하류의 송출계수는 단일판 오리피스를 보정실험한 결과와

유사한 경향을 보이고 있다.

4.3 2상유동예측

2중판 오리피스를 통한 2상유량계의 개발은 본 연구가 국내외적으로 처음으로 시도되는 것이다. 따라서 이 연구와 직접적으로 관련성이 있는 기존의 연구는 전무한 실정이나 단일판 오리피스를 통한 차압에 관한 연구와 직렬로 배열된 2개의 유량계를 이용한 2상유량의 측정에 관한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 본 실험에서 얻은 유량 변화에 따른 물-공기의 평균압력강하치는 Fig.7에 도시되어 있다. 본 실험영역에서는 액체유량이 일정할 때 기체유량이 증가함에 따라 평균압력강하치는 단조 증가함을 알 수 있으며 또 기상유량이 고정되어 있을 경우, 액상유량과 평균압력강하치도 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이 실험결과를 보면 2중판 오리피스에서의 평균압력강하는 각 상의 유량과 독특한 함수관계에 있을 것으로 추정된다. Fig.8은 차압 ΔP_1 과 ΔP_2 에 따른 유량변화곡선을 나타낸 그림으로 두 개의 직경에 대한 결과를 함께 도시하였다. Fig.9와 Fig.10은 직경이 16mm 일 때, 차압 ΔP_1 과 ΔP_2 에 따른 전체유량과 건도를 3차원 좌표계에 나타낸 그림이다. 이 그림들은 2중판 오리피스를 통한 차압치, ΔP_1 과 ΔP_2 의 측정을 통하여 각 상의 유량들, 또는 총 유량과 건도를 결정할 수 있는냐를 판단하기 위하여 제시된 것들이다. Fig.8에서 ΔP_1 과 ΔP_2 의 값이 주어질 때, 좌표계상의 한

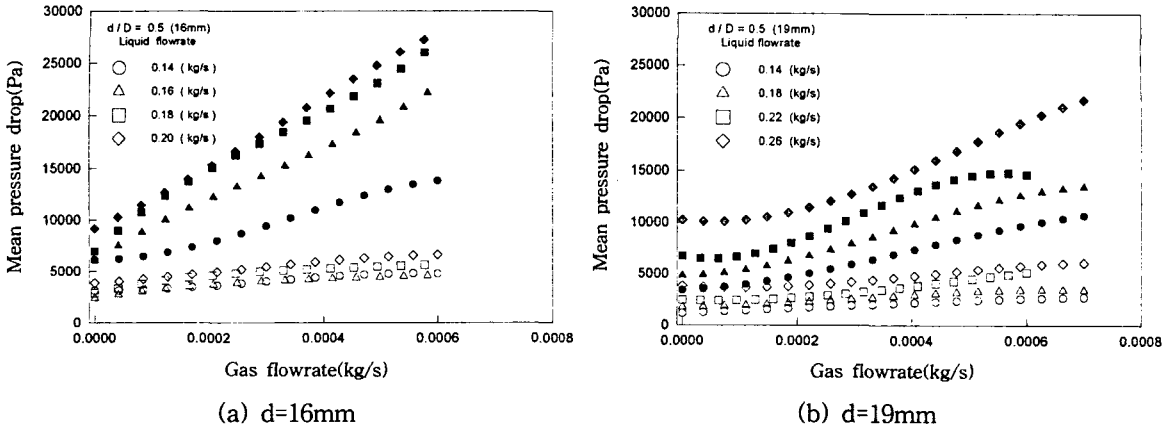


Fig.7 Time-averaged pressure drop data

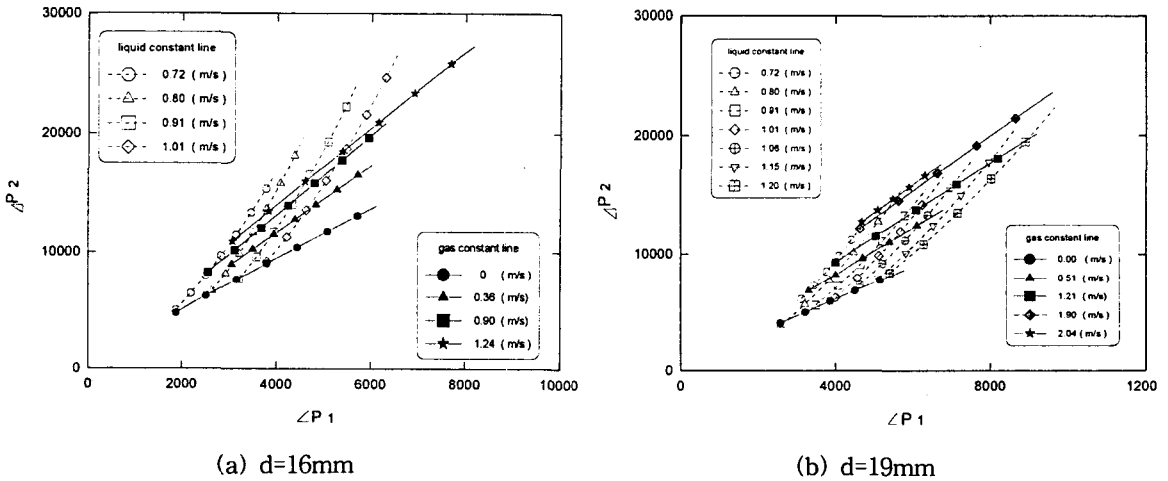


Fig.8 Chart for determination of each phase flowrates of gas-liquid two-phase flow

점이 결정되며 이 점을 지나는 일정 액상속도선(constant liquid velocity line)과 일정 기상속도선(constant gas velocity line)에서 각 상의 속도를 읽을 수 있다. 이르기 위하여서는 일정 액상속도선 또는 일정 기상속도선이 상호 교차하는 경우가 있어서는 안된다. 즉 일정속도선들이 상호교차할 경우, 교차점에서의 상의 속도는 다중(multi-valued)로 나타나므로 이 방식의 타당성에 문제가 제기될 수 있다. 그러나, Fig.8에 나타난 결과를 보면, 본 실험에서 수행한 실험범위내에는, 동일한 상에 대한 일정속도선이 교차되는 경우가 없으므로 각 상의 유량이 단일치(single-valued)를 갖

으며, 따라서 앞서 언급한 대로 ΔP_1 , ΔP_2 에 대한 도표에서 2상유량을 결정할 수 있다. 이 사실은 Fig.9와 Fig.10의 3차원·곡면 그림에서도 확인할 수 있다. 이 그림들은 총질량유량과 건도를 ΔP_1 과 ΔP_2 의 함수로 도시한 것으로, 각 곡면이 닫힌(closed)형태가 아닌 완만하며 개방된(open)형태를 가지므로 ΔP_1 과 ΔP_2 에 대한 총 질량유량과 건도가 단일치를 갖는 사실을 알 수 있다. 이 그림에서 곡면에 부분적으로 약간의 굴곡이 존재하는 것은, 실험인자의 측정에 수반되는 오차에 기인한 것으로 판단된다. 결과적으로 ΔP_1 과 ΔP_2 의 측정을 통하여 총질량유량과 건도를 결정할 수 있으며, 따라서 각

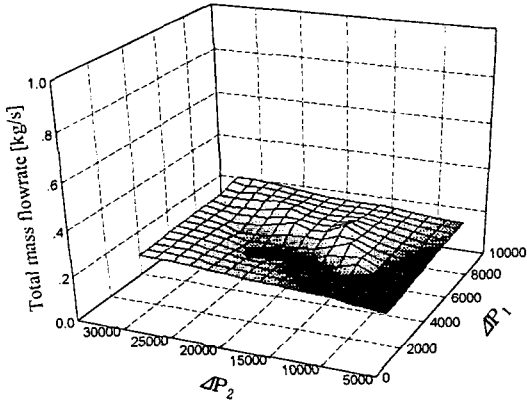


Fig.9 Total mass flowrate for ΔP_1 and ΔP_2

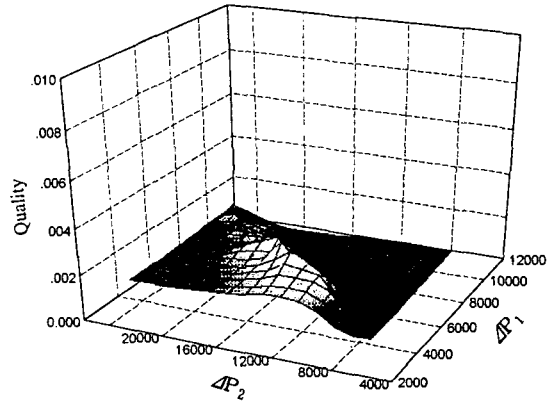


Fig.10 Quality for ΔP_1 and ΔP_2

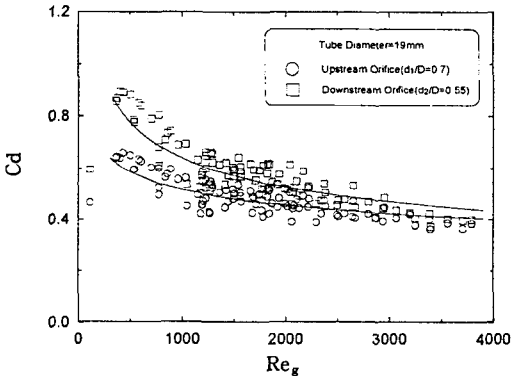


Fig.11 Discharge coefficient as a function of the gas Reynolds number

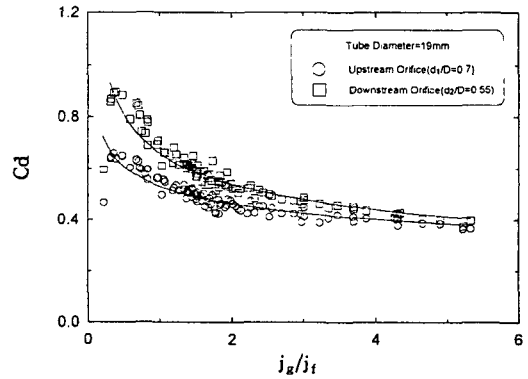


Fig.12 Discharge coefficient as a function of the superficial velocity ratio

상의 유량을 계산할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 그러나 식(1)과 (2)로 나타난 이들 인자들의 함수 관계를 정량적으로 규명하는 것은 추후에 더 많은 실험을 거쳐야 할 것으로 생각된다. 다만, 2중판 오리피스의 차압측정을 통한 2상유량의 결정과 유동양식의 판별은 타당성이 있는 것으로 결론 지을 수 있다.

4.4 무차원 인자의 영향

Eckert⁽¹⁶⁾는 기액 2상유동이 관내를 흐를 때 마찰계수, C_f 가 다음과 같은 무차원인자들의 함수로 표현된다는 사실을 밝혀 냈다.

$$C_f = F(Re_f, Re_g, We, j_g/j_f) \quad (5)$$

이 결과를 활용하여 2상유동에서 오리피스판을 통한 송출계수, C_D 를 무차원인자로 표현하면 다음과 같아진다.

$$C_D = F(Re_f, Re_g, We, j_g/j_f) \quad (6)$$

즉, 송출계수는 단상유동과 달리 기액상 레이놀즈수, 웨버수, 기액상 겉보기속도비 그리고 직경비의 함수로 표현된다고 볼 수 있다. 이 가운데 기상 레이놀즈수와 기액상 겉보기속도비의 영향을 고찰하기 위하여 관직경 19 (mm), 상류와 하류 직경비가 0.7과 0.55인 경우의 실험 결과를 Fig.11과 Fig.12에 도시하였다. Fig.11에 나타나 있듯이 기상레이놀즈수가 증가할 때 송출계수는 완만하게

감소하며 일관성있는 결과를 보여 주고 있다. 상류의 송출계수가 하류의 값보다 크며 레이놀즈수가 증가할 때 서로 근접하는 경향을 보여 주고 있다. 결보기속도비도 Fig.12에 도시되어 있듯이 동일한 경향을 나타내고 있다. 이 사실은 2중판을 사용한 유량계에서 2상유동의 송출계수비가 식 (6)에 나타난 무차원인자들의 함수로 표현될 수 있다는 개연성을 보여 주는 하나의 실례가 될 수 있다. 식 (6)의 무차원인자 가운데 액상레이놀즈수와 웨버수의 영향에 대한 고찰은 이 실험에서 수행한 유동조건의 제한성 때문에 언급하기에 적합치 않으나 이러한 무차원인자들이 송출계수에 영향을 미치는 인자라는 사실은 앞으로 검증될 수 있을 것이다. 그러나 이들의 영향을 정량적으로 표현하기 위하여서는 다양한 관크기와 물성치를 가지는 매질에 대하여 앞으로 많은 실험이 필요하리라 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서 2중판 오리피스를 사용한 차압기구식 유량계를 개발하였고 이를 이용하여 기액 2상유동의 각 상의 유량을 측정하는 새로운 방법을 제시하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 물과 공기를 매질로 사용하여 기포, 플러그, 슬러그유동에서의 확률밀도함수와 파워스펙트럼밀도함수를 분석한 결과 유동양식에 따라 독특한 형태를 갖는다.

2) 2중판 오리피스에 대한 보정실험을 수행한 결과, 상류영역의 직경비보다 하류영역의 직경비가 작을 경우에도 하류영역의 송출계수가 상류영역의 송출계수보다 크게 나타난다.

3) 2중판 오리피스에서 차압 ΔP_1 과 ΔP_2 의 측정을 통하여 기상과 액상유량의 예측이 가능하다는 사실을 확인하였으며 앞으로 다양한 매질에 대한 실험을 통하여 유량예측용 상관식을 개발할 수 있다.

후 기

이 연구는 학술진흥재단의 1995년도 기계공학분

야 학술연구조성비로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 이상천, 1990, "2상유동의 실험적 기법", 대한기계학회지, 제30권, 제4호, pp. 331~340.
2. Hoopes, J. W., 1957, "Flow for steam-water mixture in a heated annulus and through orifices", *AIChE J.*, Vol. 3, No. 2, pp. 268~275.
3. James, R., 1965, "Metering of steam-water two-phase flow by sharp-edged orifices", *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 180, Paper No. 23, pp. 549~566.
4. Murdock, J. W., 1962, "Two-phase flow measurement with sharp-edged orifices", *J. Basic Engng.*, Vol. 84, Paper No. 4, pp. 419~433.
5. Chisholm, D., 1977, "Two-phase flow through sharp-edged orifices", *J. Mech. Engng Science*, Vol. 19, Paper No. 3, pp. 128~130.
6. Lee, S. C., Lee, S. M. and Lee, J. P., 1994, "Two-phase pressure drops through sharp-edged orifices at low qualities", *Proceedings of The 3rd JSME-KSME Fluids Engineering Conference*, pp. 44~49.
7. Segokuchi, et al., 1978, "Two-phase flow measurements with orifice-couple in horizontal pipe line", *BULL JSME*, Vol. 21, No. 162, pp. 1757~1764.
8. Medvejev, et al., 1972, "Gas and liquid flowrate measurement in gas-liquid mixture", *Instrument and Control System*, Vol. 10, pp. 18~20.
9. Chen, et al., 1982, "Two parametric flow measurement in gas-liquid two-phase flow", *Proc. of the 7th International Heat Transfer Conference*, Vol. 4, pp. 475~478.
10. 이상천, 이정표, 김종엽, 1988, "수평 기액 2상

- 유동에서 유동양식의 천이특성”, 공기조화 및 냉동공학회논문집, 제17권, 제4호, pp. 342~349, 1988.
11. Griffith, P. and Wallis, G. B., 1962, “Two-phase slug flow”, *J. Heat Transfer*, Vol. 83, pp. 307~320.
 12. 이상천, 1995, “2중판 오리피스를 이용한 기액 2상유량계의 개발”, 특허청, 특허출원 제 29474호.
 13. Lee, S. C., Shin, H. S. and Lee, J. P., 1994, “Statistical characteristics of instantaneous pressure drops through orifices for various two-phase flow regimes”, *Heat Transfer* 1994, Vol. 6, pp. 211~215.
 14. Lee, S. C. and Bankoff, S. G., 1988, “Instantaneous pressure drop of gas-liquid two-phase flow in a sharp-edged orifice”, *Particulate Phenomena and Multiphase Transport*, Vol. 5, pp. 598~610.
 15. 이정표, 1990, “기액 2상유동에서 유동양식의 천이특성”, 영남대학교 박사학위논문.
 16. Eckert, E. R. G., 1996, “Physical laws of fluid mechanics and their applications to measurement techniques”, in *Fluid Mechanics Measurements*, R. J. Goldstein eds., Chap. 2, pp. 65~114, Taylor & Francis, Washington, U.S.A.