

<論 文>

오리피스 순간압력강하의 통계해석을 통한 수평 2상유동양식의 결정

이 상 천* · 이 정 표** · 김 중 엽*

(1987년 5월 27일 접수)

Determination of Horizontal Two-Phase Flow Patterns Based on Statistical Analysis of Instantaneous Pressure Drop at an Orifice

Sang Chun Lee, Jung Pyo Lee and Jung Yeup Kim

Key Words: Horizontal Two-Phase Flow(수평 2상유동), Flow Pattern(유동양식), Probability Density Function(확률밀도함수), Instantaneous Pressure Drop(순간압력강하), Sharp-edged Orifice(칼날오리피스), Flow Pattern Map(유동양식선도)

Abstract

A new method is proposed to identify two-phase flow regimes in horizontal gas-liquid flow, based upon a statistical analysis of instantaneous pressure drop curves at an orifice. The probability density functions of the curves indicate distinct patterns depending upon the two-phase flow regime. The transition region also could be identified by the distribution shape of the probability density function. The statistical properties of the pressure drop are analyzed for various flow regimes and transitions. Finally, the data of flow patterns determined by the proposed method are compared with the flow pattern maps suggested by other investigators.

1. 서 론

기액 2상유동에서의 유동변수의 해석에는 단상유동과 달리 유량조건, 기하학적 조건외에도 기상과 액상의 분포상태, 즉 유동양식(flow pattern)을 고려하여야 한다. 유동양식은 유동조건, 기하학적 형상, 유체의 물성값등과 상관관계를 가지는 것으로 믿어지는 데 유동양식의 변화는 2상유동의 불안정성에 기인한다.

이러한 유동양식의 파악은 유동의 총체적인 물리량 즉 압력강하, 기공율(void fraction), 벽면마찰계수등의 결정뿐 아니라 물질전달계수, 비동 및 응축 열전달계수등 이동현상을 해석하는 데 필수적이다.

유동양식은 대체로 분리유동(separated flow), 혼합유동(mixed flow)과 분산유동(dispersed flow)으로 분류되는 데⁽¹⁾ 이 유동양식을 유동의 거시적인 변수로 분류한 유동선도들이 많은 연구가들에 의하여 발표되었다⁽²⁾. 일반적으로 유동양식을 판별하는 데 육안판찰에 의한 방법을 많이 사용하여 왔으나 이 방법이 주관적이기 때문에 각 유동선도에 따라 상치되는 결과물

* 정희원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

** 정희원, 영남대학교 대학원 기계공학과

남는 경우가 많았다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 광자감쇠(photon attenuation)를 이용하거나⁽³⁾ 전기전도도(electrical conductivity)를 측정하는 방법⁽⁴⁾ 등이 개발되었으나 그 신뢰성이 아직까지 확립되어 있지 않다. 최근에는 유동변수 중의 하나인 관내 두 지점 사이의 압력강하의 교란치를 해석하여 유동양식을 판별하려는 시도가 있었는데⁽⁵⁾ 이 방법은 기구가 간단하고 정확도가 높아 신뢰할 만한 방법으로 인식되고 있다.

수평 기액 2상유동에서 압력강하는 마찰에 의한 성분과 운동량 변화에 의한 성분의 합으로 표현되는 데 이 압력강하의 교란치는 주로 유동이 진행되는 거리에 따른 기공율의 변화에 의하여 초래된다. 따라서 압력강하 교란치의 통계해석에 의하여 유동양식을 판별하는 데 압력차를 측정하는 두 지점의 간격도 중요한 인자가 될 것으로 판단되는 데 현재까지 이에 대한 연구 결과가 발표 되어 있지 않다. 이러한 점을 고려하여 2상유동에서 국소 압력강하 특성을 분석하여 유동양식을 판별하면 신뢰성이 더할 것으로 사료된다. 관내 유로의 단면적을 갑작스럽게 축소 시킬 때 2상유동의 국소 압력강하치의 특성은 유동양식과 독자적인 상관관계를 가진 것으로 판단되는 데 기포유동의 경우 이런 사실이 실험을 통하여 확인되었다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 이러한 개념을 바탕으로 오리피스 내의 국소 압력강하치의 통계적 해석을 통한 유동양식의 판별을 시도하였다. 수평관내 물과 공기를 매질로 2상유동을 형성하여 각 유동양식에 따른 압력강하치의 확률밀도함수를 구하였으며 순간압력강하의 통계치를 분석하였다. 본 연구에서 다른 유동양식은 기포유동, 플러그(plug)유동, 슬러그(slug)유동, 성층(stratified)유동 등이며 천이영역에 대한 실험자료도 포함하였다. 끝으로 이러한 유동양식 판별법을 사용하여 유동선도를 완성하였으며 다른 선도와 비교분석하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에서는 수평동류 2상유동을 다루었으며 사용한 매질은 상온의 물과 공기이다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 도시되어 있으며 물순환부, 공기공급부, 시험관부, 측정부로 구성되어 있다. 물은 높이 8m인 일정수두탱크에서 공급되며 조절밸브에 의하여 유량이 조정되는 데 유량측정은 오리피스와 차압변환기에 의하여 이루어 진다. 공기는 최대압력 1.0 MPa, 공기용량 220ℓ인 공기압축기에 의하여 공급되며 공기

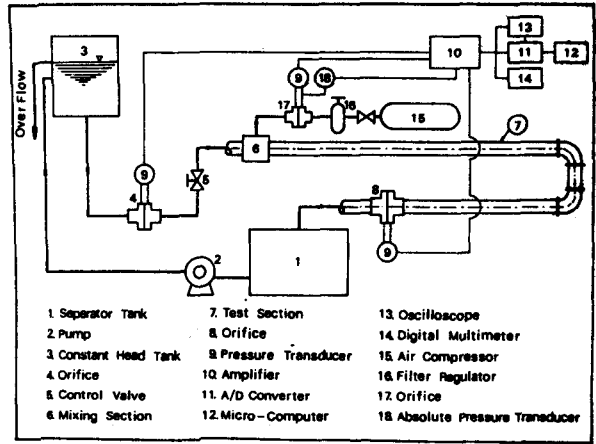


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

조절기와 필터(filter)를 거쳐 시험관내로 유입된다. 공기유량은 직경 16.7mm인 공급관에 부착된 오리피스와 압력변환기에 의하여 측정된다. 시험관은 내경 26mm인 투명한 아크릴관으로 물-공기의 혼합부와 2상유동 측정용 오리피스가 설치되어 있다. 시험관에 유입된 물은 시험관의 중심선을 따라 동심으로 설치된 직경 6mm의 노즐을 통하여 분출된 공기와 혼합되어 시험관을 따라 2상유동을 형성한다. 오리피스는 본 실험을 위하여 ASME 표준규격⁽⁷⁾에 의하여 아크릴로 제작되었는데 판지경 26mm, 판지경 14.2mm, 판두께 3.2mm, 직경비 0.5462, 경사각 45°인 칼날형식(sharpedged orifice)이다. 오리피스내 압력공사이의 거리는 $l=16.6\text{mm}$ 이며 압력 측정시 기포가 압력관에 스며들지 않도록 압력공이 관 아래로 향하도록 설치하였다. 시험관의 총길이는 10.3m이며, 오리피스는 혼합부에서 8.06m($L/D=310$) 떨어진 지점에 설치되어 있는데 이 지점에서 유동은 완전 확립된 것으로 간주할 수 있다⁽⁶⁾. 시험관을 통과한 물과 공기는 저장탱크에서 분리되며 물은 원심식 펌프에 의하여 일정수두탱크에서 오우버플로우(overflow) 되는 물을 직접 저장탱크로 보내기 위하여 바이패스(by-pass)관을 설치하였다.

2.2 실험범위 및 측정방법

실험은 실온에서 수행하였는데 액체유량의 범위는 질보기 속도(superficial velocity)로 0.15~1.66(m/s)이며 기체유량은 0.25~4.85(m/s)의 범위내에서 조절하였다. 이 유동범위는 환상유동을 제외한 기포유동, 플러그유동, 슬러그유동 및 성층유동을 포함하며 성층 플러그, 성층-슬러그의 천이영역도 관찰되었다.

오리퍼스핀을 통하여 흐르는 2상유동의 순간압력강하는 압력변환기 및 증폭기를 거쳐 12-bit A/D 변환기와 연결된 마이크로 컴퓨터로 측정된다. 이 과정에서 고주파수를 가지는 잡신호는 로우패스필터(low pass filter)를 사용하여 제거하였다. 본 실험에서 사용한 차압식 압력변환기는 스트레인 게이지 형식으로 0.1MPa 까지 측정범위를 가지며 고유진동수는 200Hz이다. 본 실험에 앞서 수주를 이용한 차압장치로 압력변환기와 증폭기의 보정실험을 수행한 결과 압력차와 출력볼트는 선형의 관계임을 확인하였다. 본 실험시 표본회수는 초당 400개이며 표본시간은 20초로 측정결과를 플로피 디스크에 수록하였다. 저장된 실험자료로부터 평균압력강하치와 교란강도를 계산하였으며 확률밀도함수를 구하여 유동양식에 따른 본포도를 분석하였다.

3. 순간압력강하치의 통계 처리

어떤 순간의 압력강하치, $\Delta P(t)$ 는 평균치 $\overline{\Delta P}$ 와 교란치 $\Delta P'$ 의 합으로 표시되는 데

$$\Delta P(t) = \overline{\Delta P} + \Delta P' \quad (1)$$

여기에서 $\overline{\Delta P}$ 는 시간에 따른 평균치로 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{\Delta P} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P(t) dt \quad (2)$$

이 식에서 T 는 측정시간을 나타낸다. Random 메이터인 ΔP 가 에르고딕 프로세스(ergodic process)이라면 식(2)의 시간에 대한 평균치는 앙상블(ensemble)평균치와 같아진다. 순간압력강하치의 교란강도(fluctuation intensity)는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta(\Delta P') = \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\Delta P - \overline{\Delta P}]^2 dt \right\}^{1/2} \quad (3)$$

순간압력강하치가 어떤 특정한 범위내에 있을 확률을 확률밀도함수로 표시할 수 있는 데 확률밀도함수 $PDF(\Delta P)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$PDF(\Delta P) = \lim_{\delta(\Delta P) \rightarrow 0} \frac{\text{probability}[\Delta P \leq \Delta P(t) \leq \Delta P + \delta(\Delta P)]}{\delta(\Delta P)} \quad (4)$$

확률밀도분포를 정량적으로 표현할 수 있는 비대칭계수(coefficient of skewness), S 와 Kurtosis 계수, K 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S = m_3 / (m_2)^{3/2} \quad (5)$$

$$K = m_4 / (m_2)^2 \quad (6)$$

여기에서 m_r ($r=2, 3, 4$)은 확률밀도함수의 r 번째 중심모멘트를 나타내며 다음의 식으로 정의된다.

$$m_r = \int_0^{\infty} (\Delta P - \overline{\Delta P})^r PDF(\Delta P) d(\Delta P) \quad (7)$$

4. 수평 2상유동양식의 분류

기액 2상유동양식은 상분포에 따라 크게 분리유동, 혼합유동과 분산유동으로 분류될 수 있다. 분산유동은 기상과 액상이 뚜렷하게 구분된 유동으로 성층, 파상 및 환상유동등이 이에 속한다. 혼합유동은 기포, 플러그나 슬러그유동과 같이 측방향으로 유동이 균일하지 못하며 액상과 기상의 이합집산이 심한 유동을 말한다. 또 분산유동은 분산기포(dispersed bubble)나 액적(droplet)유동과 같이 관전체를 통하여 매우 작은 기포나 액적이 균질하게 분포된 형상을 유지하는 유동을 말한다.

그러나 이러한 유동양식은 연구가들에 따라 표현이 다르거나 분류방식에 차이가 있는 데 이것은 실험조건, 유동매질에 따라 관찰되는 현상이 다를 수 있기 때문이다. 예를들어 Dukler와 Taitel⁽⁸⁾은 플러그와 슬러그를 합하여 간헐유동(intermittent flow)으로 명명하였으며 Baker⁽⁹⁾는 플러그유동을 처언(churn)유동으로 표현하였다. 이러한 유동양식의 표현이나 분류에서의 상이점때문에 유동양식을 이해하는 데 혼란이 있을 수 있는 데 본 연구에서는 이러한 혼란을 피하기 위하여 아래와 같이 유동을 분류하여 이에 대한 압력강하의 특성을 분석하였다.

(1) 기포유동(BB): 직경이 매우 작은 기포가 수평관의 윗부분을 거의 연속적으로 이동하는 유동

(2) 플러그유동(PL): 비교적 직경이 크고 길이가 긴 기포유동으로 기포의 길이가 감소고 있는 액체덩어리의 길이보다 짧거나 작으며 육안으로 관찰할 수 있을 정도로 느리게 이동하는 유동

(3) 슬러그유동(SL): 액상과 기상이 나사산의 모양을 이루는 유동으로 자상이 교대로 나타나는 빈도가 매우 높고 유동이 매우 빠르게 진행되어 육안관찰이 불가능한 유동

(4) 성층유동(ST): 기상은 관의 윗부분을 액상은 아래부분을 차지하여 완전한 층을 이룬 유동으로 계면이 비교적 매끈한 유동

(5) 파상유동(WV): 기상과 액상이 성층유동과 같이 분리되었으나 계면위에 거칠은 파가 존재하는 유동 위와 같은 묘사는 일반적으로 인정되고 있는 유동양식 판별인 데 위의 설명에 해당되지 않는 두 유동영역의 경계에서의 유동형태를 전이영역으로 간주하였다.

5. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 각 유동양식과 천이영역에 따른 확률 밀도함수를 구하여 특성을 분석하였으며 유동양식에 따른 평균압력강하치와 교란강도의 경향을 고찰하였다. 또 확률밀도함수에 의한 유동양식의 실험자료를 다른 유동선도와 비교하였다. 그리고 한가지 언급할 것은 2상유동이 오리피스관을 통과한 후의 유동양식은 관내의 유동양식에 관계없이 일시적으로 분산기포 유동으로 바뀌었으나 곧 원래의 유동양식으로 회복되었다. 따라서 오리피스에서의 압력강하특성은 측류에서 유동양식이 극부적으로 변화했다 하더라도 관내의 유동양식과 독자적인 상관관계를 갖는 것으로 믿어지는 때 실험결과에서 이 사실이 확인되었다.

5.1 각 유동양식에서의 확률밀도함수

본 연구에서 얻은 각 유동양식에 대한 대표적인 순간압력강하곡선의 확률밀도함수가 Fig. 2에 도시되어

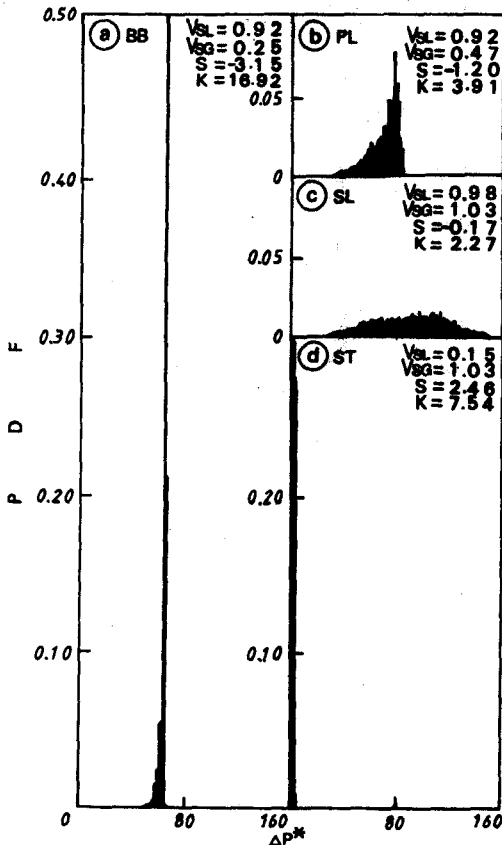


Fig. 2 Typical probability density functions for various flow patterns

있다. 이 그림은 기포, 성층, 플러그, 슬러그유동을 포함하고 있는 때 여기에서 압력강하치, ΔP^* 를 오리피스내 두 측정점사이의 액체정압 $\rho_L g l$ 로 무차원화시킨 ΔP^* 를 사용하였는데 이 그림에 표시된 속도는 겉보기 속도(superficial velocity)이다. Fig. 2 ②의 기포유동의 경우 확률밀도가 높은 단일정점을 가지며 분포폭이 매우 낮은 사실을 알 수 있다. 기포유동에서는 기공률이 매우 작으며 비교적 연속적으로 기포들이 유동하므로 교란성분이 크지 않는 때 이 사실을 반영하고 있다. Fig. 2 ③는 플러그유동의 확률밀도함수를 나타낸 것으로 단일정점을 가지며 정점에서의 압력강하치보다 작은 영역에서는 완만하게 증가하나 큰 영역에서는 급격히 감소하는 비대칭성의 모양을 가진다. 플러그유동은 비교적 길이가 긴 기포와 이것을 둘러싼 액체덩어리가 교대로 나타나는 유동이며 기포간의 결합과 이산이 비교적 활발하므로 순간압력강하의 진폭이 커지며, 그림에 나타난 바와같이 확률밀도함수의 분포폭이 비교적 넓다. 이 유동에서 액체덩어리가 지나갈 때는 교란성분이 거의 없는 높은 압력강하치를 가지므로 정점을 중심으로 비대칭성의 모양을 나타낸다. Fig. 2 ④는 슬러그유동을 나타낸 것으로 이 유동에서는 액체덩어리와 기포간의 상호작용이 활발하므로 진폭이 크며 비교적 규칙적인 순간압력강하곡선을 가진다. 따라서 확률밀도함수의 분포폭은 매우 넓으며 밀도의 변화는 비교적 완만하다. Fig. 2 ⑤는 성층유동의 확률밀도함수로 기포유동의 그것과 매우 비슷한 형태를 갖고 있으나 정점에서의 압력강하치가 영 부근의 값을 가진다. 성층유동은 일반적으로 액체 겉보기속도가 0.15m/s 이하인 영역에서 관찰되므로 평균압력강하가 매우 낮으며 또 액상과 기상 사이의 계면이 비교적 매끈하므로 시간 및 공간에 대한 기공률의 변화가 미미하며 압력강하 교란치의 크기가 매우 작다.

이 그림에서 확률밀도함수의 비대칭계수는 성층유동을 제외하고는 음의 값을 가지며 기포, 성층, 플러그 및 슬러그 유동의 순으로 Kurtosis 계수의 값이 감소하므로 확률밀도함수가 이 순서로 대칭성을 가지는 사실을 알 수 있다.

이상과 같은 결과에서 각 유동양식에 따라 독특한 확률밀도분포를 가진다는 사실을 알 수 있다. 따라서 오리피스에서의 압력강하의 통계함수를 이용하여 유동양식을 판별하는 것은 신뢰할 만한 방법으로 사료된다.

5.2 천이과정 중 확률밀도함수의 변화

유동조건이 달라질 때 유동양식의 천이에 따른 확률

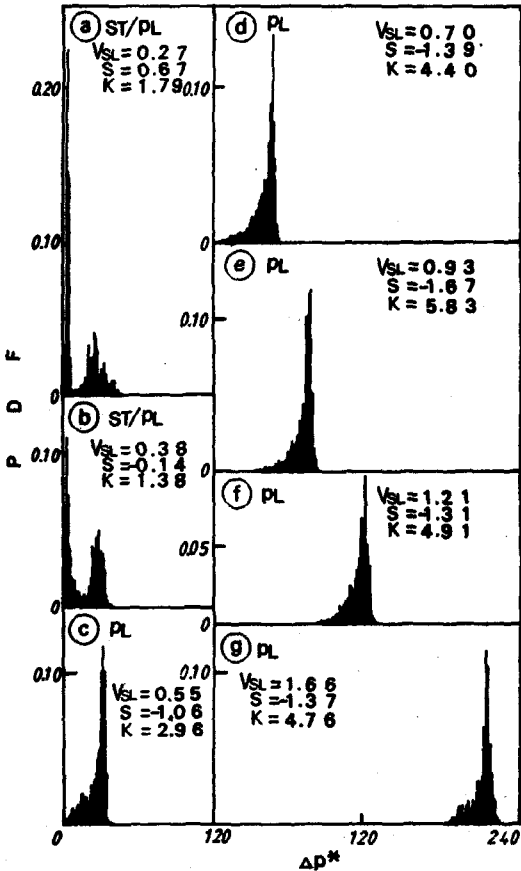


Fig. 3 Probability density functions during flow pattern transition for $V_{sc}=0.52(m/s)$

밀도함수의 변화가 Fig. 3과 Fig. 6 사이에 나타나 있다. Fig. 3과 Fig. 4는 걸보기 기상속도를 일정하게 두고 걸보기 액상속도를 일정하게 두고 걸보기 액상속도를 증가시킬 때 일어난 유동양식의 천이과정중 확률밀도함수를 나타낸 것이며 Fig. 5와 Fig. 6은 액상속도를 일정하게 놓고 기상속도를 변화시킬 때 관찰된 것을 도시한 것이다. 이 그림들은 ST/PL, ST/SL, WV/SL 등의 천이영역과 BB, ST, PL, SL의 유동양식을 포함하고 있다.

Fig. 3은 걸보기 기상속도를 0.52(m/s)에 고정시켜 놓고 걸보기 액상속도를 0.27(m/s)에서 1.66(m/s)까지 7단계로 증가시킬 때 유동양식의 변화에 따른 확률밀도함수를 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)와 (b)는 ST/PL 천이과정중의 확률밀도함수인데 두 개의 정점을 가지는 분포를 나타내고 있다. 이 천이과정 중에는 걸이가 매우 긴 기포층이 액체덩어리에 의하여 분할된 형

상을 나타내는 데 $\Delta P^*=0$ 부근의 정점은 기포층이 지나갈 때를 나타내며 두번째 봉우리는 액체덩어리가 통과할 때를 의미한다. 액상속도가 증가함에 따라 기포층의 길이가 짧아지며 액체덩어리의 길이가 길어지므로 왼쪽의 정점에 있는 밀도가 낮아지며 오른쪽의 정점의 높이가 증가한다. $V_{sl}=0.55(m/s)$ 에 이르렀을 때 기포의 길이가 액체덩어리의 길이보다 작아진 확립된 플러그유동을 형성하며 이 후 액상속도를 $V_{sl}=1.66(m/s)$ 까지 증가시킬 때 유동양식의 변화가 없으므로 확률밀도함수는 일관된 형태를 유지하며 단지 평균압력강하치만 증가한다. 이 천이과정중, Fig. 3(a)의 $V_{sl}=0.27(m/s)$ 을 제외하고는 비대칭계수가 음의 값을 가지며 플러그유동이 확립된 후 비대칭계수의 절대치와 Kurtosis 계수의 값은 액상유량이 증가함에 따라 일단 증가하였다가 감소한다. 그러나 이 유동영역에서 비대칭계수는 -1.0 부근의 값을 가지는 데 이것은 본 연구를 통하

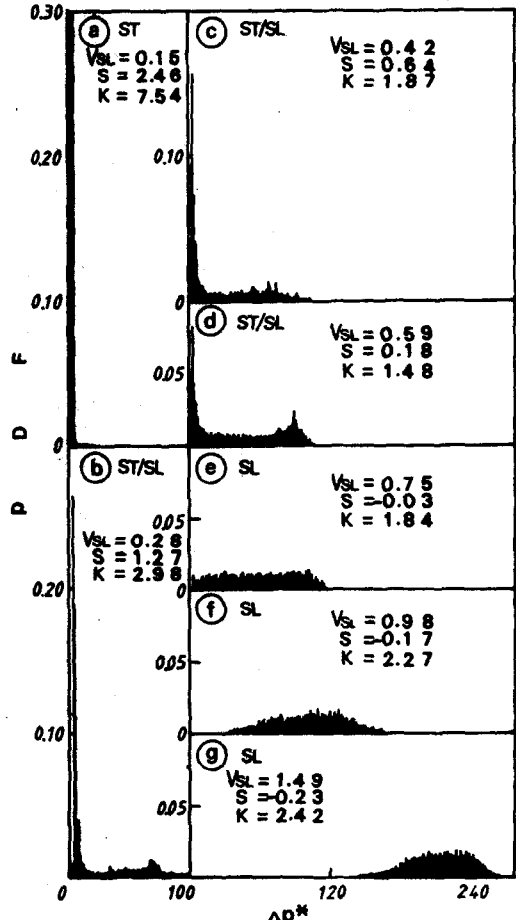


Fig. 4 Probability density functions during flow pattern transition for $V_{sc}=1.03(m/s)$

여 얻은 실험자료에서 일관되게 나타났다.

Fig. 4는 $V_{sc}=1.03(m/s)$ 일 때 액상속도를 증가시켜 유동양식이 성층유동에서 슬러그유동으로 바뀔 때의 확률밀도함수를 나타낸 그림이다. 성층유동($V_{sl}=0.15m/s$)에서 액체유량을 약간 증가시키면 부분적으로 윗 관벽에 닿지 않을 정도의 높이를 가진 액체슬러그가 간헐적으로 출현하는 데 확률밀도함수에서는 단일정점의 높이가 떨어지면서 분포폭이 넓어지는 양상으로 변한다. 액체유량을 더 증가시키면 슬러그의 출현회수가 증가하면서 이와같은 경향이 심화되며 $V_{sl}=0.75(m/s)$ 에 이르렀을 때 궁극적으로 완전한 슬러그유동으로 천이한다. 슬러그유동이 확립된 후 액체유량을 증가하면 동일한 밀도함수의 형상을 유지하며 평균 압력강하만 증가하는 사실을 알 수 있다. 이 그림에서 비대칭계수는 액상유량의 증가와 함께 계속 감소하며 슬러그유동에 들어서면 음의 값을 가지는 사실을 알 수 있다. 본 연구를 통하여 얻은 실험자료를 분석한 결과 슬러그유동에서의 비대칭계수는 양 또는 음의 값을 가지며 그 크기는 0 부근의 매우 작은 것으로 나타났다. 그리고 Kurtosis 계수는 슬러그유동으로의 천이 과정 중에는 감소하나 그 후는 계속 증가하고 있다.

Fig. 5는 액체유량($V_{sl}=0.44m/s$)을 일정하게 유지

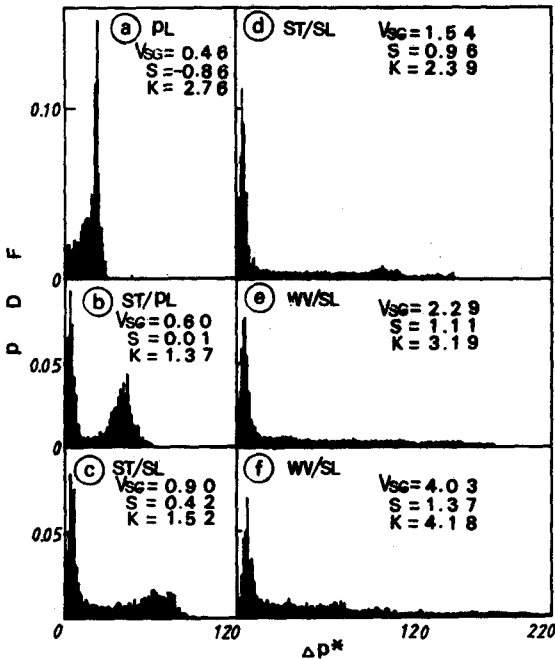


Fig. 5 Probability density functions during flow pattern transition for $V_{sl}=0.44(m/s)$

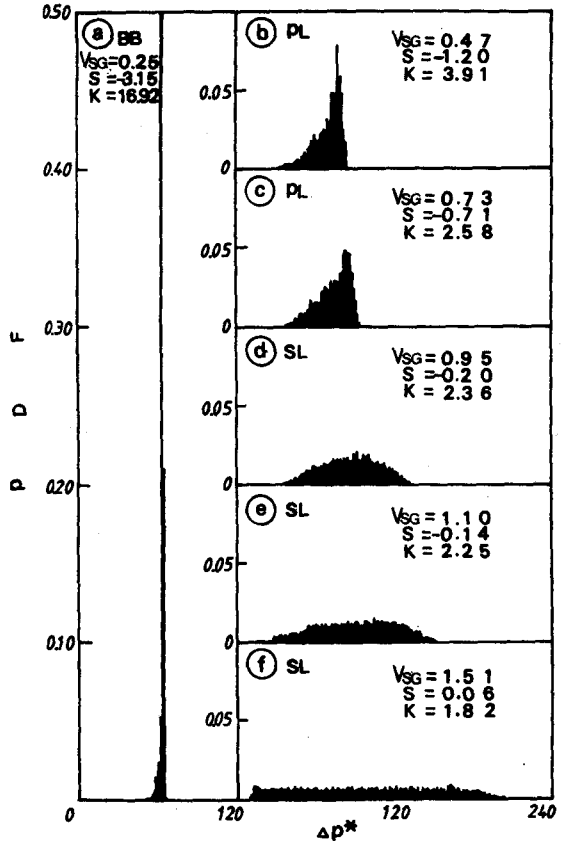


Fig. 6 Probability density functions during flow pattern transition for $V_{sl}=0.92(m/s)$

하며 기상속도를 증가시킬 때의 확률밀도함수의 변화를 나타낸 그림이다. $V_{sc}=0.46(m/s)$ 인 플러그유동에서 기상속도를 증가시키면 확률밀도함수에서 두 개의 정점을 가지는 ST/PL의 천이영역으로 변한다. 이것은 기공률의 증가에 의하여 액상과 층을 이룬 질이 매우 긴 기포가 액체덩어리에 의하여 분할된 형태로 바뀌었기 때문이다. 기상속도를 더 증가시키면 긴 기포 사이를 분할한 액체덩어리가 부분적으로 윗 벽면에서 떨어지는 슬러그형태로 바뀌면서 ST/SL과 천이영역으로 전환하는 데 이 경우의 확률밀도함수가 Fig. 5(c)와 (d)에 도시되어 있다. V_{sc} 가 2.29(m/s)에 이르면 성층부분의 계면위에 거칠은 파가 나타나 유동양식이 WV/SL의 천이영역으로 되는 데 확률밀도함수에서 보면 $\Delta P^*=0$ 부근의 정점밀도가 낮아지면서 분포폭이 두터워진다. 이 천이과정에서 비대칭계수는 기상유량의 증가와 함께 계속 증가하며 플러그유동을 제외하고

는 양의 값을 가지며 Kurtosis 계수도 ST/PL 천이과정부터 기상유량의 증가에 따라 계속 증가한다.

Fig. 6은 $V_{SL}=0.92(m/s)$ 일 때 기상유량을 증가시키면서 얻은 확률밀도함수이다. 이 액상속도는 성층이나 파상유동이 존재하는 영역보다 높은 값으로 기상유량이 증가할 때 기포, 플러그와 슬러그의 혼합유동만 나타난다. 따라서 분리유동에서 혼합유동으로 천이하는 과정을 다룬 앞의 그림들과 달리 천이과정이 복잡하지 않으며 유동영역간의 구분이 뚜렷하다. 그리고 슬러그유동이 확립되었을 때 기공률이 증가함에 따라 압력강하의 진폭이 커지며 확률밀도함수의 분포범위가 매우 넓어지는 사실을 알 수 있다. 비대칭계수는 Fig. 6①의 슬러그유동을 제외하고는 음의 값을 가지며 기상유량이 증가함에 따라 함께 증가하고 있으며 Kurtosis 계수는 반대로 감소한다.

이상의 결과에서 2상유동의 천이과정도 오리피스와 순간압력강하치에 대한 확률밀도함수로 설명이 가능하다는 사실을 확인하였다. 즉 성층 또는 파상유동과 같은 분리유동에서 플러그나 슬러그유동과 같은 혼합유동으로의 천이영역에서의 확률밀도함수는 밀도가 낮으며 폭이 넓은 분포를 나타내며 비대칭계수는 일반적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 혼합유동내에서의 천이과정중에는 유동영역간의 구분이 뚜렷하여 확률밀도함수의 분포형상이 복잡하지 않으며 기포, 플러그 및 슬러그유동으로 천이할 때 비대칭계수는 일반적으로 증가한다.

5.3 유동양식에 따른 압력강하의 통계치

각 유동양식에 따른 평균압력강하치와 교란강도의

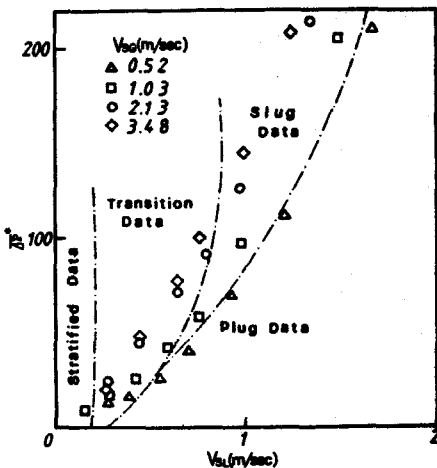


Fig. 7 Dimensionless time-averaged pressure drop for constant superficial gas velocities

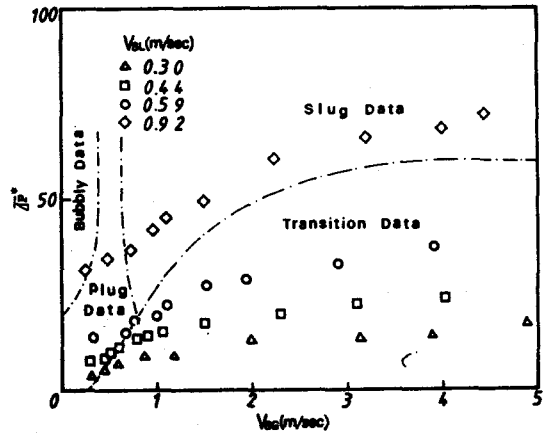


Fig. 8 Dimensionless time-averaged pressure drop for constant superficial liquid velocities

경향을 알아보았는 때 그 결과가 Fig. 7에서 Fig. 10까지 주어져 있다. 이 그림들에 표시된 유동양식은 유동영역을 의미하지 아니하며 단지 실험자료가 속한 유동형태를 나타낸다.

기체유량이 일정한 경우 액체속도의 변화에 따른 무차원 평균압력강하치가 Fig. 7에 도시되어 있으며 일정한 액체유량에 대한 기체속도와 평균압력강하치의 관계가 Fig. 8에 나타나 있다. 이 두 그림에서 평균압력강하치는 유동양식의 천이와 관계없이 액체와 기체속도가 증가할 때 단조롭게 증가하는 것을 알 수 있는데 이 사실은 앞서의 연구결과⁽⁹⁾와 일치하고 있다. 이 결과는 오리피스에서의 평균압력강하는 각 상의 유량과 함수관계에 있으며 유동형태와는 무관하다는 사실을 제시하고 있다. 따라서 2상유동의 압력강하를 기상과 액상이 홀로 흐를 때의 압력강하만으로 표현하는 것이 타당성이 있는 것으로 판단된다⁽¹⁰⁾.

Fig. 9와 Fig. 10은 액체속도와 기체속도의 변화에 따른 교란강도를 $\rho_0 g l$ 로 무차원화한 $\Delta(\Delta P^*)$ 의 값을 도시한 그림이다. 기체유량이 일정한 경우 액체속도가 증가할 때 교란강도는 천이영역에서 일반적으로 증가하나 슬러그와 플러그영역에서는 감소하는 경향을 보이고 있다. 또 액체유량이 일정한 경우에는 기체유량이 증가함에 따라 교란강도는 모든 영역에서 일반적으로 증가하고 있다. 일반적으로 교란강도는 기액상의 걸보기속도뿐 아니라 기공률과도 상관관계를 가지는 것으로 믿어진다. 천이영역에서는 기상과 액상의 계면형태가 바뀌므로 교란강도가 기공률보다는 기액상의 전체유량에 지배되는 것으로 생각되는 때 실험결과가 이 사실을 나타내고 있다. Fig. 9와 Fig. 10에서 천이

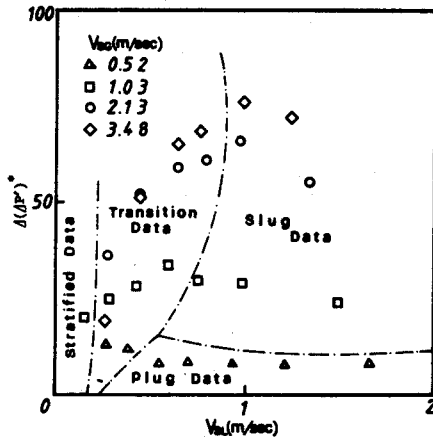


Fig. 9 Dimensionless intensity of fluctuation for constant superficial gas velocities

영역의 교란강도는 기공률의 증가에 관계없이 기액상 유량이 많아질 때 함께 증가하는 사실을 알 수 있다. 그러나 슬러그나 플러그유동이 완전히 확립되었을 때에는 교란강도가 기공률의 증가와 함께 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 매우 흥미로운 결과인 데 이 사실에서 교란강도를 통하여 천이영역과 슬러그나 플러그의 혼합유동영역간의 구분이 가능한 것으로 생각된다.

5.4 다른 유동선도와 본 실험자료의 비교

본 연구에서 사용한 유동양식 판별법에 의한 실험자료와 Mandhane 등⁽¹¹⁾과 Hoogendoorn⁽¹²⁾의 수평 2상유동양식도와 비교한 결과가 Fig. 11에 나타나 있다. 이 선도들에서는 기포와 플러그유동을 구분하지 않고 신장기포(elongated bubble) 영역으로 명명하였는데 본 연구에서는 $V_{sc}=0.4(m/s)$ 이하인 범위에서 관찰된 작

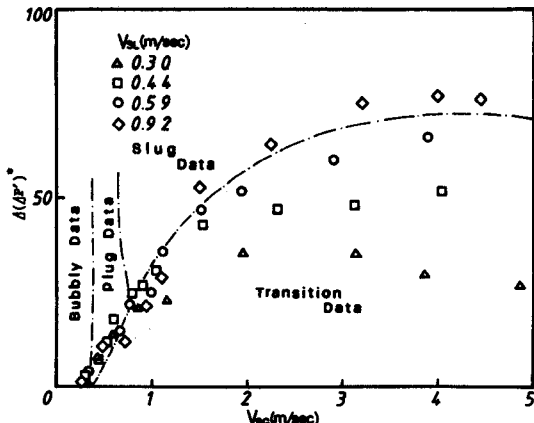


Fig. 10 Dimensionless intensity of fluctuation for constant superficial liquid velocity

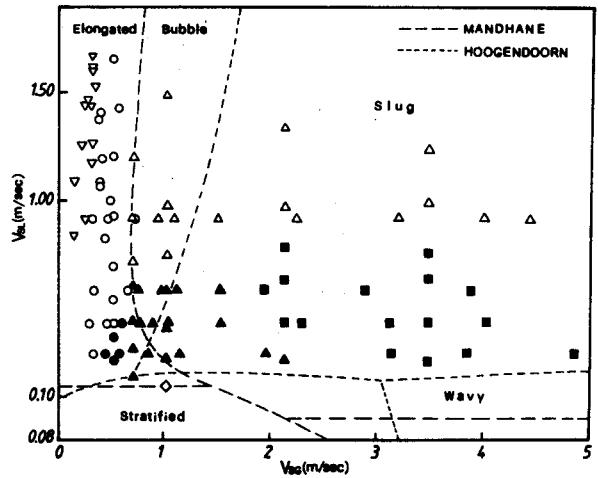


Fig. 11 Comparison of experimental data with previously proposed flow pattern maps(Data;▽ Bubbly;○ Plug;△ Slug;◇ Stratified;● Stratified/Plug;▲ Stratified/Slug;■ Wavy/Slug)

은 직경의 기포가 관 윗부분을 흘러가는 형태를 기포 유동으로 분리하여 표시하였다. 본 실험자료와 Mandhane의 유동선도는 비교적 잘 일치하고 있는데 다만 분리유동에서 혼합유동으로의 천이영역을 Mandhane 선도에서는 구분하지 않았다. 이 천이영역은 앞에서 언급한 바와같이 성층 또는 파상유동과 플러그또는 슬러그유동이 공존하는 유동형태로 확립될도함수상으로 확연히 구분되는 영역이다. 또 교란강도치의 분석에서 알 수 있듯이 유동변수들의 변화경향도 달라질 수 있기 때문에 천이 영역으로 세분하여 판별하는 것이 바람직하다. 아홉은 이 비교를 통하여 확립될도함수에 의한 유동양식의 판별이 신뢰할 만한 방법으로 간주될 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 오리피스에서의 순간압력강하곡선의 확립될도함수를 구하여 수평 2상유동양식을 판별하는 새로운 방법을 시도하였다. 물과 공기를 매질로 사용하여 기포, 성층, 플러그 및 슬러그유동에서의 확립될도함수를 분석한 결과 유동양식에 따라 함수들이 독특한 형태를 갖는 것을 확인하였으며 분리유동에서 혼합유동으로의 천이영역에 대해서도 확립될도함수로 설명이 가능하다는 사실을 입증하였다. 또 유동영역에 따른 평균압력강하치와 교란강도의 경향을 분석하였다. 평균압력강하치는 유동양식과 관계없이 기액상유량만

의 함수로 표현되는 데 반하여 교란강도는 유량외에도 유동양식과 관련되는 기공률의 영향을 받는 것으로 나타났다. 끝으로 본 연구에서 사용한 유동양식 판별법에 의한 실험자료와 이미 발표된 유동선도와의 비교를 통하여 본 판별법의 신뢰성을 입증하였다.

후 기

본 연구는 1986년도 문교부 자유과제연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 문교부 관계자에게 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- (1) M. Ishii, 1975, "Thermo-Fluid Dynamic-Theory of Two-Phase Flow", Chap. 1, Eyrolles, France.
- (2) G. Hetstroni, 1982, "Handbook of Multiphase Systems", Chap. 2, Hemisphere Publishing Co., New York.
- (3) O.C. Jones and N. Zuber, 1975, "The Interrelation between Void Fraction Fluctuations and Flow Pattern in Two-Phase Flow", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 2, pp. 273~306.
- (4) D. Barnea, O. Shoham, and Y. Taitel, 1980, "Flow Pattern Characterization in Two-Phase Flow by Electrical Conductance Probe", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 6, pp. 387~397.
- (5) N.K. Tutu, 1984, "Pressure Drop Fluctuations and Bubble-Slug Transitions in a Vertical Two-Phase Air-Water Flow", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 10, pp. 211~216.
- (6) 이상천, 오홍희, 김중엽, 1986, "차압유량계를 이용한 기액상유량 및 전도의 동시측정 가능성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제10권, 제 3호, pp. 335~342.
- (7) ASME, 1959, "Fluid Meters: Their Theory and Applications", Chap. B-2, 5th ed., New York.
- (8) A.E. Dukler and Y. Taitel, 1986, "Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid Systems", Multiphase Science and Technology, Vol. 2, pp. 1~94.
- (9) O. Baker, 1954, "Design of Pipe Lines for Simultaneous Flow of Oil and Gas", Oil and Journal, Vol. 53, p. 185
- (10) D. Chisholm, 1977, "Research Note: Two-Phase Flow through Sharp-edged Orifices", J. Mech. Engng. Sci., Vol. 19, pp. 127~129.
- (11) J.M. Mandhane, G.A. Gregory, and K. Aziz, 1974, "A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 1, pp. 537~553.
- (12) C.J. Hoogendoorn, 1957, "Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes", Chem. Engng. Sci., Vol. 9, pp. 205~217.