

〈論 文〉

차압교란치의 통계적 특성에 의한 2상유동양식의 판별

이상천* · 이정표** · 김중엽*

(1990년 5월 10일 접수)

Identification of Two-Phase Flow Patterns Based on Statistical Characteristics of Differential Pressure Fluctuations

Sang Chun Lee, Jung Pyo Lee and Jung Yeup Kim

Key Words : Flow Pattern(유동양식), Probability Density Function(확률 밀도함수), Power Spectral Density Function(파워 스펙트럼 밀도함수), Sharp-Edged Orifice(칼날오리피스), Flow Pattern Map(유동 양식 선도).

Abstract

Characteristics of flow patterns in horizontal gas-liquid two-phase flow for two different sizes of pipe were investigated based upon a statistical analysis of differential pressure fluctuations at an orifice. The probability density function and the power spectral density function of the traces indicate peculiar shapes depending upon the two-phase flow regime. Mixed and separated flows also could be identified by the autocorrelation function. The transition region from separated flow to mixed flow also could be identified by these statistical properties. The experimental data determined by this method were compared with the flow pattern maps suggested by other investigators. The result indicates that the statistical characteristics of differential pressure fluctuations at orifices may be a useful tool for identifying flow patterns of horizontal gas-liquid two-phase flow.

1. 서 론

기액 2상유동은 단상유동과 달리 2상 사이에 계면이 존재하는 데 이 계면분포는 유동조건에 따라 여러가지 형태로 변할 수 있을 뿐 아니라 시간 및 공간에 따라 달라질수 있다. 따라서 2상유동이 수반되는 장치의 열유체역학적 거동해석에는 기상과 액상의 분포형태, 즉 유동양식(flow pattern)의 정확한 파악이 선행되어야 한다.

2상유동양식의 판별에는 육안관찰에 의한 방법이 많이 사용되어 왔으나 주관적인 판단으로 인하여

신뢰성의 문제가 제기되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 간단한 기구나 장치를 이용한 방법들이 개발되어 왔다. Jones와 Zuber⁽¹⁾는 X선을 이용한 기공률의 직접 측정으로 유동양식의 판별을 시도하였다. 이 방식은 장치가 복잡하고 고가이므로 널리 활용되기 어려운 점이 있다. Barnea 등⁽²⁾은 기상과 액상의 전기전도도가 차이를 가진다는 사실을 이용하여 전기전도도 측정법으로 유동양식을 판별하였다. 이 방법은 장치 제작비용이 저렴하고 조작이 간편하나 성층 또는 기포유동을 탐지하는 탐침들의 적합한 위치 선정을 위하여 유동특성에 관한 조사가 사전에 이루어져야 하며, 또한 액상이 전기적 도체인 경우에만 적용할 수 있다. 한편 압력측정을 이용하는 방법이 많은 연구가들에

*정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

**정회원, 영남대학교 대학원

의하여 시도되었다⁽³⁻⁷⁾. 이 방법은 유동변수의 하나인 관내 두 지점 사이의 압력교란치를 해석하여 유동양식을 판별하는 방법으로 객관적이고 신뢰할 만한 방법으로 인식되고 있다. Hubbard와 Dukler⁽³⁾는 수평관에서 벽면정압교란치의 스펙트럼 밀도함수를 이용하여 유동영역을 구분하였다. 그러나 정압은 외부교란의 영향을 받기 쉬우므로 이를 해결하기 위하여 차압을 이용하는 방법이 시도되었다. Weisman 등⁽⁴⁾은 수평 2상유동에서 유동방향의 두 측정점의 압력강하를 측정하여 유동양식에 따른 진폭과 주파수를 비교하여 유동양식의 판별을 시도하였다. 그러나 이들은 순간압력강하치의 파형을 단순히 제시하여 유동양식에 따라 비교하는데 그쳤다. Tutu⁽⁵⁾는 수직관에서 압력강하의 확률밀도함수로 유동영역을 구분할 수 있다는 사실을 검증하였는데 여기에는 기포, 슬러그, 처언(churn) 및 환상유동의 결과가 제시되어 있다. 한편 Matsui는 수직관⁽⁶⁾에서 압력측정 위치와 간격에 따라 확률 밀도함수의 분포형상이 달라진다는 사실을 밝혔고, 수평관⁽⁷⁾에서 유로단면의 상하차압교란치의 통계치인 확률 밀도함수와 스펙트럼 밀도함수를 구하여 유동양식의 판별을 시도하였다.

수평 기액 2상유동에서 압력강하의 교란치는 유동이 진행되는 시간 및 공간에 따른 기공률의 변화에 의하여 초래된다. 따라서 압력강하 교란치의 통계적 해석을 통한 유동양식을 판별하는데는 압력차를 측정하는 두 지점의 간격이 매우 중요한 인자로 판단되나 이에 대한 체계적인 연구결과는 발표되어 있지 않다. 다만 최근에 Matsui 등⁽⁸⁾이 유동방향 두 지점의 차압구간 간격이 차압변동의 통계적 성질에 영향을 주며, 단구간의 압력강하가 유동상태의 변화에 민감하다는 실험결과를 단편적으로 제시한 바 있다. 즉, 동일직경의 관내 2상유동에서 압력강하 특성을 규명한 유동양식의 판별법은 두 측정지점의 간격이 중요한 인자가 될 것으로 판단되나 이에 대한 연구결과는 거의 없다. 최근에 이 등⁽⁹⁻¹¹⁾이 수평 및 상향경사관의 기액 2상유동에서 오리피스의 순간압력강하치의 통계적 해석을 통하여 유동양식 판별 및 천이특성을 구명하였다. 이들은 확률밀도함수가 각 유동양식에 따라 독특한 분포형상을 가지며 확률밀도함수의 정량적 통계치인 비대칭계수와 kurtosis계수도 유동양식에 따라 특정한 범위를 가진다는 사실을 밝혀냈다. 이 결과는 오리피스의 순간압력강하치가 근본적으로 랜덤성

(randomness)을 가지고 있으나 진폭 및 주파수의 특성은 유동양식에 따라 독특한 형태를 가질 수 있다는 사실을 내포하고 있다.

본 연구는 이러한 개념을 확장하여 직경이 26mm와 38mm인 두 개의 수평관내 기액 2상유동에서 오리피스의 차압교란치의 확률밀도함수, 자기상관함수와 파워 스펙트럼 밀도함수를 구하여 유동양식에 따른 이들 통계치의 특성을 구명하였다. 본 연구에서 다룬 유동양식은 기포, 플러그, 슬러그, 성층, 파상, 환상, pseudo-slug 유동이다. 이 결과 차압교란치의 통계적 해석을 통한 유동양식 판별법이 매우 유용하다는 사실을 밝혔으며, 또 본 판별법을 관내 압력강하치의 통계적 해석을 통하여 유동양식을 구분한 타 연구자들의 방법과 비교 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 방법

본 연구에서는 대기압에서 상온의 물-공기의 수평 동류 2상유동을 다루었다. 실험장치의 개략도가 Fig. 1에 도시되어 있다. 물은 저장탱크로부터 원심식 펌프로 시험관내로 유입되며 물공급관에는 펌프에 의하여 발생될 수 있는 유동의 교란을 제거하기 위하여 서지 탱크(surge tank)를 설치하였다. 공기는 공기압축기로부터 물-공기 혼합부의 공기노즐을 통하여 시험관에 혼입된다. 물과 공기의 유량

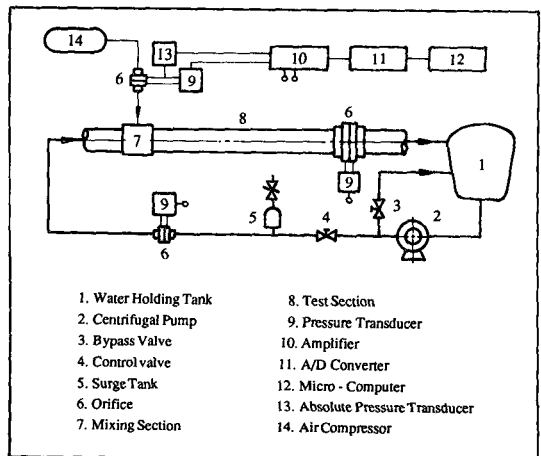


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

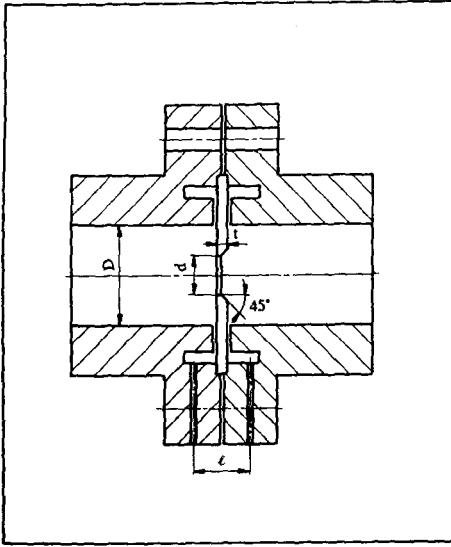


Fig. 2 Cross sectional view of orifice

은 각각의 공급관에 설치되어 있는 오리피스와 연결된 압력변환기로 측정된다. 시험관은 내경 26 mm와 38 mm인 두개의 투명한 아크릴수지관으로 시험관의 총길이는 각각 7.4 m이다. 직경 26 mm의 경우에는 오리피스 A가 시험관부의 물-공기혼합부로부터 5.3 m ($L/D=204$) 떨어진 지점에 설치되어 있고, 직경 38 mm의 시험관에는 물-공기혼합부로부터 오리피스 B가 5.7 m ($L/D=150$) 떨어진 위치에 부착되어 있다. 이 지점에서 2상유동은 완전히 확립된 것으로 실험을 통하여 확인하였다. 본 실험에 사용된 오리피스는 ASME 표준규격⁽¹²⁾에 의하여 제작하였으며 칼날오리피스형식(sharp-edged

orifice)이다. Fig. 2는 오리피스의 단면도를 나타내고 있으며, Table 1에 그 사양이 주어져 있다. 시험관을 통과한 물과 공기는 저장탱크에서 분리되고 물은 원심식펌프에 의하여 시험관으로 재순환하도록 설계되었다. 본 실험의 액체유량은 겉보기속도(superficial velocity)로 0.06~2.40 (m/s)이며 기체유량은 0.09~12.61 (m/s)의 범위내에서 조절하였으며 이 유량범위에서 기포유동(BB), 플러그유동(PL), 슬러그유동(SL), 성층유동(ST), 파상유동(WV), 환상유동(AN), pseudo-slug유동(PS)이 관찰되었다.

실험방법은 조절밸브에 의하여 물과 공기유량을 조정하여 시험관에서 2상유동을 형성시킨 후 유동상태가 안정되었다고 판단되었을 때 시험관부에 설치된 오리피스판을 통하여 흐르는 2상유동의 순간차압치를 압력변환기 및 증폭기를 거쳐 12-bit A/D변환기와 연결된 마이크로 컴퓨터로 측정하였다. 총 실험회수는 직경이 26 mm인 시험관의 경우 기포, 플러그, 슬러그, 성층, 파상, 환상 및 pseudo-slug유동을 포함하여 170회 이상이며 직경이 38 mm인 경우 환상유동을 제외한 나머지 유동에 대하여 180회 이상을 수행하였다.

2.2 측정장치 및 실험자료 처리

본 실험의 측정장치는 압력변환기, 증폭기, A/D변환기가 내장된 마이크로 컴퓨터로 구성되어 있다. 차압변환기는 스트레인 게이지형식으로 압력차와 출력볼트는 선형의 관계를 가지며 용량은 0.1 MPa이고 고유진동수는 200 (Hz)이다. 증폭기의 출력의 비직선성은 $\pm 0.2\%$ 이다. 본 실험에 앞서 압력변환기와 증폭기의 보정실험을 수행한 결과 압력차와 출력볼트는 표준편차가 0.31%의 선형의 관계를 가짐을 확인하였다. 오리피스에서의 2상유동의 순간차압치는 압력변환기와 증폭기를 거쳐 12-bit A/D변환기가 내장된 마이크로 컴퓨터로 디지털화 된다. A/D변환기의 양자화오차(quantization error)는 0~5볼트설정에 1.221 mV로 추정된다. 따라서 최대오차는 0.024% 이하이다. 고주파의 잡음을 포함할 수 있는 랜덤신호(random signal)는 샘플링(sampling)하기 전에 30~100 (Hz)의 저역필터(low-pass filter)를 이용하여 처리하였다.

순간차압치의 통계적 특성치를 해석하기 위하여 이 랜덤데이터, ΔP 가 정상적(stationary)이고 에르고딕과정(ergodic process)인지를 검정하였다.

Table 1 Dimension of orifices unit (mm)

	Symbol	Orifice A	Orifice B
Inner pipe diameter	D	26	38
Throat diameter	d	14.2	19.6
Plate thickness	t	3.2	3.8
Distance between pressure taps	l	16.6	20.9
Diameter ratio	d/D	0.546	0.516

에르고딕과정이면 ΔP 에 대한 시간과 집합(ensemble)통계치는 동일한 것으로 간주할 수 있으므로 과정중 어떠한 표본함수(sample function)로부터도 구할 수 있다. 본 연구에서는 동일한 유동조건에서 초당 최대표본회수 800개, 최대표본시간 40초로 측정된 다수의 표본함수에 대한 각각의 통계치를 조사하였다. 이 표본함수들에서 표본회수 200개, 표본시간 15초 이상인 경우 평균치는 0.5%이내의 차이를 보였으며, 각 표본의 통계치도 서로 잘 일치하였다. 이 결과에 따라 본 실험의 표본회수는 초당 200개이며 표본시간은 15초로 결정하였다. 저장된 실험자료로부터 컴퓨터 프로그램을 이용하여 확률밀도함수, 자기상관함수와 파워 스펙트럼 밀도함수를 구하여 각 유동양식에 따른 분포특성을 분석하였다.

3. 통계적 처리

확률밀도함수는 순간차압치가 어떤 특정한 범위에 있을 확률을 나타내는 데 다음과 같이 정의 된다.

$$PDF(\Delta P) = \lim_{\delta(\Delta P) \rightarrow 0} \frac{\text{probability}[\Delta P \leq \Delta P(t) \leq \Delta P + \delta(\Delta P)]}{\delta(\Delta P)} \quad (1)$$

확률밀도함수에 대한 비대칭계수(skewness coefficient)와 kurtosis계수는 다음과 같다.

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

$$KU = m_4 / (m_2)^2 \quad (3)$$

여기서 m_2 , m_3 , m_4 는 평균에 대한 2, 3, 4차 모멘트(moment)를 의미하며 정의식은 참고문헌(11)에 나타나 있다.

자기상관함수 (autocorrelation function)는 다음과 같이 정의된다.

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P(t) \Delta P(t + \tau) dt \quad (4)$$

파워 스펙트럼 밀도함수(power spectral density function) $G(f)$ 는 순간차압치가 정상 랜덤 데이터(stationary random data)이면 자기상관함수(autocorrelation function)의 푸리에 변환(Fourier transform)으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (5)$$

$(0 < f < \infty)$

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 기포유동, 플러그유동, 슬러그유동 등의 혼합유동과 성층유동, 파상유동, 환상유동 등의 분리유동에 대한 순간차압치의 확률밀도함수(probability density function), 자기상관함수(autocorrelation function)와 파워 스펙트럼 밀도함수(power spectral density function)를 구하여 그 특성을 분석하였다. 또 이 유동영역간의 천이유동인 pseudo-slug 유동에서의 특성도 구명하였다. 본 연구에서 분석한 통계적 특성을 통하여 유동양식을 판별하였으며 이 결과를 이미 발표된 몇가지 유동양식선도와 비교하여 본 판별법의 신뢰성을 입증하였다. 그리고 본 연구에서 사용한 국부유동 장애물을 통한 차압의 통계적 해석법과 기존의 다른 방법과 비교 분석하였다.

4.1 유동양식에 따른 오리피스차압의 특성

(1) 혼합유동

혼합유동은 기액상의 계면이 다수 존재하여 상(phase)간의 운동량 교환이 매우 활발한 유동으로 기포유동, 플러그유동 및 슬러그유동이 여기에 속한다. 본 실험을 통하여 얻은 혼합유동에 대한 전형적인 확률 밀도함수(PDF), 파워 스펙트럼 밀도함수(PSDF)와 자기상관함수가 Figs. 3~5에 도시되어 있다. 이 그림에서 왼편에 나타난 결과는 직경이 26(mm), 오른편에 도시되어 있는 결과는 직경이 38(mm)에 대한 것이다. 여기서 ΔP^* 는 순간차압치, ΔP 를 액체점압 $\rho_l g l$ 로 무차원화한 값이며 V_{sl} 과 V_{sc} 는 각각 액상과 기상의 겉보기 속도(superficial velocity)이고 $\overline{\Delta P^{*2}}$ 는 무차원 평균자승치(mean square value)를 나타내고 있다. Fig. 3은 기포유동의 결과이다. 기포유동은 기공률이 낮으며 매우 작은 기포가 수평관의 윗부분을 간헐적으로 통과하므로 교란성분이 미미하다. 따라서 PDF는 분포폭이 매우 좁으며 높은 밀도의 단일정점을 나타내며 정점을 중심으로 대칭성을 가진다. 본 연구에서는 기포유동의 PDF가 정규분포에 근접한다는 사실을 확인할 수 있었는데 이 결과는 Lee와 Bankoff⁽¹³⁾의 결과와 잘 일치하고 있다. 순간차압치의 주파수 특성을 나타낸 PSDF를 도시한 그림에서 기포유동의 경우 주파수 범위는 10(Hz) 이하이며 2.5~3(Hz)부근에서 피크스펙트럼(peak

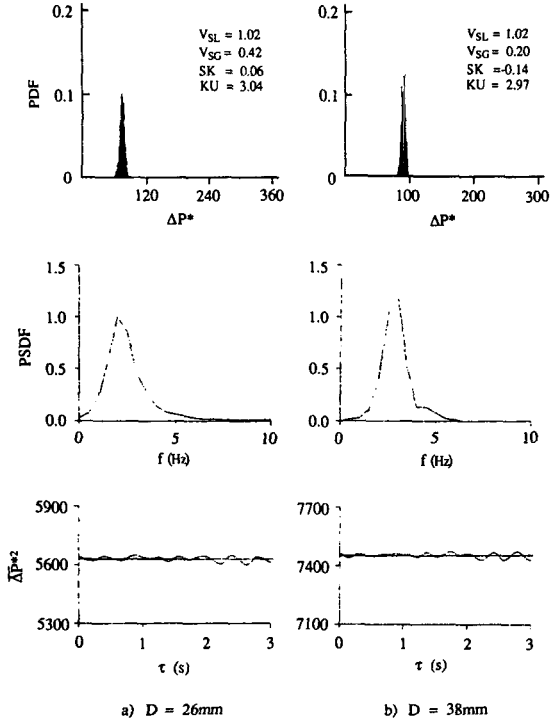


Fig. 3 Typical statistical properties of bubbly flow

spectrum)을 가진다는 사실을 확인할 수 있다. 이 피크치에서의 주파수는 기포유동의 전형적인 값으로 기포의 진행속도와 기포간격의 비를 가능하는 인자로 간주될 수 있다.

Fig. 4는 플러그유동에 대한 결과를 도시하고 있다. 플러그유동은 비교적 길이가 긴 기포와 기포가 거의 포함되지 않은 액체덩어리가 비교적 활발히 교대로 진행되는 유동형태이다. 이 유동에서는 기포간의 결합과 이산이 비교적 활발하므로 순간차압치의 진폭이 커지며 그림에 나타난 바와 같이 PDF의 분포폭이 비교적 넓다. 액체덩어리가 지나갈 때는 높은 차압치를 가지므로 확률밀도함수는 정점을 중심으로 비대칭의 형상으로 나타난다. 따라서 플러그유동의 경우 비대칭계수는 항상 음의 값을 가지는 사실을 확인할 수 있다. PSDF는 근본적으로 기포유동의 경우와 유사하나 그 밀도치는 높은 것으로 나타났다. 이것은 기포유동에 비하여 기상유량이 크므로 순간차압치의 평균자승치(mean square value)가 증가하였기 때문이다.

Fig. 5는 슬러그유동에 대한 결과이다. 이 유동은 많은 기포가 포함된 액체덩어리와 펄름이 큰 기

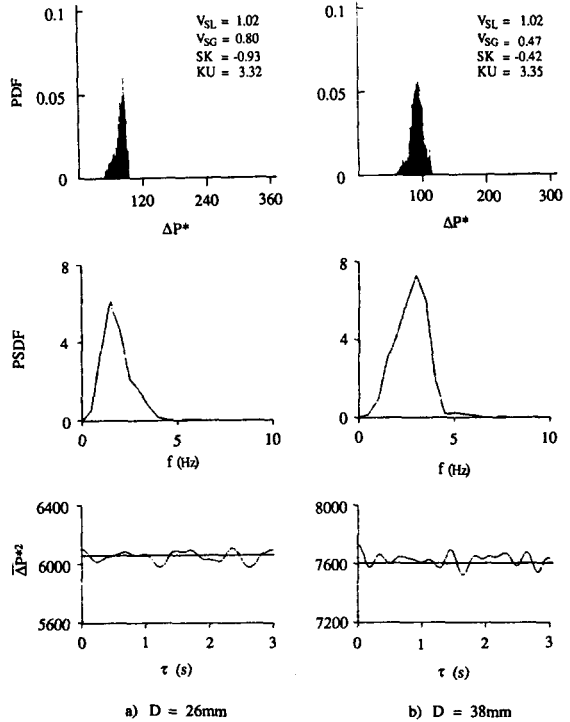


Fig. 4 Typical statistical properties of plug flow

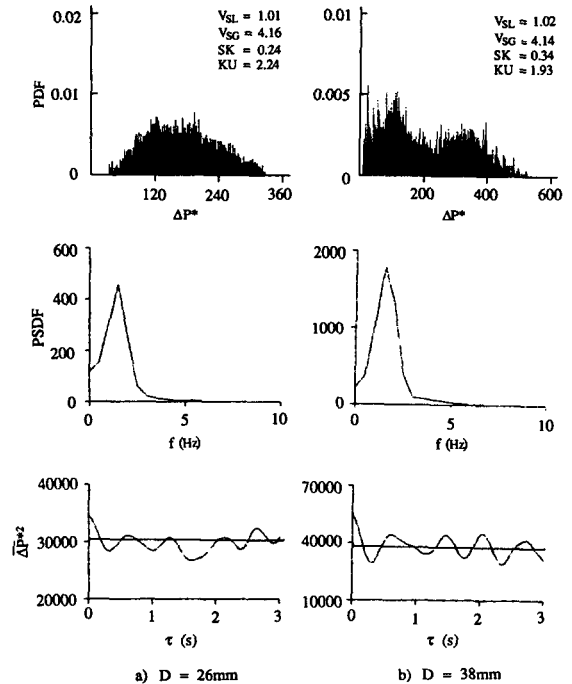


Fig. 5 Typical statistical properties of slug flow

포가 교대로 매우 빠르게 진행되는 유동형태로 진폭이 매우 크며 비교적 규칙적인 순간차압치를 가진다. 따라서 확률밀도함수는 두 개의 봉우리를 가지며 낮은 밀도의 넓은 분포형상으로 나타난다. PSDF의 특성은 플러그유동의 것과 비슷하나 순간차압 폭선이 매우 큰 진폭과 주기성을 가지므로 피크치의 파워는 매우 크고 날카롭게 나타난다. 이러한 분포형상은 Hubbard와 Dukler⁽³⁾의 간헐유동 (intermittent flow)의 실험결과와 유사하다.

이상의 실험결과에서 혼합유동의 기포, 플러그, 슬러그유동의 순간차압치의 통계치인 PDF와 PSDF는 각 유동양식에 따라 독특한 분포특성을 가지며 두개의 관측경에서 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다 한편 자기상관함수는 혼합유동 내에서는 거의 비슷한 형상을 가지나 기포, 플러그 그리고 슬러그 유동으로 바뀔 때 그 절대치는 증가하는 사실을 알 수 있다.

(2) 분리유동

분리유동은 기상과 액상이 하나의 연속적인 계면에 의하여 구분되는 유동으로 성층, 파상, 환상유동이 여기에 속한다. 이 유동영역은 일반적으로 낮은 액체유량에서 관찰되므로 혼합유동에 비하여 순간차압치의 절대치는 매우 작다. 또한 기액상이 분리된 유동형태를 가지므로 시간과 공간에 대한 기공률의 변화는 미미하다. 분리유동에 대한 전형적인 실험결과가 Figs. 6~8에 도시되어 있다. Fig. 6은 성층유동에 대한 결과이다. 성층유동은 관상부에는 기상이 관하부에는 액상이 존재하며 기액상 계면이 매우 매끈하므로 교란치의 절대치는 매우 작다. 따라서 PDF는 단일 정점의 매우 높은 밀도의 분포로 나타난다. 순간차압치의 주파수 특성을 나타낸 PSDF를 도시한 그림에서 성층유동의 PSDF의 파워는 다른 유동양식에 비하여 가장 작고 주파수 범위는 30(Hz)이하이며 주파수 0에서부터 주파수가 증가할 수록 비교적 완만히 감소하는 형태로 나타났다. 이것은 이 유동이 낮은 기액체유량에서만 존재하므로 순간차압치와 교란치의 절대치가 매우 작아 연속적인 교란치의 시간변위가 매우 짧다는 사실을 의미한다. 이러한 사실은 자기상관함수에서도 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 파상유동의 경우이다. 파상유동은 성층유동에서 기상속도가 커질 때 액상계면위에 파가 존재하는 유동형태로 성층유동과 마찬가지로 기공률의 변화가 거의 없으므로 교란성분이 그다지 크

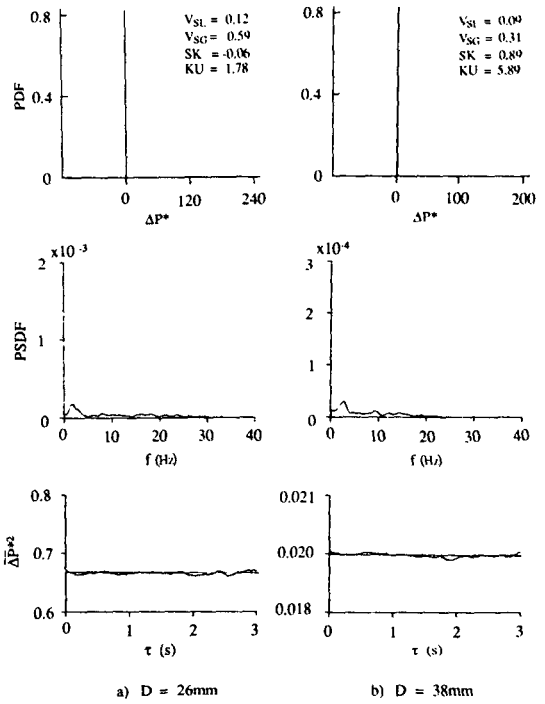


Fig. 6 Typical statistical properties of stratified flow

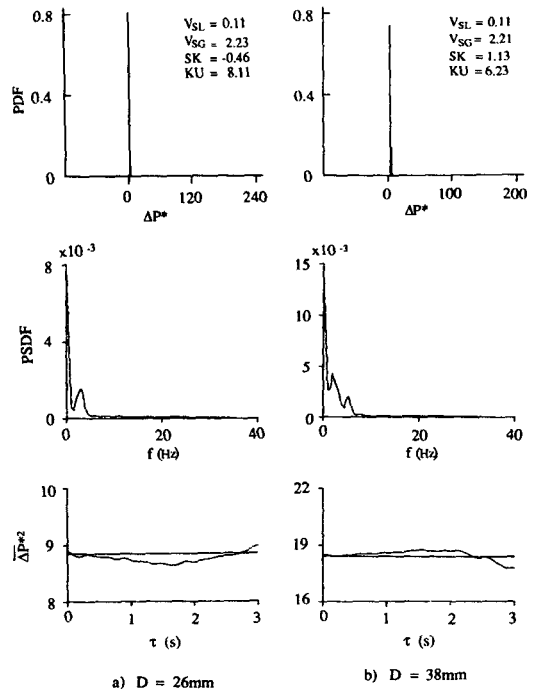


Fig. 7 Typical statistical properties of wavy flow

지 않다. 따라서 PDF는 단일정점의 높은 밀도로 나타난다. 파상유동의 PSDF는 주파수 0에서 피크치를 가지며 주파수가 증가할 수록 감소하는 경향을 가지며 파워는 성층유동 보다는 크고 주파수 범위는 40(Hz)이하이나 지배적인 밀도치를 가지는 주파수 영역은 약 10(Hz)이하에서 존재한다는 사실을 알 수 있었다. 이것은 파상유동은 성층유동과는 달리 계면파에 의하여 차압교란치의 진폭이 커지기 때문이다. 자기상관함수는 성층유동 보다 진폭의 증가로 인하여 평균자승치가 크다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 8은 환상유동에 대한 결과를 도시한 그림으로 공기유량의 제한으로 관직경 26mm에서만 관찰되었다. 환상유동은 파상유동에서 기상속도가 매우 커지면 액상의 파가 찢기어 관상부에도 액막(liquid film)이 형성되는 유동형태를 가지며 교란 성분이 비교적 커진다. 그러나 기액상의 계면이 뚜렷이 분리된 형태로 시간 및 공간에 대한 기공물의 변화가 작으므로 교란치의 절대치는 비교적 작다. 따라서 PDF는 높은 밀도의 단일정점을 나타내며

기포유동의 것과 비슷하나 비대칭계수는 항상 양의 값을 가지며 kurtosis계수는 3이하의 값을 가진다는 사실을 확인할 수 있었다. PSDF의 파워는 파상유동 보다 훨씬 크며 피크치는 파상유동과 같이 주파수 0에서 존재하며 주파수가 증가할 수록 감소하는 경향을 나타내며 파상유동 보다는 넓은 주파수 영역을 가진다. 이것은 빠른 기상속도에 의하여 액상의 계면파가 가속되기 때문으로 판단된다.

이상의 실험결과에서 분리유동의 성층, 파상, 환상유동의 순간차압치의 통계치인 PDF와 PSDF는 각 유동양식에 따라 독특한 특성을 가지며, 특히 PSDF는 혼합유동의 것과는 독특하므로 분리유동 영역과 혼합유동영역을 구분하는데 PSDF만으로도 가능하다는 사실을 제시하고 있다. 그리고 분리유동의 자기상관함수는 혼합유동의 그것과 비교할 때 비교적 완만하게 변하고 두 개의 관직경에서는 유사한 결과를 나타내고 있다는 사실을 알 수 있었다.

(3) 분리유동과 혼합유동의 천이영역

Fig. 9는 pseudo-slug유동에 대한 결과를 도시한 그림이다. pseudo-slug유동은 성층, 파상의 분리유

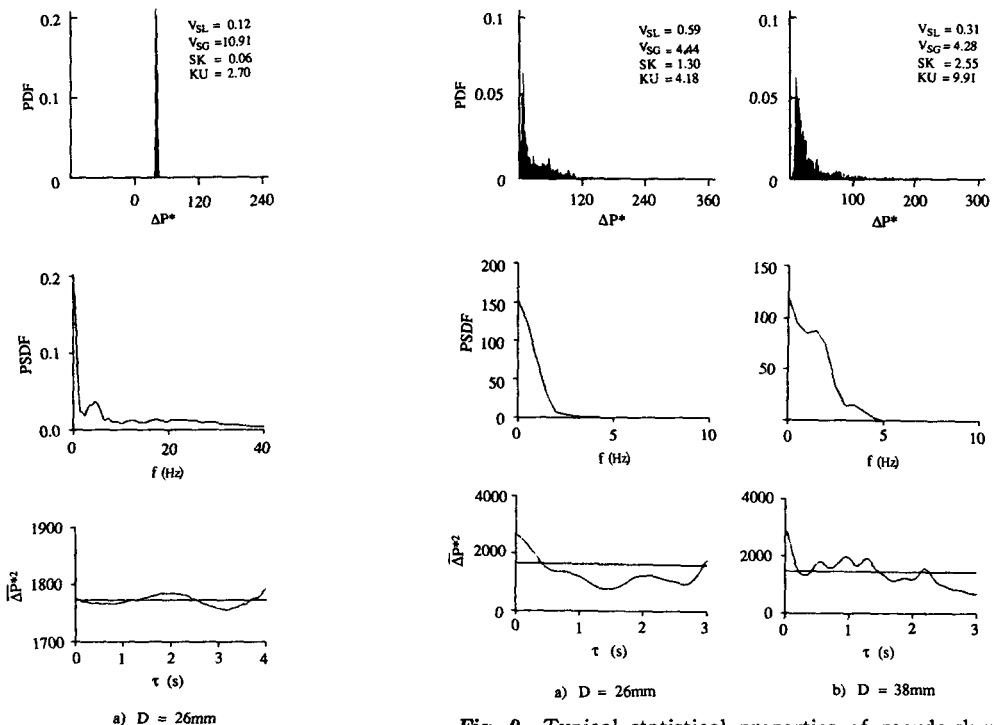


Fig. 8 Typical statistical properties of annular flow

Fig. 9 Typical statistical properties of pseudo-slug flow

동에서 액체유량이 증가하면 슬러그, 플러그유동의 혼합유동으로의 천이과정에서 나타나는 유동형태로 분리된 기액상 계면에 주기적인 액체슬러그가 존재하는 유동형태이다. 따라서 PDF는 $\Delta P^*=0$ 부근의 정점과 낮은 밀도의 넓은 분포형상으로 나타난다. 여기서 ΔP^* 가 0부근의 좁은폭의 정점은 분리된 기상을 나타내고 낮은 밀도의 넓은 분포영역은 액체슬러그의 통과를 의미한다. 따라서 비대칭계수는 항상 양의 큰 값을 가지며 kurtosis계수는 혼합유동에 비하여 큰 사실을 알 수 있었다. PSDF는 분리유동과 비슷한 형태로 주파수 0에서 피크치를 가지며 주파수가 증가할 수록 감소하는 경향을 가지는데 분리유동에 비하여 파위가 매우 크며 10(Hz)이하의 낮은 주파수 영역을 가진다. 자기상관함수는 분리된 기액상계면에서는 완만하고 액체슬러그가 통과할 때는 빠른 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과에 따르면 pseudo-slug유동의 PDF와 PSDF가 분리유동과 혼합유동의 것과 확연히 구분되므로 분리유동과 혼합유동의 경계영역을 pseudo-slug유동으로 확대 구분하여 판별하는 것이 바람직하다.

이상의 결과에서 오리피스에 의한 순간차압치의 PDF와 PSDF는 각 유동양식에 따라 독특한 분포형상을 가지며 동일한 유동양식의 경우 관직경이 달라도 거의 일관된 통계치를 나타내므로 오리피스 순간차압치의 통계적 해석을 통한 유동양식 판별은 관직경이 달라도 적용할 수 있는 신뢰적인 방법임을 암시 한다.

4.2 유동양식선도의 비교

본 연구에서 사용한 유동양식 판별법에 의한 관직경 26mm, 38mm의 수평 기액 2상유동의 실험자료와 Mandhane 등⁽¹⁴⁾, Govier와 Aziz⁽¹⁵⁾와 Hoogendoorn⁽¹⁶⁾의 유동양식선도와 비교한 결과가 Fig. 10에 도시되어 있다. 이 가운데 Mandhane의 유동양식선도가 본 실험자료와 비교적 잘 일치하는 사실을 알 수 있다. 그러나 분리유동과 혼합유동으로의 천이과정에서 성층 또는 파상유동과 플러그 또는 슬러그유동이 공존하는 유동형태인 pseudo-slug유동이 PDF와 PSDF로 확연히 구분되므로 세분하여야 바람직하다고 생각한다. 이상의 실험결과에서 오리피스의 순간차압치의 통계치인 PDF와 PSDF에 의한 유동양식의 판별은 신뢰할 만한 방법으로 간주 될 수 있다.

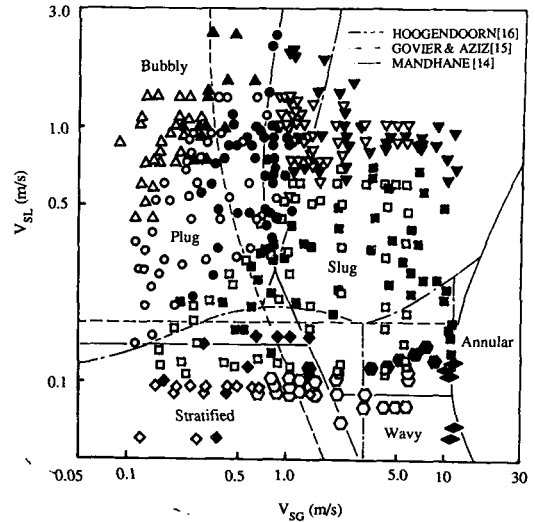


Fig. 10 Comparison of present experimental data for horizontal tube with previously proposed flow pattern maps: Δ ; Bubbly, \circ ; Plug, ∇ ; Slug, \diamond ; Stratified, \circ ; Wavy, \diamond ; Annular, \square ; Pseudo-slug (Solid symbol; $D=26\text{mm}$, Open symbol; $D=38\text{mm}$)

4.3 차압교란치를 이용한 타 방법과의 비교

유동양식을 판별하는데 압력교란치를 이용하는 방법이 여러 연구가들에 의하여 시도되었다. 본 연구에서 제시한 판별법을 이들의 방법과 비교하여 본 판별법의 우수성을 검토하는 것은 가치있는 일로 판단된다. Weisman 등⁽⁴⁾은 유동방향의 15cm간격의 두 측정점 사이의 압력강하교란치를 오실로그래프(oscillograph)로 추적하여 유동양식에 따른 진폭과 진동수를 비교하여 유동양식 판별을 시도하였다. 이들의 실험결과에서 플러그유동과 파상유동의 압력강하교란치의 순간파형이 매우 유사하여 두 유동양식을 구분하기는 어려우나, 압력강하교란치를 통한 유동양식 판별의 가능성을 제시하였다. 그러나 이들의 방법은 관직경의 크기에 상관없이 두 측정점의 길이를 일정하게 두므로 유동조건 및 기하학적 형상이 달라질 경우 시간 및 공간에 따른 기공률의 변화로 초래되는 압력강하교란치의 순간파형의 정확한 검출에 대한 신뢰성에 문제점이 제기된다. Tutu⁽⁵⁾는 수직관에서 축방향에서 관직경의 1/2의 길이 사이의 압력강하교란치의 확률밀도함수로서 유동영역을 구분할 수 있다는 사실을 밝혔다. 이 연구에서는 단일직경의 관에 대한 확률밀

도함수만을 다루었으며 기포, 슬러그, 처언 및 환상유동에 대한 제한된 통계치를 제시하는데 그쳤기 때문에 측정지점의 간격의 변화에 따른 영향을 고찰하지 못하였다. Matsui는 수직관⁽⁶⁾에서 압력측정의 간격과 위치에 따라 확률밀도함수의 형상이 달라진다는 흥미로운 사실을 제시하였고, 수평관⁽⁷⁾에서 유로 단면의 상하차압교란치의 통계치인 확률밀도함수와 스펙트럼 밀도함수로 유동양식 판별을 시도하였다. 그의 실험자료에 의하면 기포유동과 환상유동의 구분이 불가능하고, 플러그유동과 환상유동의 스펙트럼 밀도함수의 분포형상이 유사한 실험결과를 나타내었다. 또 이들이 사용한 유로단면 상하차압의 통계치를 통한 유동양식 판별방법은 플러그유동과 슬러그유동, 슬러그유동과 환상유동의 천이영역을 구분하는 데 미흡한 실험결과를 보여주고 있다. 이상의 연구자들이 사용한 방법은 두 측정점 사이의 압력강하가 주로 마찰에 의한 압력강하이므로 순간압력강하치의 절대치가 작다. 따라서 이 방법에서는 압력강하를 측정하는 계측기의 분해능(resolution)이 측정치의 정확도에 미치는 영향이 크며 외부 잡신호(noise)를 제거하는 정교한 기술이 필요하다. 또한 압력강하교란치의 통계적 해석을 통하여 유동양식을 판별하는데 압력차를 측정하는 관내 두 지점의 간격도 중요한 인자로 판단되므로 이에 관한 문제점이 제기될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 관내 유로에서 설치된 국부 유동장애물을 통한 차압의 통계적 해석법을 이용하여 유동양식의 판별을 시도하였다. 오리피스에서의 압력강하특성은 vena contracta에서 유동양식이 국부적으로 변화했다 하더라도 관내의 유동양식과 독자적인 상관관계를 가진다는 사실이 실험을 통하여 확인되었다.⁽⁸⁾ 그리고 오리피스에서의 차압치는 마찰에 의한 차압치보다 훨씬 크기 때문에 각 유동양식에 따른 차압교란치의 특성이 뚜렷이 나타나는 장점이 있다. 본 연구에서는 이 등⁽⁹⁻¹¹⁾의 실험결과에서 기포유동과 환상유동을 확률 밀도함수만으로 판별이 어려운 점을 보완하고, 각 유동양식에 따른 주파수 특성을 나타내는 스펙트럼 밀도함수와 시간특성을 나타내는 자기상관함수를 구하여 확률 밀도함수와 함께 유동양식을 판별함으로써 그 신뢰성을 더 하였다. 또한 관직경이 다른 경우에도 오리피스의 차압교란치의 통계적 특성치가 유사한 결과치를 가지므로써 본 연구에서 사용한 유동양식 판별법은 신뢰할 만

한 방법임을 입증하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 물과 공기를 매질로 하는 관직경 26mm와 38mm인 수평 동류 기액 2상유동에서 오리피스의 순간차압치의 통계적 해석을 통하여 유동양식 판별을 시도하였다. 각 유동양식에 따라 확률밀도함수와 파워 스펙트럼 밀도함수가 독특한 분포형상을 가지며, 또한 자기상관함수로 기포, 플러그, 슬러그유동의 혼합유동과 성층, 파상, 환상유동의 분리유동의 구분이 가능하다는 사실을 알 수 있었다. 특히 분리유동과 혼합유동의 천이과정에 나타나는 pseudo-slug유동도 순간차압치의 통계적 특성치로 구분이 가능하다는 사실을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용한 유동양식 판별법으로 얻은 실험자료와 이미 발표된 유동양식선도와의 비교 및 본 판별법과 차압교란치를 이용한 타 방법과의 비교분석을 통하여 본 판별법이 객관적이며 신뢰할 만한 방법임을 입증하였다. 이상의 실험 결과로부터 오리피스의 순간차압교란치의 통계적 특성은 유동양식을 판별하는데 매우 유용하게 이용될 수 있으며, 관직경이 다른 경우에도 이러한 통계적 특성치가 일관성을 가지므로 본 판별법은 관직경이 달라도 사용할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

- (1) Jones, O.C. and Zuber, N., 1975, "The Interrelation between Void Fraction Fluctuations and Flow Pattern in Two-Phase Flow", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 273-306.
- (2) Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y., 1980, "Flow Pattern Characterization in Two-Phase Flow by Electrical Conductance Probe", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 6, pp. 387-397.
- (3) Hubbard, M.G. and Dukler, A.E., 1966, "The Characterization of Flow Regimes in Horizontal Two-Phase Flow", *Proc. Heat Transfer and Fluid Mechanics Inst., Stanford University*.
- (4) Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J. and Crawford, T., 1979, "Effects of Fluid Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Pattern in Horizontal Lines", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 5, pp. 437-462.
- (5) Tutu, N.K., 1982, "Pressure Fluctuations and Flow

- Pattern Recognition in Vertical Two Phase Gas-Liquid Flows", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 8, pp. 443~447.
- (6) Matsui, G., 1984, "Identification of Flow Regimes in Vertical Gas-Liquid Two-Phase Flow using Differential Pressure Fluctuations", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 10, pp. 711~720.
- (7) 松井剛一, 逢澤俊彦, 森田章靖 1987, "水平管内氣液二相流の差壓變動の統計的性質と流動様式(流路斷面上下差壓の場合)", *日本機械學會論文集 B編*, 第52卷, 第478號, pp. 2337~2344.
- (8) 松井剛, 逢澤俊彦, 1987, "水平管内 氣液二相流の壓力降下變動の統計的性質と流動様式", *日本機械學會論文集 B編*, 第53卷, 第485號, pp. 144~148.
- (9) 이상천, 이정표, 김중엽, 1987, "오리피스 순간압력강하의 통계적해석을 통한 수평 2상유동양식의 결정", *대한기계학회논문집*, 제11권, 제5호, pp. 810~818.
- (10) 이상천, 이정표, 김중엽, 1988, "수평 기액2상유동에서 유동양식의 천이특성", *공기조화 및 냉동공학회 논문집*, 제17권, 제4호, pp. 342~349.
- (11) 이상천, 이정표, 김중엽, 1988, "순간압력강하치의 통계적해석을 통한 경사관내 2상유동양식의 판별", *공기조화 및 냉동공학회논문집*, 제17권, 제5호, pp. 590~597.
- (12) ASME, 1971, *Fluid Meters: Their Theory and Applications*, chap. 2, 6th ed., New York.
- (13) 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, Hemisphere Publishing Co., New York, pp. 163~173.
- (14) Mandhane, J.M., Gregory, G.A. and Aziz, K., 1974, "A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 537~553.
- (15) Govier, G.W. and Aziz, K., 1972, *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*, Van Nostrand Reinhold, New York, p. 503.
- (16) Hoogendoorn, C.J., 1959, "Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes", *Chem. Engng. Sci.*, Vol. 9, pp. 205~217.