

<論 文>

차압유량계를 이용한 기액 2상유량 및 건도의 동시측정 가능성에 관한 연구

이상천* · 오홍희** · 김중엽*

(1986년 1월 31일 접수)

A Feasibility Study of Simultaneous Measurement of Gas-Liquid Two-Phase Flowrate and Quality with a Sharp-Edged Orifice

Sang Chun Lee, Hong Hee Oh and Jung Yuep Kim

Key Words: Gas-Liquid Two-Phase Flow(기액 2상유동), Instantaneous Pressure Drop Curve
(순간압력강하곡선), Total Flowrate and Quality(총유량 및 건도), Simultaneous
Measurement(동시측정), Sharp-edged Orifice(칼날 오리피스)

Abstract

The feasibility of simultaneous measurement of gas-liquid two-phase flowrate and quality with a sharp-edged orifice has been investigated. Instantaneous pressure drop curves were monitored for various combinations of gas and liquid flowrates in the bubbly flow regime and some statistical properties of the curves were calculated.

The time-averaged value of pressure drop increases with increasing gas and liquid flowrate, whereas the mean amplitude and the intensity of fluctuation monotonically increase as void fraction becomes larger in the flow regime. The statistical functions for the instantaneous curves indicate a consistent pattern throughout the flow regime and the probability density function, which has a single-peaked and symmetrical distribution, is well predicted by the Gaussian distribution function. The results indicate that simultaneous determination of two-phase flowrate and quality may be possible based upon the statistical analysis of instantaneous pressure drop curves measured in a sharp-edged orifice.

1. 서 론

기액 2상유동에서 총유량과 건도의 정확한 측정은
압력강하, 기공율(void fraction)등 유동변수의 결정뿐
아니라 유동의 열유체역학적 거동해석을 위하여 중요

하고 필수적인 과제이다. 2상 유동량의 측정에는 터
어빈 유량계(turbine flowmeter), 초음파 유량계(ultrasonic flowmeter), 차압 유량계(differential pressure flowmeter)등과 같이 단상유동(single-phase flow)에 쓰이는 여러 형식의 유량계가 사용되지만 이 가운데 벤츄리관 또는 오리피스관으로 대표되는 차압 유량계가 비교적 다루기가 용이하고 경제적이기 때문에 많이 이용되고 있다.

* 정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

** 영남대학교 대학원 기계공학과

차압 유량계를 통한 2상유동 압력강하에 관한 연구는 1960년대 초에 Murdock⁽¹⁾에 의하여 본격적으로 시작된 후 활발하게 진행되어 왔다. 그는 오리피스관을 통하여 분리유동(separated flow)이 일어나는 경우, 2상유동 압력강하, ΔP_{TP} 를 단상유동의 압력강하, ΔP_G 와 ΔP_L 로 아래와 같이 표시하였다.

$$\sqrt{\Delta P_{TP}/\Delta P_G} = K \sqrt{\Delta P_L/\Delta P_G} + 1 \quad (1)$$

식(1)에서 K 는 Murdock이 도입한 실험상수로 유동형태 또는 매질등에 따라 달라지며 완전 분리유동의 경우 $K=1$ 이다. 또 Chisholm과 Rooney⁽²⁾는 분리유동시 계면을 통한 기액상 간의 상호작용을 고려하여 식(2)와 같은 상관식을 발표하였다.

$$\Delta P_{TP}/\Delta P_L = 1 + c \sqrt{\Delta P_G/\Delta P_L} + \Delta P_G/\Delta P_L \quad (2)$$

여기에서 c 는 기액상의 속도비와 밀도비의 함수로 표시되는 값이다. 이 외에도 Fouda와 Rhodes⁽³⁾, Collins와 Gacesa⁽⁴⁾, 그리고 Smith 등⁽⁵⁾도 위와 유사한 실험식 또는 2상유동의 압력강하와 총유량 및 건도의 상관식을 제시하였다.

그러나 이러한 실험식을 살펴 보면 2상유동의 경우, 단상유동과는 달리 평균압력강하치의 측정만으로 기상 또는 액상의 유량을 독자적으로 결정할 수 없다는 사실을 알 수 있다. 즉 기상 또는 액상유량(동일한 의미로 총유량 또는 건도)중 하나의 값을 미리 알고 있어야 평균압력강하의 측정으로 나머지 하나의 값을 결정할 수 있다. 이 까닭은 근본적으로 측정량은 평균압력강하치의 하나인데 비하여 결정하여야 할 유동량은 두 개이기 때문이다. 따라서 총유량 또는 건도중 하나의 값을 미리 알지 못하는 경우, 기액상을 분리하여 유량을 측정하거나⁽⁶⁾ 형식이 다른 두 개의 유량계를 사용하는⁽⁷⁾ 불편을 겪어 왔다.

이러한 불편을 덜기 위하여 차압 유량계에서 측정된 순간압력강하 곡선의 통계적 해석을 통한 총유량 및 건도의 결정은 시도할 만한 가치가 있을 것이다. 기액 2상유동에서 유동변수들은 일반적으로 시간에 따라 변화하므로 시간에 대한 평균치와 순간 변화량인 교란치의 합으로 표시된다. 2상유동 해석에 있어서 보통 평균치만을 많이 사용하나 교란성분도 유동의 특성을 구명하는 중요한 단단이 될 수 있다. 교란치의 통계적 해석을 통하여 유동형태(flow regime)의 판별이나 천이(transition)현상의 파악등 2상유동의 특성을 구명한 예는 Tutu⁽⁸⁾와 Weisman 등⁽⁹⁾에서 발견할 수 있다.

Fig. 1을 차압 유량계를 통하여 2상유동이 존재하는 경우 측정된 전형적인 순간압력강하 곡선의 예를 도시한 것이다. 이 그림에 나타난 바와 같이 순간압력

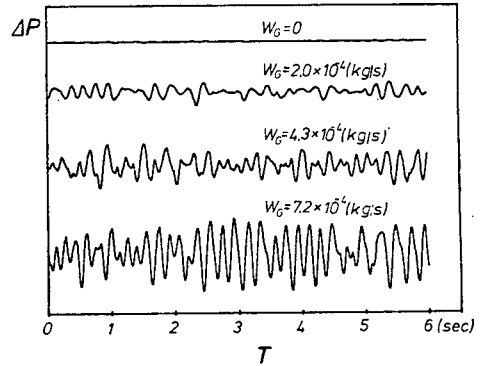


Fig. 1 Typical instantaneous pressure drop curves for constant liquid flow rate ($W_L=0.96$ kg/s)

강하치는 기액상 유량의 변화에 매우 민감하며 펄핑의 정도가 달라진다. 여기에서 순간곡선의 평균치와 교란성분의 통계적 특성치로 기액 2상유동의 두개의 유동량을 결정할 수 있는지의 여부는 큰 관심거리가 될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 가능성을 알아 보기 위하여 오리피스관을 통하여 기액 2상흐름이 있을 때 각 상의 유량변화에 따른 순간압력강하치를 분석하고자 한다. 우선 평균압력강하치를 측정하여 식(1)과 비교 분석하며, 교란치의 평균진폭과 교란강도를 구하여 기공율의 변화에 따른 이러한 통계치들의 경향을 고찰한다. 그리고 순간압력강하 곡선에 대한 통계함수들, 확률밀도함수(probability density function)와 자기상관함수(auto-correlation function)을 구하여 이들의 통계적 성질을 구명하고 2상 유동량의 결정에 대한 교란치의 활동도를 토의한다.

2. 실험

본 실험에서 사용한 유동매질은 물과 질소가스이며 실험장치의 개략도는 Fig. 2에 도시되어 있다. 이 그림에 나타난 바와 같이 실험장치는 물탱크, 순환펌프, 서어지 탱크, 바이패스관 및 압축가스 탱크로 구성되어 있다. 물탱크는 1000 l 용량으로 대기중에 개방되어 있다. 탱크에 저장된 물은 원심식 펌프에 의하여 내경 3.55 cm의 강관속을 순환하며 유량은 조절밸브 및 바이패스관에 부착된 밸브로 조정한다. 서어지 탱크는 펌프에 의하여 발생될 수 있는 유동의 교란을 제거하기 위하여 설치하였다. 순수 액체유량은 서어지 탱크 뒤에 위치한 관직경 1.9 cm, 판두께 3.2 mm, 직경비

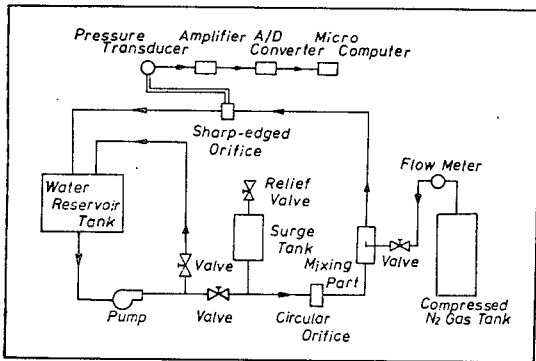


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

0.535 인 둥근 오리피스에 의하여 측정된다.

질소가스는 32l 용량의 압축가스 탱크로 부터 공급되며 유량은 부력식 유량계에 의하여 측정된다. 물과 질소가스의 혼합은 Fig. 2에 도시된 바와 같이 수직관의 중심선을 따라 평행하게 배열된 직경 4mm의 분출관을 통하여 이루어진다. 이 혼합부에서 수직거리 1.3m, 수평거리 1.5m 떨어진 지점에 2상 유동량을 측정하는 칼날 오리피스(sharp-edged orifice)가 위치하고 있는데 이 오리피스는 직경 2.7cm, 판직경 1.47cm, 판두께 7.6mm, 직경비 0.544, 그리고 오리피스 각 45°이다.

실험은 실온에서 행하였으며 액체유량의 범위는 0.86~1.32(kg/s)이며 기체유량은 $0.86 \times 10^{-4} \sim 7.19 \times 10^{-4}$ (kg/s)의 범위내에서 조절되었는데 이 유량범위는 기포유동(bubbly flow)에 속한다⁽¹⁰⁾.

오리피스관을 통하여 흐르는 2상유량의 순간압력강하는 압력변환기 및 증폭기를 거쳐 12-bit A/D 변환기와 연결된 마이크로 컴퓨터로 측정된다. 이 과정에서 고주파수를 가지는 잡신호는 low-pass filter를 사용하여 제거하였다. 본 실험에서 사용한 차압용 압력변환기는 스트레인 게이지 형식인 KYOWA PD-1 KA Model로 0.1 MPa 까지 측정범위를 가지며 고유진동수는 200 Hz이다. 본 실험에 앞서 수주를 이용한 차압장치로 압력변환기와 증폭기의 보정실험을 수행한 결과 압력차와 출력볼트는 선형의 관계임을 확인하였다. 본 실험시 표본회수는 초당 200개로 하였으며 표본시간은 10초로 각 실험당 4번의 반복측정을 하여 순간압력강하곡선들을 플러피 디스크에 저장하였다. 저장된 실험자료로부터 평균압력강하치, 교란치의 평균진폭 그리고 교란강도를 계산하였으며 또 순간곡선의 통계적 특성을 알아 보기 위하여 자체적으로 만든 프로그램으로

확률밀도함수와 자기상관함수를 구하여 분석하였다.

3. 실험자료의 통계적 처리

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

$$\Delta P(t) = \overline{\Delta P} + \Delta P' \quad (3)$$

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

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

이 식에서 T 는 측정시간을 나타낸다. Random data인 ΔP 가 ergodic process 이라면 식(4)의 시간에 대한 평균치는 ensemble 평균치와 같아진다. 순간압력강하치의 평균진폭(mean amplitude)과 교란강도(fluctuation intensity)는 다음과 같이 주어진다.

$$|\overline{\Delta P'}| = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |\Delta P - \overline{\Delta P}| dt \quad (5)$$

$$\Delta(\Delta P') = \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\Delta P - \overline{\Delta P}]^2 dt \right\}^{1/2} \quad (6)$$

순간압력강하치가 어떤 특정한 범위내에 있을 확률을 확률밀도함수로 표시할 수 있는데 만약 Gauss 분포곡선을 따른다면 확률밀도함수 PDF(ΔP)는 다음과 같다.

$$PDF(\Delta P) = \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{1}{\Delta(\Delta P')} \exp \left\{ -\frac{[\Delta P - \overline{\Delta P}]^2}{2[\Delta(\Delta P')]^2} \right\} \quad (7)$$

그리고 random data의 한 순간치와 다른 순간치의 상관관계를 나타내는 자기상관함수는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P(t) \Delta P(t+\tau) dt \quad (8)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 평균압력강하치

본 실험에서 얻은 유량 변화에 따른 질소가스-물의 평균압력강하치가 Fig. 3에 도시되어 있다. 본 실험 영역에서는 액체유량이 일정할 때 기체유량이 증가함에 따라 평균압력강하치는 단조 증가함을 알 수 있으며 또 기상유량이 고정되어 있을 경우, 액상유량과 평균압력강하치도 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이 결과는 식(1) 또는 (2)가 나타내는 경향과 일치하고 있다. 이 실험치를 식(1)과 비교하여 상수 K 를 최소자승법(least-squares technique)으로 구한 결과 $K=1.02$

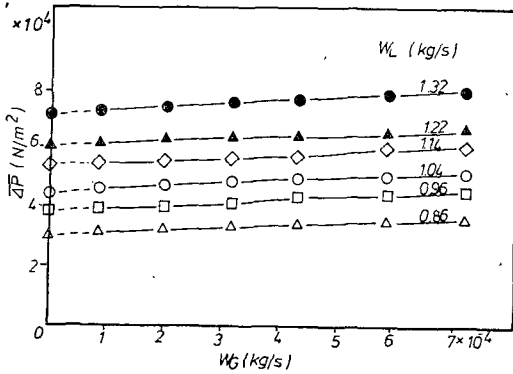


Fig. 3 Time-averaged pressure drop data

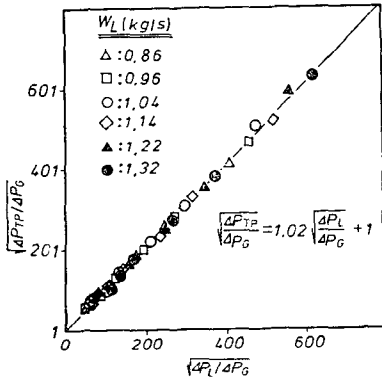


Fig. 4 Comparison of experimental data with eqn (1)

로 나타났는데 그 편차는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 5% 미만이다. 본 실험에서는 건도가 1% 이하이므로 평균압력강하치는 기상유량에 거의 영향을 받지 않으며 액상유량에 달려 있다고 말할 수 있으므로 K 가 1에 근사한 값을 가지는 것이 타당하다.

최근에 Lin⁽¹¹⁾은 K 를 밀도비의 다항식으로 표시되는 상관식을 발표하였는데 이 식에 따르면 본 실험에 사용한 매질(밀도비: 0.00173)의 경우 $K=1.47$ 로 산정된다. 이 값은 본 연구에서 구한 값과 상당한 편차가 존재하는데 이 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. 우선 Lin의 상관식은 K 를 밀도비의 함수로만 보았는데 이것은 계면을 통한 운동량 교환 등 기액상 사이의 상호작용이 없다는 가정하에 성립되므로 타당성이 희박하며 실제적으로 밀도비 뿐만 아니라 건도에 따른 함수로 보여 진다⁽²⁾. 또 이 상관식은 수증기-물과 기액 R-113의 두 매질에 대한 실험자료에 근거를 둔 것으로 다른 매질에 확대 적용하는 것이 온당치 않을지 모른다. 이러한 관점에서 Lin의 상관식은 보완되거나 수정되어야 할 것으로 사료된다.

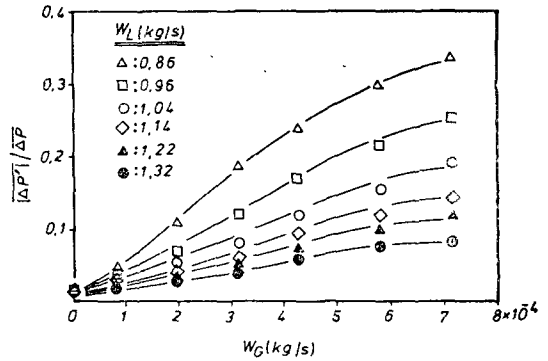


Fig. 5 Data of normalized mean amplitude

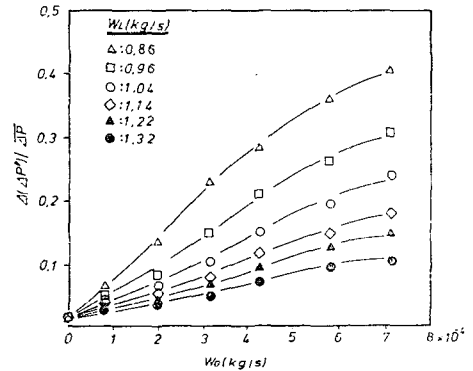
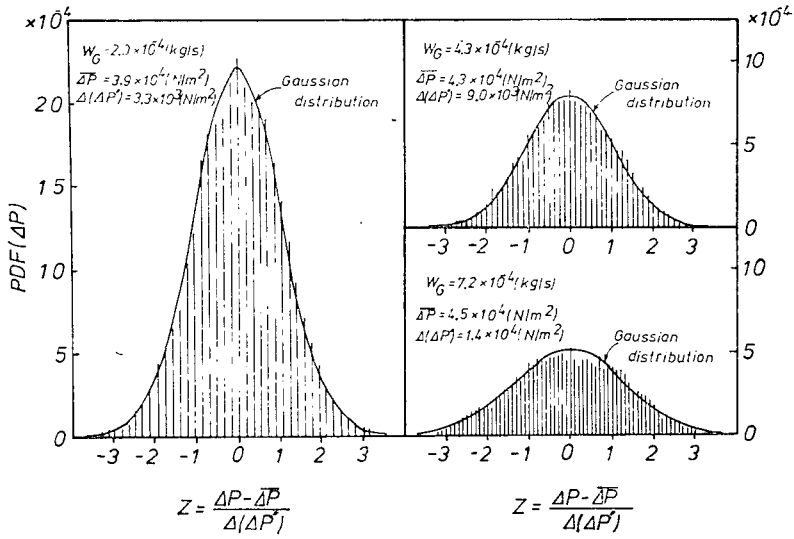


Fig. 6 Data of normalized fluctuation intensity

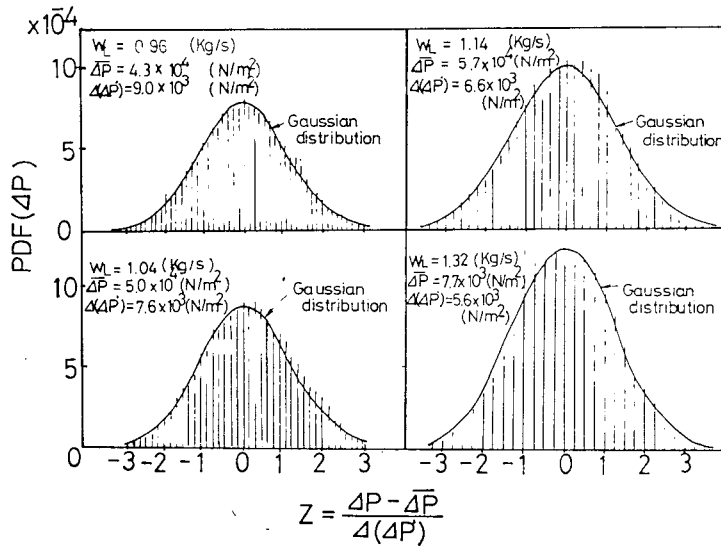
4.2 교란성분의 통계치

교란치의 구성성분은 일반적으로 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 하나는 2상유동의 특성에 따라 존재하는 고유성분이며 나머지 하나는 파이프 시스템 또는 장치등과 관련된 현상적인 성분이다. 본 실험에서는 오리피스판을 사이에 둔 두 지점의 압력차를 측정하였기 때문에 현상적인 교란성분은 상쇄되는 것으로 간주할 수 있다. 이것은 Fig. 1 또는 Fig. 5에 도시된 바와 같이 액체유동만 존재할 때 순간압력강하치의 평균진폭은 압력강하치의 0.6~0.8%에 그치고 있는 사실에서 확인할 수 있다.

교란성분에 관한 통계치로 식(5)와 (6)에 정의된 평균진폭 및 교란강도를 계산하였다. Fig. 5와 6은 평균진폭과 교란강도를 평균압력강하치로 무차원화시킨 후 기액상 유량과의 상관관계를 도시한 것이다. 여기에서 $|\Delta P'|/\Delta P$ 와 $\Delta(\Delta P')/\Delta P$ 는 같은 경향을 갖고 있는데 액상유량이 일정한 경우, 기상유량이 증가할수록 이 무차원 값들은 단조 증가하며 증가비는 액상유량과 반대경향을 나타내고 있다. 기상유량이 고정된 경우 평균압력강하치와는 달리 액상유량이 증가할 수



(a) for constant liquid flow rate ($W_L=0.96 \text{ kg/s}$)



(b) for constant gas flow rate ($W_G=4.31 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$)

Fig. 7 Typical probability density functions

록 무차원 평균진폭 및 교란강도는 감소한다. 따라서 기공율이 증가 할수록 교란치의 통계치들은 상승하는데 이것은 기포의 수가 증가하여 기포 상호간 결합 및 이산이 활발하여 지기 때문이다. 이 사실은 공기-물 2상유동에서 순간압력강하의 제곱근 평균치 (root-mean-square)는 slug-churn의 천이영역까지 계속 증가한다는 Chaudbry 등⁽¹²⁾의 실험결과와 일치하고 있다. 이 그림에서 흥미있는 것은 평균진폭 또는 교란강도가 평균치의 30~40%에 이르고 있다는 사실이다. 이것은

2상유동의 평균압력강하치를 측정하기 위하여 보편적으로 사용되어 왔던 마노미터방식의 정확도에 문제가 있다는 것을 시사하여 준다.

4.3 순간압력강하 곡선의 통계함수

순간압력강하 곡선들의 정성적 특성을 파악하기 위하여 확률밀도와 자기상관함수를 구하였다. 이러한 통계함수들은 순간곡선의 진폭 및 시간변화에 따른 특성 파악뿐 만 아니라 유동형태의 판별에도 이용할 수 있다.

본 실험에서 행한 36개의 실험조건에 대한 순간 곡선들의 확률밀도함수를 구한 결과, 거의 동일한 분포를 가지고 있음을 알 수 있었는데 Fig. 7은 이들중 몇개의 전형적인 밀도함수를 도시한 것이다. 여기에서 기포유동의 확률밀도함수는 평균치 주변에 단일정점(single peak)를 가지며 이 정점을 중심으로 좌우대칭의 분포를 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 기공을 또는 전도가 증가 할수록 정점 부근의 밀도함수치는 낮아지고 분포도가 넓어지는데 이는 교란강도가 증대되는 것을 의미한다. 이 결과는 Tutu의 실험결과⁽⁸⁾와 일치하는데 그는 기포유동내 확률밀도함수는 단일정점을 가지는 대칭분포를 가지나 slug 유동으로 옮기는 중에는 새로운 봉우리가 형성되어 두 개의 정점을 가지는 분포라는 것을 알아 냈다. 따라서 본 실험과 같이 비록 전도가 낮은 기포유동에서 얻은 결과라 할지라도 Fig. 7의 분포곡선은 전도가 큰 기포유동에도 적용될 수 있음을 짐작할 수 있다. 또 Fig. 7은 기포유동의 확률밀도함수가 Gauss 분포곡선과 잘 일치함을 보여 주고 있는데 이 사실에서 순간 곡선들의 진폭은 기액상 유량에 따라 변하나 정성적으로 일관된 분포를

갖는다는 것을 알 수 있다.

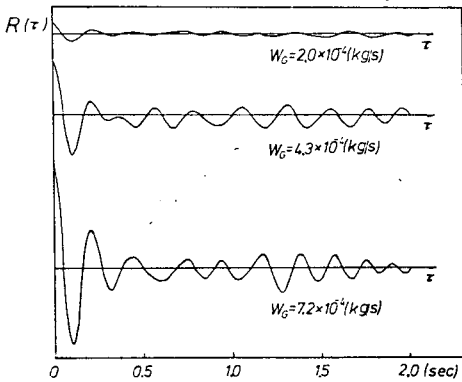
본 실험에서 구한 전형적인 자기상관함수가 Fig. 8에 도시되어 있다. 이 그림은 순간압력강하 곡선에서 한 순간치의 다른 순간치에 대한 상관도를 표시한 것으로 어떤 순간치가 장래치에 미치는 영향을 고찰하는데 이용된다. 여기에서 $R(0)$ 는 순간압력강하의 평균제곱치(mean square value)를 의미하므로 이 그림에서 보통 기상유량이 증가할 수록 세로축의 절편값이 커지는 것은 합당하며 τ 가 아주 커질 때, $R(\tau)$ 는 평균압력강하치의 제곱치에 접근한다. 기상유량이 변할 때, 자기상관함수의 절대치의 크기만 달라질 뿐 시간의 경과에 따른 감쇄 경향과 주파수 특성은 일관성이 있음을 알 수 있는데 나머지 순간곡선들에 대해서도 동일한 결과를 얻었다.

5. 토 의

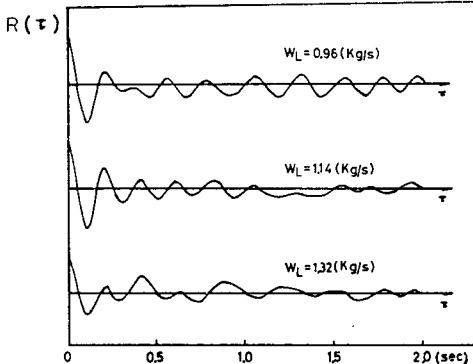
본 연구를 통하여 기포유동 영역인 경우 오리피스에서 순간압력강하 곡선은 통계적으로 일관된 성향을 가지며 교란성분의 평균진폭과 교란강도는 기공률에 대하여 단조 증가한다는 사실이 밝혀 졌다. 따라서 순간압력강하의 평균치와 평균진폭(또는 교란강도)은 기상 및 액상유량과 독자적인 상관관계(unique relation)에 있는 것으로 추정되며, 순간곡선의 통계적 해석을 통한 2상유량 및 전도의 동시 측정은 가능한 것으로 사료된다.

그러나 이러한 교란치의 통계해석이 실제적 의미를 갖기 위하여 우선측정된 순간곡선에 대한 통계치의 합당성이 전제되어야 한다, Fig. 1에 도시된 순간압력강하 곡선을 살펴 보면 이들이 stationary random process의 특징을 가지고 있다는 것을 알 수 있다⁽¹³⁾. 앞에서 언급 하였지만 본 실험에서는 주어진 기액상 유량 조건하에 네번의 반복측정을 하였는데, 각 표본의 시간에 대한 평균치 및 교란성분의 제 통계치를 구한 결과 이들이 거의 일정한 사실을 알아 내었다. 이 순간곡선들을 따라서 ergodic random process로 간주될 수 있으며 측정시간이 충분히 길다면 순간압력강하 곡선의 시간에 대한 통계치를 ensemble 통계치 대신에 현상구명에 사용하여도 무방하다.

그리고 순간압력강하는 2상유동이 완전히 확립된 영역(fully-developed region)에서 측정되어야 하는데 이는 기액상 혼합방식등 외부요인에 의한 영향을 배제하기 위하여서다. 2상유동에서 완전확립을 이루기에 필요한 관절이에 대한 체계적인 연구가 아직까지 없으



(a) For constant liquid flow rate ($W_L=0.96$ kg/s)



(b) For constant gas flow rate ($W_G=4.31 \times 10^{-4}$ kg/s)

Fig. 8 Typical auto-correlation functions

켜 단편적인 실험결과만을 문헌에서 발견할 수 있다. Hewitt⁽¹⁴⁾은 entrainment가 동반된 환상유동(annular flow)의 경우 이 길이는 관직경의 수백배가 될 것으로 추정하였으며 slug 유동에서는 Griffith와 Wallis⁽¹⁵⁾가 관직경의 200 배 정도 된다는 것을 관찰하였다. 최근에 Sim과 Lahey⁽¹⁶⁾는 삼각관을 사용하여 기포유동의 상 분포(phase distribution)를 측정한 결과 길이와 수력 직경의 20 배에 이르러도 유동히 완전히 확립된다는 사실을 밝혀 냈다. 이 결과에서 완전확립거리는 유동 상태에 따라 달라지는 것을 알 수 있는데 본 실험과 같이 건도가 1% 미만인 기포유동의 경우, 관직경의 수 십배에 불과한 것으로 추정된다. 본 연구에서는 이 점을 고려하여 혼합거리를 직경의 90 배로 잡았기 때문에 혼합방식이 교란성분의 통계치에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 사료된다.

본 연구에서 얻은 2상유량 및 건도의 동시측정 가능성에 관한 결과를 토대로 이 분야에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 우선 각 유동형태에 대한 완전확립을 이루기 위한 거리에 관한 실험적 고찰이 선행되어야 하며 성층, 환상, slug 유동등 제 유동영역에 대하여 차압유량계를 통한 순간압력강하 곡선의 통계적 해석이 뒤따라야 할 것이다. 그리고 매질의 종류, 물성치등에 따른 영향이 고찰되어야 하며 관직경, 관경사각등 기하학적 조건에 따른 통계치의 특성파악도 이루어져야 할 것으로 생각된다.

6. 결 론

본 연구에서 기액상 유량변화에 따른 오리피스의 순간압력강하치를 측정 분석하였으며 이 곡선의 통계적 해석을 통하여 2상유량과 건도를 동시에 결정할 수 있는 가능성을 제시하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 구체적으로 다음과 같다.

(1) 물-질소가스의 2상유동에서 건도가 1%이하인 경우, 오리피스를 통한 압력강하 평균치는 식(1)과 잘 일치하며 $K=1.02$ 를 갖는다.

(2) 기포유동 영역에서 기공율이 증가할 수록 순간압력강하치의 평균진폭 및 교란강도는 단조 증가한다.

(3) 동일한 유동형태의 경우, 순간압력강하 곡선의 통계함수들은 일관된 경향을 가지며, 기포유동의 확률 밀도함수는 Gauss 분포곡선과 잘 일치한다.

참 고 문 헌

- (1) J.W. Murdock, Two-Phase Flow Measurement with Orifices, J. Basic Engineering, Vol. 84, pp. 419~433, 1962
- (2) D. Chisholm and D.H. Rooney, Pressure Drop During Steam/Water Flow Through Orifices, J. Mech. Eng. Sci., Vol. 16, pp.353~355, 1974
- (3) A.E. Fouda and E. Rhodes, Total Mass Flow and Quality Measurement in Gas-Liquid Flow, Paper presented at Two-Phase Flow and Heat Transfer Symp., Fort Lauderdale, Florida, 1976
- (4) D.B. Collins and M. Gacesa, Measurement of Steam Quality in Two-Phase Upflow with Venturimeters and Orifice Plates, J. Basic Engineering, Vol. 93, pp.11~21, 1971
- (5) R.V. Smith, P.C. Wergin, J.F. Ferguson and R. B. Jacobs, The Use of a Venturi Tube as a Quality Meter, J. Basic Engineering, Vol. 84, pp.411~412, 1962
- (6) G.F. Hewitt, Measurement of Two-Phase Flow Parameters, Chap. 5, p.92, Academic Press, London, 1978
- (7) J. Reiman, H. John and R. Frank, Measurement of Mass Flow Rate and Quality with a Venturi Nozzle and a Turbine Meter in Steam-Water Flow, Paper presented at the 3rd CSNI Specialist Meeting on Transient Two-Phase Flow, Pasadena, CA, 1981
- (8) N.K. Tutu, Pressure Drop Fluctuations and Bubble-Slug Transition in a Vertical Two-Phase Air-Water Flow, Int.J. Multiphase Flow, Vol. 10, pp. 211~216, 1984
- (9) J. Weisman, D. Duncan, J. Gibson and T. Crawford, Effects of Fluid Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Horizontal Lines, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 5, pp.437~462, 1979
- (10) O. Baker, Design of Pipe Lines for Simultaneous Flow of Oil and Gas, Oil and Gas Journal, Vol. 53, p.185, 1954

- (11) Z.H. Lin, Two-Phase Flow Measurements with Sharp-Edged Orifices, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 8, pp.683~693, 1982
- (12) A.B. Chaudhry, A.C. Emerton and R. Jackson, Flow Regimes in the Cocurrent Upwards Flow of Water and Air, Paper presented at the Symposium on Two-Phase Flow, Exeter, England, 1965
- (13) J.S. Bendat and A.G. Piersol, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Chap. 1, p.13, John Wiley & Sons, New York, 1971
- (14) G.F. Hewitt, Selected Experimental Data Set No. 3 : Developing Annular Flow, Paper presented at International Workshop on Two-Phase Flow Fundamentals, Gaithersburg, Maryland, 1985
- (15) P. Griffith and G.B. Wallis, Two-Phase Slug Flow, *J. Heat Transfer*, Vol. 83, pp.307~320, 1961
- (16) S. Sim and R.T. Lahey, Jr., The Measurement of Phase Distribution in a Triangular Conduit, NUREG/CR-3526, 1983