

## 수평 기액 2상유동에서 유동양식의 천이특성

## Characteristics of Flow Regime Transitions in Horizontal Gas-Liquid Two-Phase Flow

이 상 천\*, 이 정 표,\*\*김 중 엽\*  
S. C. Lee, J. P. Lee, J. Y. Kim

## ABSTRACT

The characteristics of flow pattern transitions in a horizontal cocurrent gas-liquid flow have been investigated by means of a statistical analysis of instantaneous pressure drop curves at an orifice. The dimensionless intensity of pressure drop fluctuation shows a sudden change during the course of flow transitions, indicating that it may be a good measure to identify the flow regime transitions. The probability density function of the curves feature a unique pattern depending upon the flow regimes and the statistical properties of the PDF also have particular ranges for each flow regime. In conclusion, the statistical analysis of instantaneous pressure drops may be a powerful tool for predicting the flow regime transitions.

## 기 호 설 명

$D$	: 관직경 ( $m$ )	$F$	: Froude 수
$l$	: 오리피스의 두 압력공 사이의 거리( $m$ )	$\beta$	: 기체속도의 체적량 <하첨자>
$V_s$	: 걸보기 속도( $m/s$ )	$G$	: 기체
$\Delta P$	: 순간압력강하( $N/m^2$ )	$L$	: 액체
$\overline{\Delta P}$	: 평균압력강하( $N/m^2$ )		
$\Delta(\Delta P')$	: 교란강도( $N/m^2$ )		
$\Delta(\Delta P')^*$	: 무차원 교란강도		
$SK$	: 비대칭계수		
$KU$	: kurtosis 계수		
$m_r$	: 평균에 대한 $r$ 번째의 모우멘트		

## 1. 서 론

기액 2상유동은 냉동 및 공기조화장치, 열 및 물질전달장치, 원자력발전장치등에 널리 관찰되는 유동형태이다. 이 유동에서 2상 사이에 계면이 존재하는데 이 계면특성은 유동

\* 정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 정회원, 영남대학교 대학원 기계공학과

조건, 유체의 물성치, 기하학적 형상 등과 밀접한 연관이 있으며 결과적으로 유동양식으로 특징지어 진다. 그러므로 이러한 유동양식의 파악은 압력강하, 기공율, 열전달계수 등의 결정 뿐 아니라 2상유동의 해석에 매우 중요하다. 또 유동양식의 천이가 일어나면 유동의 운동량 및 에너지의 변화로 인한 유동의 불안정성에 의하여 기액상의 분포상태가 바뀐다. 따라서 유동양식의 천이에 대한 정확한 해석은 2상유동이 응용되는 장치의 최적운전을 위한 유동변수들의 결정에 필수적이다.

2상유동양식을 판별하기 위한 방법에는 몇 가지가 있는데 종래의 육안관찰에 의한 주관적 유동양식 판별의 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 X선이나  $\gamma$ 선을 이용한 기공율의 직접측정<sup>1)</sup> 또는 전기전도도의 측정<sup>2)</sup> 및 압력측정을 이용하는 방법 등이 보고되고 있다.<sup>3)</sup> 그러나 이 중에서 관내 두 지점의 압력강하 교란치를 해석하여 유동양식을 판별하는 방법이 객관적이고 신뢰할 만한 방법으로 인식되고 있다.<sup>4)</sup> 본 연구자들은 유로단면의 갑작스런 축소에 따른 2상유동의 국소 압력강하치의 특성은 유동양식과 독자적인 상관관계를 가진다는 사실을 확인하였다.<sup>5)</sup>

본 연구는 이러한 결과를 확장하여 물과 공기를 매질로 한 수평동류 2상유동에서 오리피스내 순간압력강하치의 통계적 해석을 통한 천이특성을 구명하였다. 본 연구에서 다분 유동영역에는 기포, 플러그, 슬러그의 혼합유동내의 천이, 성층, 파상 및 환상유동의 분리유동(separated flow)내의 천이 뿐 아니라 분리유동에서 혼합유동으로서 천이과정이 포함된다. 유동영역에 따른 순간압력강하치의 무차원 교란강도를 분석하여 천이과정중 이 값들이 급격히 변하는 사실을 밝혀내었다. 또 유동양식과 천이영역에서의 순간압력강하곡선에 대한 확률밀도함수의 통계치를 계산하여 천이영역에 대한 특성을 분석하였다. 일반적으로 확률밀도함수의 비대칭계수(skewness coefficient)와 kurtosis 계수가 유동양식에 따라 특정한 범위를 가지는 것을 확인하였으며 이 결과는 확률밀도함수의 통계해석을 통하여 유

동양식의 판별이 가능하다는 사실을 제시하고 있다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 상온의 대기압하에서 물과 공기를 매질로 사용한 수평동류 2상유동을 다루었다. Fig.1은 본 실험장치의 개략도이다. 물은 저장탱크로부터 원심식펌프에 의하여 시험관내로 유입되며 유량은 조절밸브 및 바이패스밸브로 조정된다. 펌프에 의하여 발생될 수 있는 유동의 교란을 제거하기 위하여 서어지탱크(surge tank)를 설치하였다. 순수액체 유량은 관직경 31mm의 오리피스와 차압변환기로 측정된다. 공기는 공기압축기로부터 공기조절기와 필터를 거쳐 시험관내로 유입되며 공기유량은 오리피스와 압력변환기로 측정된다. 시험관은 내경 26mm의 투명한 아크릴수지관으로 제작하였으며 물-공기 혼합부와 2상유동 측정용 오리피스가 설치되어 있다. 물-공기 혼합부에는 시험관내에서 2상유동을 형성하기 위하여 직경 4mm의 공기노즐이 시험관의 중심선을 따라 동심으로 설치되어 있다. 본 실험에 사용한 오리피스는 ASME 표준규격<sup>6)</sup>에 따라 아크릴로 제작하였으며 관직경 26mm, 관직경 14.2mm, 목직경비 0.542, 경사각 45°인 칼날오리피스(sharp-edged orifice)이며 오리피스의 두 압력공 사이의 거리  $l = 16.6mm$ 이다. 시험관의 총길이는 7.4m이며 오리피스는 물-공기 혼합부로부터 5.3m(L/D=204) 떨어진 지점에 설치되어 있으며 이 지점에서 2상유동은 완전확립된 것으로 실험을 통하여 확인하였다. 시험관을 통과한 물과 공기는 저장탱크에서 분리되고 물은 원심식펌프에 의하여 시험관내를 재순환하도록 설치하였다. 측정부로는 압력변환기, 증폭기, A/D 변환기와 연결된 마이크로 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 본 실험에서 사용한 압력변환기는 스트레인 게이지 형식으로 압력차와 출력볼트는 선형이며 측정범위는 0.1MPa 까지이고 고유진동수는 200Hz이다.

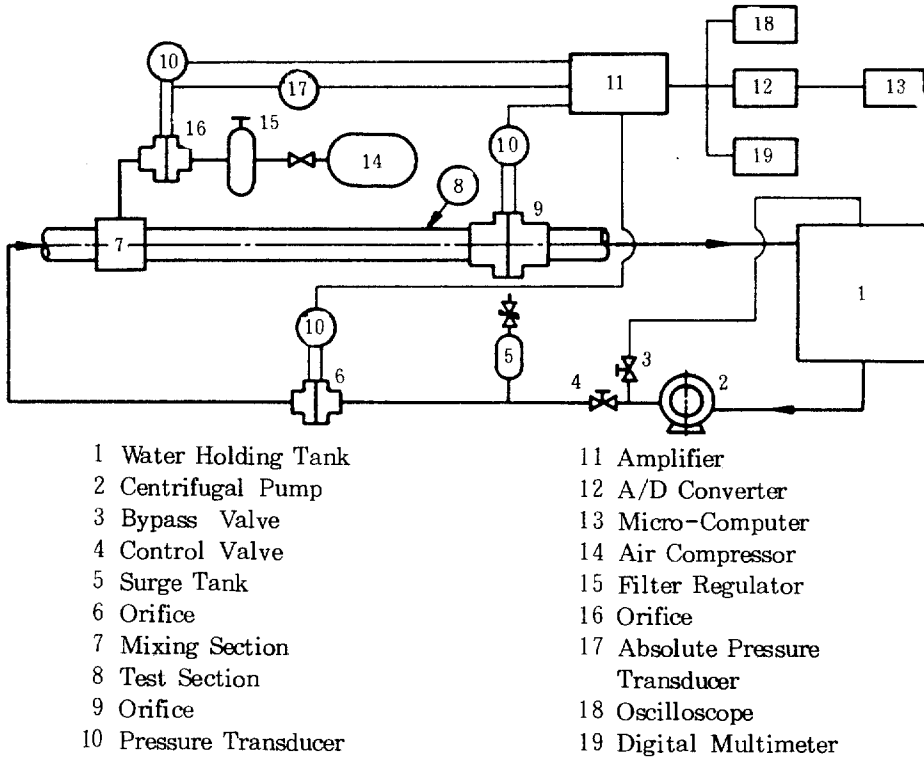


Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

### 2.2 실험범위 및 방법

실험은 실온에서 행하였으며 액체유량의 범위는 결보기속도(superficial velocity)로 0.06 ~ 2.40(m/s)이며 기체유량은 0.18 ~ 12.61(m/s)의 범위내에서 조절하였으며 이 유량범위에서 기포유동, 플러그유동, 슬러그유동, 성층유동, 파상유동 및 환상유동과 성층 또는 파상과 플러그 또는 슬러그유동이 공존하는 유동형태인 pseudo-slug 유동영역도 관찰되었다. 물-공기 혼합부로부터 시험관내에서 형성된 2상유동이 안정되었다고 판단되었을 때 오리피스를 통하여 흐르는 2상유동의 순간압력강하를 압력변환기 및 증폭기를 거쳐 12-bit A/D 변환기와 연결된 마이크로 컴퓨터로 측정한다. 본 실험의 표본회수는 초당 200개이며 표본시간은 20초이다.

### 3. 순간압력강하치의 통계 해석

어떤 순간의 압력강하치  $\Delta P(t)$ 는 평균치와 교란치의 합으로 표시되는데 여기서 시간에 따른 평균치  $\Delta \bar{P}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta \bar{P} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

이 식에서  $T$ 는 측정시간이다. Random data 인  $\Delta P(t)$ 가 에르고딕 프로세스(ergodic process)이라면 식(1)의 시간에 대한 평균치는 앙상블(ensemble) 평균치와 같아진다. 순간압력강하치의 교란강도(fluctuation intensity)는 다음과 같다.

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

순간압력강하치가 어떤 특정한 범위내에 있을 확률을 나타내는 확률밀도함수 PDF( $\Delta P$ )는 다

음과 같이 정의된다.

$$PDF(\Delta P) =$$

$$\lim_{\delta(\Delta P) \rightarrow 0} \frac{\text{Probability}[\Delta P \leq \Delta P(t) \leq \Delta P + \delta(\Delta P)]}{\delta(\Delta P)} \dots\dots\dots(3)$$

PDF 분포와 관련된 평균에 대한 r 번째의 모우멘트의 식은 다음과 같다.

$$m_r = \int_0^\infty (\Delta P - \bar{\Delta P})^r PDF(\Delta P) d(\Delta P) \dots\dots(4)$$

여기에서 비대칭계수(skewness coefficient)와 kurtosis 계수는 다음과 같이 정의되는데,

$$SK = m_3 / (m_2)^{3/2} \dots\dots\dots(5)$$

$$KU = m_4 / (m_2)^2 \dots\dots\dots(6)$$

이 식에서  $m_2, m_3, m_4$  는 식(4)에서  $r = 2, 3, 4$  일 때의 값을 나타낸다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 혼합유동내에서의 천이

혼합유동은 기포, 플러그, 슬러그유동과 같이 축방향으로 균일하지 못하며 액상과 기상의 이합집산이 활발한 유동으로 천이과정이 복잡하지 않으며 유동영역간의 구분이 뚜렷하다.<sup>5)</sup>

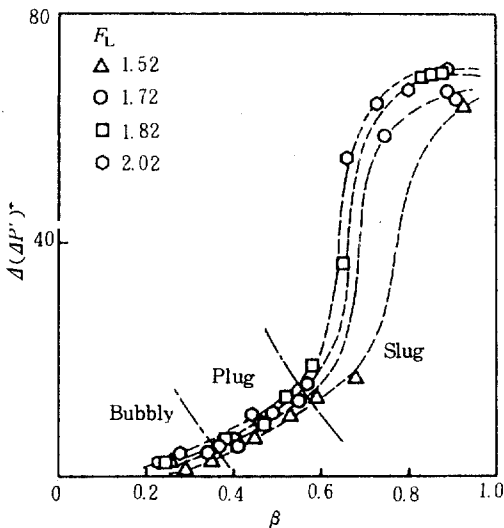


Fig.2 Dimensionless intensity of pressure drop fluctuations for bubbly-plug-slug flow transitions

Fig. 2는 액체유량이 결보기속도로  $V_{SL} = 0.77 \sim 1.02$  (m/s) 이고 기체속도가  $V_{SG} = 0.27 \sim 10.35$  (m/s)의 값을 가질 때 일정한 액체유량에 대한 기체속도의 증가에 따른 교란강도를 오리피스내 두 측정점 사이의 액체정압  $\rho_L g l$ 로 무차원한  $\Delta(\Delta P')^2$ 를 도시한 그림이다. 이 그림에서 액체유량은 결보기 액체속도에 대한 Froude 수  $F_L = V_{SL} / (gD)^{0.5}$ 로 무차원화 하였으며 가로좌표는 기체속도를 기상과 액상속도의 합에 대한 체적량(volumetric quality)  $\beta = V_{SG} / (V_{SG} + V_{SL})$ 으로 무차원화 하였으며 여기서  $g$ 는 중력가속도,  $D$ 는 관직경이며 하첨자 L과 G는 각각 액상과 기상을 나타낸다. 기포유동은 기공율이 매우 작으며 작은 기포가 비교적 연속적으로 이동하는 유동으로 교란강도가 작다. 기포유동영역에서  $\beta$ 의 증가에 따라 교란강도가 완만히 증가하는 것을 알 수 있다. 기체유량이 증가되면 기포간의 결합과 이산이 활발해지면서 비교적 길이가 긴 기포와 기포가 거의 포함되어 있지 않는 액체 덩어리가 교대로 진행되는 플러그유동으로 천이한다. 플러그유동에서의 교란강도는 증가폭이 비교적 커진다. 기체유량이 보다 더 증가 되면 많은 기포가 포함된 액체슬러그와 기포간의 이합집산이 매우 활발하며 유동이 매우 빠르게 진행되는 슬러그유동으로 천이하며 교란강도는 급격히 증가한다. 그러나 유동이 일

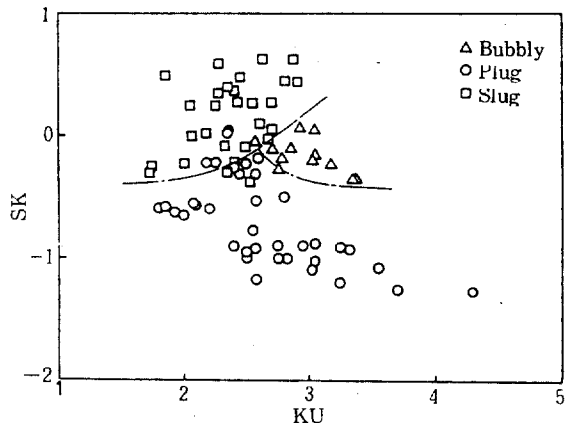


Fig.3 Map of skewness coefficient and kurtosis coefficient for bubbly, plug and slug flow regimes

단 확립된 슬러그영역으로 진입하면 기상속도가 증가하여도 교란강도의 증가폭이 매우 둔한 사실을 알 수 있다. 이 영역에서는 기체유량의 증가에 따라 기공율이 증가하지만 유동의 특성이 일관되게 유지되기 때문이다. 따라서 무차원 교란강도는 플러그에서 슬러그로의 천이과정중에만 급격하게 증가하므로 이 교란강도는 유동천이의 사실을 판별할 수 있는 기준인자로 취급될 수 있다.

Fig.3은 기포유동, 플러그유동, 슬러그유동에 대한 비대칭계수와 kurtosis계수의 값을 도시하고 있다. 앞의 논문<sup>9</sup>에서 언급하였던 바와 같이 기포유동은 교란성분이 매우 작으므로 확률밀도분포는 높은 밀도의 정점을 중심으로 대칭이며 분포폭은 매우 작다. 따라서 비대칭계수는  $-0.3 \sim 0$  부근이며 kurtosis계수는  $2.7 \sim 3.4$ 의 값을 가진다. 플러그유동은 정점을 중심으로 왼쪽편에 완만한 낮은 밀도의 비교적 넓은 분포를 가지며 비대칭성의 형상으로 나타난다. 그러므로 비대칭계수는 항상 음의 값을 가지며  $-0.2$  이하로 나타나고 있다. kurtosis계수는  $1.8 \sim 4.0$  사이의 값을 가진다. 슬러그유동은 액체슬러그와 기포간의 상호작용이 매우 활발하며 비교적 규칙적인 순간압력강하곡선을 가진다. 따라서 분포폭은 매우 넓으며 밀도는 낮으나 비교적 완만하다. 비대칭계수는  $-0.3 \sim 0.6$  사이의 값을 가지며 kurtosis계수는  $1.7 \sim 3.0$  이하의 범위이다. 이 그림에서 유동영역에 따라 확률밀도함수에 대한 비대칭계수와 kurtosis계수는 특정한 범위에 속하는 사실을 알 수 있다. 따라서 확률밀도함수의 정량적 통계치의 해석을 통한 혼합유동내에서의 천이영역 구분은 신뢰할 만한 방법으로 사료된다.

#### 4.2 분리유동내에서의 천이

분리유동은 기상과 액상이 뚜렷이 구분되는 유동으로 성층, 파상유동 및 환상유동이 여기에 속한다. 이 유동영역내에서의 천이과정을 무차원 교란강도치로 분석한 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 이 그림은 낮은 액체유량( $F_L = 0.24$ )에서 기체유량을 증가할 때 성층유동에서

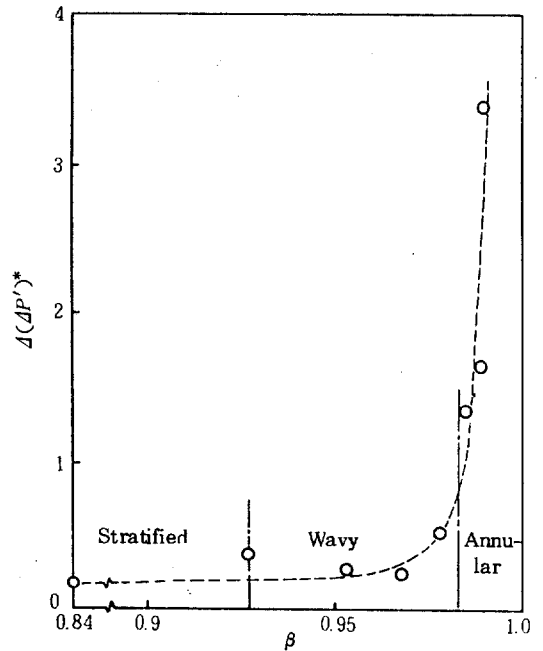


Fig. 4 Dimensionless intensity of pressure drop fluctuations for stratified-wavy-annular flow transitions

서 환상유동으로의 천이과정을 도시하고 있다. 일반적으로 분리유동영역은 혼합유동영역에 비하여 작은 액체유량에서 일어나므로 교란강도의 절대치는 훨씬 작다. 따라서 천이과정에서 교란강도는 기공율과는 무관하며 전체유량에 지배받는 변수이다. 성층유동에서 기상속도가 증가하면 액상의 계면에 파가 생성되면서 파상유동으로 천이하는데 이 천이과정에서 교란강도는 매우 완만하게 증가한다. 파상유동영역내에서 기체유량이 증가할 때 교란강도는 성층유동과 마찬가지로 서서히 증가하나 환상유동영역으로 접근할수록 빠른 기상속도에 의하여 액상계면의 파가 거칠어지면서 교란강도는 급격히 증가하는 사실을 알 수 있다. 여기서 기상속도가 더욱 증가하면 액상의 파가 관상부를 치며 관상부에 액막(liquid film)이 형성되기 시작하면서 환상유동으로 천이하는데 이때 교란강도의 상승폭은 급격히 증가한다. 이것은 기액상의 계면면적이 급격히 증가하면서 활발한 교란작용이 일어나기 때문이다. 이러한 사실은 무차원 교란강도치가 파상유동과 환

상유동의 천이를 판별하는 데에도 훌륭한 기준변수로 인식될 수 있다는 것을 암시하고 있다.

### 4.3 분리유동에서 혼합유동으로의 천이

Fig. 5는 액체속도가  $V_{SL}=0.11\sim 1.20(m/s)$  이고 기체속도가  $V_{SG}=1.53\sim 6.94(m/s)$ 의 유량범위에서 기체유량을 일정하게 유지하면서 액체유량을 증가할 때 성층 및 파상유동의 분리유동에서 슬러그유동의 혼합유동으로의 천이 과정에 대한 무차원 교란강도를 도시하고 있다. 기체유량은 겉보기 기체속도에 대한 밀도 비로 수정한 기체 Froude 수  $F_G=[\rho_G/(\rho_L-\rho_G)]^{1/2}\cdot V_{SG}/(gD)^{1/2}$ 로 무차원화 하였는데 이 무차원턴수는 Dukler A.E와 Taitel Y.<sup>7)</sup>이 분리유동과 간헐유동(intermittent)의 천이영역을 구분하는 데 사용한 변수중의 하나이다. 액체유량은 전체유량에 대한 액체의 체적량  $1-\beta=V_{SL}/(V_{SG}+V_{SL})$ 으로 무차원화하여 도시하였다. 성층 및 파상유동에서 액체유량이 증가하면 성층, 파상, 슬러그, 플러그유동이 공존하는 유동형태의 pseudo-slug로 바뀌면서 교란강도는 급격히 증가한다. pseudo-slug 영역에서는 액체유량이 증가함에 따라 교란강도가 증가하나 슬러그유동영역에서는 감소하는

경향을 나타낸다. pseudo-slug 영역에서는 기상과 액상의 계면형태가 바뀌므로 교란강도가 기공율의 증감에 관계없이 기액상의 유량이 증가할 때 함께 증가하며 슬러그유동으로의천이 영역 부근에서 교란강도치가 가장 큰 값을 가지며 확립된 슬러그유동영역에서는 교란강도가 기공율이 감소하면 함께 작아진다는 사실을 알 수 있다. 따라서 교란강도의 관점에서 보면 pseudo-slug와 슬러그유동의 천이영역에서 최대치를 가지므로 유동양식의 천이 판별에 마찬가지로 기준인자로 삼을 수 있다.

Fig.6은 성층, 파상, pseudo-slug 및 슬러그유동에 대한 비대칭계수와 kurtosis 계수를 도시한 그림이다. 성층유동과 파상유동에서 비대칭계수는  $-0.6\sim 1.0$  부근의 값을 나타내며 kurtosis계수는  $3\sim 5$ 의 값을 가진다. pseudo-slug 유동은 분리된 액상계면에 주기적인 액체 슬러그가 존재하는 유동형태로 비대칭계수는  $0.6\sim 4$ 이상의 값을 가지며 kurtosis계수도  $3\sim 25$ 부근의 값을 나타내는 데 확률밀도함수는 비대칭성의 분포형상을 가진다. 슬러그유동은 앞 그림의 혼합유동내에서의 슬러그유동의 통계치와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig.7은 기체유량( $F_G=0.859$ )이 일정할 때 액상유량의 증가로 환상유동에서 슬러그유동

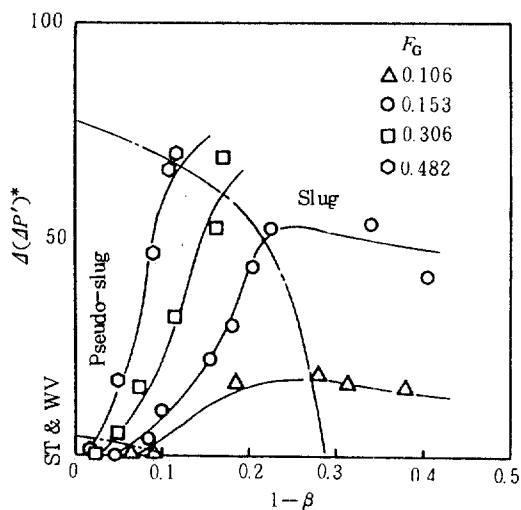


Fig.5 Dimensionless intensity of pressure drop fluctuations for stratified/wavy-pseudo slug-slug flow transitions

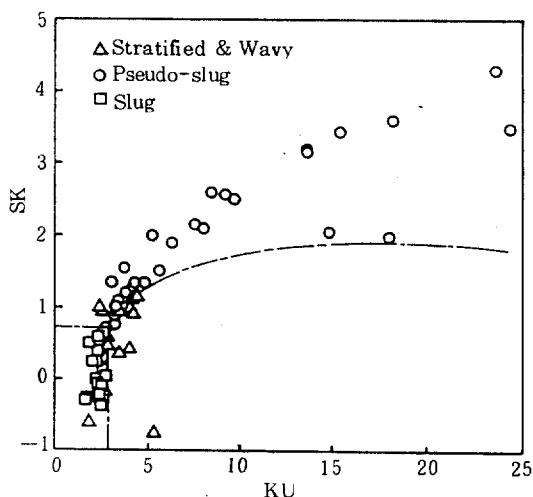


Fig.6 Map of skewness coefficient and kurtosis coefficient for stratified/wavy-pseudo slug-slug flow regimes

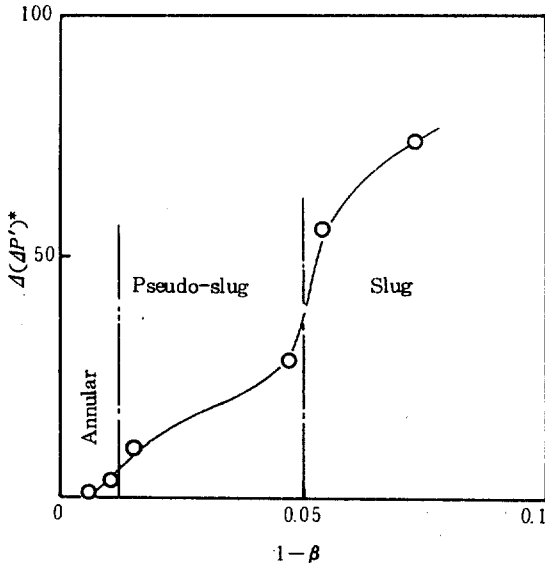


Fig.7 Dimensionless intensity of pressure drop fluctuations for annular-pseudo slug-slug flow transitions

으로의 천이과정에 따른 교란강도를 나타내고 있는 그림이다. 환상유동에서 액체유량을 증가시키면 환상, 파상, 슬러그의 혼합유동형태를 나타내는 pseudo-slug 유동영역으로 천이하면서 교란강도의 증가폭은 비교적 커진다. 슬러그유동영역이 가까울 수록 그 상승폭은 급격히 커지며 완전한 슬러그유동영역에서도 계속 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 사실은 성층, 파상의 분리유동에서 슬러그유동의 혼합유동의 천이과정에서 확립된 슬러그유동영역에서는 기공율이 감소하면 교란강도가 감소하는 경향을 나타내었으나 이 천이과정은 기공율과는 무관하게 전체유량의 증가에 교란강도도 함께 증가하므로 앞의 천이과정과는 다르다는 사실을 알 수 있다. 왜냐하면 이 유동영역은 기체유량이 액체유량보다 매우 크기 때문에 액체유량의 증가로 인한 기공율의 감소에 따른 교란강도의 감소폭 보다 전체유량의 증가에 따른 기액상의 운동량증가에 의한 유동의 교란성분이 더 크기 때문이다.

이상의 실험결과에서 교란강도와 확률밀도함수의 정량적 통계치를 통한 각 유동양식의 천이영역 구분은 신뢰할 만한 방법으로 간주

할 수 있다. 또 분리유동에서 혼합유동의 천이과정에서 나타나는 pseudo-slug 유동영역을 Baker<sup>8)</sup>, Mandhane 등<sup>9)</sup>과 Dukler와 Taitel<sup>7)</sup>의 유동양식선도에서는 구분하지 않았으나 교란강도와 확률밀도함수의 통계치로 확연히 구분되는 영역이므로 세분하여 판별하여야 바람직하다고 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 수평동류 2 상유동에서 오리피스에 순간압력강하치의 교란강도와 확률밀도함수의 통계치를 통하여 각 유동양식의 천이특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 교란강도는 혼합유동내의 플러그와 슬러그유동의 천이영역, 분리유동인 파상유동과 환상유동의 천이영역, 분리유동과 pseudo-slug 유동의 천이영역, pseudo-slug와 슬러그유동의 천이에서 급격히 변화하므로 각 유동의 천이를 구분하는 훌륭한 변수로 간주될 수 있다. 또 비대칭계수와 kurtosis 계수를 이용하여 유동양식선도를 작성할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

## 참 고 문 헌

1. Jones O.C. and Zuber N., "The Interrelation between Void Fraction Fluctuations and Flow Pattern in Two-Phase Flow", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.1, pp.273-306, 1975.
2. Barnea D., Shoham O. and Taitel Y., "Flow Pattern Characterization in Two-Phase Flow by Electrical Conductance Probe", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.6, pp.387-397, 1980.
3. Hetstroni G., *Handbook of Multiphase Systems*, Chap.2, Hemisphere Publishing Co., New York, 1982.
4. Tutu N.K., "Pressure Drop Fluctuations and Bubble-Slug Transitions in a Vertical Two-Phase Air-Water Flow", *Int. J. Multi-*

- phase Flow*, Vol.10, pp.211-216, 1984.
5. 이상천, 이정표, 김중엽, “오리피스 순간 압력강하의 통계해석을 통한 수평 2상유동양식의 결정”, 대한기계학회논문집, 제 11권, 제 5호, pp.810~818, 1987.
  6. A.S.M.E., “Fluid Meters: Their Theory and Applications”, Chap. B-2, 5th ed. New York, 1959.
  7. Dukler A.E. and Taitel Y., “Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid Systems”, *Multi-phase Science and Technology*, Vol.2, pp.1-94, 1986.
  8. Baker O., “Design of Pipe Lines for Simultaneous Flow of Oil and Gas”, *Oil and Gas J.*, Vol.53, p.185, 1954.
  9. Mandhane J.M., Gregory G.A. and Aziz K., “A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes”, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.1, pp.537-553, 1974.