

순간압력강하치의 통계적 해석을 통한 경사관내 2상유동양식의 판별

Identification of Two-Phase Flow Patterns in a Inclined Duct Based
upon a Statistical Analysis of Instantaneous Pressure Drop

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

ABSTRACT

Characteristics of flow regime transitions in inclined upwards gas-liquid two-phase flow have been investigated based upon a statistical analysis of instantaneous pressure drop curves through an orifice. The probability density functions of the curves indicate distinct patterns depending upon two-phase flow regime, which are very similar to those of horizontal two-phase. The dimensionless intensity of fluctuations of the pressure drops sharply change as the flow transitions such as plug-slug, pseudo slug-slug and annular-slug take place. The effects of inclination angle on the flow regime transitions have been also investigated. The results show that the method to identify the flow pattern based upon the statistical analysis of instantaneous pressure drops is suitable for inclined flow as well as horizontal flow.

기 호 설 명

<p>D : 관직경 ℓ : 오리피스 압력공 사이의 거리 V_S : 결보기 속도 ΔP^* : 무차원 압력강하, $\Delta P / \rho_L g \ell$ $\overline{\Delta P}^*$: 무차원 평균압력강하, $\overline{\Delta P} / \rho_L g \ell$ $\Delta(\Delta P^*)^*$: 무차원 교란강도, $\Delta(\Delta P^*) / \rho_L g \ell$ F_L : 액체 Froude 수, V_{SL} / \sqrt{gD} F_G : 기체 Froude 수, $[\rho_G / (\rho_L - \rho_G)]^{1/2} \cdot V_{SG} / (gD \cos \theta)^{1/2}$ SK : 비대칭계수 KU : kurtosis 계수 ρ : 밀도</p>	<p>β : 기체의 체적량, $V_{SG} / (V_{SG} + V_{SL})$ θ : 경사각도 < 하첨자 > G : 기체 L : 액체 S : 결보기</p>
<h3>1. 서 론</h3>	
<p>경사관의 기액 2상유동은 A형공기냉각응축기(A-frame air-cooled condensor)와 해상 및 경사진 지형에서의 배관 등에서 널리 발견되는 유동형태이며 공학적 중요성에도 불</p>	

* 정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 영남대학교 대학원 기계공학과

구하고 수평관 및 수직관에 비하여 거의 인구가 이루어지지 않았다. 현재까지 확인된 경사관에 대한 연구를 보면 1974년 Gould 등¹⁾이 수평, 수직, 45° 상향경사관에서의 유동양식 신포를 발표하였으며 1976년 Taitel 과 Dukler²⁾가 수평관과 약간 경사진 관에서 유동영역 전이를 예측하는 모델을 제시하였다. 그리고 1980년 Barnea 등³⁾과 1981년 Weisman 등⁴⁾이 연구한 바 있고 최근에 Dukler 와 Taitel⁵⁾의 연구결과가 보고되고 있다.

그러나 이러한 연구결과들은 경사각에 따른 유동양식의 전이특성과 경사관에서의 유동양식의 예측을 체계적으로 제시하지 못하고 있다. 또한 이들이 사용한 유동양식의 전이판별은 시각관찰인데 이 방법은 객관성이 결여된 유동양식 판별이어서 서로 상치되는 경우가 많다.

최근에 이동^{6,7)}이 수평 동류 기액 2상유동에서 오리피스와 순간압력강하치의 통계적 해석을 통하여 유동양식 판별 및 전이특성을 구명하였다. 이들은 확률밀도함수가 각 유동양식에 따라 독특한 분포형상을 가지며 확률밀도함수의 정량적 통계치인 비대칭계수와 kurtosis 계수도 유동양식에 따라 특정한 범위를 가진다는 것을 확인하였다. 또 부차원 교란강도를 분석하여 유동영역의 전이과정중에 이 값들이 급격히 변화하는 사실을 밝혀내었다. 따라서 이러한 결과로부터 확률밀도함수의 통계치와 교란강도를 통한 유동양식의 판별은 신뢰할 만한 방법으로 간주될 수 있다.

본 연구는 이러한 개념을 확장하여 경사각도 2~10°의 상향 기액 2상유동에서의 유동양식 판별과 경사각도에 따른 유동양식의 전이특성을 구명하였다. 경사관내 칼날오리피스(sharp-edged orifice)를 통과하는 2상유동의 순간압력강하치를 통계적으로 분석하여 유동양식에 따른 확률밀도함수를 구명하였다. 또 유동영역의 전이에 따른 압력강하의 통계치를 분석하였다. 본 연구에서 다룬 유동영역은 기포, 플러그, 슬러그, 파상, pseudo-slug 및 환상 유동이다.

2. 실험

본 연구에서는 경사관내 물과 공기의 상향 2상유동을 다루었다. Fig.1에 실험장치의 개략도가 도시되어 있다. 물은 저장탱크로부터 원심식 펌프에 의하여 시험관으로 유입되며 공기는 공기압축기로부터 물-공기혼합부의 공기노즐을 통하여 시험관내로 혼합된다. 물과 공기의 유량은 오리피스에 부착된 압력변환기로 측정된다. 시험관은 내경 26 mm인 투명한 아크릴수지관이며 총길이는 7.4 m이다. 시험관부에는 물-공기혼합부로부터 5.3 m (L/D = 204) 떨어진 지점에 2상유동 측정용 오리피스가 설치되어 있다. 오리피스는 관직경 26 mm, 오리피스구경 14.2 mm, 목직경비 0.542, 경사각 45°인 칼날오리피스(sharp-edged orifice)이다. 시험관부는 상향방향으로 임의의 각도로 이동할 수 있도록 제작하였는데 본 연구에서 채택한 경사각도는 2°, 4°, 6°, 8°, 10°이다. 실험은 대기압하의 실온에서 행하였으며 액체유량은 겉보기속도(superficial velocity)로 0.09~2.18 (m/s) 이고 기체유량은 0.22~12.76(m/s)의 범위내에서 조절하였다. 이 유량범위에서 기포유동(BB), 플러그유동(PL), 슬러그유동(SL), 파상유동(WV), pseudo-slug 유동(PS) 및 환상유동(A)이 관찰되었다.

물-공기 혼합부로부터 시험관내 형성된 2상유동이 안정되었다고 판단되었을 때 오리피스를 통하여 흐르는 2상유동의 순간압력강하를 압력변환기 및 증폭기를 거쳐 12-bit A/D 변환기와 연결된 마이크로컴퓨터로 측정한다. 본 실험의 표본회수는 초당 200개이며 표본시간은 20 초이다.

3. 순간압력강하치의 통계 해석

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

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

이 식에서 T 는 측정 시간이다. 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.

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

순간압력강하치가 어떤 특정한 범위내에 있을 확률을 나타내는 확률밀도함수 PDF(ΔP)는 다음과 같이 정의된다.

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

PDF분포와 관련된 평균에 대한 r 번째의 모멘트의 식은 다음과 같다.

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

여기에서 비대칭계수(skewness coefficient)와 kurtosis계수는 다음과 같이 정의되는데,

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

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

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

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 각 유동양식에 대한 확률밀도함수의 통계치의 특성을 분석하였다. 그리고 유동영역의 천이과정 중에 따른 교란강도의 경향과 유동양식의 천이에 대한 경사각도의 영향을 고찰하였다. 본 연구에서 얻은 상향경사관에 대한 대표적인 통계치의 자료가 Table 1에 주어져 있다.

4.1 유동영역에 따른 확률밀도함수

본 연구에서 얻은 경사각도 $2 \sim 10^\circ$ 의 상향기액 2상유동에 대한 확률밀도함수의 분포형상은 경사각도에 상관없이 거의 일관된 형상을 나타내었다. 경사각도 10° 의 상향 2상유동에서 각 유동영역에 대한 대표적인 확률밀도함수의 분포가 Fig.2에 도시되어 있다. 이 그림

Table 1. Typical data of statistical properties in inclined upwards gas-liquid flow

θ°	V_{SL} (m/s)	V_{SG} (m/s)	$\overline{\Delta P}^*$	$\Delta(\Delta P')^*$	SK	KU	Flow pattern	θ°	V_{SL} (m/s)	V_{SG} (m/s)	$\overline{\Delta P}^*$	$\Delta(\Delta P')^*$	SK	KU	Flow pattern
0	1.12	0.31	73.5	2.40	-0.23	3.18	BB	6	1.02	0.27	76.9	0.70	0.04	3.24	BB
	0.66	0.98	33.5	11.90	-1.01	2.74	PL		0.60	1.12	33.3	14.20	-0.36	2.09	PL
	0.86	2.51	95.3	58.40	0.24	2.04	SL		0.86	2.65	105.8	63.30	0.33	2.06	SL
	0.12	4.44	5.3	0.18	0.46	2.92	WV		0.12	4.70	5.90	4.00	3.89	22.17	PS
	0.12	10.91	42.1	1.60	0.06	2.70	A		0.12	10.78	38.3	0.80	0.25	2.24	A
2	1.02	0.29	79.2	2.20	-0.51	3.18	PL	8	1.02	0.28	76.4	0.80	-0.29	3.24	BB
	0.60	0.99	29.9	11.80	-0.55	2.24	PL		0.60	0.81	30.1	8.60	-0.26	1.86	PL
	0.86	2.62	112.8	64.50	0.26	2.01	SL		0.86	2.54	105.6	58.30	0.26	2.32	SL
	0.12	4.88	9.4	6.60	2.07	6.47	PS		0.19	4.77	5.80	3.20	2.85	14.32	PS
	0.12	10.64	38.6	1.00	0.51	3.17	A		0.13	10.64	34.2	0.20	0.11	2.79	A
4	1.02	0.29	77.0	1.60	-0.71	3.29	PL	10	1.02	0.27	76.9	0.70	0.10	2.87	BB
	0.60	1.12	34.2	16.60	-0.33	1.87	PL		0.60	0.98	33.5	8.30	-0.40	2.23	PL
	0.86	2.62	103.6	64.80	0.32	2.04	SL		0.86	2.53	114.4	51.00	0.19	2.09	SL
	0.12	4.62	5.3	3.60	3.70	18.04	PS		0.18	4.74	5.3	5.20	4.27	22.21	PS
	0.12	10.84	46.2	5.30	0.66	2.61	A		0.16	10.70	37.4	1.90	0.63	2.36	A

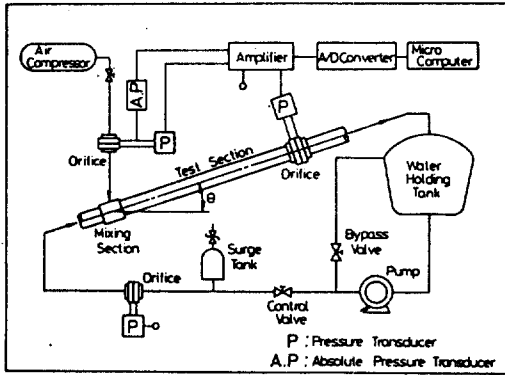


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

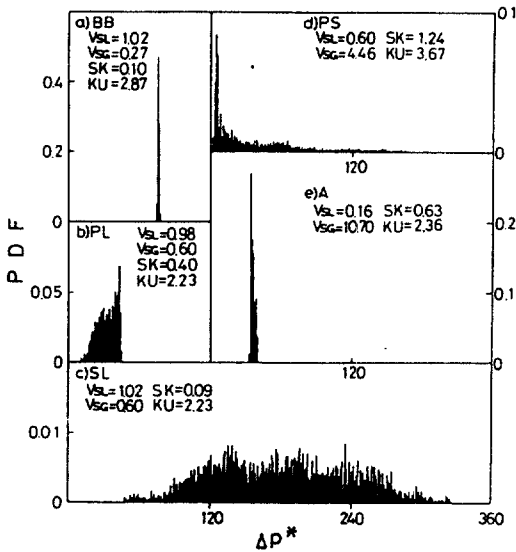


Fig. 2 Probability density functions for flow patterns at 10° upward inclination

은 기포, 플러그, 슬러그, pseudo-slug, 환상유동을 포함한다. 앞 논문⁷⁾에서 언급하였던 바와 같이 그림 (a)의 기포유동은 작은 기포가 관상부를 따라 비교적 연속으로 유동하며 기공률이 작아 교란성분이 크지 않으므로 확률밀도가 대칭성의 높은 밀도의 단일정점을 가지며 분포폭이 매우 작다는 사실을 알 수 있다. 수평관 ($\theta=0^\circ$)의 경우 비대칭계수는 $-0.3 \sim 0$ 부근이며 kurtosis 계수는 $2.7 \sim 3.4$ 의 값을 가지는 데 Table 1에서 보면 경사각도에 무관하게 거의 일관된 값을 가짐을 알 수 있다.

그림(b)는 플러그유동의 확률밀도함수를 나타낸 것으로 플러그유동은 기포가 거의 포함되어 있지 않은 액체슬러그와 비교적 긴 길이의 기포가 교대로 진행되는 유동형태로 기포간의 결합과 이산이 비교적 활발하므로 확률밀도함수의 분포폭은 보다 넓어진다. 이 유동에서는 액체슬러그가 지나갈 때는 기포를 거의 포함하지 않으므로 교란성분이 거의 없어 높은 압력강하치를 가지므로 정점을 중심으로 오른쪽 쪽에는 급격히 감소하는 형상과 왼쪽에는 낮은 밀도의 완만한 비교적 넓은 분포를 가지는 비대칭성의 모양을 나타낸다. 따라서 비대칭계수는 항상 음의 값을 가짐을 알 수 있다. 그림(c)는 슬러그유동의 경우로 많은 기포를 포함한 액체슬러그와 기포가 매우 빠르게 진행하므로 교란성분이 크고 비교적 규칙적인 순간압력강하곡선을 가진다. 따라서 확률밀도함수의 분포폭은 매우 넓으며 밀도는 낮으나 평균압력강하치를 중심으로 대칭성을 나타내므로 비대칭계수는 $-0.3 \sim 0.60$ 사이의 값이며 kurtosis 계수는 3.0 이하의 값을 가진다. 그림(d)는 pseudo-slug 유동의 확률밀도함수로 분리된 기액상의 계면에 주기적인 액체슬러그가 존재하는 유동형태로 ΔP^* 가 0 부근에 높은 밀도, 좁은 폭의 정점과 낮은 밀도의 넓은 분포영역을 가지는 형상으로 나타난다. 그러므로 비대칭계수는 2.0 이상의 값을 가지며 kurtosis 계수는 매우 크다. 그림(e)는 환상유동의 확률밀도함수로 환상유동은 관하부에는 비교적 뚜껍고 거칠은 액상이 존재하며 관상부로 가면서 얇은 액막이 형성되어 기액상의 계면이 뚜렷이 분리된 유동형태로 시간과 공간에 대한 기공률의 변화가 작으므로 입력강하의 교란치의 크기도 비교적 작다. 따라서 확률밀도의 분포형상은 높은 밀도의 단일정점을 나타내며 기포유동의 것과 비슷하나 비대칭계수는 항상 양의 값이며 kurtosis 계수는 3.0 이하의 값을 가진다. 본 실험의 유량범위에서는 경사각도 10° 에서 파상유동이 관찰되지 않았으나 파상유동은 분리된 기액상 계면에 파(wave)가 존재하는 유동형태로 확률밀도함수는 높은 밀도의 단일정점으로 나타나는

데 그림(d)의 pseudo-slug 의 분포형상에서 낮은 밀도의 분포영역이 없는 모양이다.

이상의 사실에서 경사관에서서의 각 유동양식에 따른 확률밀도함수의 분포특성이 정성적으로 수평관과의 그것과 동일한 형상을 가진다. 그리고 정량적 통계치인 비대칭계수와 kurtosis 계수는 pseudo-slug 유동영역의 경우 수평관 보다는 큰 값을 가지며 그의 유동영역에서는 거의 동일한 값을 가진다. 따라서 본 실험은 경사관에서도 각 유동영역을 구분하는데 확률밀도함수의 통계치를 통한 유동양식 판별이 가능하다는 사실을 제시하고 있다.

4.2 유동양식 천이의 특성

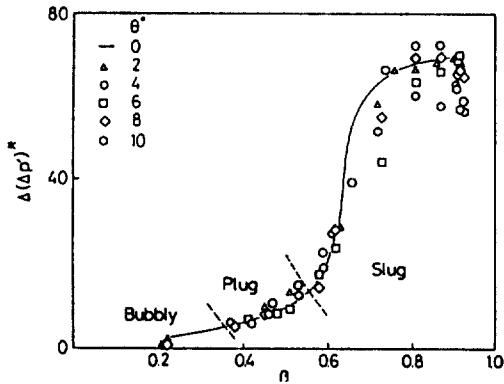


Fig. 3 Data of dimensionless intensity of pressure drop fluctuations for bubbly-plug-slug flow transition ($F_L=2.02$)

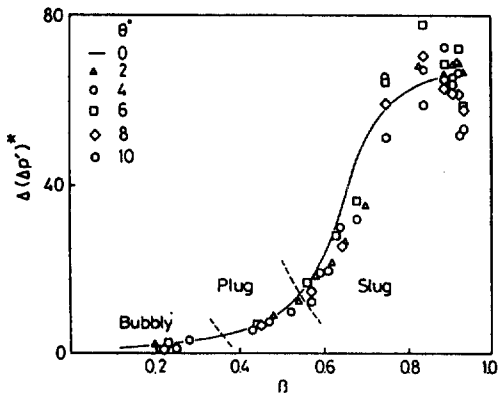


Fig. 4 Data of dimensionless intensity of pressure drop fluctuations for bubbly-plug-slug flow transition ($F_L=1.72$)

Fig.3 과 Fig. 4는 수평관과 경사관에서 액체 속도에 대한 Froude 수가 각각 2.02, 1.72로 일정할 때 기체속도의 증가에 따른 혼합유동내의 천이, 즉 기포, 플러그, 슬러그유동으로의 천이에 대한 무차원 교란강도를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 기체속도는 체적량 (volumetric quality) β 로 무차원화하여 도시하였으며 실선은 앞서의 문헌에서 얻은 수평관에 대한 자료를 표시하고 있다. 수평관 ($\theta=0^\circ$)의 경우와 같이 경사관에서도 플러그 유동에서 슬러그유동으로의 천이영역에서 교란강도가 급격히 증가하는 사실을 알 수 있다. 그러나 완전한 슬러그유동영역의 경우 큰 기체유량에서 경사각도가 커짐에 따라 무차원 교란강도가 감소함을 관찰할 수 있다. 이는 경사각도가 증가함에 따라 유동방향에 대한 중력의 작용이 감소하기 때문에 액체유량이 일정할 때 슬러그유동에서 환상유동으로의 천이가 더 낮은 기체유량에서 일어난다는 사실을 암시한다.

Fig.5와 Fig.6은 수평관과 경사관에서 기체 Froude 수를 각각 $F_G = 0.106, 0.306$ 으로 일정하게 유지시키면서 액체유량의 증가에 따른 분리유동에서 혼합유동으로의 천이, 즉 성층 또는 과상유동에서 pseudo-slug 유동 및 슬러그유동으로의 천이과정에 대한 무차원 교란강도를 도시하고 있다. 여기에서 실선은 앞의

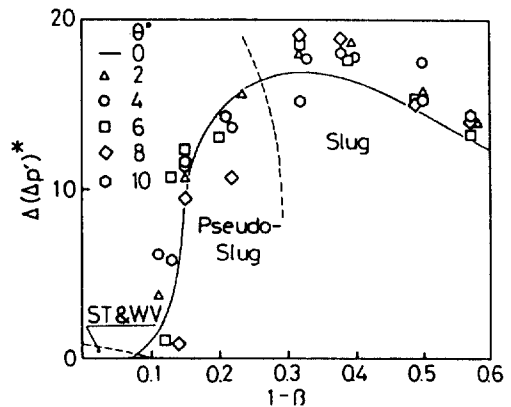


Fig. 5 Data of dimensionless intensity of pressure drop fluctuations for stratified/wavy-pseudo slug-slug flow transition ($F_G=0.106$)

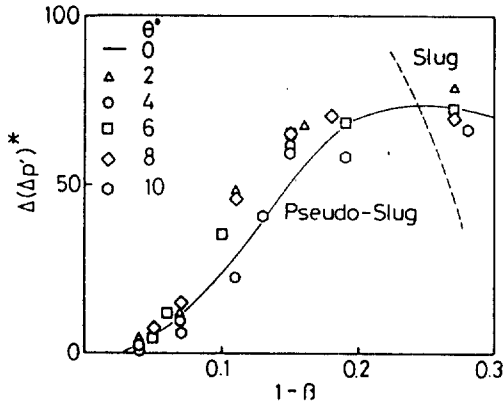


Fig. 6 Data of dimensionless intensity of pressure drop fluctuations for wavy-pseudo slug-slug flow transition ($F_G=0.306$)

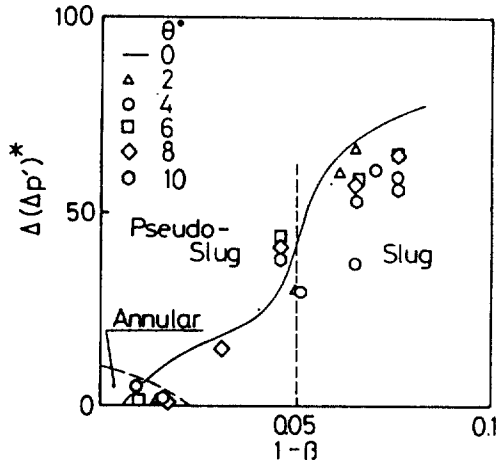


Fig. 7 Data of dimensionless intensity of pressure drop fluctuations for annular-pseudo slug-slug flow transition ($F_G=0.859$)

그림과 마찬가지로 수평관에 대한 경향을 나타내고 있다. 이 그림에서 기체속도는 기체 Froude 수로 무차원화하였으며 액체유량은 기액상 유량에 대한 액상의 체적량 $1-\beta$ 로 무차원화하여 도시하였다. 수평관에서와 같이 경사관에서도 무차원 교란강도는 pseudo-slug 유동영역에서는 기공률과는 무관하게 기액상의 전체유량이 증가할 때 함께 증가하며 확립된 슬러그유동영역에서는 기공률의 감소와 함께 감소한다는 사실을 알 수 있다. 따라서 pseudo-slug 와 슬러그유동의 천이영역에서 교란강도가 최대치를 가지므로 유동양식의

천이 판별에 기준인자로 삼을 수 있다.

Fig.7은 기체유량($F_G = 0.859$)이 일정할 때 액상유량의 증가로 환상유동에서 슬러그유동으로의 천이과정에 따른 무차원 교란강도를 도시한 그림이다. 환상유동에서 액상유량을 증가시키면 pseudo-slug 유동영역으로 천이하면서 교란강도의 증가폭은 비교적 커진다. 슬러그유동영역이 가까울수록 그 상승폭은 급격히 커지며 완전한 슬러그유동영역에서도 계속 증가하는 사실을 알 수 있다. 이러한 경향은 경사각과 무관하게 일관성을 가지는데 이 결과는 수평관에서의 실험결과와 일치하고 있다.⁷⁾

4.3 유동양식 천이에 대한 경사각도의 영향

본 연구에서 얻은 상향 경사관에서의 실험 자료를 이용하여 경사각도에 따른 유동양식을 도시한 선도가 Fig.8에 나타나 있는데 수평관에 관한 자료도 포함하였다. 기포유동은 경사각도가 커질수록 보다 낮은 기체유량에서만 존재하며 기포유동영역이 좁아짐을 알 수 있다. 이러한 사실은 경사각이 커질수록 기포가 관상부에서 서로 응집하려는 성향이 커지기 때문이다. 수평관과 경사관에서 가장 뚜렷한 유동양식의 천이변화는 작은 경사각도에도 성층유동이 완전히 사라지는 사실인데 이러한 특

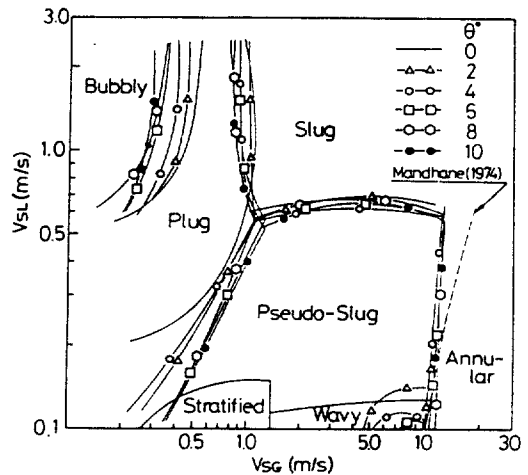


Fig. 8 Effects of inclination on flow regime transitions for horizontal and inclined upwards flow

성은 Weisman 등⁴⁾과 Dukler 와 Taitel⁵⁾의 실험결과에도 나타나 있다. 또 파상유동의 경우 경사각도가 증가함에 따라 매우 높은 기체 속도에서 존재한다는 사실을 알 수 있다. 이러한 현상은 작은 경사각도에서도 유동방향에 작용하는 중력의 힘이 벽전단응력에 커다란 영향을 끼친다는 사실을 암시한다. 본 연구에서는 기액체유량의 제한으로 액체속도 $0.1(m/s)$ 이하와 기체속도 $20(m/s)$ 이상의 유량에서의 실험은 수행할 수 없었으나 수평관에서의 파상유동과 환상유동의 천이영역이 Mandhane 등⁸⁾의 유동양식선도와 잘 일치하므로 액상유량이 큰 영역에서의 환상유동의 천이영역 구분은 이들의 천이곡선을 이용하였다. 수평관에서 경사각도가 2° 상향되면 파상유동에서 환상유동으로의 천이가 수평관에 비하여 조금 낮은 기체속도에서 일어나나 경사각도가 그 이상의 값에서는 파상유동과 환상유동의 천이영역 변화가 거의 없다는 사실을 알 수 있다. 그리고 이 그림에서 플러그유동과 슬러그유동의 천이는 경사각이 증가함에 따라 더 낮은 기체 속도에서 천이가 일어나며 플러그유동에서 pseudo-slug 유동영역으로의 천이 기상속도는 경사각도와 함께 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편 pseudo-slug 유동과 슬러그유동의 천이영역은 경사각에 크게 영향을 받지 않는 결과를 얻었다.

5. 결 론

본 연구에서는 경사각도 $2\sim 10^\circ$ 의 상향 기액 2 상유동에 대한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 오리피스에 순간압력강하치의 확률밀도함수의 통계치와 교란강도를 통한 유동양식의 천이 판별은 수평관에서 뿐만아니라 경사관에서도 신뢰할 만한 방법으로 간주될 수 있다. 경사각도에 따른 유동양식선도는 매우 작은 경사각도에도 성층유동이 사라지고 파상유동이 매우 높은 기체속도에서 존재하며 기포유동이 매우 작은 기체유량에서만 관찰되고 플러그유동영역이 넓어진다는 사실을 제시하고 있다. 그리고 순간압력강하의 교란치의 분석

을 통하여 플러그-슬러그 천이, pseudo slug-슬러그 천이, 환상-pseudo slug 천이 특성을 구명하였는데 이 결과는 수평관의 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

후 기

본 연구는 1987년도 문교부 학술연구조성비에 의하여 이루어졌습니다. 문교부 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Gould T.L., Tek M.R. and Katz D.L., "Two Phase Flow through Vertical, Inclined or Curved Pipes", J. Pet. Tech. Vol.26, pp.915-926, 1974.
2. Taitel Y. and Dukler A.E., "A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow", AIChE J. Vol.22, pp.47-55, 1976.
3. Barnea D., Shoham O., Taitel Y. and Dukler A.E., "Flow Pattern Transition for Gas-Liquid Flow in Horizontal and Inclined Pipes", Int. J. Multiphase Flow, Vol.6, pp.217-225, 1980.
4. Weisman J. and Kang S.Y., "Flow Pattern Transitions in Vertical and Upwardly Inclined Lines", Int. J. Multiphase Flow, Vol.7, pp.271-291, 1981.
5. Dukler A.E. and Taitel Y., "Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid Systems", Multiphase Science and Technology, Vol.2, pp.1-94, 1986.
6. 이 상천, 이 정표, 김 중엽, "오리피스 순간압력강하의 통계해석을 통한 수평 2상 유동양식의 결정", 대한기계학회논문집, 제 11권, 제 5호, pp. 810~818. 1987.
7. 이 상천, 이 정표, 김 중엽, "수평 기액 2상유동에서 유동양식의 천이특성", 공기조화 및 냉동공학회논문집, 제 17권, 제

4 頁, pp. 342 ~ 349, 1988.

8. 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.