

수직관에서 2상선회유동이 보이드분포와 압력강하에 미치는 영향

The Effects of Two-Phase Swirling Flow on Void Distribution and Pressure Drop in a Vertical Tube

김 인 석* 손 병 진** 신 현 동***곽 기 태****
I. S. Kim, B. J. Son, H.D. Shin, K.T. Kwack

ABSTRACT

This experimental investigation has been conducted to determine the effects of swirling angle and flow patterns on distributions of void fraction, bubble velocity and two-phase pressure drop in a vertical straight tube.

Swirling angles of 0° (non swirling), 30° , and 45° were tested with air-water two components over a range of superficial air velocities. A transparent lucite tube of 38mm in internal diameter was used for the test section.

The void fraction and bubble velocities were measured by means of a optical fiber probe at the upper part of the swirler in the test section. Pressure drops which seem to be closely related with flow patterns and swirling angle were measured by a differential pressure transducer.

It is shown that the probability density functions of pressure drop demonstrate peculiar features for both swirling angles and flow patterns, whereas the distributions of void fraction and bubble velocities are parabolic and flat shape in the vicinity of tube center, respectively except bubbly flow in any swirling angle cases, and the void fraction increases with increasing swirling angle around the center of tube.

기 호 설 명

	f_i	: 입사 도플러 주파수
	f_o	: 반사 도플러 주파수
θ	n_i	: 표본갯수
α	n_l	: 액상 골절을

본 논문은 1988년도 문교부 자유과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

* 정회원, 명지대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

*** 한국과학기술원 기계공학과

**** 정회원, 명지대학교 대학원 기계공학과

- n_g : 기상 굴절율
- $\overline{\Delta P}$: 평균압력
- $|\overline{\Delta P'}|$: 평균진폭
- $J(\Delta P')$: 교란강도
- ΔP^* : 무차원 압력강하
- J_{SL} : 결보기 불속도
- J_{SA} : 결보기 공기속도
- r : 광섬유프로브 위치
- R : 시험부 반경
- r/R : 상대 반경비
- T : 표본시간
- T_B : 기포 통과시간
- λ : 레이저 파장
- U : 기포속도

1. 서 론

2상유동계에서 발생하는 유동현상 중 유동양식, 보이드율 분포, 압력강하, 기포 거동들에 대한 연구들은 상당한 수준으로 수행이 되어 왔으나 대부분의 연구들은 기-액 혼합물이 축방향으로 유동하는 경우로서 냉동기나 각종 2상유동 유체기계와 열교환기등에 응용되는 선회유동에 대한 연구는 별로 없다. 선회 2상유동은 축방향 속도성분과 원주방향 속도성분을 지니기 때문에 2상간에 전단력 분포, 보이드율분포, 압력강하등을 포함한 유동특성들이 비선회유동인 경우와는 많은 차이점이 있다.

2상유동계에서 관길이 방향으로 발생하는 압력강하는 마찰손실, 가속손실, 정압손실로 구성되는데 일반적인 관로에서는 마찰손실이 압력손실의 대부분을 차지한다. 2성분이 수평관에서 비선회유동을 하는 경우는 Lockhart - Martinelli - Nelson 이 제시한 상관식⁽¹⁾이 보편적으로 사용되고 있으나 2상마찰계수와 실량 속도에 따라 오차범위의 증감이 있기 때문에 많은 상관식들이 다양한 유동조건으로 개발이 되어 왔다⁽²⁾ 선회유동은 단상류와 막비등을 포함한 2상류의 대류열전달계수와 압력강하를 증가시킬 뿐 아니라^{(3),(4)} 임계열

유속을 50~100% 범위까지 증가시킨다는 사실이 밝혀졌다^{(5), (6)}. 이들 연구들을 종합적으로 검토하여 보면 프로우드수, 누셀트수, 스톤튼수 등의 무차원수를 도입하여 평균열전달계수와 관련된 상관식을 제시하고 압력강하인 경우는 비선회유동과 선회유동시 발생하는 압력강하비와 테이프비틀음(tape twist ratio)로서 상관식을 제시하고 있을 뿐 선회기 각도와 유동양식에 따르는 보이드율분포와 압력강하에 대한 해석이 결여되어 있다.

관직경이 20~30mm 인 원관에서 비선회유동인 경우에 기포류에서는 관중양부보다 관벽근처에서 보이드율이 높게 나타나고 최대 보이드율은 무차원 반경비가 0.65~0.8되는 위치에 분포한다.⁽⁷⁾ 한편 관직경이 50~60mm 인 경우 최대보이드율은 관직경의 0.9배 되는 위치에서 발생한다. 일반적으로 관직경이 큰 경우는 보이드율이 관중양부에서 거의 균일하게 분포하는 반면에, 작은 경우는 오목한 포물선 형태로 분포한다. 이러한 사실은 최대보이드율의 발생위치에 영향을 주는 인자가 유로적경과 기포직경이라는 점을 시사한다. 슬러그류에서는 보이드율이 관중양부 영역에서 상당히 높은 값을 지니며 이때의 보이드율분포곡선은 관중양부에서 포물선형태를 보이고 관벽부근에서는 정점이 개재된 형태로 나타난다.⁽⁸⁾ 그러나 선회 2상유동인 경우는 선회효과로 인해 관내 보이드율분포와 기포속도가 달라질 것으로 생각된다.

한편 가압수행 원자로에 사용되는 1차냉각펌프에 2상류가 유동할 때 펌프성능은 입구 보이드율과 임펠러내의 보이드율에 영향을 받는다는 사실이 밝혀졌으나⁽⁹⁾ 입구부에서 형성되는 유동양식의 변화에 따르는 보이드율분포와 유동거동에 관한 해석은 제시되지 않고 있다.

이상에서 기술한 대부분의 선회 2상유동에 대한 연구들은 시험부 전체에 비틀림테이프를 삽입한 경우이고 시험부 입구부에 짧은 선회기를 장착하여 선회유동 특성을 구명한 연구는 없다. 그러므로 본 연구는 기-액 2성

본이 수직원관에서 선회유동을 할때 선회유동부 이전에 형성된 유동양식과 선회각도에 따르는 반경방향의 보이드울 분포, 기포속도 및 압력강하 특성을 실험적으로 분석하는데 목적이 있다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 실험장치는 Fig. 1 과 같이 비가열 수직 원관에서 공기와 물이 동시에 상향 선회유동을 하도록 공기압축기, 공기분사기, 기-액 혼합부, 선회시험부, 기-액 분리탱크, 순환수 저장탱크, 원심펌프, 기-액 유동속도 계측부로 순환회로를 구성하였다. 시험부에 유입되기 전의 유동양식이 기포류, 슬러그류, 환상류 및 각각의 천이유동양식이 발생되도록 공기와 순환수 유량을 관로에 설치한 글로우브 밸브를 이용하여 조절하였다. 각 상의 겉보기속도 계측용 오리피스는 ASME 에서 발간한 자료⁽¹⁰⁾를 참고로 하여 관경비가 0.6인 침단오리피스로 설계하여 동판으로 정밀제작한 후 보정하여 사용하였다. 순환수는 공기분사기에서 분출된 공기와 기-액 혼합부에서 혼합되어 2상류 발달부를 거쳐 선회기가 장착된 시험부에서 선회유동을 한 후 하강관을 통해 순환수 저장탱크에 회수되어 유동순환회로가 완료된

다. 2상류 발달부와 시험부를 제외한 배관은 부식을 방지하기 위하여 1 1/2 인치 스테인레스관을 사용하였다. 유동계에서 발생하는 압력강하에 영향을 미치는 기계적 진동을 최소화 시키기 위하여 주름고부호스를 이용하여 펌프와 관을 연결하였다.

2.2 선회시험부

Fig. 2는 선회시험부와 날개형 선회기를 나타내는데 선회기 날개의 선회각도 θ 는 30° 와 45° 두 종류로 동판으로 제작하였다. 시험부의 직경과 길이는 38 mm, 180 mm 이고 2상류 발달부의 직경과 길이는 각각 38 mm, 1,220 mm 로서 사진촬영을 목적으로 이들 모두는 루사이트재질을 사용하였다. 선회효과가 감쇄되지 않는 위치를 예비실험을 통하여 확인한 후 시험부에는 보이드울을 계측하기 위하여 선회기 상부로부터 180 mm 되는 곳에 직경 16 mm 의 계측공을 두고 반대편에는 압력강하를 계측하기 위하여 선회기 하단과 하단으로부터 180 mm 되는 곳에 각각 직경 2 mm 의 계측공을 뚫어서 2개의 압력탭을 장착하였다. 선회기는 동봉으로 지지하였다.

2.3 계측기기 및 자료처리

(1) 계측기기 및 프로우브

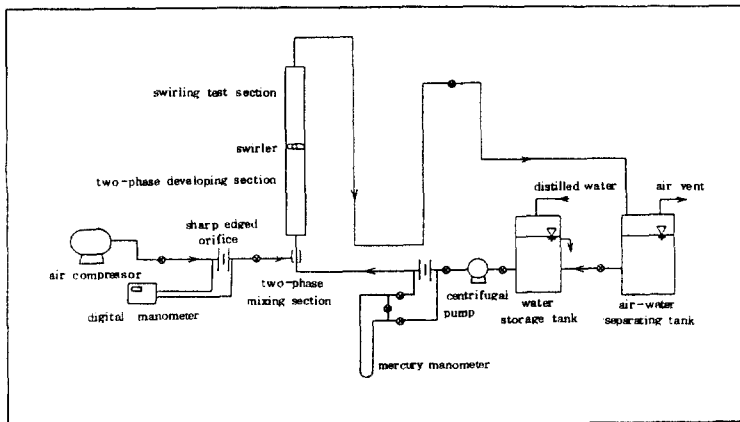


Fig. 1. Schematic diagram of the air-water swirling flow facility

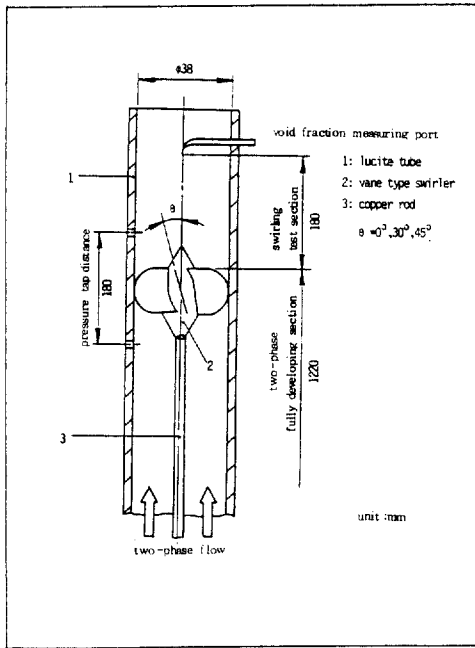


Fig. 2. Swirling flow test section and swirling vane

보이드율과 기포속도를 측정하기 위하여 본 실험에서는 L 자형 광섬유프로브를 사용하였는데 광섬유는 직경 0.35 mm 인 스테인레스봉에 들어가 있다.

보이드율과 기포속도는 He-Ne 레이저 광원으로부터 출사된 광이 기상과 액상을 통과

할 때에 굴절율과 입사광의 강도와 관련되는데, 프로브의 반사광은 전기신호로 변환되어 총표본시간 T 에 대한 기포가 통과하는 총시간 ΣT_B 의 비로, 즉 $\alpha = \Sigma T_B / T$ 로 정의되는 보이드율이 검출된다. 한편 기포속도는 도플러주파수와 관련된 다음 식에 의하여 검출된다.

$$\Delta f_i = 2n_i U / \lambda \quad (1)$$

$$\Delta f_o = 2n_g U / \lambda \quad (2)$$

여기서 f_i, f_o 는 입사, 반사 도플러주파수, n_i, n_g 는 액상과 기상의 굴절율, U는 기포속도, λ 는 레이저파장이다

시험부에서 발생하는 압력강하는 응답주파수가 10.5 KHz 인 스트레인게이지형의 차압용 압력변환기(Druck, PDCR 120/WL)를 이용하여 측정하였다.

(2) 자료처리

Fig. 3은 측정된 보이드율과 기포속도, 압력강하 자료들을 처리한 유동도를 나타낸 그림이다. 광섬유프로브의 출력신호는 2 상류 광신호처리기에서 도플러신호와 보이드신호로 검출되어 Gate Controller를 통하여 I/O Interface (24 D/O)가 연결된 16bit 마이크로 컴퓨터로 보내어 필요한 자료를 처리하였다.

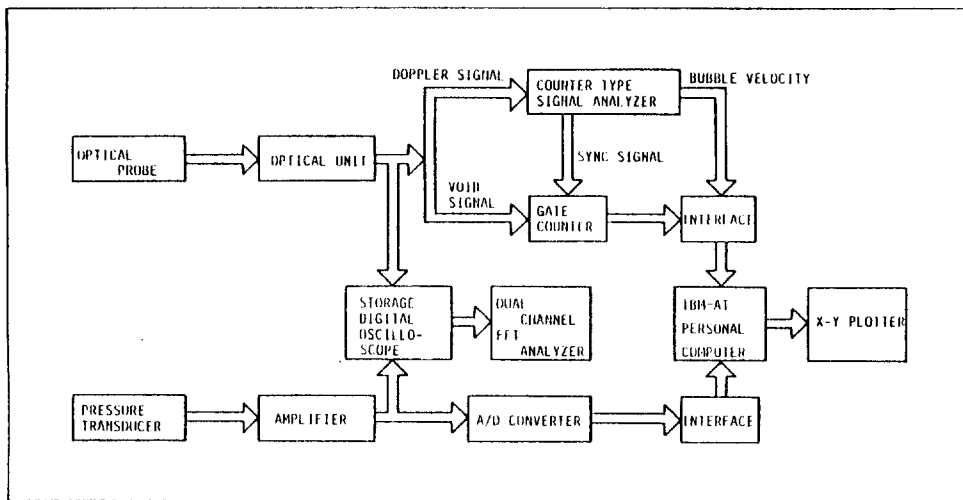


Fig. 3. Block diagram of the measuring system

한편 압력변환기에서 검출된 차압신호는 응답특성이 25 KHz 인 DC 증폭기(Instruments Division Measurement Group, 2310)를 거쳐 변환시간이 10 μ s 인 12bit A/D 변환기(Labin Master)와 연결된 마이크로 컴퓨터에서 통계처리한 후 플로터로 기록하였다.

2.4 압력강하와 관련된 기초이론

주어진 유동조건에서 발생하는 압력강하 $\Delta P(t)$ 는 평균압력 $\overline{\Delta P}$ 와 시간시리즈인 압력교란 성분 $\Delta P'$ 의 합으로 표시된다.

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

평균압력 $\overline{\Delta P}$ 는 다음과 같다.

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

압력교란성분의 평균진폭 $|\overline{\Delta P'}|$ 와 교란강도 $\Delta(\Delta P')$ 는 다음과 같이 정의된다.

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

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

$P(t)$ 를 P_i 와 $P_i + \Delta P_i$ 구간내의 값으로 가정할 경우 확률은 동일구간에 해당하는 총 측정시간 $T_i = \sum_{j=1}^{n_i} \Delta t_j$ 와 표본시간 T 의 비로 다음과 같다.

$$\text{Prob} [P_i < P(t) < P_i + \Delta P_i] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_i}{T} \quad (7)$$

여기서 Δt_j 는 해당구간의 시간순간증분으로 이때의 확률밀도함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{PDF}(\Delta P_i) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta P_i} \frac{T_i}{T} \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta P_i} \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \Delta t_j}{T} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 n_i 는 P_i 와 $P_i + \Delta P_i$ 구간에 대응하는 표본갯수이다.

상식들에서 T 는 표본시간으로 본 실험에서는 4 초로 취하였으며 표본시간 간격은 2ms, 표본갯수는 각 입력신호마다 2,000 개

씩 처리하였다.

2.5 실험방법

본 실험에서 결보기 물속도 J_{SL} 은 0.25m/s로 일정하게 유지하고 결보기 공기속도 J_{SA} 는 0.1 - 2.6m/s로 변화시켜 선회유동시험부에 유입하기 전에 기포류, 슬러그류, 환상류, 천이유동양식이 2상류 발달부에 형성되도록 하였다.

이때 유동양식은 원관에서의 경우⁽¹¹⁾와 Tutu⁽¹²⁾가 제시한 방법을 병행하여 판별하였다. 결보기 속도들은 오리피스 전후에 설치한 압력탭을 물인 경우는 수은액주계에서, 공기인 경우는 미세전자마노미터에 연결하여 각각 측정하였다.

실험은 소정의 유동양식에서 선회각도 $\theta = 0^\circ$ (비선회유동), 30° , 45° 순으로 광섬유프로브를 관중양부로부터 관벽면까지 반경방향으로 3mm 씩 이송하여 각 위치에서 보이드울과 기포속도를 2상류 신호처리기로 측정 한 후 이 신호를 디지털오실로스코프와 FFT에서 자료처리에 사용하였다. 보이드울에 대한 일련의 실험이 끝나면 선회각도를 변화시키면서 압력강하를 압력변환기로 측정하여 마이크로컴퓨터에서 식(8)을 사용하여 확률밀도 함수를 계산한 후 플로터로 그 분포를 기록하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 선회각도가 보이드울에 미치는 영향

Fig. 4~8은 유동양식과 선회각도 변화에 따른 보이드울분포를 나타낸 그림들로서 $r/R = 0$ 은 관중양부, $r/R = 1$ 은 관벽조건을 표시한다.

Fig. 4는 기포류인 경우로 비선회유동에서의 보이드울은 관벽 근처를 제외하고는 거의 변화가 없으나 선회각도가 증가함에 따라서 관중양부 쪽에서는 보이드울의 감소율이 증가한다. 한편 선회각도의 증가에 따라 보이드울은 관중양부로부터 $r/R = 0.3$ 까지는 증가하나 관벽으로 갈수록, 즉 $r/R = 0.6$ 부터는 반대로

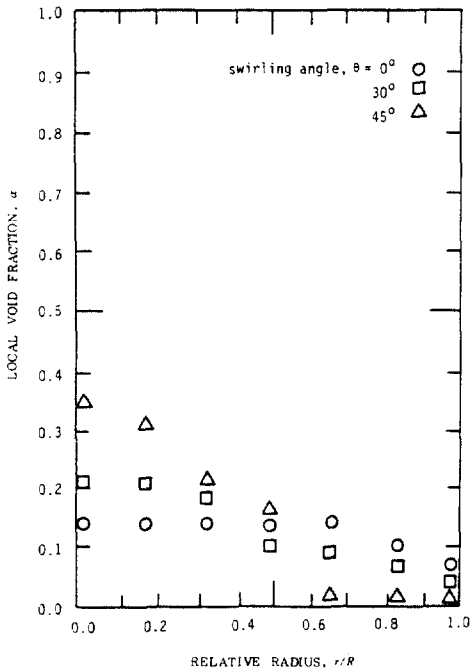


Fig. 4. Local void fraction profiles of bubbly flow for $J_{SL}=0.25$ m/sec and $J_{SA}=0.1$ m/sec

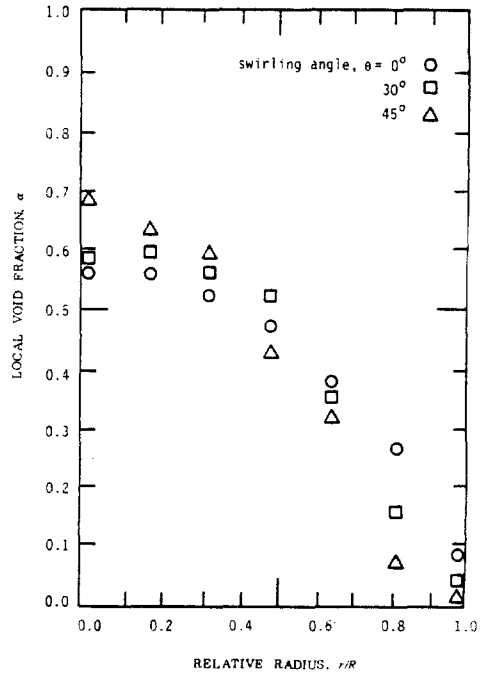


Fig. 6. Local void fraction profiles of slug flow for $J_{SL}=0.25$ m/sec and $J_{SA}=0.9$ m/sec

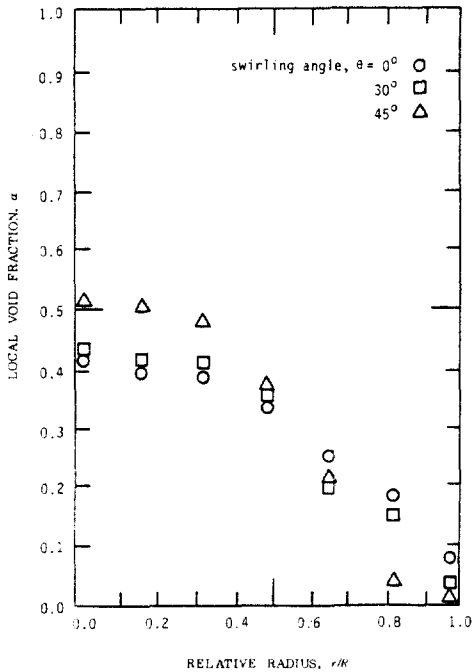


Fig. 5. Local void fraction profiles of bubbly-slug flow for $J_{SL}=0.25$ m/sec and $J_{SA}=0.3$ m/sec

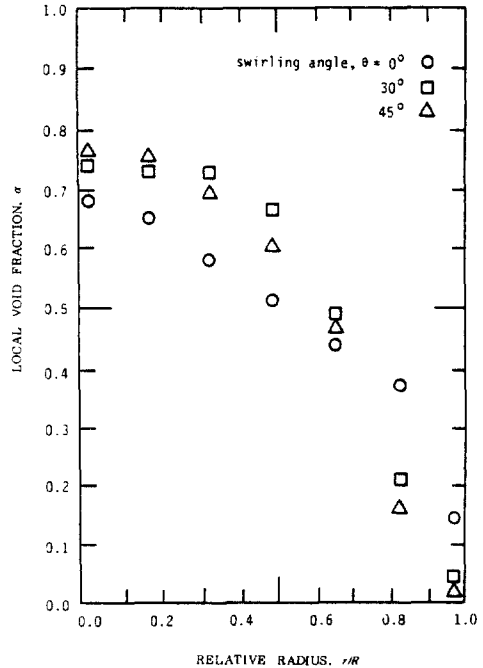


Fig. 7. Local void fraction profiles of slug-annular flow for $J_{SL}=0.25$ m/sec and $J_{SA}=1.2$ m/sec

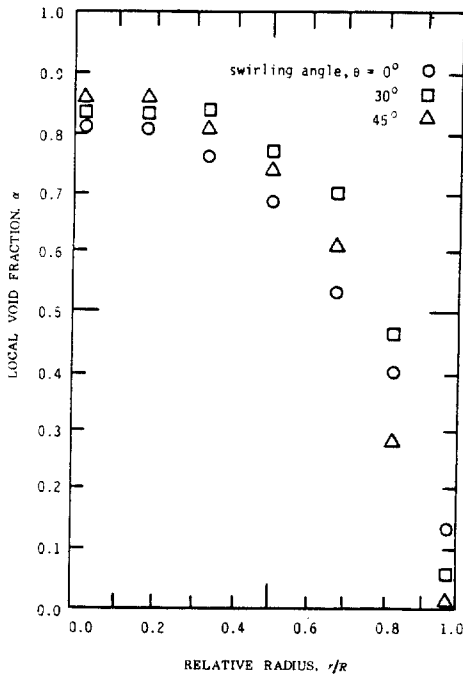


Fig. 8. Local void fraction profiles of annular flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 2.6$ m/sec

보이드율은 완만하게 감소한다. $\theta = 45^\circ$ 인 경우는 관벽근처에서 보이드율이 거의 0의 값을 지님으로 기포들은 유동하지 않고 액상만 유동함을 알 수 있다. 관중상부와 관벽쪽에서의 보이드율의 차는 선회각도가 증가함에 따라 커지는 경향을 나타낸다. 다른 유동양식에 비하여 선회각도가 보이드율에 미치는 영향이 관중상부 쪽에서 크게 나타나고 있다.

Fig. 5는 기포류-슬러그류 천이인 경우로 $r/R = 0.3$ 까지는 어느 선회각도에서나 보이드율은 거의 일정하고, 선회각도의 증가에 따라 보이드율은 $r/R = 0.5$ 까지 증가하나 관벽으로 갈수록, 즉 $r/R = 0.8$ 부터 선회각도의 증가에 따라 보이드율은 기포류인 경우보다도 크게 감소한다.

Fig. 6은 슬러그류인 경우로 $r/R = 0.3$ 까지는 $\theta = 0^\circ$ 와 30° 에서 보이드율의 변화는 비교적 없고, 선회각도의 증가에 따라 보이드율은 증가하나 관벽으로 갈수록, 즉 $r/R = 0.6$

부터 급격히 감소한다. 모든 선회각도에서 보이드율은 포물선형태로 분포한다. 관벽쪽에서는 선회각도가 증가함에 따라서 보이드율이 0에 가까워지므로 액상이 지배적으로 유동함을 알 수 있다.

Fig. 7은 슬러그류-환상류 천이인 경우로 $\theta = 30^\circ$ 와 45° 에서의 보이드율값이 비슷하므로 선회효과가 보이드율 분포에 미치는 영향이 비교적 적고, $\theta = 0^\circ$ 에서는 관벽 부근에서의 보이드율이 선회효동인 경우보다 높다. $r/R = 0.8$ 부터는 선회각도가 증가함에 따라 보이드율은 감소하고 있다. 선회각도에 관계없이 보이드율 분포는 포물선 형태이다.

Fig. 8은 환상류인 경우로 선회각도에 관계없이 보이드율분포는 포물선 형태가 되며 관중상부에서는 선회효과가 보이드율분포에 미치는 영향이 적다. $0.3 < r/R < 0.8$ 의 넓은 범위에 걸쳐서 보이드율은 $\theta = 30^\circ$ 인 경우가 $\theta = 45^\circ$ 인 경우보다 높다.

3.2 선회각도가 기포속도에 미치는 영향

Fig. 9~13은 유동양식과 선회각도 변화에 따르는 기포속도 분포를 나타낸 그림들로서 일반적인 경향은 선회각도가 증가함에 따라 기포속도가 증가하고, 동일선회각도인 경우 관벽쪽을 제외한 영역에서의 기포속도는 거의 변화가 없는 평탄한 분포를 나타내고 있다.

Fig. 9는 기포류인 경우로 선회각도가 증가함에 따라서 기포속도가 $r/R = 0.7$ 까지는 증가하나 동일한 선회각도에서는 관벽을 제외하고 기포속도의 변화는 거의 없다. $\theta = 45^\circ$ 인 경우 관벽에는 액상만이 유동하므로 기포속도는 0이 된다. 다른 유동양식에 비해서 선회효과가 기포속도에 미치는 영향이 가장 크다.

Fig. 10은 기포류-슬러그류 천이인 경우로 선회각도의 증가에 따라서 $r/R = 0.5$ 까지 기포속도는 약간씩 증가하나 동일 선회각도에서는 그 변화가 거의 없다. 한편 $r/R = 0.8$ 부터는 선회각도 증가에 따라 기포속도는 감소하

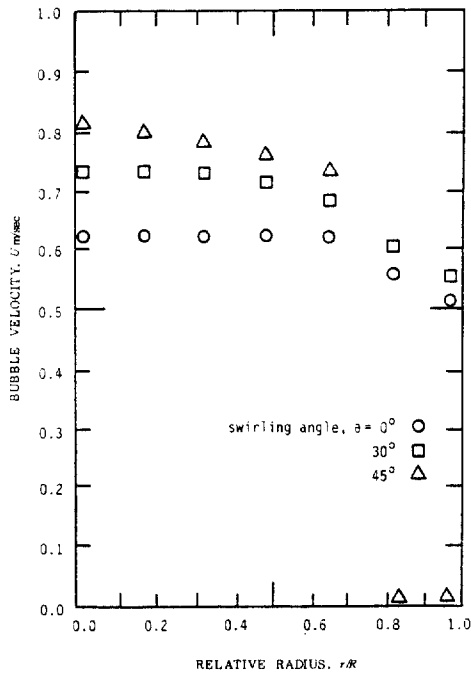


Fig. 9. Bubble velocity profiles of bubbly flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 0.1$ m/sec

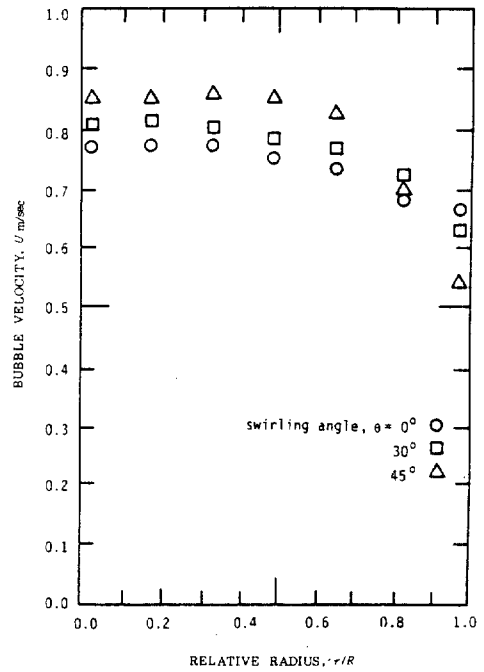


Fig. 11. Bubble velocity profiles of slug flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 0.9$ m/sec

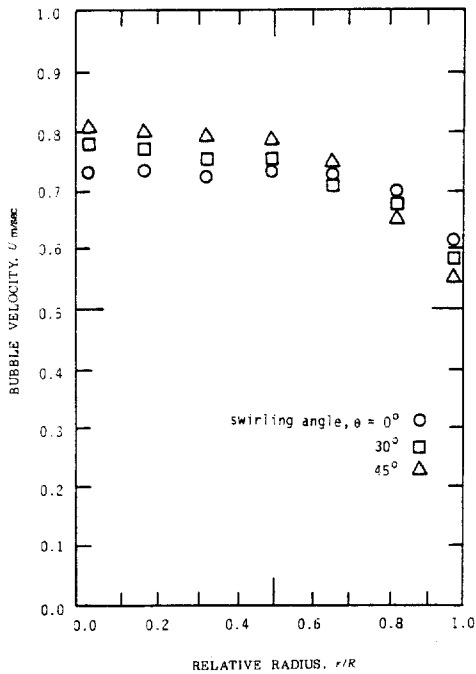


Fig. 10. Bubble velocity profiles of bubbly-slug flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 0.3$ m/sec

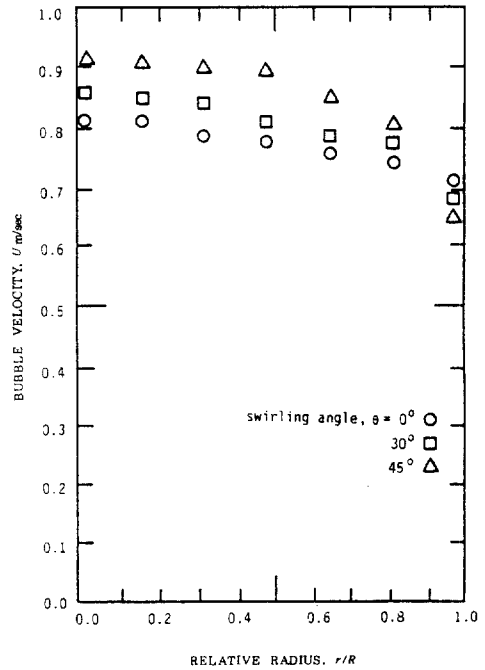


Fig. 12. Bubble velocity profiles of slug-annular flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 1.2$ m/sec

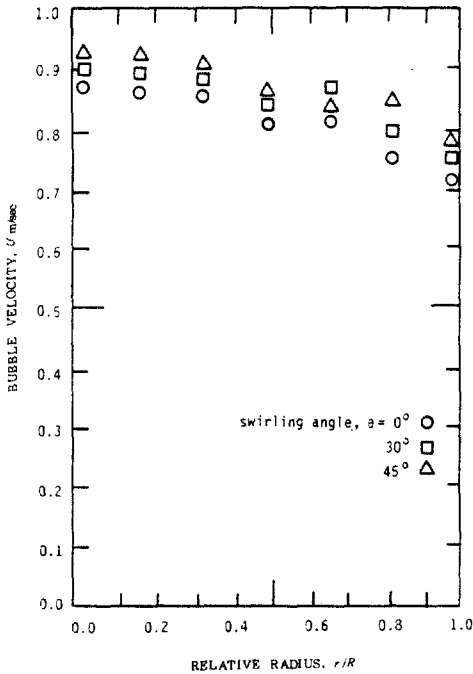


Fig. 13. Bubble velocity profiles of annular flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 2.6$ m/sec

고 있다.

Fig. 11은 슬러그류인 경우로 Fig. 9와 같은 경향을 보이고 있으나 선회각도 증가에 따르는 관벽쪽에서의 기포속도들의 차는 크다. 또한 선회각도가 증가함에 따라 관중앙부와 관벽쪽에서의 기포속도의 차는 증가하고 있다.

Fig. 12는 슬러그류-환상류인 경우로 $r/R = 0.7$ 까지 선회각도 증가에 따라 기포속도는 증가하고 동일각도에서는 약간씩 감소한다. 관벽근처에서의 기포속도의 차는 적다.

Fig. 13은 환상류인 경우로 관중앙부쪽 ($r/R < 0.5$)에서는 선회각도 증가에 따라 기포속도가 미소하게 증가하고 동일각도에서는 감소하고 있으나 선회효과가 기포속도에 미치는 영향이 적고 다른 유동양식과 달리 관벽쪽에서, 즉 $r/R = 0.8$ 부터 기포속도는 선회각도의 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다.

3.3 확률밀도함수 분포에 의한 압력강하 해석

Fig. 14~20은 선회각도와 유동양식에 따르는 압력강하분포를 확률밀도함수로 나타낸 그림들로서 횡축의 ΔP^* 는 압력강하를 액체정압으로 나눈 무차원 압력강하치이다. 선회 2상유동계에서 발생하는 압력강하에 영향을 미

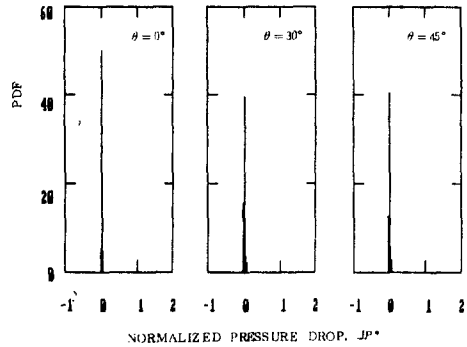


Fig. 14. Probability density functions of the pressure drop in air flow only for $J_{SL} = 0$ m/sec and $J_{SA} = 1.2$ m/sec

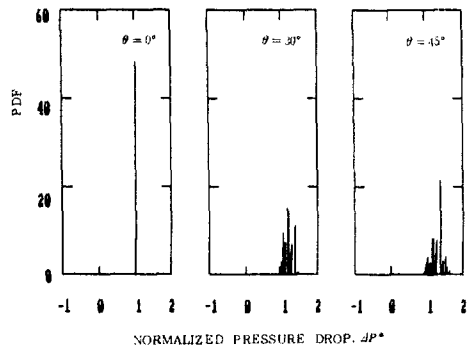


Fig. 15. Probability density functions of the pressure drop in liquid flow only for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 0$ m/sec

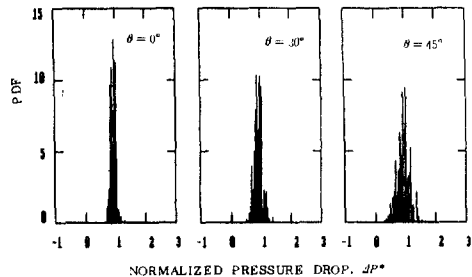


Fig. 16. Probability density functions of the pressure drop in bubbly flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 0.1$ m/sec

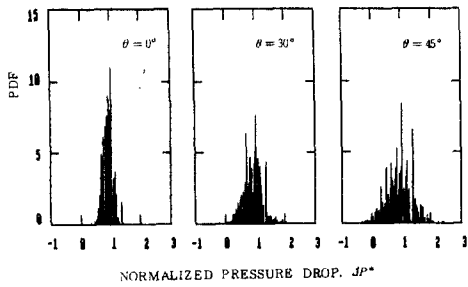


Fig. 17. Probability density functions of the pressure drop in bubbly-slug flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 0.3$ m/sec

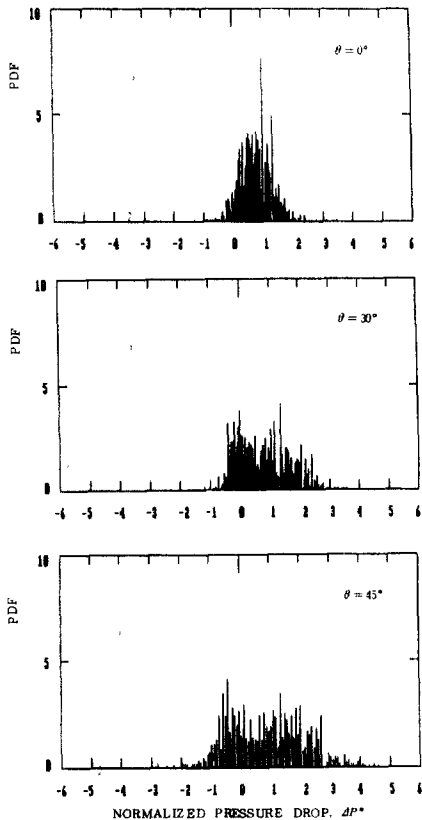


Fig. 18. Probability density functions of the pressure drop in slug flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 0.9$ m/sec

치는 정압손실과 가속손실, 마찰손실 중 어느 성분이 더 지배적으로 작용하는가 하는 점을 해석하는 일은 흥미있는 일이다. ΔP^* 가 0 과 1 사이에 분포하는 것은 정압손실을 의미하고, 0 과 1 범위를 이탈하여 분포하는 것은 가속

손실과 마찰손실로 인한 동적손실을 나타낸다.

Fig. 14는 공기만 유동한 경우로서 선회각도에 관계없이 확률밀도함수분포는 $\Delta P^* = 0$, 즉 보이드율 $\alpha = 1$ 에서 높은 값의 단일 정점으로 분포하는 반면에 물만 유동시킨 경우(Fig. 15)는 $\theta = 0^\circ$ 의 경우 $\Delta P^* = 1$, 즉 $\alpha = 0$ 에서 높은 확률밀도함수로 단일정점으로 분포한다. 그러나 선회각도가 증가함에 따라 동적손실이 증가하고 있다.

Fig.16~20에 나타난 일반적인 경향은 비선 회유동과 선회유동 어느 경우나 기포류에서 환상류로 유동양식이 천이하고, 선회각도가 증가함에 따라서 ΔP^* 가 점차적으로 0 과 1을 이탈하여 넓게 분포하므로 동적손실의 증가로 인한 압력파동이 격렬해짐을 알 수 있다.

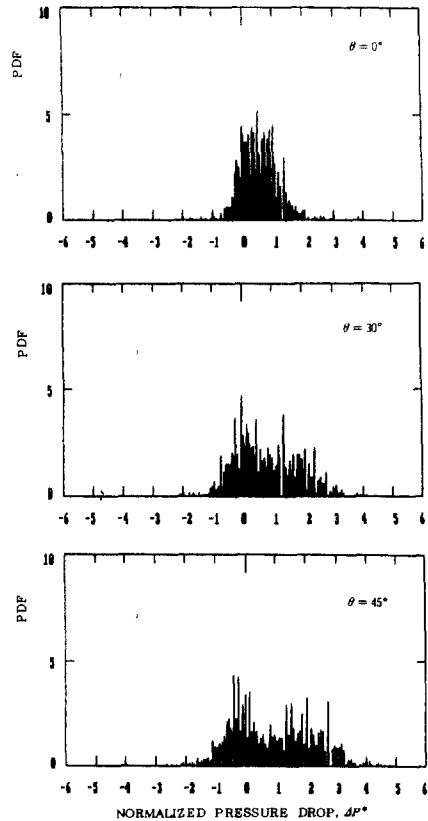


Fig. 19. Probability density functions of the pressure drop in slug-annular flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 1.2$ m/sec

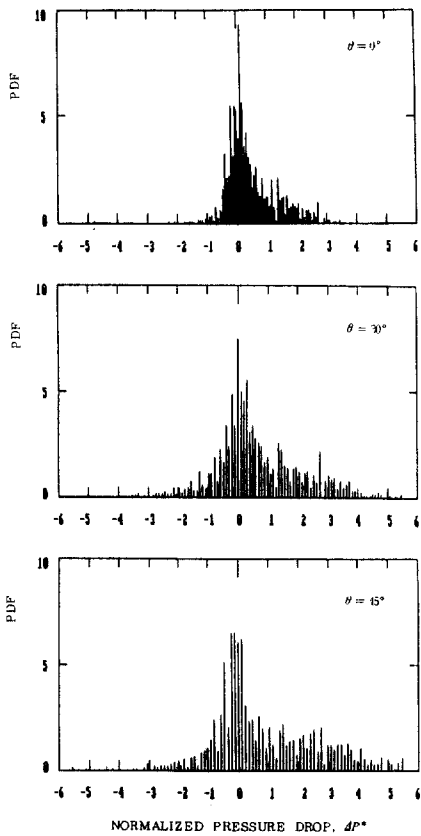


Fig. 20. Probability density functions of the pressure drop in annular flow for $J_{SL} = 0.25$ m/sec and $J_{SA} = 2.6$ m/sec

한편, 정압손실은 감소하고 있는데 이와 같은 경향은 Vohr⁽¹³⁾의 연구결과와 동일하다.

기포류에서는(Fig. 16) 비선회유동인 경우 정압손실이 압력강하의 대부분을 차지하고 선회유동인 경우 선회각도 증가에 따라 동적손실이 증가하고 있다. 기포류-슬러그류 천이 유동에서는(Fig. 17) 선회각도가 증가함에 따라 ΔP^* 가 0에 접근하는 동시에 1을 넘어서 분포함으로 정압손실과 동적손실이 함께 증가하고 있다. 슬러그류에서는(Fig. 18) 비선회유동인 경우 정압손실이 대부분 압력강하의 요인이 되나 선회유동인 경우는 선회각도의 증가에 따라 정압손실이 감소하면서 동적손실이 크게 증가하고 있으며 $\theta = 30^\circ$ 와 $\theta = 45^\circ$ 에서 2개의 정점을 지니는 분포를 나타낸다. 또

한 슬러그류부터의 유동양식에서 나타나는 특징은 벽면에서 유동하는 액막의 역류현상으로 인하여 ΔP^* 가 부(-)의 값을 지니는데 이는 마찰손실의 증가를 의미한다. 슬러그류와 슬러그-환상류 천이유동인 경우(Fig. 19) 기포류에 비하여 확률밀도함수가 낮은 정점을 지니면서 넓게 분포하는데 이는 기포류보다 압력파동이 증가함을 의미한다. 환상류에서는(Fig. 20) 비선회유동인 경우 확률밀도함수가 $\Delta P^* = 0$ 에서 가장 높고 선회유동인 경우는 선회각도 증가에 따라 정점이 감소하면서 분포폭이 확장되므로 동적손실이 크게 증가하는 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

기-액 선회 2 상류가 원관에서 상향유동을 하는 경우에 유동양식과 선회각도가 보이드율분포와 기포속도, 압력강하에 미치는 영향을 구명한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 보이드율은 선회각도에 관계없이 관중앙부쪽에서 높고 관벽쪽에서는 낮은 포물선 형태로 분포하며(기포류 제외), 모든 유동양식에서 선회각도가 증가함에 따라서 관중앙부쪽에서 그 값이 증가하는 반면에 관벽쪽에서는 반대로 감소한다.

(2) 기포속도는 관중앙부쪽에서 선회각도가 증가함에 따라 모든 유동양식에서 증가하고, 동일 선회각도에서는 관벽쪽을 제외한 영역에서 그 변화가 거의 없는 평탄한 분포를 나타낸다.

(3) 유동양식이 기포류에서 환상류로 천이하거나 선회각도가 증가함에 따라서 정압손실보다 동적손실이 압력강하에 지배적으로 영향을 미치며, 슬러그류부터의 유동양식에서는 액막의 역류현상으로 인하여 마찰손실이 증가한다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 1988년도 자유공모과제 연구비 지원에 의하여 수행되

였기에 관계자 여러분께 심심한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Martinelli, R.C., Nelson, D.B., and Schemm, N.Y., 1948, "Prediction of Pressure Drop during Forced Circulation Boiling of Water", *Tran. of ASME*, Vol.70, pp.695-702.
2. Staub, F.W., 1969, "Two-Phase Fluid Modeling - The Critical Heat Flux", *Nuci. Sci. Eng.*, Vol.35, pp.190-199.
3. Bergles, A.E., Fuller, W.D., and Hynek, S.J., 1971, "Dispersed Flow Film Boiling of Nitrogen with Swirl Flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.14, pp.1343-1354.
4. Agrawal, K.N., Varma, H.K., and Lai, S., 1982, "Pressure Drop during Forced Convection Boiling of R-12 under Swirl Flow", *J. of Heat Transfer*, Vol.104, pp.758-762.
5. Whalley, P.B., 1979, "The Effect of Swirl on Critical Heat Flux in Annular Two-Phase Flow", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.5, pp.211-217.
6. Gambill, W.R., Bundy, R.D., and Wansbrough, R.W., 1961, "Heat Transfer, Burnout, and Pressure Drop for Water in Swirl Flow through Tubes with Internal Twisted Tapes", *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. No.32*, Vol.57, pp.127-137.
7. Kazin, I.V., 1964, "Radial Distribution of Stream in Rising Turbulent Steam-Water Flow", *Teploenergetika*, Vol.11, No. 1, pp.40-43.
8. Serizawa, A., Kataoka, I., and Michiyoshi, I., 1975, "Turbulence Structure of Air-Water Bubbly Flow - I. Measuring Techniques", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.2, pp.221-233.
9. Patel, B.R., Runstadler, R.W., Jr., 1978, "Investigations into the Two-Phase Flow Behavior of Centrifugal Pumps", *ASME Sym. Polyphase Flow in Turbomachinery*, San Francisco, California, Dec. 11-15.
10. ASME, 1959, "Flow Meter and Its Application", New York
11. 손병진, 김인석, 이진, 1986. "확률밀도 함수와 전도프로우브 신호에 의한 수직 이상류의 유동양식특성" 대한기계학회논문집, 제 10 권, 제 6 호, pp. 814-822
12. Tutu, N.K., 1982, "Pressure Fluctuations and Flow Pattern Recognition in Vertical Two Phase Gas-Liquid Flows", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.8, No.4, pp.443-447.
13. Vohr, J.H., 1959, "Hydrostatic Pressure Drop in Two - Phase Flow", *USAEC Rep. TID 5673*.