

<論 文>

垂直二相流에서 流動方向과 同心圓管 間隙이 流動樣式과 보이드分布에 미치는 影響(I)

—第1報: 上向流動인 경우—

孫炳鎭*·金仁錫**·金文喆***

(1987年 7月 15日 接受)

Effects of Flow Direction and Annular Gap Size on the Flow Pattern and Void Distribution in a Vertical Two-Phase Flow(I)

—In Case of Upward Flow—

Byung Jin Son, In Suhk Kim and Moon Chull Kim

Key Words: Two-phase Flow(二相流動), Flow Pattern(流動樣式), Variance(分散度), Skewness(非對稱度), Kurtosis(尖度), Time-Averaged Local Void Fraction(時間平均局部보이드率), Annular Gap Size(環狀間隔)

Abstract

In the present paper a statistical method using probability density function has been applied to investigate experimentally the flow patterns and fluctuations of time-averaged local void fraction in air-water two-phase mixtures which flow vertically upwards in concentric annuli.

This study was carried out using three vertical concentric annuli. The annular test section consists of a lucite outer tube whose inside diameter is 38mm and a stainless steel inner rod. The rod diameter is either 12mm, 16mm or 20mm.

The two-phase flow patterns observed in the experiment were bubbly, slug, annular and each transition patterns.

It was first demonstrated that the variance, coefficients of skewness and kurtosis calculated from probability density function on time-averaged local void fraction can be used to identify the flow patterns in the annular passage, and the fluctuation of time-averaged local void fraction varies with the radial position in annular gap and the flow pattern.

1. 序 論

* 正會員, 漢陽大學校 工科大學 機械工學科

** 正會員, 明知大學校 工科大學 機械工學科

*** 正會員, 仁荷工業專門大學 機械科

率의 向上을 目的으로 활발히 進行되어 왔는데, 熱傳達率은 氣相과 液相의 流動條件에 따라 形成되는 流動樣式과 밀접한 關聯이 있음이 밝혀졌다. 二相間에 현저한 密度差가 있는 無液二相流動에 있어서 系의 熱水力學의 狀態量들은 各相의 分布에 의해 상당한 影響을 받으며, 보이드率의 變化에 따라 形成되는 流動樣式은 系壓力, 熱流束, 流動方向들에 의존한다.

流動樣式에 관한 많은 研究들이 그동안 多様な 計測方法⁽¹⁾을 利用하여 實驗적으로 進行이 되어 왔으나 대부분의 研究들은 流體와 固體界面에서 發生하는 反射와 屈折으로써 流動樣式을 可視적으로 判別하였기 때문에 資料의 不確實性이 內在되어 왔다. 또한 流動樣式을 定量的 方法보다 定性的으로 分析하였기 때문에 研究者에 따라 그 判別基準을 달리하고 있다. 이러한 문제점을 解決하기 위하여 1960年代 중반기부터 統計的方法을 利用한 研究^(2,3)들이 처음으로 시도되었으며, 最近에 와서 壓力降下의 變動⁽⁴⁾, 界面通過周波數⁽⁵⁾, 液體와 蒸氣의 溫度⁽⁶⁾를 計測하여 이들을 確率密度函數(probability density function), 히스토그램(histogram) 스펙트럼密度(spectral density)와 같은 統計的方法들으로써 流動樣式들을 究明하고 있다.

以上 記述한 바와 같이 流動樣式에 관한 研究들이 활발히 進行되어 오고 있으나 대부분의 研究들은 단순한 形狀인 圓管內에서의 二相流動에 관한 것이 대부분으로 加壓水型 原子爐, 各種 熱交換器의 管群의 설계, 化學反應過程 등의 工學的 應用과 關聯된 環狀流路에 있어서의 流動樣式에 관한 系統的이고 定量的인 研究가 없는 실정이다.

Semenenko⁽⁷⁾ 등은 氣-水 二相流가 垂直上向 環狀管에서 流動하는 경우에 實驗과 關聯된 파라미터들을 變化시키면서 可視的 觀察方法으로써 流動樣式을 判別하고, 이들에 따르는 보이드率의 特性을 究明하였으나 流動樣式을 定量的으로 提示하지 못하였다. Sekoguchi⁽⁸⁾ 등은 氣-水 二相流가 同心環狀圓管에서 上向流動을 하는 경우에 可視的 方法과 等價氣泡直徑을 計測하여 얻은 資料로써 流動樣式을 最初로 分析하였다. 그러나 이들도 各 流動樣式과 各各의 遷移條件을 明確히 定量的으로 提示하지 못하였을 뿐 아니라, 특히 슬러그流와 環狀流인 경우 計測한 等價氣泡直徑이 氣泡의 形狀과 크기 때문에 문제가 있다.

以上의 研究結果들은 流動樣式의 判別을 可視的 觀察에 基礎를 두었기 때문에 보다 明確한 定量的 分析方法의 確立이 必要하다고 생각된다.

本 研究는 同心圓管에서 氣-水 二相流가 上向과 下

向流動을 하는 경우에 대하여 時間平均 局部보이드率을 計測하여 確率密度函數를 구하고, 이들로부터 統計量인 分散度, 非對稱度係數, 尖度係數를 計算하여, 이들 값과 流動樣式을 關聯시켜 流動樣式의 判別基準을 定量的으로 提示하는데 目的이 있다. 또한 環狀間隙과 間隙의 半徑方向 位置 및 流動樣式에 따르는 時間平均 局部보이드率의 變動을 究明하는데도 目的을 두어 일차적으로 上向流動 경우에 대한 研究結果를 報告한다.

2. 實 驗

2.1 實驗裝置

Fig. 1은 本 實驗에 使用한 二相流動 實驗裝置로 非加熱垂直 同心環狀圓管에서 空氣와 물이 上向과 下向流動을 하도록 設計製作하였다. 二相流 循環回路는 5 마력 용량의 空氣壓縮機, 空氣噴出器, 氣-水 混合部, 同心圓管 試驗部, 氣-水 分離탱크, 循環水 저장탱크, 1 마력 용량의 遠心펌프, 氣-水 流動速度 計測部로 構成되었다. 循環水는 蒸溜器를 통과하여 용량 400l의 循環水 저장탱크에 供給되어 實驗中에는 그 水位를 800mm로서 一定하게 維持하였다. 空氣와 循環水 流量은 $1\frac{1}{2}$ " 글로우브 밸브에 의하여 各各의 流量을 調節함으로써 同心圓管 試驗部內의 流動狀態를 氣泡流, 슬러그流, 環狀流, 遷移流動樣式이 發生되도록 하였다. 各相의 體積流量 計測用 오리피스는 ASME에서 發刊한 資料⁽⁹⁾를 기준으로 하여 空氣인 경우는 管徑비가 0.60, 물인 경우는 0.53인 尖端오리피스(sharp edged orifice)로 設計하여 銅板으로 精密製作한 후 補正하여 使用하였다. 循環水는 오리피스를 통과한 후 空氣噴出器에서 噴出된 空氣와 氣-水 混合部에서 混合되어 同心圓管 試驗部에 流入하여 上向流動을 한다.

Fig. 2는 氣-水 混合部の 圖示로, 空氣噴出器는 內徑 28mm, 길이 230mm인 黃銅管圓周에 10mm의 一定間隔으로 直徑 0.5mm로 드릴링하여 120개의 구멍이 加工되어 있다. 壓縮機에 裝着된 壓力調整器에서 所定壓力로 調節된 空氣는 空氣필터를 지나 空氣噴出器를 通過하여 循環水와 混合, 氣-水 二相流가 形成된다.

氣-水 二相流는 內徑 38mm, 길이 1,140mm인 루사이트(lucite) 混合管을 지나 內徑 38mm, 길이 530mm인 同心圓管 試驗部로 流動한다. 同心圓管의 外管은 사진촬영을 目的으로 루사이트管을 使用하였다. 時間平均 局部보이드率(以下 보이드率로 表記)을 計測하

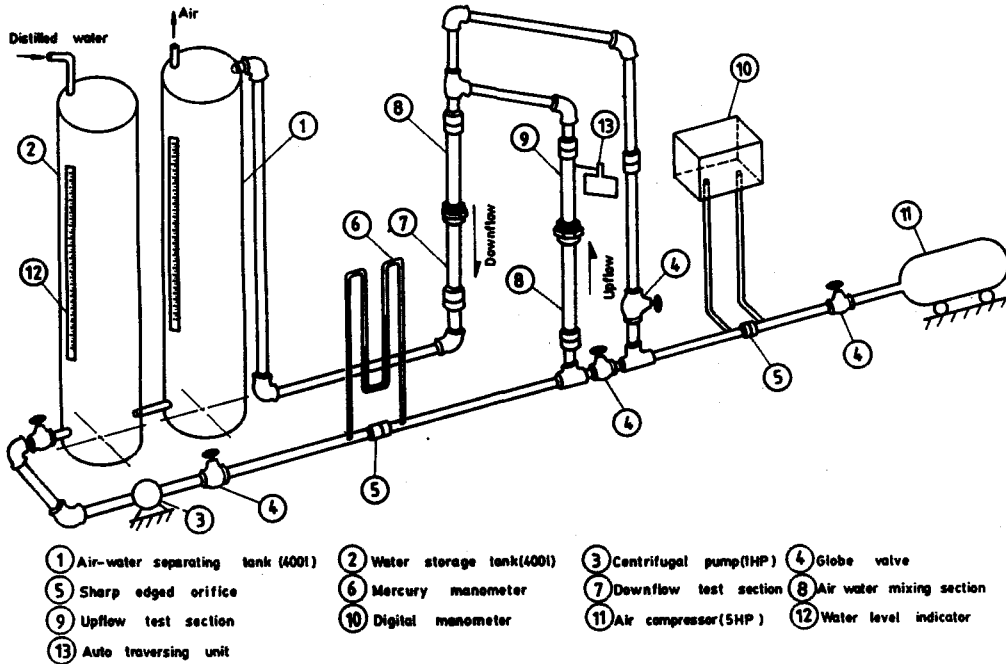


Fig. 1 Schematic diagram of the air-water two phase flow facility

기 위한 計測孔은 二相流가 充分히 發達되는 距離를 감안하여 試驗部 出口端으로부터 325mm 下部의 位置에 鑿어서 프로우브를 삽입하였다. 試驗部를 流出한 氣-水 二相流는 下降管을 통해 氣-水 分離탱크에 流入되어 氣-水가 分離된 후 循環水는 循環水 저장탱크에 回收되어 流動循環回路가 完了된다. 實驗中 系內의 壓力는 大氣壓近傍으로 유지하였다. 試驗部의 垂直方向 振動幅을 다이얼게이지로 試驗部 中央部에서 計測해 본 結果 $\frac{5}{100}$ mm의 振動이 測定되었다. 試驗부와 氣-水 混合部の 外管을 除外한 配管에 使用한 管과 엘보우들은 腐蝕을 防止하기 위해 $1\frac{1}{2}$ " 스테인레스 材質(SUS 306)을 使用하였다.

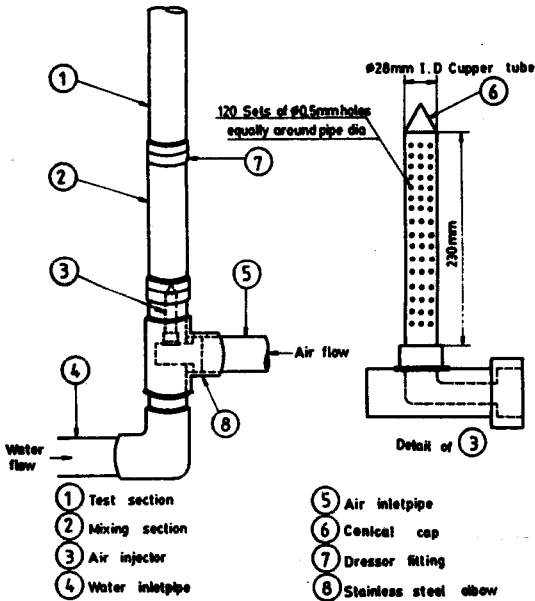


Fig. 2 Two phase mixture injector

2.2 試驗部

Fig. 3은 試驗部와 內管棒 지지부를 나타낸 그림으로 試驗部는 무사이트 材質인 內徑 38mm의 外管에 直徑이 12mm, 16mm, 20mm인 스테인레스 內管棒을 實驗條件에 附合되도록 同心으로 各各 끼워서 同心環狀 流路를 形成시켰다. 그러므로 이때 同心環狀間隙은 13mm, 11mm, 9mm, 즉 水力學的 等價直徑은 26mm, 22mm, 18mm에 相當한다. 正確한 同心을 維持하고

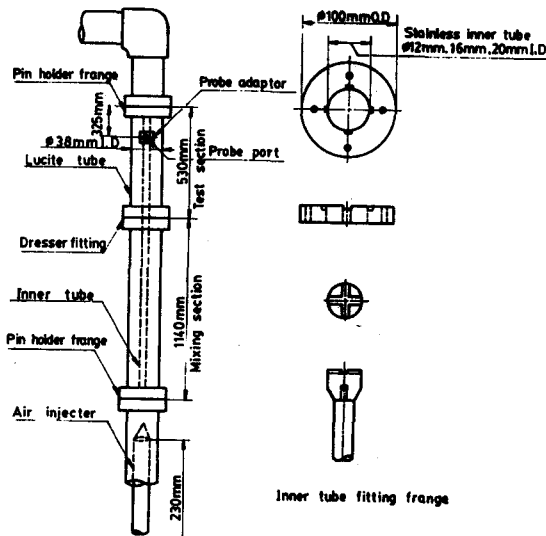


Fig. 3 Test section and inner tube fitting frange

內管棒의 振動을 防止하기 위하여 流動에 影響을 미치지 않는 位置에 內管棒 지지용 핀 3個를 120° 角度로 同一圓周上에 裝着하고, 內管棒의 上下端에는 內管棒 지지용 후렌지 2個를 設置하였다.

2.3 計測機器 및 資料處理

實驗에 使用한 計測機器와 資料處理 方法은 既遂行한 研究⁽¹⁰⁾와 同一하므로 本文에서는 略述하기로 한다.

(1) 電氣傳導 프로우브 및 보이드率 計測器

實驗에 使用한 보이드率 計測用 프로우브는 液相과 氣相이 同時에 流動하는 경우 發生하는 電氣傳導度差의 原理를 利用한 電氣傳導 프로우브로서 보이드率 計測에 影響을 미치지 않도록 L字型을 使用하였다.

프로우브의 出力信號는 입력컨디셔너, 지류볼트미터, 보이드率 유니트로 構成이 된 보이드率 計測器(시스템 7931)에서 檢出된다. 보이드率 計測器에 애넬로그 回路의 周波數 應答特性은 15kHz에서 3dB 降下한 값으로 本 實驗에서 氣泡周波數를 計測해 본 結果 21.48~107.9Hz 범위로 實驗에 使用한 보이드率 計測器의 周波數 應答特性은 보이드率을 檢出하는데 充分하다.

(2) 確率密度函數 理論과 統計的 모우멘트

보이드率을 計測하여 얻어진 資料들은 다음과 같은 統計的 理論에 의하여 處理되었다.

$\alpha(t)$ 를 α_i 와 $\alpha_i + \Delta\alpha_i$ 區間內의 값으로 가정한 경우의 確率은 同一區間內에 해당하는 總計測時間 $T_i =$

$\sum_{j=1}^{n_i} \Delta t_j$ 와 標本時間 T 의 比로 다음과 같다.

$$\text{Prob}[\alpha_i < \alpha(t) < \alpha_i + \Delta\alpha_i] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_i}{T} \quad (1)$$

여기서 Δt_j 는 해당구간의 瞬間時間增分이다. 이 때의 確率密度函數는 다음과 같이 定義된다.

$$p(\alpha) = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta\alpha_i \rightarrow 0}} \frac{1}{\Delta\alpha_i} \frac{T_i}{T} = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta\alpha_i \rightarrow 0}} \frac{1}{\Delta\alpha_i} \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \Delta t_j}{T} \quad (2)$$

한편 α_i 와 $\alpha_i + \Delta\alpha_i$ 區間에 對應하는 標本個數를 n_i , 標本時間에 對應하는 總個數를 N 라 하면 式 (1)은 다음과 같이도 定義된다.

$$p(\alpha) = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta\alpha_i \rightarrow 0}} \frac{1}{\Delta\alpha_i} \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

이 때의 平均 確率密度函數 $\overline{p(\alpha)}$ 는 다음과 같다.

$$\overline{p(\alpha)} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_k(\alpha) \quad (4)$$

한편 流動樣式을 定量的으로 分析하기 위하여 確率密度函數와 關聯된 모우멘트들을 計算하는데 使用한 式들은 다음과 같다.

$$\alpha = \sum_{i=1}^N \alpha_i p_i \quad (5)$$

$$M_n = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha)^n p_i \quad (6)$$

$$CM_3 = M_3 / M_2^{1.5} \quad (7)$$

$$CM_4 = M_4 / M_2^2 \quad (8)$$

여기서 α 는 時間平均 局部보이드率, p_i 와 α_i 는 各各 i 번째의 確率密度函數와 보이드率, M_n 은 n 번째의 모우멘트를 의미한다. 즉 $n=2$ 는 分散度(variance) M_2 , $n=3$ 는 非對稱度(skewness) M_3 , $n=4$ 는 尖度(kurtosis) M_4 를 의미한다. CM_3 와 CM_4 는 各各 非對稱度係數와 尖度係數를 나타낸다.

(3) 資料處理

Fig. 4는 實驗에서 計測한 보이드率들을 分析하기 위하여 構成한 資料處理 流動圖로 프로우브의 出力信

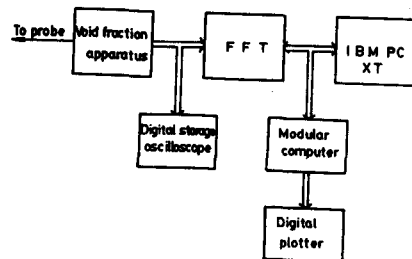


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental data processing system

號는 보이드率計測器에서 總計測時間에 대한 氣泡가 프로우브를 通過하는 總時間比로 定義되는 時間平均 局部 보이드率로 檢出된다. 한편 流動樣式에 따라서 發生하는 펄스信號를 分析하기 위하여 프로우브 出力信號를 디지털저장 오실로스코프(M2090-3C)에 入力시켰다. 또한 計測된 보이드率에 대한 統計的 計算을 目的으로 FFT(M660B)를 써서 確率密度函數 分布를 計算하여 컴퓨터를 통해 디지털플로우터로 그 分布를 記錄하였다. FFT에서 檢出된 信號는 IBM PC-XT에 연결하여 모우먼트 計算에 使用하였다.

2.4 實驗方法

本 實驗은 겉보기 水平均 速度(superficial water velocity) J_{SL} 를 0.25~1.529m/s, 겉보기 平均空氣速度(superficial air velocity) J_{SA} 를 0.018~6.12m/s의 범위로 하여 行하였다. 各 流動狀態下에서의 實驗은 물의 流量을 一定히 維持하고서 空氣流量을 10 단계로 變化시키면서 行하였다. 물流量 計測用 오리피스 전후의 壓力은 마노미터에 의하여, 空氣流量 計測用 오리피스 전후의 差壓은 分解能이 0.0005%의 微細電子마노미터에 의하여 計測하였다. 이 때 計測에 發生하는 不確實性(uncertainty)을 液柱計 읽음, 氣-水 密度變化, 오리피스係數를 고려하여 計算해 본 結果, J_{SL} 은 3.8% J_{SA} 는 4.5%의 不確實성이 介在되어 있다고 판단되었다. 보이드率 計測器는 本實驗 前에 函數發生器(function generator, M3310B)에 의하여 精密하게 補正한 후 使用하였다.

實驗은 試驗部에 內管棒의 直徑을 12mm, 16mm, 20mm로 變化시켜 同心圓管의 環狀間隙이 9mm, 11mm, 13mm이 되도록 하였다. 주어진 流動條件에서 各各의 경우에 대하여 프로우브를 2mm 間隔으로 內管棒壁面으로부터 外管壁까지 自動移送裝置로 半徑方向으로 移送를 하여 各點에서의 보이드率을 計測하였다. 이때 보이드率 計測器의 標本周波數는 10Hz로 취했고 計測된 데이터들은 애널로그 信號로 FFT에 入力되어 디지털 信號로 變換된다. 入力信號는 FFT에서 標本周波數를 20Hz로 하여 統計的으로 處理되어서 FFT와 연결된 디지털플로우터에 의해 各 보이드率에 相應한 確率密度函數가 記錄되었다. 프로우브 信號는 보이드率 出力電壓과 디지털 애널로그 信號로 오실로스코프에서 檢出하였다. 한편 同心圓管에서 形成되는 流動樣式을 現象學的으로 定性的인 分析을 하기 위하여 사진촬영도 시도하였다.

3. 實驗結果 및 檢討

3.1 可視的 觀察에 의한 流動樣式 判別

本 實驗을 통하여 現象學的으로 確認된 流動樣式은 氣泡流, 슬러그流, 環狀流, 氣泡流에서 슬러그流, 슬러그流에서 環狀流로 遷移하는 流動樣式이었다. Fig. 5는 그 한 예로서 環狀間隔을 9mm로 하여 사진촬영한 結果이다. 그림에서 (a)는 氣泡流의 特性으로 連續的으로 流動하는 液相에 氣泡들이 작은 氣泡의 형태로 散在하여 流動한다. 이와 같은 傾向은 圓管의 경우와 同一하나 圓管의 경우에 비해 氣泡들의 形狀과 크기가 달리 나타나고 있다. 이와 같은 現象은 流路의 幾何學的 形狀에 따라서 浮力, 抗力, 表面張力 效果가 달라져서 이들이 氣泡直徑과 形狀에 影響을 미치기 때문이라 생각된다. (b)는 氣泡流-슬러그流 遷移인 경우로, 겉보기 空氣平均速度가 增加함에 따라 氣泡의 크기가 增加하고, 氣泡數密度의 增加로 인해 分散氣泡들이 밀집하여 氣泡들 相互間에 충돌빈도수가 많아짐으로서 氣泡의 凝集率이 增加하여, 界面이 不規則的인 氣泡슬러그가 間歇的으로 發生한다. (c)는 슬러그流인 경우로 圓管인 경우보다도 流動의 亂流混合이 增加하기 때문에 不安定하여 겉보기 空氣平均速度가 작을 때에는 氣泡슬러그의 先端部가 거의 球形인 작은 氣泡슬러그들이 內管棒을 貫通하지 않고 環狀間隔 사이에서 發生하여 回轉하면서 上向流動을 한다. 그러나 겉보기 空氣平均速度가 增加함에 따라 큰 氣泡, 즉 테일러氣泡(Taylor bubble)가 內管棒을 둘러싼 형태로 環狀流路의 거의 全斷面을 점유하면서 上昇한다. 이러한 경우에는 테일러 氣泡 주위에 液體는 液膜의 형태로 下向

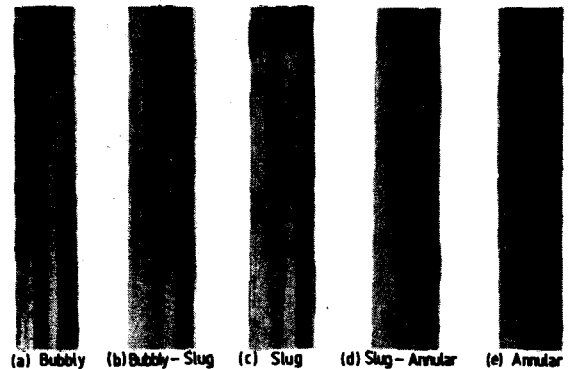


Fig. 5 Photographs of flow patterns in a concentric annulus with the annular gap size of 9mm at $J_{SL}=0.25\text{m/s}$

流動을 하기도한다. 이 때 氣泡슬러그 先端의 형태는 不規則하고 末端部에는 작은 氣泡들이 液體슬러그에 介在하여 上向으로 流動한다. 데일리氣泡 주위에 氣水 界面은 比較的 매끈하다. (d)는 슬러그流-環狀流 遷移인 경우로, 슬러그流에서 걸보기 空氣平均速度를 增加시키에 따라 데일리氣泡가 차지하던 環狀流路 全斷面에서 低速의 데일리氣泡가 高速의 데일리氣泡를 압도하면서 遷移가 계시된다. 이 때 데일리氣泡의 界面은 매우 不安定하게 波動하게되고, 작은 氣泡들이 介在된 液體가 上向과 下向으로 不規則하게 流動한다. 한편 環狀間隔에서 流動하는 작은 氣泡슬러그들은 空氣流量의 增加에 따라 그 크기와 發生頻度數가 增加하다가, 어느 순간에 이들 슬러그들의 合體現象이 發生하여 데일리氣泡가 形成된다. 空氣流量을 더욱 增加시키면 內管棒壁과 外管壁에서 波動形態의 環狀液膜이 發生하기 시작하고, 環狀間隔 사이에는 氣相이 液滴과 함께 間歇적으로 流動한다. Taitel⁽¹¹⁾은 圓管에서 最小 氣泡速度로써 이 現象을 解析하였다. (e)는 環狀流인 경우로, 內管棒壁과 外管壁에서 環狀液膜이 形成되어 이들 界面이 波動하면서 下向流動을 하고, 氣相은 環狀間隔 사이에서 上向流動을 한다.

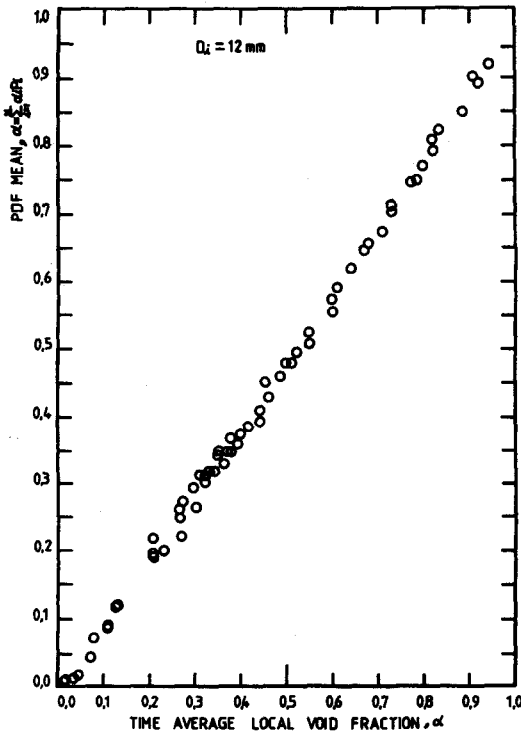


Fig. 6 The PDF mean vs time-averaged local void fraction

以上과 같이 可視的 方法을 利用하여 流動樣式을 現象學적으로 判別할 수는 있으나, 氣泡들의 流路空間內의 舉動에 관한 解析이 不可能하기 때문에 氣泡의 形狀, 直徑, 氣泡分布 등에 대한 微視的인 觀點에서의 定量的인 研究가 앞으로 要望된다.

3.2 統計的 모우멘트에 의한 流動樣式 判別

Fig. 6은 內管棒의 直徑 D_i 가 12mm인 경우 抽出한 보이드率 데이터들에 대한 stationarity를 檢證한 그림으로, 確率密度函數와 關聯된 平均보이드率과 時間平均 局部보이드率 α 가 一致한다. 그러므로 ergodicity 가정이 成立되어 모든 데이터들은 stationarity 하다는 事實이 確認되었다.

Fig. 7~Fig. 9는 同心圓管의 環狀間隔에 따르는 보이드率의 確率密度函數 分布로부터 統計的 모우멘트인 分散度 M_2 , 非對稱度係數 CM_3 , 尖度係數 CM_4 를 計算하여 앞에서와 같이 可視的 方法으로는 明確히 區分할 수 없는 流動樣式들을 定量的으로 判別한 그림들이 다. 이 때 流動條件은 걸보기 水平平均速度 J_{SL} 를 0.25

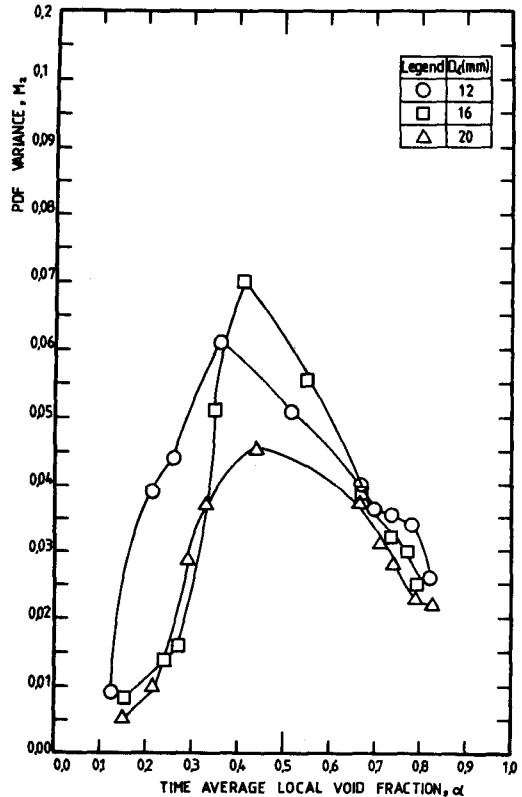


Fig. 7 The PDF variance vs time-averaged local void fraction for $J_{SL}=0.25\text{m/s}$

m/s로 一定하게 維持하고 걸보기 空氣平均速度를 10種으로 變化시켰다.

Fig. 7은 分散度 M_2 의 變化를 나타낸다. 氣泡流인 경우는, 低보이드率 領域에서 環狀間隔의 增加에 따라 M_2 는 微小하게 增加하고 있는데 이는 管內의 氣泡들이 環狀間隔의 減少에 따라서 보다 密集하여 均一하게 分布하기 때문이다. 어느 경우나 M_2 는 最小值를 지닌다. 氣泡流-슬러그流 遷移인 경우는, 環狀間隔에 關係없이 微小한 보이드率의 變化에 따라 M_2 가 0.01附近에서 매우 큰 값으로 급격히 增加하고 있음을 알 수 있다. 이를 圓管인 경우⁽¹⁰⁾와 比較해 보면 遷移가 發生하는 M_2 값은 圓管인 경우에 0.04附近으로 同心圓管인 경우가 보다 작은 分散度 값에서 遷移가 發生함을 알 수 있다. 슬러그流인 경우는, 環狀間隔에 關係없이 最大의 分散度를 지니는 特性을 나타내는데 이는 氣泡슬러그와 液體슬러그가 交代로 流動하기 때문이라 생각된다. 슬러그流-環狀流 遷移인 경우는, 環狀間隔에 關係없이 M_2 가 0.04附近에서 微小한 보이드率의 變化에 따라 M_2 의 減少率이 增加한다. 한편 環狀間隔이 減少함에 따라 M_2 값이 약간 減少한다. 環狀流인

경우는, 高보이드率 領域에서 M_2 가 작은 값으로 나타나며 環狀間隔이 減少함에 따라 M_2 값이 약간씩 減少한다.

Fig. 8은 보이드率 分布의 非對稱性을 나타낸 그림으로, 氣泡流인 경우는, 非對稱度係數 CM_3 가 陽의 값을 지니며 環狀間隔의 增加에 따라 그 값이 增加하고 있다. 이는 環狀間隔의 增加에 따라서 氣泡들이 不規則하게 散在하여 流動하기 때문이라 생각된다. 氣泡流-슬러그流 遷移인 경우는 氣泡슬러그의 生成으로 인하여 一般적으로 CM_3 가 增加하다 CM_3 의 最大值가 存在하며, 環狀間隔의 增加에 따라 그 最大值가 增加함을 알 수 있고 어느 경우나 陽의 CM_3 값을 지닌다. 슬러그流에 가까와 짐에 따라 CM_3 값은 環狀間隔에 關係없이 減少하는 傾向을 보인다. 슬러그流인 경우는 環狀間隔에 關係없이 CM_3 가 거의 0에 가까운 값을 지니는데 이는 氣泡슬러그와 液體슬러그가 週期的으로 發生하기 때문이다. 슬러그流 環狀流인 경우는 環狀間隔에 關係없이 CM_3 가 陰의 값으로 減少하고 있다. 環狀流인 경우는 最小의 CM_3 값을 지닌다.

Fig. 9는 보이드率의 確率密度函數 分布上의 最大보

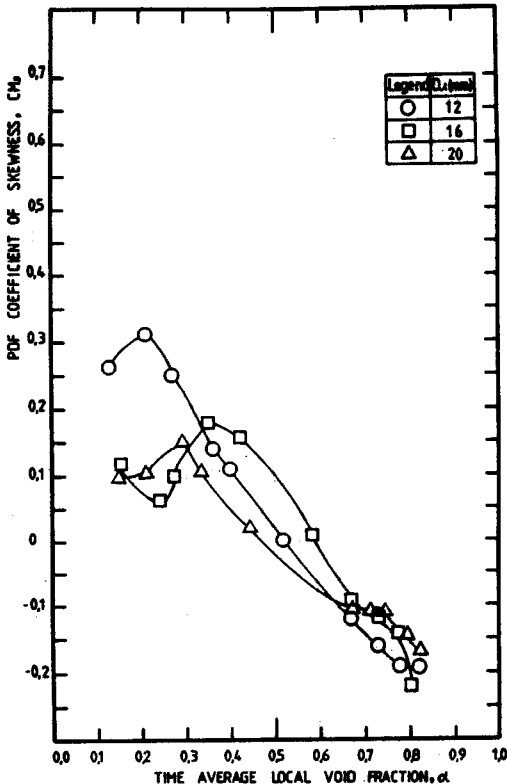


Fig. 8 The PDF coefficient of skewness vs time-averaged local void fraction for $J_{SL}=0.25\text{m/s}$

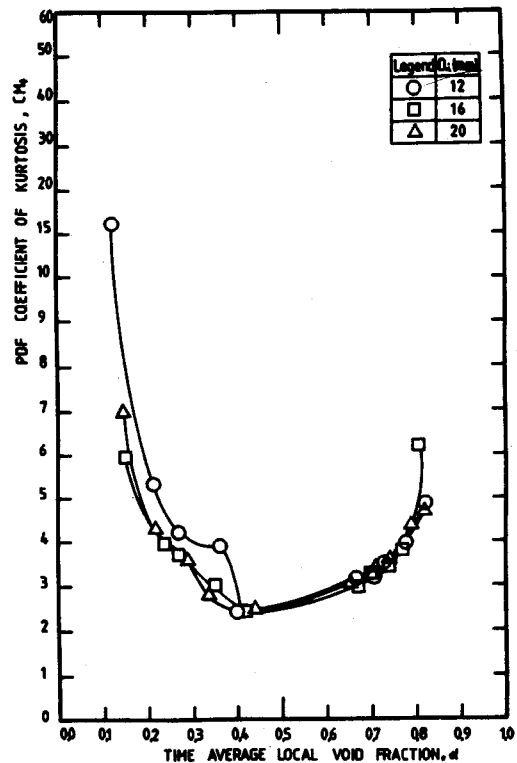


Fig. 9 The PDF coefficient of kurtosis vs time-averaged local void fraction for $J_{SL}=0.25\text{m/s}$

이드率 分布를 尖度係數 CM_4 로 나타낸 그림이다. 氣泡流인 경우는 보이드率 分布가 正規分布보다 큰 leptokurtosis 特性, 즉 CM_4 가 環狀間隔에 關係없이 3.0 보다 큰 값을 지닌다. 氣泡流-슬러그流 遷移인 경우는 CM_4 가 급격히 減少하면서 3.0에 가까운 값을 지닌다. 슬러그流인 경우는 環狀間隔에 關係없이 보이드率 分布가 正規分布보다 平坦한 Platykurtosis 特性, 즉 CM_4 가 3.0보다 작은 값으로, $\alpha=0.4$ 에서 最小值 를 지닌다. 이는 低보이드率에서 分布하는 液體슬러그와 高보이드率에서 分布하는 氣體슬러그가 서로 相殺 되기 때문이라고 생각된다. 슬러그流-環狀流 遷移인 경우는 보이드率이 크게 增加하여도 CM_4 는 微小하게 3.0에 가까운 값까지 增加하고 있다. 環狀流인 경우는 環狀間隔에 關係없이 $\alpha=0.75$ 附近부터 보이드率의 微小增加에 따라 CM_4 의 增加率은 3.0 보다 큰 값으로 增加하고 있다.

3.3 環狀間隔의 位置에 따르는 보이드率 分散度 變動特性

Fig. 10~Fig. 14는 검보기 水平均速度量 0.25m/s로

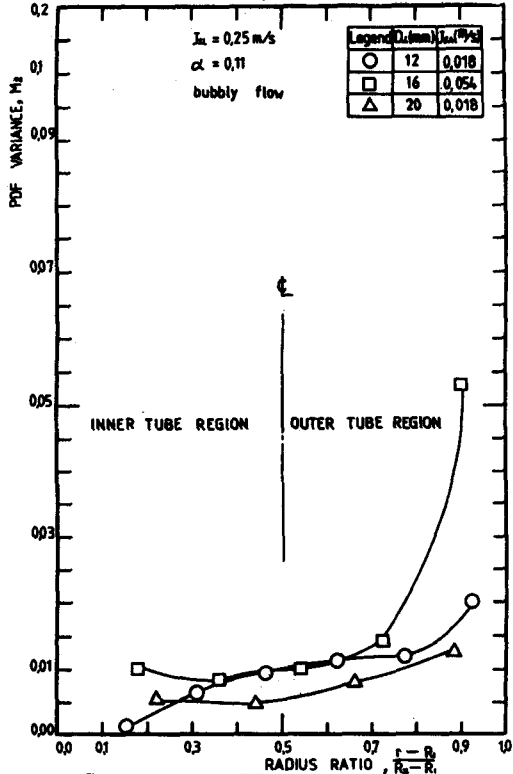


Fig. 10 Comparison of PDF variance in the annuli with distance measured from the inner tube to outer tube for bubbly flow

一定하게 維持하면서 검보기 空氣平均速度量 變化시킨 條件에서, 環狀間隔의 變化에 대한 半徑方向의 보이드率 分散度 變動特性을 나타낸 그림들이다. 이들 그림에서 R_1, R_2 는 內管과 外管의 半徑, r 는 프로우브의 位置를 나타낸다.

Fig. 10은 氣泡流인 경우로, M_2 는 $D_1=12\text{mm}$ 인 경우를 除外하고 內管棒 壁附近부터 環狀間隔 中央部 근처까지는 比較的 變化가 적으나 外管쪽으로 갈수록 環狀間隔에 關係없이 M_2 가 점차적으로 增加하다가 外管 壁 근처에서 最大가 된다. 또한 內管棒 쪽보다는 外管 쪽에서의 M_2 가 높은 값을 지닌다. 이와 같은 事實로부터 內管보다 外管쪽에서의 보이드率의 變動이 더 격렬하게 發生하고, 環狀間隔 中央部에서의 보이드率은 거의 一定함을 알 수 있다. 이는 液相이 外管部에서 支配의으로 流動함을 의미한다.

Fig. 11은 氣泡流-슬러그流 遷移인 경우로, $D_1=12\text{mm}$ 인 경우, 즉 環狀間隔이 가장 큰 경우 內管棒으로

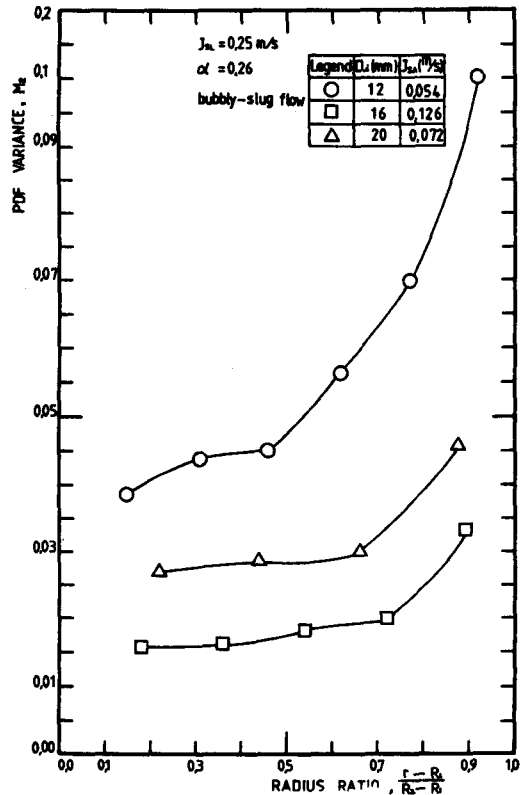


Fig. 11 Comparison of PDF variance in the annuli with distance measured from the inner tube to outer tube for bubbly-slug flow

부터 環狀間隔 中央部 근처까지는 M_2 의 變化가 적으나 外管쪽으로 갈수록 급격히 增加하다 外管壁 부근에서 M_2 가 最大가 된다. 이는 氣泡슬러그와 液體에 介在한 크기가 다른 氣泡들이 주로 外管部에서 流動하기 때문이라 판단된다.

한편 $D_i=16\text{mm}$ 와 20mm 인 경우는 內管棒으로부터 無次元半徑비가 0.7 되는 곳까지는 M_2 의 變化가 比較的 없고, 外管壁에 近接함에 따라 급격히 增加하다 外管壁 附近에서 最大가 됨을 알 수 있다. 그러므로 보이드率의 變動은 環狀間隔에 關係없이 內管보다 外管部에서 더 심하게 發生함을 알 수 있다.

Fig. 12는 슬러그流인 경우로, 內管棒에서 環狀間隔 中央部까지는 環狀間隔이 減少함에 따라 M_2 가 減少하며, 環狀間隔에 關係없이 內管壁 근처에서 M_2 는 最大值를 지나 環狀間隔 中央部에 近接함에 따라 減少한다. $D_i=16\text{mm}$ 를 除外한 全실험 범위에 대하여 M_2 는 環狀間隔 中央部에서 最小值를 지나 外管部로 갈수록 다시 增加하는 傾向을 보이고 있다. 그러므로 보이드率의 變動은 環狀間隔에 關係없이 外管보다 內

管쪽에서 심하게 發生함을 알 수 있는데, 이와같은 事實은 內管和 外管壁에 液膜이 形成되어 流動함을 의미한다.

Fig. 13은 슬러그流-環狀流 遷移인 경우로, 環狀間隔에 關係없이 內管棒 壁근처에서 無次元半徑비가 0.7 부근까지는 M_2 가 比較的 一定하나 外管部로 갈수록 약간씩 減少하다가 外管壁 근처에서 最小가 된다. 그러나 어느 경우나 M_2 의 變化는 比較的 적다. 이와 같은 事實로부터 液體슬러그에는 많은 氣泡들이 內在하여 氣泡슬러그와 함께 流動하므로 보이드率의 變化가 比較的 없음을 알 수 있다.

Fig. 14는 環狀流인 경우로, 環狀間隔에 關係없이 內管棒에서 外管으로 갈수록 M_2 는 增加하다가 無次元半徑비가 0.7 附近에서 最大가 된 후 減少하고 있다. 그러나 內管보다 外管部の M_2 가 높으므로 外管部에서 보이드率의 變化가 더 크다. 이와 같은 事實로부터 內管棒壁에서 形成되는 液膜의 波動보다는 外管壁에서

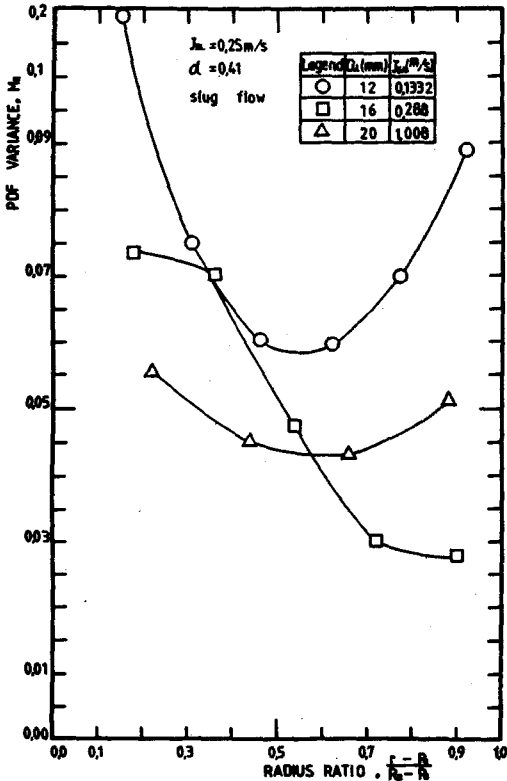


Fig. 12 Comparison of PDF variance in the annuli with distance measured from the inner tube to outer tube for slug flow

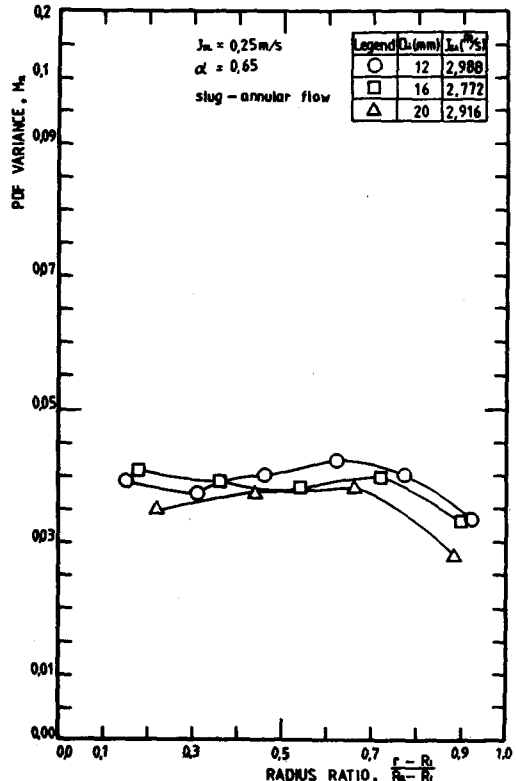


Fig. 13 Comparison of PDF variance in the annuli with distance measured from the inner tube to outer tube for slug-annular flow

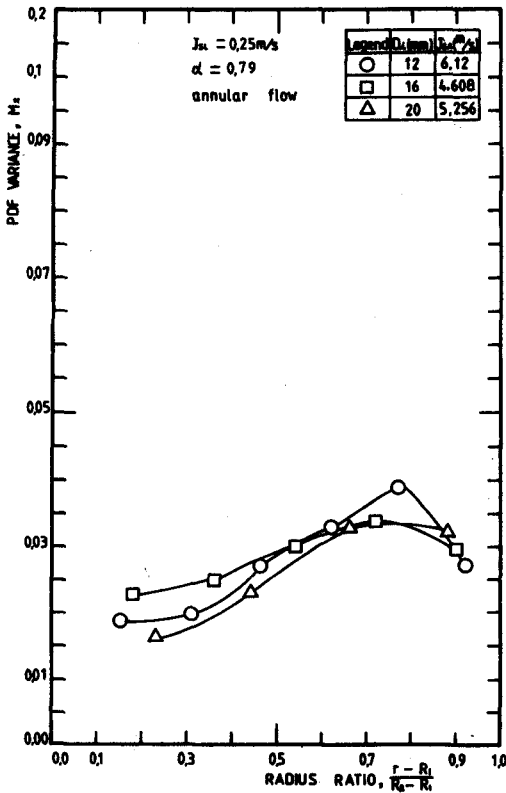


Fig. 14 Comparison of PDF variance in the annuli with distance measured from the inner tube to outer tube for annular flow

形成되는 液膜의 界面波動이 더 격렬함을 알 수 있다.

4. 結 論

垂直同心圓管에서 氣-水 二相流가 上向流動을 하는 경우의 環狀間隔에 따르는 流動樣式과 보이드率의 變動을 確率密度函數와 關聯된 統計量으로 分析한 結果 다음의 結論을 얻었다.

(1) 分散度 M_2 는 氣泡流인 경우 低보이드率 領域에서 매우 작은 값을 지니며, 環狀間隔의 增加에 따라 增加한다. 氣泡流-슬러그流 遷移는 $M_2=0.01$ 에서 發生하며, 슬러그流 狀態에서는 M_2 값의 最大値가 存在한다. 슬러그流 環狀流 遷移는 $M_2=0.04$ 부근에서 發生하고, 環狀流의 경우는 高보이드率 領域에서 작은 M_2 값을 지니며 環狀間隔의 減小에 따라 微小하게 減少한다.

(2) 非對稱度係數 CM_3 는 氣泡流인 경우 陽의 값을 지니며, 環狀間隔의 增加에 따라 增加한다. 氣泡流-슬러그流 遷移는 CM_3 의 最大値가 存在하며, 環狀間隔의 增加에 따라 그 最大値가 增加하고 陽의 값을 지닌다. 슬러그流 狀態에서는 0에 近접한 값을 지니며, 슬러그流-環狀流 遷移過程에서 陰의 값으로 減少한다. 環狀流에서는 陰의 最小値가 항상 存在한다.

(3) 尖度係數 CM_4 는 氣泡流인 경우 3.0 보다 큰 값을 유지하다가 氣泡流-슬러그流 遷移過程에서 3.0에 가까운 값까지 급격히 減少한다. 슬러그流 狀態에서는 3.0 보다 작은 最小値가 항상 存在한다. 슬러그流에서 環狀流로 遷移하는 過程에서는 3.0에 가까운 값으로 다시 增加하여, 環狀流 狀態에서는 3.0 보다 큰 값이 된다.

(4) 非加熱二相流動에서 形成되는 氣泡流, 氣泡流-슬러그流 遷移, 環狀流의 경우는 보이드率의 變動이 內管보다 外管側에서 더 크게 發生하였으며, 슬러그流-環狀流 遷移過程에서는 보이드率의 變動이 環狀間隔에 關係없이 比較的 적었다. 슬러그流 狀態에서 보이드率의 變動은 一般的으로 포물선 형태로 發生하였다. 環狀流 狀態에서는 內管보다 外管側에서 形成된 液膜의 界面波動이 더 크게 發生하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 후반기 연구비 지원에 의해 수행되었기에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

參 考 文 獻

- (1) ASME, 1969, "Two-Phase Flow Instrumentation", New York.
- (2) Neal, L.S. and Bankoff, S.G., 1963, "A High Resolution Resistivity Probe for Determination of Local Void Properties in Gas-Liquid Flow", AICHE J. 9, pp. 49~54.
- (3) Akagawa, K., 1964, "Fluctuations of Void Ratio in Two-Phase Flow", Bull. JSME, Vol. 7, pp. 122~128.
- (4) Matsui, G. and Aizawa, T., 1987, "Statistical Properties of Pressure Drop Fluctuations and Flow Patterns in Horizontal Gas-Liquid Two-Phase Flow", JSME, Vol. 53, No. 485, pp. 144~148.

- (5) Jones, O.C., 1970, "Statistical Considerations in Heterogeneous Two-Phase Flowing Systems", Ph. D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- (6) Van Paassen, C.A.A., 1974, "Thermal Droplet Size Measurements Using a Thermocouple", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 17, pp.1527~1548.
- (7) Semenenko, V.F., Korotaev, Y.P., and Nigmatulin, B.I., 1986, "True Gas Content of Gas-Liquid Flows in Annular Channels", Teploenergetika, Vol. 33, No. 1, pp.65~67.
- (8) Sekoguchi, K. and Furukawa, T., 1986, "Phase Distribution for Air-Water Two-Phase Flow in Annuli", Bull. of JSME, Vol. 29, No. 255, pp. 3007~3014.
- (9) ASME, 1959, "Flow Meter and Its Applications", New York.
- (10) 孫炳鎮, 金仁錫, 李眞, 1986, "確率密度函數斗 電導 probe 信號에 의한 垂直二相流의 流動樣式 特性", 大韓機械學會論文集, 第10卷, 第6號, pp.814~822.
- (11) Taitel, Y. and Barnea, D., 1980, "Modelling Flow Pattern Transitions for Steady, Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes", AIChE. J., Vol. 26, pp.345~354.