

垂直上向 二相流에서 同心圓管 間隙이 流動樣式과 보이드分布에 미치는 影響

Effects of Annular Gap Size on the Flow Pattern and Void Distribution
in a Vertical Upward Two-Phase Flow

孫 炳 鎮*, 金 仁 錫**, 金 文 喆***
B. J. Son, I. S. Kim, M. C. Kim

ABSTRACT

An experimental investigation has been conducted to determine the flow pattern for two-component, two-phase mixtures which flow vertically upwards in concentric annuli based on the measurement for the local void fraction and the distribution of the local void fraction in various radial locations in the annular gap.

The annular test section consists of a lucite outer tube whose inside diameter is 38mm and a stainless steel rod. The rod diameter is either 12mm, 16mm or 20mm.

It is demonstrated that the probability density function of the fluctuations in void fraction may be used as a flow pattern indicator and the local void fraction distribution depends on the flow pattern and radial location in the annular passage.

1. 序 論

氣-液 二相流動系에서 形成되는 流動樣式은 氣相과 液相의 速度, 보이드分布, 各相間의 剪斷力分布 등에 따라서 그 特性을 달리할 뿐 아니라, 流動場內의 壓力損失, 流動의 不安定性, 熱傳達에 直接的인 影響을 미치므로 原子力發電, 化學工程裝置, 各種 熱傳達機構들을 設計할 때에 필히 고려되어야 할 파라미터이다.

流動樣式은 加熱이나 非加熱의 경우에 있어서 양자의 現象이 근본적으로 同一하나, 非加熱의 경우는 流動의 上流와 下流의 樣相이 같

으나 加熱의 경우는 下流로 갈수록 乾度(quality)가 增加하기 때문에 連續인 流動樣式의 遷移가 發生하여 流動樣式이 다를 수 있다. 水平管과 垂直管 어느 경우나 形成되는 流動樣式은 氣泡流, 슬러그流, 環狀流, 遷移流動이며, 水平管에서만 形成되는 流動樣式은 이것들 이외에 波狀流(wavy flow)와 成層流(stratified flow)이다.

流動樣式에 관한 研究들이 그 동안 多様な 보이드率 計測方法¹⁾을 利用하여 實驗적으로 많이 遂行되어 왔으나, 대부분이 可視인 方法으로 流動樣式을 判別하였기 때문에 研究者

* 漢陽大 工大 機械工學科

** 明知大 工大 機械工學科

*** 仁荷工專大 機械科

* 1987年度 春季學術大會(6 月 12日)에서 發表

에 따라서 그 判別基準을 달리하고 있으며, 특히 流動樣式의 遷移特性이 明確히 밝혀지지 않았다. 그러나 1960年代 中半期부터 이러한 問題點을 해결하기 위하여 統計的 方法을 利用한 研究²⁻³⁾들이 最初로 시도되었으며, 最近에 와서 確率密度函數(probability density function), 스펙트럼密度(spectrum density function), 히스토그램(histogram)으로써 流動樣式을 究明하는 研究⁴⁻⁶⁾들이 활발히 進行되고 있다. 그러나 以上の 流動樣式에 관한 研究들은 二相流가 단순한 형태인 圓管이나 矩形管에서 流動하는 경우이고, 同心環狀管인 경우의 研究⁷⁻⁸⁾는 별로 없는 실정에 있다.

한편, 二相流動系에서의 보이드率分布에 관한 研究⁹⁻¹¹⁾들이 많이 報告되어 왔는데 이들 研究들을 綜合檢討하여 보면, 氣泡流에서 보이드率은 圓管인 경우에 管中央部보다 管壁 근처에서 더 높다는 事實이 밝혀졌다. Serizawa¹⁰⁾에 의하면 氣泡流과 슬러그流에서 보이드率이 最大로 分布하는 半徑方向 位置는 內管徑의 0.9倍되는 곳이다. Kazin¹¹⁾은 蒸氣-水가 垂直圓管에서 流動하는 경우, 蒸氣가 最大로 分布하는 管의 半徑方向 位置는 內管徑의 0.6倍되는 곳으로 提示하였다. 그러나 이들 研究들은 二相流가 圓管에서 流動하는 경우이기 때문에, 同心環狀管에서 流動樣式과 環

狀間隔 變化에 따르는 보이드率分布는 다를 것으로 판단된다.

따라서 本 研究는 氣-水 二相流가 同心環狀管에서 非加熱狀態로 上向流動을 하는 경우, 時間平均 局部보이드率(이하 보이드率로 表記)을 計測하여 確率密度函數로 處理한 후 이들 分布로서 流動樣式을 判別하고, 또한 流動樣式과 環狀間隔에 따르는 보이드率의 分布特性을 究明하는데 目的이 있다. 本 研究結果는 各種 沸騰熱傳達機構, 原子爐에서의 副流路, 化學反應裝置 등의 工學的 應用과 設計를 위한 基礎資料로 活用이 可能하다고 생각된다.

2. 實 驗

2-1 二相流動 實驗裝置

本 實驗裝置는 非加熱垂直 同心環狀管에서 空氣와 물이 上向과 下向流動을 하도록 循環回路를 設計하여 試驗部에서 氣泡流, 슬러그流, 環狀流, 遷移流動樣式이 發生하도록 製作하였다. 循環回路는 Fig. 1과 같이 空氣壓縮機, 空氣噴出器, 氣-水 混合部, 同心環狀流路 試驗部, 氣-水 分離탱크, 循環水 저장탱크, 遠心펌프, 氣-水 速度計測部로 構成하였다.

循環水는 蒸溜器를 통과하여 容量 400 l의 循環水 저장탱크에 供給되어 實驗中에는 그 水位를 800 mm로 一定하게 維持하였다. 空氣와 循環水 流量은 試驗部에서 所定의 流動樣式이 發生되도록 管路에 設置한 1½" 글로우브밸브를 利用하여 調節하였다. 各相의 體積流量 計測用 오리피스는 ASME¹²⁾에서 發刊한 資料를 參考하여 空氣인 경우는 管徑比가 0.60, 물인 경우는 0.53인 尖端오리피스(sharp edged orifice)로 精密設計하여 銅板으로 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 試驗部에 流入하여 上向流動을 한다.

Fig. 2는 氣-水 混合部를 나타내는데 空氣噴出器는 內徑 28 mm, 길이 230 mm인 黃銅管 圓周에 10 mm의 一定間隔으로 直徑 0.5 mm로

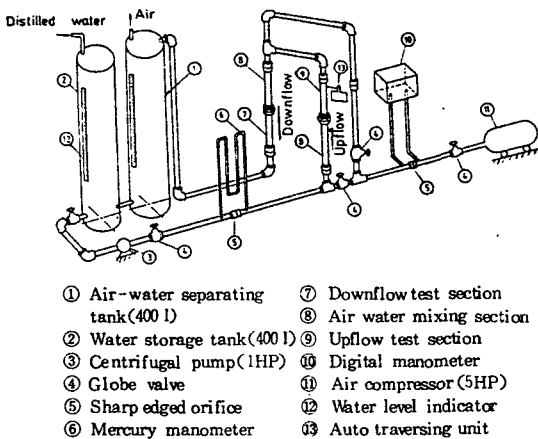


Fig. 1 Schematic diagram of the air-water two phase flow facility

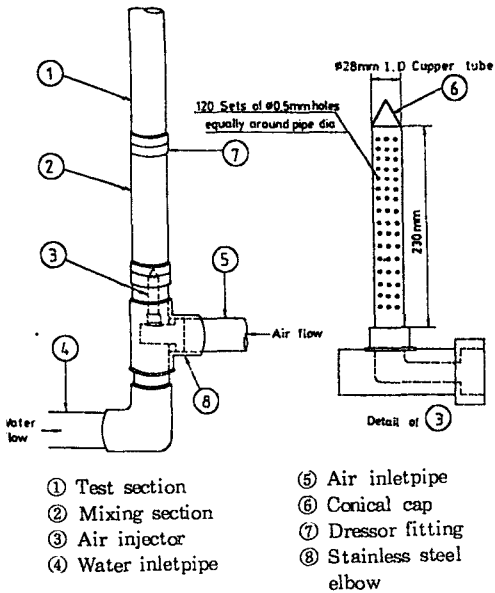


Fig. 2 Two phase mixture injector

드릴링하여 120 개의 구멍이 가공되어 있다. 壓縮機에 裝着된 壓力調整器에서 所定壓力로 조절된 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 1,140mm 인 루사이트(lucite) 混合管을 지나 內徑 38mm, 길이 530mm인 同心環狀 試驗部로 流動한다. 試驗部의 外管은 流動樣式의 사진촬영을 目的으로 루사이트管을 使用하였다. 보이드率을 計測하기 위한 計測孔은 二相流가 充分히 發達되는 거리를 감안하여 試驗部 出口端으로부터 325mm 下部의 位置에 鑿아서 프로우브를 삽입하였다. 試驗部를 通過한 二相流는 下降管을 통해 氣-水 分離탱크에 流入되어 氣-水가 分離된후, 循環水는 저장탱크에 回收되어 流動循環回路가 完了된다. 系壓力은 大氣壓으로 하였으며, 流動系의 振動을 除去하기 爲하여 實驗裝置는 實驗室壁과 바닥에 固着하였다. 實驗中에 다이얼게이지로 垂直方向의 振動幅을 試驗部 中央部에서 計測하여본 結果, $\frac{5}{100}$ mm의 振動이 確認되었다. 試驗部와 氣-水 混合管의 外管을 除外한 配管에 使用한 管과 엔

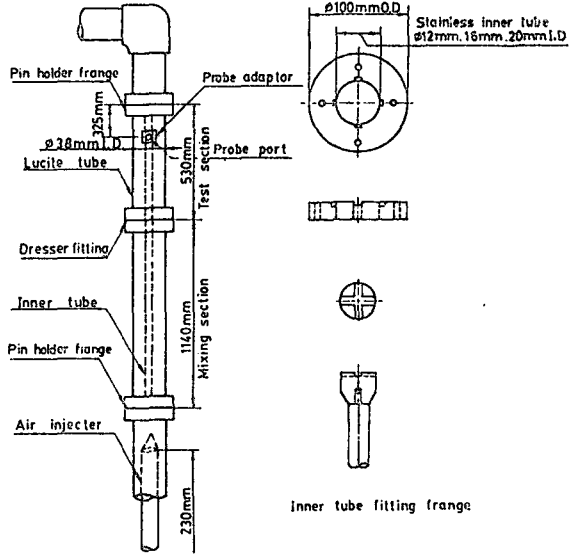


Fig. 3 Test section and inner tube fitting frange

보우들은 腐蝕을 防止하기 爲하여 1 1/2" 스테인레스(SUS 306)鋼을 使用하였다.

2-2 同心環狀流路 試驗部

Fig. 3은 試驗部와 內管棒 지지부를 나타낸 그림으로 試驗部는 루사이트 材質의 內徑 38mm인 外管에 實驗條件에 附合되도록 直徑이 12mm, 16mm, 20mm인 스테인레스 內管棒을 同心으로 끼워서 同心環狀流路를 形成하였다. 따라서 各各의 경우의 同心環狀間隙은 13mm, 11mm, 9mm이다. 正確한 同心을 維持하고 內管棒의 振動을 防止하기 爲하여 流動에 영향을 미치지않는 位置에 內管棒 지지용핀 3개를 同一円周上에 120°角度로 裝着하고, 內管棒의 上下端에는 內管棒 지지용 후랜지 2개를 設置하였다.

2-3 計測機器 및 資料處理

(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를 利用한 프로우브이며, 보이드率 計測에 影響을 주지않도록 L字型을 使

用하였다. 프로우브의 出力信號는 보이드率 計測器(시스템 7931)에서 檢出하였다. 이 機器의 周波數 應答特性은 15 KHZ에서 3 dB 降下한 값으로, 實驗에서 氣泡數 周波數를 計測하여 본 結果, 21.48 ~ 107.9 HZ 범위이기 때문에 보이드率을 檢出하는데 充分하였다.

(2) 資料處理

Fig. 4는 實驗에서 計測한 보이드率을 分析하기 위하여 構成한 資料處理 流動圖로, 프로우브의 出力信號는 보이드率 計測器에서 總計測時間, T에 대한 氣泡가 프로우브를 通過하는 總時間, $\sum t_{gi}$ 의 比로 定義되는 時間平均 局部 보이드率, $\alpha = \frac{\sum t_{gi}}{T}$ 가 檢出된다. 한편 보이드率에 따라서 發生하는 펄스信號를 分析하기 위하여, 프로우브 出力信號를 디지털 저장 오실로스코프(M 2090-3 C)에 入力시켰다. 또한 計測된 보이드率에 대한 統計的 計算을 目的으로 FFT(M 660 B)를 利用하여 보이드率의 確率密度函數(PDF)分布를 計測한 후, 모듈러 컴퓨터를 통해 디지털 플로터로 그 分布를 記錄하였다.

2-4 實驗方法

實驗에서 겉보기 水平均速度(superficial water velocity) J_{SL} 은 0.25 ~ 1.529 m/s, 겉보기 空氣平均速度(superficial air velocity) J_{SA} 는 0.018 ~ 6.12 m/s의 범위로 J_{SL} 를 一定하게 維持하고, J_{SA} 를 變化시켜서 보이드率이 10種이 되도록 하여 各流動條件에서 해당 流動樣式이 發生하도록 하였다. 오리피스 前後에 設置한 縮小型 壓力탭을 循環水인 경우는 水銀液柱計에, 空氣인 경우는 分解能이 0.0005%인 微細電子 마노미터(MI)에 연결하여 이들의 差壓을 計測하였다. 이때 計測上 發生하는 不確實性(uncertainty)을 液柱計 읽음, 氣-水의 密度變化, 오리피스係數를 고려하여 計算하여본 結果, J_{SL} 은 3.8%, J_{SA} 는 4.5%의 不確實性이 介在되었음이 確認되었다. 보이드率 計測器는 本實驗 前에 函數發生器(function generator, M3310 B)로 精密하게 補正하여 使用하였다.

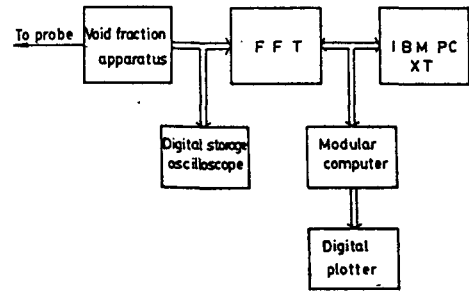


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental data processing system

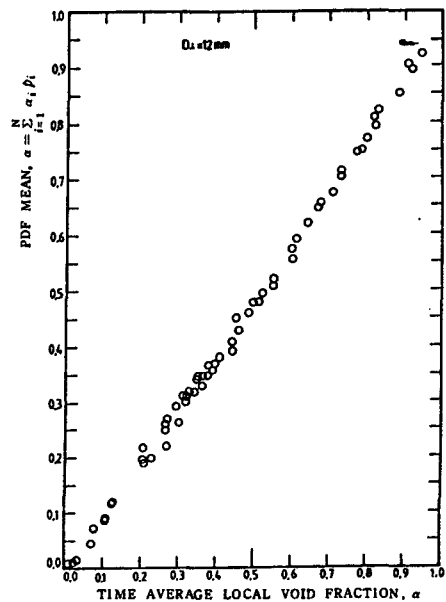


Fig. 5 The PDF mean vs time average local void fraction

實驗은 試驗部에 內管棒 直徑을 12 mm, 16 mm, 20 mm로 變化시켜 同心環狀管의 環狀間隙이 13 mm, 11 mm, 9 mm가 되도록 하여, 주어진 流動條件에서 프로우브를 2 mm 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한 후, 各點에서 보이드率을 計測하는 方法으로 遂行하였다. 이때 보이드率 計測器의 샘플링周波數는 10 HZ로 하였고, 計測된 데이터들은 FFT에 入力된다. 入力信號는 FFT에서 샘플링周波數를 20 HZ로 하여 統計적으로 處理되어서, 디지털 플로터에 의하여 各 보이드率에 相應하는 確率密度

函數가 記錄되었다.

3. 實驗結果 및 檢討

本 研究에서는 垂直上向 同心円管에서 形成되는 流動樣式을 確率密度函數 分布로써 分析하고, 流動樣式과 環狀間隔 變化에 따르는 보이드率의 分布特性을 究明하였다.

Fig. 5는 內管棒 直徑 D_i 가 12 mm인 경우 計測한 보이드率에 대한 stationarity를 代表的으로 檢證한 그림으로, 確率密度函數와 關聯된 보이드率과 時間平均 局部보이드率 α 가 一致하는 ergodicity가정이 成立되므로 모든 計測 데이터들은 stationarity하다는 事實이 立證되었다.

3-1 確率密度函數에 의한 流動樣式 分析

Fig. 6 ~ Fig. 10은 同心環狀管의 內管棒 直徑을 變化시킨 경우, 보이드率을 計測하여 確率密度函數 分布로써 流動樣式을 判別한 그림들이다. 그림에서 縱座標에 表示된 PDF_d 와 PDF_p 는 各各 디지털에너지로그 信號와 프로우브 信號에 해당하는 確率密度函數를 나타낸다.

Fig. 6은 氣泡流인 경우로, 環狀間隔에 關係없이 PDF 가 低보이드率 領域에서 單一頂點을 지니며, 그 分布가 협소한 特性을 나타내고 環狀間隔의 變化에 따라서 그 分布는 미소하게 달라지고 있다. 따라서 氣泡流에서는 環狀間隔이 보이드率 分布에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7은 氣泡流에서 슬러그流로 遷移流動을 하는 경우로, 環狀間隔에 關係없이 氣泡流에 비하여 PDF 幅이 擴張된 것을 알 수 있다. 이는 分散氣泡들의 밀집으로 인하여 테일러氣泡(taylor bubble)가 間歇적으로 發生하여 液相에 介在한 작은 氣泡들과 함께 流動하기 때문이라 생각된다. 또한 PDF 는 低보이드率 領域에서 우세하게 나타나고, 單一頂點을 지닌다.

Fig. 8은 슬러그流인 경우로, 環狀間隔에 關係없이 PDF 는 低보이드率 領域부터 高보

이드率 領域에 걸쳐서 分布하고, 그 幅은 氣泡流 - 슬러그流 遷移인 경우보다 매우 擴張되어 나타나고 있다. 이와 같은 事實로부터 슬

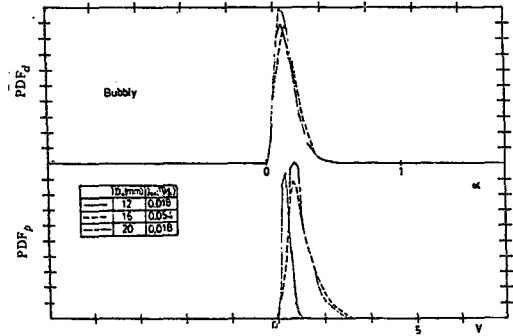


Fig. 6 Distributions of PDF compared with the inner tube diameter at $J_{SL} = 0.25 \text{ m/s}$ and $\alpha = 0.12$

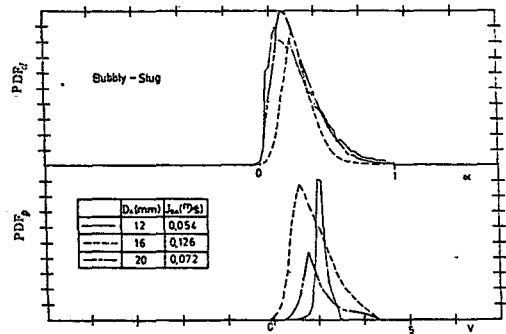


Fig. 7 Distributions of PDF compared with the inner tube diameter at $J_{SL} = 0.25 \text{ m/s}$ and $\alpha = 0.25$

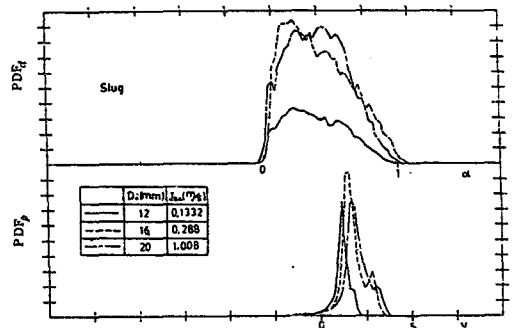


Fig. 8 Distributions of PDF compared with the inner tube diameter at $J_{SL} = 0.25 \text{ m/s}$ and $\alpha = 0.41$

러그流에서는 테일러氣泡과 작은 氣泡들이 介在된 液體슬러그가 交代로 流動함을 알 수 있다. 円管인 경우¹³⁾는 低보이드率 領域과 高보이드率 領域 두 곳에서 頂點이 發生하였으나 同心環狀管에서는 이와같은 傾向이 나타나지 않았다. 한편 環狀間隔이 變化함에 따라 PDF 分布가 달라지고 있다.

Fig. 9는 슬러그流에서 環狀流로 遷移流動을 하는 경우로, 高보이드率 領域에서 PDF가 支配的으로 分布하고, 環狀間隔에 關係없이 그 分布들은 거의 同一한 傾向을 나타내고 있다. 따라서 氣泡슬러그와 液體슬러그에 散在한 많은 氣泡들 때문에 슬러그流보다 보이드率이 높다.

Fig. 10은 環狀流인 경우로, 環狀間隔에 關係없이 高보이드率 領域에서 單一頂點을 지나는 PDF 分布를 보이며, 그 分布가 거의 같음을 알 수 있다. 한편 슬러그流 - 環狀流 遷移流動인 경우보다 PDF 分布幅이 협소하게 나타나고 있다.

3-2 流動樣式과 環狀間隔의 位置에 따르는 보이드率 分布

Fig. 11 ~ Fig. 15는 걸보기 水平均速度와 보이드率을 一定하게 維持한 條件에서, 內管棒 直徑을 變化시킨 경우에 대한 流動樣式과 環狀間隔의 半徑方向 位置에 따르는 보이드率의 分布特性을 나타낸 그림들이다. 그들 그림

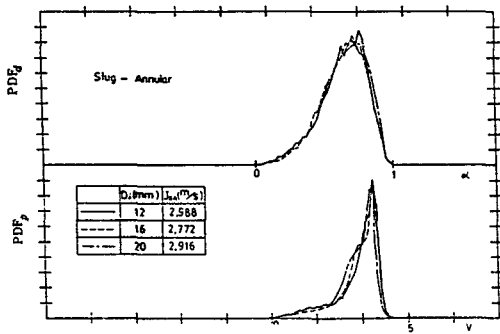


Fig. 9 Distributions of PDF compared with the inner tube diameter at $J_{SL} = 0.25\text{m/s}$ and $\alpha = 0.65$

에서 R_1, R_2 는 內管棒과 外管의 半徑, r 는 프로우브의 位置를 表示한다.

Fig. 11은 低보이드率에서 發生하는 氣泡流인 경우로, 內管壁 근처에서 內管棒 直徑이 增加함에 따라, 즉 環狀間隔이 減少함에 따라서 보이드率은 增加하고 있다. 이와같은 現象은 環狀間隔이 減少할수록 氣泡들의 密集率

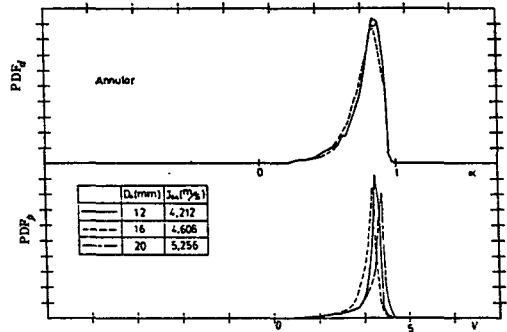


Fig. 10 Distributions of PDF compared with the inner tube diameter at $J_{SL} = 0.25\text{m/s}$ and $\alpha = 0.79$

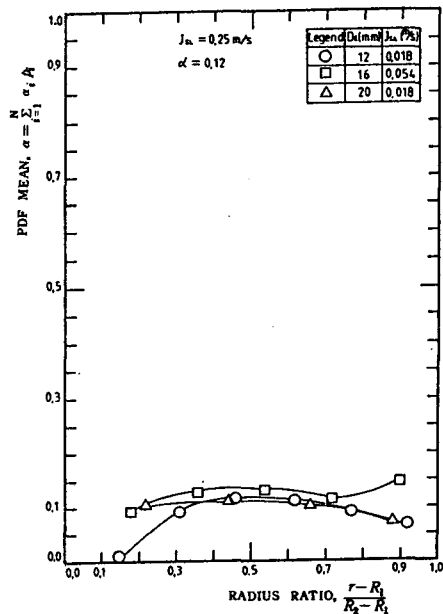


Fig. 11 Comparison of time average local void fractions in the annuli with distance measured from the inner tube to outer tube for bubbly flow

內管壁 근처에서 增加하기 때문이라 생각된다. 環狀間隔이 가장 작은 $Di = 20\text{ mm}$ 인 경우는 環狀間隔의 位置에 關係없이 보이드率은 거의 變化가 없고, 나머지 內管棒 直徑들에서는 內管보다 外管쪽의 보이드率이 다소 높은 傾向을 보이고 있다. 이는 內管보다 外管쪽이 氣泡數 密度가 增加하거나 氣泡의 크기가 크다는 것을 시사한다. 또한 環狀間隔에 關係없이 內管壁과 外管壁 근처를 除外한 位置, 즉 無次元 半徑比가 0.3에서 0.8 부근까지의 보이드率은 거의 一定하다. 한편, 內管壁 근처로부터 環狀間隔 中央部까지는 環狀間隔이 增加함에 따라서 보이드率의 增加率이 增加하고 있다. 따라서 環狀間隔이 減少할수록 보이드率의 變化가 없음을 알 수 있다.

Fig. 12는 氣泡流에서 슬러그流로의 遷移 流動을 하는 경우로, 內管壁 근처에서 環狀間隔이 減少함에 따라서 보이드率은 增加하고 있는데 이와같은 現象은 氣泡流 경우와 同一하게 解析할 수 있다. 環狀間隔에 關係없이 無次元 半徑比가 0.3에서 0.8 부근까지의 보이드率은 거의 變化가 적으나 氣泡流 보다는 이래의 보이드率이 더 크다. 環狀間隔의 位置에 關係없이 보이드率이 거의 一定한 $Di = 20\text{ mm}$ 인 경우를 除外하고는 보이드率은 內管보다 外管쪽이 더 높고, 그 差는 內管쪽이 더 크다. 한편 環狀間隔增加에 따르는 內管壁 근처로부터 環狀間隔 中央部까지의 보이드率의 增加率은 氣泡流보다 더 크게 增加하고 있다. 環狀間隔의 位置가 같은 경우, 즉 無次元 半徑比가 0.15와 0.9 부근에서 環狀間隔의 變化에 따르는 보이드率의 差는 內管쪽이 더 크며, 氣泡流 경우보다도 그 差가 增加하고 있다.

Fig. 13은 슬러그流인 경우로, 同一한 內管棒直徑에서 最大보이드率이 發生하는 環狀間隔의 位置는 氣泡流, 氣泡流 - 슬러그流인 경우와 달리 內管쪽이다. 이와같은 現象은 內管쪽에서는 테일러氣泡가 流動하고, 外管쪽에서는 氣泡가 介在된 液膜이 주로 流動하기 때문이라 생각된다. 內管徑에 關係없이 環狀間隔 中央部로부터 外管쪽으로 갈수록 보이드率

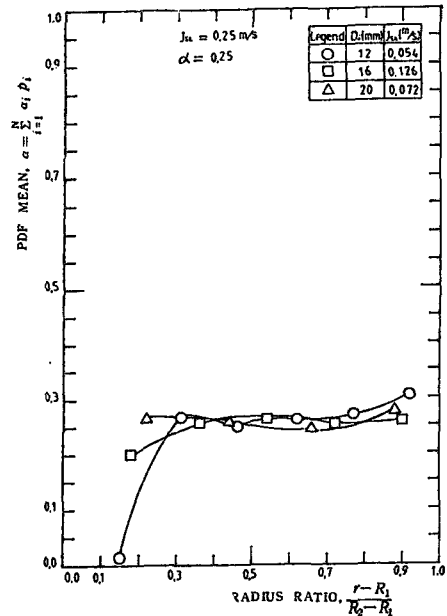


Fig.12 Comparison of time average local void fractions in the annuli with distance measured from the inner tube to outer tube for bubbly-slug flow

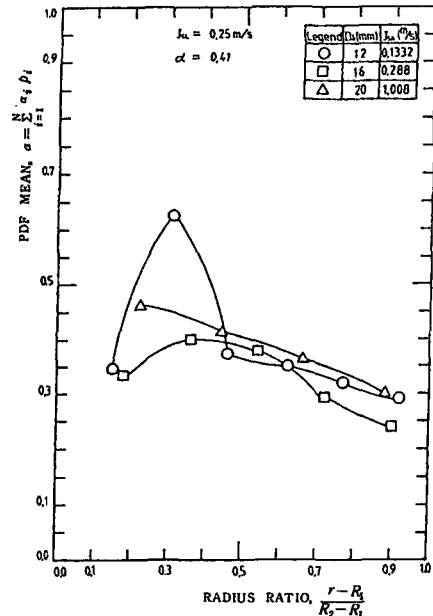


Fig.13 Comparison of time average local void fractions in the annuli with distance measured from the inner tube to outer tube for slug flow

은 減少하여 外管壁 근처인 無次元 半徑比가 0.9 부근에서 보이드率が 가장 낮게 나타나고 있다.

Fig. 14는 슬러그流에서 環狀流로 遷移流動을 하는 경우로, 內管壁 근처에서 環狀間隔이 減少함에 따라서 보이드率は 增加하고 있다. 最大보이드率は 環狀間隔에 關係없이 슬러그流과 同一하게 內管쪽에서 發生하고, 外管으로 갈수록 슬러그流 경우보다 보이드率的 減少率이 급격히 增加하고 있다. 한편, 外管壁 근처에서는 氣泡가 一部 介在된 液膜이 流動하기 때문에 보이드率が 最小가 된다. Fig. 13과 Fig. 14에서 $D_i = 12\text{ mm}$ 인 경우는 內管壁과 外管壁 근처에는 液膜이 주로 流動하기 때문에 보이드率は 비교적 같게 나타나고 있다.

Fig. 15는 環狀流인 경우로, 環狀間隔에 關係없이 보이드率は 內管壁 근처에서 最大値를 지니고, 外管壁 근처에서 最小値를 지닌다. 이때 最大보이드率과 最小보이드率의 差는 어느 流動樣式보다도 가장 크다. 外管壁 근처에서는 環狀間隔이 增加함에 따라서 보이드率は 減少하고 있다. 한편 슬러그流 - 環狀流 遷移인 경우보다도 보이드率的 減少率은 環狀間隔에 關係없이 더욱 增加하고 있다.

4. 結 論

(1) 同心環狀管의 環狀間隔에 關係없이 確率密度函數分布는, 氣泡流인 경우 低보이드率 領域에서 單一頂點으로 나타나며 그 幅은 협소하다. 氣泡流에서 슬러그流로 遷移하는 경우는 氣泡流보다 幅이 擴張된다. 슬러그流인 경우는 低보이드率과 高보이드率 領域 전반에 걸쳐서 分布한다. 슬러그流에서 環狀流로 遷移하는 경우는 高보이드率 領域으로 슬러그率보다 幅이 감소한다. 環狀流인 경우는 高보이드率 領域에서 單一頂點으로 나타나며 그 幅은 협소하다.

(2) 同心環狀管에서의 보이드率は, 氣泡流인 경우 內管壁 근처에서 環狀間隔이 減少함에 따라 增加하고, 內外管을 除外한 半徑方向 位置에서는 거의 一定하다. 氣泡流에서 슬러그

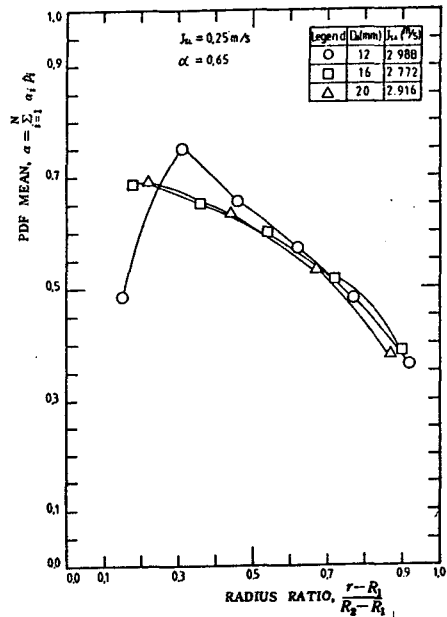


Fig. 14 Comparison of time average local void fractions in the annuli with distance measured from the inner tube to outer tube for slug-annular flow

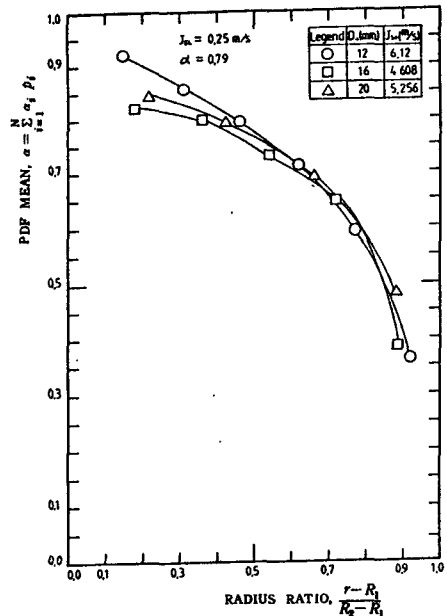


Fig. 15 Comparison of time average local void fractions in the annuli with distance measured from the inner tube to outer tube for annular flow

流로 遷移하는 경우는 環狀間隔 增加에 따르는 內管쪽부터 環狀間隔 中央部까지의 보이드 率의 增加率은 氣泡流보다 增加한다. 環狀間隔의 變化에 따르는 보이드率의 差는 內管쪽이 더 크다. 슬러그流인 경우는 環狀間隔에 關係없이 最大보이드率은 內管쪽에서 發生하고, 外管으로 갈수록 보이드率은 감소한다. 슬러그流에서 環狀流로 遷移를 하는 경우는 內管壁 근처에서 環狀間隔이 감소함에 따라 보이드率은 增加한다. 環狀流인 경우는 環狀間隔에 關係없이 最大보이드率과 最小보이드率의 差가 가장 크다.

後 記

本 研究는 1986 年度 韓國科學財團의 研究 費支援에 의하여 遂行되었기에 이에 關係者 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Jones, Jr., O.C. and Delhaye, J.M., 1976, "Transient and Statistical Measurement Techniques for Two-Phase Flows: A Critical Review", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 3, pp. 89-116.
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.* Vol. 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. Rouhani, Z., 1976, "Effect of Wall Friction and Vortex Generation on the Radial Distribution of Different Phases", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 3, pp. 35-50.
10. Serizawa, A., Kataoka, I., and Michiyoshi, I., 1975, "Turbulence Structure of Air-Water Bubbly Flow-II. Local Properties", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2, pp. 235-246.
11. Kazin, I.V., 1964, "Radial Distribution of Stream in Rising Turbulent Steam-Water Flow", *Teploenergetika*, Vol. 11, No. 1, pp. 40-43.
12. ASME, 1959, "Flow Meter and Its Application", New York.
13. 손병진, 김인석, 이진, 1986. "確率密度 函數와 전도 Probe 信號에 의한 수직이 상류의 流動樣式 特性," 大韓機械學會論文集, 제 10 권, 제 6 호, pp. 814-822.