

# 統計的 보이드率計測에 의한 垂直上向二相流의 流動樣式과 보이드分布 分析

Analyses of the Flow Patterns and Void Distribution in Vertical Upward  
Two Phase Flow with the Statistical Void Fraction Measurement

孫 炳 鎮\*, 金 仁 錫\*\*, 李 貞\*\*\*  
Byung Jin Son, In Suhk Kim, Jin Lee

## ABSTRACT

An experimental study has been conducted to investigate characteristics of the flow patterns, its transitions and the mean local void fraction obtained from which the probe was traversed diametrically from center to wall of the test section in the vertical upward air-water flow for isothermal condition using the electrical conductivity probe.

It has been shown that the probability density function of the mean local void fraction measured statistically from a Fast Fourier Transform becomes a criterion for the flow patterns and the mean local void fraction profile is a highly function of the flow patterns.

### 1. 序 論

二相流動系를 支配하는 流動樣式은 流動場 內的 速度分布, 보이드率分布, 乾度, 剪斷力分布 등에 따라 그 特性을 달리할 뿐 아니라 原子爐에서의 沸騰熱傳達, 不安定性, 壓力損失을 포함하여 臨界熱流束, 冷却材喪失事故에 따르는 再冠水過程, 各種 熱交換器들의 效率의 運用과 밀접한 關係가 있다.

流動樣式에 관한 初期의 研究들은 直接觀察의 方法을 利用하였기 때문에 客觀性이 乏如되어 왔는데 그후 고속 사진촬영에 의한 丁視的 方法(1)이 開發이 되어 주로 利用이 되

어 왔으나 이 方法도 定性的인 傾向만을 提示하고 있으며 특히 流動樣式的 遷移特性을 究明하지 못하였다. 그러나 최근에 와서 熱線風速計, radiation attenuation, X線 등의 計測機器와 光學probe, microthermocouple, 電氣probe, isokinetic probe 등이 多樣하게 開發이 되어 이들을 利用한 流動樣式에 관한 研究(2)들이 활발히 遂行되고 있다. Jones와 Zuber (3)는 X線計測機構를 開發하여 氣-水液二相流가 垂直管에서 流動하는 경우 形成되는 氣泡流, Slug 流, 環狀流에 대한 chordal 보이드率을 計測하여 이들 分布를 確率密度函數로 解析을 하였으나 流動樣式的 遷移特性을 提示

\* 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

\*\*\* 大林工專大 機械科

\* 1986年度 春季論文發表會(6月13日)에서 發表

하지 못하였다. Hubbard와 Dukler (4)는 流動壁面에서 發生하는 壓力波動에 相應한 스펙트럼分布으로써 流動樣式을 分析하였으나 遷移領域을 고려한 體系인 研究가 缺如되어 있고, Griffith(5) 등은 單一電導 probe를 써서 流動樣式에 관한 研究를 하였으나 明確한 熱工學的 資料提示가 미흡하였다.

二相流動系에서의 보이드率分布에 관한 研究(6), (7), (8)들은 그동안 많은 研究者들에 의해 遂行이 되어왔는데 이들 研究를 檢討하여 보면 氣泡流인 경우 보이드率은 管中央部보다 管壁附近에서 더 크다는 事實이 밝혀졌다. Kazin(8)의 研究結果에 의하면 蒸氣-水液이 垂直管에서 流動하는 경우 蒸氣가 最大로 分布하는 管에서의 位置는 管直徑의 0.6 배되는 곳으로 밝혀졌다. Serizawa(7)는 空氣-水液 二相流가 垂直管에서 流動하는 경우 乾度變化에 따르는 보이드率分布를 氣泡流와 Slug流에 대하여 究明한 結果, 氣泡流와 Slug流에서는 보이드率이 管直徑의 0.9 배되는 位置에서 最大로 分布하였다. 그러나 이들 研究들은 遷移流動과 環狀流에 대한 언급이 되어 있지 않다.

以上 記述한 바와 같이 그동안 流動樣式과 이와 關聯된 보이드率分布에 관한 研究들이 加熱과 非加熱條件으로 多樣한 流動條件과 計測方法에 의하여 進行이 되어 왔으나 아직도 計測機構들이 지니는 문제점들과 遷移特性에 대한 客觀的인 分析이 缺如되어 있다. 本 研究는 이러한 점에 着眼하여 電導 probe를 使用하여 局部보이드率을 計測하여 이들 데이터를 確率密度函數로 統計處理하여 平均局部보이드率(以後 보이드率로 表記)分布에 대한 PDF 分布特性으로써 流動樣式과 遷移特性을 解析하고, 또한 이들 流動樣式들이 지니는 보이드率 分布 特性을 究明하였다.

流動樣式에 따르는 보이드率分布는 各種 沸騰熱傳達機構들과 보일러 등의 熱交換器에 있어서 熱傳達效果和 밀접한 關聯이 있으므로 研究結果는 이들에 대한 熱設計時 基礎資料로써 活用과 應用이 可能하다고 본다.

## 2. 實 驗

### 2-1 實驗裝置

本 實驗에 使用한 實驗裝置는 Fig. 1과 같이 空氣-水液 二相流가 非加熱 垂直円管에서 同時に 上向流動하도록 設計製作하여 實驗過程에서 氣泡流, Slug流, 環狀流, 遷移流動이 形成되도록 氣-水液混合部, 試驗部, 循環水 저장탱크, 遠心펌프, 空氣噴射器, 오리피스部로 構成하였다.

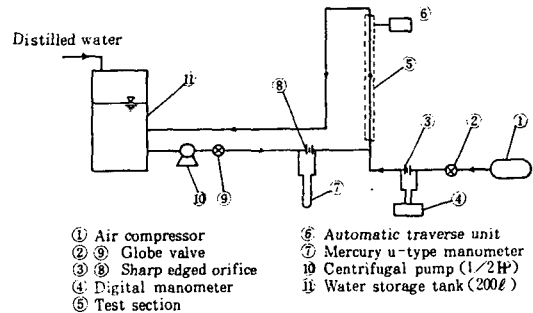


Fig. 1 Schematic diagram of the two phase flow facility

循環水는 蒸溜器를 통과하여 容量 200 ℓ의 循環水 저장탱크에 供給이 되도록 水頭를 600 mm로 一定하게 維持하였다. 遠心펌프는 1/2 HP 交流모우터로 驅動이 되어 물을 循環시킨다. 空氣와 循環水 流量은 實驗條件에 符合하도록 管路에 裝着한 두 개의 1½ inch 글로브 밸브를 利用하여 調節하였다. 各 相의 表面速度 計測用 오리피스는 ASME에서 發刊한 資料(9)를 參考하여 管徑比가 0.6인 sharp edge orifice로 精密設計 製作한 후 檢正하여 使用하였다. 循環水는 오리피스를 通過한 후 空氣噴射器에서 噴射된 空氣와 氣-水液混合部에서 混合하여 二相流가 上向流動을 한다.

Fig. 2는 空氣噴射器와 試驗部の 圖示로서 空氣噴射器는 直徑 28.7 mm, 길이 220 mm인 黃銅管円周에 10 mm의 一定間隔으로 0.5 mm로 드릴링하여 120개의 구멍을 내어 製作하였다. 壓縮機에 附着된 壓力調整器에서 所定壓力으로

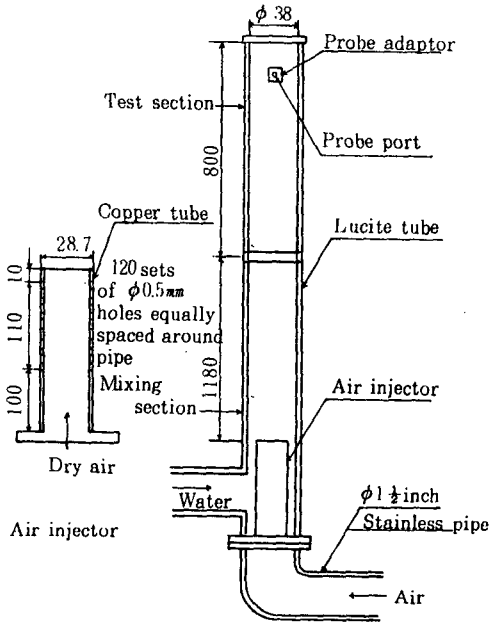


Fig. 2 Two phase air injector and test section

調節된 空氣가 이것을 通過하여 混合부에 供給이 되면서 循環水와 混合하여 氣-水液 二相流가 形成된다.

氣-水液 二相流는 直徑 38mm, 길이 1,180mm 인 lucite 混合管을 지나 直徑 38mm, 길이 800mm 인 試驗部로 流動한다. 試驗部는 流動樣式의 可視的 觀察을 目的으로 lucite 管을 使用하였으며, 보이드率을 計測하기 위하여 二相流가 定常狀態로 充分히 發達되는 試驗部 入口端으로부터 300mm되는 位置에 計測孔을 鑿어서 보이드率計測用 probe를 삽입하였다. 二相流가 完全發達되는 位置에 대한 理論的 研究는 아직 確立되어 있지 않으나 Serizawa의 實驗的 研究(7)에 의하면 流動管길이 管 直徑의 30 倍되는 位置에서 流動이 完全發達 되는 것으로 밝혀졌다. 그러므로 本 實驗에서 probe를 裝着한 位置는 氣-水液 混合管 入口 端으로부터 1,480mm, 즉 管直徑의 約 39倍되는 곳으로 試驗部길이와 計測位置가 타당하다. 試驗部를 通過한 氣-水液 二相流는 上部의 (平管을 통해 循環水저장탱크에 回收되어 流

動쿠우프가 完了된다. 系壓力은 大氣壓으로 하였으며 流動系의 振動을 防止하기 위해 實驗裝置를 實驗室壁과 바닥에 固着한 후 다이얼게이지로 試驗部의 振動을 計測하여 本 結果 5/100mm의 미소한 振動이 있었으므로 流動系의 振動이 流動樣式에 미치는 영향은 排除되었다. 試驗部와 氣-水液 混合管을 除外한 管들은 腐蝕을 防止하기 위하여 1 1/2 inch 스테인레스管을 使用하였다.

### 2-2 計測機器 및 資料處理

Fig. 3은 보이드率을 計測하는데 使用한 電導 probe의 構造圖로서 probe는 直徑 0.6mm, 길이 5mm인 30° 圓錐角을 지닌 白金針型으로 檢出部를 除外한 部分은 세라믹被覆이 되어있고 스테인레스管은 陽極이, 先端檢出部는 陰極이 된다. 檢出部 直徑은 0.1mm로 probe 外周에 直徑 1.6mm인 스테인레스管이 연결되어 있고 時定數는 1.5 msec이다. probe는 流動場內의 波動을 極小化하기 위해 90°型을 使用하였다.

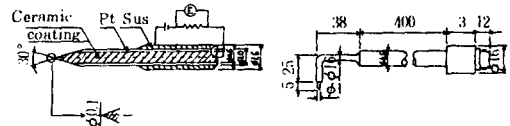


Fig. 3 Structure of the conductivity probe

電導 probe의 出力信號는 Kanomax社의 input conditioner, void fraction unit, DC voltmeter로 構成이 된 보이드率計測器(System 7931)로 檢出하였다. 이 機器는 連續的인 digital void fraction을 檢出하는데, probe의 아날로그信號는 積分回路에 의해 檢出이 되어 comparator로 傳達이 된 후 digitize 되며 氣相과 關聯된 digital pulse만 clock에 의해 計算이 되어 보이드率이 檢出된다. 아날로그回路의 周波數應答은 15 KHZ에서 DC로부터 3 dB 降下한 값이다. 대부분의 氣泡周波數는 1KHZ보다 작은데 本 實驗에서는 氣泡周波數가 30HZ부터 167HZ 範圍로 實驗에 使

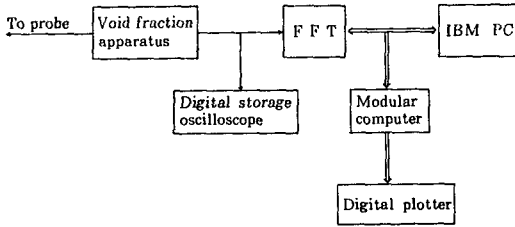


Fig. 4 Schematic diagram of experimental data processing system

用한 보이드率計測器의 周波數應答特性은 보이드率 檢出에 充分하다.

Fig. 4는 資料處理를 나타낸 그림으로 電導 probe의 出力信號는 보이드率計測器에서 時間平均이 되어 總計測時間에 대한 計測位置의 probe를 通過하는 時間의 比로 定義되는 局部 보이드率이 檢出된다. 즉 보이드率計測器에서 reference clock pulse 計算에 의하여 input conditioner로부터 矩形波펄스의 時間幅이 計測되어 주어진 計測時間에 대한 氣泡通過時間의 比가 產出된 후 보이드率을 表示된다. 이때 通過펄스數는 주어진 計測時間의 矩形波펄스의 總個數로 나타난다.

流動樣式에 따라 發生하는 펄스信號를 分析하기 위해 probe 出力信號를 Nicolet社의 digital oscilloscope(M2090-3C)에 入力시켜 그 特性을 分析하였다. 또한 計測된 보이드率에 대한 統計的 計算을 目的으로 Nicolet社의 FFT(M660B)를 利用하여 보이드率의 PDF 分布를 計測한 후 modular computer를 통해 digital plotter로 그 分布를 記錄하였다.

### 2-3 實驗方法

本 實驗에서 表面水液速度  $J_{SL}$ 의 範圍는  $0 \sim 0.5 \text{ m/s}$ , 表面空氣速度  $J_{SA}$ 의 範圍는  $0 \sim 1.749 \text{ m/s}$ 로 이 條件에서 氣泡流, Slug流, 環狀流, 遷移流動이 形成되도록 氣-水液의 流量을 調節하였다. 表面速度들은 오리피스 前後에 設置한 縮小形壓力 탱을 循環水인 경우는 水銀液柱計에, 空氣인 경우는 分解能이  $1/2,000$ 인 Furness社의 micromanometer(MI)

에 연결하여 計測하였다.

보이드率計測器는 實驗前에 HP社의 function generator(M3310B)로 DC 5volt의 sine波를 計測器에 入力시켜 計測器가 이 값과 一致하도록 input conditioner unit에 있는 gain과 bias를 調整하여 檢正한 후 使用하였다.

電導 probe는 流動場內에서 實驗前에 probe 出力電壓이 0 volt와 5 volt가 되도록 gain과 bias를 調整하여 檢正하였다.

實驗은  $J_{SL}$ 과  $J_{SA}$ 를 一定하게 維持하여 probe를 管中心으로부터 管壁面까지 半徑方向으로 3mm間隔으로 probe 自動移送裝置를 利用하여 移送한 후 各 計測點에서 보이드率計測器로 보이드率을 計測하였다. 이 때 sampling time은 0.1sec로 취했고 計測된 데이터들은 아날로그信號로 FFT에 入力되어 디지털信號로 變換된다. 入力信號는 FFT에서 sampling 周波數를 20 HZ로 하여 統計的으로 處理되어서 FFT와 연결된 플로터에 의해 各 보이드率에 相應한 PDF가 digital analog와 probe信號로 記錄되었다.

## 3. 實驗結果 및 檢討

### 3-1 平均局部 보이드率의 PDF 分布에 의한 流動樣式 分析

計測된 보이드率 데이터들에 대한 stationary 檢證은 流動樣式에 관한 研究(11)에서 平均 보이드率과 時間平均 보이드率이 一致하므로써 stationary가 成立됨이 究明되었다.

Fig. 5-9는  $J_{SL}$ 를  $0.5 \text{ m/s}$ 로 一定하게 維持하고  $J_{SA}$ 를  $0.36 \text{ m/s}$ 에서  $1.749 \text{ m/s}$ 까지 5種으로 變化시킨 경우, 보이드率分布를 統計的으로 計測하여 얻은 PDF 分布特性으로 流動樣式을 나타낸 그림이다. 그림에서 縱座標에 表示된  $PDF_d$ 와  $PDF_p$ 는 各各 digital analog信號와 probe信號에 대한 PDF를 나타낸다.

Fig. 5는 氣泡流에 해당하는 特性으로 PDF 分布가 低보이드 領域에서 單一頂點을 지니는

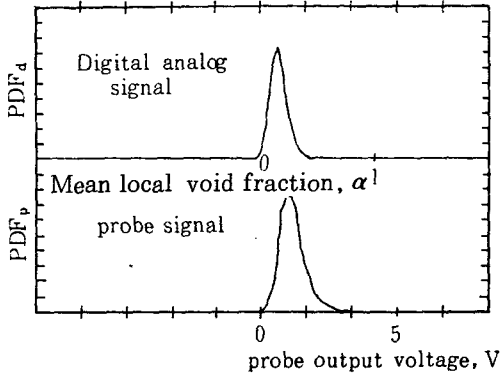


Fig. 5 PDF distribution for  $J_{SL} = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA} = 0.368 \text{ m/s}$ , and  $\alpha = 16.74 \%$

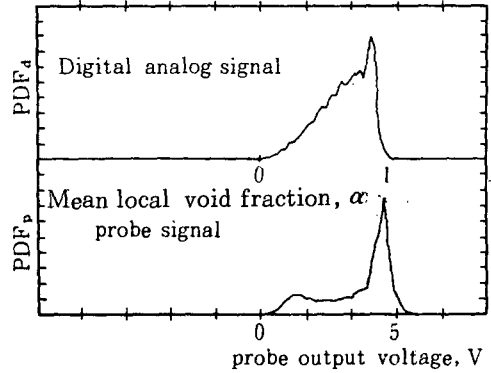


Fig. 8 PDF distribution for  $J_{SL} = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA} = 1.197 \text{ m/s}$ , and  $\alpha = 77.89 \%$

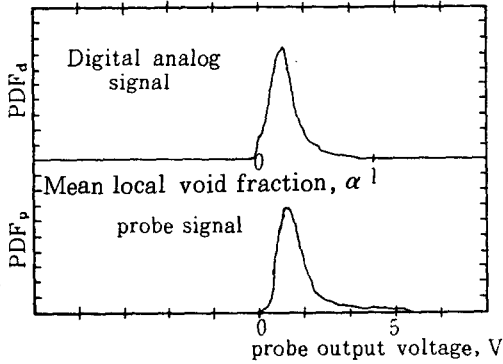


Fig. 6 PDF distribution for  $J_{SL} = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA} = 0.483 \text{ m/s}$ , and  $\alpha = 24.25 \%$

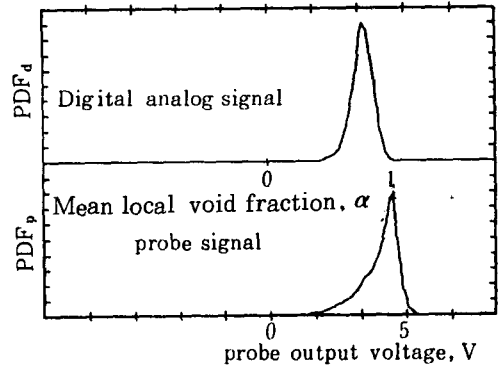


Fig. 9 PDF distribution for  $J_{SA} = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SL} = 1.749 \text{ m/s}$ , and  $\alpha = 82.29 \%$

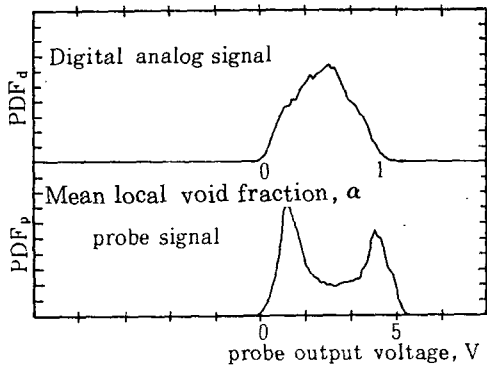


Fig. 7 PDF distribution for  $J_{SL} = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA} = 0.783 \text{ m/s}$ , and  $\alpha = 54.22 \%$

데 이는 流動液體에 많은 작은 氣泡들이 均一하게 分布함을 의미한다.

Fig. 6은 氣泡流에서 Slug 流로 遷移하는 경우로, 작은 氣泡들의 相互合體現象이 發生하여 形成된 큰 氣泡들이 間歇的으로 介在하여 流動하기 때문에 PDF의 bandwidth가 氣泡流에 비해 擴張된 것을 알 수 있다. PDF 分布는 低보이드領域에서 單一頂點으로 나타난다.

Fig. 7은 Slug 流인 경우로, 低보이드와 高보이드領域 두 곳에서 두 개의 頂點이 나타나고 있다. 이와 같은 現象은 氣泡 Slug와 液體 Slug에 散在한 많은 작은 氣泡들이 交代로 流動하고 液體가 Slug 流로의 遷移를 억제하지 못하기 때문에 發生하는 것으로 解析된다. 低

보이드領域에서의 PDF의 頂點이 高보이드領域에서의 頂點보다 높은 原因은 液體 Slug 가 氣泡 Slug 보다 支配적으로 流動하기 때문이다. 그러므로 Slug 流에서는 低보이드領域에서 形成되는 氣泡流와 高보이드領域에서 形成되는 環狀流의 週期的인 流動特性을 나타낸다.

Fig. 8은 Slug 流에서 環狀流로 遷移하는 경우로, 高보이드領域에서 單一頂點을 나타내고 PDF의 bandwidth가 擴張된 것을 알 수 있다. 이는 氣泡들이 液體보다 優勢하게 流動하고 있음을 意味한다.

Fig. 9는 環狀流인 경우로 高보이드領域에서 單一頂點이 發生하는 特性을 나타내고 있다.

또한 管中央部에는 氣泡들이 流動하고 管壁面에는 液體들이 流動하므로 bandwidth가 좁게 나타나고 있다.

以上 本 實驗에서 얻은 流動樣式에 따르는 보이드率의 PDF 分布特性은 X線計測機構를 利用하여 chordal 보이드率을 計測한 後 PDF 分布로 統計處理하여 流動樣式을 究명한 Jones (3)의 研究結果와 同一하다. 그러므로 本 實驗에서 使用한 간단한 計測機構 및 計測方法으로 X線計測機構가 지니는 計測上的 어려운 점을 解決할 수 있음을 보여주고 있다. 또한 Matsui(10)가 壓力變換器를 利用하여 靜壓波動 信號成分을 統計處理하여 얻은 PDF 分布特性으로 流動樣式을 分析한 結果와 同一한 傾向을 보이므로 보이드率 計測에 의하여도 充分히 流動樣式을 分析할 수 있음을 알 수 있다. 流動樣式의 遷移特性은 보이드率의 PDF 分布로부터 統計적으로 moment를 計算하여 流動樣式을 解析한 研究結果(11)를 活用하였다.

### 3-2 流動樣式에 따르는 平均局部보이드率 分布

上記한 PDF 分布特性에 의한 流動樣式의 分析結果를 토대로하여 보이드率 分布特性을 分析한 結果, Fig. 10-14는  $J_{SL}$ 를 0 m/s 부터 0.5 m/s로 5種으로 變化시켜 이들을 各各 一定하게 維持한 條件에서  $J_{SA}$ 를 0.046 m/s

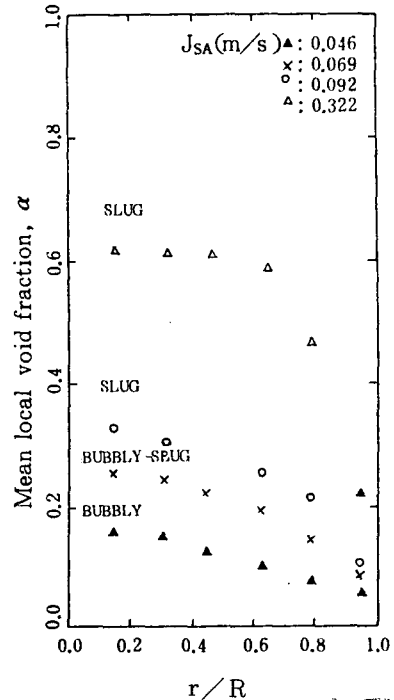


Fig. 10 Mean local void fraction Profiles for  $J_{SL} = 0 \text{ m/s}$

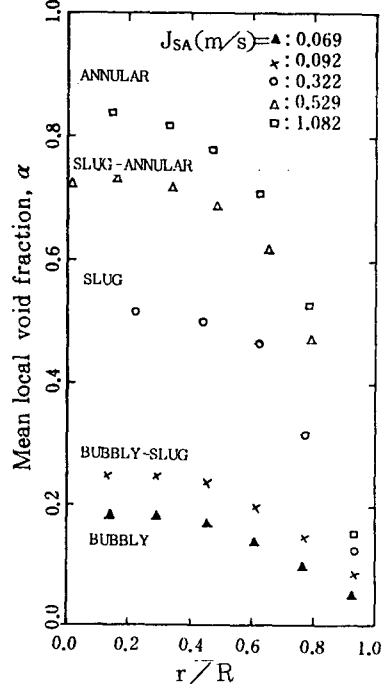


Fig. 11 Mean local void fraction Profiles for  $J_{SL} = 0.12 \text{ m/s}$

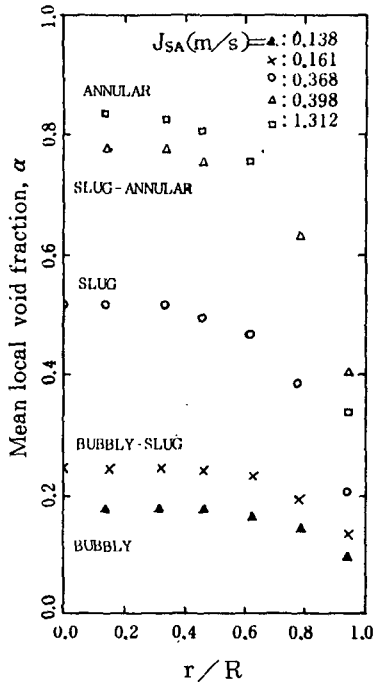


Fig. 12 Mean local void fraction Profiles for  $J_{SL} = 0.25 \text{ m/s}$

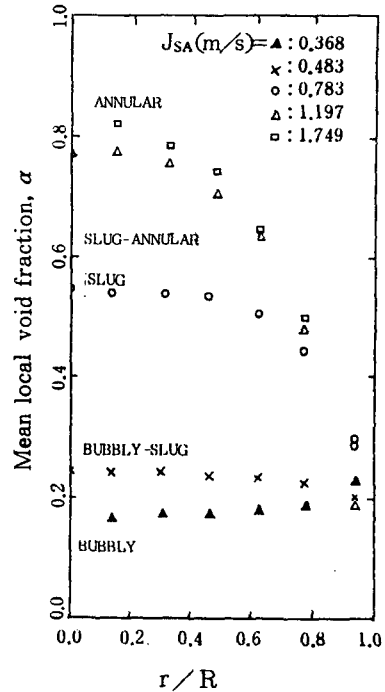


Fig. 14 Mean local void fraction Profiles for  $J_{SL} = 0.5 \text{ m/s}$

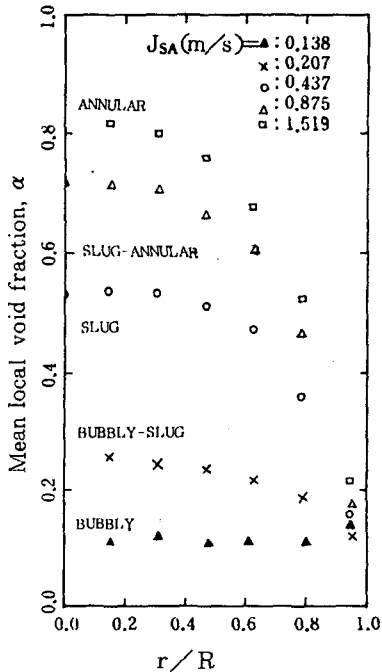


Fig. 13 Mean local void fraction Profiles for  $J_{SL} = 0.37 \text{ m/s}$

부터 1.749 m/s까지 변화시킨 경우, 管中央로부터 管壁까지 半徑方向에 따르는 보이드率分布를 나타낸 그림이다.

이들 그림들을 綜合적으로 檢討하여 보면 流動樣式에 따라 보이드率分布가 달라진다는 事實과 表面水液速度가 一定한 條件에서 表面空氣速度가 增加함에 따라, 즉 氣泡流에서 環狀流로 流動樣式이 變化함에 따라 管中央部附近에서 보이드率分布曲線은 氣泡流에 해당되는 平坦한 형태에서 環狀流에 해당하는 拋物線 형태로 變化함을 알 수 있다. 氣-水液 二相流가 流動하는 경우 보이드率分布에 관한 研究(6), (7), (8)들에 의하면 一定한 表面液體速度에서 表面空氣速度가 增加함에 따라 보이드率이 最大가 되는 頂點發生位置가 管壁으로부터 점차적으로 떨어져 發生하는데 本 實驗에서는 氣泡流를 除外한 流動樣式들에서는 管壁附近에서 最大의 보이드率이 發生하지 않았다 이는 本 實驗에서 表面水液速度가 0.5 m/s 以下の 低速이기 때문이라 생각된다.

流動樣式別로 보이드率分布特性을 分析하여 보면 低보이드率에서 發生하는 氣泡流인 경우,  $J_{SL}$ 이  $0.25\text{ m/s}$  以下の 低速에서 보이드率分布는 管中央部 附近에서 比較的 均一하고, 管壁에 近接함에 따라 減少하고 있음을 알 수 있다. 한편 Fig. 13과 Fig. 14에서  $J_{SL}$ 이  $0.37\text{ m/s}$  以上에서는 보이드率分布가 管壁附近, 즉  $r/R \cong 0.9$ 되는 位置에서 管中央部보다 더 큰 보이드率을 지니는 頂點이 發生하는 現象이 나타나고 있다. 이와 같은 現象은 氣泡流에서 氣泡의 形狀은 대부분 液相速度分布에 의하여 變化하고 氣泡의 運動은 그 形狀에 의하여 影響을 받는데 氣泡가 上記와 같은 거동을 나타내는 原因은 정확히 밝혀지지 않고 있으나 壁面附近에서의 液相이 지니는 速度勾配가 原因이 된다고 생각된다. Kazin (8)에 의하면 管直徑이  $57\text{ mm}$ 이고 蒸氣-水液速度가  $0.5\text{ m/s}$ 인 경우, 보이드率分布가 最大로 發生한 位置는  $r/R = 0.6$ 이다. Serizawa(7)에 의하면 管直徑이  $60\text{ mm}$ 이고 表面液體速度가  $1.03\text{ m/s}$ 인 경우, 보이드率이 最大로 發生한 半徑方向의 位置는  $r/R = 0.9$ 로 밝혀졌다. 이들의 研究와 本 實驗結果를 比較하여 보면 管壁附近에서 發生하는 보이드率의 頂點發生位置에 影響을 주는 因子는 管直徑과 表面水液速度이다. 이와 같은 事實로부터 試驗部の 크기와 各相의 速度는 流動中央部에서의 보이드率分布뿐 아니라 氣泡流인 경우 보이드率의 頂點發生位置를 決定하는 重要한 因子가 됨을 알 수 있다. 그러나 보이드率의 頂點發生位置에 影響을 주는 因子들은 이외에도 氣泡들의 動的舉動과 發生氣泡들의 直徑 등이 있는데 이들 相互間의 影響에 대한 體系的인 研究가 앞으로 필요하다고 본다.

以上에서 熱交換器나 原子爐에 使用하는 冷却材에서 發生하는 氣泡들이 管壁附近에 支配的으로 分布하면 熱傳達率이 顯著하게 減少함을 推論할 수 있다.

氣泡流에서 Slug 流로 遷移하는 경우 半徑方向增加에 따르는 보이드率은 管中央部보다 약간 높은 값을 지니거나 均一한 값을 維持하

다가 管壁에 接近함에 따라 減少하나 Fig. 14에 나타난 바와 같이  $J_{SL} = 0.5\text{ m/s}$ 에서 보이드率은 거의 均一한 分布를 나타낸다.

Slug 流인 경우 Serizawa (7)는 管中央部에서 比較的 높은 보이드率을 지니고 管壁附近에서 頂點이 發生하는 拋物線形態의 보이드率分布 曲線을 提示하였는데 Slug 流과 氣泡流에서 發生하는 頂點의 位置가 一致하고 있다. 그러나 本 實驗의 경우 보이드率分布가 그와 같이 拋物線形態로 同一한 傾向, 즉 管中央部에서 보이드率이 높게 나타나기는 하나 管壁附近에서 頂點이 發生하지 않았다. 이와 같은 現象은 液體와 氣泡 Slug가 交代로 生成되면서 流動하고, 各相의 速度가 低速이기 때문이라 생각된다.

Slug 流에서 環狀流로 遷移하는 경우와 環狀流인 경우, 보이드率分布曲線은 拋物線形態로 管壁에 가까와 질수록 보이드率은 급격히 減少함을 알 수 있는데 이는 管壁에 形成되는 液膜의 波動現象에 起因한다고 생각된다.

#### 4. 結 論

垂直上向 氣-水液 二相流動에서 形成되는 流動樣式을 統計的 計測方法으로 平均局部 보이드率을 計測하여 PDF 分布로 分析하고 이 들로부터 보이드率分布特性을 究明한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 보이드率에 相應하는 PDF 分布는 流動樣式에 따라 그 特性을 달리한다. 즉 氣泡流과 氣泡流-Slug 遷移인 경우 PDF 分布는 低 보이드領域에서 單一頂點으로 나타나는데 遷移에 해당하는 PDF의 bandwidth는 氣泡流보다 擴張된다. Slug 流인 경우 低보이드와 高 보이드領域 두 곳에서 頂點이 두 個 發生한다. Slug 流-環狀流 遷移와 環狀流인 경우는 PDF 分布는 高보이드領域에서 單一頂點으로 나타나는데 遷移보다 環狀流인 경우가 PDF의 bandwidth가 좁다.

(2) 流動樣式, 流動管의 直徑, 表面氣-水液 速度에 따라 平均局部 보이드率의 分布가 달



라진다. 氣泡流인 경우 表面水液速度가 0.37 m/s以上에서 平均局部보이드率은 管壁附近인  $r/R \cong 0.9$ 에서 最大로 分布한다. 또한 表面水液速度가 0.25 m/s以下の 低速에서 보이드率分布는 管中央部附近에서 比較的 均一하다. 氣泡流를 제외한 流動樣式에서는 管壁附近에서 보이드率의 頂點이 發生하지 않았다. 氣泡流-Slug 流 遷移인 경우는 보이드率이 管中央部보다 약간 높은 값을 均一하게 지나 管壁에 接近함에 따라 減少한다. Slug 流인 경우 管中央部附近에서 最大의 보이드率이 分布하였으나 管壁附近에서는 頂點이 發生되지 않았다. Slug 流-環狀流 遷移와 環狀流인 경우 보이드率分布曲線은 拋物線形態로 보이드率은 管壁에 接近함에 따라 급격히 減少한다.

### 참 고 문 헌

- (1)Hsu, Y.Y., Simon, F.F. and Graham, R.W., "Photographic and the Optical Techniques for Studying Two-Phase Flow," ASME Symposium on Two-Phase Flow Instrumentation, Chicago, Ill., PP. 1-23, 1969.
- (2)Jones, Jr., O.C. and Delhaye, J.M., "Transient and Statistical Measurement Techniques for Two-Phase Flows: A Critical Review," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 3, PP. 89-118, 1976.
- (3)Jones, Jr., O.C. and Zuber, N., "The Interrelation between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 2, PP. 273-306, 1975.
- (4)Hubbard, M.G. and Dukler, A.E., "The Characterization of Flow Regimes for Horizontal Two-Phase Flow," Proc. 1966 Heat Trans. and Fluid Mech. Inst., Stanford University Press, PP. 100-121, 1975.
- (5)Griffith, P., "Two-Phase Flow Regime Detecting," ASME Paper 64-WA/HT-43.
- (6)Rouhani, Z., "Effect of Wall Friction and Vortex Generation on the Radial Distribution of Different Phases," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 3, PP. 35-50, 1976.
- (7)Serizawa, A., Kataoka, I. and Michiyoshi, I., "Turbulence Structure of Air-Water Bubbly Flow-II. Local Properties," Int. J. Multiphase Flow Vol. 2, PP. 235-246, 1975.
- (8)Kazin, I., V., "Radial Distribution of Stream in Rising Turbulent Steam-Water Flow," Teploenergetika Vol. 11 (1), PP. 40-43, 1964.
- (9)ASME, "Flow Meter and Its Application," 1959.
- (10)Matsui, G., "Identification of Flow Regimes in Vertical Gas-Liquid Two-Phase Flow using Differential Pressure Fluctuations," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 10, No. 6, PP. 771-720, 1984.
- (11)손병진, 김인석, 이진, "확률밀도함수와 전도 Probe 신호에 의한 수직이상류의 유동양식특성," 1986 춘계기계학회 학술대회 논문초록집, pp. 530-534, 1986.