

<論 文>

# 確率密度函數와 電導 Probe 信號에 의한 垂直二相流의 流動樣式特性†

孫炳鎭\* · 金仁錫\*\* · 李眞\*\*\*

(1986年 6月 4日 接受)

## Flow Pattern Characteristics in Vertical Two Phase Flow by PDF and Signals from Conductance Probe

Byung Jin Son, In Suhk Kim and Jin Lee

**Key Words:** Two Phase Flow(二相流動), Flow Pattern(流動樣式), Flow Pattern Transition(流動樣式遷移), Probability Density Function(確率密度函數), Time Average Local Void Fraction(時間平均局部보이드率)

### Abstract

Flow patterns and its transitions in vertical two phase flow of air-water isothermal flow are identified objectively by void output signals and moments computed from the Probability Density Function which is associated with the statistical measurement for time average local void fractions using conductance probe.

It has been shown that the probe output signals, PDF distributions, and its moments are deterministic criteria of flow pattern and transition classification.

### 1. 序 論

石油化學工業, 原子力發電, 各種 熱交換器와 關聯된 機構들에 대한 熱設計를 最適으로하기 위해서는 二相流 流動現象에 관한 熱流體力學的 解析이 매우 重要하다. 二相流動系를 支配하는 파라미터들 중 보이드率分

† '86年度 大韓機械學會 春季學術大會(6.28.)에서 發表

\* 正會員, 漢陽大學校 工科學 機械工學科

\*\* 正會員, 明知大學校 工科學 機械工學科

\*\*\* 正會員, 大林工業專門大學 機械科

布에 따라 形成되는 流動樣式들은 系の 壓力降下, 熱傳達現象, 各相의 速度들에 決定的인 影響을 줄 뿐 아니라 流動樣式的 遷移는 運動量, 에너지, 質量移送의 變化를 초래하므로 필히 究明이 되어야 한다.

流動樣式에 관한 初期의 究研들은 可視的 方法을 利用하여 流動樣式을 定性的으로 解析하였기 때문에 各 觀성이 결여 되었으나 最近들어 熱線風速計, radiation attenuation, X-線 등의 測定機器와 optical probe, microthermocouple, 電氣 probe, isokinetic probe 등이 多樣하게 開發이되어 이들을 利用한 究研들이 활발히 遂行되고 있다. Neal<sup>(1)</sup>은 電導 probe 를 使用하여 slug 流

인 경우 局部보이드率과 氣泡周波數 등을 測定하여 이들 信號를 自己函數와 power density spectra로 統計處理한 후 靜壓測定方法으로 얻은 靜壓勾配로 局部보이드率을 比較檢討하였으나 各 流動樣式에 대한 資料를 提示하지 못하였다. Jones와 Zuber<sup>(2)</sup>는 X-線 測定機構를 開發하여 垂直氣液流動系에서 形成된 氣泡流, slug流, 環狀流에 대한 統計的 分析을 遂行하였으나 流動樣式에 대한 客觀적인 結果를 提示못하였다. Hubbard와 Dukler<sup>(3)</sup>는 流動壁面에서의 壓力波動에 相應한 스펙트럼 分布로써 流動樣式을 分析하였으나 遷移領域에서의 解析이 결여되어 있다. Choe<sup>(4)</sup>는 slug流-環狀流 遷移에 대하여 오실로스코우프에 나타나는 壓力波動으로 解析을 하였고, Griffith<sup>(5)</sup>, Bergles<sup>(6)</sup> 등은 單一電導 probe를 써서 氣泡流, slug流, 環狀流에 대한 研究를 하였으나 이들도 明確한 資料를 提示하지 못하고 있다. Barnea<sup>(7)</sup> 등은 세 개의 電導 probe를 使用하여 流動樣式을 解析하였으나 역시 遷移流動인 경우를 提示하지 못했다.

以上 記述한 바와 같이 그 동안 流動樣式에 관한 研究들이 여러 형태의 幾何學的 條件과 多様な 測定方法에 의하여 進行이 되어 왔으나 아직도 測定機構들이 지니는 問題점들과 流動樣式, 特히 遷移特性에 대한 客觀적인 解析이 결여되어 있는 實情이다.

本 研究는 이러한 점에 착안하여 非加熱垂直二相流動系에서 電導 probe를 利用하여 時間平均보이드率을 測定하여 이들로부터 統計的으로 處理된 確率密度函數(PDF)分布와 이와 關聯된 一聯의 모우멘트計算을 시도 하므로써 流動樣式과 遷移特性에 대하여 客觀적이고, 體系의인 解析을 하였다. 또한 學界 및 產業界에서는 測定機構의 單純化가 요구되므로 電導 probe의 出力信號를 分析하여 流動樣式에 따르는 特性을 아울러 究明하였다.

## 2. 實 驗

### 2.1 實驗裝置

本 實驗裝置는 非加熱垂直管에서 空氣와 물이 同時에 上向流動하도록 循環回路를 設計하여 實驗過程에서 氣泡流, slug流, 環狀流, 遷移流動樣式이 形成되도록 製作되었다. 循環回路는 循環水 저장탱크, 遠心펌프, 氣液流動速度 測定部, 空氣噴射器, 壓縮機, 氣液混合部, 試驗部로 Fig. 1과 같이 構成되었다. 循環水는 蒸溜器를 통해 供給된다. 循環水저장탱크의 容量은 200l로 탱크內의 水頭는 實驗中에 遠心펌프에 充分한 制動

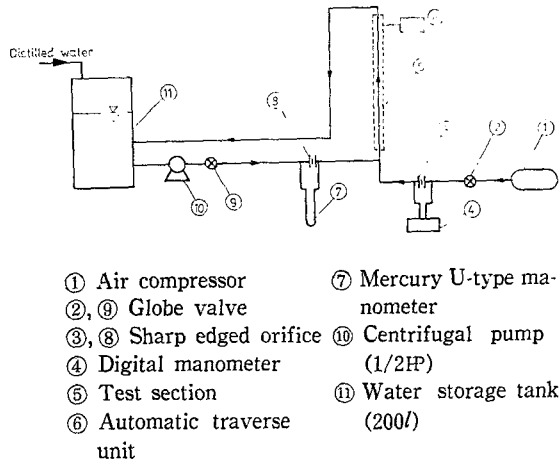


Fig. 1 Schematic diagram of the two-phase flow facility

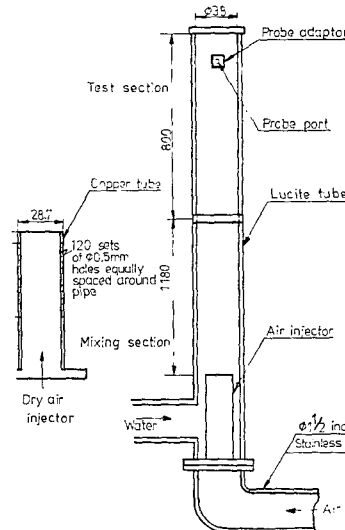


Fig. 2 Two phase air injector and test section

有效吸入揚程이 供給되도록 600mm로 一定하게 維持하였다. 遠心펌프는 1/2HP 交流모우터驅動에 의해 물을 循環시켰다. 空氣와 循環水 流量은 實驗條件에 符合되도록 管路에 設置한 두 개의 1.1/2 inch 글로우브 밸브를 利用하여 調節된다. 各 相의 表面速度測定用 오리피스는 ASME에서 發刊된 資料<sup>(8)</sup>를 參考하여 管徑比가 0.6인 sharp edge orifice로 精密設計 製作하여 檢正하였다. 循環水는 오리피스를 통과한 후 空氣噴射器에서 噴出된 空氣와 混合하여 上向二相流動을 한다.

Fig. 2는 空氣噴射器와 試驗部에 圖示로 空氣噴射器는 直徑 28.7mm, 길이 220mm인 黃銅管圓周에 10mm의 一定間隔으로 0.5mm로 드릴링하여 120개의 구멍

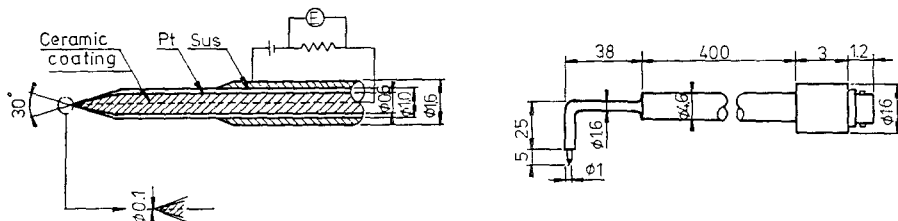


Fig. 3 Structure of the conductivity probe

을 내어製作하였다. 壓縮機에 附着된 壓力調整器에서 一定壓力로 調節된 空氣가 이것을 통과하여 混合部에 供給이 되면서 循環水와 混合되어 氣液二相流가 形成된다. 氣液二相流는 直徑 38mm, 길이 1180mm 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 局部보이드率을 測定하기 위해 二相流가 定常狀態로 充分히 發達된 試驗部入口端으로부터 300mm 位置에 測定孔을 뚫어서 probe 를 삽입하였다. 試驗部를 통과한 氣液二相流는 水平管을 통해 循環水저장탱크에 回收되어 流動循環回路가 完了된다. 系壓力는 大氣壓으로 하였으며 流動系에 振動을 除去하기 위해 實驗裝置를 實驗室壁과 바닥에 固着한 후, 다이얼 게이지로 試驗部의 振動을 測定해 본 結果 5/100mm 의 振動이 있었다. 試驗部와 氣液混合管을 除外한 管들은 腐蝕을 防止하기 위해 1·1/2 inch 스테인리스管을 使用하였다.

## 2.2 測定機器 및 資料處理

### (1) 電導 probe 와 보이드率 測定器

液相과 氣相間에 發生하는 電氣傳導差를 利用한 電導 probe 는 局部보이드率과 液膜두께를 測定目的으로 開發된 probe 로 製作이 容易하기 때문에 一般적으로 쓰이고 있다. 本 實驗에서는 局部보이드率을 測定하여 流動樣式의 特性을 究明하기 위해 Fig. 3 과 같은 電導 probe 를 使用하였다. Probe 는 直徑 0.6mm, 길이 5mm 인 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 되어 있고 스테인리스管은 陽極이, 先端檢出部는 陰極이 된다. 檢出部 直徑은 0.1mm 로 probe 外周에 直徑 1.6mm 인 스테인리스管이 연결되어 있고 時定數는 1.5msec 이다. probe 는 流動場內의 波動을 極小化하기 위해 90°型을 使用하였다.

電導 probe 의 出力信號는 kanomax 社의 DC voltmeter, void fraction unit, input conditioner 로 構成이 된 보이드率測定器(system 7931)로 檢出하였다. 이 機器

는 連續的인 digital void fraction 을 檢出하며, probe 의 아날로그信號는 微分回路에 의해 檢出이 되어 comparator 로 傳達된 후 digitize 되며, 氣相과 關聯된 digital pulse 들 만이 clock 에 의해 計算이 되어 보이드率이 檢出된다. 아날로그回路의 周波數應答는 15KHz 에서 DC 로부터 3dB 降下한 값이다. 대부분의 氣泡周波數는 1KHz 보다 적는데 本 實驗에서는 氣泡周波數가 30~167Hz 範圍로 本 實驗에 使用한 測定器의 周波數應答는 보이드率檢出에 充分하다.

### (2) 確率密度函數 理論

보이드率이 어떠한 特定보이드率  $\alpha$  보다 작은 確率 이  $P(\alpha)$  로 주어지는 경우,  $dP(\alpha)/d\alpha = p(\alpha)$  는  $\alpha_i$  와  $\alpha_i + \Delta\alpha_i$  區間에 存在하는 單位보이드率當 確率을 意味한다. 보이드率을 나타내는 電壓-時間 記錄을 보이드率增分과 時間增分으로 區分하면,  $\alpha(t)$  를  $\alpha_i$  와  $\alpha_i + \Delta\alpha_i$  區間內의 값으로 假定한 경우의 確率은 同一區間內에 해당하는 總時間  $T_i = \sum_{j=1}^{n_i} \Delta t_j$  와 標本時間  $T$  의 比로 다음과 같이 表示된다.

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

여기서  $\Delta t_j$  는  $\alpha(t)$  의  $\alpha_i$  와  $\alpha_i + \Delta\alpha_i$  區間에 해당하는 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  $\alpha_i$  와  $\alpha_i + \Delta\alpha_i$  區間에 對應하는 標本個數를  $n_i$ , 標本時間  $T$  에 對應하는 總個數를  $N$  라 하면 確率密度函數는 다음과 같이도 定義된다.

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

式(2)는 單一標本記錄의 確率密度函數를 나타내기 때문에 本 實驗에서 一定한 氣-水液의 表面速度條件에서 얻어진 보이드率에 해당하는 平均確率密度函數  $\bar{p}(\alpha)$

는 다음 式으로 求해진다.

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

(3) 資料處理

Fig. 4는 data processing을 나타낸 그림으로 電導 probe 出力信號는 보이드率 測定器에서 時間平均이 되어 總測定時間 T에 대한 주어진 位置에서 氣泡가 通過하는 時間  $t_{xi}$  比로 定義되는 局部 보이드率  $\alpha_{local}(r) = \sum \frac{t_{xi}}{T}$ 가 檢出된다. 즉 보이드率 測定器에서 reference clock pulse 計算에 의해 input conditioner로부터 矩形波 펄스의 時間幅이 測定되어 주어진 測定時間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 測定時間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 이 信號를 Nicolet社의 digital storage oscilloscope (M2090-3C)에 入力시켜 그 特性을 解析하였다. 또한 測定된 時間平均 보이드率 (以下 보이드率으로 表記)에 대한 統計的 解析을 目的으로 Nicolet社의 FFT (M660B)를 使用하여 PDF 分布를 測定한 후 modular computer를 통해 digital plotter로 그 分布를 記錄하였다. 한편, FFT에서 檢出된 digitalized void fraction과 PDF 出力은 IBM PC-XT에 연결되어 모우멘트計算에 使用되었다.

PDF 分布와 關聯된 모우멘트는 原點에 대한 1次, 2次 모우멘트, 平均에 대한 variance, skewness와 kurtosis로 計算에 使用한 모우멘트一般式은 다음과 같다.

$$M_n = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha)^n P_i \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 는 平均局部 보이드率으로 다음과 같다.

$$\alpha = \sum_{i=1}^N \alpha_i P_i \quad (6)$$

$P_i$ 와  $\alpha_i$ 는 各各  $i$ 번째의 PDF와 보이드率,  $M_n$ 은  $n$ 번째의 모우멘트를 의미한다.  $n=2$ 는 variance  $M_2$ ,  $n=3$ 는 skewness  $M_3$ ,  $n=4$ 는 kurtosis  $M_4$ 를 나타

낸다.

原點에 대한 보이드分布의 分散度를 나타내는 second raw moment  $M_{2r}$ 은 다음과 같다.

$$M_{2r} = \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 P_i \quad (7)$$

skewness 係數  $C_{M3}$ 와 kurtosis 係數  $C_{M4}$ 는 다음과 같다.

$$C_{M3} = M_3 / M_2^{1.5} \quad (8)$$

$$C_{M4} = M_4 / M_2^2 \quad (9)$$

2.3 實驗方法

本 實驗에서 表面液體速度  $J_{SL}$ 의 範圍는 0~0.5m/s, 表面空氣速度  $J_{SA}$ 의 範圍는 0~2.34m/s로 이 條件에서 氣泡流, slug 流, 環狀流, 遷移流動이 形成되도록 氣液의 流量을 글로우브 밸브로 各各 調節하였다. 表面速度들은 오리피스前後에 設置한 縮小型壓力錶을 循環水인 경우는 水銀液柱計에, 空氣인 경우는 分解能이 1/2000인 Furness社의 micromanometer (M. 1)에 連接하여 測定하였다.

보이드率 測定器는 實驗前에 H.P社의 function generator (M3310B)로 DC 5 volt의 싸인波를 測定器에 入力시켜 測定器가 이 값과 一致하도록 conditioner unit에 있는 gain과 bias를 調節하여 檢正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.

$J_{SL}$ 과  $J_{SA}$ 를 一定하게 維持하여 probe를 管中心으로부터 壁面까지 半徑方向 3mm 間隔으로 probe 自動移送裝置를 利用하여 移送한 후, 各點에서 보이드率 測定器로 보이드率을 測定하였다. 이 때 sampling time은 0.1sec로 취했고, 測定된 데이터들은 애널로그信號로 FFT에 入力되어 디지털信號로 變換된다. 入力信號는 FFT에서 sampling 周波數 20Hz, sampling period 0.05sec로 하여 統計的으로 處理되어서 FFT와 연결된 플로우터에 의해 各 보이드率에 相應한 PDF가 디지털 애널로그와 probe 信號로 記錄되었다.

Probe 信號는 보이드率 出力電壓과 digital analog level로 오실로스코프에서 檢出하였다. 實驗條件은 一定한  $J_{SL}$ 에서  $J_{SA}$ 를 變化시켜 보이드率을 13種類로 하여 PDF와 probe 信號를 檢出하였고, 또한  $J_{SL}$ 를 0.5m/s와 0.25m/s로 一定하게 維持하여  $J_{SA}$ 와 probe 位置를 變化시켜 이들로 부터 各 모우멘트에 대한 데이터를 얻기 위한 一聯의 實驗을 遂行하였다. 流動樣式의 可視的 觀察도 사진 촬영에 의해 시도하였다.

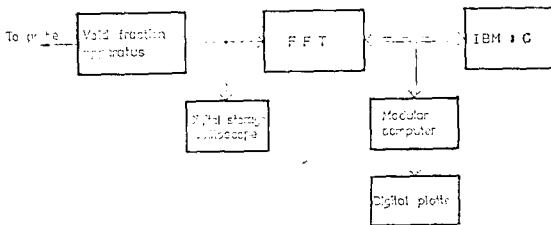


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental data processing system

3. 實驗結果 및 檢討

本 研究에서는 垂直二相流動에서 典型的으로 나타나는 氣泡流, slug 流, 環狀流, 遷移流動을 電導 probe 에서 檢出한 信號特性和 PDF 分布(Fig. 6~10), 모멘트(Fig. 11~14)로서 究明하였다.

Fig. 5는 random process의 stationary를 檢證한 그림으로써 process가 統計的으로 stationary 하다고 가정하면 PDF 平均보이드率과 時間平均보이드率이 一致해야 하는데, 이들의 相關關係가 一致하므로 stationary가 成立한다.

Fig. 6(a), (b)는 氣泡流로서 (a)는 電導 probe로 부터 檢出된 펄스들이 0 volt와 最大出力電壓 5 volt 사이에서 高周波의 波動傾向을 나타내는데 이는 電導性인 물과 물 속에 散在된 非電導性인 작은 氣泡들이 連續的으로 交代로 probe를 通過하기 때문이다. 氣泡가 通過할 때 펄스들은 陽의 最大펄스로 나타나고 있다. (b)는 低 보이드領域에서 單一最大點을 지니는 PDF 分布特性을 나타낸다.

Fig. 7(a), (b)는 氣泡流에서 slug 流로의 遷移를 나타내는 그림으로 (a)에서 氣泡들의 合體現象으로 인해 큰 氣泡들이 形成되어 管內에 散在한 작은 氣泡들과 함께 probe를 通過하므로 氣泡通過時間이 遲延되어 間歇的인 平坦한 形態의 펄스가 最大出力에 나타나고 있다. (b)는 PDF의 bandwidth가  $J_{SA}$ 의 增加에 따라

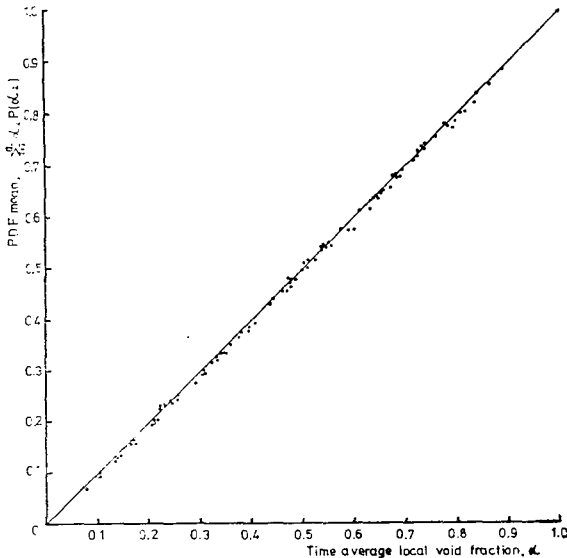


Fig. 5 The PDF mean vs time average local void fraction

增加함을 나타내는데 이와 같은 傾向은 遷移領域에서 形成되는 Taylor 氣泡때문이다.

Fig. 8(a), (b)는 slug 流로서 (a)에서 작은 氣泡들이 probe를 순간적으로 通過하므로 펄스가 짧고 그 頻度數가 減小하면서 氣泡 slug와 液體 slug가 probe를 通過하는 時間이 氣泡流—slug 流遷移에 비하여 더 遲延되고 있다. 이것은 氣泡 slug 펄스와 液體 slug 펄스가 各各 最大, 最小出力에서 矩形特性을 나타내는 사실로부터 알 수 있다. (b)에서는 PDF 分布가 低보이드와 高보이드領域 두 곳에서 最大點으로 나타나고 있다. 이와 같은 現象은 Taylor 氣泡와 작은 氣泡가 交代로 流動하고 液體가 slug 流로의 遷移를 억제하지 못하기 때문에 發生된다. 低보이드領域에서의 PDF의 最大點이 高보이드領域에서의 最大點보다 큰 理由는 液體 slug가 氣泡 slug보다 優勢하게 流動하기 때문이다. 그러므로 slug 流는 低보이드에서 形成되는 氣泡流와 高보이드에서 形成되는 環氣流의 週期的 流動特性을 지닌다.

Fig. 9(a), (b)는 slug 流에서 環狀流로 遷移하는 경우 이에 相應한 信號로서 (a)는 slug 流와 거의 類似한 傾向을 보이나 氣泡 slug의 發生頻도가 slug 流보다 顯

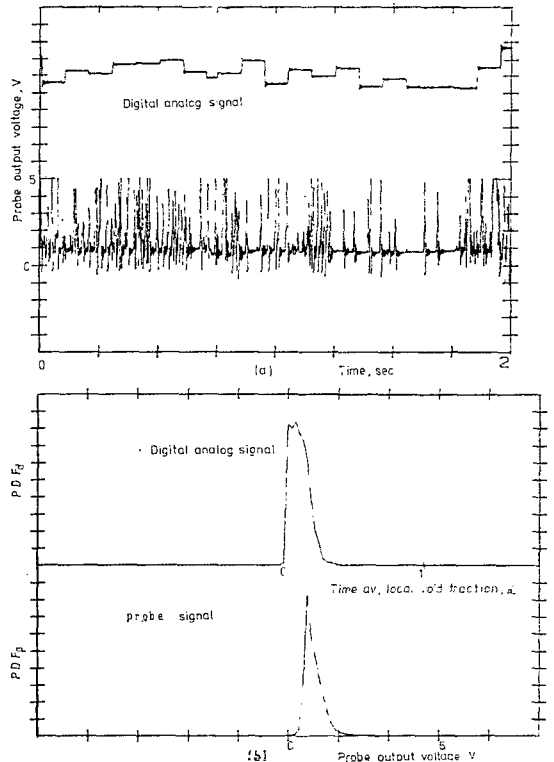


Fig. 6 Oscilloscope trace of conductivity probe signal(a). and distribution of PDF (b) for  $J_{SL}=0.5m/s$ ,  $J_{SA}=0.23m/s$ , and  $\alpha=10\%$

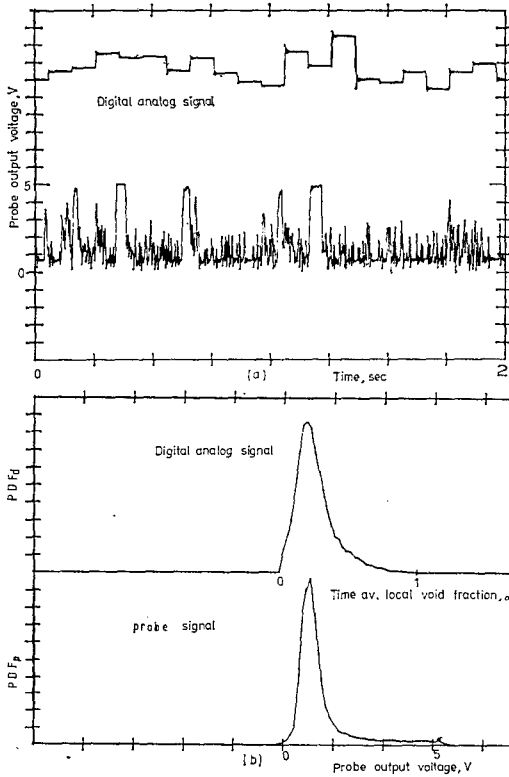


Fig. 7 Oscilloscope trace of conductivity probe signal (a), and distribution of PDF (b) for  $J_{SL} = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA} = 0.483 \text{ m/s}$ , and  $\alpha = 25.34\%$

著하게 增加하면서 高周波의 波動成分이 나타나는데 이 같은 現象은 支配的인 氣泡 slug 流動에 週期的으로 液體가 介在되어 氣泡 slug와 液體 slug가 不安定하게 波動하면서 流動하기 때문이다. (b)에서는 高보이드 領域에서 PDF가 單一最大點을 나타내고 PDF의 bandwidth가 擴張된 것을 알 수 있으므로 氣泡群들이 優勢하게 流動하고 있다.

Fig. 10(a), (b)는 環狀流에 相應한 信號로서 (a)는 管中央部에는 氣泡가 流動하고 管壁에는 液體가 流動하기 때문에 거의 均一한 氣泡 펄스들이 最大出力을 發生하고 있음을 나타낸다. 그러나 間歇的인 液體波의 流動으로 인해 0 volt의 펄스가 發生하기 때문에 矩形 펄스形態가 最大出力에 나타난다. (b)는 高보이드 領域에서 單一最大點을 지니는 PDF 分布로서 典型的인 環狀流 特性을 나타낸다.

以上の 實驗結果는 X-線으로 測定한 chordal void fraction으로 부터 PDF 特性을 究明하여 流動樣式을 解析한 Jones<sup>(2)</sup>의 研究結果, 즉 流動樣式에 따르는 보이드 分布에 대한 PDF 特性과 同一하고, Matsui<sup>(9)</sup>가

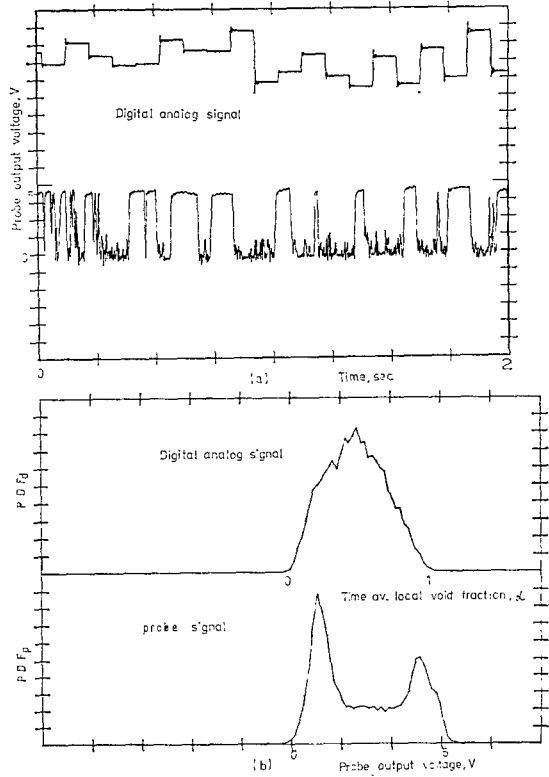


Fig. 8 Oscilloscope trace of conductivity probe signal (a), and distribution of PDF (b) for  $J_{SL} = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA} = 0.783 \text{ m/s}$  and  $\alpha = 52\%$

壓力變換器로 부터 靜壓信號를 結計處理하여 얻은 PDF 分布特性으로 流動樣式을 區分한 結果와 同一한 傾向을 보이고 있으므로, local probe를 使用하여 流動樣式에 따르는 特性을 充分히 解析할 수 있음을 提示하고 있다.

그러나 probe 信號와 PDF 分布로써 流動樣式들을 決定할 수 있으나 明確한 流動樣式, 特히 遷移流動領域을 定量的으로 區分하기가 매우 어렵다. 이러한 缺點을 解決하여 보다 客觀적으로 流動樣式을 判別하기 위해 本 研究에서는 PDF 分布로 부터 모우멘트를 計算하여 그 特性을 定量的으로 分析하였다.

Fig. 11은 本 實驗의 보이드率測定範圍內에서 測定 데이터들이 壁面을 제외하고 半徑方向에 沿하여 測定位置에 거의 無關함을 나타내는데 이는 보이드 分散도와 關聯된 PDF 2次 모우멘트들이 位置에 關係없이 거의 같음을 의미한다.

Fig. 12는 半徑方向에 따르는 보이드率 分布에 대한 variance를 나타낸 그림이다. 氣泡流에서 slug 流로의 遷移가 豫想되는 低보이드率, 즉  $\alpha = 0.2 \sim 0.3$  領域에서

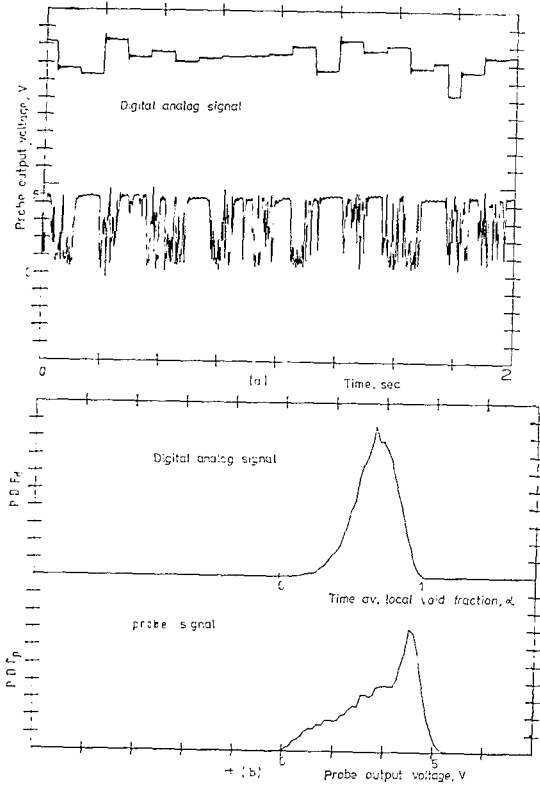


Fig. 9 Oscilloscope trace of conductivity probe signal(a), and distribution of PDF(b) for  $J_{SL}=0.5\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=1.036\text{m/s}$ , and  $\alpha=71.83\%$

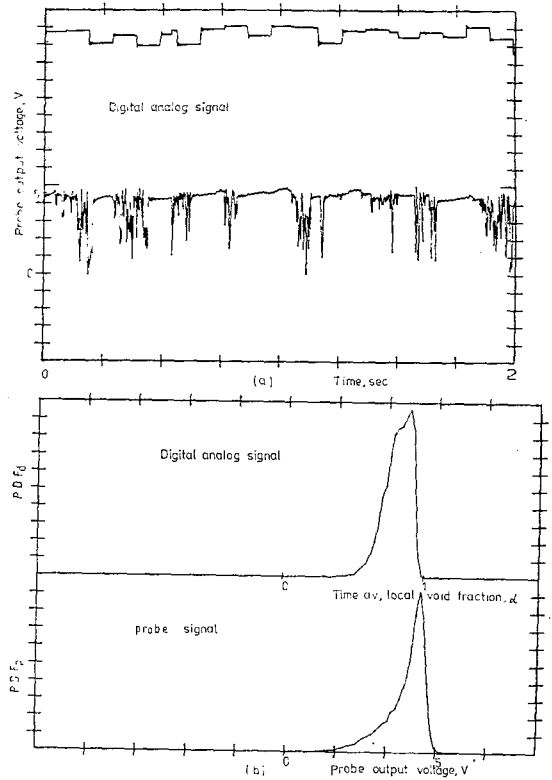


Fig. 10 Oscilloscope trace of conductivity probe signal(a), and distribution of PDF(b) for  $J_{SL}=0.25\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=1.45\text{m/s}$ , and  $\alpha=85.77\%$

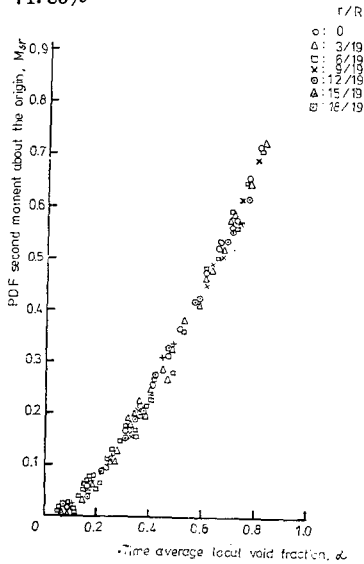


Fig. 11 The PDF second moment about the origin vs time average local void fraction for  $J_{SL}=0.25\text{m/s}$

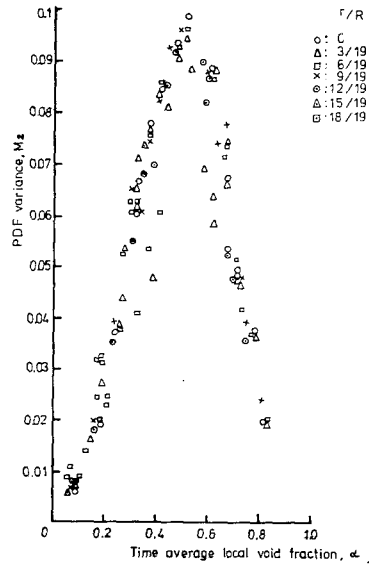


Fig. 12 The PDF variance vs time average local void fraction for  $J_{SL}=0.25\text{m/s}$

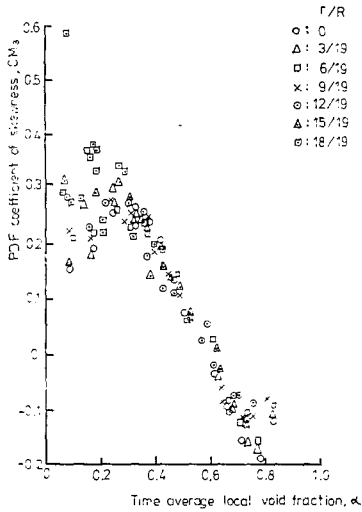


Fig. 13 The PDF coefficient of skewness vs time average local void fraction for  $J_{SL}=0.25\text{m/s}$

는 曲線이 매우 가파르므로 작은 보이드率의 變化에도 variance는 큰 變化를 보이고 있다. slug 流에서 環狀流로 遷移가豫想되는 高보이드率, 즉  $\alpha=0.7\sim 0.8$  領域에서는 보이드率이 微小하게 변하더라도 variance는 큰 變化를 보이고 있다. 또한 管壁을 除外하고는  $\alpha=0.7$ 에서 各點들이 지나는 variance가 급격히 減小하면서 거의  $\alpha=1$ 에서 0에 近接하는 傾向을 나타낸다. 이같은 現象은 보이드率이  $\alpha=1$ 에서 氣泡만이 形成되기 때문이다. Variance가 0.04에서 slug 流—環狀流의 遷移가 發生함을 알 수 있다. 한편, 氣泡流와 環狀流에서는 variance가 比較的 작게 나타나는데 이는 管內的 보이드分布가 均一하기 때문이다. Slug 流에서는 最大의 variance가 나타나는데 이는 크고 작은 보이드率이 交代로 流動하기 때문이다.

Fig. 13은 半徑方向에 따르는 보이드分布의 非對稱性을 나타내는 그림이다. 氣泡流와 氣泡流—slug 流 遷移領域에서는 PDF 分布가 오른쪽으로 偏重되어 있어 陽의 skewness 係數를 지나다가 slug 流에서는 그 값이 零이된 후, slug 流—環狀流 遷移領域과 環狀流에서는 PDF가 왼쪽으로 優勢하게 分布하여 陰의 skewness 係數를 지님을 알 수 있다. 또한, 氣泡流—slug 流의 遷移領域인  $\alpha=0.2\sim 0.3$ 에서는 skewness 係數曲線이 거의 最大値를 지니는데 이는 遷移로 인한 氣體 slug 生成으로 平均보이드의 非對稱性이 增加함을 나타내고,  $\alpha=0.8$ 에서 skewness 係數가 最小가 되어 slug 流—環狀流 遷移를 나타내고 있다. Variance와 같이 skewness도 測定位置에 關係없이 一定함을 알 수 있다.

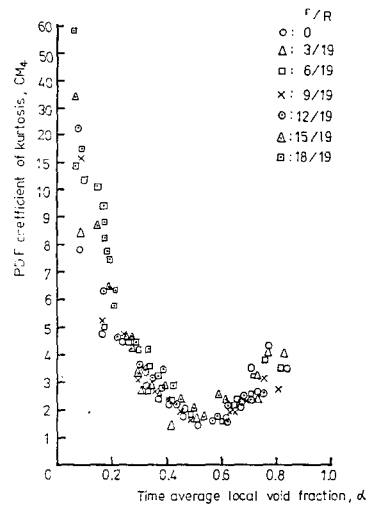


Fig. 14 The PDF coefficient of kurtosis vs time average local void fraction for  $J_{SL}=0.25\text{m/s}$

Fig. 14는 보이드分布의 最大點들에 대한 分布를 나타내는 그림이다. 氣泡流—slug 流 遷移領域에서 kurtosis 係數는 3에 가까운 값을 지는데 이는 低보이드 領域에서는 보이드率이 0.2~0.3일때, 高보이드 領域에서는 0.7~0.8일때 이들 보이드率에 對應하는 流動이 各各 支配的인 것을 의미하며,  $\alpha=0.5$ 에서 最小임을 알 수 있다. 이같은 傾向은 液體 slug와 氣泡 slug가 分布하는 高보이드와 低보이드 領域에서 各各의 PDF의 最大分布가 서로 相殺되기 때문에 kurtosis가 最小가 된다. Slug 流는 보이드分布가 正規分布보다 平坦한 platykurtic 特性, 즉 kurtosis 係數가 3보다 작음을 알 수 있다. 氣泡流는 보이드分布가 正規分布보다 더 큰 最大性을 지니는 leptokurtic 特性, 즉 kurtosis 係數가 3보다 큰 傾向을 나타내고 있다.  $\alpha=0.7$ 부터 kurtosis 係數가 급속히 增加하는데 이같은 傾向은 遷移過程에서 液體 slug가 점차적으로 掃滅되므로써 보이드分布의 最大性이 增加하기 때문이다.  $\alpha=0.8$ 에서 slug 流—環狀流 遷移가 發生하는데 管壁에 近接함에 따라 kurtosis 係數의 傾向이 相異하게 나타나므로 kurtosis로 流動樣式을 區分하는 것이 不適合함을 알 수 있다.

#### 4. 結 論

非加熱 垂直上向二相流에서의 流動樣式과 流動樣式的 遷移를 統計的 方法을 써서 系統的으로 分析한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 氣泡流와 氣泡流—slug 流 遷移 流動인 경우, PDF



分布는 低 보이드領域에서 單一最大點을 지닌다. Slug 流에서는 PDF 分布가 高, 低보이드領域 두 곳에서 最大點으로 나타난다. 環狀流와 slug 流—環狀流遷移流動에서는 PDF 分布가 高 보이드領域에서 單一最大點으로 나타난다. 그러므로 X-線으로 測定한 chordal void fraction 의 PDF 分布와 local probe 로 測定한 時間平均局部보이드率의 PDF 分布가 流動樣式에 따라 同一한 傾向을 나타내므로 既存研究들보다 本 研究에서 開發한 經濟的인 測定 시스템과 資料處理方法으로 流動樣式을 究明하는 것이 效率的이다.

(2) 氣泡流와 環狀流인 경우, variance가 매우 적고, slug 流는 最大値를 지니며 氣泡流—slug 流遷移領域에서는 그 값이 一定하다. Slug 流—環狀流遷移는 0.04에서 發生한다. 氣泡流와 氣泡流—slug 流遷移流動인 경우, skewness는 揚의 값을 지닌다. Slug 流에서는 0이 되고 slug 流—環狀流遷移流動과 環狀流에서는 陰의 값을 지닌다. 그러므로 流動樣式과 流動樣式的 遷移領域에 대한 定量的인 區分과 解析이 PDF 分布에서 얻은 데이터로 計算한 variance와 skewness로써 可能하다.

(3) 보이드率 出力電壓信號로써 流動樣式과 遷移流動을 定性的으로 區分할 수 있다.

### 參 考 文 獻

- (1) Neal, L.S. and Bankoff, S.G., "A High Resolution Resistivity Probe for Determination of Local Void Properties in Gas-Liquid Flow", A.I. Ch. E. J., Vol. 9, pp. 490~494, 1963
- (2) Jones, Jr., O.C. and Zuber, N., "The Interrelation between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two Phase Flow", Int. J. Multi Phase Flow, Vol. 2, pp. 273~306, 1975
- (3) 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
- (4) Choe, W.G., Weinberg, L. and Weisman, J., "Observations and Correlation of Flow Pattern Transition in Horizontal Cocurrent Gas-Liquid Flow", Proc. of Symposium in Two Phase Flow and Heat Transfer, University of Miami, 1976
- (5) Griffith, P. "Two Phase Flow Regime Detecting", ASME Paper 64-WA/HT-43, 1964
- (6) Bergles, A.E., Lopina, R.F. and Fiori, M.P., "Critical Heat Flux and Flow Pattern Observation for Low Pressure Water Flowing in Tubes", J. Heat Transfer, Vol. 89, pp. 69~74, 1967
- (7) Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y., "Flow Pattern Characterization in Two Phase Flow by Electrical Conductance Probe", Int. J. Multi Phase Flow, Vol. 6, pp. 387~397, 1980
- (8) ASME, "Flow Meter and Its Application", 1959
- (9) Matsui, G., "Identification of Flow Regimes in Vertical Gas-Liquid Two Phase Flow using Differential Pressure Fluctuations", Int. J. Multi Phase Flow, Vol. 10, No. 6, pp. 711~720, 1984