

## 氣泡塔內的 氣泡分布에 關한 研究

李 路 甲\* · 朴 源 燾\*

### Bubble Distributions in a Bubble Column

\*Nau Gab Lee · \*Won Hee Park

Dept. of Chemical Engineering, College of Eng.,  
Seoul National University

#### Abstract

Point bubble frequencies at various positions were measured by use of an electroresistivity probe in a stagnant, concurrent, and countercurrent bubble column. The effect of the water velocity, and distributor on the bubble frequency distributions was observed at various radial positions along the axial direction of the column.

A theoretical model to predict the bubble frequency at a given position in the bubble column was proposed and compared with experimental results.

#### 1. 緒 論

Bubble column은 그 操作과 裝置의 便利등의 理由로 hydrocarbon의 chlorination<sup>1)</sup>과 같은 氣-液系 反應裝置로서 많이 利用되어 왔고 특히 物質傳達抵抗이 反應速度에 크게 영향을 미치는 反應系에서는 有用하다<sup>2)</sup>.

Bubble column에서 무엇보다도 問題가 되는 것은 氣泡와 液體의 接觸面積과 接觸狀態의 分布이므로 氣泡分布내지 氣泡 크기등은 이러한 反應塔의 control factor로 볼 수 있고 이전에 대한 많은 研究가 行해져 왔다. Bubble column內的 氣泡를 관찰하는 方法으로는 camera 등을 써서 氣泡를 직접 촬영해서 overall properties를 研究하거나 電氣의 性質等을 利用한 probe를 bubble column內에 넣어서 point properties를 研究하는 方法들이 있다. 그런데 지금까지는 Freedman<sup>3)</sup>과 Yoshida<sup>10)</sup>와 같이 bubble column에 있어서의 壓

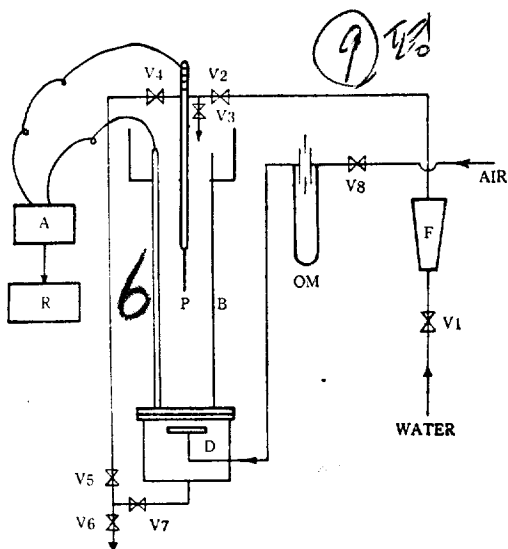
力差 및 液面差等을 利用해서 全體的 gasholdup을 구하고 hold up의 氣體流速에 대한 影響에 關해서 많이 研究했으나 point property로서의 氣泡頻度分布 및 여러가지 distributor와 液體流速의 影響에 關한 研究는 거의 없었다.

本研究에서는 液層에 공기를 불어 넣어 形成된 bubble column에서 空氣와 물의 電氣抵抗差를 利用한 電氣抵抗 probe를 利用해서 氣泡頻度を 測定하고 流速, distributor가 여러 半徑方向 및 軸方向에서의 氣泡頻度分布에 주는 影響을 관찰했다. 또 實驗結果 얻어진 氣泡分布의 不均一性을 說明하기 爲해서 Grace 및 Harrison<sup>4)</sup>이 그들의 2次元 流動層內的 기포分布에 대한 定性的인 理論的 model에서 말한 wall effect를 기초로하여 stagnant bubble column內的 氣泡分布에 대한 理論的 model을 提示하고 그 結果를 本實驗에서 얻어진 結果와 比較 檢討하였다.

#### 2. 實驗裝置 및 方法

本實驗에서는 內徑 9.51cm, 높이 88cm의 Lucite管

\*서울工大 化學工學科



V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8 : Valve  
 F : Rotameter  
 OM : Orifice Meter  
 P : Electroresistivity Probe  
 A : Amplifier  
 R : Recorder  
 B : Bubble Column  
 D : Air Distributor

Fig. 1 Arrangement of Apparatus

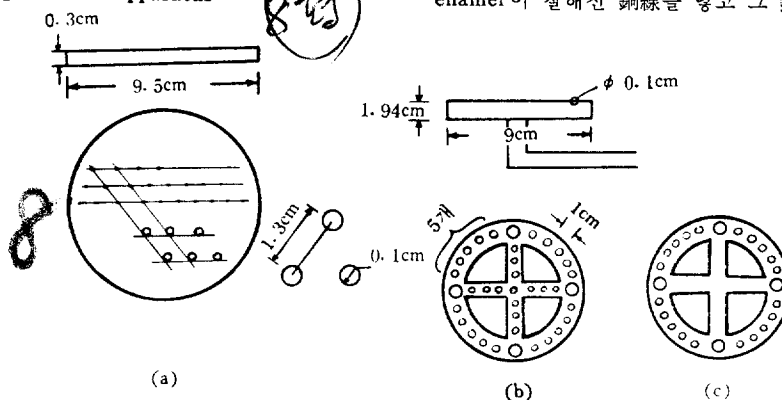


Fig. 2 (a) Air Distributor A (b) Air Distributor B (c) Air Distributor C

을 bubble column 으로 利用했으며 대략적인 裝置構造 및 配置와 probe 에 依한 測定回路가 各各 Fig. 1, 2 및 3에 표시되어 있다.

液體로서는 물을 使用하였으며 compressor 로 부터의 공기를 分布板을 通해서 불어 넣어 bubble column 을 만들었다. Fig. 1.의 液體 line 에 붙어있는 valve 들을 操作하여 bubble column 內의 물의 흐름을 stagnant, concurrent 및 countercurrent 로 바꾸거나 流速을 變

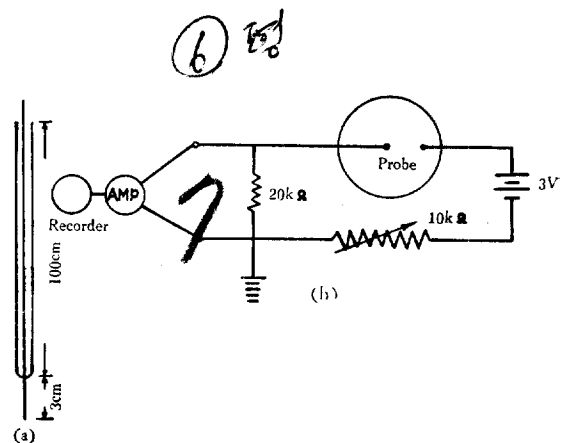


Fig. 3 (a) Electroresistivity Probe  
 (b) Measuring Circuit

更시켰으며 적당한 位置에 probe 를 位置시켜 기포빈도를 測定하였다. distributor 는 Fig. 2.에 나타난 것과 같은 A, B, 및 C의 세 종류를 使用했다.

Distributor A 는 두께 3mm 의 銅板에 구멍中心間의 간격이 1.3cm 되게 triangle pitch 로 구멍을 뚫은 것이며 distributor B 와 C 는 다같이 3/4inch 銅管을 휘어서 Fig. 2의 b 및 c와 같이 만들고 구멍중심간의 간격은 1cm 이며 모든 distributor 의 구멍의 直徑은 0.1cm 이다. probe 는 直徑 0.7cm, 길이 100cm 의 유리관에 enamel 이 칠해진 銅線을 넣고 그 銅線끝에 鐵針을 붙

여서 鐵針끝 3cm 가 유리관 밖으로 나오게하고 유리관 끝을 鐵針에 封해 붙이고 유리관 밖으로 나온 針의 끝 約 0.1cm 를 除하고는 laquer 를 발라 絶緣시켜서 만들었다. 이 probe 를 하나의 전극으로하고 氣泡塔壁面에 다른 銅線을 附着시켜서 다른 하나의 電極으로 利用했다. 이렇게 만들어진 두 電極을 Fig. 3의 b에 표시되어 있는 回路에 연결해서 기포빈도를 測定했다. 氣泡가 probe 를 지나는 순간 電氣回路가 끊어지기 때문에

Fig. 4에 표시되어 있는 것과 같은 일련의 pulse를 얻을 수 있었고 一定한 時間에 얻어진 pulse의 數로써 probe의 끝이 놓인 點에서의 기포빈도를 얻을 수 있었다. Probe에서 얻어진 信號는 Brush Amplifier Model 561200과 Brush Recorder Model RD-2321-00을 써서 記錄했으며 chart speed를 125mm/sec로 하여 各 run마다 15秒 내지 30秒 記錄했다.

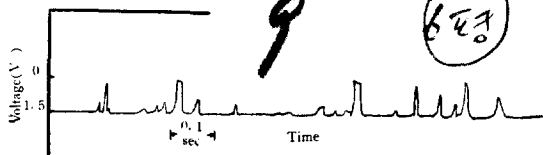
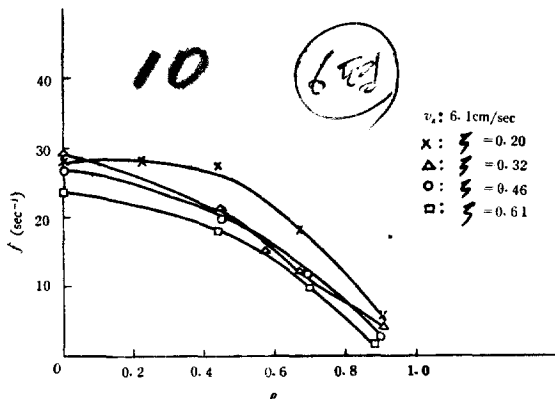


Fig. 4 Signals from the Probe

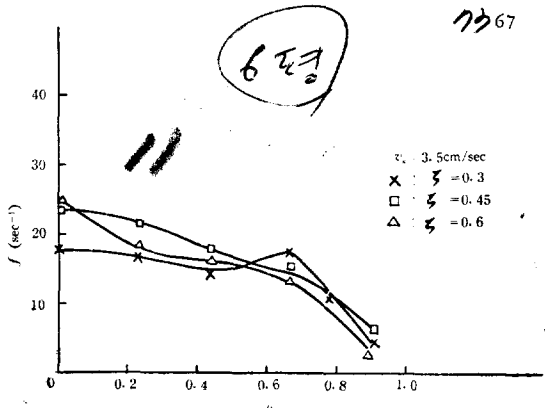
### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3-1. Stagnant bubble column.

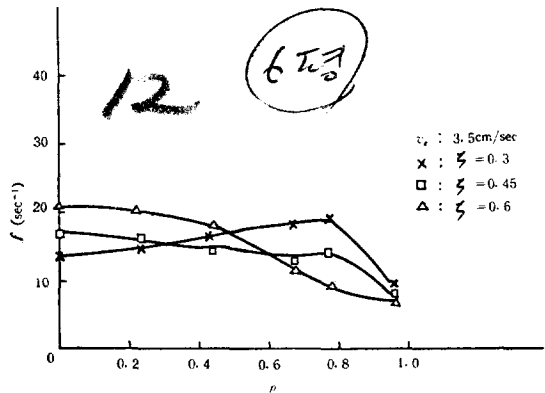
Distributor A를 써서 정지해 있는 液體層에 공기를 불어 넣어 만들어진 bubble column에서 그 軸方向으로  $\zeta=0.20, 0.32, 0.46, 0.61$ 되는 位置에서 各 半徑方向으로  $\rho=0, 0.23, 0.44, 0.67, 0.89$  되는 點에서 氣泡頻度を 測定했다. 여기서 어떤 位置의 氣泡頻度라는 것은 그 주어진 點에 놓인 probe의 끝을 지나가는 氣泡의 數를 말하며  $\zeta=z/H_c$  이고  $\rho=r/R_c$  이다. 그結果 distributor 가까운 곳( $\zeta=0.20$  및  $0.32$ )에서는 氣泡가 column의 中心部分으로 모이는 過渡期의 現象을 보였고  $\zeta=0.46$ 부터는 氣泡가 中心部分으로 모여서 거의 安定된 氣泡分布 狀態를 나타내고 氣泡會合의 影響으로 column의 아랫부분에서 위로 올라 갈 수록 全體의 氣泡頻度は 줄어들었다. (Fig. 5-a) 이와같은 現象은 Neal 등<sup>9)</sup>의 結果와 잘 一致하고 있다.



(a) For Distributor A



(b) For Distributor B



(c) For Distributor C

Fig. 5 Bubble Frequency as a Function of Position in Bed for Stagnant Bubble Column

Distributor B를 사용한 경우 bubble column의 아랫부분( $\zeta=0.3$ )에서는  $\rho=0.67$  근처와 column의 中心( $\rho=0$ )에서 2개의 相對의 最多點이 나타났다  $\zeta$ 가 증가하면 distributor A에서와 같이 徐徐히 column의 中心部分으로 氣泡가 集中되어갔다 (Fig. 5-b).

Distributor C를 사용한 경우  $\zeta=0.3$ 에서는  $\rho=0.78$  근처에서 하나의 最多點이 나타났다  $\zeta$ 가 더욱 증가하면 벽쪽의 最多點은 中心으로 점점 옮겨가서 distributor A나 B와 같은 分布를 보이지만 보다 均一한 氣泡分布를 얻을 수 있었다. (Fig 5-c) Distributor B와 C에서는 氣泡分布의 全體狀態를 보아 氣泡會合은 거의 일어 나지 않았다.

氣泡分布의 氣體流速에 대한 影響을 보기 爲해서  $\zeta=0.52$ 에서 氣體流速을 4.7, 5.2, 6.1cm/sec로 변경하면서 실험한 결과 氣體의 流速이 증가하면 全體의 氣泡頻度が 증가하고 column 中心으로 氣泡가 모여드는 傾向이 더욱 크게 나타남을 알 수 있었다 (Fig. 6).

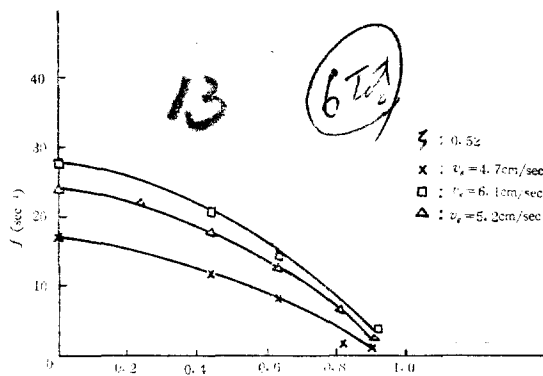


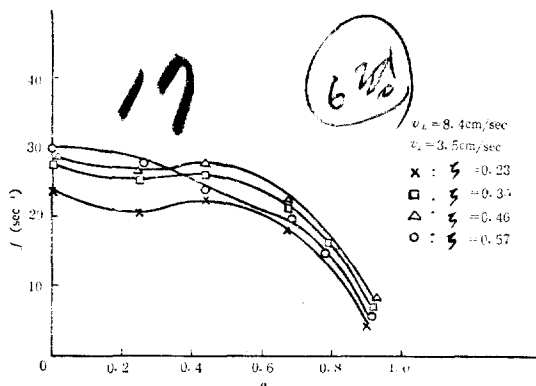
Fig. 6 Relationship between Bubble Frequency and Air Velocity for Stagnant Bubble Column with Distributor A

### 3-2. Countercurrent Bubble Column

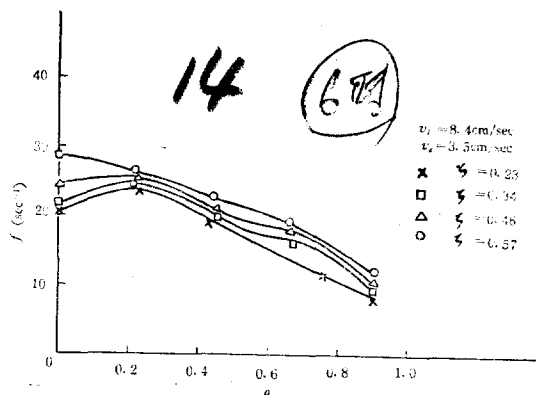
Distributor B를 利用해서 氣體流速을 3.5cm/sec로 하고 液體를 countercurrent가 되게 8.4cm/sec로 흘리면서 기포분포상태를 관찰했다. 이 경우  $\zeta=0.46$ 까지는  $\rho=0$ 과  $\rho=0.44$  근처에서 相對的 最多點이 나타나고  $\zeta=0.57$ 에서는  $\rho=0$ 에서만 最多點이 나타났다. (Fig. 7-a) 또 액체유속을 2.1, 4.2, 6.3, 8.4cm/sec로 바꾸어가면서 實驗한 결과 유속의 증가에 따라 最多點이 점점 벽쪽으로 옮겨가서 보다 均一한 分布를 주었다(Fig. 8-a).

Distributor C를 利用해서 distributor B에서와 같은 실험을 행한 경우  $\zeta=0.34$ 까지는  $\rho=0.23$  근처에서 最多點을 나타내다가  $\zeta=0.46$ 부터는 점점  $\rho=0$ 으로 氣泡가 모여드는 현상을 나타내었다(Fig. 7-b). 또 distributor C를 이용한 경우 液體流速의 영향은 distributor B의 경우와 같았다(Fig. 8-b).

이러한 counter-current bubble column에서는 氣泡會合보다는 分裂이 일어나서 column의 底面으로 부

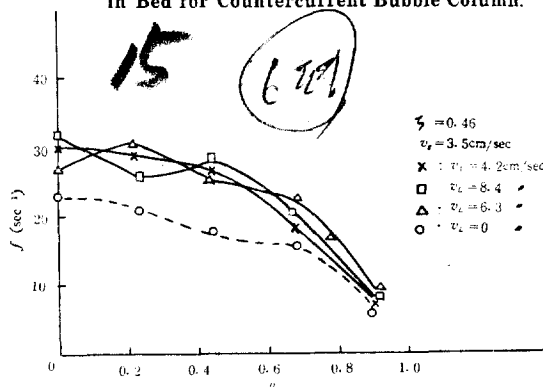


(a) For Distributor B

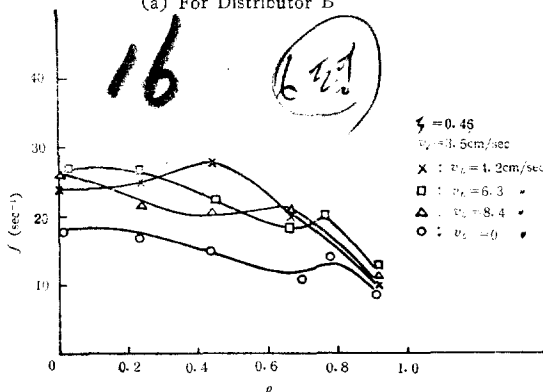


(b) Distributor C

Fig. 7. Bubble Frequency as a Function of Position in Bed for Countercurrent Bubble Column.



(a) For Distributor B



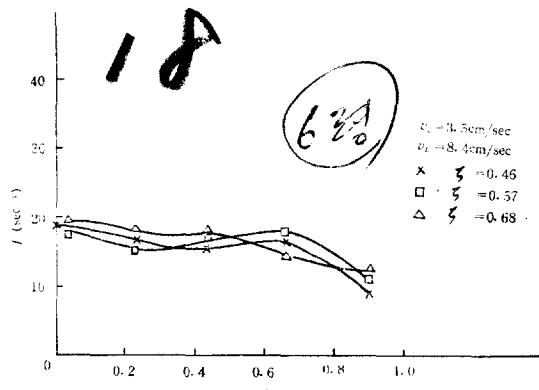
(b) For Distributor C

Fig. 8. Relationship between Bubble Frequency and Water Velocity for Countercurrent Bubble Column

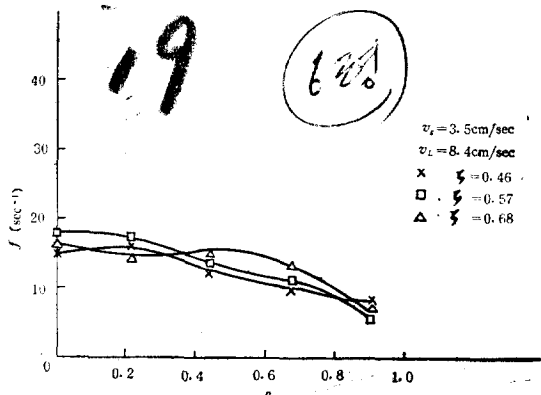
더 위로 올라 갈 수록 전체적 氣泡의 數가 증가함을 관찰할 수 있었다. 이것은 氣泡運動에 反對로 흐르는 액체의 흐름때문에 일어나는 것 같다.

### 3-3. Concurrent Bubble Column

Distributor B와 C를 利用해서 氣體流速을 3.5cm/sec로 하고 물을 concurrent가 되게 8.4cm/sec로 흘리는 경우 두개의 distributor는 共に 軸方向으로의 位置의 영향은 거의 나타나지 않았다. (Fig 9-a 및 9-b)

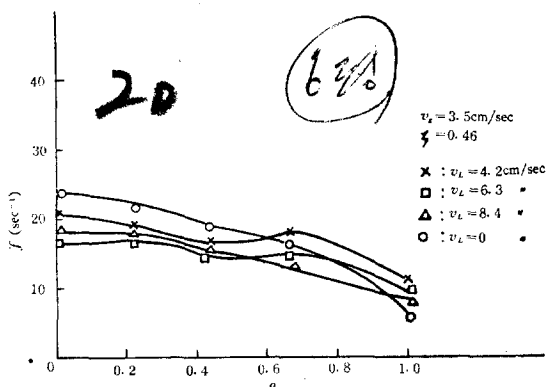


(a) For Distributor B

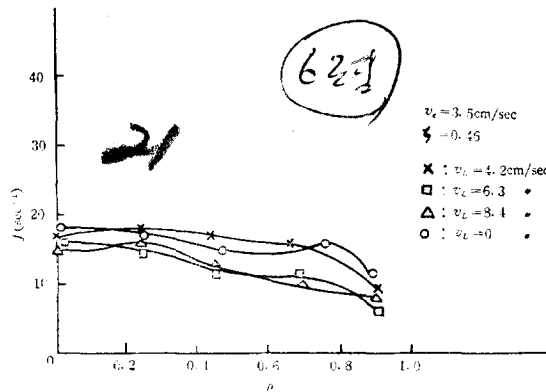


(b) For Distributor C

Fig. 9. Bubble Frequency as a Function of Position in Bed for Concurrent Bubble Column.



(a) For Distributor B



(b) For Distributor C

Fig. 10. Relationship between Bubble Frequency and Water Velocity for Concurrent

또 이 2개의 distributor를 써서 液體流速을 2.1, 4.2, 6.3, 8.4cm/sec로 變化 시켰을 때 distributor B의 경우는 流速의 증가에 따라 점점 기포회합이 많이 일어남을 보였다(Fig. 10-a). Distributor C를 이용한 경우 液體流速이 4.2cm/sec까지는 氣泡會合은 거의 일어 나지 않지만 보다 流速을 크게하면 distributor B에서와 같이 氣泡會合 현상을 나타내었다(Fig 10-b). 이러한 concurrent bubble column에서는 다른 경우보다 비교적 균일한 기포분포를 나타내었지만 氣泡會合현상 때문에 氣液間의 接觸面積이 줄어들었다.

### 4. 氣泡分布에 關한 理論的 Model

垂直의 圓筒形 bubble column을 수직으로 N개의 同心圓柱로 나누어서 各 同心圓柱間의 부피를 같게 하

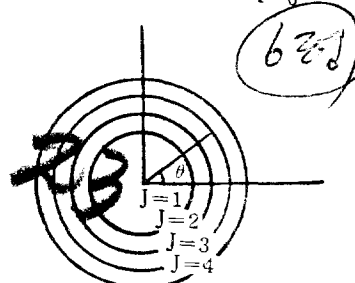
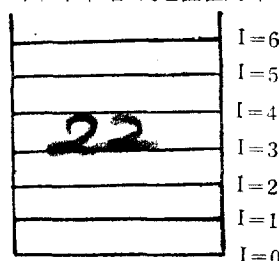


Fig. 11. Coordinate Representation for the Theoretical Model

고 또 수평 등간격으로 M등분한다(Fig. 11). 이렇게 하여 얻어진 bubble column의 부분들에 Fig. 11과 같이 번호를 붙이면 bubble column內에서의 氣泡의 位置는 整數座標(I, J)로 나타낼수가 있다. 全體의 bubble column의 對稱性에 依해 氣泡가 存在하는 位置의 角度는 考慮하지 않기로 한다. 여기서 distributor 바로 위(即 I=0)에서는 氣泡가 全斷面積을 통털어서 均一하게 分布되어 있다고 가정한다. 벽쪽으로 갈수록 점점 간격이 좁아지지만 액체의 운동에 의해 벽쪽방향으로의 氣泡運動이 防害받는다고 생각해서 하나의 氣泡가 (I-1, J)의 位置에서 (I, J±K)의 位置로 移動 확률을 P(K)로 표시하고 J에는 無關하다고 하면 하나의 氣泡가 (I-1, J)에서 (I, J+K) 및 (I, J-K)로 移動 확률은 모두  $\frac{1}{2}P(K)$ 가 되고 또 K만큼 움직여서 壁에 부딪치는 氣泡에 對해서는 그 中間位置들에 均一하게 分配하는 方法과 wall effect와 液體運動의 影響을 강조하기 위해 反對方向으로 K만큼 움직인다고 생각하는 2가지 方法을 시도해 봤는데 두번째 方法이 더욱 좋은 結果를 주었다. 따라서 이 model을 따르면 氣泡의 分布式을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(0, J) = 1.0 \quad (J=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$$F(I, J) = F(I-1, J) P(0) + \frac{1}{2} \sum_{K=1}^N [F(I-1, J+K) + F(I-1, J-K)] P(K) + FB(I, J) \quad (2)$$

對稱性으로 부터  $J-K \leq 0$ 에서는

$$F(I-1, J-K) = F(I-1, 1+K-J) \quad (3)$$

$$F(I, J) = 0 \quad (\text{For } J > N) \quad (4)$$

式(2)에서 右邊의 첫項은 昇方向으로 움직이지 않고 곧바로 위로 올라간 氣泡數를 나타내고 둘째項은 K만큼 움직여서 그 位置에 오게되는 氣泡數를 나타내고 셋째項은 벽에 부딪치는 氣泡中에서 주어진 位置에 오게되는 氣泡數를 나타내고 있다. 여기서 式(2)의 FI(I, J)는 氣泡의 分裂 및 會合을 고려하지 않은 氣泡數를 말하며 나중에 나오는 F(I, J)와는 다른 것이다. FB(I, J)는 아래의 式(5)로서 주어진다.

$$FB(I, J) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{K=\left[\frac{N-J+2}{2}\right]}^N F(I-1, J+K) P(K) + \sum_{K=\left[\frac{J+N+1}{2}\right]}^N F(I-1, K-J+1) P(K) \right\} \quad (5)$$

式(5)에서  $\left[\frac{N-J+2}{2}\right]$  및  $\left[\frac{J+N+1}{2}\right]$ 은 괄호안의 整數部分만을 擇한 整數値를 표시하고 있다. 만약 氣泡會合과 分裂이 FI(I, J)에 비례한다고 가정하고 그係數를 各各 C와 S로 표시한다면 구할려는

실제의 氣泡頻度는 다음과 같이 주어진다.

$$F(I, J) = (1-C+S) FI(I, J) \quad (6)$$

式(2)및 式(5)를 式(6)에 代入하면 求할려는 氣泡頻度式 F(I, J)는 다음과 같다.

$$F(I, J) = (1-C+S) [F(I-1, J) P(0) + \frac{1}{2} \left\{ \sum_{K=1}^N [F(I-1, J+K) + F(I-1, J-K)] P(K) + \sum_{K=\left[\frac{N-J+2}{2}\right]}^N F(I-1, J+K) P(K) + \sum_{K=\left[\frac{J+N+1}{2}\right]}^N F(I-1, K-J+1) P(K) \right\}] \quad (7)$$

만약 C와 S가 實驗으로나 理論으로 주어지고 또 P(K)가 주어지면 式(7)로 부터 F(I, J)는 逐次的으로 計算해서 全體의 分布狀態를 求할 수 있다. 會合係數, 分裂係數 및 P(K)는 氣泡塔內의 氣泡와 液體運動의 mechanism에 대한 더욱 많은 究明을 要한다. 그러나 會合이나 分裂이 일어나고 있는 경우도 normalize된 氣泡頻度에서는 會合이나 分裂이 없는 경우와 graph 모양은 똑같으므로 우리는 일단 會合과 分裂이 없는 것으로 가정하고  $P(0)=0.5$ ,  $P(K)=0.28-(K-1)(K^2-14K+66)/300$ ,  $N=5$ 로 놓고 IBM1130을 써서 計算한 結果를 Fig. 12에 나타냈으며 定性的으로 本實驗結果와 잘 一致하고 있다. 여기서 使用한 P(K)는 하나의 例로써 任意로 擇한 2次階次數列의 項들을 擇한 것이고 I의 간격을 定함에 따라 결정되어야 할 性質의 것이다.

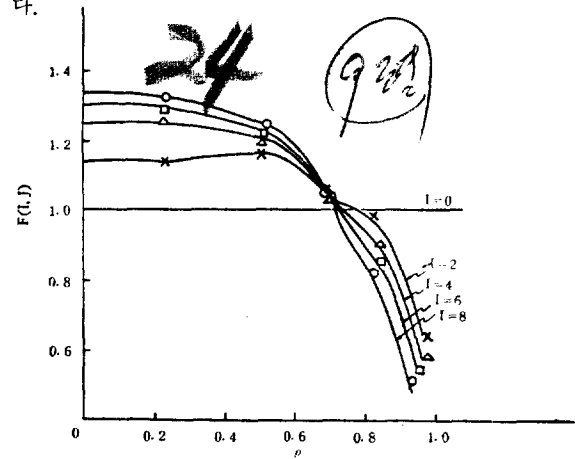


Fig. 12. Theoretical Model: The Effect of Increasing the Height above the Distributor, I, on the Bubble Frequency Distribution. N=5

## 5. 結 論

液體가 흐르지 않는 stagnant bubble column에서는 air distributor C가 가장 좋고 A가 가장 좋지 않았

다. 이것은 bubble column의 水平 斷面積全體에서 均一하게 氣體를 불어 넣는 것보다는 bubble column에서 本質의으로 由來되는 현상인 中心部分으로 氣泡가 集中하는 경향을 벽근처에서 많은 氣體를 불어 넣어줌으로써 相殺시킬 수 있음을 보여 주었다

Concurrent bubble column인 경우는 distributor B와 C가 모두 상당히 균일한 氣泡分布를 주었으나 B가 더욱 效果의이었다. countercurrent bubble column인 경우는 column의 윗 部分으로 올라 갈수록 distributor C가 더욱 效果的이었고 아랫 部分에서는 B가 더욱 效果的이었다.

Countercurrent인 경우는 氣泡의 分散이 일어나고 concurrent인 경우는 氣泡의 會合이 일어나므로 氣體와 液體間의 接觸面積을 크게하기 爲한 操作으로는 countercurrent bubble column이 concurrent bubble column보다 效果的이었다.

여기에서는 stagnant bubble column에서의 均一한 air distributor를 쓸 경우에 대한 model을 提示했지만 氣泡會合 및 分裂의 mechanism이 더욱 究明되고 bubble column內的 速度分布에 關해서 좀더 알게된다면 여기서 提示한 比較的 간단한 model로서도 실제 氣泡分布에 가까운 結果를 얻을 수 있을 것 같다.

### 記 號 說 明

- $C$  : Coalescence coefficient [—]  
 $f$  : Bubble frequency [ $\text{sec}^{-1}$ ]  
 $F(I, J)$  : Dimensionless theoretical bubble frequency distribution function [—]  
 $FB(I, J)$  : Bubble number coming to the coordinate  $(I, J)$  after hitting the bubble column wall [—]  
 $FI(I, J)$  : Dimensionless theoretical bubble frequency without coalescence and splitting [—]  
 $H_C$  : Height of bubble column [cm]  
 $I$  : Dimensionless integer representing the height above the distributor [—]  
 $J$  : Dimensionless integer representing the horizontal distance from the center of the bed [—]

- $K$  : Integer  
 $P(K)$  : the probability for a bubble moving from the coordinate  $(I-1, J)$  to the coordinate  $(I, J \pm K)$   
 $r$  : Horizontal distance from the axis of the bed [cm]  
 $R_c$  : Radius of the bubble column [cm]  
 $S$  : Splitting coefficient [—]  
 $v_g$  : Air velocity [cm/sec]  
 $v_L$  : Water velocity [cm/sec]  
 $z$  : Height above the distributor  
 $\rho$  : Dimensionless radial distance from the axis of the bed.  
 $\zeta$  : Dimensionless height above the distributor.

### 參 考 文 獻

1. P. H. Calderbank, M. B. Moo-Young and R. Bibby : Proceedings of the 3rd Chemical Engineering Symposium held in Amsterdam (1964).
2. J. R. Grace, D. Harrison : Proceedings of a Symposium presented at the Tripartite Chemical Engineering Conference, Montreal, 105 (1968).
3. Kōzō Koide, Hiroshi Kubota : Kagaku Kogaku (abridged ed.) Vol. 5 No. 1 (1967).
4. L. G. Neal, S. G. Bankoff : *A. I. Ch. E. Journal*, July, 490 (1963).
5. W. H. Park, W. K. Kang, C. E. Capes, G. L. Osberg *Chem. Eng. Sci.* **24**, 851—865 (1969).
6. H. L. Shulman, M. C. Molstad : *I. & EC* June, 1059 (1950).
7. S. L. Soo "Fluid Dynamics of Multiphase Systems" : Blaisdell, Waltham, Mass. (1967).
8. V. G. Levich "Physicochemical Hydrodynamics" : Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. (1962).
9. W. Freedman, J. F. Davidson : *Trans. Instn. Chem. Engrs*, Vol 47, (1969).
10. Fumitake Yoshida, Kiyomi Akita : *A. I. Ch. E. Journal* Vol 11, No. 1.