

# 多孔板塔의 水力學的 研究\*

崔 雄\*\* · 林 漢 膺\*\*

## Hydraulic Performance of the Perforated Tray Tower

Ung, Choi\*\* and Han-nong, Rhim\*\*

\*\*Dep. Of Chem. Eng., Seoul Nat'l. Univ.

In this paper, a six-inch cylindrical column was used to study a certain hydraulic characteristic of the perforated trays in air-water system. To obtain better understanding about the effect of the liquid head on the performance, two types of experiment were used: in one type(A) the liquid was supplied into the test column from the constant head tank; in the other type(B) it was flowed in through the downcomer and out over the outlet weir as in usual industrial usage. The various kind of the trays used are shown in Table 1 and the equivalent liquid height varied up to 20 cm in the Type A. Time averaged air flow rate covered the range upto 10 l/sec and water rate upto 260 ml/sec.

In these experiments we observed the froth layer and correlated the total pressure drop, relative froth density, etc..

얻으려고 하였다.

### 1. 序 論

從來는 蒸溜塔이라던 泡鍾塔(bubble-cap tray column)이 그 turndown ratio가 크고 安定度도 높다하여 널리 普遍化되었으나 그 製作費가 比較的 高價인 것이 短點이었다. 그러나 近來 多孔板塔(perforated tray column)이 登場, 널리 使用되고 있는데 그것은 製作이 簡便하고 價格이 低廉할 뿐만 아니라 Mayfield<sup>(1)</sup>, Kamei<sup>(2)</sup> 등이 依해서도 指摘된 바와 같이 그 操作範圍만 잘 잡으면 他種의 증류탑보다도 오히려 더 좋은 效率을 얻을 수 있다는 點이 알려져 새로운 脚光을 받게 되었다.

本 研究에서는 물 및 空氣의 系를 써서 多孔板塔의 基礎研究가 되는 單一孔板(single hole tray)의 流動實驗을 하고 그 後 多孔板實驗으로써 그 板效率을 크게 維持하는 操作下部限界(weeping point와 관계 있음) 近傍에서의 操作變數에 對한 여러 가지 水力學的 現象과 泡沫層에 對하여 實驗觀察하고 適當한 相關關係를

Table 1. 多孔板의 種類

Tray No.	Hole Dia $d_h$ , in	Plate-thickness $t$ , mm	Hole Pitch $p$ , in	Free Spac Ratio $\tau\%$	No. of Holes	$k_0 \times 10^6$	Hole Drilling Condition
1	1/16	0.65	—	—	1	0.318	
2	1/8	0.65	—	—	1	0.522	
3	1/8	1.00	3/8	2.67	24	1.36	sharp edged
4	1/8	1.00	3/8	5.19	58	1.32	sharp edged
5	1/8	0.65	1/4	8.95	80	0.815	
6	1/8	1.00	3/8	8.95	80	1.220	sharp edged
7	1/8	0.65	1/2	8.95	80	0.783	
8	3/16	0.65	—	—	1	0.725	
9	3/16	1.00	9/16	9.06	36	1.220	sharp edged
10	1/4	1.00	3/4	9.06	20	1.220	sharp edged

\* 1966年 10月 31日 受理

\*\* 서울大學校 工大 化工科

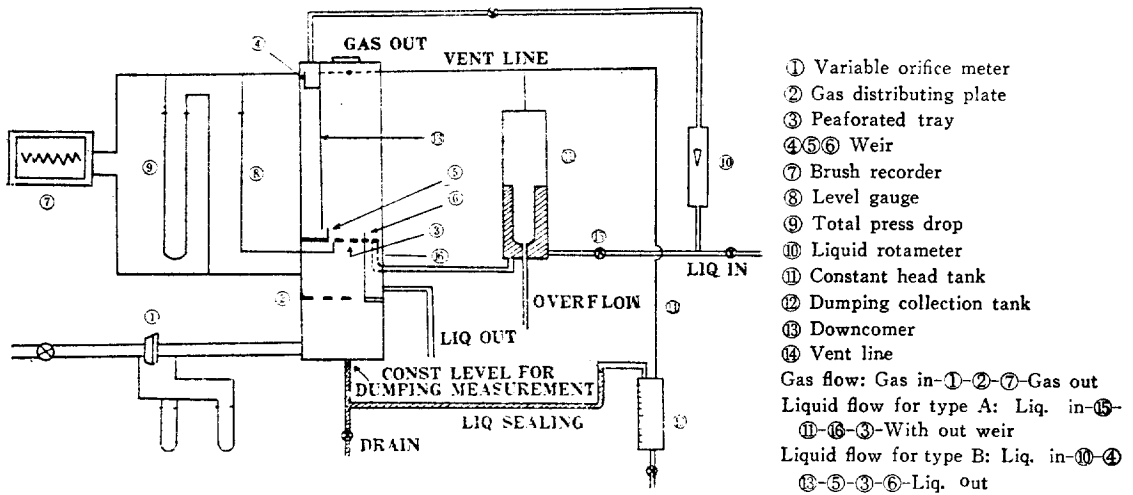


Fig. 1-A. Experimental Apparatus

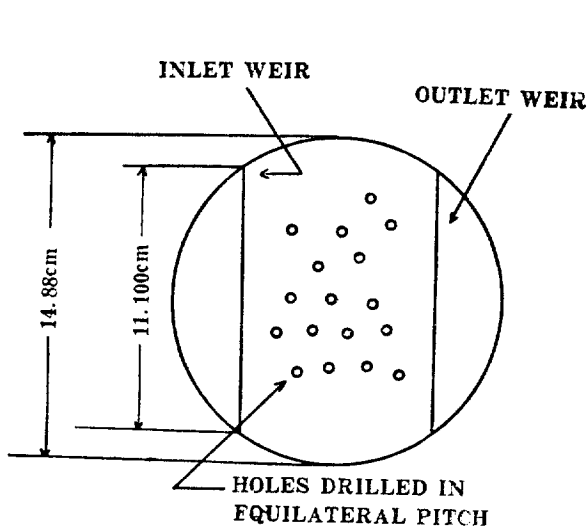


Fig. 1-B. Lay out of the testing perforated plate

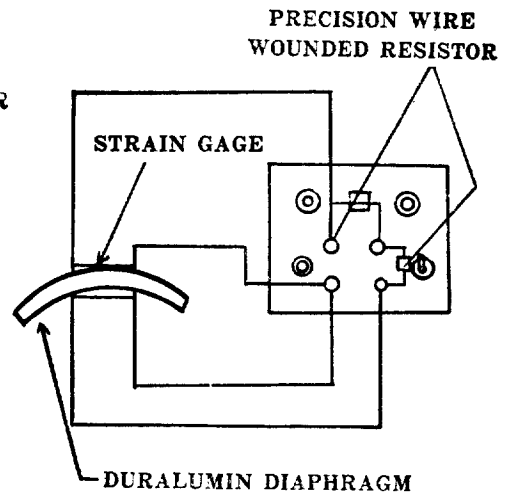


Fig. 1-C. Connections for Strain Gage

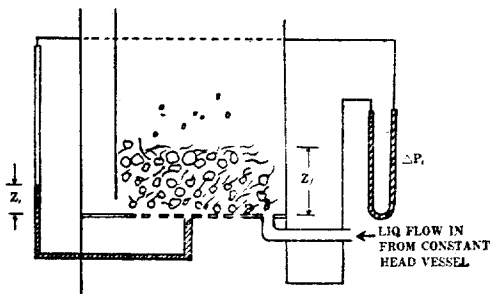


Fig. 1-D. Schematic Illustration for Experiment (Type A)

## 2. 實驗裝置 및 實驗方法

두께 5 mm, 內徑 6 in. 의 透明한 아크릴樹脂圓筒을 써서 높이 45 in. 의 塔을 만들어 그 속에 孔板을 挿入하였는데 그 實驗裝置의 配置는 Fig. 1-A 와 같다.

實驗에 使用한 系는 물과 空氣였다. 空氣는 極少量일 때는 wet test meter, 少量일 때는 0.224 in.  $\phi$ , 多量일 때는 0.520 in.  $\phi$  의 orifice meter 를 通하여 넣어 주고 空氣分配板(distributor), 孔板(perforated tray)을 지나 그 위에 있는 液層을 通過하여 塔外로 排出된다. 물은 두 가지 方法으로 塔內에 注入하였는데, 한 方法(A 方法)

은 溢流(overflow)를 利用한 定位水頭容器(constant head tank)을 거쳐 塔內 孔板上의 한 쪽으로 부터 注入하여 孔板上에 一定한 水頭를 維持하게 하였다(Fig. 1-D 參照). 또 다른 方法(B 方法)은 實際로 運轉하는 多孔板塔과 같이 물을 塔內의 downcomer를 通하여 注入시켜 孔板 위에서 空氣와 cross flow를 하도록 하였다. 이때 使用한 weir의 높이는 1, 1.5, 2.0, 3.0 in. 등이 었다.

從來의 다른 實驗者<sup>1),2),3),10)</sup>들은 낮은 相當液高(equivalent liquid height)에서만 實驗을 하였으므로 本 實驗에서는 廣範圍한 液高變化에 對한 實驗을 하여 液高에 對한 知識을 늘이기 爲하여 A 方法의 實驗을 採擇하고 아울러 從來의 B 方法도 같이하여 比較하여 보았다. 操作變數로는 空氣量은 0~10 l/sec, 물은 0~260 ml/sec, 相當液高는 0~20 cm 까지 變化시켰다. 測定值로는 主로 全壓力損失(total pressure drop), 泡沫層高(forth height) 및 dumping rate 등을 取하였다. 全壓力損失의 測定은 1/20 傾斜의 draft gauge를 썼으며, 그 全壓力損失의 맥동(fluctuation)은 strain gage로 보았다. 使用한 strain gage는 gage factor가 2.00, gage resistance가 120Ω, simple bonded type이며, 2개를 Fig. 1-C와 같이 두께 0.006in. duralumin의 diaphragm에 부쳐 美國 Brush 會社製의 Universal Amplifier와 Recorder를 使用하였다. 泡沫層高 및 그 狀態는 目測 및 寫眞撮影으로 觀察하고 dumping rate는 Fig. 1-A와 같이 미리 導管에 물을 채워 놓은 다음 塔內의 liquid sealing을 一定한 높이로 維持하면서 dumping하는 量의 增加에 따라 測定器로 넘어 흐르는 量으로써 測定하였다. 多孔板은 銅板으로 만들었으며 그 孔의 配置는 Fig. 1-B와 같으며 正三角形 pitch로 구멍을 뚫었는데 使用한 孔板의 種類는 Table 1과 같다. 또 空氣의 調節 valve로 부터 孔板下部까지의 부피 즉 chamber volume  $V_c$ 는 약 8040 ml이며 그에 相當하는 Hugh<sup>8)</sup>의 Capacitance Number  $N_c$ 는

$$N_c = \frac{4gV_c\Delta\rho}{\pi d^2 \rho_g C^2} \approx 16 \sim 300$$

이 되며 이것은 限界值(critical value)인 0.2~0.8 값보다 훨씬 커서 孔板下部에는 恒常 一定한 壓力를 維持한다고 볼 수 있었다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### (a) 全壓力損失(total pressure drop)

孔板上의 液體가 dry pressure drop( $\Delta P_d$ )에 아무런 영향을 주지 않는다면 全壓力損失은  $\Delta P_d$ 와 wet pressure drop( $\Delta P_w$ )로 分離할 수가 있다. 즉,

$$\Delta P_t = \Delta P_d + \Delta P_w \quad (1)$$

$\Delta P_d$ 는 보통 orifice 公式

$$\Delta P_d = k_o \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) U_0^2 \quad (2)$$

로 쓸 수 있으며 여기서  $\rho_g$  및  $\rho_l$ 은 各各 空氣와 液體의 密度이고  $U_0$ 는 孔에 있어서의 平均速度이다. 比例 常數  $k_o$  값은 板番號에 따라 Table 1에 表示하였다. Table 1에서 보는 바와 같이  $k_o$  값은 free space ratio( $\tau$ ) 값에 따라 變化할 뿐만 아니라 또 hole pitch  $p$ 에 따라

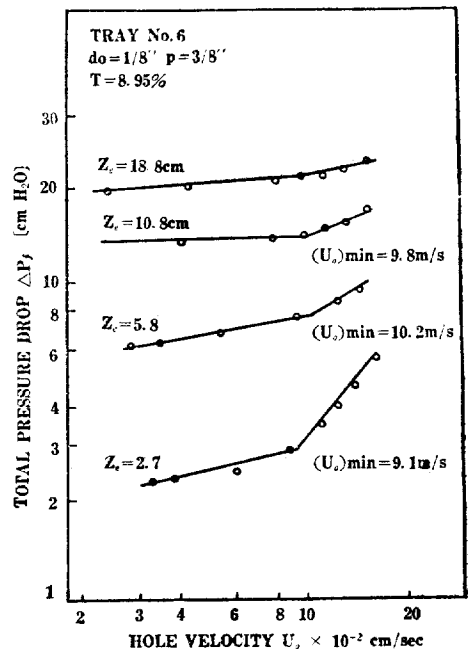


Fig. 2. Effect of Hole Velocity on the Total Pressure Drop.

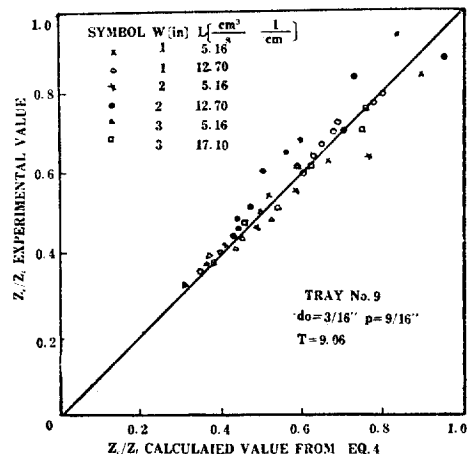


Fig. 3. Correlation for Effect of W & L on the Value  $Z_c/Z_c$ .

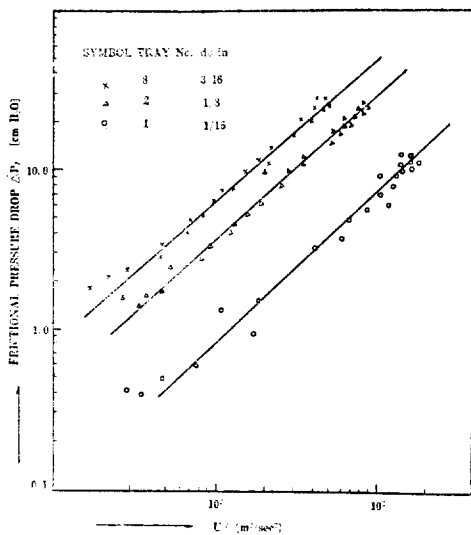


Fig. 4. Effect of Hole Velocity on  $\Delta P_f$

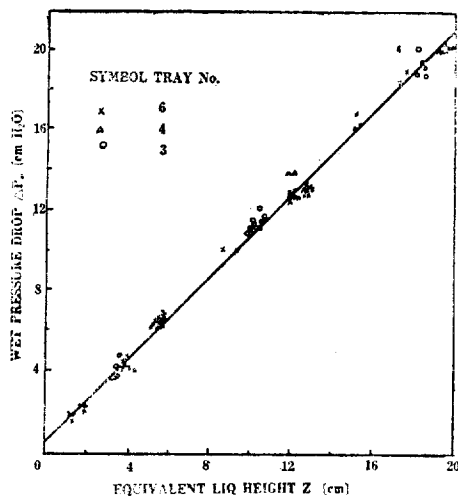


Fig. 5. Typical plot of  $\Delta P_w$  vs  $Z$ .

서 즉 각 구멍으로 부터 나오는 氣流의 相互干涉에 依하여도 變化한다. 本 實驗에서는 구멍을 銳端(sharp edged)으로 뚫었기 때문에 Arnold<sup>10)</sup> 實驗과 같이 thickness per hole diameter  $\left(\frac{t}{d_0}\right)$ 의 값에 對한 影響은 보기 힘들었다.

$\Delta P_w$ 는 또 다음과 같이 나눌 수가 있다.

$$\Delta P_w = \xi Z_e + \Delta P_f + \Delta P_s \quad (3)$$

여기서

$Z_e$ : equivalent liquid height corresponding to liquid hold-up on the tray. [cm H<sub>2</sub>O]

$\Delta P_f$ : frictional pressure drop in the liquid layer

due to bubbling and bubble rise [cm H<sub>2</sub>O]

$\Delta P_s$ : pressure drop due to surface tension

[cm H<sub>2</sub>O]

$\xi$ : proportional constant [-]

多孔板에 있어서는 (3)式中の  $Z_e$ 와 實際 設計에 使用되고 있는 澄清液高(clear liquid height;  $Z_c$ )와의 關係는 B方法 實驗으로 부터 다음과 이같이 整理할 수가 있었다(Fig. 3 参照).

$$\frac{Z_e}{Z_c} = 4.45 U_s^{-0.36} W^{-0.43} L^{0.2} \quad (4)$$

여기서

$Z_c$ : clear liquid height which is defined as weir height plus height of liquid crest calculated from Francis formula [cm H<sub>2</sub>O]

$U_s$ : superficial velocity of gas based on empty column [cm/sec]

$W$ : weir height [cm]

$L$ : liquid flow rate per width of weir  $\left[\frac{\text{cm}^3}{\text{sec cm}}\right]$

이 된다. 그러나 單一孔板에서는  $Z_e$ 와  $Z_c$ 는 거의 같다.

$\Delta P_f$ 는  $\Delta P_w$ 와  $U_s$ 와의 點綴에서  $U_s=0$ 일 때의 外挿值을  $\Delta P_w$ 에서 빼서 얻어지며, 이것을 氣泡의 主成 및 上昇運動으로 因한 摩擦에 依한 損失이라고 생각하는 것이 合理的이다. 이 값은 多孔板實驗에서는 거의 無視할 程度이지만 單一孔板의 實驗에서는 重要な 部分을 차지하여  $\Delta P_d$ 와 같은 크기의 값을 가지며 그것은 다음과 같이 整理할 수가 있다.

$$\Delta P_f = k_f U_s^{1.8} \quad (5)$$

여기서 常數  $k_f$ 의 값은 Table 2에 表示하였으며 그 값은  $W$ 와  $L$ 의 값에 거의 無關係하다(Fig. 4 参照).

Table 2.

Hole diameter	1/16 in.	1/8 in.	1/4 in.
$k_f$	$1.17(10^{-6})$	$4.05(10^{-6})$	$6.96(10^{-6})$

多孔板實驗에서는  $\Delta P_f$ 는 적으므로  $\Delta P_w$ 와  $Z_e$ 를 點綴하면  $\xi=1.0$ 의 값을 갖게되며  $\Delta P_s$ 는  $0.7\left(\frac{4\sigma}{d_0}\right)$ 으로 된다(Fig. 5 参照). 여기서  $\sigma$ 는 表面張力 $\left(\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}\right)$ 이며 0.7의 값은 生成된 氣泡의 主曲率半徑(principal radius of curvature)이 孔端에서  $\frac{d_0}{2}$ 와 相異한 값을 갖게 됨에 起因한다고 본다. 또 다른 實驗者<sup>2)</sup>의 報告에 나오는  $\xi=0.85$ 의 값이 本 實驗結果와 相異한 것은 氣體液體流量이 모두 적은 範圍에서 實驗을 하였고 또 A方

法으로서는 液體의 흐름이 없이 實驗하였기 때문이라고  
 思料된다(Fig. 5 參照).

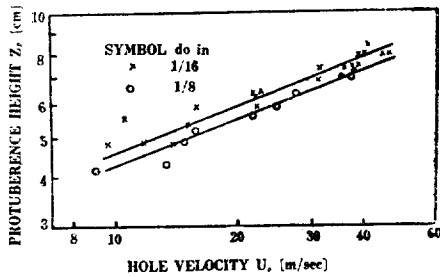


Fig. 6. Protuberance Height for Single Hole plates

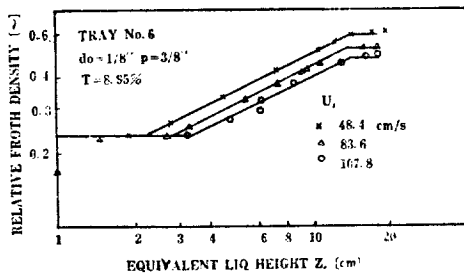


Fig. 7. Effect of  $Z$ , on  $\phi$

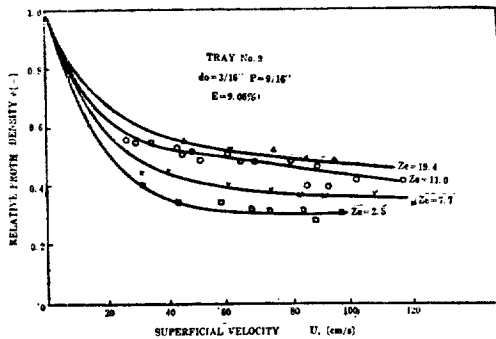


Fig. 8. Effect of  $U$ , on  $\phi$

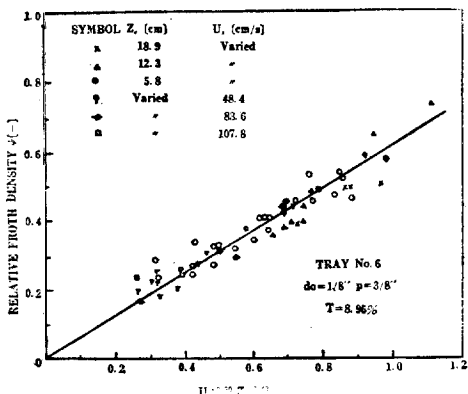


Fig. 9. Correlation for Effect of  $Z$ , &  $U$ , on  $\phi$

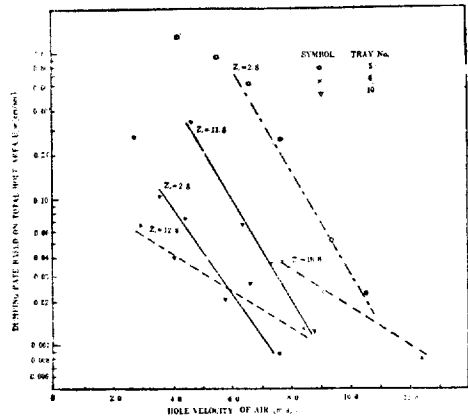


Fig. 10. Dumping Plate

結論으로 孔板의 全壓力損失은 結論에 綜合表示한  
 바와 같이 된다(結論 및 Fig. 2 參照).

#### (b) 液體突起高

(protuberance height of the liquid layer)

單一孔板 實驗에서는 液體層이 낮을때 그 上部表面  
 에 氣泡의 上昇으로 因한 drag force의 影響으로 液體  
 의 突起를 볼 수 있다. 그 突起高는 甚하면 振幅이 약  
 0.5cm, 週期는 약 0.3 sec 程度로 搖動을 하며, 單一孔  
 板을 基準으로 한 平均 突起高는 Fig. 6과 같이  $U_{0.4}$   
 에 比例한다. 이 때 液體의 流量 및 weir의 影響은 本  
 實驗의 範圍에서는 찾아 보기가 힘들었다. 이 現象은  
 多孔板塔에서의 飛沫同伴量(entrainment) 및 泡沫層高  
 의 基礎實驗으로 더욱 徹底한 研究가 要望된다.

#### (c) 泡沫層(froth layer)의 觀察

多孔板實驗에서는 單一孔板에서 일어나는 液體의 突  
 起現象과는 달리 泡沫層이 形成된다. 一般의으로 泡沫  
 層은 3部分으로 構成됨을 볼 수가 있었다. 즉 多孔板  
 바로 위에는 다만 氣泡가 垂直乃至 螺旋運動으로 上  
 昇하는 靜止部分이 있고 그 위에는 液體와 氣體가 均  
 一하게 섞여있는 泡沫層, 그리고 그위 上部表面 近處  
 에서는 氣泡가 破裂되는 層으로 構成됨을 볼 수가 있  
 었다.  $Z_e$ 를 一定하게 하고 空塔速度( $U_s$ )를 增加하면  
 最下層靜止部分은 漸漸 減小하여 結局에는  $Z_e$ 와  $U_s$   
 에 相關없이 1~0.5 cm의 높이를 계속 유지하였으며 中  
 間의 泡沫層의 氣泡는 크기 뿐만 아니라 層內에 存在  
 하는 數도 增加하여 全體의 泡沫層高를 急激히 增加시  
 킨다. 그러나 어떤 限界值 以上으로  $U_s$ 를 增加시키면  
 全體의 泡沫層은 甚한 攪亂狀態(turbulent state)가 되  
 어 層內의 氣泡는 破裂과 融合(coalescence)이 함께 일어  
 나 그 泡沫層高의 增加率은 현저하게 減小하다가 結局

에는全體泡沫層高는 一定한 값으로 된다. 氣液의 混合狀態는  $U_s$ 가 이 限界值  $U_{sc}$ 를 넘어서 부터 매우 좋아지며 良好한 板效率를 가지게 할 수가 있다. (이 경우를 pozine<sup>6)</sup>의 用語를 빌려서 spraying zone 이라고 하겠다.)

(d) 泡沫層의 相對密度(Relative froth density)

便宜上 泡沫層의 相對密度  $\phi$ 를 다음과 같이 定義하면

$$\phi = \frac{\rho_f}{\rho_l} = \frac{Z_s}{Z_f} \quad (6)$$

여기서  $\rho_f$ 와  $\rho_l$ 은 각각 泡沫層과 液體의 密度이며  $Z_f$ 는全體泡沫層高다. 이는 또한 單位泡沫層高에 對한 平均相當液高가 된다. 塔內 氣泡群이 plug flow를 한다고 假定하면 氣泡群의 平均 上昇速度( $U_b$ )와 平均 殘留時間(nominal holding time)  $T$ 는 다음과 같이 表示할 수가 있다.

$$U_b = \frac{U_s}{1-\phi} \quad (7)$$

$$T = \frac{Z_f}{U_b} = \frac{Z_f - Z_s}{U_s} \quad (8)$$

空塔速度  $U_s$ 가 적을 때는 고 氣泡群의 平均 上昇速度는 個個의 獨立氣泡의 終末 上昇速度(terminal rising velocity)와 같게 되며 孔速度와 關係없이 孔端에 있어서의 表面張力과 浮力이 서로 平衡을 이루는 크기의 氣泡를 形成한다. 따라서 이 範圍에서는  $1-\phi$ 가  $U_s$ 에 比例하며 그 比例常數는 바로 그 때의 終末上昇速度가 된다. 그러나 spraying zone에 있어서는 氣泡相互間의 干涉뿐만 아니라 泡沫層內의 교란으로 因한 氣泡의 破裂과 融合은  $1-\phi$ 의  $U_s$ 에 對한 增加率을 현저하게 減小시키며 그 mechanism은 매우 複雜하여 진다.

우리가 關心있는 部分은 spraying zone이 始作하는 이 限界點이므로 이 附近 즉  $20 < U_s < 120$  cm/sec 범위에서의  $\phi$ 를 다음과 같이 整理하였다. Fig. 7과 Fig. 8을 보면  $\phi$ 의  $Z_s$ 에 對한 影響은 3部分으로 나눌 수 있는데 즉  $Z_s$ 가 어떤 한계치  $Z_{es}$ 보다 적을 때는  $\phi$ 값은  $U_s$  및  $Z_s$ 에 相關없이  $\phi=0.23$ 을 갖는다.

이것은 바로 氣泡間의 channeling과 jetting에 따른 飛沫同伴量을 갖게 되기 때문이다. 中間部分  $Z_s$ 가  $Z_{es}$ 와 17cm 사이에는 Fig. 9에서 表示한 바와 같이

$$\phi = \gamma_f U_s^{-0.30} Z_s^{0.42} \quad (9)$$

로 된다. 여기서  $\gamma_f$ 의 값은 Table 3에 表示하였다. 또 한계치  $Z_{es}$ 는 式 9에서  $\phi=0.23$ 을 代入하여 어떤 任意速度에 對하여 구할 수 있다.  $Z_s$ 가 17cm 보다 는 값에는  $\phi$ 값은  $Z_s$ 에 無關係하게 되며  $\phi = \gamma_f (17)^{0.42} U_s^{-0.30} = 3.29 \gamma_f U_s^{-0.30}$ 로 表示할 수가 있으며,  $Z_s \approx 160$  cm에서 行한 Kato<sup>5)</sup>의 實驗과도 一致한다.

Table 3.

Tray No.	3	4	5	6	7	9	10
$\gamma_f$	0.52	0.55	0.59	0.61	0.61	0.61	0.64

$\gamma_f$ 의 값은 거의 一定하나 free space ratio  $\tau$ 와  $d_o$ 의 값에 따라 약간 變化한다.

또한 주어진  $Z_s$ 에 따라 spraying zone으로 移行하는 限界點에서의 空塔速度  $U_{sc}$ 와 그에 따른 泡沫層의 相對密度  $\phi_c$ 를 Table 4에 表示하였다. 또 Mayfield<sup>1)</sup>와 Arnold<sup>10)</sup>의 定義에 依한 低部限界點도 함께 表示하였다.

Table 4. Critical Point of Spraying Zone

Tray No.	$Z_s$ cm	Critical Point of Spraying Zone		$(U_s)$ min* cm/sec
		$(U_s)_c$	$\phi_c$	
3	3.30	55.0	0.25	54.4
	10.00	—	—	53.8
	17.20	—	—	39.0
4	5.50	70.0	0.28	68.1
	12.50	—	—	68.1
	18.50	—	—	70.1
5	2.00	<30.0	(0.23)	118.5
	5.00	50.0	0.33	—
	11.80	70.0	0.39	—
6	2.10	42.0	0.23	81.6
	5.80	80.0	0.31	91.5
	18.80	—	—	—
7	2.30	52.0	0.23	68.1
	5.50	92.0	0.34	84.1
	11.80	—	—	84.4
8	2.30	40.7	0.28	82.6
	7.75	58.0	0.40	91.5
	11.00	—	—	89.9
10	18.00	—	—	—
	2.70	<30	(0.23)	74.5
	6.00	38	0.40	106.0
	11.70	128	0.60	101.5

\*From definition of Mayfield & Arnold. <sup>11)10)</sup>

(e) Dumping Rate

Fig. 10에는 dumping rate를 全孔面積을 基準으로 하여 計算한 線速度  $U_t$ 와  $U_b$ 의 關係를 表示하였으나 相關關係式을 얻기는 어려웠다. 다만 重要한 事實은 孔間距離(hole pitch)  $p$ 에 따른 影響인데 특히  $p=2d_o$ 일 때 dumping rate가 크게 증가한다. 또  $d_o$ 와  $Z_s$ 의 값이 크면 클 수록 심한 dumping이 생긴다.

4. 結 論

(a) 全壓力損失은 다음과 같이 整理할 수가 있다.

(1) 單一孔板에서는

$$\Delta P_t = k_o \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) U_o^2 + Z_s + 0.7 \left( \frac{4\sigma}{d_o} \right) + k_f U_o^{1.3} \quad (10)$$

(2) 多孔板에서는

$$\Delta P_t = k_o \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) U_o^2 + Z_s + 0.7 \left( \frac{4\sigma}{d_o} \right) \quad (11)$$

$k$ 의 값은 Table 1에  $k_f$ 의 값은 Table 3에 表示하

였다.

(3) B 방법 實驗에 있어서의 相當液高( $Z_e$ )는 單一孔板에서는 淸澄液高와 같고 多孔板에서는 本實驗의 範圍內에서는

$$\frac{Z_e}{Z_c} = 4.45 U_o^{-0.36} W^{-0.43} L^{0.2} \quad (4)$$

로 整理된다.

(b) 單一孔板에서는 液層이 낮을 때 液體突起現象을 볼 수 있었으며 그 높이는 空塔速度  $U_o$ 의 0.4 乘에 比例한다.

(c) 泡沫層은 板附近에 靜止層, 中間에 泡沫層 그 上部에 泡沫破裂層의 3層으로 區分됨을 볼 수 있었으며 空塔速度가 어떤 限界値를 넘으면 spraying zone 이 되는데 그 限界値는 Table 4에 表示하였으며  $Z_{es}$ 는 (9)式에  $\phi=0.23$ 을 代入하여 任意的 速度에 對하여 求할 수 있다.  $Z_{es}$ 의 값은 보통 3~5 cm 사이에 있었다.

(d) 泡沫層의 比密度  $\phi$ 는 다음과 같이 整理할 수가 있다.

$Z_e < Z_{es}$ 에서는  $\phi=0.23$

$Z_{es} < Z_e < 17$ 에서는  $\phi = \gamma_f U_s^{-0.30} Z_e^{0.42}$  (9)

$Z_e > 17$   $\phi = 3.29 \gamma_f U_s^{-0.30}$

$\gamma_f$ 의 값은 Table 3에 表示하였으며  $Z_{es}$ 는 (9)式에  $\phi=0.23$ 을 代入하여 任意的 速度에 對하여 求할 수 있다.  $Z_{es}$ 의 값은 보통 3~5 cm의 사이에 있었다.

### Nomenclature

$C$	; sound velocity of gas at the experimental temperature (cm/sec)
$d_o$	; hole diameter of the perforated tray (cm)
$L$	; liquid flow rate per width of weir (cm <sup>3</sup> /sec·cm)
$k_e, k_f$	; constants (-)
$\Delta p_d$	; dry pressure drop of the perforated tray (cm H <sub>2</sub> O)
$\Delta p_f$	; frictional pressure drop in the liquid layer due to bubbling and bubble rise (cm H <sub>2</sub> O)
$\Delta p_t$	; total pressure drop across the tray (cm H <sub>2</sub> O)
$\Delta p_\sigma$	; pressure drop due to surface tension (cm H <sub>2</sub> O)
$\Delta p_w$	; wet pressure drop = $\Delta p_f + \Delta p + Z_e$ (cm H <sub>2</sub> O)
$p$	; hole pitch (in)
$T$	; nominal holding time of bubbles in froth layer (sec)
$t$	; tray thickness (cm)
$U_o$	; time averaged hole velocity of the gas through the tray (cm/sec)
$U_s$	; time averaged superficial velocity based on the

(cm<sup>3</sup>/sec)  $U_s$  at the critical point where the spraying zone

is to begin (cm/sec)

$(U_s)_{\min}$ ; the minimum value of  $U_s$  defined by Mayfield and Arnold (cm/sec)

$U_t$  ; hole velocity of dumping liquid assuming that the liquid dumps through all holes. (cm/sec)

$U_b$  ; average rising velocity of bubble bed (cm/sec)

$V_c$  ; chamber volume between regulation valve and perforated tray (ml)

$W$  ; weir height (cm)

$Z_e$  ; equivalent liquid height corresponding to liquid hold-up on the tray (cm H<sub>2</sub>O)

$Z_{es}$  ; critical equivalent liquid height defined in section (d).

$Z_f$  ; froth height on the tray (cm)

$Z_p$  ; protuberance height of liquid caused by gas flume (cm)

$Z_c$  ; clear liquid height defined as weir height plus crest of liquid over the weir calculated from Francis formula (cm)

$\phi$  ; Relative froth density.  $= \frac{\rho_f}{\rho_l} = \frac{Z_e}{Z_f} [-]$

$\phi_c$  ;  $\phi$  at the critical point where the spraying zone is to begin. [-]

$\rho_f$  ; density of froth layer (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_l$  ; density of liquid (g/cm<sup>3</sup>)

$\Delta \rho$  ;  $\rho_l - \rho_g$

$\rho_g$  ; density of gas (g/cm<sup>3</sup>)

$\sigma$  ; surface tension (dyne/cm)

$\tau$  ; % free space ratio of total hole area based on the empty column cross section (-)

$\gamma_f, \xi$  ; constants (-)

### Literature cited

1. Mayfield et. al.: Ind. Eng. Chem., **44**, 2238 (1952)
2. Kamei et. al.: Chem. Eng. (Japan) **18**, 308 (1954)
3. Brown: Ph. D. Thesis, Univ. of Calif. at Berkeley (1958)
4. Perry: Chem. Eng. Handbook, 4th ed. Mcgrawhill (1961)
5. Kato: Chem. Eng. (Japan), **26**, 1075 (1962)
6. Pozine: J. of App. Chem. (U.S.S.R.) **27**, 9 (1954)
7. Van Krevelen et. al.: Chem. Eng. Prog., **46**, 29 (1950)
8. Hughes et. al.: Chem. Eng. Prog., **51**, 557 (1955)
9. Levich: Physicohydrodynamics, Prentice-hall (1960)
10. Arnold et. al.: Chem. Eng. Prog., **48**, 633 (1952).