

# Gas 噴散 氣-液 反應槽에서 氣泡運動이 熱傳達到 미치는 影響

孫 炳 鎮\* 李 炫

### Abstract

The study for bubbling phenomena to influence heat transfer in gas-liquid contactors. The sparged contactor is gaining importance for gas-liquid chemical reactions.

In this paper, correlations between Reynolds number and heat transfer coefficient were studied and experimental expressions were also obtained over both of areas, namely, laminar area and turbulent area respectively.

### 1. 序 論

氣-液 接觸 反應機構와 反應槽의 氣泡噴散 狀態下에서의 熱交換問題는 化學工程에서 널리 應用되고 있다. 그러나, 氣泡噴散이 熱傳達到 미치는 影響에 關한 研究는 그리 많지 않아 反應槽 設計便覽이나 其他 反應槽設計에 關한 教材에도 紹介되어 있지 않은 형편이다.

氣-液 接觸反應은 一般的으로 높은 發熱反應 이든가 혹은 吸熱反應이다. 그러므로, 最適한 反應條件을 充足시키기 위해서는 많은 熱을 除去하든가 또는 供給하여야 한다. 反應槽內的 熱 交換方式은 다음과 같은 세가지 方式이 있다.

1. 反應液의 蒸發方式
2. 外部 熱交換器를 設置하여 反應液을 循環 시켜 熱을 交換하는 方式
3. 冷却코일이나 재킷(jacket)로 부터 直接 熱을 交換하는 方式

本 論文은 冷却코일을 通하여 熱이 交換될 때 氣泡運動이 熱傳達到 미치는 影響을 實驗研究한 것이다.

1958年 Kolber〔1〕는 直徑 92 mm, 192 mm 및 292 mm의 容器속의 液體內에 各各 熱源을 設置

하여 銅管壁과 液體間의 熱傳達到 研究하였다.

1962年 Fair〔2〕는 直徑 18 in 및 42 in의 容器를 實驗에 使用하였는데, Fair는 18 in의 容器에 對해서는 容器壁面과 液體間의 熱傳達到 研究하였고, 42 in의 容器에 對해서는 冷却코일과 液體間의 熱傳達到 研究하였다.

이들 論文들은 熱傳達係數와 가스의 걸보기速度  $U_{OG}$ 로써 結果式을 表現하였으며,  $U_{OG}$ 를 다음과 같이 定義하였다.

$$U_{OG} = \epsilon Z_f / \bar{\theta}_G \dots\dots\dots (1-a)$$

$$\bar{\theta}_G = \alpha Z_f / (U_{bt} + U_L) \dots\dots\dots (1-b)$$

$$\epsilon = (Z_f - Z_L) / Z_f \dots\dots\dots (1-c)$$

上記式에서 보듯이 가스의 걸보기速度  $U_{OG}$  는 가스 的 Holdup  $\epsilon$ , 가스 的 Holdup 時間  $\bar{\theta}_G$  및 修正係數  $\alpha$  등을 測定하여야 비로소 計算될 수가 있는 量이다.

물론, 化學工學的인 立場에서 物質移動을 計算하고자 할 때에는 이들 값들이 必要하나 단지 熱傳達만을 計算하기 위해서는 이와 같이 複雜한 量들을 資料로 하여 計算하는 것보다는 주어진 條件에서 直接 計算할 수 있는 가스 的 噴出速度  $V$ 와 液體 的 物性值들을 熱傳達到 聯關

\* 正會員, 한양대학교

시켜 計算하는 것이 設計資料로써 보다 妥當하다고 考慮되어 本 論文에서는 噴出速度 V로 表示되는 Reynolds 數와 熱傳達係數와의 關係를 研究하였다.

또한, 層流領域과 亂流領域을 區分하여 實驗 結果式을 表現하였다.

Nomenclature

- U<sub>OG</sub> : 가스의 絶보기速度
- ε : Fractional gas holdup
- Z<sub>f</sub> : 氣泡運動으로 膨脹된 飽和液의 높이
- Z<sub>L</sub> : 氣泡發生이 없을 때 液體의 높이
- θ<sub>G</sub> : 가스의 平均 holdup 時間
- α : 氣泡의 振動上昇으로 인한 修正係數  
(Correction factor for hindered rise)
- U<sub>br</sub> : 自然上昇 氣泡速度  
(Velocity for bubbles at free rise)
- U<sub>L</sub> : 實液體의 平均舉動速度  
(Velocity for true liquid)
- dh : 噴射口의 直徑
- n : 噴射口의 個數
- q : 傳熱量
- ρ : 密度
- Q<sub>w</sub> : 冷却水의 流量
- C : 比熱
- ΔT : 入出口에서의 溫度差
- V : 가스의 噴出速度
- Q<sub>air</sub> : 公기의 流量
- ΔT<sub>m</sub> : LMTD 로 計算한 溫度差
- h : 熱傳達係數
- A : 液體와 接觸한 冷却管의 表面積
- μ : 粘性係數
- N<sub>Re</sub> : Reynolds 數
- N<sub>u</sub> : Nusselt 數
- P<sub>r</sub> : Prandtl 數

2. 實驗裝置와 方法

2-1 實驗裝置

Fig. 1에 實驗裝置의 概要를 圖示하여 놓았

다. 實驗容器는 直徑이 各各 90 mm 및 150 mm, 同一 높이 350 mm인 유리로 만든 圓筒容器를 使用하였으며 噴散裝置에는 直徑(dh)이 0.8 mm인 噴射口를 31個(n)로 만들었다.

冷却水의 流量測定은 Orifice meter를 使用하였고, 冷却水의 入口와 出口에 各各 溫度計를 設置하여 冷却水의 入出溫度를 測定하였다. 冷却管은 外徑이 8 mm, 길이 1,950 mm인 銅管 코일型이며, 熱源으로는 220 V-5 Kw 容量의 Heater를 使用하였다.

冷却管의 溫度測定은 Thermocouple (Copper-Constantan)을 가지고 冷却管의 上部, 中部 및 下部位置에 各各 設置하여 Potentiometer (YEW Portable DC Potentiometer, TYPE 2727, Tokyo, Yokogawa, electric works, LTD, JAPAN)로 測定하였다. 液體의 溫度는 Thermocouple을 上下로 移動시켜 가면서 溫度分布를 測定하였다.

공기의 流量은 Flow meter (Flow meter kit, Cat No. 11-164-50 Mark III, stocked and distributed by Fisher Scientific Co.)로 부터 測定하였다.

2-2 實驗方法

1) 冷却水의 流量 Q<sub>w</sub>를 Orifice meter 로 測定하고 入出口에서의 溫度差 ΔT를 測定하여 傳熱量 q를

$$q = \rho Q_w C \Delta T \dots \dots \dots (2)$$

의 式으로 부터 計算하였다.

2) Flow meter로 부터 公기의 流量 Q<sub>air</sub>를 測定하여 가스의 噴出速度 V를

$$V = \frac{Q_{air}}{\frac{\pi}{4} d_h^2 \times n} \dots \dots \dots (3)$$

의 式에서 計算하였다.

3) 冷却管에 設置한 3個의 Thermocouple 로 부터 測定한 溫度分布와 冷却管의 溫度測定 位置에서 測定한 液體溫度를 使用하여 溫度差 ΔT<sub>m</sub>을 LMTD로 計算하였다.

4) 熱傳達係數 h는

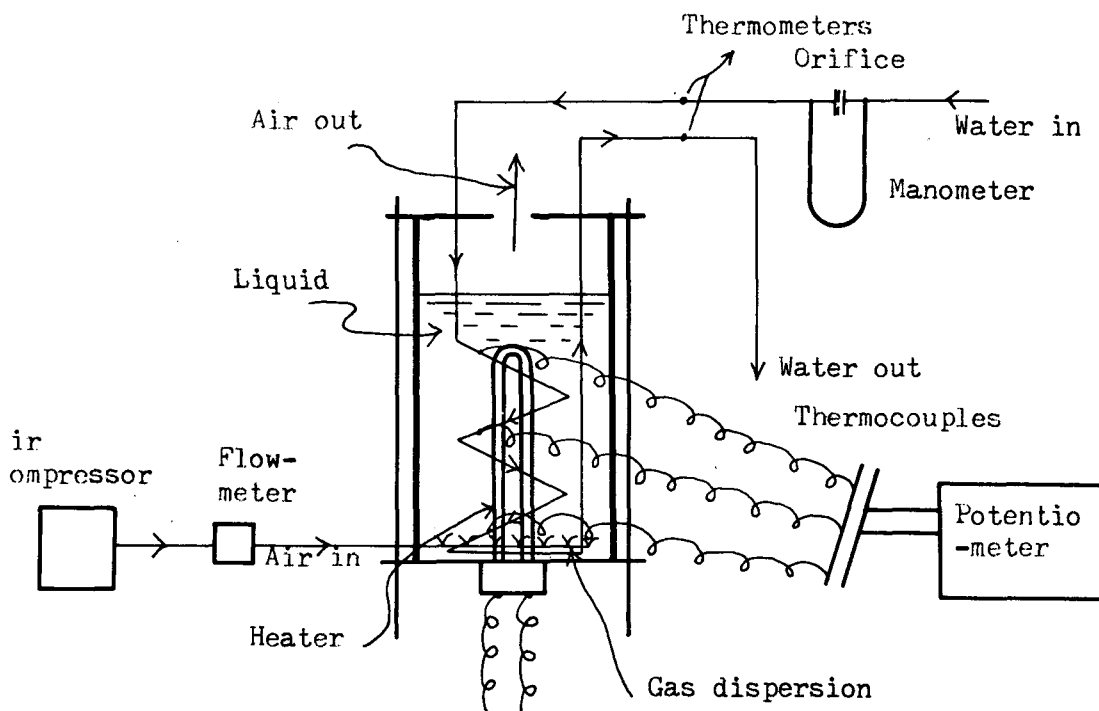


Fig. 1. Schema of experimental apparatus

$$h = \frac{q}{A \Delta T_m} \dots\dots\dots(4)$$

의 식으로 부터 計算하였다. (4)式에서 A는 液體와 接觸한 冷却管의 表面積을 나타낸다.

5) 空氣의 流量을 變化시켜 가면서 變化時마다 Reynolds 數  $N_{Re}$  를

$$N_{Re} = \frac{\rho V dh}{\mu} \dots\dots\dots(5)$$

위 式에서 計算하고, 各 Reynolds 數  $N_{Re}$  에 對하여 上記한 測定方法으로 熱傳達係數 h 를 計算하고 無次元式

$$\frac{Nu}{Pr^{\frac{1}{3}}} = C_i N_{Re}^{m_i} \dots\dots\dots(6)$$

의 關係를 實驗資料로 부터 計算하였다. (6)式에서 係數  $C_i$  와 指數  $m_i$  는 實驗資料로 부터 最少自乘法을 利用하여 電算機로 計算하였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

表 1에서 實驗測定值를 整理하여 結果를 紹介하였다.

Table 1. Experimental results

Area	$N_{Re}$	q	$\Delta T_m$	h	Nu
LAMINAR	63.1	4,104.3	31.8	2,632.6	37.6
	83.5	4,104.3	29.5	2,840.7	41.0
	98.3	4,145.3	28.6	2,956.0	42.7
	185.3	4,181.3	25.0	3,410.2	49.3
	243.1	4,228.0	22.0	3,915.0	56.9
	302.4	4,228.0	21.1	4,095.0	59.5
	335.0	4,264.3	21.0	4,148.7	60.3
	438.7	4,350.5	19.7	4,497.1	65.5
	600.3	4,350.5	17.9	4,948.8	72.2
	715.3	4,350.5	16.8	5,275.8	77.1
	958.4	4,350.7	15.6	5,687.2	83.5
TURBULENT	1,086.5	4,350.5	14.2	6,272.3	92.2
	1,462.0	4,350.5	12.4	7,181.0	105.8
	1,644.6	4,350.5	12.1	7,333.4	108.3
	2,028.5	4,350.5	11.9	7,479.2	110.6
	3,861.5	4,350.5	8.1	10,900.7	162.0
	4,886.0	4,350.5	7.6	11,630.3	173.0
	5,844.4	4,350.5	7.3	12,180.6	181.4
	8,922.0	4,350.6	6.5	13,636.7	204.3
	14,270.0	4,391.6	5.6	16,131.0	242.0
	17,746.0	4,392.0	4.9	18,431.1	280.8

表 1 을 Log-Log section paper에 圖示하면 Fig. 2 와 같다.

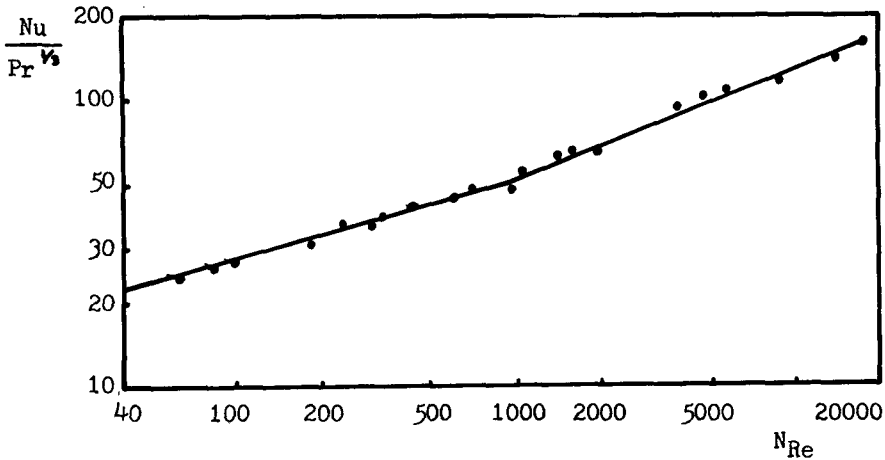


Fig. 2. Correlation of dimensionless numbers

表 1 의 結果值에 對해서 最少自乘法을 使用하여 計算한 結果 다음과 같은 熱傳達式을 얻었다.

層流領域 ( $N_{Re} < 10^3$ )에서  

$$Nu = 8.1 N_{Re}^{0.27} Pr^{1/3} \dots\dots\dots(7)$$

亂流領域 ( $N_{Re} > 10^3$ )에서  

$$Nu = 4.3 N_{Re}^{0.37} Pr^{1/3} \dots\dots\dots(8)$$

대부분의 氣泡들은 2 ~ 7 mm의 直徑을 가지고 있었다.

噴出가스의 Reynolds 數가  $10^3$  近方에서 上昇하는 氣泡가 조개지는 現象이 發生하였으며 Bubbling의 效果로 볼 수 없는 領域 卽, 亂流 領域에 突入하였다.

Reynolds 數가 270 以上에서 Liquid mixing 은 상당히 良好하였으며, 容器內 液體의 溫度도 아주 均一하였다.

反面에, Reynolds 數가 270 以下로 떨어질수록 液體의 上下溫度差가 점점 심하였졌다. 特히, Reynolds 數가 45 以下에서는 氣泡 發生密度가 극히 적어 自然對流 熱傳達 現象이라고 보아도

無妨하였으며, 冷却코일 表面에서 어떠한 Turbulence도 없었다.

#### 4. 結 論

1) Reynolds 數가 270 以上일 때 容器內 液體의 溫度는 아주 均一하다.

Reynolds 數가 270 以下일 때 容器內 液體의 上下溫度差가 점점 심하여진다.

Reynolds 數가 45 以下일 때 氣泡 發生密度가 극히 적어 自然對流 熱傳達이라고 보아도 無妨하다.

2) 直徑이 90 mm보다 큰 容器에 對해서 熱傳達係數는 直徑의 影響을 받지 않는다. (1) (2)

3) Reynolds 數  $N_{Re} \approx 10^3$ 에서 層流領域과 亂流領域으로 區分할 수 있다. 兩 領域에 對한 熱傳達式은 다음과 같이 表示된다.

層流領域 ( $N_{Re} < 10^3$ )에서  

$$Nu = 8.1 N_{Re}^{0.27} Pr^{1/3} \dots\dots\dots(9)$$

亂流領域 ( $N_{Re} > 10^3$ )에서  

$$Nu = 4.3 N_{Re}^{0.37} Pr^{1/3} \dots\dots\dots(10)$$

#### 參 考 文 獻

- 1 Kolbel, H., Siemes, W., Mass, R., Muller, K., Chemie. Ing. Techn. 30, p. 400 (1958)
- 2 Fair, J. R., et al, I & EC Process Design and Development. 1, p. 33 (1962)
- 3 Fair, J. R., Chemical Engineering, July, p. 17 (1967)
- 4 Fair, J. R., Chemical Engineering, July, p. 3 (1967)