

# 直接接觸方式 熱 및 物質交換 裝置의 傳達現象(Ⅲ)\*

金 錫 賢

<國民大學校 機械工學科 教授>

### 3. 設計解析例

物質傳達이 包含되는 交換器의 設計目標도 單純熱交換器의 境遇와 마찬가지로 여러가지 주어진 制約條件(constraints; 例를들면 交換器의 制限이나 流體流動에 必要한 壓力負荷等)을 만족시키면서 傳達能力의 單位(number of transfer units, 以下  $N_{tu}$ 로 略함)를 最大로 해 주는데 있다. 그러나 교환장치들의 類型이나 形狀에 따라 이같은 同一 目的을 爲한 過程은 各양각색이다. 本章에서는 直接 접촉식 교환기의 많은 種類中 물의 직접증발을 利用한 斷熱加濕裝置와 固體乾燥劑 斷熱除濕裝置等 두가지의 解析過程을 例示하려고 한다.

#### 3.1 斷熱加濕裝置-單流交換裝置

加濕과정은 空氣中の 습기含量을 높여주기 爲하여 또는 空氣를 冷却시킬 目的으로 흔히 使用된다. 이는 作動空氣가 各種 形態의 充填層內를 재순환하며 흐르는 물과 直接接觸하면서 이루어 지는데 만약 加습장치의 壁을 통한 熱의 交換이 적다고 한다면 그 加습과정은 斷熱的이며 이때 물의 증발에 消耗되는 잠열은 空氣로부터 供給된다. 따라서 定常상태에서 순환水는 濕球溫度인  $T_{sat}$ 가 될 것이며, 交換裝置 全體를 통하여

一定이다. 即 斷熱加습장치는 單流交換器(single stream exchanger)이며 두 作動流體(물과 空氣)의 流動方向이 달라 지더라도(並流, 對向流等) 그 解析方法은 달라지지 않는다.

그림 12는 이러한 가정下의 加습장치를 보인다. 여기서  $\dot{m}_G$ 는 空氣의 質量流量을 나타내며  $\rho$ 는 直接接觸面의 周邊길이(perimeter)이다. 미소길이  $dz$ 에 該當하는 미소체적에 對한 物質保存(species conservation) 法則으로부터

$$m_1 \dot{m}_G|_z + n_{1,s} \rho dz = m_1 \dot{m}_G|_{z+dz}$$

또는 微分方程式形態로

$$-\frac{d}{dz} (m_1 \dot{m}_G) = n_{1,s} \rho \quad (28)$$

한편 質量保存(mass conservation) 法則은 같은 方法으로

$$\frac{d\dot{m}_G}{dz} = n_{1,s} \rho \quad (29)$$

를 준다. 式 (29)는 다시

$$\dot{m}_G \frac{dm_1}{dz} = n_{1,s} \rho (1 - m_1)$$

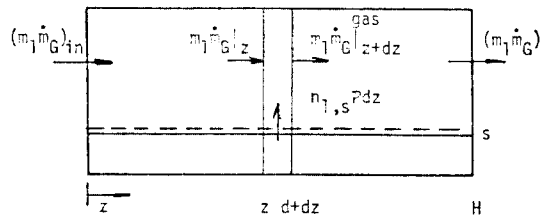


그림 12 斷熱加濕過程

\* 本 講座의 (Ⅱ)는 大韓機械學會誌 第25卷 第5號 pp. 413~418(1985. 10)에 掲載되었음.

으로 쓸 수 있으며 式 (7)과 式 (8)로부터

$$n_{1,s} = K^\circ \frac{m_1 - m_{1,s}}{m_{1,s} - 1} \quad (30)$$

을 代入하면 最終적으로

$$\frac{dm_1}{dz} = \frac{K^\circ \mathcal{P}}{\dot{m}_c} \frac{(m_1 - m_{1,s})(1 - m_1)}{(m_{1,s} - 1)} \quad (31)$$

을 얻는다. 증발율이 큰 경우의 물질전달계수  $K^\circ$ 는 實際적으로 문헌에서 그에 對한 資料를 찾기가 매우 힘들어서 式 (31)의 直接積分을 어렵게 한다. 만약  $m_1$ 과  $m_{1,s}$ 가 1보다 아주 적은 값이라면(물질전달률이 작은 경우),  $K^\circ \approx K$ 로 쓸 수 있고 또한 이때

$$\frac{K\mathcal{P}L}{\dot{m}_c} \equiv N_{tu} \quad (32)$$

의 값이 既知의 一定한 값이라고 가정하면 境界條件

$$\text{at } z=0, \quad m_1 = m_{1,in} \quad (33a)$$

$$z=L, \quad m_1 = m_{1,out} \quad (33b)$$

를 줄때 式 (31)의 積分結果로서

$$\frac{m_{1,out} - m_{1,s}}{m_{1,in} - m_{1,s}} = \exp(-N_{tu}) \quad (34)$$

를 얻는다. 윗 式은 單流熱交換器의 效率(effectiveness)의 定義와 같은 형태로

$$\epsilon \equiv \frac{m_{1,in} - m_{1,out}}{m_{1,in} - m_{1,s}} = 1 - \exp(-N_{tu}) \quad (35)$$

로 쓸 수 있다.

한편 가습장치내에서의 空氣溫度를 豫測하기 爲해서는 微分形態의 에너지 保存則을 만들어야 하나 여기서는 총괄평형식(overall balance)로부터 空氣의 排出溫度만을 求해본다. 먼저 총괄질량보존칙은  $\dot{m}_a$ 를 補充水의 量(make-up water: 가습기 內에서 증발된 물의 양을 보충해 준 것)이라 할때

$$\dot{m}_{G,out} = \dot{m}_{G,in} + \dot{m}_a \quad (36)$$

따라서 총괄물질보존칙(overall species balance)

$$\dot{m}_a = (\dot{m}_c m_1)_{out} - (\dot{m}_c m_1)_{in} \quad (37)$$

으로부터

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_{G,in}(m_{1,out} - m_{1,in})}{1 - m_{1,out}}$$

또는

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_{G,in} \epsilon (m_{1,s} - m_{1,in})}{1 - m_{1,out}} \quad (38)$$

를 얻는다. 한편 총괄에너지평형은 空氣 및 補充水의 엔탈피를 各各  $h_G, h_a$ 라 할때

$$(\dot{m}_c h_G)_{in} + \dot{m}_a h_a = (\dot{m}_c h_G)_{out} \quad (39)$$

$\dot{m}_{G,in}, T_{in}$  그리고  $m_{1,in}$ 이 既知일때 윗 式은  $T_{out}$ 을 준다. 또한 式 (37)로부터 간단한 변형을 거쳐 보충수의 量은

$$\dot{m}_a \approx \dot{m}_c \epsilon (m_{1,s} - m_{1,in}) \quad (40)$$

을 얻는다.

위에서 본 物質傳達係數  $K$ 와 가습장치 內의 液體側 傳達係數  $K_L$ , 그리고 空氣流量  $\dot{m}_c$  등의 關係를 주는  $N_{tu}$ 는 交換장치설계의 가장 重要한 因子中의 하나이다. 이는 경우에 따라

$$H_G \equiv \frac{\dot{m}_c}{K\mathcal{P}} \quad (\text{Height of Transfer Unit}^{(46)}) \quad (41)$$

또는

$$N_{Gc} \equiv \frac{K\mathcal{P}}{\dot{m}_c} \quad (\text{Spalding}^{(5)}) \quad (42)$$

등을 使用키도 하는데 式 (41)의 表現은 특히 化學工業界에서 많이 쓰인다.

式 (32), (41), (42)의 어느 것이든 氣體側 傳達係數만이 包含된 것을 注目한다.

前述한 바와같이 단열가습장치에서 液體側 傳達係數는 총괄전달현상에 아무 기여를 하지 못하기 때문이다. 換言하면 이러한 裝置에서 液體側의 傳達效果를 높이기 爲한 試圖는 必要하다는 것을 알 수 있다. 마지막으로 문제가 되는 것은 傳達장치내의 물질전달계수  $K$ 의 값인데 이는 기존자료가 없을 境遇 理論 및 實驗的 方法에 依해서 推定되어야 하며 이의 精確도가 장치의 精確도에 直接영향을 미치므로 注意를 요한다.

### 3.2 斷熱除濕裝置-에너지節約型 多孔質 充填層

作動空氣의 除濕을 爲하여 固體 또는 液體乾燥劑 또는 冷凍장치등을 이용한 여러가지 設備 장치가 使用되는데 여기서는 그중 高체전조제의 充填層에 對해서 살펴본다. 가습과정과 마찬가지로 製冰과정도 기계공학에서는 典型的인 열 및

물질전달의 複合現象例이다. 使用되는 固體 건조제는 매우 多孔性인 物質이며 많은 量의 습기를 吸收(absorb)하거나 吸着(adsorb)시키는 能力을 가지고 있다. 例를들면 실리카겔(silica-gel)의 경우 매우 작은 氣孔들로 인해 表面積對 體積의 比가 1000에서 50000[m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] 정도의 큰 값을 가진다. 熱力學的 Kelvin-Helmholz 關係式을 보면

$$P_v = P_{sat} \exp\left(\frac{2\sigma V_i}{rRT}\right)$$

$V_i$  : 액체의 比體積

$r$  : 微細孔(pore)의 半徑

로써  $r$ 이 작을수록 對應되는 습기의 分壓  $P_v$ 가 적은 것을 알 수 있다.

乾燥劑의 平衡特性은 그 氣空度(porosity)나 物理化學的 性質等에 따라 크게 틀리며 그 平衡 특성을 나타내는 方法도 여러가지이다. 空氣의 乾球 및 濕球溫度, 건조제의 水分含量, 吸着된 水分의 증기압 등이 이런 特性을 나타내는 파라미터가 되는데 그림 13은 실리카겔에 對하여 상대습도와 수분함량의 관계를 보인 것으로서 이 경우 溫度의 영향이 거의 없는 것을 볼 수 있다. 그림 14는 몇가지 商用의 건조제에 대하여 比較하여 보이는 것이다<sup>(48)</sup>. 여기서 실리카겔은 폭넓은 범위에서 線型的으로 습기를 흡착시키는 한편 Molecular Sieve는 낮은 상대습도에서 吸水

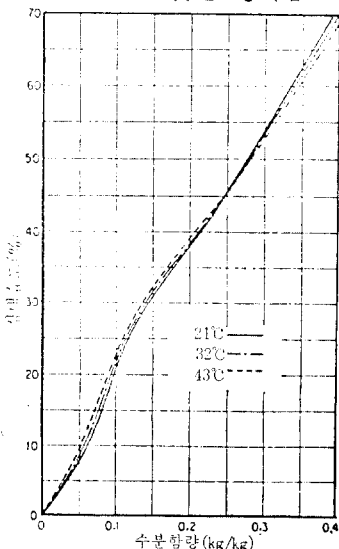
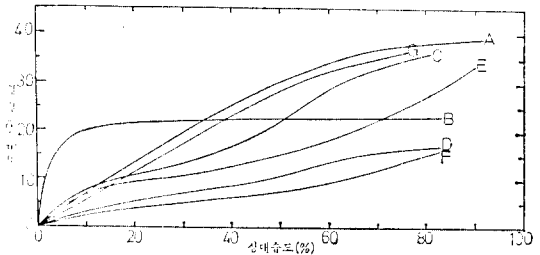


그림 13 실리카겔과 濕空氣의 平衡線圖



- A : Davison 실리카겔
- B : Davison Molecular sieves(Grade 512)
- C : 活性 알루미나(ALCO, H-151)
- D : 活性 알루미나(ALCO, F-1)
- E : 活性 알루미나(Kaiser Aluminum, KA-101)
- F : 活性 Bauxite(Floridin Co.)
- G : Sorbeads(Mobil Oil Co.)

그림 14 固體乾燥劑의 水分含量과 相對濕度

력이 크다는 것을 알 수 있는 등 건조제 선택에 도움을 준다.

습기가 많이 함유된 作動空氣는 그림 15에 보인바와 같이 充填層을 通過하면서 건조된다. 이때 공기의 습도곡선은 그림 16에 나타난것 같이 시간에 따라 충전층의 길이 방향으로 貫通하게 되며 이 곡선으로 表示된 부분(空氣의 습도가 變化하는 부분)을 “先端”(front)라고 한다. 先端이 충전층을 벗어나게 되면 건조제 충전층은 건조능력을 상실하게 되며 再生과정으로 處理된다. 그러나 空氣流動에 必要한 動力消耗을 절감하기爲한 最新의 장치들에서는 충전층의 두께가 先端

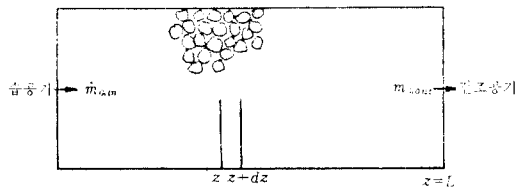


그림 15 固體乾燥劑 充填層

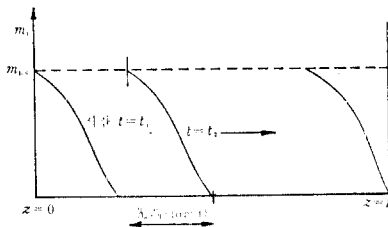


그림 16 濕空氣의 乾燥過程

의 두께에 비해 그다지 크지 않으며 이 경우 從來의 準定常(quasi-steady) 상태가 假定된 産業用 건조탑에 對한 설계차아트가 그대로 利用되지 못한다. 따라서 이러한 건조제 충전층의 과도(transient) 전달현상을 解析하기 爲한 努力이 기울여져 왔다<sup>(49~51)</sup>.

고체 건조제 장치 內의 傳達現象은 氣體側 전달현상과 고체측(solid-side 또는 bed-side) 전달현상으로 크게 區分할 수 있는데 現在까지는 後者에 對한 적절한 이론적 모델이 없으므로 단지 고체측 전달저항을 무시하든지 그것을 別途로 추정하여 보정하는 程度에 머물고 있다. 本節에서는 고체측의 전달저항이 무시된 경우(gas-side controlled)의 해석을 위한 數式모델을 먼저 제시하고 건조제 內部에서의 現象은 뒤에 따로 略述한다.

그림 17은 理論的 모델구성을 爲한 理想化된 시스템을 表示한다. 不添字 1, 2가 各各 水分 및 乾空氣를 나타낸다고 할 때 空氣側 및 건조제측의 물질保存(species conservation)들은 代數조작을 거쳐

$$\frac{\partial}{\partial z}(m_1 \dot{m}_c) = n_{1,s} \rho \quad (43)$$

$$\rho_b A_c \frac{\partial W}{\partial t} = n_{1,s} \rho \quad (44)$$

로 주어지며 여기서

$$\rho_b = \frac{\text{(건조제의 전체질량)}}{\text{(충전층 체적)}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$A_c : \text{충전층 단면적} \quad [\text{m}^2]$$

$$W : \text{건조제의 水分含量} \quad [\text{kg/kg}]$$

이다. 여기서  $W$ 는 完全乾燥된 경우를 基準으로 삼는다. 前節에서와 같은 理由로 物質傳達率

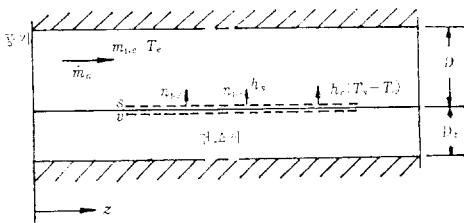


그림 17 固體乾燥劑 充填層의 理想化

(即 乾燥率)이 매우 작다고 假定하면

$$n_{1,s} = K(m_{1,s} - m_1)$$

이고 式 (43) 및 (44)는

$$\frac{\partial m_1}{\partial z} = \frac{K \rho}{\dot{m}_c} (m_{1,s} - m_1) (1 - m_1) \quad (45)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{K \rho}{\rho_b A_c} (m_{1,s} - m_1) \quad (46)$$

으로 쓸수 있다.

한편 에너지保存則들을 誘導하기 爲하여 濕空氣의 엔탈피는

$$h = \sum_{i=1}^2 m_i h_i \quad (47)$$

또한

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} (m_1 h_1 + m_2 h_2) \\ &= C_p \frac{\partial T}{\partial z} + (h_1 - h_2) \frac{\partial m_1}{\partial z} \end{aligned} \quad (48)$$

로 表示되며 乾燥劑이 엔탈피는

$$h_b = W h_{1,u} + h_{\text{solid}} \quad (49)$$

이다. 또 충전층의 比熱 및 吸着熱 ( $H_{\text{ads}}$ ; adsorption heat of water vapor)은 각각

$$C_b = W C_{p,1} + C_{\text{solid}} \quad [\text{J/kgK}] \quad (50)$$

$$H_{\text{ads}} = h_{1,s} - h_{1,u} \quad [\text{J/kg}] \quad (51)$$

임을 유의한다. 그리하여 다소 복잡한 수식조작을 거쳐 最終적으로 얻은 에너지方程式들은 空氣側과 건조제側에 對해 各各

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{K \rho}{\dot{m}_c} [Le^x + \gamma(m_{1,s} - m_1)] (T - T_s) \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_s}{\partial t} &= \frac{K \rho}{\rho_b A_c \gamma_b} \left[ Le^x (T - T_s) \right. \\ &\quad \left. - (m_{1,s} - m_1) \frac{H_{\text{ads}}}{C_p} \right] \end{aligned} \quad (53)$$

로 정리되며 여기서

$\gamma$  : 比熱比

$Le$  : Lewis 數

$x$  : 充填層 形狀에 따른 定數

를 나타낸다. 式 (45), (46) 및 (52), (53)은 熱力學的 平衡關係式

$$W = W(m_{1,s}, T_s, P) \quad (54)$$

와 함께 다섯개의 연립方程式을 이루며 적절한 初期 및 境界條件이 주어지면 다섯개의 未知數

$W, T_s, m_{1,s}, T, m_1$  을 구하기 爲해 풀려질 수 있다.

한편 이러한 이론적해석 內容으로부터 傳達能力의 單位  $N_{tu}$  와 質量比  $R$  (desiccant to air mass ratio)의 두가지 重要한 無次元 設計파라미터에 對한 定義를

$$N_{tu} = \frac{K\phi L}{\dot{m}_c} \quad (55)$$

$$R = \frac{\rho_b V}{\dot{m}_c \tau} \quad (56)$$

$L$ : 층전층의 길이

$\tau$ : 제습사이클의 시간

와 같이 도입할수 있는데 이들은 制約條件으로 흔히 주어지는 壓力降下 許容值

$$\Delta P = f \frac{\rho u^2}{2} \frac{L}{D_h} \quad (57)$$

$f$ : 마찰계수

$D_h$ : 水力直徑

등과 서로 相反되는 設計方向을 要求하게 되며 이로부터 시스템의 最適설계를 追求하게 된다.

이미 밝혔듯이 건조제 층전층의 最適설계를 위하여는 고체 건조제에 水分이 吸着되는 過程을 包含하는 物質傳達 現象을 分明히 파악하여야 한다. 이것은 기체측과 고체측의 전달현상으로 편의상 구분하게 되며 최근의 테프론(Teflon) 조직을 利用한 板形 건조제<sup>(51,52)</sup> 등에서는 板內部를 擴散하는 追加된 傳達抵抗, 即 板抵抗(plate resistance)가 存在한다(그림 18 참조).

氣體의 흐름(bulk stream,  $e$ -state)으로 부터 固體表面( $s$ -surface,  $s$ -state)까지 水分이 전달되는 現象이 氣體側의 問題로써 전달율이 적은 경우 제 2장에서 보듯이 그 전달계수  $K$ 는

$$n_{1,s} = K(m_{1,e} - m_{1,s}) \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}]$$

로 정의된다.  $K$ 는 물질전달의 누셀트數  $Nu_m$

또는 스탠튼數  $St_m$ 의 關係式으로부터 구해지며 그 資料가 구하기 힘든 경우등의 불가피한 경우에는 熱傳達關係式으로부터 類推하기도 한다. 例를들면 典型的인 充填層의 경우 關係式으로부터

$$St_m = 1.625 Re_d^{-1/2} Sc^{-2/3} \quad (58)$$

$$Re_d = \frac{\dot{m}d}{A_c \mu} \quad (59)$$

$$Sc = \frac{\nu}{\mathcal{D}_{12}} \quad (60)$$

$d$ : 층전물질의 직경

따라서

$$K = \frac{\dot{m}}{A_c} \cdot St_m \quad (61)$$

으로부터  $K$ 를 求한다.

板抵抗은 水分이 板의 조직을 투과하여 건조제 알맹이 표면에 到達하는 확산과정의 기술하며 이때 확산계수  $\mathcal{D}_{12}$ 는

$$\mathcal{D}_{12, \text{eff}} = \frac{\epsilon_v}{\tau_p} \mathcal{D}_{12}$$

와 같이 變形되어야 한다. 여기서

$\epsilon_v < 1$ : 板의 기공율(porosity)

$\tau_p > 1$ : 곡률 계수(tortuosity)

를 나타내며 적정하게 결정되어야 한다.

나머지 전달저항을 함께 묶어 고체측 전달저항(solid-side resistance)라 부른다. 이것의 실제현상은 매우 복잡하며

- (1) Knudsen 확산—비교적 큰 氣孔
- (2) 表面擴散(surface diffusion)—비교적 작은 氣孔
- (3) 吸着現象(adsorption kinetics)
- (4) 모세 작용(capillary action)—습도가 높은 경우

의 複合的 現象으로 추정된다<sup>(53,54)</sup>. 不幸히도 고체측 傳達抵抗도 영향의 多少만 判斷될 뿐 合當한 모델이 提示되지 못하고 있어 이 分野研究가 적극 要請되고 있다.

### 참 고 문 헌

- (46) Sherwood, T.K., R.L. Pigford and C.R. Wilke, *Mass Transfer*, McGraw Hill, N.Y., 1975

(9 페이지에 계속)

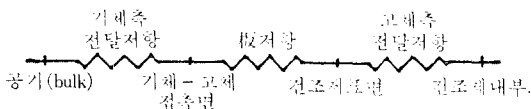


그림 18 固體乾燥劑 주위의 傳達抵抗