

그물 구조물에 의한 체단의 성능 향상에 관한 연구

조성용 · 최대기 · 이윤용

한국과학기술연구원 분리공정연구소
(1990년 1월 3일 접수, 1990년 3월 26일 채택)

A Study on Improvement of Sieve Tray Performance with Meshed Chamber

Sung Yong Cho, Dae Ki Choi and Youn Yong Lee

Separation Process Lab., KIST
(Received 3 January 1990; accepted 26 March 1990)

요 약

체단(Sieve Tray)에서 기-액간의 접촉 성능을 향상시키기 위하여 체단위에 그물 구조물(Meshed Chamber)을 설치하였을 때 수력학적 특성과 물질전달 특성을 설치하지 않았을 경우와 비교 고찰하였다. 수력학적 특성으로는 공기-물계를 사용하여 체단의 건조 압력강하와 전체 압력강하 그리고 체단위의 Clear Liquid Head를 비교하였으며 물질전달 특성은 탄산-중탄산 완충용액계에서 CO_2 흡수 실험결과로부터 기-액간 물질전달의 유효 계면면적을 구하여 비교 고찰하였다.

Abstract—In an effort to improve the contacting performance of a sieve tray, a meshed chamber was placed on the sieve tray. Its hydraulic and mass transfer characteristics were measured and compared with those of the sieve tray without the meshed chamber. The hydraulic characteristics of a sieve tray with a meshed chamber such as dry pressure drops, total pressure drops, and clear liquid heads on the tray were compared with the sieve tray alone using the air-water system. Effective interfacial areas on the tray were determined from CO_2 absorption experiments in K_2CO_3 - KHCO_3 buffer solution and compared with the tray with a meshed chamber.

1. 서 론

체단(Sieve Tray)은 증류나 흡수 등에 사용되는 기-액 접촉 장치로서 다른 장치에 비하여 설치비가 적게 들고 처리용량이 크며 장치의 오염도가 낮은 이점을 가지고 있어 화학공정에 널리 사용되고 있으며 이에 대한 수력학적 특성 및 물질전달 특성에 관한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다[1-7].

체단의 수력학적 특성과 물질전달 특성은 체단탑(Sieve Tray Column)의 처리용량과 안정성 뿐만 아

니라 분리 효율에 영향을 미치는 중요한 인자로서 체단탑 설계의 기본자료가 된다.

체단에서 기-액간의 유효 계면면적을 측정하는데는 광학적 방법(Optical Technique)[8]과 고속 사진 촬영법[9] 등이 있는데 광학적 방법은 빛을 투과시킬 때 “벽 효과(Wall Effect)”에 의해 오차가 발생하는 단점을 가지고 있으며 고속 사진 촬영법 역시 거품이 존재하는 기-액계에는 적합하지 못한 것으로 알려져 있다[4]. 위의 두 가지 방법보다도 오차를 줄이고 사용하기 편리한 방법으로써 Danckwerts와 Sharma[10, 11]가

제한한 화학반응에 의한 방법이 있다. 이 방법은 용액 중에 섞여있는 전해물질이 용액자체의 점도나 표면장력에 영향을 주어 오차를 발생시킬 수 있는 가능성을 내포하고 있지만 그 영향은 매우 작아서 무시할 만한 것으로 알려져 있다[7].

본 연구에서는 직경이 20 cm 이고 자유 면적비가 8.2%인 체단에서 K_2CO_3 - $KHCO_3$ 완충용액에 CO_2 를 흡수시키는 화학반응법으로 체단 위에서 기-액간의 유효 계면면적을 구하였으며 또한 기존의 체단보다 기-액 접촉 성능을 향상시키기 위하여 체단위에 그물 구조물(Meshed Chamber)을 설치하고 그 결과를 비교 고찰하였다.

2. 이론적 배경

체단에서 화학반응법을 사용하여 기-액간의 유효 계면면적을 구하기 위한 이론적 배경은 다음과 같다[10, 11].

일차반응이 수반되는 흡수계에서 물질수지식은 (1)식과 같이 표시할 수 있으며 이 때 경계조건들은 (2)와 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial \theta} = D \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - K_1 A \quad (1)$$

$$A=0, \quad X>0, \quad \theta=0$$

$$A=A^*, \quad X=0, \quad \theta>0 \quad (2)$$

$$A=0, \quad X=\infty, \quad \theta>0$$

(1)식을 Laplace 변환하면 (3)식과 같고 여기에 경계조건 (2)를 대입하여 풀면 (4)식을 얻을 수 있다.

$$D \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial x^2} = \bar{A} (k_1 + S) \quad (3)$$

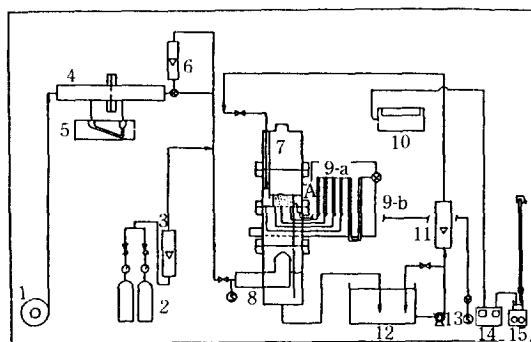
$$\bar{A} = A^* \cdot \exp \left[(-x/D) (DK_1 + K_1^2)^{0.5} \right] \quad (4)$$

Danckwerts[10, 11]는 액체의 표면에서 새로운 액체로 치환되는 것이 Age Distribution을 갖는다는 Surface Renewal Model을 제안하였으며 이 모델에 의하면 단위면적당 평균 흡수속도는 (5)식으로 쓸 수 있으며 이를 정리하면 (6)식이 된다.

$$\begin{aligned} \bar{R} &= S \cdot \int_0^\infty Re^{-s\theta} d\theta \\ &= -D (d\bar{A}/dx)_{x=0} \\ &= A^* \cdot (K_1^2 + DK_1)^{0.5} \end{aligned} \quad (5)$$

$$(Ra/A^* \cdot D^{0.5})^2 = a^2 K_1 + (K_1 a)^2 / D \quad (6)$$

결과적으로 (6)식에서 $(Ra/A^* \cdot D^{0.5})^2$ 와 K_1 의 관계를

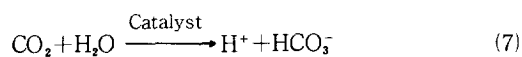


- | | |
|------------------------------|--------------------------|
| 1. Air blower | 2. CO_2 tank |
| 3. CO_2 rotameter | 4. Orifice meter |
| 6. Inclined manometer | 6. Air rotameter |
| 7. Sieve tray column | 8. Gas distributor |
| 9-a, 9-b. Manometer | 10. Recorder |
| 11. Liquid rotameter | |
| 12. Constant temp. reservoir | |
| 13. Pump | 14. pH Meter |
| 15. Magnetic stirrer | A. Overflow weir sampler |
| S. Sampling points | |

Fig. 1. Schematic flow diagram of experimental apparatus.

도시하여 그 기율기로부터 유효 계면면적을 구할 수 있다.

액상에서 촉매 반응에 의한 CO_2 의 전체 반응식은 (7)식으로 표시할 수 있으며 $NaOCl$ 촉매를 사용하였을 경우의 반응 속도식은 (8)식과 같이 표시할 수 있다.



$$r = K_1 [CO_2], \quad K_1 = K_{H_2O} + K_{OCl^-} [OCl^-] \quad (8)$$

또한 Phorecki[13]의 연구 결과로부터 K_{OCl^-} 은 (9)식과 같이 표시할 수 있다.

$$K_{OCl^-} = 1518 + 1318 [CO_3^{2-}] / [HCO_3^-] \quad (9)$$

3. 실험장치 및 방법

Fig.1은 본 연구에서 사용한 장치의 전체 흐름도이며 체단과 그물 구조물(Meshed Chamber)의 제원은 Table 1에 나타내었다. 수력학적 특성을 고찰하기 위하여 먼저 Orifice Meter에서 유량이 측정된 공기를 Distributor를 통하여 탑의 하부로 공급하면서 탑이 정상상태에 도달하였을 때 수주 Manometer를 사용하여 건조 압력강하를 측정하였다. 위와 같은 과정으로 유량을 변화시키면서 실험하였으며 또한 Fig.2와 같은

Table 1. Specification of a sieve tray and a meshed chamber

| Material | Polymethyl methacrylate |
|-----------------------------|-------------------------|
| Tray diameter | 20 cm |
| Tray thickness | 6 mm |
| Hole diameter | 3 mm |
| Pitch distance (Triangular) | 1 cm |
| Free area % | 8.2% |
| Tray spacing | 50 cm |
| Meshed chamber size | 32 Mesh Wire |

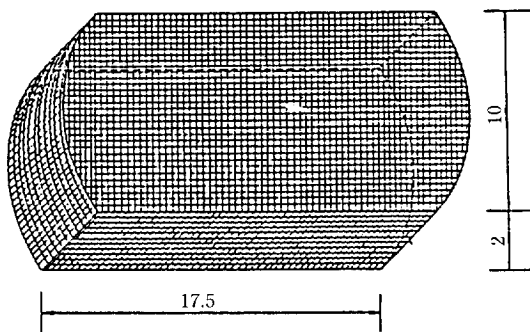


Fig. 2. Structure and size of a meshed chamber.

그물 구조물(Meshed Chamber)을 체단위에 설치하고 반복 실험하였다. 건조 압력강하의 측정이 끝난 후 일정한 공기 유속하에서($F_a=1.2$) 항온조에 저장된 증류수를 탑의 상부에 일정하게 공급하여 탑내에서 공기와 물이 향류(Countercurrent)로 흐르도록 하여 탑이 정상 상태에 도달하였을 때 탑내 현상을 관찰하고 체단의 전체압력 강하와 단위의 Dynamic Head, 그리고 Froth Height를 측정하였다. 체단위에서의 Dynamic Head는 위치에 따른 오차를 줄이기 위하여 체단의 위치에 따라 설치된 4개의 Tap을 통하여 측정하였으며 그 평균값을 취하였다. 위와 같은 실험을 액체의 유량을 변화시키면서 수행하였으며 그물 구조물(Meshed Chamber)을 설치하여 반복 실험하고 사진 촬영하였다.

체단에서 기-액간의 유효 계면면적을 측정하기 위하여 2%의 CO_2 를 함유한 공기를 일정한 유속($F_a=1.2$)으로 탑의 하부에 공급하고 Table 2와 같은 조성의 탄산-중탄산 완충 용액을 탑의 상부로 보내어 탑내에서 공기와 완충 용액이 향류로 흐르도록 한 뒤 일정 시간 경과 후 체단탑이 정상상태에 도달하면 Fig.3과 같이 Downcomer 뒤에 설치한 시료 채취기를 이용하여 액

Table 2. Composition of operating solution

| | |
|---------------------------------------|-------------------|
| K_2CO_3 | 0.6 g mol/l |
| KHCO_3 | 0.25 g mol/l |
| KCl | 1.94 g mol/l |
| NaOCl | 0.02-0.20 g mol/l |
| $[\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-]$ | 2.4 |

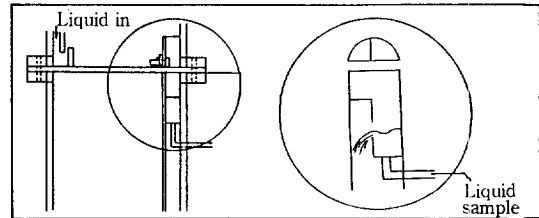
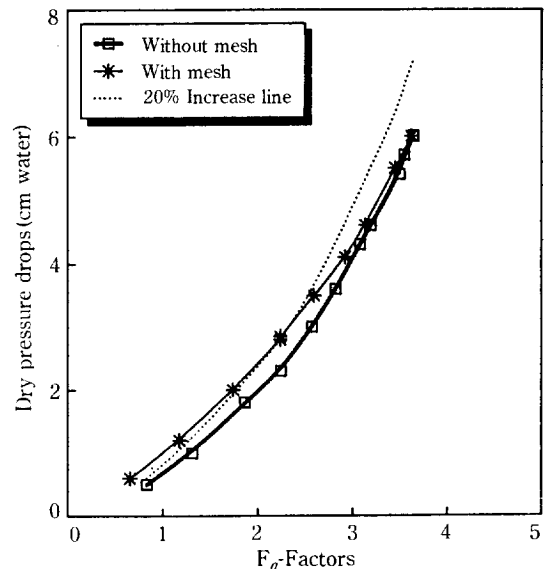
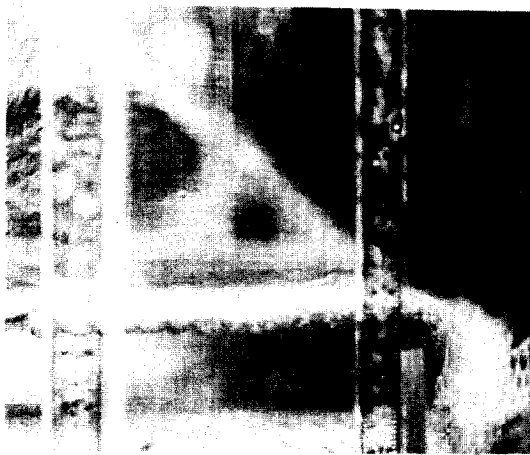


Fig. 3. Overflow weir sampler apparatus.

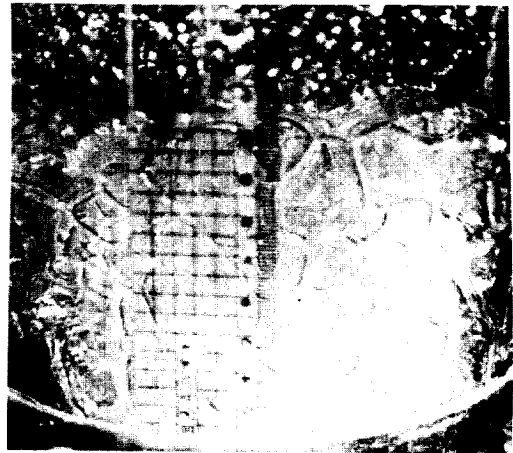
Table 3. Operating condition of effective interfacial area experiments

| | |
|--------------------|---|
| Liquid flow rate | 0.06-0.12 (m^3/h) |
| Fa-Factor | 1.2 ($\text{Kg}^{0.5}/\text{m}^{0.5} \cdot \text{s}$) |
| pH of solution | 10.2 |
| Liquid density | 1.0464 g/cm^3 |
| Liquid viscosity | 1.04 c.p. |
| Liquid temperature | $21 \pm 1^\circ\text{C}$ |
| Weir height | 3 cm |

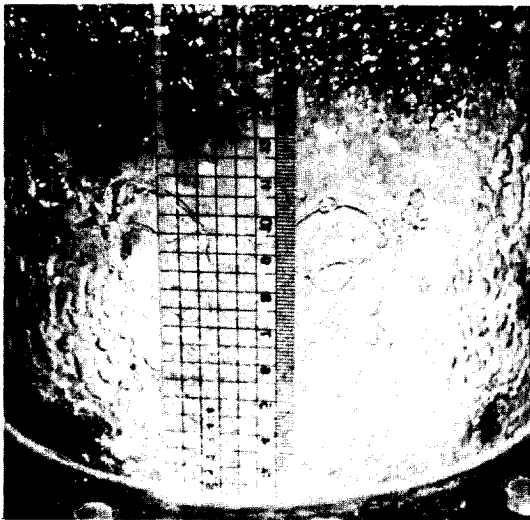
Fig. 4. Dry pressure drops against F_a -Factors.



(a) Static flow regime



(b) Cellular foam regime



(c) Froth regime without meshed chamber



(d) Froth regime with meshed chamber

Photo. 1. Photograph of phenomena in sieve tray operations.

체 시료를 채취하였다. 채취한 액체시료로부터 탄산, 중탄산 이온농도와 차아 염소산 이온농도를 측정하였다. 또한 그물 구조물을 설치하고 위와 같은 실험을 반복 수행하였으며 이 때 실험조건은 Table 3 과 같다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 수력학적 특성

Fig.4는 체단위에 그물 구조물을 설치하였을 경우와 설치하지 않았을 경우의 건조 압력강하의 실험치를 비교 도시한 것이다. 건조 압력강하는 그물 구조물을 설치한 경우가 설치하지 않은 경우에 비하여 기체의 유속

이 작은 영역에서는 20% 이상 크게 나타났으나 기체의 유속이 증가할수록 두 경우의 차이가 점점 줄어드는 경향을 보여주고 있는데 이는 Hole Reynolds Number가 작은 영역에서 기체의 마찰손실이 커지기 때문으로 볼 수 있다.

Photo 1은 본 연구에 사용한 체단탐에서 액체의 유속이 $0.12 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 일정할 때 기체의 유속이 증가함에 따른 탐내 현상을 사진 촬영한 것이다. 액체의 유속이 일정할 때 기체의 유속이 아주 작으면 체단위의 액체가 일체히 Hole을 통하여 아래로 흘러 내리는 Dumping 현상을 보이다가 기체의 유속이 조금씩 증가하면 Photo 1의 (a)와 같이 액체는 체단을 가로 질러

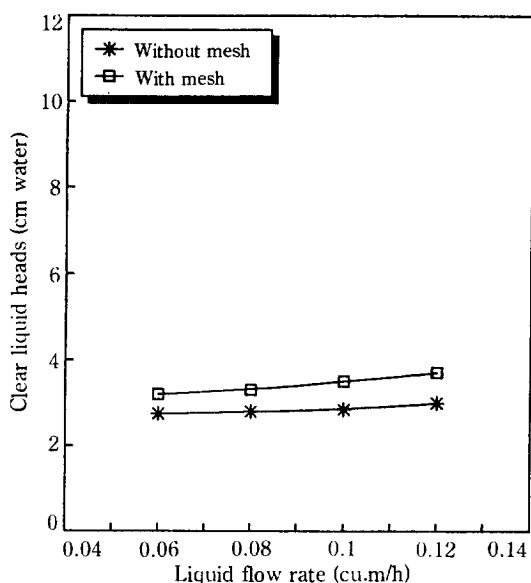


Fig. 5. Clear liquid heads against liquid flow rates at constant a F_a -Factor($F_a=1.2$).

Downcomer로 흐르게 된다. 또한 기체의 유속이 조금 더 증가하게 되면 Photo 1의 (b)와 같이 Cellular Foam을 형성하여 커다란 거품이 벽면에 달라 붙는 등 체단탑 효율에 좋지 못한 Regime을 형성하게 된다. 기체의 유속이 더욱 증가하게 되면 Photo 1의 (c)와 같은 Froth Regime이나 Spray Regime을 형성하게 되는데 일반적으로 증류탑의 효율은 이 두 Regime에서 좋은 것으로 보고되고 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 Froth Regime에서 기체의 유속을 일정하게 ($F_a=1.2$)하고 액체의 유량변화에 따른 그물 구조물(Meshed Chamber)의 효과를 고찰하였다. Photo 1의 (c)와 (d)는 액체의 유량이 일정할 때 체단위에 그물 구조물을 설치하지 않았을 경우와 설치하였을 경우를 비교한 것으로서 (c)의 경우에는 액체층 상부에서 많은 양의 액적이 기체에 의하여 Entrainment 되고 또한 Froth Height가 일정하지 못하며 Bubble의 크기가 균일하지 못한 반면에 (d)의 경우에는 Froth Height가 일정하게 유지되고 Bubble의 크기가 균일하게 부서져서 체단탑 운전이 매우 안정되는 현상을 보여 주었다.

체단위의 Clear Liquid Head는 실험에 의하여 측정된 Dynamic Head와 (10)식과 같은 Momentum Head의 합으로 표시할 수 있으며 기체의 유속이 일정할 때 액체의 유속에 따른 결과치를 Fig.5에 도시하였다.

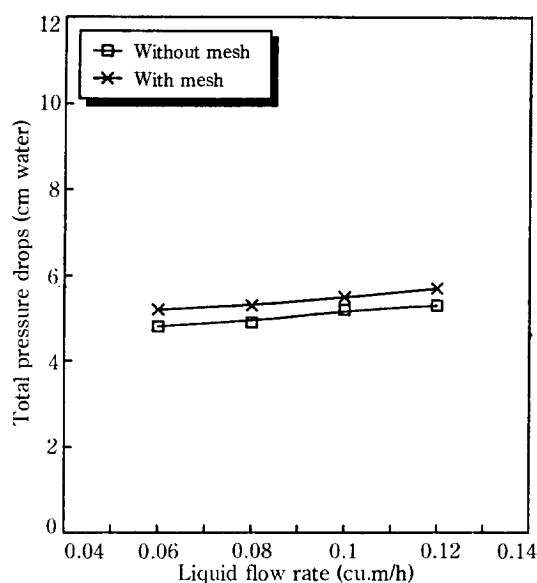


Fig. 6. Total pressure drops against liquid flow rates at constant a F_a -Factor ($F_a=1.2$).

$$h_m = 99.84 (\rho_v / \rho_L) U_a (U_h - U_a) / g \quad (10)$$

Fig.5에서 액체의 유량이 증가함에 따라서 Clear Liquid Head가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 액체의 유량이 증가함에 따라서 Weir 위에 Crest의 높이가 증가하기 때문이라고 생각할 수 있다. 또한 Fig.5에 Meshed Chamber를 설치하였을 경우를 비교 도시하였는데 이 경우에 Clear Liquid Head는 Meshed Chamber를 설치하지 않았을 경우보다 약 10% 정도 증가하는 경향을 보여 주었다.

Fig.6은 기체의 유속이 일정할 때 ($F_a=1.2$) 액체의 유량에 따른 체단의 전체 압력강하의 실험결과를 비교한 것으로서 액체의 유량이 증가할수록 체단에서의 전체 압력강하가 증가하는 경향을 나타내는데 이는 체단에서의 전체 압력강하는 건조 압력강하와 Clear Liquid Head, 그리고 잉여 압력강하의 합으로 표시할 때 액체의 유량 증가에 의하여 체단위에 Clear Liquid Head가 증가하는 것이 주원인이라 볼 수 있다. 또한 Fig.6에서 Meshed Chamber를 설치하였을 때 체단에서의 전체 압력강하는 설치하지 않았을 경우에 비하여 약 8% 정도 증가하는 것을 볼 수 있다.

4-2. 유효 계면면적

Fig.7은 체단에서 기-액간의 유효 계면면적을 구하기 위하여 CO_2 흡수 실험결과를 액체의 유량에 따라

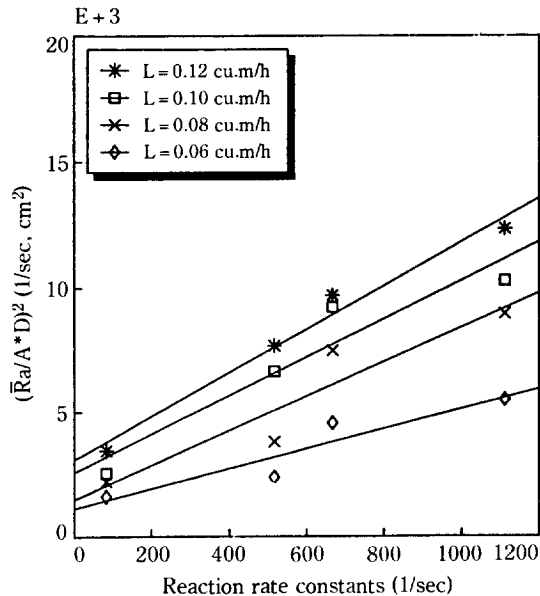


Fig. 7. Danckwerts' plot for a sieve tray alone at various liquid flow rates.

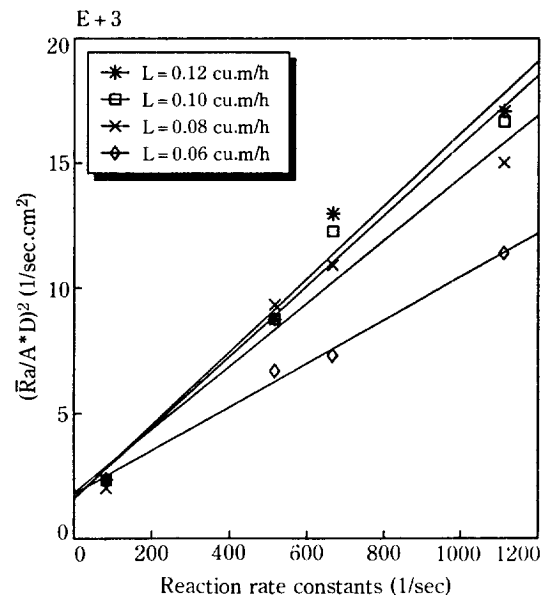


Fig. 9. Danckwerts' plot for a tray with a mashed chamber at various liquid flow rates.

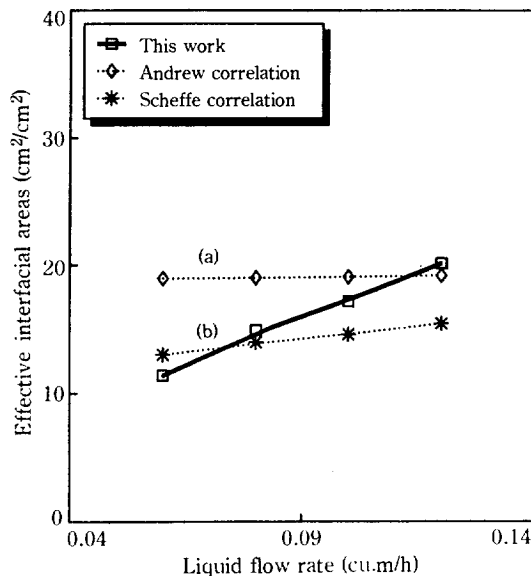


Fig. 8. Effective interfacial areas at various liquid flow rates.

Danckwerts' Plot 한 것이다. 이 그림에서 각각의 기울기로부터 기-액간의 유효 계면면적(Effective Interfacial Area)를 구하였으며 이를 Fig.8에 도시하였다. 여기서 체단의 유효 계면면적은 액체의 유량이 증가함에 따라서 증가하는 경향을 보여 주었다.

Fig.8에서 (a)는 Andrew[5, 14]가 제안한 Bubble Cap Tray에서의 유효 계면면적에 대한 (11)식을 이용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다.

$$a_s = 325 U_a^{0.5} Z_c^{0.83} \quad (11)$$

(11)식에서 Clear Liquid Depth(Z_c)는 F_a -인자와 Weir Height, 그리고 액체의 유량에 의하여 영향을 받는 값으로서 이것은 (12)식과 같이 표시할 수 있다 [13].

$$Z_c = 0.0254 (1.65 + 7.48W + 80.5L_F - 0.533F_a) \quad (12)$$

또한 Fig.8의 (b)는 Scheffe 등[14]이 제안한 Valve Tray에서의 유효 계면면적에 관한 (13)식에 의하여 계산된 값을 도시한 것이다.

$$a_s = 2.27 Re_b^{0.375} Re_L^{0.247} W^{0.515} \quad (13)$$

Fig.8에서 계산값과 본 연구 결과와의 차이는 Bubble Cap Tray나 Valve Tray 그리고 Sieve Tray의 고유특성 즉 기체가 통과하는 Hole의 갯수나 기체가 단을 통과할 때의 운동 방향, 그리고 geometry 등의 차이에 기인한다고 볼 수 있으며 또한 Sieve Tray에서의 유효 계면면적에 대하여 Charpentier[15]는 16-40 cm^2/cm^2 으로 보고하였는데 본 연구의 결과는 거의 이 범위내에 있음을 Fig.8에서 볼 수 있다. 체단탑에서 기-액간의 유효 계면면적에 대한 과거의 연구 결과들

Table 4. Results of effective interfacial area of previous and present works [7]

| | Hole dia., in. | L, gpm/ft | u_A , ft/s | a , cm^{-1} | k_L , cm/s | Tech.* |
|--------------------------|----------------|-----------|--------------|------------------------|--------------|--------|
| Calderbank et al. | | | | | | |
| Sieve tray 4 × 3 in. | 1/8 | 2.2 | 0.3-2.5 | 3-8 | 0.01-0.65 | O |
| West et al. | | | | | | |
| 3.25in. dia. sieve tray | 1/8 | 0.6-1.0 | 2.7 | 4-5 | ... | H |
| De Goederen | | | | | | |
| 10 cm dia. sieve tray | 1/8 | Static | 0.9-1.5 | 3-4 | ... | H |
| Gupta and Sharma | | | | | | |
| 10 cm dia. sieve | 1/8 | Static | 3-7 | 2-2.5 | ... | C |
| Smith and Wills | | | | | | |
| 4 in. dia. sieve | 1/8 | 0.1-0.4 | 0.5-2.0 | 3.5 | ... | H |
| Porter, Davies, and Wong | | | | | | |
| 4 × 3 in. sieve | 1/8 | 0.05-0.06 | 1-3 | 1-3 | ... | O |
| Barrett | | | | | | |
| 1 × 1 ft sieve | 7/32 | Static | 1.5-5.5 | 2.4 | ... | C |
| Pasink-Bronikowska | | | | | | |
| 1 × 1 ft sieve | 7/32 | Static | 2.0 | 2-2.28 | ... | C |
| Pohorecki | | | | | | |
| 1 × 1 ft sieve | 7/32 | Static | 2.8 | 2.64 | 0.025-0.035 | C |
| Harris and Roper | | | | | | |
| 1 ft dia. sieve | 3/16 | 0-18 | 3.8 | 2.7-4.0 | ... | C |
| Present study | | | | | | |
| 20 cm dia. sieve | 1/8 | 0.53-1.06 | 3.46 | 2-2.96 | ... | C |

*Technique: O; optical, H; gas holdup, C; chemical.

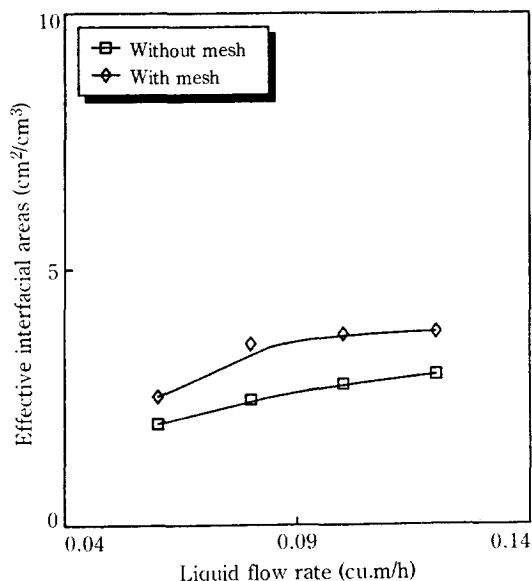


Fig. 10. Comparison of effective interfacial areas of a sieve tray alone with a sieve tray with a meshed chamber.

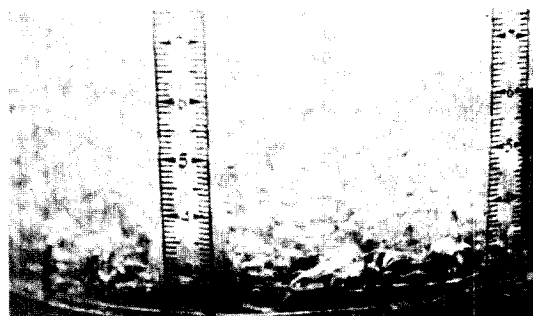


Photo 2. Photograph of phenomenon in a sieve tray with a meshed chamber.

[7]과 본 연구의 결과를 Table 4에 정리하였다.

Fig. 9는 체단위에 그물 구조물(Meshed Chamber)를 설치하고 실험한 결과를 Danckwerts' Plot 한 것이며 이 그래프의 기울기로부터 구한 각 유량에서의 Froth Volume 당 기-액간의 유효 체면면적과 체단만을 사용하였을 경우를 Fig. 10에 비교 도시하였다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 체단위에 그물 구조물을 설치하였을 경우가 설치하지 않았을 경우에 비하여 약

25-28% 정도 증가하였는데 이는 Photo 2에서 보듯이 그물 구조물을 통과한 기포는 잘게 부서질 뿐만 아니라 그 크기도 균일하게 되어 기-액간의 계면면적을 증가시키는 것으로 볼 수 있다.

5. 결 론

1. 체단위에 그물 구조물을 설치함으로써 Clear Liquid Head는 설치하지 않았을 경우에 비하여 약 10% 증가하였으며 전체 압력강하는 약 8% 증가하였다.

2. 체단위에 그물 구조물을 설치함으로써 액체의 Entrainment가 현저하게 줄어들고 Bubble이 작고 균일하게 부서지며 Froth Height가 일정하게 되어 체단탑의 운전이 안정되는 것을 관찰할 수 있었다.

3. Froth Regime에서 기체의 유속이 일정할 때 액체의 유량이 증가함에 따라서 기-액간의 유효 계면면적은 증가하였으며 액체의 유량이 0.06-0.12 m³/h의 범위에서 Froth Volume당 유효 계면면적은 2.00-2.96 cm²/cm³이었다.

4. 체단위에 그물 구조물을 설치함으로써 설치하지 않았을 경우에 비하여 기-액간의 유효 계면면적이 약 25-28% 증가하였다.

NOMENCLATURE

- a : effective interfacial area per unit volume [cm²/cm³]
 a_s : effective interfacial area per unit area [cm²/cm²]
 A : concentration of substance in solution [gmol/cm³]
 A* : concentration of dissolved gas at interface [gmol/cm³]
 \bar{A} : Laplace transformation of A [gmol/cm³]
 d : characteristic length, taken as 1 m
 D : diffusivity of dissolved gas [cm²/sec]
 F_a : F-factor for active area = U_a ρ^{0.5} [Kg^{0.5}/m^{0.5}.sec]
 g : gravitational acceleration [m²/sec]
 h_{ow} : crest over the weir [cm]
 h_M : momentum head [cm water]
 k₁ : first order reaction rate constant [1/sec]
 k_L : liquid film mass transfer coefficient [cm/sec]
 L : liquid flow rate [m³/h]
 L_F : liquid flow rate per unit average flow path width [m³/sec m]
 \bar{R} : average rate of absorption per unit area

- [gmol/cm².sec]
 r : rate of reaction of soluble gas per unit volume [gmol/cm³.sec]
 Re_G : gas phase Reynolds number
 Re_L : liquid phase Reynolds number
 S : fractional rate of surface renewal [1/sec]
 U_a : superficial gas velocity for active area [m/s]
 U_h : superficial gas velocity for hole area [m/s]
 W : weir height [cm]
 W' : dimensionless weir height (= W/d)
 X : distance [cm]
 Z_c : clear liquid head [cm water]

Greek Letters

- ρ_L : liquid density [Kg/m³]
 ρ_v : gas density [Kg/m³]
 θ : time [sec]

REFERENCES

- Hughmark, G.A. and O'Connell, H.E.: *Chem. Eng. Prog.*, **53**, 127 (1957).
- Liebson, J., Kelly, R.E. and Bullington, L.A.: *Pet. Refiner*, **36**, 127 (1957).
- Thomas, W.J. and Ogboja, O.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **17**, 429 (1978).
- Hag, M.A.: *Hydrocarbon Processing*, April, 165 (1982).
- Lockett, M.J.: "Distillation Tray Fundamentals", 1st ed., Cambridge University Press, London, (1986).
- Prince, R.G.H. and Chan, B.K.C.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **43**, T49 (1965).
- Thomas, W.J. and Haq, M.A.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **15**(4), 509 (1976).
- Calderbank, P.H. and Moo Young, M.B.: *Chem. Eng. Sci.*, **16**, 39 (1961).
- West, B.F., Gilbert, W.G. and Shimizu, T.: *Ind. Eng. Chem.*, **44**, 2470 (1952).
- Danckwerts, P.V.: "Gas-Liquid Reaction", McGraw-Hill, New York (1971).
- Roberts, D. and Danckwerts, P.V.: *Chem. Eng. Sci.*, **17**, 961 (1962).
- Thomas, W.J. and Campbell, M.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **45**, 53 (1967).
- Pohorecki, R.: *Chem. Eng. Sci.*, **31**, 637 (1976).
- Scheffe, R.D. and Weiland, R.F.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**, 228 (1987).
- Charpentier, J.C.: "Advances in Chemical Engineering", Academic New York, (1981).