

## 단효율에 미치는 액적의 비말동반과 방울흐름의 영향

김성철 · 송규민 · 홍원희 · 이 혼 · 양승만

한국과학기술원 화학공학과  
(1991년 5월 20일 접수, 1991년 8월 17일 채택)

## The Effect of the Liquid Entrainment and Weeping on the Plate Efficiencies

Sung Chul Kim, Kyu Min Song, Won Hi Hong, Huen Lee and Seung Man Yang

Department of Chemical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology  
(Received 20 May 1991; accepted 17 August 1991)

### 요 약

다단탑의 단효율에 미치는 액체의 비말동반과 방울흐름의 영향을 이론적으로 고찰하였다. 판위의 물질수지식에서 액상의 진행 방향 뿐 아니라 수직 방향으로도 농도분포가 존재할 경우의 모델을 분석하고 일부결과를 그림으로 나타내었으며 기존실험결과와 비교하였다.

**Abstract**—The effects of liquid entrainment and weeping on the plate efficiencies of the multistage column are theoretically analysed. The presented model assumes the existence of concentration profile both in the liquid flowing direction and in the radial direction. Sample results are shown graphically and compared with the experimental data reported in the literatures.

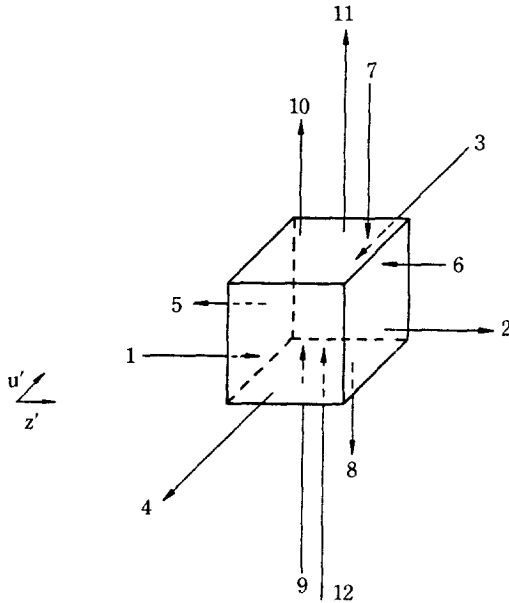
### 1. 서 론

다공판은 포모판에서보다 액체의 체류량이 적고 수력구배도 낮으며 더 큰 조업 용량을 갖고 있을 뿐 아니라 간편하고 경제적으로 제작할 수 있다는 장점을 갖고 있어 다단 증류탑에 많이 사용되고 있으나 안정된 조업을 수행하기가 쉽지 않다. 다공판에서의 조업상 불안정성은 액체와 증기의 우회에 의한 불충분한 접촉, 액체에 의한 증기의 동반흐름, 수력학적 불안정에 기인하며 이들이 단효율에 미치는 영향은 매우 크다.

증류탑의 단효율을 예측하기 위하여는 먼저 점효율(point efficiency)을 정확히 산출할 수 있어야 하며 그 다음에는 점효율과 단효율(plate efficiencies)과의 상관관계를 알아야 한다. 점효율과 단효율의 관계를 기술하는 모델에서는 액상의 혼합, 기상의 혼합, 액체의

체류시간 등의 수력학적 특성이 고려되어야 한다. 그래서 증류탑에서의 단효율 또는 판효율은 많은 사람들이 연구하여 액상과 기상의 혼합정도에 따라 구분하고[1], 여러 가지 모델을 제시하였으며 평형에 도달하지 못한 상태를 수학적 표현을 통하여 설명하고 있다[2-6].

실제의 증류탑은 비말동반과 방울흐름이 쉽게 일어나는 상태로 조업되기 때문에 액체흐름의 불균일성과 역혼합에 의해 판위에서의 혼합정도가 달라지고 판위에서 액체의 혼합은 기액평형의 도달에 지대한 영향을 미친다[7,8]. 그러므로 단효율을 기술하는 모델식에는 비말동반과 방울흐름의 영향이 고려되어야 하며, Colburn[9]은 처음으로 단위에서 액상의 완전혼합을 가정하고 평형선과 작업선이 나란한 경우에 액체의 비말동반과 단효율에 관한 모델을 제시하였다. Kageyama[10]는 Lewis의 첫번째 경우 즉 기체가 단에 들어오기



1.  $L(1+e-w)x$
2.  $L(1+e-w)\left(x + \frac{\partial x}{\partial z} dz\right)$
3.  $D_e C_{LF} S \left( \frac{\partial x}{\partial u} \right)$
4.  $D_e C_{LF} S \left( \frac{\partial x}{\partial u} + \frac{\partial^2 x}{\partial u^2} du \right)$
5.  $D_e C_{LF} S \left( \frac{\partial x}{\partial z} \right)$
6.  $D_e C_{LF} S \left( \frac{\partial x}{\partial z} + \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} dz \right)$
7.  $L_w x_n dz$
8.  $L_w x_n dz$
9.  $L_e x_{n-1} dz$
10.  $L_e x_n dz$
11.  $G y dz$
12.  $G y_{n-1} dz$

Fig. 1. Mass balance over dispersion on incremental area of plate  $n$ , allowing for liquid flow (1, 2), vapor flow (11, 12), liquid mixing (3, 4, 5, 6), entrainment (9, 10) and weeping (7, 8).

전에 완전히 혼합된다고 가정하고 액상의 비말동반과 방울흐름을 고려하여 액체의 진행 방향으로의 농도변화를 고찰하였으나 Murphree 단효율을 계산할 때에 액상의 완전혼합을 적용하였다. Koziol[11]은 액상의 비말동반과 방울흐름 뿐 아니라 액상의 부분적인 혼합에 대해서도 고려를 하였고 액상의 진행 방향으로만 농도차가 생긴다고 가정하였으며 계산결과를 기존의 실험값[5]과 비교하였다.

본 연구에서는 액체의 비말동반과 방울흐름이 단효율에 미치는 영향을 이론적으로 고찰하고, 액상의 진행 방향 뿐만 아니라 진행방면의 수직 방향으로도 농도차가 있는 모델에서의 문제를 풀었으며, 계산결과를 단의 길이, 점효율, Peclet 수, 방울흐름 및 비말동반율 등의

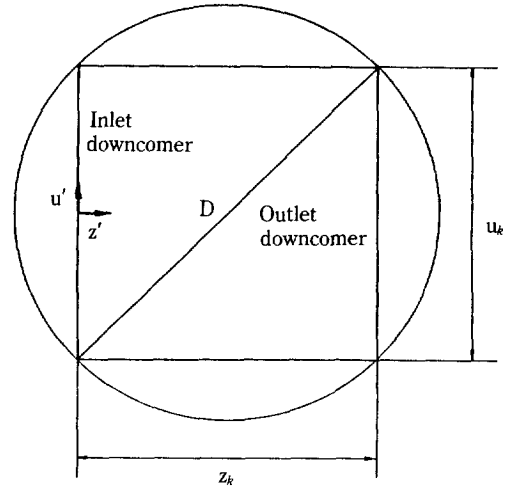


Fig. 2. Coordinate system.

함수로 표시하였고 일부의 기존 실험값과 비교하였다.

## 2. 이론적 고찰

다공판으로 구성된 다단탑의 정류부의 임의의  $n$ 번째 단에서 비말동반과 방울흐름이 동시에 일어나고 액체의 부분혼합이 이루어지는 경우가 Fig. 1에 그려져 있다. 그림의 액체 덩어리에 대하여 분산모델(dispersion model)에 의한 물질수지를 고려할 때 다음과 같은 가정을 하였다.

(1) 단 위에서 와류분산계수(eddy dispersion coefficient)  $D_e$ 값이 일정하다.

(2) 액체는 단으로 흐르기전에 완전히 혼합되거나 어떤 농도구배를 갖으며 기체는 단 사이에서 완전히 혼합된다.

(3) 고찰하는 단과 전후의 단에서 기액평형식은 직선으로 표현되며 단에서의 점효율  $E_{\text{ox}}$ 는 일정하다.

(4) 단 위에서 액상과 기상의 흐름량이 일정하다.

(5) 단 위에서 발생하는 액상의 비말동반과 방울흐름의 양이 일정하고 그 농도는 단 위에서 고려하는 성분의 평균값에 해당한다.

(6) 액상흐름의 수직방향으로도 농도차가 존재하며 농도분포는 액상흐름의 중심축에 대하여 대칭이다.

사용한 좌표축은 Fig. 2와 같으며 문제를 간단히 하기 위하여 탑 벽면의 정제 영역을 무시한 사각형의 단면을 고찰하였다. 위와 같은 가정하에 휘발도가 제일 큰 성분에 대한 정상상태 물질수지식은 다음과 같다.

$$D_e C_{LF} \left[ \frac{\partial^2 x}{\partial z'^2} dz' \frac{du'}{u_k} + \frac{\partial^2 x}{\partial u'^2} du' \frac{dz'}{z_k} \right] - L \frac{\partial x}{\partial z'} dz' \frac{du'}{u_k}$$

$$+ G(y_{n-1} - y) \frac{dz'}{z_k} \frac{du'}{u_k} + Le(x_{n-1} - x_n) \frac{dz'}{z_k} \frac{du'}{u_k} \\ + L_w(x_{n+1} - x_n) \frac{dz'}{z_k} \frac{du'}{u_k} = 0 \quad (1)$$

그리고 경계조건은 액상의 흐름 방향으로는 그 농도가 일정한 값이거나 또는 어떤 구배를 갖고 유입되어 기상과의 접촉후 그 단을 떠나는 조건 즉

$$z'=0 \text{에서 } x=(u') \quad (2)$$

$$z'=z_k \text{에서 } x=\text{finite} \quad (3)$$

이며, 또한 액체의 진행 방향과 수직을 이루는 방향으로 농도분포가 대칭이라는 조건으로부터

$$u'=0 \text{에서 } \frac{\partial x}{\partial u'} = 0 \quad (4)$$

이고, 탑 벽면의 정체영역으로 물질전달이 없다는 가정에서

$$u' = \frac{u_k}{2} \text{에서 } \frac{\partial x}{\partial u'} = 0 \quad (5)$$

가 된다. 이 식들을 무차원화하면

$$\frac{1}{Pe'} \left[ \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} + \frac{1}{(u_k/z_k)} \frac{\partial^2 \xi}{\partial u'^2} \right] - \frac{\partial \xi}{\partial z} - \lambda' E_{og} \xi \\ + \lambda' E_{M1} \alpha = 0 \quad (6)$$

$$\text{B.C. at } z=0, \quad \xi = \xi(u) \quad (7)$$

$$z=1, \quad \xi = \text{finite} \quad (8)$$

$$u=0, \quad \frac{\partial \xi}{\partial u} = 0 \quad (9)$$

$$u = \frac{1}{2}, \quad \frac{\partial \xi}{\partial u} = 0 \quad (10)$$

여기에서 사용된 무차원수들은 다음으로 정의되고 사용된 부호의 설명은 끝에 나와 있다.

$$Pe' = Pe(1 + e - w) \quad (11)$$

$$Pe = \frac{Lz_k}{D_i C_{LF} S} \quad (12)$$

$$\lambda' = \frac{\lambda}{(1 + e - w)} \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{mG}{L} \quad (14)$$

$$E_{og} = \frac{y - y_{n-1}}{y^*(x) - y_{n-1}} \quad (15)$$

$$E_{MV} = \frac{y_n - y_{n-1}}{y^*(x_n) - y_{n-1}} \quad (16)$$

$$\xi = \frac{x - x_n^*}{x_n - x_n^*} \quad (17)$$

$$\alpha = 1 - (1 + e - w) \left[ \frac{1 + (E_{og}/E_{MV})(\lambda - 1)}{\lambda} \right] \quad (18)$$

이를 이용한 (6)식의 일반해는 경계조건에 의해 다음으로 쓸 수 있다.

$$\xi(z, u) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp \left[ \left( Pe' - \left\{ Pe'^2 + 4Pe' \left( \lambda' E_{og} + \frac{4n^2 \pi^2}{Pe' (u_k/z_k)} \right) \right\}^{1/2} \right) \left( \frac{z}{2} \right) \right] \cos(2n\pi u) \\ + \left( 1 - \frac{E_{MV}}{E_{og}} \alpha \right) f(z) + \frac{E_{MV}}{E_{og}} \alpha \quad (19)$$

여기서

$$f(z) = \frac{\exp[(D + Pe')(z - 1)]}{1 + \frac{D + Pe'}{D}} + \frac{\exp[D(1 - z)]}{1 + \frac{D}{D + Pe'}} \quad (20)$$

$$D = \frac{Pe'}{2} \left[ \left( 1 + \frac{4\lambda E_{og}}{Pe'} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (21)$$

이다. 그런데 단입구의 경계조건  $z=0$ 에서

$$\xi(0, u) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2n\pi u) + A_0 \quad (22)$$

이고

$$A_0 = \left( 1 - \frac{E_{MV}}{E_{og}} \alpha \right) f(0) + \frac{E_{MV}}{E_{og}} \alpha \quad (22a)$$

이므로 Fourier cosine transformation을 수행하면

$$A_n = 2 \int_{-1/2}^{1/2} g(u) \cos(2n\pi u) du \quad (23)$$

그리고

$$g(u) = \xi(0, u) - A_0 \quad (23a)$$

가 되어, 단으로 들어오는 농도분포  $\xi(u)$ 에 따라 일반해가 결정된다. 예로써

$$(i) \ g(u) = \text{const.인 경우 } A_n = 0$$

$$(ii) \ g(u) = |u|, \ A_n = \frac{(-1)^n - 1}{n^2 \pi^2}$$

$$(iii) \ g(u) = u^2, \ A_n = \frac{(-1)^n}{n^2 \pi^2}$$

가 된다.

이제 고려하는 단전체에 대한 효율을 알기 위하여는  $u$ 와  $z$ 에 대하여 이중 적분을 하면 된다. 먼저  $u$ 에 대하여 (6)식을 적분하면 액상의 진행 방향의 임의의 점  $z$ 에서의  $u$ 방향으로의 평균농도는 다음으로 표현되며,

$$\xi'(z) = \int_{-1/2}^{1/2} \xi(z, u) du \quad (24)$$

이 정의에 의해 (6)식은 Koziol[11]의 모델식과 같은 형태로 표현되며

$$\frac{1}{Pe'} \left( \frac{d^2 \xi'}{dz^2} \right) - \frac{d\xi'}{dz} - \lambda' E_{og} \xi' + \lambda E_{MV} \alpha = 0 \quad (25)$$

이 식의 일반해는 다음과 같다.

$$\xi'(z) = \left( 1 - \frac{E_{MV}}{E_{og}} \alpha \right) f(z) + \frac{E_{MV}}{E_{og}} \alpha \quad (26)$$

그리고 (25)식을 다시  $z=0$ 에서 임의의 점  $z$ 까지 적분하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{Pe'} \frac{d\xi'}{dz} \Big|_0^z - \xi' \Big|_0^z - z \lambda' [E_{ap}(z) - \alpha E_{MV}] = 0 \quad (27)$$

이제 가정에 의해 평형관계가

$$y_n^* = m x_n + b \quad (28)$$

의 직선식으로 표현될 때에, 단의 입구에서 임의의 점  $z$ 까지의 평균단효율(local average efficiency)  $E_{ap}(z)$ 을 정의하면 (27)식에 의해 다음으로 계산할 수 있다.

$$E_{ap}(z) = \frac{1}{z \lambda'} \left[ \frac{1}{Pe'} \frac{d\xi'}{dz} \Big|_0^z - \xi' \Big|_0^z + z \lambda' \alpha E_{MV} \right] \quad (29)$$

여기서 평균단효율  $E_{ap}(z)$ 과 점효율(point efficiency)  $E_{og}$  그리고 머프리증기효율(Murphree vapor efficiency)  $E_{MV}$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{E_{ap}(z)}{E_{og}} = \frac{1}{z} \int_0^z \xi'(z) dz \quad (30)$$

$$\frac{E_{MV}}{E_{og}} = \int_0^1 \xi'(z) dz \quad (31)$$

그러므로 액상이 단을 떠나는 웨어(weir)에서는 즉  $z=$

1에서는

$$E_{ap}(1) = E_{MV} \quad (32)$$

가 성립하고, Murphree vapor efficiency는 (26)과 (31)식에 의해 다음으로 계산할 수 있다[11].

$$\frac{E_{MV}}{E_{og}} = \frac{F}{1 + \alpha(F-1)} \quad (33)$$

여기서

$$F = \frac{1 - \exp[-(D + Pe')]}{(D + Pe') \left( 1 + \frac{D + Pe'}{D} \right)} + \frac{\exp(D) - 1}{D \left( 1 + \frac{D}{D + Pe'} \right)} \quad (34)$$

으로 AIChE의 식[4]과 같으며 액상의 혼합정도를 나타내는  $Pe$ 값이  $\infty$ 인 경우에는 Lewis의 case I[1]의 결과와 같으며  $Pe=0$ 인 완전혼합에서는  $E_{MV} = E_{og}$ 가 된다. 그러나 Murphree 단효율을 계산하기 위하여는 (18)식으로 정의된  $\alpha$ 값을 알아야 하며  $\lambda=1$ 이 아닌 경우에는, 보정평균 단효율  $E_{ca}$ 와 Murphree 단효율과의 비를 알아야 한다. Murphree 단효율은 정상적으로 단으로 유입되고 유출된 액상과 기상의 농도로 정의된 것이고 액상의 비탈동반과 방울흐름의 영향을 고려한 것이 아니기 때문에 이들의 영향을 고려한 보정평균 단효율을 계산하여야 하며 보정평균 단효율은 다음과 같이 웨어에서의 값으로 정의되어 있다.

$$E_{ca} = \frac{Y_n - Y_{n-1}}{y_n^*(\bar{x}_n) - Y_{n-1}} \quad (35)$$

여기서

$$Y_n = \frac{L}{G} \bar{x}_{n+1} + \left( 1 - \frac{L}{G} \right) x_D \quad (36)$$

$$\bar{x}_n = (1-w) \bar{x}_n + w x_n \quad (37)$$

그런데 보정평균 단효율은 고려하는 단부위(column section)에서의 성분 물질수지와  $n$ 번째 단에서의 성분 물질수지로부터 구할 수 있으며 최종적으로는 다음의 식으로 계산된다[11].

$$AE_{ca}^2 + BE_{ca} - E_{MV} = 0 \quad (38)$$

$$A = (\lambda - 1)(1 + e) \left\{ 1 + \frac{wM}{(1 + e)} \right\} \quad (39)$$

$$B = 1 + e E_{MV} + M \left\{ \frac{w}{(1 + e)} - K \right\} - (\lambda - 1) \{ E_{MV} + MK \} \quad (40)$$

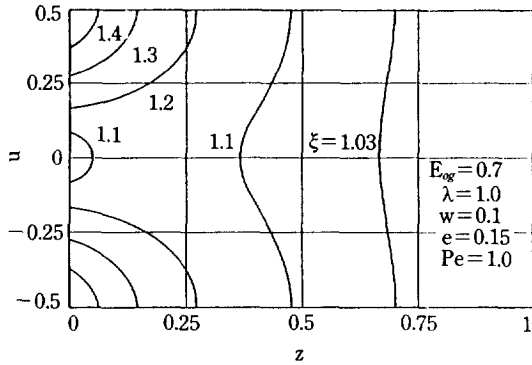


Fig. 3. Concentration profile as a function of  $u$  and  $z$  for  $g(0, u) = |u|$  and  $Pe = 1$ .

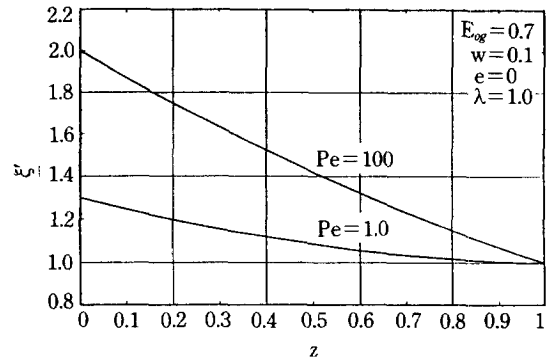


Fig. 5. Average concentration profile as a function of  $z$  for  $Pe = 1$  and  $100$ .

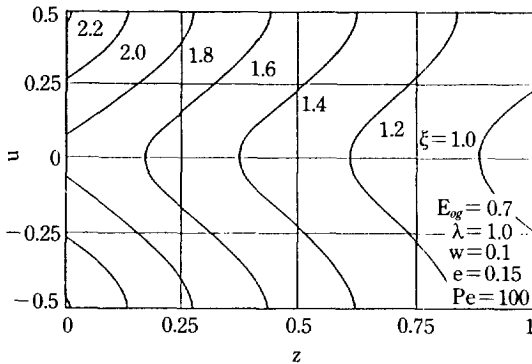


Fig. 4. Concentration profile as a function of  $u$  and  $z$  for  $g(0, u) = |u|$  and  $Pe = 100$ .

$$M = \frac{E_{MV}}{E_{og}} - 1 \quad (41)$$

$$K = \frac{e(1-\lambda)}{\lambda} \quad (42)$$

### 3. 결과 및 토의

중류탑의 임의의 단에서 점효율  $E_{og}$ 와 액상의 비발 동반율, 방울흐름율 그리고 탈거 인자(stripping factor), 액상의 혼합정도 등을 알면 (19)식에 의해 단에서의 농도변화를 알 수 있으며, (30)식에 의하여 고찰하는 지점까지의 평균 단효율을, 그리고 (38)식에 의해 단 전체에 대한 보정평균 단효율을 계산할 수 있다. Fig. 3과 4는 경계조건을  $\xi(0, u) = |u|$ 로 하였을 때의 위치에 따른 농도분포를 나타낸 것이다. 여기서  $Pe$  수는 convection에 의한  $z$ 방향의 물질전달과 diffusion에 의한  $z$ 방향과  $u$ 방향의 물질전달의 비를 나타내며,  $Pe = 1$ 이면 상대적으로 비교해서  $u$ 방향으로의 물질전달도 무시할

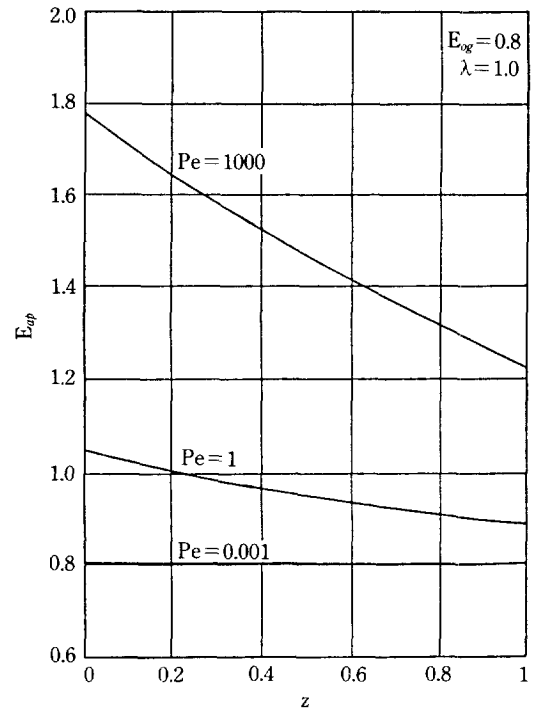


Fig. 6. Local average efficiency  $E_{ap}$  as a function of  $z$  for  $E_{og} = 0.8$ ,  $\lambda = 1.0$ , no entrainment and no weeping.

수 없게 되며 따라서  $z$ 가 증가하면서 최초의  $u$ 방향의 농도구배가  $u$ 방향의 확산의 영향에 의해서 없어지게 되는 것을 Fig. 3에서 볼 수 있다. 이에 반해서  $Pe = 100$  일 경우에는 convection에 의한  $z$ 방향의 물질전달의 확산에 의한  $u$ 방향의 물질전달에 비해서 지배적이기 때문에  $u$ 방향으로의 농도구배가 존재하는 것을 Fig. 4에서 알아볼 수 있다. Fig. 5는 이 때  $u$ 방향으로 평균한

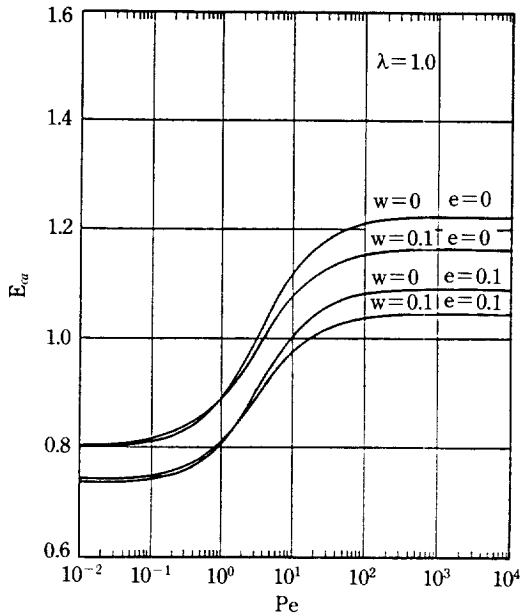


Fig. 7. Corrected plate efficiency  $E_{ca}$  as a function of Peclet number.

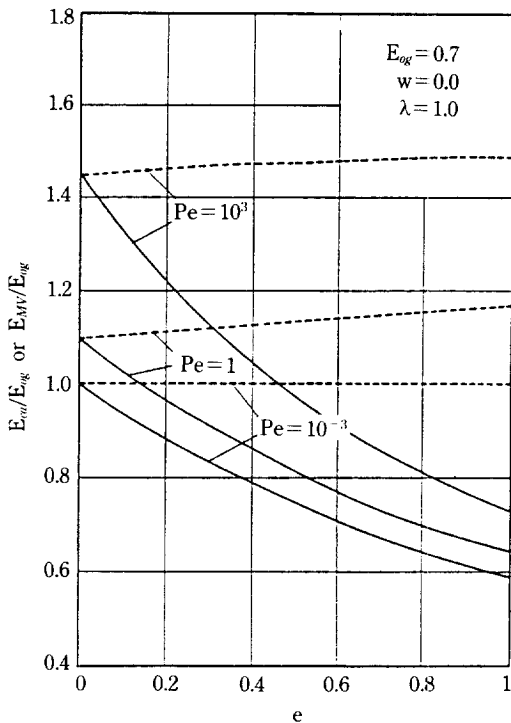


Fig. 8. Effect of the liquid entrainment on efficiencies  $E_{MV}$  (broken line) and  $E_{ca}$  (solid line) without weeping ( $E_{og}=0.7$  and  $\lambda=1.0$ ).

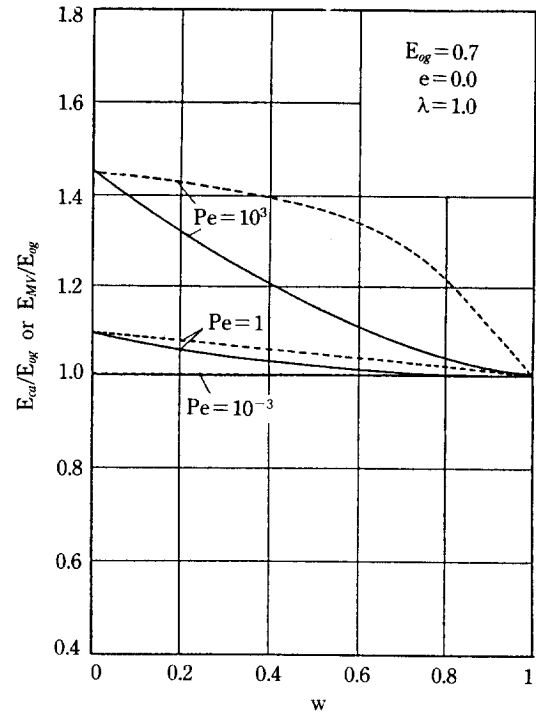


Fig. 9. Effect of the liquid weeping on efficiencies  $E_{MV}$  (broken line) and  $E_{ca}$  (solid line) without entrainment ( $E_{og}=0.7$  and  $\lambda=1.0$ ).

농도  $\xi'$ 를 액상의 흐름 방향축에 따라 나타낸 것으로 액상의 혼합정도가 농도변화에 미치는 영향이 잘 나와 있다. 농도분포를 알면 (30)식에 의해 고찰하는 지점까지의 평균 단효율을 알 수 있다. Fig. 6에는  $E_{og}=0.8$ 이며 액상의 비말동반과 방울흐름이 없을 때의 혼합정도가 작을수록  $E_{ap}$ 의 변화폭이 큰 것을 보여주고 있다. 비말동반과 방울흐름이 없는 경우에는 웨어에서의  $E_{ap}$ 값 즉  $E_{MV}$ 값과  $E_{ca}$ 값이 같아지지만, 그렇지 않은 경우에는 (38)식에 의해 보정평균 단효율  $E_{ca}$ 를 계산하여야 한다. Fig. 7은  $E_{ca}$ 와  $Pe$ 와의 관계를 나타낸 것이다.  $Pe \approx 100$  이상에서는 액상의 혼합이 없는 플럭흐름으로 취급가능하고 액상혼합이 없을수록 단효율이 커지는 것을 보이고 있으며, 비말동반이나 방울흐름이 있으면 대체적으로 단효율이 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 액상의 혼합정도가 매우 클 때 즉  $Pe$ 값이 1보다 작을 때에는 약간의 방울흐름이 단효율을 약간 증가시키는 것을 알 수 있으며, 단위에서 같은 양의 비말동반과 같은 양의 방울흐름이 있는 경우에 단효율에 대한 비말동반의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. Fig. 8과 9에는 비말동반과 방울흐름이 웨어에서의  $E_{ap}$ 값 즉  $E_{MV}$ 값과  $E_{ca}$ 값에 미

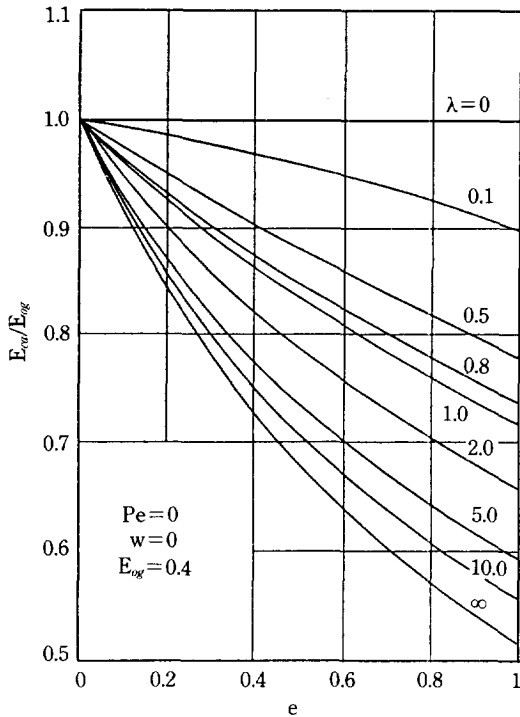


Fig. 10. Corrected plate efficiency  $E_{ca}$  as a function of entrainment and stripping factor ( $Pe=1$ ,  $w=0$ ,  $E_{og}=0.4$ ).

치는 영향을 나타내었다. Fig. 8에서는 방울흐름이 없을 때 액체의 비말동반량이 늘어날수록  $E_{ca}$  값이 감소됨을 보이고 있으나  $E_{MV}$  값은 비말동반량이 많아질수록 증가하는 것으로 나타나고 있어 비말동반과 방울흐름을 보정하지 않은  $E_{MV}$  값은  $E_{ca}$  값과 큰 차를 보이며 양이 많을수록 그 차이가 크다. Fig. 9에는 비말동반이 없을 때 방울흐름의 영향을 나타내었다. 액상의 혼합정도가 클수록 또 방울흐름의 양이 많을수록 보정평균 단효율  $E_{ca}$  값은 점효율을  $E_{og}$ 에 접근함을 보이며 보정하지 않은  $E_{MV}$  값은 틀린 결과를 나타내고 있다.

Fig. 10에서는 방울흐름이 없고 액상의 완전혼합이 이루어질 때  $E_{ca}$  값은 탈거 인자값  $\lambda$ 가 증가할수록 작아진다는 것을 알 수 있다. 이는 탈거인자가 클수록 기체의 흐름이 많게 되므로 비말동반의 영향이 매우 크게 나타나는 것을 보여주는 것이다. 반면에 비말동반이 없고 액상에서 완전혼합이 일어나는 경우에는  $E_{ca}$  값에 방울흐름의 양과 탈거인자가 별 영향을 미치지 않는 것을 보여주고 있다.

Fig. 12에는  $E_{ca}$  값에 대한 비말동반과 방울흐름의 영향을 함께 나타내었다. 방울흐름에 대한  $E_{ca}/E_{og}$ 의 변화

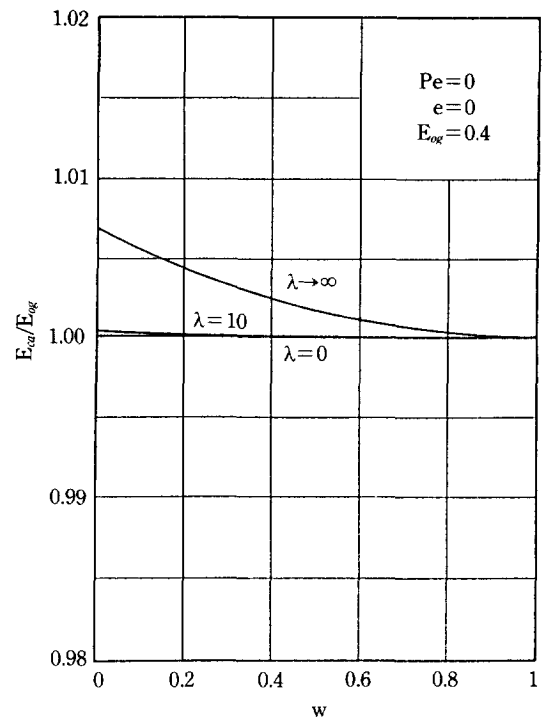


Fig. 11. Corrected plate efficiency  $E_{ca}$  as a function of weeping and stripping factor ( $Pe=1$ ,  $e=0$ ,  $E_{og}=0.4$ ).

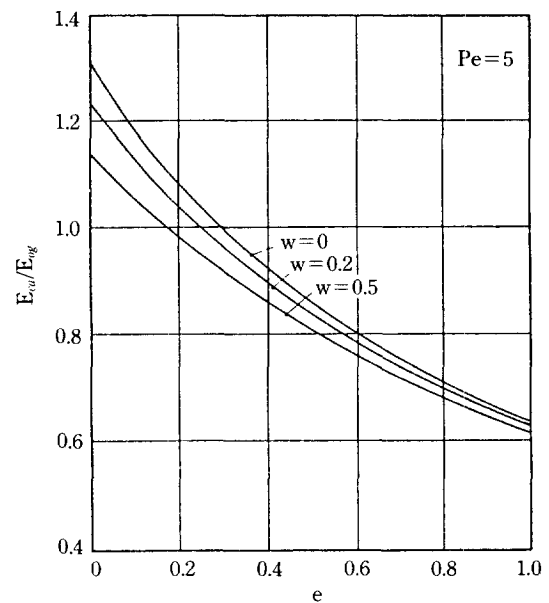


Fig. 12. Effect of liquid entrainment and weeping on corrected plate efficiency  $E_{ca}$ .

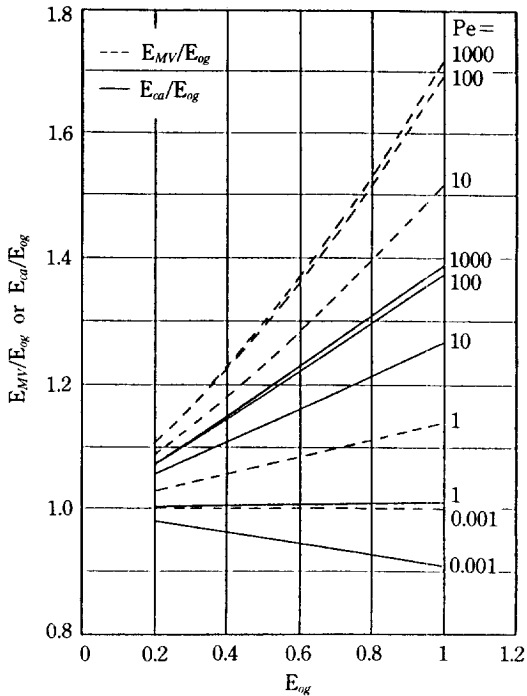


Fig. 13. Effect of point efficiency  $E_{og}$  and Peclet number  $Pe$  on  $E_{MV}$  and  $E_{ca}$ .

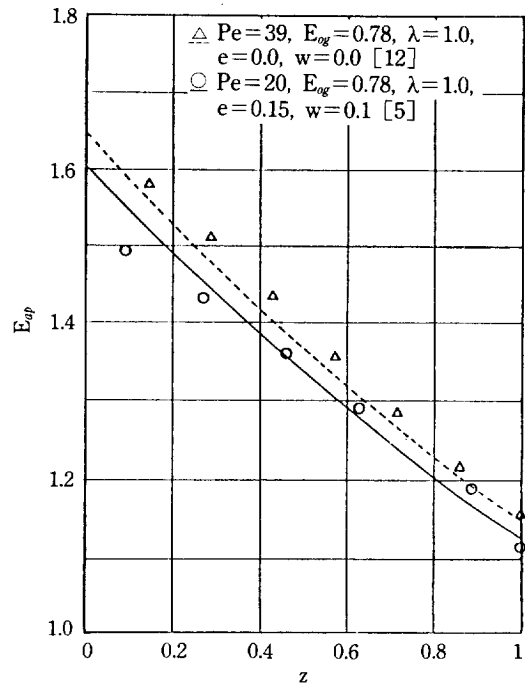


Fig. 15. Comparison of  $E_{ap}$  as a function of  $z$  with experimental data of Dribika and Biddulph[12] and Zuideweg[5].

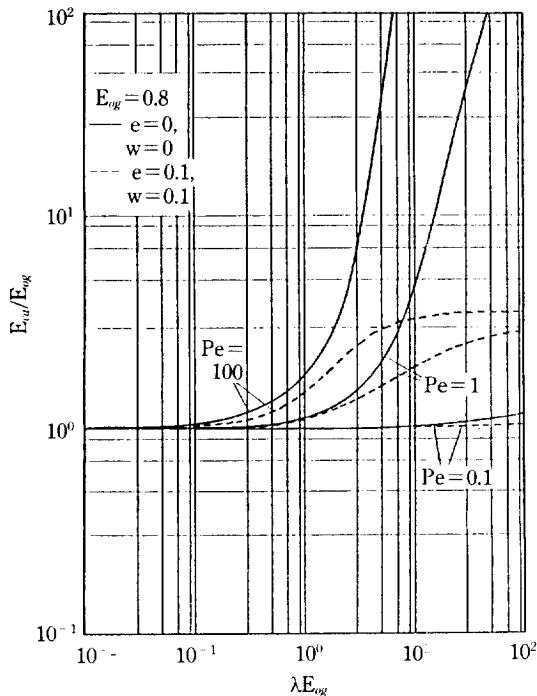


Fig. 14. Relation between  $E_{ca}$  and  $\lambda E_{og}$  for liquid mixing,  $e=0.1$  and  $w=0.1$ .

보다 비말동반에 대한 변화가 큰 것을 알 수 있고 비말동반과 방울흐름이 없는 경우에는 AIChE 식[4]으로 계산한  $E_{MV}/E_{og}$  값과 같다.

Fig. 13에서는 약간의 비말동반과 방울흐름이 있을 때  $Pe$  수가 1보다 큰 경우에는  $E_{og}$  값이 증가할수록  $E_{ca}$ 와  $E_{MV}$  값이 증가하지만 액상의 혼합 정도가 큰 경우 즉  $Pe$  수가 1보다 작을 때는  $E_{ca}$  값이  $E_{og}$  값보다 작아지는 것을 보여주므로써 액상의 혼합이 없을수록 단효율이 좋다는 것을 나타내고 있다. 단효율은 액상의 흐름에 따른 농도변화와 단효율의 정의때문에 항상 점효율 보다 큰 값을 갖게 되고 액상의 흐름이 플러그 흐름에 가까울수록 큰 값을 보인다. (33)식에 의해 계산된 단효율과 점효율과의 관계는 보통  $E_{MV}/E_{og}$ 와  $\lambda E_{og}$ 의 관계로 나타내는데[4, 13], 비말동반과 방울흐름이 있는 경우에는 Fig. 14에서와 같이 보정된 단효율  $E_{ca}/E_{og}$ 와  $\lambda E_{og}$ 의 관계를 보아야 한다. 비말동반이나 방울흐름이 없는 경우에는 일반적으로 알려진 결과[4]와 같으나 약간의 비말동반이나 방울흐름이 있으면  $\lambda E_{og}$  값이 증가함에 따라 단효율이 급격히 떨어짐을 알 수 있다. Fig. 15에서는 액상의 진행방향  $z$ 에 대한 평균 단효율  $E_{ap}$ 의 변화를 기존의 실험결과[5, 12]와 비교하였다. Dribika와 Biddulph[12]의 실험값은 작은 지름의 Oldershaw 단에



서 에탄올과 n-프로판올의 농도분포를 측정한 것이며 와류분산(eddy dispersion)의 물질전달식을 사용하여 점효율  $E_{og}$ 를 예측한 것이다. 실험결과는 비말동반과 방울흐름이 없는 경우와 잘 일치하며 Pe 수가 39이므로 액상의 흐름이 거의 플러그 흐름임을 알 수 있다. 그러므로 작은 지름의 Oldershaw column에서 액상이 완전 혼합이 이루어진다는 가정에 의해 단효율과 점효율이 같다고 생각하는 것은 큰 오차를 유발시킬 수 있다. Zuideweg[5]의 실험값은 직경 45 cm의 탑에서 싸이클로 헥산-톨루엔계에 대해 측정된 것으로 플러그 흐름만 밝히고 있어  $Pe=20$ ,  $E_{og}=0.78$ 을 가정하고  $\lambda=1$ ,  $e=0.15$ ,  $w=0.1$ 로 계산한 값과 연결시켜 보았다.

#### 4. 결 론

액체의 비말동반과 방울흐름이 단효율에 미치는 영향을 이론적으로 고찰하고, 액상의 진행 방향으로의 농도분포 뿐 아니라 수직 방향으로의 농도분포가 존재할 경우의 모델을 분석하여 다음의 결과를 얻었다.

(1)  $E_{ap}$ 값은 액상의 진행 방향으로 감소하고 액체의 혼합정도가 작을수록 그 변화폭이 크다.

(2) 비말동반과 방울흐름이 있는 경우 단효율은 감소하며, 단위에서 같은 양의 비말동반과 방울흐름이 있을 때에는 단효율에 미치는 비말동반의 영향이 더 크다.

(3) 비말동반과 방울흐름이 있는 경우에 이들을 보정해주지 않은 Murphree 단효율  $E_{MV}$ 는 보정 단효율  $E_{ca}$ 과 큰 차를 보이며 양이 많을수록 그 차이가 크다.

(4) Pe 수가 클수록 단효율에 미치는 액체의 비말동반과 방울흐름의 영향이 커진다.

(5) Pe 값이 작을수록 즉 액상의 혼합정도가 클수록 단효율은 점효율  $E_{og}$ 값에 가까워진다.

#### We define

$$e = L_e/L$$

$$w = L_w/L$$

$$Pe' = Pe(1 + e - w)$$

$$\lambda = mG/L$$

$$\lambda' = \lambda/(1 + e - w)$$

$$\xi = \frac{x - x_n^*}{x_n - x_n^*}$$

$$\xi'(z) = \int_{-1/2}^{1/2} \xi(z, u) du$$

#### Efficiencies

The efficiencies used in this paper are based on the following definitions.

$$\bullet \text{ Point plate efficiency } E_{og} = \frac{y - y_{n-1}}{y^*(x) - y_{n-1}}$$

$$\bullet \text{ Murphree plate efficiency } E_{MV} = \frac{y_n - y_{n-1}}{y_n^* - y_{n-1}}$$

$$\bullet \text{ Corrected plate efficiency } E_{ca} = \frac{Y_n - Y_{n-1}}{y^*(\bar{x}_n) - Y_{n-1}}$$

$$\bullet \text{ Local average plate efficiency}$$

$$E_{ap}(z) = \frac{1}{z\lambda} \left[ \frac{1}{Pe'} \cdot \frac{\xi'}{z} \Big|_0^z + z\lambda' \alpha E_{MV} \right]$$

And the relationship between  $E_{ap}$  and  $E_{MV}$  is obtained

$$\frac{E_{MV}}{E_{og}} = \int_0^1 \xi'(z) dz \quad \frac{E_{ap}(z)}{E_{og}} = \frac{1}{z} \int_0^z \xi'(z) dz$$

$$\text{Also } \frac{E_{ap}(z)}{E_{MV}} = \frac{\frac{1}{z} \int_0^z \xi'(z) dz}{\int_0^1 \xi'(z) dz}$$

#### 감 사

본 연구는 한국과학기술원 기본 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

#### NOMENCLATURE

$C_{LF}$	: total concentration of gas-liquid mixture
$D$	: column diameter
$D_e$	: eddy diffusivity
$E_{og}$	: point plate efficiency
$E_{ap}$	: local average plate efficiency
$E_{ca}$	: corrected plate efficiency
$E_{MV}$	: Murphree plate efficiency
$e$	: entrainment fraction
$G$	: vapour flow rate
$L$	: liquid flow rate
$L_e$	: liquid entrainment rate
$L_w$	: liquid weeping rate
$m$	: slope of equilibrium line
$Pe$	: Peclet number

$S$  : cross-sectional area of gas-liquid mixing  
 $x$  : mole fraction of the light component in liquid phase  
 $\bar{x}_n$  : average mole fraction in liquid leaving n-th plate  
 $\tilde{x}_n$  : mean mole fraction in liquid on n-th plate  
 $x_D$  : mole fraction in overhead product  
 $x'_n$  : mole fraction at weir on n-th plate  
 $y$  : mole fraction in gas phase  
 $y_n$  : mole fraction in gas leaving n-th plate  
 $Y_n$  : corrected mole fraction in gas leaving n-th plate  
 $z', u'$  : distance on plate  
 $z, u$  : dimensionless distance on plate  
 $z_k$  : distance between liquid inlet and outlet  
 $u_k$  : width of rectangular active area  
 $\lambda$  : stripping factor  
 $w$  : weeping fraction  
 $*$  : equilibrium value

2. Hughmark, G. A.: *AIChE J.*, **17**(6), 1295(1971).
3. Lashmet, P. K. and Szczepanski, S. Z.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **13**(2), 103(1974).
4. Gerster, J. A.: *Bubble Tray Design Manual AIChE J.*, New York(1958).
5. Zuiderweg, F. J.: *Chem. Eng. Sci.*, **37**, 1441(1982).
6. Lockett, M. J.: "Distillation Tray Fundamentals", Cambridge Univ., Press(1986).
7. Porter, K. E., Lockett, M. J. and Lim, C. T.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **50**, 91(1972).
8. Shore, D. and Haselden, G. G.: *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, **32**, 2-49(1969).
9. Colburn, A. P.: *Ind. Eng. Chem.*, **28**, 28(1936).
10. Kageyama, O.: *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, **32**, 2-67(1969).
11. Koziol, A.: *Chem. Eng. Technol.*, **12**, 333(1989).
12. Dribika, M. M. and Biddulph, M. W.: *AIChE J.*, **32**(11), 1864(1986).
13. King, C. J.: "Separation Processes", 2nd Ed. McGraw Hill(1980).

## REFERENCES

1. Lewis, W. K.: *Ind. Eng. Chem.*, **28**, 399(1936).