

단위 조작

Unit operation

제 11 장. 증류탑

11.1 기액 평형과 라울의 법칙

11.2 단단 평형접촉

11.3 flash 증류

11.4 환류증류와 McCabe-Thiele 법

11.5 단효율

기액 단단 평형접촉 = flash 공정

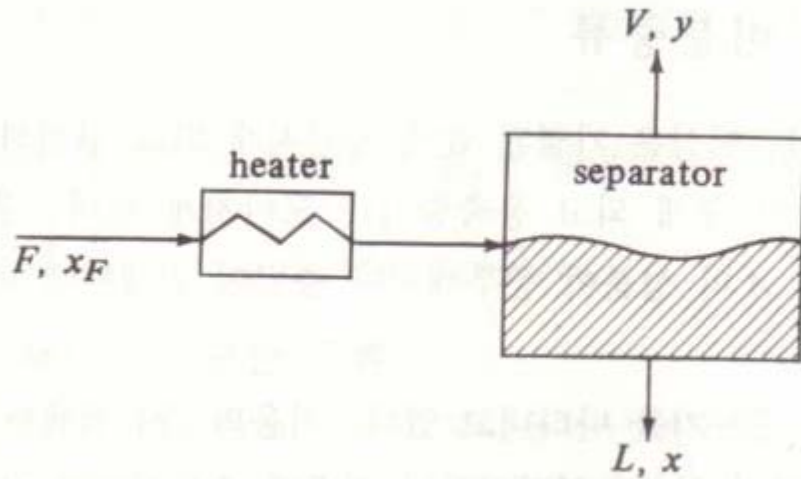


FIGURE 11.3-1. Equilibrium or flash distillation.

Flash 자유도 : $F=C-P+2$
 $F=2-2+2 = 2$

온도와 압력이 주어지면 flash 공정의 자유도 $F=0$ 이다.

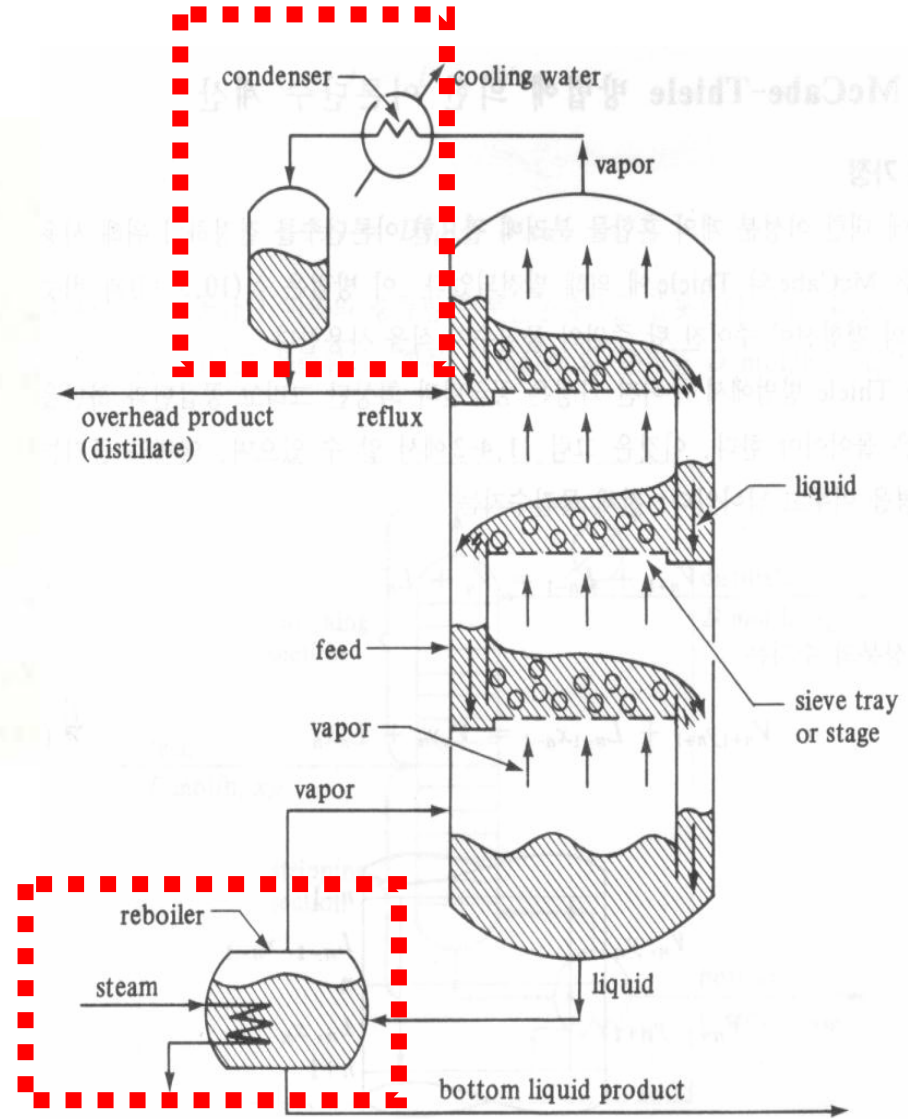


FIGURE 11.4-1. Process flow of a fractionating tower containing sieve trays.

flash 공정

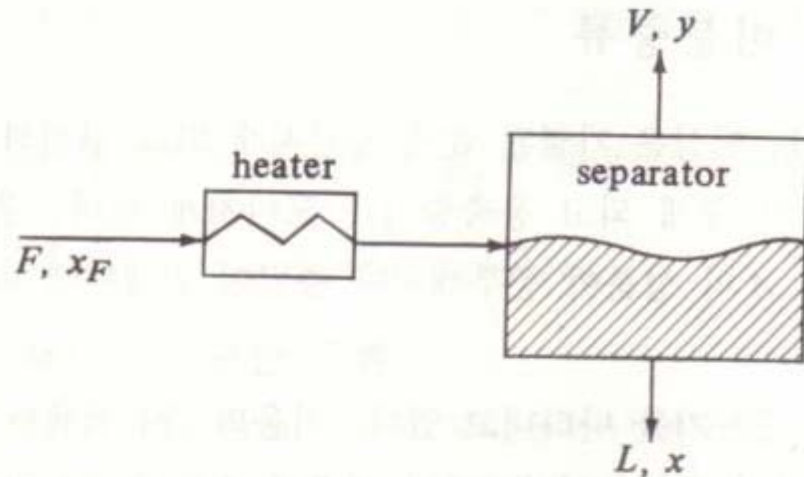


FIGURE 11.3-1. Equilibrium or flash distillation.

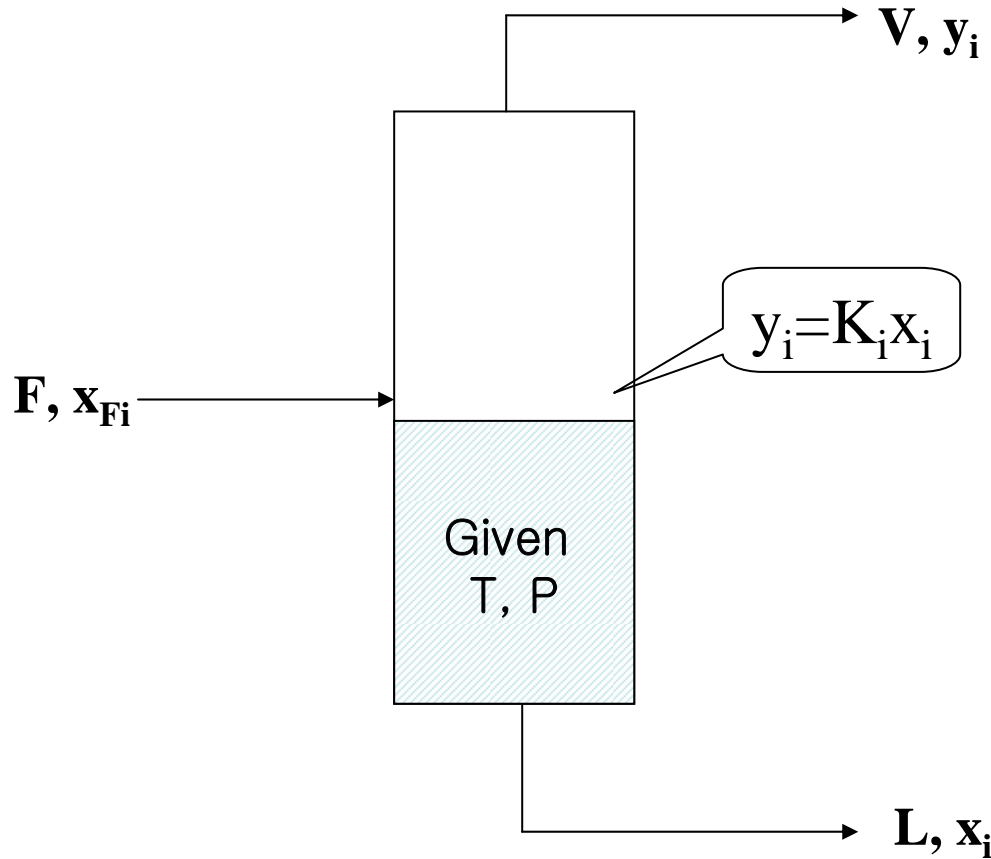
질량보존: $Fx_{Fi} = Vy_i + Lx_i$ for $i = 1 \dots N_{comp}$

에너지보존: $FH_F + Q = VH_V + LH_L$

평형식: $y_i = \underline{K_i}x_i$ for $i = 1 \dots N_{comp}$

평형상수값: 온도와 압력이 주어지면 평형상수값은 정해진다.

flash 공정



$$F = V + L$$

$$F x_{Fi} = V y_i + L x_i$$

$$y_i = \frac{F x_{Fi}}{V + (F - V) / K_i}$$

$$\sum y_i = 1$$

Flash 공정에서 유입되는 원료의 유량 (F), 조성 (x_{Fi}) 을 알고, 주어진 온도와 압력에서 기액 두상간의 평형상수 (K_i) 값을 알면, 유출되는 기액상 유량 (V, L) 그리고 조성 (x_i, y_i) 을 알 수 있다.

11.4 증류탑

11.4 증류탑

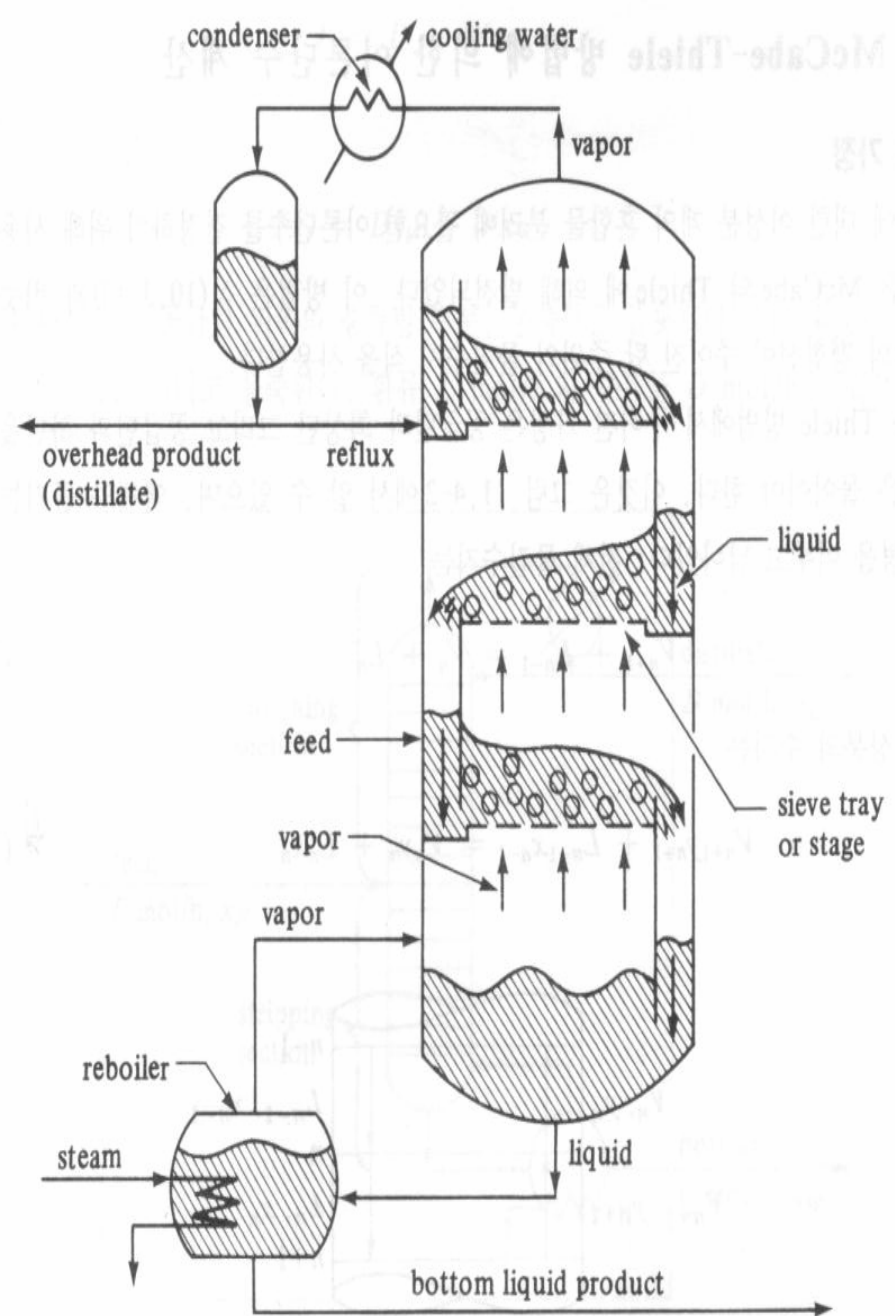
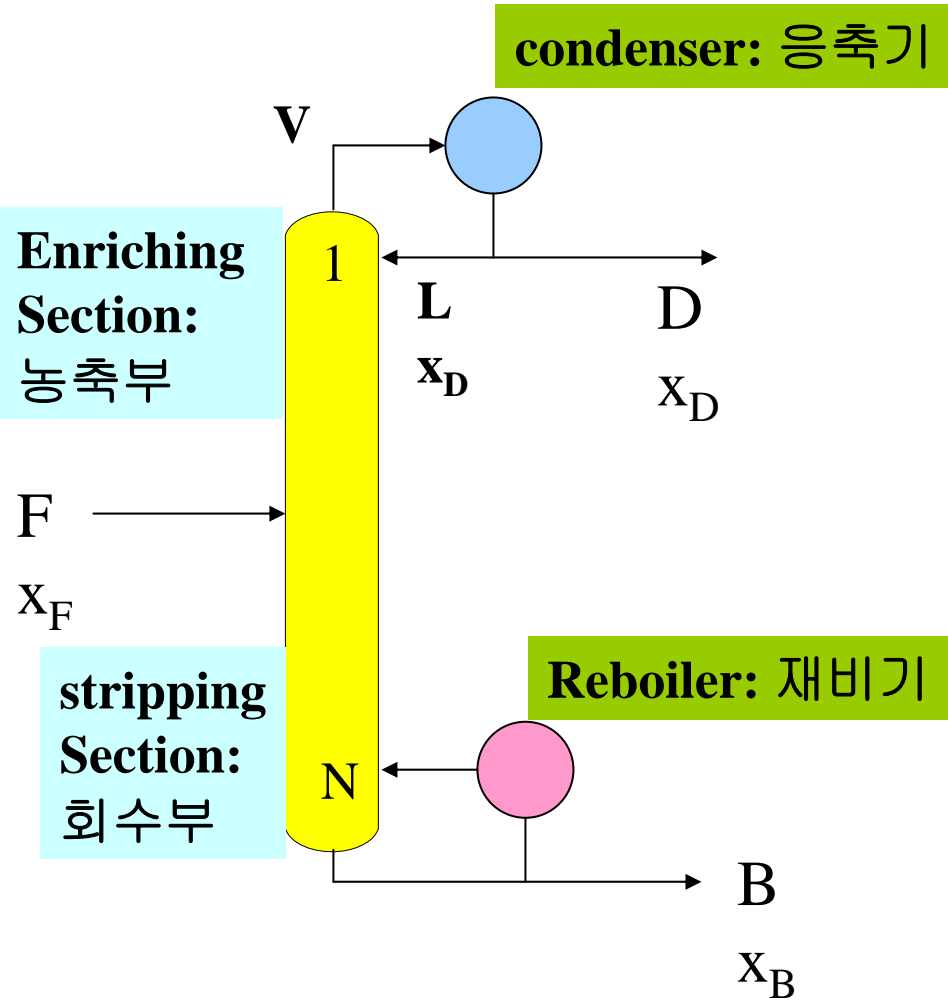


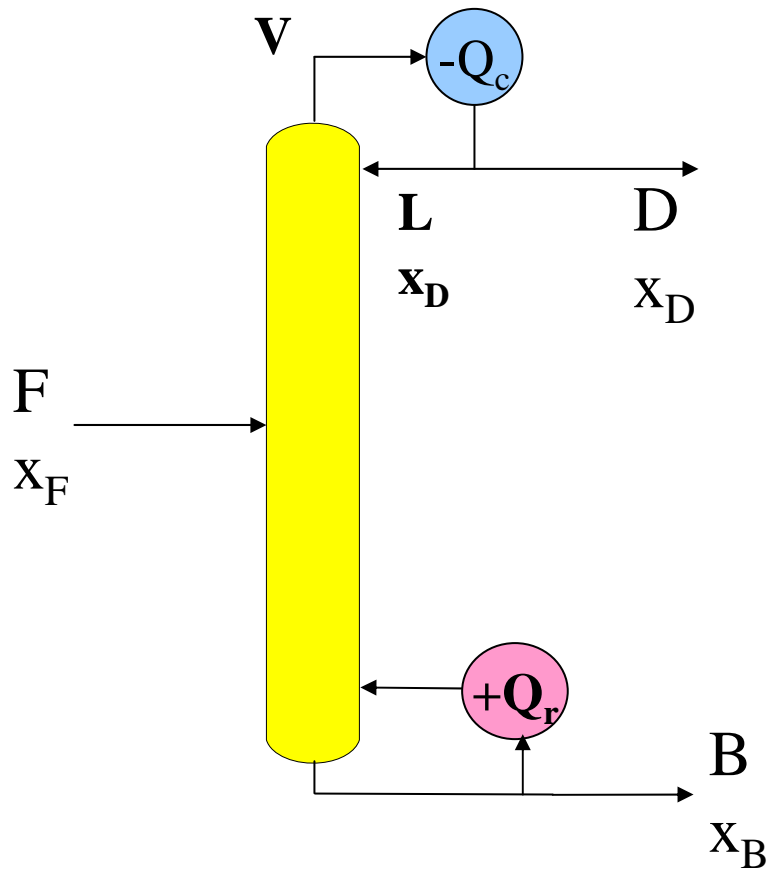
FIGURE 11.4-1. Process flow of a fractionating tower containing sieve trays.

11.4 증류탑

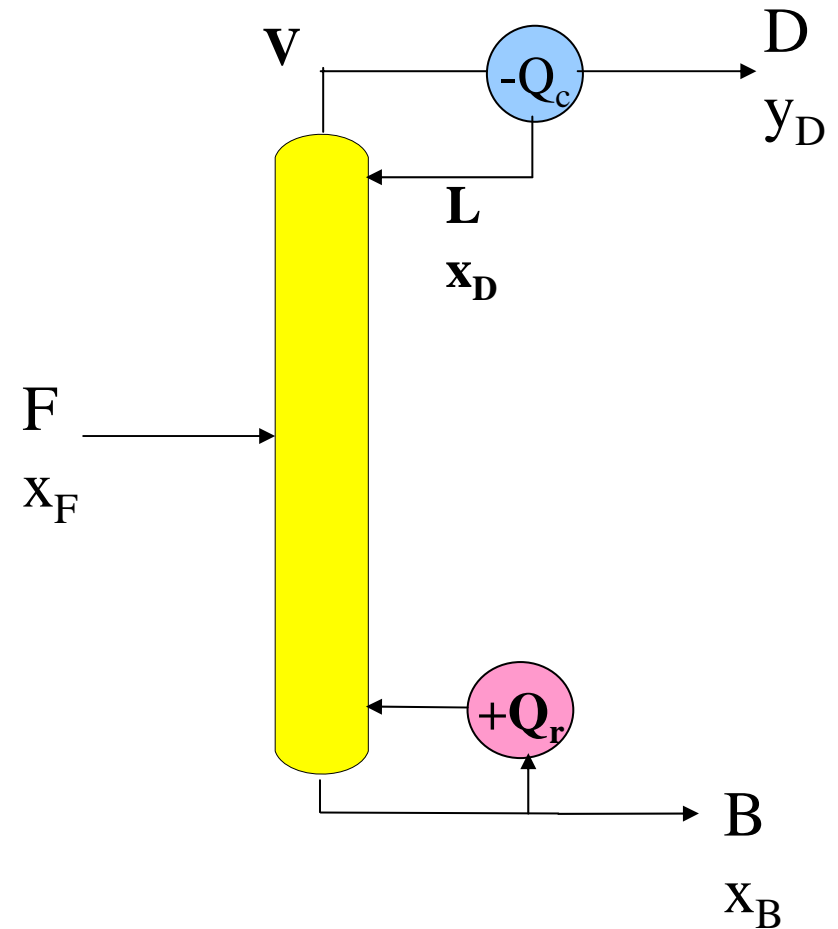
1. 증류탑의 구성과 형태
2. 작업선: 물질수지식으로 구함
3. 평형선: 상대휘발도로 구함
4. 주입선 (공급선): 물질수지식으로 구함
5. 평형단수: McCabe-Thiele 작도법 (과제 4)
6. 최소단수와 최소 환류비
7. 단효율

증류탑의 구분

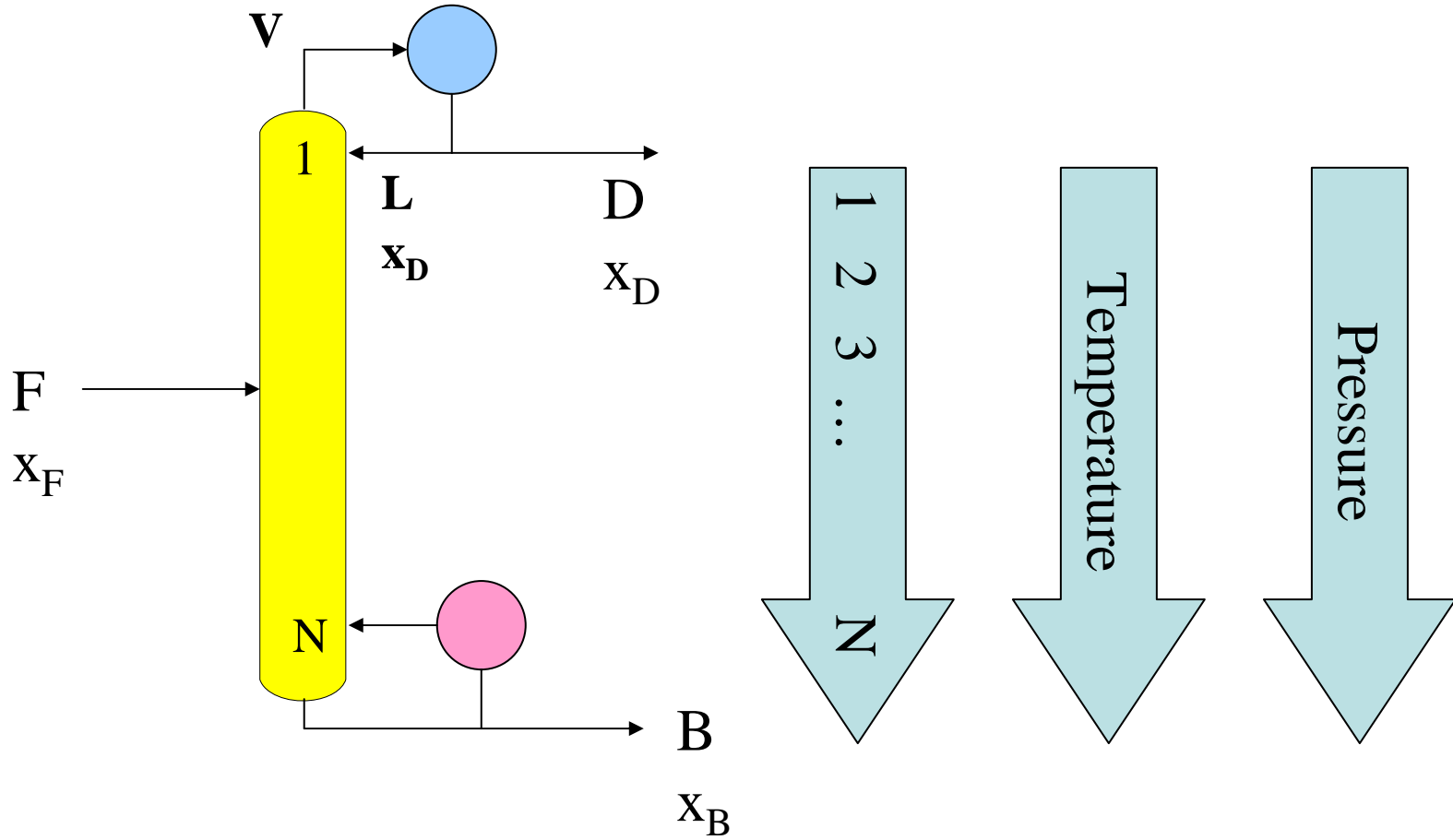
완전 응축기/부분 기화



부분 응축기/부분 기화



증류탑 내에서의 온도와 압력분포



11.4 증류탑

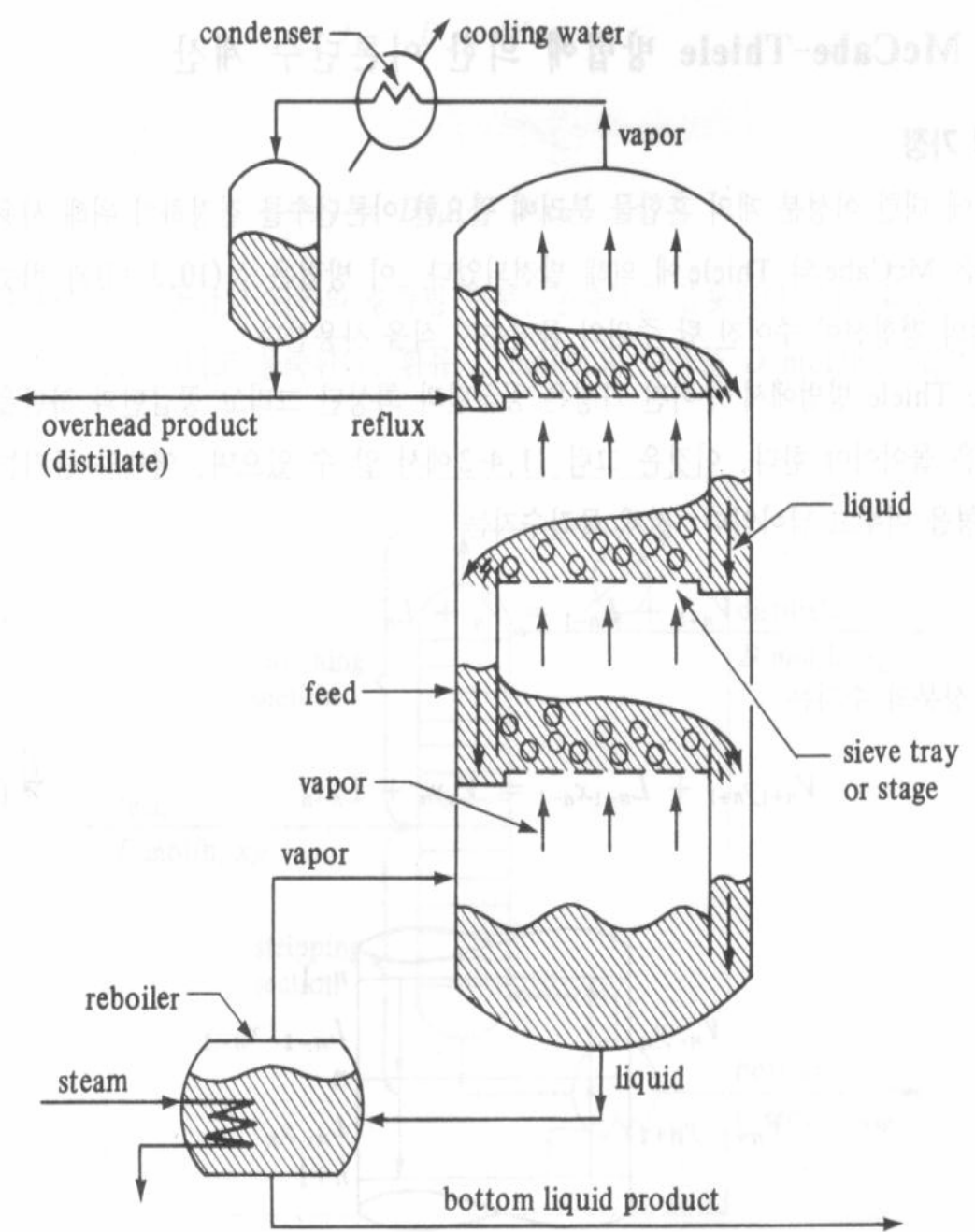
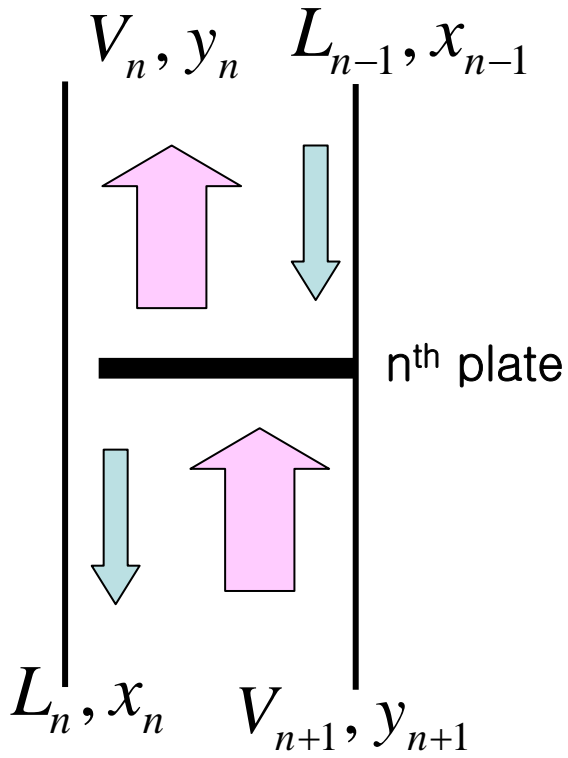
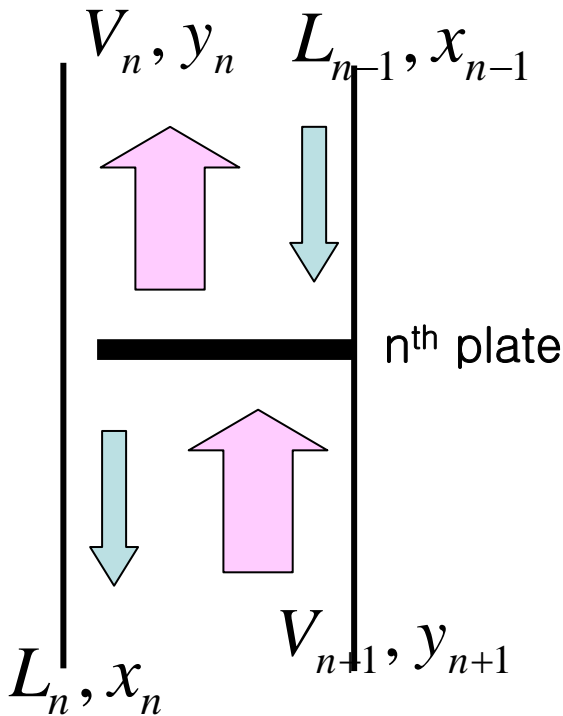


FIGURE 11.4-1. Process flow of a fractionating tower containing sieve trays.

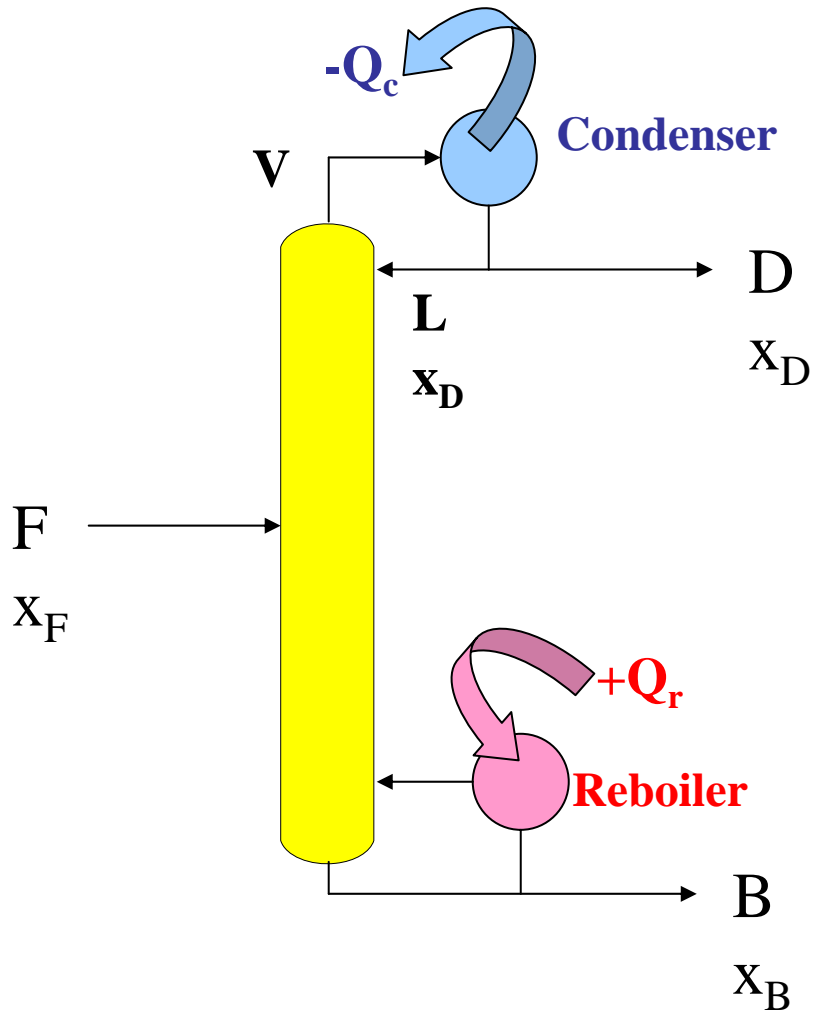
증류탑 n^{th} plate 물질수지식



$$V_{n+1} + L_{n-1} = V_n + L_n$$

$$V_{n+1} \cdot y_{n+1} + L_{n-1} \cdot x_{n-1} = V_n \cdot y_n + L_n \cdot x_n$$

증류탑 전체 물질수지식



$$F = D + B$$

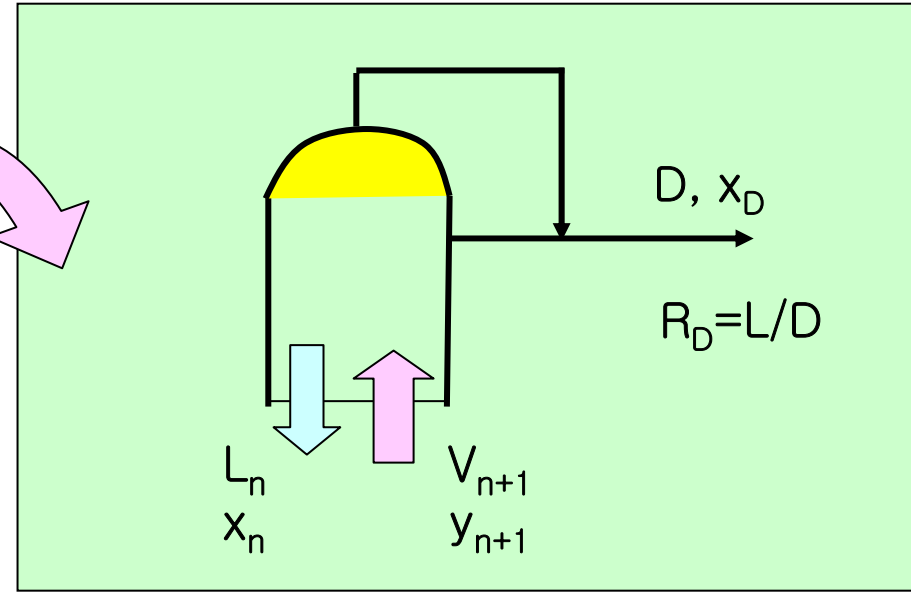
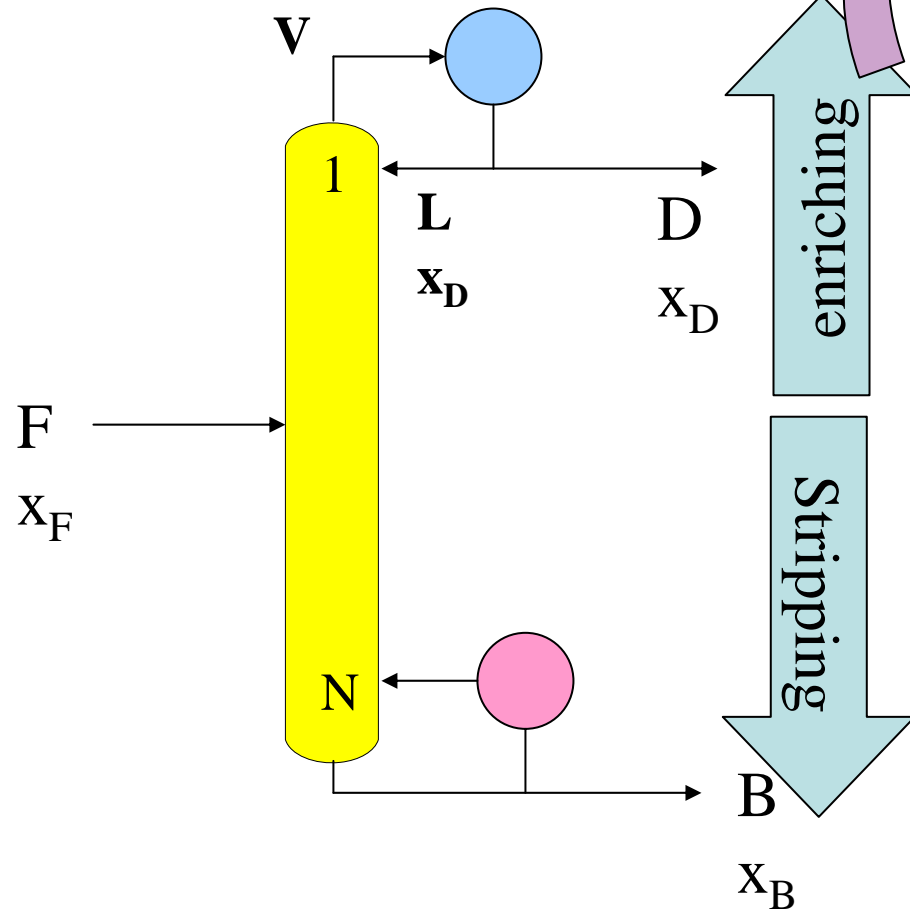
$$F x_F = D x_D + B x_B$$

$$R_D = L/D = (V - D)/D$$

$$D/F = (x_F - x_B)/(x_D - x_B)$$

증류탑 농축부 물질수지식

상부 작업선 : operating line



$$V_{n+1} = L_n + D$$

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} x_n + \frac{Dx_D}{V_{n+1}}$$

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{L_n + D} x_n + \frac{Dx_D}{L_n + D}$$

$$y_{n+1} = \frac{R_D}{R_D + 1} x_n + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

증류탑 농축부 작업선

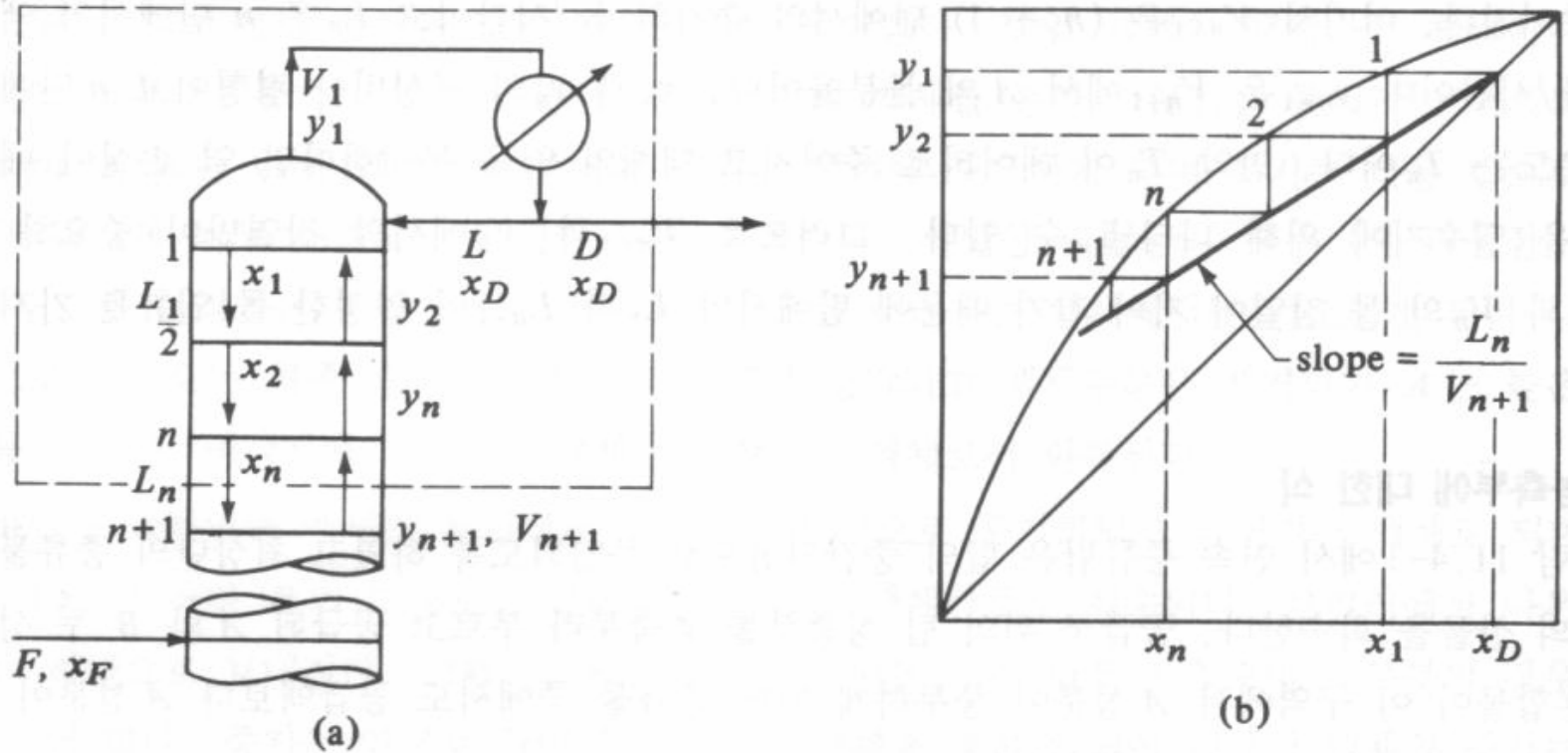
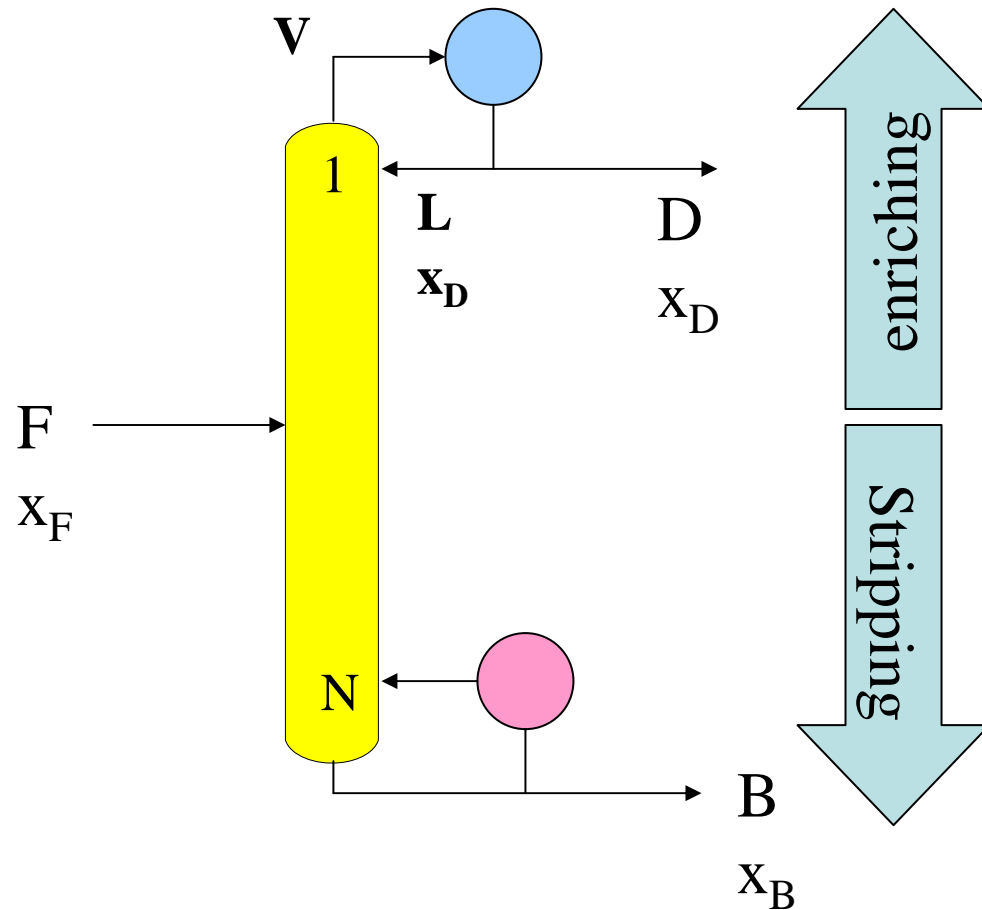


FIGURE 11.4-4. Material balance and operating line for enriching section: (a) schematic of tower, (b) operating and equilibrium lines.

$$y_{n+1} = \frac{R_D}{R_D + 1} x_n + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

증류탑 회수부 물질수지식

작업선 : operating line



$$V_{n+1} = L_n + D$$

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} x_n + \frac{Dx_D}{V_{n+1}}$$

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{L_n + D} x_n + \frac{Dx_D}{L_n + D}$$

$$y_{n+1} = \frac{R_D}{R_D + 1} x_n + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

$$V_{m+1} = L_m - B$$

$$y_{m+1} = \frac{L_m}{V_{m+1}} x_m - \frac{Bx_B}{V_{m+1}}$$

$$y_{m+1} = \frac{L_m}{L_m - B} x_m - \frac{Bx_B}{L_m - B}$$

기액 평형선과 상대휘발도(α_{AB})

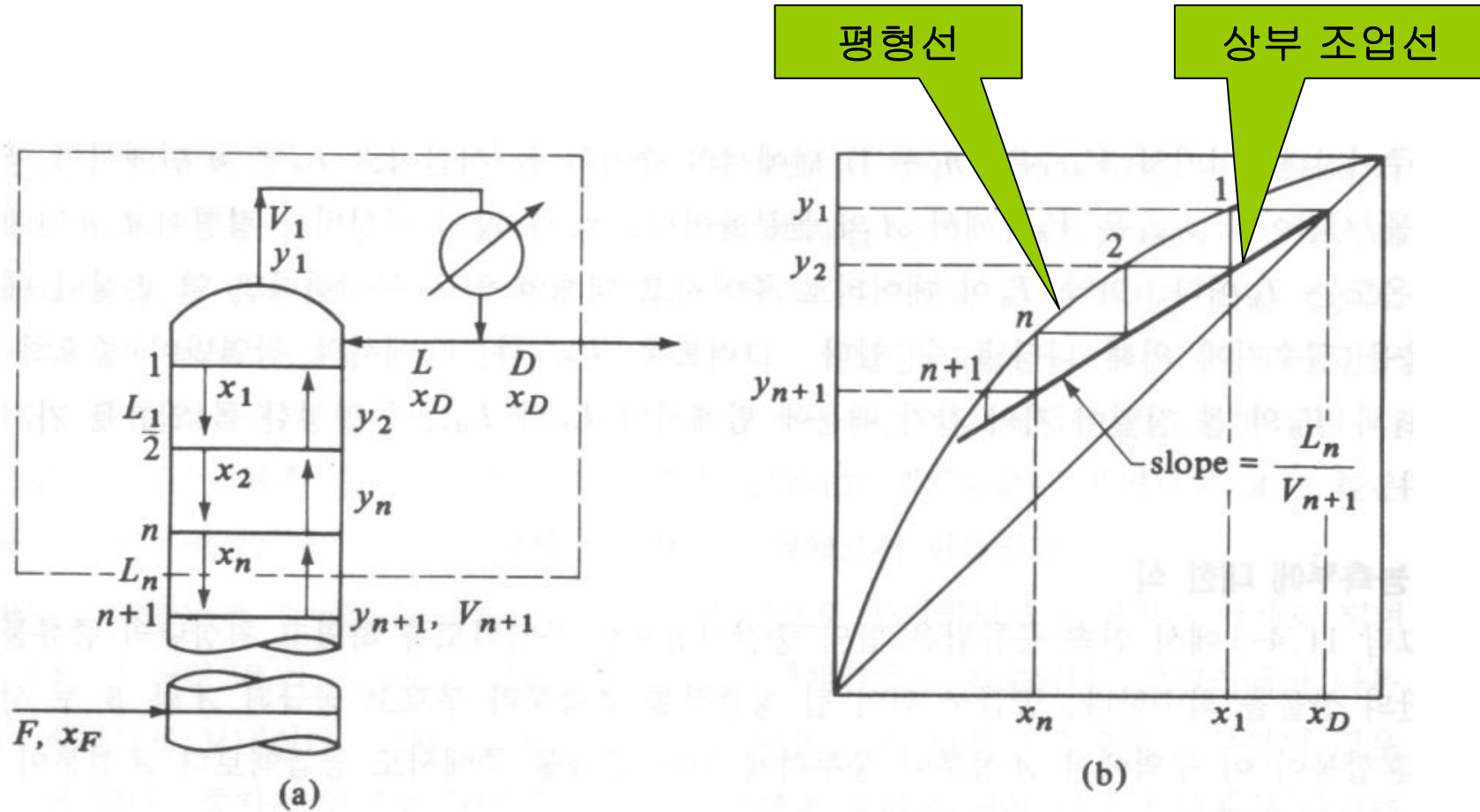


FIGURE 11.4-4. Material balance and operating line for enriching section : (a) schematic of tower, (b) operating and equilibrium lines.

Binary equilibrium line

$$\alpha_{ik} = \frac{y_i / x_i}{y_k / x_k} = \frac{K_i}{K_k}$$

$$\alpha_{12} = \frac{y_1 / x_1}{(1 - y_1) / (1 - x_1)}$$

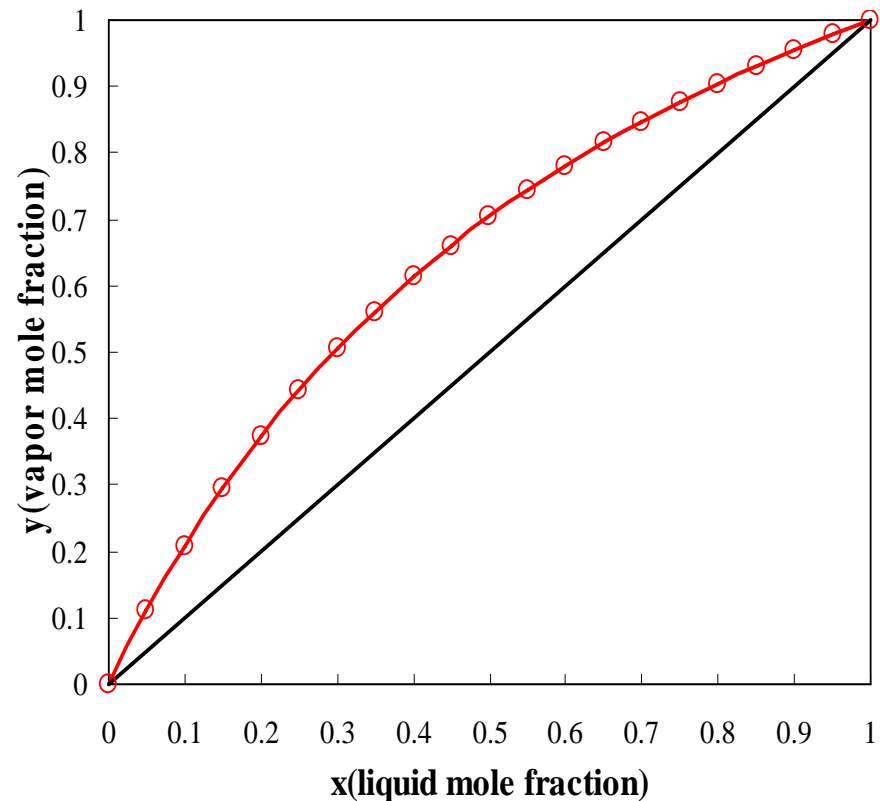
$$\alpha(1 - y)x = y(1 - x)$$

$$y(1 - x + \alpha x) = \alpha x$$

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}$$

문제: 벤젠과 톨루엔 계의 상대휘발도는 2.38 이다.

이 이성분계의 평형선을 그리시오.



예제 11.3-1 벤젠-톨루엔의 상대휘발도

- 온도 $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 벤젠과 톨루엔의 증기압

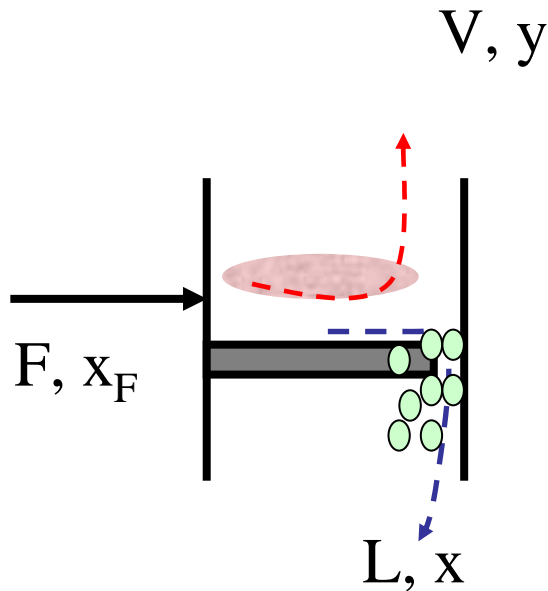
$$P_{benzene}^{vap} = 204.2\text{ kPa}$$

$$P_{Toluene}^{vap} = 86.0\text{ kPa}$$

이 주어져 있다. 이 두 성분은 라울의 법칙에 따른다고 하면, 톨루엔에 대한 벤젠의 상대휘발도는 얼마인가?

$$\begin{aligned}\alpha_{Ben-Tol} &= \frac{K_{Ben}}{K_{Tol}} = \frac{P_{Ben}^{vap} / P}{P_{Tol}^{vap} / P} \\ &= \frac{204.2}{86.0} = 2.38\end{aligned}$$

물리적 의미는?



주입단에서의 물질 수지식

$$F x_F = V y + L x$$

$$y = -\frac{L}{V} x + \frac{F}{V} x_f$$

$$y = -\frac{q}{q-1} x + \frac{x_f}{q-1}$$

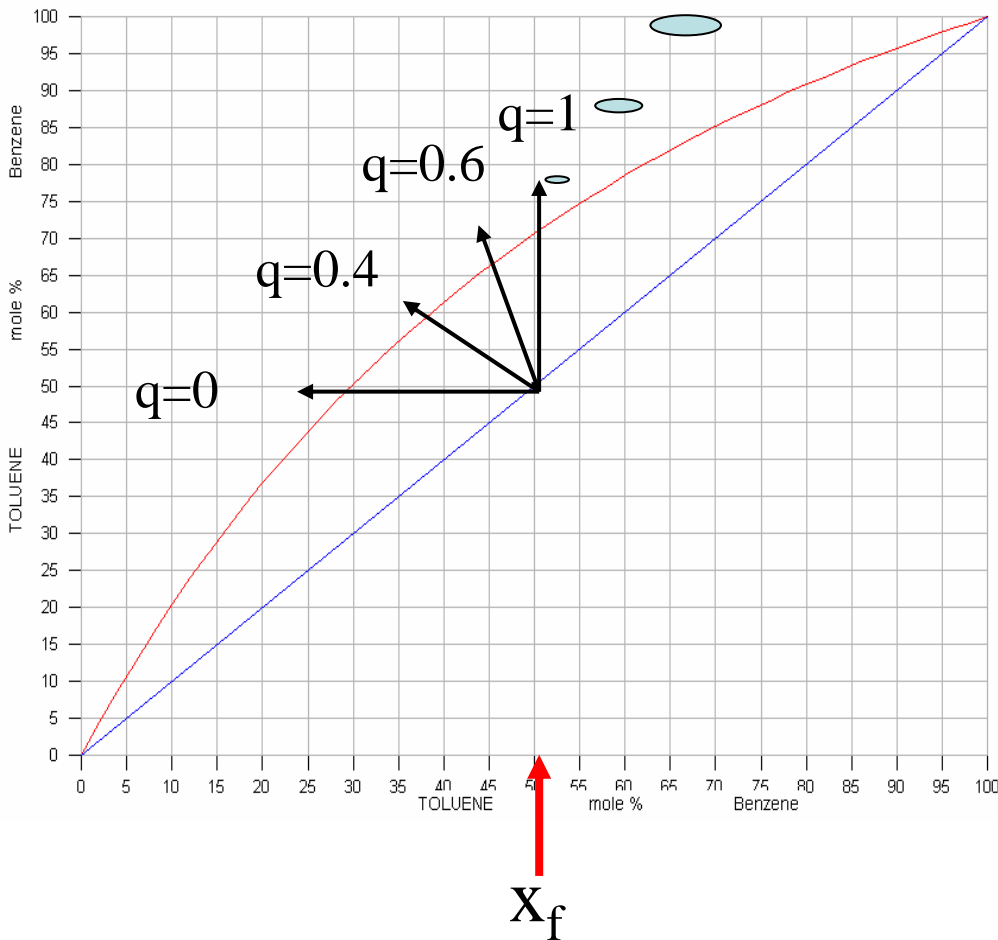


여기에서,

$q=L/F$ (유입량에 대한 액화율)

증류탑 - 주입선

주입선



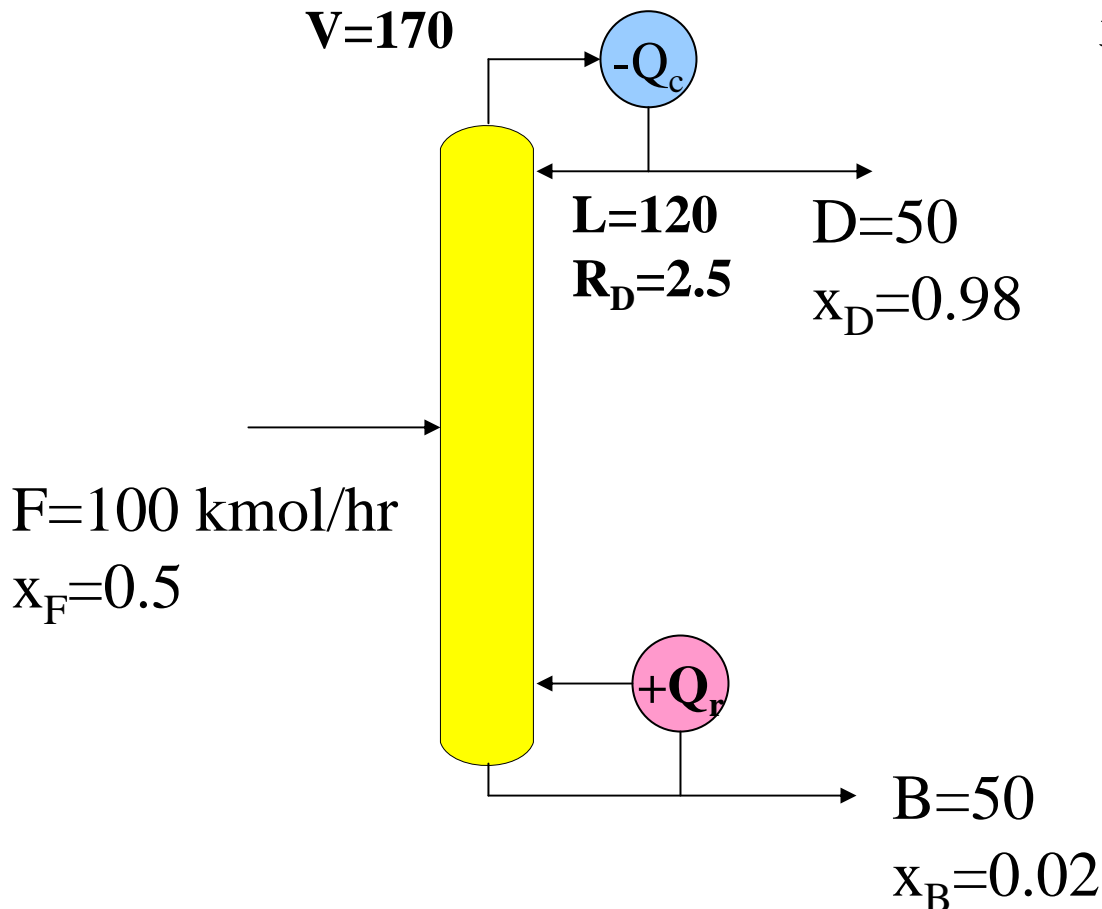
$$y = -\frac{q}{1-q}x + \frac{x_f}{1-q}$$

평형단수 구하기: McCabe-Thiele 법

1. 물질수지식을 이용하여 유입/유출물의 유량과 물분율을 계산다.
2. 평형선을 그린다 (상대 휘발도를 이용하거나 실험데이터 사용)
3. 상부 작업선을 그린다.
4. 공급선 (주입선) 을 그린다.
5. 주입선과 상부 작업선이 만나는 점과 탑하부의 조업점을 연결하여 하부 작업선을 그린다.
6. 수직/수평선을 이용하여 상부조업점과 하부조업점간의 단수를 그린다.

예제: 증류탑 평형단수 구하기

문제: 벤젠과 톨루엔이 반씩 섞여있는 혼합물을 분리하려 한다.
 유입되는 원료의 유량, $F=100\text{kmol/h}$ 이고,
 아래 그림과 같은 조건에서 평형단수는 몇단인가?
 단, 주입단에서 액화율 $q=0.4$ 이고, 톨루엔에 대한 벤젠의 상대휘발도 $\alpha=2.4$ 로 일정하다.



$$\text{평형선: } y_{equil} = \frac{2.4x}{1 + (2.4 - 1)x}$$

상부작업선:

$$y_{oper} = \frac{2.5}{2.5 + 1}x + \frac{0.98}{2.5 + 1}$$

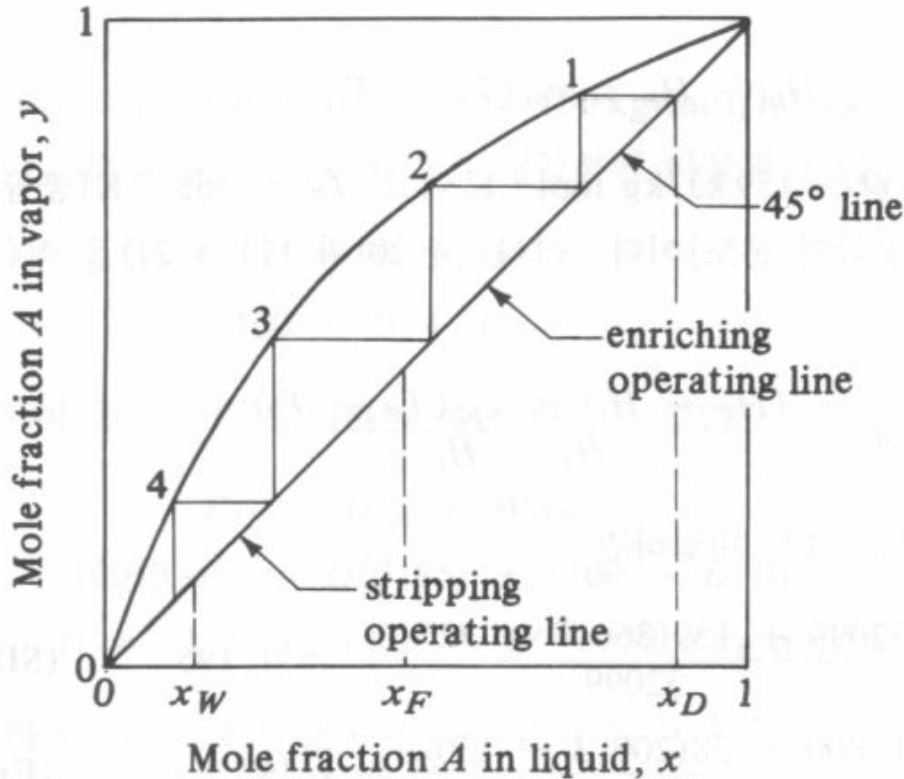
$$\text{공급선: } y_{feed} = -\frac{0.4}{1 - 0.4}x + \frac{0.5}{1 - 0.4}$$

예제: 증류탑 평형단수 구하기

- 전산실습: MS Excel 이용



11.4c 최소단수



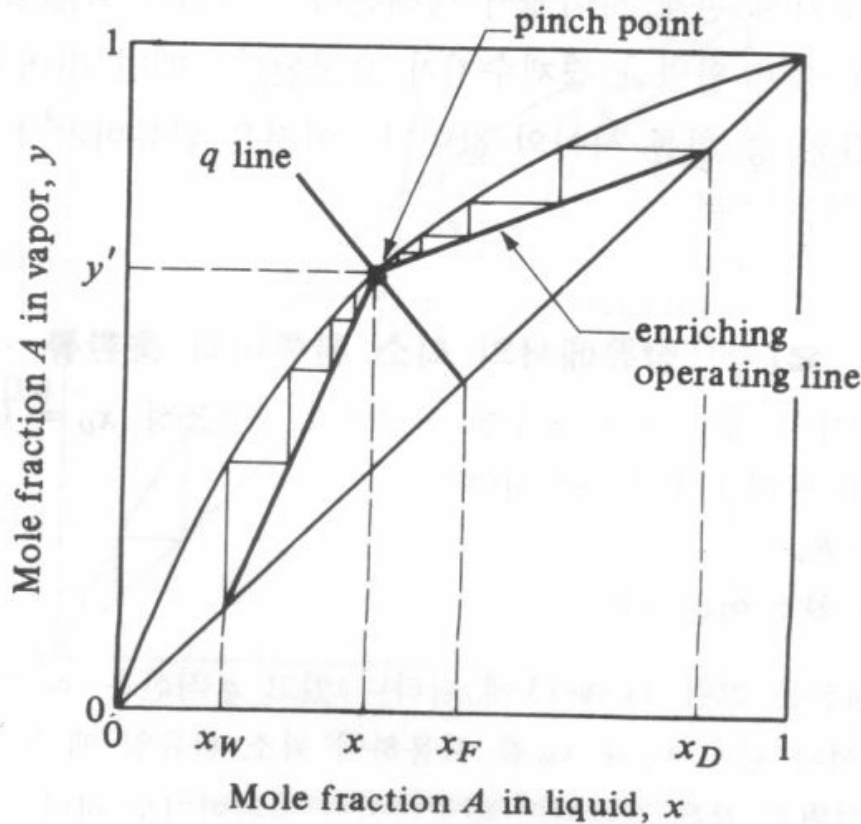
$$y_{n+1} = \frac{R_D}{R_D + 1} x_n + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

if $R_D = \infty$ or $D = 0$,
then $y = x + 0$

$$N_{\min} = \frac{\ln \left(\frac{x_D}{1 - x_D} \cdot \frac{1 - x_B}{x_B} \right)}{\ln \alpha_{av}}$$

FIGURE 11.4-10. Total reflux and minimum number of trays by McCabe-Thiele method.

11.4c 최소환류비



$$y_{n+1} = \frac{R_D}{R_D + 1} x_n + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

$$\frac{R_D}{R_D + 1} = \frac{x_D - y'}{x_D - x'}$$

윗식을 만족하는 환류비를
최소환류비 (R_{\min}) 라 한다.

FIGURE 11.4-11. Minimum reflux ratio and infinite number of trays by McCabe-Thiele method.

11.5 단효율

- 3가지 단효율
 - 총괄 단효율: E_0
 - 머프리 단효율: E_M

$$E_0 = \frac{\text{이론단수(평형단수)}}{\text{실제단수}}$$

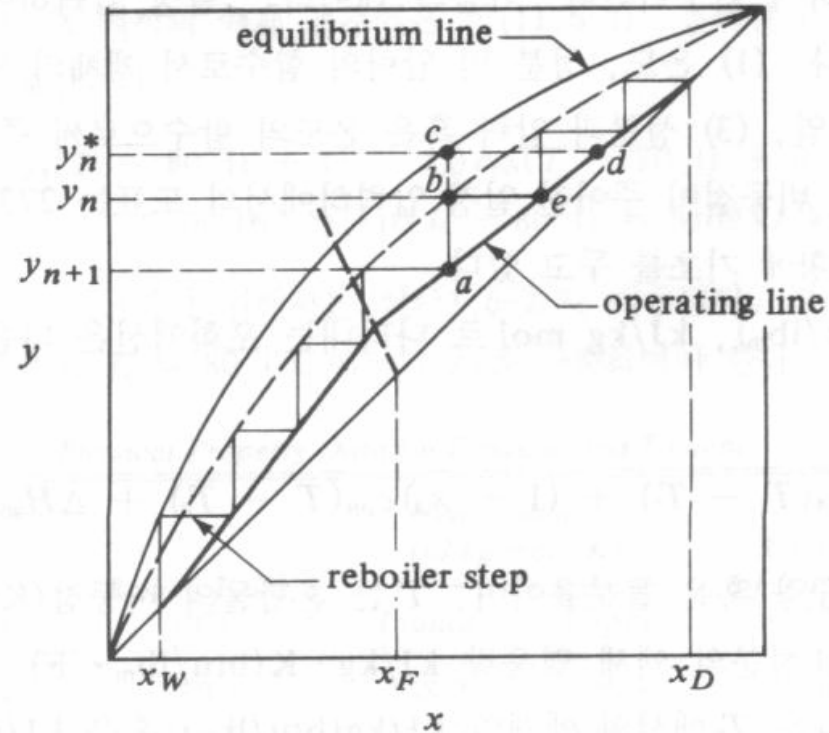


FIGURE 11.5-2. Use of Murphree plate efficiency to determine actual number of trays.

$$E_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

과제 5. ch 11장 연습문제

11.1-3: Fig. 11.1-1/2 참조(교재 704-706쪽)

11.2-1: flash 공정

11.4-2: MS Excel 사용, 포화액일때, $q=1$

11.4-4:

11.5-1: $E_M=0.5$ 으로 수정, MS Excel 사용