

10.2-1. 평형과 헨리법칙 상수

이산화탄소의 분압은 $P_A = 1.333 \times 10^4 Pa$, 기상의 전체 압력은 $P = 1.133 \times 10^5 Pa$, 온도 $T=303 K$ 에서의 수용액상의 이산화탄소 몰분율은?

풀이: 부록 A. 3-18 (교재 961쪽) 에 의하면 이산화 탄소, 온도 $T=303 K$ 에서 물속 용해도는

$$P_A[atm] = 0.186 \times 10^4 x_A$$

이다. 따라서

$$x_A = \frac{P_A}{0.186 \times 10^4} = \frac{1.333 \times 10^4 Pa \cdot \frac{1 atm}{1.013 \times 10^5 Pa}}{0.186 \times 10^4 atm} = 7.075 \times 10^{-5}$$

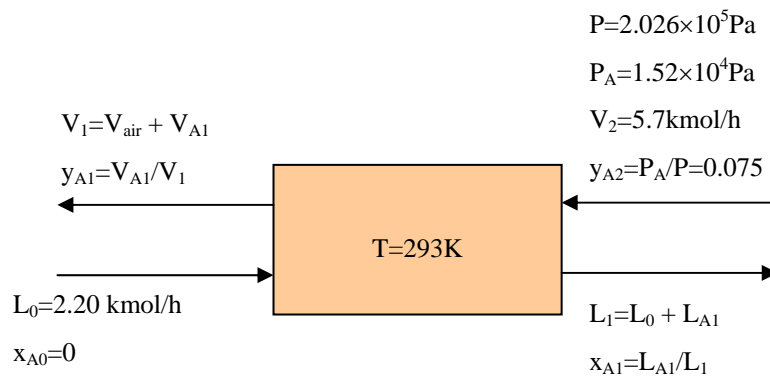
10.2-3. 기 액계에 대한 상법칙

SO_2 -air- H_2O 혼합물에서 전체 압력 $P=1 atm$, SO_2 의 분압 $P_A=0.2 atm$ 이다. 자유도는?

풀이: $F=C-P+2$ 인데, 여기서 성분수 $C=3$ 이고, 상수(phase number) $P=2$ 이다. 따라서 자유도는 $F=3$ 이다. 하지만, 이중에서 전체압력 P 가 주어져 있고, 기상의 SO_2 분압이 정해져 있으므로, 실제자유도 $F=1$ 이다. 정해지지 않은 변수는 온도이다.

10.3-1. 기액계에서 평형단 접촉

풀이: 주어진 문제를 그림으로 나타내면 다음과 같고, 주어진 값들을 그림에 명시하였다.



물-이산화황 평형식은 그림 10.2-1 (교재 646쪽) 에서 보는 바와 같이

$$p_A[atm] = 29.6x_A \tag{10.3-1-1}$$

이다. V_1, L_1, y_1, x_1 을 구하기 위하여

1) 기상의 공기는 물속으로 흡수되지 않는 불활성 물질이라고 가정하면,

$$V_{air} = V_2(1 - y_{A2}) = 5.7 \text{ kmol/h} \cdot \left(1 - \frac{1.52 \times 10^4}{2.026 \times 10^5} \right) = 5.27 \text{ kmol/h} \quad (10.3-1-2)$$

2) 단단 평형 접촉에서의 이산화황에 대한 성분물질수지식을 정리하면, 식 10.3-4 (교재 648쪽) 이 유도된다. 즉,

$$\frac{L_0}{1 - x_{A0}} x_{A0} + \frac{V_{air}}{1 - y_{A2}} y_{A2} = \frac{L_0}{1 - x_{A1}} x_{A1} + \frac{V_{air}}{1 - y_{A1}} y_{A1}$$

주어진 값을 위식에 대입하면,

$$0 + \frac{5.27}{1 - 0.075} \cdot 0.075 = \frac{2.2}{1 - x_{A1}} x_{A1} + \frac{5.27}{1 - y_{A1}} y_{A1}$$

$$\frac{2.2}{1 - x_{A1}} x_{A1} + \frac{5.27}{1 - y_{A1}} y_{A1} = 0.4273 \quad (10.3-1-3)$$

여기에서 액상과 기상은 평형상태에서 유출되므로, 두 상은 평형식 (10.3-1-1) 을 만족한다.

식 (10.3-1-1) 을 기상의 몰분율로 표현하면,

$$y_A \equiv \frac{p_A}{P} = \frac{29.6}{P} x_A = \frac{29.6 \text{ atm}}{2.026 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \frac{1 \text{ atm}}{1.013 \times 10^5 \text{ Pa}}} x_A = 14.8 x_A \quad (10.3-1-4)$$

3) 식 (10.3-1-4) 를 식 (10.3-1-3) 에 대입하여 풀면,

$$\frac{2.2}{1 - x_{A1}} x_{A1} + \frac{5.27}{1 - 14.8 x_{A1}} 14.8 x_{A1} = 0.4273$$

이식은 2차방정식으로서 해를 구하면, $x_{A1} = 0.005$ 이다 (엑셀에서 도구의 해찾기 사용).

따라서 $y_{A1} = 14.8 \times 0.005 = 0.074$ 이다.

4) 유출되는 기상의 유량을 구하면,

$$y_{A1} = \frac{V_{A1}}{V_1} = \frac{V_{A1}}{V_{A1} + V_{air}}$$

이므로

$$0.074 = \frac{V_{A1}}{V_{A1} + 5.27} \quad \text{이고, } V_{A1} = 0.416 \text{ kmol/h}$$

따라서 $V_1 = V_{air} + V_{A1} = 5.686 \text{ kmol/h}$

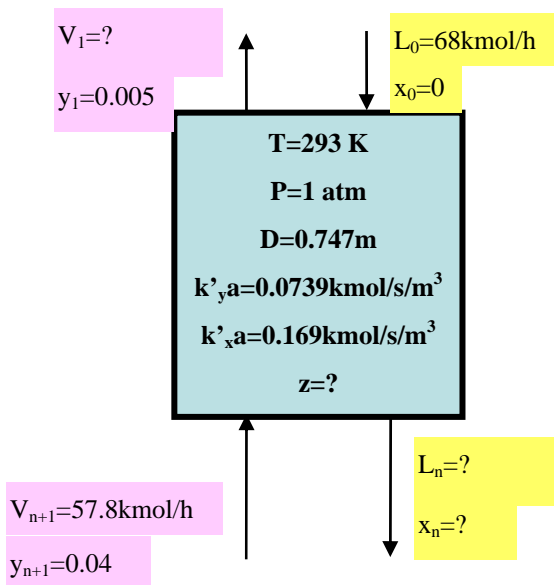
5) 유출되는 액상의 유량은 기상의 유량을 구하는 방법과 동일하게 구할 수 있다.

$$x_{A1} = \frac{L_{A1}}{L_1} = \frac{L_{A1}}{L_{A1} + L_0}$$

$$0.005 = \frac{L_{A1}}{L_{A1} + 2.2} \rightarrow L_{A1} = 0.011 \text{ kmol/h}$$

따라서, $L_1 = L_{A1} + L_0 = 2.211 \text{ kmol/h}$

10.6-6 충전탑에서의 암모니아 흡수



탑의 높이를 계산하는 순서는

- 1) 먼저 미지수, V_1, L_n, x_n 을 물질수지식을 이용하여 구한다.
- 2) 평형선과 작업선을 구한다.
- 3) 탑 상부와 하부의 기액 계면에서 평형농도, y_{Ai}, y_{Ani} 를 구하기 위하여 막 물질전달계수 ($k'_x a, k'_y a$) 를 이용한다.
- 4) 기상이 잃은 유량과 기액 표면에서 전달된 유량과의 관계식,

$$\frac{V}{S} (y_{A1} - y_{A2}) = k'_y \cdot a \cdot z \cdot (y_A - y_{Ai})_{lm}$$

으로부터 탑의 높이를 구한다.

1) $y_1 = \frac{V_{A1}}{V_1} = \frac{V_{A1}}{V_{A1} + V_{air}}$ 이다. 여기에서 $V_{air} = V_{n+1}(1 - y_{n+1}) = 55.488 \text{ kmol/h}$ 이고, $y_1=0.005$ 이므로,

$$V_{A1} = \frac{y_1}{(1 - y_1)} V_{air} = 0.279 \text{ kmol/h}$$

따라서 $V_1 = V_{air} + V_{A1} = 55.767 \text{ kmol/h}$ 이다.

유출되는 액상 유량은 $L_n = L_0 + L_{An}$ 이다. 여기에서 액상의 암모니아 유출량은 질량보존에 의해 기상이 잃은 암모니아 유량과 동일하다. 즉, $L_{An} = V_{n+1} \cdot y_{n+1} - V_1 \cdot y_1 = 2.033 \text{ kmol/h}$ 이다.

따라서 $L_n = L_0 + L_{An} = 70.033 \text{ kmol/h}$ 이고, $x_n = \frac{L_{An}}{L_n} = 0.029$

2) 평형선은 부록 A.3-22 (교재 962쪽) 에서 실험데이터로부터 유추할 수 있다. 20°C에서 액상 물분율이 $x_A=0.0309$ 일때까지 평형선을 직선으로 간주할 수 있으므로,

$$y = \frac{0.0239}{0.0309}x = 0.7735x \quad (10.6-6-1)$$

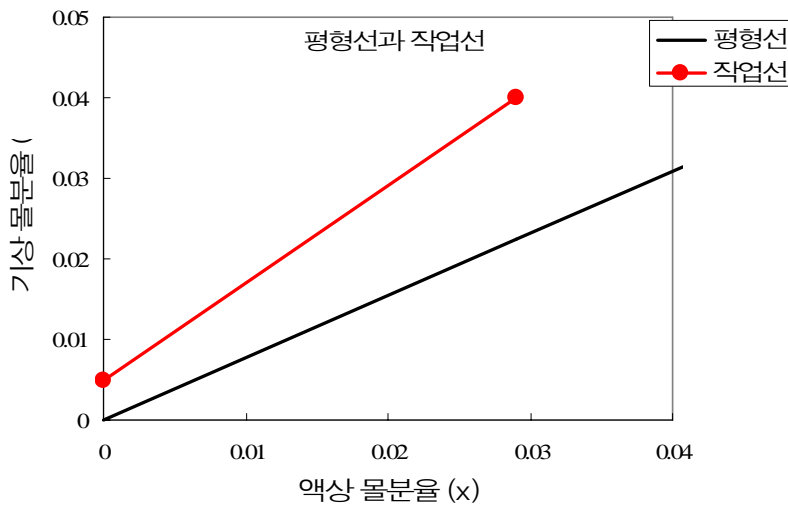
작업선은 성분물질수지식으로부터 다음과 같다.

$$y = \frac{L_n}{V_{n+1}}x + \frac{V_1y_1 - L_0x_0}{V_{n+1}}$$

주어진 값들을 대입하여 작업선을 구하면 다음과 같다.

$$y = 1.212x + 0.0048$$

작업선과 평형선을 그래프로 표현하면 다음과 같다.



3) 탑 상부와 하부 기액 계면에서의 평형농도를 구하기 위하여 먼저 탑 상부의 평형농도 기울기는

$$slope_{upper} = -\frac{k'_x a / (1 - x_0)}{k'_y a / (1 - y_1)} = \frac{-0.169 / (1 - 0)}{0.0739 / (1 - 0.005)} = -2.275$$

탑하부의 평형농도 기울기는

$$slope_{lower} = -\frac{k'_x a / (1 - x_n)}{k'_y a / (1 - y_{n+1})} = \frac{-0.169 / (1 - 0.029)}{0.0739 / (1 - 0.04)} = -2.261$$

작업선에서 출발하여 평형선에 도달하는 두개의 <평형-작업 농도선>은 기울기와 한점을 알고 있으므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$y_{upper} = -2.275 \cdot (x - 0) + 0.005 \quad (10.6-6-2)$$

$$y_{lower} = -2.261 \cdot (x - 0.029) + 0.04$$

<평형-작업 농도선>과 평형선이 만나는 점은 두 직선의 교차점을 구하는 문제로서 식 (10.6-6-2) 에 평형선 식 (10.6-6-1) 을 대입하여 풀면, 탑 상부에 대하여

$$0.7735x = -2.275x + 0.005,$$

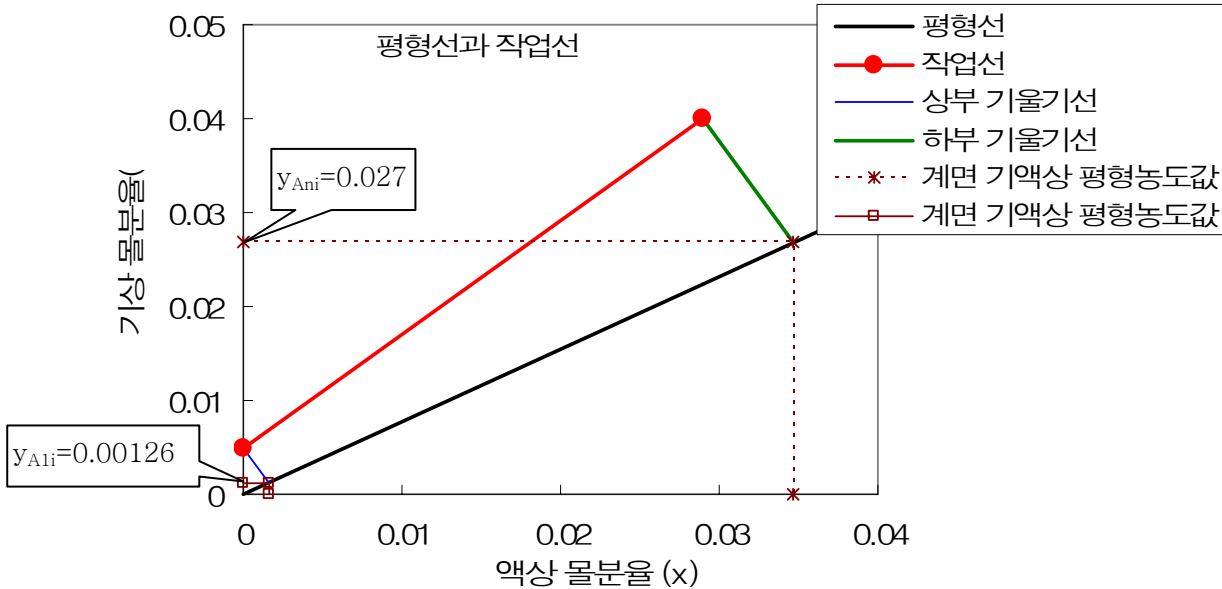
$$\therefore x_{upper} = 0.00164, y_{upper} = y_{Ai} = 0.00127$$

탑 하부에 대하여,

$$0.7735x = -2.261(x - 0.029) + 0.04,$$

$$\therefore x_{lower} = 0.035, y_{lower} = y_{Ani} = 0.027$$

<평형-작업 농도선> 을 그래프에 표현하면 다음과 같다.



4) 흡수탑의 높이는 교재 682 쪽으로부터 다음과 같다.

$$z = \frac{V (y_{n+1} - y_1)}{S (y - y_i)_{lm}} \cdot \frac{1}{k'_y \cdot a}$$

여기에서 평균 기체 유량 $V = \frac{57.8 + 55.767}{2} = 56.78 \text{ kmol/h}$, 흡수탑의 단면적

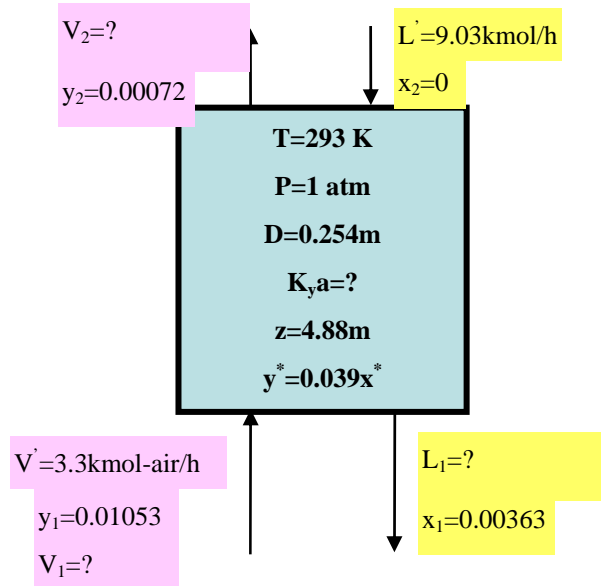
$S = 3.14 \times \frac{(0.747\text{m})^2}{4} = 0.438\text{m}^2$, 기상의 유출입 물분율 $y_{n+1} = 0.04, y_1 = 0.005$, 기상물질전달 계수

$k'_y a = 0.0739 \text{ kmol/s} = 266.04 \frac{\text{kmol}}{\text{h} \cdot \text{m}^3}$, 대수평균 기상농도

$$(y - y_i)_{lm} = \frac{(y_1 - y_{i1}) - (y_{n+1} - y_{i(n+1)})}{\ln \frac{(y_1 - y_{i1})}{(y_{n+1} - y_{i(n+1)})}} = \frac{(0.005 - 0.00127) - (0.04 - 0.027)}{\ln \frac{(0.005 - 0.00127)}{(0.04 - 0.027)}} = 0.00746$$

이다. 따라서 $z = \frac{56.78 (0.04 - 0.005)}{0.438 \cdot 0.00746} \cdot \frac{1}{266.04} = 2.274\text{m}$

10.6-8. 실험적인 총괄 물질전달 계수의 추정



총괄물질전달계수 $\frac{1}{K'_y a} = \frac{1}{k'_y a} + \frac{m}{k'_x a}$ 이므로, 기상물질전달 계수 $k'_y a$, 액상물질전달계수 $k'_x a$ 그리고 평형계수 m 을 구하면 된다.

1) 먼저 유출입 기액상 유량을 구한다. 유입되는 기상의 유량은

$$y_1 = \frac{V_{A1}}{V_{A1} + V'} \rightarrow V_{A1} = \frac{y_1}{1 - y_1} V' = 0.0351$$

$$\therefore V_1 = V_{A1} + V' = 3.3351 \text{ kmol/h}$$

유출되는 기상의 유량은

$$y_2 = \frac{V_{A2}}{V_{A2} + V'} \rightarrow V_{A2} = \frac{y_2}{1 - y_2} V' = 0.0024$$

$$\therefore V_2 = V_{A2} + V' = 3.3024 \text{ kmol/h}$$

유출되는 액상의 유량은

$$x_1 = \frac{L_{A1}}{L_{A1} + L'} \rightarrow L_{A1} = \frac{x_1}{1 - x_1} L' = 0.0329$$

$$\therefore L_1 = L_{A1} + L' = 9.0629 \text{ kmol/h}$$

2) 공기중 희석된 아세톤의 액상으로 흡수 평형계수 $m=0.039$ 은 실험데이터로부터 알 수 있다.

3) 교재 695 쪽에 의하면, 25.4 mm Rasching rings 충전물질에 대하여 기상물질전달계수는

$$H_G = \frac{V}{k'_y a S} = 0.557 \cdot G_y^{0.32} \cdot G_x^{-0.51} \cdot N_{Sc}^{0.5}$$

이다. 여기에서, 기상의 평균총질량 flux 는

$$G_y = \frac{\frac{3.3 \text{ kmol}}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{28.84 \text{ kg}}{1 \text{ kmol}} + \frac{0.02 \text{ kmol}}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{58.08 \text{ kg}}{1 \text{ kmol}}}{0.0506 \text{ m}^2} = 0.5284 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

액상의 평균총질량 flux 는

$$G_x = \frac{\frac{9.03 \text{ kmol}}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{18 \text{ kg}}{1 \text{ kmol}} + \frac{0.016 \text{ kmol}}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{58.08 \text{ kg}}{1 \text{ kmol}}}{0.0506 \text{ m}^2}$$

$$= 0.8974 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

기상에 대한 Schmidt number 는

$$N_{Sc} = \frac{\mu_{air}}{\rho_{air} D_{AB}} = \frac{1.82 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.15 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 1.011$$

따라서 $H_G = 0.4826 \text{ m}$ 이고, 기체물질전달계수의 역수는

$$\frac{1}{k'_y a} = \frac{S}{V} \cdot 0.4826 = \frac{0.0506 \text{ m}^2 \cdot 0.4826 \text{ m}}{3.32 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}} = 0.007361 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{h}}{\text{kmol}}$$

교재 696쪽에 의하면, 액상물질전달계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_L = \frac{L}{k'_x a S} = 2.35 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{G_x}{\mu_L} \right)^{0.22} N_{Sc}^{0.5}$$

여기에서 $G_x = 0.8974 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ 이고, 물의 점도는 $\mu_L = 1.0 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$, 액상의 Schmidt number 는 부록

에서 물성치를 찾아서 구하면, $N_{Sc} = \frac{\mu_L}{\rho_L D_{AB}} = \frac{1 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{998.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1.28 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 782.66$ 이다.

따라서 $H_L = 0.2934 \text{ m}$ 이고, 액상물질전달계수의 역수는

$$\frac{1}{k'_x a} = H_L \frac{S}{L} = 0.001643 \frac{\text{m}^3 \text{ h}}{\text{kmol}}$$

총괄물질전달계수의 역수는 $\frac{1}{K'_y a} = \frac{1}{k'_y a} + \frac{m}{k'_x a}$ 이므로,

$$K'_y a = \frac{1}{\frac{1}{k'_y a} + \frac{m}{k'_x a}} = \frac{1}{0.007361 + 0.039 \cdot 0.001643} = 134.67 \frac{\text{kmol}}{\text{h} \cdot \text{m}^3} = 0.0374 \frac{\text{kmol}}{\text{s} \cdot \text{m}^3}$$