

폐가스 흡수장치의 기본 설계

(2)

■ 본연합회 발행 「폐가스흡수처리」

4. 충전높이

충전높이 Z를 결정하는 데는 이 동단위수와 HTU를 조작조건, 평형관계, System의 물성 등에 근거하여 구하면 된다. 즉 HTU는 1-2-3에 상술한 바와 같이 용량계수와 다음의 관계에 있고

HTU=(mol 유속)/(용량계수)
또는 대응하는 추진력에 기인하는 NTU와 HTU는

$$Z = H_{OG} \cdot N_{OG} = (G_{Mav} / K_G a P) \cdot N_{OG} \quad (6)$$

$$= H_{OL} \cdot N_{OL} = (L_{Mav} / K_L a \rho_{Mav}) \cdot N_{OL} \quad (7)$$

이므로 HTU 또는 용량계수가 실험식이라든가 실측치로서 주어져 있다면 용이하게 Z를 산출할 수 있다.

충전탑의 용량계수는 각종 충전물 및 기·액계에 대해 측정된 data도 풍부하여 그것들이 제5장에 제시되어 있다. 한편 $k_G a$ 및 $k_L a$ 의 실험식 또는 k_G, k_L, a 의 각 상관식에서 저항의 가성치가 성립한다고 하면 (1-69)(1-71)식에 의해 총괄 용량계수, 또는 총괄 HTU를 결정할 수 있다.

4-1 용량계수와 HTU의 실험식

비교적 신뢰성이 높다고 알려져 있는 식은 액측에 대한 Sherwood-Holloway의 식¹¹⁾ 가스측에 대한

Fellinger의 식¹²⁾이 있다.

액측 용량계수와 H_L : Sherwood-Holloway의 식

$$\frac{k_L a}{D_L} = \alpha \left(\frac{L}{\mu} \right)^{1-n} \left(\frac{\mu}{\rho D} \right)_L^{0.5} \quad (8)$$

$$H_L = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{L}{\mu} \right)^n \left(\frac{\mu}{\rho D} \right)_L^{0.5} \quad (9)$$

여기서 L/μ 는 (1/m)의 단위를 쓰고, α, n 의 값은 표 4¹³⁾에 제시한다. 가스측 용량계수와 H_G : Fellinger의 data정리식

$$k_G a = \beta G^{1-m} L^q \left(\mu / \rho D \right)^{-S_G} \quad (10)$$

$$H_G = \beta G^m L^{-q} \left(\mu / \rho D \right)^{S_G} \quad (11)$$

여기서 G, L은 기·액의 각 질량속도(kg/m²·hr)이고, β, m, q 의 값은 표 5¹⁸⁾에 제시한다. s는 0.5~1.0의 data가 많지만 s=0.5로 되어 있다.

4-2 물질이동계수와 비표면적에 의한 용량계수

물 및 유기용매에 대한 흡수, 증발의 문헌값과 실험값에서 (1-73)식의 a_w 에 의해 분리한 k_G 를 정리하여 (1-75)식을 얻을 수 있다.¹⁶⁾

$$\frac{k_G R T}{a_i D_G} = 5.23 \left(\frac{G}{a_i \mu G} \right)^{0.7}$$

$$\left(\frac{\mu_G}{\rho_G D_G} \right)^{1/3} (a_i D_p)^{-2.0} \quad (1-75)$$

위의 식은 15mm이상의 Ring, Saddle, 충전물의 $k_G a$ 를 $\pm 30\%$ 오차내에서 추산할 수 있다. 또한 (10)식의 $s=0.5$ 에 비교하여 (1-75)의 k_G 에 미치는 확산계수의 의존성은 다르지만 이 점에 대해서도 기상의 슈미트수가 일반적으로 0.2~2의 범위내에 있고, 실험오차에 들어가므로 어느 것이나 단정하기 어렵다. 또 15mm이하의 충전물에 대한 실험치의 상관정도는 (1-75)식의 계수 5.23을 2.00로 대입하는 편이 높다. 그러나 k_G 와 a 에 미치는 조작변수의 영향을 고려하면 기상(기체상)혼합에 의한 추진력의 변화를 무시할 수는 없을 것이다.

한편 액측 용량계수의 식 (8), (9)는 물의 표면장력이 거의 같은 수용액의 경우에만 적용할 수 있다. 필자들도 이와 같은 system에 대한 $k_L a$ 를 (1-73)식의 a_w 에 근거하여 정리해 $\pm 10\%$ 오차내에서 (12)식에 의해 k_L 을 상관할 수가 있었다.¹⁵⁾

$$k_L \left(\frac{\rho_L}{\mu_L g} \right)^{1/3} = 0.015 \left(\frac{L}{a_i \mu_L} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{-1/2} (a_i D_p)^{0.4} \quad (12)$$

따라서 물을 흡수액으로 하는 경우는 (12)식과 (1-73)식에서 정도 높은 $k_L a$ 를 추산할 수 있다.

표 4 (8), (9)식의 상수, a, n

총 전 물	크 기(in)	α	n	적 용 범 위 L(kg/m ² ·hr)
Raschig Ring	3/8	3110	0.46	2000~75,000
	1/2	1400	0.35	
	1	425	0.22	
	1½	382	0.22	
	2	240	0.22	
Bert Saddle	1/2	687	0.28	2000~75,000
	1	778	0.28	
	1½	732	0.28	
Partition Ring	3	160	0.16	12,000~70,000
Single · Spiral	3	380	0.21	2000~75,000
Triple · Spiral	3	856	0.36	12,000~70,000

표 5 (11)식의 상수, β , m, q

총전물의 종류	β	m	q	적용범위(kg/m ² ·hr)		
				G	L	
Raschig Ring(in)	3/8	0.730	0.45	0.47	1000~2500	2500~ 7500
	1	2.90	0.39	0.58	1000~4000	2000~ 2500
	1	2.64	0.32	0.51	1000~3000	2500~22,500
	1½	8.24	0.38	0.66	1000~3500	2500~ 7500
	1½	0.812	0.38	0.40	1000~3500	7500~22,500
	2	1.237	0.41	0.45	1000~4000	2500~22,500
Bert Saddle	1/2	19.85	0.30	0.74	1000~3500	2500~ 7500
	1/2	0.225	0.30	0.24	1000~3500	7500~22,500
	1	0.638	0.36	0.40	1000~4000	2000~22,500
	1½	1.9	0.32	0.45	1000~5000	2000~22,500
Partition Ring	3	423	0.58	1.06	750~4500	15,000~50,000
Single Spiral	3	0.658	0.35	0.29	650~3500	15,000~50,000
Double Spiral	3	6.75	0.38	0.60	1000~5000	2500~15,000
Triple Point	No.6146	1.24	0.37	0.39	650 ~ 5000	15,500~32,500
Grit	No.6295	1.66	0.17	0.27	500~5000	10,000~57,500

그러나 유기용매라든가 표면장력이 적은 수용액에 대한 k_L 은 물의 값보다 일반적으로 적은 경우가 많으므로 a_w 기준의 Re 수($\equiv L/a_w \mu_L$)를 이용해서 정리한 것이 (1-74)식이고, 변형하면

$$k_L \left(\frac{\rho_L}{\mu_L g} \right)^{1/3} = 0.0051 \left(\frac{L}{a_w \mu_L} \right)^{2/3}$$

$$\left(\frac{\mu_L}{\rho_L \mathcal{D}_L} \right)^{-1/2} (a_t D_p)^{0.4} \quad (1-74)$$

위의 식은 (12)식의 k_L 보다도 물에 대한 정도는 낮지만 물 외의 수용액, 유기용매계도 포함하여 $\pm 20\%$ 오차내에서 $k_L a$ 를 추산할 수 있다. 또한 위의 식에 대응하는 기·액 접촉면적은 (1-73)식의 비표면적

$$\frac{a}{a_t} = 1 - \exp \left\{ -1.45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0.75} \right\}$$

$$\left(\frac{L}{a_t \mu_L} \right)^{0.1} \left(\frac{L^2 a_t}{\rho_L^2 g} \right)^{-0.05}$$

$$\left(\frac{L^2}{\sigma \rho_L a_t} \right)^{0.2} \quad (1-73)$$

에 같다고 하는 가정 $a = a_w$ 에 기인한다.

여기서 (1-75)식의 k_G 와 (1-73)식의 a_w 와의 곱으로써 얻어지는 $k_G a$ 와 (10)식의 비교를 아래에 제시한다.

흡수계: 물에 의한 공기 중의 암모니아 흡수

총전물: 1in Raschig Ring(자기체) $a_t = 4.7/0.0254 = 185m^2/m^3$
온도: 27°C, 압력: 1기압
물성치: 기상 확산계수 $\mathcal{D}_G = 0.066m^2/hr$, 밀도 $\rho_G = 1.165kg/m^3$, 점도 $\mu_G = 6.50 \times 10^{-2} kg/m \cdot hr$
가스측 물질이동계수 k_G : (1-73)식에서 기체정수 $R = 0.082m^3 \cdot atm/kg \cdot mol \cdot ^\circ K$, $T = 301^\circ K$, $a_t D_p = 4.7$

$$k_G = 5.23 \left(\frac{G}{185 \times 6.50 \times 10^{-2}} \right)^{0.7}$$

$$\left(\frac{6.50 \times 10^{-2}}{1.165 \times 0.066} \right)^{1/3} (4.7)^{-2.0}$$

$$\left(\frac{185 \times 0.066}{0.082 \times 301} \right) = 0.0193G^{0.7}$$

[kg·mol/m²·hr·atm] (i)

기·액 접촉면적 a_w : (1-73)식에서 표면장력 $\sigma = 72dyne/cm = 9.33 \times 10^5 kg/hr^2$, 자기체의 임계 표면장력 $\sigma_c = 61dyne/cm$ (표 1-8), $\rho_L = 996kg/m^3$, $\mu_L = 3.10kg/m \cdot hr$, 중력가속도 $g = 1.27 \times 10^3 m/hr^2$ 이므로

$$\frac{a_w}{a_t} = 1 - \exp \left\{ -1.45 \left(\frac{61}{72} \right)^{0.75} \right\}$$

$$\left(\frac{L}{185 \times 3.10}\right)^{0.1} \left(\frac{185 \times L^2}{996^2 \times 1.27 \times 10^8}\right)^{-0.05}$$

$$\times \left(\frac{L^2}{996 \times 9.33 \times 10^5 \times 185}\right)^{0.2}$$

$$= 1 - \exp(-1.48 \times 10^{-2} L^{0.4}) \quad (ii)$$

$$k_{Ga_w} = 3.57G^{0.7} \{1 - \exp(-1.48 \times 10^{-2} L^{0.4})\} \quad (iii)$$

가스측 HTU : (11)식에서 $\beta = 2.90$, $m = 0.39$, $q = 0.58$, $Sc_G = 0.845$ 이므로

$$H_G = 2.67G^{0.39} L^{-0.58}$$

$$k_{Ga} = (G/29) / H_G = 0.0138L^{0.58} G^{0.61} \quad (iv)$$

한편 표 5의 $\beta = 2.64$, $m = 0.32$, $q = 0.51$ 을 이용하면

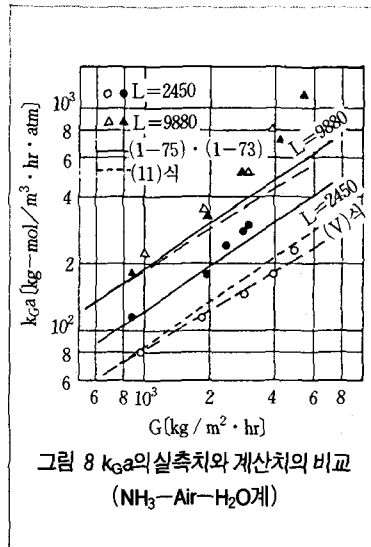
$$k_{Ga} = 0.0142L^{0.51} G^{0.68} \quad (v)$$

지금 실측치와 비교하기 위해 그 액 유속의 최소치 $L = 2450 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 에 대한 (iii)의 관계를 그림 8에 실제 선으로 표시하였다. 이것은 도시한 Houston Walker⁽¹⁴⁾의 값*(\blacktriangle , \bullet)과 거의 일치한다. 한편 (iv)와 (v)의 관계를 파선과 점선으로 그림 8에 표시하였지만, 양식의 차는 적어 Fellinger의 실측치(\circ , \triangle)와 거의 일치한다.

그런데 액의 유속이 증가함에 따라 양자의 실측치는 가까워지고 $L = 9880$ 일 때 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 (iii)과 (iv)의 관계도 일치하여 가는 경향을 나타낸다.

이 식은 많은 실험 data를 상관 지은 것이고, Fellinger의 data는 다른 실험치보다 액 유속의 의존성이 큰 영향을 나타낸다.

같은 비교를 슈미트 수가 큰 Acetone-Air-H₂O계에 대해 제시하면 $D_G = 0.0342 \text{ m}^2/\text{hr}$, $Sc_G = 1.64$



(1-75)식에서 $k_G = 0.01256G^{0.7}$, (ii)의 a_w 를 이용하여 $L = 2450 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ $k_{Ga_w} = 0.664G^{0.70} \quad (vi)$

$L = 9880$ $k_{Ga_w} = 1.03G^{0.70} \quad (vii)$

(11)식에서 $L = 2450$ $k_{Ga} = 0.861G^{0.61} \quad (viii)$

$L = 9880$ $k_{Ga} = 2.00G^{0.61} \quad (ix)$

이들의 관계와 실측치⁽¹⁴⁾의 비교를 그림 9에 표시한다. 그림에서 이 system에 대해서도 (11)식은 적용하한에서 실측치와의 편차가 큰 것을 알 수 있다.

다음에 액측에 대한 비교를 제시한다.

흡수계 : 물에 의한 탄산가스의 흡수(25°C)

충전물 : lin-Raschig Ring(자기제)

물성치 : 액상확산계수 $D_L = 1.93 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec} = 6.95 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{hr}$, 액점도 $\mu_L = 3.22 \text{ kg/m} \cdot \text{hr}$, 액밀도 $\rho_L = 997 \text{ kg/m}^3$, $\sigma = 9.33 \times 10^5 \text{ kg/hr}$

액측 물질이동계수 k_L : 물을 흡

수제로 하기 때문에 (12)식이 적용된다.

$$k_L = 0.015 \left(\frac{L}{185 \times 3.22}\right)^{1/2} (464)^{-1/2}$$

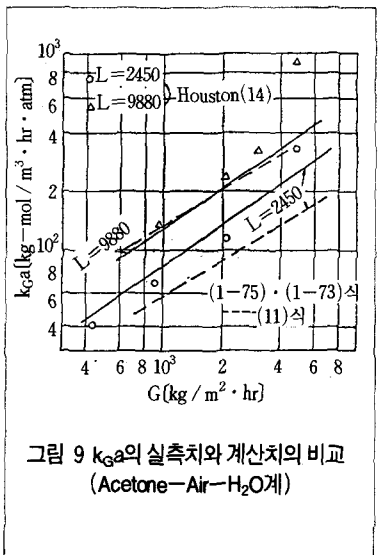
$$(4.7)^{0.4} \left(\frac{997}{3.22 \times 1.27 \times 10^8}\right)^{-1/3}$$

$$= 3.96 \times 10^{-3} L^{1/2} (\text{m/hr}) \quad (X)$$

(1-74)식에 의하면 $k_L = 1.495 \times 10^{-2} (L/a_w)^{2/3} (\text{m/hr}) \quad (xi)$

비표면적 a_w : (1-73)식에서의 27°C와 25°C의 물의 물성치의 변화는 적으므로 (ii)식이 적용된다.

$$(X), (ii) \text{식에서 } k_L a_w = 7.33 L^{1/2} [1 - \exp(-1.48 \times 10^{-2} L^{0.4})] \quad (xii)$$



$$(xi), (ii) \text{식에서 } k_L a_w = 0.0853 L^{2/3} [1 - \exp(-1.48 \times 10^{-2} L^{0.4})]^{1/3} \quad (xiii)$$

(8)식에 의한 $k_L a$: 표 4를 참조하여

$$k_L a = 425 \left(\frac{L}{\mu_L} \right)^{1-0.22} (464)^{1/2} D_L$$

$$= 6.38 \times 10^{-2} (L/\mu)^{0.78} = 2.56 \times 10^{-2} L^{0.78} \quad (\text{XIV})$$

(XII), (XIII), (XIV)의 관계를 실측치와 같이 표시한 것이 그림 10이고, 흡수액이 물이므로 (12)식의 k_L 과 (1-73)식의 $k_L a_w$ 는 실측치와 완전히 일치한다. 한편 (1-74)식에 의한 $k_L a_w$ 은 액 유속이 큰 범위에서 약 8% 정도 적게 되지만 Sherwood의 (8)식은 일반적으로 큰 경향을 나타낸다고 알려져 있다.

lin-Berl Saddle(자기제)의 경우 $a_t = 5.6/0.0254 = 220 \text{m}^2/\text{m}^3$ 이고 $a_w/a_t = 1 - \exp(-1.336 \times 10^{-2} L^{0.4})$

(12)식에 의한 $k_L = 3.86 \times 10^{-3} L^{1/2}$

(1-74)식에 의한 $k_L = 1.602 \times 10^{-2} (L/a_w)^{2/3}$

$$k_L a_w = 0.85 L^{1/2} [1 - \exp(-1.336 \times 10^{-2} L^{0.4})] [1/\text{hr}] \quad (\text{XV})$$

$$k_L a_w = 0.0971 L^{2/3} [1 - \exp(-1.336 \times 10^{-2} L^{0.4})]^{1/3} [1/\text{hr}] \quad (\text{XVI})$$

(8)식에 의한 $k_L a$: 표 4에서 $k_L a = 778 (L/\mu)^{0.72} (Sc)^{1/2} (6.95 \times 10^{-6})$

$$= 0.0503 L^{0.72} [1/\text{hr}] \quad (\text{XVII})$$

(XV), (XVI), (XVII)의 관계를 실측치와 같이 표시한 것이 그림 11이고, 이것들은 $\pm 10\%$ 오차내에서 일치한다.

이상의 비교에서 분명한 바와 같이 k_G , k_L , a_w 의 상관식을 이용하면 Ring, Saddle, 구상의 각종 충전물의 물, 수용액, 유기용액의 각 system에 대한 용량계수를 정도 높게 추산할 수 있다. 한편 (8), (10)

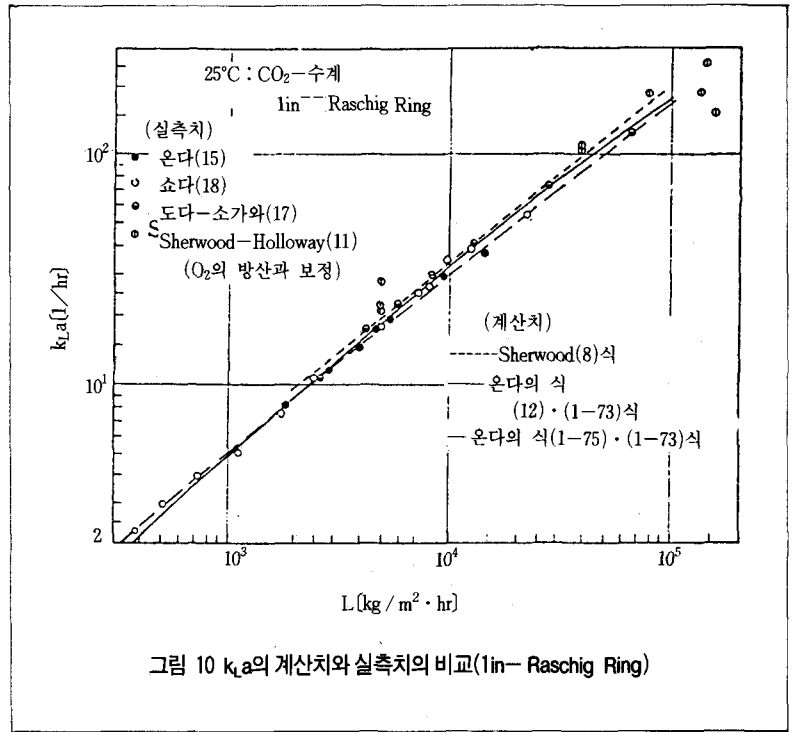


그림 10 $k_L a$ 의 계산치와 실측치의 비교(lin-Raschig Ring)

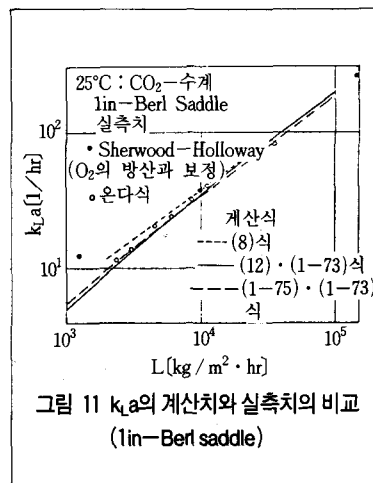


그림 11 $k_L a$ 의 계산치와 실측치의 비교(lin-Berl saddle)

식은 한정된 system에만 적용되고 적용범위도 좁다.

5. 설계 계산 예

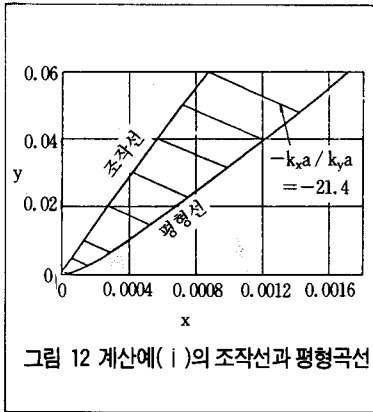
i) 황화광의 배소로에서 배출

되는 공기 94.0, SO_2 , 6.0vol%의 가스를 lin-Raschig Ring 충전탑에서 물로 세정하고, 출구 가스 속의 SO_2 가 0.1% 이하로 될 때까지 제거코자 한다. 가스는 매시 454kg 처리한다고 보고, 탑은 flooding속도의 50%로 사용하도록 설계되고, 물은 최소 액 유속의 2배 사용한다고 한다. 30°C , 1atm으로 조작할 때 필요한 탑의 직경 및 충전높이를 구하라. 단 계산에 필요한 data는 다음과 같을 것이다.

액밀도 $\rho_L = 997 \text{kg}/\text{m}^3$, 액점도 $\mu_L = 0.801 \text{c.p.}$, 표면장력 $\sigma = 72 \text{dyne}/\text{cm}$, 가스점도 $\mu_G = 0.066 \text{kg}/\text{m} \cdot \text{hr}$

SO_2 - H_2O 계의 평형 data는 제5장 표 5-1에 제시되어 있고, 이것을 그림 12에 도해한다.

조작조건은 $y_1 = 0.06$, $y_2 = 0$.



001, $x_2=0$ 이고 평형곡선을 이용하여 $x_1^*=0.00174$ 로 된다.

$$G_M S = (454) / [(0.06)(64) + (0.94)(29)] = 14.7 \text{ kg-mol/hr}$$

$$G_{Mi} S = G_M S (1 - y_1) = (14.7)(0.94) = 13.8 \text{ kg-mol/hr}$$

조작선의 식(1-47)에서

$$13.8 \left(\frac{0.06}{0.94} - \frac{0.001}{0.999} \right) = (L_{Mi} S)_{\min} \left(\frac{0.00174}{0.99826} \right)$$

$$\therefore (L_{Mi} S)_{\min} = 492 \text{ kg-mol/hr}$$

이 최소액 유량의 2배를 사용함으로써 인해 $L_{Mi} S = 2(L_{Mi} S)_{\min} = 984 \text{ kg-mol/hr}$ 이 액의 유량에 대응하는 출구농도 x_1 은 (1-47)식에서

$$13.8 \left(\frac{0.06}{0.94} - \frac{0.001}{0.999} \right) = 984 \left(\frac{x_1}{1-x_1} \right)$$

$$\therefore x_1 = 0.00088$$

따라서 조작선의 식(1-47)을 $x \ll 1$ 의 경우에 간단히 하면

$$x = 0.01388 \frac{y}{1-y} - 0.00000655$$

로 되므로, 이 관계를 $y=0.06 \sim 0.001$ 까지 그림 12의 평형선도상에 긋는다.

다음에 탑의 직경을 구하기 위해 그림 7에서 flooding속도를 계산한다. 이때 탑저의 조건을 기준으로 한다.

$(GS)_1 = 454 \text{ kg/hr}$, $(LS)_2 = (984)(18) = 17700 \text{ kg/hr}$ 의 물에 흡수되는 SO_2 의 양은 $(14.7)(0.06)(64) - (0.001/0.999)(13.8)(64) = 55.62 \text{ kg/hr}$ 로 되므로 탑을 지나는 액의 유량은

$$(LS)_1 = 17700 + 56 = 17756 \text{ kg/hr}$$

로 된다. 한편 입구 가스의 밀도는 평균 분자량이 $(29)(0.94) + (64)(0.06) = 31.0$ 이므로 $\rho_G = (31/22.4)(273/303) = 1.24 \text{ kg/m}^3$ 로 된다.

$$(L/G) \sqrt{\rho_G / \rho_L} = (17756/454)(1.24/997)^{1/2} = 1.34$$

그림 7에서

$$G_F^2 a_t \psi (\mu_L)^{0.2} / g_c \epsilon_d^3 \rho_G \rho_L = 0.015$$

표 1에서 $a_t = 190 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $\epsilon_d = 0.73$ 이라 하여

$$G_F = 2.12 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hr}$$

$$\therefore G = (0.5)(2.12 \times 10^3) = 1.06 \times 10^3 = 1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$$

$$\text{탑 단면적 } S = GS/G = (454)/(1060) = 0.428 \text{ m}^2$$

$$\text{탑 직경 } D_T [(4)(0.428)/(3.14)]^{1/2} = 0.738 \text{ m}$$

$$\text{액 질량 속도 } L = (984)(18)/(0.428) = 41400 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$$

이 G 및 L에 대한 $k_G a$ 와 $k_L a$ 를 산출하기 위해 필요한 확산계수를 추산한다. 액상 확산계수 \mathcal{D}_L : (1-26)식에서 SO_2 의 분자량 V는 표 1-2에서 44.8이라 하여

$$\mathcal{D}_L = 7.4 \times 10^{-8} \frac{T (\chi M_1)^{1/2}}{\mu V^{0.6}}$$

$$= (7.4 \times 10^{-8}) \cdot$$

$$\frac{(303)(2.6 \times 18)^{1/2}}{(0.801)(44.8)^{0.6}}$$

$$= 1.96 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

이 값은 그림 5-14의 $2.05 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 와 거의 일치한다.

기상 확산계수 \mathcal{D}_G : (1-21)식에서 임계정수는 표 5-14에서 공기 $(T_c/P_c)_1^{1/3} = [(-140.7 + 273)/37.2]^{1/3} = 1.526$

$$\text{SO}_2 (T_c/P_c)_2^{1/3} = [(157.2 + 273)/77.7]^{1/3} = 1.770$$

$$\therefore \mathcal{D}_G = \frac{0.0067 T^{1.83}}{P [(T_c/P_c)_1^{1/3} + (T_c/P_c)_2^{1/3}]^3}$$

$$\sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}}$$

$$= \frac{0.00067 (303)^{1.83}}{(1)(1.526 + 1.770)^3}$$

$$\sqrt{\frac{1}{29.0} + \frac{1}{64}}$$

$$= 0.141 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

비표면적: a_w : (1-73)식에서 $a_t = 185 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 라 하여

$$a_w / a_t = 1 - \exp \{-1.45(61/72)^{0.75} [(41400)/(185)(2.89)]^{0.1}\}$$

$$\times [(41400)^2 / (9.33 \times 10^5)(997)(185)]^{0.2} \times [(185)(41400)^2 / (997)^2 (1.27 \times 10^8)]^{-0.05}$$

$$= 0.655$$

$$\therefore a_w = a_t = (0.655)(185) = 121 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

가스측 물질이동계수 k_G : (1-75)식

$$k_G = (5.23) [(1060)/(185)(0.066)]^{0.70} [(0.066)/(1.21)(0.051)]^{1/3}$$

$$\times (4.7)^{-2.0} (185 \times 0.051) / (0.082 \times 303)$$

$$= 2.08 \text{ kg-mol} / \text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{atm}$$

$$\text{액측 물질이동계수 } k_L: (1-74) \text{ 식}$$

$$k_L = (0.0051) \left[\frac{(41400)}{(121)(2.89)} \right]^{2/3} \left[\frac{(2.89)}{(997)(7.06 \times 10^{-6})} \right]^{-1/2}$$

$$\times (4.7)^{0.4} \left[\frac{(2.89)(1.27 \times 10^8)}{(997)} \right]^{1/3} = 0.803 \text{ m/hr}$$

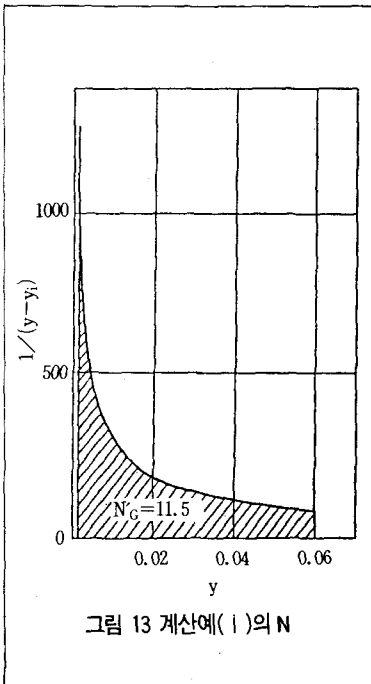
용량계수

$$k_y a = k_G a P = (2.08)(121)(1) = 252 \text{ kg-mol} / \text{m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \Delta y$$

$$k_x a = k_L a \rho_{Ma} \nu = (0.803)(121)(55.5) = (97.2)(55.5)$$

$$= 5392 \text{ kg-mol} / \text{m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \Delta x$$

또한 (8)식에 의한 $k_L a$ 는 106(1/hr)로 되어 약 9% 크다. 또 (11)식에 의한 $k_G a$ 는 적용범위 밖이지만 추정하면 $H_G = 0.112 \text{ m}$ 이고, $k_G a = 293 \text{ kg-mol} / \text{m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{atm}$ 로 된다.



한편 NTU는 가스 경막의 추진력을 기준으로 하면

$$N_G = \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1-y)_{OM}}{(1-y)(y-y_i)} dy$$

로 되므로 $-k_x a / k_y a = -(5392) / (252) = 21.4$ 되는 물매의 직선을 그림 12와 같이 조작선에서 평형선에 그음으로써 계면조성 y_i 를 구한다. 그러나 위식에서 y_a 가 적으므로 $(1-y)_{OM} \approx (1-y)$ 라 할 수 있다.* 그러므로

$$N_G = \int_{y_2}^{y_1} \frac{0.06}{0.001 y - y_i} dy$$

을 그림 13과 같이 그림상에 적분하여 $N_G = 11.5$ 가 얻어진다. 이것에 대응하는 HTU는

$$H_G = G_{Ma} \nu / k_y a = G_{Ma} \nu / k_y a \cdot Y_{BOM}$$

Y_{BOM}

지금 y 는 적으므로 y_B 의 탐정과 탐저의 대수평균을 산술평균으로 하고, 아래 주석을 참조하여

$$Y_{BOM} = \left[\frac{(1-y_1)_{OM} + (1-y_2)_{OM}}{2} \right] / (2) = (0.945 + 0.9994) / 2 = 0.972$$

$$G_{Ma} \nu = (14.7 + 13.8) / (2)(0.428) = 33.4 \text{ kg-mol} / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$$

$$\therefore H_G = (33.4) / (252)(0.972) = 0.136 \text{ m}$$

그러므로 필요 충전높이 $Z = H_G \cdot N_G = (0.136)(11.5) = 1.57 \text{ m}$ 이 경우의 압력손실은 (4)식에 의하면

$$\Delta P / Z = 12.2 \text{ kg} / \text{m}^2 \cdot (\text{충전층 1m})$$

이것은 그림 7에서

$$G^2 a_r \psi (\mu'_L)^{0.2} / g_c \epsilon_d^3 \rho_G \rho_L = 0.00378$$

$$(L/G) \sqrt{\rho_G / \rho_L} = 1.34$$

의 점에서 주어지는 parameter 선을

읽어내면 $\Delta P / Z = 0.14 \text{ in} / \text{충전층 1ft} = 12.2 \text{ mmH}_2\text{O} / \text{충전층 1m}$ 로 되어 일치한다.

그러므로 $\Delta P = (12.2)(1.57) = 19.3 \text{ kg} / \text{m}^2$ 로 된다.

ii) 반응 흡수탑의 예로서 온도 26°C , 1 atm 하에서 CO_2 2.41vol%를 포함하는 공기를 0.5N-NaOH 수용으로 세정하고, 출구조성 0.94%까지 감소시키는 충전탑의 높이를 구하기로 한다. 충전물은 1/2in-Raschig Ring으로 하고, 가스의 유속은 $930 \text{ kg} / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$, 액의 유속은 $7570 \text{ kg} / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$ 라 한다.

물성치: $\rho_G = 1.19 \text{ kg} / \text{m}^3$,

$\rho_L = 1012 \text{ kg} / \text{m}^3$, $\mu_G = 6.58 \times 10^{-2} \text{ kg} / \text{m} \cdot \text{hr}$, $\mu_L = 1.10 \text{ c.p.g}$, $\sigma = 72.1 \text{ dyne} / \text{cm}$, $\mathcal{D}_G = 0.165 \text{ cm}^2 / \text{sec}$, $\mathcal{D}_L = 1.585 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{sec}$

비표면적: (1-73)식에서 $a_r = (4.7) / (0.0127) = 370 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ 라 하고

$a \approx a_w = 118.8 \text{ m}^2 / \text{m}^3$

액측 물질이동계수: (1-74)식에서 $k_L = 0.182 \text{ m/hr}$

가스측 물질이동계수: (1-75)식에서

$$k_G = 2.97 \text{ kg-mol} / \text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{atm}$$

탐저 농도 C_{B1} : 반응은 총괄적으로 $2\text{NaOH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3$ 로 되므로 양론적 계수를 $\nu = 2$ 라 하여 물질수지를 생각하면

$$N_A = G_{Mi} \left(\frac{y_1}{1-y_1} - \frac{y_2}{1-y_2} \right)$$

$$= \frac{L}{\nu \rho_L} (C_{B2} - C_{B1})$$

$$= \frac{(930)}{(29)} \left(\frac{0.0214}{1-0.0214} - \frac{0.0094}{0.9906} \right)$$

$$= \frac{(7570)}{(2)(1012)} (0.50 - C_{B1})$$

∴ $C_{B1} = 0.394 \text{ kg} \cdot \text{mol} / \text{m}^3$
 탑내의 NaOH 평균농도 : $\bar{C}_B = (0.50 + 0.394) / (2) = 0.447$
 (1-146)식에서

$$\gamma = \frac{\sqrt{k_r \bar{C}_B \mathcal{D}_L}}{k_L} = \frac{((7.38 \times 10^3)(3600)(0.447)(1.585 \times 10^{-3})(0.36))^{1/2}}{(0.182)}$$

= 45.2
 여기서 반응속도정수 k_r 는 NaOH-CO₂계에 대하는

$\log k_r = 11.86 - (2410/T) + 0.154I$
 의 관계를 인용하였다.²⁰⁾ 또한 I는 ion 강도이고 (1-20)식에서 \bar{C}_B 에 대응하는 값을 이용하면
 $I = [(1^2)(0.447) + (1^2)(0.447)] / (2) = 0.447$

$\log k_r = 3.868$
 ∴ $k_r = 7.38 \times 10^3 \text{ l} / \text{mol} \cdot \text{sec}$
 탑내의 CO₂ 평균치 $p = 0.0154 \text{ atm}$ 을 이용하여
 $q = \bar{C}_{B0} / \nu C_{A1} = (0.447) / (2) (\text{Hp}) = 512$

여기서 헨리상수 H는 그림 1-1에서 용해도 0.0006 (mol분율/atm)을 읽어 낼 수 있으므로 H에 변환한다.

$$H = \frac{\rho_L}{H'(M_1 - x(M_1 - M_2))}$$

에 있어서 $1/H' = 0.0006$, $\rho_L = 997$, $M_1 = \text{물의 분자량 } 18$, $M_2 = \text{CO}_2 \text{의 분자량 } 44$, x 는 1기압일 때 0.0006으로 되므로 순수에 대한 헨리상수 H_w 는 $0.0333 \text{ kg} \cdot \text{mol} / \text{m}^3 \cdot \text{atm}$ 으로 된다. 이 H_w 와 0.5N-NaOH에 대한 H의 관계는 (1-18), (1-19)와 표 1-1에서 $I = 0.5$ 라 하고

$$K_s = k_g + k_c + k_a = -0.2277 + (-0.0183) + 0.3875 = 0.1415$$

$$\log \frac{H_w}{H} = K_s I = (0.1415)(0.5) = 0.0707$$

$$\therefore H = H_w \cdot 10^{-0.0707} = (0.0333)(0.849) = 0.0283 \text{ kg} \cdot \text{mol} / \text{m}^3 \cdot \text{atm}$$

라 구할 수 있다.

일반적으로 $2 < \gamma < 0.2q = 102$ 의 범위에 γ 가 있을 때는 1차 반응으로 볼 수 있다. 이 경우 $\beta = \gamma$ 로 되고 (1-133)식에서 총괄 물질 이동계수 K_G 를 구할 수 있다.

$$1/K_G = (1/2.97) + (1)/(2.83 \times 10^{-2})(45.2)(0.182) = 4.631$$

$$\therefore K_G = 0.216 \text{ kg} \cdot \text{mol} / \text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{atm}$$

이동단위수 N_{OG} : 액 본체 중 CO₂ 농도를 0이라 본다면 $y^* = 0$ 이고, (1-52)식에서

$$\therefore N_{OG} = \frac{y_1 - y_2}{[(y_1 - y_1^*) - (y_2 - y_2^*)]} \ln$$

$$\frac{(y_1 - y_1^*)}{(y_2 - y_2^*)} = \ln \frac{y_1}{y_2} = 0.824$$

$$H_{OG} = \frac{G_{Mav}}{K_G a \cdot P} = \frac{(930/29)}{(0.216)(118.8)(1)} = 1.23 \text{ m}$$

소요 충전 높이 $Z = (1.23)(0.824) = 1.01 \text{ m}$

이 값은 Tepe-Dodge²³⁾의 실험에 사용한 탑에서 인용한 것으로서 실제의 충전 높이는 0.916m이므로 계산치는 약 10% 큰 값에 불과하다.

이와 같은 계산법에 의해 20°C NaOH 및 KOH 수용액에 의한 CO₂의 흡수에 대한 $K_G a$ 와 액 알칼리 농도의 관계를 구한 것이 그림 14이다.^{21), 22)}

Tepe들의 실측치²³⁾와 그 농도의존성은 똑같다. 또 NaOH계에서는 $C_B = 1.8$ 이고, $K_G a$ 의 최대치를 나타내는 것이 인정된다.²¹⁾ 한편 KOH는 농도에 의한 액 점도의 변화가 적으므로 그 최대치는 4.5N 근방에 있다. $K_G a$ 와 C_B 의 관계는 액측 지배로 1차 반응의 경우 (1-147)식에서 $K_G a \propto C_B^{1/2}$ 로 되지만 H, \mathcal{D}_L 등에 대한 액 농도 의존성

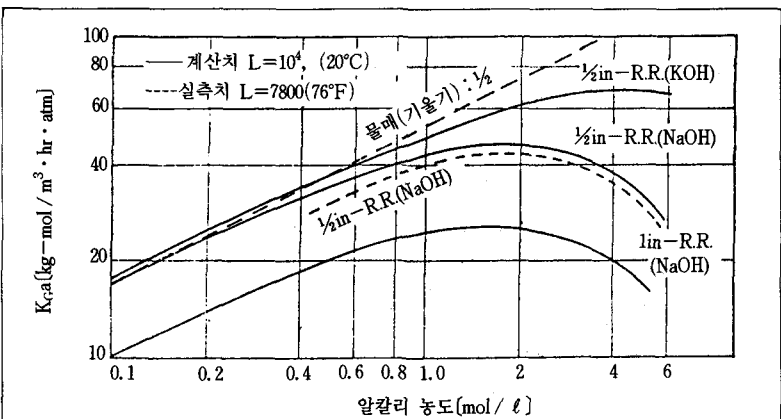


그림 14 알칼리액 농도에 의한 $K_G a$ 의 변화

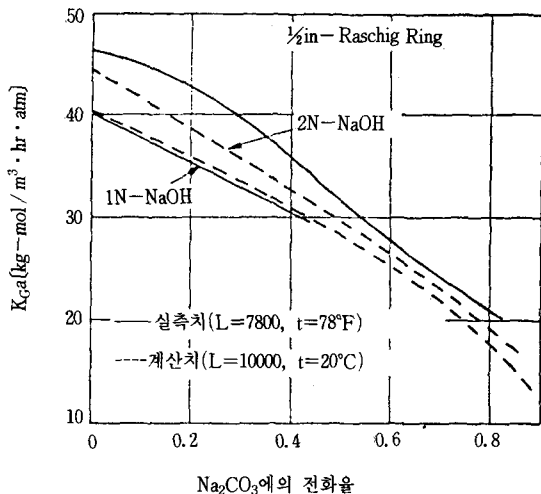


그림 15 NaOH의 전화율에 따른 K_{Ga} 의 영향

이 다르므로 그림 14와 같이 된다.

한편 알칼리는 CO_2 의 흡수와 함께 $CO_2 + OH^- \rightarrow HCO_3^-$ 로 변화하여 농도가 떨어진다. 이와 같은 NaOH의 전화율에 의한 K_{Ga} 의 영향도 위에서 설명한 K_{Ga} 의 계산법과 같은 방법으로 구할 수 있다.

일반적으로 \mathcal{D}_L , H , a 에 미치는 전화율의 기여는 Na_2CO_3 또는 $NaHCO_3$ 도 같다고 볼 수 있다. 또 ion 강도 I 도 변화하지 않으므로 OH^- 의 감소만을 고려하면 된다. 그림 15에 1N-NaOH에 대한 가스측 저항을 무시한 경우의 계산결과와 실측치의 비교를 표시한다. 계산치는 $L=10000$, 액온 $20^\circ C$ 이고 실측치와 조건은 다르지만 전화율에 의한 의존성은 일치하고 있다.

탄산나트륨 또는 탄산칼리 용액에 의한 CO_2 의 흡수에 대한 K_{Ga} 도 탄산화비 $[CO_3^{2-}] / [HCO_3^-]$ 의 관계로서 반응속도 정수를 부여하

고, 1차 반응의 가정에서 실측치와 거의 일치한다. 이에 관한 상세한 점은 문헌을 참조하기 바란다.

참고문헌

- 1) 恩田, 竹内 : 화학공학, 33, 724 (1968)
- 2) Porter, K. E. & J. J. Templeman : Trans. Inst. Chem. Engrs., 46, T86(1968)
- 3) Dutkai, E. & E. Ruckenstein : Chem. Eng. Sci., 23, 1365(1968)
- 4) Jameson, G. J. : Trans. Inst. Chem. Engrs., 45, 74(1967)
- 5) Baker, T. et al : Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 31, 296(1935)
- 6) Eckert, J.S. : Chem. Eng. Prog., 57, No. 9, 54(1961)
- 7) Leva, M. : Tower Packing and Packed Tower Design", 2nd ed. U.S. Stoneware Com.(1953)

- 8) Perry, R.H. : "Chem. Engr's Handbook" 4th ed. McGraw-Hill.(1963)
- 9) Lobo, W.E. et al : Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 41, 693(1945)
- 10) Sawistowski, H. : Chem. Eng. Sci., 6, 138(1957)
- 11) Sherwood, T.K. & F.A.L. Holloway : Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 39, 36(1940)
- 12) Fellingner, L. : Sc. D. Thesis, M.I.T.(1941)
- 13) 화학공학협회편 : "화학공학편람", 신판(1950)
- 14) Houston, R. H. & C. A. Walker : Ind. Eng. Chem. 42, 1105(1950)
- 15) 恩田, 竹内, 小山 : 화학공학, 31, 126(1967)
- 16) Onda k, H. Takeuchi & Y. Okumota : J. Chem. Eng. of Japan 1, 56(1968)
- 17) 藤田, 早川 : 화학공학 20, 113 (1956)
- 18) 疋田, 외2명 : 화학공학, 18, 454(1954)
- 19) 은전, 강본, 본전 : ibid. 24, 490(1960)
- 20) 삼한행정 : 명고옥대학공학연구과수사논문(1965)
- 21) 恩田, 竹内 : 제6회반응공학シンポジウム(명고옥), 151 (1966)
- 22) Onda K., E. Sada & H. Takeuchi : J. of Chem. Eng. of Japan, 1, 62(1968)
- 23) Tepe, J. B. & B. F. Dodge : Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 42, 827(1946) ◀