

충전탑에서 흡수에 따른 물질전달과 수력학적 거동에 관한 연구

김 석 태
 동아대학교 환경문제연구소
 (2000년 8월 28일 접수)

A Study on Hydraulic Behavior and Mass Transfer by Absorption in Packing Tower

Seuk-Taek Kim
 Environmental Problems Research Institute., Dong-A University
 (Manuscript received 28 August, 2000)

Packing tower has been used in the chemical industry and the protection of environment for a long time. In the view of environmental protection, purification of exhaust gas can be performance effective by gas absorption in counter-current packing tower. In this study, characteristics of hydraulic and mass transfer were investigated in D. 0.3m x H. 1.4m packing tower with 50mm plastic Hiflow-ring. This study was carried out "Test systems were experimented in conditions of Air, Air/H₂O, NH₃-Air/H₂O, NH₃-Air/H₂O-H₂SO₄ and SO₂-Air/H₂O-NaOH under steady state". The extent of test included dry and wetting pressure drop, physical law, separation efficiency, and hold-up as function of gas and liquid load.

Key words : Mass transfer, Pressure drop, Hold-up, Liquid load, HTU, NTU

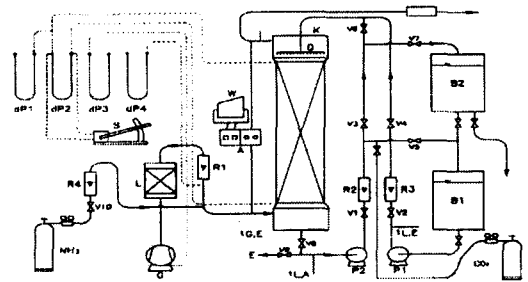
1. 서 론

대기오염 방지시설에서 각종 유해물질을 제거하는 공정에는 여러 가지 방법이 적용되고 있으나, 흡수관계에 있어서는 환경보전 및 화학공업의 증류와 흡수, 탈착 및 액-액추출 공정에서 에너지 절약의 측면으로 충전탑이 많이 사용되어지고 있다. 특히 충전탑은 환경분야에서 흡수방법에 의한 유해가스의 흡수제거, 추출 또는 탈착에 이용되고 있으며, 충전물의 재질은 플라스틱, 금속 및 세라믹 등으로 만들어져 적용조건에 따라 적절하게 선택되어지고있다. 충전물로서 개발되어 사용되고 있는것은 Hiflow-ring, Envi-pac, Hakette, Top-pac, VSP-ring, Montz-packing, Sulzer 등이 있다. 이들 충전물은 과거의 재래적 충전물 보다 압력손실이 적고 효율적인 분리작용과 유체역학, 수력학적인 특성, 액체함량, 부하한계 값 및 가스와 액체 물질전달 특성 등이 우수한 것으로 증명되었다.¹⁾ 본 연구의 결과를 근거로하여 실제 충전탑의 설계, 시공 및 산업현장에서 방지시설 운전에도 많은 도움이 될 것이다.

2. 실험 방법

본 연구는 가스부하인수 F_v , 액체부하 u_L , 체적물질전달 계수 β_v , a_v 의 함수로서, 액체함량 k_L , 확산계수 D_v , 고유압

력손실이 가스와 액체의 역류흐름에 의한 수력학적 특성과 물질전달실험에서 얻어졌다. 실험의 목적은 가스상의 압력손실, 가스-액체의 압력손실, 수력학적, 유체역학적 및 동력학적 물질전달을 규명하기 위해 다음과 같은 세개의 각각 시스템 : NH₃-Air/H₂O, NH₃-Air/H₂O-H₂SO₄, SO₂-Air/H₂O-NaOH 으로 이루어 졌다. 실험에 사용된 충



$dP_1 \sim dP_4$: U-manometer, S : Inclined-manometer, $R_1 \sim R_4$: Rota-meter, L : Humidifier, G : Gas blower, W : Recorder, A : Gas analyzer, K : Column(Tower) $V_1 \sim V_{10}$: Valve, P_1, P_2 : Pump, B_1, B_2 : Liquid storage vessel, D : Distributor

Fig. 1. Schematic diagram of experiment.

전탑의 개요는 Fig. 1에 나타내었다. 충전탑 직경 d_s 는 0.3m, 높이 H는 1.4m, 충전물은 불규칙하게 충전된 것으로 Plastic 50mm Hiflow-ring을 충전하였으며, 액체분배는 관 분배기를 이용했으며, 분배밀도 B는 600 1/m^2 으로 하였으며, 사용한 충전물은 Table 1에 나타내었다. 흡수실험을 위한 시스템에서 실험조건은 Table 2에 나 cx으며, 물질전달 성분은 SO_2 와 NH_3 로서, 각각 NaOH 와 H_2SO_4 에 흡수되어진다.

Table 1. Investigated packing

Packings	Hiflow-ring, pp
Height	50mm
Diameter	50mm
Thickness	1.5mm
$N \text{ [1/m}^3\text{]}$	6996
$a \text{ [m}^2\text{/m}^3\text{]}$	114
$\epsilon \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]}$	0.930
$W \text{ [Kg/m}^3\text{]}$	58

Table 2. Conditions and system used for investigations

System	$\text{NH}_3\text{-Air/H}_2\text{O}$	$\text{NH}_3\text{-Air/H}_2\text{O+H}_2\text{SO}_4$	$\text{SO}_2\text{-Air/H}_2\text{O+NaOH}$
$\rho_s \text{ [Kg/m}^3\text{]}$	1.18	1.18	1.18
$\rho_L \text{ [Kg/m}^3\text{]}$	998.2	1032.7	1039.4
$\nu_s \text{ [m}^2\text{/S]}$	15.2×10^{-6}	15.2×10^{-6}	15.2×10^{-6}
$D_s \text{ [m}^2\text{/S]}$	2.38×10^{-5}	2.38×10^{-5}	1.2×10^{-5}
Transfer component	Physical absorption	Chemical absorption	Chemical absorption
solute by	in the solvent	$2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{SO}_2 + 2\text{NaOH}$
		$= (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	$= \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
Conditions	System operated under normal pressure and temperature		

3. 유체 역학적 거동

Air/Water system에서 충전층 내의 건조압력손실 $\Delta P_0/H$ 와 관련된 압력손실 ΔP_{LH} 는 가스 부하인수 F_v 와 액체부하 u_L 의 함수로서 측정되었다. Fig. 2는 50mm Hiflow-ring, pp에 대한 건조압력 손실을 나타내고 있으며 건조압력손실 $\Delta P_0/H$ 는 가스 부하인수 F_v 의 함수로서 실험식 공식(2)에서 구하여졌다.²⁾

$$F_v = u_v \sqrt{\rho_v} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P_0}{H} = \phi \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{F_v^2}{d_s K} \quad (2)$$

공식(2)에서 d_s 는 Billet의 공식(3)으로부터 계산되며, 벽 효과계수 K는 공식(4)으로부터 계산된다.

$$d_s = 6 \frac{1-\epsilon}{a} \quad (3)$$

$$\frac{1}{K} = 1 + \frac{2}{3} \frac{1}{1-\epsilon} \frac{d_s}{d_t} \quad (4)$$

저항계수 ϕ 는 레이놀드 수 Re_v 의 함수로서 레이놀드 수는 공식 (5)으로 계산된다.

$$Re_v = \frac{u_v d_s}{(1-\epsilon)\nu_v} K \quad (5)$$

액체를 분사할 때의 액체함량(Liquid hold-up)은 압력

손실에 영향을 미치므로 충전층 내에 액체가 머물고 있는 액상용적을 고려하여 액체함량은 공식(6)에서, 그리고 압력손실은 공식 (7)에서 계산됨을 나타낸다. ²⁾

$$h_L = \frac{V_L}{V_s} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta P}{H} = \phi_L \frac{1-(\epsilon-h_L)}{(\epsilon-h_L)^3} \frac{F_v^2}{d_s K} \quad (7)$$

이 공식을 변형하여 공식 (8)으로 된다.

$$\frac{\Delta P}{H} \phi_L \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{F_v^2}{d_s K} [1 + \frac{h_L}{1-\epsilon}] [1 - \frac{h_L}{\epsilon}]^{-3} \quad (8)$$

Fig. 3에서는 액체가 분사된 충전 층에서의 압력손실을 나타내고 있다. 공식 (7), (8)에서 액상저항계수 ϕ_L 는 충전물의 재질과 형상에 따라서 액체 레이놀드 수 Re_L 에 의존되며, 액상의 레이놀드 수는 공식(9)을 이용해서 구한다.³⁾

$$Re_L = \frac{u_L}{\nu_L} \quad (9)$$

Symbol	d_s m	H m	N 1/m ³	B 1/m ²	Systems
●	0.30	1.4	6996.0	600	NH ₃ -Air/Water
■					NH ₃ -Air/H ₂ SO ₄
□					SO ₂ -Air/NaOH

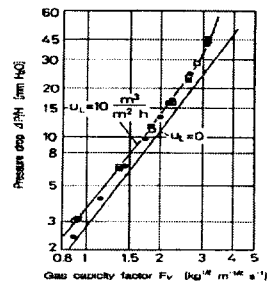
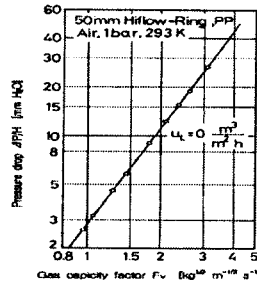


Fig. 2. Dry pressure $\Delta P_0/H$ for 50mm Hiflow-ring, pp.

Fig. 3. Wetting pressure $\Delta P_{LH}/H$ for 50mm Hiflow-ring,

충전물에서 범람점의 평가는 Fig. 4를 이용하며,^{3), 5)}여기서는 흐름부하인수에 의존되는 범람부하인수의 함수로서 표시되며 공식 (10), (11)을 통하여 계산되어진다.

Symbol	d_s m	H m	N 1/m ³	B 1/m ²	Systems
●	0.30	1.4	6996.0	600	NH ₃ -Air/Water
■					NH ₃ -Air/H ₂ SO ₄
□					SO ₂ -Air/NaOH

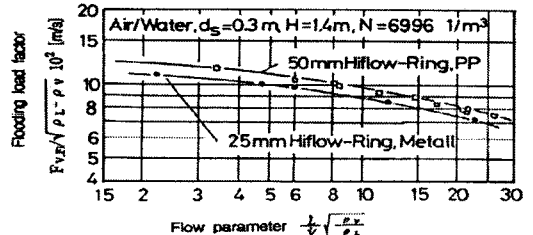


Fig. 4. Flooding data for 50mm Hiflow-ring, pp.

$$\frac{F_{v,FL}}{\sqrt{\rho_L - \rho_V}} = u_{v,FL} \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V}} \text{ [m/s]} \quad (10)$$

$$\frac{L}{V} \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L}} = f(x) \quad (11)$$

식에서 L 은 액체의 몰유량(Kmol/s), V 는 가스의 몰유량(Kmol/s).

4. 물질전달

가스상의 물질전달단위 수 NTU_{OV} 는 가스의 입, 출구와 액체의 입, 출구에서 농도를 측정하여 계산된다.^{4), 6)}

$$NTU_{OV} = \frac{y_u - y_o}{\Delta y_u^* - \Delta y_o^*} \ln \frac{\Delta y_u^*}{\Delta y_o^*} \quad (12)$$

여기서 y_u, y_o 는 유입과 배출가스의 농도이며 $\Delta y_u^*, \Delta y_o^*$ 는 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta y_u^* = y_u - y_u^*, y_u^* = m_{yx} x_u \text{ [kmol/kmol]} \quad (13)$$

$$\Delta y_o^* = y_o - y_o^*, y_o^* = m_{yx} x_o \text{ [kmol/kmol]} \quad (14)$$

공식 (13), (14)에서 m_{yx} 는 평형곡선의 기울기를 의미하며, 충전탑의 높이 H에 대한 가스상의 전달단위 높이는 공식 (15)에서 구하고, 가스상의 전달단위높이 HTU_{OV} 는 공식 (16)을 이용하여 실험에 의해 결정되어진다.⁴⁾

$$HTU_{OV} = \frac{H}{NTU_{OV}} \text{ [m]} \quad (15)$$

$$HTU_{OV} = f(F_V, u_L) \quad (16)$$

실험에서 가스상의 전달단위 수에 대한 압력손실을 측정하여 공식 (17)의 함수로서 나타내어진다.

$$\frac{\Delta P}{NTU_{OV}} = \frac{\Delta P}{H} HTU_{OV} \text{ (mmHg O)} \quad (17)$$

$$\frac{\Delta P}{NTU_{OV}} = C_1 F_V^{2.3} Sc_v^{-2/3} \quad (18)$$

공식 (18)은 슈미트 수를 고려한 압력손실을 계산하는 방법이며, 전달단위수당 압력손실을 나타내며, 물질전달의 평가에서 화학반응이 동반될 경우 이 식이 적용되어지고 화학반응이 있으면 액체 상에서 확산 저항은 없는 것으로 가정했다. Fig. 5는 각 시스템에서 가스부하인수 F_V 에 의존된 비 압력손실을 나타내었으며 실험을 통하여 공식 (18)에서의 상수 C_1 을 구할 수 있으며 이러한 결과로서 공식 (19)가 유도되어진다.⁵⁾

$$\frac{(\frac{\Delta P}{NTU_{OV}}) Sc_v^{-2/3}}{F_V^{2.3}} \approx C_1 = const \quad (19)$$

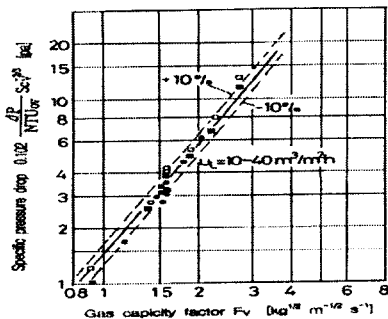


Fig. 5. Specific pressure drop $\Delta P/NTU_{OV} \cdot Sc_v^{-2/3}$ which depended on factor for F_V in three system.

결과적으로 전달단위높이 HTU_{OV} 는 공식 (20)에 의해서 나타내어진다.

$$HTU_{OV} = HTU_{OV} + \lambda HTU_L \quad (20)$$

화학반응이 있으면 HTU_L 은 거의 0에 가깝고 $HTU_{OV} = HTU_{OV}$ 가 된다.

$$HTU_{OV} = HTU_{OV} + m_{yx} \frac{1}{L/V} \frac{u_L}{\beta_L a} \quad (21)$$

$$\lambda = m_{yx} \frac{1}{L/V} \quad (22)$$

NH_3 , Air/Water 시스템의 경우 확산저항은 양측에 놓이게 되며, 가스 상에서의 물질전달 단위높이 HTU_{OV} 를 구하기 위해서는 공식 (23)에 의한 액상의 전달단위높이 HTU_L , 평형곡선의 기울기 m_{yx} , 전달 증가계수 λ 공식 (23)으로부터 계산되어지며 50mm Hiflow-ring, pp.에 대한 공식 (18)에서는 상수 C_1, c_2 는 0.135, 2 이었다.^{6), 7)}

$$HTU_L = \frac{u_L}{\beta_L a_s} \rightarrow u_L = \frac{1}{3600} \frac{L}{\rho_L \frac{\pi}{4} d_s^2} \quad (23)$$

액체상의 체적물질 전달계수 $\beta_L a_s$ 는 공식 (24)을 이용하여 구하였으며. 여기서 부하상수 C, 충전상수 n은 실험을 통하여 얻게 된다.

$$\beta_L a_s = C u_L^n D_s^{1/2} \text{ [1/s]} \quad (24)$$

또한 가스상의 체적물질 전달계수 $\beta_V a_s$ 는 공식 (25), (26)을 이용하여 구하여진다.

$$\beta_V a_s = \frac{u_V}{HTU_V} \text{ [1/s]} \quad (25)$$

$$\beta_V a_s = C F_V^n u_L^m D_s^{2/3} \text{ [1/s]} \quad (26)$$

Fig. 6은 가스부하인수 F_V 의 함수로서 공식(26)을 이용하는 가스상의 체적물질 전달계수 $\beta_V a_s$ 을 나타내었으며 Table 3.에서는 50mm Hiflow-ring, pp.에 대한 상수 값을 나타내었다.

Table 3. Parameter for estimating gas phase mass transfer coefficient

packing	d mm	C 10^{-6}	n	m	system	number of the measure point	$\delta(\beta_V a_s)$
Hiflow ring, 50	50	5.18	0.675	0.46	NH_3 -Air/H	13	± 10.0
					NH_3 -Air/H	10	± 18.9
pp					SO_2 -Air/N	11	± 5.6

전달단위 높이 HTU 는 공식 (27)을 적용하여 계산되며 액상의 저항을 고려하면 공식 (21)에 의해서 계산된다. 이러한 계산의 결과로서 구하고자 하는 흡수공정에서의 전달단위높이를 구하게 되며, 이들의 이론적인 값으로부터 충전탑의 높이는 공식 (28)을 이용해서 구할 수 있다.⁸⁾ 즉 기체와 액체의 조건을 일정하게 변화시켰을 때 HTU 가 높다는 것은 충전탑의 효율이 낮다는 것이고, NTU 가 높다는 것은 효율이 높다는 것이다.

$$HTU_V = \frac{\frac{\Delta P}{NTU_V}}{\frac{\Delta P}{H}} \quad (27)$$

$$H = HTU_v NTU_v$$

(28)

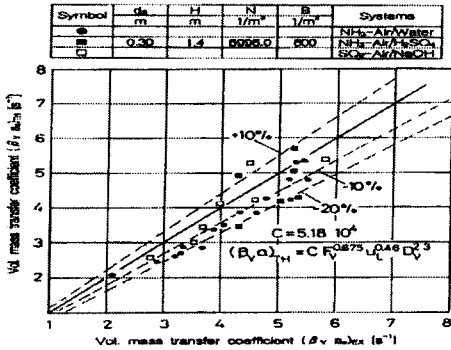


Fig. 6. Correlation about value of theory and experiment of $\beta_v a$.

5. 결 론

본 연구는 대기오염물질, 특히 유해가스 및 악취물질을 제거하는데 여러 가지 방법이 적용되고 있으나 충전탑을 이용하여 처리하는데 기본적인 자료를 얻기 위해 수행되었으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 충전탑에서 50mm Hiflow-ring, pp.을 충전하여 세 개의 각각 다른 시스템에서 실험한 결과 처리효율과 유체역학, 수력학 및 물질전달 특성을 조사한 것을 요약하면,

1. 충전탑에서 흡수에 따른 물질전달에서 기체와 액체의 변화되는 부하에서 물질전달이 일어나는 경우 기/액비의 운전조건을 고려하여 충전탑의 높이(HTU)와 물질전달 단위수(NTU)를 효율적으로 전개한 공식에 의거 본 연구내용을 적용 함으로서 압력손실이 작게 발생함으로 충전탑 운전에 필요한 소요동력이 절감될 수 있다.

2. 산업현장에서 발생하는 혼합물질을 수력학적인 근거에의거 본 연구내용을 적용함으로써 유해가스 및 대기오염물질을 효과적으로 분리함으로써 흡수와 탈착, 추출, 증류 및 정류공정에서 효율적으로 적용될 수 있다.

따라서 본 연구는 환경보전과 화학공업 분야에 사용되는 충전탑의 설계와 시공 및 산업현장에서 방지시설 운전 에 오염물질 처리 효율향상 및 방지시설 운전비용 절감차원에 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 기대한다

참 고 문 헌

- 1) Hiflow - ring : Techn. Documentation of Rauscher Verfahrenstechnik GmbH, Stein-wiesen (1985).
- 2) Billet, R. and J. Mackowiak, Neuartige Fürper aus kunststoffen für thermische Stofftrenn-verfahren Chemie technik 9(1980) Nr.5, S.219/226,
- 3) Billet, R. and J. Mackowiak, Wirksamkeit Von Kunststofffüllkörper bei der Absorption, Desorption und Vakuumrektifikation Vt-Verfahrenstechnik 15(1982) Nr. 2, 5, 67/74,
- 4) Billet, R. and J. Mackowiak : Chemie-Technik 9, No. 5, 219(1980).
- 5) Billet, R. and J. Mackowiak, Hiflow-Ring, ein Hochleistungsfüllkörper für Gas/Flüssingsysteme, Teil 1, Ausführung in Kunststoff Chemie-technik 14(1985) Nr. 12, S. 195/206.
- 6) J. H. Kim : Diss. Ruhr-Universität Bochum(1986).
- 7) R. Billet : Destillation Engineering, chemical publishing company, NEW YORK(1979)
- 8) Billet, R. and J. Mackowiak : Vt "Verfahrenstechnik" 17, No. 4, 203 (1983).