

젖은 벽탐의 액-액 총류막에서의 물질전달

박상욱 · 양삼석 · 김종현* · 아사이 사토루**

부산대학교 공과대학 화학공학과

*경남전문대학

**일본 오사카 부립대학 화학공학과

(1989년 2월 20일 접수, 1989년 10월 5일 채택)

Mass Transfer in a Wetted-Wall Column with Liquid-Liquid Laminar Flow

Sang Wook Park, Sam Seoug Yang, Jong Hyun Kim*, and Satoru Asai**

Department of Chemical Engineering, Pusan National University

*Kyung Nam Junior College

**Department of Chemical Engineering, University of Osaka Prefecture, Japan

(Received 20 February 1989; accepted 5 October 1989)

요 약

액-액계면을 통한 용질의 물질전달기구를 규명하기 위해서 탈단효과를 보정한 젖은 벽탐을 사용하여 25°C에서 n-butanol, ethyl acetate 및 cyclohexanone 이 물에 용해될 경우 분산상에서의 용질의 물질전달계수를 측정하여 이론치와 비교하였으며, I₂가 용해된 n-hexane 및 cyclohexane 용액과 Na₂SO₄ 수용액과의 접촉을 통하여 연속상에서의 I₂의 물질전달계수를 측정하여 이론치와 비교하였다. 액-액계면을 통한 용질의 물질전달기구를 침투설에 의하여 설명하였으며, 용질의 전달속도와 농도의 관계를 나타내는 대류-확산방정식의 수치처리 방법을 실험변수와 물질전달계수가 포함된 무차원군의 극한치들로부터 이루어진 Beek-Bakker 모델로 해석할 수 있었다.

Abstract—Film- and continuous-phase mass transfer in liquid-liquid system was studied using a cocurrent laminar wetted-wall column of a modified form. The film-phase mass transfer coefficients were measured by dissolution of n-butanol, ethyl acetate and cyclohexanone in water, and the continuous-phase mass transfer coefficients measured by the transfer of I₂ dissolved in continuous-phase of n-hexane and cyclohexane into the interface, where I₂ disappeared by the instantaneous irreversible reaction with Na₂S₂O₃ in the aqueous film-phase. These coefficients could be analyzed by the penetration theory and were in good agreement with Beek-Bakker model.

1. 서 론

액-액간 물질전달의 기초연구에 있어서는 액-액의 접촉면적이 잘 알려져 있고 유동상태가 명확한 실험장치가 필요하다. 그런데 젖은 벽탐(wetted-wall column)은 기-액계 물질전달의 기초연구에 많이 이용되

어 왔지만 액-액계에 관한 보고는 매우 적다. 반응을 수반하는 물질전달을 조직적으로 연구하기 위하여서는 액-액의 접촉시간을 넓은 범위로 변화시키는 것이 중요하며 액주탐과 젖은 벽탐을 합쳐서 사용하는 것이 필요하다. Hikita 등[1]은 액주탐을, Asai 등[2]은 젖은 벽탐을 각각 사용하여 분산상측 및 연속상측의 물질

전달 실험을 행하여 얻어진 물질전달계수의 실측치가 각각 속도구배를 양수와 음수로 한 경우의 Beek-Bakker 모델[3]의 이론해에 거의 일치함을 보여주었다.

젖은 벽탑에 대해서 종래의 것으로는 젖은 벽탑 윗부분에서 흘러내리는 액막의 표면이 수액관내의 표면으로부터 뺀어 올라간 정지액막에 의해 피복되어 이 부분에서는 물질전달속도를 감소시키는 말단효과를 나타내는 것이 알려져 있다[4, 5]. 반응 추출의 경우의 일반적인 말단효과와 보정은 용이하지 않기 때문에 액-액 물질전달의 기초연구용 젖은 벽탑으로서는 말단효과를 무시할 수 있는 장치고안이 바람직하다.

본 연구에서는 Hikita 등[6, 7]과 Park 등[8, 9]이 제안한 말단효과를 무시할 수 있는 기-액계 젖은 벽탑과 같은 원리에 근거로 한 액-액계 개량형 젖은 벽탑을 제작하여 분산상과 연속상층의 물질전달기구를 규명하고, 이론치와 실험치와를 비교하고자 한다.

2. 이 론

두 액체가 젖은 벽탑의 층류막을 계면으로 하여 병류로 접촉될 경우, 액체의 밀도와 점도가 일정하고 액체의 흐름이 정상상태라고 가정하면, 두 액체의 운동방정식은 다음과 같이 Navier-Stokes 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\mu_1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv_1}{dr} \right) + \rho_1 g, \quad R_1 \leq r \leq R_i \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\mu_2}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv_2}{dr} \right) + \rho_2 g, \quad R_i \leq r \leq R_2 \quad (2)$$

각 액체의 젖은 벽탑 내에서 분산상과 연속상에서의 속도분포는 식 (3)의 경계조건을 사용하여 식 (1)과 (2)로부터 구할 수 있다[10]. 이들 속도분포는 두 액체의 경계면에서의 경계속도, v_i 와 속도구배, $a = \left. \frac{dv_1}{dr} \right|_{r=R_i} = \left. \frac{dv_2}{dr} \right|_{r=R_i}$ 를 구하는데 사용된다. 각 상에서의 속도분포를 Fig. 1에 간략하게 나타내었다.

$$r = R_1; v_1 = 0$$

$$r = R_i; \mu_1 \frac{dv_1}{dr} = \mu_2 \frac{dv_2}{dr}, \quad v_1 = v_i = v_i \quad (3)$$

$$r = R_2; v_2 = 0$$

두 액체의 병류 접촉의 계면속도, v_i 와 속도구배, a 가 일정할 경우 접촉계면을 통하여 전달되는 용질의 물질전달식은 다음과 같은 대류-확산방정식으로 나타낼 수 있다[12].

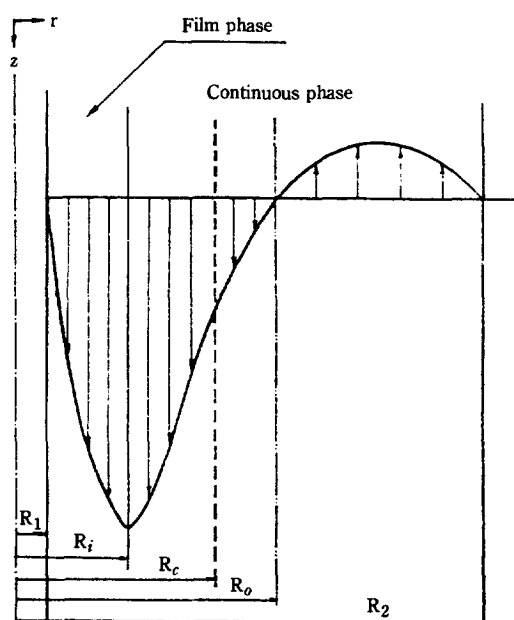


Fig. 1. Velocity profile.

$$(v_i + ar) \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial C}{\partial r} \quad (4)$$

식 (4)의 해를 구하기 위하여 사용되는 경계조건은 다음과 같다.

$$z = 0, \quad r > 0; C = 0$$

$$z \geq 0, \quad r = R_i; C = C_s$$

$$z > 0, \quad r = \infty; C = 0 \quad (5)$$

액체계면을 통하여 전달되는 용질의 물질전달기구를 침투설에 적용될 경우, 전달되는 용질의 침투거리가 분산상의 거리, $(R_i - R_1)$ 와 연속상의 거리, $(R_2 - R_i)$ 에 비하여 매우 작을 경우 식 (4)의 v_i 와 a 는 일정하다고 생각할 수 있다. 식 (4)의 해석해는 불가능하기 때문에 Fick의 법칙에서 정의된 용질의 물질전달계수, k 가 포함된 무차원군 해석에 의해 근사해방법을 사용하여 물질전달관계식을 유도할 수 있다[3, 11-13]. Beek와 Bakker[3]는 $a > 0$ 일 경우의 점근해(asymptotic solution)를, Byers와 King[13]은 $a < 0$ 일 경우의 점근해를 구하였다. 액체의 전체의 접촉길이, Z 에 대한 평균 물질전달계수, \bar{k} 는 $\frac{1}{Z} \int_0^Z k dz$ 로부터 구할 수 있으며, 평균 물질전달계수가 포함된 무차원군의 결과식은 다음과 같다[13].

$$a \geq 0, \quad \text{all } B; \bar{Y}^n = \bar{Y}_0^n + \bar{Y}_\infty^n \quad (6)$$

$$a \geq 0, \quad B < 0.05; \bar{Y}^n = \bar{Y}_0^n - \bar{Y}_\infty^n \quad (7)$$

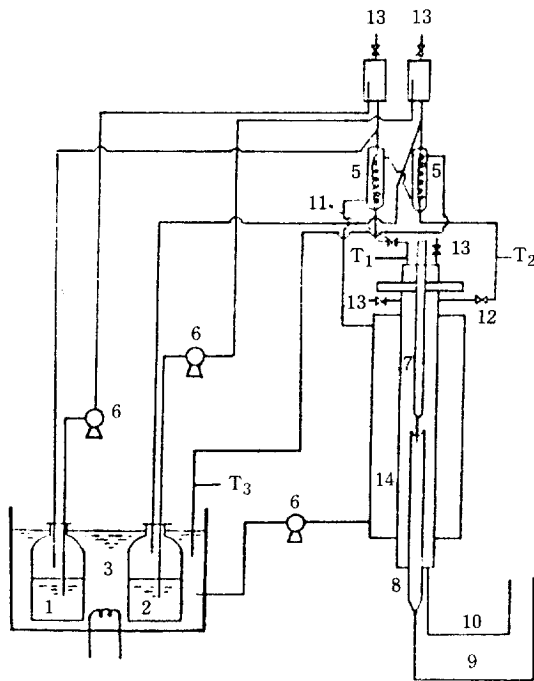


Fig. 2. Experimental apparatus flow sheet.

1. Feed tank (film phase)
 2. Feed tank (continuous phase)
 3. Water bath
 4. Constant head device
 5. Condenser
 6. Tubing pump
 7. Wetted-wall rod
 8. Run-off tube
 9. Sampling line (film phase)
 10. Sampling line (continuous phase)
 11. Needle valve (film phase)
 12. Needle valve (continuous phase)
 13. Two-way valve
 14. Water jacket
- T₁, T₂, T₃: Thermometer

식 (6), (7)에서 무차원군은 다음과 같이 정의된다.

$$B = \frac{a^2 D Z}{v_i^3}$$

$$\bar{Y} = \bar{k} \left(\frac{Z}{v_i D} \right)^{1/2}$$

$$\bar{Y}_0 = 2/\sqrt{\pi}$$

$$\bar{Y}_\infty = 0.808 B^{1/4} \quad (8)$$

여기서 n 는 식 (4)의 해를 수치해에 의하여 구한 물질 전달계수와 실험치의 차이가 최소가 되는 숫자이며, Hatanaka[12]는 n 가 2.5에서 수치해와 실험치와의

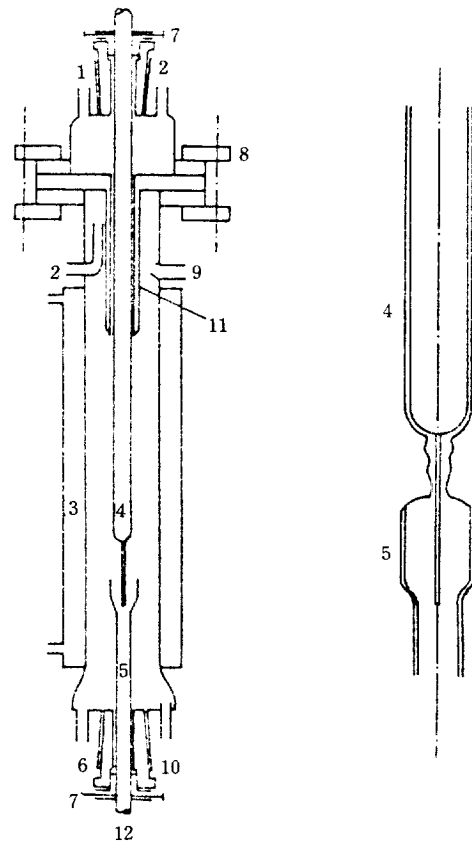


Fig. 3. Main part of wetted-wall column.

- | | |
|---------------------|--------------------|
| 1. Liquid inlet | 2. Air vent |
| 3. Water jacket | 4. Wetted-wall rod |
| 5. Run-off tube | 6. Drain |
| 7. Adjustable screw | 8. Flange |
| 9. Liquid inlet | 10. Liquid outlet |
| 11. Nozzle | 12. Liquid outlet |

최대편차가 0.2%이었음을 보고하였고, Byers와 King[13]은 0.9%를 제시하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서 사용한 벽탑(Fig. 2)은 내경 4.6 cm, 길이 68 cm의 파이렉스 유리로 제작되었으며 외경 1.39 cm, 길이 58 cm의 유리봉 벽에 층류막을 형성시켜 액-액간 물질전달 실험을 행하였다. 유리봉의 끝 부분은 반구형이며 이 선단에 외경 2 mm, 길이 5 cm의 가는 유리봉을 부착시켜 액체흐름의 말단효과(end effect)를 보정하였다[9]. 젖은 벽 이외의 부분에서 발생할 수 있는 물질전달을 무시하기 위하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 유리봉 끝 반구부와 유리세봉과의 접합 부에서 액체의 위치를 일정하게 유지하면서 액체를 유

출시켰다.

분산상에서의 물질전달계수를 측정하기 위하여 3종의 유기용매를 사용하였으며 액체의 유량범위는 분산상에서 9-114 cm³/min, 연속상에서 0-320 cm³/min 이며, 액-액 접촉길이는 2.5-22.5 cm 까지 변화시켰다.

연속상 물질전달 실험은 0.01 g-mol/l 의 Na₂SO₄ 수용액과 5×10⁻⁴에서 10×10⁻⁴ g-mol/l 의 농도의 I₂ 가 포함된 2종의 유기용매를 각각 분산상과 연속상으로 사용하였다. 연속상에서의 물질전달계수는 액-액 계면에서 Na₂S₂O₃의 순간 비가역반응[I₂+2Na₂S₂O₃→2NaI+Na₂S₄O₆]에 의한 I₂의 물질전달속도로부터 측정하였다. 액체의 유량범위는 분산상과 연속상에서 각각 18-120 cm³/min, 27-218 cm³/min 이며, rod의 길이 변화범위는 5.0에서 15.5 cm 이었다.

분산상과 연속상의 액체는 젖은 벽탐의 윗 부분으로부터 병류로 접촉시켰으며 실험온도는 25°C이며, 접촉액막의 계면에서 rippling 현상을 방지하기 위하여 소량의 계면활성제(Scourol 100, Kao Chem. Co., Japan)를 첨가하였다. 젖은 벽탐 출구의 분산상에서의 n-butanol, cyclohexanone, ethyl acetate 농도는 굴절계로 측정하였고, 연속상에서 I₂의 농도는 분광광도계에 의하여 측정하였다. 각 상에서의 물성치인 밀도, 점도, 수용액에서의 유기물의 용해도 값은 재래식 방법에 의하여 구하였으며, 용질의 확산계수는 Wilke-Chang 식을 사용하여 계산하였으며, PEG(polyethylene glycol) 10 wt% 수용액에서 n-butanol의 확산계수는 PEG의 분자량(점도분자량 3350)의 크기를 보정한 값[8]으로부터 구하였다. 본 실험에서 사용된 계의 물성치 및 액-액 계면 접촉조건을 Table 1에 나타

내었으며, 액-액 접촉의 실험과정은 Yang[10]에 의해 상세하게 보고되었다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 분산상 물질전달

액-액 계면을 통하여 용질이 이동될 때 분산상에서의 물질전달기구를 해석하기 위하여 사용된 액-액계는 H₂O-n-butanol, PEG 수용액-n-butanol, H₂O-ethyl acetate 및 H₂O-cyclohexanone 계이었다. 액-액 계면을 통하여 용질이 이동될 때 물질전달기구를 Higbie의 침투설에 적용할 수 있다고 가정하면 용질의 flux, N는 다음과 같이 표현된다.

$$N = 2C_s \left[\frac{D_1}{\pi t} \right]^{1/2} \quad (9)$$

여기서 C_s는 용질의 분산상에서의 용해도이며, D₁는 용질의 확산계수, t는 액-액 접촉시간이다. 분산상의 두께가 연속상에 비하여 매우 작고 용질이 분산상으로 침투하는 거리가 더욱 작을 경우 액-액간 접촉시간, t는 Z/v_i로 둘 수 있다. 따라서 접촉길이, Z에 대하여 용질의 전달속도, W는 다음과 같이 나타내어진다.

$$W = 2\pi R_i Z N \quad (10)$$

여기서 R_i는 액-액간 접촉 계면거리이다. 식 (9)를 식 (10)에 대입하여 정리한 식 (11)에서 W/(R_i v_i^{1/2})를 Z^{1/2}에 대하여 도식화하여 H₂O-ethyl acetate 계를 대표적으로 Fig. 4에 나타내었다.

$$W = 4R_i C_s (\pi D_1 v_i Z)^{1/2} \quad (11)$$

Table 1. Physical properties of system used (25°C)

Film phase (1)-solute-continuous phase (2)	Phase	ρ (kg/m ³)	$\mu \times 10^4$ (Pa·s)	C _{1i} (kg/m ³)	D × 10 ⁹ (m ² /s)	t (sec)
Water-n-butanol-	1	997	8.94	73.9	0.650	0.15-1.97
	2	840	28.6			
Water-cyclohexanone-	1	997	8.94	85.6	0.87	0.99-9.07
	2	947	19.07			
Water(PEG)-n-butanol-	1	997	27.84	86.6	0.57	0.43-3.12
	2	840	28.60			
Water-ethylacetate-	1	997	8.94	66.54	1.02	0.53-6.49
	2	899	5.11			
Na ₂ S ₂ O ₃ (aq)-I ₂ -	1	997.8	9.08		4.15	0.50-1.53
	2	668.2	3.55			
Na ₂ S ₂ O ₃ (aq)-I ₂ -	1	997.9	8.95		2.25	0.46-1.18
	2	755.9	6.78			

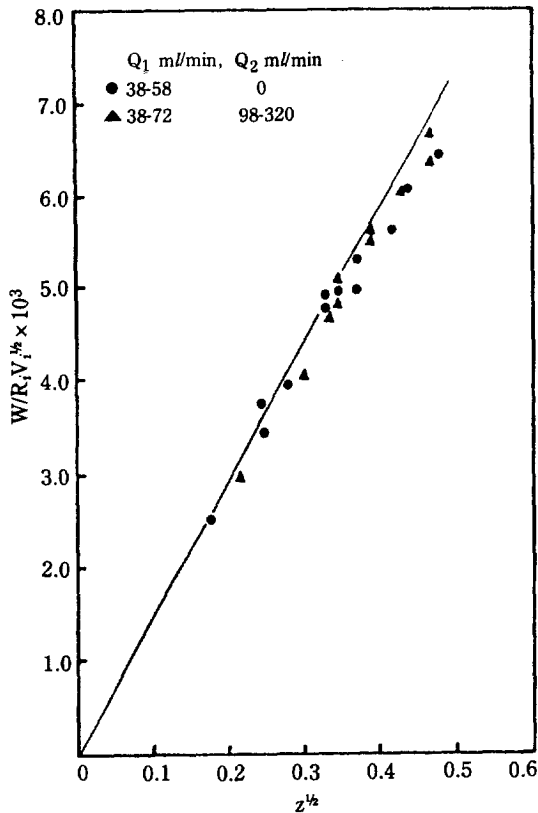


Fig. 4. Film-phase mass transfer dissolution of ethyl acetate in water.

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 실험치들은 원점을 지나고 최대편차 2.1%의 범위에서 이론식 (11)에 잘 일치하였다. 그 이외의 계인 H_2O - n -butanol, PEG 수용액- n -butanol, H_2O -cyclohexanone 계에서도 평균 편차 2.8% 이내에서 이론치와 잘 일치하였다. 이는 본 실험에서 사용한 젖은 벽탐이 말단효과가 보정되어 액-액 물질전달 실험에 사용될 수 있음을 알 수 있으며, 액-액간 물질전달기구를 침투설에 적용하여 설명할 수 있다.

액-액 접촉길이, Z , 분산상과 연속상의 유량, Q_1 , Q_2 와 같은 실험변수를 변화시키면서 분산상에서의 용질의 평균 물질전달계수, k_1 를 다음과 같이 용질의 물질전달 수지식으로부터 구하였다.

$$Q_1 (C_{1, \text{out}} - C_{1, \text{in}}) = 2\pi \bar{R}_1 Z k_1 (C_s - C_1) \quad (12)$$

젖은 벽탐 입구의 분산상에서의 용질농도, $C_{1, \text{in}}$ 는 분산상으로서 순수한 H_2O 를 사용하였기 때문에 0이 되며, 침투설에서 나타낸 바와 같이 액-액 계면에서 분

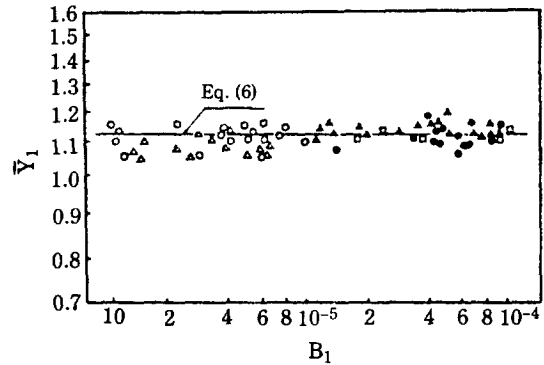


Fig. 5. Film-phase mass transfer.

- : water- n -butanol (A.V. = 3.4%)
- : PEG(aq.)- n -butanol (A.V. = 3.6%)
- ▲ : water-cyclohexanone (A.V. = 2.9%)
- △ : water-ethyl acetate (A.V. = 3.3%)
- : water-MIBK[2] (A.V. = 2.1%)

산상 내부로 용질이 침투되는 거리가 매우 짧아 분산상 본체에서의 용질의 농도, C_1^0 도 0이 되어 식 (12)로부터 \bar{k}_1 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\bar{k}_1 = \frac{Q_1 C_{1, \text{out}}}{2\pi \bar{R}_1 Z C_s} \quad (13)$$

주어진 실험변수 Z , Q_1 , Q_2 로부터 분산상에서의 \bar{k}_1 을 식 (13)에서 구하고 Fig.1에서 알 수 있는 바와 같이 본 실험조건에서 계면의 속도구배, a 는 항상 양의 값을 나타내기 때문에 식 (8)을 사용하여 분산상에서의 실험치, B_1 과 Y_1 과의 관계를 도식화할 수 있으며, 이에 대한 결과와 식 (6)을 사용하여 주어진 B_1 에 대하여 구한 이론치, Y_1 과 함께 Fig.5에 나타내었다. 본 실험에서 사용된 각각의 system의 이론치와 실험치와의 평균편차(average deviation, A.V.)를 Fig.5에 나타내었으며, 전체 system에 대한 평균편차가 3.3%의 범위에서 실험치는 이론치에 잘 일치하고 있어, 이는 액-액간 계면을 통한 용질의 분산상에서의 물질전달기구를 침투설에 의한 근사해를 Beek-Bakker 모델 식 (6)으로 해석할 수 있음을 알 수 있다.

4-2. 연속상 물질전달

액-액 계면을 통한 연속상의 물질전달기구를 해석하기 위해서 연속상이 율속단계가 될 수 있는 계로서 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 수용액- n -hexane(I_2)와 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 수용액-cyclohexane(I_2)계를 선택하였다. Fig.1에서 나타낸 연속상의 속도분포에서 실험변수, Z , Q_1 , Q_2 의 조건에 따라 연속상 내에 순환되는 액체가 존재하여, 젖은

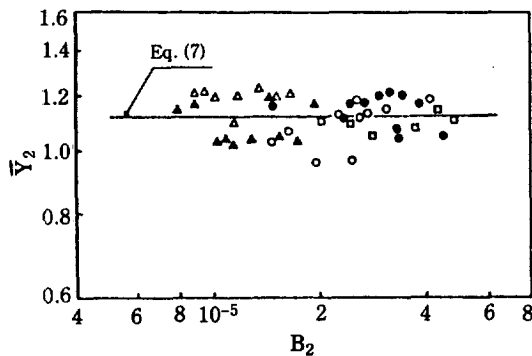


Fig. 6. Continuous-phase mass transfer-transfer of I_2 to interface from n-hexane and cyclohexane.

Driving force: inlet concentration, $C_{2,in}$
 ●: 5×10^{-4} gmol/l I_2 -n-hexane (A.V. = 8.1%)
 ○: 10×10^{-4} gmol/l I_2 -n-hexane (A.V. = 7.6%)
 ▲: 5×10^{-4} gmol/l I_2 -cyclohexane (A.V. = 9.3%)
 △: 10×10^{-4} gmol/l I_2 -cyclohexane (A.V. = 8.7%)
 □: 5×10^{-4} gmol/l I_2 -toluene [2] (A.V. = 5.8%)

벽탐에 유입되는 연속상 액체와 $R_c < r < R_o$ 범위에서 윗 방향으로 흐르는 액체가 상호 섞여 순환하는 경우와, $R_i < r < R_c$ 와 $r_c < r < R_o$ 범위에서 아래 방향으로 2개의 층화흐름(stratified flow)이 형성되는 경우로부터 벽탐 출구에서 순환흐름과 층화흐름이 상호 섞이어 출구흐름(exit flow)이 형성된다. 그러나 순환흐름과 층화흐름과의 섞임 정도(degree of mixing)를 이론적으로 구할 수 없기 때문에 연속상에서 용질의 농도, $C_{2,R}$ 을 다음과 같은 두 경우의 한계에서 구한다. 즉 공급되는 흐름이 순환액체와 전혀 섞이지 않는 경우로서 $C_{2,R}$ 은 $C_{2,in}$ 으로 취급할 수 있거나, 공급되는 흐름에 순환액체가 $R_i < r < R_c$ 와 $R_c < r < R_o$ 두 범위에서 완전히 섞여 순환액체가 출구농도, $C_{2,out}$ 가 되어 $C_{2,R}$ 은 다음식 (14)로 나타낸 $C_{2,in}$ 으로 취급할 수 있다.

$$C_{2,R} = \frac{Q_2 C_{2,in} + Q_{c,ir} C_{2,out}}{Q_2 + Q_{c,ir}} \quad (14)$$

여기서 순환되는 액체의 유량, $Q_{c,ir}$ 는 $\int_{R_i}^{R_o} 2\pi r v_z dr$ 의 관계로부터 구할 수 있으며, R_o 는 연속상의 속도분포에서 연속상의 속도가 0일 경우의 위치이다[10].

연속상에서 용질의 평균 물질전달계수, \bar{k}_2 는 연속상에서의 용질의 물질수지식과 침투설로부터 다음과 같이 구하여진다.

$$k_2 = \frac{Q_2 (C_2 - C_{2,out})}{2\pi R_i Z C_{2,R}} \quad (15)$$

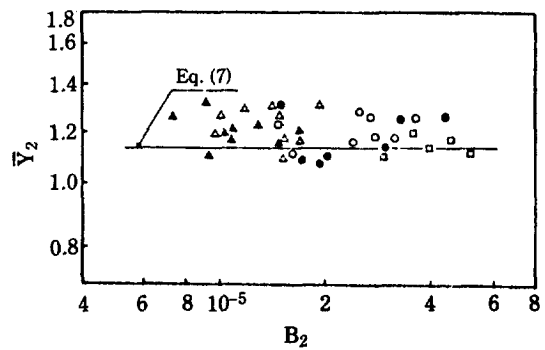


Fig. 7. Continuous-phase mass transfer-transfer of I_2 to interface from n-hexane and cyclohexane.

Driving force: concentration, $C_{2,m}$, defined by Eq. (14).

●: 5×10^{-4} gmol/l I_2 -n-hexane (A.V. = 8.7%)
 ○: 10×10^{-4} gmol/l I_2 -n-hexane (A.V. = 8.6%)
 ▲: 5×10^{-4} gmol/l I_2 -cyclohexane (A.V. = 9.8%)
 △: 10×10^{-4} gmol/l I_2 -cyclohexane (A.V. = 9.1%)
 □: 5×10^{-4} gmol/l I_2 -toluene [2] (A.V. = 6.9%)

여기서 $C_{2,R}$ 은 $C_{2,in}$ 또는 $C_{2,m}$ 이다. 주어진 실험변수, Z, Q_1, Q_2 및 I_2 의 농도에 따라 식 (15)로부터 \bar{k}_2 를 구하고 식 (8)에서 실험치 B_2 와 \bar{Y}_2 와의 관계를 $C_{2,R}$ 을 $C_{2,in}$ 으로 취급되는 경우와 $C_{2,R}$ 을 $C_{2,m}$ 으로 취급되는 경우에 각각 Fig. 6과 7에 나타내었으며, 아울러 식 (7)로부터 구한 이론치와 실험치와의 평균편차를 각각의 system에 대하여 Fig. 6과 7에 나타내었다. 이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이 식 (7)로부터 구한 이론치와 비교하면 $C_{2,R}$ 을 $C_{2,m}$ 으로 취급하는 경우(전체 평균편차 9.1%)보다는 $C_{2,in}$ 으로 취급하는 경우(전체 평균편차 8.4%)가 보다 잘 일치하고 있으나 본 실험조건에서는 두 경우의 평균편차가 10% 이내에 있기 때문에 연속상의 흐름이 no mixing과 complete mixing의 한계조건의 현상보다는 일부 섞임 현상으로 생각되며, Fig. 6과 7에서 볼 수 있는 바와 같이 연속상에서의 용질에 대한 물질전달기구를 Beek-Bakker 식으로부터 구한 근사해로서 해석할 수 있다.

5. 결 론

액-액 계면을 통한 용질의 물질전달기구를 규명하기 위해서 말단효과를 보정한 젖은 벽탐을 사용하여 25°C에서 n-butanol, ethyl acetate 및 cyclohexanone 이 물에 용해될 경우 분산상에서의 용질의 물질전달계수를

측정하여 이론치와 비교하였으며, I_2 가 용해된 n-hexane과 cyclohexane 용액과 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 수용액과의 접촉을 통하여 연속상에서의 I_2 의 물질전달계수를 측정하여 이론치와 비교하였다. 액-액 계면을 통한 용질의 물질전달기구를 침투설에 의하여 설명하였으며, 용질의 전달속도와 농도의 관계를 나타내는 대류-확산방정식의 수치처리 방법을 실험변수와 물질전달계수가 포함된 무차원군의 극한치들로부터 이루어진 Beek-Bakker 모델로 해석할 수 있었다.

감 사

본 연구는 1989년도 한국과학재단 연구비지원(과제번호: 891-1002-026-2)으로 수행한 연구결과의 일부분입니다.

NOMENCLATURE

- a : velocity gradient at liquid-liquid interface, $[l/s]$
- B : dimensionless variable, $[a^2 DZ/v_i^3]$
- C : conc. of solute, $[kg/m^3]$
- C_1^o : conc. of solute in main body of film-phase, $[kg/m^3]$
- $C_{2,m}$: conc. solute in continuous-phase defined by eq. (14), $[kg/m^3]$
- $C_{2,R}$: representative conc. of solute in continuous-phase, $[kg/m^3]$
- C_s : solubility of solute in film-phase, $[kg/m^3]$
- D : diffusivity of solute, $[m^2/s]$
- g : gravitational acceleration, $[m/s^2]$
- k : mass transfer coefficient, $[m/s]$
- N : mass transfer flux, $[kg/(m^2s)]$
- p : pressure, $[N/m^2]$
- Q : volumetric flow rate of liquid, $[m^3/s]$
- R_c : radius of inner plane of core circulation region, $[m]$
- R_i : radius of liquid-liquid interface, $[m]$
- R_o : radius of inversion plane of continuous-phase flow, $[m]$
- R_1 : radius of wetted-wall rod, $[m]$
- R_2 : radius of inside wall of column, $[m]$
- r : distance in radial direction, $[m]$
- t : contact time between film- and continuous-phase, $[s]$
- v : velocity, $[m/s]$
- W : total mass transfer rate, $[kg/s]$

$\bar{Y}, \bar{Y}_o, \bar{Y}$: dimensionless variables defined by eq. (8)

z : distance in axial direction, $[m]$

Z : length of rod, $[m]$

Greek Letters

μ : viscosity, $[Pa \cdot s]$

ρ : density, $[kg/m^3]$

Subscripts

cir : circulation

i : liquid-liquid interface

in : inlet

out : outlet

1 : film-phase

2 : continuous-phase

Superscript

— : average value

REFERENCES

1. Hikita, H. and Asai, S.: 화학공학(일본), **28**, 1017 (1964).
2. Asai, S., Hatanaka, J., Kimura, T., and Yoshizama, H.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**, 483 (1987).
3. Beek, W.J. and Bakker, C.A.P.: *Appl. Sci. Res.*, **10**, 241 (1961).
4. Lynn, S., Straatemeir, Jr., and Kramers, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **4**, 491 (1955).
5. Robert, D. and Danckwerts, P.V.: *ibid.*, **17**, 961 (1962).
6. Hikita, H. and Takatsuka, T.: *Chem. Eng. J.*, **11**, 131 (1976).
7. Hikita, H., Asai, S., and Himukashi, Y.: 화학공학(일본), **31**, 818 (1967).
8. Park, S.W., Park, P.W., Kim, S.S., and Yun, J.W.: *Hwahak Konghak*, **25**, 447 (1987).
9. Park, S.W., Han, S.B., Kim, S.S., and Park, T.Y.: *Hwahak Konghak*, **26**, 280 (1988).
10. Yang, S.S.: Thesis of Master of Science, Pusan National University (1989).
11. Churchill, S.W. and Usagi, R.: *AIChE J.*, **37**, 1505 (1982).
12. Hanataka, J.: *Chem. Eng. J.*, **28**, 127 (1984).
13. Byers, C.H. and King, C.J.: *AIChE J.*, **13**, 628 (1967).