

액-액 계면에서의 물질전달 — 평판 교반조에 의한 액-액간 물질전달 —

박상욱 · 전병수 · 임균택*

부산대학교 공과대학 화학공학과
*전남대학교 공과대학 고분자공학과
(1990년 5월 28일 접수, 1990년 8월 31일 채택)

Mass Transfer Across Liquid-Liquid Interface —Mass Transfer in an Agitated Vessel with Liquid-Liquid Flat Interface—

Sang Wook Park, Byung Soo Chun and Gyun Taek Lim*

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

*Department of Polymer Engineering, College of Engineering, Chonnam National University, Kwangju

(Received 28 May 1990; accepted 31 August 1990)

요 약

불균일상의 액-액 계면을 통하여 전달되는 용질의 물질전달계수를 개량된 Lewis cell을 사용하여 측정하였다. 수용액상의 측정치 Sherwood수, Sh_1 를 수용액상의 Reynolds수, Re_1 , Schmidt수, Sc_1 , Capillary수, Ca_1 , 유기상의 Reynolds수, Re_2 및 점도 보정치, ϕ 등과 같은 실험변수들을 사용하여 관련지었으며, 평균편차 15.3% 이내에서 다음과 같은 상관관계식을 얻을 수 있었다.

$$Sh_1 = 0.0194 Sc_1^{1/3} Ca_1^{6/13} [\phi^4 Re_1^3 + Re_2^{8/3}]^{1/4}$$

Abstract—The mass transfer coefficients of a solute through a flat interface of partially miscible binary systems were obtained in an agitated vessel of a modified Lewis cell type. The observed Sherwood number for an aqueous phase, Sh_1 were correlated in terms of the aqueous Reynolds number, Re_1 , Schmidt number, Sc_1 , Capillary number, Ca_1 , a function of viscosity ratio, ϕ and the organic phase Reynolds number, Re_2 . The correlation among these variables represented with an average deviation of 15.3% as the following equation.

$$Sh_1 = 0.0194 Sc_1^{1/3} Ca_1^{6/13} [\phi^4 Re_1^3 + Re_2^{8/3}]^{1/4}$$

1. 서 론

불균일계 액체-액체의 접촉계면을 통하여 용질이 전달될 경우 용질에 대한 확산이론은 화학반응을 수반한 증류, 추출, micelle에서의 화학반응, 유화중합 등의 화학공정에서 화학반응의 반응기구와 물질전달기구를 규명하는데 매우 중요한 역할을 한다. 액-액 물질전달 기구를 고찰하기 위하여 사용되는 실험적 장치로서

젯은 벽탑, 충전탑, Lewis cell 등이 있으며, 이들 가운데 Lewis cell은 액-액 계면부근에서 유체학적 거동을 정확히 수식화 할 수는 없지만 내용물의 양을 적게 취급할 수 있고 접촉계면면적을 쉽게 구할 수 있기 때문에 Lewis[1], Gordon과 Sherwood[2] 등의 연구를 시작으로 하여 현재까지 널리 사용되어 오고 있다. Lewis cell을 사용한 액-액 접촉계면부근에서 액체의 유동현상에 대한 유체학적 조건이 매우 복잡하여 이론적 해결은 불

가능하여 물질전달계수와 실험변수와의 상관관계를 실험치로부터 구하여 확산현상을 설명하는 연구[3-8]가 대부분이지만 이들이 사용한 실험변수의 범위와 사용한 평판교반조의 크기와 조건이 각각 다르게 한정되어 이들이 제시한 경험식으로부터 추산한 물질전달계수 값들은 서로 큰 차이를 나타내며, 특히 비뉴턴액체의 거동을 나타내는 경우에서 물질전달에 대한 상관관계에 대한 연구는 거의 되어 있지 않다.

본 연구는 Lewis cell을 개량한 평판교반조를 사용하여 액체의 밀도, 점도, 계면장력, 확산계수 등의 물성치를 변화시킨 실험변수의 보다 폭넓은 범위에서 물질전달계수를 측정하여 액-액간 접촉계면을 통한 용질의 물질전달계수에 영향을 미치는 물성치와의 상관관계를 구하고 층류상태가 power-law에 적용되는 비뉴턴 액체에서 물질전달에 대한 상관관계의 적용 가능성을 확인하고 문헌에서 나타난 경험식들과 비교 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서 사용한 평판교반조(Fig. 1)는 내경 80 mm, 높이 160 mm의 파이프스원통형으로 제작되었다. 교반조내에는 두 개의 임펠라(직경이 교반조 내경의 4/10인 32 mm, 높이가 교반조 내경의 1/10인 8 mm의 평판날개)가 액-액 계면의 상부와 하부에 각각 위치하여 각 임펠라에 부착된 모터에 의하여 독립적으로 회전시켰다. 네 개의 방해판(두께 3.1 mm, 폭 8 mm의 평판)을 균일한 간격에서 교반조 내면의 90° 방향으로 부착시켜 각 상의 용액의 농도를 균일하게 희석하는데 사용하였다. 직경 140 mm의 외부 원통을 교반조에 부착시켜 두 원통 사이로 물(water jacket)을 순환시켜 교반조내의 온도를 일정하게 유지하였다. 각 임펠라의 회전속도는 회전속도계를 사용하여 일정한 속도로 조절하였으며, 두 임펠라의 회전방향은 동일하였다. 상부(본 실험조건에서는 유기상)에 위치한 임펠라의 회전속도는 26에서 400 rpm, 하부(수용액상)에서는 0에서 330 rpm으로 변화시켰으며, 이 회전속도 범위에서의 액-액 접촉계면은 교란(disturbance) 현상을 관찰할 수 없었다. 액-액 접촉계면의 면적은 $5.03 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 이었으며, 각 상의 부피는 동일하게 $4.02 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 로 주입시켰으며, 실험온도는 25°C이었다. 유기상의 용매는 n-hexane, toluene, cyclohexane, iso-ethyl acetate, iso-butyl acetate 등이고, 용질의 물질전달계수는 수용액에 용해된 I_2 , caproic acid, O_2 등이 액-액 계면을 통하여

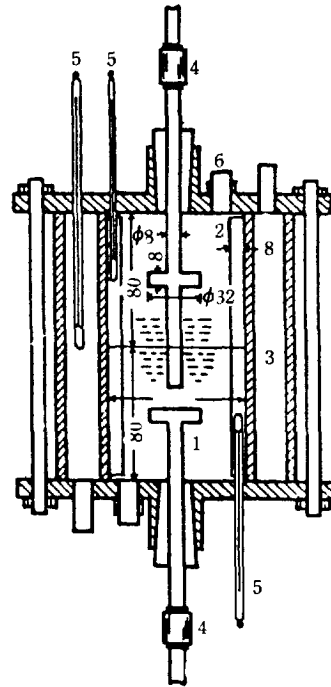


Fig. 1. Agitated vessel with a flat interface.

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 1. Agitated vessel | 2. Baffle |
| 2. Water jacket | 4. Motor |
| 5. Thermometer | 6. Sampling inlet |

유기상으로 전달될 경우 수용액상에서의 값(individual aqueous side mass transfer coefficient)으로 구하였다. 각 상의 점도를 변화시키기 위하여 CMC(carboxymethyl cellulose)와 paraffin oil을 물과 유기용매에 각각 첨가하였으며, decalin을 유기용매에 첨가하여 밀도를 변화시켰다. 수용액상의 점도범위는 0.597×10^{-3} 에서 $5.94 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 까지 유기상의 점도범위는 0.4×10^{-3} 에서 $28.2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 까지 변화시켰다. 수용액상에서의 I_2 의 농도는 요오드법, caproic acid의 농도는 페놀 프타렌지시약을 사용한 HCl 표준용액에 의한 적정법, O_2 는 DO 메타를 사용하여 측정하였다. 수용액상에서의 용질의 확산계수는 Wilke-Chang식[9]으로부터 구하였으며, CMC 수용액에서의 확산계수는 Park 등[10]이 제시한 경험식을 사용하였으며, 액-액간 계면장력은 모세관 오름법(capillary-rise method)[11]을 사용하여 측정하였으며, 용액의 밀도와 점도는 비중병과 Oswald 점도계를 사용하여 각각 측정하였다. Table 1에 액-액간 계면을 통한 용질의 물질전달계수를 구하기 위하여 본 실험에서 사용한 계의 종류 및 물성치를 나타내었다. 평판교반조내의 두 용액은 각각 완전혼합이라고 가정

Table 1. Experimental conditions and physical properties of system used at 25°C

System phase ₁ -solute-phase ₂	Phase (-)	Re (-)	$\mu \times 10^3$ (Pa·s)	ρ (kg/m ³)	$D_{AB} \times 10^9$ (m ² /sec)	$\sigma \times 10^3$ (N/m)
0.02 wt% CMC sol-I ₂ -n-hexane	1	400-2500	1.768	998	1.325	50.88
	2	1470	0.359	668		
0.08 wt% CMC sol-I ₂ -n-hexane	1	600-2000	3.801	998	1.489	50.90
	2	1470	0.359	668		
0.15 wt% CMC sol-I ₂ -n-hexane	1	400-1000	5.940	998	1.586	50.93
	2	1470	0.359	668		
water-I ₂ -20 vol% paraffin oil + 80 vol% n-hexane	1	750	0.894	997	1.218	49.77
	2	0-1470	0.597	717		
water-I ₂ -40 vol% paraffin oil + 60 vol% n-hexane	1	750	0.894	997	1.218	50.31
	2	0-1470	1.180	755		
water-I ₂ -60 vol% paraffin oil + 40 vol% n-hexane	1	750	0.894	997	1.218	51.33
	2	0-1470	3.147	793		
water-I ₂ -80 vol% paraffin oil + 20 vol% n-hexane	1	750	0.894	997	1.218	52.02
	2	0	11.500	830		
water-I ₂ -90 vol% paraffin oil + 10 vol% n-hexane	1	750	0.894	997	1.218	52.03
	2	0	28.200	848		
25 wt% sucrose sol-I ₂ -n-hexane	1	450-5170	2.090	1170	0.535	50.73
	2	0-1270	0.359	668		
40 wt% sucrose sol-I ₂ -n-hexane	1	440-4450	5.140	1195	0.219	49.04
	2	0-1270	0.359	665		
50 wt% sucrose sol-I ₂ -n-hexane	1	510-3980	12.810	1220	0.092	47.31
	2	0-1270	0.359	665		
water-I ₂ -n-hexane	1	600-7000	0.894	997	1.218	49.60
	2	0-4400	0.359	668		
water-I ₂ -toluene	1	750-1900	0.894	997	1.218	34.85
	2	0	0.552	862		
water-I ₂ -cyclohexanone	1	750-1900	1.144	996	0.952	3.27
	2	0	1.907	947		
water-I ₂ -iso-ethyl acetate	1	750-1900	1.049	995	1.038	5.75
	2	0	0.511	899		
water-I ₂ -iso-butyl acetate	1	750-1900	0.904	996	1.205	13.10
	2	0	0.651	871		
water-I ₂ -95 vol% decalin + 5 vol% iso-butyl acetate 2	1	750-1900	0.907	997	1.200	27.04
	2	0	1.997	879		
water-caproic acid-n-hexane	1	750-1900	0.894	997	0.672	49.60
	2	0-4400	0.359	668		

하여 회분식에서의 물질전달속도는 다음과 같은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$-V_1/S \, dC_1/dt = k_L (C_{1i} - C_1) \quad (1)$$

여기서 V_1 은 수용액상의 부피이며, S 는 액-액계면의 접촉면적이며, C_1 과 C_{1i} 는 수용액에서의 용질의 농도 및 포화농도이다. 식 (1)을 적분하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있으며, 식 (2)에서 C_{1o} 는 $t=0$ 일 때의 농도이며, 이 식의 좌변을

$$\ln[(C_{1i} - C_{1o}) / (C_{1o} - C_1)] = k_L St / V_1 \quad (2)$$

t 에 대하여 도식화하여 직선의 기울기로부터 물질전달 계수, k_L [13]을 구한다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. Reynolds수에 대한 k_L 의 영향

수용액상과 유기상의 Reynolds수, Re_1 과 Re_2 가 k_L 에

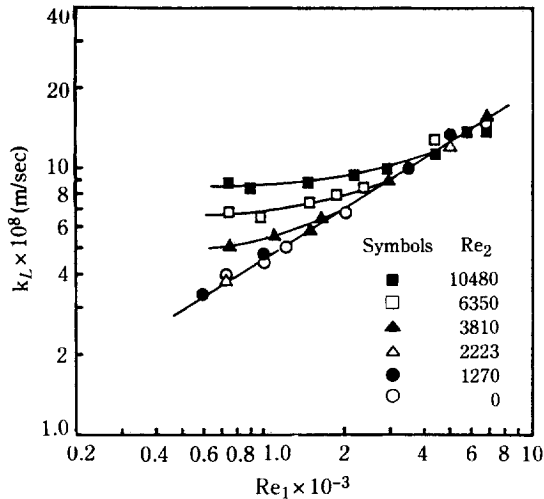


Fig. 2. Effect of Reynolds numbers Re_1 and Re_2 on mass transfer coefficients k_L in the water- I_2 (or caproic acid)-n-hexane system at 25°C.

미치는 영향을 고찰하기 위하여 water-solute-n-hexane계에서 용질, I_2 와 caproic acid가 수용액상에서 유기상으로 전달될 경우 용질의 k_L 을 Re_1 와 Re_2 의 변화에 대해 plot하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 유기상의 Re_2 가 0인 경우 k_L 은 Re_1 의 0.7승에 비례함을 알 수 있으며, 이것은 교반조와 임펠라의 종류와 크기가 동일한 조건[12]에서 관찰된 기-액계에서의 현상과 유사하였다. 또한 Re_2 가 1270인 경우에서도 Re_2 가 0인 경우와 동일한 결과를 얻었다. 한편 Re_2 가 0이 아닌 경우 k_L 은 Re_1 이 작은 범위에서 Re_2 에만 의존하고 점근값(asymptotic value)에 접근하나 Re_1 이 5000 이상에서 증가하면 Re_2 는 k_L 에 영향을 주지 않고 단지 Re_1 에만 의존하여 Re_2 가 0인 경우로 접근함을 알 수 있다.

3-2. 점도에 의한 k_L 의 영향

수용액상의 점도변화에 대한 k_L 의 영향을 관찰하기 위하여 sucrose 수용액과 CMC(평균분자량 136800) 수용액- I_2 -n-hexane계에서 수용액의 점도변화를 물보다 6배까지 증가시켜 Re_1 의 변화에 대한 I_2 의 물질전달계수, k_L 을 Re_2 가 1270인 경우에 대해 plot하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 두 수용액에서 k_L 은 Re_1 의 증가에 따라 증가하였으며, 수용액의 점도에 무관하게 k_L 은 Re_1 의 0.8승에 비례하였다. sucrose 수용액의 점도증가에 따라 k_L 은 감소한 반면 power-law에 적용되는 비뉴튼액체의 거동을 나타내는

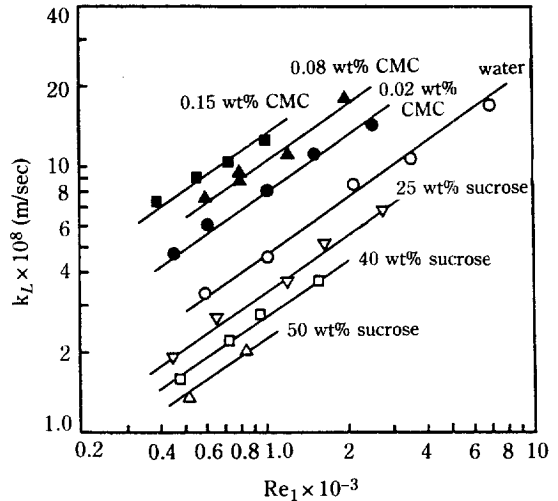


Fig. 3. Effect of first phase viscosity μ_1 on mass transfer coefficients k_L in the CMC and sucrose aqueous solution- I_2 -n-hexane system at 25°C; $Re_2=1270$.

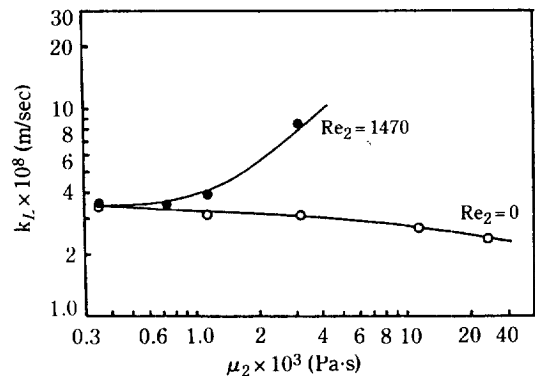


Fig. 4. Effect of second phase viscosity μ_2 on mass transfer k_L in the water- I_2 -paraffin oil+n-hexane system at 25°C; $Re_1=750$.

CMC 수용액의 경우 증가하였다. CMC 수용액에서와 같이 점도 증가에 따라 k_L 의 증가하는 현상은 Park 등 [10]에서 지적한 바와 같이 CMC 수용액에서 점도증가에 따라 I_2 의 확산계수의 증가현상에 기인된 것으로 생각된다. Fig. 4에 n-hexane 유기상에 paraffin oil을 첨가하여 μ_2 를 물보다 약 47배까지 증가시킨 H_2O - I_2 -n-hexane계에서 Re_1 이 750, Re_2 가 0과 1470에 대한 I_2 의 k_L 을 μ_2 의 변화에 따라 나타내었다. Re_2 가 0인 경우 μ_2 의 증가에 따라 k_L 값은 점차 감소하는 경향을 나타내고 있으며, Re_2 가 1470인 경우 μ_2 가 낮은 범위의 작은 변화에 따라 k_L 이 급격히 증가함을 알 수 있었다.

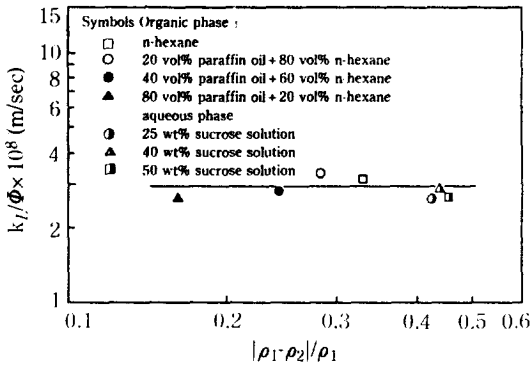


Fig. 5. Effect of density difference $\Delta\rho$ on mass transfer coefficient k_L in the aqueous solution- I_2 -organic solution; $Re_1=760$, $Re_2=0$.

3-3. 밀도차이에 의한 k_L 의 영향

수용액상과 유기상과의 밀도차이의 변화에 대한 k_L 의 영향을 관찰하기 위하여 Table 1에서 두 용액의 계면장력값이 거의 비슷한($\sigma \approx 50 \times 10^{-3}$ N/m) 계를 선정하여 $|\rho_1 - \rho_2| / \rho_1$ 의 변화에 대한 k_L 의 영향을 관찰한 결과 [13] 실험치들이 산만하여 일반적인 경향을 관찰할 수 없었다. 선정된 계에서 수용액상은 물보다 14배, 유기상에서는 n-hexane보다 72배까지 점도변화가 크기 때문에 밀도차이만은 k_L 에 대한 영향을 관찰하기 위해서는 다음과 같이 ϕ 를 정의하여 $|\rho_1 - \rho_2| / \rho_1$ 을 k_L/ϕ 에 대해서 도시화하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 점도 보정이 수반된 k_L 은 밀도차이에 큰 영향이 없음을 알 수 있었다.

$$\left. \begin{aligned} \phi &= 1 & \text{for } \mu_2/\mu_1 \leq 7.0 \\ \phi &= (\mu_2/\mu_1)^{-1/5} & \text{for } \mu_2/\mu_1 > 7.0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3-4. 확산계수에 의한 k_L 의 영향

Water-n-hexane계에서 전달되는 용질, caproic acid, I_2 및 O_2 의 k_L 을 측정하여 주어진 Re_1 과 Re_2 에 대해서 각 용질의 확산계수에 따라 도시화하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 k_L 은 D 의 2/3승에 비례함을 알 수 있었으며, 이 결과는 기체흡수에서 Hikita 등[12]의 결과와 일치하였다.

3-5. 계면장력에 의한 k_L 의 영향

계면장력의 변화에 대한 k_L 의 영향을 관찰하기 위하여 $Re_1=750$, $Re_2=0$ 에서 수용액상에서 I_2 가 유기상으로 전달될 경우 유기상의 종류를 변화시키면서 σ 를 15배까지 폭넓게 변화시켜 I_2 의 k_L 을 측정하여 σ 에 대한

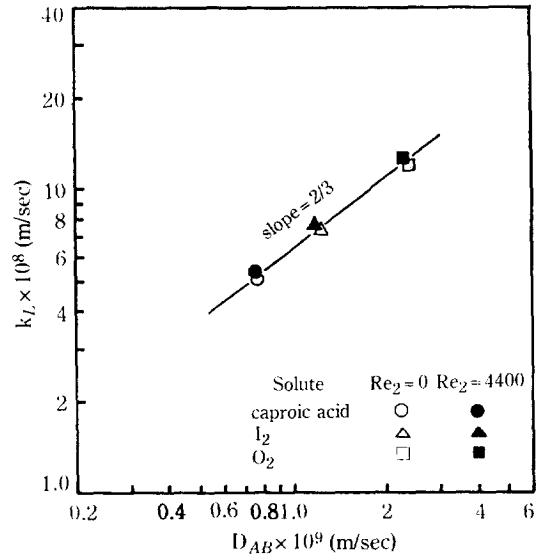


Fig. 6. Effect of diffusivity D_{AB} on mass transfer coefficients k_L in the water-n-hexane system; $Re_1=1900$.

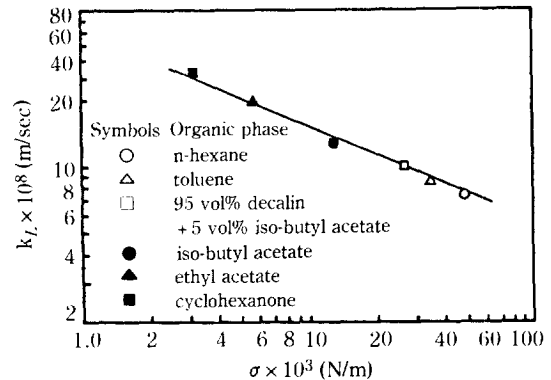


Fig. 7. Effect of interfacial tension σ on mass transfer coefficients k_L of I_2 in the aqueous solution at 25°C; $Re_1=1900$, $Re_2=0$.

k_L 의 도시화를 Fig. 7에 나타내었다. 선정된 계의 수용액상에 대한 유기상의 점도가 0.359×10^{-3} Pa·s에서 1.997×10^{-3} Pa·s까지 변화하였으나 Fig. 3에서 $Re_1=750$, $Re_2=0$ 인 경우 μ_2 에 대한 k_L 의 영향이 거의 없었으며, Fig. 5에서 선정된 계에서의 밀도차이에 대한 k_L 의 영향력이 거의 없었다. Fig. 7에서 나타난 바와 같이 k_L 은 유기상의 종류에 무관하게 $\sigma^{-0.5}$ 에 비례함을 알 수 있었으며, Re_2 가 0이 아닌 경우에도 같은 현상을 나타내었다.

3-6. 측정치의 상관관계

액-액 계면 부근에서 수력학적 조건들이 매우 복잡하기 때문에[8] 물질전달기구에 대한 이론적 취급이 불가능하므로 물질전달계수와 실험변수와의 상관관계를 일반적인 차원해석을 사용하여 구하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 수용액상의 용질이 유기상으로 이동될 때의 물질전달계수 k_L 은 Re_1 과 Re_2 의 간단한 적(product)으로는 나타낼 수 없었다. 따라서 수용액상의 Sherwood수, Sh_1 을 Re_1 과 Re_2 에 대한 함수라고 가정하고 다음과 같은 상관관계식을 사용하였다[14, 15].

$$Sh_1^n = Y_1^n + Y_2^n \quad (4)$$

여기서 Y_1 과 Y_2 는 식 (5)로 나타낸다.

$$Y_j = a_j Re_1^{a_j} Mo_1^{b_j} Sc_1^{c_j} Ar_1^{d_j} (\mu_2/\mu_1)^{e_j} (\rho_2/\rho_1)^{f_j} (|\Delta\rho/\rho_1|)^{g_j} \quad (5)$$

여기서 $j=1, 2$

$$\left. \begin{aligned} Sh_1 &= k_L L / D_{AB} \\ Mo_1 &= g \mu_1 |\Delta\rho| / \rho_1 \sigma^3 \\ Sc_1 &= \nu_1 / D_{AB} \\ Ar_1 &= d^3 \rho_1 g |\Delta\rho| / \mu_1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

이다.

식 (5)에 본 실험에서 주어진 계의 각 실험치들을 대입하여 식 (5)의 계수를 simplex법[16]을 사용하여 구하였으며 이에 대한 결과는 다음과 같다.

$$Sh_1 = 0.0194 Sc_1^{1/3} Ca_1^{1/3} [\phi^* Re_1^3 + Re_2^3]^{1/4} \quad (7)$$

여기서

$$\left. \begin{aligned} Ca_1 &= (Ar_1 Mo_1)^{1/3} \rho_1 / |\Delta\rho| \\ Re_1 &= d^2 N^2 \rho_1 / \mu_1 \\ Re_2 &= Re_1^2 \nu_2 / \nu_1 = d^2 N^2 / \nu_1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

본 실험에서 식 (7)을 적용할 수 있는 실험변수의 범위는 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} 400 &< Re_1 < 7000 \\ 0 &\leq Re_2 < 6280 \\ 565 &< Sc_1 < 1334 \\ 192 &< Ca_1 < 3060 \\ 0.06 &< \mu_2/\mu_1 < 32 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Fig. 8에 실험치와 식 (7)에서 계산된 계산치를 도시화하여 나타내었으며 실험치는 최대편차 $\pm 30\%$, 평균편차 15.3% 이내에서 계산치와 잘 일치하였다.

3-7. 문헌에서 상관관계 계수들과의 비교

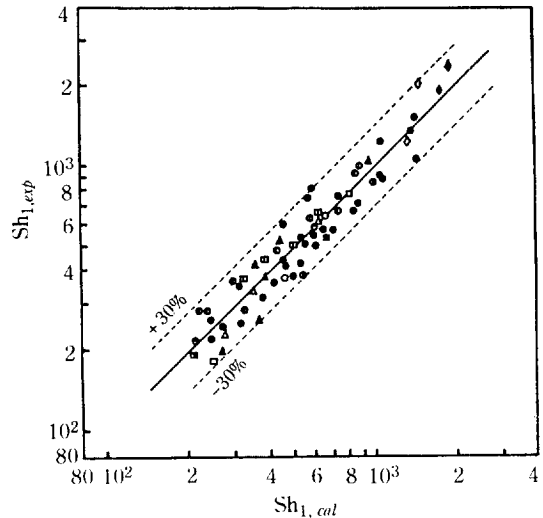


Fig. 8. Comparison of experimental values of Sh_1 with calculated values from eq. (6).

Lewis cell 또는 개량형 Lewis cell에서 물질전달계수에 대한 실험적 상관관계가 많은 연구자들[1, 3-8]에 의해 제시되었다. 이들 상관관계식들을 Table 2에 나타내었으며, 이들 상관관계에서 상관관계 계수 C_1, C_2, \dots 는 교반조의 크기, 교반기 날개 등과 같은 교반조의 기하학적 배치에 의존하는 상수이다. 본 연구에서 행한 식 (9)와 같은 실험범위에서 사용된 실험변수값과 물질전달계수 측정값을 Table 2에 제시한 각 상관관계식에 대입하여 얻어진 상관관계 계수값과 실험치와의 평균편차를 Table 2에 나타내었다. Mayers[3]의 상관관계식은 Re_2 가 0이 아닌 경우에 해당되며, 본 실험에서는 Re_2 가 0인 경우에도 k_L 을 측정하였으므로 상관관계 비교에서는 제외되었다. Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 실험치와 계산치와의 차이가 Lewis[1]의 경우 평균편차 83%의 큰 차이를 나타내고 있으며, 상관관계식으로 나타난 각 실험변수에 대한 물질전달계수의 영향을 다음과 같이 고찰하였다.

Table 2에 나타난 상관관계식에서나 또는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 k_L 은 Re_1 과 Re_2 에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며 Re_1 과 Re_2 의 지수에 의존하며, Re_1 과 Re_2 의 지수값은 연구자에 따라 약간의 차이가 있다. 특히 유기상의 회전속도가 0인 경우 k_L 은 μ_2 에 무관하나 Re_2 가 0이 아닌 경우 μ_2 가 크게 증가할수록 k_L 은 점차 감소하는 본 실험의 결과의 현상은 Bulicka와 Prochazka[6]의 결과와 잘 일치하고 있다. 한편 Lewis[1], McAnamey[4] 및 McManamey 등[5]의 상관관계식에서 k_L 의 영향을 주는 실험변수들 중에 μ_2 의 항은

Table 2. Previous correlations for mass transfer coefficient

Investigator	Correlation equation	C_i	M. D(%) ¹⁾
Lewis[1]	$Sh_1 = C_i Sc_1 \left[\left(Re_1 + Re_2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1.45} + 1.48 \times 10^5 \right]$	7.96×10^{-7}	82.9
Mayers[3]	$Sh_1 = C_i Sc_1^{0.6} (Re_1 Re_2^0)^{1/2} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{1.9} \left(0.6 + \frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{-2.4}$	—	—
McManamey[4]	$Sh_1 = C_i Sc_1^{0.63} Re_1^{0.5} \left(1 + \frac{Re_2 \rho_2}{Re_1 \rho_1} \right)$	10.51×10^{-3}	73.8
McManamey 등[5]	$Sh_1 = C_i \left[\frac{Sc_1}{Ar_1} \frac{Ca_1 \Delta \rho \rho_1}{1 + 0.00562 Ca_1 \Delta \rho \rho_1} \right. \\ \left. (Re_1 + Re_2) \left(Re_1^2 + Re_2^2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \right]^{1/2}$	2.42×10^{-5}	32.8
Bulicka & Prochazka[6]	$Sh_1 = C_i Sc_1^{1/2} Re_1^{3/4} \left[\frac{1 + (Re_2/Re_1)^3 (\mu_2 \rho_2 / \mu_1 \rho_1)^{1/2}}{1 + (\mu_2 / \mu_1)^{2/3} (\rho_1 / \rho_2)^{1/2}} \right]^{1/4}$	1.86×10^{-2}	43.2
Asai[7]	$Sh_1 = C_i Sc_1^{1/3} Ca_1^{0.3} [\phi^4 Re_1^3 + Re_2^{6/3}]^{1/4}$	1.19×10^{-2}	26.7
Seo[8]	$Sh_1 = C_i Ca_1^{1/2} Sc_1^{0.5} Re_1^{0.79} \exp \left(1.60 \times 10^{-4} \frac{\nu_1}{\nu_2} Re_2^0 \right)$	1.93×10^{-3}	26.6

M. D¹⁾ : mean deviation

없으며, Fig. 2에서 Re_1 이 5000 이상인 경우 또는 Fig. 4에서 Re_2 가 0인 경우 k_L 은 μ_2 에 영향을 받지 않아 이 현상은 상기의 문헌들의 결과와 잘 일치하고 있다.

교반조내에서 물질전달계수에 대한 용질의 분자확산의 영향은 Table 2의 Sh_1 과 Sc_1 의 관계에서 알 수 있는 바와 같이 각 연구자에 따라 상관관계식이 서로 잘 일치하지 않고 있다. 즉 McManamey 등[5]은 Levich model[17]을, Bulicka와 Prochazka[6]는 Kolmogorov의 난류이론[18]을 기준으로 한 표면갱신설을 사용하여 k_L 과 D 와의 관계에 대한 해석을 다르게 취급하였으며 Seo[8]와 동일하게 상관관계식에서 Sh_1 은 Sc_1 의 1/2승에 비례하고 있음을 나타내었다. 한편 Lewis[1]는 1승에, McManamey[4]는 0.63승에 비례함을 나타내었으나 이론적인 뒷받침은 없었다. 본 실험값으로 얻은 상관관계식 (7)에서 Sh_1 은 Sc_1 의 1/3승에 비례하며 다른 연구자들이 제안한 상관관계식의 지수보다 작은 값을 나타내었다. 계면장력, σ 에 k_L 이 미치는 영향은 McManamey 등[5]과 Seo[8]에서 σ 의 -1/2승에 비례하였으며, 본 실험에서는 -6/13승에 비례하여 본 실험결과는 문헌치와 일치하였다. 밀도비, ρ_2/ρ_1 는 Table 2에 제시된 상관관계식에서 k_L 에 영향을 미치고 있으나 ρ_2/ρ_1 의 값이 2.5보다 적은 범위에서 밀도비는

k_L 에 영향이 거의 미치지 않아 본 실험에서 무차원군으로 결합된 Sh_1 에 밀도차의 영향을 배제하였다.

이상과 같이 물질전달계수에 영향을 미치는 여러 가지 실험변수들의 상관관계식이 서로 다른 것에서 지적하였듯이 이론적 model의 가정과 물리적 특성치들을 좁은 범위에서 변화시켜 상관관계식을 도출한 것으로 사료되며, 본 실험에서 얻어진 관계식 (7)은 McManamey 등[5]과 Seo 등[8]의 관계식과 비교적 잘 일치하였다. 특히 층류에서 power-law에 적용되는 비뉴튼액체인 CMC 수용액에서 I_2 의 물질전달계수를 구하는 상관관계식 (7)에 적용하여 사용할 수 있었다.

4. 결 론

불균일상의 액-액 계면을 통하여 전달되는 용질의 물질전달계수를 개량된 Lewis cell을 사용하여 측정하였다. 수용액상의 측정치 Sherwood수, Sh_1 를 수용액상의 Reynolds수, Re_1 , Schmidt수, Sc_1 , Capillary수, Ca_1 , 유기상의 Reynolds수, Re_2 및 점도 보정치, ϕ 등과 같은 실험변수들을 사용하여 관련지었으며, 평균편차 15.3% 이내에서 다음과 같이 상관관계식을 얻을 수 있었다.

$$Sh_1 = 0.0194 Sc_1^{1/3} Ca_1^{6/13} [\phi^4 Re_1^{-3} + Re_2^{8/3}]^{1/4}$$

감 사

본 연구는 1989년도 한국과학재단 연구비지원(과제 번호 : 89-1002-026-2)으로 수행한 연구결과의 일부입니다.

NOMENCLATURE

a_j, b_j, \dots	: exponents defined by eq. (4) [-]
Ar_1	: Archimedes number, $d^3 \rho g / \Delta \rho \mu^2$ [-]
C_1	: concentration of solute in first phase solution [kgmol/m ³]
C_{10}	: concentration of initial solute in first phase solution [kgmol/m ³]
C_{1i}	: concentration of solute in interface [kgmol/m ³]
Ca_1	: Capillary number, $gd^2 \rho / \sigma$ [-]
d	: diameter of stirrer blade [m]
D_{AB}	: diffusivity of solute in solution [m ² /sec]
g	: gravitational constant [m/sec ²]
k_L	: mass transfer coefficient [m/sec]
L	: diameter of vessel [m]
Mo_1	: Morton number, $g \mu^4 / \Delta \rho \rho^2 \sigma^3$ [-]
N_1, N_2	: first phase, second phase agitation speed [1/sec]
n	: exponent defined by eq. (3) [-]
Re_1	: first phase Reynolds number, $d^2 N_1 / \nu_1$ [-]
Re_2	: second phase modified Reynolds number, $d^2 N_2 / \nu_1$ [-]
Re_2^o	: second phase Reynolds number, $d^2 N_2 / \nu_2$ [-]
S	: cross-sectional area of vessel [m ²]
Sc_1	: Schmidt number, ν_1 / D_{AB} [-]
Sh_1	: Sherwood number, $k_L L / D_{AB}$ [-]
V_1	: volume of first phase solution [m ³]
Y_1, Y_2	: function defined by eq. (3) [-]
Y_j	: function defined by eq. (4) [-]

Greek Letters

a_j : coefficients defined by eq. (4) [-]

μ_1	: viscosity of first phase [Pa·s]
μ_2	: viscosity of second phase [Pa·s]
ν	: kinetic viscosity, ρ / μ [kg/m ³]
ρ_1	: density of first phase [kg/m ³]
ρ_2	: density of second phase [kg/m ³]
$\Delta \rho$: density difference, $\rho_1 - \rho_2$ [kg/m ³]
ϕ	: correction factor defined by eq. (6) [-]

REFERENCES

- Lewis, J.B.: *Chem. Eng. Sci.*, **3**, 248 (1954).
- Gordon, K. F. and Sherwood, T.K.: *Chem. Eng. Prog. Symposium Series*, **50**, 15 (1954).
- Mayers, G.R.A.: *Chem. Eng. Sci.*, **16**, 69 (1961).
- McManamey, W.J.: *Chem. Eng. Sci.*, **16**, 251 (1961).
- McManamey, W.J., Davies, J.T., Woolen, J.M. and Coe, J.R.: *Chem. Eng. Sci.*, **28**, 1061 (1973).
- Bulicka, J. and Prochazka, J.: *Chem. Eng. Sci.*, **31**, 137 (1976).
- Asai, S., Hatanaka, J. and Uekawa, Y.J.: *Chem. Eng. Japan*, **16**, 463 (1983).
- Seo, Y.G., Park, S.B. and Lee, W.K.: *Korean J. Chem. Eng.*, **4**, 120 (1987).
- Wilke, C.R. and Chang, P.: *AIChE*, **1**, 264 (1955).
- Park, S.W., Han, S.B., Kim, S.S. and Park, T.Y.: *HWAHAK KONGHAK*, **26**, 280 (1988).
- Marylin Kay and McClure, D.W.: *Journal of Chemical Education*, **47**, 541 (1970).
- Hikita, H., Asai, S., Ishikawa, H. and Saito, Y.: *Chem. Eng. Sci.*, **30**, 607 (1975).
- Chun, B.S.: Master Thesis, Pusan National University (1990).
- Churchill, S.W. and Usagi, R.: *AIChE J.*, **18**, 1211 (1972).
- Beek, W.J. and Bakker, C.A.P.: *App. Sci. Res.*, **A10**, 241 (1961).
- Beveridge, G.S. and Schechter, R.S.: "Optimization: Theory and Practice", McGraw-Hill, Inc., New York, p. 290 (1970).
- Davies, J.T.: "Turbulence Phenomena", Academic Press, New York, p. 141 (1972).
- Davies, J.T.: "Turbulence Phenomena", Academic Press, New York, p. 51 (1972).