

유기염화물 수용액의 투과증발에 미치는 농도분극의 영향

조민석·김승재*·김진환†

전남대학교 화학공학과, *환경공학과
(1998년 3월 20일 접수, 1998년 6월 16일 채택)

Effect of Concentration Polarization on The Pervaporation of Aqueous Chlorinated-Organic Solution

Min-Suk Cho, Seung-Jai Kim*, and Jin-Hwan Kim†

Department of Chemical Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

*Department of Environmental Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

(Received March 20, 1998; Accepted June 16, 1998)

요약: 실리콘 고무 (polydimethylsiloxane, PDMS) 막에 의한 trichloroethylene (TCE)과 chlorobenzene (CB) 수용액의 투과증발실험을 수행하고 농도분극이 분리특성에 미치는 영향을 연구하였다. 경계층저항은 직렬저항모델을 사용하여 설명하였으며, 수용액으로부터 미량의 유기염화물을 제거하는 투과증발에서는 농도분극현상이 투과저항에 중요한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 같은 막두께에서, 막에 대한 친화력이나 선택투과성이 더 큰 TCE가 CB 수용액보다 경계층저항의 영향이 더 크게 나타났다. 막두께가 증가할수록 경계층저항의 영향은 감소하고 막저항이 지배적이 되며, 겔보기분리계수는 증가하여 막의 고유분리계수에 가까워졌다.

Abstract: The pervaporation experiments of aqueous solutions of trichloroethylene (TCE) and chlorobenzene (CB) through the silicone rubber (polydimethylsiloxane, PDMS) membrane were carried out and the effect of concentration polarization on the separation characteristics was investigated. The resistance-in-series model was used to explain the boundary layer resistance. It was clear that the concentration polarization phenomenon had a significant effect on the permeation behavior in the pervaporation separation of the trace organic chlorides from aqueous solutions. With the same membrane thickness, the permeation of TCE, which has a stronger affinity for the PDMS, appeared to be more influenced by the boundary layer resistance than that of CB. The effect of boundary layer resistance was reduced and the membrane resistance became dominant with increasing membrane thickness at a given hydrodynamic condition. The separation factor was increased to approach the intrinsic separation factor of the membrane with its thickness.

Key words: Polydimethylsiloxane, Concentration Polarization, Pervaporation, Resistance-in-series, Separation Factor

1. 서 론

특정성분의 분리를 위한 고분자막의 제조기술이 발전되어 감에 따라 여러 가지 산업적 공정에 막분리기술의 응용이 확산되어가고 있다. 최근에는 폐수처리분야에서도 막분리기술의 성능이 입증되어 널리 활용되어 가고 있는 단계에 있다. 막분리공정에 의한 폐수처리는 단순히 오염물질을 제거한다는 개념 뿐만 아니라 폐수중에 함유된 유효물질을 농축회수하여 재사용할 수 있다는 측면에서 많은 이점을 가지고 있다[1].

폐수중의 유기물질을 제거하기 위한 막분리공정에는 주로 한외여과나 역삼투 등이 응용되어 왔으나, 폐수중에 미량으로 함유된 유기물질을 제거하거나 농축하는 데는 물보다 유기물질을 선택적으로 투과시키는 것이 더 효율적인 것으로 알려져 있다. 이러한 막분리법으로 투과증발이 새로운 기술로 주목을 받고 있으며 이 투과증발의 이점은 오염물질이 폐수로부터 거의 순수한 상태로 분리되기 때문에 재사용이 용이하다는 것이다[2]. 투과증발은 친수성 고분자막

에 의한 유기수용액의 탈수, 소수성 고분자막에 의한 유기물의 제거 및 유기혼합물중 특정 성분의 분리 등에 효과적이다. 특히 기존의 분리공정으로는 분리가 어려운 공비혼합물의 분리, 비등점이 유사한 액체혼합물의 분리, 이성질체 및 열에 민감한 액체혼합물의 분리와 폐수중 유해성분의 제거, 유기용매의 회수 및 발효공정에서 생성물의 분리 등 다방면에 응용이 기대되는 분리기술이다[3,4].

염소계 유기화합물은 다른 용제류에 비해 가격이 저렴하고 용해력 및 세정력이 우수하며 인화성이 없기 때문에 기계, 금속 및 섬유 산업에서 뿐만 아니라 일반적인 용제로도 널리 사용되고 있다. 그러나 후처리 과정에 있어서 이들 화합물을 완전히 제거 또는 회수하지 못하고 있는 실정이다. 염소계 유기화합물들은 독성이 매우 강하고 체내에 축적성이 강하며 대부분 발암성물질로 알려져 있어 이들로 인한 지하수 및 지표수의 오염은 음용수 공급에 큰 문제를 일으키게 되므로 폐수로부터 효과적인 분리제거가 요구된다[5].

막분리공정에서 일차적인 전달저항은 막자체에 있다. 그러나 미량성분을 분리하는 막공정에서는 막표면에 인접한 경계층에서의 물질전달저항이 총괄저항에 큰 영향을 미칠 수 있다[6,7]. 경계층저항은 분리의 결과로 경계층에 형성된 농도구배에 기인하게 되는데 이러한 현상을 농도분극이라 한다. 막분리공정에서 농도분극의 영향

† 주 저자 (e-mail: jinhkim@orion.chonnam.ac.kr)

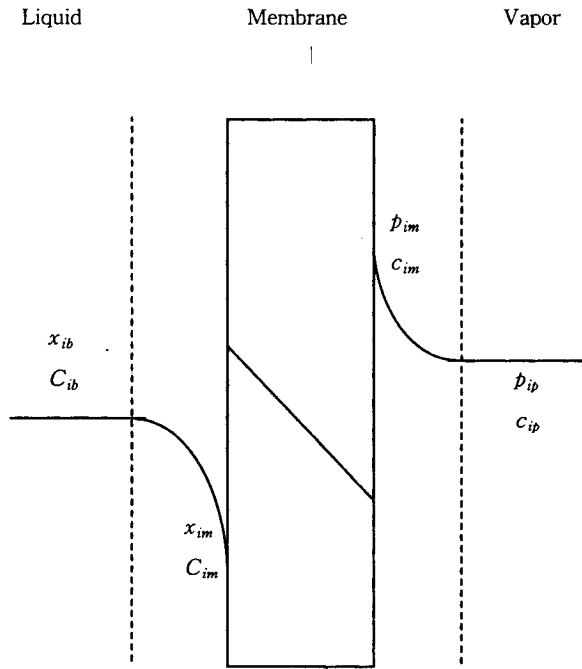


Figure 1. Schematic of the resistance-in-series model.

은 공급액 내에 미량으로 존재하는 성분을 배제하는 역삼투에서보다 선택적으로 투과하는 투과증발에서 더 심하게 나타나는 것으로 보고되어 있다[8]. 따라서 미량성분을 제거하기 위한 투과증발에서 막의 선택이나 모듈의 설계 및 조작 조건의 결정에는 농도분극에 대한 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 polydimethylsiloxane (PDMS)막에 의한 trichloroethylene (TCE)과 chlorobenzene (CB) 수용액의 투과증발에서 분리거동에 미치는 농도분극의 영향을 연구하였다. 농도분극현상은 직렬저항모델 (resistance-in-series model) [9,10]을 사용하여 설명하였으며, 특히 막의 두께가 분리특성에 미치는 영향을 중점적으로 연구하였다.

2. 이 론

투과증발에서 막을 통한 물질의 이동은 Figure 1에 나타낸 바와 같이 5단계로 설명된다[9]. 즉, 투과물이 ① 공급측의 경계층을 통하여 확산한 다음, ② 막에 흡착되고, ③ 흡착된 성분이 막을 통하여 확산한 다음, ④ 투과측에서 증기상태로 탈착되며, ⑤ 탈착된 성분이 투과측 경계층을 통하여 확산한다. 일반적으로 흡착과 탈착은 확산에 비하여 빠르게 진행되므로 저항을 무시할 수 있으며 투과측의 압력을 대단히 낮게 유지하면 투과측에서의 확산저항을 무시할 수 있으므로 물질전달에 대한 총괄저항은 공급측의 경계층저항과 막저항의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{k_L} + \frac{\delta}{Q_i^m} \tag{1}$$

$$\frac{1}{Q_i} = \frac{H_i'}{k_L \delta} + \frac{1}{Q_i^m} \tag{2}$$

식 (1)에서 K_i 는 총괄물질이동계수, k_L 은 경계층에서의 물질전달계수, Q_i^m 은 막의 액체투과도 (liquid permeability), δ 는 막의 두께를 나타낸다. 식 (2)에서 Q_i 는 총괄투과도 (overall permeability), H_i' 은 Henry상수를 나타내며, Q_i^m 은 막의 증기투과도

(vapor permeability)라 한다.

유기물이 극히 미량으로 존재하는 수용액의 투과증발에서 투과측의 압력을 무시하고 투과속도를 투과도나 총괄물질이동계수로 나타내면 다음과 같다.

$$J_i = \frac{Q_i p_i^{sat} \gamma_i^\infty}{\delta} x_{ib} = K_i C_{ib} \tag{3}$$

$$J_i = \frac{Q_i^m p_i^{sat} \gamma_i^\infty}{\delta} x_{im} = \frac{Q_i^m}{\delta} C_{im} \tag{4}$$

여기에서 p_i^{sat} 은 포화증기압, γ_i^∞ 는 무한희석상태의 활동도계수를 나타내며, C_i 와 x_i 는 각각 몰농도와 몰분율을 나타내고, 하첨자 "b"와 "m"은 각각 벌크액체와 공급측계면을 나타낸다. 또한 식 (1)과 (2)로부터 다음의 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$K_i = \frac{Q_i H_i'}{\delta} \tag{5}$$

$$Q_i^m = Q_i^m H_i' \tag{6}$$

유기물이 대단히 낮은 농도로 존재하기 때문에 물의 전달에 대한 경계층저항을 무시할 수 있는 것으로 가정하면[9] 물의 투과속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_w = \frac{Q_w^m p_w^{sat} \gamma_w}{\delta} x_{wb} \cong \frac{Q_w^m p_w^{sat}}{\delta} \tag{7}$$

여기에서 Q_w^m 은 물의 투과도, p_w^{sat} 은 실험온도에서 물의 포화증기압을 나타낸다. 식 (7)은 투과측의 압력을 무시하고, 미량으로 존재하는 유기물수용액에서 물의 몰분율과 활동도계수를 각각 1로 가정하여 나타낸 식이다.

농도분극이 존재할 경우 실험에서 측정된 겉보기분리계수 (apparent separation factor) α 는 막의 고유분리계수 (intrinsic separation factor) α^{intri} 보다 작은 값을 나타낸다[10]. 겉보기분리계수는 공급액의 벌크농도를 기준으로 나타낸 분리계수이며 고유분리계수는 공급액의 막계면 농도를 기준으로 한 분리계수로서 각각 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha = \frac{y_i / y_w}{x_{ib} / x_{wb}} \tag{8}$$

$$\alpha^{intri} = \frac{y_i / y_w}{x_{im} / x_{wm}} \tag{9}$$

유기물이 미량으로 존재하는 수용액의 경우 $x_{wb} \cong x_{wm} \cong 1.0$ 으로 근사할 수 있으며, 투과증기에서는 $y_i / y_w = J_i / J_w$ 가 성립하기 때문에 식 (3)과 (4) 및 (7)을 이용하면 각각의 분리계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{Q_i p_i^{sat} \gamma_i^\infty}{Q_w^m p_w^{sat}} \tag{10}$$

$$\alpha^{intri} = \frac{Q_i^m p_i^{sat} \gamma_i^\infty}{Q_w^m p_w^{sat}} \tag{11}$$

따라서 미량으로 존재하는 유기물수용액의 투과증발에서 겉보기 분리계수에 대한 고유분리계수의 비는 농도분극율 ($= x_{im} / x_b$)의 역수와 같으며 다음과 같은 관계가 성립한다.

Table 1. Physical Properties of Trichloroethylene and Chlorobenzene at 25 °C

Components	M_i g/mol	p_i^{sat} kPa	S_i mol/m ³	H_i^* kPa · m ³ /mol	γ_i^∞	$\Delta_{P,S}^{**}$ (MPa) ¹
TCE	131.40	9.90 ⁽³⁾	8.37 ⁽³⁾	1.183	6,624	3.66
CB	112.56	1.58 ⁽⁴⁾	4.19 ⁽⁴⁾	0.377	13,239	5.82

* $H_i^* = p_i^{sat}/S_i$

** $\Delta_{P,S} = [(\delta_{D,P} - \delta_{D,S})^2 + (\delta_{P,P} - \delta_{P,S})^2 + (\delta_{H,P} - \delta_{H,S})^2]^{1/2}$

$$\frac{\alpha^{intri}}{\alpha} = \frac{x_b}{x_m} = \frac{Q_i^m}{Q_i} = 1 + E \tag{12}$$

$$E = \frac{1/k_L}{\delta/Q_i^m} = \frac{Q_i^m H_i^*}{k_L \delta} \tag{13}$$

여기에서 E 는 무차원수로서 막저항에 대한 경계층저항의 비를 나타낸다. 따라서 E 값은 경계층저항의 영향이 적을수록 감소한다. $E = 0$ 이면 막저항에 비하여 경계층저항을 무시할 수 있다는 것을 의미하며, $E = \infty$ 이면 경계층저항이 총괄저항을 지배한다는 것을 의미한다.

겉보기분리계수 α 는 농도분극현상이 일어나는 정도에 따라 달라지게 되는데[6], 막저항에 비하여 경계층저항을 무시할 수 있을 때 막의 고유분리계수 α^{intri} 에 가까워진다. 식 (12)와 (13)에서 보면 막의 두께 또는 경계층의 물질전달계수가 증가하면 E 값이 감소하며 분리계수가 증가함을 알 수 있다. 즉 두께 $\delta \rightarrow \infty$ 또는 $k_L \rightarrow \infty$ 가 되면 $E \rightarrow 0$ 이 되어 $\alpha \rightarrow \alpha^{intri}$ 가 된다.

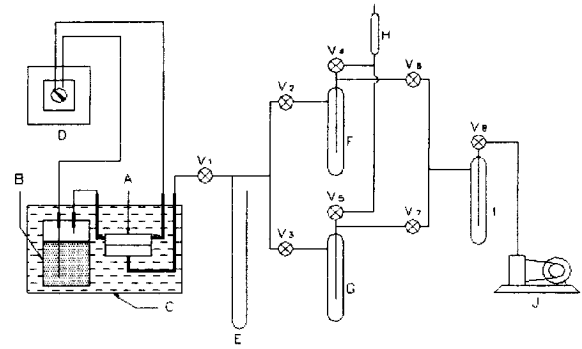
3. 실험

3.1. 재료 및 막의 제조

본 연구에서는 물보다 유기화합물을 선택적으로 투과하는 PDMS 막을 사용하였다. 막은 General Electric사 제품의 PDMS수지 (RTV615A)와 경화제 (RTV615B)를 10:1의 비율로 혼합하여 제조하였다. 수평하게 유지된 유리판 위에 수지와 경화제의 혼합물을 casting하여 상온에서 24시간 방치한 다음 80 °C로 고정된 진공건조기에서 24시간 동안 가교시켰다. 본 연구에 사용한 TCE와 CB는 Junsei Chemical사 제품이며 이들 유기염화물의 물리적 특성을 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 S_i 는 물에 대한 용해도를 나타내며, 이 용해도를 이용하여 수용액에서 무한희석상태의 활동도계수를 계산하였다[11]. $\Delta_{P,S}$ 는 PDMS와의 용해도parameter차이를 나타내며 $\Delta_{P,S}$ 의 값이 작을수록 고분자막과의 친화력이 커지며 따라서 투과도나 선택도가 증가한다.

3.2. 투과증발실험

25 °C에서 PDMS막에 의한 TCE와 CB수용액의 투과증발실험을 행하였다. 실험장치의 상세도는 Figure 2와 같다. 투과셀 (permeation cell)은 직경 10 cm의 stainless steel로 제작하였으며, 막은 여과지와 다공판으로 지지하였다. 투과셀의 윗판과 아랫판 사이에는 원형 gasket과 O-ring을 삽입하여 새는 것을 방지하였다. 실험 온도를 조절하기 위하여 막이 장착된 투과셀과 공급탱크를 항온조 내에 완전히 잠기게 하였다. 공급액은 미량펌프를 이용하여 일정유속으로 투과셀에 공급하였다. 투과측은 진공펌프를 사용하여 1 torr이하로 유지하였으며, 투과측은 액체질소를 사용하여 응축기에서 포집하였다.



A : Permeation cell B : Feed tank C : Thermostat
 D : Peristaltic pump E : Manometer F : Cold trap
 G : Cold trap H : Vents to atmosphere I : Cold trap
 J : Vacuum pump V : Valves

Figure 2. Schematic diagram of the pervaporation apparatus.

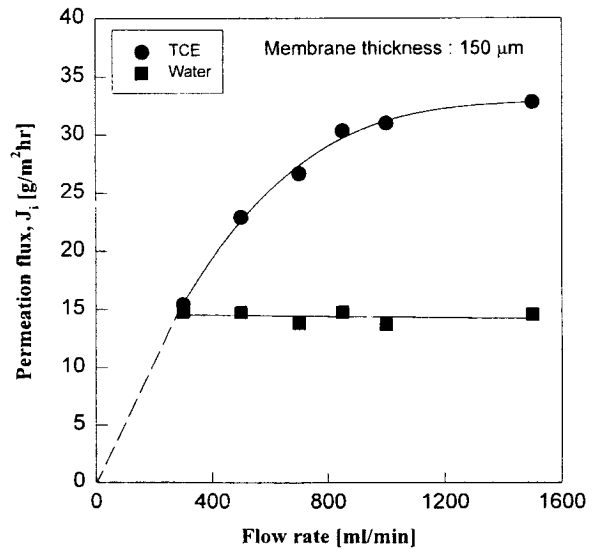


Figure 3. Permeation fluxes as a function of flow rate.

4. 결과 및 고찰

25 °C에서 400 ppm의 TCE수용액을 PDMS막으로 투과증발실험을 행하여 공급액의 유속에 따른 투과속도의 변화를 Figure 3에 나타내었다. 물의 투과속도는 유속에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내었으나, TCE의 투과속도는 유속이 증가함에 따라 증가하다가 유속이 1000 mL/min 이상에서 거의 일정한 값을 나타내었다. 이러한 결과는 물의 투과속도에 미치는 농도분극의 영향은 무시할 수 있으나, TCE의 투과속도는 유속이 낮을 경우에 농도분극의 영향을 심하게 받고 있다는 것을 입증하고 있다. 특히 유속이 300 mL/min에서 1,000 mL/min으로 증가함에 따라 TCE의 투과속도가 2배 정도 증가하였다. 본 실험장치의 경우 유속이 1000 mL/min이상에도 달하면 난류도가 증가하여 경계층 저항보다는 막 자체의 저항이 전체 투과공정을 지배하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 이후의 실험에서 막두께에 따른 농도분극의 영향을 알아보기 위하여 500 mL/min의 유속에서 실험을 행하였다.

공급액의 유속을 일정하게 유지하고 막두께를 변화시켜 가면서 PDMS막에 의한 TCE와 CB수용액의 투과증발실험을 행하고 막두께에 따른 유기물의 총괄저항을 Figure 4에 나타내었다. 식 (1)과

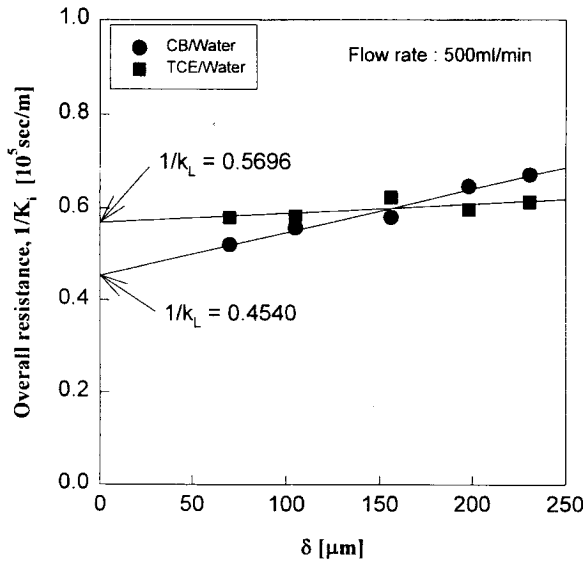


Figure 4. Overall resistance of organics as a function of membrane thickness.

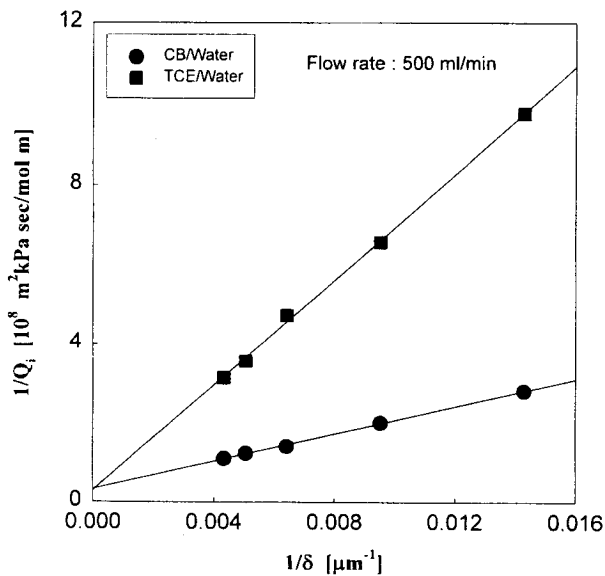


Figure 5. Permeabilities as a function of reciprocal membrane thickness.

같이 직선이 얻어졌으며, 이 직선의 절편과 기울기로부터 경계층에서의 물질전달계수와 막에서의 액체투과도를 얻을 수 있었다. Figure 4에서 직선의 절편은 경계층저항을 나타내며 기울기는 막저항을 나타낸다. TCE가 CB의 경우보다 경계층저항은 더 큰 데 비하여 막저항은 더 작게 나타나고 있다. 이와 같이 같은 흐름조건에서 TCE가 CB보다 경계층저항이 더 큰 것은 농도분극의 영향이 TCE의 투과에 더 크게 작용하고 있음을 의미한다. 농도분극은 분리의 결과로 일어나는 현상이기 때문에 분리가 잘 되는 성분일수록 농도분극이 심하게 일어난다[12]. TCE는 CB보다 PDMS막에 대한 친화력이 더 클 뿐만 아니라 분자의 크기가 작기 때문에 TCE가 CB보다 PDMS막에 의한 선택성이 더 크다. 식 (2)는 막두께의 역수와 투과도의 역수를 도시하면 직선이 얻어진다는 것을 의미한다. Figure 5와 같이 직선이 얻어졌으며 절편과 기울기로부터 막에서의

Table 2. Transport Parameters Through PDMS Membrane

Parameters	Organics	This work		Previous work	Reference
		Eq. (1)	Eq. (2)		
k_L [m/sec]	TCE	1.756×10^{-5}	1.783×10^{-5}	2.3×10^{-5}	2
	CB	2.203×10^{-5}	2.178×10^{-5}		
Q_i^m [mol/m ² kPa sec]	TCE	4.275×10^{-8}	3.286×10^{-8}	2.30×10^{-8}	13
	CB	2.841×10^{-8}	2.952×10^{-8}	6.29×10^{-8}	12
Q_i^m [m ² /sec]	TCE	5.057×10^{-8}	3.887×10^{-8}	2.7×10^{-8}	13
	CB	1.071×10^{-8}	1.113×10^{-8}	2.2×10^{-8}	7
Q_w^m [mol/m ² kPa sec]	H ₂ O	1.191×10^{-8}		1.12×10^{-8}	16
				1.21×10^{-8}	15
				1.36×10^{-8}	13

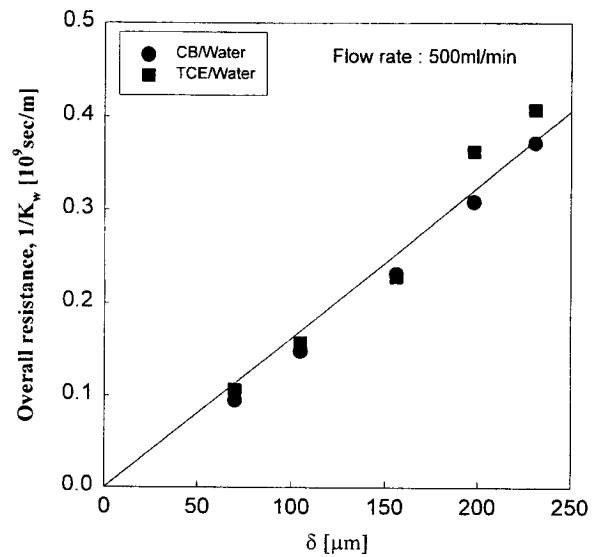


Figure 6. Overall resistance of water as a function of membrane thickness.

증기투과도와 경계층에서의 물질이동계수를 얻을 수 있었다. Figure 4와 5에서 구한 직렬저항모델의 매개변수를 문헌값들과 함께 Table 2에 비교하였다. 두가지 방법으로 구한 매개변수의 값들이 거의 비슷하였으며, 문헌값들과 비교하여 보았을 때 고유투과도의 값들도 문헌값들과 잘 일치하였다.

막두께에 따른 물의 투과에 대한 총괄저항을 Figure 6에 나타내었다. 유기물의 종류에 상관없이 실험오차 범위 내에서 원점을 지나는 직선이 얻어졌다. 이는 식 (7)이 성립함을 입증하며 묽은 수용액의 투과증발에서는 물의 투과에 미치는 농도분극의 영향을 무시할 수 있다는 것을 의미한다. Figure 6에 나타낸 직선의 기울기로부터 물의 투과도 Q_w^m 을 구하여 Table 2에 정리하였다. 물의 투과도 역시 문헌값들과 잘 일치하였다.

막두께에 따른 농도분극을 Figure 7에 나타내었다. 미량성분이 선택적으로 투과되는 투과증발의 경우에 농도분극율은 $0 \leq x_m/x_b \leq 1$ 의 범위이다. 이 경우 농도분극율이 증가할수록 농도분극의 영향이 감소하며, 분극율이 1이 되면 농도분극현상이 없어진다. Figure 7에서 보면 막두께가 증가할수록 농도분극율이 증가하여 농도분극의 영향이 줄어들음을 알 수 있다. 같은 막두께일 경우 CB수용

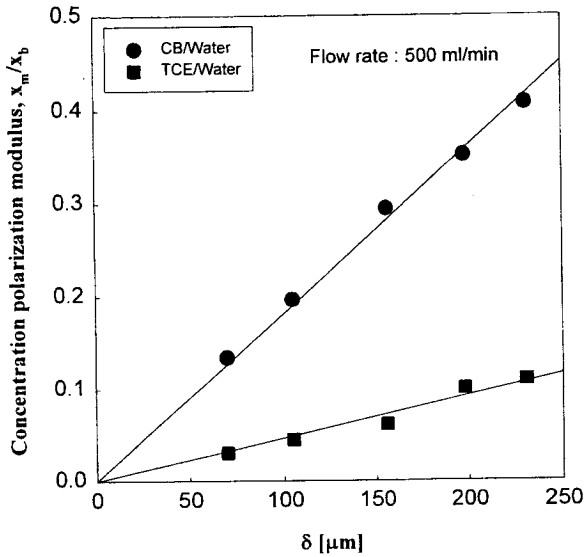


Figure 7. Concentration polarization modulus as a function of membrane thickness.

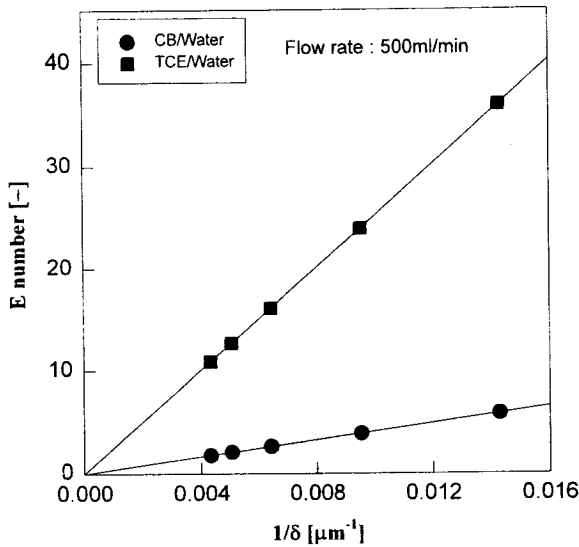


Figure 8. Dimensionless E number as a function of reciprocal membrane thickness.

액보다 TCE수용액에서 농도분극이 더 심하게 일어나는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 Figure 4의 결과와도 일치한다.

막저항에 대한 경계층저항의 비를 식 (13)과 같이 무차원수 E 로 정의하여 나타낸다[9]. 식 (13)에서 보면 E 값은 막의 고유투과도와 Henry상수, 물질전달계수 및 막의 두께에 의존한다. 막과 투과성분 사이의 친화력이 크면 고유투과도 Q_m^0 가 증가하기 때문에 E 값도 증가한다. 물 속에서 유기성분의 확산계수가 크면 물질전달계수 k_L 이 증가하기 때문에 E 값은 감소한다. 반면에 증기압이 높거나 활동도계수가 커지면 Henry상수 H' 가 증가하기 때문에 E 값은 증가한다. 유속이 일정할 때 경계층저항의 크기는 막두께와 무관하나, 막두께가 증가할수록 막저항이 커지기 때문에 E 값은 감소하게 된다. Figure 8은 막두께에 따른 E 값의 변화를 도시한 것인데, E 값이 막의 두께에 반비례함을 알 수 있다. 또한 같은 막두께에서

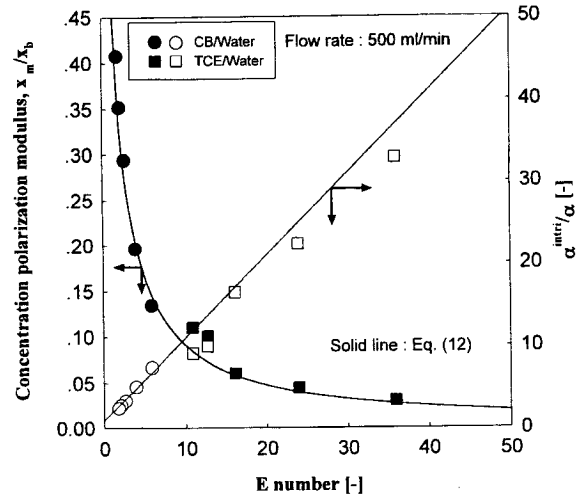


Figure 9. Concentration polarization modulus and separation factor ratio as a function of E number.

CB수용액에 비하여 TCE수용액의 경우에 막저항에 대한 경계층저항의 비가 더 크게 나타나고 있다.

Figure 9에는 무차원수 E 값에 따른 농도분극율과 분리계수의 비 (α^{mtr}/α)를 나타내었다. 식 (12)에서 보는 바와 같이 농도분극율과 분리계수의 비는 서로 역수의 관계가 성립한다. E 값이 감소할수록 농도분극율이 증가하는 것을 볼 수 있으며 특히 E 값이 10 이하일 때, 즉 경계층저항이 막저항의 10배 이하에서 농도분극의 영향이 급격히 감소함을 볼 수 있다. 농도분극현상이 일어날 경우 공급측 막계면에서의 농도가 벌크농도보다 낮기 때문에 실험에서 구한 겉보기분리계수는 실제막의 고유분리계수에 비하여 낮게 나타난다. 막의 두께가 증가할수록 (E 값이 감소할수록) 겉보기분리계수가 고유분리계수에 가까워지며 막두께가 무한대가 되는 극한에서 두 분리계수가 일치하게 된다. 따라서 고유분리계수는 막저항이 총괄저항을 지배할 때 얻어지며, 주어진 막으로 얻을 수 있는 최대분리계수를 나타낸다. 또한 Figure 9에서 직선은 식 (12)로부터 얻어진 것이다. TCE와 CB수용액에 대한 실험값들이 모두 식 (12)에 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

25 °C에서 PDMS막에 의한 TCE와 CB수용액의 투과증발실험을 행하여 농도분극이 분리거동에 미치는 영향을 연구하였다. 직렬저항모델을 사용하여 경계층에서의 물질전달계수와 막에 의한 투과도를 구하고, 막두께가 투과에 미치는 영향을 알아보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수용액으로부터 미량의 유기염화물을 제거하는 투과증발에서는 농도분극현상이 분리특성에 중요한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.
- 2) 같은 막두께에서 CB수용액보다 TCE수용액의 경우에 경계층저항의 영향이 더 크게 나타났으며, 이는 TCE가 막에 대한 친화력이나 선택투과성이 더 크기 때문이다.
- 3) 막두께가 증가할수록 경계층저항의 영향은 감소하고 막저항이 지배적이며, 겉보기분리계수는 증가하여 막의 고유분리계수에 가까워진다.

감 사

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구비(과제번호 971-1107-046-1)에 의하여 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

Nomenclature

C_i	concentration of component i in the feed, [mol/m^3]
c_i	concentration of component i in the permeate, [mol/m^3]
E	dimensionless number, [-]
H_i'	Henry's law constant, [$kPa m^3/mol$]
J_i	organic permeation flux, [$mol/m^2 hr$] or [$g/m^2 hr$]
J_w	water permeation flux, [$mol/m^2 hr$] or [$g/m^2 hr$]
K_i	overall mass transfer coefficient, [m/sec]
k_L	liquid boundary layer mass transfer coefficient, [m/sec]
p_i^{sat}	saturated vapor pressure of component i , [kPa]
p_w^{sat}	saturated vapor pressure of water, [kPa]
Q_i	overall permeability, [$mol m/m^2 kPa sec$]
Q_i^m	intrinsic vapor permeability of the membrane, [$mol m/m^2 kPa sec$]
Q_i^m	intrinsic liquid permeability of the membrane, [m^2/sec]
Q_w^m	water permeability, [$mol m/m^2 kPa sec$]
S_i	solubility in water, [mol/m^3]
x_{ib}	mole fraction of component i in bulk of feed, [-]
x_{im}	mole fraction of component i in feed at membrane interface, [-]
y_i	mole fraction of organic component i in permeate, [-]
y_w	mole fraction of water in permeate, [-]
α	apparent separation factor, [-]
α^{intri}	intrinsic membrane separation factor, [-]
δ	membrane thickness, [m]
δ_D	solubility parameter for dispersion force, [$(MPa)^{1/2}$]
δ_H	solubility parameter for hydrogen bonding, [$(MPa)^{1/2}$]
δ_P	solubility parameter for polar interaction, [$(MPa)^{1/2}$]
ρ_L	molar density of feed solution, [mol/m^3]
γ_i^∞	infinite dilution activity coefficient, [-]
γ_w	activity coefficient of water, [-]
$\Delta_{P,S}$	solubility parameter difference, [$(MPa)^{1/2}$]

Subscripts

b	bulk
m	interface
i	component i
L	liquid
p	permeate
w	water

참 고 문 헌

1. T. Q. Nguyen and K. Nobe, *J. Membrane Sci.*, **30**, 11(1987).
2. H. H. Nijhuis, M. H. V. Mulder and C. A. Smolders, *J. Membrane Sci.*, **61**, 99(1991).
3. R. Y. M. Huang, "Pervaporation Membrane Separation Process", 62, University of Waterloo, Canada(1991).
4. P. Aptel, N. Challard and J. Cuny, *J. Membrane Sci.*, **1**, 271 (1976).
5. B.-K. Oh, S.-Y. Ha and S.-T. Ha and Y.-M. Lee, *Membrane Journal*, **4**, 57(1994).
6. A. S. Michaels, *J. Membrane Sci.*, **101**, 117(1995).
7. B. Raghunath and S.-T. Hwang, *J. Membrane Sci.*, **65**, 147 (1992).
8. J. G. Wijmans, A. L. Athayde, R. Daniels, J. H. Ly, H. D. Kamaruddin and I. Pinnau, *J. Membrane Sci.*, **109**, 135(1996).
9. W. Ji, S. K. Sikdar and S.-T. Hwang, *J. Membrane Sci.*, **93**, 1(1994).
10. X. Feng and R. Y. M. Huang, *J. Membrane Sci.*, **94**, 201 (1994).
11. W. J. Lyman, W. F. Reehl and D. H. Rosenblatt, "Handbook of Chemical Property Estimation Methods", Chap. 3, McGraw-Hill, New York(1982).
12. B. Raghunath and S.-T. Hwang, *J. Membrane Sci.*, **75**, 29 (1992).
13. C. Lipski and P. Côté, *Environ. Prog.*, **9**, 254(1990).
14. D. Mackay, W. Y. Shiu and R. P. Sutherland, *Envir. Sci. & Tech.*, **13**, 333(1979).
15. Pierre Côté and Chris Lipski, Proceedings of Third International Conference on Pervaporation Processes in the Chemical Industry, pp. 449-462(1988).
16. R. Psaume, Ph. Aptel, Y. Aurelle, J. C. Mora and J. L. Bersillon, *J. Membrane Sci.*, **36**, 373(1988).