

막반응기에서 Aliquat 336에 의한 n-butyl acetate의 알칼리 가수분해반응 II. 실험적 고찰

박상욱 · 문진복 · 정영훈 · 박대원 · 신정호

부산대학교 공과대학 화학공학과
(1993년 8월 31일 접수, 1993년 10월 26일 채택)

Alkaline Hydrolysis of n-Butyl Acetate with Aliquat 336 in a Membrane Reactor II. Experimental Study

Sang-Wook Park, Jin-Bok Moon, Young-Hoon Jung, Dae-Won Park and Jung-Ho Shin

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Pusan National University
(Received 31 August 1993; accepted 26 October 1993)

요 약

다공질 polypropylene 고분자 막반응기에서 Aliquat 336에 의한 n-butyl acetate의 알칼리 가수분해반응실험을 행하여 유기상에 존재하는 n-butyl acetate의 농도를 측정하였다. 막내에서 화학반응을 수반한 물질전달기구를 해석한 수치모사로부터 구한 계산값과 측정값을 비교하여, 막반응기는 두 상의 본체가 완전혼합 반응기이며, 수용액상에서 상이동촉매의 중간생성물은 순간 가역반응, 막내에서 가수분해반응은 준1차 반응으로 해석할 수 있었다.

Abstract—Concentrations of unreacted n-butyl acetate in the alkaline hydrolysis of n-butyl acetate by Aliquat 336 were measured with a porous polypropylene membrane reactor, and compared with those predicted from the theoretical model based on the mass transfer mechanism with chemical reaction in the organic membrane layer. The membrane reactor was an ideal mixed reactor, the reaction of intermediate of catalyst in the aqueous phase was an instantaneous reversible reaction, and the reaction of n-butyl acetate in the membrane layer was pseudo 1st-order reaction.

1. 서 론

상이동촉매(phase transfer catalyst)에 의한 액-액 불균일계 반응이 구해치환 반응일 경우 상이동촉매와 결합한 이온의 중간생성물이 상호불용인 불균일상간을 동시에 이동하여 유기용매에 난용인 음이온 친핵체 또는 염기의 가용화 효과를 증가시켜 반응속도, 선택도를 증가시키고, 상온, 상압에서 반응을 진행시킬 수 있는 특징 때문에 상이동촉매에 의한 반응기구, 반응전환율 증가를

위한 촉매성능 개발 등 이에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다[1-10]. 그러나 이들 연구는 상이동촉매의 첨가에 의한 생성물의 수율과 반응을 촉진하는 촉매특성에 목적을 둔 반응율속 범위에서의 연구가 대부분이고 확산과정의 영향을 고려한 반응제에 대한 실험적 및 이론적 연구는 매우 미비한 실정이다.

Park 등은 평면교반조에서 액-액 불균일계 접촉계면을 통하여 전달되는 용질의 물질전달계수를 측정하여 실험변수와 물질전달계수와의 관계를 무차원군으로 나

타내어 물질전달계수의 실험변수에 대한 상관관계식을 제시하고[11], 유기상과 수용액상간의 계면을 통하여 전달되는 상이동촉매의 분배계수와 수용액상에서의 해리상수 및 상이동촉매를 사용한 *n*-butyl acetate의 알칼리 가수분해반응속도상수를 화학반응을 수반한 물질 전달기구의 해석으로부터 구하였다[12-14]. 또한 고속 교반조를 사용하여 불용인 두 액체의 분산상태에서 반응기구를 평면교반조에서의 특성과 비교하였다[15]. 이들 일련의 화학반응을 수반한 물질전달현상의 특성에 대한 연구자료를 기초로 하여 본 연구(II)에서는 화학 반응 공정과 생성물의 분리공정을 동시에 수행할 수 있는 친유성 다공질 고분자막의 막반응기에서 Aliquat 336 상이동촉매에 의한 *n*-butyl acetate의 알칼리 가수분해반응실험을 행하여 실험결과를 앞의 연구(I)[16]의 이론적 모사 결과와 비교함으로써 막반응기 성능을 고찰하고자 한다.

2. 실험

실험에 사용한 시약, *n*-butyl acetate(Junsei Chem. Co. Ltd.), toluene(Junsei Chem. Co. Ltd.), NaOH(Tedia Co. Ltd.), NaCl(Tedia Co. Ltd.)은 특급시약을 사용하였으며, Aliquat 336(Aldrich Chem. Co. Ltd.)은 1.0 kmol/m³ NaCl과 HCl 수용액과 증류수로 여러번 세척한 후 건조하여 사용하였다[12].

실험에 사용한 막은 친유성 다공질 polypropylene 고분자 평판막, Celgard 2500[Hoechst Celanese Co., 세공율: 45%, 유효세공크기: 7.5×10^{-6} cm, 막두께(nominal thickness): 2.5×10^{-3} cm]이며, 사용한 막 면적은 69.47 cm²이었다.

실험에 사용한 막반응기(Fig. 1)는 개량된 Lewis cell로서 내경 100 mm, 높이 30 mm의 파이렉스로 제작하였다. 반응기 중간에 teflon 지지체로 막을 고정시킨 반응기 하부에 소정의 농도로 조제한 NaOH 수용액을, 반응기 상부에 *n*-butyl acetate와 분석용 내부표준물질인 dodecane의 toluene 용액을 각각 185 cm³로 하여 반응기에 주입한 후 25°C에서 교반시켜 반응을 행하였다. 반응기 하부는 자석교반기로, 반응기 상부는 모터에 부착된 임펠러에 의해 각각 독립적으로 교반시켰다. 일정 시간마다 유기상을 미량 채취하여 *n*-butyl acetate 농도를 기체 크로마토그래프(Shimadzu 8A, Silicon GE SE-30-20% Chromosorb W, TCD, He 유량: 20 cm³/min, TCD 온도: 260°C, column 온도: 80-260°C : 32°C/min)에 의해 dodecane을 표준물질로 하여 측정하였고, 수용액상에서 OH⁻ 이온의 농도를 phenolphthalein 지시약에 의한 HCl 적정법으로 각각 측정하였으며, 이들

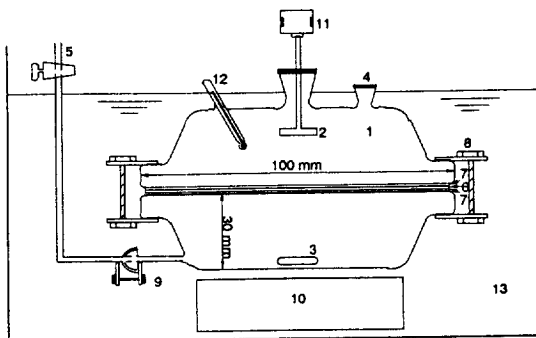


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|----------------------------|------------------------------|
| 1. Agitated vessel | 8. Joint |
| 2. Stirring impeller | 9. Ball joint |
| 3. Magnetic stirring bar | 10. Immersion stirring plate |
| 4. Sample inlet | 11. Motor |
| 5. Aqueous phase injection | 12. Thermometer |
| 6. Membrane | 13. Water bath |
| 7. Teflon supporter | |

측정농도로부터 계산한 *n*-butyl acetate와 NaOH 각 성분에 대한 전화율은 2%이내에서 일치하였다.

막반응기에서 *n*-butyl acetate, NaOH, Aliquat 336, 이온강도, 교반속도 등의 실험변수를 변화시키면서 25°C에서 반응전화율을 측정하여 앞의 연구(I)[16]에서 제시한 모사 결과와 비교하였다.

3. 물성치 측정

3-1. 막의 유효두께(effective thickness)

막의 유효두께, δ^{eff} 는 격막(diaphragm) cell을 이용한 확산계수 측정으로부터 구하였다[17].

$$D = \frac{1}{\beta t'} \ln \left(\frac{C_1'' - C_2''}{C_1 - C_2} \right) \quad (1)$$

$$\beta = \frac{A \varepsilon}{\delta^{\text{eff}}} \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) \quad (2)$$

여기서, D 는 확산계수, t' 는 확산시간, C_1'' , C_2'' 와 C_1 , C_2 는 $t'=0$ 와 t' 에서 cell의 하부와 상부의 농도, V_1 , V_2 는 하부와 상부의 부피를 각각 나타내며, A 는 접촉면적, ε 는 세공율, β 는 식 (2)에서와 같이 굴곡인자를 포함한 cell 상수이다. 알고 있는 확산계수($D_{\text{toluene-benzene}} = 1.85 \times 10^{-5}$ cm²/s, 25°C [18])로부터 식 (1)을 이용하여 cell 상수, β 를 구하여 막의 유효두께, δ^{eff} 를 구할 수 있다.

막의 호칭 두께를 한장부터 석장까지 변화시키면서 시간변화에 대한 cell 상부와 하부에서의 toluene의 농

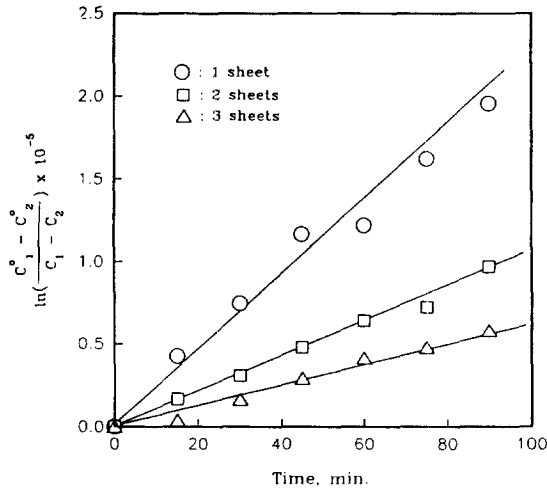


Fig. 2. $\ln(C_1 - C_2/C_1 - C_2)$ vs. time for various thickness of membrane.

도를 기체 크로마토그래프로부터 측정하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 실험치들은 원점을 지나는 직선을 잘 만족하였으며, 이 직선의 기울기로부터 구한 값들로부터 막의 유효두께, δ^{eff} 를 구하여 두께, δ 에 대해 Fig. 3에 나타내었다. 99.9%의 상관관계로 직선을 잘 만족함을 알 수 있고, 식 (3)의 관계로부터 측정한 굴곡도, τ 는 3.97로서 문헌 [19]에서의 측정값 3.3과 유사한 값을 가짐을 알 수 있다.

$$\delta^{eff} = \tau \cdot \delta \quad (3)$$

3-2. 확산계수

Toluene 용액에서의 n-butyl acetate와 상이동촉매 Aliquat 336의 확산계수, D_{RY} , D_{QY} 는 Wilke-Chang 식 으로부터 산출하였으며, 그 값은 각각 2.03×10^{-5} , $8.75 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 이며, 막내에서의 유효확산계수는 식 (4)로부터 구하였다[17].

$$D^{eff} = \frac{D}{\tau} \quad (4)$$

전해질 수용액에서의 Aliquat 336의 확산계수, D_{Q+Y-} 는 염류효과를 고려한 Ratcliff[20]와 Hikita 등[21]이 제시한 방법을 사용하여 전보[14]에서 구한 식 (5)로부터 구하였다.

$$\frac{D_{Q+Y-}}{D_{Q+Y-W}} = 1 - (0.138[\text{NaOH}] + 0.0784[\text{NaCl}]) \quad (5)$$

여기서, D_{Q+Y-W} 는 물에서 Aliquat 336의 확산계수로서

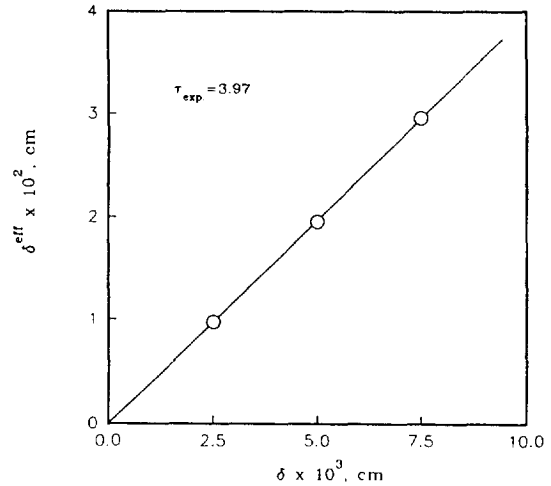


Fig. 3. Effect of nominal thickness on effective thickness.

전보[12]에서 구한 값, $1.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 을 사용하였다.

3-3. 물질전달계수, 추출상수 및 반응속도상수

물에서의 Aliquat 336의 물질전달계수, K_m 은 전보 [11]에서 사용한 방법으로 측정하였으며, 수용액상의 교반속도, 200, 500, 700, 900 rpm에서 물질전달계수는 각각 0.863×10^{-4} , 1.6659×10^{-4} , 1.858×10^{-4} , $1.8972 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 이었고, 전해질 수용액에서의 물질전달계수는 전해질 수용액에서 식 (5)로부터 구한 확산계수를 경 막설을 사용하여 산출하였다.

QY와 QX의 분배계수, α_1 과 α_2 는 전보[12]에서 구한 식 (6)과 (7)로부터 구하였으며, QY와 QX의 해리상수, K_1 과 K_2 는 전보[12]에서 구한 값, 0.0047 kmol/m^3 와 $219 \text{ m}^3/\text{kmol}$ 을 각각 사용하였다. 이들 α_1 , α_2 , K_1 및 K_2 를 사용하여 앞의 연구(I)[16], 식 (21)과 (22)로부터 QY와 QX의 추출상수, K_{QY} 와 K_{QX} 를 구하였다.

$$\log\left(\frac{\alpha_1}{0.0065}\right) = -(0.296[\text{NaCl}] + 0.341[\text{NaOH}]) \quad (6)$$

$$\log\left(\frac{\alpha_2}{0.5382}\right) = -(0.198[\text{NaCl}] + 0.243[\text{NaOH}]) \quad (7)$$

n-Butyl acetate의 알칼리 가수분해반응의 반응속도 상수, k_2 는 전보[14]에서 구한 값, $36 \text{ m}^3/\text{kmol} \cdot \text{s}$ 을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

상이동촉매, Aliquat 336(QY)을 사용하여 막반응기에서 n-butyl acetate(RY)의 NaOH(X^-) 알칼리 가수

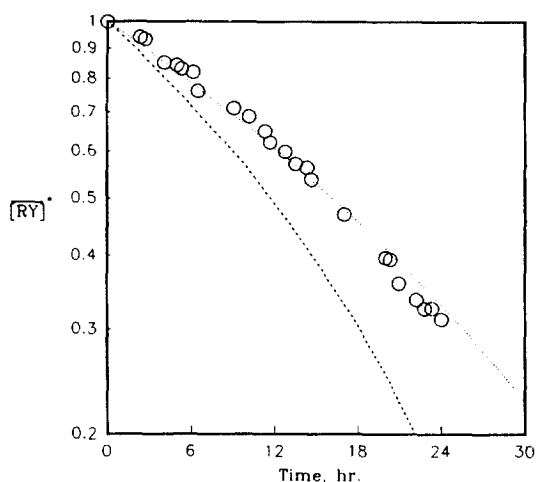


Fig. 4. Effect of diffusivities of QY, QX, and RY on $[RY]^*$. (○: exp. data, ---: calculated value with bulk diffusivity, ···: calculated value with effective diffusivity)

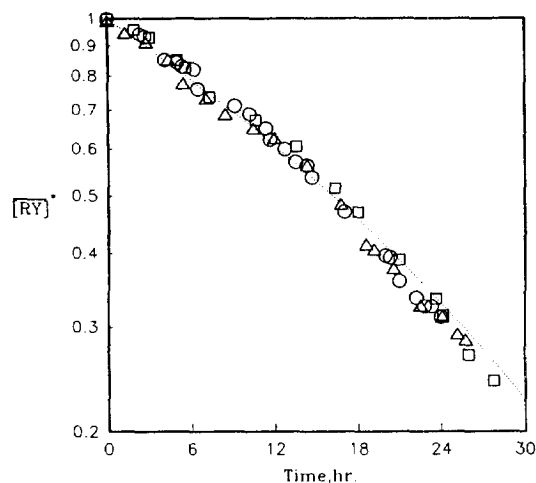


Fig. 5. Agitation effect of organic phase on $[RY]^*$ at agitation of aqueous phase, 700 rpm. (○: 900, □: 1100, △: 1300 rpm, ···: calculated value)

분해 반응실험을 행하여 유기상에 존재하는 n-butyl acetate의 미반응농도를 측정하여 실험변수 변화에 대한 전환율의 영향을 Fig. 4-13에 나타내었다.

막내에 존재하는 상이동촉매와 결합한 중간생성물, QY, QX 및 반응물, RY의 확산계수가 반응에 미치는 영향을 검토하기 위하여 각 성분의 막내 유기상에서의 확산계수값과 막내 굴곡도, τ 를 고려하여 식 (4)로부터 구한 유효확산계수값을 각각 사용하여 수치모사로부터

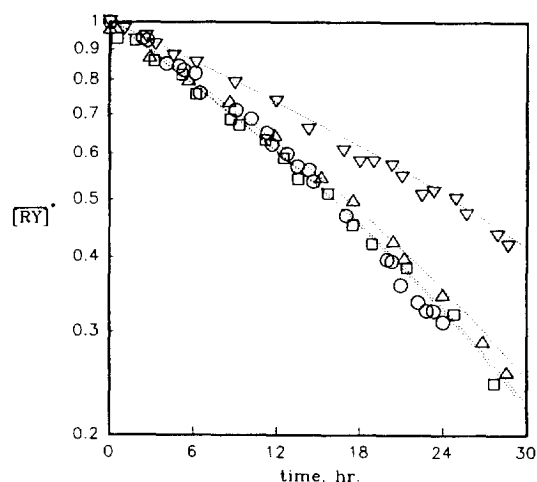


Fig. 6. Agitation effect of aqueous phase on $[RY]^*$ at agitation of organic phase, 900 rpm. (▽: 200, △: 500, ○: 700 rpm, □: 900 rpm, ···: calculated value)

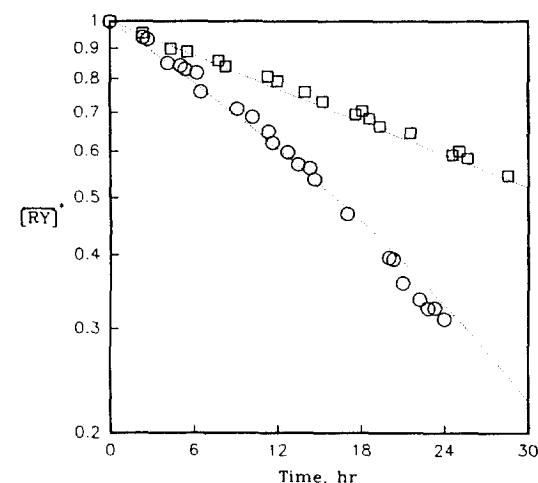


Fig. 7. Effect of concentration of n-butyl acetate on $[RY]^*$ at NaOH, 2.0 and Aliquat 336, 0.24 kmol/m³. (□: 1.0, ○: 0.5 kmol/m³, ···: calculated value)

산출한 $[RY]^*$ 와 측정값을 Fig. 4에 나타내었다. 이 때의 반응조건은 n-butyl acetate 농도, 0.5, NaOH, 2.0, Aliquat 336, 0.24 kmol/m³에서 유기상과 수용액상의 교반 속도는 각각 900과 700 rpm이었다. 이 그림에서 측정값은 유효확산계수를 사용한 수치모사에서 산출한 계산값과 잘 일치하는 것으로 보아 본 모델에서 사용한 확산계수는 막내의 굴곡도를 고려한 유효확산계수를 사용하여야 함을 알 수 있고, 아울러 식 (3)을 사용한 굴곡도의 측정값이 타당함을 알 수 있었다.

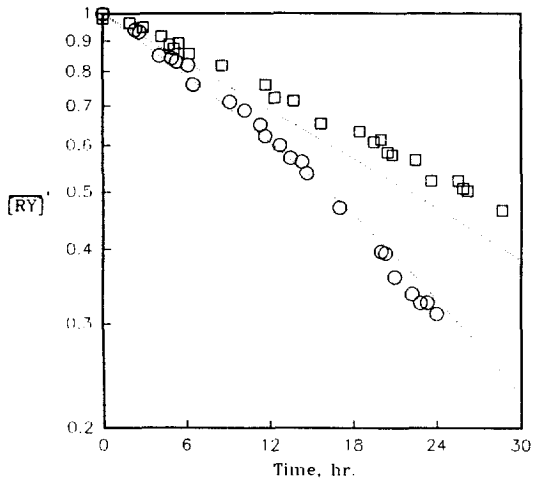


Fig. 8. Effect of NaOH concentration on $[RY]^*$ at n-butyl acetate, 0.5 and Aliquat 336, 0.24 kmol/m³.
(○: 2.0, □: 1.0 kmol/m³, ...: calculated value)

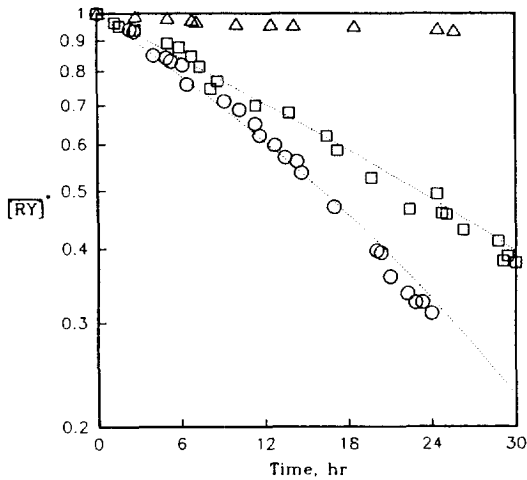


Fig. 9. Effect of concentration of Aliquat 336 at n-butyl acetate, 0.5, and NaOH, 2.0 kmol/m³.
(△: 0, □: 0.12, ○: 0.24 kmol/m³, ...: calculated value)

막반응기의 막내에서 물질전달저항이 존재하고 수용액상과 유기상에서는 완전혼합 상태로 가정한 모델을 확인하기 위하여 NaOH, 2.0, n-butyl acetate, 0.5, Aliquat 336, 0.24 kmol/m³ 농도를 대표적으로 하여, 유기상과 수용액상의 교반속도를 변화시키면서 $[RY]^*$ 를 측정하여 Fig. 5와 6에 나타내었다. Fig. 5에 수용액상의 교반속도를 700 rpm으로 고정하고 유기상의 교반속도를 900, 1100 및 1300 rpm으로 변화시키면서 측정한 $[RY]^*$ 값은 수치모사로부터 산출한 계산값과 잘 일치

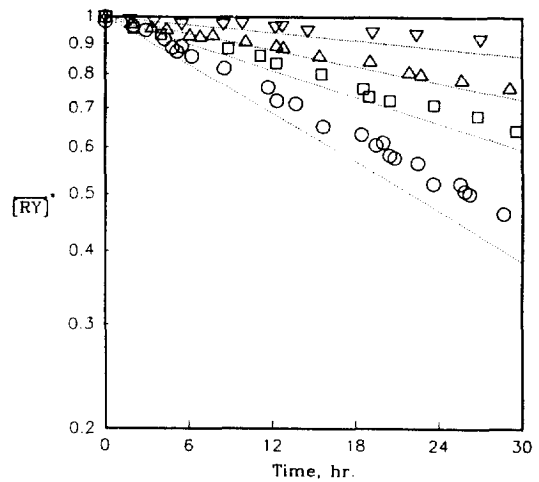


Fig. 10. Effect of ion strength on $[RY]^*$ at n-butyl acetate, 0.5, NaOH 1.0 and Aliquat 336, 0.24 kmol/m³.
(○: 1.0, □: 1.5, △: 2.0, ▽: 3.0 kg-ion/m³, ...: calculated value)

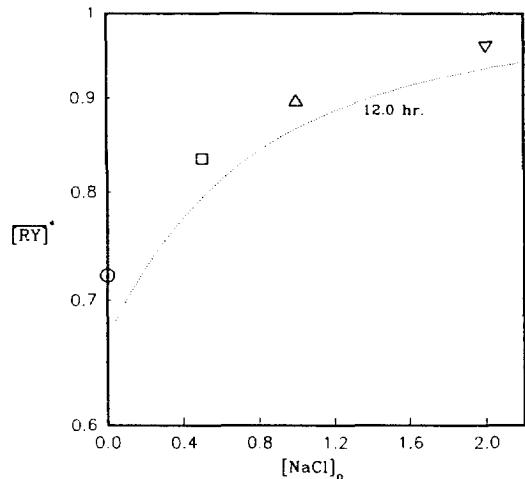


Fig. 11. Effect of concentration of NaCl on $[RY]^*$ at reaction time, 12.0 hours.
(○: 0, □: 0.5, △: 1.0, ▽: 2.0 kmol/m³, ...: calculated value)

하였으며, $[RY]^*$ 변화는 교반속도에 무관하였다. 따라서 주어진 교반속도 범위에서 유기상은 농도구배가 존재하지 않는 완전혼합으로 간주할 수 있으며, 실험변수 변화에 대한 반응실험은 유기상의 교반속도를 900 rpm으로 고정하여 행하였다. Fig. 6에 유기상의 교반속도, 900 rpm에서 수용액상의 교반속도를 200, 500, 700 및 900 rpm으로 변화시키면서 $[RY]^*$ 의 측정값과 수치모사로

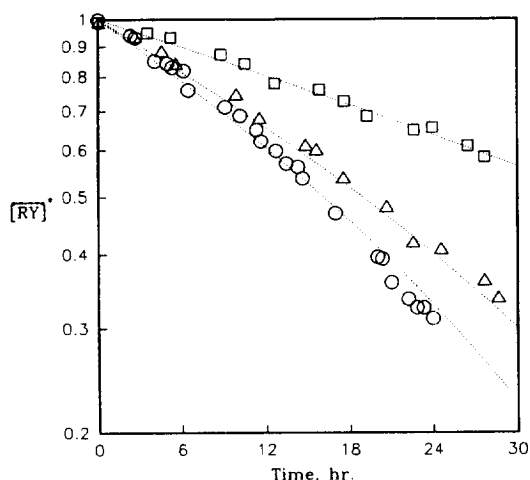


Fig. 12. Effect of contact area of membrane on $[RY]^*$.
(○: 31.26, △: 26.65, □: 14.22 cm^2 ,: calculated value)

부터 산출한 계산값을 도식하였다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 측정값은 계산값에 잘 일치하였으며, 수용액상의 교반속도가 증가함에 따라 반응전화율은 증가하였으나, 교반속도 700과 900 rpm에서 $[RY]^*$ 의 측정값과 계산값이 교반속도에 무관하였다. 따라서 교반속도 700 rpm 이상에서는 수용액상이 완전혼합 상태로 간주할 수 있으며, 차후 반응실험은 수용액상의 교반속도를 700 rpm으로 고정하고 행하였다.

막반응기 성능을 검토하기 위하여 반응물과 상이동 촉매의 농도를 변화시키면서 측정된 $[RY]^*$ 를 Fig. 7-9에 나타내었다. Fig. 7에 NaOH 농도, 2.0, Aliquat 336 농도, 0.24 kmol/m^3 에서 n-butyl acetate의 농도, 0.5와 1.0 kmol/m^3 을 대표적으로 하여 $[RY]^*$ 의 측정값과 수치모사로부터 산출한 계산값을 도식하였다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 측정값은 계산값에 잘 일치하였으며, n-butyl acetate의 농도가 증가함에 따라 $[RY]^*$ 는 증가하여 반응전화율은 감소하였다. 이는 앞의 연구(I)의 식 (1)에서 나타난 바와 같이 막내에 존재하는 n-butyl acetate의 농도 항과 상이동촉매와 결합한 중간생성물, QX의 농도 항으로 나타난 반응속도는 RY의 의존성보다 QX의 의존성이 보다 크기 때문인 것으로 생각되며, 이 결과는 분산교반조와 평면교반조에서의 실험결과 [15]와 일치하였다. Fig. 8에 n-butyl acetate의 농도, 0.5, Aliquat 336, 0.24 kmol/m^3 에서 NaOH 농도, 1.0과 2.0 kmol/m^3 로 변화시키면서 $[RY]^*$ 의 측정값과 계산값을 도식하였다. 이 그림에서 측정값은 계산값에 잘 접근하였으며, NaOH 농도가 증가함에 따라 전화율은 증가하였다. 이는 NaOH 농도가 증가함에 따라 QX의 농도가

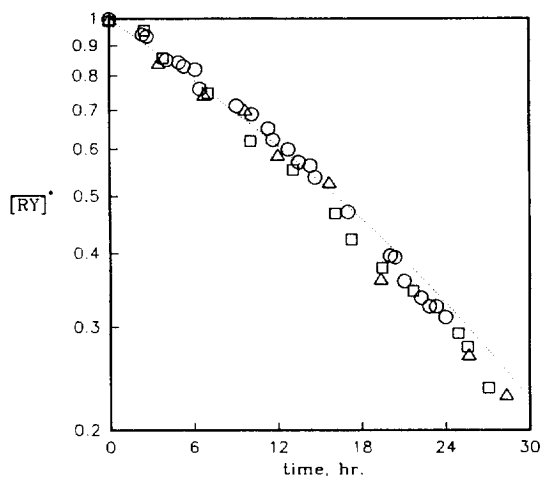


Fig. 13. Effect of reuse of membrane on $[RY]^*$ at n-butyl acetate, 0.5, NaOH, 2.0 and Aliquat 336, 0.24 kmol/m^3 .

(○: one time, □: two times, △: five times,: calculated value)

증가한 것으로 기인된다.

Fig. 9에 n-butyl acetate의 농도, 0.5, NaOH, 2.0 kmol/m^3 에서 Aliquat 336의 농도를 0, 0.12, 0.24 kmol/m^3 로 증가시키면서 $[RY]^*$ 의 측정값과 계산값을 도식하였다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 상이동촉매 농도변화에 대한 측정값과 계산값에 잘 일치하였으며, 농도 증가에 따라 전화율도 증가하였다. 이는 Fig. 8에서와 같이 상이동촉매의 농도가 증가함에 따라 막내의 QX 농도가 증가하였기 때문인 것으로 추측된다. 한편 촉매를 사용하지 않은 경우에도 n-butyl acetate의 알칼리 가수분해가 일어나는 현상은 전보[22]의 실험결과와 일치하였다.

유기상과 전해질 수용액상 간 접촉계면을 통하여 전달되는 용질의 분배계수는 수용액의 이온강도에 영향을 받기 때문에 [12], 반응전화율의 이온강도 효과를 검토하여 막반응기 성능을 고찰할 필요가 있다. Fig. 10과 11에 n-butyl acetate의 농도, 0.5, Aliquat 336, 0.24 kmol/m^3 에서 수용액에 NaOH 1.0 kmol/m^3 농도에 NaCl을 0, 0.5, 1.0, 2.0 kmol/m^3 로 변화시켜 수용액의 이온강도 변화에 대한 $[RY]$ 의 측정값과 계산값을 반응시간 변화와 반응시간 12.0 hrs에서 NaCl 농도변화에 대해서 각각 나타내었다. Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 반응시간이 경과함에 따라 측정값은 계산값에 잘 일치하지는 않았지만 계산값에 접근하는 경향을 보여주었으며, 이온강도가 증가함에 따라 $[RY]^*$ 의 농도변화는 감소하여 반응전화율이 감소하였다. 이는 이온강도가

증가함에 따라 QY와 QX의 분배계수, α_1 과 α_2 가 감소하여 막내의 QX는 증가하여 반응속도를 촉진할 수 있으나, 막내의 생성물, QY 역시 증가하고, QX와 QY의 추출상수, K_{QX} 와 K_{QY} 를 증가시켜 반응속도에 복잡하게 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 11에 수용액상에 NaCl의 농도변화에 대한 $[RY]^*$ 를 Fig. 10에서 중 반응시간, 12.0 hrs에서 $[RY]^*$ 를 도시하였다. 이 그림에서 NaCl의 농도가 증가하여 이온강도 증가에 따라 $[RY]^*$ 의 농도변화가 감소함을 알 수 있었다.

유기상과 수용액상의 접촉면적의 영향을 고찰하기 위하여 막의 면적을 공극율을 고려한 14.22, 26.65, 31.26 cm^2 으로 변화시켜 $[RY]^*$ 의 측정값과 계산값을 Fig. 12에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 측정값은 계산값에 잘 일치하였다.

막반응기 반응실험에서 사용된 막, Celgard 2500의 내구성을 검토하기 위하여 매 실험마다 사용한 막을 진공하에서 toluene과 물-acetone 혼합용액으로 여러번 세척한 후 진공건조하여 반응실험을 행하였다. Fig. 13에 막 사용횟수를 1회에서 5회까지 반복 사용함에 따라 $[RY]^*$ 의 측정값과 계산값을 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각 사용횟수마다 측정된 $[RY]^*$ 값이 계산값에 잘 일치하는 것으로 보아 본 실험조건에서 5회까지는 막을 계속 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

다공질 polypropylene 고분자 막반응기에서 25°C에서 상이동촉매, Aliquat 336에 의한 n-butyl acetate의 NaOH 알칼리 가수분해반응실험을 행하여 유기상 본체에 존재하는 미반응 n-butyl acetate 농도를 측정하였다.

친유성 다공질 막내에서 일어나는 상이동촉매에 의한 액-액 불균일 반응계를 경막설에 적용한 물질전달기구의 해석으로 구한 계산값과 측정값을 비교하였다. 주어진 반응계는 확산저항은 막내에 존재하고 유기상과 수용액상 본체는 완전혼합 상태이며, 막내에서 일어나는 반응기구는 준1차 반응이며, 수용액상에서 상이동촉매의 중간생성물의 반응은 순간가역 해리반응으로 해석할 수 있었다. 본 실험에서 사용한 막반응기로서 막의 굴곡도, 3.97을 구할 수 있었다.

감 사

본 연구는 1990년도 한국과학재단 연구비 지원(과제번호: 90-03-00-09)으로 수행한 연구 결과의 일부입니다.

사용기호

A	: membrane area [cm^2]
C_1, C_2	: concentration defined by eq. (1) [kmol/m^3]
D_j	: diffusivity of j component [cm^2/s]
D_j^{eff}	: effective diffusivity of j component [cm^2/s]
k_2	: 2nd-order reaction rate constant [$\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{s}$]
K_1, K_2	: dissociation constant of Q^+Y^- and Q^+X^- [$\text{kmol}/\text{m}^3, \text{m}^3/\text{kmol}$]
K_m	: mass transfer coefficient [cm/s]
K_{QX}, K_{QY}	: extraction constant of QX and QY [m^3/kmol]
Q^+	: active catalyst
QX	: intermediate combined with Q^+ and X^-
QY	: intermediate combined with Q^+ and Y^-
RX	: product of organic phase
RY	: reactant of organic phase
r	: reaction rate [$\text{kmol}/\text{m}^3\cdot\text{s}$]
t	: reaction time [s]
V_1, V_2	: volume of lower and upper cell [cm^3]
X^-	: reactant of aqueous phase [kmol/m^3]
Y^-	: species of aqueous phase [kmol/m^3]
z	: distance above interface [cm]
$[j]$: concentration of j component [kmol/m^3]

그리스 문자

ϵ	: porosity [-]
α	: distribution coefficient [-]
β	: cell constant defined by eq. (2)
δ	: membrane thickness [cm]
δ^{eff}	: effective membrane thickness [cm]
τ	: tortuosity [-]

상첨자

*	: dimensionless
—	: organic phase

하첨자

o	: initial
i	: interface

참고문헌

1. Starks, C. M.: *J. Am. Chem. Soc.*, **93**, 195(1971).
2. Weber, W. P. and Gokel, G. W.: "Phase Transfer Catalysis in Organic Synthesis", Springer-Verlag, New York(1977).
3. Starks, C. M.: "Phase Transfer Catalysis", Academic Press, New York, 37(1978).

4. Dehmlow, E. V. and Dehmlow, S. S.: "Phase Transfer Catalysis", Verlag Chemie GmbH, Weinheim (1983).
5. Freedman, H. H.: *Pure & Appl. Chem.*, **58**, 857 (1986).
6. Starks, C. M.: "Phase Transfer Catalysis-New Chemistry, Catalysts, and Applications", Symp. Am. Chem. Soc. (1987).
7. Wang, D. and Weng, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 2019 (1988).
8. Wang, M. and Yang, H.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, 522(1990).
9. Do, J. and Chou, T.: *ibid.*, **29**, 1095(1990).
10. Wang, M. and Wu, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **46**, 509 (1991).
11. Park, S. W., Chun, B. S. and Lim, G. T.: *Hwahak Konghak*, **28**, 594(1990).
12. Park, S. W., Moon, J. B., Park, D. W. and Shin, J. H.: *Hwahak Konghak*, **30**, 612(1992).
13. Park, S. W., Moon, J. B., Ha, Y. S. and Lim, G. T.: *Polymer*, **17**, 100(1993).
14. Park, S. W., Moon, J. B., Park, D. W. and Shin, J. H.: *Hwahak Konghak*, **31**, 107(1993).
15. Park, S. W., Moon, J. B. and Hwang, K. S.: *J. Korean Ind. and Eng. Chemistry*, (1993)(to be submitted).
16. Park, S. W., Moon, J. B., Jung, Y. H., Park, D. W. and Shin, J. H.: *Hwahak Konghak*, (1993)(to be submitted).
17. Cussler, E. L.: "Diffusion-Mass Transfer in Fluid Systems", Cambridge University Press, p. 133 (1984).
18. Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Sherwood, T. K.: "The Properties of Gases and Liquids", 3rd ed., McGraw-Hill, New York, p. 580(1977).
19. Ahn, B. G.: Master Thesis, Pusan National University(1986).
20. Ratcliff, G. A. and Holdcroft: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **41**, 315(1963).
21. Hikita, H., Asai, S., Ishikawa, H., Seko, M. and Kitajima: *Chem. Eng. J.*, **17**, 77(1979).
22. Park, S. W., Moon, J. B., Ko, M. S. and Kim, G. W.: *J. Korean Ind. and Eng. Chemistry*, **3**, 119(1992).