

Tri-n-butyl phosphate와 액상고분자 지지액막을 이용한 페놀의 분리

안 효 성 · 이 용 택* · 윤 인 주* · 김 명 수**

충남대학교 공과대학 화학공학과
한국자원연구소*, 한국표준과학연구원**
(1998년 9월 8일 접수, 1998년 12월 15일 채택)

Supported Liquid Membrane Composed of Tri-n-butyl Phosphate or Liquid Polymer for Phenol Separation

Hyoseong Ahn, Yongtaek Lee[†], In Ju Youn^{*}, and Myungsoo Kim^{**}

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Chungnam National University

^{*}Korea Institute of Geology, Mining and Materials

^{**}Korea Research Institute of Standards and Science

(Received September 8, 1998, Accepted December 15, 1998)

요 약 : 다양한 수질 오염원 중 페놀과 같은 유기화합물은 배출조건이 비정상적인 경우 기존의 처리방법으로 제거하거나 파괴하기 어렵다. 수용액으로부터 페놀을 분리하기 위한 최근의 연구들은 활성탄에 의한 흡착, 용매 추출 등에 의해 수행되어져 왔으며, 물-기름 유화에 기초를 둔 액막법이 기존의 기술들을 대체하기 위한 방법으로 시험되어져 왔다. 본 연구에서는 tri-n-butyl phosphate(TBP)와 액상 고분자를 지지액막의 액막용액으로 선정하여 수용액상의 페놀을 분리하였다. 공급측 페놀 농도를 변화시키고 다양한 액막용액을 사용하여 이들이 페놀분리에 미치는 효과를 연구하였다. TBP를 운반체로 사용한 경우의 실험결과들은 용매추출에서 주로 사용되고 있는 methyl isobutyl ketone(MIBK)보다 높은 물질전달속도를 보여주었으며, 선택한 액상고분자 중 polypropylene glycol 4000(PPG 4000), polybutylene glycol 500(PBG 500)의 경우 MIBK와 유사하거나 조금 높은 값을 나타내었다.

Abstract : Among various water contaminants, organic compounds like phenol are difficult to be removed or destroyed by conventional methods under the unusual discharge conditions. The separation of phenol from aqueous solution has been carried out by several methods recently: absorption by an activated carbon, solvent extraction and liquid membrane technology. The liquid membrane based on water-oil emulsification has been tested as an alternative technology of the conventional technology. In this work, tri-n-butyl phosphate(TBP) and liquid polymers were examined as a liquid membrane in the supported liquid membrane(SLM). The feed concentration of phenol was varied and various types of liquid membranes were used to examine their effects on separation of phenol. It was found that TBP, polypropylene glycol 4000(PPG 4000) and polybutylene glycol 500(PBG 500) were proper carriers because mass transfer rates through them were much higher than or similar to that through methyl isobutyl ketone(MIBK) which was used as a conventional solvent in a solvent extraction process.

1. 서 론

수질오염의 주 원인으로 인식되고 있는 산업폐수는 산업체의 생산품목에 따라 오염물질의 종류와 배출되는 오염 정도가 각각 다르다. 일반적으로 오염원을 폐수로부터 제거하기 위하여 분해, 응집, 침전 기술이 사용되고 있지만 처리비용을 줄이기 위하여 다양한 연구가 계속되고 있다.

페놀은 방부제, 소독제, 합성수지, 접착제, 염료, 농약 등의 제조 원료로 사용되는 유기화합물로 국소 부식을 야기시키며 단백질 및 세포의 원형질을 응고 사멸시키고 피부나 점막에 흡수되어 신경계에 자극을 주어 마비증상을 일으키며, 이외에도 암, 신장장애, 빈혈 등을 야기하는 것으로 보고되었기 때문에 페놀의 국내 배출기준은 매우 엄격하게 관리되고 있다. 다양한 수질오염원 중 페놀과 같은 벤젠계의 유기물질은 난분해성 오염원으로서 처리가 용이하지 않을 뿐만 아니라 배출량이 비정상적일 경우 기존처리기술로는 처리가 어렵다.

따라서, 수용액으로부터 페놀을 분리하는 많은 연구가 수행되었다. 활성탄소를 이용한 흡착법^[1,2], 다양한 종류의 용매를 이용한 용매추출법^[3,4]과 같은 기술들이 페놀의 분리회수에 응용 개발되었다. 에멀전 액막을 이용하여 페놀 등의 여러 유기물에 대한 분리 및 농축에 관해 연구된 바 있으며^[5], 생물 막반응기를 이용하여 3-chloronitrobenzene을 분리하였으며^[6], 소수성의 다공성 고분자 중공사막을 이용하여 *p*-nitrophenol을 추출한 바 있다^[7]. 최근에는 지지액막(SLM)기술을 이용 지지액막의 액막용액으로서 trioctylamine(TOA)를 사용하여 페놀의 투과속도를 실험적, 이론적으로 규명하였으며^[8], dibenzo-18-crown-6(DBC)를 액막용액으로 사용하여 수용액상의 페놀을 분리하여 그 성능을 해석한 바 있다^[9].

본 연구에서는 tri-*n*-butyl phosphate(TBP)와 액상고분자를 액막용액으로 선택하여 페놀의 분리 가능성을 확인하고자 하였다. TBP는 기존의 용매추출법에서 페놀 추출제로 사용되었던 methyl isobutyl ketone(MIBK)나 diisopropyl ether(DIPE) 등에 비하여 페놀에 대한 추출능력이 유사하거나 쌍극자 모멘트가 크기 때문에 그보다 높을 것으로 예상되며 물에 대한 용해도가 낮아 적합한 운반체로 생각된다. 액상고분자는 물에 대한 용해도가 매우 낮은 종류를 선택하여 페놀에 대한 친화도가 우수한 종류로 지지액막을 구성할 수 있다면 특성상 우수한 안정성을 확보할 수 있을 것으로 생각된다. 공급측에서의 페놀의 초기농도의 영향을 살펴보기 위해 다양한 공급측 농도를 사용

하고, 액막내 TBP를 일정 부피분율로 변화시켜 TBP의 농도변화에 따른 결과를 살펴봄에 다양한 액상고분자들의 페놀 분리 능력을 살펴보고자 하였다. 이에 근거하여 페놀의 운반체로서 TBP와 액상고분자의 적합성 여부를 확인하고자 하였다.

2. 이 론

공급측 수용액의 농도 C_f , 탈거측 농도 C_s 인 페놀이 Fig. 1에 도식된 평판형 지지액막을 통해 이동될 때 페놀의 물질수지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$- \frac{V_f}{A} \frac{dC_f}{dt} = K(C_f - C_s) \quad (1)$$

여기서 K 는 총괄물질전달계수, V_f 는 공급측의 부피, A 는 막의 면적이다. 수거측 부피가 V_s , 공급측 초기농도가 C_0 인 경우 총괄물질수지는 다음과 같다.

$$V_f C_0 = V_f C_f + V_s C_s \quad (2)$$

공급측 부피와 탈거측 부피가 동일한 경우 $V_f = V_s = V$ 로 나타낼 수 있고 따라서 (2)식은

$$C_0 = C_f + C_s \quad (3)$$

로 초기농도를 나타낼 수 있으며 (3)식을 (1)식에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dC_f}{(2C_f - C_0)} = - \frac{A}{V_f} K dt = - \frac{A}{V} K dt \quad (4)$$

(4)식을 $t = 0$ 에서 $C_f = C_0$, $t = t$ 에서 $C_f = C_f$ 를 사용하여 적분하면

$$\ln\left(2\frac{C_f}{C_0} - 1\right) = - \frac{2KA}{V} t \quad (5)$$

만약 수거용액으로 수산화나트륨 수용액을 사용하면 막을 통과한 페놀이 수산화나트륨과 순간반응하여 sodium phenolate가 형성되므로 $C_s = 0$ 가 된다. 이를 이용하여 (1)식과 (2)식을 정리하면

$$- \frac{V}{A} \frac{dC_f}{dt} = KC_f \quad (6)$$

(6)식을 $t = 0$ 에서 $C_f = C_0$, $t = t$ 에서 $C_f = C_f$ 를 사용하여 적분하면

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = -\frac{KA}{V}t \quad (7)$$

과 같은 식을 얻을 수 있고 이로부터 총괄물질전달계수(K)를 실험적으로 계산할 수 있다.

3. 실험

3.1 시약

막분리실험과 분석에 사용된 시약들은 Table 1, Table 2, Table 3와 같으며 별도의 후처리 없이 사용하였다.

Table 1. Chemicals used in Experiments

Chemical	Manufacturer	Purity
phenol	Kokusan Chemical Works, Japan	EP
TBP	Cameleon Guaranteed Reagent, Japan	EP
MIBK	Shinyo Pure Chemicals, Japan	EP
kerosene	Junsei Chemical Co., Japan	EP
sodium hydroxide	Duksan Pharmaceutical Co., Korea	93.0% min.

Table 2. Liquid Polymers used in Experiments

Chemical	Manufacturer
Polypropylene glycol 4000	Aldrich, USA
Polybutylene glycol 500	Aldrich, USA
Polybutylene glycol 2000	Aldrich, USA
Polybutylene glycol mono butyl ether 1500	Aldrich, USA
Polybutadiene 3000	Aldrich, USA

Table 3. Chemicals used in Analysis

Chemical	Manufacturer	Purity
4-amino antipyrine	Junsei Chemical Co., Japan	GR
potassium ferricyani-de ammonium chloride	Duksan Pharmaceutical Co., Korea	GR
ammonia water	Kanto Chemical Co., Japan	EP
	Shinyo Pure Chemicals, Japan	GR

3.2 실험장치

본 실험에서 사용된 회분식 막분리기를 Fig. 1에 나타내었으며 지지체로 사용된 막의 규격 및 재질은 Table 4와 같다. 회분식 막분리기는 PTFE 재질로 제작되었으며 공급측과 수거측 셀용기(cell)의 내경은 6dm, 부피는 250cm³이고 유효접촉면적은 11.34cm²이다.

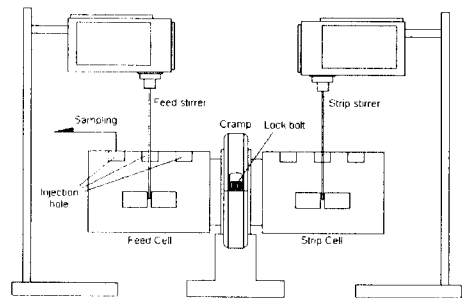


Fig. 1. Batch membrane test cell.

Table 4. Specification of Porous Membrane Supporter

material	PVDF
type	disk
porosity	70%
mean diameter of pore	0.45 μ m
thickness	120 μ m
manufacturer	MILLIPORE

3.3 실험방법

준비된 운반체 용액에 고분자 지지체를 24시간 담그어 모세관력에 의해 지지체의 세공을 운반체로 함침시킨 뒤 막분리장치의 중심부에 결합하고 두 개의 셀용기를 결합한 후 조임쇠(clamp)를 끼우고 나사를 잠근다. 공급측 셀용기 위의 주입구를 통해 공급측에 페놀수용액 220ml를 넣고 누수여부를 확인한 후 수거측에 수산화나트륨 수용액 220ml를 넣고 교반기를 500rpm으로 하여 양측을 각각 교반시키며 30분 간격으로 3시간에 걸쳐 공급측에서 마이크로 피펫을 사용하여 미량의 시료를 취하여 분석하였으며, 모든 실험은 상온에서 수행하였다. 취해진 공급측 수용액내의 페놀농도를 UV(UVS-31P, 선일, Korea)를 사용한

4-amino- antipyrine법과 HPLC(영인, Korea)를 사용하여 분석하였다. 공급측 페놀수용액의 농도를 500, 3000, 5000, 10000ppm으로 변화시켰으며 TBP의 경우 시약용 등유(kerosene)와 혼합하여 30, 50, 100 vol.%로 변화시켰다. 수거측 수산화나트륨 수용액은 수거측으로 이동되어진 페놀을 효과적으로 반응시키기 위하여 0.1M의 수용액을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2에 30 vol.% TBP와 50 vol.% TBP의 분배계수 측정결과를 도시하였다. (8)식과 같이 정의되는 분배계수(distribution coefficient)는 Fig.2에서와 같이 평형농도가 증가함에 따라 차츰 감소하였으며 TBP의 함량이 증가하면 분배계수도 증가함을 알 수 있다.

$$\text{분배계수} = \frac{\text{유기상의 페놀의 평형농도(무게농도)}}{\text{수용액상의 페놀의 평형농도(무게농도)}} \quad (8)$$

분배계수는 페놀의 기존 용매추출 공정에서 용매로 사용되고 있는 DIPE와 MIBK의 분배계수 각각의 값들인 36.5와 78[3] 보다 높게 나타났다. 기존의 페놀 용매 추출에 상업적으로 사용되었던 MIBK와 DIPE는 페놀에 대한 높은 분배계수를 갖는 이유에 대하여 MIBK와 DIPE의 높은 극성도로서 설명되었다[12]. 분자의 극성도는 정량적으로 분자내에 존재하는 분자구조로 인한 전기적 쌍극자 모멘트(dipole moment)로 나타낼 수 있다. Fig.3에서 볼 수 있듯이 TBP의 경우 분자내에 인산(phosphoryl)기를 갖고 있고 그 쌍극자 모멘트 값이 MIBK와 DIPE에 비하여 월등히 크기 때문에 극성도가 보다 더 클 것으로 예상되며 따라서 페놀에 대한 분배계수도 클 것으로 예상되었고 실험을 통하여 이를 확인하였다. 또한 TBP는 MIBK나 DIPE보다 많은 수의 비공유 산소를 가지고 있어 페놀의 수소원자와의 결합 가능성이 높기 때문에 페놀에 대한 높은 분배계수를 가진다고 생각된다. DIPE와 MIBK의 경우도 순수한 용매로 사용되기 보다는 희석제에 희석되어 사용되는 경우가 대부분이고 희석될 경우 분배계수 값은 순수용매의 경우보다 더 낮아짐을 감안한다면 희석제에 희석된 TBP의 분배계수값은 월등히 큰 것으로 생각된다.

Fig. 4와 Fig. 5에 액상고분자들에 대한 페놀의 분배계수값을 도시하였다. PPG 4000과 PBG 500의 경우 다른 고분자들보다 상대적으로 높은 값을 나타내었으며 MIBK나 DIPE의 분배계수와 유사하거나 좀 더 큰

값을 나타내었다.

PPG와 PBG는 낮은 분자량에서는 일정시간이 지나면 PEG처럼 물에 용해되는 성질을 가지므로 친수성이라고 볼 수 있으며 이는 PPG와 PBG의 주사슬 끝

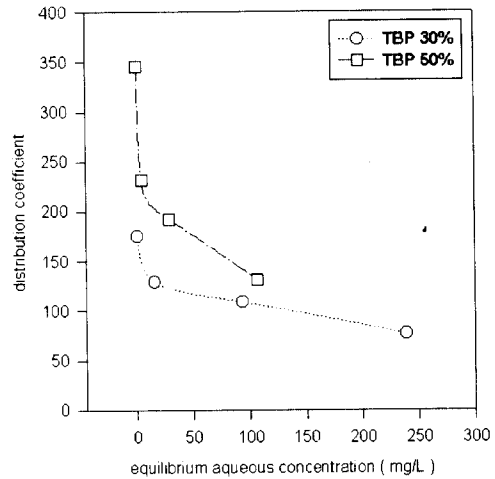


Fig. 2. Distribution coefficients of phenol in TBP liquid membranes.

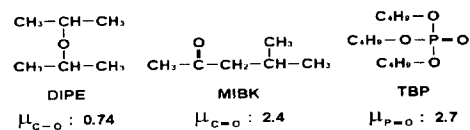


Fig. 3. Dipole moments of solvents.

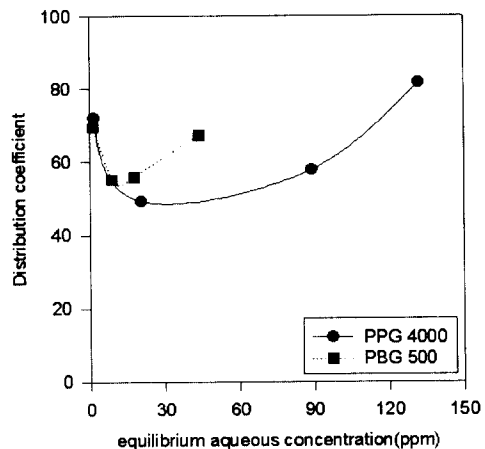


Fig. 4. Distribution coefficients of liquid polymers : PPG 4000 and PBG 500.

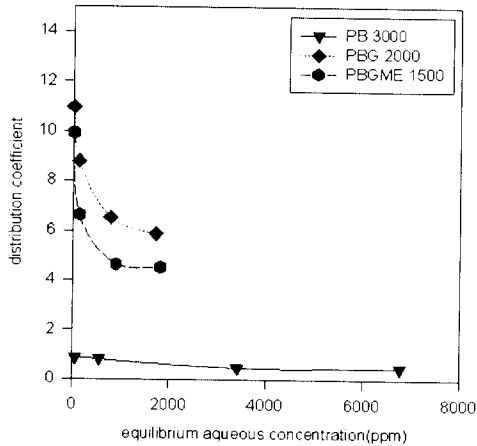


Fig. 5. Distribution coefficients of liquid polymers : PB 3000, PBG 2000 and PBGME 1500.

에 있는 -OH기의 친수성 영향이 주사슬의 -CH₂-, -CH₃-가 가지는 소수성보다 큰 효과를 나타내기 때문으로 판단된다. 그러나 분자량이 증가하면 반복되는 주사슬의 길이가 길어지고 이에따라 주사슬이 가지는 소수성이 -OH기의 친수성 영향보다 큰 효과를 나타내기 때문에 액상을 유지하는 일정 분자량 이상의 폴리글리콜(polyglycol)의 경우 소수성을 나타내는 것으로 생각된다. PPG나 PBG의 소수성과 페놀의 벤젠고리에 의한 소수성에 기인하는 친화력이 작용할 뿐만 아니라 PPG나 PBG의 경우 반복되는 주사슬에 있는 비공유 에테르기 산소와 수소결합 가능성 때문에 분배계수값이 크게 나타난 것으로 생각된다. PB 3000 액상고분자는 에테르기가 없고 PBG 2000이나 PBGME 1500 액상고분자들은 분자량이 크고 구조적으로 페놀분자가 에테르기에의 접근을 방해하기 때문에 분배계수값이 낮은 것으로 생각된다.

공급측 페놀 초기농도, 500ppm을 사용하고 액막용액의 구성성분으로서 여러 부피분율의 TBP를 사용한 경우와 MIBK를 액막용액으로 사용한 경우의 시간변화에 따른 공급측 농도, C₁의 변화를 Fig. 6에 도시하였다. 이 그림으로부터 TBP의 수송능력이 MIBK보다 우수함을 알 수 있으며, 이는 Fig. 3에서 TBP 중심원자의 쌍극자 모멘트가 기존의 용매추출에서 사용되었던 MIBK나 DIPE보다 높고 친전자성을 띠는 페놀과 쉽게 반응할 수 있기 때문으로 생각된다.

실험을 통하여 얻은 공급측 농도, C₁의 변화를 (7)식에 대입하여 얻은 값을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 (7)식의 직선관계를 잘 만족함을 알 수 있으며 선형보간법(Sigmoidplot)에 의하여 구한 이

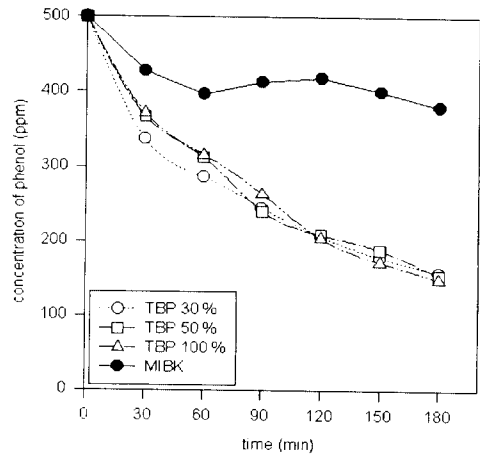


Fig. 6. Feed side concentration vs. time with various liquid membranes : TBP 30, TBP 50, TBP 100 and MIBK, C₀ = 500 ppm.

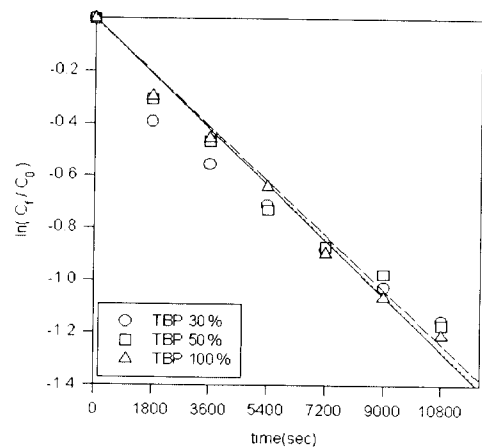


Fig. 7. Plot of $\ln(C_1/C_0)$ vs. time with various liquid membranes : TBP 30, TBP 50 and TBP 100, C₀ = 500 ppm.

직선들의 기울기로부터 얻어진 각 분율 TBP에서의 총괄물질전달계수, K는 30 vol.%, 50 vol.%, 100 vol.%의 각각에 대하여 2.278×10^{-3} , 2.230×10^{-3} , 2.287×10^{-3} cm/s로서 거의 비슷한 값을 나타내었다.

이는 공급되는 페놀의 농도가 낮기 때문에 액막용액 중 TBP의 부피분율에 관계없이 액막에 접촉한 모든 페놀분자들이 반응하여 이동하는 것으로 판단된다. 페놀의 농도가 증가하면 TBP의 부피분율에 따라 부분반응 혹은 전체가 반응할 수 있을 것으로 생각되고 결과적으로 총괄물질전달계수에 큰 영향을 미칠 것

로 판단되므로 페놀의 농도를 점차적으로 높이어 실험적으로 확인하고자 하였다.

공급측 페놀의 초기농도를 3000, 5000, 10000ppm으로 변화시키면서 시간에 따른 공급측 농도의 변화를 측정하였다. 그 결과를 (7)식으로 표현할 때 각각 직선관계식이 성립함을 모든 페놀 초기농도값에 대하여 확인할 수 있었으며 이로부터 구한 총괄물질전달계수를 Fig. 8에 액막용액 중 TBP의 부피분율의 함수로 나타내었다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 같은 페놀 초기농도에서는 액막용액으로 사용되는 TBP의 농도가 증가할수록 총괄물질전달계수값이 증가함을 알 수 있다. 이와같은 경향은 더 많은 TBP 분자들이 페놀분자들과 결합할 수 있기 때문인 것으로 생각된다. 다만 페놀의 농도가 낮은 경우에는 대부분의 페놀이 TBP와 결합할 수 있기 때문에 그 효과가 두드러지지 않으나 페놀의 농도가 높으면 일부분의 페놀 분자들만이 TBP와 결합할 것으로 예상되기 때문에 그 효과가 확실하게 나타남을 알 수 있다. 또한, 페놀 초기농도가 낮으면 TBP 농도증가에 따른 총괄물질전달계수값은 완만하게 증가하나 페놀 초기농도가 높으면 총괄물질전달계수값은 TBP 농도증가에 따라 급격히 증가함을 알 수 있다. TBP를 액막용액으로 사용하는 경우 페놀농도가 3000 ppm 이하이면 총괄물질전달계수는 TBP 농도에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있으며 특히 순수한 TBP이 액막용액으로 사용될 경우 공급측 농도 변화에 민감하지 않아 공급측 농도변화가 많은 경우에도 액막으로서 우수한 투과능력을 계속 나타냄을 알 수 있다.

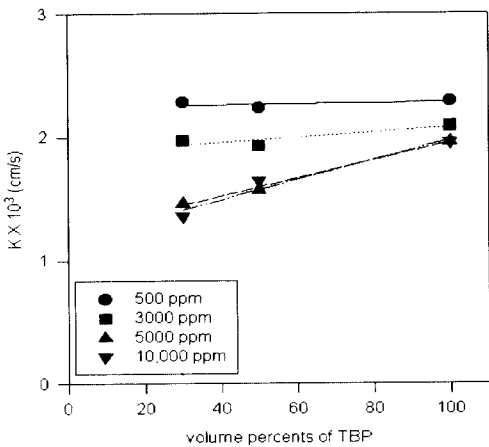


Fig. 8. Total mass transfer coefficients as a function of volume percents of TBP.

공급측 페놀 농도 500 ppm을 사용하고 50 vol.% MIBK(MIBK 50), 50 vol.% TBP(TBP 50), PPG 4000을 액막으로 사용한 경우 시간변화에 따른 공급측 농도변화를 Fig.9에 나타내었으며 이를 이용하여 (7)식에 대입하여 얻은 결과를 Fig.10에 나타내었다. PPG 4000의 총괄물질전달계수는 5.177×10^{-4} cm/s로 MIBK 50의 1.978×10^{-4} cm/s보다 우수한 값을 나타내었다. Table 5에 사용된 여러 액막용액의 총괄물질전달계수를 정리하였다. 액상고분자의 경우 공급측 농도가 증가함에 따른 총괄물질전달계수의 감소 정도는 TBP의 경우보다 낮았다.

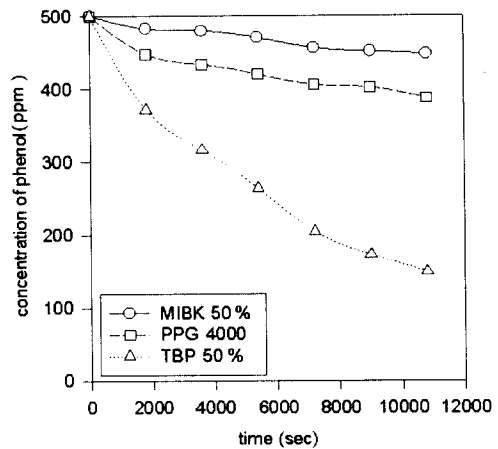


Fig. 9. Feed side concentration vs. time with various liquid membranes : MIBK 50, PPG 4000 and TBP 50, $C_0 = 500$ ppm.

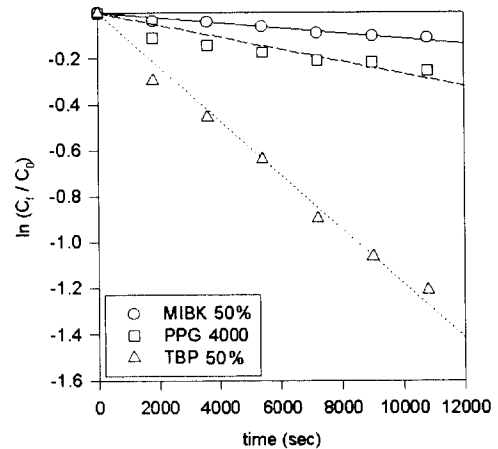


Fig. 10. Plot of $\ln(C_t/C_0)$ vs. time with various liquid membranes : MIBK 50, PPG 4000 and TBP 50, $C_0 = 500$ ppm.

Table 5. Total mass transfer coefficients of various liquid membranes.

liquid membranes	Total mass transfer coefficients (cm/s)	
	initial feed concentration	
	500 ppm	3000 ppm
TBP 100%	2.287×10^{-3}	2.091×10^{-3}
TBP 50%	2.230×10^{-3}	1.930×10^{-3}
TBP 30%	2.278×10^{-3}	1.971×10^{-3}
PPG 4000	5.177×10^{-4}	4.892×10^{-4}
PBG 500	5.311×10^{-4}	4.304×10^{-4}
MIBK 50%	1.978×10^{-4}	

5. 결 론

TBP의 페놀 분리능력은 기존 용매추출에서 사용된 MIBK보다 월등히 높은 것으로 나타났다. 공급측 초기 페놀농도가 같은 경우 총괄물질전달계수는 TBP의 부피분율이 증가함에 따라 증가하였으나, 초기 페놀농도가 증가하면 같은 부피분율에서의 총괄물질전달계수는 감소하였다. 이는 페놀농도가 낮은 경우 액막 주위에 존재하는 대부분의 페놀분자들이 액막 용액으로 사용되는 TBP와 결합할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 순수 TBP의 경우 페놀 초기농도 변화에 따른 총괄물질전달계수의 변화가 적은 것으로 보아 초기농도변화가 총괄물질전달계수에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 따라서 순수 TBP는 다양한 초기농도 조건에서 항상 일정한 총괄물질전달계수값을 나타내며 운반체로서 적절한 역할을 수행할 수 있을 것으로 생각된다. PPG 4000, PBG 500의 경우에도 MIBK보다 높은 총괄물질전달계수를 나타내었으며 이를 통하여 충분한 페놀 분리능력을 가지고 있음을 알 수 있었다. 페놀에 대한 선택도가 다소 TBP에 비하여 낮지만 비교적 안정된 액막을 제공할 수 있는 액상고분자를 액막으로서 사용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 핵심전문연구(과제번호 : 971-1107-047-1)의 지원으로 수행되었기에 감사드립니다.

기 호 설 명

- V_f : volume of feed side, cm³
 V_s : volume of strip side, cm³
 C_0 : initial concentration of feed side, ppm
 C_f : concentration of feed side, ppm
 C_s : concentration of strip side, ppm
 K : total mass transfer coefficient, cm/sec
 A : contact area of membrane, cm²
 t : time, sec

참 고 문 헌

- G. Calleja, J. Serna and J. Rodriguez, *Carbon*, **31**(5), 691 (1993)
- G. A. Sorial, M. T. Suidan, R. D. Vidic and S. W. Maloney, *J. Environ. Eng.*, **119**(6), 1026 (1993)
- D. C. Greminger, G. P. Burns, D. N. Hanson and C. J. King, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **21**, 51 (1982)
- R. K. Roop, R. K. Hess, *ACS Symp. Ser.*, 468 (1989)
- W. Zhang, S. Zhu, Y. Dai and J. Wang, *Proceeding, CKSST'95*, Aug. 21-24, 231 (1995)
- A. G. Livingston, *Biotechnol. Bioeng.*, **41**(10), 927 (1993)
- C. J. Tompkins, A. S. Michaels and S. W. Prertti, *J. of Membrane Sci.*, **75**, 277 (1992)
- M. L. Wang and K. H. Hu, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **33**(4), 914 (1994)
- S. W. Park, C. F. Kaseger, J. B. Moon and J. H. Kim, *Korean J. of Chem. Eng.*, **13**(6), 596 (1996)
- S. V. Ho, P. W. Sheridan and E. Krupetsky, *J. of Membrane Sci.*, **112**, 13 (1996)
- C. H. Yun, R. Prasad and K. K. Sirkar, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **31**, 1709 (1992)
- T. C. Lo, M. H. I. Baird and C. Hanson, *Handbook of Solvent Extraction*, John Wiley and Sons, New York (1983)