HWAHAK KONGHAK Vol. 35, No. 4, August, 1997, pp. 578-584
(Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers)

액체막에 의한 벤젠과 싸이클로헥산 혼합물의 분리

박주온 · 정태수†

성균관대학교 화학공학과
(1997년 3월 6일 접수, 1997년 5월 22일 채택)

Separation of Mixture of Benzene and Cyclohexane by Liquid Surfactant Membrane

Joo-On Park and Tai-Soo Chung†

Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea
(Received 6 March 1997; accepted 22 May 1997)

요 약

벤젠과 싸이클로헥산의 혼합물을 액체막에 의하여 분리함에 있어서 계면활성제의 종류와 농도, 접촉온도가 투과율, 분리계수 및 막의 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 음이온 계면활성제를 사용한 경우 그 농도와 접촉온도가 증가함에 따라 두 성분의 투과율은 증가하였으나 비이온 계면활성제의 경우에는 일관성있는 경향을 보여주지 않았다. 비이온 계면활성제보다 음이온 계면활성제를 사용했을 때 더 높은 투과율과 분리계수를 얻을 수 있다. 사용한 모든 계면활성제의 경우 접촉온도가 상승함에 따라 막파괴율은 증가하였다.

Abstract—In the separation of a mixture of benzene and cyclohexane by liquid surfactant membrane, investigated was the effect of surfactants and their concentration on the permeability, separation factor and membrane stability for different contact temperatures. In the case of anionic surfactants the fraction of permeation increased as their concentration and contact temperature increased, however, no consistent trend was observed in the case of nonionic surfactants. Higher permeability and separability were achieved with anionic surfactants than with nonionic ones. For all the surfactants used percentage of membrane breakup increased as the contact temperature increased.

Key words: Liquid Membrane, Separation, Surfactant, Permeability, Membrane Breakup

1. 서 론

막분리 공정은 선택적 투과성을 가진 막을 이용하여 분리대상 물질의 특성상 막을 경계면으로 하는 두 상간의 농도차, 전위차, 압력차 등을 추진력으로 하여 분리, 정제 및 농축하는 공정이다. 막분리 공정은 지금까지 널리 사용되고 있는 전통적인 분리공정보다 분리속도가 빠르고 효율적이며, 상변화에 따르는 열 도입 및 방출과정을 필요로 하지 않아 에너지 사용면에서도 경제적이다. 또한 열에 약한 물질이나 용질의 구조, 특성, 향기 등의 파괴나 손상없이 물질을 분리, 정제할 수 있는 장점이 있어서 많은 연구가 계속되고 있으며 여러 분야에서 활용할 수 있는 큰 잠재력을 지니고 있다[1]. 이러한 장점을 이용하여 전통적인 화학공업분야뿐만 아니라 해수의 담수화, 폐수처리, 탄화수소 혼합물의 분리, 산소 및 수소의 농축, 의약품 정제 등 의학과 생화학부문까지 그 응용범위가 점차 확대되고 있다[2]. 또한 담체에 의한 촉진확산에 의해 특정 분리대상 물질에 대하여 선택성을 높일 수 있다.

액막분리공정은 막을 통한 분자의 확산과 막에서의 분자의 용해도 차이를 이용한 막의 선택적 투과원리를 응용한 것으로 막이 두껍고(10^{-4} cm) 접촉면적이 적어서 투과속도가 느린 고체막보다 추출용매의 소모량이 적고 막의 두께가 매우 얇아(10^{-7} cm) 추출물질의 이동속도가 빠르고 동일체적에 대해서 큰 접촉면적을 얻을 수 있어 효과적이다[2]. 이러한 액체막에 의한 분리법은 기본적으로 액막의 투과원리와 인위적으로 액막에 다양한 기능을 부가하여 혼합물을 분리하는 방법으로 액막을 기준으로 양 방향에서 추출과 역추출이 동시에 일어나는 특징이 있다. 액막에 의한 분리공정은 Li[3, 4]가 계면활성제 액체막을 이용한 탄화수소 혼합물의 분리에 성공한 것이 시초이다. 그 후 Casamatta 등[5], Carraciolo 등[6], Cussler[7]는 액체막의 투과메카니즘 및 해석모델의 연구를 통하여 액막의 공업적 이용가능성을 제시하였으며, Shah와 Owens[8]는 벤젠과 헥산 혼합물의 액막에 의한 분리에 관한 연구 결과를 분별증류에 의한 분리와 비교하여 액막에 의한 분리가 더 효율적일 수 있다고 하였다.

본 연구에서는 비점의 차이가 작은 벤젠과 싸이클로헥산을 원료로 선정하여 액막분리시 필연적으로 수반되는 막파괴에 의한 막의 안정성과 분리능 실험을 계면활성제의 종류와 농도, 접촉기에서의 온도를 변수로 그 영향을 실험적으로 측정 분석하였다. 최근 유화제[9, 10]로 개발된 비이온 계면활성제의 투과특성에 관한 연구를 병행

하여 시도하였다. 비이온 계면활성제는 음이온 계면활성제에 비해 세척력이나 기포력은 우수하지 않으나 유화 분산제로는 우수하며, 종래의 계면활성제처럼 이온화하지 않으므로 반대이온의 영향을 받지 않아 산, 알칼리 등의 극성 물질의 영향을 받지 않고 특히 경수, 염수에 의해 큰 영향을 받지 않는 안정한 계면활성제로 인체에도 덜 유해한 것으로 알려져 있다.

2. 이 론

Emulsion형 액체막법은 서로 혼합되지 않는 유기용액과 수용액이 계면활성제에 의해 균일하게 혼합되어 emulsion상태로 안정화하고 다시 연속상과 multi-emulsion 형태를 유지하여 투과면적을 증대시킴으로써 투과속도를 크게 한 것이다. 이 방법은 용액과 계면활성제를 고속으로 교반하여 emulsion을 만들고 이를 연속상인 용매와 접촉시켜 용질의 액막에 대한 투과도의 차이로 분리하는 것이다. 이때 액막은 용액과 용매에 불용성이어야 하므로 O/W/O형(oil/water/oil type)이나 W/O/W형(water/oil/water type) emulsion이 되는데 전자는 주로 이온성 계면활성제를 사용하여 탄화수소 분리에 사용되고 후자는 비이온 계면활성제와 담체나 희석제 등을 첨가하여 사용된다.

본 실험에서는 O/W/O형 액체막을 이용하여 탄화수소 혼합물을 분리함에 있어 원료 유상과 액막 수용액(친수성 계면 활성제와 막강화제 등을 포함)을 교반, 혼합하여 O/W 에멀젼을 조제하고 이것을 회수유상 중에 교반, 분산시켜 O/W/O 복에멀젼이 조제된다. 이때 외부액적(globule)의 크기는 약 0.1-0.2 mm 정도이고 그 내부에 존재하는 내부액적(droplet)의 크기는 1-10 μm정도이다. 각각의 액적내부로부터 투과속도가 큰 물질이 용매쪽으로 잘 투과되어 나가 에멀젼내에는 투과속도가 낮은 물질이 남게 되므로 혼합된 물질의 분리가 가능하다. 용매층은 증류로써 투과물과 용매로 분리할 수 있고 에멀젼층은 원심분리, 여과, 가열, 정전기적인 침전법 등의 해유화 공정에 의해 미투과물과 계면활성제 용액으로 분리할 수 있다. 이때 분리된 용매는 재사용이 가능하다.

본 실험에서 혼합물 시료로 사용한 벤젠과 싸이클로헥산이 액막을 선택적으로 투과하는 간단한 모델을 Fig. 1에 나타내었다[11]. 담체를 수반하지 않는 용해도 차이에 의한 단순확산의 경우 계면활성제 액체막에 Fick의 제1법칙을 적용하여 θ 시간 동안 두께 L의 액체막을 통하여 투과하는 용질의 투과속도식을 나타낼 수 있다.

$$\frac{dn_s}{d\theta} = D_s A\left[\frac{C_s - C_s'}{L}\right] \tag{1}$$

여기서 n_s는 막을 투과하는 물질의 mole수이고, D_s는 투과용질의 투과계수이며 A는 막의 표면적이다. C_s는 용질의 혼합물내에서의 농도이고 C_s'은 투과되고 난 후의 용매에서의 농도이다. 분리하고자 하는 물질 A와 B 두 물질에 대해서 (1)식을 적용하면

$$\frac{dn_A}{d\theta} = D_A A\left[\frac{C_A - C_A'}{L}\right] \tag{2}$$

$$\frac{dn_B}{d\theta} = D_B A\left[\frac{C_B - C_B'}{L}\right] \tag{3}$$

과 같다. (3)식을 (2)식으로 나누면 A와 L이 소거된 (4)식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dn_B}{dn_A} = \frac{D_B}{D_A}\left[\frac{C_B - C_B'}{C_A - C_A'}\right] \tag{4}$$

농도의 미소 변화구간에서 Δn_B는 ΔC_B에, Δn_A는 ΔC_A에 비례하고 D_B/D_A를 $\alpha_{B,A}$이라 하면 (4)식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\Delta n_B}{\Delta n_A} = \alpha_{B.A}\frac{C_B - C_B'}{C_A - C_A'} \tag{5}$$

$$\frac{\Delta n_B}{\Delta n_A} = \frac{\Delta C_B}{\Delta C_A} \tag{6}$$

$$\alpha_{B,A} = \left[\frac{\Delta C_B}{\Delta C_A}\right]\left[\frac{C_A - C_A'}{C_B - C_B'}\right] \tag{7}$$

초기에는 $C' \cong 0$이고, 항상 $C >> C'$이므로

$$\alpha_{B,A} = \left[\frac{\Delta C_B}{\Delta C_A}\right]\left[\frac{C_A}{C_B}\right] \tag{8}$$

과 같이 표시할 수 있다. 여기서 $\alpha_{B,A}$를 상대투과비라 한다.

본 실험에서 $\alpha_{B,A}$[12]는 용매내의 A와 B의 농도변화와 emulsion 내의 농도변화로부터 용이하게 산출할 수 있다. 즉 $\alpha_{B,A}$는 A의 분배계수에 대한 B의 분배계수의 비이며, 각각의 분배계수는 용매상의 몰분율에 대한 에멀젼상의 몰분율의 비이다. $\alpha_{B,A}$는 분리계수 또는 선택도와 같고, 증류에서의 비휘발도나 추출에서의 선택도와 같이 분리계수의 값이 1보다 클수록 분리가 용이함을 의미한다.

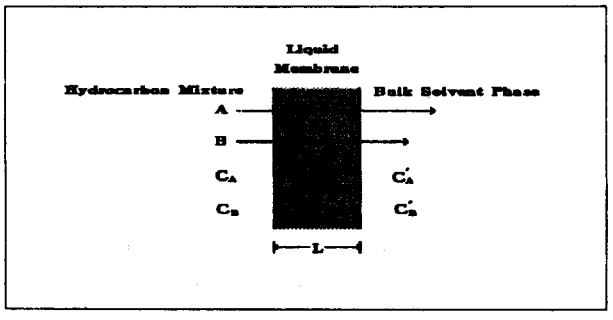

Fig. 1. Simplified liquid membrane model.

3. 실 험

3-1. 사용시약

혼합물 시료로 사용한 벤젠과 싸이클로헥산은 일본 Junsei Chemical 사의 특급 시약이며 물성은 Table 1[12, 13]에 나타내었다. 막강화제로 쓰인 glycerol과 용매인 케로신은 일본 Yakuri Pure Chemicals 사의 1급 시약을 사용하였다. 액막의 막파괴율실험에 있어서 중요한 역할을 하는 염료는 물에 대한 용해도가 아주 작은 한국

Table 1. Physical properties of benzene and cyclohexane

Properties \ Components	Benzene (C_6H_6)	Cyclohexane (C_6H_{12})
Boiling point at 760 mmHg (°C)	80.10	80.75
Refraction index at average D line of sodium at 20 °C	1.501	1.375
Surface tension at 20 °C(dyne/cm)	28.18	24.38
Solubility in water at 25 °C(g/100 g)	0.1780	0.0055

Oriental Chemical사의 Brilliant oil blue(1-butyl-amino-4-methylamino anthraquinone)인 유용성 청색 염료를 사용하였다. 본 실험에 사용한 계면활성제는 음이온 계면활성제로서 sodium polyoxyethylene(2) lauryl ether sulfate(SBN-2N-27, Nikkol Chemical Co., Japan), triethanolamine lauryl sulfate(TEALS, Nikkol Chemical Co., Japan)이며, 비이온 계면활성제로서 polyoxyethylene(10) octylphenyl ether, Hydrophile-Lipophile Balance(HLB) 11.5(OP-10, Nikkol Chemical Co., Japan), polyoxyethylene(10) nonylphenyl ether, HLB 16.5(NP-10, Nikkol Chemical Co., Japan)이다.

3-2. 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치는 크게 유화기와 접촉기로 나눌 수 있다. 유화기와 접촉기는 300 ml 비이커를 사용하였고, 유화기에 사용한 교반기는 직경 40 mm의 four-blade propeller이고 접촉기에 사용한 교반기는 직경 45 mm의 four-blade paddle이었다. 유화기의 교반속도는 정전압 전동기에 analog가 부착된 control box를 연결하여 stroboscope(Sugawara Lab. Inc., Model MSX-XA)를 사용하여 조절하였다. 접촉기의 교반속도는 digital형인 Glas-Col사의 GT24 stirring system(Model 099D HST220)을 사용하여 조절하였다. 접촉기의 항온을 유지하기 위해 물중탕, 재킷, 온도 조정기(한영 전자, Model HY 6500S) 등으로 구성된 항온장치를 사용하여 항온을 유지하였다.

3-3. 실험방법

3-3-1. 액막의 투과특성실험

유화기에서 벤젠과 싸이클로헥산을 각각 50 wt%의 일정성분으로 섞은 탄화수소혼합물 25 ml와 계면활성제용액[Surfactant+H_2O+(glycerol)] 25 ml를 섞어서 1,200 rpm으로 10분간 격렬하게 교반시켜 O/W형 에멀젼을 제조하였다. 유화기의 유화단계에 있어서 계면활성제의 종류와 농도, 액체막을 통한 탄화수소의 투과가 일어나는 접촉기에서의 온도를 변수로 하여 액막의 투과특성에 대한 실험을 수행하였다. 용매인 케로신 150 ml를 250 rpm으로 교반하면서 이에 따로 제조한 에멀젼을 서서히 가하면 액적상태로 분산되어 O/W/O형 액막이 제조되며, 이 액막을 통하여 혼합물의 벤젠과 싸이클로헥산의 선택적인 투과가 일어나게 된다. 한편 일정시간 후에 교반을 멈추고 정치하면 용매층과 에멀젼층 및 계면활성제 용액층으로 분리되며, 10 ml 주사기를 사용하여 용매층으로부터 시료를 채취하여 gas-chromatography로 분석을 하였다.

3-3-2. 액막의 안정성 실험

액막이 이상적으로 안정한 경우 액적 내부의 용질은 막에 의한 선택적 투과에 의해서만 용매로 전달되며 이때의 분리도는 주로 막에 대한 용질의 용해도와 확산계수의 차이에 따라 영향을 받게 된다. 그러나 액막 파괴로 인해 일부의 원료 혼합물이 비선택적으로 직접 용매로 전달되기 때문에 이로 인해 투과량이 증가하는 반면 분리도가 감소될 수 있으므로 Li[4]에 의해 제안된 dye tracer technique을 이용하여 투과실험과 동일한 변수에 대한 막의 안정성을 측정하였다. 즉 탄화수소에 유용성염료인 Brilliant oil blue를 녹인 다음 투과실험과 동일한 조건으로 용매와 접촉시키면 직경이 큰 염료 분자는 막을 통하여 투과되기 어려우므로 액적내부의 염료는 주로 막이 파괴되는 경우에 용매로 전달되기 때문에 염료가 용매에 착색되는 정도를 자외선 분석법(ultraviolet absorption spectroscopy)으로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

Alkyl ether sulfate계인 SBL-2N-27, lauryl sulfate계인 TEALS의 음이온 계면활성제와 최근 유화제로 각광받고 있는 polyoxyethylene ether계의 비이온 계면활성제인 OP-10, NP-10을 사용하여 계면활성제의 종류와 농도, 에멀젼과 용매 접촉시의 접촉온도 등을 변수로 하여 막을 통한 투과율과 막의 안정성에 미치는 영향을 검토하였다. 유화기에서의 교반속도와 교반시간을 1,200 rpm 및 10분, 막강화제 농도는 30 wt%, O/W 비는 1 : 1로 고정하여 실험하였으며 접촉단계에서의 교반속도는 250 rpm, O/W형 에멀젼과 용매의 부피의 비는 1 : 3으로 고정하여 실험하였다[8]. 접촉시간과 정치시간을 변화시키며 실험하여 가장 높은 벤젠 분리계수를 나타내는 조건으로 각각 5분을 선택하여 실험하였으며 TEALS의 경우에는 접촉시간 2.5분을 적용하였다.

4-1. 투과율

벤젠과 싸이클로헥산혼합물의 투과율 변화를 계면활성제의 종류와 농도, 접촉기에서의 접촉온도에 따라 Fig. 2부터 5에 나타내었다. 본 실험에서는 투과율을 혼합물 시료에 초기 공급된 탄화수소의 양에 대한 용매 케로신상에 투과된 탄화수소의 양으로 정의하였다. 이때 용매인 케로신에서 측정된 탄화수소의 양은 액막을 선택적으로 투과한 양과 액막파괴로 인한 비선택적인 양이 모두 포함된다.

Fig. 2는 음이온 계면활성제 SBL-2N-27을 사용한 경우 계면활성제의 농도 및 접촉온도 변화에 따른 투과율을 나타내었다. 전체적으로는 계면활성제 농도가 증가할수록 투과율도 증가하는 경향을 보였으며, 0.50 wt% 이상에서는 그 증가율이 다소 둔화되어 0.50 wt% 이상 과잉된 계면활성제는 투과율에 큰 영향을 미치지는 않는 것으로 나타났다. 또한 접촉온도가 상승함에 따라 투과율도 증가하는 경향을 보였다. 이것은 온도가 상승함에 따라 벤젠과 싸이클로헥산의 물에 대한 용해도 및 확산도가 모두 증가하고 일부는 막파괴로 인하여 투과량이 증가하기 때문이다. 즉 접촉온도가 상승함에 따라 액막에 있어서 물의 확산계수가 증가하고 또한 유기상 용매의 점도가 감소하여 액막을 통한 탄화수소 혼합물의 투과가 용이하게 되어 투과율이 증가하게 된다[14]. Fig. 3은 음이온 계면활성제 TEALS를 사용한 경우로서 이것 역시 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 투과율이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 Fig. 2와 비교하여 접촉온도 변화에 따른 투과율의 변화는 크지 않았으며 이는 접촉온도의 영향이

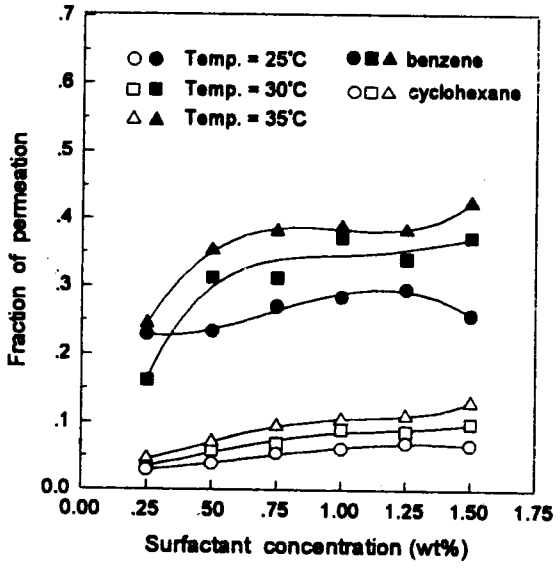

Fig. 2. Fraction of permeation vs. concentration of SBL-2N-27 as an anionic surfactant, t_e=5 min, t_r=5 min.

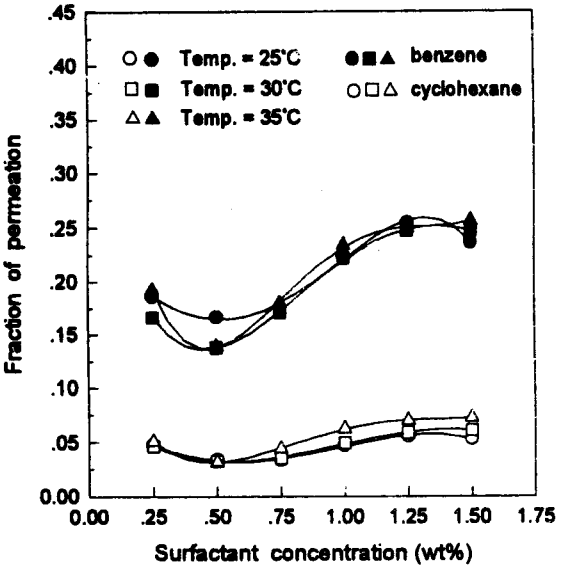

Fig. 3. Fraction of permeation vs. concentration of TEALS as an anionic surfactant, t_e=2.5 min, t_s=5 min.

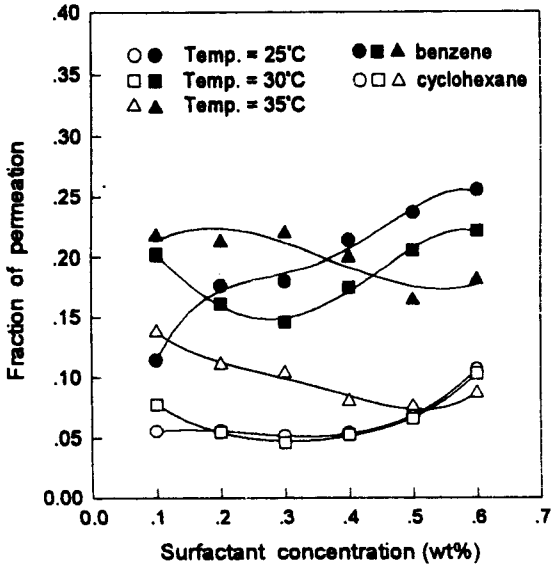

Fig. 5. Fraction of permeation vs. concentration of NP-10(HLB 16.5) as a nonionic surfactant, t_e=5 min, t_s=5 min.

비교적 작다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4와 5는 비이온 계면활성제인 OP-10(HLB 11.5)과 NP-10(HLB 16.5)을 사용한 경우로서 접촉온도가 투과율의 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 벤젠과 싸이클로헥산의 투과율은 접촉온도가 상승함에 따라 증가하였다. 접촉온도 25 ℃에서는 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 투과율이 높아지며, 접촉온도 30 ℃에서는 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 투과율의 변화가 거의 없었다. 하지만 35 ℃에서는 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 투과율은 다소 낮아지는 경향을 보였다.

4-2. 분리계수

계면활성제의 종류와 농도, 접촉온도를 변수로 하여 벤젠 분리계수에 대한 실험을 하였으며 그 결과를 Fig. 6부터 9에 나타내었다. SBL-2N-27은 벤젠 분리계수 10.2로 가장 좋은 선택도를 나타내었으며 TEALS는 6.1, OP-10은 2.9, NP-10은 4.8의 벤젠 분리계수를 나타내었다. 사용된 모든 계면활성제가 접촉온도 25 ℃에서 가장 좋은 벤젠 분리계수를 나타내었다. 전반적으로 비이온 계면활성제보다는 음이온 계면활성제가 다소 높은 벤젠 분리계수를 나타내었다. 비이온 계면활성제가 음이온 계면활성제보다 분리계수가 떨어지는 것은 단일액적방법으로 극성이 강한 방향족이나 불포화 탄화수소 혼합물을 극성이 약한 탄화수소 혼합물에서 분리하기 위해서는 비이온 계면활성제보다 이온성이 강한 계면활성제가 탄화수소 혼합물의 물에 대한 용해도를 증가시킨다고 보고한 Li[3]의 연구 결과와 유사하다.

SBL-2N-27은 0.25 wt%, TEALS는 0.75 wt%, OP-10은 0.30 wt%, NP-10은 0.40 wt%에서 가장 좋은 벤젠 분리계수를 보이고 있다. 액체막을 통한 투과물의 투과는 액막에 대한 용해도와 확산도의 함수

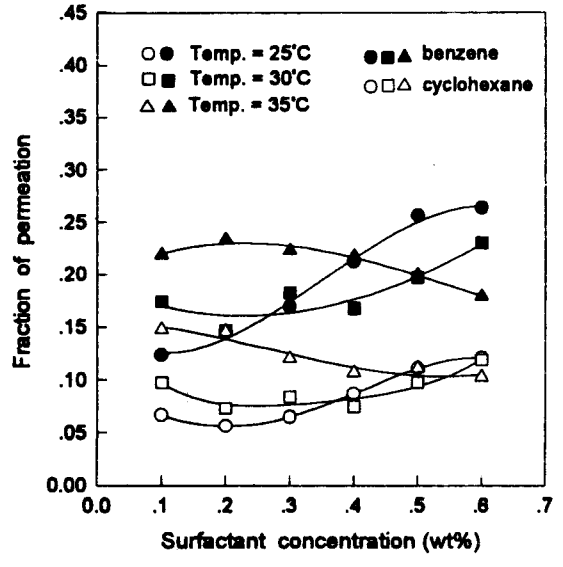

Fig. 4. Fraction of permeation vs. concentration of OP-10(HLB 11.5) as a nonionic surfactant, t_e=5 min, t_s=5 min.

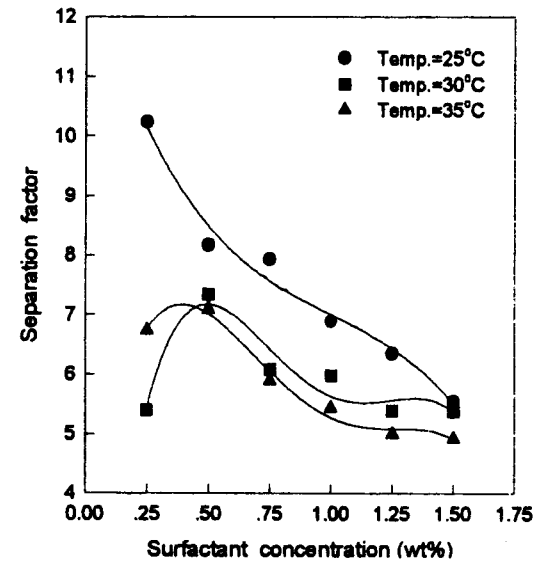

Fig. 6. Separation factor(benzene) vs. concentration of SBL-2N-27 as an anionic surfactant, t_e=5 min, t_s=5 min.

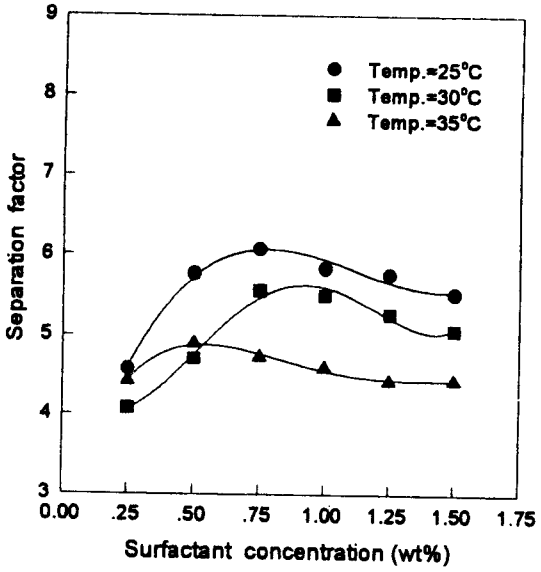

Fig. 7. Separation factor(benzene) vs. concentration of TEALS as an anionic surfactant, t_c=2.5 min, t_s=5 min.

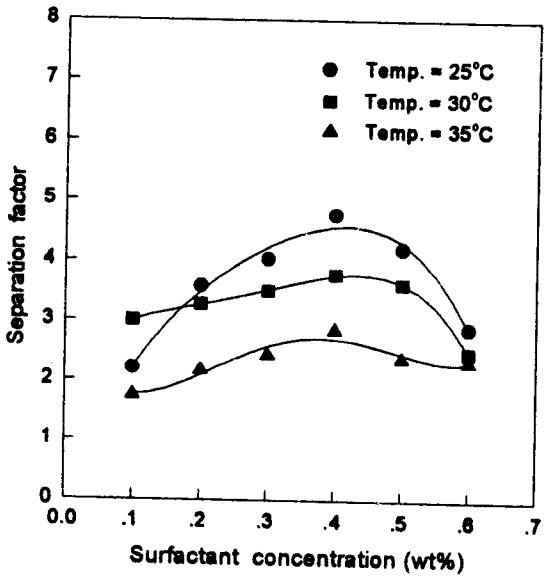

Fig. 9. Separation factor(benzene) vs. concentration of NP-10(HLB 16.5) as a nonionic surfactant, t_c=5 min, t_s=5 min.

인데 계면활성제의 농도가 낮을 때는 상대적으로 물의 양이 많고 액적이 커지므로 액적의 수가 적어 투과되는 용질의 양이 적어지므로 벤젠 분리계수는 감소하게 된다. 반면에 가장 좋은 벤젠 분리계수를 보이는 계면활성제 농도 이상에서는 초기 공급된 탄화수소를 충분히 포함하고 남은 잉여의 미셀과 계면활성제 분자들은 탄화수소의 막 계면으로의 이동을 방해하게 되어 투과속도가 저하되므로 벤젠 분리계수는 감소하게 된다. 계면활성제의 농도가 최대 벤젠 분리계수를 보이는 농도에서 막이 가장 안정하고 적당한 막의 두께와 액적의 크기 및 수의 분포를 얻을 수 있어 막을 통한 물질의 투과가 효율적으로 이루어질 수 있음을 나타낸다고 하겠다. 접촉온도가 상승함에 따라 탄화수소 혼합물의 투과율이 증가한다. 그러나 계면활성제 농도가 0.50 wt%이상에서는 싸이클로헥산 투과율의 증가 경향이 벤젠 투과율의 증가 경향보다 미소하나마 크기때문에 벤젠 분리계수는 감소한다고 사료된다.

정치시간과 접촉시간을 변화시키며 벤젠 분리계수에 대한 실험을 하였으며 그 결과를 Fig. 10과 11에 나타내었다. 액막의 형성과 안정성이 유지되는 시간의 범위내에서 접촉시간과 정치시간을 선정하였다. Fig. 10은 음이온 계면활성제인 SBL-2N-27의 경우로서 접촉시간을 5분으로 고정하여 정치시간 5분과 10분에서 실험한 결과이며 계면활성제 농도 변화의 전체영역에서 정치시간 5분에서 벤젠 분리계수가 10분에서 분리계수보다 높게 나타났다. Fig. 11은 비이온 계면활성제인 NP-10을 사용하여 정치시간을 5분으로 하고 접촉시간 2.5분과 5분에서 실험한 결과로서 계면활성제 농도 0.5 wt%에서 가장 높은 벤젠 분리계수를 나타내었다.

4-3. 액막의 안정성 실험

액막 파괴로 인해 원료 혼합물이 비선택적으로 직접 용매로 전달

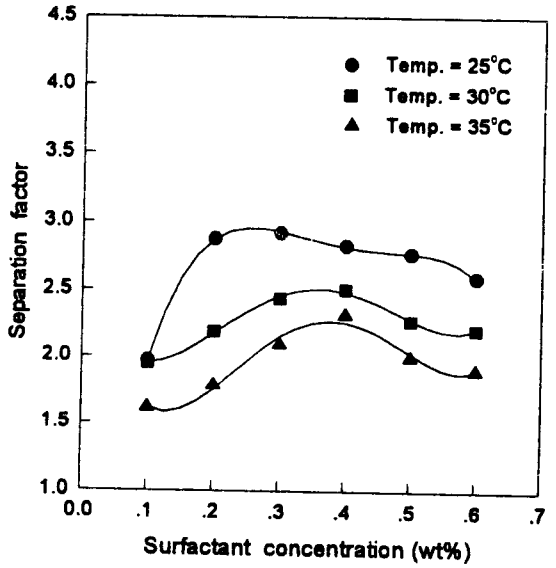

Fig. 8. Separation factor(benzene) vs. concentration of OP-10(HLB 11.5) as a nonionic surfactant, t_c=5 min, t_s=5 min.

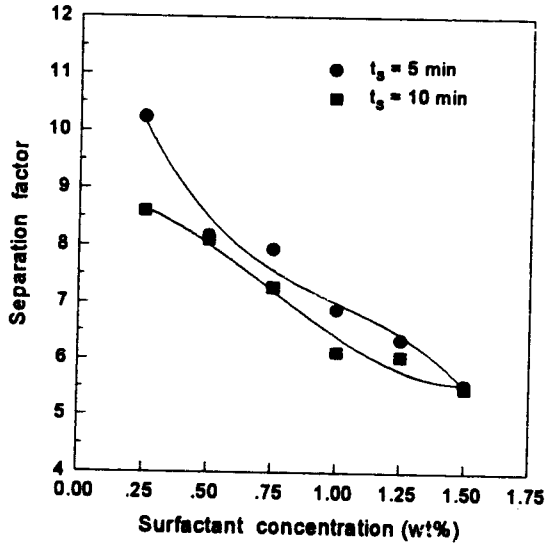

Fig. 10. Separation factor(benzene) vs. concentration of SBL-2N-27 as an anionic surfactant at 25 ℃, t_c=5 min.

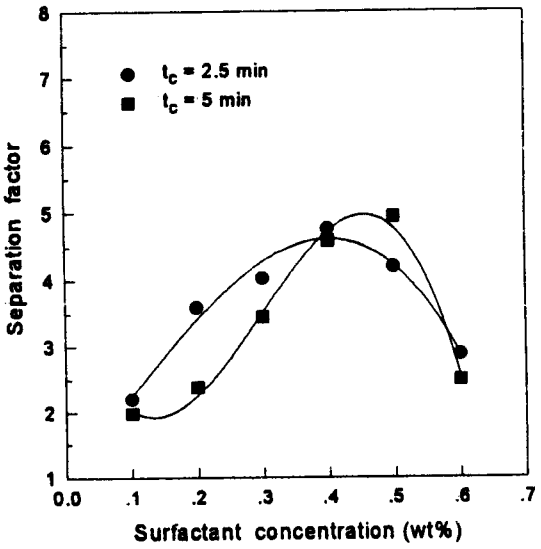

Fig. 11. Separation factor(benzene) vs. surfactant concentration of NP-10(HLB 16.5) as a nonionic surfactant at 25 ℃, t_s=5 min.

되기 때문에 이로 인해 투과도가 증가될 수 있으므로 투과특성실험에서의 막파괴율을 구하기 위해 Li에 의해 제안된 dye tracer technique을 이용하여 막의 안정성 실험을 하였다. Fig. 12는 음이온 계면활성제인 SBL-2N-27의 경우 계면활성제 농도 및 접촉온도에 따른 막파괴율을 보여주고 있다. 계면활성제 농도와 접촉온도가 증가함에 따라 막파괴율도 증가하였다. 특히 35 ℃에서는 계면활성제 농도가 증가함에 따라 급격한 막파괴가 일어났다. Fig. 13은 비이온 계면활성제인 NP-10(HLB 16.5)의 경우 계면활성제의 농도와 접촉온도를 변화하였을 때의 막파괴율을 보여준다. 접촉온도가 상승함에 따라 막파괴율도 증가함을 보여준다. 투과특성 실험시 가장 좋은 투과율과 벤젠 분리계수를 보여주었던 접촉온도와 농도인 25 ℃와 0.40 wt%에서 가장 낮은 막파괴율을 보여줌으로써 선택적인 투과로 효율적인 분리를 이루어 내었으며 바로 이 농도가 최적의 계면활성제 농도라고 할 수 있다.

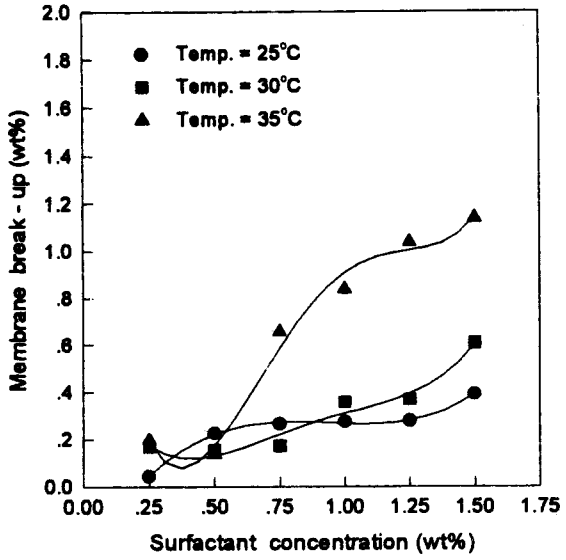

Fig. 12. Membrane breakup vs. anionic surfactant(SBL-2N-27) concentration, t_c=5 min, t_s=5 min.

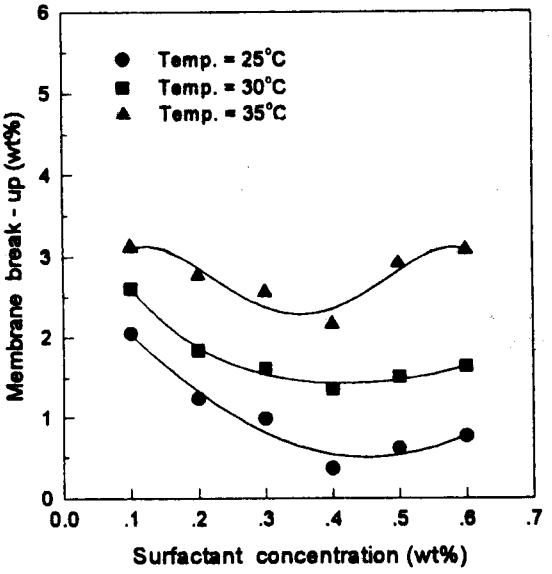

Fig. 13. Membrane breakup vs. nonionic surfactant(NP-10) concentration, t_c=5 min, t_s=5 min.

5. 결 론

액체막에 의한 벤젠과 싸이클로헥산의 분리에 있어서 계면활성제의 종류와 농도, 접촉온도를 변수로 투과율, 벤젠 분리계수, 막안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 계면활성제는 음이온 계면활성제와 비이온 계면활성제를 사용하였다. 음이온 계면활성제로서 sodium polyoxyethylene(2) lauryl ether sulfate, triethanolamine lauryl sulfate이고, 비이온 계면활성제로서는 polyoxyethylene(10) octylphenol ether, polyoxyethylene(10) nonylphenyl ether이다. 음이온 계면활성제를 사용한 경우 계면활성제 농도 및 접촉온도가 증가할수록 벤젠과 싸이클로헥산의 투과율은 증가하였으나, 비이온 계면활성제를 사용하였을 경우에는 일관성있는 경향을 보여주지 않았다. 또한 모든 계면활성제에서 접촉온도가 상승함에 따라 벤젠 분리계수는 감소하였다. 음이온 계면활성제가 비이온 계면활성제보다 벤젠 분리계수 및 투과율이 높게 나타났다. 모든 계면활성제에서 접촉온도가 상승함에 따라 막파괴율은 증가하였으며, 최적의 투과효과를 보여준 농도에서 가장 낮은 막파괴율을 보여주었다.

사용기호

A : transport area [cm^2]
C : concentration of a component in feed [mol/cm^3]
C′ : concentration of a component in solvent [mol/cm^3]
D : diffusion rate constant [cm^2/sec]
L : thickness of membrane [cm]
n : number of moles of a species permeated across membrane [mol/cm^3]
P : fraction of permeation [-]
t : time [min]

그리이스 문자

$\alpha_{B,A}$: separation factor or selectivity [-]
θ : time for a component to permeate across membrane [sec]

하첨자

A, B : components
C : contact
S : solute or settling

참고문헌

1. Rousseau, R. W., ed.: "Handbook of Separation Process Technology", Wiley-Interscience, New York, 826(1987).
2. Lee, K. H., Evance, D. F. and Cussler, E. L.: *AIChE J.*, **24**(5), 860(1978).
3. Li, N. N.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, **10**, 215(1971).
4. Li, N. N.: *AIChE J.*, **17**(2), 459(1971).
5. Casamatta, G., Bouchez, D. and Angelino, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **33**, 145(1978).
6. Carraciolo, F., Evance, D. F. and Cussler, E. L.: *AIChE J.*, **21**(11), 160(1975).
7. Cussler, E. L.: *J. Membrane Sci.*, **1**, 319(1976).
8. Shah, N. D. and Owens, T. C.: *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop.*, **11**, 58(1972).
9. Schick, M. J., ed.: "Nonionic Surfactants", Marcel Dekker, Inc., New York, 589(1967).
10. Porter, M. R.: "Handbook of Surfactants", Chapman and Hall, Inc., New York, 116(1991).
11. Li, N. N. and Cahn, R. P.: *J. Membrane Sci.*, **1**, 129(1976).
12. McAuliffe, C.: *J. Phys. Chem.*, **70**, 1267(1966).
13. Marsden, C. and Mann, S.: "Solvents Guides", 2nd ed., Cleaver-Hume Press Ltd., London, 65(1963).
14. Goswami, A. N. and Rawat, B. S.: *J. Membrane Sci.*, **24**, 145 (1985).