

Asymmetric Composite Membrane을 이용한 폐수 중의 VOC 분리에 관한 연구

백귀찬 · 권창오*

경희대학교 환경·응용화학부, *김천대학 환경관리과

A Study on the Separation of Volatile Organic Compounds in Water using Asymmetric Composite Membrane by Pervaporation

Gwi Chan Paik and Chang Oh Kweon*

College of Environment and Applied Chemistry, Kyung Hee University

Yongin-gun Kiheung-up Seochon-ri 1, Kyunggi-do 449-701, Korea

**Department of Environment Management, Kim Cheon College*

Samrak-dong 754, Kimcheon 740-200, Korea

In this work, polydimethylsiloxane-polyetherimide asymmetric composite membrane with polyetherimide support was prepared by phase inversion process and dip coating. Polydimethylsiloxane dense polymer membrane was also made from the room temperature vulcanizing silicone rubber. These membranes were evaluated in terms of the removal of volatile organic compounds such as trichloroethylene, chloroform, 1,1,1-trichloroethane, perchloroethylene from water by pervaporation.

The flux and selectivity of dense polymer membrane was in the range of 65.3 to 73.6 g/m²h and 152.8 to 2031.2, respectively. And pervaporation property of asymmetric composite membrane was in the range of 95.8 to 112.4 g/m²h and 151.7 to 2039.3, respectively. asymmetric composite membrane has remarkably greater flux than dense polymer membrane. However, the physical properties of dense membrane and composite membrane were not changed. PDMS-PEI composite membrane showed the best performances among the silicone polymeric membranes, and has better durability and mechanical strength than dense polymer membrane. Asymmetric composite membrane should be a useful candidate for the removal of volatile organic compounds dissolved in water.

Key words : Volatile Organic Compounds, Pervaporation, Asymmetric composite membrane

I. 서 론

수용액에서 유기물을 선택적으로 투과 분리하는 투과증발공정은 1980년대에 이르러서야 상업적으로 응용되기 시작하였는데 이는 유기물에 선택도를 갖는 대부분의 소수성 막 재질이 용제에 대한 화학적, 열적 안정성이 요구되었기 때문이다. 이와 같은 투과증발공정에 개발사용되는 여러 재질의 막 중에서 현재 적용되고 있는 막은 polydimethylsiloxane(PDMS)이 주를 이루고 있는데 이는 선택

도와 안정도를 동시에 지니고 있으며 VOCs에 대해 높은 투과유량을 보여주기 때문이다. 투과증발은 역삼투막, 한외여과막 등의 다른 막 분리와 달리 혼합물 분리가 막 소재 물질과 분리 대상 유기물 사이의 화학 친화도에 의해 이루어지기 때문에 혼합물 중의 특정 성분에 대한 선택도가 높은 비다공성 고분자 막(nonporous dense membrane)이 사용된다. 투과증발법은 투과(permeation)와 증발(evaporation)의 합성어로서 증발하기 쉬운 성분으로 되어있는 혼합용액의 분리에 적용되는 막분리법이다. 즉 액상과

기상 사이에 막이 놓여져 이것을 통해 액체가 선택적으로 흡수되어 기체상으로 확산되는 것으로 규정 될 수 있다. 따라서 분리조작은 막을 사용하여 한쪽(공급측)에 혼합용액을 넣고 다른 한쪽(투과측)을 감압하거나 불활성의 담체기체 등을 흐르게 함으로써 투과성분의 증기압을 낮게 유지하여 조작된다. 이때 막 내부에 투과증발공정의 추진력인 화학 포텐셜 구배가 발생하여 막을 통한 물질투과가 이루어지는데 각 투과성분의 투과속도는 투과 성분과 막 재료간의 물리화학적 인력에 의해 결정된다.¹⁾

유기염소계 화합물은 금속, 기계, 섬유산업 뿐만 아니라 일반 용제로 그 사용성과 수요가 증대되어 왔으나 후처리에 있어서 이러한 물질들을 완벽하게 제거, 처리하지 못하고 있는 실정이다. 또한 유기염소계 화합물로 인한 지하수 및 지표수의 오염으로 인해 국민건강 뿐만 아니라 생명까지도 크게 위협하고 있는 실정이다.²⁾

특히 chloroform, trichloroethylene(TCE), perchloroethylene(PCE) 등의 유기염소계 화합물은 대부분 발암성 유발물질들로서 음용수 처리에 매우 심각한 문제가 되고 있다. 일반적으로 이들을 제거하는 방법으로는 폭기(aeration), 활성탄 흡착, 오존 분해 등이 사용되어 왔다.

그러나 이러한 방법들 중 오존 분해법은 이들 화합물을 제거하는 과정에서 새로운 독성물질이 발생될 수 있는 가능성이 있고 폭기로 제거된 유기염소계 물질들은 대기중으로 비산하여 대기오염이라는 또다른 문제점을 안게되어 활성탄 흡착이라는 후처리 과정이 요구된다. 또한 활성탄 흡착은 매우 유효한 방법이나 일반적으로 장치가 크고 재생조작 등과 같은 번거로운 문제점을 갖고 있다.³⁻⁵⁾ 따라서 기존의 유기염소계 화합물 제거 방법과 비교할 때 경제성과 후처리 면에서 막 분리를 이용한 투과증발 공정이 뛰어난 경쟁력을 갖고있어 선호되고 있으며 현재 이 분야에 대한 투과증발 적용에 대한 연구는 매우 활발히 진행되고 있다.

막을 이용하여 극소량의 오염물질을 제거하는 경우에 있어서는 다량의 물을 투과시키는 것보다 미량의 오염물질을 선택적으로 투과시키는 것이 훨씬 효율적이므로 최근 투과증발법은 물에 용해

된 미량의 유기염소계 화합물제거에 유용한 방법으로 관심의 대상이 되고 있다.

이에 본 연구에서는 미량의 유기물 분리에 적합하다고 기대되는 균질 치밀막인 PDMS막을 용매 증발법에 의해 제조하였으며, PDMS를 선택층으로 하고 열적 및 화학적으로 매우 안정하며 기계적 성질이 우수한 무정형 열가소성 고분자 소재⁶⁾인 PEI 지지체(지지막)를 상전환법에 의해 제조한 후 이 지지막을 묶은 PDMS 용액에 dip-coating시켜 PDMS-PEI(polydimethylsiloxane-polyetherimide) 복합막을 제조하였다. 복합막의 형성 여부를 확인하기 위해 막의 단면을 주사전자현미경을 통해 확인하였다. 투과증발법에 의해 수중에 미량으로 함유되어 있는 chloroform, TCE, PCE 및 1,1,1-trichloroethane 등의 유기염소계 화합물 제거실험을 통해 이들 막들에 대한 투과유량 및 선택도 등의 투과증발 특성을 비교 분석하여 나날이 심각해지는 수질문제 중 특히 우리의 건강과 생명을 위협하는 음용수 처리 문제에 있어 보다 효율적인 유기염소계 화합물 제거 방안을 제시하는 데 필요한 기초자료를 얻는 데 그 목적을 두었다.

2. 투과증발 이론

2.1. 용해도 파라미터

용해도 파라미터 이론은 고분자와 용질 사이의 상호작용을 설명하기 위한 이론이다. 이 이론은 처음에는 혼합 액체의 거동을 설명하기 위해 개발되었으나 고분자와 용매의 적합성을 예측하는 데도 매우 유용하게 사용될 수 있다.

식 (1)에 나타낸 것 처럼 용해도 파라미터는 세 성분으로 구성되어 있으며 이들은 분산력 성분(δ_d), 극성력 성분(δ_p), 수소결합 성분(δ_h)으로 정의된다.⁷⁾

$$\delta^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2 \quad (1)$$

이들 세 성분을 3차원 공간 안에서 직교축에 대해 벡터값으로 표시할 수 있다. 반경 벡터의 끝부분이 바로 용해도 파라미터가 된다. 따라서 각 용매와 용질 그리고 고분자가 삼성분 좌표(δ_d , δ_p ,

δ_h)로 표시될 수 있다. 고분자와 용매의 친화성 정도는 고분자와 용매를 표시하는 벡터들의 끝점 사이의 거리 Δ 에 의해 정해질 수 있다. 여기서 거리 Δ 는 다음 식으로 표시된다.⁸⁾

$$\Delta = [(\delta_{d,p} - \delta_{d,s})^2 - (\delta_{p,p} - \delta_{p,s})^2 - (\delta_{h,p} - \delta_{h,s})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 Δ 는 용해도 파라미터 차이를 의미하며 아래첨자 s와 p는 각각 용매와 고분자를 뜻한다. Fig. 1에 이러한 내용을 도시하였다. Δ 가 감소하면 고분자의 용매에 대한 팽윤이 증가함을 의미하며 고분자와 투과물 사이의 상호작용이 큼을 의미한다. 그러므로 분리대상 화합물의 용해도 파라미터 값을 알면 이와 유사한 고분자를 선택하여 분리에 응용할 수 있게 된다.

그러나 용해도 파라미터의 기본법칙은 주어진 계에서 응집에너지 밀도 및 상호용해도와 관련이 있다는 가정 하에서 이루어지므로 용해도 파라미터 이론을 투과증발막 선택에 이용할 경우 한가지 제한되는 점은 이 이론이 오직 에너지 관계만을 고려하였고 엔트로피 관계는 무시했다는 점이다. 그럼에도 불구하고 이 이론이 고분자 막과 분리대상 물질의 상호작용 현상을 처음 추정할 때 유용하게 쓰이고 있는 실정이다.⁹⁾

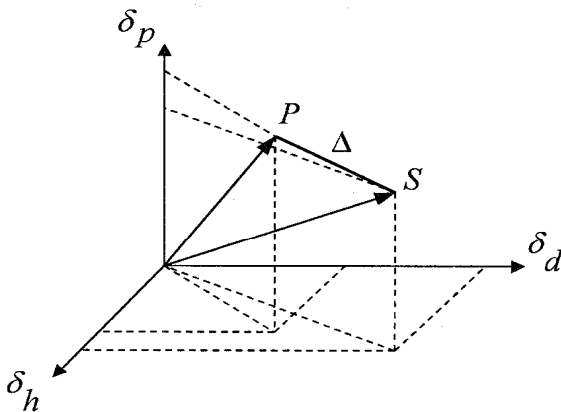


Fig. 1. Schematic drawing of polymer(P) and solvent(S) in a three dimensional δ_p , δ_d , δ_h space (Δ is the distance between the endpoint of the polymer and solvent vectors).

2.2. 용해-확산 모델

Fig. 2와 같이 투과증발 분리기구의 물질전달 모델은 다음과 같이 연속적인 3단계로 이루어지는 용해-확산 모델로 가정할 수 있다.^{10,11)}

2.2.1 상부 공급액측에서 막내로의 흡착단계 (sorption step)

분리하고자하는 액체분자들이 공급액으로 부터 막표면으로 용해되어 들어간다. 이 용해된 액체분자들로 인하여 막표면은 팽윤되며 이때 용해속도가 바로 다음 단계인 확산속도보다 훨씬 빠르기 때문에 항상 공급액과 막표면은 열역학적으로 평형 상태로 존재하는 것으로 간주된다. 따라서 흡착단계는 열역학적 특성을 띠고 있다.

2.2.2 막을 통한 투과물의 확산단계(diffusion step)

막표면에 흡착된 액체분자들은 막내부에 고분자 사슬운동에 의해 형성된 자유체적들을 통해 막 하부쪽으로 확산되어 이동하면서 투과성분의 가소행위(plasticizing)로 인하여 팽윤구배가 형성된다. 확산속도는 막의 유동성과 투과성분의 가소행위 정도에 따라 결정되나 세 단계 중 가장 속도가 느려 유량(flux)을 결정하는 단계이며 속도론적 특성으로 다루어진다.

2.2.3 하부 투과측에서 증기상으로의 탈착단계 (desorption step)

확산에 의해 막하부면에 도달한 투과성분 분자들은 낮은 증기압의 하부쪽(permeate side)에서 증발 혹은 탈착된다. 하부압력이 투과성분의 포화증기압보다 훨씬 낮기 때문에 탈착속도가 매우 빠르며 막표면의 투과성분의 농도를 무시한다.

세 단계 중 탈착 저항은 매우 작기 때문에 총괄 공정에 영향을 끼치지 않는다고 간주되므로 막을 통한 투과거동은 주로 흡착과 확산단계에 의해 영향을 받게된다. 따라서 투과증발공정에서 액체혼합물의 분리는 공급액측 막표면에서의 선택적인 용해와 막내부에서의 선택적인 확산에 의해 일어나므로 유량과 선택도는 공급 혼합물에서 각 성분의 용해도와 확산도에 의하여 결정된다. 액상 혼합물

의 구동력이 같을 때 막이 친화성이 강한 한 성분을 다른 성분보다 보다 빨리 투과시키는 능력을 가지기 때문에 분리가 일어난다.¹²⁾

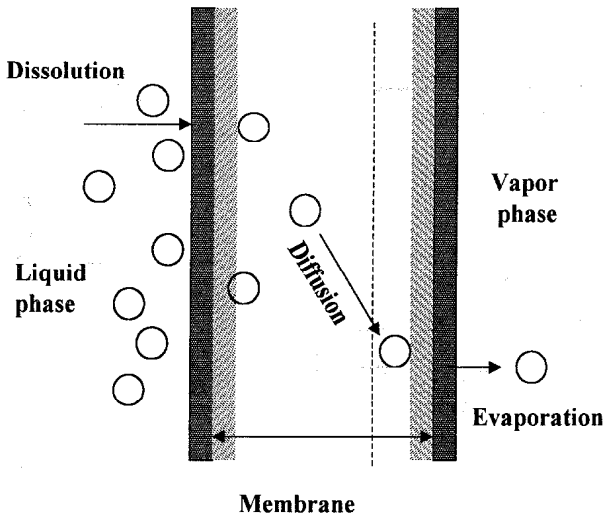


Fig. 2. The mechanism of permeation through a membrane.

3. 실험

3.1. 시약 및 시료

Chloroform, TCE, PCE 및 1,1,1-trichloroethane 등의 유기염소계 화합물과 toluene은 모두 Yakuri Pure Chemicals Co.제(Japan)의 특급시약을 사용하였다. 물은 증류수를 초순수 장치(water purification system, Myron L Company series 750)로 처리한 탈 이온수를 사용하였으며, 복합막의 지지체인 PEI를 용해시키는데 필요한 N-methyl-2-pyrrolidone (NMP)은 Aldrich Co.제(U.S.A.)의 특급시약을 CaH₂를 넣고 환류하여 탈수시킨 후 질소분위기 하에서 증류하여 사용하였다.

또한 PDMS막은 Shin-Etsu Chem. Co.제(Japan) RTV(Room Temperature Vulcanizing) silicone rubber(KE-1402)로부터 제조하였으며 PTMSP-PEI 복합막의 지지체로 사용된 polyetherimide(PEI) (Ultem 1000)는 General Electric Co.제(U.S.A.)를 사용하였다.

3.2. 투과증발 장치 및 투과증발 실험

투과실험장치는 막을 장착하는 투과증발분리 용기(cell)와 연결관, 항온조 및 온도조절기, 냉각트랩, 압력계, 진공펌프 그리고 공급액 급여장치 및 feed tank 등으로 구성하였으며 공급액과 접촉하는 유효막넓이는 11.94 cm²이었다. 또한 막 하부층의 압력은 투과 구동력을 일정하게 유지하기 위하여 2 Torr 이하로 유지시켰다. 이러한 조건에서 모든 분리수용액의 농도를 0.05 wt%, 온도를 30°C로 각각 고정시켜 투과증발 분리 실험을 수행하였다. 투과물의 농도는 기체 크로마토그래피(Gow Mac 850P)를 이용하여 분석하였고 검출기로는 열전도도 검출기(TCD), 컬럼은 Porapak Q를 사용하였다. Fig. 3에는 미량의 유기염소계 화합물의 실질적 분리가 일어나는 투과 용기의 구조를 나타내었다.

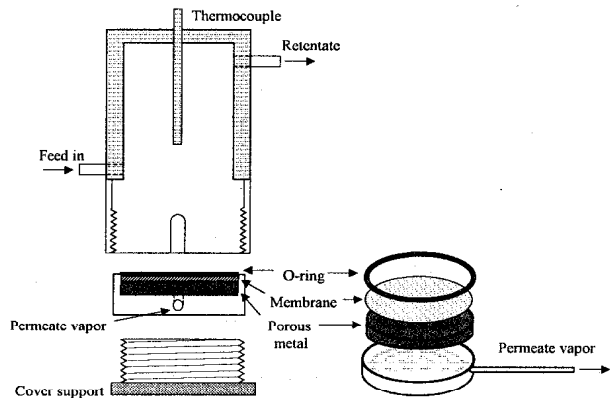


Fig. 3. A cross section at view of pervaporation cell.

투과 유량은 막 1 m² 넓이에 대해 1 h 당 투과된 투과물의 무게(g)로 산출하였으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Flux}(\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}) = W/A \times t$$

여기서 W는 투과물의 무게(g), A는 유효막넓이(m²) 그리고 t는 운전시간(h)을 나타낸다.

또한 선택도는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Selectivity}(\alpha_{w/c}) = (Y_w/Y_c)/(X_w/X_c)$$

단, Y_w와 Y_c는 각각 투과액의 물과 유기염소계 화합물의 무게 분율이며 X_w와 X_c는 각각 공급액의

물과 유기염소계 화합물의 무게 분율이다.

3.3. Dense Membrane 및 Asymmetric Composite Membrane 제조

Dense membrane(PDMS)은 RTV silicone rubber와 경화제(Shin-Etsu Chem. Co., CAT-1402, Japan)를 일정비율(9:1)로 균일하게 혼합한 후 고정된 유리판 위에서 100 μm 의 knife gap를 가진 casting knife로 casting하여 40°C의 진공 오븐에서 24시간 건조한 후 투과증발실험에 사용하였다.

복합막의 지지막으로서는 열적, 화학적으로 안정하며 기계적 성질이 우수한 소재인 PEI를 사용하였으며 선택층으로는 미리 제조한 PDMS막을 이용하였다. 따라서 투과증발 분리에 사용된 복합막은 크게 두 과정으로 나누어 제조되었다. 먼저 PEI 지지막을 제조하기 위하여, 상전환법에 의하여 비대칭 막을 제조한 후 이 지지막 위에 고분자 용액을 dip-coating시켜, 이것을 열처리하여 복합막을 제조하였다. Fig. 4에는 PDMS-PEI 복합막의 제조 과정을 순서대로 보여주고 있다.

본 연구에 지지막으로 이용된 PEI는 이미 상용화된 polyethersulfone, polysulfone 등과 함께 다양한 용도로 많은 연구가 진행되고 있다. 1986년 Peinermann과, 1991년 Sourirajan 등이 보고한 기체분리막 소재로서의 연구¹³⁾를 시작으로 1993년 Huang과 Feng 등의 투과증발용 분리막 소재로서의 연구¹⁴⁾와 1993년 Merlen 등의 한외여과막 소재로서의 연구¹⁵⁾ 등이 대표적인 예이며 1989년에 국내에서도 Ultem 1000의 특성과 합성에 관한 연구가 발표된 바 있다.

즉 PEI 지지막의 성능을 평가하기 위하여 공급액으로 증류수와 PEG(polyethylene glycol) (Poly-science Inc.)을 이용하여 한외여과 투과 분리를 실험을 하고 그 결과를 해석하여 막의 분획 분자량(molecular weight cut-off : MWCO)과 순수(純水)의 투과계수를 산출하였다. 먼저 물 투과 유량은 질소 기체의 압력을 2 bar로 고정시켜 용기 내부로 주입시키고 10분 간격으로 5회 측정하였다. 투과물 측정결과 10분당 평균 5.5 ml가 얻어져 아래의 식에 의해 계산된 투과유량은 0.02 ml/min.atm.cm²의

값을 나타냈다.

$$\text{Flux}(\text{ml}/\text{min} \cdot \text{atm} \cdot \text{cm}^2) = \frac{\text{permeate}(\text{ml})}{\text{시간}(\text{min}) \times \text{압력}(\text{atm}) \times \text{막넓이}(\text{cm}^2)}$$

한편 막의 MWCO를 알아보기 위해 분자량이 정해진 PEG를 증류수에 용해시켜 0.1 wt%의 수용액을 제조하였다. 이때 실험에 사용된 PEG의 분자량은 7,500, 10,000 및 40,000인 세 가지였다. 이들 수용액을 40분간 2 bar 조건에서 안정화시킨 후 시료로서 채취하였다. 시료채취 후 30여분간 막을 증류수로 헹굼 처리한 후 다음 시료에 대해서도 이와 같은 실험을 반복하였다.

TOC(total organic carbon) 분석 결과와 아래에 나타낸 rejection 계산식을 이용하여 분획 분자량을 산출한 결과 분획 분자량은 약 20,000이었다.

$$\text{Rejection}(\%) = \left(1 - \frac{\text{permeate concentration}}{\text{feed concentration}}\right) \times 100$$

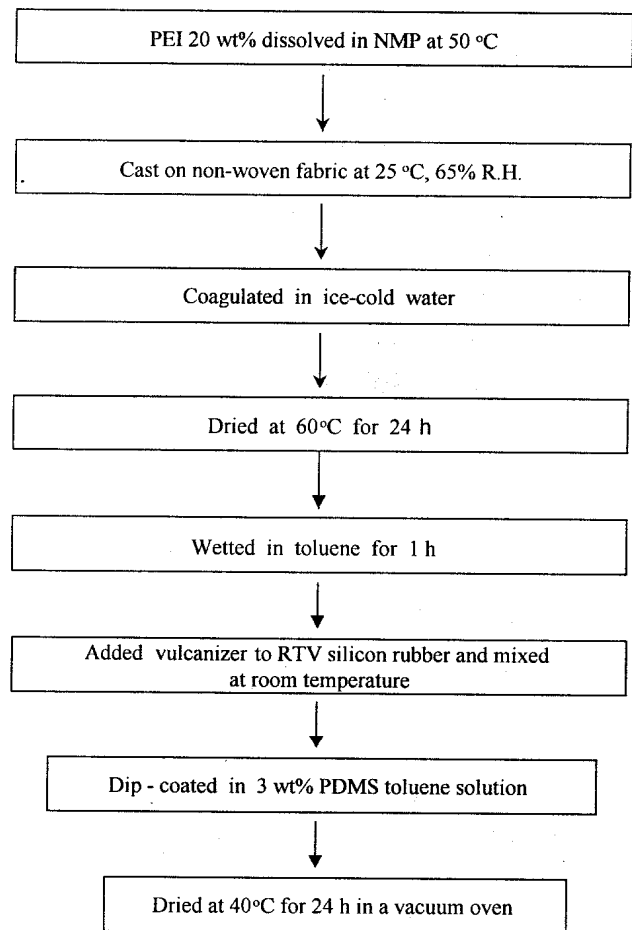
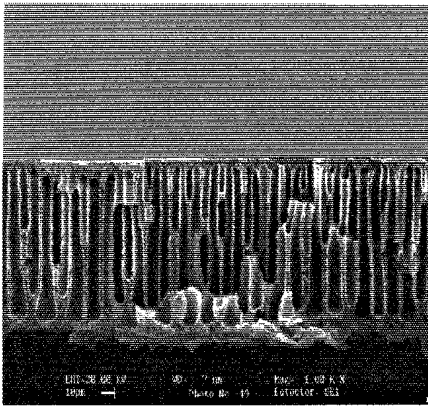


Fig. 4. Procedure of asymmetric composite membrane preparation process.

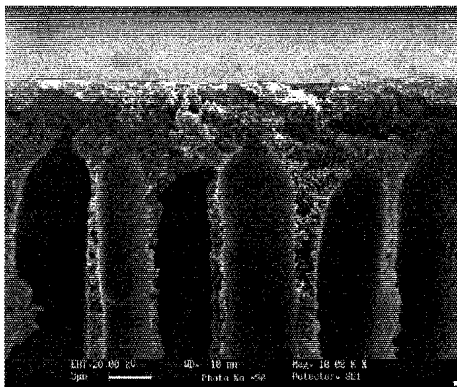
4. 결과 및 고찰

4.1. SEM(주사전자현미경)에 의한 Asymmetric Composite Membrane의 단면(cross section) 관찰

Fig. 5의 (a)와 (b)에 열적, 화학적으로 안정하며 기계적 성질이 우수한 소재로 보고된 복합막의 지지체로 이용된 PEI막의 단면구조를 각각 1,000과 10,000의 배율로 촬영한 것을 나타냈다. 그림에서 보는 것처럼 무수히 많은 손가락 모양의 다공성 구조를 관찰할 수 있어 지지체인 PEI가 성공적으로 제조되었음을 확인 할 수 있었다. PEI막의 두께는 약 145 μm 였다. PEI 지지막은 선택도와는 무관하며 단지 막의 기계적 강도에 영향을 줄 수 있다.



(a)

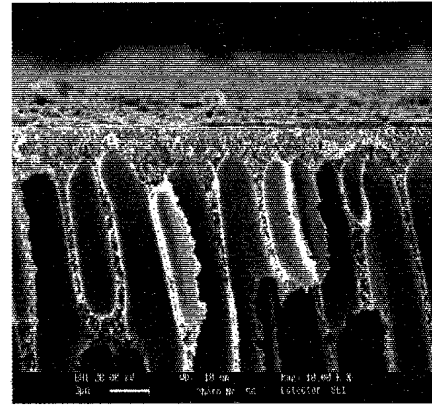


(b)

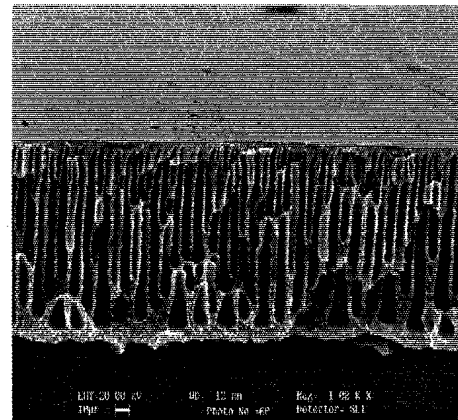
Fig. 5. Cross section at views of PEI support membrane.

Fig. 6의 (a)에는 1,000 배율로, 그리고 (b)에는 10,000 배율로 촬영한 PDMS-PEI 복합막의 단면을 나타내었다. (d)에서 보는 바와 같이 다공성 PEI 지지층 위에 얇게 코팅된 선택층을 볼 수 있다. 이는 복합막이 성공적으로 제조되었음을 보여주고 있으며 dip-coating에 의해 형성된 선택층이 두께는 약 0.5 μm 였다.

선택층으로 사용된 고분자의 종류와 두께에 따라서 복합막의 투과특성이 달라진다. 균질 치밀막이 복합막의 선택층으로 작용하더라도 선택도는 거의 변하지 않고 단지 복합막화 함으로서 균질 치밀막일 때보다 막 두께가 최소화됨으로써 투과유량이 크게 증가하는데 본 연구에서도 이를 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 6. Cross section at views of asymmetric composite membrane with PEI support.

4.2. 투과증발실험 결과

용매 증발법에 의해 제조한 PDMS 균질 치밀막과 이를 선택층으로 하는 PDMS-PEI 복합막 대한 투과증발특성을 수중에 미량 용해되어 있는 유기염소계 화합물의 제거실험을 통해 살펴본 결과들은 다음과 같다.

소수성 고무상 고분자인 PDMS는 투과증발법에 의한 액체혼합물의 분리뿐만 아니라 기체투과용 소재로서도 널리 쓰이고 있으며 유연한 siloxane 결합 때문에 기체투과성이 뛰어난 소재로 각광받고 있는 PDMS막을 RTV silicone rubber와 경화제를 일정비율(9:1)로 균일하게 혼합한 후 제조하여 투과증발 분리실험을 수행하였다. 이 결과들을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 투과유량은 65.3 g/m².h에서 73.6 g/m².h범위의 값을 보였고 선택도는 152.8에서 2031.2 범위의 결과를 나타냈다. PCE의 선택도가 2031.2로서 가장 우수한 결과를 나타냈으며 투과유량은 역시도 PCE가 73.6 g/m².h으로서 다른 용질에 비해 월등히 높은 값을 보이고 있다. TCE가 PCE 다음으로 좋은 투과특성을 보이고 있어 본 연구에 사용된 PDMS막은 PCE와 TCE의 선택적 제거에 유용함을 알 수 있다.

비대칭 PEI 지지막 위에 0.5 wt% PDMS 용액을 dip-coating시켜 열처리한 후 얻어진 PDMS-PEI 복합막을 사용한 투과증발 분리 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

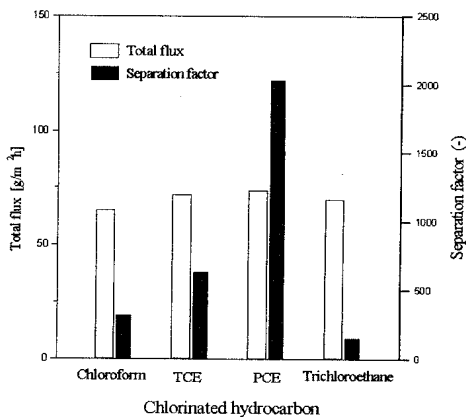


Fig. 7. Pervaporation performances of volatile organic compounds through dense polymer membrane.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 투과유량은 95.8 g/m².h에서 112.4 g/m².h범위의 값을 나타냈고 선택도는 151.7에서 2039.3 범위이었다. 투과유량과 선택도는 PDMS막에서와 동일하게 PCE의 분리에서 112.4 g/m².h 및 2039.3로서 가장 좋은 결과를 나타냈으며 TCE가 103.7 g/m².h과 638.2로서 두 번째로 우수한 결과를 보였다.

전체적으로 이러한 분리 결과들을 PDMS 막을 사용하여 분리한 실험 결과(Fig. 7)와 비교해 보면 선택도에서는 모든 분리물질에 대해 근사한 수치를 보였으나 투과유량은 분리대상 용질에 대해 거의 1.6배에 달하는 증대된 값을 보였다. 이러한 원인은 다공성 PEI 지지막은 단지 지지체 역할만 할 뿐 막의 선택도와는 무관하며, 선택층으로 사용된 PDMS 고분자가 균질 치밀막인 PDMS막과 물리적 성질이 같은 동일물질이어서 선택도는 거의 변하지 않고 다만 막 두께가 최소화됨으로써 투과유량이 증가하게 되는 당연한 결과 때문인 것이다. 또 Aptel 등¹⁶⁾도 투과증발에서 막의 두께를 얇게 하였을 때, 투과유량은 증가했지만 선택도는 차이가 거의 없다고 보고한 바 있다.

PDMS-PEI 복합막은 기계적 강도가 뛰어나고 지속적으로 우수한 선택도를 나타낼 뿐만 아니라 투과유량도 비교적 우수한 결과를 보이고 있어 향후 수중에 용해되어있는 미량의 유기염소계 화합물 제거에 복합막 소재로서 응용이 가능하리라 사료된다.

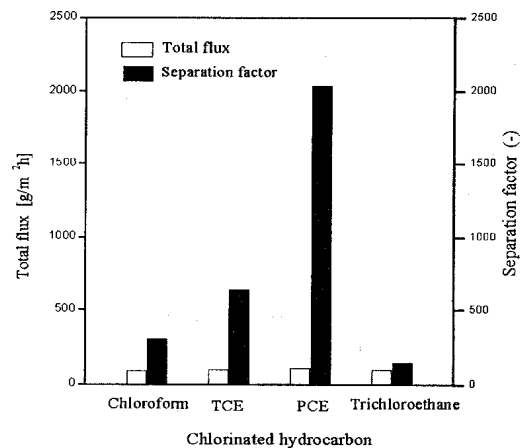


Fig. 8. Pervaporation performances of volatile organic compounds through asymmetric composite membrane.

5. 결 론

본 연구는 PDMS-PEI 비대칭 복합막을 상전환 법과 dip coating에 의해 제조하여 PDMS 균질 치밀막의 투과유량을 향상시키고자 하였다. 이를 위해 균질 치밀막과 비대칭 복합막을 이용하여 투과 증발법에 의해 수중에 용해된 미량의 휘발성 유기 화합물 제거 실험을 통해 투과증발 특성을 상호 비교한 결과, 다음과 같은 결론들을 얻었다.

고분자막들의 투과유량 값은 $65.3 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ 에서 $112.4 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ 사이였으며, 선택도는 150에서 2039.3 범위에 있었다. PDMS 균질 치밀막과 PDMS-PEI 복합막 모두에서 분리대상 용질 중 PCE의 분리에서 가장 우수한 투과특성을 보였으며 TCE가 PCE 다음으로 좋은 분리결과를 나타내어 본 연구에 사용된 고분자 막들은 PCE와 TCE의 선택적 제거에 유용함을 알 수 있었다. 또한 PDMS-PEI 복합막과 이 복합막의 선택층에 해당하는 PDMS 균질 치밀막의 투과증발 특성을 비교한 결과 전체적으로 선택도에는 큰 차이가 없었으나 투과유량은 상당히 증대되었으며 균질 치밀막의 투과특성 상호관계가 복합막화 된 후에도 그대로 이어져 있어 물리적 성질이 복합막이 된 후에도 거의 변하지 않았음을 확인할 수 있었다.

본 연구에 사용된 실리콘계 고분자 막 중 PDMS-PEI 복합막이 투과유량면에서 우수하였고 또 PDMS 균질 치밀막에 비해 내구성과 기계적 강도가 좋으므로 앞으로 PEI 지지막 제조시 표면 다공성과 막 형태를 변화시키기 위해 casting 용액에 첨가제를 투여하거나 또는 이 용액을 부지포위에 casting시킨 후 gel화 시간 등의 최적조건을 찾거나 선택층으로 이용될 PDMS 용액의 농도를 변화시켜 우수한 투과유량을 나타낼 수 있는 제조조건을 찾아 PDMS-PEI 복합막을 제조한다면 PDMS-PEI 복합막이 폐수 중의 휘발성 유기화합물 제거에 더 뛰어난 투과 성능을 나타낼 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) P. J. Hickey, F. P. Juricic and C. S. Slater, *Sep. Sci. Technol.*, **1992**, 27, 843-852.
- 2) S. Goethaert, C. Dotremont, M. Kuijpers, M. Michiels and C. Vandecasteele, *J. Membrane Sci.*, **1993**, 78, 135-145.
- 3) J. Wenchang, S. S. Sikdar and S. T. Hwang, *J. Membrane Sci.*, **1994**, 93, 1-19.
- 4) C. Dotremont, S. Goethaert and C. Vandecasteele, *Desalination*, **1993**, 91, 177-186.
- 5) H. H. Nijhuis, M. H. V. Mulder and C. A. Smolder, *J. Appl. Polym. Sci.*, **1993**, 47, 2227-2243.
- 6) R. Y. M. Huang and X. Feng, *J. Appl. Polym. Sci.*, **1995**, 57, 613-624.
- 7) T. Yamaguchi, S. Nakao and S. Kimura, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **1993**, 32, 848-853.
- 8) P. E. Froehling, A. Koenhen and C. A. Smolders, *Polymer*, **1976**, 17, 835-836.
- 9) M. H. V. Mulder, F. Kruitiz and C. A. Smolders, *J. Membrane Sci.*, **1982**, 11, 349-363.
- 10) R. Y. M. Huang and J. W. Rhim, *J. Membrane Sci.*, **1992**, 71, 211-220.
- 11) K. Meckl and R. N. Lichtenthaler, *J. Membrane Sci.*, **1996**, 113, 81-86.
- 12) R. Rautenbach and R. Albrecht, *J. Membrane Sci.*, **1985**, 25, 1-23.
- 13) K. Kneifel and K. V. Peinermann, *J. Membrane Sci.*, **1992**, 65, 295-310.
- 14) S. Sourirajan, X. Feng, F. H. Tezel, T. Matsuura and B. A. Farnand, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **1993**, 32, 533-539.
- 15) X. Feng and R. Y. M. Huang, *J. Membrane Sci.*, **1993**, 84, 15-26.
- 16) P. Aptel, J. Cuny, J. Jozegowicz, G. Morel and J. Neel, *J. Appl. Polym. Sci.*, **1972**, 16, 1061-1076.