

## 폴리설폰 중공사막에 의한 산소/질소 혼합물의 분리

김 종 수 · 송 근 호 · 이 광 래

강원대학교 공과대학 화학공학과  
(1999년 2월 2일 접수, 1999년 4월 2일 채택)

### Separation of Oxygen/Nitrogen Mixture by Polysulfone Hollow-Fiber Membrane

Jong-Soo Kim, Kun-Ho Song, and Kwang-Rae Lee

Dept. of Chemical Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea  
(Received February 2 1999, Accepted April 2, 1999)

**요 약** 국내 K 그룹 연구소에서 제조한 폴리설폰 중공사막의 산소/질소 혼합물에 대한 압력, stage cut, 공급기체 혼합물의 조성에 따른 분리성능을 조사하였다. 본 실험의 압력범위의 온도 30°C에서의 이상분리인자( $O_2/N_2$ )는 57이었으며, 유입기체 혼합물의 21 mole% 산소농도가 약 50 mole%로 농축되었다. 직압측과 고압측의 압력비는 산소농축에 미치는 영향이 작았으며, 이상분리인자의 영향은 매우 컸다. 그러나, 이상분리인자가 증가함에 따라 이상분리인자의 영향은 둔화되었다. 따라서, 이상분리인자가 큰 산소계 개방계 더불어 공정변수의 최적화가 필요하다. 수학적 모델링에 의한 예측치와 실험치가 잘 맞았다.

**Abstract :** The performance of the polysulfone hollow fiber membrane manufactured by K group Research Institute in Korea was investigated for the separation of  $O_2/N_2$  mixture as a function of pressure, stage cut, and feed gas composition. The ideal separation factor( $O_2/N_2$ ) at temperature 30°C was around 57 in the pressure ranges studied. Oxygen concentration of 21 mole% in feed stream was concentrated to about 50%. Although the pressure ratio between high and low pressure side showed little effect, ideal separation factor showed greater effect on the oxygen enrichment. However, the effect was declined with increase in the ideal separation factor. Therefore, the optimization of process variable is necessary as well as development of new material with high ideal separation factor. It was found that experimental data were well correlated with the prediction of mathematical model.

## 1 서 론

기체혼합물을 분리하는 기체분리막 공정은 혼합기체 중에서 막과 친화성이 좋은 특정기체분자가 입막차를 추진력으로 하여 선내적으로 막을 투과하는 원리를 이용한다. 공기 중의 산소/질소 분리[1, 2], 암모니아 제조공정, 석유공정, 석유화학공정에서의 수소화수·농축, 천연가스에서 이산화탄소와 황화수소를 분리·제거, 석유화학공정의 폐가스로부터 유기물

(organic vapor)의 분리, 천연가스로부터의 헬륨의 회수, 매립지 가스로부터의  $CO_2$  분리[3]와  $CH_4$ 의 농축, 공기의 건조 등이 있다. 80년대의 석유파동으로 인하여 에너지 절감을 목적으로 산소농축막, 질소농축막, 탄화수소 농축막 등을 개발하고 있으며, 산소농축막은 의료용·연소용·석유화학 공정의 산화반응용 등에 이용될 수 있다.

본 연구에서는 국내 K 그룹 중앙연구소에서 제조한 폴리설폰 중공사막에 대한 순수한 산소와 질소의 투

과량을 측정하고 산소와 질소 혼합물(공기)의 분리 실험을 수행하였으며, 모델링에 의한 전산모사 값을 실험치와 비교하였다. 전산모사에 의한 계산치와 실험치를 비교하고 이를 근거로 하여 실험하지 않은 범위에서, 공정변수인 압력차, 이상분리인자등의 변화에 따른 투과부와 배제부의 농도 변화를 예측하였다.

## 2 실험

국내 K-1급 중압인 수소에서 유리상 고분자(glassy state polymer)인 폴리설폰으로 제조된 중공사막을 사용하였다. 중공사막이 들어 있는 모듈을 향온소(Polyscience series 730)를 이용하여 일정한 온도로 유지하였다. 건조기체 및 습윤기체의 투과실험 장치에 대한 개략도를 Fig 1에 나타내었다. 본 연구는 건조기체의 투과실험 및 분리성능에 대한 실험이므로, 수분함량을 조절하기 위한 bubbler(E) 부분은 사용하지 않았다. 즉, 밸브 K와 M은 닫힌 상태에서 운전하였다. 가스실린더로부터 공급되는 기체에 함유된 수분을 제거하기 위하여 실리카겔(B)을 통과시킨 후 막모듈(F)에 주입하였다.

유입기체는 중공사막의 인측(tube side)으로 공급하고, 투과부(shell side, permeate side)에서의 유체의 흐름은 유입부의 흐름과 반대 방향인 향류(counter-current)형태로 흐르게 하였으며, 두께되지 않은 유체는 배제부(reject side)를 통해 유출되도록 하였다. 유입부, 투과부, 배제부에서의 유량은 전량유량계(Teledyne Brown Eng Hastings instruments)를 기체계(Q)에 연결하여 각각의 유량을 측정하였다. 투과부와

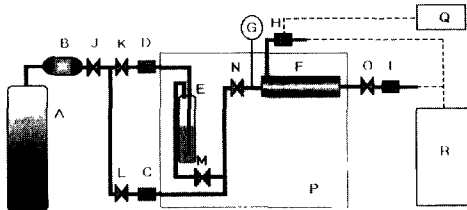


Fig. 1. Schematic diagram of permeation rate measuring apparatus. (A) gas cylinder, (B) silica gel, (C, D, H, I) mass flow meter, (E) bubbler(water), (F) membrane module, (G) pressure gauge, (J, K, L, M, N)valve, (P) constant temp bath, (Q) Recorder, (R) GC

Table 1 Specification of polysulfone hollow fiber membrane modules

ID of fiber	OD of fiber	Length of module	No of fibers	Area
320 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	135 cm	94 ea	1993 $\text{cm}^2$

배제부 사이의 압력차의 유량은 유입부의 배제부 쪽에 설치된 needle valve(N, O)를 이용하여 조절하였다. 유입압력은 디지털압력계(G)를 사용하여 측정하였고, 투과부의 압력은 대기압으로 유지하였다. 기체혼합물의 막 모듈에 의한 분리성능을 측정하기 위하여 유입부, 투과부, 배제부의 농도는 기체크로마토그래피(Shimadzu, GC-14B)를 이용하여 분석하였다.

## 3 이론

### 3.1 분리인자 (separation factor, $\alpha$ )

#### 3.1.1 이상분리인자 (ideal separation factor, $\alpha^*$ )

순수한 두 기체의 투과도의 비율로 정의되는 이상 분리인자 (ideal separation factor  $\alpha$ )는 고분자막에 대한 기체의 확산도 비(mobility selectivity)와 용해도 비(solubility selectivity)의 곱으로 결정되며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\alpha^* = \left[ \frac{D_1}{D_2} \right] \left[ \frac{S_1}{S_2} \right] = \frac{P_1}{P_2} \tag{1}$$

#### 3.1.2 Stage cut ( $\theta$ )

분리막 공정에서의 stage cut ( $\theta$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = \frac{q_p}{q_f} \tag{2}$$

여기서,  $q_p$ 와  $q_f$ 는 각각 투과유량과 공급유량을 나타낸다.

### 3.2 수학적 모델링에 의한 전산모사

분리막에 의한 기체혼합물의 분리성능에 대한 예측을 가능하게 하는 수치해석적 모델이 여러 가지 제안된 바 있다. 이러한 모델들은 유체의 흐름 형태에 따라 평행류(co current flow), 향류(counter current flow), 원진혼합(perfect mixing), 일방혼합(one side mixing)등으로 구분된다. 본 연구에서는 실험으로 수행한 향류의 경우에 대한 이론적 모델을 이용하여 분



하였다 식(8) 또는 식(10)의 해는 초기조건  $x = x_0$ ,  $y = y_0$ 에서의 초기값으로부터 시행착오법으로 얻을 수 있다  $x = x_0$  (outlet point)일 때  $q = 1$ 이고  $y = y_0$ 인 초기값으로부터 5th order Runge-Kutta 적분방법[8]을 이용하여 유입기체의 농도인  $x = x_1$  (initial point)일 때까지 반복 계산하여  $q$ 를 구하고, 그때의  $q = 1/(1-\theta)$ 와 투과부의 농도  $y_1$ , 즉,  $y_p$ 를 구한다 주어진 초기조건중에 모듈 끝부분에서의 투과부의 농도  $y_p$ 는 실험적으로 측정 불가능하므로 식(13)(Weller Steiner Case I)을 이용하여,  $x_0$ 에 대응하는 투과부의 농도  $y_0$ 를 계산한다[5]

### 4 결과 및 고찰

#### 4.1 순수한 기체(N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)의 투과도

##### 4.1.1 압력 의존성

순수한 산소와 질소의 투과율은 일정한 온도(30℃)에서, 압력이 증가함에 따라 약간씩 증가하는 경향을 보였으나(Table 3) 이와같이 압력의 증가에 따른 순수 기체의 투과율이 약간씩 증가하는 것은 상용으로 판매되고 있는 폴리이미드 중공사막(polyimide hollow fiber membrane)에서도 볼 수 있다[6, 7] 이러한 압력의 증가에 따른 순수기체의 투과율이 약간씩 증가하는 것은 본 실험에 사용한 폴리실론 중공사막에 미세공(pinhole)과 같은 결함(defects)이 존재하는 것으로 판단된다

##### 4.1.2 이상분리인자 ( $\alpha^*$ )

순수한 산소와 질소간의 이상분리인자는 폴리실론을 수행한 온도, 압력 범위 내에서 약 5.7의 값을 나타내었다(Table 3) 일반적으로 폴리실론 막의 산소와 질소간의 이상분리인자는 5~6정도를 나타내고 있으며, 이것과 매우 유사한 값을 가짐을 알 수 있다

**Table 3.** Permeation rate and ideal separation factor ( $\alpha^*$ ) (permeation rate [ $\times 10^{-4}$  cc(STP)  $cm^{-2} \cdot sec \cdot cmHg$ ])

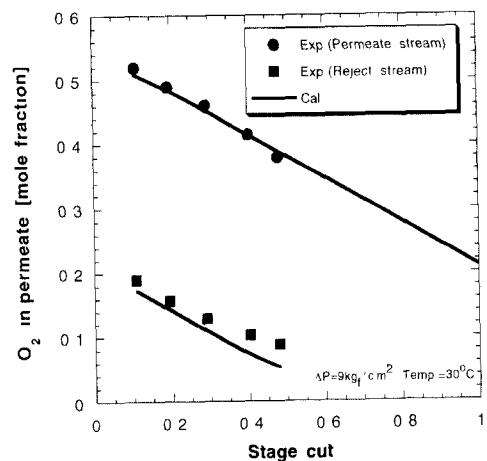
$\Delta p$ [ $kg_f/cm^2$ ]	Permeation rate of O <sub>2</sub>	Permeation rate of N <sub>2</sub>	Ideal separation factor ( $\alpha^*$ )
3	4.4481	0.7720	5.76
6	4.6136	0.8271	5.78
9	4.7055	0.8504	5.53

### 4.2 산소/수소 혼합물에 대한 분리성능

순수한 O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>의 투과도를 이용하여 공정변수인 stage cut ( $\theta$ )의 변화, 압력차이의 변화, 공급기체 조성의 변화에 따른 기체혼합물(O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>)의 분리성능에 미치는 영향을 실험으로 측정하고, 모델링에 의한 투과부와 배제부의 농도 및 유량에 대한 계산치와 비교하였다 또한, 막재료의 특성인 이상분리인자의 변화가 분리성능에 미치는 영향을 분석하였다

#### 4.2.1 Stage cut ( $\theta$ )의 영향

공정변수인 stage cut ( $\theta$ )의 변화에 따라 투과부의 농도와 배제부의 농도가 변화한다 공급부(feed stream)의 산소농도 21 mole%, 압력차이 ( $\Delta P$ ) 6  $kg/cm^2$ , 온도 30℃에서 공정변수인 stage cut ( $\theta$ )을 0.10, 0.19, 0.34, 0.43로 변화시켰을 때, 투과부의 산소농도는 각각 49.7 mole%, 16.6 mole%, 41.0 mole%, 37.4 mole%로 변화하였으며, 배제부의 산소농도는 각각 19.7 mole%, 16.6 mole%, 12.7 mole%, 10.9 mole%로 변화하였다(Fig. 3, Table 4) 따라서, stage cut ( $\theta$ )을 작게 할수록 투과부의 산소농도를 높일 수 있으며, 산소농도 21 mole%인 공기를 약 50 mole%까지 농축할 수 있음을 알 수 있다 동일한 온도(30℃)에서 압력차이 ( $\Delta P$ )를 9  $kg/cm^2$ 로 유지하고, stage cut ( $\theta$ )을 0.10, 0.19, 0.27, 0.37, 0.40으로 변화시켰을 때, 투과부의 산소농도는 각각 52.0 mole%, 49.0 mole%, 46.1 mole%, 41.5 mole%, 37.9 mole%로 변화하였으며 배제부의 산소농도는 각각 18.0 mole%, 15.0 mole%, 12.0 mole%, 8.4 mole%, 7.4 mole%로 변화



**Fig. 3.** The effect of stage cut on the concentration of O<sub>2</sub> in permeate and reject stream

하였다(Fig. 4, Table 5) 따라서, 압력차이 ( $\Delta P$ )를 증가시켰을 때 투과부의 산소농도를 52 mole%로 조금 더 농축시킬 수 있음을 알 수 있다

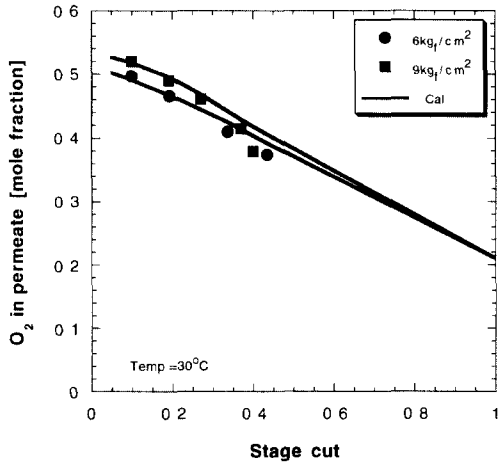


Fig. 4. The effect of stage cut on the concentration of O<sub>2</sub> in permeate stream

Table 4 The effects of stage cut on O<sub>2</sub> concentration in permeate and reject stream ( $\Delta p=6 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ , Temp =30°C)

Stage cut ( $\theta$ )	Feed stream		Permeate stream		Reject stream	
	$x_{O_2}$	Flow rate [SCCM]	$x_{O_2}$ Exp (Cal)	Flow rate [SCCM]	$x_{O_2}$ Exp (Cal)	Flow rate [SCCM]
0.10	0.21	7.923	0.497 (0.491)	0.78	0.197 (0.179)	7.143
0.19	0.21	3.807	0.466 (0.467)	0.73	0.166 (0.149)	3.077
0.34	0.21	2.051	0.410 (0.425)	0.69	0.127 (0.101)	1.361
0.43	0.21	1.472	0.374 (0.392)	0.64	0.109 (0.070)	0.832

Table 5 The effects of stage cut on O<sub>2</sub> concentration in permeate and reject stream ( $\Delta p=9 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ , Temp =30°C)

Stage cut ( $\theta$ )	Feed stream		Permeate stream		Reject stream	
	$x_{O_2}$	Flow rate [SCCM]	$x_{O_2}$ Exp (Cal)	Flow rate [SCCM]	$x_{O_2}$ Exp (Cal)	Flow rate [SCCM]
0.10	0.21	12.00	0.520 (0.518)	1.20	0.180 (0.180)	10.80
0.19	0.21	6.26	0.490 (0.496)	1.19	0.150 (0.150)	5.07
0.27	0.21	4.11	0.461 (0.468)	1.11	0.120 (0.120)	3.00
0.37	0.21	2.76	0.415 (0.429)	1.02	0.084 (0.084)	1.74
0.40	0.21	2.32	0.379 (0.418)	0.93	0.074 (0.074)	1.39

#### 4.2.2 공급기체 혼합물 농도의 영향

압력차이 ( $\Delta P$ ) 6  $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ , 온도 30°C, stage cut ( $\theta$ ) 0.34에서 산소농도가 21.0 mole%, 40.3 mole%, 58.6 mole%, 78.4 mole%인 산소/질소 혼합물을 공급하였을 때, 투과부의 산소농도는 각각 41.0 mole%, 67.3 mole%, 82.0 mole%, 91.3 mole% 이었으며(Fig. 5, Table 6), 배제부의 산소농도는 각각 12.7 mole%, 28.4 mole%, 45.5 mole%, 69.6 mole% 이었다(Table 6)

#### 4.3 모델링에 의한 전산모사

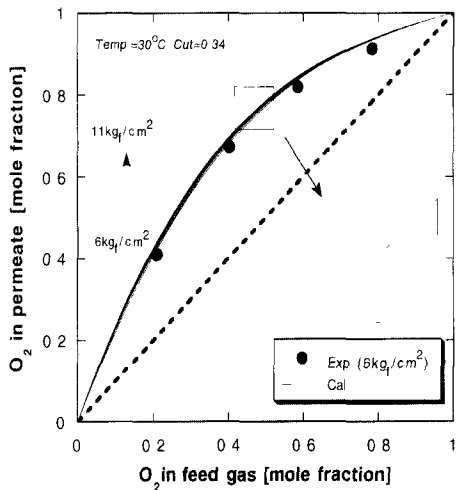
##### 4.3.1 Pecklet 수 (Pecklet Number)

본 모델링에서는 플러그 흐름을 가정하고 있으므로 실험치와의 비교하여 실험이 Pecklet 수가 1보다 훨씬 큰 경우에만 타당하다 따라서, 실험이 Pecklet 수가 1보다 훨씬 큰 경우에 수행되었는지를 점검하여야 한다 Table 7에서 알 수 있듯이 본 실험의 모든 경우에서 Pecklet 수가 1보다 훨씬 크므로 플러그 흐름이라는 가정을 만족시킬 수 있다[4]

**Table 6.** The concentration of O<sub>2</sub> in permeate and reject stream with variation of feed gas composition ( $\Delta p = 6 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ ,  $\theta=0.34$ , Temp = 30°C)

Feed stream		Permeate stream		Reject stream	
$x_{O_2}$	Flow rate [SCCM]	$x_{O_2}$ , Exp (Cal)	Flow rate [SCCM]	$x_{O_2}$	Flow rate [SCCM]
0.210	2.051	0.410 (0.425)	0.690	0.127	1.361
0.403	3.040	0.673 (0.684)	1.040	0.284	2.000
0.586	4.140	0.820 (0.838)	1.450	0.455	2.990
0.784	5.700	0.913 (0.934)	1.950	0.696	3.750

(Remark) Exp experimental data, Cal calculated by modelling (theory)



**Fig 5** The effect of pressure on the concentration of O<sub>2</sub> in permeate stream

**Table 7** Peclet number for the experiments at 30°C (A O<sub>2</sub>, B N<sub>2</sub>)

Pressure [ $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ ]	$D_{AB}$ [ $\text{cm}^2/\text{sec}$ ]	Stage cut	Reject flow rate [SCCM]	Peclet No
6	0.0302	0.0984	7.143	704
		0.4348	0.832	82
9	0.0211	0.1000	10.800	1,523
		0.4000	1.390	196

4.3.2 Stage cut ( $\theta$ )의 영향

공급 기체 혼합물의 산소농도를 21 mole%로 일정하게 공급하고, 공정변수인 stage cut ( $\theta$ )을 변화시킬 때, 투과부와 배제부의 산소농도의 실험치와 진산모사에 의한 계산치를 Table 4, 5에 나타내었다. 실험치와 계산치간의 오차범위가 4% 이내임을 알 수 있다.

또한, stage cut ( $\theta$ )은 0.34로 일정하게 유지하고 공급기체 혼합물의 조성을 변화시켰을 때의 투과부와 배제부의 산소농도의 실험치와 계산치를 Table 6에 나타내었다. 실험치와 모델링에 의한 계산치가 잘 일치하고 있음을 보여주며, 실험치와 계산치간의 오차범위가 1~4% 이내였다.

4.3.3 압력비의 영향

진출한 바의 길이 공정변수인 stage cut ( $\theta$ )의 변화, 공급기체 혼합물의 조성변화, 압력차의 변화에 따른 진산모사 결과가 실험치를 잘 예측하여 주고 있음을 확인하였으므로 (Figs. 3, 4, 5), 이를 근거로 하여 공급부의 압력 대 투과부의 압력비 ( $p_h/p$ )를 6에서 11까지 증가시켰을 경우의 진산모사 결과를 Table 8와 Fig 5에 나타내었다. 압력비를 6에서 11까지 증가시켰을 때, 투과부의 농도는 약 20%의 농도증가 효과밖에 없었다. 따라서, 공정변수 중의 하나인 압력비의 증가에 의해 투과부의 농도를 증가시키려고 하는 것은 효과적이지 못함을 알 수 있다.

4.3.4 이상분리인자 ( $\alpha^*$ )의 영향

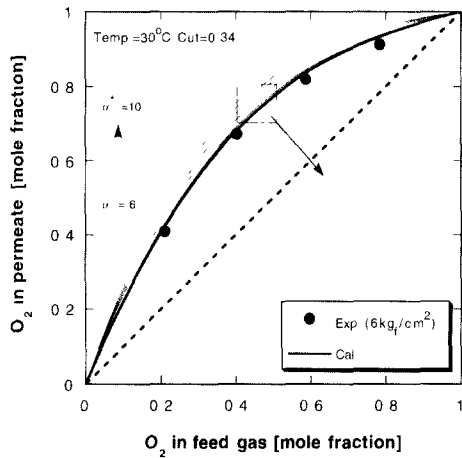
진출한 바의 길이 공정변수인 stage cut ( $\theta$ )의 변화, 공급기체 혼합물의 조성변화, 압력차의 변화에 따른 진산모사 결과가 실험치를 잘 예측하여 주고 있음

**Table 8.** The calculated O<sub>2</sub> concentration in permeate by theory at various pressure ratios ( $p_1 = p_2/p_{10}$ ,  $\theta=0.34$ , Temp = 30°C)

Feed conc [x <sub>0</sub> ]	Press ratio					
	P <sub>1</sub> 1/6	P <sub>1</sub> 1/7	P <sub>1</sub> 1/8	P <sub>1</sub> 1/9	P <sub>1</sub> 1/10	P <sub>1</sub> 1/11
0.210	0.425	0.431	0.436	0.439	0.442	0.445
0.403	0.684	0.689	0.693	0.697	0.699	0.701
0.586	0.838	0.841	0.843	0.845	0.846	0.847
0.784	0.934	0.936	0.937	0.937	0.938	0.938

**Table 9.** The calculated concentration of O<sub>2</sub> in permeate by theory at various ideal separation factors ( $\alpha^*$ ) ( $\theta$  0.34, Temp 30°C,  $\Delta p$  6 kg/cm<sup>2</sup>)

Feed conc [x <sub>0</sub> ]	$\alpha^*$					
	$\alpha^* = 5.58$	$\alpha^* = 6$	$\alpha^* = 7$	$\alpha^* = 8$	$\alpha^* = 9$	$\alpha^* = 10$
0.210	0.425	0.433	0.451	0.464	-	-
0.403	0.684	0.694	0.715	0.732	0.747	0.761
0.586	0.838	0.845	0.861	0.874	0.884	0.893
0.784	0.934	0.938	0.946	0.952	0.956	0.960



**Fig. 6.** The effect of ideal separation factor on the concentration of O<sub>2</sub> in permeate stream

을 확인하였으므로, 이항 근사로 하여 막소재의 분리 특성인 이상분리인자 ( $\alpha^*$ )의 변화에 대한 산란보사실험 결과를 Fig 6과 Table 9에 나타내었다. 이상분리인자 ( $\alpha^*$ )의 증가에 따라 투과부의 농도가 상당히 증가하

므로, 막 소재의 특성인 이상분리인자를 증가시키기 위한 분리막 재료의 개발이 매우 중요함을 알 수 있다. 그러나, 분리막의 이상분리인자가 6에서 11까지 증가함에 따라 투과부의 농도증가율이 점점 둔화되는 것을 알 수 있다. 따라서 분리막 재료의 개발에 의한 이상분리인자의 증가만으로는 투과부의 농도증가에 한계가 있으므로, 공정변수(온도, 압력비, stage cut 등)의 최적화가 필요하다.

### 5 결 론

- (1) 순수한 산소와 질소의 투과도는 압력이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보였다.
- (2) 산소와 질소간의 이상분리인자는 투과실험을 수행한 온도, 압력 범위 내에서 약 5.7의 값을 나타내었다.
- (3) 폴리선택막의 혼합물(O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>)에 대한 분리성능은 공급부(feed stream)의 산소농도 21 mole%, 압력차이 ( $\Delta P$ ) 6 kg/cm<sup>2</sup>, 온도 30°C, stage cut ( $\theta$ ) 0.10에서 투과부의 산소농도는 약 50 mole%였다. 농인한 조

건(온도 30°C)하에서 압력차이 ( $\Delta P$ )가  $9 \text{ kg}_f / \text{cm}^2$ 일 때 투과부의 산소농도는 약 52.0 mole%이었다 따라서, 압력차이 ( $\Delta P$ )를 증가시켰을 때 투과부의 산소농도를 조금 더 증가시킬 수 있음을 알 수 있다

(4) 전산모사 결과와 실험시간의 오차범위가 4% 이내로서, 실험치와 계산치가 잘 일치하였다 공압부의 압력 내 투과부의 압력비 ( $p_h / p$ )를 6에서 11까지 증가시켰을 때, 투과부의 농도는 약 2.0%의 농도증가 효과밖에 없었다 따라서, 공성변수 중의 하나인 압력비의 증가에 의해 투과부의 농도를 증가시키고자 하는 것은 효과적이지 못함을 알 수 있다

(5) 이상분리인자 ( $\alpha$ ) 증가에 따라 투과부의 농도가 상당히 증가하므로, 막 시체의 투성인 이상분리인자를 증가시키기 위한 분리막 재료의 개발이 매우 중요함을 알 수 있다 그러나, 분리막의 이상분리인자가 6에서 11까지 증가함에 따라 투과부의 농도증가율이 점점 둔화되었다 따라서, 분리막 재료의 개발에 의한 이상분리인자의 증가만으로는 투과부의 농도증가에 한계가 있으므로 공성변수의 최적화가 필요하다

감 사

본 논문은 에너지기술개발과제(“연소세어용 산소분리화농축시스템 개발”)의 위탁과제(“중공사막 모듈의 설계기술 개발”)로 수행된 결과의 일부이며 이에 감사드립니다

사 용 기 호

A	area
$\alpha$	separation factor, ratio of permeabilities
$Q_1, Q_2$	permeability (STD) [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm} / \text{sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg}$ ]
h	variable flow rate in permeate side
$p_o$	pressure ratio [ $p / p_h$ ]
$p$	absolute outside pressure (low pressure)
ID	inside diameter
OD	outside diameter
D	diffusion coefficient
S	solubility coefficient

P	permeability
Pe <sub>t</sub>	Pecklet number
U	Velocity
L	module length
$\Delta P$	pressure difference
$p_h$	absolute inside pressure (high pressure)
$q_i$	feed flow rate [ $\text{cm}^3 / \text{sec}$ ]
$q_o$	reject flow rate [ $\text{cm}^3 / \text{sec}$ ]
$q_p$	permeate flow rate [ $\text{cm}^3 / \text{sec}$ ]
$q$	variable flow rate on the high pressure side
$\ell$	thickness of membrane
$x$	incremental high pressure concentration
$x_o$	conc of faster permeating gas rejected from diffusion cell
$y$	incremental low pressure concentration
$y_o$	conc of faster permeating gas at outlet
$\theta$	cut or fraction permeated

참 고 문 헌

- 1 W J Koros, G N Smith and V Stannett, *J Appl Polym Sci*, **26** 159 (1981)
- 2 D R Paul, *J Polym Sci, A2*, **7** 1811 (1969)
- 3 D R Paul and W J Koros, *J Polym Sci, Polym Phys Ed*, **14**, 675 (1976)
- 4 S T Hwang and K Kammermeyer, *Membrane in Separations*, p370, Wiley, New York, NY (1975)
- 5 C T Blaisdell and K Kammermeyer, *Chem Eng Sci*, **28**, 1249 (1973)
- 6 K R Lee and S T Hwang, *J Membrane Sci*, **73**, 37 (1992)
- 7 I J Chung, K R Lee, and S T Hwang, *J Membrane Sci*, **105(3)**, 177 (1995)
- 8 James B Riggs, *An Introduction to Numerical Methods for Chemical Engineers*, 2nd Ed., Texas Tech University Press (1994)