

## 원판틀형 역삼투 모듈을 이용한 분리 특성 해석

정 건 용<sup>†</sup> · 정 옥\* · 원 장 목\* · 배 성 렬\* · 하 백 현\*

한국과학기술연구원 CFC 대체기술센터

\*한양대학교 화학공학과

(1995년 1월 9일 접수, 1995년 4월 27일 채택)

### Analysis of the Separation Using Disc Plate and Frame Type Reverse Osmosis Module

Kun Yong-Chung,<sup>†</sup> Wook Chung\*, Jang-Mook Won\*, Seong-Youl Bae\*, and Baik-Hyon Ha\*

CFC Alternatives Technology Center, Korea Institute of Science and Technology, Cheongryang P. O. Box, 131, Seoul 130-650, Korea

\*Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received January 9, 1995, Accepted April 27, 1995)

**요 약 :** NaCl과 Sucrose 용액을 역삼투용 원판틀형 모듈에 공급하여 투과실험하였으며 Kimura-Sourirajan[8]이 제안한 방법으로 분리성능을 분석하였다. 사용한 분리막의 순수투과계수는 압력에 무관하게  $2.17 \times 10^{-6}(\text{gmol}/\text{cm}^2\text{-sec-bar})$ 로 일정하게 유지되었다. Sucrose 용액의 농도분극화 현상은 NaCl 용액보다 심각하였으며 40bar 이상에서는 압력이 증가함에 따라서 오히려 투과선속이 감소하였다. 용질 배제율은 NaCl 수용액의 경우 압력이 증가함에 따라서 감소하였으나 sucrose 수용액의 경우는 압력에 따라서 배제율도 증가하였다.

**Abstract:** Separation performance was measured for the disc plate and frame type reverse osmosis module using NaCl and sucrose solutions. An analysis of membrane performance was done following the equations proposed by Kimura-Sourirajan[8]. The membrane permeability was  $2.17 \times 10^{-6}(\text{gmol}/\text{cm}^2\text{-sec-bar})$  and independent of operating pressure. The effect of concentration polarization for sucrose solution was higher than that of NaCl. Permeation flux for sucrose solution above 40 bar was decreased as operating pressure was increased. Solute rejection for NaCl solution was decreased, but that of sucrose was increased as operating pressure was increased.

#### 1. 서 론

역삼투(Reverse Osmosis) 기술은 10 내지 100 기압 정도의 압력차를 이용하여 각종 염이나 유기물질을 분리하거나 농축하는데 이용되는 분리공정의 한 방법이다. 역삼투막의 개발목표는 높은 투과선속과 배제율로써 공정의 효율과 경제성을 향상시키는데 있다. 세계적인 oil shock 이후 역삼투 기술이 대표적인

에너지 절약형 담수화 기술로 인식되면서 역삼투 공정이 활발히 보급되기 시작하였다. 역삼투 공정의 주된 적용 범위는 해수 및 염수의 담수화, 반도체 및 전자산업분야와 식품산업 및 의료용 등의 초순수 제조 분야이다. 역삼투 공정의 새로운 응용 분야로서 폐수처리 공정을 들 수 있다. 폐수처리 분야에 사용되는 역삼투 공정은 초순수 제조나 해수 담수화 공정에 비하여 낮은 압력에서 이루어지는 공정으로서 주

로 용해물질들의 농도가 희박하지만 독성이 강하거나 그 가격이 고가이어서 회수 또는 농축이 필요한 경우에 주로 사용된다. 이밖에 역삼투 공정은 도시폐수나 매립지 침출수와 화학공장, 석유화학공장, 전기화학공장, 식품공장 등에서 배출되는 폐수의 처리에 사용되고 있으며 방대한 양의 물을 사용하는 Pulp 및 제지산업에서의 응용도 기대된다. 섬유산업 중 세척, 염색, 나염, 표백 등의 공정에서는 상당량의 폐수가 생성되며 특히 섬유폐수중에는 각종 salt, 염료, 지방산, 계면활성제, oil, grease, 산화제 및 환원제 등이 포함되어 있다. 이러한 폐수를 처리하여 재사용하는 경우, 미량의 염분이 잔존하더라도 제품의 염색에 심각한 영향을 미치므로 역삼투 공정에 의하여 처리된 물을 재순환하며 농축액은 재처리하여 공정에 투입한다. 이밖에도 공장폐수의 closed화, 이른바 무방류 system에도 유기물 제거능력이 탁월한 역삼투 공정이 점차 확대 적용되고 있다.

그러나 막분리 공정에서 불가피하게 동반되는 막 표면에서의 여과물질 축적(농도 분극화)과 이밖의 여과물질이 분리막을 오염시켜 분리성능을 저하시키는(막오염) 현상을 극복하기 위한 기술적인 해결방안이 요구된다. 농도분극화 및 막오염 현상을 극복하는 기술로는 화학적으로 막 표면 성질을 친수성 또는 친유성으로 개선하는 등의 막소재 관련 방법, 원료용액의 전처리 등으로 부유물질의 함량을 감소시키거나 계면활성제 등을 첨가하여 원료용액의 성질을 개조하는 방법 그리고 효율적인 역세척 운전 등의 운전방법 개선 등이 있다. 이밖에도 막 표면에서 유체의 와류를 형성시켜 막 표면에 모여있는 용질을 혼합시키는 방법 등이 있다[1, 2].

본 연구에서는 독일 Rochem사의 역삼투용 판틀형 모듈에 NaCl과 sucrose 용액을 공급하여 용액농도 및 운전압력 등이 역삼투 분리 성능에 미치는 효과를 측정, 평가하였다.

## 2. 역삼투이론

역삼투 현상은 아직까지 확실하게 그 원리가 규명되지 않았지만 한외여과나 정밀여과와는 상당히 다른 분리 mechanism을 따르는 것으로 알려져 있다[3, 4]. 현재까지 알려진 역삼투 이론은 bound water hole/alignment type diffusion model[5], preferential sorption/capillary flow mechanism[6] 그리고 solu-

tion-diffusion model[7] 등이 제시되어 있다. 첫번째 모델은 물 분자중에 수소가 cellulose-acetate 막에 carboxyl기와 결합하여 bound water를 형성하고 막에 가해지는 압력에 의하여 bound water가 막의 미세공을 투과한다는 것이다. Sourirajan이 제시한 선택적인 흡착 및 미세공 흐름 메카니즘의 경우, 막의 화학적 성질이 수용액 중에 용질에 대하여 negative 흡착을 나타내면 막 근방에서 선택적인 물의 층이 생성되어 용질의 농도가 막 근방에서 급격히 감소하게 된다. 따라서 계면에서의 순수층이 막의 미세공을 통하여 가해진 압력을 추진력으로 투과하게 된다. 마지막으로 용해-확산 메카니즘은 미세공의 막의 경우와 같이, 용매 및 용질이 먼저 막으로 용해하고 그다음 chemical potential 차이에 의하여 막의 반대편으로 확산하여 가는 원리이다.

역삼투 공정의 효율에 영향을 미치는 인자들에는 원료용액 중 용해물질의 종류, 용액의 농도 및 pH, 조업온도, 조업압력, 원료용액의 농도 및 공급속도 그리고 역삼투막의 분리 특성 등이 있다. 본 연구에서는 Kimura-Sourirajan[8]에 의하여 제안된 식들을 사용하여, 운전변수에 따른 분리 특성을 추정하였다. 용질과 물이 막을 투과할 때의 농도 분포는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 물은 압력차를 구동력으로 하여 투과하며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$N_B = A[P - ((X_{A2}) - \pi(X_{A1}))] \quad (1)$$

또한 순수 투과계수인 A는 순수한 물의 투과속도를 사용하여 다음과 같이 독립적으로 구할 수 있다.

$$A = \frac{N_A}{M_B \times S \times 3600 \times P} \quad (2)$$

용질은 농도차에 의해 막을 투과하는 것으로 알려져 있으며, 간단한 diffusion equation에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_A = \frac{D_{AM}}{\delta} (C_{M2}X_{AM2} - C_{M1}X_{AM1}) \quad (3)$$

용액의 농도  $X_A$ 와 막내의 농도  $X_{AM}$  사이에 선형적인 관계가 존재한다고 가정하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$CX_A = KC_M X_{AM} \quad (4)$$

계속해서 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 식 (5)와 같

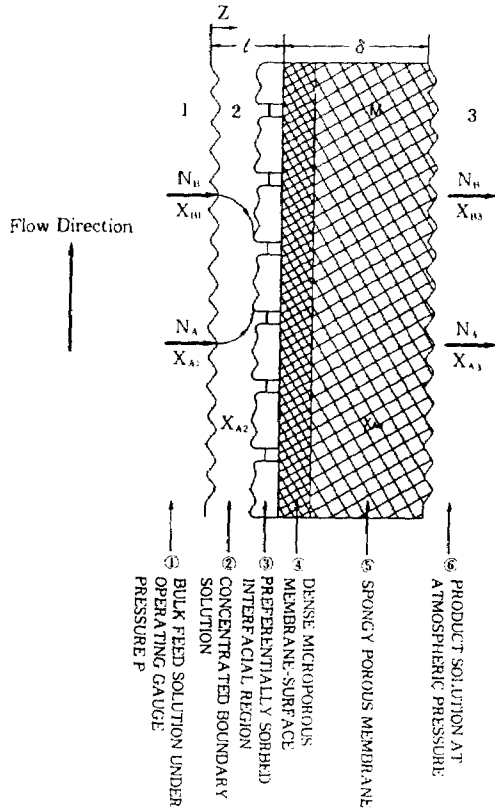


Fig. 1. Schematic flow diagram and concentration polarization near membrane.

이  $N_A$ 를 나타낼 수 있다.

$$N_A = \frac{D_{AM}}{K\delta} (C_2 X_{A2} - C_3 X_{A3}) \quad (5)$$

또한  $X_{A3}$ 은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며 식 (5)를 식 (6)에 대입하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\frac{N_A}{N_A - N_B} = X_{A3} \quad (6)$$

$$N_B = \frac{D_{AM}}{K\delta} \frac{1 - X_{A3}}{X_{A3}} (C_2 X_{A2} - C_3 X_{A3}) \quad (7)$$

여기서  $D_{AM}/K\delta$ 는 solute transport parameter라 부르며 막을 통하는 용질의 물질전달 계수이다. 이상에서는 막내에서의 용질 이동에 관하여 살펴 보았다.

다음은 막 표면에 형성되는 농도경계층 내에서 용질의 이동현상을 규명하고자 한다. 원료용액에 압력을 가하면 식 (1)에서와 같이 투과속도가 압력에 따라서 선형적으로 증가한다. 그러나 임계압력 이상에서는 압

력을 증가하여도 더이상 투과속도가 증가하지 않는 이른바 물질전달 영역에 도달하게 된다. 즉 원료용액과 함께 막 표면으로 이동한 용질은 막 표면에서 분리되어 다시 원료용액 내로 확산되지 못하고 막 표면에 축적되어 농도분극화 현상을 유발한다. 이 현상은 조업 압력이 증가함에 따라서 더욱 심화되어 임계압력에 도달하면 용질이 막 표면에 도달하는 속도와 막 표면으로부터 용액으로 확산되는 속도가 평형을 이루어 정상 상태가 된다(film theory). 이 경우 Fick의 제1법칙을 적용하면 식 (8)과 같이 주어진다[9].

$$N_A = X_A(N_A + N_B) - D_{AB}C_1 \frac{dX_A}{dz} \quad (8)$$

식 (8)을 농도 경계층인,  $z=0(X_A=X_{A1})$ 에서  $z=l(X_A=X_{A3})$ 까지 적분하면 식 (9)와 같다.

$$\ln\left(\frac{X_{A2} - X_{A3}}{X_{A1} - X_{A3}}\right) = \frac{l}{C_1 k} (N_A + N_B) \quad (9)$$

여기서  $k = D_{AB}/l$ 로 정의되며, 용액측에서의 물질전달 계수라 부른다. 식 (6)과 (9)를 결합하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_B = C_1 k (1 - X_{A3}) \ln\left(\frac{X_{A2} - X_{A3}}{X_{A1} - X_{A3}}\right) \quad (10)$$

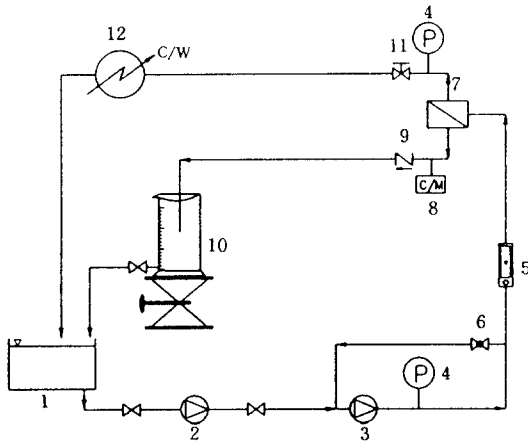
그리고 막에 있어서 염배제율은 다음과 같이 공급용액의 농도와 투과용액의 농도의 비로 정의한다.

$$R = 1 - \frac{C_3}{C_1} \quad (11)$$

실험을 통하여 순수 투과계수, 투과유속, 염배제율을 측정하면, 식 (2), (5), (7), (10) 등을 이용하여  $A, D_{AM}/K\delta, k$ 를 구할 수 있다. 운전압력, 원료용액의 농도, 용액의 유속 그리고 용질의 특성 등에 따른  $A, D_{AM}/K\delta, k$ 의 상관관계는 일반적인 조업 조건하에서 막과 모듈의 분리성능을 평가할 수 있는 유용한 수식이다.

### 3. 실험

역삼투 실험장치는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 공급원액인 NaCl 또는 sucrose 수용액은 원액 저장조로부터 가압되어 최대 65bar, 6 l/min로 역삼투 모듈에 공급될 수 있다. 모듈의 운전압력은 고압펌프 (3)과 모듈 (7) 사이에 위치한 by-pass 밸브 (6)와 모



- |                       |                               |
|-----------------------|-------------------------------|
| 1. Reservoir          | 7. R/O Module                 |
| 2. Circulation Pump   | 8. Conductivity Meter         |
| 3. High Pressure Pump | 9. Check Valve                |
| 4. Pressure Gauge     | 10. Mass Cylinder             |
| 5. Flowmeter          | 11. Pressure Regulating Valve |
| 6. By Pass Valve      | 12. Coil Type Heat Exchanger  |

Fig. 2. Schematic flow diagram of disc plate and frame type R/O system.

들 뒤에 압력조절 밸브 (11)를 사용하여 유지할 수 있다. 막모듈을 통과한 투과액과 잔류액은 전량 원액 저장조로 회수되었으며 mass cylinder (10)를 사용하여 주기적으로 투과유속을 측정하였다. 사용된 원액 저장조의 부피는 60liter이며 투과유속을 측정하기 위한 체류부피는 1liter 이하이므로 공급수의 농도를 2% 범위 내에서 일정하게 유지시킬 수 있다. 고압펌프로 인한 용액의 온도 상승을 막기 위하여, 온도조절기가 부착되어 있는 항온조의 물물 Coil식 열교환기 (12)에 통과시켜 용액을  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지시켰다.

### 3. 1. 분리막 모듈 System

독일의 Rochem Separation System사의 원판틀 (Disc Plate & Frame)형 모듈을 사용하여 분리성능을 측정하였으며 원판틀형 모듈의 재원은 Table 1과 같다. 각 원판틀은 고압에 견딜 수 있는 ABS 재질로 제작되었다. 또한 원판틀은 공급용액의 유로 형성과 난류가 활발히 형성될 수 있도록 약 0.8mm 높이의 요철이 5내지 8mm pitch의 삼각형태로 사출되었으며 막은 원판틀 아래, 위 양면에 놓여진다.

Table 1. Design and Operating Details of the Disc Plate and Frame type R/O System

| ROCHEM RO-SYSTEM 100 DT       |   |
|-------------------------------|---|
| Max. operating pressure       | 65bar                                     |
| Max. flow rate                | 6 l/min                                   |
| Max. feed temperature         | 35°C                                      |
| Membrane                      | 252-TFC                                   |
| Membrane dimension            | 191mm OD×45mm ID<br>doughnut type octagon |
| Effective membrane area/sheet | 434cm <sup>2</sup>                        |
| Number of module plates       | 31ea                                      |
| Module plate material         | ABS Plastic                               |

### 3. 2. 역삼투용 분리막

사용된 분리막으로는 고품분 제거율이 높으며 수명이 긴 것으로 알려진 FilmTec사의 polyamide 복합막이다. 분리막은 직경이 191mm이며 막과 막 사이에는 투과액이 흐를 수 있도록 polyester spacer가 삽입되어 있고 가장자리는 8각 형태로 초음파 용접되어 있다. 따라서 양면을 분리막으로 사용할 수 있으며 분리막의 유효면적이 434cm<sup>2</sup>인 분리막 31개가 모듈내에 삽입되어 있으므로 총 분리막 유효면적은 13,454 cm<sup>2</sup>이다.

### 3. 3. 원료용액

원료용액으로 사용한 시료는 NaCl(東洋化學工業(株)의 시약용)과 sucrose(第一製糖(株))이다. NaCl 수용액과 sucrose 수용액을 만들기 위한 물은 수돗물을 이상의 역삼투 system을 통과시켜 제조한 초순수로써 conductivity가 2.5μsiemens/cm 이하이었다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4. 1. 순수 실험결과

역삼투 system에 사용된 역삼투막의 순수 투과계수를 구하기 위하여 역삼투 system으로 정제된 초순수를 사용하여 투과실험을 행하였다. 막모듈 전후에 압력강하는 약 3bar 정도이었으며 분리막에 가해진 압력은 모듈입구와 출구의 평균압력으로 택하였고 압력에 대한 순수 투과유속을 나타내면 Fig. 3과 같다. 투과유속이 운전압력에 대하여 선형적으로 증가하였으며 기울기인 순수 투과계수 (A)는  $2.17 \times 10^{-6}$  gmole/(cm<sup>2</sup>-sec-bar)이었다. Fig. 4는 운전압력에 따

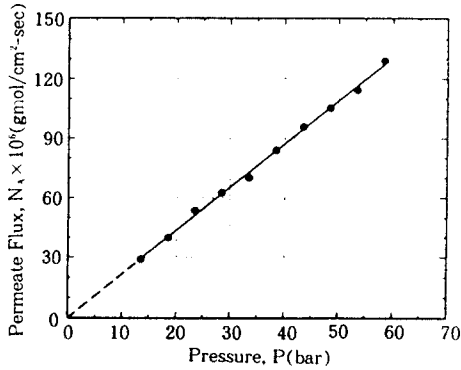


Fig. 3. Effect of operating pressure on pure water permeation flux ( $N_A$ ) at 6 l/min and 25°C.

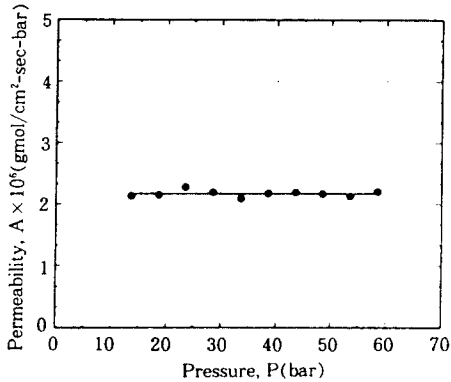


Fig. 4. Effect of operating pressure on pure water permeability constant (A) at 6 l/min and 25°C.

른 순수 투과계수를 나타낸 것으로 압력에 무관하게 거의 일정하게 유지되었다.

4. 2. 농도분극화 실험

농도분극화 현상을 측정하기 위하여 NaCl과 sucrose 수용액을 사용하였다. NaCl 수용액의 경우 1, 2 그리고 3wt%의 수용액을 사용하였으며 각 농도에서 18.5, 28.5, 38.5, 48.5 그리고  $58.5 \pm 1$ bar의 압력에서 운전하였다. 또한 모든 실험에서 용액의 공급속도는 약 6 l/min로 일정하게 유지하였다. 매 실험시마다 투과유량을 일정시간 간격으로 측정하였으며 약 10분 이내에 투과량의 변화가 3% 이내인 정상상태에 도달하였다. 또한 투과액 중에 포함되어 있는 NaCl 농도는 conductivity meter(Kyoto Electronics,

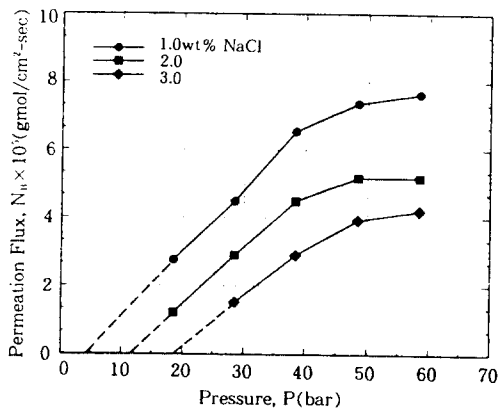
CM-117)를 이용하여 측정하였다.

Sucrose 수용액의 경우 또한 NaCl 용액과 같이 1, 2 그리고 3wt%의 농도에서 18.5, 28.5, 38.5, 48.5 그리고 58.5 lbar로 압력을 변화시켰으며, 그 투과선속과 투과액중의 sucrose 농도를 측정하였다. 투과액중 sucrose 농도는 refractometer(Atago Co., Abbe type 3T)를 이용하여 sucrose 표준용액으로부터 얻은 굴절도와 농도의 보정곡선으로 구하였다.

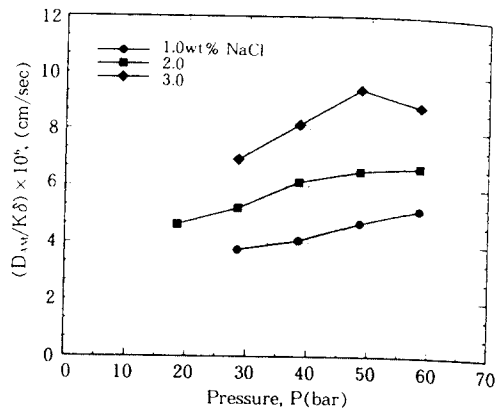
매 실험마다 용액을 공급하기 이전에 모듈 내에 축적된 용질을 세척하기 위하여 순수를 모듈에 공급하여 세척하였으며 매 700시간 조업 후에는 비가역적으로 막 표면에 남아 있는 이물질 제거하기 위하여 화학적 세척방법으로 모듈을 세척하였다. 이상의 방법으로 실험한 결과 순수투과유량을 97% 이상 일정하게 유지할 수 있었다.

NaCl 농도가 투과선속에 미치는 영향은 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 NaCl 함량이 증가함에 따라서 투과선속이 급격히 감소하였다. 이는 원료용액 중에 NaCl 농도가 증가함에 따라서 막 표면에 농도분극화 현상이 증가하게 되고 삼투압 역시 농도에 비례하여 증가되기 때문이다. 또한 투과선속을 압력인 x축까지 외삽하면 원료용액에 작용하는 삼투압 효과를 추정할 수 있다. 1, 2 그리고 3wt% NaCl 용액의 삼투압 효과는 각각 5, 12 그리고 20bar 정도이고 이 수치를 기존의 NaCl 삼투압 데이터[10]와 비교하면 2 내지 4bar 정도 작으나 기존자료와 비교적 잘 일치하였다. Fig. 5(b)는 sucrose 농도에 따른 투과선속의 영향을 나타내고 있다. Sucrose 함량을 증가시키면 NaCl 경우와 마찬가지로 막 투과 선속이 급격히 저하되나 NaCl 경우보다는 농도 변화에 따른 투과선속의 영향이 크지 않았다. 또한 Fig. 5(b)에서 추정 한 1, 2 그리고 3wt% sucrose 용액의 삼투압은 3bar 이내이었으며 이는 기존 실험 데이터[10]와 잘 일치하는 결과이다. 그러나 NaCl의 경우와는 달리 40bar 이상에서는 압력을 증가하여도 오히려 투과유속이 감소하는 특이한 현상이 발견되었으며 Fig. 8에서 보다 자세히 설명하기로 한다.

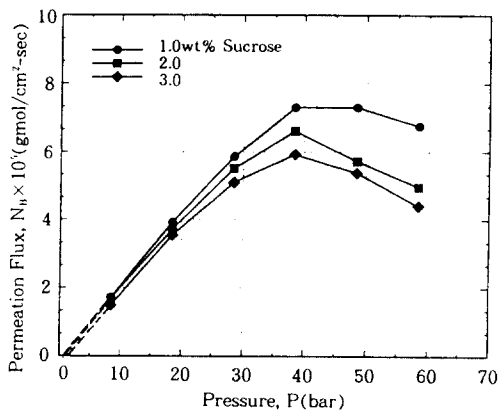
Fig. 6(a, b)는 NaCl 및 sucrose 수용액의 농도 및 압력변화에 따른 solute transport parameter( $D_{AM}/K\delta$ )의 변화를 나타낸 것이다. NaCl의 경우, 압력과 농도가 증가함에 따라서  $D_{AM}/K\delta$ 는 증가하였으나 sucrose의 경우 약 40bar까지 각 농도에서 압력에 대하여  $D_{AM}/K\delta$ 는 거의 일정하였다. 또한 sucrose 농



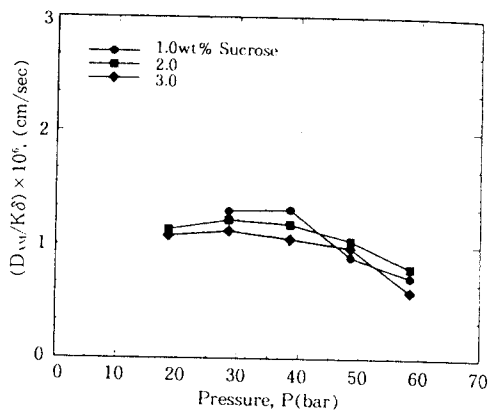
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5. Effect of operating pressure on permeation flux ( $N_B$ ) for (a) NaCl solution and (b) Sucrose solution at 6 l/min and 25°C.

Fig. 6. Effect of operating pressure on solute transport parameter ( $D_{AV}/K\delta$ ) for (a) NaCl solution and (b) Sucrose solution.

도가 증가함에 따라서  $D_{AM}/K\delta$ 는 감소하였으며 NaCl의 경우보다 농도의 영향이 작았다. 그러나 sucrose의 경우,  $N_B$ 는 Fig. 5(b)에서와 같이 40bar 이상에서 감소하며 더욱이 농도분극화 현상으로  $X_{A2}$ 는 증가하므로 식 (7)에 의하여  $D_{AM}/K\delta$ 는 압력이 증가함에 따라서 감소하였다.

Fig. 7은 계산된 분리막 표면에서의 물분율( $X_{A2}$ )를 운전압력에 대하여 나타낸 것으로 물질전달계수가 작은 sucrose의 경우가 농도분극화 현상이 심하여 보다 큰  $X_{A2}$ 값을 보였다. 또한 이상에서 구한  $X_{A2}$ 에 해당하는 삼투압( $\pi_{A2}$ )을 구한 후 막 투과를 위한 추진력인 운전압력과 삼투압의 차이를 압력의 함수로 나타

내면 Fig. 8과 같다. NaCl의 경우 운전압력이 증가함에 따라  $[P - (\pi_{A2} - \pi_{A3})]$  값도 증가하였으나 농도가 증가함에 따라서는  $[P - (\pi_{A2} - \pi_{A3})]$  값이 크게 감소하였다. 이와 같은 경향은 운전압력에 따른 투과선속을 나타내는 Fig. 5(a)과도 일치한다. 그러나 sucrose의 경우 40bar까지는  $[P - (\pi_{A2} - \pi_{A3})]$  값이 증가하였으나 그 이상에서는 감소함을 알 수 있고 이와 같은 경향은 Fig. 5(b)와도 일치한다. 즉 40bar 이상에서는 막투과를 위하여 작용하는 실질적인 추진력이 감소하여 운전압력은 증가하였으나 투과선속은 감소한 것으로 추정된다.

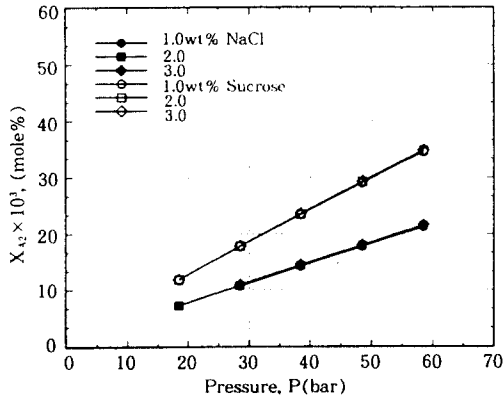


Fig. 7. Effect of operating pressure on solute concentration at membrane surface.

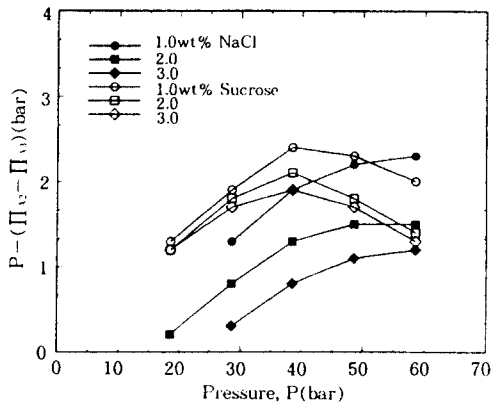


Fig. 8. Effect of operating pressure on net transmembrane pressure difference  $[P - (\pi_{s2} - \pi_{s3})]$ .

### 4. 3. 배제율

운전압력과 원료용액의 농도 변화에 따른 용질의 배제율을 Fig. 9에 나타내었다. 배제율은 압력에 대하여 약 1% 이내에서 일정하게 유지되었으며 용액의 농도에 따라서는 약 2% 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 NaCl의 경우는 농도가 증가할수록 배제율이 감소하였으나 sucrose의 경우는 반대로 농도가 증가할수록 배제율도 증가하였다. 분자의 크기가 작은 NaCl의 경우 막 표면의 농도가 증가할수록 염이 막을 보다 쉽게 통과할 수 있다. 그러나 NaCl에 비하여 분자 크기가 크고 또한 물질전달계수가 작은 sucrose는 막 표면에서의 농도가 NaCl 경우보다 높아(Fig. 7 참조) 막 표면의 형성된 용질의 층이 배제

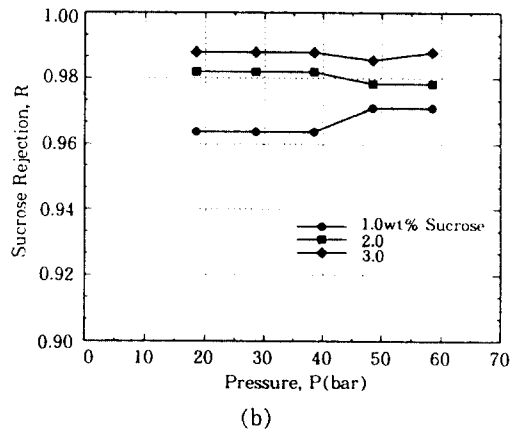
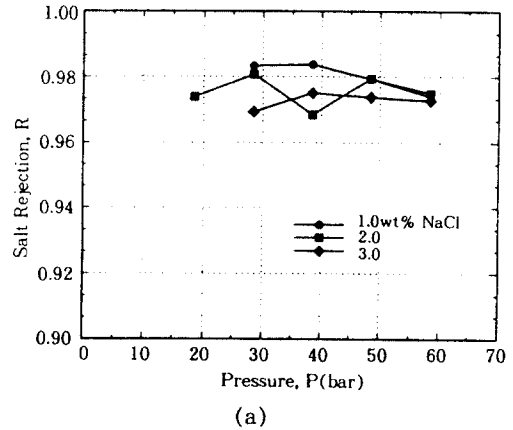


Fig. 9. Effect of operating pressure on solute rejection for (a) NaCl solution and (b) Sucrose solution.

율 증가에 영향을 미칠 수 있을 것으로 추정된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 NaCl과 sucrose 용액을 원판틀형 모듈에 공급하여 분리성능을 실험 분석하였다. 사용한 분리막의 순수투과계수는 압력에 무관하게  $2.17 \times 10^{-6} (\text{gmol}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{bar})$ 로 유지되었다. NaCl 수용액을 원료용액으로 사용할 경우, 1, 2, 3wt% 농도에 따라서 약 6, 12, 18bar에서부터 투과선속이 나타나기 시작하였다. 투과선속을 외삽하여 추정한 이상의 압력은 원료용액의 삼투압에 해당되며 기존의 실험 데이터와 비교하여 2 내지 4bar 정도 낮은 압력이다.

또한 1, 2, 3wt% Sucrose 용액에 경우 삼투압이 3bar 이하로 작게 나타났으며 이는 기존의 실험 데이터와도 잘 일치하였다.  $D_{AM}/K\delta$ 는 NaCl 수용액의 경우 압력이 증가함에 따라서 증가하였으나 sucrose 수용액의 경우는 40bar 이하에서 일정하게 유지되었으며 그 이상에서는 감소하였다.

Sucrose의 diffusivity는 약  $0.5 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{sec}$  근방으로 NaCl Diffusivity인  $1.5 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{sec}$ 에 비하여 약 3배 작으므로 농도분극화 현상이 심각하여 분리막 표면에서의 농도가 NaCl의 경우보다 높게 나타났다. 또한 농도에 대한 투과선속의 의존성은 농도에 따른 삼투압 효과가 큰 NaCl 수용액 경우가 sucrose의 경우보다 훨씬 크게 나타났다. 특히 sucrose의 경우는 40bar 이상의 운전압력에서 압력이 증가함에 따라서 오히려 투과선속이 감소하는 현상이 나타났으며 농도가 증가할수록 더욱 심각하였다. 이는 분리막 양단에 작용하는 실질적인 압력 즉  $[P - (\pi_{A2} - \pi_{A3})]$ 를 운전압력에 함수로 plot하면 sucrose의 경우 40bar 이상에서 감소함을 알 수 있었다. 따라서 sucrose를 분리할 경우 40bar 이상에서의 운전은 경제적으로 비효율적이며 경제적인 운전압력은 sucrose 농도에 의존할 것이다.

용질 배제율은 NaCl 수용액의 경우 압력이 증가함에 따라서 감소하였으나 sucrose 수용액의 경우는 압력에 따라서 배제율도 증가하였다.

### 기호 설명

|                  |  |
|------------------|--|
| A                | : pure water permeability constant<br>[gmole/cm <sup>2</sup> -sec-bar]                   |
| C                | : molar density[gmole/cm <sup>3</sup> ]  |
| $C_{M2}, C_{M3}$ | : molar density of solution in equilibrium with $C_2$ and $C_3$ [gmole/cm <sup>3</sup> ] |
| $D_{AM}$         | : diffusivity of solute in membrane phase<br>[cm <sup>2</sup> /sec]                      |
| K                | : proportionality constant   |
| k                | : mass transfer coefficient[cm/sec]  |
| l                | : boundary layer thickness[cm]   |
| M                | : molecular weight   |
| N                | : flux through membrane[gmole/cm <sup>2</sup> -sec]                                      |
| P                | : operating pressure[bar]  |
| R                | : solute rejection   |
| S                | : effective membrane area[cm <sup>2</sup> ]  |

|                    |   |
|--------------------|---|
| X                  | : mole fraction   |
| $X_{AM2}, X_{AM3}$ | : $X_{AM}$ in equilibrium with $X_{A2}$ and $X_{A3}$          |
| z                  | : distance in boundary layer vertical to membrane surface[cm] |

### 그리스 문자

|          |                                       |
|----------|---------------------------------------|
| $\delta$ | : effective thickness of membrane[cm] |
| $\pi$    | : osmotic pressure[bar]               |

### 첨 자

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| A | : solute                         |
| B | : solvent                        |
| M | : membrane phase                 |
| W | : water                          |
| 1 | : feed solution                  |
| 2 | : concentrated boundary solution |
| 3 | : permeate solution              |

### 참고 문헌

1. H. B. Winzeler and G. Belfort, *J. of Membrane Sci.*, **80**, 35(1993).
2. J. A. Howell, V. Sanchez, and R. W. Field, "Membranes in Bioprocessing", Blackie Academic & Professional, London, UK(1993).
3. R. G. Gutman, "Membrane Filtration", Adam Hilger, IOP Publishing Ltd., Bristol, UK(1987).
4. Y. Osada and T. Nakagawa, "Membrane Science and Technology", Marcel Dekker, Inc., NY, NY(1992).
5. C. E. Reid and E. J. Breton, Jr., *J. Appl. Polym. Sci.*, **1**, 133(1959).
6. S. Sourirajan, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **2**, 51 (1963).
7. H. K. Lonsdale, U. Marten, and R. L. Riley, *J. Appl. Polym. Sci.*, **9**, 1341(1965).
8. S. Kimura and S. Sourirajan, *AIChE J.* **13**, 497 (1967).
9. B. R. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, Inc., NY, NY(1960).
10. S. Sourirajan, "Reverse Osmosis", Academic Press Inc., NY, NY(1970).