

## 고분자 용액의 한외여과에서 농도분극층 저항에 관한 연구

염경호

충북대학교 공과대학 공업화학과, 충북 청주시 개신동 산48

### A Study on the Concentration Polarization Layer Resistance in Ultrafiltration of Macromolecular Solutions

Kyung-Ho Youm

Department of Industrial Chemical Engineering, College of Engineering,  
Chungbuk National University, Cheongju 360-763, Chungbuk, Korea

#### 요 약

십자류 흐름 평판형 cell에서 비대칭 cellulose acetate 막으로 PEG #6000 및 dextran 70T 용액의 한외여과를 압력차와 도입용액 농도 변화에 따라 실험하여 막투과량 및 용질 배제도를 측정하고, 막투과량에 미치는 농도분극층 저항을 고찰하였다.

이 결과 농도분극층 저항  $R_{b1}$ 을 농도분극층내의 고분자 용액의 평균 농도  $C_{b1}$ 과 상관시켜 다음의 무차원 관계식으로 나타낼 수 있었다.

$$\frac{R_{b1}}{R_m} = \alpha \left( \frac{C_{b1}}{\rho_{b1}} \right)^\beta$$

#### Abstract

The experimental studies were carried out on ultrafiltration of PEG #6000 and dextran 70T macromolecules, using an asymmetric cellulose acetate membrane in a cross flow plane type cell. Effects of pressure difference, feed concentration were studied on permeate flux and observed rejection for both the macromolecules, and the concentration polarization layer resistance  $R_{b1}$  on permeate flux was analysed.

The concentration polarization layer resistance  $R_{b1}$  was correlated with the average macromolecule concentration  $C_{b1}$  in polarization layer. The resulting dimensionless correlation was expressed as :

$$\frac{R_{b1}}{R_m} = \alpha \left( \frac{C_{b1}}{\rho_{b1}} \right)^\beta$$

## 1. 서 론

막을 이용한 분리공정의 하나인 한외여과법은 최근에 들어 에너지 다소비형인 증류, 증발, 추출 등 기존 분리공정의 대체기술로 인식되면서 다양한 분야에의 이용이 시도되고 있다. 특히 한외여과법은 상온 및 무균상태 조작성이 가능하고 열조작이 불필요하여 분리물질의 구조 및 특성 등의 파괴나 손상없이 물질을 분리·정제할 수 있는 장점이 있어 식품의 농축, 균체 및 효소의 정제, 혈장단백질 분리, 인공신장기, 막 생물반응기, 초순수 제조 등 주로 식품공업, 생물공학 및 의용공학 분야에의 응용성이 높은 분리공정으로 인식되고 있다.<sup>1, 2, 3</sup> 한외여과법을 실제 분리공정에 실용화하는데 있어서 최대의 문제점은 한외여과의 주 분리대상이 되는 고분자 용액(macromolecular solution)의 확산계수가 낮아 농도분극(concentration polarization)이 심하게 일어난다는 점이다. 한외여과에 있어서 농도분극의 정도는 분리대상 용액의 특성(용질 분자량 및 형상, 용액의 물성), 막의 특성(막재질, 세공크기 등), 조작조건(압력차, 순환 유속, 도입용액 농도) 및 한외여과 막모듈의 형태에 따라 달라지게 되며, 농도분극 현상은 한외여과 공정에 있어서 다음과 같은 문제점을 유발시키게 된다.<sup>4</sup>

- 1) 막 표면에서의 용액 농도가 증가함에 따라 화학 포텐셜이 증가되어 추진력인 유효 압력차를 감소시킨다.
  - 2) 용액의 막표면 농도가 극단적으로 높아지면 용질의 겔이나 침적이 형성되어 수력학적 저항을 증가시킨다.
  - 3) 막표면에 고농도의 용액층이 형성되어 막의 용질배제 성능을 변화시킬 수 있다.
  - 4) 막표면에 형성된 고농도의 용액이 막과 작용하여 막재질의 조성을 변화시킬 수 있다.
- 이와같은 농도분극의 문제점이 발생하게 되면 실

제 유기물의 한외여과 공정에 있어서 막투과량은 극단적으로 순수 투과량의 약 2-10% 정도에 지나지 않게 될 수도 있다. 따라서 한외여과 공정의 설계시 정확한 소요 막면적 및 용질 분리성능을 결정하기 위해서는 농도분극에 대한 정량적 해석이 필수적으로 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 십자류 흐름(cross flow)의 평판형 한외여과 cell에서 cellulose acetate 한외여과 막을 사용하여 수용성 고분자인 polyethylene glycol(PEG) 및 dextran의 분리 실험을 추진력인 압력차와 도입용액 농도 변화에 따라 수행하여 막투과량 및 용질 배제도를 측정하고, 막투과량에 미치는 농도분극층의 저항을 정량적으로 해석하였다.

## 2. 이 론

한외여과 막을 통해 용매가 선택적으로 투과하게 되면 막과 용액간의 계면(막표면)에 용질이 쌓이게 되어 막표면에 농도경계층이 형성되는 이른바 농도분극 현상이 생기게 된다. 막표면에 농도경계층 및 속도경계층이 완전히 형성된 완전발달 흐름(fully developed flow)을 가정하여 도입용액의 흐름방향으로의 물질전달을 무시할 경우 농도 분극층내에서의 용질이동은 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 정상상태에서 막을 투과한 용질의 이동량은 농도분극층을 통한 도입용액 방향으로의 용질의 확산 이동량과 같게 되어 다음의 물질수지 식이 성립된다.

$$N_s = C_p J_v = C J_v - D_s (dC/dx) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{경계조건 : } C &= C_b \text{ at } x=0 \\ C &= C_m \text{ at } x=\delta \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $J_v$ 는 막투과량이며,  $C_b$ 와  $C_m$ 은 도입용액 및 막표면에서의 용액의 농도이다.

식(1)을 식(2)의 경계조건하에서 적분하면 막 투과량  $J_v$ 는 다음과 같이 된다.<sup>5, 6, 7</sup>

$$J_v = k \ln\left(\frac{C_m - C_p}{C_b - C_p}\right) \quad (3)$$

단,  $k = D_s / \delta$

이때  $k$ 는 농도분극층에서의 물질전달 계수이며,  $D_s$ 는 용질의 확산계수,  $\delta$ 는 농도분극층의 두께이다.

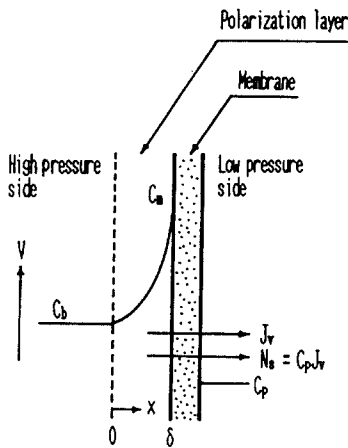


Fig. 1. Concentration polarization layer in ultrafiltration system.

또한, 막투과량에 대한 경계층저항 모델(boundary layer resistance model)<sup>8</sup>에 의하면 막투과량  $J_v$ 는 다음의 두 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$J_v = \frac{\Delta P}{R_m + R_{b1}} \quad (4)$$

$$J_v = \frac{\Pi_m - \Pi_b}{R_{b1}} \quad \text{또는,} \quad (5)$$

여기서,  $\Pi_m$ 과  $\Pi_b$ 는 각각 막표면 농도 및 도입용액 농도에서 계산된 용액의 삼투압이며,  $R_m$ 은 막

자체의 저항,  $R_{b1}$ 은 막투과량에 대한 농도분극층의 저항으로서 다음식으로 정의된다.

$$R_{b1} = \int_0^\delta P_s(x)^{-1} dx \quad (6)$$

### 3. 실험

#### 3-1. 실험재료

한외여과 막은 미국 Osmonics사에서 제조된 평판형 cellulose acetate 재질의 비대칭 막(SEPA-CA-O, molecular weight cut-off=1,000)을 사용하였으며, 고분자 용질로는 polyethylene glycol(PEG #6000, Union Carbide Co., USA,  $M_w=70,000$ )과 dextran(70T, Fluka AG., Switzerland,  $M_w=70,000$ )의 두종류를 사용하였다.

PEG #6000 및 dextran 70T 용액의 농도에 따른 밀도는 Pycnometer로 측정하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다. PEG #6000 및 dextran 70T 용액의 삼투압은 Vilker<sup>9</sup>이 제시한 방법에 따라 용액농도  $300\text{kg}/\text{m}^3$  범위까지 고압 막형 삼투압 측정기(high pressure membrane osmometer)로서 측정하였다. 이때 삼투압 측정기에 사용된 막은 미국 Osmonics사의 SEPA-CA-50막(molecular weight cut-off=600)으로서 이 막을  $90^\circ\text{C}$ 에서 20분간 열처리시켜 PEG 및 dextran의 투과가 없음을 확인한 후 사용하였으며, PEG #6000 및 dextran 70T 용액의 농도에 따른 삼투압을 아래의 virial 식으로 나타내었다.<sup>10</sup>

$$\Pi_{\text{PEG}} = 408C + 6C^2 + 0.0514C^3 \quad (7)$$

$$\Pi_{\text{dextran}} = 50C + 0.74C^2 + 0.0079C^3 \quad (8)$$

Table 1. Density of PEG #6000 and dextran 70T solutions as a function of concentration at  $35^\circ\text{C}$

C(kg/m <sup>3</sup> )	ρ(kg/m <sup>3</sup> )	
	PEG #6000	dextran 70T
40	1000.71	1006.64
80	1006.82	1020.13
120	1014.36	1032.77
160	1020.04	1044.94
200	1026.21	1057.88
240	1033.08	1070.89

3-2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 한외여과 cell은 박층 유로를 갖는 십자류 흐름의 평판형으로서 유로의 높이가 0.34cm, 유효 막면적이 32.67cm<sup>2</sup>(길이 14.85cm×너비 2.2cm)되게 하였으며, 용액 도입부 및 배출부에서의 전이흐름(transient flow)의 영향이 없도록 설계하여 아크릴로 제작하였다. 실험장치의 구성도를 Fig. 2에 나타내었으며, 실험은 아래의 순서로 수행하였다.

- ① 막을 실험 최대압력 3.92×10<sup>5</sup>Pa에서 24시간 동안 압밀화(compaction)시킨 후 압력차 변화에 따라 순수 투과량을 측정한다.
- ② 농도를 알고 있는 PEG #6000 또는 dextran 70T 용액을 용액 저장조에 넣고, 압력차 변화에 따른(낮은 압력차로 부터 수행) 막투과량 및 투과액중의 고분자 농도를 측정한다.
- ③ 다른 농도의 PEG #6000 및 dextran 70T용액에 대해 ②의 실험을 수행(낮은 용액농도로 부터 수행)한다.

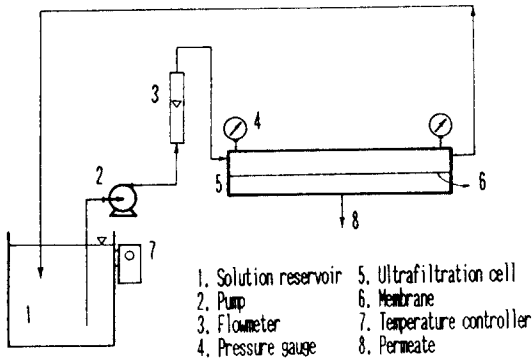


Fig. 2. Schematic diagram of ultrafiltration experimental system.

추진력인 압력차는 0.49×10<sup>5</sup> Pa, 0.98×10<sup>5</sup> Pa, 1.47×10<sup>5</sup> Pa, 1.96×10<sup>5</sup> Pa, 2.94×10<sup>5</sup> Pa, 3.92×10<sup>5</sup> Pa의 6단계로 변화시켰으며, 도입용액 농도는 3.53kg/m<sup>3</sup>, 6.57kg/m<sup>3</sup>, 10.35kg/m<sup>3</sup>, 13.56kg/m<sup>3</sup>의 4단계로 변화시켰다. 도입용액의 순환유속은 0.4m/s로 일정하게 유지시켰다. 모든 실험은 35°C의 일정온도에서 수행하였다.

정상상태의 실험값을 얻기위해 모든 막투과량 및 투과액 농도는 실험 시작 후 약 30분 이상이 경과된 뒤에 측정하였다. 실험도중 도입용액 농도를 항상 일정하게 유지시키기 위해 배출액 및 투과액을 모두 용액 조장조로 순환 시켰으며, 도입액 및 투과액중의 PEG 및 dextran 농도는 전유기 탄소 측정기(TOC, model 525, O.I. Co., USA)로 측정한다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 막투과량 및 용질 배제도

순수 투과량은 압력차에 따라 직선적으로 증가하였으며, 순수 투과량으로부터 구한 SEPA-CA-O 막의 막저항 R<sub>m</sub>은 10.48×10<sup>9</sup>kg/(m<sup>2</sup>·s)이었다.

PEG #6000 및 dextran 70T 용액의 한외여과시 압력차 및 도입용액 농도 변화에 따른 막투과량 J<sub>v</sub>의 변화를 Fig. 3에 나타내었으며, 측정 용질 배제도(observed solute rejection) R<sub>o</sub>의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 이때 측정 용질 배제도 R<sub>o</sub>는 투과액중의 PEG 및 dextran 농도로 부터 식으로 계산하였다.

$$R_o = 1 - \frac{C_p}{C_b} \tag{9}$$

이 결과 PEG #6000 및 dextran 70T 용액 모두에 대해 압력차가 증가할수록 막투과량은 순수 투과량보다 감소하였으며, 용질 배제도도 감소하

였다. 압력차가 증가함에 따라 막투과량이 순수 투과량보다 감소하는 것은 농도분극이 증가하기 때문이며, 용질 배제도가 감소하는 것은 압력차에 따른 막투과량 증가로 인해 세공내 전단율(shear rate)이 증가되어 유연(flexible) 고분자인 PEG와 dextran의 형태변형이 유발되어 막세공 투과가 증가하기 때문으로 사료된다.<sup>11, 12</sup> 또한 일정 압력차에서 도입용액 농도가 높을 수록 막투과량의 감소 정도가 더욱 증가하였으며, 용질 배제도도 감소하였다. 본 연구의 실험범위 하에서 막투과량은 한계 투과량(limiting permeate flux) 상태에서는 도달하지 못하였으며, 따라서 막표면에 PEG 또는 dextran의 겔층이 형성되지 않는 것으로 가정하였다.

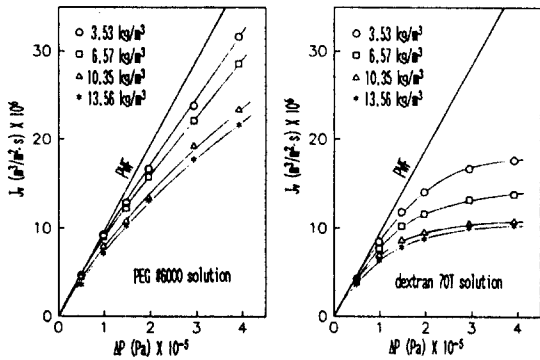


Fig. 3. Permeate flux as a function of pressure difference and feed concentration

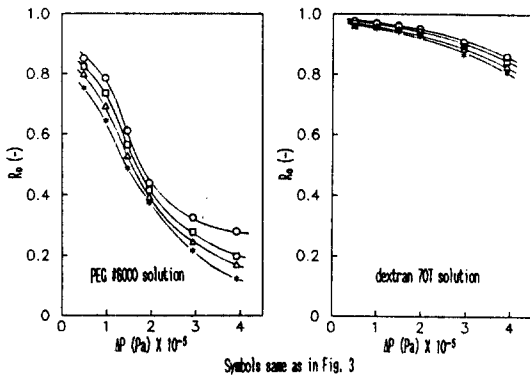


Fig. 4. Observed rejection as a function of pressure difference and feed concentration.

4-2. 농도분극층 저항

PEG #6000 및 dextran 70T 용액의 한외여과 실험결과인 Fig. 3의 막투과량으로 부터 식(4)에 의해 막투과량에 대한 농도분극층 저항  $R_{b1}$ 을 계산하여 이를 압력차 및 도입용액 농도 변화에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 이 계산된 농도분극층 저항  $R_{b1}$ 에는 농도분극층 저항 자체뿐만 아니라 고분자의 막표면 흡착으로 인한 저항, 고분자의 세공막음(pore clogging)으로 인한 저항 등이 모두 포함되어 있다.<sup>13, 14</sup> 그러나 본 실험에서 막투과량은 한계 투과량 상태에는 도달되지 못하였으므로 이  $R_{b1}$ 에는 겔층 형성에 의한 저항은 포함되어 있지 않은 것으로 간주하였다.

Fig. 5의 결과로 부터 압력차와 도입용액 농도가 증가할 수록 농도분극층 저항  $R_{b1}$ 이 증가함을 알 수 있으며, 또한 동일한 압력차 및 도입용액 농도에서 dextran 70T 용액의 경우가 PEG #6000 용액 보다 농도분극층 저항이 높게 나타났다.

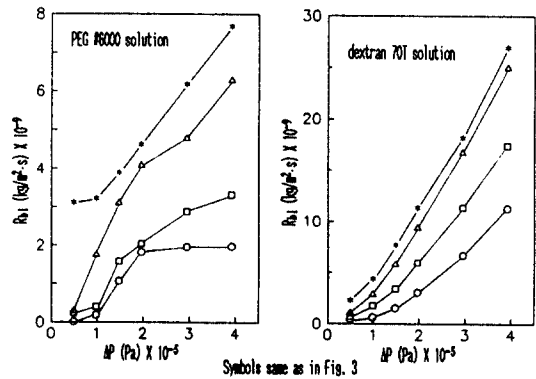


Fig. 5. Polarization layer resistance as a function of pressure difference and feed concentration.

4-3. 농도분극층 저항  $R_{b1}$ 과 농도분극층의 평균 농도  $C_{b1}$ 의 상관관계

Poddar등<sup>15</sup>은 PEG #6000 및 Kraft black liquor solid용액의 교반형 회분 cell(stirred batch cell)에 의한 한외여과 실험으로 부터 농도분극층 저항

$R_{b1}$ 을 막표면 농도  $C_m$ 과 다음의 무차원 상관관계로 나타낼 수 있음을 보고한 바 있다.

$$\frac{R_{b1}}{R_m} = \alpha \left( \frac{C_m}{\rho_m} \right)^\beta \quad (10)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 상수이며,  $\rho_m$ 은 막표면 농도  $C_m$ 에서의 고분자 용액의 밀도이다.

식(10)의 무차원 상관관계를 본 연구의 실험결과에 적용시키기 위해서는 막표면 농도  $C_m$ 의 계산이 필요하다. 막표면에서의 고분자 용액 농도  $C_m$ 은 본 연구자가 발표한 경계층저항 모델에 의한 계산법<sup>10</sup>으로서 구하였는 바, PEG #6000 및 dextran 70T 용액의 농도에 따른 삼투압 관계식인 식(7) 또는 식(8)을 사용하여 식(5)로부터  $C_m$ 을 계산하였다. 이 결과 PEG #6000 용액의 경우 계산된 막표면 농도  $C_m$ 은 4-110kg/m<sup>3</sup>의 범위 값을 나타내었으며, dextran 70T 용액의 경우에는 30-300kg/m<sup>3</sup>의 범위 값을 나타내었다.

식(10)의 무차원 상관관계를 본 연구의 PEG #6000 및 dextran 70T 용액의 한외여과 실험에 적용시켜 curve fitting한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그러나 식(10)은 본 실험의 결과를 잘 만족시키지 못하고 있는 바, 이는 내재적으로 식(10)이 농도분극층 내의 고분자 용액 농도가 막표면 농도인  $C_m$ 값을 갖는 것으로 생각하여 농도분극층 저항  $R_{b1}$ 을  $C_m$ 과 상관시킨 관계식이기 때문으로 사료된다. 그러나 실제로 농도분극층내의 고분자 용액 농도는  $C_b$ 로부터  $C_m$ 까지 범위의 값을 갖고 있으므로, 따라서 막투과량에 대한 농도분극층 저항  $R_{b1}$ 을 막표면 농도  $C_m$ 보다는 농도분극층내의 평균 고분자용액 농도  $C_{b1}$ 과 상관시키는 것이 보다 더 타당성이 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 농도분극층 저항  $R_{b1}$ 을 농도분극층내의 평균 고분자 농도  $C_{b1}$ 과 상관시키고자 하였다.

농도분극층내 고분자 용액의 평균 농도  $C_{b1}$ 을 농도분극층에서의 농도분포를 나타내는 식(2)에 의해 막표면 농도  $C_m$ 으로부터 다음 식으로 계산한 후,

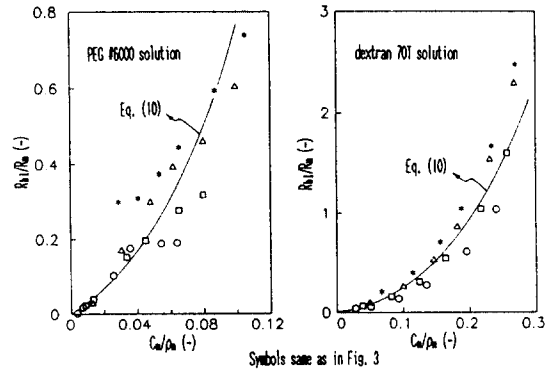


Fig. 6. Plot of  $(C_m/\rho_m)$  vs.  $(R_{b1}/R_m)$ .

$$C_{b1} = \frac{\int_0^\delta C \, dx}{\int_0^\delta dx} = C_p + \frac{(C_m - C_b)}{\ln\left(\frac{C_m - C_p}{C_b - C_p}\right)} \quad (11)$$

$(C_{b1}/\rho_{b1})$ 에 따른  $(R_{b1}/R_m)$ 의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과  $(R_{b1}/R_m)$ 과  $(C_{b1}/\rho_{b1})$ 은 우수한 상관관계를 나타내었다. 즉, 농도분극층 저항  $R_{b1}$ 을 막표면 농도  $C_m$ 과 상관시킨 식(10) 보다는 농도분극층의 평균 농도  $C_{b1}$ 과 상관시킨 다음의 무차원 관계식이 보다 타당함을 알 수 있다.

$$\frac{R_{b1}}{R_m} = \alpha \left( \frac{C_{b1}}{\rho_{b1}} \right)^\beta \quad (12)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 분리대상 고분자 용질의 형상과 크기 및 막과의 상호작용력에 따라 달라지는 상수이며,  $\rho_{b1}$ 은  $C_{b1}$ 에서의 고분자 용액의 밀도이다.

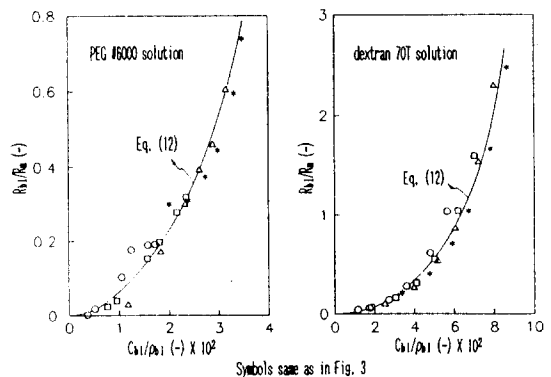


Fig. 7. Plot of  $(C_{b1}/\rho_{b1})$  vs.  $(R_{b1}/R_m)$ .

Fig. 7의 결과를 대수좌표계에 plot하여 Fig. 8에 나타내었으며, 이로부터 구한 PEG #6000 및 dextran 70T 용액에 대한 무차원 상관관계식은 다음과 같다.

$$\text{PEG \#6000} : \frac{R_{b1}}{R_m} = 1509.49 \left( \frac{C_{b1}}{\rho_{b1}} \right)^{2.25} \quad (13)$$

$$\text{dextran 70T} : \frac{R_{b1}}{R_m} = 438.61 \left( \frac{C_{b1}}{\rho_{b1}} \right)^{2.20} \quad (14)$$

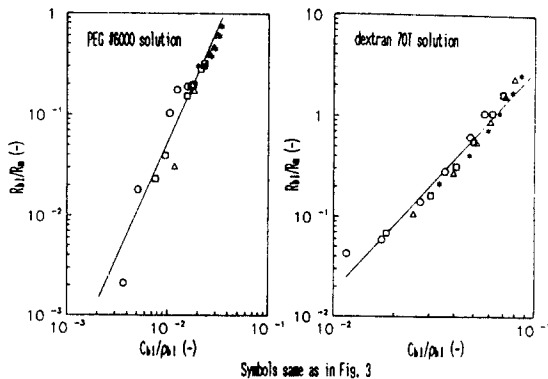


Fig. 8. Log-log plot of  $(C_{b1}/\rho_{b1})$  vs.  $(R_{b1}/R_m)$ .

### 5. 결 론

십자류 흐름 평판형 cell에서 비대칭 cellulose acetate 막을 사용하여 PEG #6000과 dextran 70T 용액의 한외여과 실험을 행하여, 막투과량에 대한 농도분극층 저항을 해석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 압력차 및 도입용액 농도가 증가함에 따라 농도분극층 저항이 증가되어 막투과량은 순수 투과량 보다 감소하였으며, 측정 용질 배제도도 감소하였다.
- 2) 농도분극층 저항  $R_{b1}$ 을 농도분극층내의 고분자 용액 평균 농도  $C_{b1}$ 과 상관시킬 수 있었으며, 이때 PEG #6000 및 dextran 70T 용액 각각에 대한 무차원 상관관계식은 다음과 같다.

$$\text{PEG \#6000} : \frac{R_{b1}}{R_m} = 1509.49 \left( \frac{C_{b1}}{\rho_{b1}} \right)^{2.25}$$

$$\text{dextran 70T} : \frac{R_{b1}}{R_m} = 438.61 \left( \frac{C_{b1}}{\rho_{b1}} \right)^{2.20}$$

### 감 사

이 논문은 1990년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 지방대 신진과제 학술연구조성비에 의해 수행된 것으로서 이에 감사드립니다.

### 기호설명

- C macromolecule concentration(kg/m<sup>3</sup>)
- C<sub>b</sub> macromolecule concentration in feed solution(kg/m<sup>3</sup>)
- C<sub>b1</sub> average macromolecule concentration over polarization layer(kg/m<sup>3</sup>)
- C<sub>m</sub> macromolecule concentration on membrane surface(kg/m<sup>3</sup>)
- C<sub>p</sub> macromolecule concentration in permeate(kg/m<sup>3</sup>)
- D<sub>s</sub> macromolecule diffusion coefficient(m<sup>2</sup>/s)
- J<sub>v</sub> permeate volume flux(m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·s)
- K mass transfer coefficient(m/s)
- M<sub>w</sub> weight-average molecular weight(kg/kmol)
- N<sub>s</sub> solute permeate flux(kg/m<sup>2</sup>·s)
- P<sub>s</sub> solvent permeability of macromolecule solution(m<sup>2</sup>)
- R<sub>b1</sub> concentration polarization layer resistance(kg/m<sup>2</sup>·s)
- R<sub>m</sub> membrane resistance(kg/m<sup>2</sup>·s)
- R<sub>o</sub> observed solute rejection(-)

V recirculation velocity(m/s)  
 x coordinate perpendicular to membrane surface(m)

### Greek Letters

$\alpha, \beta$  constants in Eq.(10) and Eq.(12)  
 $\delta$  thickness of polarization layer(m)  
 $\Delta P$  pressure difference(Pa)  
 $\Pi$  osmotic pressure of macromolecule solution(Pa)  
 $\Pi_b$  osmotic pressure at  $C_b$ (Pa)  
 $\Pi_m$  osmotic pressure at  $C_m$ (Pa)  
 $\rho$  density of macromolecule solution(kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_{b1}$  density at  $C_{b1}$ (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_m$  density at  $C_m$ (kg/m<sup>3</sup>)

### Abbreviations

PWF pure water flux  
 PEG polyethylene glycol

### 참고문헌

1. M.C. Porter, and L.Nelson, : in "Recent Developments in Separation Science", Vol. II, Li, N. N., Ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 227(1972)
2. 大矢晴彦: "膜利用技術 ハソトフシク-逆浸透法・限外濾過法 II應用", 幸書房, 東京(1978)
3. E., Flaschel, C.Wandrey and M.R. Kula : in "Advances in Biochemical Engineering and Biotechnology", A., Fiechter, Ed., Springer Verlag, Berlin, 73(1983)
4. E. Matthiasson and B. Sivik : Desalination, 35, 59(1980)
5. A.S. Michaels : Chem. Eng. Progr., 64(12), 31 (1968)
6. M.C. Porter : Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., 11(3), 234(1972)
7. W.F., Blatt, A., Dravid, A.S. Michaels and L. Nelson : in "Membrane Science and Technology", Flinn, J.E., Ed., Plenum Press, New York, NY, 47(1970)
8. J.G., Wijmans, S., Nakao, J.W.A., Van Den Berg, F.R. Troelstra and C.A. Smolders : J. Memb. Sci., 22, 117(1985)
9. V.L., Vilker, C.K. Colton and K.A. Smith : J. Colloid Interface Sci., 79(2), 548(1981)
10. K.H. Youm and W.S. Kim : J. Chem. Eng. Japan, 24(1), 1(1991)
11. T.D. Long and J.L. Anderson : J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed., 22, 1261(1984)
12. Q.T. Nguyen and J. Neel : J.Memb. Sci., 14, 111(1983)
13. J.L. Harris : J. Memb. Sci., 29, 97(1986)
14. A., Suki, A.G. Fane and C.J.D. Fell : J. Memb. Sci., 21, 269(1984)
15. T.K., Poddar, R.P. Singh and P.K. Bhattacharya : Chem. Eng. Comm., 75, 39(1989)