

향류식 역삼투 나권형 모듈을 이용한 염분리농축 특성 해석

조 한 옥 · 민 병 렬 · 최 광 호*

연세대학교 화학공학과, *코오롱 엔지니어링(주) 기술연구소
(1994년 7월 25일 접수, 1994년 9월 2일 채택)

Analysis of the Salt Separation and Concentration Using Counter-current Reverse Osmosis Spiral Wound Module

Han-Wook Cho, Byoun-Ryul Min, and Kwang-Ho Choi*

Dept. of Chem. Eng., Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea

*R & D Center, KOLON Engineering Inc.

(Received July 25, 1994, Accepted September 2, 1994)

요 약 : 역삼투 공정을 농축공정에 이용하기 위해 향류식 역삼투 나권형 모듈을 고안, 제작하여 염수의 농축실험을 수행하였다. 역삼투 분리의 배제도와 농축도의 관계를 고찰한 결과, 배제유량에 대한 투과유량의 비가 양쪽 관계의 중요한 매개변수이며, 반사계수 값에 따라, 역삼투막의 배제도와 농축도가 Spiegler-Kedem 식의 경향을 따른다. 향류식 역삼투 공정은 일반 역삼투 농축 공정에 비해 농축의 장애 요소인 삼투압차를 효과적으로 저하시키는 효과가 있으며 농축도가 상대적으로 우수하였다. 향류식 나권형 모듈의 수치모사 결과 농축공정의 농축도 증가를 위해서는 모듈의 지름보다 모듈의 길이를 늘리는 것이 유리함을 알 수 있었다.

Abstract: Counter-current type reverse osmosis spiral wound module was manufactured for the separation and concentration of salt solution. The ratio of permeate volumetric flow rate vs. brine volumetric flow rate was effective parameter between rejection and degree of cocentration. The reflection coefficient was correspondent to the relation between rejection and degree of cocentration by Spiegler-Kedem model. Counter-current reverse osmosis process had more osmotic pressure drop effect and more degree of concentration than general reverse osmosis process. As a result of computer calculation, the extension of module length than module diameter was more effective for the increase of degree of concentration.

1. 서 론

역삼투(reverse osmosis, RO) 공정은 일반적으로 투과물질을 유용물질로 선택하므로 공정의 중요한 분리인자는 배제도와 투과플럭스에 의해 표현된다. 그러나, 역삼투막 표면을 접촉하면서 거처간 배제물질을 유용물질로 얻고자 할 때, 중요한 분리인자는 농축도

이다. 따라서 투과물질을 유용물질로 분리해내는 회석 공정과 배제물질을 유용물질로 분리해내는 농축공정 양측이 역삼투 공정에서 수행될 수 있다. 회석(striping)과 농축(enriching)에 대한 막분리의 특성평가는 Kao[1]에 의해 수치적으로 수행된 바 있다.

역삼투 공정은 공급용액의 삼투압보다 큰 적용압력을 막표면에 가하여 물질분리를 일으키므로, 농축공

정에서 유발되는 배제액 농도의 상승은 삼투압의 증가를 일으켜 실질 적용압력의 효과를 떨어뜨리게 되며, 결과적으로 농축효과를 감소시키게 된다.

이와 같은 현상을 해결하고자 Lee[2] 등은 새로운 형태의 역삼투 공정을 제안하였다. 즉, 역삼투막 활성층의 반대쪽인 투과부에 임의의 고농도 용액을 주입하여 전체 투과용액 농도를 증가시키므로써, 막표면 활성층 쪽인 고농도 농축 배제용액과의 삼투압차를 감소시켜 역삼투압으로 적용되는 조작 압력의 효과를 높이는 것이다.

본 연구에서는 이와 같은 점을 응용하여 항류식 역삼투(counter-current reverse osmosis, CCRO) 나권형 모듈을 고안하였으며 여기서 항류식이란 도입부에 투과 흐름의 반대방향으로 고농도 삼투압 감소액(osmotic sink solution)을 유입시키는 흐름방식을 의미한다.

2. 이 론

2. 1. 반사계수 값, σ 에 따른 배제율(R), 농축도(DC)의 관계

막을 통과하는 전체 부피 투과 플럭스(J_v)와 농도 차에 의한 용질 확산 플럭스(J_D)는 dissipation 함수로부터 파생되며 이때의 J_v , J_D 는 Onsager의 현상학적 방정식에 의해 다음과 같이 표현된다[3].

$$J_v = L_p \Delta P + L_{pD} \Delta \pi \quad (1)$$

$$J_D = L_{Dp} \Delta P + L_D \Delta \pi \quad (2)$$

여기서 ΔP 는 조작압력차, $\Delta \pi$ 는 막양쪽 용액의 삼투압차, L_p 는 J_v 에 대한 단위 압력당 투과계수, L_D 는 J_D 에 대한 삼투압당 확산 유동성(diffusional mobility), L_{pD} 는 적용압력에 의한 전체투과 효과와 삼투압차에 따른 확산 유동효과의 결합계수(coupling coefficient)로서 Onsager의 상호관계(reciprocal relation)에 따라 L_{pD} 와 L_{Dp} 는 같다.

(1)식의 양변을 $\Delta \pi$ 로 나누면

$$\frac{J_v}{\Delta \pi} = L_p \frac{\Delta P}{\Delta \pi} + L_{pD} \quad (3)$$

가 되고 이 식을 이용하여 실험자료를 도식할 때 $\Delta P / \Delta \pi = 0$ 가 되는 y 축 절편값이 L_{pD} , 기울기는 L_p 로 표현된다.

이때 막의 고유 특성치인 반사계수 σ 를 다음 정의로부터 구할 수 있다.

$$\sigma = -\frac{L_{pD}}{L_p} = \left[\frac{J_D}{J_v} \right]_{\Delta \pi=0} \quad (4)$$

막의 실제 배제율(rejection rate), R 값은 Push의 모델식으로부터 다음과 같이 표현된다[4].

$$\frac{1}{1-R} = \frac{1}{1-\sigma} - \frac{\sigma}{1-\sigma} \exp \left[-J_v(1-\sigma) \frac{1}{P_M} \right] \quad (5)$$

$$P_M = \frac{\Delta x}{P_S} \quad (6)$$

$$R = 1 - \frac{C_P}{C_F} \quad (7)$$

여기서 Δx 는 막두께, P_S 는 특정 구간에서의 용질 투과도(local solute permeability), C_P 는 투과 용질의 농도, C_F 는 공급 용질의 농도를 나타낸다. (5)식의 R 은 Spiegler-Kedem 모델식[5]으로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R = \frac{\sigma \left[1 - \exp \left[-J_v(1-\sigma) \frac{\Delta x}{P_S} \right] \right]}{1 + \sigma \left[-1 + \left[1 - \exp \left[-J_v(1-\sigma) \frac{\Delta x}{P_S} \right] \right] \right]} \quad (8)$$

(8)식을 다시 변형하면,

$$\left[1 - \exp \left[-J_v(1-\sigma) \frac{\Delta x}{P_S} \right] \right] = \frac{R(1-\sigma)}{\sigma(1-R)} \quad (9)$$

한편, 농축도 DC(degree of concentration)는 총투과유량 Q_P 와, 총배제유량 Q_B 의 비에 따라 R 과 다음과 같은 관계가 있다.

$$DC = \frac{C_B - C_F}{C_F} = R \times \frac{Q_P}{Q_B} \quad (10)$$

여기서, C_B 는 농축수로서, 유출되는 Brine 용액의 염농도이다.

2. 2. 항류식 역삼투 나권형 모듈의 수치모사

항류식 역삼투 평판형 모듈은 Min과 Lee[6]에 의해 고안되었으나 막면적의 효과를 증대시키기 위해 Min[7]은 Fig. 1의 전개도와 같은 항류식 역삼투 나권형 모듈을 제안하였다. 이는 일반 역삼투 나권형 모듈의 형태를 변형시킨 것으로서 투과부 spacer의 X 방향 양단 사이에 항류 흐름을 유도하기 위하여 barrier를 설치하는 것이 항류식 역삼투 나권형 모듈의 특징이다. 항류식 역삼투 나권형 모듈을 이용하여

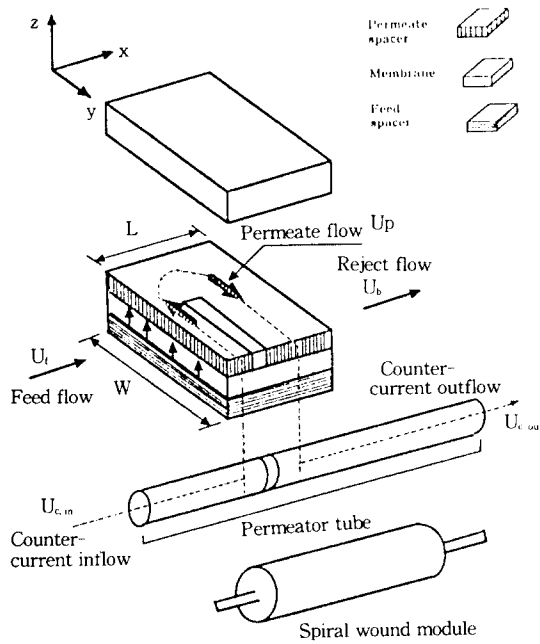


Fig. 1. Three dimensional perspective of unwound CCRO module.

일반 역삼투 공정과 향류식 역삼투 공정의 분리농축 특성을 해석하기 위해 다음과 같은 가정으로 모델식을 설정하였다.

가정

- 1) 막투과 모델은 Kedem-Katchalsky식에 지배된다.
($J_v = L_p(\Delta P - \sigma \Delta \pi)$)
- 2) 배제부와 투과부의 유체흐름은 plug flow이며 완전혼합으로서 1차원 방향에 각각 지배된다.
- 3) 각 좌표방향에 따른 유체 압력손실은 Darcy의 법칙을 따른다.

모듈 투과부

$$\frac{d P_p}{d y} = -k_p \mu U_p \quad [\text{Darcy의 법칙}] \quad (11)[8]$$

투과용액 물질수지

$$\frac{1}{-k_p \mu} = \frac{d^2 P_p}{d y^2} = \frac{2}{h_p} L_p (P_B - P_p - \Delta \pi) \quad (12)$$

일반 역삼투 공정

B. C. : $y_{end} = L ; P_p = 0$

$$\left[\frac{d P_p}{d y} \right]_{y=0} = 0 \quad (13)$$

향류식 역삼투 공정

B. C. $y = 0 ; P_p = P_{p, \text{inlet}}$

$$\left[\frac{d P_p}{d y} \right]_{y=0} = -k_p \mu U_p \quad (14)$$

투과용질 물질수지

$$\begin{aligned} \frac{1}{-k_p \mu} \frac{d^2 P_p}{d y^2} + \frac{1}{-k_p \mu} \frac{d P_p}{d y} \frac{d C_{\text{mix}}}{d y} \\ = \frac{2}{h_p} \frac{C_p}{C_{\text{mix}}} L_p (P_B - P_p - \Delta \pi) \end{aligned} \quad (15)$$

일반 역삼투 공정

B. C. : $y = 0 ; C_p = 0$ (16)

향류식 역삼투 공정

B. C. : $y = 0 ; C_p = C_{c, \text{in}}$ (17)

모듈 배제부

$$\frac{d P_B}{d x} = -k_B \mu U_B \quad [\text{Darcy의 법칙}] \quad (18)[8]$$

배제용액 물질수지

$$\frac{1}{k_B \mu} = \frac{d^2 P_B}{d x^2} = \frac{2}{h_B} L_p (P_B - P_p - \Delta \pi) \quad (19)$$

일반 및 향류식 역삼투 공정

B. C. $x = 0 ; P_B = P_{B, \text{inlet}}$

$$\left[\frac{d P_B}{d x} \right]_{x=0} = -k_B \mu U_F \quad (20)$$

배제용질 물질수지

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_B \mu} \frac{d^2 P_B}{d x^2} + \frac{1}{k_B \mu} \frac{d P_B}{d x} \frac{d C_B}{d x} \\ = \frac{2}{h_B} \frac{C_p}{C_B} L_p (P_B - P_p - \Delta \pi) \end{aligned} \quad (21)$$

일반 및 향류식 역삼투 공정

B. C. : $x = 0 ; C_B = C_F$ (22)

여기서 P는 적용압력, k는 마찰 매개변수, μ 는 유체의 점도, U는 유속, C는 유체의 농도, x, y는 각각의 모듈 전개도의 좌표 방향, 첨자 B, P, F, C, mix는 각각 배제부, 투과부, 공급부, 향류부, 향류액과 투과

액의 혼합을 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

Fig. 2는 본 연구에서 제작된 향류식 역삼투 나권형 모듈을 이용하여 수행된 일반 및 향류식 역삼투 공정 흐름도이다. Feed Tank에 채워진 일정농도의 염수는 고압 펌프에 의해 일정압력을 받는 상태로 역삼투 나권형 모듈을 통과하면서 농축수와 투과수로 분리되어 Feed Tank로 재순환된다.

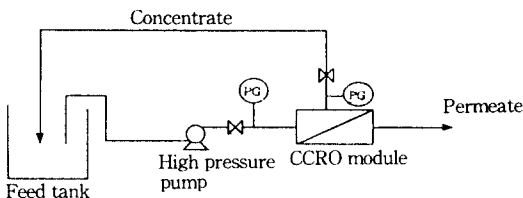


Fig. 2a. Reverse osmosis process.

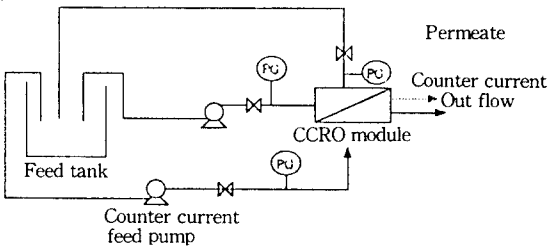


Fig. 2b. Counter current reverse osmosis process.

3.2. 실험방법

향류식 역삼투 나권형 모듈을 이용한 염분리농축 실험절차는 다음과 같다.

- 1) Feed tank에 일정한 농도의 염수를 채운다.
- 2) Feed tank로부터 일정 유량의 feed 일부를 향류액으로 하여 원심펌프에 의해 모듈의 투과부에 공급하되 투과부 내의 압력을 1Mpa 내외로 고정시킨다.
※ 일반 역삼투 분리 실험에서는 2)항을 제외한다.
- 3) 고압펌프를 이용하여 feed를 막모듈에 공급, 순환시키면서 압력을 가한다.
- 4) 배제액 및 투과액의 유량, 농도를 sampling하여 측정한다.

3.3. 실험범위

본 연구는 막재질, 모듈 크기, 공급유량, 공급 원수

Table 1. Scope of RO & CCRO Experiment

Membrane material	TFC(support layer : polysulfone active layer : polyamide)
Module size	body size : 2.5"D×21"L membrane length : 0.45m membrane width : 0.35m leaf type : 3-leaf feed spacer thick. : 0.00048m perm. spacer thick. : 0.00038m
Feed conc.(ppm NaCl)	10,000, 20,000, 35,000
Pressure(Mpa)	0.5~4.5
Feed flow rate(m ³ /hr)	0.45~2.50
Counter-current flow(m ³ /hr)	0.1~0.5

농도, 조작압력, 향류유량 등의 실험범위를 Table 1과 같이 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. RO 및 CCRO 공정의 투과성능

Fig. 3은 RO 및 CCRO 공정에서 조작압력(operational pressure)에 따른 공급 농도별 투과성능을 나타내었다. 그림의 직선관계는 삼투압차가 전혀없는 순수 투과 플럭스를 압력에 따라 나타낸 것이다. 실

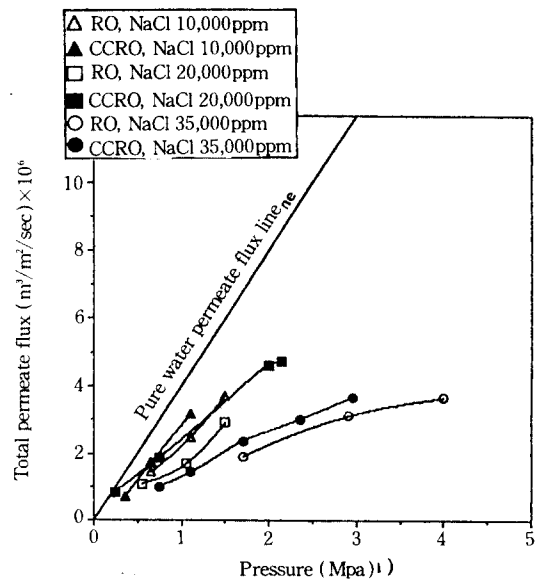


Fig. 3. The total permeate flux with varying operational pressure values.

험에서 구한 염수의 농도별 투과 플럭스는 각 공정의 조작압력에 대한 것으로서 염수의 저농도부가 고농도 부보다, CCRO가 RO보다 조작압력이 낮은 저압부에서 해당 투과 플럭스들이 분포되어 순수 투과 직선 경향에 접근함을 알 수 있다. 저농도부와 CCRO 공정에서, 순수 투과 직선(pure water permeate flux)에 대한 플럭스차 및 압력손실(삼투압차)은 근소하며 이러한 조건이 삼투압차 감소효과에 유리하다. 즉, 같은 조작압력에서는 CCRO의 투과 플럭스가 RO의 투과 플럭스보다 우수하였다.

공급 농도별로 투과 직선의 기울기는 농도가 증가하면 감소하고 이에 따라 투과 직선에 근접하는 CCRO의 투과 플럭스도 농도 증가에 따라 감소하나 RO의 투과 플럭스가 CCRO의 투과 플럭스보다 농도 증가에 따라 현격히 감소하므로 고농도 농축 분리 조건에서 CCRO의 투과 플럭스 효과가 우수함을 알 수 있다.

4. 2. 삼투압차에 따른 RO 및 CCRO 공정의 유효 적용압력 효과

실제 공정의 조작압력과 삼투압차의 비에 대응되는 투과 플럭스와 삼투압차의 비율 Fig. 4에 나타내었다. 같은 조작압력 실험범위에서 RO 및 CCRO 공히 염 농도 10,000, 20,000ppm과 35,000ppm에 대하여 각각 직선 경향을 보이며, $\Delta P/\Delta \pi$ 를 유효 적용압력 효과로 볼 때, 같은 직선에서 CCRO가 RO에 비해 유효 적용압력이 크고, 삼투압차에 대한 투과 플럭스 효과인 $J_v/\Delta \pi$ 는 같은 공급 농도 조건에서 CCRO가 RO보다 우수함을 알 수 있다. 즉, 공급 농도가 증가할수록 투과 플럭스 효과는 감소하므로 고정된 적용압력에서 삼투압차를 감소시키기 위해 CCRO 공정을 이용하면 투과 플럭스 효과를 높일 수 있다.

Coupling Coefficient인 L_{PD} (Y절편)의 절대값은 공급 농도가 낮은 부분에서 공급 농도가 높은 부분보다 더 큰 값을 가지며 투과 계수 L_p (기울기)도 이 경향을 따른다. L_p 값은 저농도에서 2.5×10^{-12} (m/s/Mpa), 고농도에서 1.2×10^{-12} (m/s/Mpa)로 나타났다. 결과적으로 σ 의 정의로부터 어느 공급농도 조건에서도 σ 는 고유치로서 거의 일정하므로 농축공정에서 투과 플럭스 효과는 L_{PD} 와 L_p 의 절대값이 일치할 때 즉, $\sigma=1$ 일 때 가장 이상적임을 알 수 있다. 즉, L_{PD} 절대치가 증가하면 L_p 도 증가하고, L_{PD} 절대치가 감소하면 L_p 도 감소한다. Fig. 4의 직선관계들로부터

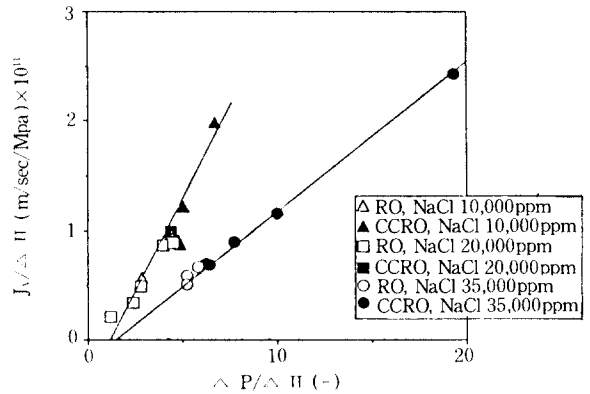


Fig. 4. The ratio total permeate flux(J_v) vs. osmotic pressure drop($\Delta \pi$) with varying the ratio operation pressure drop(ΔP) vs. osmotic pressure drop at RO and OSRO, each process.

σ 값은 0.9175로 산정되었다.

4. 3. RO 및 CCRO 공정의 배제율 및 농축도

Fig. 5~Fig. 7은 실제 유효압력(=조작압력-삼투압차)에 따른 RO 및 CCRO의 배제율(R) 및 농축도(DC)를 비교한 것이다. 공급농도별로 CCRO의 R 및 DC가 RO의 경우보다 높음을 알 수 있으며 R이 증가함에 따라 DC도 증가한다. 또한, 실제 유효압력이 증가할수록 CCRO와 RO의 DC값 차가 증가함을 알 수 있다. 이는 Fig. 3과 연관지어 볼 때 CCRO와 RO의 투과 플럭스 차에 비례하기 때문이다.

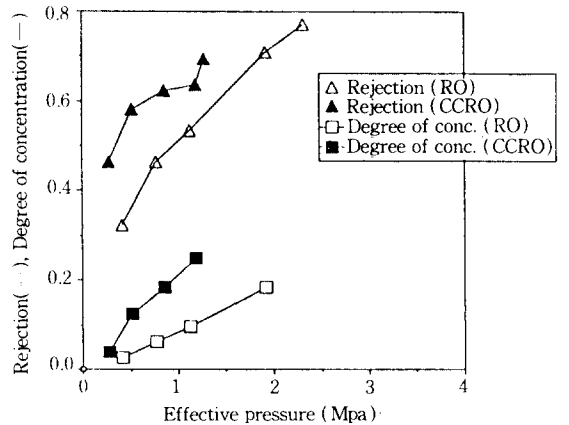


Fig. 5. The rejection and degree of concentration with varying effective pressure at NaCl 10,000ppm.

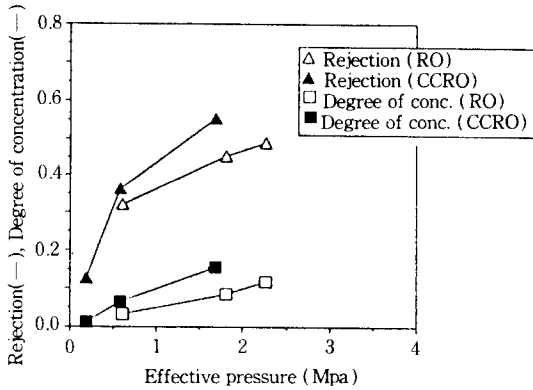


Fig. 6. The rejection and degree of concentration with varying effective pressure at NaCl 20,000ppm.

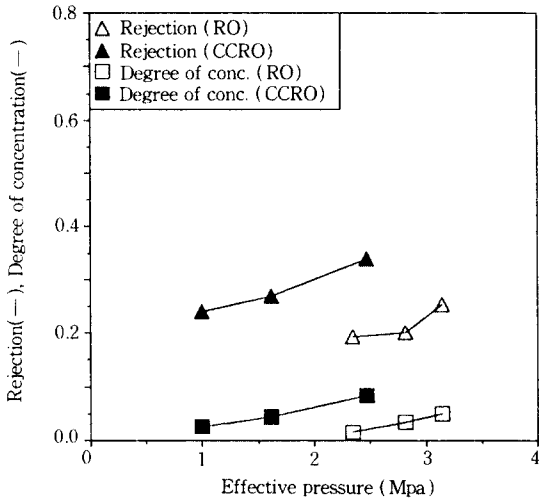


Fig. 7. The rejection and degree of concentration with varying effective pressure at NaCl 35,000ppm.

Fig. 8은 R과 DC의 비로서 유효 압력차의 증가에 따라 그 비도 증가한다. 이론에서 언급한 바와 같이 $DC/R = Q_p/Q_b$ 가 성립하므로 배제유량에 대한 투과유량의 비가 높아질수록 배제율에 대한 농축도의 비가 증가함을 알 수 있다. 따라서 농축도를 증가시키기 위해서는 투과유량이 배제유량에 비해 증대되어야 한다.

Fig. 9는 Q_p 와 Q_b 의 비가 0.1~0.4인 범위일 때 염분리농축 실험에서 구한 R과 DC의 관계를 나타낸

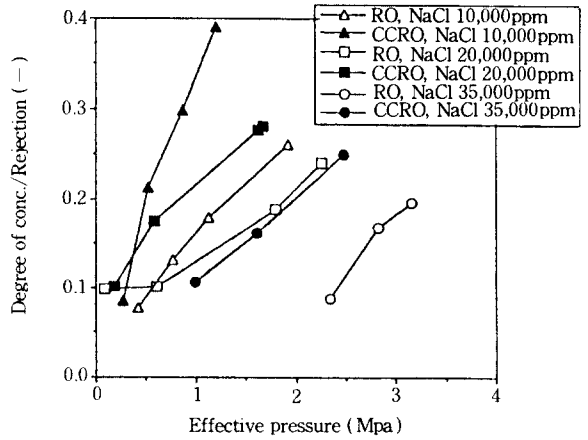


Fig. 8. The ratio of degree of conc. vs. rejection with varying effective pressure values.

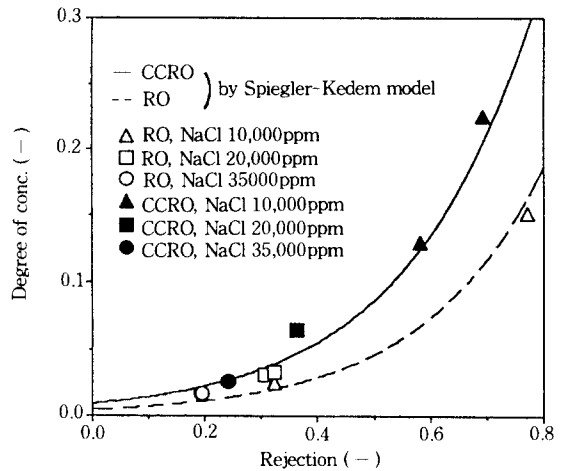


Fig. 9. The relation between rejection and degree of concentration with $\sigma = 0.9175$.

것이다. R과 DC 관계의 실험수치들은 고유치 σ 값 (0.9175)을 갖는 특정 막을 적용시켰을 때, 각각의 Q_p/Q_b 수치에 따라 계산된 $[1 - \exp(-J_v(1-\sigma)/P_M)]$ vs. R의 관계 곡선과 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서, 역삼투법을 이용한 염분리농축 공정의 최적 조건은 $[1 - \exp(-J_v(1-\sigma)/P_M)]$ vs. R의 관계 곡선을 이용하여 배제율, 농축도 및 배제유량에 대한 투과유량의 비 등의 인자로서 구할 수 있다.

$[1 - \exp(-J_v(1-\sigma)/P_M)]$ vs. R 곡선과 실험 수치로부터 CCRO 공정이 RO 공정보다 농축효과 면에

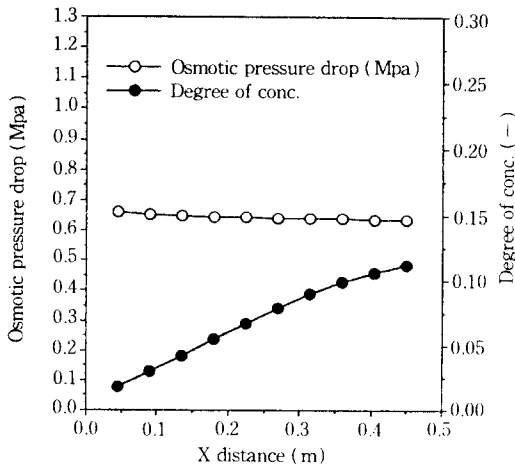


Fig. 10. The profile of osmotic pressure drop and degree of concentration along the X distance of spiral wound module at the RO process (NaCl 10,000ppm).

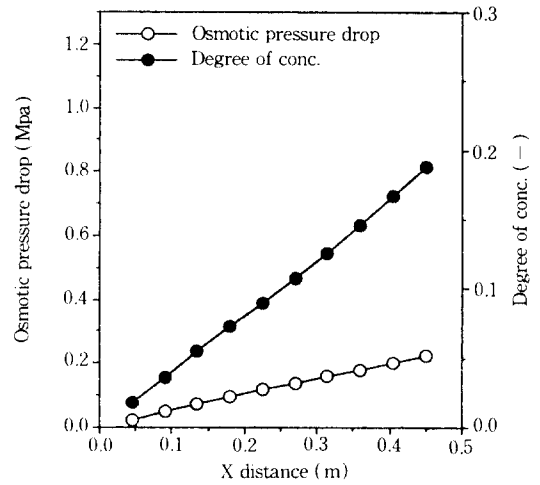


Fig. 12. The profile of osmotic pressure drop and degree of concentration along the X distance of spiral wound module at the CCRO process (NaCl 10,000ppm).

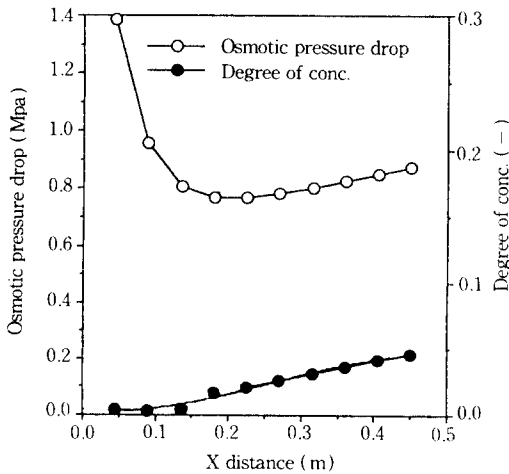


Fig. 11. The profile of osmotic pressure drop and degree of concentration along the X distance of spiral wound module at the RO process (NaCl 35,000ppm).

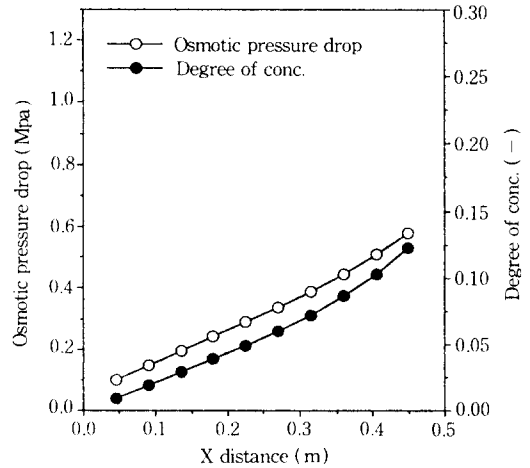


Fig. 13. The profile of osmotic pressure drop and degree of concentration along the X distance of spiral wound module at the CCRO process (NaCl 35,000ppm).

서 전반적으로 우수함을 알 수 있다.

4. 4. 향류식 역삼투 나권형 모듈 수치모사

Fig. 10~Fig. 15는 향류식 역삼투 나권형 모듈을 이용한 RO 및 CCRO 공정의 염분리농축 수행시, 염수의 공급방향인 X방향과 투과액의 흐름방향인 Y방향에 따라 예측되는 삼투압차, 농축도 등의 변화를

수치모사로써 계산한 결과이다.

이 계산결과들을 도출하기 위해 설정된 초기조건들을 Table 2에 나타내었다.

여기서 P_f 는 공급염수의 입구측 압력, P_c 는 향류액 입구측 압력, Q_m 는 배제된 염수 유량, Q_p 는 투과분리 유량, Q_c 는 향류액 유입유량이다.

Table 2. Data of the RO & CCRO Process

		P_F (Mpa)	P_C (Mpa)	Q_b (lpm)	Q_p (lpm)	Q_c (lpm)
RO Process	NaCl 10000ppm	3	--	1.86	0.51	--
	NaCl 35000ppm	4	--	0.64	0.16	--
CCRO process	NaCl 10000ppm	2.8	1.2	0.74	0.25	0.46
	NaCl 35000ppm	4.4	1.4	0.69	0.19	0.4

Fig. 10~Fig. 13은 염수농도 10,000ppm 및 35,000 ppm의 RO, CCRO 공정에서의 삼투압차에 따른 농축도의 변화를 나타내었다. X방향에 따라, Fig. 10의 RO 공정에서, 염수농도 10,000ppm의 삼투압차가 0.66Mpa에서 0.64Mpa로 완만하게 감소하며 농축도는 증가하나 농축도 수치 0.1 이후 그 증가율은 떨어지고 있다. RO 공정에서 분리농축 구간에 따른 삼투압차 감소현상은 용질의 막 투과플럭스가 증가하기 때문이며 이러한 용질투과 현상으로 농축도 증가율이 둔화된다고 사료된다. Fig. 11의 염수 35,000ppm의 경우, X방향 시작부에서 삼투압차가 1.38Mpa에서 급격히 떨어지나, 염수 배제액이 X방향으로 진행할수록 삼투압차는 0.76Mpa에서 다시 증가하며, 농축도는 0.025에서 증가율이 둔화됨을 볼 수 있다. 이는 공급염수가 고농도일수록 염수 배제액 농도의 삼투압에 영향을 주기 때문이다. 결국 용질의 투과플럭스와 초기 삼투압의 영향이 크면 삼투압차의 증가는 농축도의 증가를 저하시키며, 고농도 분리농축공정에서는 삼투압 영향이 특히 두드러진다. 반면, Fig. 12와 Fig. 13의 CCRO 공정에서는 초기에 0.1Mpa 미만인 삼투압차가 X방향에 따라 증가하나, RO 공정에 비해 같은 scale의 X방향 시작부에서, 삼투압차와 농축도 간의 분포폭이 좁으며 농축도 증가율이 단조증가형이고 농축도 수치가 상대적으로 크다. 즉, RO 공정의 염수농도 10,000ppm과 35,000ppm의 경우, X방향의 말단인 배제액 출구 부분에서 농축도는 각각 0.12와 0.05인 반면, CCRO 공정의 염수농도 10,000ppm과 35,000ppm의 경우, 농축도는 각각 0.2와 0.12로서, 각각 1.7배 및 2배의 농축도 효과를 보이고 있으며, 이 계산수치는 실험결과와 근사함을 보였다. CCRO 공정의 분리농축 구간에 따른 삼투압차의 증가현상은 막을 투과하는 순수한 물 성분이 증가하여 농축도가

심화되면서, 투과부의 향류액을 희석시켰기 때문이라 사료된다. 분리농축 공정은 삼투압차 및 삼투압차와 농축도간의 분포폭을 X방향 시작부에서 좁힐 수록 유리하며 이는 X방향에 따른 단조증가형 농축 증가율을 갖는 CCRO 공정으로 가능함을 알 수 있다. 아울러 삼투압차의 감소 및 농축도의 증가를 위한 조작용 공급염수가 저농도일수록 유리하며, 저농도 및 고농도의 경우, 공히 X방향의 길이를 증가시킬수록 유리하다.

Fig. 14와 Fig. 15는 향류식 나권형 모듈의 길이 방향(X distance) 및 원주(perimeter)가 되는 폭 방향(Y distance)에 따른 농축도의 변화를 보여주고 있다. X방향에 따른 농축도는 RO, CCRO 공정에서 모두 증가 경향을 보이며 같은 공급 염수농도 조건이라면 CCRO 공정의 농축도가 우수하다. 염수농도 10,000 ppm에서의 RO 공정 농축도는 염수농도 35,000ppm의 CCRO 공정의 농축도보다 크나 임계 증가치(0.11)를 보이는 반면, X방향으로 진행됨에 따라 35,000ppm의 CCRO 공정 농축도가 10,000ppm의 RO 공정 농축도보다 커지는 단조증가 경향을 보인다. 따라서, 향류식 나권형의 모듈의 길이를 더욱 길게 할수록 농축도를 증가시키는데 효과적이라 사료된다.

Y방향에 따른 농축도는 공급염수가 모듈 배제부의 출구에서 농축된 결과를 나타낸 것으로서 배제부의 출구는 X방향의 말단부에 해당된다. RO 공정에서 공급염수 10,000ppm의 농축도는 Y방향으로 진행됨에 따라 완만한 증가 현상을 보이는 반면 35,000ppm의 농축도는 Y방향으로 진행됨에 따라 농축도가 감소하는 현상을 보인다. 이는 나권형 모듈의 구조상 조작용력을 최대한으로 받을 수 있는 곳이 투과 집수부, 즉 Y방향 말단부이므로 저농도 농축공정에서는

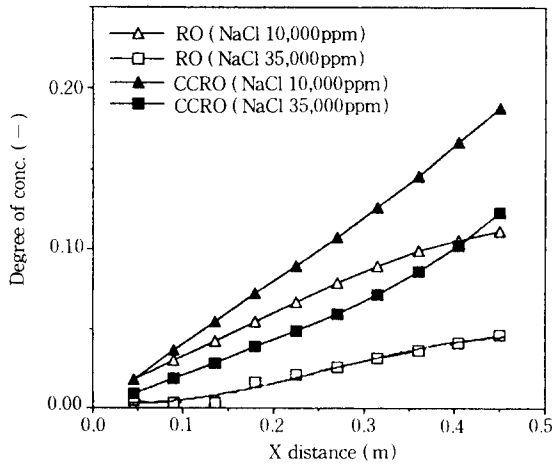


Fig. 14. The profile of degree of concentration along the X distance of spiral wound module at each RO, CCRO process.

이 구간에서 최대 농축도(0.12)를 보일 것이나 고농도 농축에서는 조작압력과 더불어 삼투압차의 영향이 매우 크므로 삼투압차가 Y방향 말단부에서 가장 크게 발생된 결과, Y방향 시작부에서 최대 농축도(0.075)를 보였다. CCRO 공정에서는 10,000ppm, 35,000ppm 공히 Y방향에 따라 농축도가 감소하는 경향을 보이는 바 이는 향류액으로 유입되는 삼투압 감소 용액의 효과가 Y방향 말단부에서 가장 낮기 때문이라 사료된다. 이로부터 CCRO 공정은 RO 공정의 고농도(35,000ppm) 농축효과와 경향이 유사함을 알 수 있으며 RO 공정에 비해 농축도가 우수하다.

CCRO 공정의 농축도 증가율은 X방향으로 단조증가 효과를 보이나 Y의 방향에서는 임계 농축도(염수농도 10,000ppm에서 농축도 0.23, 염수농도 35,000ppm에서 농축도 0.15)가 나타나므로 농축도의 증가 효과는 X방향의 길이에서 주효하며 이를 고려한 Y방향의 최적 모듈 지름을 선정해야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 향류식 역삼투 나린형 모듈을 고안, 제작하여 염수의 분리농축 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 역삼투법을 이용한 염분리농축은 역삼투막의 특성치인 반사계수 σ 가 1에 가까울수록, 배제유량에

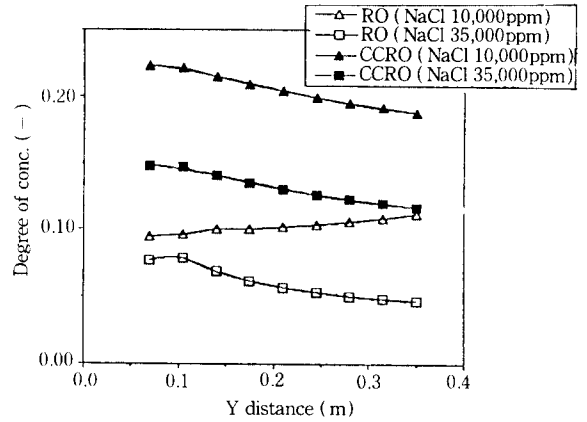


Fig. 15. The profile of degree of concentration along the Y distance of spiral wound module at each RO, CCRO process.

대한 투과유량의 비를 증가시킬수록 유리하다. 본 연구의 역삼투막의 σ 값은 0.9175로 산정되었으며, σ 값에 대한 배제율과 농축도의 관계는, Pusch 모델 형태로부터 얻어진 Spiegler-Kedem식의 관계를 따른다.

2) 동일한 압력 조건에서는, 삼투압차 감소를 유발하여 투과플럭스를 상승시키는 향류식 공정이 농축공정으로서 유리하다. 본 연구에서 제작한 향류식 나린형 모듈을 염분리농축에 이용하였을 때, 향류식 역삼투 공정의 최대 농축도는 농도별로 각각 0.25, 0.15, 0.09로서 일반 역삼투 공정의 농도별 최대 농축도 0.15, 0.1, 0.05보다 1.5~1.8배 높으며, 수치계산결과도 근접한 경향을 도출하였다.

3) 수치계산 결과, 본 연구에서 제작된 향류식 나린형 모듈의 길이에 따른 삼투압차의 범위는 역삼투 공정의 경우, 0.6~1.4Mpa이었고, 향류식 역삼투 공정의 경우, 0.01~0.58Mpa로서 향류식 역삼투 공정의 최대 삼투압차는 역삼투 공정의 최소 삼투압차보다도 낮은 수치를 나타내었다. 농축도는 역삼투 공정의 경우, 염농도 10,000ppm에서 최대 농축도 0.12(X방향) 및 0.12(Y방향)로, 35,000ppm에서 최대 농축도 0.05(X방향) 및 0.075(Y방향)로 계산되었으며, 향류식 역삼투 공정의 경우, 염농도 10,000ppm에서 최대 농축도 0.2(X방향) 및 0.23(Y방향)으로, 35,000ppm에서 최대 농축도 0.12(X방향) 및 0.15(Y방향)로 계산되어, 향류식 역삼투 공정이 일반 역삼투 공정보다 2배의 농축도 효과를 나타내었다.

4) 수치계산 결과, 본 연구에서 제작된 길이 0.45m, 폭(원주) 0.35m의 3-leaf형 향류식 나권형 모듈은 폭(원주) 0.25m가 유효크기이며 길이는 0.45m 이상으로 제작하여야 농축도를 증대시킬 수 있다. 즉, 향류식 나권형 모듈 제작시, 농축도 향상을 위해서는 막면적을 최대화시켜야 하며, 최대화의 경향은 모듈의 지름보다 길이를 효과적으로 연장시키는데 있다.

5) 효율적인 향류식 역삼투 농축공정은 투과부의 적용압력 손실과 삼투압 감소용액(osmotic sink solution)에 의한 삼투압차를 저하시키는데 있다. 이를 위해, 모듈의 배체부와 투과부에 삽입하는 spacer의 재질 및 두께, 향류액 유입 방식 등을 고려한 유체 특성 연구가 수행되어야 한다.

감 사

본 연구는 상공자원부 공업기반기술개발사업의 지원으로 수행된 바 이에 감사드립니다.

기 호 설 명

- C : solution concentration [ppm]
- DC : degree of concentration [-]
- J_D : diffusional solute flux [kg/m²/sec]
- J_V : total permeate flux [m³/m²/sec]
- k : friction parameter [1/m²]
- L_D : diffusional mobility [kg/m²/sec/Mpa]
- L_P : permeability [m/sec/Mpa]
- L_{PD} : coupling coefficient [m/sec/Mpa]
- P : pressure [Mpa]
- P_S : local solute permeability [kg/m/sec/Mpa]
- R : rejection coefficient [-]
- U : fluid velocity [m/sec]
- X : length of spiral wound module [m]
- Y : spiral perimeter of spiral wound module[m]

그리스 문자

- μ : fluid viscosity[kg/m/sec]
- σ : reflection coefficient[-]
- π : osmotic pressure[Mpa]

첨 자

- B : brine channel side
- C : counter-current side
- F : feed side
- P : permeate channel side
- mix : mixed solution of counter-current flow and permeate flow

참고문헌

1. Kao, Yuen-Koh, *J. of Memb. Sci.*, **39**, 143(1988).
2. Lee, E. K. L., W. C. Babcock, and P. A. Bresnahan, Counter Current Reverse Osmosis for Ethanol-Water Separation, U. S. Department of Energy, (DOE/ID/12320-T1(DE83009725)) (1983).
3. A. Katchalsky, Curran, and F. Peter, "Nonequilibrium Thermodynamics in Biophysics", Havard Univ. Press, Cambridge(1965).
4. W. Pusch, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, **81**(9), 854(1977b).
5. K. S. Spiegler and O. Kedem, *Desalination*, **1**, 311 (1966).
6. 이광현, 박사학위논문, 연세대학교 대학원 화학공학과, 서울(1991).
7. 민병렬외, "분리농축을 위한 향류식 역삼투 나권형 모듈의 개발", 상공자원부(1994).
8. S. Avlontis, W. T. Hanbury, and M. Ben, Boudinar, *Desalination*, **81**, 191(1991).