

멤브레인(Membrane Journal)

Vol. 2. No. 1. 1992. 33~48

특별강연

## Osmotic Sink Reverse Osmosis Process를 이용한 에탄올의 농축특성에 관한 연구

이광현\* · 민병렬

\*동의대학교 공과대학 화학공학과

연세대학교 공과대학 화학공학과

### A Study on the Ethanol Concentration by Osmotic Sink Reverse Osmosis Process

Kwang-Hyun Lee, Byoung-Ryul Min

\*Department of Chemical Engineering, Donggeui University

Department of Chemical Engineering, Yonsei University

#### 요 약

역삼투공정과 비교하여 효율적인 농축공정인 OSRO공정에 의한 농축공정을 개발하여 에탄올 농축에 적용한 결과 역삼투공정에 비하여 높은 에탄올 농축효과를 얻었으며, 에탄올 분리효과가 뛰어난 OSRO용 막의 개발 및 농축장치를 다단으로 사용할 경우 산업화가 가능하다는 결과를 얻었다.

역삼투공정에 대한 OSRO공정의 농축도차( $DC_{OSRO} - DC_{RO}$ )는 전 실험범위에서 0보다 큰 값을 보이므로 에탄올 농축에 있어서 OSRO공정이 역삼투공정에 비해 효과적임을 확인하였다. OSRO공정에서 공급용액의 농도 및 부피유속이 감소하고 적용압력이 증가하는 것이 조업조건으로서 유리하였다.

OSRO공정에 대한 이론식의 수치모사에 의한 해석적 결과로부터 단수가 증가할 수록 역삼투공정 및 OSRO공정의 농축도값은 커짐을 알 수 있었고, 같은 단내에서는 적용압력이 상승함에 따라 농축도값은 증가하는 경향을 보였다. 또한 수치모사에 의한 농축도 이론치는 실험치와 약 15% 이내에서 일치하였다.

농축도는 적용압력과 osmotic sink solution의 부피유속에는 비례하여 증가하며, 공급액 농도와 부피유속에 대해서는 감소함을 알 수 있었으며, 본 연구에서는 실험범위외의 수치모사에 의한 농축도 이론치도 제시하였다.

#### Abstract

OSRO process was developed and it was confirmed more effective in ethanol concentrating process comparing to reverse osmosis process.

It may be industrialized if more effective membrane for OSRO and reverse osmosis, which indicate the value greater than zero, it was shown that OSRO process was more effective than reverse osmosis for the ethanol concentration process. The decrease of feed concentration and flow rate and the increase of applied pressure made more effective operating conditions in OSRO process to concentrate ethanol.

From the numerical results for the multi-plates, theoretical DC values of reverse osmosis and OSRO process was increased as the number of stages increased.

DC values were increased with the increase of applied pressure in same number of stages. The theoretical values of DC by numerical calculation were corresponded to the experimental values within 15% tolerance.

DC value was increased proportional to applied pressure and osmotic sink solution flow rate but it was decreased proportional to feed concentration and flow rate. The numerical calculation over the wide ranges including experimental condition was proposed in this study.

## 1. 서 론

발효에 의해 생성되는 에탄올의 농도는 batch식 발효에서 13-14%, 고정화 발효방법에서 5-10% 정도이다.<sup>1</sup> 이를 고순도의 에탄올로 농축하기 위한 방법으로는 증류법, 투과증발법, 역삼투법등이 있으며 증류를 이용하여 농축하는 경우에는 상당히 큰 열에너지를 필요로한다.<sup>2,3,4</sup>

역삼투 공정은 일정농도 이상의 용존염 및 에탄올용액 농축시 막양단의 삼투압차가 크게 증가되므로 유효 압력차를 유지하기 위해 적용 압력을 높여야 하는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 막하부쪽에 고농도의 용액을 흘려보내 막 양측의 삼투압차를 감소시켜 외부에서 가해주어야하는 수력학적 압력이 역삼투 공정보다 낮은 상태에서도 역삼투 공정을 진행할 수 있도록 한 것이 향류식 역삼투 공정이다.<sup>5,6,7,8</sup>

본 연구에서는 향류식 역삼투 단일단과 다단 test cell을 사용하여 역삼투 및 osmotic sink reverse osmosis공정에 의한 에탄올 투과실험을 행하여 막분리 공정에서의 기본적인 물질전달 현상을 이해하고, 역삼투 및 osmotic sink reverse osmosis공정에서의 에탄올 농축도를 비교하여 그 차이점을 검토, 분석함으로써 osmotic sink reverse osmosis공정에 적합한 막의 선택 및 막분리 공정의 응용에 필요한 자료를 제공하고자 한다..

## 2. 이론적 배경

### 2-1. Osmotic sink reverse osmosis공정의 개요

1973년 Loeb과 Bloch<sup>5</sup>는 향류 흐름의 방법과 종류에 따라 향류식 역삼투 공정을 다음의 세가지로 구분하였다.

- 1) Concentrate return reverse osmosis (CRRO)
- 2) Osmotic sink reverse osmosis (OSRO)

3) Osmotic sink osmosis (OSO)

OSRO는 막을 사이에 두고 공급액과 osmotic sink solution을 상호 역방향으로 격리공급시킴으로서 혼합을 방지한 상태에서 막양쪽의 삼투압차를 감소시켜 상대적으로 증가된 유효압력차에 의해 역삼투 공정보다 다량의 물이 투과되어 공급액이 농축되는 공정이다. 막을 통한 용질의 플럭스는 막양쪽의 농도차에 비례하므로 막하부쪽에 osmotic sink solution의 도입으로 인한 농도증가 효과에 의해 역삼투공정에 비해 용질의 플럭스가 감소하게 된다. 따라서 에탄올 용액은 보다 농축될 수 있다.<sup>9,10</sup>

OSRO는 그림 1에서와 같이 막의 저압쪽으로 도입되는 용액이 osmotic sink solution이다. Osmotic sink solution이란 삼투압 차를 줄일 수 있는 농도가 높은 용액으로, 천연적 혹은 인공적일 수도 있다. 흑해는 천연적인 osmotic sink solution의 예인데, 이것은 용액을 탈수시켜 높은 삼투압용액을 만들 수 있는 잠재력이 큰 천연자원이다.

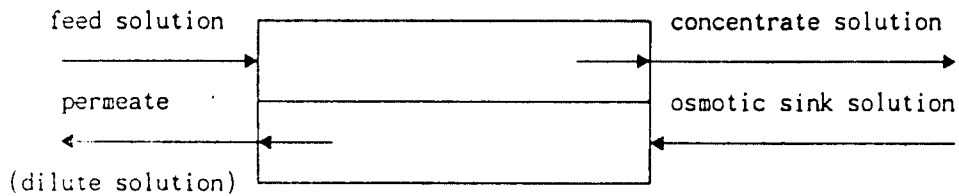


Fig. 1. Schematic diagram of osmotic sink reverse osmosis (OSRO).

2-2. OSRO(Osmotic sink reverse osmosis)의 이론식 유도

2-2-1. Cylindrical Coordinate에서의 투과 Mechanism 해석

Plug flow, fully mixing의 조건하에서 그림 2와같은 test cell의 일부를 고려하자.

막 상부에서 유체는 cell의 안쪽에서 바깥쪽으로 흐르며 임의의 작은 미분소에 대하여 총괄 물질수지에 대한 식은

$$- \frac{dV_1}{dr} - \frac{V_1}{r} = \frac{\rho_1}{\rho_1 \delta} J_v \dots \dots \dots (1)$$

B.C. :  $r=0, \quad V_1=V_f$

Kedem과 Katchalsky는 solute flux  $J_s$ , total volume flux  $J_v$ 를 다음과 같이 표시하였다.<sup>11</sup>

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma \Delta \pi) \dots \dots \dots (2)$$

$$J_s = C_s(1 - \sigma) L_p(\Delta P - \sigma \Delta \pi) + \omega \Delta \pi \dots \dots \dots (3)$$

또한 전체 solute 에 대한 식은 물질 수지(mass balance)로부터 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$- V_1 \frac{dC_1}{dr} - C_1 \frac{dV_1}{dr} - \frac{V_1 C_1}{r} = \frac{1}{\delta} J_s \dots \dots \dots (4)$$

B.C.1 :  $r=0, \quad C_1=C_f$

B.C.2 :  $r=0, \quad V_1=V_f$

막 하부에서 유체는 cell의 바깥쪽에서 안쪽으로 흐르며 이를 막 상부에서와 같은 방법으로 정리하면 총괄 물질수지에 대한 식은

$$\frac{dV_2}{dr} + \frac{V_2}{r} = \frac{\rho_2}{\rho_2 \delta} J_v \dots\dots\dots (5)$$

막 하부의 전체 solute에 대해서는

$$V_2 \frac{dC_2}{dr} + C_2 \frac{dV_2}{dr} + \frac{V_2 C_2}{r} = \frac{1}{\delta} J \dots\dots\dots (6)$$

B.C.1 :  $r=R, V_1=V_{2f}$

B.C.2 :  $r=R, C_2=C_f$

Kozeny-Carman식<sup>12</sup>에서 다공성 매체의 특성과 흐름의 점도등에 의하여 결정되는 상수를 정의하여 이로부터 흐름의 압력 강하와 흐름 거리 그리고 유체 속도의 관계를 다음의 간단한 식으로 표현하였다.

막상부에서는

$$\frac{dP_1}{dr} = -k_1 V_1 \dots\dots\dots (7)$$

B.C. :  $r=0, P_1=P_f$

막하부에서는

$$\frac{dP_2}{dr} = -k_2 V_2 \dots\dots\dots (8)$$

B.C. :  $r=R, P_2=P_{2f}$

### 2-3. 농축도 (Degree of Concentration, DC)

농축도란 용액의 농축 공정에서 농축하고자 하는 용액의 농축된 정도를 나타내는 용어으로써 다음과 같이 정의한다.

$$DC(\text{Degree of Concentration}) = \frac{C_r - C_f}{C_f}$$

$C_r$  : 배제액의 농도

$C_f$  : 공급액의 농도

### 2-4. OSRO 공정의 수치모사

위에서 유도된 여섯개의 상미분 방정식을 연립하여 4th order Runge-Kutta 방법을 이용하여 프로그래밍하였다. 또한 이 프로그램에는 같은 system에서의 RO공정을 모사할 수 있는 routine을 포함시켜, RO와 OSRO의 농축정도를 비교할 수 있도록 하였다.

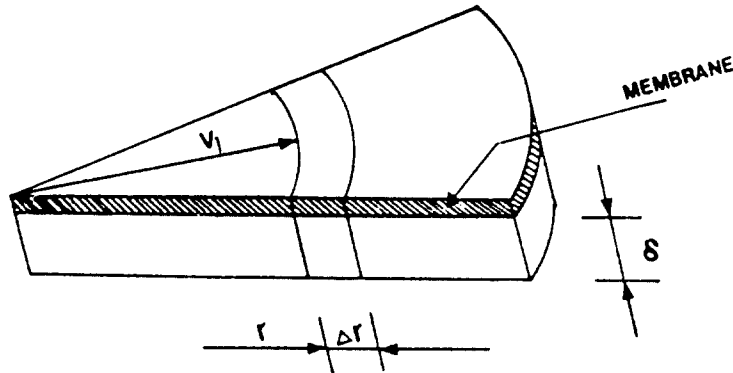


Fig. 2. Schematic diagram for mass balance in test cell (cylindrical coordinate).

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3-1. 실험장치 및 재료

##### 3-1-1. 실험 장치

본 연구에 사용된 실험장치인 countercurrent reverse osmosis multi-test cell의 개략적인 공정도를 그림 3에 나타내었다. 용질인 에탄올을 함유한 수용액은 향류식 역삼투장치내의 막의 상하측으로 향류 흐름이 되도록 도입하였다. 향류식 역삼투 장치는 그림 4에 나타낸 바와 같은 판틀형(plate and frame)으로서 에탄올 수용액의 흐름은 평판막의 접선방향으로 흐르게 되며, 유로내에 feed spacer를 설치함으로써 에탄올 수용액이 완전 혼합이 되도록 하였다.

##### 3-1-2. 실험 재료

향류식 역삼투 실험에 사용된 막들은 역삼투 복합막인 TFCL (UOP CO., U.S.A.)과 FT-30 (FilmTec Co., U.S.A.) 그리고 blend막인 CA blend (UOP Co., U.S.A.) 평판막의 3 종류 막을 사용하였다.

##### 3-1-3. 분석

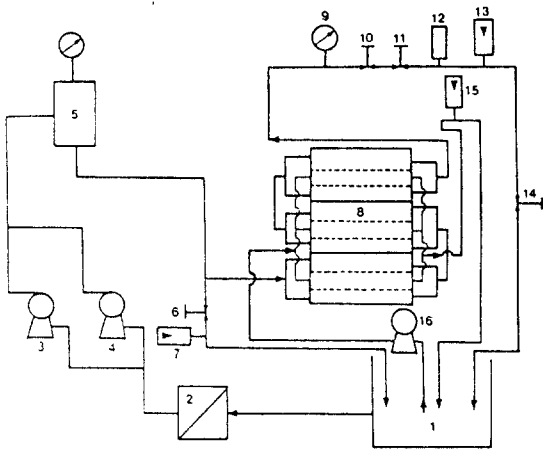
에탄올의 농도 분석은 가스크로마토그래피(G.C.-8A, Shimazu, Japan)로 분석하였다.

#### 3-2. 실험 범위 및 방법

##### 3-2-1. 단을 이용한 에탄올 농축 실험

공급용액인 에탄올 수용액을 표 1과같은 조작조건하에서 역삼투 및 OSRO 공정의 농축실험을 행하여 농축도(degree of concentration)를 구하였다.

실험장치의 가동시간에 따른 투과량 및 배제율을 측정하여 정상상태 도달시간을 구하였으며 모든 데이터는 정상상태에 도달한 후에 측정하였다.



- 1. feed tank    2. pre-filter    3. feed pump-1
- 4. feed pump-2
- 5. damper    6. needle valve    7. flow meter
- 8. test cell
- 9. pressure gauge    10. needle valve    11. pressure relief valve
- 12. thermometer    13. flow meter    14. needle valve
- 15. flow meter
- 16. recirculation pump

Fig. 3. Schematic flow diagram for counter-current reverse osmosis multi-cell system (OSRO).

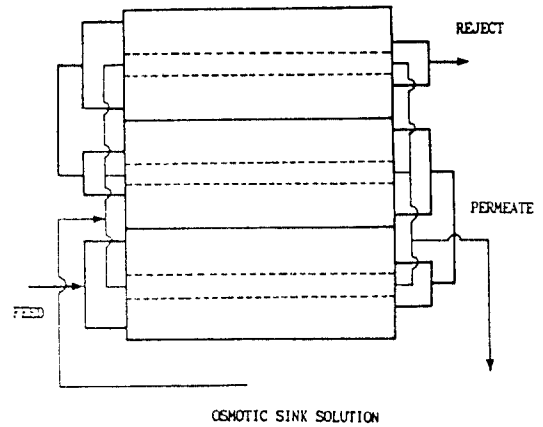


Fig. 4. Change of flow direction in counter-current reverse osmosis system.

Table 1. Experimental conditions for osmotic sink reverse osmosis(multi-test cell).

Membrane	FT-30(FilmTec Co., U.S.A.)			
Feed Concentration(wt%)	5.2,	9.8,	16,	18
Feed flowrate(ml/sec)	0.522,	0.667,	0.790,	0.836
Temperature(°C)	20 ± 0.2			
Pressure(MPa)	2.94,	3.92,	4.90,	5.88
Osmotic sink solution concentration(wt%)	5.2,	9.8,	16,	18
Osmotic sink solution flowrate(ml/sec)	4.08,	7.29,	11.57,	14.43

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4-1. 단일단을 이용한 막들의 reverse osmosis와 osmotic sink reverse osmosis에 의한 에탄올 농축도 비교

막들을 사용하여 RO 및 OSRO에 의한 에탄올 농축실험을 행한 결과, 각각의 막들에 대해서 살펴보면 3 가지막 모두 같은 적용압력하에서 저농도 에탄올 알코올 수용액의 농축도가 고농도 에탄올 수용액의 농축도보다 큰 값을 나타냄을 표 2와 표 3으로부터 알 수 있었다. 또한 세 가지막 모두 동일한 농도 및 공급액 부피유속하에서는 RO의 농축도보다 OSRO의 농축도가 큰 값을 나타냄을 표 2와 표 3으로부터 알 수 있었다. 막들의 RO 및 OSRO에 의한 에탄올 농축실험에서 실험치와 이론치를 살펴보면, 세가지막 모두 실험치와 이론치가 RO의 경우 10% 이내에서 OSRO의 경우 12% 이내에서 일치하였다.

저농도(5.2 wt%) 및 고농도(9.8 wt%)에서 같은 적용압력하에서 FT-30막의 농축도가 가장 우수한 것으로 나타났으며 cellulose acetate blend막의 농축도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 따라서 osmotic sink reverse osmosis multi-test cell 실험을 위해서는 FT-30막을 사용함이 적당하다고 사료된다.

Table 2. The DC value of RD with pressure difference for 0.522 ml/sec feed flow rate on single-test cell.

Pressure difference (MPa)	Membrane	Feed concentration (wt%)	Degree of concentration*
2.94	TFCL	5.2	0.122
		9.8	0.020
	FT-30	5.2	0.149
		9.8	0.080
	CA blend	5.2	0.011
		9.8	0.013
3.92	TFCL	5.2	0.152
		9.8	0.035
	FT-30	5.2	0.284
		9.8	0.110
	CA blend	5.2	0.036
		9.8	0.023
4.90	TFCL	5.2	0.182
		9.8	0.088
	FT-30	5.2	0.361
		9.8	0.139
	CA blend	5.2	0.048
		9.8	0.026

$$* \text{ Degree of concentration} = \frac{C_{rej} - C_{feed}}{C_{feed}}, [ - ]$$

Table 3. The DC value of OSRO with pressure difference for 0.522 ml/sec feed flow rate on single-test cell.

Pressure difference (MPa)	Membrane	Feed concentration (wt %)	Degree of concentration *
2.94	TFCL	5.2	0.145
		9.8	0.028
	FT-30	5.2	0.218
		9.8	0.138
3.92	TFCL	5.2	0.185
		9.8	0.053
	FT-30	5.2	0.333
		9.8	0.171
4.90	TFCL	5.2	0.219
		9.8	0.112
	FT-30	5.2	0.418
		9.8	0.200
4.90	TFCL	5.2	0.064
		9.8	0.035
	CA blend	5.2	0.064
		9.8	0.035

$$* \text{ Degree of concentration} = \frac{C_{rej} - C_{feed}}{C_{feed}}, [ - ]$$

#### 4-2. 2단을 이용한 막의 reverse osmosis와 osmotic sink reverse osmosis에 의한 에탄올 농축도 비교

앞 절에서 에탄올 농축을 위한 효과적인 막으로 선택된 막(FT-30)으로서 2단에 대한 RO 및 OSRO 에탄올농축실험을 행하여 농축도(degree of concentration)를 구하였다. 단일단에서와 같은 경향으로 적용압력이 증가 할 수록 전 농도범위에서 농축도는 증가하는 경향을 보였으며, 같은 적용압력하에서 저농도(5.2 wt%)측의 농축도가 가장 큰 값으로 나타났다(그림 5).

따라서 에탄올 농축을 위한 조업조건으로서 공급용액의 농도가 낮을 수록 또한 적용압력이 높을 수록 유리함을 알 수 있었다.

동일한 농도 및 공급액 부피유속하에서는 RO의 농축도보다 OSRO의 농축도가 큰 값을 나타냄을 알 수 있었다(그림 6).

막(FT-30)의 RO 및 OSRO에 의한 에탄올 농축실험에서 실험치와 이론치를 살펴보면, 세가지막 모두 실험치와 이론치가 RO의 경우 약 9%이내에서 OSRO의 경우 10 %이내에서 일치하였다.



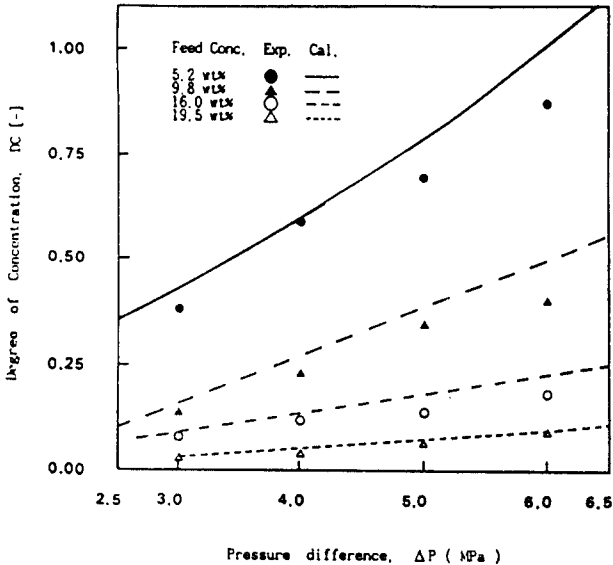


Fig. 5. The DC value of RO with pressure difference for 0.522 ml/sec feed flowrate on double-test cells.

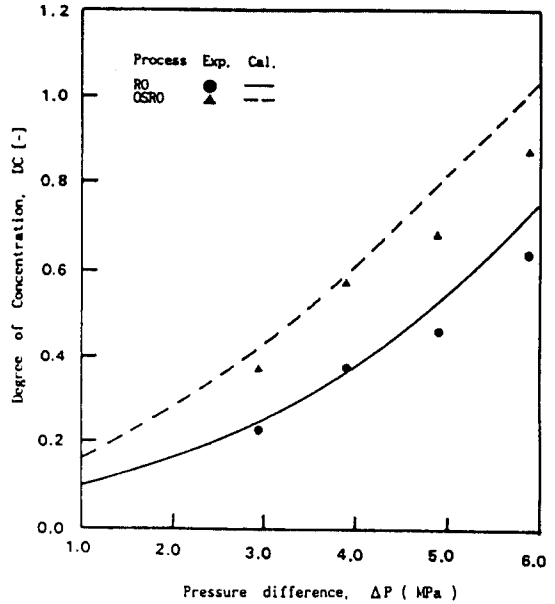


Fig. 6. The comparison of DC value between RO and OSRO with pressure difference on double-test cell. (5.2 wt% feed solution, feed flowrate=0.522 ml/sec, osmotic sink solution=4.08 ml/sec)

### 4-3. 3단을 이용한 에탄올 농축실험

#### 4-3-1. 3단을 이용한 RO 및 OSRO의 농축도변화 실험

세개의 단에 대해서 앞절의 실험방법과 똑같은 방법으로 막(FT-30)의 역삼투 및 OSRO 에탄올 농축실험을 행하여 1단과 2단에서의 농축도와 비교한 결과, 단수가 증가할 수록 동일한 공급액 농도와 적용압력하에서 농축도가 상승함을 그림 7로부터 알 수 있었다. 이러한 농축도는 막면적에 직접적인 영향을 받기 때문이다. 2단의 경우와 마찬가지로 RO 및 OSRO의 농축도 값은 공급용액의 농도가 낮고 단수와 적용압력이 커질 수록 큰 값을 보이므로 조업조건으로는 공급용액의 농도가 낮을수록, 적용압력이 높을수록 또한 단수가 증가할 수록 유리함을 확인할 수 있었다.

#### 4-3-2. 공급용액의 농도와 부피유속, 적용압력, osmotic sink solution의 부피유속의 변화에 따른 농축도 변화실험

##### 4-3-2-1. 공급용액의 농도변화에 따른 RO 및 OSRO에 의한 농축도 변화실험

공급용액 농도의 4가지 변화에 대한 공급용액 각각의 부피유속과 적용압력 및 공급액 부피유속 하에서 공급용액의 농도가 감소할 수록 농축도는 증가하는 경향을 보이고 있으며 적용압력이 커질수록 실험범위내의 농도에서는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 공급액의 농도(5.2 wt%)가 낮아지고 적용압력(5.88 MPa)이 커짐에 따라 RO 및 OSRO의 농축도 증가폭이 가장 큰 것으로 나타났으며, OSRO의 농축도는 RO의 농축도에 비해 매우 큰 값을 보였다.

4-3-2-2. 공급용액의 부피유속변화에 따른 RO 및 OSRO에 의한 농축도 변화실험

공급용액의 부피유속을 0.522, 0.667, 0.70, 0.836 ml/sec로 변화시키면서 각각의 공급액 부피유속에 대하여 공급액의 농도와 적용압력 및 osmotic sink solution의 부피유속 변화에 따른 RO 및 OSRO공정의 농축도 변화를 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 이들로 부터 RO 및 OSRO 둘다 동일한 적용압력 및 공급액 농도하에서 공급용액의 부피유속이 감소할 수록 농축도는 증가하는 경향을 보이고 있으며 적용압력이 커질수록 실험범위내의 공급액 부피유속하에서는 농축도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 공급액의 부피유속이 실험범위내에서 가장 적은 0.522 ml/sec인 경우 같은 적용압력하에서 가장 큰 농축도 값을 보였으며 적용압력이 상승함에 따라서도 농축도값이 가장 큰 것으로 나타났다. 공급액의 부피유속이 작아질 수록, 적용압력이 커짐에 따라 OSRO의 농축도값은 RO에 비해 큰 값을 보였다.

4-3-2-3. Osmotic Sink Solution의 부피유속 변화에 따른 농축도변화실험

OSRO공정에서 공급용액의 농도와 부피유속 및 적용압력의 변화시 osmotic sink solution의 부피유속 변화에 따른 농축도의 변화를 고찰하고 osmotic sink solution의 부피 유속이 4.08 ml/sec이고 공급용액 Table 4. The DC value of OSRO with osmotic sink solution flow rate for 5.88 MPa pressure difference on triple test cells.(feed flow rate=0.522 ml/sec).

Osmotic sink solution flow rate (ml/sec)	Pressure difference (MPa)	Degree of concentration*
4.08	2.94	0.429
	3.92	0.731
	4.90	1.236
	5.88	1.641
7.29	2.94	0.431
	3.92	0.733
	4.90	1.238
	5.88	1.641
11.57	2.94	0.433
	3.92	0.734
	4.90	1.241
	5.88	1.645
14.43	2.94	0.436
	3.92	0.736
	4.90	1.244
	5.88	1.647

\* Degree of concentration =  $\frac{C_{rej} - C_{feed}}{C_{feed}}$ , [ - ]

의 농도가 5.2 wt%, 적용압력이 5.88MPa일때의 농축도의 변화를 표 4에 나타내었다. 이들로부터 실험범위 내에서의 농축도는 osmotic sink solution의 부피유속이 커짐에 따라 증가하는 경향이 있으며 osmotic sink solution의 부피유속이 4.08 ml/sec에서 14.43 ml/sec로 증가함에 따라 농축도는 약 1.3%정도 증가하는 경향을 보였다.

#### 4-3-2-4. 역삼투공정과 OSRO공정에 의한 농축도차

역삼투공정과 OSRO공정의 농축도차는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$DC_{OSRO} - DC_{RO} = \frac{C_{R, OSRO} - C_{R, RO}}{C_f}$$

위 관계로부터 구한 역삼투공정과 OSRO 공정의 농축도차를 그림 12에 나타내었다. 이들로부터 역삼투공정과 OSRO 공정의 농축도차, 즉 역삼투공정에 대한 OSRO공정의 농축효과의 척도는 공급용액의 농도 및 부피유속이 감소할 수록 적용압력이 상승할 수록 커짐을 알 수 있었는데 조업조건으로서 실험범위내에서는 공급용액의 농도 및 부피유속이 감소할 수록 적용압력이 상승할 수록 유리함을 다시 확인할 수 있었다. 농도가 9.8 wt%일 경우 같은 공급액 부피유속하에서는 적용압력이 상승함에 따라 농축도차는 25% - 108% 범위내에서 증가하였으며 같은 적용압력하에서는 공급액 부피유속이 감소함에 따라 농축도차는 44% - 119% 범위내에서 증가함을 보였다. 따라서 역삼투 공정과 OSRO 공정의 농축도차는 실험범위내에서 적용압력의 변화에 따른 영향보다는 공급용액의 부피유속 변화에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

#### 4-4. 농축도 예측

단수를 3단으로 하였을때 실험범위내에서 농축도 최고치인 1.877을 얻었을 때와 동일한 실험조건에서 단수를 3단이상으로 하였을때 OSRO공정의 수치모사에 의한 농축도 이론치는 이전 절들에서 나타난 결과와 마찬가지로 보다 상승할 것으로 예측되며 그 결과를 그림 13에 나타내었다.

이로부터 단수가 증가할 수록 OSRO공정의 농축도 이론치는 커짐을 알 수 있었고, 같은 단(stage)내에서 적용압력이 상승함에 따라 농축도 이론치는 증가하는 경향을 보였다. 특히 적용압력이 5.88 MPa일때 4단에서의 농축도 이론치는 2.065로 가장 큰 값을 보였다. 본 연구의 실험범위를 벗어나는 영역에서의 농축도 이론치를 수치모사를 통해 구해보면, 농축도 1.877을 얻었을 때의 실험조건에서 공급용액의 농도만 5.2 wt%에서 4.5 wt%로 대체하고 다른 조건들은 모두 동일하게 하였을 때 OSRO공정의 수치모사에 의한 농축도 이론치는 적용압력이 5.88 MPa일때 4단에서의 농축도 이론치는 2.302의 값을 보였다. 이는 공급용액의 농도가 감소할 수록 농축도가 증가한다는 앞에서의 결과를 이론적으로 뒷받침하고 있다. OSRO공정에 의한 농축효과를 크게 하기 위해서는 OSRO공정용 막의 개발뿐만 아니라, 모듈 형태면에서의 개선이 필요하다. 즉 본 연구에서 사용한 향류식 판틀형 모듈(plate and frame module)이외에 향류식 나권형 모듈(spiral wound module)을 개발함으로써 막면적과 공급액 도입유량이 크게 증가하게 되므로 농축효과가 더욱 커질 것으로 기대된다.

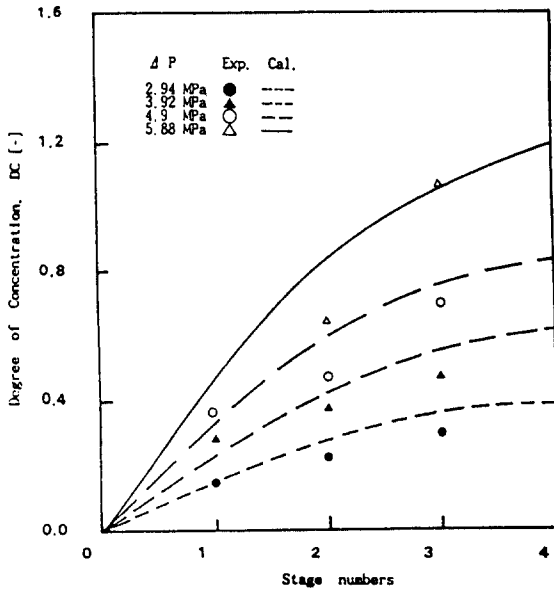


Fig. 7. The DC value of OSRO with number of stage for 0.522 ml/sec feed flowrate (5.2 wt% feed solution : osmotic sink solution flowrate=4.08 ml/sec : 1, 2, 3 test cells).

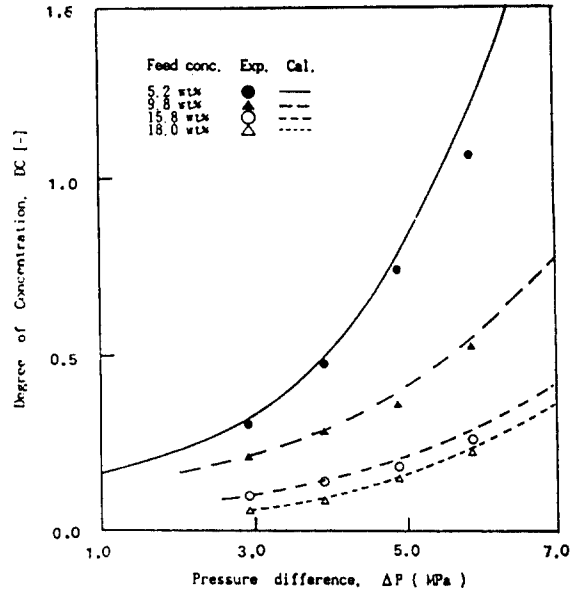


Fig. 8. The DC value of OSRO with pressure difference for 0.522 ml/sec feed solution on triple-test cells.

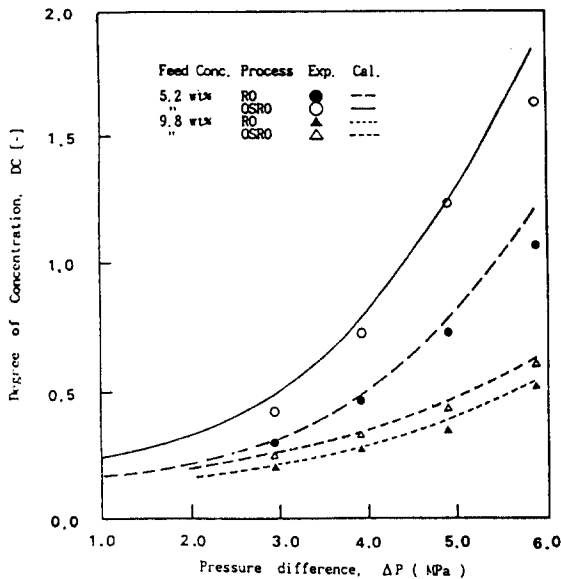


Fig. 9. The comparison of DC value between RO and OSRO with pressure difference for 0.522 ml/sec feed flowrate on triple-test cells.(5.2, 9.8 wt% feed solution)

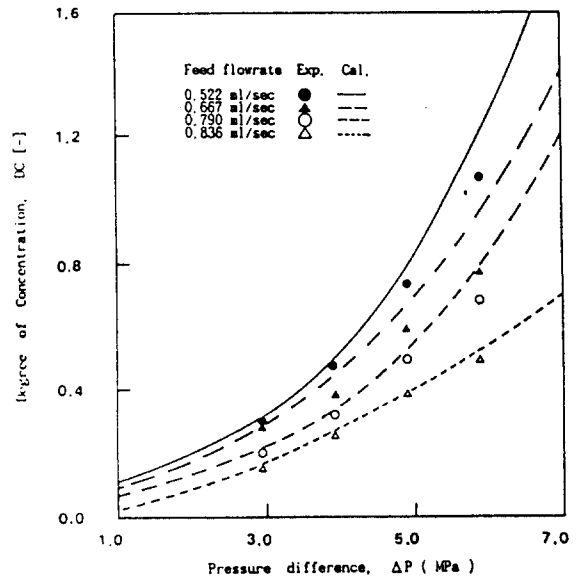


Fig. 10. The DC value of RO with pressure difference for 5.2 wt% feed solution on triple-test cells.

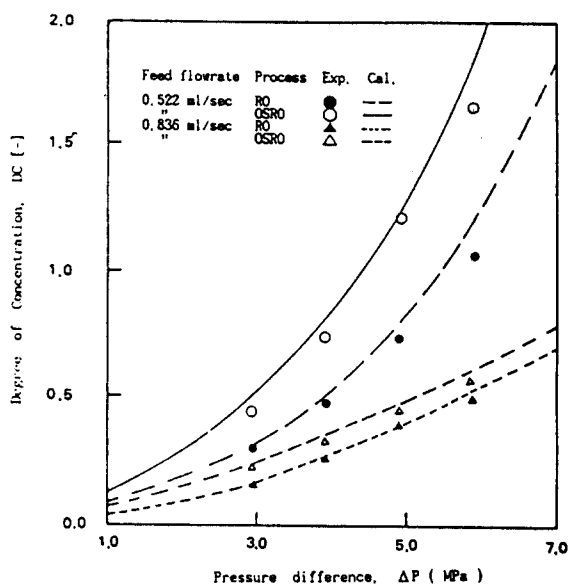


Fig. 11. The comparison of DC value between RO and OSRO with pressure difference for 0.522, 0.836 ml/sec feed flowrate on triple-test cells. (5.2 wt% feed solution, osmotic sink solution flowrate=4.08 ml/sec)

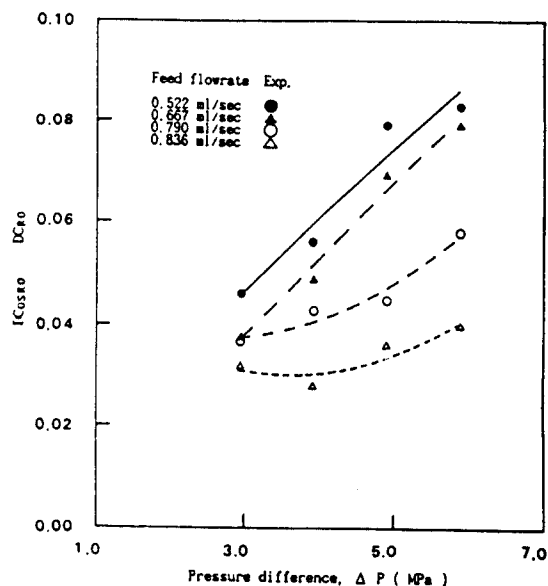


Fig. 12. The difference of DC value between RO and OSRO with applied pressure for 9.8 wt% feed concentration on triple-test cells. (osmotic sink solution flowrate=4.08 ml/sec)

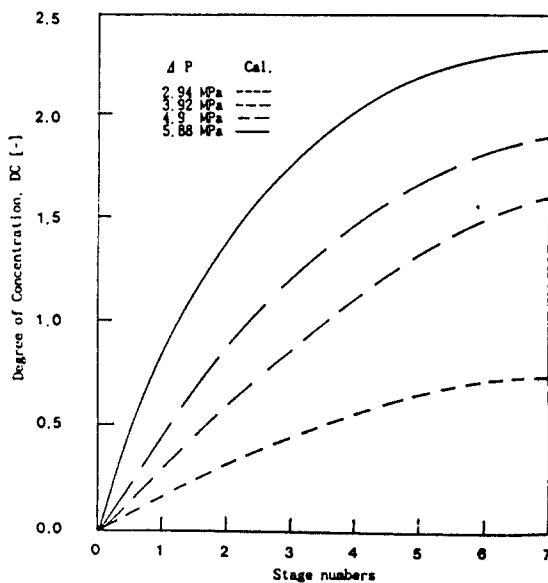


Fig. 13. The numerical result of DC value from simulation according to stage numbers on osmotic sink reverse osmosis.

(feed conc.=5.2wt%, feed flowrate=0.522 ml/sec, osmotic sink solution flowrate=4.08 ml/sec)

## 5. 결론

1. 역삼투공정과 비교하여 OSRO공정의 농축효과의 척도를 의미하는 농축도차( $DC_{OSRO} - DC_{RO}$ )는 전 실험범위에서 항상 0보다 큰 값을 보이므로 에탄올 농축에 있어서 OSRO공정이 역삼투공정에 비해 효과적임을 알 수 있었다.

따라서 OSRO공정에 의한 농축공정을 개발하여 에탄올 농축에 적용한 바 역삼투공정에 비하여 높은 에탄올 농축효과를 얻었으며, 에탄올 분리효과가 뛰어난 OSRO용 막의 개발 및 농축장치를 보다 다단으로 할 경우 산업화가 가능하다는 결과를 얻었다.

2. OSRO공정에 대한 이론식의 수치모사시 도입변수와 막상수값을 이용하여 해석하였으며 이로부터 총 부피 투과 플릭스와 베제액 농도의 정량적인 해를 구할 수 있었으며, 해석적 결과로부터 농축도 이론치는 실험치와 약 15% 이내에서 일치하였다.

3. 공급액농도와 부피유속, 적용압력, osmotic sink solution의 부피유속과 같은 조작변수들의 변화에 따른 역삼투 및 OSRO 공정의 농축도 변화를 고찰하며, 본 연구에서는 실험범위외의 수치모사에 의한 농축도 이론치도 제시하였다.

## 감사

이 논문은 교육부지원 한국 학술진흥재단의 학술연구조성비에 의해 수행된 것으로서 이에 감사드립니다.

## 기 호 설 명

R	: Rejection coefficient( $=1 - C_p/C_w$ )	
$J_s$	: Solute flux	(mole/cm <sup>2</sup> · sec)
$J_v$	: Total volume flux	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> · sec)
P	: Pressure	(MPa)
$\Delta P$	: Pressure difference across the membrane	(MPa)
$\pi$	: Osmotic pressure difference across the membrane	(MPa)
$C_p$	: Permeate flow concentration of solute	(wt %)
$C_w$	: Solute concentration at the membrane wall	(wt %)
$L_p$	: Pure water permeability coefficient	(cm <sup>3</sup> /MPa · cm <sup>2</sup> · sec)

$\sigma$	: Reflection coefficient	
$C_1$	: Concentration at the upperside of membrane	(mole/cm <sup>3</sup> )
$V_1$	: Average feed flow velocity upperside of membrane	(cm/sec)
$l$	: Cell length	(cm)
$C_s$	: Logarithmic average solute concentration	(mole/cm <sup>3</sup> )
$\omega$	: Solute permeability coefficient	(mole/MPa · cm <sup>2</sup> · sec)
$\delta$	: Channel thickness	(cm)
$\rho$	: Density of solution at a differential element	(g/cm <sup>3</sup> )
$\rho'$	: Density of solution at a next differential element	(g/cm <sup>3</sup> )

## 참 고 문 헌

1. 醱酵工學, 63 (5) 457 (1985)
2. 醱酵工學, 64 (6) 487 (1986)
3. 醱酵工學, 65 (5) 447 (1987)
4. 민병렬 : “膜分離”, 화학공학 특론, 한국화학공학회, 서울(1988).
5. S. Loeb, and M.R. Bloch, : Desalination, 13, 207(1973).
6. E.K.L., Lee, W.C. Babcock, and P.A. Bresnahan, P.A. : Countercurrent Reverse Osmosis for Ethanol-Water Separation, U.S. Department of Energy, (DOE/ID/12320-T1(DE 83009725).(1983).
7. D.R. Lloyd, : “Materials Science of Synthetic Membranes“, ACS(1985).
8. M.M., Charles, E.E, A.L., Debra, Stephen, and L.C. Briant : “Membrane Applications and Research in Food Processing”, Noyes Data Co.(1989).
9. D.M. Gurmukh, : Jouonal of Memb. Science, 12, 1(1982).
10. A.L. Stephen, and T.T. George, : Jouonal of Memb. Science, 30, 289(1987).
11. A., Katchalsky, and P.F. Curran, : “Nonequilibrium Thermodynamics in Biophysics”, Harvard University Press(1965).
12. A.L. James, : Thesis, SUNY Buffalo(1978).
13. S.T. Hwang, and K. Kammermeyer, K. : “Membranes in Separations”, John Wiley and Sons, Inc.(1975)
14. R.E. Kesting, : “Synthetic Polymeric Membranes, 2nd ed.”, John Wiley and Sons(1985).

15. P. Meares, : "Membrane separation Processes", Elsevier Scientific Publishing Company(1976).
16. E.H. Rodd, : "Rodd's Chemistry of Carbon Compounds : Vo1. I", Elsevier Publishing Co.,New York(1965).
17. S., Sourirajan, and T. Matsura, Reverse Osmosis/Ultrafiltration Process principles", National Research Council of Canada(1985).
18. L. Onsager, : "Reciprocal Relations in Irreversible Processes I", Physical Review, 37, 405(1931).
19. B.R. Min, : Ph.D Dissertation, SUNY Buffalo(1983).
20. K.S., Spiegler, and O. Kedem, O. : Desalination, 1, 311(1966).

---

주) 본 원고는 1992년도 춘계총회 및 학술대회에서 강연한 내용입니다.