

원판틀형 역삼투 모듈의 투과성능 비교

박민수·배성렬·정건용*†

한양대학교 화학공학과 · *서울산업대학교 화학공학과
(1997년 4월 17일 접수, 1997년 6월 12일 채택)

The Separation Performance of Disc Plate and Frame Type Reverse Osmosis Modules

Min Soo Park, Seong Youl Bae, and Kun Yong Chung*†

Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Daehak-dong, Ansan, Kyunggi-do 425-791, Korea

*Department of Chemical Engineering, Seoul National Polytechnic University, Gongneung-dong,

Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(Received April 17, 1997, Accepted June 12, 1997)

요 약 : 직선형(Type 1), 곡선형(Type 2) 및 병렬형(Type 3) baffle을 설치한 역삼투용 판틀형 모듈을 설계 제작하였으며 NaCl과 sucrose 용액을 각각의 모듈에 공급하여 용액농도 및 운전압력등이 분리특성에 미치는 효과를 측정하고 각 모듈의 특성치를 비교하였다. 운전압력 35bar, 원료 공급유량 6l/min 이내의 운전조건에서 Type 3가 투과선속 및 배제율 측면에서 가장 우수하였다. NaCl 수용액의 경우, Type 1에 대한 Type 2 및 3의 투과선속 향상율은 운전압력이 증가함에 따라서 감소하였다: 1wt% NaCl 수용액에 대한 Type 3 투과선속 향상율은 10bar 근처에서 약 100%이었으나 35bar에서는 약 10%로 감소하였다. 그러나 sucrose 수용액에 대한 Type 2 및 3의 투과선속 향상율은 농도 및 운전압력에 따라서 크게 변화하였다. 또한 Type 3의 경우, 원료용액의 공급속도 변화에 따른 투과선속의 의존성은 거의 선형적으로 나타났으며 이는 baffle이 존재하지 않는 난류영역에서 보다 큰 값이었다.

Abstract: The disc plate and frame type modules for reverse osmosis were developed using three different types of baffles: linear (Type 1), curved (Type 2) and parallel shapes (Type 3). Separation performance tests were carried out for the modules using NaCl and sucrose solutions under the various concentrations and operating pressures. The permeation flux and solute rejection ratio for Type 3 module were the highest within operating pressure (35bar) and flow rate (6l/min). The flux improvement ratio of Type 2 or 3 to Type 1 for NaCl solution decreased as operating pressure increased: flux improvement ratios of Type 3 for 1wt% of NaCl solution were about 100 and 10% at 10 and 35bar, respectively. However, the flux improvement ratio for sucrose solutions varied with the operating pressure and concentration. The permeation flux for Type 3 depended on the flow rate linearly, which is higher than that of turbulent flow region in the smooth channel.

1. 서 론

역삼투 기술은 수십 내지 수백 기압의 운전압력으로 각종 염이나 유기물질을 분리하거나 농축하는데

이용되는 분리공정의 한 방법으로 막 또는 분리대상 물질의 물리화학적 특성과 압력차등의 변수로 투과성능이 결정된다. 역삼투 현상은 아직까지 확실하게 그 원리가 규명되지 않았지만 한외여과나 정밀여과와는

상당히 다른 분리 mechanism을 따르는 것으로 알려져 있다[1, 2]. 현재까지 알려진 역삼투 이론은 bound water hole/alignment type diffusion model, preferential sorption/capillary flow mechanism 그리고 solution-diffusion model 등이 제시되어 있다[3]. 역삼투막의 개발목표는 높은 투과선속과 배제율로써 공정의 효율과 경제성을 향상시키는데 있다. 분리공정 초기에는 분리막 표면의 용질농도가 bulk 용액의 농도와 같지만 분리막을 통하여 물등의 용매가 선택적으로 투과하면 분리막 근방의 경계층에는 bulk 용액의 농도보다 훨씬 높은 용질층이 형성된다. 일반적으로 용질은 확산계수가 용매에 비하여 작기때문에 용매가 분리막을 투과하는 것보다 훨씬 작은 속도로 bulk 용액내로 확산 이동하므로 분리막 표면의 경계층은 점차 두꺼워지며 용질의 농도도 증가하게 된다. 특히 NaCl 등에 비하여 수십 내지 수백배 작은 확산계수를 지니는 용질을 분리하는 한외여과 또는 정밀여과에서는 분리막 표면에서의 고농도 용질층 이른바 농도분극화 현상이 지배적인 투과저항이 된다. 역삼투 공정에서는 경계층내의 용질농도가 bulk 용액보다 일반적으로 약 2 내지 3배가량 높게 형성되나 한외/정밀여과에서는 비교적 효과가 작은 용질 삼투압이 지배적인 인자가 되므로 결국 농도분극화 현상을 최소화하여야 투과성능을 극대화할 수 있게 된다.

그러나 분리막 공정에서는 막근방에서 매우 안정한 용질의 경계층을 형성하므로 이를 극복하기 위한 효과적인 기술적 해결방안이 절실히 요구된다. 농도분극화 및 막오염 현상을 극복하는 기술로는 화학적으로 막표면 성질을 친수성 또는 친유성으로 개선하는 등의 막소재 관련 방법, 원료용액의 전처리 등으로 부유물질의 함량을 감소시키거나 계면활성제등을 첨가하여 원료용액의 성질을 개조하는 방법 그리고 효율적인 역세척 운전등의 운전방법 개선등이 있다. 이 밖에도 원료용액의 공급속도를 증가시키거나 분리막 모듈내에 여러가지 형태의 baffles 등을 부착시켜 막 표면에 모여있는 용질을 혼합시키는 방법등이 있다 [4, 5]. 그러나 난류촉진제인 baffles는 경계층을 감소시키는데 매우 효과적인 방법이지만 막모듈 제작시에 어려움과 운전시 동력비가 증가한다. 따라서 모듈 제작비, 운전비등을 고려한 종합적인 투과성능 평가가 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 역삼투용 관틀형 모듈을 설계함에 있어서 모듈내에 직선형, 곡선형 및 병렬형 형태의

baffles를 설치하여 인위적으로 난류를 유도하도록 하였다. 각 모듈에 NaCl 및 sucrose 용액을 공급하여 용액농도 및 운전압력등이 역삼투 분리성능에 미치는 효과를 측정하였으며 또한 각 모듈의 투과선속 및 배제율을 비교, 평가하였다. 본 연구에서 사용한 염배제율은 다음과 같이 공급용액 농도(C_f)와 투과용액의 농도(C_p)비로 정의하였다.

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (1)$$

2. 실험

2.1. 역삼투용 분리막

본 연구에서 사용한 분리막은 FilmTec사의 polyamide 복합막으로 가장자리가 8각 형태로 초음파 용접되어 있으며 분리막 사이에는 투과액이 원활히 흐를 수 있도록 polyester spacer가 삽입되어 있다. 중심 부위에는 직경 4.5cm 가량의 구멍이 존재하므로 분리막 사이에 spacer를 통하여 흐른 투과액이 분리막 외부로 배출될 수 있다. 따라서 분리막 양면을 사용할 수 있으며 유효 단면적은 434cm²이다.

2.2. 역삼투 모듈

세가지 형태의 역삼투용 원판틀형 모듈을 제작하였으며 각 모듈의 형태는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 분리막 표면을 흐르는 공급액은 모듈과 분리막 사이에 위치한 내부 o-ring으로 밀봉할 수 있다. 분리막 내부의 spacer를 통하여 흐르는 투과액은 8각으로 용접된 분리막 내부를 통하여 중심방향으로 흐르며 투과수 집수부로 모여 배출된다. 이상의 방법으로 잔류액과 투과액을 분리시킬 수 있으며 외부 o-ring과 12개의 볼트/너트를 사용하여 모듈을 대기로 부터 밀봉시킬 수 있다. 원료액은 모듈의 중심부분으로 공급되며 4mm 직경인 20개의 구멍을 통하여 바깥 원주 방향으로 일정하게 분포되어 흐르면서 분리막과 접촉하여 투과액과 잔류액으로 분리된다. 분리막의 한쪽 표면과 접촉한 잔류액은 원주 근처에서 8각형태의 분리막과 원형 모듈사이에 형성되는 활모양의 빈공간에서 180° 회전되어 반대편의 분리막 표면과 접촉하면서 원 중심부로 흐른다. 원 중심부에서는 그 다음 모듈(모듈이 1개 이상인 경우)의 중심부로 들어가며 이상의 방법을 순차적으로 반복하여 최종 모

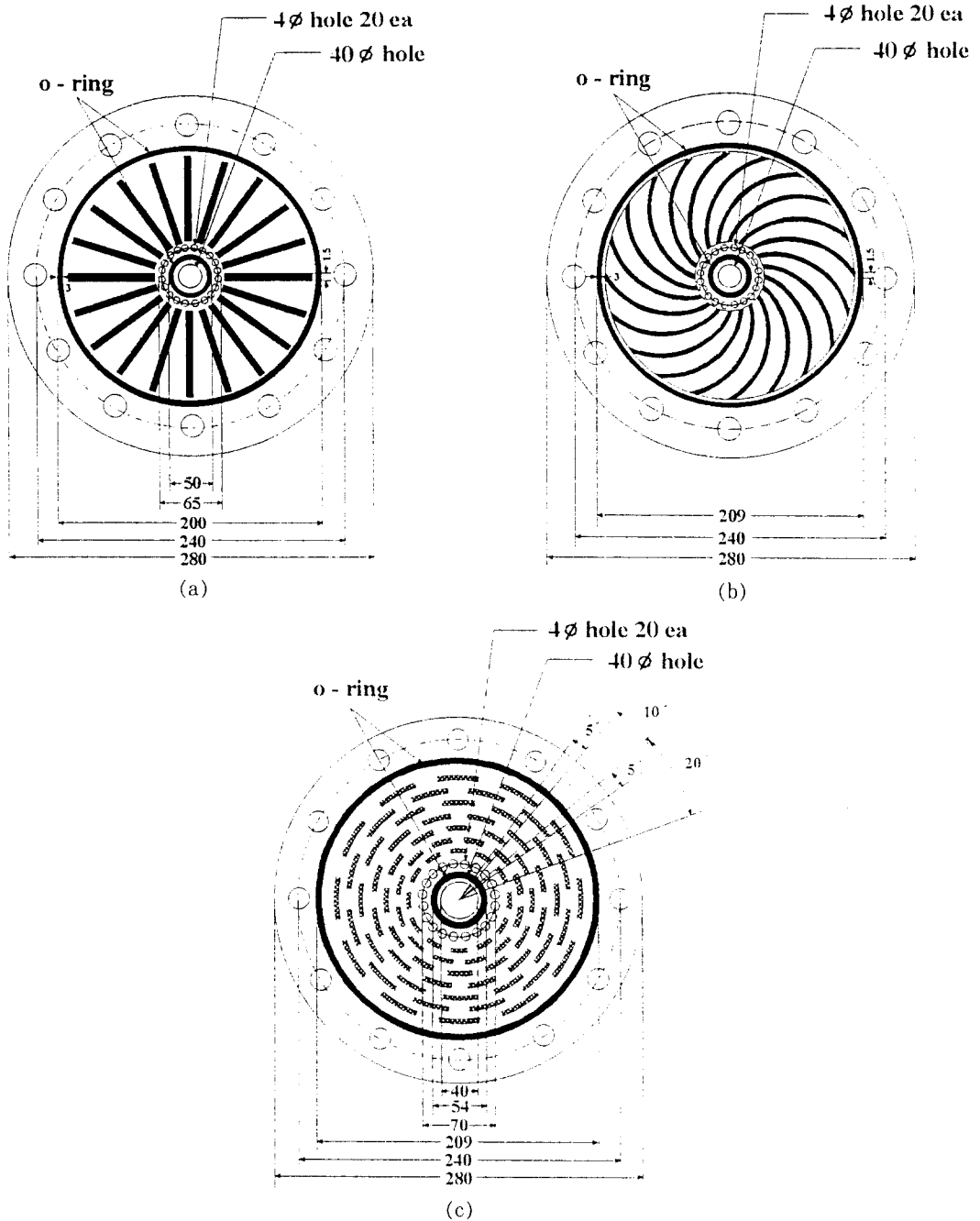


Fig. 1. Schematic Drawing of Disc Plate and Frame Type Modules: (a) Linear (Type 1), (b) Curved (Type 2) and (c) Parallel (Type 3) Shapes.

들을 통과한 후 모듈밖으로 배출된다.

Fig. 1(a)는 20개의 빗금친 baffle이 직선 방사형

으로 구성된 형태로(이하 Type 1) 각각의 baffle은 밑변이 3, 윗변이 1.5이며 높이가 1.5mm인 사다리꼴

단면이다. 분리막과 접촉하는 윗변의 길이를 축소시켜 baffle과의 접촉으로 인한 분리막의 유효 면적 감소를 줄이도록 노력하였다. 따라서 중앙으로 공급된 원료액은 인접 baffle과 각각의 baffle 윗면이 접촉하는 분리막의 유로를 통하여 흐른다. 중심으로 공급된 원액은 바깥쪽으로 유로의 단면적이 증가하는 방향으로 흐른 후 180° 회전하여 반대방향인 중심부위에 모여서 구멍을 통하여 다음 모듈로 흐르게 된다. Fig. 1(b)는 곡선 형태인 baffle로 인접 baffle과 분리막이 형성하는 유로를 곡선형으로 만들어 유체의 흐름중에 와류를 형성하기 위한 것으로(이하 Type 2) 나머지 부분은 Fig. 1(a)와 같다. Fig. 1(c)는 Fig. 1(a)와 b)의 경우에 분리막과 baffle의 상부가 접촉하여 불가피하게 발생하는 분리막의 유효면적 감소를 제거하고 baffle로 인한 난류현상을 유도하기 위하여 2mm 높이의 유로중 1.5mm에 baffle을 설치하였다(이하 Type 3). 이 경우, 분리막은 baffle과 접촉하지 않으며 유체는 baffle를 넘어가든지 또는 각각의 baffle 옆에 있는 공간으로 돌아가게 된다.

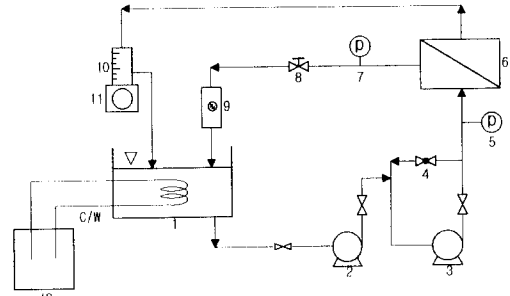
NaCl 수용액에 대한 내부식성과 고강도를 지닌 polycarbonate 수지로 모듈을 제작하였다. 특히 본재질은 투명하여 부분적이지만 유동현상을 관측할 수 있었다. 최적의 모듈형태가 결정되면 사출방식으로 손쉽게 다량의 모듈을 제작할 수 있을 것으로 판단되나 여러 형태에 따른 사출 molder의 비용때문에 본 연구에서는 평판을 각아 제조하였다.

2.3. 원료용액

원료용액으로 사용한 시료는 NaCl(東洋化學工業(株))과 분자량이 342인 sucrose(第一製糖(株))이다. NaCl 수용액과 sucrose 수용액을 만들기 위한 물은 Rochem R/O 시스템을 통과시켜 제조한 초순수로써 conductivity가 2.5μ siemens/cm 이하이다.

2.4. 실험장치 및 방법

제작한 모듈의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 제작하였다. 대기압 상태의 공급액인 NaCl 또는 sucrose 수용액은 저장조 (1)로부터 최대 40bar까지 가압하기 위하여 2대의 pump(금성사/PWN-262D, Cat Pump/247)를 사용하였다. 1단계로 대기압에서 7bar까지 가압시킨후 2단계 고압펌프 (3)에서 원하는 운전조건의 압력으로 상승시킬 수 있으며 최대 공급유량은 6.5~7l/min이다. 모듈의



- | | |
|------------------------|-----------------------------------|
| 1. Reservoir | 8. Back Pressure Regulating Valve |
| 2. Booster Pump | 9. Flowmeter |
| 3. High Pressure Pump | 10. Mass Cylinder |
| 4. By-Pass Valve | 11. Mass Balance |
| 5. Pressure Valve | 12. C/W Circulator |
| 6. R/O Membrane Module | |
| 7. Pressure Gauge | |

Fig. 2. Schematic Flow Diagram for R/O System.

운전압력은 고압펌프 (3)과 RO 모듈 (6) 사이에 위치한 by-pass 밸브 (4)와 모듈뒤에 위치한 압력조절 밸브 (8)를 사용하여 조절할 수 있다. 막모듈을 통과한 투과액과 잔류액은 전량 원액 저장조로 회수되었으며 mass cylinder (10) 또는 mass balance (11)를 사용하여 주기적으로 투과유속을 측정하였다. 사용된 원료액 저장조의 부피는 30리터이며 투과유속을 측정하기 위한 체류부피는 1리터 이하이므로 공급수의 농도변화는 수 % 이내에서 일정하게 유지시킬 수 있었다. 고압펌프로 인한 온도상승을 막기 위하여 항온순환기 (12) (Eyler/CTP-301)를 사용하였으며 원료액의 온도는 $25\pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

NaCl 수용액의 경우는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0wt%의 농도에서 공급압력을 10bar에서 2.5bar씩 증가시켜 $35\pm 1\text{bar}$ 까지 변화시켰으며 투과유속과 투과액의 농도를 측정하였다. 또한 원료 공급속도에 따른 투과유속 변화실험을 제외한 모든 실험에서 용액의 공급유량은 약 6l/min 로 일정하게 유지하였다. 매 실험시마다 투과 유량을 일정시간 간격으로 측정하였으며 약 30분 이내에 투과량의 변화가 3% 이내인 정상상태에 도달하였다. 매 실험시 투과액은 시간에 따라서 100ml까지 일정하게 측정하였으며 압력을 바꾸어 실험 할 때에는 30분간 시스템을 순환시켜 정상상태에 도달한 후 실험을 재개하였다. 또한 투과액중에 포함되어 있는 NaCl 농도는 conductivity meter(Kyoto Electronics/CM-117)를 이용하여 측정하였다.

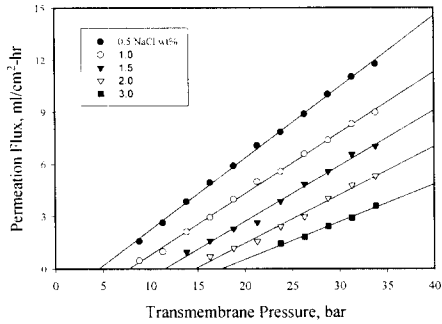


Fig. 3. Permeation Flux in terms of Operating Pressure and NaCl Concentration for Type 1 at 6l/min.

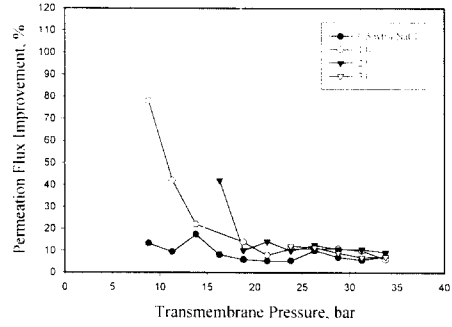
Sucrose 수용액의 경우는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0, 10.0, 15.0wt%까지 변화시켰고 압력변화는 NaCl의 경우와 같다. 투과액중 sucrose 농도는 refractometer(Atago Co./Abbe type 3T)를 이용하여 sucrose 표준용액으로부터 얻은 굴절도와 농도의 보정 곡선으로 구하였다. Sucrose 수용액의 경우에는 농도에 따른 삼투압이 NaCl 수용액보다 작으므로 3% sucrose 수용액을 35bar로 고정시킨 후 각 농도에서 유속을 1에서 6l/min까지 1l/min씩 증가시키면서 공급 속도에 따른 투과유속과 투과액의 농도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

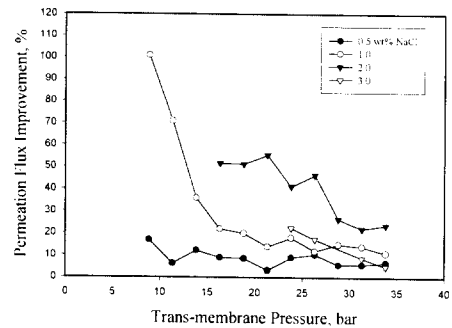
3.1. 역삼투 모듈의 성능

막모듈 전후에 압력강하는 약 2.5bar 정도로 각각의 모듈에 대하여 실험장치내에서 비슷하였으며 분리막에 가해진 trans-membrane pressure는 모듈입구와 출구의 평균압력으로 택하였다. 수용액중 NaCl이나 sucrose의 농도가 증가함에 따라서 삼투압이 증가하므로 NaCl 수용액의 경우는 농도가 3wt% 일때 25bar 이상, sucrose 수용액의 경우에는 15wt% 농도일 때 15bar 이상에서 실험을 행하였다. 우선, 운전순서에 따른 투과선속 및 용질 배제율의 변화를 점검하기 위하여 운전압력을 증가 또는 감소하는 방향으로 실험하였으며 그 결과, 투과유속과 배제율은 운전 압력의 조작 순서와 관계없이 수% 내에서 일치하였다.

NaCl과 sucrose 수용액을 사용하여 직선형(Type



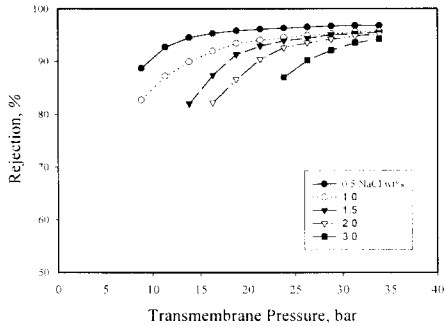
(a)



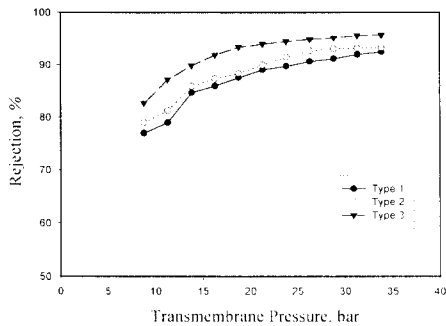
(b)

Fig. 4. Permeation Flux Improvement Ratio for NaCl Solution of (a) Type 2 and (b) Type 3 to Type 1 at 6l/min.

1), 곡선형(Type 2), 병렬형(Type 3)의 세가지 모듈 형태에 따른 투과선속과 배제율을 비교하기 위해 실험하였으며 그 결과는 다음과 같다. 모듈 형태에 대하여 NaCl 농도가 투과선속에 미치는 영향을 측정하였고 그중 대표적으로 Type 1의 투과선속을 Fig. 3에 나타냈었다. NaCl 함량이 증가함에 따라서 투과선속이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 원료용액중에 NaCl 농도가 증가함에 따라서 막표면에 농도분극화 현상이 증가하게 되고 NaCl 삼투압 역시 농도에 비례하여 급격히 증가하기 때문이다. 또한 투과선속을 운전압력인 x축까지 외삽하면 원료용액에 작용하는 삼투압 효과를 간접적으로 추정할 수 있다. 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 그리고 3wt% NaCl 용액의 삼투압 효과는 각각 5, 8, 11, 15 그리고 18bar 정도이고 이 수치를 기존의 NaCl 삼투압 데이터[6]와 비교하면



(a)



(b)

Fig. 5. NaCl Rejection of (a) Type 3 at 6l/min and (b) Type 1, 2 and 3 for 1wt% NaCl Solution at 6l/min.

2 내지 4bar 정도 작으나 비교적 잘 일치하였다. Fig. 4(a와b)는 Type 2와 3 모듈형태에서의 투과선속을 Type 1과 비교하여 투과선속의 증가율을 나타낸 것으로 직선형인 Type 1 경우의 투과선속이 가장 낮았으며 병렬형인 Type 3가 가장 높았다. 투과선속 향상율은 압력이 증가하면서 그 효과가 감소하는데 이것은 운전압력이 삼투압 근처일 경우, baffle에 의한 난류형성으로 분리막 표면의 낮은 NaCl 농도와 이에 따른 삼투압 감소효과가 상대적으로 크게 나타나기 때문이다. 예를들어 Type 3의 1wt% NaCl의 경우, 10bar 근처에서는 약 100%이나 운전압력이 감소함에 따라서 35bar 근방에서는 약 10%로 감소하였다. NaCl 농도가 증가함에 따라서 일반적으로 투과선속의 향상율이 증가하였으나 Type 3의 3.0wt% NaCl 수용액에 경우는 증가율이 압력의 증가에

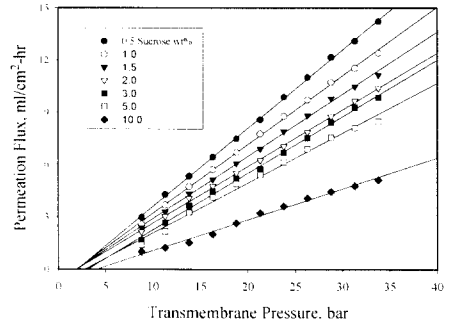
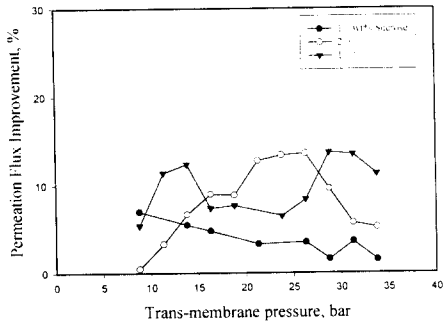
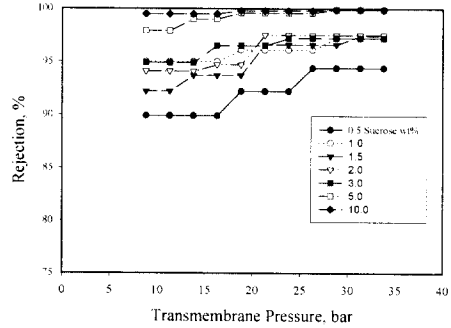


Fig. 6. Permeation Flux in terms of Operating Pressure and Sucrose Concentration for Type 1 at 6l/min.

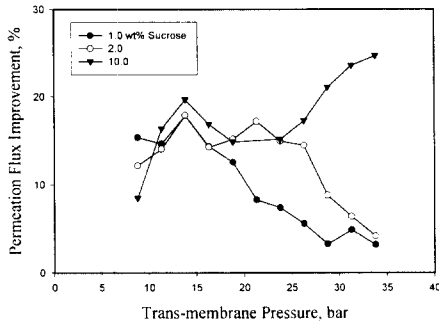
따라서 현저하게 감소하여 35bar에서는 제일 낮은 증가율을 나타내었다. 또한 Type 2와 3의 투과선속의 향상율을 동일농도에서 비교하면 병렬형인 Type 3가 곡선형인 Type 2보다 우수함을 알 수 있다. Fig. 5(a)는 NaCl 배제율이 가장 우수한 Type 3에 대한 것으로 Type 1과 2에 경우에도 비슷한 경향을 보인다. 배제율은 압력이 낮거나 농도가 높을수록 현저히 감소함을 알 수 있다. 이것은 압력이 감소하면 막을 통과하는 물의 양이 상대적으로 줄어드는 반면에 농도구배에 의한 NaCl의 확산량은 거의 일정하게 되므로 단위 투과액당 존재하는 NaCl의 양이 증가하게 되어 배제율이 감소하기 때문이다. 또한 동일 운전압력에서 농도가 증가하면 마찬가지로 NaCl의 농도구배가 증가하므로 NaCl의 분리막 투과량이 증가하여 배제율이 감소하게 된다[7]. Fig. 5(b)는 3가지 모듈의 NaCl 배제율을 비교한 것으로 Type 3가 투과선속 및 용질배제율 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났다. Fig. 6은 sucrose 농도에 따른 투과선속의 영향을 나타낸 것이다. Sucrose 함량을 증가시키면 NaCl 경우와 마찬가지로 투과선속이 감소하나 sucrose의 삼투압이 NaCl 보다 낮으므로 농도변화에 따른 투과선속의 영향은 NaCl 경우보다 작다. Fig. 7은 sucrose 농도 및 모듈형태에 따른 투과선속을 나타낸 것이다. Sucrose의 경우에도 Type 3 모듈이 Type 2보다 우수한 투과선속의 향상을 나타내고 있다. 1wt% sucrose 농도에 경우 투과선속 향상율은 운전압력이 증가함에 따라서 감소하였으나 2wt%에 경우는 약 26bar에서 최대 향상율을 나타냈으며 그 이상에서는 점차적으로 감소하였다. 그러나 고농도인



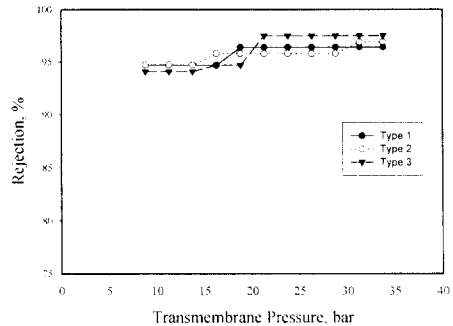
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 7. Permeation Flux Improvement Ratio for Sucrose Solution of (a) Type 2 and (b) Type 3 to Type 1 at 6l/min.

Fig. 8. Sucrose Rejection for (a) Type 3 at 6 l/min and (b) Type 1, 2 and 3 for 2wt% Sucrose Solution at 6l/min.

10wt%의 경우는 15 내지 25bar에서 투과향상율이 낮았으며 그 이상에서는 증가하였다. 이상에서와 같이 고농도 용액의 경우, 특이한 투과향상율을 나타내는 분리막 표면에서 sucrose 농도가 급격하게 증대되어 용액물성이 변화한 것으로 추정할 수 있지만 자세한 현상은 향후 규명되어야 할 것이다. 또한 Fig. 8 (a)에서와 같이 sucrose 배제율은 NaCl 경우와는 달리 압력에는 거의 무관하지만 농도가 증가함에 따라서 증가하였으며 정전용 등[3]의 결과와도 일치한다. Sucrose의 분자량은 NaCl보다 훨씬 크기 때문에 sucrose 농도에 의한 확산효과는 압력효과보다 상대적으로 작아서 가시적으로 나타나지 않은 것으로 판단된다. 또한 동일 압력하에서 sucrose의 농도를 증가시키면 분자크기가 크고, 물질전달계수가 작은 sucrose는 막 표면에서의 농도가 NaCl 경우보다 높아

막표면의 형성된 용질층이 배제율을 증가시킨 것으로 추정된다. 운전압력에 따라서 다소 변화하지만 sucrose 수용액의 경우에도 약 20bar 이상에서는 Type 3의 용질배제율이 가장 우수하였다(Fig 8(b)).

이상에서와 같이 Type 1, 2 그리고 3의 모듈 특성을 측정하여 본 결과, 병렬형인 Type 3가 가장 우수하였으며 직선형인 Type 1이 가장 열등하였다. 곡선형의 경우는 baffles과 분리막으로 이루어진 곡선형 유로의 길이가 직선형보다 길므로 원료용액이 분리막과 접촉할 수 있는 시간이 상대적으로 길어진다. 더욱이 곡선형 유로내에서는 원심력에 의한 Dean vortex 효과를 기대할 수 있으므로 직선형보다 유리할 수 있다[8]. Type 3는 원료용액의 흐름과 직교하는 방향으로 baffles이 존재하므로 유체는 baffle과 분리막 사이의 공간(baffle 높이의 1/3)으로 overflow 되

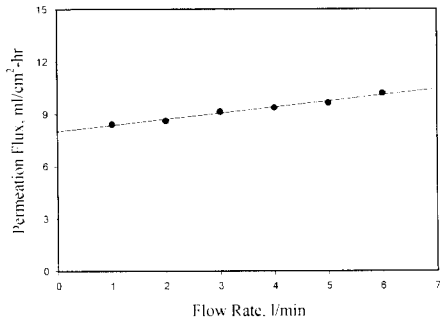


Fig. 9. Effect of Feed Flow Rate on Permeation Flux for Type 3 and 3wt% Sucrose Solution at 35bar.

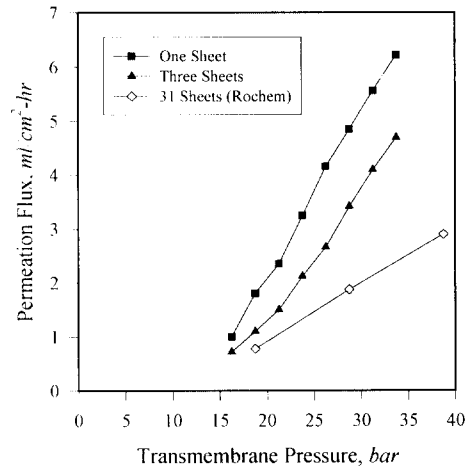
거나 또는 baffle 사이에 빈 공간으로 돌아서 흐르면서 유로의 축소/확대에 의한 난류를 유발하게 된다. 생성된 난류는 분리막 표면의 농축되어 있는 용질을 공급액과 잘 혼합시켜 농도분극화 현상을 감소시키며 이에 따라서 분리막 표면에서의 삼투압을 감소시키므로 Type 1과 2에 비하여 높은 투과유속을 나타낸 것으로 추정된다. 그러나 각 baffle 후미에서는 유체역학적 조건에 의존하여 흐름의 사각지대(flow dead zone)가 존재할 수 있다. 이 경우, 농도분극화 현상을 부분적으로 가속화시킬 수 있으므로 baffle의 위치 및 형태에 대한 최적화가 요구되며 최적의 baffle 형태는 수치모사 방법으로 연구중에 있다[9].

3. 2. 공급유량의 변화효과

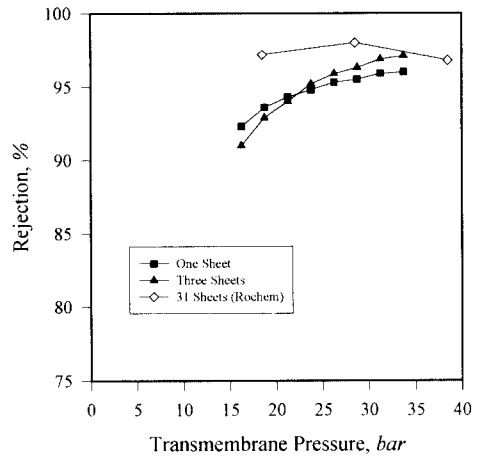
원료용액의 공급속도에 따른 Type 3 모듈의 투과선속 효과를 측정하기 위하여 3wt% sucrose 수용액을 35bar로 유지시키면서 유량을 1에서 6l/min까지 변화시켰다. 측정된 투과선속은 Fig. 9에 나타난 바와 같이, 공급유량에 따라서 선형적으로 변화하였다. 따라서 투과선속은 물질전달 계수(k)에 비례하므로 물질전달 계수도 공급유량(Q)에 선형적으로 비례하며 식 (2)의 지수 (a)는 1에 해당된다.

$$k \propto Q^a \tag{2}$$

일반적으로 baffles가 존재하지 않는 층류영역에서의 a 값은 1/3, 난류영역에서는 0.8 정도이나 Type 3 모듈은 baffles에 의한 난류효과와 증대로 이보다 훨씬 큰 값을 나타내고 있다[10]. 즉 공급유량에 대한 투과선속의 의존성이 크므로 공급속도를 가능한한



(a)



(b)

Fig. 10. Membrane Plate Stack Effect on (a) Permeation Flux and (b) Solute Rejection for 2wt% NaCl Solution at 6l/min.

높게 유지하는 것이 유리할 것으로 추정된다.

3. 3. 모듈갯수에 따른 투과선속

Type 3 형태로 제작된 모듈을 NaCl 수용액 2wt%에서 모듈의 수를 1개 또는 3개를 적층하여 직렬로 연결한후 실험한 결과를 기존 Rochem module (31개 적층)과 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 여러 개의 모듈을 적층해서 실험을 하는 경우에 첫번째 모듈을 통과한 농축수가 두번째 모듈을 통과하는 공급

수가 되므로 모듈의 갯수가 많아짐에 따라서 각각의 모듈에서 유입농도가 순차적으로 증가하기 때문에 생산수의 양은 점점 감소된다. 그러므로 투과액의 총량은 모듈의 갯수가 많을수록 크지만 단위면적으로 나타나는 투과선속은 총 투과유량을 단면적으로 나눈 평균값이므로 모듈 1개의 경우가 가장 높고 모듈의 수가 증가 할수록 낮았다. 또한 배제율은 모듈 1개와 3개의 결과치가 비슷하나 운전압력이 낮을 경우 모듈 1개의 경우가 다소 높게 나타났다. 또한 Rochem module에 대한 배제율은 이보다 높은 97% 수준에서 유지되었다[3].

4. 결 론

본 연구에서는 직선형, 곡선형 및 병렬형 형태의 baffles이 설치된 역삼투용 판틀형 모듈에 NaCl 및 sucrose 용액을 공급하여 용액농도 및 운전압력등이 투과성능에 미치는 효과를 비교, 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 운전압력 35bar, 원료공급액의 유속 6l/min 이 내의 운전조건에서 병렬형인 Type 3가 투과유속 및 배제율의 측면에서 가장 우수하였다.

Type 3, 1wt% NaCl의 경우, Type 1에 대한 투과선속 향상율은 10bar 근처에서 약 100%이나 운전압력에 따라서 감소하여 35bar에서는 약 10%로 감소하였다. NaCl 농도가 증가함에 따라서 투과선속의 향상율이 증가하였으나 Type 3의 3.0wt% NaCl 수용액 경우는 압력의 증가에 따라서 오히려 감소하여 35bar에서는 제일 낮은 증가율을 나타내었다. Sucrose 함량을 증가시키면 NaCl 경우와 마찬가지로 투과선속이 감소하나 sucrose의 삼투압이 NaCl 보다 낮으므로 농도변화에 따른 투과선속의 영향은 NaCl 경우보다 작다. 또한 NaCl 배제율은 운전압력이 낮거나 농도가 높을수록 현저히 감소하였으나 sucrose 배제율은 NaCl 경우와는 달리 압력에는 거의 무관하였으며 농도에 따라서 증가하였다.

2. 3wt% sucrose 용액의 경우, 원료 용액의 공급속도를 1에서 6l/min까지 1l/min 씩 증가시키면서 투과선속을 측정한 결과 투과선속은 선형적($\alpha=1$)으

로 증가하였으며 이는 난류영역의 0.8보다 큰 값이므로 Type 3에 경우, 원액 공급속도를 높게 유지하는 것이 유리할 것으로 추정된다.

3. 분리막 모듈을 적층하여 NaCl 수용액의 투과실험을 실시한 결과, 적층수가 증가할수록 투과선속은 감소하였으나 20bar 이상에서 NaCl 배제율은 증가하였다.

감 사

본 연구는 통상산업부 에너지자원 기술개발지원센터(RACER)의 에너지절약 연구기술개발 자금의 지원으로 수행되었기에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. R. G. Gutman, "Membrane Filtration", Adam Hilger, IOP Publishing Ltd., Bristol, UK (1987).
2. C. E. Reid and E. J. Breton, Jr., J. Appl. Polym. Sci. 1, 133 (1959).
3. 정건용, 정욱, 원장묵, 배성렬, 하백현, 멤브레인, 5(2), 81 (1995).
4. H. B. Winzeler and G. Belfort, J. Membrane Sci., 80, 35 (1993).
5. J. A. Howell, V. Sanchez, and R. W. Field, "Membranes in Bioprocessing", Blackie Academic & Professional, London, UK (1993).
6. S. Sourirajan, "Reverse Osmosis", Academic Press Inc., NY (1970).
7. G. Dogu and T. Dogu, AIChE J., 35, 1370 (1989).
8. K. Y. Chung, R. Bates, and G. Belfort, J. Membrane Sci., 81, 139 (1993).
9. S. C. Yi, S. Y. Bae, J. M. Won and B. H. Ha, The 4th Japan-Korea Symposium on Separation Technology, 1081, Waseda Univ., Tokyo, Japan (1996).
10. M. Cheryan, "Ultrafiltration Handbook", Technomic Publishing Co., PA (1986).