

逆滲透壓法과 그 應用

姜 錫 浩*

逆滲透壓法과 그 應用

역삼투압법은 일반적인 分離操作의 하나인데, 원리 상으로는 기상이나 혹은 수용액, 비수용액인 액상의 유기물질, 무기물질을 分離하고 농축하고 분류하는데, 적용 할 수 있는 단위조작의 한 部分이며, 최근 십년 동안에 매우 급속히 발전하여서 물의 처리나 해수의 전환을 비롯하여 각 가지 화학공업에 있어서 새롭고 융통성있는 單位操作의 한 분야가 되고 있으며 이 方法의 發達은 공학적으로 경제적으로 또한 사회적으로 큰 의의를 가지고 있으므로 그 개요를 소개한다.

1. 滲透壓

1748年 J. A. Nollet(佛)의 실험 이후 백여년이 지난 1877년에 Pfeffer와 Van't Hoff의 과학적 측정이 행하

여 저서 비로서 액체의 滲透壓이 비점상승이나 빙점강하와 같이 용액의 중요한 성질임이 밝혀 졌다. 삼투압의 이론은 농도가 진한 용액이나 콜로이드 용액에서도 분명히 밝혀 저서 고분자 물질의 발달에도 큰 영향을 끼쳤다.

滲透壓 현상에서 매우 중요한 두 가지 사실 즉 「반투막을 사이에 두고 농도가 서로 다른 두 용액이 평형에 도달하는 속도는 반투막의 종류에 따라서 달라지지 만 어떤 주어진 용액의 삼투압은 모든 반투막에 대해서 독립적으로 동일한 값을 나타낸다」는 사실 이다.

따라서 역삼투압법에 利用될 수 있는 반투막을 선택

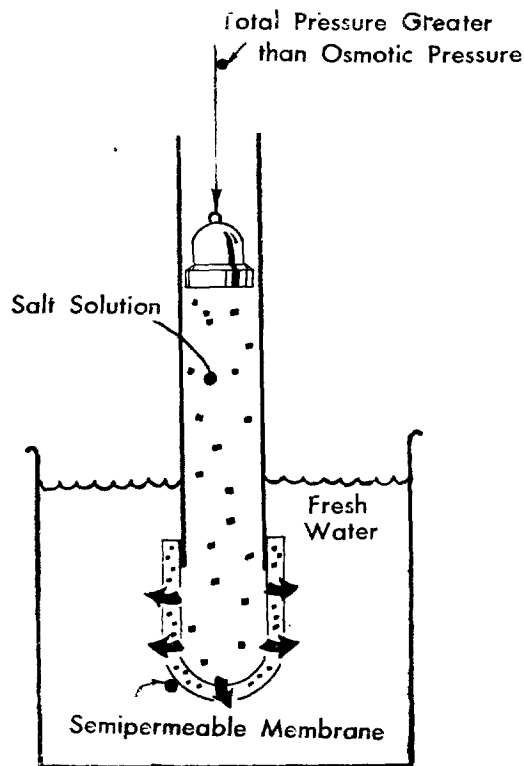
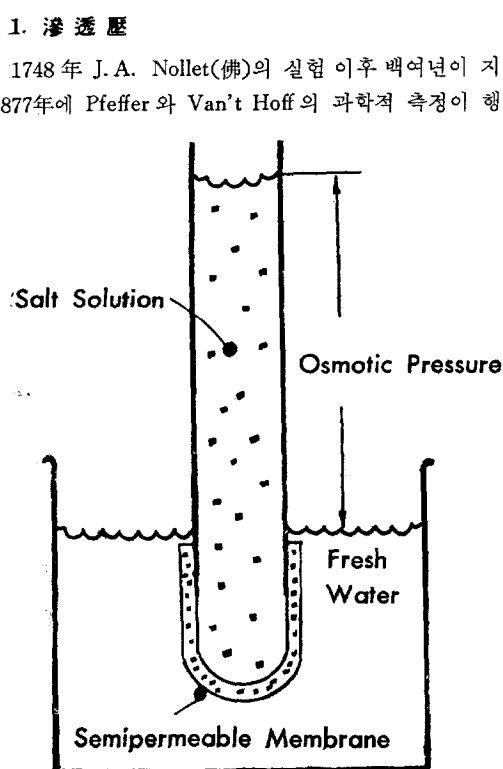


Fig. 1. Schematic Diagram of Osmosis and Reverse Osmosis.

한다는 것은 공학적 견지에서 매우 중요하며, 용액의 삼투압, 몰랄 밀도, 점도, 확산 계수 등은 기본적으로 역삼투압 공정에 필요한 물리화학적 자료로써 문헌^{1,2,3)}으로 부터 얻거나 측정할 필요가 있다. <Fig. 1>은 삼투압과 역삼투압 현상을 설명하는 간단한 그림이다.

2. 역삼투압법 혹은 한외여과

반투막을 利用한 分離操作은 적용되는 유체에 따라서 기체 확산과 액체 투과법의 두 가지로 나누어 고찰할 수가 있다.⁴⁾

유기물의 증기나 영구 기체의 확산에 의한 分離는 기체 분자의 반투막에 대한 용해도 혹은 흡착량과 기체의 확산 계수의 곱에 비례하는 기체 투과량으로 결정되는데, 이때 온도의 영향, 반투막의 두께와 반투막 제조시의 건조 방법은 물론, 반투막을 형성하는 분자의 크기에도 영향을 받는다.

액체 투과법은 용액중의 용매가 치밀한 구조를 가지는 반투막의 한편으로 부터 다공성인 반대편으로 확산하는 경우로서 Fick의 법칙이 적용되고 용액의 초기 농도와 반투막을 통과한 용액중의 용질 농도에 영향을 받는다. 또한 이때는 반투막의 치밀구조 쪽에 작용하는 압력의 영향도 매우 중요한데 용액의 삼투압 $\Delta\pi$, 작용 압력 ΔP 는 역삼투압법에 의해서 유출되는 용매의 량 J_w 에 대하여 다음의 관계가 있다.

$$\text{solvent flux; } J_w = K_w(\Delta P - \Delta\pi) \quad (1)$$

여기서 K_w 는 순수용매의 반투막에 대한 투과 계수이며, 반투막을 이루는 고분자 물질의 구조에 따라 달라지는 값인데 반투막의 성능을 表示하는 수단이기도 하지만 작용 압력의 함수이기도 하다. 반투막에 의한 기상과 액상의 분리는 실제로는 dialysis와 Reverse Osmosis로 알려져 있는데 dialysis의 반대 현상인 Reverse Osmosis는 가끔 문헌에 따라서 hyperfiltration으로 소개되기도 하며 어떤 연구가는 ultrafiltration이라고도 부른다. 어느 것이나 분리수단으로서 반투막을 사용하며 driving force로서 압력이 쓰이지만 <Table I>에서와 같이 RO와 UF는 적용 범위나 조건에 따라서 미소한 차이가 있음을 알 수 있다.⁵⁾

역삼투압법이나 한외여과는 모두 보통의 용액이나 콘로이드 용액을 농축하거나 분리 또는 정제하는 목적에 쓰이는데 이 조작의 장점은^{5,6)}

(1) 불순물의 혼입이 극히 위험하거나 열에 민감한 제약 및 식품 공업 생산품의 처리에 매우 유용하며

(2) 장치가 소단위의 Module이므로 대소규모를 막

Table I. Differences between Reverse Osmosis or Hyperfiltration and Ultrafiltration.

	Reverse Osmosis	Ultrafiltration
Size if solute retained	Molecular weights generally less than 500 to 1000	Molecular weights generally over 1000
OSMOTIC pressure of feed solutions	Important, over 1000 psi	Generally negligible
Operating pressure	Great than 100 psi up to 2000 psi	10 to 100 psi
Membrane Nature of membrane retention	diffusive transport barrier; possibly molecular screening	Molecular screening
Chemical nature of membrane	Important in affecting transport properties	Unimportant in affecting transport properties so long as proper pore size and pore size distribution are obtained

론하고 장치 비용이 Module의 수에 비례하며,

(3) 操作이 用易하여 펌프 조작만이 중요하며,

(4) 농축과 정제를 동시에 할 수 있듯이, 한 조작으로서 두 가지 이상의 기능을 발휘할 수 있으며,

(5) 에너지 소모가 매우 적다.

는 점등을 들 수가 있다. 특히 이 방법을 이용하면 초기 투자 비용이 크더라도 조작비가 매우 싸고 예를 들어 점점 규제가 까다로워 지고 있는 수질 오염의 해결책으로서 매우 밝은 전망을 보이고 있다. 따라서 더욱 연구가 필요한 것은 반투막을 포함하는 Module을 어떻게 하면 값싸게 제작할 수 있는냐가 관심의 초점이고 이런 Module의 생산만이 RO의 이용을 加速하게 된다.

3. 반투막의 제조와 그 종류 및 성능

지금까지 여러가지의 인공 반투막이 제조 되었으나 cellulose acetate 반투막 만큼 성능이 우수한 것은 발견되지 못하고 있다. <Table II>는 여러가지 반투막의 물중의 Cl^- 에 대한 용질 분리도(solute separation, f)를 표시한다.⁴⁾ 동일한 반투막 재료라고 하더라도 film casting의 조건에 따라서 매우 상이한 용질 분리도를 가지므로 가장 좋은 재료를 써서 가장 적당한 방법으로 반투막 film을 만들 필요가 있다. 1959~1960에 걸

Table II. Semipermeable Membrane Selection with Solute Separation; f

Membrane	solute separation, f
Polyvinyl alcohol	0.05~0.07
Ethyl cellulose	—
Nylon	—
Cellophane	0.003~0.004
Polystyrene	—
Saran	—
Cellulose acetate	0.92

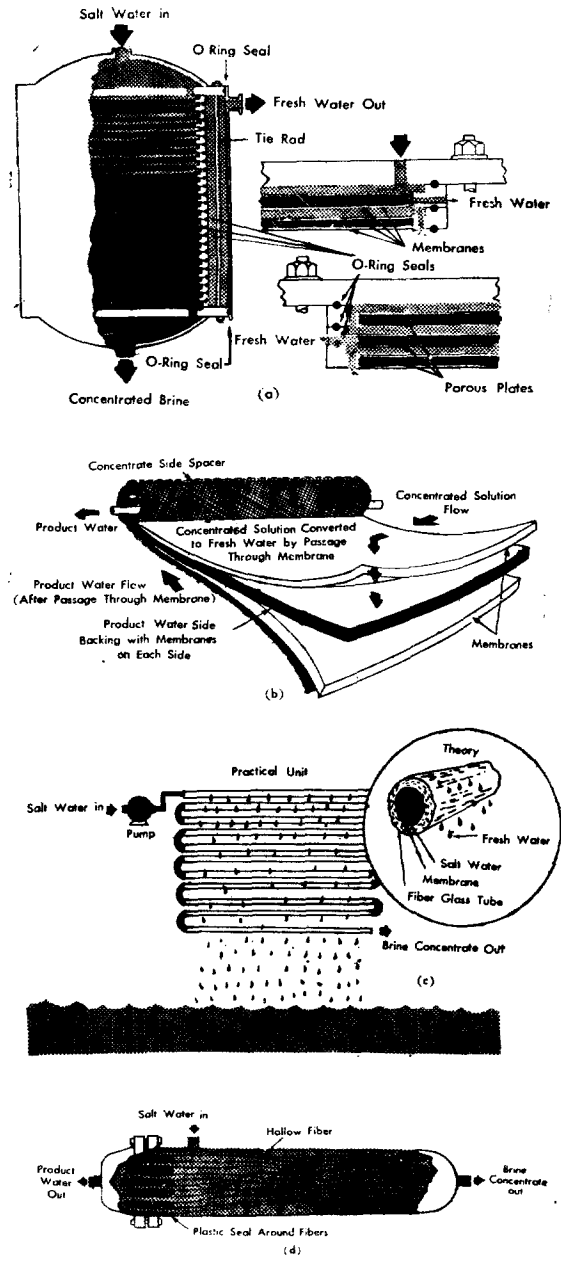
처서 개발된 미국 UCLA의 Loeb-Sourirajan Type의 cellulose acetate 반투막은 film casting 조건⁷⁾이 개량되었기 때문에 현재로서는 가장 우수한 반투막의 일종이라고 알려져 있다. cellulose acetate 반투막을 만드는 방법에 대한 매우 많은 연구가 진행되었는데 Loeb와 Sourirajan⁸⁾ 및 Sourirajan과 Govindan⁹⁾의 예를 소개한다. acetyl content가 39.3%인 cellulose acetate 17% (모두 중량비), 아세톤 68%, 물 13.5%, 마그네슘 피클로레이트 1.5%의 casting 용액을 만들어 -10°C로 유지하면서 acetone 증기를 포함하는 밀실에서 유리판위에 film 형으로 casting 한다. Casting 후에 acetone을 증발시켜 film을 건조하는데 film의 양쪽에서의 건조온도를 다르게 유지하면, 필름의 양쪽 표면의 신축성이 달라져서 한쪽은 치밀구조가 되고 다른쪽은 다공성인 주글 주글한 면을 얻게 된다. 이 film를 사용하기 전에 증류수 속에 담겨서 1700 psig로 1hr정도 처리한다. 만들어진 반투막의 성능은 film의 건조 조건에 따라서 크게 달라지는데 건조 조건의 개선으로 쉽게 반투막을 만들 수 있다는 보고도 있다.^{10,11)}

미국의 American Corp. (Lexington, Msas.), Abor. Inc. (Cambridge, Mass.), Permutit Company (Paramus, N. J.), Gulf General Atomic Inc. (San Diego) 등에서 여러가지 Cellulose Acetate로 된 Module을 생산하고 있다. <Fig. 2>는 CA 반투막으로 만든 각각 특징있는 네가지 실용성있는 Module의 구조를 표시한 그림이다.

<Fig. 2-a>는 재래식 압축 여과기와 비슷한 구조로서 epoxy 板으로 보강한 구조물의 양쪽을 반투막으로 덮어서 반투막을 통과하는 물이 epoxy 板內的 통로를 통해서 밖으로 흘러 나가게 되어 있다.

이러한 반투막 여판을 여쇄와 번갈아 끼우고 전체를 압력하에서 운전 한다.

<Fig. 2-b>는 반투막과 비압축성인 지지판(보통 stainless steel screen)을 겹쳐서 두루마리로 한 것인데



- a) plate and frame Reverse Osmosis unit,
- b) Spiral wound membrane module, partially unrolled,
- c) Tubular Reverse Osmosis unit,
- d) Hollow fine fiber Reverse Osmosis membrane module.

Fig. 2. Four Types of Commercial modules made of Cellulose Acetate.

반투막을 통과하는 물을 두루마리 중심부의 집수 파이프를 지나서 stainless steel의 casing 밖으로 배출된다. 한편 농축 용액은 측방향으로 흘러나가게 된다.

<Fig. 2-c>는 반투막 자체를 1~2인치 직경의 관으로 casting 한것인데 양쪽이 반투막의 치밀구조이고 같은 재료로 된 관의 바깥부분은 다공성 벽으로 supporter의 역할과 물의 통로 역할을 겸 한다.

<Fig. 2-d>는 관상 열교환기(shell and tube heat exchanger)와 꼭 같은 구조로서 직경 25~250 μm 정도의 hollow fibre를 수천개씩 한다발로 묶어서 양쪽을 epoxy 수지로 접합하여 tube sheet를 만들면 hollow fibre를 통과한 염수중의 물만이 tube sheet 안쪽 벽을 통하여 바깥으로 길러나게 된다. <Fig. 2-c와 d>에서 tubular module의 구조와 hollow fibre의 구조는 크기에 차이가 있으나 모두 내벽은 0.25 μm 의 dense film이고 외측은 porous structure로서 공통점이 있으며 <Fig. 3>은 scanning electron micrograph에 의한 hollow fibre의 구조를 나타낸 것이다.¹³⁾

위에서 소개한 네가지 유형을 포함하는 모든 RO 설계는 중간 시험 단계이거나 field test를 끝내고 실용화된 것도 있다.



Fig. 3. Scanning electron micrograph of the group XM fiber of Amicon Corp., 132 \times

4. 역삼투압 조작의 원리

간단히, 반투막의 치밀구조쪽에 용매와 용질을 포함하는 용액이 있고 다공성인 다른쪽에는 순수 용매만이 있다고 생각 하자. 용액의 삼투압 $\Delta\pi$ 보다 더 큰 압력 ΔP 를 용액편에 걸어주면 용매가 반투막을 통해서 다른쪽으로 이동할 것이며 반투막에 대한 용해도가 낮아서 투과하지 못하는 용질은 농축될 것이다. 용매 이동

에 대한 연구는 많은데 간단한 경우로서 저압인 경우에 투과액속에 극히 적은 양의 용질이 섞여 나온다고 하면 투과액중의 용매 이동량 J_w 는 삼투압 $\Delta\pi$ 와 작용 압력 ΔP 의 차이에 비례하고 반투막의 두께 δ 에 반 비례하므로¹⁴⁾

$$J_w = K_w \frac{\Delta P - \Delta\pi}{\delta} \quad (1)$$

로 표시되고 투과액중에 소량이지만 함께 이동하는 용질의 (이동)량 J_s 는 용질의 투과 계수 K_s 와 반투막 양쪽에서 용질의 농도차이 ΔC 의 곱으로 표시된다.

$$J_s = K_s \cdot \Delta C \quad (2)$$

실제로, 반투막의 선택도(selectivity of a membrane)는 J_w , J_s 및 용질 투과도(solute passage; SP)에 의해서 결정되는데 용질 투과도¹⁵⁾는 원래의 용액중의 용질 농도에 대한 투과액중의 용질 농도의 비로서 정의되는 값이며

$$SP = \frac{\text{Concentration of solute in permeate}}{\text{Concentration of solute in feed}} \quad (3)$$

이 용질 투과도는 흔히 쓰이는 용질 분리도(solute separation or solute rejection; f)의 다른 표시법이기도 하다. 용질 분리도¹⁶⁾ f는 아래와 같이 정의된 것으로

$$f = \frac{\text{Conc. of solute in feed} - \text{conc. of solute in permeate}}{\text{conc. of solute in feed}} = \frac{X_{A1} - X_{A3}}{X_{A1}} = 1 - \{SP\} \quad (4)$$

의 관계가 있는 것이다. f는 주로 반투막의 개발에 관한 연구에 종사하는 Sourirajan 등의 논문에서 사용되고 있으며 SP는 현장 연구에서 쓰이고 있는데 한가지 용어로 통일할 필요성이 있다.

$\left[\frac{\text{mass}}{(\text{time}) \cdot (\text{area})} \right]$ 의 차원을 가지는 J_w 를 표시하는 (1)식은 δ 와 K_w 를 반투막의 특성이라고 봐서 한데 묶으면

$$J_w = A \cdot (\Delta P - \Delta\pi) \quad (5)$$

로 쓸 수 있고, 여기서 A는 순수 용매(물)의 투과도 정수로서 반투막의 성능을 specify하며 작용 압력의 함수가 되는데 J_w , J_s 및 f 값에 의해서 결정 된다.

(5) 식의 A를 solute transport parameter ($D_{AM}/K\delta$)항으로 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.¹⁶⁾

$$J_w = \frac{D_{AM}}{K\delta} \left(\frac{1 - X_{A3}}{X_{A3}} \right) \cdot (\rho_2 X_{A2} - \rho_3 X_{A3}) \quad (6A)$$

$$=k \cdot \rho_1 (1 - X_{A3}) \ln \left(\frac{X_{A2} - X_{A3}}{X_{A1} - X_{A3}} \right) \quad (6B)$$

두께 δ 인 반투막 M 내에서의 용질 A 의 확산 계수 D_{AM} 과 용질의 용액-반투막에 대한 분배비 K 를 한 데 묶은 $D_{AM}/K\delta$ 는 solute transport parameter 로서 역시 반투막의 성능을 specify 하며 용질의 화학적 성 질이나 반투막의 구조에 관계되나 반투막 경계면에서 의 용질 농도에는 독립적인 값인데 각종 반투막의 성

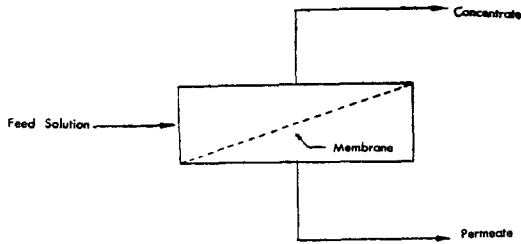


Fig. 4. Membrane Process flow Schematic.

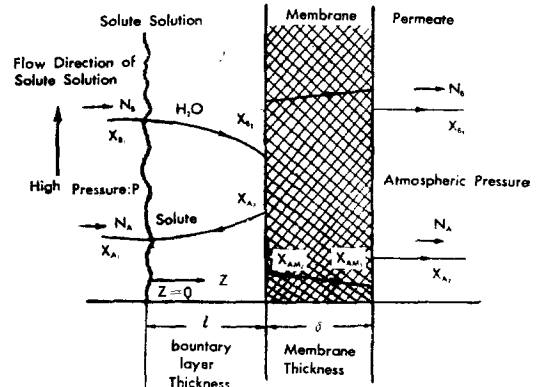


Fig. 5. Concentration Distribution in the Boundary Layer and the Membrane.

능을 $D_{AM}/K\delta$ 로서 비교할 수 있다.¹⁷⁾

(6A) 및 (6B)식을 이해하는 데는 <Fig. 4>⁵⁾와 <Fig. 5>¹⁴⁾가 도움이 된다.

Table III. Various Applications of the Reverse Osmosis or the Ultrafiltration

Major category	Systems	References
Water Reuse and Waste Water Treatment	Sea water desalination	19A, 19B, 19Q
	Brackish water desalination	19A, 19C
	Biological sludge dewatering	16
	Metal hydroxide sludge	16
	Electroplating waste	16
	Domestic and hospital waste	19D, 19E
Chemical Industry	Ethylene glycol-water	19F
	Propylene glycol-water	19F
	Caustic soda-viscose	4
	Spent acid from metallurgical liquors	5
Food Processing Industry	Enzyme removal	19G
	Sucrose-water	19H
	Protein from soy-whey	5
	Concentration of egg white	19I
	Concentration of maple sap	19J
Medical and Pharm. Industry	Water from urine and wash water	19K, 19L
	Concentration of antibiotics	19M
	Urea-water	9
Gas Separation	Helium-methane separation	19N
	Nitrogen-ethylene separation	19N
	Oxygen-nitrogen separation	19N
	Sulfur dioxide-nitrogen sep.	19N
	Carbon dioxide-oxygen sep.	19K
	Ammonia-nitrogen-hydrogen	19N
Petroleum Industry	Toluene from naphtha	19O
	Fractionation of cracked gasoline	19O
Others	Removal of radioactive contaminants	19P

일반적으로 SP가 증가함에 따라서 (다른 말로 하면 f 가 감소함에 따라서) solvent flux J_w 는 비례적으로 증가하며 <Fig. 6> 또 고분자 물질에 있어서는 용질의 분자량의 크기에 대하여 비교할 때 동일한 J_w 에 대하여 작은 분자량의 물질이 더 큰 SP를 가진다.¹⁵⁾

조사된 몇가지 용액중에서 쉽게 이온화하는 금속 및 비금속 이온의 용질 분리도 f 는 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{Br}^-$ 순으로 감소한다. 즉 SP로는 부등호의 방향이 반대가 된다는 발표가 있다.¹⁶⁾

5. RO의 응용

앞에서도 말한바와 같이 역삼투압법이 각광을 받기 시작한 것은 소금물의 삼투압이 측정되고 이 원리의 역

을 이용하는 바다물의 단물화가 시도된 것이 처음이라고 할 수 있으며 따라서 군사적 목적의 소규모 Naval assembly가 제작되었다.^{19D)} 같은 기간에 다른 방면에 대한 응용 연구도 계속되어서 물의 정제를 비롯하여 의학, 식품공업, 제약공업, gas 공업, 석유 정제 사업, 석유 화학 공업, 기타 방사능 물질의 처리, 유인 우주 비행체 내에서의 life support에 이르기까지 응용되고 있거나 기술적, 경제적 가능성을 보이고 있다.

<Table III>은 각 응용 분야에 대한 실례를 들고 간단히 그 특징과 참고 연구 자료를 한테 묶은 것이다.

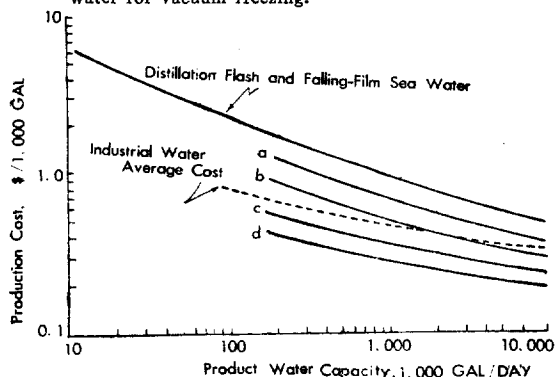
6. 경제적 관점에서의 검토

RO의 응용이 가장 오래되고 또한 활발한 desalina-

Table IV. Comparison with other Desalination Processes

Process	Commercial availability	Pretreatment requirements	Effluent concentration range, ppm*	Effect of feed concentration on operating costs
Flash distillation	All sizes	Deaeration, antifoam, scale control	50-70,000	Slight
Falling-film distillation	All sizes	Deaeration, scale control	>100,000	Slight
Vapor compression distillation	1 MM gal./day and smaller	Deaeration, scale control	50-75,000	Slight
Electrodialysis	All sizes	Scale control, prevention of membrane fouling	2-10,000	High
Vacuum freezing	2 MM gal./day and smaller	Deaeration	50-70,000	Moderate
Reverse osmosis	Small unit	Scale control, protection of membranes	2-10,000	Moderately high
Solvent extraction	None	Prevention of emulsions, loss of solvent	2-10,000	Moderately high
Hydrate	None	Prevention of loss of solvent	2-10,000	Moderately high

*Effluent concentration using sea water feed for distillation processes, brackish water for solvent processes, and sea water for vacuum freezing.



- (a) 6000 ppm to 500 ppm by reverse osmosis
- (b) 3000 ppm to 500 ppm by electrodialysis
- (c) 3000 ppm to 1000 ppm by reverse osmosis
- (d) 1700 ppm to 500 ppm by electrodialysis

Fig. 6. Estimated desalination costs versus plant capacity.

tion의分野에 있어서 RO와 기타 기술에 대한 비교를 McIlhenny의 논문^{19B)}에서 인용한 <Table IV>로 대신한다.

위의 비교는 주로 공업용수의 문제가 심각한 경우에 고려되어야 하겠으나 어느 방법이나 재래의 공업용수를 얻는 방법으로 대체 되기에는 경제적으로 유리한 입장이 못된다.

<Fig. 6>은 해수의 단물화 방법에 의한 공업용수의 생산비용을 process의 용량의 함수로서 나타낸 것인데^{8), 19B)} 이 비용은 현재 가동중인 unit나 혹은 믿을 만한 추산치에 근거를 둔 것이다.

특히 RO와 ED의 방법만이 공업용수의 평균생산비에 접근하는데 3000 ppm의 용해성 물질을 포함하는 해수를 냉각수용으로 필요한 수질 1000 ppm 정도로 가

지 연화하는 비용은 공업용수의 평균 생산비보다 낮은 것을 알 수 있다.

ED와 RO를 비교한다면 ED 방법에 의한 생산 비용은 해수의 농도가 높을 때는 RO보다 비싸게 됨을 그림과 表에서 추정할 수가 있다.

이렇게 RO의 응용 전망이 매우 넓고 밝은듯 하지만 아직 몇가지 근본적인 문제점이 남아 있다. 폐수 처리에 있어서는 폐수중에 포함된 어떤 성분이나 유기물질에 대하여 반투막이 매우 취약하고, 또 반투막 자체가 매우 수축성이기 때문에 RO의 효율적 운전이 지장을 받고 있으며 따라서 이러한 문제들이 해결되어야만 본 문에서 주로 예를 든 해수처리나 폐수처리에 도움을 줄 것이고 또 <Table III>에 表示한 각 system에 대하여도 그 system에 알맞는 반투막의 개발만이 Reverse Osmosis Process의 실용화에 기여하게 될 것이다.

References

- Hook, A. V. and H. D. Russel; *J. Am. Chem. Soc.*, **67**, 370, (1945).
- Robinson, R. A. and R. H. Stokes; "Electrolyte Solutions" 2nd. ed., Butter Worths Co., London 1959.
- Timmermans, J.; "Physicochemical Constants of Binary systems in Concentrated solutions", Vol. 4, Interscience, New York, 1960.
- Li, N. N., R. B. Long and E. J. Henry; *Ind. Eng. Chem.*, **57**, 3, 18 (1965).
- Goldsmith, R. L., et al; New Membrane Process Applications, presented at the 70th National A. I. Ch. E. Meeting, August 31., Atlantic City, New Jersey.
- Goldsmith, R. L., et al; "Industrial Ultrafiltration" in Membrane Processes in Industry and Biomedicine, Plenum Press, N. Y. (1971).
- Kunst, B. and S. Sourirajan; *J. Appl. Polymer Sci.*, **14**, 723 (1970).
- Loeb, S. and S. Sourirajan; *Advan. Chem. Ser.*, No. 38, 117 (1963).
- Sourirajan, S. and T. S. Govindan; Proceedings of First International Symposium on Water Desalination, Washington, D. C., 251 (1965).
- Knapp, C. H. and W. J. Ward III; *Ind. Eng. Chem.*, Prod. Res. Devel., **7**, 3, 169 (1968).
- Kunst, B. and S. Sourirajan; *J. Appl. Polymer Sci.*, **14**, 1996 (1970).
- Chanabasppo, K. C.; *Chem. Eng. Progr. Symp. Ser.*, No. 97, Vol. **65**, 144 (1969).
- Cross, R. A.; Assymetric Hollow Fibers for Ultrafiltration and Dialysis, presented at the 70th National Meeting of the A. I. Ch. E., Atlantic City, New Jersey
- Kimura, S. and S. Sourirajan; *J. A. I. Ch. E.*, **13**, 497 (1967).
- Mattson, R. J. and V. J. Tomsic; *Chem. Eng. Progr.*, **65**, 1, 63 (1969).
- Kimura, S. and S. Sourirajan; *Ind. Eng. Chem., Proc. Des. Devel.*, **7**, 41 (1968).
- Ohya, H. and S. Sourirajan; *J. Appl. Polymer Sci.*, **15**, 705 (1971).
- Erickson, D. L. et al; *Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Devel.*, **5**, 205 (1966).
- Loeb, S. and J. S. Johnson; *Chem. Eng. Progr.*, **63**, 1, 90 (1967).
- McIlenny, W. F.; *Chem. Eng. Progr.*, **63**, 6, 76 (1967).
- Dykstra, D. I.; *Chem. Eng. Progr.*, Symp. Ser., No. 90, Vol. **64**, 166 (1968).
- 松浦剛; 化學工學, **35**, 4, 419 (1971).
- Gouveia, A. and K. A. H. Hooton; *Chem. Eng. Progr.*, Symp. Ser., No. 90, Vol. **64**, 280 (1968).
- Matsuura, T. and S. Sourirajan; *Ind. Eng. Chem., Proc. Des. Devel.*, **10**, 1, 102 (1971).
- Stavenger, P. L.; *Chem. Eng. Progr.*, **67**, 3, 30 (1971).
- Kimura, S. and S. Sourirajan; *Ind. Eng. Chem., Proc. Des. Devel.*, **7**, 4, 548 (1968).
- Lowe, E. et al; *Food Techn.*, **23**, 758, 48 (1969).
- Underwood, C. and C. O. Willits; *Food Techn.*, **23**, 787, 79 (1969).
- Popma, D. C.; *Astronautics & Aerospace Eng.* August, 53 (1963).
- Popma, D. C. and V. G. Collins; *Chem. Eng. Progr.*, Symp. Ser., No. 63, Vol. **62**, 1 (1966).
- Madson, R. F.; *DECHEMA Monographien*, Vol. **64**, 325 (1970).

- 19N. Agrawal, J.P. and S. Sourirajan; *J. Appl. Polymer Sci.*, **14**, 1303 (1970).
- 19O. Binning, R.C. et al; *Ind. Eng. Chem.*, **53**, 45 (1961).
- 19P. American Standard Catalogue, Bulletin ROS-101 105.
- 19Q. Havens, G.G. and D.B. Guy; *Chem. Eng. Progr.*, Symp. Ser., No. 90, Vol. **64**, 299 (1968).
- 19R. Permutit Catalogue; Bulletin 5572.
- 19S. Gulf General Atomic Catalogue, ROGA Reverse Osmosis
- 19T. Amicon Corp. Catalogue, Publication No. 403-A (1970).