

膜 分 離 工 程

———在來式 分離工程을 對替시키기 위한 努力의 하나로———

張 虎 男  
韓國科學技術院 化學工學科

Membrane Separation Processes

——As an Alternative to Conventional Separation Processes——

Ho Nam Chang

Department of Chemical Engineering,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
P.O. Box 150 Chongyang-ri, Seoul, Korea

1. 膜분리공정

膜분리 공정이라함은 膜을 사용하여 기체상 액체상에서 무기, 유기물질을 압력차, 농도차, 전위차를 이용하여 분리, 증류, 부분정제하는 공정을 말한다. 여기서 膜이라 함은 열이나 물질의 흐름에 대한 장벽의 역할을 하는 相이라 정의할 수 있으며 순수한 액체나 고체를 제외하고는 구성에 있어서 불균일하다. 이러한 불균일성이 膜에 의한 분리공정, 전달현상연구에 재미난 현상을 나타내는 주원인이 된다고 생각된다.

膜이 인류에 의해 분리공정에 최초로 사용된 것은 기원전 15~19세기경에 에집트인에 의해 맥주와 포도주 여과에 사용되었고 근세에 와서는 영국의 Graham에 의하여 1854년에 투석기(dialyzer)에 사용된 것이 시초라고 하겠다. 그 이후 20세기에 와서  $U^{235}$ 와  $U^{238}$ 의 분리에 사용되었고 인공신장, 전기투석(electrodialysis)에 의한 전해질분리등에 사용되다가 1960년 미국 UCLA에서 Loeb과 Sourirajan이 역삼투압

용비대칭성 cellulose acetate를 개발하여 소금물에서 순수한 물을 분리시키는데 성공하여 膜분리공정에 일대 혁신을 일으켰고 최근에는 미국의 Monsanto 화학회사에서 Prism Process라는 가스분리공정을 개발하는 데 성공하여 석유화학공업의 각종 폐기가스 재생공정에 사용하고 있는 실정이다. 최근에 새로운 고분자膜 제조기술이 급속도로 발전하고 있기 때문에 앞으로는 많은 재래식 분리공정들이 膜분리공정으로 대체될 것으로 보인다.

Table 1에는 현재 산업적으로 활용되고 있는 대표적인 분리공정을 열거하여 보았다. 위에 열거한 것 이외에도 다른 종류의 분리공정을 복합적으로 응용한 것들이 많이 있을 수 있다.

2. 膜 분리공정의 특성

Fig. 1은 전형적인 膜 분리공정의 개략도를 보인 것이다.

압력차를 이용하지 않고 농도차나 전위차만을 이용하여 분리하는 공정은 Permeate의 量  $Q_p$

Table 1. Typical Membrane Separation Processes Name

	Feed	Driving force	Products	Principle of Separation	Practical Example
1. Gaseous Diff.	Gas	Pressure Gradient	gases	difference in rates of Knudsen on surface diffusion through a porous barrier	concentration of $U^{235}F_6$ from natural $UF_6$
2. Gas Permeation	Gas	Pressure gradient	gases	different solubilities and transport rates through membrane	purification of hydrogen by means of palladium barriers
3. Dialysis	Liquids	conc gradient	Liquids	different rates of diffusional transport through membrane (no bulk flow)	Recovery of NaOH in rayon manufacture artificial kidneys
4. Electrodialysis	Liquids	Electrical Field (Ion Exchange Membranes)	Liquids	tendency of anionic membranes to pass only anions, etc.	Desalination of blakish waters
5. Osmosis	salt solution	osmotic pressure difference	two liquids	tendency to achieve uniform pressures removes water from more dilute solution	suggested for food dehydration
6. Reverse Osmosis	Liquid solution	pressure gradient	two liquid solution	different combined solubilities and diffusivities of species in membrane	sea water desalination
7. ultrafiltration	Liquids containing large molecules	pressure gradient	two liquid phases	different permeabilities depending on sizes of molecules to be separated	wastewater treatment; protein concentration

가 뚫어질 수가 있다. 이런 경우에는 막을 사이에 두고 향류 혹은 병류로 운전하기도 한다. (절선참조)

膜분리공정의 장점이라고 한다면 첫째로 연속공정이 용이하고, 둘째로 증류나 결정화에서 처럼 相변화가 없기 때문에 다른 공정에 비해 에

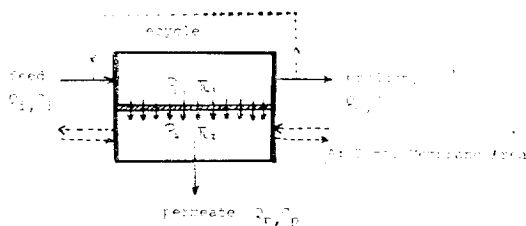


Fig. 1. A Schematic Diagram of Typical Membrane Processes

너지 절약의 이점이 크다는 것을 들 수가 있겠다. 단점이라고 한다면 특히 역삼투압 공정에서 문제가 많이 되고 있는데 feed 쪽의 삼투압이 permeate 쪽보다 너무 높으면 결국 유효압력차를 줄여주는 효과가 있으므로 농도가 높은 물질을 역삼투압을 이용하여 분리하려면 다른 분리공정에 비하여 원천적으로 불리하다고 할 수 있다. 참고로 NaCl 등 몇가지 무기물질과 Sucrose 등의 유기물의 삼투압을 Table 2에 열거하였다.

농도가 묽은 용액에서는 아래 (1)식으로 주어진 Van't Hoff 식이 적용된다. 즉,

$$\pi = CRT \tag{1}$$

여기서,  $C$ 는 (mol/l),  $R$ 은 기체정수이며 0.08 205 latm  $k^{-1}mol^{-1}$ 로 주어진다. 따라서 (1)식

에 의하면 소금물 1g/l의 경우 삼투압은 0.836 atm이며 35g/l의 경우 29.26 atm이 된다.

Fig. 2에서는 막 분리공정의 추진력간의 상관관계를 나타낸 것이다. 예를들면, 역삼투압 공정은 hydraulic pressure difference  $\Delta P$ 를 추진력으로하여 막간의 농도차  $\Delta C$ 를 일으키는 공정이다. Electrodialysis 공정은 막간의 전위차를 이용하여 전하의 이동  $J_i$ 를 일으키는 공정이다.

Table 2. Typical Osmotic Pressures

Compound	concentration (mg/l)	concentration (moles/l)	Osmotic pressure (atm at 25°C)
NaCl	35,000	0.6	27.07
NaCl	1,000	0.0171	0.77
NaH <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1,000	0.0119	0.87
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,000	0.00705	0.41
MgSO <sub>4</sub>	1,000	0.00831	0.24
Sucrose	1,000	0.00292	0.71
Sucrose	282,000	0.825	26.64
Dextrose	1,000	0.00555	0.136

막사이의 각종 전달 현상을 표시하는 방법은 Kedem-Katchalsky가 제안한 비가역적 열역학에서 유도한 현상론적 식이 흔히 사용된다. 즉, flux equation으로

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma \Delta \pi) \tag{2}$$

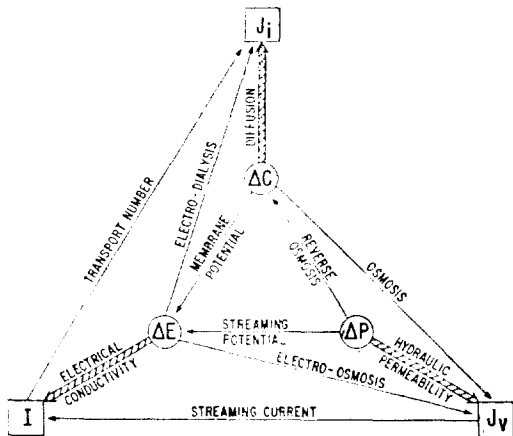


Fig. 2. Schematic Representation of the Isothermal Transport Properties of Membranes

그리고 solute flux를 나타내는 식으로는

$$J_s = (1 - \sigma) J_v C_{s1n} + \mu \Delta C_s \tag{3}$$

여기서  $\sigma$ 는 reflection coefficient이며  $\sigma = 1$ 이면 solute가 전연 막을 통과치 않는 경우이며  $\sigma = 0$ 이면 전부 통과하는 경우를 이야기 한다. (2)식과 (3)식이 막분리공정의 전부를 표현하는 식은 아니며, 단지 ultrafiltration이나 역삼투압을 표현하는 식이라 할 수 있다. 즉  $\Delta P$ 와 삼투압  $\Delta \pi$ 가 없을 경우 (2)식은 필요치 않게 되며 (3)식만 필요케 된다. 막은 크게 나누어 pore membrane과 solution diffusion membrane으로 나눌 수 있는데 pore membrane은 막에 일정한 크기의 Pore가 있는 상태여서 통과시키고자 하는 물질의 크기가 pore의 크기보다 크면 retention되고 작으면 빠져나가게 된다. Flux는 Poiseuille의 법칙에 따라 압력차에 비례하고 pore의 반경의 4승에 비례한다. 따라서 pore

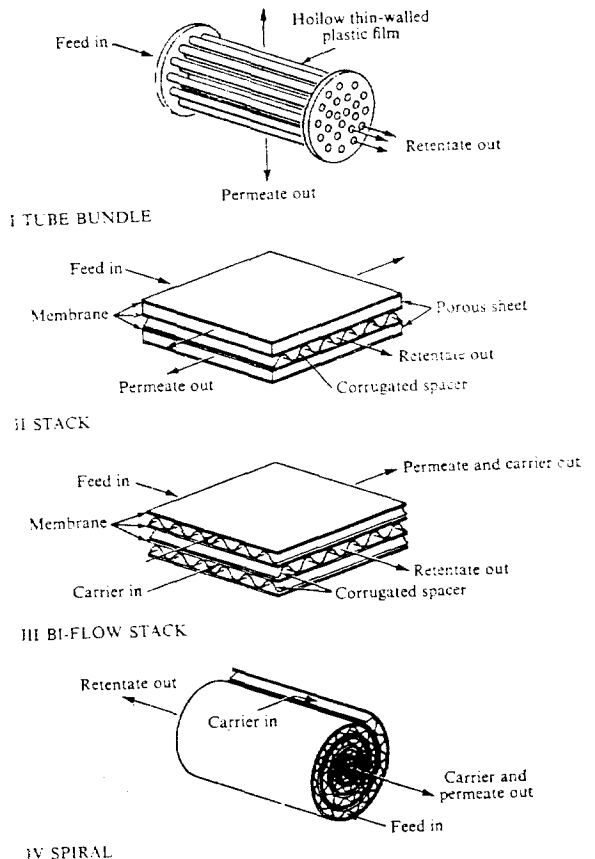


Fig. 3. Various Types of Membrane Modules

size 가 2 배 증가하면 유량은 16 배로 늘어나게 된다 수식으로 표시하면,

$$\text{flux} = \frac{n\pi r^4 \Delta p}{8\mu l} \quad (4)$$

따라서 rejection 은 flux 에 무관하다. 한편 solution diffusion 膜에서 flux 는 압력차에서 삼투압차를 뺀 것에 비례하며, 즉

$$\text{water flux} = W_p(\Delta p - \Delta\pi) \quad (5)$$

solute flux 는 water flux 에 무관하게 주어진다.

$$F_i = K_p \Delta C_i \quad (6)$$

따라서 압력을 높이면 water flux 는 증가하나 solute flux 는 일정하므로 분리정도가 좋아진다.

膜을 분리용으로 사용할 때는 여러형태로 module 화하여 사용하는데 크게 나누어 평판형(II, III), 튜브형(IV), hollow-fiber 형(I)이 있으며 Fig. 3에 자세한 모양이 주어져 있다. 역삼투압용으로는 튜브형과 hollow fiber 형이 많이 쓰인다.

### (1) 膜 분리공정의 Performance Criteria

여러가지 분리공정의 원리가 한꺼번에 사용되고 있으므로 한가지 기준으로 모든 공정의 Performance 를 따지는 것은 불가능하므로 Table I 에 나온 공정을 Group 으로 묶어서 판단하도록 한다. 첫번째 공정의 경우  $U^{235}F_6$  와  $U^{238}F_6$  의 diffusion rate 의 차이를 이용하여 분리하므로 diffusion 하는 동안 pore 안에서 mixing 이 안일어나도록 membrane 이 제조되어야 할 것이다. 두번째 gas permeation 의 경우는 각 분리하고자 하는 gas 간의 상대적인 permeability 차이를 크게 해줄 수 있는 membrane 이 고안되어야 겠고 세번째 dialysis 의 경우는 투과시키고자 하는 물질의 투과도가 크면 되겠고 네번째 electro dialysis 의 경우 coion 은 될 수 있는 대로 통과를 시키지 않고 counterion 은 잘 통과시키는 소위 Permselectivity 가 좋고 Ion flux 가 큰 Ion Exchange membrane 이 좋은 membrane 이라고 하겠다. 압력을 이용하는 ultrafiltration 이나 Reverse Osmosis 공정은 첫째로 flux 가 커야하며 다음 rejection 이 좋아야 한

다. 이 두가지 판단기준은 각각 (7)식 (8)과 식으로 표시된다.

$$\text{flux} = Q_p/A \quad (l/m^2 \cdot \text{day or } \sim m^3/m^2 \cdot \text{day}) \quad (7)$$

$$\text{Rejection} = (1 - C_p/C_i) \times 100(\%) \quad (8)$$

다른 膜분리공정과 달리 위의 두 공정에서는 flux 와 rejection 이 가장 중요한 performance 의 판단기준이 되며 셋째로 모든 공정에 공통적으로 요구되는 것은 膜의 사용수명에 관한 것이다. 흔히 분리하고자하는 기체나 액체용액이 膜의 분리능력이나 수명에 해를 끼치는 경우가 있는데 이런 경우에는 膜, 분리공정이 적합하다고 볼 수 없게 된다. 그러나 최근의 膜 제조기술의 개발로 점점 약품에 강하고 수명이 긴 膜이 제조되기 시작하므로 종전에 비경제적이었던 공정들이 경제적인 공정으로 전환되고 있는 실정이다. 그러면 대표적인 분리공정들의 실예를 하나씩 들어보기로 한다.

### (2) Prism Separator Process

Monsanto Chemical Company 에서 최근에 개발하여 1977 년 이후로 20 여개 석유화학계열 공장의 폐기 가스처리에 사용하고 있다. 중요한 응용공정을 보면, Petrochemical Synthesis Hydrogenator Purge, Ammonia Purge, Hydrodesulfurizer Purge, Methanol Purge, FCC Absorber Offgas, Gasoil Hydrofiner Purge 공정에 사용된다. 참고로 Fig. 4 에 Ammonia Purge Gas 에서  $H_2$  를 회수하는 공정을 보여주고 있다. Feed gas 로는 6.1%  $H_2$ , 22%  $N_2$ , 17% 의 혼합가스가 들어가며 Permeate gas 로는 400 psig 에서 86%  $H_2$  8%  $N_2$ , 6% 혼합가스가 회수되며 그의것은 Product stream 으로 나가게 된다. membrane module 은 그림에서 보는 것처럼 hollow fiber type 이다. 이 공정의 원리는 Feed 와 Permeate gas stream 의 압력차에 의하여 가스가 hollow fiber 를 통하여 흐르게 되며, 이때  $N_2, H_2, CH_4$  의 통과속도의 차이에 의하여 분리되게 된다. 즉  $H_2O, H_2, He$  등은 빨리 통과하며  $CH_4, N_2$  등은 천천히 통과한다.

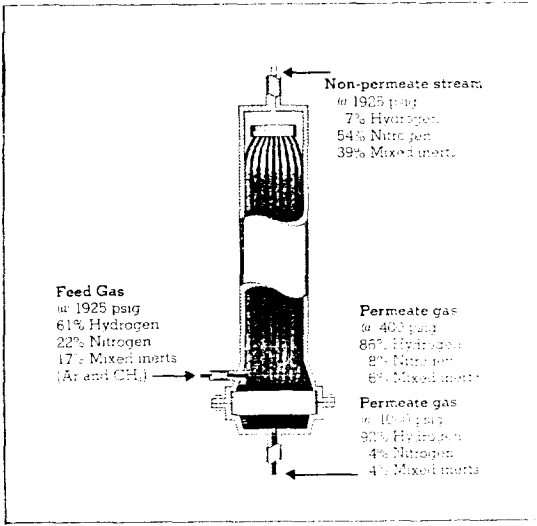


Fig. 4. Monsanto's Prism Process (hollow fiber type)

(3) Artificial Kidney

신장의 기능이 일시 혹은 장기적으로 본래의 기능을 다하지 못할 때 인공신장에 의존하게 된다. 특히 장기적으로 기능이 마비되는 경우에는 신장이식을 받거나 인공신장에 의존하여야 하는데 신장이식의 경우 거부반응과 이식받을 수 있는 신장의 한계성때문에 인공신장 이용환자가 늘고 있다. 현재 세계적으로 약 11 만명의 환자가 인공신장의 혜택을 받고 있는데 원리는 피속의 요소, 크레아틴, 요산 등의 신진대사의 노폐물

을 피와 투석액을 膜을 사이에 두고 흘러보냄으로써 피로 부터 투석액으로 보내는 공정이다. 총膜면적은 1m<sup>2</sup> 정도이며, 최근에는 500mmHg 정도의 膜간 압력차를 이용하여 중간분자 및 저분자를 제거하는 방법이 상당히 각광을 받고 있다.

(4) Electrodialysis Process

Fig. 5 에는 Electrodialysis Process 의 원리를 보여 주고 있는데 Na<sup>+</sup> ion 는 ⊖ 전극으로 끌려가고 Cl<sup>-</sup> ion 은 ⊕ 전극으로 끌려가게 된다. 그러나 이온교환막의 선택적인 통과성 때문에 양이온교환막은 양이온을 음이온 교환막은 음이온만 통과시키기 때문에 그림에서 처럼 한쪽 compartment 에서는 농축이 되고 다른 쪽에서는 희석이 된다. 국내에서는 한주 소금이 이러한 공정을 이용하여 바닷물을 농축, Evaporation 및 crystallization 과정을 거쳐 생산되고 있다.

이 공정은 전해질을 비전해질로 부터 선택분리하는 데 유용하며 다음과 같은 공정에 이용되고 있다. 즉,

1. Desalination (cf. Reverse Osmosis)
2. Deashing of whey concentrates
3. Modification of liquid milk products
4. Oxidation-reduction
5. Electroorganic Synthesis
6. Electroosmosis

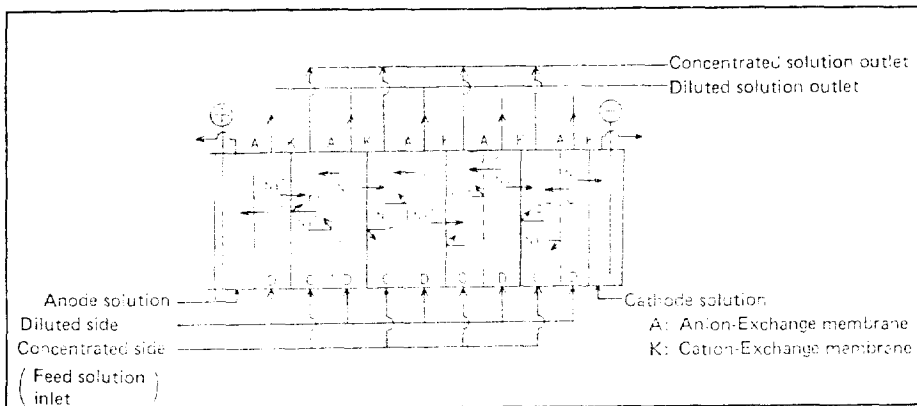
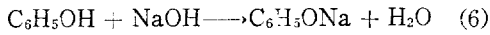


Fig. 5. A Schematic Diagram of Electrodialysis Separation (NaCl case)

(5) Liquid Membrane Process

Fig. 6 에는 액막을 이용한 폐놀 제거법을 보여주고 있는 데 물속에 NaOH 를 넣고 water-in-oil emulsion 을 만들고 다시 계면활성제를 넣어 수용액 속에 교반하면 water-in-oil-water (w/o/w) 의 액막이 생기게 되며 계면활성제는 이 액막을 안정시키는 역할을 한다. 즉 친수성기는 물 쪽을 향하고 소수성 hydrocarbon group 은 oil 쪽을 향하게 된다. 폐놀은 제일 바깥의 water phase 에서 oil phase 를 통하여 다시 water 속의 NaOH 와 반응하게 된다. 즉,



이 외에도 액막 분리공정은 폐수속의 chromium 제거나 fluorocarbon 을 이용한 혈액에 산소를 전달시키는 공정에 이용된다.

(6) Ultrafiltration Process

Ultrafiltration (한외여과) 공정은 분자량 250 정도에서 15 만 정도의 Protein 등을 압력차를 이용하여 여과하는 공정이다. 즉 Reverse Osmosis 가 분자량 60 정도의 소금을 분리하는 데 비해 분자량이 큰 것을 분리하는 것이 특징이며, 여기에 사용되는 압력은 0.3~5 atm 정도이며, Reverse Osmosis 의 20~150 atm 정도에 비하면 낮은 압력이라 할 수 있다. flux 는 대개 0.5~150 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.day 로 R.O. 의 1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.day 에 비하면 많이 높다고 할 수 있다. 여기에 사용되는

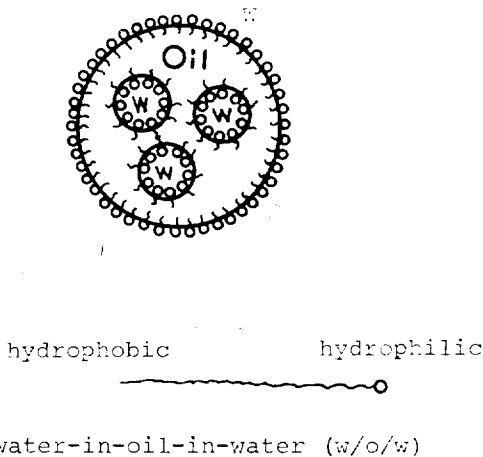


Fig. 6. An Example of Liquid Membrane Process

膜은 pore membrane 으로 분리하고자하는 용질의 크기에 따라 분리정도가 결정된다. 이론적으로 용질의 크기가 pore size 보다 크면 100% retention 되고 작으면 전부 빠져 나오게 되겠지만 pore size 가 일정하지 않고 또 pore 와 분자들간의 상호 작용이 있으므로 retention 은 0~100% 로 변하게 된다. 공업적으로는 protein concentration 이라든지 juice processing, milk processing 등의 Food processing 에 많이 이용되고 있다.

(7) Reverse Osmosis Process

Loeb 과 Sourirajan 은 종전의 cellulose acetate membrane 이 salt rejection property 는 좋으나 flux 가 나빠서 실용성이 없는 데 착안하여 Fig. 7 에서 보는 것처럼, Asymmetric membrane 이 되도록 membrane 을 만들었다. 이렇게 함으로써 같은 압력차를 이용하여 많은 flux 를 낼 수 있게 되었으며, 또한 skin layer 의 pore size 도 shrinking process 를 적용함으로써 high flux, high rejection membrane 을 만들었다. 이 이후로 Reverse Osmosis process 는 각광을 받기 시작하여 Desalination 뿐만 아니라

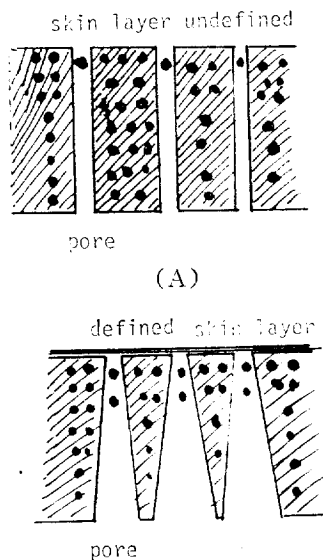


Fig. 7. A Schematic Comparison of Normal Membrane (A) vs. Loeb-Sourirajan Asymmetric Membrane: solute

각종 폐수처리, Food Processing, pulp and paper industry 등 광범하게 응용되고 있다. Reverse Osmosis는 대부분 cellulose acetate membrane이 사용되지만 porous membrane에 아주 얇은 다른 종류의 salt rejecting membrane을 casting하여 rejection property를 높이고 flux도 높게 하는 “composite membrane”과 porous tube에 humic acid, hydrous zirconium oxide acrylic acid 등을 통과시켜 膜을 형성시킨 다음 여기에 분리시키고자 하는 물질을 보내는 “dynamic membrane”도 개발되어 응용이 활발히 연구되고 있다. Reverse Osmosis는 membrane separation process 중 제일 규모가 크고 널리 사용되고 있는 공정이므로 이 방법의 연구에 대해서 알아 보기로 한다.

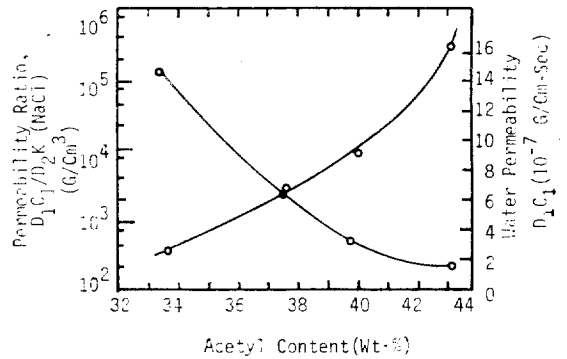
### 3. 膜 技術에 관한 研究

우선 膜의 화학적 조성에 관한 연구, 膜의 선택성에 대한 연구, 膜제조방법에 관한 연구, 膜 주변의 물질전달(polarization, gel formation)에 관한 연구, 膜의 응용에 관한 연구등이 膜 기술에 관한 중요한 연구분야라 하겠다.

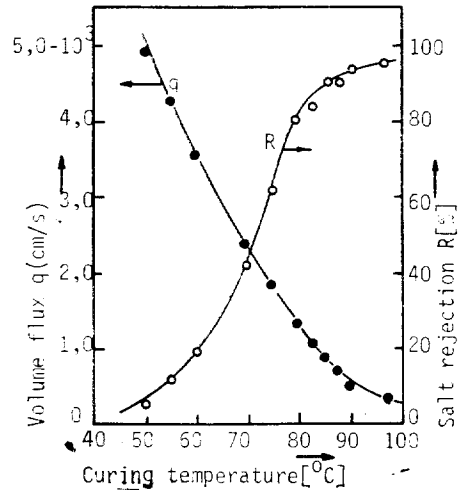
Table 3에는 Reverse Osmosis용 膜 제조에 사용되는 고분자 물질들을 보여주고 있는데 膜의 조성에 따라 膜분리에 관련되는 膜의 물리 화학적 성질이 많이 달라진다. 또한 한 계열의 고분자물질, 예를들면 cellulose acetate에서도 functional group에 methacrylate, benzoate, propionate, butyrate 등을 사용함으로써 膜의

**Table 3.** Various Polymers used for Reverse Osmosis CA = cellulose

Cellulose	CA
Cellulose Acetate	CA + CTA
Polyamide	CAM(methacrylate)
Polyurea	CAB(benzoate)
Polyfuran	CAP(propionate)
Polyether	CAB(butyrate)
Fluoropolymer	
Polyvinyl Alcohol	



**Fig. 8.** Permeabilities of Water vs. NaCl with the Change of Acetyl Content (wt%) of CA



**Fig. 9.** Dependence of Volume Flux and Salt Rejection on Curing Temp.

물리 화학적 성질을 바꿀 수 있다. Fig. 8에는 cellulose acetate의 acetyl content에 따라 물과 NaCl의 Permeability가 달라짐을 보여주고 있다. 즉 acetyl content가 높아지면 NaCl의 rejection은 좋아지나 water flux는 감소할 것이다. 따라서 적당한 acetyl 함량을 택하여야 할 것이다.

膜의 화학적 성분은 膜의 화학약품, pH에 대한 내구성에 중요한 영향을 미친다. 예를 들면 CA의 경우 사용할 수 있는 pH range는 3~8까지이고 보통 4.5~6 정도에서 사용되며 CTA (cellulose triacetate)는 2~9까지에 보통 4~6에서 사용되며, polyamide(PA)는 3~11까지에

보통 4.5~6 근처에 사용된다. 이러한 pH 범위 내에서도 膜은 서서히 가수분해하여 기능을 상실한다. 또한 염소( $\text{Cl}_2$ )에 대한 내구성을 보면 CTA는 0.0~5.0 ppm 까지 사용가능하고 보통 0.4~0.6 ppm 정도에서 사용되며 CA는 0.0~2.2 ppm 에 보통 0.4~0.6 ppm 정도에 사용되며 PA는 0.0~0.1 ppm 여서 보통의  $\text{Cl}_2$  함유용수에 사용할 수 없는 정도이다. 따라서 膜을 선택하기 전에 사용하고자 하는 용액의 膜의 수명에 대한 영향등이 철저히 검토 되어야 할 것이다.

또한 동일 고분자물질 예를들어 CA 를 가지고 어떤 과정을 거쳐 막을 만드느냐에 따라 물질의 분리능력이 많이 달라질 수 있다. 즉 같은 고분자 물질인 경우 pore size 나 asymmetry에 따라 분리능력이 현저하게 달라질 수가 있기 때문에 membrane processing이 membrane chemistry 못지 않게 중요하다고 할 수 있다. 결국 Loeb 과 Sourirajan 의 공로도 여기에 있는 것이다.

CA 膜의 경우 첫째과정으로 CA 를 물 아세톤,  $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ , 혹은 formaldehyde 등의 solvent 에 녹인 다음 두번째과정으로  $-10^\circ\text{C}$  정도에서 casting 하여 30 초정도 말린다음 얼음물에서 침전시키고 다시  $90^\circ\text{C}$  정도의 뜨거운 물에 넣어 shrinking 시킨다. Fig. 9 에는 수축시키는 온도와 salt rejection ( $\text{NaCl}$ ), water flux 의 관계를 보여 주고 있는 데 서로 상반되는 관계가 있어서 일반적으로 낮은 온도나 높은 온도가 좋다고 이야기 할 수가 없다. 膜제조과정에는 여러가지 공정변수들이 많으므로 이런 것들을 바꾸어 가면서 최적화하는 것이 이런 계통연구의 주안점이라 할 수 있겠다.

또한 R.O.나 U.F. 공정에 있어서 많은 문제가 되고 있는 것이 膜표면에서의 polarization 현상인데 이는 膜주변의 유체전달현상과 많은 관련이 있어서 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

또한 이미 시판 중인 膜이나 개발중인 膜의 응용분야를 찾는 것도 膜분리연구의 중요한 분야가 되고 있다.

## 4. 結 言

이상 膜분리 공정의 전반에 걸쳐 여러분야를 간단하게 소개하였다. 최근에 와서 활기를 띄고 있는 연구는 膜분리공정이 Desalination 등 예전부터 많이 사용되는 분야 뿐만 아니라 일반적인 분리공정에 사용될 수 있다는 가능성을 보여 주고 있다. 예를들어 서독의 Erlangen-Nürnberg 대학의 S.Peter 교수는 asymmetric polyvinyl alcohol 膜을 개발하였는데 이 膜은  $\text{NaCl}$  등의 무기물질의 rejection ability 는 낮지만 phenol 등 유기물질의 분리에 우수한 성능을 나타내고 있다. 또한 pH, solvent 등 약품에 대한 내구성이 무척 강하며  $80^\circ\text{C}$  정도의 고온에서도 사용할 수 있어 일반적인 분리공정에 사용될 수 있음을 보여주고 있다. 물론 아직까지 flux 가 CA 보다 낮아서 이를 향상시키는 문제가 남아 있게 마련이지만 상당히 희망적인 膜이라 할 수 있다. 앞으로도 유사한 膜의 개발로 재래식 공정이 에너지 소모가 작고 경제적인 膜분리공정으로 대체될 것으로 보인다.

## 참 고 문 헌

### A. 단행본

- (A 1) R.E. Kesting, "Synthetic Polymeric Membrane," McGraw-Hill, New York, 1971.
- (A 2) S.Hwang, and K.Kammermeyer, "Membranes in Separation," Wiley-Intersci, New York, 1975.
- (A 3) R.E. Lacey and S. Loeb, "Industrial Processing with Membranes," Wiley-Intersci, New York, 1972.
- (A 4) H.K. Lonsdale and H.E. Podall, "Reverse Osmosis Membrane Research," Plenum Press, New York, 1972.
- (A 5) P.Mears, "Membrane Separation Processes," Elsevier, Amsterdam, 1976.
- (A 6) S.Sourirajan, "Reverse Osmosis," Academic Press, New York, N.Y. 1970.
- (A 7) S.Sourirajan, "Reverse Osmosis and

Synthetic Membranes," National Research Council Canada, Pub. NRCC No. 15627, Ottawa, Canada. 1977.

- (A 8) A.F. Turbak, "Synthetic Membranes, vol. II. Hyper-and Ultrafiltration Uses," ACS Symp. Ser. 154, ACS, Washington D.C., 1981.
- (A 9) G. Eisenman, "Membranes vol. 1. Macroscopic Systems and Models," Marcel Dekker, Inc. New York, 1972.
- (A 10) W.J. Weber, Jr., "Physicochemical Processes for Water Quality Control." Wiley-Intersci, New York, 1972.

## B. 정기 간행물

- (B 1) Desalination.
- (B 2) J. Membrane Science.
- (B 3) Proc. Int. Symp. Fresh Water from the Sea.
- (B 4) Water & Sewage Works.
- (B 5) Trans. Amer. Soc. Artif. Int. Organs.
- (B 6) J. Biomed. Mat. Res.
- (B 7) Separation and Purification Method.
- (B 8) Separation Science and Technology.

