

분리막에서 이온교환막의 현상

조 성 우 · 양 원 강

1. 개 요

1.1 이온교환막이란

분리막 연구에서 전기투석법에 의한 이온교환막의 활용은 화학공업, 산업, 환경분야에 이르기까지 눈부신 진보를 가져왔다.^{1,2}

1950년에 Juda와 McRae의³ 이온교환 수지합성이 보고된 이래 근 50년의 세월이 지나고 있다. 1960년에 들어서 Loeb와 Sourirajan의⁴ 초산 셀룰로오스 분리막에 의한 탈염법 보고가 있었고, Michaelis, Miecka의⁵ 한외여과법을 이용한 용액속의 용질분리에 대한 보고 후 분리막에 대한 연구의 관심이 모아졌다고 본다. 또 1970년에 탄화수소계에서 탄화불소계의 이온교환막(참고 2.3절)이 DuPont사에서 발표된 후로 더 큰 연구의 관심이 집중되었다고 본다.

분리막 분야에서 분리수단의 첫번째로 이용된 이온교환막법은 대부분 고분자골격에 하전기를 결합시켜 이온전도성을 갖게 한 고분자합성 물질을 분리(이온, 분자)에 사용한 막을 일컫는다. 이온교환막의 활용도는 호수의 염분을 제거하여 농·공업수로 사용하거나, 바닷물에서 소금을 얻거나, 폐수내의 염 제거, 우라늄의 농축 등이 있으며, 또 생체내의 이온의 전달기능이 알려진 후 이온교환막의 제조와 응용에 대한 관심이 깊어졌다고 본다. 디비닐벤젠과 폴리스티렌에서 슬폰산기, R-SO₃⁻나 카르복실기, R-COO⁻를 합성시켜 양이온교환이 일어나는 이온교환막을 양이온 교환막이라고⁶ 한다. 그리고 제4급 암모늄염기, R≡NOH나 약염기성의 제1급 아민,

R-NH₂이 이온교환기로 작용하면 음이온 교환막이라고 부른다.^{6,7}〈표 1〉

최근에는 바이폴라(bipolar) 이온교환막을 이용하여 전기투석법으로 물을 전기분해하여 산과 알칼리로 분해하는 Water Splitting⁷ 방법이 소개되었으며 폐산의 처리, 산성가스의 처리 및 바닷물로부터 산/알칼리, 우라늄염의 농축 등 다양한 용도에 활용될 수 있는 바이폴라 이온교환막도 보고되었다. 이온교환막에 의한 분리, 농축 및 흡착은 기대되는 연구분야이다.⁸⁻¹¹〈표 2〉



조성우

1997 동국대 화학과(이학사)
1999 동국대 화학과(이학석사)
1999~ 동국대 연구원
현재 (Assistant Researcher)



양원강

1970 경희대 화학과(이학사)
1981~ 일본구주대 대학원 화학과
1988 (이학석·박사)
1995~ 기초과학센터 소장
1997
1989~ 동국대학교 화학과 조교수·교수
현재

Ion Exchange Membrane Phenomena on The Separation Membrane

동국대 자연과학대학 화학과(Sungwoo Cho and Wongkang Yang, Dept. of Chemistry, College of Natural Science, Dongguk University, Kyongju 780-714, Korea) e-mail : yangwk@mail.dongguk.ac.kr

표 1. Characteristics of Cation Exchange Nafion Membrane

Species	Sulfonic	Carboxylic	Ratio
Ion exchange group	-SO ₃ H	-CO ₂ H	-CO ₂ H/SO ₃ H
pK _a	<1	2-3	2-3/<1
함수율	High	High	Low
전기저항	Low	High	Low
화학적안정성 크기	High	High	High

1.2 이온교환막의 종류

이온교환막은 그 기능에 따라서 다음과 같이 명명하고 있다. 양이온을 투과시키면 양이온 교환막, 음이온을 투과시키면 음이온 교환막, 음/양이온 교환기를 같이 합성시켜서 음/양이온을 동시에 투과시키면 양성이온 교환막이라고 한다. 표 3과 같이 이온교환막의 종류를 분류한다.⁶

다음은 이온교환막에서 대표적인 이온교환기의 역할과 그의 확산성 모델로¹³ 그의 장점을 열거한다 (그림 1).¹³

- 균일한 친수성
- 이온교환용량이 크다
- 이온교환속도가 높다.
- 화학적 안정성
- 물리적, 열적 안정성이 높다.

2. 본 론

2.1 이온교환막의 성질

이온교환막은 전위차를 driving-force로 하는 전기투석(electrodialysis, ED)에 사용되는 선택투과성 분리막이다.¹⁴ 이온교환막의 기본적인 성질은 이온선택적 투과성과 전도성이며 이것을 다시 세분하면 막의 이온선택 투과성, 막의 함수율, 막의 골격이 되는 이온교환의 균질성으로 나눌 수 있다. 또 연구 목적에 따라서 동부호 및 이부호 이온사이의 선택성, 이온교환수지의 오염 내구성, 이온교환기의 전기적저항, 이온교환기와 채널의 영향 등이 막의 성능평가의 쟁점이 된다.¹⁵⁻¹⁷ 이온교환막의 기능에 따른 성질은 그림 2에 나타나 있다.

2.1.1 동일부호 이온선택투과 모델

양이온, 음이온의 모델로 Na⁺, Cl⁻에 대한 투과당량을 선택도 값으로 정리해 보자.

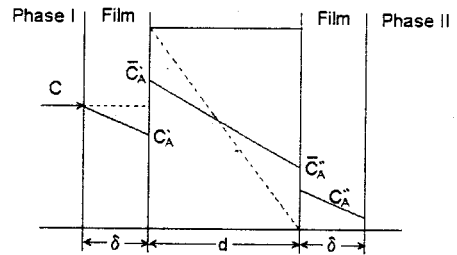
투과당량에 대한 선택을, α와 각각의 이온 m₁, m₂에 대한 식을 정리하면 다음과 같다.¹⁸

표 2. 분리막의 기능성별 응용분야

Membrane	Application	Medical Application
전도성막	태양전지, 전자기기	심장박동용 전지
반전도성막	전자사전	
광전도도막	화상정보의 바이스	인공신장 인공폐
광감응막	정보광전송	
용질투과막	담수화, 초순수제조	
기체투과막	산소부화, 수소분리	
유기성액체막	혼합액 분리	인공신장 인공폐
이온교환막	식염제조, 폐수처리	
효소고정막	탈염, 유라늄 농축	치료용막
	Bioreactor	
	(아미노산, 알콜) 당제조	
미생물고정막	막 센서	치료용막
광화학반응막	수소제조(광분해)	

표 3. 이온교환막의 종류¹²

양이온하전교환막	cation charge membrane
음이온하전교환막	anion charge membrane
양성이온하전교환막	amphoteric charge membrane
모자이크하전막 ⁷	mosaic charge membrane
바이폴라하전막	bipolar charge membrane
방사선 graft 중합하전막	radiation graft polymeric membrane



" Ion - Exchange Membrane " ed by F. Helfferich p 348 1962

그림 1. Model of ionic diffusion phenomena, δ is ionic density layer, d is membrane thickness.

$$\alpha \frac{m_1}{m_2} = \frac{t_{Na^+}/t_{Cl^-}}{C_{Na^+}/C_{Cl^-}}, \bar{t}_i = \frac{\bar{L}_i}{\sum \bar{L}_j} \quad (1)$$

$$\alpha \frac{m_1}{m_2} = \frac{\bar{L}_{Na^+} C_{Cl^-}}{\bar{L}_{Cl^-} C_{Na^+}} \quad (2)$$

$$\alpha \frac{m_1}{m_2} = \frac{U_{Na^+} C_{Na^+} C_{Cl^-}}{U_{Cl^-} C_{Cl^-} C_{Na^+}} \quad (3)$$

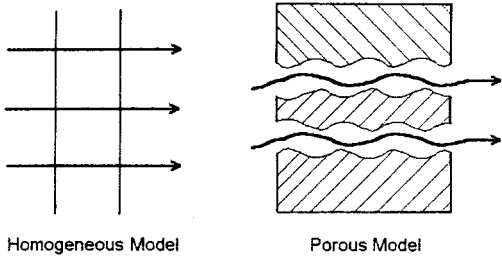


그림 2. Model of ion transport across ion exchange membrane.

$$\alpha_{m_1}^{m_2} = \frac{\bar{t}_{m_2}/\bar{t}_{m_1}}{C_{m_2}/C_{m_1}} \quad (4)$$

여기서 \bar{t}_i 는 i 이온에 대한 운반율(transport number), C_i 는 용액의 이온농도이다.¹⁶

$$\alpha_{m_1}^{m_2} = \frac{\bar{L}_{m_2}C_{m_1}}{\bar{L}_{m_1}C_{m_2}} \quad (5)$$

여기서 \bar{L} , \bar{t} 는 막내의 이동도(mobility)와 운반율이고, 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{t}_i = \bar{L}_i / \sum_j \bar{L}_j, \quad \bar{L}_i = U_i C_{Rm} V \quad (6)$$

$$\alpha_{m_1}^{m_2} = \frac{U_{m_2} C_{Rm_2} C_{Rm_1}}{U_{m_1} C_{Rm_1} C_{m_2}} \quad (7)$$

여기서 U_{m_1} , U_{m_2} 는 각각의 이온의 막내 운반율이다.

이온들 사이의 관계를 평형상수 식으로 정리하면 다음과 같아진다.

$$K_{m_1}^{m_2} = \left(\frac{C_{Rm_2}}{C_{Rm_1}} \right) / \left(\frac{C_{m_2}}{C_{m_1}} \right) \quad (8)$$

$$\alpha_{m_1}^{m_2} = K_{m_1}^{m_2} \cdot \frac{U_{m_2}}{U_{m_1}} \text{이 성립한다(그림 3, 4).}$$

부호가 같은 이온의 경우, 막내에서 이온의 운반율의 비와 이온 평형상수의 곱의 관계는 운반율 차이로 막내에서 이온의 투과에 영향을 미치는 결과는 nonporous막에서와 같다. 그러면 부호가 같은 이온들의 선택성의 컨트롤은 불가능한가? 이온반경의 크기와 하전의 세기에 대한 수학적 관점으로 가능하다.

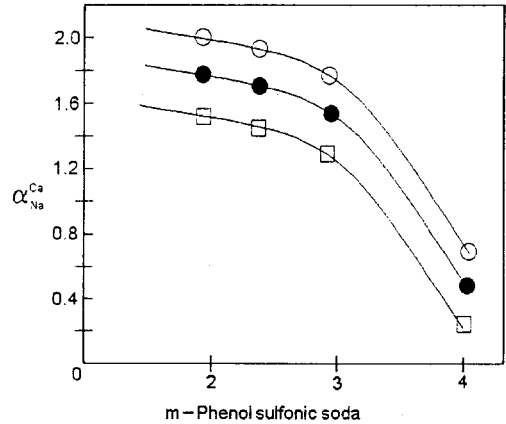


그림 3. Relationship of α_{Na}^{Ca} and phenol.

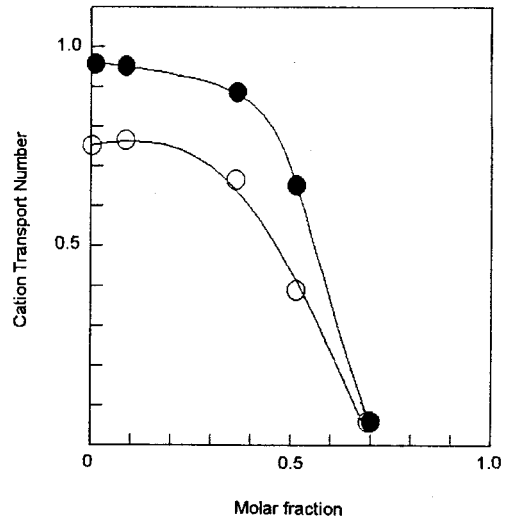


그림 4. α_{Na}^{Ca} and transport number in 2-methyl-5-vinyl pyridine, ● : cations transport number, ○ : α_{Na}^{Ca} ratio of metal ions.

2.1.2 이부호 이온선택투과¹⁸

이온교환막의 핵심적 일은 서로 다른 부호의 이온에 대한 선택적 기능으로 잘 알려져 있다. 양이온 선택막에서는 음이온의 선택성 및 반응을 따로 고려할 필요는 없다.¹⁹ 양이온 교환막은 양이온외에 대해서는 높은 저지율을 나타내는 것이 일반적 상식이다. 이온교환막의 성능은 이온교환막내의 이온운반율, 이온의 이동정도, 농도변화, 용액의 양의 변화값을 측정하여 해석할 수 있다. 앞에서 언급했지만 이것은 막내이온의 농도가 고정전하의 이온밀도보다 높아야만 이온의 운반율이 커지기 때문이다.

네른스트식에 의한 염화나트륨용액에 대한 막내

표 4. Characteristics of Ion Exchange Membrane (CMV & AMV & ASV)^e

Classification	CMV	AMV	ASM
Thickness	0.11~0.15	0.11~0.15	0.11~0.15
Transport No. ^a	>0.91	>0.93	>0.95
Resistance ^b	2.0~3.5	2.0~3.5	3.0~4.5
Water Content(%) ^c	15~16	15~16	15~16
Ion Exchange Capacity(meq/g dry resin)	1.5~1.8	2.0~2.3	2.0~2.3
Bursting Strength ^d (kg/cm ²)	3~5	3~5	3~5

^a Membrane potential 0.5/1.0N-NaCl, ^b AC method in 0.5N-NaCl, ^c Wet membrane, ^d Mullen bursting strength, ^e CMV, AMV & ASM made of ion exchange membranes of cation and anion, respectively.

이온농도 식을 정의하면 다음과 같다.²⁰⁻²²

$$C_i = \left(\frac{C_R^2 + 4C_{NaCl}^2 \pm C_R}{2} \right), \quad i = +, - \text{ ion} \quad (9)$$

여기서 C_R 은 고정전하의 농도값이다.

2.1.3 이온교환기의 전기저항

이온교환기의 전기저항은 용액과 평형상태에서 농도, 조성 및 온도에 영향을 미치고 교류법, 직류법으로 저항을 분석하는 것이 보통이다. 그리고 일반적으로 이온교환기의 저항분석을 위해서 이온교환기의 단위 용량이 커야 하고 막의 두께가 매우 얇아야 한다.

무기 이온교환막인 세라믹, 제올라이트막은 내열성, 선택특이성, 내열수성이 특히 강한 것이 장점이다.

2.1.4 이온교환막의 화학적 성질²³

이온교환막과 전해질용액 사이에 화학적으로 대단히 복잡한 변수가 존재하는 것은 잘 알려진 사실이다. 대표적 변수에는 1) 막내 고정이온의 농도, 2) 교환기의 활성이다. 한예로 이온교환막이 중성이며 선택해질의 음·양이온의 선택투과성 막으로 사용할 때 선택투과 기능을 제대로 하지 못하게 되는 것이다. 또 교환기의 농도가 막의 기계적 성능을 잃지 않는 범위에서 고밀도여야 한다. 특별한 용도의 분리 대상이나 조건에 따라서는 강전해질의 이온교환기와 다른 교환기의 합성막이 사용된다. 이 이온교환막의 투석방법에 따른 응용분야를 표 4에 나타내었다.

표 5. 이온교환막의 화학적 및 구조적 성질

<ul style="list-style-type: none"> 이온교환막의 화학적 영향; 교환골격의 구조적 영향 교환기의 활성 영향
<ul style="list-style-type: none"> 이온교환막의 외부조건에 따른 영향; 분리막/전해질용액의 평형 영향 막내 이온이동의 영향

2.2 이온교환막 기능성²³

이온교환막은 가교된 고분자 골격에 이온교환기를 결합시켜 만들어진 고체산성형 또는 고체 염기성형 분리막이고 하전기의 성능은 교환기의 밀도가 높아야 하는 것 알려져 있다. 일반적으로 이온교환막은 교환용량, 함수율, 고정전하 밀도로 특징지어지며 그림 2는 이온교환막을 통한 간단한 모델(그림 1)이다.

이온교환기 안팎의 이온분포는, Henderson,⁸ Teorell,⁹ Meyer,¹¹ Sievers²⁶(TMS-theory)의 열역학 정리에 따르면 교환기의 이온밀도의 한계와 밀접한 연관을 지니고 있다. 이온교환막을 거시적 이론에서 Donnan¹⁰ 평형을 도입하여 해석하는 것이 기본이었다. 그러나 이것은 이온교환막이 갖는 미시적 성질의 해석에는 합당하지 못하였다. 고정전하의 밀도와 고분자가교에 의한 포아 구조가 대단히 불규칙적이기 때문이다. 이온교환막의 성능은 외부용액에서 막을 통과하는 이온농도를 측정하여 판정하고 있기 때문이다.

표 6. 투석에 의한 이온교환막의 분리법¹⁸

전기투석법	농축	바닷물의 농축 폐수에서 염회수
	탈염	해수담수화폐수 재이용 비전해질의 탈염정제
	화학반응	착물반응과 복분해반응 산, 알칼리, 염제조
확산투석법	폐산회수	
기타	전해용막 전지의 고체전해질 냄새 감응막	

표 7. 일반적인 이온교환막의 성질^{24,25}

교환용량(meq./g dry-resin)	2.0
고정전하밀도(eq./kg H ₂ O)	7.0
막함수율(g H ₂ O/g dry-resin)	0.28

2.2.1 막과 전해질용액의 확산이론²⁷

다음과 같이 간단한 시스템에서 이온의 확산식을 정리해본다.

전해질 용액1	이온교환막	전해질 용액2
------------	-------	------------

막-전해질계에서 확산현상은 농도기울기로 본다. 전기영동법에 의한 농축, 탈염의 분리에서 전류효율의 저하와 삼투현상 때문에 거의 확산이론을 적용하지 않지만 막-전해질용액의 이온교환막 시스템에서는 농도기울기가 존재하게 되면 반드시 이온 flux에 의한 확산계수를 계산해야 한다. 막과 전해질 확산식을 아래 조건에서 $C_1 \gg C_2$, 또는 $C_2 \gg C_1$ 정리하면 이온프락스 식은 다음과 같이 정리한다.

$$J_i = -D_i C \text{ grad } \mu_i \quad (10)$$

$$= -D_i (\text{grad } C_i + C_i \text{ grad } \ln f_i) \quad (11)$$

$$J_i = -D_i (\text{grad } C_i + Z_i C_i \frac{F}{RT} \text{ grad } \Psi + C_i \text{ grad } \ln f_i) \quad (12)$$

양이온과 음이온에 대한 각각 이온의 프락스 식은 다음과 같다.

$$J_+ = -D_+ \left(\frac{dC_+}{dx} + Z_+ \bar{C}_+ \frac{F}{RT} \frac{d\Psi}{dx} + \bar{C}_+ \frac{d \ln f_+}{dx} \right) \quad (13)$$

$$J_- = -D_- \left(\frac{dC_-}{dx} + Z_- \bar{C}_- \frac{F}{RT} \frac{d\Psi}{dx} + \bar{C}_- \frac{d \ln f_-}{dx} \right) \quad (14)$$

여기서 \bar{C}_\pm , Z_\pm , D 는 각각 막내 이온농도, 전해질용액의 하전과 용질 이온의 확산계수이다.

f_\pm 는 활동도 계수이고, $\frac{d\Psi}{dx}$ 는 전위 기울기이고, R , T 는 기체상수, 절대온도이다.

확산전위는

$$\Psi^0 = \left(\frac{t_+}{|Z_+|} - \frac{t_-}{|Z_-|} \right) \frac{RT}{F} \ln f_\pm \quad (15)$$

$$t_+ + t_- = 1 \quad (16)$$

막전도도, G_m 값은 이온전도도와 이온 운반율, t_\pm 의 관계는 다음과 같다.

$$g_+ = G_m t_+, \quad g_- = G_m t_- \quad (17)$$

여기서 G_m 는 도전성 이온전도도 g_a, g_β 의 합이다.

$$i_a = Z_+ F J_+ \quad (18)$$

$$= -g_+^0 (V_o - V_+) \quad (19)$$

$$i_\beta = Z_- F J_- \quad (20)$$

$$= -g_-^0 (V_o - V_-) \quad (21)$$

따라서 확산성이온 전도도 g_\pm^0 를 구할 수 있다. 확산성 이온전도도와 도전성 이온전도도의 비의 값은 다음과 같다.³¹

$$\frac{g_a^0}{g_a} = \frac{g_\beta^0}{g_\beta} = 1 - g_{a\beta} \left(\frac{1}{g_a} + \frac{1}{g_\beta} \right) \quad (22)$$

위의 관계식에서

$$g_{a\beta} = t_a (g_\beta - g_\beta^0) \quad (23)$$

$$= t_\beta (g_a - g_a^0) \text{가 된다.} \quad (24)$$

전도도 행렬식의 매트릭스 $g_{aa}, g_{\beta\beta}, g_{a\beta}$ 를 구할 수 있다.

$g_a, g_\beta, g_a^0, g_\beta^0, G_m$ 를 구하여 전기적 성질의 분석이 가능해진다. 한편, 투과계수 행렬식의 요소이다.

$$P_{aa}, P_{a\beta}, P_{\beta\beta}, P_{\beta a}, P_{\beta a} (P_{\beta a})$$

여기서 g_a 와 P_a, g_a^0 와 $P_a^0, g_{a\beta}$ 와의 관계식을 정리하면

$$g_a = \frac{(Z_a F)^2}{RT} P_a (a_a^1 a_a^2)^{1/2} \frac{\sin h Z_a (\psi_o - \psi_a) / 2}{Z_a (\psi_o - \psi_a) / 2} \quad (25)$$

$$g_a^0 = \frac{(Z_a F)^2}{RT} P_a^0 (a_a^1 a_a^2)^{1/2} \frac{\sin h Z_a (\psi_o - \psi_a) / 2}{Z_a (\psi_o - \psi_a) / 2} \quad (26)$$

$$g_{a\beta} = \frac{(Z_a Z_\beta F)^2}{RT} P_{a\beta} (a_a^1 a_a^2)^{1/2} \frac{\sin h Z_a (\psi_o - \psi_a) / 2}{Z_a (\psi_o - \psi_a) / 2} \quad (27)$$

$$\text{여기서 } \psi = \frac{FV}{RT} \quad (28)$$

$$\psi_a = \frac{FV}{RT} = \left(\frac{1}{Z_a} \right) \ln \frac{a_a^1}{a_a^2} \quad (29)$$

$$Z_a P_a = Z_a P_{aa} + Z_\beta P_{\beta\beta} \quad (30)$$

$$Z_\beta P_\beta = Z_\beta P_{\beta\beta} + Z_a P_{a\beta} \quad (31)$$

막요소를 확산식에서 정리가 가능한 셈이다.

$$P_a = \bar{D} \frac{1}{RT} \left[\frac{\bar{C}_a}{(a_a^1 a_a^2)^{1/2}} \right] \quad (32)$$

분리막 투과에서 막내 확산, 막내에서 용액으로 확산을 알면 확산계수, D 를 구할 수 있다.²⁷ 확산계수는 pH, 용액농도, 전해질 종류, 온도에 민감하고 셀 농도에는 더욱 의존성(그림 5)이 크다. 그러나 그림 6처럼 막내에서의 자기확산 값은 일정한 것으로 약속한다.

다음은 비닐피리딘 에폭시 화합물계 음이온 막내로 NaCl의 확산계수와 외부용액 농도와 온도에 대한 의존성이다(그림 7).²⁸⁻³⁰

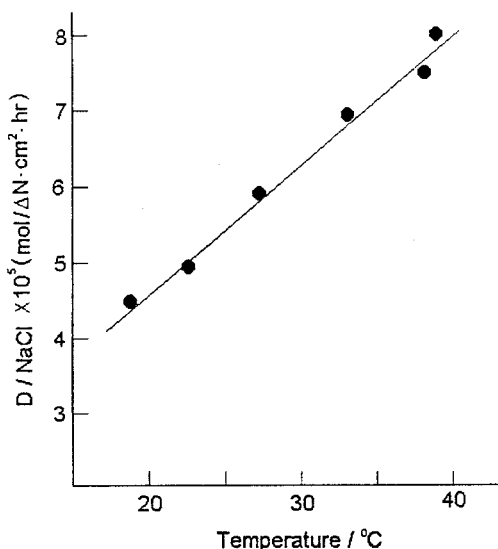


그림 5. 확산계수의 온도의존성.

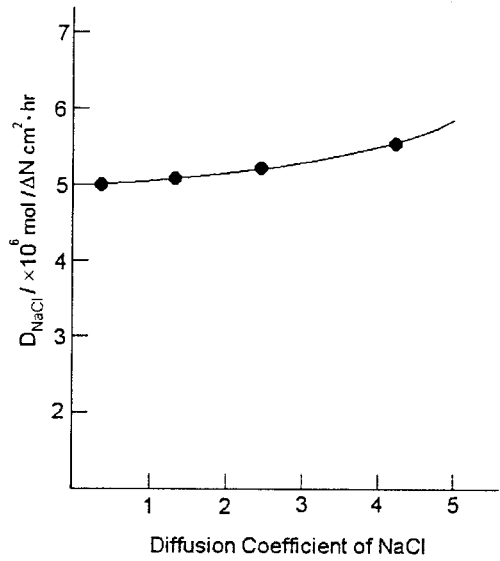


그림 6. 음이온교환막내 확산계수.

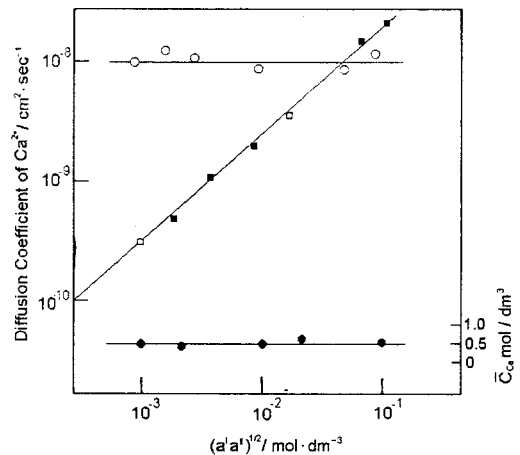


그림 7. 양이온 교환막과 CaCl₂용액에서 Ca의 확산계수. ○ 막내 확산계수, ● radio trace에 의한 확산계수, ■ 용액에서 막으로 확산계수, □ 막에서 용액으로 확산계수.

2.3 탄화불소계 이온교환막

탄화수소계의 이온교환막에서 1970년 고분자공격을 탄화수소계에서 탄화불소계로 변화된 것이 보고된 이후 미국의 DuPont사가 Nafion이란 탄화불소계 이온교환막을 발표한 것이 탄화불소계 이온교환막의 본격적 등장이다.³¹

다음은 간단한 탄화불소계 이온교환막의 특징이다.²²

2.3.1 탄화불소계 막 제조법

폴리(테트라플루오로에틸렌)의 골격에 퍼플루로이서를 공중합하여 가수분해시키면 다음과 같이 탄화

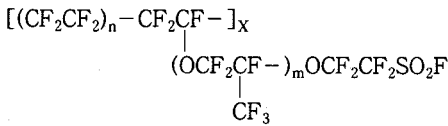
표 8. 이온교환막을 투과하는 염의 확산계수

전해질	NaCl	KCl	KBr	CaCl ₂	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄
$D/d \times 10^5 \text{ eq/N cm}^2\text{hr}$	7.48	7.31	8.50	3.68	7.83	0.9

표 9. 탄화불소계 이온교환막의 성질

상품명	막의 두께(/mm)	교환용량(meg/g)	막전기저항(/ohm.cm ²)	막내 교환기
Du Pont No. 117	0.19	0.91	1.5	술폰산기
No. 324	0.36	0.67	4.5	술폰산기
Nafion No. 423	0.42	0.83	3.5	술폰산기
No. 901	0.40	0.83	3.5	카르복실기/술폰산기

불소계 이온교환막이 합성되고 간단한 구조는 아래와 같다.



균일막은 NaOH농도 증가에 반대하여 양이온 운반율이 감소하고 막내 함수율의 영향이 크다. 막표면에 에틸렌아민을 처리하면 술폰아미드층이 만들어져 전류효율이 좋아지며 높은 선택성을 나타내는 것으로 알려져 있다.³²

술폰산 막의 pKa는 <1이고 카르복실산 막의 pKa는 1.9로 강산이다. 이것은 불소의 강한 전자흡인력 때문이다. 카르복실산 막은 함수율이 낮고 물 분자의 수소결합 증가로 이온클라스터가 형성되어 안정하다.

근래 탄화불소 골격에다 일반 고분자를 합성시켜 제조된 3차원 망목 구조를 지닌 이온교환막의 특성에 대한 연구가 Dr. Yamauchi에⁴⁰ 의해 보고되었다. 연구내용은 이온교환막내의 이온교환기와 고분자의 망목구조내에 형성되는 포아에 의한 이온의 선택투과 비교에서 포아의 영향이 크다는 결과 보고였다.

2.3.2 탄화불소계 막의 특성

탄화불소계 막의 일반적 성질은 낮은 전기저항, 높은 선택 투과성, 좋은 기계적 특성, 우수한 화학적, 열적 안정성이다. 막내 고정이온교환과 반대이온과 주위의 물분자는 대개 공모양의 구형 클라스터를 만들어서 막 전체에 분산한다. 탄화불소 골격의 수소성에 대한 반반력과 이온교환기의 정전기적 반반력의 균형에 의해 일정한 모양이 만들어진다.³³⁻³⁵

탄화불소계 양이온 교환막은 앞에서 기술한 것같이 전기저항이 낮아 전류효율이 떨어지고 이온선택성도 떨어진다. 반면에 높은 온도인 170 °C에서 연속 사용이 가능하고, 수용액 속에서는 220-240 °C에도 사용 가능성이 특이하다. 한편, 음이온 교환막은 내구성이 좋고 폐산 용액에서 산의 분리, 전해법에서 강산 회수분리에 적절하다. 반대로 양이온 교환막은 산업생산에서 생기는 산업폐수처리 분리용 막으로 가장 기대가 크다.^{36,37}

3. 결 론

이온의 선택투과, 회수, 농축이 가능한 이온교환막 분리법은 폐액속의 금속분리, 폐산속의 산회수, 바닷물에서 우라늄의 농축 등을 저에너지로 분리할 수 있는 환경보호 차원에서 볼 때 가장 적절한 분리법이다. 또 여러 기기분석의 전처리 방법으로 이온교환막법은 대단히 유용하다.^{38,39}

21C 벽두부터 물부족으로 겪을 고통을 생각하면 무진장한 바닷물의 식수화에서 이온교환막법 연구개발이 바닷물에서 우라늄농축, 냄새센서에 까지 연구개발이 기대된다.

참 고 문 헌

1. H. Kimizuka, "Membrane Transport of Ions", ed. by Kyoritsu, p. 125, 1988.
2. Kimizuka and Koketsu, *J. Theoret. Biol.*, **6**, 290 (1964).
3. W. Juda and W. A. McRae, *J. Am. Chem. Soc.*, **72**, 1044 (1950).
4. S. Leob and S. Sourirajan, *Adv. Chem. Ser.*, **38**, 117

- (1963).
5. A. S. Michaelis and R. Miecka, *J. Phys. Chem.*, **65**, 1765 (1961).
 6. F. Helfferich, "Ion-exchange", Chapter 8-10, McGraw-Hill, N. Y., 1962.
 7. V. Frilette, *J. Phys. Chem.*, **60**, 435 (1956).
 8. P. Henderson, *Z. Physik. Chem.*, **63**, 325 (1907).
 9. T. Teorell, *Proc. Biophys. Chem.*, **3**, 305 (1935).
 10. F. G. Donnan, *Z. Physik. Chem.*, **A168**, 369 (1934).
 11. J. S. Mears and P. Mackie, *Pro. Roy. Soc., Ser. A*, **232**, 498 (1955).
 12. O. Kedem and S. R. Caplan, *Trans. Faraday Soc.*, **61**, 1897 (1965).
 13. J. A. Marinsky & Y. Marcus, "Ion Exchange and Solvent Extration", Chap. 4, ed. by Marcel Dekker, Inc., N. Y., 1973.
 14. N. Lakshminarayanaiah, "Transport Phenomena in Membrane", Chapt. 2~3, Acad. Press, N. Y. & London, 1969.
 15. T. Matsuura and S. Sourirajan, *J. Appl. Polym. Soc.*, **17**, 4006 (1972).
 16. S. G. Schultz, "Basic Principle of Membrane Transport", Chapt. 4, 6, Cambr. Univ. Press, 1980.
 17. W. G. F. Grot, *Chem. Ing. Tech.*, **44**, 167 (1972).
 18. T. D. Gierke, *J. Electrochem. Soc.*, **124**, 319C (1977).
 19. E. Kumamoto and H. Kimizuka, *J. Phys. Chem.*, **85**, 635 (1981).
 20. R. E. Kesting, "Reverse Osmosis and Synthetic Membranes", p. 69, NRC, 1977.
 21. T. Hanai, "Membrane and Ion(Jpn)", Chap. 2-3, Kagakudoin, Tokyo, 1978.
 22. M. Seno, "Membrane Chemistry", Chapt. 1 & 3, Dainihon Press, Tokyo, 1987.
 23. K. Sollner, *Arch. Biochem. Biophys.*, **54**, 129 (1955).
 24. H. Kimizuka, Y. Nagata, and W. Yang, "Membranes and Membrane Processes", p. 85, E. Drioli Plenum Press, N. Y., 1986.
 25. M. Igawa, K. Echizenya, T. Hayashita, and M. Seno, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **60**, 381 (1987).
 26. M. Matsumoto, H. Shimauchi, and F. Nakashio, *Solvent Extr. Ion Excha.*, **5**, 301 (1987).
 27. K. H. Meyer and J. F. Sievers, *Helv. Chim. Acta*, **20**, 634 (1937).
 28. J. Crank, "The Mathematics of Diffusios", ed. by Oxford, 2nd, p. 51, 282, Oxford, 1975.
 29. T. Sata, *Kolloid Z. Z. Polym.*, **243**, 157 (1972).
 30. T. Sata, *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.*, **16**, 1063 (1978).
 31. Nafion is a registered trademark of the Du Pont Corp.
 32. T. Shimidzu, A. Ohtani, T. Iyoda, and K. Honda, *J. Electroanal. Chem.*, **224**, 123 (1987).
 33. Y. Nagata, K. Kohara, W. K. Yang, A. Yamauchi, and H. Kimizuka, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **61**, 793 (1988).
 34. U. Yokoyama, A. Tanioka, and K. Miyasaka, *J. Membr. Sci.*, **38**, 223 (1988).
 35. A. Katchalsky and P. F. Curran, "Nonequilibrium Thermodynamics in Biophysics", Chapt. 9, Harvard Univ. Press, 1965.
 36. J. Schneider, R. Wagner, and J. Wildhardt, *Makromol. Chem. Makromol. Symp.*, **50**, 67 (1991).
 37. T. Kawahara, *Nipponkagakukaishi*, **47**(4), 265 (1993).
 38. S. Kimura and T. Nomura, *Membrane (Jpn)*, **7**, 353 (1992).
 39. B. Adnadjevic, J. Jovanovic, and S. Gajinovic, *J. Membr. Sci.*, **136**, 173 (1997).
 40. A. Yamauchi, M. Imai, A. Jibu, and M. Shinozaki, *J. Membr. Sci.*, **148**, 139 (1998).