

---

---

막분리 개요와 분리막 용어 표준화

---

---

민 병 렬 교수  
(연세대학교)

# 막분리 개요와 분리막 용어 표준화

연세대학교 화학공학과 민병렬

## 1. 막의 정의

막(membrane)은 다음과 같이 정의된다.

- (1) 막은 두 개의 삼차원 균일상을 분리시키고 있는 상(phase)으로, 상의 물리화학적 성질에 의해 물질 및 에너지의 교환속도가 좌우되는 제 3의 상이다.
- (2) 막은 모든 이동현상의 저항이 총집중되어 있는 상을 말하며, 그 저항은 물질에 따라 선택적으로 다르다. 그러므로 물질에 따라 막을 통한 이동속도가 다르며, 이로 인해 물질의 분리가 일어난다.

무수히 많은 물질들이 막재질로 사용될 수 있고, 두께가 일반적으로 표면크기에 비해 상대적으로 매우 작다.

### 관련용어설명

영 어	정 의	학회 한글 용어	용어(표준화)
membrane	2개의 상의 경계를 이루고 물질의 이동속도에 영향을 주는 얇은 물체	막(膜)	

## 2. 막의 분류

막은 막을 구성하고 있는 물질의 물성, 구조, 막의 응용분야 및 역할 등에 의하여 분류될 수 있다. 막은 막의 구조에 의하여 다음과 같이 분류할 수 있다.

### 2.1 막의 구조에 의한 분류

#### 2.1.1 세공막(Macroporous membrane)

세공막은 공경(pore diameter, 0.1~10 $\mu$ m)이 분자크기와 비교하여 매우 크고, 주로 macromolecule, colloid와 microparticle 등이 분리될 수 있는 막을 뜻한다. 이 막에는 이온이나 물과 같은 대표적인 용매는 쉽게 통과할 수 있다.

#### 2.1.2 미세공막(Microporous membrane)

미세공막이란 공경(50Å~500Å)이 고분자 사슬(chain)의 크기에 준하는 막이므로 주로 organic compound, macromolecule이나 Knudsen 흐름에 의한 기체 분리에 사용된다.

#### 2.1.3 비공성막(Nonporous membrane)

미세공조차도 존재하지 않는 막 혹은 막구성물질인 micells 혹은 무기성 결정간의 간격(10Å 내외)만이 존재하는 막으로, 이 분자 간격을 통하여 물질이 투과된다. 이온의 95% 이상 분리되는 역삼투막, 기체분자 등이 용해되어 확산되는 고분자, 금속막 등이 이 부류에 속한다.

### 관련용어 설명

영 어	정 의	학회 한글 용어	용어(표준화)
macroporous membrane	공경이 큰 (~ $\mu$ m)막	세공막(細孔膜)	
microporous membrane	공경이 작은 (수백 Å)막	미세공막(微細孔膜)	
nonporous membrane	확산에 의해 물질이동이 일어나는 막	비세공막(非細孔膜)	

2.2 막분리의 종류

표 1. 막분리

종류	막분리의 적용	추진력	막투과 물질	잔류물질
역삼투법	· 해수로부터의 염분리 · 수용액 중의 유기물 분리 · 폐수처리 · 용수처리	· 압력차	물	현탁물질 콜로이드 용해물질
한외여과막	· 수용액 중의 유기물 분리	· 압력차 (10~70kg/cm <sup>2</sup> )	물 염류 저분자 유기물	현탁물질 콜로이드 고분자중 유기물 유지
기체분리막	· 기체분리 · 수소분리 · 천연가스분리	· 압력차 · 용해농도차 (1~15 atm) · 수소분압차	H <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> , He, H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> 등	N <sub>2</sub> , 탄화수소, CO 등
	· Palladium 막을 이용한 수소 분리	· 양자와 전자의 확산	수소이온	수소이온외의 기체
액막법	· 액막의 용해도차를 이용한 유 기용매 분리	· 용해도차 · 농도차	Phenol(용해도가 높 은 물질)	Toluene(용해도가 낮 은 물질)
정밀여과법	· 용액 속의 부유물 분리	· 압력차 (0.1~2 kg/cm <sup>2</sup> )	물, 용제, 용액 성분 콜로이드	부유물
	· 공기 중의 분진 분리	· 압력차 (0.005 ~ 0.2 kg.cm <sup>2</sup> )	기체	분진(미립자, 미생물 등)
확산투석법 (공업용)	· 산, 알칼리 용액 중의 염분리	· 농도차	산, 알칼리	염
확산투석법 (의료용)	· 혈액의 정화	· 농도차	이온, 중저분자 유 기물(요소 등)	고분자 유기물(분자 량 1000 이상) 현탁물질(혈구 등)
전기투석법	· 제염공정 등 염의 농축 · 해수로부터의 염제거	· 전위차(1~2V)	이온	비이온물질 고분자물질
투과증발법	· 공비혼합물의 분리 · 유기이성체의 분리 · 알코올류의 탈수공정	· 압력차	Etanol (물)	물 (Ethanol)
이온 교환의 연료전지	· 연료전지 사이에서 수소, 수 산 이온의 선택적 투과	· 전기화학반응 · 이온의 확산	· 수소이온 (양이온 교환막을 이용하는 경우) · 수산이온 (음이온 교환막을 이용하는 경우)	물
막종류	수용액 분리 농축	온도차	물(증기상)	염, Ethanol
막 접촉기	VOC, 천연가스, 암모니아 분리	농도차	VOC, 천연가스	CO <sub>2</sub> , air

관련 용어 설명

영 어	정 의	학회 한글 용어	용어(표준화)
homogeneous membrane	분리막의 단면이 균일층으로 이루어진 막	균질막(均質膜)	
asymmetric membrane	치밀층과 다공질 지지층으로 이루어진 분리막	비대칭막(非對稱膜)	
porous membrane	다공질의 구조로 이루어진 분리막	다공막(多孔膜)	다공질막(多孔質膜)
dense layer, skin layer	비대칭막 및 복합막에서 나타나는 표면의 얇은 치밀한 구조의 층	고밀도층(高密度層), 표면층(表面層)	치밀층(緻密層), 스킨층
dense support, porous layer	비대칭막 및 복합막에서 표면의 치밀층을 지지하는 다공질층	다공지지층(多孔支持層)	다공질지지층(多孔質支持層)
mosaic membrane	모자이크상의 구조를 가지고 있는 분리막	모자이크 막(膜), 짜붙임막(膜)	모자이크 막(膜)
permselective membrane	특정의 물질 또는 이온을 클라서 투과시킬 수 있는 분리막	선택적투과막(選擇的透過膜)	선택투과막(選擇透過膜)
blend membrane	2종 이상의 다른 막소재를 혼합하여 성형성시킨 분리막	혼합막(混合膜)	블렌트막(膜)
composite membrane	치밀층과 다공질 지지층이 다른 소재로 이루어진 분리막	복합막(複合膜)	
dynamic membrane, dynamically formed membrane	여과과정에서 용액 중에 포함된 물질에 의해 다공질 지지체 상에 형성된 분리기능을 갖는 막	활성막(活性膜), 활성형성막(活性形成膜)	다이나믹-막(膜)
flat (sheet) membrane	평면상 또는 시트상의 분리막	평판막(平板膜)	평막(平膜)
pore size	분리막의 전체 체적에 대한 미세공이 차지하고 있는 체적의 비	공경(孔徑)	미세공크기(微細孔)
porosity	분리막의 전체 체적에 대한 미세공이 차지하고 있는 체적의 비	공극률(孔隙率)	공공률(孔孔率)

### 3. 막분리의 이용 분야

막분리는 막의 물리화학적 특성, 분리대상 물질의 물리화학적 특성, 그리고 물질의 이동현상을 조절하는 압력차, 농도차 및 전위차 등의 추진력, 이 세가지 요소의 조합에 의해 행해진다.

#### 3.1 기체분리법(Gas separation)

막을 이용한 기체분리연구는 19세기 중반부터 착수되어 20세기 중반에 이르러  $UF_6$  증기로부터  $^{235}UF_6$  증기를 분리 농축시켰던 미국의 Manhattan project를 효시로 산업화되기 시작한 이래, 최근에는 silicone 고무, cellulose acetate, polysulfone, polyofine 등을 재료로한 비공성 초박막 (유효두께 ;  $\sim 0.1\mu m$ ) 이 개발되어, 산소부화, 폐가스로부터 유효가스분리 등의 공업적 이용과 silicone과 미세공성 polypropylene 막과의 복합막 등 의료용 산소부화막과 인공폐의 막으로 이들 유기고분자막에 의한 기체투과는 기체의 분압차, 각 기체의 막에 대한 용해도 및 막내에서의 기체의 농도구배에 의해 이루어진다. 이때 막에 대한 각 기체의 용해도차와 막내에서의 확산계수의 차는 기체분리에 결정적인 요소로 작용한다. 유기고분자막 이외에도 팔라듐(Pd) 금속막을 이용한 수소분리, 액체막을 이용한 기체분리 등 그 응용분야는 계속적인 증가추세를 보이고 있으며, 이는 폐가스의 재생, 공급 기체의 조성조절 및 연소효율을 향상시키는 산소부화 등 산업 에너지절감에 상당한 기여를 할 것이다.

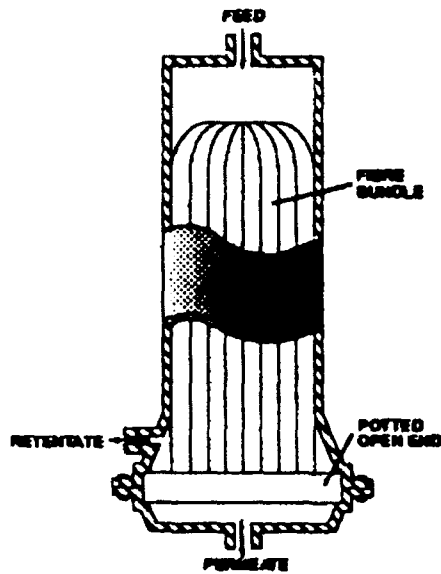


그림 1. Gas separation hollow fiber module

관련 용어 설명

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
separation factor	<p>물질의 투과도 비</p> <p>기체분리(A,B): <math>\alpha = \left( \frac{y_A}{1-y_A} \right) \left( \frac{1-x_A}{x_A} \right)</math></p> <p><math>x</math> : 막상부의 기체농도</p> <p><math>y</math> : 막 투과부의 기체 농도</p>	분리인자(分離因子)	
separation coefficient	<p>물 질 분 리 상 수</p> <p><math>Sc_{A,B} = \left( \frac{x_A}{1-x_A} \right)_{down\ stream} \left( \frac{1-x_A}{x_A} \right)_{upstream}</math></p>	분리계수(分離係數)	
bubble point test	적절한 액에 필터를 충분히 함침시킨 후 기체압을 가하여 필터의 미세공으로부터 기포가 나올 때의 차압을 측정하는 시험	끓는점시험, 비점시험 (沸點試驗)	버블포인트 시험(試驗)
diffusion test, forward flow test, diffusive flow test	적절한 액에 필터를 충분히 함침시킨 후 적절한 기체로 버블포인트 이하의 기체압을 가하면 확산에 의해 2차측에 투과하는 기체의 유량을 측정하는 시험	확산시험(擴散試驗), 확산(擴散)흐름시험(試驗),	확산유량시험(擴散流量試驗)
pressure hold test	적절한 액에 필터를 충분히 함침시킨 후 기체압을 가하여 필터의 미세공으로부터 기포가 나올 때의 차압을 측정하는 시험	압력결합시험(壓力結合試驗), 압력(壓力)구멍시험(試驗)	프레스홀더 시험(試驗), 압력유지시험(壓力維持實驗)

### 3.2 정밀여과법(Microfiltration)

정밀여과란 용질의 크기가 0.1~10 $\mu$ m 정도인 용질을 분리하는 막분리 공정으로 이때 사용되는 막은 공경의 약 0.01~10 $\mu$ m 정도이고, 세공이 막 총 용적의 80% 정도를 차지하는 것이 적합하다.

막의 재질로는 cellulose 계통이나 nylon, PVC, polytetrafluoroethylene(PTFE) 등 여러 고분자물질 등이 적합하다.

정밀여과 공정에서 추진력은 압력차로 표시되는데, 이때 압력차는 일반적으로 10~100 psig 이다. 이 막의 분리효과는 근본적으로 막의 경경과 분리 대상물질의 크기에 의하여 좌우된다. 분리대상 물질의 크기가 공경에 비하여 작아도 전부 막을 통과하는 것은 아닌데 분리대상 물질이 막에 흡착되거나 세공 부근에서 입체장애(steric hindrance)에 의해 투과되지 않는 것이 그 예다. 정밀여과 공정의 가장 큰 문제는 막 표면에서의 콜리이드 물질의 침착현상으로, 세공을 막음으로써 정밀여과의 효과를 상대적으로 저하시키는데 이는 막을 교체하거나 재생시켜 원상으로 회복시킬 수 있다.

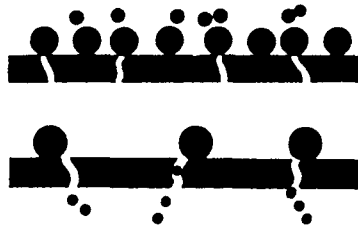


그림 2. Separation using microfiltration membranes.

#### 관련용어 설명

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
microfiltration, MF	0.01~수 $\mu$ m 정도의 미립자 및 미생물을 여과하여 분리하는 조작 혹은 기술	정밀여과(精密濾過)	

### 3.3 역삼투법(Reverse osmosis)

이온 및 분자크기가 10 $\text{\AA}$  이내인 용질을 분리하는 막분리 공정으로, 1970 연대 해수 담수화 및 폐수처리에서 성공적으로 산업화되기 시작하였다. 막의 재질은 지지층 위에 분리효과를 위한 분리층(활성층)으로 형성된 비대칭형 cellulose acetate 나 aromatic polyamide를 위시하여 최근에는 용존염을 99%까지 제거시킬 수 있는 복합막이 개발되었다. 이 복합막은 지지층 위에 염제거 효과가 큰 고분자 박막을 형성시킨 것으로, 지지막은 기계적 강도가 크고 내화학약품성이 큰 polysulfone이 주로 사용되며, 분리층은 cellulose-tri-acetate, crosslinked polyether 등이 주로 사용된다.

역삼투막은 공경이 약 10 $\text{\AA}$  내외이고, 세공이 거의 존재하지 않으므로 일반적으로 비공성막이라고 할 수 있으며, 이는 유기고분자가 micelle을 형성하고 있는 micelle 간의 간격을 통하여 물질투과가 행해진다.

역삼투법에서는 유기고분자의 dielectric 계수가 낮기 때문에 용존염이 이 막에 잘 흡착되지 않을 뿐 아니라, 고압(800~1500 psig)에서는 용매인 물이 유효압력차가 아닌 삼투압차에 비례하여 투과되므로 물이 용존염에 비하여 상대적으로 잘 투과되기 때문에 분리효과가 상승된다.

역삼투는 분자크기에 따른 분리조작이 아니므로 정밀여과나 한외여과에서와 같은 유기물의 침착현상이 적으며, 결과적으로 막의 수명도 길어진다. 역삼투막은 용존염을 분리제거할 뿐 아니라 분자량이 적은 유기물 및 aromatic hydrocarbon 등의 분리조작에도 그 이용 가능성이 고조되고 있다.

Figure A: the different levels of two saline solutions having different concentrations give rise to the osmosis phenomenon by which water passes from the diluted solution to the concentrated one

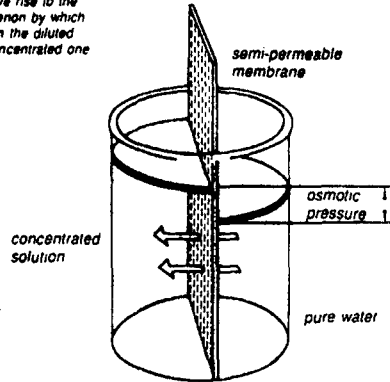


Fig A · OSMOSIS

Figure B: the exertion of mechanical pressure reverses the osmosis phenomenon. This is the principle applied to desalination

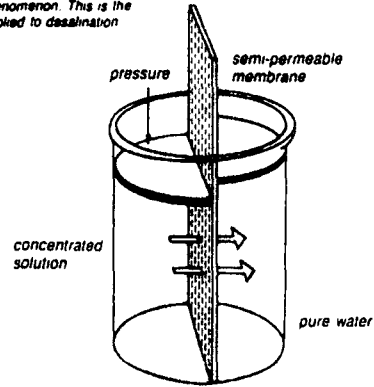


Fig B · REVERSE OSMOSIS

그림 3. Separation by reverse osmosis

관련용어 설명

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
reverse osmosis membrane	막양측의 용매간에 삼투압차 이상의 압력차를 고농도액측에 가하여 용매(또는 물)을 용질로부터 선택적으로 저농도액측으로 이행시킴에 의해 물질을 분리하는데 이용되는 분리막	역삼투막(易滲透膜)	
salt passage	원수의 농도를 투과수의 농도로 나눈 값	염투과(鹽透過)	염투과비율(鹽透過比率)



영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
permeability coefficient	물질이 막을 통과할 때 투과가 쉬운 정도를 나타내는 계수	투과계수(透過計數)	
rejection	막을 통과하기 전후의 특정물질의 농도를 각각 1-(C1/C2)로 나타내는 양. C1은 입구농도를 나타내는 경우와 평균농도를 나타내는 경우가 있다. C2는 투과액의 농도	저지(沮止)	제거율(除去率), 저지율(沮止率)
salt rejection	역삼투막에 의한 염 배제율	염배제(鹽排擠)	탈염율(脫鹽率)
allowable maximum differential pressure	모듈 또는 엘리먼트의 성능을 손상시키지 않고 사용할 수 있는 최대 압력차	최대허용압력차(最大許容壓力差)	최대허용차압(最大許容差壓)
allowable maximum temperature	모듈 또는 엘리먼트의 성능을 손상시키지 않고 사용할 수 있는 최대 온도	최대허용온도(最大許容溫度)	
chemical resistance	화학물질에 의한 막내구성	화학내구성(化學耐久性)	
chlorine resistance	염소에 의한 막내구성	염소내구성(鹽素耐久性)	
membrane life	막이 분리 성능을 유지하는 기간	막수명(膜壽命)	
flux decline factor	역삼투막이 투과수유량의 감소율을 나타내는 지수로서 다음의 식으로 정의한다. $J/J_0 = \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-m}$ $J_0$ = 초기투과플럭스 $J$ = t시간 경과후 투과플럭스 $t$ = 운전시간 $t_0$ = 초기시간(운전시작후 1시간) $m$ = 지수값	플럭스하강도(下降度), 플럭스하락도(下落度)	투과수유량감소지수(透過水流量減少指數)
integrity test	필터가 물리적 손상을 가지고 있는지, 일정 압력을 유지할 수 있는 성능을 가지고 있는지를 확인하는 시험	완전시험(完全試驗), 무결점시험(無缺點試驗)	완전성시험(完全成試驗)
reverse osmosis, RO	막양측의 용액간의 삼투압차 이상의 압력을 고농도용액측에 가하여, 용매를 삼투현상과의 역방향으로 희박용액측으로 이동시켜 용매(혹은 물)과 용질과를 분리할 목적으로 하는 조작 혹은 기술	역삼투(易滲透)	

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
osmotic pressure difference	삼투압 상이 평형에 도달하게 되는 반투막의 양측에 생기는 압력차	삼투압차(滲透壓差)	
effective pressure	평균조작압력차( $\Delta P_0$ )로부터 삼투압력차( $\Delta \pi$ )를 뺀 실제 막에 거리는 유효압력	유효압력(有效壓力)	
saline water	염류를 포함하는 물의 총칭	해수(海水)	염수(鹽水)
brackish water	담수보다 염농도가 높은 물	염수(鹽水), 염분수(鹽分水), 염분함유수(鹽分含有水)	간수
feed (water)	분리장치에 공급하는 피처리수	원수(原水)	공급수(供給水)
raw water	처리전의 물	원수(原水)	
product water	분리장치에 의해 얻어지는 물	생산수(生産水)	
permeate, permeate water	막 또는 필터를 투과한 물	투과액(透過液)	투과수(透過水)
concentrate, concentrated water, retentate	막 또는 필터를 투과하지 않고 용질, 현탁물질 등이 농축된 물	농축수(濃縮水), 저지(沮止)	

### 3.4 Nanofiltration

Nanofiltration 은 RO와 UF의 처리범위의 중간범위인 Molecular weight 가 수백에서 수천인 용매를 처리하는 과정이다. Nanofiltration은 RO의 변형으로 작은 용매분자 분리에 사용하나 Sucrose와 같은 약간 큰 분자까지 분리할 수 있다. Nanofiltration막은 보통 배제율(NaCl) 20-70%, 유기용매는 200에서 500의 분획분자량을 보인다. 이 분획범위는 분자의 지름이 약 10Å 즉 1 nanometer에 상응한다. 이 막은 RO와 UF 약 10000 사이의 적용범위를 가지고 있으며 RO보다 1/4~1/2 수준인 0.4-0.7 MPa 압력범위에서 해수처리에 이용된다.

배제 메카니즘은 RO와 같으며 RO의 막공경이 큰 막이라고 생각하면 될 것이다. 소금과 적당한 분자량의 유기물 분리에 많이 응용되고 있으며 그 예로써 유장이나 설탕의 탈염에 쓰인다. Nanofiltration은 50%~97.5%의 배제율을 동시에 취할 수 있으며 물의 연화과정에서 이온교환법의 대체용으로 이용되고 있다. Nanofiltration 은 미래에 새롭게 발전 기대되는 분야이다.

### 3.5 한외여과법(Ultrafiltration)

한외여과란 분자크기가 10~1000Å에 달하는 Macromolecule이나 콜로이드 입자를 분리하는 막분리 공정으로 막의 공경은 20~500Å 범위이다.

이 방법은 역삼투법과 유사한 분리조작법으로 압력차를 추진력으로 사용한다. 한외여과에서 사용하는 압력차는 대개 10~100psig 범위인데, 이는 분자량이 큰 입자는 상대적으로 삼투압이 낮기 때문에 삼투압 이상의 압력을 가하는데 고압을 요하지 않기 때문이다. 한외여과는 수학적 모델링(modeling)이 역삼투압과 같으나, 근본적으로 역삼투압과 상이하다.

역삼투법의 분리조작은 막과 용존염과의 상관성에 의해 주로 지배되는 반면, 한외여과법은 용질 및 공경의 크기에 의해 거의 지배된다. 즉, 한외여과는 미세공 입구에서 입체장애(steric hinderance)와 세공내에서 용질과 세공벽간의 마찰저항에 의해 분리효과가 나타난다. 한외여과법에서 분자량절단(molecular weight cut-off)은 중요한 항목으로 이때 기울기가 무한대에 가까워질수록 분자량의 절단상태가 예리해지므로 우수한 여과막으로 간주할 수 있다.

한외여과는 분리대상물의 크기면에서 볼 때 역삼투법과 정밀여과법의 중간으로 산업 이용분야가 광범위하고, 막재질은 친수성이 있어야 한다는 측면에서 볼때 역삼투압막의 재질과 같고 단지 세공의 크기가 클 뿐이다.

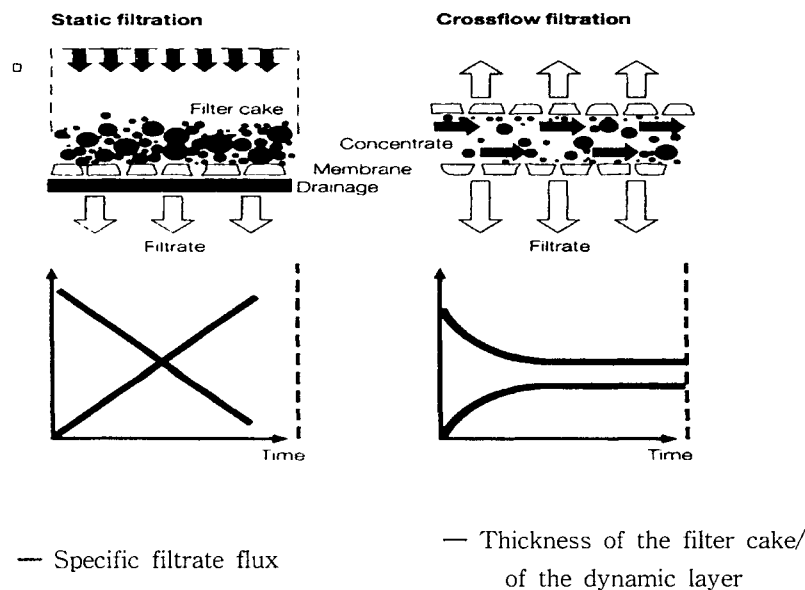


그림 4. Static filtration and crossflow filtration.

### 관련용어 설명

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
ultrafiltration membrane	분자량 수백에서 수백만 정도의 용질 또는 입자를 여과에 의해 분리하기 위해 이용되는 막	한외여과막(限外濾過膜)	역삼투막(逆滲透膜)
removal, retention	필터가 미립자, 세균을 잡아두는 성능	제거(除去), 저지(沮止)	보축성
ultrafiltration, UF	분자량 수백만 정도의 용질 혹은 입자를 여과에 의해 분리하는 조작 혹은 기술	한외여과(限外濾過)	

#### 3.6 확산투석법

확산투석법에는 공업용과 인공신장 등에 이용되는 의료용이 있다. 의료용 투석막은 혈액 등의 체액 중에서 대사노폐물을 분리시키므로 생체적합성이 좋을 뿐 아니라 응혈현상도 없어야 한다. Cellulose acetate, Cellophane, Cellulose 계열의 고분자 등이 인공신장막으로 주로 사용되고 있으며, 이온교환막이 공업용 확산투석막으로 사용된다.

예를 들면 황산과 황산철의 혼합용액을 음이온 교환막을 통해 투과시키면 철이온은 음이온 교환막의 양전하에 의해 배척되기 때문에 막을 투과하지 못하나  $H^+$ 는 직경이 작아서 막을 통과하고,  $SO_4^{2-}$ 는 음이온교환막을 잘 투과한다. 결국  $H_2SO_4$ 는 막을 투과하여 황산과 황산철로 분리된다.

확산투석에서는 처리액측과 반대측의 물 또는 투석액을 계속 흘러 보내야 막 양측액의 농도차에 의해 대상물질이 분리된다.

#### 3.7 전해투석법(Electrolytic dialysis)

전해투석법은 전기투석법과 같이 이온교환막을 사용하고, 추진력으로 전위차를 이용한다. 양극과 음극 사이에 양이온 교환막을 넣고 양극에 NaCl용액을 공급하면,  $Na^+$ 는 음극으로 끌려 양이온 교환막을 투과하여 음극실로 들어간다. 이  $Na^+$ 는 음극실에서 물의 전해에 의해 생성된  $OH^-$ 와 결합하여 NaOH로 생성된다. 한편  $Cl^-$ 는 양이온 교환막을 투과할 수 없으므로 양극실에 남게되고, 음극에서는 음전하를 상실하여  $Cl_2$  가스로 된다. 이와 같이 NaCl 용액은 전해되어 NaCl과  $Cl_2$ 로 된다.

이 경우 양이온 교환막은  $Cl^-$ 가 음극실로 확산되어, 이미 생성된 NaOH와 반응하여 NaCl이 생성되는 것을 방지하는 역할을 한다. 따라서 전해투석은 석면 등의 격막을 사용하는 경우에 비해 가성소다의 제품순도가 높고 또한 전력 소비량도 적다는 잇점이 있다.

이온 교환막을 이용하는 전해법은 염류의 전해 뿐만 아니라 전해 이온 치환, 전해 산화 환원 및 제반 전해유기 합성에도 이용되고 있다.

최근에는 물을 수소이온과 수산이온으로 분리하는 양극성막(bipolar membrane)의 개발로 양이온교환막과 음이온교환막 그리고 양극성막을 이용하여 염수를 전해투석하여 가성소다와 염산을 동시에 생산할 수 있는 양극성 전해투석법이 개발되어 산업분야 응용의 파급효과가 크게 예상된다.

### 관련용어 설명

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
dialysis	막을 통한 확산에 의한 물질 투과 현상	투석(透析)	
dialysis membrane	용질, 이온등을 확산에 의해 막을 투과하는 현상을 이용하여 분리를 행하는 분리막	투석막(透析膜)	

### 3.8 전기투석법(Electrodialysis)

전기투석은 제 4 암모늄 염기( $\text{NH}_4^+$ )나 아민 등의 양전하를 갖는 음이온 교환막과 술폰산기( $\text{SO}_3^-$ )와 카르보닐산기( $\text{COOH}^-$ ) 등의 음전하를 가지는 양이온 교환막을 차례로 세워 직류전압을 가한다. 이때  $\text{Na}^+$  등의 양이온은 음전하를 갖는 양이온 교환막에 투과되나 양전하를 갖는 음이온교환막에 대해서는 같은 양전하이므로 투과되지 못하며,  $\text{Cl}^-$  등의 음이온은 그 반대 현상을 나타낸다. 그러므로 전기투석장치는 양이온 교환막에 의해 형성되는 탈염질과  $\text{NaCl}$  농축실로 구성된다. 상술한 바와 같이 전기투석에서는 염류의 탈염과 농축이 행해진다. 그러므로 전기투석에서 추진력은 전위차이며, 막의 전하가 분리대상 이온을 선택적을 투과시킨다. 전기투석에서는 전력 소비량을 가급적 줄이는 것이 중요하다. 이를 위하여 전기저항이 적은 막을 사용, 막 간 거리를 축소시키거나, 막 간의 액 흐름을 위하여 전기저항이 적은 막을 사용, 막 간 거리를 축소시키거나, 막 간의 액 흐름을 빠르게 하여 난류로 만들어 막 면의 농도분극을 작게 하는 것, 또한 액체의 온도를 상승시켜 전기저항을 감소시키는 등의 연구가 진행되고 있다. 최근에는 막 면의 스케일로 인한 전기저항의 상승을 방지하기 위하여 전극의 일정시간마다 바꾸어주는 전극전환방식(EDR방식) 등으로 전력비가 대폭 절감되었다.

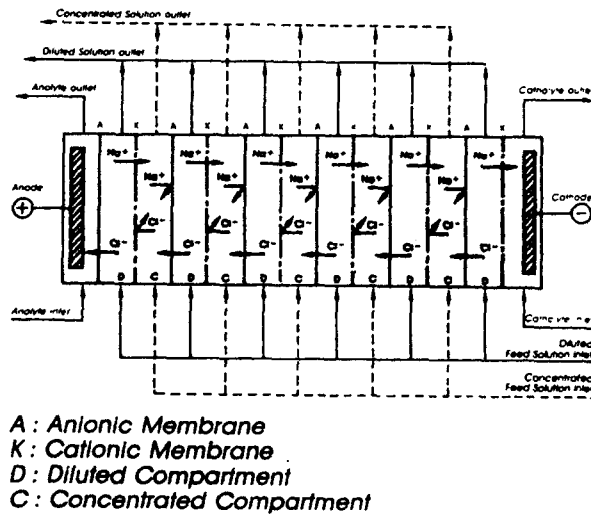


그림 5. Schematic diagram of electro-dialysis module.

### 관련용어 설명

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
charged membrane	하전을 띄고 있는 분리막	하전막(荷電膜)	
ion-exchange membrane	분리막 내부에 고정화되어 있는 양이온이나 음이온을 가지고 있는 교환기의 작용으로 이온성분을 분리하는 막	이온교환막(交換膜)	
electrodialysis	양이온 교환막과 음이온 교환막을 나란히 직류 전류를 흐르게 하여 양이온과 음이온을 선택적으로 투과시켜 목적하는 분리를 수행하는 조작 혹은 기술	전기투석(電氣透析)	

#### 3.9 이온 교환막 연료전지(Ionexchange membrane fuel cell)

양이온 교환막의 양측으로 다공성 금속막을 전극으로 하여 압착시켜 연료 전극이 수소, 산소전극에 산소 또는 공기를 공급하면 연료극에서는  $H_2$ 가  $H^+$ 와 전자로 분리되어,  $H^+$  양이온 교환막을 투과하여 산소전극에 도달한다. 산소전극에서는  $H^+$ 가 공급되어  $1/2 O_2$ 와 전자를 받아  $H_2O$ 를 생성한다. 이때 기전력( $E^0$ )의 이론치는 1.23V이다. 이온교환막 연료전지에서는 막중의  $H^+$ 은 추진력인 전기화학반응에 의해서 확산되고 이 확산된 수소이온은 산소전극에서 화학반응을 일으킨다. 이 연료전지의 원형은 1964년 미국의 제미니 계획에 처음으로 채택되었으며, 현재에는 이에 대한 개량연구가 수행되어 그 성능 및 경제성이 일층 향상되었으므로 장차 오염이나 소음이 없는 직접발전방식으로서의 응용이 기대되고 있다.

#### 3.10 액막(Separation in liquid membrane)

액막법은 추출과 역추출을 단일장치로 동시에 행할 수 있는 분리조작으로, 여기서 액막이란 유기용액이나 수용액으로 구성된 얇은 층을 말하며, 이 막속에 분리 대상 물질에 대한 추출용매를 함유하고 있거나 혹은 막 자체가 분리대상물질에 대해 선택적 용해도를 가지고 있는 것을 말한다.

액막은 다공성 지지막을 가진 지지액막(supported liquid membrane)과 계면활성체에 의한 유체(emulsion)나 얇은 평막 형태로 된 계면 활성 액막(liquid surfactant membrane)으로 대별되며 분리대상 물질이나 목적에 따라 여러 가지로 응용될 수 있다.

이 액막법은 탄화수소 혼합물의 분리, 폐수처리, 금속이온의 분리에 응용되고 있으며, 용매의 소모량이 적고 담체를 이용하여 특정분리 대상 물질에 대한 선택성을 높일 수 있어 그 응용범위가 확대되고 있다.

### 3.11 투과증발법(Pervaporation)

투과증발법으로는 막을 이용한 액체 혼합물의 흡착, 막을 통한 선택적인 확산이나 흐름 그리고 증기상으로의 탈착이 있다. 이 법은 1955년 Haberbaumer에 의하여 공비 흐름 조성물과 같은 유기액체 혼합물을 분리하기 위한 미세공 Vycor 유리막과 막간의 압력 강하 차에 의하여 행하여진 이래 효율이 높고 조작성이 단순할 뿐 아니라, 단일상 선택도가 우수하고 증류나 추출과 같은 기존의 평형분리 조작보다 그 성능이 우수한 것으로 판명되었다.

위와 같은 잇점에도 불구하고, 이 방법은 장치비가 고가이고 장치조립이 복잡할 뿐만 아니라 조작성이 비싸며 막의 안정성 때문에 아직까지 산업화되지 못한 실정이다. 합성고분자막의 비약적인 발전추진에서 볼 때 특히 액체투과조작은 탄화수소 혼합물이나 공비 혼합물, 비점과 용해도가 유사한 혼합물 및 수질 오염혼합물을 분리하기 위한 공정으로 유망하다.

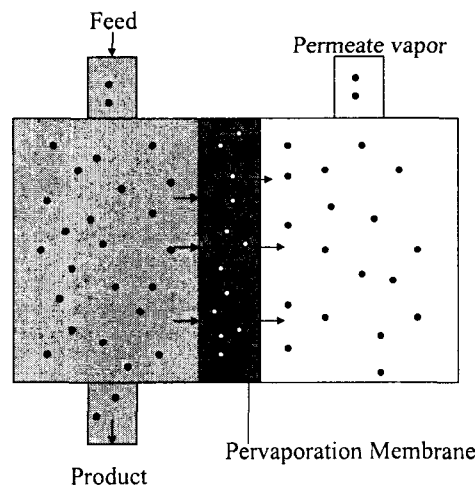


그림 6. The pervaporation membrane separation process.

### 3.12 Membrane Distillation

Membrane Distillation은 Pervaporation과 그 형태가 유사하지만, 다공성 막을 사용한다는 점에서 비다공성 막을 사용하는 Pervaporation과 구분되는 공정이다. Membrane Distillation에 사용되는 막은 액상의 feed에 의해 젖지 않아서 액상이 막 기공에 침투하거나 투과하지 않아야 하므로, non-wettable porous hydrophobic membrane이 사용된다.

Membrane Distillation의 원리는 다음과 같다.

여기서 feed부의 온도가 응축부의 온도보다 높으면, 막 양쪽에 vapor pressure의 차이가 생기게 된다. 막 기공입구에서 액상의 feed가 기화되고 기화된 기체분자가 다공성 막의 가공을 통과하여 응축부에서 응축됨으로써 물질의 전달이 일어난다. 이때, 막은 단지 두 상사이의 장벽을 제공해주는 역할만을 하게된다. 예를 들어, feed가 NaCl 수용액인 경우 NaCl의 vapor pressure는 무시할 수 있으므로, water만이 기화되어 물분자가 막을 통과하게 되고 이로 인해 분리가 일어난다. water/ethanol 계와 같이 두 물질 모두의 vapor pressure를 무시할 수 없는 경우에도, 두 물질의 물질전달 속도의 차이로 인해 분리가 일어나게 된다.

Membrane Distillation은 hollow fiber를 사용하여 단위 liquid volume 당 높은 접촉면적을 가진다는 것이 장점이며, Membrane Distillation 이 사용되는 분야에는 다음과 같은 것들이 있다.

- Water purification and demineralisation of sea-water, brackish water and waste water
- Extraction of ethanol from fermentation media
- Concentration of aqueous salt solution and acids

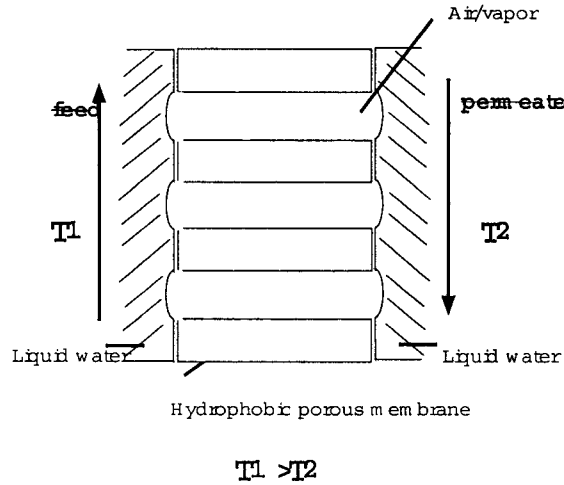


그림 7. Schematic representation of membrane distillation

관련용어 설명

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
membrane distillation	온도차를 동력으로 하여 다공막을 통한 증기상태의 물질이동 현상	막증류(膜蒸溜)	

3.13 Membrane Contactor

Membrane distillation 공정에서는 막을 사이에 두고 distillation이 일어난다. 이와 유사하게 막을 사이에 두고 extraction이 일어날 수 있는데, 그 공정을 일반적으로 'Membrane contactor'라고 한다. pertraction, perstraction, gas absorption, membrane based solvent extraction, membrane based gas absorption and stripping, hollow-fiber contained liquid-membrane 등으로 불리는 여러 공정이 모두 Membrane contactor의 범주에 속한다.

분리는 성분간의 확산속도의 차이로 인해 일어나며, 이때 membrane 은 단지 접촉면으로서의 역할만 한다. Membrane contactor는 hollow-fiber를 사용하면 단위 부피당 매우 큰 접촉면적을 가질 수 있으므로, 기존의 dispersed-phase contactor보다 효율이 높다. packed and trayed column의 단위 부피당 접촉면적은 보통 30~300m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> 인데 반해 hollow-fiber를 사용한 Membrane contactor에서는 1600~6600m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>나 된다. 또한 dispersed phase의 flooding 현상을 membrane이 막아준다는 장점이 있다. 하지만 membrane이 필요하다는점, membrane 때문에 overall mass transfer resistance가 증가한다는 점, 운전 압력에 제한이 있다는 점등은 단점



이다.

Membrane contactor는 크게 gas-liquid membrane contactor와 liquid-liquid membrane contactor로 나눌 수 있다.

gas-liquid membrane contactor는 또 다시, 기체가 기체상으로부터 액체상으로 이동하는 형태(a)와 기체가 액체상에서 기체상쪽으로 이동하는 형태(b)로 나눌 수 있다.

Membrane contactor가 사용되는 예는 다음과 같다.

G - L contractors

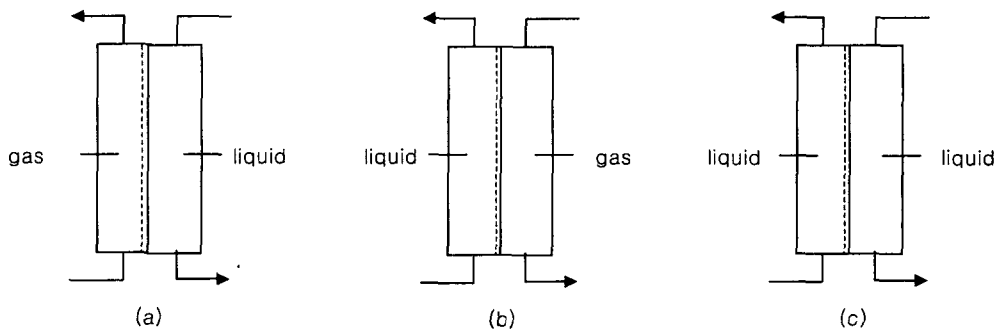
- SO<sub>2</sub> , CO<sub>2</sub>, CO , NO<sub>x</sub> from flue gases
- CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S from natural gas
- CO<sub>2</sub> from biogas
- O<sub>2</sub> transfer (blood oxygenation, aerobic fermentation)
- CO<sub>2</sub> transfer (beverages)
- VOC from offgas
- NH<sub>3</sub> from air (intensive farmery)
- saturated/unsaturated (ethane/ethylene)

L - G contractors

- volatile bioproducts (alchols, aroma compounds)
- O<sub>2</sub> removal from water

L - L contractors

- heavy metals
- fermentation products (citric acid, acetic aide, lactic acid penicillin)
- phenolics



Schematic drawing of various membrane contractors. <a>gas-liquid contractor,<b>liquid-gas contractor,<c>liquid-liquid contractor

그림 8. Schematic drawing of membrane contactors.

관련용어 설명

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
membrane contactor	다공막을 접촉면으로 사용하는 물질전달 (추출)공정	막접촉기(膜接觸器)	

#### 4. 막분리 장치

막분리 장치의 공학적인 개념설계는 판틀(plane-and-frame)형, 원관형, 중공사(hollow fiber)형, 및 나권형(spiral wound)의 4가지로 대별된다. 중공사형은 압력용기 내의 세밀한 중공사의 내관으로부터 투과물이 빠져나오는 형태이다. 나권형은 공급액이 지나가는 막과 투과물이 빠져나오는 지지천이 구멍이 난 관 주위에 감겨져 있는 형태로서, 막 가장자리에 봉투와 같은 형태로 밀봉되어 있는데 이를 막편엽(membrane leaf)이라 한다. 예형 나권형모듈에서는 모듈의 투과액측의 압력강하를 최소로 하기 위해서 편엽길이를 가급적 짧게 하여 막을 여러 편(multiple leaves)으로 하는 방법이 현재 산업화의 추세이다.

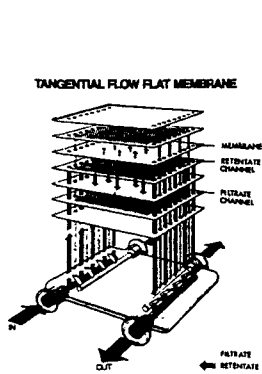


그림 8. 판틀형 모듈

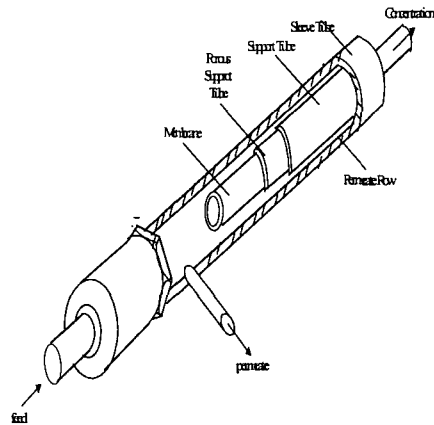


그림 9. 원관형 모듈

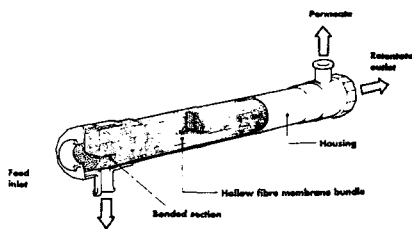


그림 10. 중공사형 모듈

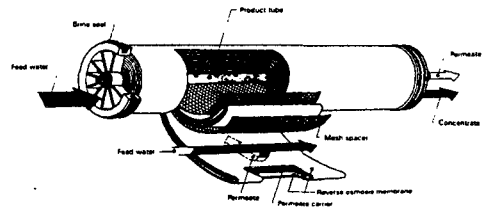


그림 11. 나권형 모듈

관련용어 설명

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
flat (sheet) membrane	평면상 또는 시트상의 분리막	평판막(平板膜)	평막(平膜)
hollow fiber membrane	가운데 구멍이 뚫린 섬유상으로 성형된 막	중공사막(中空絲膜), 실관막	
module	1 개 이상의 엘리먼트를 압력용기에 넣어 일체화한 것	모듈	
element	막과 그 지지체 및 유로재를 일체화하여 압력 용기에 넣어 성형가공한 것	엘리먼트	
housing	부품을 수납하는 용기	하우징, 걸용기(容器)	
tubular (type) module	막을 원기둥으로 하여 상용한 용기	관형(管形)모듈	
spiral wound (type) module	막을 나선상으로 성형 가공하여 사용하는 모듈	나권형(螺捲型) 모듈	
flat (sheet) membrane, plate and frame (type) module	평막을 평면 상에 사용하는 모듈	평판막(平板膜), 판틀형 모듈	
tube sheet	중공사막이나 원기둥의 열린부분을 고정하는 부품	판형관(版形管)	
end cap	모듈 혹은 엘리먼트의 열린부분을 밀폐하기 위한 것	끝막음, 끝뚜껑	
port	모듈의 원수, 투과수 및 농축수의 입구 및 출구 부분	포트	

## 5. 막분리 장치 설계

막분리 장치 설계 목적은 ① 막의 노후 현상과 화학적 변화 장치, ② 농도 분극 현상의 최소화, ③ 막의 재생 등을 기하는데 있다.

막분리시 농도 분극 현상과 오염 문제는 항상 수반되는 근본적인 문제이다. 막분리시 공급물의 일부만 막을 투과하고 나머지는 투과하지 못한다. 이 투과되지 못한 성분은 막 표면에서 공급물과의 교반 상태가 양호하지 못한 관계로 농도 구배 현상이 일어난다. RO, UF, MF, 기체분리와 같은 공정에서 농도 분극율은 막 표면에서 투과되지 못한 성분의 농도( $C_w$ ), 투과액의 농도 ( $C_p$ )와 공급액의 농도( $C_f$ )의 관계로 정의된다. 즉, 이 비율은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\frac{C_w - C_p}{C_f - C_p} = \exp\left(-\frac{J}{K_m}\right)$$

여기서,  $J$ : 투과 유체의 막투과 속도

$K_m$ : 경계층에서의 물질 전달 계수

현재 사용되는 막은 일반적으로 투과속도가 빨라서 경계층 두께를 가급적 최소화시킴으로써 농도 분극율을 작게하여 막분리 효과를 향상시킬 수 있다. 이 효과는 막 표면을 지나는 공급 유체의 속도를 빠르게 하거나 난류 발생기를 사용하여 얻을 수 있다.

물론, 기체분리에서는 기체의 확산 계수가 매우 높기 때문에 상대적으로 농도 분극은 큰 문제가 되지 않는다.

관련용어설명

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
filter	입자를 분리하는데 이용되는 다공성의 물체 또는 장치	여과기(濾過器)	필터
flux	단위시간에 막의 단위면적을 통과하는 물질의 량	플럭스	(투과) 유속
(water) permeate flux	물 투과 플럭스	물투과(透過)흐름	
degration, deterioration	막구조가 물리적, 화학적, 생물학적 원인에 의하여 변화하여 분리막 또는 엘리먼트의 성능이 저하되는 현상	품질저하(品質低下), 침식(浸蝕), 열화(裂化), 분해(分解)	노화(老化)
compaction	과올딩이 전혀없는 상태에서 장시간의 압력부하에 의하여 막이 치밀하게 되는 현상	압축(壓軸)	압밀화(壓密化)
(average) operating pressure	역삼투 혹은 한외여과를 수행할 때 모듈 내의 공급액에 가하여지는 압력 평균 조작압력 $(P_0) = \frac{P_{in} + P_{out}}{2}$ 여기서 $P_{in}$ : 모듈내 막 상단부 도입압력 $P_{out}$ : 모듈내 막 상단부 배출압력	평균운전압력(平均運轉壓力)	평균조작압력(平均造作壓力)
transmembrane pressure difference	막의 일차측과 이차측과의 압력 차이	막투과압력차(膜透過壓力差)	막(간)차압(膜間差壓)
pressure drop, pressure loss	액체 중에 있는 2점간에 유체의 마찰에 의해 발생하는 압력저하	압력강하(壓力降下), 압력손실(壓力損失)	
concentration rate	농축수 농도와 공급수 농도와의 비	농축률(濃縮率)	농축배율(濃縮倍率)
upstream	막 또는 필터의 여과 전의 액측	상부(上部)흐름	일차측 一次側(상류측 上流側)
downstream	막 또는 필터의 여과 후의 액측	하부(下部)흐름	이차측 二次側(하류측 下流側)
cross flow filtration	운전조작방법 중의 하나로 공급수를 막면에 나란히 흐르게 하고 투과수를 공급수와 직각 방향으로 흐르게 하는 여과 방법	십자(十字)흐름 여과(濾過), 교차(交叉)흐름 여과(濾過)	십자류 여과(十字類濾過)

영 어	정 의	한 글	용어(표준화)
dead end filtration	운전조작방법 중의 하나로서 공급수를 막면에 직각 방향으로 흐르게 하여 전량을 여과하는 방법	무배출 여과(無配出 濾過)	전량여과(全量 濾過)
specific resistivity recovery characteristics			
pretreatment	막 또는 필터의 오염을 완화시키기 위해 주로 현탁물질의 제거를 위한 용질, 여과, pH 조절, 살균 등을 행하는 처리	전처리(前處理)	
safety filtration	역삼투 장치의 고압펌프 등의 앞에 설치하여 이물질에 의해 펌프등이 손상을 입지 않도록 설치해 주는 필터	안전(安全)필터	
post-treatment	투과수의 용도에 맞도록 수질을 조절하기 위해 탈기, pH조절, 살균 등을 행하는 처리	후처리(後處理)	
fouling	막자체의 구조는 변화하지 않지만 미세공이 막히거나 부착층의 형성으로 분리막의 기능이 저하되는 현상	파울링	막 오염
fouling index	<p>역삼투막법에서 모듈로의 공급수 중의 미량의 현탁물질을 정량화하는 지수</p> <p>비고 1. FI또는 SDI로 표기한다.</p> <p>2. FI(SDI)구하는 방법은 다음과 같다.</p> $FI(SDI) = (1 - \frac{T_0}{T_{15}}) \times \frac{100}{15}$ <p>여기서, T<sub>0</sub>은 0.45 μm을 정밀여과막을 이용하여 시료인 물을 206 kPa의 가압하에 여과시킬 때, 처음으로 500 ml를 여과시키는데 걸리는 시간</p> <p>T<sub>15</sub>는 T<sub>0</sub>와 동일한 상태에서 15 분간 계속하여 여과시킨 후 500ml을 여과시키는데 걸리는 시간</p>	파울링도(度)	오염지수(汚染指數), 파울링인덱스
concentration polarization	막 표면에 투과하지 못한 용질이 쌓이는 현상	농축극성(濃縮極性)	
gel layer	막을 투과하지 못한 용질이 쌓여 이루어진 겔 층	겔층(層)	
scale	막 표면에 비가역적으로 쌓인 용질	스케일	
flushing	막 표면에 쌓인 용질의 세척	세척(洗滌)	

## 참고문헌

1. 한국막학회 편 “막분리 (기초, 응용)”, 1996, 자유아카데미
2. Keith Scott “Handbook of Industrial Membrane”, 1995, Elsevier
3. 일본공업규격(JIS) “막용어, Technical Terms for Membrane and Membrane Process
4. W.T.Koros et.al. “Terminology for Membranes and Membrane Processes”  
Pure&Appl. chem, Vol.68, No.7, pp1479-1489, 1996