

제 5 장 여과 및 막분리

5-1. 여과 (filtration)

여과는 유체를 여과매체(filtering medium)에 통과시켜서 세공보다 큰 입자가 막위에 퇴적되게 함으로써 유체로부터 고체입자를 분리하는 것이다. 유체는 액체나 기체일 수 있으며, 여과 대상은 유체나 고체 또는 둘 다가 될 수 있다. 여과속도를 개선하기 위하여 가열 또는 재결정의 전처리를 거치던가 셀룰로스, 규조토와 같은 “여과 조제” (filter aid)를 첨가하여 공급물을 예비처리하는 경우도 많다.

유체는 여과매체 전후에서의 압력차에 의해서 매체를 통하여 흐르게 된다. 따라서 여과기는 여과매체 상류측의 압력을 대기압보다 높게 하여 조작하는 것과 하류측을 감압하여 조작하는 것으로 분류하기도 한다. 대기압보다 높은 압력을 얻기위해서 유체에 중력, 펌프나 송풍기, 원심력을 가하기도 한다. 중력 여과기(gravity filter)는 아주 거대한 결정을 용액으로부터 분리하거나, 음료수의 청정화, 폐수처리등에 한하여 이용된다. 공업적 여과는 대개 가압 여과기(pressure filter)나 감압(진공) 여과기(vacuum filter)이다. 또 퇴적 고체의 배출이 연속적인가 간헐적인가에 따라서 연속 또는 비연속 여과기로 구분한다. 비연속 여과기(discontinuous filter)는 조작주기동안은 연속적이지만 축적된 고체를 배출하기 위해서는 주기적으로 조업을 중단시켜야 한다.

1. 여과의 분류

여과는 여과매체의 양면에 압력차를 줌으로써 행하여지며 여과 압력을 적용하는 방법으로 분류하면, 중력 여과기(gravity filter), 진공 여과기(vacuum filter), 가압 여과기(pressure filter), 압착 여과기(compression filter), 원심 여과기(centrifugal filter)가 있다.

중력 여과기(gravity filter)는 여과저항이 비교적 적은 경우로서 여액은 중력에만 의하여 여과매체를 통과하여 여과하는 방식이다. 진공 여과기(vacuum filter)는 여과저항이 커져서 중력만으로는 불충분할 때 여재의 한쪽을 감압하여 사용한다. 가압 여과기(pressure filter)는 1기압 이상의 여과압력이 필요한 경우로 보통 0.5~5기압 정도의 압력을 적용한다. 압착 여과기(compression filter)는 액체를 고압으로 압출하는 것으로서 300~600기압의 압력이 적용된다. 그리고 원심 여과기(centrifugal filter)는 여재를 통하여 액체를 흘리는데 원심력 이용한 여과기이다.

여과기는 케이크 여과기(cake filter), 청정화 여과기(clarifying filter) 및 십자류 여과기(crossflow filter) 등으로 나눈다. 케이크 여과기는 결정이나 슬러지 케이크같이 비교적 대량의 고체를 분리하는데 사용한다. 청정화 여과기는 고체를 제거해서 청정기체나 음료같은 발포성 청정액 생산에 사용되는데 고체입자는 여과매체 안쪽에 포집되거나 또는 외부 표면에 포집된다. 이때 소량의 고체를 제거하므로 여과매체의 기공의 지름이 제거될 입자보다 더 크다.

십자류 여과기는 급송부유물이 가압하에서 여과매체를 비교적 고속으로 통과하는 방법으로 액체의 흐름이 막과 평행하기 때문에 막위의 케이크쌓임이 감소된다. 여과매체로는 부유입자를 여과해 낼 만한 소기공을 가진 세라믹, 금속, 고분자막등이 있다. 한외여과기(ultrafilter)는 주로

<여과 메카니즘>

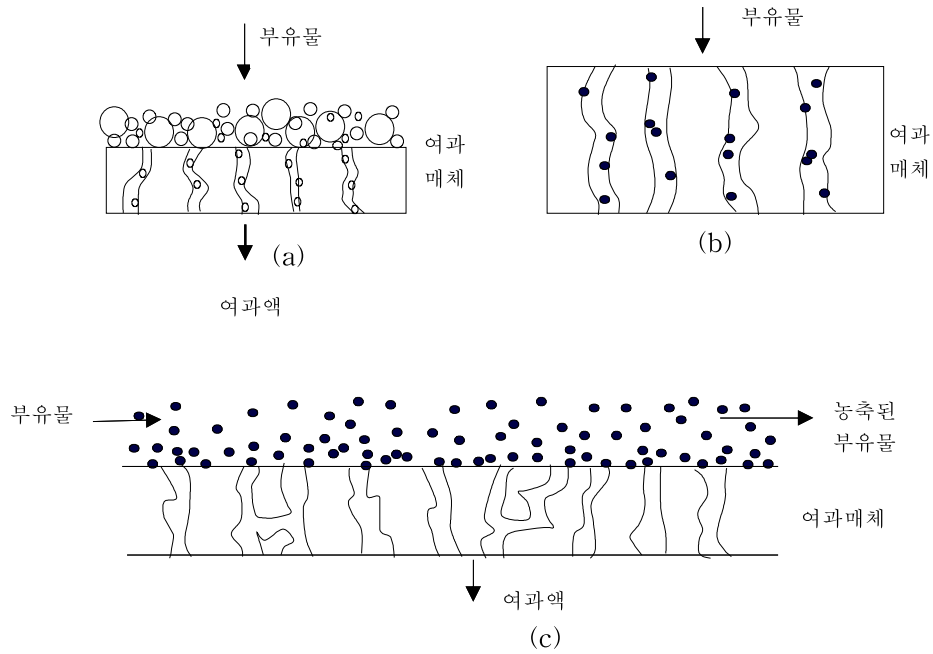


그림 5-1. 여과 메카니즘의 종류 : (a) cake filter (b) clarifying filter (c) crossflow filter

극소기공의 분리막이 설치된 십자류 장치이고 콜로이드나 거대분자물질(macromolecule)을 분리, 농축하는데 쓰인다.

5-2. 막분리 (membrane separation)

현재 물질 분리를 위해 증류, 추출, 흡수, 흡착, 재결정 등의 다양한 분리 공정이 이용되고 있다. 그러나 이러한 분리 공정들은 다량의 에너지소비 및 공간 이용의 비효율성 등의 문제가 야기되고 있으므로 에너지 절약형 첨단 분리공정으로서 고분자 분리막을 이용한 분리공정의 중요성이 대두되고 있다. 고분자 분리막은 선택적 분리기능 및 효율적인 물질투과 능력을 갖고 있어 화학, 환경, 의료, 바이오텍 산업, 식품공업등에 이르기까지 그 산업적 수요가 날로 확대되고 있다. 특히 공업 및 농업 폐수, 독성 산업 폐기물 등 환경오염 물질의 분리제거를 위해서 고분자 분리막을 이용한 막분리 공정의 활용 빈도가 괄목한 증대를 보일 것으로 예상된다.

1. 막 (membrane)의 정의

막이란 두 개의 상을 나누는 경계에 위치하여 여러 종류의 화학물질의 투과를 제어하는 기능이 있고, 두상의 물질의 농도가 다를때 물질의 혼합을 피해 농도차를 유지하므로써 비평형상태를 지속시킬 수 있다. 막을 이용하여 물질의 분리가 가능한 것은 물질에 따라 막을 통한 이동속도가 다르기 때문이다.

2. 막의 분류

막은 세공막(macroporous membrane), 미세공막(microporous membrane), 비공성막(non-porous membrane)로 분류할 수 있다. 세공막은 구멍의 지름이 0.1~10 μ m 정도이고 분자크기가 매우 큰 거대분자나 콜로이드, 미세입자등을 분리하는데 이용되는 막이다. 이 막의 특성은 이온이나 물같은 용매를 쉽게 통과 할수 있다. 미세공막은 구멍의 지름이 50Å~500Å 정도인 미세공이 있어 주로 유기혼합물이나 쿤센(Knudsen)흐름에 의한 기체분리에 사용된다. 비공성막은 미세공이 존재하지 않는 막을 말하며 무기성 결정간의 간격이 존재하여 이간격이 10Å 정도 되는 막을 말한다. 따라서 비공성막은 미세구멍을 통해 물질이 투과되는 것이 아니라 분자 사이에 난 간격을 통해 물질이 투과 된다. 역삼투막, 기체분자 등이 용해되어 확산되는 고분자막, 금속막이 이 부류에 속한다.

아래에 몇 가지 전형적인 작은 입자, 분자 그리고 이온의 크기를 나타내었다.

표 5-1. 여과대상 입자, 분자, 이온의 겉보기 크기

여과 대상	크기의 범위(nm)		
효모와 곰팡이	1000	-	10000
박테리아	300	-	10000
콜로이드상태의 고형물질	100	-	1000
바이러스	30	-	300
거대분자(단백질, 다당류 M.W.10 ⁴ -10 ⁶)	2	-	10
효소(M.W. 10 ⁴ -10 ⁵)	2	-	5
항원(M.W. 300-1000)	0.6	-	1.2
유기산(M.W. 100-500)	0.4	-	0.8
무기이온(M.W. 10-100)	0.2	-	0.4
물(M.W. 18)	0.2		

3. 막의 특성 및 분류

막의 특성은 재료물질, 구조, 생산방법, 형태, 지지체의 유무, 소수성및 친수성, 표면전하(양성, 중성, 음성)등으로 분류되어 질수 있다. 재료물질로는 유기물, 고분자, 세라믹, 금속등에 의해 분류되고, 구조로는 균일성과 대칭성으로 분류되며, 생산방법으로는 상전환, sintering늘이기, track etching 등으로 분류된다. 형태로는 평평한형태(sheet), 실관(hollow fiber)등으로 분류된다.

막이 가지는 중요한 수행특성은 다음과 같은 인자에 의해 결정되어 진다.

1. 유지 효율 (retention efficiency)
2. 침투성 (permeability)
3. 처리 능력 (dirt handling capacity)

4. 화학적 저항성 (chemical resistance)
5. 온도 한계 (temperature limit)
6. 기계적 강도 (mechanical strength)
7. 청결도 (cleanliness)

유지효율은 구멍이 미세한 막에서 가장 중요한 수행특성이다. 이 구멍크기를 측정하기 위해 대표적으로 bubble point법을 사용하는데 이 방법은 막 구멍에 습한 액체를 채우고 막의 한쪽 면으로 기체압력을 가하여 기체의 기포가 막의 다른 면에서 나타날 때의 압력을 측정함으로써 구멍의 크기가 결정된다. 이때 최초로 기포가 보이는 점을 bubble point라고 한다. Young-Laplace방정식에 의해 압력에 따른 구멍의 크기를 계산할 수 있다.

$$P_{PB} = \frac{4\gamma \cos \Theta}{d} \quad (5-1)$$

d : 구멍지름

P_{PB} : bubble point 압력

Θ : 막표면에서의 액체와 표면각

γ : 액체의 표면장력

막의 침투성은 구멍 크기, 공극, 두께, 비대칭성의 함수이며, 균일/대칭인 막의 침투성은 구멍 크기가 줄어들고 공극이 감소하고 두께가 증가함에 따라 감소한다. 비대칭인 막은 일반적으로 같은 구멍크기의 대칭막에 비해 더 좋은 침투성을 갖는다. 막은 비슷한 크기의 고체 물질보다 노출된 표면 범위가 100-1000배로 훨씬 넓으므로 온도의 변화에 따른 영향을 더 많이 받을 수 있다. 막은 또 표면이 화학적으로 안정 뿐만 아니라 적당한 기계적 강도를 가지고 있어야 하며, 막의 청결도 반도체 산업에서 최근에 중요성이 증가되고 있다.

4. 막을 이용한 분리공정

막을 이용한 분리공정에는

- (1) 막을 통과하는 입자의 크기를 이용한 것
- (2) 막을 통한 확산속도의 차이를 이용한 것 두가지로 크게 나눈다.

5-3. 막을 통과하는 입자의 크기를 이용한 분리공정

막을 통과하는 입자의 크기를 이용한 분리공정은 막을 사이에 두고 압력을 걸어서 액체는 통과시키고 고체 입자는 통과시키지 않는 원리를 이용한 방법이다. 이런 분리공정에는 미세여과,

한외여과, 역삼투등이 있다.

미세여과(microfiltration)는 분리막중 가장 미세다공이 큰 것을 이용하여 용질이나 콜로이드 등의 미세한 고체 입자를 제거하는 공정으로 지름이 0.1~10 μ m 정도의 고체입자를 분리한다.

한외여과 (ultrafiltration)는 미세여과와 원리는 거의 같고 지름이 1nm~0.1 μ m인 용질을 분리하는 방법이다. 삼투압 (reverse osmosis)은 극초미세여과로 지름이 약 10Å 이내인 분자 또는 이온 분리에 쓰이는 방법이다.

공정	필요 구동력(ΔP)	분리대상물크기	대상물
미세여과	0.5~ 5기압	0.1~10 μ m	균의 제거, 세포분리
한외여과	2~ 10기압	1nm~0.1 μ m	단백질, 효소, 다당류등의 고분자불질의 분리 농축
역삼투	10~100	10Å 이내	배양액으로부터 염, 산 및 염기의 제거

표 5-2. 입자크기를 이용한 분리공정들

1. 미세여과 (microfiltration)

1) 미세여과의 개요

미세여과란 용질의 크기가 0.1~10 μ m정도인 용질을 분리하는 막분리 공정으로 이때 사용되는 막의 세공직경은 약 0.01~10 μ m정도이다. 막분리 공정중에서 세공의 크기가 비교적 큰편에 속하며 1926년 독일에 의해 상업화된 이후 급진전하였다. 시장규모면에서도 한외여과나 역삼투보다 상대적으로 크다. 또한 미세여과는 삼투압을 극복할 필요가 없기 때문에 50 psia (3bar)보다 낮은 압력에서도 실행될 수 있는 잇점이 있다. 미세여과막의 재료물질은 일반적으로 결정성고분자로 이루어진 반면에 한외여과는 무정형(유리질, amorphous)고분자로 이루어졌다. 미세여과는 주로 발효공정(fermentation), 의학(medical), 전기분야(electronics)및 음료산업분야에 많이 적용된다.

2) 미세여과의 이론

미세여과의 여과 방식은 기존에는 dead-end flow방식으로 작동되었지만 최근에는 막표면을 따라 유량이 통과하는 교차흐름(crossflow) 방식을 많이 쓰고 있다. 교차흐름의 장점은 유체의 흐름이 막을 가로질러 막표면에 평행하게 진행되기 때문에 축적되는 물질이 거의 없는 장점이

있다.

미세여과시 막내 선속도는 Darcy's law에 의해 설명할 수 있다.

$$J_v = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{n_o(R_m + R_c)} \quad (5-2)$$

J_v : 투과 또는 용적 flux

V : 투과된 전체 부피

A : 막 면적

t : 여과 시간

ΔP : 여과막과 케이크층을 가로지르는 압력차

n_o : 정지된 유체의 점도

R_m : 막 저항 (막의 막히고 팽창에 기인해 시간에 따라 증가할 수 있다)

R_c : cake의 저항 (cake의 강화와 압축으로 인해 시간에 따라 증가할 수 있다)

3) 미세여과막의 특성

미세여과막의 주요한 특징은 세공의 크기, 여과능력(filteration capacity), 제거효과(removal efficiency)의 3가지로 나누어진다. 이런 주요한 특징을 이용하여 미세여과의 공업적 적용을 예측할수 있다.

세공크기는 최대 세공크기, 세공크기의 분포로 나누어 측정된다. 최대 세공크기는 bubble point 방법으로 측정하는데 이것은 앞의 막의 수행특성에서 언급한바 있다. 이 방법은 낮은 압력에서 큰 세공이 열리므로 최대 세공크기를 측정하는데 적합하다. 최대 세공크기 r_m 은 다음의 식으로 나타낸다.

$$P = \frac{-2\tau \cos\theta}{r_m}$$

(5-3)

P : 초기 끓는점에서의 압력

τ : 액체의 표면 장력

θ : 막 표면에서의 액체의 표면각

r_m : 평균세공 크기

세공크기의 분포는 scanning electron microscope (SEM)이나 transmission electron microscope (TEM)의 사진촬영에 의해 직접적으로 결정된다.

여과능력은 보통 0.2-0.3MPa의 압력에서 이 막이 할 수 있는 전체 여과량이다. 이 여과능력은 막이 취급하는 용액이나 여과속도에 따라 달라진다.

제거효과를 측정하는 방법으로는 두가지가 제안되었다. 첫째로 박테리아 여과효과이고 두 번째가 유액(latex) 여과효과이다. 박테리아 여과효과는 크기를 알고있는 박테리아를 함유하는 수용액을 막을 통하여 통과시킨 후 남아 있는 박테리아를 관찰하는 것이다. 두 번째로 유액 여과 방법은 막을 통하여 일정한 크기의 유액(latex)을 통과시켜 박테리아보다 더 미세한 부분까지도 제거효과를 평가할 수 있다.

4) 미세여과의 공업적 응용

미세여과는 현재 식품공업, 생물화학공업, 의료분야, 반도체 제조공정등에 광범위하게 이용되고 있다. 이중 반도체 제조공정에서는 다양한 화합물 즉 황산, 질산, 암모니아, 과산화수소등이 많이 이용되는데 공정이 지속될수록 화합물에는 미세분자들이 늘어나게 된다. 이 미세분자들을 제거하여 화합물을 정화시키는데 미세여과가 쓰이고 있다. 일반적인 산업에서 미세여과가 가장 많이 쓰이는곳은 음료수의 살균과 초순수의 정제공정일 것이다. 이 공정은 일반적으로 제약 공정에서 사용하고 있으며 반도체 산업에서 매우 중요하다. 제약산업에서 미세여과의 적용은 각종 주사제, 안약액, 항생제, 백신, 혈청과 혈장공정에 사용할 뿐만아니라 생물공학적으로 생산된 단백질을 포함하여 발효제품의 분리정제에도 응용된다.

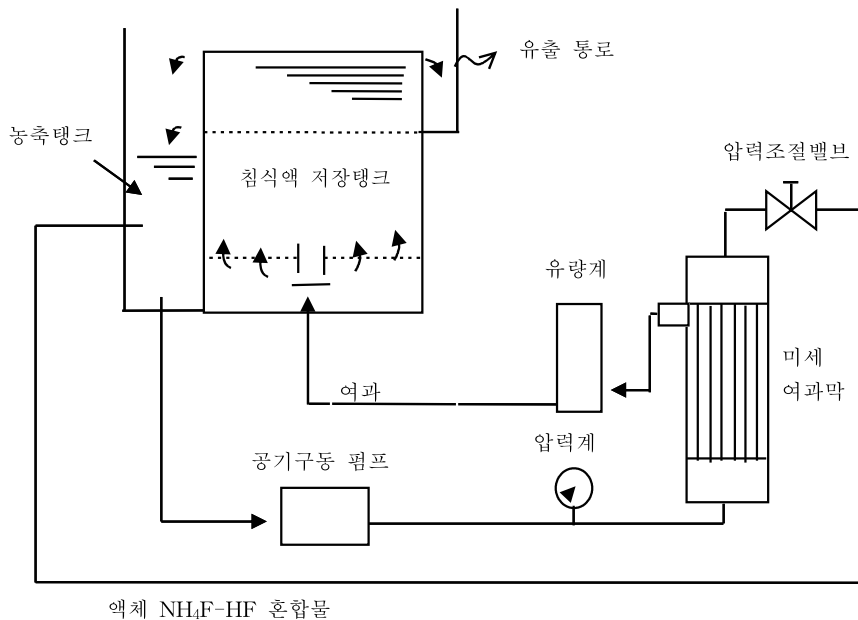


그림 5-2. 반도체 제조공정에서 미세여과를 이용한 혼합물의 정화공정

2. 한외여과 (ultrafiltration)

1) 한외여과의 개요

한외여과법은 액체 중에 용해되거나 분산된 물질을 입자크기나 분자량크기별로 분리할수 있는 공정으로 압력차를 추진력으로 하며 미세여과와 역삼투의 중간 영역의 입자를 분리한다. 한외여과막은 대략 10~500Å 범위의 세공 크기를 가지며 입자의 크기가 1nm~0.1μm 정도인 당류, 단백질, 생체물질, 고분자 물질의 분리에 주로 사용된다. 미세여과와 기본원리는 동일하나 미세여과의 막구조는 대칭형(symmetric)의 세공구조이나 한외여과막은 비대칭형(asymmetric)구조의 치밀한 층구조로 되어있어 미세여과보다 더 작은 입자를 분리해 낼수 있다. 한외여과의 단점은 역삼투보다 큰 분자량을 갖는 물질을 분리해 내기 때문에 막오염이 역삼투보다 심하다. 그러나 역삼투는 분리대상물질이 염류 및 무기이온이므로 용액내 높은 삼투압으로 인해 큰 압력이 요구되나 한외여과는 대상물질이 분자량이 큰 물질이므로 용액내의 삼투압은 무시할수 있어서 낮은 압력으로 운전된다.

2) 한외여과의 이론

한외여과는 다공성막을 통한 물질의 흐름이므로 유체역학에서 관을 통한 층류 흐름을 가정한다면 Hagen-Poiseuille식으로 표현될 수 있다. 이 식은 세공내 용질의 흡착 또는 침적이 없고 세공내로 투과하는 흐름이 층류라는 가정을 포함한다. 단위 면적당 n 개의 세공을 통과하는 용매의 투과량을 체적플럭스 J_v 라하고 Hagen-Poiseuille식을 적용해서 다음식으로 나타낸다.

$$J_v = \left(\frac{n d^4}{128\eta} \right) \frac{\Delta p}{l} \quad (5-4)$$

J_v : 체적플럭스

n : 단위면적당 세공수

d : 막의 지름

l : 막의 길이

η : 침투 용액의 점도

Δp : 막사이의 압력차

이 방정식에 의하면 체적플럭스가 세공지름의 4제곱에 비례하고 압력차에 비례한다. 그러나 실제로 플럭스는 압력차에 따라 선형적으로 증가되지 않는다. 초기에는 압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가하나 어떤 압력을 지나서는 농도분극(concentration polarization)현상 때문에 플럭스는 더 이상 증가하지 않는다. 농도분극현상이란 막에 의해 배제된 용질이 막표면에 쌓이는 현상이다. 만일 이 용질이 물리화학적 결합력이 강한 물질이라면 압력을 증가 시킴에 따라 농도분극현상이 더욱 심해져 막투과량이 급격히 감소하게 되고 막표면의 침전물이 의한 고형화되

어 막의 오염(fouling)이 초래되어 압력을 아무리 올려도 더 이상 플럭스가 증가되지않는 한계 투과량(limiting permeate flux) 상태에 도달하게 된다.

농도 분극의 정도는 막의 종류에 따라 달라지는 인자인 플럭스 J_V 와 수력학적 조작 상태에 따라 달라지는 물질전달 계수 k 에 영향을 받는다.

$$k = \frac{J_V}{C_{Ai} - C_A} \quad (5-5)$$

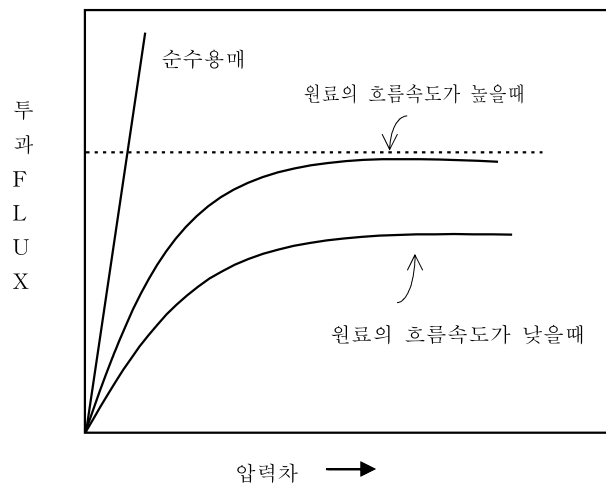


그림 5-3. 한외여과 공정에서 압력에 따른 투과용매의 플럭스

플럭스 감소 현상은 그림 4에 나타난 경계층 모델로 설명 될수 있다. 그림에서 δ 는경계층의 두께로 c_f (벌크피드 농도)와 c_w (막 표면에서의 농도)간의 농도 변화에 따른 거리이다. 용질이 침투적 대류에 의해 막 표면으로 이동하는 속도와 벌크로 되돌아가는 속도가 다음식과 같이 평형을 이룬다.

$$J_V(c - c_p) = -D \frac{dc}{dx} \quad (5-6)$$

경계층을 따라 이 방정식을 적분하면, 그 플럭스는 다음과 같이 표현될수 있다.

$$J_V = k \ln[(c_w - c_p)/(c_f - c_p)] \quad (5-7)$$

여기서 $k(= D/\delta)$ 는 물질전달계수이다.

공급된 압력이 증가함에 따라 플럭스가 증가되며 c_f 에 상대적인 c_w 의 값도 또한 증가한다. 그러나 c_w 가 용해한계 이상이 되면 막 표면에 겔층 또는 침전이 생기기 때문에 압력이 증가해도 더이상 플럭스는 증가되지 않는다. c_p 가 작다고 가정될 때 이 플럭스의 한계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

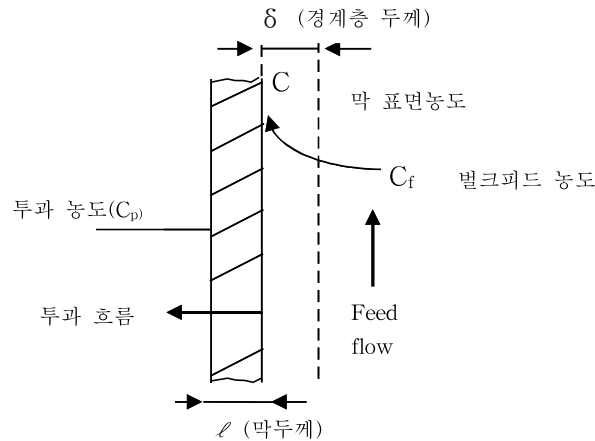


그림 5-4. crossflow 여과에서 경계층 모델

$$J_{vg} = k \ln(c_g/c_f) \tag{5-8}$$

식 (5-8)은 겔농도 c_g 를 알수 있고 물질전달계수 k 에 대한 적절한 상호관계가 주어졌을때 다양한 한외여과 시스템에서 플럭스의 한계를 추정하는데 사용될수 있다. 겔 농도는 주로 용매-용질 계와 작용 온도와의 함수이며 막 특성, 피드 농도, 흐름 상태, 작용 압력에는 무관하다.

물질전달계수 k 는 실험에 의해 결정된 무차원수인 셔우드수(Sherwood number, Sh)로서 나타내어 질수 있다. 셔우드수는 아래와 같이 레이놀드수(Reynolds number, Re)와 슈미트수(Schmidt number, Sc)의 상호관계에서 측정할수 있다.

$$Sh = \frac{kd}{D} = aRe^b Sc^c \tag{5-9}$$

여기서 a, b, c 는 막을 통과하는 흐름의 형태(층류 혹은 난류)에 따라 정해지는 상수값이고 $Re = dvp/\mu$ 이고 , $Sc = \mu/\rho D_e$ 이다. 식 (5-9)에서 셔우드수를 결정한후 k 를 구하고 농도분극에 의한 플럭스 한계를 구할 수 있다.

3) 한외여과막의 재료

한외여과 막의 재료로는 고분자 소재와 무기소재가 이용되어지고 있다. 한외여과막은 활성층과 지지층으로 구성되어 있는 비대칭 막구조를 가지고 있다. 표 2는 한외여과막 제조를 위해 사용되는 고분자와 무기물질의 예이다.

표 5-2. 막에 이용되는 고분자 소재 및 무기소재

고분자 소재	무기소재
polysulfone	γ -alumina / α -alumina
polyethersulfone	borosilicate glass
cellulose acetate	pyrolized carbon
regenerated cellulose	zirconia / stainless steel
polyacrylonitrile	
polyamides	zirconia / carbon

고분자 재료를 이용한 한외여과막의 제조방법에는 용매교환법, 상유도분리법, track etching 법 등이 있는데 이중 상변환법이 가장 보편적으로 사용되고 있다.

① 용매교환법

용매교환법이란 고분자 재료를 적정용매에 용해하여, 필름형 혹은 실관(hollow-fiber)으로 성형한 후 이를 비용매에 침전시켜 상분리를 유발한 다음 용매를 추출하므로써 다공성 구조를 이루게 하는 방법이다. 용매교환법에 의한 한외여과막의 제조시 막의 구조에 영향을 미치는 인자들로써 고분자 용액의 농도, 용매의 증발속도, 고분자의 침전속도, 첨가제의 종류 및 양 등을 들 수 있다.

② 상분리 유도법

상분리 유도법이란 상온에서는 서로 섞이지 않는 고분자와 희석제를 넣고 가열하여 균일하게 용융혼합한 후 성형하여 적당한 조건에 따라 냉각하여 상분리를 유도한 다음 사용하였던 희석제를 추출함으로써 다공성 구조를 얻는 방법이다. 상유도 분리법은 종래의 용매교환법보다 구조 조절이 용이한 잇점이 있다. 그리고 내열성, 고약품성의 한외여과막을 제조할 수 있기때문에 열악한 조업 조건이 요구되는 폐수처리용 막제조에 사용될 수 있다.

③ Track etching

Track etching법이란 핵반응기로부터 방출되는 방사선(radiation)을 이용해서 고분자 필름에 흠집을 낸후 이를 부식성 용매에 담가 침식(etching)을 함으로써 모세관형 미세다공을 얻는 방법이다. 이 방법에 의하면 아주 균일한 크기의 원형실린더형 미세다공을 만들 수 있어서 분획 분자량의 측면에서 고도의 정확도를 요구하는 분석화학이나 생물공학, 의학적 용도로 사용되고 있다. 방사선의 조사시간 및 침식조(etching bath)에서의 체류시간등이 미세다공의 크기를 결정하는 주요인자이다. Track etching법은 다공도가 낮고 제조 비용이 비싸다는 단점이 있다.

무기막 소재로 대표적인것은 세라믹막, 유리막, 금속막이다. 세라믹막의 제조는 금속(Al, Zr)에 비금속 물질이 산화물, 질화물, 탄화물형태로 결합된 형태인 세라믹을 졸-겔공정으로 세공크기가 수십 μm 의 다공성막을 제조한후 막표면에 세라믹 미세분말을 도포하여 활성층을 형성시켜 제조한다. 이 방법을 slip-casting방법이라고 하고 이 방법으로 만들어진 대표적인 세라믹막은 α -alumina를 지지체로하여 γ -alumina를 입힌 세라믹막이다. 유리막은 유리를 산으로 침출시켜 만드는데 대표적인 유리막 소재는 silica(SiO_2)이다. 무기막이 고분자막보다 우수한 성질은 열적 안정성, 화학적 안정성, 물리적 안정성에 있다. 무기막은 800 $^{\circ}\text{C}$ 의 고온에서도 견딜수 있기 때문에 열적으로 안정하여 기체분리나, 화학반응과 결부시켜 무기막 촉매 및 생성물의 분리를 위해 사용할 수 있다. 또한 고분자막에 비해 유기용매 및 pH에 안정하므로 강산 및 강염기로 막 세척시 안정하고 수명이 긴 장점이 있다. 무기막은 고압조건같은 물리적 힘에도 안정하다. 그러나 부서지기 쉬운 단점도 있다.

4) 한외여과막의 형태

한외여과막은 분리성이 좋은 막형태로 제작하여야 한다. 한외 여과막의 모듈(module)은 원료 공급이 막히는 것을 방지하기 위하여 관형태(tubular type)가 주종을 이루어 왔으나 나선형(spiral-wound type), 판틀형(plate-and-frame type) 및 실관형(hollow-fiber type)으로도 사용되어지고 있다.

① 판틀형 (plate-and-frame type)

판틀형은 평평한 여러개의 막을 쌓아놓은 형태이다. 이 평판형은 다른 막형태보다 간단한 구조를 가지기 때문에 연구실 연구에 자주 사용되며 제조하기 쉽고, 교체와 cleaning이 쉽다. channel 너비는 막힘을 감소 시키기 위해 변화 시킬수 있고, 높은 압력에서 운전하기 위하여 막 지지체를 첨가되었고 단위 부피당 막 표면적이 비교적 작다.

② 실관형(hollow-fiber type)

실관형과 모세관형(capillary-fiber)은 매우 높은 단위부피당 표면적을 제공한다. 그러나 이 형태는 다른 막 형태보다 더 쉽게 막힌다.

③ 나선형(spiral-wound type)

두개의 층을 가진 넓고 긴 막을 나선모양으로 감은 형태이다. 원료는 축방향이나 나선 방향으로 두층의 바깥을 지나 통과하게 된다. 투과된 것은 나선모양의 중앙 파이프로 이동된다. 실관형과 같이 나선형막들도 높은 단위 부피당 표면적을 가지고 있다.

④ 관형(tubular type)

관형은 높은 점성이나 미립자 물질을 가지는 원료에 유용하게 쓰인다.

5) 한외여과의 공업적 응용

한외여과의 응용분야는 식품, 생물, 의약, 반도체 산업용 순수 제조공정, 음료수 제조공정등 대단히 넓으며 최근에는 포도주 제조, 식초양조, 젤라틴 농축에도 한외여과공정이 사용되고 있

다. 식품산업에서는 단백질 분리 및 농축과 식품공업의 폐기물처리가 주요 분야이다. 단백질 분리 및 농축은 치즈 유장으로부터 유장 단백질의 분리와 치즈제조를 위한 우유의 농축이 있고, 식품공업의 폐기물처리로서는 유업에서의 치즈잔액, 대두찌꺼기의 제거에 많이 응용된다. 또한 한외여과는 발효공업에서 노폐물이나 세균 분산액을 연속적으로 제거해서 생산물이나 균량을 증대시키는데 유효하다. 한외여과공정의 예로 pyrogen-free water 제조와 친화성 막분리를 이용해 단백질은 분리하는 공정을 소개한다.

① pyrogen-free water 제조

비경구용 의약품(주로 주사제)을 제조하는 경우에는 사용하는 물속에 균이 없을 것은 물론이고 pyrogen의 제거까지도 필요로 하고 있다. pyrogen이란 극히 미량으로도 항온동물의 체온을 이상적으로 상승시키는 물질을 말하며 이제까지 pyrogen의 제거는 매우 곤란한 문제로 남아 있었으나 막분리 기술이 도입됨에 따라 물속의 pyrogen은 물론 주사제 원료물질의 pyrogen 제거까지도 가능케 되었다.

pyrogen은 일반적으로 세균의 세포벽이 분해되어 발생하며 pyrogen의 원인물질은 주로 분자량 수만-수십만의 lipopolysaccharide이다. 일반적으로 제약용 원수의 경우 pyrogen을 99% 이상 거를 수 있는 막이어야 하며 한외여과막 및 역삼투막은 모두 99.99% 이상 이들을 제거할 수 있는 기능을 가지고 있다. 한외여과막을 사용하여 의약 용수제조를 위한 막분리 공정을 아래 나타내었다.

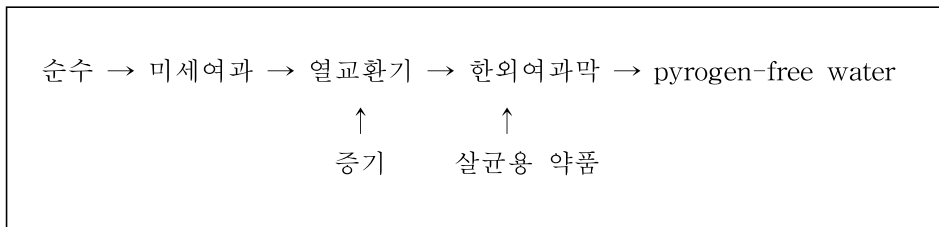


그림 5-7. 한외여과막을 이용한 pyrogen 제거공정

② 친화성 막분리(affinity - membrane)공정

이 공정은 특정한 단백질과 결합할 수 있는 항체(antibody)를 리보솜(libosome)과 같은 담체에 부착시켜 친화성 운반체(affinity carrier)를 형성시킨 다음 단백질의 혼합물을 가하면 이 복합체와 원하는 단백질이 결합하게 되는데 이렇게 결합된 입자는 다른 단백질에 비하여 크기가 크므로 막분리를 하면 다른 단백질로부터 쉽게 분리된다. 원하는 단백질과 결합된 복합체에 전해액을 가하면 단백질은 담체로부터 분리되어 두개의 크기가 다른 혼합물이 얻어지는데 원하는 단백질은 막분리에 의하여 순수하게 분리 시킬 수 있고 친화성 운반체는 다시 재사용할 수 있다.

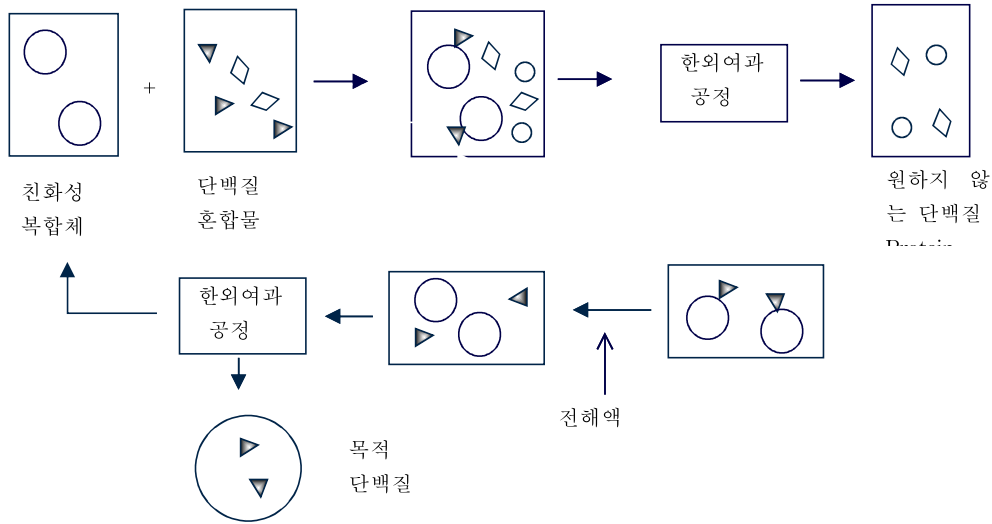


그림 5-8. 친화성 막분리 공정에 의한 단백질의 분리

3. 역삼투(reverse osmosis)

1) 역삼투의 개요

역삼투공정은 보통 10-100기압 정도의 압력구배를 이용하여 각종 염이나 유기물질들을 제거하는 공정이다. 역삼투공정에서는 분자수준의 초미립 분리가 이루어진다. 역삼투 공정의 주된 적용범위로는 우선 해수 및 염수의 담수화가 있고 반도체 및 전자산업분야에서 필수적인 초순수제조에도 많이 사용되고 있다. 또한 역삼투공정으로 얻어진 초순수는 각종 세균이 전혀 없는 상태이므로 의료용으로도 많이 사용되고 있다. 역삼투 공정의 새로운 응용분야로는 폐수처리공정을 들 수 있다. 각종 폐수에는 여러종류의 유기 및 무기물질들이 용해되어 있어 환경오염의 주범이 되고 있는데 수처리분야에 사용되고 있는 역삼투공정은 초순수제조나 해수 담수화 공정에 비하여 낮은 압력에서 이루어지는 공정으로서 주로 용해물질들의 농도가 희박하지만 독성이 강하거나 그 가격이 고가이어서 회수가 필요한 경우에 주로 사용된다. 역삼투 공정은 도시 폐수나 매립물에서 스며 나오는 폐수는 물론 화학공장, 섬유공장, 석유화학공장, 전기화학공장, 펄프 및 제지공장, 식품공장등에서 배출되는 폐수의 처리에 사용되고 있다.

2) 역삼투의 이론

삼투현상(osmosis)이란 반투과성막을 사이에 두고 용매가 용질의 농도가 낮은쪽에서 높은쪽으로 통과하는 현상을 말한다. 반대로 역삼투는 용질의 농도가 낮은쪽에 삼투압보다 더 큰 압력을 가하여 용매의 이동을 용질의 농도가 낮은쪽으로 보내는 방법을 말하며, 이러한 방법을 이용해서 분리해내는 조작을 역삼투법(reverse osmosis)이라고 한다.

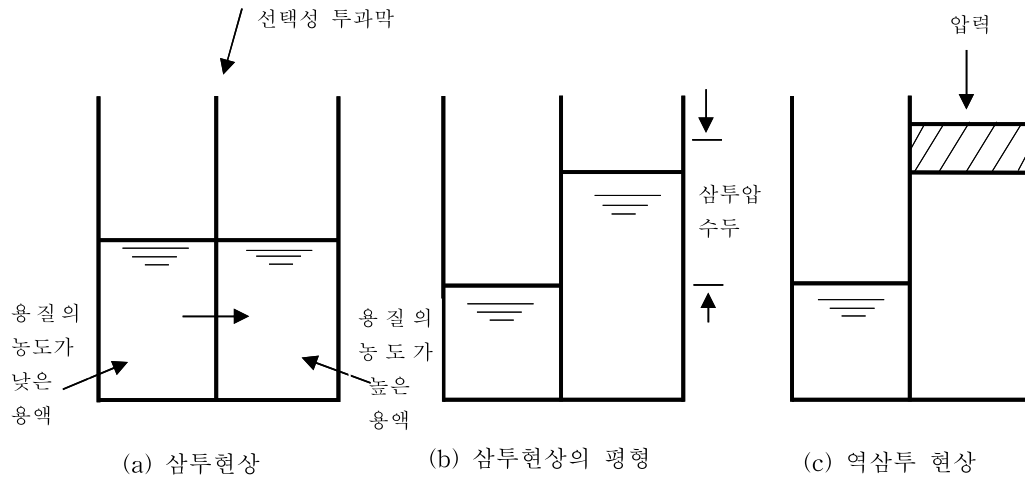


그림 5-9. 역삼투의 원리

역삼투는 반투성 막을 통하여 용매를 막으로 통과시킬 때 압력을 이용한다는 면에서는 앞에서 설명한 미세여과 및 한외여과의 작용기전과 거의 같다. 삼투압식은 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\pi = \Phi v n R T / V \quad (5-10)$$

- 여기서 π = 삼투압
- Φ = 삼투계수
- v = 전해질 한 분자에서 형성되는 이온의 수
- n = 전해질의 몰수
- R = 일반 기체 상수
- T = 절대온도
- V = 용매의 부피

삼투 계수 Φ 는 그 물질의 농도와 성질에 따라 다른 값을 가진다. 역삼투압막을 통한 용질의 투과량은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$J_w = A(\Delta p - \Delta \pi) \quad (5-11)$$

$$J_s = B \Delta C \quad (5-12)$$

J_w : 물의 플럭스(water flux)

- A : 물의 플럭스에 대한 막상수
- ΔP : 가해진 압력
- $\Delta\pi$: 삼투압 차이
- B : 용질의 투과 상수
- ΔC : 막에 의해 분리된 용질안에서의 농도차

위 식에서 볼수 있듯이 역삼투에서 용질의 플럭스는 압력에 무관하고 단지 막사이의 농도에 의해서만 결정된다는 것을 알수 있다.

3) 역삼투압법의 공업적 응용

역삼투공정은 연속공정이 용이하고 이온 및 10Å이내의 용질을 분리해 낼수 있기 때문에 해수의 담수화, 폐수처리, 유기물질 회수, 식품농축등에 적용되고 있다. 또 높은 공급 압력에 견디는 내압성, 내열성, 내염소성 및 친수성, 물에대한 높은 침투성이 있기 때문에 최근 의약품 제조나 반도체 공업과 같은 고순도의 물을 다량 요구하는 산업에도 많이 이용되고 있다. 표 5-3은 현재 사용되고 있는 역삼투압법의 응용분야를 나타내었다.

표 5-3. 역삼투압법의 응용 분야

아래그림은 역삼투압법을 이용한 초순수제조장치의 공정도이다.

무기공업화학	해수, 지하 간수, 하수의 담수화, 중금속염등의 회수
유기공업화학	glycerin과 NaCl등 유기물과 무기물의 분리, 유기 용액에서의 용매의 회수
식품공업	천연과즙, 야채주스의 농축, 염분의 제거, 우유, 커피, 차 등의 추출물의 분리와 농축
의학/제약공업	인공신장, 바이러스, 박테리아등의 분리, 알칼로이드, 호르몬, 비타민, 왁진, 항생물질 등의 분리, 농축
기타	펄프공업 등의 화학공정 폐수의 처리, 방사성 폐수의 처리, 각종 배수에서의 유용물질의 회수

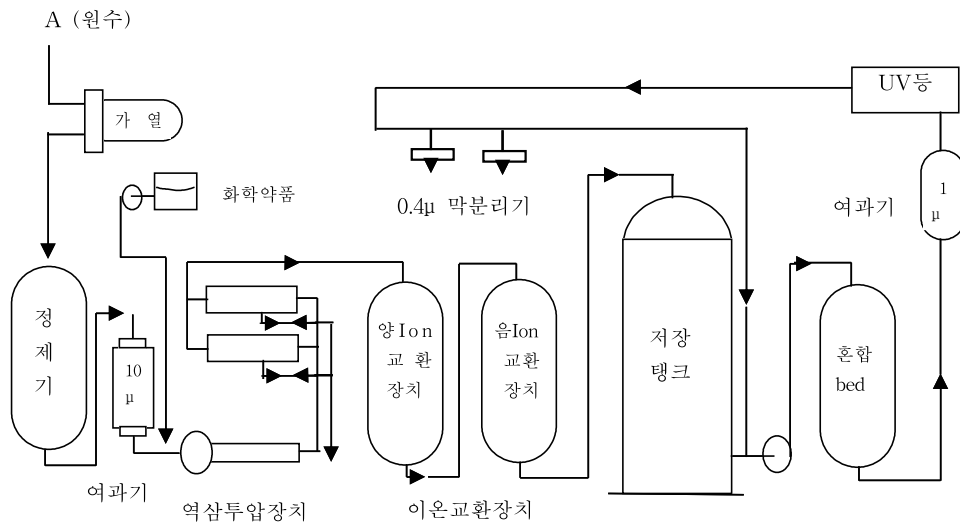


그림 5-10. 초순수제조 공정의 flow chart

5-4. 막을 통한 확산속도의 차이를 이용한 분리공정

막을 통한 확산속도의 차이를 이용한 분리 공정은 기체분리와 액체분리로 나눌수 있다. 기체 분리에는 다공질막(porous membrane)과 비다공질막(nonporous membrane)을 통한 기체투과가 있고, 액체분리에는 투과증발, 투석, 액액추출용막등을 이용한 분리방법이 있다.

1. 기체분리

기체분리는 혼합기체중 막과의 친화성이 좋은 기체 분자가 압력차에 의해 막 반대편의 저압상으로 선택적으로 투과하는 현상을 이용하여 분리하는 것을 말한다. 기체분리는 1950년대에 공기에서 산소를 분리하거나, 천연가스에서 헬륨의 분리등을 위해 연구가 시작되었다. 1980년대에 석유과등을 거치면서 일본에서 에너지 절감을 목적으로 산소분리막 개발을 시도하였고, 이후 질소분리막, 이산화탄소분리막의 개발이 이어졌다. 분리막을 통한 기체투과는 막의 구조에 따라 다공질막과 비다공질막을 이용한다.

1) 다공질막(porous membrane)을 통한 기체투과

다공질막을 통한 기체투과는 기체혼합물을 저압 영역으로 확산하도록 하여 막을 통과하는 기체 중 저분자량 성분만 농축되도록 하는 방법이다. 기체의 평균 자유경로(mean free path)보다 세공이 아주 작으면 기체는 Knudsen확산에 의해 보다 작고 가벼운 분자만 독립적으로 확산되게 된다. Knudsen 확산이란 기체분자들의 평균자유경로가 세공크기에 비해 훨씬 클때 기체분

자와 벽사이의 충돌횟수가 기체분자들 사이의 충돌횟수 보다 훨씬 큰 경우의 확산현상이다. 따라서 분자가 작을수록 평균분자 속도가 커지므로 세공을 잘 빠져 나갈수 있다는 의미이다. 원통형 세공 중의 기체 A에 대한 확산계수는 세공크기와 평균 분자 속도에 비례하고, 평균 분자속도는 분자량 M의 제곱근에 역비례한다.

$$D_A = 9700r\left(\frac{T}{M_A}\right)^{0.5}$$

(5-13)

D_A : 성분A의 Knudsen 확산계수(cm^2 / s)

r : 세공반지름(cm)

T : 절대온도(K)

M_A : 성분A의 분자량

각 기체의 플럭스는 농도구배에 비례하며 이상기체라 가정하면 성분 A의 투과 플럭스는 다음과 같다.

$$J_A = D_A\left(\frac{\Delta C_A}{\Delta Z}\right) = D_A\left(\frac{\Delta P_A/RT}{\Delta Z}\right) \quad (5-14)$$

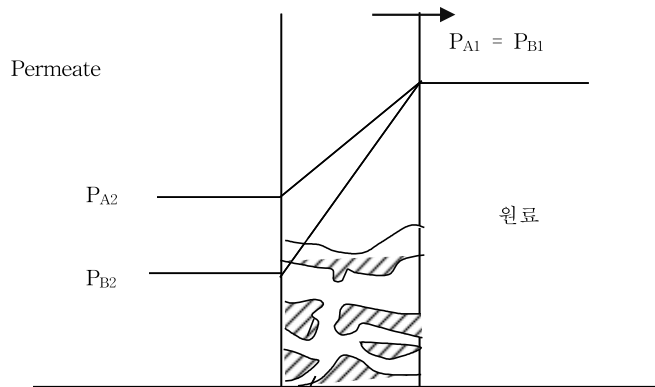


그림 5-14. 다공성막에서 전형적인 압력구배

P_{A1} , P_{B1} 은 원료측의 A성분과 B성분의 분압이고, P_{A2} , P_{B2} 는 투과측의 A성분과 B성분의 분압이다.

2) 비다공질막(nonporous membrane)을 통한 기체 투과

비다공질 고분자막을 통한 기체투과는 기공이 없는 고분자막을 사이에 두고 기체가 고압측에서 고분자에 용해되고 고분자 상을 통해 확산되어 저압측에서 탈착하거나 증발하는 방법이다. 이때 고분자에 용해되어 확산되고 탈착되는 정도가 기체분자마다 차이가 있는것을 이용하여 분리가 이루어진다. 즉 이 방법의 선택도는 비다공성의 고분자 자신의 물성 및 기체와 고분자막간의 상호작용에 의해 결정된다. 고분자막에 대한 기체의 용해도가 압력에 비례한다면 농도구배는 막을 통한 압력구배에 비례한다. 각 기체에는 Henry의 법칙이 적용되고 계면에서의 평형을 가정하게 된다. 또한 기체-경막 저항을 무시하면 기체-고분자계면에서의 분압은 bulk중의 분압과 같아진다. 기체 A의 플럭스는 다음과 같다.

$$J_A = -D_A \left(\frac{dC_A}{dz} \right) = D_A \left(\frac{C_{A1} - C_{A2}}{Z} \right)$$

(5-15)

여기서 D_A 는 막을 통한 A성분의 확산계수이고, C_A 는 A성분의 농도, Z 는 막의 두께를 나타낸다. 용해도계수 S (mol/cm^3-atm)를 사용하여 농도와 분압을 연관시킬 수 있다.

$$C_A = P_A S_A, \quad C_B = P_B S_B$$

(5-16)

이 식을 사용하여 농도구배를 압력구배로 대체하면,

$$J_A = \frac{P_A S_A (P_{A1} - P_{A2})}{Z}$$

(5-17)

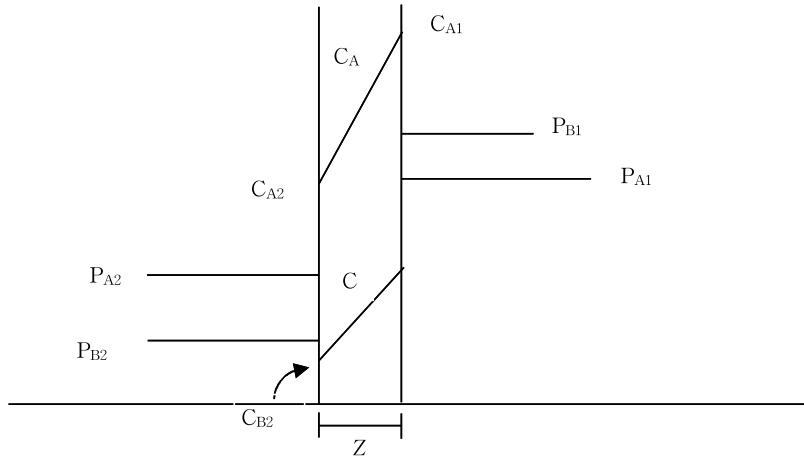


그림 5-12. 비다공성막에서의 기체의 농도 구배

기체분리막은 석유화학에서 의료용까지 각 산업에 광범위하게 응용되고 있는데 예를 들면 공기중에서 산소 및 질소의 분리 및 농축이나 석유화학공업에서 부산물로 생성되는 수소가스의 회수 및 정제에 이방법이 사용되고 있고 정유공장, 화학공장등에서 발생하는 유기증기(volatile organic compound)의 회수에도 기체분리가 사용된다. 특히 유기증기는 대기에 방출되면 대기오염을 일으키고 또 산소와 반응시 폭발우려도 있으므로 회수할 필요가 있다. 또 의료분야에서는 혈액내에 산소를 공급하는 인공폐에도 기체분리막이 이용되고 있다.

2. 액체분리

액체분리는 다공성막이나 비대칭 고분자막을 이용하여 액체혼합물을 분리하는 공정이며 투과증발, 투석, 액액추출등이 있다.

1) 투과증발(pervaporation)

(1) 투과증발법의 개요

투과증발(pervaporation)은 투과(permeation)와 증발(evaporation)의 합성어로 분리막을 사이에 두고 한쪽은 분리하고자 하는 혼합액체를 반대쪽은 펌프나 진공으로 감압시켜서 그 압력차에 의해 액을 투과시킴으로써 감압된 반대쪽에서는 액이 증발하여 분리되는 방법이다. 특히 이 방법은 액체분자가 선택적인 투과 증발막을 통해 확산해 나갈때 상변화 현상이 일어나기 때문에 기액평형이 적용되지 않는게 특징이다. 그리고 서로 다른 종류의 물질은 각각 다른 속도로 막을 통과하기 때문에 공급 흐름에서 낮은 농도인 물질이 투과막을 거치면서 매우 높은 농도로 될 수 있다. 그래서 막의 물리화학적 구조에 따라 효율적인 분리현상이 일어난다. 투과증발에 대한 연구는 1950년대 초 American Oil에서 Binning, Lee 와 공동연구자들에 의한 유기 혼합물의 분리가 최초이다. 그러나 상업화되지 못하다가 1980년대에 와서 경제적으로 분리공정에 사용이 가능한 막의 생산기술의 발전으로 실용화 단계에 이르렀다. 현재까지 투과증발의 가장많은 연구 분야는 물과 에탄올 혼합물에서 에탄올의 분리공정이다. 이것은 1970년대 오일쇼크이후 대체연료로 에탄올이 부각됨에 따라 그 중요성이 인식되었다.

(2) 투과 증발의 이론

투과증발의 기본 메카니즘은 고분자막의 공급쪽에서 액체 혼합물의 수작, 고분자막을 통한 확산, 고분자막의 기상쪽에서 통과한 물질의 탈착으로 요약할 수 있다. 고분자막에 있어 수작과 확산은 확산되는 성분의 이동속도에 영향을 미친다. 확산계수와 용해도는 조성의 영향을 크게 받는다. 막을 통한 물질이동의 추진력은 막 사이의 화학포텐셜의 차이 때문에 생기며 화학포텐셜은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_i = \mu_i^* + RT \ln a_i \quad (5-18)$$

여기서 μ_i^* 는 표준 화학퍼텐셜, a_i 는 막을 통과하는 성분의 활동도, R은 기체 상수이고 T는 절대온도이다.

i 성분의 활동도는 아래와 같이 표현된다.

$$a_i = \frac{P_i}{P_i^*} \quad (5-19)$$

여기서 P_i^* 는 i 성분의 포화 증기압이고 P_i 는 증기압이다. 다성분 혼합물에 있어서 성분활동도는 아래로 표시된다.

$$a_i = \gamma_i X_i \quad (5-20)$$

다성분 혼합물의 분리에 대한 투과증발 과정을 나타내기 위해서는 순수성분의 확산 단계에 대해서 생각해 보아야 되는데 이것은 Fick의 법칙으로 설명된다. 이것은 막을 통한 액체의 확산속도를 나타내는 식이다.

$$J_i = -D_i \frac{dc_i}{dl} \quad (5-21)$$

여기서 J_i 는 flux, D_i 는 확산계수, c_i 는 막 내에서의 농도이며 l 은 막을 통과하는 거리이다.

$$D_i = D_{i0} \exp(A_i c_i) \quad (5-22)$$

여기서 D_i 는 매우 옅은 농도에서 확산계수이고, A_i 는 투과물과 고분자의 상호작용에 대한 플라스틱 계수이다. .

만일 $A_i \leq 0$ 이라면 다음식으로 확산계수와 농도사이 관계식이 근사되어질수 있다.

$$D_i = D_{i0} (1 + A_i c_i) \quad (5-23)$$

5-22식을 5-21식에 대입해서 적분하면 다음식이 나온다.

$$J_i = \frac{D_{i0}}{A_i l} [\exp(A_i c_{if}) - \exp(A_i c_{ip})] \quad (5-24)$$

여기서 c_{if} 와 c_{ip} 는 각각 막에서 공급(feed)측과 투과된 측(permeate)의 성분 농도를 나타낸

다. 투과증발이 진공 상태 또는 감압된 상태에서 행해질 때 c_{ip} 는 0에 가까워진다. 그래서 위의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_i = \frac{D_{io}}{A_i l} [\exp(A_i c_{if}) - 1] \quad (5-25)$$

주어진 액체-고분자 계에서 확산계수 D_{io} , 플라스틱 계수 A_i 그리고 막의 두께 l 은 모두 일정한 값이다. 막의 공급측에서 침투 성분의 농도는 물질의 이동에 많은 영향을 준다. 따라서 위의 식을 보면 물질의 투과속도는 투과물질의 용해도 및 확산속도에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

투과증발의 물질의 선택도(α)는 아래의 식으로 나타내어진다.

$$\alpha_{A/B} = \frac{Y_A/Y_B}{X_A/X_B} \quad (5-26)$$

여기서 X_A, X_B 는 공급측(액상)의 몰분율이고, Y_A, Y_B 는 투과측(기상)의 몰분율이다.

(3) 투과증발법의 공업적 응용

투과증발은 약 5-15% 물을 함유한 알콜의 탈수과정에 가장 흔히 사용되며 이때 물 선택적인 막(water-selective membrane)이 사용된다. 물과 유기물은 각각 서로 다른 극성을 띠어서 막에 대한 투과성이 서로 다르기 때문에 분리될 수 있다. 발효액중 에탄올의 농도가 5-10% 정도로 낮을 때는 증류과정에 의해 에탄올을 농축할 수 있으나 에탄올의 농도가 95.6wt%에서는 물과 공비혼합물을 형성되므로 증류는 물을 제거하는데 비효과적이다.

두 번째 응용은 물에서 소량의 유기화합물을 제거하는 경우인데 유기화합물의 농도가 매우 낮다면 유기화합물의 제거가 물의 제거보다 경제적으로 유리하므로 용매선택적인 막(solvent selective membrane)을 사용하여 물에서 유기물을 분리한다. 용매선택적 막의 재질은 rubbery polymer, silicone rubber, polydimethylsiloxane, polybutadiene, natural rubber, polyether copolymers 등이다. 이런 분리막은 benzene, 1,1,2-trichloroethane, chloroform 같은 휘발 소수성 유기물에 대해 높은 선택도를 가진다.

투과증발을 생물공학에 응용한 예는 에탄올 또는 부탄올발효에서 발효용액부터 생성된 에탄올과 부탄올을 제거함으로써 알콜이 미생물의 성장을 억제하는 것을 막아 생산성을 증가시키는 것이다.

2) 투석 (dialysis)

(1) 투석의 개요

투석은 다공질막을 통하여 사용하여 용액으로부터 작은분자량을 가진 용질이 낮은 농도영역으로 확산하여 선택적으로 분리되는 공정이다. 이때 막을 통한 압력차는 거의 없으며 각 용질의 플럭스는 농도차에 비례한다. 분자량이 큰 용질은 대개 공급 용액 중에 잔류하는데 그 이유는 이들은 확산도가 낮고 또 작은 세공에서 이런 분자들의 확산은 크게 방해받기 때문이다. 투석중 대표적인 것이 전기투석(electrodialysis)이다. 전기투석은 전하를 띤 이온교환막을 이용하게 되는데 이 이온교환막은 양이온 또는 음이온교환기를 가진 얇은층으로 되어있어 양이온교환막은 양이온만 투과시키고, 음이온교환막은 음이온만 투과시켜 분리가 일어나게 된다.

(2) 투석의 이론

투석은 얇은 다공질막을 사용하여 용액으로부터 저분자량 용질이 저농도영역으로 확산하도록 하여 선택적으로 분리해내는 방법이다. 전형적 투석공정에서 농도구배를 그림13에서 나타내었다.

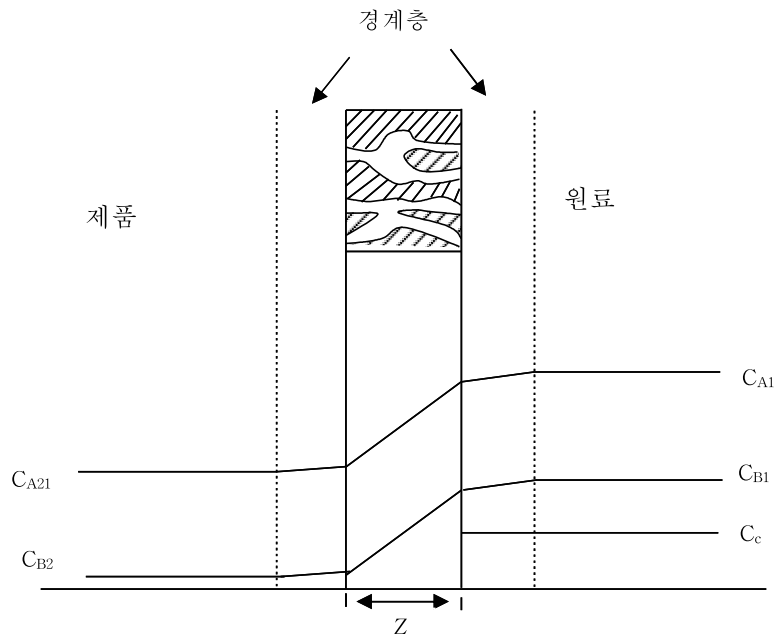


그림 5-13. 투석에서의 농도구배

막 중에서 C_A 와 C_B 의 값은 세공 유체중의 농도이지 막 전체 부피에 기준한 농도가 아니며, 콜로이드 입자는 세공 크기보다 크므로 세공내의 유체와 생성물에서 $C_C = 0$ 이다. 용질 플럭스에

관한 식은 물질전달에 대한 세 가지 저항(원료측 경계층의 저항, 막의 저항, 제품측 경계층의 저항)을 고려한다.

$$J_A = K_A(C_{A1} - C_{A2})$$

(5-27)

$$\frac{1}{K_A} = \frac{1}{K_{1A}} + \frac{1}{K_{mA}} + \frac{1}{K_{2A}}$$

(5-28)

공급물과 생성물에 대한 계수 K_{1A} , K_{2A} 는 유량, 물성, 막구조에 따라 다르며, 막에 대한 계수 K_m 은 유효확산도 D_e 에 비례하고, 막두께 Z 에 반비례한다.

(2) 투석의 응용

투석은 신장병이 있는 사람의 혈액으로부터 노폐물을 제거하는 인공신장에 가장 잘 응용되어 있다. 요소를 비롯한 저분자가 막을 통하여 외부 용액으로 확산되며, 단백질과 세포는 혈액 중에 잔류한다. 투석의 공업적 응용은 비스코오스법으로 인조견을 만들때 생성되는 헤미셀룰로오스 용액으로부터 가성소다를 회수하는 것이다. 또 투석법을 이용하여 천연 생성물이나 콜로이드용액으로부터 소금이나 설탕을 회수할수도 있다. 전기투석을 대규모로 응용할 때는 이온 선택성 막을 사용하며, 전위구배에 의해 막을 통한 이온의 이동을 촉진시킨다.