

Membrane Distillation의 전망

조 한 옥[†]· 신 우 철

삼양그룹중앙연구소
(1997년 5월 30일 접수)

The Prospect of Membrane Distillation

Han Wook Cho[†] and Woo Cheol Shin

Sam Yang Group R & D Center, 63-2, Hwaam-dong, Yuseong-gu, Taejeon, Korea
(Received May 30, 1997)

요 약 : 새로운 분리공정으로서 membrane distillation(MD)에 대하여 고찰하였다. 정밀여과에서 이용되고 있는 소수성막이 MD공정에 적합한 막소재가 된다. MD는 고온보다는 완화된 온도에서 100%에 가까운 선택도를 가지면서 기존의 수처리 공정을 간소화시킬 수 있는 가능성이 있다. MD는 막표면의 기공에서 증기-액체간의 상분리가 일어나는 분리원리를 이용한다. 공급액 및 투과액의 온도, 조성, 막의 젖음현상, 열 및 물질전달이 MD의 선택도와 플럭스를 결정할 수 있다.

Abstract: Membrane Distillation(MD) is reviewed as an application to new separation technology. Hydrophobic membrane which has been used to microfiltration is feasible material for MD process. MD has perfect selectivity under moderate temperature and is promised to simplify typical water treatment process. The principle of MD separation is phase transition by vapor-liquid interface at the pore of membrane surface. Feed and permeate temperature, composition, membrane wetting, heat and mass transfer phenomena affect the selectivity and flux of MD.

1. 서 론

현재 수처리 공정을 중심으로 이용되고 있는 분리막 기술에는 Ultra-filtration(UF), Nano-filtration(NF) 그리고 Reverse Osmosis(RO)등이 있다. 이들 분리 공정의 추진 구동력(driving force)은 압력차에 의한 것이며 이 압력차에 의해 투과 생산수가 diffusion, sorption 또는 viscous flow의 형태로 막표면을 선택적으로 통과하게 된다. 이와 같은 현상을 촉진시키기 위해서 친수성 재료를 막소재로 선택하거나 막표면을 친수화시켜 분리효율을 높이려는 연구가 많이 진행되어 왔다.

반면 Micro-filtration(MF)과 같이 입자의 크기에

따른 분리를 이용하는 막은 소수성 재료를 이용할 수 있다. 즉, Polytetrafluorethylene(PTFE)이나 Polypropylene(PP) 등은 물과 반발하면서 막표면의 오염도를 줄이며 내화학성이나 내구성이 뛰어난 재료들이다.

MF는 소수성재료라는 특성 때문에 수처리 공정에서 다른 novel membrane에 비해 밀도가 높은 dense membrane을 제조할 수 없으며 이보다는 기공이 큰 μm 단위의 크기로 적절한 입자를 여과하면서 수처리 공정의 전처리 단계로 활용된다. 하지만 MF membrane표면에 유입되는 공정수(process solution)를 hydraulic pressure가 아닌 thermal force를 이용하여 상분리하면 증발된 수분은 막의 기공을 투과하면서 응축되고, 공정수의 용존 입자는 어떤 크기

가 되더라도 막표면에서 잔여물로 남아 배출되는데 이러한 공정을 Membrane distillation(MD)이라고 한다.

2. MD의 역사

Membrane distillation(MD)에 대한 개념은 이미 1940년대에 여러 과학자들에 의해 제안되었다. 비휘발성 용매의 완전 분리가 MD의 고유 특성이며 기존의 증류법이나 압력을 이용해 조작되는 필터와는 달리 어떠한 입자도 상분리되는 용매에 동반되지 않는다는 것이다(no entrainment)[4].

1963년 미국의 Bodell이 MD기술을 U.S.patent에 등록시킨 이래 1967년에는 미국의 Weyl 및 Pactide가, 그리고 1969년에는 벨기에의 Henderyckt와 일본의 Sasakura Kia에 의해 흥미있는 분야로 발전하였다. MD를 이용한 최초의 체계적 학술논문은 “The SU Membrane distillation System”으로 1983년 스웨덴에서 출간되었다. 같은 해 일본 회사인 Nitto는 “Thermo pervaporation membrane separators”라는 내용의 기술 보고서를 제출하였다. 1984년에는 “Membrane distillation”라는 제목으로 2개의 논문이 미국의 Daniel Curtin, 독일의 Schneider와 Van Gassel에 의해 출간되었다.

Membrane distillation이라는 용어가 결정되기 전에는 Thermal pervaporation, Thermo pervaporation 또는 Transmembrane distillation이라는 용어로 지칭되었으나 1986년 로마에서 열린 “Workshop on Membrane distillation”에서 이들 용어를 표준화하고 Smolders와 Franken이 “Terminology for Membrane distillation”라는 내용을 집약하여 현재의 Membrane distillation이라는 용어로 통일된 것이다[5].

3. MD process의 개요

MD는 현재 널리 상용화되고 있는 RO공정과 달리 재질상 소수성 고분자를 분리막으로 이용하며 기공은 $0.1\mu\text{m}$ 내외, 두께는 $100\mu\text{m}$ 내외인 MF수준의 막이 적용될 수 있다[2].

$60\sim 90^\circ\text{C}$ 가 되는 수용액이 소수성막을 거치면 액상의 비휘발성 용매는 막표면에서 반발되고 막기공에서 일어나는 증기상(vapor phase)만이 기공을 투과하여 막투과부에서 곧바로 응축된다. 이 때, MD의

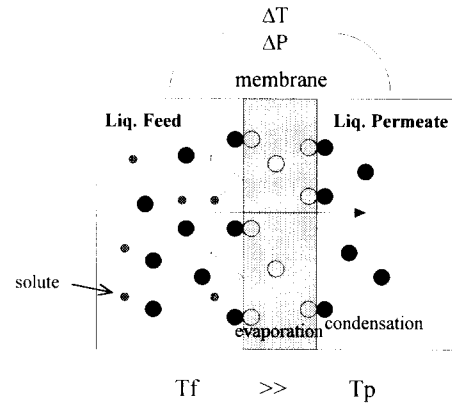


Fig. 1. Phenomenon of Membrane Distillation(MD).

추진 구동력은 온도차이며 동시에 증기압 차가 수반되어 상분리를 촉진시킨다(Fig. 1)[6]. 즉, distillation보다 낮은 온도와 reverse osmosis보다 낮은 압력의 운전 조건을 이용하므로 MD는 열병합 발전소나 모든 화학공정에서 발생하는 폐열을 이용하여 폐수 처리나 boiler 공급액의 탈염, VOC 제거등을 효과적으로 수행할 수 있다. 특히 일조량이 많은 도서 지역에서는 태양열을 이용한 MD의 해수담수화가 가능하다.

무엇보다도 MD에서 쓰이는 막재질이 소수성이므로 RO에서 쓰이는 친수성막과는 달리 공정수의 영향을 덜받아 chemical attack이나 fouling의 발생이 저하된다. 이는 전처리 공정이 필수적인 수처리 공정에서 전처리 과정을 간소화 시킬 수 있다는 것을 시사하는 것이다.

증발 공정에서는 multi-effect evaporation process가 효과적인 분리 조작을 수행하는데 문제는 여러 개의 effect 또는 stage를 설치하는 비용과 점유공간이 많이 든다는 것이다. 이에반해 MD는 공정수가 각각의 막기공을 거치는 multi-effect 효과가 있으므로 다공성의 막자체가 multi-effect evaporation이라 볼 수 있다. Fig. 2는 MD를 이용하여 해수를 담수화시키는 공정이다[3]. 고온의 해수와 응축된 증류수가 막을 사이에 두고 향류식으로 공급되어 미소한 온도차(5°C 내외)를 유지하게 된다. 이 장치는 열교환기를 이용해 해수와 담수간의 증발열을 부분적으로 회수할 수 있다.

앞서 열거한 MD의 특성은 한마디로 에너지 비용이나 관리 비용등이 기존 수처리 공정에 비해 절감된

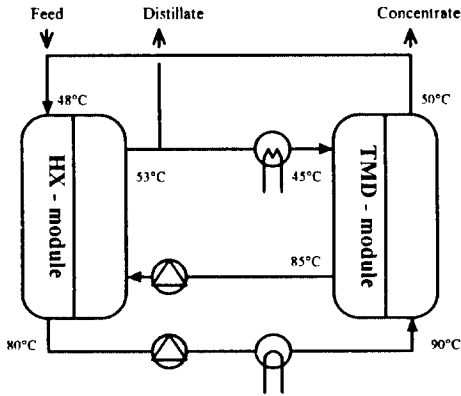


Fig. 2. Flow schematic of trans membrane distillation(TMD) with heat exchanger(HX) for recovery of heat of evaporation.

다는 것이다. 이와같은 MD의 장점을 요약하면 다음과 같다[4].

- 1) 이온, 거대 분자, 콜로이드, 세균 및 기타 비용매의 100% 분리
- 2) 기존 distillation process에 비해 낮은 온도의 운전 조건
- 3) 기존 membrane process보다 낮은 압력의 운전 조건
- 4) 공정수와의 상호작용이 미비하여 fouling이나 scaling현상 둔화
- 5) 공정수의 농도나 부하물량에 대한 영향이 미비
- 6) 공정 수행시 막에 요구되는 기계적 강도가 높지 않아도 됨
- 7) 전처리 공정을 간소화시킬 수 있으므로 점유공간이 줄어들음

4. MD의 형태와 막의 특성

MD process에서 증기압차를 발생시키는 방법에는 막투과부 쪽의 구성 형태에 따라 다음과 같이 분류된다[4].

- 1) DCMD(Direct Contact MD): 응축흐름(condensing fluid)이 막에 직접 접촉
- 2) AGMD(Air Gap MD): 공기의 간극(gap)에 의해 막으로부터 응축 표면(condensing surface)이 떨어져 있는 형태
- 3) SGMD(Sweep Gas MD), VMD(Vacuum MD):

공기 간극 이외에 sweeping gas, vacuum에 의해 응축표면이 막과 간극을 이루는 형태

DCMD는 장치가 덜 들고 조작성이 간단한 형태로서 수용액의 탈염이나 농축에 적용할 수 있는 가장 간단한 process이다. SGMD나 VMD는 휘발성 유기물이나 용존기체를 수용액으로부터 분리코자 할 때 적용된다. AGMD는 어느경우에나 적용될 수 있는 범용 형태이다.

이 외에 Osmotic Evaporation MD(OEMD)는 막양단의 온도를 동일하게 유지하면서 osmotic pressure에 의한 상분리로 물질을 분리하는 방법으로서 DCMD와 같은 형태를 가지면서 열에 민감한 식품이나 약품의 농축에 유리하다[6].

MD는 다공성의 소수성 membrane을 사용해야 하므로 PTFE(polytetrafluorethylene), PP(polypropylene), PVDF(polyvinylidenedifluoride)를 membrane의 소재로서 쓸 수 있다. MD의 membrane 기공크기는 100Å에서 1μm이며 기공은 필요한 플렉스를 투과시킬 수 있을만큼 커야한다. 반면 특정한 분리조작 조건 하에서 액체는 투과하지 못할만큼 막의 기공이 작아야 한다.

막기공을 통과하는 물 플렉스는 다음과 같이 표현된다.

$$N \propto \frac{\langle r^{\alpha} \rangle}{\tau \delta}$$

α 는 Knudsen diffusion일 경우 1, viscous flux일 경우 2가 된다. ϵ 은 porosity, τ 는 tortuosity, δ 는 membrane thickness이다.

위 식은 MD의 플렉스에 있어서 r 과 ϵ 가 매우 중요한 인자임을 보여준다. porosity는 membrane의 열전도 손실을 차단하기 위해서도 중요하다.

막표면에 분포된 기공 중 가장 큰 기공크기와 조작 조건 사이의 관계는 Laplace(Cantor)식으로 표현된다.

$$P_{liq} - P_{vapor} = \Delta P_{interface} < \Delta P_{entry} \\ = \frac{-2B\gamma_l \cos\theta}{\gamma_{max}}$$

B 는 geometric factor, θ 는 액체-고체의 접촉각이다. MD process에서 일반적으로 액체-고체 접촉각은 90° 이상이 된다. 물이 MD membrane과 접촉하는 경우 membrane에 침투할 수 있는 압력조건은

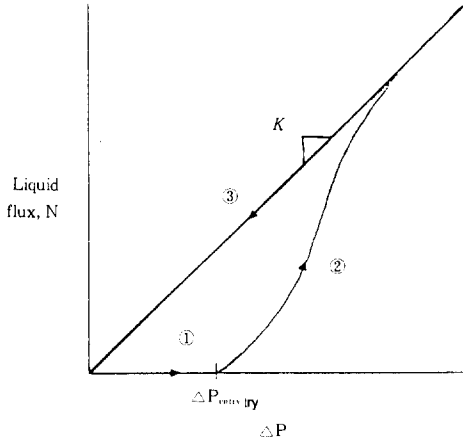


Fig. 3. Characteristic graph of liquid flux versus pressure drop in porous hydrophobic membranes.

185KPa(27psi)이다. 표면장력은 증기-액체 계면의 압력차를 유발하게 하며 $\Delta P_{interface}$ 가 ΔP_{min} 보다 크면 액체가 membrane 기공을 침투하여 막이 젖게 되므로 이 때는 막을 건조시키거나 세척하여 젖은 기공들이 재차 증기-액체 계면을 형성하지 않도록 해야한다. Fig. 3에 다공성의 소수성막의 압력차에 대한 투과액의 플럭스 관계를 나타내었다[7]. 압력이 증가하면서 $\Delta P_{interface}$ 까지는 액체가 membrane을 통과하지 못한다(1단계). 이 시점에서 액체가 가장 큰 기공을 통과하기 시작하면 압력이 ΔP_{min} 이상으로 증가하면서 액체가 상당수의 기공에 범람되어 투과액의 플럭스는 Darcy의 법칙인 $N = k \Delta P$ 를 따르게 된다. 막이 젖게되면 투과액의 순도가 떨어지게 되므로 MD 공정은 중단(shut down)되어야 한다. 실제로 이러한 젖음현상을 방지하기 위해 Schneider는 기공의 최대 허용 크기 반지름을 0.5에서 $0.6\mu m$ 으로 정의하였다.

5. 증기-액체(vapor-liquid equilibrium)

MD의 구동 추진력은 막 양단(배제부와 투과부)의 온도차에 의해 수반되는 증기압차이며 이는 막 투과부에 진공이나 sweep gas조작에 의해서도 발생할 수 있다.

kinetic 효과와 증기-액체의 접촉 곡률(curvature)

효과가 막표면 상의 증기-액체간의 평형상태와 무관하다고 가정할 때 접촉 곡률 효과의 측정은 Kelvin 식을 이용할 수 있다.

$$P^o = P^o_{\infty} \exp\left\{\frac{2\gamma_l}{rCRT}\right\}$$

P^o 는 순수 액체의 포화압력으로서 곡률의 반지름 r 을 갖는 convex liquid surface에 작용한다. P^o_{∞} 는 막표면에서의 순수 액체 포화압력이며 γ_l 은 액체의 표면장력이다. C 는 액체의 몰밀도, R 은 기체상수, T 는 온도가 된다. 물-증기가 계면을 이룰 경우 막의 기공이 $0.1\mu m$ 이면 접촉각은 180° 로서 표면에서 액적이 완전 반발하는 것이다. 이 때 P^o 와 P^o_{∞} 비는 $50^\circ C$ 에서 1.02에 불과하다.

VLE 식(또는 data)은 막표면에서의 각 성분별 부분 증기압을 결정하는데 적용시킬 수 있다. 순수 액체(용존된 공기 포함)에 대하여 부분 증기압은 해당 성분의 포화압력과 같으며 포화 압력 P^o 는 Antoine 식으로 결정할 수 있다.

$$P_i = P^o = \exp\left[A - \frac{B}{C+T}\right]$$

P^o 는 Pa단위, T 는 K단위이며 A, B, C 는 특정 성분의 고유 상수이다. 막 내부의 전압력 P 는 포화압력보다 크며 이는 용존된 (dissolved air)부분압에 작용하기 때문이다.

이성분계의 실제 혼합물에서는 부분압이 다음과 같이 결정된다.

$$P_i = y_i P = x_i a_i P^o$$

여기서 y_i 와 x_i 는 증기와 액체의 i 성분 몰분율이며 P 는 전압, P^o 는 순수성분 i 의 포화압력, a_i 는 용액의 i 성분에 대한 활동도 계수이다. 위 두식을 이용할 때 P 와 온도, 조성간의 복잡한 관계를 열 및 물질전달 식을 이용하여 수차의 반복해법으로 수정계산해야 되는 어려움이 있다.

근사해법으로서 Clausius-Clapeyron 식이 이러한 증기압-온도 관계를 단순화 시킬 수 있다.

$$\frac{\Delta P^o}{\Delta T} \approx \frac{dP^o}{dT} = \frac{P^o \Delta H_v}{RT^2}$$

여기서 P^o 는 포화압력, ΔH_v 는 물기화 잠열이다. 이 식은 $\Delta T < 15^\circ C$ 인 경우 상당한 오차가 발생한다.

다른 근사법은 이상적인 dilute solution에 대한 것

으로서 증기압-조성 관계를 다음과 같이 단순화 시킨 것이다.

$$P_i = P_i^o (1-x)$$

여기서 x 는 용질의 몰농도이다. 위 두 식을 결합하여 MD의 negative flux 현상을 설명할 수 있다. 즉, $P_{fi} - P_{fp} < 0$ 이면 negative flux가 발생하며 이는 feed 및 permeate에서의 osmotic pressure차 때문이다. 이를 이용하여 osmotic evaporation MD농축 공정에 사용할 수 있다.

결과적으로 순수한 permeate를 얻기 위한 direct contact MD는 positive flux를 얻기 위한 최소한의 온도차를 다음과 같은 식에서 구해야 한다.

$$\Delta T^o = \frac{RT^2}{\Delta H_v} \left(\frac{x}{1-x} \right)$$

실제로 MD process에서는 ΔT^o 가 1°C 또는 그 이하일 수도 있으므로 온도차에 대한 문제는 그리 고려할 만한 것이 못된다.

6. 열전달

MD process는 용액의 막 투과시 일어나는 물질전달 외에 막표면 경계(boundary) 부근에서 일어나는 열전달을 고려해야 한다

DCMD의 경우, Fig. 4를 통해 저항 및 온도 profile을 볼 수 있으며 이때 전체 열전달 계수는 다음과 같다.

$$H = \left[\frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_m + N\Delta H_v/\Delta T_m} + \frac{1}{h_p} \right]$$

N 은 몰플럭스, ΔH_v 는 물기화열이다. 따라서 막을 통과하여 전달되는 전체 열량은 다음과 같다.

$$Q = H\Delta T$$

위식은 경계층의 저항을 최소화 해야 하는 것이 중요함을 나타내고 있다. 전체 열전달 저항에 대한 경계층의 저항의 정도는 temperature polarization coefficient로 측정할 수 있다.

$$\theta = \frac{T_{fm} - T_{pm}}{T_f - T_p}$$

설계가 잘된 MD system은 물질전달제한을 받는다. θ 는 1로 수렴해야 하며 실제로는 0.4~0.7 범위

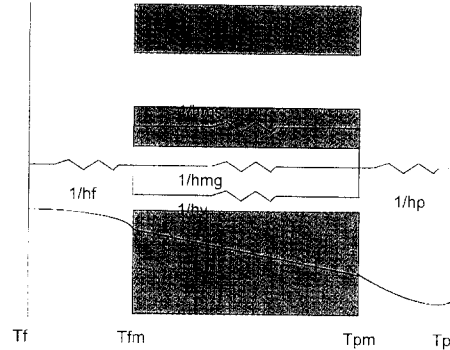


Fig. 4. Heat transfer resistances in MD.

에 있으면 system의 설계가 양호하게 되었다고 말할 수 있다(θ 가 0으로 수렴하면 열전달 제한).

VMD인 경우는 temperature polarization coefficient가 다음과 같다.

$$\theta = \frac{T_f - T_{fm}}{T_f - T_{sat}}$$

T_{sat} 은 투과부에서 발생하는 압력에 상응하는 feed의 평형온도이다. θ 가 0으로 가면 물질전달 제한을 받는 영역이며 1로 가면 열전달의 제한을 받게되어 DCMD와 반대의 경향을 보인다.

7. 물질전달

Fig. 5는 electrical analog에 의한 물질전달의 경로를 나타낸 것이다. 농도 분극은 물질전달에 대한 저항이 경계층 뿐 아니라 막표면에서의 용질 농축이 막을 순간적으로 젖게 할 수 있기 때문에 상당히 주의할 기울일 필요가 있다.

feed side의 경계층에 대한 물질수지는 몰 플럭스 N , 물질전달계수 k_f , 용액농도 x 간의 관계를 고려하여 여러구간에서 적용될 수 있으며 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{N}{k_f C} = \ln \left[\frac{x_{fm} - x_p}{x_f - x_p} \right]$$

막을 투과하는 플럭스는 증기압차에 비례하므로 Darcy의 법칙에 따라

$$N = k\Delta P^o$$

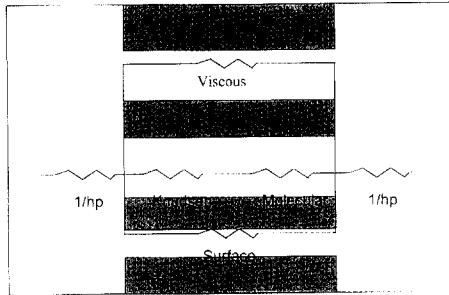


Fig. 5. Mass transfer resistances in MD.

k 는 막 내부의 온도, 압력, 조성의 함수이다.

ΔP^o 는 벌크한 조건보다는 막표면의 온도, 조성에 따른 복합적 함수이다. 따라서 열 및 물질전달 방정식이 동시에 풀려야 한다. 조건을 이상적으로 가정하면 해석적 해법이 가능하므로 이와 같은 조건을 탈염 공정에 적용할 수 있다. 이 경우 막 양 단의 압력은 막표면의 순수한 물의 포화 압력과 같다. 여기에 Clausius-Clapeyron 식을 적용시키면

$$N = k \frac{dP^o}{dT} \Delta T_m = k \frac{P^o \Delta H_v}{RT^2} \Delta T_m$$

P^o 와 T 는 막 내부의 평균값이며 막양단의 물질전달 계수가 $h_1 = h_2$ 이면 평균값을 벌크한 조건으로 대치하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = k' \Delta T_m$$

이러한 가정은 오차가 크므로 정확한 열 및 물질전달 속도(rate)를 구하려면 반복 계산 해법이 필요하다. 게다가 k 값이 정확하게 결정되어야 한다.

MD 모델에 따라 k 값 측정에는 기본적인 차이가 있다. Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 3개의 전달 메카니즘(surface diffusion 제외)에 의해 막을 투과하는 현상이 있다.

각 메카니즘에 대하여 결합된 저항들은 확산하는 분자들과 다른 분자 또는 기공의 벽 사이에서 충돌하면서 일어난다.

순수 기체에서 평균 자유 경로는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{k_B T}{P \sqrt{2} \pi \sigma^2}$$

k_B 는 Boltzman 상수, σ 는 분자의 충돌 지름이다. 포

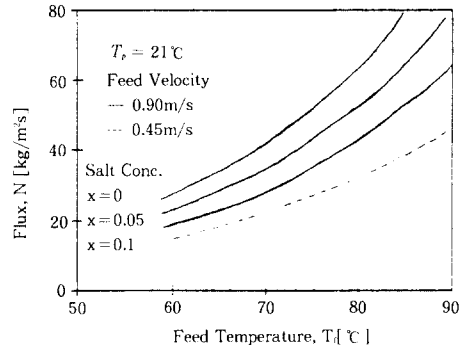


Fig. 6. DCMD flux versus feed temperature concentration and velocity.

화된 물은 60°C, 20kPa에서 평균 자유 경로가 0.7로서 분자-기공벽의 충돌비율이나 분자-분자 간의 충돌 비율은 비슷하다고 볼 수 있다. 또한 확산 메카니즘을 MD modeling시 고려해야 한다.

다공성 매체를 투과하는 플럭스의 일반 모델은 DGM(dusty gas model)이다. 이 모델은 Maxwell (1860년)에 의해 처음 도입된 것으로 다공성 매체의 확산을 고려할 때 적합하며 다음의 두가지 형태로 적용할 수 있다

$$\frac{N_i^D}{D_m^k} + \sum_{j=1}^n \frac{P_i N_j^D - P_j N_i^D}{D_{ij}} = \frac{-1}{RT} \nabla P_i$$

$$N_i^V = \frac{-P_i B_o}{RT \mu} \nabla P$$

N_i^D 는 diffusive flux, N_i^V 는 viscous flux이며 전체 플럭스는 $N_i = N_i^D + N_i^V$ 가 된다. P 는 전압, P_i 는 i 성분의 분압 μ 는 유체의 점도이다. effective diffusivity는 다음과 같이 정의된다.

$$D_{ij}^o = K P D_{ij}, \quad D_{ij}^k = k_{ij} \left(\frac{8RT}{\pi M_i} \right)^{1/2}$$

D_{ij} 는 일반 확산계수, M_i 는 i 의 분자량이다. $(8RT/M_i)$ 는 분자의 평균속도이며 K, k_{ij}, B_o 는 막의 기하형태와 막-분자의 상호작용에 좌우된다. MD process가 non-isothermal system인 반면 DGM은 isothermal flux에 대한 model이므로 조건설정에 차이가 있으나 열확산과 열증발(thermal transpiration)을 적용하면 DGM을 MD process에 적용시킬 수 있다. MD operation 영역에서는 T 대신 $T_{average}$ 를 DGM에 대입하여 적용할 수 있다.

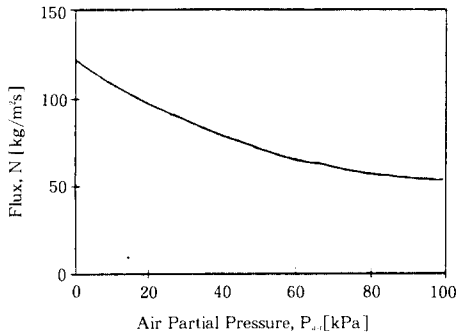


Fig. 7. DCMD flux versus air partial pressure in the membrane with $T_i = 90^\circ\text{C}$ and $T_p = 50^\circ\text{C}$.

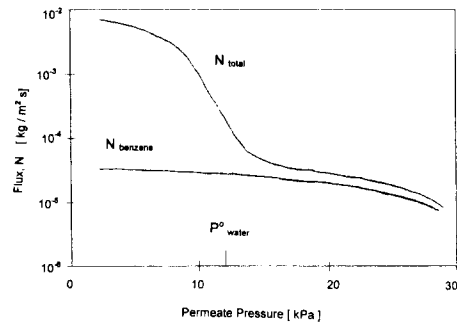


Fig. 8. VMD flux versus vacuum pressure with 1000ppm benzene in water and $T_i = 50^\circ\text{C}$.

8. MD의 응용

1) DCMD : DCMD는 탈염공정에서 관심있게 연구되어 온 분야로서 유스농축, 혈액농축 및 폐수처리 등에도 적용할 수 있다. Fig. 6과 7은 MD 막의 물 플럭스 N의 관계를 나타낸 것이다[8]. 이들 관계로부터 feed의 온도, 농도, 유속(경계층 저항), 막 내부의 분자확산저항(molecular diffusion resistance)이 되는 부분 공기압(partial air pressure)이 물 플럭스에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 실제 DCMD는 1964년 Weyl에 의해 플럭스가 $1\text{kg/m}^2\text{-hr}$ 인 실험결과를 얻었는데 이는 RO의 플럭스에 비해 수십분의 일에 불과한 것이었다. 그러나 막 제조가 진보된 기술로 구현되면서 Gore나 Enka 회사에서 상용화 수준의 MD(플럭스 $75\text{kg/m}^2\text{-hr}$)를 개발하였다. 이 성능결과에서 배제율은 100%에 근접하여 RO에서는 볼 수 없는 우수한 결과를 보인 것이다.

2) VMD : VMD는 pervaporation과 유사한 공정이다. 기본적인 차이는 분리하는 membrane의 작용에 있다. VMD membrane은 다공성 및 소수성을 가지므로 증기-액체 계면을 형성하게 한다. VMD의 선택도는 부분적으로 Knudsen-diffusion에 의하며 대부분은 membrane-solution 계면에서 작용하는 증기-액체 평형조건에 의해 결정된다. 반면 pervaporation은 비공성(dense)의 막을 이용하며 선택도는 membrane 재질에 대한 각 성분의 용해도와 확산도에 의해 결정된다. 이러한 차이로 인해 VMD는 pervaporation보다 많은 플럭스를 얻을 수 있다. feed 온도, 유량, 비휘발성 용질의 농도가 DCMD와 같은 동일인자가 되며 Fig. 8에 투과부 압력에 따른 전체

플럭스와 휘발성 오염원(1,000 ppm benzene)의 플럭스를 나타내었다[9]. 투과압이 물의 증기압보다 커지면 전체 플럭스는 벤젠의 플럭스와 유사하여 결과적으로 농축된 벤젠을 얻을 수 있다. 또한, VMD는 다른 MD 형태에 비해서 열전도에 의한 손실이 작은 것이 특징이다.

3) 발전소 용수처리 : 발전소에서 용수의 수질은 매우 중요하다. 이는 발전소 설비의 부식형성 및 scale 형성을 제어하는데 핵심요소가 되기 때문이다. 화력 발전소의 경우 보일러 공급용수의 수질은 ppb(part per billion)단위로 조절되어야 하며 원자력 발전소의 경우는 방사성 오염원이 문제가 되므로 용수의 수질은 ppt(part per trillion) 단위의 범위를 요한다. 원자력 발전소의 용수 탱크 수리는 매우 위험한 작업이며 비용이 많이 든다. 따라서 최근 이들 원자력 발전소에서는 RO나 Ion exchange가 용수처리 공정으로 부각되고 있다. 스웨덴의 Radzero 회사는 이에대한 새로운 공정기술로서 Membrane distillation을 개발하여 실험적으로 우수한 결과를 나타내었다. MD process는 용수처리 공정을 RO공정이나 Ion exchange 공정에 비해 상당히 간소화시킬 수 있는 가능성을 제시하였으며 Table 1에 실험결과를 나타내었다[5].

9. 결 론

종래 막분리 기술은 상분리를 수반하지 않는다는 공정의 특성으로 인해 에너지 절감면에서나 운전비용 면에서 유리한 입장을 취해 왔다. 물론 태동기의 막

Table 1. MD에 의한 원자력 발전소 폐수처리 결과

(Membrane Distillation의 permeate capacity = 0.5~36L/hr)

Type of contamination	Amount	Method	Detection	Result	Test by
Bacteria	14000 (after 7day)	Membrane filter count	-	0	National Bacteriologic Laboratory, Stockholm
Chlorine	3.4 mg/l	<1 μ g/l	<0.01 mg/l	0	Water Protection Ass of South West Finland
Salt water	31000 ppm	Ion chromatgraphy	<1ppm	0	VBB Viak Stockholm
Trihalomethanes	1000 μ g/l	Gas chromatgraphy	<1 μ g/l	0	University of Turku, finland
Radon	380 Bq/l	Alfa detection	<4Bq/l	0	Swedish Radiation Protection institute
Cesium Strontium Plutontium radium	2.4Bq	Lithium Drifted Germanium Detector	0.1 Bq	0	Radiation Physics Department, Univ. of Lund

분리 공정은 그 이용사례 폭이 좁을 수 밖에 없었으나 막소재, 막모듈 및 시스템이 함께 발전하면서, 무엇보다도 고갈되는 수자원의 확보 측면에서 국내외적으로 저변확대가 진행되고 있는 실정이다.

이와 같은 추세에서 Membrane Distillation은 종래 막분리 공정이 가지고 있는 선택도의 향상과 막분리 단위기술만으로 해결하기 힘든 공정조건을 극복할 수 있는 화학공학상의 새로운 단위조작(unit operation)이 될 수 있다.

아직 MD 공정의 안정적 운전이 실제로 수행된 사례가 드물지만 종래 막분리 기술의 변천사와 같이 소재, 모듈, 시스템의 발전이 병행되면 위와 같은 전망을 밝게 해주리라 본다.

References

1. M. Soltanieh and W. N. Gill, Chem. Eng. Commun. 12, 279(1981).
2. M. C. Porter, "Handbook of industrial membrane technology", Noyes publications, Park Ridge, NJ (1990).
3. Enka/Membrana, Trans Membrane Distillation, product literature, (1984).
4. K. W. Lawson and D. R. Lloyd, J. Membrane Sci. 124,1 (1997).
5. HVR Technical report, "Absolutely pure water", Sweden(1997).
6. W. Kunz, A. Benhabiles, and R. Ben Aim, J. Membrane Sci. 1221, 25(1996).
7. C. Gostoli and G. C. Sarti, Sep. Sci. Technol., 22, 855(1987).
8. R. W. Schofield, A. G. Fane, C. J. D Fell and R. Macoun, Desalination, 77, 279(1990).
9. G. C. Sarti, C. Gostoli and S. Bandini, J. Membrane Sci. 80, 21(1993).