

수처리용 분리막 모듈 설계 및 오염 방지

(서울산업대학교 화학공학과)

정 건 용

수처리용 분리막 모듈 설계 및 오염 방지

서울산업대학교, 화학공학과
정 건 용

Abstract

Reverse osmosis(R/O), ultrafiltration(UF) and microfiltration(MF) processes are widely used for water treatment. In the seminar, characteristics of typical membrane modules including tubular, hollow fiber, plate and frame and spiral wound types will be discussed in detail. The design methods based on hydrodynamics for hollow fiber and spiral wound modules will be introduced analytically. Concentration polarization (CP) and membrane fouling mechanism as well as the techniques for CP reduction will be handled. The CP control techniques contain chemically modified membrane surface, pretreatment of feed water, operation of low trans-membrane pressure, chemical or physical cleaning methods and artificial production of various fluid turbulences near the membrane surface, etc. In especially, the recent commercial membrane modules for CP control including module rotation, vibration and Taylor or Dean vortex system will be introduced and discussed in detail.

수처리용 분리막 기술에는 주로 역삼투 (Reverse Osmosis, R/O), 한외여과 (Ultrafiltration, UF) 및 정밀여과 (Microfiltration, MF) 공정등이 널리 사용되고 있으며 분리막 선정시 고려하여야 할 중요인자를 나열하면 다음과 같다: (1) Packing 밀도, (2) 모듈 제조비용, (3) 세척 용이도, (4) 운전 비용 (막교체, 에너지 소비, 화공약품), (5) 모듈내 유체 이동현상 (유체 정체영역 회피). 그러나 이상의 모든 조건을 만족하는 모듈을 구하기는 매우 힘드므로 공정 특성상 상대적으로 중요한 인자를 고려하여 모듈을 선택하여야 한다. 또한 상용화된 수처리용 분리막 모듈의 상대적 특성과 R/O, UF 및 MF 등의 용도별 적용 가능성을 요약하여 다음의 표에 나타내었다.

상용 분리막 모듈 특성 비교

	Tubular	Hollow Fiber	Plate and Frame	Spiral Wound
Packing 밀도	불량	극히 우수	양호	우수
제조비용/면적	고가	저가	고가	중/저가
막교체 비용	고가	중/고가	저가	고가
에너지 소모량	다량	소량	보통	보통/소량
모듈내 체류량	다량	소량	보통	보통
오염도	소량	다량	보통	다량
세척 용이도	극히 우수	양호/불량	우수	불량

분리막 모듈의 용도별 비교

	Tubular	Capillary (내압형)	Hollow Fiber (외압형)	Plate and Frame	Spiral Wound
R/O	+	-	+	+	++
UF	++	+	-	++	+
MF	++	+	-	+	-

++ : very suitable

+ : suitable

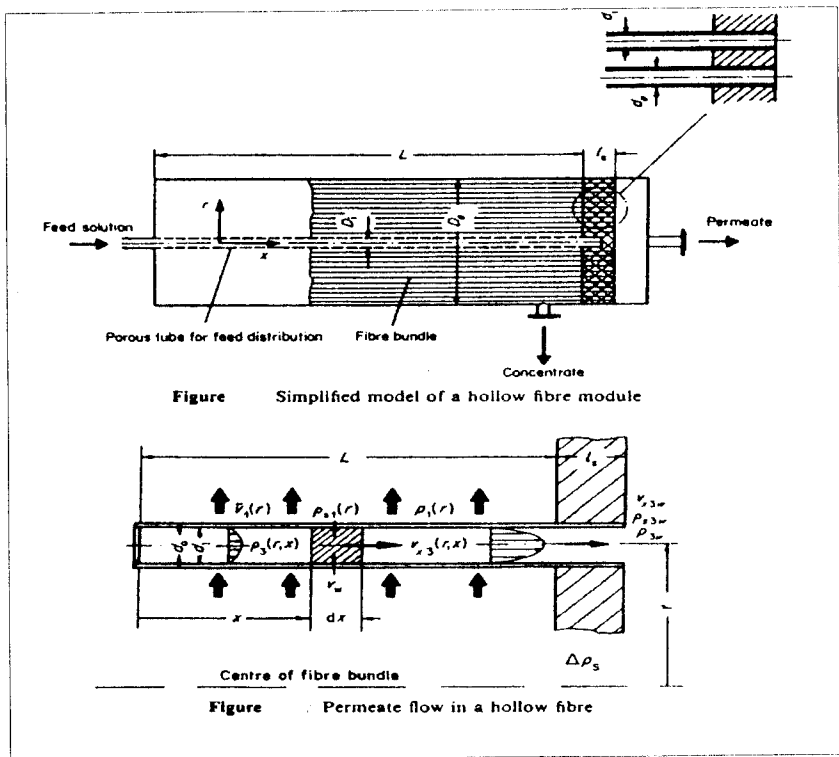
- : not suitable

모듈설계

1. Hollow Fiber Module

(Rautenbach, R., "Membrane Processes", John Wiley & Sons, 1989.)

- 가정: - 농도분극화 무시 (Low Permeability)
 - 중공사막 균일분포
 - 원료측 압력, 농도 및 속도 : 반경 방향 (r) 만의 함수
 - Solution-Diffusion Model 적용



- 투과액측 압력분포 (Hagen Poiseuille Equation) :

$$\frac{dp_3}{dx} = - \frac{32\mu v_{x3}(x)}{d_i^2} \quad (1)$$

- 평균 투과유속 (Solution-Diffusion Model) :

$$\frac{dv_{x3}}{dx} = \frac{4d_e v_w}{d_i^2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_w(x) &= A[p_1(r) - p_3(x) - b(\rho_{s1}(r) - \rho_{s3}(x))] \\ &= A[p_1(r) - p_3(x) - bR\rho_{s1}(r)] \end{aligned} \quad (3)$$

where $\rho_{s3} = (1-R)\rho_{s1}$

$$V_w = \int_{x=0}^{x=L} v_w(x) \pi d_e dx = \frac{\pi}{4} d_i^2 \overline{v_{x3w}} \quad (4)$$

- Potting 부위 압력강하

$$\Delta p_s = p_{3L} - p_{3w} = \frac{32\mu l_s \overline{v_{x3w}}}{d_i^2} \quad (5)$$

- 경계조건: (i) $x=0$: $\frac{dp_3}{dx} = 0$ (6-1)

(ii) $x=L$: $p_3 = p_{3L}$ (6-2)

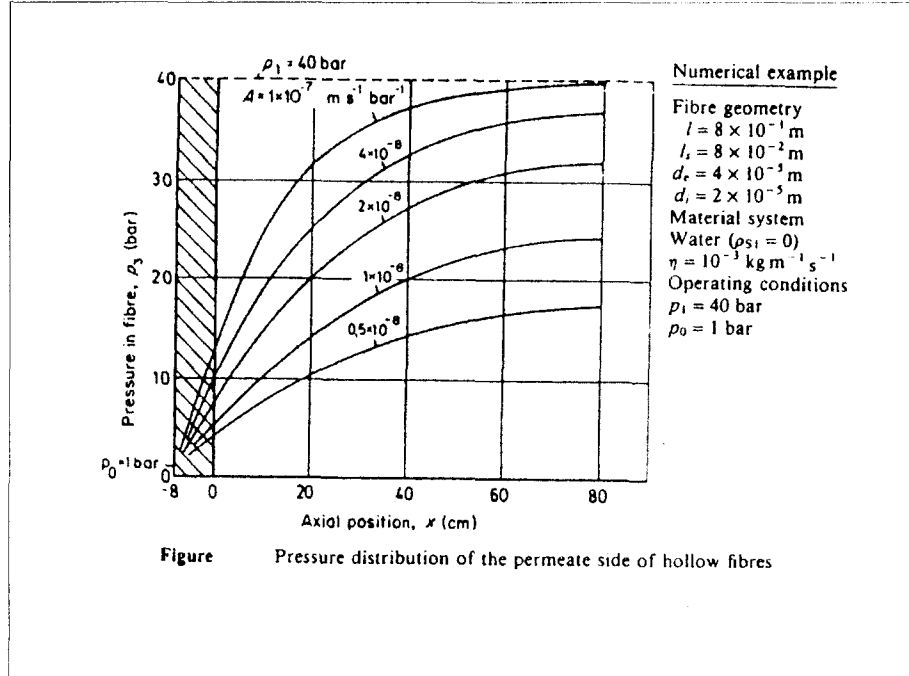
식 (1) 과 (3) 으로부터

$$\frac{d^2 p_3}{dx^2} = - \frac{128\mu d_e A}{d_i^4} (p_1 - p_3 - bR\rho_{s1}) \quad (7)$$

식 (7) 과 경계조건 (6-1/2) 을 사용하여 적분하면,

$$\frac{p_1 - p_3(x) - bR\rho_{s1}}{p_1 - p_{3L} - bR\rho_{s1}} = \frac{\cosh(Hx)}{\cosh(HL)} \quad (8)$$

where $H = \sqrt{\frac{128\mu d_e A}{d_i^4}}$



식 (3) 과 (8) 를 사용하여 식 (4) 를 적분하면,

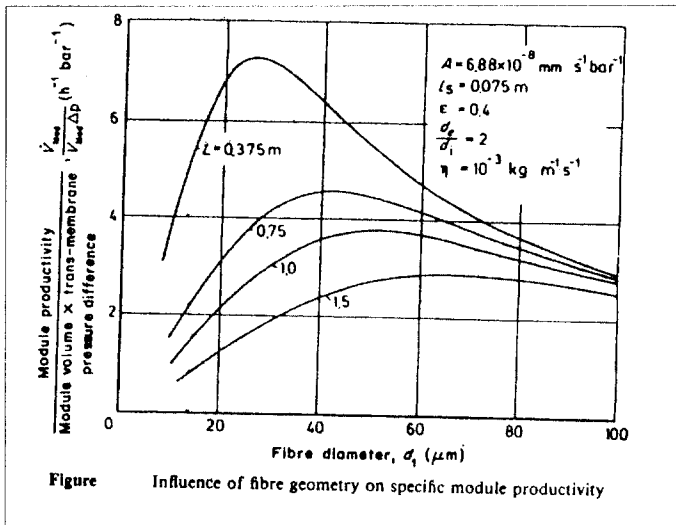
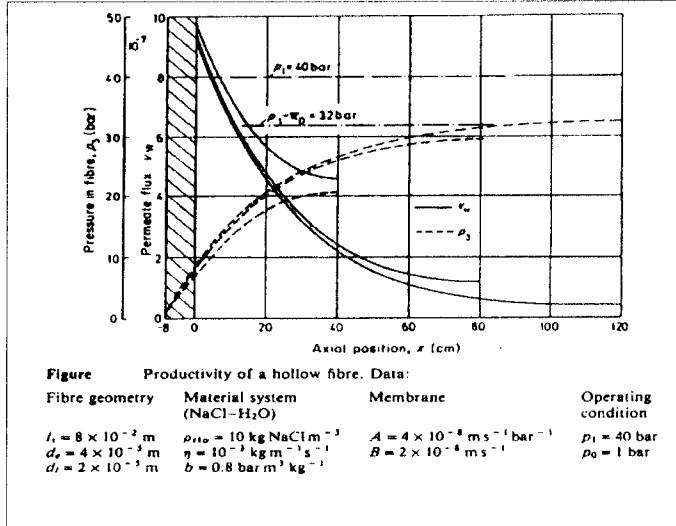
$$V_w = \frac{\pi d_e A \tanh(HL) [p_1 - p_{3L} - bR\rho_{sl}]}{H} \quad (9)$$

식 (9)에 식 (5)를 대입하면,

$$V_w = \frac{\pi d_e A \tanh(HL) [p_1 - p_{3w} - bR\rho_{sl}]}{H [1 + Hl_s \tanh(HL)]} \quad (10)$$

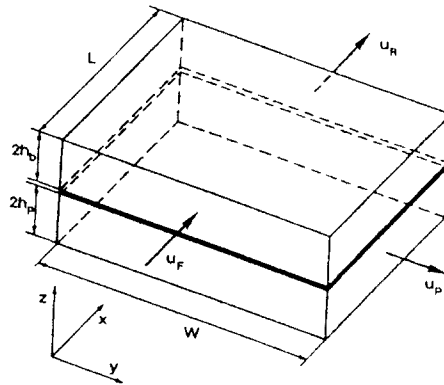
- 단위부피 및 운전비용 (압력강하) 에 대한 투과선속, SP

$$SP = \frac{4(1-\epsilon)}{d_e} \frac{A\Delta P}{HL} \frac{\tanh(HL)}{1 + Hl_s \tanh(HL)} \quad (11)$$



2. Spiral Wound Module

(Evangelista, F., Optimal Design and Performance of Spiral Wound Modules, Chem. Eng. Comm., 1988, 72, 69–81, 83–94.)



(1) 투과액 층

$$\frac{\partial u_p(x, y)}{\partial y} = \frac{J_v(x, y)}{h_p} \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_p(x, y)}{\partial y} = \frac{A_p \mu}{8h_p^2} u_p(x, y) \quad (13)$$

- Net Driving Force (농도분극화 영향 포함)

$$\Delta P_e(x, y) = \frac{[P_b(x, y) - P_p(x, y) - \Delta\pi_F]}{1 + l_p \Delta\pi_F / k} \quad (14)$$

$$\frac{dP_p}{dy} = - \frac{d\Delta P_e}{dy} \quad (15)$$

$$J_v = l_p \Delta P_e \quad (16)$$

식 (14), (15)를 식 (12)에 대입하면,

$$-\Delta P_e(x, y) d\Delta P_e = \frac{A_p \mu}{8h_p l_p} u_p(x, y) du_p \quad (17)$$

$$u_p(x, y) = \sqrt{\frac{8h_p l_p}{A_p \mu} [\Delta P_e(x, 0)^2 - \Delta P_e(x, y)^2]}^{1/2} \quad (18)$$

식 (17)을 식 (12)에 대입하여 적분하면,

$$\Delta P_e(x, y) = \Delta P_e(x, W) \frac{\cosh(\alpha_p y)}{\cosh(\alpha_p W)} \quad (19)$$

$$\text{where } \alpha_p = \sqrt{\frac{A_p \mu l_p}{8h_p^3}}$$

(2) 원료액 측

투과액 측과 마찬가지로,

$$\frac{d\Delta P_e(x, W)}{dx} = -\frac{A_b \mu}{8h_b^2} u_b(x, W) \quad (20)$$

$$\frac{du_b(x, W)}{dx} = -\frac{J_v(x, W)}{h_b} = -\frac{l_p \Delta P_e(x, W)}{h_b} \quad (21)$$

$$\Delta P_e(x, W) d\Delta P_e = \frac{A_b \mu}{8h_b l_p} u_b(x, W) du_b \quad (22)$$

$$u_b(x, W) = \left\{ u_F^2 - \frac{8h_b l_p}{A_b \mu} [\Delta P_e(x, W)^2 - \Delta P_e(0, W)^2] \right\}^{1/2} \quad (23)$$

$$\Delta P_e(x, W) = \frac{\beta \Delta P_{eF}^2 \cosh(\alpha_b x) - u_F^2 \sinh(\alpha_b x) / \beta + \Delta P_{eF} u_F e^{-\alpha_b x}}{\beta \Delta P_{eF} + u_F} \quad (24)$$

$$\text{where } \alpha_p = \sqrt{\frac{A_b \mu l_p}{8h_b^3}}, \quad \beta = \sqrt{\frac{8h_b l_p}{A_b \mu}} \quad \text{and } \Delta P_{eF} = \Delta P_e(0, W)$$

(3) 단위부피당 투과유속 (S)

$$S = \frac{\int_0^L \int_0^W l_p \Delta P_e(x, y) dx dy}{LW(h_b + h_p + h_m + h_{ms})} \quad (25)$$

식 (23)을 식 (18) 및 (24)에 대입하고 적분하면,

$$S = \frac{\tanh(\alpha_p W) [\beta \Delta P_{eF}^2 \sinh(\alpha_b L) + u_F^2 \{1 - \cosh(\alpha_b L)\} / \beta + \Delta P_{eF} u_F (1 - e^{-\alpha_p L})]}{\alpha_p \alpha_b L W (\beta \Delta P_{eF} + u_F) (h_b + h_p + h_m + h_{ms})} \quad (26)$$

(4) 최적형태

원료측의 유속을 일정하다고 가정하면 (Low Permeability),

$$S = \frac{l_p \tanh(\alpha_p W) (\Delta P_{eF} - A_b \mu u_F L / 16 h_b^2)}{\alpha_p W (h_b + h_p + h_m + h_{ms})} \quad (27)$$

- 최적 원료 및 투과액측 Channel 높이:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial h_p} \right)_{W, L} = 0, \quad \left(\frac{\partial S}{\partial h_b} \right)_{W, L} = 0$$

$$h_p = \left[\frac{3}{32} A_p \mu l_p (h_b + h_m + h_{ms}) \right]^{1/4} W^{1/2} \cong \left[\frac{3}{32} A_p \mu l_p h_b \right]^{1/4} W^{1/2} \quad (28)$$

$$h_b = \left[\frac{5}{16} \frac{A_b \mu u_F L (h_p + h_m + h_{ms})}{\Delta P_{eF}} \right]^{1/3} \cong \left[\frac{5}{16} \frac{A_b \mu u_F L h_p}{\Delta P_{eF}} \right]^{1/3} \quad (29)$$

식 (26)과 (27)은 연립으로 풀면,

$$h_p^o = \left(\frac{3A_p \mu l_p W^2}{32} \right)^{3/11} \left(\frac{5A_b \mu u_F L}{16\Delta P_{eF}} \right)^{1/11} \quad (30)$$

$$h_b^o = \left(\frac{3A_p \mu l_p W^2}{32} \right)^{1/11} \left(\frac{5A_b \mu u_F L}{16\Delta P_{eF}} \right)^{4/11} \quad (31)$$

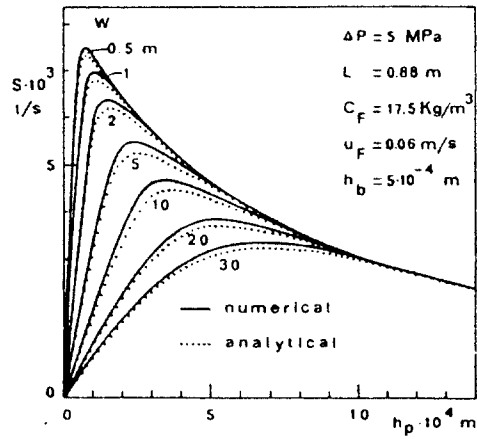


FIGURE Specific permeation rate of a spiral wound module with constant permeate spacer.

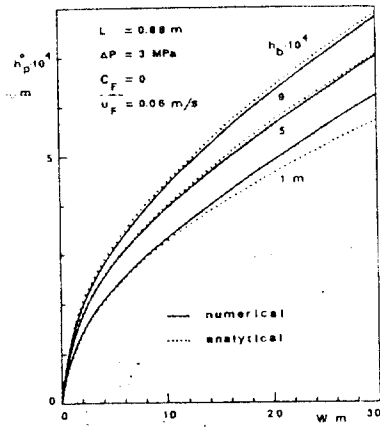


FIGURE Optimum values of half of permeate channel height.

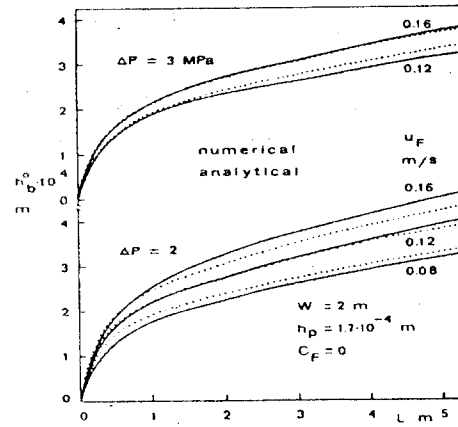


FIGURE Optimum values of half of brine channel height.

분리막 오염방지 기술

- 농도분극화 (Concentration Polarization)

분리막은 혼합물 중에 특정성분만을 선택적으로 통과시키며 나머지 물질은 배제시켜 분리 또는 농축시킨다. 그러나 분리막에 의하여 제거된 물질의 확산계수는 작아서 막 표면에 축적되며 더 나아가 용질층 (cake) 을 형성할 수도 있으며 이 같은 현상을 소위 농도분극화라 한다. 용질의 축적은 국부적으로 용액의 물리적 성질을 변화시키며 삼투압의 증가와 물질 경계층내에 유체 역학적 저항을 증가시키므로 분리 성능을 급격히 저하시킨다. 그러나 운전조건의 조절이나 물리적인 세척 방법으로 제거할 수 있으므로 가역적 현상이라 할 수 있다.

- 막오염 (Membrane Fouling)

용질이나 현탁액의 입자가 분리막의 표면이나 분리막 세공 내부에 축적 또는 흡착되어 분리막내의 세공의 단면적을 감소시키거나 완전히 막음으로서 분리 성능을 감소시키는 현상이 이른바 분리막 오염 현상이다. 막오염은 비가역적 현상이므로 용액 취급방법등 운전조건을 변화시켜 단시간 동안 투과유속을 다소 증가시킬 수는 있지만, 일단 오염되면 최초의 상태로 환원시킬 수 없다.

- 농도분극화 및 막오염 방지기술

농도분극화 및 막오염 현상은 분리막을 크게 오염시킴으로 분리 성능을 급격히 격감시키며 초기 투과유속에 2 내지 10% 수준까지 감소될 수도 있다. 따라서 농도분극화 및 분리막 오염을 감소시키는 방법을 연구중에 있으며 요약하면 다음과 같다.

- (1) 분리막 표면을 화학적으로 개질 처리 (친수성화 <----> 친유성화)
- (2) 원료용액을 전처리하여 고형함유량을 감소 또는 희석시키는 방법
- (3) 운전압력을 너무 높지 않게 적절하게 유지하는 방법
- (4) 주기적으로 분리막을 역세척하거나 화학적 또는 물리적 세척 방법
- (5) 유체역학적 불안정성 (난류, Taylor, Dean 와류등)

그러나 근본적으로 농도분극화 및 막오염 저항을 해결할 수 없으므로 각 공정별 특성에 따라서 분리성능의 향상을 추구하고 있는 실정이다.

- 투과모델

(1) 압력지배 모델 (Pressure Controlled Model) : $J \propto \Delta P$

- Hagen-Poiseulle Equation

$$J = \frac{\epsilon d^2 \Delta P}{32 \mu L}$$

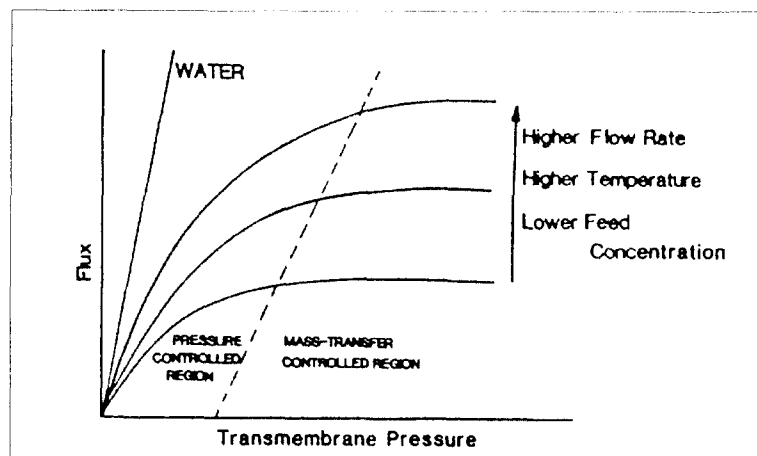
- Kozeny-Carman Equation

$$J = \frac{\lambda \epsilon^3 \Delta P}{(1 - \epsilon)^2 S^2 \mu L}$$

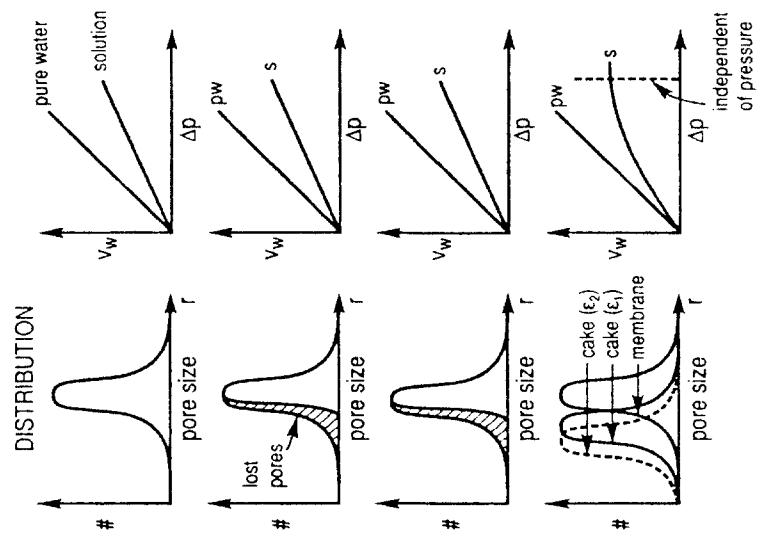
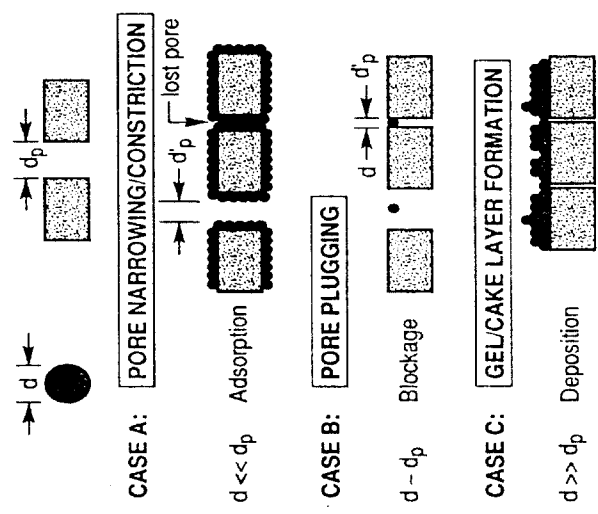
(2) 물질전달 모델 (Mass Transfer Controlled Model) : $J \propto k$

$$J = k \ln \frac{C_g}{C_b}$$

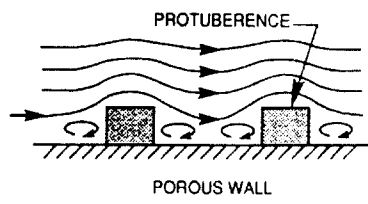
$$Sh(= \frac{kd}{D}) = A(Re)^a (Sc)^b (\frac{d}{L})^c$$



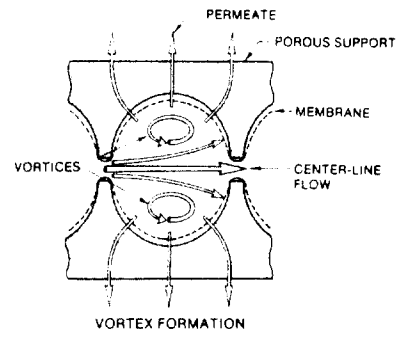
FOULING SCHEMATICS



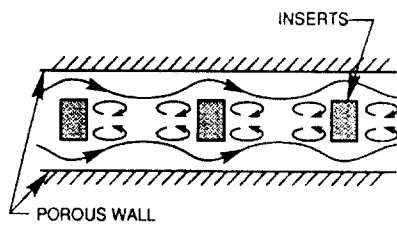
(a)



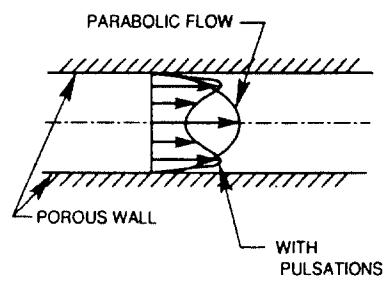
(b)



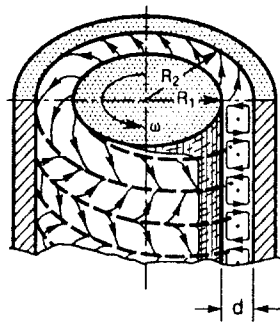
(c)



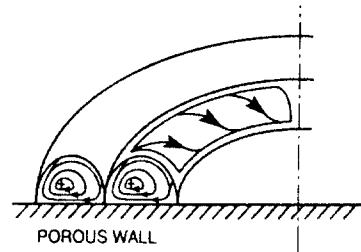
(d)



(e)



(f)



Commercial Module for CP & Fouling Control

Tubular :

- Static Mixer
- Sponge Cleaning Ball
- Backwashing (Liquid, Gas)

Hollow Fiber / Capillary :

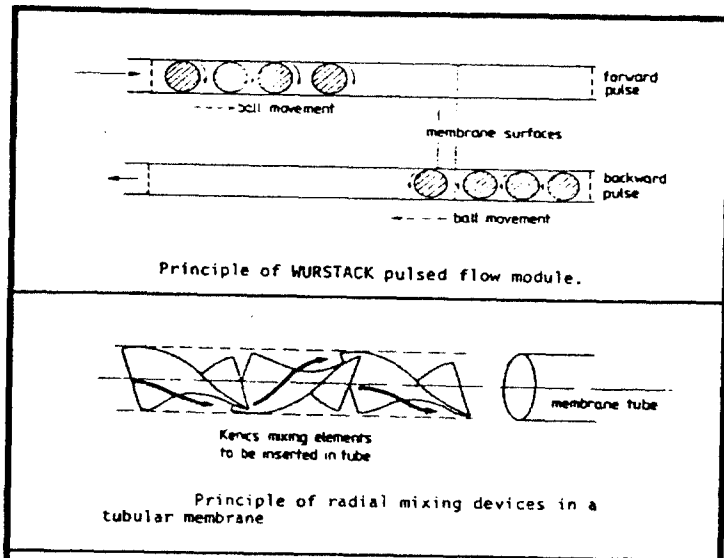
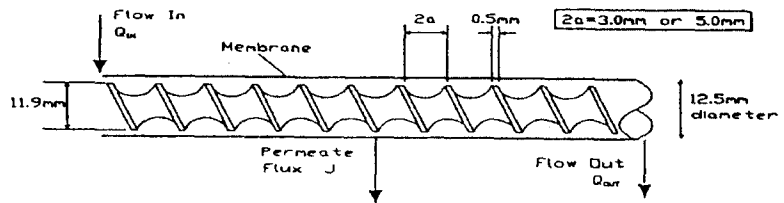
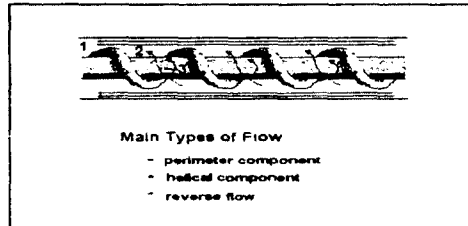
- Backwashing (Liquid, Gas / Memtec)

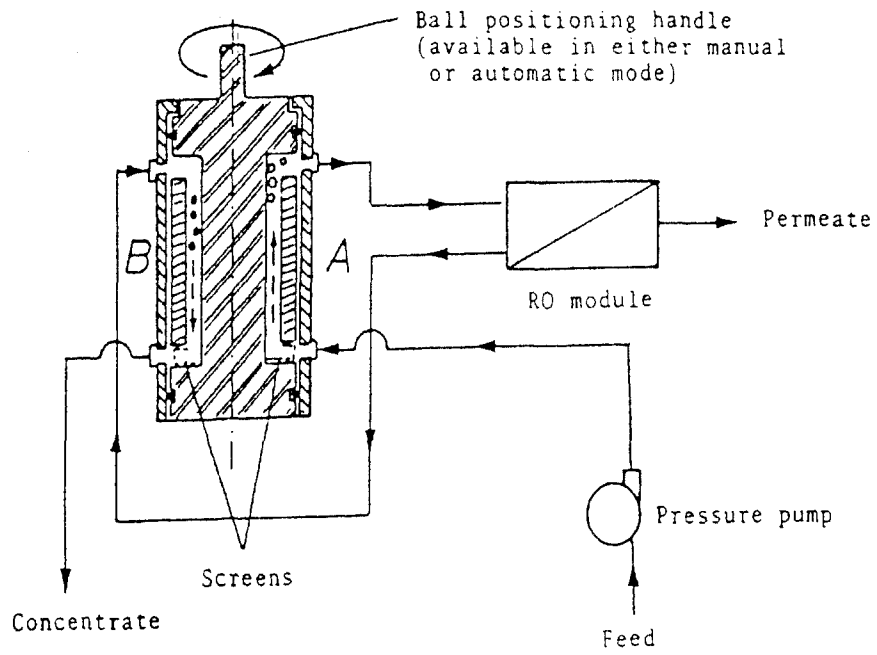
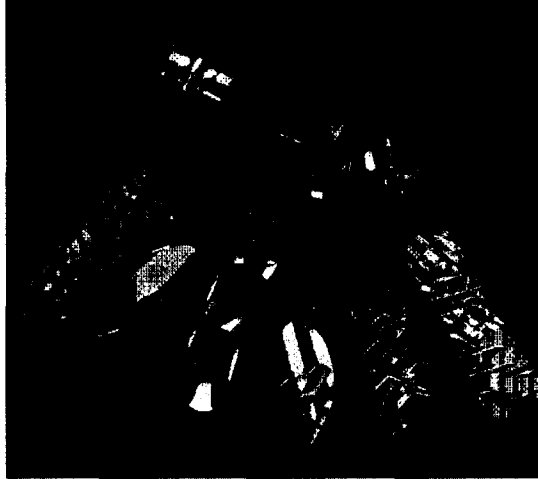
Plate and Frame :

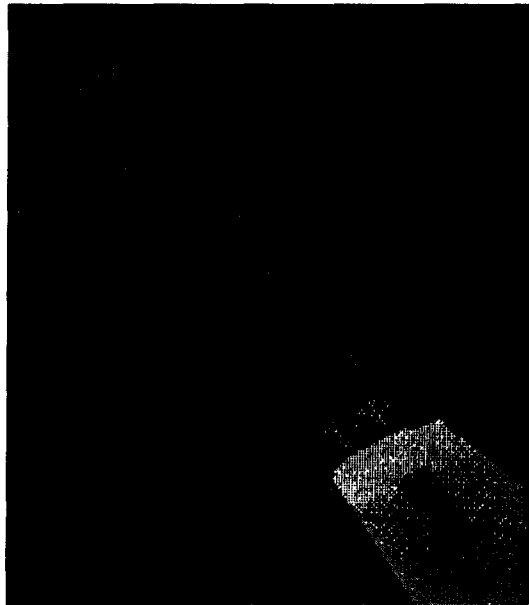
- Rotation (ABB Flootek)
- Vibration (New Logic)
- Baffles (Rochem Separation)
- Rough Surface (Nitto Denko)
- Taylor Vortex (Memplex)
- Dean Vortex (Bioengineering)

Spiral Wound :

- Dean Vortex (RPI, Millipore, Toray)



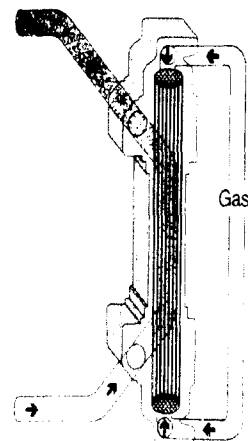




STEP 2

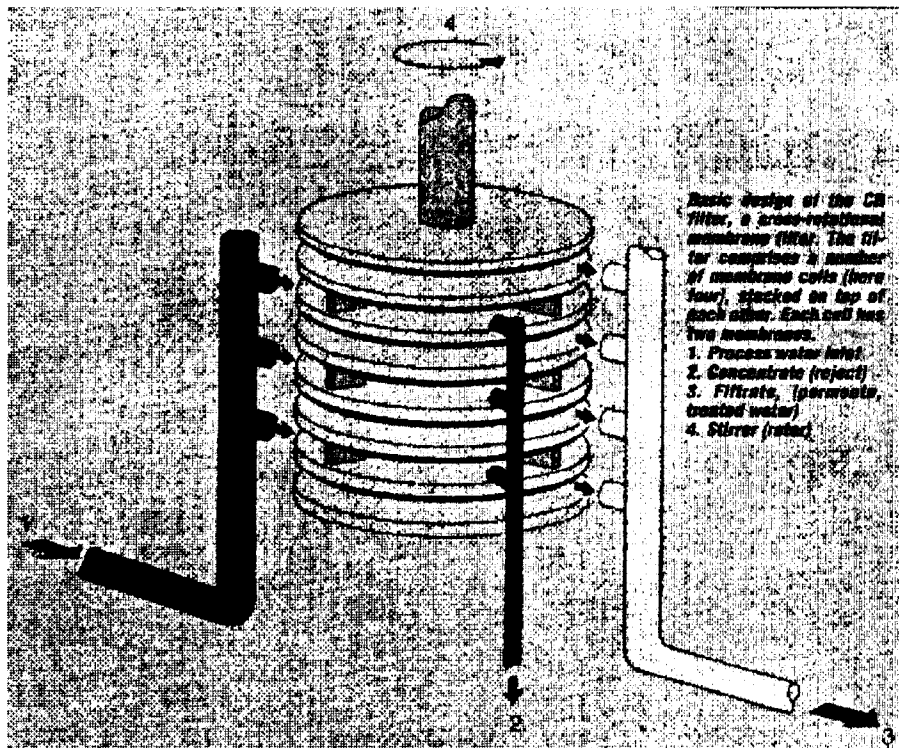
The dislodged debris is flushed from the Module and either collected or disposed of according to application.

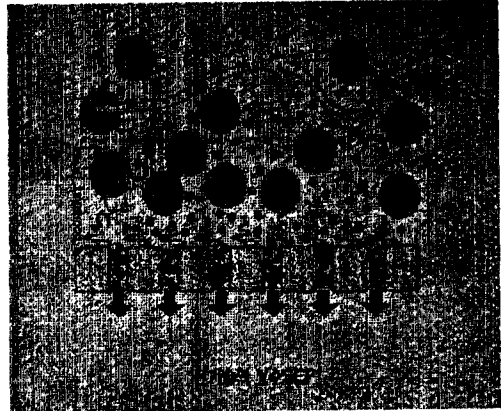
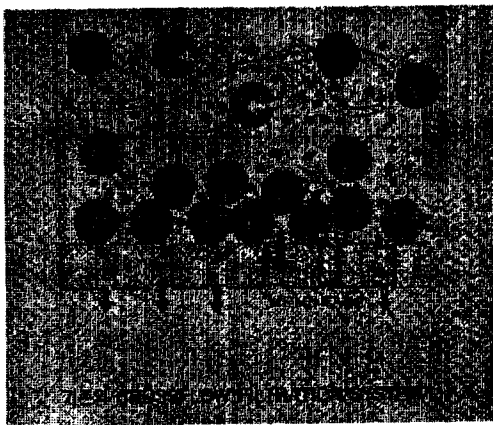
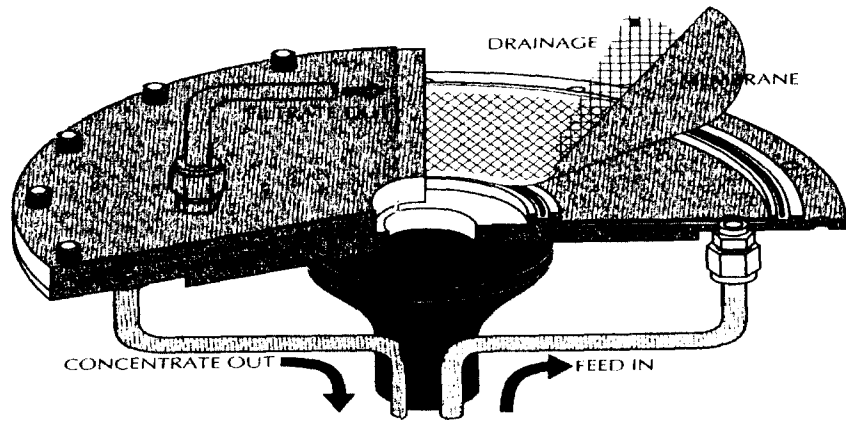
Single fibre during Backwash.

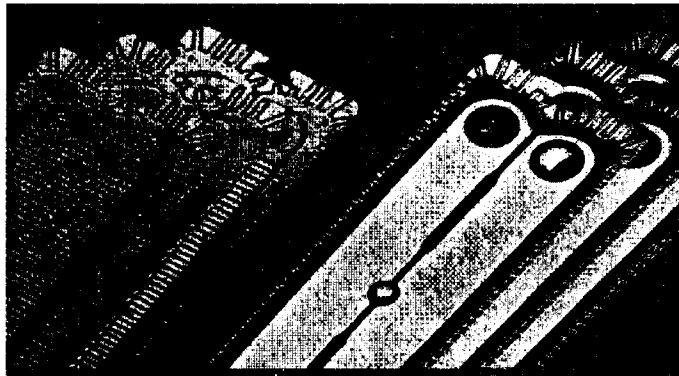
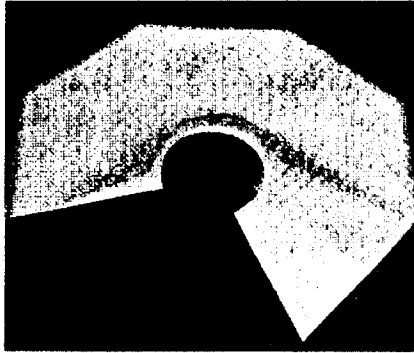
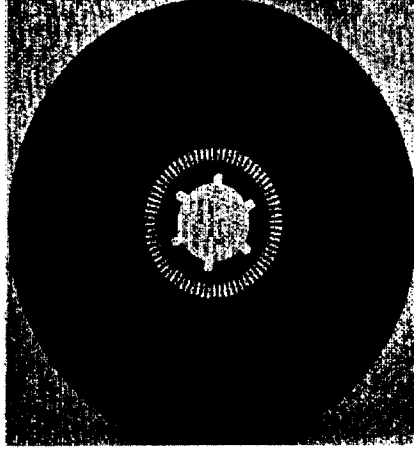


STEP 1

Gas is forced into the centre and through the walls of the Fibres, lifting accumulated debris off the surface.







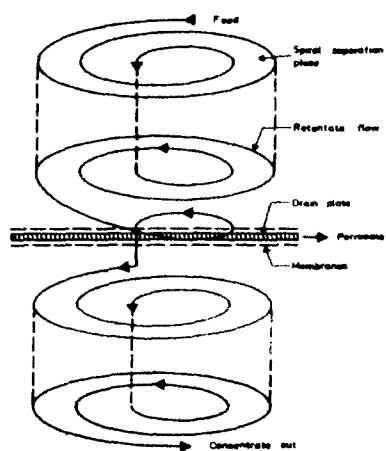


Fig. 1. Continuous retentate flow in the module stack

■ ■ ■
BIOENGINEERING



Fig. 2. Spiralplate with half-nine coils for retentate

