

4.4 한외여과 2

플럭스 감소현상은 그림 8에 도시한 경계층 모델(boundary layer model)로 설명될 수 있다. 그림에서 δ 는 경계층의 두께로 c_f (벌크피드 농도)와 c_w (막 표면에서의 농도) 간의 농도변화에 따른 거리이다. 용질이 대류에 의해 막 표면으로 이동하는 속도(the rate of convective transfer of solute toward membrane)와 벌크로 되돌아가는 속도(the rate of diffusion of solute toward bulk)가 다음 식과 같이 평형을 이룬다.

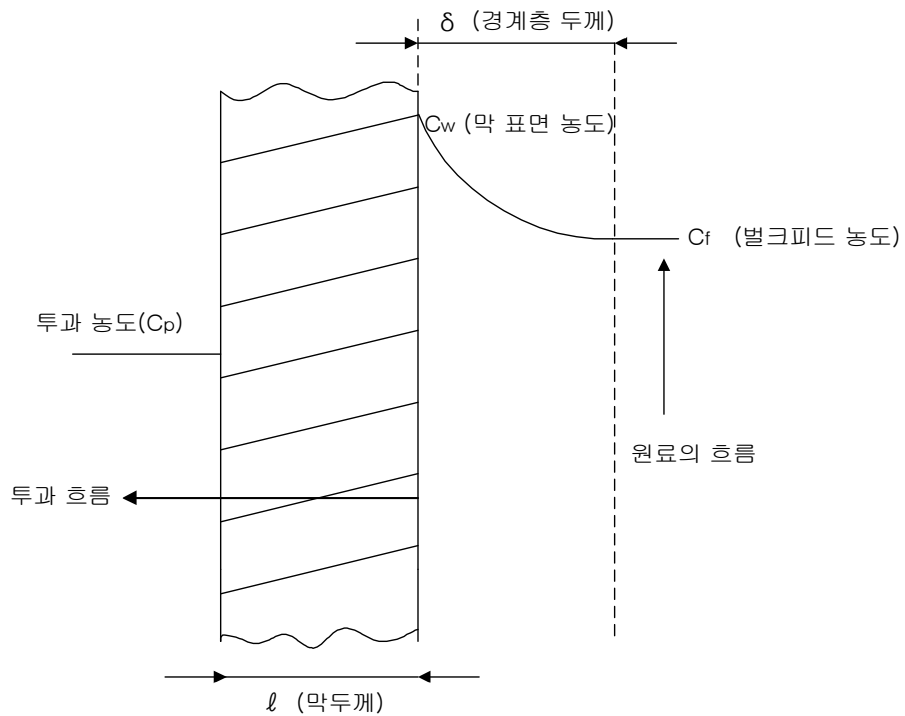


그림 8 crossflow 여과에서 경계층 모델

$$J_v(c - c_p) = -D \frac{dc}{dx} \quad (34)$$

여기서, D 는 확산계수이다. 경계층을 따라 이 방정식을 적분하면, 그 플럭스는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$J_v = k \ln [(c_w - c_p) / (c_f - c_p)] \quad (35)$$

여기서, $k(= D/\delta)$ 는 물질전달계수(mass transfer coefficient)이며, δ 는 경계층의 두께(film thickness)이다.

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 더 이상 플럭스는 증가되지 않는다. c_p 가 작다고 가정될 때 이 플럭스의 한계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$J_{avg} = k \ln(c_g / c_f) \quad (36)$$

식 (36)는 겔 농도 c_g 를 알 수 있고, 물질전달계수 k 에 대한 적절한 상호관계가 주어졌을 때 다양한 한외여과 시스템에서 플럭스의 한계를 추정하는 데 사용될 수 있다. 겔 농도는 주로 용매-용질 계와 작용 온도와의 함수이며 막의 특성, 원료 농도, 흐름 상태, 작용 압력에는 무관하다.

물질전달 계수 k 는 실험에 의해 결정된 무차원수인 셔우드수(Sherwood number, Sh)로서 나타내어질 수 있다. 셔우드수는 아래와 같이 레이놀드수(Reynolds number, Re)와 슈미트수(Schmidt number, Sc)의 상호관계에서 측정할 수 있다.

$$Sh = \frac{kd}{D} = a Re^b Sc^b \quad (37)$$

여기서, a , b 는 막을 통과하는 흐름의 형태(층류 혹은 난류)에 따라 정해지는 상수값이며 a 는 경계층이론에 의하여 1/3, b 는 층류에 대해 0.5, 난류에 대해 1.0이다. $Re = dv / \mu$ 이고, $Sc = \mu / D$ 이며 여기서 d 는

세공의 지름, v 는 세공 내의 유체의 평균 흐름 속도, ρ 는 유체의 밀도, μ 는 유체의 점도이다. 식 (37)에서 Re 와 Sc 를 알면 셔우드수가 결정되고 이로부터 k 를 구한다. 이 k 를 식 (36)에 대입하면 농도분극에 의한 플럭스 한계를 구할 수 있다.

막 표면의 겔형성(gel formation) 등 침전물 형성문제는 압력이 막에 직접 수직으로 걸리지 않고 막 표면에 수평으로 걸리는 교차흐름 여과(cross-flow filtration)를 사용하여 부분적으로 제거될 수 있다. 한외여과 장치의 rejection coefficient는 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{C_B - C_F}{C_B} \quad (38)$$

여기서 C_B 는 벌크에서의 용질의 농도, C_F 는 여과액(filtrate)내의 용질의 농도이다.

주요 막 형태 중에서 평판형(plate and frame device)과 실관형(hollow fiber cartridge)이 있다 (그림 9). 그 외에 나선감김형 카트리지(spiral cartilage)의 구조도 있다. 실관 카트리지는 부피에 대해 큰 표면적을 갖는다. 그러나 이것은 다른 두 형태보다 더 쉽게 막힌다. 평판 형태는 제조하기 쉽고 막을 교체하기 쉬우나 부피에 비해 막 표면적이 작다. 그리고 높은 압력에서 운전하기 위하여 막에 지지체를 부착해야 한다. 나선모양의 카트리지는 평판막을 감은 것으로 부피 대 표면적을 증가시키기 위해 구성된 것이다. 대부분의 한외여과막은 P 가 5~7 atm 이하로 운전된다.

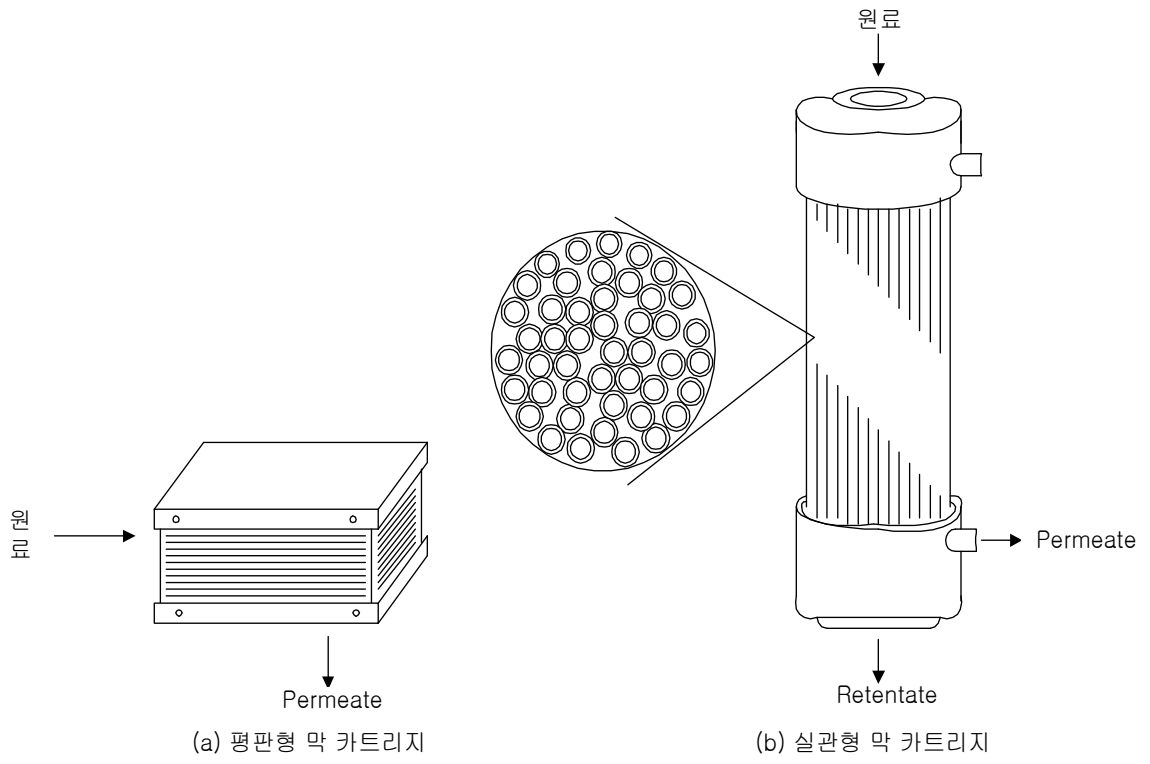


그림 9 평판형 막(a)와 실관형 막(b) 카트리지