

## YEF(Yonsei End Free) 모듈의 막 내경과 길이에 따른 압력손실 모델링

윤소담, 권오성, 노수홍  
연세대학교 보건과학대학 환경공학부

### Modeling of the pressure loss by membrane inner diameter and length in YEF(Yonsei End Free) module

So Dam Yoon, Oh Sung Kwon, Soo Hong Noh  
School of Environmental Engineering, Yonsei University

#### 1. 서론

분리막의 투과율을 감소시키는 농도분극현상(concentration polarization)은 막 자체의 성질에는 영향을 주지 않으며 수리학적 특성을 이용하여 농도분극현상에 의한 투과율 감소를 최소화 할 수 있다.

YEF 모듈은 하부가 고정되었고 상부의 끝이 자유롭게 움직이며, 폭기량을 최소화하기 위해 모듈 내부에 산기관이 설치되어 중공사막 표면에서의 스크러빙(scrubbing)과 진동(vibration)현상을 증가시켜 케익이나 농도분극현상을 줄이는데 효과적이다.

YEF 모듈에서 흡입공정을 실시할 경우 고정된 하부 쪽에서만 흡입하게 되므로 봉인되어 있는 다른 쪽 끝에서 중공사막의 내경을 통해 콜렉터(collector)까지 유체가 이동하게 되면 수두손실이 발생하게 된다. 이러한 수두손실로 인해 펌프에 의한 흡입력이 중공사막의 내부 벽면에 골고루 미치지 못하게 되어 비효율적인 운전이 하게 된다. 이 때문에 단면적 증가를 통한 모듈의 대형화는 막의 특성에 의해 제약을 받게 된다. 따라서 본 연구의 목적은 YEF 모듈에서의 막 내경과 길이에 따른 압력손실을 알아보고, YEF 모듈 대형화의 가능성과 제한인자를 확인하는데 있다.

#### 2. 이론

하향식 침지형 중공사막 모듈의 투과 모델은 S.Chang에 의해서 연구된 바 있다. 이를 변형하여 상향식 침지형 중공사막 모듈의 투과 모델을 구성하였다. 중공사막을 이용한 여과시 유체가 중공사막의 벽면을 통과하여 흐르기 위해서는 두가지 방향의 속도를 가지게 되는데 벽면을 통과해서 들어

가는 방향과 내경을 통해서 흐르는 방향이 그것이고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(x, r) = -\frac{1}{4\mu} \left( \frac{dp}{dx} + g\rho \right) (R_i^2 - r^2) \quad (1)$$

$$v(x, r) = \frac{1}{16\mu} \frac{d^2P}{dx^2} (2R_i^2 r - r^3) \quad (2)$$

유체가 일정한 속도로 투과하여 지속적으로 이동한다고 가정하고, 중공사막을 통과하는 유체의 유속을 직렬 여과 저항 모델식에 의해 다시 표현하면,

$$v(x, R_i) = -v_m(x, R_i) = -\left[ \frac{(h+l-x)\rho g - p(x)}{\mu R_m} \right] \quad (3)$$

로 표현할 수 있다. 여기에  $r=R_i$  라고 하면, 식(2)와 (3)은

$$v(x, R_i) = \frac{1}{16\mu} \frac{d^2p}{dx^2} R_i^3 = -\left[ \frac{(h+l-x)\rho g - p(x)}{\mu R_m} \right] \quad (4)$$

와 같이 되고, 내경과  $R_m$  값에 의한 저항계수를

$$\lambda^2 = \frac{16}{R_i R_m} \quad (5)$$

이라고 하고 식(4)를 정리하고  $p(x)$ 에 대해 적분하여 정리하면,

$$p(x) = (h+l-x)\rho g - \mu R_m \lambda J_{mi} \frac{e^{\lambda x} + e^{\lambda(2l-x)}}{e^{2\lambda l} - 1} \quad (6)$$

$$J(x) = \lambda J_{mi} \frac{e^{\lambda x} + e^{\lambda(2l-x)}}{e^{2\lambda l} - 1} \quad (7)$$

식(6)에서 중공사막 내의 압력  $p(x)$ 값은 수두에 의한 외부압력에서 유체가 막을 통과하는데 필요한 압력의 차를 빼어준 것과 같다. 그러므로 식(6)과 (7)을 이용하여 상향식 YEF 모듈에서의 압력과 투과유속의 분포를 알 수 있다.

### 3. 결과 및 토론

Fig. 1에서 보면, 유효 막길이  $2m(L=2m)$ , 내경  $0.8\text{mm}$ 인 막의 경우, 하단 부분( $x=0$ )에서 상단부분( $x=L$ )으로 갈수록 TMP가 감소하며  $x=0$ 일 때, 최대값을  $x=L$ 일 때, 최소값을 갖는다. Fig. 2는 중공사막이  $1\text{m}$ 에서  $3\text{m}$ 로 길어지면서  $x=L$  지점과  $x=0$  지점에서의 TMP 차가 증가함을 보여주며, 평균 투과유속이 증가할수록 TMP 차가 커짐을 알 수 있다. Fig. 3에서는  $30\ell/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 운전시, 유효 막길이가  $2\text{m}$ 일 때, 내경  $0.3\text{mm}$  이하,  $x=0.5\text{m}$  이상

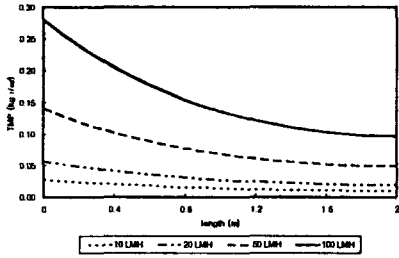


Fig. 1. Simulated local TMP distribution along the fiber (effective fiber length = 2m,  $D_i = 0.8\text{mm}$ )

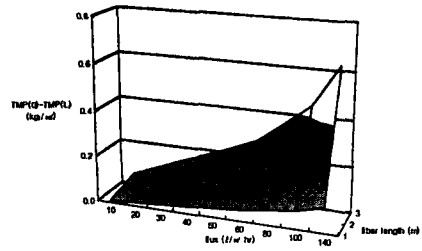


Fig. 2. Simulated TMP drop along the fiber ( $D_i = 0.8\text{mm}$ )

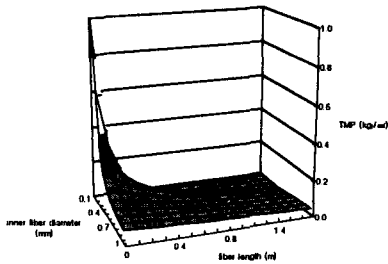


Fig. 3. Effect of inner fiber diameter with the flux of  $30\text{ l/m}^2 \cdot \text{hr}$  (effective fiber length = 2m)

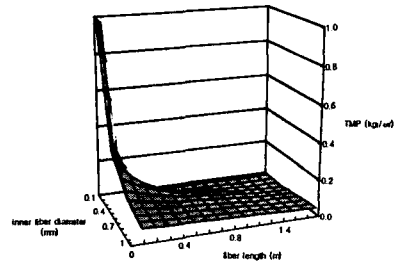


Fig. 4. Effect of inner fiber diameter with the flux of  $100\text{ l/m}^2 \cdot \text{hr}$  (effective fiber length = 2m)

인 경우 TMP가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 내경  $0.3\text{mm}$  이하의 중공사막인 경우,  $x=0.5\text{m}$  이상인 지점에서의 여과는 거의 일어나지 않음을 의미하며, 한편으로는 길이가  $2\text{m}$ 이고 내경이  $0.3\text{mm}$  이상인 막을 사용하여,  $30\text{ l/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 운전하면 펌프의 흡입력이 중공사막의 내부 전면에 끌고루 미쳐 효율적인 운전을 하게 됨을 뜻한다. Fig. 4에서는 Fig. 3에서와 같은 조건에서  $100\text{ l/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 운전할 경우, 내경  $0.3\text{mm}$  이하의 중공사막인 경우,  $x=0.2\text{m}$  이상인 지점에서의 여과는 거의 일어나지 않으며, 내경  $0.3\text{mm}$  이상의 중공사막을 사용하여야 함을 알 수 있다. 결과적으로, 하수처리와 정수처리과정에 있어, 길이가  $2\text{m}$ 이고 내경  $0.8\text{mm}$ 인 막을 사용하는 YEF 모듈의 경우, 투과시 효율적인 막의 조건임을 알 수 있다. 지금까지 상향식 중공사막 모듈의 투과 모델을 이용하여 막 내경과 길이에 의한 TMP의 변화를 예측하고, YEF 모듈 대형화에 있어서의 제한 인자에 대해 살펴 보았다. 앞으로, 이러한 고찰과 더불어, 막 재질과 길이에 변화를 둔 YEF 모듈의 투과 실험을 진행하고, 모델과의 연관성을 확인해야 할 것이다.

#### 4. 참고문헌

- [1] Sheng Chang, "Optimization of Submerged Hollow Fiber Membrane Module", The University of new South Wales (2001)
- [2] S. Chang, A.G. Fane, "The effect of fibre diameter on filtration and flux distribution-relevance to submerged hollow fibre modules", J. Membrane Science, 184, 221-231, (2000)
- [4] 윤희성, "대형 YEF(Yonsei End Free) 모듈의 수리학적 특성", 연세대학교 (2004)