

Happel Cell 모델을 이용한 막오염 지수 예측

Prediction of Membrane Fouling Index by Using Happel Cell Model

박찬혁 · 김하나 · 홍승관*

Chanhyuk Park · Hana Kim · Seungkwan Hong*

고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과

(2005년 7월 25일 논문 접수; 2005년 9월 20일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Membrane fouling index such as Silt Density Index (SDI) and Modified Fouling Index (MFI) is an important parameter in design of the integrated RO/NF membrane processes for drinking water treatment. In this study, the effect of particle, membrane and feed water characteristics on membrane fouling index were investigated systematically. Higher fouling index values were observed when filtering suspensions with smaller particle size and higher feed particle concentration. Larger membrane resistance due to smaller pore size resulted in an increased membrane fouling index. The variations of feed water hardness and TDS concentrations did not show any impact on fouling index, suggesting that there were no significant colloidal interactions among particles and thus the porosity of particle cake layer accumulated on the membrane surface could be assumed to be 0.36 according to random packing density. Based on the experimental observations, fundamental membrane fouling index model was developed using Happel Cell. The effect of primary model parameters including particle size (a_p), particle concentration (C_p), membrane resistance (R_m), were accurately assessed without any fitting parameters, and the prediction of membrane fouling index such as MFI exhibited very good agreement with the experimental results.

Key words: Membrane Fouling, Fouling Index, Silt Density Index (SDI), Modified Fouling Index (MFI), Happel Cell Model

주제어: 막오염, 막오염 지수, Silt Density Index (SDI), Modified Fouling Index (MFI), Happel Cell Model

1. 서 론

수질오염이 심각한 사회 문제가 되고 이에 대한 경

각심이 고조됨에 따라 고도정수처리 공정의 도입은 필수불가결한 사안이 되었다. 그 중 막여과 정수처리 공정은 청정한 음용수 고갈에 따라 해수 등의 대체 수자원 확보를 위해 개발되어 선진국을 중심으로 많

*Corresponding author Tel: +82-2-3290-3322, FAX: +82-2-928-7656, E-mail: skhong21@korea.ac.kr (Hong, S.K.)

은 연구가 집중되고 있으며, 국내에서도 시설의 노후화에 따른 개선, 개량과 고도정수처리 시설로서 막여과 공정의 도입이 적극적으로 검토되고 있다.

막여과 공정에서 막 표면이나 공극에 입자성 물질이 축적되어 발생하는 막오염은 투과 플럭스(flux) 감소, 막 수명 감소, 세정 및 유지비용 증가, 생산수의 수질 저하 등의 문제를 야기시켜 경제성 있는 정수처리 기술로 인정받는데 걸림돌이 되고 있다. 따라서, 막오염을 방지하기 위해 다양한 전처리 공정의 개발 및 도입이 필요하다. RO/NF 공정 설계 시, 전처리 공정의 도입 유무는 입자성 물질을 대상으로 하는 SDI(Silt Density Index) 또는 MFI(Modified Fouling Index) 등의 막오염 지수로 막오염 정도를 결정하여 설계지점으로 사용하고 있다(Boerlage et al., 2002; Brauns et al., 2002; Vrouwenvelder et al., 2003). 하지만, 현재까지 막오염을 일으키는 원인 물질의 특성과 막오염 지수와의 상관관계를 규명한 연구 결과가 부족하여, 기존의 막오염 지수로는 막오염의 원인/정도 등 구체적인 막오염 현상을 정확히 예측하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 여러 가지 인자들이 막오염 지수에 미치는 영향을 분석하고, Happel cell 모델을 사용하여 입자와 막의 특성에 따라 MFI를 예측할 수 있는 모델을 개발하고자 한다.

2. 기초 이론 및 실험 방법

2.1. 막오염 지수(Membrane Fouling Index)

막오염 지수는 간단한 시험을 통해 시간, 비용을 크게 줄일 수 있어야 한다. 일반적으로 전처리 공정의 도입유무를 결정하기 위해 정해진 막오염 지수는 Table 1과 같다(Lyonnaise des Eaux, 1996). 이는 막오염 지수를 측정할 결과가 Table 1에 나타난 범위 내에 있으면 전처리 공정 없이도 막오염이 일어나지 않음을 의미한다. RO/NF 공정의 설계 시, 시간과 비용이 많이 소요되는 pilot test 대신, 약 15분 정도 소요되는 간단한 막오염 지수 측정으로 전처리 공정의 도입 필요성을 판단하고 있다.

막오염 지수는 30psi(207 kPa)의 압력으로 공경이 0.45 μ m이고, 직경이 47mm인 막에 원수를 통과시켜 측정한다. SDI는 막을 통과하여 일정부피(일반적으로 500mL)를 여과하는데 걸리는 시간(t_i)과 일정 시

Table 1. RO/NF 공정 도입을 위한 일반적인 막오염 지수

Fouling Index	Range	Application
SDI	0 - 2	Reverse Osmosis (RO)
	0 - 3	Nanofiltration (NF)
MFI	0 - 2 s/L ²	Reverse Osmosis (RO)
	0 - 10 s/L ²	Nanofiltration (NF)

간($t = 15$ 분)을 여과시켜 사용한 후, 같은 부피를 여과하는 데 걸리는 시간(t_f)을 계산하여 다음의 식으로 구한다(ASTM D4189).

$$SDI = \frac{[1 - (t_i / t_f)]}{t} \times 100 \quad \text{식 (1)}$$

MFI는 SDI 측정에 사용한 같은 장비와 절차에 따라 계산하지만, 15분의 여과시간에 걸쳐 매 30초마다 여과량(V)을 기록하고, 시간으로 나누어 유량(Q)을 구한다(Schippers, 1980). MFI는 Darcy의 법칙에 근거하여 식 (2)~(5)의 과정으로 막 표면에 형성된 케익층의 두께가 여과량과 비례한다고 가정하여 계산한다. R_f , R_k 는 각각 필터와 케익의 저항(L^{-1})이며, I 는 막오염 생성량(L^2T), μ 는 절대 점성계수 ($ML^{-1}T^{-1}$), A 는 막 면적(L^2), ΔP 는 막간차압(ML^{-2})이다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu} \frac{A}{(R_f + R_k)} \quad \text{식 (2)}$$

$$t = \frac{\mu R_f}{\Delta P A} V + \frac{\mu I}{2 \Delta P A^2} V^2 \quad \text{식 (3)}$$

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu R_f}{\Delta P A} + \frac{\mu I}{2 \Delta P A^2} V \quad \text{식 (4)}$$

$$\frac{1}{Q} = a + MFI \times V \quad \text{식 (5)}$$

2.2. Happel Cell 모델

입자성 물질이 막을 통과하는 동안, 막을 통과하지 못하는 입자들은 막 표면에 쌓이게 되고, 농도 분극(concentration polarization)층을 형성하게 된다. 하지만, 계속해서 입자성 물질이 쌓이면, 막 표면과 농도 분극층 사이에 입자 케익층(particle cake layer)이 형성될 것이며, 물이 막을 통과하는 데 있어 케익층과 농

도 분극층에 쌓인 입자는 추가적인 저항이 되어 압력 손실을 유발하고, 투과 플럭스(permeate flux)를 감소시킨다. 따라서, 막간차압은 막 자체를 통과할 때 생기는 압력 손실(P_m), 농도 분극층으로 인한 압력 손실(P_p), 케익층으로 인한 압력 손실(P_c)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_p + \Delta P_c \quad \text{식 (6)}$$

막 자체를 통과할 때 생기는 압력 손실(P_m)은 투과 플럭스(v_w)와 막의 저항(R_m)의 곱으로 나타내며($\Delta P_m = v_w \cdot R_m$), 막의 저항(R_m)은 온도와 관계되어 점성에 의한 영향을 받는다. 그리고, 농도 분극층으로 인한 압력 손실(P_p)은 농도 분극층에 있는 입자가 막의 반대 방향으로 이동하므로, 입자에 의한 마찰력의 합으로 나타낼 수 있으며, 식 (7)과 같다(Song and Elimelech, 1995; Wijmans et al., 1985).

$$\Delta P_p = \frac{3N_{FC}kT}{4\pi a_p^3} \quad \text{식 (7)}$$

N_{FC} 는 케익층이 형성될 때의 critical filtration number이며, k 는 Boltzmann 상수, T 는 절대 온도, a_p 는 입자의 반경을 의미한다. 또한, 케익층에서의 압력 손실은 축적된 입자층을 통과하는 마찰력과 관계된다.

$$\Delta P_c = \frac{kT}{D} As(\theta_{\max})v_w M_c \quad \text{식 (8)}$$

$kT/D (= 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot a_p)$ 는 마찰계수이며, D 는 입자의 확산계수, $As(\theta_{\max})$ 는 입자 사이를 통과하는 유체흐름에 의한 영향을 나타낸 계수이다. 그리고, M_c 는 케익층에 축적된 입자의 갯수이며, 특히 As 는 식 (9)의 Happel cell 모델로부터 얻을 수 있다.

$$As = \frac{1 + \frac{2}{3}\theta^5}{1 - \frac{3}{2}\theta + \frac{3}{2}\theta^5 - \theta^6} \quad \text{식 (9)}$$

θ 는 porosity와 관련된 것으로서, $\theta = (1 - \varepsilon)^{1/3}$ 이다. ε 는 축적된 입자에 의한 케익층의 porosity를 의미하며, random packing density를 가정하면, $\varepsilon = 0.36$, $\theta_{\max} = 0.86$, $As(\theta_{\max}) = 123.22$ 가 된다. 축적된 입자의 갯수

인 M_c 는 케익층의 두께(δ_c)와, 케익층 내 입자의 volume fraction(C_c)에 따라 달라지며, 식 (10)에 의해 얻을 수 있다.

$$M_c = \frac{\theta_{\max}^3}{\frac{3}{4}\pi a_p^3} \delta_c = \frac{3C_c}{4\pi a_p^3} \delta_c \quad \text{식 (10)}$$

위의 식들을 농도 분극층에서의 입자 이동을 나타낼 수 있는 이류-확산식(Convection-Diffusion Equation)에 대입한 후, 케익층의 두께를 시간의 변화에 대해 나타내고, ΔP_c 에 비해 ΔP_p 는 매우 작으므로 이를 무시하면, 식 (11)과 같이 투과 플럭스(v_w)를 계산할 수 있다. 이 과정에서 $v_0 (= \Delta P/R_m)$ 를 초기 투과 플럭스로 계산한다.

$$v_w = (1 - \frac{3kTAs(\theta_{\max})C_0\Delta P}{4\pi a_p^3 DR_m^2} t) \times v_0 \quad \text{식 (11)}$$

따라서, Happel cell 모델로 투과 플럭스를 계산하고, 막 면적(A)을 곱하여 유량(Q)을 구하며, 이 값에 시간을 곱하면 여과량(V)을 계산할 수 있어 x 축을 여과량(V), y 축을 $1/Q$ 로 나타내면, 기울기 값인 MFI 예측이 가능하다. 따라서, 식 (12)를 사용하면 Happel cell 이론을 이용한 MFI를 예측할 수 있다.

$$\frac{1}{v_w \times A} = a + MFI \times (v_w \times A \times t) \quad \text{식 (12)}$$

2.3. SDI/MFI 실험

막오염 지수 측정은 30psi(207kPa)의 압력에서 47mm 직경, 0.45 μ m 공경의 정밀여과(Microfiltration)막(Millipore Corp. Bedford, MA, USA)을 사용하여 물을 통과시켰으며, 이는 ASTM D4189에서 제시한 운전 조건과 막을 사용한 것이다. 47mm 직경의 막은 in-line filter holder(Millipore Corp. Bedford, MA, USA)에 넣어 silicone O-ring으로 고정시켜 사용하였으며, 80psi까지 견딜 수 있는 polypropylene 재질의 holder를 사용하였다. In-line filter holder 앞에는 미세하게 압력을 조절할 수 있는 소형 pressure regulator(14R113FC, Parker Hannifin Corp. Michigan, USA)를 사용하여 막오염 지수 측정에 필요한 30psi(207kPa)를 유지시켰다.

Table 2. 본 연구에 원수로 사용한 수돗물의 특성

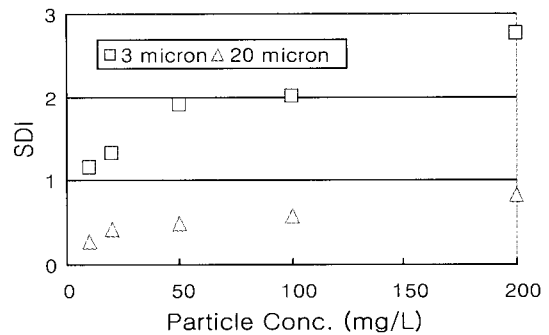
Water Quality Parameter	Tap Water
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	39
pH	7.3
Turbidity (NTU)	0.15
Temperature (°C)	20
TDS (mg/L)	102
Hardness (mg/L as CaCO ₃)	64
Ionic Strength (M)	0.001

대상 원수는 3 μ m(SILNOS-3M, ABCNanoTech, KOREA), 20 μ m(SILNOS-20M, ABCNanoTech, KOREA) 크기의 silica 입자를 사용하여 해당 농도를 수돗물에 완전히 부유상태로 만들어 사용하였으며, 이를 위해 여과시간 동안 계속하여 mixing을 하였다. 본 실험에 사용한 수돗물은 1주마다 한 번씩 측정하여 평균적인 특성을 Table 2에 나타내었으며, 수돗물 자체로 인한 막오염 정도는 상대적으로 미비하였다. 한편, 막의 특성을 보다 자세히 분석하기 위해 모세관압측정기(Capillary flow porometer, CFP-1200AE, Poros Materials, USA)를 사용하여 막의 공경 분포를 측정하였다. 또한, Happel cell 모델에 미치는 영향을 분석하기 위해 입자와 막의 특성 및 원수 특성의 변화에 따라 막오염 지수를 측정하였다.

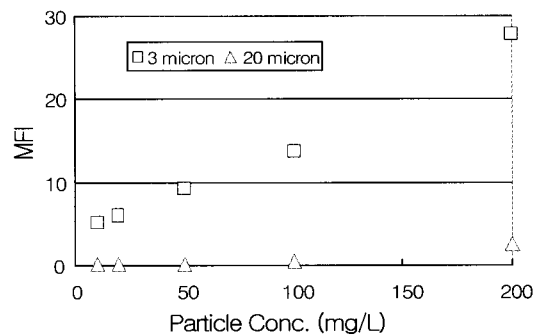
3. 결과 및 고찰

3.1. 입자 특성이 미치는 영향

막오염 지수는 silica 입자 크기 3 μ m, 20 μ m을 사용하였으며, 해당 농도를 0~200mg/L로 만들어 측정하였다. Fig. 1은 입자의 크기 및 농도 변화에 의한 막오염 지수를 나타낸 결과이다. 3 μ m 입자의 막오염 지수가 높게 나타나는 반면, 20 μ m 입자의 막오염 지수는 높지 않음을 알 수 있다. 또한, 3 μ m 입자의 경우, 농도가 높아질수록 막오염 지수가 증가하는 반면, 20 μ m 입자의 경우에는 농도가 높아져도 막오염 지수의 증가는 크지 않았다. 이는 같은 농도의 원수라도 3 μ m 입자의 경우에는 20 μ m 입자의 경우보다 입자의 총 갯수가 많으므로, 막 표면에 쌓이는 입자의 양이 많아져 막오염 지수가 높은 결과를 나타낸다.



(a) SDI



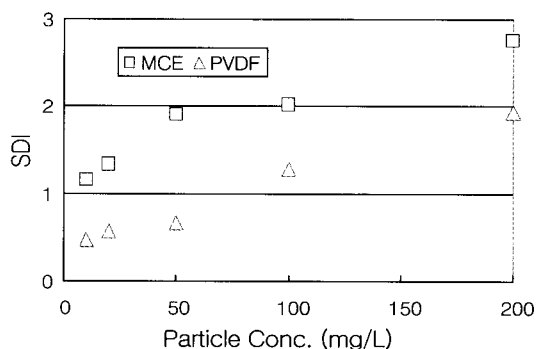
(b) MFI

Fig. 1. 입자 크기 및 농도에 따른 막오염 지수.

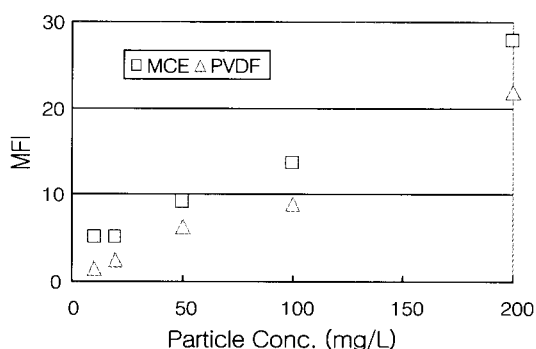
3.2. 막 특성이 미치는 영향

본 연구에서는 cellulose 계통의 MCE(Mixed Cellulose Ester) 재질의 막과 PVDF(Poly Vinyl DiFluoride) 재질의 막을 사용하여 막오염 지수를 비교하고자 하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이, 막의 재질에 따라서 막오염 지수가 다른 경향을 볼 수 있다. 이는 막이 가지고 있는 특성에 따라 막오염이 다르게 진행된다는 것을 의미한다. 막 제조사에 의하면, MCE와 PVDF 막의 평균 공경이 0.45 μ m으로 같다고 보고하고 있지만, 보다 정확한 막의 특성을 알기 위해, MCE 막과 PVDF 막의 공경 분포(pore size distribution)를 조사하여 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다. MCE 막은 0.45 μ m보다 작은 공경이 상대적으로 많이 분포되어 있는 반면, PVDF 막은 0.45 μ m보다 큰 공경을 가진 분포가 주를 이루고 작은 공경이 거의 없어 막 자체의 저항(R_m)값이 작음을 알 수 있었다. 따라서, Table 1에 제시된 현재 사용되는 막오염 지수의 범위는 막의 재질 및 평균 공경, 공경 분포 등을 반영하고



(a) SDI



(b) MFI

Fig. 2. 막 재질에 따른 막오염 지수.

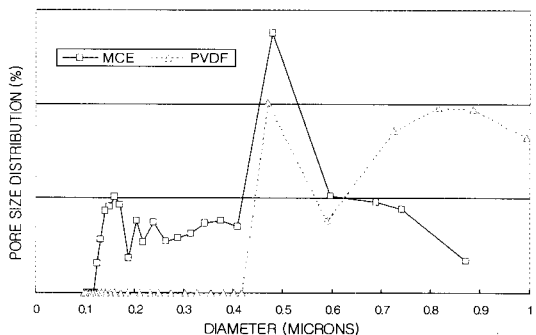


Fig. 3. MCE 막과 PVDF 막의 공경 분포.

있지 않으므로, RO/NF 공정 설계 시 정확한 막오염 예측이 불가능함을 알 수 있다.

3.3. 원수 특성이 미치는 영향

원수 특성이 막오염 지수에 미치는 영향을 조사하기 위해, 이온강도(Ionic Strength) 및 경도(Hardness)에 따라 막오염 지수를 측정하였다. 이 결

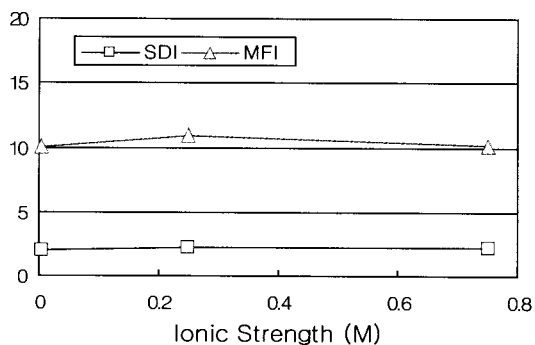


Fig. 4. 이온강도에 따른 막오염 지수.

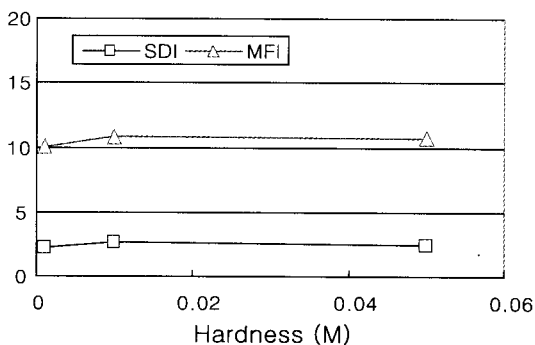


Fig. 5. 경도에 따른 막오염 지수.

과, 입자 크기 및 농도, 막의 재질에 의해 막오염 지수가 변하는 것과 다르게, Fig. 4, Fig. 5에서와 같이 막오염 지수는 크게 변하지 않았다. 입자 크기가 3 μ m 정도로 다소 큰 경우, 이온강도 및 경도의 증가에 따른 colloidal interaction의 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서, random packing density라고 가정할 수 있으며, 막 표면에 축적된 입자 케익층의 porosity를 0.36으로 사용 가능하다는 것이 증명되었다. 따라서, 이러한 가정을 바탕으로 Happel cell을 이용한 막오염 지수 모델을 개발하였으며, 이를 다음 3.4에 자세하게 설명하였다.

3.4. Happel cell 모델에 의한 막오염 지수 예측 비교

원수의 탁도가 10NTU 이상(Silica 입자농도 100 mg/L)인 물은 대체적으로 전처리 공정이 필요하다고 알려져 있어, 막오염 지수의 모델링을 수행하지 않았다. MFI를 예측하기 위해 Happel cell 모델을 사용하였으며, 입자의 크기 및 농도가 미치는 영향과 막의

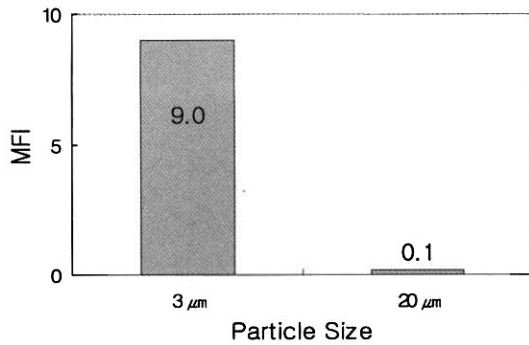


Fig. 6. 입자의 크기(a_p)가 MFI에 미치는 영향 예측(Happel cell model).

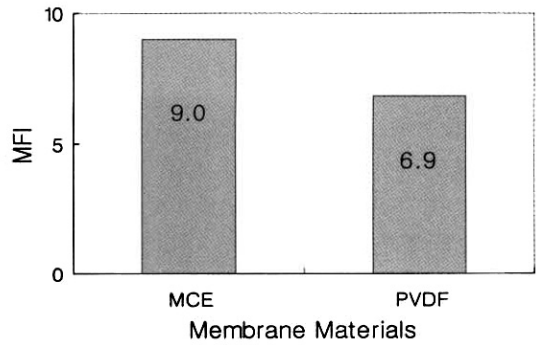


Fig. 8. 막의 재질(R_m)이 MFI에 미치는 영향 예측(Happel cell model).

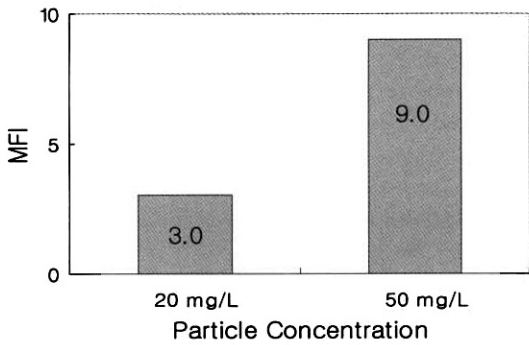


Fig. 7. 입자의 농도(C_p)가 MFI에 미치는 영향 예측(Happel cell model).

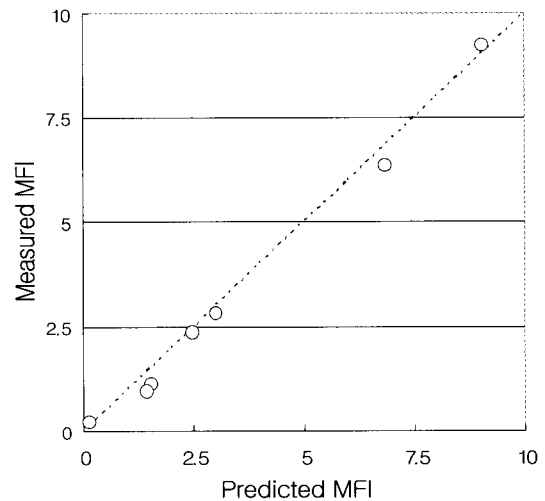


Fig. 9. Happel cell 모델을 사용한 예측 MFI와 측정 MFI 비교(입자 크기: 3 μm , 20 μm ; 입자 농도: 0~50mg/L; 막의 공경 및 재질: 0.45 μm , MCE/PVDF).

재질이 미치는 영향을 분석하여, 이들 인자에 따른 MFI 변화를 다음 Fig 6, 7, 8에 각각 나타내었다. 입자 크기에 따라 MFI를 예측한 결과, 3 μm 입자의 경우 MFI 값이 9.04로, 20 μm 일 때의 MFI값인 0.14보다 64.6배 크게 나타났다. 50mg/L의 동일한 농도로 막을 통과하였지만, 막 표면에 쌓이는 입자의 갯수는 3 μm 크기의 입자가 많아 막오염이 심한 것을 알 수 있다. 한편, 입자 농도에 따라 MFI를 예측한 결과, 20mg/L 농도의 경우 MFI값이 3.03으로 50mg/L 농도에서의 MFI 값인 9.04보다 작게 나타났다. 이는 동일한 크기(3 μm)의 입자 사용시, 50mg/L 농도를 사용한 경우는 20mg/L 농도의 경우보다 막 표면에 쌓이는 입자 갯수가 많아 막오염 정도가 심한 것이며, volume fraction을 나타내는 C_p 값의 증가로 인한 것이다. 막의 재질에 따른 MFI 예측 결과, 재질에 따라 달라지는 막 자체의 저항(R_m)값이 $5.98 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ (PVDF)에서 $6.43 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ (MCE)로 1.08배

증가하면, MFI 값도 6.85에서 9.04로 1.32배 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

한편, Happel cell 모델을 통해 예측한 MFI 값과 실험을 통해 측정된 MFI 값을 비교한 결과(Fig. 9), 다양한 인자가 변하여도 Happel cell 모델을 사용한 예측 MFI값이 실측한 MFI 값을 매우 유사하게 예측할 수 있어, 막오염 지수 예측에 매우 좋은 모델로 판단된다. 또한, 이 모델은 random packing density로써 porosity가 실험조건에 따라 변하는 인자가 아닌 0.36으로 고정시켜 사용할 수 있어 기타 모델과 달리 근본적으로 fitting parameter 없이 막오염 지수를 예측하기에 유리하다.

4. 결 론

고도정수처리공정으로 RO/NF 막여과 공정 도입 시, 막오염 제어를 위한 전처리 공정 도입 필요성은 막오염 지수(SDI, MFI)로 판단하고 있다. 본 연구에서의 실험 결과, 막오염 지수는 다양한 인자들에 의해 영향을 받을 수 있으며, 이는 Happel cell 이론을 통해 예측이 가능하였다. $3\mu\text{m}$ 입자의 경우, $20\mu\text{m}$ 일 때의 MFI 값보다 매우 크게 예측되었으며, 이는 모델에서 입자의 크기(a_p)와 관련되어 동일한 농도에서도 막 표면에 축적되는 입자의 갯수가 훨씬 많아 케익 형성이 빠르게 진행되어 막오염을 일으키는 것으로 판단된다. 또한, 입자 농도가 $0\sim 200\text{mg/L}$ 로 증가함에 따라 MFI가 증가하는 경향을 보였으며, 역시 입자의 갯수가 많아져 막오염이 증가하는 결과로 모델에서는 C_0 값의 증가로 설명이 가능하다. 한편, 막의 재질이 변화함에 따라 MFI값이 다를 수 있었으며, PVDF 막보다 막 자체의 저항값(R_m)이 큰 MCE 막에서 MFI가 크게 측정되어, R_m 이 증가함에 따라 MFI가 증가하는 것을 알 수 있었다. Happel cell 모델을 통해 여러 가지 인자들에 의한 MFI 변화를 예측한 결과는 실제 MFI 측정값과 매우 유사하였으며, 따라서 Happel cell 모델을 통해서 MFI 측정 없이도 막오염 정도의 예측이 가능할 것으로 판단된다. 하지만, pore plugging 등의 내부 막오염(internal fouling)과 같은 다른 막오염 메커니즘이 있을 경우에는 Happel cell 모델의 적용이 불가하므로, 이를 적용할 수 있는 새로운 이론과 함께 막오염 지수 예측 모델 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 “상업용 FRM(Fouling Resistant Membrane)의 비교 평가 및 Fouling Mechanism 규명” 과제의 일환으로 (주)새한 CSM의 연구비 지원에 의해

수행되었습니다.

참고문헌

- Boerlage, Siobhan F.E., Kennedy, M.D., Dickson, M.R., El-Hodali, Dima E.Y., Schippers, J.C. (2002) The Modified Fouling Index using Ultrafiltration Membranes (MFI-UF): Characterization, Filtration Mechanisms and Proposed Reference Membrane, *Journal of Membrane Science*, **197**, pp. 1-21.
- Boerlage, Siobhan F.E., Kennedy, M., Aniyee, M.P., Schippers, J.C. (2003) Applications of the MFI-UF to Measure and Predict Particulate Fouling in RO Systems, *Journal of Membrane Science*, **220**, pp. 97-116.
- Brauns, E., Van Hoof, E., Molenberghs, B., Dotremont, C., Doyen, W., Leysen, R. (2002) A New Method of Measuring and Presenting the Membrane Fouling Potential, *Desalination*, **150**(1), pp. 31-43.
- Hong, S., Faibish, Ron S., Elimelech, M. (1997) Kinetics of Permeate Flux Decline in Crossflow Membrane Filtration of Colloidal Suspensions, *Journal of Colloid and Interface Science*, **196**, pp. 267-277.
- Lyonnaise des Eaux. (1996) *Water Treatment Membrane Processes*, pp. 9.16-9.29, AWWARF, McGraw-Hill, New York.
- Schippers, J.C., Verdouw, J. (1980) The Modified Fouling Index, a Method of Determining the Fouling Characteristics of Water, *Desalination*, **32**, pp. 137-148.
- Song, L., Elimelech, M. (1995) Theory of Concentration Polarization in Crossflow Filtration, *Journal of the Chemical Society Faraday Transactions*, **91**, pp. 3389-3398.
- Standard Test Method for Silt Density Index (SDI) of Water, ASTM D4189-95, pp. 395-397.
- Vrouwenvelder, J.S., Kappelhof, J.W.N.M., Heijman, S.G.J., Schippers, J.C., Kooij, D. (2003) Tools for Fouling Diagnosis of NF and RO Membranes and Assessment of the Fouling Potential of Feed Water, *Desalination*, **157**(1-3), pp. 361-365.
- Wijmans, J. G., Nakao, S., van den Berg, J.W.A., (1985) Hydrodynamic Resistance of Concentration Polarization Boundary Layers in Ultrafiltration, *Journal of Membrane Science*, **22**, pp. 117-135.