

가압식 분리막 여과에서 무기입자의 존재가 유기파울링에 미치는 영향

장 호 석 · 김 정 환[†]

인하대학교 환경공학과

(2020년 4월 24일 접수, 2020년 4월 27일 수정, 2020년 4월 27일 채택)

Effect of Inorganic Particles on Organic Fouling in Pressurized Membrane Filtration

Hoseok Jang and Jeonghwan Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Inha University, Inharo-100, Incheon 22212, Republic of Korea

(Received April 24, 2020, Revised April 27, 2020, Accepted April 27, 2020)

요 약: 본 연구에서는 가압식 분리막 여과에서 무기입자의 존재가 유기파울링에 미치는 영향을 관찰하였다. 유기파울링의 유발을 위해 알긴산나트륨(sodium alginate, SA)를 이용한 정밀여과 실험에서 무기 실리카(SiO₂) 입자의 존재 유무와 상관없이 분리막 파울링은 여과초기 완전공극막힘에서 여과시간이 경과할수록 케이크 형성에 의해 주로 지배되었다. 그러나 무기입자의 존재 시 정압여과에서 알긴산나트륨 파울링 케이크 비저항값과 압축성은 상대적으로 낮게 관찰되었고 이로 인해 낮은 파울링 속도가 관찰되었다. 동일한 시료를 이용한 정량여과 실험을 수행한 결과 정압여과에 비해 정량여과에서 여과초기 공극막힘현상 및 파울링 속도는 더욱 증가하였다. 이와 같은 현상은 파울링층이 지닌 압축성으로 막간차압의 증가 시 케이크 비저항값이 함께 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 알긴산나트륨과 실리카 입자가 함께 존재 시 알긴산나트륨이 단독으로 존재하는 것보다 수리학적 세정을 통한 파울링 제거효과는 더욱 좋은 것으로 관찰되었다.

Abstract: In this study, effect of inorganic particles on organic fouling was investigated by a laboratory-scaled pressurized membrane filtration. In order to cause organic fouling, sodium alginate (SA) was used as a feed solution. Regardless of the presence of inorganic SiO₂ particles, the complete pore blocking played an important role in determining the fouling rate during the initial period of membrane filtration. However, the formation of cake layer resulted in the membrane fouling more dominantly as filtration time progressed. In the presence of inorganic particles, both specific cake resistance and compressibility associated with the membrane fouling formed were relatively lower than that without SiO₂ particles. Membrane fouling was more severe at constant flux mode of filtration than that observed at constant pressure mode probably due to the concomitant increase of compressibility of fouling layer with transmembrane pressure (TMP). It was found that the presence of SA and SiO₂ particles in feed solution provided the synergistic effect on the hydraulic backwashing to reduce membrane fouling as compared to the SA solution alone without the inorganic particles.

Keywords: pressurized membrane filtration, organic fouling, inorganic particles, hydraulic cleaning

1. 서 론

저압 분리막 기술은 정수처리와 하수처리뿐만 아니라 산업폐수처리 등 다양한 수처리 분야에서 적용되고 있다. 정밀여과막(microfiltration membrane)과 한외여과막(ultrafiltration membrane)은 작은 부지면적, 용이한 자동화, 높은 유기물 및 바이러스 제거율 등의 장점을 지

니고 있어 지표수 처리를 위한 공정으로서 높은 관심을 받고 있다[1]. 지난 약 20여 년간 저압 분리막 시장은 빠르게 성장하였으나 운전 시 필연적으로 발생하는 분리막 막힘현상(파울링)은 여전히 분리막 공정 적용에 있어 해결해야 할 과제이다[1-3]. 분리막 파울링 현상은 수투과도 감소뿐 아니라 분리막 역세, 정세, 공기폭기 그리고 화학세정 등 재래식 혹은 고도화된 파울링 감소기술

[†]Corresponding author(e-mail: jeonghwankim@inha.ac.kr, <http://orcid.org/0000-0002-4252-6153>)

의 적용을 요구하므로 분리막의 운전비용을 크게 상승시킬 수 있다.

산/염기 용액을 통한 화학적 세정은 효과적으로 분리막 파울링을 제거하기 위해 일반적으로 적용하는 기술이나 약품사용으로 인한 비용의 상승 및 분리막 손상에 의한 소재의 수명 단축을 야기한다. 따라서 화학 세정 빈도를 저감시키기 위한 수리화학적 물리적 세정은 분리막 수처리 적용에서 매우 중요하다[3]. 수리화학적 물리적 세정은 주로 투과수를 이용해 이루어지나 그 세정 효과는 투과수의 성장, 파울링 유발물질의 성장, 이온 강도, 여과방식, 세정빈도와 강도 등 다양한 인자에 의해 영향을 받을 수 있다[4,5]. 지표수를 처리하는 저압 분리막 공정에서 파울링 현상을 유발시키는 주된 물질은 주로 휴민산, 다당류, 단백질, 탄수화물 등으로 구성되어 있다[4,6]. 이 중 다당류는 지표수 처리에 있어 물리 세정에 의한 제거가 어렵게 만드는 물질로 알려져 있으며 하수처리 시에도 주요한 파울링 유발물질로 알려져 있다[6,7]. 분리막 여과 시 발생하는 유기파울링은 함께 존재하는 무기입자와의 상호 작용에 따라 파울링 속도의 경향이 매우 다르게 나타날 수 있어 이에 대한 보다 더 나은 이해가 필요하다[8]. 특히, 기존의 연구들은 재래식 수처리 공정에서 수행되는 응집/침전으로 입자성 물질이 제거된 모래여과 공정과의 비교를 위해 분리막의 유기파울링에 대해서 주로 이루어져 지표수의 직접적인 분리막 여과에서 이루어지는 입자성 물질을 포함한 유-무기 혼합 파울링에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다[8]. 또한 가압식 분리막 공정은 막간 차압은 일정하나 파울링에 의해 투과 유량이 감소하는 정압여과와 파울링에 의한 투과 유량 감소에 대해 막간 차압을 증가시켜 일정한 투과 유량을 계속 생산하는 정량 여과방식으로 나뉘나 이 두 여과방식이 유기파울링에 미치는 영향에 관한 정보는 여전히 제한적이다[5,9].

본 연구에서는 분리막 수처리에서 무기 입자를 대표하는 실리카(SiO_2) 입자와 유기파울링을 대표하는 알긴산나트륨(SA; sodium alginate)을 이용하여 정량여과 조건에서 가압식 정밀여과를 수행하고 무기입자의 존재가 유기파울링에 미치는 영향을 실험적으로 관찰하였다. 또한 Hermia 모델을 통해 결과치와 예측치를 비교하고 해석함으로써 지배적인 파울링 기작에 대해 이해하고자 하였다. 또한 주기적인 세정을 수행하는 가압식 정밀여과 시스템의 운전을 통해 정압/정량여과 조건에서 무기 입자 유무에 따른 파울링 현상을 비교하였다.

2. 실험 및 분석

2.1. 대상시료

본 연구에서는 지표수의 무기 입자성 물질을 대표하는 실리카(SiO_2 , Samchun chemical, Korea) 입자를 10 mg/L으로 제조하였고 알긴산나트륨(sodium alginate, Duksan, Korea) 2 mg/L을 이용해 혼합용액을 제조하였다[8,10,11]. 실험 전 24시간 동안 교반한 100 mg/L의 알긴산나트륨 농축액을 각 실험 조건에 맞는 농도로 수돗물을 통해 희석하였고, 2~3 μm 입도분포가 약 40% 그리고 60~90 μm 입도분포가 약 60%인 실리카 입자를 투여한 뒤 3시간 동안 교반한 후 여과실험을 수행하였다.

2.2. 정압 여과 실험 및 Hermia 모델

분리막 파울링의 기작을 이해하기 위해 Hermia의 파울링 모델을 사용하여 정압 전량여과에서 무기 입자의 유무에 따른 주요 파울링 기작을 관찰하였다. 여과 대상수 200 mL를 평균 공극 크기 0.1 μm 의 mixed cellulose ester 재질의 평막(A010A047A, Advantec, Japan)과 전량 여과 셀(HP4750, Sterlitech, USA), 그리고 질소가스를 통해 0.2 및 0.5 bar의 정압 조건에서 전량 여과를 수행하였고, 시간에 따른 투과 유량 감소는 전자저울(Adventurer Pro, Ohaus, USA)을 통해 측정하였다.

실험 결과를 해석하기 위해서 Hermia의 여과 모델을 적용하였다. Hermia 모델은 Table 1과 같이 파울링 기작을 공극수축(pore constriction), 완전공극막힘(complete blocking), 중간공극막힘(intermediate blocking), 케이크형성(cake formation)의 4가지의 기작으로서 해석하는 모델이다[12]. Table 1에서 J는 투과 플럭스, J_0 는 초기 투과 플럭스, t는 여과 시간, K_{pc} 는 공극 수축, K_{cb} 는 완전공극막힘, K_{ib} 는 중간공극막힘, K_{cf} 는 케이크형성에 대한 Hermia 상수이며 C_f 은 여과 대상수의 오염물질의 양, ρ 는 여과 대상수의 밀도, e는 분리막의 두께, σ 는 투과 유량 당 막힌 면적, α_{Ave} 는 평균 케이크 비저항, μ 는 투과수의 점도이다. 본 연구에서는 실험에서 얻은 투과 플럭스 값을 통해 각각의 기작에 해당하는 Hermia 상수를 MatLab를 이용해 최소 제곱법을 통해 구하였다(MatLab R2020a, Mathworks, USA). 이를 토대로 정압 여과 조건에서 플럭스의 감소를 모사, 실험 결과 값에 대해 모사 값의 결정계수 R^2 이 가장 큰 기작을 지배적인 파울링 기작으로 규정하였다. 하나의 파울링 기작이 여과 시간 전체에 대해 충분한 설명력은 갖지 못하는

Table 1. Hermia Blocking filtration Law

Fouling mechanism	Expression	Parameter
Pore constriction	$J = \frac{4J_0}{(K_{pc}J_0t + 2)^2}$	$K_{pc} = \frac{2C_f}{\rho_f e}$
Complete blocking	$J = J_0 \exp(-K_{cb}t)$	$K_{cb} = J_0\sigma$
Intermediate blocking	$J = \frac{J_0}{K_{ib}J_0t + 1}$	$K_{ib} = \sigma$
Cake formation	$J = \frac{J_0}{(2K_{cf}J_0^2t + 1)^{\frac{1}{2}}}$	$K_{cf} = \frac{\alpha_{ave}C_{pl}\mu}{\rho_f e}$

경우($R^2 < 0.90$), 여과 시간 경과에 따라 지배적인 파울링 기작이 변화하는 것으로 가정하고 두 개의 파울링 기작으로써 Hermia 상수를 구하였다.

또한, 아래의 식 (1)와 같이 정압여과에서는 시간에 따른 순수 투과 플럭스 대비 여과 대상수의 투과 플럭스 비율, 정량여과에서는 순수 수투과도 대비 여과 대상수의 수투과도의 비율인 정규화 투과 플럭스 및 정규화된 수투과도를 통해 파울링에 의한 분리막 여과 성능을 나타내었다.

$$\text{Normalized flux} = \frac{J_t}{J_0}$$

$$\text{Normalized permeability} = \frac{J_t/\Delta P_t}{J_0/\Delta P_0} \quad (1)$$

여기서 J_0 는 순수 투과 플럭스($m^3/m^2/s$), ΔP_0 는 순수 투과 플럭스에서의 막간 차압(bar), J_t 는 시간 t 에서의 여과 대상수의 투과 플럭스($m^3/m^2/s$), ΔP_t 는 시간 t 에서의 막간 차압(bar)이다.

알긴산나트륨과 무기 실리카 입자간의 상호 작용을 알아보기 위해 정전기적인 특성을 나타내는 지표인 제타 전위를 측정하였고(ELS-Z, Photal Otsuka Electronics, Japan), 무기입자의 존재 유무에 따른 오염물질의 크기 분포를 관찰하기 위해 용액의 입도 분석을 수행하였다(Mastersizer 2000, Malvern Pnalytical, Netherlands). 분리막 표면의 파울링 형성을 확인하고자 주사 전자 현미경(S-4300SE, Hitachi, Japan)을 통해 여과 후 분리막의 표면을 관찰하였다.

2.3. 정압/정량 여과 실험

앞서 정량 여과 실험을 통해 얻은 Hermia 모델 해석

결과를 바탕으로 정압/정량 여과에 따른 파울링 거동을 관찰하고자 아래의 Fig. 1과 같이 실험실 규모의 정밀 여과 중공사 분리막 수처리 시스템을 구축하였다. 분리막은 평균 공극크기 $0.05 \mu m$ 를 갖는 정밀여과 중공사 PSf (polysulfone) 100 가닥으로 구성되어 있는 총 막 면적 $0.11 m^2$ 의 가압식 모듈을 사용하였으며 해당 분리막 모듈의 순수 투과도는 $594 \pm 94 L/m^2/hr/bar$ 로 측정되었다. 대상수의 투과/역세/정세를 수행하기 위한 마그네틱 펌프(WT3000-1JA/MG200, Longer pump, China)와 각 단위 공정을 제어하기 위한 반자동 볼밸브(AT24-3T, Valcon, Korea), 투과 유량을 측정하기 위한 프로펠러형 디지털 유량계(FHK G1/4, Digmesa, Swiss), 막간 차압을 측정하기 위한 압력계(PSAN-LICA, Autronics, Korea)로 구성되어 있으며 압력 및 유량 기록, 여과, 역세, 정세의 각 공정의 전환 및 정압/정량 유지를 위한 시스템 제어는 program logic controller (PLC)를 통하여 수행되었다. 본 연구에서 정압 여과는 0.17 bar의 압력 조건에서, 정량 여과는 0.17 bar의 순수투과 플럭스에 해당하는 $100 L/m^2/h$ 조건에서 수행되었고, 여과(filtration) 30분 - 역세(backwashing) 30초 - 정세(forward flushing) 30초를 반복하여 총 투과 유량 15 L를 달성할 때까지 분리막 공정을 지속하였다. 역세 및 정세수는 투과수를 사용하였고, 역세는 투과 압력 혹은 유량의 2배, 정세는 투과 압력 혹은 유량과 동일한 압력 혹은 유량을 적용하여 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 파울링 기작 분석

정량 여과 셀을 통해 알긴산나트륨 2 mg/L 단독용액과 알긴산나트륨 2 mg/L와 실리카 입자 10 mg/L가 혼

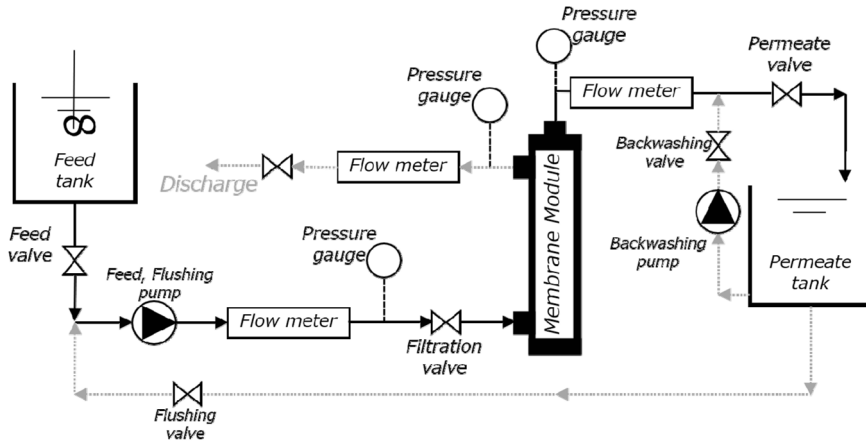


Fig. 1. MF hollow fiber membrane water treatment system.

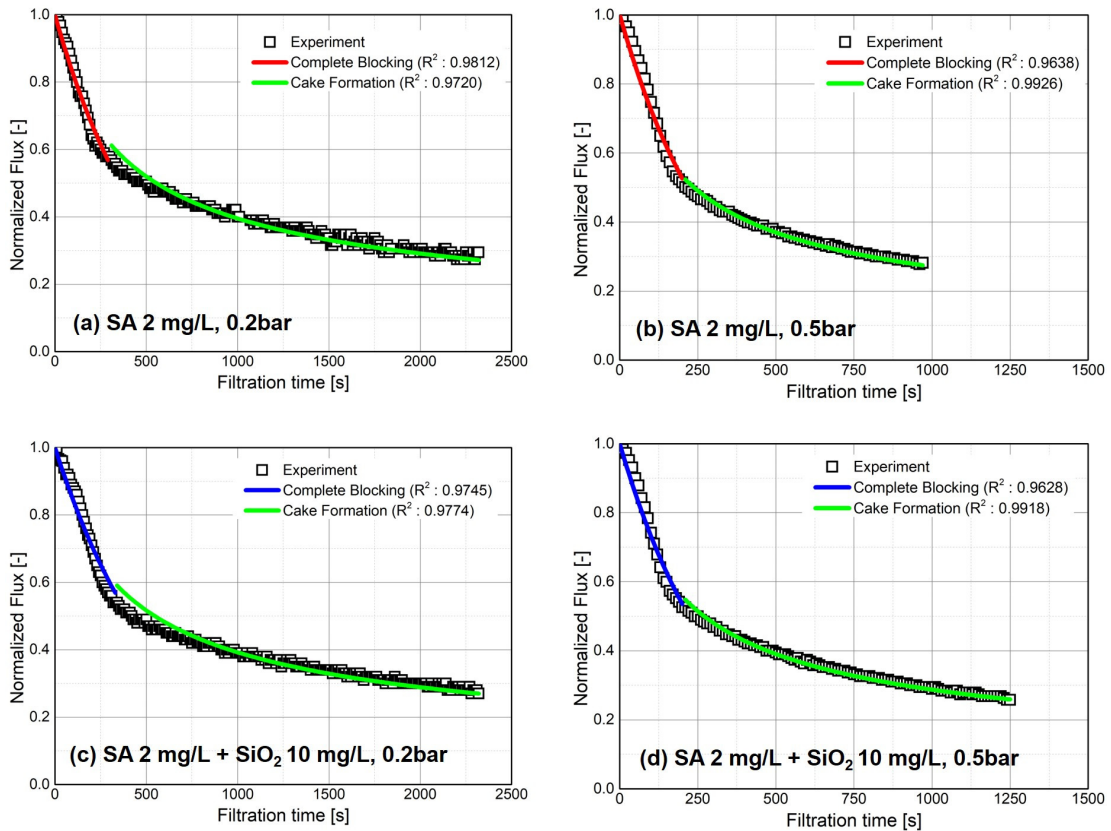


Fig. 2. Fouling behavior and mechanism depend on presence of inorganic silica particle and applied pressure.

합된 혼합용액을 이용하여 0.2와 0.5 bar 압력에서 여과하고 시간에 따른 투과 플럭스를 관찰한 실험 결과 값과 Hermia 모델을 통해 모사된 값을 Fig. 2에 나타내었다. 실험 결과 투과 플럭스는 초기에 급격하게 발생하다가 시간에 경과할수록 그 감소폭은 줄어들었으며 이와 같은 현상은 실리카 입자의 유무에 상관없이 유사하

게 관찰되었다. 낮은 압력 조건에서는 실리카의 존재 유무에 상관없이 대상액 200 mL를 여과하는데 비슷한 시간이 소요되었으나, 높은 압력 조건에서는 실리카가 존재하는 경우가 실리카가 존재하지 않는 경우보다 긴 여과 시간을 필요로 하였다. Hermia 모델을 적용하여 지배적인 파울링 기작을 구한 결과 모든 실험 조건에서 파

Table 2. Dominant Fouling Mechanisms Determined by Hermia Model

Applied pressure	Feed composition	First phase	Second phase
0.2 bar	SA	Complete blocking $K_{cb} = 1.95 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	Cake formation $K_{cf} = 1.59 \times 10^4 \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$
	SA + SiO ₂	Complete blocking $K_{cb} = 1.71 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	Cake formation $K_{cf} = 1.46 \times 10^4 \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$
0.5 bar	SA	Complete blocking $K_{cb} = 3.20 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	Cake formation $K_{cf} = 6.74 \times 10^4 \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$
	SA + SiO ₂	Complete blocking $K_{cb} = 3.12 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	Cake formation $K_{cf} = 8.19 \times 10^4 \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$

울링 기작은 여과 초기에는 완전공극막힘이 지배적이었으나 여과 시간 경과에 따라 케이크층 형성이 더욱 지배적인 것으로 관찰되었다.

실험 조건에 따른 Hermia 상수 및 지배적인 파울링 기작을 Table 2에 제시하였다. 0.2 및 0.5 bar 여과 조건에서 완전공극막힘 상수 값(K_{cb})은 실리카 입자 존재 시 각각 12.3 및 2.5% 감소하여 상대적으로 낮은 압력에서 완전공극막힘을 줄이는데 기여하는 것으로 나타났다. 이는 낮은 압력 조건에서는 실리카 입자에 의해 막힌 공극에 의해 상대적으로 알긴산나트륨에 의한 공극막힘이 줄어들었으므로 일어난 결과로 여겨진다. 또한 0.2 bar 조건에서 실리카 입자의 유무에 따른 케이크 상수 값(K_{cf})은 큰 차이가 없었으나 상대적으로 높은 0.5 bar 조건에서 케이크 상수 값은 실리카 입자가 존재할 경우 약 18% 증가하였다. 이는 높은 압력조건에서는 상대적으로 빠른 여과 유속에 의해 실리카 입자와 알긴산나트륨이 동시에 막 표면으로 침강하면서 보다 압축성 있는 케이크층을 형성하고 케이크층이 압축되면서 보다 높은 케이크 상수 값을 갖게 된 것으로 판단된다[14-16].

3.2. 제타전위와 입도분석

본 연구에서 사용된 알긴산나트륨 및 실리카 입자의 제타 전위 분석 결과, 알긴산나트륨 단독 용액과 실리카 단독 용액의 제타 전위는 각각 -59.25, -17.57 mV로 나타났으나 알긴산나트륨 + 실리카 혼합 용액에서는 -25.14 mV로 표면전하가 감소하였다. 이는 알긴산나트륨보다 상대적으로 낮은 제타전위를 지닌 실리카 입자의 존재로 인해 표면전하의 중화효과가 발생한 것으로 사료된다. 용액을 0.2 bar에서 여과한 후 분리막 표면을 전자 현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 알긴산나트륨 + 실리카 혼합용액 여과 후 막 표면에서 실리카 표면에 케이크를 형성한 알긴산나트륨이 일부 관

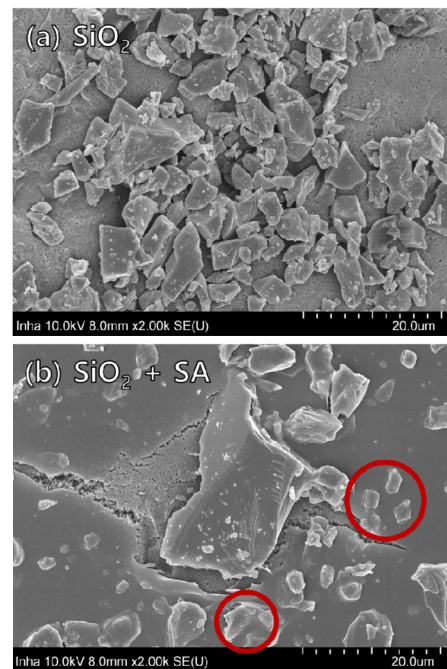


Fig. 3. Plain view of fouling layer formed by (a) SiO₂ only and (b) SiO₂ + SA solution at 0.2 bar.

찰되나, 대부분의 알긴산나트륨은 막 표면에 케이크층을 형성하는 것으로 나타나 혼합여과에서 유발된 파울링 물질은 알긴산나트륨으로 여겨진다. 또한, 이러한 케이크 구조는 높은 압축성 등으로 파울링 속도를 더욱 증가시켜 여과 성능 하락에 케이크층이 더 지배적인 역할을 한 것으로 판단된다.

3.3. 무기입자 존재에 따른 수리학적 세정효과

정압/정량 여과 방식 및 무기 입자 존재에 따른 파울링 거동과 세정 효과를 관찰하기 위해 여과(filtration) 30분 - 역세(backwashing) 30초 - 정세(forward flushing) 30초를 반복하여 수행하는 정밀여과 증공사 시스템을

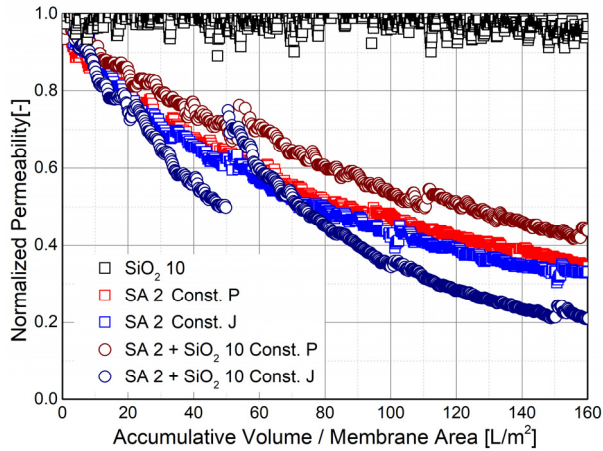


Fig. 4. Fouling behavior at constant vs. constant flux mode of filtration with pressurized membrane system.

운용하고 단위 막 면적 당 누적 투과량에 따른 수투과도를 Fig. 4에 비교하였다. 실리카 입자 단독으로는 투과도에 큰 영향을 미치지 못하였으나, 알긴산나트륨이 존재하는 용액의 여과에서는 주기적인 역세와 정세를 수행하였음에도 불구하고 정압과 정량여과 방식에 상관없이 투과도는 점진적으로 감소하였다. 그러나 세정효과는 알긴산나트륨 + 실리카 혼합용액을 정압조건에서 수행하였을 때 상대적으로 좋았으며 정량여과와 비교 시 약 20% 이상의 투과 플럭스 향상효과가 관찰되었다. 실리카 입자가 없는 순수 알긴산나트륨 용액의 경우 정압과 정량여과에 따른 투과 플럭스 감소경향은 큰 차이가 없이 거의 유사한 것으로 관찰되었다. 앞서 언급된 바와 같이 알긴산나트륨 + 실리카 혼합용액의 여과로부터 형성된 케이크층은 정량여과에서 압력이 증가할수록 압축성으로 케이크 저항 값이 증가하게 되고 이로 인해 수리학적 세정효과가 정압여과에 비해 상대적으로 낮았던 것으로 사료된다. 실리카 유무에 따른 수리학적 세정효과를 비교한 결과 알긴산나트륨 + 실리카 용액의 경우 알긴산나트륨 용액을 단독으로 적용하였을 때보다 분리막 세정효과는 다소 향상된 것으로 관찰되었다. 이는 실리카입자의 존재에 의해 여과 초기 공극막힘에 의한 파울링 현상이 다소 감소됨으로 인한 결과로 여겨진다. 그러나 모든 용액 조건에서 분리막 세정효과는 여과 시간 지속에 따라 감소하는 것으로 나타났다, 2, 3차 세정 시 세정에도 불구하고 수투과도 회복은 관찰되지 않았다. 이는 여과 시간 지속에 따라 케이크층이 압축됨에 따라 수리학적 세정 조건에서도 효

과적으로 제거될 수 없었던 것으로 사료된다.

4. 결 론

가압식 분리막 여과에서 무기입자의 유무가 유기 파울링에 미치는 영향을 다양한 운전조건에서 관찰하였다. 실험결과, 무기입자의 유무에 관계없이 여과초기에는 완전공극막힘이 지배적이었으나 여과시간이 증가할수록 케이크층 형성이 지배적인 파울링 기작으로 관찰되었다. 알긴산나트륨 + 실리카 혼합용액에서 공극막힘에 대한 실리카 입자의 기여도는 상대적으로 낮은 운전압력에 더 높았으며 반면 높은 운전압력에서 케이크층 형성에 대한 실리카 입자의 기여도는 더욱 증가하였다. 알긴산나트륨 + 실리카 혼합용액을 이용해 수리학적 세정효과를 정압과 정량여과에서 관찰하여 비교한 결과 정량여과에서 세정효과는 상대적으로 낮았으며 이는 케이크층 압축성으로 인해 여과시간에 따라 막간차압이 증가하면서 저항 값도 함께 증가된 것으로 사료된다. 본 연구결과는 고탁도 원수처리 혹은 처리수 잔류탁도 제거를 위한 분리막 여과 적용 시 운전모드와 세정최적화를 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgements

This subject is supported by Korean Ministry of Environment as “Global Top Project” (2016002100002).

Reference

1. W. Gao, H. Liang, J. Ma, M. Han, Z. Chen, Z. Han, and G. Li, “Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: A review”, *Desalination*, **272**, 1 (2011).
2. P. Xiao, F. Xiao, D. S. Wang, T. Qin, and S. P. He, “Investigation of organic foulants behavior on hollow-fiber UF membranes in a drinking water treatment plant”, *Sep. Purif. Technol.*, **95**, 109 (2012).
3. H. Chang, H. Liang, F. Qu, B. Liu, H. Yu, X. Du, G. Li, and S. A. Snyder, “Hydraulic backwashing for low-pressure membranes in drinking water treatment: A review”, *J. Membr. Sci.*, **540**, 362 (2017).

4. A. W. Zularisam, A. Ahmad, M. Sakinah, A. F. Ismail, and T. Matsuura, "Role of natural organic matter (NOM), colloidal particles, and solution chemistry on ultrafiltration performance", *Sep. Purif. Technol.*, **78**, 189 (2011).
5. H. Chang, B. Liu, H. Liang, H. Yu, S. Shao, and G. Li, "Effect of filtration mode and backwash water on hydraulically irreversible fouling of ultrafiltration membrane", *Chemosphere*, **179**, 254 (2017).
6. M. T. Alresheedi, B. Barbeau, and O. D. Basu, "Comparisons of NOM fouling and cleaning of ceramic and polymeric membranes during water treatment", *Sep. Purif. Technol.*, **209**, 452 (2019).
7. K. Kimura, Y. Hane, Y. Watanabe, G. Amy, and N. Ohkuma, "Irreversible membrane fouling during ultrafiltration of surface water", *Water Res.*, **38**, 3431 (2004).
8. M. Schulz, A. Soltani, X. Zheng, and M. Ernst, "Effect of inorganic colloidal water constituents on combined low-pressure membrane fouling with natural organic matter (NOM)", *J. Membr. Sci.*, **507**, 154 (2016).
9. D. J. Miller, S. Kasemset, D. R. Paul, and B. D. Freeman, "Comparison of membrane fouling at constant flux and constant transmembrane pressure conditions", *J. Membr. Sci.*, **454**, 505 (2014).
10. K. S. Katsoufidou, D. C. Sioutopoulos, S. G. Yiantsios, and A. J. Karabelas, "UF membrane fouling by mixtures of humic acids and sodium alginate: Fouling mechanisms and reversibility", *Desalination*, **264**, 220 (2010).
11. H. C. Kim and B. A. Dempsey, "Membrane fouling due to alginate, SMP, EfOM, humic acid, and NOM", *J. Membr. Sci.*, **428**, 190 (2013).
12. J. Hermia, "Constant pressure blocking filtration law application to powder-law non Newtonian fluid", *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **60**, 183 (1982).
13. S. Lee and S. River, "Relating organic fouling of reverse osmosis membranes to intermolecular adhesion forces", *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 980 (2006).
14. A. Charfi, H. Jang, and J. Kim, "Membrane fouling by sodium alginate in high salinity conditions to simulate biofouling during seawater desalination", *Bioresour. Technol.*, **240**, 106 (2017).
15. A. Charfi, H. Jang, and J. Kim, "Hydraulic cleaning effect on fouling mechanisms in pressurized membrane water treatment", *Membr. J.*, **27**, 519 (2017).
16. K. Listiarini, W. Chun, D. D. Sun, and J. O. Leckie, "Fouling mechanism and resistance analyses of systems containing sodium alginate, calcium, alum and their combination in dead-end fouling of nanofiltration membranes", *J. Membr. Sci.*, **344**, 244 (2009).