

## 회분식 막여과 시스템에서 약품역세가 여과성능에 미치는 영향

### The Effect of Chemical Backwash on Filtration Performance of Batch Membrane Filtration System

김관엽 · 이의종 · 권진섭 · 김형수\*

Kim, Kwan Yeop · Lee, Eui Jong · Kwon, Jin Sub · Kim, Hyung Soo\*

성균관대학교 건설환경시스템공학과 환경공학연구소

(2009년 8월13일 접수, 2009년12월14일 채택)

#### Abstract

The main object of this work was to determine the influence of periodic chemical backwash on filtration resistance in membrane filtration system. In this work Hermia's models were used to investigate the fouling mechanisms involved in the microfiltration of 0.45 $\mu$ m filtered sewage feed. Batch microfiltration experiments were performed at transmembrane pressure 0.4 bar and different feed SCOD concentration (9 ~ 67 mgSCOD/L). The results showed that the best fit to experimental data corresponded to the intermediate blocking model followed by the standard and complete blocking model for all the experimental conditions tested. From the simulation results of filtration performance, it was found that in order to maintain sustainable operation of membrane filtration system, irreversible foulant component accumulated continuously on membrane surface and/or pore must be effectively removed. In addition, it was verified that periodic chemical backwash using NaOCl or NaOH effectively improved filtration performance of membrane.

**Key words** : membrane filtration, fouling, chemical backwash, pore blocking resistance, adsorption resistance, filtration performance

**주제어** : 막여과, 파울링, 약품역세, 공극폐색저항, 흡착저항, 여과성능

#### 1. 서론

분리막을 이용한 하폐수 처리기술은 유럽이나 일본을 중심으로 일찍부터 다양한 형태의 응용방법들에 대한 연구가 진행되어 왔다. 하지만 90년대 초반까지는 분리막 비용과 에너지 비용 등 고비용의 문제와 막폐색의 문제 등으로 인하여 현실적인 응용기술로 발전하지 못하고 학문적 연구의 영역이나 특수한 경우에 한정되어 적용되어 왔다. 하지만

1990년대 초반부터 활성슬러지 반응조에 분리막을 침지시키고 폭기과정에서 발생하는 공기방울에 의한 상향수류를 분리막의 폐색을 억제하는 효과적인 수단으로 활용하는 형태의 침지형, 활성슬러지 결합형 분리막 활용방안이 제시되면서 그 동안 분리막 기술의 현장적용상의 가장 큰 장애요인이었던 막폐색 문제가 상당부분 완화되었으며 막폐색 억제를 위한 에너지 비용도 대폭 절감되게 되었다. 또한 분리막 제조공법의 개발과 생산수량의 증가를 통하여 분리막의 가

\* Corresponding author Tel:+82-31-290-7520, Fax:+82-31-290-7549, E-mail: sookim@skku.edu(Kim, H.S.)

격도 상당부분 절감되었다. 그러나 이런 기술개발을 통하여 초기 투자비용은 기존 하수처리시스템과 비슷한 수준으로 낮추었지만 분리막의 교체비용과 분리막 fouling의 수력학적 제어에 필요한 고에너지 등으로 인해 운전비용은 여전히 높다 (Judd, 2006).

MBR fouling을 제어하기 위해 국내외 적으로 많은 연구가 이루어지고 있으며 제어방법 또한 순환세정 장치 (임 등, 2004), 초음파 (김 등, 2006), 오존공기 세정 (김 등, 1995), 맥동원수공급 및 공기포요동세정 (김 등, 1995) 등 다양한 방법으로 접근되고 있다. Bella 등 (2006)은 매 여과 시간 9분당 1분의 주기로 처리수를 이용하여 역세척을 실시한 침지형 MBR에서 일부 가역적인 여과저항 성분이 비가역적으로 전환된다고 하였으며, 이 수력학적 비가역적인 fouling이 막여과 공정의 여과성능에 영향을 미치는 중요한 요소라고 하였다. 또한 Geng 등 (2007)은 운전이 지속되면서 장기적으로 비가역적인 여과저항 ( $R_a$ ) 값이 증가하여 결국 시스템의 한계차압에 이르게 하였다고 보고하였다. 한편, 화학세정에 관한 연구에서 Chang 등 (2002)은 완전히 fouling이 진행되어 한계차압 (또는 한계여과저항)에 도달한 분리막보다 부분적으로 오염이 진행된 분리막이 세정의 효율이나 경제성 면에서 유리하다고 하였으며, Zondervan 등 (2008)은 화학세정을 최적화 하는 것보다 시스템 운전 중의 fouling을 제어하는 것이 효율적이라고 하였다.

결국, MBR의 경제성을 높이기 위해서는 공정을 더욱 compact하게 만들어 부지 및 부대시설을 줄여야 하며 이를 위해서는 높고 안정적인 flux가 필수적이다. 이를 위해서는 운전 중 비가역적막오염의 제어가 필요하며 기존의 폭기나 초음파 등과 같은 물리적 제어로는 한계가 있다. 따라서 최근에는 EFM (Enhanced flux maintenance)이나 유지세정과 같은 운전 중 화학세정을 이용한 방법이 사용되고 있지만

이에 대한 정량적인 연구나 분리막의 고풍력스 운전에 대한 방안으로서의 적용은 미비한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 MBR 공정에서 고풍력스, 장기운전을 달성하기 위한 수단으로써 약품역세를 제안하였으며 회분식 막여과 장치를 이용하여 여과저항을 측정함으로써 foulant 부하에 따른 분리막 여과특성을 파악하고 여과저항 성분을 분석하였다. 약품은 차아염소산나트륨 (NaOCl)과 가성소다 (NaOH)를 이용하여 농도 및 접촉시간에 따른 fouling 회복능을 여과저항으로 정량화 하였으며 이를 통해 얻은 결과를 기초로 막여과 시 여과저항 전개를 시뮬레이션함으로써 약품역세에 의한 여과성능 향상 정도를 정량적으로 파악하여 막여과 공정에서 여과성능에 대한 약품역세의 영향을 확인하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 분리막

실험에 사용된 분리막은 일본 A사의 pencil형 가압식 hollow fiber 중공사 분리막으로 모듈의 실제 형태와 제원은 Table 1에 정리하였다.

### 2.2. 회분식 막여과 실험장치

회분식 막여과 실험장치는 Fig. 1과 같이 구성하였다. 운전 구동력은 질소가스의 압력으로 하였으며 압력용기에 여과원수를 채운 뒤, 분리막으로 전량여과 하였다. 분리막을 통해 여과된 처리수는 전자저울로 질량을 측정하여 pc를 통해 연속적으로 기록하였으며 순수 또는 역세용액을 펌프를 이용하여 분리막 모듈 하부로 공급하여 여과운전의 역방향으로 여과하는 역세를 실시하였다. 역세척 및 화학세정 후에는 압력용기에 원수를 순수로 대체하여 여과함으로써 투과

Table 1. Hollow fiber module

	Pencil type MF module	
	Material	PVDF (Polyvinylidene fluoride)
ID/OD [mm]	0.8 / 1.2	
Dimension [mm]	Φ25 × L100	
Pore size [μm]	0.12	
Filtration area [m <sup>2</sup> ]	0.0057	



능 및 회복률을 측정하였다. 원수는 하수처리장 원수를 0.45  $\mu\text{m}$  GF/C 여지로 여과하여 입자성 물질을 제거하여 사용하였으며 SCOD로서 foulant 농도를 나타내었다.

### 2.3. Foulant 부하에 따른 fouling 특성 파악 실험

Foulant 부하는 원수의 foulant 농도를 변화시키면서 일정 수량을 여과하는 방법(M-1)과 일정 foulant 농도의 원수를 여과수량을 변화시키는 방법(M-2)을 사용하여 제어하였다. foulant 농도는 원수를 순수로 희석하여 원하는 농도로 조절하여 사용하였으며 여과압력은 0.4 bar로 일정하게 제어하였다. fouling 특성 분석을 위한 실험조건은 Table 2에 정리하였다. 총여과저항 ( $R_t$ ) 중 공극폐색저항 ( $R_p$ )을 정량화하기 위해 역세수량을 증가시켜 가면서 감소되는 여과저항 성분을 산정하였으며 더 이상 감소되지 않을 때의 수량

을 역세수량으로 결정하였고, 이 때 감소된 여과저항값을 공극폐색저항 ( $R_p$ )로 하고, 총여과저항 ( $R_t$ )에서 수역세를 통해 제거되지 않고 남은 여과저항을 흡착저항 ( $R_a$ )로 간주하였다.

### 2.4. 약품역세 조건에 따른 여과저항 회복 실험

선행 실험과 같이 다양한 조건에서 fouling이 발생한 분리막을 수역세를 실시하여 공극폐색저항 ( $R_p$ )과 흡착저항 ( $R_a$ )을 정량화 한 뒤, 순수에 차아염소산나트륨 (NaOCl) 또는 가성소다 (NaOH)의 세정약품을 첨가하고 일정시간 정지하는 방식으로 약품용액의 농도와 접촉시간에 따라 흡착저항 ( $R_a$ )의 회복 특성을 평가하였다. 또한, 수역세와 약품세정을 결합한 약품역세를 적용하여 fouling이 발생한 분리막의 여과저항 회복 특성을 평가하였다. 약품역세에 의한

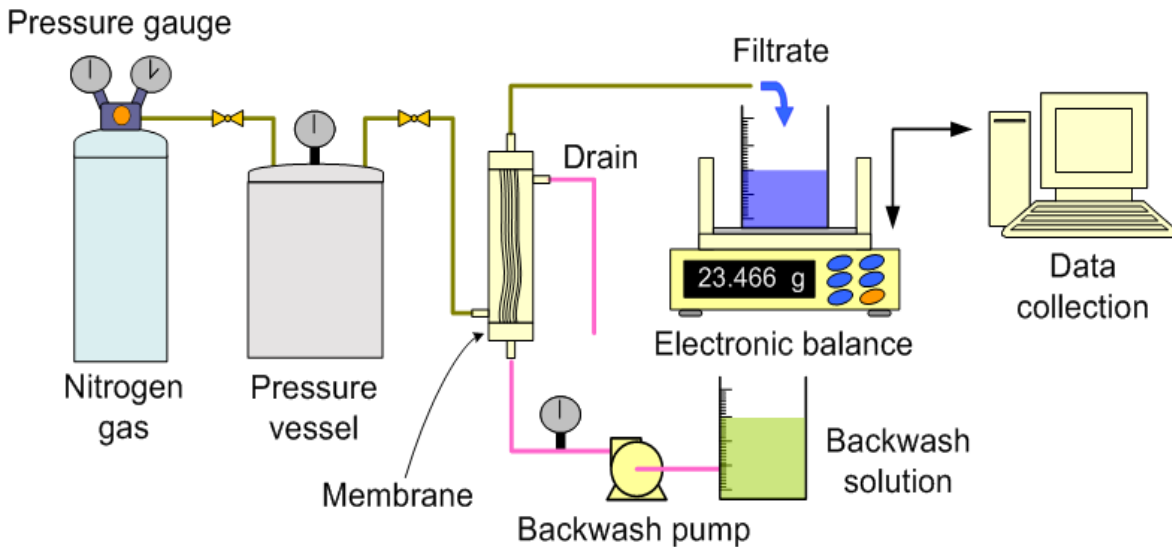


Fig. 1. Batch membrane filtration apparatus

Table 2. Experiment conditions

Module	Foulant conc. mgSCOD/L	Permeate vol. mL	Foulant loading mgSCOD/m <sup>2</sup>
M-1-1	9	300	474
M-1-2	18	300	947
M-1-3	25	300	1316
M-1-4	48	300	2526
M-1-5	67	300	3526
M-2-1	41	100	719
M-2-2	41	200	1439
M-2-3	41	300	2158
M-2-4	41	400	2877
M-2-5	41	500	3596

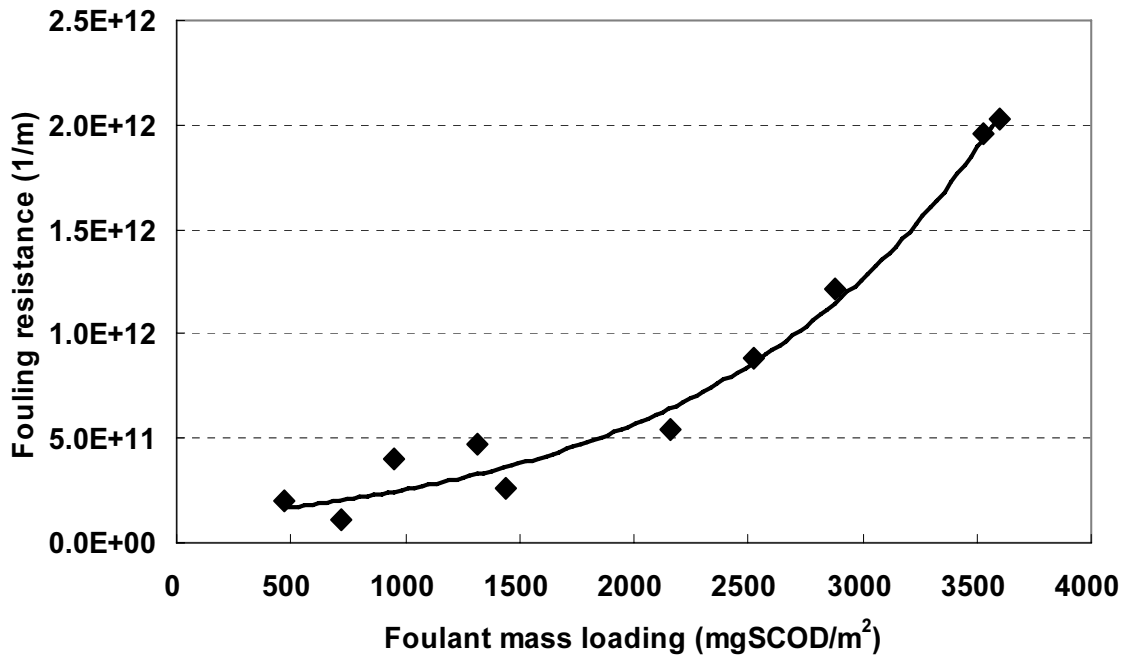


Fig. 2. Fouling resistance according to foulant mass loading

여과저항 회복량 산정시 역세수량 및 약품역세 수량은 선행 실험에서 결정된 수량을 적용하였으며 차아염소산나트륨의 농도는 100, 300, 600 ppm으로 하였고, 가성소다는 0.01, 0.025, 0.05 N을 적용하였다. 접촉시간은 각각의 약품에 대해 10분, 30분, 60분, 90분, 120분으로 하였다.

#### 2.5 약품역세를 적용한 막여과의 시뮬레이션

본 실험에서는 전량여과 회분식 여과실험에 대해 Hermia의 모델을 사용하여 fouling 메커니즘을 조사하였다. 회분식 막여과 실험에서는 원수를 0.45  $\mu\text{m}$ 로 전처리 하여 입자성 물질을 배제한 뒤 여과를 수행하였기 때문에 Hermia의 모델식 중 케익여과를 제외하고, 완전폐색, 중간폐색, 표준폐색의 3가지 모델에 본 회분식 막여과 실험의 결과를 적용하였다. 여과시간에 따라  $\ln(J)$ ,  $1/J$  및  $1/J^{0.5}$ 을 plotting 하여 선형관계를 확인하였으며 이 중 선형관계가 가장 잘 나타나는 모델식을 본 회분식 막여과 실험의 모델식으로 결정하였다. 결정된 모델식을 회분식 막여과 실험에서 여과수량과 여과저항의 관계에 적용하여 foulant 농도에 따른 폐색 계수를 도출하였다. 선행 실험에서 결정된 약품역세 조건에 따른 여과저항 회복값과 결정된 모델식 및 폐색계수를 이용하여 별도의 세정과정 없이 연속적으로 여과하는 control 운전과 수역세 및 약품역세가 적용된 막여과에서 여과수량

과 약품역세 조건에 따른 여과저항 변화를 MATLAB 7.6.0 (R2008a)로 시뮬레이션 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Foulant 부하에 따른 fouling 특성

M-1, M-2 실험에서 foulant 질량부하에 따른 fouling 저항 ( $R_f$ )은 Fig. 2에서와 같이 지수적인 관계를 갖는다. 이를 이용하여 임의의 foulant 농도 또는 여과수량에 따라 여과에 의해 분리막에 발생하는 fouling 저항 ( $R_f$ )을 예측할 수 있다.

적정 수역세의 수량을 결정하기 위해 foulant 질량부하가 가장 높은 3596 mgSCOD/m<sup>2</sup>에서 fouling이 발생한 분리막에 수량을 변화시키면서 수역세를 실시하였으며 순수투과능을 측정하여 fouling에 의한 여과저항( $R_f$ )을 알아보았다. Fig. 3에서와 같이 고유저항 ( $R_m$ )이  $1.393 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ 인 분리막이 여과 후 총여과저항은  $2.166 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 이었으며 여과에 의해 발생한 fouling의 의한 저항 ( $R_f$ )은  $2.027 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 이다. 이 분리막을 순수로 50 mL씩 증가시키면서 단계적으로 역세 하였을 경우 여과저항이 지속적

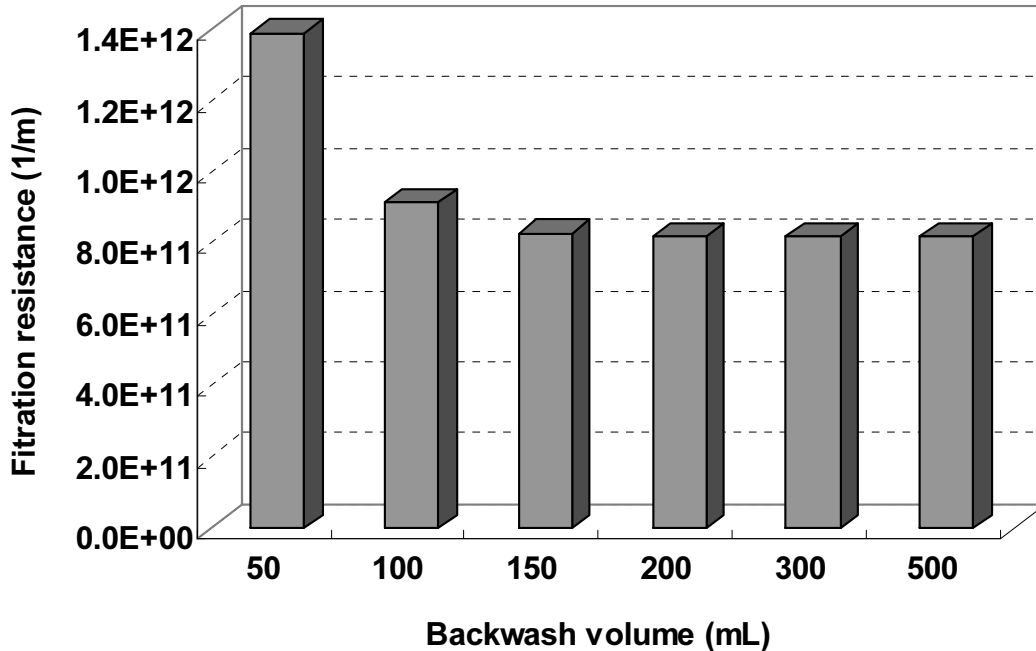


Fig. 3. Filtration resistance according to backwash volume (3596 mgSCOD/m<sup>2</sup>)

으로 감소하다가 역세수량이 200 mL 이후 여과저항 ( $8.200 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ )의 감소는 나타나지 않았다. 이는 수역세에 필요한 역세수량은 200 mL로 충분하며 그 이상에서는 여과저항이 더 이상 회복되지 않으므로 역세의 의미가 없다고 할 수 있다. 또한, fouling 저항 ( $R_f$ )  $2.027 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  중 수역세에 의해 가역적인 공극폐색저항 ( $R_p$ )은 역세로 회복된 최대 여과저항으로 그 값은  $1.346 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  ( $=2.166 \times 10^{12} - 8.200 \times 10^{11}$ )이다.

선행 실험에서 M-1-1~M-2-5까지의 여과조건에서 fouling이 발생한 분리막을 200 mL의 수역세를 적용하여 공극폐색저항 ( $R_p$ )과 흡착저항 ( $R_a$ )으로 구분한 결과는 Table 3과 같다. 각각의 여과조건에서 분리막에 가해진 foulant 질량부하가 증가함에 따라 공극폐색저항 ( $R_p$ )과 흡착저항 ( $R_a$ )은 증가하는 경향을 보이는데, 특히 각각의 fouling 저항 ( $R_f$ )에 대한 비율을 살펴보면, 공극폐색저항 ( $R_p$ )은 63.2%~68.5%, 흡착저항 ( $R_a$ )은 31.55~36.8%로 나타났다. Foulant 질량부하에 관계없이 공극폐색저항 ( $R_p$ )과 흡착저항 ( $R_a$ )은 비교적 일정한 비율을 보였으며 평균적으로 각각의 비율은 65.6%, 34.4%이었다. 따라서 본 실험에 적용된 조건 하에서는 foulant 질량부하에 관계없이 일정한

비율의 공극폐색저항 ( $R_p$ )과 흡착저항 ( $R_a$ )이 발생하는 fouling 특성을 보였다.

### 3.4 약품세정 및 약품역세 조건에 따른 여과저항 회복 실험

각각의 여과조건에서 fouling이 발생한 분리막의 여과저항 성분을 분석하기 위해 세정을 실시하였다. 역세수량은 선행실험에서 결정된 200 mL을 적용하였으며 각각의 모듈은 여과 종료 후 수역세 및 약품세정을 실시한 뒤, 각각의 여과저항을 측정하여 수역세로 인해 감소된 저항 ( $R_p$ ) 및 약품역세에 의해 감소된 저항 ( $R_{ar}$ )을 산정하였다. 또한, 본 실험에 적용된 약품세정 조건은 일반적인 회복세정 조건보다 농도가 낮고, 접촉시간이 짧기 때문에 모든 흡착저항 ( $R_a$ )이 제거되지는 않았으며 수역세 및 약품세정으로 제거되지 않은 저항은 잔류흡착저항 ( $R_{air}$ )으로 간주하였다.

Table 4는 차아염소산나트륨과 가성소다의 약품역세 조건에 따른 흡착저항 제거량을 비교한 것이다. 차아염소산나트륨과 가성소다의 직접적인 비교는 할 수 없지만 차아염소산나트륨 100, 300, 600 ppm이 가성소다 0.01, 0.025, 0.05 N보다는 같은 접촉시간에서 흡착저항 ( $R_a$ )에 대한 세정효과가 높은 것으로 나타났다.

Table 3 Fraction of pore blocking ( $R_p$ ) and adsorption ( $R_a$ ) resistance

Module	$R_f$ $\times 10^{11} \text{ m}^{-1}$	$R_p$ $\times 10^{11} \text{ m}^{-1}$	$R_p/R_f$ -	$R_a$ $\times 10^{11} \text{ m}^{-1}$	$R_a/R_f$ -
M-1-1	1.980	1.299	65.6%	0.681	34.4%
M-1-2	4.048	2.733	67.5%	1.315	32.5%
M-1-3	4.723	3.061	64.8%	1.662	35.2%
M-1-4	8.877	5.610	63.2%	3.267	36.8%
M-1-5	19.57	12.63	64.5%	6.938	35.5%
M-2-1	1.079	0.725	67.2%	0.354	32.8%
M-2-2	2.592	1.661	64.1%	0.931	35.9%
M-2-3	5.392	3.691	68.5%	1.701	31.5%
M-2-4	12.13	7.835	64.6%	4.294	35.4%
M-2-5	20.27	13.46	66.4%	6.810	33.6%

Table 4. Adsorption resistance removal ( $\times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ ) according to NaOCl and NaOH concentration and contact time

	NaOCl			NaOH		
	100ppm	300ppm	600ppm	0.01N	0.025N	0.05N
10 min	3.041	5.704	6.894	2.641	5.452	5.991
30 min	6.323	9.332	12.44	4.667	7.606	10.86
60 min	7.026	10.24	14.52	5.691	10.38	12.79
90 min	7.070	12.05	15.38	6.228	10.57	13.26
120 min	8.090	13.07	16.33	7.080	10.73	13.45

### 3.5 회분식 막여과 실험의 모델선정

투과플럭스 감소가 공극폐색 및 흡착에 의한 유효막면적의 감소에 의해 제어된다면 실험 data를 Hermia 모델에 맞추어 구분할 수 있다. 유효막면적의 감소는 공극 내부 (표준폐색) 또는 외부 (중간/완전폐색)에서 일어날 수 있다. 표준폐색에서는 콜로이드 및 용질분자가 완전히 분리막 공극으로 들어가는 반면, 공극폐색이 분리막 공극 외부에서 발생하였다면, 공극폐색을 일으키는 분자는 분리막 공경과 유사하여 부분적으로 공극 내부로 진입하거나 (중간폐색) 공극보다 커서 분리막을 완전히 폐색할 것이다 (완전폐색). 완전폐색, 표준폐색, 중간폐색에서 시간에 따른 플럭스 변화를 표현한 식은 다음과 같다 (Hermia, 1982).

$$\ln J = \ln J_0 - k_c t \quad \text{식 (1)}$$

$$\frac{1}{J^{1/2}} = \frac{1}{J_0^{1/2}} + k_s t \quad \text{식 (2)}$$

$$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_0} + k_i t \quad \text{식 (3)}$$

여기서,  $J_0$  : 새막의 순수투과플럭스

$J$  : 여과시간  $t$ 에서의 투과플럭스

$k_c, k_s, k_i$ 는 각각 완전폐색, 표준폐색, 중간폐색의 모델계수 폐색모델에 적용한 결과를 정확히 판단하기 위하여 실험 data를 각 모델에 적용하였을 때, 각 실험조건에 대한  $R^2$  값을 Table 5에 정리하였다. 중간폐색모델에 적용하였을 때  $R^2$ 값이 1에 가장 가까운 값을 나타내었기 때문에 본 회분식 막여과는 중간폐색모델의 형태로 fouling이 발생하는 것으로 판단된다.

### 3.6 회분식 막여과 실험의 여과성능 시뮬레이션

본 회분식 막여과는 중간폐색모델이 적합한 것으로 나타났으므로 이에 따라 약품역세가 적용된 회분식 막여과의 연속적인 여과저항 전개를 시뮬레이션 하였다. 식 (3)에서 투과플럭스 ( $J$ )를 여과유량 ( $Q$ )로 변환하여 여과시간 ( $t$ )과 여과유량 ( $Q$ )의 관계로 표현하면 다음 식과 같다 (Hermia, 1982).

$$Q = Q_0 e^{-K_i V} \quad \text{식 (4)}$$

여기서,  $Q_0$  : 초기여과유량 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q$  : 시간  $t$ 에서의 여과유량 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$K_i$  : 중간폐색계수 ( $\text{m}^{-3}$ )  $V$  : 여과수량 ( $\text{m}^3$ )

Table 5. R<sup>2</sup> value for each blocking model

Foulant conc. (mg SCOD/L)	완전폐색모델	표준폐색모델	중간폐색모델
9	0.986	0.993	0.994
18	0.952	0.984	0.998
25	0.947	0.982	0.998
48	0.924	0.978	0.998
67	0.928	0.980	0.999
Ave.	0.947	0.983	0.997

Darcy의 법칙에 따르면,

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R} = \frac{Q}{A} \quad \text{식 (5)}$$

여기서,  $J$  : 투과플럭스       $\Delta p$  : 막간차압 (pa)  
 $\mu$  : 점성계수 (pa.s)       $R$  : 여과저항 ( $m^{-1}$ )  
 $A$  : 막면적 ( $m^2$ )

이므로 (식-4)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$JA = J_0 A e^{-K_i V} \quad \text{식 (6)}$$

$$\frac{\Delta P}{\mu R} A = \frac{\Delta P}{\mu R_0} A e^{-K_i V} \quad \text{식 (7)}$$

$$\frac{\mu R}{\Delta P} \frac{1}{A} = \frac{\mu R_0}{\Delta P} \frac{1}{A} e^{K_i V} \quad \text{식 (8)}$$

$$R = R_0 e^{K_i V} \quad \text{식 (9)}$$

로 여과저항 ( $R$ )은 여과수량 ( $V$ )의 함수로 표현될 수 있다.

$1/J$ 와 시간  $t$ 의 관계에서 선형식의 기울기가 중간폐색계수  $K_i$  ( $m^{-1}$ )이며 여기에 막면적을 곱하면 식 (9)에서 여과저항 ( $R$ )과 여과수량 ( $V$ )의 관계에서의 중간폐색계수  $K_i$  ( $m^{-3}$ )이 된다. 각각의 foulant loading에 따른 선형식의 기울기에 막면적을 곱하여 산정한 중간폐색계수를 foulant 농도에 따라 도시한 결과는 Fig. 4와 같다. foulant 농도가 증가할수록 중간폐색계수는 증가하며 이는 fouling이 빠르게 진행되어 여과저항 증가속도가 빠르다는 것을 의미한다.

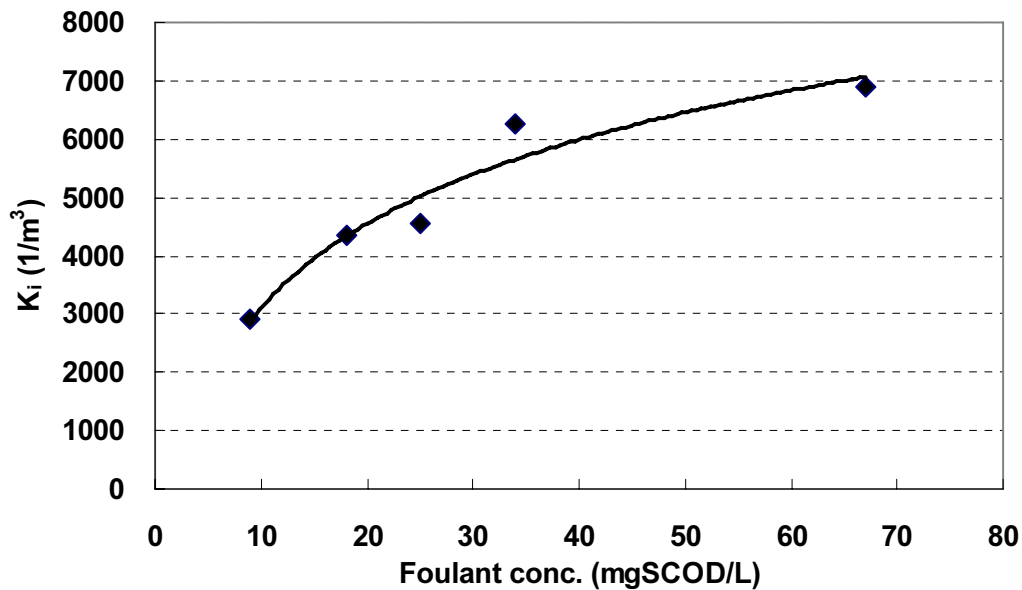


Fig. 4. Intermediate blocking coefficient ( $K_i$ ) according to foulant concentration.

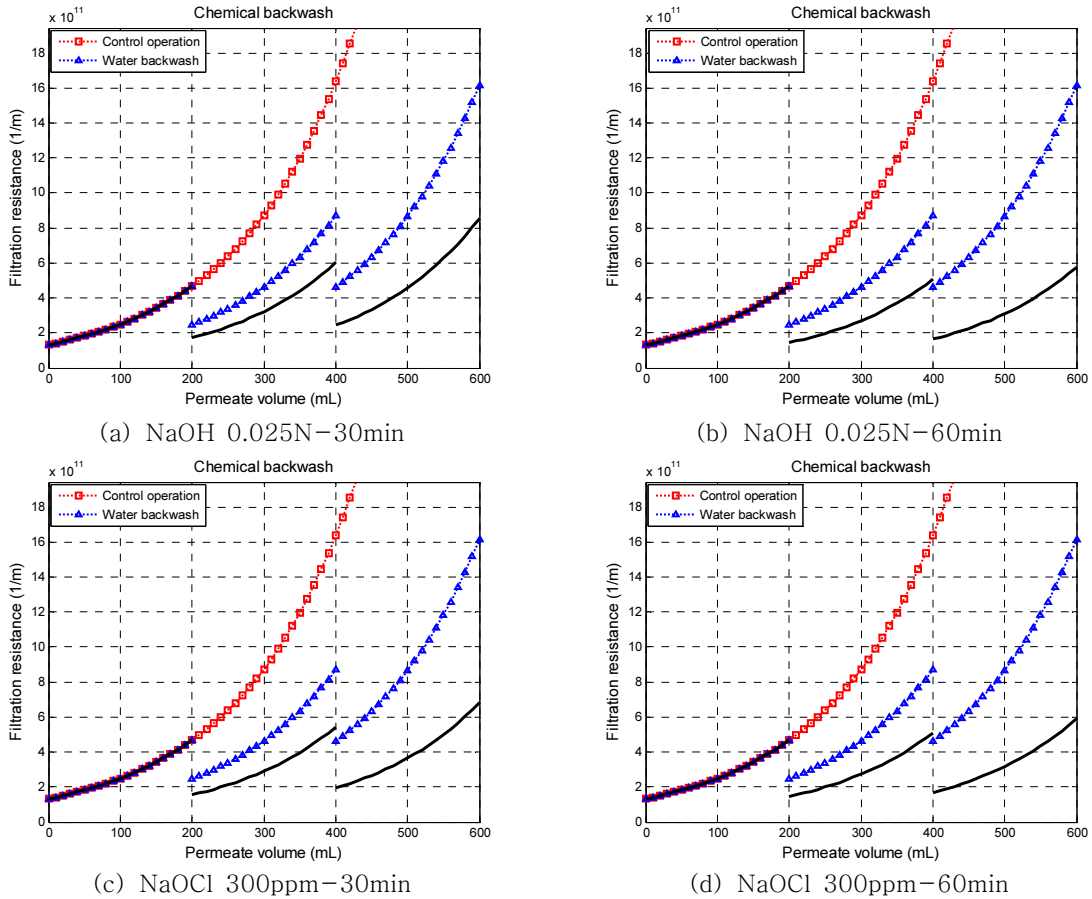


Fig. 5. Simulation results of batch membrane filtration

분리막 초기저항 ( $R_0$ )는 분리막 고유저항 ( $R_m$ )으로 새막의 순수투과능으로 결정하였으며 본 시뮬레이션에서는 회분식 막여과 실험에 사용된 분리막들의 고유저항값을 산술 평균한  $1.333 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ 을 적용하였다. 중간계폐색계수  $K_f$  값은 foulant 농도가 48 mgSCOD/L일 때, 도출된 값으로  $6270 \text{ m}^{-3}$ 을 적용하였다. 그 외 약품역세조건 (약품 종류, 농도 및 접촉시간)에 따른 여과저항 회복요소는 회분식 실험을 통해 얻은 데이터를 적용하였다.

Fig. 5는 48 mgSCOD/L 원수를 회분식 여과하는 경우를 시뮬레이션 한 결과로서 연속적으로 여과만 한 경우 (Control operation)와 200 mL를 여과주기로 하여 수역세를 실시한 경우 (Water backwash) 및 약품역세 (Chemical backwash)를 실시한 경우를 비교한 것으로 적용한 조건 중 일부만을 도시하였는데, 약품의 농도와 접촉시간이 증가할수록 약품역세의 효과는 더 큰 것으로 나타났다.

Table 6과 7은 각각 400, 600 mL 여과주기 중점에서의 총여과저항을 정리한 것으로 약품역세를 적용한 경우의 총

여과저항 ( $R_{tcb}$ )를 control 운전에서의 총여과저항 ( $R_{tc}$ )과 수역세를 적용한 경우의 총여과저항 ( $R_{twb}$ )에 대한 비율로 나타내어 약품역세에 의한 여과성능 향상 정도를 정량적으로 비교하였다.

위의 결과로부터 여과운전 중 주기적인 약품역세를 통해 흡착저항 ( $R_a$ )을 제거함으로써 여과성능이 향상될 수 있음을 확인하였다. 수역세와 약품역세의 여과성능 차이는 최대 3.1배로 control 운전 (최대 10.8배)에 비해 비교적 낮은 향상율을 보였지만 이는 여과수량을 600 mL로 제한하였을 때의 결과이고, 더욱이 식 (9)에서와 같이 여과수량과 여과저항은 지수관계를 갖기 때문에 여과가 지속되어 여과수량이 증가할수록 여과성능 향상율은 더욱 커질 것으로 예상된다. 또한 본 회분식 막여과 실험에서는 총여과저항 ( $R_t$ )에 대해 공극폐색저항 ( $R_p$ )와 흡착저항 ( $R_a$ )의 비율이 각각 65.6%, 34.4%로 공극폐색저항 ( $R_p$ )이 약 2배 정도 높은 비율로 존재하였는데, 여과 공급수 성상 및 분리막 공경, 분



Table 6. Total filtration resistance at 400 mL filtrate cycle

약품종류	역세조건		여과저항 $\times 10^{11} \text{ m}^{-1}$	R <sub>tc</sub> /R <sub>tc</sub>	R <sub>tc</sub> /R <sub>tw</sub>
	농도	접촉시간			
Control	-	-	16.37	-	-
수역세	-	-	8.696	53.1%(4)	-
NaOCl	100 mg/L	30분	6.480	39.6%	74.5%
	100 mg/L	60분	6.233	38.1%	71.7%
	300 mg/L	30분	5.425	33.1%	62.4%
	300 mg/L	60분	5.107	31.2%	58.7%
NaOH	0.025 N	30분	6.030	36.8%	69.3%
	0.025 N	60분	5.058	30.9%	58.2%
	0.025 N	120분	4.935	30.1%	56.8%
	0.050 N	30분	4.890	29.9%	56.2%

리막 재질 등 여과조건이 변경되어 흡착저항 ( $R_a$ )의 비율이 높아지면, 약품역세에 의한 여과저항 향상율은 더욱 높아질 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

fouling 특성을 파악하고, 여과저항의 성분을 분석하며 수역세와 약품세정을 결합한 약품역세를 도입한 시스템의 여과성능 향상 확인 및 평가를 위한 실험에서 도출된 결론은 다음과 같다.

분리막에 가해진 foulant 질량부하에 따라 일정수량 여과시 fouling 저항( $R_f$ )은 지수적인 형태로 증가하였다. 이는 일정한 수량의 여과에서는 낮은 foulant 농도 및 같은 foulant 농도에 대해서는 적은 여과수량에서는 fouling 저항이 낮게 발생하다가 여과가 진행될수록 그 속도가 빨라지는 것을 의미하며 실제 정유량 여과방식의 막여과 공정에서는 fouling이 진행될수록 유효막면적의 감소로 국부플럭스가 증가하며 이에 따라 여과저항 증가가 가속화 되는 것을 의미한다.

역세수량이 증가함에 따라 여과저항 감소량이 증가하다가 일정수량 이상에서는 더 이상의 여과저항 회복이 나타나지 않음을 확인하였다. 이를 통해 가역적인 여과저항 성분만을 제거할 수 있는 수역세만으로는 안정적인 여과성능을 유지할 수 없으며 비가역적인 성분이 동시에 제거될 필요가 있다고 판단되었다.

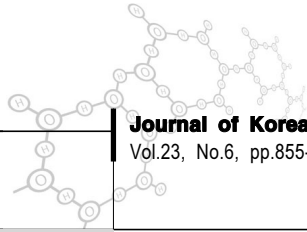
fouling 저항 ( $R_f$ )에 대한 비율을 살펴보면, 동일한 조성의 원수와 운전조건 하에는 foulant 농도 및 여과수량에 관계없이 공극폐색저항 ( $R_p$ )과 흡착저항 ( $R_a$ )은 대체적으로

일정한 비율로 발생하였다.

약품역세가 적용된 회분식 막여과의 연속적인 여과저항 전개를 Hermia의 폐색모델에 적용하여 시뮬레이션 한 결과를 통해 약품역세에 의한 현저한 여과성능 향상을 확인하였으며 여과수량과 여과저항은 지수관계를 갖는 것으로 나타났으므로 여과수량이 증가할수록 여과성능 향상율은 더욱 증가할 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

- 김형수, 藤田賢二, 안규홍, 송경근 (1995) 막 폐쇄 역제를 위한 백동 원수 공급과 공기포요동세정 방법의 비교 연구, *한국수처리학회지*, **3**(1), pp.15-23.
- 김석완, 임재림, 이준걸 (2006) 초음파를 이용한 침출수 처리를 위한 막분리 공정의 막힘현상 개선(1): 초음파의 영향인자 평가, *대한환경공학회지*, **28**(2), pp.207-215.
- 김관엽, 김지훈, 이용수, 박재홍, 김형수 (2007) 침지형 MBR 공정에 적용한 PTFE 분리막의 성능 및 주기적인 화학역세에 의한 고평택스 운전성 평가, *한국막학회*, 추계추계학술발표회 논문집, pp.295-299.
- 김관엽, 이의종, 송준섭, 김지훈, 김형수 (2008) 주기적인 약품역세를 적용한 침지형 MBR 시스템의 운전성능에 관한 연구, *상하수도학회지*, **22**(1), pp.87-92.
- 임우찬, 서경수, 유성환 (2004) 순환세정장치에 의한 MBR 공정의 흡입유량 증대에 관한 연구, *대한상하수도학회 · 한국물환경학회*, 공동추계 학술발표회 논문집, pp.247-250.
- Bella G.D., Durante F., Torregrossa M. and Viviani G. (2006) The role of fouling mechanisms in a submerged



- membrane bioreactor during the start-up, *Desalination*, **200**(1-3), pp.722-724.
7. Chang, Y., Kramer, A.J. and Lubben, D.R. (2002) Effective Membrane Fouling Control: A New Membrane Cleaning Concept, *Proceedings of Water Quality Technology Conference*, Seattle, WA.
  8. Geng Z., E.R. Hall E.R. and Berube P.R. (2007) Membrane fouling mechanisms of a membrane enhanced biological phosphorus removal process, *J. Membr. Sci.*, **296**(1-2), pp.93-101.
  9. Hermia, J. (1982) Constant Pressure Blocking Filtration Laws-Application Topower-Law Non-Newtonian Fluids, *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **60**, pp.183-187.
  10. Judd, S. (2006) *The MBR book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*, Elsevier.
  11. Zondervan E., Blankert B., Betlem B.J.L. and Roffel B. (2008) Development of a multi-objective coagulation system for long-term fouling control in dead-end ultrafiltration, *J. Membr. Sci.*, **325**(2), pp.823-830.