



약품역세를 적용한 하수재이용 막여과 시스템의 운전성능 평가

Evaluation of operating performance of secondary effluents treatment membrane system adapted chemical backwashing

김영훈 · 이창하 · 전민정 · 이용수 · 이의종 · 남종우 · 김형수*

Kim, Young Hoon · Lee, Chang Ha · Jeon, Min Jung · Lee, Yong Soo · Lee, Eui Jong · Nam, Jong Woo · Kim, Hyung Soo*

성균관대학교 건설환경시스템공학과

(2011년 3월 30일 접수 ; 2011년 6월 9일 수정 ; 2011년 6월 13일 채택)

Abstract

Secondary effluent contains particle compounds which are comprised of microorganisms that occurs membrane fouling when the water is reused. This study evaluates the characteristics of membrane fouling of secondary effluent reuse. Effects of chemical backwashing are analyzed to reduce membrane fouling by regular chemical backwashing. As the result, major membrane foulants are verified EPS materials which include protein and polysaccharide that cause biofilm cake layer on the membrane. Also, sodium hypochlorite is applied to chemical backwashing. The backwashing improves recover rate when injected chemical concentration is increased and chemical backwashing cycle is amplified. Chemical backwashing cycle affects more than injected chemical concentration yet idle time does not noticeably influence on reducing membrane fouling.

Key words : Membrane filtration system, Chemical backwashing, Secondary effluent treatment, Plate&Flame membrane, Membrane fouling

주제어 : 막여과 공정, 약품 역세, 하수재이용, 평판형 막, 막오염

1. 서론

전 세계적으로 수자원 고갈 및 수요의 증가로 인해 대체 수자원의 확보가 중요한 현안으로 대두되고 있다.(안 등, 2003). 이러한 물 부족 현상의 대안으로 수자원의 보존과 친환경적인 측면, 안정적인 용수의 확보 측면에서 하수처리수의 재이용이 주목되고 있다(현 등, 2005). 하수처리장의 방류수는 갈수기에도 안정적인 유량을 확보할 수 있다는 이점과 고도처리시설의 도입에 따라 양질의 처리수가 연중 방류되기 때문에 적절히 활용하면 대체 수자원으로 그 가치가

크다고 할 수 있다(이 등, 2007).

하수 처리수의 재이용은 미국을 비롯하여, 영국, 일본 등의 많은 나라에서 이미 오래 전부터 시행되고 있으며, 미국의 경우에는 각 주(state)마다 물 재이용에 관한 가이드라인까지 설정되어 이용되고 있다(EPA, 1992). 특히 미국의 캘리포니아 주 오렌지카운티에서는 1970년 후반부터 하수처리장 방류수를 고도처리시스템(Water Factory 21)을 사용하여 농업용수 및 지하수 함양용수로 재이용하고 있으며, 이러한 고도처리시스템은 다층여과와 활성탄 공정을 비롯하여 역삼투막(RO) 공정으로 구성되어 있다(Asano,

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

1998). 현재 하수처리수의 재이용시스템으로 가장 많이 이용되는 방법으로는 응집-침전-모래여과-활성탄 흡착-소독과 같은 공정이며(Asano, 1998; Hamode et al., 2004). 최근에는 재이용을 위한 하, 폐수의 처리 공정에 막을 이용한 기술적용이 증가되고 있는 추세이다(현 등, 2005). 막을 이용한 공정은 원수의 특성에 맞게 처리가 가능하며, 재이용수의 용도에 따른 수질제어가 가능할 뿐만 아니라 운용의 편리성 때문에 많은 각광을 받고 있다(박 등, 2004).

그러나 하수를 재이용하고자 하는 경우 기존의 생물학적 처리공정을 거친 처리수라 하여도 미생물을 포함한 입자성분이 다량 포함되어 있어 막의 막힘에 의한 급격한 투과플럭스 감소와 이로 인한 수명 단축 등의 문제를 지니고 있다(안 등, 1998). 실제로 유기 MF막을 사용하여 하수처리수를 재이용 할 경우 종종 급격한 막오염 현상이 발생된다는 연구도 보고되었다(Roorda et al., 2005).

따라서, 본 연구에서는 하수처리수를 재이용하기 위한 막여과 공정에서 오염된 막의 특성을 파악하여 막오염 물질을 규명하고, 막오염 제어를 위하여 주기적인 약품역세를 실시하여 막오염 저감효과를 평가하였다. 또한 약품 역세 농도, 역세 주기, 정지 시간 등의 조건 변화에 따른 투과능 회복을 비교하여 그 차이를 평가하고자 하였다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 분리막

실험에 사용한 분리막은 침지방식의 평판형 정밀여과막으로 그 사양은 Table 1에 정리하였다. 약품역세를 적용하는 운전에서는 저농도이지만 약품과 자주 접촉하는 것을 고려하여 내화확성이 우수한 PTFE 재질의 분리막을 사용하였다.

2.2 대상원수

본 실험에 사용된 원수는 일반 활성슬러지 공정의 2차 침

전지 상등수이다. 수질은 Table 2와 같다.
(생략)

2.3 실험장치

하수재이용 막여과 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다. 하수재이용 막여과 장치는 원수 저장조와 분리막이 침지된 침지조 및 여과 장치로 구성되었다. 여과 장치는 회전수 및 방향을 제어할 수 있는 연동펌프 (Peristaltic pump, Cole-Parmer, USA)와 흡입압력을 측정할 수 있는 압력계로 구성되었다. 공급수조에 설치된 수위센서와 2차 침전지 저류조 내에 침지되어 있는 공급수 공급펌프를 연결하여 수위변동에 따라 자동적으로 하수처리장 내의 2차 침전지 상등수가 공급수조로 공급되도록 하였다. 평판형 막이 침지되어 있는 침지조에는 플롯 밸브를 설치하여 공급수의 공급량을 조절하였다. 분리막의 여과는 연동펌프를 타이머가 부착된 제어반에 연결하여 일정시간 여과와 휴지를 반복하였으며 블로어를 이용하여 휴지시간에 폭기를 행하여 분리막 표면의 케익층 부착을 제어하였다. 약품 역세용액은 실험목적에 따라 투과수 또는 차아염소산나트륨(NaOCl)을 사용하였으며 분리막의 약품 역세척은 평판형 막 적용시 역세압을 가할 경우 막면이 부풀어 막이 손상될 위험이 있으므로, 자연유하로 막 개당 1L의 투과수 또는 약품액을 주입하였다. 조 내의 농축수 배출은 정량 펌프(Peristaltic pump)를

Table 2. Characteristics of raw water

Parameters	Secondary effluent
Turbidity(NTU)	2.8~4.6
SS(mg/L)	6~8
COD _{cr} (mg/L)	5~40
SCOD _{cr} (mg/L)	0~8
T-N(mg/L)	15~20
T-P(mg/L)	2~3.5
NO ₃ -N(mg/L)	15~20
NH ₃ -N(mg/L)	0~2

Table 1. Characteristics of membrane module

Type	Microfiltration
Module Type	Plate & Frame (Submerged, Outside-In)
Pore size	0.1 μ m
Material	PTFE (Polytetrafluoroethylene)
Effective filtration area per module	0.3m ² /module

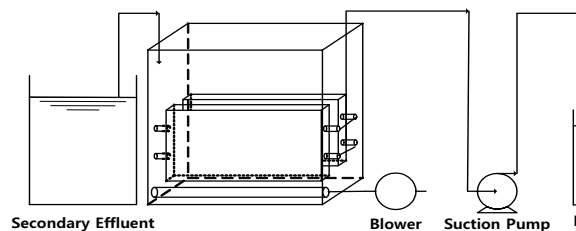


Fig. 1. Schematic diagram of Lab-scale of submerged membrane process

Table 3. Conditions of operation

	RUN-1	RUN-2	RUN-3	RUN-4	RUN-5	RUN-6	RUN-7	RUN-8
Flux _{ave} (L/m ² /hr)	50	50	40	40	40	40	40	40
Flux _{rapid} (L/m ² /hr)	57	57	45	45	46	46	45	46
backwash solution	pure water	NaOCl	pure water	NaOCl	NaOCl	NaOCl	NaOCl	NaOCl
injected chemical concentration (mL)	-	600	-	600	300	600	1,200	1,200
injected chemical mass (mL)	-	-	-	300	300	300	300	300
chemical backwashing cycle	1cycle/1day	1cycle/1day	1cycle/1day	1cycle/1day	2cycle/1day	2cycle/1day	1cycle/1day	1cycle/1day
Idle after chemical backwashing	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	60min

Table 4. Parameters of operation

Flux _{ave}	L/m ² · hr	50	40	40
Flux _{rapid}	L/m ² · hr	57	45	46
Operation mode	-	9min suction / 1 min idle		
chemical backwashing cycle	cycle/day	1	1	2
Recovery rate	%	90		
Permeate rate	mL/min	570	450	460
Discharge rate	mL/min	63.3	50	51.1
Aeration rate	L/min · module	30		

사용하여 분리막의 여과시간과 연동하여 일정시간 배출되도록 설정하였다. 회수율은 여과 유량 대비 배출유량을 조절하여 결정하였다.

2.4 운전조건

본 실험에서 적용한 운전조건을 **Table 3**에 정리하였다. RUN-1~RUN-2는 각각 임계플럭스 도출 실험 결과에서의 초임계플럭스인 투과플럭스 50L/m²/hr (순간플럭스 57L/m²/hr)에 순수 및 NaOCl 600ppm로 약품역세를 적용하여 약품역세 적용 유무에 따른 여과성능을 파악하였다. RUN-3~RUN-4에서는 RUN-1~RUN-2의 운전조건은 동일하나 투과플럭스를 임계플럭스인 40L/m²/hr(순간플럭스 45L/m²/hr)로 설정하여 실행하였다. RUN-5~RUN-6은 투과플럭스 40L/m²/hr(순간플럭스 46L/m²/hr)에서 1일 2회 약품역세를 실시한 운전이다. 이 때 차아염소산나트륨 용액 농도는 300ppm, 600ppm으로 하여 역세약품 농도

에 따른 여과성능 차이를 확인하였다. RUN-7~RUN-8은 40L/m²/hr에서 각각 NaOCl 1,200ppm으로 1일 1회 약품역세를 실시하며 이때의 정치시간을 30분, 60분으로 하여 정치시간 변화에 따른 여과성능을 평가하였다. **Table 4**에는 각 운전조건에서의 운전인자를 정리하였다.

2.5 분석방법

본 연구의 TMP는 Lab 실험 장치에 설치된 압력계를 이용하여 측정하였고, 투과유량은 직접 실측하였으며, 투과플럭스는 투과유량과 막면적으로 계산($J = Q/A$)하였다. 여과저항은 아래의 직렬 여과저항 모델을 사용하여 계산하였다.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} \quad (1)$$

여기서 J는 투과플럭스, μ 는 점성계수, R_t 은 총여과저항, ΔP 는 막간차압을 나타낸다.

R_t 는 다시 아래의 식으로 구분 지을 수 있다.

$$R_t = R_m + R_a + R_c \quad (2)$$

여기서 R_m 은 막고유 여과저항, R_a 는 흡착저항, R_c 는 케이크저항을 나타낸다.

수온 및 pH는 pH/ORP/DO meter(Horiba D-25)를 사용하였으며, 막 표면 오염물질의 정량적인 파악을 위하여 Fourier Transformed Infrared Spectroscopy(FTIR)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 막오염 특성 파악

Fig 2는 PTFE 평판형 막모듈의 새막과 오염막의 모습이 다. 육안으로도 막표면에 오염물질이 전체적으로 도포됨을

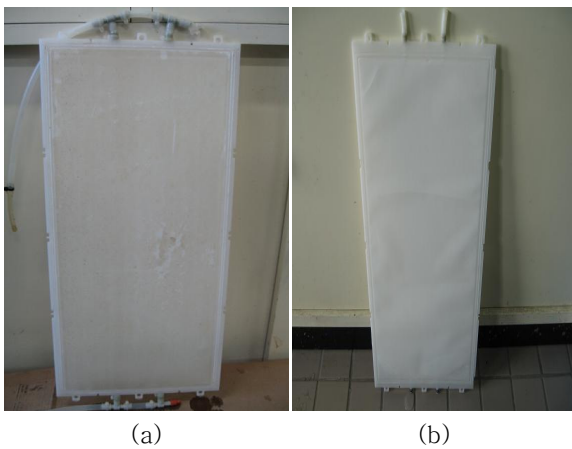


Fig. 2. PTFE membrane ((a) Clean membrane, (b) Fouled membrane)

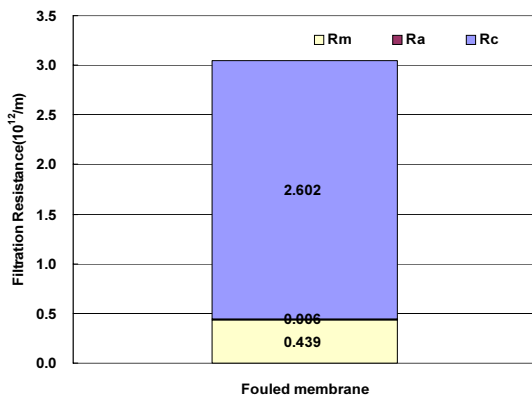


Fig. 3. Fraction of Filtration Resistance for fouled membrane

확인할 수가 있었다. Fig. 3은 오염된 분리막의 여과저항 성분을 분석한 결과이다. 여기서 R_c 는 스펀지 등을 통한 막면 세정으로 제거된 여과저항이며, R_a 는 화학세정 이후 제거된 여과저항을 말한다. 그래프에서 알 수 있듯이 총여과저항(R_t)에서 막고유저항(R_m)은 14.4%, 흡착저항(R_a) 0.2%, 케이크 저항(R_c)로 85.4%로 막오염 성분 중 흡착저항(R_a)의 발생정도는 미비하였고 케이크에 의한 여과저항이 주를 이루는 것을 확인할 수가 있었다. 이러한 결과는 Chang 등의 결과와 일치하는데, Chang 등은 케이크 저항(R_c)은 분리막의 재질 또는 미생물 플록의 형태와 관계없이 총 여과저항(R_t)에 가장 큰 부분이라고 보고하였으며, 모든 분리막의 재질이나 미생물 플록에서 케이크 저항(R_c)이 총 여과저항(R_t)의 51~97%를 차지하고 있다고 보고하였다(Chang et al., 1999).

막 표면에 형성되어 막오염을 일으키는 케이크의 주 오염원은 유기물 및 미생물에 의한 오염으로 판단되며, 이들 오염원을 확인하기 위하여 Fourier Transformed Infrared Spectroscopy(FTIR)으로 새막과 오염막의 스펙트럼을 비교 분석하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 결과로부터 새막과 오염막의 스펙트럼은 확연한 차이를 나타냈다. 오염막의 스펙트럼을 분석하자면 3286cm⁻¹의 피크를 기준으로 3600~3600cm⁻¹의 광범위한 피크는 hydroxyl functional groups의 O-H 밴드의 Stretching에 의한 영향이며, 2924cm⁻¹ 피크는 C-H 밴드의 Stretching에 의한 영향이다(Kumar et al., 2006; Wang et al., 2008). 1636cm⁻¹과 1541cm⁻¹의 두 피크는 amides I과 amides II로 불리는 protein의 이중 구조이다(Maruyama et al., 2001). Protein은 결합 EPS의 주요 물질 중 하나이다(Wang et al., 2009). 1374cm⁻¹의 피크는 Carboxylate 또는 무기 이온을 나타낸다(Ivnitsky et al., 2005). 1052cm⁻¹의 강한 피크는 prtein과 더불어 결합 EPS 물질의 주요물질인 polysaccharide를 나타낸다(Ivnitsky et al., 2005; Wang et al., 2009). FTIR 분석결과로부터 막

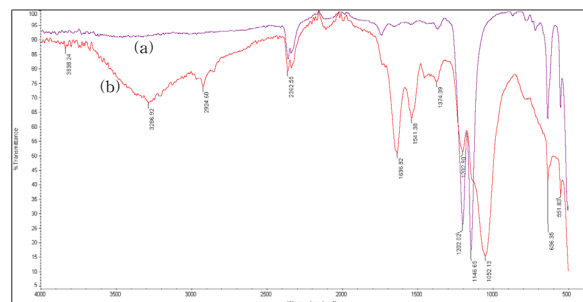


Fig. 4. FTIR of PTFE membrane (a) Clean membrane, (b) Fouled membrane

면의 biofilm을 구성하는 protein과 polysaccharide 등의 EPS 물질이 주요 막오염 물질로 판단된다. 이러한 미생물 오염을 제어하기 위하여 이후 실험에서 차아염소산을 통한 약품 역세를 적용하였다.

3.2 임계플럭스 결정

막여과 시스템에서 임계플럭스(Critical flux)는 일반적으로 투과플럭스를 단계적으로 증가시키면서 각 단계에서 막간차압(TMP)의 안정성을 판단하여 결정한다. 임계플럭스는 투과능 저하가 발생되지 않는 최대플럭스 또는 그 이상에서는 막오염이 관찰되지 않는 플럭스로 정의된다(Field et al., 1995). 본 실험에서는 lab-scale 하수재이용 막여과 시스템의 임계플럭스를 도출하기 위해 30L/m²/hr부터 10L/m²/hr 단위로 플럭스를 단계적으로 증가시키면서 막간차압을 관찰하였다. 플럭스 1단계당 여과지속시간은 2시간으로 하였다. Fig. 5는 플럭스 단계 실험에서 투과플럭스에 따른 막간차압의 변화를 나타낸 것이다. 30 및 40L/m²/hr에서는 막간차압의 변화가 거의 나타나지 않았으며 50L/m²/hr 이상의 플럭스에서는 막간차압이 지속적으로 증가하는 것이 관찰되었다. Fig. 6은 각 플럭스 단계에서의 막간차압 증가율 (dP/dt, kPa/hr)을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 관찰된 바와 같이 30, 40L/m²/hr에서는 막간차압 증가율이 0.36, 0.82 kPa/hr로 매우 작은 값을 보이다가 50L/m²/hr부터 급격히 증가하여 50, 60L/m²/hr에서는 각각 4.01, 16.97kPa/hr를 나타내었다. Field 등(1995)의 연구결과에 따라 40L/m²/hr를 임계플럭스로 결정할 수 있다.

3.3 막여과 공정 운전 성능에 따른 의한 약품역세 효율 평가

선행 실험에서 일반 활성슬러지 2차 침전지 상등수를 원수로 한 하수재이용 lab-scale 막여과 시스템의 임계플럭스는 40 L/m²/hr로 결정되었다. 본 실험에서는 이 임계플

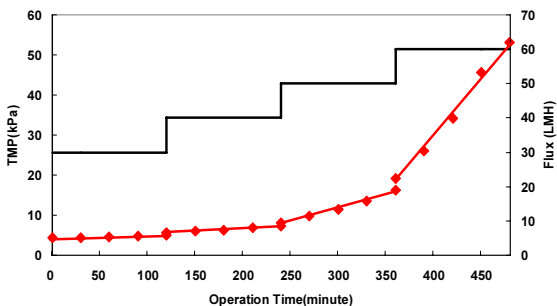


Fig. 5. Result of critical flux measuring test of Lab-scale membrane system

럭스를 기준으로 하여 초임계플럭스(Supra-critical flux) 운전에서의 약품 역세의 적용에 따른 막간차압의 변화를 관찰하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. 초임계플럭스인 50 L/m²/hr에서는 1일 1회의 수 역세 및 약품역세를 적용하였을 경우 여과저항 회복 효과는 있었으나, 단 이를 만에 여과저항이 급격하게 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 단기간의 여과저항 상승으로 보건대 초임계플럭스인 50L/m²/hr에서의 연속 운전은 불가능 할 것으로 판단된다. 그러나 수역세 및 약품 역세의 경우 약품 적용 유무에 따른 투과능 회복의 차이는 확인하여 약품 역세로 인한 막 파울링 제어가 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 8은 임계플럭스인 40L/m²/hr에서의 차아염소산 나트륨의 농도별 여과저항 변화이다. 약품 역세를 적용하지 않고 수역세만을 행한 경우 약 50 시간 경과 후 여과저항이 4.0×10¹²/m에 도달하였는데, 이는 실험에서 운전을 정지시키고 CIP를 실행해야 하는 여과저항이다. 이에 반해 차아염소산나트륨 600ppm을 약품 역세를 적용한 경우에는 약 4일 만에 한계 여과저항에 도달하였고, 1,200ppm의 고농도 차아염소산나트륨을 적용할 경우 한계 여과저항에 도달하는데 8일이 걸렸다. 이 결과를 토대로 약품역세를 적용하

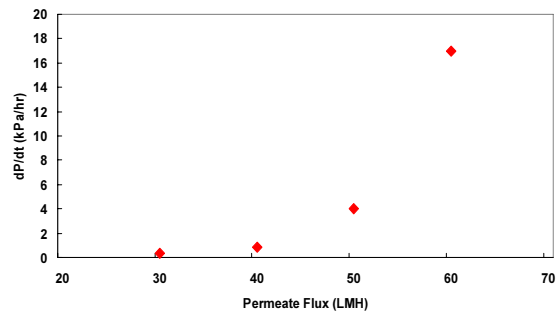


Fig. 6. Rate of TMP increasing with permeate flux

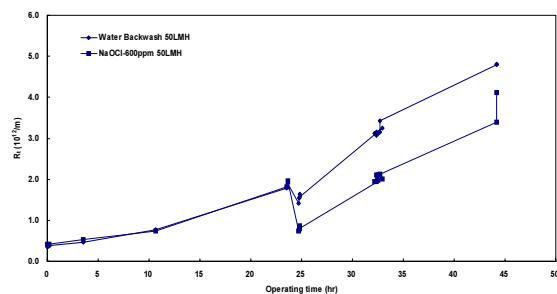


Fig. 7. Variation of filtration resistance with applying chemical backwashing of 50 L/m²/hr (RUN-1~RUN-2)

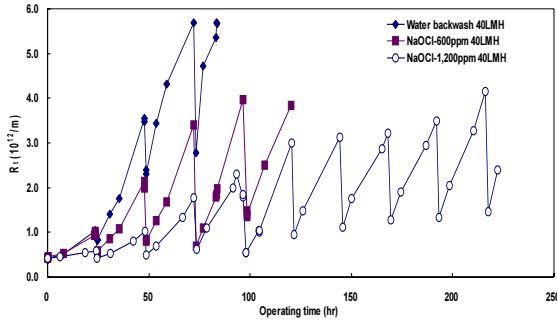


Fig. 8. Variation of filtration resistance for chemical backwashing concentration of 40 L/m²/hr (RUN-3, RUN-4, RUN-7)

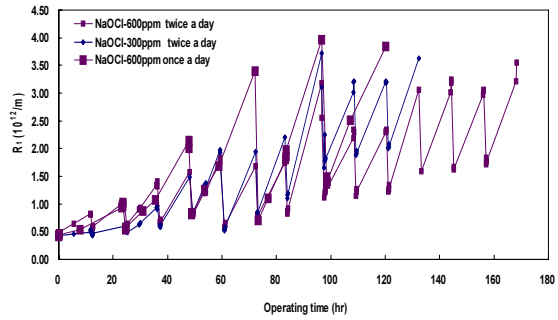


Fig. 9. Variation of filtration resistance for chemical backwashing cycles of 40 L/m²/hr (RUN-5, RUN-6, RUN-7)

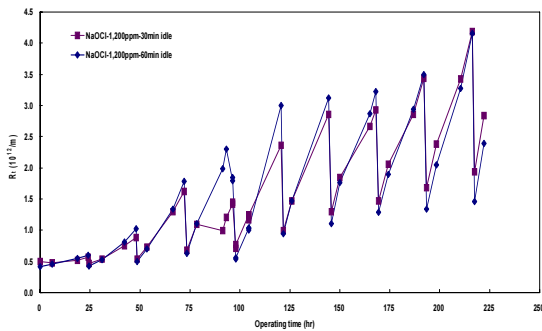


Fig. 10. Variation of filtration resistance for idle time of 40 L/m²/hr (RUN-7, RUN-8)

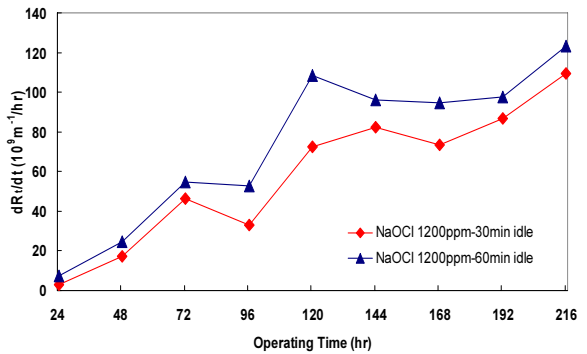


Fig. 11. Rate of filtration resistance increasing with operating time

는 경우가 적용하지 않는 경우보다 막오염 제어가 효과가 있음을 알 수 있었으며, 약품의 농도가 높아짐에 따라 그 효과는 증대되었다.

Fig. 9는 투과플럭스 40L/m²/hr에서의 약품 역세 주기에 따른 여과저항 변화 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 NaOCl 600ppm의 동일 농도로 약품역세를 적용한 경우 1일 1회 약품역세 실험에서 한계 여과저항에 걸리는 시간은 5일 정도였으나, 동일 농도에서 1일 2회의 약품역세를 행한 실험에서는 7일이 소요되었다. 또한 1일 1회 NaOCl 600ppm을 주입하는 것보다 1일 2회 NaOCl 300ppm을 주입하는 것이 여과저항의 회복이 더 뛰어난 것을 알 수 있었다. 이 두 조건의 경우 하루에 주입되는 약품량은 같다. 결과로부터 동일 약품 농도일 경우에도 역세주기가 짧을수록 막오염 제어 성능이 좋을 것을 알 수 있었으며, 같은 양의 약품을 쓰는 경우(이때의 사용되는 처리수의 양은 1일 1회의 경우 막당 1L, 1일 2회의 경우 막당 2L가 소비된다.) 약품

역세주기가 짧을수록 투과능 회복이 좋아짐을 알 수가 있었다. 그러나 약품 주기를 짧게 할수록 여과시간이 단축되어 처리수량이 감소하므로 최적의 역세주기를 결정할 필요가 있다. 향후 이에 대한 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

약품 역세를 행한 후의 정지 시간이 여과 성능 회복의 미치는 영향을 파악하기 위하여 평균 플럭스 및 역세 주기 등의 동일 조건에서 정지시간의 30분, 60분 변화에 따른 여과저항을 비교해 보았다. 각각의 평균 플럭스는 40L/m²/hr로 동일하나, 정지시간 차이로 인하여 순간플럭스는 정지 30분의 경우 45L/m²/hr, 정지 60분의 경우에는 46L/m²/hr로 서로 달랐다. 정지 시간에 따른 여과저항 변화는 Fig. 10과 같다. 결과로부터 역세후 정지 60분을 행한 경우의 투과능 회복이 조금 더 향상되었다. 하지만 Fig. 11의 운전기간에 따른 여과저항 증가율 (dR_f/dt, 10⁹m⁻¹/hr)을 살펴보면 정지 60분의 순간플럭스가 1L/m²/hr 높은 관계로 여과저항 증가율이 정지 시간 30분의 운전 조건보다 높음을 알

수 있었다. 따라서 약품역세 전의 여과저항은 정치시간 60분이 정치시간 30분보다 같거나 좀 더 높음을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 정치시간은 여과저항의 성능 향상에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

실험을 토대로 평판형 침지식 막여과 공정에서 주기적인 약품 역세를 행하는 경우 여과 성능의 향상을 확인할 수 있었으나, 여과 성능의 향상에도 불구하고 여과가 진행됨에 따라 막오염이 급격하게 증가하여 2회/일 주기로 NaOCl 600ppm의 약품 세정을 행하는 경우에도 7일 만에 한계 차압에 도달하여 CIP 세정을 행하였다. 적용 공정의 장기적인 운전을 행하기 위해서는 전처리 등의 추가적인 대안이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 하수재이용 막여과 공정의 막오염 특성을 평가하였고, 막오염 제어를 위한 주기적인 약품역세를 실시하여 약품역세에 의한 막오염 저감효과를 평가하였다.

○ 하수재이용 막여과 공정에서 막오염의 주요 원인은 총여과저항의 85.4%를 차지하는 케이크 층이며, 주 오염 성분은 protein과 polysaccharide로 이루어진 EPS 물질로 막면에 biofilm으로 인한 케이크 층이 주요오염원인 것을 확인할 수가 있었다.

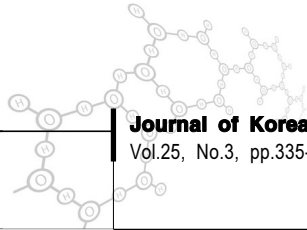
○ 막면의 Biofilm의 억제를 위한 차아염소산나트륨을 사용한 약품 역세를 적용한 결과, 수역세만을 행한 경우보다 투과능 회복이 뛰어났으며 약품 주입 농도가 높을수록, 약품 세정 주기가 짧을수록 투과능 회복이 좋음을 확인할 수 있었다. 그리고 효율적인 여과저항의 회복을 위해서는 약품 세정 농도를 높이기보다는 약품 세정 주기를 짧게 하는 것이 더 효과적인 결과를 통하여 확인할 수가 있었다. 그러나 약품 역세 주기가 짧을수록 처리수량은 감소하게 되므로 최적의 역세주기를 결정할 필요가 있다. 약품 역세 정치시간은 길수록 투과능 회복은 증가하였으나 동일한 처리수량을 위해서는 투과플럭스를 높여야 하기 때문에 정치시간에 의한 영향은 그리 크지 않음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발 사업” 과 중소기업청 “중소기업 기술혁신개발사업” 으로 지원받았으며, 이에 감사를 표합니다.

참고 문헌

- Asano, T., (1998), Wastewater reclamation and reuse, CRC press, USA, *Technomic publishing company*
- Chang S. and Lee C. H., (1999), Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system; the effect of floc structure on membrane fouling, *Seperation Sci. Tech.*, **34**, pp. 1743-1758
- EPA, (1992), Manual-guideline for water reuse, EPA/625/R-92/004, *U.S. environmental protection agency and U.S. agency for international development*, washington, DC.
- Field R. W., Wu D., Howell J. A. and Gupta B. B., (1995), Critical flux concept for microfiltration fouling, *Journal of Membrane Science*, **100**, pp. 259-272
- Hamoda, M. F., Al-Ghusain, I. and Al-Mutairi, N. Z., (2004), Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse, *Desalination*, **164**, pp. 203-211
- Ivnitsky H., Katz I., Minz D., Shimoni E., Chen Y., Tarchitzky J., Semiat R. and Dosoretz C. G., (2005), Characterization of membrane biofouling in nanofiltration processes of wastewater treatment, *Desalination*, **185**, pp. 255-268
- Kumar M., Adham S. S. and Pearce W. R., (2006), Investigation of seawater reverse osmosis fouling and its relationship to pretreatment type, *Environ. Sci. & Tech.*, **40**(6), pp. 2037-2044
- Maruyama T., Katoh S., Nakajima M., Nabetani H., Abbott T. P., Shono A. and Satoh K., (2001). FT-IR analysis of BSA fouled on ultrafiltration and microfiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, **192** (1-2), pp. 201-207
- Roorda, J. H., Wortel, N. C., and Dalen, R., (2005), New process for treatment of organically fouled water; experiences with WWTP effluent, *Desalination*, **178**, pp. 141-148
- Wang Z. W., Wu Z. C., Ying X. and Tian L. M., (2008), Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (MBR) under sub-critical flux operation; membrane foulant and gel layer characterization, *Journal of Membrane Science*, **325**(1), pp. 238-244
- Wang Zhiwei, Wu Zhichao and Tang Shujuan, (2009) Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged



- membrane bioreactor, *Water Research*, **43**, pp. 2504-2512
- 박기영, 맹승규, 김기팔, 이석현, 권지향, 안규홍, (2004), 물 재이용을 위한 하수처리장 방류수 색도의 자외선처리에 미치는 과산화수소의 영향, *상하수도학회지*, **18**(3), pp. 377-384
- 안규홍, 송경근, (1998), 하수 재이용(중수도)을 위한 한외여과 공정에서 역세척 운전인자의 특성, 한국수처리기술연구회, **6**(1), pp. 25-32
- 안규홍, 안석, 맹승규, 김기팔, 홍준석, 정민우, 권지향, Zubair Ahmed, (2003), 하수 2차 처리수 재이용을 위한 저압 및 중압 고도산화시스템의 성능평가, *상하수도학회지*, **17**(4), pp. 493-501
- 이용두, 김창영, 박형건, (2007), 하수처리장 방류수 재이용을 위한 섬유사여과기(PCF)/RO 적용에 관한 연구(1), *공동주택 학술발표회 논문집, 한국물환경학회, 대한상하수도학회*, pp. 183
- 현승훈, 김응도, 홍승관, 안원영, 임성균, 김건태, (2005), 침지형 MF 중공사막을 이용한 하수 2차 처리수의 재이용 연구, *상하수도학회지*, **19**(1), pp. 47-52