D정수장 정밀여과막 실증플랜트의 최적 운전조건 연구

A Study on Operating Condition of Test-Bed Plant using Membrane filtration of D Water Treatment Plant in Gwang-Ju

양형재 · 이승훈 · 문경란^{*,†}

Hyung-Jae Yang · Seung-Hoon Yi · Kyung-Ran Moon^{*,†}

포스코ICT Emerging Biz사업실 · *조선이공대학교 생명환경화학공과

POSCO ICT Emerging Biz

^{*}Department of Bioenvironmental & Chemical Engineering, Chosun College of Science & Technology

(Received February 25, 2017; Revised March 17, 2017; Accepted March 26, 2017)

Abstract : Membrane filtration has become more popular in drinking water treatment recently, since the filtration can control not only particulate matters but also pathogenic microorganisms such as giardia and cryptosporidium very effectively. Pilot-scale (120 m³/d of treatment capacity) and test-bed (25,000 m³/d of treatment capacity) microfiltration experiments were conducted to find optimum operating mode and the critical flux. Optimum operating mode of pilot-test was assessed as inflow 1.0 min, filtration 36.5 min, air backwash 0.9 min, backwash 1.0 min and outflow 1.0 min with 50 LMH (L/min·m²) of critical flux. Critical Flux was calculated to be 50 L/m²-h (within TMP 0.5 bar) based on the increase formula of the transmembrane pressure difference according to the change of time at Flux 20, 40, 56 and 62 LMH in pilot operation. Chemical cleaning was first acid washed twice, and alkali washing was performed secondarily, and a recovery rate of 95% was obtained in the test-bed plant. The results of operating under these appropriate conditions are as follows. Turbidity of treated water were 0.028, 0.024, 0.026 and 0.028 NTU in spring, summer, autumn and winter time, respectively. Microfiltration has superior treatment capability and performance characteristics in removing suspended solids and colloidal materials, which are the main cause of turbidity and important carrier of metal elements, and it has shown great potential in being an economically substitute to traditional processes (sand filtration).

Key Words : Microfiltration, Critical Flux, Turbidity, CIP (Clean-In-Place)

요약 : 최근 막여과 공정은 입자상 물질뿐만 아니라 Giardia, cryptosporidium과 같은 병원성미생물이 효과적으로 제거됨에 따라 국내외 적용성이 확대되는 추세이다. 본 연구는 광주광역시 D정수장의 원수·침전상등수의 처리를 위해 120 m³/d 처리 규모의 Pilot Plant (2014. 1월부터 운영)와 2,500 m³/d 처리규모의 실증실험시설(2015. 1월부터 운영)의 막여과 공정을 운영하면서 최적 운전조건과 한계여과속도를 찾고자 하였다. 정밀여과막의 Pilot-test에서 얻어진 운전모드는 유입 1.0분, 여과 36.5분, 공기역세 0.9분, 역세 1.0분, 배출 1.0분이었으며, 이를 적용하여 실증실험을 하였다. 한계여과속도(critical flux)는 Pilot 운전에서 Flux 20, 40, 56 및 62 LMH일 때의 시간의 변화에 따른 막간차압의 증가식을 기반으로 50 L/m²-h로 산정(TMP 0.5bar 이내)되었다. 화학세정은 1차로 산세정 2회, 2차로 알칼리 세정을 하여 95%의 회복율을 얻었다. 이러한 적정 조건으로 운전한 결과 처리수의 탁도는 봄·여름·가을·겨울 평균 각각 0.028, 0.024, 0.026 및 0.028 NTU, 연평균 탁도는 0.026 NTU로, 탁도 제거율은 98.4%로 나타났다. 광주광역시 D정수장의 원수·침전상등수를 1일 2,500 m³ 처리하는 실증실험시설 운영을 통해 부유고형물 및 콜로이드성 물질을 제거하는데 탁월한 처리성능을 확인하였고, 일반적인 모래여과공정을 대체할 수 있는 적정 운영기술이 확보되었다.

주제어 : 정밀여과막, 한계여과속도(Critical Flux), 탁도, 회복세정

1. 서론

막여과란 Membrane을 여재로 사용하여 물을 통과시켜 반투과(semi-permeable)의 성질을 이용하여 어떤 물질을 성질이 다른 물질과 분리 혹은 전달하는 것으로 정의될 수 있다.^{1,2)} 막여과 정수공정은 시설의 컴팩트화·자동화, 처리수질의 안정성 등의 이점을 기반으로 향후 국내에서 확대 보급될 전망이다. 노후정수시설 개량 시 고품질 수돗물 요구에 따라 탁도와 *Cryptosporidium*, *Giardia* 등과 같은 병원성미생물을 효과적으로 제거하여³⁾ 고품질의 수돗물을 생산할 수 있기 때문에 막분리 공정의 도입은 가속화될 가능성이 매우 높다.⁴⁻⁶⁾ 막여과 정수시스템은 국내외적으로

기후변화에 따른 물부족 대비한 최첨단기술로 반드시 필요하며, 지역별 상수원수 수질 맞춤형 장비를 개발해서 기존 정수처리공정보다 안전한 수돗물 생산·공급을 목적으로 많은 연구가 이루어져야한다.

세계 분리막 수처리 시장은 하수처리 및 담수화 분야에서 각광을 받고 있으며, 분야별 물시장 중 가장 빠르게 성장하고 있는 분야이다.⁷⁾ 이와 같이 본 연구는 급성장하는 세계 물 시장을 선점하고, 우리나라 물 기업의 기술 및 산업경쟁력을 강화하기 위해 추진하는 연구이다.⁸⁾ 효율적 운영관리를 위해 프로그램에 지능형 시스템을 포함하여 막분리 운전을 최적화하는 동시에 시스템에서 발생하는 다양한 오류를 사전에 진단하고 복구할 수 있는 감시제어 기술이 필요하다.

[†] Corresponding author E-mail: kymoon@cst.ac.kr Tel: 062-230-8500 Fax: 062-230-8501

본 연구는 지능형 막여과 정수처리 플랜트의 설계 · 시공 · 운영 기술을 확보하기 위해서 환경부와 에코스마트상수도 운영시스템 개발의 일환으로 연구되었다. 상수도시스템과 관련된 세부기술을 국산화로 상용화하고, 세계최고의 기술을 보유하고 설계 · 시공 · 운영실적 확보로 세계시장으로의 진출기반을 확립하는데 목적이 있다. 또한 지능형 상수도 시스템에 대한 최적화 관리통합운영으로 시설운전의 자동화 집약화를 통한 저에너지화를 추구한다.⁶⁾

이에 따라 광주광역시 D정수장에서 Pilot-test (120 m³/day)를 운전하여 운전인자를 도출 후, 기존 정수시설과 막여과 시스템을 통합하는 2,500 m³/day 규모의 Test-Bed을 갖춰 막여과를 운영하였다. 운영인자중 Pilot-test를 통해 TMP의 변화를 관찰하여 한계 Flux 산정과, 최적 세척방법 선정과 Test-Bed의 운전을 통한 처리수의 탁도 및 입자분포 등을 조사하였다.

2. 연구 방법

2.1. 여과 막의 선정

정수장의 모래여과 대신 막 여과를 적용한 Pilot Plant (Fig. 1) 운전결과에 기초하여 정수용량 2,500 m³/d 규모의 Test-Bed (Fig. 2)를 설계하였다. 병원성 미생물 *Cryptosporidium*, *Giardia*를 제어하고 탁도 0.05 NTU 이하를 만족할 수 있는 Pore size 0.05 µm, PVDF재질의 Micro Filter를 적용하여 운전한 결과를 제시한다.

막모듈 사양은 PVDF (Polyvinylidene Fluoride)재질의 가압식 Hollow fiber형식의 Micro-filter가 적합한 것으로 평가하고 다음과 같이 선정하였다(Table 1). Test-Bed에 적용한 정밀여과막의 재질인 PVDF는 강도가 강하고 내약품성 · 무독성 · 내연소성의 장점을 가지고 있기 때문에 망간 발생시에 산화제를 이용한 막표면에 부착된 오염물질을 화학세정에도 막손상에 미치는 영향이 상대적으로 작다.⁹⁾ 전량여과방식(dead-end filtration method)은 막공급 수질에 따

Fig. 2. Membrane filtration facility of Test Bed.

Table 1. Specification of microfilter

Specification	Type	Module	Material	Water qualities
- ϕ : 216 mm	- Pressure	- 48 EA	PVDF	- Turb.; < 0.05 NTU
- L: 1,950 mm	- hollow fiber	- 2 Line		- Mn; < 0.03 mg/L
- A: 60 m ²	- Dead end	- 24 EA/Unit		- Giardia; 3 Log
- Pore size; 0.05 µm	- Out-in (out-side pressure)			

라 막의 막힘이 빠르고 일반세척으로는 회복되지 않는 막힘이 발생하기 쉽지만 PVDF는 에너지 효율이 좋은 편이다.¹⁾

2.2. 시설의 구성

막여과 정수시스템은 전처리부(스크린, 혼화조, 응집조, 침전조), 막여과조, 소독조, 망간제거기 및 제어장치(산화제주입기, PLC (Programmable Logic Controller), pH조절부, 결정부, 데이터베이스)로 구성되었다. 이중 막여과조는 전처리된 원수속에 함유되어 있는 작은 현탁물질이 체(Mesh)원리에 의해 막여과의 공칭공경(Normal pore size)보다 큰 입자의 세균 · 바이러스 · 미세고형물 등을 제거, 기존 정수처리 공정의 모래여과지를 대체하는 기능을 갖는다. 제어장치는 망간제거기에 의해 제척된 망간 농도에 따라 산화

Fig. 1. Membrane filtration water treatment system of pilot-test.

제의 주입 여부 및 주입될 산화제의 목표량을 결정하고, 결정된 산화제 목표량에 해당하는 산화제를 주입하여 막여과조에서 유출되는 여과수의 망간농도가 목표치가 되도록 제어, 여과수의 망간 농도를 저감시키기 위해 별도의 시설물 없이 전처리부와 막여과조를 연결하는 배관 내에 산화제를 직접 주입함으로써 막여과조로 공급되는 과정에서 산화제와 접촉되게 설계하였다. 역세척수 회수장치는 역세척에서 발생한 배출수를 섬모상여과기 PCF (Pore Control Fiber) Filter로 세척하여 원수보다 수질이 좋은 상징수를 원수로 재사용하여 회수율(99%)을 높이고자 하였다. 섬유다발을 비틀어 공극을 작게 하여 여과하고, 부유물질이 쌓여 여과가 설정한 압력 초과시에는 섬유다발을 풀어 공극을 넓게 한 후, 공기세척 및 역세하였다.

2.3. 운전 모드의 설정

Table 2는 병렬형 2계열 설계된 Pilot Plant 운전을 통해 얻은 운전모드이다. 적정운전시간의 선정은 유입, 여과, 역세, 배출시간의 변화에서 막간차압의 변화율, 회복율의 변화 산정을 통해 도출하였다. Pilot Plant에 도출된 운전인자를 적용하여 Test-bed에 적용하였다. 운전모드는 유입 1.0분, 여과 36.5분, 역세 1.0분, 배출 1.0분 그리고 막세척에서 공기세척 1.0분, CEB (chemical enhanced backwashing) 주기 1회/7일, CIP (clean-in-place)주기 1회/6월이다. 여름철 조류발생 시에 발생하는 맛·냄새 원인물질인 2-MIB와 Geosmin 제어는 입자상활성탄(granular activated carbon, GAC)을 이용하였고, 망간제어는 이산화염소(ClO₂)를 이용하였다.^{3,10-12)}

2.4. 실험 방법

2.4.1. 한계 Flux

MF막의 공칭공경은 대략 0.1~10 μm의 범위에 있으며, 구동력은 압력차로서 일반적으로 1-10psig가 주로 사용되며, 분리효과는 막의 공칭공경과 분리대상 물질의 크기에 좌우된다. 정밀여과의 가장 큰 특징은 입체와 유체를 분리하는데 있으며 간단한 sieve mechanism을 따르게 된다.¹³⁾ 여과가 진행됨에 따라서 막표면 위에서 배제된 입자들이 쌓이면서 케이크 층을 형성하여 유체의 흐름을 방해하게 되어 Flux가 감소하게 되는 것을 수식으로 나타내면,

$$J = \Delta \frac{P}{R_t}, \quad R_t = R_m + R_c \quad (1)$$

J : flux (L/m²-day)

Table 2. Operating mode

Flux	TMP	Operating time (min)					Chemical cleaning interval	
		In-flow	Filtration	Air Backwash	Bach wash	out flow	CEB	CIP
49	≤1.5	1.0	36.5	1.0	1.0	1.0	7 days	6 months

ΔP : transmembrane pressure (kgf/cm²)

R_t : total resistance (R_m: membrane resistance, R_c: cake resistance)

Flux는 ΔP 증가에 비례하여 증가하게 되지만, 여과가 진행될수록 입자에 의해서 쌓이는 케이크 층에 의해서 케이크 저항(R_c)이 증가하게 된다. R_m은 막 자체가 갖는 저항값으로 변화하지 않으므로 전체저항(R_t)도 증가하며 Flux는 감소하게 된다.¹³⁾

한계 Flux의 산정을 위한 실험은 Flux를 20, 40, 56 및 62 LMH (L/m²·hr)로 변경하면서 시간의 변화에 따른 막간차압의 변화율을 조사하였다.

2.4.2. 회복세정

막여과 공정에서 막오염 발생 측정인자는 TMP (transmembrane pressure, 막간차압)으로 일반적으로 지수함수적으로 증가한다. 연속운전에서 막오염의 발생과 더불어 막간차압이 증가한다. 특정 TMP (1.5 bar)이상이 되면 고농도 산과 알칼리를 이용하여 10~20시간 동안 막면에 접촉시켜 막오염 물질을 제거한다. 이와 같이 막간차압을 운전초기의 낮은 상태로 회복시켜주는 회복세정(CIP)을 수행한다. CIP주기를 평가항목으로 하여 막간차압의 회복율을 산정하여 안전성을 평가하였다. 잦은 화학세정은 고농도의 화학약품과 장시간 접촉으로 인해 막재질 고유의 특성의 약화 친수기의 탈착 등으로 궁극적인 막 수명 단축의 원인이다. 따라서 원수의 특성에 따라 대상시설에 대한 최적의 화학세정을 제시해야 한다. 막여과 공정이 장기간 낮은 막간차압에서 운영하면 화학세정 주기를 연장할 수 있고 장기간 안정적으로 처리수의 생산이 가능하므로 이는 매우 중요한 막여과공정 운영기술이다. 최적 유지세정의 시점을 찾기 위해 노력하였다. Table 3은 세정방법으로, CIP 이후 막간차압 변화에 따른 회복율을 조사하였다.

$$CIP recovery(\%) =$$

$$\frac{(\text{before CIP TMP}_{20} - \text{after CIP TMP}_{20})}{(\text{before CIP TMP}_{20} - \text{initial CIP TMP}_{20})} \quad (2)$$

TMP₂₀ : TMP @ 20℃

initial CIP TMP₂₀ : 초기 막 자체가 가지고 있는 저항값

before CIP TMP₂₀ : CIP전 막간차압

after CIP TMP₂₀ : CIP후 막간차압

Table 3. Recovery cleaning conditions

Recovery cleaning	Chemical conditions	
1 st cleaning	HCl (1 N) + oxalic acid (1%)	① Citric acid (1%) ② H ₂ SO ₄ (0.2%)
2 nd cleaning	0.3% NaOCl + NaOH (0.1%)	① NaOH (0.1%) ② NaOCl (0.2%)
3 rd cleaning	1 N HCl	

2.4.3. 처리수의 탁도 측정

Test-Bed 운영중 안정화가 이루어진 2015. 5~8월까지 운전하여 처리수의 자동측정망 탁도 자료 중의 대푯값 42개 자료를 분석하였다. 처리공정이 상수원수 → 응집침전 → 상징수 → 가압식 MF여과로 이루어져 원수와 응집침전후 상징수 즉 막유입수 및 막처리수 3곳에서 채수하여 탁도를 측정하였다. 또한 운전한 Test-Bed의 처리수와 기존의 모래여과 처리수의 탁도를 비교하였다.

2.4.4. 막손상 감시를 위한 입자 분포

막파단 감시방법은 간접법과 직접법이 있으며, 본 연구에서는 간접법인 탁도계와 입자계측기감시방법중 입자계측을 통한 막 파단을 감시하였다. 연속 탁도 측정값이 지속시간 2분 동안 0.15 NTU 이상 초과되는 경우, 연속입자계수(2~3 μm)측정값이 지속시간 2분 동안 30개/mL를 초과하는 경우(단, 측정하는 지속시간은 연속 탁도 모니터링기와 입자계수기의 계측기내 시료 저장시간 등의 사양을 고려하여 조정 가능하도록 함)로 하고 있다.¹⁾ 실험기간 동안(2, 3, 4 micron)의 입자 계측을 2분주기로 측정하여 결과를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유입수의 특성

Table 4는 2010~2014까지 5년간 조사한 유입수의 특성을 나타낸다. 원수의 망간농도의 범위는 0.013~0.094 mg/L, 2010년과 2014년의 평균농도는 각각 0.014 및 0.008 mg/L를 나타내었다. 탁도 2.85 NTU, pH 7.8, UV_{254} 0.048/cm, DOC 1.635 mg/L를 나타내었다.

3.2. 한계 Flux의 산정

CIP(회복세척)주기를 평가하기 위해 Pilot Plant 운전기간 동안 Flux변화에 따라 TMP 변화를 관찰하여 CIP 주기평가

Table 4. Raw water quality

Parameters	Avg	Max	2010	2014
pH	7.8	9.3 (July 2014)	8.0	7.8
Turbidity (NTU)	2.85	6.67 (Oct. 2014)	2.66	3.44
UV_{254} (cm^{-1})	0.048	0.095 (Sept. 2012)	0.049	0.045
Mn (mg/L)	0.013	0.094 (Mar. 2011)	0.014	0.008
DOC (mg/L)	1.635	2.785 (Dec. 2010)	2.164	1.448

Fig. 3. Variations of TMP and TMP recovery.

Fig. 4. Variations of TMP from dp/dt at LMH.

와 함께 한계 Flux를 도출하였다. Flux를 변화시켜 운전하면서 TMP의 변화를 조사한 결과, Fig. 3과 같이 TMP가 증가할 때 Flux를 낮추었으나 TMP는 계속 증가하였고 CIP 진행으로 TMP가 85% 회복하는 것을 볼 수 있었다. 막의 오염이 이미 발생한 이후라면 TMP의 감소는 Flux가 임계구역 이하로 떨어지는 원인이 된다.¹⁴⁾

Fig. 4는 Flux 변동에 따른 TMP변화를 나타내었다. Flux 변동에 따른 TMP변화를 기초로 한계 Flux 산정을 위해, 수온이 낮을 때 점도가 높아지고 막여과 처리수의 탁도는 다소 증가하는 경향이 있으므로, 한계 Flux 산정을 위한 실험을 수온이 낮은 겨울철이어서 실험기간 중 수온은 7~8℃ 정도이었다. 이때의 한계 Flux는 여름철에는 Flux를 20% 정도 증가하여 운전하여도 가능할 것으로 판단하였다.

Flux를 20 LMH로 조정하여 운전한 시간변화에 따른 TMP의 변화(dp/dt)는 $Y = -0.05x + 2.37$ 로 나타났다. 기울기가 음을 값을 나타낸 것은 시간의 변화에 따라 압력이 감소한다는 의미인데 실제로 감소한다는 의미보다는 측정값의 오차인 것으로 보이며, 시간의 변화에도 압력은 거의 증가하지 않는다고 보는 것이 타당하다. 정밀여과에서 고압력보다 저압력이 훨씬 더 효과적이라는 자료를 토대로 Flux 20 LMH에서 시작하였다.

Flux를 40 LMH로 조정하여 운전하여 시간변화에 따른 TMP의 변화를 살펴본 결과, $Y = 0.0355x + 0.5665$ 로 나타났다. 기울기가 $Y = 0.0355x$ 를 나타내었는데 시간의 변화에 따라 압력이 조금씩 증가하고 있다는 것을 알 수 있었으며, 시간의 변화에 따라 압력은 증가함을 감지 할 수 있을 정도라¹⁵⁾고 볼 수 있다.

Flux를 56 LMH로 조정하여 운전한 시간변화에 따른 TMP의 변화를 살펴본 결과, $Y = 0.315x - 2.6435$ 로 나타났다. 기울기가 $Y = 0.315x$ 를 보인 것은 시간의 변화에 따라 압력이 다소 증가하고 있다는 것을 알 수 있었다. Y의 절편이 음의 값으로 보이는 것은 X축에서 매우 짧은 기간만을 나타내었으며 측정시작점이 13일 정도 경과한 시점에서 실험이 이루어 졌기 때문이다.^{11-12,16)}

Flux를 62 LMH로 조정하여 운전한 시간변화에 따른 TMP의 변화를 살펴본 결과, $Y = 0.85x - 23.7435$ 로 나타났다. 기울기가 $Y = 0.85x$ 를 보인 것은 시간의 변화에 따라 압력이 다소 증가하고 있다는 것을 알 수 있었다. Y의 절편이 음의 값으로 보이는 것은 X축에서 매우 짧은 기간만을 나타내었으며 측정시작점이 1개월 정도 경과한 시점이므로 음의 값이 나타난 것이다.

한계여과속도는 수력학적 조건에 따라 증가될 수 있기 때문에 측정실험에서는 유체역학적 상태를 달리하여 진행하여야한다.¹⁷⁾ 여기서는 Flux를 다르게 설정하여 운전을 진행할 경우 TMP의 변화상태(dp/dt)를 측정할 것이다. Flux 20 LMH는 시간에 따른 플럭스의 감소는 나타나지 않는 그 이하의 플럭스이며 시작은 이러한 지점이 적절하다고¹⁵⁾ 판단하였다. 원수를 대상으로 2014. 1~2015.7월까지 운전한 자료에서 실험한 위의 결과는 Flux 20, 40, 56 및 62 LMH일

Fig. 5. Estimation of critical flux.¹⁷⁾

때의 시간의 변화에 따른 TMP의 변화식을 Fig. 5에 도시하여 nonlinear least squares method로 산정한 것이다. 따라서 본 시설을 이용한 D정수장 원수를 대상의 한계여과속도는 50 LMH인 것으로 평가하였다.

3.3. 최적 세정방법

CIP실험을 한 결과 1차 산 세정염산(1 N) + 옥살산(1%) - 알칼리 세정(0.3% NaOCl + NaOH)- 2차 산세정(1 N 염산)을 한 경우는 회복율이 75%이상을 보였으나, 1차 산세정(Citric acid (1%)), 2차 산세정(H_2SO_4 (0.2%))후 알칼리 세정을 1차(NaOH (0.1%)), 2차(NaOCl (0.2%))로 운영 후 회복율은 95% 이상을 보여 최적 화학세정 방법으로 선정되었다.

CIP 세제로 citric acid를 사용하는 것은 다가양이온(multivalent cation)의 이물질과 침전물을 제거하기 위한 것이며, 옥살산을 사용하면 aluminosilicate clay가 용해되어 분해되는 것으로 조사되었다.¹⁸⁾ 본 실험에서 멤브레인의 cake의 성분조사가 이루어지지 않아 정확한 규명은 어려웠지만 CIP 세제로 citric acid를 사용한 경우가 회복율이 높게 나타났다. 그러나 무기염의 의한 분리막 오염이 주요한 오염원일 경우, 알칼리-산-알칼리 세정의 경우 알칼리 세정약품이 점토에 흡착되어 세정효과를 기대하기 어려워, 산세정을 먼저 실시하여 무기염을 용해시켜 세정효과를 극대한 후 알칼리 세정을 실시하여 유기오염물질을 세정하는 방법이 회복율을 더 높이는 것을 알 수 있었으며, 이는 연¹⁹⁾ 등의 연구와도 유사한 결과를 보였다.

Fig. 6은 2015. 8~2016. 4월까지의 Test-bed 운전 중의 TMP의 변화에 따라 CIP를 실시하고 전후의 TMP를 측정하여 회복율을 산정하였다.

A 계열은 1차 CIP후의 TMP는 0.53 bar로 떨어져 회복율 81%를 보였다. 이후 운전에서 TMP가 다시 증가하여 약 20일 후에 2차 CIP를 하여 TMP가 0.27 bar로 떨어져 회복율은 97%를 보인 것이다.

B 계열은 1차 CIP후의 TMP는 2.03에서 0.55 bar로 떨어져 회복율 81%를 보였다. 이후 운전에서 TMP가 다시 증가하여 약 20일 후에 CIP를 하여 TMP가 0.23 bar로 떨어져 회복율은 99%를 보였다. CIP의 Interval을 줄이거나 CIP시간을 늘이면 TMP는 더 낮게 떨어지고 회복율은 100% 이

(a) Membrane A series

(b) Membrane B series

Fig. 6. Variations of TMP at membrane series.

상을 보일 것으로 판단하였으나 실제 실험에서 100% 이상의 회복율은 관찰되지 않았다. 이와 같은 현상은 첨가적인 CIP진행이 TMP회복을 높여줄 수 있다는 것으로 판단되며 Schneider 등³⁾의 연구결과에서도 유사하게 관찰되었다. CIP Interval이 짧아지거나, 산·알카리세척 세정시간이 증가하면 높은 회복율을 기대할 수가 있을 것으로 보인다.

3.4. 처리수질(Turbidity) 평가

Fig. 7은 2015. 5~2016. 4월까지의 Test-Bed 처리수를 수질 자동측정 38회 분석결과이다. A계열의 농도범위는 0.018~0.050 NTU로 평균값은 0.031 NTU(표준편차 0.011)를 B계열의 농도범위는 0.023~0.050 NTU로 평균값은 0.029 NTU(표준편차 0.008)로 안정적인 수질을 보였다.

Fig. 7. Turbidity of treated water (Mar. 2015~Apr. 2016).

Fig. 8. Correlation between turbidity and water temperature.

Table 5. Seasonal turbidity of treated water

Season	Influent	Effluent	Removal rate
Spring	March	1.6	0.026
	April	1.8	0.030
	May	2.3	0.026
	Mean	1.9	0.028
Summer (June~August)	June	2.3	0.020
	July	2.1	0.025
	August	3.1	0.024
	Mean	2.5	0.024
Autumn	September	0.9	0.024
	October	0.4	0.025
	November	1.1	0.028
	Mean	0.8	0.026
Winter	December	3.2	0.025
	January	4.2	0.036
	February	2.3	0.025
	Mean	3.2	0.028
Overall Mean	2.1	0.026	98.4

Fig. 8은 탁도와 수온의 변화를 나타내었다. 월별변화 분석에서 원수의 탁도는 1.3~980 NTU의 범위로 평균 12.6 NTU이었으며, 응집침전 상징수의 탁도범위는 0.26~6.48 NTU이며 평균탁도는 1.6 NTU 정도였다. 이때 처리수의 탁도는 시설 시운전 중인 3. 17일 이후로 탁도가 0.05, 0.04 NTU를 보이다 정상가동이 시작되는 5월부터 수질이 안정되어 계속 0.02~0.03 NTU 범위내로 나타나 안정적인 수질을 나타내며 정상 운전되었다. 수온이 높을수록 처리수의 탁도는 비교적 감소하는 현상을 보이고 있는데, 이는 추운 겨울철 점도가 높아지면 처리수의 탁도가 미미하게 높아지는데 영향을 주는 것으로 보인다.

실시간으로 분석된 처리수의 주1회 탁도 자료에서, MF여과 처리수의 탁도 범위는 0.012~0.049 NTU로 평균 탁도는 0.026 NTU이며 표준편차는 0.009로 나타났다(40개 Sample). 기존의 모래여과 공정의 평균 탁도 0.059 NTU(범위 0.04~0.11 NTU), 표준편차 0.015 (42개 Sample)와 비교하면 개발기술에 의한 처리수의 탁도는 매우 낮고 안정적인 수질로 평가할 수 있다.

Table 5는 계절별 처리수 탁도와 제거율로 겨울철 수온이

Fig 9. Particle numbers of treated water.

낮아 유입수의 점도가 높아지면서 탁도가 상대적으로 높게 나타나다 여름철 수온 상승으로 점도가 낮아지면서 탁도는 비례하여 낮아지는 현상을 감지할 수 있었다. 봄 · 여름 · 가을 · 겨울 처리수의 평균 탁도는 각각 0.028, 0.024, 0.026 및 0.028 NTU로, 유입수의 점도가 낮은 여름철의 농도가 가장 낮고 겨울과 봄철이 비교적 높다는 것을 감지할 수 있었지만 상관도는 높지 않은 것으로 판단된다. 봄 · 여름 · 가을 · 겨울 탁도 제거율은 각각 98.5, 99.0, 96.8 및 99.1%로, 겨울철 제거율이 가장 높게 나타났다. 개발한 막여과 정수시스템에 의한 탁도 제거율은 유입수의 탁도에 영향을 받지만 평균 98.4%정도의 제거율을 나타내었다

3.5. 막손상 감시를 위한 입자 분포

Fig. 9는 운전중인 Test-Bed의 막손상의 판단을 위한 간접 완결시험법중 입자분포로 2분 주기의 Particle 개수를 나타낸 것이다. 실험 기간 동안 2 micron의 입자 개수는 2분간 7.8개 이하, 3 micron의 입자 개수는 2분간 5.9개 이하, 4 micron의 입자개수는 2분간 5.4개 이하를 보여주었다. 간접 완결성시험법에서의 막손상 판단근거는 연속 탁도 측정값이 지속시간 2분 동안 0.15 NTU 이상 초과되는 경우, 연속입자계수(2~3 μm)측정값이 지속시간 2분 동안 30개/mL를 초과하는 경우(단, 측정하는 지속시간은 연속 탁도 모니터링기와 입자계수기의 계측기내 시료 저장시간 등의 사양을 고려하여 조정 가능하도록 함)일 때 손상이 있는 것으로 판단한다.²⁰⁾ 따라서 본 연구에서는 간접 완결성시험법으로 평가한 결과 막손상은 없는 것으로 판정되었다.

4. 결론

광주광역시 D정수장의 침전상등수를 1일 2,500 m^3 처리하는 정밀여과막 실증실험시설을 운영하여 음용수를 생산 · 공급하기 위한 정밀여과막 운전의 최적공정인자를 얻고자 하였다. Pilot 실험을 통해 운전인자를 도출 후, Test-Bed을 갖춰 막여과를 운영하면서 Pilot-test를 통해 TMP의 변화를 관찰하여 한계 Flux 산정과, 최적 세척방법 선정과 Test-Bed의 운전을 통한 처리수의 탁도 및 입자분포 등을 조사하였다.

Pilot plant 운전을 2014. 1월~2015년 7월까지, 실증시설은 2015. 1월~2016. 4월까지 운영하여 다음과 같은 결과를 얻었다. Pilot plant 운전결과 최적운전모드는 유입 1.0분, 여과 36.5분, 공기역세 0.9분, 역세 1.0분 및 배출 1.0분으로 산정하였다. 한계 Flux는 20, 40, 56 및 62 LMH일 때의 시간의 변화에 따른 TMP의 변화식을 the nonlinear least squares method로 산정하여 실증시설의 한계 Flux는 50 LMH인 것으로 평가하였다. 또한 화학세정은 산세정 1차 Citric acid (1%), 2차 H_2SO_4 (0.2%)으로, 알카리 세정, 1차 NaOH (0.1%), 2차 NaOCl (0.2%)으로 설정되었으며, 이때의 세정회복율은 A계열 경우 2차의 CIP로 97%를 보였으며, B계열은 2

차의 CIP로 99%를 보였다. 실증시설을 1년 동안 운영하여 얻은 처리수의 Turbidity는 봄 · 여름 · 가을 · 겨울 평균 각각 0.028, 0.024, 0.026 및 0.028 NTU, 연평균 탁도는 0.026 NTU 그리고 탁도제거율은 98.4%로 나타났다. 막 손상 판단 평가에서, 2 micron의 입자개수는 7.8개/2분 이하, 3 micron의 입자개수는 5.9개/2분 이하, 4 micron의 입자개수는 5.4개/2분 이하로 나타나 간접 완결성시험법으로 평가한 결과 막 손상은 없었다. 광주광역시 D정수장의 침전상등수를 1일 2,500 m^3 처리하는 실증실험시설 운영을 통해 정밀여과막의 부유고형물 및 콜로이드성 물질을 제거하는데 탁월한 처리능력이 있음을 확인하였다. 이로써 정밀여과막이 기존의 모래여과를 대신하여 보다 안정적으로 음용수를 공급하는 막여과 시설의 설계 · 시공 · 운전기술을 확보되어 정부의 중수도시의 노후정수장 개량사업과 하수처리장 처리수 재이용사업의 참여 및 국내 · 외 물 산업에 진출기회를 마련한 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 “환경부 차세대 에코이노베이션사업(글로벌 탐 환경기술 개발사업)”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다(과제번호 GT-SWS-11-02-007-7).

KSEE

References

1. National Institute of Environmental Research, “Maintenance of Membrane Filtration on Water Purification Facility (NIER-GP2013-153),” (2013) (in Korean)
2. Cho, J. W., “Membrane Engineering,” Shingkwang Publisher, Korea(2013).
3. Schneider, C., John, P. and Huehner, R., “Removal of Manganese by Microfiltration in a Water Treatment Plant,” Proceedings of the 2011 Membrane Technology Conference, AWWA&IWA, San Antonio, Texas USA(2011).
4. Kim, I. H., Lee, G. S., Lee, K. H. and Moon, J. C., “Intelligent water purification plant optimization technology using membrane,” *J. Environ. Technol.*, **10**, 119~121(2011).
5. Yang, H. J., Yi, S. H., Kang, Y. J., Song, Y. S. and Park, Y. H., “Estimation of Critical Flux for Test-Bed of Membrane filtration,” In Proceedings of the 2015 Korea society of Environmental Enginners., Korea. Busan(2015).
6. Yang, H. J., Yi, S. H., Kang, Y. J., Song, Y. S., Park, Y. H. and Ro, S. G., “Evaluation of Manganese Removal rate for MF Pilot Test,” *J. Environ. Technol.*, **7**, 94~99(2015).
7. The Export-Import Bank of Korea, “Strategy for overseas expansion of domestic water industry,” (2014).
8. Noh, S.-H., Lee, K.-C., Choi, Y.-H., Kim, K.-C., Bang, M.-L., Cho, S.-H., Kim, D.-H., Lee, J.-H., Lee, J.-C. and Jeong, H.-J., “eco-smart water supply system as a total solution,”

- J. Environ. Technol.*, **5**, 93~98(2016).
9. Kyung, G. M. and Park, J. Y., "Effect of Operating Conditions and Recovery of Water Back-washing in Spiral Wound Microfiltration Module Manufactured with PVDF Nanofibers for Water Treatment," *Membr. J.*, **25**(2), 180~190 (2015).
10. White, G. C., Handbook of Chlorination and Alternate Disinfectants, Fourth Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York (1999).
11. Yang, H. J., Yi, S. H., Song, Y. S. and Park, Y. H., "Evaluation of Optimum MF Flux for Drinking Water Treatment at K Waterworks," The 50th Annual Conference of Japan Society on Water Envi. 2016a in Tokushima (Mach 16-18), 3-G-13-13, p. 461(2016).
12. Yang, H. J., Yi, S. H., Song, Y. S., Park, Y. H., Son, G. R. and Kang, Y. J., "Evaluation of Manganese Removal rate for Pilot Test," Proceeding of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Eng. (CEES'16) Prague, Czech Republic-March 30-31, 2016b, pp. AWSPT 118-1~5 (2016).
13. Song, Y. S., "Study on Application of Drinking Water Clarified Using a Membrane Filtration," Chounnam national university, Doctoral degree(2003).
14. Howell, J. A., "Cub-critical flux operation of microfiltration," *J. Membr. Sci.*, **107**(Issues 1-2), 165~171(1995).
15. Field, R. W., Wu, D., Howell, J. A. and Gupta, B. B., "Critical flux concept for microfiltration fouling," *J. Membr. Sci.*, **100**(3), 259~272(1995).
16. Yang, H. J., Yi, S. H., Song, Y. S., Park, Y. H., Son, G. R. and Kang, Y. J., "A Review of MF Filtration Process in Drinking Water Production at K Waterworks," The 49th Annual Conference of Japan Society on Water Environment 2015 in Ishikawa (Mach 16-18), 3-H-11-2, p. 45(2015).
17. Espinasse, B., Bacchin, P. and Aimar, P., "On an experimental method to measure critical flux in ultrafiltration," *Desalination*, **146**(1-3), 91~96(2002).
18. Cama, J. and Ganor, J., "The effects of organic acids on the dissolution of silicate minerals: A case study of oxalate catalysis of kaolinite dissolution," *Geochim. et Cosmochimica Acta*, **70**, 2191~2209(2006).
19. Yeon, K. H., Cho, J. B., Lee, Y. K., Kang, H. J. and Kim, W. G., "Taeyoung Submerged-type Membrane Filtration for Advanced Drinking Water Treatment," *J. Korean Geo-Environ. Soc.*, **14**(4), 15~27(2013).
20. National Institute of Environmental Research, "Installation criteria of purification works for membrane filtration (NIER-GP2013-151)," (2012) (in Korean).