



호소수 탁도변화 대응을 위한 고프럭스 막여과공정의 Pilot 연구

A pilot study of high flux membrane process for responding to influent turbidity changes in reservoir water

강준석¹·성자영¹·유제완¹·김형수¹·이재규²·전민혁²·천지훈^{2*}

Joonseok Kang¹·Jayeong Seong¹·Jewan Yoo¹·Hyungsoo Kim¹·Jaekyu Lee²·Minhyuk Jeon²·Jihoon Cheon^{2*}

¹성균관대학교 수자원전문대학원, ²도레이 첨단소재(주)

¹Graduate school of Water Resources, Sungkyunkwan University, ²Toray Advanced Materials Korea Inc.

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

ABSTRACT

In the membrane process, it is important to improve water treatment efficiency to ensure water quality and minimize membrane fouling. In this study, a pilot study of membrane process using reservoir water was conducted for a long time to secure high flux operation technology capable of responding to influent turbidity changes. The raw water and DAF(Dissolved Air Flotation) treated water were used for influent water of membrane to analyze the effect of water quality on the TMP (Trans Membrane Pressure) and to optimize the membrane operation. When the membrane flux were operated at 70

Received 31 July 2020, revised 22 October 2020, accepted 30 October 2020.

*Corresponding author: Jihoon Cheon (E-mail: jihoon.cheon@torayamk.com)

- 강준석 (연구교수) / Joonseok Kang (Research Professor)
경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 16419
2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Republic of Korea
- 성자영 (박사과정) / Jayeong Seong (Ph. D. Candidate)
경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 16419
2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Republic of Korea
- 유제완 (박사과정) / Jewan Yoo (Ph. D. Candidate)
경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 16419
2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Republic of Korea
- 김형수 (교수) / HyungSoo Kim (Professor)
경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 16419
2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Republic of Korea
- 이재규 (책임연구원) / Jaekyu Lee (Senior Researcher)
서울시 강서구 마곡동로10길 7, 07790
7, Magokdong-ro 10-gil, Gangseo-gu, Seoul 07790, Republic of Korea
- 전민혁 (책임연구원) / Minhyuk Jeon (Senior Researcher)
서울시 강서구 마곡동로10길 7, 07790
7, Magokdong-ro 10-gil, Gangseo-gu, Seoul 07790, Republic of Korea
- 천지훈 (팀장) / Jihoon Cheon (Team Leader)
서울시 강서구 마곡동로10길 7, 07790
7, Magokdong-ro 10-gil, Gangseo-gu, Seoul 07790, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

LMH and 80 LMH under stable water quality conditions with an inlet turbidity of 10 NTU or less, the TMP increase rates were 0.28 and 0.24 kPa/d, respectively, with minor difference. When the membrane with high flux of 80 LMH was operated for a long time under inlet turbidity of 10 NTU or more, the TMP increase rate showed the maximum of 43.5 kPa/d. However, when the CEB(Chemically Enhanced Backwash) cycle was changed from 7 to 1 day, it was confirmed that the TMP increase rate was stable to 0.23 kPa/d. As a result of applying pre-treatment process(DAF) on unstability water quality conditions, it was confirmed that the TMP rise rates differed by 0.17 and 0.64 kPa/d according to the optimization of the coagulant injection. When combined with coagulation pretreatment, it was thought that the balance with the membrane process was more important than the emphasis on efficiency of the pretreatment process. It was considered that stable TMP can be maintained by optimizing the cleaning conditions when the stable or unstable water quality even in the high flux operation on membrane process.

Key words: Water treatment, Membrane process, CEB(Chemically Enhanced Backwash), DAF(Dissolved Air Flotation), MF(Microfiltration), High flux system

주제어: 정수처리, 막여과공정, 유지세정, 용존공기부상, 정밀여과막, 고프럭스 시스템

1. 서 론

산업 발전 및 기후변화에 따라 수질오염의 발생이 심화되면서 탁도 및 유기물, 무기물, 색도유발물질 등 수중에 포함된 오염물질의 제거를 통해 안전한 수돗물을 생산하기 위한 기술을 개발하기 위한 다양한 정수처리 공정의 연구가 진행되고 있다 (Guigui et al., 2002; Lee et al., 1999). 또한 미세플라스틱과 같은 새로운 오염원의 검출 및 기후변화에 따른 집중호우로 인해 유입수 탁도의 급변화 현상이 발생하면서 기존의 정수처리시설에서 처리수질 및 운영효율 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 현재 우리나라의 정수처리공정은 일반적으로 “혼화/응집/침전-모래여과-염소소독”을 적용하고 있으며 여과공정의 처리효율 향상 및 수질 안전성 확보를 위한 전처리 공정에서 응집제 및 염소의 투입량 증가에 의해 처리수중에 존재하는 잔류알루미늄과 소독부산물(Disinfection By-products, DBPs) 문제가 대두되고 있다 (Lee and Oh, 2007). 이러한 문제를 해결하기 위하여 막여과 고도정수처리시설이 도입되는 추세이며 막여과 공정은 수질변화에 효과적인 대응이 가능하고 소요부지면적이 적으며 기존의 재래식 공정에 비해 유지관리가 용이한 장점을 갖는다 (James et al., 1995). 막 여과법(Membrane filtration)은 기존의 급속모래 여과 공정을 대신하여 장치의 단순화 및 운전의 자동화, 수질의 고품질화 등의 장점으로 점차 도입이 증가되는 추세이다 (Lee et al., 2000). 국내 막여과 정수시설은 2004년 양평군 이동정수장의 도입을 시작으로 2009년 이후 급격하게 정수시설의 용량이 확대되었으

며 2017년 기준 총 시설용량 442,080 m³/일(27개소)의 막여과 정수시설이 도입된 것으로 조사되었다 (Kang et al., 2017; Ministry of Environment, 2014). 정수처리 공정에서 막여과 공정은 제거대상물질의 제거효율을 향상시키면서 분리막에 발생하는 막오염을 최소화하여 생산성 및 처리효율을 확보하는 것이 중요하다. 그러나 수중에 존재하는 입자상 및 용존 유기물은 막표면에 침적하여 물의 흐름을 방해함으로써 운전압력이 높아지거나 여과지속시간이 짧아지는 막오염 현상이 발생하게 된다 (Lee et al., 2004). 이러한 현상을 최소화하기 위하여 전처리를 적용한 “혼화/응집(침전)-분리막 여과-(후처리)”의 공정이 적용되고 있으나 전처리 공정에 따라 부지면적, 설치시설, 약품비 증가 등의 문제가 발생한다 (Kim et al., 2013; Lee et al., 2000). 2000년 이후, 일부 정수장을 중심으로 기존의 침전공정보다 조류 및 색도 제거에 대하여 우수한 성능을 보이는 용존공기부상(Dissolved Air Flotation : DAF) 공정을 대체공정으로 적용한 사례가 증가하고 있다. 원수 내에 존재하는 탁도 유발 물질은 콜로이드성 물질로서 표면이 음전하를 띠고 서로간의 반발력으로 인해 가라앉지 않고 안정적으로 부유한 상태로 수중에 존재한다 (Gregory, 1998). 이러한 상태에서 응집제를 투입할 경우, 가수분해에 의해 짧은 시간 내에 응집제가 균일하게 확산되어 원수 내의 오염물질을 중화 및 응집시켜 침전성이 우수한 큰 플록을 생성하여 제거하므로 막여과 공정의 전처리로 연계하여 막여과 시설의 효율을 증가시키고 공정성능을 향상시킬 수 있다 (Gregory and Duan, 2001). 정수처리 공정에서 주로 사용되는 응집제



는 alum 및 고분자 응집제인 polyaluminium chloride(PACl) 등의 alum 계통 응집제의 활용빈도가 높다 (Jim et al., 2011). 특히, PACl은 alum 응집제보다 염기도 및 고분자 알루미늄종의 비율이 높기 때문에 알칼리 소모가 적고 플록 형성률이 우수한 것으로 알려져 있다 (Pernitsky and Edzwald, 2003). 그러나 응집제 주입시설 및 주입량이 최적화되지 않을 경우에는 금속염 가수분해종의 발생으로 인하여 flux 감소 등 막여과 공정의 효율을 감소시킬 수 있는 것으로 알려져 있다 (Jung et al., 2007; Song et al., 2001). 또한, 침전 또는 부상을 생략한 응집/혼화 공정 연계는 분리막에 응집플록이 직접 유입됨에 따라 막 표면에서 케익층을 형성하여 분리막의 투과효율을 감소시키는 막오염 물질로 작용할 수 있다.

국내의 정수시설 중 MF/UF 막여과 공정이 도입되어 운영 중인 5,000 m³/일 이상의 막여과 정수시설은 11개소이며 해당 시설에서 운영되고 있는 막여과유속은 일반적으로 1.0~3.0 m³/m²·일로 확인되었다. 그중 PVDF 재질의 유기막을 적용한 정수시설은 7개소이며 해당 정수시설의 운영조건은 1.0~1.7 m³/m²·일(42~70 LMH)이며 PVDF 소재에 비해 내구성이 우수한 무기막(Ceramic) 및 기타 유기막(PS&PAN) 소재를 사용한 정수시설은 1.4~3.0 m³/m²·일(60~126 LMH)의 막여과유속 조건으로 운영이 되고 있는 것으로 확인되었다 (Korea Environment Corporation, 2017). 막여과공정은 현장상황에 따라 가동범위 내에서 막여과유속의 조정이 유연하기 때문에 수량적 측면에서 안정적인 확보가 가능한 장점을 갖는다. 기존 정수시설의 노후화로 인하여 사회적인 이슈가 발생함에 따라 기존 정수시설에 대한 개량사업(Retrofit) 및 고품질 수돗물에 대한 국민의 요구에 따른 신규정수시설 설치가 고려되고 있다. 또한, 기존의 광역범위의 수도공급에서 도시에 인접한 소규모 정수시설의 도입이 검토되고 있는 추세에서 부지면적 대비 높은 생산량을 확보를 위한 방안으로 막여과공정의 도입은 이러한 제한적인 조건을 충족할 수 있는 기술로 알려져 있다.

본 연구에서는 정수시설의 이러한 문제에 대한 해결책을 제시하기 위하여 부지면적 축소에 대응 가능하고 나아가 생산수질 개선 등 효율향상이 가능한 분리막 공정에서 원수를 직접 적용하는 방식과 용존공기부상(DAF) 공정을 전처리로 적용한 공정에서의 여과효율을 비교평가 하였다. 부산 회동수원지 파일럿 플랜트 실증연구센터에 분리막 파일럿 장치를 설치하

여 회동수원지의 원수 수질에 맞는 막여과 공정의 운전성능 및 운전방법을 검토하였다. 또한, 전처리 공정 적용에 따른 운전경향을 분석하여 전처리 공정이 막여과공정의 운영효율에 미치는 영향과 효율적인 운전방법을 제시하고자 한다.

2. 실험 및 방법

2.1 원수수질

본 연구에서는 부산 회동수원지의 호소수를 원수로 적용하여 평가하였다. 원수의 평균탁도는 5.62 NTU이며 여름철 우기시의 최대 유입농도는 83.0 NTU이다. DOC의 경우, 평균농도는 3.06 mg/L이며 최대농도는 4.86 mg/L으로 확인되었다. Mn의 경우, 평균농도 0.07 mg/L, Chl-a는 5.82 mg/m³의 농도로 유입되었으며 Chl-a는 수질불안정기에 4.0~23.5 mg/m³로 상대적으로 고농도의 Chl-a가 유입됨을 확인하였다. DAF 공정의 평균 제거율은 탁도 96%, DOC는 30~40%, Mn 60~70%, Chl-a는 100% 제거되는 것으로 확인되었다 (Table 1).

Table 1. Feed water conditions of membrane process

Parameter		Membrane feed water	
		Raw water	DAF treated water
Turbidity	Average (NTU)	5.62	<1.0
	Maximum (NTU)	83.0	2.60
	Minimum (NTU)	1.35	0.22
DOC	Average (mg/L)	3.06	1.80
	Maximum (mg/L)	4.86	2.67
	Minimum (mg/L)	2.31	1.55
Mn	Average (mg/L)	0.07	0.02
	Maximum (mg/L)	0.24	0.06
	Minimum (mg/L)	0.01	0.01
Chl-a	Average (mg/m ³)	5.82	0.00
	Maximum (mg/m ³)	23.5	0.00
	Minimum (mg/m ³)	0.57	0.00

2.2 장치 구성 및 사양

부산 회동수원지 파일럿 플랜트 실증연구센터에 설치된 분리막은 도레이첨단소재의 HFU-2020N으로 공칭공경 0.01 μm, 유효 막면적 72 m²을 갖는 PVDF 재

pp. 393-402
pp. 403-410
pp. 411-423
pp. 425-435
pp. 437-443
pp. 445-462
pp. 463-471
pp. 473-480
pp. 481-493
pp. 495-502
pp. 503-512



(a) Feed water Tank (b) Control Panel (c) Module skid(up) (d) Chemical tank(down)

Fig. 1. Photograph of a pilot plant installed at site.

Table 2. Specifications of HFU-2020N module

Parameters	Contents
Model	HFU-2020N
Membrane type	Microfiltration
Certifications	KWWA F 106
Module type	Out-In side
Filtration type	Dead-end/Cross flow
Permeate turbidity (NTU)	Less than 0.05
Membrane dimension (mm)	In 1.4 / Out 0.8
Module dimension (mm)	Ø216 X L2,160
Material	PVDF
Module material	PVC
Nominal pore size (µm)	0.01
Membrane surface area (m ²)	72
Max. Operating pressure (kPa)	300
Max. Operating TMP (kPa)	300
Max. Temperature (°C)	40
Adhesive	Polyurethane
Manufactory	TORAY Advanced Materials Korea Inc.



질의 정밀여과막 1기를 설치하여 전량여과 방식으로 운전하였다 (Fig. 1). 분리막의 세부사양은 Table 2에 나타내었다. 파일럿 플랜트는 Fig. 2 및 Table 3에 나타낸 바와 같이 충수-여과-역세척-공기세척-배수의 여과공정 및 유지세정(Chemically Enhanced Backwash, CEB) 등의 조건으로 자동운전이 가능하며 일일 최대 200 m³(116 LMH)의 처리수 생산이 가능하다. 전처리

로 적용한 DAF pilot plant는 1,000 m³/일 용량이며 혼화조 및 반응조, 부상조, 처리수조로 구성되었다. 부상조 하단에는 미세기포를 발생시킬 수 있는 노즐 6개가 장착되어있으며 수리학적 부하율(Hydraulic loading rate)은 10~15 m/h 조건으로 운전하였다. 응집제는 PAC(10%)를 사용하였으며 유입수질에 따라 40~60 mg/L의 농도로 주입하였다.

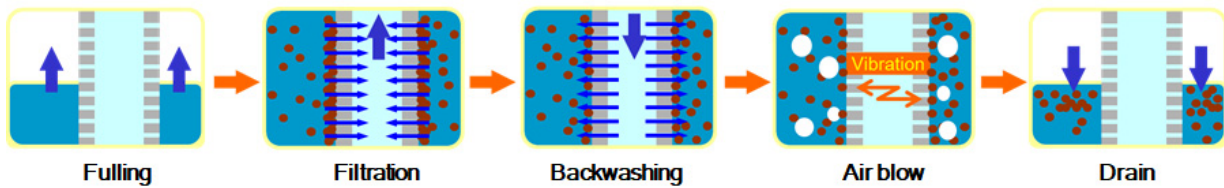


Fig. 2. Schematic diagram of operating process.

Table 3. Operating conditions of pilot plant

Operating conditions	Flux (LMH)	70, 80
	Backwashing (LMH)	120
	Air blow flow rate (Nm ³ /hr)	6~8
	Filtration time (min)	20~60
	Backwashing time (sec)	30~60
	Air blow time (sec)	30~60
	Recovery rate(%)	94, 96
CEB (Chemically Enhanced Backwash)	NaOCl concentration(mg/L)	300~500
	Submerged time (min)	20~60
	Period cycle (day)	1~7
CIP (Clean in place)	1,500 mg/L, H ₂ SO ₄	2 hrs
	1,500 mg/L, NaOCl	2 hrs
	3,000 mg/L, H ₂ SO ₄	2 hrs

2.3 파일럿 플랜트 유지세정 조건

본 실험에 사용된 파일럿 플랜트의 운전조건은 고 탁도 및 고조류 등 원수 수질 악화에 의해 TMP가 일정수준 이상으로 빠르게 상승할 때, drain-backwash를 적용하여 회수율을 약 2.2% (회수율 96% → 94%) 정도 감소하는 대신 flux는 유지하여 운전하였다. Drain-backwash는 원수 탁도가 30 NTU 이상으로 3일 이상 유입되거나 TMP가 급격하게 상승할 경우, 1회/7일 주기에서 1회/1일 주기로 변경하여 적용하였다. 또한, CEB의 경우에도 TMP가 급격하게 상승하거나 CEB 이후에 TMP 회복이 어려운 경우에 drain-backwash와 마찬가지로 1회/7일 주기에서 1회/1일 주기로 적용하였다.

- ※ 일반 운전조건 : 충수 → 여과 → 역세척 → 공기 세척 → 배수
- ※ Drain-Backwash : 충수 → 여과 → 배수 → 역세척 1 → 역세척 2 → 공기세척 → 배수

3. 결과 및 고찰

3.1 일반적 막여과유속에서의 운전결과

앞선 문헌조사 결과에서 제시한 바와 같이 국내의 막여과 정수장은 일반적으로 48~70 LMH 범위의 막여과 유속 조건으로 운전되고 있다. 본 연구에서는 막여과 정수장의 일반운전 조건 범위인 70 LMH에서 부산 회동수원지의 호소수를 대상으로 여과성능을 평가하였으며 평가결과는 Fig. 3에 나타내었다. 여과 지속시간에 따른 TMP(Trans Membrane Pressure)를 측정하였으며 측정된 TMP는 수온의 영향을 보정하기 위하여 25°C로 보정한 보정차압($\Delta P_{T=25^\circ C}$)을 적용하였다 (식 1과 2). 식 1과 2에서, T는 온도(K), A, B, C, D는 점성계수 μT 를 구하기 위한 상수로 각각 A: 0.1257187×10^{-1} , B: $-0.5806436 \times 10^{-2}$, C: 0.1130911×10^{-2} , D: $-0.5723952 \times 10^{-6}$ 이다. 식 3의 CIP 주기 예측은 여과 시간 동안 증가한 TMP(종료 TMP-여과초기 TMP)를 여과시간(일)로 나누어 TMP의 상승속도를 환산하였다.

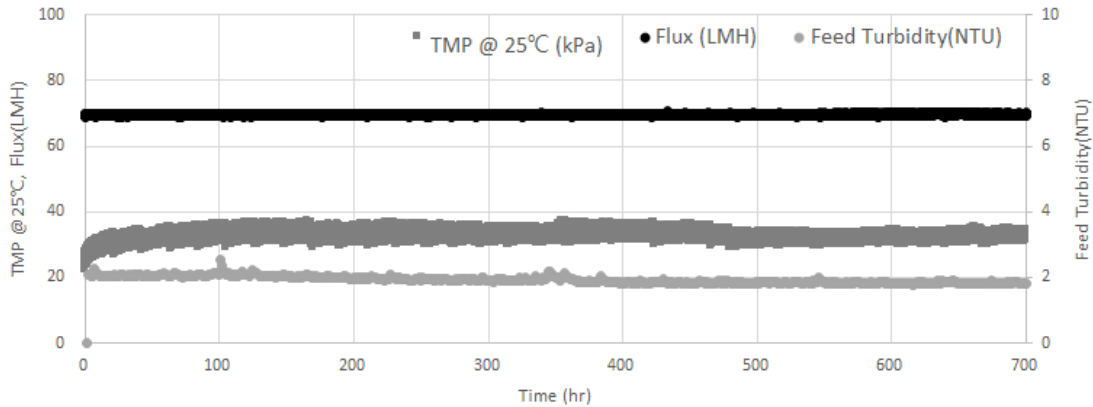


Fig. 3. TMP (25 °C) changes during operating time at 70 LMH.

여과 초기차압은 22.3 kPa이며 약 700시간(약 29일)동안 8.3 kPa 상승하여 여과 종료 시 TMP는 30.6 kPa(최대 37.2 kPa)로 TMP상승속도는 0.28 kPa/d인 것으로 확인되었다(식 3). 해당기간 동안의 유입원수 평균탁도는 3.4 NTU(최대 11.1 NTU), 평균 TOC 3.8 mg/L, Chl-a는 2.0 mg/m³ 이하로 안정적인 수질이 유입되었으며 처리수 탁도는 0.05 NTU 이하, TOC는 3.0 mg/L 이하를 유지하였다. 유입수질이 안정적인 해당 수원지의 수질에서 전처리 공정을 연계하지 않은 단독여과 공정에서 일반적인 막여과유속 조건인 70 LMH에서의 운전결과는 매우 안정적인 것을 확인하였다.

Expected CIP cycle

$$= \frac{(Final\ TMP - Initial\ TMP)}{(Operating\ Time(days))} \quad (3)$$

3.2 막여과유속 80 LMH에서의 운전결과

부산 회동수원지의 원수를 대상으로 막여과 정수시설의 일반적 막여과유속 조건인 70 LMH에서 전처리 연계 없이 안정적인 운영이 가능함을 확인하였으며 보다 높은 막여과유속의 적용 가능성을 확인하기 위하여 막여과유속을 80 LMH로 상승하여 평가하였다. 막여과공정에서 대응 가능한 최대 수질범위를 확인하기 위하여 전처리 적용 없이 원수 대상으로 운전하였으며 원수의 평균탁도는 3.3 NTU(최대탁도 13.4 NTU), 평균 TOC 3.6 mg/L, Chl-a는 3.0 mg/m³ 이하로 확인되었다. 운전결과는 Fig. 4에 나타내었으며 앞선

$$\Delta P_{T=25^{\circ}C} = \Delta P \left(\frac{\mu_{25}}{\mu_T} \right) \quad (1)$$

$$\mu_T = A \exp \left[\frac{(1 + BT)}{(CT + DT^2)} \right] \quad (2)$$

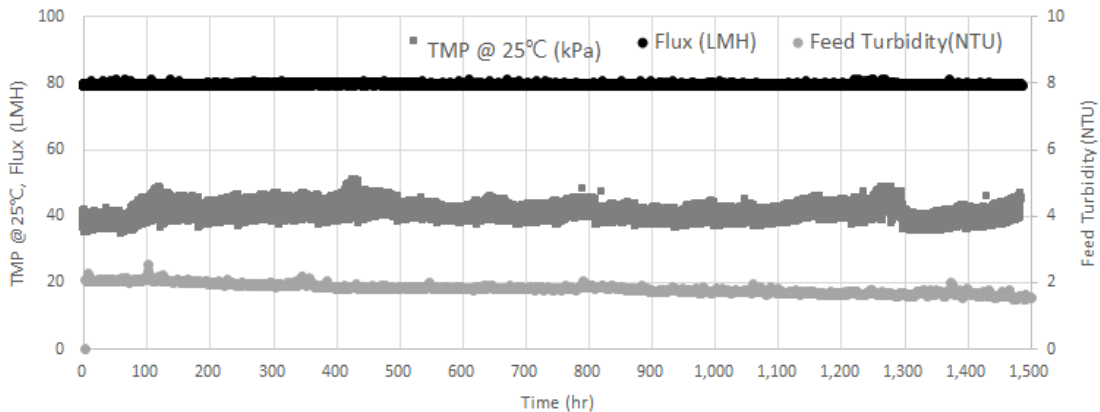


Fig. 4. Result of TMP (25°C) changes at high flux(80 LMH).



3.1의 막여과유속 70 LMH 조건에서 운전 후, 약품세정을 실시하지 않고 운전조건을 변경하여 연속적으로 운전하였다. 초기 TMP는 36.1 kPa이며 약 1,500시간(약 63일)동안 운전한 결과, 종료 TMP는 51.0 kPa로 약 18.9 kPa 상승하였으며 TMP 상승속도는 0.24 kPa/d인 것으로 확인되었다. 운전기간 동안 물리세척에 의해서 충분히 회복되어 TMP의 급격한 상승 없이 안정적인 운전이 가능하였으며 이를 통해 유입수질이 안정적인 경우, 전처리 공정과 연계가 없이도 80 LMH 조건(회수율 96%)에서 안정적으로 운전이 가능함을 확인하였다.

3.3 수질 불안정기에서 막여과유속 80 LMH에서의 운전결과

막여과유속 80 LMH 조건에서 운전 이후, 장마로 인해 플랜트 유입수의 탁도가 급격하게 증가하였으며 장마철 고탁도 유입에 대응하기 위한 최적 운전조건을 도출하기 위하여 일반수질 유입시와 동일한 조건인 80 LMH로 운전을 진행하였다. 해당기간 동안의 평균탁도는 8.3 NTU이나 최대 탁도는 76.9 NTU로 고탁도가 유입됨에 따라 TMP가 급격하게 상승함을 확인하였다. 또한, 해당 시기의 평균 TOC는 3.6 mg/L로 앞선 수질 안정기와 유사한 농도를 보였으나 Chl-a 농도는 4.0~23.5 mg/m³으로 수질 안정기에 비하여 상대적으로 높은 농도의 탁도 및 Chl-a가 유입됨을 확인하였다. Fig. 5에 나타낸 결과와 같이 초기 TMP는 45.4 kPa이나 고탁도가 유입됨에 따라 약 9시간 만에 61.7 kPa로 16.3 kPa이 급격하게 상승하였으며 이때의

TMP 상승속도는 43.5 kPa/d로 매우 빠른 속도로 상승함을 확인하였다. 따라서 drain-backwash 및 CEB 주기를 기존의 1회/7일 적용에서 1회/1일로 변경하여 적용함에 따라 회수율은 96%에서 94%로 감소하였으나 운영조건 변경 이후에는 TMP 상승속도 0.23 kPa/d로 안정적인 제어가 가능함을 확인하였다. 이를 통해 막여과공정을 단독으로 적용할 경우, 물리세척 및 유지세정의 주기와 조건의 최적화를 통해 전처리 공정을 적용하지 않은 단독여과 조건에서도 80 LMH의 고프럭스 운전이 안정적으로 가능함을 확인하였다.

3.4 수질 불안정기에서 DAF 전처리 연계 운전결과

수질 불안정기에 DAF 공정을 전처리로 적용하여 막여과공정의 유입수로 적용하여 막여과유속 80 LMH 조건에서 연계하여 평가한 결과, 여과초기의 TMP는 36.0 kPa에서 약 1,700시간(약 71일) 운전 후에 83.1 kPa로 47.1 kPa이 상승하였다. 이때의 TMP 상승속도는 0.64 kPa/d로 동일한 막여과유속 80 LMH를 적용한 3.2장의 수질 안정기에서 TMP 상승속도 0.24 kPa/d 및 수질 불안정기에서의 막여과 단독공정의 0.23 kPa/d에 비해 약 2.7배 높은 것을 확인하였다. Kang et al. (2018)의 연구에 따르면 응집공정을 전처리로 적용한 막여과공정에서 침전 등을 통해 유입원수에 응집 floc을 미포함하는 경우, 전처리 공정에서 오염물질을 사전에 처리함으로써 막표면에서 제거되어 축적되는 오염물질의 양을 감소하기 때문에 단독여과 공정에 비하여 물리세척 등에 의한 회복이 용이한 장점을 갖는 것으로 알려져 있다. 그러나 이는 막

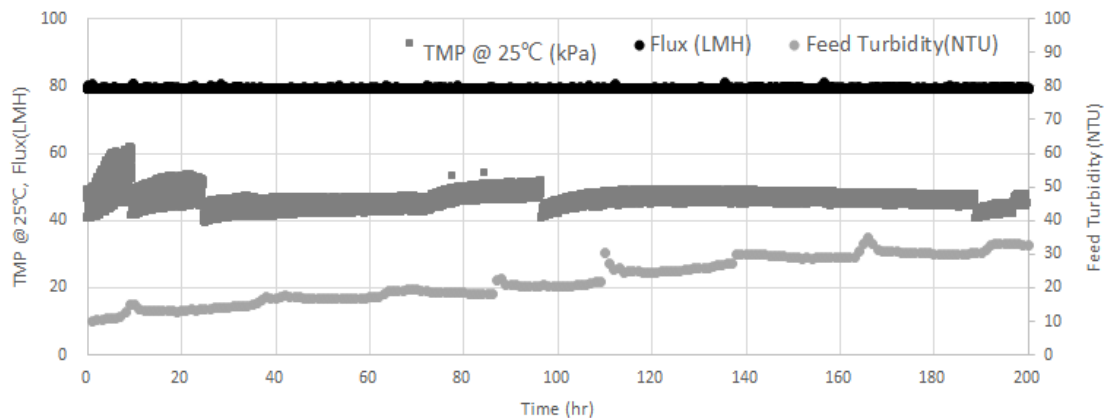


Fig. 5. Result of high flux(80 LMH) operation on high turbidity conditions.

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

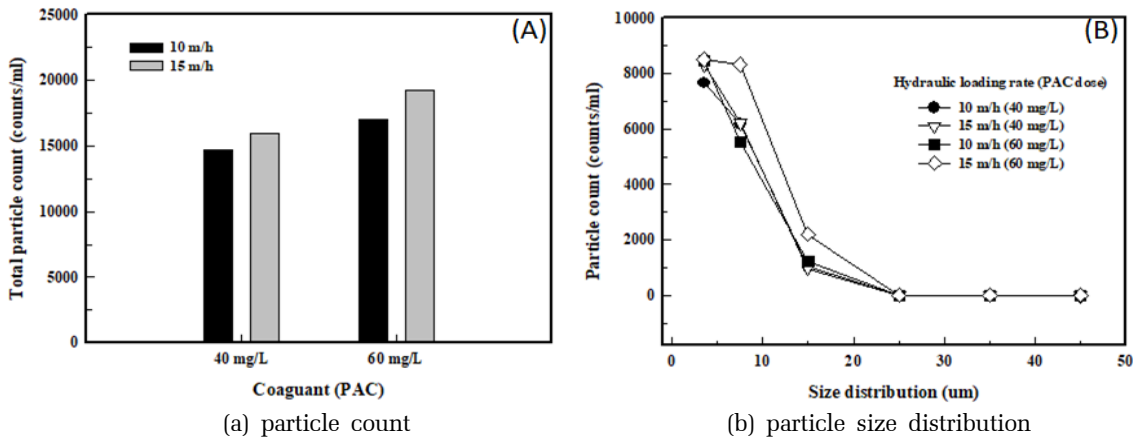


Fig. 6. Effect of coagulation dose and overflow load of DAF on particle characteristics.

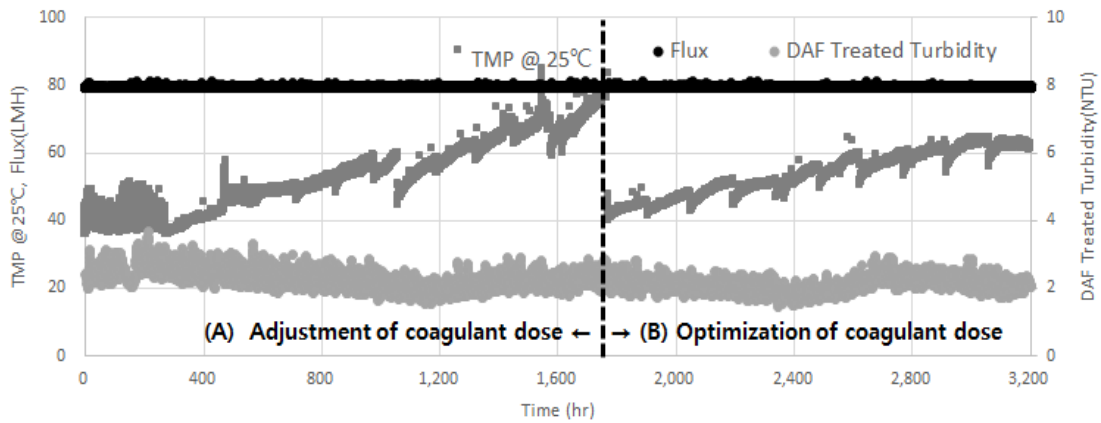


Fig. 7. TMP behavior after optimization of coagulation dose in DAF-MF process.

여과과정 중심의 전처리 공정의 응집제 주입량 및 침전시간 등의 최적화의 경우이며, 전처리 공정에서 응집제의 주입량이 적정량 이상 또는 이하일 경우 막오염이 가속화 될 수 있으며 전처리 공정에서 미 반응된 상대적으로 작은 크기의 floc은 막표면에 축적되어 케익층 내의 공극 협소 등을 야기함에 따라 막오염이 심화될 수 있는 것으로 알려져 있다 (Choi et al., 2005; Ha et al., 2007). 이처럼 미반응 잔류 알루미늄이 막오염에 영향을 미치는 것을 고려하여 응집제 주입량과 수면적 부하에 따른 DAF 처리수의 입자계수를 분석한 결과, Fig. 6에 제시한 바와 같이 응집제 주입량 40 mg/L 농도와 수면적 부하 10 m/h 조건에서 12,644 counts/ml로 가장 적은 입자수를 가지는 것을 확인하였다. DAF 처리수는 평균탁도 1.0 NTU 이하로 안정적이지만 처리수의 제거효율을 높이기 위하여 응집제를 최대 60 mg/L까지 주입하였으나 이로 인해 처리수

에 잔류하는 알루미늄 농도가 증가하여 막오염에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

전처리 공정인 DAF 공정의 응집제 주입량 및 수면적 부하의 최적화 조건을 도출하여 약 1,500시간(약 63일)동안 여과를 수행한 결과, 초기 TMP 40.3 kPa에서 여과 종료 시 TMP는 63.1 kPa로 약 22.8 kPa 상승하여 최적화 이후 TMP가 안정적인 것을 확인하였다 (Fig. 7). DAF 공정의 최적화 이후의 TMP 상승속도는 0.17 kPa/d로 일반수질 조건에서의 TMP 상승속도인 0.28 kPa/d(70 LMH) 및 0.24 kPa/d(80 LMH)보다 안정적인 것을 확인하였다. DAF 전처리 공정에서 막여과 공정의 막오염을 유발하는 입자성 물질을 우선적으로 제거하여 막여과 공정으로 유입되므로 일반수질 조건에서 막여과 단독공정의 TMP 상승속도보다 안정적으로 유지가 가능한 것으로 판단된다. 또한, DAF 공정의 최적화를 통해 0.64 kPa/d에서 0.17 kPa/d로 0.47



Table 4. Estimation of CIP cycle by water quality & operating conditions

	Flux (LMH)	Feed turbidity (NTU)	TMP increase (kPa/d)	Estimation of CIP cycle (days) (Max. 150 kPa)	CEB/Drain backwash (days)	etc.
Raw-MF	70	< 10	0.28	180 <	7	
Raw-MF	80	< 10	0.24	180 <	7	
Raw-MF	80	10 <	43.5	< 30	7	
Raw-MF	80	10 <	0.23	180 <	1	
DAF-MF	80	10 < (DAF < 0.5)	0.64	180 <	7	Adjustment
DAF-MF	80	10 < (DAF < 0.5)	0.17	180 <	7	Optimization

kPa/d의 TMP 상승속도를 저감하여 전처리 공정 연계 시 최적화의 중요성과 최적화를 통한 공정의 효율성 확보가 가능함을 확인하였다 (Table 4). 전처리 공정에서 높은 처리효율을 확보함으로써 후단의 막여과공정의 운영효율의 향상이 가능하지만 최적화가 이루어지지 않을 경우, 오히려 처리수에 잔존하는 미반응 floc 및 잔류 알루미늄(응집제) 등은 막여과공정의 처리효율을 감소시킬 수 있으므로 막여과공정에 최적화된 전처리 공정의 조건을 도출하는 것이 중요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 분리막공정에서 운영조건에 따른 CIP 주기 산출을 통하여 보다 안정적이고 효율적인 막여과공정의 운영가능성을 평가하였다. 막여과공정의 일반적인 막여과유속 70 LMH를 80 LMH로 향상하여 원수 단독여과 및 DAF 전처리 연계공정에서의 운영효율을 평가하였으며 고탁도 유입 등 수질변화에 따라 최적운영조건을 도출하여 보다 안정적인 운영이 가능함을 확인하였다.

유입탁도 10 NTU 이하의 안정적인 수질조건에서는 막여과유속에 관계없이 TMP 상승속도는 0.24 kPa/d 이하로 예상 CIP 주기를 6개월 이상으로 안정적인 운영이 가능할 것으로 판단된다. 10 NTU 이상의 탁도가 장기적으로 유입되어 상대적으로 불안정한 수질조건에서 80 LMH 조건의 TMP 상승속도는 43.5 kPa/d로 급격하게 증가하였으나 역세방법 및 CEB 주기 등의 운영조건을 변경하여 운전한 결과, 회수율이 96%에서 94%로 감소하였으나 TMP 상승속도는 0.23 kPa/d로

수질 안정기 시기와 유사한 안정적인 고유속 운전이 가능함을 확인하였다. 또한, 수질 불안정기에서 DAF 공정을 전처리로 연계할 경우, 응집제 주입량 및 수면적 부하 조건의 최적화가 이루어지지 않으면 TMP 상승속도는 0.64 kPa/d로 80 LMH의 정상운전 대비 2.7 배 높은 속도로 TMP가 상승한 반면, DAF 공정의 최적화를 수행한 이후(처리수 탁도 0.5 NTU 이하), DAF 연계 공정의 TMP 상승속도는 0.17 kPa/d로 매우 안정적으로 유지가 가능함을 확인하였다. 이를 통해 응집 전처리 연계 시에는 전처리 공정의 안정적인 처리효율을 확보하는 것도 중요하지만 막여과 공정과의 연계성을 고려하여 공정간 최적화를 확보할 수 있는 운영기술을 확보하는 것이 중요한 것으로 사료된다. 단독여과 공정의 경우에도 일반수질 및 수질 불안정시에 세정주기 최적화를 통해 안정적인 TMP 유지가 가능하며 이를 통해 막여과 공정의 적용을 통한 안정적인 처리수질의 확보와 운영효율을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌환경기술개발사업(2016 002100001)”으로 지원 받은 과제입니다.

References

Choi, Y.H. and Kweon, J.H.(2005). Investigation of Membrane Fouling in Microfiltration by Characterization of Flocculent Aggregates, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 28(3), 337-344.
 Gregory, J. (1998). Colloidal interactions, *Matel. Sci. Forum*,

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

- 25-26, 125-144.
- Gregory, J. and Duan, J. (2001). Hydrolysing metal salts as coagulants, *Pure Appl. Chem.*, 73(12), 2017-2026.
- Guigui, C., Rouch, J.C., Durand-Bourlier, L., Bonnelye, V. and Aptel, P. (2002). Impact of coagulation conditions on the in-line coagulation/UF process for drinking water production, *Desalination*, 147, 95-100.
- Ha, G.R., Kim, H.S., Oh, Y.G., Kim, C.H., Quang, C.X., Tam, P.T.T. and Lee, Y. H. (2007). Determination of optimal coagulant dosage in pre-coagulation/submerged MF for reducing membrane fouling, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 2007(5), 2087-2091.
- James, C.V., Mark, A.T. and Uday, G.K. (1995). The use of membrane filtration in conjunction with coagulation processes for improved NOM removal, *Desalination*, 102, 57-61.
- Jin, Y.C., Choi, Y.H. and Kweon, J.H. (2011). Impact of characteristics of polymeric Al coagulants PACl and alum on membrane flux and fouling of microfiltration, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 25(2), 231-240.
- Jung, C.W., Shim, H.S. and Sohn, I.S. (2007). Effect of metal salt coagulant on membrane fouling during coagulation-UF membrane process, *Korean Chem. Eng. Res.*, 45(5), 523-528.
- Kang, J.S. Park, S.G., Lee, J.J. and Kim, H.S. (2018). Effects of membrane fouling formation by feed water quality and membrane flux in water treatment process using ceramic membrane, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 32(2), 77-87.
- Kang, J. S., Park, S.G., Song, J.Y., Jeong, A.Y., Lee, J.J. and Kim, H.S. (2017). Evaluation of membrane fouling characteristics due to manganese and chemical cleaning efficiency in microfiltration membrane process, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 31(6), 539-549.
- Kim, J.H., Mun, B.S., Jang, H.J., Kim, J.H., and Kim, B.S.(2013). Increase of recovery ratio by two stage membrane process(the pressurized PVDF membrane followed by submerged PE membrane), *Membr. J.*, 23(1), 45-53.
- Korea Environment Corporation. (2017). Development of membrane filtration water treatment facility technical inspection manual.
- Lee, B.G., Lee, K.S., Lee, K.K. and Kang, S.H. (2007). Characteristics of long term Period MF Membrane Pilot Plant Operation for Replacement of Sand Filtration, *J. Korean Soc. Water Environ.*, B-3, 163-171.
- Lee, B.H., Kim, J.G. and Lee, K.H. (2000). Membrane fouling by iron and manganese in hollow-fiber microfiltration, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 7, 591-597.
- Lee, J.D., Lee, S.H., Jo, M.H., Park, P.K., Lee, C.H. and Kwak, J.W. (2000). Effect of coagulation conditions on membrane filtration characteristics in coagulation-microfiltration process for water treatment, *Environ. Sci. Technol.*, 34, 17, 3780-3788.
- Lee, S.H., Kweon, J.H., Choi, Y.H. and Ahn, K.H. (2004). Effects of characteristics of flocculant aggregates on membrane fouling in microfiltration with coagulation pretreatment, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 18(6), 785-793.
- Lee, Y.T. and Oh, J.K. (1999). A study on the optimization of process and operation condition for membrane system in tap water treatment, *Membr. J.*, 9(4), 193-201.
- Ministry of Environment. (2014). The study for applicability evaluation and the developmental direction of membrane water treatment facilities.
- Pernitsky, D.J. and Edzwald, J.K. (2003). Solubility of polyaluminium coagulants, *J. Water Supply Res. Technol.*, 52(6), 395-406.
- Song, Y.K., Jung, C.W., Hwangbo, B.H. and Shon, I.S. (2001). Characteristics of Al(III) hydrolysis species distribution on coagulation process, *Korean Chem. Eng. Res.*, 44(5), 547-554.