



자유 말단형 침지식 분리막을 이용한 정수장 배출수 처리 연구

– 막오염 발생 원인과 해결 방안 –

A study on the treatment of water discharge from the water treatment plant using end-free submerged membrane - Causes and solution of membrane fouling -

김준현¹·장정우²·김진호²·박광덕^{3,*}

Jun-Hyun Kim¹·Jung-Woo Jang²·Jin-Ho Kim²·Kwang-Duck Park^{3,*}

¹인천광역시 상수도사업본부 수질연구소, ²주에코시티, ³한국건설기술연구원 국토보전연구본부

¹Incheon Water Quality Institute, ²Econity, ³Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute for Civil Engineering and Building Technology

pp. 093-104

pp. 105-114

pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159

ABSTRACT

As water resources are limited and legal regulations are strengthened, there is a growing need to reuse residuals in WTP(Water Treatment Plant). In this study, membrane filtration system was constructed and its operation method was studied for water quality stabilization and reuse of WTP residuals. The operation parameters were stable for 1 year and 6 months. Membrane fouling was identified as particulate pollution (activated carbon) and inorganic pollution (manganese). The membrane system was operated steadily with raw water of high concentration SS(Suspended solid) containing activated carbon because membrane fouling was reduced by the effect of End-Free type. In the case of inorganic contamination, dissolved manganese eluted by chemicals and acted as a membrane fouling source, and the operating conditions for minimizing membrane fouling

Received 15 October 2019, revised 6 February 2020, accepted 13 February 2020.

*Corresponding author: Kwang-Duck Park (E-mail: kdpark@kict.re.kr)

• 김준현 (연구사) / Jun-Hyun Kim (Researcher)

인천광역시 부평구 부평대로 332, 21316

Waterworks headquarters Incheon metropolitan city, 332, Bupyung-daero, Bupyung-gu, Incheon 21316, Republic of Korea

• 장정우 (선임연구원) / Jung-Woo Jang (Senior Researcher)

경기도 용인시 처인구 양지면 중부대로 2374-41, 17162

2374-41, Jungbu-daero, Yangji-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17162, Republic of Korea

• 김진호 (전무이사) / Jin-Ho Kim (Executive Director)

경기도 용인시 처인구 양지면 중부대로 2374-41, 17162

2374-41, Jungbu-daero, Yangji-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17162, Republic of Korea

• 박광덕 (전임연구원) / Kwang-Duck Park (Research Specialist)

경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, 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.

were confirmed by newly developing application methods and types of cleaning chemicals. Based on the results, design parameters for reducing manganese membrane fouling were derived.

Key words: End-Free, Submerged membrane, WTP residuals, Reuse, Fouling

주제어: 자유말단, 침지식 분리막, 정수장 배출수, 재이용, 막오염

1. 서 론

일반적으로 정수를 처리하고 생산하는 과정에서 발생하는 누수는 전체적인 유수율 감소라는 문제점을 발생시킨다. 서울시의 경우 최근 94.4%까지 유수율을 증가시켰지만 아직 전국의 평균은 유수율이 85.2%로 확인된다 (Ministry of Environment, 2018). 한정된 수자원으로 인하여 누수의 방지는 물론 사용되고 버려지는 물을 재이용하는 공정이 최근에는 널리 보급되어 있다. 또한 배·급수 공정 외에도 정수를 생산하는 과정에서도 침전지 슬러지 및 급속여과 역세척수 등의 폐수가 발생되고 있다. 정수 처리수의 수질기준에 대한 기준이 강화되면서 발생하는 부산물들의 농도와 발생량이 높아지게 되고 이를 처리하기 위한 연구가 점점 대두되고 있다.

기존 정수장에서 발생하는 배출 폐수는 배슬러지/농축조 등의 침전 시설을 이용한 재래식 처리방식으로 처리 해왔으나 방류수 수질기준이 점진적으로 강화되고 있어 일부 정수장에서는 방류수 수질기준을 만족하지 못하는 경우가 발생하고 있으며, 정수장슬러지의 합수율과 더불어 배출수 처리시설의 개선에 대한 연구가 새로운 관심사항으로 대두되고 있다 (Bae et al., 2003; Bae et al., 2007; Kim et al., 2009; Lee et al., 2009; Lee et al., 2011; Moon and Moon, 2004). 특히, 방류수 수질기준 항목 중 부유물질(Suspended solid, SS)에 대한 법적 기준이 2013년 1월 1일 이후 10 mg/L이하로 강화됨에 따라 장마철 고탁도 원수유입 또는 침전지 청소, 동절기 기온하강에 따른 슬러지 부상 문제로 방류수의 법적 수질기준을 초과할 수 있다. 이는 기존에 설치된 재래식 처리시설은 설계기준상으로 강화된 법적기준을 만족시키기 어렵기 때문이다. 또한, 태풍, 지진 등으로 원수의 수질이 급격하게 변하는 문제가 발생 시 기존 공정의 비정상 작동으로 인하여 법적 수질 기준을 만족시키기 어려운 상황이 발생할 수 있다.

이에 따라 일부 정수장에서는 농축조의 후단 처리 시설로 섬유상여과기 등을 도입하여 농축조의 용량부족

을 보완하고 방류수 처리의 안정성을 높이고 있으나 섬유상여과기의 경우 농축수 내 부유물질의 농도가 증가하면 처리수의 부유물질 농도 또한 비례하여 증가할 가능성이 보고되고 있다 (Lee et al., 2011). 그리고 처리수질의 한계로 최종 방류수를 하천유지용수로 사용할 수밖에 없다. 따라서 안정된 방류수 수질 확보와 경제적 효과를 기대할 수 있는 막여과 연구가 실험실 규모로 이루어져왔다 (Beicha et al., 2009; Brugger et al., 2000; Dotremont et al., 1999; Eom et al., 2008; E-WATER Project, 2005; Kim et al., 2009; Willemse et al., 1999).

재이용을 위해 폐수의 처리공정을 적용함에 가장 중요한 부분은 처리수의 수질이다. 정수 공정에서 발생하는 폐수를 재이용하는데 가장 문제가 되는 수질 항목은 망간의 존재이다. 망간은 산화반응으로 흑색으로 변화하고 건강에도 해를 끼치는 문제를 발생시킬 수 있다. 정수장에서 망간은 원수에서 유입되어 배출수 처리과정 중에 농축된다. 처리 공정중 수질의 pH에 따라 망간의 형태가 변화되어 상등수에 고농도로 용출되는 경우가 발생하며, 이 경우 처리수의 활용에 한계를 가져오게 된다. 또한, 기후 조건 악화, 재난 발생에 따른 상황을 실제 운전 상황을 고려하여 다양한 환경 조건을 토대로 분석을 시도하였다.

본 연구에서는 정수장 농축조 방류수를 침지식 막여과 공정을 적용하여 방류수질을 안정화하고 재이용 가능성을 확인하였다. 배출수 처리공정이라는 특수한 현장에 알맞은 최적 운전 조건을 연구하였고, 이를 도출하는 과정에서 발생하는 문제점을 처리하고 이를 해결하는 연구를 진행하였다. 현장 조건에 따른 막오염의 현상을 검토하고 이를 완화하기 위해 진행하였다.

2. 연구방법 혹은 재료 및 실험방법

2.1 대상 정수장

본 연구는 풍납취수장을 취수원으로 하는 A-정수장에서 진행되었다. A-정수장은 시설용량 413,000 m³/day

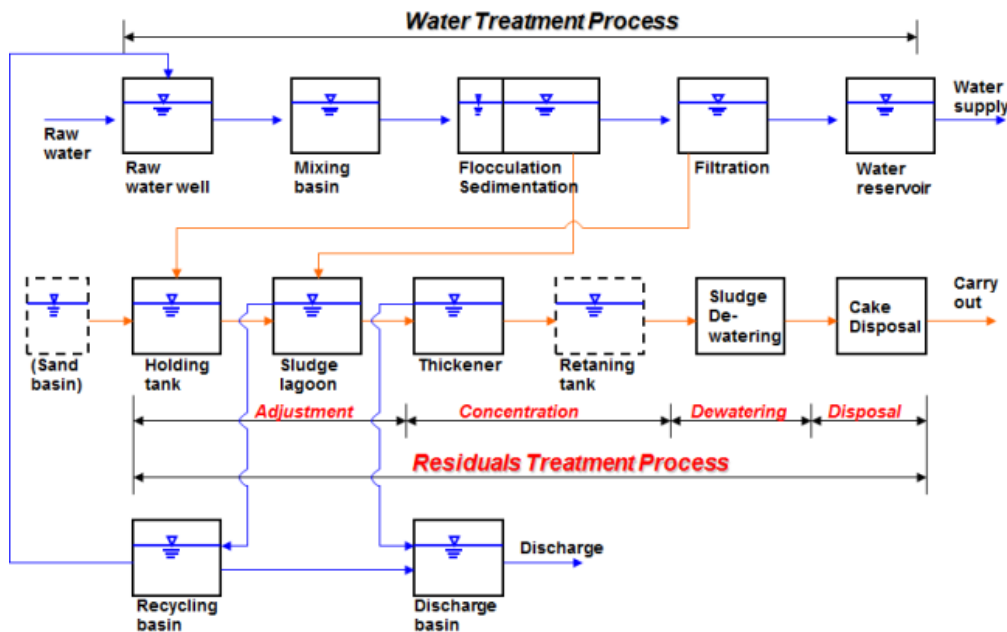


Fig. 1. The treatment process of A-water treatment plant.

으로 이루어져 있으며 급속 사여과를 주요 처리 공정으로 적용한 정수장이다. Fig. 1과 같은 공정으로 이루어져 있으며 본 실험에 적용한 막여과 시설 원수의 취수위치는 배슬러지 상등수이다. 농축조의 최종방류수는 혼화/응집의 배슬러지와 급속여과지의 역세배출수 슬러지를 포함하고 있다.

A-정수장은 배출수 처리공정에서 최종 방류 수량이 평균 2,000 m³/day 이상의 처리량을 갖는 현장으로 ‘물환경보전법’에 의해 폐수배출시설의 사업장규모로 제1종 사업장으로 분류된다. 강화된 수질기준 및 농축조의 배출수 처리의 안정성이 부족해짐에 따라 현재 A-정수장에서는 농축조 후단에 섬유디스크필터(유천엔바이로)를 설치하여 부족한 수질기준을 보완하고 있다. Fig. 2는 A정수장에 설치된 섬유디스크 필터 모습이다. 하지만 섬유디스크필터의 처리능력 한계 상 고농도의



Fig. 2. Fiber disc-filter to treatment discharge water in A-WTP.

원수가 유입되면 처리수 수질이 악화될 수 있으며 정수장에서 분말활성탄을 하는 경우 잦은 필터교체의 문제를 가지고 있다.

2.2 연구 설비

처리수의 재활용 및 방류수질의 안정화를 위해 1,000 m³/d 규모의 막여과 처리시설을 설치하여 배슬러지지의 상등수를 원수로 하는 막여과 시스템을 2015년부터 2017년까지 운영하였다. 기존 시설과의 구성 차이는 Fig. 3에서 나타내고 있다.

막여과 시설의 처리수는 여포세정수 및 원수회수 방식으로 재이용되며 막여과 시설에서 고농축 탈수가 가능할 경우 농축조를 거치지 않고 바로 탈수시설로 이송이 가능하다.

Fig. 4에서 나타내듯 막여과 설비는 정수장내 탈수동 내부에 설치되었다. 배출수 처리용 막여과 시스템은 2단의 분리막조로 구성되어있어, 각 운영 방법에 따라 농축률을 달리하여 운전이 가능하다. 1단 분리막조에는 고프럭스, 저농축을 목적으로 운전하며, 2막 분리막조에서는 고농도의 농축운전을 통하여 농축 슬러지를 탈수시설로 바로 이송하는 연구가 가능한 시설이다. 일반적으로 탈수시설로 유입되는 슬러지는 약 2~4%이다.

연구에 사용된 분리막의 사양은 다음 Table 1과 같다.

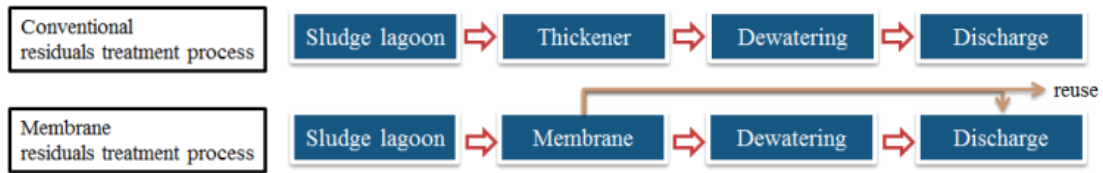


Fig. 3. Difference process between conventional treatment system and membrane filtration system.



Fig. 4. Membrane system in A-WTP(Water Treatment Plant) (Water Journal, 2019).

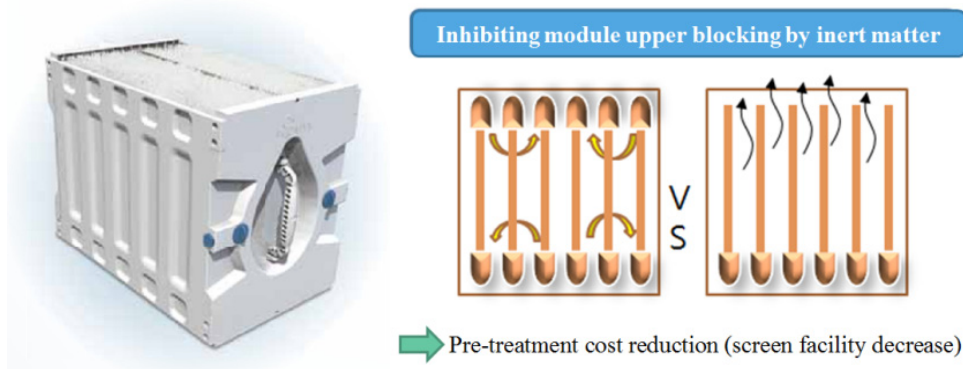


Fig. 5. Appearance and characteristic of End-Free type membrane.

Table 1. Specification of membranes

	Contents
Material	PVDF(hydrophilic)
Pore size(um)	0.1
OD/ID(um)	1200/700
Membrane area(m ²)	21
Flux	0.3 ~ 1.0 m ³ /m ² ·d
Operation pressure	-0.06 ~ -0.6 bar
Critical pressure	-0.6 bar
pH range	1 ~ 10
Temp. range	under 35°C

본 연구에 사용된 분리막 형태는 자유 말단형(End-Free)으로 기존의 다른 분리막 모듈과 다른 가장 큰 특징은 분리막 끝단이 자유로이 움직일 수 있는 형태를

갖는 점이다. 이 특성을 이용하여 본 분리막은 고농도의 원수에서도 처리효율이 높게 유지되며 폐색방지 효과가 높다고 할 수 있다. 즉 막오염 저감효과 향상은 전처리에 대한 부하를 줄이게 되며, 그 결과 전처리 시스템의 설비 비용을 추가적으로 감소시킬 수 있다. Fig. 5에서는 막오염 저감에 관한 거동을 그림으로 나타내고 있다.

2.3 운전 조건

Table 2와 같이 운전조건은 원수의 성상에 따라 변경하였다. 운전기간동안 원수의 SS나 용존성 무기물의 부하가 급히 달라지는 구간이 발생하였고 최적의 운영조건을 찾기 위해 운전조건을 변경하였다. 본 연구현장에서는 세정공기의 양이나 역세 유량에 따른



Table 2. Operation condition by raw water circumstance

Cycle	Flux	Recovery	Back wash	Air flow	Note
Filtration : 9 min Relaxation : 1 min	0.3~0.7 m/d	72~92%	1.5Q (30 sec)	20 m ³ /hr	Change flux by raw water quality

막오염 저감효과는 미비하였기에 운전 값을 고정하고 운전 플럭스 및 배출주기 변경을 통하여 막조 내부 농축률을 변경시켰다. 일반적으로 배슬러지에서 안정적인 침강이 이루어졌을 때 막여과 시스템의 유입 원수의 SS농도는 약 5~20 mg/L의 농도이며, 시스템 회수율을 90%로 고려하면 막여과 시스템 원수의 SS 농도는 약 50~200 mg/L가 된다. 하지만 고농도 원수가 유입되면 막조의 농도는 약 5,000~10,000 mg/L까지 농도가 증가하여 운전에 영향을 주기 때문에 배출 주기의 선정이 중요하다.

3. 결 과

3.1 막여과 시설 운영 결과

정수장의 환경 조건 변화에 따라 배슬러지지 수질은 다양하게 변동되었다. Fig. 6은 이를 나타내고 있으며 계절의 변화 및 정수장의 운영 조건에 따라 고농도 SS가 함유된 원수가 막여과로 유입되거나 고농도망간이 함유된 원수가 유입되었다. 이에 따라 막여과 시스템의 운전 조건을 달리하여 연구를 진행하였으며, 안정적인 운영 조건을 도출하였다. Table 3는 원수조건에 따른 막여과

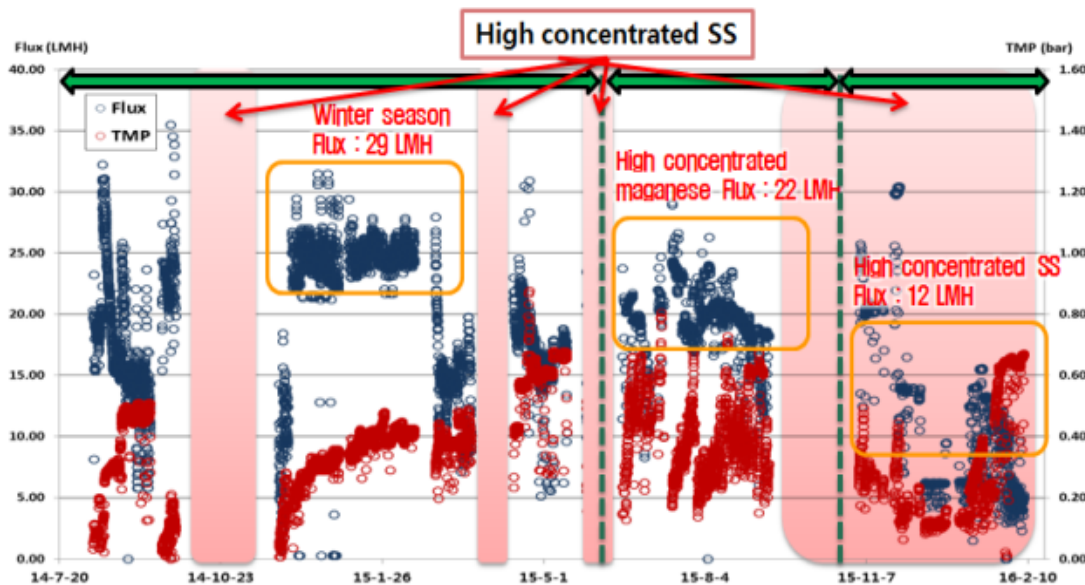


Fig. 6. Performance of membrane filtration for residuals treatment.

Table 3. Operation condition by raw water circumstance

Parameter	Normal operation		Abnormal operation
	Low manganese	High manganese	
Membrane surface	1,512 m ²	1,512 m ²	1,512 m ²
Filtration flux	29LMH (0.72 m/d)	22 LMH (0.55 m/d)	12 LMH (0.3 m/d)
Production quantity	1,088 m ³ /d	830 m ³ /d	453 m ³ /d
Backwash quantity	72 m ³ /d	55 m ³ /d	33 m ³ /d
Net production	1,016 m ³ /d	775 m ³ /d	420 m ³ /d

pp. 093-104

pp. 105-114

pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159

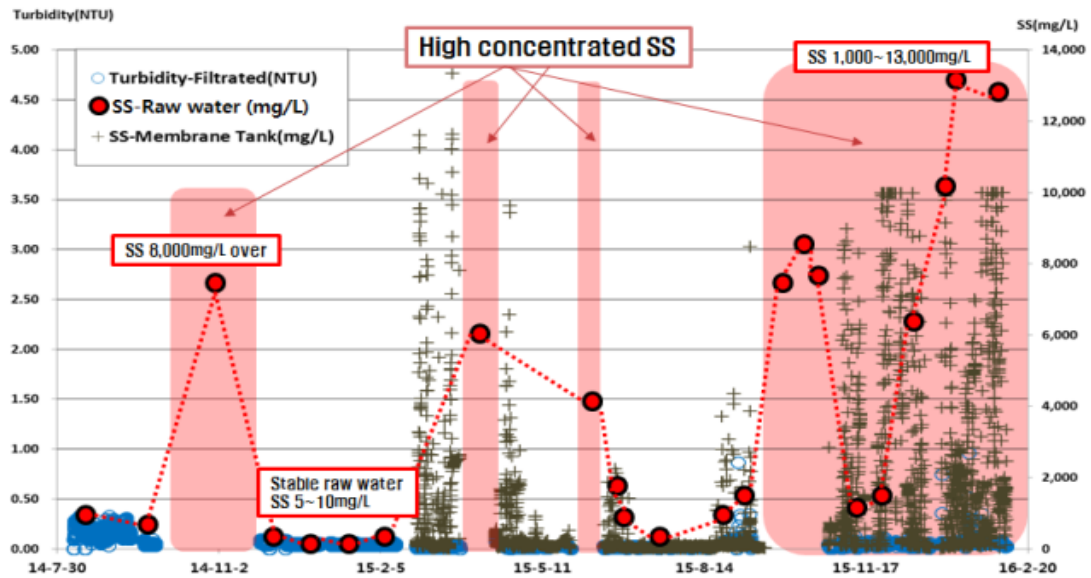


Fig. 7. Water quality of membrane filtrated water(Turbidity).

시스템의 운전조건변화 및 운영결과를 정리하고 있다.

일반적으로 SS 유입 농도에 따라 정상과 비정상운영으로 나누어 진행하였다. 최적의 운전결과를 확인한 결과, 비정상의 경우 0.3 m/d에서 정상의 경우에는 최대 0.7 m/d의 플럭스에서 안정적으로 운전이 진행되었다. 15년도 하절기에 원수에 유입되는 고농도 망간 원수로 인하여 막오염이 강하게 발생하였고 이를 제어 가능한 세정조건을 검토 및 적용하여 0.55 m/d의 플럭스에서 안정적인 운전이 가능하였다.

Fig. 7은 막여과 시스템의 생산수의 수질을 나타내고 있다. 원수는 시기에 따라 SS 5~10 mg/L에서 13,000 mg/L의 고농도 SS까지 유입되었으며, 막여과 시스템은 원수의 탁질 물질 부하에 관계없이 0.05 NTU 이하의 수질을 안정적으로 생산하였다.

3.2 원수 성상에 따른 막여과 발생 경향

운영하는 동안 다양한 성상의 원수가 유입되었으며 경우에 따라 고농도의 SS가 함유된 원수가 유입되거나 고농도의 무기물이 함유된 원수가 유입되었다. 이에 따라 다양한 막오염 현상이 발생하였고 이를 해결하기 위해 여러 방안을 적용해 보았다.

3.2.1 활성탄 유입에 의한 막오염

정수장은 기후 변화에 따른 폭염, 가뭄 등 수원지 이

상에 따른 조류 유입시기 또는 전국규모의 행사 진행시, 맛, 냄새 물질(Geosmin, 2-Methylisoborneol (MIB)) 제거를 위해 1차 침전지에 분말활성탄을 주입하고 있다. 공정에 따라 입상활성탄이 설치된 정수장도 있지만 본 사업소는 분말활성탄을 통해 유기물 부하를 저감하고 있다. 침전지에 주입된 활성탄은 응집제를 이용하여 침전 제거하며, 제거된 활성탄은 배슬러지지로 배출된다. 따라서 본 막여과 설비의 원수에는 침전된 활성탄이 다량 유입하게 된다. 유입농도는 원수에 약 5~20 mg/L의 농도로 유입되었으며, 정수장 회수율 99%를 고려하면 막여과 시스템 원수의 활성탄 농도는 약 500~2,000 mg/L가 된다. 일반적으로는 배슬러지지에서 침강되어 막여과 설비에는 저농도의 활성탄이 유입되나, 동절기 침강성의

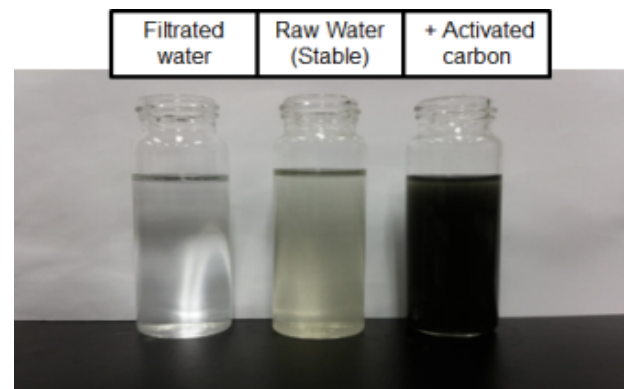


Fig. 8. Water quality of mixed activated carbon.

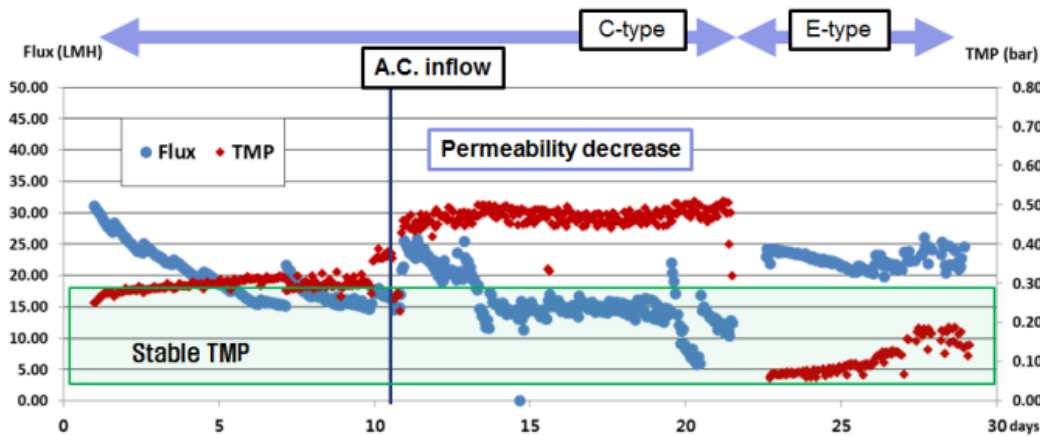


Fig. 9. Performance of membrane filtration by module type in A.C. mixed raw water.

불량이나 배슬러지지의 스크래퍼 고장 등으로 인하여 막여과 설비에 유입되는 활성탄의 농도는 최대 13,000 mg/L까지 상승하였다.

Fig. 8은 활성탄이 유입되었을때의 수질과 원수 및 여과수를 나타내고 있으며 막여과의 효과를 육안으로 구분할 수 있다. Table 4를 통해 각 수질의 성상을 나타내고 있으며 막여과를 적용한 결과 상당한 오염부하원 원수에도 입자성 오염에 대해서는 99%이상의 제거율과 유기물 오염에 대해서 80% 이상의 제거율을 갖는 것으로 나타났다. Fig. 9는 유입시기의 운전 결과를 나타내고 있다. 상, 하단이 모두 고정되어 있는 구형 분리막과 상단 자유말단형 분리막 모듈을 모두 적용하여 모듈 형태에 따른 여과 성능을 확인 하였다. 기존 구형 분리막 모듈은 활성탄이 유입됨과 함께 막간차압(Trans-membrane pressure, TMP)가 급상승하는 것으로 나타났으나 자유말단형의 경우 TMP가 안정하게 유지됨을 확인할 수 있었다. 이는 자유말단형 형태가 고농도 SS조건에서 슬러지 폐색현상을 방지하기 때문에 안정된 운전결과를 가져오기 때문이다.

Fig. 10와 같이 구형 분리막 모듈은 상단이 고정되어 슬러지가 쌓여있으나 자유말단형은 상단이 자유로이 움직여서 슬러지가 폐색되지 않고 모듈 외부로 배출되어 폐색이 감소함을 확인하였다.

Table 4. Comparison +activated carbon water with stable raw water

	Filtrated	Raw	+ A.C.
SS (mg/L)	0	5 ~ 10	3,000 ~ 13,000
TOC (mg/L)	3	5 ~ 8	>15



Fig. 10. Comparison sludge packing statue by membrane module type.

3.2.2 용존성 망간에 의한 막오염

15년 하절기에는 배슬러지지 상등수의 망간 농도가 높게 측정되었다. 대부분이 용존성 상태로 존재하였기 때문에 유입원수 뿐 아니라 막여과 처리수의 망간 농도도 높게 측정되는 현상이 나타났다. 용존성임에도 불구하고 높은 망간 농도가 막여과 시설에서 문제가 되는 이유는 차아염소산나트륨으로 유지세정을 하는 진행되는 과정에서 염소에 의해 용존 망간이 산화되어 분리막 모듈의 공극을 막아 막오염이 발생하는 현상이 생기기 때문이다. 특히 공극 내에서 발생한 막오염은 쉽게 제거되지 않아 회복 불가능한 막오염을 발생시킬 수 있다.

Fig. 11은 하절기시 상승하는 정수장내 망간 농도를 나타내고 있다. 배슬러지지의 정수장 배출수 체류시간이 길어지고, 여름철 수온이 올라가면서 수중 미생

pp. 093-104

pp. 105-114

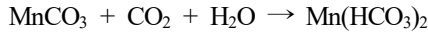
pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159

물에 의해 생성된 이산화탄소에 의해 망간염이 발생한다. 이렇게 발생한 망간염은 수소탄산염으로 변화하여 수중에 용해된다. 아래의 식은 화학반응에 의한 망간염 발생원리를 설명하고 있다.



또한 정수장은 조류유입시기에 pH를 조절하여 응집 효율을 증대시키기 위해 CO₂를 주입한다. Fig. 13.에서 설명하듯이 CO₂가 주입된 시기에 정수장 pH는 낮아졌고 이에 따라 용존성 망간의 비율은 더욱 증가하였다. Fig. 12의 오른쪽 그림은 pH에 따른 용출 망간의 농도이다. pH 8~9를 기점으로 산성으로 갈수록

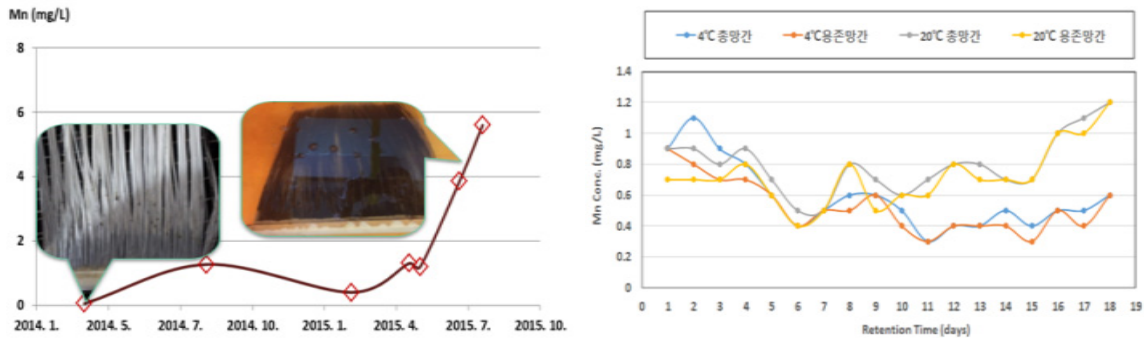


Fig. 11. Mn concentration of Sludge-lagoon supernatant (left) and Mn concentration of thickener supernatant in H-WTP (right).

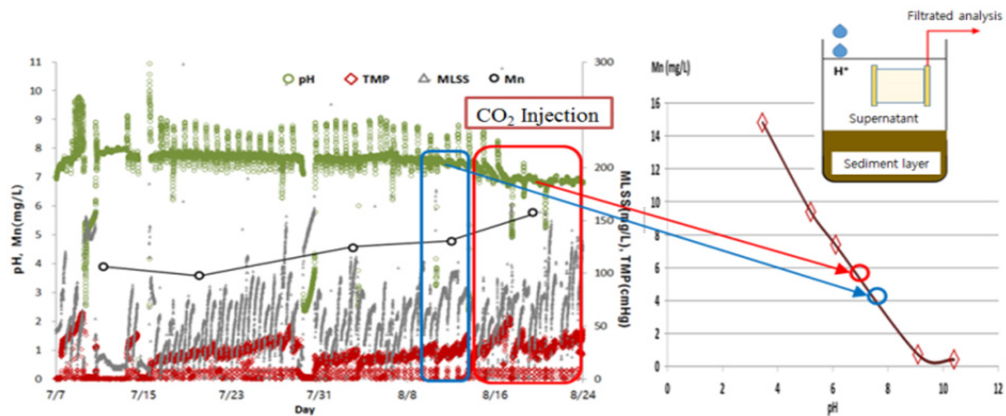


Fig. 12. TMP performance by pH(left) and soluble Mn concentration by pH(right).

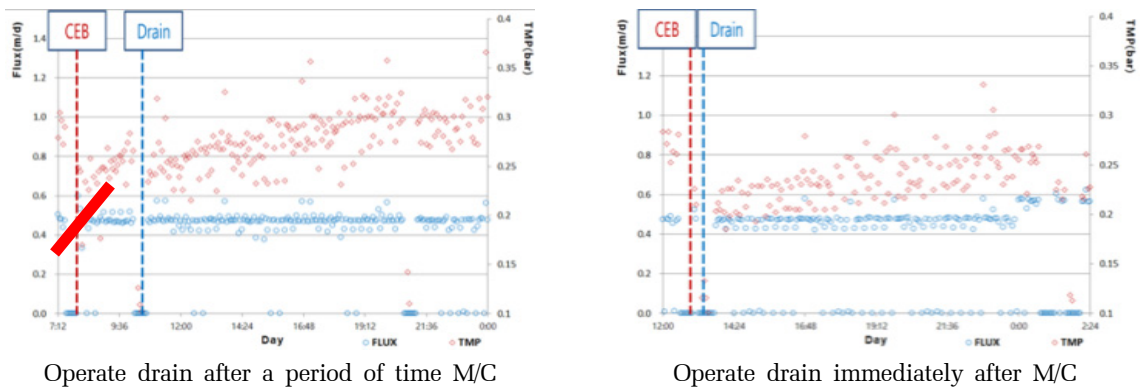


Fig. 13. TMP performance by chemical solution contact time.

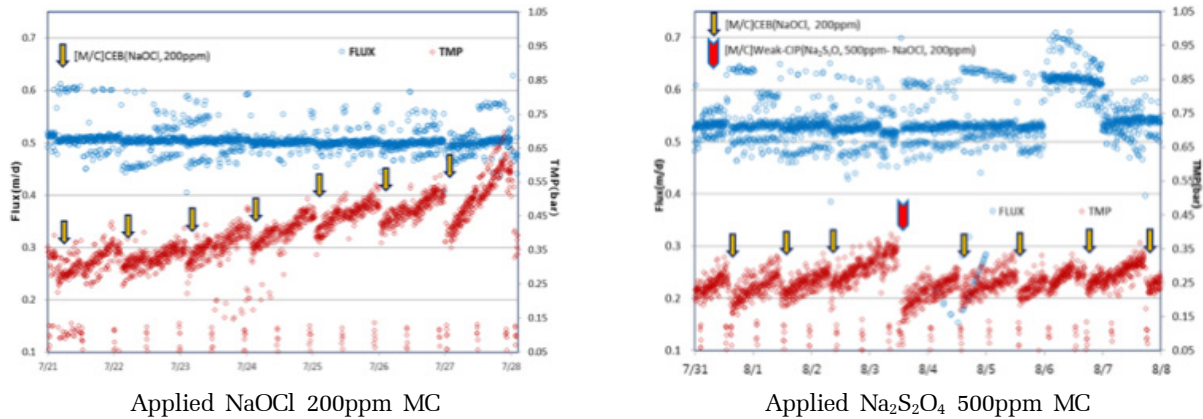


Fig. 14. Preventing TMP increasing by sodium hydrosulfite cleaning.

용출되는 망간의 농도는 급격히 증가한다.

본 연구에서는 망간에 의한 막오염 발생을 저감하기 위해 유지세정 조건과 막조 배출 주기를 조절하였다. 막오염이 발생하는 주요 원인은 차아염소산나트륨에 의한 산화망간의 발생이기 때문에 차아염소산나트륨과 처리수 및 원수와의 접촉시간을 줄여 산화망간이 생성되는 양을 최소화하는 공정을 적용하였다. Fig. 13는 접촉시간에 따른 막오염 증가를 나타내고 있다. 적용 결과 막오염 증가율은 약 2.5배 저감되는 효과를 보여 보다 안정적인 운전이 가능하게 되었다.



Fig. 15. Cleaning effect of Na₂S₂O₄ 500 ppm by submerged method.

하지만 장기간 운전에 따라 누적되는 잔여의 산화망간 오염에 의해 결국 TMP는 상승하게 된다. 따라서 이에 대한 대책으로 주 2회 차아황산나트륨(Na₂S₂O₄) 세정으로 입자화된 망간을 제거하는 공정을 진행하였다. 그 결과 Fig. 14와 같이 TMP증가율을 급격히 완화시킬 수 있었고 NaOCl만을 사용한 유지운영과 비교하여 장기적인 운영조건을 확보할 수 있었다. Fig. 15는 망간에 오염된 분리막의 색상과 차아황산나트륨세정을 통해 회복된 분리막의 색상의 변화가 나타나며 육안으로 분리막이 회복됨을 확인할 수 있었다.

3.2.3 망간 막오염 저감 설계 실험

유지세정의 조건개선을 통해 망간의 막오염 발생을 저감하며 운영이 가능하지만 이 방법은 장기적으로 한계성을 가지기 때문에, 지속적으로 유입되는 망간 막오염에 대한 발생을 미리 예방하는 전처리 제거기술의 개발이 필요하다. 특히 원수의 수질변화 등으로 정수장 운영이 어려워질 경우 망간 등의 제어를 위해서는 더욱 세밀한 검토가 필요하다. Table 5는 일반적

Table 5. Treatment method of manganese

Method	Removal Method	Content
Oxidation	- Aeration, Chlorine, Potassium permanganate(KMnO ₄), Ozone	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidation by MnO₂, removal a solid • Aeration – low removal rate (20~30%) • Chlorine – low removal rate and require long-reaction time (more than 30 min) • KMnO₄ – harmful by-products
Contact	- Manganese sand, Adsorbent	• Difficulty with separation and regeneration of adsorbate
ETC	- Ion exchange, Microorganism	• Complex condition of operation

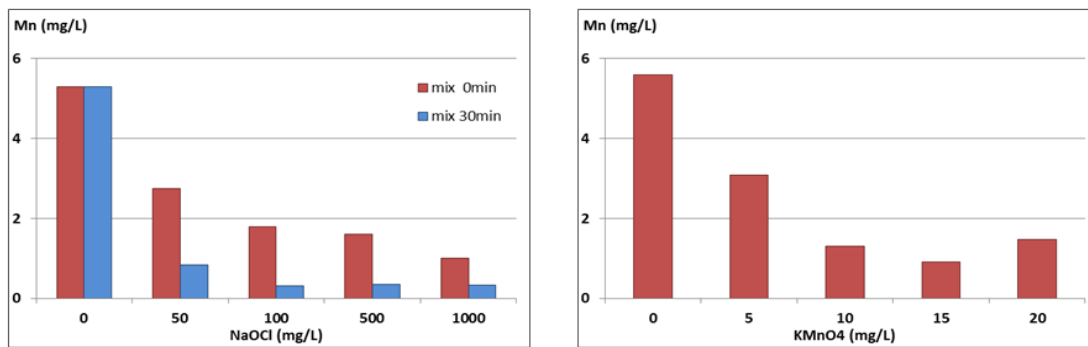


Fig. 16. Mn concentration by oxidation pre-treatment : chlorine oxidation(left) and KMnO₄ oxidation(right).

으로 적용되는 망간 제거기술을 나열하고 있다.

다양한 공정이 존재하지만 각 공정마다 장단점이 존재하므로 현장에 맞는 제거 공정을 검토해야 할 필요성이 있다. 특히 대부분 정수과정의 생산수를 위한 망간 제거에 관련된 연구이며 슬러지 및 배출수의 망간 제어를 위한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구현장의 경우 약 4~5 mg/L의 고농도 망간이 함유된 고농도 원수가 유입되므로 이에 알맞은 제어 연구가 필요하다.

용존성 망간의 경우 입자성 망간으로 산화시켜 침전 처리하는 방법이 안정성 측면에서 가장 뛰어나므로, 본 연구에서는 염소 및 과망간산칼륨을 이용한 산화 실험을 진행하였다.

Fig. 16은 산화제 종류에 따른 잔여 망간의 농도를 나타내고 있다. 염소산화 실험의 결과 약품과의 접촉 시간 및 약품 농도에 따라 약 50~95%의 제거율 차이가 발생하였으며 특히 시간에 따른 제거율 차이가 크게 발생하였다. 염소를 이용한 산화실험에서 염소 농도를 증가시킬수록 제거율이 높아졌으나, 100 mg/L 이상의 농도에서는 주입률 대비 제거효율이 낮게 나타났다. 접촉시간 30분은 실공정 적용 시 적용할 수 있는 최대한의 체류시간으로 설정되었다. 최적의 조건에서 처리수의 망간농도는 0.05 mg/L로 측정되었으며 먹는 물 수질기준을 가까스로 만족하여 안정적인 처리 효율을 얻기 어려웠다. 또한 반응시간에 따라 제거율 차이가 크게 발생하여 실 공정 적용에 어려움이 많을 것으로 판단된다.

과망간산칼륨의 경우 약품 농도에 따라 55~84%의 제거율을 보였다. 접촉시간에 따른 변수는 적용하지 않았는데, 반응속도가 빨라 주입 직후와 30분 후의 제거율 차이가 발생하지 않았기 때문이다. 이러한 빠른 반응속도 덕분에 연속공정에 쉽게 적용 가능하나 산

화제의 과주입시 미반응된 과망간산칼륨이 원수 내 존재하여 전체 망간 농도가 오히려 증가하는 현상이 발생하였다. 원수의 경우 망간 농도가 일정하게 유지되지 않기 때문에 주입 농도 결정에 많은 어려움이 따르며 연속공정을 적용하기 어렵다. 또한 처리수의 망간농도는 염소 산화와 마찬가지로 먹는 물 수질기준을 만족하기 어려웠다.

따라서 안정성과 현장 적용성을 모두 고려하였을 경우 pH를 통한 망간 제어 방법이 가장 효율적으로 판단되어 추가 실험을 진행하였다.

pH조절에 따른 망간 제어 방법은 원수의 농도에 상관없이 일정 pH로 유지 시 망간이 입자화되어 침전 제거할 수 있는 공정이다. 망간의 용해도가 감소하는 최적 pH를 맞추면 망간농도는 먹는 물 수질기준을 만족하는 처리 효율을 보이기 때문에 연속공정에서 쉽게 적용 가능하다. 하지만 생산된 막여과 처리수를 활용하기 위해서는 pH를 다시 조절해야 하는 추가 공정이 필요하다.

막여과 공정에서 망간 농도를 완벽하게 제어하기 위해서는 전처리로 응집공정과 연계하여 막오염 저감 효율을 검토하는 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

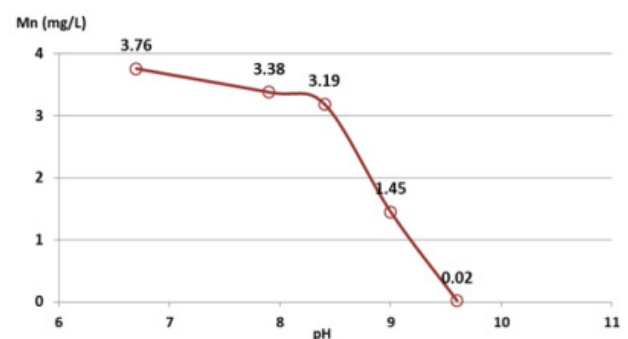


Fig. 17. Mn concentration by pH-control treatment.



4. 결 론

본 연구에서는 정수장에서 발생하는 배출수의 처리를 위해 침지식 막여과 시스템을 운영하였으며, 원수의 수질 변화 등 다양한 이상 조건에서의 운전이 따른 분리막 모듈의 구조적 형태에 따른 여과 안정성 및 운전 시 발생하는 막오염 문제를 확인하였다. 연구 수행 결과로 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 정수장의 배출수는 정수장의 운영조건이나 환경적 특성상 수질이 일정하지 않고 연속적으로 변화하고 있다. 특히, 원수의 수질 변화 등으로 정수장 운영이 불안정해질 경우 이러한 상황은 더욱 가속될 것이라고 예상된다. 분말활성탄 유입 조건에 따라 원수 SS는 5~13,000 mg/L까지 급변하고 운영 및 계절 조건에 따라 용존성 망간의 농도가 약 5 mg/L로 급증하였다.
- 2) 기존 상하단 고정형 분리막 모듈이 아닌 자유말단형 분리막 모듈을 적용할 경우 고농도의 SS원수에서도 슬러지 폐색이 발생하지 않아 안정적인 운전이 가능하였다. 더욱 안정된 생산량을 위해 적정 운영 플럭스를 도출하였다. SS의 농도에 따라 최저 12 LMH에서 최대 30 LMH의 운영 플럭스에서 안전하게 시스템이 유지됨을 확인하였다.
- 3) 고농도 망간오염의 발생은 분리막의 유지세정 공정과 연계되어 발생하며, 막오염의 최소화할 수 있는 유지 세정조건 및 새로운 세정 약품을 적용하여 막오염의 발생을 완화하였다. 본 연구에서는 차아황산나트륨을 이용하여 유기물 산화시 발생하는 망간에 의한 2차 오염을 제거하는 연구결과를 확인하였다.
- 4) 고농도 망간 오염을 미연에 방지하기 위한 전처리 연구를 진행한 결과, pH 조절을 통한 침강 분리공정이 가장 안정적이며 효율적인 방법인 것을 확인하였다. 기존의 염소, 과망간사칼륨 산화공정은 안정성 및 현장 적용성의 한계로 인하여 고농도 망간 제거에는 알맞지 않음을 확인하였다.
- 5) 정수처리 공정에서 수원에 포함된 망간의 영향으로 심미적인 영향을 일으킬 수 있다. 따라서 비상 상황 조건을 종합적으로 고려할 때 본 연구는 망간 영향 및 제거와 관련하여 향후 후속 연구에서 상당한 의미가 있다고 판단된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경시설 재난재해 대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었고 이에 감사드립니다.(2019002870001)

References

- Bae, B.U., Park, J.H., Jeong, Y.G., and Lim, K.H. (2003). Thickening characteristics of water treatment sludge as a function of the type of raw water, *Korean Soc. Environ. Eng.*, 25(11), 1400-1404.
- Bae, B.U., Her K., Joo, D.S., Jeong, Y.G., Kim, Y.I., and Ha C.W. (2007). A new program to design residual treatment trains at water treatment plants, *Korean Soc. Environ. Eng.*, 29(3), 277-282.
- Beicha, A., Zaamouche, R. and Sulaiman, N.M. (2009). Dynamic ultrafiltration model based on concentration polarization-cake layer interplay, *Desalination*, 242(1-3), 138-148.
- Brugger, A. (2000). Reuse of filter backwash water using ultrafiltration technology, *Filtr. Sep.*, 27(1), 22-26.
- Department of Environment. (2009). Water quality and water ecosystem preservation of in Laws, Enforcement Regulations, attached form 10.
- Dotremont, C., Molenberghs, B., Doyen, W., Bielen, P., and Huysman, K. (1999). The recovery of backwash water from sand filters by ultrafiltration, *Desalination*, 126, 87-97.
- Eom, J.Y., Kim, K.Y., Kim, Y.H., Song, J.S., Kim, H.S., Han, M.A., and Yang, H.S. (2008). A study about applicability of treatment for backwash water using tubular membrane system with dead-end operation mode, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 22(4), 437-444.
- E-WATER Preoject. (2005). Final report, Japan Water Technology Institute Center.
- Kim, Y.H., Kim, K.Y., Kim, J.H., Lee, Y.S., Lee, E.J., Eom, J.Y., Kim, H.S., and Hwang, S.J. (2009). A study about applicability of treatment for water treatment residual sludge using crossflow tubular membrane system, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 23(4), 499-505.
- Lee, Y.H., No, E.S., and Han, M.W. (2011). Technology inspection reports of Nam-dong water treatment plant, vi-126-vi-148.
- Ministry of Environment. (2018). 2017 Statics of waterworks.
- Moon, W.J., and Moon, Y.T. (2004). "Diagnosis through estimation on the capacities of water treatment plant

pp. 093-104

pp. 105-114

pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159

- residuals treatment facilities”, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers spring conference 2004*, Korea.
- Water Journal. (2009). <http://www.waterindustry.co.kr/domestic/domestic02.php?ptype=view&code=domestic02&idx=8178> (July 22, 2019).
- Willemse, R.J.N. and Brekwoort, Y. (1999). Full-scale recycling of backwash water from sand filters using dead-end membrane filtration, *Water Res.*, 33(15), 3379-3385.