

A study about treatment for water treatment residual sludge using submerged membrane system

침지식 막여과 공정을 이용한 정수장 배출수 처리에 관한 연구

JUN-Hyun Kim¹ · Ju-Hyung Lee¹ · Baek-Su Moon¹ · Young-Ju Kwak¹ · Jung Woo Jang^{2*} · Jinho Kim²

김준현¹ · 이주형¹ · 문백수¹ · 광영주¹ · 장정우^{2*} · 김진호²

¹인천시 수질연구소 · ²(주) 에코니티

Abstract : Various treatment system for residuals have applied to save water resources, but most of them were not be satisfied with legal standard consistently. In this study, submerged membrane treatment system was operated to treat water treatment plant residuals and operation parameters was evaluated. Result of this experiment, high concentration organic matters contributed to high increase Transmembrane pressure(TMP) of membrane system(from 0.05 bar to 0.35 bar). And backwash process was effective to stabilize membrane system operation. After Cleaning-In-Place(CIP), permeability was recovered about 100 % from first operation condition. Inorganic matters (Fe, Mn, Al, Ca, Mg) were not effective membrane filtration performance. The quality of residual treatment was satisfied with drinking water quality standard and a treated water from that system was suitable for water reuse.

Key words : Residuals treatment, Membrane system, Submerged Membrane

주제어 : 배출수 처리, 막여과 시스템, 침지형 분리막

1. 서론

일반적으로 정수처리공정에서 주요 연구, 관리의 대상은 정수생산이었으나 방류수 수질기준이 점진적으로 강화되고 있어(Dept. of Env., 2009) 정수장슬러지의 함수율과 더불어 배출수 처리시설의 개선에 대한 연구(Bae et al., 2007; Moon et al., 2004; Bae et al., 2003)가 새로운 관심사항으로 대두되고 있다. 방류수 수질기준 항목 중 특히, 부유물질(Suspended solid, SS)에 대한 법적기준이 2013년 1월 1일 이후 10 mg/L 이하로 강화됨에 따라 장마철 고탁도 원수유입 또

는 침전지 청소, 동절기 기온하강에 따른 슬러지 부상 시기에 법적기준을 초과할 수 있다.

국내 특·광역시 대부분의 정수장의 경우 침전 슬러지는 배슬러지지(조정조)를 거쳐 농축조에서 농축되고 농축된 침전슬러지는 탈수시설로 처리된 후 하천에 방류되고 있으며, 역세척 배출수는 배출수지(회수조)로 이송 후 상등수만 착수정으로 회수하여 원수로 재사용하고 있다.(Kim et al., 2009; Lee et al., 2011) 이와 같은 기존의 재래식 배출수처리시설의 규모를 결정하는 계획정수생산량, 설계탁도, 원수의 부유물질농도와 탁도의 비(SS/NTU), 응집제 투입량과 환산계수 등(Bae et al., 2007; Moon et al., 2004; Bae et al., 2003; Lee et al., 2011)을 조사하고 배출수

* Received 24 February 2014, revised 10 April 2014, accepted 11 April 2014.

* Corresponding author: Tel : +82-31-334-4180 E-mail : jungwoo.jang@econity.com

농축조 설계 기준인 계획슬러지 체류시간 24 ~ 48시간, 고형물 표면부하 10 ~ 20 kg/m² · day 의 상수도시설기준(Kim et al., 2009; Dept. of Env., 1997; Lee et al., 2011)을 검토해 보았을 때 호소수를 취수하는 국내 정수장의 경우 농축조가 과소하게 설계되어 있어 설계탁도를 초과하는 고탁도시 정수장 운영자가 많은 난항을 겪고 있으므로(Kim et al., 2009) 배출수 처리시설의 개선이나 보완이 필요하다. 따라서 일부 정수장에서는 섬유상여과기등을 도입하여 농축조의 용량부족을 보완하고 방류수 처리의 안정성을 높이고 있다. 그러나 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 수질확보와 경제적 효과를 기대할 수 있는 막여과 연구가 실험실 규모로 이루어져왔다.(Kim et al., 2009; Eom et al., 2008; Beicha et al., 2009; Brugger et al., 2000; Dotremont et al., 1999; E-WATER, 2005; Willemse et al., 1999)

현재 우리나라는 국제인구행동연구소에 의해 물부족 국가로 분류되어 있다. 따라서 한정된 수자원의 효율적인 사용으로 수자원의 낭비를 최소화하여야 한다. 본 연구에서는 침지식 막여과 공정을 최종방류수 처리시스템에 도입하여 강화된 법적기준을 만족시키고 처리수의 재활용을 통해 회수율 99 % 이상의 정수공정을 달성하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 모델 정수장

본 연구는 인천 4개 정수장 중 팔당수계를 취수원으로 사용하는 인천시 N-정수장을 대상으로 강화된 방류수 수질기준을 준수하기 위한 것으로 최종방류수의 수질특성과 침지식 막여과

공정 도입 가능성을 검토하였다. N-정수장은 시설용량 542,000 m³/day로 이루어져 있으며 급속사여과를 주요 처리 공정으로 적용한 정수장이다. Fig. 1과 같은 공정으로 이루어져 있으며 본 실험에 적용한 막여과 시설 원수의 취수위치는 농축조 상등수이다. 농축조의 최종방류수는 혼화/응집의 배슬러지와 급속사여과지의 역세 배출수 슬러지를 포함하고 있다.

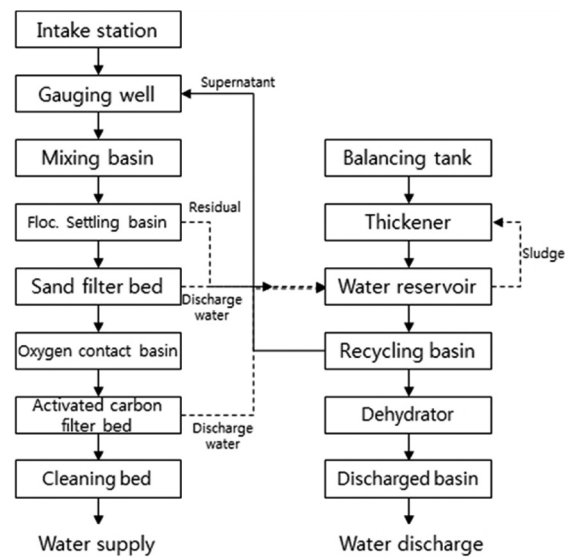


Fig. 1. The treatment process of N-water treatment plant.

N-정수장은 농축시설의 용량부족을 보완하기 위해 고분자 응집제를 농축조 분배조(약품혼화조)에 주입하여 1차 농축조로 이송시키고 고액분리 후 상등수는 수중 펌프를 이용하여 2차 농축조로 보낸다. Table 1에 정리된 N-정수장 방류수 특성을 보면 3년간 일평균 SS농도가 10 mg/L를 초과한 일수가 총 38일로 나타났다. Fig. 2에서와 같이 방류수 SS농도는 온도의 계절적 변화에 따라 반복적으로 증감함을 알 수 있으며 특히, 겨울철 수온이 저하되는 시기에 농축조에서 슬러지의 침강성이 낮아지거나 부상이 발생해 SS농도가 높게 나타나고 있다.(Song et al., 2007)

Table 1. Number of days for SS over 10 mg/L in effluent discharge N-water treatment plant in the 3 years

year	2009					2010					2011			
month	4	5	10	11	12	1	2	3	4	9	9	10	11	
count(days)	1	1	4	5	6	3	3	6	1	1	1	4	2	

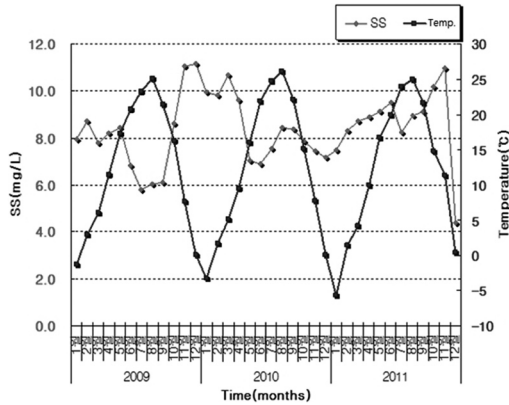


Fig. 2. SS and temperature distribution of effluent discharge N-water treatment plant in the 3 years.

Table 2. Specifications of submerged MF cartridge module

parameter	specification
material	HDPE(hydrophilicity)
pore size(um)	0.4
OD/ID(um)	650/410
surface(m ²)	16.9
flux(m ³ /m ² · d)	0.3 ~ 0.5
pressure(kg _f /cm ²)	-0.06 ~ -0.5
critical pressure(kg _f /cm ²)	-0.6
pH range	2 ~ 12
temperature range(°C)	under 35

2.2. 실험 장치

2.2.1. 분리막의 종류 및 특성

주요 실험 장치는 가로, 세로, 높이가 각각 880 mm, 880 mm, 1,520 mm인 아크릴 재질의 사각 농축조에 침지형 정밀여과막 카트리지를 내부에 장착하여 최종 방류수를 Out-side-in 방식으로 연속 처리되도록 구성하였으며 공정 구성은 Fig. 3과 같다. 여과 시스템은 (주)에코니티에서 제공한 PE 재질의 침지형 중공사막을 사용하였으며 전량여과(Dead-end flow)방식으로 운전하였다. 막에 대한 특징은 Table 2과 같다.

2.2.2. 막여과 시스템 운전 방법

침지형 막여과 시스템의 운전은 두 가지 조건으로 나누어 진행하였다. 1차 실험은 9분 여과, 1분 역세척(처리수+폭기), 배출(1일 주기), 10분 연속 폭기의 방식으로 운전하였으며 회수율은 약 87 %였다. 2차 실험은 9분 여과, 1분 정지, 배출(1일 주기), 5분 연속 폭기의 방식으로



320 W × 396 H × 490 L, Weight 7 kg

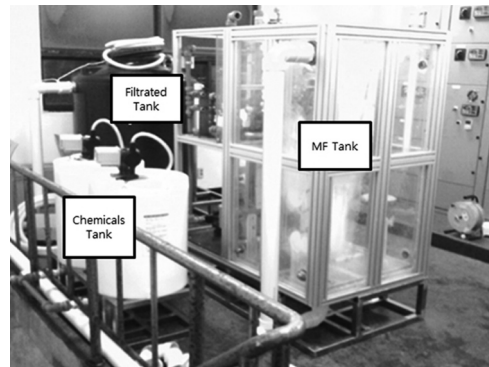
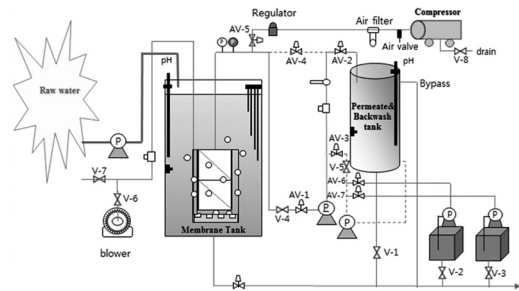


Fig. 3. Schematics of submerged MF pilot plant.

운전하였으며 회수율은 약 89 %였다.

여과시스템의 운전에 필요한 Flux 측정을 위해 pilot plant에 설치된 전자 유량계를 이용하여 여과유량을 측정하였고, KONICS사의 압력계와 협성계기사의 아날로그 온도계를 이용하여 압력과 온도를 각각 측정하였다. 연속적인 pH 측정을 위해 pH meter(천세, CRYSTAL P-808SE)를 이용하였으며 탁상용 pH meter(Thermo Orion)를 이용하여 온라인 pH meter의 작동상태를 수시로 확인하였다.

2.3. 분석 방법

막여과 유입원수의 Total organic carbon (TOC) 변화와 막간차압(TMP)의 상관성을 중점적으로 알아보하고자 침지막 농축조 상부 0.5 m 지점에 TOC온라인연속측정기(TOC-2010, Shimadzu)의 유입부를 연결하여 5분 간격으로 24 시간 모니터링하였다. 막여과 유입원수의 특성 및 침지식 막여과의 여과성능을 알아보하고자 막여과 유입원수, 침지막 농축수, 최종처리수를 각각 주 3회 시료 채취 후 분석하였으며 먹는 물 수질공정시험기준에 의거하여 탁도(2100AN, HACH), TOC·DOC(TOC-V CSH, Shimadzu), UV₂₅₄(Cary 300, Varian), 철·망간·칼슘·마그네슘·알루미늄(Opitma5300DV, perkinElmer)을 각각 분석하였고 SS는 Standard Method에 따라 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 침지형 막여과 시스템 여과성능 평가

3.1.1. 원수 성상에 따른 운전 평가

본 pilot plant는 인천시 N-정수장 최종방류수를 원수로 하여 처리하는 침지형 MF 분리막 시스템으로 역세와 폭기 방식에 따라 조건을 나누어서 운전하였다. 그리고 고분자 유기 응집제의 함유에 따른 막여과 성능을 평가하였다.

3.1.1.1. 고분자 응집제가 함유된 원수 여과 성능

N-정수장은 고분자 유기응집제가 농축조 분배조에 상시로 유입되고 있는 원수로 운전조건을 달리하여 1차, 2차 실험을 진행하였다. N-정수장의 최종 방류수에 첨가된 고분자 유기응집제는 OCI-SNF사의 YANGFLOC제품(A-231-PH, 중음이온성)으로 25 °C에서 원액점도는 650 ~ 1000 cps이다. 1차 실험은 Table 3에 정리한 것 같이 9분 여과(9분 폭기), 1분 역세(1분 폭기), 1일 배출, 회수율은 86.82 %의 조건으로 진행되었다. Fig. 4에서 나타난 것처럼 운전 기간 중 여과 Flux는 0.54 ~ 0.56 m/d, TMP는 0.04 ~ 0.07 bar로 유지되었다. (여과 Flux & TMP, at 25 °C) 운전기간동안 TMP는 0.04 bar에서 0.07 bar로 약 0.001 bar/day의 속도로 증가하여 비교적 안정된 TMP를 유지하였다.

Table 3. 1st experiment conditions

parameter	contents	parameter	contents
filtration time	9 min (aeration 9 min)	filtration flux	0.56 m/d at 25 °C
back wash time	1 min (aeration 1 min)	back wash flux	0.825 m/d at 25 °C
drain cycle	1day	recovery	86.82 %

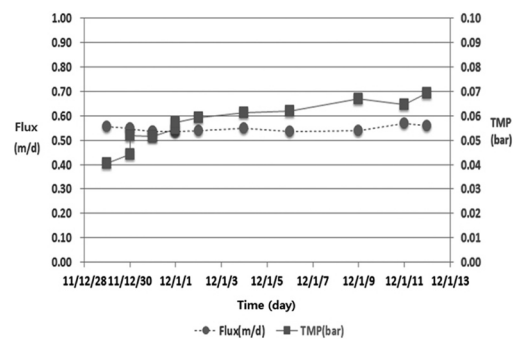


Fig. 4. 1st filtration correction Flux & TMP(at 25 °C).

2차 실험은 Table 4의 조건과 같이 9분 여과(4분 폭기), 1분 정지(1분 폭기), 1일 배출, 회수율은 88.77 %로 진행되었다. Fig. 5는 운전 TMP 및 Flux를 나타내고 있다. 초기 여과 Flux는 0.542 m/d, 초기 TMP는 0.052 bar에서 운전을 시작하였으며, 31일 경과 후 Flux는 0.292 m/d로 감소하고 TMP는 0.364 bar로 0.008 bar/day의 속도로 증가하였다. (여과 Flux & TMP ; at 25 °C)

2차 실험의 결과, 1차 실험에 비해 TMP상승은 0.001 bar/day에서 0.008 bar/day로 약 8배 높게 이루어졌는데 역세공정에 의한 오염물질 제거기능이 큰 운전 변수로 작용하였다고 할 수 있다. 또한 정수장 배출수를 처리하는 막여과 공정에서 공기세정만으로는 막오염 저감에 대한 효과가 낮다고 판단되었다.

본 연구를 통해 배출수의 막여과 공정에서 역세공정의 적용 시 TMP상승률이 감소하는 결과를 얻어 세정 주기를 길게 가질 수 있는 안정적인 운전조건을 확인하였으나, 전체 회수율이 2

% 감소하는 것으로 나타났다.

3.1.1.2. 고분자 응집제가 미 함유된 원수 여과 성능

N-정수장의 1차, 2차 실험을 통하여 고분자 유기응집제 존재 시 역세공정이 없는 경우 막오염이 쉽게 발생하는 것을 확인하였으며, 고분자 유기 응집제가 함유되지 않은 원수의 경우 막여과 성능에 어떠한 차이를 발생시키는지 확인하기 위해 추가 실험을 진행하였다.

추가 실험이 진행된 곳은 인천의 G-정수장으로 풍납 취수장을 취수원으로 하고 있다. 급속여과지를 주 공정으로 하고 있으며 농축조에는 혼화/응집지의 슬러지와 여과지 배출수가 포함되어 있다. G-정수장은 농축조에 고분자유기 응집제를 상시 주입하지 않아 막여과 시스템의 배출수 여과 능력을 확인할 수 있는 장소로 선정되었다. 원수의 취수위치는 N-정수장과 동일한 농축조 상등수였다. 막여과 시스템 운전조건은 N-정수장의 2차 실험 조건인 Table 4와 동일하였으며, Fig. 6은 G-정수장의 배출수 막여과 처리시설의 운전기간동안의 TMP변화를 나타내고 있다.

G-정수장의 TMP상승률은 0.0026 bar/day로 N-정수장의 0.008 bar/day에 비하여 약 1/3배의 차이가 발생하였으며 원수의 변화에 따른 막오염 정도의 차이가 발생함을 확인하였다. Table 5에서 보듯이 두 원수의 입자성 물질 및 무기물의 농도는 비슷하나 유기물의 농도에서

Table 4. 2nd Experiment conditions

parameter	contents	parameter	contents
filtration time	9 min (aeration 4 min)	filtration flux	0.54 m/d at 25 °C
back wash time	1 min (aeration 1 min)	back wash flux	-
drain cycle	1day	recovery	88.77 %

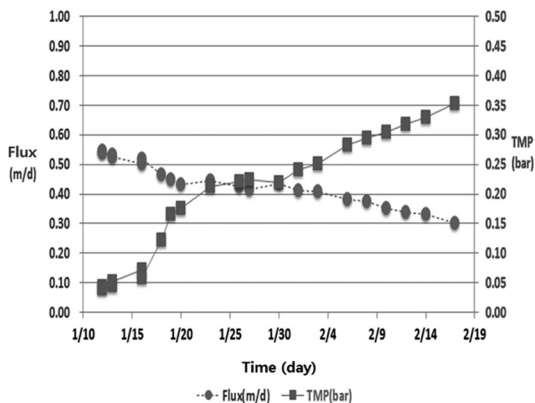


Fig. 5. 2nd filtration correction Flux & TMP (at 25 °C).

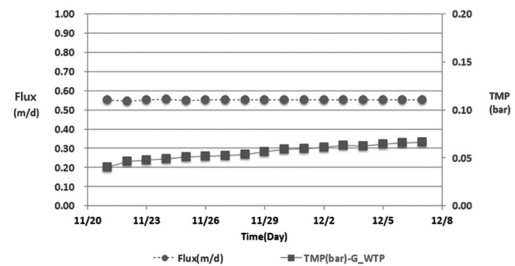


Fig. 6. Difference of membrane filtration TMP in G-water treatment plant.

차이가 발생함을 확인할 수 있었다. 막여과 농축수의 경우 DOC로 측정되는 유기물농도의 차이는 약 1.3배로 N-정수장의 유기물 농도가 높게 측정되었으며, 농축조에 유입된 고분자 유기응집제로 인해 증가한 유기물 부하가 막오염에 기여한다고 해석 된다.

두 정수장에서 진행한 실험 결과, 고분자 유기응집제가 투입되지 않은 정수장 배출수의 경우 막여과 시스템을 통하여 안정된 운전조건을 가질 수 있음을 확인하였다. TMP의 증가율을 낮게 유지함으로써 약품세정의 주기를 늘려 분리막의 수명을 증대시킬 수 있고, 약품 주입량 및 세정공기량을 절감하여 운영 유지비용(전기비+약품소모비)의 감소를 가져오게 되어 경제성 있는 운전 시스템을 완성할 수 있음을 확인하였다.

3.1.1.3. 화학적 세정 효과

N-정수장 배출수 처리에 사용된 분리막을 Table 6와 같은 방법으로 화학적 세정을 하였다. 2차 실험에 사용된 분리막의 초기 운전 조건(at 25 °C 기준)은 flux가 0.542 m/d, TMP는 0.052 bar 이었다. 운전 40일 후 flux와 TMP가 각각 0.292 m/d, 0.364 bar인 시점에서 화학적 세정을 하였으며 Table 7의 결과에서 분리막의 투과율(permeability)이 화학적 세정 후 100% 초기 운전 값으로 회복되었다. 투과율은 여과 flux를 TMP로 나눈 값(LMH/bar)으로 일정한 여과 압력에서의 단위 투과 유량을 나타낸다. 세정효율은 화학세정 전, 후의 투과율을 운전 초기의 투과율로 나누어 산출하였다. 유기물 세정 후의 회복 값은 초기 운전 값 대비 투과율이 93.9% 회복되었고, 마지막 무기물 세정 후의 투과율의 추가 회복은 6.1%를 달성하였다. 이러한

Table 5. Analysis water parameter according to water source

Plant		DOC (mg/L)	Turbidity(NTU)	Fe(mg/L)	Mn(mg/L)	Al(mg/L)
N-water treatment plant	Raw water	4.1	3.24	0.01	0.16	0.02
	concentrated water	13.9	13.8	0.04	0.27	0.10
G-water treatment plant	Raw water	5.6	3.05	0.02	0.50	0.01
	concentrated water	10.9	15.3	0.04	0.58	0.20

Table 6. Chemical cleaning methods

check subject before cleaning	'Flux, TMP, Temperature' check by raw water or pure water
organic cleaning	soaking 4 hr at NaClO 4,000 mg/L
rinse	remove fouling matter on membrane surface by aeration 1 min 'Flux, TMP, Temperature' check by raw water or pure water under pH 8
inorganic cleaning	soaking 2 hr at 0.1wt % Oxalic acid
rinse	remove fouling matter on membrane surface by aeration 1 min 'Flux, TMP, Temperature' check by raw water or pure water above pH 7

Table 7. The change in TMP & flux by chemical cleaning (at 25 °C)

parameter	first operation	before cleaning	after organic cleaning	after inorganic cleaning
TMP [bar]	0.052	0.364	0.054	0.051
flux [m/d]	0.542	0.292	0.541	0.544
permeability [LMH/bar]	416.9	32.1	400.7	426.7
efficiency	100 %	-	93.9 %	6.1 %
			total : 100 % recovery	

사실을 미루어 간접적으로 막오염 물질의 대부분을 차지하는 성분이 유기물이라고 해석되었으며, 잔여 유기물 및 무기물 오염물질은 산세정을 통해 완전히 제거되었음을 확인 할 수 있었다.

Fig. 7는 세정 전후의 분리막 모듈 사진으로 막 표면에 부착된 오염물질이 화학세정을 통해 제거됨을 육안으로 확인할 수 있었다.

3.1.2. 처리수질 분석

막여과 시스템은 입자성 물질에 대하여 월등한 제거 효율을 가지며, N-정수장에서 진행된 실험의 운전기간 동안 침지막 농축수의 탁도 및 SS의 농도와는 무관하게 막여과 처리수는 Table 8, 9, Fig. 8에서와 같이 안정하게 연속 처리되었다. 원수의 경우 봄, 여름, 가을과 달리 겨울철에 SS가 10 mg/L를 넘는 경우가 발생하지만 막여과 처리수는 최종 방류수 법적기준인 SS 10 mg/L이하를 만족하고 있으며, 처리수질

평균 0.0 mg/L를 달성하였다. 다른 배출수 처리공정인 섬유상여과기의 처리수질인 SS 0.5 ~ 1.5 mg/L와 비교하여 뛰어난 처리수질을 나타내고 있어 처리수의 재활용에도 넓은 가능성을 갖는다. (Kang, 2007)

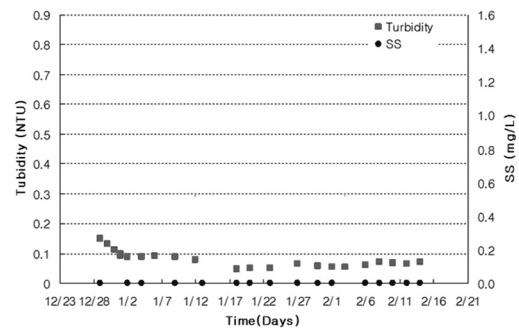


Fig. 8. Turbidity and SS results of membrane filtration effluent in N-water treatment plant.

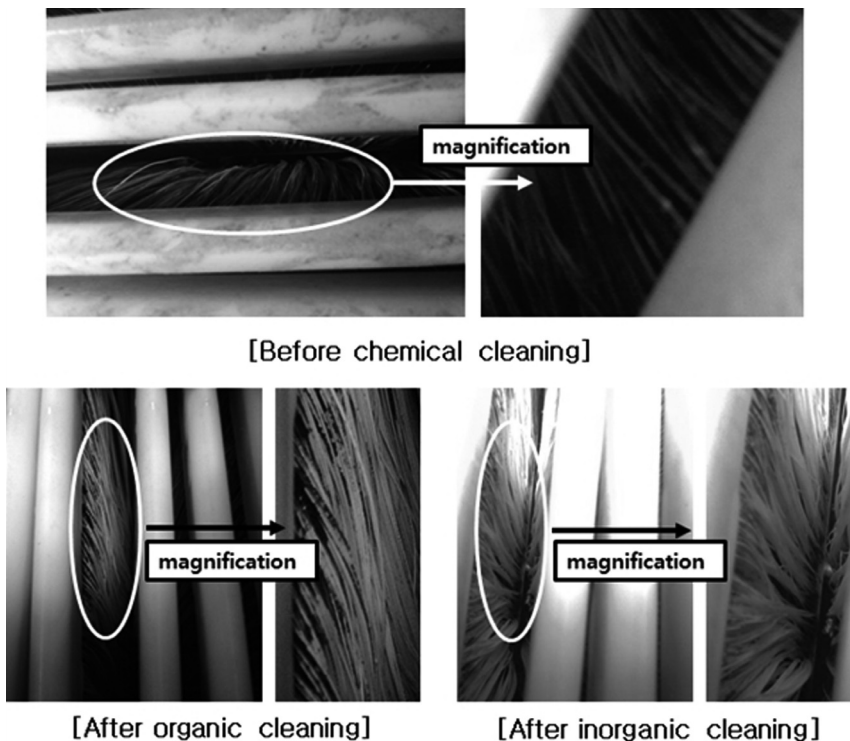


Fig. 7. Membrane picture before and after chemical cleaning.

Table 8. SS and turbidity results of raw, concentrated and filtrated water in 1st filtration experiment in N-water treatment plant

(Period : 2011.12.29. ~ 2012.01.13.)

Item	date sample division	12/29	12/30	12/31	1/1	1/1	1/2	1/4	1/6	1/9	1/12	1/13
		Turbidity(NTU)	raw water	3.93	3.76	2.97	3.24	3.12	3.02	3.08	2.85	2.67
concentrated water				13.1	13.8	18.5	15	13.4	12.6	11.8	10.4	20.4
filtrated water	0.149		0.132	0.112	0.092	0.097	0.088	0.088	0.091	0.088	0.078	0.043
SS(mg/L)	raw water	4.0	2.8	3.2	3.0	3.5	2.0	3.5	3.5	3.0	7.0	6.0
	concentrated water			13.8	10.0	12.0	10.0	10.0	8.5	9.5	15.5	16.5
	filtrated water	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 9. SS and turbidity results of raw, concentrated and filtrated water in 2nd filtration experiment in N-water treatment plant

(Period : 2011.01.16. ~ 2012.02.17.)

Item	division date	1/16	1/18	1/20	1/23	1/27	1/30	2/1	2/3	2/6	2/8	2/10	2/12	2/14
		Turbidity (NTU)	raw water	9.26	9.39	5.32	3.13	2.35	6.12	7.48	6.48	6.81	6.47	6.7
concentrated water	30.4		29.1	16.7	8.33	5.46	11.7	17.1	12.1	10.1	9.51	7.88	4.24	6.02
filtrated water	0.076		0.049	0.052	0.05	0.064	0.059	0.053	0.055	0.061	0.072	0.068	0.066	0.073
SS(mg/L)	raw water	15.5	12.0	8.0	7.0	3.0	8.0	11.0	15.0	17.0	17.0	14.0	10.0	11.0
	concentrated water	43.3	42.0	34.0	19.0	10.0	20.0	31.0	25.0	27.0	24.0	20.0	18.0	19.0
	filtrated water	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

3.1.3. 막오염 영향 인자 분석

3.1.3.1. 유기물이 막오염에 미치는 영향 평가

SUVA는 DOM(Dissolved organic matter)의 특성을 알기위한 가장 단순화된 매개변수다.(Chae et al., 2004) 여기서 UV_λ는 보통 cm⁻¹이고, DOC는 mg/L로서, 변환계수 100은 SUVA의 단위 (m⁻¹/(mg DOC/L); L/mg · m)로 표현하기 위해 사용하였다.

$$SUVA_{\lambda} = \frac{UV_{\lambda}}{DOC} \cdot 100$$

일반적으로 원수에서 UV 흡광도를 유발하는 물질들은 휴믹과 펠빅산, 다른 방향성 유기물질(예, 페놀류), 금속(예, 철, 망간), 음이온(예, 질산염, 아황산염) 등이며, 이들 물질들의 용존성과 입자성 물질들이 UV 빛을 흡수한다. 한강수계는 팔당댐의 방류량과 강우량이 높은 여름철에 UV₂₅₄ 흡광도가 증가하고 DOC는 강우량

의 영향을 크게 받지 않는다. 년중 한강수계의 UV₂₅₄ 흡광도는 1 ~ 12 m⁻¹의 범위에 있으며 DOC는 1 ~ 2 mg/L 범위에 있다.(Chae et al., 2004) Table 10와 같이 막여과 농축수의 UV₂₅₄ 흡광도는 0.6 ~ 8.9 m⁻¹의 범위에 있으므로 수계원수와 비슷하지만 DOC는 최소 8.21 mg/L에서 최고 11.8 mg/L 범위에 있으므로 수계보다 4배 이상 높게 나타났다.

SUVA 값이 4이상이면 고분자량, 휴믹성, 소수성이며, 2이하이면 저분자량, 비휴믹성, 친수성을 나타낸다.(Edwards, 1997) 따라서 막여과 농축수는 분자량이 작은 친수성, 비휴믹 물질이 주를 이루고 있다. 이러한 SUVA값을 이용한 농축수의 특성을 고려했을 때 막여과 공정에서 막오염 발생과 연관성이 낮아 보이지만,(Jung et al., 2007) DOC의 주요원인 물질이 N-정수장의 Table 11 실험결과에서 보듯이 유기물질이 수중에서는 완전히 용존되어 있지 않은 콜로이드

Table 10. Organic parameter of concentrated water from submerged membrane filtration in N-water treatment plant

	1/16	1/18	1/20	1/23	1/25	1/27	1/30	2/1
UV ₂₅₄ [cm ⁻¹]	0.0753	0.0891	0.0301	0.0062	0.0173	0.012	0.0113	0.0366
DOC[mg/L]	15.5	14.6	16.5	11.03	16.8	15.9	8.21	12.7
SUVA[cm ⁻¹ /mg/L]	0.49	0.61	0.18	0.06	0.10	0.08	0.14	0.29

Table 11. TOC change according to coagulant injection in N-water treatment plant

source water	1	2	avg.
paldang raw water [mg/L] (WTP feed water)	1.46	1.05	1.25
balancing tank [mg/L] (before injection polymer coagulant)	4.16	4.94	4.55
1 st thickener [mg/L] (after injection polymer coagulant)	8.89	8.82	8.85
2 nd thickener [mg/L] (final discharged tank)	23.73	20.62	22.17

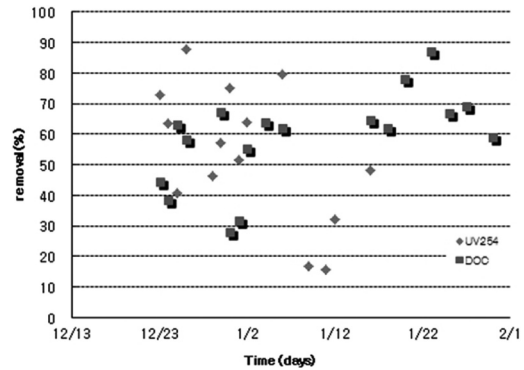


Fig. 9. Removal rate for organic matters with submerged membrane in N-water treatment plant.

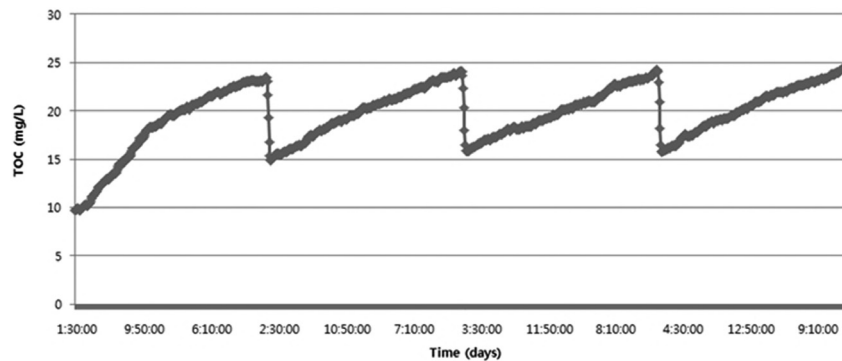


Fig. 10. The result of TOC On-Line analyzer.

(colloid) 상태로 분포되어 있어서 막의 유기물 오염의 주요 원인으로 작용하였다고 해석된다. 또한 Fig. 9을 통해 유기물 제거율은 평균 60%로 측정되며 이는 유기물이 분리막에 의해 배제되었다고 해석되어 용존된 상태보다 콜로이드 상태로 분포되어 있다고 해석할 수 있다.

막여과 농축조와 TOC 분석기를 온라인으로 연결하여 TOC를 연속 측정할 결과 Fig. 10와 같이 배출 주기(1일)에 따라 유기물이 농축됨을 알 수 있다. 농축되는 TOC 농도는 배출전 25 mg/L로 측정되며 이는 초기 농도인 10 ~ 15 mg/L

에 비해 막여과 시스템 운전 시간을 줄이고 막오염에 영향을 주는 농도이다.(Sim et al., 2007)

유기물질의 제거율과 화학세정 결과를 통하여 수중의 유기물이 막오염의 주요 원인을 확인하였으며, 그 유기물의 주요성분은 콜로이드 상태의 유기물을 함유하고 있는 고분자 유기응집체로 해석되었다.

3.1.3.2. 무기물이 막오염에 미치는 영향 평가

MF 분리막의 주요 기능은 Pore Size 이하만 여과시키는 절대여과에 있다. 그러므로 Pore

Size 이상의 입자상 물질에 의해 막의 기공이 막히면 여과압력이 증가하고 막의 수명이 짧아지게 된다. 수중에 용존된 Fe, Mn 이온은 폭기에 의해 입자상 물질로 산화되어 막의 기공을 막는 fouling 물질이 될 수 있다. 하지만, N-정수장의 실험결과인 Fig. 11에서 보듯이 침지막 유입수 내 Fe은 거의 존재하지 않으며 Mn은 평균 0.18 mg/L 이하로 낮게 유지되고 있다. 또한 Table 12에서 정리한 결과 용존된 상태로 농축조에 유입된 만큼 분리막을 통하여 유출된다. Al이온의 경우 정수장의 혼화/응집공정의 배슬러지에서 발생하며 고농도 존재시 막오염을 유발할 수 있으나, 본 시스템에서는 원수 및 농축

수에서 평균 0.1 mg/L이하로 존재하여 막오염에 영향을 주지 않았다. 경도 유발물질인 Ca, Mg도 Fig. 12과 같이 낮게 유입됨을 확인하였고, 분리막을 통하여 유입된 만큼 유출된다. 역시 Table 12를 통하여 확인할 수 있듯이 N-정수장의 원수 대비 침지막조 안의 무기물 농도 농축이 실험기간 동안 발생하지 않은 점을 통하여 무기물 농축은 일어나지 않는 것을 연속적으로 확인 하였다. 막오염 측면에서 Table 7에서 측정된 것과 같이 산세정을 통하여 무기물에 의한 막오염이 6.1 %정도 일어났음을 간접적으로 확인 가능하다.

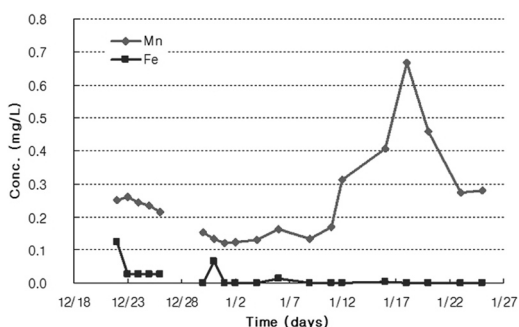


Fig. 11. Concentration of Mn and Fe in influent water through submerged membrane.

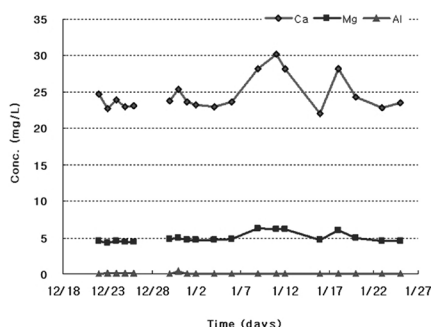


Fig. 12. Concentration of Ca, Mg and Al in influent water with submerged membrane.

Table 12. Experiment results for inorganic matters with membrane filtration

item	sample	12/30	12/31	1/1	1/2	1/4	1/6	1/9	1/11	1/12	1/16	1/18	1/20	1/23	1/25
Mn [mg/L]	raw	0.153	0.1337	0.1215	0.1229	0.1308	0.161	0.1335	0.1706	0.3133	0.4054	0.6681	0.46	0.2716	0.2802
	conc.	0.1129	0.1136	0.1097	0.1217	0.1251	0.2696	0.1649	0.1255	0.2348	0.4092	0.558	0.4014	0.2606	0.2737
	treat.	0.128	0.1286	0.1327	0.1282	0.1308	0.1706	0.1197	0.1816	0.2565	0.4475	0.5994	0.4839	0.2756	0.3052
Fe [mg/L]	raw	0.000	0.066	0	0	0	0.014	0	0	0	0.002	0	0	0	0
	conc.	0	0	0.006	0	0.021	0.045	0.016	0	0	0	0	0	0	0
	treat.	0	0.002	0	0	0	0	0.012	0	0	0	0	0	0	0
Ca [mg/L]	raw	23,7900	24.3	25.43	25.33	23.6	23.19	22.95	23.66	28.21	30.24	28.18	22.02	28.23	24.28
	conc.	21.59	23.12	21.9	22.57	22.96	23.7	24.92	32.42	31.88	26.66	25.73	21.15	26.69	24.5
	treat.	21.61	22.24	23.07	23.81	23.3	22.61	24.54	24.31	29.71	26.61	25.43	22.32	30.96	23.05
Mg [mg/L]	raw	4.7620	4.808	4.896	4.937	4.627	4.654	4.617	4.801	6.23	6.191	6.209	4.721	6.008	4.902
	conc.	4.347	4.651	4.326	4.486	4.53	4.641	4.857	5.726	6.336	6.104	6.124	4.297	5.467	4.836
	treat.	4.426	4.575	4.554	4.905	4.793	4.611	4.892	5.07	6.561	6.298	5.956	4.877	6.76	4.734
Al [mg/L]	raw	0		0.347	0.054	0.042	0.021	0.016	0.031	0.007	0.009	0.024	0	0	0
	conc.	0.05	0.095	0.126	0.065	0.096	0.101	0.143	0.164	0.003	0.027	0.018	0.03	0.015	0.032
	treat.	0	0.002	0.018	0	0.04	0.008	0	0	0.053	0.021	0	0	0	0

conc.=concentrated water, treat.=treated water

3.2. 원수특성을 고려한 막여과 공정 도입 가능성 평가

3.2.1. 방류수처리 추가 시설 도입 필요성

수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙 제6조(별표 4)에 따라 1000 m³/d 이상의 수도 사업시설(역세는 하지 않고 물리적으로만 처리하는 시설은 제외)은 폐수배출시설로 분류되며, 폐수처리시설 기본배출부과금 산정시 방류수 수질기준을 초과한 배출량으로 산정하므로, 이를 면제받기 위해서는 폐수종말처리시설 방류수 수질기준(시행규칙 제26조 별표10)을 준수하여야 한다. 따라서 2013년 1월 1일 이후 강화된 법적 기준인 부유물질(SS) 농도 10 mg/L이하로 처리하여야 한다. Table 13은 2013년 이후 방류수의 법적기준 강화내용을 정리하고 있다.

N 정수장은 Table 14의 농축조 처리시설 용량평가 결과 용량부족으로 진단되었으며, 3년간 (2008.11 ~ 2011.11) SS농도가 10 mg/L를 초과한 일수가 총 38일이나 되었다.(Lee et al., 2011) 법적 기준을 만족시키기 위해서는 고품물 부하 및 체류시간에 적합하도록 농축조를 신설하거나 모래여과지, 섬유디스크필터, 마이크로디스크필터, PCF, 막여과 등을 추가로 신설하여 최종방류수의 2차 처리가 필요하다. 상기의 대안들 중 농축조와 모래여과지 신설은 초기투자비용이 많이 소요되고, 마이크로디스크필터와 섬유디스크필터는 Bulking에 의한 고탁도 유입시 처리수량이 급격히 감소하고 여과수질이 불량하다. 또한 PCF와 막여과는 여과 및 역세시 펌프가동으로 인한 운전비 과다, 섬유 교체 및 세정에 따른 유지비용 및 원수 저장조가 필요

Table 13. Water quality standards for effluent discharge from final wastewater treatment plants (Article 26 of the Enforcement regulations, *10)

parameter	period and water quality									
	until 2010.12.31.	from 2011.1.1. until 2011.12.31.	2012.1.1. ~ 2012.12.31.				after 2013.1.1.			
			I area	II area	III area	IV area	I area	II area	III area	IV area
BOD (mg/L)	under 20(30)	under 20(30)	under 20(30)	under 20(30)	under 20(30)	under 20(30)	under 10(10)	under 10(10)	under 10(10)	under 10(10)
COD (mg/L)	under 40(40)	under 40(40)	under 40(40)	under 40(40)	under 40(40)	under 40(40)	under 20(40)	under 20(40)	under 40(40)	under 40(40)
SS (mg/L)	under 20(30)	under 20(30)	under 20(30)	under 20(30)	under 20(30)	under 20(30)	under 10(10)	under 10(10)	under 10(10)	under 10(10)
T-N (mg/L)	under 40(60)	under 40(60)	under 40(60)	under 40(60)	under 40(60)	under 40(60)	under 20(20)	under 20(20)	under 20(20)	under 20(20)
T-P (mg/L)	under 4(8)	under 4(8)	under 0.2(0.2)	under 0.3(0.3)	under 0.5(0.5)	under 4(8)	under 0.2(0.2)	under 0.3(0.3)	under 0.5(0.5)	under 2(2)
총대장균군수 (개/mL)	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000 (3,000)	3,000 (3,000)	3,000 (3,000)	3,000 (3,000)
생태독성 (TU)	-	under 1(1)	under 1(1)	under 1(1)	under 1(1)	under 1(1)	under 1(1)	under 1(1)	under 1(1)	under 1(1)

Table 14. Thickener capacity evaluation of each plant (Current status) (Lee et al., 2011)

object facility	item	standard	value(desing standard)	capicity evaluation
thinkener (1)	HRT	24 ~ 48 hrs	4.4	insufficiency
	soliding loading	10 ~ 20 kg/m ² ·day	325.3	insufficiency
thickener (2)	HRT	24 ~ 48 hrs	8.9	insufficiency
	soliding loading	10 ~ 20 kg/m ² ·day	162.7	insufficiency

Table 15. 2011 status of volumes of filter cloth washing water and effluent discharge in N-water treatment plant

month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Filter cloth cleaning flux (m ³ /day)	66	120	94	65	58	47	48	87	105	96	102	83
Discharged water flux (m ³ /day)	279	362	509	351	244	261	163	221	285	200	363	175

하다는 단점을 가지고 있다. 막여과 공정은 처리 과정에서 농축 배출수가 발생하나 기타 공정에 비해 처리수 재이용율이 높은 장점을 가지고 있다. 이러한 여과설비 중 여과수질의 안정성을 고려했을 때 막여과 설비가 가장 적합하다고 판단된다.

3.2.2. 최종 방류수 재활용 방안

침지식 막여과를 이용한 여과수의 수질을 확인하기 위해 먹는물 수질 기준 58 항목을 분석한 결과 모든 항목에서 수질 기준 이내로 분석되었다. Table 15의 현황에서 보듯이 침지막 유입원수로 사용되는 방류량이 탈수기동에서 사용하는 여포세정수량보다 항상 많이 발생하고 있다. 따라서 침지막을 사용하여 생산된 여과수를 1차적으로 저장조에 보관한 후, 탈수기 가동시 필요한 세정수로 재활용하고 잉여 생산수는 정수장 관내의 조정용수로 활용 한다면 회수율 99 % 이상의 시스템을 달성할 수 있으리라 생각되어진다.

4. 결론

본 연구는 2013년부터 법적으로 강화된 폐수 종말처리시설의 방류수 수질기준을 만족시킴과 동시에 인천시 N-정수장 최종방류수의 재처리 시스템으로써 막여과 공정 도입의 타당성을 검토하고자 추진되었다. 시스템의 경제성과 수질의 안정성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 막여과 시스템의 운전방법을 역세공정을 달리하여 2가지 형태로 실험을 진행한 결과, 역세 공정 적용 시 미적용 공정보다 TMP 상승률이 1/8배 낮게 유지되었으며 고분자

유기 응집제가 함유되지 않은 원수에서는 더욱 막오염 현상이 감소하여 안정적인 운전이 가능함을 확인하였다. 화학적 세정 후 100 % 초기 운전 값으로 회복되었으며 유기물에 의한 fouling이 거의 대부분을 차지한다고 판단되었다.

2. 수온의 저하로 농축조의 슬러지가 부상됨에 따라 유입원수의 탁도와 SS가 높게 유지되어도 침지식막 여과수의 수질은 평균 탁도 0.08 NTU이하이며 SS 0.0 mg/L 로 안정하게 처리되었다.
3. 처리수의 TOC 제거율이 평균 60 %으로 유기물이 완전히 용존 되어 있지 않는 콜로이드(colloid) 상태로 존재함을 간접적으로 추측할 수 있어 분리막의 fouling에 영향을 준 것으로 판단되었다.
4. 단기적으로 실험하였을 경우의 무기물들은 막여과 처리 전과 후의 농도 차이가 없는 것으로 측정되었으며 최종방류수를 처리함에 있어 막 오염에 주는 영향이 유기물에 비하여 미비함을 알 수 있었다.
5. 농축조의 용량부족과 강화된 법적기준을 만족시키기 위해 막여과 설비를 도입할 경우 여타의 여과설비보다 장기적으로 수질의 안정성을 확보할 수 있다.

사사

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션사업(글로벌 환경기술개발사업)”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. (GT-SWS-11-01-003-0)

참고문헌

- Kim Kwang Nam (2007) Chem micro disk filter for treating suspended solid in water (CMDf), *Korea Environmental Preservation Association Global Environmental technology seminar*, pp. 43~47.
- Young Hoon Kim, Kwan Yeop Kim, Ji Hoon Kim, Yong Soo Lee, Eui Jong Lee, Jung Yeol Eom, Hyung Soo Kim, Sun Jin Hwang (2009) Research Papers : A Study about Applicability of Treatment for Water Treatment Residual Sludge Using Crossflow Tubular Membrane System, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 23(4), pp.499~505.
- Won Jae Moon, Yong Taik Moon (2004) Diagnosis through estimation on the capacities of water treatment plant residuals treatment facilities, *journal of Korean Society of Environmental Engineers spring conference 2004*, pp.864~869.
- Department of Environment (2009) *Water quality and water ecosystem preservation of Laws, enforcement regulations*, attached form 10
- Byung-Uk Bae, Jin-Ho Park, Yeon-Gu Jeong, Kyeong-Ho Lim (2003) Thickening Characteristics of Water Treatment Sludge as a Function of the Type of Raw Water, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 25(11), pp.1400~1404.
- Byung-Uk Bae, Kuk Her, Dae-Sung Joo, Yeon-Gu Jeong, Young-Il Kim, Chang-Won Ha (2007) A New Program to Design Residual Treatment Trains at Water Treatment Plants, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 29(3), pp.277~282.
- Man Sik Song, Young June Choi, Kwang Ho Kim, Jong Woon Kwak, Young Beom Kim (2007) Effect of Seasonal Water Parameters on Floc Formation, *Journal of Korean Society on Water Quality 2007 spring conference*, pp.1440~1448.
- Hyun Sool Shim, Chul Woo Jung, Hee Jomg Son, In Shik Sohn (2007) Effect of Membrane Materials on Membrane Fouling and Membrane Washing, *Korean Chemical Engineering Research*, 45(5), pp.500~505.
- Jung Yeol Eom, Kwan Yeop Kim, Young Hoon Kim, June Sup Song, Hyung Soo Kim, Myung Ae Han, Hyung Seok Yang (2008) A Study about Applicability of Treatment for Backwash Water Using Tubular Membrane System with Dead-End Operation Mode, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 22(4), pp.437~444.
- Yune Han Lee, Eui Seok No, Myung Woong Han (2011) *Technology inspection reports of Nam-dong water treatment plant*, pp. vi-126~vi-148.
- Chul-Woo Jung, Hee-Jong Son, Hyun-Sool Shin, In-Shik Sohn (2007) Effect of Organic Molecular Weight and Functional Group on Membrane Fouling, *Korean Chemical Engineering Research*, 45(6), pp.669~676.
- Seon Ha Chae, Kyung Hyuk Lee, Jae Lim Lim, Seong Su Kim, Chang Keun Wang, Hyo Won Ahn (2004) Characteristics of DOM according to Seasonal Variation of Raw Water in Lakes and Rivers, *journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 26(11), pp.1244~1250.
- Department of Environment (1997) *Water facilities standards*, pp.378~392., Korea Water & Wastewater Works Association, Gwachcheon
- Abdellah Beicha, et al. (2009) Dynamic ultrafiltration model based on concentration polarization-cake layer interplay, *Desalination*, 242(1~3), pp.138~148.
- A. Brugger et al. (2000) Reuws of filter backwash water using ultrafiltration technology, *Filtration & Separation*, 27(1), pp.22~26.
- Chris Dotremont, et al. (1999) The recovery of backwash water from sand filters by ultrafiltration, *Desalination*, 126, pp.87~97.
- Edwards, M. (1997) Predicting DOC Removal during Enhanced Coagulation, *J. AWWA*, 89(5), pp.78~89.
- E-WATER Project (2005) Final Report, Japan Water Technology Institute Center
- R. J. N. Willems et al. (1999) Full-scale recycling of backwash water from sand filters using dead-end membrane filtration, *Water Research*, 33(15), pp.3379~3385.