멤브레인(Membrane Journal)
Vol. 23 No. 1 February, 2013, 12-23

섬진강 수계에서 막여과 정수처리 공정 적용성 평가

김 종 두 · 박 경 욱* · 박 철 휘†

서울시립대학교 대학원 환경공학과, *금호건설 기술연구소
(2012년 12월 4일 접수, 2013년 1월 19일 수정, 2013년 2월 20일 채택)

Application of Water Treatment with Membrane in Seomjin River

Jongdoo Kim, Kyungwook Park*, and Chulhwi Park†

Department of Environmental Engineering, Graduate School, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea
*Institute of Construction Technology, KUMHO Engineering & Construction, Yongin 449-822, Korea
(Received December 4, 2012, Revised January 19, 2013, Accepted February 20, 2013)

요 약: 섬진강 수계의 복류수를 대상으로 막여과 정수처리 공정 현장 적용성 평가를 위해 여과막의 공경에 따른 막오염도 예측 및 최적 응집제 주입농도 선정을 통해 파일롯플랜트 규모의 검증실험을 실시하였다. 막공경에 따른 막오염도 평가를 위한 여과저항 평가실험 결과, 0.1 μm와 0.01 μm 여과막의 비가역적 여과저항 증가율은 각각 $0.44 \times 10^{12}/m^2$, $0.42 \times 10^{12}/m^2$로 나타났으며, Flux-test 실험결과, 적정응집제 주입농도는 Jar-Test 실험결과에 비해 낮게 나타났다. 현장 적용성 평가를 위해 6개월 동안의 파일롯플랜트 운영을 수행하였다. 응집을 실시하지 않은 막여과공정은 여과유속 1.0～1.5 $m^3/m^2 \cdot$ day, 응집을 실시한 막여과 공정은 여과유속 1.0～2.0 $m^3/m^2 \cdot$ day의 조건에서 운전한 결과 두 조건 모두 6개월 이상 막차압이 안정되게 유지되었다. 따라서 섬진강 수계의 복류수를 이용한 막여과 공정 운영에 있어 적정 여과유속으로 운전 시 응집제 사용 없이 안정적인 운전이 가능함을 알 수 있었다.

Abstract: On the subject of river bed water in Seomjin river, it had accomplished the verifying experiment of membrane filtration pilot plant for evaluating the applicability of its process throughout the prediction of membrane fouling as a function of the pore size of membrane and the determination of optimum coagulant dosage. On the result of the experiment for the evaluation of the membrane fouling as a function of the pore size, a increasing rate of irreversible resistance of membrane pore size 0.1 μm and 0.01 μm was measured each $0.44 \times 10^{12}/m^2$ and $0.42 \times 10^{12}/m^2$, respectively. And on the result of Flux-test, it showed that the optimum coagulant dosage was measured lower than the it of the Jar-test. The result to be operated in a condition of a permeate flux 1.0～1.5 $m^3/m^2 \cdot$ day without coagulation and a permeate flux 1.0～2.0 $m^3/m^2 \cdot$ day with coagulation was maintained at stable trans-membrane pressure (TMP) value for 6 months up to. Therefore it showed that the stable operation without the coagulation was possible on permeate flux 1.0～1.5 $m^3/m^2 \cdot$ day in the operation of membrane filtration process.

Keywords: *membrane, pore szie, pilot-plant, resistance, seomjin river*

1. 서 론

막여과 정수처리 공정은 기존의 모래여과에 비해 깨끗하고 안전한 처리 수질로 수돗물에 대한 신뢰성을 높일 수 있고, 원수 수질 변화에도 안정적인 처리수질 및 수량을 확보 할 수 있는 장점이 있으며, 컴팩트한 구성으로 인한 소요부지의 감소로 경제적인 공정으로 알려져 있다[1].

그러나 대부분 모래여과 공정으로 구성된 국내 정수장은 오랜 기간의 운영 노하우를 바탕으로 수계별 특성에 따른 운전 조건이 반영되어 있는 반면, 기존 정수장 개량사업을 중심으로 확대 적용되고 있는 막여과 공정은 운영실적이 충분하지 않아 원수 특성 및 운전조건별 운영인자가 부족한 실정이다.

†교신저자(e-mail: chpark@uos.ac.kr)

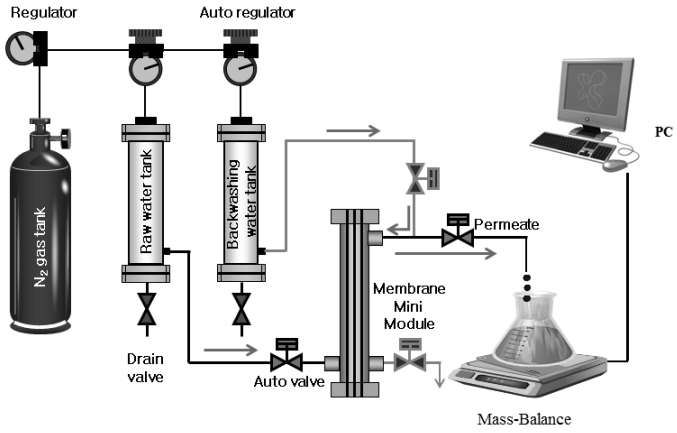

Fig. 1. Schematic diagram of flux-tester.

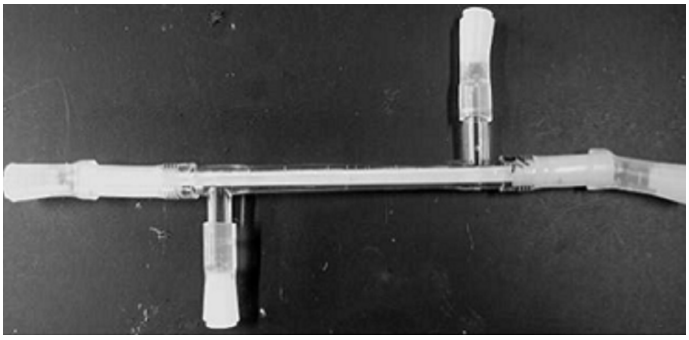

Fig. 2. View of mini membrane module for flux-test.

Table 1. Specifications of Mini Membrane Module

Item	Units	Value	
Pore size	μm	0.01	0.1
Material	–	PVDF	PVDF
O. D	μm	1,390	1,300
I. D	μm	828	700
Thickness	μm	282	300
Length	cm	20～21	20～21
Membrane area	cm^2	26～28	26～28

섬진강 유역은 국내의 수계 중 강수량이 가장 많은 지역이며[2], 겨울철 갈수기인 2월과 강우가 집중되는 6～8월에 유기물의 농도가 높아지는 특성을 보인다[3]. 막여과 공정에서 원수의 유기물과 입자상 물질의 존재는 막오염의 원인으로 작용하며[4-8], 막오염 저감을 위해 원수의 특성에 적합한 여과막의 선정과 더불어 응집처리와 같은 전처리가 필수적이다[9-11]. 따라서, 막오염 저감을 위한 적정 여과막 선정과 더불어 안정적인 운전조건의 설정은 막여과 공정의 운전 안정성을 향상시킬 수 있을 것이다.

본 연구에서는 섬진강 수계 원수를 사용하는 막여과 시설의 도입에 앞서 여과막 선정의 적정성 및 장기운전을 통한 현장 적용성을 평가하고자 하였다. 여과막 선정의 적정성을 평가하기 위해 막공경에 따른 유기물 제

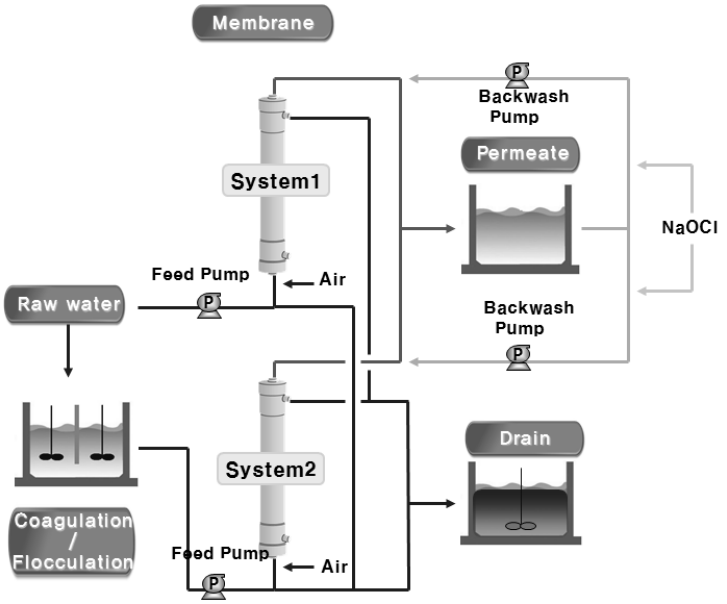

Fig. 3. Schematic diagram of the pilot-plant.

Table 2. Specifications of Membrane Module

Material	PVDF (Polyvinylidene-fluoride)
Type	Pressured hollow fiber θ 216 mm × L 2,160 mm
Pore size	0.01 μm
Surface area	72 m^2/module

거 특성 및 막오염도를 비교하고, 현장 적용성을 평가하기 위해 Jar-test 및 Flux-test를 통한 최적응집농도를 선정하고, 250 m^3/일 규모의 Pilot-plant를 운영하여 장기운전에 따른 운전 안정성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

원수 특성에 적합한 여과막 선정은 0.1 μm와 0.01 μm 공경의 막의 유기물 제거 특성과 막오염도를 비교 평가하였고, 적정 응집제 주입농도는 선정된 여과막을 이용해 Jar-test와 Flux-test를 실시하였고, 250 m^3/day 규모의 Pilot-plant에 적용하여 6개월간 운영하였다.

2.1. 실험장치

2.1.1. Flux-test 장치

여과막의 투과성능 및 오염도를 평가하기 위해 Flux-test를 수행하였다. Flux-test 장치는 원수조, 역세수조, Mini-module, 압력공급 및 제어설비 등으로 구성하였다. 여과 및 역세 공정시간은 타이머 설치를 통해 조정하였고, 압력조절은 질소가스를 이용해 정압제어를 실시하였다. Flux-test 장치에 적용된 Mini-module은 실제 막모듈에 적용되는 fiber를 절단하여 사용하였다. Flux-test 장치의 공정도는 Fig. 1과 같고, Mini-module의 사진 및 사양은 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다.

2.1.2. Pilot-plant

상용 막모듈을 이용해 섬진강 수계 I 정수장에 250 m^3/일 규모의 Pilot-plant를 설치하였다. 원수는 I 정수장 착수정에 유입되는 복류수를 사용하였고, 이물질 등의 제거를 위해 자동스트레이너(150 μm)를 통과시킨 후 막여과 공정에 유입하였다. 막여과 공정 구성은 ① 무응집-막여과(System1) ② 혼화/응집-막여과(System2)의 2계열로 구성하였다. Pilot-plant는 원격제어 시스템을 이용한 자동/무인 운전을 실시하였다. Pilot-plant의 개요도 및 적용 막모듈의 세부사항을 Fig. 3과 Table 2에 나타내었다.

2.2. 실험방법

2.2.1 수질 분석 및 여과 공경 선정

I 정수장 원수 특성에 적합한 여과막 선정을 위해 원

Table 3. Coagulant Characterization Data (PACs)

Parameters	Units	Value
Al_2O_3	%	16
Specific gravity	-	1.38
SiO_2	ppm	0.25
pH	-	3.62
Fe	ppm	< 0.001
As	ppm	N. D

수 수질분석을 실시하였다. 원수의 수질 특성 및 주된 막오염 물질의 분포를 확인하기 위해 유기물과 무기물의 농도를 측정하였다. 유기물은 TOC (Total Orgnic Carbon), DOC (Dissolved Organig Carbon), UV_{254} 등을 측정하였다. 유기물 중 소수성 유기물의 비율을 나타내는 SUVA (Specific UV Absorbance) 값은 DOC와 UV_{254} 값을 이용하여 계산하였으며, 계산식은 다음과 같다(1).

$$SUVA = ABS/DOC \times 100\ (m^{-1} \cdot L/mg) \quad (1)$$

ABS : Absorbance (cm^{-1})
DOC : Dissolved Orgnic Carbon (mg/L)

막오염도 비교 평가를 위해 여과막은 0.1 μm와 0.01 μm 공경의 막을 사용하였고, 원수 및 투과수의 유기물 분자량 분포를 분석하기 위한 Gel permeation chromatography (GPC) 분석과 막오염도를 평가할 수 있는 Flux-test를 실시하였다. GPC 분석(GPC SYSTEM21, Shodex, Japan)은 Asahipak GS-320 컬럼을 사용하였고, DOC (Total Carbon Detector LCT-100) 분석과 UV_{260} (UV-41, shodex, Japan)분석을 통해 유기물 크기별 분포를 분석하였다. 원수 및 공경별 투과수의 GPC 분석을 통해 공경별 유기물 제거 성능을 평가하였으며, Flux- test를 통해 여과저항을 측정하였으며, 여과저항은 차압과 여과유속의 비를 통해 산정하였다(2). 여과저항 증가율, 비가역적 여과저항 증가율, 역세회복율은 여과막의 오염도 및 오염도 회복특성을 평가하는 지표로 계산식은 다음과 같다(3-5),[12].

$$R = \frac{\Delta P}{\mu J} \quad (2)$$

R : 여과저항(1/m)
△P : 차압(kPa)
μ : 점도(Pa・S)
J : 여과유속($m^3/m^2 \cdot sec$)

$$R_r = \frac{(R_1 - R_2)}{V} \quad (3)$$

R_r : 여과저항 증가율($1/m^2$)
V : 막 단위 면적당 투과된 투과수량(m^3/m^2)
R_1 : 역세 전 여과저항(1/m)
R_2 : 역세 후 여과저항(1/m)

$$R_b = \frac{J_f}{J_0} \times 100 \quad (4)$$

R_b : 역세회복율(%)
J_f : 최종 역세 후 여과유속($m^3/m^2 \cdot sec$)
J_0 : 초기 여과유속($m^3/m^2 \cdot sec$)

$$R_{ir} = \frac{(R_2 - R_1)}{V} \quad (5)$$

R_{ir} : 비가역적 여과저항 증가율($1/m^2$)
V : 막 단위 면적당 투과된 투과수량(m^3/m^2)
R_1 : 여과 초기 여과저항(1/m)
R_2 : 역세 후 여과저항(1/m)

2.2.2. 응집제 주입농도 선정

적정 응집제 주입농도 선정을 위해 Jar-test와 Flux-test를 실시하였고, 응집제는 I 정수장에서 사용 중인 PACs (16%)를 사용하였으며, 응집제특성은 Table 3에 나타내었다. 응집제 주입농도 0, 10, 15, 20, 30 ppm의 조건에서 각각 실험을 수행하였고. Jar-test는 급속교반 1분(120 rpm), 완속교반 4분(60 rpm), 침전 15분을 거친 후 상등액의 Zeta-potential, DOC, pH, 탁도, UV_{254}를 측정하였다. Flux-test는 급속교반 1분(120 rpm), 완속교

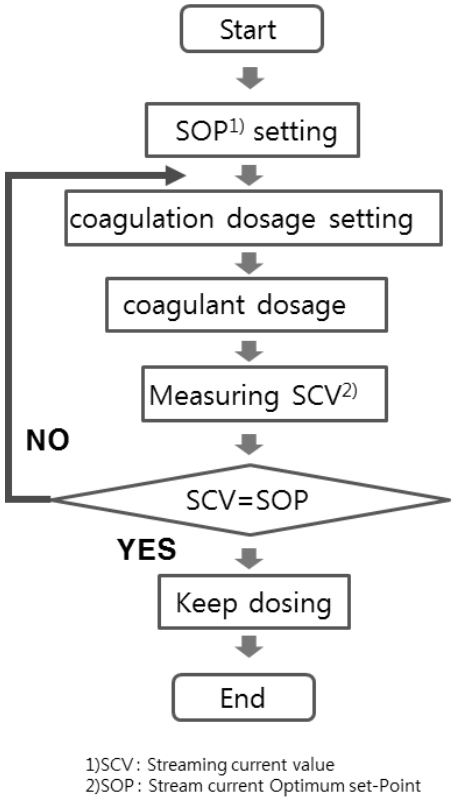

Fig. 4. Schematic diagram of the streaming current control.

Table 4. Variation of Raw Water Characteristics

Item	Turbidity	Fe	Mn	TOC	DOC	UV_{254}	SUVA
Unit	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	cm^{-1}	m^{-1} · L/mg
Mean	6.15	0.0024	0.0037	1.417	1.157	0.019	1.64
Max	911.08	0.0300	0.0200	0.850	0.640	0.016	2.50
Min	0.58	N.D	N.D	2.390	1.850	0.020	1.08

반 4분(60 rpm) 후 침전 공정 없이 직접 여과를 실시하였다. 1 cycle은 7분 여과와 1분 역세의 공정으로 이루어졌으며, 총 5 cycle 동안의 생산유량을 실시간으로 측정하여 여과-역세에 따른 막오염도를 평가하였다.

2.2.3. Pilot-plant 운영

Pilot-plant에 공급되는 원수는 I 정수장의 원수인 섬진강 수계의 복류수를 사용하였다. 무응집 공정으로 구성된 System1은 I 정수장 착수정의 원수를 직접 사용하였고, 혼화/응집 공정으로 구성된 System2는 응집제 PACs (16%)를 사용해 응집을 실시하였다.

응집제 주입은 유동전류(수중의 입자를 둘러싸고 있는 확산층 이온이 유체와 함께 이동하면서 만들어내는 전위) 제어를 통한 자동응집제어를 실시하였다. 유동전류 제어는 Flux-test를 통한 적정 응집제 주입농도 선정 결과를 바탕으로 설정한 유동전류 제어값(SOP)을 유지하도록 응집제 주입량을 자동으로 변경하는 방식으로 운전 개요도는 Fig. 4와 같다.

막여과 공정은 급수-여과-역세-배수의 순으로 반복 운전하였고, 운전기간 동안 별도의 유지세정은 실시하지 않았다. 운영기간 중 탁도, pH, 수온 등의 수질항목은 실시간 측정하였다.

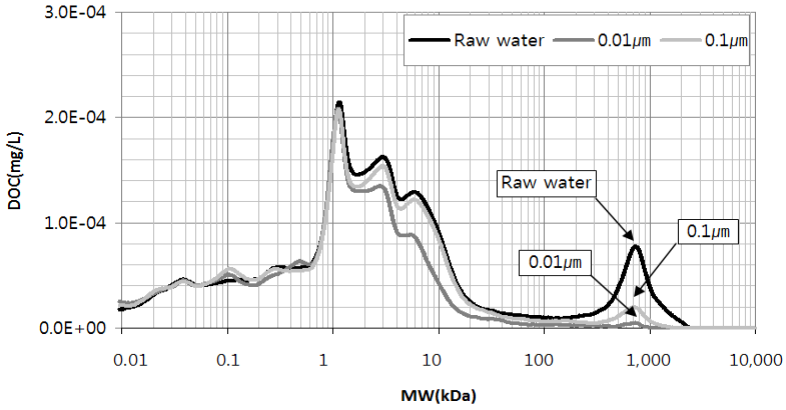

Fig. 5. Distribution of DOC in permeate water by different pore size filtration.

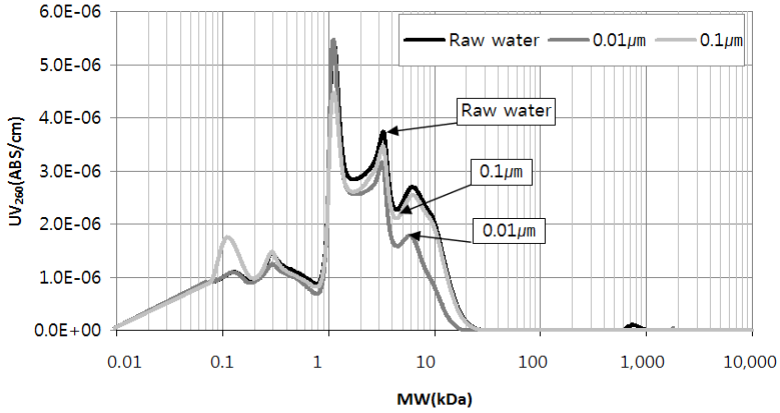

Fig. 6. Distribution of UV_{260} in permeate water by different pore size filtration.

3. 결과 및 고찰

3.1. 여과막 공경 선정

3.1.1. 원수특성

원수의 수질 특성 분석을 위해 무기물과 유기물에 대한 분석을 실시하였다. 복류수의 특성상 무기물의 농도가 높게 나타나는 것이 일반적이나, 원수 수질 분석결과 Fe는 평균 0.0024 mg/L, Mn은 평균 0.0037 mg/L로 낮은 농도를 보였다.

원수 중 Fe과 Mn의 농도가 낮게 나타난 것은 I 정수장의 취수 암거 심도가 낮아 하상 퇴적층 및 토사로부터 무기물 용출이 적게 발생한 원인으로 판단되며, 낮은 농도로 인해 무기물에 의한 막오염 영향은 적을 것으로 예상된다. 원수의 유기물 특성을 평가하기 위한 TOC 분석결과는 1.417 mg/L, DOC는 1.157 mg/L, UV_{254}는 0.019 cm^{-1}로 나타났다. 유기물 중 소수성 유기물 비율의 지표인 SUVA 값은 1.64 m^{-1}·L/mg로 나타나, 낙동강 수계의 SUVA 값이 2.16 m^{-1}·L/mg[13]인 것을 고려할 때 소수성 유기물의 비율이 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. 원수 수질의 상세 분석결과는 Table 4에 나타내었다.

3.1.2. 유기물 분포 특성

원수의 유기물 분자량 분포 측정을 위해 분자량별 DOC와 UV_{260} 농도를 측정하였다. 분석결과 1~10 kDa 범위에서 가장 높은 유기물 농도를 보였으며, 1,000 kDa 주변에서도 상대적으로 많은 양의 유기물이 측정되었다. 대상 원수를 이용한 막 공경에 따른 유기물 제거 특성을 평가한 결과를 Figs. 5와 6에 나타냈으며, 막의 공경별 유기물 제거율은 Fig. 7에 나타내었다.

공경에 따른 유기물 제거율 분석결과 0.1 μm 공경에

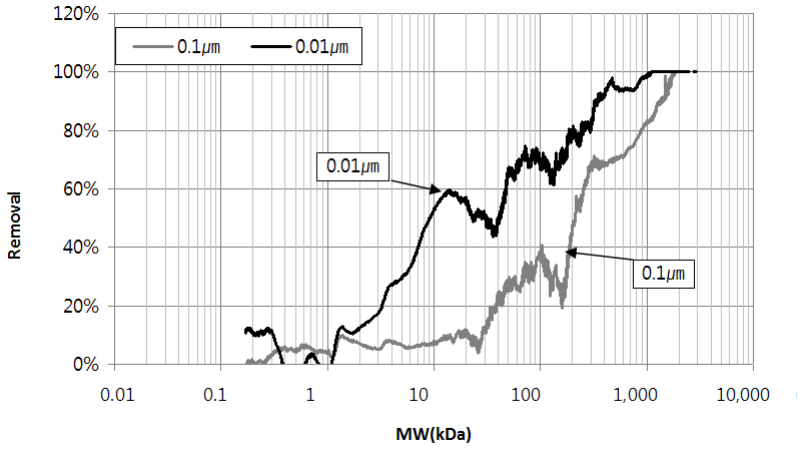

Fig. 7. Removal rate of DOC by different pore size filtration.

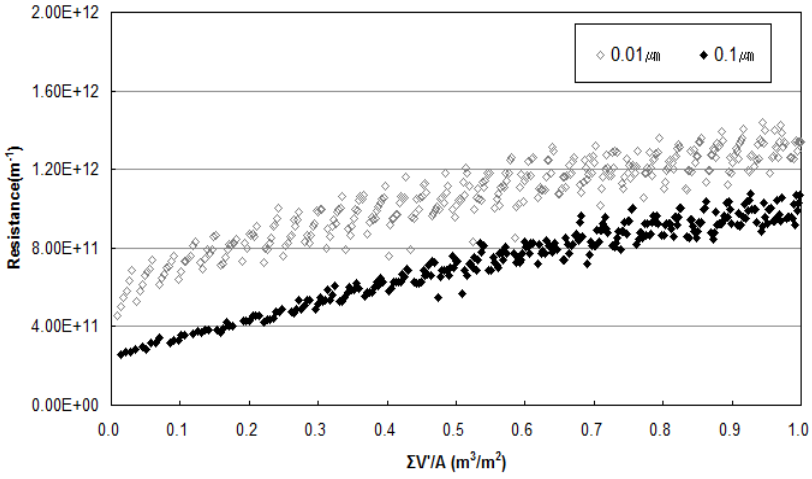

Fig. 8. Variation of the resistance with the volume of water throughput from the membranes.

Table 5. Increasing Rate of Resistance and Backwash Recovery

Pore size	Increasing rate of resistance [× 10^{12}/m^2]		Backwash recovery [%]
	R_r	R_{ir}	R_b
0.01 μm	7.70	0.42	96.74
0.1 μm	3.90	0.44	61.40

비해 0.01 μm 공경의 막이 상대적으로 높은 유기물 제거율을 보였으며, 1,000 kDa 범위의 유기물 제거율은 0.1 μm 막에서 76%인 반면, 0.01 μm 막의 제거율은 93%로 높게 나타났다. 공경 0.01 μm의 분획능이 약 150 kDa, 공경 0.1 μm의 분획능이 약 1,000 kDa임을 고려할 때[14], 0.1 μm 공경 막의 유기물 제거율 또한 높게 나타난 것은 유기물에 의한 막공경 막힘 또는 케익층의 형성에 의한 유기물 배제효과로 추정되며[15], 결론적으로 0.01 μm 공경의 여과막이 비가역적 막오염이 상대적으로 적게 생성될 것으로 예측할 수 있었다.

3.1.3. 여과저항 평가

막공경에 따른 막의 오염도를 평가하기 위해 실시한 Flux-test 실험 결과를 Fig. 8과 Table 5에 나타내었다.

Table 6. Water Quality of Raw Water and Coagulated Water through Jar-test

Dosing coagulant (ppm)	Zeta-potential (mV)	DOC (mg/L)	pH	Turbidity (NTU)	UV254 (cm^{-1})
0	-15.48	4.574	8.09	3.07	0.021
10	-10.3	4.675	8.06	0.26	0.015
15	0.14	4.524	7.93	0.08	0.013
20	5.25	4.462	7.80	0.10	0.013
30	8.09	3.424	7.75	0.10	0.013

Table 7. Results of Flux-test

	Accumulate flux rate (%)	Cycle flux rate (%)	Backwash recovery (%)	Increasing rate of irreversible resistance ($1/m^2$)
Raw water	55	44	58	1.70×10^9
5 ppm	85	80	86	5.70×10^8
10 ppm	84	80	86	2.90×10^8
15 ppm	75	67	77	2.80×10^8
20 ppm	75	67	77	5.70×10^8
30 ppm	47	36	50	2.40×10^9

실험 초기 여과저항은 공경이 작은 0.01 μm 여과막이 높은 경향을 보이나 여과시간의 경과에 따른 비가역적 여과저항 증가율(R_{ir})은 0.1 μm 여과막이 더 높게 나타났다.

Fig. 8에서 나타난 결과와 같이 회당 여과저항 증가율(Rr)은 0.01 μm 여과막의 경우 여과주기 마다 일정한 수준을 보이는데 비해 0.1 μm 여과막은 여과수량이 증가할수록 서서히 커지는 경향을 보였다.

0.01 μm 여과막의 경우 역세회복율은 96.74%, 비가역적 여과저항 증가율은 $0.42 \times 10^{12}/m^2$로 나타났으며, 0.1 μm 여과막은 역세회복율은 61.40%, 비가역적 여과저항 증가율은 $0.44 \times 10^{12}/m^2$로 나타났다(Table 5). 0.01 μm 여과막의 분획능이 약 150 kDa인 점을 고려할 때 1,000 kDa 주변의 유기물은 막표면에 억류 후 배제 되어서 역세회복율(R_b)이 높고 비가역적여과저항 증가율(R_{ir})은 낮게 나타난 것으로 보여진다.

반면, 0.1 μm 여과막은 초기 여과저항증가율(R_r)은 낮게 나타났지만 투과수량 증가와 함께 지속적으로 상승하는 것으로 나타나 막공경 내에 침투한 오염물질이 제거되지 못하고 지속적으로 농축되어 장기적으로 막차압 상승의 원인이 된 것으로 사료된다[16]. 원수에 대한 막오염도 실험결과를 바탕으로 Pilot-plant는 0.01 μm 여과막을 대상으로 운영하였다.

3.2. 응집제 주입농도 선정

3.2.1. Jar-test

Jar-test를 통해 응집농도별(0, 10, 15, 20, 30 ppm)로 Zeta-potential, DOC, pH, 탁도, UV_{254} 등의 분석을 실시해 최적응집제 주입 농도를 측정하였다. 원수의 Zeta-potential은 -15.48 mV, 탁도는 3.07 NTU, UV_{254}는 0.021 cm^{-1}로 나타났으며, 응집제 주입량의 증가에 따라 Zeta-potential은 증가하고, 탁도와 UV_{254}는 감소하였다. 응집제를 15 ppm 주입 시 Zeta- potential 0.14 mV로 최적응집 농도로 나타났으며, 탁도 및 UV_{254} 값 또한 가장 낮은 값을 보였다. 탁도 및 UV_{254}은 15 ppm에서 가장 낮은 값을 보였지만, DOC의 경우 응집제 주입량이 증가할수록 제거율이 높게 나타나 30 ppm 주입 시 가장 높은 제거율을 나타내었다. Jar-test 결과는 Table 6에 나타내었다. Jar-test 분석 결과 15 ppm의 농도 주입 시 탁도 및 UV_{254} 값이 최소값을 보였으며, Zeta-potential 값이 0에 가깝게 나타나 이때 최적응집 효율을 나타내는 것을 알 수 있었다.

3.2.2. Flux-test

최적응집제 주입농도 선정을 위한 다른 방법의 하나로 Flux-test를 실시하였으며, 응집농도별(0, 5, 10, 15,

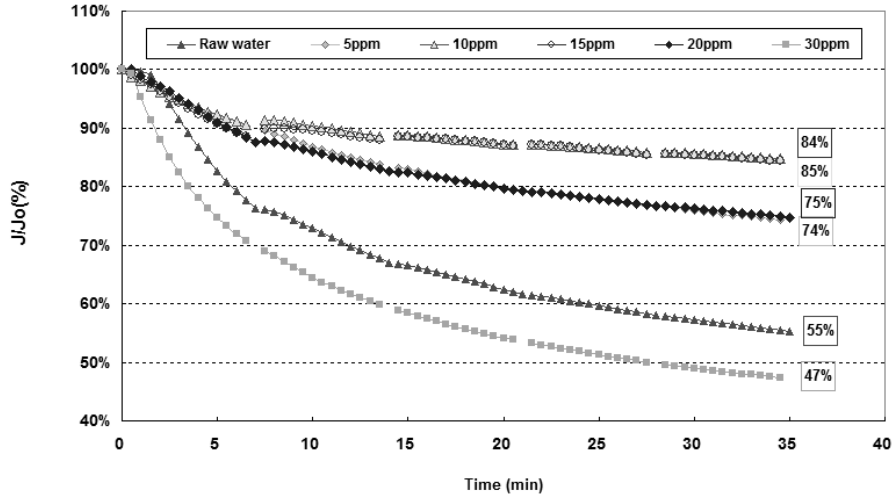

Fig. 9. Time course of membrane permeability as a function of PACs dose (Accumulate).

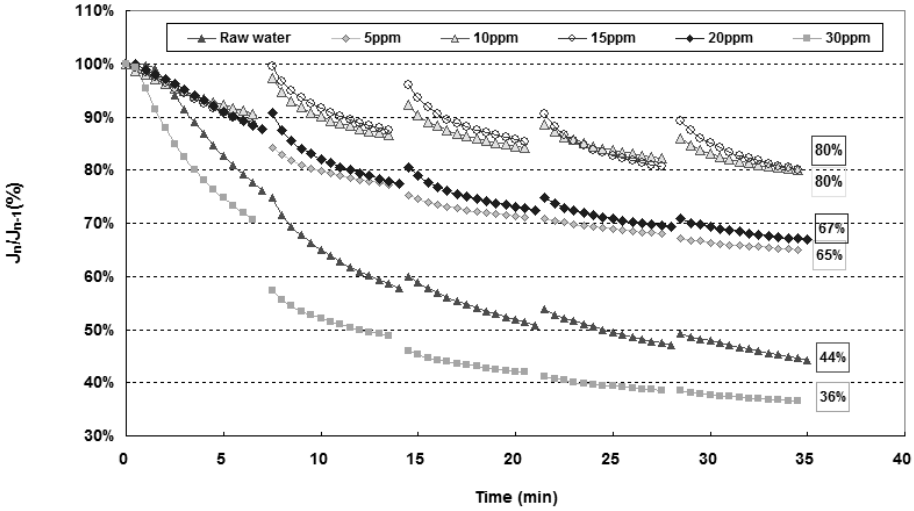

Fig. 10. Time course of membrane permeability as a function of PACs dose (Cycle).

20, 30 ppm) 투과유속비, 역세회복율, 비가역적 여과저항 증가율 등을 측정한 결과를 Table 7에 나타내었고, 응집농도별 누적투과유속비(Accumulate flux rate)와 회당투과유속비(Cycle flux rate)는 Figs. 9와 10에 각각 제시하였다.

회당 투과유속비 측정 결과 10 ppm와 15 ppm 주입 시 최종 80%로 가장 높게 나타났으며, 누적 투과유속비는 10 ppm과 15 ppm에서 최종 85%, 84%로 각각 나타났다. 응집제 주입농도 15 ppm 주입 시 초기에는 높은 투과유속비를 보였으나 여과시간이 경과하면서 낮아지는 경향을 보여 최종 역세회복율은 10 ppm과 15 ppm에서 86%로 같은 값을 보였고, 막의 비가역적 오염 정도를 평가하는 비가역적 여과저항 증가율은 10 ppm와 15 ppm에서 $2.90 \times 10^8/m^2$와 $2.80 \times 10^8/m^2$로 나타나 비슷한 값을 보이는 것으로 나타났다.

Jar-test 실험 결과에서는 응집제 주입농도 15 ppm이 최적주입농도로 나타났으나, Flux-test 결과 10 ppm과 15 ppm 주입 시 투과유속비, 역세회복율, 비가역적 여과저항 증가율에서 유사한 결과 값을 보여, 응집제 약품사용량에 대한 경제성을 고려할 때 10 ppm 주입이 더 경제적인 응집 농도로 판단되었다. 유동전류에 의한 응집제 자동제어를 위해 응집제 10 ppm 주입 시 경우의 유동전류 값은 +20으로 나타났으며, 이 값을 Pilot-plant의 초기 응집제 주입농도 설정 시 유동전류 제어값으로

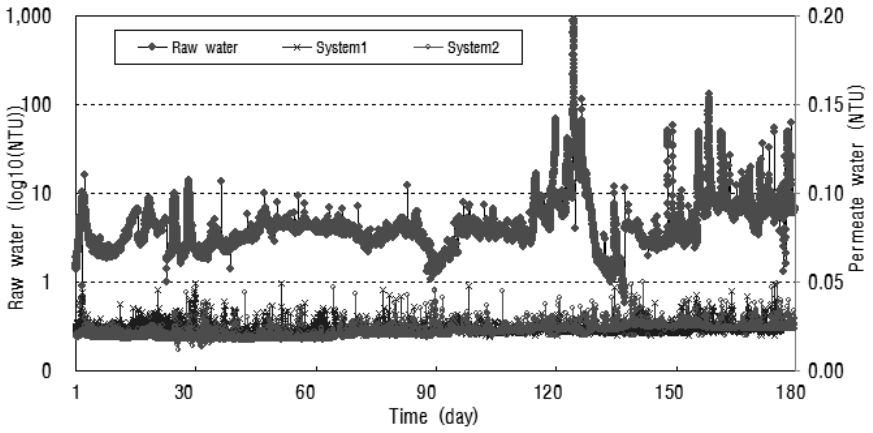

Fig. 11. Variation of turbidity during the pilot-plant operation.

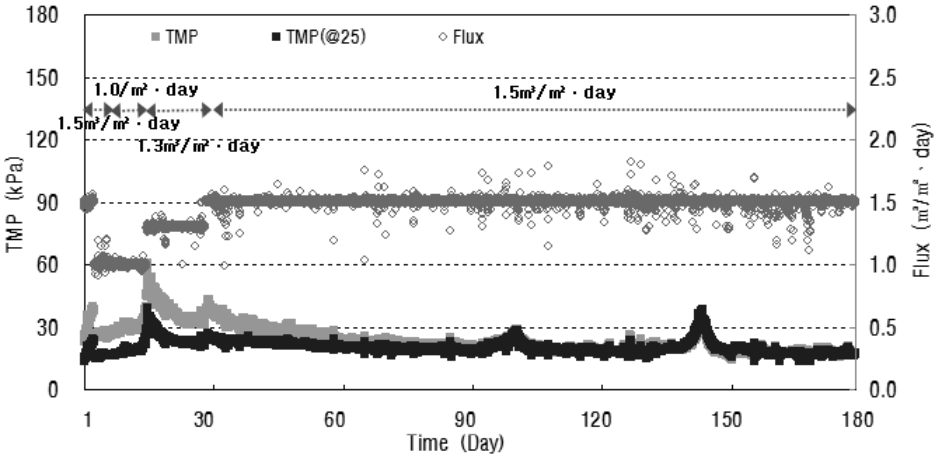

Fig. 12. Variation of TMP during the system1 operation without pre-treatment.

적용하였다.

3.3. 현장적용결과

운전 기간 중 유입 원수의 탁도와 생산수 탁도는 실시간으로 측정하여, 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 유입원수는 최소 0.58 NTU에서 고탁도 시 최대 911 NTU까지 유입되었으며, 900 NTU 이상의 고탁도가 유입된 것은 여름철 급수량의 증가로 인해 취수 암거에서 취수되는 복류수 외에 표층수의 추가적인 취수가 이루어져 집중 강우로 인한 토사 및 탁질의 유입 때문이다. 막여과 처리수의 탁도는 고탁도 유입 여부와 상관없이 상시 0.05 NTU 이하로 안정되게 나타났고, 먹는 물 수질분석(미생물, 소독부산물 제외)도 44개 항목 모두 적합한 것으로 나타났다.

응집제를 주입하지 않은 System1은 운전의 안전성을 고려해 1.0~1.5 $m^3/m^2 \cdot day$의 여과유속으로 운전하였고, 혼화/응집 전처리를 실시한 System2는 최적유동전류값을 이용한 자동응집제어공정을 적용하여 1.0~2.0 $m^3/m^2 \cdot day$의 여과유속에서 운전하였다. 6개월간의 여과유속과 차압 및 보정차압(수온 25°C)의 변화를 Figs. 12, 13에 나타내었다. 차압은 1차(공급)측과 2차(생산)측의 압력차이를 말하며, 수온에 따른 물의 점성변화로 인한 차압의 변화는 온도 보정을 통해 수온 25°C의 보정차압으로 나타내었다.

Pilot-plant의 운전 막간차압의 분석결과 System1은 최소 13.2 kPa에서 최대 38.8 kPa로 안정적인 차압을 유지하였고, System2는 최소 13.8 kPa에서 최대 70.1 kPa로 나타났다. 2계열 모두 고탁도(911 NTU) 유입 시

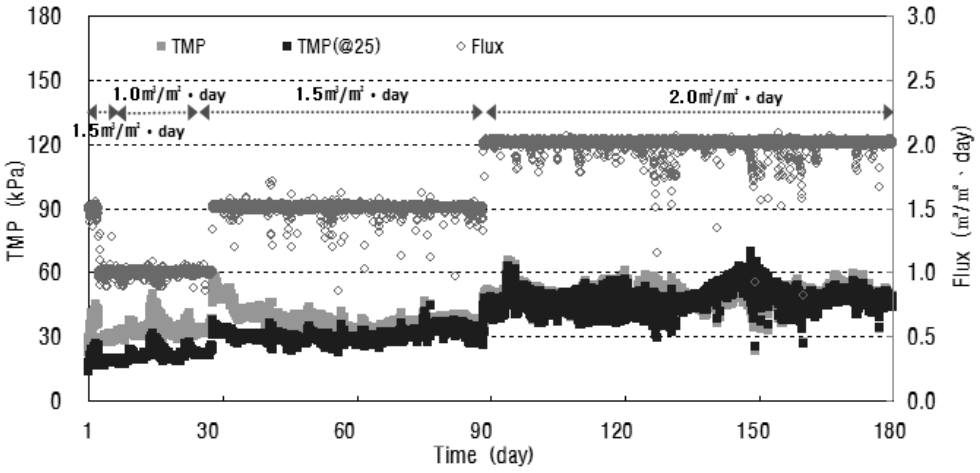

Fig. 13. Variation of TMP during the system1 operation with pre-treatment.

일시적인 차압 상승은 있었으나, 원수의 탁도가 감소됨에 따라 막간차압도 회복되었다. System2는 여과유속의 증가(1.5 → 2.0 $m^3/m^2 \cdot day$) 시 막간차압의 일시적으로 상승 후 일정한 차압변화를 보였으나, 여과주기별 차압 변화폭은 기존 1.5 $m^3/m^2 \cdot day$에 비해 넓어진 것을 확인 할 수 있었다.

6개월의 운전 기간 동안 2계열 모두 안정적인 차압을 나타내, 기존의 복류수를 이용한 막여과 공정에서 낮은 여과유속(0.9~1.0 $m^3/m^2 \cdot day$)에서도 3개월~6개월의 운전 후 약품세척이 이루어진 사례와 비교할 때[17], 높은 여과유속(1.0~2.0 $m^3/m^2 \cdot day$)에서도 약품세척 없이 장기간 운전이 가능하였다. 약품세척은 막여과 공정에서 주요한 비용 중 하나인 점을 고려할 때[18], 향후 실증 플랜트 설계 시 6개월 이상의 약품세척 주기 설정으로 인한 약품사용량 및 폐액처리비용 절감 효과가 기대되었다.

4. 결 론

본 연구는 막여과 시설의 운영에 앞서 원수의 수질특성에 적합한 여과막 선정과 적정응집제 주입농도 선정방법 및 Pilot-plant 운영을 통한 현장 적용성을 평가하기 위해 수행된 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) I 정수장에서 사용되는 복류수의 수질분석 결과 무기물은 낮게 측정되었고, 유기물 농도 분석결과 소수성유기물 농도는 낮으나 분획분자량 1,000 kDa 부근의 유기물 농도가 높게 나타났다.

2) 원수 특성에 적합한 여과막 공경 선정을 위해 유기물질 제거효율 및 Mini-Module을 이용한 Flux-test 실험결과 0.1 μm 공경의 여과막에 비해 0.01 μm 공경의 여과막이 막오염도가 낮게 나타났으며, 이는 원수 중 막공경 0.1 μm (분획분자량 1,000 kDa)과 유사한 크기의 유기물 농도가 높아 1,000 kDa 부근의 유기물 배제율이 높은 0.01 μm (분획분자량 150 kDa) 여과막에 비해 상대적으로 막오염이 높은 것으로 판단되었다.

3) Jar-test와 Flux-test를 이용한 적정응집제 주입농도 선정 실험결과 Jar-test에서는 10 ppm, Flux-test에서는 15 ppm이 최적 주입농도로 나타났다.

4) I 정수장 원수를 이용한 막여과 Pilot Plant 운영결과 응집제를 주입하지 않은 여과유속 1.5 $m^3/m^2 \cdot day$ 운전조건과 혼화 · 응집을 실시한 여과유속 2.0 $m^3/m^2 \cdot day$의 운전조건 모두 막차압은 안정되게 나타나, 여과유속 조건에 따라 응집전처리 공정에 대한 선택 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. H. Huang, K. Schwab, and J. G. Jacangelo, “Pretreatment for low pressure membrane in water treatment: a review”, *Environ. Sci. Technol*. **43**, 3011 (2009).
2. K. H. Lee, Y. J. Huh, D. Y. Kim, S. W. Han, D. J. Hwang, and B. J. Lim, “Evaluation for water

quality and pollutant load of sumjin river watershed", *Proceedings of 2010 Co-Conference of Korea Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, 629 (2010).
3. S. S. Im, K. C. Choi, K. H. Lee, Y. H. Lee, and J. Y. Lee, "A study of spatial distribution of organic matters in sumjin river", *Proceedings of 2012 Spring Co-Conference of Korea Society on Water Environment and Korean Society of water and wastewater*, 714 (2012).
4. R. Bian, Y. Watanabe, N. Tambo, and G. Ozawa, "Removal of humic substances by UF and NF membrane systems", *Wat. Sci. Tech*., **40**, 122, (1999).
5. A. G. Fane and C. J. D. Fell, "A review of fouling and fouling control in ultrafiltraion", *Desalination*, **62**, 117 (1987).
6. L. F. Fu and B. A. Dempsey, "Modeling the effect of particle size and change on the structure of filter cake in ultrafiltration", *J. Membr. Sci*., **149**, 221 (1998).
7. K. L. Jones and C. R O'Melia, "Ultrafilration of protein and humic substances; Effect of solution chemistry on fouling and flux decline", *J. Membr. Sci.*, **193**, 163 (2001).
8. Y. Wei and L. Z. Andrew, "Humic acid Fouling During Microfiltration", *J. Membr. Sci.*, **157**, 1 (1999).
9. J. G. Jacangelo, E. M. Aieta, K. E. Carns, E. W. Cummings, and J. Mallevialle, "Assessing hollow-filber ultrafiltration for particulate removal", *J. AWWA*, **87**, 68 (1995).
10. AWWA Membrane Technology Reasearch Committee, 1998 Committee Report; Membrane Process. AWWA., **90(6)**, 91 (1998).
11. J. H. Chung, K. H. Choo, and H. S. Park, "Low Pressure Hybrid Membrane Processes for Drinking Water Treatment", *Membrane Journal*, **17(3)**, 167 (2007).
12. H. N. Jang, "Advanced water treatment of river water by coagulation-membrane filtration process", Ph. D. Dissertation, Univ. of Kyunghee, Seoul, Korea (2009).
13. C. W. Jung and H. J. Son, "The relationship between disinfection by-product formation and characteristics of natural organic matter in the raw water for drinking water", *Journal of Korean Society of Envirnmental Engineers*, **26**, 457 (2004).
14. Ksrry J. Howe and Mark M. Clark, "Fouling of microfiltration and ultrafiltration membranes by natural waters", *Environ. Sci. Technol*., **36**, 3571 (2002).
15. A. l. Schafer, A. G. Fane, and T. D. Waite, "Fouling effect on rejection in the membrane filtration of natural waters", *Desalination*, **131**, 215 (2000).
16. S. Minegishi, N. Y. Jang, Y. Watanabe, S. Hirata, and G. Ozawa, "Fouling mechanism of hollow filber UF membrane with pretreatment by Coagulation/ Sedimentation Process, Water Science and Technology", *Water Supply*, **1(4)**, 49, (2001).
17. C. H Kim, J. L. Lim, H. S. Kim, and S. H. Kim, "Long term operation of ultrafiltration process using river-bed water", *Proceedings of 2004 Co-Conference of Korea Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, 601 (2004).
18. J. Mallevaille, P. E. Odendaal, and M. R. Wiesner, Water Treatment Membrane Processes, McGraw-Hill (1996).