
시흥정수장 막여과 시설 시범운영

김 한 승

(한국수자원공사 수자원연구원 국제상하수도연구소)

시흥정수장 막여과시설 시범운영

A Demonstrative Operation of A Membrane Filtration System in Siheung Water Treatment Plant

김한승, 김충환, 김학철, 윤재경, 안효원

(Hanseung Kim, Chunghwan Kim, Hakchul Kim, Jaekyung Yoon, Hyowon Ahn)

한국수자원공사 수자원연구원 국제상하수도연구소

International Water & Wastewater Research Center, KIWE, KOWACO

462-1 Jeonmin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-730, Korea

Abstract

A demonstrative operation of a membrane system with its capacity of 3,600m³/d was carried out using reservoir water as raw water for the application of membrane filtration system to drinking water treatment. The operation was undertaken at a constant flux of 0.9 m³/m²/d for three months. Backwashing with NaClO of 3 ppm was allowed for 30 seconds every 20 minutes of filtration. Physical cleaning was introduced after 69 times of filtration/backwashing cycle with air-scrubbing and backwashing for 1 minute, and flushing for 2 minutes. In this study, water treatment performance was investigated compared with the existing rapid sand filtration process. The membrane system was operated with no significant problems during the test period. Higher water quality was obtained in the membrane filtration than in the rapid sand filtration in terms of particulate matters such as turbidity and microbes. Although the finished water of the membrane filtration contained slightly higher concentration in dissolved matters than that of the conventional one, it met the drinking water standard. The demonstrative operation showed that membrane filtration has a reliability in drinking water treatment. Researches should be needed on cost analysis through long-term operation and optimization of operation condition for further application.

key words: Drinking water, flux, membrane, ultrafiltration

1. 서론

정수처리에 있어서 막여과기술은 운전의 자동화, 유지관리의 용이성, 설치공간 및 에너지의 효율성, 안정된 처리수질 등을 장점으로, 유지관리 및 경영능력에 문제점을 안고 있는 소규모 시설을 비롯하여, 노후화에 따른 시설의 갱신 및 신규설비에 급속도로 보급되고 있는 실정이다. 지난 20여년간 처리규모는 꾸준히 증가하여 최근에는 수십만 m³/일 규모의 시설이 가동되고 있다 (Ventresque *et al.*, 2000). 국내에

서도 막여과공정에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있는 가운데, 실제 정수시설로서의 도입이 신중히 검토되고 있다. 정수처리에 주로 사용되고 있는 막은 정밀여과(MF)와 한외여과(UF)로 입자성물질의 탁월한 제거를 가장 큰 장점으로 들 수 있다. 특히 최근 문제가 되고 있는 크립토포리디움이나 지아디아 등의 병원성원충과 바이러스 등을 거의 완벽하게 제거할 수 있어, 이러한 병원성 미생물에 대한 하나의 방편으로서 막여과에 의해 정수의 미생물학적 안전성을 확보할 수 있다 (Drozd and Schwartzbrod, 1997; Jacangelo *et al.*, 1995; Kogela *et al.*, 1991; Madaeni *et al.*, 1999).

본 연구는 시흥정수장에 설치되어 있는 3,600m³/d 규모의 막여과시설의 시범운영을 통하여, 막여과공정의 최적운영기술 확립 및 일반공정과 연계한 운용기술을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 막여과시설은 지난 2004년 1월에 완공되어 약 2개월간의 시운전을 마치고, 4월부터 6월까지 3개월간 기타여과방식 인증신청을 위한 운전을 실시하였다. 본고에서는 3개월간의 운전결과 중심으로 막여과에 의한 정수수질을 기존의 급속모래여과에 의한 수질과 비교하여 처리성능을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 시흥정수장 막여과시설의 개요

본 막여과시설은 한국수자원공사의 시흥정수장 부지내에 설치되어 있다. 막여과시설의 처리용량은 총 3,600m³/일로 각 계열당 1,200m³/d 용량의 3계열로 이루어져 있다. 공급시설은 기존정수장의 원수와 침전수를 공급할 수 있도록 2 개의 공급수 라인으로 구성되어 있으며, 원수공급라인 중의 하나에는 In-Line Mixer를 설치하여 혼합/응집수가 공급되도록 하여, 모두 3종류의 공급수 (원수, 침전수, 혼합/응집수)를 사용할 수 있다.

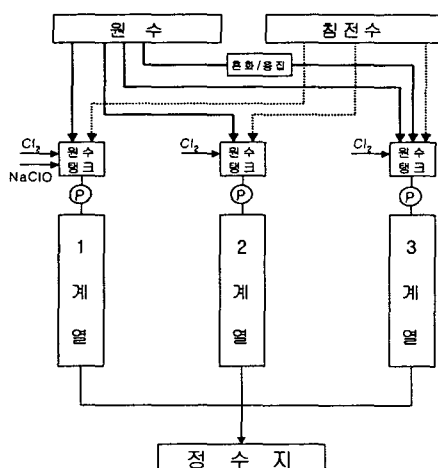


그림 1. 계열별 원수공급 흐름도

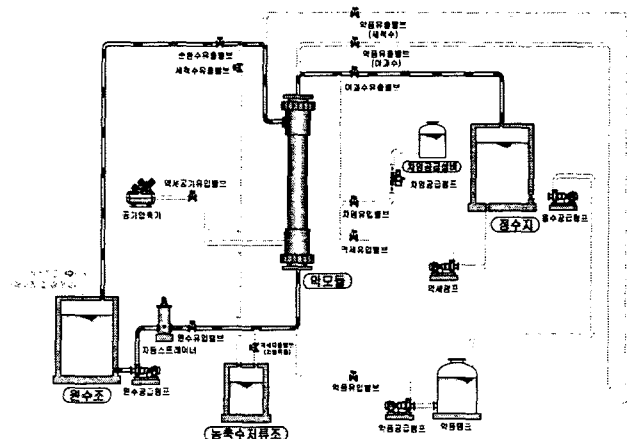


그림 2. 막여과시설의 흐름도

사용된 막은 분획분자량 80,000 Da의 중공사 한외여과막으로 중공사의 내경/외경은 0.8/1.4 mm이며, PAN(Polyacrylonitrile)재질로 되어 있으며, 모듈당 막면적은 41m²로 계열당 36모듈 (총 108개 모듈)이 사용되었다.

염소주입으로는 Cl₂ 및 NaClO의 주입이 가능하며, 운전방식은 기존정수장의 중앙통제실에서 막여과시설의 원격 감시/제어가 가능한 자동운전으로 하였고, 운전자료는 탁도, 수온, 압력, 투과수량, 운전시간 등이 자동 저장되며, 운전상에 문제가 발생하였을 때는 경보가 나도록 하였다.

현재는 시범운전을 하고 있어 정수공급은 하고 있지 않으나, 추후 목감동지역의 생활용수로 공급될 예정이다.

표 1. 막여과시설의 개요

구 분		내 용	비 고
정수시설 주소		경기도 안산시 선부2동 32번지 시흥정수장내	행정구역
급수 지역		시흥시 목감동 지역	
부지면적		전체면적 : 2006.34m ² 막여과 설비동 : 456.0m ² (연면적 : 682.25m ²) 조경면적 : 832.79m ² 주차 및 기타 : 717.55m ²	막여과 정수시설 부지
원수 조정조		W2.0m×L3.2m×H4.2m×3지	시설용량 120%
정수지		W5.0m×L8.0m×H4.4m×2지	
농축수 저류조		W0.9m×L1.0m×H4.2m×2지	약품세정용 1지 여과농축수 1지
모듈 사양	규격	ø0.14m×L2.227m	-
	유효막면적	41.0m ² /Module	
	모듈수	108 Module (36Modules/계열 × 3계열)	
	계열	3 계열	
	공급 최대 압력	350 kPa	
막사양	형태	Hollow Fiber(중공사)	-
	분획분자량	80,000 Daltons	
	재질	Polyacrylonitrile(PAN)	
	중공사 내경/외경	0.8/1.4(mm)	

2.2 운전조건

운전기간은 2004년 4월 1일부터 6월 30일까지 3개월간이었다. 막공급수로는 세 계열 모두 원수를 그대로 사용하였다. 운전조건은 0.9 m³/m²/일의 정유량운전으로, 여과 20분마다 역세 30초를 하며, 여과/역세를 69회 반복한 후, 물리세정 (공기세정과 역세를 1분, 플리싱 2분)을 실시하였다.

표 2 운전조건

시설용량	3,600 m ³ /일 (1,200 m ³ /일 × 3계열)	
공정흐름	원수→원수조→여과막→정수지→송수	막여과 공정
물리적세정	(여과+역세)×69회+(공기/역세+플러싱)	1일 주기
화학세정	1st step : 1% HNO ₃ + 1% Oxalic acid 2nd step : 1000ppm Cl(NaOCl) + 0.4% NaOH 3rd step : pH2 HNO ₃ 1st step(2시간) → Rinse(10분) → 2nd step(2시간) → Rinse(10분) → 3rd step(1시간) → Rinse(30분)	1회/6개월
운전방법	Cross-Flow (여과 80%, 순환 20%)	
여과형태	정유량여과 (0.9 m ³ /m ² /일)	펌프회전수제어

3. 운전결과

3.1 수온 및 pH 변화

수온 및 pH의 변화를 그림3과 4에 나타내었다. 운전을 개시한 시점인 4월1일의 원수 수온은 18.0°C였으며, 이후 0.15°C/일의 추세로 직선적인 수온의 증가가 보였다. 정수의 수온은 막여과수가 원수에 비해 약 1.9°C, 기존공정수가 1.2°C 낮아, 정수과정 중에 수온이 약간 저하되는 것으로 사료된다.

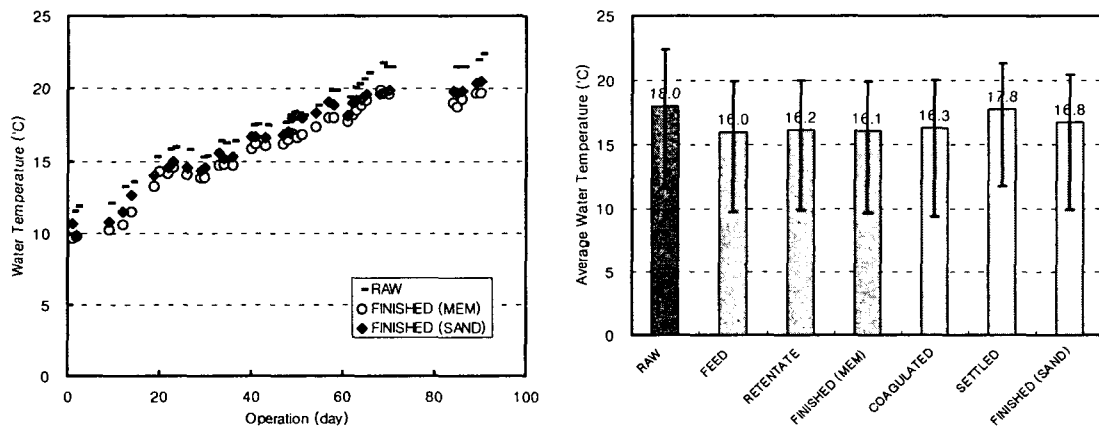


그림 3. 막공정과 기존공정에 있어서 원수 및 각 공정수의 수온

원수의 pH는 6.90에서 8.42 사이에서 변동하였으며, 운전초기 8 정도에서 점차 감소하여 후기에는 7정도에 이르는 양상을 보였다. 이러한 pH의 저하현상은 4월의 강우가 적은 상태에서 조류의 농도가 상대적으로 높아 조류의 대사활동에 의해 pH가 높게 나타나다가, 5월 및 6월에 강우량이 증가하면서 조류농도가 낮아지므로 pH가 중성부근으로 낮아지는 것으로 판단된다. 조류의 발생과 pH의 상승은 막오염을 야기시키거나 응집제의 첨가량을 증가시켜 운전효율을 떨어뜨리는 것으로

보고되고 있다(小森 *et al.*, 2004; 小嶋 *et al.*, 2004). 원수의 평균 pH는 7.56이었다.

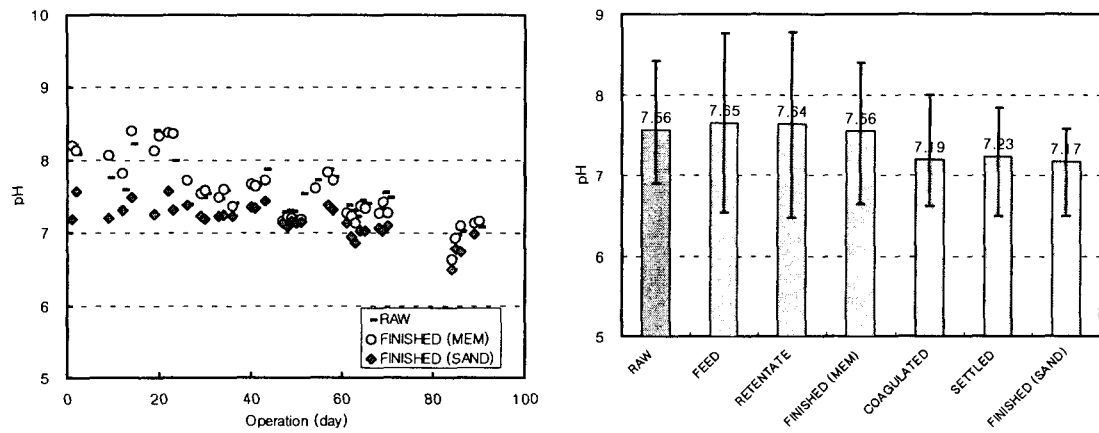


그림 4. 막공정과 기존공정에 있어서 원수 및 각 공정수의 pH

막여과수의 pH는 원수의 pH와 유사한 거동을 보이고 있으며, 원수와 거의 차이가 없었다. 반면 기존정수의 경우 원수의 평균값보다 약 0.4 정도 낮은 값을 보였는데, 이는 응집공정과정에서 응집제와의 반응으로 pH의 저하가 나타난 것으로 사료된다.

3.2 탁도 변화

탁도의 변화를 그림 5에 나타내었다. 원수의 탁도는 최저 3.920 NTU, 최고 129.0 NTU사이에서 변동을 보였으며, 평균탁도는 15.90 NTU이었다.

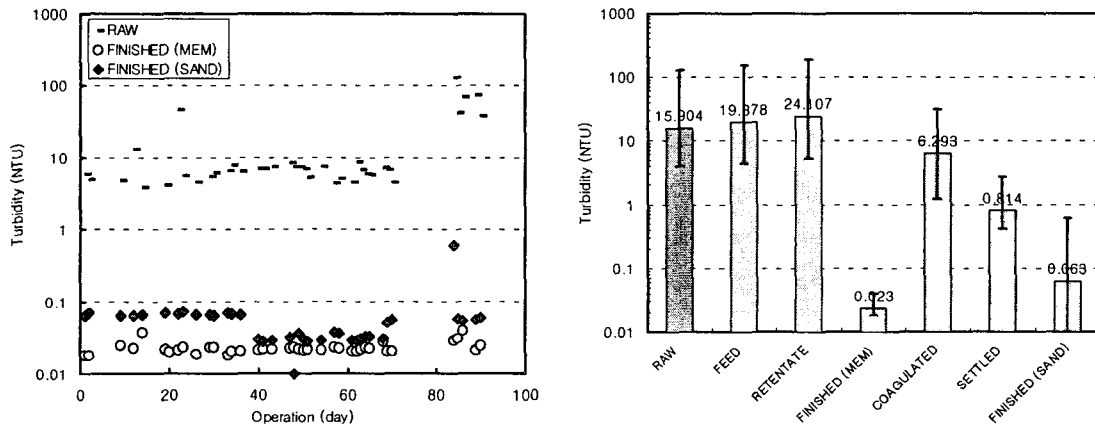


그림 5. 막공정과 기존공정에 있어서 원수 및 각 공정수의 탁도

한편 막여과공정에서는 공급수의 탁도가 19.38 NTU, 농축수의 탁도가 24.11 NTU

로 막에 의한 농축현상과 농축수 순환에 의한 공급수 탁도의 상승이 일어남을 알 수 있었다. 최종처리수의 평균탁도는 0.023 NTU (최대 0.040 NTU)로 수질기준인 0.5 NTU의 1/10 이하의 수준으로 원수탁도의 변동과 관계없이 안정된 값을 나타내었다. 한편, 기존공정의 경우 응집, 침전, 여과의 순으로 정수공정이 진행됨에 따라 평균 탁도는 6.293, 0.814, 0.063 NTU로 낮아지고 있음을 알 수 있었다.

기존공정의 경우 처리수의 평균탁도는 0.063 NTU로 수질기준을 충분히 만족하고 있었으나, 일시적으로 원수탁도가 급격히 높아지는 경우 처리수의 탁도도 상승하는 현상을 보였다. 전반적으로는 0.1 NTU 이하의 값을 유지하고 있었으나 막여과수보다는 탁도가 약간 높음을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 막여과공정은 원수탁도의 변동에 무관하게 높은 탁도 제거율과 안정된 처리수질을 얻을 수 있음을 시사하고 있다.

3.3 색도 변화

원수의 평균 색도는 3.9도(1.3~9.1)이며, 막여과수는 1.0도, 기존정수는 0.2도로 나타나, 기존공정에 의한 색도 제거효율이 막여과보다 더 높았다 (그림 6).

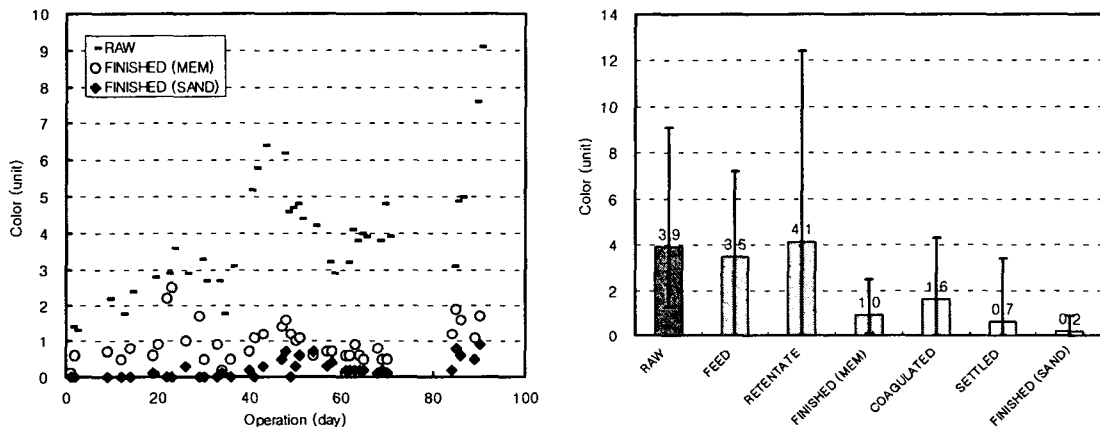


그림 6. 막공정과 기존공정에 있어서 원수 및 각 공정수의 색도

막여과공정의 경우 여과수의 평균색도가 1.9도로 나타나 막에 의한 색도의 제거는 약 50%정도로 원수중 색도를 이루고 있는 성분의 50%는 막에 의해 제거되며, 나머지 50%는 막을 통과하는 물질로 이루어진 것으로 사료된다. 한편 기존공정의 경우 색도는 응집과 침전에 의해 82%정도 제거되며 모래여과를 거치면서 추가적으로 12%가 제거되어 전체적으로는 94%의 제거율을 나타내었다. 이는 원수중 색도를 이루고 있는 물질이 응집제 주입에 의해 플록을 형성하여 침전하거나 여과지에서 제거되기 쉬운 형태로 바뀌었음을 시사하고 있다. 따라서, 막여과공정에서도 원수색도가 높을 경우 전처리로서 응집제의 주입을 고려해 볼 수 있을 것으로 사료된다.

3.4 UV₂₅₄ 변화

용존성 유기물의 지표로서 자외선흡광도 (UV₂₅₄, 1/cm)를 측정하였다 (그림 7). 원수의 평균 UV₂₅₄는 0.0749 (0.0278 ~ 0.4120)로 막여과정수의 경우 0.0248, 기존공정의 경우 0.0150으로 각각의 제거율은 66%와 80%를 보여 기존공정에 의한 제거율이 약간 높았다. 이는 색도와 비슷한 양상을 나타내고 있어, 응집에 의한 제거가 효율적임을 시사하고 있다.

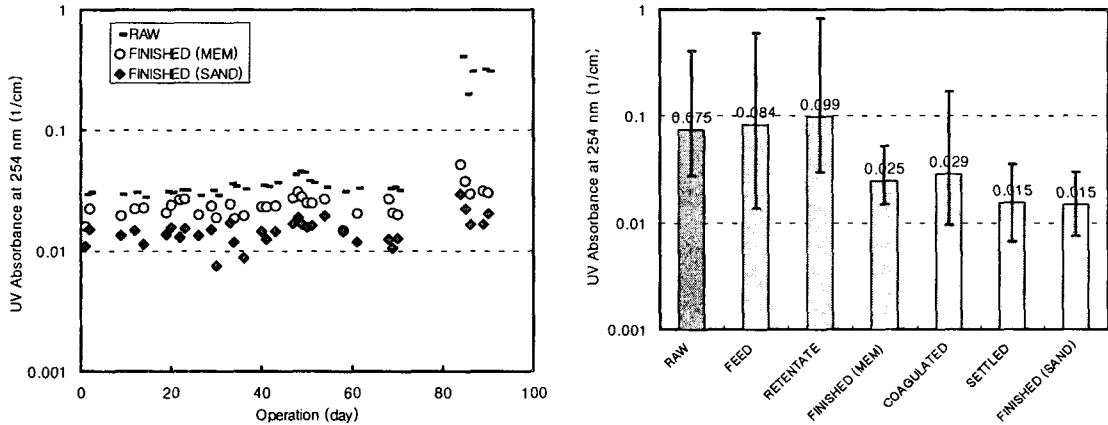


그림 7. 막공정과 기존공정에 있어서 원수 및 각 공정수의 UV₂₅₄

3.5 일반세균 및 과망간산칼륨 소비량 변화

주간측정항목으로 일반세균과 과망간산칼륨소비량을 측정하였다. 결과를 그림 8에 나타내었다.

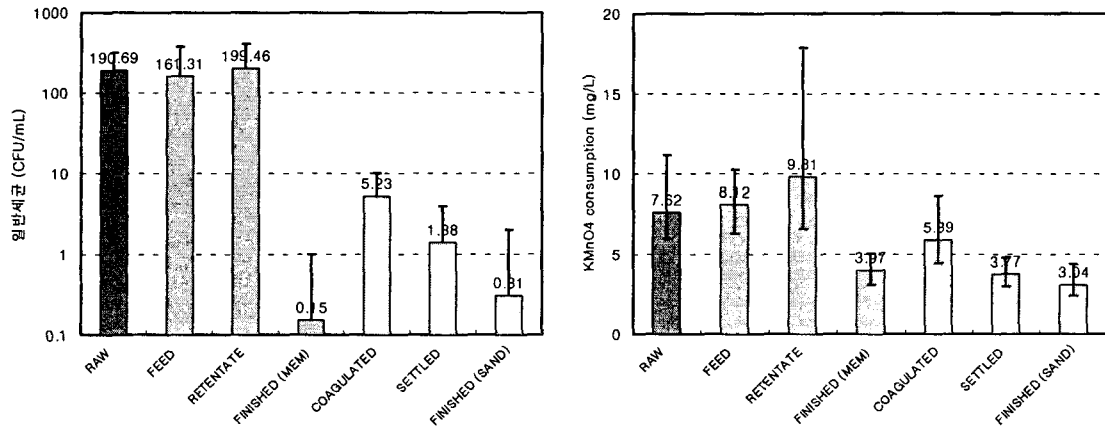


그림 8. 막공정과 기존공정에 있어서 일반세균 및 과망간산칼륨 소비량

일반세균의 경우 막여과공정이 99.9%, 기존공정이 99.8%의 제거율을 보였다. 기존공정의 경우 혼화에 의해서 90%, 침전에 의해서 90%, 여과에 의해서 90% 정도 제거되는 것으로 나타나 각 공정에 대한 제거 기여도가 동등함을 알 수 있었다. 제거율면에서 보면 막여과공정이 기존공정과 동등이상의 제거효과가 있음을 나타내었다. 한편 과망간산칼륨소비량의 경우 막여과공정에서는 48%, 기존공정에서는 60%가 제거되어 기존공정에 의한 제거율이 높았으며, 혼화, 응집, 침전, 여과에 걸쳐 단계적으로 제거율이 높아지는 것을 알 수 있었다. 따라서 과망간산칼륨소비량도 색도나 UV₂₅₄와 마찬가지로 응집제 주입에 의해 효과적으로 제어될 수 있음을 시사하고 있다.

3.6 수질평가

수질평가 지표로서 일일측정항목 및 주간측정항목에 대한 원수, 막여과정수, 기존공정정수의 수질을 표 3에 나타내었다. 각 항목의 정수수질을 비교해 보면 색도, UV₂₅₄, 과망간산칼륨 소비량과 같은 용존성 물질은 기존공정의 제거율이 약간 우수하며, 탁도나 일반세균과 같은 입자성 물질은 막여과공정의 제거율이 우수함을 나타내었다. 또한 표 4에 나타난 바와 같이 수돗물수질 55개항목을 측정된 결과, 검출된 항목 17개 모두 수질기준을 만족하여 막여과공정에 의한 정수는 음용수로서 적합한 것으로 나타났다.

표 3. 막여과수와 기존정수의 수질비교

		원수	막여과정수	기존공정정수
일일 측정 항목	수온 (°C)	18.0 (11.6~22.4)	16.1 (9.7~19.9)	16.8 (9.9~20.5)
	pH	7.56 (6.90~8.42)	7.56 (6.64~8.40)	7.17 (6.50~7.58)
	전기전도도 (uS/cm)	150 (85~208)	152 (89~208)	161 (118~227)
	탁도 (NTU)	15.90	0.023	0.063
	색도 (unit)	3.9	1.0	0.23
	알칼리도 (mg/L)	46.0	45.4	41.8
	경도 (mg/L)	63.2	60.6	61.4
	UV ₂₅₄ (1/cm)	0.0749	0.0248	0.0150
주간 측정 항목	일반세균 (cfu/mL)	191	0.154	0.308
	총대장균군 (cfu/mL)	-	-	-
	NH ₄ -N (mg/L)	0.059	0	0
	KMnO ₄ 소비량 (mg/L)	7.39	3.97	3.04
	SS (mg/L)	4.66	0	0
	증발잔류물 (mg/L)	121	103	118

표 4. 막여과수에 대한 55개 수질항목 검사결과

수질검사결과 (막여과)

검사항목	기준	결과	검사항목	기준	결과	
1.일반세균	100 CFU/ml	0	28.디클로로아세트니트릴	0.09 mg/l	0.0032	적 적
2.총대장균군	음성/100ml	음성	29.할로아세틱에시드	0.1 mg/l	0.0523	
3.대장균/분원성대장균	음성/100ml	음성	30.디클로로메탄	0.02 mg/l	불검출	
4.납	0.05 mg/l	불검출	31.벤젠	0.01 mg/l	불검출	
5.볼소	1.5 mg/l	불검출	32.톨루엔	0.7 mg/l	불검출	
6.비소	0.05 mg/l	불검출	33.에틸벤젠	0.3 mg/l	불검출	
7.세레늄	0.01 mg/l	불검출	34.크실렌	0.5 mg/l	불검출	
8.수은	0.001 mg/l	불검출	35.1,1디클로로에틸렌	0.03 mg/l	불검출	
9.시안	0.01 mg/l	불검출	36.1,2디브로모-3-클로로프로판	0.003 mg/l	불검출	
10.6가크롬	0.05 mg/l	불검출	37.과망간산칼륨소비량	10 mg/l	0.8	
11.암모니아성 질소	0.5 mg/l	불검출	38.경도	300 mg/l	80	
12.질산성질소	10 mg/l	2.3	39.냄새	무취	적	
13.카드뮴	0.005 mg/l	불검출	40.맛	무미	적	
14.페놀	0.005 mg/l	불검출	41.동	1 mg/l	0.016	
15.총트리할로메탄	0.1 mg/l	0.047	42.색도	5 도	불검출	
16.카바릴	0.07 mg/l	불검출	43.세제	0.5 mg/l	불검출	
17.다이아지논	0.02 mg/l	불검출	44.수소이온농도	5.8 - 8.5	7.7	
18.파라티온	0.06 mg/l	불검출	45.아연	1 mg/l	0.076	
19. 페니트로티온	0.04 mg/l	불검출	46.염소이온	250 mg/l	10	
20.사염화탄소	0.002 mg/l	불검출	47.중발잔유물	500 mg/l	89	
21.1,1,1트리클로로에탄	0.1 mg/l	불검출	48.철	0.3 mg/l	불검출	
22.테트라클로로에틸렌	0.01 mg/l	불검출	49.망간	0.3 mg/l	불검출	
23.트리클로로에틸렌	0.03 mg/l	불검출	50.탁도	0.5 NTU	0.05	
24.클로로포름	0.08 mg/l	0.0380	51.황산이온	200 mg/l	12	
25. 트리클로로아세트니트릴	0.004 mg/l	불검출	52.알루미늄	0.2 mg/l	0.10	
26. 클로랄하이드레이트	0.03 mg/l	0.0073	53. 붕소	0.3 mg/l	불검출	
27. 디브로모아세트니트릴	0.1 mg/l	0.0017				
판 정	기준에 적합					

4. 결론

이상의 결과를 종합해보면, 막여과공정에 의한 정수수질은 음용수로서 적합하다는 것이 확인되었다. 특히 탁도와 일반세균의 제거율이 기존공정에 비해 뛰어나다는 사실은 병원성 미생물에 대한 확실한 방벽으로서의 역할이 기대됨을 시사한다. 이는 막여과 단일공정 만으로도 기존의 응집/침전/여과공정을 대체할 수 있음이 확인한 것이라 하겠다. 다만, 색도 및 UV₂₅₄와 같은 용존성 물질에 대한 제거율이 기존공정에 비해 약간 떨어지고 있으나, 이는 정밀여과나 한외여과가 갖고 있는 한계로서 적절한 전처리 및 후처리의 도입으로 극복될 수 있으리라고 판단된다.

금후 다양한 원수종류 및 운전조건 하에서 운전성과 수질을 평가하여 막여과공정 운전의 안정성을 검증할 예정이다. 또한 운영기술의 개발 및 운전조건 최적화에 대한 연구와 장기운전을 통한 경제성 평가 및 유지관리 가이드라인 수립도 병행하여 수행해 나아갈 것이다.

5. 참고문헌

- Drozd C. and Schwartzbrod J. (1997). Removal of *Cryptosporidium* from river water by crossflow microfiltration: A pilot-scale study, *Wat. Sci. Tech.*, 35(11-12), 391-395
- Jacangelo J. G., Adham S. S. and Laine J.-M. (1995). Mechanism of *Cryptosporidium*, *Giardia*, and MS2 virus removal by MF and UF, *Jour AWWA*, 87(9), 107-1212)
- Kolega M., Grohmann G. S., Chiew R. F. and Day A. W. (1991). Disinfection and clarification of treated sewage by advanced microfiltration, *Wat. Sci. Tech.*, 23, 1609-1618
- Madaeni S. S. (1999). The application of membrane technology for water disinfection, *Wat. Res.*, 33(2), 301-308
- Ventresque C., Gisclon V., Bablon G. and Chagneau G. (2000). An outstanding feat of modern technology: the Mery-sur-Oise nanofiltration treatment plant (340,000 m³/d), *Desalination*, 131, 1-16
- 小森登, 長井孝夫, 堀口育男, 丹野由花, 小平哲広 (2004). 高pH時の浄水処理における粒子数の挙動、第55回全国水道研究発表会、p 322-333
- 小嶋隼, 諏合忍, 江口慎一, 中山雅秀, 遠藤久美 (2004). 新三郷浄水場の高pH対策、第55回全国水道研究発表会、p 610-612