



전처리 MF의 다양한 역세 공정을 적용한 하수재이용 파일럿 플랜트 연구

Study of MF membrane as pretreatment option using various backwash process from wastewater reuse pilot plant

박광덕¹·박찬수²·이창규²·김종오²·최준석^{1*}

Kwang-Duck Park¹·Chansoo Park²·Chang-Kyu Lee²·Jong-Oh Kim²·June-Seok Choi^{1*}

¹한국건설기술연구원 환경플랜트연구소, ²한양대학교 건설환경공학과

¹Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Environment and Plant Engineering Research Institute

²Civil & Environmental Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

Various studies have forwarded an outstanding wastewater effluent treatment systems toward securing sustainable supply of water sources. In this paper, a broad overview of the performance of MF membrane as pretreatment option for wastewater reuse will be presented based on the literature survey and experiments conducted over the wastewater reuse pilot plant. The pilot plant was operated with a continuous data acquisition for about 300days under various chemical enhanced backwash (CEB) system with subsequent treated water quality analysis. Accordingly, assessment of the effluent revealed that the pretreated water is suitable enough to be used as an input for Reverse Osmosis (RO) unit and significant effect of CEB and concentration of NaOCl is also conceived from the analysis. Moreover, it's also observed that the application of various CEB condition over long operational hours induced a constant declination of overall performance of MF membrane.

Key words: Chemical enhanced backwash, Membrane filtration, Pressured membrane, Reclaimed wastewater, Treated wastewater

주제어: 화학세정, 막여과, 가압식 분리막, 재생수, 하수방류수

1. 서 론

전 세계적으로 수자원 고갈 및 수요의 증가로 인해 대체수자원의 확보가 중요한 현안으로 대두되고 있다 (Ahn et al., 2003). 특히, 최근 전 세계적으로 기후변화에 따른 홍수와 가뭄 등 물공급의 불균형 현상이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 향후 이러한 물불균형 문제는 더욱 심화될 것으로 예상된다. 특히 중동지역을 중

심으로 일부 국가에서는 심각한 물부족 현상을 경험하고 있으며, K-water의 발표자료에 의하면 2025년에는 전 세계 인구 중 7억 정도가 물부족 문제에 직접적인 영향을 받을 것으로 예상되고 있다. 우리나라도 1인당 강수량(연 2,629 m³)이 세계 평균의 1/6 수준이고, 특히 하천 취수율이 34%로 물에 관한 스트레스가 높은 국가군에 속하여 가뭄시 물이용에 취약한 실정이다(K-water, 2013).

이러한 문제를 해결하기 위한 다양한 대책과 기술이 제시되고 있으며, 최근 가장 많이 주목받고 있는 분야가 해수담수화 및 하수처리수 재이용 기술이다

Received 21 April 2016, revised 3 June 2016, accepted 7 June 2016

*Corresponding author: June-Seok Choi (E-mail: jschoi@kict.re.kr)

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 263-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 293-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350

(GWI, 2015). 해수담수화는 풍부한 해수 자원을 이용할 수 있다는 장점이 있지만, 고 에너지 비용이 소모되는 단점이 있다. 따라서 최근 저 에너지 및 저 비용으로 용수를 확보할 수 있는 하수처리수 재이용 기술에 대한 관심이 더욱 증가되고 있다(Hyun et al., 2005). 하수처리장의 방류수는 갈수기에도 안정적인 유량을 확보할 수 있다는 이점과 고도처리시설의 도입에 따라 양질의 처리수가 연중 방류되기 때문에 적절히 활용하면 대체 수자원으로 그 가치가 크다고 할 수 있다(Lee et al., 2007).

하수처리수의 재이용은 미국을 비롯하여, 영국, 일본 등의 많은 나라에서 이미 오래전부터 시행되고 있으며, 미국의 경우에는 각 주(state)마다 물 재이용에 관한 가이드라인까지 설정되어있다(EPA, 2012). 특히 미국의 캘리포니아 주 오렌지카운티에서는 1970년 후반부터 하수처리장 방류수를 고도처리시스템(Water Factory 21)을 사용하여 농업용수 및 지하수 함양용수로 재이용하고 있으며, 이러한 고도처리시스템은 다층여과와 활성탄 공정을 비롯하여 역삼투막(Reverse osmosis, RO) 공정으로 구성되어 있다. 현재 하수처리수의 재이용시스템으로 가장 많이 이용되는 방법으로는 응집-침전-모래여과-활성탄 흡착-소독과 같은 공정이며(Asano, 1998), 최근에는 재이용을 위한 하, 폐수의 처리 공정에 막을 이용한 기술적용이 증가되고 있는 추세이다(Hyun et al., 2005). 막을 이용한 공정은 원수의 특성에 맞게 처리가 가능하며, 재이용수의 용도에 따른 수질제어가 가능할 뿐만 아니라 운용의 편리성 때문에 많은 각광을 받고 있다(Park et al., 2005).

그러나 하수를 재이용하고자 하는 경우 기존의 생물학적 처리공정을 거친 처리수라 하여도 미생물을 포함한 입자성분이 다량 포함되어 있어 재이용에 이용되는 RO막의 막힘에 의한 급격한 투과플럭스 감소와 이로 인한 막 수명 단축 등의 문제를 지니고 있다(Pearce, 2008; Lee et al., 2006). 이러한 한계점을 극복하기 위해 정밀여과막(Micro filtration, MF) 전처리 공정을 통해 막 오염을 방지하고 있다지만(Fane, 1996; Wintgens et al, 2005; Sadr Ghayeni et al., 1996). 하지만 RO막에 비하여 미비한 수준이지만나 MF막 또한 막오염으로 인한 수명단축현상이 발생하고 있다(Lee et al., 2004; Juang et al., 2007). 이를 방지하기 위하여 화학세정을 통한 막오염 방지기술이 개발되고 있으나(Ahn and Song, 1999; Ang et al. 2011; Beyer et al,

2010), 아직 파일럿 이상의 플랜트 규모에서 화학세정 주기 및 주입 농도 등의 운전 조건개발이 미비한 상태이다.

본 연구에서는 실제 하수처리장 방류수를 이용하여 하수재이용수의 안정적인 공급을 위하여 MF 막을 이용하는 파일럿 플랜트를 구축하여 실제 막오염 정도를 평가함과 동시에 화학세정 주기 및 주입농도를 다양하게 변화하여 효과적으로 막오염을 방지할 수 있는 운전조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 막여과 시스템 운전 방법

가압식 정밀여과막은 모듈 내부에 장착하여 최종 방류수를 외압식(Outside-in)방식으로 연속 처리되도록 구성하였으며, 여과 시스템은 순환여과(Cross flow) 방식이 아닌 전량여과(Dead-end flow) 방식으로 운전하였다. 막여과공정은 30초 채움, 30분 여과, 2분 40초 역세척(처리수+폭기), 80초 배수로 약 34분을 한 주기로 연속 운전하였다(Fig. 1). 한 주기 내에서 역세척시 NaOCl을 사용하지 않고처리수를 이용하여 유입유량의 1.5배 유량으로 세척역세하였으며, 화학적 역세척(CEB, Chemical enhanced backwash)은 NaOCl 농도 조절 및 1일 CEB 횟수를 변화해가며변경하며 운전하였다. 운전조건과 운전일은 Table 1와과 같다.

하수처리수 재이용을 위한 파일럿 플랜트MF 설비의 경우 운전 초기 CEB 시스템이 갖추어져 있지 않아 여과공정 역세척 공정 진행시 차염 25 mg/L의 NaOCl의을 주입하여 농도를 낮게 하여 세정하였으나 지속적으로 플럭스가 감소하고 막 성능 회복에 어려움이 있어 CEB를 할 수 있도록 플랜트를공정을 수정하여 운전하였다. 또한 사전 실험으로 백필터(Bag Filter) 공극별 실험을 진행하여 백필터를 선정하였다.으며, 25 μ m의 백필터로 운전시 약 4일간 유량에 영향없이

Table 1. Operation days

Type	Microfiltration
Module type	Hollow Fiber
Pore size	0.1 micron
Material	PVDF (PolyVinylidene Fluoride)
Membrane area	68 m ³

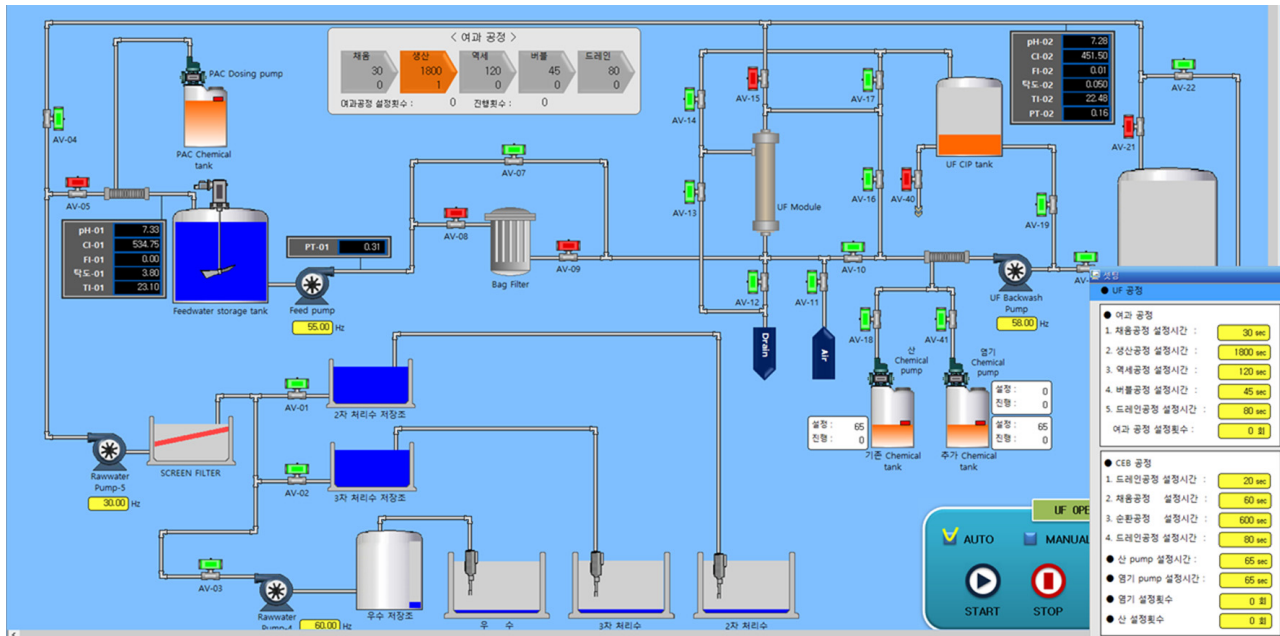


Fig. 1. HMI screen display with operation condition control

탁질 물질이 제거되는 것을 확인하였으므로 이를 사용하였다를 제거할 수 있어 백필터 교체후 약 3일간의 데이터를 비교하였다.

본 연구에 사용된 하수재이용 MF 설비의 경우 막 여과 성능을 알아보기로 pH, 유입 및 생산유량, 유입 및 유출 탁도, 유입 및 유출 압력 등이 초단위로 자동으로 저장되도록 구축되어 있는 시스템이다.이때, 이 수집 데이터를시스템을 바탕으로이용하여 파일럿 플랜트 운전시 안정적이며, 지속적으로 유량이 생산 가능한 운전 조건을 찾기 위하여, 다양한 CEB 조건을 실험하였다.

2.2 하수재이용 파일럿 플랜트

본 연구에서 사용된 가압식 MF 파일럿 플랜트 공정은 하수 최종방류수를 취수하여 백필터(Bag filter)를 MF 막 전처리로 사용하였으며, 후단에 RO(Reverse Osmosis) 및 AOP(Advanced Oxidation Process)공정이 구성되어있다. 하지만 본 연구에서는 가압식 MF 설비 운전의 최적화를 위한 데이터만 분석하였다. 파일럿 플랜트에 적용한 MF 막은 국내 막제조회사에서 제작한 PVDF(Polyvinylidene Fluoride) 재질의 가압형 중공사막으로 실험하였다. 막의 사양은 Table 2와 같다.

Table 2. Membrane characteristics

Condition	CEB/day	NaOCl concentration (mg/L)	Operation Days
1	1	100	42
2	1	200	33
3	1.5	200	54
4	2	200	37
5	4	100	134

재이용하기 위한 하수방류수는 경기도 위치한 하수처리장에서 인근 신도시 및 구도시의 하수를 처리하여 한강에 방류하는 최종방류수로 최근 강화된 방류수 수질기준을 준수하기 위하여 총인처리시설을 사용한 하수방류수를 원수로 적용하였다. 원수(하수방류수)와 MF 처리수 수질은 2주마다 샘플링하여 분석의뢰하여 나온 결과값이다.

여과시스템의 운전에 필요한 플릭스 측정을 위해 파일럿 플랜트에 설치된 전자 유량계를 이용하여 여과유량을 측정하였고, 압력, 온도, pH, 전기전도도 및 탁도 등 자동계측시스템에서 온라인데이터를 수신한 데이터를 바탕으로 연구를 진행하였다. 또한 계절의 영향을 저감하기 위해 플랜트 내부의 온도는 최대한 상온을 유지할 수 있도록 냉난방 시설을 갖추어 진행하였으며 약 300일동안 장기적으로 운전하며 막 세정 효과를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가압식 MF 막여과 실험 결과

본 연구기간 동안 운전 조건별 플럭스와 유량 변화를 통해 가압식 MF 설비의 운전 능력을 평가하였으며, Fig. 2는 조건별 72시간 운전한 플럭스의 1분 간격 데이터로 나타내었다. 실험은 연속적인 운전으로 지속적인 막 오염물질 부하에 의해 플럭스 저감현상을 보였다. 또한

여건상 매 조건별 고농도의 화학세정이 불가능하여 각 조건별 플럭스 저감을 및 변동폭을 관찰하였다.

Fig. 2(a)에서 조건은 1일 CEB를 2회, NaOCl 주입 농도는 100 mg/L의 농도로 약 10분간 외부로 순환시켰다. 플럭스는 3일간 34.80 LMH에서 점차 32.84 LMH로 감소하였으며, 1일 플럭스 감소율은 1.88%로 산정되었다. 그 그래프를 살펴보았을 때 다른 조건에 비하여 플럭스 변동의 폭이 큰 것을 확인 할 수 있으며, 약 3.4 LMH 정도의

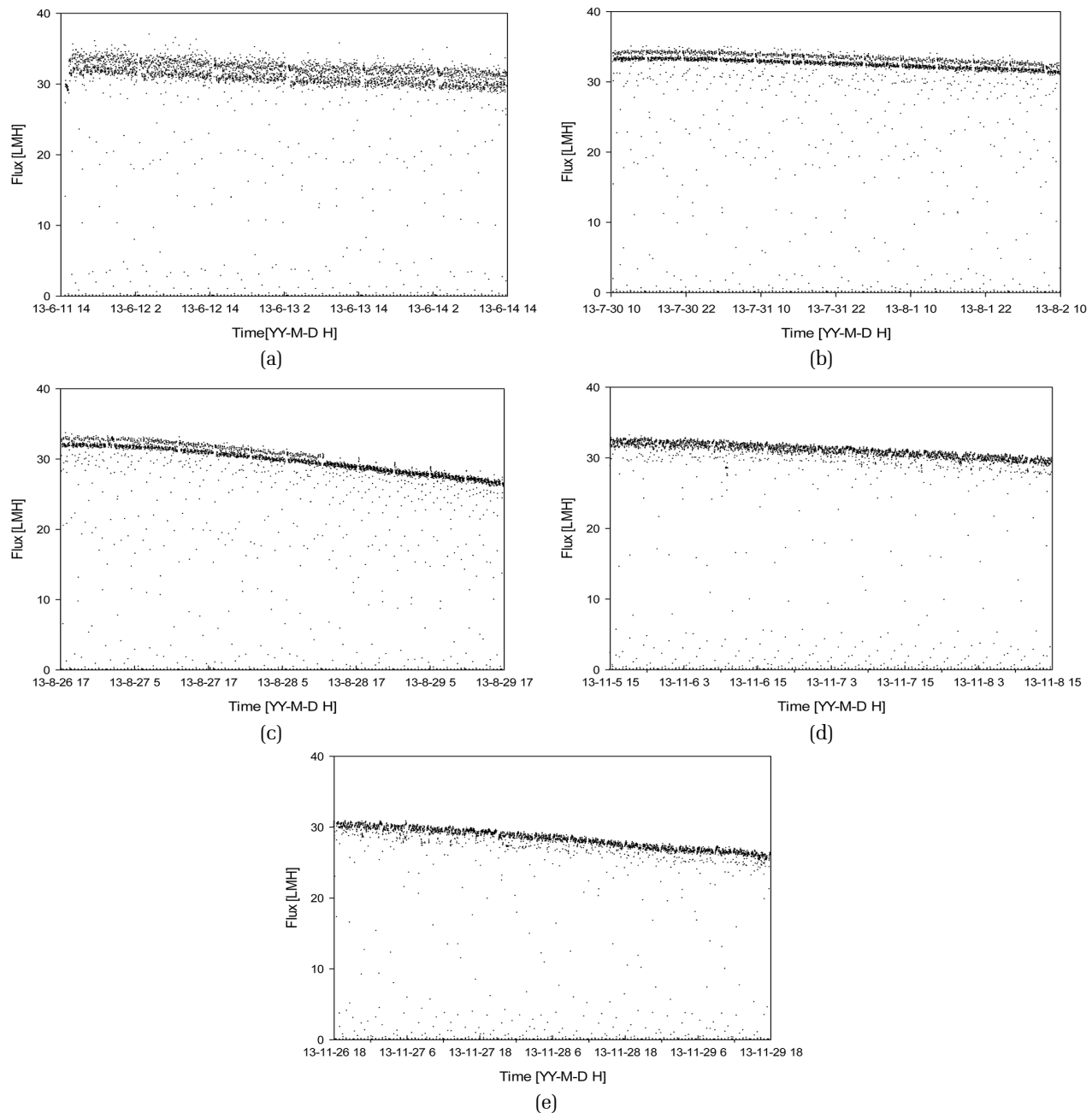


Fig. 2. Flux change at different conditions for 72 hours.



변동폭이 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 2-(a)의 운전조건은 다른 조건의 그래프와 비교해 1일 플럭스 감소율은 가장 낮으나 플럭스의 변동이 크게 일어나 유량이 안정적으로 확보되지 않았다(Raffin et al., 2012). Fig. 2에서 플럭스 그래프의 상하 변동폭은 각 사이클마다 변화하는 플럭스 변화량을 나타낸다. 좀 더 자세히 변화량을 보기위해 사이클당 변화량을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3-(a)은 여과운전 내 불안정한 플럭스의 변화량을 보여준다. 안정적인 운전을

위해 막간차압을 저감하고 일정한 플럭스 유지를 위해 CEB 횡수 및 NaOCl 농도를 변화시키며 운전하였다.

Table 3은 각 조건별 1일 플럭스 감소율과, 3회의 주기(cycle) 별 유량의 표준편차를 나타내었다.

Fig. 2-(b)는 1 CEB/day 조건에 NaOCl 200 mg/L 농도의 약품으로 실험한 결과는 두번째로 낮은 1일 플럭스 감소율을 나타내며, 플럭스 변동이 크지 않아 최적화 된 것으로 판단이 가능하다. 하지만 유량데이터를

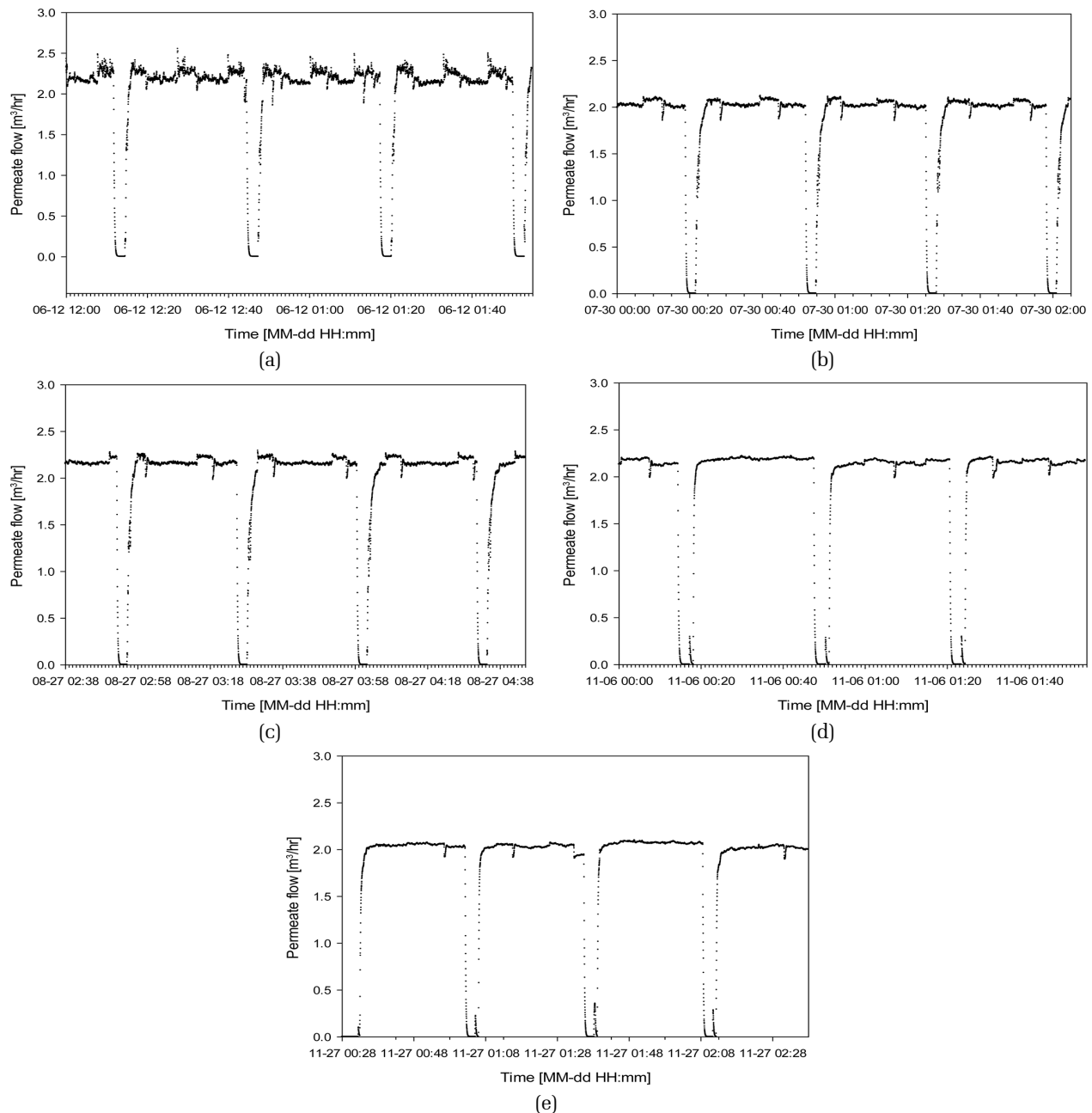


Fig. 3. Flux change at different conditions for several cycles

Table 3. Operating Condition, flux decline rate, and flow rate standard deviation

No.	CEB/day	NaOCl concentration (mg/L)	Flux decline rate per day (%) [*]	Flow rate standard deviation ^{**}
1	1	100	1.88	0.079
2	1	200	2.48	0.046
3	1.5	200	6.26	0.052
4	2	200	3.08	0.035
5	4	100	5.08	0.034

^{*} (max flux for 1 day - max flux for 3 days) / max flux for 1 day × 100(%)

^{**}

Table 4. Waste water and treated water quality analysis

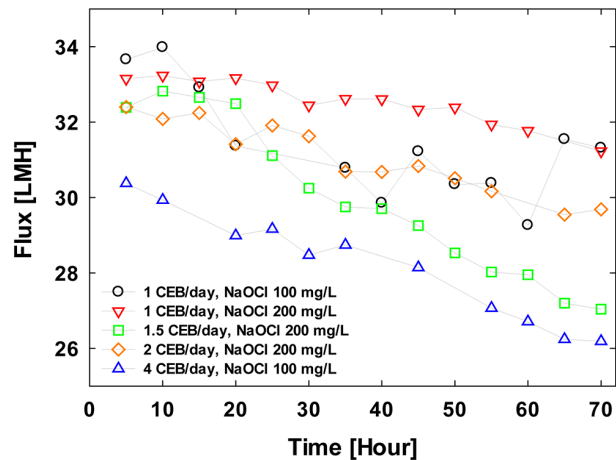
Parameters	Feed water	MF treated water
Turbidity(NTU)	2.15	0.07
TOC(mg/L)	4.75	4.51
COD(mg/L)	8.83	7.82
T-N(mg/L)	9.21	9.20
T-P(mg/L)	0.069	0.105
Cr(mg/L)	0.000	0.005
Cu(mg/L)	0.005	0.003
Fe(mg/L)	0.018	0.014
Mn(mg/L)	0.028	0.027
Pb(mg/L)	0.008	0.006

사이클 별로 확인한 결과를 Table 3에서 각 사이클당 플럭스 변동폭을 유량에 대한 표준편차로 나타내었을 때, Fig. 2-(b) 운전조건에서 표준편차는 0.046으로 다른 조건과 비교하여 3번째로 높은 결과를 보였다. 최적조건은 각 사이클당 유량 저감율뿐만 아니라 유량 표준편차까지 고려하여 안정적인 운전성능을 보인 조건으로 판단할 수 있다.

CEB를 하루 1.5회로 증가시켰지만 Fig. 2-(c)와 같이 성능은 크게 개선되지 않았으며 유량 저감이 가속화되었다. Fig. 3-(c)를 보면 사이클당 변화는 Fig. 3-(b)와 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

200 mg-NaOCl/L 농도로 일 2회 CEB 실시한 결과 플럭스 개선의 효과를 보였다(Fig. 2-(d)). 고농도 화학세정없이 운전시작한지 약 130일이 경과되었지만 플럭스 저감률은 3.08%로 낮은 수치를 보였다.

Fig. 2-(e)는 일일 NaOCl 100 mg/L 농도로 CEB를 4회 실시한 결과를 나타낸 것이다. 지속적인 플럭스 감소로 하루 4회에 걸친 화학세정을 했음에도 불구하고 1일 유량감소율은 5.08%로 가장 높았다. 반면 Fig. 3-(e)와 같이 유량 생산의 표준편차는 0.034로 가장 낮아 사이클당

**Fig. 4.** Flux logged every 10 hours for 72 hours.

플럭스는 가장 안정적인 결과를 보였다. 이는 화학세정의 세정주기를 높였지만 막의 막힘 현상이 가속화 되어 효율적인 약품 세정이 되지 않아 효과가 적은 것으로 사료되며 막의 성능을 위해서는 일정 이상의 약품을 투입하는 것이 성능향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

총 운전 기간동안 MF로 처리한 하수방류수는 Table 4에 보이는 것처럼 탁도 및 유기물 수치가 양호한 편이라고 판단되지만 10개월 이상 운전한 결과 막에 상당한 부하가 있는 것으로 판단된다. 막을 통과한 처리수의 탁도는 RO 유입수로 적절한 0.1 NTU 이하로 안정적으로 처리되었다. 안정적이며 일정한 RO 성능을 나타내기 위해서는 MF 전처리의 수질이 중요하다. 적절한 MF 세척방법은 수량뿐만 아니라 수질에까지 영향을 미칠 수 있다. 이에 전처리 공정의 선택은 심각한 클로이드 물질의 막힘 현상을 저감시키며 유지관리비용도 저감할 수 있어 중요한 항목이다(Chu et al., 2009).

Fig. 4은 조건별 72시간 운전한 플럭스의 10시간당의 데이터로 나타내었다. 운전초기에 비해 여러 운전조건을 변경하였음에도 불구하고 약 18% 플럭스가



지속적으로 감소하였다. 운전조건에 따라 플럭스 저감량 및 운전 성능에 변화를 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 하수재이용 기술을 확보하기 위하여 경기도 북부에 위치한 하수처리장의 하수 방류수를 적용하여 약 300일 동안 운전하였다. 지속적인 막오염에도 불구하고 플럭스 및 운전의 안정성을 높이기 위하여 여러 CEB 조건으로 반복 세정하여 그 효과를 알아보았다. 우선 공정 운전시 유량 변동폭이 작고 유량 감소량이 적은 것이 안정적인 유량 확보에 유리한 것으로 판단되었다. 또한 총 5가지 운전 방식을 각 조건별 플럭스, TMP 및 처리수 유량 표준편차 등으로 확인한 결과 MF 막여과를 장기간 운전하기 위하여 역세척 또는 CEB 공정을 할 때가 아닌 원수를 처리할 때 안정적인 유량이 확보되지 않으면 TMP 또한 변동이 크게 된다. 그리고 압력의 변화가 크게 될 경우 장비의 운전 및 유지관리에 문제가 발생할 가능성도 있으므로 운전의 안정적인 확보가 장기간 운전에서는 매우 중요할 것으로 판단된다.

References

- Ahn, K. H., An, S., Maeng, S. K., Kim, K. P., Hong, J. S., Jung, M. W., Kweon, J. H., and Ahmed, Z. (2003). Assessment of advanced oxidation processes using low and medium-pressure lamps with H_2O_2 for reclamation of biologically treated wastewater effluents, *KSWW*, 17, 542-549.
- Ahn, K. H., Song, K. G., (1999). "Treatment of domestic wastewater using microfiltration for reuse of wastewater", *Desalination*, 126, 7-14
- Ang, W. S., Yip, N. Y., Tiraferri, A., Elimelech, M., (2011). "Chemical cleaning of RO membranes fouled by wastewater effluent: Achieving higher efficiency with dual-step cleaning", *Journal of Membrane Science*, 382, 100-106
- Asano, T. (1998). *Wastewater Reclamation and Reuse*, CRC press, USA, Technomic publishing company.
- Beyer, M., Lohrengel, B., Nghiem, L. D., (2010). "Membrane fouling and chemical cleaning in water recycling applications", *Desalination*, 250, 977-981
- Chu, C. P., Jiao, S. R., Hung, J. M., Lu, C. J. and Chung, Y. J. (2009). Reclamation of the wastewater from an industrial park using hollow-fibre and spiral-wound membranes: 50 $m^3 d^{-1}$ pilot testing and cost evaluation, *Environmental Technology*, 30, 871-877.
- EPA. (2012). *Manual-guideline for water reuse*, EPA/600/R-12/618, U.S environmental protection agency, Washington DC.
- Fane, A. G. (1996). "Membranes for water production and wastewater reuse", *Desalination*, 106, 1-9
- GWI. *Global water market 2015*. Global Water Intelligence.
- Hyun, S., Kim, E. D., Hong, S., Ahn, W., Yim, S., and Kim, G. (2005). Treatment of secondary municipal wastewater by submerged hollow fiber MF membranes for water reuse, *KSWW*, 19, 47-52.
- Juang, L. C., Tseng, D. H., Lin, H. Y., (2007). "Membrane processes for water reuse from the effluent of industrial park wastewater treatment plant: a study on flux and fouling of membrane", *Desalination*, 202, 302-309
- K-water. (2013). *International year of water cooperation*, MLIT & K-water.
- Lee, N., Amy, G., Croue, J. P., Buisson, H., (2004). "Identification and understanding of fouling in low-pressure membrane (MF/UF) filtration by natural organic matter (NOM)", *Water research*, 38, 4511-4523
- Lee, S., Ang, W. S., Elimelech, M., (2006). "Fouling of reverse osmosis membranes by hydrophilic organic matter: implications for water reuse", *Desalination*, 187, 313-321
- Lee, Y. D., Kim, C. Y., and Park, H. G. (2007). "A study on the application of fiber filter (PCF) / RO for reuse of effluence from sewage plant (1)", *Fall Joint Conference of KSWW & KSWE*, 21-22 November, 2007, KSWW, Goyang, Korea.
- Park, K. Y., Maeng, S. K., Kim, K. P., Lee, S. H., Kweon, J. H., Ahn, K. H. (2005). Effect of Hydrogen Peroxide on UV Treatment of Color in Secondary Effluent for Reclamation, *KSWW*, 18, 377-384.
- Pearce, G.K., (2008). "UF/MF pre-treatment to RO in seawater and wastewater reuse applications: a comparison of energy costs", *Desalination*, 222, 66-73
- Raffin, M., Germain, E., and Judd, S. J. (2012). Influence of backwashing, flux and temperature on microfiltration for wastewater reuse. *Separation and purification technology*, 96, 147-153.
- Sadr Ghayeni, S. B., Madaeni, S. S., Fane, A. G., Schneider, R. P., (1996). "Aspects of microfiltration and reverse osmosis in municipal wastewater reuse", *Desalination*, 106, 25-29
- Wintgens, T., Melin, T., Schafer, A., Khan, S., Muston, M., Bixio, D., Thoeve, C., (2005). "The role of membrane processes in municipal wastewater reclamation and reuse", *Desalination*, 178, 1-11