

ORIGINAL ARTICLE

## 하수방류수 재이용을 위한 Birm filter + UF 적용시 용도별 사용 가능성 및 막오염 특성

정진희 · 이승철 · 성낙창 · 최영익\*

동아대학교 환경공학과

### Possible Uses of Reclaimed Wastewater Effluent Treated Using Birm Filtration Along UF, and Analysis on Membrane Fouling

Jin-Hee Jung, Seung-Chul Lee, Nak-Chang Sung, Young-Ik Choi\*

*Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 49315, Korea*

#### Abstract

In response to the water shortage problem, continued attempts are being made to secure consistent and reliable water sources. Among various solutions to this problem, wastewater effluent is an easy way to secure the necessary supply, since its annual output is consistent. Furthermore, wastewater effluent has the advantage of being able to serve various purposes, such as cleaning, sprinkling, landscaping, river management, irrigation, and industrial applications. Therefore, this study presents the possible use of reclaimed industrial wastewater treated with Birm filters and a UF membrane, along with an analysis on membrane fouling. The preprocessing stage, part of the reclamation process, used Birm filters to minimize membrane fouling. Since this study did not consider heavy metal levels in the treated water, the analyses did not include the criterion for irrigation water quality. However, the wastewater reclaimed by using Birm filters and a UF membrane met every other requirement for reclaimed water quality standards. This indicated that the treated water could be used for cleaning, channel flow for maintenance, recreational purposes, and industrial applications. The analysis on the fouling of the Birm filter and UF membrane required the study of the composition and recovery rate of the membrane. According to SEM and EDX analyses of the UF membrane, carbon and oxygen ion composition amounted to approximately 57%, whereas inorganic matter was not detected. Furthermore, the difference in the recovery rates of the distressed membrane between acidic and alkaline cleaning was more than ~78%, which indicated that organic rather than inorganic matter contributed to membrane fouling.

**Key words** : Birm filter, UF membrane, SEM, EDX

#### 1. 서론

인간생활에 있어 물은 반드시 필요하며, 물은 사람의 생명을 유지하기 위해 필수적인 6대 영양소 중의

하나이다. 물 없이는 생명도, 가족도, 국가도 운영할 수 없는 것이다. 미국 NIC (national intelligence council)는 2016년에는 세계인구의 절반이 넘는 약 30억 명이 물 부족국가로 분류되는 나라에 살 것이라고

Received 23 June, 2016; Revised 23 July, 2016;

Accepted 2 September, 2016

\*Corresponding author : Young-Ik Choi, Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 49315, Korea

Phon : +82-51-200-7675

E-mail : youngik@dau.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

예측했다. 또한 OECD 보고서에서 2000년에 3억 명이 겪고 있는 심각한 물 부족을, 2025년에는 30억 명(52개국), 2050년에는 전 세계 인구의 2/3가 직면할 것을 예측하고 있으며, 세계은행은 국가분쟁의 원인이 20세기는 “석유”였다면, 21세기는 “물”이 될 것이라고 지적하는 형편이다(Cosgrove et al., 2000).

우리나라의 경우 1인당 강수량이 연 2,591 m<sup>3</sup>로 세계 평균의 약 1/8 수준이고 하천 취수율은 36%에 달해 물에 관한 스트레스가 높은 국가군에 속하여 가뭄 시 수자원 공급에 취약한 실정이다(Lee et al., 2007). 우리나라의 경우 이용 가능한 총 수자원량의 부족보다는 과도한 담수자원을 사용함으로 발생하는 생태적 스트레스와 지역적으로 물의 편중이 심하기 때문이다(Jung et al., 2013).

이러한 상황을 극복하기 위해 단편적인 수자원 확보가 아닌 지속적이고 안정적으로 확보할 수 있는 새로운 수원을 찾기 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있으며, 다양한 물 부족 해결방안 중 연간 발생량이 일정한 하수방류수는 확보가 용이하고 세정용수, 살수용수, 조경용수, 하천유지용수, 농업용수 및 공업용수 등과 같이 다양한 목적으로 활용가능하다는 큰 장점을 가지고 있다(Park et al., 2006). 하수재이용의 수원인 하수처리방류수는 일반 상수원인 하천에 비하여 2~10배의 유기물을 함유하고 있기 때문에 이를 처리하기 위한 맞춤형 공정이 필요하며, 현재 재이용에 적합한 공정은 표준화되어 있지 않은 실정이다(Lee et al., 2012).

재이용에 사용되는 여러 공정 중 MBR (membrane) 공정은 체거름 기작을 이용하여 기존의 공법보다 완벽한 고액분리가 가능하며 긴 SRT (solid retention time)로 인하여 높은 MLSS를 유지할 수 있으며, 잉여 슬러지 발생량을 감축시켜주는 효과가 있다(Yamamoto K et al., 1989). 또한 처리효율이 높아 공정의 안정성과 신뢰성이 높고 유지 관리 간단 및 침전지 불필요로 인한 공정의 Compact화가 가능하다(Park et al., 2015). 특히 낮은 압력에서 운전될 수 있는 MF 막 및 UF 막의 경우 막 제조 기술의 발달로 생산단가가 감소하고 높은 압력이 요구되는 NF 막 및 RO 막에 비해 경제적인 이점으로 점점 사용이 증가하고 있는 추세이다(Kim et al., 2015).

막공정 운영시 발생하는 막오염은 주로 유기물과 입자성 물질로 분류할 수 있으며, 막분리 공정 전에 감소시킬 수 있다는 점에서 그 중요성이 부각되고 있다(Kwon et al., 2003). 막오염은 운전시간이 증가함에 따라 분리막 표면에 케익층과 농도 분극 현상에 의해 플럭스가 감소하는 현상을 말하는데, 상대적으로 높은 농도의 유기물질 및 콜로이드성 물질 등을 포함하고 있는 하수처리수는 분리막의 오염을 빠르게 진행시켜 MBR 공정의 경제성과 효율성을 저감시킨다(Oh et al., 1998; Cosgrove et al., 2000).

투과플럭스가 많고 낮은 압력에서 운전이 가능한 MF (Microfiltration) 및 UF (Ultrafiltration)에 대한 다양한 연구도 발표되고 있다. 그러나 막 단독 사용 시 막오염의 증가로 인해 투과 flux가 빠르게 감소하며, 막의 분자량 크기보다 작은 분자량을 가진 유기물질들은 막을 통과하므로 제거에 효과적이지 못하기 때문에 적절한 전처리 공정이 요구된다(Park et al., 2004; Park et al., 2004; Kim et al., 2003). 하수에 포함된 망간이온이 원수에 함유된 경우 초기에는 무색 투명하나, 시간이 경과될수록 공기와 접촉하여 산화되므로 붉은색의 수산화물을 형성하여 제품을 착색하거나 배관, 열기기, 막 내부에 scale을 형성하여 기기를 손상시키는 주요 영향인자로 작용한다. 이에 본 연구에서는 공업지역에서의 하수방류수 재이용을 위해 전처리시설 Birm filter를 통해 막오염을 저감하고 UF membrane를 통해 생산된 생산수의 용도별 사용 가능성 및 막오염 특성을 파악하는데 그 목적이 있다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1. 실험재료

연구에 사용된 원수는 B시 N사업소의 하수처리 방류수를 대상으로 하였으며, 원수의 수질을 분석하여 Table 1에 나타내었다. N사업소는 인근 산업단지에서 배출되는 공장폐수와 생활하수를 MLE+화학처리공법으로 처리하는 공공하수처리시설로서, 시설용량은 일 평균 160,000 m<sup>3</sup>/일, 일 최대 80,000 m<sup>3</sup>/일이며, 이 중 공장폐수 유입량은 40,000 m<sup>3</sup>/일로 도금폐수, 염색폐수 및 음폐수 등이 80% 이상을 차지하고 있다. 원수 수질에 대한 농도는 BOD<sub>5</sub> 5.8 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 13.1

**Table 1.** The average concentration of the raw water for experiment

Parameters	Unit	Raw water
pH	-	7.2
SS	mg/L	9.6
BOD <sub>5</sub>	mg/L	5.8
CODMn	mg/L	13.1
DO	mg/L	7.8
Turbidity	NTU	7.0
Odor	-	불쾌
Color	도	2.0
Residual chlorine	mg/L	3,882
E.Coli	CFU/100 mL	98,468
T-N	mg/L	10.3
T-P	mg/L	0.8

mg/L 및 Turbidity 7.0 NTU 등으로 나타났으며, 세부 성상을 Table 1에 나타내었다.

## 2.2. 실험장치 및 방법

### 2.2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 Pilot-plant 막여과 장치 공정도를 Fig. 1에 나타내었으며, UF막은 전량여과방식으로 운영하였다.

### 2.2.2. Raw water tank

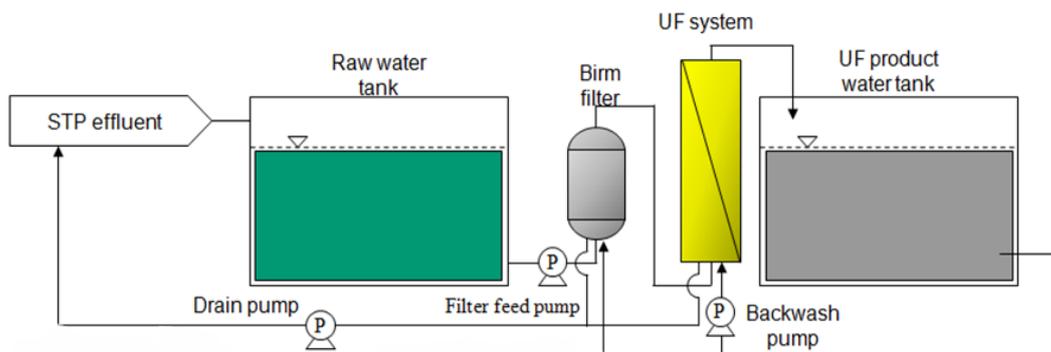
원수에 잔존하는 박테리아, 대장균 등 이물질들의 소독을 위해 NaOCl을 주입하였으며, 주입량은 2.8 mL/min이다. 이때 전체 크기는 W 1,070 mm × L 1,200 mm × H 1,020 mm로 용량은 1.2 m<sup>3</sup>이다.

### 2.2.3. Birm filter

원수 중에 함유되어 있는 Mn 성분을 산화촉매재인 Birm을 충전한 탱크에 하향류식 여과하는 방식으로 Mn을 제거하여 UF막 및 RO막 부하를 줄여주는 역할을 하며, 장치의 전체 크기는 Ø 750 mm × H 1,830 mm로 용량은 0.4 m<sup>3</sup>로 설치하였다.

### 2.2.4. UF Membrane

유입수에 포함된 콜로이드 성분과 현탁성 입자 및 박테리아 등 여과 대상물질 특성이 있는 UF막을 사용하였다. 또한 역세가 가능한 합성 중합체 막을 사용하였으며, 장치의 전체크기는 Ø 220 mm × H 2,200 mm, 용량은 0.84 m<sup>3</sup>이다.



**Fig. 1.** Schematic diagram of the pilot-plant.



Fig. 2. Photographs of raw water tank.



Fig. 3. Photographs of raw Birm filter.

3. 결과 및 고찰

3.1. 용도별 사용 가능성

수질오염 지표는 통상적으로 일반 오염물질이라 칭하며 하천, 해수 등 여러 분야에 있어 공통적으로 분석하는 항목으로, Birm filter 및 UF 공정의 연계처리 후 생산된 최종 생산수 DO의 경우 6.3 mg/L, BOD<sub>5</sub>의 경우 0.7 mg/L로 나타났으며, COD<sub>Mn</sub>의 경우 5.4 mg/L, SS의 경우 미검출, T-N의 경우 1.6 mg/L 및

T-P의 경우 0.1 mg/L로 나타났다.

심미적 영향물질에는 여러 종류가 있으나 본 연구에서는 하수처리수 재이용기준에 근거해 pH, 탁도, 냄새, 색도 및 잔류염소를 분석하였으며, 최종 생산수 pH의 경우 7.2, 탁도, 색도 및 잔류염소의 경우 미검출로 나타났다. E. Coli의 경우 미검출로 나타나 농업용수 부분에서 다른 항목 기준에 비해 기준이 높게 설정된 부분을 만족함으로써 보건·위생상의 안전할 수준으로 미생물에 의한 영향은 없을 것으로 판단된다.

Table 2. Characteristics and operating conditions of birm filter

Parameters	Specifications of equipment	Parameters	Unit	Setting
Bulk density	560~640 kg/m <sup>3</sup>	Set Time	min	1,440
Specific gravity	2.0 g/cm <sup>3</sup>	Backwash (set time)	min	10
Effective size	0.48 mm	Settle (set time)	min	5
Uniformity coefficient	2.7	Rinse (set time)	min	10
Max. water temperature	38℃	Inlet Pressure	kg/cm <sup>2</sup>	0.6
Water pH range	6.8~9.0	Product Water Flow	m <sup>3</sup> /hr	4.7
		Backwash Pressure	kg/cm <sup>2</sup>	0.2
		Backwash Flow	m <sup>3</sup> /hr	9

**Table 3.** Characteristics and operating conditions of UF membrane

Parameters	Specifications of equipment	Parameters	Unit	Setting
Model	HFS-2020N	Set time	min	30
Filtration mode	Pressured	Set TMP	kgf/cm <sup>2</sup>	1.2
Membrane material	PVDF	Backwash	sec	35
Membrane area	72 m <sup>2</sup>	Air in	sec	60
Pore size	0.02 micron	Drain	sec	30
Max. applied pressure	300 kPa	Filling	sec	30
Max. operating temperature	40℃	Product water flow	m <sup>3</sup> /hr	4.3
pH range	0~12	Backwash pressure	kgf/cm <sup>2</sup>	2.9
-	-	Backwash flow	m <sup>3</sup> /hr	8



(a) UF membrane



(b) UF product water tank

**Fig. 4.** Photographs of UF and UF product water tank.

**Table 4.** Compare of water pollution index 1

Parameter	Cleaning water	Landscaping water	Channel flow maintenance	Recreation water
pH	6.5~8.5	6.5~8.5	6.5~8.5	6.5~8.5
SS (mg/L)	-	-	-	6 이하
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	10 이하	10 이하	10 이하	3 이하
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	>20	>20	-	-
DO (mg/L)	-	-	2	2
Turbidity (NTU)	2 이하	2 이하	-	-
Odor	불쾌하지 않음			
Color (도)	20 이하	206 이하	40 이하	106 이하
Residual chlorine (mg/L)	0.2 이상	-	-	-
E.Coli (CFU/100 mL)	N.D	N.D	1000 이하	N.D
T-N (mg/L)	-	-	10 이하	10 이하
T-P (mg/L)	-	-	1 이하	1 이하

**Table 5.** Compare of water pollution index 2

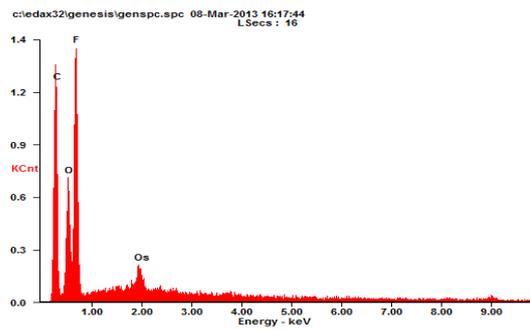
Parameter	Agriculture water	Industrial water	Linked treatment process
pH	6.5~8.5	6.5~8.5	7.2
SS (mg/L)	-	10 이하	N.D
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	8 이하	6 이하	0.7
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	-	-	5.4
DO (mg/L)	2	2	6.3
Turbidity (NTU)	-	10 이하	N.D
Odor			불쾌하지않음
Color (도)	-	-	N.D
Residual chlorine (mg/L)	-	-	N.D
E.Coli (CFU/100 mL)	200 이하	1000 이하	N.D
T-N (mg/L)	-	-	1.6
T-P (mg/L)	-	-	0.1

**3.2. UF membrane 오염 특성**

막 여과공정에서 투과플럭스를 감소시키는 원인은 크게 막 오염에 의한 현상(막의 fouling 유발)과 막 손상에 의한 현상으로 분류할 수 있으며, Birm filter 및 UF 막공정의 막오염 특성을 파악하기 위해 먼저 UF membrane의 SEM 및 EDX 분석한 결과 약 47%가 탄소이온, 약 18% 산소, 약 33%가 불소인 것으로 나타났으며, 일반적으로 무기물에 의한 오염은 산을 이용하여 제거하고, 유기물에 의한 오염은 알칼리로 세척

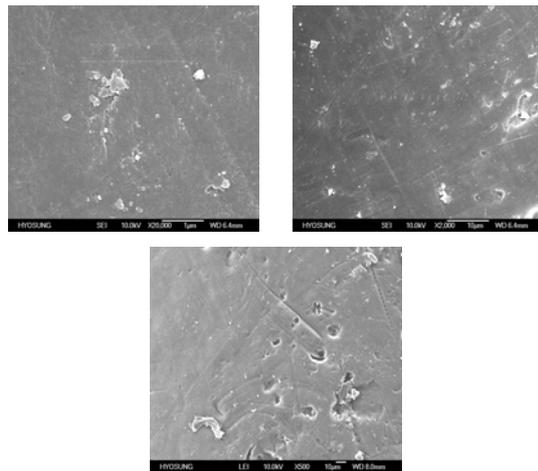
하는 것이 주된 방법으로, 세부적인 membrane의 오염 특성을 알아보기 위해 산 세정을 실시하였다.

이때 투과 및 순환유량 9 m<sup>3</sup>/hr로 세정을 실시하였으며, 약품투과 1.5 hr, 공기세정 2 min 공기세정, 약품순환 1.5 hr, 공기세정 2 min, 세척(역세) 및 차압 측정 순으로 진행하였다. UF membrane의 산 세정의 경우 UF 처리수를 황산(95%)으로 pH 2로 조정하였으며, 알칼리 세정의 경우 NaOCl 18 L 주입(2,400 mg/L) 후 NaOH로 pH 12 조정하여 진행하였다.



Element	Wt%	At%
C	37.80	47.58
O	19.55	18.48
F	42.65	33.94

**Fig. 5.** Result of UF membrane with EDX.



**Fig. 6.** Result of UF membrane with SEM.

**Table 6.** Result of UF membrane CIP

Parameters	Driving first pressure	Differential pressure before washing	Acid washing	Alkali washing	Second acid washing	Entirety recovery rate
Time			3 hr	3 hr	3hr	9 hr
Differential pressure after washing	0.7 bar	2.7 bar	2.4 bar	0.8 bar	0.8 bar	0.8 bar
Differential pressure entirety recovery rate			15%	94%	-	95%

산세정의 경우 차압 회복률 15%로 나타났으며, 알칼리 세정의 차압 회복률은 94%로 나타나 알칼리세정에 의한 차압 회복률이 산세정 시 차압 회복률 보다 높은 것으로 나타나 본 연구에 사용된 UF membrane 은 무기물보다는 유기물에 의한 오염도가 더 큰 것으로 판단된다.

**4. 결론**

수질오염지표인 DO, BOD, SS, T-N 및 T-P의 경우 전항목 관련 수질기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 심미적 영향물질인 pH, 탁도, 냄새, 색도 및 잔류염소의 경우 또한 용도별 재이용 수질권고기준을 만족하는 것으로 나타났으며, E. Coli 또한 미검출로 나타나 농업용수의 기준에도 부합하는 것으로 나타났다. 위 결과로 미루어 Birm filter 공정을 적용하여 UF 공정과 연계처리 시 최종 생산수는 본 연구에서 분석하지 않은 농업용수의 세부항목들을 제외한 용도별 용수기준을 모두 만족하는 것으로 나타나 농업용수의 청소용수, 유지용수, 친수용수, 공업용수로의 사용 가능성은 충분할 것으로 판단된다.

Birm filter 및 UF membrane 오염 특성 평가를 위해 UF막의 SEM 및 EDX 분석한 결과 약 57%가 탄소이온, 산소이온으로 분석되었으며, 무기물이 검출되지 않아 무기물보다는 유기물에 의한 막 오염도가 높을 것으로 판단된다. 또한 산 세정 및 알칼리 세정의 차압 회복률이 약 78% 이상 차이가 나타난 것으로 미루어 무기물 오염보다는 유기물에 의한 오염이라는 것을 증명해 주는 것으로 판단된다.

**감사의 글**

본 연구는 동아대학교 교내 연구비지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

**REFERENCES**

Cosgrove., Rijsberman., 2000, World Water Vision, 21.  
 Lee, C. S., Park, S. C., Song, S. W., Koo, B. H., 2007, 하수처리장 방류수 재이용방안선정을 위한 하천환경평가, Proceedings of the Korean Environment Sciences Society Conference, 16(1), 189-193.  
 Jung, H. S., Kim, H. K., Sung, C. H., Jang, T. I., Park, S. W., 2013, Effects of wastewater effluent on river discharge using SWAT model, Journal of Agriculture & Life Sciences, 44(1), 32-38.  
 Moon, S. Y., Ahn, S. H., Lee, S. H., Park, J. H., Hong, S. W., Choi, Y. S., 2006, Effect of ozonation in microfiltration, Membrane for Wastewater Reuse, KSWW, 20(4), 535-543.  
 Lee, H. W., An, K. H., Choi, J. S., Kim, S. K., Oh, H. J., 2012, Effect of trans-membrane pressure on reversible and irreversible fouling formation of ceramic membrane, KSEE, 34(9), 637-643.  
 Yamamoto, K., Hiasa, M., Mahmood, T., Matsuo, T., 1989, Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank, WS&T, 21, 43-54.  
 Park, T. Y., Choi, C. K., Original paper : Analysis of hydrophobic membrane fouling on the COD loading rates at the state of passive adsorption in membrane bioreactor, KSEE, 37(3), 152-158.  
 Kim, S. H., Kang, L. S., 2015, Effect of coagulation

- condition on the membrane fouling of coagulation-UF Process, KSWST, 23(1), 45-54.
- Kwon, J. H., R. D., Fouling mechanisms in ultrafiltration with softening pretreatment of a high alkalinity water, KSEE, 25(6), 778-785.
- Oh, H. Y., Song, S. R., Jang, I. H., Youn, Y. C., Song, G. S., 1998, A Study on the application of spiral wound ultrafiltration membrane for reuse of primarily treated sewage, KSEE, 20(5), 665-673.
- Park, C. H., Youn, J. K., Sin, W. K., 2004, A Study on the sewage reuse and BNR process optimization by submerged membrane bioreactor, KSWST, 12(2), 17-26.
- Park, B. K., Lee, J. H., Kim, J. H., 2004, Development of a membrane system with automatic and remote control for small drinking water treatment plants, seoul, 55.
- Kim, H. S., Xiang, J. G., 2003, The Effects of PAC (powdered activated carbon) on water treatment performance of an immersed membrane system using flat-sheet membrane module, KSWW 21(2), 195-201.