

## MBR 시스템에서의 금속필터 적용타당성 연구

이 민 수\* · 이 강 훈\*\* · 이 용 수\*\*\* · 정 건 용\*,†

\*서울과학기술대학교 에너지환경공학과, \*\*가톨릭대학교 에너지환경공학과, \*\*\*한양대학교 건설환경공학과  
(2022년 1월 27일 접수, 2022년 2월 22일 수정, 2022년 2월 22일 채택)

### A Study on the Validity of the Metal Filter Application in MBR Process

Min Soo Lee\*, Kang Hoon Lee\*\*, Yong Soo Lee\*\*\*, and Kun Yong Chung\*,†

\*Department of Environmental Energy Engineering, Seoul National University of Science & Technology,  
Seoul 01811, Republic of Korea

\*\*Department of Environmental Engineering, Catholic University, Songsim Global Campus,  
Bucheon-si 14662, Republic of Korea

\*\*\*Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

(Received January 27, 2022, Revised February 22, 2022, Accepted February 22, 2022)

**요 약:** 본 연구에서는 stainless steel로 재질로 된 금속평막모듈을 이용하여 고프럭스가 유지되면서 처리수의 안정화 방안을 모색하였다. 이 모듈은 기공사이즈가 13 µm 단위여서 플럭스가 60 LMH에서 100 LMH까지 고프럭스로 운전이 가능하다 그러나 SS가 초기 운전 시 30~50 ppm 정도 유출되지만 SS가 응집핵으로 작용하므로 응집이 가능하게 된다. 기존 고분자 막 여과수는 응집핵이 없어서 coagulation은 되지만 flocculation이 안되므로 추가적으로 응집보조제인 clay나 벤토나이트를 투여하게 되는데 본 연구에서는 이런 응집보조제 필요 없이 SS 누출만으로 flocculation이 되므로 총인처리와 처리수질이 안정성을 도모하고자 하였다. 최종적으로 안정적인 처리수에 고프럭스가 가능한 Metal필터 운전이 MBR 시스템에서 적용가능한지 타당성을 연구하고자 하였다.

**Abstract:** In this study, a method for stabilizing treated water was conducted while maintaining high flux using a metal flat membrane module made of stainless steel. This module had a pore size of 13 µm, so it was possible to operate at a high flux from 60 LMH to 100 LMH. However, although SS leaked about 30~50 ppm during initial operation, aggregation was possible because SS acted as aggregation nucleus. While polymer membrane permeate does not have aggregation nucleus, so coagulation is possible but not flocculation. Typically clay or bentonite, which is used as aggregation nucleus, is additionally administered. In this study, the total phosphorus treatment and the quality of the treated water were to promote stability because flocculation was achieved only with SS leakage without the need for such an aggregation nucleus. Finally, the feasibility of operating a metal membrane filter capable of high flux in stable treated water to be applied to the MBR system.

**Keywords:** metal membrane, pore size, metal filtration, stainless steel

#### 1. 서 론

최근 수자원 확보 방안과 방류수 수질기준 강화에 대한 대책으로 최근에 막분리 공정에 대한 관심이 대두되고 있다. 특히 2012년부터 공공하수처리시설의 방류수

수질기준이 총인(T-P)은 10배(2 mg/L→0.2 mg/L), BOD (10 mg/L→5 mg/L)와 COD (40 mg/L→20 mg/L)는 각각 2배로 강화되어 활성 슬러지를 반응기 내부에 고농도로 유지하여 유기물 제거 효율과 질산화 효율을 증가시킬 수 있는 MBR (membrane bio-reactor) 공정은

†Corresponding author(e-mail: [kychung@seoultech.ac.kr](mailto:kychung@seoultech.ac.kr); <http://orcid.org/0000-0002-5182-0012>)

좋은 대안책으로 제시되고 있다[1-3].

이러한 막분리 공법의 여러 가지 장점에도 불구하고 최근에야 국내의 처리시설에 도입이 되는 이유 중 가장 큰 부분이 막분리가 진행됨에 따라 발생하는 막오염에 의한 플럭스의 저하현상이다. 막 표면에 케이크가 쌓인 상태로 오래 운전이 되면 비가역적인 2차 막오염이 발생하여 플럭스가 저하되는데 이는 일반적인 세정으로는 플럭스 회복이 불가능하고 주기적인 세정 및 막 교체가 필요해 운영비가 많이 소요된다[4,5]. 막오염 현상이 공정의 효율성을 결정하는 중요한 변수가 됨에 따라 국내외에서 막오염에 관한 많은 연구[6,7]가 진행되고 있지만, 여러 요인들이 결합되어 막오염에 영향을 주기 때문에 정확한 메커니즘을 밝히기 어렵고 메커니즘을 규명할 수 있는 일반적인 방법이 정립되어 있지 않은 실정이다. 결과적으로 근본적인 막 오염 제어 및 예측에는 무리가 있으며 또한 실제 플랜트 적용에 있어서 제한된 운영을 할 수 밖에 없다. 따라서 효율적인 막공정 운영을 위해 가장 먼저 막오염의 정확한 원인을 파악해야 하며 이를 바탕으로 막오염의 예측과 제어방안에 관한 연구가 병행되어야 한다.

본 연구에서는 고플럭스 유지를 위한 방안으로 stainless steel 재질로 된 금속평막모듈을 이용하여 처리수의 안정화 방안을 모색하였고 최종적으로 안정적인 처리수에 고플럭스가 가능한 Metal필터 운전이 MBR 시스템에서 적용가능한지 타당성을 연구하고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 실험 장치

본 실험에 사용된 막모듈은 (주)이화금속에서 제공되는 금속메쉬망 12~14  $\mu\text{m}$  (200/1400T)을 사용하였으며 Fig. 1처럼 모듈케이스 재료는 ABS으로 제작하였고 막모듈 내의 오염제거를 위해 집수구 2개랑 드레인 2개를 추가하여 제작하였다. Table 1에는 Metal필터 모듈제원을 나타내었다.

### 2.2. MBR 반응조 구성

본 연구에 사용된 MBR 반응조는 Fig. 2에서와 같은 반응조로 유효면적은 100 L이며 반응조는 3개로 운영되었고 아크릴로 제작하여 운전하였다. 운전조건은 pH 7, 수온 14~16°C, MLSS 5,000~6,000 mg/L, DO 4.80~6.8mg/L, 산기량 50 mL/min, 펌프가동 주기는 10분 가



Fig. 1. Module of Metal filter used in this study.

Table 1. Specification of Metal Filter

Parameter	Index	
Particle Cut-off	13.43 $\mu\text{m}$	
Membrane Material	SUS 316 L	
Model	KJH13MF	
Effective Surface Area	0.1232 $\text{m}^2$	
Material of Parts	Pipe	ABS Resin
	Sealant	Polyurethane
Connection	8 mm	
Dimensions (mm)	220 × 280 × 5	
Operation Temperature	< 100°C	
pH	1~14	
Object	Wastewater	
Flux ( $\text{m}^3/\text{day}$ )	60	

동 / 2분 정지로 하였다. 슬러지 인발은 MLSS 5,000~6,000 mg/L에 맞춰 주기적으로 인발하였고, 반응조 체류(HRT 4~6)은 수면높이 60 cm, 가로 67.2 cm, 세로 25 cm로 총 100 L의 부피를 유지하였다. 연속투과막 하단에는 막 표면에 생성되는 케이크에 의한 저항을 최소화하기 위하여 추가의 포기장치를 설치하여 24시간 실시하였다. 유입수는 수위조절기를 통해 연속적으로 유입되게 하였고 유출수는 정량펌프를 통해 10분 운전, 2분 정지시간을 두어 간헐 흡입방식으로 운전하였다. 반응조 내의 교반은 별도의 교반장치 없이 포기에 의한 자연교반이 이루어지도록 하였으며, 공기분산에 의한 케이크 층의 영향을 최소화하기 위하여 막모듈과 산기관은 10 cm의 간격을 두었다.

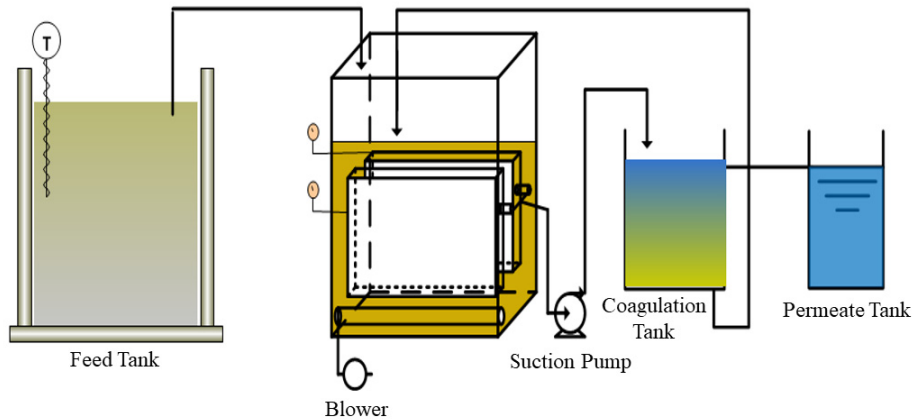


Fig. 2. Schematic diagram of MBR process with Metal filter.

Table 2. Main Characteristic of Raw Wastewater

Cycle	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	SS (mg/L)
1 <sup>st</sup>	120	40	3.6	130
2 <sup>nd</sup>	135	43	4.32	152
3 <sup>rd</sup>	117	35	3.14	98
Average	127	39.3	3.68	126

2.3. 유입수 성상

본 실험에서 사용된 유입원수는 수원에 위치한 성균관대학교 하수처리장 내의 유입하는 원수를 사용하였고 원수의 수질은 Table 2에 나타내었다.

2.4. 분석방법

유입, 유출수에 대한 T-N, COD<sub>Cr</sub>, BOD<sub>5</sub>, SS, T-P 등의 항목을 분석하였다. 각 분석에 대한 실험 방법은 Table 3에 나타내었다.

또한 반응조의 미생물과 응집제로 인해 발생한 기타 입자물질들이 형성하고 있는 슬러지 입자크기를 측정하기 위하여 Particle Size Analyzer (Master Sizer, Malvern)를 이용하였다.

2.5. Metal필터 투과 플럭스 실험

본실험에 사용된 막 장치(Milipore, U.S.A)는 막힘형 형태(dead end flow)로 Fig. 3에 간략하게 도식하였다. 막분리 실험은 5 L 용량의 스테레인스 저류조에 시료수를 주입 후, 고순도 질소 가스를 이용하여, 0.2 bar의 투과압력으로 300 mL 용량의 각기 다른 공경을 가진

Table 3. Analysis Method of Wastewater

Index	Method	Equipments
pH	Electrometic (Orion 720A, USA)	pH meter
Escherichia	Membrane filtration method	Incubator
COD <sub>cr</sub>	Reactor digestion	μV
T-N, T-P	Instrumental analysis	HACH analysis
SS	GF/C filtration	Vacuum pump, Dry oven

Metal 필터에 주입하여 여과하였으며, 여과 중에 교반 장치는 사용하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 필터는 평판 disc 형태로 지름 76 mm, 막 공극 크기가 0.45 μm, Milipore, U.S.A)으로 친수성재질인 MF 고분자막과 1, 5, 8, 13, 16, 27, 35 μm를 가진 Metal필터를 각각 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 임계플럭스 결정

임계플럭스 실험에 앞서 순수여과플럭스를 확인하기 위하여 초순수를 사용하여 Metal필터 공경크기별로 각각의 플럭스를 Table 4에 나타냈다.

침지형 분리막 여과장치를 이용하여 케이크가 발생되지 않는 최대플럭스를 측정하기 위한 임계플럭스 실험을 하였다. 실험방법은 초순수를 이용하여 초기막저항값(Rm)을 측정한 후 반응조안에 용액을 채우고 플럭스를 30, 60, 100, 150 LMH를 각각 2시간씩 수행하면서

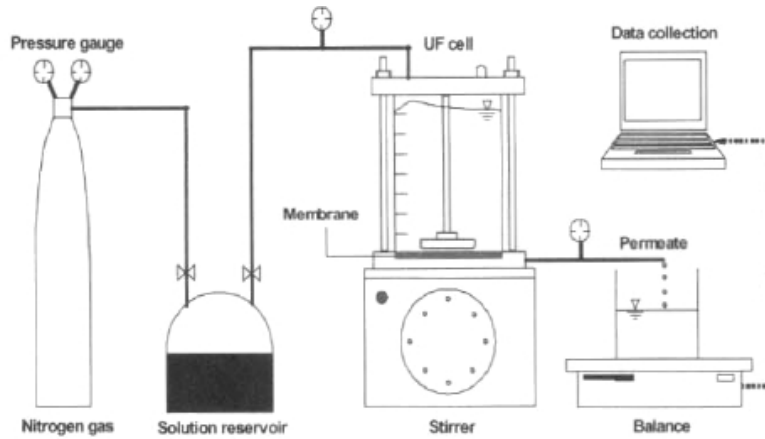


Fig. 3. Schematics of experimental setup for a batch cell (dead-end filtration).

Table 4. Pure Water Flux of Each Pore-size

Pore size	Pressure (bar)	Temp (°C)	Flux (LMH)	Adjusted flux (LMH)	Pressure (LMH)	Average flux (LMH)
12~14	0.25	21.1	2,050	2,244	8,977	8884
	0.45	21.1	3,688	4,036	8,970	
	0.25	21.1	1,988	2,176	8,703	
27~29	0.25	21.1	1,968	2,154	8,615	8232
	0.32	21.1	2,293	2,510	7,844	
	0.32	21.1	2,408	2,635	8,235	
35~38	0.45	21.1	2,217	2,426	5,391	5302
	0.45	21.1	2,155	2,359	5,242	
	0.45	21.1	2,168	2,373	5,274	

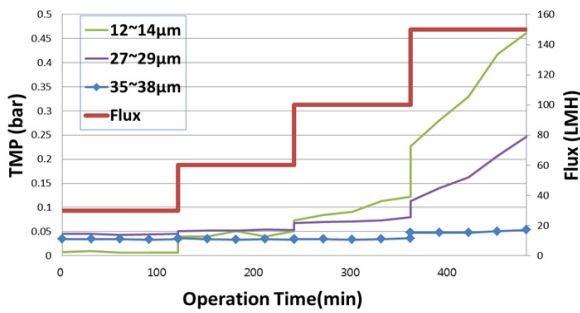


Fig. 4. Determination of critical flux.

시간에 따른 TMP (trans membrane pressure)의 변화를 관찰하였고 실험 결과는 Fig. 4와 같다.

3.2. 플럭스 변화에 따른 Metal filter의 압력변화  
MLSS 5,500 mg/L인 상태에서 공경이 13 µm인 Metal

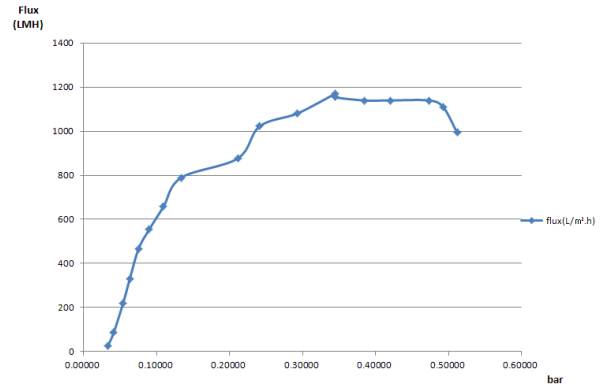


Fig. 5. Variation of pressure according to flux change.

필터가 플럭스 변화에 그에 따른 압력변화를 통해 최대 플럭스와 그에 따른 압력변화의 추이를 Fig. 5에 나타내었다.

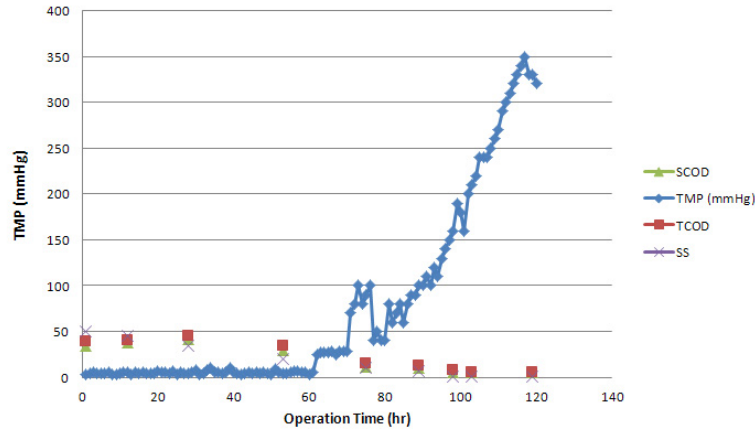


Fig. 6. Variation of pressure at 60 LMH.

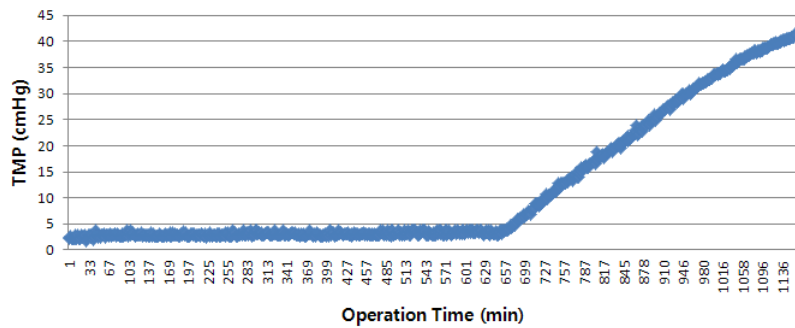


Fig. 7. Variation of pressure at 100 LMH.

3.3 고프럭스 운전 시간에 따른 압력변화 실험

앞선 임계플럭스 실험을 통해 100 LMH 이상은 급격한 막의 저항이 시작되므로 60과 100 LMH 두 가지 조건에서 운전을 통해 세정주기를 판단하고자 하였다.

① 60 LMH

Fig. 6에 나타나듯이 60 LMH로 운전 시 69 hr에서 급격한 상승을 보인 이후로 계속적으로 증가하였다. 분리막의 역세시점은 TMP 350 mmHg로 정하였으므로 최적의 세정주기는 4~5일이라는 것을 확인할 수 있었다.

② 100 LMH

Fig. 7에서 나타나듯이 100 LMH로 운전 시 669 min (6.7 hr)에서 급격한 상승을 보인 이후로 계속적으로 증가하였다. 분리막의 역세시점은 TMP 350 mmHg로 정

하였으므로 최적의 세정주기는 1일이라는 것을 알 수 있다.

3.4 응집제가 여과성능에 미치는 영향

호기성슬러지에 침지된 금속필터에 응집제가 미치는 영향을 알아보기 위해서 PAC를 10, 50, 80, 150, 300 ppm/day 각각 투여하였다. 투입시기는 1일 3회로 나누어서 투여하였고 희석배수는 5배로 하였다. Fig. 8을 보면 PAC 주입을 한 경우, 그렇지 않았을 경우에 비해 투과플럭스가 안정된 상태를 유지하는 현상을 확인하였다. 이는 2000년 발표된 연구결과[8]에 의하면 PAC이 반응조에 존재하는 콜로이드성 현탁물질을 응집시킴과 더불어 알칼리도 성분과 반응하여 금속수산화물을 생성시켜 미세플럭을 조대플럭으로 전환함으로써 안정된 투과플럭스를 유지하고 투과압력을 낮추는 데 기인한 것으로 판단된다.

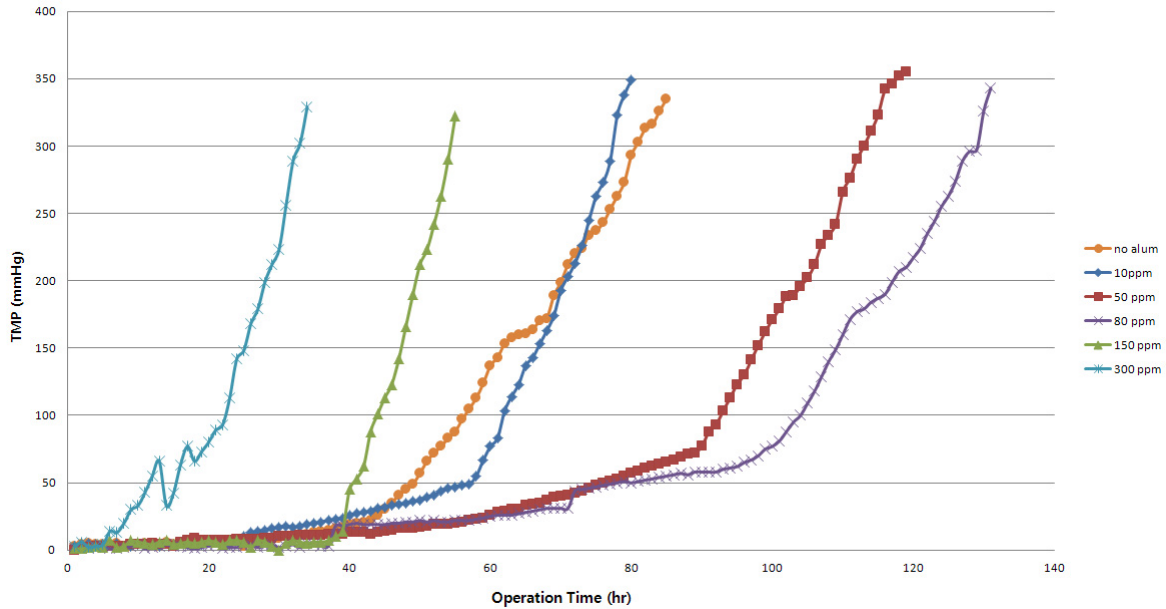


Fig. 8. Variation of pressure according to PAC.

그러나 응집제 투여량을 150, 300 ppm으로 증가시킨 결과 TMP (mmHg)의 증가속도는 오히려 빨라졌다. 2009년 발표된 연구결과[9]에 의하면 과도한 응집제투여량은 분리막의 여과성능을 저하시킨다는 결과를 나타냈다. 마찬가지로 pore-size가 큰 필터에서도 여과성능이 저하된다는 것과, 이에 최적 PAC 주입량은 80 ppm 이라는 것을 확인하였다.

유기물 제거율 실험은 1일마다 1회씩 측정한 평균값을 나타냈으며 COD의 최대값은 35~5 mg/L이고 평균값은 11 mg/L이다, SS의 최대값은 35~10 mg/L이고 평균값은 14 mg/L 이다. Table 5에 나타나듯이 유기물의 제거효율이 PAC을 투여하지 않는 운전조건에 비해 제거율이 더 높게 나왔다. 이는 Nagaoka[10]의 연구결과에 의하면 점성을 갖는 미생물 대사산물이 액체명반과 반응하여 불용성 금속염으로 전화됨으로써 나타난 결과라고 보고하였다. 따라서 응집제 투여는 플럭스 증대뿐만 아니라 유기물 제거효율에도 향상을 가져다주므로 금속 filter를 MBR에 적용 시 PAC 투여하는 게 옳다고 판단된다.

Fig. 9는 PAC 투여량에 따른 Particle 사이즈를 측정하였다. 14.22  $\mu\text{m}$  이하 파티클 크기에 따른 floc 사이즈 비율이 가장 높은 것은 80 ppm이다. PAC 투여량이 늘어나면 날수록 14.22  $\mu\text{m}$  이하 파티클이 비중이 높았

Table 5. Removal Efficiency of Organic Matter

PAC	COD mg/L	SS mg/L
응집제 투여 전	11	14
응집제 투여 후	5	1

는데 이는 Metal필터의 공경크기가 13  $\mu\text{m}$ 이므로 PAC 투여량이 높으면 높을수록 여과성능을 저하시킨다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에서 나타난 바와 같이 PAC 주입량에 따른 활성슬러지의 Particle size는 막의 공극크기에 따라 공경크기와 비슷한 크기의 Particle이 많을수록 투과 플럭스 감소율이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 공극 막힘현상(pore blocking)이 필터의 투과 플럭스 감소의 직접적인 요인이라 판단된다. 2002년 발표된 연구결과[11]에 의하면 여기에 공극흡착현상(pore adsorption)이 발생하여 막오염 메커니즘 중 공극오염(pore fouling) 현상이 주된 막오염 메커니즘으로 작용하기 때문이라고 보고하였다. Li and Chen[12]의 연구에서도 막의 공극 크기가 클수록 겔층 형성과 농도분극화 현상보다 공극 막힘현상과 공극 흡착현상에 의하여 투과 플럭스 감소율이 더 크게 나타난다고 보고하였다.

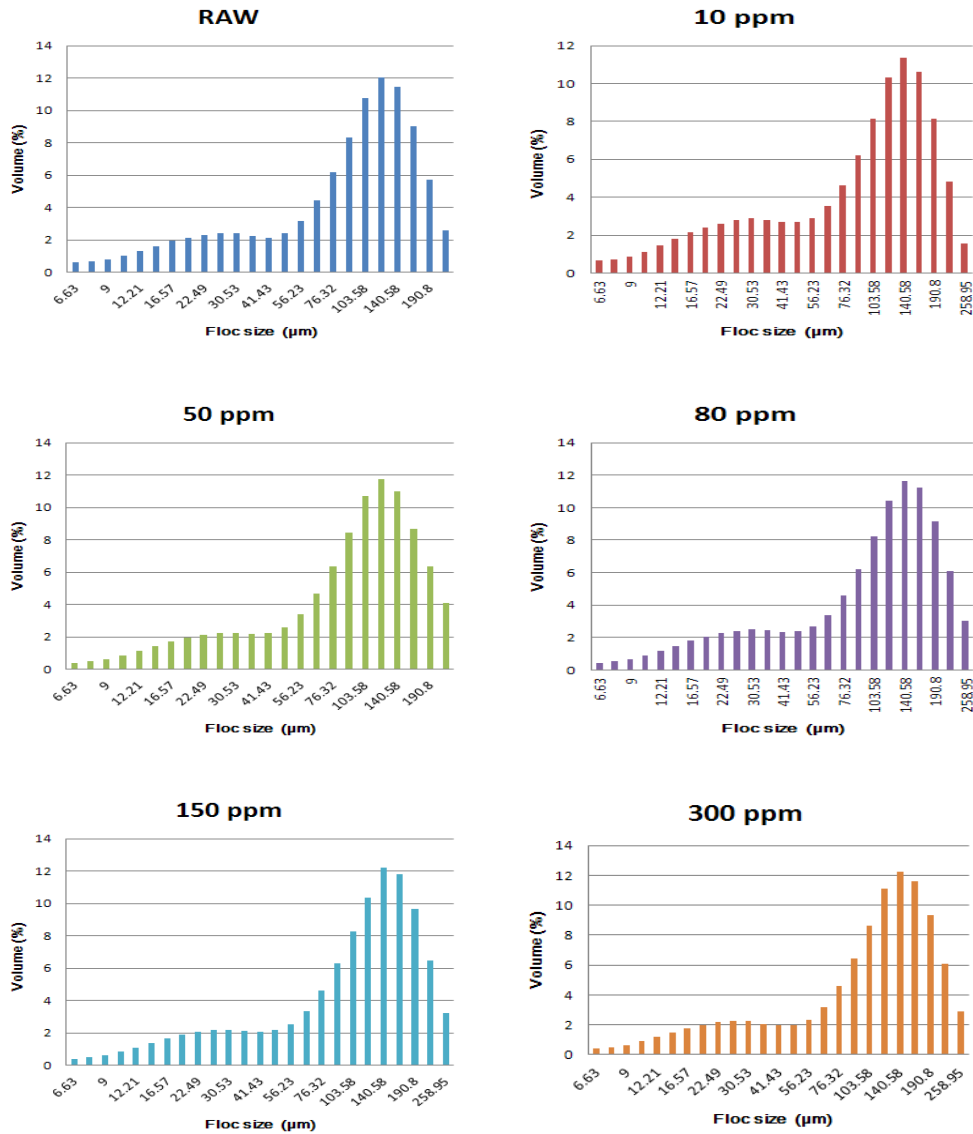


Fig. 9. Particle size according to PAC administration (10, 50, 80, 150, 300 ppm).

3. 결 론

본 실험에서는 Metal필터를 이용한 MBR에서의 적용 타당성을 나타냈고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Metal필터의 공경크기가 13 μm인 경우 평균 8,884 LMH로 나타났고 이는 고분자막에 비해 월등한 플럭스를 가진 것으로 알 수 있다. 임계플럭스는 100 LMH 이하로 운전해야 여과주기를 늘릴 수 있다는 것을 보였다.

MLSS 5,000 mg/L 인 상태에서 Metal필터 13 μm로 고평럭스 운전 시 최대 1,170 LMH까지 가능하며, 60

LMH로 운전 시 69 hr에서 급격한 상승을 보인 이후로 계속적으로 증가하였다. 분리막의 역세시점은 TMP 350 mmHg로 정하였으므로 최적의 세정주기는 4~5일이라는 것을 알 수 있다. 반면, 100 LMH로 운전 시 669 min(6.7 hr)에서 급격한 상승을 보인 이후로 계속적으로 증가하였다. 분리막의 역세시점은 TMP 350 mmHg로 정하였으므로 최적의 세정주기는 1일이라는 것을 알 수 있다.

PAC 투여에 따른 파티클사이즈 실험을 통해 14.22 μm 이하 파티클 크기에 따른 플럭스비율이 가장

높은 것은 Alum 80 ppm임을 알 수 있다. PAC 투여량이 늘어나면 날수록 14.22  $\mu\text{m}$  이하 파티클이 비중이 높았다. 이는 Metal필터의 공경크기가 13  $\mu\text{m}$ 이므로 PAC 투여량이 높으면 높을수록 여과에 더 안 좋은 것을 알 수 있다. 또한 PAC 투여량에 따른 압력변화실험 결과 Alum 80 ppm임과 일치하므로 최적의 PAC 투여량은 80 ppm임을 알 수 있다.

### 감 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 글로벌환경기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(2016002100001)

### Reference

1. K. J. Kim and S. H. Yoon, "Wastewater treatment using membrane bioreactors (MBR)", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**, 239-248 (2001).
2. K. Y. Kim, J. M. Kim, H. S. Kim, S. B. Lee, Y. J. Park, and S. J. Bae, "A Study on the optical internal recycle rate and MLSS concentration of membrane coupled A<sub>2</sub>O process for wastewater treatment", *Membr. J.*, **15**, 114-120 (2005).
3. H. Kishino, H. Ishida, H. Iwabu, and I. Nakano, "Domestic wastewater reuse using a submerged membrane bioreactor", *Desalination*, **106**, 115-109 (1996).
4. J. S. Kim and K. H. Ahn, "Effects of operation parameters on critical flux during submerged-type membrane filtration system", *Korean Society of Water & Wastewater*, **16**, 717-725 (2002).
5. USEPA, "Membrane filtration guidance manual", USEPA 815-R-06-009 (2005).
6. A. S. Josson and B. Josson, "The influence of nonionic and ionic surfactants on hydrophobic and hydrophilic ultrafiltration membranes." *J. Membr. Sci.*, **56**, 49-76 (1991).
7. E. Guibelin, F. Delsalle, and P. Binot, "The ACTIFLO process: A highly compact and efficient process to prevent water pollution by stormwater flows", *Water Sci. Technol.*, **30**, 86-88 (1994).
8. J. R. Park and E. H. Kim, "Study on the organic and phosphorus removal of domestic sewage using submerged hollow fiber microfiltration membrane and alum added into activated sludge reactor (Alum-MBR System)", *Korean Society on Water Environment*, **16**, 401-411 (2000).
9. K. Y. Kim, J. H. Kim, Y. H. Kim, and H. S. Kim "The Effect of coagulant on filtration performance in submerged MBR system", *Membr. J.*, **16**, 182-187 (2006).
10. H. Nagaoka, "Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process", *Water Sci. Technol.*, **34**, 165-172 (1996).
11. C. W. Jung, S. W. Han, and L. S. Kang, "Characteristic of organic substances absorption onto membrane materials", *J. Korean society of environmental engineers*, **24**, 1339-1348 (2002).
12. C. W. Li and Y. S. Chen, "Fouling of UF membrane by humic substance: Effects of molecular weight and powder-activated carbon (PAC) pre-treatment", *Desalination*, **170**, 59-67 (2004).