

ORIGINAL ARTICLE

소규모 개인하수처리시설의 MBR공정 적용에 관한 연구

엄한기 · 최유현 · 주현종^{1)*}

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, ¹⁾경기대학교 환경에너지공학과

A Study on Process Improvement for Reduction of Pollution Loading Rate in Small Individual Sewage Plant

Han Ki Eom, Yoo Hyun Choi, Hyun Jong Joo^{1)*}

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School, Kyonggi University, Suwon 16627, Korea

¹⁾Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon 16627, Korea

Abstract

In this study, the applicability of MBR process was evaluated to improve processing of personal sewage treatment facilities of 50 m³/day or less. As result of the research, stable discharge water quality could be secured as result of the MBR effector operation according to rate of inflow and inflow load and treatment efficiency of 98% or higher was shown by the membrane filtering method operation for SS, BOD₅. it was found that high treatment efficiency of 99% or higher. It is judged that detention time can be designed until 6.9 hr when applying MBR process on personal sewage treatment facilities with high pollution load and that cutback of pollution load can be possible through this study. It was shown that MBR process application reduces an annual cost of 4,829,600 won based on the basic unit calculation results and solves burden of amount of borne by causers according to excess of discharge water quality standards.

Key words : MBR, Individual sewage treatment plant, High influent loading

1. 서론

2012년도 기준으로 전국의 개인하수처리시설은 총 2,890,386 개소가 운영되고 있으며, 이 중 정화조는 2,474,311 개소, 오수처리시설은 416,075 개소로 이루어져 있다(MOE, 2014). 개인하수처리시설의 경우 수질 오염총량관리제 의무제 시행에 따라 개소수가 더욱 증가할 것으로 예상되고 있으나, 2013년도 하반기에 실시한 팔당특별대책지역 내 50 m³/day 이하 개인하수처리 시설 집중점검 진행결과 위반 시설수가 다수 발생된 것으로 나타났다(The Policy Council for the Paldang

Watershed, 2014). 위반 내용으로는 수질기준 초과가 대부분을 차지하고 있으며, 이에 따라 개인하수처리시설 및 운영에 문제가 있음을 시사하고 있다. 50 m³/day 미만의 개인하수처리시설의 문제점의 경우 저가 불량 FRP 등 록제품의 생산 및 유통, 개인하수처리시설 준공 및 유지체계 관리의 부실, 법적방류수 수질기준 초과 등이 있으며, 이중 법적방류수 수질기준 초과에 따른 오염부하량 증가로 인해 환경오염이 심각하게 대두 되고 있는 실정이다.

개인하수처리시설의 처리 공법은 부패탱크, 접촉속기, 살수여상 등으로 이루어져 있으며, 현수미생물 공법과

Received 16 December, 2015; Revised 11 January, 2016;

Accepted 26 January, 2016

*Corresponding author: Hyun Jong Joo, Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon 16627, Korea
Phone : +82-31-257-7689
E-mail : hjjoo@kyonggi.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.

같은 접촉폭기 방법이 가장 주된 처리방법으로 운영되고 있는 실정이다. 현수미생물 공법은 부착미생물막이 고점도의 호기성균으로 둘러싸여 미생물 탈리가 거의 없어 슬러지 발생량이 적고, 충격부하가 강한 이점이 있다. 하지만 관리가 소홀할 경우 미생물이 탈리되어 방류수의 2차 오염을 야기시키고 과도한 유기물 부하로 미생물이 과잉 증식되어 접촉제 사이를 막는 폐쇄현상이 발생하는 등의 단점이 있다(Clara et al., 2005). 분리막의 경우 선택적으로 혼합물을 분리시킬 수 있는 기술로 알려져 있으며 현재 MBR과 관련된 기술은 서서히 발전해 오고 있는 추세이다(Crawford et al., 2002). 분리막이 적용된 활성슬러지 공정은 산업폐수, 생활하수 처리의 고도화 및 효율화를 목적으로 많이 적용되고 있는 실정이다. 또한 향후 엄격한 수질규제와 처리수 재이용에 대한 의무화로 인해 MBR공정 적용이 증가할 것으로 전망되고 있다(Cicek, 2003; Visvanathan et al., 2000).

본 연구의 목적은 50 m³/day 이하 소규모 개인하수처리시설에서 발생하는 법적 방류수 수질기준 초과를 방지하기 위해 고부하 오염원 처리에 적합한 MBR 공정을 적용하는데 있다. 이에 따라 실험실 규모의 반응기 운전을 통해 고부하 유입에 따른 처리효율과 최적의 반응조 설계인자를 도출하고, 오염부하량 삭감 원단위 산정을 통해 소규모 개인하수처리시설 내 MBR 공정 적용 가능성에 대하여 연구하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구재료

소규모 개인하수처리시설에 적용 가능한 MBR 공정

을 평가하고자 Y시 내 오염부하량이 높은 음식점 개인하수처리시설 유입수를 채수하여 연구재료로 사용하였으며 유기물 및 영양염류 분석결과를 Table 1에 나타내었다. MBR 공정을 모사하기 위해 실험실 규모의 아크릴소재 반응기를 구성하였으며, Fig. 1에 실험장치를 나타내었다. MBR 반응기의 용량은 포기조 30 L, 막분리조 7.5 L로 총 37.5 L이며, 완전혼합이 가능한 교반장치와 산소공급을 위한 폭기장치, 정량펌프, 수위조절 레벨, 자동제어 컨트롤 패널로 구성되어 있다. MBR 반응기에 적용된 Membrane은 MF로써 현재 개인하수처리시설에서 주로 이용되고 있는 막 (YUASA)을 선정하였으며, Table 2과 Fig. 2에 막 제원 및 실험에 사용된 Lab scale용 Membrane을 나타내었다. 막 재질은 PVC로 이루어져 있으며 Membrane의 pore size는 0.1 ~ 0.4 μm (최대빈도 0.25 μm), 유효 면적 0.8 m²/장, 표준여과속도 0.4 ~ 0.8 m³/m²·day이며 Fulx의 경우 0.363 m³/장이다.

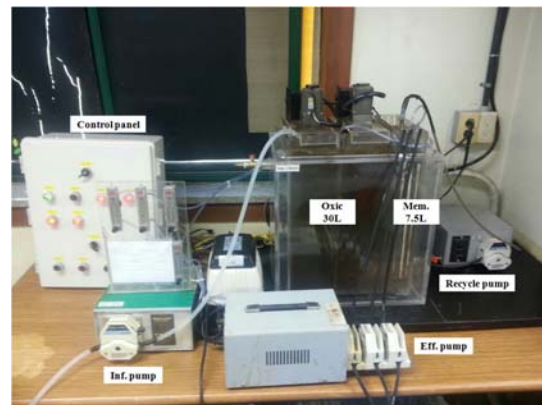


Fig. 1. Experimental equipment of Lab. scale MBR.

Table 1. Characteristics of influent

pH	TCOD _{Mn}	SCOD _{Mn}	TBOD ₅	SBOD ₅	TN	TP	TSS
7.34	680	580	610	540	56	5.7	256

Table 2. Characteristics of membrane

Material	Pore size (μm)	Effective area ratio (m ² /sheet)	Standard filtration velocity (m ³ /m ² ·day)	Membrane flux m ³ /sheet
PVC	0.1 ~ 0.4 (Max frequency 0.25)	0.8	0.4 ~ 0.8	0.363

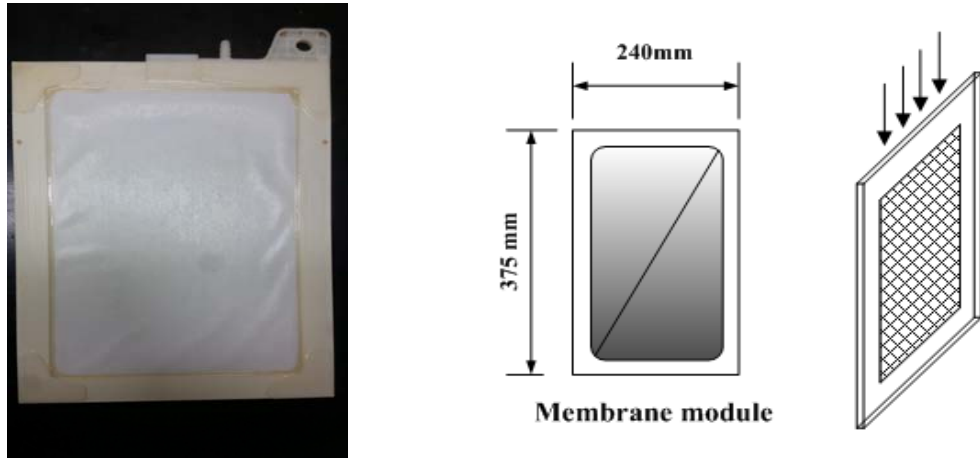


Fig. 2. Composition of Lab. scale membrane.

2.2. Lab. scale MBR 반응기 운전특성

Lab. scale MBR 반응기를 이용하여 공정의 오염원 처리효율을 평가하고 반응조 설계인자를 도출하고자 한다. 실험조건의 경우 MBR 공정 내 최적 체류시간 도출 및 부하량 증가에 따른 처리효율을 평가하기 위하여 유입유량에 따라 Mode 1 ~ 4으로 구분하였으며, 각각 0.028, 0.050, 0.072, 0.095 kg BOD₅/day로 유입부하량을 설정하였다. 반응기 운전에 사용된 유입수는 개인하수처리시설 중 오염부하량이 높은 음식점에서 배출되는 원수를 적용하였다. Table 3에 Mode별 실험조건을 나타내었다.

2.3. MBR 적용에 따른 오염부하 삭감량 및 오염부하 삭감 원단위 산정

MBR 적용으로 개인하수처리시설의 오염부하량 삭

감과 오염부하 삭감 원단위 산정을 위해 Y시의 하수관리 비용 분석자료와 50 m³/day 이하 개인하수처리시설에서 배출되는 방류수를 채수하여 방류수 분석을 실시하였다. 처리시설 선정의 경우 설계용량 대비 실제 유입유량 비율의 일치성, 처리공법의 대표성, 처리용량 등을 고려하여 본 연구 기준에 적합한 시설을 선정하였다.

오염부하 삭감 원단위 산정절차는 첫째로, 처리시설별 소요되는 전력량, 약품사용량 및 슬러지처리량을 통해 하수처리비용을 산정하였으며 둘째, 단위공정별 BOD₅ 및 SS 수질분석을 통해 오염부하량 및 오염부하 삭감량을 도출하였다. 마지막으로 위 단계별로 도출된 단위공정별 하수처리비용을 오염부하 삭감량으로 나누어 BOD₅, SS 오염부하 삭감 원단위를 산정하였다.

Table 3. Operating conditions of Lab. scale MBR

Parameter	Value	Parameter	Value
DO (mg/L)	4.0 ~ 5.0	MLSS (mg/L)	7,000 ~ 9,500
pH	7.1 ~ 8.0	MLVSS (mg/L)	6,000 ~ 8,000
Temp (°C)	15 ~ 20	F/M ratio (kg COD/MLVSS day)	Mode 1 ~ 4
Recycle (Q)	1.0 ~ 2.0	SRT (Day)	50 day

Table 4. Experimental conditions of MBR

Mode	Influent flow (L/day)	BOD ₅ loading (kg/day)	F/M ratio kg BOD ₅ / kgMLVSS	HRT (hr)		
				Oxic	Membrane	Total
Mode 1	50	0.028	0.56	14.4	3.6	18.0
Mode 2	90	0.050	1.00	8.0	2.0	10.0
Mode 3	130	0.072	1.44	5.5	1.4	6.9
Mode 4	170	0.095	1.90	4.2	1.1	5.3

BOD₅ 또는 SS 오염부하량 삭감 원단위(원/kg)

= 단위공정별 하수처리비용 (원/일) /

BOD₅ 또는 SS 오염부하 삭감량 (kg/일)

2.4. 수질분석방법

항목별 분석방법은 Standard Methods (APHA, 2012) 및 공정시험법에 준하여 분석하였다. 고형물 측정의 경우 시료를 GF/C filter (Whatman, 공극 1.2 μm) 및 934-AH filter가 부착된 Gucci 도가니로 여과하여 측정하였다. BOD₅의 경우 공정시험법 중 5-day BOD 시험법을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. MBR 반응기 운전결과

Lab. scale MBR 운전을 통해 오염부하별 BOD₅ 및 SS의 처리효율을 평가하고, 최적 반응조 체류시간을 도출하였다. Table 5 및 Fig. 3 ~ 5에 MBR 운전결과를 나타내었다.

유입유량 및 BOD₅부하에 따라 Mode를 구분하여 MBR 반응기 운전을 실시하였다. Mode 1에서 유입수 BOD₅의 최대, 최소 평균농도는 594.0, 514.0, 552.7 mg/L를 보였으며, 방류수 BOD₅ 농도는 최대 3.5, 최소

Table 5. Results of pollution source removal characteristics on MBR at each operation mode

Parameter		Influent (mg/L)			Membrane (mg/L)			Effluent (mg/L)		
		Min.	Max.	Ave.	Min.	Max.	Ave.	Min.	Max.	Ave.
Mode 1	SBOD ₅	514.0	594.0	552.7	2.6	4.1	3.5	2.2	3.5	2.8
	NH ₃ -N	36.2	52.0	44.5	0.2	0.8	0.4	0.2	0.7	0.4
	TSS	162.0	285.0	215.5	7,420	7,560	7,464	1.0	7.0	3.4
Mode 2	SBOD ₅	518.0	592.0	555.8	2.6	5.0	4.1	2.5	4.2	3.5
	NH ₃ -N	39.2	52.2	45.0	0.2	0.8	0.4	0.2	0.8	0.4
	TSS	154.0	252.0	211.0	7,480	7,600	7,482	1.0	5.0	3.2
Mode 3	SBOD ₅	517.0	590.0	554.2	4.2	7.6	5.8	4.4	6.6	5.2
	NH ₃ -N	40.4	52.0	45.7	0.4	0.9	0.7	0.4	0.9	0.6
	TSS	179.0	236.0	199.6	7,440	7,500	7,475	1.0	6.0	3.0
Mode 4	SBOD ₅	512.0	566.0	532.9	5.4	10.5	9.1	6.2	9.6	8.3
	NH ₃ -N	40.8	49.8	46.4	0.7	4.0	2.1	0.5	3.2	1.6
	TSS	182.0	263.0	207.6	7,400	7,510	7,474	1.0	7.0	3.2

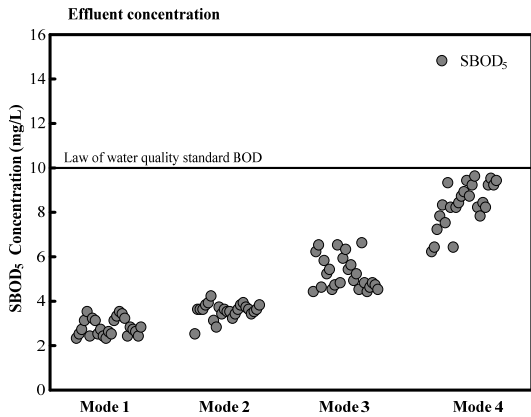


Fig. 3. Results of effluent BOD₅ concentration HRT variation.

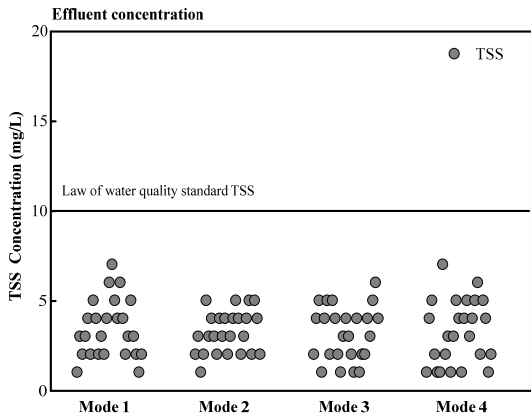


Fig. 4. Results of effluent SS concentration at each operation mode.

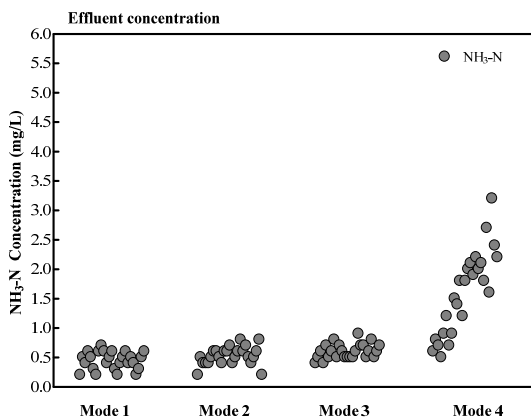


Fig. 5. Results of effluent NH₃-N concentration HRT variation.

2.2, 평균 2.8 mg/L로 약 99%의 제거효율을 나타내었다.

Mode 2 조건에서 BOD₅의 경우 유입수의 평균농도가 555.8 mg/L에서 MBR 공정을 거친 후 방류수에서 3.5 mg/L로 분석되었으며, 약 99% 높은 제거효율을 보였다. Mode 3과 Mode 4의 경우에서도 각각 BOD₅ 농도가 유입수 평균 554.2, 532.9 mg/L에서 방류수 평균 5.2, 8.3 mg/L로 약 99, 98%의 제거효율을 보였다. Cha (2004)의 연구결과 반응조 내 HRT와 유기물 제거효율의 관계는 비례한다고 보고하고 있으나 본 연구 결과에서는 HRT가 감소해도 BOD₅ 제거효율의 경우 98~99%를 나타내고 있다. 이는 MBR의 공정특성 중 반응조 내 고농도 미생물 유지가 가능하다는 점과 0.5~1.9의 F/M ratio 범위 내에서는 안정적인 유기물 제거가 가능한 것으로 판단된다.

NH₃-N 제거의 경우 Mode별 유입수의 평균 농도는 44.5, 45.0, 45.7, 46.4 mg/L에서 방류수 평균농도 0.4, 0.4, 0.6, 1.6 mg/L로 Mode 3까지는 NH₃-N의 농도가 1.0 mg/L이하로써 완전한 질산화 반응이 이루어 졌으나 Mode 4의 운전조건에서 NH₃-N가 점차 증가하는 현상을 보이고 있다. 따라서 유기물 제거와 더불어 질산화반응 또한 HRT에 따른 반응시간이 중요하다고 기존 연구에서도 보고하고 있으며(Tasuki and Kenji, 1999), 본 연구결과에 따라 개인하수처리시설에 MBR공정을 적용할 경우 유입수 내 유기물 및 질소부하량 변동이 큰 특성에 따라 안정적인 유기물 및 질산화효율을 유지하기 위해서는 Mode 3의 운전조건인 체류시간 6.9 hr을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Mode 별 SS의 경우 각각 방류수 평균농도는 3.4, 3.2, 3.0, 3.2 mg/L로 분석되었으며, 98% 이상의 높은 제거효율을 보였다. 이는 MBR 공정 내 분리막 특성에 따른 결과이며, 분리막은 Membrane의 공극크기에 따라 부유물질 및 병원성 미생물을 제거하여 우수한 처리수질을 얻을 수 있다(Santos et al., 2011). 따라서 MBR공정 적용시 기존처리공정 내 존재하는 침전지에서 발생하는 슬러지 팽화 및 스킴발생에 따른 방류수 수질기준 초과에 대한 문제점을 개선할 수 있으며 안정적인 처리수질 확보가 가능 할 것으로 판단된다.

3.2. 오염부하 삭감량 및 원단위 산정 결과

공공하수처리시설 7개소를 대상으로 BOD₅, SS 오염

Table 6. Evaluation results of pollution loading reduction rate and unit on applying MBR

Parameter	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Eff. conc. in applying Lab. test results (mg/L)	Reduction loading rate (kg/day)	Daily reduction cost (won/day)	
Site A	BOD ₅	558.8	102.4	7.3	2.9	3,988
	SS	225.0	48.0	2.3	1.4	2,890
Site B	BOD ₅	247.8	130.8	3.2	2.6	3,567
	SS	100.0	36.0	1.0	0.7	1,457
Site C	BOD ₅	466.4	168.4	6.1	3.2	4,537
	SS	127.0	70.0	1.3	1.4	3,509
Site D	BOD ₅	566.4	118.4	7.4	1.7	2,327
	SS	252.0	45.0	2.5	0.6	1,343
Site E	BOD ₅	538.0	110.8	7.0	2.6	3,627
	SS	128.0	41.0	1.3	1.0	2,092
Site F	BOD ₅	238.0	66.4	3.1	1.9	2,654
	SS	154.0	83.0	1.5	2.4	5,154
Average			BOD ₅		2.5	3,495
			SS		1.3	2,740

부하 삭감 원단위를 검토한 결과 각각 1,398.8 원/BOD₅ kg, 2,108.9 원/SS kg으로 나타났다(The Policy Council for the Paldang Watershed, 2014). 50 m³/day 이하 개인하수처리시설에서 배출되는 방류수의 수질분석결과와 Lab. scale 반응기에서 도출된 평균 BOD₅, SS 제거효율을 바탕으로 MBR 공정 적용할 경우 예상되는 방류수 농도를 도출하였다. Table 6에 MBR 공정 적용에 따른 오염부하 삭감량 및 원단위 산정 결과를 나타내었다.

50 m³/day 이하 개인하수처리시설에서 BOD₅ 및 SS 오염부하 삭감량을 산정한 결과 평균 각각 2.5, 1.3 kg/day로 나타났다. 또한 삭감부하량에 따른 원단위의 경우 BOD₅ 및 SS가 각각 1,398.8, 2,108.9 원/day으로 나타났으며, 총 6,235 원/day로 분석되었다. 이에 따라 50 m³/day 이하 개인하수처리시설에 MBR 공정을 적용하였을 경우 BOD₅ 및 SS 오염부하 삭감에 따라 일평균 6,235원의 비용이 절감되었으며, 1년으로 환산한 결과 평균 약 2,275,775원의 비용이 절감하는 것으로 나타났다. 또한 개인하수처리시설의 처리용량을 최소 21

m³/day, 최대 50 m³/day이라 가정하고 개인하수처리시설의 방류수가 수질기준을 초과한다는 가정하에 용량보정계수인 2.5를 곱해줄 경우 1년간 삭감비용은 개소당 5,689,437원으로 나타났다. 이는 지역별 전수조사 결과 적용시 비용산정에 있어 많은 차이가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 50 m³/day 이하 개인하수처리시설에서 발생하는 방류수질기준 초과와 문제점을 해결하기 위해 MBR 공정의 적용을 검토 하였으며, 이에 따른 오염부하량 삭감가능성에 따른 경제성을 평가하였다. 연구결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 50 m³/day 이하 개인하수처리시설에서 발생하는 가장 큰 문제점의 경우 시설관리 및 운영 미흡에 따른 방류수질기준이 초과되고 있으며 이에 따라 BOD₅, SS 규제만 받는 개인하수처리시설의 경우 안정적인 방류수질

을 유지하기 위해 MBR 공정의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2) 고유입부하의 개인하수처리시설에 MBR 공정을 적용할 경우 최적 체류시간은 6.9 hr으로 나타났으며 안전계수 등을 고려하여 활용할 경우 향후 개인하수처리시설 설계인자로 적용 가능할 것으로 판단된다.

3) 소규모 개인하수처리시설 내 MBR 공정을 적용함에 따라 추가오염부하량 삭감이 가능할 것으로 판단되며, 일단위 산정을 통해 삭감된 오염부하량을 경제적 가치로 환산할 경우 MBR공정은 향후 개인하수처리시설 공정설계 시 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4) 본 연구는 실험실 규모의 연구를 통해 도출된 연구로써 향후 실제 소규모 개인하수처리시설 현장에 MBR 공정 적용 시 현장조건에 따른 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 수도권매립지공사의 환경에너지 대학원 인력양성 프로그램의 지원으로 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Cha, G. C., You, Y. U., Kim, D. J., Yoo, I. K., 2004, Behavior of SMP and ECP with change of loading rate of organic compounds in MBR Process, *J. of KSEE*, 26(2), 211-218.
- Cicek, N., 2003, A review of membrane bioreactors and their potential application in the treatment of agricultural wastewater, *Canadian Biosystems Engineering*, 45, 37-46.
- Clara, M., Strenn, B., Gans, O., Martinez, E., Kreuzinger, N., Kroiss, H., 2005, Removal of selected pharmaceuticals, fragrances and endocrine disrupting compounds in a membrane bioreactor and conventional wastewater treatment plants, *Water Res.*, 39(19), 4797-4807.
- Crawford, G., Fernandez, A., Shawwa, A., Daigger, G., 2002, Competitive bidding and evaluation of membrane bioreactor equipment-three large plant case studies, *Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC*, 21(30), Chicago, USA.
- Environment Installation Division, Korea Environment Corporation 2012, Intergration sewerage administration satabilization policy of Nakdong river, 1-3.
- Santos, A., Ma, W., Judd, S. J., 2011, Membrane bioreactors : Two decades of research and implementation, *Desalination*, 273(1), 148-154.
- Ministry of Environment, Sewerage Division, 2014, Sewerage Policy, No. 11-1480000-000159-10, 1199-1256.
- Ministry of Environment, Sewerage Division, 2009, Study on efficient manufacturing installation and management of individual wastewater treatment facilities, 1-99.
- Tasuki, U., Kenji, H., 1999, Domestic wastewater treatment by a submerged membrane bioreactor with gravitational filtration, *Water Res.*, 33(12), 2888-2892.
- The Policy Council for the Paldang Watershed 2014, Study load reduction measures to secure the area Paldang small private sewage treatment facilities, 2-7.
- Visvanathan, C., Ben aim, R., Parameshwaran, K., 2000, Membrane separation bioreactors for waste-water treatment, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 30(1), 1-48.