



실규모 flat sheet MBR 운영 효율과 Fouling 특성을 위한 미생물 군집 평가

Performance and microbial community analysis for fouling characteristics in a full-scale flat sheet membrane bioreactor

김승원 · 최정동*

Seungwon Kim · Jeongdong Choi*

한국교통대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Korea National University of Transportation

ABSTRACT

Membrane bioreactor (MBR) provides the benefits on high effluent quality and construction cost without the secondary clarification. Despite of these advantages, fouling, which clogs the pore in membrane modules, affects the membrane life span and effluent quality. Studies on the laboratory scale MBR were focused on the control of particulate fouling, organic fouling and inorganic fouling. However, less studies were focused on the control of biofouling and microbial aspect of membrane. In the full scale operation, most MBR produces high effluent quality to meet the national permit of discharge regulation. In this study, the performance and microbial community analysis were investigated in two MBRs. As the results, the performance of organic removal, nitrogen removal, and phosphorus removal was similar both MBRs. Microbial community analysis, however, showed that *Azonexus sp.* and *Propionivibrio sp.* contributed to indirect fouling to cause the chemical cleaning in the DX MBR.

Key words: Fouling, Membrane bioreactor, Wastewater, Microbial community, Flat sheet

주제어: 파울링, 분리막 생물 반응조, 하수, 미생물 군집, 평막

Received 18 October 2023, revised 11 November 2023, accepted 13 November 2023.

*Corresponding author: Jeongdong Choi (E-mail: jchoi@ut.ac.kr; Fax: 82-43-841-5350, Tel: 82-43-841-5353)

김승원 (대학원생) / Seungwon Kim (Graduate student)

충청북도 충주시 대학로 50, 27469

50, Daehak-ro, Daesowon-myeon, Chungju-si, Chungcheongbuk-do 27469, Republic of Korea

최정동 (교수) / Jeongdong Choi (Professor)

충청북도 충주시 대학로 50, 27469

50, Daehak-ro, Daesowon-myeon, Chungju-si, Chungcheongbuk-do 27469, Republic of Korea

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.

pp. 311-324

pp. 325-334

pp. 335-345

pp. 347-361

pp. 363-373

pp. 375-382

pp. 383-394

pp. 395-408

pp. 409-423

pp. 425-435

pp. 437-446

pp. 447-456

1. 서론

도시 및 산업 부분에서 배출되는 하수량의 증가와 엄격한 방류수 수질 기준에 대비하기 위해 전국의 하수처리시설은 기존 공법을 고도처리시설로 변경하였으며, 최근 환경재료 분야의 분리막(Membrane)기술의 발전으로 인해 분리막 생물 반응조(Membrane Bioreactor, MBR)의 적용 사례가 증가하고 있다 (Krzeminski et al., 2017). 분리막은 재료의 특성에 따라 평막(flat sheet membrane) 형식 또는 중공사막(hollow fiber membrane) 형식이 대표적으로 사용되고 있으며, 막 자체의 평균 사용기간은 5~10년 사이로 하수처리 공정운전 중에 막의 손상이 일어나지 않는다면 장기간 사용이 가능하고, 양질의 유출수를 확보할 수 있고, 2차집전지를 건설하지 않아 부지소요 비용을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점에도 불구하고, 막 공정 운전의 단점은 막 표면이 막히는 현상인 막 오염(fouling)이다. 막오염의 발생은 (1) 입자성 막오염(particulate fouling), (2) 무기성 스케일 형성(inorganic scales), (3) 유기성 막오염(organic fouling), 그리고 (4) 생물학적 막오염(biological fouling)으로 나뉘어진다 (Metcalf and Eddy, 2014). 입자성 막오염은 유입수 내 입자성 물질에 의해 발생하는 것으로 주요 막손상 물질은 유무기 콜로이드, 점토 및 실트, 실리카 등에 의해서 유발되며 주기적인 세척으로 저감이 가능하다. 스케일링 형성은 유입수 내 화학성분이 막표면에서 제거됨에 따라서 해당 성분의 농도가 높아지는 현상으로 염 농도 제한, antiscalant 등 화학적인 방법이 있다. 유기성 막오염은 휴믹산, 펠빅산, 단백질 등의 NOM(natural organic matters)에 의해서 발생되며 전처리를 통해서 저감이 가능하다. 생물학적 막오염(biofouling)은 미생물의 성장에 의해 발생되거나 미생물 유래 고분자 물질이라 불리는 EPS(extracellular polymeric substance)로 인해서 발생되며 물리/화학적 세정에 의해서 감소될 수 있다.

MBR 공정의 막오염의 저감을 위해서 다양한 연구가 시도되었다 (Nabi et al., 2023; Judd, 2006). Judd (2006)의 연구에서 막오염 저감을 요약한 방법으로 유입수 전처리, 역세척, 막표면의 화학적 세정, 공기방울 세정, mixed liquor의 화학적 변화 등을 들 수 있다. Sohn et al. (2021)은 분말 활성탄을 막공정에 주입하여 소수성 향상과 플록 형성 능력을 향상시켜 막오염

을 저감시켰으며 생물막 분리막 공정의 미생물 조성을 변화시켰다. Rezaei and Mehrnia (2014)는 MBR 반응조에 천연 zeolite을 주입하여 fouling 저감과 SMP(soluble microbial product) 감소의 효과를 보였다. 또한, 최근 MBR 공정의 효율 향상을 위해서 막 표면의 화학적 변화를 위한 시도가 이루어지고 있다. Deowan et al. (2016)은 UF 막에 antifouling 코팅을 적용했을 시, MBR 공정에서 막오염이 저감되는 것을 관찰할 수 있었다. 생물학적인 막오염 저감방법으로 미생물의 신호 전달 물질을 차단하는 Quorum quenching(QQ)을 이용한 방법이 제시되고 있으나 실제 적용에서는 효소(enzyme)의 안정성과 경제적인 비용이 해결해야 할 문제이다 (Oh et al., 2012; Yi et al., 2023). 그러나, MBR 공정의 미생물 분석을 통한 막오염 현상 규명에 대한 연구는 거의 없으며 실규모 처리장을 대상으로 미생물을 분석한 연구 자료가 미비한 실정이다.

막오염 저감 방안으로 위에서 언급한 내용은 대부분 실험실 규모에서 적용된 사례를 보여주고 있다. 실험실 규모의 실험에서는 막 표면의 변화, 막오염 저감을 위한 새로운 물질의 추가, 생물학적인 방안의 적용이 가능하다. 그러나 상업용 막을 적용하는 현장 MBR 운영의 경우, 방류수 수질 기준을 준수하고 있고, 분리막의 교체 주기가 5년 이상으로 안전하게 유지가 되고 있으며 몇몇 처리장의 경우 거의 10년간 분리막 교체를 하지 않고 안정된 수질을 확보하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 공정이 같은 평막을 사용하고 처리용량이 비슷한 두 곳의 처리장을 대상으로 공정 효율을 분석하였다. 또한, 생물막 오염 특성 분석을 위해서 MBR 내의 미생물을 분석하여 두 곳 처리장 운영 측면에서 막 세정주기가 상대적으로 빈번한 처리장 및 TMP가 상대적으로 빨리 상승하는 처리장을 분석하여 막오염 현상을 미생물 분포와 연계하여 규명하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 MBR 처리시설 분석

본 연구에서 동일 평막(flat sheet membrane)을 사용하는 소규모하수처리시설(DX 처리장 및 IO처리장)을



Fig. 1. Schematic of the full-scale wastewater treatment plant.

선정하였다. DX 처리장은 하루에 약 75톤의 하수를 처리하고 IO처리장은 하루에 약 125톤의 하수를 처리한다. 두 처리장의 공정은 침사지, 유량조정조, 스크린, 혐기성 반응조, 호기성 반응조, 무산소 반응조, MBR 반응조(호기) 순으로 운영되고 있으며 Fig. 1에 도식화 되었다. 평균 유입수 수질 Table 1과 2에 나타내었다. 반응조 내 MLSS의 농도는 DX 처리장의 경우 6.8~8.7 g/L, IO는 6.7~8.3 g/L 범위로, 이는 MBR 공정에서 운영되고 있는 전형적인 값으로 볼 수 있다. 또한, TMP의 증가 및 막오염으로 인한 처리 효율 저하시, 운영 지침 및 운영자의 판단에 따라 막 장치를 세척조로 이동하여 차아염소산을 투여한 역세척을 실시하였다.

2.2 수질 분석

용존성 물질을 측정하기 위하여 샘플을 0.45 µm 여과기를 사용하여 여과하였으며 수질분석은 수질공정 시험법을 기준으로 주 1회 분석되었다. 공정 시험 기준에 따라 BOD, COD, T-N, T-P, SS, Total Coliforms의 경우 각각 ES 04305.1c, ES 04315.3c, ES 04363.1a, ES 04362.1c, ES 04303.1b, ES 04701.3d 방법을 적용하였다. 그 외, MLSS 분석을 공정시험법에 준하여 격주에 1회 실시하였다.

2.3 미생물 분석

2.3.1 시료 Sampling 및 genomic DNA 추출

미생물을 비교 분석하기 위해 각 하수처리장의 침지형 막에서 역세척하기 전 생물막 시료를 채취하였다(반응조 운전 360일 시점). 채취된 샘플의 genomic DNA를 분리하기 위해서 Soil DNA extraction kit (NucleoSpin Soil, Macherey-Nagal, Germany)를 사용하였으며, 제조사에서 공급한 매뉴얼을 기준으로 DNA를 추출하였다.

2.3.2 DNA 분석

추출한 DNA를 nanodrop(Nanodrop, Thermo Scientific, USA)을 이용하여 농도를 측정하였고 추출된 시료는 분석 전 -20°C에 보관하였다. 추출된 genomic DNA를 100 ng/µL로 나누어 10 x Taq buffer, dNTP mixture, 10 µM의 fusion primer를 혼합하여 최종 50 µL로 PCR(polymerase chain reaction)을 수행하였다. PCR의 온도 조건은 94°C에서 5분간 initial denaturation, 55°C에서 30초간 primer annealing, 72°C에서 30초간 extension의 과정을 30회 반복 후 72°C에서 7분간 final elongation을 진행하였다. PCR 산물을 2% agarose gel의 전기영동하여 증폭 확인 후 Illumina Misequencing을 이 용해 sequencing을 진행하였으며, sequencing을 통해 얻어진 데이터는 NCBI 16S 데이터베이스에서 유전자 염기서열 검색을 통해 비교·분석하여 사용했다 (Macrogen, Korea).

3. 결과 및 고찰

3.1 MBR 처리장의 영양물질 분해 분석

두 곳의 MBR 반응조 1년간의 유입수 및 유출수의 수질이 Table 1과 2에 정리되었다. 하수처리 공정에서, 유기물 및 무기물의 지표로 COD 및 BOD가 활용된다. 반응조에서 유기물질의 분해는 대부분 호기성 박테리아에 의한 유기물의 산화로 분해가 이루어지고 일부는 생물학적인 질소 및 인 제거 기작에 필요한 유기물의 산화로 이루어진다. DX 처리장의 BOD 및 COD 제거율은 98.71±1.10%, 92.69±1.27%를 보였으며, IX 처리장은 97.66±1.46%, 91.03±1.72 %의 제거율을 보여 동일 막 공법을 사용할 경우 처리 효율은 비슷했으며, BOD 방류기준 10 mg/L와 COD 방류기준 40 mg/L의 수질 기준을 동시에 만족시키면서 운영되었다. Fig. 1에서, 유입수 농도가 일시적으로 증가한 경

Table 1. Characteristics of influent and effluent in a full-scale MBR(DX)

	Flow rate (m ³ /d)	Influent (mg/L)						Effluent (mg/L)					
		BOD	COD _{Mn}	SS	T-N	T-P	<i>E.coli</i>	BOD	COD _{Mn}	SS	T-N	T-P	<i>E.coli</i>
Regulation	-	-	-	-	-	-	-	10	40	10	20	2	3000
Water quality	75	167±33	117.7±19.1	175.5±36	48.2±5.9	5.6±1.2	115,000±42,900	2.0±1.6	8.4±0.8	1.3±2.0	9.5±3.9	0.5±0.5	41.6±40
		Loading rates (kg/d)						Removal Efficiency(%)					
	-	12.53	8.83	13.16	3.61	0.42	-	98.7	92.7	99.2	80.2	90.0	99.9

Table 2. Characteristics of influent and effluent in a full-scale MBR(IO)

	Flow rate (m ³ /d)	Influent (mg/L)						Effluent (mg/L)					
		BOD	COD _{Mn}	SS	T-N	T-P	<i>E.coli</i>	BOD	COD _{Mn}	SS	T-N	T-P	<i>E.coli</i>
Regulation	-	-	-	-	-	-	-	10	40	10	20	2	3000
Water quality	125	155.2±24.9	101.8±23.5	160.5±35.8	45.6±6.7	5.2±1.2	93,240±22,000	3.5±2.1	8.9±1.7	2.4±2.6	6.9±5.1	0.4±0.4	58.1±64.2
		Loading rates (kg/d)						Removal Efficiency(%)					
	-	19.4	12.73	20.06	5.7	0.65	-	97.7	91.0	98.5	84.6	91.4	99.9

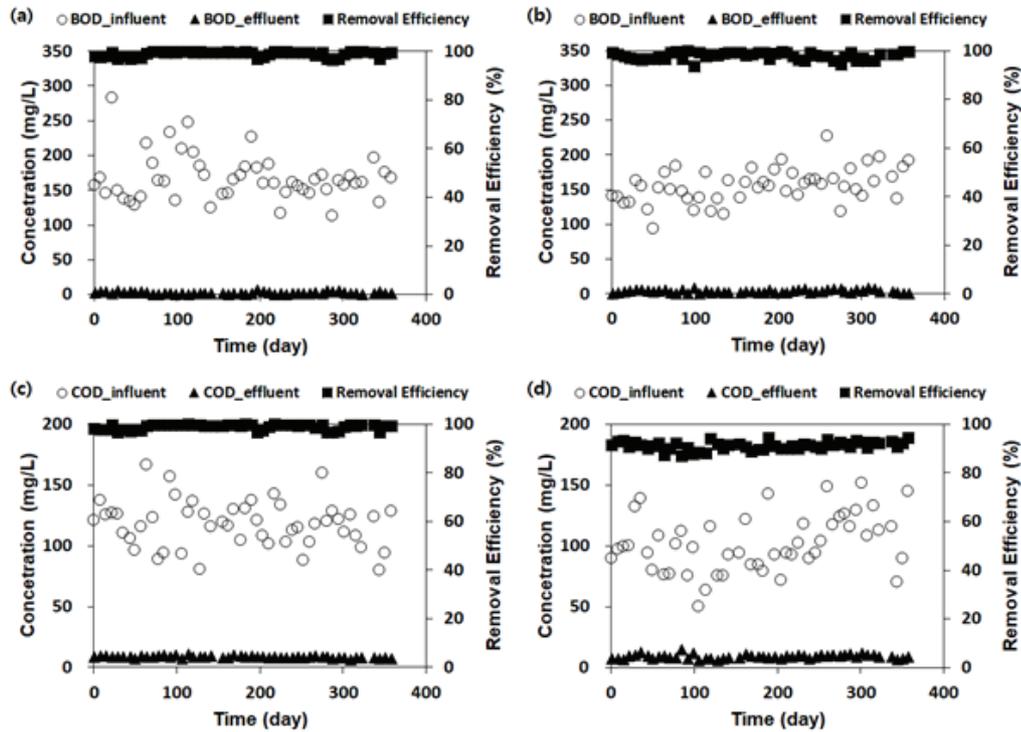


Fig. 2. BOD and COD reduction in the MBR.(a) BOD Removal in DX, (b) BOD removal in IO, (c) COD removal in DX, (d) COD removal in IO.



우에도 유출수의 농도가 방류수 수질 기준 이하로 유지될 수 있었던 것은 활성슬러지 동역학적인 해석에서 유출수 농도는 유입수의 영향을 받지 않으며 슬러지 체류시간(solid retention time, SRT) 및 수리학적 체류시간(hydraulic retention time, HRT)이 일정하게 유지될 시 공정에 영향을 주지 않는 이론과 일치한다 (MetCalf and Eddy, 2014). 또한, 1년간의 수질 모니터링 데이터에서 간헐적으로 유입수 농도가 증가 및 감소하는 것은 지역적인 유입수질의 변화가 있었을 것이라 추측이 가능하며 소규모 마을 처리장에서 일반적으로 볼 수 있는 현상이다 (Im and Gil, 2014).

하수의 영양물질 제거는 유기물, 질소와 인의 제거를 의미하며 수생태계의 부영양화 저감을 위해서 필수적으로 방류수 허용 기준 농도 이하로 처리하여 배출하여야 한다. 하수 내 질소화합물은 암모니아성 질소, 아질산성 질소 및 질산성 질소로 존재하고 질소의 생물학적 분해는 질산화(nitrification)와 탈질(denitrification)의 과정을 거쳐 질소가스형태로 대기에 방출된다. 질산화 반응은 1차적으로 암모니아가 아질산으로 변화하는 과정과 아질산이 다시 질산성 질소로 전환되는 과정

으로 나누어지고 각각의 공정에 대표적인 미생물은 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*가 존재한다.

유출수의 T-N 농도는 DX처리장이 9.5±3.9 mg/L 이며 IO처리장은 6.5±5.1 mg/L로 두 처리장 모두 방류수 수질기준인 20 mg/L를 준수하고 있다(Table 1). DX 처리장 질소 제거율은 80.2±7.6%, IO처리장은 84.6±11.7%로 약 4%정도 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다 (Fig. 3). Cao et al. (2020)은 실규모 처리장인 A2O공정의 질소 제거 실험에서 79.6%의 총질소 제거율을 보였다. 그러나 실규모 MBR 운전에서 T-N 제거율이 95% 이상을 보이는 연구도 있어 공정의 특성 및 미생물의 조성이 질소 제거에 영향을 미칠 수 있는 것을 보여준다 (Phan et al., 2015).

하수의 생물학적인 인 제거는 인축적미생물 (polyphosphate accumulating organisms, PAO)의 물질대사를 이용하여 혐기상태에서 세포 내 축적된 폴리인산이 가수분해 과정을 거쳐 정인산으로 방출되며 유기물이 세포 내 섭취되고 물속의 인 농도는 증가한다. 호기상태에서는 세포 내 저장된 기질이 산화, 분해가 되고 PAO는 이때 발생하는 에너지를 이용하여 방출

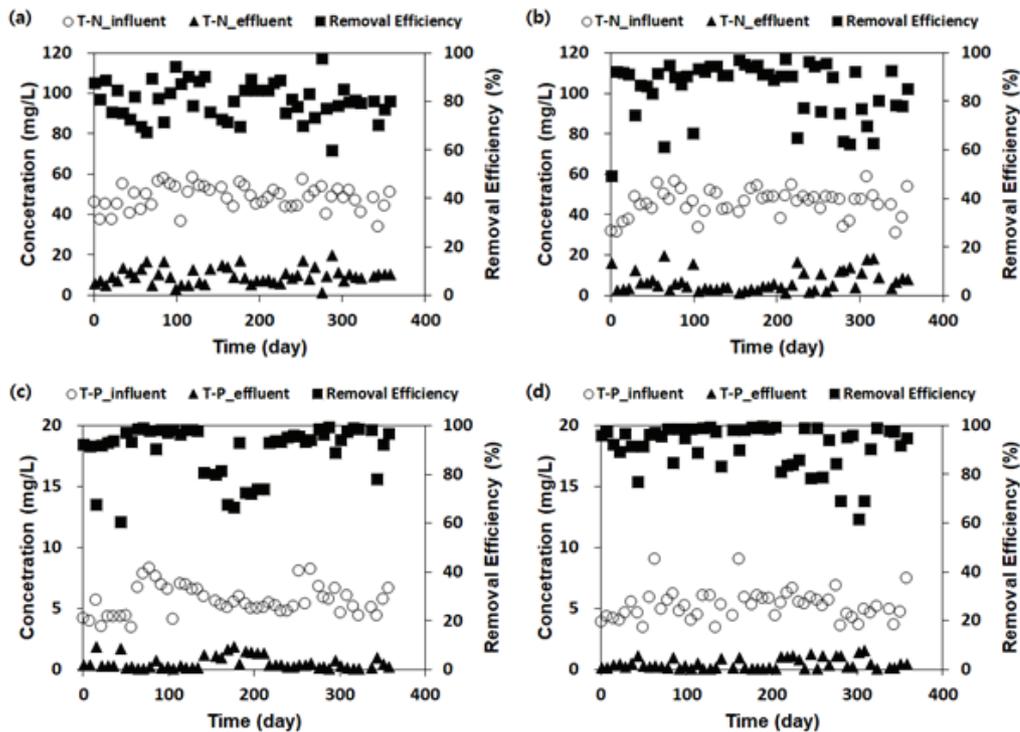


Fig. 3. Nitrogen and Phosphorus reduction in the MBR. (a) Nitrogen Removal in DX, (b) Nitrogen removal in IO, (c) Phosphorus removal in DX, (d) Phosphorus removal in IO.

pp. 311-324
pp. 325-334
pp. 335-345
pp. 347-361
pp. 363-373
pp. 375-382
pp. 383-394
pp. 395-408
pp. 409-423
pp. 425-435
pp. 437-446
pp. 447-456

된 인과 하수 내 존재하는 인을 섭취하여 물속의 인 농도가 감소하게 된다 (MetCalf and Eddy, 2014). 이러한 현상을 고도생물학적 인 제거(Enhanced biological phosphorus removal, EBPR)라 하고 화학적 인 처리 방법과 비교하여 화학약품 비용과 슬러지 발생량을 줄일 수 있는 장점을 가진다. DX 처리장의 인 제거율은 90.0±10.5%, IO 처리장은 91.4±9.1%로 제거율에서 큰 차이가 나타나지 않았다 (Fig. 3). Sayi-Ucar et al. (2015)는 장기간의 MBR 공정 운전에서 온도 변화에 따른 생물학적 질소 및 인 제거 연구를 수행하였는데, 생물학적인 인 제거가 24°C의 온도에서 95%까지 이르렀으며 온도가 35°C 이상으로 상승할 경우 50%까지 감소하는 것을 관찰하였다. 본 연구의 두 공정도 약 20°C 정도의 온도에서 운영되어 90% 이상의 인 제거 효율을 확보할 수 있었을 것으로 판단된다.

3.2 SS 및 Total Coliforms 제거

활성슬러지 공정의 경우 2차 침전조를 이용하여 생물반응조에서 이동한 슬러지를 침전시키고 SS를 제거

후 최종 유출수로 방류하게 된다. 그러나 MBR 공정은 막자체의 고액분리 특성을 이용하여 기존에 사용되는 활성슬러지 공정보다 양질의 유출수 확보가 가능한 장점이 있다. DX 처리장의 SS 및 Total coliforms의 제거 효율은 99.23±1.13%, 99.96±0.04%이었으며, IO 처리장 제거 효율은 98.47±1.62%, 99.93±0.07%이었다 (Fig. 4).

3.3 분리막 세정 및 막오염 제어

현장에서는 막 오염 제어를 위해 막세정과 막오염 방지를 수행하게 된다. 막세정은 일반적으로 막 오염이 발생된 후에 수행되는 세정을 일컫는데 반해 막오염 방지는 막 오염을 사전에 방지하거나 예방하는 모든 방안을 말한다 (Park et al., 2018). 막오염 제어는 물리적, 화학적, 생물학적 및 전기적 방법이 있으나 현장에서는 막의 여과 성능을 즉각 회복시키는 방안으로 화학약품에 의한 세정법이 오랫동안 사용되어 왔다.

운전 기간동안 DX 처리장은 한 번의 막공정 세척

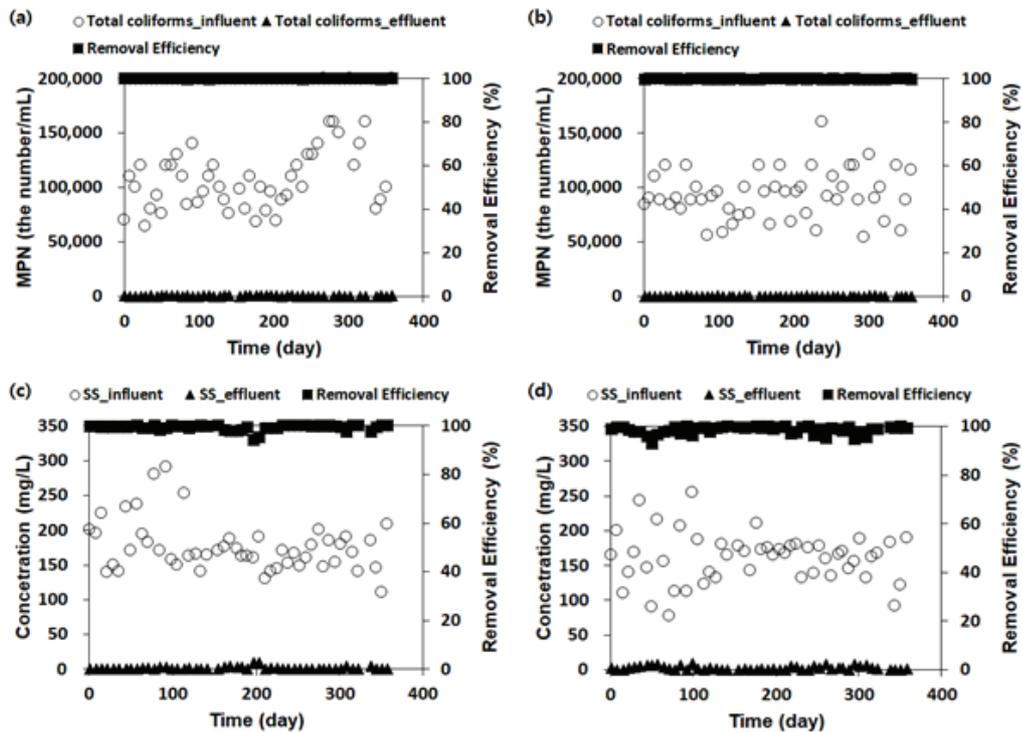


Fig. 4. Total coliforms and SS reduction in the MBR. (a) Total coliforms Removal in DX, (b) Total coliforms removal in IO, (c) SS removal in DX, (d) SS removal in IO.



이 있었으며 IO처리장은 막의 세척없이 운영되었다. 공정은 계의 세정법을 통하여 세정이 이루어지고 차아염소산나트륨(NaClO) 용액과 구연산 용액으로 실시되었다. 차아염소산이온(OCl⁻)의 산화전위는 오존이나 H₂O₂보다 낮으나 MBR 공정에서 일반적으로 사용되는 산화제로 적용 농도는 일반적으로 300~1000 mg/L (Park et al., 2015) 이나 DX 처리장의 경우 비회복적인 막오염을 생각하여 고농도인 1000 mg/L로 세정되었다. 두 처리장에서 사용되는 평막은 파울링에 대한 강한 저항성을 가지고 있어 최근 10년 이내 시공 및 운전한 공정에서 새로운 막 교체가 이루어진 사례는 없다. DX 공정의 세정은 막간차압(TMP, trans-membrane pressure)의 증가로 인해서 향후 미질 유기물질 및 영양소 제거 효율 저하를 미리 막기 위해서 수행되었다. 그러나, 막의 세정으로 인해서 공정효율의 차이가 발생했다는 것을 설명하기는 조금 무리가 있을 것이다.

3.4 MBR 공정 미생물 비교를 통한 막공정 효율 분석

실규모로 운영되고 있는 MBR 하수처리공정을 비교 분석한 결과 유기물, 질소 및 인 제거 등 수질 방류 기준을 준수하고 처리 효율에는 별다른 차이점이 없었다. 그럼에도 불구하고 막세정과 막 공정 운전에서 DX 처리장이 막 세정을 수행했으며 IO처리장과 비교하여 막 오염에 취약한 점을 보였다. 재질이 같은 막 모듈 사용과 유입수의 성상이 비슷한 경우로 두 곳의 막 공정의 차이점을 보기 위해서 biofouling에 영향을 미치는 미생물의 분포 현상을 규명하는 것이 필요하였다.

생물학적 수처리 공정의 미생물 분포 특성 연구를 위한 전통적인 분석법은 polymerase chain reaction(PCR), quantitative PCR 등을 이용한 방법이 사용되었다 (Ma et al., 2013; Teksoy Basaran et al., 2014). 제시된 전통적인 분석법은 시료의 낮은 검출 한계 및 부분적인 sequencing 정보의 제공으로 인해서 분석의 한계를 보였다. 따라서, 최근 생물학적인 수처리 공정에 적용되는 미생물 분석법으로 High-throughput pyrosequencing 법이 이용되고 있다 (Ng et al., 2016; Choi et al., 2017; Ouyang et al., 2020). 이 방법은 시료 내 박테리아의 다양한 분포 및 군집을 기존 방법과 비교하여 면밀히 분석할 수 있으며 적은 분포를 보이는 군집을 분석할 수 있는 유용한 방법이다.

막공정 내 미생물 분포 pyrosequencing 분석 중 phylum level의 결과를 Fig. 5에 도식화 하였다. 분석 결과에서 1% 이하의 군집을 삭제한 경우 DX 처리장은 *Proteobacteria* 외 5개의 phylum으로 구분이 되었으며 IO 처리장은 *Proteobacteria* 외 7개의 다양한 Phylum으로 분석되었다. Phylum level에서는 *Proteobacteria*와 *Bacteroidetes*가 DX처리장은 약 81%, IO처리장은 67%로 우점으로 관찰되었다. *Proteobacteria*와 *Bacteroidetes*는 하수처리 공정의 영양물질 제거 및 막 표면에 생물막을 형성하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다 (Rehman et al., 2020; Xia et al., 2010). *Bacteroidetes*는 DX처리장에서는 16%, IO처리장에서는 27%가 분포하는 것으로 분석되었다. *Bacteroidetes*는 탄수화물군의 분해자(carbohydrate degrader)이고 용존산소 농도가 높은 장소에서 주로 발견된다 (Ma et al., 2013; Meng and He, 2015). 두 처리장에서 유기물 분해로 표현되는 BOD, COD 분해의 경우 *Proteobacteria*와 *Bacteroidetes*의 우점으로 인해 97% 이상의 BOD 분해, 91% 이상의 COD 분해 효율을 이룰 수 있을 것이라 추측이 가능하다. 두 Phyla 외에도 *Nitrospirae*, *Verrucomicrobia*, *Actinobacteria*, *Acidobacteria* 등이 검출되었으나 상대적으로 적은 분포로 분석되었다.

Fig. 6은 class level에서 분류한 것으로 DX 하수처리장에서는 *Betaproteobacteria* (41%), *Gammaproteobacteria* (10%), *Deltaproteobacteria* (7%)가 분포해 있었으며, IO하수처리장에서는 *Betaproteobacteria*와 *Chitinophagia*가 분포해 있었다. *Betaproteobacteria*가 각 처리장에서 많이 검출되었으나, 다른 미생물군에서 분포가 달랐다. *Betaproteobacteria* 등 *Proteobacteria* class는 막 오염을 유발하는 미생물들 중 biofouling을 발생시키는데 큰 영향을 미치는 것을 연구를 통해 밝혀졌다 (Xia et al., 2010). 그리고 *Chitinophagia*의 경우 막 오염 완화에 기여하는 미생물인 것으로 밝혀졌다 (Takimoto et al., 2021). 이를 통해 *Chitinophagia*가 우세한 IO 처리장이 DX 처리장보다 biofouling 부분에서 막 상태가 양호한 이유로 간접적으로 추정할 수 있다.

Fig. 7은 genus level 분석 결과이다. DX 하수처리장에서 *Azonexus*, *Propionivibrio*, *Simplicispira*가 주로 분포해 있었고, IO 하수처리장에서는 *Propionivibrio*, *Terrimonas*, *Stenotrophobacter*가 분포해 있었다. 이를 통해 DX 처리장의 막 상태가 IO 처리장보다 좋지 않은 이유로 *Azonexus*, *Propionivibrio*가 막 오염을 빠르

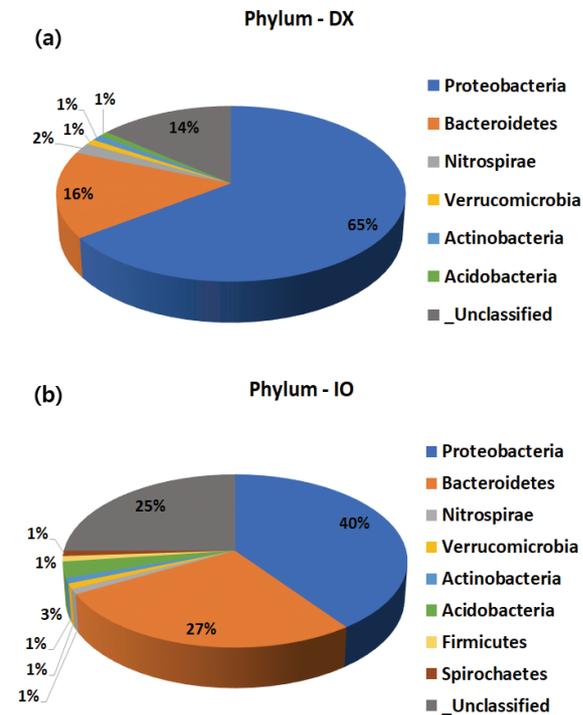


Fig. 5. Abundance of phylum level in (a) DX, (B) IO. The abundance less than 1.0% was eliminated.

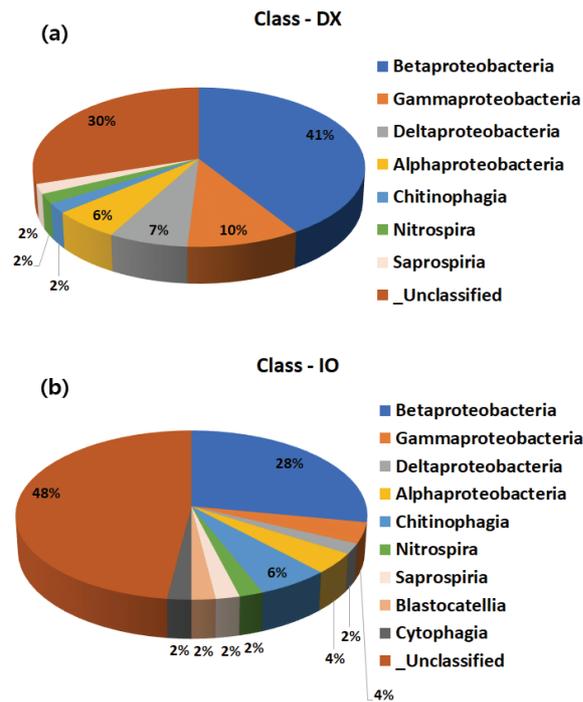


Fig. 6. Classification of class level in (a) DX (b) IO. The abundance less than 1.0% was eliminated.

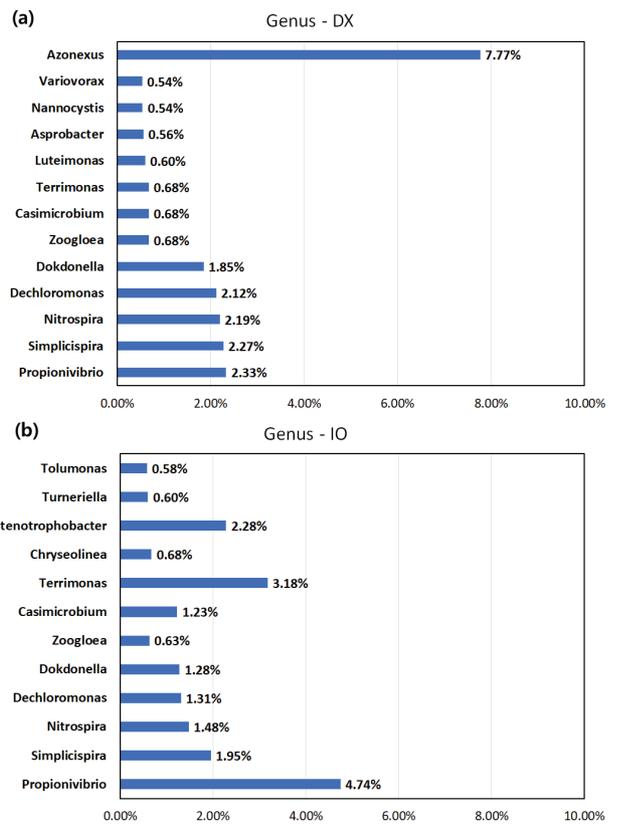


Fig. 7. Genus level in (a) DX (b) IO. The abundance less than 0.5% and unclassified species were eliminated.

게 하여 역세척 주기가 짧은 것으로 추정된다. 기존의 문헌에서 *Azonexus*의 경우 biofilm을 형성하는 pioneer species로 증명되었다 (Zhao et al., 2022). 또한, *Azonexus*는 microbial fuel cell 등의 미생물 전기 화학 연구에서 발견되었으며 biofilm형성에 주로 기여하는 것으로 보고되었으며 (Crone et al., 2020), 메탄 회수를 위한 혐기성 생물막 공정에서 체외 전자 이동 및 biofilm 형성에 기여하는 것을 확인하였다 (Liu et al., 2019).

4. 결론

본 연구에서는 동일 막을 사용하는 분리막 기반 하수처리장의 운영 분석 및 분리막의 생물막을 분석하여 막 형성 미생물의 분포를 비교하였다. 동일 막을 사용하는 두 곳의 방류수는 수질 기준에 맞추어 거의 동일한 결과를 보였으나, 막공정 운전에서 DX 처리장은 한 번의 화학적 세정을 하였고 IO 처리장은 화학



적인 세정을 거치지 않고 운전을 하였다. 두 처리장의 genus level에서 *Propionivibrio*가 상당수 분포하는 것은 하수의 일반적인 특징을 나타내는 것으로 판단된다. 또한 *Azonexus*가 DX 처리장에서 많이 분포되어 있음을 확인하였고 막오염에 간접적으로 기여했을 것으로 판단된다. 본 연구를 통하여 실규모 MBR처리장의 fouling 혹은 생물막 형성에 기여를 하는 미생물 분포를 확인하였다. 실규모 운영 처리장의 다양한 자료를 확보하기 위해서는 여러 MBR처리장 분리막으로부터 획득된 샘플의 미생물 분석이 필요할 것이다.

사 사

본 연구는 2021년도 한국연구재단 이공분야기초연구사업(2021R1A2C1007887)의 부분적인 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Cao, J., Zhang, T., Wu, Y., Sun, Y., Fu, B., Yang, E., Zhang, Q. and Luo, J. (2020). Correlations of nitrogen removal and core functional genera in full-scale wastewater treatment plants: Influences of different treatment processes and influent characteristics, *Bioresour. Technol.*, 297, 122455.
- Choi, J., Kim, E.S., and Ahn, Y. (2017). Microbial community analysis of bulk sludge/cake layers and biofouling-causing microbial consortia in a full-scale aerobic membrane bioreactor, *Bioresour. Technol.*, 227, 133-141.
- Crone, B., Sorial, G.A., Pressman, J.G., Ryu, H., Keely, S.P., Brinkman, N., Bennet-Stamper, C., Garland. (2020). Design and evaluation of degassed anaerobic membrane biofilm reactors for improved methane recovery, *Bioresour. Technol. Rep.*, 10, 100407.
- Deowan, S.A., Galiano, F., Hoinkis, J., Johnson, D., Altinkaya, S.A., Gabriel, B., Hilal, N., Drioli, E. and Figoli, A. (2016). Novel low-fouling membrane bioreactor (MBR) for industrial wastewater treatment, *J. Membr. Sci.*, 510, 524-532.
- Im, J. and Gil, K. (2014). A study a RCSTP nutrient removal efficiency in winter season, *J. Wetland Res.*, 16, 363-370.
- Judd, S. (2006). *The MBR Book : Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*. Elsevier, Oxford.
- Krzeminski, P., Leverette, L., Malamis, S. and Katsou, E. (2017). Membrane bioreactors-A review on recent developments in energy reduction, fouling, control, novel configuration, LCA and market prospects, *J. Membr. Sci.*, 527, 207-227.
- Liu, C., Sun, D., Zhao, Z., Dang, Y. and Holmes, D.E. (2019). Methanotrix enhances biogas upgrading in microbial electrolysis cell via direct electron transfer, *Bioresour. Technol.*, 291, 121877.
- Ma, Z., Wen, X., Zhao, F., Xia, Y., Huang, X., Waite, D. and Guan, J. (2013). Effect of temperature variation on membrane fouling and microbial community structure in membrane bioreactor, *Bioresour. Technol.*, 133, 462-468.
- Metcalf and Eddy, (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th ed, McGraw-Hill, New York.
- Meng, F. and He, X. (2015). Effects of naturally occurring grit on the reactor performance and microbial community structure of membrane bioreactors, *J. Membr. Sci.*, 496, 284-292.
- Nabi, M., Liang, H., Zhou, Q., Cao, J., and Gao, D. (2023) In-situ membrane fouling control and performance improvement by adding materials in anaerobic membrane bioreactor: A review, *Sci. Total Environ.*, 865, 161262.
- Oh, H.S., Yeon, K.M., Yang, C.S., Kim, S.R., Lee, C.H., Park, S.Y., Han, J.Y. and Lee, J.K. (2012) Control of membrane biofouling in MBR for wastewater treatment by quorum quenching bacteria encapsulated in microporous membrane, *Environ. Sci. Technol.*, 46(9), 4877-4884.
- Ouyang, Y., Hu, Y., Huang, J., Gu, Y., Shi, Y., Yi, K. and Yang, Y. (2020). Effects of exogenous quorum quenching on microbial community dynamics and biofouling propensity of activated sludge in MBRs, *Biochem. Eng. J.*, 157, 107534.
- Park, H.D., Chang, I.S. and Lee, K.J. (2015). *Principles of membrane bioreactors for wastewater treatment*, CRC Press.
- Phan, H.V., Hai, F.I., McDonald, J.A., Khan, S.J., Zhang, R., Price, W.E., Broeckmann, A. and Nghiem, L.D. (2015). Nutrient and trace organic contaminant removal from wastewater of a resort town: Comparison between a pilot and a full scale membrane bioreactor, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 102, 40-48.
- Rehman, Z.U., Fortunato, L., Cheng, T. and Leiknes, T.O. (2020). Metagenomic analysis of sludge and early-stage biofilm communities of a submerged membrane bioreactor, *Sci. Total Environ.*, 701, 134682.
- Rezaei, M. and Mehmia, M.R. (2014). The influence of zeolite (clinoptilolite) on the performance of a hybrid membrane

- bioreactor, *Biores. Technol.*, 158, 25-31.
- Sayi-Ucar, N., Sarioglu, M., Insel, G., Cokgor, E.U., Orhon, D. and van Loosdrecht, M. C. M. (2015). Long-term study on the impact of temperature on enhanced biological phosphorus and nitrogen removal in membrane bioreactor, *Water Res.*, 84, 8-17.
- Sohn, W., Guo, W., Ngo, H.H., Deng, L. and Cheng, D. (2021). Powdered activated carbon addition for fouling control in anaerobic membrane bioreactor, *Biores. Technol. Rep.*, 15, 100721.
- Takimoto, Y., Hatamoto, M., Soga, T., Kuratate, D., Watari, T. and Yamaguchi, T. (2021) Maintaining microbial diversity mitigates membrane fouling of an anoxic/oxic membrane bioreactor under starvation condition, *Sci. Total Environ.*, 759, 143474.
- Teksoy Basaran, S., Aysel, M., Kurt, H., Ergal, I., Akarsubasi, A., Yagci, N., Dogruel, S., Ubay Ubay Cokgor, E., Keskinler, B., Sozen, S. and Orhon, D. (2014). Kinetic characterization of acetate utilization and response of microbial population in super fast membrane bioreactor. *J. Membr. Sci.*, 455, 392-404.
- Xia, S., Li, J., He, S., Xie, K., Wang, X., Zhang, Y., Duan, L. and Zhang, Z. (2010). The effect of organic loading on bacterial community composition of membrane biofilms in a submerged polyvinyl chloride membrane bioreactor, *Bioresour. Technol.*, 101(17), 6601-6609.
- Yi, K., Ouyang, Y., Huang, J., Pang, H., Liu, C., Shu, W., Ye, C. and Guo, J. (2023). Evaluating the effect of aeration rate on quorum quenching membrane bioreactors: Performance of activated sludge, membrane fouling behavior, and the energy consumption analysis, *J. Environ. Chem. Eng.*, 11, 109037.
- Zhao, Y., Zhu, S., Fan, X., Zhang, X., Ren, H. and Huang, H. (2022). Precise portrayal of microscopic processes of wastewater biofilm formation: Taking SiO₂ as the model carrier. *Sci. Total. Environ.*, 849, 157776.