



MBR 공정에서 물리세정 조건에 따른 막 오염 제어 성능 평가와 현장 적용성에 관한 연구

Evaluating membrane fouling and its field applicability under different physical cleaning conditions in MBRs

박정훈¹·김형수¹·박기태¹·박정우¹·박세근²·강희석²·김지훈^{1,*}

Jeonghoon Park¹·Hyungsoo Kim¹·Kitae Park¹·Jungwoo Park¹·Sekeun Park²·Heeseok Kang²·Jihoon Kim^{1,*}

성균관대학교 수자원전문대학원¹·정우이엔티(주)²

Sungkyunkwan University Graduate School of Water Resources¹ · Jeong Woo ENT Inc.²

ABSTRACT

Membrane bioreactors (MBRs) employ a process of biological treatment that is based on a membrane that has the advantages of producing high-quality treated water and possessing a compact footprint. However, despite these advantages, the occurrence of "fouling" during the operation of these reactors causes the difficulty of maintenance.

Hence, in this study, three physical cleaning methods, namely, backwashing, air scrubbing, and mechanical cleaning ball was performed to identify optimum operating conditions through laboratory scale experiments, and apply them in a pilot plant. Further, the existing MBR process was compared with these methods, and the field applicability of a combination of these physical cleaning methods was investigated.

Consequently, MCB, direct control of cake fouling on the membrane surface was found to be the most effective. Moreover, as a result of operating with combination of the physical cleaning process in a pilot plant, the TMP increasing rate was found to be - 0.00007 MPa/day, which was 185% higher than that obtained using the existing MBR process. Therefore, assuming fouling only by cake filtration, about one year of operation without chemical cleaning is considered to be feasible through the optimization of the physical cleaning methods.

Key words: Physical cleaning, Fouling, Cake filtration, MBRs

주제어: 물리세정, 막 오염, 케이크 여과, 생물막 반응기

1. 서 론

2012년부터 공공하수처리시설의 방류수수질기준을 2~10배 강화함에 따라 기존의 활성슬러지공법 (conventional activated sludge process)으로 방류수질을 적용시키기에 다소 어려움이 따르고 있다. 향후 더욱 강화될 수질규제 기준과 수자원 재이용 보급률의 증가 측면에서 볼 때, 소요부지 면적이 적고 고농도의

MLSS(약 8,000~15,000 mg/L)를 유지할 수 있는 MBR (membrane bioreactor) 공정이 대응책으로 제시되고 있으며, 처리 효율이 높고 운전 및 유지 관리가 비교적 간단하다는 장점으로 점차 도입사례가 급증하고 많은 연구가 진행되고 있다(Judd, 2006; Park, 2016).

하지만 이러한 장점에도 불구하고 분리막을 이용한 하수처리공정에서 발생하는 막 오염은 분리막의 투과수량 감소 및 운전압력 상승 등을 유발하여 유지관리비용 상승으로 연결되어 MBR 적용에 제한이 되고 있으며 (Farquharson, Zhou, 2010; Han et al., 2016; Miyoshi et al.,

Received 24 August 2016, revised 16 October 2016, accepted 18 October 2016

*Corresponding author: Jihoon Kim(E-mail: jitt23@skku.edu)

pp. 481-489

pp. 491-500

pp. 501-509

pp. 511-519

pp. 521-532

pp. 533-543

pp. 545-551

pp. 553-559

pp. 561-569

pp. 571-577

pp. 579-586

pp. 587-596

pp. 597-604

pp. 605-612

2015), 이를 제어하려는 많은 연구가 진행되고 있다.

이러한 막 오염을 제어하기 위한 방법으로 세정약품을 사용하는 화학세정 방법(Beyer et al., 2010; Field et al., 2008; Kimura et al., 2006)과 공기 세척(Psoch, Schiewer, 2006) 혹은 역세척(Hilal et al., 2005; Pearce, 2007) 등의 물리세정 방법(Han, Chang, 2016; Lin et al., 2010; Rodgers, Sparks, 1991; Raosenberger et al., 2011)으로 나눌 수 있으며, 잦은 화학세정의 경우 분리막의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 세정 약품비 및 폐액 처리비 등 운영비 상승에 요인이 되고 있다. 이에 다양한 물리세정방법 즉 초음파(Fang, Shi, 2005), 미디어(Meng, Yang, 2007; Wang et al., 2009; Shim, 2013), 역세척 등 실험실 규모 장치를 통해 많은 연구가 진행되고 있으나, 현장 적용을 통한 실증화는 부족한 현실이다.

이에 따라 본 연구에서는 역세척이 가능한 평막을 이용하여 공기세척, mechanical cleaning ball(MCB) 및 역세척 등 실험실 규모 장치를 통해 최적 운전인자를

도출하고자 하였으며, 일 처리용량 100 m³/일 규모의 파일럿 장치에 적용하여 기존 MBR 공정과의 운전 비교 및 각각의 물리세정 효율 평가 등을 통해 실증화 가능성 평가를 하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 원수 성상

본 실험의 실험실 규모 장치 및 파일럿 장치는 경기도 화성시에 위치한 S 시 환경사업소 내에 설치하였으며, 실험실 규모 장치 실험에 사용된 원수의 조건은 파일럿 장치 운전조건과 동일하게 진행하였다. 원수 성상과 파일럿 장치 운전조건을 아래의 Table 1 및 Table 2에 각각 나타냈다.

2.2. 분리막

실험실 규모 장치와 파일럿 장치 실험에 사용된 분

Table 1. Characteristics of the wastewater used in this experiment

| Item | Concentration (mg/L) | | |
|----------------------------------|----------------------|-------|-------|
| | Max. | Min. | Ave. |
| COD _{cr} | 591.0 | 125.0 | 432.3 |
| T-N | 54.0 | 6.8 | 32.2 |
| NH ₄ ⁺ -N | 41.2 | 5.4 | 26.7 |
| NO ₃ ⁻ -N | 0.8 | 0.1 | 0.4 |
| T-P | 7.8 | 2.1 | 5.0 |
| PO ₄ ³⁻ -P | 6.3 | 1.3 | 4.0 |

Table 2. Operation condition of the pilot plant

| Parameter | Specification | |
|---------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Temperature(°C) | Ave. 19.80(17.30 ~ 22.20) | |
| Anaerobic(hr) | 1.5 | |
| Anoxic(hr) | 1.0 | |
| Aerobic(hr) | 3.0 | |
| SRT(day) | Ave. 30(28 ~ 40) | |
| Internal recycle(%) | 150 ~ 350 | |
| MLSS conc.(mg/L) | Ave. 9,250(8,940 ~ 9,860) | |
| Membrane separation | Flux(L/m ² ·h at 20 °C) | Ave. 31.0(29.4 ~ 33.4) |
| | HRT(hr) | 0.5 |
| | Recycle(%) | 200 ~ 250 |
| | MLSS conc.(mg/L) | 16,354(15,500 ~ 17,200) |



Table 3. Characteristics of the membrane

| Item | Substance |
|--|-------------------------------------|
| Manufacturer | Microdyn |
| Type | Flat sheet |
| Material | PES(Polyethersulfone) |
| Pore size(μm) | 0.04 |
| Membrane surface(m^2) | 0.34(Lab. scale) / 100(Pilot plant) |
| Pressure range(MPa) | - 0.003 ~ 0.040 |
| Max. Backwashing pressure(MPa) | + 0.015 |
| Max. Temperature($^{\circ}\text{C}$) | 40 |
| Max. Aeration($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$) | 60 |
| pH range | 2 ~ 11 |

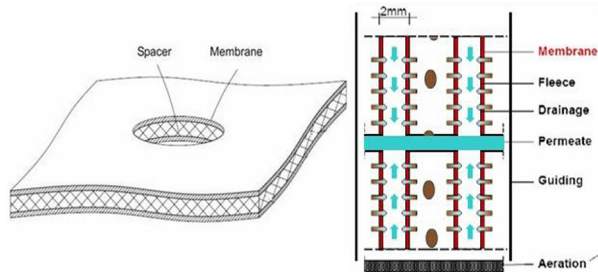


Fig. 1. Schematic structure of the flat sheet membrane.

리막을 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에 사용된 분리막은 독일 M사의 역세척이 가능한 평판형 막으로 공극의 크기는 $0.04 \mu\text{m}$, 재질은 Polyethersulfone(PES)이며, 분리막 특성은 아래의 Table 3과 같이 나타냈다.

2.3. 실험장치

실험실 규모 장치의 구성을 Fig. 2에 도식화 하여 나타냈으며, 100 L 용기에 냉각기를 설치하여 수온을 유지하였고, 파일렛 장치의 막분리조와 순환하여 실험을 진행하였으며, 공정제어의 경우 PLC 프로그램을 통해 정유량으로 제어가 가능하게 구성하였다. 또한 파일렛 장치의 구성에서 생물반응조의 구성은 A^2/O 공정 기반으로 한 외부순환형 분리막 공정이며, Fig. 3으로 도식화 하였다.

2.4. 운전조건

2.4.1. Mechanical cleaning ball(MCB)

MCB 운전을 위한 최적인자 도출을 위해 실험실 규

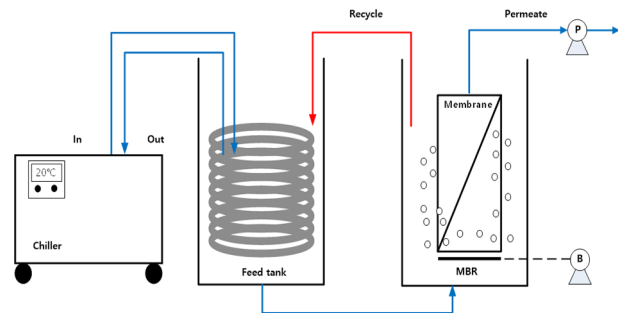


Fig. 2. Schematic diagram of the lab. scale reactor.

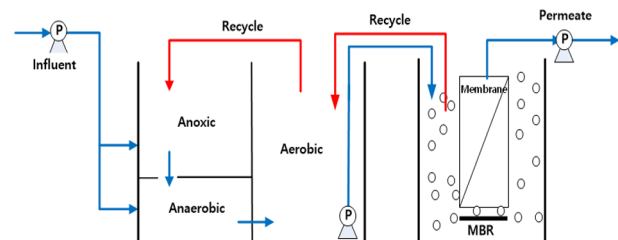


Fig. 3. Schematic diagram of the pilot plant.

모 장치로 임계 유속 실험을 진행하였고, 실험 조건을 $5.6 \text{ MCB}\cdot\text{kg}/\text{m}^3$, $7.6 \text{ MCB}\cdot\text{kg}/\text{m}^3$, $9.6 \text{ MCB}\cdot\text{kg}/\text{m}^3$, $11.6 \text{ MCB}\cdot\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 선정하였으며, 공기 세척 유량은 사전 도출된 값으로 설정하여 진행하였다. 실험 조건을 아래 Table 4와 같이 나타냈다.

Table 4. Experimental condition of the lab. scale test for optimum MCB dosage

| Experimental condition | | | | |
|-----------------------------|-----|-----|-----|------|
| MCB- kg/m^3 | 5.6 | 7.6 | 9.6 | 11.6 |

pp. 481-489
pp. 491-500
pp. 501-509
pp. 511-519
pp. 521-532
pp. 533-543
pp. 545-551
pp. 553-559
pp. 561-569
pp. 571-577
pp. 579-588
pp. 587-596
pp. 597-604
pp. 605-612

2.4.2. 공기 세척

원활한 실험을 위해 전단력은 다소 떨어지지만 산소 전달 효율이 높은(3-10%) 미세 기포(2-5 mm : EPA, 1989)를 공기 세척에 적용하였는데, 일반적으로 공기 세척에 사용하는 조대 기포(6-10 mm)는 전단력이 우수하지만 산소 전달 효율(1-3%)이 떨어져 물리 세정 불을 함께 운용할시 반응조 내 세정불의 고른 분포가 어렵기 때문이다.

미세 기포를 이용한 공기 세척의 최적 운전조건을 도출하는 방법으로 막 면적당 공기량 SADm(specific aeration demand per membrane area)을 이용하여 선정하였으며, 0.4 m³/m²·hr, 0.5 m³/m²·hr, 0.6 m³/m²·hr, 0.7 m³/m²·hr 및 0.8 m³/m²·hr로 실험조건을 선정하여 다음 Table 5와 같이 나타냈다.

2.4.3. 역세척

역세척의 최적 조건을 도출하기 위해 여과량은 사전 임계 유속 실험을 통해 선정된 40 LMH(at 20 °C)로 실험을 진행하였으며, 역세척 유량은 10, 20, 30, 40 및 50 LMH로 선정하였다. 역세척 시점은 한계 차

압인 0.04 MPa에 도달 시 진행하였으며, 역세척 후 재운전을 통해 TMP(transmembrane pressure) 측정에 따른 여과저항으로 전환하여 효율성을 비교평가 하였고, 실험 조건은 다음 Table 6과 같다.

2.4.4. 파일럿 장치 실험

실험실 규모 장치를 이용하여 최적 조건을 도출한 각 물리세정 공정의 세정 효율을 평가하기 위하여 파일럿 규모 장치를 이용한 3가지 mode를 실험하였다. mode 1의 경우 역세척의 효율 평가를 위해 MCB와 공기 세척의 최적 조건을 적용하고, mode 2에서는 MCB의 효율 평가를 위해 역세척과 공기 세척을 적용하였으며, mode 3에는 공기 세척, MCB, 역세척을 적용하였다.

또한 기존 물리세정 공정과 복합 물리세정 공정의 운전 비교를 통한 현장 적용성 평가를 하고자 하였으며, 이를 위해 기존 물리세정 방법인 조대 기포를 적용한 mode 4 실험을 추가로 진행하였고, mode 3, 4의 TMP 상승률을 분석하여 효율성을 비교 평가하였다. 실험 조건은 다음 Table 7과 같으며 각 mode 1~5의

Table 5. Experimental condition of the lab. scale test for optimum air scrubbing rate

| Experimental condition | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| Specific aeration demand per membrane area(SADm) (m ³ /m ² ·hr) | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |

Table 6. Experimental condition of the lab. scale test for optimum backwashing rate

| Experimental condition | | | | | |
|------------------------|---|----|----|----|----|
| Filtration(LMH) | 40 | | | | |
| Cycle | Filtration 510 s → Relaxation 30 s → Backwashing 30 s → Relaxation 30 s | | | | |
| Backwashing(LMH) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |

Table 7. Operation condition of the pilot plant test

| Item | Pilot plant | | | |
|---|-------------|--------|--------|---------------|
| | Mode 1 | Mode 2 | Mode 3 | Mode 4 |
| MCB(kg/m ³) | 9.6 | NA* | 9.6 | NA* |
| Backwashing(LMH) | NA* | 30.0 | 30.0 | NA* |
| Bubble type | Fine bubble | | | Coarse bubble |
| Air scrubbing(m ³ /m ² ·hr) | 0.6 | | | |

NA* : Not applied



운영 기간은 각각 30일이다.

2.5. 분석방법

유입원수와 막분리조 수질 분석 방법은 Table 8과 같다. COD_{cr}, T-N, NH₄⁺-N, NO₃-N, T-P, PO₄³⁻-P는 HACH사의 분광광도계 DR-6000을 사용하여 흡광도 측정을 하였으며 MLSS의 측정은 standard methods (APHA, 2005)에 준하여 GF/C filter와 Gucci 도가니를 사용하였다.

또한 공정의 임계 유속 구간을 산정하기 위하여 각 유속 구간을 15분간 운전하였으며, 각 구간의 압력 변화율(ΔTMP)을 시간 변화율(Δt)로 나눈 값(ΔTMP/Δt)들의 경향에서 변화하는 폭이 큰 구간을 임계 유속 구간으로 산정하였다. 그리고 역세척 최적 조건 도출 실험에서는 한계 차압인 0.04 MPa에 도달하는 순간의 저항 값(R_{in} = 1.169E+12)을 초기 저항 값으로 적용하였으며, 초기 여과저항 값과 역세 후의 여과 저항 값을 식(1)에 적용하여 역세 유량에 따른 각각의 물리세정 회복율(%)을 도출하였다.

$$[(R_{in} - R_{af}) / R_{in}] \cdot 100 = \text{Recovery rate}(\%) \quad (1)$$

R_{in} : Initial filtration resistance

R_{af} : Filtration resistance after backwashing

3. 결과 및 고찰

3.1. 실험실 규모 실험

3.1.1. MCB

Fig. 4는 MCB 적정 투입량 실험의 결과를 나타내었으며, MCB의 양이 증가할수록 TMP 상승폭이 적었다. 5.6 MCB-kg/m³, 7.6 MCB-kg/m³을 투입하였을 때, 35

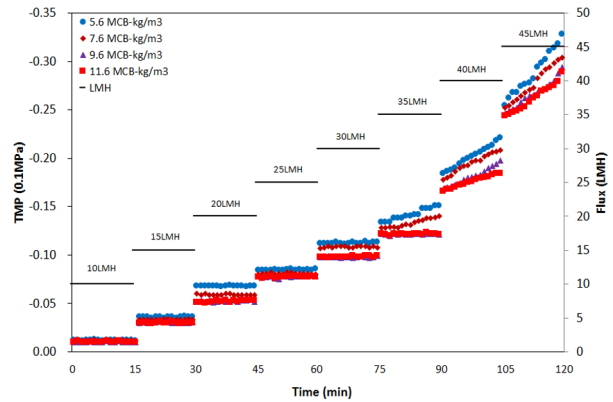


Fig. 4. Results of the critical flux test with different MCB dosage.

LMH에서 TMP가 상승하였지만, 9.6 MCB-kg/m³, 11.6 MCB-kg/m³의 경우 40 LMH에서 TMP가 상승하는 결과를 보였다. 따라서 파일럿 장치 적용 평가 시 9.6 MCB-kg/m³를 최적 MCB 투입 양으로 선정하였다.

3.1.2. 공기 세척

실험 결과 SADm 조건 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 및 0.8 m³/m²-hr에 따라 임계 유속 지점이 25, 30, 35, 35 및

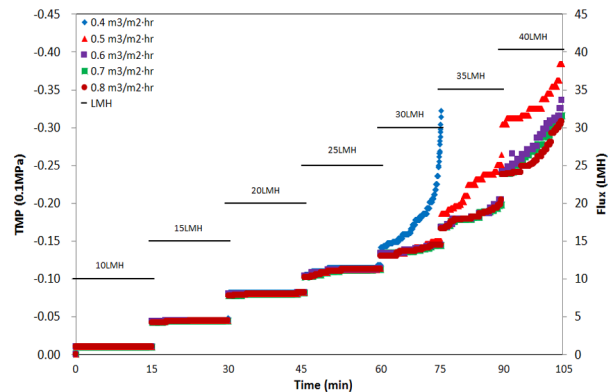


Fig. 5. Results of the critical flux test with different air scrubbing

Table 8. Analytical methods and instrumentation

| Item | Method | Instrument Reference |
|----------------------------------|---|-------------------------------|
| COD _{cr} | Closed method | Standard methods(2005) |
| SS | Gravimetric method | Standard methods(2005) |
| T-N | Chromotropic Acid Method | Hach DR 6000 |
| NH ₄ ⁺ -N | Nesslerization method | Hach / Standard methods(2005) |
| NO ₃ ⁻ -N | Ultraviolet spectrophotometric screening method | Hach / Standard methods(2005) |
| T-P | Sulfuric acid-nitric acid digestion | Hach / Standard methods(2005) |
| PO ₄ ³⁻ -P | Vanadomolybdo phosphoric acid colorimetric method | Hach / Standard methods(2005) |

pp. 481-489
pp. 491-500
pp. 501-509
pp. 511-519
pp. 521-532
pp. 533-543
pp. 545-551
pp. 553-559
pp. 561-569
pp. 571-577
pp. 579-588
pp. 587-596
pp. 597-604
pp. 605-612

Table 9. Results of the backwashing test about recovery rate of filtration resistance

| Item | 10 LMH | 20 LMH | 30 LMH | 40 LMH | 50 LMH |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Initial filtration resistance (1/m) | 1.169E+12 | | | | |
| Filtration resistance after backwashing (1/m) | 7.200E+11 | 6.574E+11 | 5.847E+11 | 4.873E+11 | 4.620E+11 |
| Efficiency (%) | 38.4 | 43.7 | 50.0 | 58.3 | 60.5 |

rate.
35 LMH으로 나타났다. SADm 0.6, 0.7 및 0.8 m³/m²·hr의 임계 유속이 35 LMH로 동일하므로 이에 최적의 공기 세척 유량을 0.6 m³/m²·hr로 선정하였으며, 실험 결과는 아래 Fig. 5에 나타내었다.

3.1.3. 역세척

운전조건에 따른 실험 결과 초기 저항 값은 1.169E+12이며 역세척 유량 10, 20, 30, 40 및 50 LMH의 실험 후 저항값은 각각 7.200E+11, 6.574E+11, 5.847E+11 및 4.873E+11이었고 회복율은 각각 38.4, 43.8, 50.0, 58.3 및 60.5%로 나타났으며, 역세척 속도가 빨라질수록 회복율도 높아지는 경향을 나타냈다. 역세척 효율 측면에서는 40 LMH 적용이 최적이라 판단되나, 본 연구에 사용된 제막사의 권장 역세척 압력인 +0.015 MPa 이하를 유지하기 위해 30 LMH를 선정하였으며, 실험 결과는 아래 Table 9와 Fig. 6에 나타내었다.

3.2. 파일럿 장치 실험

실험실 규모 실험을 통해 최적 운전 조건을 도출한 물리세정 공정의 효율성 평가 및 기존 물리세정 공정과 복합 물리세정 공정의 운전 비교와 현장 적용성

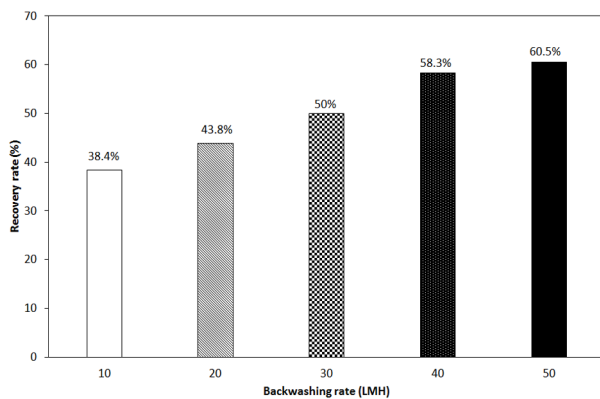


Fig. 6. Recovery rates of filtration resistance by backwashing.

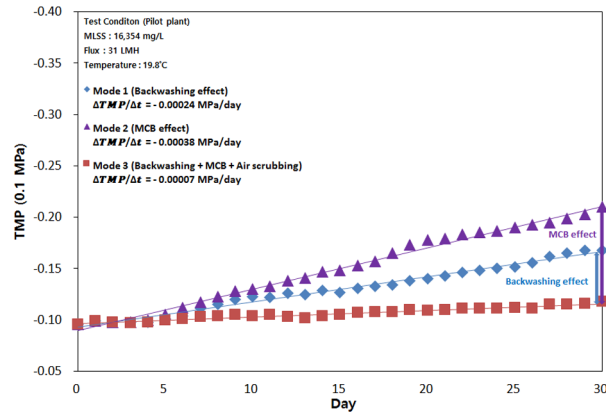


Fig. 7. Efficiency evaluation of the physical cleaning methods in a pilot plant.

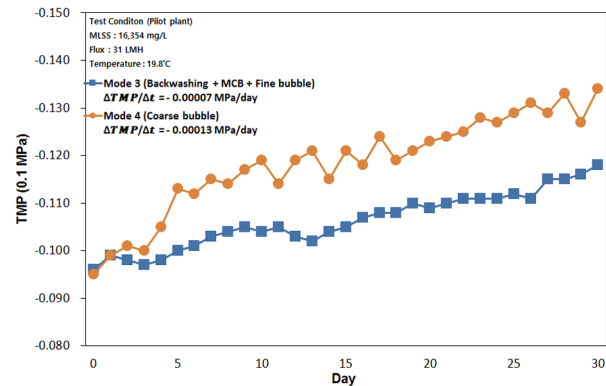


Fig. 8. Comparison of the coarse bubble and combination of the physical cleaning process

평가를 위해 약 30일간 파일럿 장치를 운영하였으며, 그 결과는 다음 Fig. 7, Fig. 8과 같다.

mode 1, 2의 운전 결과 역세척을 적용하지 않은 mode 1에서는 압력이 -0.00024 MPa/day로 증가하였으며, MCB 적용을 제외한 mode 2의 경우 -0.00038 MPa/day로 압력이 증가하였다. 또한 조대 기포만 적용한 기존 공정인 mode 4의 경우 운전 5일째에 급격한 TMP 상승을 보이며 -0.00013 MPa/day로 압력이



증가하였다.

이에 반해 3가지 공정을 모두 조합한 복합 공정 mode 3의 경우 비교적 일정한 압력 상승을 보였으며, - 0.00007 MPa/day로 증가하여 운전 기간인 약 30일 동안 기존 공정 대비 높은 세정 효율을 보였다.

실험 결과를 통해 기존 연구에서 언급한 분리막 표면의 cake 퇴적에 의한 가역적 오염(Kim, 2011; Lee, 2009)을 MCB와 같은 비압축성 물질을 이용하여 막 표면을 직접적으로 물리적 세정하는 방법이 공기 세척, 역세척과 같은 간접적인 물리세정 방법에 비해 높은 제거율을 보였으며, 이는 선행 연구(Yang et al., 2006; Kimura et al., 2008)의 내용과 일치하는 결과이다.

4. 결 론

본 연구에서는 역세척이 가능한 평판형 분리막을 사용하여 MCB, 공기세척 및 역세척 등 3가지의 물리 세정 방법을 통해 MBR 막 오염 제어 특성을 알아보고자 하였으며, 기존 MBR 공정과의 비교 평가를 통해 복합 물리세정의 효율과 현장 적용 가능성을 평가하고자 하였다. 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 실험실 규모 장치를 통해 도출된 최적 운전조건을 파일럿 장치에 적용하여 운전한 결과 각각의 물리 세정 조건별 효율 평가에서는 MCB 및 공기 세척 등 막표면의 직접적인 막 오염 제어가 역세척과 비교하여 높은 효율을 나타냈으며, MCB + 공기 세척이 공기 세척 단독 공정보다 높은 효율을 나타냈다. 이를 통해 MBR 공정 운영 간 막 오염 특성은 막 표면에서의 cake 형성으로 인한 막오염이 지배적으로 나타났으며, MCB와 같은 비압축성 물체와 결합한 공정이 막 오염 제어에 용이한 것으로 사료된다.

2) 파일럿 규모 장치를 통해 조대 기포를 이용하여 기존 MBR 공정을 모사한 mode 4과 미세 기포, MCB 및 역세척 등 복합 물리세정을 적용한 mode 3의 운전 비교 결과 복합 물리세정이 적용된 mode 3 공정의 경우 약 30일간 운전결과를 통해 TMP 상승률은 - 0.00007 MPa/day인 것으로 나타났으며, 기존 MBR 공정을 모사한 mode 4의 TMP 상승률은 - 0.00013 MPa/day으로 나타나 mode 3 대비 mode 4의 TMP 상승률은 185%인 것으로 나타났다. 이를 통하여 MBR 공정에서 cake 막오염 만을 고려하였을 경우 화학세정 없이 약 1년 이상 운전이 가능할 것으로 판단된다.

References

- American Public Health Association(APHA). (2005). *American Public Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th ed., American Public Health Association, Washington, DC, USA.
- Beyer, M., Lohrengel, B., Nghiem, L. D. (2010). Membrane fouling and chemical cleaning in water recycling applications, *Desalination*, 250, 977-981.
- Chang, I. S., Bag, S. O., Lee, C. H. (2001). Effects of membrane fouling on solute rejection during membrane filtration of activated sludge, *Process Biochem.*, 36, 855-860.
- Fang, H. H. P., Shi, X. (2005). Pore fouling of microfiltration membranes by activated sludge, *J. Membr. Sci.*, 264, 161-166.
- Farquharson, A., Zhou, H. (2010). Relationships of activated sludge characteristics to fouling rate and critical flux in membrane bioreactors for wastewater treatment, *Chemosphere*, 79, 149-155.
- Field, R., Hughes, D., Cui, Z., Tirlapur, U. (2008). Some observations on the chemical cleaning of fouled membranes, *Desalination*, 227, 132-138.
- Han, S. H., Chang, I. S. (2016). Comparison of Filtration Resistances according to Membrane Cleaning Methods, *J. Env. Sci. Intern.*, 25, 817-827.
- Han, X., Wang, Z., Wang, X., Zheng, X., Ma, J., Wu, Z. (2016). Microbial responses to membrane cleaning using sodium hypochlorite in membrane bioreactors : Cell integrity, key enzymes and intracellular reactive oxygen species, *Water Res.*, 88, 293-300.
- Hilal, N., Ogunbiyi, O. O., Miles, N. J., Nigmatullin, R. (2005). Methods employed for control of fouling in MF and UF membranes: A comprehensive review, *Sep. Sci. Technol.*, 40, 1957-2005.
- Judd, S., Judd, C. (2006). *The MBR Book : Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*. 2nd Ed., Vasa, England. pp. 342.
- Kim, B. K. (2011). Prediction of Membrane Fouling by using Flux Decline Model in Microfiltration, Master's Thesis, The graduate school of University of Seoul.
- Kimura, K., Maeda, T., Yamamura, H., Watanabe, Y. (2008). Irreversible membrane fouling in microfiltration membranes filtering coagulated surface water, *J. Membr. Sci.*, 320, 356-362.
- Kimura, K., Yamamura, H., Watanabe, Y. (2006). Irreversible Fouling in MF/UF Membranes Caused by Natural Organic Matters (NOMs) Isolated from Different Origins, *Sep. Sci.*

pp. 481-489

pp. 491-500

pp. 501-509

pp. 511-519

pp. 521-532

pp. 533-543

pp. 545-551

pp. 553-559

pp. 561-569

pp. 571-577

pp. 579-586

pp. 587-596

pp. 597-604

pp. 605-612

- Technol., 41, 131-1344.
- Lee, S. J. (2009). A Study on Membrane Fouling by COD fraction of Influent in Submerged MBR, Master's Thesis, The graduate school of University of Seoul.
- Lin, J. C. T., Lee, D. J., Huang, C. (2010). Membrane Fouling Mitigation : Membrane Cleaning, Sep. Sci. Technol., 45, 858-872.
- Meng, F., Yang, F. (2007). Fouling mechanisms of deflocculated sludge, normal sludge, and bulking sludge in membrane bioreactor, J. Membr. Sci., 305, 48-56.
- Miyoshi, T., Yuasa, K., Ishigami, T., Rajabzadeh, S., Kamio, E., Ohmukai, Y., Saeki, D., Ni, J., Matsuyama, H. (2015). Effect of membrane polymeric materialson relationship between surface pore size and membrane fouling in membrane bioreactors, Appl. Surf. Sci., 330, 351-357.
- Park, J. W. (2016). Characteristic of membrane fouling and control according to temperature changes in MBRs process, Master's Thesis, The graduate school of SungKyunKwan University.
- Pearce, G. (2007). Introduction to membranes : Fouling control, Filtr. Sep., 44, 30-32.
- Psoch, C., Schiewer, S. (2006). Resistance analysis for enhanced wastewater membrane filtration, J. Membr. Sci., 280, 284-297.
- Raosenberger, S., Helmus, F. P., Krause, S., Bareth, A., Meyer-Blumenroth, U. (2011). Principles of an enhanced MBR-process with mechanical cleaning, Water Sci. Technol., 64, 1951-1958.
- Rodgers, V. G. J., Sparks, R. E. (1991). Reduction of membrane fouling in the ultrafiltration of binary protein mixtures, AIChE J., 37, 1517-1528.
- Shim, S. N. (2013). Optimization of mechanical cleaning effect of moving beads using Box-Behnken design in MBR for wastewater treatment, Master's Thesis, The graduate school of Seoul National University.
- Wang, Z., Wu, Z., Tang, S. (2009). Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor, Water Res., 43, 2504-2512.
- Yang, Q., Chen, J., Zhang, F. (2006). Membrane fouling control in a submerged membrane bioreactor with porous, flexible suspended carriers, Desalination, 189, 292-302.