

역세척, 여과/이완 및 사인파형 연속투과 운전방식에 따른 침지형 평막의 막간차압

김 재 효 · 김 은 수 · 정 건 용[†]

서울과학기술대학교 화공생명공학과
(2019년 7월 24일 접수, 2019년 8월 13일 수정, 2019년 8월 19일 채택)

Transmembrane Pressure of Backwashing, Filtration/Relaxation and the Sinusoidal Flux Continuous Operation Modes for Submerged Plate Membrane

Jae Hyo Kim, Eun Soo Kim, and Kun Yong Chung[†]

Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 01811, Korea

(Received July 24, 2019, Revised August 13, 2019, Accepted August 19, 2019)

요 약: 본 연구에서는 역세척이 가능한 평막과 MBR 하부에서 공급되는 공기 및 자연적으로 순환되는 구형 입자를 이용하여 투과 실험하였다. 활성슬러지 수용액은 MLSS 8,000 mg/L로 유지하였으며 여과/이완(FR), 이완시 역세척(FR/BW), 사인파형 연속투과 운전(SFCO) 및 사인파형 연속투과 운전 시 역세척(SFCO/BW) 방식에 따른 막간차압(TMP)을 측정하였다. 역세척 유량을 47에서 14 L/m² · hr로 감소시키면, TMP가 증가하였으며 SFCO보다는 FR 방식의 TMP가 크게 증가하였다. 또한 역세척 방식이 구형입자를 이용한 세척방식보다 TMP를 더 감소시켰으며, 구형입자와 역세척 방식을 동시에 사용하면 각각의 방법보다 더 효과적임을 확인할 수 있었다.

Abstract: In this study, permeation experiments were conducted using naturally circulating spherical beads, backwashable plate membrane and the air supplied from the bottom of the MBR. The activated sludge solution was maintained at 8,000 mg/L of MLSS and compared transmembrane pressure (TMP) with respect to FR (filtration and relaxation), FR/BW (filtration and relaxation/backwashing), SFCO (sinusoidal filtration continuous operation) and SFCO/BW (sinusoidal filtration continuous operation/backwashing). As the backwashing flux decreased from 47 to 14 L/m² · hr, the TMP increased generally, but the TMP of FR system increased significantly comparing with SFCO. In addition, the backwashing method reduced more TMP comparing to the cleaning method using spherical beads, and it was confirmed that the operation method using the spherical beads and the backwashing simultaneously is more effective than each method.

Keywords: MBR, TMP, plate membrane, backwashing, spherical beads

1. 서 론

MBR (membrane bioreactor) 공법은 기존의 활성슬러지 공법보다 처리효율이 우수하고 침전조가 불필요하므로 소요 면적을 대폭 축소시킬 수 있는 장점이 있지만, 아직까지 수처리 공정에 일반적으로 적용되지는 못하는 실정이다. 주요한 이유로는 분리막 오염(fouling)과 운전에 소요되는 높은 에너지 등이다. 일반적으로 MBR

공정에 필요한 에너지는 기존의 활성슬러지 공정과 비교하여 2배 이상이 필요하고 이 밖에도 분리막 세척을 위한 추가적인 화학약품과 복잡한 배관 그리고 주기적인 분리막의 교체가 필수적이다[1,2]. 따라서 막 오염을 효과적으로 제어할 수 있는 물리적, 화학적 및 생물학적 방법을 지속적으로 개발하고 있다[3]. 예를 들면, 미생물들 간의 신호전달 물질을 차단하는 quorum quenching [4], 응집제 투입[5], 간헐적 산기[6], 분리막에 나노 입자

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

를 첨가함으로써 막 오염 저항성을 향상시키는 방법[7,8], 분말활성탄(powdered activated carbon)을 이용한 흡착 및 물리적 세척[9], 역세척(backwashing, BW)[10] 등 다양한 방법이 있다. 이 밖에도 기존의 MBR 운전방식인 여과/이완(filtration and relaxation, FR) 과정을 통한 간헐적 여과와 처리수를 일정한 유속이 아닌 사인파형 연속투과 운전(sinusoidal flux continuous operation, SFCO) 방식도 개발 중이다[11].

이 중에서 역세척 방법은 중공사형 막모듈(hollow-fiber membrane module)에 일반적으로 적용되고 있지만, 막 사이에 오염물이 영커 훼손될 수 있다. 이에 반하여 평막 모듈(plate membrane module)은 오염물의 제거가 용이한 장점이 있다. 그럼에도 불구하고 평막 모듈은 외측 프레임에만 막이 집착되고 중간 부분은 고정되어 있지 않아 역세척을 실시할 경우, 모듈 내부로부터 외부 방향으로 압력이 발생하게 된다. 따라서 역세척 유량 및 시간이 경과하면 평막이 부풀어 손상되거나 또는 장시간 역세척 시 평막이 모듈에서 탈착될 위험이 있어 적용 사례가 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 역세척이 가능하도록 자체적으로 지지(self-supporting)가 가능한 평막을 이용하여 경제적이고 효율적으로 막 오염을 제어하는 방법을 개발하고자 한다. 역세척이 가능한 평막을 반응기에 삽입하고 하부에서 주입되는 공기를 이용하여 자연스럽게 순환되는 구형 입자 또는 역세척의 효과를 FR 및 SFCO 운전 방식에 따른 막간차압을 비교하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1. 분리막 모듈

실험에 사용한 분리막은 ‘아모그린텍’사에서 제조한 역세척이 가능한 침지형 평막으로 Fig. 1과 같다. 분리막은 Fig. 1(a)와 같이 자체적으로 지지가 가능한 0.4 cm 두께의 평막으로 역세척이 가능하다. 실험에 사용된 분리막 모듈은 Fig. 1(b)와 같이 한 변이 13.8 cm인 정사각형이며, 모듈에 장착된 분리막은 가로, 세로 각각 8 cm로 양쪽 면의 분리막 면적은 128 cm²이다.

2.2. 활성슬러지 특성

본 실험에 사용한 하수는 M 환경사업소에서 채취한 반송슬러지를 사용하였다. 활성슬러지의 농도유지를 위해 Table 1과 같이 인공폐수를 매일 주입하였다. 활성슬

Table 1. The Artificial Wastewater Compositions

Compositions	Concentrations (mg/L)
Glucose	450
NH ₄ Cl	112.5
KNO ₃	22.5
KH ₂ PO ₄	11.25
K ₂ HPO ₄	11.25

Table 2. Water Quality in the Activated Sludge Reactor

Variables	Concentrations
MLSS	8,000 mg/L (± 5%)
Temperature	25 ± 1 °C
pH	7~8
DO	2~4 mg/L

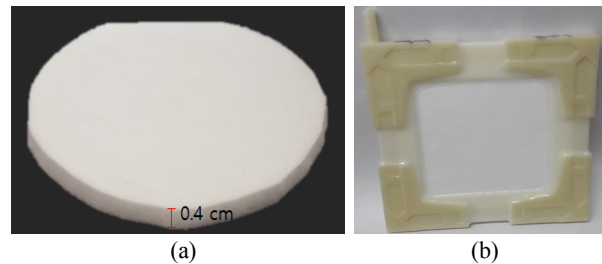


Fig. 1. Pictures of the backwashable plate, (a) membrane and (b) module.

러지는 Table 2와 같이 MLSS 8,000 mg/L로 일정하게 유지하고 실험을 진행하였다. MLSS는 Istek사의 Partech 740을 사용하여 측정하였으며 pH 및 용존산소(dissolved oxygen, DO)는 Istek사의 125PD로 측정하였다.

2.3. 구형 입자

구형 입자의 밀도를 유체의 밀도와 같게 제작하여 부력과 중력의 힘을 동일하게 하면 중성부력(neutral buoyancy)을 유지하고 추가적인 에너지 없이 유체의 흐름만으로 입자가 순환하며 분리막 표면을 효율적으로 세척할 수 있다. 본 실험에서는 지름이 1 cm이고 중간에 약 2 mm 크기의 원통형 공간이 있는 플라스틱 구형 입자를 사용하였으며 밀도를 조절하기 위하여 입자 중간 빈 공간에 예폭시 접착제를 소량 주입하여 구형 입자를 제조하였다[12].

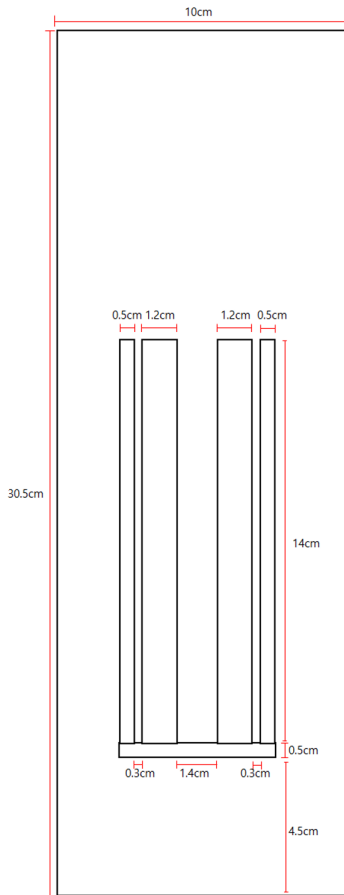


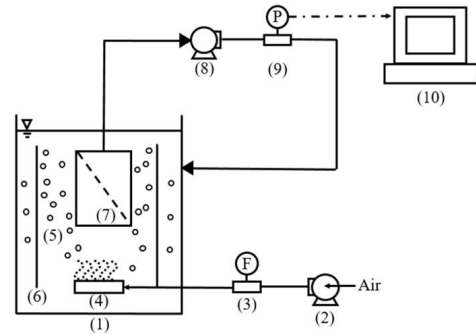
Fig. 2. Drawing of the MBR reactor.

2.4. MBR 반응기 제작

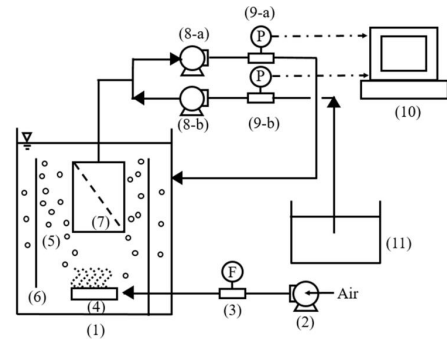
투과 실험에 사용한 MBR 반응기는 Fig. 2와 같이 투명한 아크릴로 제작하였다. 반응기는 가로 16 cm, 세로 10 cm, 높이 30.5 cm로 내부 부피는 약 4 L이다. 반응기 내부에는 분리막 모듈을 장착할 수 있도록 분리막 모듈 두께 1.3 cm보다 조금 큰 1.4 cm의 공간을 확보하였다. 구형 입자가 분리막 표면과 접촉하면서 원활히 순환할 수 있도록 분리막 모듈 양쪽 면에 입자 직경인 1 cm보다 큰 1.2 cm의 공간을 확보하였으며 두께 0.3 cm의 장애판을 삽입하였다.

2.5. 실험 장치

FR 및 SFCO 운전방식의 MBR 장치 개략도는 Fig. 3과 같다. 활성슬러지가 들어가 있는 4 L 크기의 MBR 반응기(1)에 에어 블로워(2)를 통해 공기를 공급하였다. 공기의 유량은 유량계[(3), RMA-26-SSV, Dwyer]를 이용하여 조절하고 산기관(4)을 통해 공기를 MBR 반응기



(1) MBR reactor, (2) Air blower, (3) Air flowmeter, (4) Air diffuser, (5) Spherical beads, (6) Baffle, (7) Backwashable flat membrane, (8) Suction pump, (9) Pressure gauge, (10) Computer
 Fig. 3. Schematic flow diagram of MBR system with spherical beads for FR and SFCO modes.



(1) MBR reactor, (2) Air blower, (3) Air flowmeter, (4) Air diffuser, (5) Spherical beads, (6) Baffle, (7) Backwashable flat membrane, (8-a,b) Suction pump, (9-a,b) Pressure gauge, (10) Computer, (11) Permeate/backwashing tank
 Fig. 4. Schematic flow diagram of MBR system with spherical beads for backwashing mode.

하부로 공급하였다. 반응기 하부에서 산기된 공기는 구형 입자(5)를 유체와 함께 자연스럽게 분리막과 장애판(6) 사이를 순환하게 한다. 장애판 사이에 역세척이 가능한 평막(7)을 설치하고 분리막과 연결된 펌프[(8), JWS 600, Jeniewell]를 통해 FR 및 SFCO 운전방식으로 분리막을 투과시킨다. 투과액은 활성슬러지 농도를 일정하게 유지하기 위하여 MBR 반응기로 순환시켰다. 막간차압은 압력계[(9), PTDC-500RCIA, Sensys]로 측정하고 컴퓨터(10)로 일정 시간마다 자동으로 기록하였다.

역세척(BW)이 가능한 FR/BW 및 SFCO/BW 운전방식의 MBR 장치 개략도는 Fig. 4와 같이, 역세척이 가능하도록 역세척 펌프(8-b) 및 압력계(9-b)를 역세척수 저장조(11)와 추가적으로 연결하였다. 투과 운전은 펌프(8-a)를 통해 FR 또는 SFCO 방식으로 분리막을 투과하여 저장

조(11)에 축적한다. 역세척은 투과용 펌프(8-a)를 정지시키고, 역세척용 펌프(8-b)를 작동시켜 저장조의 물로써 역세척을 실시하였다. 실험에 사용한 펌프(8)는 연동형 펌프이므로 체크밸브 없이도 역류를 방지할 수 있었다.

2.6. 실험 방법

2.6.1. FR 및 SFCO 운전

본 실험은 1개의 분리막을 MBR 반응기 내에 침지시키고 동일한 조건의 투과유속, 200 및 500 mL/min 산기량에서 FR 또는 SFCO 방식으로 실험하였다. FR 운전방식은 10분 투과 운전 후 2분 이완하는 주기로 반복 운전하였다. SFCO 운전은 12분 주기를 기준으로 1분마다 투과 유량을 연속적으로 변화시키면서 매 주기당 투과 유량이 FR 방식과 같은 부피가 되도록 Labview 프로그램을 이용하여 투과 파형을 조절하였다[11].

2.6.2. 역세척 및 구형입자 세척

역세척 유량을 47, 33, 23, 14 L/m²·hr로 변화시키거나, 또한 역세척 시간을 60, 30, 10 sec/cycle로 변화시키면서 최적의 역세척 조건을 모색하였다.

이 밖에, 투과유속 20 L/m²·hr일 경우, 이상의 최적 역세척 조건에서 구형입자를 MBR 반응조에 투입되는 활성슬러지 3.5 L 기준 1.5 vol% 농도로 투입하여 구형입자에 따른 추가적인 TMP 변화를 측정하였다.

2.7. 분리막 세척

매 투과 실험을 마친 뒤 분리막 표면을 부드러운 재질의 스펀지로 20회 이상 닦아내 물리적 세척을 하였고 NaOCl 0.5 wt% 수용액에 15분간 침지시켜 15분간 화학적 세척을 실시하였다. 그 후 분리막을 순수에 침지시켜 TMP를 측정하고 초기 순수에 침지시켜 측정한 TMP 값과 10% 오차 범위일 때까지 화학적 세척을 반복 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 역세척 유량에 따른 TMP 변화

FR 및 FR/BW 운전방식은 MLSS 8,000 mg/L, 산기량 200 mL/min 및 20 L/m²·hr 조건 하에 진행하였고 역세척 시간은 60 sec/cycle에서 역세척 유량을 47, 33, 23, 14 L/m²·hr로 감소시키면서 이에 따른 TMP 변화를 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 역세척을 실시하지 않

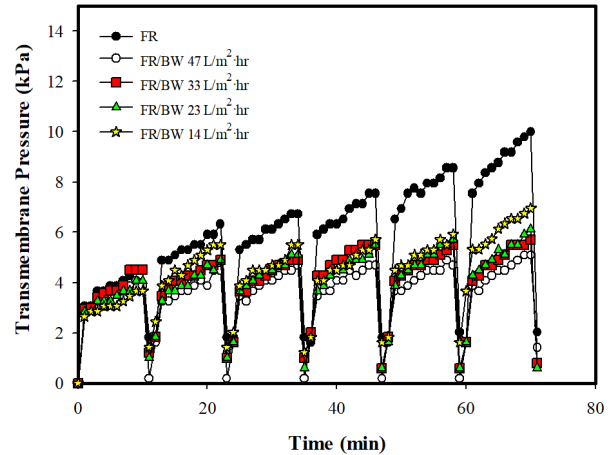


Fig. 5. Transmembrane pressure with respect to operating time and backwashing flux at 20 L/m²·hr and 60 sec/cycle backwashing cycle for FR and FR/BW modes.

을 경우, TMP는 급격히 증가하여 6번째 주기에서는 10.0 kPa까지 증가하였으며 이를 1번째 주기와 비교하면 2.2배에 해당된다. 그러나 47 L/m²·hr로 역세척을 실시하면 TMP는 6번째 주기에는 5.1 kPa까지 서서히 TMP가 증가하였으며 1번째 주기 TMP보다는 32% 상승하였다. 계속해서 역세척 유량을 33, 23, 14 L/m²·hr까지 감소시킬 경우, 6번째 주기에서의 TMP는 각각 5.7, 6.1, 6.9 kPa까지 증가하였으며, 1번째 주기 TMP와 비교하면 각각 27, 50, 90% 상승하였다. 역세척 유량이 가장 큰 47 L/m²·hr에서 FR에 대한 FR/BW의 역세척에 따른 TMP 감소 효과는 49%이었다.

SFCO 및 SFCO/BW 운전방식은 FR 및 FR/BW와 동일한 조건에서 역세척 유량을 47 및 14 L/m²·hr로 변화시키면서 이에 따른 TMP 변화를 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. SFCO 방식의 6번째 주기 최대 TMP는 31.7 kPa이었으며 이는 1번째 주기 최대 TMP의 9.1배에 해당된다. 그러나 47 및 14 L/m²·hr 조건에서 역세척을 동반하는 SFCO/BW 방식 6번째 주기의 최대 TMP 값은 각각 6.1, 15.7 kPa로 감소하였으며, 이는 1번째 주기 최대치의 각각 1.8 및 4.5배에 해당된다.

역세척에 의한 TMP 감소효과는 일정한 투과유속에서 지속적으로 오염되는 FR 운전방식보다는 투과유속이 변하여 오염도가 운전시간에 따라서 변화할 수 있는 SFCO 운전방식에서 보다 효과적일 수 있음을 확인하였다.

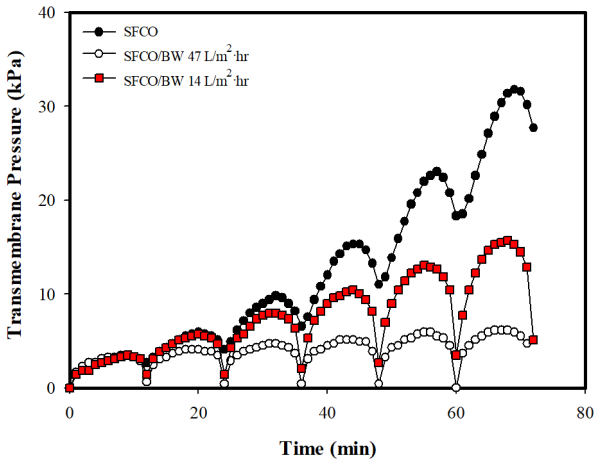


Fig. 6. Transmembrane pressure with respect to operating time and backwashing flux at 20 L/m² · hr and 60 sec/cycle backwashing cycle for SFCO and SFCO/BW modes.

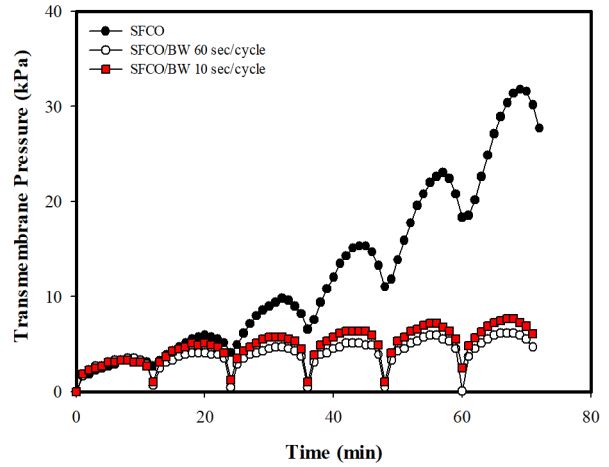


Fig. 8. Transmembrane pressure with respect to operating time and backwashing cycle at 20 L/m² · hr and 47 L/m² · hr backwashing flux for SFCO and SFCO/BW modes.

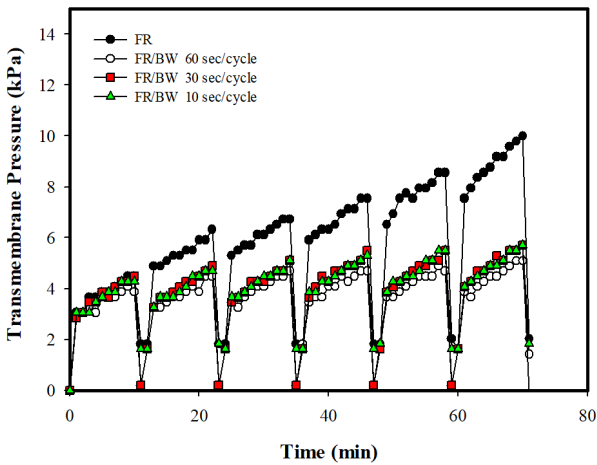


Fig. 7. Transmembrane pressure with respect to operating time and backwashing cycle at 20 L/m² · hr and 47 L/m² · hr backwashing flux for FR and FR/BW modes.

3.2. 역세척 시간에 따른 TMP 변화

FR 및 FR/BW 운전방식은 MLSS 8,000 mg/L, 산기량 200 mL/min 및 20 L/m² · hr 조건 하에 수행하였고 역세척 유량은 47 L/m² · hr에서 역세척 시간을 60, 30, 10 sec/cycle로 감소시키면서 이에 따른 TMP 변화를 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 역세척을 실시하지 않을 경우, TMP는 급격히 증가하여 6번째 주기에서는 10.0 kPa까지 증가하였으며, 이는 1번째 주기 TMP보다 123% 증가한 값이다. 그러나 60 sec/cycle로 역세척을 실시하면 TMP는 6번째 주기에는 5.1 kPa까지 서서히 TMP가 증가하였으며 1번째 TMP보다는 32% 높은 값이다. 또한

역세척 시간을 30 sec로 감소시키면 6번째 주기에서의 TMP는 5.6 kPa까지 증가하였으며 계속해서 10 sec/cycle까지 감소시킬 경우, 6번째 주기에서의 TMP는 5.7 kPa까지 약간 증가하였다. 따라서 비록 짧은 시간동안 역세척을 실시하더라도 TMP의 상승을 제어 가능한 것으로 확인할 수 있었다.

SFCO 및 SFCO/BW 운전방식은 FR 및 FR/BW의 운전방식과 동일한 조건에서 역세척 시간을 60 및 10 sec/cycle로 변화시켰으며 이에 따른 TMP를 Fig. 8에 나타내었다. 60 sec/cycle 역세척 조건에서 6번째 주기에서의 최대 TMP는 6.1 kPa이었으며, 역세척이 없는 SFCO 운전방식의 최대 TMP 값인 31.7 kPa와 비교하면 81%의 TMP가 감소함을 알 수 있다. 또한 역세척 시간을 10 sec/cycle까지 감소시키면, 6번째 주기에서의 최대 TMP는 7.7 kPa로 약간 증가함을 알 수 있었다.

FR, FR/BW, SFCO 및 SFCO/BW의 모든 운전방식에서 주기당 총 투과량은 42.6 mL/cycle이다. 47 L/m² · hr, 60 sec/cycle 조건으로 역세척할 경우, 필요한 역세척수는 10 mL/cycle이며 투과수중 일부를 역세척수로 사용한다면 유효 투과수량은 32.6 mL/cycle로써 투과수 회수율은 77%에 해당한다. 하지만, 47 L/m² · hr, 10 sec/cycle 조건으로 역세척할 경우는 1.7 mL/cycle의 역세척수가 소모되며 투과수 회수율은 96%에 이른다. 따라서 투과수 회수율과 TMP 상승에 따른 공정비 증가를 고려하여 경제적인 역세척 조건을 결정하여야 한다.

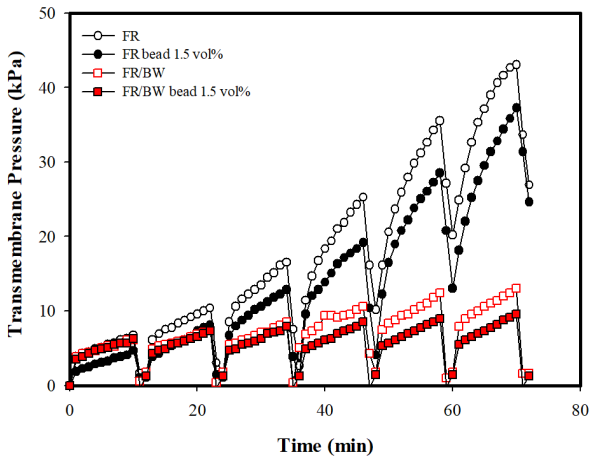


Fig. 9. Transmembrane pressure with respect to operating time at $20 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$, $47 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ backwashing flux and 10 sec/cycle backwashing cycle with and without beads for FR and FR/BW modes.

3.3. 역세척 및 구형 입자에 따른 TMP 변화

MLSS $8,000 \text{ mg/L}$, 산기량 500 mL/min 및 $20 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 조건하에서 구형 입자의 농도를 0 또는 $1.5 \text{ vol}\%$, 역세척 조건은 $47 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$, 10 sec/cycle에서 FR 및 FR/BW 방식으로 운전하면서 TMP 변화를 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 구형입자가 없는 FR 및 FR/BW 운전 방식에서 TMP는 6번째 주기에서 각각 43.1 , 13.1 kPa 까지 상승하였다. 계속해서 구형입자 $1.5 \text{ vol}\%$ 를 투입하고 동일한 조건에서 FR 및 FR/BW 방식으로 운전할 경우, 6번째 주기에서의 최대 TMP는 각각 37.3 , 9.6 kPa 이었다. 따라서 구형 입자를 추가한 FR 및 FR/BW 방식의 TMP 감소 효과는 각각 14 , 27% 로, 역세척을 동반하는 경우가 보다 효과적이었다.

SFCO 및 SFCO/BW 방식도 동일한 조건에서 운전하면서 TMP 변화를 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. 구형 입자가 없는 SFCO 및 SFCO/BW 방식의 6번째 주기에서의 최대 TMP는 32.0 , 9.9 kPa 이었다. 구형입자를 투입할 경우, SFCO 및 SFCO/BW 방식의 6번째 주기에서의 최대 TMP는 각각 25.9 , 7.6 kPa 이었다. 따라서 구형 입자를 추가한 SFCO 및 SFCO/BW 방식의 TMP 감소 효과는 각각 19 , 23% 로, FR 운전방식에서와 같이 역세척을 동반하는 경우가 조금 더 효과적이었다.

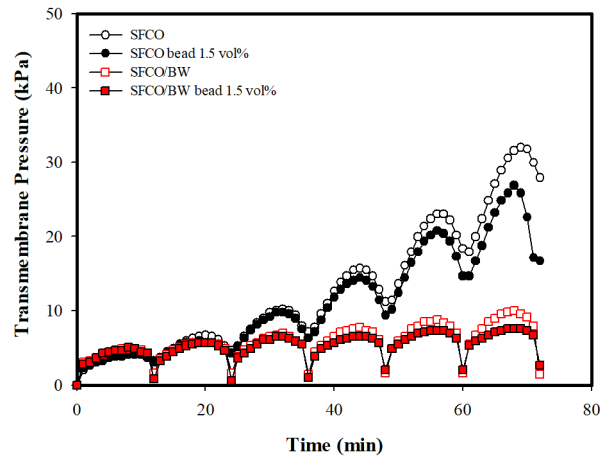


Fig. 10. Transmembrane pressure with respect to operating time at $20 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$, $47 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ backwashing flux and 10 sec/cycle backwashing cycle with and without beads for SFCO and SFCO/BW modes.

4. 결 론

역세척이 가능한 침지형 평막을 사용하여 FR 및 SFCO 운전방식으로 역세척 또는 구형입자에 따른 TMP 변화를 측정하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 역세척 유량을 47 에서 $14 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 감소시키면, TMP가 증가하였으며 FR보다는 SFCO 방식의 TMP가 크게 감소하였다.

- FR 또는 SFCO 방식에서 역세척의 실시 여부가 10 내지 60sec/cycle의 역세척 시간의 운전변수보다 TMP 감소에 효과가 큰 것으로 확인되었다.

- FR 또는 SFCO 방식에서 구형입자를 투입할 경우, TMP 감소효과는 역세척을 동시에 실시할 경우가 역세척이 없을 경우보다 큰 것으로 나타났다.

감 사

이 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. A. Fenu, J. Roels, T. Wambecq, K. DeGusse, C. Thoeye, G. DeGuedre, and B. van De Steene, "Energy audit of a full scale MBR system", *De-*

- salination*, **262**, 121 (2010)
2. J. A. Gil, L. Túa, A. Rueda, B. Montaña, M. Rodríguez, and D. Prats, "Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR", *Desalination*, **250**, 997 (2010)
 3. Z. Wang, J. Ma, C. Y. Tang, K. Kimura, Q. Wang, and X. Han, "Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review", *J. Membr. Sci.*, **468**, 276 (2017).
 4. H. S. Oh and C. H. Lee, "Origin and evolution of quorum quenching technology for biofouling control in MBRs for wastewater treatment", *J. Membr. Sci.*, **554**, 331 (2018).
 5. 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 (2006).
 6. Y. K. Choi, O. S. Kwon, H. S. Park, and S. H. Noh, "Mechanism of gel layer removal for intermittent aeration in the MBR Process", *Membr. J.*, **16**, 188 (2006).
 7. J. H. Choi, J. B. Lee, and I. C. Kim, "A characterization of the nano-material MF membranes with excellent fouling resistance", *Membr. J.*, **15**, 289 (2005).
 8. J. H. Choi, J. B. Lee, and I. C. Kim, "Development of MBR system commercialization technology using a membrane with a good fouling resistance", *Membr. J.*, **18**, 35 (2008).
 9. Y. Gao, D. Ma, Q. Yue, B. Gao, and X. Huang, "Effect of powdered activated carbon (PAC) on MBR performance and effluent trihalomethane formation: At the initial stage of PAC addition", *Bioresource Technology*, **216**, 838 (2016).
 10. C. Psoch and S. Schiewer, "Anti-fouling application of air sparging and backflushing for MBR", *J. Membr. Sci.*, **283**, 273 (2006).
 11. I. H. Won, H. W. Lee, H. J. Gwak, and K. Y. Chung, "Transmembrane pressure of flat-sheet membrane in emulsion type cutting oil solution for symmetric/asymmetric sinusoidal flux continuous operation mode", *Membr. J.*, **25**, 320 (2015).
 12. D. I. Jeong, J. S. Min, S. M. Lee, and K. Y. Chung, "Transmembrane pressures for the submerged flat membrane in the activated sludge solution by circulation of the cleaning spherical beads", *Membr. J.*, **28**, 62 (2018).