

침지식 평막 MBR 내 응집제 투여에 따른 사인파형 연속투과 운전 방식의 막간차압

원인혜·김대천·정건용[†]

서울과학기술대학교 화공생명공학과
(2015년 1월 12일 접수, 2015년 1월 25일 수정, 2015년 1월 26일 채택)

Transmembrane Pressure of the Sinusoidal Flux Continuous Operation Mode for the Submerged Flat-sheet Membrane Bioreactor in Coagulant Dosage

In Hye Won, Dae Chun Kim, and Kun Yong Chung[†]

Department of Chemical and Biomolecular Engineering Seoul National University of Science and Technology, Seoul
137-743, Korea

(Received January 12, 2015, Revised January 25, 2015, Accepted January 26, 2015)

요약: 본 연구에서는 MBR 내에 침지된 분리막 오염을 평가하기 위하여 운전시간에 따른 막간차압(TMP)을 측정하였다. 유효 막면적이 0.02 m^2 이고 공칭 세공크기가 $0.15 \mu\text{m}$ 인 정밀여과용 평막 모듈을 MLSS 5,000 mg/L인 활성슬러지 용액에 침지시켰다. 운전/휴직(R/S) 및 사인파형 투과유속 연속운전(SFCO) 방식에 따른 TMP를 비교하기 위하여 동시에 투과 실험을 수행하였다. SFCO 운전방법에 따른 TMP는 R/S에 비하여 최대 93% 낮게 유지되었으며 투과유속이 증가함에 따라서 TMP 감소 효과는 줄어들었다. 또한 응집제인 FeCl_3 를 활성슬러지 용액에 500 mg/L 농도로 주입시키면 SCFO 운전방식의 경우, 투과 운전시간을 5배 이상 증가시켜도 한계 운전 TMP인 55 kPa의 40% 미만으로 유지됨을 확인할 수 있었다.

Abstract: In this study transmembrane pressure (TMP) was measured with respect to operational time in order to estimate fouling of the submerged membrane in the membrane bioreactor(MBR). The microfiltration flat sheet module which has 0.02 m^2 of effective area and $0.15 \mu\text{m}$ nominal pore size was submerged in the activated sludge solution of MLSS 5,000 mg/L. The permeate experiments were carried out simultaneously to compare TMP of the run/stop (R/S) with that of the sinusoidal flux continuous operation (SFCO). TMP for SFCO mode was up to 93% lower than that of R/S mode, and the effect of TMP drop reduced as permeate flux increased. Also, TMP of the SCFO mode was maintained below 40% of the limited operating TMP 55 kPa until the permeate operational time extended to longer than 5 times for the case as the coagulant FeCl_3 was dosed into the activated sludge solution with 500 mg/L concentration.

Keywords: MBR, flat membrane, coagulant, sinusoidal permeate flux, membrane fouling

1. 서론

하폐수 처리 및 재이용을 위하여 통상적으로 사용되었던 기존의 활성 슬러지 공정(conventional activated sludge, CAS)은 처리 시 발생하는 슬러지 생성량이 많아 처리비용이 많이 소모되고 BOD (biological oxygen demand) 과부하와 독성 부하 등의 충격부하에 약하며 슬러지 팽화(sludge bulking) 등의 운영상 문제점이 발

생하고 있다. 반면에 분리막 생물반응기(membrane bioreactor, MBR)는 반응조 안의 미생물량을 조절할 필요가 없으며 분리막을 사용하는 특성상 슬러지 팽화 현상이 없어 유출수로 슬러지가 유출되지 않아 별도의 침전지가 필요하지 않다. 또 충격부하, 독성부하, 유기물 부하와 같은 운영상의 부하에 대한 적응력이 대단하며 다른 처리공정보다 슬러지 생산량이 적다[1]. 이러한 장점에 물의 수요 증가로 점점 엄격해지는 수질규제에 맞추기 위해 MBR 기술은 지속적으로 증가될 것으로 전

[†]Corresponding author(e-mail: kychung@seoultech.ac.kr)

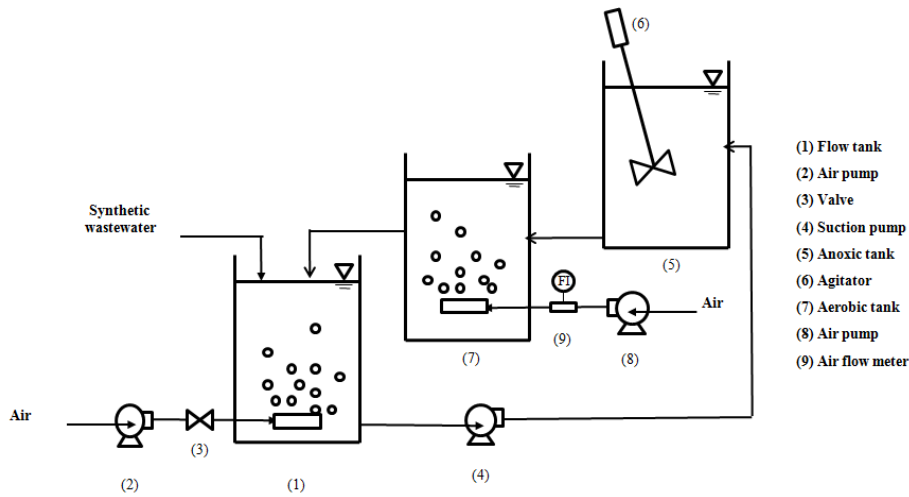


Fig. 1. Schematic flow diagram of the artificial wastewater system.

망하고 있다[2]. 통상적으로 장기간 운전에 따른 막 표면의 오염과 세척 시 필요한약품비용 및 파울링 제어를 위한 포기 시 소모되는 에너지의 경제성은 CAS 공정과 비교할 때 높은 것으로 분석된다[3]. 이를 극복하기 위하여 분리막 모듈의 성능 개선 및 에너지 비용의 절감 등 설치운영비를 절감할 수 있는 기술개발이 요구되며 많은 연구가 진행되고 있다[4,5]. 특히, 막 오염에 대한 세척 및 세정 이전에 막 오염의 매개변수를 제어하고 최적화하는 것이 MBR 공정에서 막오염을 저감시키는 데에 중요하게 작용한다. 막오염을 저감시키는 방안으로는 간헐적 흡입, 역세척[6], 모듈 디자인의 최적화, 간헐적 산기[7,8], 응집제 주입[9,10] 등의 다양한 기술이 도입되며 MBR의 투과유속 증가를 위한 새로운 방식이 개발되고 있다[11,12].

그중 콜로이드, SMP (soluble microbial product) 등의 입자크기에 따른 막의 오염을 저감하는 방안으로 응집제를 주입할 수 있다[13]. MBR에서 수중의 미생물 플록은 음의 전하를 띠므로 양이온성 고분자는 미생물 플록을 응집시키기에 적합하다. 응집제 중에서 특히 고분자와 $FeCl_3$, 양이온의 경우 생체 고분자물질을 줄이고 입자크기를 증가시켜 그 응집제의 양이 늘어날수록 투과유속을 상당히 증가시킬 수 있다[14].

본 연구에서는 실험적 규모의 MBR 시스템에서 응집제 투여량에 따른 콜로이드 및 SMP 등의 크기를 침지식 정밀여과용 평막으로 투과시키면서 막 오염을 저감시키고자하였다. 응집제 투여량에 따른 투과실험 중 발생하는 분리막간 차압(trans-membrane pressure, TMP)

을 측정하여 각각의 운전방법에 따른 분리막 투과성능을 평가하였다. 또한, 기존 침지식 분리막의 운전/휴직(run/stop, R/S) 운전방식에 비하여 효과적인 사인파형 투과유속 연속운전(sinusoidal flux continuous operation, SFCO) 방법을 MBR에 적용하고자 투과 실험을 실시하였다[15].

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1. 분리막 모듈

본 실험에서 사용한 분리막은 공칭공경 $0.15 \mu m$ 인 P 사 CPVC (chlorinated poly-vinyl chloride) 평막으로 유효 막 표면적이 약 $0.02 m^2$ ($0.1 \times 0.1 m$)이며 평막이 $0.006 m$ 두께의 지지체에 고정되어 있는 모듈로서 처리수는 막모듈 상단 처리수 관으로 모아져서 배출되는 방식이다[16].

2.2. 유입수 전처리 및 특성

실험에 사용한 하수는 Y 하수처리장의 반송슬러지를 사용하였으며 실험에 필요한 조건을 만족시키기 위하여 실험실적 규모의 반응조를 설치하여 유입수를 관리하였으며 개략적인 흐름도를 Fig. 1에 나타내었다. 60 L 크기의 유량 조정조(1)에는 Y 하수처리장의 반송슬러지와 Table 1과 같은 미생물 성장에 필요한 인공폐수를 주입하였으며 에어펌프(2)에서 공급되는 공기는 밸브(3)로 산기량을 조절하여 산기관을 통해 유량조정조의 슬러지를 균일하게 유지하였다. 활성슬러지 용액은

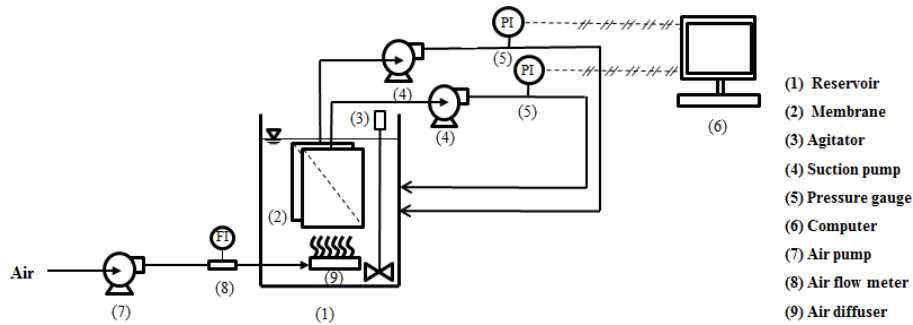


Fig. 2. Schematic flow diagram of the submerged flat sheet membrane system[16].

Table 1. The Artificial Wastewater Compositions

Compositions	Concentrations (mg/L)
Glucose	300
KNO ₃	135
KH ₂ PO ₄	45
Na ₂ CO ₃	pH 7-8 (control)
MgSO ₄ ·7H ₂ O	3.2
MnSO ₄ ·4H ₂ O	2.8
FeCl ₃ ·6H ₂ O	0.1
CaCl ₂ ·2H ₂ O	3.2

Table 2. Water Quality in the Activated Sludge Reactor

Variables	Concentrations
COD _{tank}	350~400 mg/L
COD _{out}	15~25 mg/L
DO	2~4 mg/L
ORP	150~250 mV
pH	7~8
Temperature	25 ± 1°C
MLSS	5,000 mg/L (± 5%)
Aeration	1,000 mL/min by air

펌프((4), Flex-Flo AV- 114-7)를 이용하여 무산소조(5)로 이동시키며 공기가 공급되지 않는 무산소 탱크에서 교반시켜(6) 수중 질소의 탈질화 및 균일화를 달성한 후 높이차로 호기조(7)에 자연 유입시킨다. 에어펌프(8)에서 공급되는 공기는 유량계((9), Dwyer)로 산기량을 조절하여 공급되어 미생물 성장의 최적 DO를 유지하며 수중 질소의 질산화 및 유기물 제거가 이루어진 후 다시 유량조정조로 유입되어 순환하는 방식이다. 이 과정에서 미생물에 의해 질산화와 탈질화 및 유기물의 제거가 이루어지므로 수질 상태를 유지 관리하기 위하여 인공폐수를 지속적으로 주입하였다. 또한, SVI (sludge volume index)를 50 내지 150으로 유지하여 슬러지 별킹 등 운영상의 문제를 최소화하였다. 유기물에 대한 과부하나 미생물의 생장에 이상이 생겼을 시에는 종균제 등을 주입하였다. 유입수의 수질은 용존산소(dissolved oxygen; DO), pH (Istek 125PD) 그리고 ORP와 온도 (TES, TES-1380)를 측정하였다. 또한 휴대용 SS (suspended solid) 측정기인 Istek사 Partech 740를 사용하여 MLSS 농도를 측정하였으며 COD는 해당 범위의 수질 분석키트(HS-COD-MR)를 이용하여 150°C에서 전

처리한 후 UV Spectrophotometer (HS-3300)로 분석하였다. 이상의 수질상태는 Table 2에 요약하여 나타내었다.

2.3. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치에 대한 개략적인 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다. 20 L 크기의 저장조(1)에는 Fig. 1에서 호기조(7)의 용액을 공급하였다. 이 저장조에는 평막형 분리막 모듈(2)이 침지되어 있으며 교반기(3)로 용액을 균일하게 하였다. 분리막 모듈과 연결된 펌프((4), Masterflex 7518-00)를 사용하여 일정한 유량으로 투과액을 얻었다. 투과액은 슬러지의 MLSS 농도를 일정하게 유지하도록 저장조로 반송하였다. 흡인압력은 압력계((5), Sensys PTDC-100RCIA)로 측정하였고 UTP 케이블로 연결된 컴퓨터(6)에 실시간으로 측정압력을 저장하였다. 또한 에어펌프(7)를 사용하여 유량계((8), Dwyer)로 공급될 산기량을 조절하였고 저장조 하부에 설치된 산기관(9)을 통하여 저장조에 균일하게 공급하였다. 공급된 공기는 저장조 내에서 슬러지에 의해 분리막 표면에 축적되는 젤층을 세척하여 막 오염을

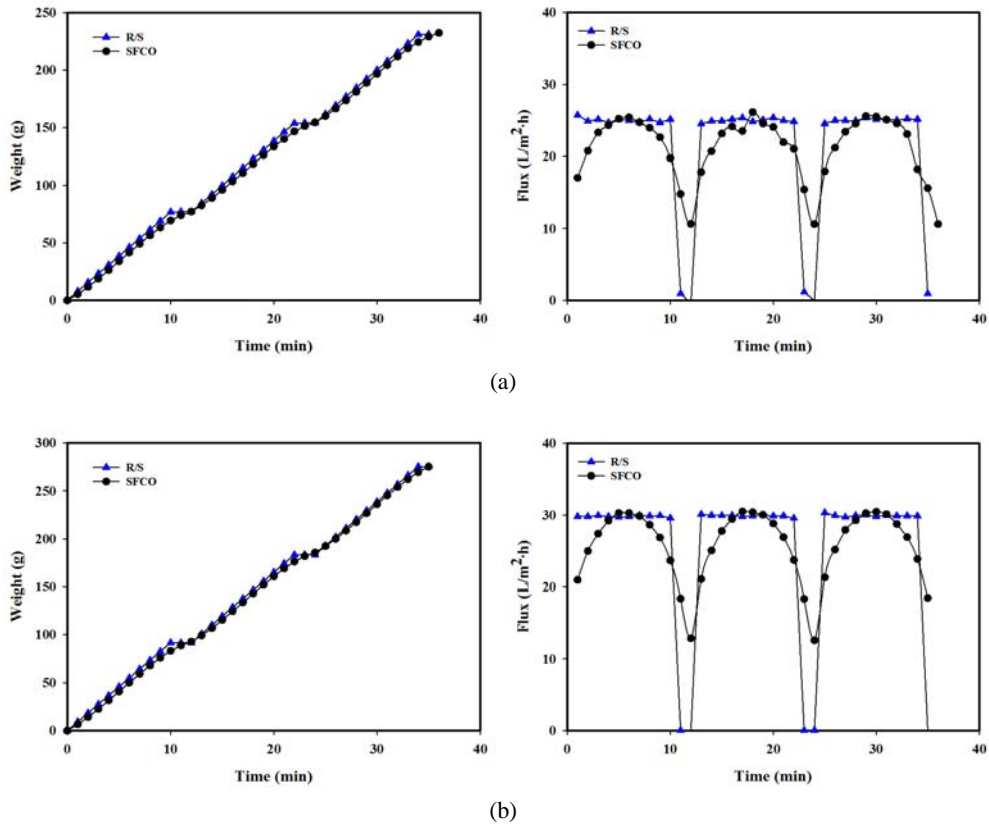


Fig. 3. Calibration graphs of the permeate weight and flux for R/S and SFCO operational modes at permeate flux : (a) 25 and (b) 30 $L/m^2 \cdot hr$.

줄이는 역할을 할 수 있다.

2.4. 실험방법

본 실험에서는 MLSS가 5,000 mg/L인 활성슬러지 저장조 내에 표면적이 같은 동일한 분리막 2개를 침지시키고 동시에 SFCO 및 R/S 운전방식을 적용하여 투과시간에 따른 흡입압력 또는 TMP를 비교하였다. 투과 실험 후 원활한 분리막의 세척을 위하여 TMP가 55 kPa에 도달하면 R/S 및 SFCO 운전을 동시에 중지하였다. 또한 분리막 모듈 하단부에 위치한 산기관을 통하여 1 L/min의 공기를 연속적으로 공급하면서 투과실험을 실시하였다. 또한 본 연구에서는 역세척이 곤란한 평막 모듈을 사용하였으므로 역세공정을 고려하지 않았다.

R/S 운전방식은 10분 흡입 및 2분 휴직하며 SFCO 운전방식은 제어프로그램인 Labview에서 12분 주기로 각 시간에 따른 유량을 변화시켜 펌프 운전하였다. 또한 SFCO 방식은 연속적으로 투과유속이 변화하지만

최대 투과유속이 R/S의 투과유속을 초과하지 않도록 조절하였으며 R/S 휴직 중에도 SFCO 방식은 투과가 진행됨을 알 수 있었다[16]. R/S 및 SFCO 운전방식으로 투과유량이 10, 20, 25, 30 $L/m^2 \cdot hr$ 일 경우 매 12분 후에는 분리막을 투과한 투과량이 같은 것을 확인하였고 이를 Fig. 3에 나타내었다. 또한, 처리수의 COD를 측정하여 모든 실험에서 95% 배제된 것을 확인하였다.

2.5. 분리막 세정

투과 실험을 마친 후에는 분리막 표면을 부드러운 재질의 스펀지로 물리적 세척하여 막 표면의 오염층을 제거하였다. 순수에 침지시켜 동일 투과유속에서 TMP를 확인 후 0.5% NaOCl 수용액에 침지시켜 동일 투과유속에서 펌프로 5분간 흡입하여 세정하였다. 다시 순수에 침지시켜 TMP를 확인하며 초기 TMP로 회복될 때까지 위의 과정을 반복하였다. 응집제 투여로 인한 막오염 발생 시 1% $C_3H_4OH(COOH)_3$ 수용액에 침지 후 5분간 흡입하여 세정하였다. 그리고 분리막 모듈을 99.5% 에탄

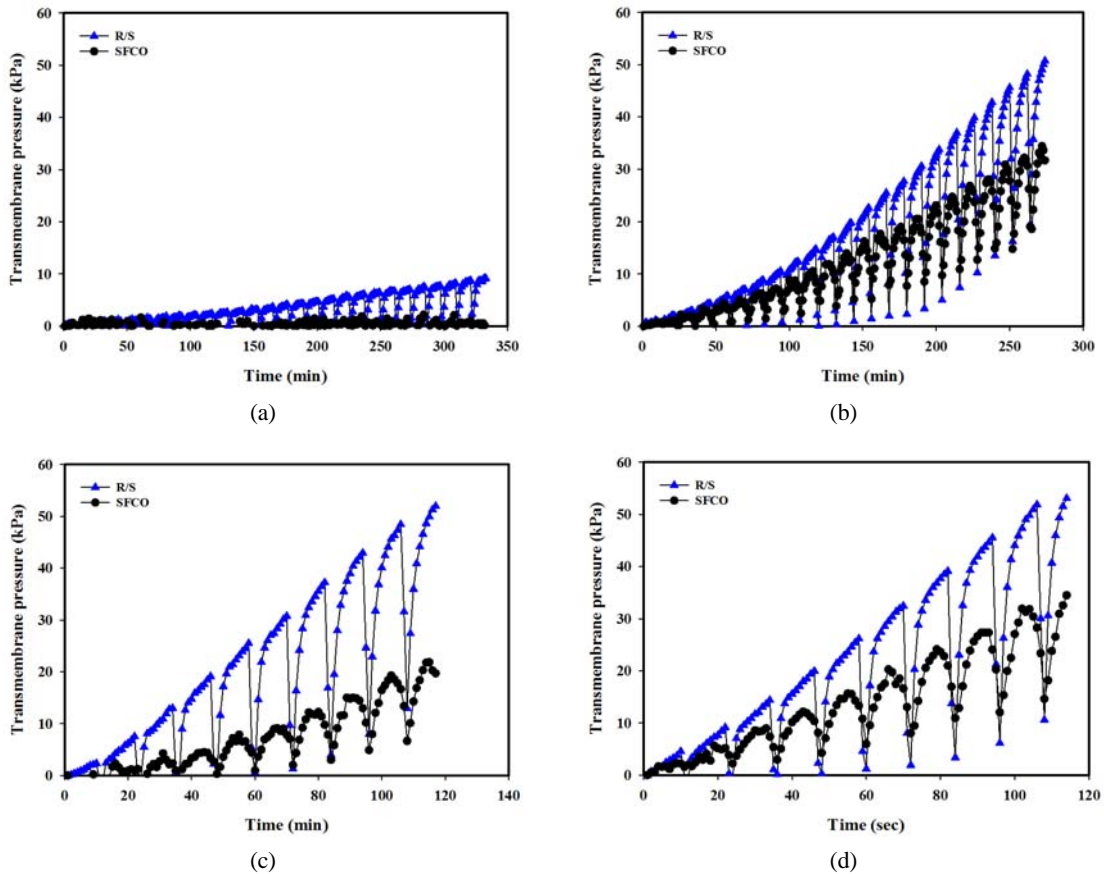


Fig. 4. Transmembrane pressure of R/S and SFCO operational modes for the MLSS 5,000 mg/L activated sludge solution without FeCl₃ at aeration rate 1 L/min, 25°C and permeate flux : (a) 10, (b) 20, (c) 25 and (d) 30 L/m² · hr.

올에 침지시켜 친수화시킨 후 투과실험을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 활성슬러지 투과실험

먼저 응집제를 투여하지 않은 상태에서 SFCO와 R/S 운전방식의 TMP 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 투과유속이 낮은 10 L/m² · h에서 R/S 운전방식은 TMP가 선형으로 증가함을 알 수 있었다. 한편 SFCO 운전방식의 TMP는 사인파형 투과유속에 따라서 주기적으로 1 kPa 이하로 운전되었으며 330분 이후에도 R/S 방식에 비하여 매우 낮게 운전됨을 확인할 수 있었다. 투과유속을 20 L/m² · hr로 증가시키면 R/S 운전방식의 경우 각 운전주기마다 서서히 TMP가 증가하여 300분에는 최대 허용 TMP인 55 kPa에 도달하여 운전을 중단하였다. SFCO 방식의 경우도 90분까지는 R/S 운전방식과 비슷하게 TMP가 증가하였으나 이 후부터는 40 kPa 이하로

운전되어 R/S 운전방식보다 효과적임을 확인할 수 있었다. 투과유속을 25 L/m² · hr로 증가시키면 R/S 운전방식에서는 네 번째 운전주기인 37 내지 38분에서 TMP가 20 kPa 이상에 도달하며 그 이후에는 더욱 빠르게 TMP가 증가하여 120분에는 50 kPa 이상이 되었다. 하지만 이 경우에도 SFCO 운전방식은 120분에 20 kPa까지 상승하여 R/S 운전 방식보다는 훨씬 효과적임을 확인할 수 있었다. 투과유속을 30 L/m² · hr까지 더욱 증가시키면 R/S 운전방식에서는 TMP가 급격히 증가하여 110분에 50 kPa 이상에 도달하여 운전을 중지하였다. SFCO 운전방식은 R/S 운전방식보다 서서히 증가하여 최대 35 kPa까지 도달함을 확인하였다.

3.2. 응집제 투여실험

응집제인 FeCl₃ 투여량이 100 mg/L에 대한 R/S 및 SFCO 운전방식의 TMP 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 투과유속이 10 L/m² · h에서는 R/S 운전방식의 경우

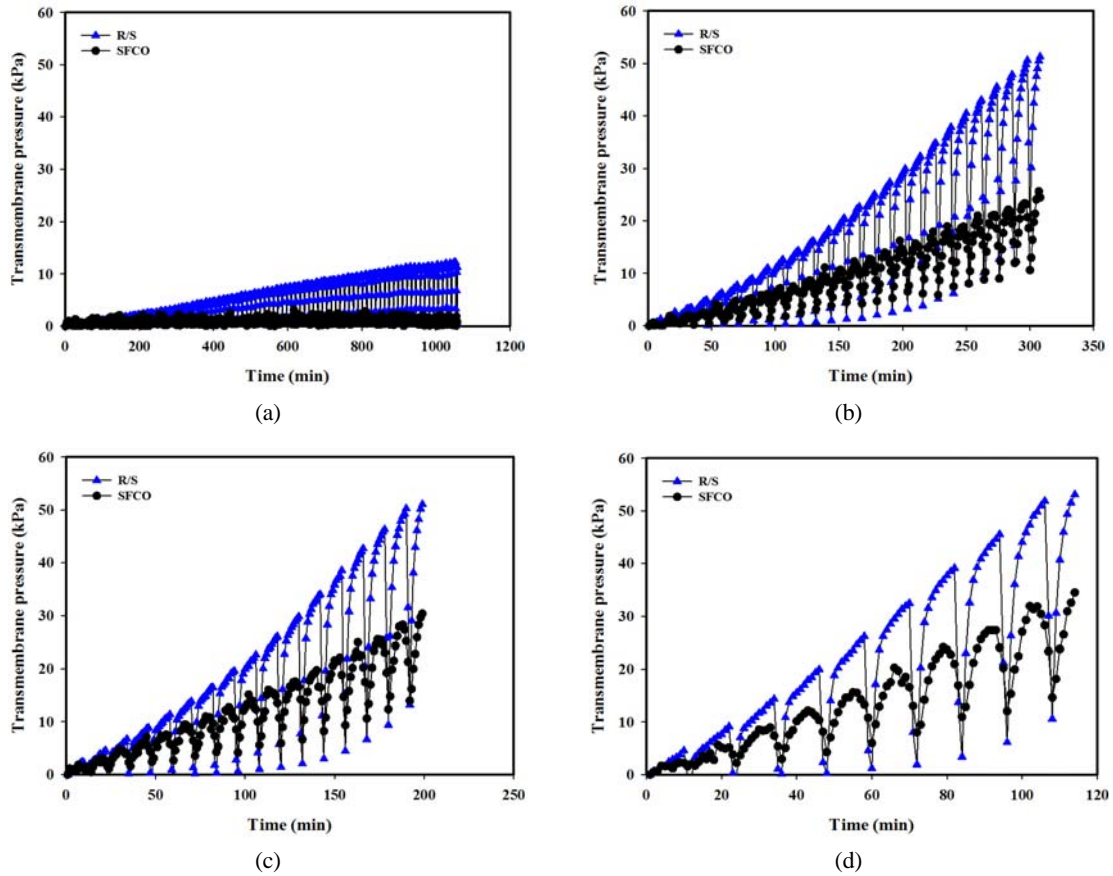


Fig. 5. Transmembrane pressure of R/S and SFCO operational modes for the MLSS 5,000 mg/L activated sludge solution with FeCl₃ 100 mg/L at aeration rate 1 L/min, 25°C and permeate flux : (a) 10, (b) 20, (c) 25 and (d) 30 L/m² · hr.

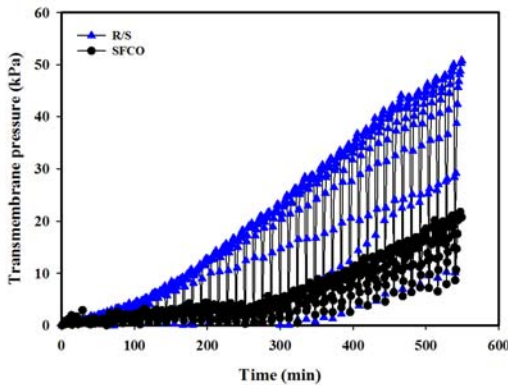


Fig. 6. Transmembrane pressure of R/S and SFCO operational modes for the MLSS 5,000 mg/L activated sludge solution with FeCl₃ 500 mg/L at aeration rate 1 L/min, 25°C and permeate flux 25 L/m² · hr.

TMP는 점차적으로 증가하여 1,056분에 12 kPa정도로 운전되었으며 SFCO 운전방식은 주기적으로 3 kPa 이하로 운전되었다. 투과유속을 20 L/m² · h로 증가시키

면 R/S 운전방식의 경우 300분에서 TMP가 50 kPa 이상에 도달하여 운전을 중지하였으며 이때 SFCO 운전방식은 25 kPa까지 도달함을 확인하였다. 투과유속을 25 L/m² · h로 증가하였을 경우 R/S 운전방식의 TMP가 180분 전후로 50 kPa 이상 증가하여 운전을 중지하였지만 SFCO 운전방식은 30 kPa까지 도달하였다. 투과유속을 30 L/m² · h까지 증가시키면 120분 내에 50 kPa 이상에 도달하였으며 SFCO 운전방식은 최대 32 kPa까지 도달하였다.

응집제 투여량을 500 mg/L로 증가시킬 경우 투과유속이 25 L/m² · h일 때 R/S 및 SFCO 방식 투과실험의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. R/S 운전방식의 TMP가 120분까지는 7 kPa로 서서히 증가하다가 그 이후에는 더욱 빠르게 증가하여 540분 이후에는 50 kPa 이상 도달하여 운전을 중지하였다. SFCO 운전방식은 280분까지 TMP가 7 kPa로 매우 낮게 유지되었으며 그 이후에는 선형적으로 증가하여 540분 이후에는 20 kPa까지

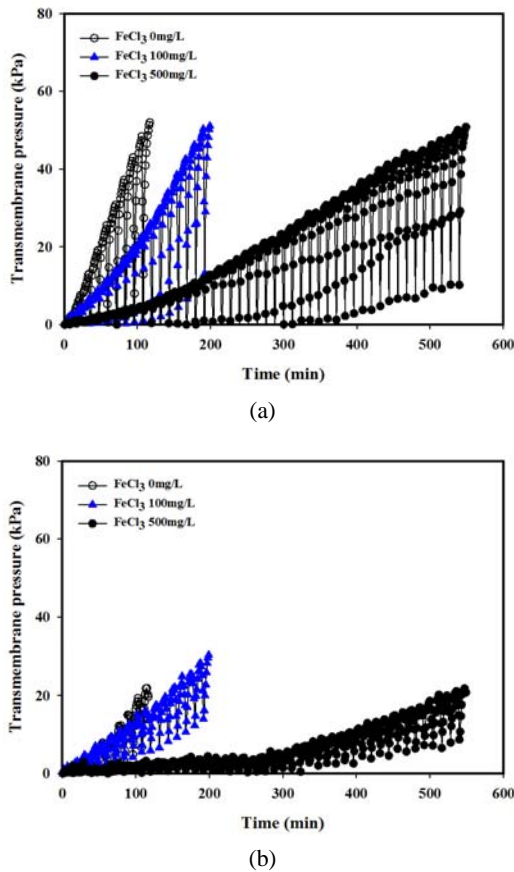


Fig. 7. Transmembrane pressure of the MLSS 5,000 mg/L activated sludge solution with FeCl₃ 500 mg/L at aeration rate 1 L/min, 25°C and permeate flux 25 L/m² · hr for (a) R/S and (b) SFCO operational modes.

도달하였지만 R/S 운전방식에 비하여 막오염 저감에 매우 효과적임을 확인하였다.

응집제 투여량에 따른 TMP 상승을 확인하기 위하여 투과유속이 25 L/m² · h의 경우를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 먼저 Fig. 7(a)에 나타난 R/S 운전방식의 경우 응집제를 주입하지 않으면 100분 전후에 TMP가 50 kPa까지 도달하였지만, 응집제를 100 또는 500 mg/L 주입하면 50 kPa까지의 운전시간이 각각 180, 540분에 증가하여 5배 이상 장시간 운전이 가능하였다. 이와 같이 응집제를 사용하면 미생물 플록이 응집하여 생체 고분자물질이 감소하고 또한 플록 입자의 크기를 증가하는 등 분리막 투과에 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 그러나 폐슬러지의 발생량이 증가하는 어려움이 있어 경제성을 고려하여야 한다. Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 SFCO 운전방식의 경우, 응집제를 100 mg/L 투여하

면 응집제를 투여하지 않은 경우보다 약간의 TMP 상승 억제효과가 있었다. 하지만, 응집제 투입량을 500 mg/L로 증가시키면 약 280분까지 TMP가 7 kPa로 매우 낮게 유지하다가 그 이후에 선형적으로 증가하였다. 이와 같이 SFCO 운전 방식에 응집제를 사용하면 막오염에 따른 TMP 상승을 매우 효과적으로 제어할 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

사인파형 투과유속의 SFCO 방식으로 MBR을 운전할 경우 활성슬러지의 막오염을 효과적으로 제어할 수 있어 TMP 상승을 감소시킬 수 있었다. 또한 TMP 상승을 억제하기 위하여 응집제를 활성슬러지 반응조에 주입하면 막오염 유발 물질의 응집 제거와 응집에 따른 용액 내 입자의 분포가 증가하는 등으로 막 오염을 감소시킬 수는 있지만, 반송 슬러지 내지는 폐슬러지의 처리량을 증가시키는 추가적인 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 기존의 MBR 운전/휴식을 반복하는 R/S 방식과 TMP 상승 억제 효과가 있는 SFCO 운전방식에 응집제를 주입하여 TMP 상승을 비교 평가한 결과, SCFO 운전방식이 매우 효과적임을 확인하였다. SCFO 운전방식의 경우, 응집제 농도가 100 mg/L일 때보다는 응집제 농도를 500 mg/L로 증가시키면 투과시간을 5배 이상 증가시켜도 한계 운전 TMP인 55 kPa의 40% 미만으로 유지되어 MBR의 경제적 운전이 가능함을 확인할 수 있었다.

감 사

이 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. M. Mayhew and T. Stephenson, "Low biomass yield activated sludge: A review." *Environ. Technol.*, **18**, 883 (1997).
2. K. Sutherland, "The rise of membrane bioreactors", *Filtration & Separation*, **47**, 14 (2010).
3. A. Fenu, J. Roels, T. Wambecq, K. De Gussem,

- C. Thoeve, G. De Gueldre, and B. V. D. Steene, "Energy audit of a full scale MBR system", *Desalination*, **262**, 121 (2010).
4. A. Santos, W. Ma, and S. J. Judd, "Membrane bioreactors: Two decades of research and implementation", *Desalination*, **273**, 148 (2011).
 5. F. Meng, S. R. Chae, A. Drews, M. Kraume, H.-S. Shin, and F. Yang, "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs) : Membrane fouling and membrane material", *Water Research*, **43**, 1489 (2009).
 6. J. Y. Park and J. H. Hwang, "Hybrid Water Treatment of Photocatalyst Coated Polypropylene Beads and Ceramic Membranes: Effect of Membrane and Water Back-flushing Period", *Membr. J.*, **23**, 211 (2013).
 7. F. Wicaksana, A. G. Fane, and V. Chen, "Fibre movement induced by bubbling using submerged hollow fibre membranes", *J. Membr. Sci.*, **271**, 186 (2006).
 8. 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).
 9. K. G. Song, Y. Kim, and K. H. Ahn, "Effect of coagulant addition on membrane fouling and nutrient removal in a submerged membrane bioreactor", *Desalination*, **221**, 467 (2008).
 10. 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).
 11. S. Yoon, J. Collins, D. Musale, S. Sundararajan, S. Tsai, A. Hallsby, J. Kong, J. Koppes, and P. Cachia, "Effects of flux enhancing polymer on the characteristics of sludge in membrane bioreactor process", *Water Sci. Technol.*, **51**, 151 (2005).
 12. S. Yoon, J. Collins, D. Musale, S. Sundararajan, S. Tsai, A. Hallsby, J. Kong, J. Koppes, P. Cachia, D. Chung, and K. Kronoveter, IWA Water Environment and Membrane Technology Conference, Seoul, Korea (2004).
 13. T. Tran, S. Gray, R. Naughton, and B. Bolto, "Polysilicato-iron for improved NOM removal and membrane performance", *J. Membr. Sci.*, **280**, 560 (2006).
 14. H. Koseoglu, N. O. Yigit, V. Iversen, A. Drews, M. Kitis, B. Lesjean, and M. Kraume, "Effects of several different flux enhancing chemicals on filterability and fouling reduction of membrane bioreactor (MBR) mixed liquors", *J. Membr. Sci.*, **320**, 57 (2008).
 15. K. Y. Chung, D. C. Kim, and I. H. Won, "Method for Reducing Membrane Fouling in the Water Treatment Apparatus", Korean Patent, 10-2014-0149394 (2014).
 16. I. H. Won and K. Y. Chung, "Characteristics of the Sinusoidal Flux Continuous Operation Mode for the Submerged Flat-sheet Membrane Module in Cutting Oil Solution", *Korean Chem. Eng. Res.*, in press (2015).