

세척용 구형입자 순환에 따른 활성슬러지내 침지식 평막의 막간차압

정도인·민지수·이수민·정건용[†]

서울과학기술대학교 화공생명공학과
(2018년 2월 18일 접수, 2018년 2월 23일 수정, 2018년 2월 24일 채택)

Transmembrane Pressures for the Submerged Flat Membrane in the Activated Sludge Solution by Circulation of the Cleaning Spherical Beads

Doin Jeong, Ji Su Min, Soo Min Lee, and Kun Yong Chung[†]

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

(Received February 18, 2018, Revised February 23, 2018, Accepted February 24, 2018)

요약: 본 연구에서는 순수와 유사한 밀도의 세척용 구형 입자를 제작하고 순수 수조 내에서 산기량 및 입자 농도에 따른 입자의 유동 속도를 측정하였다. 세척용 구형 입자 1~3%를 MLSS 8,000 mg/L인 활성슬러지 용액에 주입하고 20 LMH 및 산기량 500 mL/min 조건에서 FR 및 SFCO 모드로 동시에 투과 실험하였다. 사용한 분리막은 유효 막면적이 90 cm², 공칭 세공크기가 0.4 μm인 평막이다. 입자 농도가 증가할수록 TMP가 감소하였으며 FR 모드, 입자 농도 2%일 때 가장 효과적인 것으로 확인되었다.

Abstract: In this study the cleaning spherical beads with same density as water were fabricated. Bead moving velocity was measured with respect to the aeration rate and bead concentration in water reservoir. The permeation experiments for FR (filtration and relaxation) and SFCO (sinusoidal filtration continuous operation) modes were simultaneously carried out under the condition of 1 to 3% cleaning spherical bead concentration, 20 LMH and 500 mL/min aeration rate in the MLSS 8,000 mg/L activated sludge solution. The used membrane was the 90 cm² effective area and 0.4 μm nominal pore size flat membrane. The TMP (transmembrane pressure) decreased as the bead concentration increased, and was shown most effective in FR mode with 2% bead concentration.

Keywords: MBR, TMP, flat membrane, spherical beads, cleaning

1. 서론

하폐수 처리장에서 일반적으로 사용하는 활성슬러지 공법(Conventional Activated Sludge; CAS)은 오랫동안 다양한 운전 기술축적 및 연구 개발 등으로 매우 안정적이고 경제적인 수처리 기술이지만, 부유물을 침전시켜 처리용수를 배출하여야 하므로 대규모의 침전지가 필요하며 또한 고도처리를 위한 탁도, 미생물 및 세균의 조절에 많은 기술적 한계가 있다. 이에 비하여

MBR 공법(Membrane Bioreactor)은 분리막을 활성슬러지 반응조에 침전시켜 생물학적 반응과 동시에 처리수를 분리하는 방법이다. 따라서 기존 CAS 공정에 비교하여 침전지가 불필요하여 설치공간이 절반 이하밖에 필요하지 않으므로 특히 토지 비용이 고가인 대도시 근방에서는 매우 경제적인 뿐만 아니라 분리막을 이용하여 탁도, 콜로이드 등의 입자성 물질 제거와 박테리아와 같은 병원성 미생물을 효과적으로 제거할 수 있다 [1]. 하지만 MBR 공정은 분리막을 사용하기 때문에 운

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

전시간이 경과할수록 분리막 표면 근방에는 제거된 각종 콜로이드 또는 입자가 축적되고 경우에 따라서는 미생물 플록이 흡착하여 성장 또는 증착하고 상당한 두께의 케이크 층을 형성하기도 한다. 따라서 MBR 공정상 불가피하게 발생하는 분리막의 오염을 감소시키고 안정적인 운전이 가능하도록 주기적으로 분리막을 세척하지만, 주요 운전변수인 분리막간차압(Transmembrane Pressure; TMP)이 증가하면 분리막을 교체하여야 한다. 이러한 MBR 공정의 문제점을 극복하기 위하여 분리막 오염을 감소시킬 수 있는 내오염성 분리막 등의 우수한 소재를 개발하거나 또는 분리막 오염을 감소시키고 경제적인 동력을 소비하는 MBR 운전기술을 개발하는 추세이다. 예를 들면 분리막 표면에 은 입자 또는 graphene oxide와 같은 복합 나노물질을 흡착시켜 미생물의 성장을 방해함으로써 분리막의 수명을 늘리기도 하며[2,3], 분리막의 물리적/화학적 특성 개질, MLSS 농도를 변화시키거나 응집제 투입[4,5], 임계 투과유속 이하에서의 저압 운전[6], 산기량의 조절[7,8] 등의 다양한 방법이 있다. 이밖에도 기존 MBR 운전 시스템인 여과/이완 방식(Filtration and Relaxation; FR)과 달리 연속적으로 처리수를 생산하는 SFCO (Sinusoidal Filtration Continuous Operation) 방식도 보고된 바 있다[9].

본 연구에서는 활성슬러지 수용액과 유사한 밀도를 지닌 세척용 구형 입자를 제작하여 반응조에 주입하였다. 구형 입자는 하부에서 공급되는 공기와 함께 유동하면서 FR 또는 SFCO 운전방식에 따라서 침지된 분리막 표면의 오염 물질축적 절감으로 운전 시간에 따라서 TMP가 효과적으로 관리되는지를 확인하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1. 분리막 모듈

실험에 사용한 분리막은 P사의 CPVC (Chlorinated Poly-Vinyl Chloride) 평막이며 공칭 세공크기(normal pore size)는 0.4 μm 이다. 분리막은 실험실적으로 투과 실험이 가능하도록 높이 15.5 cm, 넓이 15 cm 및 두께 0.8 cm인 평판틀 양면에 2장을 장착하였으며 한 면의 유효 막면적은 90 cm^2 이다.

2.2. 세척용 구형 입자

입자가 유체의 밀도와 같아 중력적으로 중립 상태가 되면 입자유동을 위한 추가적인 동력이 없어도 유체의

Table 1. Water Quality of the Activated Sludge

Variables	Values
MLSS	8,000 (\pm 500) mg/L
PH	7 \pm 1
DO	3~6 mg/L
ORP	200~350 mV
Temperature	25 \pm 1 $^{\circ}$ C

흐름에 따라서 효율적인 세척이 가능할 수 있다. 본 실험에서는 지름이 1 cm이고 중간에 약 2 mm 크기의 원통형 공간이 있는 플라스틱 입자를 사용하였으며, 이 입자는 물보다 약간 가벼우므로 비어있는 공간에 예폭시 접착제를 소량 주입하여 구형 입자를 제조하였다.

2.3. 생물막 반응기 제작

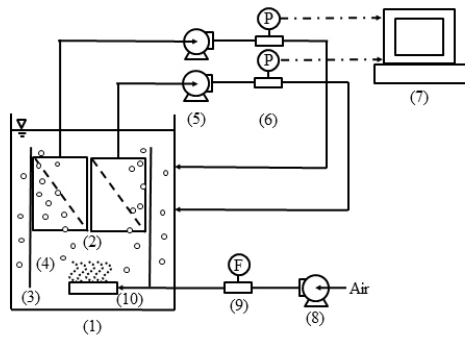
평막형 분리막 모듈을 설치하고 분리막 표면으로 세척용 입자가 자유롭게 순환할 수 있도록 반응기를 설계 제작하였다. 생물막 반응기는 5 mm 두께의 투명한 아크릴을 사용하였으며 가로 16 cm, 세로 10 cm, 높이 30 cm인 직육면체로 최대 4 L 규모이다. 또한 하부 산기관에서 공급되는 공기 흐름에 따라서 플라스틱 입자가 순환하면서 분리막 표면과 접촉하여 오염물을 제거할 수 있도록 1.2 cm 간격으로 분리막 모듈을 설치하였으며 모듈 외부에도 1.2 cm 간격으로 아크릴 판을 설치하였다.

2.4. 활성슬러지 특성

실험에 사용한 하수는 U 하수처리장에서 채취한 반송슬러지를 사용하였다. 반송슬러지 채취 후 실험실에서 10일 간 실험에 적합하도록 순응시켰다. 활성슬러지의 탈질화 및 농도의 유지를 위하여 인공폐수를 매일 주입하였고 Table 1에 그 성분을 표시하였다.

2.5. 실험 장치

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 활성슬러지가 들어있는 MBR 반응기(1)에 P사의 CPVC 평막 모듈 2개를 설치하고 각 분리막 외부에는 플라스틱 입자가 통과할 수 있도록 장애판(3)을 설치하였다. 반응기 내에는 분리막을 세척하는 플라스틱 입자가(4) 포함되어 있다. 분리막 모듈에 연결된 2개의 펌프((5), Masterflex 7518-00)는 FR 및 SFCO 방식으로 운전하였고 실험 중 막간차압압력을 압력계((6),



(1) MBR Reactor (2) Flat membrane (3) Baffle (4) Beads (5) Suction Pump (6) Pressure Gauge (7) Computer (8) Air Pump (9) Air Flowmeter (10) Air diffuser

Fig. 1. Schematic flow diagram of MBR system with the cleaning beads.

Sensys PTDC-500RCIA)를 이용하여 측정하여 컴퓨터 (7)에 일정 시간마다 자동적으로 기록하였다. 반응기는 에어펌프를 통하여 공기를 공급하였고 공기 유량계(9), Dwyer)를 이용하여 유량을 조절하여 수조 하부에 설치된 산기관을 통하여 반응기에 공급하였다.

2.6. 실험 방법

2.6.1. 플라스틱 입자 유동실험

본 실험에서는 순수 내 입자 유동을 확인하고 산기량과 입자의 농도 또는 개수에 따른 입자 속도를 파악하여 활성슬러지에서 최적 세척조건을 찾고자 하였다. 실험 장치의 바닥면과 산기관 사이에는 입자가 끼여 유동하지 못하는 현상을 감소시키기 위하여 장치의 바닥면에 아래로 오목한 판을 설치하였다. 그 다음 산기관 1개와 분리막 모듈 및 칸막이를 각각 2개씩 설치한 뒤 2.5 L의 순수한 물을 넣었다. 실험장치에 입자 농도(개수)를 1% (50개)에서 5% (250개)까지 0.5% (25개)씩 증가시켰으며 각각의 경우에 산기량을 250, 500, 750, 1,000 mL/min로 변화시키면서 동영상 촬영하였다. 동영상으로 찍은 입자가 모듈의 아랫부분에서 위로 이동하여 분리막을 통과할 때까지의 시간을 10회 반복 측정하고 모듈 길이인 9.5 cm를 적용하여 입자의 이동속도를 산출하였다.

2.6.2. 분리막 투과실험

본 실험은 2개의 같은 분리막을 하나의 수조에 침지시켜 20 LMH (L/m² · hr)의 유량인 FR 모드와 그에 상응하는 SFCO 모드를 이용하여 진행하였다. FR 모드는

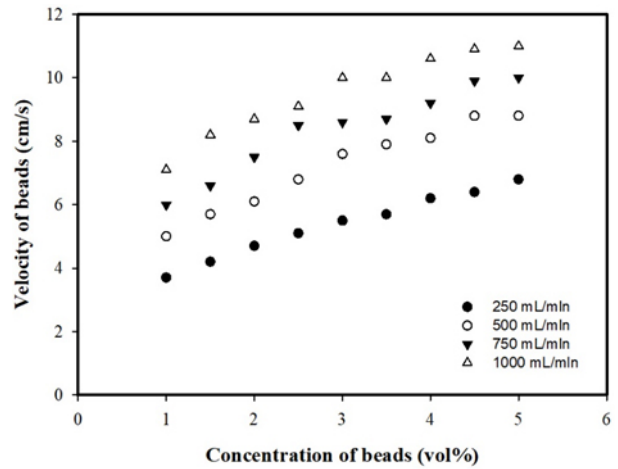


Fig. 2. The velocity of beads with respect to the concentration and aeration rate.

20 LMH로 10분간 운전 및 2분간 휴지를 반복하였고 SFCO는 컴퓨터 제어 프로그램인 Labview를 이용하여 운전하였다. 처음에는 입자를 주입하지 않고 산기량을 500 mL/min으로 운전하였으며 운전 중에는 컴퓨터로 TMP를 측정하였다. 실험은 분리막의 손상을 방지하기 위하여 두 분리막 중 하나의 TMP가 50 kPa에 도달하면 중지하였다. 분리막 세척이 끝나면 입자의 농도를 1, 2 및 3%로 변경하면서 투과 실험을 수행하였다.

2.6.3. 분리막 세정

투과 실험 이후 분리막의 표면을 부드러운 재질의 스펀지로 각 면을 30회 문질러 주었으며 이후 NaOCl 0.5 wt% 수용액에 침지시켜 20 LMH의 유량으로 10분간 투과시켰다. 그 후 분리막을 순수에 담가 기초실험을 진행하였으며 초기 압력에 5% 이내의 TMP 값이 나오면 다음 실험을 진행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 플라스틱 입자 유동실험

Fig. 2에 나타난 바와 같이 입자 속도는 산기량이 250 mL/min일 경우 1% 농도에서 가장 느린 3.7 cm/s 이었으며 입자의 농도가 5%까지 증가하면 6.8 cm/s로 84% 상승하였다. 산기량 1,000 mL/min일 경우에 1% 농도에서 입자 속도는 7.1 cm/s로 250 mL/min에 비하여 92% 증가하였다. 또한 농도가 5%이며 산기량 1,000 mL/min의 경우는 11 cm/s까지 입자 속도가 상승하였

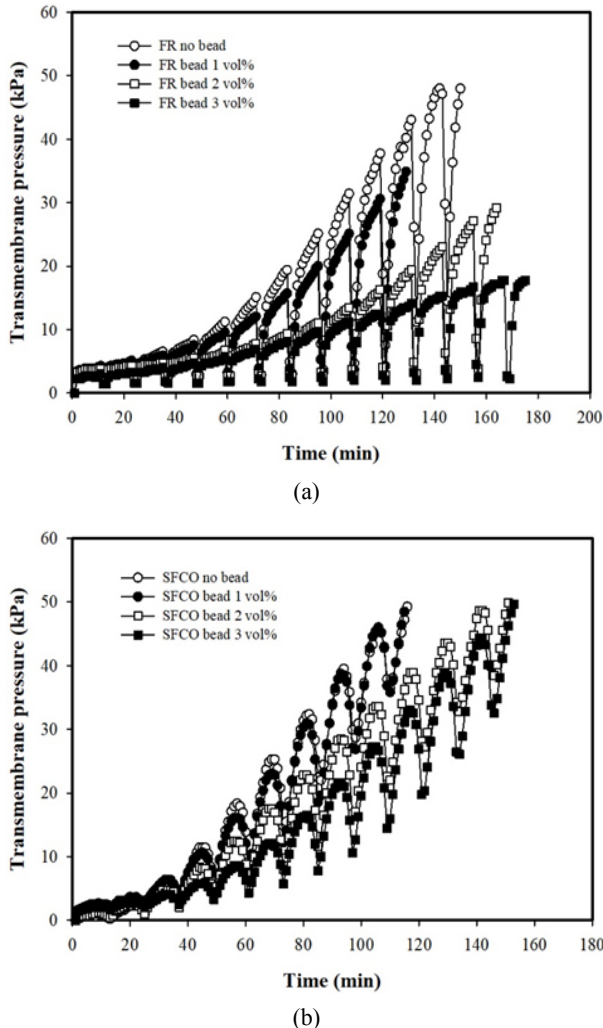


Fig. 3. Transmembrane pressure with respect to operating time at 20 LMH and aeration rate, 500 mL/min for (a) FR and (b) SFCO modes.

으며 이는 농도 1% 및 산기량 250 mL/min에 비하여 197% 증가한 값이다.

산기량을 250에서 500, 750 그리고 1,000 mL/min로 증가시키수록 농도에 무관하게 입자의 유동속도가 증가함을 확인할 수 있었다. 특히 산기량을 250에서 500 mL/min로 증가시키면 입자 유동속도가 30% 이상 높게 증가하지만 500에서 750 mL/min 그리고 750에서 1,000 mL/min로 산기량이 각각 증가하면 입자 유동속도의 증가율은 10% 정도로 점차 감소함을 알 수 있었다. 또한 입자 농도가 3% 이상에서는 산기량 250 mL/min일 경우를 제외하고 입자 속도가 완만하게 증가함을 알 수 있었다.

따라서 산기량 증가에 따른 입자의 속도 증가율이 높은 500 mL/min에서 분리막 투과실험을 실시하였다.

3.2. 분리막 투과실험

MLSS 8,000 mg/L인 활성슬러지 반응조에 세척용 구형 입자의 농도를 0, 1, 2 및 3%으로 변화시키면서 산기량 500 mL/min 및 투과유속 20 LMH에 조건에서 운전시간에 따른 TMP 변화를 Fig. 3에 나타내었다. FR 모드에서 세척용 입자를 주입하지 않을 경우 Fig. 3(a)와 같이 5번째 주기부터 점차 TMP가 상승하기 시작하여 8번째 내지 9번째 주기에서는 매우 높았으며 세척용 입자 농도가 1%일 경우는 TMP가 다소 낮게 나타났지만 그 효과는 크지 않음을 알 수 있다. TMP 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 9번째 주기인 96분 내지 108분에서 최대 TMP를 비교하면, 입자의 농도가 0, 1, 2 그리고 3%일 때 TMP는 각각 31.4, 25.1, 13.5 그리고 11.2 kPa로 낮게 유지됨을 알 수 있다. 즉 입자 농도가 높을수록 TMP는 낮게 유지되었으며 특히 1에서 2%로 입자의 농도를 증가시킬 경우 TMP는 최대 46% 감소함을 확인할 수 있었다.

SFCO 모드의 경우 운전시간에 따른 TMP 변화는 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같다. 9번째 주기인 96분 내지 108분에서 최대 TMP를 나타내면, 입자의 농도가 0, 1, 2 그리고 3%일 때 TMP는 각각 45.2, 45.2, 32.4 그리고 24.9 kPa로 동일 조건하에서 FR 모드의 경우보다 훨씬 높게 나타났다. 특히 입자를 1%까지 주입하여도 TMP 감소효과는 전반적으로 미미하였으며, 2%까지 증가할 경우 TMP가 28% 정도 감소하였지만 FR 모드와 비교하면 2배 이상 높은 TMP를 나타내었다. 하지만, 계속해서 입자를 3%까지 증가시키면 효과는 작지만 TMP는 지속적으로 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 FR 및 SFCO 모드에 경우, 입자 농도 증가에 따른 TMP 감소율은 2%일 때가 가장 크며 경제적으로 효과적임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 활성슬러지 수용액과 유사한 밀도를 지닌 세척용 구형 입자를 제작하여 반응조에 주입하고 하부에서 산기되는 공기와 함께 유동하면서 분리막 표면의 오염 물질을 효과적으로 감소시키는 가능성을 확인하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저 세

척용 입자가 별도의 구동 장비없이 산기되는 공기와 함께 순수에서 유동되는 것을 육안으로 확인하였으며 입자속도는 산기량과 입자 농도에 따라서 증가함을 확인하였다. 최적 입자속도 영역인 1~3% 입자 농도와 산기량 500 mL/min 조건에서 FR 및 SFCO 모드의 투과실험 결과, 입자 농도가 증가할수록 TMP가 감소하였으며 FR 모드, 입자 농도 2%일 때 가장 효과적인 것으로 확인되었다.

감 사

이 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. O. Ferrer, R. Casas, C. Galvan, F. Lucena, A. Vega, O. Gibert, J. Jofre, and X. Bernat, "Challenge tests with virus surrogates: An accurate membrane integrity evaluation system", *Desalination and Water Treat.*, **51**, 25 (2013).
2. I. H. Won, W. G. Jang, K. Y. Chung, and H. S. Byun, "Preparation of PVdF/GO composite nanofibrous flat membrane and its permeation characteristics in activated sludge", *Membr. J.*, **25**, 67 (2015).
3. J. H. Lee, J. H. Yun, and H. S. Byun, "Integration of graphene oxide into PAN nanofibers with improved physical property", *Membr. J.*, **27**, 255 (2017).
4. 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).
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. D. J. Jeong and K. Y. Chung, "Critical flux with respect to aeration rate for the submerged microfiltration hollow fiber membrane in the activated sludge solution", *Membr. J.*, **26**, 116 (2016).
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. 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).