

가압식 분리막을 이용한 Side-Stream MBR 공정의 비정상 운전조건에서 막 오염 저감

Fouling Mitigation for Pressurized Membrane of Side-Stream MBR Process at Abnormal Operation Condition

고병곤* · 나지훈** · 남덕현** · 강기훈** · 이채영*.*.*.*.†

Byeong-Gon Ko* · Ji-Hun Na** · Duck-Hyun Nam** · Ki-Hoon Kang** · Chae-Young Lee*.*.*.*.†

*수원대학교 토목공학과 · **대림산업(주) · ***하천환경기술연구소

*Department of Civil Engineering, The University of Suwon · **Daelim Industrial Co. Ltd.

***Institute of River Environmental Technology

(Received March 22, 2016; Revised April 18, 2016; Accepted April 25, 2016)

Abstract : Pressurized membrane used for side-stream MBR process requires fouling control strategy both for normal and abnormal operation conditions for stable operation of the facilities. In this study, 85 m³/day of pilot-scale side-stream MBR process was constructed for the evaluation of fouling mitigation by air bubble injection into the membrane module. In addition, fouling phenomena at abnormal operation conditions of low influent and/or loading rate were also investigated. Injection of air bubble was found to be effective in delaying transmembrane pressure (TMP) increase mainly due to scouring effect on the membrane surface, resulting in expanded filtration cycle at a high flux of 40 L/m²·h (LMH). At abnormal operation condition, injection of PACl (53 mg/L as Al) into the bioreactor showed 19% reduction of TMP increase. However, inhibition of nitrifying bacteria by continuous PACl injection was observed from batch experiments. In contrast, injection of powdered activated carbon (PAC, 0.6 g/L) was able to maintain the initial TMP of 0.2 kg/cm² for 5 days at the abnormal conditions. It may have been caused from the adsorption of extracellular polymeric substances (EPS), which was known to be excessively released during growth inhibition condition and act as the major foulants in MBR operations.

Key Words : Side-Stream Membrane, Air Lift Membrane, Membrane Bio-Reactor (MBR), Fouling, Sewage Treatment

요약 : 공기주입형 가압식 MBR 공정은 일반적인 침지식 MBR 공정과 마찬가지로 정상 운전조건에서 막 오염에 대한 제어 및 관리 기술뿐만 아니라 저유량, 저부하 조건과 같은 비정상 운전조건에서도 시설의 운영에 지장이 없도록 막 오염에 대한 제어 대책이 필요하다. 85 m³/일 규모의 공기주입형 가압식 MBR 실증시설 운영을 통해 공기주입에 의한 분리막 오염 저감 효과와 비상 시 운전조건에서 미생물에 의해 나타날 수 있는 막 오염 문제를 고찰하였다. 가압식 분리막에서 공기의 주입은 분리막 표면에서 공기방울에 의한 scouring 효과에 의해 TMP 상승 기간을 연장시키고 처리의 안정성과 높은 효율의 플럭스(40 L/m²·h 이상)를 장시간 유지할 수 있는 것으로 분석되었다. 비정상 운전조건에서는 생물반응조에 PACl (53 mg/L as Al)을 주입한 경우 19%의 TMP 상승 감소효과가 있었으나 MBR 공정의 비정상 운전조건 지속에 따른 반복적인 PACl의 주입은 질산화 미생물의 활성도에 영향을 미치게 되어 궁극적으로 질소 처리효율이 악화될 수 있음을 회분식 배양 실험을 통해 확인하였다. 생물반응조에 PAC (0.6 g/L)을 주입한 경우에서는 연속운전 5일 동안 TMP 상승 없이 운전 초기 TMP인 0.2 kg/cm²을 유지하여 안정적으로 운전이 가능하였다. 이것은 미생물의 성장 저해조건에서 막 오염 원인물질을 유발하는 EPS와 같은 고분자 물질의 흡착에 따른 것으로 판단된다.

주제어 : 가압식 분리막, 공기주입형 분리막, MBR, 막 오염, 하수처리

1. 서론

최근 하수처리 기술은 처리시설 설치를 위한 부지면적을 최소화 할 수 있고 강화된 방류수 수질 기준을 준수하기 위한 방법으로 MBR (Membrane Bio-Reactor) 공정의 기술 적용이 크게 증가하고 있다.¹⁾ 국내의 MBR 공정은 기술개발 초기부터 최근까지 침지식 분리막이 적용되어 왔으나 분리막의 성능 유지를 위해 유지 관리 시 분리막을 꺼내어 계외 세정을 하여야 하는 단점들이 있었다. 그러나 해외에서는 이미 계외 세정이 필요 없는 공기주입형 가압식 분리막 모듈이 개발되어 하수처리시설에 적용되어 왔다.²⁻⁴⁾ 일반적인 가압식 분리막은 분리막 내부로 MLSS (Mixed Liquor Suspended

Solids)를 주입하여 공극 외부로 여과 처리수를 생산하는 방식이다. 공기주입형 가압식 분리막은 분리막 내부로 MLSS와 공기를 동시에 주입함으로써 scouring 효과로 40~60 L/m²·h (LMH)의 높은 플럭스 유지와 장주기 운전을 가능하다.^{5,6)} MBR 공정은 정상 운전조건에서 막 오염을 제어할 수 있는 관리 기술뿐만 아니라 처리시설 가동초기의 저유량, 저부하와 같은 비정상 운전조건에서도 운영에 문제가 없는 막 오염 제어 대책을 필요로 한다. 생물반응조의 저유량, 저부하와 같은 비상 시 운전조건은 미생물에 불리한 성장조건을 야기할 수 있고 이것으로 인해 생물학적 막 오염 발생률이 높아지기 때문이다.⁷⁻¹⁰⁾ 일반적인 침지식 분리막을 이용한 MBR 공정에서도 이를 위해 응집제(Poly-Aluminum Chloride, PACl)

† Corresponding author E-mail: chaeyoung@suwon.ac.kr Tel: 031-220-2470 Fax: 031-220-2522

및 분말활성탄(Powdered Activated Carbon, PAC)과 같은 anti-foulant 주입으로 막 오염을 제어하기 위한 연구가 지속적으로 진행중에 있다.¹¹⁾ 특히, PACI, 황산알루미늄, 황산제이철, 염화제이철 및 고분자 유기응집제 등과 같은 응집제는 막 오염 제어 목적 이외에도 인의 제거를 위해 응집제 주입지점을 2차 처리수에 주입하거나 생물반응조 내 주입하기도 한다. 하지만 생물반응조 내에 응집제가 주입될 경우 축적된 알루미늄염은 질산화 미생물에 독성 또는 활성 저해제로 작용할 수 있으며,¹²⁾ 응집제 주입에 따른 질산화 저해와 관련하여 황산알루미늄 주입시 질소 제거율이 88%에서 78%로 감소된다는 연구결과도 보고된 바 있다.¹³⁾

본 연구는 실제 하수를 이용한 시설용량 85 m³/일 규모의 공기주입형 가압식 MBR 실증시설의 운영을 통해 공기주입에 의한 분리막 오염 저감 효과와 저유량, 저부하와 같은 비정상 운전조건에서 미생물의 활성도 저하로 나타날 수 있는 막 오염 문제의 대안을 검토하고자 하였다. 이를 위해 PACI 및 PAC 주입이 막 오염에 미치는 영향을 TMP (Transmembrane Pressure)의 변화 특성과 여과성(filterability) 분석을 통해 조사하였으며 응집제 주입으로 인한 미생물의 활성도 영향을 평가하였다. 회분식 반응조를 이용한 질산화율 측정과 질산화 미생물 호흡률 측정을 통해 응집제 주입 농도에 따른 응집제의 생물반응조 주입이 질산화에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다.

2. 연구방법

2.1. Pilot 실험장치

공기주입형 가압식 MBR 공정은 시설용량 85 m³/일 규모로 12개월간 ○○시 공공하수처리시설 내에 설치하여 운전하였으며, 유입수는 동일 하수처리시설의 하수 원수(1차 침전지 유입 원수)를 사용하였다. 공정의 구성은 A²O를 기본으로 슬러지 감량 유도조(sludge holding tank)와 공기주입형 가압식 분리막을 결합한 형태의 MBR 공정을 구성하였다 (Fig. 1).

적용된 공기주입형 가압식 분리막의 제조사는 Pentair, 재료는 PVDF (Poly Vinylidene Fluoride), 공칭공경 0.02 μm, 유

효 막 면적 33 m²/module, 그리고 외경은 5.2 mm이다. 분리막의 공기주입량은 10 N m³/h·module이며, 생물반응조의 MLSS는 7,000~8,000 mg/L의 운전조건을 유지하였으며 동절기 40 LMH, 춘하절기 50 LMH의 플럭스로 연구를 수행하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. TMP (Transmembrane Pressure) 분석

공기주입형 가압식 MBR 공정의 TMP는 Fig. 2와 같이 계절별로 여과, 역세 운전 적정성을 평가한 후 동절기 40 LMH에서 여과시간 6분, 춘하절기 50 LMH에서 여과시간 7분을 기준으로 분석하였다. 유지세정(Chemical Enhanced Backwashing, CEB)은 계절별 특성을 고려하여 제조사에서 권장하는 TMP 0.7 kg/cm²에 도달하였을 때 수행하였다. TMP는 호기조에 설치한 MLSS 공급펌프측의 압력계와 가압식 분리막 모듈의 여과수측 압력계 측정값을 이용하여 산정하였다. 공기주입에 따른 막 오염 저감 효과는 MBR 실증시설을 40 LMH로 운전하면서 공기를 주입하지 않은 경우와 10 N m³/h·module의 공기를 주입한 경우로 나누어 비교 분석하였다. 또한 비정상 운전조건에서 미생물의 상태에 따라 발생할 수 있는 생물학적 막 오염 제어는 주입물질에 따라 저감 효과를 평가하기 위해 anti-foulant를 주입하지 않은 경우를 대조군으로 PACI과 PAC을 각각 53 mg/L as Al 및 0.6 g/L로 주입한 경우로 비교 분석하였다. PACI은 실험기간 중 정량펌프를 이용하여 연속 주입하였으며 PAC는 생물반응조의 부피를 기준으로 일시 주입하였다. 실험에 사용된 PACI 및 PAC의 사양 및 주입조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of PACI and PAC used in the study and their injection rate

Type	Condition 1	Condition 2
Agent	Poly-aluminium chloride (PACI)	Powdered activated carbon (PAC)
Particle size (μm)	-	< 74 (98%)
Content	17%	-
Source	-	Coconut shell
Dose	53 mg/L as Al	0.6 g/L

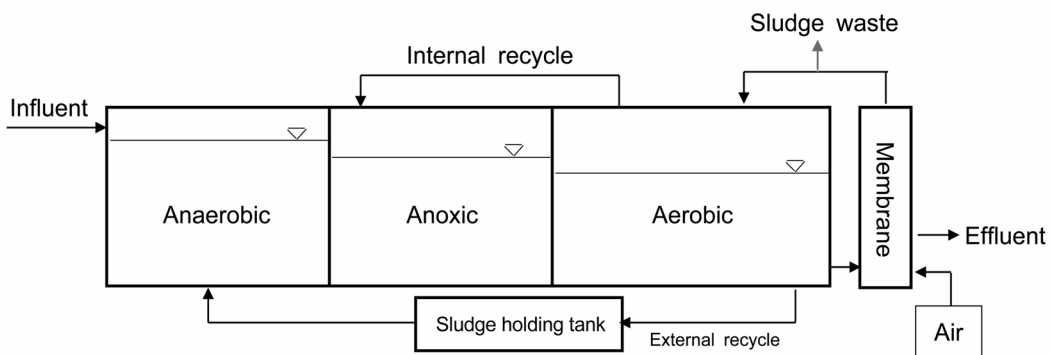


Fig. 1. Process diagram of MBR pilot plant (85 m³/day) used in the study.

Table 2. Criteria of sample filterability (unit : mL/5 min)

Condition	30°C	20°C	10°C
Good	25	20	15
Medium	20	15	10
Bad	< 15	< 10	< 5

2.3. 여과성(filterability) 평가

여과성(filterability)은 GF-C 여지를 이용하여 MLSS를 5 분 동안 대기압으로 여과한 여과액의 용량으로 평가할 수 있다. 여과성 평가기준은 Table 2와 같다.

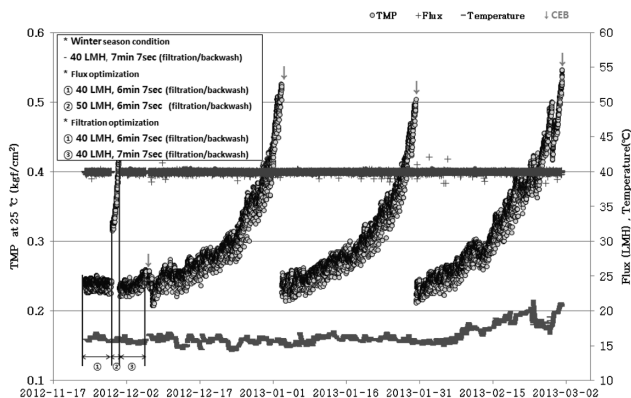
2.4. 질산화 및 질산화 미생물 호흡률 평가

본 실험에서는 4개의 1 L 부피의 회분식 반응조에 혼합액(MLSS 200 mL, 생물반응조 유입수 800 mL)과 4개의 농도별로 PACl (0, 50, 100 그리고 200 mg/L) 주입 후, 급속 교반(200 rpm) 30초, 완속교반(30 rpm) 15분, 폭기 180분, 침전 30분, 상등수 800 mL 제거, 생물반응조 유입수 800 mL 주입 및 PACl 주입의 순서를 3회 반복하여 수행하였으며 이때 사용한 MLSS의 농도는 12,000 mg/L이었다. 매 회 상등수를 채수하여 NH₄⁺-N을 측정하고 질산화 효율을 평가하였다. 응집시 pH의 저하를 막기 위해 1 N의 NaOH를 사용하여 pH 7을 유지하였다. 3회의 반응을 마친 후 상등수를 제거한 슬러지에 대해 미생물 호흡률 측정장치(EZ-Oxyro, (주)드림바이오스, 한국)를 이용하여 질산화 미생물의 호흡률 측정하였다. 이때 종속영양미생물에 의한 산소 소모율을 배제하고 질산화 미생물인 독립영양미생물의 산소 소모율에 의한 활성도를 측정하기 위하여 NH₄⁺, KH₂PO₄, NaHCO₃, MnSO₄ 및 FeSO₄를 각각 20, 22, 300, 1.7 및 2.2 mg/L가 되는 인공원수를 만들어 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공기 주입에 따른 TMP 경향

Fig. 2와 같이 동절기는 40 LMH로 27일, 하절기는 50 LMH



(a) TMP trend during winter season

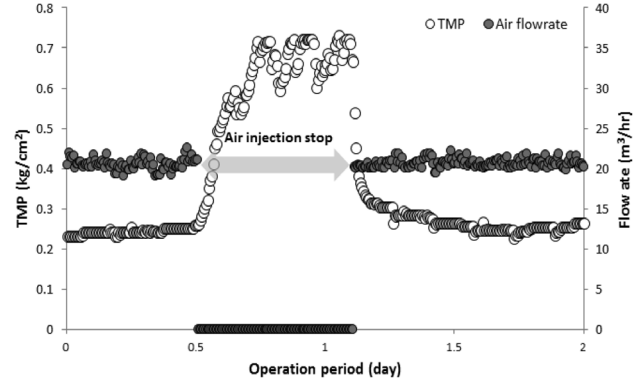


Fig. 3. TMP changes according to air injection into the membrane module.

로 42일의 연속운전이 가능하였다. 이는 일반적인 침지식 MBR 공정 운전 여과 플럭스인 20 LMH 내외의 값과 비교하여 약 2배 이상의 높은 여과성능이다.

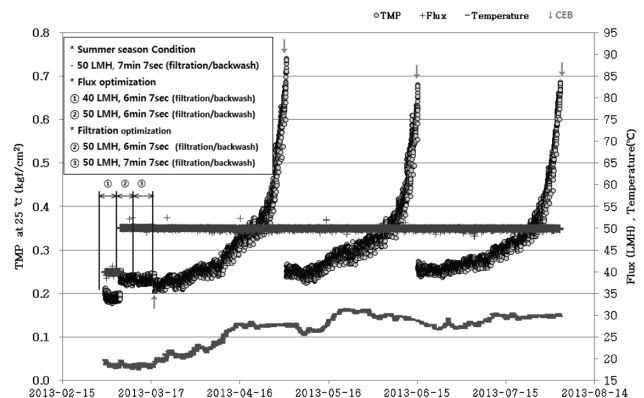
공기주입(airlift)이 막 TMP에 미치는 영향을 실험으로 알아보기 위해 MBR 공정 실증시설의 운전 중 공기 주입을 멈추어 보았다. 실험결과 Fig. 3과 같이 공기 주입이 멈추었을 때 TMP가 급격히 상승하여 막 운전의 최대 허용 TMP인 0.7 kg/cm²까지 상승하는 경향을 보였다. 또한, 공기를 다시 주입한 경우 TMP는 이전 경향을 다시 회복하였으며 안정적으로 운전되었다.

공기주입형 가압식 MBR 공정은 기존 침지식 MBR 공정과 비교하여 2배 이상의 높은 플럭스를 유지할 수 있었다. 이는 공기를 multi-bore 형태의 가압식 분리막에 MLSS와 함께 주입하면 공기의 scouring 효과에 의해 분리막 표면에 MLSS가 쌓이는 현상을 억제하고 제어하는 것으로 판단된다.

3.2. Anti-foulant 주입에 따른 막 오염 저감분석

공기주입형 가압식 MBR 공정에서 anti-foulant 주입에 따른 TMP 변화 경향은 Fig. 4와 같다.

실험결과 PACl나 PAC과 같은 anti-foulant의 주입이 없는 운전조건에서 TMP는 회귀방정식의 기울기 0.0324로 실험



(b) TMP trend during spring and summer season

Fig. 2. TMP changes obtained from continuous operation of the MBR pilot plant.

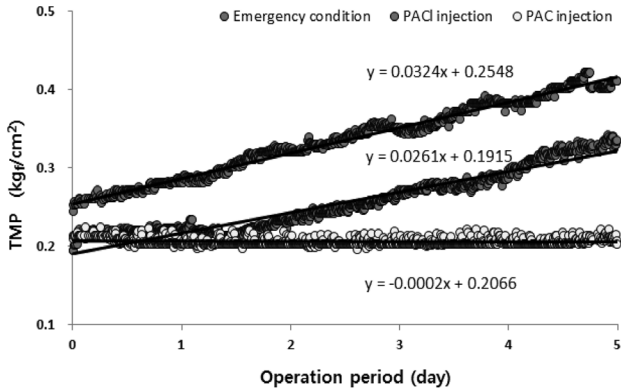


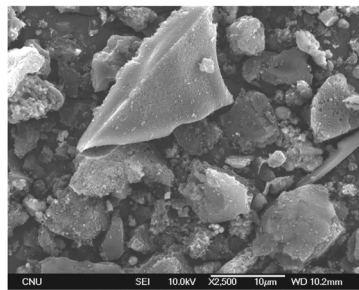
Fig. 4. TMP changes according to PACI or PAC injection into the bioreactor.

5일 동안 지속적인 상승을 보였다. 반면, PACI를 주입한 회귀방정식의 기울기는 0.0261로 anti-foulant의 주입이 없는 경우의 TMP와 비교하여 약 19% 감소하는 경향을 보였다. PAC의 주입은 PACI의 주입에 비해 회귀방정식의 기울기가 -0.002로 향상된 결과를 보였으며, TMP는 운전 초기와 같은 0.2 kg/cm²로 실험 5일 동안 일정하게 유지되어 안정적인 운전이 가능하였다. 따라서 가동 초기 PAC 주입으로 막의 플럭스가 매우 크게 개선되었으며 안정적인 TMP의 유지가 가능하다면 유지 및 화학 세정의 주기가 길어지는 장점을 지닌다. 또한 안정적인 TMP 유지는 분리막 제조사에서 권고하는

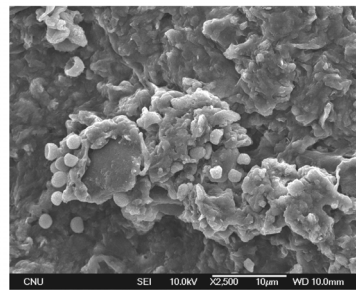
순환유량(유입량 Q대비 최대 10Q)을 낮출 수 있으며, 이는 유지관리비 절감을 가능하게 할 수 있는 방법이 될 수 있다. 플럭스와 TMP를 안정화시키는 주요한 원인은 입자성 물질의 주입이 EPS (Extracellular Polymeric Substances)와 같은 막 오염 물질을 흡착하고 슬러지 강도를 변화시키며 분리막 내부에서 PAC의 전계방출형 물리적 scouring 효과가 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 호기조 주입 전 PAC와 주입 후 미생물과 결합한 PAC을 전계방출형 주사 전자현미경(Field Emission-Scanning Electron Microscope, FE-SEM)을 이용하여 표면 분석하여 Fig. 5에 나타내었다.

PAC을 호기조에 주입한 결과 미생물은 PAC와 결합된 형태로 나타났으며, 슬러지의 구조는 단단하게 변하여 분리막 표면에 달라붙는 슬러지의 특성을 개선시키는 것으로 판단할 수 있었다. 시설 가동 초기 미생물 상태가 분리막 여과에 적합하지 않은 비정상 운전조건일 경우 발생하는 낮은 플럭스 운전은 원수의 유입량을 낮추어 미생물에 지속적인 유기탄소원의 공급을 저해한다. 이러한 경우 PAC 주입은 막의 플럭스를 개선시켜 처리수를 증가시키고 원수 유입량을 정상화시켜 미생물의 상태를 분리막 여과에 적합한 상태로 회복시킬 수 있을 것으로 기대된다. Fig. 6에 PAC 주입 전과 후의 여과성(filterability) 실험 결과를 나타내었다.

실험결과에서 PAC을 주입하지 않은 기간 동안 여과성이 일정량 상승한 것은 하절기 계절적 특성에 의한 수온 상승으로 양호한 미생물 플러키 형성된 것에 기인한 것으로 판단



(a) Fresh PAC



(b) PAC taken from the bioreactor

Fig. 5. SEM images of PAC.

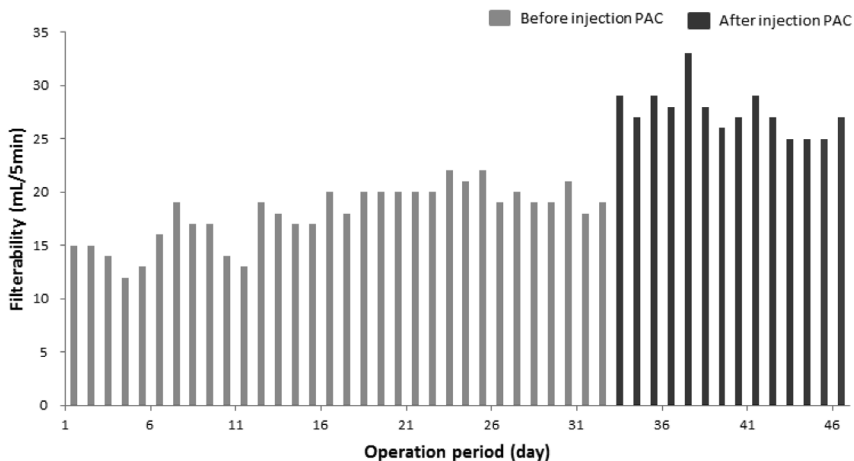


Fig. 6. Filterability measured before and after PAC injection.

된다. PAC 주입 전 미생물 여과성 실험의 평균은 18 mL/5 분, PAC 주입 후의 미생물 여과성 실험의 평균은 28 mL/5 분으로 PAC 주입 후의 여과성 지수가 유의할 만큼 상승하였다. 이때의 표준편차는 각각 2.7, 2.1이었으며 PAC 주입 전과 주입 후 평균값의 통계적 유의성을 t-test로 평가한 결과 양측검정 p값이 유의수준 0.05보다 매우 작은 4.5×10^{-15} 으로 나타나 통계적으로 유의함을 알 수 있었다.

또한 PAC 주입 후 약 2개월 동안 PAC의 추가 주입이 없었음에도 지속적으로 여과성 지수가 높게 나타났다. 따라서 PAC와 같은 입자성 물질의 주입은 상시가 아닌 시설 가동 초기 공정의 안정화를 위해 또는 운전 중 공정이 불안정할 경우 주입하여 미생물의 여과성 개선에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

사용된 PAC는 막의 손상을 최소화하기 위해 야자계를 사용하였다. 본 연구에서는 비정상 운전조건만을 고려하여 주입된 PAC에 한정하여 단기간 실험을 수행하였으므로 PAC의 주입이 막 손상에 높은 상관관계를 나타내지 않을 것으로 사료된다. 그러나 막 오염을 제어하기 위해 장기간의 PAC을 주입할 경우 입자성 물질 scouring과 관련한 막의 손상을 고려하여야 할 것이다.

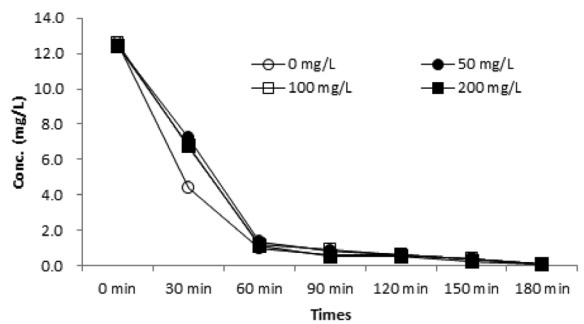
3.3. PACI 농도와 미생물활성도 평가

비정상 운전조건에서 생물반응조에 주입하는 응집제가 미생물의 활성화에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 응집제 주입 누적 실험이 진행되는 동안 수행된 각 실험 차수별 폭기시간 180분 경과에 따른 $NH_4^+ - N$ 의 농도변화 경향은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7(a)와 같이 PACI 1회 주입 실험에서 실험군과 대조군의 유의할 만한 차이를 보이지 않았다. Fig. 7(b), (c)와 같이 PACI 2회와 3회 누적 주입 실험에서 반응시간 60분 경과 후, PACI를 주입하지 않은 대조군과 PACI 200 mg/L를 주입한 실험군의 $NH_4^+ - N$ 농도는 각각 1.9 mg/L, 6.4 mg/L로 차이를 보였다. 이와 같이 PACI를 응집제로 이용한 누적 주입에 따른 회분식 실험결과 2회와 3회 주입 실험에서는 질산화 차이가 누적횟수에 비례하여 발생하였으므로 생물반응조 내 PACI의 지속적인 주입은 미생물의 질산화에 부정적 영향을 미치는 것으로 판단된다. PACI 주입에 따른 질산화 미생물의 호흡률은 PACI를 주입하지 않은 대조군의 호흡률에 비하여 감소하는 경향은 Fig. 8과 같다. 상대적으로 응집제 주입량이 많은 PACI 200 mg/L 누적 주입의 경우 호흡률 시점이 가장 늦게 나타났으며, 최대 호흡률은 $3 O_2 \text{ mg/L} \cdot \text{hr}$ 로 PACI를 주입하지 않은 대조군에 비해 약 50% 감소되었다.

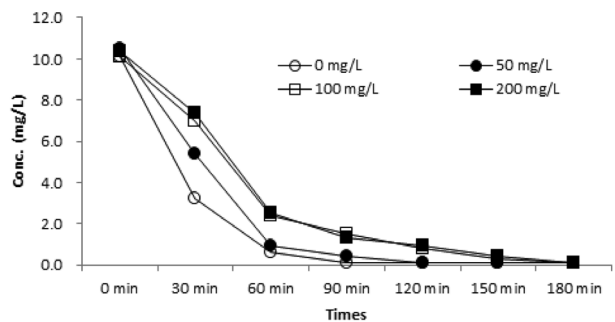
이와 같이 질산화 미생물의 호흡률 감소 원인은 질산화 미생물의 활성도가 낮아진 것으로 판단할 수 있으며, 생물반응조에서 PACI 누적 농도가 높아질수록 질산화 미생물의 활성도를 낮추어 질산화에 문제를 일으킬 수 있는 것으로 나타났다.

$NH_4^+ - N$ (1 time)



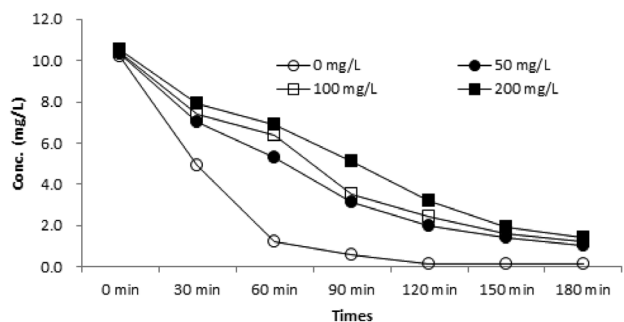
(a) Nitrification efficiencies after the first PACI injection

$NH_4^+ - N$ (2 times)



(b) Nitrification efficiencies after the second PACI injection

$NH_4^+ - N$ (3 times)



(c) Nitrification efficiencies after the third PACI injection

Fig. 7. Efficiencies of nitrification according to repetitive PACI injection with different doses.

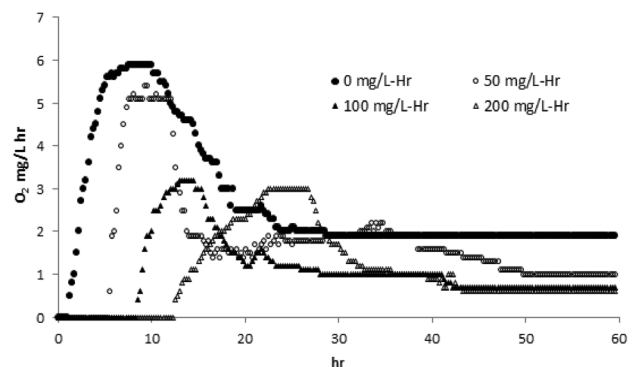


Fig. 8. Respiration rates of nitrifying microorganisms with different PACI injection rates.

4. 결론

공기주입형 가압식 MBR 공정의 실증시설 운영을 통해 공기주입에 따른 분리막의 운전특성과 저유량, 저부하와 같은 비정상 운전조건에서 anti-foulant 주입에 따른 운전특성, 생물학적 공정의 영향을 평가하였다.

MBR 공정에서 가압식 분리막에 공기주입은 분리막 표면과 공기막의 scouring 효과에 의해 TMP 상승을 억제하고 세정 주기를 향상시킴으로써 처리 안정성과 40 LMH 이상의 높은 플럭스를 유지할 수 있었다.

비정상 운전조건에서 anti-foulant로 PACl을 주입한 경우와 주입하지 않은 경우를 비교한 결과 19%의 TMP 감소효과가 있었으며 PAC을 주입한 경우에는 연속운전 5일 동안 TMP 상승 없이 0.2 kg/cm²로 안정적인 운전이 가능하였다.

운전조건 변화에 따른 공정의 안정성을 유지하기 위해 수행한 막 오염 제어 실험에서 anti-foulant로 주입한 PAC와 PACl은 TMP의 상승을 억제하는 것으로 나타났으며 이것은 생물학적 막 오염을 유발하는 EPS와 같은 고분자 물질의 흡착 또는 분리막 공극에 비가역적 막 오염 발생을 억제하는 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

하지만 PACl을 주입할 경우에는 농도와 누적주입 횟수에 따라 미생물의 질산화에 영향을 줄 수 있는 것으로 나타나 주입시 운전조건에 맞는 적정주입량 산정이 필요할 것으로 사료된다.

또한, PAC을 주입할 경우 EPS와 같은 고분자 물질의 흡착과 물리적 scouring 효과에 의해 생물학적 막 오염 제어가 가능할 것으로 사료된다.

따라서 MBR 공정에서 하수처리의 비정상 운전조건에서 anti-foulant 주입은 공정의 안정성과 지속성을 유지하는데 기여할 것으로 사료된다.

KSEE

References

- Judd, S., *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*, Elsevier(2006).
- Heran, M., Durante, F., Lebegue, J. and Grasmick, A., "Air lift relevance in a side-stream MBR system," *Desalination*, **199**(1-3), 485~486(2006).
- Hoque, A., Kimura, K., Miyoshi, T., Yamato, N. and Watanabe, Y., "Characteristics of foulants in air-sparged side-stream tubular membranes used in a municipal wastewater membrane bioreactor," *Sep. Purific. Technol.*, **93**, 83~91(2012).
- Bouchot, M. E., Espinasse, B. and Cabassud, C., "Fouling effects and critical flux in relation with module design and aeration conditions for a side-stream outside/in filtration system," *Desalination*, **199**(1-3), 487~489(2006).
- Psoch, C. and Schiewer, S., "Long term study of an intermittent air spared MBR for synthetic wastewater treatment," *J. Membr. Sci.*, **260**(1-2), 56~65(2005).
- Cabassud, C., Laborie, S. and Lainé, J. M., "How slug flow can improve ultra filtration flux in organic hollow fiber," *J. Membr. Sci.*, **128**(1), 93~101(1997).
- Kim, B.-C., Nam, D.-H., Na, J.-H. and Kang, K.-H., "Analysis of extracellular polymeric substance (EPS) release in anaerobic sludge holding tank and its effects on the membrane fouling in membrane bioreactor (MBR)," *Water Sci. Technol.*, **70**(1), 82~88(2014).
- Jiang, T., Kennedy, M. D., de Schepper, V., Nam, S.-N., Nopens, I., Vanrolleghem, P. A. and Amy, G., "Characterization of soluble microbial products and their fouling impacts in membrane bioreactors," *Environ. Sci. Technol.*, **44**(17), 6642~6648(2010).
- Sun, F.-Y., Wang, X.-M. and Li, X.-Y., "Change in the fouling propensity of sludge in membrane bioreactors (MBR) in relation to the accumulation of biopolymer clusters," *Biore-sour. Technol.*, **102**(7), 4718~4725(2011).
- Wang, Z., Wu, Z. and Tang, S., "Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor," *Water Res.*, **43**(9), 2504~2512(2009).
- Satyawali, Y. and Balakrishnan, M., "Effect of PAC addition on sludge properties in an MBR treating high strength wastewater," *Water Res.*, **43**(6), 1577~1588(2009).
- Liu, Y., Shi, H., Li, W., Hou, Y. and He, M., "Inhibition of chemical dose in biological phosphorus and nitrogen removal in simultaneous chemical precipitation for phosphorus removal," *Biore-sour. Technol.*, **102**, 4008~4012(2011).
- Banu, J. R., Do, K.-U., Kaliappan, S. and Yeom, I.-T., "Effect of alum on nitrification during simultaneous phosphorous removal in anoxic/oxic reactor," *Biotechnol. Biopro. Eng.*, **14**(4), 543~548(2009).