

분뇨처리를 위한 MBR공정에서 Microbubble의 적용

임지영, 김진한[†]

인천대학교 건설환경공학과

Application of Microbubble in MBR Process for Night Soil Treatment

Ji-Young Lim, Jin-Han Kim[†]

Department of Civil & Environmental Engineering, Incheon National University

(Received: Feb. 9, 2017 / Revised: Mar. 12, 2017 / Accepted: Mar. 12, 2017)

ABSTRACT: In this study, the microbubbles were applied to the MBR process for night soil treatment, and the removal efficiency was estimated. As a result of the this study, when the microbubble was supplied directly to the aerobic tank in which the membrane was submerged, excessive scum was generated so could not stable operation of the process. The SS removal efficiencies in the pre-treatment tank were 74.3%, 82.8%, 75.0%, 52.1% on average at the 2 kg, 4 kg, 6 kg, and 8 kg COD_{Cr}/m³, respectively. The mean removal efficiencies were more than 99.4%, 94.0%, 74.1% for SS, TCOD_{Cr}, SCOD_{Cr} by MBR process. On the other hand, when the microbubble are directly supplied to the aerobic tank, the microbubble and the scum are attached each other to accelerate the fouling. Therefore, it can be confirmed that stable treatment can be achieved by applying microbubble to the front of the bioreactor for removal of SS and oxidation of organic matters in high concentration organic wastewater treatment such as night soil.

Keywords: Microbubble, MBR, Night soil, OLR, Organic oxidation

초 록: 본 연구에서는 고농도 유기성 폐수인 분뇨 처리를 위한 MBR 공정에 마이크로버블을 적용하여 처리효율을 검토하고, 안정적 운영의 가능성은 평가하고자 하였다. 연구결과, 마이크로버블을 분리막이 침지되어 있는 호기조에 직접 공급하였을 때에는 과도하게 스컴이 발생하여 처리공정의 안정적 운영이 불가능하였다. 생물반응조 전단에 마이크로버블을 공급하는 전처리조를 설치하여 고액분리와 유기물 산화를 실시한 다음 MBR 공정으로 처리한 결과 전처리조에서의 SS 제거율은 2kg, 4kg, 6kg, 그리고 8 kg COD_{Cr}/m³·day의 유기물 부하에서 각각 평균 74.3%, 82.8%, 75.0%, 52.1%를 나타내었으며, 전체 처리공정 처리수의 SS 제거율은 평균 99.4% 이상이었다. 또한 최종처리수의 TCOD_{Cr} 제거율은 평균 94.0% 이상이었으며, SCOD_{Cr} 제거율은 평균 74.1% 이상이었다. 한편, 마이크로버블을 호기조에 직접 공급할 경우 마이크로버블과 오염물질들이 함께 분리막에 부착되어 fouling 현상이 가속되는 현상을 확인할 수 있었다. 따라서, 분뇨와 같은 고농도 유기성 폐수 처리공정에는 SS 제거와 유기물 산화를 목적으로 생물반응조 전단에 마이크로버블을 적용함으로써 안정적인 처리가 가능함을 확인 할 수 있었다.

주제어: 마이크로버블, MBR, 분뇨, 유기물 부하, 유기물 산화

[†] Corresponding Author (e-mail: jinhan@INU.ac.kr)

1. 서 론

환경부 하수도법 시행규칙(환경부령 제660호, 2016.06.27.) 제3조(방류수 수질 기준 등) 제1항 제2호 관련 분뇨처리시설의 방류수 수질기준은 BOD 30 mg/L이하, COD 50 mg/L이하, SS 30 mg/L이하, T-N 60 mg/L이하, T-P 8 mg/L이하(단, 공공 하수처리시설로 유입하여 처리하는 분뇨처리시설은 방류수수질기준을 적용하지 아니한다)로 규정되어 있다. 분뇨는 유기오염물질과 암모니아성 질소 농도가 높아 처리가 용이하지 않으며, 방류수 수질기준 등 환경기준에 맞추어 수계로 방류하기 위해서는 고도처리와 같은 기술이 적용되어야 함으로 높은 처리비용 요구 등의 어려움이 있다.

고도처리 분야에서 가장 주목받고 신뢰성 있는 기술로 인정받고 있는 것이 분리막 기술이며, 특히 침지형 MBR(submerged membrane bioreactor)은 완벽한 고액분리가 가능하고 안정된 처리수를 확보할 수 있기 때문에 꾸준히 응용되어왔다¹⁾. 그러나 MBR이 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 폐수처리 적용에 있어 제한요소로 지적되는 fouling으로 인해 MBR 공정의 운전 및 유지관리 비용 상승이라는 문제점을 가지고 있다. 분뇨의 경우 고농도 유기성 폐수로 고형물의 농도와 점도가 높을 뿐만 아니라 입자상의 고형물로 인해 MBR을 이용하여 높은 처리효율을 얻기 위해서는 전처리공정에서 고액분리가 필수적으로 선행되어야 한다²⁾.

분뇨를 포함한 다양한 폐수에 있어 부상분리공정에 마이크로버블을 적용한 기술들이 소개되고 있으며 실제 폐수처리에 있어 마이크로버블을 이용한 고액분리 및 살균효과가 주목을 받고 있다.

또한, 분리막의 사용주기를 증가시키기 위한 foulants의 제거 목적으로 마이크로버블을 이용하여 MF, UF 분리막의 세척 및 역세척에 이용한 결과 공기 마이크로버블에 의해 foulants의 제거를 확인하였다. 다만, 세정효과는 버블 발생속도와 버블 크기에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다³⁾.

마이크로버블에 대한 정의는 아직 표준화가 이루어지지 않았으며 학자들에 따라 버블의 크기가 수십 μm , 수백 μm 등 여러 가지로 혼용되고 있는 실정이

다^{4,5)}. 마이크로버블은 일반버블에 비하여 그 크기가 작아 비표면적이 증대됨으로써 최소의 동력만으로 질량전달율이 극대화되므로 기존 밀리버블을 사용한 부상분리공정에 비하여 고액분리 효율이 높다. 또한, 용해효율이 높으며 수중에서 부상속도가 매우 느리기 때문에 수중에 체류하는 시간이 길고, 음전하를 띤 마이크로버블이 자체적으로 파괴되거나 양전하를 띤 물질과 물리적으로 충돌하여 파괴되면서 하이드록실 라디칼이 순간적으로 발생하게 되는데 이렇게 생성된 하이드록실 라디칼의 강력한 산화력에 의한 살균 효과가 있다고 알려져 있다⁶⁻⁹⁾.

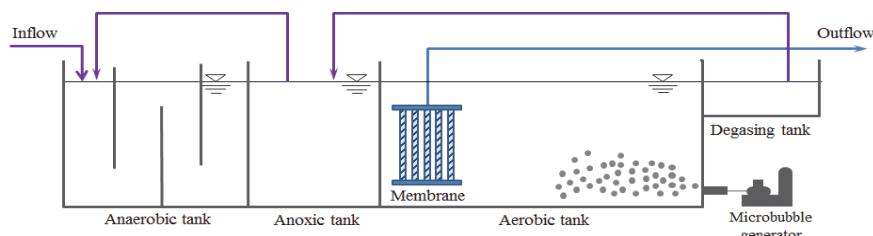
본 연구에서는 고농도 유기성 폐수인 분뇨에 마이크로버블을 생물학적 처리 공정인 A2O 공정을 이용하는 MBR 공정에 적용하여 분뇨처리 효율을 검토하고, 안정적인 운영 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

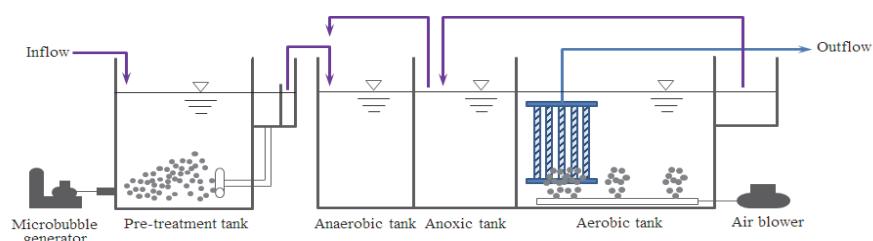
2.1. 시스템 구성

본 연구에서는 인천광역시 소재 G사업소 위생처리장의 협잡물 처리기를 거친 배양조 유입수를 유입원수로 사용하였다. 위생처리장의 계획처리용량은 1,780 m^3/day 이며, 정화조오니, 생분뇨와 축산 폐수가 유입된다. 위생처리장의 처리공법은 협잡물 처리기에서의 전처리 후 배양조, 협기조, 간헐포기조로 이루어진 HBR-II 공정이다.

본 연구에서는 협잡물 처리기를 거친 분뇨를 협기조, 무산소조, 호기조로 구성된 생물반응조(A2O)에 유입시켜 유기물, 질소를 제거하고 호기조에 침지된 분리막을 통해 고액분리를 하였다. 실험은 마이크로버블을 분리막이 침지되어 있는 호기조에 직접 공급하는 경우와 생물반응조의 전단에 설치한 전처리조에 공급하는 경우로 구분하여 그 처리특성을 파악하였다[Fig. 1]. 반응조 용적은 협기조 25 L, 무산소조 25 L, 호기조 50 L, 그리고 전처리조의 용적은 140 L로서 현장에서 bench-scale 규모로 수행하였다. G사업소 위생처리장의 운전조건을 기준으로 HRT 2.4일, 내부반송 1Q, 반응조의 MLSS 농도는 6,000 mg/L로 유지하였다.



(a) Case of microbubble supply to aerobic tank



(b) Case of microbubble supply to the front of bioreactor

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental reactor

Table 1. Characteristics of influent

Item	Range	Average
COD _{Cr} (mg/L)	1,600~9,800	6,200
SCOD _{Cr} (mg/L)	400~3,280	1,513
BOD(mg/L)	1,060~3,930	2,704
T-N(mg/L)	202~564	415
T-P(mg/L)	63~137	99
SS(mg/L)	744~10,400	4,840

본 연구에서 사용된 유입원수의 성상을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 마이크로버블 발생장치

마이크로버블 발생은 선행연구¹⁰⁾에서 사용한 가압식 마이크로버블 발생장치를 사용하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 마이크로버블 발생장치는 가압수(순환수)를 보내는 가압펌프(PU-S990U, Wilo, Germany), 가압탱크 전단부에 공기와 순환수의 접촉효율을 향상시키는 혼합탱크와 가압탱크, 벤튜리노즐 형태의 감압장치, 충돌판, 그리고 공기공급을 위한 컴프레셔(AT-2525A, Besto, China)로 구성되어 있다. Table 2에 운전조건을 나타내었는데, 운전압력은 3 bar, 공기주입율은 0.3 LPM이었다¹¹⁾. 마이크로버블 발생장치에서 생성되는 마이크로버블의 크기분포를 Fig. 3에 나타내었다. 발생된 마이크



(a) Microbubble generator



(b) Nozzle

Fig. 2. Photograph of microbubble generator

Table 2. Specification of microbubble generator

Item	Specification
Pressure pump	10 m ³ /hr
Compressor	2.5HP/1.8kw, 126 L/min
Pressure	3 bar
Circulation flow rate	2.7 m ³ /hr
Air flow rate	0.3 LPM
Bubble size, D ₅₀	39.89~44.39 μm

로버블의 크기(D₅₀; 누적분포로 환산하였을 때 누적분율 0.5에서의 기포 입자의 크기)는 39.89~44.39 μm 범위이었으며, 발생된 전체기포 중에서 50 μm 이하의 기포가 차지하는 분율은 60.97%이었다.

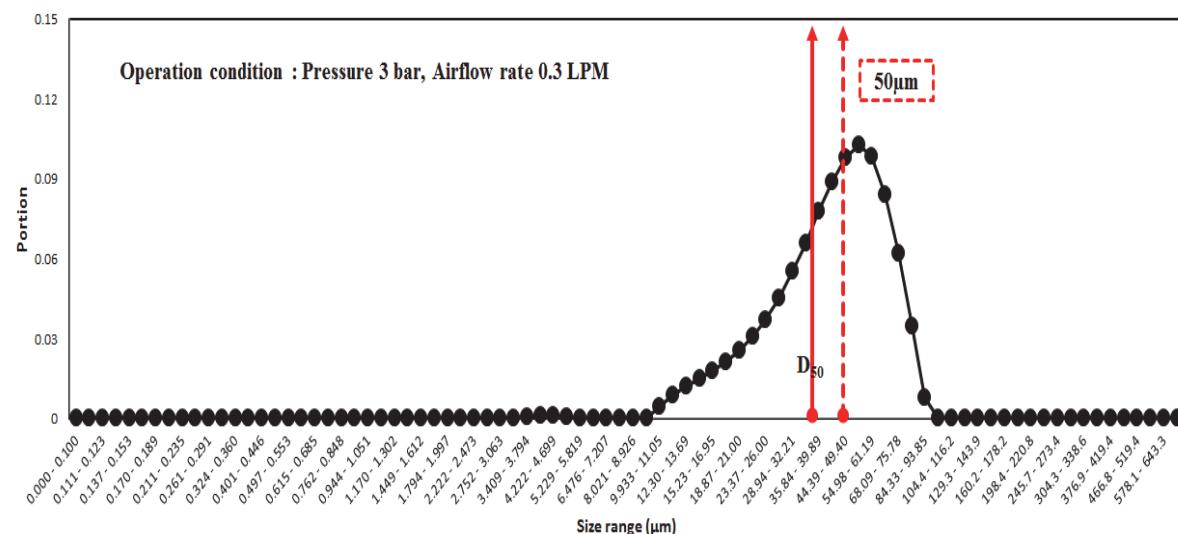


Fig. 3. Distribution of generated bubble size

2.3. 분리막의 특성 및 운전조건

호기조에 침지한 분리막은 D사(Korea)에서 제조한 PVDF 재질의 중공사막으로서 분리막의 특성 및 운전조건을 Table 3에 요약하였다. 생물반응조 운영을 위한 원수공급펌프, 에어펌프, 교반기 및 흡입펌프의 작동은 PLC로 제어하였다.

Table 3. Characteristics of membrane

Item	Characteristics
Pore size	0.2 μm
Material	PVDF
Type	Hollow fiber
Configuration	$\varnothing 0.1\text{m} \times 0.3\text{mH}$
Operating type	Submerged
Cycle	8 minutes filtration 2 minutes backwashing
Flux(LMH)	2,38

2.4. 분석방법

COD_{Cr} 은 Standard Methods¹²⁾에 의하여, SS, T-N, T-P 항목은 수질오염공정시험기준¹³⁾에 따라 분석하였다. SCOD_{Cr} 분석을 위하여 시료를 공극이 1.2 μm 인 GF/C(Whatman, UK)로 여과하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 호기조에 마이크로버블을 공급하는 공정

호기조에 마이크로버블을 직접 공급하는 경우, 운전기간 동안 많은 양의 스컴이 호기조 상부 자유수면에서 발생되었고 그로인하여 스컴이 월류하는 등의 문제가 심각하게 발생함으로써 처리공정의 정상적인 운영이 어려웠다. 따라서, 반응조 상부에 고압의 분사노즐을 사용하고 펌프를 이용한 스컴의 순환 등 여러 개선방안을 적용하였으나, 점도가 높은 분뇨의 특성상 개선에는 한계가 있었다. 또한 이를 해결하기 위하여 마이크로버블의 발생장치 압력을 변화시켜 발생버블의 크기를 변화시키고, 주입하는 공기량도 변화시켜 보았으나 스컴 발생량에는 큰 차이가 없었다.

3.2. 생물반응조 전단에 마이크로버블을 공급하는 공정

분뇨는 높은 고형물 농도를 포함하는 유기성 폐수로서, 생물학적으로 처리하기 위해서는 긴 처리시간이 요구된다. 따라서 과도한 스컴이 발생되어 안정적인 처리공정의 운영이 불가능하였던 3.1절의 연구결과를 바탕으로 생물반응조 전단에 마이크로버블을 공급하는 전처리조를 설치하는 공정을 구성

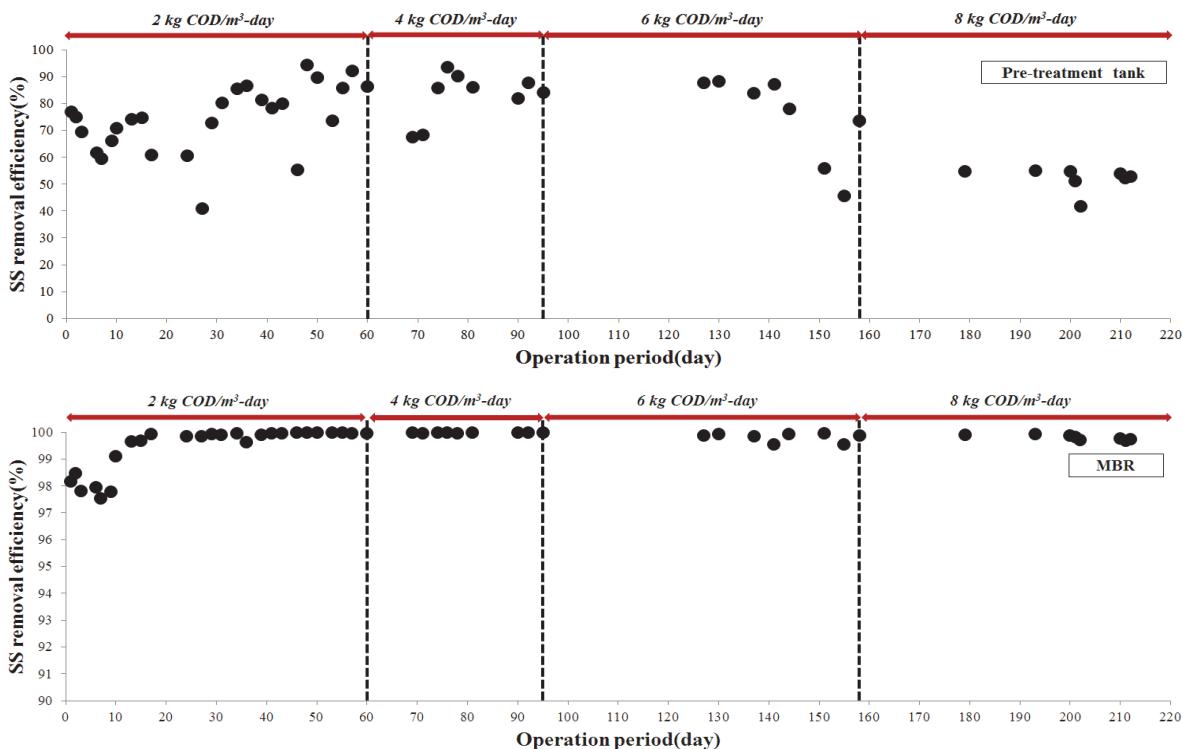


Fig. 4. Effect of organic loading rate on the SS removal efficiency

하였다. 전처리조의 설치로 인하여 마이크로버블에 의한 입자성 물질들이 부상분리되고, 일부 유기물질이 산화처리됨에 따라 생물반응조로 유입되는 분뇨의 고형물 및 유기물 부하를 낮출 수 있었다. 또한, 스컴의 경우 전처리조에서 대부분 제거되어 생물반응조에서의 스컴 생성량을 감소시키는 효과를 나타내었다.

3.2.1. SS 제거율

Fig. 4에 전처리조 및 전체 공정에서의 유기물 부하별 SS 제거율을 나타내었다. 2~8 kg COD_{Cr}/m³·day 범위의 유기물 부하에 따른 전처리조에서의 SS 제거율은 각각 평균 74.3%, 82.8%, 75.0%, 52.1%를 나타내었다. 8 kg COD_{Cr}/m³·day의 유기물 부하에서 SS 제거율이 가장 낮았는데, 이는 고형물의 농도가 약 7,000 mg/L 이상인 고농도의 원수가 지속적으로 유입되어 마이크로버블에 의한 부상분리의 효과가 감소되었던 것에 그 원인이 있다. 전체 공정의 유기물 부하에 따른 SS 제거율은 각각 평균 99.4%, 99.9%, 99.8%, 99.8%로서 유기물 부하에

관계없이 높은 처리성능을 나타내었다.

3.2.2. 유기물질 제거율

전처리조와 MBR 공정에서의 유기물 부하에 따른 COD_{Cr} 제거율 측정 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 유기물 부하가 2 kg에서 8 kg COD_{Cr}/m³·day으로 증가함에 따라 전처리조에서의 TCOD_{Cr}은 각각 평균 58.3%, 57.8%, 73.6%, 59.6%이었고, SCOD_{Cr}은 각각 평균 22.6%, 26.8%, 44.8%, 16.8%이었다. 즉, 용존성 유기물이 유기물 부하에 따라 16.8~44.8% 정도 제거율을 보였는데, 이는 마이크로버블의 산화력에 기인한 것으로 판단된다. 가축분뇨의 슬러지 및 유기물질을 마이크로버블을 이용하여 처리한 결과 마이크로버블이 파괴되면서 발생된 하이드록실 라디칼에 의한 슬러지 및 유기물질 감량에 효과가 있었다는 Jang 등¹⁴⁾의 연구결과도 있다. 결과적으로 마이크로버블을 이용하여 전처리조에서 SS 제거와 함께 용존성 유기물의 제거가 가능하게 됨으로써 후단의 생물반응조에 유기물 부하를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

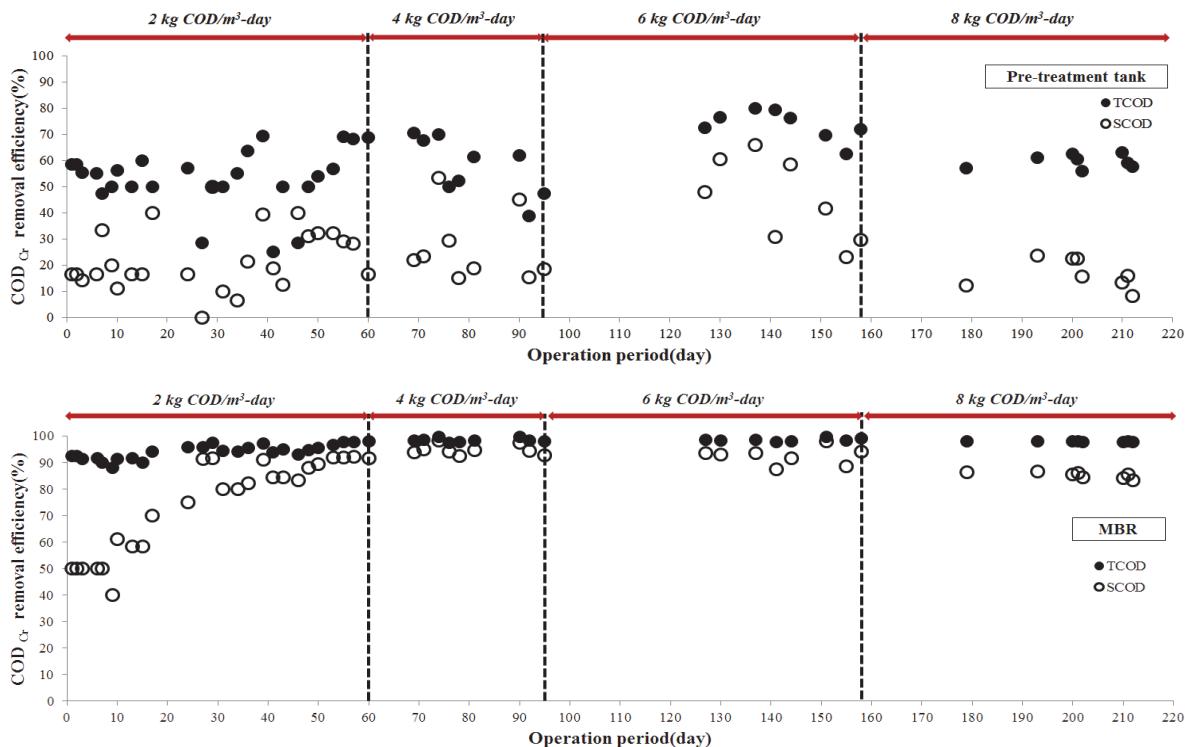


Fig. 5. Effect of organic loading rate on the COD_{Cr} removal efficiency

최종처리수의 유기물 부하에 따른 TCOD_{Cr} 제거율은 각각 평균 94.0%, 98.4%, 98.5%, 97.8%였으며, SCOD_{Cr} 은 각각 평균 74.1%, 94.7%, 92.4%, 85.2%였다. 이는 가축분뇨를 무산소, 호기조로 구성된 생물반응조에 분리막을 적용하여 MLSS 8,000 mg/L, HRT 20일로 운전하였을 때 SCOD_{Cr} 제거율은 97.8%였다는 Na 등¹⁵⁾의 연구결과에 비해서는 조금 낮은 제거율로 볼 수 있지만 해당 선행 연구에서의 HRT에 기인한 유기물 부하가 1.46 kg

$\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 이었다는 것을 고려한다면 마이크로 버블을 전처리로 이용할 경우 8 $\text{kg COD}_{\text{Cr}}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 정도의 매우 높은 유기물 부하에서도 분뇨의 안정적 처리가 가능함을 알 수 있다.

3.2.3. T-N 제거율

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 전처리조에서 T-N의 제거율은 유기물 부하율 2~8 $\text{kg COD}_{\text{Cr}}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 범위에서 각각 평균 12.0%, 34.8%, 32.6%, 22.8%○]

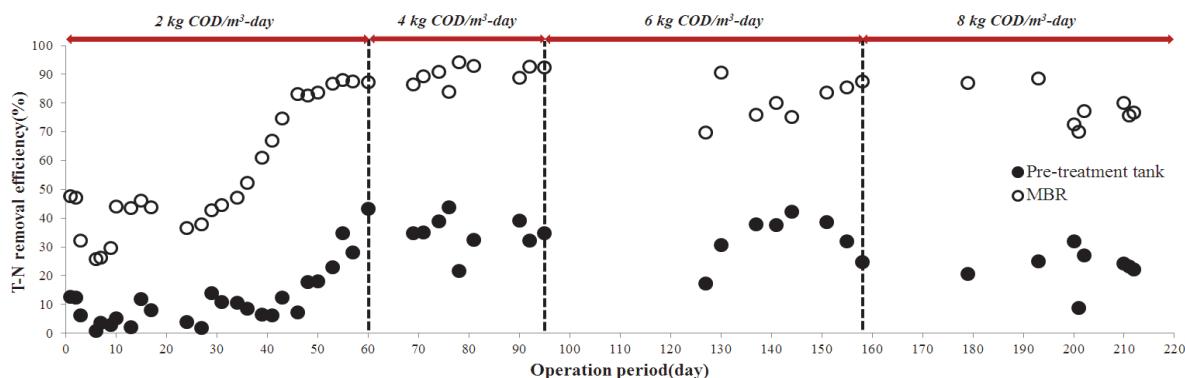


Fig. 6. Effect of organic loading rate on the T-N removal efficiency

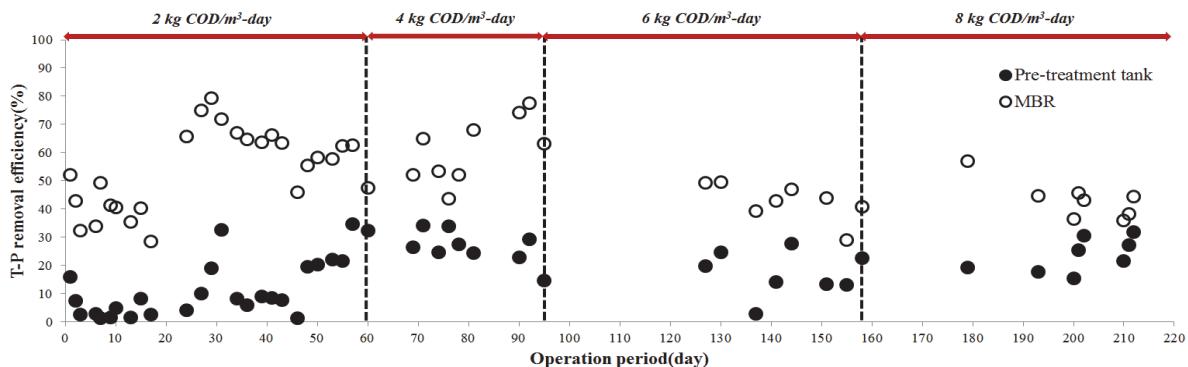


Fig. 7. Effect of organic loading rate on the T-P removal efficiency

었다. 또한, 최종처리수의 T-N 제거율은 각각 평균 55.8%, 90.2%, 81.0%, 78.5%이었다.

マイクロバブル을 호기조에 직접 공급하였던 경우에는 호기조에서 생성된 스CMP에 마이크로바ブル이 부착되어 무산소조로 반송되므로 완벽한 무산소 조건 형성되지 않아 탈질반응에 방해요인이 되었다. 그러나 마이크로바ブル을 전처리조에 적용할 경우에는 스CMP에 잔류하는 마이크로바ブル이 충분히 제거됨에 따라 호기조에서 무산소조로 내부반송시 스CMP 및 잔류바블의 방해를 줄일 수 있어 탈질효율이 다소 높아진 것을 확인할 수 있었다.

3.2.4. T-P 제거율

T-P의 제거율을 Fig. 7에 나타내었다. 유기물 부하 증가에 따른 전처리조의 T-P 제거율은 각각 평균 11.8%, 26.5%, 17.3%, 23.7%이었으며, 최종

처리수의 T-P 제거율은 각각 평균 53.9%, 61.1%, 42.8%, 43.2%이었다. 유입수의 농도 변동이 심하여 유기물 부하 증가에 따라 일관적인 처리경향이 보이지는 않지만 유기물 부하가 증가할 경우 제거율이 감소되는 경향을 보였다. 하지만 선행연구¹⁵⁾의 연구결과와 비교해보면 6 kg COD_{Cr}/m³·day 이상의 높은 유기물 부하에서도 높은 T-P 제거율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.3 분리막

MBR 공정은 침전조 없이 호기조 내에 분리막을 침지하여 반응조 내의 미생물의 농도를 높게 유지할 수 있으므로 고농도 폐수 처리에 널리 적용되고 있다.

본 연구에서는 분리막의 막힘현상을 해결하기 위하여 마이크로바ブル을 이용한 세정을 실시하였으나,

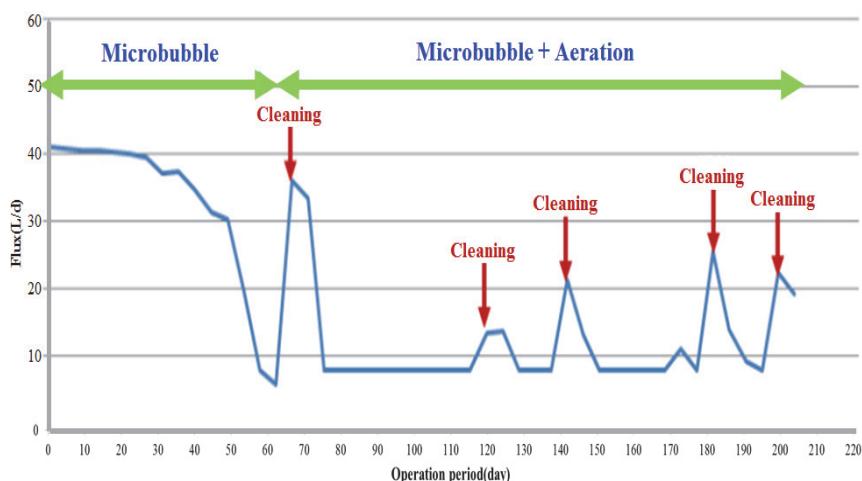


Fig. 8. Characteristics of flux fluctuation by backwash

Stephen 등³⁾의 연구결과와는 달리 마이크로버블이 오염물질들과 함께 분리막에 부착되어 fouling 현상이 가속화되는 것을 확인할 수 있었다. 분뇨의 경우 점성이 높고 마이크로버블의 전단력이 매우 낮기 때문에 마이크로버블에 의한 분리막 세정은 어려움이 있는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 마이크로버블과 산기관을 통한 일반 버블을 함께 사용하여 분리막의 세정효율을 검토하였으나 점성이 높은 분뇨 자체의 특징으로 인하여 flux 확보에는 어려움이 있었다.

제거율은 평균 42.8% 이상이었다.

5. 분리막의 세정 목적으로 마이크로버블을 적용한 결과, 마이크로버블과 오염물질들이 함께 분리막에 부착되어 fouling 현상이 가속되는 현상을 확인할 수 있었다.

결론적으로 분뇨 등 고농도 유기성 폐수를 처리할 경우 마이크로버블을 고액분리 및 유기물의 산화를 목적으로 생물반응조 전단에 적용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

고농도 유기성 폐수인 분뇨 처리를 위한 MBR 공정에 마이크로버블을 적용하여 처리효율을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 호기조에 마이크로버블을 직접 공급하는 경우 많은 양의 스CMP이 호기조 상부 자유수면에서 발생하고 이로 인하여 스CMP가 월류하는 등의 문제가 심각하게 발생하였다. 또한 질소제거를 위한 호기조에서 무산소조로의 내부반송시 잔류하는 마이크로버블의 공급에 의해 무산소 조건을 유지하기 어려움이 있었다.

2. 생물반응조 전단에 마이크로버블을 공급하는 전처리조를 설치하여 마이크로버블에 의한 고형물의 부상분리 및 유기물 산화 후 생물반응조로 처리한 결과, $4 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 의 높은 유기물 부하에서 전처리조에서의 SS 제거율은 평균 82.8%로 가장 높았으며, 최종 처리수의 SS 제거율은 모든 유기물 부하에서 평균 99.4% 이상이었다.

3. 전처리조에서의 마이크로버블의 산화력에 의한 SCOD_{Cr} 제거율은 유기물 부하에 따라 16.8~44.8% 정도로 나타났다.

4. 분뇨를 마이크로버블로 전처리한 다음 MBR 공정으로 처리한 결과 $2\sim8 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 의 높은 유기물 부하 범위에서 최종처리수의 TCOD_{Cr} 제거율은 평균 94.0% 이상, SCOD_{Cr} 은 평균 74.1% 이상, T-N 제거율은 평균 55.8% 이상, 그리고 T-P

References

- Shin, D. H., Baek, B. D. and Chang, I. S., "Control of Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactor(MBR) Using Air Scouring", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 30(9), pp. 948~954. (2008).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Development of Solids/liquid Separation System of Swine Wastewater by Flotation Process with Micro-bubbles. (2001).
- Stephen, P. C., Matthew, W. A. and Maqsood, F., "Microbubble RO Membrane Cleaning Reduces Fouling on WWRO Plant", Desalination and Water Treatment, 55, pp. 2900~2908. (2015).
- Li, P., Tsuge, H. and Itoh, K., "Oxidation of Dimethyl Sulfoxide in Aqueous Solution Using Microbubbles", Industrial & Engineering Chemistry Research, 48(17), pp. 8048~8053. (2009).
- Kawahara, A., Sadatomi, M., Matsuyama, F., Matsuura, H., Tominaga, M. and Noguchi, M. "Prediction of Microbubble Dissolution Characteristics in Water and Sea Water", Experimental Thermal and Fluid Science, 33(5), pp. 883~894. (2009).
- Agarwal, A., Ng, W. J. and Liu, Y. "Principle and Applications of Microbubble and Nanobubble Technology for Water Treatment", Chemosphere,

- 84(9), pp. 1175~1180. (2011).
7. Marui, T., "An Introduction to Micro/Nano-Bubbles and Their Applications", *Systemics, Cybernetics and Informatics*, 11(4), pp. 68~73. (2013).
8. Cha, H. S., "Present State and Future Prospect for Microbubble Technology", *Bulletin of Food Technology*, 22(3), pp. 544~552. (2009).
9. Li, P., Takahashi, M. and Chiba, K., "Enhanced Free-Radical Generation by Shrinking Microbubbles Using a Copper Catalyst", *Chemosphere*, 77, pp. 1157~1160. (2009).
10. Lim, J. Y., Kim, H. S., Park, S. Y. and Kim, J. H., "Pre-treatment Characteristics of Night Soil by Microbubble", *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 24(4), pp. 31~37. (2016).
11. Lim, J. Y., Kim, H. S., Park, S. Y. and Kim, J. H., "Evaluation of Characteristics for Microbubble Generation According to Venturi Nozzle Specification", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 16(9), pp. 6397~6402. (2015).
12. APHA(American Public Health Association), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17th ed., Washington DC, USA. (1989).
13. Ministry of Environment, *Standard Methods for Examination of Water Quality*. (2014).
14. Jang, J. K., Kim, M. Y., Sung, J. H., Chang, I. S., Kim, T. Y., Kim, H. W., Kang, Y. K. and Kim, Y. H., "Effect of the Application of Microbubbles and/or Catalyst on the Sludge Reduction and Organic Matter of Livestock Wastewater", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 37(10), pp. 558~562. (2015).
15. Na, Y. M., Bae, J. B., Moon, T. H., Hwang, Y. Y., Lee, Y. W., "Livestock Wastewater Treatment Using MBR/NF/RO and Application of Post-Denitrification and Air Flotation Process to Treat Excess Sludge and NF/RO Brine", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 35(6), pp. 407~414. (2013).