

마이크로버블 공급에 의한 폭기조내 교반과 용존산소 분포 특성

임지영¹, 김현식¹, 박대석¹, 조영근¹, 송승준¹, 박수영¹, 김진한^{1*}
¹인천대학교 건설환경공학과

Characteristic of Mixing and DO Concentration Distribution in Aeration Tank by Microbubble Supply

Ji-young Lim¹, Hyun-Sik Kim¹, Dae-Seok Park¹, Young-Gun Cho¹,
Seung-Jun Song¹, Soo-Young Park¹, Jin-Han Kim^{1*}

¹Dept. of Civil & Environmental Engineering, Incheon National University

요약 본 연구는 가압식 마이크로버블 발생장치를 이용하여 공기를 마이크로화 시켜 공급하면서 pilot-scale 규모의 폭기조 내 DO 농도 및 ORP 변화를 살펴보았다. 마이크로버블에 의한 폭기조 내 교반 및 산소전달 능력을 확인한 결과, 폭기조 횡(橫)방향으로 마이크로버블 공급위치에 따라 폭기조 내액의 순환으로 인하여 단일반응조 내에서 측정위치별 DO 농도가 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한, 마이크로버블 공급위치에 따른 교반현상을 파악하고 마이크로버블 공급위치의 적정성을 확인하고자 유체유동해석을 한 결과, 마이크로버블 공급위치가 폭기조 횡(橫)방향으로 1/2지점일 경우, 좌측면에서 공급될 때보다 폭기조 내부의 교반이 잘 이루어져 사영역이 적게 발생하는 것을 확인되었다. 실험 및 유체유동해석 결과를 바탕으로 마이크로버블 공급위치에 따라 단일반응조에서 DO 농도를 변화시켜 격벽이 없는 영역분리가 가능하므로 혐기, 무산소, 호기를 한 공간에서 운영할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 마이크로버블을 공급했을 경우, 산기관을 사용할 때와는 다르게 MLSS가 부상농축되는 고액분리 현상이 발생하였는데 마이크로버블이 생물학적 처리를 위하여 부상의 목적이 아닌, MLSS의 혼합과 적절한 DO 농도 유지를 목적으로 사용되기 위해서는 폐수 종류에 따른 적절한 크기의 버블선택이 중요함을 확인할 수 있었다.

Abstract This study examined the DO concentration distribution and ORP distribution using microbubbles on pilot-scale aeration tanks. As a result of MLSS mixing and oxygen transfer phenomenon using microbubbles, different DO concentrations were observed depending on the circulation of the liquid with the microbubble supply location on the lateral of an aeration tank. The simulation results of CFD (computational fluid dynamics) program showed that MLSS mixed with a microbubble supply in the middle the reactor is much better than on the left side of the reactor. A single reactor containing an anaerobic, anoxic, and aerobic zone, was evaluated without partition according to the location of the microbubble supply based on the experiments and CFD analysis. MLSS was separated into solid-liquid by the microbubble supply in the aeration tank. Consequently, selecting the appropriate microbubble size is important for MLSS mixing and was maintained at the proper DO concentration for biological treatment.

Keywords : Aerator, Dissolved oxygen(DO), Microbubble, Sewage treatment, Single reactor

1. 서론

국내 가동 중인 대부분의 하수처리장은 표준 활성슬러지 공법이나 그 변법들로 이루어져 있고, 이러한 공법

들의 유기물 및 부유물질 제거율은 약 90% 정도인 반면, 질소제거 효율은 미흡한 실정이다[1]. 질산화 및 탈질 과정은 각각 호기성 상태와 무산소 상태에서 이루어지기 때문에 완전한 질소제거를 위해서는 호기성 반응조와 무

이 논문은 인천대학교 2014년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Jin-han Kim(Incheon National University)

Tel: +82-32-835-8745 email: jinhan@inu.ac.kr

Received March 8, 2016

Revised (1st April 21, 2016, 2nd May 4, 2016)

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

산소 반응조를 분리하여 설치하는 공간 분할 공법(A₂O, Bardenpho 공법 등)이나 시간에 따라 반응조 내의 조건을 호기성 조건과 무산소 조건으로 변환시켜 운영하는 시간 분할 공법(SBR, 간헐폭기공법 등)이 적용[2]되었으나 소요부지 면적이 크고 하수처리장 전체 운영비용 중 전력비가 약 40%를 차지할 정도로 전력비용 중 송풍기에 의한 전력비용이 적지 않은 부분을 차지[3]하는 실정을 고려해 볼 때, 반응조 내에서 질산화와 탈질을 동시에 유도하며, 송풍기 사용에 따른 전력비를 절감할 수 있는 컴팩트한 시스템 개발이 필요하다. 단일반응조 구현을 위해 개발된 KNCL(kist nutrient compact reactor)[4]은 수직형태의 반응조로 반응조 중간에서 공기를 공급하고 상부는 호기조, 하부는 혐기조와 무산소조, 침전조로 구성되어 있다. Park 등[5]은 MBR반응조 내 송풍기를 이용하여 단계적으로 용존산소 농도를 변화하였고, Kim[6]은 반응조 중간에 생물막을 형성시키고 하수를 간헐 유입시키면서 상부 포기에 의해 용존산소가 반응조 하부로 확산되는 것을 차단하여 반응조 하부를 무산소 영역, 상부는 호기·혐기조를 이루어 질산화와 탈질을 동시에 유도하였다. 기존 기술들은 대부분 송풍기를 이용한 공기 공급방식으로 마이크로버블을 이용한 공급방식에 대한 연구를 찾아보기는 어려운 상태이다.

생물학적 처리공정에 있어 반응조 내 질산화와 탈질을 동시에 유도하기 위하여 적절한 용존산소 농도 유지가 필수적인데, DO 농도가 1.0 mg/L 이하로 충분히 낮으면 탈질은 물론 질산화 및 BOD 산화와 같은 호기성 반응도 동시에 일어날 수 있다[7]. Münch 등[8]은 활성슬러지 반응조 내 용존산소 농도 3.0 mg/L 이상의 호기 조건에서 25% 정도의 탈질을 보였으며, Chen 등[9]은 용존산소 농도 1.2 mg/L에서 유기물 및 총질소가 각각 96% 및 90% 제거된 것으로 보고하였다. 질산화와 탈질을 동시에 수행하기 위해서는 DO 농도를 질산화와 탈질에 영향을 미치지 않는 적절한 농도로 유지하는 것이 가장 중요하며, Pochana와 Keller[10]은 질산화와 탈질반응이 동시에 일어나기 위해서 최적의 용존산소 농도는 0.5 mg/L라고 하였다.

질소제거에 미치는 영향인자는 질산화와 탈질에 미치는 인자를 구분하여 분석함으로써 평가할 수 있다[11]. DO(dissolved oxygen) 농도는 질소제거의 중요한 인자로서 평가되고 있다. 즉, 질산화 과정에서의 DO 농도는 전자수용체로서 충분한 질산화를 위해서는 폭기조의

DO 농도가 약 2.0 mg/L 이상을 유지해야 되며, 반면에 탈질 단계에서는 DO 농도가 0.3 mg/L 이상이면 탈질반응이 저해되는 것으로 알려져 있다[12].

한편, ORP(oxidation reduction potential)는 DO meter 측정한계 이하의 상태를 평가하는 데 보조적인 기능으로 쓰이며 호기, 무산소, 혐기의 슬러지 상태를 표현하는데 유용한 방법으로 생물학적 처리공정의 운전 및 모니터링 인자로 활용이 가능하다[13-15]. 보통 mV 단위로 측정되는 ORP는 양(+)의 값을 나타내면 유기물이 미생물에 의하여 CO₂와 H₂O로 분해되는 산화반응상태를 나타내며, 낮은 음(-)의 값을 나타내면 NO₂⁻, NO₃⁻ 등이 전자수용체로 작용하는 환원반응에 있다는 것을 의미한다[16].

마이크로버블을 수처리에 적용할 경우 가장 큰 특징은 일반버블의 크기가 1 ~ 3 mm 정도인 것에 비하여 마이크로버블은 크기가 수백 μm[17] 또는 1 ~ 100 μm[18], 100 μm 이하[19, 20]로 크기가 작아 부력에 대한 저항효과가 커지기 때문에 부상속도가 느리며 대전작용으로 인한 floc 부착효과가 크므로 높은 수면적 부하를 가지고 있는 것으로 보고되어 있다[21].

본 연구에서는 폭기조 내에 공기를 마이크로화 시켜 공급하면서 폭기조 내 DO 농도 및 ORP 변화를 살펴봄으로써 마이크로버블에 의한 폭기조 내 교반 및 산소전달 능력을 확인하고 혐기, 무산소, 호기의 구현이 분리된 반응조 대신 격벽이 없는 단일반응조에서의 영역분리 가능성을 확인해 보고자 하였다. 또한, 마이크로버블 공급 위치에 따른 교반현상을 파악하기 위하여 유체유동해석을 실시하였다.

2. 본론

2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 폭기조는 인천시 G사업소 하수처리시설내 설치되어 동 사업소의 1차 침전지 유출수를 대상으로 운전하였다. 폭기조는 pilot-scale 규모로 유효면적은 3.4 m(W 1.97 m × H 2.15 m × D 0.8 m)이었으며 실험은 회분식으로 진행하였다.

2.2 실험 방법

폭기조 내의 DO 농도 및 ORP를 측정하여 폭기조 내의 영역분리 현상을 관찰하였다. MLSS 농도를 조정하

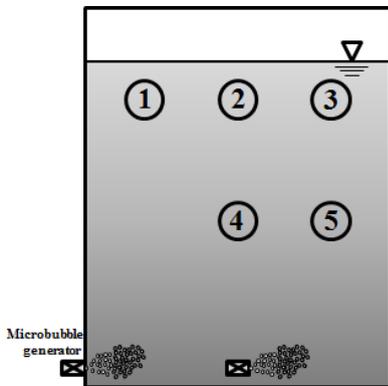


Fig. 1. Aeration tank and measurement location

Table 1. List of measurement & measurement equipment

	①	②	③	④	⑤
Items	DO ORP	DO	DO ORP	DO	DO
Measurement equipment	HQ40d, Hach, USA * DO measurement range : 0.01 to 20 mg/L * ORP measurement range : -1,500 to 1,500 mV				

기 위하여 G사업소 하수처리시설 2차침전지의 잉여슬러지를 주입하였다.

DO 농도 및 ORP는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 수면에서 10 cm 아래 3개 지점(①, ②, ③)과 수면에서 1 m 아래(폭기조 유효깊이의 중간지점) 2개 지점(④, ⑤)에서 측정하였다. Table 1에 지점별 측정항목 및 측정장비에 대해 요약하였다.

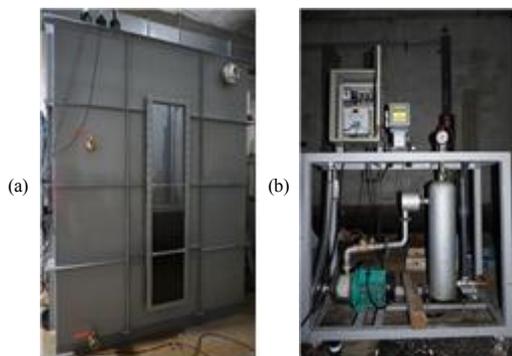


Fig. 2. Photograph of experimental equipment
(a) Aeration tank (b) Microbubble generator

Table 2. Operation condition

Items		Condition
Initial DO concentration(mg/L)		3
Initial ORP(mV)		212
MLSS(mg/L)		1,000, 2,400, 4,400
Location of microbubble generator		Bottom of reactor (left, middle)
Temperature(℃)		26±2
Microbubble generator	Pressure(bar)	3.5
	Circulation flow rate(m ³ /h)	2.7
	Air flow rate (LPM)	5
	Bubble size D ₅₀ (μm)	49.40 ~ 54.98

본 실험에 사용된 폭기조 및 가압식 마이크로버블 발생장치를 Fig. 2에 나타내었다. 마이크로버블의 안정적인 생성을 위하여 충돌판 노즐을 사용하였으며, Table 2에 실험조건을 정리하였다.

마이크로버블 공급 전 폭기조 바닥에 병렬로 연결되어 있는 4개의 멤브레인 산기장치(SH 550, 삼환기공)를 이용하여 폭기조 내의 MLSS를 완전 혼합하고 DO 농도를 3.0 mg/L로 유지시킨 후 실험을 수행하였다. 간헐포기 방식은 질산화 및 탈질과정에서 질소 처리효율의 극대화를 유도하고, 포기시간의 단축으로 인하여 에너지를 크게 절감시킬 수 있다고 알려져 있다[22, 23]. 따라서, 본 실험에서는 마이크로버블 공급 6분, 휴지시간 6분을 두어 폭기조 내의 현상을 관찰하였다.

본 실험에 사용된 반응조는 steel로 제작된 pilot-scale 이므로 아크릴 반응조와는 달리 반응조 내부를 관찰 할 수 없었다. 따라서, 유체유동해석을 통하여 마이크로버블 공급위치에 따른 교반현상을 파악하고 마이크로버블 공급위치의 적정성을 확인하고자 하였다. 반응조 내에서 발생하는 수리학적 현상에 대한 모델링을 효과적으로 수행하기 위해서 계산격자 구성이 용이하고 수행시간이 비교적 짧은 workstation용 프로그램인 fluent v6.3.26을 선정하였다. 수치기법은 유한체적법이며, 비구조적 격자망을 사용하였다. Table 3에 유체유동해석을 위한 적용 모델에 대해 제시하였으며, Table 4에 적용조건을 정리하여 나타내었다.

Table 3. Application model

Items		Condition
Application Model	Turbulent Model	<ul style="list-style-type: none"> • K-ε model • Steady State
	Multiphase	<ul style="list-style-type: none"> • Phase: 2(Water, air), →Continuous water inflow into reactor →Air supply at the bottom of reactor →Suppose no chemical reaction between two phase
Material property	Water (Except TS)	<ul style="list-style-type: none"> • Density : 998 kg/m³ • Viscosity : 0.01006 kg/m·s • Cp : 4,182 J/kg·k • Thermal Conductivity : 0.6 w/m·k
Operating Condition		<ul style="list-style-type: none"> • Gravity : 9.81 m/s² • Temperature : 300 K • Standard atmospheric pressure

Table 4. Application condition of model

Items		Case
Boundary condition	Inlet (Water)	<ul style="list-style-type: none"> • Velocity-Inlet : 0.425 m³/hr • Second Phase VF : 0 • Temperature : 300 K
	Inlet (Circulation)	<ul style="list-style-type: none"> • Velocity-Inlet : 0.425 m³/hr • Second Phase VF : 0 • Temperature : 300 K
	Wall	<ul style="list-style-type: none"> • No Slip Shear Condition • Surface of water : Free Slip Condition
	Outlet	<ul style="list-style-type: none"> • Outlet : Pressure Outlet • Surface : Air Trap Mode
Energy	Convection	<ul style="list-style-type: none"> • Subject : NA • Heat insulation material : NA • Wall Thickness : NA • Thermal Conductivity : NA
	Heat Source	<ul style="list-style-type: none"> • Chamber Temperature : 300 K

3. 결과 및 고찰

3.1 마이크로버블 공급위치 및 MLSS 농도에 따른 DO 농도 변화

3.1.1 마이크로버블 공급위치-폭기조 좌측

마이크로버블을 폭기조 좌측에서 공급하는 경우, Fig. 3에 제시한 바와 같이 ①지점을 제외한 ②, ③, ④, ⑤번 지점에서 지속적인 DO 농도 감소현상을 보였다.

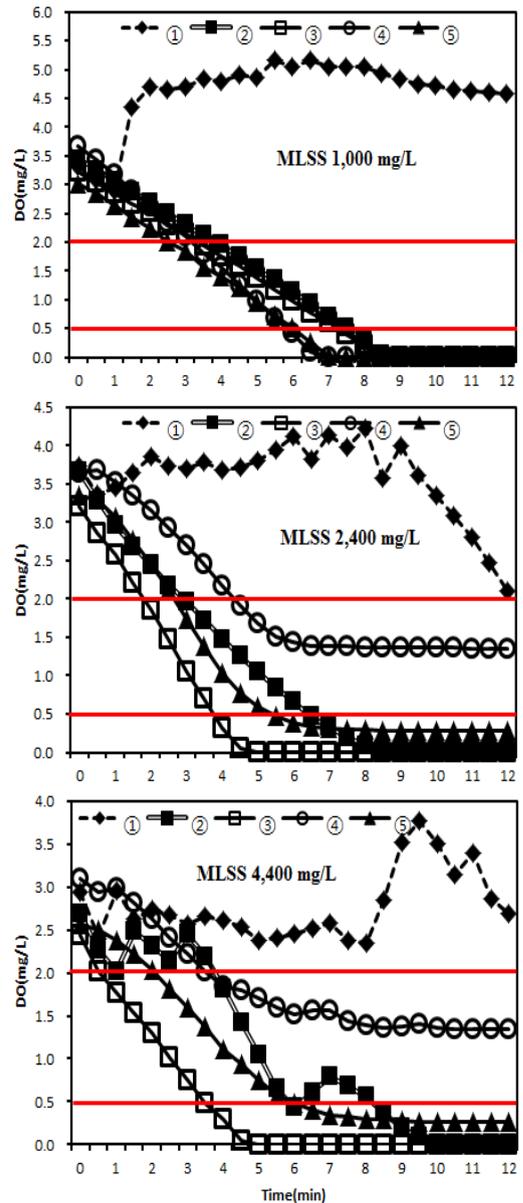


Fig. 3. Variation of dissolved oxygen concentration (Microbubble supply on the left side of the reactor)

생물반응조를 운영함에 있어 호기조건의 DO 농도를 2.0 ~ 3.0 mg/L, 무산소 조건의 DO 농도를 0.5 mg/L 이하로 보았을 때, ①지점은 호기, ②, ③, ④, ⑤지점은 무산소 및 혐기상태로 변화되는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상은 MLSS 농도가 높아질수록 뚜렷한 차이를 나타내었다.

3.1.2 마이크로버블 공급위치-폭기조 중앙

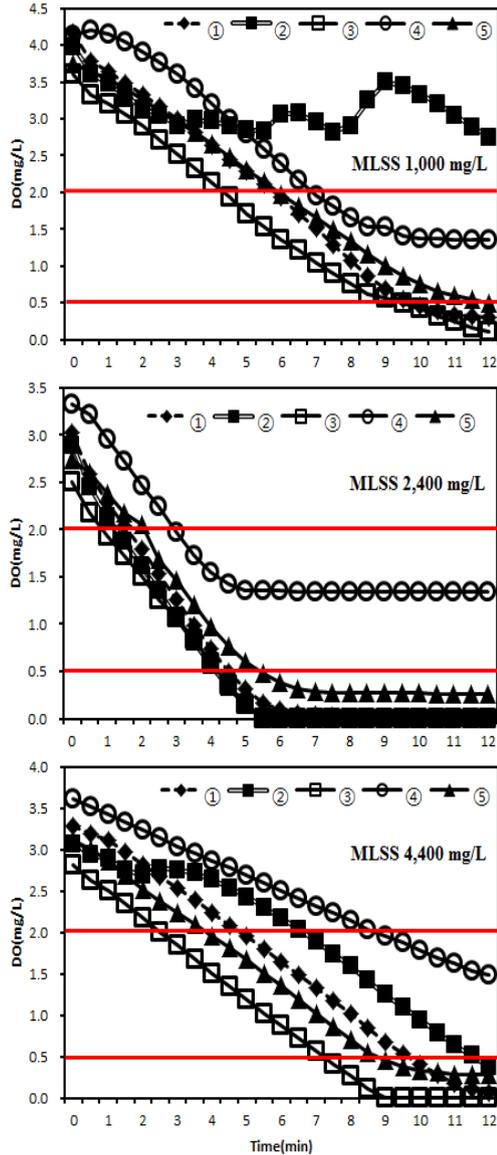


Fig. 4. Variation of dissolved oxygen concentration (Microbubble supply in the middle the reactor)

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 마이크로버블을 폭기조 1/2지점에서 공급하였을 경우, MLSS 1,000 mg/L의 조건에서는 ②지점을 제외한 ①, ③, ④, ⑤지점에서 지속적인 DO 농도 감소현상을 보였는데, DO 농도 측정결과 ②지점은 호기, ①, ③, ④, ⑤지점은 무산소상태를 거쳐 혐기상태로 변화되는 것을 확인 할 수 있었다. MLSS 2,400 mg/L의 조건에서는 ④지점을 제외한 모든 지점에

서 DO 농도의 감소가 나타났고, MLSS 4,400 mg/L의 조건에서는 마이크로버블 공급시간이 지속될수록 모든 지점에서 DO 농도 감소현상이 나타났다.

MLSS의 농도가 높아짐에 따라 마이크로버블이 공급되는 위치의 주변지역에 국한되어 DO 농도가 증가되었는데, 높은 MLSS 농도에 의한 flocc의 무게와 항력, 증력에 의한 방해작용으로 인해 마이크로버블의 산소 전달 능력이 감소된 것으로 사료된다.

3.2 마이크로버블 공급위치 및 MLSS 농도에 따른 ORP 변화

기존 연구결과에 제시된 바와 같이 질산화 및 탈질이 안정적으로 이루어지기 위한 ORP 조건은 혐기조 -150 ~ -350 mV, 무산소조 50 ~ -150 mV, 호기조 100 ~ 300 mV로 알려져 있다.

본 실험에서 ORP 측정은 ①, ③지점에서만 이루어졌으므로 두 지점을 대상으로 비교하였다. 실험결과 마이크로버블을 폭기조 좌측에서 공급했을 경우, 호기성 영역이라고 판단된 ①지점의 ORP는 MLSS 1,000 mg/L, 2,400 mg/L, 4,400 mg/L의 조건에서 각각 166 ~ 169 mV, 198 ~ 205 mV, 213 ~ 220 mV이었다. 반면, 무산소 범위의 DO 농도 값이 측정된 ③지점의 ORP 측정결과 MLSS 1,000 mg/L에서 128 ~ 136 mV, MLSS 2,400 mg/L에서 192 ~ 202 mV, MLSS 4,400 mg/L에서 197 ~ 215 mV로 확인되었다. 비록, ③지점에서 원활한 산소공급이 이루어지지 않아 급격한 DO 농도 감소를 보였지만, 내액 속에 잔존해있는 마이크로버블이 분산되어 유체의 흐름에 따라 느린속도로 ③지점으로 이동됨에 따라 유기물의 분해가 서서히 진행되었기 때문에 ORP의 감소 역시 느린속도로 나타난 것으로 사료된다.

마이크로버블을 폭기조 1/2지점에서 공급했을 경우, MLSS 1,000 mg/L의 조건에서 ①지점 및 ③지점의 ORP는 각각 135 ~ 155 mV, 82 ~ 91 mV이었고, MLSS 2,400 mg/L의 조건에서 ①지점 및 ③지점의 ORP는 각각 134 ~ 180 mV, 184 ~ 188 mV이었다. MLSS 4,400 mg/L의 조건에서 ①지점 및 ③지점의 ORP는 각각 212 ~ 220 mV, 197 ~ 215 mV이었다. 명확한 분석은 어렵지만 내액 속에 존재하고 있던 마이크로버블이 소멸되지 않고 분산되면서 용해되게 되고 용해된 산소를 이용하여 미생물이 유기물을 산화시키게 되므로 ORP의 값이 양의 값으로 측정된 것으로 생각된다.

3.3 마이크로버블 공급위치에 따른 내부 교반 현상 비교-유체유동해석

Fig. 5에 폭기조 좌측 및 1/2지점에서 마이크로버블을 공급하였을 경우 내부 교반 현상에 대하여 유체유동해석으로 나타내었다. 폭기조 좌측에서 마이크로버블을 공급하였을 경우 유입수에 의한 선회류 및 난류 발생이 없으며 내부 순환수 및 마이크로버블 교반현상이 주를 이루고 있는 것을 확인할 수 있었다. 1/2지점에서 마이크로버블을 공급하였을 경우 좌측에서 공급할 때에 비하여 폭기조 내부의 사영역 감소를 확인하였고 내부 순환수 및 마이크로버블에 의한 교반현상이 좌측에 비해 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 마이크로버블에 의한 슬러지 부상

Fig. 6에 산기관을 사용했을 경우와 마이크로버블을 사용했을 경우의 수면층을 비교하였다. 산기관을 사용할 경우 MLSS의 혼합이 잘 이루어지지만, 마이크로버블을 이용하였을 경우 Fig. 7에 나타난 바와 같이 floc이 마이크로버블과 함께 부상되어 MLSS가 부상농축 되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 마이크로버블이 생물학적 처리를 위하여 부상의 목적이 아닌, MLSS의 혼합과 적절한 DO 농도 유지를 목적으로 사용되기 위해서는 폐수 종류에 따른 적절한 크기의 버블선택이 중요할 것으로 판단된다.

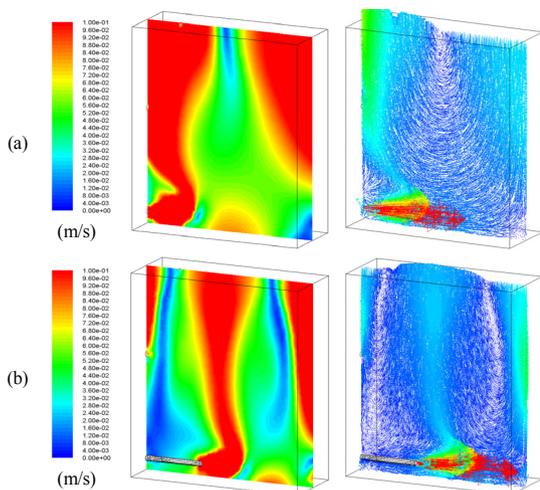


Fig. 5. Fluid flow by microbubble-inlet position (a) left of reactor (b) middle of reactor



Fig. 6. Comparison of surface in aeration tank(sludge flotation) (a) Air diffuser (b) Microbubble generator

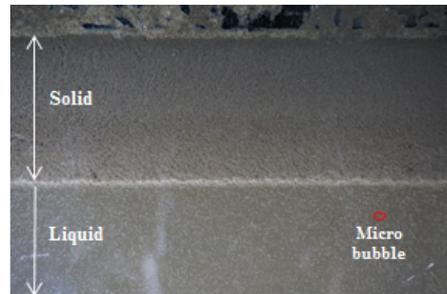


Fig. 7. Solid/liquid separation in aeration tank by flotation with microbubble

4. 결론

본 연구는 생물학적 처리에 있어 마이크로버블을 이용하여 단일반응조 내에서의 DO 농도 및 ORP 변화를 살펴보고, 질산화 및 탈질이 가능한 단일반응조 설계 가능성을 검토하였다.

Pilot-scale의 실험 및 유체역학적 전산해석을 병행하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 마이크로버블 발생장치를 작동시킨 후 폭기조 내의 DO 농도 측정결과 측정위치별로 DO 농도가 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 즉, 폭기조 좌측 지점에서

마이크로버블을 공급할 경우 마이크로버블 공급 전단부에서는 호기성 상태인 DO 농도 2.0 ~ 3.0 mg/L 를 유지할 수 있지만 후단부에서는 마이크로버블 공급에 의한 교반력이 떨어져 MLSS 혼합이 균일하게 일어나지 않아 정체구역이 발생하였으며, 정체구역 안에서 미생물에 의해 DO가 소모되어 자연스럽게 DO 농도 0.5 mg/L 이하의 무산소 및 혐기성 상태가 유지되었다.

폭기조는 floc 자체의 중력과 마이크로버블의 공급위치에 따라 수직, 수평적으로 혐기, 무산소, 호기 상태가 형성되며 슬러지는 부상하여 고액분리층을 형성하게 되었다. 따라서 폭기조 내액의 순환으로 단일반응조 내에서 DO 농도의 조절 가능성을 확인할 수 있었고, DO 농도를 변화시켜 격벽이 없는 영역분리가 가능하므로 혐기, 무산소, 호기를 한 공간에서 운영할 수 있는 격벽이 없는 새로운 형태의 질소제거 시스템을 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 마이크로버블이 생물학적 처리를 위하여 부상의 목적이 아닌, MLSS의 혼합과 적절한 DO 농도 유지를 목적으로 사용되기 위해서는 폐수 종류에 따른 적절한 크기의 버블선택이 중요하다.

3. 유체유동해석 결과 마이크로버블 공급위치가 폭기조 횡(橫)방향으로 1/2지점일 경우, 좌측면에서 공급될 때보다 폭기조 내부의 교반이 잘 이루어져 사영역이 적게 발생하는 것이 확인되었다. 반면, 마이크로버블을 발생시켜 공급위치에 따른 폭기조 내 산소전달 능력을 확인한 결과, 좌측면에서 공급할 때 혐기, 무산소, 호기의 영역이 확실하게 분리되었다. 따라서, 수처리 목적에 따라 폭기조 내의 균질한 MLSS 혼합 및 DO 농도의 안정적 분포를 위해서는 마이크로버블 발생장치의 위치선정 및 배열방식이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

References

- [1] J. I. Park, T. J. Lee, "A study of the simultaneous nitrification and denitrification on a single bioreactor", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol.29, No.2, pp.220-228, 2007.
- [2] M. S. Choi, T. J. Lee, "Nitrogen Removals according to Aeration/Non-aeration Periods in the Intermittent Aeration Reactor and Analysis of Microbial Community", Environmental Engineers Research, Vol.36, No.1, pp.42-48, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4491/ksee.2014.36.1.42>
- [3] M. H. Kim, S. H. Ji, J. H. Jang, "A Study on Energy Saving Effect from Automatic Control of Air Flowrate and Estimation of Optimal DO Concentration in Oxidative Reactor of Wastewater Treatment Plant", Journal of Energy Engineering, Vol.23, No.2, pp.49-56, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5855/ENERGY.2014.23.2.049>
- [4] Y. D. Lee, Y. S. Choi, E. B. Shin, J. U. Lee, "A New Approach to Biological Process for Nitrogen Removal", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol.17, No.4, pp.387-397, 1995.
- [5] N. B. Park, W. Y. Choi, A. H. Y, H. B. Jun, "Effects of DO concentration on Simultaneous Nitrification and Denitrification(SND) in a Membrane Bioreactor(MBR)", Korean Journal of Environmental Agriculture, Vol.28, No.4, pp.371-377, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2009.28.4.371>
- [6] H. H. Kim, A Study on Sewage Treatment Efficiency of each Operating Condition by APB-SBR, Master Thesis, Chonnam National University, 2015.
- [7] B. E. Rittman, P. L. McCarty, Environmental Biotechnology : Principal and Applications, McGraw-Hill, 2001.
- [8] E. V. Münch, P. Lant, J. Keller, "Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors", Water Research, Vol.30, No.2, pp.277-284, 1996.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00174-3](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(95)00174-3)
- [9] Z. Chen, D. Hu, N. Ren, Z. P. Zhang, "Simultaneous removal of organic substances and nitrogen in pilot-scale submerged membrane bioreactors treating digested traditional Chinese medicine wastewater", International Biodeterioration & Biodegradation, Vol.62, No.3, pp.250-256, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.01.010>
- [10] K. Pochana, J. Keller, "Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification(SND)", Water Science and Technology, Vol.39, No.6, pp.61-68, 1999.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00123-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00123-7)
- [11] Y. D. Lee, Y. S. Choi, H. S. Yoon, S. W. Hong, B. H. Joo, "Factors affecting the performance of nitrogen removal in a single sludge reactor : Pilot-scale experience", Journal of Korean Society on Water Environment, Vol.16, No.3, pp.1229-1414, 2000.
- [12] C. R. Burdick, D. R. Reffling, H. D. Stensel, "Advanced biological treatment to achieve nutrient removal", Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 54, No.7, pp.1078-1086, 1982.
- [13] P. Tanwar, T. Nandy, P. Ukey, P. Manekar, "Correlating on-line monitoring parameters, pH, DO and ORP with nutrient removal in an intermittent cyclic process bioreactor system", Bioresource Technology, Vol.99, pp.7630-7635, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.004>
- [14] F. A. Koch, W. K. Oldham, "Oxidation-reduction potential-a tool for monitoring, control and optimization for biological nutrient removal system", Water Science & Technology, Vol.17, pp.259-281, 1985.
- [15] J. Charpentier, H. Godart, G. Martin, Y. Mogno, "Oxidation-reduction potential(ORP) regulation as a way to optimize aeration and C, N and P removal:

Experimental basis and various full-scale examples”, Water Pollution Research and Control Brighton, pp.1209-1223, 1989.

- [16] E. Paul, S. Plisson-Saune, M. Mauret, J. Cantet, “Process state evaluation of alternating oxic-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO”, Water Science and Technology, Vol.38, No.3, pp.299-306, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00469-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00469-7)
- [17] A. Kawaraha, M. Sadatomi, F. Matsuyama, “Prediction of microbubble dissolution characteristics in water and sea water”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.33, No.5, pp.883-894, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.03.004>
- [18] N. Kurup, P. Naik, “Microbubbles: a novel delivery system”, Asian Journal of Pharmaceutical Research and Health Care, Vol.2, No.3, pp.228-234, 2010.
- [19] K. Tabei, S. Haruyamu, S. Yamaguchi, H. Shirai, F. Takakusagi, “Study of microbubble generation by swirl jet”, Journal of Environment and Engineering, Vol.2, No.1, pp.172-182, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/jee.2.172>
- [20] S. B. Margery, The American Heritage Dictionary of English Language, 4th ed., Houghton Mifflin Company, Boston, USA, 2000.
- [21] R. Parmar, S. K. Majumder, “Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification-A state-of-the-art report”, Chemical Engineering and Processing, Vol.64, pp.79-97, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2012.12.002>
- [22] J. W. Lim, P. E. Lim, C. E. Seng, “Enhancement of nitrogen removal in moving bed sequencing batch reactor with intermittent aeration during REACT period”, Chemical Engineering Journal, Vol.197, pp.199-203, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.036>
- [23] R. B. Moura, M. H. R. Z. Damianovic, E. Foresti, “Nitrogen and carbon removal from synthetic wastewater in a vertical structured-bed reactor under intermittent aeration”, Journal of Environmental Management, Vol.98, pp.163-167, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.009>

임 지 영(Ji-Young Lim)

[준회원]



- 2015년 2월 : 인천대학교 대학원 건설환경공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 대학원 건설환경공학과 (박사과정)

<관심분야>
물환경, 환경에너지

김 현 식(Hyun-Sik Kim)

[준회원]



- 2016년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 대학원 건설환경공학과 (석사과정)

<관심분야>
물환경, 환경에너지

박 대 석(Dae-Seok Park)

[준회원]



- 2014년 2월 : 인천대학교 대학원 건설환경공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 대학원 건설환경공학과 (박사과정)

<관심분야>
물환경, 환경에너지

조 영 군(Young-Gun Cho)

[정회원]



- 2004년 8월 : 인하대학교 공학대학원 환경공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 대학원 건설환경공학과 (박사과정)

<관심분야>
하 · 폐수처리, 환경에너지

송 승 준(Seung-Jun Song)

[정회원]



- 2011년 2월 : 인하대학교 공학대학원 환경공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 인천대학교 대학원 건설환경공학과 (박사수료)

<관심분야>
물환경, 환경에너지

박 수 영(Soo-Young Park)

[정회원]



- 1997년 8월 : 인하대학교 대학원 환경공학과 (공학박사)
- 2013년 11월 ~ 현재 : (주)에스비이앤이(전무이사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 건설환경공학부 겸임교수

<관심분야>
물환경, 환경에너지

김 진 한(Jin-Han Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 인하대학교 대학원 화학공학과 (공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1985년 5월 : 한국화학연구원 연구원
- 1985년 9월 ~ 2010년 2월 : 인천전문대학 교수
- 2010년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>
물환경, 환경에너지