Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.25, No.1, pp.41-49, February, 2011

상하수도학회지, 논문
25권 1호, pp.41-49, 2월, 2011

폐색 저감형 산기관의 개발 및 적용성 평가

A study on the Development and Evaluation of Sludge Occlusion Reduced Diffuser

김영훈[1] · 김관엽[2] · 이의종[1] · 남종우[1] · 이창하[1] · 전민정[1] · 김형수[1*]

Kim, Young Hoon[1] · Kim, Kwan Yeop[2] · Lee, Eui Jong[1] · Nam, Jong Woo[1] · Lee, Chang ha[1]
Jeon, Min Jung[1] · Kim, Hyung Soo[1*]

1 성균관대학교 건설환경시스템공학과, 2 포스코건설 녹색환경연구그룹 기술연구소/R&D CENTER

(2010년 10월 20일 접수 ; 2011년 2월 7일 수정 ; 2011년 2월 11일 채택)

Abstract

The diffuser which is conventionally adapted to MBR, has problem that decreasing the cleaning effect of membrane module by inflexible air supply due to the occlusion of sludge from diffuser hole. To solve this problem, diffuser structure of submerged module should be improved to discharge sludge which is flow into the diffuser for prevent occlusion in the diffuser.

In this study, the structure of the diffuser was reformed to open lower part for preclusion the blocking. And the outlet diameter of the diffuser was drawn through the condition for the depth of water and air rate, to prevent air-leak condition of improved diffuser. Moreover, application is evaluated by comparing test with occlusion effect of the conventional and improved diffuser.

From the results, air-water boundary changes are steady with changes of water depth and it shows linear relation about air rate. By using this linear numerical formula, the height of diffuser' s outlet can be decided. Also, it displays that it can prevent the occlusion effect during the comparing test.

Hereafter, if this diffuser is applied to practical MBR process, the occlusion problem of diffuser will be disappeared.

Key words : Diffuser, Diffuser Occlusion, MBR, Air Scrubbing, Physical Cleaning

주제어 : 산기관, 산기관 폐색, MBR, 공기 세정, 물리 세정

1. 서 론

침지형 MBR(Submerged Membrane Bioreactor)공정은 완벽한 고·액 분리가 가능하고 안정된 처리수를 확보할 수 있기 때문에 꾸준히 하수처리에 적용되고 있으며 실적 또한 증가 추세에 있다(신, 2007), (Stephenson et al., 2000). 그러나 이러한 장점에도 불구하고 여과 과정으로 인한 입자성 물질, 미생물 대사산물과 같은 유기물질 등에 의한 막오염 (Membrane fouling)의 발생은 막여과 공정의 성능 유지 및 장기 운전성을 저해하는 제한요소가 되고 있다(김, 2008), (Pierre et al., 2003).

MBR에서 막오염을 제어하기 위해 사용하는 일반적인 방법은 분리막 표면으로 과잉의 공기를 공급하여 발생한 전단력(Shear force)으로 인한 케이크층의 발달을 저해하는 물리세정을 주로 행하게 된다(신, 2007), (P. Le-Clech, et al, 2005), (Lee. J., et al, 2001). 이 때, 공기를 공급하는

* Corresponding author Tel:+82-31-290-7520, Fax:+82-31-290-7549, E-mail: sookim@skku.edu(Kim, H.S.)

산기관의 분출구 내부로 슬러지가 유입되어, 시간이 경과함에 따라 산기관의 내부는 슬러지에 의해 축적되고, 결국 산기관을 막는 원인이 된다. 즉, 기존 산기관의 에어분출구가 위를 향하는 수직 절곡된 타입이기 때문에, 슬러지가 산기관의 에어 분출구로 쉽게 유입되어 산기관을 막게 되고, 결국 원활한 에어 공급이 이루어지지 않아 분리막 모듈의 세정 효과가 크게 감소하는 문제점이 있다(S. P. Hong et al., 2002). 이에, 슬러지의 유입 및 축적으로 막힌 산기관을 주기적으로 물로 세척을 하거나 제거를 위한 별도의 작업이 필요하게 되고, 결과적으로 침지형 MBR 공정의 운전 및 유지관리 비용이 상승하는 요인으로 작용한다(Chang, I.-S., et al, 1999).

이러한 문제점을 해결하기 위하여, 침지형 모듈의 산기관 구조를 슬러지가 유입되었을 때 슬러지가 다시 배출될 수 있는 구조로 개선하여, 미생물에 의하여 산기관이 막히는 현상을 방지하여야 공기의 공급을 항상 원활하게 이룰 수 있어 기존에 별도로 진행되던 산기관 세척 작업을 배제하여 비용을 절감시킬 수 있을 것이다.

본 연구에서는 에어 분출구의 하단에 슬러지물의 배출 통로가 되는 배출구가 소정의 길이로 연장 형성되며, 그 하단부가 개방된 폐색 저감형 산기관으로 구조를 개선하였다. 이렇게 개선된 산기관은 미생물 슬러지가 에어분출구를 통하여 산기관 내로 유입되더라도, 개방된 하단부로 배출되기 때문에 산기관의 내부에 슬러지가 축적되는 것을 원천적으로 차단할 수 있고, 결국 기존의 산기관의 막힘 현상 방지가 용이할 것이다. 따라서 기존에 별도 진행되던 산기관의 세척 작업이 배제되어 비용 또한 절감시킬 수 있게 된다.

일정 압력(수위+⊿P(밀도×중력가속도×⊿h))을 가진 공기는 수위 차에 의한 압력차에 의하여 상부로 분출하게 된다(Whalley, et al, 1987), (Hout et al., 2002). 따라서 이러한 산기관 내의 압력차에 의한 기액 경계면의 높이(△h)보다 산기관의 배출구의 높이(h)가 작다면 공기는 산기관 하부로부터 새어나가게 되어 MBR 내에서의 공기 세정 효과는 미비할 것이다. 공기의 산기관 하부 배출을 방지하기 위해서는 최적의 배출구의 길이 산정이 중요하다. 배출구의 길이는 MBR 침지조의 수위와 공기량의 조건에 따라 결정할 수 있다.

본 연구에서는 개선된 산기관의 최적 배출구 길이를 산정하기 위하여 수심과 공기량 변화에 따른 배출구 내부의 기액 경계 변화 결과로부터 소요 공기량에 대한 적정 배출구의 높이를 도출하고자 하였다. 또한 기존 산기관과 개선된 산기관의 시간에 따른 공기량 변화를 비교하여 폐색 저감형 산기관의 성능을 파악하였다.

2. 실험방법

2.1. 소요 공기량에 대한 적정 배출구 높이 도출

Fig 1.은 일반적인 침지형 MBR 공정에 적용된 폐색 저감을 위한 하단부 개방 산기관의 개략도이다. 침지형 MBR 공정에서의 산기관은 공기 세정을 통한 멤브레인의 막오염 제어를 위하여 침지막의 하단부에 위치한다. 본 연구에서의 산기관은 상단부에 일정 간격으로 산기 구멍(Diffuser Hole)이 뚫려 있으며, 이 산기 구멍으로 멤브레인의 공기 세정을 위한 공기가 배출된다. 산기관의 하단부는 산기관 내로 유입되는 슬러지 배출이 용이하도록 개방되어져 있다. 산기관 하단부가 개방되어 있으므로 폭기를 행하지 않을 시에는 산기관 내는 물로 채워지며, 폭기 진행시 산기관 내로 유입되는 공기의 압력에 의하여 산기관 내에는 공기와 액체가 상존하는 기액 경계면(△h)이 발생한다. 이러한 기액 경계면 높이는 산기관 배출구 높이(h)를 초과하지 말아야 한다.

본 연구에서는 **Fig 2, 3**과 같이 배출구의 높이(h)가 5cm, 10cm인 하단부 개방형 산기관을 사용하였으며 산기관의 재원은 **Table 1**에 나타내었다. 산기관은 산기관 내의 기액 경계를 확인 할 수 있도록 투명아크릴로 제작되었으며, 산기관을 침지시킬 조 역시 육안으로 기액 경계를 확인할 수 있게 투명아크릴로 제작하였다.

실험은 우선 수심에 따른 영향을 살펴보기 위하여 20, 35, 50 L/min의 세 가지 공기량 조건에서 수심 변화에 따른 산기관 내부의 기액 경계 높이 변화를 확인하였다. 다음으로는 공기량 변화에 따른 산기관 내부의 기액 경계 높이를 확인하기 위하여 수심을 1.5 m로 고정시킨 후 공기량을 20~70 L/min으로 조건을 변화시키면서 그 영향을 파악하였다.

2.2. 폐색 저감형 산기관의 성능 평가

본 연구에서는 배출구 10cm의 하단부 개방 산기관과 동일한 제원의 기존 산기관을 제작하여 비교실험을 행하였다. 실험은 실제 운영되는 MBR 실험 장치에 배출구 10cm의 산기관과 산기관 하단부가 막혀 있는 기존 산기관을 각각 적용하여 연속 폭기를 행하였으며, 그에 따른 공기량 변화를 관찰하였다. 실험에 사용된 MBR의 평균 MLSS 농도는 10,000~12,000 mg/L로 유지하였으며, 산기관은 MBR조 내 수심 1.5m의 위치에 설치하였다. 연속 폭기 시의 초기 공기량은 50L/min으로 고정하였으며, 산기관에 주입되는 공기량의 정확한 측정을 위하여 각각의 산기관과 블로우에 연결된 공기 배관에 유량계를 부착하여 사용하였다.

상하수도학회지, 논문
25권 1호, pp.41-49, 2월, 2011

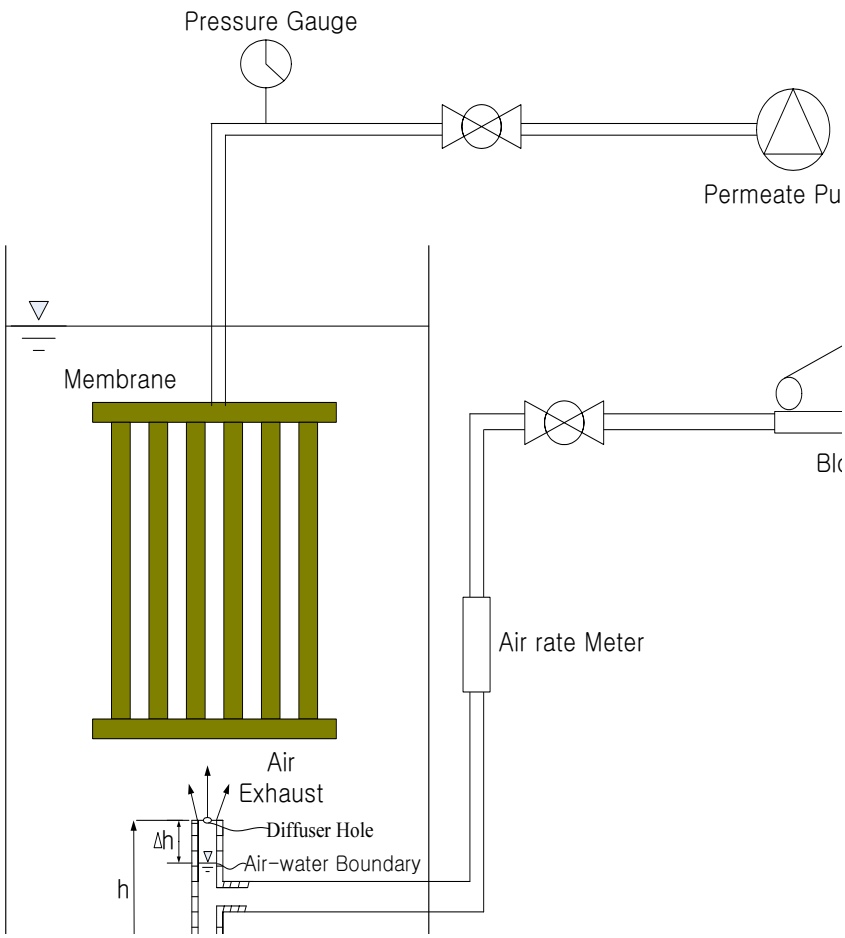

Figure 1. Improved diffuser flow

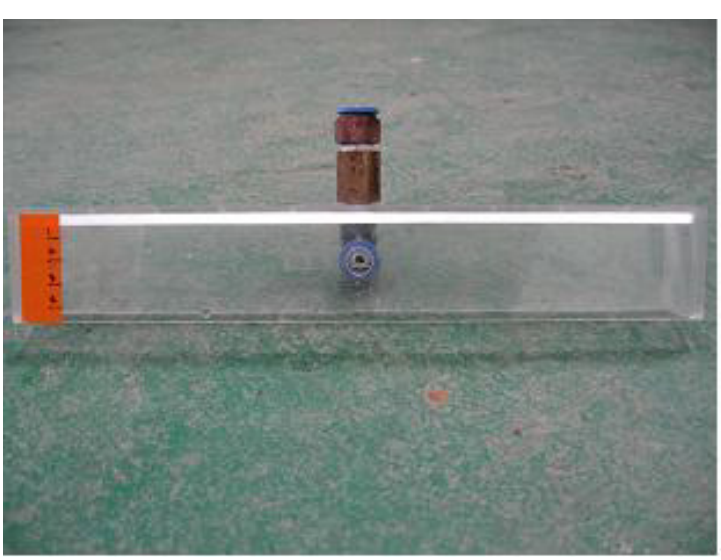

Figure 2. Diffuser with outlet diameter(h) 5cm

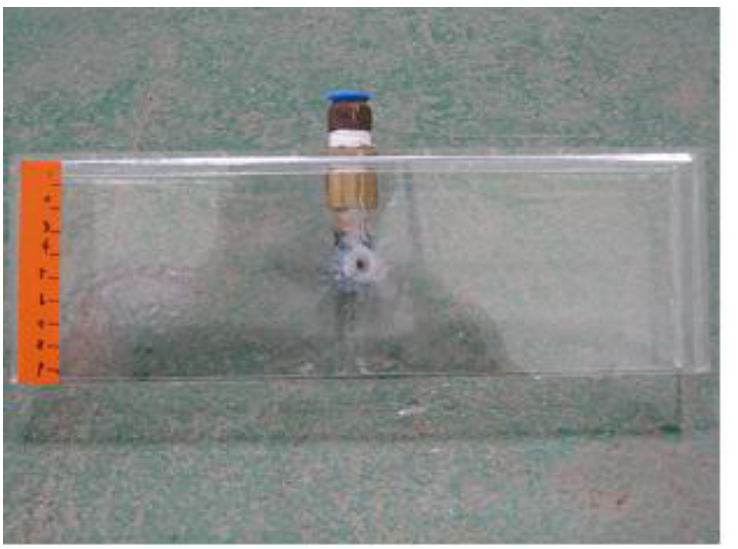

Figure 3. Diffuser with outlet diameter(h) 10cm

Table 1. Specifications of diffuser

Specifications	Diffuser with outlet diameter 5cm	Diffuser with outlet diameter 10cm
Width(mm)	30	30
Length (mm)	300	300
Height (mm)	50	100
Diffuser Hole Size (mm)	1.5(ϕ)	1.5(ϕ)
Interval of Diffuser Hole (mm)	30	30

3. 결과 및 고찰

3.1. 소요 공기량에 대한 적정 배출구 높이 도출

배출구 5cm인 산기관을 적용한 적정 배출구 높이 산정 실험에서 공기량의 변화에 따른 산기관 내의 기액 경계 변화를 확인할 수가 있었다. 초기 공기량 20L/min 주입 시 배출구 상부 1.6cm 높이 지점에 기체와 액체의 경계(Fig 4)면이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이후 공기량이 증가할수록 기액 경계면은 점점 하강하였으며, 공기량이 50L/min 일 때 기액 경계는 5cm인 배출구 바닥보다 낮아져 공기가 배출구의 옆으로 새어 나가는 것을 확인할 수가 있었다(Fig. 5). 공기 세정을 통한 막오염 제어를 주로 행하는 MBR 공정에서는 공기 세정에 소요되는 에너지가 전체 공정의 에너지 소요에 70% 이상의 많은 부분을 차지한다(Bart et al., 2010). 따라서 MBR 공정의 효율적인 공기 세정을 위해서는 산기관 내의 공기가 밖으로 새어나가지 않게 공기량의 변화에 따른 산기관 내부의 기액 경계가 배출구의 높이보다 크지 않도록 소요 공기량에 대한 적정 배출구의 높이를 알아내는 것이 매우 중요하다.

배출구 10cm인 산기관을 적용한 공기량 별 수심에 따른 산기관 내의 기액 경계 변화를 Fig 6에 나타내었다. 수심에 따른 기액 경계 변화는 20L/min에서 1.6cm, 30L/min에서 3.8cm, 40L/min에서 8.5cm로 수심의 깊이 변화와는 상관없이 동일함을 알 수 있었다. 수심의 변화와 관계없이 배출되는 공기량 및 기액 경계가 일정하다는 것은 수심 변화에 따른 수압에 비례하여 동일한 양의 공기를 공급하기 위한 블로우의 공기압이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다. 실험 결과로부터 수심 변화에 따른 산기관 내의 기액 경계 변화는 일정함을 확인할 수 있었으며, 공기량 변화에 따른 기액 경계 변화만이 발생함을 알 수 있었다.

상하수도학회지, 논문
25권 1호, pp.41-49, 2월, 2011

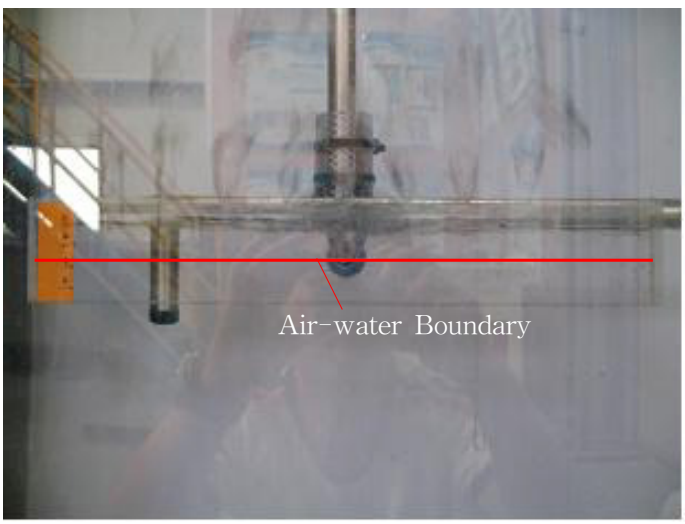

Figure 4. Air-water boundary changes when air rate is 20L/min.

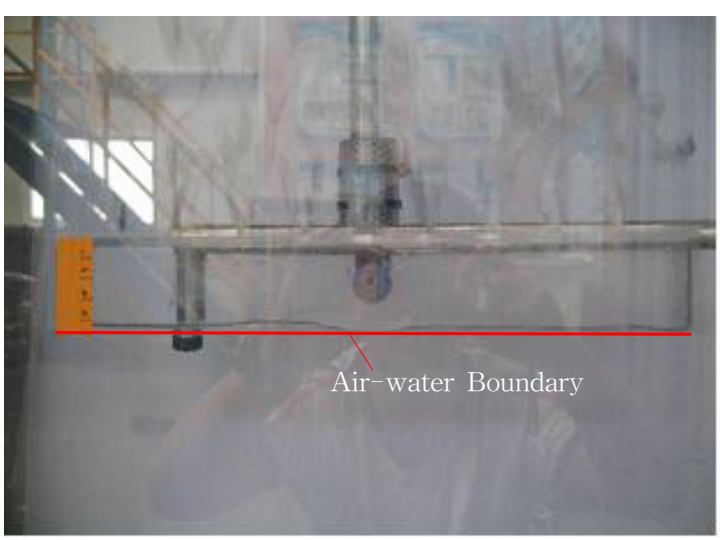

Figure 5. Air-water boundary changes when air rate is 50L/min.

1.5m의 일정한 수심에서의 공기량 변화에 따른 산기관 내의 기액 경계 변화는 **Table 2, 3**과 같다. 배출구가 5cm인 산기관의 경우 산기관내의 기액 경계는 20L/min에서 1.6cm이었으며, 공기량이 증가할수록 증가하여 40L/min에서 4.5cm의 기액 경계를 확인할 수가 있었다. 그 이후, 산기관의 하단부로 공기가 새어나가는 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 배출구가 10cm인 산기관의 경우 기액 경계는 20L/min에서 1.6cm, 30L/min은 3.0cm, 60L/min에서 8.5cm의 기액 경계를 각각 나타내었다. **Fig 7, 8**은 일정한 수심(1.5m)에서의 공기량 변화에 따른 산기관 배출구 내 기액 경계 변화를 도식화 한 것이다. 실험 결과로부터 공기량과 기액 경계와의 다음의 상관관계식을 구할 수 있었다.

i) 배출구 5cm 산기관

$$y = 0.1457x - 1.3286$$

ii) 배출구 10cm 산기관

$$y = 0.1749x - 2.2486$$

여기서, y = 산기관 내 기액경계(cm)
x = 공기량(L/min)

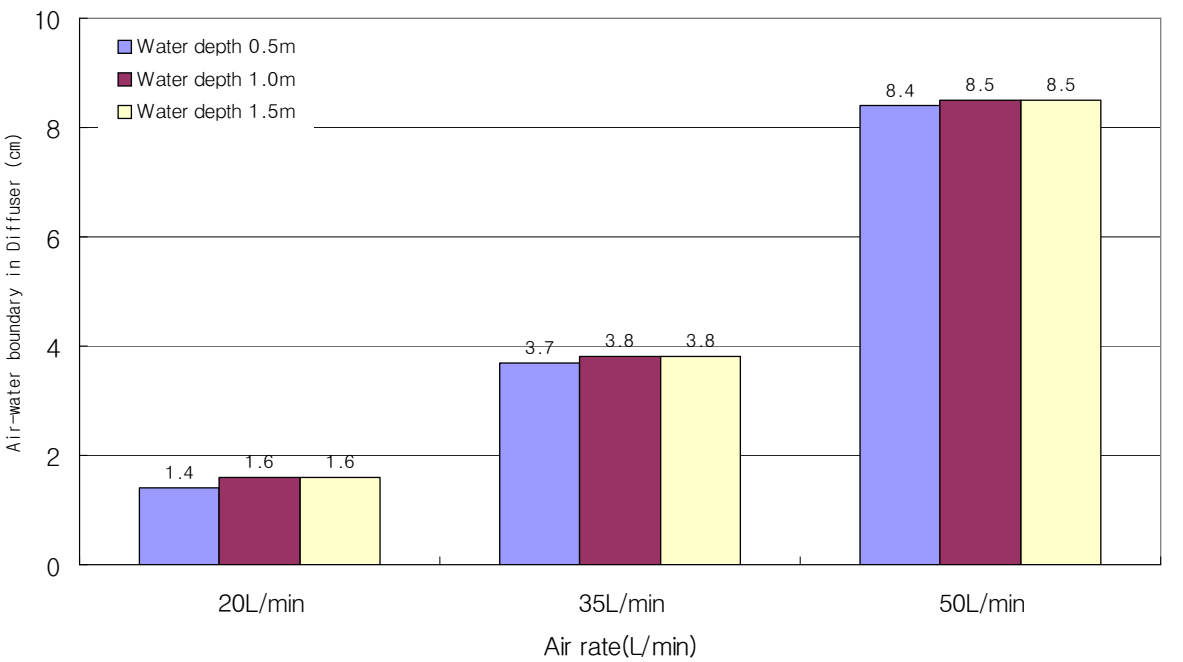

Figure 6. Air-water boundary changes inside diffuser outlet by air rate follow water depth

Table 2. Air-water boundary changes of diffuser with outlet diameter 5cm

Water Depth (m)	Air-Water boundary (cm)	Air rate (L/min)
1.5	1.6	20
1.5	3.0	30
1.5	3.8	35
1.5	over	40

Table 3. Air-water boundary changes of diffuser with outlet diameter 10cm

Water Depth (m)	Air-Water boundary (cm)	Air rate (L/min)
1.5	1.5	20
1.5	3.0	30
1.5	3.7	35
1.5	4.5	40
1.5	6.4	50
1.5	8.5	60

위의 상관관계식 모두 R^2가 0.99 이상의 신뢰도를 가지고 있으며, 선형적임을 알 수 있었다. 따라서 본 관계식을 통하여 소요 공기량에 따른 적정 배출구의 높이를 산출하는데 적용이 가능할 것으로 판단된다. 여기서, 배출구 5cm 산기관과 배출구 10cm 산기관의 상관관계식이 차이가 나는 이유는 Table 2, 3에서 알 수 있듯이 두 산기관의 기액 경계 높이가 공기량 별로 1mm의 미세한 차이에 의한 영향으로, 소요 공기량에 따른 산기관 배출구의 높이를 결정할 때 관계식에 따른 영향은 미비할 것으로 사료된다. 향후 MBR 공정에 본 산기관을 적용한다면 도출된 관계식으로 소요

상하수도학회지, 논문
25권 1호, pp.41-49, 2월, 2011

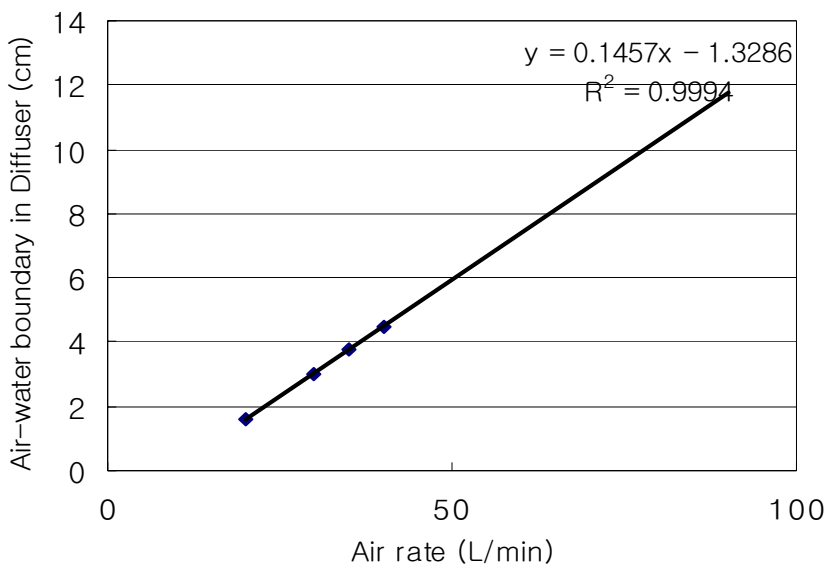

Figure 7. Air-water boundary changes of diffuser with outlet diameter 5cm (at water depth 1.5m)

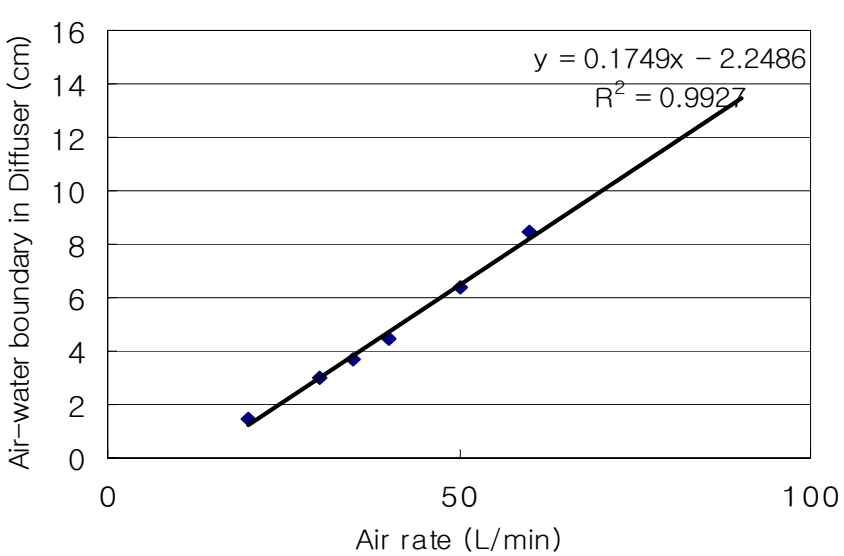

Figure 8. Air-water boundary changes of diffuser with outlet diameter 10cm (at water depth 1.5m)

공기량에 따른 배출구 높이를 산정할 수 있어 산기관 제작에 많은 도움을 줄 것으로 생각되며, MBR조 내에는 고농도(6,000~15,000mg/L)의 미생물이 존재함으로 이를 감안하여 배출구의 높이에 여유를 두어 설계를 하여야 할 것이다.

3.2. 폐색 저감형 산기관의 성능 비교 평가

Fig 9는 시간 경과에 따른 산기관의 공기량 변화에 대한 결과 그래프이다. 기존 산기관과 개선 산기관이 적용된 조 내

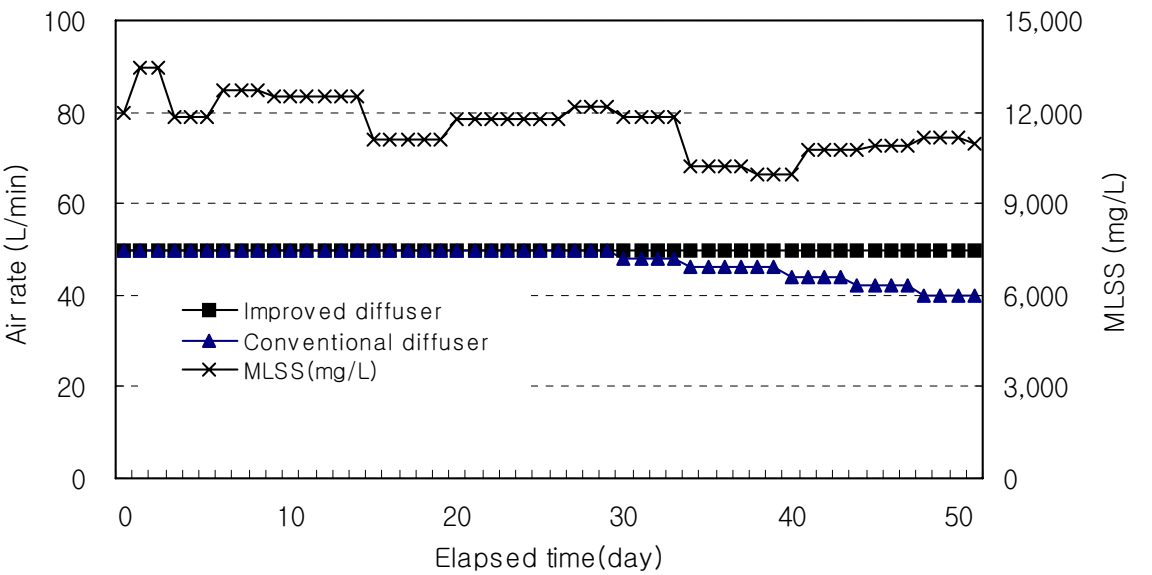

Figure 9. Air rate changes for MBR process

의 MLSS 농도는 10,000~12,000mg/L로 안정적으로 MBR 공정이 운영되고 있음을 간접적으로 판단할 수 있었다.

산기관 비교 실험에서 기존 산기관은 50L/min의 초기 공기량이 30일 가량 지속하다가 31일 이후부터 꾸준히 감소하여 실험 종료 시에는 40 L/min까지 감소하는 것을 확인할 수가 있었다. 이는 MBR 공정에서 공기를 공급하는 산기관의 산기구멍 내부로 유입된 슬러지가 산기관 외부로 빠져나가지 못하고 시간이 경과함에 따라 내부에 슬러지가 축적하게 되고 블로우의 건조된 공기에 의해 슬러지는 건조되며, 이 건조된 슬러지가 산기관 내에서 산기 구멍을 막아 원활한 공기 공급이 이루어지지 않아서이다. 이러한 공기량의 감소는 분리막 모듈의 세정 효과를 감소시켜 막오염을 가속시키며, 화학세정 빈도를 앞당기는 결과를 초래한다. 반면, 개선된 폐색 저감형 산기관의 경우 초기 공기량으로 설정한 50 L/min이 50일 간의 시간이 경과함에도 그대로 유지되는 것을 확인 할 수가 있었다. 이는 기존 산기관과 동일하게 슬러지는 산기구멍 내부로 유입되지만 산기관의 하단부가 개방되어 있으므로 슬러지가 자동적으로 산기관 외부로 방출하기 때문이라고 판단된다.

결과로부터, 개선된 폐색 저감형 산기관은 산기관 내 슬러지 유입으로 인한 산기관의 막힘 현상을 자연스럽게 해결할 수 있어 공기세정을 위한 공기량을 항상 원활하게 제공할 수 있다. 따라서 산기관 막힘으로 인한 공기량 감소로 추가적인 공기 주입이 필요하지 않으며, 막힌 산기관의 세척을 위한 별도의 작업이 필요 없게 되어 MBR공정의 운전 및 유지관리 비용의 상승을 막을 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 MBR 공정에서 산기관의 장기 운전시 슬러지 유입으로 인한 막힘 현상을 해결하기 위하여 하단부를 개방한 폐색 저감형 산기관을 적용하였으며, 이 산기관의 공기가 하단부로 새는 것을 방지하기 위해서는 산기관의 배출구 길이를 조절하여야 하는데, 이는 폭기조의 수위와 공기량과 밀접한 관련이 있다. 이러한 산기관의 배출구 길이와 수심 및 공기량의 상관관계를 유도하기 위한 소요 공기량에 대한 적정 배출구 높이 도출 실험과 폐색 저감형 산기관의 적용성 평가를 위한 산기관 막힘 비교 실험으로부터 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 배출구 5cm의 산기관으로 행한 실험에서 공기량 변화에 따른 산기관 내의 기액 경계 변화를 확인 할 수 있었으며, 공기량 50L/min 일 때 기액 경계는 배출구 하단부보다 낮아져 공기가 옆으로 새는 것을 확인 할 수가 있었다. 불필요한 공기의 유출을 막기 위해서는 적절한 배출구 높이 산정이 중요할 것으로 사료된다.

2. 산기관 배출구 내의 기액 경계 변화는 수심에 위한 영향은 받지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 일정 공기량을

상하수도학회지, 논문
25권 1호, pp.41-49, 2월, 2011

공급하기 위해서는 수심에 따른 수압에 비례하여 주입되는 공기압이 증가하는 것으로 판단되며, 향후 수심에 따른 공기압 변화에 대한 연구를 진행할 예정이다.

3. 동일 수심에서 공기량 변화에 따른 산기관 내 기액 경계 변화의 상관성을 살펴본 결과 공기량과 기액 경계 변화는 선형적이며 신뢰도가 높음을 알 수 있었다. 실험으로 도출된 이 관계식을 통하여 소요 공기량에 따른 배출구의 기액 경계 높이를 산출하여 폐색 저감형 산기관의 배출구 높이를 결정할 수 있다.

4. MLSS 농도 10,000~12,000 mg/L로 운전되는 MBR 공정에서 기존 산기관은 실험 경과 31일 이후부터 공기량이 감소하였으나, 폐색 저감형 산기관은 초기의 설정 공기량이 실험 종료인 50일 동안이나 그대로 유지됨을 확인하였고, 산기관 하단부의 개방으로 산기관의 막힘 현상을 방지 할 수 있음을 증명하였다.

실험으로 얻어진 결과로 부터 소요 공기량으로 도출된 산기관 배출구의 기액 경계 높이에 MBR 공정의 조 내 미생물 농도에 따른 안전치를 고려한다면 적정한 산기관 배출구의 높이를 결정할 수 있을 것이다. 향후 본 산기관을 실제 MBR 공정에 적용한다면 산기관의 막힘 현상으로 인한 문제들은 자연적으로 사라질 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발 사업”으로 지원받았으며, 이에 감사를 표합니다.

참고 문헌

Bart Verrecht, Thomas Maere, Ingmar Nopens, Christoph Brepols and Simon Judd (2010) The cost of a large-scale hollow fibre MBR, *Water Res.*, **44**(18), 5274-5283.

Chang, I. -S., Lee, C. -H., and Ahn, K. -H., (1999) Membrane filtration characteristics in membrane coupled activated sludge system - The effect of floc structure on membrane fouling, *Sep. Sci. Technol.*, **34**(9), 1743-1758.

Hout, R. V., Gulitsaki, A., Barrnea, D., and Shemer, L., (2002) Experimental investigation of the velocity field induced by a taylor bubble rising in a stagnant water, *Int. J. Multiphase Flow*, **28**(4), 579~.596.

Lee, J., Ahn, W. -Y., and Lee, C. -H., (2001) Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor, *Water Res.*, **35**(10), 2435-2445.

P. Le-Clech., A. Fane and G. Leslie, (2005), MBR focus : the operators' perspective, *Filtration & Separation*, **42**(5), pp. 20-23.

Pierre Le Clech, Bruce Jefferson, In Soung Chang and Simon J. Judd, (2003), Critical flux determination by the flux-step method in a submerged membrane bioreactor, *Journal of Membrane Science*, **227**(1-2), pp. 81-93.

S. P. Hong, T. H. Bae, T. M. Tak, S. Hong, and A. Randall, (2002) Fouling control in activated sludge submerged hollow fiber membrane bioreactor, *Desalination*, **143**(3), 219-228.

Stephenson, T., Judd, S., Jefferson, B., and Brindle, K., (2000) *Membrane bioreactor for wastewater treatment*, IWA Publishing, London.

Whalley, P. B., (1987), *Boiling, condensation, and gas-liquid flow*, Oxford university press, USA

김관엽, 이의종, 송준섭, 김지훈, 김형수 (2008), 주기적인 약품역세를 적용한 침지형 MBR 시스템의 운전성능에 관한 연구, *대한상하수도학회*, **22**(1), pp. 87-92.

신동환, 백병도, 장인성 (2008), 침지형 생물 반응기 공정에서 플럭스 향상을 위한 공기 세척 효과에 관한 연구, *대한환경공학회*, **30**(9), pp. 948-954.