» 연구논문 «

하폐수의 재사용 및 방류를 위한 폭기조 내 표준산소전달 효율 모니터링 시스템에 관한 연구

김홍석* · §김용범** · 고경한** · 김상우*** · 심환보****

*한국화학융합시험연구원, **주씨투씨소재, ***주청아, ****주에머스

Study on the Standard Oxygen Transfer Efficiency Monitoring System in the Aeration Tank for Reuse and Discharge of Wastewater

Hong-Seok Kim*, §Yong-Beom Kim**, Kyung-Han Ko**,
Sang-Woo Kim*** and Hwan-bo Shim****

*Korea Testing & Research Institute, Gwacheon-si, 13810, Korea

**CTOC Co. Ltd. Daejeon-si, 34028, Korea

***Chunga Co. Ltd. Sejong-si, 30077, Korea

****Emwus Co. Ltd. Sejong-si, 30046, Korea

요 약

본 연구에서는 활성 슬러지 하수처리장에서 배출되는 off-gas에 대한 포집 및 측정 모니터링을 통해 폭기조의 산소전달효율을 측정하고 청수와 비교하여 시스템의 신뢰성을 검증하는 연구를 수행하였다. 먼저, 청수를 기반으로 용존산소, 산소전달계수 및 표준산소전달효율을 측정하였으며 각각 8.60 mg/L, 9.49/hr, 23.96%의 값이 얻어졌다. 한편, 하수처리장 현장에서 진행한 off-gas 시험 결과 표준산소전달효율이 22.81%로 계산되어 청수와의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 현장에 설치된 산기관의 성능 및 폭기조의 상황을 모니터링 시스템을 이용해 실시간으로 확인함으로써 신뢰성있는 데이터를 확보할 수 있음을 의미한다.

주제어 : 하수처리, off-gas, 표준산소전달효율, 폭기조, 모니터링 시스템

Abstract

In this investigation, off-gas generated from the activated sludge in wastewater treatment plant was monitored. Through monitoring, the oxygen transfer efficiency in the aeration system and the reliability was evaluated by comparing to clean water. First, the dissolved oxygen, oxygen transfer coefficient, and standard oxygen transfer efficiency were measured based on clean water, and the values were 8.60 mg/L, 9.490/hr and 23.96%, respectively. The off-gas monitoring at the wastewater treatment plant indicated that the standard oxygen transfer efficiency was 22.81%. Little difference in oxygen transfer efficiency this data inferred that the performance was improved through diffuser installation in the field monitoring system.

Key words : wastewater treatment, off-gas, standard oxygen transfer efficiency, aeration system, monitoring system

· Received : October 30, 2019 · Revised : November 20, 2019 · Accepted : November 27, 2019

§ Corresponding Author : Yong-Beom Kim (E-mail : tech@ctoc.kr)

Technical Research Institute, CTOC Co. Ltd., No 101, 160 Techno 2-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34028, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

활성 슬러지 공정(Activated sludge system)은 유기 물질을 제거하는 생물학적 폐수처리의 대표적인 공정 중 하나로 현재 하수처리장의 80% 이상이 적용하고 있으며, 폭기조 내에 산소를 충분히 주입해 유입되는 폐수와 미생물을 접촉시킨 다음 침전조에서 고액분리하는 공정이다. 산소를 공급해주기 위한 폭기 방식은 크게 산기식과 기계식으로 구분되며, 이러한 폭기시스템은 활성 슬러지 공정을 이용한 하수처리장 전체 전력 비중에 가장 크게 차지하는 것으로 알려져 있다¹⁻³⁾. 특히, 처리용량, 유입물의 성질 및 폭기 장비에 따라 전력 소모량에 차이가 있으나, 일반적으로 총 에너지 사용량의 약 50%가 사용되고 있는 실정이기 때문에 경제적이고 에너지 효율적인 운영을 통한 유지관리 비용 절감이 핵심 이슈로 대두되고 있다¹⁻⁴⁾. 더욱이, 하수처리장에서 처리한 방류수를 활용하도록 ‘하수도법’이 제정되었지만 아직도 하수처리수의 재이용률은 매우 낮은 실정이다.

활성 슬러지 공정에서는 산소를 얼마나 효과적으로 하수에 전달하는지를 나타내는 표준산소전달효율(SOTE, standard oxygen transfer efficiency)에 따라 유지관리 비용이 달라지기 때문에 이를 제어하는 것이 폭기조의 효율성을 높이는 주요 변수라 할 수 있다^{5,6)}. 산소는 용해도가 낮고 전달 속도가 느려 하수처리에서 필요한 양의 산소를 전달하기 위해서는 공기나 기포를 수중에서 인위적으로 주입시켜 기체와 물의 경계면을 넓혀줌으로써 추가적인 산소를 공급할 수 있다. 지난 수십년간 산소전달 메커니즘을 설명하기 위해 많은 연구와 이론들이 제안되었지만 가장 많이 이용되는 것은 1924년 Lewis 및 Whitman에 의해 발표된 이중막이론(two-film theory)으로 타 이론 모델에 비해 실제 수치와 유사한 결과를 얻을 수 있기 때문에 많이 이용되어 왔다⁷⁾. 활성 슬러지 공정을 이용하는 하수처리장의 폭기조에서 산소전달효율을 측정하기 위해 사용되는 방법으로는 물질 수지법, Dual nonsteady state test, Tracer technique, off-gas 등이 있다. 이러한 방법들 중에서 off-gas 측정 방식은 폭기조 내부로 유입되는 가스와 폭기조에서 하수 속에 존재하는 미생물에 의해 흡수된 후 배출되는 가스에 포함된 산소 분율을 측정하여 폭기조에 설치된 산기관에 의한 표준산소전달효율을 계산하게 된다⁸⁾. 다른 일반적인 측정 방법과 비교하였을 때, 정확성과 정밀성이 비교적 훌륭하고 빠르며 신뢰성 있는 결과값 산출이 가능할 뿐만 아니라 공정을 중단할 필요가 없다는

것이 off-gas 방법의 장점으로 알려져 있다. 그러나, 심한 거품 현상은 가스 sampling을 복잡하게 만들 수 있으며 분석 특성상 유입 및 방출되는 가스에 대한 정확한 매스 밸런스를 얻는 것이 어렵다는 단점도 있다.

본 연구에서는 생물학적 폐수처리 방법으로 많이 활용되는 활성 슬러지 하수처리장에서 배출되는 off-gas를 분석하여 폭기조의 용존산소 및 산소전달계수를 측정하고 표준산소전달효율을 계산하여 모니터링 시스템의 수치와 비교를 통해 시스템의 성능을 평가하였다. 향후에는 시스템 향상 및 성능 최적화를 위한 방안을 모색하여 폐수를 공업용수로 재사용하거나 방류할 수 있는 수준의 연구를 진행하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 장치

본 연구에서는 off-gas를 포집하기 위해 1.0 mW × 1.5 mL × 0.5 mH 크기로 제작된 장치를 이용하였으며 (Fig. 1a) 플라스틱 재질로 구성된 포집 장치의 무게는 20 kg 내외로 작업자의 이동 및 설치가 용이하도록 제작되었다. 제작된 포집 장치는 폭기조 수면에 완전 밀폐된 형태로 설치한 후 수면에서 배출되는 가스는 포집 장치 이용해 포집하고 이 가스를 배출가스 분석기(Fig. 1b)에 유입시켜 off-gas를 분석하였다. Fig. 1c와 1d는 본 연구에서 모니터링 시스템 평가를 위한 시험 현상으로써 하수처리장 및 청수 플랜트의 모습을 나타낸 것이다.

2.2. 실험 방법

본 연구에서는 활성 슬러지 공정에 중요한 운영 변수인 처리수 내 모니터링 시스템을 통해 공정 중 발생하는 off-gas 분석(산소전달계수, 용존산소, 표준산소전달효율, 표준산소전달효율 등)을 진행하였다. Off-gas 분석은 산기식 포기장치가 설치된 활성 슬러지 시스템을 대상으로 수행하였다. 실제 하수처리장의 폭기조에서 off-gas 분석 시스템의 성능을 평가하기 위해 청수 및 하수처리장에서의 비교 실험을 실시하였으며 산소전달효율은 아래의 식을 통해 계산되었다.

$$\begin{aligned} \text{OTE} &= \frac{\text{mass O}_2 \text{ inlet} - \text{mass O}_2 \text{ outlet}}{\text{mass O}_2 \text{ inlet}} \\ &= \frac{G_i(M_0/M_i)MR_i - G_e(M_0/M_i)MR_e}{G_i(M_0/M_i)MR_i} \end{aligned}$$

Fig. 1. (a) Collecting unit, (b) Off-gas analyzer for test, (c) Wastewater plant, (d) Clean water plant

$$= \frac{MR_i - MR_e}{MR_i}$$

여기서 G_i 는 유입 및 배출 가스 스트림에서 일정한 불활성 질량의 속도, M_o 와 M_i 는 산소 분자량 및 삽입되는 분자량, MR_i 와 MR_e 는 유입가스 및 배출가스의 insert에 대한 몰비를 나타낸다.

3. 결과 및 분석

3.1. 청수의 산소전달계수 및 용존산소

용존산소농도 측정을 위해 우선적으로 시험조에 청수를 주입한 후 아황산나트륨과 염화코발트를 용해시켜 용존산소를 일정 농도 이하(1 mg/L)로 제거하였다. 그 후 장치에 공기를 일정하게 폭기시켜 산소 농도가 포화될 때까지 용존산소농도량을 측정하였다. 샘플링 위치별로 용존산소를 측정한 후 다음 식을 이용해 용존산소 농도 곡선과 산소전달계수를 계산하였다.

$$C_t = C_{\infty} - (C_{\infty} - C_{s0})\exp(-K_L a t)$$

여기서 C_t 는 시간 t 에서의 용존산소, C_{∞} 는 용존산소 포화농도 추정값, C_{s0} 는 초기 용존산소농도, $K_L a$ 는 산소전달계수를 의미한다. 활성 슬러지 공정의 폭기조에서는 하수뿐만 아니라 호기성 미생물이나 부유물들이 있어 상수를 이용해 얻은 C_{∞} , C_{s0} 및 $K_L a$ 는 폭기조 내 혼합용액의 값으로 추정할 수 없기 때문에 유입되는 하수의 특성이나 온도 등을 고려해야 한다. 산소전달효율은 포기장치에서 산소전달계수($K_L a$) 값과 밀접한 관계가 있어 아래의 식으로 계산되며 θ 는 온도보정계수이다.

$$K_L a_{t^{\circ}C} = K_L a_{20^{\circ}C} \cdot \theta^{(t-20)}$$

산소전달효율을 평가하기 위해 시간에 따른 용존산소(DO, dissolved oxygen) 농도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 때, 외기온도는 23°C, 수온은 22°C, 포화산소농도는 8.74 mg/L, 수심은 4.7 m, 통기량은 365 m³/hr인 시험

Fig. 2. DO concentration for aeration time.

Fig. 3. $\ln(C_s - C_t)$ value according to time in clean water.

조건하에서 초기 0.38 mg/L까지 탈기한 후 폭기를 시작 하였으며 16분 후 최고 농도인 8.6 mg/L에 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 초기 DO농도가 지속적으로 상승하다가 포화농도(C_s)에 가까워질수록 DO 농도 변화가 느리게 진행되는 경향을 보였다. 또한, Fig. 3에 나타난 바와 같이 용존 산소 변환량($\ln(C_s - C_t)$)이 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 그래프를 통해 $y = -0.1654x + 2.4142$ 라는 1차 함수식을 수립할 수 있었고 기울기는 0.1652값을 나타내었다. 측정된 온도에서의 총괄 $K_L a_{(22^\circ\text{C})}$ 값은 9.912/hr로 계산되었고 이 값을 바탕으로 계산된 $K_L a_{(20^\circ\text{C})}$ 은 9.452/hr였으며, 7회 반복 측정한 결과(Table 1) 평균 9.490/hr를 나타내었다. 반복 측정에 따른 값의 변화는 크게 차이가 없었으며 오차 범위도 1% 이내로 산기관 설치가 바람직하게 되었으며 산소전달 측면에서도 비교적 일정한 것으로 판단된다.

3.2. 청수의 표준 산소전달량

표준산소전달량(SOTR, standard oxygen transfer rate)은 폭기조 내 표준상태에서의 단위시간당 산소용해

Table 1. Total oxygen transfer coefficient value via repetitive test

Number of times	$K_L a_{(20^\circ\text{C})}$
1	9.452
2	9.512
3	9.485
4	9.583
5	9.432
6	9.467
7	9.499
average	9.490

량으로 볼 수 있으며 아래 식을 통해 계산할 수 있다.

$$\text{SORT} = K_L a_{(20^\circ\text{C})} \times C_{s(20^\circ\text{C})} \times W$$

여기서 $K_L a_{(20^\circ\text{C})}$ 은 20°C 에서의 산소전달계수, $C_{s(20^\circ\text{C})}$ 은 20°C 에서의 포화산소농도, W 는 폭기조 용량을 의미한다. 위 식을 이용해 계산된 표준산소전달량은 25.844 kg O_2/hr 였으며, Table 2의 결과에서 보듯이 7회 반복 측정한 결과 평균 25.948 kg O_2/hr 로 오차 범위 1% 이내의 값을 얻을 수 있었다.

3.3. 청수의 표준산소전달효율

표준산소전달효율은 단위시간당 산소용해량/산기관의 주입산소량으로 계산할 수 있다. 이를 통해 계산된 표준산소전달효율은 24.4%로 일반적인 산기관의 효율과 유사한 수치를 나타내었으며 반복 시험을 통해 평균 23.96%의 효율을 얻을 수 있었다. 이는 폭기조 내 수중에서 발생한 기포들이 접촉 시간과 접촉 면적이 높지

Table 2. Standard oxygen transfer rate value via repetitive test

Number of times	kg O_2/hr
1	25.844
2	26.008
3	25.935
4	26.203
5	25.790
6	25.885
7	25.973
average	25.948

않아 일반적인 값이 나오는 것으로 판단된다. 기존 문헌에 의하면 포화 용존산소에 대한 온도 및 압력, 공정 운영조건, 폭기조의 형태 등 다양한 인자들이 표준산소 전달효율에 영향을 미치는 것으로 보고 있다^{9,10}. Powell-Groves 등은 다양한 폭기 시스템 및 운영 조건에 대한 정보를 통해 산소전달에 영향을 미치는 요소들(산기관의 형태, 배치, 사용기간 등)에 대해 정리하기도 했다. 이 결과에 따르면 표준산소전달효율은 기존 인자들 외에 추가적인 요소들에 의해서도 상당히 영향을 받으므로 향후에는 표준산소전달효율 개선을 위한 연구가 지속적으로 이뤄져야 할 것이다.

3.4. 하수처리장 현장에서 off-gas 시험

Off-gas 모니터링 시스템의 현장 적용성을 검증하기 위해 하수처리장에서 테스트를 진행하였으며 이 때, 외기 기온은 27°C, 수온은 29°C, 포화산소농도는 7.69 mg/L, 현장기압은 1,001 hPa이고 계산을 위한 변수값을 Table 3에 나타내었다. MR_t 는 0.265, MR_c 는 0.2425이고 off-gas analyzer에서 트랩을 통해 CO_2 와 수증기를 제거하였다. 계산을 통한 현장에서의 산소전달효율은 6.79%를 나타내었는데 이는 측정 당시의 산소전달효율 이므로 표준상태로 산정한 표준산소전달효율로 계산되기 위해서는 아래식을 통해 계산하게 된다.

$$OTE_{sp20} = \frac{OTE_f}{C_{\infty f} - \text{현장 } DO_{\text{값}}} \times 1.024^{(20-T)}$$

여기서 OTE_{sp20} 20°C, 1기압조건하에서 산소전달효율, OTE_f 은 앞서 측정 계산된 산소전달효율, $C_{\infty f}$ 은 기압 및 온도가 보정된 포화농도를 의미한다.

Table 3. Analysis variables and values for the real standard oxygen transfer coefficient calculation of test bed

Variables (unit)	Value
$C_{\infty 20}$ (mg/L)	11.353
$C_{\infty f}$ (mg/L)	9.02
C_s (mg/L)	7.69
Y_i , O_2 -in(%)	0.2095
Y_e , O_2 -out(%)	0.1952
Y_{CDi} , CO_2 -in(%)	0
Y_{CDe} , CO_2 -out(%)	0
Y_{Wi} , H_2O -in(%)	0
Y_{We} , H_2O -out(%)	0

$$SOTE = OTE_{sp20} \times \beta \times C_{\infty 20}$$

이때 계산된 OTE_{sp20} 값을 이용하여 표준산소전달효율을 구하게 되는데 β 는 청수대비 하수의 보정비이며 일반적으로 0.95값을 사용, $C_{\infty 20}$ 수온이 20°C일때 포화산소농도를 의미한다. 위식으로 표준산소전달효율은 22.74%를 계산되었으며 7회 시험 반복 진행한 결과 평균 22.81%의 효율을 얻을 수 있었다. 이를 통해 청수에서의 표준산소전달효율과 off-gas 분석을 통해 얻어진 하수처리장에서의 표준산소전달효율이 유사한 값을 가진다는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 현장에 설치된 산기관의 성능 및 폭기조의 상황을 모니터링 시스템을 이용해 실시간으로 확인할 수 있다는 것을 의미한다. 신뢰성 있는 표준산소전달효율 모니터링 시스템을 폐수처리장 현장에 적용함으로써 실시간으로 폭기조의 상황을 파악하고 관리자의 빠른 대응을 유도할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 off-gas 모니터링 시스템을 통해 청수 및 하수처리장에서 배출되는 off-gas를 측정하고 표준산소전달효율을 비교하는 분석시스템에 대한 신뢰성을 평가하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었으며 향후 시스템 향상 및 성능 최적화를 위한 방법들을 진단하고 대응해 나가고자 한다.

표준산소전달효율을 파악하기 위해 청수를 이용하여 실험을 진행한 결과 용존산소는 8.6 mg/L, 산소전달계수는 평균 9.490/hr, 표준산소전달효율은 23.96%의 일반적인 산기관의 효율을 보였다.

Off-gas 시험을 통한 하수처리장 현장에서의 표준산소전달효율은 평균 22.81%로 나타났으며 이는 청수에서의 값과 유사하여 폭기조 모니터링 시스템의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

향후, 개발된 모니터링 시스템의 장시간 안정성 및 현장 적용성 평가를 통해 많은 관련 업계에 활용될 수 있도록 지속적인 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술평가관리원의 산업융합촉진사업(과제번호: 10073296)으로 연구가 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

1. Liu, C., Li, S., and Zhang, F., 2011 : The Oxygen Transfer Efficiency and Economic Cost Analysis of Aeration System in Municipal Waste Water Treatment Plant, Energy Proc., **5**, pp.2437-2443.
2. Kaliman, A., Rosso, D., Leu, S. Y., and Stenstrom, M. K., 2008 : Fine-Pore Aeration Diffusers: Accelerated Membrane Ageing Studies, Water Res., **42**, pp.467-475.
3. Rozich, A. F., 1992 : Design and operation of activated sludge processes using respirometry, Lewis Publisher.
4. Rosso, D., Larson, L. E., and Stenstrom, M., 2008 : Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art, Wat. Sci. Tech., **57**, pp.973-978.
5. Olsson, G. and Andrews, J. F., 1981 : Dissolved oxygen control in the activated sludge process, Wat. Sci. Tech., **13**, pp.341-347.
6. Harris, S. L., Stephenson, T., and Pearce, P., 1996 : Aeration investigation of biological aerated filters using off-gas analysis, Wat. Sci. Tech., **34**, pp.307-314.
7. Lewis, W. K. and Whitman, W. G., 1924 : Principle of gas absorption, Ind. Eng. Chem., **16**, pp.1215-1220.
8. Viswanathan, S., Pham, H., Kelly, R. F., Redmon, D. T., and Fernandes, W., 2008 : Evaluation of Oxygen Transfer Efficiency via Off-gas Testing at Full Scale Integrated Fixed film Activated Sludge Installation, In: Proc. WEFTEC 2008 Conference.
9. Libra, J. A., Schuchardt, A., Sahlmann, C., Handschag, J., Wiesmann, U., and Gnirss, R., 2002 : Comparison of the efficiency of large-scale ceramic and membrane aeration systems with the dynamic off-gas method, Wat. Sci. Tech., **46**, pp.317-324.
10. Amerlinck, Y., Bellandi, G., Amaral, A., Weijers, S., and Nopens, I., 2016 : Detailed off-gas measurements for improved modelling of the aeration performance at the WWTP of Eindhoven, Wat. Sci. Tech., **74**, pp.203-211.

김 홍 석

- 서울과학기술대학교 박사
- 현재 한국화학융합시험연구원 환경평가팀 수석연구원

김 용 범

- 한양대학교 화학공학과 학사
- 카엘 기술연구소
- 현재 ㈜씨투씨소재 연구소 팀장

고 경 한

- 충남대학교 기계공학과 열유체전공 공학석사
- 충남기계공업/계룡공업고등학교 기계과 교사
- 국제문화대학원대학교 외래교수
- 현재 ㈜씨투씨소재 대표이사

김 상 우

- 충남대학교 화학공학과 석사
- 현재 ㈜청아 연구소 이사

심 환 보

- 충남대학교 화학공학과 공학박사
- 원자력연구원 전문연구원
- 케이맥(주) 시스템개발팀장
- 현재 ㈜에머스 대표이사