



하수처리장 폭기조의 용존산소농도 모니터링 대표지점 선정에 관한 연구

A study on the determination of a representative location for monitoring the dissolved oxygen concentration in a aeration tank of sewage treatment plant

방석용¹·범봉수²·김진한^{1*}

Seok-Yong Bang¹·Bong-Su Bum²·Jin-Han Kim^{1*}

¹인천대학교 도시과학대학 건설환경공학부, 인천광역시 아카데미로 119, 22012

²경인여자대학교 보건환경과, 인천광역시 계양구 계양산로 63, 21041

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

²Department of Human and Environmental, Kung-In Womens's University, 63, Gyeyangsan-ro, Gyeyang-gu, Incheon 21041, Republic of Korea

pp. 329-339

pp. 341-351

pp. 353-366

pp. 367-377

pp. 379-388

pp. 389-394

pp. 395-404

ABSTRACT

In order to determine the location of average concentration and distribution status of dissolved oxygen in the rectangular aeration tank of the sewage treatment plant was analyzed and the difference of dissolved oxygen concentration was remarkable at each location. Compared with the computational fluid dynamics analysis, it was found that the results were consistent with the measurement results by showing the difference of dissolved oxygen concentration between the locations. Based on the measured data, the representative location of dissolved oxygen in aeration tank was selected by using statistical analysis method and the representative location was expressed in three-dimensional coordinates(LWH : 25%, 50%, 33%) from flow direction and left wall. Also the difference between the dissolved oxygen concentration at the actual measurement location and the average concentration value of the entire aeration tank was founded, and the equations for calibrating the automatic measurement data considering the actual measurement location were calculated.

Key words: Dissolved oxygen, Computational fluid dynamics, Monitoring, Calibration equation

주제어: 용존산소, 전산유체역학, 모니터링, 보정식

1. 서 론

하수의 생물학적 처리공정은 수중미생물의 대사작용을 이용하여 오염물질을 처리한다. 이를 효과적으로 운영하기 위해서는 수중미생물의 대사 활동에 필요한 적절한 환경이 제공되어야 하며 특히 하수 내의

유기물 산화와 질산화는 호기성 미생물의 대사작용으로 인하여 산소가 소모되므로 이에 필요한 산소를 포기장치를 통해 폭기조로 공급하여야 한다 (Micheal et al., 2002).

처리효율을 안정적으로 유지하면서 처리 비용을 절감하기 위해 하수처리시스템의 고도화 및 최적 운전이 이루어져야 한다. 이를 위하여 유기물과 질소 제거 예측을 위한 활성슬러지 내부 변수 간의 상호관계를

Received 6 August 2019, revised 21 October 2019, accepted 22 October 2019.

*Corresponding author: Jin-Han Kim (E-mail: jinhan@inu.ac.kr)

이용한 모델링이 연구되었으며 (Henze et al., 2000), 모델링을 기반으로 질소제거공정의 설계와 모사가 이루어졌다 (Barros and Carlsson, 1998). 또한, 활성슬러지 모델링을 이용하여 최적 DO 농도를 결정하며, 포기공정을 제어하여 에너지 절감을 유도하는 연구들이 시도되었으며 (Åmand and Carlsson, 2012; Fikar et al., 2005), 폭기조 미생물의 호흡률(oxygen uptake rate)을 이용한 최적 DO농도의 산정과 포기공정 제어를 통한 에너지 절감과 질산화 공정을 해석하는 연구들이 진행되었다 (Kim and Kim, 2019; Lee et al., 2014).

CFD(computer fluid dynamics)는 실험실 및 파일럿 규모 또는 현장조건에서 적용하기에 어렵거나 비용이 많이 소요되는 시스템을 평가할 수 있는 기법으로 다상 유동 거동의 분석 및 계면의 물질전달, 화학반응과 결합된 유동 범위에 대한 광범위한 매개 변수의 영향을 예측할 수 있어 기존의 모델링 방식보다 많이 이용되고 있다 (Karpisnka and Bridgeman, 2016). 특히 수처리 분야에서는 산기장치의 개발 (Bhuyar et al., 2009; Morchain et al., 2000)과 운영중인 공기 공급 시스템의 평가 (Jensen et al., 2006; Lei and Ni, 2014) 및 공정 최적화 (Glover et al., 2006; Le Moullec et al., 2010; Lei and Ni, 2014)에 적용되고 있다.

현재 국내 하수처리장에서는 폭기조에 pH, DO(dissolved oxygen), ORP(oxidation reduction potential), MLSS(mixed liquor suspended solid) 농도 등의 자동 측정장비를 설치하고 폭기조의 운영상태를 중앙통제실에서 실시간 모니터링 하고 있으나, 폭기조의 형상 및 규모에 따라 전체의 운전 상태를 평가하기 위한 측정 장비의 설치 개수나 위치에 대한 명확한 규정이 없고 예산상의 문제로 인하여 그 설치 개수가 부족하여 측정결과가 전체의 대표성을 가질 수 없으며, 대부분 관리 부실로 인하여 측정 장비가 고장난 상태로 체계적인 관리가 불가능하다. 또한, 현장 운영 시 폭기조 미생물의 관리를 위한 적정 DO 유지에 대한 기준이 없고, 산소공급을 위한 포기장치의 가변제어 조건의 확립이 어려우므로 포기장치의 전력소비율이 전체 하수처리장 유지관리비의 약 40~70%를 차지하고 있는 실정이다 (Kim et al., 2014; Rosso et al., 2008).

따라서 본 연구에서는 현재 DO 농도 자동측정에 의해 운영되고 있는 하수처리장 폭기조를 대상으로 폭기조내 DO 농도를 직접 측정하여 폭기조내 DO 농도 분포를 평가하고, 측정값과 전산유체역학(CFD) 결

과를 비교 분석함으로써 결과적으로 측정값의 통계적 해석을 통한 폭기조내 대표성 있는 DO 농도모니터링 지점을 선정하고자 하였다.

2. 연구방법

실험은 Table 1에 나타낸 바와 같이 MLE공법으로 설계되어 A2O형식으로 생물반응조를 운영하고 있는 인천시 S사업소의 장방형 폭기조를 대상으로 수행하였다. 폭기조는 폭 8 m, 길이 36 m, 높이 5 m 크기로 270 mm 디스크형 멤브레인 산기관이 설치되어 있으며 유입구로부터 일 평균 9,280 m³/day의 하수가 유입된다.

용존산소 측정 위치는 Fig. 1에 나타내었다. Portable DO meter(ProDO, YSI, USA)를 사용하여 측정하였으며, 유하방향을 따라 9 m 간격으로 폭의 3등분점, 수심의 1/3(1.7 m), 2/3(3.4 m)지점으로, 총 30개 지점을 총 4회 측정하였다. 또한, 폭기조 내 유체와 공기의 흐름을 분석하기 위하여 수행된 CFD는 fluent v6.3.26 으로서 적용모델과 조건을 Table 2에 요약하였다.

Table 1. Characteristics of aeration tank

Item		S-Sewage treatment plant
Aeration tank proportions	W(m)	8
	L(m)	36
	H(m)	5
Aerator	Type	Disc Type Membrane Diffuser
	Number	340EA
Treatment process		MLE / A2O
Average inflow quantity (m ³ /day)		9,280

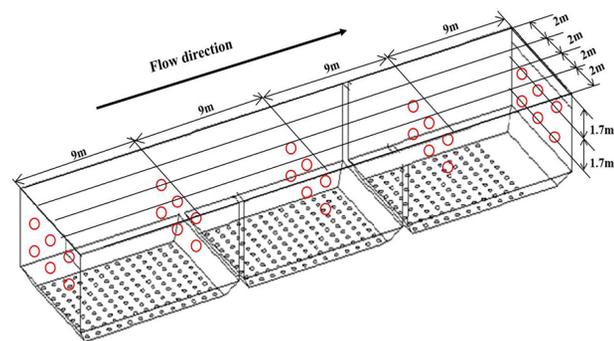


Fig. 1. Diagram of measurement locations(circle).



Table 2. Specification of CFD model

Application model	Phase	<ul style="list-style-type: none"> • K-turbulent model • Steady state • Turbulent kinetic energy : $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ • Turbulent dissipation energy : $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Property	Water(mixed)	<ul style="list-style-type: none"> • Density : 998.2 kg/m^3 • Viscosity : $1.003 \text{ g/m}\cdot\text{s}$ • CP : $4.182 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ • Thermal conductivity : $0.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	Air	<ul style="list-style-type: none"> • Density : 1.225 kg/m^3 • Viscosity : $1.789 \text{ g/m}\cdot\text{s}$
Basic condition	Operating condition	<ul style="list-style-type: none"> • Gravity : 9.81 m/s^2 • Temperature : 286 K • Standard atmospheric pressure
Boundary condition	Wall	• No slip shear condition
	Release(air)	• Release from aerator, escape at surface of water
	Oulet	• Pressure outlet
	Inlet	<ul style="list-style-type: none"> • Velocity inlet condition(Magnitude, Normal) • Reference frame : absolute • Velocity magnitude : $9,280 \text{ m}^3/\text{day}$
Air supply condition	Aeration method	• 270mm disc type membrane diffuser
	Air supply	• $39,360 \text{ m}^3/\text{day}$

본 연구에 사용한 CFD 모델은 높은 정확도로 학계 및 산업 분야에서 가장 광범위하게 적용되는 표준 K-turbulent 모델을 사용하였으며, 물과 공기의 물성치는 15°C 를 기준으로 하였다. 또한, 유입은 폭기조 유입부 정중앙 바닥면에 위치한 $3 \times 3 \text{ m}$ 크기의 유입구로부터 자연유하되고, 유출은 펌프에 의한 압력 유출로 설정하였다. 공기 주입 조건은 실제 일 평균 주입량인 $39,360 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 산기관을 통해 주입되며 물 표면에서 방출되는 것으로 설정하였다.

3. 결 과

3.1 용존산소 분포 특성

폭기조의 용존산소 분포 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 측정결과 수심 1.7 m와 3.4 m의 폭기조 유입부분(0 m)에서 유하방향 좌측벽으로부터 2 m지점을 제외한 지점에서 비교적 뚜렷한 용존산소 농도 차이를 보였다. 이는 대상 시설의 무산소조로부터 폭기조로 유입되는 웨어가 정중앙 바닥면에 위치한 이유로 용존산소 농도가 낮은 혼합액이 유입되어 발생한 것으로 판단된다.

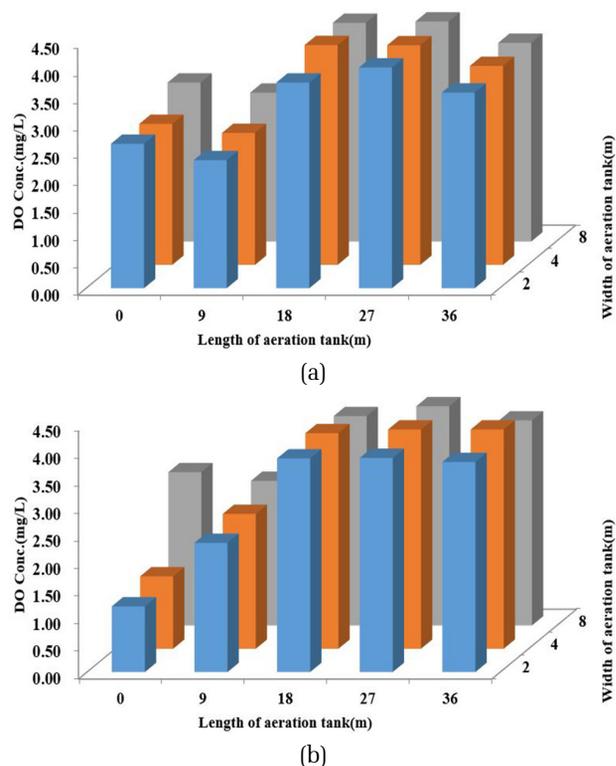


Fig. 2. Distribution of DO concentration (a) depth 1.7 m (b) depth 3.4 m.

pp. 329-339

pp. 341-351

pp. 353-366

pp. 367-377

pp. 379-388

pp. 389-394

pp. 395-404

수심 1.7 m에서 유입부로부터 9 m지점은 이전 유입부 분에서보다 용존산소농도가 낮게 측정되었지만, 수심 3.4 m의 동일한 지점에서선 좌측벽으로부터 2 m지점을 제외하면 그 농도가 증가함을 알 수 있었다. 이후 모든 수심에서 유입부로부터 18 m 지점에서 최대 상승 폭을 나타내며 폭기조 말단 부분(36 m)으로 갈수록 농도가 감소하는 경향을 보였다. 폭을 기준으로 유입부에서 유하방향으로 18 m이후 지점부터 좌우측 2 m지점에 비해 중앙부분의 DO 농도가 더 높은 경향을 보였다.

3.2 CFD 분석

폭기조에 대한 공기 유동의 CFD 분석결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3을 살펴보면 정상상태에서 폭기조 내 기포의 분율 분포는 0~2% 범위로 기포가 표면과 폭기조의 중앙에 집중되는 것을 알 수 있다. 이는 실제 측정결과에서 나타난 바와 같이 유입부에서 유하방향으로 18 m지점에서의 급격한 DO 농도 상승과 폭을 기준으로 중앙부의 DO 농도가 높은 경향을 보였던 것과 유사하였다. 또한, 좌측 벽으로부터 2 m 지점이 6 m 지점보다 더 높은 기포의 분율을 보였는데 실제 DO 농도 측정결과 유입부에서 좌측벽 2 m지점에서의 DO 농도가 정중앙과 우측벽 2 m지점에서의 DO 농도보다 높았던 것과 유사한 경향을 보였다. 한편 폭기조 말단(36 m)부근에서 사영역이 나타났는데,

이는 내부반송펌프에 의한 것으로 판단되며 실제 36 m 지점 DO 농도 측정치가 감소한 것과 일치하였다. 수심에 따라서는 수면으로부터 수심 1 m 부근까지 기포가 집중됨을 보이지만 더 깊은 수심에서는 포기기 주변을 제외하면 비교적 비슷한 기포분율 분포를 보였다. 결과적으로 유입부를 제외한 수심에 따른 지점간 명확한 농도차를 보이지 않음을 확인할 수 있다.

3.3 대표지점선정

폭기조내 DO 농도의 대표지점 선정방법은 각 측정 지점의 DO 농도와 폭기조 전체의 평균 DO 농도와와의 정규화를 통해 수행하였다. 먼저 측정 시마다 각 지점에서의 DO 농도와 폭기조 전체 평균농도와의 차를 정규화하였다. 정규화된 차이, 즉 상대차이(relative difference) δ_{ij} 는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\delta_{ij} = \frac{C_{ij} - C_j}{C_j} \tag{1}$$

여기서 C_j 는 측정 시점 j 에서 폭기조 전체의 평균농도를 나타내는 것으로 상대 차이에 대한 평균은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\overline{\delta_{ij}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \tag{2}$$

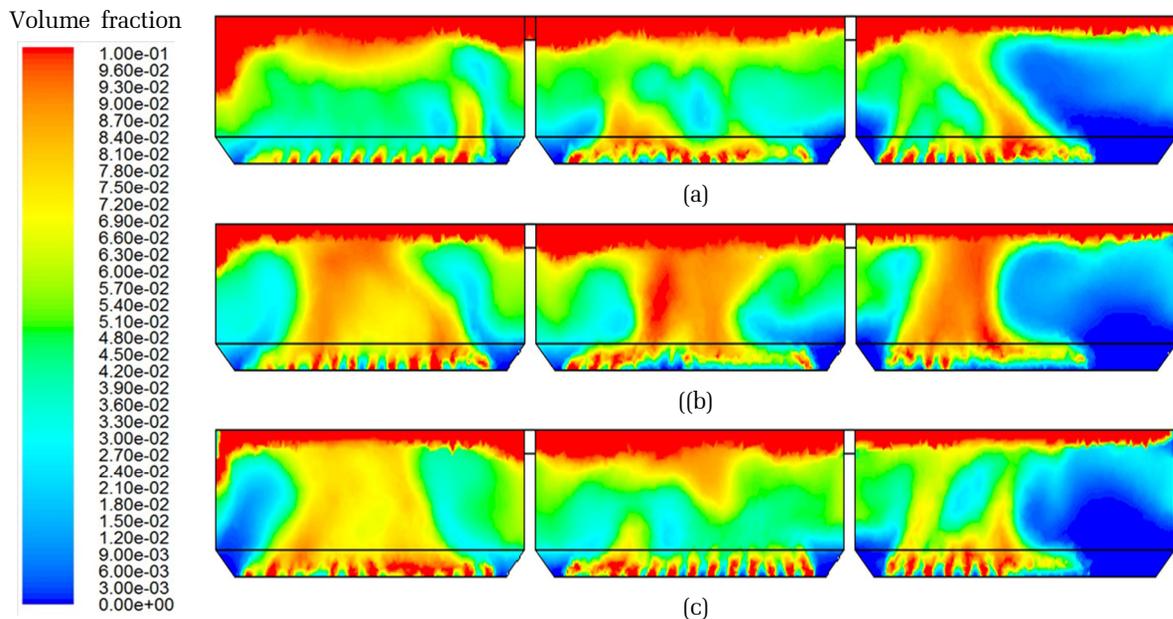


Fig. 3. Simulation results of air distribution status by CFD; (a) 2 m (b) 4 m (c) 6 m from left wall.



m 은 총 측정 횟수를 나타낸다. 상대 차이에 대한 평균은 폭기조 전체의 평균과 각 지점 DO 농도 간의 편향 정도를 판단하는 데 사용되었으며 농도 수준의 차이를 반영한 정규화 된 값으로 이를 순위화하여 Table 3에 나타내었다. 측정지점은 유입부 수면 좌측 벽을 기준으로 3차원으로 좌표화 하였다.

Table 3. Estimation of representative location in rectangular aeration tank

location (L,W,H)	$\sum mean $	Rank
(9,4,1.7)	0.009113	1
(0,4,1.7)	0.027476	2
(9,2,1.7)	0.041745	3
(9,6,1.7)	0.079745	4
(36,6,3.4)	0.136684	5
(0,6,1.7)	0.137503	6

결과적으로 상대 평균값이 0에 근접한 순으로 순위를 결정하였는데, 유입부로부터 유하방향으로 9 m(25%), 좌측벽으로부터 4 m(50%), 수심 1.7 m(33%)지점이 폭기조 전체의 평균 DO 농도에 근접함을 확인할 수 있었다. 실제 대상 시설의 폭기조내 용존산소 모니터링을 위한 자동측정기기는 유하방향으로부터 27 m 좌측에 위치하고 있다. 이들 측정 위치에서의 용존산소 농도는 폭기조 대표지점 농도보다 높은 용존산소 농도값을 나타내므로 실제 폭기조 상태보다 긍정적인 판단이 이루어질 가능성이 있다. 따라서 여러 현실적인 문제로 하나의 지점에서 DO 농도를 모니터링 할 경우에는 보다 정확한 모니터링을 위하여 측정값들을 평균화시키기 위한 보정을 실시하거나 DO 농도 모니터링을 위한 측정기기의 설치 위치를 조정할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

3.4 농도 보정식

하수처리장마다 폭기조의 규모와 형상이 다르고 궁

극적으로는 과잉의 산소공급을 제어하여 하수처리장 유지관리비의 절감을 목적으로 한다면 폭기조의 DO 농도를 대표할 수 있는 위치에 측정기기를 설치하는 것이 바람직하지만 현실적인 문제로 폭기조 하류부에 측정기기가 설치되었다면 하수처리장마다 적절한 보정 식을 이용하여 폭기조의 대표성 있는 DO 농도를 파악하여 산소공급을 제어하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

S 하수처리장 내 설치된 자동측정기기에 의해 측정된 DO 농도를 폭기조 내 DO 평균농도로 보정하기 위한 식을 산출하였다. 식은 실제 DO 농도 측정값들과 평균 DO 농도, 온도 간의 관계를 선형 및 비선형 회귀분석을 통하여 산출하였으며 선형 회귀분석과 비선형 회귀분석에 의한 보정 식은 각각 식 (3) 및 식 (4)에 나타내었다.

$$DO_a = \frac{-0.2678T + 7.2113}{-0.2759T + 8.0826} \cdot DO_m \quad (3)$$

$$DO_a = 0.9958e^{-0.016T} \cdot DO_m \quad (4)$$

DO_a 는 폭기조내 평균 DO 농도, DO_m 은 자동측정장치 위치에서의 측정 DO 농도이며 T는 수온(°C)이다. 각 보정 식에 의한 농도보정 결과와 실제 폭기조 평균 농도와의 오차율을 Table 4에 나타내었는데, 측정 자료의 양이 적고 수온의 차이가 크게 나질 않아 선형 또는 비선형 회귀분석의 오차율 차이는 크게 없었다.

4. 결 론

폭기조에서 DO 농도 측정 대표지점을 선정하기 위하여 폭기조 내 DO 농도 측정 및 CFD 결과와 비교 분석하여 DO 농도 분포를 파악하고, 측정값을 통계적으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 폭기조의 DO 농도 측정결과 초기 무산소조로부

Table 4. Calculation results of average DO concentration based on the correction formula

	Temp. (°C)	Monitoring DO (mg/L)	Average DO (mg/L)	Linear regression		Non-linear regression	
				DO (mg/L)	Error (%)	DO (mg/L)	Error (%)
1 st	13.1	4.32	3.56	3.49	2.10	3.58	0.47
2 nd	12.9	4.42	3.75	3.58	4.55	3.67	2.15
3 rd	15.3	4.35	3.39	3.39	0.03	3.51	3.47
4 th	17.7	2.96	2.34	2.22	5.02	2.29	2.20

터의 낮은 DO 농도의 혼합액이 유입되어 농도변화가 발생하는 유입구 지점을 제외하면 수심에 따른 농도 변화가 미미하였지만 유하방향을 기준으로 할 경우 현저한 농도차를 보였다.

2) CFD 분석결과 폭기조 표면 중앙부에 기포가 집중되어 있음을 확인할 수 있었으며, 폭기조내 공기분율과 실제 DO 농도측정값이 유사함을 확인하였다.

3) DO 농도 측정결과를 정규화하여 대표지점을 산출한 결과, 연구대상 폭기조의 경우 유입부로부터 유하방향으로 9 m(25%), 좌측벽으로부터 4 m(50%), 수심 1.7 m(33%) 지점이 폭기조내 DO 농도의 대표지점으로 판단되며 원활한 폭기조 제어를 위해서는 실제 모니터링을 위한 자동측정기기의 설치 위치와의 용존산소 농도차를 고려하여야 하므로 모니터링을 위한 자동측정기기의 설치 위치가 매우 중요함을 알 수 있었다.

4) 자동측정기가 설치된 위치에서의 DO 농도 측정값과 폭기조 평균 DO 농도, 수온 간의 상관관계를 이용하여 비선형 회귀분석방법으로 보정 식을 산출한 결과, $DO_a = 0.9958e^{-0.016T} \cdot DO_m$ 의 회귀분석 식을 얻을 수 있었다.

사 사

본 논문은 중소벤처기업부에서 지원하는 2018년도 기술개발사업(No.C0653054)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- Åmand, L. and Carlsson, B. (2012). Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process, *Water Res.*, 46, 2101-2110.
- Barros, P.R. and Carlsson, R. (1998). Iterative design of a nitrate controller using an external carbon source in an activated sludge process, *Water Sci. Technol.*, 37(12), 95-102.
- Bhuyar, L.B., Thakre, S.B. and Ingole, N.W. (2009). Design characteristics of curved blade aerator w.r.t aeration efficiency and overall oxygen transfer coefficient and comparison with CFD modeling, *Int. J. Eng. Sci Technol.*, 1(1), 1-15.
- Fikar, M., Chachuat, B. and Latifi, M.A. (2005). Optimal operation of alternating activated sludge processes, *Control Eng. Pract.*, 13, 853-861.
- Glover, G., Printemps, C., Essemiani, K. and Meinhold, J. (2006). Modelling of waste water treatment plants-how far shall we go with sophisticated modelling tools?, *Water Sci. Technol.*, 53(3), 79-89.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and Loosdrecht, M. (2000). *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Publishing, London. 16-22.
- Jensen, M.D., Ingildsen, P., Rasmussen, M.R. and Laursen, J. (2006). Computational fluid dynamics modelling of hydraulics and sedimentation in process reactors during aeration tank settling, *Water Sci. Technol.*, 53(12), 257-264.
- Karpinska, A.M and Bridgeman, J. (2016). CFD-aided modelling of activated sludge systems, *Water Res.*, 88, 861-879.
- Kim, D. and Kim, S. (2019). Nitrification process analysis by respirometry in a sequencing batch reactor, *Korean Soc. Water Wastewater*, 33(1), 55-62.
- Kim, M.H., Ji, S.H. and Jang, J.H. (2014). A study on energy saving effect from automatic control of air flowrate and estimation of optimal DO concentration in oxic reactor of wastewater treatment plant, *J. Energy Eng.*, 23(2), 49-56.
- Le Moullec, Y., Gentric, C., Potier, O. and Leclerc, J.P. (2010). CFD simulation of the hydrodynamics and reactions in an activated sludge channel reactor of wastewater treatment, *Chem. Eng. Sci.*, 65(1), 492-498.
- Lee, K.S., Kim, M.H., Kim, J.R. and Yoo, C.K. (2014). Optimal DO setpoint decision and electric cost saving in aerobic reactor using respirometer and air blower control, *Korean Chem. Eng. Res.*, 52(5), 581-586.
- Lei, L. and Ni, J. (2014). Three dimensional three phase model for simulation of hydrodynamics, oxygen mass transfer, carbon oxidation, nitrification and denitrification in an oxidation ditch, *Water Res.*, 53(0), 200-214.
- Micheal, W., Alexander, L., Regina, N., Ulrike, P., Natuschka, L. and Holger, D. (2002). Microbial community composition and function in wastewater treatment plants, *Antonie van Leeuwenhoek J. Microbiol.*, 81, 665-680.
- Morchain, J., Maranges, C. and Fonade, C. (2000). CFD modelling of a two phase jet aerator under influence of a crossflow, *Water Res.*, 34(13), 3460-3472.
- Rosso, D., Stenstrom, M.K. and Larson, L.E. (2008). Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art, *Water Sci. Technol.*, 57, 973-978.