

산소 용해수 발생 장치를 이용한 소형 연못의 산소 거동 연구

김영택 · 배윤선* · 노은경* · 박철휘*†

한국건설기술연구원 건설환경연구부

*서울시립대학교 환경공학부

A Study on Kinetics of Oxygen in Small Size Pond using Oxygen Solubilization Device System

Young-Taek Kim · Yoon-Sun Bae* · Eun-Kyung Roh* · Chul-Hwi Park*†

Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology

*Department of Environmental Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

(Received 1 November 2005, Accepted 12 April 2006)

Abstract

The major problem in closing water like lakes and ponds in Korea is that because they are exposed to surrounding, so easily polluted. The pollution in closing water can be caused by not only artificial factor like sewage but also natural factor like elution from sediment. For insurance of safe and satisfied water source, lots of studies and projects are now going on. In this study, we examined the behavior and effect of microbubble (3~10 μm) produced by device called O.S.D (Oxygen Solubilization Device) in small size pond. The value of oxygen transfer coefficient (K_1a) was 0.68/min independently of air flow rate, 6.5 times higher than commercial aeration stone and the variation of nitrogen concentration was 0.008 NO_3/O_2 , DO concentration was potentially saturated for 24 hr. From the results of pilot plant, SOD of experiment (O.S.D) and control were 12.18 $gO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ and 47.95 $gO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ respectively. In conclusion, because O.S.D has extraordinary physico-chemical characteristics, it can contribute to improvement of both the waterbody and the sediment environment.

keywords : Oxygen solubilization device, Oxygen transfer coefficient (K_1a), Sediment Oxygen Demand (SOD)

1. 서론

국내 상수 사용량이 증가함에 따라 생활오수 발생량 또한 상승하고 있으며, 증가된 생활오수의 발생량은 주변 수계로의 영양염류의 유입을 증가시켜 부영양화를 초래하고 있다. 또한 우리나라의 호소·하천은 오염물질에 쉽게 노출되어 있어 그 수질은 주변 토지 이용도에 따라 다양한 성상을 보이며, 비료 및 축산폐수와 같은 인위적인 요인 뿐 만 아니라 자연적인 요인 중의 하나인 저질의 용출에 의해서도 부영양화가 쉽게 발생할 수 있는 특징을 가지고 있다(국립환경연구원, 2003).

우리나라 수자원 이용의 대부분은 하절기 3~4개월에 집중되는 강우를 저장하여 갈수기에 이용코자 건설된 댐이나 저수지를 통하여 이루어지고 있다. 따라서 안정적인 수자원 확보를 위하여 수중포기 및 미세기포를 이용한 호수나 저수지의 성층화 파괴 및 조류성장 저해를 강구하는 프로젝트 및 연구가 진행되고 있으며, 이는 저층에 산소를 공급하는 방법과 인공순환에 의하여 성층을 파괴하는 방법으로 대별된다(Little, 1995; McGrinnis et al., 1998). 수자원 공

사에서 운영하는 총 13개 다목적 댐 및 용수 댐에는 총 266기의 수중폭기장치가 설치되어 있으며, 김 등(2001)에 의하면 이중 3개의 댐을 대상으로 DO 및 조류 개체수 등을 이용하여 수중폭기 장치의 효과를 분석한 결과 수온 성층의 파괴, 저층 용존산소의 증가, 조류 개체수의 감소 등의 효과가 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 수중 산소전달율(K_1a), DO, SOD와 같은 산소관련 물리화학적 인자들을 이용하여 수중폭기 및 미세기포 발생이 가능한 산소용해장치(Oxygen solubilization device)를 이용한 소형 연못의 수질개선효과를 평가해 보고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 산소 용해수의 특성

산소 용해수는 마이크로 버블(microbubble)과 비슷하나 자연수를 가압(4~5기압)하면서 물과 공기의 비를 3:1~4:1로 혼합하면 초미세기포(diameter 3~10 μm)가 발생하여 물에 용해되어 10시간 이상 포화 농도를 가지는 특징이 있어 일반적인 폭기(aeration)와는 상이하며, 이는 일반 산기석(air diffuser stone)으로 포기시켜 포화시키거나 순산소(pure oxygen)를 용해시킨 후의 상태와는 구별된다.

† To whom correspondence should be addressed.

chpark@uos.ac.kr

2.2. 파일럿 플랜트 실험

서울시립대학교 내 연못의 규모는 1,000 m³이고 깊이는 0.8~0.9 m, 면적은 1,200 m²로, Fig. 1과 같이 산소 용해수 발생장치를 설치하고, 확산장치를 이용하여 전 수역에 안정적인 DO 공급이 균등하게 이루어지게 하였다. 서울시립대학교 내 연못을 연못 중앙 다리를 중심으로 산소 용해장치를 운전 중인 실험구와 처리를 하지 않은 대조구로 나누어 실험을 실시하였으며, 실험구와 대조구 간의 수체교류가 없도록 다리 아래 펜스를 설치(Fig. 3)하여 비교 분석하였다. 2004년 7월부터 11월까지 5개월간에 걸쳐 실험을 실시하였으며 DO, pH 및 온도는 월 2회 저층과 표층에서 현장 측정하였다.

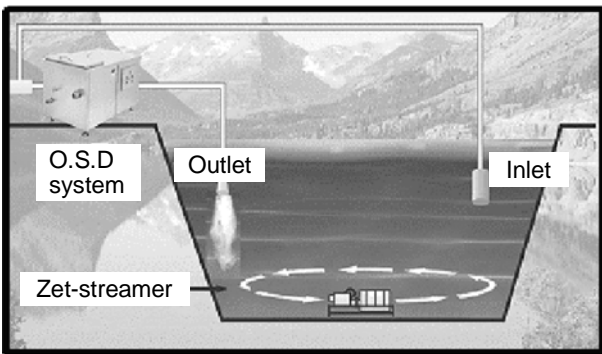


Fig. 1. Pilot plant dynamic operating sectional diagram.

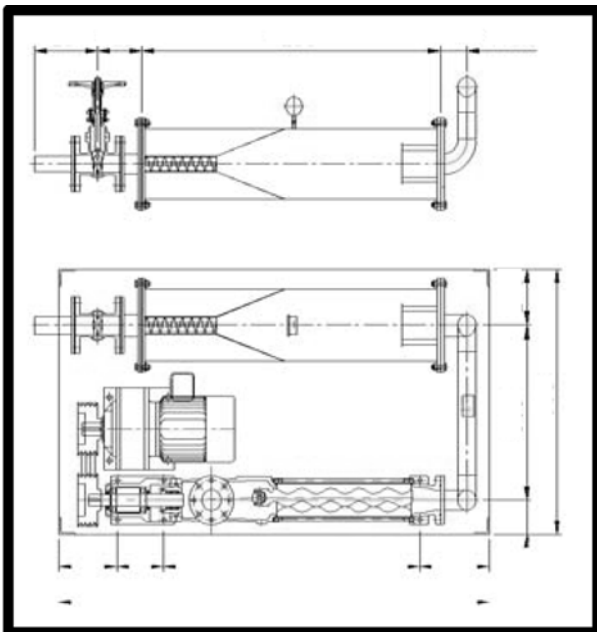


Fig. 2. O.S.D system plane figure.

Table 1. System specification

	Power (phase,voltage),(kw)	Capacity (m ³ /hr)	Dimensions (L×W×H)
O.S.D	(3p,220/380),4.0	20	100×800×800
Zet-streamer	(3p,220/380),1.5	300~600	1500×40×700

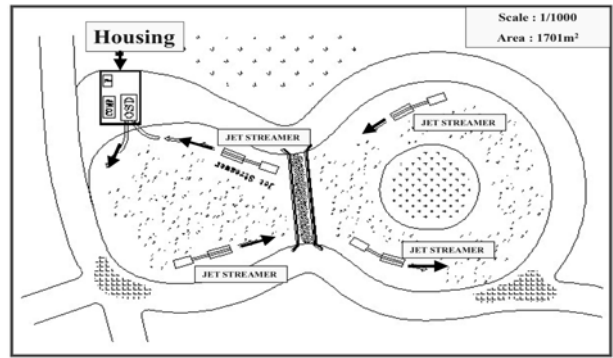


Fig. 3. Pilot plant dynamic operating plane diagram.

2.3. 수체 내 물질 이동

2.3.1. 물질 이동량 산정

특정기체가 용매와 접촉할 때 그 계면을 통과하는 물질 이동이 진행된다(Cowan et al., 1996; Little, 1995).

산소 전달율을 높이기 위한 방법으로 순산소 포기나 침층포기가 주로 이용되는데, 이때 단위 면적당 단위시간에 이동하는 물질량(N_A : mg/m²·sec)은 Fig. 4의 경계면에서의 인자를 이용하여 아래 식으로 나타낼 수 있다(Wagner et al., 1998).

$$N_A = K_g(C_g - C_{gi}) \tag{1}$$

$$= K_L(C_{oi} - C) \tag{2}$$

$$= K_L(C_s - C) \tag{3}$$

$$N = N_A \times A \tag{4}$$

$$N = K_L(C_s - C) \times A \tag{5}$$

여기서,

N_A = 물질이동량, (ML⁻²T⁻¹)

N = 물질이동속도, (MT⁻¹)

A = 기액계면의 접촉면적, (L²)

K_L = 물질이동계수, (LT⁻¹)

C_g = 기체 내에서의 농도, (ML⁻³)

C = 액체내에서의 농도, (ML⁻³)

C_s = 포화용존농도, (ML⁻³)

C_{gi}, C_{oi} = 접촉계면에서의 농도, (ML⁻³)

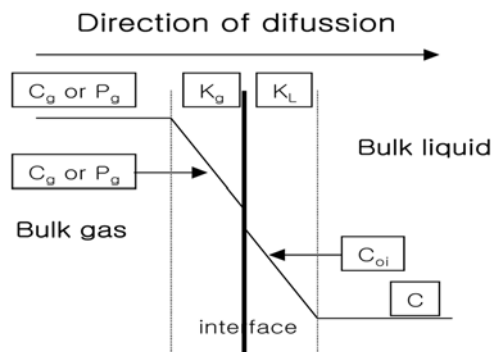


Fig. 4. Steady-state dissolved oxygen concentration profile in the vicinity of the gas-liquid interface.

2.3.2. 물질 이동속도 계산

물의 용적 당 액체에 흡수되는 용존 기체의 물질이동 속도를 $N/V=dC/dt$ 라고 할 때, 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Wagner et al., 1998).

$$\frac{dC}{dt} = K_L(C_s - C) \times (A/V) \tag{6}$$

$$= K_L(C_s - C) \times 1/L \tag{7}$$

$$= K_L a(C_s - C) \tag{8}$$

여기서,

V = 접촉부피 (L^3)

L = 접촉조의 길이 (L)

2.4. 산소전달계수($K_L a$) 산정

$K_L a$ 를 구하는 방법은 확산계수를 이용한 이론적 계산 방법과 포기실험에 의한 방법으로 나눌 수 있으며, 포기실험에 의한 방법은 정상 포기법과 비정상 포기법으로 나뉜다.

본 연구에서는 포기실험에 의한 방법 중 인위적 포기를 통하여 수체 내 용존 산소를 증가시켜 산출하는 방법인 비정상포기법에 의한 산정방법을 사용하였다.

2.4.1. 산소전달계수의 산정방법

1) 이론적 계산방법

정상상태에서 확산계수 D, 노출시간 t, 유효 비 접촉면적 A/V가 일정하다고 가정할 때 아래 식에 의해 $K_L a$ 를 산정 가능하다.

$$K_L a = K_L \times \frac{A}{V} \tag{9}$$

$$= 2 \times \sqrt{\frac{D}{\pi t}} \times \frac{A}{V} \tag{10}$$

여기서,

$K_L a$ = 산소전달계수, (T^{-1})

D = 분자확산계수, (ML^{-1})

A = 기액계면의 접촉면적, (L^2)

K_L = 물질이동계수, (LT^{-1})

V = 접촉부피 (L^3)

t = 접촉시간 (T)

2) 포기실험에 의한 방법

- 정상 포기법

물질전달이 일어나는 안정된 상태에서 정상적으로 운전되고 있는 포기조의 $K_L a$ 가 계산된다. 하수처리장의 활성슬러지나 불순물이 포함된 원수에 이용되며 산소섭취속도는 \bar{y} 와 포기조의 단위면적당 산소공급속도(dC/dt)가 동일한 정상상태로 가정하여 계산한다.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a(C_s - C) - \gamma \tag{11}$$

여기서 정상상태이면 $dC/dt=0$ 이고 식 (12)가 된다.

$$K_L a(C_s - C) = \gamma \tag{12}$$

따라서

$$K_L a = \frac{\gamma}{C_s - C} \tag{13}$$

이들 방법은 보통 Lewis와 Whitman의 Two-film 이론에 기초를 두고 전달 계수를 산정하고 있다.

- 비정상포기법

산소가 고갈된 상태에서 인위적으로 포기에 의해 산소를 주입하여 상수의 용존산소를 증가시켜 산출하는 방법이다.

여기서 $K_L a$ 는 단위 부피에 대해 시간당 DO 농도변화를 측정함으로써 산출가능하다.

$$V \frac{dC}{dt} = K_L a(C^* - C)V \tag{14}$$

여기서,

V = 반응조의 부피, (L^3)

C^* = 실험결과로 추정된 평균 포화

용존산소의 농도, (ML^{-3})

$K_L a$ = 산소전달계수, (T^{-1})

C = 용존산소의 농도, (ML^{-3})

t = 시간, (T^{-1})

여기서 $C = C_0$ 일 때, t = 0로 두고 적분하여 미분식을 풀면 식 (15)가 된다.

$$K_L a = -\frac{1}{t} \ln\left(\frac{C - C^*}{C_0 - C^*}\right) \tag{15}$$

따라서 실험에 의해 시간 t, 평균포화산소농도 C^* , 실험 초기 산소농도 C_0 , 시간에 따라 실측된 산소농도 C를 구하여 $K_L a$ 를 수치로 확인할 수 있다.

2.4.2. 산소전달계수 실험장치

실험은 산소용해장치를 이용하여 공기 중의 산소를 4~5 kg/cm^2 상태에서 수중 용해시킨 실험구와 일반적인 상업용 산기석을 이용한 대조구로 구분하여 실시하였으며, 두 장치의 DO 변화를 연속 측정하여 산소전달효율을 계산하였다.

제한 인자인 공기유량은 공기유량 게이지를 이용하여 3.2 L/min으로 유지하였으며, 초기 DO를 zero로 하기 위하여

Na₂SO₃를 132 mg/L 주입하였다. 수질 연속 모니터링장치 (YSI SONDE 6600)를 이용하여 30초 간격으로 DO를 연속 측정하여 PC로 전송시켜 도시하였다. 반응조의 용량은 25L, 기계 순환에 의한 HRT는 3.4분이었다.

공기의 주성분은 N₂, O₂, CO₂로 구성되어 있으며, 구성비는 78:21:0.03이다. 대기층과 수층 경계면에서 헨리의 법칙에 의해 상(phase)간 이동이 일어나면, 산소가 수중에 용해되어 DO는 증가하게 된다. 이에 따라 공기 중에 가장 높은 분율을 차지하고 있는 질소의 수중 축적 가능성을 배제할 수 없으므로 Nitrate와 산소농도의 증가비 또한 비교해 보았다.

2.5. DO에 관한 물질수지식

2.5.1. 수체에 완전혼합반응(CSTR) 후 DO에 관한 물질수지식

소규모 호소는 체류시간이 길고 물질의 유입과 유출이 있는 완전혼합반응의정상상태로 볼 수 있다.

Fig. 5는 CSTR 조건에서 호소수계의 물질거동을 도식한 것이며, 수체 내에서 DO 소모는 BOD와 SOD 소모량이 대표한다고 가정하면, DO 소모량과 BOD 그리고 SOD 소모량의 관계는 식 (16)과 같게 된다.

$$DO_c(t) = k_1 \cdot BOD + k'_1 \cdot SOD(t) \tag{16}$$

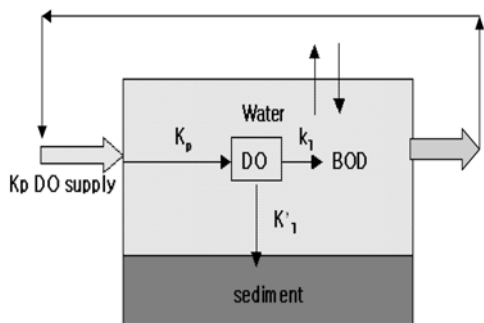


Fig. 5. Steady state flowchart of DO supply and consumption in pond.

수중 DO 유입은 채포기나 생화학 작용에 의한 것으로 실험구와 대조구 모두 동일한 조건으로 가정하였다. 산소 용해수의 주입량과 전체수계에 산소 변화량과의 비율을 이용하여 전체 산소전달 효율을 평가하였으며, 식 (17)의 DO product는 산소 용해장치에 의해 공급되는 DO량이고 K_p는 공급율이다.

$$DO_{product}(t) = K_p DO_{sat} - DO(t) \tag{17}$$

위 식들에 연못내 DO 농도의 미소변화를 합하면 식 (18)이 되고

$$DO(t + \Delta t) = DO(t) + k_p [DO_{sat} - DO(t)] \cdot \Delta t - k_1 \cdot BOD(t) \cdot \Delta t - k'_1 \cdot SOD(t) \cdot \Delta t \tag{18}$$

또한 식 (19)와 (20)과 같다.

$$\frac{DO(t + \Delta t) - DO(t)}{\Delta t} = k_p [DO_{sat} - DO(t)] - k_1 \cdot BOD(t) - k'_1 \cdot SOD(t) \tag{19}$$

$$\frac{dDO}{dt} = k_p [DO_{sat} - DO(t)] - k_1 \cdot BOD(t) - k'_1 \cdot SOD(t) \tag{20}$$

연구대상 연못은 강우 및 증발에 의한 유입 유출을 제외하면 정상 상태이며, 강우 시 연못주변의 산책로 지역에서 오염물질이 유입될 수 있으나 배수로에 대부분 차집 되므로 고려하지 않았다.

정상상태에서 변화량의 평균값은

$$BOD_{ave} = \frac{A}{k_1} \text{ 와 } SOD_{ave} = \frac{A}{k'_1} \text{ 이고}$$

$$DO_{ave} = DO_{sat} - \frac{A}{k_p} \text{ 가 된다.}$$

A는 초기 DO 농도이며, 앞에서 언급한 바와 같이 유입은 없는 것으로 가정하였다. 수체의 DO 소모는 수층은 BOD, 저층은 DO 소모량이 가장 많은 데 SOD를 측정하여 기준값으로 하였다.

이를 종합적하여 CSTR 조건에서 물질수지식으로 나타내어 보면

$$dCV = C_{in}Qdt - V(k_1 + k'_1)Cdt - CQdt \tag{21}$$

양변을 C에 관해 정리하면

$$\frac{dC}{dt} = C_{in} \cdot \frac{Q}{V} - (k_1 + k'_1) \cdot C - C \cdot \frac{Q}{V} \tag{22}$$

CSTR에서 좌변이 0이고 V/Q = θ 이므로

$$\frac{1}{\theta} = \frac{(k_1 + k'_1) \cdot C}{C_{in} - C} \tag{23}$$

이며 이 식을 이용하면 반응계수와 농도변화 그리고 체류시간(HRT)과의 관계를 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산소전달계수(K_La) 산정

1) 산기석을 이용한 경우

DO 농도는 초기 20분까지는 직선형으로 증가하였으나 이 이후에는 증가폭이 완만해지기 시작하여 평형을 이루는 점 이후의 농도를 평균하여 C*를 결정하였다. 식 (15)을 통하여 계산된 산소 전달계수는 다음과 같다.

$$K_{La} : 0.11/\text{min}$$

$$C^* : 8.42 \text{ mg/l (반응 약 50분 후)}$$

2) 산소 용해수를 이용한 경우

산소 용해수를 이용하여 대조구와 동일한 공기량을 주입 하였을 때 산소전달율이 6.5배 높게 나타났다. 이는 산소 용해수 장치의 기계적인 압력조절에 의한 것으로서 압력에 의한 영향으로 초미세기포가 생성되고 용해도를 높여 산기 석에 비해 산소전달속도가 4.9~5.9배 높게 나타난 것으로 평가된다.

$$K_{1,a} : 0.68 /\text{min}$$

$$C^* : 9.32 \text{ mg/L (반응 약 9.5분 후)}$$

3.2. 용존산소(DO)에 의한 물질 수지식

CSTR 조건에서 물질 수지식으로 나타내면

$$dC \cdot V = C_{in} \cdot k_p \cdot Qdt - V \cdot Cdt - C \cdot Qdt \quad (24)$$

K_p 는 산소 용해장치에서 발생하는 산소가 수계에 완전혼합 반응에 의해 전달되는 분율을 나타내며 이를 구하기 위해서는

$$\frac{dC}{dt} = C_{in} \cdot k_p \cdot \frac{Q}{V} - C - C \cdot \frac{Q}{V} \quad (25)$$

θ 에 관해 다시 정리하면

$$\frac{1}{\theta} = \frac{C}{C_{in} \cdot k_p - C} \quad (26)$$

산소 용해장치를 이용한 경우 산소생산계수 k_p 는 $C_{in} = 9.38 \text{ mg/L}$, $\theta = 9.5 \text{ min}$, $C = 9.32 \text{ mg/L}$ 의 조건에서 장치에서 발생된 908.9 mgO_2 에 비교해 보면, 실제 반응조에서 측정된 농도는 98%의 분율을 가졌다. 연못물을 사용하였을 경우는 92%, 하수원수의 경우 평균 85%로 오염정도에 따라 다른 값을 나타내었다. 따라서 k_p 는 수질특성과 조건에 따라 0.85~0.98 정도의 값을 나타내는 것으로 평가되었다.

3.3. Nitrate와 산소농도 증가비

산기식 포기과 산소 용해장치에 의해 공급된 일부산소에 의하여 질소가 산화되어 nitrate 형태로 전환되는 것을 알

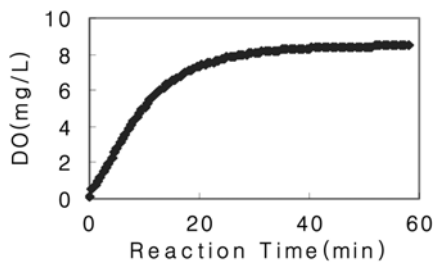


Fig. 6. Variation of dissolved oxygen concentration using diffused aeration system.

수 있었으나 산소증가량 대비 질소 증가 분율은 0.0143 nitrate/oxygen(산기식 포기)과 0.0083 nitrate/oxygen(산소용해장치)로 크지 않았다. 산기식포기가 산소용해 장치보다 1.7배 정도 높게 나타난 것은 산소 용해장치에서 증가하던 산소와 질소의 분압이 고압 4~5 Kg_f/cm^2 에서 저압 1 Kg_f/cm^2 으로 급격한 압력 변화를 거치며 질소계 물질이 휘발되었기 때문으로 사료된다.

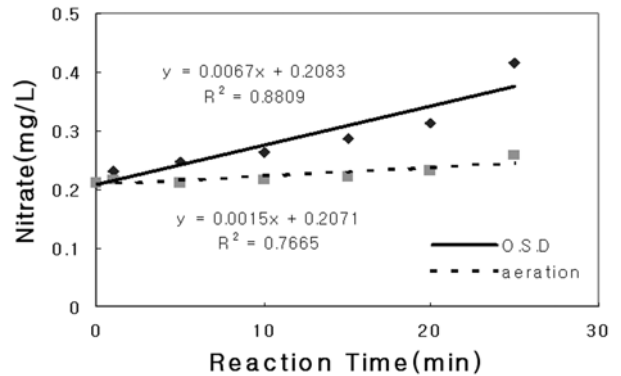


Fig. 8. The variation of nitrate concentration with the O.S.D system operated.

3.4. 탈산소계수 (K_t)

실험구와 대조구 모두 24°C에서 DO가 포화될 때까지 30분간 반응 시킨 후 운전을 중지하고 수질연속도모니터링 장치(YSI SONDE 5600)를 이용하여 DO를 측정 한 결과는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다.

산기석을 이용하여 30분간 폭기시킨 결과 24°C에서 최고 8.42 mg/L를 나타내었고 반응을 정지한 후 5분 만에 반응 전 농도인 5.86 mg/L로 평형상태를 유지하였다. 산소 용해장치를 이용한 산소 공급은 DO가 최고 15 mg/L까지 상승하였으며, 5분경과 후에는 11.0 mg/L, 24시간이 경과하여도 수체잔류성이 높아 7.0 mg/L에서 평형상태에 도달하였다. 산소용해수의 산소전달계수는 기존 산기석에 의한 폭기법에 비해 6.5배정도 높았으며 탈산소 속도 역시 평형상태에 도달 때까지 24시간 이상이 소요되어 잔류성도 우수한 것으로 나타났다.

3.5. 파일럿 플랜트의 수질변화

3.5.1. 파일럿 플랜트의 DO 변화

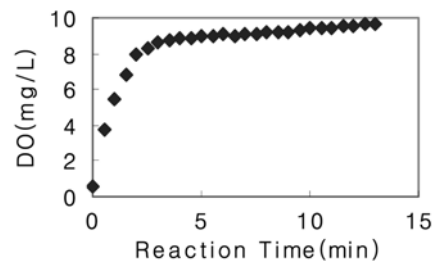


Fig. 7. Variation of dissolved oxygen concentration using oxygen solubilization device system.

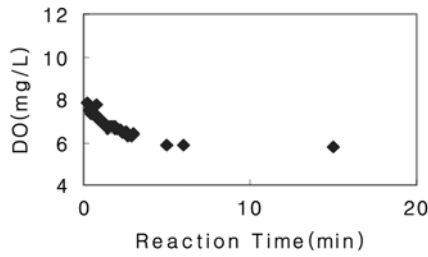


Fig. 9. The variation of DO concentration using aeration system.

DO는 조류의 번식과 수심 및 교반상태에 많은 영향을 받으므로, 저질의 SOD가 실제 연못에서는 어떻게 작용하고 있는지를 파악하기 위하여 낮은 수심에도 표층과 저층을 나누어 측정하였다. 수체의 평균 DO 농도는 하계 고온시 산소포화도가 낮아짐에 따라 낮은 농도를 나타내는 것이 일반적이지만, 실험구에서는 평균 2 mg/L 이상의 높은 값을 유지하고 있었다. 또한 저질에서 5 cm 상부에서 측정된 DO는 실험구에서는 1 mg/L 내외의 차이가 있었지만, 대조구에서는 2 mg/L 이상이 차이가 발생, 같은 수심임에도 불구하고 DO의 농도차가 표층과 저층의 차이로 나타남을 알 수 있었다. 이는 SOD 측정 시 대조구에서 최고 4배 이상 산소를 소모하는 것으로 보아 저질에서 많은 산소를 필요로 했기 때문으로 판단되며, 산소용해수는 저질의 필요한 산소를 공급함으로써 표층과 저층의 DO 차이를 줄이는 역할을 하는 것으로 나타났다.

대조구 대비 총 DO 21.46 KgO₂가 증가하였으며, 위와 같은 양의 O₂가 수계에 전달되어 수질 정화에 기여한 것으로 판단된다(Fig. 11).

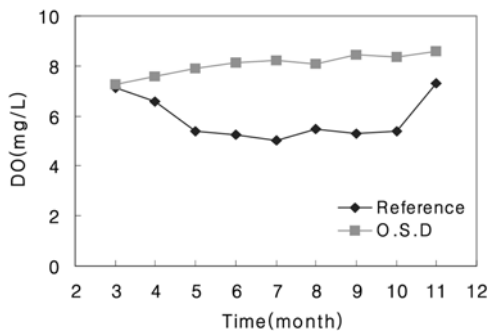


Fig. 11. DO concentration and control in sediment in O.S.D and control.

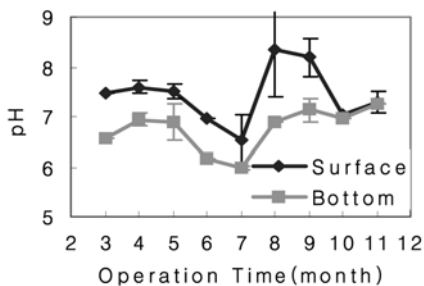


Fig. 12. The variation of pH in condition of control.

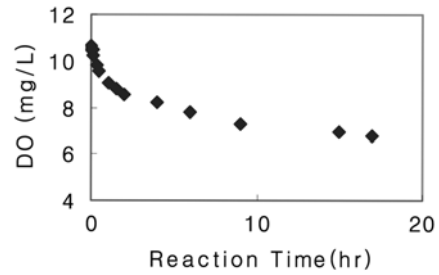


Fig. 10. The variation of DO concentration using O.S.D system.

3.5.2. 파일럿 플랜트의 pH 변화

DO처럼 pH 변화 또한 저질의 산화 및 물질 용출에 기여도가 크다. 실험구와 대조구의 표층과 저층의 pH 차이를 보면 실험구에서는 계절적 영향을 일부 받았으나 전반적으로 pH 7.0의 값을 나타낸 반면 대조구에서는 pH 6.0까지 낮아져 약 산성을 나타내는 것을 볼 수 있었다, 이러한 결과가 대조구 저층에서의 물질 용출에 기인한 것으로 판단된다.

3.5.3. 파일럿 플랜트의 DO 물질 수치

- 산소용해수발생장치의 유량 : 8 m³/hr
- 발생 DO량: 평균 13 mg/L
- 플랜트의 HRT : 2.6 day
- 호흡률(Control): 2.04 mgO₂/L · d

위와 같은 조건 하에서 수체의 산소 요구량은 BOD를, 저질의 산소요구량은 SOD를 대표 값으로 사용하여 반응 전 실험구와 대조구 모두 수체 내에서 필요로 하는 산소량인 총 RO(Required Oxygen)를 산정한 결과 29.8 kg/d 값을 얻었다. 이중 산소 용해장치에 의하여 공급되는 산소량은 RO의 8.4%에 해당하는 2.5 kg/d였다.

5개월간의 운전 결과를 바탕으로 SOD를 통하여 수질 정화 효과를 살펴본 결과, 산소용해수를 가동한 실험구 연못의 산소소비량이 5개월 동안 총 21.5 KgO₂ 감소하였고, 5개월간 생성된 374.4 KgO₂ 중 5.7%가 SOD 정화에 이용된 것으로 평가되었다.

4. 결론

1) 일반적인 산기석을 이용한 경우 K_La (산소전달계수)는

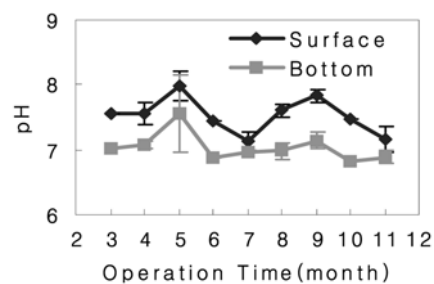


Fig. 13. The variation of pH in condition of O.S.D.

- 0.10/min, C^* 값은 8.42 mg/L였고, 산소용해수의 K_{La} 은 0.68 /min이며, C^* 값은 9.32 mg/L로 산기석을 이용한 전달율보다 6배 정도 우수하였다.
- 2) 반응조 내 질소는 산화되어 nitrate 형태로 DO 농도의 1% 미만으로 이내로 증가하였다.
 - 3) 과포화시킨 후 산기석 포기는 8.42 mg/L까지 상승했고 반응을 정지한 후 5분 만에 5.8 mg/L의 평형상태를 유지하였고, 산소용해장치는 산소 공급 후 DO 변화는 최고 15 mg/L까지 상승하였고 24시간 후에도 7 mg/L 이상 유지하였다.
 - 4) 산소 용해장치의 탈산소 속도는 TOC 기준 5 mg/L의 유기 탄소에 대비 240배 정도 낮았다. 이는 수중에 산소용해수가 용존되어 쉽게 탈기되지 않았음을 의미한다.
 - 5) 파일럿 플랜트의 산소용해수는 대조구 대비 5개월 동안 총 주입 DO량 중 5.7%인 21.46 KgO₂가 증가하였고 이를 통해 수질 개선이 이루어졌다.
 - 6) 저질 개선 효과는 실험구 12.18 gO₂/m² · d이며 호소전체에 SOD에 의한 RO는 7.308 KgO₂였고 대조구는 47.95 gO₂/m² · d이며 호소전체에 SOD에 의한 RO는 28.77 KgO₂로 5개월 동안 저질에서는 4배의 RO 개선 효과가 있었다.

참고문헌

- 국립환경연구원, 낙동강 수계 수중생태계 수질모델인자 조사 (2003).
- 김선규, 이병두, 조창국, 송호영, 이용우, 김석구, 석관수, 수중폭기에 의한 상수원 수질개선 효과분석, *한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동 춘계 학술발표회 논문집*, pp. 77-80 (2001).
- 손희중, 정철우, 강임석, 상수원수중의 천연유기물질 특성과 염소 소독부산물 생성의 관계, *대한환경공학회지*, **26**(4), pp. 457-466 (2004).
- 정하영, 조경재, 낙동강 하류 수계에서 저질 퇴적층의 SOD와 영양염 용출, *한국육수학회지*, **36**(3), pp. 322-335 (2003).
- Ashley, K. I., Hypolimnetic Aeration: Practical Design and Application, *Water Research*, **19**, pp. 735-740 (1985).
- Appan, A. and Ting, D.-S., A Laboratory Study of Sediment Phosphorus Flux in Two Tropical Reservoirs, *Water Science and Technology*, **34**(7,8), pp. 45-52 (1996).
- Bartoli, M., Nizzoli, D. and Viaroli, P., Microphytobenthos Activity and Fluxes at the Sediment, Water Interface: Interactions and Spatial Variability, *Aquatic Ecology*, **37**, pp. 341-349 (2003).
- Cowan, J. and Boynton, W., Sediment-Water Oxygen and Nutrient Exchanges along the Longitudinal Axis of Chesapeake Bay: Seasonal Patterns, Controlling Factors and Ecological Significance, *Estuaries*, **19**(3), pp. 562-580 (1996).
- Deppe, T. and Benndorf, J., Phosphorus Reduction in a Shallow Hypereutrophic Reservoir by in-lake Dosage of Ferrous Iron, *Water Research*, **36**, pp. 4525-4534 (2002).
- Kim, L.-H., Choi, E. and Stenstrom, M. K., Sediment Characteristics, Phosphorus Types and Phosphorus Release Rates between River and Lake Sediments, *Chemosphere*, **50**(1), pp. 53-61 (2003).
- Little, J. C., Hypolimnetic Aerators: Predicting Oxygen Transfer and Hydrodynamics, *Water Research*, **29**(11), pp. 2475-2482 (1995).
- McGinnis, D. F. and Little, J. C., Bubble Dynamics and Oxygen Transfer in a Speece Cone, *Water Science and Technology*, **37**(2), pp. 285-292 (1998).
- Ramstad, T. and Nestrick, T. J., Determination of Polar Volatiles in Water by Volatile Organics Analysis, *Water Research*, **15**, pp. 375-381 (1981).
- Reckhow, D. A., Legube, B. and Singer, P. C., The Ozonation of Organic Halide Precursors: Effect of Bicarbonate, *Water Research*, **20**(8), pp. 987-998 (1986).
- Salyards, M. J., Knighton, W. B. and Grimsrud, E. P., Effects of Oxygen and Water on the Resonance Electron Capture Reactions of Low Electron Affinity Compounds, *International Journal of Mass Spectrometry*, **222**, pp. 201-212 (2003).
- Soltero, R. A., Sexton, L. M., Ashley, K. I. and Kim, O. M., Partial and Full Lift Hypolimnetic Aeration of Medical Lake, WA to Improve Water Quality, *Water Research*, **28**(11), pp. 2297-2308 (1994).
- Steeby, J. A., Hargreaves, J. A., Tucker, C. S. and Cathcart, T. P., Modeling Industry-wide Sediment Oxygen Demand and Estimation of the Contribution of Sediment to Total Respiration in Commercial Channel Catfish Ponds, *Aquacultural Engineering*, **31**, pp. 247-262 (2004).
- Wagner, M. R., Popel, H. J. and Kalte, P., Pure Oxygen Desorption Method-A New and Cost Effective Method for the Determination of Oxygen Transfer Rates in Clean Water, *Water Science and Technology*, **38**(3), pp. 103-109 (1998).