

산소용해수를 이용한 호소 저질 및 수질개선에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Pond Sediment and Water Quality Purification using Oxygen Solubilization Device(OSD) System

김영택¹ · 배윤선² · 노은경² · 박철휘^{2,*} · 이연구³

Young-Taek Kim¹ · Yoon-Sun Bae² · Eun-Kyung Roh² · Chul-Hwi Park^{2,*} · Yeon-Ku Lee³

1 한국건설기술연구원 건설환경연구부

2 서울시립대학교 환경공학부

3 대성이앤비

(2005년 10월 31일 논문 접수; 2006년 1월 19일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The pollution in closing water can be caused by not only artificial factor like sewage but also natural factor like elution from sediment.

In this study we analyzed Sediment Oxygen Demand (SOD) for verification of sediment purification effect and sediment elution experiment as well as general items like COD, TN, TP, SS to complement and assess the effect of sediment and water quality.

The experiment result showed that the release rate of OSD system were 4 times and 3 times as large as control for P and Fe respectively. SOD for operated OSD system and control were $12.18\text{gO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ and $47.95\text{gO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. From water qualities analyzed by COD, TN, TP, SS, chlorophyll-a, the removal efficiency increase of TN, TP, chlorophyll-a and COD were about 10~20%, 40~50% and 10% respectively.

In conclusion, OSD can contribute to improvement of both the waterbody and the sediment environment effectively.

Key words: Oxygen solubilization device, Sediment Oxygen Demand(SOD), Water quality purification

주제어: 산소용해장치, 저질산소요구량, 수질개선

1. 서론

호소 및 하천은 유역에서 발생하는 인위적인 오염 물질로부터 오염될 수 있지만, 자연적인 요인 중의

하나인 저질의 용출로 인한 오염도 부영양화의 중요한 요인으로 지적되고 있다. 이는 저니 내부의 중금속 및 인이 존재하고 있으며 저니 표면에서 미생물의 활동 및 입도분포가 경계면에서의 흡착 및 용출의 중요한 원인으로 작용하기 때문이다.

*Corresponding author Tel: 82-2-2210-2176, FAX: +82-2-2244-2245, E-mail: chpark@uos.ac.kr (Park, C.H.)

우리나라의 저수지에 설치된 수중폭기장치에 의한 N, P, chlorophyll-a 등과 같은 일반 수질항목 분석을 통한 호소 및 하천에 대한 수질 개선 효과에 대한 연구(서, 2004)는 보고되고 있지만, 저질의 용출로 인한 오염을 배제할 경우 수체 전반적인 수질 개선 효과분석이 불가능하다.

호소나 하천수의 저질에서는 많은 생화학적 반응이 진행되고 있다. 특히 수층과 저층이 만나는 경계면(water-sediment surface)에서 반응이 가장 많이 일어나며 퇴적된 유기물이 미생물이나 저서생물 혹은 화학적 기작에 의해 분해되는 에너지 대사 과정이 일어나게 된다. 미생물에 의해 유기물이 분해되는 과정은 산소 또는 산화물을 전자수용체(electron acceptor)로 필요로 한다(Abrams & Jerrel, 1995).

저질은 수계에서 퇴적층은 영양염의 순환에서 중요한 역할을 하며, 수층-저질(water-sediment surface) 사이에서 무기영양염의 이동 양상은 영양염의 농도나 생산성을 변화시키고 영양단계에 영향을 주기도 한다(Bostr m et al., 1982).

퇴적층 내 축적된 다량의 유기물이 분해되면서 산소를 소비하여 하천이나 호소의 저층이 무산소 상태가 되면 이 과정에서 pH나 ORP 변화가 수반 되는데 이때 영양염류의 재용출을 용이하게 할 수 있다. 이러한 결과는 부영양화의 제한인자로 작용하는 인(Phosphorus)이 무산소 조건에서는 Fe-P 상태로 용출이 일어나며, 호기 조건에서는 착염상태로 존재한다는 사실이 보고되기도 하였다(Jansseon et al., 1988). SOD와 영양염 용출에 관한 실험 결과에 의하면 SOD는 온도의 상승에 따라 직선적으로 증가하고, 저질에서 영양염 용출은 호기/빈산소 조건, 온도, 유기물의 함량에 따라 영향을 받으며, NH₄⁺와 SiO₂는 용존산소와 관계없이 용출이 일어나지만, 25°C 이상에서 PO₄³⁻는 빈산소 조건에서 용출량이 많고, 호기조건에서는 적은 것으로 나타났다. 또한 NH₄⁺, SiO₂와 PO₄³⁻는 온도증가에 지수적으로 늘어난 반면, NO₃⁻는 무산소에서 호기 상태보다 흡수가 빠르고 온도의 증가에 비례하는 것으로 나타났다(정과 조, 2003).

호소에서 인의 제거는 인위적인 준설 및 정수식물을 통해 가능하지만, 저니에 흡착된 인의 용출을 저해함으로써 효율적으로 호소 내에서의 인을 통제할 수 있다. 인은 일반적으로 아래와 같은 방법으로 침

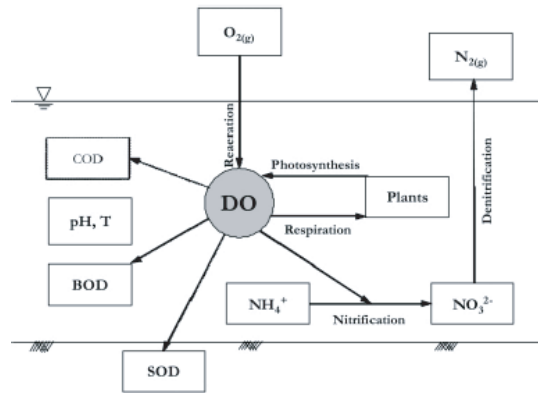
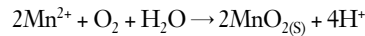
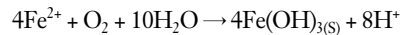
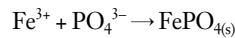


Fig. 1.1. A schematic of the major processes influence the concentration of DO in rivers. (Makoto Higashino et al.)

전된다.



본 연구에서는 COD, TN, TP, SS, chlorophyll-a와 같은 일반 수질항목의 분석과 더불어 저질의 개선 효과를 검증하기 위한 SOD, 저질용출 실험을 병행하여 수중폭기 및 미세기포 발생이 가능한 산소용해장치(Oxygen solubilization device)를 통한 수체 전반적인 수질 개선 효과를 분석해 보고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. SOD 측정

SOD 실험은 2004년 3월부터 서울시립대학교 소재 연못에 산소용해장치를 가동한 후, 저니의 산소요구량(SOD)을 파악하기 위하여 8, 9, 10월 3개월간 산소용해장치를 운전한 실험구와 자연상태의 대조구의 저니에 대하여 코어를 이용하여 각각 5곳을 무작위로 선택하여 채취하였다.

실험은 회분식 조건으로 실시하기 위하여 배양기는 아크릴로 제작였으며, 지름 8cm, 높이 34cm로 총 용량은 2.4L였다. 시료는 파일렛 플랜트의 실험구와 대조구의 저니를 채취하여 반응조 바닥에 5cm 깔고, 각각 현장수를 여과하여 포기시킨 후 사용하였다. DO 농도는 반응조 바닥으로부터 5cm 상부에 위치

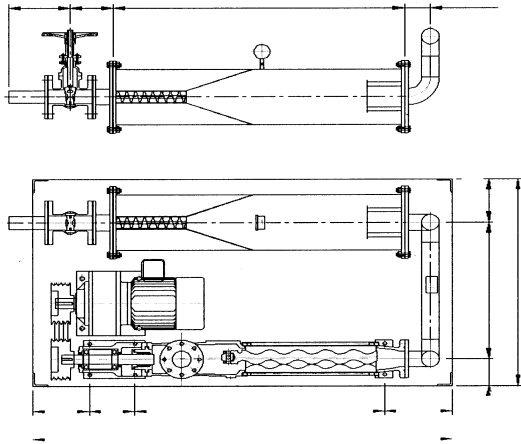


Fig. 2.1. OSD system plane figure.

곳에 유출관을 DO미터(YSI 2100)와 연결하여 6~10 hr 동안 연속 측정하였다.

SOD는 실험구와 대조구에서 시간에 따른 용존산소 소모량($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)을 연속적으로 측정함으로써 현장수의 부피와 반응조의 단면적을 이용하여 아래와 같은 방법으로 산출하였다.

$$\text{SOD}(t_1) = \text{SOD}(t_2) \times 1.065^{(t_1 - t_2)} \quad \text{식 2.1}$$

여기서, t_1 : culture temperature($^{\circ}\text{C}$)

t_2 : standardized 20°C

수계의 각기 다른 온도에 대한 용출속도를 보정하기 위하여 아래의 식이 이용되었으며 실험은 20 ± 1 에서 수행되었다.

$$\text{SOD}(\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}) = \frac{(\text{O}_c)(V)}{(A)(t)} \quad \text{식 2.2}$$

여기서, O_c : O_2 consumption(mg/L)

V : water volume(L)

A : water-sediment interface area(m^2)

2.2. 영양염류 및 중금속 용출 측정

저니 내의 중금속 농도, 저니 표면의 미생물의 활동 및 입도분포도는 흡착 및 용출의 중요한 원인이 되기도 하는데, 이를 위해 인과 유기물의 용출을 확인하기 위한 시스템을 구성하여, 실험을 실시하였다.

Table 2.1. System specification

	Power (phase, voltage), (kw)	Capacity (m^3/hr)	Dimensions (L x W x H)
OSD	(3p, 220/380), 4.0	20	100 x 800 x 800
Zet-streamer	(3p, 220/380), 1.5	300-600	1500 x 40 x 700

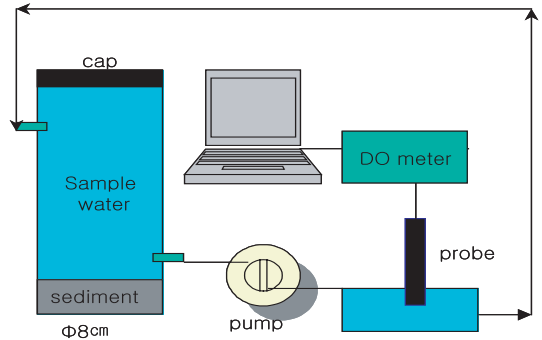


Fig. 2.2. SOD recording system.

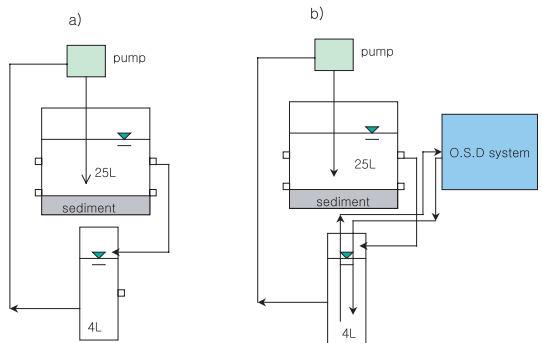


Fig. 2.3. Release and sorption test system a) is control, b) is experiment condition using OSD system.

서울시립대학교 소재 연못을 대상으로 pH 7~8로 정하고 온도는 $18 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 에서 DO를 실험구는 $8\text{mg}/\text{L}$ 로 산소용해장치를 이용하면서 유지하였고 대조구는 성층화시 저층의 조건으로 유지하기 위하여 질소가스를 이용하여 탈기시킨 후 $0.78\text{mg}/\text{L}$ 에서 실험을 시작하였다.

반응조는 아크릴로 가로, 세로, 높이가 각각 0.3m로 제작하였으며 저니는 지름이 5mm인 스테인레스 체(sieve)로 걸러 입자가 큰 불순물을 제거하여 $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, Fe^{2+} 의 각각 초기농도를 측정 후 1~2일 간격으로 20일 동안 측정하여 단위면적당 흡착 및 용출정도를 화학적 반응에 의한 플럭스로 산

Table 2.2. Analytical items and experiment methods

Items	Analytical methods
Temperature	DO meter(YSI model 58), YSI 5600
DO	DO meter(YSI model 58), YSI 5600
COD _{Cr}	Closed Reflux Method(SM5220B)
Chlorophyll-a	Acid method
TN	Ultraviolet spectrophotometric method
TP	Ascorbic acid method
SS	Glass fiber filter method

출하였다.

$$F_{(\text{release \& sorption})} = \frac{(M_c)(V)}{(A)(t)}$$

여기서, $F_{(\text{release \& sorption})}$: Flux of release and sorption
($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)

M_c : material consumption(mg/L)

V : water volume(L)

A : water-sediment interface area(m^2)

2.3. 파일럿 플랜트 시험

실험 대상 연못은 용적 1,000 m^3 , 개방 면적 1,200 m^2 이며, 평균수심 0.8~0.9m이었다. 사용된 산소용해수 발생장치(OSD)는 시간당 8 m^3/hr , HRT는 63hr, 연못은 양방향으로 수체의 이동이 없도록 펜스를 설치한 후 장치를 설치한 실험구와 원 상태로 유지시킨 대조구로 분리하였다. 본 연구에 사용된 연못은 물의 유입과 유출은 없으며 강수와 증발에 의해서만 이루어지는 상태로 1,000 m^3 이상으로 유입량이 증가할 경우 맨홀로 자동 유출되어 배출되는 구조를 가지고 있다.

2.4. 일반 항목 분석

수질분석은 수질 오염 공정시험법과 Standard Methods에 준하여 이루어졌고, 세부 내용은 Table 2.2와 같은 방법으로 시료를 채취하여 분석을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 저니의 산소요구량(SOD)

코어를 이용하여 실험구와 자연상태의 대조구의

저니를 각각 5곳을 무작위로 채취한 시료를 일정한 비로 혼합하여 SOD를 측정하였다.

산소용해수 발생장치에 의한 시간별 저니의 자정력 복원정도를 조사하기 위하여 SOD 및 유기물 함량을 비교 분석하였다.

3.1.1. 온도에 따른 SOD 변화량

저니의 산소소모량은 온도의 변화에 따라 민감하게 반응하여 산소용해수 발생장치를 가동한 연못에서의 산소소모량이 3~4배 정도 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

일반적으로 여름철 수온이 증가하면 저층의 산소가 고갈될 가능성이 상존하고 있어 수심이 깊은 호소의 경우 충분한 DO 공급이 이루어지지 않을 경우, 혐기성 상태가 되어 조류성장에 필요한 인과 질소 성분 및 일부 무기물질이 유출되어 조류가 과대번식하게 될 우려가 발생하게 된다. 그러나 산소용해장치를 운전한 실험구의 경우, 계절에 따른 수온 변화에 따른 영향에도 불구하고 최고 27°C에서 15.18 $gO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 대조구의 16°C에서의 21.23 $gO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 의 절반에 미치는 수준을 유지한 것을 확인할 수 있었다.

이는 산소 용해수가 저질에 균일하게 혼합되어 수층표면과 저니부분의 용존산소농도를 균일하게 유지되게 하여 저니에서 생물학적으로 요구되는 용존산소와 일부 산화 반응에 이용되는 산소를 지속적으로 공급받았기 때문으로 판단된다.

3.1.2. 유기물 함량에 따른 SOD 변화량

SOD는 유기물 함량이 증가할수록, 온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다(Table 3.1). 유기물 함량은 탄소 함량(% Carbon contents)로 나타내었으며, 저질의 일부를 110°C에서 건조 후 550°C로 태워 무게차를 이용하여 다음 식으로 계산 하였다.

$$\% \text{ carbon} = \frac{\% \text{VS}}{1.8}$$

여기서, $\% \text{VS} = 100 - \% \text{Ash}$

대조구의 경우 계절적인 요인에 따른 온도 상승으

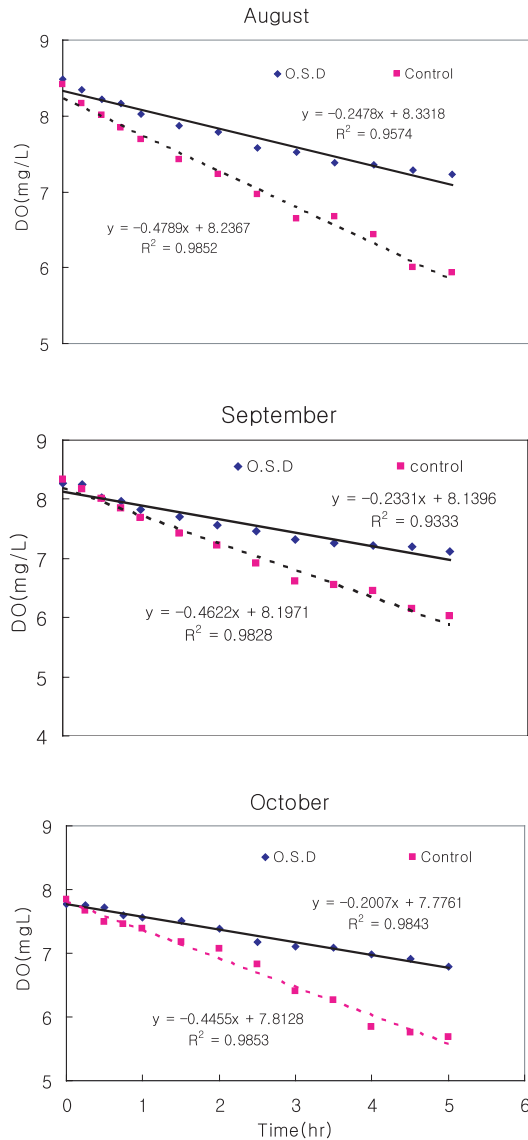


Fig. 3.1. SOD test on Aug. Sep. Oct.

Table 3.1. SOD test variation of temperature and carbon content

Items	Carbon contents(%)		SOD($gO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)			
	Operated OSD	Control	Operated OSD		Control	
			Field data	at 20°C	Field data	at 20°C
27°C(Aug.)	0.31	1.41	15.18	9.91	47.95	30.86
21°C(Sep.)	0.31	1.30	10.49	9.85	41.60	39.06
16°C(Oct.)	0.28	1.20	7.64	9.83	21.23	27.31

로 유기물 함량은 증가되었고, 그에 따른 SOD는 높게 나타났음에도 불구하고 산소용해수 장치를 가동한 실험구의 경우 일정한 경향이 나타나지 않았으며, 그 변화량도 0.5% 내외로서 온도의 영향은 인지하기 어려웠다. 저니에서의 온도에 의한 영향도 배제할 수 없으므로 그에 따른 추가의 연구가 필요하다. 여름철에는 저층의 산소고갈로 영양염류 용출이 초래할 수 있으나, Table 3.1을 보면 산소용해수의 운전이 호소 저니의 유기물 함량을 평균 75% 저감시켜 유기물 분해에 소모되는 산소 소비량이 감소하는 것으로 나타나 산소 용해수로 인하여 저니의 자정력이 향상되고 있음을 알 수 있었다.

탄소 함량과 SOD관계를 OSD 장치 실험조건과 대조조건을 비교하여 도시한 결과, 탄소함량이 증가할수록 SOD는 비례적으로 증가함을 알 수 있었으며, OSD 장치를 이용 시에서는 $R^2 = 0.952$ 로 나타났고, 대조구에서는 $R^2 = 0.916$ 으로 나타났다. 또한 2003년 조 등의 연구내용의 온도와 SOD를 Fig. 3.2와 같이 분석해보면 처리 과정에 상관없이 $R^2 = 0.8207$ 로 나타나 상관관계가 일관성을 나타내고 있으므로 저질의 유기물 함량과 SOD와의 관계는 자정능력에 비교적 중요한 영향인자임을 알 수 있었다.

3.2. 영양 염류 및 중금속 용출

20일 동안 날짜별로 P와 Fe의 농도를 측정하여 도시한 결과 P와 Fe의 용출은 DO농도에 많은 영향을 받음을 알 수 있었다. 단위시간에 대한 단위 면적당 용출량은 질소가스로 탈기시킨 무산소 조건의 경우가 산소용해수를 주입한 경우보다 P와 Fe이 각각 약 4배와 3배 높은 용출량을 보였다(Table 3.2).

초기 저질의 P와 Fe의 농도는 $582mgP/kg$ sediment와 $176mgFe/kg$ sediment였으나 반응이 종료된 20일

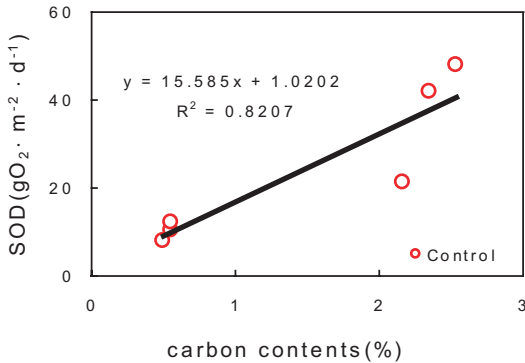


Fig. 3.2. The correlation of carbon contents and SOD.

후의 농도는 실험구의 경우 357mgP/kg sediment와 91 mgFe/kg sediment, 대조구의 경우 12mgP/kg sediment와 8mgFe/kg sediment로 낮아져 무산소 조건에서 용출량과 속도가 호기조건보다 높음을 확인 할 수 있었다.

이 결과는 Adhityan Appan(1996), Cho(2003), Kim et al.(2003)의 P 용출에 영향을 미치는 인자는 DO, 온도 및 pH 등이며, 이는 최고 5배까지도 용출량의 차이를 나타낸다는 내용과 일치한다.

3.3. 파일럿 플랜트의 수질 변화

3.3.1. COD 변화

연못의 COD는 유기물 변화의 지표로서 사용되었고 실험은 3월부터 분석하기 시작하여 월 2회 시료를 채취하여 분석한 결과를 평균치로 나타내었다. Fig.

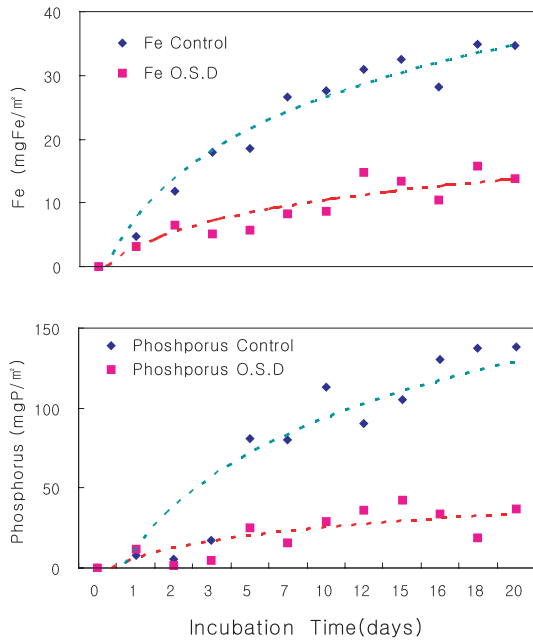


Fig. 3.3. Phosphorus release rates with experiment period.

3.4의 그래프에서 8월과 9월에 농도가 상승한 이유는 잦은 강우로 인한 인근 야산으로부터

유입된 유기물 부하량이 증가되거나 강우시 토구로 유입되는 우수의 낙차에 의해 저질이 교란되었기 때문으로 판단된다. 그러나 전체적으로는 8~20% 정도 COD 농도가 감소한 것으로 나타났다. 산소용해수의 역할은 유기물이 일부 산화시킴으로서 생분해도를 향상시키고, 저질에서 유기물을 분해시킴으로써

Table 3.2. Phosphorus and ferric release rates with experiment period.

Experiment period (days)	Phosphorus(mg P/m ²)		Ferric(mg Fe/m ²)	
	N ₂ stripping(DO 0.78mg/L)	OSD(DO 8mg/L)	N ₂ stripping(DO 0.78mg/L)	OSD(DO 8mg/L)
0	0.024	0.003	0.015	0.004
1	7.68	1.60	4.64	3.19
2	5.80	1.45	11.89	6.52
3	17.40	4.35	17.98	5.07
5	81.20	25.23	18.56	5.80
7	79.75	15.95	26.68	8.19
10	113.10	28.71	27.55	8.70
12	90.62	35.81	31.03	14.86
15	105.12	42.19	32.50	13.37
16	130.06	33.42	28.13	10.51
18	137.46	18.99	34.80	15.71
20	137.89	37.26	34.61	13.77

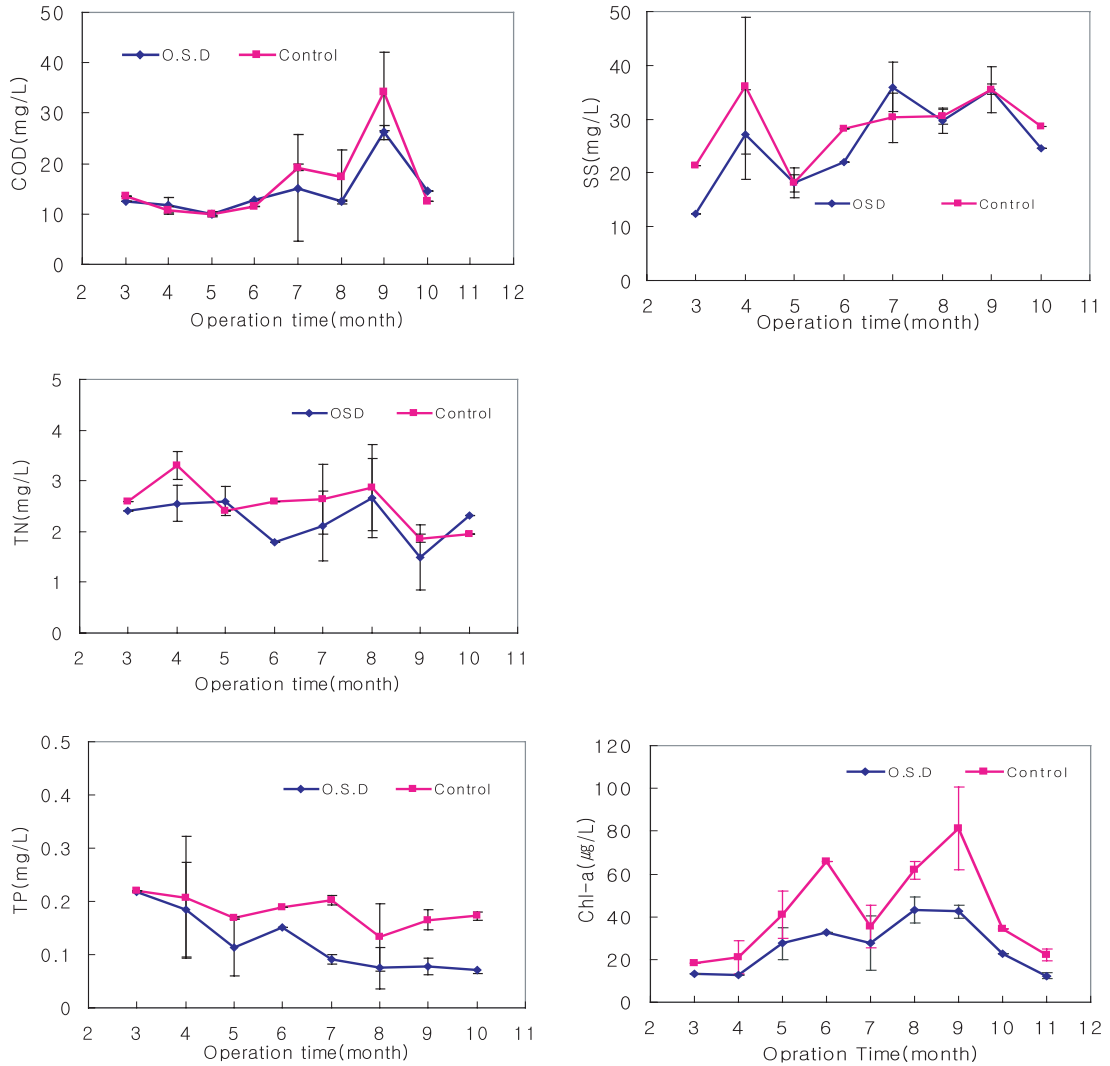


Fig. 3.4. The variation of water qualities in pond at 2004.

용출량을 감소시키는 것으로 판단된다.

3.3.2. T-N 변화

대조구의 T-N농도는 실험시작인 3월경보다 10월 중에 15% 정도 감소하는 경향을 나타내었으나, 실험 구도 비슷한 감소율을 나타내어 계절적인 요인이나 기후 조건이 원인인 것으로 판단된다.

3.3.3. T-P 변화

초기의 농도의 차이는 작년에 진행되었던(서성녀, 2004) 호소정화기술로 산소용해수와 미생물 제제를

이용한 결과, T-P가 감소된 것으로 보여지며, 6월 이후에는 실험구가 대조구에 비하여 평균적으로 40% 정도 감소하고 있는 결과를 보여주고 있다. 이는 실험실 조건에서와 같이 산소용해수로 인한 PO₄-P가 양이온 계통의 금속류와 결합하여 저질에 흡착됨으로써 용출되지 않았기 때문이며, 저질의 T-P 농도는 수계에서 농도가 감소됨에 따라 저질의 인 함량이 저질의 건조 중량으로 284에서 306mg/kg으로 증가한 결과를 통해서 추정이 가능하다. 또한 조류 생체량에 대한지표로 사용되는 chlorophyll-a의 값과도 유사한 경향을 나타내는 바, 조류 성장의 제한 요인으로 작

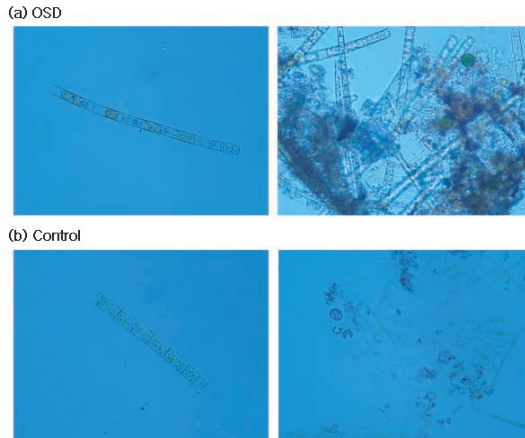


Fig. 3.5. The microphotograph of algae in pond

용하였을 것으로 판단된다.

3.3.4. SS 변화

본 연구에 적용된 연못은 일반적인 연못에 비하여 수중에 부유물질이 많아 30NTU 이상의 비교적 높은 탁도를 유지하고 있는 것으로 나타났는데, 이는 수심이 낮은 상태에서의 분수의 가동이 저질층을 교란시켜 미세입자의 점토질과 콜로이드성 입자의 부상을 유발시켰기 때문으로 판단된다. 계절적인 요인으로서 하절기에 증가하는 경향은 3.3.1절에도 언급하였듯이 많은 강우량과 높은 강우빈도로 인해 외부에서 유입되는 부유물질 증가에 기인한 것으로 판단된다.

3.3.5. Chlorophyll-a 변화

본 연구에서 적용된 연못에서는 녹조류인 *Aulacoseira sp.*가 주로 발견되었다. Fig. 3.5를 보면, 대

Table 3.3. N/P ratio and chlorophyll-a concentration.

Month	Operated OSD		Control	
	N/P	Chlorophyll-a (µg/L)	N/P	Chlorophyll-a (µg/L)
3	11.01	13.4	11.76	18.2
4	13.78	12.7	15.90	20.85
5	22.81	27.45	16.11	40.9
6	11.92	32.8	9.29	65.6
7	23.19	27.7	13.03	35.4
8	35.84	43.25	16.92	61.7
9	19.23	42.35	11.30	81.4
10	32.91	22.4	11.25	34.2
11	18.77	12.3	12.05	22.1

조구의 경우 세포벽 내부에 엽록소로 포화되어 있으나, OSD 장치를 가동한 실험구에서는 엽록소양이 적거나 일부 세포벽 내부가 비어있었고, 조류의 서식 형태도 실험구는 생육에 저해를 받는 것으로 보이는 집단으로 덩어리 형태로 엉켜 있음을 볼 수 있다.

앞에서 실험한 결과를 토대로 분석해 보면 산소용해수는 저층뿐만 아니라 전 수체에 용존산소를 공급함과 동시에 저층의 유기물을 이산화탄소로 산화시켜 유기물 함유량을 저감시킴으로써 저질에서의 SOD를 감소시켜 포화상태에 가까운 용존 산소 농도의 유지가 가능하였다. pH는 영양염류 및 미량원소를 용출시키는 주된 원인이 되기 때문에 가능한 한 pH 7의 중성 부근에서 유지하고 충분한 상태의 용존 산소 농도를 유지함으로써 인산과 철 등의 영양염류 용출을 억제한 결과 Fig. 3.4에 나타난 바와 같이 chlorophyll-a 농도는 실험구에서 보다 낮게 나타났고, Fig. 3.5와 같이 조류의 생육에 저해를 받아 성장이 억제된 것으로 판단된다.

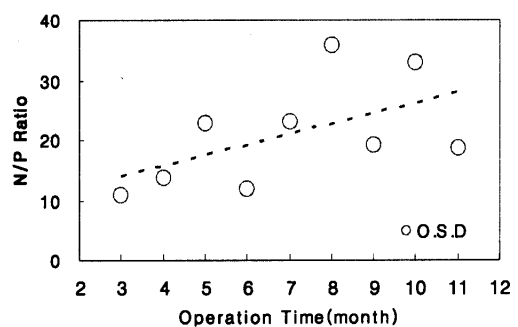
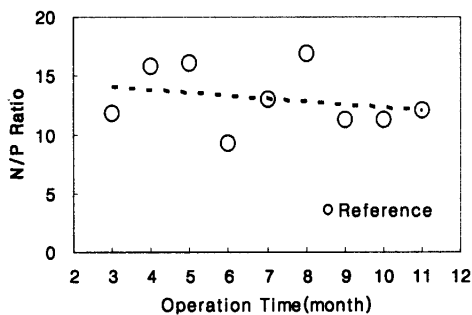


Fig. 3.6. The comparison of N/P ratio in control condition and OSD condition.

3.3.6. N/P ratio 분석

조류의 생체량에 대한 지표로 사용되는 chlorophyll-a는 N/P 비율에 따라 성장에 영향을 받는데, 일반적으로 조류의 성장에 대한 N/P 비율은 8~16 또는 8~21가 최적 조건으로 알려져 있다. 본 연구에서 OSD 장치를 사용한 실험구의 초기 N/P 비는 평균 12로 조류의 성장 적정조건이었으나, 산소용해장치 가동한 3개월 후에는 20 이상으로 인이 제한 요인으로 작용할 수 있는 조건이 되었다.

3.3.7. N/P ratio에 대한 chlorophyll-a 분석

Chlorophyll-a의 농도는 전체적으로 실험구에서 낮은 농도로 관찰되었고, N/P ratio가 과영양화 상태에서 인이 제한 요인으로 작용한 부문은 대조구에 비해 50% 내외로 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 서울시립대학교 소재 연못을 대상으로 COD, TN, TP, SS, chlorophyll-a와 같은 일반수질항목의 분석과 더불어 저질의 개선효과를 검증하기 위한 SOD, 저질용출 실험을 병행하여 수중폭기 및 미세기포 발생이 가능한 산소용해장치(Oxygen solubilization device)를 통한 수체 전반적인 수질 개선효과를 분석해 보았다.

1) 저니의 SOD는 온도 및 저질에 함유된 유기물의 영향을 많이 받으나, 산소용해수를 운전한 실험구의 경우 계절적으로 큰 변화 없이 일반적으로 SOD가 상승하는 27°C에서 $12.18\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 로 대조구의 16°C에서의 $21.23\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 의 50% 정도로 나타나 산소용해수를 가동한 연못의 SOD가 3~4배정도 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

2) 저니의 유기물 함량이 운전 시간이 증가할수록 저감되어 유기물 분해에 의한 산소 소비량을 감소시켜 저니가 산소 용해수로 인하여 자정력이 향상됨을 확인하였다.

3) 인과 철의 용출은 DO농도에 많은 영향을 받고, 무산소조건의 경우 단위시간에 대한 단위 면적당 용출량이 산소용해수를 주입한 경우보다 인과 철이 각각 4배와 3배 정도 높은 용출량을 보이며, 이때 저질

의 P와 Fe의 농도는 초기 $582\text{mgP/kg sediment}$ 와 $176\text{mgFe/kg sediment}$ 에서 반응이 종료된 20일 후 실험구의 경우 $357\text{mgP/kg sediment}$ 와 $91\text{mgFe/kg sediment}$, 대조구의 경우 12mgP/kg sediment 와 8mgFe/kg sediment 로 낮아져 무산소 조건에서 용출량과 속도가 호기조건보다 높음을 확인 할 수 있었다.

4) 수질 변화에서 COD는 대조구에 비하여 8~20%, TN은 10~20%, TP 40% 내외로 감소하였고, 특히 저질의 건조 중량 무게 당 인농도가 284mg/Kg 에서 306mg/Kg 으로 증가한 결과가 이를 입증하여 주었다. SS는 대조구와 차이가 거의 없었으나 조류(algae)는 평균 40% 감소하였다.

5) 부영양화 지표중 하나인 N/P 비는 실험구의 저질 내 인 흡착에 의한 농도 감소로 20 이상으로 인이 제한 조건이 되었고 대조구는 16을 연중 유지하여 부영양화 상태였다.

참고문헌

1. 김석, 이상준 (2004) X-ray 영상기법을 이용한 미세기포의 크기 및 속도 동시 측정기술 개발, *대한기계학회논문집*, **28**(6), pp.659-664.
2. 서동일, 황현동, 이은형, 허우명 (2004) 연초호의 인공순환장치 운영에 의한 수질개선효과 분석, *상하수도학회지*, **18**(3), pp.357-365.
3. 서명교, 신항식, 안갑환, 전항배, 최윤찬(공역) (1998) pp.58~59, 폐수처리단위조작, 사이텍미디어.
4. 이선주, 권순범 (2002) 호소수를 이용한 용종공기부상법(DAF)의 효율에 관한 연구, *상하수도학회지*, **16**(3), pp.341-349.
5. 정용순, 황종연 (2002) 대청호와 금강하구연담 퇴적물 중 유기물 함량, *한국환경분석학회지*, **5**(2), pp.113-118.
6. 정하영, 조경제 (2003) 낙동강 하류 수계에서 저질 퇴적층의 SOD와 영양염 용출, *한국육수학회지*, **36**(3), pp.322-335.
7. Adhityan Appan and Ting Ding-Sie (1996) A laboratory study of sediment phosphorus flux in two tropical reservoirs, *Water Science and Technology*, **34**(7,8), pp. 45-52
8. Andreas Kappler, Marcus Benz, Bernhard Schink, Andreas Brune (2004) Electron shuttling via humic acids in microbial iron (III) reduction in a freshwater sediment, *FEMS Microbiology Ecology*, **47**, pp.85-92
9. B.A. Cox (2003) A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers, *The Science of the Total Environment*, **314**(316), pp. 303-334.

10. Burris VL, Little JC. (1998) Bubble dynamics and oxygen transfer in a hypolimnetic aerator. *Water Sci Technol*, **37**(2), pp.293-300.
11. Daniel F. McGinnis, John C. Little (2002) Predicting diffused-bubble oxygen transfer rate using the discrete-bubble model, *Water Research*, **36**, pp.4627-4635.
12. Hervé Gallard and Urs von Gunten (2002) Chlorination of natural organic matter: kinetics of chlorination and of THM formation, *Water Research*, **36**(1), pp.65-74.
13. Inke Schauser, J. org Lewandowski, Michael Hupfer (2003) Decision support for the selection of an appropriate in-lake measure to influence the phosphorus retention in sediments, *Water Research*, **37**, pp.801-812.
14. John C. Little (1995) Hypolimnetic aerators: PREDICTING OXYGEN TRANSFER AND HYDRODYNAMICS, *Wat. Res.*, **29**(11), pp.2475-2482.
15. Makoto Higashino, Charles J. Gantzer, Heinz G. Stefan (2004) Unsteady diffusional mass transfer at the sediment/water interface: Theory and significance for SOD measurement, *Water Research*, **38**, pp.1-12.
16. Mi Hyung Kim, Myong Jin Yu (2005) Characterization of NOM in the Han River and evaluation of treatability using UF/NF membrane, *Environmental Research*, **97**, pp.116-123.
17. Mohammed Rasheeda, Christian Wildb, Ulrich Frankeb, Markus Huettel (2004) Benthic photosynthesis and oxygen consumption in permeable carbonate sediments at Heron Island, Great Barrier Reef, Australia, Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, **59**, pp.139-150.
18. S.S. Alves., C.L. Maia, J.M.T. Vasconcelos, (2004) Gas-liquid mass transfer coefficient in stirred tanks interpreted through bubble contamination kinetics, *Chemical Engineering and Processing*, **43**, pp.823-830.
19. Sundby, B., Gobeil, C., Silverberg, N., Mucci, A. (1992) The phosphorus cycle in coastal marine sediments, *Limnology and Oceanography*, **37**(6), pp.1129-1145.
20. Thomas JA, Funk WH, Moore BC, Budd WW. (1994) Short term changes in Newman Lake following hypolimnetic aeration with Speece Cone, *Lake Reserv Manage*, **9**, pp.111-338.
21. Vassilis Z. Antonopoulos , Soutana K. Gianniou (2003) Simulation of water temperature and dissolved oxygen distribution in Lake Vegoritis, Greece, *Ecological Modelling*, **160**, pp.39-53.