

퇴적된 저질토의 산소요구량 (SOD)을 효율적으로 산정하기 위한 새로운 추정방법의 개발

An In Situ Method Proposed for Measuring Sediment Oxygen Demand in Rivers and Lakes

고광백* · 정연규**

Ko, Kwang Baik · Choung, Youn Kyoo

Abstract

A mathematical formula and an experimental method were proposed to measure sediment oxygen demands (SODs) in streams and lakes. The SODs appeared to be the first order reaction with respect to dissolved oxygen concentration at the sampling points in the Suknamchun. The SODs estimated using the nonlinear regression analysis ranged from 2.48 to 5.33 g O₂/(m² · day), which are fallen within the typical range (1.5 - 10.0 g O₂/(m² · day)) of the SODs in the moderately polluted streams. The proposed methods are found to be relatively simple and easy to use in estimating SODs in flowing or impounded waters.

요 지

본 연구에서는 하천이나 호수의 저변부에 퇴적되어 있는 저질토로 인한 산소요구량 (SOD)을 효율적으로 산정할 수 있는 실험방법과 추정방법을 제안하였다. 이 방법을 청주시 인근 석남천 상류지점에 적용한 결과 저질토의 산소요구로 인하여 수체내 용존산소의 농도는 용존산소의 농도에 대하여 1 차 반응의 형태로 감소하였다. 본 연구에서 제안한 방법으로 추정된 SOD는 2.48 - 5.33 g O₂/(m² · day)의 범위로서 통상 오염된 하천에서의 SOD의 범위(1.5 - 10.0 g O₂/(m² · day))이내 이었고, 실험방법 및 추정방법 또한 비교적 단순하고 용이하여 현장에서 활용할 수 있음이 규명되었다.

1. 서 언

하천이나 호수의 수질관리를 위하여 흔히 사용되는 가장 중요한 지표는 수체의 자정능력을 나타내는 용존산소의 농도이다. 용존산소의 농도를 예측하거나 일정한 수준이상으로 유지하기 위하여서는 수체

의 용존산소 공급률 (reaeration rate)과 소모율 (oxygen uptake rate)의 측정이 필수적이다. 수체내 용존산소의 소모량은 크게 수체내 유기물의 생물학적 분해로 인한 산소요구량과 퇴적된 저질토의 생물학적 및 화학적 분해로 인한 산소요구량 (sediment oxygen demand, SOD)으로 구분할 수 있다. SOD의 정확한 측정이 수질관리의 필수적임에도 불구하고 SOD 측정을 위한 각종 기존방법과 추정

* 정희원 · 충북대학교 공과대학 환경공학과 부교수

** 정희원 · 연세대학교 공과대학 도시공학과 교수

방법은 지극히 다양하여 측정자료 상호간의 비교조차 불가능한 상태이다. 아울러 하천의 경우 SOD가 수체내 용존산소 소모율의 약 50%까지도 차지할 수 있다는 보고⁽¹⁾를 고려할 때 보다 효율적인 SOD 측정방법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 하천이나 호수의 저변부에 퇴적되어 있는 저질토로 인한 SOD를 효율적으로 측정할 수 있는 실험방법과 추정방법을 제안하였고, 이 방법을 인근 하천을 대상으로 저질토의 SOD를 산정하는데 이용함으로써 이 방법의 이용 가능성을 규명하였다. 이 개발된 SOD 측정 및 추정방법은 하천이나 호수등 어느 곳에선 활용이 가능하다고 판단되며, 특히 수체의 자정능력의 평가, 하천유량 및 유기오염물 부하량의 조절대책등을 수립하고자 할 경우에 사용할 수 있다.

2. 기존 SOD 측정방법

SOD는 반응조(respiration chamber) 안에 저질토를 유입시켜 이 저질토가 수체내 용존산소를 소모하는 불을 측정하여 추정하고 있으며, 이에는 크게 현장에서 측정하는 방법(in-situ technique)과 실험실에서 측정하는 방법(laboratory technique)으로 분류할 수 있다. SOD는 통상 단위 면적당 시간당 용존산소의 소모율인 $g\ O_2/(m^2 \cdot hr)$ 로 표시한다.

SOD를 추정하기 위하여 가장 많이 사용되는 식은 아래와 같다.

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{SOD}{H} \quad (2.1)$$

여기서 C=수체내 용존산소의 농도, mg/L
 t=시간, hr
 SOD = 저질토로 인한 단위 면적당 수체내 용존산소의 소모율, $g\ O_2/(m^2 \cdot hr)$
 H=수심, m

상기와 같은 식은 수체내 용존산소의 농도가 적어도 3-8 mg/L의 범위일 경우에 용존산소의 농도가 SOD에 큰 영향을 주지 않는다는 가정하에 사용되고 있다.^(2,3) QUAL2E와 같은 대표적인 하천 수질관리 모형에서도 SOD의 추정을 위하여 상기식을 사용하고 있다.⁽⁴⁾

SOD에 대한 수체내 용존산소의 영향을 고려한 Monod형의 식은 아래와 같다.⁽⁵⁾

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{SOD}{V} - \frac{C}{K_0 + C} \quad (2.2)$$

여기서 A=퇴적된 저질토와 수체와의 접촉면, m^2
 V=퇴적된 저질토 상부에 위치한 수체의 체적, m^3
 K_0 =계수의 일종으로서 dC/dt 의 값이 (SOD A)/V의 값의 1/2일 경우의 수체내 용존산소의 농도, mg/L

저질토를 상부의 호기성지역과 하부의 혐기성지역으로 구분하여 SOD의 추정도 가능하다.⁽⁶⁾ 호기성 지역은 호기성 박테리아가 유기물을 분해하는 지역으로서 이 경우의 용존산소의 소모를 biological sediment oxygen demand (BSOD)로 간주할 수 있다. 혐기성 지역에서는 혐기성 박테리아에 의하여 각종 유기물이 분해되는 지역으로서 생성된 CH_4 , NH_3 , H_2S 및 각종 금속 이온이 상부에 호기성지역으로 유입되어 이들이 용존산소와 결합하여 산화된다고 가정하였으며 이로인한 SOD를 chemical sediment oxygen demand (CSOD)로 간주하여 다음과 같은 수학적 모형도 제안되었다.

$$V \frac{dC}{dt} = -(U \frac{C}{K_0 + C} + K_1 C) A \quad (2.3)$$

여기서 U=BSOD, $g\ O_2/(m^2 \cdot hr)$
 K_1 =CSOD에 의한 산소소모율 계수, m/hr
 상기한 식들의 경우 SOD에 대한 수온의 영향을 고려하기 위하여 흔히 Arrhenius 관계식이 사용되고 있다. 즉,

$$K_T = K_{20} \theta^{(T-20)} \quad (2.4)$$

여기서 θ 값은 1.02-1.09의 범위로서 주로 1.047이 사용되고 있다.⁽⁵⁾

현장 혹은 실험실에서 SOD를 측정할 경우에 실험방법과 실험장치에 따라 소형 회분식과 연속식 반응조를 이용한다. 현장에서 실시하는 방법은 바닥면이 열려 있는 반응조를 저질토 위로부터 밑으로 삽입하여 반응조의 상부에는 호수나 하천수가 담기도록 유도하고, 하부에는 일정한 깊이의 저질토가

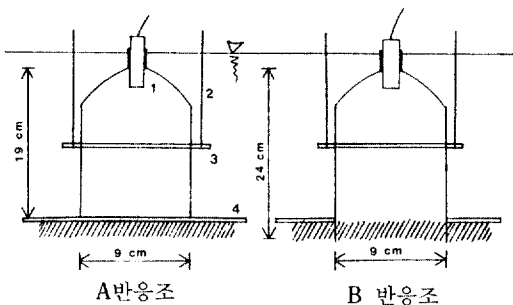
위치하도록 하여 산소소모율을 직접 측정하는 방법이다. 이때 사용되는 반응조의 모양은 사각형이나 원통형일 수 있으며, 재질은 plexiglass 혹은 acrylic plastic을 사용하는 등 다양하다. 특히 연속식 반응조를 이용하는 경우라면 정량펌프등을 이용하여 반응조 내외부로 유입 및 유출되는 하천수의 유량을 인위적으로 조정한다.^(7,8,9,10) 실험실에서 실시하는 방법은 가급적 저질토를 변형되지 않은 원형 그대로 (undisturbed core sample) 실험실로 운반하여 SOD를 측정하는 방법으로서 저질토내의 미생물의 성장을 억제하거나 화학반응을 정지시키기 위하여 포르말린등을 투여한다.^(2,6,8,11,12,13,14)

일정한 온도하에서 일정한 부피를 갖은 용기내 가스의 양의 변화는 용기내 압력의 변화를 측정하여 산정할 수 있다는 원리를 근거로 SOD를 간접적으로 추정하는 방법⁽⁶⁾도 있다. 즉, 용기내 용존산소가 포함되어 있는 하천수에 일정량의 저질토를 투입한 후 이를 보온기(incubator)에 보관한다. 용기내에 포집기(akali trap)를 설치하여 탄산가스를 흡수시키고, 압력계를 연결하여 압력의 차이를 기록하면 이 압력의 변화를 기초로 SOD를 추정계산하는 방법이다.

3. 연구방법

3.1 SOD 측정을 위한 실험방법의 제언

본 연구에서는 그림 1에서와 같이 2 대 (A 반응조와 B 반응조)의 현장 설치용 반응조(in situ respi-



1. 용존산소 측정기
2. 탈착이 가능한 지지대
3. 지지판
4. 저변부 지지판

그림 1. A 반응조와 B 반응조의 구조.

ration chamber)를 제작하였다. B 반응조를 저질토 속으로 5 cm 정도 삽입하여 고정시키기 위하여 A 반응조 보다 B 반응조의 높이를 5 cm 높게하였으나 반응조내의 부피는 서로 동일하게 제작였다. 아울러 A 반응조의 경우에는 반응조내 수체가 저질토와 직접 접촉하지 못하도록 차단하였으나, B 반응조는 반응조 저변부에 탈착용 판막을 설치하여 이 반응조내 수체가 저질토와 접촉하여 SOD의 측정이 가능하도록 하였다. 각 반응조의 부피는 1.2 L이고 직경은 9 cm이며, A 반응조의 높이는 19 cm이고 B 반응조의 높이는 24 cm이다.

제작된 반응조를 SOD 측정현장으로 옮겨 저질토위에 설치한 후, 측정현장에서 채취한 하천수를 재포기하여 A 반응조와 B 반응조에 각각 투입하고 용존산소 측정기를 이용하여 시간의 변화에 따른 용존산소의 농도를 동시에 측정하였다. A 반응조와 B 반응조 사이의 거리는 약 10 cm 정도이었으며 각 반응조의 외부는 알루미늄 박지를 씌워 햇빛의 유입을 차단하여 광합성의 영향을 배제하였다. 또한 각 반응조 상부에 있는 DO probe 투입구에는 나사뚜껑을 장치하여 용존산소의 주기적인 측정시 이외에는 반응조내 수체와 대기의 접촉을 차단하여 실험중 수체의 재포기를 방지하였다.

3.2 수학적 모형의 수립

수표면에서의 재포기와 각종 수중식물(녹조류 및 식물성 프랑크톤 포함)에 의한 광합성은 수체내 용존산소의 주요 공급원(source)이다. 각종 박테리아에 의한 유기물의 분해시 용존산소의 소모 (oxygen uptake due to bacterial oxidation of CBOD and NBOD) 뿐만아니라 기타 수중 미생물에 의한 호흡 및 저질토의 산소요구량등은 수체내 용존산소의 주요 수요원(sink)이다.

A 반응조내 수체의 경우에는 실험중에 광합성과 수표면으로 부터의 재포기로 인한 용존산소의 공급이 없으며, 저질토의 용존산소 요구로 인한 용존산소의 수요도 없다. 이 반응조를 회분식 반응조로 가정한다면 이 반응조에는 각종 박테리아와 기타 수중 미생물의 호흡으로 인한 용존산소의 수요만을 고려할 수 있다. 이 과정을 용존산소의 농도에 대하여 1 차 반응이라하면 다음과 같은 물질수지식을 고려할 수 있다.

$$\frac{dC_1}{dt} = -K C_1 \quad (3.1)$$

여기서 $C_1 = A$ 반응조내 수체의 용존산소의 농도, mg/L

$t =$ 시간, hr

$K =$ 각종 박테리아와 기타 수중 미생물의 호흡으로 인한 탈산소계수, hr^{-1}

B 반응조의 경우에도 A 반응조와 같이 광합성과 수표면으로 부터의 재포기로 인한 용존산소의 공급은 없으나, B 반응조의 구조를 고려하면 B 반응조내 수체가 저질토와 접촉하고 있으므로 저질토의 용존산소 요구로 인한 용존산소의 수요를 추가로 고려할 수 있다. 따라서 가장 흔히 사용되는 2.1식과 같은 SOD 항을 3.1식에 추가한다면, B 반응조내 수체를 대상으로 용존산소에 대한 물질수지식을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dC_2}{dt} = -K C_2 - \frac{SOD}{H} \quad (3.2)$$

여기서 $C_2 = B$ 반응조내 수체의 용존산소의 농도, mg/L

SOD = 저질토로 인한 단위 면적당 수체내 용존산소의 소모율, $g O_2/(m^2 \cdot hr)$

$H = B$ 반응조의 깊이 (= V/A), m

$V = B$ 반응조의 부피, m^3

$A = B$ 반응조 바닥면의 면적으로서 반응조내 수체와 저질토의 접촉면적, m^2

동일한 하천수를 재포기하여 각 반응조에 투입하였을 뿐만 아니라 동시에 인접지점에서 실험을 실시하였기 때문에 3.1식과 3.2식의 탈산소계수는 반드시 동일한 값이다.

2.1식 혹은 3.2식의 SOD는 단위 면적당 용존산소의 flux를 의미한다. 이 SOD를 수식에 포함된 계수로 간주한다면 이 SOD도 역시 실험결과로 추정할 계수의 일종이다. 따라서 2.1식과 3.2식은 저질토의 산소요구로 인하여 수체내 용존산소의 농도가 용존산소의 농도에 대하여 0 차 반응의 형태로 감소한다는 가정하에 사용할 수 있는 식이다.

본 연구에서는 저질토의 산소요구로 인하여 B 반응조내 수체의 용존산소의 농도가 수체내 용존산소의 농도에 대하여 1 차 반응의 형태로 감소할 수

있다는 가정하에 다음과 같은 식을 수립하였다.

$$\frac{dC_2}{dt} = -K C_2 - \frac{K_{sod} C_2}{H} \quad (3.3)$$

여기서 $K_{sod} =$ SOD 반응계수, m/hr

이 연구의 목표인 SOD를 효율적으로 추정하기 위하여 3.2식과 3.3식 중에서 어느 식을 사용할 것인가의 여부는 동일한 실험결과를 각 식에 적용하여 비선형회귀분석⁽⁶⁾ 결과를 기초로 판단할 수 있다. 즉, A 반응조로 부터의 측정결과를 3.1식에 적용하여 K 값을 추정하였다. 이 K 값을 3.2식과 3.3식의 K 값으로 대입하였다. B 반응조로 부터의 측정결과를 3.2식에 적용하여 SOD를 추정하였으며, B 반응조로 부터의 측정결과를 다시 3.3식에 적용하여 K_{sod} 를 추정하였다.

4. 실험결과 및 비교분석

A 반응조와 B 반응조를 청주시 남동부를 흐르는 소형 하천인 석남천 상류의 한 지점에 설치한 후, 시간의 변화에 따른 각 반응조내 용존산소의 감소를 동시에 측정하였다. 아울러 본 연구에서 제안한 추정방법을 가지고 $K(hr^{-1})$, SOD($g O_2/(m^2 \cdot hr)$)와 $K_{sod}(m/hr)$ 를 각각 추정하였다.

실험중 수체의 평균수온은 $26.3^\circ C$, 대기압(local barometric pressure)은 999.8 mbar, 상대습도는 65%, 평균 기온은 $28.5^\circ C$ 이었고, 반응조 외부를 흐르는 수체의 용존산소의 평균농도는 $4.0 mg/L$ 이었다.

상기한 현장조건하에서 A 반응조에 인위적으로 재포기한 하천수를 투입하여 이를 대상으로 용존산소의 감소를 측정한 결과는 그림 2와 같다. 초기 용존산소의 농도는 약 $7.4 mg/L$ 이었으며 서서히 감소하여 약 4 시간 30 분이 경과한 후에는 약 $4.1 mg/L$ 로 감소하였다. 이 측정결과를 3.1식에 적용하여 비선형회귀분석법으로 K를 추정한 결과 K 값은 $0.13 hr^{-1}$ 이었다. 이렇게 추정된 K 값을 3.1식에 다시 대입하여 예측한 용존산소의 변화는 그림 2에 곡선으로 표시하였다.

A 반응조의 바로 옆에 설치된 B 반응조에서도 재포기된 하천수를 투입하여 용존산소의 감소를 측정하였으며 그 결과는 그림 3과 같다. 초기 용존산

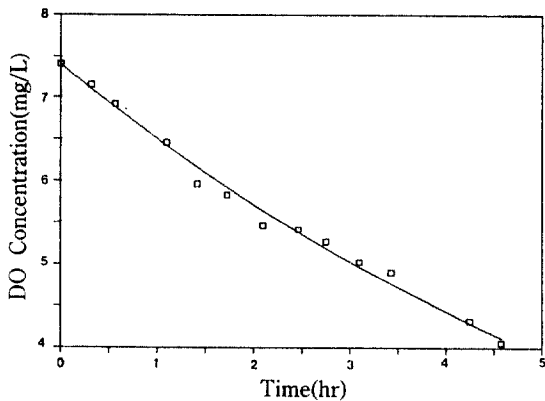


그림 2. A 반응조내 용존산소의 농도변화

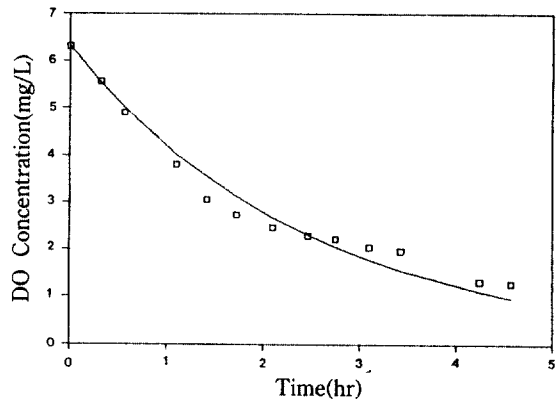


그림 4. B 반응조내 용존산소의 농도변화 (II)

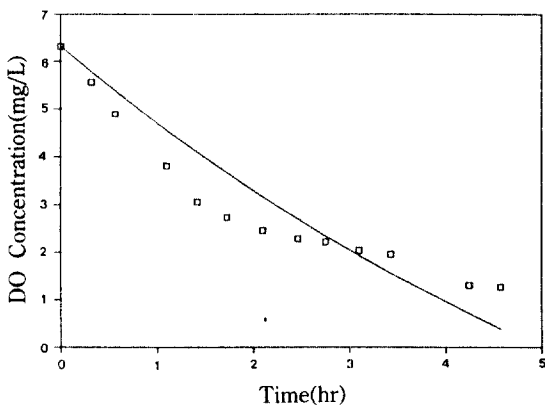


그림 3. B 반응조내 용존산소의 농도변화 (I)

소의 농도는 약 6.3 mg/L이었으며 서서히 감소하여 약 4 시간 30 분이 경과한 후에는 약 1.2 mg/L로 감소하였다. 이 측정결과를 3.2식에 대입하여 비선형회귀분석법으로 SOD를 추정한 결과 SOD 값은 $0.17 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{hr}) (= 4.07 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{day}))$ 이었고 residual sum of squares(RSS)는 4.7943이었다. 추정된 SOD 값을 다시 3.2식에 대입하여 예측한 용존산소의 변화는 그림 3에 곡선과 같다.

그림 3에서와 같이 B 반응조의 경우에는 용존산소 농도의 측정치와 추정된 SOD를 3.2식에 대입하여 산정한 예측치와는 용존산소의 농도가 감소하는 경향에 뚜렷한 차이가 발생하였다. 따라서 B 반응조에서의 측정자료를 3.3식에 적용하여 비선형회귀분석법으로 3.3식의 K_{sod} 를 추정한 결과 K_{sod} 값은 0.053 m/hr이었고 RSS는 0.8917이었다. 이렇게 추정된 K_{sod} 값을 3.3식에 대입하여 예측한 용존산소의 변

표 1. 추가로 실시한 SOD 추정결과

실험조건	Case 1	Case 2
수체의 평균수온(°C)	25.0	25.4
대기압(mbar)	996.5	994.0
상대습도(%)	63.0	70.3
기온(°C)	28.5	25.8
수체내 용존산소의 평균농도 (mg/L)	3.9	3.4
K 추정 (3.1식 참조)		
추정값(hr^{-1})	0.04706	0.06644
SOD 추정 (3.2식 참조)		
추정값($\text{g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{hr})$)	0.1750	0.1397
추정값($\text{g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$)	4.20	3.35
RSS	4.8001	0.5717
K_{sod} 추정 (3.3식 참조)		
추정값(m/hr)	0.05643	0.03040
RSS	0.9275	0.2372
SOD ($\text{g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$) 산정값	5.33	2.48

화는 그림 4에 곡선과 같다. K_{sod} 값과 B 반응조의 부피와 단면적 및 실험중 반응조 주위를 흐르는 수체의 평균 용존산소의 농도를 고려하여 산정한 SOD 값은 $0.21 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{hr}) (= 5.08 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{day}))$ 이었다.

그림 3과 그림 4는 B 반응조에서의 동일한 측정 자료를 3.2식 과 3.3식에 각각 적용하여 얻은 결과로서, 이 그림상에서 측정치와 예측치를 비교하거나 혹은 3.3식을 이용할 경우의 RSS가 3.2식을 이용할

여 추정 할 경우의 RSS 보다 훨씬 작기 때문에 3.3 식이 이 실험결과를 해석하는데 더욱 적합한 수식이 입증되었다. SOD를 추정하기 위하여 3.2식을 사용한 경우에 SOD는 $4.07 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ 이었고 3.3식을 사용한 경우에 SOD는 $5.08 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ 이었다. 따라서 3.2식을 사용하면 3.3식을 사용할 경우 보다 SOD가 약 20% 정도 낮게 산정되었다. 그러나 오염된 하천에서의 SOD가 통상 약 $1.5 - 10.0 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ 의 범위⁽⁶⁾임을 고려하면 이 SOD 값들은 모두 이 범위이내 이었다.

본 연구에서 제안한 실험방법과 추정방법을 사용하여 상기한 측정지점과 약 30 cm와 약 1 m 정도 떨어진 인접지점에서의 K, SOD와 K_{sod} 및 추정된 K_{sod} 를 기초로 산정한 SOD등을 요약하면 표 1과 같다.

표 1에 기술한 결과를 비교하여 볼 때, 이 경우에도 각각 3.3식이 3.2식 보다 실험결과 해석에 더욱 적합한 식임이 재차 규명되었다. 따라서 석남천 상류지역의 경우에 저질토의 산소요구로 인하여 수체내 용존산소의 농도는 용존산소의 농도에 대하여 1 차 반응의 형태로 감소하고 있음이 규명되었다. Case 1의 경우에는 3.2식을 사용하면 3.3식을 사용할 경우보다 SOD가 약 21% 정도 낮게 산정되었으며, Case 2의 경우에는 3.2식을 사용하면 3.3식을 사용할 경우 보다 약 35% 정도 높게 산정되었다. 이러한 추정결과와 비교는 동일한 측정결과를 기초로 추정방법에 따라 SOD의 산정값에 다소 큰 차이가 발생할 수 있다는 사실을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서 제안한 SOD 측정을 위한 실험방법과 SOD 추정방법을 석남천 상류의 인접지점에 적용한 결과로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) SOD의 추정을 위하여 본 연구에서 수립한 3.3 식이 기존의 3.2식 보다 실험결과 해석에 더욱 적합한 식임이 규명되었다. 저질토의 산소요구로 인하여 수체내 용존산소의 농도는 용존산소의 농도에 대하여 1 차 반응의 형태로 감소하였다.

2) 기존 방법으로 추정된 SOD($3.35 - 4.20 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$)가 본 연구에서 제안한 방법으로 추정된

SOD($2.48 - 5.33 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$) 보다 약 20% 정도 낮게 혹은 35% 정도 높게 산정되어 추정방법에 따라 SOD 값에 큰 차이가 발생하였으나, 본 연구에서 제안한 실험방법은 실험중 수체의 광합성 및 재포기를 효과적으로 차단할 수 있어 현장에서 용이하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

1990년도 교육부지원 학술진흥재단 지방대학육성 학술연구조성비의 일부로서 본 연구를 수행할 수 있도록 재정적인 지원을 한 학술진흥재단 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- Hanes, N. B. and R. L. Irvine, "New Techniques for Measuring Oxygen Uptake Rates of Benthic System," *J. Water Pollu. Control Fed.*, Vol. 40 (1968) pp. 223-232.
- Martin, D. C. and D. A. Bella, "Effect of Mixing on Oxygen Uptake Rate of Estuarine Bottom Deposits," *J. Water Pollu. Control Fed.*, Vol. 43 (1971) pp.1865-1876.
- McKeown, J. J., et al., "Studies on the Behavior of Benthic Deposit of Wood Origin," *J. Water Pollu. Control Fed.*, Vol. 40 (1968) pp. R333.
- U.S. EPA, *The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User's Manual*, Environmental Research Laboratory, U.S. EPA, Athens, GA, EPA/600/3-87/007 (1987).
- U.S. EPA, *Rates, Constants, and Kinetic Formulations in Surface Water Quality Modeling*, 2nd Eds, Environmental Research Laboratory, U.S. EPA, Athens, GA, EPA/600/3-85/040 (1985).
- Walker, R. R. and W. J. Snodgrass, "Model for Sediment Oxygen Demand in Lakes," *J. Environ. Eng. Div., Proc. ASCE*, Vol. 112, No. 1 (1986) pp. 25-43.
- Shapiro, J. and O. Zur, "A Simple in situ Method for Measuring Benthic Respiration," *Technical Note, Water Res.*, Vol. 15 (1981) pp. 283-285.
- Bowman, G. T. and J. J. DeFlino, "Sediment Oxygen Demand Techniques: A Review and Comparison of Laboratory and in situ Systems," *Water*

- Res.*, Vol. 14 (1980) pp. 491-499.
9. Wu, R. S. S., "A Respirometer for Continuous and in situ Measurements of Sediment Oxygen Demand," *Technical Note, Water Res.*, Vol. 24, No. 3 (1990) pp. 391-394.
 10. Hickey, C. W., "Review Oxygen Uptake and Respiratory Decay of Sewage and Fungus Biofilms," *Water Res.*, Vol. 22, No. 11 (1988) pp. 1375-1380.
 11. Edberg, N. and B. V. Hofsten, "Oxygen Uptake of Bottom Sediment Studied in situ and in the Laboratory," *Water Res.*, Vol. 7 (1973) pp. 1285-1294.
 12. James, A., "The Treatment of Benthic Respiration," *Water Res.*, Vol. 8 (1974) pp. 955-959.
 13. Belanger, T. V., "Benthic Oxygen Demand in Lake Apopka, Florida," *Water Res.*, Vol. 15 (1981) pp. 267-274.
 14. Hickey, C. W., "Oxygen Uptake Kinetics and Microbial Biomass of River Sewage Fungus Biofilms," *Water Res.*, Vol. 22, No. 11 (1988) pp. 1365-1373.
 15. Rolly, H. S. and M. Owens, "Oxygen Consumption Rates and Some Chemical Properties of River Muds," *Water Res.*, Vol. 1 (1967) pp. 759-766.
 16. Constantinides, A., *Applied Numerical Methods with Personal Computers*, McGraw-Hill, Inc. (1987).

(接受：1992. 9. 21)