

## 낙동강에서 수질모델 실행을 위한 탈산소계수의 평가

유재정<sup>†</sup> · 윤영삼 · 이혜진 · 김문수 · 양상용 · 이영준\*

국립환경연구원 낙동강물환경연구소

\*국립환경연구원 영산강물환경연구소

### Estimation of CBOD Decay Rate for the Execution of Water Quality Model in the Nakdong-River Basin

Jae-Jeong Yu<sup>†</sup> · Young-Sam Yoon · Hae-Jin Lee · Moon-Soo Kim · Sang-yong Yang · Young Joon Lee\*

*Nakdong River Water Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research*

*\*Yeongsan River Water Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research*

(Received 3 May 2005, Accepted 14 July 2005)

#### Abstract

CBOD(carbonaceous BOD) decay rate was investigated for the execution of water quality model in Nakdong-Rive basin. Estimation of laboratory-derived CBOD decay rate,  $k_1$  and CBOD decay rate in natural waters,  $k_d$  were carried out. Hydraulic factors were applied for the calculation of  $k_d$ . Values of biochemical oxygen demand were investigated in Weagwan, Koreong, Jeokpo, Namgi and Mulgeom sites for the four times.

The ranges of  $k_1$  value were  $0.04 \pm 0.01 \sim 0.14 \pm 0.03$ . The values of  $k_1$  in upstream sites were much larger than those in the downstream sites. The values of  $k_d$  were 0.025, 0.036, 0.005 and 0.001 at Weagwan, Jeokpo, Namgi and Mulgeom, respectively, indicating that values of  $k_d$  were generally larger than those of  $k_1$ .

**keywords** : Deoxygenation coefficient, CBOD decay rate, Input parameter, Model parameter, Model input parameter

## 1. 서론

지표수에 있어 용존산소(dissolved oxygen)는 수중생태계의 건강지표가 되며, 하천수로 유입된 오염물질을 정화하는 능력을 평가하는 결정인자로서 가장 중요하다. 하천에서 용존산소 농도변화에 영향을 미치는 인자로서는 대기로부터의 재포기(atmospheric reaeration), 광합성(photosynthesis), 식물 및 동물의 호흡(respiration), 저질 산소요구량(sediment oxygen demand), 생물화학적 산소요구량(BOD), 질산화(nitrification), 염도(salinity), 그리고 온도 등이 있다. 용존산소의 포화농도는 온도, 압력 및 염분농도의 영향을 받는다. 고도가 높아짐에 따라 대기압이 감소함으로 인해 고도가 2,000 feet 증가할 때 마다 포화농도는 7 %씩 감소한다(Benson et al., 1979). 담수에 있어서는 많은 경우 용존산소의 포화농도는 온도의 함수가 된다. 재포기(reaeration)는 대기와 수표면의 접촉면에 있어서 산소의 교환에 의해 이루어진다. 자연상태의 재포기는 전형적으로 대기에서 수체로 이동한다. 그러나 광합성으로 인해 수체내의 농도가 과포화(supersaturation)가 될 경우에는 수체에서 대기로의 이동이 일어난다.

탈산소계수(deoxygenation coefficient)는 박테리아의 활동

이나 조류의 호흡작용에 의해 수중의 용존산소가 제거되는 것을 말하며, 실험실에서 측정할 수도 있고 현장에서 직접 구할 수도 있으나 현장에서 결정하는 방법은 어려우며 큰 하천일수록 실험실에서 측정한 값과 현장에서 구한 값의 상관관계가 높은 것으로 나타나 있다. 2004년부터 낙동강에 시행되고 있는 수질오염총량관리에는 수질모형에 의한 수질예측이 중요한 부분을 차지하고 있으며, 수질모델링을 위해서는 많은 종류의 모델 입력자료가 필요하다. 특히 탈산소계수는 용존산소(DO) 및 생물화학적 산소요구량의 모델링에 중요한 매개변수이나, 낙동강에서의 탈산소계수 조사는 거의 이루어지지 않았다.

수질모델링에 있어서 탈산소계수는 실험실에서 유도된 값을 주로 이용하고 있으나 본 연구에서는 채수한 시료를 실험실에 이송하여 정적인 상태에서 유도하는 방법과 아울러 자연수에 있어서 유하시간을 함수로 하여 탈산소계수를 유도하는 방법을 병행하여 결과를 비교하였고, 실험실에서 유도된 값만 있는 경우에는 동 조사구간의 수리자료를 이용하여 자연수에서의 탈산소계수를 유도하여 실험실 계수와 비교 연구하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 이론적 배경

BOD는 수중 미생물이 유기물질을 분해할 때 소모되는

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
youjj@me.go.kr

용존산소, 환원상태의 질소나 광물질의 산화에 소모된 용존 산소량으로 나타낸다. 그러나 환원물질의 양은 무시할 정도로 적으므로 BOD에 영향을 주는 요소는 탄소성 BOD (CBOD : carbonaceous BOD)와 질소성 BOD (NBOD : nitrogenous BOD)가 대부분이다. 생활하수의 경우에는 CBOD 물질의 생분해 다음에 NBOD물질의 분해가 이루어지므로 BOD 곡선은 2단계로 나타난다.

CBOD는 침전, 생물에 의한 분해, 저서생물(benthic flora)에 의한 흡착 또는 섭취 등에 의해 제거가 되며, 어떤 물질은 휘발에 의해 제거되기도 한다. 침전 또는 흡착된 CBOD물질은 SOD(sediment oxygen demand)로 나타난다. CBOD 운동방정식은 수체에서의 분해조작을 주로 표현하고 있다. 거의 모든 수질모델에서 CBOD분해속도상수는 1차반응식으로 표현된다.

$$BOD_t = BOD_u (1 - e^{-k_d t}) \quad (1)$$

$$dL/dt = -k_d L \quad (2)$$

$$L = L_0 \exp(-k_d L) \quad (3)$$

여기서  $BOD_t =$  Consumed BOD at time  $t$  day (mg/L)

$BOD_u =$  ultimate BOD (mg/L)

$k_d =$  deoxygenation coefficient ( $day^{-1}$ )

$t =$  incubation time (day)

$L = BOD$

현장수온에서의 탈산소계수는 아래 식으로 구한다. 이 식은 모든 계수의 온도보정에 일반적으로 사용된다.

$$k_t = K_{20} \times \Theta^{(t-20)} \quad (4)$$

여기서,  $k_t =$  decay coefficient at temperature  $t$  °C

$k_{20} =$  decay coefficient at temperature 20 °C

$\Theta =$  calibration constant ( $\approx 1.05$ )

하천에서 직접 반응계수를 구하는 것은 물의 이동과 환경조건의 변화로 인해 실험조건을 정하기가 매우 어려우므로 일반적으로 실험실에서 분해실험을 한다. 그러나 실험실에서의 CBOD의 미생물분해 실험결과는 하천현장에서의 분해결과와 다르므로 다음과 같은 항들이 사용된다.

$k_l =$  laboratory-derived CBOD decay rate

$k_d =$  CBOD decay rate in natural waters

$k_s =$  CBOD settling rate

$k_R =$  overall rate of CBOD removal from water column

따라서 다음의 관계식이 성립한다.

$$k_R = k_d + k_s \quad (5)$$

$k_d \gg k_l$ , typically

현장에서 구한  $k_d$  값 대신에 정치상태의 실험실 측정결과로부터 얻은  $k_l$  값은 사용시 혼란을 야기할 수 있다. 따라서 하천의 특성에 근거한 인자의 보정 값이 다음과 같은 방정식에 의하여 BOD 계산에 사용되고 있다(Bosko, 1966).

$$k_d = k_l + n(V/D) \quad (6)$$

여기서,  $V =$  stream velocity, length/time

$D =$  stream depth, length

$n =$  coefficient of bed activity, dimensionless

$n$ 값은 하상 활성계수로서 하천경사와 관련된 단계함수(step function)이며, 무차원수이다.

## 2.2. 탈산소계수 산정

일반적으로  $k_d$  값을 결정할 때 DO나 CBOD<sub>u</sub>를 측정하여 계산한다. 하천 모델링에 있어서 이러한 전통적인 방법에 의해 수리학적 요소의 함수로서  $k_d$  정량화를 위한 노력이 진행되었다. 수중에서 유기물 분해시 소비되는 산소소비속도는 BOD 연속측정의 방법으로 측정한다. 시료를 혼합하고 산소를 공급한 후에 여러 개의 BOD 병에 시료를 채운 후 초기 DO를 측정한다. 이후 시료를 20°C에서 배양하면서 1, 2, 3, 5, 6, 7일에 한 개씩 BOD 병의 DO를 측정하였다. 일반적으로 질소의 산화는 7일 이후에 발생하는 것으로 알려져 있으며, 암모니아의 농도가 높은 경우에만 유의적으로 발생하므로 본 연구에서는 측정된 BOD는 CBOD인 것으로 간주하였다. 측정된 BOD<sub>t</sub> 자료를 nonlinear regression 법으로 적합시켜 탈산소계수를 구하였다.

## 2.3. 조사방법

실험실에서 탈산소계수 조사를 위해 낙동강 본류의 왜관, 고령, 적포, 남지, 물금 등 5개 지점을 선정하였으며, 교각이 있는 지점에 대해서는 5개 지점에 대해 채수를 하여 동일량 혼합하여 시료로 하였다. 조사시기는 3월, 5월, 7월 및 9월 등 4회이다.

자연수에서 탈산소계수 산정을 위해서는 유기오염물질이 분해될 수 있는 충분한 거리와 조사구간 내에 오염물질의 유입이나 유출로 인한 영향이 적어야 한다. 고령교 지점의 자연수에서의 탈산소계수 산정을 위해 사문진교 지점에서 시작하여 고령교 하류 약 6 km지점에 있는 박석진교까지 약 19 km를 조사구간으로 선정하였으며, 동 구간에 대해 보트를 타고 하류로 이동하면서 1차조사시(5월) 8개 지점, 2차 조사(10월)에서는 9개 지점에 대해 수행하였으며, 횡단 방향으로 오염농도의 차이를 고려하여 동일 지점에 대해 5개 지점 채취하여 동일량 혼합하여 시료로 하였다. 기타 4개 지점의 자연수에서의 탈산소계수 산정은 기존의 수리·수문 조사 자료를 이용하여 유속과 유하시간을 구하고 이를 이용하여 탈산소계수를 산정하여 실험실 산정자료와 비교하였다.

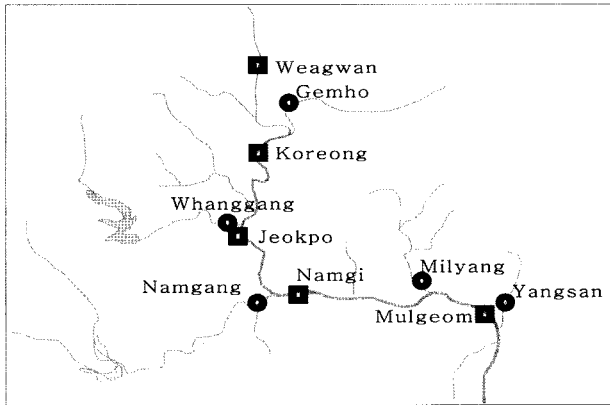


Fig. 1. Area of Investigation.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 실험실 탈산소 계수 산정결과

낙동강 본류 5개 지점에서 시료를 채수하여 실험실로 이송하여 시간별 BOD농도를 구하여 탈산소계수를 조사한 결과는 표 1과 같다. 1차 조사시기인 3월의 경우 탈산소계수 값은  $0.05 \pm 0.01 \text{ day}^{-1} \sim 0.09 \pm 0.03 \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 2차 조사 시기의 탈산소계수 값은  $0.04 \pm 0.01 \sim 0.12 \pm 0.02 \text{ day}^{-1}$  범위로 조사되었다. 1, 2차 조사에서는 지점별로 탈산소계수 값이 비교적 큰 차이를 보이지 않았다. 3차 조사시기인 8월의 경우 각 유역별 강우 증가에 따른 하천 내 오염물질의 대량 유입에 따라 탈산소계수 또한 조사대상 대부분의 지점에서 증가하였다. 4차 조사의 경우도 3차 조사시기에 비해 양은 적으나 빈번한 강우조건으로 인해 1,2차에 비해 다소 높은 값을 보이고 있었으며, 특히 물금과 고령의 탈산소계수가  $0.07 \pm 0.01, 0.10 \pm 0.01 \text{ day}^{-1}$ 로 왜관, 적포, 남지에 비해 낮게 나타났는데, 이는 이 기간에 유입오염원의 영향이 적었기 때문인 것으로 보인다.

#### 3.2. 자연수에 대한 탈산소계수 조사결과

1차 조사의 수질분석 결과는 전체적으로는 상류보다 하류로 갈수록 농도가 낮게 나타났으나 하류가 상류보다 오염도가 높게 나타는 경우도 있었는데 이것은 자연수에서는 조류의 증식 등 내부적 생산 오염원에 영향을 받기 때문이다. 자연수에서의 탈산소계수 산정결과는 표 2에 수록한 바와 같이  $0.46 \pm 0.10 \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 보이고 있었으며, 표

Table 2. CBOD decay rate ( $k_d$ ) in natural waters in the Nakdong river basin

	Unit	CBOD decay rate ( $\text{day}^{-1}$ )	
		Range <sup>1)</sup>	Value
1st (may)	$\text{day}^{-1}$	0.02 ~ 3.4	$0.046 \pm 0.095$
2nd (october)	$\text{day}^{-1}$	0.02 ~ 3.4	$0.09 \pm 0.06$

<sup>1)</sup>Brown(1987), Typical Carbonaceous deoxygenation rate constant ranges for QUAL2E reaction coefficients

준편차가 크게 나타났다. 그러나 본 연구에서 구한 모델계수는 모두 Brown(1987)이 제시한 모델계수의 상·하한의 범위 내에 존재하였다. 2차조사결과 탈산소계수가  $0.09 \pm 0.06$ 으로 1차 조사에서와 유사하게 반응계수의 표준편차가 크게 나타났다. 이러한 높은 표준편차는 조사구간에서 유속이 낮고 하상특성과 외부요인 등이 복합적으로 작용하여 수질변화 요소가 매우 다양하게 작용하고 있음을 의미한다.

#### 3.3. 수리계수를 이용한 자연수에서의 탈산소계수의 산정

탈산소계수는 자연수에 대해 구하는 것이 가장 바람직하나 조사구간의 지형적 특성으로 인하여 표준편차가 매우 높게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 수리·수문 기초자료와 실험실에서 구한 탈산소계수,  $k_1$ 을 이용하여 식 (2)에 의해  $k_d$  값을 구하였다. 수리·수문 자료로서는 조사구간의 평균유속(V), 평균수심(D) 및 하상구배(stream slope)에 의한 하상활성계수(coefficient of bed activity : n) 등이 필요하다. 평균수심과 평균유속 산정은 최고수심 및 최고유속에 환산계수를 곱하여 구하였으며, 최고수심과 최고유속은 보트로 이동하면서 조사지점의 상하 각 4 km 거리를 370 m 마다 실측한 자료를 이용하였다. 실측자료는 6-11월 사이에 걸쳐 갈·저수기에 1회씩 조사하였으며, 이러한 수리계수를 실험실 측정 결과에 동일하게 적용하였다. 환산계수는 동 구간에서 유량측정을 위한 하상단면과 유속에 대한 다수의 실측자료(오염총량관리를 위한 유량측정망 운영결과)를 이용하여 구하였다. 이러한 자료를 이용한 수리계수 계산결과는 Table 3에 나타낸 바와 같으며, 상류인 왜관의 경우 최고수심은 1.58 m이고 환산계수는 0.41로 나타나 평균수심은 0.65 m로 계산되었다. 왜관지점의 최고유속은 0.40 m/sec, 환산계수는 0.40으로 나타나 평균 유속은 0.16으로 계산되었다. 하류인 물금의 경우 수심과 유속의 변화가 상

Table 1. Laboratory-derived CBOD decay rate ( $k_1$ ) in the Nakdong river basin

site	range <sup>1)</sup>	CBOD decay rate ( $\text{day}^{-1}$ )			
		1	2	3	4
		march	may	august	september
Weagwan	0.02 ~ 3.4	$0.08 \pm 0.03$	$0.06 \pm 0.01$	$0.12 \pm 0.02$	$0.19 \pm 0.02$
Koreong	0.02 ~ 3.4	$0.07 \pm 0.02$	$0.12 \pm 0.02$	$0.14 \pm 0.03$	$0.10 \pm 0.01$
Jeokpo	0.02 ~ 3.4	$0.09 \pm 0.03$	$0.09 \pm 0.01$	$0.09 \pm 0.02$	$0.12 \pm 0.01$
Namgi	0.02 ~ 3.4	$0.05 \pm 0.01$	$0.07 \pm 0.01$	$0.10 \pm 0.02$	$0.13 \pm 0.02$
Mulgeom	0.02 ~ 3.4	$0.07 \pm 0.02$	$0.04 \pm 0.01$	$0.13 \pm 0.03$	$0.07 \pm 0.01$

<sup>1)</sup>Brown(1987), Typical Carbonaceous deoxygenation rate constant ranges for QUAL2E reaction coefficients

**Table 3.** Calculated CBOD decay rate ( $k_d$ ) using the  $k_1$  and hydraulic data. in the Nakdong river basin

Site	$k_1$	$k_d$	Depth [D] (m)			Velocity [V] (m/sec)			<sup>1)</sup> Slope	<sup>2)</sup> n
			Max.	Fac.	Av.	Max.	Fac.	Av.		
Weagwan	1	0.08								
	2	0.06								
	3	0.12								
	4	0.19								
Jeokpo	1	0.09								
	2	0.09								
	3	0.09								
	4	0.12								
Namgi	1	0.05								
	2	0.07								
	3	0.10								
	4	0.13								
Mulgeom	1	0.07								
	2	0.04								
	3	0.13								
	4	0.07								

<sup>1)</sup>건교부(1991)<sup>2)</sup>BOSKO(1966), Coefficient of bed activity

류보다 심하지 않아 수심과 유속에서 환산계수는 각각 0.67 및 0.52로 나타났다. 하상활성계수는 하천구배의 단계 함수(step function)이다. 하상활성계수의 값은 BOSKO (1966)이 제시한 값을 이용하였다. 동 자료를 이용하면 왜관에서 물금까지의 낙동강 본류는 경사가 낮아 하상활성계수가 모두 0.1에 해당된다.

이상과 같은 자료를 이용하여  $k_d$  값을 구한 결과  $k_1$  값보다 모두 높게 나타났으며, 지점별로는 왜관에서는 0.025, 적포에서는 0.036 및 남지에서는 0.005만큼 높아졌으며, 물금지점은 0.001만큼 평균적으로 높은 값을 나타냈다.

#### 4. 결론

수질모델 입력자료를 얻기위하여 낙동강 본류의 왜관, 고령, 적포, 남지 및 물금 등 5개 지점에 대해 탈산소계수를 실험실에서 4차례 유도하였으며, 고령지점에 대해서는 자연수에서 직접 탈산소계수를 1회 유도하여 실험실에서 유도된 값과 비교하였고, 실험실 유도 값만 있는 다른 4개지점에 대해서는 동 구간에 대한 수리자료를 이용하여 계산에 의해 자연수에서의 탈산소계수를 구하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 실험실에서 산정한 탈산소계수는 왜관에서  $0.06 \pm 0.01 \sim 0.19 \pm 0.02$ , 고령에서는  $0.07 \pm 0.02 \sim 0.14 \pm 0.03$  적포에서는  $0.09 \pm 0.03 \sim 0.12 \pm 0.01$  남지에서는  $0.05 \pm 0.01 \sim 0.13 \pm 0.02$  및 물금에서는  $0.04 \pm 0.02 \sim 0.13 \pm 0.03$ 으로 나타났으며, 하류로 갈수록 유기탄소의 분해가 상당히 진전되어 탈산소 값은 낮게 나타나고 있었다.
- 2) 고령교 지점에 대한 자연수에서의 탈산소계수 조사구간

은 사문진교와 박석진교 구간에 대해 2회 수행하였으며, 자연수에서 산정결과( $k_d$ )는  $0.046 \pm 0.095$  및  $0.09 \pm 0.06$ 으로 나타났으며, 조사구간에 있어서 충분한 유하시간이 확보되지 못하여 표준편차가 높게 나타났고, 또한 실험실 유도 탈산소계수보다 오히려 낮게 나타났는데, 이는 조류증식 등 수체내 내부생산 오염물질 등에 기인하는 것으로 판단이 된다.

- 3) 실험실 유도 탈산소계수와 동 구간의 수리자료를 이용하여  $k_d$  값을 산정결과 왜관에서는  $k_1$  값보다 0.025가 높았고, 적포는 0.036, 남지는 0.005, 물금은 0.001 높게 나타냈다. 자연수에서 유도된 계수는 실험실에서 유도된 값보다 클 수밖에 없음을 고려하면 많은 변수가 작용한 자연수에서 직접 구한  $k_d$  값 보다  $k_1$  값에서 수리자료를 이용하여 유도한  $k_d$  값이 수질모델 입력변수로서 보다 합리적인 결과를 보이고 있었다.

#### 참고문헌

- 환경부, 수질오염공정시험방법 (2004).  
 건교부, 낙동강하천정비기본계획(보완)(하구둑-밀양강합류부) (1991).  
 건교부, 낙동강하천정비기본계획(보완II)(밀양강합류부-남강 합류부, 남강) (1991).  
 건교부, 낙동강하천정비기본계획(보완III)(남강합류부-반변천 합류부) (1991).  
 김범철 외 21인, 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사 (II), 국립환경연구원 (2004).  
 유재정의 13인, 낙동강 유역에 적합한 수질예측모델개발, 낙동강수계관리위원회(낙동강물환경연구소) (2004).  
 유재정 외 6인, 낙동강 본류의 유하시간 및 정체구간 수질 변화 조사연구, 낙동강물환경연구소 (2001).

- APHA, AWWA, WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition (1998).
- Benson, B. B., Krause, D. Jr. and Peterson, M. A., The Solubility and Isotopic Fractionation of Gases in Aqueous Solution. I. Oxygen., *Journ. of solution Chem.*, **8**(9), pp. 655-690 (1979).
- Bosko, K., Advances in Water pollution research, International Association on Water Pollution Research, Munich (1966).
- Brown, L. and Barnwell, T. O. Jr., The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and User Manual. Report EPA/600/3-87/007. U. S. EPA, Athens, GA (1987).
- George, L. B., William, B. M., Donald, B. P., Carrie, L. C., James, R. P., Gretchen, L. R., L., Kay, M. J., Peter, W. H., Chan, Steven A. G., Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, second edition, Report EPA/600/3-86/040, U. S. EPA, Athens, GA (1985).