

재포기 계수, 1차 생산율 및 호흡률을 이용한 하천의 용존산소 추정

김경섭[†] · 황성규^{*}

환경대학교 환경공학과 · *평택산업단지관리공단

(2009년 2월 25일 접수, 2009년 6월 16일 채택)

Estimation of Dissolved Oxygen in Streams using Reaeration, 1st Production and Respiration Rates

Kyung Sub Kim[†] · Sung Gyu Hwang^{*}

Department of Environmental Engineering, Hankyong National University · *Pyungtaek Industrial Complex Management

ABSTRACT : Dissolved oxygen is considered as one of the important water-quality constituents in streams from one century ago and fishes perish in low dissolved oxygen concentration. Environmental scientists and engineers have introduced the deterministic model to estimate dissolved oxygen concentration of streams and recommended the use of the Delta Method (DM), Approximate Delta Method (ADM), Extreme Value Method (EVM) and Optimization Method (OPT) which can be applied in no spatial variation of dissolved oxygen. The diurnal or annual variation of dissolved oxygen is mainly determined from the parameters such as reaeration rate, 1st production rate and respiration rate which are related to dissolved oxygen. Each method was briefly introduced and applied to two sampling sites of Anseong Stream watershed in this paper. The limitation, advantages and disadvantages of each method were reviewed and analyzed after running the each method. From these analyses, the benefit-cost approach to estimate dissolved oxygen effectively in streams was recommended.

Key Words : Dissolved Oxygen, Deterministic Model, Reaeration Rate, 1st Production Rate, Respiration Rate

요약 : 용존산소는 하천의 중요한 수질관리 항목중의 하나로 1세기 전부터 언급되어 왔으며, 농도가 낮을 경우 물고기 폐사를 유발하기도 한다. 환경과학자 및 공학자들은 하천의 용존산소 파악을 위한 결정론적 모델을 제안하였으며, 용존산소가 공간적으로 변하지 않을 경우 적용 가능한 델타 방법(Delta Method), 근사 델타 방법(Approximate Delta Method), 극한값 방법(Extreme Value Method) 및 최적화 방법(Optimization Method)등을 소개하였다. 이 방법들은 주로 용존산소와 관련 있는 매개변수 즉, 재포기 계수, 1차 생산율 및 호흡률 등을 산정하여, 이로부터 일주기 또는 년주기 용존산소를 파악한다. 본 논문에서는 용존산소 파악을 위한 각 방법을 간단히 소개하며, 안성천 유역의 금석천 및 안성천 본류, 두 지점에 적용하여 각 방법의 한계와 장·단점을 파악하였다. 이를 기초로 비용/효과적인 용존산소 파악 방법을 제안하였다.

주제어 : 용존산소, 결정론적 모델, 재포기 계수, 1차 생산율, 호흡률

1. 서론

용존산소(Dissolved Oxygen : DO)는 지표수에서 수질관리의 중요한 지표으로써 일세기 전부터 언급되어 왔으며,¹⁾ 우리나라에서도 수질기준의 항목으로 삼고 수계를 관리하고 있다. 대기중에 존재하는 산소는 수중에 산소가 부족할 때 수중으로 녹아 들어가며, 역으로 수중식물의 광합성 작용에 의해 생성되는 산소는 수중에 산소가 풍부할 경우 대기로 방출되기도 한다. 또한 식물의 광합성 및 호흡의 작용과 관련 있는 이산화탄소는 수중의 탄산염 시스템에 영향을 미치기도 한다. 일반적으로 용존산소 문제는 산소요구량이 많은 폐수가 수체내에 유입되면서 이로 인한 기준이하의 용존산소 부분이 존재하면서 발생하며 물고기

가 폐사하기도 한다.

환경공학자들은 하천의 수질관리를 위하여 용존산소 파악을 위한 다양한 방법을 제시하였다. O'Connor와 Di Toro²⁾는 재포기 계수, 1차 생산율 및 호흡률을 이용하여 용존산소를 파악하는 분석적 방법을 제시하였으며, 1차 생산율을 파악에 Fourier 급수를 사용하였다. Chapra와 Di Toro³⁾는 1차 생산율 파악에 반정현함수(half-sinusoidal function)를 적용하여 도표를 이용한 분석해(analytical solution)로 용존산소를 파악하는 델타 방법(Delta Method)을 제안하였다. 이 방법은 O'Connor와 Di Toro 방법보다는 적용이 간단한 장점이 있다. Butcher와 Covington⁴⁾은 수온의 변화가 심한 하천에서 델타 방법의 한계를 설명하였으며, 이 경우 용존산소에 영향을 미치는 재포기 계수, 1차 생산율 및 호흡률 등의 매개변수는 온도의 영향을 고려해 주어야 함을 하천의 적용을 통하여 보여주었다. 이들은 실측치와 계산치의 차이의 제곱의 합을 최소화하는 최소자승

[†] Corresponding author
E-mail: kskim@hknu.ac.kr
Tel: 031-670-5174

Fax: 031-670-5097

법을 적용한 최적화 모델을 구축하여 최적의 매개변수를 파악하였다. McBride,⁵⁾ McBride와 Chapra⁶⁾는 델타 방법의 도표를 설명할 수 있는 정확해(closed-form solution)를 소개하였으며, 정확해의 특성을 잘 나타내는 적용이 간편한 근사식을 제안하였다. 이를 하천에 적용하여 델타 방법과 유사한 결과가 나오음을 보여주었고 이 방법을 근사 델타 방법(Approximate Delta Method)이라 불렀다. Wang 등⁷⁾은 최소 및 최대 용존산소가 발생하는 시기에 시간에 대한 용존산소 농도변화 즉, 기울기가 0이라는 점을 이용한 극한값 방법(Extreme Value Method)을 제안하였다. 황성규⁸⁾는 Butcher와 Covington⁴⁾와 같이 최적화 모델로 용존산소를 파악하는 방법을 시도하였다. 본 논문에서는 매개변수를 이용한 하천의 용존산소 파악을 위하여 제안된 주요 방법을 우리나라 하천에 적용하여 각 방법의 한계와 장·단점을 알아보고, 비용/효과적인 대안을 도출해 보도록 한다.

2. 재료 및 방법

하천내 식물이 유로 연장에 따라 균등하게 분포하고 있어 용존산소가 공간적으로 변하지 않을 경우 용존산소는 식 (1)로 파악 가능하다.

$$\frac{dD}{dt} + k_a D = R - P(t) \quad (1)$$

여기서, D = 용존산소 부족량($C_{sat} - C$) (M/L^3), C_{sat} = 포화 용존산소 농도(M/L^3), C = 용존산소 농도(M/L^3), t = 시간(T), k_a = 재포기 계수($1/T$), R = 호흡률($M/L^3 \cdot T$) 및 $P(t)$ = 1차 생산율($M/L^3 \cdot T$)이다. 하천내 식물에 의한 1차 생산율은 식 (2)와 같이 반정현함수로 근사화 할 수 있다.

$$P(t) = P_m \sin\left(\frac{\pi t}{f}\right), \quad 0 \leq t \leq f \quad (2a)$$

$$P(t) = 0, \quad f \leq t \leq T \quad (2b)$$

여기서, P_m = 최대 생산율($M/L^3 \cdot T$), f = 광주기(photoperiod) (T), T = 주기(T)이며 $t=0$ 은 해뜨는 시간이다. 식 (2a)를 적분하여 일평균 생산율(P_{av})로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$P_{av} = P_m \left(\frac{2f}{\pi T}\right) \quad (3)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 분석적으로 해를 구하면 식 (4)가 얻어진다.

$$D_1(t) = \frac{R}{k_a} - \sigma \left[\sin\left(\frac{\pi t}{f} - \theta\right) + \gamma e^{-k_a t} \right], \quad 0 \leq t \leq f \quad (4a)$$

$$D_2(t) = \frac{R}{k_a} - \sigma \left[\sin(\theta) + \gamma e^{-k_a f} \right] e^{-k_a(t-f)}, \quad f \leq t \leq T \quad (4b)$$

여기서, $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\pi}{k_a f}\right)$, $\gamma = \sin(\theta) \left[\frac{1 + e^{-k_a(T-f)}}{1 - e^{-k_a f}} \right]$, $\sigma = P_m / \sqrt{k_a^2 + \left(\frac{\pi}{f}\right)^2}$ 이다. 식 (4a)는 시간에 따라 최대 및 최소값이 존재하며 식 (4b)는 지수적으로 증가함을 알 수 있다.

식 (1)은 시간에 대한 변화가 없는 경우 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = P_{av} + k_a \bar{D} \quad (5)$$

여기서 \bar{D} 는 평균 용존산소 부족량($C_{sat} - \bar{C}$) (M/L^3), \bar{C} 는 평균 용존산소 농도(M/L^3)이다.

2.1. 델타 방법(Delta Method : DM)

Chapra & Di Toro³⁾는 하천의 k_a , R 및 P_{av} 를 파악하기 위하여 일주기 용존산소 변화를 정현함수로 적합(curve fitting)하여 적합식의 태양정오 시간과 최대 용존산소가 발생하는 시간의 간격(ϕ) 및 최대 및 최소 용존산소 농도의 차이(Δ)를 이용하였으며, 식 (4)를 수치적으로 해석하여 ϕ 및 k_a , Δ/P_{av} 및 k_a 관계를 나타내는 도표를 광주기별로 제시하였다. 매개변수 추정과정은 먼저 적합식의 ϕ 를 파악하여 ϕ 및 k_a 관계를 나타내는 도표에서 k_a 를 구하며, 다음으로 Δ/P_{av} 및 k_a 관계를 나타내는 도표에서 P_{av} 를 구한다. 마지막으로 식 (5)를 이용하여 R 을 구한다.

2.2. 근사 델타 방법(Approximate Delta Method : ADM)

McBride & Chapra⁶⁾는 ϕ 및 k_a 의 관계를 나타내는 분석해를 식 (4a)의 최소 용존산소 부족량이 나타나는 시간에서 용존산소 부족량 기울기가 0이 되는 점을 이용하여 식 (6)과 같이 구하였으며,

$$\pi \cos\left[\pi\left(\frac{1}{2} + \frac{\phi}{f}\right) - \theta\right] - (k_a f) \gamma e^{-k_a(\phi+f/2)} = 0 \quad (6)$$

Δ/P_{av} 및 k_a 의 관계를 나타내는 분석해도 식 (4a)에서 최소 및 최대 용존산소 부족량이 나타나는 시간(t_{min} , t_{max})이 각각 식 (7) 및 (8)로 나타나

$$\pi \cos\left(\frac{\pi t_{min}}{f} - \theta\right) - (k_a f) \gamma e^{-k_a t_{min}} = 0, \quad t_{min} > f/2 \quad (7)$$

$$\pi \cos\left(\frac{\pi t_{max}}{f} - \theta\right) - (k_a f) \gamma e^{-k_a t_{max}} = 0, \quad t_{max} > f/2 \quad (8)$$

그 때의 농도를 구하여 식 (9)와 같이 제시하였다.

$$\frac{\Delta}{P_{av}} = \frac{\pi T}{2\sqrt{(k_a f)^2 + \pi^2}} \delta \quad (9)$$

여기서 $\delta = \frac{\Delta}{\sigma} = -[\sin(\frac{\pi t_{max}}{f} - \theta) + \gamma e^{-k_a t_{max}}] + [\sin(\frac{\pi t_{min}}{f} - \theta) + \gamma e^{-k_a t_{min}}]$ 이다.

또한 McBride & Chapra⁶⁾는 식 (6) 및 (9)로 주어지는 델타 방법의 도표가 로지스틱 함수를 따르는 특성을 이용하여 k_a 산정을 위한 근사식 (10)을 제안하였으며,

$$k_a = 7.5 \left(\frac{5.3\eta}{\eta\phi} \right)^{0.85} \tag{10}$$

여기서 $\eta = (f/14)^{0.75}$, 또한 P_{av} 산정을 위한 근사식 (11)을 제안하였다.

$$\frac{\Delta}{P_{av}} = \frac{16}{\eta(33 + k_a^{1.5})} \tag{11}$$

결론적으로 식 (10)은 식 (6), 식 (11)은 식 (9)의 근사식이며, ADM에서 용존산소 파악을 위한 매개변수 추정 은 델타 방법과 유사한 과정으로 적용이 간단한 근사식을 이용하여 구한다.

2.3. 극한값 방법(Extreme Value Method : EVM)

Wang 등⁷⁾은 최소 및 최대 용존산소가 나타나는 시기에 시간에 대한 용존산소 변화 즉, 기울기가 0이 된다는 점을 이용한 극한값 방법을 제안하였다. 식 (1)에서 광주기 이외의 시간대에서 $P(t) = 0$ 이며, 용존산소 부족량이 최대가 되는 시간에서 $dD/dt = 0$ 이므로 식 (1)로부터 다음 식이 얻어진다.

$$R = k_a D = k_a [C_{sat}(t_{max}) - C(t_{max})] \tag{12}$$

여기서 $C_{sat}(t_{max})$ 는 최대 용존산소 부족량(최소 용존산소 농도: $C(t_{max})$)이 나타나는 시간에 해당하는 포화 용존산소이다. 광주기 시간대에서 용존산소 부족량이 최소(최대 용존산소 농도: $C(t_{min})$)가 되는 시간에 또한 $dD/dt = 0$ 이므로 식 (12)와 같이 식 (13)이 얻어진다.

$$P(t_{min}) = R - k_a D = R - k_a [C_{sat}(t_{min}) - C(t_{min})] \tag{13}$$

여기서 $C_{sat}(t_{min})$ 는 최소 용존산소 부족량이 나타나는 시간에 해당하는 포화 용존산소이다. P_{av} 는 식 (13)의 $P(t_{min})$ 으로부터 식 (2a) 및 (3)을 이용하여 구할 수 있다. k_a 는 DM 및 ADM과 같이 ϕ 로 산정하거나 수리특성으로 파악 가능한 경험식¹⁾을 이용하여 이를 시작으로 R 및 P_{av} 를 구한다.

2.4. 최적화 방법(Optimization Method : OPT)

이 방법은 용존산소 실측치와 계산치의 차이의 제곱의 합을 최소화하는 함수를 목적함수로 하며 매개변수가 취

Table 1. Calculation procedure of each method

method	calculation procedure
DM	$\phi, \Delta \rightarrow k_a \rightarrow P_{av} \rightarrow R$
ADM	$\phi, \Delta \rightarrow k_a \rightarrow P_{av} \rightarrow R$
EVM	$C(t_{max}), C(t_{min}), k_a \rightarrow R \rightarrow P_{av}$
OPT	k_a, P_{av}, R

할 수 있는 값의 범위를 제약조건으로 하는 최적화 모델을 구축하여 최적의 매개변수를 파악한다. 최적화 모델의 해는 다양한 수치기법을 적용하여 풀며 이 방법은 DM, ADM 및 EVM와 같이 순차적으로 매개변수를 파악하는 것이 아니라 동시에 매개변수를 파악한다. 계산치는 분석 해인 식 (4)를 사용하거나 식 (1)로 주어지는 상미분 방정식을 수치해석하여 얻는다.

각 방법의 계산과정을 요약하여 나타내면 Table 1과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 대상 지역 및 적용

용존산소 파악 대상 지역은 안성천 수계 지방하천인 금석천 하류 지점 및 금석천 합류 후 안성천 본류 지점으로 하였으며, 금석천 지점은 하폭 약 4~6 m, 수심 약 10~20 cm, 안성천 본류 지점은 하폭 약 16~20 m, 수심 약 20~30 cm를 나타내고 있다. 2007년 10월 27~28일 양일간에 걸쳐 용존산소 및 수온 등을 약 2시간 간격으로 실측하였으며, 양일간 운량은 3할 이하, 일조시간은 약 9시간 정도를 나타내 용존산소 파악에 적합한 기상조건을 나타내었다.

실측한 용존산소를 이용하여 매개변수를 파악하기 위한 각 방법을 적용하였으며 금석천 및 안성천 본류 적용 결과가 Fig. 1에 나타나 있다. 여기서 OPT_temp는 매개변수가 수온에 따라 변하므로 이를 고려한 최적화 방법이며 수온에 따른 매개변수 변화는 Arrhenius 식($k(T) = k(20)\theta^{T-20}$)을 사용하여 k_a, P 및 R 의 θ 값을 Butcher와 Covington⁴⁾가 사용한 1.024, 1.066 및 1.08을 적용하여 파악하였고 구한 매개변수는 20℃에서의 값이다. OPT에서 제약조건으로 주어지는 매개변수의 범위는 $0.05 \leq k_a \leq 40$ (1/d), $0 \leq P_{av}H \leq 30$ (g/m² · d) 및 $0 \leq RH \leq 30$ (g/m² · d)를 취하였으며, 여기서 H 는 수심(m)이고 Excel의 해찾기 기능을 사용하여 해를 구하였다. 그림에 보이듯이 EVM을 제외하고는 모두 비슷한 결과치를 나타내나 금석천보다 안성천 본류에서 다소 차이를 보이며 실측치와의 적합정도를 파악하기 위하여 실측치와 계산치의 차이(오차)의 제곱의 합을 Table 2에 나타내었다. 오차 제곱의 합은 금석천 및 안성천 본류 모두 OPT_temp에서 제일 작았으며 EVM에서 제일 크게 나타났다. OPT_temp에서 오차가 작은 이유는 Fig. 2에 나타나 있듯이 수온변화가 약 10℃에 달하고 있어 온도의 영향을 고려한 실제에 가까운 매개변수 적용에 의한 것으로 보이며, 이로부터 수온변화가 심한 하

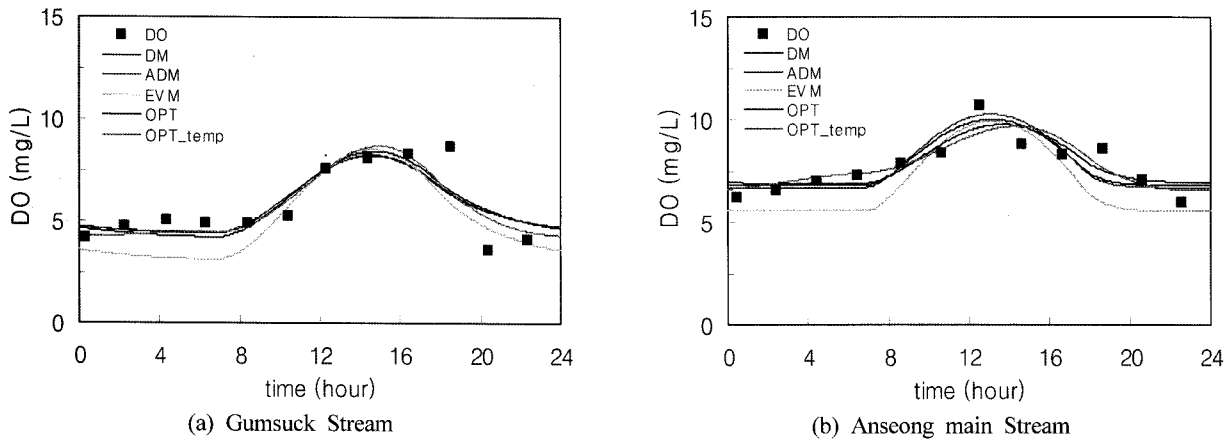


Fig. 1. Running results of each method.

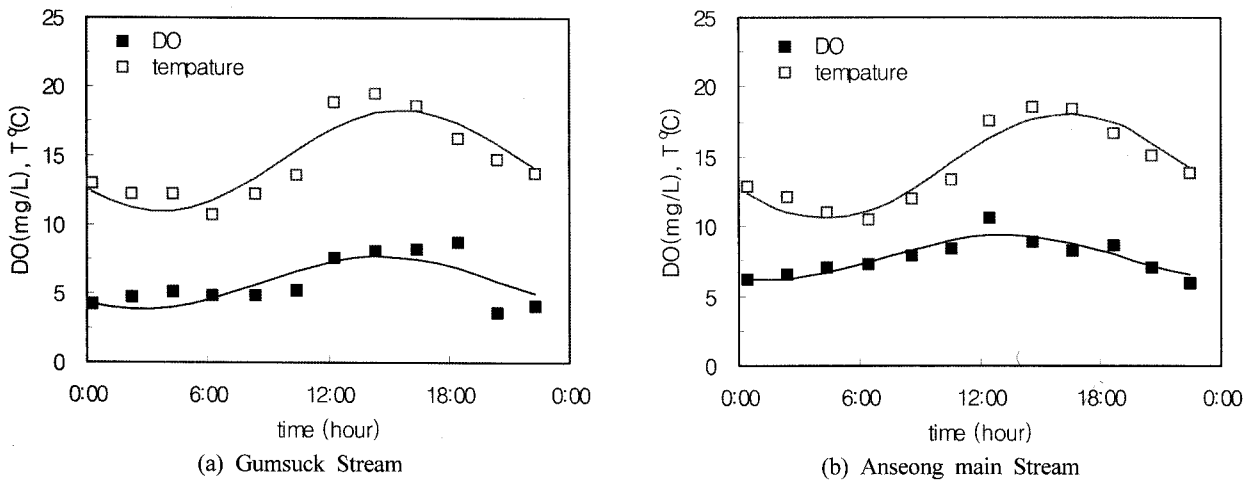


Fig. 2. Variation of temperature and DO.

천의 경우 온도의 영향을 필히 고려해야 함을 알 수 있다. EVM의 오차가 큰 것은 자체가 가지고 있는 한계에 기인한 것으로 판단된다. 즉 식 (4a)에 의하면 용존산소 최대 및 최소 농도는 광주기내 시간에서 발생하나 EVM에서 최소 용존산소는 광주기내 시간이 아닌 $P(t)=0$ 인 광주기외 시간에서 발생한다는 식 (12)의 적용에 의한 것으로 판단된다. ADM은 DM과 같은 과정으로 매개변수를 파악하며 근사식을 사용하므로 적용이 간편하나 두 하천에서 모두 DM보다 오차가 약간 큼을 알 수 있다. 평균절대오차가 Table 3에 나타나 있으며 각 방법을 적용하여 파악한 매개변수는 Table 4와 같다.

Table 2. Sum of the squares of the errors (unit : (mg/L)²)

station	DM	ADM	EVM	OPT	OPT_temp
Gumsuck Stream	11.980	12.087	20.295	11.765	9.578
Anseong main Stream	5.743	6.477	18.950	5.225	4.680

Table 3. Mean absolute errors (unit : mg/L)

station	DM	ADM	EVM	OPT	OPT_temp
Gumsuck Stream	0.726	0.722	1.022	0.749	0.620
Anseong main Stream	0.576	0.597	1.078	0.558	0.497

Table 4. Values of the estimating parameters

parameter	DM	ADM	EVM	OPT	OPT_temp
k_a (/d)	7.197	7.427	7.197	6.553	3.846
P_{av} (mg/L · d)	10.522	10.558	14.826	10.920	14.249*
R (mg/L · d)	41.893	42.931	51.272	39.535	38.620

*는 P (mg/L · d)

3.2. DM 방법 분석

DM 방법은 실측 용존산소 자료를 이용하여 정현함수로 적합하여 이 함수에서 ϕ 와 Δ 를 파악하여 k_a , P_{av} 및 R 를 순차적으로 구하며, Fig. 3(a)에 보이듯이 DM의 모의 결과는 OPT 결과와 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다. DM 결과에서의 ϕ 와 Δ 는 정현함수 적합에서 구한 ϕ (2.40 h), Δ (3.846 mg/L)와 거의 같은 값을 나타내지만 DM 결과는 정현함수와는 다르게 OPT 결과를 따르며, 최소 용존산소 농도가 나타나는 시기가 적합식과 매우 다름을 알 수 있다. 따라서 DM 방법을 실제에 가깝게 적용하기 위해서는 정현함수로 적합한 식에서 ϕ 와 Δ 를 파악하는 것이 아니라 실측자료를 비선형으로 적합한 결과에서 ϕ 와 Δ 를 파악하여 매개변수를 산정하면 오차가 줄어들 것이다. OPT 결과에서 ϕ (2.53 h)와 Δ (4.219mg/L)를 파악하여

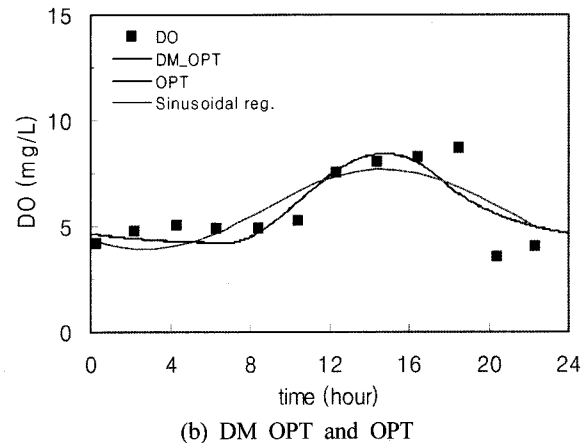
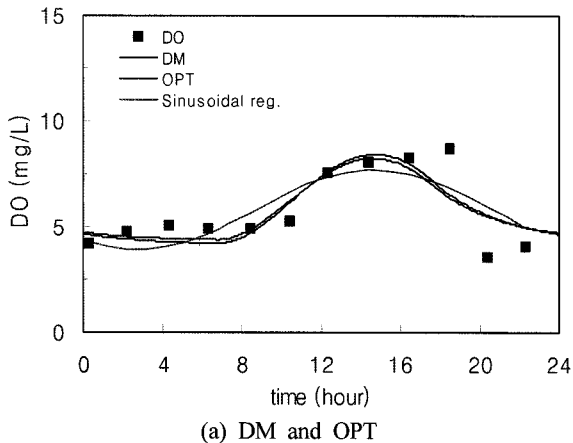


Fig. 3. Running results of DM, OPT and DM_OPT (Gumsuck Stream).

DM에 적용한 결과(DM_OPT)가 Fig. 3(b)에 나타나 있으며, 그림에 보이듯이 DM_OPT는 OPT와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 실측 용존산소 적합을 위하여 정현함수를 사용하는 원래의 DM 방법보다는 최적화한 적합식을 사용하는 DM 방법이 실제에 가까운 용존산소를 파악할 수 있을 것으로 판단한다. 안성천 본류 지점에서도 금석천 지점과 유사하게 DM 방법이 분석되었다.

3.3. 비용/효과적인 용존산소 추정방법

DM 및 ADM은 실측 용존산소 농도를 이용하여 정현함수 적합을 통하여 매개변수를 파악하며, EVM은 광주기 내에서 최대 용존산소 농도 발생과 광주기외에서 최소 용존산소 농도가 발생한다는 가정하에 매개변수를 파악한다. DM 및 ADM은 실측 농도가 충분히 존재하지 않을 경우 적용이 불가능하며, 실측농도가 있을 경우 실측 자료를 적합하여 매개변수를 파악하기보다는 OPT와 같이 직접 매개변수를 파악하는 것이 오차도 줄이고 실제 용존산소 변화를 재현할 수 있다. EVM은 광주기외에서 최소 용존산소 농도가 발생한다는 가정이 비현실적이다. 이상의 제안된 용존산소 추정방법 분석으로부터 DM 및 ADM의 단점을 극복하고 오차가 최소인 OPT의 장점을 살릴 수 있는 최소의 용존산소 실측자료를 활용한 경제적인 용존산소 파악 방법을 제안하면 다음과 같다. 1단계 : k_a 를 수리특성 자료(유속 및 수심)를 활용하여 구한다. 2단계 : 식 (7) 및 (8)에서 최대 및 최소 용존산소 부족량이 발생하는 시간을 구한다. 3단계 : t_{min} 및 t_{max} 에서 용존산소를 실측한다. 4단계 : 3단계에서 구한 농도로 Δ 를 구한다. 5단계 : 식 (9)를 사용하여 P_{ov} 를 구한다. 6단계 : 식 (5) 또는 (4a)를 이용하여 R 을 구한다. 7단계 : 구한 매개변수로 용존산소를 파악한다. 수온 변화가 심한 하천에 적용할 경우 OPT-temp와 같이 온도의 영향을 고려하여 20℃에서의 매개변수를 파악한다. 이 방법은 최소 및 최대 용존산소가 나타나는 두 시기에 용존산소를 파악하기만 하면 세 매개변수를 산정할 수 있으며 이를 통하여 일주기 또는 년주기 용존산소의 변화를 용이하게 파악할 수 있는 장점이 있다.

4. 결론

본 연구에서는 하천에서 용존산소의 변화를 추정하는 다양한 방법을 소개하였으며, 이를 통하여 얻어진 주요 연구 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) DM 및 ADM은 실측 용존산소 농도를 이용하여 정현함수 적합을 통하여 순차 적으로 매개변수를 파악하며, DM 및 ADM의 결과는 OPT의 결과를 따르는 것으로 나타났다.
- 2) DM 및 ADM을 실제에 가깝게 적용하기 위해서는 정현함수로 적합한 식에서 ϕ 와 Δ 를 파악하는 대신 실측 자료를 비선형으로 적합한 결과에서 ϕ 와 Δ 를 파악하여 매개변수를 산정하는 것이 오차를 줄일 수 있는 것으로 파악되었다.
- 3) 수온의 변화가 심한 하천에서 일주기 또는 년주기 용존산소 파악은 온도에 의한 영향을 필히 고려한 매개변수를 적용하여야 오차가 감소함을 알 수 있었다.
- 4) DM 및 ADM의 단점을 극복하고 OPT의 장점을 살릴 수 있는 최소의 용존산소 실측자료를 활용한 경제적인 용존산소 파악 방법을 제안하였으며, 이 방법은 실측 농도가 충분히 존재하지 않으면 DM 및 ADM을 적용할 수 없는 한계를 극복할 수 있을 것으로 판단한다. 용존산소 실측 자료는 Δ 파악을 위하여 최대 및 최소 용존산소가 나타나는 두 시기에만 필요하다.
- 5) 용존산소 실측 농도가 충분히 존재할 경우 DM, ADM 및 EVM보다는 OPT와 같이 직접 매개변수를 산정하여 용존산소를 파악하는 것이 오차를 줄이는 것으로 나타났다.

사사

본 연구는 2007년도 환경대학교 교비 해외파견 연구비의 지원에 의해 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Steven C. Chapra, Surface Water-Quality Modeling, Mc-

- Graw-Hill, New York, pp. 347~364(1997).
2. O'Connor, D. J. and Di Toro, D. M., "Photosynthesis and oxygen balance in streams," *J. Sanit. Engrg.*, **96**(2), 547~571(1970).
 3. Chapra, S. C. and Di Toro, D. M., "Delta Method for Estimating Primary Production, Respiration, and Reaeration in Streams," *J. Environ. Eng.*, **117**(5), 640~655 (1991).
 4. Butcher, J. B. and Covington, S., "Dissolved-Oxygen Analysis with Temperature Dependence," *J. Environ. Eng.*, **121**(10), 756~759(1995).
 5. McBride, G. B., "Calculating Stream Reaeration Coefficients from Oxygen Profiles," *J. Environ. Eng.*, **128**(4), 384~386(2002).
 6. McBride, G. B. and Chapra, S. C., "Rapid Calculation of Oxygen in Streams: Approximate Delta Method," *J. Environ. Eng.*, **131**(3), 336~342(2005).
 7. Wang, H., Hondzo, M., Xu, C., Poole, V., and Spacie, A., "Dissolved Oxygen Dynamics of Streams Draining an Urbanized and an Agricultural Catchment," *Ecol. Model.*, **160**, 145~161(2003).
 8. 황성규, 델타 방법을 이용한 하천의 용존산소 매개변수 추정, 환경대학교, 석사학위 논문(2008).