농업용 저수지 수질모델 (ARSIM-rev) 개발 및 적용

Development and Application of Agricultural Reservoir Water Quality Simulation Model (ARSIM-rev)

함중화*[†] · 김동환* · 김형중* · 김미옥*

Haam, Jong Hwa · Kim, Dong Hwan · Kim, Hyung Joong · Kim, Mi-Ock

ABSTRACT

Agricultural reservoir water quality simulation model (ARSIM-rev) was developed in this study for water quality simulation of a small and shallow agricultural reservoir with limited observed water quality data. Developed ARSIM-rev is a zero-dimensional water quality model because of little spatial differences in water quality between stations in a small and shallow agricultural reservoir. ARSIM-rev used same water quality reaction equations with WASP except for several equations, and daily based input parameters such as settling rate, release rate from sediment, and light extinction coefficient changed yearly based input parameters in ARSIM-rev. A number of pre- and post-processors were developed such as auto calibration and scenario analysis for ARSIM-rev. CE-QUAL-W2, WASP, and developed ARSIM-rev were applied to Mansu agricultural reservoir to evaluate model performance, and ARSIM-rev demonstrated similar model performance with CE-QUAL-W2 and WASP when low number of observed data was used for agricultural reservoir water quality simulation. Overall, developed ARSIM-rev was feasible for water quality simulation in a small and shallow agricultural reservoir with limited observed water quality data, and it can simulate agricultural reservoir water quality precisely enough like common water quality model such as CE-QUAL-W2 and WASP within a limited time.

Keywords: ARSIM-rev; agricultural reservoir; water quality model

1. 서 론

최근 농어촌지역의 경제발전에 따른 오염부하량의 과도한 배출로 자연의 환경용량을 초과하고 수역의 생태계 균형을 파괴시켜 수질환경의 현저한 악화를 가져왔다. 이에 따라 수질개선을 위한 노력이 다각도로 진행되고 있으며, 농업용 저수지의 수질관리를 위해선 현재수질의 정확한 평가와 미래수질변화에 대한 예측이 필수적으로 수질개선대책을 수립하고, 대책에 따른 효과를 분석하기 위해 수질예측모델이 많이 이용되고 있다. 이러한 수질예측모델은 매우 복잡한 수질환경의 변화를 일반화, 단순화시켜 줌으로써 수질변화에 영향을 주는 요인들에 대한 이해를 증진시키고 조절방법을 알려줌과 동시에 수질예측을 가능하게 하여 각종대책에 따른 관리효과를 매우 경제적으로 파악할 수 있는 장점을 지니고 있다 (Chapra, 1997; Park *et al.*, 2001).

일반적으로 호소 수질예측을 위해 WASP (Ambrose *et al.*,

1993), CE-QUAL-W2 (Cole and Wells, 2008), EFDC (Tetra Tech, 2007) 등의 복잡한 모델이 많이 사용되고 있는데, 이러한 모델들은 많은 종류의 실측자료를 이용해 모델을 구축하여 위치별, 수심별 수질농도를 예측할 수 있어 다양한 시나리오 분석에 매우 유용하며, 실측자료가 충분히 있는 경우 실측값과 매우 유사한 모의결과를 얻을 수 있다. 하지만 충분한 자료와 시간을 갖고 모델 구축 및 보정을 실시하지 않거나 모델 구동자가 모델에 대한 전문적인 지식이 부족할 경우에 신뢰할 수 없는 모의 결과가 나타날 수 있다.

전국 17,600여개의 농업용 저수지 중 3,300여개의 저수지를 한국농어촌공사에서 관리하고 있으며, 이중 규모가 큰 25개 저수지는 농업용호소 수질측정망으로 지정하여 월 1회 저수지별 2~3지점에 대해 수질을 측정하고 있으며, 그 외 수질관리가 필요한 저수지를 중심으로 800개 저수지는 농업용수 수질측정망으로 지정하여 연 4회 1지점 (5개 저수지는 2지점)에 대해 수질을 측정하고 있다. 전국 농업용 저수지의 4.7 %인 825개소만이 수질측정망으로 지정되어 정기적으로 수질조사를 실시하고 있어 전체적으로 모델 구축 및 보정을 위한 저수지 내 실측 수질자료가 충분하지 않은 실정이다. 또한 수질측정망으로 지정되어 운영되고 있는 저수지도 여러 지점에서 수심별 실측된 자료가 거의 없어 수질측정망 자료만을 이용하여 2차원 및 3차원모델을 적용

* 한국농어촌공사 농어촌연구원

[†] Corresponding author Tel.: +82-31-400-1832

Fax: +82-31-400-1889

E-mail: jonghwah@hanmail.net

2012년 8월 17일 투고

2012년 10월 10일 심사완료

2012년 11월 1일 게재확정

및 보정하는데 한계가 있다. 그러므로 수질개선대책사업이나 연구 목적으로 농업용 저수지의 수질을 모의할 경우 많은 시간과 비용을 들여 여러 지점에서 수십별 수질조사를 수행하여 모델 보정을 위한 수질자료를 확보한 후 2차원 및 3차원 모델을 적용하여 시나리오 분석을 실시하고 있다.

그러나 농업용 저수지 수질개선대책사업이나 연구목적 외에 수질관리를 목적으로 짧은 시간 내에 적은 비용으로 농업용 저수지 수질을 모의해야 하는 경우가 많아 기존의 2차원 및 3차원 모델을 적용하는데 한계가 있다. 그러므로 시간, 비용, 자료가 충분한 경우 복잡한 모델을 사용하는 것이 유리할 수 있지만, 그렇지 못한 경우 복잡한 모델을 사용하기보다는 보유한 자료, 허용되는 시간 및 비용 범위 내에서 적합한 모델을 선정하여 사용하는 것이 적합하다. 하지만 기존 모델 중 자료가 충분하지 않은 농업용 저수지에 적용하는데 적합한 모델이 거의 없어, 실무부서에서 농업용 저수지 수질관리에 수질예측모델을 활용하지 못하는 것이 현실이다.

그러므로 한국농어촌공사 농어촌연구원에서는 농업용 저수지 수질관리를 목적으로 적은 입력자료로 짧은 시간 내에 농업용 저수지 수질을 모의할 수 있는 저수지 유역모델 (ARSIM-wsd) 과 저수지 수질모델 (ARSIM-rev)이 결합된 간단한 농업용 저수지 통합모델 (Agricultural Reservoir Simple Integrated Model, ARSIM)을 개발 중에 있다. 본 연구에서는 간단한 농업용 저수지 통합모델 중 실측자료가 충분하지 않은 농업용 저수지의 수질을 모의할 수 있는 저수지 수질모델 (ARSIM-rev)을 개발하였으며, 개발된 모델의 적용성을 평가하였다.

II. 모델 개발

1. ARSIM-rev 개발 방향

전국 농업용 저수지의 95 %는 만수면적 10.1 ha 이하의 소규모 저수지이고, 70 %는 수심 4.8 m 이하의 수심이 얕은 저수지이다. Ham (2010)의 연구에서 한국농어촌공사에서 관리하고 있는 농업용 저수지 중 4개의 대표 저수지를 선정하여 각 저수지별 총 9지점 (수평방향 3지점, 수심방향 3지점)에서 실측된 Chl-a, COD, T-N, T-P에 대해 분산분석을 실시한 결과, 저수지 만수면적 (평균 12.2 ha)이 작고 수심 (평균 4.0 m)이 깊지 않아 전체적으로 15 %만이 공간적인 (지점별, 수십별) 수질농도 차이가 있는 것으로 나타나기는 했으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

그러므로 ARSIM-rev는 농업용 저수지로 유입된 물질은 저수지 전체에 대해 균일한 농도로 분포한다고 가정하여 단순-완전혼합모델 (0차원 모델)형태로 개발하였다. 완전혼합수질모델은

공간대표점의 수가 적고, 입력자료의 공간분포특성의 파악과 유출입수의 처리가 용이하며, 경제조건의 처리가 간편하여 농업용 저수지와 같이 수질의 공간적 분포변화가 크지 않은 저수지의 수질예측용으로서 활용도가 큰 것으로 알려져 있다 (Chapra, 1997; Lim and Kwun, 1989; Ruley and Rusch, 2004; Shin and Kwun, 1990).

ARSIM-rev는 동물성 플랑크톤 이상의 상위 생물상에 대한 영향은 모델에 고려하지 않았으며, 물질의 물리, 화학, 생물학적 변화는 대부분의 모델에서와 같이 1차 반응으로 해석하였다. 또한 반응식에서 미분식을 계산하기 위해 Euler방법에 비해 상대적으로 정확한 값을 얻을 수 있는 Runge Kutta 4차 방법을 사용하여 Visual BASIC 6.0으로 개발하였다.

2. 기본방정식

가. 물수지 방정식

저수지 물수지는 유입량과 유출량을 주어진 시간단위별로 저수량 또는 저수지 수위를 추적하기 위해 사용되는데, 이는 연속 방정식에 의해 식 (1)과 같이 표시될 수 있다. 총방류량 (Out_t)은 저수지 무효방류량, 농업용수 이용량, 기타 용수 이용량, 기타 손실량의 합으로 표현될 수 있으나, 각각을 구분하여 산정하기 쉽지 않아 총 방류량만을 이용하여 물수지방정식을 만들었다.

$$V_t = V_{t-1} + In_t + P_t - E_t - Out_t \quad (1)$$

여기서, V_t , V_{t-1} = t, t-1일의 저수량, In_t = 유역으로부터 유입량, P_t = 수면강수량, E_t = 수면증발량, Out_t = 총방류량이다.

수면강수량과 증발량은 기상자료를 이용하여 계산되도록 하였으며, 유입량과 방류량은 직접 입력하도록 하였다. 하지만 대부분의 농업용 저수지에서 방류량이 실측되지 않기 때문에, 총방류량을 직접입력 방법 외에 식 (1)을 식 (2)와 같이 변형하여 일별 실측한 저수율을 입력받아 총방류량을 자동으로 추정할 수 있도록 하였다. 또한 실측한 방류량 및 저수량자료가 모두 없는 경우에는 저수량변화가 없는 것 ($V_{t-1} - V_t = 0$)으로 가정하여 식 (2)와 (3)과 같이 수정하여 총방류량을 자동으로 추정하여 입력되도록 하였다.

$$\begin{aligned} Out_t &= (V_{t-1} - V_t) + In_t + P_t - E_t \\ &= V(R_{t-1} - R_t) + In_t + P_t - E_t \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, V = 총저수량, R_t , R_{t-1} = t, t-1일의 저수율이다.

$$Out_t = In_t + P_t - E_t \quad (3)$$

나. 수온모의 방정식

저수지의 수온은 화학적, 생물학적 반응의 속도에 매우 커다란 영향을 미치는 항목으로 시간에 따른 수온변화를 모의하기 위해 Chapra (1997)가 제시한 식 (4)를 이용하였다. 식 (4)에서 저수지의 수온은 유입수 및 방류수의 수온, 순수태양열, 대기의 장파장, 물의 장파장, 전도, 증발에 의해 변화된다.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} T_{in} - \frac{Q_{out}}{V} T + \frac{J_{sn}}{\rho C_p H} \quad (4)$$

$$+ \frac{\sigma (T_{air} + 273)^4 (A + 0.031 \sqrt{e_{air}}) (1 - R_L)}{\rho C_p H}$$

$$- \frac{\epsilon \sigma (T + 273)^4}{\rho C_p H} - \frac{c_1 f(U_w) (T - T_{air})}{\rho C_p H}$$

$$- \frac{f(U_w) (e_s - e_{air})}{\rho C_p H}$$

$$e_s = 4.596e^{\frac{17.27 T_{air}}{237.3 + T_{air}}}, e_{air} = \frac{e_s \cdot R_h}{100}, f(U_w) = 19.0 + 0.95 U_w^2$$

여기서, T , T_{in} , T_{air} = 저수지, 유입수 및 공기 온도 ($^{\circ}\text{C}$), Q_{in} , Q_{out} = 저수지 유입량 및 방류량 (m^3/d), V = 저수지의 체적 (m^3), A = 저수지 수표면적 (m^2), H = 수심 (m), ρ = 물의 밀도 (kg/m^3), C_p = 물의 비열 ($\text{J}/\text{kg}/^{\circ}\text{C}$), J_{sn} = 순 태양 단파장 ($\text{J}/\text{m}^2/\text{d}$), σ = Stefan-Boltzmann 상수 = $4.9 \times 10^{-8} \text{ J}/\text{m}^2/\text{d}/\text{K}^4$, e_s , e_{air} = 공기

의 수증기압 및 포화 수증기압 (mm Hg), R_L = 반사계수 (대략 0.03), ϵ = 물의 복사율 (대략 0.97), U_w = 풍속(m/s), $f(U_w)$ = 수표면 위에서 풍속에 의한 열전달의 의존도, R_h = 상대습도 (%) 이다.

다. 물질수지 방정식

모델에 적용되는 기본 물질수지식은 식 (5)와 같다. 식 (5)에서 첫 번째 항은 외부로부터 유입되는 부하량을 표시하고, 하천으로부터 유입, 강우로부터 유입 등이 포함된다. 두 번째 항은 저수지내에서 물질의 증가 및 감소를 나타내는 것으로 증식, 사멸, 침강, 퇴적층으로부터 용출 등이 고려된다.

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_m W_{im} + \sum_n S_{in} \quad (5)$$

여기서 V_i = 저수지의 체적 (m^3), C_i = 저수지의 평균물질농도 (mg/L), W_{im} = 외부로부터 저수지로 유입되는 부하량 (g/d), S_{in} = 저수지에서 물질의 증감량 (g/d), m = 외부 유입부하량의 종류, n = 모델 내에서 물질의 반응식 종류를 나타낸다.

라. 수질변화 방정식

저수지 내의 수질은 유입 및 유출 이외에 침강과 용출, 유기염류의 무기화, 식물플랑크톤의 증식과 사멸 등의 작용에 의해 변화된다. 본 연구에서 적용한 수질항목간의 상호관계는 Fig. 1과 같으며, 대부분의 반응식은 WASP의 반응식을 이용하였고, 일부식을 수정하였다.

Fig. 1 ARSIM-rev state variable interactions

식물플랑크톤 성장률 (GR)을 계산하기 위해 필요한 광소멸계수 (K_e , Light extinction)는 WASP에서 일단위로 직접 입력하도록 되어 있으나, 일단위의 광소멸계수를 산정하여 입력하기 쉽지 않다. 그러므로 ARSIM-rev에서는 CE-QUAL-W2에서 사용된 여러 광소멸계수 계산 방법 중 Chapra (1997)가 제시한 식 ($K_e = 1.5/TR$)을 사용하여 투명도값을 입력하면 모델 내부적으로 광소멸계수가 계산되도록 하였다. 월별 변화를 고려하기 위해 연평균 투명도에 월별 투명도 가중치를 적용하여 월별 광소멸계수가 계산되도록 하였다. WASP에서는 광도의 단위로 Langley/day를 사용하도록 되어 있으나, 국내 기상청에서 제공되는 광도 단위와 달라 입력에 어려움이 있어 ARSIM-rev에서는 Langley/day 대신 $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ 를 사용하도록 하였다.

WASP에서 CBOD, Org-N, Org-P의 개별 침강속도는 입력된 유기물의 침강속도에 각 구획 (segment)별 CBOD, Org-N, Org-P의 비용존성 비율을 각각 곱하여 개별 침강속도를 계산하는 반면, ARSIM-rev는 CBOD, Org-N, Org-P의 침강속도를 각각 직접 입력하도록 하였다.

WASP에서 퇴적층으로부터 용출되는 $\text{NH}_3\text{-N}$ (TFNH_3)과 $\text{PO}_4\text{-P}$ (TFPO_4)양은 일단위로 입력된 퇴적층으로부터 용출되는 $\text{NH}_3\text{-N}$ 과 $\text{PO}_4\text{-P}$ 양에 각 구획별로 입력된 계수 (FNH_3 , FPO_4)를 곱하여 계산하는 반면, ARSIM-rev는 WASP의 SOD (퇴적층산소소비율)와 같이 입력된 연평균 단위면적당 용출되는 $\text{NH}_3\text{-N}$ (R_{wN})과 $\text{PO}_4\text{-P}$ (R_{wP}) 평균수심 (D)으로 나눠 $\text{NH}_3\text{-N}$ 과 $\text{PO}_4\text{-P}$ 용출량이 계산되도록 하였다.

WASP에서 식물플랑크톤, 유기물, 무기물의 침강속도, $\text{NH}_3\text{-N}$ 과 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 퇴적물로부터 용출량 및 SOD를 일단위로 입력하도록 되어 있지만, ARSIM-rev에서는 연평균 값을 입력하도록 하였다. WASP에서와 같이 일단위로 입력할 경우 일별로 다른 침강속도, 용출량 및 SOD를 입력할 수 있어 쉽게 실측값과 유사하게 모델을 보정할 수 있는 장점이 있지만, 실제 일 단위 값을 입력하는 것이 매우 어려워 대부분의 모델에서 보정을 위한 인자로 사용되는 것이 현실이다.

또한 WASP에서는 식물플랑크톤 내 탄소의 함량을 구하기 위해 Chl-a 농도에 Chl-a 1 mg에 포함된 탄소량을 의미하는 CCHL ($\text{mgC}/\text{mgChl-a}$)을 곱하여 탄소함량을 계산하고, 질소와 인의 함량은 계산된 탄소함량에 NCRB (mgN/mgC)와 PCRB (mgP/mgC)를 곱하여 산정한다. 이 방법은 탄소의 함량을 계산하는 방법과 질소, 인의 함량을 계산하는 방법이 서로 달라 혼돈의 우려가 있어, ARSIM-rev에서는 일반적으로 많이 사용하는 식물플랑크톤 내 탄소, 질소, 인의 함량비를 나타내는 HCA ($\text{mgC}/\text{mgChl-a}$), HNA ($\text{mgN}/\text{mgChl-a}$), HPA ($\text{mgP}/\text{mgChl-a}$) 값을 이용해 식물플랑크톤 내 탄소, 질소, 인의 함량을 산정하였다.

재폭기계수 K_a 는 다양한 식으로 계산할 수 있는데, ARSIM-rev

에서는 CE-QUAL-W2에서 호소에 적합하다고 추천하는 14개의 식 중 Banks and Herrera (1977)가 제시한 풍속 (W)과 수심 (D)을 이용한 식 ($K_a = (0.728 W^{0.5} - 0.317 W + 0.0372 W^2)/D$)을 사용하여 계산하였다.

(1) 식물플랑크톤

본 모델에서 식물플랑크톤의 총 발생량은 대부분의 모델이 채택하고 있는 Chl-a 농도로 모의하도록 하였다. 식물플랑크톤은 광합성에 의한 성장과 내생호흡, 사멸, 침강, 동물플랑크톤에 의한 포식 등으로 감소하며, 그 반응식은 식 (6)과 같다. 식물플랑크톤의 성장은 식 (7)과 같이 수온, 광도, 영양염류 (N, P)의 농도에 의해 최대성장률 (K_{1C})이 점차 감소되도록 하였다. 영양염류 중 DIN (용존무기질소)과 DIP (용존무기인)의 농도가 생장제한인자라고 판단하여 이 두 영양염류에 대하여 식 (10)과 같이 Michaelis-Menten의 식을 적용하고, Liebig의 최소율의 법칙에 따라 N과 P의 농도 중에서 보다 많이 제한되는 영양염류의 제한계수를 택하였다. 식물플랑크톤은 보통 내생호흡, 사멸, 침강 및 동물플랑크톤에 의한 포식 등에 의해 감소하는데, 호흡과 사멸에 의한 감소는 식 (11)과 같이 표현하였으며, 침강에 의한 감소는 식 (12)와 같이 나타냈다. 그러나 동물플랑크톤 포식에 의한 감소는 계산이 용이하지 않아 고려하지 않았다.

$$\frac{dCHLA}{dt} = (GR - DR - ST) \cdot CHLA \quad (6)$$

$$GR = K_{1C} \cdot f(T) \cdot f(L) \cdot f(N,P) \quad (7)$$

$$f(T) = K_{1T}^{(T-20)} \quad (8)$$

$$f(L) = \frac{2.718}{K_e \cdot D} \cdot f_d \cdot \quad (9)$$

$$\left[\exp\left\{-\frac{I_0}{I_{s2}} \cdot \exp(-K_e \cdot D)\right\} - \exp\left\{-\frac{I_0}{I_{s2}}\right\} \right]$$

$$I_a = f_d \cdot 37.247 + 5.1933, \quad I_0 = 0.9 \cdot \frac{I_a}{f_d}, \quad K_e = 1.5/TR$$

$$f(N,P) = \text{Min}\left(\frac{DIN}{K_{MNG1} + DIN}, \frac{DIP}{K_{MPG1} + DIP}\right) \quad (10)$$

$$DR = K_{1RC} \cdot K_{1RT}^{(T-20)} + K_{1D} \quad (11)$$

$$ST = V_{CHLA}/D \quad (12)$$

여기서, CHLA = 식물플랑크톤 농도 (mg/m³), GR = 성장률 (1/d), DR = 호흡 및 사멸률 (1/d), ST = 침강률 (1/d), $K_{1C} = 20$ °C 에서 식물플랑크톤의 최대성장률 (1/d), $f(T)$ = 온도보정 함수, $f(L)$ = 광에 의한 보정 함수, $f(N, P) = N$ 및 P 의 농도에 의한 보정 함수, $K_{1T} = K_{1C}$ 의 온도보정계수, f_d = 하루 중 낮 시간의 비율 (일조시간/24), D = 수심 (m), I_a , I_0 = 지표면과 수면 바로 아래에서의 일평균 광도 (MJ/m²/d = 23.9 langley/d), I_{s2} = 광 합성 포화광도 (MJ/m²/d), TR = 연평균투명도 (m), K_e = 수중에서의 광소멸계수 (1/m), K_{MNGI} , $K_{MPCI} = N$ 과 P 의 반포화농도 (mg/L), DIN, DIP = 용존 무기질소 및 용존 무기인 농도 (mg/L), $K_{1RC} = 20$ °C에서의 호흡률 (1/d), $K_{1RT} = K_{1RC}$ 의 온도보정계수, K_{1D} = 자연적인 사멸률 (1/d), V_{CHLA} = 식물플랑크톤의 침강 속도 (m/d)이다.

(2) 질소

식물플랑크톤의 호흡 및 사멸, 분해에 의해 NON과 NH₃-N이 증가하며, 성장에 의해 NH₃-N과 NO₃-N이 감소되고 식물플랑크톤에 포함된 유기질소 (CHLA-ON)가 증가된다. 호기성 조건에서 질산화에 의해 NH₃ → NO₂ → NO₃로 변환되며, 혐기성 조건에서 탈질작용에 의해 NO₃ → N₂로 변환된다. 또한, 유기질소의 침강과 바닥으로부터 NH₃의 용출이 일어난다. 이상의 조건들을 근거로 하여 NON, NH₃-N, NO₃-N에 대한 모델 내 반응식을 나타냈으며, NO₂-N의 농도는 농업용 저수지에서 매우 낮기 때문에 본 모델에서는 NO₂-N과 NO₃-N을 합하여 NO₃-N으로 고려하였다.

$$\frac{dCHLA-ON}{dt} = CHLA \cdot H_{NA}/1000 \quad (13)$$

$$\frac{dNON}{dt} = DR \cdot (CHLA \cdot H_{NA}/1000) \cdot f_{ON} \quad (14)$$

$$- K_{71C} \cdot K_{71T}^{T-20} \cdot NON \cdot$$

$$\frac{(CHLA \cdot H_{CA}/1000)}{K_{MPHYT} + (CHLA \cdot H_{CA}/1000)}$$

$$- \frac{V_{NON}}{D} \cdot NON$$

$$\frac{dNH_3}{dt} = -GR \cdot (CHLA \cdot H_{NA}/1000) \cdot P_{NIB} \quad (15)$$

$$+ DR \cdot (CHLA \cdot H_{NA}/1000) \cdot (1 - f_{ON})$$

$$+ K_{71C} \cdot K_{71T}^{T-20} \cdot NON \cdot$$

$$\frac{(CHLA \cdot H_{CA}/1000)}{K_{MPHYT} + (CHLA \cdot H_{CA}/1000)} - K_{12C} \cdot$$

$$K_{12T}^{T-20} \cdot NH_3 \cdot \frac{DO}{K_{nit} + DO} + \frac{R_{wN}}{D} \cdot R_{wNT}^{(T-20)}$$

$$\frac{dNO_3}{dt} = -GR \cdot (CHLA \cdot H_{NA}/1000) \cdot (1 - P_{NIB}) \quad (16)$$

$$+ K_{12C} \cdot K_{12T}^{T-20} \cdot NH_3 \cdot \frac{DO}{K_{nit} + DO}$$

$$- K_{20C} \cdot K_{20T}^{T-20} \cdot NO_3 \cdot \frac{K_{NOB}}{K_{NOB} + DO}$$

여기서, H_{NA} = 식물플랑크톤 세포내의 N 성분비율 (mgN/mg Chl-a), f_{ON} = 식물플랑크톤의 사멸 및 분해로 인해 발생하는 T-N에 대한 ON의 비율, K_{71C} = 유기성 질소의 분해율 (1/d), K_{12C} = 암모니아성 질소의 산화율 (1/d), K_{20C} = 질산성 질소의 탈질률 (1/d), K_{71T} , K_{12T} , $K_{20T} = K_{71C}$, K_{12C} , K_{20C} 의 온도 보정계수, A_b = 저수지 퇴적층의 면적 (m²), V = 저수지 체적 (m³), V_{NON} = 유기질소 (NON)의 침강속도 (m/d), K_{MPHYT} = 식물플랑크톤의 반포화 상수 (mgC/L) 일반적으로 0 입력, R_{wN} = NH₃-N의 용출계수 (gN/m²/d), R_{wNT} = 온도보정계수, K_{nit} = 질산화에 대한 반포화 산소농도 (mgO₂/L), K_{NOB} = 탈질화에 대한 반포화 산소농도 (mgO₂/L), P_{NIB} = 암모니아 선택계수이다.

(3) 인

유기성인은 WASP에서와 같이 살아있는 식물플랑크톤에 포함되어있는 유기성인 (CHLA-OP)과 죽은 유기물질에 포함된 유기성인 (NOP)으로 구분하여 모의되도록 하였다. 인은 질소의 경우와 같이 식물플랑크톤의 광합성에 의해 감소하고, 호흡 및 사멸, 분해에 의해 증가되며, 침강과 무기화, PO₄-P의 용출에 의해 변화된다.

인의 침강은 유기성인 (NOP)의 침강과 Ca, Fe, Al 등의 광물질과 결합하여 침강하는 PO₄-P의 침강으로 구분하여 모의하였다.

$$\frac{dCHLA-OP}{dt} = CHLA \cdot H_{PA}/1000 \quad (17)$$

$$\frac{dNOP}{dt} = DR \cdot (CHLA \cdot H_{PA}/1000) \cdot f_{OP} \quad (18)$$

$$- K_{83C} \cdot K_{83T}^{T-20} \cdot NOP \cdot$$

$$\begin{aligned} & \frac{(CHLA \cdot H_{CA}/1000)}{K_{MPHYT} + (CHLA \cdot H_{CA}/1000)} \\ & - \frac{V_{NOP}}{D} \cdot NOP \\ \frac{dPO_4}{dt} = & -GR \cdot (CHLA \cdot H_{PA}/1000) \\ & + DR \cdot (CHLA \cdot H_{PA}/1000) \cdot (1 - f_{OP}) \\ & + K_{83C} \cdot K_{83T}^{T-20} \cdot NOP \cdot \\ & \frac{(CHLA \cdot H_{CA}/1000)}{K_{MPHYT} + (CHLA \cdot H_{CA}/1000)} \\ & - \frac{V_{PO_4}}{D} \cdot PO_4 + \frac{R_{wP}}{D} \cdot R_{wPT}^{(t-20)} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, H_{PA} = 식물플랑크톤 세포내의 P 성분비율 (mgP/mg Chl-a), f_{OP} = 식물플랑크톤의 사멸 및 분해로 인해 발생하는 T-P에 대한 OP의 비율, K_{83C} = NOP의 분해계수 (1/d), K_{83T} = K_{83C} 의 온도 보정계수, V_{NOP} = NOP의 침강속도 (m/d), V_{PO_4} = PO_4 -P의 침강속도 (m/d), R_{wP} = PO_4 -P의 용출계수 (mgP/m²/d), R_{wPT} = R_{wP} 의 온도보정계수이다.

(4) CBOD

CBOD는 식물플랑크톤의 사멸에 의해 증가되며, 유기물의 분해, 탈질화에 의한 유기물 소모, 침강에 의해 감소된다. CBOD는 살아있는 식물플랑크톤에 포함된 CBOD (CHLA-CBOD)와 죽은 유기물에 포함된 CBOD로 나눠 모의하였다.

$$\frac{dCHLA-CBOD}{dt} = \frac{32}{12} \cdot CHLA \cdot H_{CA}/1000 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{dCBOD}{dt} = & \frac{32}{12} \cdot DR \cdot (CHLA \cdot H_{CA}/1000) \\ & - K_{DC} \cdot K_{DT}^{T-20} \cdot CBOD \cdot \frac{DO}{K_{CBOD} + DO} \\ & - \frac{5}{4} \frac{32}{14} K_{20C} \cdot K_{20T}^{T-20} \cdot NO_3 \cdot \left(\frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + DO} \right) \\ & - \frac{V_{CBOD}}{D} \cdot CBOD \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, H_{PA} = 식물플랑크톤 세포내의 탄소 성분비율 (mgC/mg Chl-a), K_{DC} = 20 °C에서의 CBOD 분해율 (1/d), K_{DT} = K_{DC}

의 온도 보정 계수, K_{CBOD} = 반포화 산소농도 (mgO₂/L), V_{CBOD} = CBOD의 침강속도 (m/d)이다.

(5) 용존산소

DO의 농도에 영향을 미치는 일반적인 환경인자는 재폭기, 유기물 분해작용, 광합성, 호흡작용, 퇴적층의 산소소모 등으로 다양하며, 본 모델에서 DO는 식 (22)와 같이 재폭기, 식물플랑크톤의 광합성에 의해 증가하고, 유기물의 산화, 질산화, 식물플랑크톤 호흡, 퇴적층의 산소소모 (SOD)에 의해 감소되도록 하였다.

$$\begin{aligned} \frac{dDO}{dt} = & K_a \cdot K_{aT}^{T-20} (DO_s - DO) \\ & - K_{DC} \cdot K_{DT}^{T-20} \cdot CBOD \cdot \frac{DO}{K_{BOD} + DO} \\ & - \frac{64}{14} K_{12C} \cdot K_{12T}^{T-20} \cdot NH_3 \cdot \frac{DO}{K_{nit} + DO} \\ & + GR \cdot (CHLA \cdot H_{CA}/1000) \cdot 32 \cdot \\ & \left(\frac{1}{12} \cdot P_{NH_3} + \frac{1}{12} + 1.5 \cdot \frac{H_{NA}/H_{CA}}{14} \right) \cdot (1 - P_{NH_3}) \\ & - \frac{32}{12} \cdot K_{1RC} \cdot K_{1RT}^{T-20} \cdot (CHLA \cdot H_{CA}/1000) \\ & - \frac{R_{wD}}{D} \cdot R_{wDT}^{(T-20)} \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, K_a = 재폭기계수 (1/d), K_{aT} = K_a 의 온도 보정계수, DO_s = DO 포화농도 (mg/L), R_{wD} = 퇴적층 산소 소비율 (SOD, g/m² · day), R_{wDT} = R_{wD} 의 온도 보정계수이다.

3. ARSIM-rev의 주요 기능 및 특성

가. 입출력 기능

필수 입력자료는 저수지 총저수량 및 수표면적, 유입하천 유량 및 수질, 모의 연도 및 해당 기상관측소, 초기 저수지 수질이며, 유입하천의 유량 및 수질자료를 제외하고는 대부분 한국농어촌공사에서 운영 중인 농업용 저수지 수질측정망 자료만으로도 쉽게 모델의 입력자료를 생성할 수 있도록 필요한 입력자료 수를 줄였다. ARSIM-rev만으로 대부분의 모델링과정을 수행할 수 있도록 다양한 전처리 및 후처리 기능을 추가하였다.

모델 초기화면에서 입력자료를 ‘기상-유입하천’, ‘저수지’, ‘반응계수’의 세 개의 탭으로 구분하여 입력하도록 하였다 (Fig. 2). 모델 구축을 위해 필요한 기상자료는 DB형태로 모델과 같이 제공하여 사용자가 대상 농업용 저수지의 관찰관측소와 모의년도

Fig. 2 ARSIM-rev main input and output window

를 선택하면 기상자료가 DB로부터 모델에 자동으로 입력되도록 하였으며, 구축된 DB이외의 기상자료를 입력하고 싶은 경우 사용자가 직접 입력창에 값을 입력할 수 있도록 하였다.

모델 실행 직후 결과를 쉽게 파악할 수 있도록 모의결과는 Fig. 2와 같이 표와 그래프 형태로 화면에 나타나도록 하였으며, 보정을 위한 실측 수질농도가 입력된 경우 각 항목별로 모델의 적합도를 나타내는 다양한 통계값이 자동으로 계산되어 출력되도록 하였다.

나. 자동보정기능

일반적으로 수질예측 모델링에서 적절한 반응계수를 찾는 보정과정에 매우 많은 시간이 소요되므로 이러한 시간을 단축시키기 위해 ARSIM-rev모델에 자동보정기능을 추가하였다. ARSIM-rev에 적용한 자동보정기능은 유전자알고리즘을 이용해 모델의 모의값이 실측값과 유사하게 모의되도록 수만 번 이상 모델을 자동으로 실행하여 최적의 반응계수 세트를 찾아주도록 하였다. ARSIM-rev에서 목적함수로 상대오차 (RB, relative bias), 평균 제곱근오차 (RMSE, root mean square error), 상대평균절대오차 (RMAE, relative mean absolute error), 모델효율계수 (NSE, Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient), 결정계수 (R^2 , coefficient of determination)를 사용하였으며, 보정대상 수질항목으로 Chl-a, T-P, T-N, COD, DO 중 하나 또는 여러 개를 선택할 수 있도록 하였다. 여러 개의 수질항목을 선택할 경우 수질항목별 가중치를 적용하여 원하는 수질항목이 더 잘 모의될 수 있도록 하였다. 보정할 수질항목을 선택하면 해당 수질항목에 영향을 미치는 반응계수가 자동으로 선택되도록 하였으며, 사용

자가 원하는 반응계수를 추가하거나 삭제할 수 있도록 하였다.

모델 사용자가 자동보정기능을 수행하기 위해서는 모델 실행에 필요한 입력자료 외에 자동보정과 관련된 보정대상 수질항목, 가중치, 보정대상 반응계수, 목적함수를 선택하고 population no, iteration no를 입력해야 한다. 모든 입력자료를 입력한 후 자동보정기능을 실행하면 입력한 population no와 iteration no의 곱만큼 모델이 반복 실행되어 실측값과 가장 유사하게 모의될 수 있는 10개의 반응계수 세트와 모의 결과가 화면에 출력되어 사용자가 쉽게 반응계수 세트별 적합도를 파악할 수 있도록 하였다 (Fig. 3). 비록 하나의 수질항목에서 적합도가 높게 나타나더라도, 다른 수질항목에서 실측값과 큰 차이가 나타날 수 있기 때문에 추천된 10개의 반응계수 세트 중 모델 사용자가 전체 수질항목에 대해 고르게 실측값과 유사하게 모의된 반응계수 세트를 최종적으로 직접 선택할 수 있다.

다. 시나리오 분석기능

유역환경변화 및 수질개선대책 적용에 따른 농업용 저수지의 수질변화를 개략적으로 모의할 수 있도록 간단한 시나리오 분석기능을 ARSIM-rev에 추가하였다.

유역의 오염원 증감 및 처리장 설치로 인해 유입하천의 수질이 변할 경우 예상되는 저수지 수질변화는 유역환경변화에 따른 유입하천 수질변화율을 직접 입력하여 모의할 수 있으며, 저수지의 수질개선을 목적으로 저수지 유입부에 침강지, 인공습지와 같은 처리시설을 설치할 경우 예상되는 저수지의 수질변화는 처리시설의 시설용량 및 수질항목별 처리효율을 직접 입력하여 모의할 수 있다.

Fig. 3 Auto-calibration input and output windows

Fig. 4 Scenario analysis input and output windows

시나리오분석 결과는 시나리오 적용 전·후의 수질항목별 연평균 수질 외에 일별수질을 표와 그래프로 화면에 나타나도록 하였다. 시나리오분석기능을 이용할 경우 목표수질을 만족시키기 위해 필요한 유입하천의 목표 수질개선을 쉽게 계산할 수 있을 뿐만 아니라, 침강지와 인공습지를 조성할 경우 필요한 시설용량 및 처리효율을 계산할 수 있다. 하지만, 자세한 유역환경변화에 따른 저수지 수질변화를 모의하기 위해서는 다른 수질모델과 동일하게 별도의 유역모델과 연계하여 적용해야 한다.

III. 결과 및 고찰

1. 모델 적용

개발된 ARSIM-rev의 적용성을 분석하기 위해 동일한 자료를 이용하여 ARSIM-rev와 기존 모델을 구축한 후 각 모델의 모의 결과를 비교·분석하였다. 기존 모델로는 저수지 수질예측에 많이 이용되고 있는 CE-QUAL-W2와 WASP를 선정하였다.

CE-QUAL-W2는 종방향 및 수심방향으로 여러 개의 구획을

Table 1 A descriptive list of model components

		CE-QUAL-W2*	WASP5*	ARSIM-rev
range of application		intermediate-level, detailed-level	intermediate-level	screening-level
waterbody type		river, lakes	estuary, river, well mixed / shallow lake	well mixed / shallow lake
input data	requirements	medium	medium	low
	calibration	difficult	difficult	easy
	default data	medium	medium	high
	user interface	-	low	medium
model output	statistics	low	low	medium
	graphics	-	low	medium
parameters simulated		DO, CBOD, NBOD, Temp, NH ₃ , NO ₂ , NO ₃ , Org-N, PO ₄ , Org-P, Chl-a, Sal, organic carbon, fecal coliform, inorganic suspended solids, dissolved, labile, and refractory particulate organic carbon, dissolved silica, particulate biogenic silica, total active metal	DO, CBOD, NBOD, NH ₃ , NO ₂ , NO ₃ , Org-N, PO ₄ , Org-P, Chl-a fecal coliform, conservative and non-conservative substances	DO, CBOD, NH ₃ , NO ₂ , NO ₃ , Org-N, PO ₄ , Org-P, Chl-a

* source : USEPA, 1997

분할하여 적용할 수 있는 모델로 하천이나 성층화가 나타나는 깊은 저수지에 적합한 모델이나 횡방향으로 1개의 구획으로만 분할할 수 있어 횡방향의 수질변화가 큰 저수지에는 적합하지 않은 단점이 있다. WASP은 종방향, 횡방향 및 일부 수심방향에 대한 수질변화를 모의할 수 있는 모델로 우리나라의 많은 저수지 및 담수호에 적용되고 있으나 (Chang *et al.*, 2009; Chung *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2004; Park *et al.*, 2010), 성층해석에 한계가 있어 깊은 저수지에는 적합하지 않은 단점이 있다.

CE-QUAL-W2와 WASP은 요구되는 입력자료가 많고 보정이 어려운 단점이 있지만, 수질관리를 위한 자세한 분석이 가능하여 중간 또는 복잡한 수질모의에 적합한 모델이다 (Table 2). 반면에 본 연구에서 개발한 ARSIM-rev는 요구되는 입력자료수가 적고, 초기 값 및 기상자료 DB가 모델과 같이 제공되고, 자동보정기능과 모델 결과에 대한 통계값과 그래프를 제공하는 후처리기능이 모델에 포함되어있어 빠르고 쉽게 수질모의가 가능해 스크리닝 단계에 적합한 모델이다.

대상저수지로 수질이 악화되어 저수지 수질관리가 필요한 경기도 안성시에 있는 만수저수지를 선정하였다. 1945년에 준공된 만수저수지의 유역은 산림 48.8 %, 논 17.3 %, 밭 16.8 %, 기타 17.1 %로 구성되어 있으며, 유역면적, 만수면적, 유효저수량 및 평균수심은 각각 375 ha, 22.3 ha, 614,000 m³, 2.8 m이다. 주 오염원은 축산계로 BOD, T-N, T-P 발생부하량의 73 %, 76 %, 90 %가 축산계에 의한 것이다.

ARSIM-rev는 저수지 전체를 하나의 구획으로 분할하였으며, CE-QUAL-W2와 WASP은 각각 저수지를 15개 (종방향 3개, 수심방향 5개)와 8개 (종방향 4개, 수심방향 2개)의 구획으로 분할하여 수질을 모의하였다. 조사지점은 저수지의 중앙부와 두 개의 주요 유입하천이며, 2010년 5월부터 11월까지 월 1회 조사하였다. 유입하천은 모델 입력자료로 활용하기 위해 저수지 유입

Fig. 5 Mansu agricultural reservoir watershed

전 하천 말단지점에서 유량과 수질을 측정하였으며, 모델보정자료로 활용하기 위해 저수지 중앙부 표층수를 채취하여 수질을 측정하였다. 방류량은 저수지의 일별저수율변화로부터 수위변화를 추정한 자료를 이용하였다.

입력자료의 수에 따른 각 모델의 모의결과를 비교하기 위하여 본 연구에서 조사한 7회 자료와 수질측정망 조사시기와 동일한 4회 (5, 7, 9, 11월) 자료를 이용하여 모델을 구축하였다. 각 모델의 보정은 채수지점에 해당하는 구획의 표층 모의결과와 실측값을 비교하여 보정하였다. 3개의 모델을 이용해 만수저수지의 수질을 모의한 결과는 Fig. 6~7과 Table 2와 같다.

입력된 자료 수에 따른 모델별 모의결과를 살펴보면, 4회의 실측자료를 이용한 경우 (Fig. 6) Chl-a와 T-N은 WASP이 실측값과 가장 유사하게 모의되었으며, COD는 ARSIM-rev가 T-P는 CE-QUAL-W2가 실측값과 가장 유사하게 모의되었다. 7회

Fig. 6 Mansu reservoir modeling result using 4 observed stream and reservoir data set

Fig. 7 Mansu reservoir modeling result using 7 observed stream and reservoir data set

Table 2 RMSE of ARSIM, CE-QUAL-W2, and WASP in Mansu reservoir

Mansu		Chl-a (mg/m ³)	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	rank
4 obs.	ARSIM-rev	50.96	3.80	1.12	0.164	2
	CE-WUAL-W2	65.85	5.18	0.81	0.112	3
	WASP	41.29	4.00	0.79	0.164	1
7 obs.	ARSIM-rev	43.51	5.44	0.68	0.145	3
	CE-WUAL-W2	49.13	4.72	0.57	0.114	2
	WASP	37.16	4.04	0.55	0.140	1

의 실측자료를 이용한 경우 (Fig. 7) Chl-a, COD, T-N는 WASP 이 실측값과 제일 유사하게 모의되었으며, T-P는 CE-QUAL-W2가 실측값과 제일 유사하게 모의되었다 (Table 2). 전체적으로 WASP이 실측값과 제일 유사하게 모의되었으며, 그 다음으로 4회의 실측자료를 이용한 경우에는 ARSIM-rev, 7회의 실측자료를 이용한 경우에는 CE-QUAL-W2가 실측값과 유사하게 모의되었다.

유입하천 및 저수지의 실측횟수가 충분하지 않은 경우에는 0차원 모델인 ARSIM-rev가 2차원 모델인 CE-QUAL-W2, WASP 과 큰 차이가 없었으나, 실측 자료수가 많은 경우에는 CE-QUAL-W2와 WASP이 ARSIM-rev보다 실측값과 더 유사하게 모의되었다.

2. 모델 적용성 평가

실측자료가 충분하지 않고 수심이 얇아 수심별 농도차이가 크지 않는 농업용 저수지에서는 0차원형태로 개발된 ARSIM-rev 모델이 2차원 또는 3차원 모의가 가능한 모델들과 대등한 수준의 모의결과를 얻을 수 있었다. 그 원인은 CE-QUAL-W2와 WASP의 입력자료 생성에 필요한 자료가 부족하였고, 매우 많은 모델 계수를 갖고 있는 CE-QUAL-W2와 WASP를 충분한 시간을 갖고 전체 모델 계수를 변경하면서 보정하지 못했기 때문이라 생각된다. 반면에 ARSIM-rev모델은 대상저수지가 공간적인 농도변화가 적어 0차원 모델인 ARSIM-rev로도 실측값과 유사하게 모의할 수 있었고, 자동보정기능을 이용해 1시간에 4만 번 이상 모델계수를 변경하면서 적절한 반응계수를 찾을 수 있었기 때문에 CE-QUAL-W2, WASP과 대등하거나 일부 항목에서 더 좋은 모의결과를 얻을 수 있었던 것으로 생각된다. CE-QUAL-W2와 WASP모델의 입력자료 생성을 위해 많은 자료가 제공되고, 장시간 보정한다면 CE-QUAL-W2와 WASP이 ARSIM-rev보다 훨씬 좋은 모의 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

이상에서와 같이, 실측자료가 부족하고 짧은 시간 내에 수질변화를 모의하고자 하는 경우 비록 정확도는 기존의 2차원 및 3

차원모델보다는 낮을 수 있지만 충분하지 않은 실측자료만으로도 짧은 시간 내에 수질변화 모의가 가능한 ARSIM-rev모델을 사용하는 것이 적합할 것이라 생각된다. 하지만 공간적인 농도변화가 크고 충분한 시간을 갖고 현장조사를 통해 실측자료를 획득한 후 모델을 구축할 수 있는 경우에는 CE-QUAL-W2와 WASP과 같은 복잡한 모델을 사용하여 보다 정확한 수질을 모의하는 것이 적합할 것이라 생각된다.

IV. 결 론

본 연구에서 실측자료가 충분하지 않은 농업용 저수지의 수질모의를 위해 농업용 저수지 수질모델 (ARSIM-rev)을 개발하였으며, 개발된 모델의 적용성을 평가하기 위해 기존 모델인 CE-QUAL-W2, WASP과 모델 적용결과를 비교·분석 하였다.

1. 농업용 저수지는 상대적으로 규모가 작고 수심이 얇아 공간적인 농도차이가 크지 않은 것으로 조사되어, 실측자료가 충분하지 않은 농업용 저수지에 쉽고 간단하게 적용할 수 있는 단순 완전혼합모델 (0차원모델)형태의 농업용 저수지 수질모델 (ARSIM-rev)을 개발하였다.

2. 개발된 농업용 저수지 수질모델 (ARSIM-rev)의 수질반응식은 대부분 WASP의 반응식을 사용하였으며, 일부 반응식과 일단위로 입력해야 했던 침전율, 용출율, 빛소멸계수 등의 입력방법을 연평균 값으로 입력하도록 수정하여 개발하였다.

3. 개발된 ARSIM-rev와 기존모델인 CE-QUAL-W2, WASP을 만수저수지에 적용한 결과 전체적으로 적은 수의 유입하천 유량 및 수질자료를 사용하여 모델을 적용한 경우에는 기존모델과 비슷한 정도의 모의결과를 얻을 수 있었다.

4. 본 연구에서 개발한 ARSIM-rev모델이 규모가 작고 수심이 얇아 공간적인 수질농도 차이가 크지 않으며, 실측자료가 충분하지 않은 농업용 저수지에 적합하며, 짧은 시간 내에 기존 모델과 비슷한 정확도의 모의결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

5. 향후 저수지의 오염정도 및 규모가 다른 여러 저수지에 적용하여 ARSIM-rev모델의 적용성을 분석하고, 합리적인 저수지 수질모의를 위해 ARSIM-rev와 연계 적용할 수 있는 유역모델 개발이 필요하다.

REFERENCES

- Ambrose, R. B, T. A. Wool, and J. L. Martin, 1993. The water quality analysis simulation program, WASP5 version 5.10. Part A: Model documentation, Athens, GA: U.S. Environmental Protection Agency.
- Chang, I. S., K. B. Park, W. H. Lee, and J. H. Kim,

2009. Water quality prediction of Chungju regulation reservoir by WASP model. *Journal of the KENSS* 18(6): 683-690 (in Korean).
3. Chapra, S. C., 1997. Surface water quality modeling. NY: McGraw-Hill.
4. Chung, P. G., H. S. Goh, M. H. Hyun, and E. J. Lee, 2004. Water quality management using WASP5 & WASP builder for a basin of an agricultural reservoir. *Journal of Korean Society on water quality* 20(5): 422-431 (in Korean).
5. Cole, T. M. and S. A. Wells, 2008. CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.6, User Manual, Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.
6. Kim, M. A., Y. H. Kim, H. K. Lee, D. H. Hwang, and J. Y. Kim, 2004. Estimation of nutrients reduction rate to prevent eutrophication on the Hwang reservoir. *Journal of Korean Society on water quality* 20(6): 589-596 (in Korean).
7. Ham, J. H., 2010. A study on the application measure of water model in each type of agricultural reservoir, 26-36. 11-D150769-000014-01. Uiwang, Gyeonggi: Korea Rural Community Corporation, Rural Research Institute (in Korean).
8. Lim, J. W. and S. K. Kwun, 1989. Development and Application of multiple box water quality model for estuary reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 31(4): 111-122 (in Korean).
9. Park, B. H., S. K. Kwun, and J. R. Jang, 2001. Development and application of a water quality model to assess water purification techniques for lakes and reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(6): 174-186 (in Korean).
10. Park, J. C., J. H. Choi, Y. I. Song, S. J. Song, and D. I. Seo, 2010. Water quality modeling of Youngju dam reservoir by HSPF, EFDC and WASP. *Journal of Environmental impact assessment* 19(5): 465-473 (in Korean).
11. Ruley, J. E. and K. A. Rusch, 2004. Development of a simplified phosphorus management model for a shallow, subtropical, urban hypereutrophic lake. *Ecological Engineering* 22: 77-98.
12. Shin, K. S. and S. K. Kwun, 1990. Prediction of water quality in Haenam estuary reservoir using multiple box model(I). *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 32(3): 116-129 (in Korean).
13. Tetra Tech, 2007. The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation, User Manual US EPA version 1.01. Fairfax, VA.
14. USEPA, 1997. Compendium of tools for watershed assessment and TMDL development, EPA841-B-97-006. Washington, DC: USEPA.