

농업용저수지 수질모델 (ARSIM-rev)



함 중 화
한국농어촌공사 농어촌연구원
주임연구원
jonghwah@hanmail.net



김 동 환
한국농어촌공사 농어촌연구원
연구원
kimdh@ekr.or.kr

1. 개발 배경 및 목적

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 있어 호소의 수질관리를 위해 다양한 수질예측모델이 사용되고 있다 (Chapra, 1997; Ruley and Rusch, 2004).

일반적으로 호소 수질모델로써 WASP, CE-QUAL-W2, EFDC 등의 모델이 사용되고 있으며, 유역모델로써 HSPF, SWAT 등의 모델이 이용되고 있다. 기존의 모델들은 위치별, 수심별 수질농도를 예측할 수 있어 다양한 시나리오 분석에 유용하나 매우 복잡하고, 많은 종류의 입력자료를 필요로 하기 때문에 실측자료가 충분히 존재할 경우에는 모델 구축 시 실측값과 매우 유사한 모의결과를 얻을 수 있지만 충분한 자료와 시간을 갖고

모델 구축 및 보정을 실시하지 않거나 모델 구동자가 모델에 대한 전문적인 지식이 부족할 경우에 신뢰할 수 없는 모의결과가 나타날 수 있다.

전국 17,600여개의 농업용저수지 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 한국농어촌공사에서 관리하는 저수지는 연 4회 정기적으로 수질을 조사하고 있다. 시군에서 관리하고 있는 14,300여개의 농업용저수지 중 1,000여개는 2년에 한번 수질조사를 실시하고 있어 전체적으로 모델구축 및 보정을 위한 저수지 내 실측 수질자료가 부족한 실정이다.

또한 저수지 내 여러 지점에 대해 수심별로 실측된 자료가 거의 없어 기존에 사용되고 있는 2차원 및 3차원 모델을 적용 및 보정하는데 한계가 있다. 그러므로 수질 개선대책사업이나 연구 목적으로 농업용저수지의 수질을 모의할 경우 많은 시간과 비용을 들여 여러 지점에서

수심별 수질조사를 별도로 수행하여 모델 보정을 위한 수질자료를 확보한 후 2차원 및 3차원 모델을 적용하여 시나리오 분석을 실시하고 있다.

하지만 농업용저수지 수질개선대책사업이나 연구 목적 외에 농업용저수지 수질관리를 목적으로 짧은 시간 내에 적은 비용으로 농업용저수지 수질을 예측해야 하는 경우가 많고, 자료가 부족한 농업용저수지에 적용하는데 적합한 모델이 거의 없어, 실무부서에서 농업용저수지 수질관리에 수질예측모델을 활용하지 못하는 것이 현실이다.

그러므로 한국농어촌공사 농어촌연구원에서는 실측된 자료가 부족한 농업용저수지의 수질을 모의할 수 있도록 유역모델과 저수지 수질모델이 결합된 간단한 농업용저수지 통합모델 (Agricultural Reservoir Simple Integrated Model)을 개발 중에 있다. 이중 농업용저수지의 수질을 모의할 수 있는 농업용저수지 수질모델 (ARSIM-rev)은 단순 완전혼합모델 (0차원 모델)형태로 개발되어 현재 실무부서에서 농업용저수지 수질관리를 위한 간단한 수질모의에 사용하고 있으며, 저수지로 유입되는 유입하천의 유량 및 수질을 모의할 수 있는 농업용저수지 유역모델 (ARSIM-wsd)은 개발 중에 있다. 여기서는 현재까지 개발이 완료된 농업용저수지 수질모델 (ARSIM-rev)을 소개하고자 한다.

2. ARSIM-rev 개발 방법

가. 개발방법

전국 농업용저수지의 95 %는 만수면적 10.1 ha 이하의 소규모 저수지이고, 70 %는 수심 4.8 m 이하의 수심이 얇은 저수지이다. 한국농어촌공사 농어촌연구원

(2010)의 연구결과에 의하면 한국농어촌공사에서 관리하고 있는 농업용저수지 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, 수심별) 수질농도차이가 있는 것으로 나타나기는 했으나 그 차이는 크지 않았다. 그러므로 ARSIM-rev는 농업용저수지로 유입된 물질은 저수지 전체에 대해 균일한 농도로 분포한다고 가정하여 단순-완전혼합모델 형태로 개발하였다. 동물플랑크톤 이상의 상위 생물상에 대한 영향은 모델에 고려하지 않았으며, 물질의 물리, 화학, 생물학적 변화는 대부분의 모델에서와 같이 1차 반응으로 해석하였다.

나. 수질변화방정식

저수지 내 수질은 유입 및 유출 이외에 침강과 용출, 유기물의 무기화, 식물플랑크톤의 증식과 사멸 등의 작용에 의해 변화된다. ARSIM-rev에서 적용한 수질항목 간의 상호관계는 그림 1과 같으며, 대부분의 반응식은 WASP의 반응식을 이용하였고, 일부 식을 수정하였다.

식물플랑크톤 성장률을 계산하기 위해 필요한 광소멸계수 (Light extinction)는 WASP (Ambrose *et al.*, 1993)에서 일단위로 직접 입력하도록 되어 있으나, 일단위의 광소멸계수를 산정하여 입력하기 쉽지 않다. 그러므로 ARSIM-rev에서는 CE-QUAL-W2 (Cole and Wells, 2001)에서 사용된 여러 광소멸계수 계산 방법 중 Chapra (1997)가 제시한 식 ($Ke=1.5/TR$)을 사용하여 투명도로부터 모델 내부적으로 광소멸계수가 계산되도록 하였다. 월별 변화를 고려하기 위해 연평균 투명도에

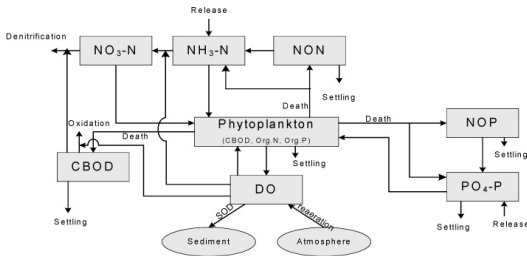


그림 1. 수질 항목 간 상호 관계

일별 투명도 가중치를 적용하여 일별 광소멸계수가 계산되도록 하였다. WASP에서는 광도의 단위로 Langley/day를 사용하도록 되어 있으나, 국내 기상청에서 제공되는 광도 단위가 달라 입력에 어려움이 있어 ARSIM-rev에서는 Langley/day 대신 MJ/m²/d를 사용하도록 하였다.

WASP에서 CBOD, Org-N, Org-P의 개별 침강속도는 입력된 유기물의 침강속도에 각 구획 별 CBOD, Org-N, Org-P의 비용존성 비율을 각각 곱하여 개별 침강속도를 계산하는 반면, ARSIM-rev는 CBOD, Org-N, Org-P의 침강속도를 각각 입력하도록 하였다. WASP에서 퇴적층으로부터 용출되는 NH₃-N과 PO₄-P량은 일단위로 입력된 퇴적층으로부터 용출되는 NH₃-N양과 PO₄-P양에 각 구획 별로 입력된 계수를 곱하여 계산하는 반면, ARSIM-rev는 WASP의 SOD (퇴적층산소소비율)와 같이 입력된 연평균 단위면적당 용출되는 NH₃-N양과 PO₄-P양을 수심으로 나눠 NH₃-N과 PO₄-P의 용출량이 계산되도록 하였다.

WASP에서 식물플랑크톤, 유기물, 무기물의 침강속도, NH₃-N과 PO₄-P의 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 대부분 모델에서 보정을 위한 인자로 사용되는 것이 현실이다.

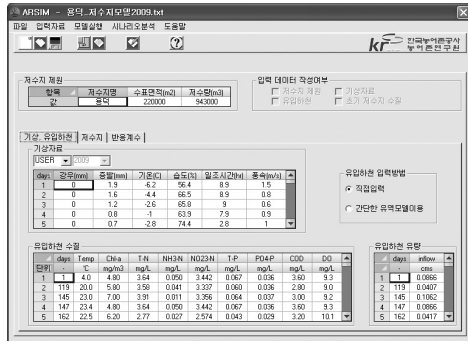
또한 WASP에서는 식물플랑크톤 내 탄소의 함량을 구하기 위해 Chl-a 1 mg에 포함된 탄소량을 의미하는 CCHL (mg C/mg Chl-a)을 곱하여 탄소함량을 계산하고, 질소와 인의 함량은 계산된 탄소함량에 NCRB (mg N/mg C)와 PCRB (mg P/mg C)를 곱하여 산정한다. 이 방법은 탄소의 함량을 계산하는 방법과 질소, 인의 함량을 계산하는 방법이 서로 달라 혼돈의 우려가 있어, ARSIM-rev에서는 일반적으로 많이 사용하는 식물플랑크톤 내 탄소, 질소, 인의 함량비를 나타내는 HCA (mg C/mg Chl-a),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

3. ARSIM-rev의 주요 기능 및 특성

가. 사용자 인터페이스 구성

개발된 저수지 수질모델의 구성화면은 그림 2와 같으며, 기상자료, 유입하천 및 저수지의 유량과 수질자료, 반응계수를 입력할 수 있는 초기화면, 모델실행 후 일별 저수지 수질 및 모델효율을 나타내는 결과화면 모델을 자동으로 보정할 수 있는 자동보정화면, 유입하천 수질 개선으로 인한 저수지 수질변화를 모의할 수 있는 시나리오 분석 화면 등으로 구성된다.

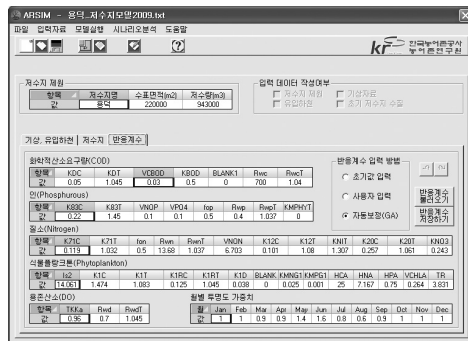
나. 입출력 기능



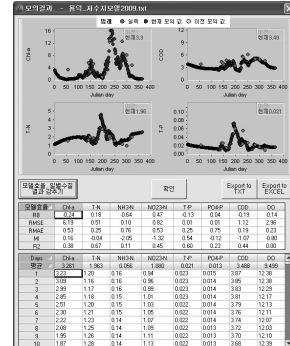
〈입력화면-기상, 유입하천 자료입력〉



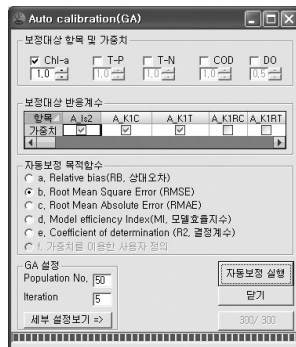
〈입력화면-저수지 자료입력〉



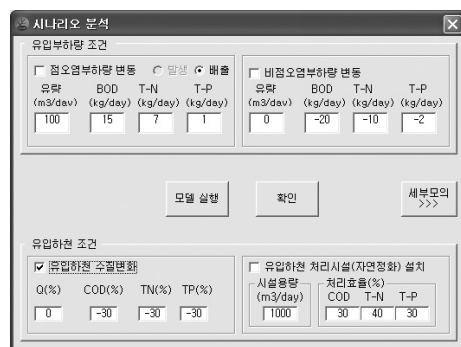
〈입력화면-반응계수 입력〉



〈결과출력화면〉



〈자동보정 화면〉



〈시나리오 분석화면〉

그림 2. ARSIM 초기화면 및 기능 별 화면

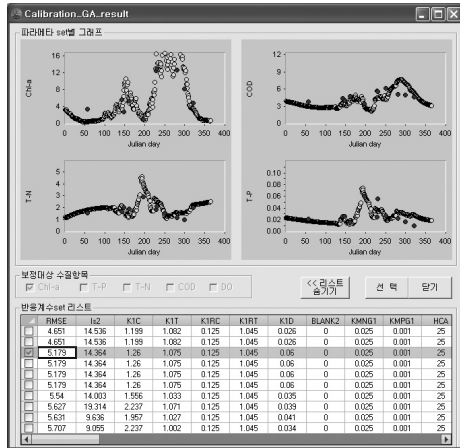


그림 3. 자동보정 실행 후 반응계수 세트

필수 입력자료로는 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 보정을 위해 입력하는 반응계수는 대부분 WASP과 동일한 명칭 및 기본값을 사용하고 있으며, 반응계수를 선택하면 해당 계수의 설명, 범위 및 초기 값을 화면에 나타낸다. 모델 구축을 위해 필요한 기상자료는 DB형태로 모델과 같이 제공되어 사용자가 대상 농업용저수지의 관할관측소와 모의연도를 선택하면 자동으로 DB로부터 입력되며, 구축된 DB이외의 기상자료를 입력하고 싶은 경우 사용자가 직접 입력창에 값을 입력할 수 있다. 모델 실행 직후 모델 실행결과를 쉽게 파악할 수 있도록 모의결과는 표와 그래프로 화면에 나타나며, 보

정을 위한 실측 수질농도가 입력된 경우 각 항목별로 모델의 적합도를 나타내는 다양한 통계값이 자동으로 계산되어 출력된다.

다. 자동보정기능

일반적으로 수질예측 모델링에서 적절한 반응계수를 찾는 보정과정에 매우 많은 시간이 소요되므로 이러한 시간을 단축시키기 위해 ARSIM-rev 모델에 자동보정기능을 추가하였다. ARSIM-rev에 적용한 자동보정기능은 유전자알고리즘을 이용해 모델의 모의값이 실측값과 유사하게 모의되도록 수만 번 이상 모델을 자동으로 실행하여 최적의 반응계수 세트를 찾아준다. ARSIM-rev에서 목적함수로는 상대오차 (RB, relative bias), 평균제곱근오차 (RMSE, Root Mean Square Error), 상대평균절대오차 (RMAE, relative mean absolute error), 모델효율계수 (NSE, Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient), 결정계수 (R^2 , coefficient of determination)가 사용되었으며, 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 할 수 있다. 보정할 수질항목을 선택하면 해당 수질항목에 영향을 미치는 반응계수가 자동으로 선택되며, 사용자가 원하는 반응계수의 선택을 추가하거나 삭제할 수 있다.

모델 사용자가 자동보정기능을 수행하기 위해서는 모델 실행에 필요한 입력자료 외에 자동보정과 관련된 보정대상 수질항목, 가중치, 보정대상 반응계수, GA목적함수를 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 나타난다(그림 3). 모델사용자는 10개의 반응계수 세트 중 최적의 모의결과를 얻을 수 있는 반응계수 세트를 직접 선택할 수 있다.

라. 시나리오 분석기능

유역환경변화 및 수질개선대책 적용에 따른 농업용 저수지의 수질변화를 개략적으로 모의할 수 있도록 간단한 시나리오 분석기능을 ARSIM-rev에 추가하였다. 시나리오 분석기능을 통해 유역의 오염원 증감 및 처리장 설치로 인한 유입하천의 수질이 변할 경우 예상되는 저수지 수질변화 모의와 저수지의 수질개선을 목적으로 저수지 유입부에 침강지, 인공습지와 같은 처리시설

을 설치할 경우 예상되는 저수지의 수질변화를 모의할 수 있다. 유역환경변화에 따른 유입하천 수질변화율을 입력하거나 처리시설의 시설용량 및 수질항목별 처리 효율을 입력하여 저수지 수질변화를 모의할 수 있다. 시나리오분석 결과는 시나리오 적용 전·후의 수질항목별 연평균 수질 외에 일별수질을 표와 그래프로 화면에 나타난다(그림 4). 시나리오분석기능을 이용할 경우 목표수질을 만족시키기 위해 필요한 유입하천의 목표수질개선율을 쉽게 계산할 수 있을 뿐만 아니라, 침강지와 인공습지를 조성할 경우 필요한 시설용량 및 처리 효율을 계산할 수 있다. 하지만, 자세한 유역환경변화에 따른 저수지 수질변화를 모의하기 위해서는 다른 수질모델과 동일하게 별도의 유역모델과 연계하여 적용해야 한다.

4. ARSIM-rev 적용성 평가

개발된 ARSIM-rev의 적용성을 분석하기 위해 동일한 자료를 이용하여 ARSIM-rev모델과 기존 모델의 모의결과를 비교하였다. 기존 모델로는 저수지 수질예측에 많이 이용되고 있는 CE-QUAL-W2와 WASP를 선정하였다.

대상저수지로는 수질이 악화되어 저수지 수질관리가 필요한 만수저수지를 선정하였으며, 만수저수지의 유역면적, 만수면적, 유효저수량 및 평균 수심은 각각 375 ha, 22.3 ha, 614,000 m³, 2.8 m이다. ARSIM-rev는 저수지 전체를 하나의 구획으로 분할하였으며, CE-QUAL-W2와 WASP는 각각 저수지를 총 15개 (중방향 3개, 수심방향 5개)와 총 8개 (중방향 4개, 수심방향 2개)의 구획으로 분할하여 수질을 모의하였다. 모델에 사

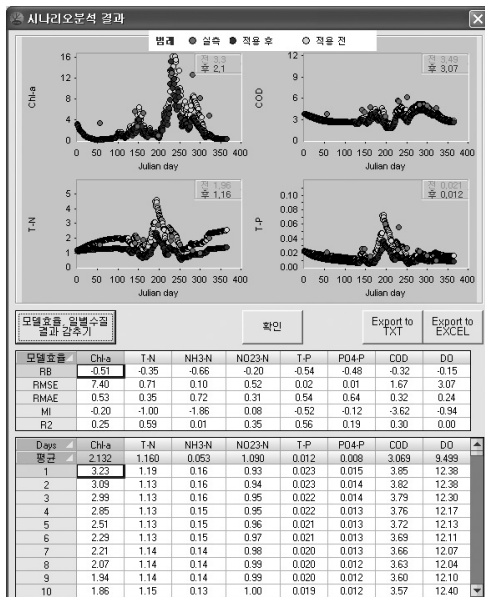


그림 4. 시나리오 분석 결과 화면

표 1. 만수저수지에 적용한 ARSIM-rev, CE-QUAL-W2, WASP의 RMSE

만수저수지		Chl-a	COD	T-N	T-P	적합도
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

용된 수질자료 수에 따른 모델별 모의 정도를 분석하기 위해 연 4회와 7회 실측한 자료를 이용하여 모델을 보정하였고, 실측자료와 모의결과를 이용해 RMSE를 계산하였다(표 1).

사용된 유입하천 실측 유량 및 수질 자료 수에 따른 모델별 모의결과를 살펴보면, 전체적으로 WASP이 실측값과 제일 유사하게 모의되었으며, 그 다음으로 4개의 실측자료를 이용한 경우에는 ARSIM-rev, 7개의 실측자료를 이용한 경우에는 CE-QUAL-W2가 실측값과 유사하게 모의되었다. 유입하천의 실측자료수가 부족한 경우에는 0차원 모델인 ARSIM-rev이 2차원 또는 3차원 모델인 CE-QUAL-W2, WASP과 큰 차이가 없었으나, 실측 자료수가 많은 경우에는 CE-QUAL-W2와 WASP이 ARSIM-rev보다 실측값과 더 유사하게 모의되었다.

실측자료가 충분하지 않고 수심이 얇아 수심별 농도 차이가 크지 않은 농업용저수지에서는 0차원형태로 개발된 ARSIM-rev모델이 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 WASP을 충분한 시간을 갖고 전체 모델 계수를 변경하면서 보정하지 못했기 때문이라 생각된다. 반면에 ARSIM-rev모델은 대상저수지가 공간적인 농도변화가 적어 0차원 모델인 ARSIM-rev으로도 실측값과 유사하게 모의할 수 있었고, 자동 보정기능을 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 있었다. CE-QUAL-W2와 WASP모델의 입력자료 생성을 위해 많은 자료가 제공되고, 장기간 동안 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 3차원모델보다는 낮을 수 있지만 부족한 실측자료만으로도 짧은 시간 내에 수질변화 예측이 가능한 ARSIM-rev모델을 사용하는 것이 적합한 것으로 나타났다.

5. ARSIM-rev 특징 요약

- 적은 입력자료로도 쉽게 농업용저수지 수질예측 가능
- 다양한 사용자 편의기능을 제공하여 실무자가 쉽게 모델 이용 가능
- ARSIM-rev만으로 자료입력, 모델보정, 결과출력, 시나리오분석까지 가능하여 다른 모델에 비해 쉽고 빠르게 모델링 수행 가능
- 실측자료가 부족한 경우 기존 모델과 대등한 수준

의 모의 가능

- 농업용저수지 유역에 신규오염원 시설 설치 허가 등과 같은 다양한 민원에 수질모의결과를 바탕으로 신속하고 합리적인 대응 가능

참고문헌

1. Ambrose, R. B. and T. A. Wool, James L. Martin, 1993, THE WATER QUALITY ANALYSIS SIMULATION PROGRAM, WASP5 PART A: MODEL DOCUMENTATION, Environmental Research Laboratory Athens.
2. Chapra, S. C, 1997. Surface water quality modeling. NY: McGraw-Hill.
3. Cole, T. M. and S. A. Wells. 2001. CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.5, User Manual. U. S. Army Corps of Engineers, Washington DC.
4. 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.
5. 한국농어촌공사 농어촌연구원, 2010. 농업용저수지 유형별 수질예측모델 적용방안 연구.

기획: 강문성 mskang@snu.ac.kr