

# 논의 비점오염 유출해석을 위한 HSPF-Paddy모델



정광욱  
(사)한국수계환경연구소 / 소장  
jungkw@konkuk.ac.kr



전지홍  
안동대학교 환경공학과 조교수  
jhjeon@andong.ac.kr

## 1. 머리말

우리나라에서 연간 사용하는 수자원의 50% 이상이 농업수로 이용되며 거의 대부분이 비재배에 사용되는 점을 고려하면, 관계한 농업용수가 얼마나 비재배에 직접 이용되며, 얼마나 배수되고, 배수된 물이 하류 수자원의 수질에 얼마나 영향을 미치며, 수자원의 수질보전을 위해서는 농지배수를 어떻게 관리 및 처리해야 하는지가 지속적인 농업발전을 위해서는 반드시 해결해야 할 과제이다.

논에서의 수문 및 오염물질 유출과정은 다른 토지 이용 상태와 다소의 차이점을 나타낸다. 논에서의 저류현상은 강우시 유출을 감소시키며, 낙수에 의해 비강우시 유출현상을 유발시킨다. 따라서 논이 우세한 유역의 경우 농민의 물관리 관행이 전체 유역의 수문 현상에 영향을 줄 수 있다. 또한 논은 물을 저류하고 있기 때문에 다른 토지이용상태와는 달리 물 환경에 가깝다고 할 수 있으며 시비된 비료성분은 물에 용해

되어 dynamic state로 각각의 수질항목 간에 반응을 한다.

현재 개발되어 널리 활용되고 있는 모델들은 논 특성을 반영하여 모의하는데는 한계를 갖고 있다. 우리나라와 같이 농지면적중 논이 많은 비중을 차지하고 있는 특성을 갖고 있는 곳에서는 논 수문 및 수질을 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 본 기사에서는 논 수문 및 수질해석이 가능한 모듈을 추가한 장기 수문 및 수질 예측 모델인 HSPF-Paddy모델의 개발개념 및 적용사례에 대해서 소개하고자 한다.

## 2. HSPF-Paddy모델 개발

HSPF모형은 미국 환경부에 의해서 개발된 유역모형으로서, 농경지와 도시지역을 포함한 유역에 적용가능한 모델로 현재 전세계 여러유역에서 활용되고 있는 모델이다 (USEPA, 1997). HSPF-Paddy모델은 HSPF모델을 수정하여 개발된 모형이다.

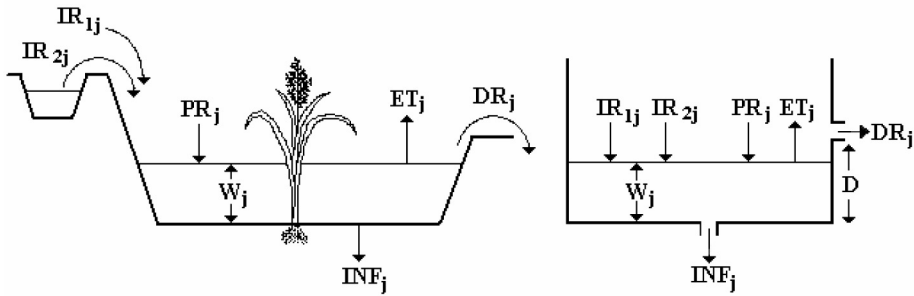


그림 1. 논에서의 수문해석 개념도

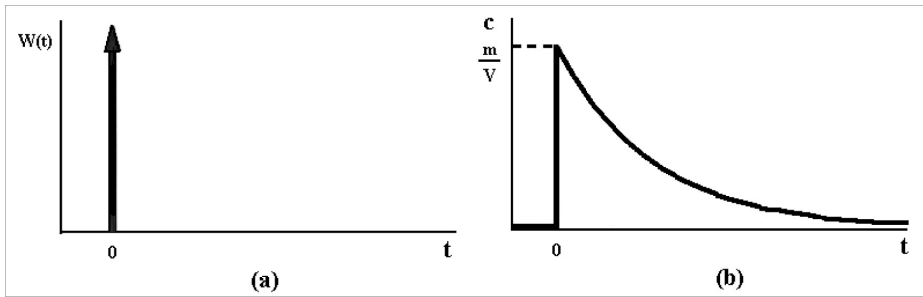


그림 2. Dirac delta 함수에 의한 수질변화 개념도

## 2.1 논외의 물수지 해석

논에서의 물수지 개념도는 <그림 1>과 같다. 논에서의 유입수량은 관개, 빗물유입, 강우, 그리고 유출량은 증발산량, 침투량, 지표유출로 구성되어 있다. 논에서의 주된 유입원인 비료는 영농기간동안 일정한 양이 일정시기에 정형화된 형태로 투입된다. 관개용수와 영농지역의 위치에 따라 영농방식은 차이를 보이나 일반적인 관행영농방법은 영농초기의 관개와 영농후기의 완전낙수로 인하여 당해연도의 부하는 다음해의 수질에 영향을 미치지 못하는 특징을 갖고 있다. 관개-시비-낙수-수확과 같은 일련의 과정은 해마다 일정한 경향을 가지면 반복하게 되는 특징을 갖고 있다. 본 연구에서

개발된 모형은 관행적인 영농방식을 반영할 수 있게 개발되었다.

- 논은 완전혼합반응조(CSTR)이다.
- 계산단위를 일별로 하는 daily continuous model 이다.
- 예측 가능한 수질항목은 TN, TP이다.
- 논에서의 영양물질의 주요 공급원은 비료와 바다에서의 용출이다.

## 2.2 논외의 물질수지 해석

Dirac delta 함수 (혹은 impulse loading)는 상대적으

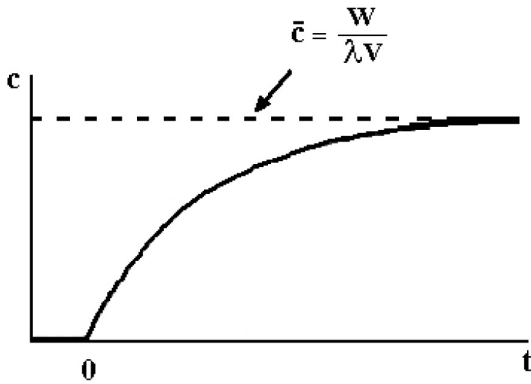


그림 3. Continuous source 함수에 의한 수질변화개념도

로 짧은 시간에 다량의 오염물질이 유입되는 현상, 예를 들어 수계에 갑작스런 사고로 인한 오염원의 유출과 같은 현상을 해석하는데 많이 사용된다. 비료의 유입 또한 일시적으로 다량의 영양물질이 유입되므로 시비에 의한 농도변화를 delta 함수로써 표현하였다. Delta 함수는  $t=0$ 에서 무한히 길고 얇은 선의 형태를 가지며 면적은 1이 된다. 이는 다음과 같은 특성을 가지고 있다 (그림 2).

시비를 제외하고 고려되어야 할 항목은 바닥에서의 용출이다. 즉, 비교적 수질이 양호한 관개수를 유입하였을 경우 논 표면수는 논바닥에서의 용출에 의한 기본농도(background concentration)을 가지게 되는데, 이는 수학적으로 continuous source 함수로써 표현할 수 있다. 본 함수는 일정시간 반응후 정상상태에 도달하게 되는 특징을 갖고 있다 (그림 3).

### 2.3 HSPF-Paddy모델 개발

HSPF모델은 카테고리를 기준으로 분할되어 모의되며 이러한 경계는 사용자의 정의에 따라 분류되지만, 일반적으로 유사한 수리학적 특성을 기준으로 정의된

다. 유역모형에서는 물이나 유사, 수질오염물질이 유역에서 발생하여 하천이나 저수지로 유입되는 형태로 정의된다. 투수층을 모의하는 PERLND, 불투수층을 모의하는 IMPLND, 그리고 하천을 모의하는 RCHRES로 구성된다. PERLND에서의 주요한 모듈은 용설을 모의하는 SNOW, 지표면에서의 토양유실을 모의하는 SEDMNT, 물수지를 모의하는 PWATER, 수질을 모의하는 PQUL과 AGCHEM 등으로 구성된다. 그 외 용설과 토양온도모의를 위해 대기온도를 보정하는 ATEMP, 유출수의 수온과 AGCHEM의 반응상수, 용존산소와 이산화탄소의 용해도 등에 영향을 주는 토양온도를 모의하는 PSTEMP 등이 있다. 용설은 축적되고 용해되며 물은 저장되거나 증발된다. 오염물질들은 지표면에 축적되고 제거된다. 물과 부유물질, 다양한 오염물질은 유역에서 발생하여 아래의 유역이나 하천 혹은 저수지로 유입된다.

HSPF의 IMPLND모듈의 개요도는 (그림 5)와 같으며 왼쪽에서 오른쪽으로 실행된다. 대부분의 모듈들은 PERLND의 모듈과 유사하며 SNOW와 ATEMP모듈은 투수층과 불투수층 모두 사용된다. IWATER은 PERLND모듈의 PWATER과 상응하며, SOLID는 SEDMNT, IWTGAS는 PWTGAS, IQUAL은 PQUAL과 상응한다. IMPLND는 침투와 그로 인한 지표아래의 유출을 포함하지 않기 때문에 PERLND보다는 간단하다.

RCHRES는 수로나 완전혼합으로 가정할 수 있는 호소에서 일어나는 과정을 모의한다. RCHRES에서의 물의 흐름은 단일방향의 흐름으로 가정하고 RCHRES를 통한 물질의 유출입은 (그림 6)과 같다. 오염원이나 상류 RCHRES에서의 물과 오염물질들은 하루 RCHRES

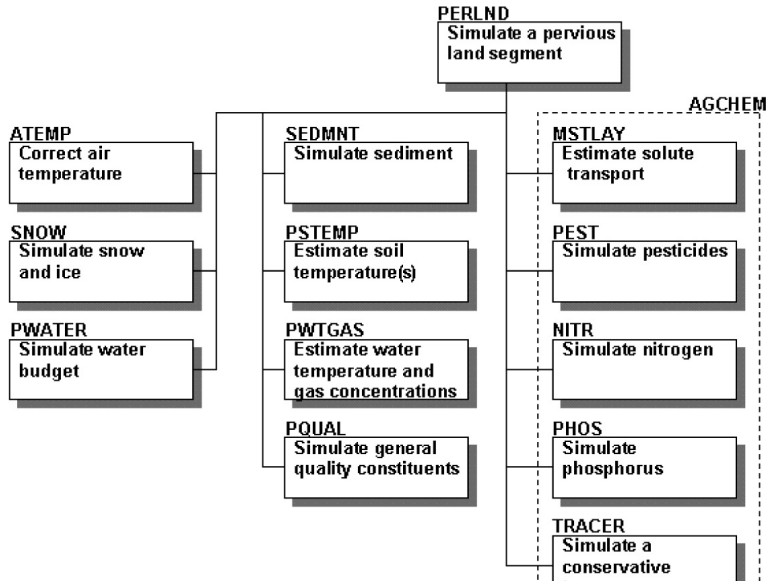


그림 4. PERLND module 구성요소

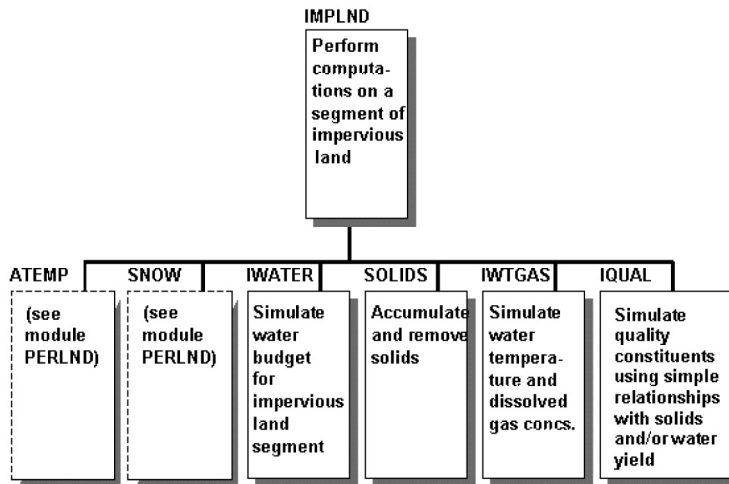


그림 5. IMPLND module 구성요소

의 하나의 유입구(INFLO)로 유입되며 RCHRES에서의 유출은 여러개의 유출구(OFLO) 중 하나의 유출구를 통해 유출된다.

HSPF-Paddy모형을 개발하기 위해서 투수층을 모의하는 PERLND의 PWATER 모듈을 수정하여 논의 물수지를 표현하였다. 강우는 식물 등에 의해 일부 차단

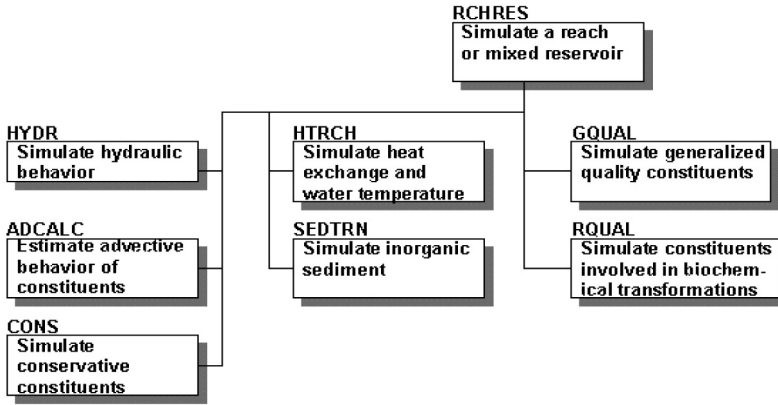


그림 6. RCHRES module 구성요소

된후 지표면에 도달하게 되며, 표면의 물웅덩이나 표층에 저류되어 침투되거나 지표 유출된다.

지표면에 공급된 잉여의 공급량(MSUPY)은 <그림 7>과 같이 두개의 line에 의해 침투량과 기저유출량이 결정되며, line I과 line II는 서브루틴 DIVISN에 의해 결정된다. 잉여 공급량 중 line I 만큼의 값은 지하로 침투되며, line II와 line I 과의 차이만큼은 기저유출로 손실된다. MSUPY와 line II와의 차이 값인 잠재 지표 유출량으로 계산된다.

식물 등에 의한 차단이 모의 되며, 식물에 의한 저류 후 남은 물의 양(CEPO)은 서브루틴 ICEPT에 의해 모의된다. 저류 후 남은 잉여의 물은 침투되거나 지표 유출되며, 서브루틴 DISPOS, DIVISN, UZINF, PROUTE를 포함하는 서브루틴 SURFAC에 의해 침투량과 지표유출량이 모의된다.

지표면에 공급된 잉여의 공급량(MSUPY)은 <그림 3-34>와 같이 두개의 line에 의해 침투량과 기저유출량이 결정되며, line I과 line II는 서브루틴 DIVISN에 의해 결정된다. 잉여 공급량 중 line I 만큼의 값은 지하로

침투되며, line II와 line I 과의 차이만큼은 기저유출로 손실된다. MSUPY와 line II와의 차이 값인 잠재 지표 유출량으로 계산되며, 잠재지표유출량 중 실제 지표 유출량을 계산해서 하천모델인 RCHRES로 유입시킨다.

그러나 논외의 경우, 잠재지표유출량이 물꼬 높이에 의해 전량 지표유출로 발생하지 않는다. 본 연구에서 개발된 HSPF-Paddy에서의 침투와 기저유출, 잠재지표 유출량 개념도는 <그림 8>과 같다. MSUPY에서 line II 값과의 차이값에 논외의 물꼬 높이인 DIKE의 높이만큼을 뺀 값을 잠재지표유출량으로 하였다. 수정된 HSPF-Paddy에서는 잠재지표유출량이 0보다 큰 경우 지표 저류량은 DIKE가 되며, 0보다 작은 경우 지표유출은 일어나지 않으며, 기저유출이 일어나고 침투가 이루어진 이후의 잉여공급량 전량은 물꼬에 의해 지표면에 저류되도록 하였다.

HSPF의 투수층에서의 질소 및 인 모의는 서브루틴 NITR과 PHOS에서 모의 된다. 서브루틴 NITRXN에서는 식물에 의한 질산성 질소와 암모니아성 질소의 흡수와 식물 잔재물에 의한 유기질소의 유입, 탈질화, 질산

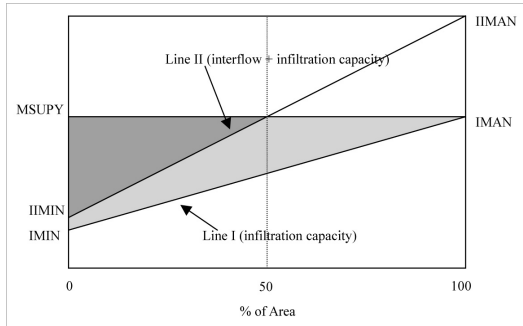


그림 7. HSPF에서의 침투와 기저유출, 잠재지표유출량 개념도

성질소와 암모니아성 질소의 고정, 유기질소의 무기화, 대기 질소 고정, 암모니아성 질소의 휘발, 암모니아성 질소의 흡착과 탈착 등을 모의 한다. PHORXN에서는 일차 반응식이나 Freundlich method에 의한 인산염의 흡착 및 용출에 대해서 모의한다. 암모니아성 질소와는 달리, 일반적으로 인산염의 대부분은 토양입자에 흡착하기보다는 양이온과 결합한다. 이는 암모니아성 질소에 비해 인산염이 토양 내에서 이온의 형태로 덜 용해되는 이유이다.

HSPF-Paddy에서는 시비에 의해 투여된 영양물질은 저류된 논물에 용해되어 Dirac delta 함수에 의해 투여된 양이 감소하며, 잉여 공급된 물량이 침투나 기저유출 후 물꼬 높이 보다 높은 경우 지표유출과 함께 영양물질이 유출되는 것으로 수정하였다. HSPF입력과일인 uci파일의 SPEC-ACTIONS블락에 의해 시비는 지표면에 이루어지는 것으로 HSPF모형을 개선하였다.

## 2.4 HSPF-Paddy모델의 적용

개발된 HSPF-Paddy모델을 이용하여 새만금 유역에 적용성을 평가하였다. <그림 9>는 새만금 유역의 소

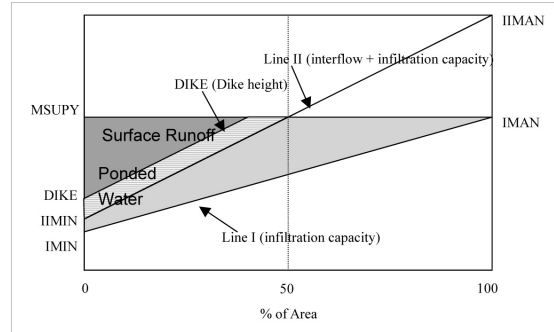


그림 8. HSPF-Paddy에서의 침투와 기저유출, 잠재지표유출량 개념도

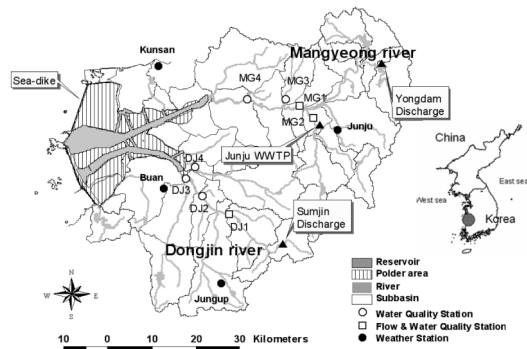


그림 9. 새만금 유역의 모니터링 위치 및 소유역 구분

유역 구분 및 모니터링 위치도를 나타내었다. HSPF-Paddy모델은 2000~2002년 데이터를 이용하여 보정하였으며, 2003~2004년 데이터를 이용하여 검증하였다. 5년동안의 모니터링 데이터를 이용하여 유역수문을 검증한 결과 예측값이 실측값을 잘 반영하고 있는 것으로 평가되었다 <그림 10>.

수질 모의는 1995~2004년 측정된 환경부 측정데이터를 이용하여 보 · 검증 하였으며 그 결과는 <그림 11>과 같다. 일부 관측된 자료가 모의치와는 다른 급격히 높은 값을 나타내기도 하지만, 전체적인 수질 경향을 반영하고 있는 것으로 평가되었다.



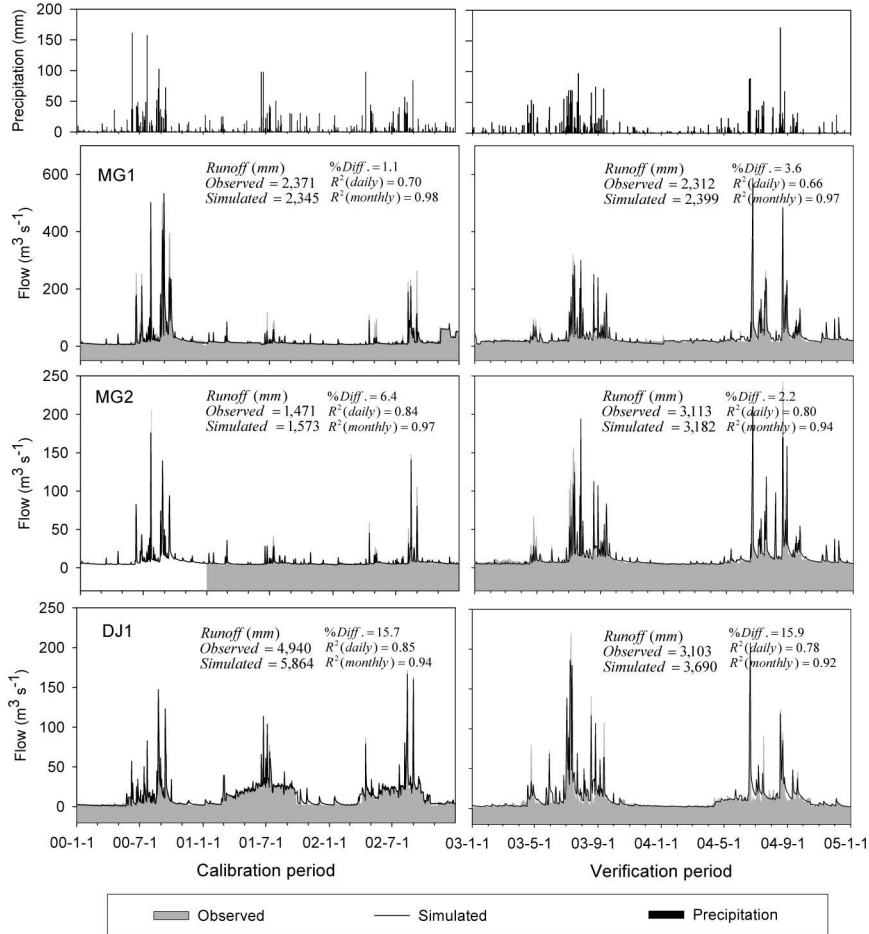


그림 10. HSPF-Paddy 모델의 수문 보·검증 결과

### 3. 마치면서

논의 수문 및 수질특성을 반영할 수 있게 개발된 유역모형인 HSPF-Paddy모델에 대해 간략하게 소개하였다. HSPF-Paddy모델을 적용한 새만금지역은 여러 토지이용이 복합된 곳으로 산림, 농경지, 도심지, 습지, 나지, 초지 등을 포함한 하천의 종류에서 이루어졌다.

현재 가용한 수문 및 수질데이터는 유역의 종류에 위치하고 있기 때문에, 논에서 발생하는 유출 및 수질특성이 명확하게 반영되는 측정지점을 선정하여 검증하는데는 어려움이 있다. HSPF-Paddy모형의 지속적인 발전을 위해서는 논이 우점한 지역의 지속적인 모니터링을 통해 얻은 실측데이터를 이용해서 보완하는 과정이 필요하다.

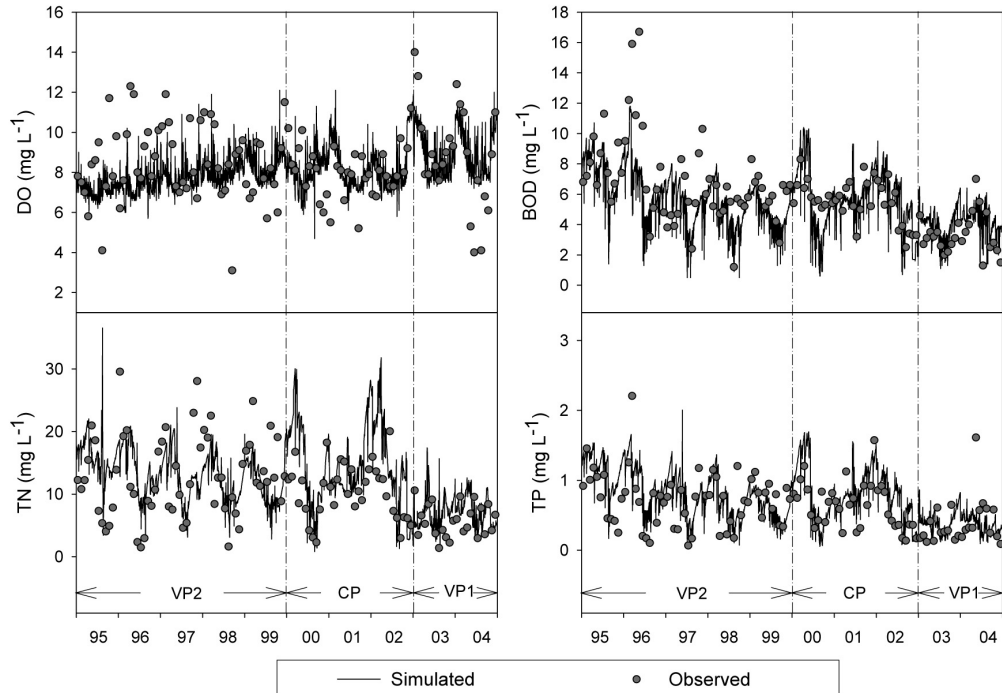


그림 11. HSPF-Paddy 모델의 수질 보·검증 결과

## 참고문헌

1. Jeon, J.H., Yoon, C.G., Jung, K.W., Jang, J.H., 2007, HSPF-Paddy simulation of water flow and quality for the Saemangeum watershed in Korea, *Water Science and Technology*, 56(1), 123-130.
2. Jeon J.H., Yoon C.G., Donigian A.S. Jr., Jung K.W., 2007, Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions, *Agricultural Water Management*, 90, 75-86.
3. Jung, K.W., Yoon, C.G., Jang, J.H., and Kong, D.S., 2008, Estimation of pollutant loads considering dam operation in Han River Basin by Basin/Hydrological Simulation Program – Fortran, *Water Science and Technology*, 58(12), 2329-2338.
4. USEPA, 1997. Compendium of tools for watershed assessment and TMDL Development, EPA-841-B-97-006, US Environmental Protection Agency, Office of WATER, Washington, DC.

기획: 강문성 [mskang@snu.ac.kr](mailto:mskang@snu.ac.kr)