

# HSPF 모형을 이용한 유역단위에서의 대장균 모의 검토

## Fecal Coliform Simulation of Watershed Scale using HSPF Model

고재영\*, 장태일\*\*, 박승우\*\*\*

Jae young Ko, Tae il Jang, Seung woo Park

### 요    지

본 연구에서는 HSPF 모형을 이용하여 유역 단위에서의 점원·비점원에 의한 분변성 대장균을 모의하였다. 대상유역으로는 경기도 화성시 발안면과 팔탄면에 위치한 발안저수지 유역의 HP#7 소유역으로 선정하였으며, 대상지구의 기상자료, 지형자료, 수문자료 및 대장균 자료를 구축하였다. 대장균 모의를 위한 실측자료는 현장에서의 샘플링 방법과 실험에 의한 오차, 대장균 실험의 경제성 등을 고려하여 실측자료의 상한값과 하한값을 두어 실측자료를 보정하였다. 모형의 매개변수 보정은 2002~2003년의 관측 자료를, 모형의 보정은 2004~2005년의 관측 자료를 활용하여 모형의 적용 타당성을 검토하였다.

핵심용어 : 대장균, Fecal Coliform, HSPF 모형

### 1. 서 론

오염총량관리는 수질환경기준 달성을 목표로 하고 있으므로 해당 수역에서 환경기준을 초과하는 물질이 대상물질이 되는 것이 원칙이며, 미국에서는 탁수를 유발하는 고형물을 비롯하여 수체의 부영양화 원인물질인 질소와 인, 그밖에 다양한 유해물질이 각 지역의 환경여건에 따라 수질관리의 대상물질이 되고 있다. 현재는 대부분의 주에서 수체의 인체의 보건위생과 관련된 분변성대장균(Fecal Coliform)을 수질관리항목으로 두고 이에 대한 연구를 해 나가고 있는 실정이다. 그러나 우리나라에서 실질적으로 관리되고 있는 하천의 환경기준항목은 유기물의 생분해 및 산소고갈과 관련된 BOD와 DO로 국한되어 있는 실정이다. 현재 BOD 이외의 오염물질을 관리하기 위한 제도적 여건 및 기본 자료의 축적이 미비한 것이 현실이며, 총 유기탄소, 질소, 인 등의 수질항목에 대해서는 2011년부터 시행될 제 2차 오염총량관리의 대상물질에 포함될 예정이다(공동수, 2005). 분변성대장균은 인간을 포함한 온혈동물의 배설물에서 발생하며, 수체에 발견될 경우에는 보통 배설물에 의해 수체가 오염된 경우이다. 인체가 분변성대장균에 노출 될 경우에는 설사와 복통, 구역질 및 두통과 같은 질병을 유발한다(USEPA, 2002).

따라서 본 연구에서는 향후 국내에서도 고려되어야 할 보건 위생상의 건전한 유역관리를 위한 오염총량관리를 목적으로 HSPF 모형을 이용하여 유역단위에서의 점원과 비점원에 의한 대장균을 모의하였다.

\* 서울대학교 지역시스템공학부 대학원 · E-mail : captain9@snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 지역시스템공학부 대학원 · E-mail : uriduri7@snu.ac.kr

\*\*\* 서울대학교 지역시스템공학부 교수 · E-mail : swpark@snu.ac.kr

## 2. 모형의 구성

### 2.1 HSPF 모형의 개요

HSPF(Hydrological Simulation Program – Fortran) 모형은 1960년대 초반 스탠포드 유역 모형(Stanford Watershed Model)으로 처음 개발되었다. HSPF 모형은 준분포형, 개념적 모형으로 차단, 토양수분, 지표유출, 중간유출, 기지유출, 적설심, 수분함량, 용설, 증발산, 지하수 충전, 용존산소(DO), 생물학적 산소 요구량(BOD), 온도, 농약, 대장균(Fecal Coliform), 유사운송, 토립자 크기, 하천 홍수추적, 저수지 홍수추적, pH, 질소, 인, 식물성 플랑크톤, 동물성 플랑크톤 등의 다양한 항목에 관한 모의 할 수 있다(Bicknell et al., 2001). 이를 활용하여 HSPF 모형은 토지이용 변화, 저수지 운영, 점원 또는 비점원 오염 처리 대안 등에 대한 평가를 위해 이용되고 있다.

HSPF 모형에서의 대장균 모의는 Chick의 법칙에 의한 대장균 사멸 변수로써 온도와 더불어 시비법과 토양의 pH를 추가한 MWASTE 모형과 Chick의 법칙 이외에 수정-범토양유실추정식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE), 온도보정함수 등을 추가하여 지표면에 살포된 시비된 거름으로부터 발생하는 대장균의 사멸량을 추정할 수 있도록 한 COLI 모형의 대장균 모의방법을 합하여 사용하였다(Paul et al., 2002).

### 2.2 대상유역의 선정

HSPF 모형을 이용한 유역단위에서의 인체에 유해한 분변성 대장균을 모의하기 위한 시험유역으로는 경기도 화성시 발안면과 팔탄면에 위치한 발안저수지 유역을 선정하였다. 발안저수지 유역은 농업용저수지인 기천저수지와 발안저수지를 포함하고 있으며, 산간지, 평탄지, 취락지, 농경지, 공단 등 다양한 이용형태를 보이고 있다. 본 연구에서는 발안저수지 유역에 위치한 7개 소유역 중 HP#7 소유역을 대상으로 모형을 적용하였다. 대상유역으로 선정된 HP#7 소유역의 유역면적은  $10.87\text{km}^2$ , 유로장은 7.31km, 최대기복률은 290m, 기복률비는 0.0397, 유역의 평균경사는 0.006m/m, 형상계수는 2.217으로 장방형의 유역모양을 가지고 있다.

### 2.3 수문자료

기상자료와 강우자료는 시험유역으로부터 약 10km 떨어진 수원기상대의 자료를 이용하였다. 2002년부터 2006년까지의 시간별 강수량, 기온, 풍속, 일사량, 운량, 일별 대형 증발량을 구득하였으며, 시간별 대형증발량은 일별 증발량을 이용하여 BASINS에 내장된 WDMUtil을 통해 시간별 증발량으로 환산하였다. HP#7 소유역의 유량자료는 월 1~2회 정기적 점검을 통하여 하천 수위측점에 대한 수위-유량관계식으로부터 추정하였다. 2002년부터 2006년까지의 유량측정 성과를 바탕으로 저수위와 홍수위를 구분하여 수위-유량관계식을 추정하였고, 관계식의 결정계수는 각각 0.994와 0.981로 비교적 높은 상관관계를 보이고 있다. HP#7 시험유역의 유출량은 2002년부터 2005년까지의 실측 수위자료와 수위-유량 관계로부터 산정하였으며, 일유출량 자료를 바탕으로 연도별 유출율을 산정한 결과는 25.6~59.5%의 범위를 보였다.

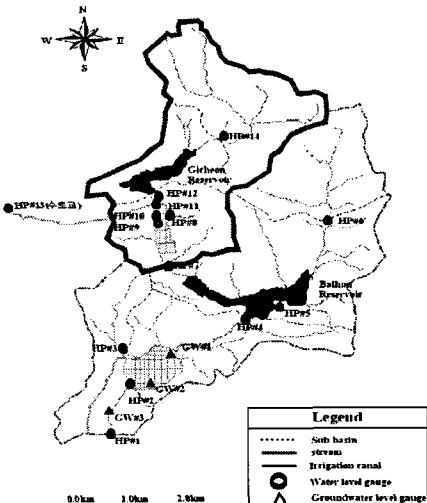


그림 1. 발안저수지 유역도

## 2.4 대장균 자료

대장균 시료의 채취는 관개기에 월 1~2회 정기적으로 실시하였으며, 현장에서 채취한 대장균 시료는 서울대학교 농업생명과학대학 농업과학공동기기센터(National Instrumentation Center for Environmental Management, NICEM)에 분석을 의뢰하였다. 대장균 모의에 사용된 대장균의 실측치는 실제 실험비용이나 실험방법에 따른 오차의 범위 등을 고려하여 실측치의 최대, 최소의 값을 설정하고 최소~최대의 범위 밖의 실측치는 모두 최소치나 최대치로 바꾸어 모의의 보정과 검정에 적용하였다. 본 연구에서 설정한 실측치의 최소값은 100 MPN/100ml이며, 최대값은 8,000 MPN/100ml이다. 이는 미국의 각 주에서 시행되는 TMDL 수질기준 중, 박테리아에 관한 기준 및 연구가 활발히 진행되고 있는 버지니아 주(Virginia)의 TMDL 수질 기준을 참고(VADEQ, 2005)하여 최소값과 최대값을 선정하였다.

## 2.5 GIS 자료

시험유역의 GIS 자료는 지형도, 토양도, 토지이용도 등의 기본도부터 하천도, 소유역 경계도, 경사방향도, 경사도, 수문학적토양도 등을 구축하였다. 시험유역의 기본도는 지형자료의 구축을 위해 국립지리원의 1:5,000 NGIS 수치지도를 이용하였으며, 시험유역의 토양도는 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도를 이용하였다. 본 연구에서는 토지 이용도를 구축하기 위하여 시험유역에 대한 Landsat-5 TM 영상 자료를 이용하여 무감독분류방법을 사용하였으며, 분류결과 산림이 전체 유역면적의 74.1%를 차지하고 있으며, 논이 14.2%, 밭이 0.7%, 초지가 0.1%, 주거지 7.7%, 그리고 저수지 및 하천이 3.3%로 분석되었다.

## 3. 모형의 보정과 검증

### 3.1 모형의 보정

유출 모의의 보정은 단순시행착오법으로 모형의 매개변수를 결정하였으며, 목적함수로서 결정계수 ( $R^2$ ) 및 RMSE(Root Mean Square Error)와 RMAE(Root Mean Absolute Error)를 사용하였다. 그림 2는 일강수량과 2002년에서 2003년까지의 실측 자료를 이용하여 보정한 모의 결과 중 2003년의 모의 결과를 보여주고 있으며, 보정 결과 RMSE는 2.883 mm/day, RMAE는 1.770 mm/day,  $R^2$ 는 0.71로 나타났다.

대장균 모의의 보정은 대장균 자료가 갖는 관측범위의 광범위한 특이성 때문에 유출모의와 같은 보정방법을 사용할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 실제 관측이 이루어진 날과 전후 3일을 더해 총 7일간의 모의치의 최대·최소값을 이용하여, 전체 실측 자료수에 대한 최대~최소 범위에 드는 실측자료수의 비를 이용하여 모형의 보정을 실시하였다. 본 연구에서는 대장균 모의에 있어, 계절에 따라 토지피복의 변화가 많은 농경지를 대상으로 월별로 그 값을 다르게 적용하였다. 그림 4는 2002년과 2003년의 실측치의 전후 3일을 포함한 7일간의 모의치의 평균, 최대치 및 최소치와 대장균 실측치를 도시한 것이며, 그림 5는 2002년과 2003년 전 기간에 걸친 대장균 실측치와 모의치를 도시한 것이다.

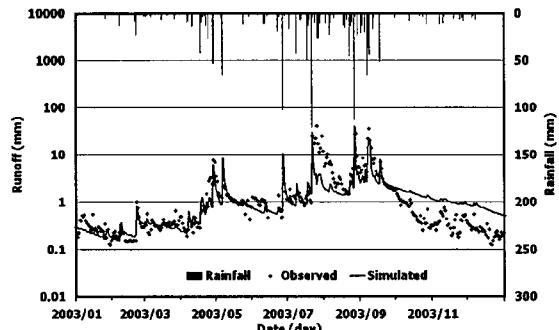


그림 3. HP#7의 유출량 모의 결과(2003년)

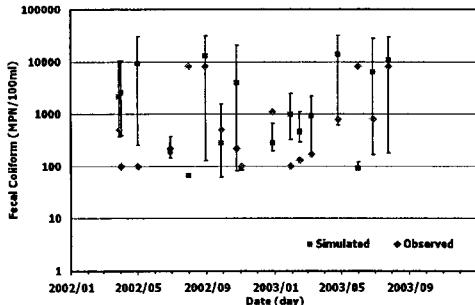


그림 4 대장균 실측과 모의치의 7일간 최대 및 최소

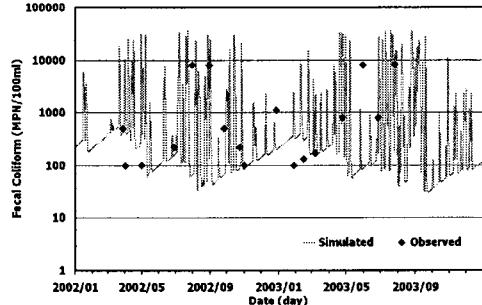


그림 5. 대장균 모의 결과(2002년 ~ 2003년)

대장균 모의 보정 결과는 전체 실측치의 개수에 대한 실측치가 위치한 범위의 비로 나타내었으며, 보정 결과 2002년에서 2003년 사이의 전체 실측의 수는 17개이며, 7일간 모의치의 최대·최소의 범위 안에 드는 실측의 개수는 9개, 최소치보다 작은 실측치의 수는 5개, 최대치보다 큰 실측치의 수는 3개로 나타났다.

### 3.2 모형의 검정

유출 모의의 검정기간 2004년에서 2005년까지이며, 모의결과는 RMSE는 2.148 mm/day, RMAE는 0.655 mm/day,  $R^2$ 는 0.39, EI는 0.59로 나타났다.

대장균 모의의 검정에 사용된 실측의 수는 19개이며, 7일간 모의치의 최대·최소 범위안의 수는 9개, 최소값보다 작은 실측의 수는 4개, 최대값 보다 큰 실측의 수는 6개로 나타났다.

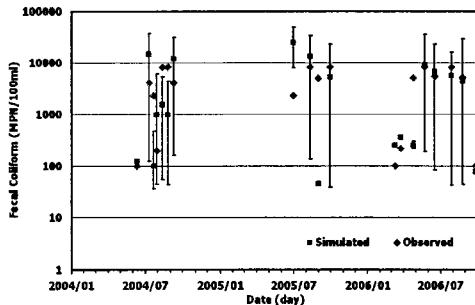


그림 5. 대장균 실측과 모의치의 7일간 최대 및 최소

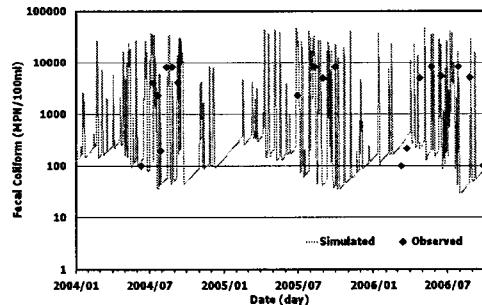


그림 6. 대장균 모의 결과(2004년 ~ 2006년)

### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 보건위생상의 건전한 유역관리를 위한 오염총량관리를 목적으로 HSPF 모형을 이용하여 유역단위의 유출량과 대장균을 모의하였으며, 시험유역을 대상으로 지형, 수문, 수질 자료를 구축하여 모형의 보정과 검정을 통해 모형의 적용성을 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 대장균 모의를 위하여 대장균 자료를 수집하였으며, 모의의 시간적, 물질적 경제성을 고려하여 하한치(100 MPN/100ml), 상한치 (8,000 MPN/100ml)를 두었으며, 하한치 이하의 값이나 상한치 이상의 값은 모두 하한치와 상한치로 보정하였다.
2. 유출모의 결과, 모의의 보정기간인 2002년 ~ 2003년의 경우 RMSE는 2.88 mm, RMAE는 1.77 mm,  $R^2$ 는 0.71, EI는 0.59로 나타났으며, 모형의 검정기간인 2004년 ~ 2005년의 경우 RMSE는 2.15 mm, RMAE는 0.66,  $R^2$ 는 0.39, EI는 0.47로 나타났다.

3. 대장균 모의의 보정과 검정은 실측일과 전후 3일을 포함한 총 7일간의 최대·최소치의 범위에 드는 비율을 살펴보았으며, 대장균 모의의 보정기간의 경우 최대·최소의 범위에 드는 실측의 비율은 52.94%, 최대치를 초과하는 실측의 비율은 17.65%, 최소치에 못 미치는 실측의 비율은 29.41%로 나타났으며, 검정기간의 경우에는 각각 47.37%, 31.58%, 21.05%로 나타났다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의  
연구비 지원 (과제번호: 4-5-2)에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. Bicknell, B.R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, Jr., T. H. Jobes, and A. S. Donigan, Jr. (2001) Hydrologic Simulation Program—Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12, USEPA, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA..
2. Paul, S., Haan, P., Matlock, M. D., Mukhtar, S. (2002) Analysis of the HSPF Model for Predicting In-stream Fecal Coliform Concentrations, An ASAE Meeting Presentation, Paper Number: 022157, ASAE.
3. U.S. Environmental Protection Agency (2002) Drinking Water Contaminants. <<http://www.epa.gov/safewater/hfacts.html>>
4. Virginian Department of Environmental Quality (2005) Bacteria Total Maximum Daily Load Development for Beaver Creek, VADEQ.
5. 공동수(2005) 우리나라의 수질총량관리 현황 및 전망, 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제38권, 3호, pp. 14-22.