

최근 수질모델링 기법 및 연구동향

Review of Hydrologic and Nonpoint-source Pollution Models

강 문 성* 김 철 겸**

Kang, Moon-Seong · Kim, Chul-Gyum

I. 서 론

수질모형은 과거 40년 동안 다양한 공간적 규모 (Point, Field, and Watershed Scales)에 대한 오염물질 기작 및 이송 과정을 모의하기 위하여 개발되어져 왔다 (Srivastava et al., 2007). 비점오염원 모형의 개발은 1970년대에 본격화되어 1980년대에 현재 이용되고 있는 대부분의 모형이 완성되었다. 1990년대 이후 지리정보시스템 (Geographic Information System, GIS)의 응용과 오염총량제 실시 등에 따라 도시 및 농촌유역에서의 비점원오염의 추정과 관리방안에 따른 발생량과 배출량의 저감을 계량화하기 위한 도구로서 발전되었다 (Park, 2006).

이러한 모델들의 지속적인 개발과 응용은 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 성능 및 기술의 향상으로 수질 모델링과 관련된 연구가 가속화하고 있다. 최근에는 지리정보시스템, 전문가 시스템 (Expert System), 사용자 인터페이스 (graphical user interface, GUI), 객체지향 모델링 기법 (Object-oriented Modeling System,

OOM), 원격탐사 (Remote Sensing, RS) 등의 새로운 기술을 수질모형과 통합하기 위한 시스템 개발과 적용성 평가 등의 연구가 활발히 시도되고 있다.

본 원고에서는 국내외 학회지에 최근에 소개된 수질모형의 연구동향 고찰 논문을 근거하여, 수질 모형의 일반적인 구분, 그에 따른 종류와 특징을 살펴보고, 주요 수질모형을 선정하여 그에 대한 모델링 기법 및 특징 등을 간략히 정리하여 소개하고자 한다.

II. 수질모형의 종류 및 구분

1. 수질모형의 일반적 구분

자연현상을 모델링하기 위한 전통적인 기법은 그 정의와 원칙의 필요성에 의하여 여러 범주로 분류되어 왔다. Woolhiser & Brakensiek (1972)와 Chow (1972)는 Fig. 1에서와 같이, 모델링 기법을 물리적, 결정론적 및 추계학적 모델 등을 포함하는 여러 가지 범주로 구분하였다

* 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부 조교수, 농업생명과학연구원 겸임연구원(mskang@snu.ac.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원(cgkim@kict.re.kr)

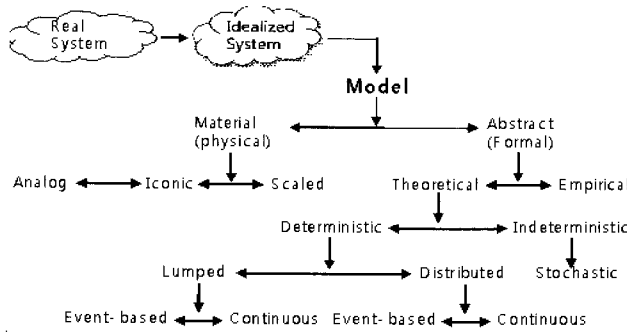


Fig. 1. Simplified Classification of Models (Adapted from Chow et al., 1988)

(Novotny & Olem, 1993; Tim, 1996). 최근에는 모형의 결과에 대한 불확실성과 오차를 줄이기 위해서 결정론적 모형에 추계학적 모형을 적용하는 병용모형 (Hybrid Model)의 적용성에 관한 연구도 시도되고 있다 (Obropta & Kardos, 2007). 또한, 수질모형은 모형의 복잡성, 계산 시간 등에 따라 simple method, mid-range method, detail method 등으로 구분할 수 있다 (강, 2008).

Novotny & Olem (1993)은 대상오염물질의 운송기작의 모의수준에 따라 확산오염모형을 1등급부터 5등급으로 구분하기도 하였다. 1등급과 2등급은 스크린 모형 (Screen Model)로 구분되며, 단위 부하량을 이용하는 방법과 유출사상 평균농도에 관한 확률분포 개념에 근거한 통계적 방법 등이 이에 속한다. 3등급과 5등급까지는 수문 순환을 고려한 유역비점원오염 추정모형을 포함하는 시뮬레이션 모형 (Simulation Model)이 이에 해당된다. 3등급은 비교적 단순화된 단일 홍수사상 및 연속 모형으로 구성되며, 4등급과 5등급은 복잡한 단일 홍수사상 및 연속 모형으로 구분된다.

그러나, 최근 비점오염원 모형의 지속적인 추가 및 보완을 거듭함으로써 그 등급의 변화를 가져오기도 한다. 그 예로서, AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution model, Young et

al., 1987) 모형은 4등급에 해당되는 단일 홍수사상 모형에서 연속 모의가 가능한 AnnAGNPS (Annual AGNPS)를 개발함으로써 5등급 모형으로도 구분되고 있다. 또한, 도시비점오염원 모형인 SWMM (Storm Water Management Model)도 단일 홍수사상 모형에서 연속모의가 가능하도록 발전하였다 (Rossman, 2005; Obropta & Kardos, 2007).

본고에서는 유역에서의 수문/수질 거동을 수학적으로 나타내는 결정론적 모형에 초점을 맞추어 고찰하도록 하였다.

2. 결정론적 모형

수문 순환 및 오염물질 운송기작을 고려한 모형은 대부분 결정론적 모형으로서, 공간적인 변이에 따라 분포형 모형 (Distributed Model)과 총괄형 모형 (Lumped Model)으로 구분된다. 분포형 모형은 장방형 격자나 삼각형 등으로 유역을 세분하고, 각 격자 또는 요소에 대하여 수문과 토양침식, 비점원 오염 운송기작을 고려한다. 이에 반해서, 총괄형 모형은 유역 내 수문단위나 오염원 등의 공간분포를 고려하지 않는 경우를 의미한다. 분포형 모형에는 ANSWERS (Beasley et al., 1980), SWRRB (Williams et al., 1985), HSPF (Hydrologic Simulation

Program-FORTRAN, Johanson et al., 1982; Barnwell & Kittle, 1984), AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution model, Young et al., 1987), SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold et al., 1993) 등이 있다. 총괄형 모형에는 CREAMS (Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, Knisel, 1980), EPIC (Williams et al., 1984), WEPP (Water Erosion Prediction Project, Foster and Lane, 1987), 그리고 GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System, Leonard et al., 1987) 등이 있다 (강, 2008).

또한, 수문사상을 기준으로 단일 홍수사상 모형 (Storm Event Model)과 연속 모형 (Continuous Model)으로 나누기도 한다. 단일 홍수사상 모형에는 AGNPS, ANSWERS 등이 있으며, 연속 모의 모형에는 STORM (Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model), GWLF (Generalized Watershed Loading Function), 그리고 SWAT 모형 등이 이에 속한다. SWMM, HSPF, DR3M-QUAL (Distributed Routing Rainfall Runoff Model-Quality) 모형

등은 홍수사상 및 연속 모의가 모두 가능한 모형이다.

수질오염모형은 적용 대상지역을 기준으로 도시수질모형 (Urban Model)과 농업수질모형 (Agricultural Model)으로 구분하기도 한다. 도시지역의 수질모형은 HSPF, SWMM, STORM, DR3M-QUAL, 그리고 MOUSE (Hydroworks, Model of Urban Sewers) 모형 등이 있다. 농업지역의 수질모형으로는 ANSWERS, CREAMS, GLEAMS, EPIC, AGNPS, AnnAGNPS, 그리고 SWAT 모형 등으로 구분된다. 또한, 도시와 농촌이 혼재된 유역에 적용성이 뛰어난 수질모형으로는 GWLF 과 HSPF 등이 있다. Table 1은 유역의 형태에 따른 주요 오염원과 대상 오염물질에 대한 오염 부하량 추정을 위해 사용되는 유역수질모형을 정리하여 나타내고 있다 (USEPA, 2008).

모형의 적용 지역에 대한 공간적 범위에 따라 지점모형 (Point Model), 포장모형 (Field-scaled Model)과 유역 모형 (Watershed Model)으로 나눌 수 있다 (Srivastava et al., 2007). 공간적 범위에 의한 대표적인 수질모의 모형의 종류 및 특징은 Srivastava et al. (2007)가 체계적으로 정리한 바 있다.

Table 1. Example Approaches Used for Estimating Watershed Loads

Land Use	Sources/Concerns	Pollutants	Models
Agricultural	Grazing	Nutrients and sediment	GWLF, AGNPS, SWAT
Agricultural	Livestock and wildlife sources	Nutrients	Spreadsheet -estimation STEPL, SWAT, HSPF
Agricultural	Cropland management, Conservation tillage	Nutrients and pathogens	AGNPS, SWAT
Mixed Use	Stormwater, management, Agricultural Residential	sediment and nutrients	P8-UCM, SWMM, HSPF
Mixed Use	Stormwater, management, Agricultural	pathogens	Spreadsheet -estimation HSPF
Urban	Stormwater management, Land use conversion, Redevelopment	sediment, nutrients, metals	P8-UCM, SWMM, HSPF

Adapted from USEPA (2008)

Ⅲ. 유역 수질모델링 기법 및 주요 모형

1. 유역 수질모형 적용 방법

유역에서의 모형의 적용은 사용목적에 따라 screening, intermediate, detail 단계로 구분할 수 있다. simple method는 대부분이 screening 단계에 적용되며, mid-range와 detailed method는 보다 폭넓은 단계에 적용이 가능하다 (국립환경과학원, 2008; USEPA, 2008).

일반적으로 screening 단계는 점오염원과 비점오염원의 단순 비교와 같이 초기 계획수립 단계에 적용되는데, 다양한 토지이용상태와 오염원에 대한 평가가 이루어질 수 있으며, 이를 토대로 계획수립의 정밀도를 높일 수 있다. simple method는 연간 모의를 기본으로 하기 때문에 screening 단계의 적용에 제한되어 있다. 몇몇 mid-range model (GWLF, SITEMAP, AGNPS)은 점오염과 비점오염을 통합적으로 평가할 수 있어 screening 단계에 매우 적용성이 높다.

Intermediate 단계에서는 다양한 점오염원과 비점오염원을 유발시키는 지형학적 분석이 보다 자세히 묘사되며, 특정한 점오염원 혹은 비점오염원에 대한 평가와 일차적인 각 대안별 평가와 선택이 이루어진다. SLAMM, P8-UCM, SIMPTM는 주로 도시지역을 적용대상으로 하기 때문에 도시 강우유출 관리기법을 평가하며 intermediate 단계의 적용에 유용하다.

Detail 단계에서는 다양한 오염원으로부터 오염원 특징의 정확한 구분과 오염물질의 거동의 상세한 묘사, 대안별 오염물질의 생성, 이동, 제거 등의 상세한 묘사를 필요로 한다. Detail

단계에서 유출이나 수질의 단일 강우사상모의 혹은 연중 모의를 실시함으로써 사업의 목적을 달성할 수 있는 설계기준을 수립하는데 도움을 준다. WMM, HSPF, DR3M, STORM, SWRRB/ SWAT 등은 다양한 점오염원과 비점오염원의 상세한 묘사가 가능하며, 이러한 모형의 결과를 이용하여 관리기법을 평가하거나, 설계기준을 수립하는데 이용된다.

HSPF나 SWMM과 같은 detail model의 screen 단계의 적용은 수많은 인자들의 초기값을 적용함으로써 시간과 필요한 입력자료를 줄일 수 있다. 도시유출모의가 가능한 SWMM, HSPF, SLAMM, P8-UCM, DR3M-QUAL 등은 수많은 설계기준을 제공할 수 있지만, 수많은 입력자료와 사용자의 전문성을 요구하며, 적절한 입력값과 결과값의 해석이 필요하다.

한편, 유역수질모형은 유역에서의 강우-유출, 침식 및 토사이송, 오염물질 거동, 하천내 오염물질 이송, 최적관리기법의 적용성 평가 등을 해석하기 위한 일련의 방정식 또는 기법이 사용된다 (USEPA, 2008). 따라서, 이러한 유역내의 특성들을 고려하여 적합한 모형을 선정하여 적용하여야 한다.

2. 유용한 유역 수질모형 - USEPA 추천

다양한 유역 규모에서의 수많은 수질모형들이 광범위한 수질문제에 대한 해결책을 제시하기 위하여 사용되고 개발되어져 왔다. USEPA (2008)에서는 이들 유역수질모형들 중에서 공공성과 사용자의 적용과 사용이 가능한 유역수질모형에 초점을 맞추어 주요 유역수질모형을 선정하였다. 선정된 모형들은 일반적으로 오염총량제 및 유역관리 연구에 이용되고 있다.

USEPA (2008)에서는 유용한 유역수질모형에

대해서, 1) 단지 지면 기반 기작 모의 (Landscape only) 또는 지면을 포함하는 하천 및 이송 기작 모의 여부, 2) 모의수준의 정도 (Level complex), 3) 출력자료의 시간단위 정도 (Time step), 4) 지표수만 고려 또는 지표수를 포함한 지하수 고려 여부 (Hydrology), 5) 오염물질 모의 항목 (Water quality), 6) 모형에 의해 모의 가능한 최적관리기법 (Type of BMPs) 등을 비교하고 있으며, 각각의 모형을 개발한 기관을 정리하여 상세히 기술하고 있다.

Borah & Bera (2003, 2004)은 주요 홍수사상 및 연속 유역수질모형에 대하여, 모델링 구성요소 및 기법, 시간적 범위, 유역 특성, 초과 강우량 모의 기법, 지표 유출량 모의 기법, 지표 하 유출량 모의 기법, 하도에서의 유출량 모의 기법, 저수지 내 물순환 모의 기법, 지표 토양유실량 모의 기법, 하도내 토사 이송 모의 기법, 저수지 토사 이송 모의 기법, 화학성분 모의 기법, 최적관리기법 적용 및 평가 가능 여부 등을 정리하여 나타낸 바 있다.

IV. 주요 수질모형 모델링 기법 및 특징

1. 주요 수질모형의 특징 - USEPA 선정

USEPA (2008)에서는 AGNPS, STEPL, GWLF, HSPF, SWMM, P8-UCM, 그리고 SWAT 등을 주요 유역수질모형으로 선정하였다. 선정된 7개의 주요 유역수질모형의 모형 다운로드, 사용자 지침서 등의 각종 정보는 다음의 웹사이트에서 얻을 수 있다.

1) AGNPS

www.ars.usda.gov/research/docs/htmlPd/ocid=5199

2) STEPL

Temporary URL <http://it.tetratex.com/step>.

3) GWLF

The original version of the model has been used for 15 years and can be obtained from Dr Douglas Haith at Cornell University A Windows interface (Dai et al 2000) is available at www.vims.edu/bio/vimsida/basinsim.html. Penn State University developed an ArcView interface for GWLF (www.avgwlf.psu.edu) and Compiled data for the entire state of Pennsylvania (Evans et al., 2002)

4) HSPF

HSPF is available through EPA's Center for Exposure Assessment Modeling (www.epa.gov/ceampubl/swater/hspf) and also as part of EPA's BASINS system (www.epa.gov/ost/basins/). Another formulation of HSPF's EPA's Loading Simulation Program in C++ (LSPC), which can be downloaded at www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/lspc.html.

5) P8-UCM

www.wwwalker.net/p8/p8v24.zip.

6) SWAT

www.brc.tamus.edu/swat.

SWAT is also included in EPA's BASINS system.

www.epa.gov/waterscience/basins/basinsv3.htm.

7) SWMM

www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/index.htm,

Table 2은 선정된 주요 유역수질모형에 의해 유역 발달에서의 시간별, 일별, 그리고 연간 오염물질 항목의 모의 여부를 비교하여 보여주고 있다. 또한, Table 3는 유역의 전반적인 특성 및 도시와 농업지역의 최적관리기법의 적용성 여부를 비교하여 나타내고 있다.

Table 4은 주요 유역수질모형에 대한 각각의 모형의 셋업 (setup) 및 적용에 소요되는 시간, 숙련도 여부, 구입비용 등을 비교하여 나타내었다.

Table 5는 주요 유역수질모형의 적용을 위한

기본적인 입력자료를 각각의 모형별로 비교하여 보여주고 있다.

Table 6는 주요 모형의 보정을 위하여 대표적으로 선택할 수 있는 유출과 오염물질을 나타내고 있다. 모형의 보정은 실측자료와 모의자료의 회기방정식, 상태오차, 모형의 효율지수, 그리고 Student's t-test 등을 통하여 수행할 수 있다.

2. 농업지역 유역수질모형

Srivastava (2007)는 공간적 범위에 따라 지점모형, 포장규모 모형, 유역규모 모형으로 구분하였다. Srivastava (2007)는 유역의 공간적 범위의 모형에 대한 입력 기상자료, 수문 순환,

Table 2. Water Quality Endpoints Supported by the Selected Watershed Models

Parameter/Endpoint	AGNPS	STEPL	GWLF ^a	HSPF	P8-UCM	SWAY	SWMM
Total phosphorus (TP) load	▶	○	▶	●	●	▶	●
TP concentration	▶	—	▶	●	●	▶	●
Total nitrogen (TN) load	▶	○	▶	●	●	▶	●
TN concentration	▶	—	▶	●	●	▶	●
Nitrate concentration	—	—	—	●	—	▶	●
Ammonia concentration	—	—	—	●	—	▶	●
TN:TP mass ratio	—	—	▶	●	—	▶	●
Dissolved oxygen	▶	—	—	●	—	▶	●
Chlorophyll a	—	—	—	●	—	▶	—
Algal density (mg/m ³)	—	—	—	—	—	—	—
Net total SS load	—	○	—	●	●	—	●
Total SS concentration	▶	—	—	●	●	▶	●
Sediment concentration	▶	—	▶	●	●	▶	●
Sediment load	▶	○	▶	●	—	▶	●
Metals concentrations	—	—	—	●	—	▶	●
Conductivity	—	—	—	●	—	—	—
Pesticide concentrations	▶	—	—	●	—	▶	—
Herbicide concentrations	▶	—	—	●	—	▶	—
Toxics concentrations	—	—	—	●	—	—	—
Pathogen count (E. coli, fecal coliform)	—	—	—	●	—	▶	●
Temperature	—	—	—	●	—	▶	—

Key: — Not supported ○ Annual ▶ Daily ● Hourly

^aGWLF calculations are performed on a daily basis, but the results are presented on a monthly basis.

Source: USEPA, 2005. TMDL Model Evaluation and Research Needs EPA/600/R-05/149. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, OH. www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r05149/600r05149.htm

Table 3. Land and Water Features Supported by the Selected Watershed Models

Land and Water Feature	AGNPS	STEPL	GWLF	HSPF	P8-UCM	SWAY	SWMM
General Land and Water Features							
Urban	—	○	▶	▶	▶	▶	●
Rural	●	○	▶	●	○	●	▶
Agriculture	●	○	▶	●	○	●	○
Forest	—	○	▶	●	○	●	○
River	—	—	○	●	○	○	○
Lake	—	—	—	▶	—	○	○
Reservoir/impoundment	—	—	—	▶	▶	○	▶
Estuary (tidal)	—	—	—	—	—	—	—
Coastal (tidal/shoreline)	—	—	—	—	—	—	—
Detailed Land Features							
Air deposition	—	—	—	○	—	—	—
Wetlands	—	—	—	▶	○	○	○
Land-to-land simulation	○	—	—	○	—	—	—
Hydrologic modification	—	—	—	▶	—	—	▶
BMP siting/Placement	●	—	—	○	▶	—	▶
Urban Land Management							
Street sweeping and vacuuming	—	—	○	—	▶	○	▶
Nutrient control practices (fertilizer, Pet waste management)	▶	—	—	○	○	○	○
Stormwater structures (manhole, splitter)	—	—	—	—	○	—	▶
Detention/retention ponds	▶	—	—	○	▶	○	▶
Constructed wetland processes	—	—	—	—	○	○	○
Vegetative practices	▶	—	○	○	○	○	○
Infiltration practices	—	—	—	○	○	—	—
Rural Land Management							
Nutrient control practices (fertilizer, manure management)	●	○	○	●	—	●	○
Agricultural BMPs (contouring/terracing/row cropping)	●	○	○	●	—	●	○
Irrigation practices/tile drains	○	—	—	—	—	●	—
Ponds	▶	—	—	▶	▶	▶	▶
Vegetative practices	▶	○	○	○	—	▶	—

Key: — Not supported

○ Low Simplified representation of features, significant limitations

▶ Medium: Moderate level of analysis, some limitations

● High: Detailed simulation of processes associated with land or water feature

Source: USEPA, 2005. TMDL Model Evaluation and Research Needs, EPA/600/R-05/149. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH. www.epa.gov/nrml/pubs/600r05149/600r05149.htm

Table 4. Application Considerations of the Selected Watershed Models

Application Considerations	AGNPS	STEPL	GWLF	HSPF	P8-UCM	SWAY	SWMM
Experience required	▶	●	●	—	●	○	—
Time needed for application	▶	●	●	—	●	▶	○
Data needs	▶	●	●	○	●	▶	○
Support available	▶	○	○	●	○	▶	▶
Software tools	▶	●	●	●	○	●	○
Cost to purchase	●	●	●	●	●	●	●

Experience:

- Substantial training or modeling expertise required (generally requires professional experience with advanced watershed and/or hydrodynamic and water quality models)
- Moderate training required (assuming some experience with basic watershed and/or water quality models)
- ▶ Limited training required (assuming some familiarity with basic environmental models)
- Little or no training required

Support Available

Time needed for App.

Software tools

Data Needs

Cost to Purchase

- None
- Low
- ▶ Medium
- High
- > 6 months
- > 3 months
- ▶ > 1 month
- > 1 month
- None
- Low
- ▶ Medium
- High
- High
- Medium
- Low
- Significant cost (> \$500)
- Nominal cost (< \$500)
- ▶ Limited distribution
- Public domain

Source: USEPA, 2005. TMDL Model Evaluation and Research Needs. EPA/600/R-05/149. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory Cincinnati OH. www.epa.gov/nrmr1/Dubs/600r05149/600r05149.htm

지하수 거동, 잠재증발산량, 토양유실 등의 모의 기법, 오염물질 모의 항목, 시간에 대한 출력 형태, 개발자, 해당 웹사이트를 정리하여 나타내었다. 이에 대한 자세한 내용은 Srivastava (2007)에 자세히 수록되어 있으므로 참조하기 바란다.

3. 도시지역 유역수질모형

도시지역에서 신뢰할 수 있는 유역수질모형은 1) 오염총량제 개발, 2) 합류식 하수관거 유출수 (combined sewer overflows, CSOs) 관리, 3) 최적관리기법의 선정 및 설치, 4) 토지이용변화

Table 5. Typical Data Needs for Example Models

Model	Number of Watersheds	Land-Use/Soil Parameters	Stream Channel characteristics	Nutrient Applications	Management Practices
AGNPS	> 1	CN/USLE	N/A	Application rate	Location and type associated with land use
STEPL	1	CN/USLE	N/A	N/A	General type
GWLF	1	CN/USLE	N/A	Manure/nutrient applications, date	General/agricultural
HSPF	> 1	HSPF-specific	Flow/discharge relationships, length	Application rate	Location and type
P8-UCM	1	CN/USLE	N/A	N/A	General type
SWAT	> 1	CN/USLE	Dimensions of stream channel	Application rate	location and type associated with land use
SWMM	> 1	Green-Ampt USLE	Dimensions of stream channel, conduits, and Pipes	Buildup/wash-off rates rates	Location and type associated with land use

Table 6. Typical Calibration Options for Selected Example Models

	Flow calibration	Pollutant calibration
AGNPS	Limited CN	Nutrient concentrations in water and sediment
STEPL	Limited/CN only	Loading rate
GWLF	Ground water recession	Nutrient concentrations in water (runoff, ground water) and sediment
HSPF	Multiple, infiltration, soil storage, ground water	Pollutant buildup and wash-off, instream transport/decay
P8-UCM	Limited/CN only	Loading rate or more detailed buildup and Wash-off of dust and pollutants
SWAT	Ground water	Nutrient concentrations in water and sediment
SWMM	Multiple, infiltration, soil storage, ground water	Pollutant buildup and wash-off, instream transport/decay

영향 평가, 그리고 5) 수질 기회비용 해석 등의 수행을 효과적으로 지원할 수 있어야 한다 (Obropta & Kardos, 2007).

Obropta & Kardos (2007)는 도시지역을 대상으로 적용되고 있는 주요 유역수질모형의 오염물질 축적과 유출 기작 등을 포함하는 다양한 특징을 비교하여 자세히 설명한 바 있다. 또한, 국외의 적용사례는 Borah & Bera (2004)가 상세히 정리하였으며, 관심있는 독자는 참조하기 바란다.

V. 결론

본 원고에서는 전체적인 수질모형의 종류와 특징을 살펴보고, 주요 수질모형에 대한 모델링 기법 및 특징에 대하여 소개하였다.

최근, 유역수질모형은 GIS와 RS 등과 통합적으로 이루어지고 있으며, 사용자를 위한 GUI (Graphical User Interface) 개발 등이 활발하게 진행되어 있다. 가장 대표적인 GUI 시스템으로 개발된 것은 BASINS으로서 유역과 수질에 대한 손쉬운 평가와 점원오염과 비점오염을 사용자 중심에서 통합적으로 관리할 수 있다.

이와 같이, 유역 규모의 수질모형의 지속적인

개발과 더불어 지리정보시스템, 전문가 시스템 (expert system), 사용자 인터페이스 (graphical user interface, GUI), 객체지향 모델링 기법 (object-oriented modeling system, OOM), 원격탐사 (remote sensing, RS) 등의 새로운 기술을 수질모형과 통합하기 위한 사용자 중심의 종합적인 통합 시스템으로의 개발에 보다 많은 노력을 기울여야 할 것이다. 이와 더불어 유역수질모형의 매개변수의 불확성의 특징을 구명할 수 있는 효율적인 방법의 심도 깊은 연구가 요구된다. 또한, 추계적 모형 및 결정론적 모형과 추계적 모형의 병용 모형 개발 등의 연구도 지속해 진행함으로써, 수질모형 사용자의 기대에 부응하기 위한 기능성과 응용성을 확대해 나가기 위한 노력이 지속되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Beasley, D. B., L. F. Huggins, and E. J. Monke. 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. Trans. ASAE 23(4): pp.938~944.
2. Borah, D. K., and M. Bera. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. Transaction of the ASAE 46(6): pp.1553~1566.

3. Borah, D. K., and M. Bera. 2004. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications. *Transaction of the ASAE* 47(3): pp.798~803.
4. Chow, V. T., and B. C. Yen. 1974. A laboratory watershed experimentation system. *Hydraulic Engineering Series No. 27*. Urbana, Ill.: University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Civil Engineering.
5. Knisel, W.G. 1980. CREAMS: A field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. *Cons. Res. Rpt 26*. Washington, D.C.: USDA.
6. Leonard, R.A., Knisel, W.G., and Still, D.A. 1987. GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. *Trans. of ASAE*, Vol. 30, No. 5, pp.1403~1418.
7. Migliaccio, K. W., and P. Srinivasan. 2007. Hydrologic components of watershed-scale models. *Transaction of the ASABE* 50(5): pp.1695~1703.
8. Novotny, V., and Olem, H. 1993. "Water Quality, Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution", Van Nostrand Reinhold, New York.
9. Obropta, C. C., and J. S. Kardos. 2007. Review of urban stormwater quality models: Deterministic, stochastic, and hybrid approaches. *Journal of the AWRA* 43(6): pp.1508~1523.
10. Rossman, L. A. 2005. Storm water management model user's manual, Version 5.0. EPA-600-R-05-040, Office of Research and Development, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio, p.247.
11. Srivastava, P. K. W. Migliaccio, and J. Simunek. 2007. Landscape models for simulating water quality at point, field, and watershed scales. *Transaction of the ASABE* 50(5): pp.1683~1693.
12. Tim, U. S.. 1996. Emerging technologies for hydrologic and water quality modeling research. *Transaction of the ASAE* 39(2): pp.465~476.
13. USEPA. 2008. Handbook for developing watershed plans to restore and protect our waters.
14. Woolhiser, D. A., R. E. Smith, and D. C. Goodrich. 1990. KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual, ARS-77. Fort Collins, Colo.: USDA Agricultural Research Service.
15. Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson. 1987. AGNPS, Agricultural nonpoint-source pollution model: A watershed analytical tool. *Conservation Research Report No. 35*, Washington, D.C.: USDA.
16. 강문성. 2008. 오염총량관리를 위한 농업비점원오염 모형. *수자원정보 겨울호*, pp.3~18.
17. 국립환경과학원. 2008. 한강수계 수질오염총량관리 유형별 유달을 산정방법 연구.
18. 박승우. 비점원 오염 모델의 종류와 적용방법. *한국수자원학회, 물과 미래* 30(12): pp.19~26.

이 연구는 서울대학교 신입교수 연구정착금으로 지원되는 연구비에 의하여 수행된 내용의 일부임.