농촌유역 모형의 모의요소별 적용기법

송 인 홍
서울대학교 농업생명과학연구원 연구교수
inhongs@snu.ac.kr

강 문 성
서울대학교 조경 · 지역시스템공학부 교수
농업생명과학연구원
mskang@snu.ac.kr

김 진 택
한국농어촌공사 농어촌연구원 책임연구원
jtkim@ekr.or.kr

1. 서론

유역의 도시화 및 각종 인간 활동에 의한 오염물질의 발생은 하천 등의 수역에 나쁜 영향을 끼쳐왔다. 세계적으로도 홍수, 농경지 및 하천제방 침식, 토양유실, 농약 및 화학비료 시용에 의한 수질악화는 환경적으로는 물론, 사회 경제적으로 중요한 문제점으로 대두되고 있다(Borah & Bera, 2003).

유역의 비점원 (Nonpoint Source, NPS) 오염물질은 강수 유출 및 토양침식에 의해 오염원으로부터 하천, 호소 및 바다로 이송되는 과정에서 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 기작에 의해 끊임없이 변화한다(강, 2006). 주요 비점오염원에는 유사, 비료성분, 독성물질, 중금속, 미생물 등이 있다. 이들은 성질에 따라 크게 물에 쉽게 용해되는 용해성과 유사에 부착되어 나오는 유사 부착 형태로 구분될 수 있다.

유역에서의 비점오염원의 발생과 배출, 그 저감대책에 의한 소멸 기작은 매우 복잡하여 그 정확한 정량적 관계가 구명되지 못하고 있다. 따라서 유역에서의 수질관리를 위한 여러 가지 대안에 대한 수계의 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 유역에서의 모든 물리 현상을 수학적으로 표현하고 현상 간의 관계를 함수관계로 표현할 수 있는 수학적 모형이 필요하다.

컴퓨터 기술의 진보와 더불어 기술의 발전 단계별로 모형이 진화하여 왔으며, 모형의 구성요소인 다양한 수문 및 수질 모의 기작 또한 함께 발전해왔다. 본 원고에

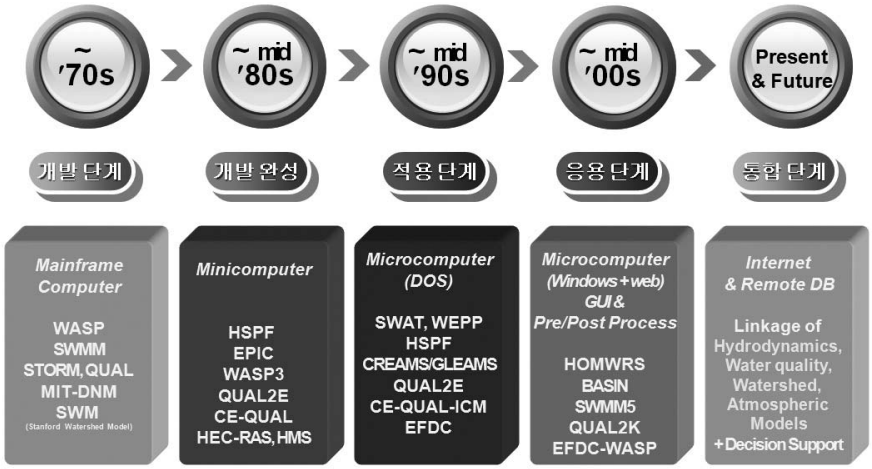

그림 1. 기술발전 단계별 수문/수질 모형의 개발 현황

서는 각 수문 및 수질 구성 요소별로 모의기법을 살펴보고 모형에 따라 어떤 기법이 적용되고 있는지 고찰하였다.

2. 수문/수질 모형의 발전 및 적용 현황

가. 수문/수질모형의 기술 발전 현황

수문 및 수질 모델 개발을 시간적으로 기술의 발달에 따라 구분해 보면 다음의 그림 1과 같이 크게 5단계로 요약할 수 있다. 물론 미국에서 개발된 모형을 위주로 분석한 것이라는 한계가 있지만, 사실상 미국의 모형이 국내는 물론 세계적으로 매우 널리 활용되고 있다는 점에서 전반적으로 모형의 발전단계를 고찰하는데 매우 유용할 것으로 기대된다.

1단계는 1960년대에서 70년대 중반까지로 기본적으로 Mainframe 컴퓨터의 개발과 함께 시작된 최초의 현대적 수질모형 개발 단계이다. 모형의 입력자료를 준비하고 일련의 순서에 따라 컴퓨터에 공급하고, 이의 출력결과를 자석태엽에 저장하여 차후에도 활용가능하도록 하는 지금에서 보면 매우 원시적인 형태를 띠었다. 하지만 이 당시에도 모형의 알고리즘은 상당한 수준으로 개발되어 있었으며, 이시기에 개발된 모형으로 WASP, SWMM, 초기 QUAL, Standford 유역모형 등이 있다.

2단계는 80년대 중반까지로 컴퓨터 기술의 발전으로 Mainframe 컴퓨터가 중앙정부에서 운용하는 컴퓨터라면, Minicomputer로 주요 기관단위로 컴퓨터의 보급이 확대되면서 컴퓨터에 대한 접근성이 향상되었다. 이 시기에 기존의 개발된 모형을 더욱 정교하게 보완되고, 또한 일반화가 이루어졌다. 이당시 개발된 모형에는 HSPF, WASP3, QUAL2E, CE-QUAL, HEC-RAS, DSS, HMS 등이 있다.

3단계는 1990년대 중반까지로 DOS 기반의 개인용 컴퓨터(Microcomputer)의 등장으로 컴퓨터의 사용이 획기적으로 늘어난 시기로 개별 사무실 단위에서도 컴

퓨터를 사용할 수 있게 된 시기이다. 모형의 더욱 진화하여 어느정도 표준화 단계에 접어들게 되고, 모형의 배포나 교육, 기술적인 지원 등이 체계화되는 시기이다. 이때 개발된 주요 모형으로 HSPF, EFDC, CE-QUAL-ICM 등이 있다.

4단계는 2000년대 초기로 Windows 기반의 컴퓨터로의 진화로 다양한 사용자 편의 인터페이스가 개발되어 모형 적용의 편의성이 획기적으로 진전되었다. 또한 GIS tool을 이용하여 지형 등 공간자료를 모델링에 적용하는 기술이 일반화 되는 시기이다. 주요 모형으로 SWMM5, BASINS, QUAL2K 등의 모형이 있다.

5단계는 현재 단계로 인터넷의 발달과 컴퓨터 전산기술의 진전으로 개인용 컴퓨터가 과거의 슈퍼컴퓨터 수준의 기능까지 수행할 수 있게 됨에 따라 계산상의 한계가 어느 정도 극복되고 네트워크를 통한 원격 모델링 기법이 적용가능하게 되었다. 또한 유역단위 공간자료 및 기초자료 DB를 활용하고, 실시간 계측자료를 모의에 활용하며, 기후변화를 고려할 수 있는 등 모델링의 정도를 향상시키고, 이러한 모형 예측 결과를 의사결정에 활용하는 보다 통합적인 관점에서 DB, 모형, 의사결정 등의 여러 시스템을 통합하는 방향으로 나아가고 있다.

나. 주요 수질모형 및 적용 현황

USEPA (2008)에서는 AGNPS, STEPL, GWLF, HSPF, SWMM, P8-UCM, 그리고 SWAT 등을 주요 유역수질모형으로 선정한 바 있다. 표 1은 선정된 주요 유역수질모형에 대해 모의 시간, 모의 오염물질 항목 등을 비교하여 나타내고 있다.

농촌 유역에 적용되는 모형은 공간적 범위에 따라 크게 지점모형, 포장규모 모형, 유역규모 모형으로 구분된다(Srivastava, 2007). 유역의 공간적 범위에 따라 유역규모의 모형에 대한 입력 기상자료, 수문 순환, 지하수 거동, 잠재증발산량, 토양유실 등의 모의 기법, 오염물질 모의 항목, 시간에 대한 출력 형태 등에 차이가 나타낸다. 도시지역에서 신뢰할 수 있는 유역수질모형은 대부분 오염총량제, 합류식 하수관거 유출수(CSOs) 관리, 최적관리기법의 선정 및 설치, 토지이용변화 영향 평가, 수질 기회비용 해석 등을 목적으로 많이 이용되고 있다 (Obropta & Kardos, 2007).

모형의 국내외 적용 현황을 살펴보기 위해 국내 국회도서관과 SCOPUS 논문 DB를 대상으로 모형의 적용 논문수를 조사한 결과, 국내에서는 SWAT, SWMM, AGNPS, HSPF모형이 많이 적용되었고, 국제적으로는 BASINS, SWAT, STORM, 수질탱크모형 등이 널리 이용되고 있는 것으로 나타났다.

3. 수문 및 수질 모의 요소별 모의 기법

가. 초과강우 또는 침투량 산정 기법

초과 강우 즉 직접유출량을 산정하는 것은 유역단위 모델링에 있어서 첫 번째 단계이다. 여기에는 나무나 식생에 의한 차단, 지면저류, 토양 침투량을 산정하고 물수지를 고려하여 초과 강우를 산정하여 직접유출량을 결정하는 것이 가장 일반적이다. 초과강우 또는 침투량을 산정하는 방법에 따라 SCS CN법, Richard, Philip, Smith & Parlange법, Green & Ampt, Horton, Modified Holton-Overton, 초기 손실 및 일정침투율 등의 기법이 모델링에 이용되고 있다. 각 기법별로 적용되어 있는 모형 현황을 정리하면 다음의 표 2-1과 같다. 가장 널리 이용되는 방법은 SCS CN법으로 AGNPS,

표 1. 유역모형별 모의 수질항목 비교 (USEPA, 2005)

Parameter/Endpoint	AGNPS	STEPL	GWLF[a]	HSPF	P8-UCM	SWAT	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 (㎎/㎡)	—	—	—	—	—	—	—
Net total suspended solids load	—	○	—	●	●	—	●
Total suspended solids 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

[a]GWLF calculations are performed on a daily basis, but the results are presented on a monthly basis.

TR-55 등 많은 모형의 초과 강우 기법으로 널리 적용되고 있다.

SCS Curve Number (CN) 방법: USDA SCS(Soil Conservation Service)에서 개발한 방법으로 지난 반세기 동안 가장 널리 이용되어온 방법이다(Borah, 2011). 이 방법은 각 토양, 토지피복, 선행토양수분조건 등에 따른 다양한 유역에서의 유출곡선을 조사하여 각 특성에 따른 고유의 CN값을 DB로 정리하여 이로부터 직접유출량을 산정하는 식을 도출하고, 실제 모형에서도 이를 이용한다. 이를 수식화하면 다음의 식 (1), (2)와 같다.

$$Q_r = \frac{(P - 0.2S_r)^2}{P + 0.8S_r} \quad (1)$$

$$S_r = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (2)$$

표 2. 초과 강우 (or 침투량) 산정 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)

SCS runoff curve number	Richard's equation	Philip's equation	Smith and Parlange procedure	Green and Ampt equation	Horton's equation	Modified Holton-Overton equation	Initial loss and constant rate
AGNPS	GSSHA (optional)	HSPF	DWSM (optional)	DR3M	MIKE URBAN (optional)	ANSWERS	HEC-HMS (optional)
DWSM	MIKE SHE		KINEROS	GSSHA	SWMM		MIKE URBAN
HEC-HMS				HEC-HMS (optional)			
SEDIMOT Ⅲ				PRMS			
SWMM (optional)				SWMM (optional)			
TR-55							

Qr: 직접유출 또는 초과강우량 (mm), P: 강우량 (mm), Sr: 최대 강우손실량(mm), CN: 토양, 피복, 토양수분 조건에 따른 유출곡선번호

Richard's Infiltration Equation: 토양을 통한 물의 수직 거동을 표현하는 방정식으로 1931년에 Richard에 의해 Darcy의 법칙으로부터 유도되었다. Darcy법칙은 다공매질을 통한 유체의 흐름은 수리경사(hydraulic gradient)에 비례하고, 이 비례 상수를 수리 전도율 (hydraulic conductivity)로 나타내었다. Richard 방정식을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\right]-\frac{\partial K}{\partial z} \qquad (3)$$

Θ: 토양수분 (㎣/㎣), t: 시간(h), z: 지표로부터 하향 깊이 (mm), K: 수리전도율(mm/h), D: 토양수 확산도 (mm^2/h)

Philip's Infiltration Equation: 1957년 Philip이 K와 D가 토양수분과 함께 변한다는 가정 하에 Richard 방정식을 보다 덜 제한적인 조건에서 해를 구하였다. 이 식은 다양하게 표현되는데 이 중 대표적인 형식은 다름과 같다.

$$f(t)=\frac{1}{2}St^{(-1/2)}+A \qquad (4)$$

f(t): 토양 침투율 (mm/h), S: 토양 흡수율(Sortivity), A: 토양 특성 계수

Smith & Parlange Infiltration Equation: 이 방정식은 Richard 방정식으로부터 두 가지 가정 하에 지표

저류시간과 침투율 사이의 관계식을 도출한 방법이다. 자세한 방법은 Borah (2011)를 참조할 수 있다.

Green and Amp Equation: 1911년 Green & Ampt는 토양 wetting front를 선형으로 가정하고, 균질한 토양 조건에 대해 Darcy법칙으로부터 침투방정식을 유도하였다. 방정식을 다음과 같다.

$$f = K_x \left[1 + \frac{H_c(\theta_c - \theta_i)}{F} \right] \quad (5)$$

f: 침투율(mm/h), K_s: 포화 투수계수(mm/h), Hc: Capillary suction head (mm), Θ_e: 유효 공극률, Θ_i: 초기 토양 수분, F: 누적 침투량(mm)

이 밖의 Horton, Modified Holton-Overton 침투 방정식은 대부분의 수문 교과서에 수록이 되어 있고, 또한 Borah (2011)을 참조하면 상기 기법에 대해 보다 자세한 정보를 얻을 수 있다.

나. 지표 유출 및 하도 추적 기법

유체의 흐름을 표현하는 가장 기본적인 지배 방정식은 St. Venant 방정식으로 연속방정식(질량보전법칙)과 운동량보전법칙으로부터 유도된다. 지배 방정식은 크게 다섯 개의 항으로 구성되어 있는데, 국소 가속도, 이류 가속도, 압력, 중력, 마찰 항 등이다. 각 항목에 대한 고려 정도에 따라 모형의 정확성이 달라지고, 또한 모형의 복잡성도 고려 항목에 비례하여 증가한다. 고려 항목의 개수에 따라 Dynamic wave, Diffusive wave, Kinematic wave 방정식으로 구분된다. 이를 수식으로 표시하면 다음의 식 (6)과 같고, 고려 항목에 따른 모의기법도 함께 보여주고 있다.

전체 다섯 항을 모두 고려하면 Dynamic wave 방정식이 되는데, 모든 항을 고려하는 만큼 모형의 정확도는 크다. 반면, 모형 구성의 복잡성이 크고, 또한 계산량이 많고 계산 결과의 수렴성에 있어서 안정성이 낮다. 따라서 이 기법은 유역단위에서는 거의 사용되지 않고 일부 사용되는 경우에도 극히 제한적인 범위에서 이용되고 있다.

Diffusive wave 방정식은 Dynamic wave방정식에서 국부 가속 및 이류 가속항을 무시하여 간편화시킨 모의기법이다. 압력항이 중력항과 마찰항으로 이루어진 간편식이 된다. 이 방정식 역시 수치적으로 해석이 되며, 이 기법을 이용하는 모형에는 CASC2D와 MIKE SHE 모형이 있다.

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_{\text{Local Acceleration}} + \underbrace{\frac{\partial\left(\frac{\alpha Q^2}{A}\right)}{\partial x}}_{\text{Advective Acceleration}} + \underbrace{gA\frac{\partial y}{\partial x}}_{\text{Pressure Force}} - \underbrace{gA(S_0 - S_f)}_{\text{Gravity \& Friction Force}} = 0 \quad (6)$$

Kinematic wave

Diffusive wave

Dynamic wave

물리기작을 고려하는 즉, 지배방정식을 가장 간편화 시킨 모형이 바로 운동파방정식(Kinematic wave equation)이다. 이 기법은 상대적으로 적용에 안정성이 있으면서도 물리적 기작을 고려한다는 점에서 많은 모형에 이용되어 왔다. 이 기법의 운동량은 오직 중력항과 마찰항 만으로 표시되는데, 즉 에너지 경사(마찰항)는 바닥경사(중력항)와 같다는 것이다. 또한 이 모형은 많이 단순화되었기 때문에 엄밀해도 구할 수 있고, 수치적으로 해석될 수 있다는 것이 장점이다.

기본방정식을 기반으로 한 모형은 기본적으로 물리적인 기작을 고려해야 하기 때문에 모형으로 구축하는데 어느 정도의 제약이 따른다. 이를 극복하기 위해 물리적 기작을 고려하는 대신 연속방정식과 저류방정식을 연계한 물 수지를 통해 흐름추적을 하는 기법이 개발되었는데 이것이 바로 비선형저류방정식(Nonlinear reservoir equation)과 Muskingum 방정식이다. 비선형저류방정식은 연속방정식과 물의 유량 결정을 위해 Manning공식을 결합하여, 수로나 지표 유출의 각 세그먼트를 하나의 저류조로 가정하고 물수지 분석하여 추적하는 개념이다. Muskingum 방정식은 비선형저류방정식에 있어서 수표면의 경사의 점증적인 변화를 고려할 수 있도록 약간의 변화를 구한 기법이다.

이보다 더 간단한 방법으로 경험식에 의한 하도 추적 방법이 있다. 여기에는 합리식, 단위도법, 합성단위도

표 3. 지표추적(Overland routing) 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)

Diffusive wave equations : numerical solution	Kinematic wave equations : numerical solution	Kinematic wave equations : analytical solution	Nonlinear reservoir equations	Unit hydrograph	SCS unit hydrograph: TR-55 method (synthetic)	Time-area histogram	Rational formula or its modifications
GSSHA	HEC-HMS (optional)	DR3M	ANSWERS	HEC-HMS (optional synthetic: Snyder, SCS & Clark)	HEC-HMS (optional)	MIKE URBAN	AGNPS
MIKE SHE	KINEROS	DWSM	HSPF	MIKE URBAN (optional: Snyder)	MIKE URBAN (optional)		
	PRMS		MIKE URBAN (optional)	SEDIMOT III (synthetic: gamma function)	TR-55		
			SWMM				

법, Snyder 단위도, SCS 단위도법(TR-55법) 등이 있으며, 그 이용의 편의성 때문에 널리 모형에 적용되어 왔다.

지금까지 살펴본 지표 및 하도 추적 기법을 적용한 모형에 대해 살펴보면 각각 표 3, 4와 같다. Dynamic wave 기법을 적용한 모형에는 MIKE SHE와 SWMM 모형이 있고, 가장 널리 이용되는 모형인 HSPF 모형은 간단한 경험식에 기초한 추적기법을 적용하고 있다. 다음의 표 3, 4의 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 모형의 정도는 낮아지는 반면 모형의 간편성은 증가한다.

다. 지하수 흐름 모의 기법

지하수 흐름 해석에 가장 기본 법칙은 Darcy의 법칙이다. 이를 3차원 수식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (7)$$

표 4. 하도추적(Channel routing) 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)

Dynamic wave equations : numerical solution	Diffulsive wave equations : numerical solution	Kinematic wave equations : numerical solution	Kinematic wave: analytical and shock-fitting solution	Muskingum method	Nonlinear reservoir equations	Rational formula or its modifications	Other methods
GSSHA (optional for mild channels)	GSSHA	DR3M	DWSM	HEC-HMS	ANSWERS	AGNPS (included in overland cells)	HSPF (outflow is a function of reach volume or demand)
MIKE URBAN	MIKE SHE	HEC-HMS (optional)		SEDIMOT III	HEC-HMS (Modified Plus : optional)		TR-55 (SCS unit hydro-graph or TR-55 method)
SWMM	MIKE URBAN (optional)	KINEROS MIKE URBAN (optional) PRMS SWMM (optional)					

h: 정수두(m), K: 수리전도도(m/h), S_s: Specific storage(1/m), t: 시간(h), x,y,z: 거리 (m).

3차원 지하수 흐름 방정식은 엄밀해가 없고, 대략적인 수치해석을 통해 해를 구할 수 있다. 이 방정식에서 한 방향 흐름을 균일하게 가정하면 한 차원을 줄여 2차원 방정식으로 간소화할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T_x\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T_y\frac{\partial H}{\partial y}\right)=S_s\frac{\partial h}{\partial t}+W \quad (8)$$

H: 수두 (m), T: Transmissivity (m^2/h), S_c: 저류계수, W: Source 또는 sink (m/h)

운동파 저류방정식(Kinematic storage equation): 1983년 Sloan et al에 의해 개발된 모형으로 다음의 수식과 같다.

$$q_s = K_s \sin\alpha \frac{2V}{L(\theta_s-\theta_d)} \quad (9)$$

q_s: 지하수 흐름(m^3/s/m), Ks: 포화투수계수(m/s), α: 불투수층 각도, L: 경사장(m), Θ_s: 포화 토양수분, Θ_d: 포장용수량

Baseflow recession curve: Chow et al이 1988년에 유도한 식으로 지수감수곡선이다. 수식으로 표현하면 다음과 같다.

표 5. 지하수 흐름 해석 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)

3-D groundwater flow equation	2-D groundwater flow equation	Kinematic storage equation	Huggins and Monke drainage	Basecflow recession curve	Other methods	None
MIKE SHE	GSSHA	DWSM	ANSWERS	HEC-HMS	HSPF (empirical relations)	AGNPS
					MIKE URBAN (MOUSE RDI license: linear reservoir)	DR3M
					SWMM (mass balance and empirical fluxes)	KINEROS
						PRMS
						SEDIMOT Ⅲ
						TR-55

$$Q_b(t) = Q_0 e^{-(t-t_0)/k} \quad (10)$$

Q_b: 기저유출량(m^3/s), Q_0: t_0에서의 유량(m^3/s), k: 지수감수상수

지금까지 지하수 흐름 해석에 이용되는 각 기법에 대해 간략하게 살펴보았다. 이러한 각기법이 적용되고 있는 모형 현황을 정리하면 다음의 표 5와 같다. 표에서 가장 왼쪽의 3차원 흐름해석 모형이 가능한 MIKE SHE가 가장 정도 및 복잡성이 높고, 오른쪽으로 갈수록 모형의 간편성이 증가한다. 통상 널리 이용되는 모형은 많은 경우 경험식 기반의 매운 간단한 모형을 이용하여 지하수 흐름을 해석하고 있는데, 여기에는 HSPF, SWMM모형이 포함되며, AGNPS모형은 지하수 흐름에 대해 고려하지 않았다.

라. 증발산량 산정

증발산량 산정은 기상자료를 바탕으로 작물이나 식생을 고려하여 산정하는 것이 가장 일반적이다. 이외에도 증발접시를 통한 증발량을 측정하고 여기에 계수를 고려하여 증발산을 추정하는 경우도 있다. 또한 일부 모형의 경우 내부에서 증발산량을 산정하기보다 이용자가 산정하여 입력 자료로 요구하는 모형도 있는데, STORM, HSPF 모형이 여기에 속한다.

본 연구에서는 각 증발산량 산정방식에 대한 자세한 소개는 생략하고자 한다. 그 이유는 이러한 증발산량 산정식은 대부분의 수문학 교재에 제공이 되고 있기 때문에 쉽게 참고가 될 수 있기 때문이다.

주요 산정 기법을 나열하면, 우선 Penman 방정식이

그림 2. 증발산량 산정 방법에 따른 모형 현황

가장 오래전에 개발되었고, 그 밖에 Penman-Monteith, Priestly-Taylor, Hargreaves, Crop growth base Ritiche방정식 등이 있다. 여기서 가장 널리 이용되는 기법은 Penman-Monteith 방정식이다. 이 모형은 공기동역학적인 측면과 태양 복사에너지를 조합하여 증발산량을 산정하는 방식이다. 그림 2와 같이 미국 농무성에서 개발된 모형들은 Penman-Monteith, Priestly-Taylor, Crop growth base Ritiche 기법 모두를 이용자가 선택하여 증발산량 산정에 이용할 수 있도록 하고 있다.

마. 유사량 산정

유사량 산정 기법에 가장 일반적으로 사용되는 기법은 USLE (Univeral Soil Loss Equation) 기법이다. 이 방법은 지형, 토양, 강우 특성, 식생, 관리 인자 등을 고려하여 장기간 년평균 유사량을 산정하는 기법이다. 이 식을 기반으로 수정 USLE의 강우에너지 인자를 유출에너지 인자로 수정한 MUSLE식이 개발되고 (Williams, 1975), USLE개발 DB의 전반적인 업데이트 및 발전된 각 인자관련 이론 등을 종합적으로 적용하여 USLE식을 전반적으로 보완한 RUSLE 등이 개발되었다.

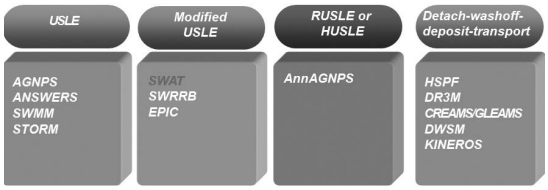

그림 3. 유사 산정식에 따른 모형 현황

이 밖에 유사의 이탈, 세굴, 이송, 퇴적 등 토립자 거동의 각 기작을 경험식으로 규명하공 이를 모델에 적용하는 detach-washoff-deposit-transport 기법도 유사 모의에 이용되는 기법이다.

각 유사 산정 기법별로 적용된 모형의 현황을 살펴보면 그림 3과 같다. 전반적으로 오래된 모형은 USLE를 많이 사용하고, 농촌유역에서 가장 널리 이용되는 SWAT모형의 경우 수정 USLE식을 이용하고 있다. 토립자 거동 기작을 이용하는 모형에 HSPRF, CREAMS, KINEROS 등 다수의 모형들이 조사되었다.

4. 결론

기존 시스템 개발 현황은 유역 규모의 수질모형의 발전을 모색하는 동시에 지리정보시스템, 전문가 시스템 (export 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 노력이 이루어지고 있다. 또한 컴퓨팅 기술의 진보로 고도의 계산이 가능해짐에 따라 추계적 모형뿐만 아니라 결정론적 모형과의 병행 사용을 통한 모의의 정확성을 증진시켜 나가고 있다. 이러한 노력은 각 모의 요소에 대한 모의기법을 개발하는데 있어서도 적용되는 측면이 있다.

다만, 모형의 정확도를 증가시키기 위해서는 여러 가지 물리적인 기작이나 고차원을 고려하는 것이 필요하지만 이는 모형의 복잡성을 증가시키고 모형의 안정성을 저하시킬 수 있다. 컴퓨터 기술의 발전으로 처리속도 증가는 어느 정도의 복잡성을 해결하는 역할을 하고 있고, 실제 모형도 3차원을 고려하고 물리적인 기작도 더 많이 고려하는 경향이 있다. 그럼에도 불구하고, 유역단위 전체에서의 모형 구동에서는 많은 불확실성이 존재하는 만큼 모의 기작의 정확한 구축도 중요한 요소이긴 하지만, 모형의 개발 내지는 적용 목적에 부합하면서도 사용의 편의성을 고려하는 것 또한 매우 중요한 요인이라 하겠다. 따라서 각 모의 요소에 대한 기법을 선정하는 경우 모형의 복잡성 내지는 정확성과 사용의 편의성을 고려하여 서로 균형이 잘 이루어지도록 적용 기법을 선정하는 것이 필요할 것이다.

컴퓨터 기술 발전과 더불어 우리가 직면하는 문제의 복잡성 또한 증가하고 있다. 농촌 유역의 모델링에 있어서도 다양한 요소들을 포함하는데, 여기에는 수문, 수질, 생태계, 나아가 사회 경제적인 요소를 포괄하고 있다. 또한 지역적으로 그 특성에 따라 발생하는 문제도 굉장히 국부적으로 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 특징에 따라 해석하는 모형도 능동적으로 구축될 필요성이 끊임없이 제기 되고 있다. 이러한 노력이 하나가 바로 개체지향 모델링 기법이라 할 수 있다. 즉 다양한 모의 요소를 하나의 독립적인 객체로 모듈화 하여 다수의 모듈을 조합하여 활용할 수 있도록 하자는 개념이다. 이를 통해 특정 문제

에 맞게 필요한 모듈을 선정하고 배열하여 맞춤형 모델을 구축하도록 하자는 것이다. 이는 아직 개발 단계로 현실화를 위해서는 많은 노력이 요구되지만, 미래 문제의 복잡성 등을 고려할 때 모형 개발에 있어서 매우 중요한 의미를 가진다.

참고문헌

1. 강문성, 2008. "오염총량관리를 위한 농업비점원오염모형" 수자원정보. *Water Resources Information* 48: 18-29.

2. Borah, D.K., 2011. Hydrologic procedures of storm event watershed models: a comprehensive review and comparison. *Hydrological Processes*, Wiley Online Library, DOI: 10.1002/hyp.8075.

3. Borah, D.K., and M. Bera, 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. *Transactions of the ASAE* 46(6): 1553-1566.

4. Obropta C. C. and Kardos J. S., 2007. "Review of Urban Stormwater Quality Models: Deterministic, Stochastic, and Hybrid Approaches". *Journal of the American Water Resources Association* 43(6): 1508 – 1523 , 2007 | 1093-474x.

5. Srivastava, P., K.W. Migliaccio, and J. Simunek, 2007. Landscape models for simulating water quality at point, field, and watershed scales. *Transactions of the ASABE* 50(5): 1683-1693.

6. USEPA, 2008. Handbook for developing watershed plans to restore and protect our waters, Ch 8. Estimate pollutant loads, EPA 841-B-08-002.

7. 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.

8. Williams, J.R., 1975. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. U.S. Dept. Agric. ARS-S-40. pp 244-252.

기획: 강문성 mskang@snu.ac.kr