

# 분포형 수문·수질 모델링의 최근 동향과 활용 방안

김성준 (건국대학교 지역건설환경공학과 조교수)

## 1. 서론

컴퓨터 성능의 향상과 더불어 GIS의 발전 그리고 DEM(Digital Elevation Model)의 획득·사용이 가능하게 되므로써 수문학(또는 생태학)에서의 분포형 모델은 1969년 Freeze와 Harlan이 처음으로 물리적인 기반의 분포형 모델을 소개한 이후로 그 발전을 거듭하고 있다. 이러한 모델의 개발을 위한 기술적인 실현이 가능해짐에 따라 Beven(1985), Abbott 등(1986), Bathurst와 O'Connell(1992) 등에 의하여 제안된 바와 같이 공간적인 예측에 대한 공감대가 형성되면서 지속적인 개발의 노력이 있어 왔다. 그 결과 Systeme Hydrologique Europeen(SHE, Abbott 등, 1986; Bathurst 등, 1995; Refsgaard와 Storm, 1995)과 Institute of Hydrology Distributed Model(IHDM, Beven 등, 1987; Calver, 1988; Calver와 Wood, 1995) 등과 같이 실질적인 적용에 사용될 수 있도록 개발된 여러 시스템들이 출현하게 되었다. 이러한 모델들은 원칙적으로 물리적인 개념을 추구하고면서 개발되었으며, 현장에서 측정이 가능한 물리적인 매개변수들로 구성하였다(Beven, 1996).

하드웨어의 그래픽 성능이 모델의 입력과 출력을 쉽게 가시화할 수 있게 되면서 1990년대부터는 GISIWAM(R.K.R. Hess Associates & ESRI), Geo-STORM(Innovative Systems, LLC), MIKE 11(DHI), WMS(Brigham Young Univ.-Engineering Computer Graphics Lab., 1996),

OWLS(Chen, 1996) 등과 같이 포괄적인 그래픽 사용자 환경을 제공하는 시스템의 개발도 병행되고 있다. 한편, 국내에서는 1990년대 중반부터 GIS를 이용한 수문모델의 적용 및 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내의 연구로는 농공학 분야에서 김대식 등(1995)이 격자 물수지를 이용한 강우유출 모델을 개발하여 경기도 화성군 반월유역에 적용하였고, 최진용(1996)은 GIS를 이용한 장기유출모델을 개발하여 동일유역에 적용한 바 있다. 한편 수자원분야에서는 김상현 등(1996), 김상현(1997, 1998), 조홍제 등(1997, 1998), 김상현 등(1999), 정선희 등(1999), 배덕효 등(2000)이 TOPMODEL의 적용성 검토와 알고리즘 개선과 관련된 연구, 김성준(1998), 김성준 등(1998), 채효석 등(1999), 김성준 등(1999), 김성준 등(2000)은 격자기반의 강우유출, 일유출, 증발산산량 산정모델의 개발을 시도하였다. 이 외에도 SCS-CN법을 이용한 유출해석(김경탁 등, 1999) 등의 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 유동훈과 이정영(2000)은 지표면 유출과정에서 침투를 고려하여 홍수시 하천유출을 모의하는 연계모형을 개발하였고, 유동훈과 오윤창(2000)은 지표수와 지하수를 동적으로 연계하는 통합모형을 구축하여 양양 남대천 유역, 안성천 유역 등에 적용하였다. 수질환경분야에서는 김진택(1995)이 농업 비점원오염 유출모델인 AGNPS와 GRASS(Geographic Resources Analysis Support System)와의 호환모델을 개발하여 반월유역에 적용하였고, 김성준(1996), Kim 등(2000), 김

성준 등(2000)은 각각 농촌 소유역의 하천수질관리를 위한 시스템을 개발하여 경기도 북하천유역에 적용하였으며, 이외 격자기반의 토양침식 및 유사운송 모델을 개발하여 화용간척지역에 적용한 연구, AGNPS 모델을 이용하여 농촌 소유역의 축산농가 관리기법을 제시한 연구 등이 있다.

본 고에서는 지금까지 개발되어 온 분포형 수문·수질모델들의 유형과 현재 국내외의 대표적인 분포형 수문·수질모델들을 살펴보고, 이들을 수자원분야에 활용하기 위한 실질적인 방안을 제시하므로써, 분포형 모델의 기본적인 이해와 더불어 앞으로 이 분야에서의 연구활성화 및 실무적용성을 기대하고자 한다.

## 2. 분포형 모델 (Distributed Model)

### 2.1 분포형 모델의 분류

분포형 모델 중에서도 수문/수질과 관련된 지표 및 지표하 모델에서는 일반적으로 4가지의 모델구조를 찾아볼 수 있는데, 이들은 모두 지형(topography)을 기본으로 하고 있다: (1) 소위 균질한 소유역(homogeneous subcatchment)으로 구성하여 동일한 성질을 갖는 수문반응단위(Hydrological Response Units, HRUs)에 근거를 둔 모델; (2) 격자기반(grid-based)의 모델; (3) 불규칙삼각망(Triangular Irregular Network, TIN) 기반의 모델; (4) 등고기반(contour-based)의 모델이 그것이다. 이들은 Wood 등(1988)에 의하여 제안된 대표요소면적(Representative elemental area, REA)을 실현한 것이라 볼 수 있다. 이 절에서 보여주는 모델들은 일반적으로 물리적인 기반을 두면서 분포적인 매개변수들을 갖는 모델들이라 할 수 있다(Moore 등, 1993).

#### 2.1.1 HRU 모델(hydrological response units models)

수문학적 모델화에서 복잡한 수문과정을 다루는 전통적인 방법으로서 대상유역을 소유역 또는 보다

단순한 단위로 구분하는 방법을 사용하여 왔다. 이러한 접근 방법은 Finite Element Strom Hydrograph Model(FESHM) (Ross 등, 1979; Hession 등, 1987)에서 찾아볼 수 있다. 이 모델은 두 가지 유역구분방법을 제시하고 있다. 그 하나는 토양종류와 토지이용 또는 피복상태에 따라 결정하는 수문반응단위(HRU)로 유역을 나누는 것이다. 이러한 구분은 공간적으로 분포하는 초과강우량과 침투를 계산하기 위한 기본이 된다. 다른 하나는 지형을 기본으로 하여 유역을 내부적으로 연결된 지표면 흐름요소와 수로 그리고 지표면 흐름경로로 구분하는 것이다. 이로부터 HRU 면적가중 초과강우량은 각 요소별로 연속성을 가지면서 유역출구로 추적된다. 이러한 두 가지 방법의 한계는 초과강우량의 발생기작을 지표면흐름 추적기작과 분리하는데 있다. 이 두 기작간의 상호 작용과 반응은 실제로 발생하며, 때로는 상당히 중요하다(예, runoff-runon 문제). 사실 대부분의 수문·수질모델들이 1980년대 중반에 이와 같은 모델의 구조를 반영하지 않고 개발되었다.

다음의 세 가지 모델구조들은 기본적인 HRU 그리고 요소추적개념을 규모적으로 축소시키면서 혼합시킨 관점에서 생각할 수 있다. 계산요소를 계속 작게 만들어 나간다는 것은 각 단위별로 내부적으로는 균질하거나 균등하게 처리할 수 있다는 것이며, 수문의 공간적 변이가 각 단위간의 변이에 의해서 표현될 수 있음을 기대할 수 있다. 분할의 공간적 규모를 줄이면 줄일수록, 모델의 자료와 계산용량은 거의 지수함수적으로 증가하게 된다. 따라서 GIS와 고해상도를 갖는 모델간의 연계가 요구된다.

#### 2.1.2 격자기반의 모델(grid-based models)

유역을 격자 또는 셀 단위로 나누어 접근하는 것은 이제 동력학적 과정기반 수문모델들의 일반적인 구조로 인식되고 있다. 이러한 유형의 모델들은 ANSWERS(Beasley와 Huggins, 1982), AGNPS(Young 등, 1989), SHE(Abbott 등, 1986) 등이다. AGNPS는 반경험적 지표수 수질모

의모델로서 흐름추적은 수행하지 않는다. SHE는 분할흐름을 해석하기 위하여 파의 2차원 확산방정식을 적용하고 있다. ANSWERS는 최대 경사선을 기준으로 단위 셀내에서 분할 가중치를 적용하였다. 이와 같은 접근의 문제점은 흐름경로가 반드시 최대경사선을 따르지 않는다는 것이다. 따라서 흐름특성(저류심과 유속)을 규정짓는데 있어 이들을 물리적으로 해석하기 어렵다는 것이다. ANSWERS는 DEM에서 경사도와 그 방향을 발생시키기 위하여 ELEVAA라는 전처리 프로그램을 이용한다. Panuska 등(1991)은 지형기반의 매개변수 파일을 작성하기 위한 연계프로그램을 개발하여 격자기반의 DEM, 지형분석방법과 AGNPS를 결합시켰다. 지형기반의 속성들은 모델에서 요구하는 입력자료의 1/3을 차지하였다. 이러한 모델들이 격자구조를 사용하므로서 얻는 이득은 작물유형, 토지피복특성과 같이 픽셀단위로 원격탐사된 자료들을 사용할 수 있다는 것이다. 각 셀에서의 지형특성을 작물유형·토지피복 특성등과 결합시킨 상태에서 모델의 매개변수들을 평가할 수 있다.

Beven과 Kirkby(1979)는 지형을 고려하여 홍수를 예측할 수 있는 TOPMODEL을 개발하여 지금은 전세계적으로 널리 사용되고 있다. 이 모델은 유출기여지역의 개념을 적용하고 있으며, 지형과 토양특성을 고려하여 토양수분 그리고 포화지역의 변화를 예측한다(Beven, 1986). 이후 TOPMODEL은 Horton 지표유출을 고려할 수 있도록 개선하였다(Beven, 1986; Sivapalan 등, 1987). Beven과 Wood(1983), Beven 등(1984), Hornberger 등(1985), Kirkby(1986), Beven(1986)은 이 모델의 개발과 적용성에 대하여 언급하였다. Sivapalan 등(1987)과 Wood 등(1988)은 이 모델을 이용하여 수문유사성을 시도한 바 있다. 이들은 일련의 무차원 유사매개변수들을 개발하였으며, 이 중에는 Geomorphic Instantaneous Unit Hydrograph(Sivapalan과 Wood, 1990)을 적용하여 부분 유출기여지역(partial area runoff)을 설명할 수 있도록 사용되고 있는 규모적 토양-지형 매개

변수를 포함하고 있다. 유역 홍수반응에 있어 유사성과 규모문제에 대한 탁월한 연구는 Wood 등(1990)이 수행한 바 있다. Band와 Wood(1986, 1988)는 격자기반의 DTM을 사용하여 하천망으로 구성시킨 배수지역의 집합으로 전체 유역을 나눈 후에,  $\ln(As/\tan\beta)$ (여기서  $As$ 는 소유역별 비유역면적,  $\beta$ 는 경사각) 분리분포함수를 추출하였다. 상호 연계된 각 유역의 매개변수 분리화는  $\ln(As/\tan\beta)$ 분포의 실질적인 차이를 나타내어 유역간의 수문반응을 차별화시켰다. TOPMODEL기법은 격자기반에 근거를 둔 가장 전형적인 분석기법이기기는 하지만 등고기반의 분석에도 쉽게 적용시킬 수도 있다.

### 2.1.3 TIN 기반의 모델(TIN-based models)

TIN은 동력학적 수문모델화에 사용되어 왔다(예, Palacios-Velez와 Cuevas-Renaud, 1986, 1989; Silfer 등, 1987; Vieux 등, 1988; Maidment 등, 1989; Goodrich, 1990; Jones 등, 1990; Djokic과 Maidment, 1991; Goodrich 등, 1991). Vieux 등(1988)은 면의 세 경계선 중의 하나가 유선을 형성하고 이 중에서도 유출경계선은 하나만 존재하는 면을 발생시킴으로써 동력학적 모델화 과정에서 TINs 사용상의 문제점을 최소화시켰다. 그러나 이를 위해서는 등고선도를 이용하여 지형을 미리 파악하여야 하기 때문에 TIN 방법의 장점을 최대한 활용한다고 볼 수는 없다. 면간의 접합점만이 유선으로 형성되지 않을 수도 있는 보다 일반적인 경우의 면흐름을 해석하기 위해서는 경계조건의 변화(즉, 하나나 두 개의 유입·유출경계선)를 다양하게 고려하여야 한다. 이와 같은 조건에서 각각의 면에 대한 하류방향으로의 유입·유출을 계산하는 방법은 Silfer 등(1987)이 연구한 바 있다. Maidment 등(1989)은 Jones 등(1990)의 TIN기반 유역분할법을 이용하여 2차원 St. Venant 방정식으로 면흐름을 해석한 바 있다. Djokic과 Maidment(1991)는 도시지역에서의 홍수유출을 해석하기 위하여 흐름의 유입구와 배수망을 구성하므로서 TIN 지표지형모델과 GIS를 연계한 바 있다. Goodrich 등(1991)은 지표면을 TIN으로 표현하여

지표흐름을 예측하기 위한 2차원 운동과 직렬모델을 채택하였다. 이들의 방법은 경사가 가장 급한 방향으로의 등각회전에 기반을 두어 TIN면내의 유한요소분할을 수행한다. 이는 2차원영역에서 1차 연립방정식을 풀 수 있도록 한 것이다. TIN의 표현은 Palacios-Velez와 Cuevas-Renaud(1986, 1989)가 제안한 방법에서 시작되었다.

#### 2.1.4 등고기반의 모델(Contour-based models)

등고기반의 유역분할 및 지형분석방법은 분할자체가 수리학에 기본을 두고 있기 때문에 수문·수질모델들을 구성하는데 있어 자연스러운 방법을 제공하고 있다. 이는 근본적으로 벡터기법이며, Onstad와 Brakensiek(1968)이 유선 또는 유관분석이라는 용어로 제안한 것이 그 시초이다. 등고선은 등수두선으로 가정하고, 이에 직교하는 선이 유선을 형성한다. 등고선과 유선들의 인접한 쌍들로 각 요소경계가 이루어진다. 이와 같은 형태로 분할하여 유역내의 모든 흐름을 일련의 1차 방정식으로 표현하고 각 요소내에서는 1차원 흐름만을 고려한 유한차분식으로 해석할 수 있다.

TAPES-C(Moore 등, 1988b; Moore와 Grayson, 1991)와 TOPOG(Dawes 와 Short, 1988)와 같은 지형분석 프로그램들은 이와 같은 기법을 이용한 예이다. TOPOG는 TAPES-C에서 개발된 개념과 방법을 사용하고 있으며, 두 방법 모두 O'Loughlin(1986)의 연구로부터 시작되었다.

Kozak(1968)과 Onstad(1973)는 소유역에서의 분포적 유출거동을 시험하기 위하여 이와 같은 방법을 사용하였다. 두 경우 모두 유역분할은 수작업으로 수행되었다. Onstad와 Brakensiek(1968)과 Kozak(1968)은 매우 간단한 지형의 소유역을 대상으로, Onstad(1973)는 단순한 가상의 대칭유역을 대상으로 적용한 바 있다. Tisdale 등(1986)은 분포적 지표면 유출을 시험하기 위하여 음함수 형태의 1차원 운동과방정식으로 이 기법을 적용하였는 바, 원뿔 형태의 가상적인 유역을 대상으로 하여 정상상태

의 저류심과 유출량에 대한 해와 비교하여 좋은 결과를 얻은 바 있다. 이들은 2차원 유한요소 모델화기법에 의한 것보다 이 방법이 간단한 방정식을 이용하면서도 동일한 물리적인 특성과 정확도를 유지하는 상태에서 계산상으로도 빠르다는 것을 알아냈다. Moore 와 Grayson(1991), Moore 등(1990), Grayson(1990)은 등고기반의 요소망을 구축하고, 요소간의 지표하 및 지표흐름을 추적하기 위한 운동과방정식을 이용하여 유출기여지역과 Horton지역의 지표흐름을 모의할 수 있는 간단한 과정기반의 수문 모델을 제시하였다. 운동과방정식을 푸는데 있어, 이 모델들은 각 요소의 경사와 면적, 해당요소의 상·하류요소들의 폭과 흐름길이, TAPES-C 프로그램에 의하여 계산된 요소간의 연결성들을 이용하고 있다 (Moore 등, 1988b; Moore와 Grayson, 1991).

## 2.2 국외의 대표적인 분포형 수문·수질모델

분포형 유출모델은 유역의 공간적인 수문 변화량을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 유출수에 의해 이동되는 유사 및 화학물질의 양도 파악할 수 있다. 분포형 유출모델의 각종 매개변수는 유역의 지형, 토양종류, 식생 등에 따라 결정되므로 계측자료가 빈약하거나 전혀 없는 미계측유역에 적용하기가 용이하며, 유역의 일부 지역에 대한 인위적인 변화가 있는 경우에 따른 유출영향 평가를 할 수 있고 대응방안의 효과를 제시할 수도 있다.

분포형 유출모델과 관련된 최근의 연구동향을 살펴보면 소규모의 시험유역이나 실험실 규모에서 개발되어 적용성을 평가받은 많은 모델들이 있으며, 유역의 복잡한 지형특성을 충분히 고려할 수 있도록 GIS를 도입하는 경우가 증가하고 있다. 이렇게 개발된 모델들로는 미국에서 개발된 AGNPS 모델, ANSWERS 모델, DBSIM 모델, CASC2D 모델 등이 있고, 영국에서 개발된 IHDM 모델, TOPMODEL 모델, 영국과 프랑스, 덴마크가 공동으로 개발한 SHE 모델, 호주에서 개발된 THALES 모델 등이 있다. 이 중 SHE 모델은 그 구조가 가장 복잡하지만 각 수문과정 등이 모듈화되어 있고 상업

용으로 상품화되어 있다. 그리고 AGNPS 모델과 ANSWERS 모델은 소규모 유역에서 농업에 의한 비점오염원의 대책 수립에 많이 이용되고 있는 모델이다. 또한 DBSIM 모델과 TOPMODEL 모델은 유역의 지형에 의한 토양 내에서의 물의 이동을 모의하는 새로운 개념의 모델로, DBSIM 모델은 홍수예보에 이용되도록 시스템화하여 발표되기도 하였다.

본 절에서는 국내에서 그 활용성을 인정받고 있는 대표적인 분포형 모델인 AGNPS(Agricultural Non-Point Source pollution management), TOPMODEL(TOPography -based hydrological MODEL) 그리고 최근에 그 연구가 활발한 CASC2D모델에 한정하여 모델의 기본개념 위주로 간략히 소개하기로 한다(Singh, 1995; 김현준, 1995).

### 2.2.1 AGNPS(Agricultural Non-Point Source pollution model)

AGNPS 모델은 미국 농무성의 농업연구소(Agricultural Research Service)와 미네소타 환경보전국(Minnesota Pollution Control Agency) 및 토양보전국(Soil Conservation Service)에서 공동으로 개발하였는데, 수 acre에서 50,000 acre (200 km<sup>2</sup>) 크기의 농업용 유역에서 발생하는 유출량과 유출수의 수질 및 유사량 예측을 목적으로 개발되었다.

AGNPS 모델은 워크스테이션 UNIX용으로 개발되었으나 현재는 퍼스널 컴퓨터에서도 사용할 수 있도록 조정되어 있으며, 1987년에 개발된 이후로 계속 개선되어 현재 버전 5.0 및 최근에는 98버전도 발표하였다. 이 모델에서는 일단 유역이 잠재적인 오염문제를 가지고 있다고 판단되면 여러가지 유역관리기법을 적용하여 그 영향을 평가할 수 있는 개선방안이 제공되고 있다.

AGNPS 모델은 분포형 매개변수를 사용하는 사상 단위의 강우-유출 모의 모델이며, 정사각형의 셀 단위로 모의를 하되 유역의 크기가 2,000 acre(48 km<sup>2</sup>)을 넘는 경우는 셀의 크기를 40 acre(0.16 km<sup>2</sup>)로 제한하도록 권장하고 있다. 이 모델의 주 적용대상은

경작지가 많은 유역의 유출량, 유사량, 영양분(질소:N, 인:P)의 이송을 모의하는 것이다. 모델의 주요 성분은 수문부분과 유사운송 및 수질부분으로 되어 있으며 계산과정은 ① 유역 및 셀의 입력자료 처리, ② 각 셀 별로 수문, 수질, 유사 등의 성분 계산, ③ 셀에서 이동되는 유출 성분량 계산, ④ 유사는 입자크기에 따라 5 종류로 구분, ⑤ 유역의 출구까지 계산한 후 결과 출력 순이다.

### 2.2.2 TOPMODEL(Topography-based hydrological model)

TOPMODEL은 Kirkby(1976), Beven과 Kirkby(1976)에 의해서 기본 이론이 제시되었고 Beven(1979), Beven과 Kirkby(1979)에 의해 모델의 구조 및 보정 방법이 제시되었다. TOPMODEL은 수문학적 모델링 패키지가 아니라 지표수 또는 지하수에 대한 동적인 유출기여지역을 표현하는(분포형 또는 유사 분포형 방식으로 유역의 수문학적 거동을 나타내는) 개념적인 도구의 집합이라고 할 수 있다. TOPMODEL은 간단한 수문학적 이론의 가정에 근거하며 유역의 수문 반응을 표현하기 위해 보정될 매개변수의 수가 최소가 되도록 하고 있다. TOPMODEL은 두가지 목적을 가지고 있는데, 하나는 실용적이고 실질적인 예보와 연속모의모델의 개발이며, 다른 하나는 수문학적 과정과 규모와 현실 및 모델의 진행상의 문제가 연구될 수 있는 이론적 구조를 개발하는 것이다.

TOPMODEL은 유역의 지형과 토양에 따른 포화층에서의 흐름과 유출기여면적을 고려하여 유출계산을 수행하며 매개변수는 현장에서 측정하여 정할 수 있다. TOPMODEL은 강우와 증발 자료만 있으면 미세측 유역에도 적용이 가능하며 유역면적은 500 km<sup>2</sup> 정도까지 가능하다고 한다. TOPMODEL의 유출모의 과정은 차단저류와 침투저류 및 포화층의 저류 등 3개의 저류량으로 구성되어 있다. 증발은 3개의 저류량 모두에서 소모되며, 차단저류를 초과한 강우는 유출기여면적의 분포에 따라 지표유출의 형태로 나타나고 침투저류량과 포화저류량의 물은 회귀 흐름 및 기

저유출의 형태를 통하여 하천흐름에 기여한다.

### 2.2.3 CASC2D 모델

CASC2D는 강우분포도를 입력자료로 하여 유역의 수문학적 반응을 모의하는 물리적인 분포형 매개변수를 가지는 격자 (정사각형)기반의 2차원 부정류 및 초과침투(Hortonian)를 고려하는 수문모델이다.

이 모델은 ① 연속적인 토양수분 추적, ② 강우 차단 및 저류, ③ 침투, ④ 지표 및 하천유출 추적으로 구성되어 있다. 초기 CASC2D모델은 Green and Ampt 침투, 확산파(diffusive-wave) 지표 및 하천흐름의 추적을 포함하였다 (Julien 등, 1995). 가장 최근의 CASC2D 모델은 연속적인 토양수분 추적 및 유역규모의 유사운송 등을 포함하여 다양한 요소들이 추가되었다. CASC2D는 모델이 발표된 이후로, 미공병단 (U.S. Army Corps of Engineers)과 군 연구소 (U.S. Army Research Office)의 지원 하에 대단한 향상이 있어 왔다. 현재 진행되고 있는 내용으로는 2차원 지하수 모델과의 연계, 수질항목을 받아들일 수 있도록 호수, 습지, 저류지를 포함하는 과정, 그리고 알고리즘의 지속적인 향상 등이다.

실질적으로, CASC2D는 하천의 수문동력학적 부정류를 모의하기 위하여 연계된 물리적인 기반의 과정모듈들로 구성되어 있다. CASC2D와 미공병단의 HEC-1, HEC-HMS와 같은 범용적인 다른 모델간의 주요한 차이점은 유출의 개념적인 접근(예, 단위 유량도)이 없다는 것이다. 이는 CASC2D가 다른 모델들보다 뛰어나다는 것이 아니라, 전혀 새로운 방법으로 접근하고 있다는 것을 의미한다. CASC2D는 주어진 강우자료를 대상으로 유역의 유출을 평가하기 위하여, 질량 및 에너지 보존방정식, 선형모멘트 방정식을 사용한다. CASC2D는 사용자가 지정하는 해상도(격자크기)에 맞추어 공간적으로 해석이 가능하므로, HEC-1, HEC-HMS보다는 훨씬 많은 입력 자료를 요구하고 있다. CASC2D에서의 전형적인 격자크기의 범위는 30-150 m이다. 공간적인 분포형 모델링은 과거의 접근방법보다는 훨씬 많은 입력 자료를 이용하여 유역내 어느 격자점에서든지 원하는

수문학적 변수값을 결정할 수 있는 능력을 제공한다. CASC2D는 공간적으로 변화하는 유역 매개변수 또는 강우자료를 받아들일도록 구성되어 있다.

초기 CASC2D의 실행은 매우 많은 입력과 출력 조건을 가지는 복잡한 과정을 거치도록 되어 있었다. Brigham Young대학의 컴퓨터그래픽공학연구소에 의하여 개발된 미 국방성 WMS (Watershed Modeling System) 인터페이스는 이러한 CASC2D의 어려운 점을 해결하였다. 이 인터페이스는 사용자가 입력파일을 작성하는데 발생하는 어려운 점들을 해결하는 한편, 모델의 실행과정을 단계적으로 도와 주도록 설계되어 있어 매우 높게 평가되고 있다. WMS는 GIS의 전체 기능을 가지거나, 또는 가지도록 개발된 것이 아니다. WMS 인터페이스는 ARC/INFO와 GRASS GIS 시스템으로부터 직접 자료를 받아들여 CASC2D로 보낼 수 있도록 한 것이다. 특히 공개소프트웨어인 GRASS GIS는 CASC2D의 입력자료를 준비하는데 매우 도움이 된다. CASC2D는 모든 공간분포변수들을 저장하는데 GRASS ASCII 자료 파일형태를 취하고 있다.

## 2.3 국내의 분포형 수문모델 개발 현황

### 2.3.1 KIMSTORM(Grid-based Kinematic Wave Storm Runoff Model)

김성준(1998), 김성준 등(1998)은 격자 물수지 기법(Grid-based water balance technique)을 이용하여 지표흐름과 지표하 흐름을 모두 고려한 분포형 강우-유출모델(KIMSTORM)을 개발하고, 래스터GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 모델의 입력자료를 추출하는 모델의 전처리과정과 모델의 결과를 시간적·공간적으로 표현해 주는 후처리과정을 개발하였다.

개발한 격자기반의 운동과 강우-유출모델의 적용 가능성을 검토하기 위하여 임진강유역내의 연천댐 유역(1,875 km<sup>2</sup>)에 적용한 바 있다. 모델의 입력자료로는 수치고도모델, 하천도, 흐름방향도, 토양도, 토지피복도, 티센망도 등 6개의 도형자료를 이용하였다. '90년 및 '96년도에 발생한 홍수사상과 비교하였는

바, 모델의 결과는 양호하였다. 출력결과인 시간별 지표유출 분포도로부터 유역에서 발생한 유출양상을 공간적으로 확인할 수 있었다. 본 모델은 이 외에도 보청천유역, 홍보간척지역(Kim 등, 2000)에도 적용하여 그 적용성이 재차 입증된 바 있다.

KIMSTORM은 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 개개의 격자마다 유출해석을 위한 수문정보를 입력하여 격자별 물수지를 계산하므로써 유역의 전반적인 시간적·공간적 수문량을 파악하도록 하는 모델이다. Figure 1은 강우유출 계산시 본 연구에서 고려한 물수지 인자를 도시한 것이다.

본 모델은 C-언어를 이용하여 격자기반의 강우-유출 계산모델을 구성하고, 모델의 입력자료의 준비와 출력은 GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 모델의 전·후처리과정을 수행하므로써 모델의 유연성을 최대한 확보하도록 개발되었다.

본 모델의 구조적 흐름도는 Figure 2와 같다. 모델의 입력자료로는 유역의 수치고도모델, 흐름방

향도, 하천도, 토양도, 토지피복도, 티센망도를 사용한다. 본 모델은 이들 자료를 래스터이미지 분석용 GIS소프트웨어(GRASS, IDRISI)를 이용하여 ASCII 형식의 파일로 불러들인다. 모델은 수행되면서 유역의 시간적·공간적 유출심, 유출량, 토양수분 분포도 등을 주어진 시간간격으로 ASCII 파일형식의 도면으로 출력하며, 원하는 지점에서의 유출곡선을 텍스트파일로 출력한다. 이들 결과는 격자기반 GIS 소프트웨어의 형식으로 전환시켜 그래픽으로 표현이 가능하다.

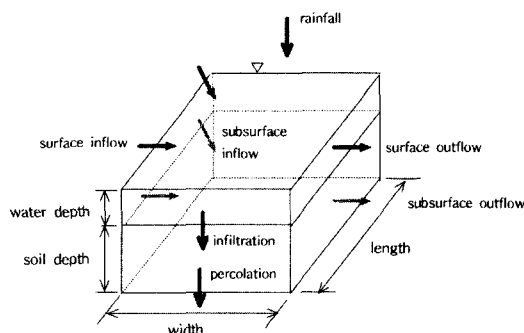


Figure 1. Grid-based water balance components

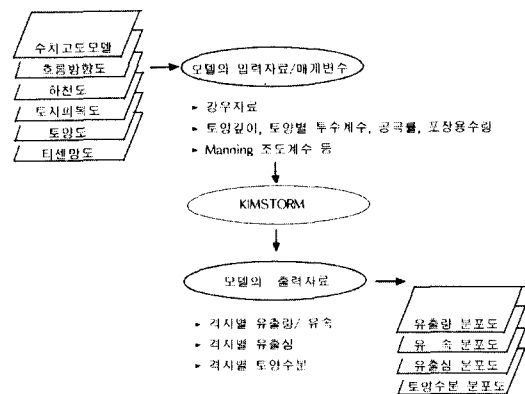


Figure 2. Schematic diagram of KIMSTORM

### 2.3.2 GRISMORM(Grid-based Soil Moisture Routing Model)

김성준 등(2000)은 격자 물수지 기법을 이용하여 유역내의 토양수분변화를 일단위로 추적할 수 있는 격자기반의 일유출모델을 개발하고, 래스터 GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 모델의 입력자료를 추출하는 모델의 전처리과정과 모델의 결과를 시간적·공간적으로 표현해 주는 후처리과정을 개발하였다. 본 모델은 단방향 흐름경로 알고리즘을 채택하였으며, 유역 유출이 선형저수지(linear reservoir) 개념을 따른다고 가정하였다. 개발한 격자기반의 일단위 토양수분 추적모델의 적용가능성을 검토하기 위하여 대청댐 상류에 위치한 보청천 유역의 일부인 이평교 지점(75.6 km<sup>2</sup>)을 대상으로 '95년 및 '96년도의 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서 자료를 이용하여 적용하여 보므로써 개발된 모델을 이용한 하천 일유출, 유역 토양수분 추적 및 지하수 함양량 추정의 효용성을 입증하였다.

격자 물수지는 유역을 일정한 크기로 분할한 상태에서 각 격자의 유입·유출을 계산하므로써 일별로 유역 전체에 대한 물수지를 파악할 수 있게 된다. Figure 3은 모델이 고려하는 물수지인자를 도시한 것이다. 모델은 각 격자별 지표흐름, 지표하에서 불포화 토양층흐름과 포화토양층 흐름의 세 가지 흐름에 대한 물수지를 모의한다. 격자마다 일단위의 토양수분의 변화를 계산하는데, 토양의 포화도에 따라 지

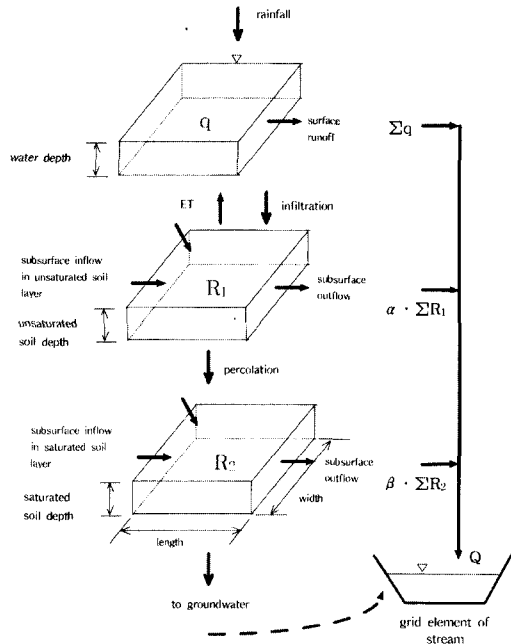


Figure 3. Grid-based water balance components

표유출이 발생하고 지하수로의 흐름이 발생된다. 지표흐름의 유입인자는 강우, 유출인자는 지표유출이고, 지표하 불포화 토양층흐름의 유입인자는 강우에 의한 침투, 주변격자로부터의 횡유입, 유출인자는 증발산, 격자의 횡유출, 포화토양층으로의 침투이며, 포화토양층 흐름의 유입인자는 토양층으로부터의 유입, 주변격자로부터의 횡유입, 유출인자는 격자의 횡유출이다. 임의 하천지점에서의 유출은 이론적으로 유역내에서 발생된 격자별 지표유출의 합과 하천을 따라 주변격자에서 하천격자로 유입되는 지표하유출의 합으로 계산할 수 있다. 한편 본 모델은 일단위로 모의되므로 유역에서 발생된 지표유출이 계산 하천 지점으로 도달하는 시간이 하루이내이어야 하며, 지표하 흐름방향은 지표흐름방향과 동일한 것으로 가정하였다.

### 2.3.3 GRIDET(Grid-based Evapotranspiration Estimation Model)

채효석 등(1999)은 인공위성 영상자료로부터 작

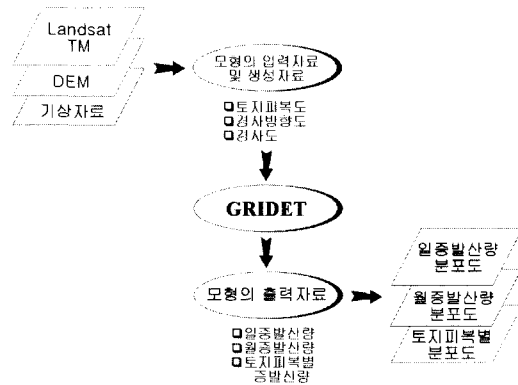


Figure 4. Schematic Diagram of GRIDET

성한 토지피복도에서 각 토지피복별로 알베도 값과 지중열 계수 등을 이용하고, DEM을 이용하여 일사량을 보정하여 유역의 공간적인 증발산량을 파악할 수 있는 격자형 증발산량 산정 모델을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 Morton법을 이용하는 보완관계식에 의한 실제 증발산량 산정식을 이용하였으며, 알고리즘의 타당성과 적용성을 검토하기 위하여 1995년도 보청천 유역에서의 토지피복별 일 증발산량을 계산하였다. 개발된 격자형 증발산량 산정 모델은 분포형 수문모델과 통합할 수 있는 장점을 가지고 있다.

GRIDET의 구조적 흐름도는 Figure 4와 같다. 모델의 입력자료로는 유역의 Landsat TM 자료로부터 추출된 대상 지역의 토지피복도, DEM과 이들로부터 추출된 경사도와 경사방향도, 그리고 평균해면기압, 평균풍속, 평균온도, 일조시간, 일사량 등의 일별 기상관측자료이다. 이러한 입력자료들은 영상처리용 소프트웨어(ER-Mapper, Arc/Info)로부터 ASCII 형태의 입력자료로 생성되며, 모델이 수행되면 유역의 일증발산량, 월증발산량 및 토지피복별 증발산량 등과 같은 자료들이 일별로 ASCII 형태로 출력된다. 또한, 대상 지역에 대한 일증발산량의 공간분포도가 격자기반 GIS 소프트웨어인 GRASS의 형식을 가지는 파일로 생성되어 그래픽 표현이 가능하다.

### 2.3.4 SIRG (Surface runoff, Infiltration, River discharge, Groundwater flow)



유동훈 등(1999)은 최근 합리식에 근거한 RRL이나 ILLUDAS, SWMM 모형 등의 장점과 기능들을 종합하고 단점들을 보완한 모형으로서 농경지 또는 산지유역이나 도시유역에 광범위하게 적용할 수 있는 지표수-지하수 유량변동 수치모형인 SIRG를 개발하였다. 이 수치모형은 지표면 유출(surface runoff-S), 침투(infiltration-I), 하천유출(river discharge-R)과 지하수 흐름(groundwater flow-G) 등을 각각 모의하는 4가지 모형을 Figure 5에 제시된 바와 같이 동적으로 연계한 하나의 통합모형이다. 모형의 적용 가능성을 검토하기 위하여 건설교통부 과제의 일환인 “지표수-지하수 연계운영 시스템 개발(1999)”을 통하여 강원도 양양 남대천 유역에 대한 모형의 정확성이 입증되었으며, 경기도 안성천 유역(“중소유역 홍수 예경보 시스템 구축”, 산학협동재단, 2000)과 경기도 왕숙천 유역(“새말천 홍수 범람 원인 조사 및 분석”)에 대한 홍수 유출 모의를 수행함으로써 다양한 규모와 특징의 유역에 대한 적용 가능성을 입증하였다.

현재 수자원 설계 실무에서 주로 이용하고 있는 공식은 SCS Method, 합리식, Nakayasu Method 등이고 유출모형으로 RRL(Road Research Laboratory) Model, ILLUDAS Model(1974) 등이 있다. SCS Method는 지형조건에 따라 결정되는 CN치에 의해 결정되는 방법이고 합리식은 유역에 발생하는 강우의 강우강도와 유역면적으로부터 유역 출구에서의 침투홍수량을 결정하는 단순한 공식으로 여러 단점과 불합리한 점들이 있지만 사용상 편의성

과 단순성 때문에 현재까지도 많이 이용되고 있다. RRL, ILLUDAS 등의 모형들도 유출량을 결정하는 기본 공식으로 SCS 방법이나 합리식을 사용하고 있다. 기존 유출모형인 RRL, ILLUDAS, SWMM 등은 지표면유출 산정시 유역면적의 크기에 제한이 있는 단점이 있는데, [SIRG]에서는 유역면적의 크기에 따른 유역계수와 수문곡선의 형상에 따른 형상계수를 도입하여 침투유량을 산정하여 유역의 크기에 따른 한계를 극복하였다.

기존 하천 해석프로그램인 HEC-RAS(1997)는 하천 상류의 유입곡선과 하류의 유출곡선을 경계조건으로 사용하며 대하천과 같이 잘 정비된 하천과 수로에의 적용에는 큰 문제점이 없으나 중소하천과 같이 정비가 불량한 자연형 하천에 대하여는 사행성을 충분히 고려하지 않아 문제점이 많다. 수문해석 프로그램인 HEC-HMS(1997)에서 지표면유출은 하천 유출 해석시 유입경계조건으로만 사용되고 측방유입량으로는 고려하지 않아 홍수시 중소하천과 같이 하천 측방으로 유입되는 지표면 유출에 의해 하천 유량과 수위가 급변하는 유역에서는 유량과 수위 산정에 적합한 결과를 산정하기 곤란하다. [SIRG]에서는 이와 같은 문제점을 해결하고자 지표면유출과 하천 유출을 각 구간별로 실시간으로 연계하여 유역 각 지점에서의 유출수문곡선과 하천 각 지점에서의 유량과 수위 변화를 동적으로 연계하여 해석하였다.

홍수유출량 산정에 있어 매우 중요한 유역의 형태와 지면의 상태를 대표하는 것이 도달시간이라 할 수 있다. [SIRG]에서는 도달시간의 이론적 유도과정을 재검토하고 도달시간 산정에 반드시 고려되어야 하는 인자들의 기준을 마련하였다. 도달시간의 이론적 유도는 지표면 유출을 개수로 흐름(층류, 완난류, 전난류)으로 파악하여 수행하였고 강우강도를 주요 인자로 고려하여 재현기간별 강우강도를 고려하여 도달시간을 산정하였다.

지하수 흐름은 침투류와 깊은 상관 관계가 있어 침투류 해석을 통한 지하수로의 시간별 유입량 산정이 필요하고, 지하수 흐름을 해석하기 위하여 유한차분법을 이용하였다. 또한 시간별 하천과의 연계를 통해

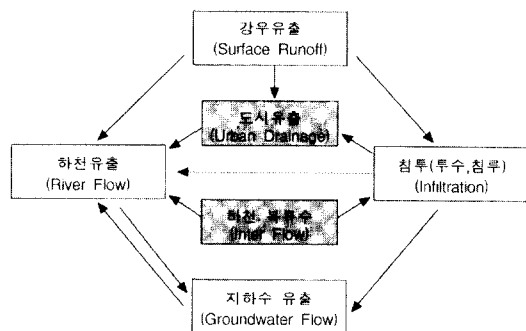


Figure 5. Schematic diagram of SIRG

지하수위와 하천수위의 변화를 제시하였다. 지하수 유출모형은 수심적분된 2차원모형을 개발하였으며, 1단계로서 x, y 방향의 격자 크기는 동일하게 구성하였다. 자유수면을 가진 지하수층으로 구성하여 상류부는 강우시 복류수유출로 처리하였다.

### 3. 분포형 수문·수질모델의 개발과 활용을 위한 방안

#### 3.1 한국형 분포형 모델 개발의 필요성

GIS와 수문·수질모델의 결합은 이 분야 모델개발의 새로운 장을 열고 있다. 특히 국내외의 분포형 수문·수질모델의 개발양상은 격자기반(grid-based)으로 그 방향을 잡아가고 있다. 국내에서 수자원 연구분야에 적용되고 있는 모델들을 보면 그 경향을 잘 파악할 수가 있다. 국외의 분포형 모델 중에서 현재 국내에서 그 적용이 활발한 모델들은 TOPMODEL, AGNPS, SWAT 등이다. 이들 분포형 모델들이 활발하게 적용되는 가장 큰 이유 중의 하나는 기존의 총괄형 모델에서는 불가능하였던 유역내 수문·수질 거동의 시간적·공간적 분포상황을 파악할 수 있다는 것이라고 할 수 있다. 즉 유역의 어느 지역에서 문제가 발생되어 이들이 궁극적으로는 어떻게 하천의 유량과 수질에 영향을 미치는지를 파악하므로써 유역단위(watershed scale)의 계획(planning), 관리(management), 복원(restoration) 등의 문제를 해결할 수 있다는 것이다.

한편 이 모델들은 우리나라의 지형조건 및 토지이용조건에 적합한지 의문을 가져볼 필요가 있다. 우리나라는 토지이용의 형태상 외국에서는 거의 찾아볼 수 없는 논(paddy field)이 하천주변에 산재해 있는 특징을 가지고 있다. 따라서 논에서의 수문·수질 거동을 고려하는 우리나라 고유의 모델 개발 또는 기존 외국모델의 수정이 요구된다. 또한 상기의 모델들은 중·소규모의 농업유역(수십km<sup>2</sup> ~ 수백km<sup>2</sup>)에 적용하도록 개발된 모델들이다. 따라서 도시유역에서의 수문·수질거동을 적절하게 표현할 수 있는 모델 그리고 중·대유역 단위(수백km<sup>2</sup> ~ 수천km<sup>2</sup>)의 모델개발도

요구된다.

기상분야에서는 RS, GIS를 이용한 전지구적 대기 순환모델(General Circulation Model: GCM)에 집중적인 연구가 진행되고 있다. 이는 미래 지구의 다양한 기후변화 시나리오에 의한 지구자원의 변동 상황을 예측하고, 이에 대한 범세계적인 차원의 대책 수립을 지원하기 위함이다. GCM에 사용되는 계산 격자의 크기는 2°×2.5°(위도×경도)로 그 규모가 상당히 크다. 따라서 GCM과 같은 전지구적 규모(global-scale)의 모델 결과를 지역적/구역적 규모(regional/local-scale; 수문학적인 측면에서는 광역적 규모; meso-scale)의 수문모델과 결합하기 위해서는 공간수문학(Spatial Hydrology)의 근본 문제인 규모(scale)와 해상도(resolution)와 관련된 다양한 연구가 필요하다.

#### 3.2 GIS자료의 공유 및 활용문제

분포형 수문·수질모델들을 적용하기 위해서는 우선 수자원관련 GIS자료의 구축과 더불어 이들 GIS 자료들을 모델링에 적합하게 가공하여야만 한다. 그러나 지금까지는 이러한 GIS자료들을 개인적으로 구축해야 하는 어려움과 더불어 구축된 자료들을 어떻게 다루어야 하는지 그 방법론에 있어 표준화에 대한 연구가 없었던 것이 사실이다. 그러나 이제는 NGIS에서 구축한 자료들을 구입하여 사용할 수 있는 단계에 이르렀으며, 한국수자원공사에서는 수자원관리종합정보시스템(Water Resources Management Information System: WAMIS)을『기초자료 관리 시스템』,『분석 시스템』 및『정책지원 시스템』의 3분야로 구분하여 추진하고 있으며, 전체를 단기, 중기 및 장기계획의 3단계로 설정하여, 1단계인 1999년까지는 우선적으로 기초자료 관리시스템 구축을 완료하였으며, 2단계로 2000~2005년(6년)까지 분석시스템을 개발하고 최종단계인 2006년~2011년(6년)에는 기초자료관리 및 분석시스템을 연계하여 수자원 정책지원시스템을 구축하는 것으로 추진하고 있다. 이 시스템의 최종목표는 물관련 전기관을 대상으로 물정보 인프라를 구축하여 국가수자원의 정보

관리체계를 완성하므로써 궁극적으로는 전문가, 공공기관, 국민이 각각 수준별로 요구하는 다양한 수자원 정보들을 신속하게 지원·서비스하는 것이라고 할 수 있다. 따라서 이 시스템의 개발이 진행됨에 따라 모델의 개발 또는 적용에 필요한 다양한 수자원관련 GIS주제도들이 수문단위지도(Hydrologic Unit Map) 기반하에서 제공될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

지난 수십년간 지구환경에서의 유체와 오염물질흐름을 지배하는 과정을 좀 더 이해해 보려는 노력과 더불어 컴퓨터 성능의 엄청난 향상은 수문·수질 모델링 연구를 급속히 팽창시켜 왔다. 이 기간동안 수문·수질모델링에 대한 새로운 방법적인 접근이 나타났고, 수많은 연구 프로그램들이 전 세계로 확산되었다.

지금까지 개발된 수문·수질 모델들은 각기 새롭고 흥미로운 방법으로 복잡한 수문과정을 검토하기 위한 기반을 제공하여 왔다. Horton, Saint Venant, Chow와 같은 학자들의 선구자적인 노력에 힘입어 수문모델링 분야는 그 발전을 거듭해 왔으며 지금도 다양한 사용자들이 그들만의 독특한 사회를 형성하고 있다.

그러나 비록 지난 20여년 동안 수문·수질 모델들이 나름대로 그 역량을 발휘하여 왔다 할지라도 사용자들의 기대는 따르지 못했던 것 같다. 다시 말하면 수문·수질모델의 사용자들이 새로운 모델들을 만났을 때 현실성이 없다는 불평을 늘어 놓는다. 따라서 모델 개발자들은 최근의 새로운 기법(지리정보시스템, 원격탐사, 객체지향 프로그래밍, 소프트웨어 공학 등)들을 도입함으로써 사용자들에게 보다 나은 기능을 갖춘 수문·수질모델을 제공할 필요가 있다.

수문·수질에서 분포형 모델들은 Morton(1993)이

“조정모델(mediating model)”이라 정의한 바 있는 영역에 속한다. 이들은 그럴듯한 사실에 근거하여 정량적인 예측을 가능하게 한다. 이제 수문·수질분야에서 분포형 모델링은 연구초반에 생각했던 것보다는 그렇게 나쁘지 않다는 것이다. 이미 언급한 바와 같이 유역규모에서 수문 및 하천수질 거동 등을 예측하는데 있어 성공적으로 평가받고 있는 TOPMODEL, AGNPS, MIKE SHE, CASC2D, KIMSTORM 등과 같은 모델들이 그 예라 할 수 있다.

이제 당면과제는 우리나라 실정에 맞는 다양한 목적을 위한 분포형 모델들을 개발하는 것이다. 또한 이들 모델들을 어떻게 하면 보다 편리하고도 실용적으로 활용할 수 있겠는가를 생각해야 할 때이다. 이들 모델을 사용하여 원하는 결과를 신속하게 얻기 위해서는 수자원분야에서 어떠한 GIS자료(수자원분야에서의 프레임워크 자료)가 필요하며, 또한 이들 GIS자료들을 어떻게 가공하여 준비해야 하는지에 대한 표준화가 필요하다. 자료의 표준화는 모델 개발자와 사용자에게 필수불가결한 조건이라고 말할 수 있다.

한편 모델의 적용가능성 여부(기존/개발 모델의 보정 및 검증)를 판단하기 위해서는 현장 관측자료의 중요성을 간과해서는 안된다. 즉 하천유량관측과 더불어 유역에서의 증발산량, 토양수분, 지하수위, 수질 등과 관련된 자료들의 관측이 병행되어야 할 것이다. 이는 분포형 모델의 미래뿐만이 아니라 수자원 전 분야, 나아가서는 GIS 기술자체의 진일보 발전하는 계기가 될 것임을 확신한다. 따라서 이를 위하여 “21세기 수자원 프론티어 사업”에서 학계 및 수자원 관련기관 등이 의견수렴하여 권역별 대표유역의 선정(또는 기존 대표유역의 재 설계) 및 현장관측자료의 장기적이고도 체계적인 수집, 관리 및 정보화에 관한 일련의 연구들이 추진되기를 기대하는 바이다. ●

〈참고문헌〉

건교부. (1999). 지표수-지하수 연계운영 시스템 개발.

김상현. (1997). "인공배수구역에서의 TOPMODEL의 적용." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제5호, pp. 539-548.

김상현. (1998). "확장 TOPMODEL의 영역화 민감도 분석." 한국수자원학회논문집, 제31권, 제6호, pp. 741-756.

김성준. (1996). "농촌소유역의 하천수질관리를 위한 GIS응용." 한국GIS학회지, 제4권, 2호, pp. 147-157.

김성준. (1998). "격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(I)-이론 및 모형-." 한국수자원학회논문집, 제31권, 3호, pp. 303-308.

김성준, 채효석, 신사철. (1998). "격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(II)-적용예-." 한국수자원학회논문집, 제31권, 제3호, pp. 309-315.

김성준, 채효석. (1999). "격자기반의 토양수분추적모형 개발: 보청천유역 사례연구." 한국GIS학회지, 제7권, 제1호, pp. 39-48.

김성준, 채효석. (2000). "격자기반의 토양수분추적에 의한 지하수함양량 추정기법 개발." 한국수자원학회논문집, 제33권, 제1호, pp. 61-72.

김진택. (1995). 농업비점원 오염모형을 위한 지리정보시스템 호환모형의 개발 및 적용. 서울대학교 박사학위논문.

유동훈, 이정영. (2000). "지표면-하천 유출의 연계 수치모형." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 65-70.

유동훈, 오윤창. (2000). "지표면-지하수의 연계 수치모형." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 359-364.

유동훈, 이정영. (2001). "지표면-하천 유출의 연계 수치모형." 한국수자원학회논문집, 제34권 제1호, pp. 91-103

유동훈. (2001). "새말천 홍수 범람 원인 조사 및 분석", 한국수자원학회.

최진용. (1996). 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문.

김현준. (1995). 강우예보의 시공간 특성을 고려한 홍수예보모형의 개발. 한국건설기술연구원.

조홍제, 조인률, 김정식. (1997). "TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한 연구." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제5호, pp. 515-526.

채효석, 김성준, 정관수. (1999). "격자기반의 일 증발산량 추정모형 개발." 한국수자원학회논문집, 제32권, 제6호, pp. 721-730.

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.O., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986). "An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen (SHE)." J. of Hydrology, Vol. 87, pp. 45-59.

Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979). "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology." Hydro. Sci. Bull., Vol. 24, pp. 43-49.

Beven, K.J. (1996). "A Discussion of Distributed Hydrological Modelling." Distributed Hydrological Modeling, Abbott M.B. and Refsgaard J.C. (eds.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 255-278.

Kim, Seong J. and Steenhuis, T.S. (1998). "Grid-Based Variable Source Area Storm Runoff Model." Hydroinformatics 98, August 24-26, 1998, Copenhagen, DK, pp. 1383-1390.

Kim, Seong J., Yoon C.G., and Kim Sun J. (2000). "Development of grid-based soil-water erosion and deposition model (KIMEROM)." Int'l Annual ASAE meeting, July 9-12, 2000, Milwaukee, Wisconsin.

Maidment, D.R., Djokic, D., and Lawrence, K.G. (1989). "Hydrologic modeling on a triangulated irregular network." Transactions, American Geophysical Union, Vol. 70, p. 1091.

Moore, I.D., Turner, A.K., Wilson, J.P., Jenson, S.K., and Band, L.E. (1993). "GIS and Land-Surface-Subsurface Process Modeling." Environmental modeling with GIS, Goodchild, M.F., Parks B.O., and Steyaert L.T. (eds.), Oxford University Press, New York, NY, pp.

- 
- 196-230.
- Morton, A. (1993). "Mathematical models: questions of trustworthiness." *Brit. J. Phil. Sci.*, Vol. 44, pp. 659-674.
- Singh, V.P. (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*, WRP, Colorado.
- Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., and Abderson, W.P. (1989). "AGNPS: a nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds." *J. of Soil and Water Conservation*, Vol. 44, pp. 168-173.