

## 격자기반의 개념적 수문모형의 개발

## Development of Grid-Based Conceptual Hydrologic Model

김 병 식\* / 윤 선 규\*\* / 양 동 민\*\*\* / 권 현 한\*\*\*\*

Kim, Byung-Sik / Yoon, Seonkyoo / Yang, Dong-Min / Kwon, Hyun-Han

## Abstract

The distributed hydrologic model has been considerably improved due to rapid development of computer hardware technology as well as the increased accessibility and the applicability of hydro-geologic information using GIS. It has been acknowledged that physically-based distributed hydrologic model require significant amounts of data for their calibration, so its application at ungauged catchments is very limited. In this regard, this study was intended to develop a distributed hydrologic model (S-RAT) that is mainly based on conceptually grid-based water balance model. The proposed model shows advantages as a new distributed rainfall-runoff model in terms of their simplicity and model performance. Another advantage of the proposed model is to effectively assess spatio-temporal variation for the entire runoff process. In addition, S-RAT does not rely on any commercial GIS pre-processing tools because a built-in GIS pre-processing module was developed and included in the model. Through the application to the two pilot basins, it was found that S-RAT model has temporal and spatial transferability of parameters and also S-RAT model can be effectively used as a radar data-driven rainfall-runoff model.

**Keywords** : conceptually distributed hydrologic model, radar rainfall, S-RAT, parameter, temporal and spatial transferability

## 요 지

분포형 수문모형은 컴퓨터 하드웨어의 급속한 발전과 GIS를 이용한 수문지리공간정보의 접근성 및 활용성 증가에 따라 근래에 많은 발전을 이루게 되었다. 하지만 물리기반의 분포형 수문모형은 입력자료 구축 및 모형구동에 많은 시간과 노력이 필요하며 수문자료가 불충분한 미계측 유역에서는 모형의 구축이 어렵다는 한계점을 지니고 있다. 이에 본 논문에서는 개념적 격자 물수지 기법을 이용한 개념적 분포형 수문모형 S-RAT을 개발하였다. S-RAT 모형은 집중형 수문모형의 자료구축의 간편성과 분포형 수문모형의 공간적 유출해석 능력을 동시에 만족할 수 있으며 격자기반 레이더강우자료를 활용할 수 있다. 또한 전처리과정 및 유역의 지형자료 추출 기능을 탑재함으로 상용 GIS 분석 도구들에 대한 의존성이 없는 장점을 가진다. 본 논문에서는 도시유역인 중랑천 유역과 산지유역인 내린천 유역 적용을 통해 S-RAT 모형의 유출모의능력 및 매개변수의 시공간적 전이성을 확인하였으며 지상강우와 레이더강우의 입력 자료로써의 활용성을 확인하였다.

**핵심용어** : 개념적 분포형 수문모형, 레이더 강우, S-RAT, 매개변수, 시공간적 전이성

\* 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 수석연구원·공학박사 (e-mail: hydrokbs@kict.re.kr)  
Senior Researcher, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology

\*\* 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 연구원 (e-mail: skyoon@kict.re.kr)  
Researcher, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology

\*\*\* 노아솔루션 기술연구소 소장 (e-mail: ydm@noaa.co.kr)  
Director, Institute of Technology, NOAA Solution

\*\*\*\* 교신저자, 전북대학교 토목공학과 조교수·공학박사 (e-mail: hkwon@jbnu.ac.kr)  
Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, 664-14 1Ga Deokjin-dong Jeonju-si Jeonbuk, Korea

## 1. 서 론

수문순환의 과정을 해석하고 예측하는 것은 과거로부터 지금까지 많은 수문학자들의 가장 중요한 과제 중 하나라고 할 수 있으며 이 중 단기간에 발생하는 호우사상에 대한 유출해석은 홍수관리 측면에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 수문모형은 물순환 과정에서의 유역의 유출현상을 모의하는 수학 모형으로서 유출 거동 모의 방법과 유역의 공간적 특성변화를 고려하는 방법에 따라 크게 집중형 수문모형 (lumped hydrological model)과 분포형 수문모형 (distributed hydrological model)으로 구분할 수 있다. 1960년대 중반 이후 강우-유출 관계를 모의하기 위하여 컴퓨터를 이용하기 시작하였으며, 최근 들어 지형정보시스템의 등장과 컴퓨터 계산 능력의 두드러진 발달과 더불어 수문모형도 집중형 모형에서 분포형 모형으로 발전하고 있는 추세이다. 특히, 분포형 수문모형에 관한 연구는 1990년대에 들어 인공위성자료나 레이더 자료의 활용성이 높아지면서 활발해지기 시작하였으며, 최근에는 컴퓨터 성능의 급격한 발달과 수치해석 기법의 발달로 많은 발전을 이룩하였다.

유출해석 과정은 시공간적으로 그 분포가 변동하기 때문에 현실적으로 지표유출과 지표하유출거동을 현장 측정한다는 것은 어려우며 실제로는 모형화를 통하여 그 흐름과 양을 파악하게 된다. 분포형 수문모형은 집중형 수문모형과는 달리 수치지형자료를 이용하기 때문에 유역의 내부의 어느 점에서든지 유출모의가 가능하며 인접 격자의 강우, 침투 등의 계산치를 이용하여 물수지를 계산하게 된다. 분포형 수문모형은 지형, 토지이용, 토양 그리고 고해상도의 격자강우에 대한 정보가 없는 유출량의 공간적 분포를 예측한다는 것은 불가능하다.

국외에서는 이미 적용성을 평가 받은 다수의 분포형 유출 모형들이 있으며 유역이 지닌 지형 특성을 충분히 고려할 수 있도록 지리정보시스템 (GIS)을 도입하는 경우도 증가하고 있다. Julien and Saghafian (1991)은 강우와 지형의 지리학적 변화, 토양의 분포 등을 모의할 수 있는 모형을

제안한 후 Molnar and Julien (2000)이 유역면적에 따른 적용성을 검토하였으며, Sharif et al. (2002)은 레이더 강우자료에 관한 불확실성에 관한 연구를 수행하였다. Abbott et al. (1986a, b)은 강우, 차단, 증발산, 침투량에 대한 고려와 2차원 지표류 유출해석, 지하수 유출을 포함한 강우-유출모형을 제시하였으며, 이모형은 현재 MIKE SHE의 이름으로 DHI에서 보완되고 있다. Moore and Grayson (1991)은 수치고도자료와 원격탐사자료를 이용하는 물리기반의 모형에 대하여 기술하였으며 Vflo<sup>TM</sup> (Vieux et al., 1990; Vieux, 2001), CASC2D (Julien and Saghafian, 1991; Ogden and Julien, 1994; Julien et al. (1995)), Systeme Hydrologique European (SHE)(Abbot et al., 1986a, b) 등이 결정론적 물리기반의 모형에 대하여 소개한 바 있다.

일본에서는 격자기반의 분포형 장기유출 모형인 Hydro-BEAM (Hydrological River Basin Environment Assessment Model)이 1998년부터 개발이 진행되고 있으며 (박진혁과 허영택, 2008), 토목연구소 (2002)에서는 침투, 증발산, 지표면 유출, 중간유출, 지하수 유출 등을 모의할 수 있는 격자기반의 분포형 수문순환 모형인 WEP (Water and Energy transfer Processes)을 개발하였다. WEP 모형은 국내에서 청계천 유역의 물순환 해석에 적용되고, 도시하천 유역의 물순환 해석을 위한 적용성이 검토된 바 있다(노성진 등, 2005).

국내 연구동향을 간단히 살펴보면 김성준(1998)은 유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 전체 유역에 대한 물수지를 계산하는 KIMSTORM (KInematic wave STOrm Runoff Model)을 개발한 바 있으며, 최현상 (2001)은 2차원 분포형 강우-유출모형을 개발하였다. 최근 최윤석 등 (2008)은 유한체적법을 이용한 2차원 격자기반의 분포형 모형인 GRM을 개발하여 HyGIS 시스템과 연계할 수 있도록 하였다. GRM은 지표면 유출과 하도 유출의 해석을 위해서 운동과 방정식을 이용하고 있으며, 침투량 산정은 Green-Ampt 모형을 이용하고 있다.

분포형 수문모형은 집중형 수문모형과는 달리 모형의 매개변수를 평균화하는 것이 아니라 유역의 특성을 충실히 표현할 수 있도록 입력자료를 구성한다. 특히, 물리적 기반의 분포형 수문모형은 일반적으로 집중형 또는 준 분포형 수문모형에 비해 많은 계산시간이 필요하고, 우리나라 산악지역의 자연유역처럼 수문자료가 불충분하거나 미계측 유역이 존재하는 경우에는 실무에서 물리적-분포형 모형을 이용하여 유출해석을 하는데 있어 많은 한계와 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 개념적 격자 물수지 기법을 이용하여 집중형 수문모형의 자료구축의 간편성과 분포형 수문모형의 공간적 유출해석 능력을 동시에 만족할 수 있는 그리고 격자기반 레이더 자료를 그대로 입

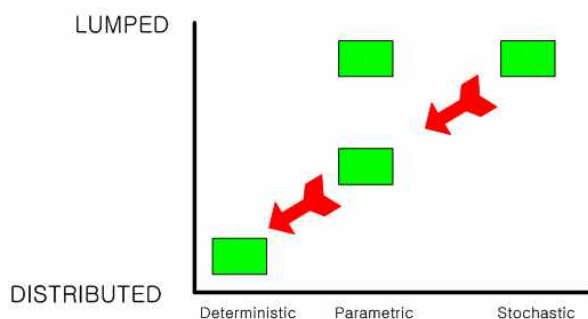


Fig. 1. Development of Hydrologic Model

력하여 활용할 수 있는 격자기반의 개념적-분포형 수문 모형을 개발하였다. 또한 본 논문에서는 개발된 모형을 국내 도시구역 및 산지구역에 적용하여 그 적용성을 검토하였다.

## 2. S-RAT (Spatial Runoff Assessment Tool) 모형의 개발

### 2.1 모형의 개요

본 논문에서 제시한 격자기반의 개념적 분포형 수문 모형 (이하 Spatial Runoff Assessment Tool, S-RAT)은 GUI 환경을 구현하기 위해 C# 언어 기반으로 개발하였다 (Fig. 2). 먼저 GIS 자료를 이용하여 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 개개의 격자마다 시간간격별 개념적 물수지를 계산함으로써 유역의 시간적·공간적 유출량변화를 모의하도록 설계되었다. 기존 대부분의 분포형 수문모형들이 지형학적 입력자료들을 추출하기 위해 Arc 관련 소프트웨어 또는 IDRIS 등과 같은 GIS 관련 상용 도구에 의존하여 전처리 과정을 수행해야 하는 번거로움이 있으나 S-RAT은 TOPAZ의 공개 소스를 이용하여 개발된 DEM 전처리과정을 통해 유출흐름방향도, 하천망도, 유역경사도 등의 입력자료를 추출하고 바로 유출모의 단계로 이행되기 때문에 자료구축에 있어서 매우 간편한 장점이 있다. 또한 S-RAT 모형은 격자기반 레이더 강우자

료를 GIS 격자와 동일하게 입력할 수 있도록 개발되었다. Fig. 3은 본 모형의 분석 흐름도를 나타낸 것이다. 모형의 입력자료인 유역의 수치지형도, 토양도, 토지이용도는 ASCII 격자 형식의 파일로 입력하게 되며 DEM으로부터 지형적 매개변수를 생성한다. 또한 토양도와 토지이용도로부터 각 격자별 CN 값 및 조도계수 격자자료를 생성한다. 이렇게 생성된 유역의 지형학적 자료와 함께 입력된 강우자료 및 온도자료로부터 유출 및 추적계산을 수행하여 최종적으로 모의지점의 유출모의자료를 생성하게 된다 (Fig. 3).

### 2.2 모형의 기본 이론

#### 2.2.1 GIS 자료를 이용한 수문지형학적 인자 추출

(1) DEM 자료의 함몰부 (sink)와 평탄지역 (flat area) 제거를 위한 전처리

DEM을 이용하여 수문지형학적 인자를 산정하기 위해서는 고도차로 인한 경사의 함몰부 (sink), 평탄지역 (flat area)을 제거하여야 한다. 이러한 부분을 제거하지 않으면 유로 (flow direction)의 형성이 불가능하다. 일반 DEM과 수문용 DEM을 비교하면 Table 1과 같다.

DEM이 가질 수 있는 기본적인 오류인 sink와 flat 같은 오류를 제거하지 않을 경우 원활한 흐름방향 분석이 이루

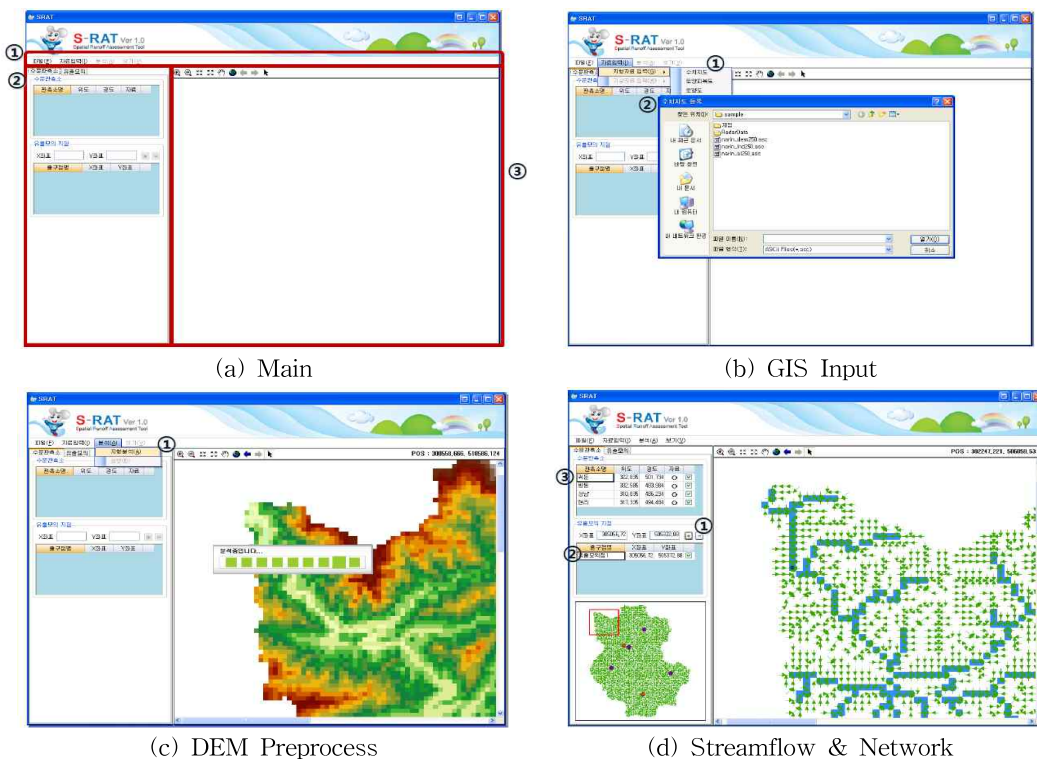


Fig. 2. GUI in S-RAT

어지지 않는다. sink란 8개의 흐름방향 격자 (flow direction grid) 중 하나의 흐름방향을 할당할 수 없는 흐름을 갖는 셀들의 집합이거나 한 셀을 나타내는 것으로 즉, 흐름이 한 곳으로 모여 정지하는 지점을 의미한다. S-RAT 모형에서는 원시 DEM에 있는 sink와 flat을 제거하기 위해 filling 알고리즘 (Jenson and Domingue, 1988; Martz and Jong, 1988)을 사용하였다.

(2) 흐름방향 및 경사 추출 및 흐름누적 산정  
S-RAT 모형에서는 각 격자별 흐름방향을 계산하기 위해 8방향 (이하 D-8 방법)을 적용하였고 (Band, 1986; Tarboton, 1997) 이를 바탕으로 흐름방향 및 경사도를 추출하였다.

DEM의 각 격자에 흐름벡터가 할당되면 각 격자에 해당하는 하천의 기여배수면적 (Contribution drainage area)이 결정된다. Fig. 4와 같이 흐름벡터의 경로를 따라 배수

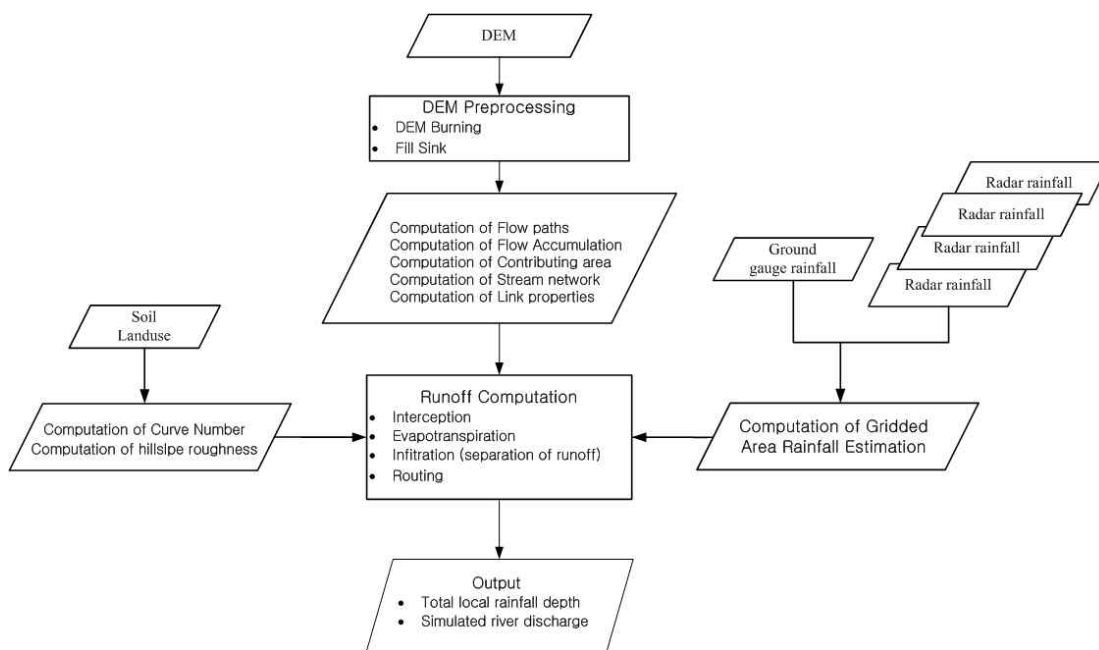


Fig. 3. Flow Chart of Components in S-RAT

Table 1. Comparison of Normal DEM and Hydrologic DEM

구 분	일반용 DEM	수문용 DEM
차이점	함몰부, 평지가 존재함	함몰부, 평지가 존재하면 안 됨
사용목적	도로설계, 토량 산출	수문학적 용도

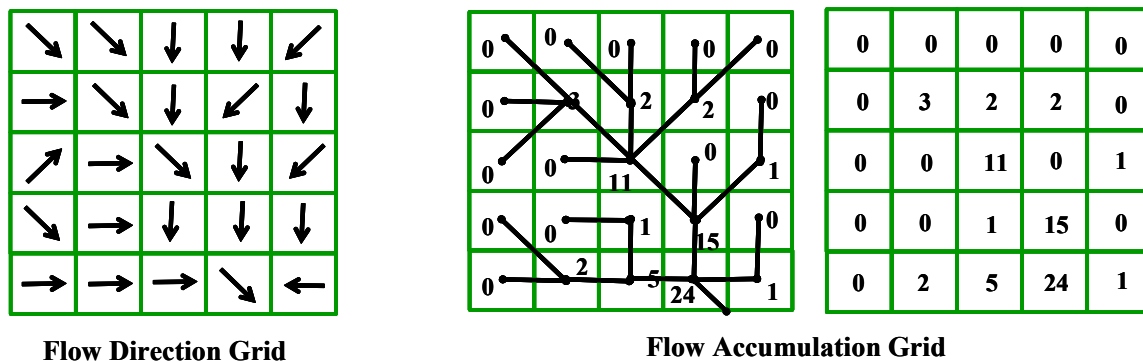


Fig. 4. Analysis of Flow Direction & Flow Accumulation

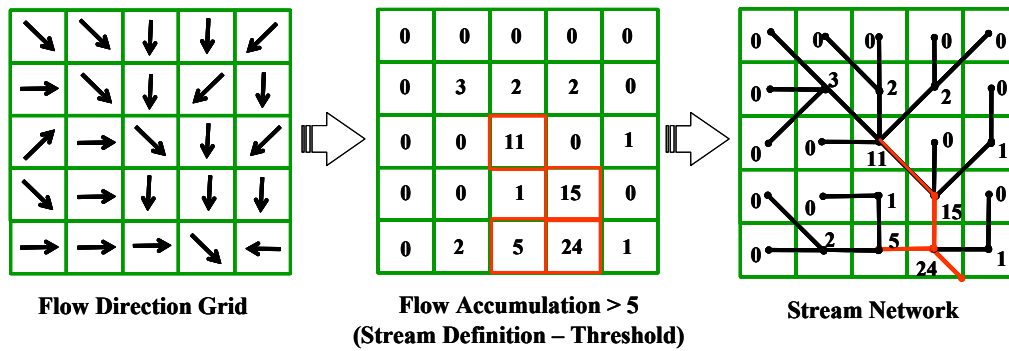


Fig. 5. Formation of Stream Network Determined by Threshold

면적이 1개소씩 증가되고, 각 격자에서 배수면적의 값이 누적된다. 이때 누가되는 값을 흐름누적값 (flow accumulation value)이라고 한다.

(3) 하천망 분석

유역 내에서의 하천망은 각 격자로부터 묘사되는 것으로, 유역 내의 모든 격자는 Fig. 5와 같이 임계값 (threshold)보다 큰 경우에만 하천망으로 구분할 수 있다.

2.2.2 수문요소의 산정

(1) 격자별 면적 강우량의 산정

본 모형은 유역 내에서의 강우의 공간적 변동성을 고려하기 위해 두 가지 방법을 이용하여 격자 기반의 공간 강우장을 생성한다. 먼저 지점강우자료의 경우 관측소의 위치정보 (위도, 경도, 고도)와 각 격자의 위치정보를 이용하

여 Thiessen 방법 또는 역거리법을 이용하여 격자별 강우량 값을 생성한다. 레이더 강우의 경우에는 GIS 자료와 동일하게 격자로 입력되기 때문에 그대로 사용된다.

(2) 증발산량의 산정

잠재증발산량은 Radiation 방법 (Doorenbos et al., 1984)을 이용하여 산정하였다. 이 방법은 Penman-Monteith 방정식을 간략화한 것이며 Radiation 방법을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E_p[t, (i, j)] = a + bT[t, (i, j)]N(i)W_{ta(i)} \quad (1)$$

여기서, a와 b는 radiation 방법의 회귀계수,  $N(i)$ 는 월 평균 최대일조시간,  $W_{ta(i)}$ 는 고도별 보정계수

$N(i)$ 과  $W_{ta(i)}$ 는 Doorenbos et al. (1984)이 제시한 값을 모형 상수화하여 이용하였다 (Table 2 and 3 참조).

Table 2. Mean Daily Duration  $N(i)$  of the Maximum Possible Sunshine Hours for Different Months and Latitudes (Doorenbos et al., 1984)

Nor lats	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
South lats	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
50	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14	12.6	11	9.7	8.9
42	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.6	11.1	9.8	9.1
40	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15	14.7	13.7	12.5	11.2	10	9.3
35	10.1	11	11.9	13.1	14	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30	10.4	11.1	12	12.9	13.6	14	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25	10.7	11.3	12	12.7	13.3	13.7	13.5	13	12.3	11.6	10.9	10.6
20	11	11.5	12	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15	11.3	11.6	12	12.5	12.8	13	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10	11.6	11.8	12	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5	11.8	11.9	12	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12	11.9	11.8
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

Table 3. Values of the Weighting Factor  $W_{ta(i)}$  at Different Altitudes (Doorenbos et al., 1984)

고도(m)	온도																			
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
0	0.43	0.46	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.71	0.73	0.75	0.77	0.78	0.85	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86
500	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.6	0.62	0.65	0.7	0.72	0.74	0.76	0.78	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87
1000	0.46	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.8	0.82	0.83	0.85	0.86	0.87	0.88
2000	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88
3000	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.88	0.88	0.89
4000	0.53	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.76	0.78	0.79	0.81	0.83	0.84	0.85	0.86	0.88	0.89	0.9	0.9

(3) 침투 및 유출

S-RAT 모형은 각 격자별 침투 및 직접 유출을 산정하기 위해 SCS Curve Number (이하 CN) 방법을 사용하였다. 이를 위해 토양도 및 토지이용도를 입력 받아 CN 값 격자자료를 생성하여 계산하게 된다.

$$S(i,j) = 254 \left( \frac{100}{CN(i,j)} - 1 \right) \quad (2)$$

여기서,  $S(i,j)$ 는 잠재보유수량 (Soil Conservation Service, 1972; Chow et al, 1988),  $CN(i,j)$ 는 격자별 CN 값

$$\frac{P_n[t,(i,j)]}{P[t,(i,j)]} = \frac{F[t,(i,j)]}{HS(i,j)} \quad (3)$$

여기서,  $F[t,(i,j)]$ 는 침투저류조의 침투능 (water content) (mm),  $HS(i,j)$ 는 침투 저류조의 용량

$$I[t,(i,j)] = P[t,(i,j)] - P_n[t,(i,j)] \quad (4)$$

$$W[t,(i,j)] = \frac{F[t,(i,j)]}{H_s} \quad (5)$$

$$I[t,(i,j)] - W[t,(i,j)] = \frac{dF[t,(i,j)]}{dt} \quad (6)$$

여기서,  $W[t,(i,j)]$ 은 지표하 유출,  $P_n[t,(i,j)]$ (mm)는 직접유출,  $H_s$ 는 무차원 상수로서 개념적 매개변수이다. Eqs. (3)~(6)을 이용하여 침투저류조의 질량보존 지배방정식을 산정하면 다음과 같다. Eq. (7)은 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 해석 할 수 있다.

$$\frac{dF[t,(i,j)]}{dt} = -\frac{F[t,(i,j)]}{H_s} - E[t,(i,j)] + P[t,(i,j)] \left\{ 1 - \frac{F[t,(i,j)]}{HS(i,j)} \right\} \quad (7)$$

Fig. 6은 본 모형의 격자 물수지 계산 개념도를 나타낸 것이다.

(4) 지표 및 지표하 유출 추적

S-RAT 모형은 지표유출 및 지표하유출 모두 유한차

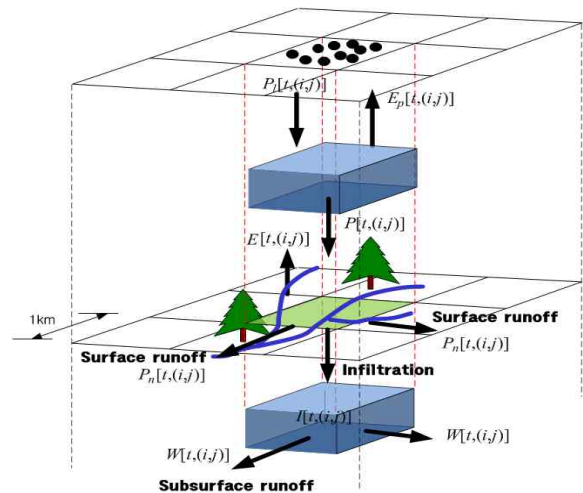


Fig. 6. Schematic Representation of Model Interaction among Soil, Vegetation and Atmosphere at the Local Scale

분법 기반의 Muskingum-Cunge 방법 (Cunge, 1969)을 사용하며 이 과정에서 필요한 조도계수 격자별 값을 입력된 토지이용도로부터 산정된다. Muskingum-Cunge 방법은 부정류의 연속방정식과 하도 내의 저류량-유출량 관계를 이용하는 수문학적 홍수추적방법인 Muskingum을 확장하여 유한차분법으로 접근하는 추적방법이다. 지표하유출 추적에 Muskingum-Cunge 방법을 적용하기 위해 Orlandini et al. (1999)의 알고리즘을 참고하였다. 각각의 격자는 주변격자의 상류 격자의 유출 수문곡선을 상류 격자의 유입수문곡선도 받아들이며 현재의 격자의 수문곡선과 합성하게 된다. Muskingum-Cunge 방법은 이미 널리 알려져 있는 방법이기 때문에 본 논문에서는 간략히 정리하였다.

Muskingum-Cunge 추적방법은 유입수문곡선과 하도의 물리적 특성을 기초로 수문곡선의 확산을 고려하는 비선형 계수 방법이다. 다른 수문학적 방법과 비교하여 유리한 점은 매개변수가 물리적 현상에 근거하고 있다는 점

과 흐름 조건을 광범위하게 변화시켜도 부정류 방정식의 해와 비교적 잘 일치하며 (Ponce and Yevjevich, 1978), 방정식의 해가 사용자가 임의로 정하는 계산 시간간격에 무관하다는 점 등이다. 각 격자별 유출량을 측방유입으로 가정하고 Muskingum 형태의 식을 연속방정식에 적용하면 Fig. 7과 같은 t-s 평면에 다음과 같이 이산화 될 수 있다.

### 3. S-RAT 모형의 적용성 검토

본 논문에서는 S-RAT 모형의 적용성을 검토하기 위하여 중랑천과 내린천 유역을 대상으로 유출모의를 실시하였다. 중랑천유역의 경우 유역면적이 비교적 작고, 도시유역이며 지점강우자료를 입력자료로 사용하였다. 그리고 모형 매개변수의 공간적 전이성 (spatial transferability) (Halit et al., 2006)을 검토하기 위하여, 먼저 중랑교 지점 홍수사상 유출모의를 통해 매개변수보정을 실시하

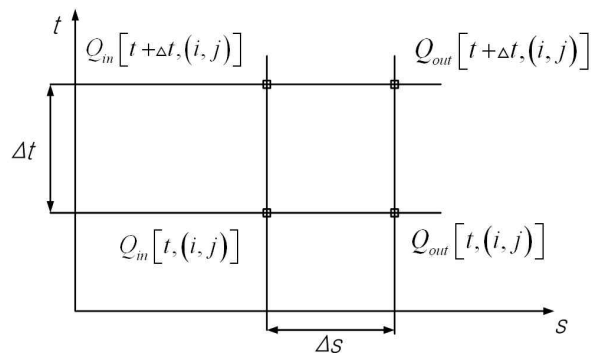


Fig. 7. Space-Time Grid for the Resolution of the Muskingum-Cunge Method (Ponce, 1986)

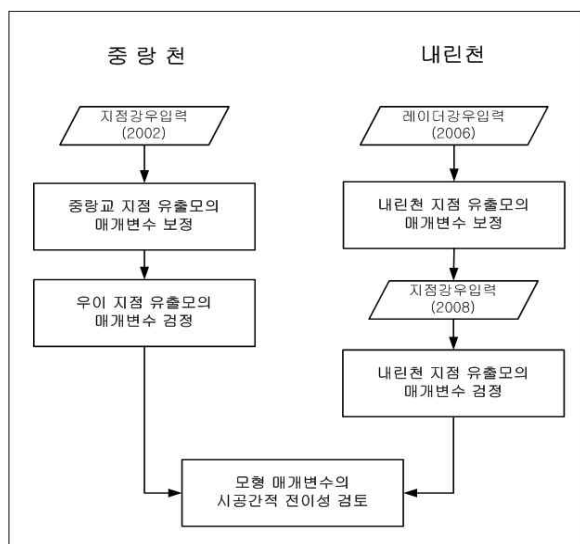


Fig. 8. Flow Chart of Methodology Used in This Study

고, 동일 강우사상에 대한 우이 지점 유출모의의 정확성을 검토하였다. 내린천 유역의 경우 유역면적이 비교적 크고, 산지유역의 특성상 지형기복으로 인한 강우의 공간적 편차가 크기 때문에 입력자료로 레이다자료를 사용하였다. 레이다자료의 보정을 위해서는 최근 그 정확성이 검증된 조건부 합성기법을 사용하였다 (Kim et al., 2008). 그리고 보정된 매개변수의 시간적 전이성 (temporal transferability) (Halit et al., 2006)을 검토하기 위하여, 먼저 2006년 레이다강우자료를 사용하여 매개변수를 보정을 실시하고, 보정된 매개변수를 2008년 홍수사상 유출모의를 통해 검증하였다. 위의 과정을 Fig. 8에 도식화하였다.

### 3.1 대상유역 현황

중랑천 (Fig. 9)의 유역면적은 299.60 km<sup>2</sup>이며 유역연장은 34.80 km, 유역 평균폭과 평균고도는 각각 8.1 km는 EL. 107.2m이다. 서울특별시와 의정부시가 3/4 이상을 점하고 있는 고밀도 도시지역으로 농경지는 상류부의 제 1, 2지류 연변에 다소 분포하고 있으며, 하상 재료는 대부분 가는 모래와 굵은 모래로 구성되어 있다 (국토해양부, 2005). 현재 중랑천 내에는 국토해양부 관할로 상계, 송정, 우이, 의정부, 장암, 진접, 퇴계원 T/M 우량관측소가 운영 중이다. 또한 중랑교, 우이, 신곡 등 3개의 중랑천 수위관측소가 운영 중이다 (Table 4).

내린천 유역 (Fig. 9)은 유역면적이 400.63 km<sup>2</sup>, 유로연장 41.18 km<sup>2</sup>이며 소양강 지류로서 동측은 양양 남대천 및 연곡천 유역, 남측은 남한강 유역, 서측은 홍천강 유역 및 본류인 직할하천 유역에 접하고 있다. 현재 내린천 유역내에는 수자원공사 관할로 귀둔, 현리, 상남, 방동, 창촌 T/M 우량관측소, 국토해양부 관할의 명개 T/M 우량관측소가 운영 중이다. 또한 1개의 내린천 수위관측소가 운영 중이다 (Table 4).

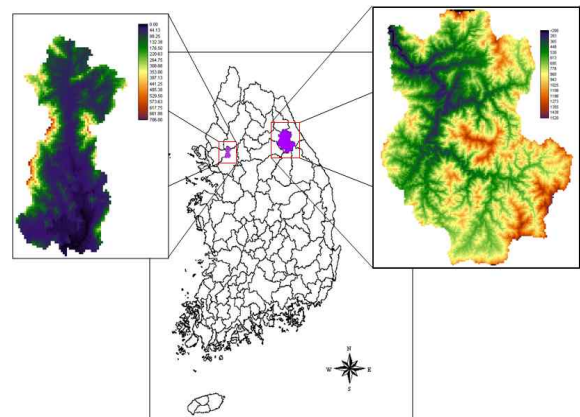


Fig. 9. Location of Jung-rangcheon and Nae-rincheon Basin

Table 4. Gauging Stations Information in Jungrangcheon and Naelincheon Catchments

유역명	관측 소명	관측 기종	위 치			관측 개시일	관할 기관	
			주 소	경도	위도			
중랑천	우량	상계	T/M	서울시 노원구 상계동	127-05-16	37-40-20	2002/10/01	국토해양부
		송정	T/M	서울시 성동구 송정동	127-03-26	37-32-58	2002/03/01	국토해양부
		우이	T/M	서울시 노원구 월계동	128-19-35	37-38-49	2002/10/01	국토해양부
		의정부	T/M	경기도 의정부시 의정부동	127-02-59	37-44-30	1916/04/01	국토해양부
		장암	T/M	경기도 의정부시 장암동	127-03-14	37-41-58	2002/10/16	국토해양부
		진접	T/M	경기도 남양주시 진접읍	127-11-32	37-43-23	2002/10/01	국토해양부
		퇴계원	T/M	경기도 남양주시 퇴계원면	127-09-14	37-38-50	1984/04/01	국토해양부
	수위	중랑교	T/M	서울시 중랑구 중화동	127-04-16	37-35-20	1990/11/01	국토해양부
		우이	T/M	서울시 노원구 월계동	127-59-59	37-22-40	2002/10/16	국토해양부
신곡		T/M	경기도 의정부시 의정부동	127-03-20	37-43-57	2002/10/16	국토해양부	
내린천	우량	귀둔	T/M	강원도 인제군 인제읍	128-23-39	38-00-37	1992/08/01	수자원공사
		현리	T/M	강원도 인제군 기린면	128-20-18	37-56-39	1972/08/11	수자원공사
		상남	T/M	강원도 인제군 상남면	128-15-48	37-52-16	1987/05/04	수자원공사
		방동	T/M	강원도 홍천군 내면	128-30-06	37-50-45	1992/08/01	수자원공사
		명개	T/M	강원도 홍천군 내면	128-30-19	37-50-49	1983/09/01	국토해양부
		창촌	T/M	강원도 홍천군 내면	128-22-52	37-45-57	1972/08/11	수자원공사
	수위	내린천	T/M	강원도 인제군 인제읍	128-14-33	30-00-19	2002/11/05	수자원공사

### 3.2 모형 구축 및 유출모의

#### 3.2.1 중랑천

강우자료의 기간은 2003년 8월 22일~2003년 8월 26일이며 Thiessen 방법을 이용하여 면적강우량을 산정하였다. 중랑천 유역의 하천 하천망도와 각 격자에서의 경사를 구하기 위하여 300m 격자 크기의 DEM을 사용하여

모형을 구성하였으며 Fig. 10은 GIS 입력자료를 나타낸 것이다.

모형의 정량적 평가를 위해 ME (Model Efficiency), MAE (Mean Absolute Error), RRMSE (Relative Root Mean Square Error), NPE (Normalized Peak Error)와 PTE (Peak Timing Error)를 이용하였다 (Table 5). 각각의 평가지수를 식으로 나타내면 Eqs. (8)~(11)과 같다.

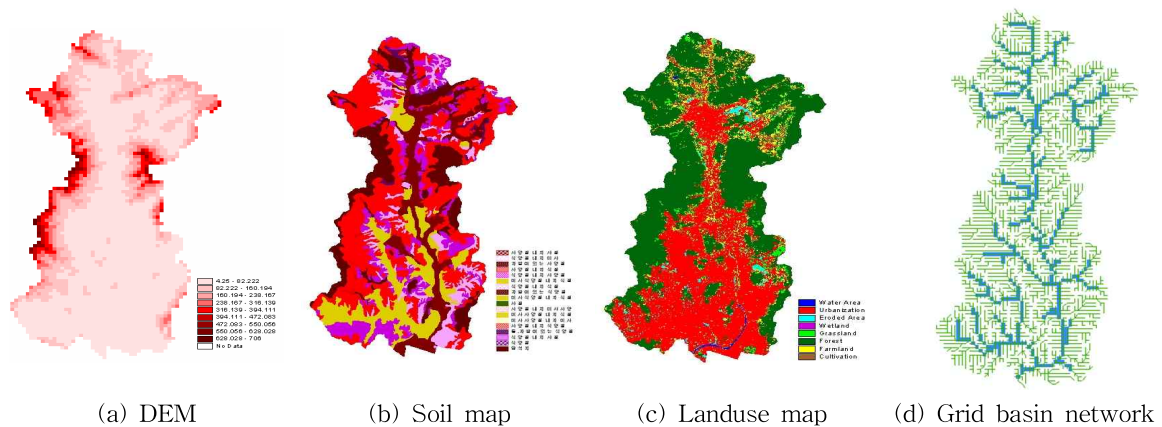


Fig. 10. GIS Data of Jungrangcheon



$$RRMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{oi} - Q_{ci}}{Q_{oi}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (8)$$

여기서  $Q_o$ 는 관측유출량을 의미하고,  $Q_c$ 는 모의된 유출량,  $n$ 은 시간 간격에 대한 개수를 의미한다.

$$NPE = \frac{Q_f^{\max} - Q_o^{\max}}{Q_o^{\max}} \quad (9)$$

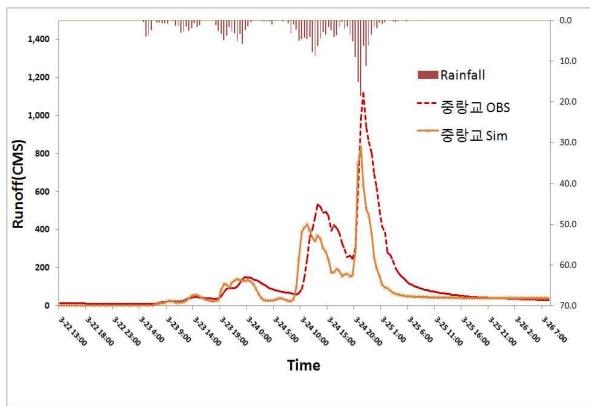
여기서  $Q_f^{\max}$ 는 모의 첨두유출량,  $Q_o^{\max}$ 는 실제 첨두유출량을 의미한다.

$$PTE = T_f^{\max} - T_o^{\max} \quad (10)$$

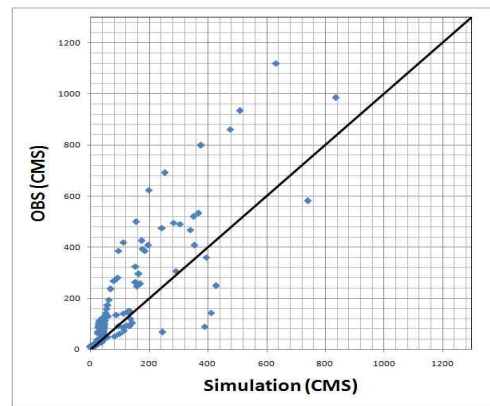
여기서  $T_f^{\max}$ 와  $T_o^{\max}$ 는 각각 모의 첨두홍수량과 관측 첨두홍수량이 발생한 시간을 의미한다. 또한 본 논문에서는 모형의 효율계수 ME를 산정하기 위해서 Eq. (11)을 사용하였다.

Table 5. Errors and Model Efficiency

	중 량 천		내 린 천	
	Calibration (중량교)	Validation (우이)	Calibration (2006)	Validation (2008)
RRMSE	0.66	0.89	0.65	0.51
NPE	-0.25	0.34	0.01	0.13
PTE	0.5	0.5	0.5	0.6
ME	0.65	0.33	0.88	0.79

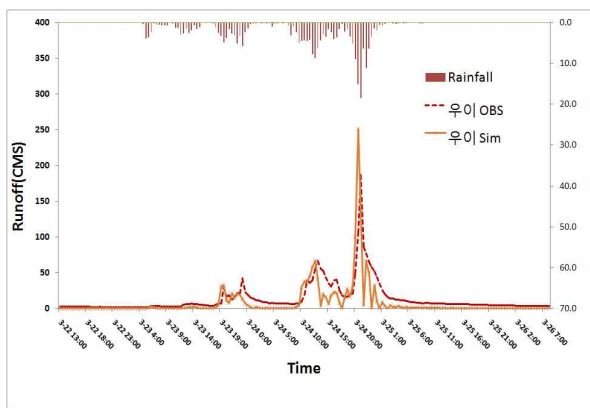


(a) Hydrograph

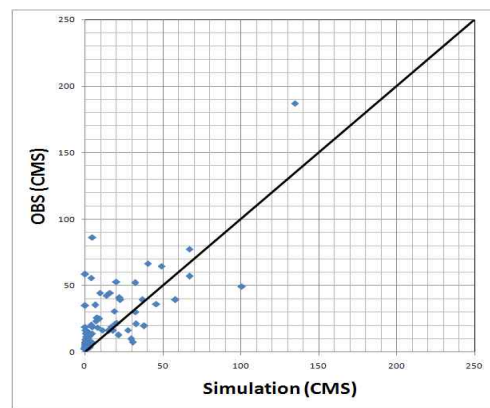


(b) Q-Q Plot

Fig. 11. Runoff Hydrograph and Q-Q Plot (Jungranggyo)



(a) Hydrograph



(b) Q-Q Plot

Fig. 12. Runoff Hydrograph and Q-Q Plot (Wui)

$$ME = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{oave})^2 \right] - \left[ \sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2 \right]}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{oave})^2} \quad (11)$$

여기서  $Q_{oave}$  는 실제유출량의 평균값을 의미하고,  $Q_o$  는 관측유출량,  $Q_c$  는 모의된 유출량,  $n$  은 시간 간격에 대한 개수를 의미한다.

Fig. 11 은 중량교 지점에서의 모의된 유출수문곡선 및 Q-Q plot을 도시한 것이다. 중량교 관측유출량자료를 통해 보정한 매개변수를 유지한 채 동일 홍수사상에 대해 유역 내 다른 수위관측지점인 우이관측소의 유출모의를 실시한 결과는 Fig. 12와 같다. 유출수문곡선에서 알 수 있듯이 첨두도달시간 및 첨두량이 관측치와 다소 차이를 보이고 있다. 이는 본 모형이 격자기반 단순화된 물수지 개념으로 유출모의를 수행하기 때문에 하수관거 유입 등과 같은 도시배수시스템의 영향이 매우 큰 도시유역에서는 한계가 있기 때문일 것으로 판단된다. 하지만 중량교 지점에서 보정한 매개변수를 우이지점에서 적용하였을 때, RRMSE가 0.66에서 0.89로 근소하게 변화되었고, 관측수문곡선을 비교적 안정적으로 재현하였으며, Q-Q plot 상에서 중심으로부터 많은 이격을 보이지 않는 것을

볼 때, 본 연구에서 제안하는 S-RAT 수문모형은 보정한 매개변수의 공간적 전이성(spatial transferability)을 가지고 있다고 판단된다.

### 3.2.2 내린천

내린천 유역에서는 산지유역의 복잡한 지형기복으로 인한 강우의 시공간적 편차를 고려하기 위해 광덕산 레이더자료(2006년 7월 14일~2006년 7월 17일)를 사용하였다. 또한, 원 레이더 자료정량적 오차를 보정을 위하여 Kim et al. (2008)이 제시한 조건부합성기법을 이용하였다. 내린천 유역의 지형입력자료를 구축하기 위해 250 m 격자 크기의 DEM을 이용하였으며 Fig. 13은 GIS 입력자료를 나타낸 것이다.

매개변수 보정 후 모의된 유출수문곡선 및 Q-Q plot을 Fig. 14에 도시하였다. 보정된 매개변수를 유지한 채 2008년 7월 23일~2006년 7월 27일 지점강우자료를 입력자료로 하여 모의된 유출수문곡선 및 Q-Q plot을 Fig. 15에 도시하였다. 중량천 유역의 경우와 마찬가지로 홍수모의의 우수성을 확인할 수 있다. 2006년도 강우자료를 통해 보정한 매개변수를 2008년도 강우자료에 적용하였을 때, RRMSE가 0.65에서 0.51로 근소하게 변화되었고, 관측수문곡선을 비교적 안정적으로 재현하였으며, Q-Q plot 상

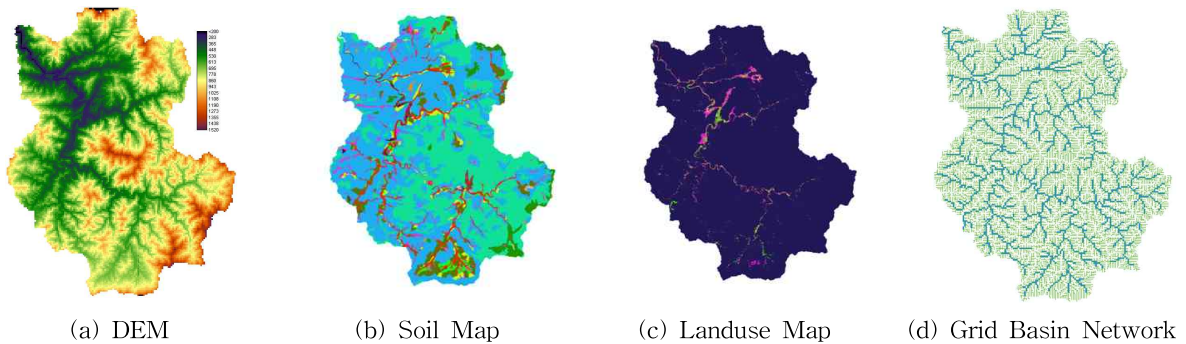


Fig. 13. GIS Data of Naelincheon

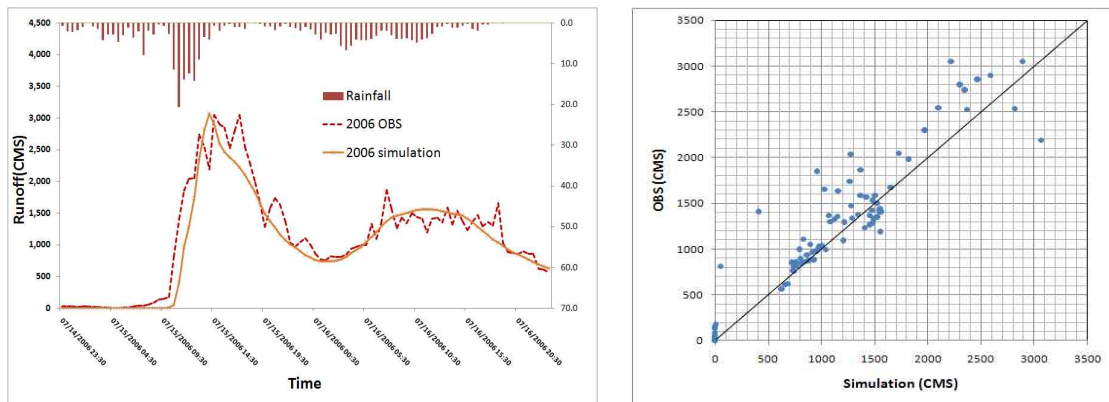


Fig. 14. Hydrograph and Q-Q Plot (Calibration using 2006 Radar data)

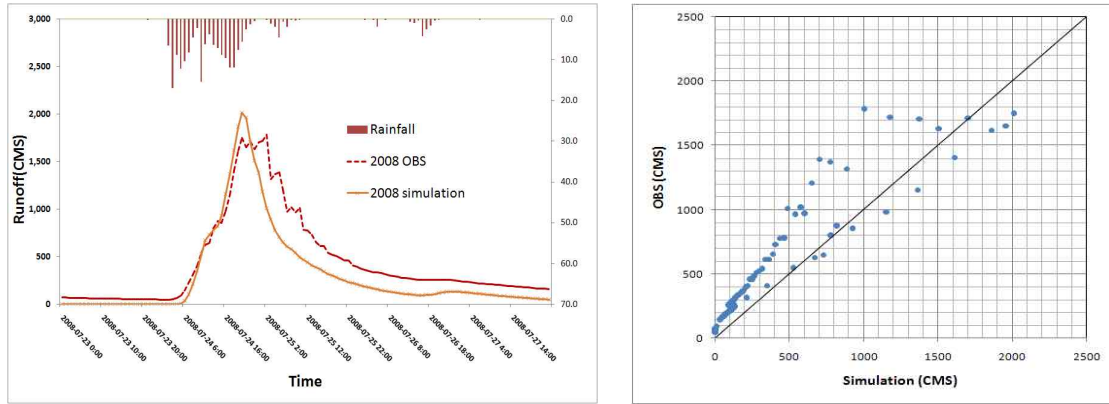


Fig. 15. Hydrograph and Q-Q Plot (Validation using 2008 point rainfall data)

에서 점들이 중심선 주변에 분포되어 있는 것을 볼 때, 매개변수의 시간적 전이성 (temporal transferability)을 가지고 있다고 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 논문에서는 격자 물수지 기법을 이용한 개념적 분포형 수문모형 S-RAT을 소개하였다. 본 모형은 집중형 수문모형의 자료구축 간편성과 분포형 수문모형의 공간적 유출해석 능력을 동시에 만족할 수 있으며 격자기반 레이더강우자료를 활용할 수 있다. 또한 전처리과정 및 유역의 지형자료 추출 기능을 탑재함으로 상용 전처리 과정 툴들에 대한 의존성이 없는 장점을 가진다. 도시유역인 중랑천 유역과 산지유역인 내린천 유역 적용을 통해 모형의 유출모의능력 및 매개변수의 시공간적 전이성이 있음을 확인하였으며 구체적인 결과는 다음과 같다.

- (1) 지형학적 입력자료들을 추출하기 위해 Arc 관련 소프트웨어 또는 IDRIS 등과 같은 GIS 관련 상용 패키지에 의존하여 전처리 과정을 수행해야 하는 번거로움이 있는 기존 대부분의 분포형 수문모형들과 비교하였을 때, 본 모형은 자체적으로 전처리 과정을 통해 유출흐름방향도, 하천망도, 유역경사도 등의 입력자료를 추출하고 바로 유출모의 단계로 이행되는 등 모형구축에 있어서 매우 간편함을 확인할 수 있었다.
- (2) 중랑천 유역 적용결과 RRMSE 값이 0.89, NPE 값이 0.34 등 다소 모의능력이 떨어졌으나 이는 본 모형이 격자기반 단순화된 물수지개념으로 유출모의를 수행하기 때문에 하수관개 유입 등과 같은 도시배수시스템의 영향이 매우 큰 중랑천과 같은 도시유역에서는 모의에 한계가 있을 것으로 판단된다.
- (3) 내린천 유역의 2006년 홍수사상 유출모의 결과

RRMSE 값이 0.51, NPE 값이 0.13 등으로 양호했고, 관측 수문곡선 잘 재현하였으며 Q-Q plot 상에서 점들이 중심선 주변에 분포되어 있는 것을 볼 때 레이더강우자료는 S-RAT 모형에 입력자료로서 높은 적용성이 있다고 판단된다. 이는 유역면적이 크고 지형기복이 심해 강우의 공간적 편차가 큰 산지유역에서 레이더강우자료를 사용한 S-RAT의 높은 적용성을 의미하는 것으로 판단된다.

- (4) 본 연구에서는 개발된 S-RAT 모형만을 적용하였으나, 향후 보다 많은 유역 및 사상에 대한 적용성을 검토하고, Vflo™ 및 GRM과 같은 기존 분포형 모형과의 동일유역 동일 사상에 대한 모의성능 비교 연구를 통해 보다 객관적인 평가를 해야 할 것으로 사료된다. 또한 S-RAT 모형은 격자기반 개념적 물수지 기법에 기반하기 때문에 계산알고리즘이 완전물리기반 분포형 모형과 비교하였을 때 비교적 간단한 장점이 있다. 따라서 단일사상 뿐만 아니라 장기유출모의에 있어도 활용성이 있을 것이라 판단되며 향후 이에 대한 사례연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

국토해양부 (2005). **주요지천 홍수에보프로그램 개선**.  
 김성준 (1998). “격자기반의 운동과 강우-유출모형 개발 (I)-이론 및 모형-.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 31, No. 3, pp. 303-308.  
 노성진, 김현준, 장철희 (2005). “청계천 유역에 대한 WEP 모형의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 38, No. 8, pp. 645-653.  
 박진혁, 허영택 (2008). “홍수유출해석을 위한 운동과기반의 분포형 모형 개발 및 적용.” **한국수자원학회**

- 문집, 한국수자원학회, Vol. 41, No. 4, pp. 509-518.
- 최윤석, 김경탁, 이진희 (2008). "유한체적법을 이용한 격자기반의 분포형 강우-유출 모형 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 41, No. 9, pp. 895-905.
- 최현상 (2001). GIS와 불확실성 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발, 박사학위논문, 경북대학교
- 한국건설기술연구원(1995) 이차원 하천모형의 개발 (I)  
한국건설기술연구원(1996) 이차원 하천모형의 개발 (II).
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986a). "An introduction to european hydrological system—systeme hydrologique europeen, 'SHE'. 1. History and philosophy of a physically-based distributed modeling system." *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986b). "An introduction to the european hydrological system—systeme hydrologique europeen, 'SHE'. 2. Structure of a physically-based distributed modelling system." *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 61-77.
- Kim, B.S., Kim, B.K., and Kim, H.S. (2008). "Flood simulation using the gauge-adjusted radar rainfall and physics-based distributed hydrologic model". *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 4400-4414.
- Band, L.E. (1986). "Topographic partition of watersheds with digital elevation models." *Water Resources Research*, Vol. 22, pp. 15-24.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, Singapore.
- Cunge, J.A. (1969). "On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method)." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 7, pp. 205-230.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., Aboukhaled, A., Damagnez, J., Dastane, N.G., Van der Berg, C., Rijtema, P.E., Ashford, O.M., and Frere, M. (1984). "Guidelines for predicting Crop Water Requirements." *FAO Irrigation and Drainage Paper*, Rome.
- Halit Apaydin, Alper, S. Anli, and Ahmet Ozturk (2006). "The temporal transferability of calibrated parameters of a hydrological model." *Ecological Modelling*, Vol. 195, pp. 307-317.
- Jenson, S.K., and Domingue, J.O. (1988). "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 11, pp. 1593-1600.
- Julien, P.Y., and Saghafian, B. (1991). "CASC2D Users Manual—A Two Dimensional Watershed Rainfall-Runoff Model." Civil Engr. Report, CER90-91PYJ-BS-12. Colorado State University, Fort Collins.
- Julien, P.Y., Saghafian, B., and Ogden, F.L. (1995). "Raster-based hydrological modeling of spatially-varied surface runoff." *Water Resources Bulletin*. AWRA, Vol. 31, No. 3, pp. 523-536.
- Martz, L.W., and Jong, E.D. (1988). "CATCH: A FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models." *Computers & Geosciences*, Vol. 14, No. 5, pp. 627-640.
- Molnar, D.K., and Julien, P.Y. (2000). "Grid size effects on surface water modeling." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 5, pp. 8-16.
- Moore, I.D., and Grayson, R.B. (1991). "Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 6, pp. 1177-1191.
- Ogden, F.L., and Julien, P.Y. (1994). "Runoff model sensitivity to radar rainfall resolution." *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 1-18.
- Orlandini, S., Perotti, A., Sfondrini, G., and Bianchi, A. (1999). "On the storm flow response of upland Alpine catchments." *Hydrological Processes*, 13, 549-562.
- Ponce, V.M. (1986). "Diffusion wave modelling of catchment dynamics." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, Mo. 8, pp. 716-727.
- Ponce, V.M., and Yevjevich, V. (1978). "Muskingum-Cunge method with variables parameters" *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 104, No. 12, pp. 1663-1667.
- Sharif, H.O., Ogden, F.L., Krajewski, W.F., and Xue, M. (2002). "Numerical simulations of radar rainfall error propagation." *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 8.
- Soil Conservation Service (1972). *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.
- Tarboton, D.G. (1997). "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models." *Water Resources Research*,

Vol. 33, No. 2, pp. 309.

Vieux, B.E. (2001). Distributed hydrologic modeling using GIS, kluwer academic publishes, norwell, massachusetts. *Wat Sci Tech Series*, Vol. 38, p. 293.

Vieux, B.E., Bralts, V.F., Segerlind, L.J., and Wallace, R.B. (1990). "Finite element watershed modeling: one-

dimensional elements." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No. 6, pp. 803-819.

논문번호: 10-042	접수: 2010.05.24
수정일자: 2010.07.15/07.19	심사완료: 2010.07.19