

## 격자기반의 토양수분추적모형 개발 : 보청천 유역 사례연구

김성준\*·채효석\*\*

### Development of GRID-based Soil MOsture Routing Model (GRISMORM) Applied to Bocheongchun Watershed

Seong-Joon Kim\*·Hyo-Seok Chae\*\*

#### 요 약

격자 물수지 기법을 이용하여 일단위 토양수분변화를 추적할 수 있는 분포형 토양수분추적모형을 개발하였다. 본 모형은 C-언어로 구성하여 다양한 GIS 소프트웨어들을 수용할 수 있도록 유연성을 확보하였다. 전처리 과정으로서 래스터 GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 모형에 필요한 자료를 준비하고, 후처리과정으로서 모형의 결과를 GRASS상에서 도시할 수 있도록 구성하였다. 개발된 모형의 적용성을 검토하기 위하여 보청천 유역의 일부인 이평교 유역(75.6km<sup>2</sup>)을 대상으로 이평교 지점에서의 실측 일유출량과 모형에 의한 모의발생치를 비교하였으며, 출력결과로서 월별로 정리된 토양수분 분포도를 GRASS상에 작성하여 예시하였다.

**ABSTRACT :** A GRID-based Soil MOsture Routing Model(GRISMORM) which predicts temporal variation and spatial distribution of water balance on a daily time step for each grid element of the watershed was developed. The model was programmed by C-language which aims for high flexibility to any kind of GIS softwares. The model uses ASCII-formatted map data supported by the irregular gridded map of the GRASS(Geographic Resources Analysis Support System)-GIS and generates daily or monthly spatial distribution map of water balance components within the watershed. The model was applied to Ipyunggyo watershed(75.6km<sup>2</sup>) ; the part of Bocheongchun watershed. Predicted streamflows resulting from two years('95 and '96) daily data were compared with those observed at the watershed outlet. The results of temporal variation and spatial distribution of soil moisture are also presented by using GRASS.

#### 1. 서 론

컴퓨터 성능의 향상과 더불어 지리정보시스템 (Geographic Information System, GIS)의 발전 그

리고 수치고도모델의 획득·사용이 가능하게 되므로 서 수문학에서의 분포형 모형은 Freeze와 Harlan (1969)이 처음으로 물리적인 기반의 분포형 모형에 대한 청사진을 소개한 이후로 그 발전을 거듭하고

\* 건국대학교 농공학과  
(Dept. of Agric. Engrg., Konkuk Univ., 93-1 Mojin-dong, Kwangjin-gu, Seoul 143-701, Korea)

\*\* 한국수자원공사 수자원연구소  
(The Water Resour. Research Inst., KOWACO, 462-1, Junmin-dong, Yousung-gu, Taejon 306-090, Korea)

있다. 모형의 수행을 위하여 한 번에 몇 일이 걸리던 수학적 과정이 이제는 수시간내에 처리가 가능해졌으며, 하드웨어의 그래픽 성능은 모형의 입력과 출력을 가시화할 수 있게 하였다. 이러한 모형의 개발을 위한 그 기술적인 실현이 가능해짐에 따라 공간적인 예측에 대한 공감대가 형성되면서 지속적인 개발의 노력이 있어 왔다.

우리나라에서도 1990년 이후부터 GIS에 대한 관심이 높아지면서 이를 수문분야에 적용해보려는 시도가 있어왔다. 90년대 초반에는 GIS장비를 구비하는데 있어서의 경제적인 문제, 자료의 획득 또는 생성에 있어 어려움이 많았지만, 중반부터는 GIS를 이용한 수문모형의 적용 및 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내의 연구로는 최진용(1996)이 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형을 개발한 바 있다. 이 연구에서는 유역 증발산량의 산정에 중점을 두어 SCS 방법으로 하천의 일단위 유출량을 모의하도록 구성하여 경기도 화성군 반월유역에 적용한 바 있다.

본 연구는 격자 물수지 기법을 이용한 분포형 토양수분추적모형을 개발하고, 래스터 GIS 소프트웨어인 GRASS(Geographic Resources Analysis Support System ; US Army CERL, 1993)를 이용하여 본 모형의 입력자료를 추출하는 모형의 전처리 과정과 모형의 결과를 시간적·공간적으로 표현해주는 후처리과정을 개발하고자 한다. 또한 보청천 유역의 일부인 이평교 유역(75.6km<sup>2</sup>)을 대상으로 하여 개발된 모형의 적용가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 모형의 개발

### 2.1 격자 흐름방향

격자의 흐름방향은 해당 격자로 유입되는 양과 그 격자로 부터 유출되는 양을 결정하기 위하여 필요하다. 따라서 각 격자의 고도값을 이용하여 해당 유역의 전반적인 흐름방향도(flow direction map)

를 생성하여야 한다. 흐름방향은 일반적으로 3×3 격자를 이용하여 주위의 격자 중에서 가장 낮은 고도값으로 흐르는 단방향 흐름경로(single flowpath)와 하나 이상의 격자로 배분되어 흐르는 다방향 흐름경로(multiple flowpath) 알고리즘이 있다. 본 연구에서는 우리나라의 경우 지형경사가 비교적 급하므로 단방향 흐름경로를 채택하였다. 흐름방향도는 GRASS에서 r.watershed를 이용하면 자동생성이 가능하다. <Fig. 2.1>은 3×3 격자 상에서 중심격자가 가지는 방향값을 주위격자에 표시한 것이다. 예를 들어 중심격자의 값이 1이라면 중심격자는 1의 방향으로 흐르게 된다.

한편 격자의 유출방향은 단방향이지만 유입되는 격자는 하나이상일 수가 있다. 따라서 중심격자로 유입되는 격자들은 <Fig. 2.2>의 3×3 격자를 180° 회전시킨 상태에서 그 격자가 가지는 방향값을 이용하면 주위 격자에서 중심격자로 흘러 들어오는 격자들을 모두 계산할 수 있다(정하우 등, 1995).

3	2	1
4		8
5	6	7

<Fig. 2.1> 3×3 window and it's outflow direction

7	6	5
8		4
1	2	3

<Fig. 2.2> 3×3 mirror window for inflow direction

## 2.2 격자 물수지

격자 물수지는 유역을 일정한 크기로 분할한 상태에서 각 격자의 유입·유출을 계산하므로써 일별로 유역 전체에 대한 물수지를 파악할 수 있게 된다. <Fig. 23>은 모형이 고려하는 물수지인자를 도시한 것이다.

### 2.2.1 불포화층 토양수분 추적

#### (unsaturated soil moisture routing)

토양이 포화될 때까지의 강우량은 모두 침투되며, 그 이후 강우량은 모두 지표유출로 처리된다. 다음 식은 격자단위의 토양수분 수지식을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \frac{dSMu_i}{dt} = & F(t)_i + \sum Qu_{sub.in,i} \\ & - Qu_{sub.out,i} - ET(t)_i \\ & - DPu(t)_i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $FT_i$ =침투량( $m^3$ ),  $SMu_i$ =토양수분( $m^3$ ),  $Q_{sub.in,i}$ =주위격자로부터의 지표하 유입량( $m^3/sec$ ),  $Q_{sub.out,i}$ =계산격자에서의 지표하유출량( $m^3/sec$ ),  $ET_i$ =증발산량( $m^3$ ),  $DPu_i$ =포화토양층으로의 유출량( $m^3$ ),  $i$ =격자주소,  $t$ =시간간격(일)이다.

### 2.2.2 증발산량

본 연구에서는 Morton법(1978)에 의하여 실제 증발산량을 구하는 방법을 이용하였다. Morton(1978)은 실제 증발산량과 Penman법에 의해 얻을 수 있는 잠재 증발산량은 서로 보완관계가 있으며, 실제 증발산량과 잠재 증발산량의 합은 Priestly와 Taylor(1972)에 의해 제안된 잠재 증발산량의 2배와 거의 유사하다는 관계식을 제안했다.

$$E_a = 2E_p - E_{pp} \quad (2)$$

여기서  $E_a$ =실제증발산량( $mm/day$ ),  $E_{pp}$ =Penman에 의한 잠재증발산량( $mm/day$ ),  $E_p$ =Priestly와 Taylor에 의한 잠재증발산량( $mm/day$ )이다.

### 2.2.3 불포화토양층 지표하흐름

불포화토양층의 토양수분이 포장용수량이상이면 횡방향으로의 흐름이 발생하게 되며, 이 흐름은 운동과 가정에 의하여 다음의 운동량 방정식을 적용하였다(Beven, 1982 ; Sloan and Moore, 1984).

$$Qu_{sub} = K_s A_{sub} \sin \beta \quad (3)$$

여기서  $Qu_{sub}$ =지표하유량( $m^3/sec$ ),  $K_s$ =포화투수계수( $m/sec$ ),  $A_{sub}$ =흐름단면적( $m^2$ )이다.

한편 토양층에서의 정보가 부족한 경우에는 간단한 선형저수지 개념( $Qu_{sub} = \alpha \cdot R1$ , 여기서  $\alpha$ =저수지계수,  $R1$ =포장용수량이상 격자의 토양수분 저류량)을 도입하여 유역의 불포화토양층 유출량을 추정할 수 있다.

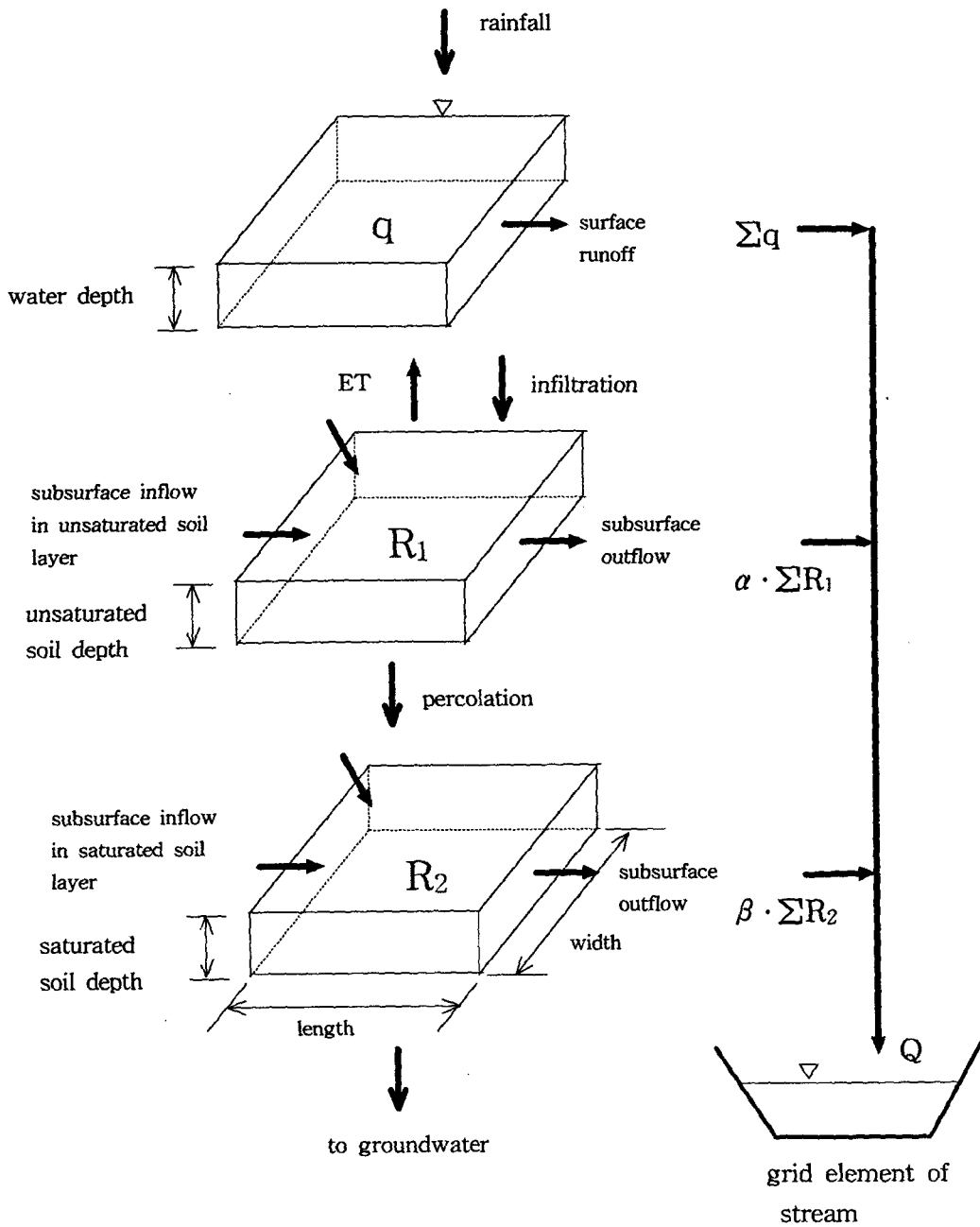
### 2.2.4 포화토양층 지표하흐름

포화토양층에 대한 격자단위 수지식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dSMs_i}{dt} = & DPu(t)_i + \sum Qs_{sub.in,i} \\ & - Qs_{sub.out,i} - GW(t)_i \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $SMs_i$ =포화토양층 변동량( $m^3$ ),  $DPu$ =불포화 토양층으로부터의 유입량( $m^3$ ),  $Q_{sub.in,i}$ =주위격자로부터의 포화수 유입량( $m^3/sec$ ),  $Q_{sub.out,i}$ =계산격자에서의 포화수유출량( $m^3/sec$ ),  $GW$ =심층지하수로의 침투량( $m^3$ )이다.

불포화토양층 흐름과 마찬가지로 포화토양층에 대한 정보가 부족할 경우는 간단한 선형저수지 개념



<Fig. 2.3> Grid-based water balance components

님( $Q_{gw} = \beta \cdot R_2$ , 여기서  $\beta$ =저수지계수,  $R_2$ =포화토양층 함양량)을 이용하여 포화토양층에서의 유출량을 추정할 수 있다.

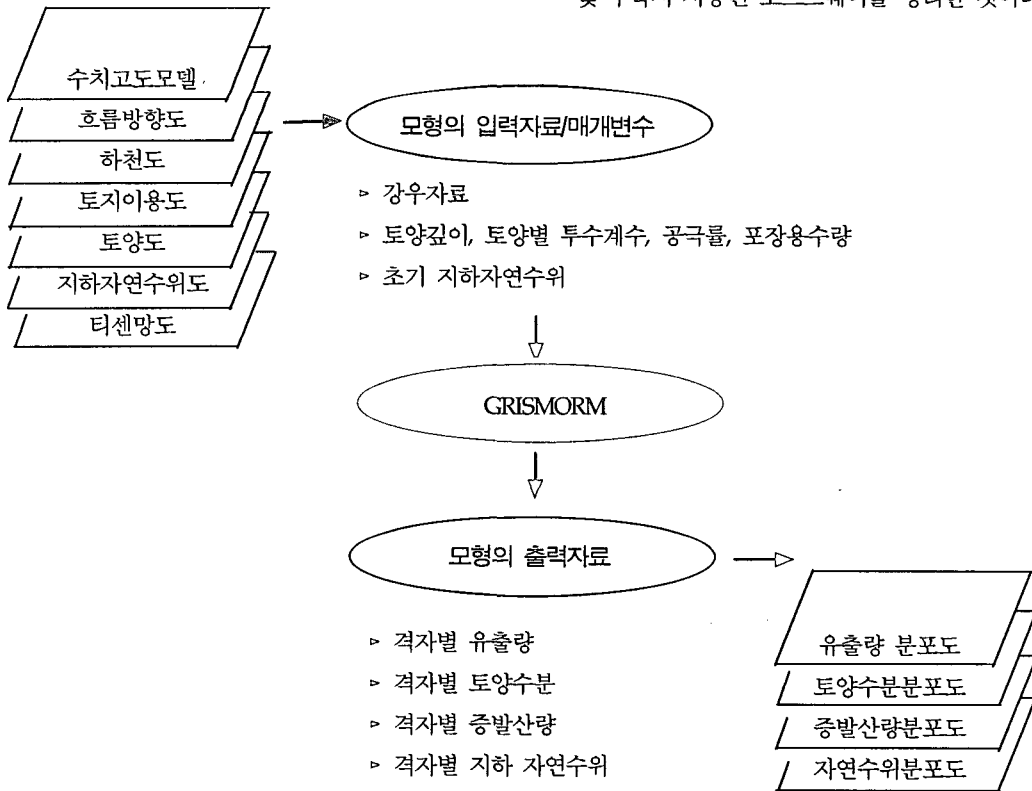
### 3. 모형의 구성

본 분포형 모형의 구조적 흐름도는 <Fig. 3.1>과 같다. 모형의 입력자료로는 유역의 수치고도모델, 흐름방향도, 하천도, 토양도, 토지이용도, 지하 자유수위분포도, 티센망도를 사용한다. 본 모형은 이들 자료를 격자기반(raster-based)의 GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 ASCII 형식의 파일로 불러들인다. 모형은 수행되면서 유역의 시간적·공간적 유출심, 토양수분 및 지하 자유수위 분포도 등을 주어

진 시간간격으로 ASCII 파일형식의 도면으로 출력하며, 원하는 지점에서의 유출곡선을 텍스트파일로 출력한다. 이들 결과는 격자기반 GIS 소프트웨어의 형식으로 전환시켜 그래픽으로 표현이 가능하다.

### 4. 입력자료의 준비

개발된 분포형 토양수분추적모형을 적용하기 위하여 준비한 모형 자료는 수치고도모델, 유역경계도, 토양도, 토지 이용도, 지하 자유수위도, 티센망도이다. 하천도와 흐름경로도는 GRASS의 r.watershed명령어를 이용하여 수치고도모델에서 자동생성하였다. <Table 4.1>은 모형자료별 자료원 및 구축시 사용된 소프트웨어를 정리한 것이다.



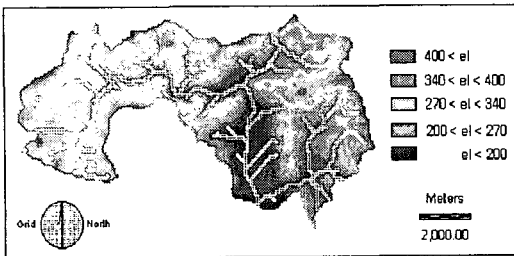
<Fig. 3.1> Schematic diagram of GRId-based Soil MOisture Routing Model(GRISMORM)

〈Table 4.1〉 Mapsets prepared in this study

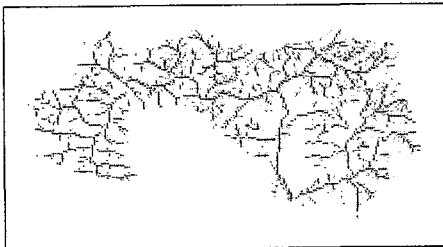
구분	자료원	축척	소프트웨어
수치고도모델	Defense of Mapping Agency	경위도 3초 간격	IDRISI 2.0
유역경계도	국립지리원	1 : 50,000	PC ARC/INFO 3.4.2
토양도	농촌진흥청	1 : 250,000	PC ARC/INFO 3.4.2
토지이용도	LANDSAT TM	30×30m2	ER MAPPER 5.5
지하자연수위도	한국수자원공사	경위도 점자료	IDRISI 2.0
티센망도	국립지리원	경위도 점자료	IDRISI 2.0

4.1 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM)과 하천망(Stream network)

수치고도모델은 미국의 Defense of Mapping Agency에서 제작·보급한 것으로서, 경위도 3초 크기의 격자에 대한 평균지반 고도값이 ASCII 형태로 저장되어 있는 정수자료이다. 우리나라의 경우 3초 간격 격자의 가로 방향 크기는 75m이며, 세로 방향 크기는 95.5m이다. 본 연구에서는 이 수치고도모델을 MS-Windows 95용 IDRISI에서 UTM(Universal Transverse Mercator) 좌표계로 변환하였다. 하천망은 DEM자료를 GRASS로 불러들여 r.watershed 명령어를 이용하여 생성시켰다. 〈Fig. 4.1〉은 IDRISI에서 이평교 유역을 경계로 clipping한 DEM(114행×200열)을 보여주고 있다.



〈Fig. 4.1〉 DEM and stream network



〈Fig. 4.2〉 Flow direction map

4.2 흐름방향도(Flow direction map)

흐름방향도는 GRASS의 r.watershed를 사용하여 drainage map을 생성시키면 되며, 각 격자는 1~8까지의 방향값을 가지게 된다. 만약 격자값이 -1의 값을 가지면 그 격자는 와지를 나타내는데 이를 방지하기 위하여 DEM의 low-pass filtering과정을 거치게 된다. 한편 흐름방향도가 제대로 생성되었는지 확인하기 위하여 간단한 Fortran 프로그램을 작성하여 이평교 유역의 흐름방향도를 출력하였는데, 하천 중의 일부가 연결되지 않은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 유역에서 흐름방향이 불완전하게 생성된 격자를 보완하기 위하여 r.watershed의 accumulation map을 이용하였다. accumulation map은 각 격자를 통하여 배수되는 격자의 수를 누가시켜 나타낸 것이다. 이미 생성시켜 놓은 drainage map을 accumulation map으로 보완하는 프로그램을 작성하였는데, 누가격자수가 많은 격자의 방향으로 흐름방향을 수정하도록 하였다. 〈Fig. 4.2〉는 이를 이용하여 하천이 모두 연결된 흐름방향도를 보여주고 있다.

4.3 토양도

토양도는 농촌진흥청 토양물리과에서 제작된 남한지역의 토양도(1 : 250,000)로부터 구축하였다. ARC/INFO 자료를 DLG 파일형태로 변환시킨 후, 이를 IDRISI로 불러들여 원래 토양부호별로 입력된 자료를 사양토, 식양토, 양질식토, 식토, 암석지역 등의 토양종류별로 재분류(RECLASS)하였다.

#### 4.4 토지이용도

토지이용도는 1995년 1월 11일, 4월 1일, 5월 3일, 6월 20일, 10월 10일, 11월 27일에 획득된 6개의 LANDSAT TM 자료(path : 115/row : 35)를 이용하여 추출하였다. 본 연구에서는 대상지역을 크게 산림, 물, 논, 밭 등 4개의 교차자료를 선택하여 최대우도법(maximum likelihood)을 이용·분류하였다.

#### 4.5 지하 자유수위도

초기 지하 자유수위 분포도는 농어촌진흥공사가 1982년부터 1991년까지 시행한 “전국 지하수 수맥도 조사사업” 자료에서 관측공의 경위도별 자유수위자료를 이용하여 구축하였다. IDRISI에서 관측공의 위치도를 vector map으로 작성한 후, Surface Interpolation의 INTERPOL에서 자유수위에 대한 value file을 이용하여 지하 자유수위 분포도를 생성시켰다.

#### 4.6 티센망도

강우관측소의 경위도 좌표를 이용하여 IDRISI에서 강우관측소 위치도를 vector map으로 작성한

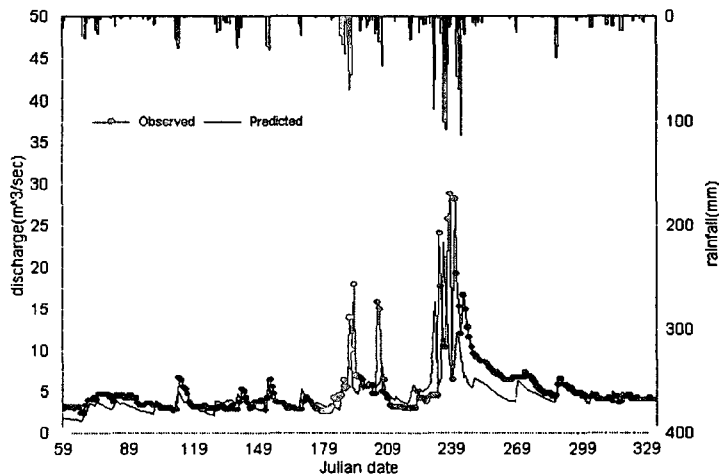
후, THIESSEN을 이용하여 임진강유역의 티센망도를 생성시켰다.

### 5. 적용결과 및 고찰

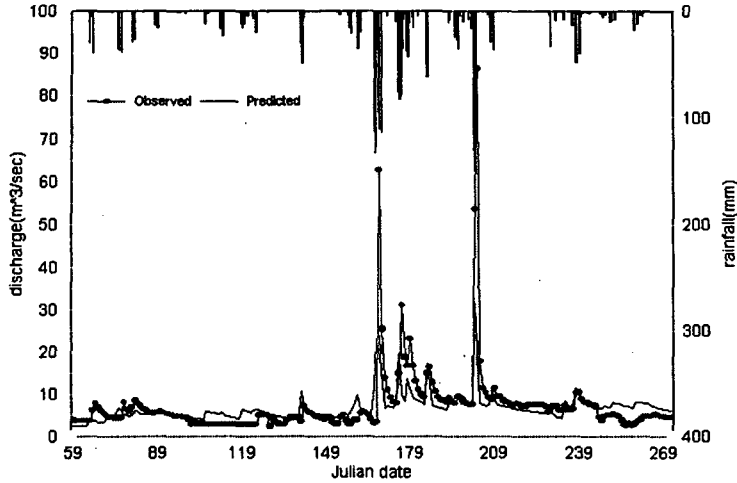
모형의 적용성을 검토하기 위하여 보청천유역의 일부인 이평교유역(75.6km<sup>2</sup>)을 대상으로 본 모형을 적용하였다. 수문자료는 '95~'96년도 IHP유역 연구보고서(한국수자원학회, 1995, 1996)의 보청천유역 일수문자료를 이용하였다. 기상자료는 보은관측소의 일기상자료를 사용하였고, 강우자료는 이평교유역을 지배하는 이원 동정, 삼산측후소의 자료를 이용하였으며, 유출량자료는 이평교지점에서 실측된 자료를 이용하였다.

#### 5.1 이평교지점에서의 일유출량 비교

이평교지점에서의 실측 일유출량과 모델에 의한 모의발생 일 유출량을 비교하면 <Fig. 5.1>과 같으며, 유출량은 402.3mm(유출율 ; 49.1%)로 모의되었으며, 불포화층 토양수분저류량(R1)과 포화층 토양수분함양량(R2)의 변화량을 조정하면서 실측 일유출량의 형태를 따라가는지 확인하였는데, 전반적인



<Fig. 5.1> Predicted versus observed streamflow(1995)



<Fig. 5.2> Predicted versus observed streamflow(1996)

유출의 특성과 감쇄형태를 잘 표현하는 것으로 나타났다.

<Fig. 5.2>는 '96년에 대한 결과인데, 평균강수량(3월~9월)은 968.7mm(이원 : 978.1mm, 동정 : 971.6mm, 삼산 : 957.5mm)였으며, 실측 유출량은 391.3mm로서 유출율은 40.4%였다. '95년도에 보정된 동일한 매개변수들을 이용한 결과 유출량은 362.3mm(유출율 ; 37.4%)로 모의되었다.

## 5.2 토양수분의 시간적·공간적 분포

<Fig. 5.3>은 '95년 3월부터 10월까지의 월 토양수분의 변화를 나타낸 것이다. 월별 토양수분의 상태를 살펴보면 6월~8월의 3개월간은 유역의 토양수분이 높은 상태로서 강우에 의한 유출율이 높은 상태, 5월과 9월은 토양수분이 중간 상태로서 유출율이 보통인 상태, 나머지는 유역의 토양수분이 전반적으로 낮은 상태로서 유출율이 낮은 상태로 구분할 수 있을 것으로 판단된다.

적모형을 개발하였다. 본 모형은 C-언어로 구성하였다. 전처리과정으로서 래스터 GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 모형에 필요한 자료를 준비하고, 모형은 이들을 ASCII 형태로 받아들여 일별 수행결과(유역출구에서의 유출량, 지표유출 분포도, 토양수분 분포도)들을 ASCII 형태의 화일로 자동발생시킨 후, 후처리과정으로서 이들 결과를 GRASS 상에서 도시하여 주는 형태로 구성하였다.

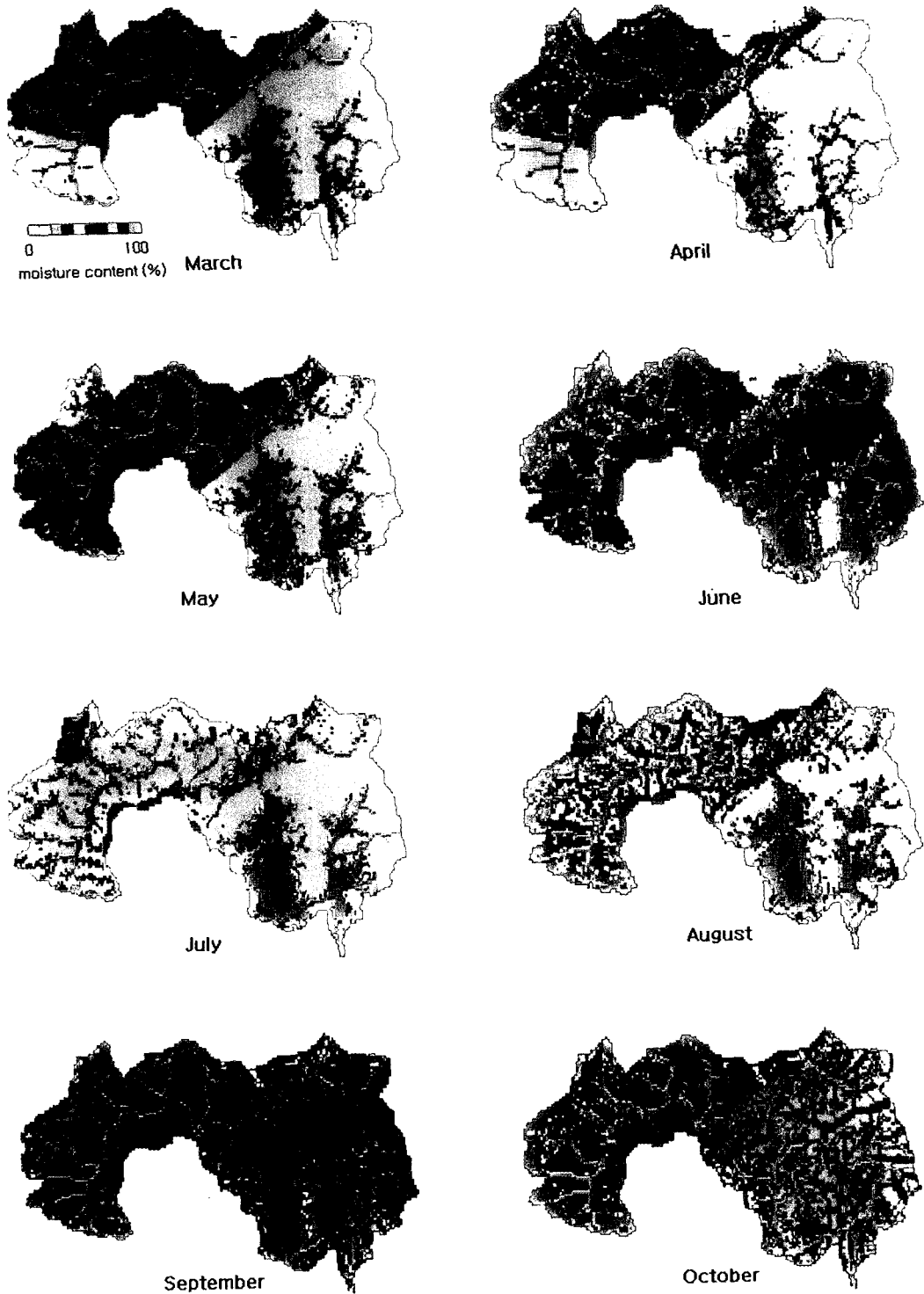
개발된 모형의 적용성을 검토하기 위하여 보청천유역의 일부인 이평교 유역(75.6km<sup>2</sup>)을 대상으로 모형에 필요한 자료(수치고도모델, 하천도, 흐름방향도, 토양도, 토지이용도, 티센망도)를 준비한 후, '95년 및 '96년도의 IHP유역 연구보고서 자료를 이용하여 이평교 지점에서의 실측 일유출량과 모형에 의한 모의발생치를 비교하였다. 출력결과로서 일단위·월단위의 토양수분 분포도를 통하여 유역전반에서 발생하는 유출기여지역과 토양수분의 변화양상을 공간적으로 확인할 수 있었다.

## 6. 요약 및 결론

격자 물수지 기법을 이용한 분포형 토양수분추



격자기반의 토양수분추적모형 개발 : 보청천 유역 사례연구



〈Fig. 5.3〉 Soil moisture content predicted for eight months(March~October, 1995)

## 참 고 문 헌

- 정하우, 김성준, 최진용, 김대식, 1995, "소유역 지표유출의 시간적·공간적 재현을 위한 GIS응용 모형," 한국GIS학회지, 3권 2호, pp. 135~146.
- 최진용, 1996, "지리정보시스템을 이용한 장기유출 모형에 관한 연구," 서울대학교 박사학위논문.
- 한국수자원학회, 1995, "국제수문개발계획(IHP) 연구보고서," 건설교통부.
- 한국수자원학회, 1996, "국제수문개발계획(IHP) 연구보고서," 건설교통부.
- Beven, K. J., 1982, "On subsurface stormflow : Predictions with simple kinematic theory for saturated and unsaturated flows," Water Resour. Res., Vol. 18, pp. 1627~1633.
- Freeze, R. A. and Harlan, R. L., 1969, Blueprint for a physically-based digitally simulated hydrologic response model, J. of Hydrology, Vol. 9, pp. 237~258.
- Morton, F. I., 1978, "Estimating evapotranspiration from potential evaporation- Practically of an iconoclastic approach," J. of Hydrology, Vol. 38, pp. 1~32.
- Priestly, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972). "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters." Mon. Weather Rev., Vol. 100, pp. 81~92.
- Sloan, P. G. and Moore, I. D., 1984, "Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds," Water Resour. Res., Vol. 20, pp. 1815~1822.
- U.S. Army CERL, 1993, "GRASS 4.1 Users Manual," Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL.