

격자기반의 토양수분추적에 의한 지하수함양량 추정기법 개발

Groundwater Recharge Assessment via Grid-based Soil Moisture Route Modeling

김 성 준* / 채 효 석**

Kim, Seong Joon / Chae, Hyo Seok

Abstract

The purpose of this study is to improve the method of evaluating groundwater recharge by using grid-based soil moisture routing technique. A model which predicts temporal variation and spatial distribution of soil moisture on a daily time step was developed. The model uses ASCII-formatted map data supported by the irregular gridded map of the GRASS(Geographic Resources Analysis Support System)-GIS and can generate daily and monthly spatial distribution map of surface runoff, soil moisture content, evapotranspiration within the watershed. The model was applied to Ipyunggyo watershed(75.6 km²) located in the upstream of Bocheongchun watershed. Seven maps; DEM(Digital Elevation Model), stream, flow path, soil, land use, Thiessen network and free groundwater level, were used for input data. Predicted streamflows resulting from two years(1995, 1996) daily data were compared with the observed values at the watershed outlet. The results of temporal variations and spatial distributions of soil moisture are presented by using GRASS GIS. As a final result, the monthly predicted groundwater recharge was presented.

keywords: Grid-based, Daily runoff, Soil moisture routing, Groundwater recharge, GRASS-GIS

요 지

지하수 함양량을 추정하기 위한 방법으로 격자기반의 일별 토양수분 추적기법을 모델링하였다. 본 모델은 GRASS-GIS를 이용하여 모델에 필요한 자료들을 준비하고, 모델은 이들을 ASCII 형태로 받아들여 일별 수행 결과(유역출구에서의 유출량, 지표유출 분포도, 토양수분 분포도 등)들을 GRASS상에서 도시하여 주는 형태로 구성하였다. 보청천유역의 일부인 이평교 유역(75.6 km²)을 대상으로 모델의 적용성을 검토하였다. '95년 및 '96년도의 IHP유역 연구보고서 자료를 이용하여 실측 일유출자료와 모의 일유출자료를 비교하였다. 일단위 및 월단위의 유역 토양수분의 변화양상을 공간적으로 확인할 수 있었으며, 본 기법을 이용하여 1995년도 보청천의 이평교유역에 대한 지하수 함양량을 계산하였다.

핵심용어 : 격자기반, 일유출, 토양수분추적, 지하수함양량, GRASS-GIS

* 건국대학교 농업생명과학대학 농공학과 조교수

Assist. Prof., Dept. of Agric. Engrg., College of Agr. & Life Sci., Konkuk Univ., Seoul, 143-701, Korea

** 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

Researcher, The Water Resour. Research Inst., Korea Water Resources Corporation, Taejon, 306-090, Korea

1. 서 론

지하수 함양량을 분석하기 위해서는 지하수 관측 자료를 활용하는 방법, 수문곡선을 이용한 분석, 기존의 SCS 방법, 지표 구성물질의 수리특성을 분석하는 방법 및 물수지법이 주로 이용된다. 이상의 방법 중에서 지하수 관측자료를 기초로 지하수 함양량을 추정하는 경우에 가장 정확한 정보를 얻을 수 있으며, 수문곡선을 이용하는 경우에는 수문곡선에서 지하수에 대한 성분을 추출하여 지하수의 배출량을 계산함으로써 함양량을 추정하는 것으로 비교적 정확한 방법이다. 기존의 SCS 방법을 이용할 경우 계산과정에서 지면저류량으로부터 증발산량을 제외하는 방법이다.

우리나라에서는 SCS 방법을 이용하거나 지하수 함양량과 배출량이 장기간에 걸쳐 동일하다는 조건하에서 물수지법을 이용하고 있다. 한편 관측을 이용하는 경우 많은 경제적인 부담이 따르게 되며, 기존의 물수지법을 이용하는 경우에도 유역 전체를 하나의 모의 요소로 고려하는 집중형 모델(lumped model)을 이용하고 있어 유역에 대한 정확한 물리적 요소를 고려하지 못하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 물수지법의 단점을 보완하기 위하여 인공위성 자료와 수치지도 등과 같은 공간자료를 이용한 격자기반의 토양수분 추적모형을 개발하여 지하수 함양량에 대한 정보를 추출하고자 한다. 이를 위해서 지하수 함양량에 기여하는 유역의 유출량, 기저유출량 및 증발산량 등과 같은 인자를 계산할 수 있는 성분들을 Landsat TM 위성자료 및 수치고도모델, 토양도, 지하자유수위도 등으로부터 얻을 수 있는 기법을 개발하였다. 또한 본 연구의 기법을 대청댐 상류에 위치한 보청천 유역의 일부인 이평교 지점(75.6 km²)을 대상으로 '95년 및 '96년도의 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서 자료를 이용하여 적용하여 봄으로서 개발된 지하수 함양량 추정방법의 효용성을 입증하고자 하였다. 아울러 인공위성 자료와 지리정보시스템을 이용한 지하수 자원의 분포 상태를 효과적으로 파악하고 관리할 수 있는 기법을 제시하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 토양수분 추적기법 개발

본 연구에서 제시하는 격자기반의 토양수분 추적기법은 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 개개의 격자마다 일별 물수지를 위한 수문정보를 입력하여

격자별 물수지를 계산하므로써 유역에서의 시간적·공간적 수문량 변화를 파악하도록 하는 모델링 기법이다.

2.1 격자 흐름방향

격자의 흐름방향은 해당 격자로 유입되는 양과 그 격자로부터 유출되는 양을 결정하기 위하여 필요하다. 따라서 각 격자의 고도값을 이용하여 해당유역의 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. 그림 1은 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 그림 2와 같이 그림 1의 3×3 격자를 180° 회전시킨 상태로서, 주변격자들이 가지는 방향값을 읽으면 중심격자로 흘러 들어오는 격자(1, 7, 8)들을 모두 파악할 수 있게 된다(김 등, 1995).

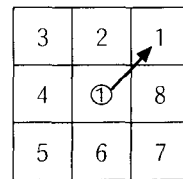


그림 1. 3×3 window and its outflow direction

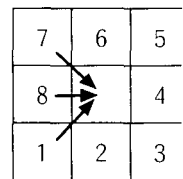


그림 2. 3×3 mirror window for inflow direction

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. 그림 3은 본 연구에서 고려하는 물수지 인자를 도시한 것이다. 모델은 각 격자별로 지표흐름과 지표하에서는 토양층을 3개(불포화층, 변동포화층, 하부층)로 구분하여 각 토양층흐름에 따른 물수지를 모의한다. 격자마다 일단위의 토양수분의 변화를 계산하는데, 토양의 포화도에 따라 지표유출이 발생하고 지하수로의 흐름이 발생된다. 지표흐름의 유입인자는 강우, 유출인자는 지표유출이고, 지표하 불포화 토양층흐름의 유입인자는 강우에 의한 침투, 주변격자로부터의 횡유입, 유출인자는 증발산, 격자의 횡유출, 변동포화 토양층으로의 침투이며, 변동포화 토양층 흐름의 유입인자는 불포화토양층으로부터의 유입, 주변격자로부터의 횡유입, 유출인자는 격

자의 횡유출, 하부토양층으로의 침투이다. 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 하천지점으로 도달하는 시간이 하루 이내이어야 하며, 지표하 흐름방향은 지표흐름방향과 동일한 것으로 가정하였다.

2.2.1 불포화층 토양수분 추적

불포화 토양층은 주로 생물이 활동하는 부분으로 간주하였으며, 이 층은 2~3m 아래로는 내려가지 않는 것으로 알려져 있다. 토양수분의 상태는 증발산, 침투에 따른 지표유출의 발생, 침투에 의한 지하수위의 변동 등에 영향을 미치므로, 격자별 토양수분의 추적은 유역내에서의 수문거동을 파악할 수 있게 된다. 토양이 포화될 때까지의 강우량은 모두 침투되며, 그 이후 강

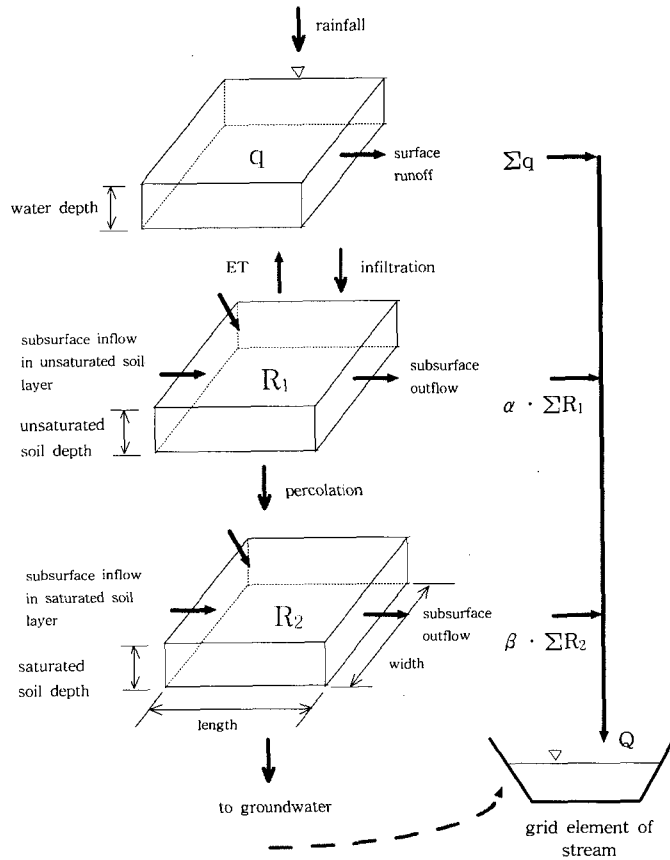


그림 3. Grid-based water balance components

우량은 모두 지표유출로 처리된다. 다음 식은 격자단위의 토양수분 수지식을 나타낸 것이다.

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

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

토양수분은 포화상태(유효공극율)에서 시들점(wilting point)의 범위내에서 변하는데, 포장용수량(field capacity)이상이 되면 식 (2)와 같이 유효공극율, 포장용수량, 토양깊이를 사용하여 유출심의 함수로 표현할 수 있으며, 그 이하에서는 증발산량에 의하여 소비된다. 여기서 포장용수량은 토양층의 경계면이 포화되기 시작하는 토양수분을 의미한다. 토양층의 수분이 포장용수량 이상이 되면 일정한 투수계수(유효투수계수)의 비율로 포화토양층으로 유입된다. 유역 경계에 위치하는 격자의 유출심은 항상 0으로 가정한다.

$$\begin{aligned} H_i &= D_c(SMu_i - F_c)/(PO_e - F_c), \\ &F_c < SMu_i < PO_e \\ &= D_c, & SMu_i \geq PO_e \\ &= 0, & SMu_i \leq F_c \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 H_i = 유출심(m), D_c = 토양깊이(m), PO_e = 유효공극율(m^3/m^3), F_c = 포장용수량(m^3/m^3)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 Priestley와 Taylor(1972)에 의해 제안된 잠재 증발산량의 2배와 거의 유사하다는 관계식을 제안했다. 그러나 Morton식에 의해 증발산량을 계산할 경우 경험식에 의해 구하는 인자가 많이 존재하게 되며, 결과적으로 복잡한 계산 과정이 필

요하다. Brusaert와 Stricker(1979)식에 의해 얻어진 증발산량은 겨울철에 과소평가되는 것으로 알려지고 있으며, 이 식에 Morton(1983) 식을 이용하여 이류항(advection term)에 대한 고려를 하였다. 이류항은 겨울철을 제외하고는 0이다. 따라서 토지피복에 의한 지중열 계수(ground heat flux coefficient)를 이용하였으며, 지표면과 토양에서 이루어지는 전도에 대한 열의 교환을 고려하였다.

$$E_a = 2E_p - E_{pp} \quad (3)$$

$$E_{pp} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + M - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_s - e_a) \quad (4)$$

$$E_p = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + M - G) \quad (5)$$

$$M = 0.66L_n - 0.44R_n \quad (6)$$

$$G = C_r \cdot R_n \quad (7)$$

여기서 E_a = 실제 증발산량(mm/day), E_p = Priestly 와 Taylor에 의한 잠재 증발산량(mm/day), E_{pp} = Penman에 의한 잠재증발산량(mm/day), Δ = 포화수증기압 곡선의 기울기($kPa/^\circ C$), γ = 건습구 온도계 정수, R_n = 순복사에너지(mm/day), M = 수면으로부터 이루어지는 에너지(mm/day), G = 지중열 flux($MJ/m^2/day$), $f(u)$ = 풍속함수(m/sec), e_s = 대기의 포화수증기압(kPa), e_a = 대기의 수증기압(kPa), L_n = 장파복사에너지($MJ/m^2/day$), C_r = 지중열계수이다. 위 식들에서 사용된 각 계수에 대한 설명은 다음과 같다.

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(237.3 + T)^2} \quad (8)$$

$$\gamma = 0.0016286 \frac{P}{\lambda} \quad (9)$$

$$P = 1013.25 - (0.119861 \times H) + (5.365 \times 10^{-6} \times H^2) \quad (10)$$

$$\lambda = 2.501 - 0.002361T \quad (11)$$

$$f(u) = 0.26(1 + 0.54u_2) \quad (12)$$

$$u_2 = u \times (Z/2)^{0.17} \quad (13)$$

$$e_s = 0.6108 \times \exp[17.27T/(237.3 + T)] \quad (14)$$

여기서 T = 대기온도(°C), P = 대기압(kPa), λ = 증발에 대한 잠열(MJ/kg), H = 고도(m), u_2 = 지상 2m에서의 풍속(m/sec), u = 풍속(m/sec), Z = 풍속관측높이(m)이다.

지표면에 입사되는 태양복사에너지는 지표면의 알베도에 비례하여 일부 반사되며, 지표면에 흡수된 태양에너지는 온도에 비례하여 장파복사에너지를 방출하게 된다. 따라서 지표면에서 순복사에너지 R_n 은 태양복사에너지와 지구복사에너지의 차로 나타낼 수 있다.

$$R_n = S_n - L_n = (1 - A)I - \sigma(T + 273.4)^4(0.56 - 0.092\sqrt{e_a})(0.1 + 0.9\frac{n}{N}) \quad (15)$$

여기서 S_n = 단파복사에너지, A = 지표면의 알베도, I = 총 입사하는 태양 복사에너지(MJ/m²/day), σ = Stefan-Boltzman 상수(4.903×10⁻⁹MJ/m²/K⁴/day), n = 일조시간(hr), N = 가조시간(hr)이다.

2.2.3 불포화토양층 지표하흐름

불포화토양층의 토양수분이 포장용수량 이상이 되면 횡방향으로의 흐름이 발생하게 되며, 이 흐름은 운동과정에 의하여 다음의 운동량 방정식을 적용하였다(Beven, 1982; Sloan과 Moore, 1984).

$$Qu_{sub} = K_s A_{sub} \sin B \quad (16)$$

여기서 Qu_{sub} = 지표하유량(m³/sec), K_s = 포화투수계수(m/sec), A_{sub} = 흐름단면적(m²), B = 경사각(degree)이다.

한편 토양층에서의 정보가 부족한 경우에는 간단한 선형저수지 개념($Qu_{sub} = \alpha \cdot R_1$, 여기서 α = 저수지계수, R_1 = 포장용수량 이상 격자의 토양수분 저류

량을 도입하여 유역의 불포화토양층 유출량을 추정할 수 있다. 이는 $\ln(Q)$ (여기서 Q 는 지표유출이 배제된 하천유출량)가 시간에 대하여 선형관계가 성립할 경우 적용할 수 있다. α 는 실측 유출자료의 감소구간으로부터 구할 수 있다.

2.2.4 변동포화토양층 지표하흐름

변동포화토양층은 불포화토양층보다는 안정된 토양의 구성과 구조를 가지며, 강우에 의하여 단기포화가 발생하는 구역으로서, 지하수유출 이전까지의 수문곡선 감쇄구간에 기여하는 토양층으로 하였다. 이 토양층에 대한 격자단위 수지식은 다음과 같다.

$$\frac{dSMS_i}{dt} = DPu(t)_i + \sum Qs_{sub.in,i} - Qs_{sub.out,i} - GW(t)_i \quad (17)$$

여기서 SMS_i = 변동포화토양층 변동량(m³), DPu = 불포화토양층으로부터의 유입량(m³), $Qs_{sub.in,i}$ = 주위격자로부터의 포화수 유입량(m³/sec), $Qs_{sub.out,i}$ = 계산격자에서의 포화수 유출량(m³/sec), GW = 하부층으로의 침투량(m³)으로서 지하수 유출성분이다.

변동포화토양층에서의 흐름도 불포화토양층에서의 흐름과 동일하게 운동량방정식을 적용하며, 임의 하천 지점에서의 변동포화토양층 유출량을 계산하려면 하천 주변격자에서 하천으로 유입되는 변동포화토양층 유출량의 합을 계산하면 된다. 그러나 불포화토양층 흐름과 마찬가지로 변동포화토양층에 대한 정보가 부족할 경우는 간단한 선형저수지 개념($Q_{gw} = \beta \cdot R_2$, 여기서 β = 저수지계수, R_2 = 변동포화토양층 함양량)을 이용하여 변동포화토양층에서의 유출량을 추정할 수 있다.

3. 토양수분 추적모델의 구성

본 모델의 구조적 흐름도는 그림 4와 같다. 모델의 입력자료로는 유역의 수치고도모델, 흐름방향도, 하천도, 토양도, 토지피복도, 지하 자유수위분포도, 티센망도를 사용한다. 본 모델은 이들 자료를 격자기반의 GIS 소프트웨어인 GRASS(U.S. Army CERL, 1993)를 이용하여 ASCII 형식의 파일로 불러들인다. 모델은 수행되면서 유역의 시간적·공간적 유출심, 토양수분 및 지하 자유수위 분포도 등을 주어진 시간간격으로 ASCII 파일형식의 도면으로 출력하며, 원하는

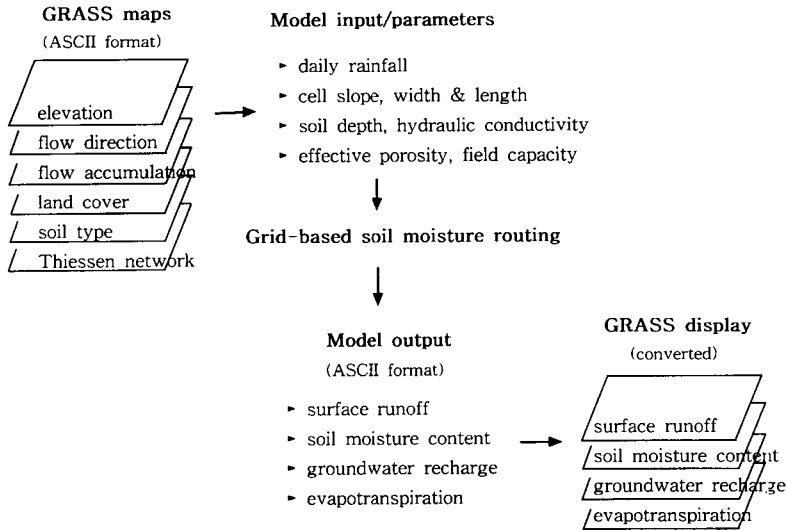


그림 4. Schematic diagram of grid-based soil moisture routing

지점에서의 유출곡선을 텍스트파일로 출력한다. 이들 결과는 격자기반 GIS 소프트웨어의 형식으로 전환시켜 그래픽으로 표현이 가능하다.

4. 자료의 준비

개발된 토양수분 추적모델의 적용성을 검토하기 위하여 준비한 도형 자료는 수치고도모델, 토양도, 토지 피복도, 지하자유수위도, 티센망도이다. 하천망과 흐름 방향도는 GRASS의 r.watershed 명령어를 이용하여 수치고도모델에서 자동생성하였다. 다음은 도형자료별 자료의 근거 및 획득 방법을 정리한 것이다.

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

수치고도모델은 미국의 국방지도청(Defense of Mapping Agency)에서 제작·보급한 것으로서, 경위도 3초 크기의 격자에 대한 평균지반 고도값이 ASCII

형태로 저장되어 있는 정수자료이다. 본 연구에서는 이 수치고도모델을 MS-Windows 95용 IDRISI에서 UTM(Universal Transverse Mercator) 좌표계로 변환하였다. 하천망은 DEM자료를 GRASS로 불러들여 r.watershed 명령어를 이용하여 생성시켰다. 그림 5는 IDRISI에서 이평교 유역경계로 잘라낸 DEM(114행×200열)을 보여주고 있다. 격자의 가로 방향 크기

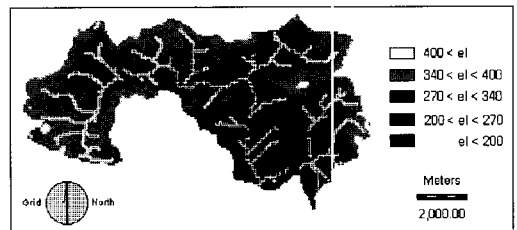


그림 5. DEM and stream network of Ipyunggyo watershed

표 1. Mapsets prepared in this study

Map	Scale/Data type	S/W	Data source
DEM	Latlong 3 arc sec.	IDRISI	D.M.A.
Soil	1 : 250,000	ARC/INFO	R.D.A.
Land cover	30×30 m ²	ER Mapper	Landsat TM
Free groundwater level	Latlong point	IDRISI	KOWACO
Thiessen	Latlong point	IDRISI	N.G.I.

Note) D.M.A.: U.S. Defense of Mapping Agency, R.D.A.: Rural Development Administration
KOWACO: Korea Water Resources Corporation, N.G.I.: National Geography Institute

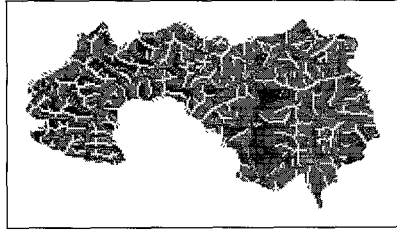


그림 6. Flowpath map from drainage map and accumulation map

는 75m이며, 세로 방향 크기는 95.5m이다.

4.2 흐름방향도

흐름방향도는 GRASS의 r.watershed를 사용하여 배수망도(drainage map)을 생성시키면 되며, 각 격자는 1~8까지의 방향값을 가지게 된다. 만약 격자값이 -1의 값을 가지면 그 격자는 와지(pits)를 나타내는데 이를 방지하기 위하여 3×3 적응박스필터(adaptive box filter) 과정을 거치게 된다. 이 필터는 해당되는 중심격자가 주변의 8격자와의 평균과 표준편차가 크게 차이가 나면 중심격자를 주변격자들의 평균치로 치환하는 방법이다. 한편 흐름방향도가 제대로 생성되었는지 확인하기 위하여 간단한 FORTRAN 프로그램을 작성하여 이평교 유역의 흐름방향도를 출력하였는 바, 하천 중의 일부가 연결되지 않은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 유역에서 흐름방향이 불완전하게 생성된 격자를 보완하기 위하여 r.watershed의 흐름누적도(accumulation map)을 이용하였다. 흐름누적도는 각 격자를 통하여 배수되는 격자의 수를 누가시켜 나타낸 것이다. 이미 생성시켜 놓은 배수망도를 흐름누적도로 보완하는 프로그램을 작성하였는데, 누가격자수가 많은 격자의 방향으로 흐름방향을 수정하도록 하였다. 그림 6은 이를 이용하여 하천이 모두 연결

된 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(그림 7).

4.4 토지피복도

토지피복도는 1995년 1월 11일, 4월 1일, 5월 3일, 6월 20일, 10월 10일, 11월 27일에 획득된 6개의

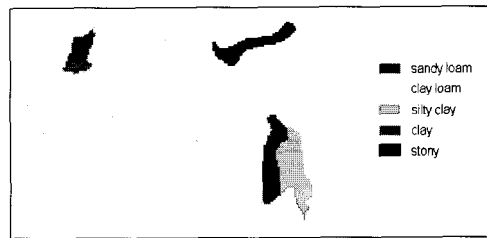


그림 7. Soil map(1:250,000) reclassified by soil type



그림 8. Land use map from Landsat TM scene

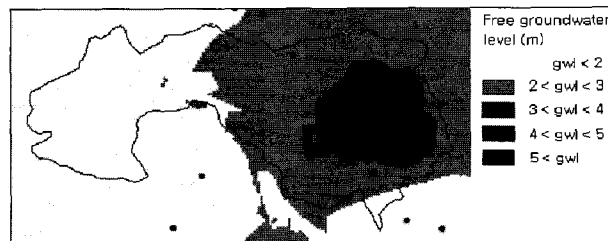


그림 9. Initial free groundwater level map of Ipyunggyo watershed

LANDSAT TM 자료(path : 115 / row : 35)를 이용하여 추출하였다. 본 연구에서는 대상지역을 크게 산림, 물, 논, 밭 등 4개의 교사자료를 선택하여 최우도법(maximum likelihood)을 이용·분류하였으며, 그 결과는 그림 8과 같다.

4.5 초기 지하자유수위도(포화토양깊이 분포도)

초기 지하자유수위 분포도는 지하수자원 기본조사보고서(한국수자원공사, 1993)의 경위도별 지하자유수위 자료를 이용하여 구축하였다. IDRISI에서 관측공의 위치도를 벡터도면(vector map)으로 작성한 후, Surface Interpolation(표면내삽)의 INTERPOL에서 자유수위에 대한 속성파일(value file)을 이용하여 지하자유수위 분포도를 생성시켰다.

4.6 티센망도

강우관측소의 경위도 좌표를 이용하여 IDRISI에서 강우관측소 위치도를 벡터도면으로 작성한 후, THIESEN을 이용하여 이평교유역의 티센망도를 생성시켰다.

5. 모델의 적용 매개변수

본 모델에 적용한 토양 매개변수(유효공극률, 포장용수량, 시뒀점)들은 Rawls 등(1982)의 자료를 인용하였으며, 그 외의 매개변수들은 보정하였는데 이들을 정리하면 표 2와 같다. 불포화토양층과 변동포화토양층의 두께는 토양의 종류에 관계없이 각각 1.0m, 6.0m로 보정하였는데, 이는 대상유역에서의 토양층과 관련된 자료를 획득할 수 없어 토양깊이를 임의로 조정하여 강우에 의한 수문곡선의 감쇄형태를 모의한 결과이다. 한편 비의 생육기간 중의 유효우량(effective rainfall)은 강우 발생전의 담수심 상태 및 물꼬관리에 따라 그 차이가 크지만, 본 연구에서는 서울대 농업개발연구소(1988)의 “저수지 불관리 연구”에서 수원지역의 30년간 기상자료를 이용하여 제시한 6월~9월의 월별 평균 유효우량을 인용하여 적용하였다(표 3).

6. 모델의 적용결과 및 고찰

모델의 적용성을 검토하기 위하여 보정천유역의 일부인 이평교유역(75.6 km²)을 대상으로 본 모델을 적용하였다. 수문자료는 '95~'96년도 IHP유역 연구보고

표 2. Soil parameters calibrated in this study

Soil type Parameters	Sandy loam	Clay loam	Silty clay	Clay	Stony
PO _t (cm ³ /cm ³)	0.453	0.464	0.479	0.475	0.437
PO _e (cm ³ /cm ³)	0.412	0.390	0.423	0.385	0.417
F _c (cm ³ /cm ³)	0.207	0.318	0.387	0.396	0.091
W _p (cm ³ /cm ³)	0.095	0.197	0.250	0.272	0.033
D _{cu} (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
D _{cs} (m)	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
K _{ss} (cm/day)	90.0	12.5	12.5	3.0	250.0
K _{su} (cm/day)	45.0	6.25	6.25	1.5	125.0

Note) PO_t : Total porosity

D_{cu}, D_{cs} : Depth of unsaturated & saturated soil layer respectively

K_{ss}, K_{su} : Saturated hydraulic conductivity of unsaturated & saturated soil layer respectively

표 3. Effective rainfall of paddy field used in this study

(unit:mm/day)

Month Eff. rainfall	June	July	August	September
Maximum	31.0	46.0	30.0	37.0
Minimum	10.0	6.0	6.0	7.0
Average	14.0	16.0	13.0	16.0

서의 보청천유역 일수문자료를 이용하였다. 기상자료는 보은관측소의 일기상자료를 사용하였고, 강우자료는 이평교유역을 지배하는 이원, 동정, 삼산축후소의 자료를 이용하였으며, 유출량자료는 이평교지점에서 실측된 자료를 이용하였다. 본 모델에서의 증발산량에 대한 결과는 채 등(1999)의 논문에 자세히 설명되어 있다.

6.1 이평교지점에서의 일유출량 비교

'95년의 이평교유역 평균강수량(3월~11월)은 819.9 mm(이원 : 880.3mm, 동정 : 914.5mm, 삼산 : 733.2mm)이었으며, IHP 보고서에 의한 이평교지점에서의 실측 유출량은 474.8mm로서 유출율은 57.9%이었다. 수문곡선의 전반적인 형태 특히 감쇄구간에서의 기울기 등은 모델의 적용성 검토에 사용하였다.

강우 종료후 유출이 감소하는 양상을 선형저수지 개념으로 표현가능한지를 파악하기 위하여 '95년도 자료들을 대상으로 하여 그림 10과 같이 유출 발생후 경과일에 대한 유출량의 대수값을 도식한 결과, 지표하 불포화토양층과 변동포화토양층에서의 선형저수지계수(α, β)를 조합하면 유출 감쇄구간을 적절히 표현할 수 있을 것으로 판단되었다. 본 유역에 대한 불포화토양층 저수지계수(α)와 변동포화토양층 저수지계수(β)를 각각 0.088 days^{-1} , 0.022 days^{-1} 로 하여 이평교지점에서의 실측 일유출량과 모델에 의한 모의발생 일 유출량을 비교하면 그림 11과 같으며, 유출량은 402.3mm(유출율; 49.1%)로 모의되었다. 불포화층 토양수분저류량(R_1)과 변동포화층 토양수분함양량(R_2)의 변화량을 조정하면서 실측 일유출량의 형태를 따라가는지 확

인하였는데, 전반적인 유출의 특성과 감쇄형태를 잘 표현하는 것으로 나타났다.

그림 12는 '96년에 대한 결과인데, 평균강수량(3

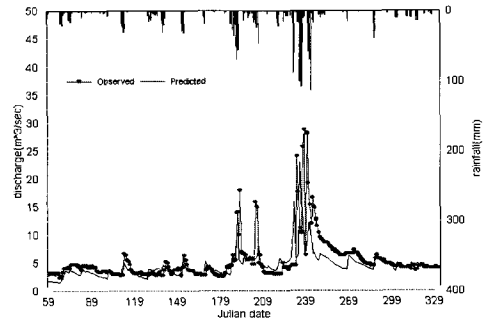


그림 11. Predicted versus observed streamflow(1995)

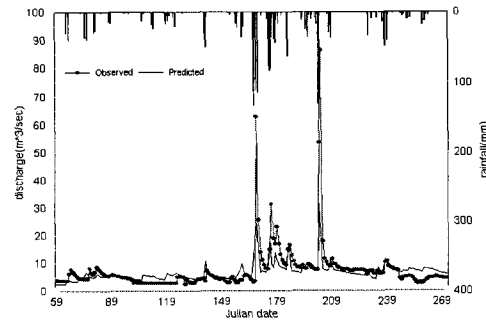


그림 12. Predicted versus observed streamflow(1996)

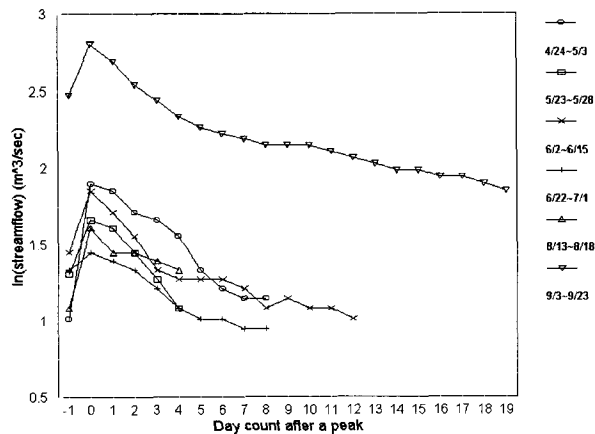


그림 10. Recession curves for Ipyunggyo watershed showing the pattern of $\ln(\text{streamflow})$

월~9월)은 968.7mm(이월 : 978.1mm, 동정 : 971.6 mm, 삼산 : 957.5mm)이었으며, 실측 유출량은 391.3 mm로서 유출율은 40.4%이었다. '95년도에 보정된 동일한 매개변수들을 이용한 결과 유출량은 362.3mm (유출율; 37.4%)로 모의되었다.

6.2 토양수분의 시간적·공간적 분포

그림 13은 '95년 3월부터 10월까지의 월 토양수분의 변화를 나타낸 것이다. 월별 토양수분의 상태를 살펴보면 6월~8월의 3개월간은 유역의 토양수분이 높은

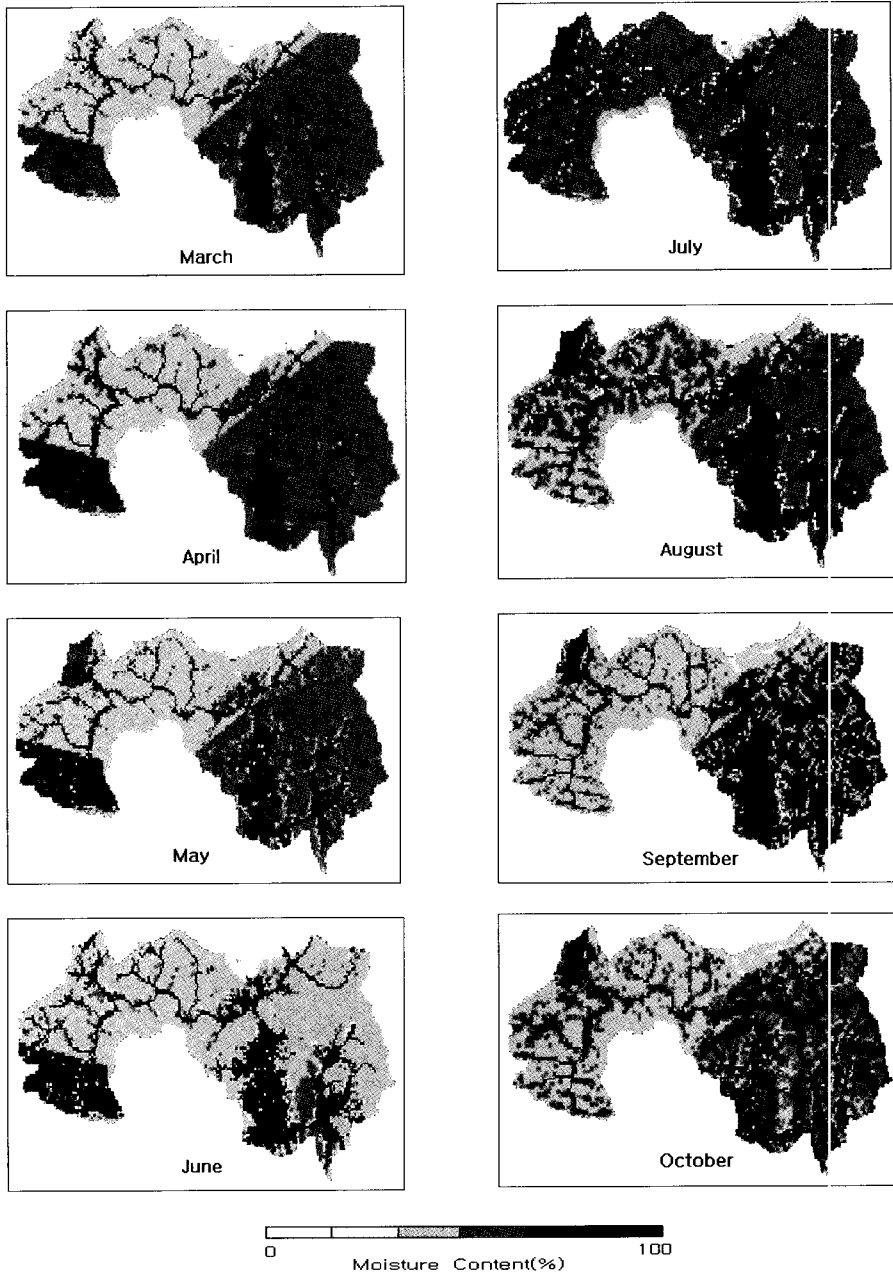


그림 13. Soil moisture content predicted for eight months(March~October, 1995)

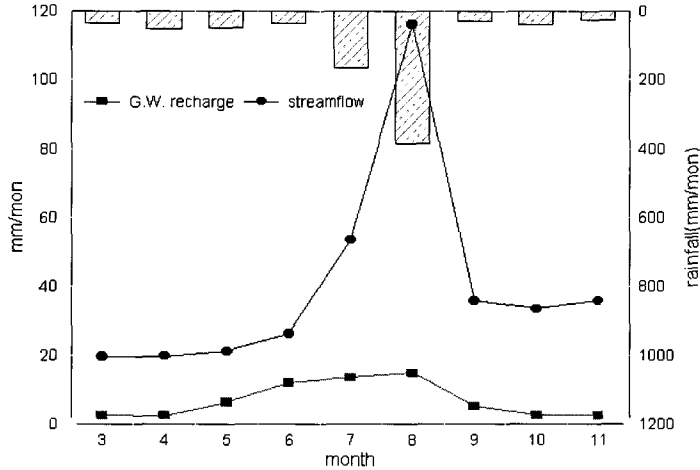


그림 14. Monthly predicted groundwater recharge(1995)

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.

6.3 지하수 함양량 추정

본 연구에서의 지하수 함양량은 변동포화토양층에서 하부층으로 침투되는 양으로 정의한다. 그림 14는 '95년도 3월~11월에 대한 월별 지하수 함양량을 모의하여 도시한 것이다. 총 강우량 819.9mm, 유출량 402.2mm(유출율 : 49.1%), 증발산량 638.4mm(증발산 손실율 : 77.9%)에 대한 총 지하수함양량은 61.7mm(함양율 : 7.53%)로 모의되었다. 이 기간동안의 유역 물수지를 보면 산정손실량(증발산량+지하수함양량)이 평형손실량(강우량-유출량)보다 282.4mm 크게 산정되어 물수지상 불균형을 보이고 있는데, 이는 이 기간중의 강우량이 평년강우량보다 작은데 기인한 것으로 판단된다. 지하수함양량 중에서 6월~8월 동안의 함양량이 40.3mm, 기여율은 약 65.3%를 차지하며, 여기에 5월과 9월의 함양량 11.4mm를 합하면 약 83.8%로서 5개월(5월~9월)동안의 지하수함양량이 기간중 지하수함양량의 대부분을 차지하는 것으로 추정되었다.

7. 결 론

지하수 함양량을 추정하기 위한 방법으로 격자기반

의 토양수분 추적기법을 모델링하였다. 본 모델은 C-언어로 구성하였으며, 전처리과정으로서 GRASS를 이용하여 모델에 필요한 자료(수치지도모델, 하천도, 흐름방향도, 토양도, 토지피복도, 티센망도 등)를 준비하고, 모델은 이들을 ASCII 형태로 받아들여 일별 수행 결과(유역출구에서의 유출량, 지표유출 분포도, 토양수분 분포도 등)들을 ASCII 형태의 화일로 자동발생시킨 후, 후처리과정으로서 이들 결과를 GRASS상에서 도시하여 주는 형태로 구성하였다.

모델의 적용성을 검토하기 위하여 보청천유역의 일부인 이평교 유역(75.6 km²)을 대상으로 '95년 및 '96년도의 IHP유역 연구보고서 자료를 이용하였다. 실측 일유출자료의 전반적인 형태 특히 감쇄구간에서의 기울기 등을 모델 개발에 사용하였으며, 간단한 선형저수지 개념을 도입하여 유역출구에서의 일유출량을 모의할 수 있도록 개발하였다. 개발과정에서 일단위 및 월단위의 유역 토양수분의 변화양상을 공간적으로 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 토양수분 추적기법을 이용하여 1995년도 보청천의 이평교유역에 대한 지하수 함양량을 계산하였다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1995). 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.
- 건설교통부 (1996). 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.
- 김대식, 정하우, 김성준, 최진용 (1995). "소유역 지

- 표유출의 공간적 해석을 위한 지리정보시스템 응용모형(II)-격자 물수지모형을 위한 GIS응용 모형 개발-." 한국농공학회지, 한국농공학회, 제 37권, 제5호, pp. 35~42.
- 서울대 농업개발연구소 (1988). 저수지 물관리 연구 (IV).
- 채효석, 김성준, 정관수 (1999). "격자기반의 일 증 발산량 추정모형 개발." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 721-730
- 한국수자원공사 (1993). 지하수자원 기본조사보고서.
- 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.
- Brusaert, W., and Stricker, H. (1979). "An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration." *Water Resources Res.*, Vol. 15, pp. 443-450.
- Earth Resources Mapping Pty Ltd. (1997). ER Mapper 5.5, Western Australia.
- ESRI (1992). *PC ARC/INFO, Ver. 3.4.2*. Redlands, CA.
- Morton, F.I. (1978). "Estimating evapotranspiration from potential evaporation- Practically of an iconoclastic approach." *J. of Hydrology*, Vol. 38, pp. 1-32.
- Morton, B.L. (1983). "Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology." *J. of Hydrology*, Vol. 66, pp. 1-76.
- Priestley, 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.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Saxton, K.E. (1982). "Estimation of soil water properties." *Trans. of ASAE*, Vol. 25, pp. 1316-1320, 1328.
- 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.
- (논문번호:99-075/접수:1999.09.13/심사완료:1999.11.11)