

소유역 지표유출의 공간적 해석을 위한 지리정보시스템의 응용모형(I)

- 격자 물수지 모형의 개발 및 적용 -

GIS Application Model for Spatial Simulation of Surface Runoff from a Small Watershed(I)

- Development and Application of the Cell Water Balance Model -

김 대 식* · 정 하 우**
Kim, Dae Sik · Chung, Ha Woo

Summary

Geographic data which are difficult to handle by the characteristics of spatial variation and variety turned into a possibility to analyze with the computer-aided digital map and the use of Geographic Information System(GIS). The purpose of this study is to develop and apply a GIS application model (GISCELWAB) for the spatial simulation of surface runoff from a small watershed. This paper describes the modeling procedure and the applicability of the cell water balance model (CELWAB) which calculates the water balance of a cell and simulates surface runoff of watershed simultaneously by the interaction of cells.

The cell water balance model was developed to simulate the temporal and spatial storage depth and surface runoff of a watershed. The CELWAB model was constituted by Inflow-Outflow Calculator (IOC) which was developed to connect cell-to-cell transport mechanism automatically in this study.

The CELWAB model requests detail data for each component of a cell hydrologic process. In this study, therefore, BANWOL watershed which have available field data was selected, and sensitivity for several model parameters was analyzed. The simulated results of surface runoff agreed well with the observed data for the rising phase of hydrograph except the recession phase. Each mean of relative errors for peak discharge and peak time was 0.21% and 2.11% respectively. In sensitivity analysis of CELWAB, antecedent soil moisture condition(AMC) affected most largely the model.

* 서울대학교 대학원

키워드 : 지리정보시스템, 수문모형, 유출입계산자,

** 서울대학교 농업생명과학대학

이송체계

I. 서 론

기존의 강우-유출해석 모형은 분석 대상 유역의 유역출구에서 수문곡선만을 구하도록 구성되어있다. 그러나 모형을 유역내 유출현상의 전체적인 파악에 이용할 수 있도록 하기 위해서는 모형이 유역출구에서 수문곡선 뿐만 아니라 유역내 모든 지점에서 물의 이동 현상을 재현할 수 있도록 구성되어야 한다. 그런데 지점별로 물의 흐름을 재현하기 위해서는 지점의 흐름방향 및 지점간 물의 이송관계가 우선적으로 구명되어야 하고 이로부터 강우-유출을 유역전체에 대하여 공간적으로 해석할 수 있는 분포형 모형이 필요하다.

분포형 모형은 유역을 격자별로 분할하여 이 격자에 대한 지형자료를 요구한다. 격자별 자료에는 고도자료, 토양도, 토지이용도 등이 포함되며, 이 중에서 고도자료는 흐름방향 형성의 기초자료가 된다. 지형자료가 수치지도화되고 이를 이용할 수 있는 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)이 개발되므로써 격자를 기존 수작업에 의한 방법보다 더욱 정교하게 분할할 수 있게 되어 유역을 수천개에서 수만개 이상의 격자로 구성할 수 있게 되었다. 따라서 이때에 수작업에 의한 흐름방향 형성과 이송체계의 작성은 불가능하게 된다. 그러므로 모형도 이런 정교한 GIS자료를 효율적으로 이용할 수 있도록 개발되어야 하며, 이를 위해서는 격자별 흐름방향을 형성하고 이송체계를 자동으로 추적할 수 있는 기법이 필요하다.

본 보에서는 GIS의 흐름방향 형성기법을 이용 및 응용하여 격자수문기작을 구성하고, 격자간 이송체계를 자동으로 추적하므로써 모든 격자에 대한 물수지 계산을 가능하게 하는 유출입계산자를 개발하며, 이를 이용하여 격자 물수지 모형을 개발하는데 그 목적을 두었다. 또한 시험유역에 대하여 모형의 적용성을 검토하였다.

II. 기본이론

1. 격자 수문기작

지상의 어느 지점에 내린 강우는 그 지점의 수문인자에 영향을 받으며 물리적 자연법칙에 따라 흘러가게 된다. 흘러가는 물은 도중에 계속 변하는 수문특성에 따라 흐름방향 및 흐름특성이 달라지게 된다. 즉 임의지점에서 통과하는 물에 대해 수문특성을 고려해 줄 수 있고 시간 간격별로 지점의 저류량의 변화를 알 수 있다면 지점별, 시간 간격별 물수지 개념으로 유역전체에 걸쳐 강우-유출관계의 재현이 가능하게 된다.¹⁾

한 지점을 동질 요소의 격자로 나타내고, 이 격자에 대한 수문과정을 다음과 같이 정의할 수 있다. 강우가 지면에 닿기 전에 일부는 식물 등에 의해 차단되고 일부는 증발되며, 지면에 도달한 강우의 일부는 지면凹凸부분에 저류되어 침투되고, 이를 충족시킨 물은 지표유출을 형성하고 흐름방향을 따라 아래로 흐르며, 도중에 다시 저류되거나 침투되기도 하는데 이를 모두 충족시키고 남은 물은 유역출구의 직접유출량에 기여하게 된다. 한편 침투된 물은 토양의 포장용수량을 충족시키면서 배수되어 지하수를 이루며 도중에 지표유출로 환원되어 지표유출을 이루기도 한다.²⁾

이러한 격자별 수문순환과정을 고려하여 인접격자와 격자 사이의 상호 물수지 관계를 규명하면, 유역의 모든 격자에 대하여 시간 간격별로 물수지계산이 가능하게 되고 유역 출구에 있는 격자의 시간별 유출량이 유역전체의 유출곡선이 된다.¹⁾

Hewlette(1982)은 소유역의 경우 지하유출의 속도는 매우 느려서 강우지속기간 동안에는 하천흐름에 거의 기여하지 않으며, 지표유출에 거의 영향을 주지 않는다고 하였다.³⁾ 따라서 본 연구에서는 침투유출에 기여도가 적은 중간유출을 제외하고 지표유출만으로 침투

유량과 도달시간을 산정하기 위하여 임의의 지점에서 지표유출의 기작을 Fig. 1과 같이 도식적으로 정의하였다. Fig. 1의 유출기작의 성립을 위해서 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 지표유출은 격자의 흐름방향을 따라 한 방향으로만 흐른다.
- 2) 마찰경사는 바닥경사와 같다.
- 3) 강우지속 기간 동안에는 지하유출이 지표유출로 환원되지 않는다.
- 4) 침투는 수직방향으로만 이루어진다.

2. 지배방정식

Fig. 1의 각 성분을 구성하는 방정식을 정의하면 다음과 같다.

가. 동수파 공식

(Kinematic Wave Equation)

격자내의 흐름으로써 직접유출량에 기여하는 흐름은 지표흐름(surface flow)과 하천흐름(channel flow)으로 구별된다. 이 흐름들은 부정류(unsteady flow)이므로 연속방정식과 운동량방정식으로 해석이 가능하다.

지표류나 작은 하천흐름에서 처럼 배수효과(backwater effect)가 없는 경우에는 운동량방정식의 동력학적인 항(dynamic term)을 무시하고, 하도경사와 마찰경사를 같다고 가정하면 식(1)과 같이 유도된다. 이를 Manning의 평균유속공식에 적용하면 식(2)와 같이 유도된다.

$$S = S_f \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, Q 는 유량(m^3/s), A 는 단면적(m^2), R 은 동수반경 m , n 은 조도계수, S_0 는 하도경사, S_f 는 마찰경사를 나타낸다.

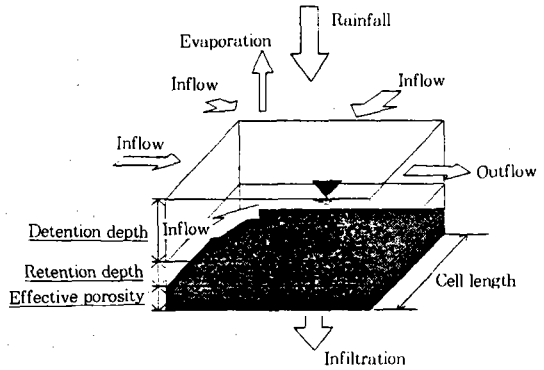


Fig. 1. Computational cell dimensions and the components of hydrologic process

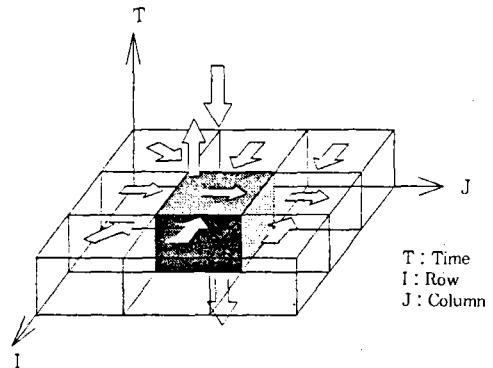


Fig. 2. Modeling of inflow-outflow relationship

나. 지면 저류량(Retention storage)

지면 凹凸부분에 저류되어 침투, 증발로 손실되는 양으로 지면의 조도상태에 따라 결정되는데, Huggins & Monke의 식 (3)과 같이 구성된다.

$$DEP = HU \times ROUGH \times \left(\frac{H}{HU}\right)^{(1/ROUGH)} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, DEP 는 저류량(mm) H 는 수심(mm), HU 는 조도의 최고높이(mm) $ROUGH$ 는 지표면특성 매개변수이다.

다. 침투(Infiltration)

침투율은 Huggins & Monke가 토양함수량의 함수로 표시한 식 (4)와 같이 구성된다.

$$FMAX = FC + A\left(\frac{PIV}{TP}\right)^B \dots\dots\dots (4)$$

여기서, FMAX는 침투율(mm/hr), FC는 정상상태의 침투율(mm/hr), PIV는 토양중의 잉여저류량(mm³), TP는 격자의 총공극량(mm³), A는 초기침투량(mm/hr), B는 지수이다.

라. 배수(Drainage)

격자의 용적으로 부터 토양수분이동은 격자 용적내의 토양수분함량에 따른 함수로 나타낸다. 토양수분이 포장용수량에 달한 경우에 배수되므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$DR = FC \left(1 - \frac{PIV}{GWC}\right)^{e_d} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, DR은 배수율(mm/hr), GWC는 최대중력수량(mm₃), e_d는 지수이다.

III. 유출입 계산자의 개발

1. 흐름방향 생성

(Flow direction generation)

GIS에서 격자의 흐름방향을 생성하기 위한 기법으로는 유입격자를 표시하는 유입격자도(inflow cell map) 생성과 유출격자를 표시하는 유출격자도(outflow cell map) 생성으로 구별되고, 이 중에서 유출격자도를 흐름방향도(flow direction map)라 한다.

유입격자도는 Greenlee(1987)가 개발한 Fig. 3과 같은 3×3의 윈도우를 사용하여 격자의 고도자료로 부터 생성하는데, 그 원리는 임의의 격자는 주위의 8개 격자로 둘러싸여 있으며, 계산격자(processing cell)를 윈도우의 가운데에 놓고 주위 8개 격자 중에서 고도

값이 높은 격자의 위치에 있는 윈도우의 2진수(binary)를 합산한 후 이 값을 계산격자에 저장하므로써 유입 격자도를 생성하게 된다. 여기서 8개의 2진수 조합으로 0~254까지 나타낼 수 있는데 이 조합은 절대 중복되지 않으며, 이 값으로 각 격자는 흘러들어오는 격자를 기억하게 된다.

흐름방향도는 윈도우를 사용하여 주위 격자간에 가장 급한 경사를 가지는 격자의 2진수로 표시하게 되고, 이는 최급경사방향(direction of the steepest slope)이 된다. Fig. 4는 고도자료(Digital Elevation Model, DEM)로 부터 윈도우를 사용하여 생성된 유입격자도와 흐름방향도를 나타낸 것이다.

2. 유출입계산자 (Inflow-Outflow Calculator)

유입격자도의 값을 역추적하면 계산격자로 흘러들어오는 격자를 찾아낼 수 있게 된다. 그러나 유입량 계산에 유입격자도를 이용하는 데는 Fig. 5와 같이 한 격자는 0~8개의 흐름방향을 가질수 있으므로 한 방향의 흐름을 가진다는 기본 가정에 위배된다. 그러므로 GIS에서 생성되는 유입격자도를 수정없이 사용하기에는 이러한 문제점이 발생하기 때문에 이것을 해결할 수 있는 새로운 기법의 개발이 필요하게 된다.

본 연구에서는 이런 흐름방향의 중복성 문제를 해결하고자 흐름방향도를 이용하여 유입격자를 찾아내는 새로운 윈도우를 개발하고, 이를 유입계산자(inflow calculator)라 명명하였다. 이의 원리는 Greenlee(1987)의 윈도우

6	7	8	Corresponding bit position							
5		1	8	7	6	5	4	3	2	1
4	3	2	128	64	32	16	8	4	2	1

Neighborhood cell positions Base10 bit values

Fig. 3. Generation window of inflow and outflow map

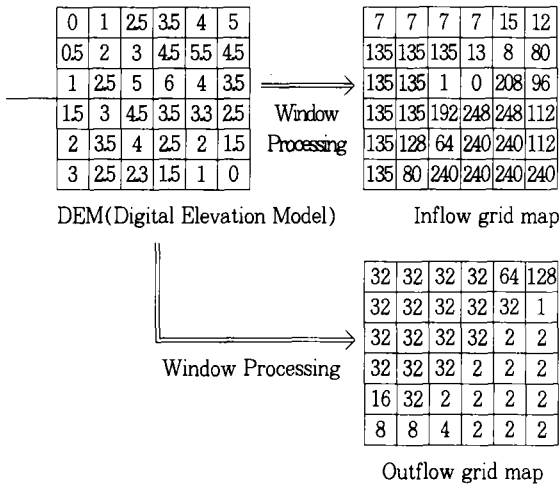


Fig. 4. Generated example of inflow and outflow map

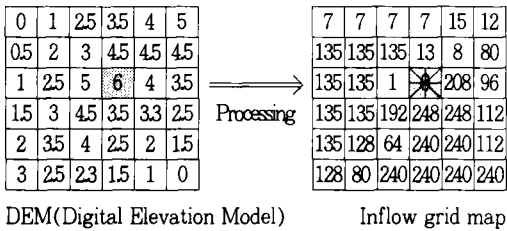


Fig. 5. Multiple flow direction

를 1800 회전시킨 것으로 흐름방향 벡터의 출발점에서 종점으로 바라보는 시각을 종점에서 출발점으로 바라보는 시각으로 옮겨 놓은 것이다. 이를 흐름도로 나타내면 Fig. 6과 같은데 주위 8개의 흐름방향 벡터를 검색하여 계산격자로 흘러들어오는 격자를 유입계산자로 찾아내고 계산격자의 흐름방향벡터를 유출계산자로 읽어 유출방향을 찾아내게 된다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 고도자료로부터 생성된 GIS의 유입격자도는 흐름방향이 중복되는 반면, Fig. 8에서 처럼 본 연구에서 개발한 유입계산자는 흐름방향도로 부터 유입격자를 결정하므로써 한 방향의 흐름을 가지게 된다. 이들로부터 격자의 유출입량을 계산하기 위해 유입계산자를 사용하여 유입량을 계산하고, Greenlee의 윈도우를 사용

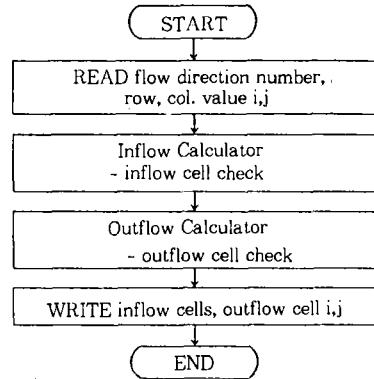


Fig. 6. Flow chart of Inflow-Outflow Calculator

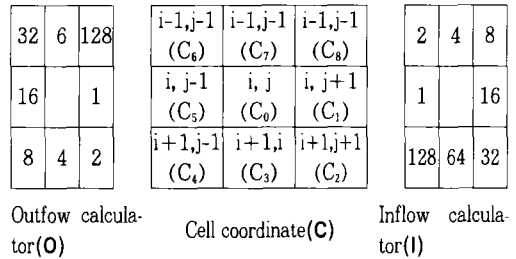


Fig. 7. Inflow-Outflow Calculator, IOC

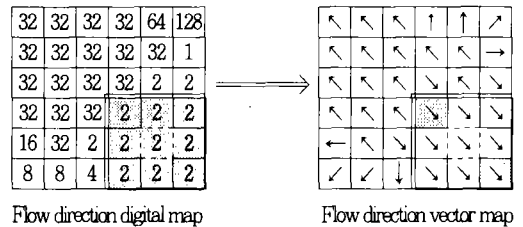


Fig. 8. Vector map of flow direction

하여 유출량을 계산하는 유출입계산자(Inflow-Outflow Calculator, IOC)를 Fig. 7과 같이 구성하였다. 이 IOC는 격자별 이송체계를 자동으로 추적하여 격자별 물수지 계산을 가능하도록 하기 위한 것이다.

Fig. 7과 Fig. 8을 설명하면 다음과 같다. 계산격자의 좌표를 $i, j(C_0)$ 라 하면 주위 인접격자는 Fig. 7에서 격자좌표(Cell coordinate, C)와

같이 C_1 에서 C_8 까지 정의할 수 있다. 이들의 각각 위치에 해당하는 유출계산자(Outflow calculator, O)와 유입계산자(Inflow calculator, I)의 값들을 식 (6) 및 식 (7)과 같이 행렬로 나타낼 수 있다.

$$O = [O_1 \ O_2 \ O_3 \ O_4 \ O_5 \ O_6 \ O_7 \ O_8]$$

$$= [1 \ 2 \ 4 \ 8 \ 16 \ 32 \ 64 \ 128] \dots (6)$$

$$I = [I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4 \ I_5 \ I_6 \ I_7 \ I_8]$$

$$= [16 \ 32 \ 64 \ 128 \ 1 \ 2 \ 4 \ 8] \dots (7)$$

여기서, O 는 유출계산자 행렬, I 는 유입계산자 행렬이다.

이들을 Fig. 8의 흐름방향 수치지도(Flow direction digital map)의 음영으로 된 부분에 적용하면 계산격자(C_0)는 가운데 점선격자가 되며 주위 인접격자에 대해서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_0 = 2 \dots (8)$$

$$C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8]$$

$$= [2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2] \dots (9)$$

여기서, C 는 인접격자의 흐름방향 값을 나타내는 행렬이다.

식 (8)의 계산격자(C_0)의 값과 식 (6)의 유출계산자(O)의 값이 일치하는 것은 O_2 가 되어 계산격자는 $C_2(i+1, j+1)$ 의 방향으로 흘러간다. 또한 식 (7)과 식 (9)에서 서로 일치하는 것은 I_6 이 되어 계산격자로 흘러 들어오는 격자는 $C_6(i-1, j-1)$ 이 된다. 따라서 이들을 Fig. 8의 흐름방향 벡터지도(Flow direction vector map)에서 음영으로 된 격자로 표시할 수 있다.

IV. 격자 물수지 모형의 개발

1. 격자 물수지식의 구성

Fig. 1의 격자수문기작의 각 성분을 나타내는 지배방정식과 Fig. 2와 같은 인접 격자의 흐름 관계로 부터 격자의 저류량 변화는 저류방정식 (10)과 같이 표시된다.

$$\frac{dS_{i,j,t}}{dt} = \sum I_{i,j,t} - \sum Q_{i,j,t} \dots (10)$$

여기서, i 는 행번호, j 는 열번호, t 는 시간, $S_{i,j,t}$ 는 격자의 저류량(m^3)은 dt 는 계산시간 간격(s), $\sum I_{i,j,t}$ 와 $\sum Q_{i,j,t}$ 는 각각 격자의 유입량과 유출량의 합(m^3/s)으로써 식 (11)과 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\sum I_{i,j,t} = \sum I_d + R_t * A \dots (11)$$

여기서, $\sum I_d$ 는 (i, j, t)주위 8개 격자중 흘러 들어오는 격자의 지표유입량의 합(m^3/s), R_t 는 dt 동안의 강우량(m/s), A 는 격자의 면적(m^2)이다.

$$\sum Q = DISCH_{i,j,t} + FMAX_{i,j,t} + EVAP_{i,j,t} \dots (12)$$

여기서, $DISCH_{i,j,t}$ 는 지표유출량(m^3/s), $FMAX_{i,j,t}$ 는 침투량(m^3/s), $EVAP_{i,j,t}$ 는 증발산량(m^3/s)을 나타낸다.

이상의 식들로 부터 t 시간의 저류량은 $t-1$ 시간의 저류량으로부터 식 (13)과 같이 표시된다.

$$S_{i,j,t} = S_{i,j,t-1} + \Delta S_{i,j,t} \dots (13)$$

여기서, $S_{i,j,t}$ 는 t 시간 i, j 격자의 저류량(m^3), $\Delta S_{i,j,t}$ 는 Δt 시간동안 저류량의 변화량(m^3)이다.

2. 격자 물수지 모형의 구성

개발된 유출입계산자를 이용하여 Fig. 9와 같이 격자 물수지 모형(Cell Water Balance Model, CELWAB)을 개발하였다.

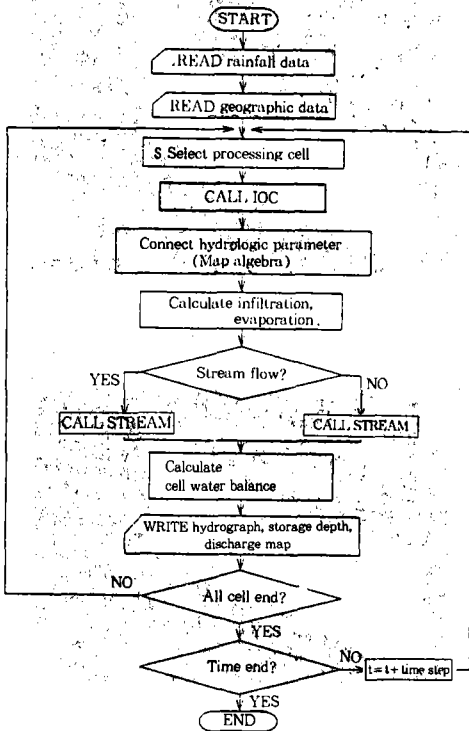


Fig. 9. Flow chart of CELWAB model

V. 모형의 적용

1. 유역의 개요

CELWAB 모형의 적용을 위해서는 Fig. 1의 각 성분을 구성할 수 있는 정교한 자료가 필요하다. 본 연구의 시험유역은 경기도 안산시 반월동에 위치한 WS#1 유역으로, 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과에서 측정하여 발표한 자료를 이용하였으며, 김(1986)은 이 유역에 ANSWERS 모형을 적용하여 좋은 결과를 보인 바 있다.²⁾

본 유역의 지상인자는 유역면적 274ha, 주하천 길이 3.85km, 하천 평균경사 13.77m/km이

며, 토지이용은 임야 85.7%, 논 10% 등으로 구성되어있고, 토양 특성은 양토 49.78%, 자갈 또는 잔돌이 있는 양토 26.21%로 이루어져 있다.^{1), 2)} 식생 및 피복상태는 차단, 지면 저류량, 유효수심 등을 결정하는데 이용되며, 이들에 대한 값은 Table-1과 같은 지수를 사용하였다.^{1), 2)} 본 연구에서는 토양 피복도 작성의 어려움으로 토지이용상태에 따라 논은 paddy rice, 밭은 beans, 임야는 woods, 기타는 home site의 값을 각각 사용하였다.

Table-1. The coefficients of each land cover condition

land cover	coefficient of cover condition				
	PIT	PER	RC	HU	RN
corn	0.75	0.60	0.47	15.0	0.070
grass	1.0	1.00	0.44	3.0	0.150
pasture	0.4	1.00	0.55	3.5	0.040
beans	1.0	0.90	0.47	10.0	0.60
paddy rice	0.04	0.90	0.55	20.8	1.120
woods	1.7	0.90	0.55	8.5	0.200
homesite	0.02	0.50	0.40	9.0	0.090
fallow	0.00	0.00	0.47	7.0	0.100

note) PIT: maximum potential interception(mm)
 PER : percent cover(%)
 RC : roughness coefficient
 HU : roughness height(cm)
 RN : Manning's n

배수계수, 하천자료와 강우자료는 김(1986)이 사용한 값들을 이용하였는 바, 배수율을 조절하는 배수계수는 모든 격자에 대하여 2.54mm/24hr, 하천단면자료로는 폭 2.048m, 4.572m와 조도계수 0.06, 0.08의 두가지 형태를 사용하였으며, 모의 발생 결과와 비교하기 위하여 사용된 강우자료는 김(1986)이 실측자료에서 수평분리법에 의하여 기저유출을 분리한 1986년 7월 11, 16, 24일과 8월 13, 20일의 5개 자료를 사용하였다.²⁾

2. 도형자료의 구축

CELWAB 모형의 입력자료는 격자의 각 성

분의 방정식에 필요한 것으로 경사도, 토양도, 토지이용도, 흐름방향도, 토양피복도의 5가지 지형도를 필요로 하며, 이들을 ARC/INFO로부터 적절한 자료처리 과정을 거쳐 생성하여 Fig. 10~Fig. 11와 같이 30m의 격자지도(Grid map)로 나타내었다. 나머지는 金(1995)¹⁾에 상세히 기록되어 있다.

상대 침투율(FC), 침투통제깊이(DF), Manning의 조도계수(n)와 지표면 조도높이(HU)의 6개 매개변수는 강우에 따라 상이하다고 연

3. 초기조건 및 조절 매개변수

초기토양함수량은 토양의 물리적 특성과 기후 조건 등에 의하여 결정되는데, 유역전체에 대하여 일별 물수지식으로 산정한 값을 사용하였다.

$$ASM = ASML + RAIN - ET - RO - PERC \dots\dots\dots (14)$$

여기서, *ASM* = 초기 토양함수량(mm), *ASML* = 직전 토양함수량(mm), *RAIN* = 일강우량(mm), *ET* = 일증발산량(mm), *RO* = 일유출량(mm), *PERC* = 일지하침투량(mm)이다.

한편, 본 연구에서는 침투량 계산을 위해 Holtan식의 매개변수들을 사용하였으며, 이 중에서 초기함수량(*ASM*), 초기침투율(*A*), 정상

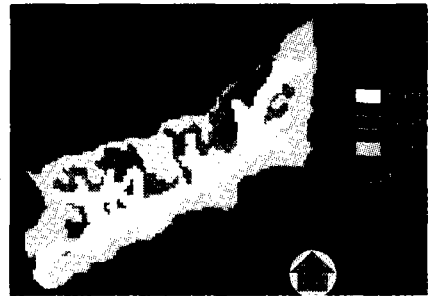


Fig. 10. Land use grid map of WS #1

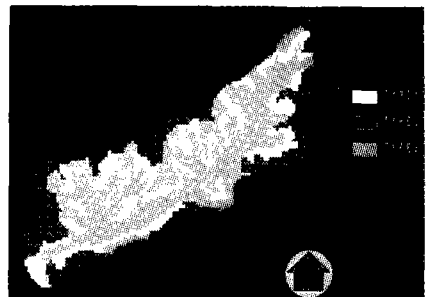


Fig. 11. Soil grid map of WS #1

Table-2. Optimal parameters for simulation of CELWAB model

Water-sjed	stpr event	model	Infiltration Parameters				Surface roughness HU, mm	Manning's Coefficient	
			FC mm/hr	A mm/hr	DF mm	ASM (%)		Overland flow	Overland flow
WS #1	7/11/86	ANSWERS	3.04	1317	120	50	9.6	0.070	0.070
		CELWAB	3.52	127.0	120	50	9.6	0.070	0.070
	7/16/86	ANSWERS	3.08	130.0	125	52	9.7	0.099	0.070
		CELWAB	4.81	158.5	104	52	9.6	0.099	0.070
	7/24/86	ANSWERS	4.38	131.7	110	77	9.6	0.104	0.050
		CELWAB	3.81	158.5	107	77	9.6	0.104	0.050
	8/13/86	ANSWERS	1.93	33.3	72	93	9.6	0.104	0.075
		CELWAB	2.56	52.3	84	93	9.6	0.104	0.075
	8/20/86	ANSWERS	3.60	116.7	70	59	9.6	0.104	0.110
		CELWAB	4.42	145.1	61	59	9.6	0.104	0.110
	Mean	ANSWERS	3.21	108.7	99	66	9.6	0.096	0.075
		CELWAB	4.02	128.3	95	66	9.6	0.096	0.075

구 발표된 바 있으므로, 이들을 강우에 따른 보정매개변수로 하여 Table-2에 정리하였다. Table-2의 결과를 보면, 강우 사상별로 정상상

태 침투율은 2.56~4.81mm/hr, 초기침투율은 52.3~158.5mm/hr, 침투통제깊이는 61~120mm로 많은 차이를 보이고 있으며 조도계수(n)는 지표류인 경우 0.07~0.104, 하천류인 경우 0.05~0.11까지 약간의 차이를 보이고 있다.

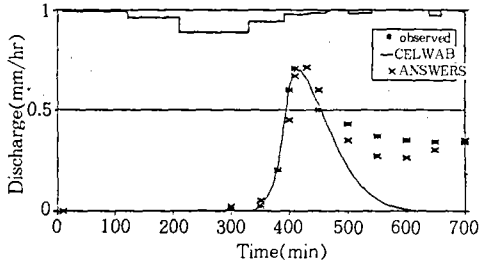


Fig. 12. Hyetograph and hydrographs, WS #1 (7/16/86)

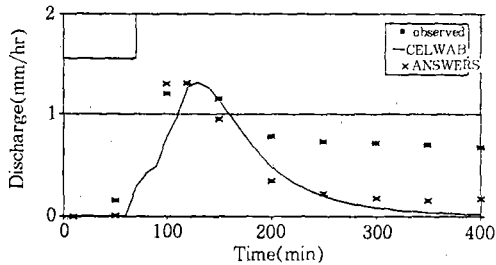


Fig. 13. Hyetograph and hydrographs, WS #1 (8/20/86)

4. 모형의 적용결과

CELWAB 모형의 모의발생결과를 실측치 및 ANSWERS모형의 결과와 비교한 결과 Fig. 12~Fig. 13과 같이 나타났다. Table-3은 침투유량과 도달시간을 정리한 것이다.

전체적으로 보면, 상승부는 실측치보다 약간 늦게 상승하며 수문곡선의 폭은 실측치보다 좁게 나타났다. 감퇴부에서는 많은 오차를 보이고 있는데, 이는 CELWAB 모형이 지점 수문기작의 가정에서 지표유출량만을 산정하도록 구성되어 있어 중간유출을 재현하지 못하기 때문이라 생각된다. 그러나 침투유량은 상대오차가 각각 0.33, 0.11, 0.28, 0.32, 0.02%

Table-3. Summary of hydrologic simulation with CELWAB model

Storm event	rainfall(mm)	Model	Peak discharge (mm/hr)	Peak time(min)
7/11/86	43.83	observed	0.431	920
		ANSWERS	0.427	924
		CELWAB	0.429	910
7/16/86	43.24	observed	0.706	413
		ANSWERS	0.712	432
		CELWAB	0.706	411
7/24/86	24.13	observed	0.758	319
		ANSWERS	0.746	309
		CELWAB	0.759	325
8/13/89	27.90	observed	2.377	935
		ANSWERS	2.362	944
		CELWAB	2.384	947
8/20/86	22.48	observed	1.315	120
		ANSWERS	1.317	120
		CELWAB	1.314	127
Mean error (%)	-	observed	-	-
		ANSWERS	0.84	1.97
		CELWAB	0.21	2.11

로 평균 0.21%, 도달시간은 각각 1.08, 0.48, 1.88, 1.28, 5.83%로 평균 2.1%로 나타나 비교적 잘 일치하는 것으로 판단되었다. 한편, CELWAB모형의 출력결과는 유출구에서의 수문곡선 뿐만 아니라 격자별, 시간별로 출력하도록 구성되어 제 2보에서 상술 할 출력자료 처리 모형에서 이들 격자별 출력결과를 도형화하도록 하였다.

5. 모형의 예민도 분석

CELWAB 모형의 예민도를 분석하기 위하여 8월 20일 강우자료를 대상으로 Table-2의 최적값과 이에 대한 기준값을 Table-4와 같이 선정하여 정상상태 침투율은 3.0~4.5mm/hr, 초기 침투율은 60.0~150.0mm/hr, 침투통제깊이는 80~110mm, 초기토양수분조건은 60~90%, 하천 매닝계수(n)는 0.06~0.09, 시간간격은 10초~30초, 격자크기는 30m, 50m의 범위내에서 모형의 거동을 비교한 결과 Table-5와 같이 나타났다.

정상상태 침투율 3.0, 3.5, 4.0, 4.5mm/hr의 값 변화에 대하여 비교해 본 결과로서, Table-5에서 보면 정상상태 침투율이 3.0에서 4.5mm/hr로 증가함에 따라 침투유량은 4.47에서 3.34mm/hr로 점점 작아지며 그 차이는 1.13mm/hr으로 나타났고, 도달시간은 125에서 127min으로 증가하며 그 차이는 2min으로 나타났다. 초기토양수분조건 60, 70, 80, 90%에 대한 비교 결과는 Table-5에서 보는 바와 같이, 60%와 70%에서는 유출이 나타나지 않았으며

Table-5. Hydrograph characteristics with different parameter values of the CELWAB model

Parameter		Peak discharge (mm/hr)	Peak time (min)
FC (mm/Hr)	3.0	4.470	125
	3.5	4.053	127
	4.0	3.687	127
	4.5	3.340	127
A (mm/hr)	80	3.654	124
	90	3.458	126
	120	3.375	127
	150	3.340	127
DF (mm)	80	4.257	122
	90	3.954	124
	100	3.658	124
	110	3.340	127
ASM (%)	60	0.000	-
	70	0.000	-
	80	0.910	153
	90	3.340	127
n	0.06	4.216	112
	0.07	3.895	118
	0.08	3.602	123
	0.09	3.340	127
time step (second)	10	3.379	125
	15	3.370	125
	20	3.360	126
	30	3.340	127
cell size (m)	30	3.360	130
	50	3.379	125

80%에서는 침투유량 0.910, 도달시간 153min으로 비교적 작은 유출이 발생되는데, 이로부터 초기토양수분조건에 대한 예민도가 대단히 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 초기토양수분조건 선정에 특히 주의해야 할 것으로 판단되었다.

Table-4. Reference values for sensitivity analysis of the CELWAB model

parameters	FC	A	DF	ASM	n	time step (second)	cell size (m)
optimum values	4.42	145.1	61	59	0.11	30	30
reference values	4.5	150.0	110	90	0.10	30	30

VI. 결 론

지형자료가 수치지도화되고 이를 이용할 수 있는 지리정보시스템이 개발됨으로써 복잡한 지형자료를 쉽게 이용할 수 있게 되었으며, 다양한 분야에서 적용이 시도되고 있다. 이러한 GIS 기법은 많은 이용성이 있으며, 기존의 수작

업에 의한 해석방법에서 고려치 못한 새로운 접근방법을 가능하게 해주고 있다. 본 보에서는 GIS의 흐름방향 형성기법을 이용 및 응용하여 격자간 이송체계를 자동으로 추적하므로써 모든 격자에 대한 물수지 계산을 가능하게 하는 유출입계산자를 개발하고, 이를 이용하여 격자 물수지 모형을 개발하고 그 적용성을 분석하였다.

1) 지표류의 격자수문기작을 정의하고 GIS의 흐름방향 생성기법을 응용, 발전시켜 격자별 이송체계를 자동으로 규명하는 유출입계산자를 개발하여 격자물수지 모형을 구성하였다.

2) 시험유역은 274ha로 30m의 격자 3,044개로 구성되는데 이들 격자에 대한 상호 물수지 계산이 유출입계산자에 의해 자동으로 계산되었다.

3) 격자 물수지 모형을 1986년도의 5개 경우에 대하여 적용한 결과, 모의발생 유출곡선의 첨두유량과 도달시간에서 상대오차가 각각 평균 0.21%, 2.11%로 나타났다.

4) 유출곡선에서 중간유출량을 제외한 직접 유출 부분은 실측자료 및 이미 검증된 수문모형 ANSWERS의 결과와 유사한 형태를 나타내어 격자 물수지 모형의 적용성이 입증되었다.

5) 모형의 예민도 분석에서는 초기토양수분 조건에 대한 예민도가 가장 크게 나타났다. 따라서 초기토양수분조건의 선정에 특히 주의해야 할 것으로 판단되었다.

6) 격자 물수지 모형은 지표류만을 재현하도록 구성되어 감퇴부에서는 실측치와 많은 차이가 나타났으므로 중간유출을 고려할 수 있는 지점수문기작에 대한 추가적 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 김대식, 1995, 지표배수량 산정을 위한 지리정보시스템의 응용모형 개발, 서울대학교 석사학위 논문
2. 김병진, 1987, 수문모형 ANSWERS의 반월유역에의 적용, 서울대학교 석사학위 논문
3. 유근배, 1990, 지리정보론, 상조사

4. Arnold J. G. et al, 1993, Continuous time, GRID cell watershed model, ASAE, Proceedings of the 18-19 June 1993 Conference, pp. 267-278
5. Baxter E. V., 1993, DEM aggregation and smoothing effects on surface runoff modeling, J. of Computing in Civil Engineering, Vol.7, No.3, pp. 310-338
6. Baxter E. V. et al, 1993, Nonpoint-pollution model sensitivity to GRID-cell size, J. of Water Res. Plan. and Man., Vol. 119, No.2, pp. 141-157
7. Beasley, D.B., L.F. Huggins, and E.J. Monke, 1980, ANSWERS: A model for watershed planning. Trans. ASAE 23 (4):938-944
8. Chow V. T. et al, 1988, Applied hydrology, McGRAW-HILL, pp. 201-302
9. ESRI, 1991, GRID command reference
10. Famiglietti J.S., 1992, Aggregation and scaling of spatially-variable hydrological process: Local catchment-scale and macroscale models of water and energy balance, Ph.D Thesis. University of Maryland.
11. Huggins, L.F. and J.R. Burney, 1982, Hydrologic modeling of small watersheds, ASCE, pp. 169-221
12. Smith M.B., 1992, A distributed parameter hydrologic model for urban stormwater protection (stormwater), DRSC. Thesis. Univerza V Ljubljani (Yugoslavia)
13. Smith M.B. et al, 1994, Data set derivation for GIS-based urban hydrological modeling, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.60, No.1, pp. 67-76

(접수일자 : 1995년 3월 24일)