

격자기반의 운동파 강우유출모형 개발(I)

- 이론 및 모형 -

Grid-Based KIneMatic Wave STOrM Runoff Model (KIMSTORM)(I)

- Theory and Model -

김 성 준*

Kim, Seong Joon

Abstract

A grid-based KIneMatic wave STOrM Runoff Model (KIMSTORM) which predicts temporal and spatial distributions of saturated overland flow, subsurface flow and stream flow in a watershed was developed. The model adopts the single overland flowpath algorithm and simulates surface and/or subsurface water depth at each grid element by using grid-based water balance of hydrologic components. The model which is programmed by C-language uses ASCII-formatted map data supported by the irregular gridded map of the GRASS(Geographic Resources Analysis Support System) GIS and generates the spatial distribution maps of discharge, flow depth and soil moisture within the watershed.

Keyword : kinematic wave, storm runoff model, GRASS-GIS, grid-based water balance

요 지

격자기반의 물수지 기법을 이용하여 강우에 의한 지표흐름과 지표하흐름의 시간적 변화와 공간적 분포를 모의할 수 있는 분포형 강우-유출모형을 개발하였다. 본 모형은 제 수문인자들의 격자별 물수지를 계산하여 단방향 흐름경로 알고리즘에 의하여 지표 및 지표하 흐름을 추적한다. 전처리과정으로서 GRASS를 이용하여 모형에 필요한 ASCII 형태의 자료들을 준비하고, 후처리과정으로서 모형의 수행결과인 영역의 유출량, 유출고, 토양수분 분포 등을 GRASS상에서 도시할 수 있도록 ASCII 형태로 출력하도록 구성하였다.

핵심용어 : 운동파, 강우유출모형, GRASS-GIS, 격자물수지

* 건국대학교 농공학과 조교수

1. 서 론

수문모형은 유역의 유출현상을 물리적으로 표현하는 수학적 모형으로서, 공간적인 변화의 고려 유무에 따라서 총괄형 모형(lumped model)과 분포형 모형(distributed model)으로 구분된다. 대표적인 분포형 모형으로는 NWSRFS(Hydrologic Research Laboratory, 1972), ANSWERS(Beasley 등, 1980), TOPMODEL(Beven 등, 1979; 1984), SHE(Abbott, 등, 1986a; 1986b), DBSIM(Cabral 등, 1990), THALES(Grayson 등, 1992a, 1992b) 등이 있다. 이 모형들에 대한 자세한 내용은 Singh(1996)의 "Computer Models of Watershed Hydrology"에서 찾아볼 수 있다.

이와 같이 분포형 수문모형에 대한 연구는 1970년 후반부터 많은 연구자들에 의해 시작되었으며, 컴퓨터 성능의 향상과 더불어 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)의 발전 그리고 수치고도 모델(Digital Elevation Model, DEM)의 획득·사용이 가능하게 되므로써 이 분야의 연구는 더욱 가속화되고 있다. 또한 하드웨어의 그래픽 성능이 모델의 입력과 출력을 쉽게 가시화할 수 있게 되면서 1990년대 중반부터는 MIKE SHE(Refsgaard와 Storm, 1995), WMS(Watershed Modeling System, Brigham Young Univ. - Engineering Computer Graphics Lab., 1996) 등과 같이 포괄적인 그래픽 사용자환경을 제공하는 시스템의 개발도 병행되고 있다.

한편, 국내에서는 1990년대 중반부터 GIS를 이용한 수문모형의 적용 및 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내의 연구로는 김진택(1995)이 농업 비점원오염 유출모형인 AGNPS와 GRASS(Geographic Resources Analysis Support System)와의 호환모형을 개발하여 경기도 화성군 반월유역에 적용하였다. 김대식(1995), 김대식 등(1995)은 격자 물수지 모형을 이용한 강우유출모형을 개발하였다. 이 연구에서는 ARC/INFO의 ARC와 GRID모듈에서 모형의 입력자료들을 추출하고, ARC/INFO의 내장언어인 AML(Arc Macro Language)과 UNIX C를 이용하여 출력결과를 처리하였으며, 특히 지표흐름을 중심으로 모형을 구성하여 반월유역(274 ha)에 적용한 바 있다. 최진용(1996)은 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형을 개발하였는데, 이 논문에서는 유역 증발산량의 산정에 중점을 두어 하천의 일단위 유출량을 모의하도록

구성하여 동일유역에 적용한 바 있다.

본 연구에서는 격자 물수지 기법을 이용하여 지표흐름과 지표하흐름을 모두 고려한 분포형 강우 유출모형을 개발하고, 래스터 GIS 소프트웨어인 GRASS(U.S. Army CERL, 1993)를 이용하여 본 모형의 입력자료를 추출하는 모형의 전처리과정과 모형의 결과를 시간적·공간적으로 표현해 주는 후처리과정을 개발하고자 한다.

2. 모형의 개요

본 연구에서 제시하는 분포형 강우유출모형은 대상 유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 개개의 격자마다 유출해석을 위한 수문정보를 입력하여 격자별 물수지를 계산하므로써 유역의 전반적인 시간적·공간적 수문량을 파악하도록 하는 모형이다.

분포형 모형의 입력자료는 각 격자별로 수치화된 자료(래스터 자료)가 요구되는데, 이들 자료를 효율적으로 구성하기 위해서는 지리정보시스템을 이용한 입력자료의 처리 및 추출이 필수적이다.

본 연구에서는 C-언어를 이용하여 격자기반의 강우-유출 계산모형을 구성하고, 모형의 입력자료의 준비와 출력은 GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 모형의 전·후처리과정을 수행하므로써 모형의 유연성을 최대한 확보하도록 개발하였다.

3. 모형의 이론

3.1 격자 흐름방향(flow direction)

격자의 흐름방향은 강우에 의하여 유출이 발생되면 해당 격자로 유입되는 양과 그 격자로 부터 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. Fig. 1은 3×3 격자 상에서 중심격자가 가지는 방향값을 주위격자에 표시한 것이다. 예를 들어 중심격자의 값이 1이라면 중심격자는 1의

| | | |
|---|---|---|
| 3 | 2 | 1 |
| 4 | | 8 |
| 5 | 6 | 7 |

Fig. 1. 3×3 Window and Outflow Direction

| | | |
|---|---|---|
| 7 | 6 | 5 |
| 8 | | 4 |
| 1 | 2 | 3 |

Fig. 2. 3×3 Mirror Window for Inflow Direction

방향으로 흐르게 된다.

한편 격자의 유출방향은 단방향이지만 유입되는 격자는 하나 이상일 수가 있다. 따라서 중심격자로 유입되는 격자들은 Fig. 2와 같이 Fig. 1의 3×3 격자를 180° 회전시킨 상태에서 그 격자가 가지는 방향값을 이용하면 주위 격자에서 중심격자로 흘러 들어오는 격자들을 모두 계산할 수 있다(김대식, 1995). 흐름방향도에서 발생하는 와지(sink)는 래스터 GIS 소프트웨어인 IDRISI를 이용하여 low-pass filtering 과정을

거치면 제거할 수 있다.

3.2 격자 물수지

격자 물수지는 유역을 일정한 크기로 분할한 상태에서 각 격자의 유입·유출을 계산하므로써 주어진 시간 간격별로 유역 전체에 대한 물수지를 파악할 수 있게 된다. Fig. 3은 강우유출 계산시 본 연구에서 고려한 물수지인자를 도시한 것이다.

3.2.1 지표 흐름(surface flow)

지표흐름은 운동파(kinematic wave) 이론을 적용하였다. 지표흐름은 얇은 면흐름(shallow sheet flow), 하천흐름은 직사각형 수로조건에서 흐름상태는 완전난류로 가정하고 Manning 식을 사용하였다.

$$Q_{sur} = \alpha R^{m1} A_{sur}^{m2} \quad (1)$$

여기서 A_{sur} 는 흐름단면적 (m^2), α , $m1$, $m2$ 는 상수이다.

식 (1)에서 지표흐름의 경우, $\alpha = \frac{\tan^{1/2} \beta}{n w^{2/3}}$, $R = h = A_{sur}/w$, $m1 = 0$, $m2 = 5/3$, n 은 Manning 조도계수, β = 격자 경사각(degree), w 는 격자 폭(m), h 는 흐름깊이(m)이며, 하천흐름의 경우는 $\alpha = \frac{\tan^{1/2} \beta}{n}$, $R = \xi A_{sur}^{1/2}$, $\xi = 0.354$ (Moore와 Burch, 1986; Moore와 Foster, 1990), $m1 = 2/3$, $m2 = 1$ 이다.

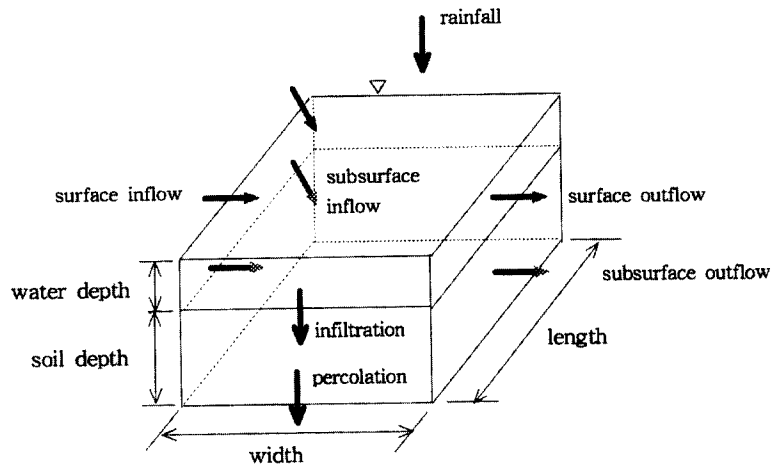


Fig. 3. Grid-Based Water Balance Components

3.2.2 지표하 흐름(subsurface flow)

지표하 흐름도 운동과 가정에 의하여 다음의 운동량 방정식을 적용하였다(Beven, 1982; Sloan과 Moore, 1984).

$$Q_{sub} = K_s A_{sub} \sin \beta \quad (2)$$

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

3.2.3 침투(infiltration)와 침투(percolation)

침투는 Huggins와 Monke식을 적용하였으며, 식은 다음과 같다. 침투 즉 지하수유출은 토양수분이 포장용수량 이상일 경우에 최종침투율로 배제되는 것으로 가정하였다.

$$f = f_c + f_o \left(\frac{SM_r}{PO_e} \right)^b \quad (3)$$

여기서 f 는 침투율(mm/hr), f_c 는 최종 침투율(m/hr), f_o 는 초기 침투율(mm/hr), SM_r 은 잉여저류능 (m^3/m^3), PO_e 는 유효공극률 (m^3/m^3), b 는 상수이다.

3.2.4 초기 토양수분상태(initial soil moisture content)

초기 토양수분은 토양의 물리적인 특성인 공극율, 포장용수량 및 토양깊이를 사용하면 토양수분의 상태에 따라 유출고의 함수로 표현할 수 있다. 각 격자에서의 초기유출고는 다음과 같이 계산할 수 있으며, 유역 경계에 위치하는 격자의 초기유출고는 0 으로 가정한다.

$$\begin{aligned} H_{ini} &= D_c (SM_{ini} - F_c) / (PO_e - F_c), & \text{for } F_c < SM_{ini} < PO_e \\ &= D_c, & \text{for } SM_{ini} \geq PO_e \\ &= 0, & \text{for } SM_{ini} \leq F_c \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 H_{ini} 는 초기유출고(m), D_c 는 토양깊이 (m), SM_{ini} 는 초기토양수분 (m^3/m^3), F_c 는 포

장용수량 (m^3/m^3)이다.

3.2.5 격자 물수지(Grid-based water balance)

물수지는 각 격자별로 계산되며, 임의 시간에 계산된 격자별 물수지 결과는 입력자료 및 모형의 매개변수와 함께 다음 시간으로 전달되어 각 격자의 변화를 추적하게 된다. 격자에서의 저류량과 토양수분 변화량은 각각 계산되며, 지표흐름과 하천흐름에 대한 격자 물수지식은 다음과 같다. 지표면과 하천의 구분은 GRASS의 r.watershed 명령어를 사용하면 하천(stream map 또는 accumulation map)을 자동 생성시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dS_i}{dt} &= P(t)_i - F(t)_i + \sum Q_{sur.in,i} - Q_{sur.out,i} \\ &\quad \text{for overland flow} \\ &= P(t)_i - F(t)_i + \sum Q_{sur.in,i} + \sum Q_{sub.in,i} \\ &\quad - Q_{sur.out,i} \quad \text{for stream flow} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 i 는 격자 주소, S_i 는 격자 저류량 (m^3), P_i 는 강우량 (m^3/sec), F_i 는 침투량 (m^3/sec), $Q_{sur.in,i}$ 는 주위격자로부터의 지표면 유입량 (m^3/sec), $Q_{sur.out,i}$ 는 계산격자에서의 지표면 유출량 (m^3/sec)이다. 한편 해당격자가 하천인 경우는 주위격자로 부터의 지표하 유출량이 하천격자로 유입되는 것으로 하였다.

$$\frac{dSM_i}{dt} = F(t)_i + \sum Q_{sub.in,i} - Q_{sub.out,i} - DP(t)_i \quad (6)$$

여기서 SM_i 는 격자 토양수분 (m^3), $Q_{sub.in,i}$ 는 주위격자로부터의 지표하 유입량 (m^3/sec), $Q_{sub.out,i}$ 는 계산격자에서의 지표하 유출량 (m^3/sec), DP_i 는 지하수 유출량 (m^3)이다.

4. 모형의 구성

본 모형의 구조적 흐름도는 Fig. 4와 같다. 모형의 입력자료로는 유역의 수치고도모델, 흐름방향도, 하천도, 토양도, 토지피복도, 티센망도를 사용한다. 본 모형

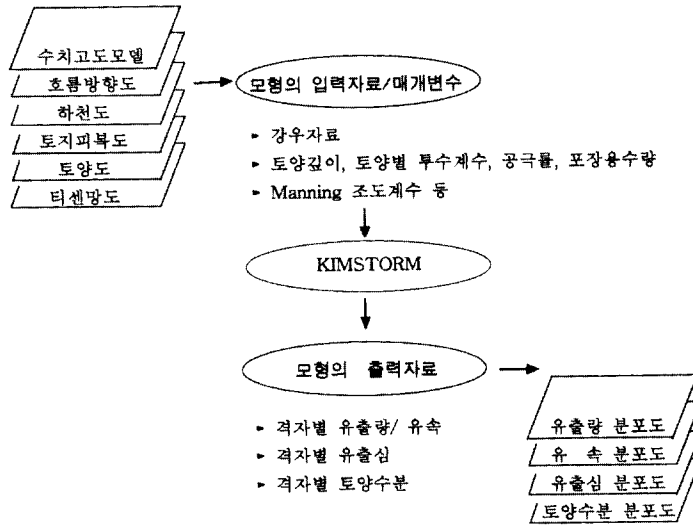


Fig. 4. Schematic Diagram of Grid-Based Kinematic Wave Storm Runoff Model

은 이들 자료를 래스터이미지 분석용 GIS 소프트웨어 (GRASS, IDRISI)를 이용하여 ASCII 형식의 파일로 불러들인다. 모형은 수행되면서 지역의 시간적·공간적 유출고, 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.

5. 요약 및 결론

격자 물수지 기법을 이용한 분포형 강우-유출모형을 개발하였다. 본 모형은 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 개개의 격자마다 유출해석을 위한 수문정보를 입력하여 격자별 물수지를 계산하고 단방향 흐름경로 알고리즘에 의하여 지표 및 지표하흐름을 추적하므로써 지역의 전반적인 시간적·공간적 수문량을 파악하도록 하는 모형이다. 전처리과정으로서 모형에 필요한 자료를 준비하고, 모형은 이들을 ASCII 형태로 받아들여 모형의 수행결과(입의하천지점에서의 수문곡선, 지표유출 분포도, 토양수분 분포도)들을 ASCII 형태의 화일로 자동발생시킨 후, 후처리과정으로서 이들 결과를 GRASS 상에서 도시하여 주는 형태로 구성하였다.

참고 문헌

- 김대식(1995). 지표배수량 산정을 위한 지리정보시스템의 응용모형 개발. 석사학위논문, 서울대학교.
- 김대식, 정하우, 김성준, 최진용(1995). "소유역 지표 유출의 공간적 해석을 위한 지리정보시스템 응용모형(II) - 격자 물수지모형을 위한 GIS 응용모형 개발 -." 한국농공학회지, 한국농공학회, 제 37권, 제5호, pp. 35-42.
- 김진택(1995). 농업비점원 오염모형을 위한 지리정보시스템 호환모형의 개발 및 적용. 박사학위논문, 서울대학교.
- 최진용(1996). 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형에 관한 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986a). "An introduction to the European Hydrologic System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE" I: History and philosophy of a physically based distributed modelling system." *J. of Hydrology*, Vol. 87, pp. 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., and O'Connell, P.E. (1986b). "An introduction to the European Hydrologic System - Systeme

- Hydrologique Europeen, "SHE" 2: Structure of a physically based distributed modelling system." *J. of Hydrology*, Vol. 87, pp. 61-77.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F. and Monke, E.J. (1980). "ANSWERS: A model for watershed planning." *Trans. of ASAE*, Vol. 23, No. 4, pp. 938-944.
- 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.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979). "A physically based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., Schoffield, N. and Tagg, A. (1984) "Testing a physically-based flood forecasting model(TOPMODEL) for three UK catchments." *J. of Hydrology*, Vol. 69, pp. 119-143.
- Brigham Young Univ. - Engineering Computer Graphics Lab.(1996). *WMS 4.1 Reference Manual*.
- Cabral, M.C., Bras, R.L., Tarboton, D. and Entekhabi, D. (1990) *A distributed, physically-based rainfall-runoff model incorporating topography for real-time flood forecasting*. Ralph M. Parsons Lab., Peo. No. 332, MIT Dept. of Civil Eng., Cambridge, MA.
- Grayson, R.B., Moore, I.D. and McMahon, T.A. (1992a). "Physically based hydrologic modelling: I. A terrain based model for investigative purposes." *Water Resour. Res.*, Vol. 26, No. 10, pp. 2639-2658.
- Grayson, R.B., Moore, I.D. and McMahon, T.A. (1992b). "Physically based hydrologic modelling: II. Is the concept realistic?" *Water Resour. Res.*, Vol. 26, No. 10, pp. 2659-2666.
- Hydrologic Research Laboratory(1972). *National Weather Service river forecast system: forecast procedures*. Technical Memorandum NWS-HYDRO-14, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.
- Moore, I.D. and Burch, G.J. (1986). "Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory." *Water Resour. Res.*, Vol. 22, pp. 1350-1360.
- Moore, I.D., and Foster, G.R. (1990). "Hydraulics and overland flow." *Process Studies in Hillslope Hydrology*, Edited by Anderson, M.G. and Burt, T.P., John Wiley, New York, pp. 215-254.
- Refsgarrd, J.C. and Storm, B. (1995). "MIKE SHE." *Computer Models of Watershed Hydrology*. Edited by Singh, V.P., WRP, Colorado, pp. 809-846.
- Singh, V.P.(1996). *Computer Models of Watershed Hydrology*. WRP, Colorado.
- 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.

<최종본 접수일 : 1998년 4월 24일>