

유한체적법을 이용한 격자기반의 분포형 강우-유출 모형 개발

Development of Grid Based Distributed Rainfall-Runoff Model with Finite Volume Method

최 윤 석* / 김 경 탁** / 이 진 희***

Choi, Yun Seok / Kim, Kyung Tak / Lee, Jin Hee

Abstract

To analyze hydrologic processes in a watershed requires both various geographical data and hydrological time series data. Recently, not only geographical data such as DEM(Digital Elevation Model) and hydrologic thematic map but also hydrological time series from numerical weather prediction and rainfall radar have been provided as grid data, and there are studies on hydrologic analysis using these grid data. In this study, GRM(Grid based Rainfall-runoff Model) which is physically-based distributed rainfall-runoff model has been developed to simulate short term rainfall-runoff process effectively using these grid data. Kinematic wave equation is used to simulate overland flow and channel flow, and Green-Ampt model is used to simulate infiltration process. Governing equation is discretized by finite volume method. TDMA(TriDiagonal Matrix Algorithm) is applied to solve systems of linear equations, and Newton-Raphson iteration method is applied to solve non-linear term. Developed model was applied to simplified hypothetical watersheds to examine model reasonability with the results from $Vflo^{TM}$. It was applied to Wicheon watershed for verification, and the applicability to real site was examined, and simulation results showed good agreement with measured hydrographs.

keywords : distributed model, rainfall-runoff, finite volume method, kinematic wave equation, GRM

요 지

유역의 수문현상을 해석하기 위해서는 다양한 지형자료와 수문 시계열자료가 필요하다. 최근 들어 DEM(Digital Elevation Model)과 수자원 주제도와 같은 지형자료 뿐만 아니라 수치예보자료 및 강우레이더의 관측자료와 같은 수문 시계열자료 또한 격자 형태로 제공되고 있으며, 이를 활용한 수문분석에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 이러한 격자형 자료를 이용하여 효과적으로 단기간의 강우-유출 현상을 모의하기 위한 물리적 기반의 분포형 강우-유출 모형인 GRM(Grid based Rainfall-runoff Model)을 개발하였다. 지표면 유출과 하도 유출의 모의는 운동과 방정식을 이용하고 있으며, 침투량 산정을 위해서 Green-Ampt 모형을 이용하고 있다. 지배방정식은 유한

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원

Researcher, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do
411-712, Korea
(e-mail: yschoi51@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구실 책임연구원

Research Fellow, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do
411-712, Korea

*** 인하대학교 사회기반시스템공학부 연구교수

Research Prof., Inst. of Water Resources System, Inha Univ., Inchoen, 402-751, Korea

체적법을 이용하여 이산화 하였으며, TDMA(TriDiagonal Matrix Algorithm) 방법을 이용하여 연립방정식을 풀고, 비선형 항에 대해서는 Newton-Raphson 방법으로 반복 계산함으로써 수렴해를 도출하였다. 개발된 모형은 단순화된 가상의 유역에 대해서 적용한 결과를 *Vflo*TM 모형의 모의결과와 비교함으로써 타당성을 검토하였다. 또한 위천 유역의 적용을 통해 모형의 검증 및 실제 유역에 대한 적용성을 검토하였으며, 모의결과는 관측유량의 재현성이 높은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 분포형 모형, 강우-유출, 유한체적법, 운동파 방정식, GRM

1. 서 론

유역의 수문 분석에 이용되는 격자 형태의 지형자료는 수문학적 지형 요소들의 공간분포를 표현할 수 있으며, 수치예보자료와 강우레이더자료 등으로부터 생성되는 격자 형태의 강우자료는 강우의 공간분포를 나타낼 수 있다. 최근 들어 이와 같이 격자 형태로 제공되는 지형 및 수문시계열자료가 다양해지고 있으며, 이에 대한 활용성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 격자형태의 자료를 이용하여 유역내에서 격자 단위로 유출모의를 수행 할 수 있는 분포형 강우-유출 모형 (GRM)을 개발하였다.

Abbott *et al.*(1986)은 물리적 기반의 분포형 모형인 SHE(Systeme Hydrologique Europeen)를 개발한 바 있다. SHE 모형에서는 유역에서의 수문순환의 해석을 위하여, 차단, 증발산, 지표면 유출, 하도 유출, 지표하 흐름, 응설을 모의할 수 있다. 지표면 흐름에서는 2차원 확산과 방정식을 양해 유한차분법을 이용하여 해석하고 있으며, 하도에서의 흐름은 일차원 확산과 방정식의 해석에 음해 유한차분법을 적용하고 있다. Goodrich *et al.*(1991)은 지표면 흐름 해석을 위하여 2차원 운동과 방정식을 적용한 바 있으며, 2차원 TIN(Triangular Irregular Network) 요소에 대해서는 유한요소법으로 해석하고, 시간 차원에 대해서는 상미분 방정식을 유한차분법으로 해석하였다. 최진규와 손재권(1992)은 유역을 TIN으로 구성하고, 이에 대한 유출해석을 위하여 2차원 운동과 방정식을 유한요소법으로 해석하는 유출모형을 개발한 바 있다. Julien *et al.*(1995)은 그리드를 기반으로 하는 2차원 유역모형인 CASC2D(CASCade of planes in 2-Dimensions)를 개발하였으며, 장기간 및 단기간의 침투, 지표면 흐름, 하도 흐름 등을 모의한다. 지표면 흐름은 2차원 확산과 방정식을 양해 유한차분법으로 해석하고 있으며, 하도 흐름은 일차원 확산과 방정식 혹은 일차원 동역학과 모형을 적용할 수 있다 (Ogden, 1997).

일본에서는 격자기반의 분포형 장기유출 모형으로

Hydro-BEAM(Hydrological River Basin Environment Assessment Model)이 1998년부터 개발이 진행되고 있으며(박진혁 등, 2008), 지표수와 지하수의 통합모의, 유역 환경평가 등에 적용된 바 있다. Hydro-BEAM 모형은 지표 유출과 지표하 유출, 지하수 흐름 및 차단, 침투, 증발산 등을 모의한다. 지표 흐름의 해석에는 일차원 운동과 모형을 적용하고 있으며, 지표하 유출에 기여하는 토양층의 수분 분포는 일차원 Richard 방정식을 이용하고, 이에 대한 유출은 선형저수지법을 이용하고 있다(Nawahda *et al.*, 2004). 또한 토목연구소(土木研究所, 2002)에서는 침투, 증발산, 지표면 유출, 중간유출, 지하수 유출 등을 모의할 수 있는 격자기반의 물리적 분포형 수문순환 모형으로 WEP(Water and Energy transfer Processes)을 개발한 바 있으며, 지표면 유출 해석에 일차원 운동과 방정식을 이용하고, 하도 추적에는 운동과 방정식과 동력학과 방정식을 선택하여 적용할 수 있다. WEP 모형은 국내에서 청계천 유역의 물순환 해석에 적용되고, 도시하천 유역의 물순환 해석을 위한 적용성이 검토된 바 있다(노성진 등, 2005).

분포형 강우-유출 모형에 대해서 Vieux *et al.*(1990)은 유역의 강우-유출 모의를 위하여 운동과 방정식을 공간적으로는 유한요소법으로 해석하고, 시간 차원에 대해서는 양해 유한차분법으로 해석한 분포형 모형을 개발한 바 있으며, 이는 *Vflo*TM 모형(Vieux *et al.*, 2002; Vieux, 2004)으로 발전하였다. Vieux and Vieux (2003)은 홍수 예보에 *Vflo*TM을 적용한 바 있으며, 홍준범 등(2006)은 국내 유역에의 적용성을 평가하였다. 신사철(1996)은 직접유출량의 추적을 위해서 운동과 모형을 특성곡선법으로 해석하고 기저유출을 모의할 수 있는 격자기반의 분포형 강우-유출 모형을 개발한 바 있다. 김성준(1998)은 유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고, 각 격자별 물수지를 계산함으로써 전체 유역에 대한 물수지를 계산하는 KIMSTORM(KIneMatic wave STOrm Runoff Model)을 개발한 바 있으며, 지표 흐름, 지표하 흐름, 침투 등을 모의하고 있다. 최현상(2001)은 2차원 분포형 강우-유출모형을 개발한 바 있으며, 지표

면 흐름은 2차원 확산과 방정식을 적용하고, 하도 흐름은 1차원 확산과 방정식을 적용하여 유한차분법으로 해석하였다.

유출해석을 위한 유한체적법의 적용은 Zhao *et al.*(1994)에 의해서 유역에서의 2차원 부정류 해석에 이용되었으며, 이진희(1996)는 개수로에서의 2차원 부정류 해석을 위해 2차원 천수방정식을 유한체적법으로 해석하였다. 또한 한국건설기술연구원(1996)에서는 유한체적법과 먹기법을 이용하여 2차원 천수방정식을 해석하는 2차원 하천모형을 개발하였으며, 강석구(2003)는 홍수범람 해석을 위한 2차원 천수방정식의 해석에 유한체적법을 적용한 바 있다. Jain *et al.*(2004)은 격자 형태로 모형화된 유역의 지표면 흐름의 해석을 위해서 확산과 방정식을 유한체적법으로 해석하였으며, RSM (Regional Simulation Model)(SFWMD, 2005)에서는 유역을 TIN으로 모형화하고 이에 대한 유출해석을 위하여 2차원 Saint-Venant 방정식을 적용하고 이를 유한체적법을 이용하여 해석하고 있다.

본 연구에서 개발한 GRM은 지표면 유출과 하도 유출의 해석을 위해서 운동과 방정식을 이용하고 있으며, 침투량 산정은 Green-Ampt 모형을 이용하고 있다. 지배방정식은 향후 모형의 확장성을 고려하여 유한차분법 및 유한요소법에 비하여 유량 및 운동량의 보존을 잘 만족하고, 검사체적의 경계조건에 의한 흐름을 통제를 비교적 간단히 처리할 수 있는 유한체적법(한국건설기술연구원, 1995, 1996)을 이용하여 이산화 방정식을 유도 하였다. 이산화 방정식은 TDMA 방법을 이용하여 연립방정식의 해를 구하고, 비선형 항에 대해서는 Newton-Raphson 방법을 이용하여 반복 계산함으로써 수렴해를 도출하였다.

2. 지배방정식

본 연구에서는 단기간의 강우-유출해석을 위한 분포형 모형의 개발을 목적으로 하고 있으며, 따라서 홍수 유출의 주요 수문인자인 강우, 침투, 지표유출, 지표하 유출을 주요 컴포넌트로 포함하고 있다. Fig. 1은 단위 요소에서의 각 수문성분의 흐름과 검사체적의 설정을 나타낸 것이다.

2.1 지표흐름

지표흐름은 지표면 흐름과 하도 흐름으로 구분할 수 있으며, 이에 대한 유출해석을 위해서 운동과 방정식을 적용하고 있다. 운동과 방정식은 연속방정식과 운동량 방정식의 조합으로 해석되며, 지표면 흐름에서의 연속 방정식은 Eq. (1)과 같고, 하도 흐름에서의 연속방정식

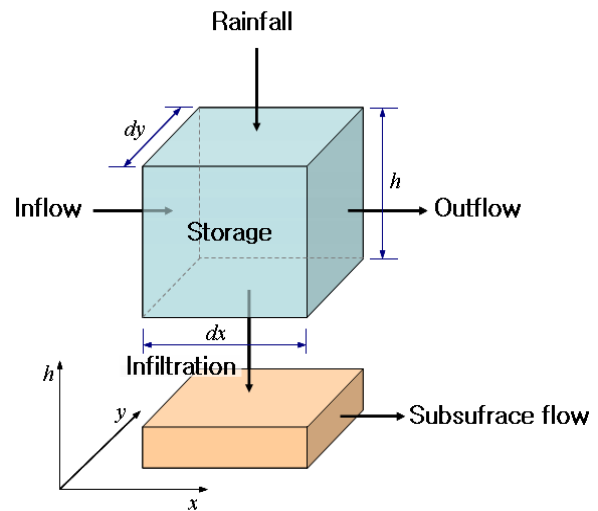


Fig. 1. Model Components and Control Volume

은 Eq. (2)를 적용한다. Eq. (2)에서는 하도에서의 유효 강우량을 측방유입량과 같이 계산하고 있으며, 운동과 모형에서의 운동량 방정식은 Eq. (3)과 같이 기술된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = Pr - IFr \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = Prdy + q_L \quad (2)$$

$$S_0 = S_f \quad (3)$$

여기서 q : 단위폭당 유량(= uh), h : 수심, u : 유속, Q : 유량, S_0 : 바닥 경사, S_f : 마찰경사, Pr : 강우강도, IFr : 침투율, t : 시간, A_x : x 방향에 직각인 단면적, q_L : 측방유입량

Eq. (3)은 중력과 마찰력이 평형을 이루는 상태로 Eq. (4)의 Manning의 유속공식에서 마찰경사 대신에 바닥경사를 적용함으로써 유속을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 수심이 작은 지표면 흐름에서 Eq. (4)의 동수반경으로 수심을 근사적으로 적용하고 있으며, 하도 추적에서의 동수반경은 비대칭 사다리꼴 단면을 적용할 수 있다.

$$u = \frac{R^{2/3} S_0^{1/2}}{n} \quad (4)$$

여기서 n : 조도계수, R : 동수반경

2.2 침투

GRM에서는 강우강도가 침투율보다 클 때 발생하는

침투초과유출과 토양의 포화시 발생하는 포화초과유출을 모의할 수 있으며, 침투량 산정을 위하여 Green-Ampt 모형을 적용하고 있다. Green-Ampt 모형에서는 Eq. (5)와 같이 누가침투량을 계산하고 있으며, 침투율은 누가침투량을 이용해서 Eq. (6)으로 계산된다.

$$F(t) = Kt + \Delta\theta\psi \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\Delta\theta\psi}\right) \quad (5)$$

$$f(t) = K\left(\frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1\right) \quad (6)$$

여기서 $F(t)$: t 시간에서의 누가침투량, $f(t)$: t 시간에서의 침투율, $\Delta\theta$: 토양수분함량변화($\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$), S_e : 유효포화도($S_e = (\theta - \theta_r)/(\eta - \theta_r)$), θ : 수분함량($\theta_r \leq \theta \leq \eta$), θ_r : 잔류 수분함량($\theta_r = \eta - \theta_e$), η : 공극율, θ_e : 유효공극율, K : 수리전도도

Green-Ampt 모형을 이용하여 침투량을 계산하기 위한 토성별 매개변수는 Chow *et al.*(1988)을 참고할 수 있다. 토양의 유효포화도를 결정하는데 적용되는 초기 수분함량(θ)을 제외한 모든 매개변수는 토성에 따라서 미리 정해진 값을 이용하게 된다. 초기수분함량(θ)은 선행강우에 따라서 변화할 수 있으며, 총유출량과 침투 유출의 적합을 위해 보정되는 매개변수이다.

2.3 지표하 유출

Beven(1981)은 포화상태에서의 지표하 흐름의 모의를 위해서 운동과 모형을 적용한 바 있다. 본 연구에서는 침투가 진행되면서 토양이 포화될 경우에 대해서 Eq. (7)을 이용하여 지표하 유출을 모의하고 있다.

$$Q_s = KD_s \sin(S_a) \quad (7)$$

여기서 Q_s : 지표하 유출, D_s : 불투수층 상부의 포화된 토양 깊이, S_a : 지면의 경사각

3. 이산화 방정식

본 연구에서는 유한체적법을 이용하여 운동과 모형의 이산화 방정식을 작성하며, 이를 위한 검사체적의 설정은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 검사체적의 번호는 변수의 아래첨자 i 로 표시하였으며, 검사체적의 중심부를 p , 검사체적으로 유입이 발생하는 상류 방향의 검사체적면을 w , 유출이 발생하는 하류 방향(x 방향)의 검사체적면을 e 로 표시하고 있다(Patankar, 1980).

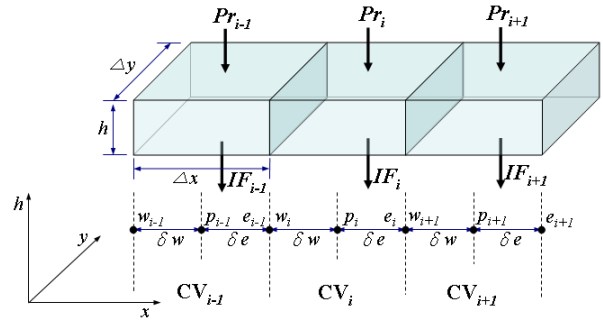


Fig. 2. Control Volumes for Discretization

3.1 이산화 방정식의 작성

지표면 흐름해석을 위한 Eq. (1)의 연속방정식을 검사체적 CV_i 에 대해서 x 와 t 의 향으로 적분하기 위한 식은 Eq. (8)과 같다.

$$\int_{w_i}^{e_i} \int_j^{j+1} \frac{\partial h}{\partial t} dt dx + \int_j^{j+1} \int_{w_i}^{e_i} \frac{\partial (uh)}{\partial x} dx dt = \int_j^{j+1} \int_{w_i}^{e_i} (Pr_i - IFr_i) dx dt \quad (8)$$

Eq. (8)에서 j 는 시간 첨자를 나타내고 있다. Eq. (8)을 적분하고, 계산하고자 하는 검사체적 i 의 중심점(p_i)에서의 $j+1$ 시간의 수심(h_{ip}^{j+1})으로 정리하면 Eq. (9)와 같이 지표면 흐름해석을 위한 이산화 방정식을 얻을 수 있다. Eq. (2)의 하도 흐름에 대해서도 같은 방법으로 이산화 방정식을 유도하면 Eq. (10)과 같다.

$$h_{ip}^{j+1} = h_{ip}^j - \left[\alpha \{ (\overline{uh})_{ie}^{j+1} - (\overline{uh})_{iw}^{j+1} \} + (1 - \alpha) \{ (\overline{uh})_{ie}^j - (\overline{uh})_{iw}^j \} \right] \frac{\Delta t}{\Delta x} + \{ \alpha S_i^{j+1} + (1 - \alpha) S_i^j \} \Delta t \quad (9)$$

$$A_{ip}^{j+1} = A_{ip}^j - \left[\alpha \{ (\overline{uA})_{ie}^{j+1} - (\overline{uA})_{iw}^{j+1} \} + (1 - \alpha) \{ (\overline{uA})_{ie}^j - (\overline{uA})_{iw}^j \} \right] \frac{\Delta t}{\Delta x} + \{ \alpha Pr_i^{j+1} + (1 - \alpha) Pr_i^j \} \Delta y \Delta t + \{ \alpha (q_{L_i}^{j+1}) + (1 - \alpha) (q_{L_i}^j) \} \Delta t \quad (10)$$

여기서 S_i : 생성 항($S_i = Pr_i - IFr_i$), α : 시간 가중계수, A : 하도 단면적

Eq. (9)와 Eq. (10)에서 시간 가중계수 α 는 0 ~ 1의 값을 가지며, 1인 경우에는 음해법(implicit)으로, 0인 경우에는 양해법(explicit)으로 시간차분값을 구하는 것을 의미한다. 또한 본 연구에서는 침투에 의한 손실을 고려하여 유효강우량을 계산하고 이를 Eq. (9)에서의

생성항으로 해석하였으며, 지표하 유출에 의해서 발생되는 유출량을 Eq. (10)에서의 측방유입 성분으로 해석하였다.

3.2 이산화 방정식의 해법

Eq. (9)와 Eq. (10)의 이산화 방정식은 각 검사체적에 대해서 수립될 수 있으며, 본 연구에서는 이를 행렬식으로 작성하고 TDMA 방법을 이용하여 연립방정식을 풀고 있다. 또한 각 식에서는 유속과 수심 및 유속과 단면적의 비선형식을 포함하고 있으며, 이에 대해서는 Newton-Raphson 방법을 이용하여 반복 계산함으로써 수렴해를 도출하였다.

3.3 경계조건 및 초기조건

GRM은 유역을 일정한 크기의 격자로 모형화하고, 각각의 격자를 검사체적으로 설정하고 있다. 각 검사체적에 대해서 강우, 침투, 유출 등을 모의하며, 검사체적 및 유역 전체에 대해서 경계조건을 설정하고 있다.

유역 전체에 대한 경계조건은 유역내에서 흐름이 발생하는 최상류 격자와 흐름이 종료되는 최하류 격자에 대해서 부여된다. 최상류 격자에서는 자신으로 유입되는 유량이 "0"이라는 조건이 부여되며, 최하류 격자에 대해서는 운동과 방정식의 기본 가정인 등류흐름으로 유출되는 조건이 설정된다. 각각의 검사체적에 대해서 부여되는 경계조건은 검사체적의 상류측 면에서는 유량이 보존되어야 하며, 하류측은 등류흐름의 조건이 설정된다.

GRM은 지표흐름 모의를 시작할 때의 초기조건으로 지표면에서의 초기수심과 하도에서의 초기 유량을 설정한다. 지표면에서의 초기수심은 건조한 상태에서 출발하는 것으로 가정하며, 이는 모든 지표면 흐름(overland flow) 모의 대상 격자에서의 초기수심이 "0"으로 설정되는 것을 의미한다. 하도에서의 초기조건은 최하류에 있는 격자에 대하여 초기유량이 입력될 수 있다. 초기유량이 "0"으로 입력될 경우 모든 하도 격자의 초기 수심은 "0"으로 설정되며, "0"보다 큰 값이 입력될 경우에

는 각 하도 격자의 흐름누적수(flow accumulation)에 비례하여 전체 하도 격자의 초기유량을 할당한다. 이와 같이 할당된 유량은 Eq. (10)에서의 하도 단면적으로 나타낼 수 있으며, 이는 하도 흐름(channel flow) 모의 시 초기조건으로 설정된다.

4. 가상 유역에 대한 검토







본 연구에서는 GRM 모형의 수문성분 해석모듈의 타당성을 검토하기 위하여 가상의 유역을 설정하였으며, 이에 가상의 균일한 강우를 발생시킨 후 해석결과를 검토하였다. 각각의 격자에 대한 모의결과는 GRM 모형과 동일한 지배방정식을 적용하고 있는 $Vflo^{TM}$ 의 모의결과와 비교하였다.

모형의 검증을 위해 설정한 가상의 유역과 강우에 대한 사항은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 3가지 형태의 가상 유역에 대하여 10 mm/h, 30 mm/h, 50 mm/h의 강우강도로 1시간과 3시간 동안 지속되는 강우를 적용하여 그 결과를 검토하였으며, 이 중 10 mm/h와 30 mm/h로 3시간 동안 지속되는 강우에 대한 각 유역의 최하류셀의 모의결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서는 GRM의 모의결과와 $Vflo^{TM}$ 의 모의결과가 모든 가상 유역과 모든 강우에서 유사한 값을 보여주고 있으며, 따라서 각 수문성분의 해석모듈이 적합하게 구현된 것으로 검토되었다.

5. 실제 유역의 적용 및 검증

본 연구에서는 GRM 모형을 실제 유역에 적용함으로써 모형의 구동을 위한 자료의 구축과정과 매개변수의 설정배경 및 추정과정을 제시하였으며, 모형을 검증하고 실제 유역에 대한 적용성을 검토하였다. 대상 유역은 경상북도 군위군의 무성 수위관측소 상류에 위치한 유역이며 약 472km²의 유역 면적을 가지고 있다. 수문사상은 2007년에 관측된 강우와 유량자료를 이용하여 4개의 사상을 추출하고 이를 모형에 적용하였다.

Table 1. Applied Hypothetical Watersheds and Rainfall Events

Watershed	Grid size	Watershed size (row × column)	Cross section type	Profile type	Slope	Roughness coefficient
Type 1	100m×100m	20×1			0.001	0.015
Type 2	100m×100m	20×11			0.001	0.015
Type 3	100m×100m	20×21			0.001	0.015
Rainfall intensity		10 mm/h, 30 mm/h, 50 mm/h				
Rainfall duration		1 hour, 3 hours				

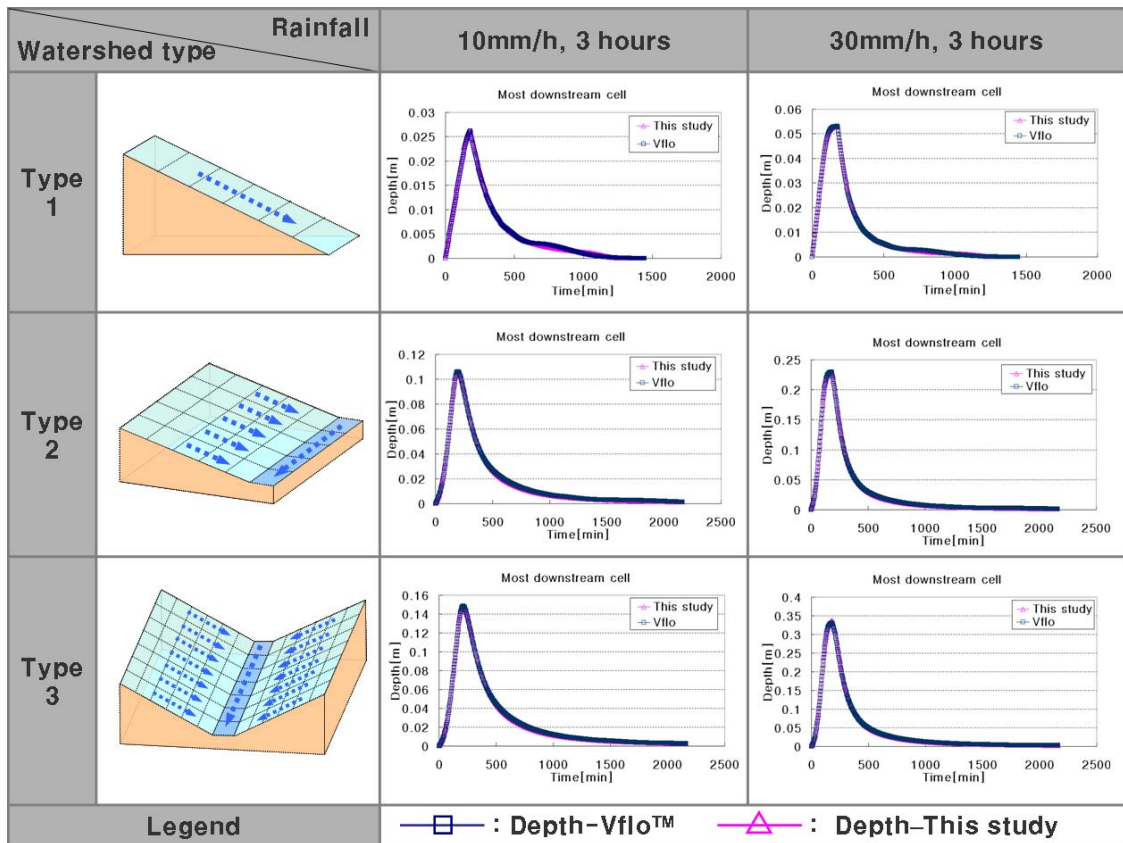


Fig. 3. Comparison of Simulation Results from This Study(GRM) with *Vflo*™

5.1 공간정보 구축

GRM 모형은 DEM을 이용하여 생성된 수문학적 지형정보를 모형의 주요 입력자료로 사용한다. 본 연구에서는 위천 유역의 DEM을 1/25,000 수치지도의 등고자료를 이용하여 100m×100m 크기로 구축 하였으며, HyGIS(Hydro Geographic Information System)(한국건설기술연구원, 2007)를 이용하여 DEM의 sink와 flat area를 전처리하고 흐름방향, 흐름누적수, 하천망, 경사, 유역경계 정보를 그리드 레이어로 생성하였다.

HyGIS를 이용한 공간정보 구축에서 흐름방향 레이어는 D8-method(O'Callaghan and Mark, 1984)에 의해서 결정된 정보를 이용하였고, 하천망 레이어는 1/25,000 수치지도로부터 추출한 하천망의 총연장과 가장 근접한 하천 총연장을 가지는 흐름누적수를 입력하여 생성된 것을 이용하였으며(김경탁, 1998), 속성으로 하천차수를 포함하고 있다. 또한 경사 레이어는 D8-method에서 이용되는 최급경사 방법을 적용하여 계산된 정보를 이용하였다.

5.2 토양도 구축

본 연구에서는 개략토양도에 비하여 토양특성을 비

교적 잘 반영하고 있는 것으로 알려진 정밀토양도(김경탁, 2003)를 적용하였다. 토양도는 침투과정의 모의에 적용되는 Green-Ampt 모형의 매개변수 설정에 이용된다. 본 연구에서는 위천 유역의 정밀토양도를 토성별로 분류하고, 각각의 토성에 대한 Green-Ampt 매개변수(Chow *et al.*, 1988)를 설정하였다. 이때 정밀토양도의 토성과 Green-Ampt 매개변수의 "Soil class"의 대응은 한국토양총설(농업기술연구소, 1992)을 참고하였다. 또한 토양의 포화초과유출을 모의하기 위해서는 토양의 유효토심에 대한 정보가 필요하다. 한국토양총설에서는 Table 2와 같이 토양상별 토양심도를 제시하고 있으며, GRM에서는 Table 2의 "GRM suggested value"를 토양상별 유효토심으로 제안하고 있다. 또한 토양상별 유효토심은 Eq. (7)에서의 지표하 유출모의를 위한 토양 깊이(D_s)로도 이용된다.

5.3 토지피복도 구축

토지피복도는 유효강우량 산정과 지표면 흐름을 해석할 때 적용되는 토지피복 특성별 불투수율과 조도계수의 설정에 이용된다. 본 연구에서는 토지피복 특성별 조도계수로 Vieux(2004)에 의해서 제안된 값을 적용하고 있으나, 수역에 대해서는 흐름이 발생하는 수역은

Table 2. Soil Depth

Depth class	Soil depth[cm] (National Institute of Agricultural Science and Technology, 1992)	GRM suggested value[cm]
Very shallow	0-20	10
Shallow	20-50	25
Moderately deep or Moderately shallow	50-100	75
Deep	100-150	125
Very deep	more than 150	150

Table 3. Roughness Coefficient and Impervious Ratio for Land Cover

Land cover class	Roughness coefficient (Vieux, 2004)	Impervious ratio	
		Sakong(2003)	GRM suggested value
Forest	0.1	0.001-0.050	0.05
Agricultural area	0.035	0.107-0.842	0.391
Grass	0.15	0.141-0.860	0.44
Urban area	0.015	0.641-0.947	0.853
Bare	0.035	0.115-0.808	0.442
Water	0.045(Chow, 1959)		1
Wetland	0.07		1

Table 4. Rainfall Events

Event number	Rainfall period	Total rainfall[mm]	Time interval[min]
Event 1	2007/06/23/18:00 - 06/25/00:00	42	60
Event 2	2007/08/31/20:00 - 09/02/21:00	100	60
Event 3	2007/09/04/10:00 - 09/08/03:00	112	60
Event 4	2007/09/15/05:00 - 09/18/02:00	143	60

하도인 것으로 가정하여 하도에서의 조도계수를 적용하고 있으며, 본문 “5.5 매개변수 추정”에서 이에 대한 내용을 기술하고 있다. 토지피복 특성별 불투수율은 사공호상(2003)에 의해서 제안된 값을 적용하고 있다. 사공호상은 농업지역, 수역, 습지의 불투수율을 직접적으로 제안하지 않고 있다. 따라서 농업지역에 대해서는 논, 밭, 비닐하우스의 불투수율을 평균한 값을 적용하였으며(홍준범 등, 2006), 수역과 습지는 모든 강우가 직접 유출에 기여하는 것으로 가정하였다.

5.4 수문사상

본 연구에서는 위천유역의 11개 강우관측소(무성, 군위, 고매, 효령, 대율, 산성, 화수, 석산, 의흥, 신령, 서부)와 1개의 수위관측소(무성)에서 관측된 2007년의 1시간 간격의 강우와 유량자료 중 4개의 사상을 추출하여 모형에 적용하였으며, Table 4와 같다.

GRM에서는 격자 형태로 유역에 분포된 강우자료를

입력자료로 사용한다. 따라서 본 연구에서는 HyGIS를 이용하여 위천 유역의 11개 강우관측소에 대한 티센계수를 산정하고, 이를 이용하여 면적평균강우량을 계산하였으며, 이를 공간자료와 동일한 크기(100m×100m)의 그리드 레이어로 전환하여 GRM의 입력 강우자료로 이용하였다.

5.5 매개변수 추정

GRM 모형은 강우-유출 현상을 물리적으로 해석하고 있다. 따라서 유역경계, 하천망, 토양, 토지피복 등에 의해서 결정되는 물리적인 특성들은 보정을 하지 않고 그대로 적용하였다. 그러나 이와 같이 물리적인 특성을 반영하는 고정된 매개변수가 아닌 선행 강우에 의해서 결정되는 가변적인 매개변수로서 토양의 초기함수율과 건천차수가 있으며, 하도 조도계수는 침투유량과 침투유량의 발생시간에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

초기함수율은 포화초과유출을 모의할 때 토양의 유

효도심과 함께 최대 가능침투량을 결정하는 매개변수로서 선행강우에 의한 토양의 포화도를 나타내고 있다. 초기함수율은 “0 ~ 1”의 범위에서 적용하며, 선행강우가 클수록 1에 가까운 값을 입력하게 된다. GRM에서는 토양의 초기함수율의 기본 값으로 “0”을 제안하고 있다.

GRM에서는 하도에 발생된 강우에 대해서는 모든 강우가 직접유출에 기여하는 것으로 모의한다. 따라서 입력된 하천 그리드 레이어의 하천망이 조밀할 경우 작은 강우에 의해서도 직접유출이 크게 모의될 수 있다. 그러나 선행강우가 작을 경우 하천망의 최상류측 지류는 건천일 경우가 있으며, 건천에서는 침투과정이 먼저 발생하게 된다. GRM에 입력된 하천망이 조밀할 경우 사용하는 선행강우량, 하천유출량 등을 고려하여 건천차수를 입력할 수 있으며, 건천으로 설정된 하천은 지표면 유출과 동일한 과정을 거쳐서 직접유출량이 계산된다. 건천차수는 “0 ~ 최대하천차수”의 범위에서 입력할 수 있으며, 최대하천차수는 입력된 하천망 그리드 레이어를 통해서 확인할 수 있다. 건천차수가 “0”일 경우에는 입력된 하천망에서 건천이 없는 것으로 인식하게 되며, GRM에서는 “0”을 기본 값으로 제안하고 있다.

GRM에서 하도 조도계수는 Chow(1959)와 Chaudhry(1993)에 의해서 제안된 하도에서의 조도계수 중 “Natural Streams - Bottom: gravel, cobbles and boulders (0.040)”와 “Natural Streams - Bottom: cobbles with large boulders (0.050)”의 중앙값인 0.045를 기본 값으로 제안하고 있다.

이와 같이 토양의 초기함수율과 건천차수 및 하도 조도계수는 토양 함수율의 초기조건과 입력된 하천망의 가변성과 불확실성 및 하도표면 조도에 대한 불확실성

을 반영하는 매개변수로서 총유출량, 침투유출량, 침투 유출량의 발생시간의 적합에 관여한다.

5.6 모의결과

위천 유역에 대해서 Table 4와 같은 수문사상을 GRM 모형에 적용하고, 모의결과를 관측 유량과 비교하였다. 4개의 강우사상 중 지속시간이 비교적 짧고 시간분포가 비교적 단순한 “Event 1”을 대상으로 GRM에서 제안하고 있는 매개변수 값으로 모의를 수행하고, 그 결과에 따라서 매개변수의 보정 여부를 판단하였으며, 모의결과는 Fig. 4 및 Table 5와 같다. 모의조건은 Green-Ampt 매개변수, 지표면 조도계수, 불투수율, 하도 조도계수 등 모든 매개변수가 GRM에서 제안된 값으로 설정된 상태에서 모의를 수행하였으며, 선행강우에 따라서 수문사상별로 달라지는 토양의 초기함수율과 건천차수는 각각 시행착오법으로 0.3과 1로 보정한 값을 적용하였다.

Fig. 4는 모의유량과 관측유량을 비교하고 있다. Fig. 4에서 모의결과는 관측유량을 잘 재현하고 있으며, 강우에 대한 유출반응 또한 타당한 것으로 검토되었다. 또한 Table 5에서는 총유출량과 침투유출량, 침투유출의 발생시간의 상대오차가 각각 1.8 %, 0.9 %, 0.0 %로 관측 유출을 매우 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 “Event 1”을 제외한 3개의 강우에 대해서도 GRM에서 제안하고 있는 매개변수 값을 그대로 유지하고 초기함수율과 건천차수만을 보정하여 그 결과를 검토하였다.

“Event 2” ~ “Event 4”의 강우에 대해서 초기함수율과 건천차수만을 보정하여 모의한 결과는 Fig. 5 ~ Fig. 7 및 Table 6과 같다. 관측유량과의 비교결과 침투 유량은 5 % 이내의 상대오차로 관측유량을 매우 잘 모

Table 5. Simulation Results(Event 1)

Event number	Comp. time step [min]	Running time [min]	Parameters			Total discharge			Peak discharge			Time to peak discharge		
			Initial saturation	Dry stream order	Channel roughness coeff.	Obs. [m ³]	Sim. [m ³]	Relative error [%]	Obs. [m ³ /s]	Sim. [m ³ /s]	Relative error [%]	Obs. [hour]	Sim. [hour]	Relative error [%]
Event 1	2	9.4	0.30	1	0.045	1574	1546	1.8	67.6	68.2	0.9	18	18	0.0

Table 6. Simulation Results(Event 2 ~ Event 4)

Event number	Comp. time step [min]	Running time [min]	Parameters			Total discharge			Peak discharge			Time to peak discharge		
			Initial saturation	Dry stream order	Channel roughness coeff.	Obs. [m ³]	Sim. [m ³]	Relative error [%]	Obs. [m ³ /s]	Sim. [m ³ /s]	Relative error [%]	Obs. [hour]	Sim. [hour]	Relative error [%]
Event 2	2	9.3	0.82	0	0.045	10270	10345	0.7	906.3	886.4	2.2	27	27	0.0
Event 3	2	13.0	0.78	0	0.045	12714	11218	11.8	692.5	685.6	1.0	26	26	0.0
Event 4	2	10.8	0.40	0	0.045	16153	12861	20.4	1050.5	1098.8	4.6	45	45	0.0

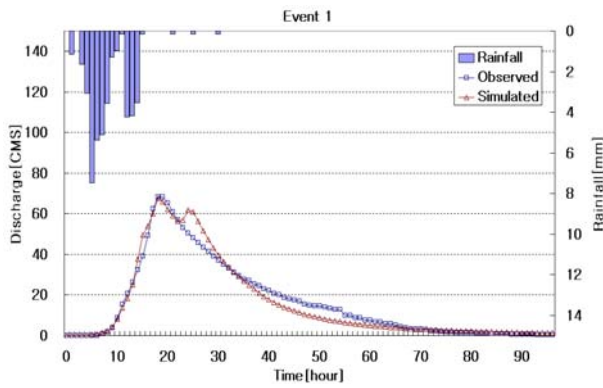


Fig. 4. Simulation Results - Event 1

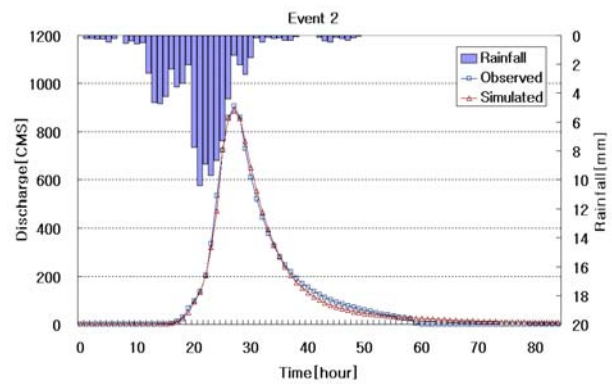


Fig. 5. Simulation Results - Event 2

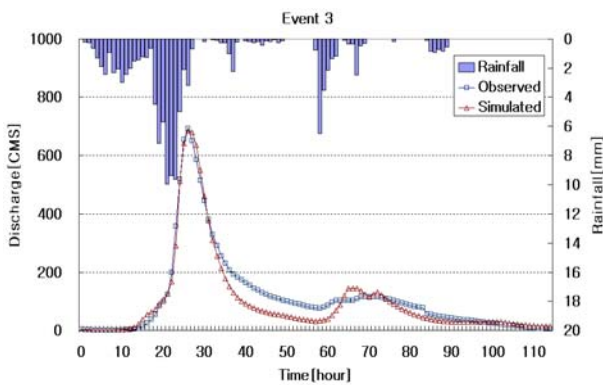


Fig. 6. Simulation Results - Event 3

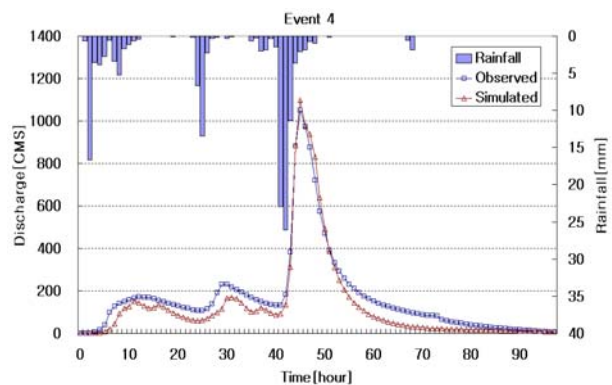


Fig. 7. Simulation Results - Event 4

의하고 있는 것으로 나타났으며, 침투유량의 발생시간은 정확히 일치하는 것으로 나타났다.

총유출량은 "Event 2"는 1% 이내의 상대오차로 관측 유출량을 잘 모의하고 있으며, "Event 3"과 "Event 4"는 "Event 2"에 비해서 큰 상대오차를 보이고 있다. 이는 "Event 3"과 "Event 4" 사상이 각각 약 90 시간의 강우기간을 모의한 경우로서 두 번 이상의 유량 증가가 발생되며, 이 과정에서 침투유량에 비해서 상대적으로 작은 유량의 구간에서 실측값과 오차가 발생하는 것을 알 수 있으나 강우에 대한 유출반응은 적절히 반영되고 있는 것으로 나타났다.

GRM 모형을 이용해서 위천 유역의 4개의 강우사상에 대해 모의한 결과 GRM에서 제안하고 있는 매개변수 값을 사용하고, 선행강우에 따라서 수문사상별로 달라지는 초기함수율과 건천차수 만을 보정하였을 때에도 모의결과가 모든 사상에 대하여 관측된 유출의 재현성이 높은 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 격자 기반의 분포형 강우-유출 모형인 GRM을 개발하였다. 지표면 유출과 하도 유출의 해

석을 위한 지배방정식은 운동과 방정식을 이용하였으며, 침투량 산정은 Green-Ampt 모형을 이용하고 있다. 지배방정식은 유한체적법을 이용해서 이산화 하였으며, TDMA 방법을 이용하여 연립방정식의 해를 구하고, 비선형 항에 대해서는 Newton-Raphson 방법을 이용하여 수렴해를 도출하였다.

GRM 모형의 타당성을 검토하기 위해서 가상의 유역을 설정하고, 각 격자에 대해서 모의된 결과를 $Vflo^{TM}$ 의 모의결과와 비교하였다. 가상의 유역에 대한 검토결과 강우, 침투, 지표면 유출, 지표하 유출, 하도 유출의 수문성분에 대한 해석 모듈이 적합하게 구현된 것으로 나타났으며, 모형 구동을 위한 입출력 모듈 또한 적합한 것으로 검토되었다.

GRM 모형을 위천 유역에 적용함으로써 모형 구동을 위한 자료의 구축과 매개변수의 설정 과정을 제시하였으며, 모형을 검증하고 실제 유역에 대한 적용성을 검토하였다. 위천 유역의 적용결과 모형의 구동을 위한 자료구축과 적용과정 및 매개변수의 설정이 적합한 것으로 나타났다.

위천 유역의 4개 강우사상에 대한 적용에서는 모든 매개변수에 대해서 GRM에서 제안하고 있는 값을 적용하고, 선행강우에 따라서 수문사상별로 달라지는 초기

함수율과 건천차수 만을 보정하였다. 모의결과는 관측 값과 비교하였을 때 침투유량은 0.9~4.6 %, 총유출량은 0.7~20.4 %의 상대오차를 나타냈고 침투시간의 발생시간은 정확히 일치하였으며, 따라서 관측된 유출의 재현성이 높은 것으로 나타났다. 이를 통해서 실제 유역에 대한 적용성이 충분히 있는 것으로 사료되나, 이는 향후 다양한 유역과 수문사상에 대한 추가 검토를 필요로 한다.

향후 GRM 모형은 좀 더 많은 유역에서 다양한 수문사상을 적용하여 모형의 적용성에 대한 검토를 지속적으로 수행할 필요가 있을 것이다. 또한 다양한 특성을 가지는 공간자료 및 수문사상을 적용할 때 참고할 수 있는 자료의 적용방법 및 매개변수의 추정과정에 대한 가이드라인의 설정을 위한 추가적인 연구를 지속할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호:1-2-3)과 건설교통부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신사업과제의 연구비지원(과제번호 07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

강석구 (2003). **유한체적법을 이용한 2차원 홍수범람 모형의 개발**. 석사학위논문, 한양대학교, pp. 5-19.

김성준 (1998). “격자기반의 운동과 강우유출모형 개발 (I)-이론 및 모형-.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제3호. pp. 303-308.

김경탁 (1998). **GIS 적용에 따른 유출응답에 관한 연구**. 박사학위논문, 인하대학교, pp. 94-98.

김경탁 (2003). “정밀도양도를 이용한 CN 산정에 대한 제안.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, Vol. 36, No. 4, pp. 45-53.

노성진, 김현준, 장철희 (2005). “청계천 유역에 대한 WEP 모형의 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제8호. pp. 645-653.

농업기술연구소 (1992). **중보 한국토양총설**. 토양조사자료 13. 농촌진흥청. pp. 283-290.

박진혁, 윤지현, 정구열, 성영두 (2008). “홍수유출해석을 위한 Hydro-BEAM 모형의 개선.” **2008년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 2179-2183.

사공호상 (2003). “IKONOS 위성영상을 이용한 불투수

지표면 분석방법에 관한 실증연구.” **한국 GIS 학회지**, 한국 GIS 학회, Vol. 11, No. 4, pp. 509-518.

신사철 (1996). “분포형 강우-유출 모형에 의한 유출 해석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제6호. pp. 131-139.

이진희 (1996). **유한체적법에 의한 개수로에서의 2차원 부정류 해석**. 인하대학교, 석사학위논문. pp. 11-27.

최진규, 손재권 (1992). “유한요소법에 의한 소유역 유출모형의 적용.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제25권, 제3호. pp. 97-104.

최현상 (2001). **GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발**. 박사학위논문, 경북대학교, pp. 31-39.

한국건설기술연구원 (1995). **이차원 하천모형의 개발 (I)**, KICT/95-WR-1103-1, pp. 73-91.

한국건설기술연구원 (1996). **이차원 하천모형의 개발 (II)**, 건기연 96-055, pp. 95-104.

한국건설기술연구원 (2007). **HyGIS 개발**. 과학기술부. pp. 11-63.

홍준범, 김병식, 윤석영 (2006). “VfloTM 모형을 이용한 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성 평가.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제6B호. pp. 613-622.

土木研究所 (2002). **WEP 모델 解説書**, 土木研究所, pp. 3-22.

Abbott, M.B., Bathurst, J.C, Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986). “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.

Beven, K. (1981). “Kinematic subsurface stormflow.” *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 5, pp. 1419-1424.

Chaudhry, M.H. (1993). *Open-channel flow*. Prentice-Hall, pp. 82-86.

Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, pp. 101-123.

Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, pp. 110-147.

Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A, and Keefer, T.O. (1991). “Kinematic routing using finite elements on a triangular irregular network.” *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 6, pp. 995-1003.

- Jain, M.K., Kothiyari, U.C., and Ranga Raju, K.G. (2004). "A GIS based distributed rainfall-runoff model." *Journal of Hydrology*, Vol. 299, pp. 107-135.
- Julien, P.Y., Saghaffian, B., and Ogden, F.L. (2004). "Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff." *Water Resources Bulletin*, Vol. 32, No. 3, pp. 523-536.
- Nawahda, A., Kojiri, T., and Ikebuchi, S. (2004). "Distributed runoff model linking surface with groundwater processes." *Annals of Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ., No. 47C.
- O'Callaghan, J.F. and Mark D.M. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Computer vision, graphics, and image processing*, Vol. 28, pp. 324-344.
- Ogden, F.L. (1997). *CASC2D Reference manual*, Univ. of Connecticut. pp. 20-32.
- Patankar, S.V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation. pp. 42-66.
- SFWMD(South Florida Water Management District). (2005). *Regional Simulation Model (RSM) - Theory manual*, South Florida Water Management District Office of Modeling. pp. 26-32.
- Vieux, B.E., Bralts, V.F., Segerling, L.J., and Wallace, R.B. (1990). "Finite element watershed Modeling: one-dimensional elements." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 116, No. 6, pp. 803-819.
- Vieux, B.E. and Vieux, J.E. (2002). "VfloTM: A real time distributed hydrologic model." *Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, Nevada.
- Vieux, B.E. and Vieux, J.E. (2003). "Operational deployment of physics-based distributed rainfall-runoff model for flood forecasting in Taiwan." *Proceedings of International Symposium on Information from Weather Radar and Distributed Hydrologic Modeling*, IAHS, Sapporo, Japan.
- Vieux, B.E.(2004). *Distributed hydrologic modeling using GIS*. Kluwer Academic Publishers.
- Zhao, D.H., Shen, H.W., Tobios III, G.Q, Lai, J.S., and Tan, W.Y. (1994). "Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 863-883.

(논문번호:08-71/접수:2008.06.08/심사완료:2008.07.04)