

# 분포형 강우-유출 모의를 위한 격자 네트워크 해석

## Grid Network Analysis for Distributed Rainfall-Runoff Modelling

최 윤 석\* / 이 진 희\*\* / 김 경 탁\*\*\*

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

### Abstract

It needs to conceptualize watershed with triangular or rectangular elements and to analyze the changes in hydrological components of each element for distributed modeling of rainfall-runoff process. This study is the network analysis of watershed grid for flow routing occurred in each element when analyzing rainfall-runoff process by one-dimensional kinematic wave equation. Single flow direction from D8-method(deterministic eight-neighbors method) is used, and the information of flow direction and flow accumulation are used to determine the computation order of each element. The application theory of finite volume method is suggested for each flow direction pattern between elements, and it is applied it to calculate the flow of each grid. Network analysis method from this study is applied to GRM(Grid based Rainfall-runoff Model) which is physically based distributed rainfall-runoff model, and the results from simplified hypothetical watersheds are compared with *Vflo*<sup>TM</sup> to examine the reasonability of the method. It is applied to Jungrangcheon watershed in Han river for verification, and examination of the applicability to real site. The results from Jungrangcheon watershed show good agreement with measured hydrographs, and the application of the network analysis method to real site is proper.

**keywords** : distributed model, grid, network analysis, rainfall-runoff, GRM

### 요 지

유역의 강우-유출 현상을 분포형으로 모의하기 위해서는 삼각형 혹은 사각형 요소로 유역을 모형화하고 각 요소에서의 수문성분의 변화를 해석하여야 한다. 본 연구는 사각형 요소인 격자로 모형화된 유역에서의 강우-유출 현상을 1차원 운동과 방정식을 이용하여 모의할 때 각 격자에서 발생된 흐름의 추적을 위한 격자 네트워크 해석에 대해 수행하였다. 격자의 흐름방향은 D8-method(deterministic eight-neighbors method)에 의해 결정된 단방향 흐름정보를 이용하였고, 각 격자별 흐름방향과 흐름누적수 정보를 이용하여 해당 격자의 계산 순서를 결정하게 된다. 또한 1차원 운동과 방정식을 유한체적법으로 해석할 때 격자간의 흐름방향 형태에 따른 해석방법을 제시하고, 이를 격자별 유출량 계산에 적용하였다. 본 연구에서 제시된 격자 네트워크 해석법은 물리적 기반의 분포형 강우-유출 모형인 GRM(Grid based Rainfall-runoff Model)에 적용하였으며, 단순화된 가상의 유역에 대한 모의결과를 *Vflo*<sup>TM</sup> 모형의

\* 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)

\*\* 교신저자, 인하대학교 사회기반시스템공학부 연구교수  
Research Prof., Inst. of Water Resources System, Inha Univ., Inchoen, 402-751, Korea.  
(e-mail: jinheelee@inha.ac.kr)

\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구실 책임연구원  
Research Fellow, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 411-712, Korea

모의결과와 비교함으로써 타당성을 검토하였다. 또한 한강 수계의 중랑천 유역의 적용을 통해 실유역에 대한 적용성을 검토하였다. 중랑천 유역의 적용결과 모의된 유출 수문곡선은 관측 수문곡선을 잘 재현하였으며, 이에 따라 격자 네트워크 해석 과정의 실유역 적용이 타당한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 분포형 모형, 격자, 네트워크 해석, 강우-유출, GRM

## 1. 서론

사각형 요소인 격자로 모형화된 유역의 강우-유출 현상을 분포형으로 모의하기 위해서는 각 격자별 유출 강우량을 산정하고, 이에 대한 격자간 흐름을 추적하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 1차원 운동과 방정식을 이용하여 격자 기반의 분포형 강우-유출 모의를 수행할 때 격자간의 흐름 추적을 위한 격자 네트워크 해석법을 제시하고자 한다.

격자 기반의 1차원 분포형 강우-유출 모의에서는 유역을 구성하고 있는 격자의 개수가 증가함에 따라 모형의 수행에 소요되는 시간이 매우 길어질 수 있으며, 따라서 격자를 해석하는 방법에 따라서 모형 수행의 속도에 큰 영향을 미치게 된다. 1차원 운동과 방정식에서 격자에서의 흐름은 하류방향으로 낮아지는 경사를 가지는 단방향으로 발생되며, 하류에서 상류로의 흐름은 고려하지 않는다. 따라서 격자간의 흐름 추적은 유역을 구성하고 있는 격자 요소의 단방향 흐름 경로에 따라 순차적으로 수행되어야 한다.

Smith and Brilly(1992)는 격자의 흐름추적 순서를 결정하기 위하여 유역의 격자를 “Start Cell”과 “Junction Cell”로 특성을 부여하고 있다. 흐름추적의 순서는 “Start Cell”이 포함된 구간을 먼저 계산하고, 상류에 있는 흐름추적 구간의 개수가 작은 것에서부터 큰 것의 순서로 순차적으로 계산한다. Smith and Brilly에 의해서 제안된 격자 네트워크 해석법은 흐름추적을 수행할 때 마다 유역의 전체 격자에 대한 흐름 특성의 판단을 반복적으로 수행하지 않고, 상류에 있는 흐름추적 구간의 개수가 작은 것에서부터 큰 것으로 순차적으로 계산한다는 기준만을 적용함으로써 흐름경로 결정과정을 단순화 하고 있다. 그러나 각 격자에서의 흐름 특성에 대한 정보 외에 자신과 상류의 흐름추적 구간에 대한 정보와 하나의 구간에서의 계산순서에 대한 정보가 추가적으로 필요한 특징이 있다.

Vieux *et al.*(1990)은 유역 격자에 대한 지표면 흐름의 추적을 위해 1차원 운동과 방정식을 적용하고, 이의 공간적 해석에 유한요소법을 이용하고 있다. 이때 각 격자별로 상하류에 있는 격자의 정보와 상하류의 격자

와 연결된 격자의 개수를 이용하여 각 요소의 결합도를 결정하고 요소 강성행렬을 작성한 후 유역 전체에 대한 강성행렬을 생성하는 직접강성법을 적용하고 있다.

Smith and Brilly(1992) 및 Vieux(2004)는 격자의 흐름방향 정보만을 이용해서 격자 네트워크를 해석하고 있으며, 정인균 등(2008)은 KIMSTORM(KIneMatic wave STOrn Runoff Model) 모형에서 유역격자에 대한 흐름누적수를 이용하여 계산순서를 미리 결정하는 방법을 적용한 바 있다.

최윤석 등(2008)은 격자 기반의 분포형 강우-유출 모형인 GRM을 개발한 바 있으며, 유한체적법을 이용한 지배방정식의 해석과 강우, 유출, 침투, 지표하 유출 등 주요 수문성분에 대한 해석방법 및 매개변수 추정방법을 제시하고, 이를 실유역에 적용하였다.

본 연구에서는 GRM 모형의 지표면 흐름과 하도 흐름의 계산에 적용되는 격자 네트워크 해석에 대해서 기술하고 있다. 흐름방향과 흐름누적수를 이용하여 유역 격자에 대한 1차원 네트워크를 구축하고 격자의 계산순서를 설정하였다. 또한 1차원 운동과 방정식을 유한체적법으로 해석할 때 격자간의 흐름관계에 따라 직각흐름, 대각선 흐름, 네트워크 흐름을 가지는 가상의 유역을 설정하고 각각에 대한 해석방법을 제시하였으며, 이에 대한 유출모의 결과를 분석하여 그 타당성을 검토하였다. 본 연구에서의 격자 네트워크 해석법이 적용된 GRM 모형을 중랑천 유역에 적용하고, 모의 수행 속도와 모의결과를 검토함으로써 격자 네트워크 해석법의 실유역 적용성을 검토하였다.

## 2. 지배방정식

본 연구에서는 격자 기반의 분포형 강우-유출 모의를 위해서 유역 격자의 네트워크 해석법을 제안하였으며, 이를 격자 기반의 분포형 강우-유출 모형인 GRM에 적용하고 그 타당성을 검토 하였다. GRM에서는 지표흐름의 모의를 위해서 운동과 방정식을 유한체적법으로 해석하고 있으며, 지표면 흐름과 하도 흐름의 연속 방정식은 각각 Eqs. (1) and (2)와 같다. 또한 운동량방정식은 Eq. (3)를 적용하고, Eq. (4)의 Manning의 유속

공식에서 마찰경사 대신에 지면의 바닥경사를 적용함으로써 유속을 계산하게 된다.

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

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

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

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

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

지표면 흐름 및 하도 흐름 해석을 위한 1차원 운동과 방정식은 Eqs. (1), (2) and (4)를 이용하여 수심과 유속 혹은 단면적과 유량을 계산한다. 이때 흐름은 낮은 경사를 가지는 하류의 단방향으로 발생되며, 높은 경사의 방향 혹은 지면의 경사가 "0"인 경우에 대한 흐름해석은 고려하지 않고 있다. 이와 같이 1차원 운동과 모형을 이용하여 유역 격자에서의 유출현상을 모의하기 위해서는 모든 격자에서의 경사는 반드시 "0"보다 큰 값을 가져야하며, 흐름의 방향은 하류의 단방향으로 설정되어야 한다.

### 3. 지형정보

본 연구에서는 유역 격자의 네트워크 해석을 위해서 각각의 격자에 대해 단방향으로 설정된 흐름방향 정보와 흐름누적수 정보를 이용하고 있다.

#### 3.1 흐름방향

유역 격자에 대한 단방향 흐름정보는 DEM(Digital Elevation Model)을 이용해서 계산할 수 있다. O'Callaghan and Mark(1984)는 DEM에서의 단방향 흐름설정을 위한 D8-method를 제안하였다. D8-method에서는 3×3 크기의 격자에서 가운데에 위치한 격자의 흐름방향을 결정하기 위해서 주변 8개 격자와의 중심점 거리와 고도차를 이용하며, 이를 통해서 계산된 경사 중 가장 급한 하향경사의 방향으로 흐름방향을 설정한다. Fig. 1은 D8-method에서의 흐름방향별 격자의 값을 나타낸 것이고, Fig. 2는 3×3 영역의 중심에 있는 격자의 흐름방향 계산 사례를 나타낸 것이다(한국건설기

술연구원, 2007).

D8-method를 이용해서 유역 전체의 격자에 대해서 흐름방향을 결정하기 위해서는 DEM에 있는 sink와 flat area와 같은 영역이 제거되어야 한다(김정탁과 최윤석, 2005). ArcGIS, TOPAZ(TOPographic PArameteriZation) 혹은 HyGIS(Hydro Geographic Information System)와 같이 수문학적 지형보정 기능이 포함된 프로그램에서는 DEM의 sink와 flat area를 자동으로 보정하고 격자별 단방향 흐름정보를 생성할 수 있으며, 본 연구에서는 HyGIS를 이용하여 DEM을 보정하고 격자별 흐름방향 정보를 생성하였다.

64	128	1
32	x	2
16	8	4

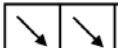
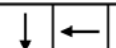
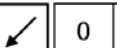

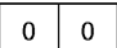
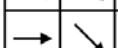
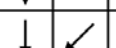
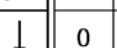
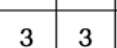
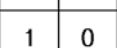
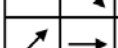
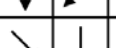
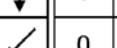
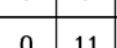
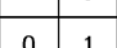

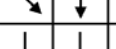
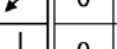
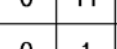
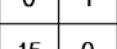
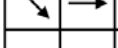
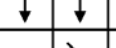
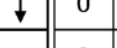

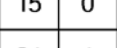
Fig. 1. Flow Direction Index

Elevation			Weighted drop			Flow direction
92	91	90	-1.4	-1.0	0.0	
92	90	89	-2.0	x	1.0	2
94	93	90	-2.8	-3.0	0.0	

Fig. 2. Flow Direction for 3×3 Grid

#### 3.2 흐름누적수

흐름누적수는 격자의 흐름방향 정보를 이용하여 유역내 각 격자의 흐름을 추적하는 과정에서 자신의 격자를 흐름경로로 포함하고 있는 상류 격자의 개수를 나타내는 것이다. 따라서 최상류 격자의 흐름누적수는 "0"이 되며, 최하류 격자의 흐름누적수는 유역에 포함된 격자의 총 개수보다 1이 작은 값을 가지게 된다. Fig. 3은 5×5 크기의 영역에 대해서 흐름방향 정보를 이용하여 흐름누적수를 계산한 사례를 나타낸 것이다.

					0	0	1	0	0
					0	3	3	1	0
					0	0	11	0	1
					0	0	1	15	0
					0	2	5	24	1

(a) Flow direction (b) Flow accumulation

Fig. 3. Flow Accumulation

### 4. 격자 네트워크 생성

#### 4.1 흐름정보 구축

유역의 격자 네트워크는 격자의 흐름방향과 흐름누적수 정보를 이용하여 구축된다. 흐름방향 정보는 임의 격자에 대해서 인접한 상류 격자의 정보를 설정하는데

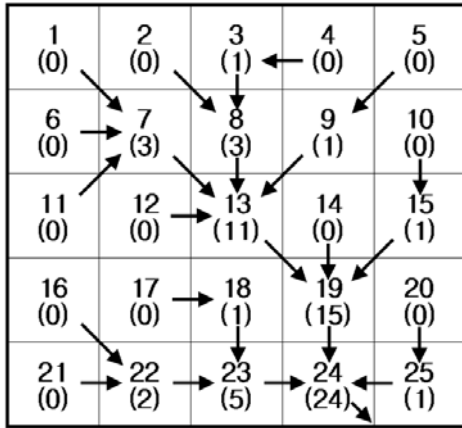


Fig. 4. Grid Numbering and Flow Accumulation

Table 1. Flow Information for Grid Networking

Grid ID	Neighboring upstream grid		Flow acc.	Grid ID	Neighboring upstream grid		Flow acc.
	Count	ID			Count	ID	
1	0		0	14	0		0
2	0		0	15	1	10	1
3	1	4	1	16	0		0
4	0		0	17	0		0
5	0		0	18	1	17	1
6	0		0	19	3	13, 14, 15	15
7	3	1, 6, 11	3	20	0		0
8	2	2, 3	3	21	0		0
9	1	5	1	22	2	16, 21	2
10	0		0	23	2	18, 22	5
11	0		0	24	3	19, 23, 25	24
12	0		0	25	1	20	1
13	4	7, 8, 9, 12	11				

이용되고, 흐름누적수 정보는 임의 격자의 계산 순서를 설정하는데 이용된다. Fig. 3에서 적용한 가상의 유역을 이용해서 격자 네트워크 정보를 도시하면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 각 격자별로 부여된 번호는 격자의 고유한 ID이며, 괄호로 표시된 숫자는 흐름누적수를 나타낸 것이다. 또한 격자간에 표시된 화살표는 화살표 시점에 있는 격자의 흐름방향을 나타낸 것이다. Fig. 4의 흐름 정보를 이용하여 각 격자별 직상류 격자의 ID와 흐름누적수를 정리하면 Table 1과 같다.

#### 4.2 계산 순서 설정

1차원 운동과 모형에서 흐름은 낮은 경사 방향으로 형성되는 하류 방향으로만 진행된다. 유역 전체의 격자에서 흐름의 경로는 흐름누적수가 "0"인 격자에서 시작하여 격자별로 설정된 흐름방향을 따라서 진행된다. 이때 두개 이상의 흐름경로가 만나는 격자에 대해서 유출량을 계산하기 위해서는 상류에 있는 모든 흐름경로에서의 유출량이 미리 산정되어 있어야 하며, 자신의 격자로 유입되는 양은 상류에서의 유출량 합과의 유량보존 조건으로 계산된다.

유역 격자의 흐름에서 임의의 흐름누적수를 가지는 격자의 상류에 있는 격자는 반드시 자신보다 작은 흐름누적수를 가지며, 이는 흐름이 흐름누적수가 작은 격자에서 큰 격자로 진행되는 것을 의미한다. 따라서 유역 격자에 대한 유출량 계산 순서는 다음과 같은 조건으로 설정할 수 있다.

- ① 흐름누적수가 작은 격자로부터 시작하여 큰 격자로 순차적으로 진행한다.
- ② 동일한 흐름누적수를 가지는 격자들에 대해서는 인접한 상류 격자의 개수가 작은 것부터 큰 것으

로 순차적으로 진행한다.

- ③ 동일한 흐름누적수를 가지고, 인접한 상류 격자의 개수가 같은 격자들에 대해서는 "Grid ID"가 작은 것부터 큰 것으로 순차적으로 진행한다.
- ④ 인접한 상류 격자의 개수가 1보다 큰 격자에 대해서는 자신의 격자로 유입되는 유량은 상류 격자에서의 유출량 합과 유량보존 조건으로 계산한다.

1차원 운동과 방정식을 이용해서 Fig. 4의 유역에 대한 유출해석을 수행하기 위한 격자별 계산 순서를 설정하면 Table 2와 같다. Table 2와 같은 격자의 계산순서는 유출해석을 수행하기 전 단계에 설정되며, 유출해석의 전체 과정에서 동일하게 적용됨으로써 모의 대상 격자를 검색하기 위한 추가적인 노력이 필요 없게 된다. 또한 2차원 배열을 가지는 유역격자를 유한체적법의 검사체적 번호와 함께 일차원으로 재배열함으로써 격자간 흐름정보의 설정 및 참조를 단순화할 수 있다.

### 5. 유한체적법의 적용

#### 5.1 이산화 방정식

GRM에서는 운동과 방정식을 이용한 지표수 흐름해석을 위해서 유한체적법을 적용하고 있으며, 이를 위한 검사체적의 설정은 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 아래첨자  $i$ 는 검사체적의 번호를 나타내고 있으며,  $p$ 는 검사체적의 중심부,  $w$ 는 검사체적으로 유입이 발생하는 상류 방향의 검사체적면,  $e$ 는 유출이 발생하는 하류 방향( $x$  방향)의 검사체적면을 각각 표시하고 있다(Patankar, 1980).

지표면 흐름해석을 위한 Eq. (1)의 연속방정식을 검사체적  $CV_i$ 에 대해서  $x$ 와  $t$ 의 항으로 적분하기 위한

Table 2. Grid Ordering for Kinematic Wave Solution

Computation order	Grid ID	Neighboring upstream grid ID	Computation order	Grid ID	Neighboring upstream grid ID	Computation order	Grid ID	Neighboring upstream grid ID
1	1	-	10	16	-	19	22	16, 21
2	2	-	11	17	-	20	8	2, 3
3	4	-	12	20	-	21	7	1, 6, 11
4	5	-	13	21	-	22	23	18, 22
5	6	-	14	3	4	23	13	7, 8, 9, 12
6	10	-	15	9	5	24	19	13, 14, 15
7	11	-	16	15	10	25	24	19, 23, 25
8	12	-	17	18	17			
9	14	-	18	25	20			

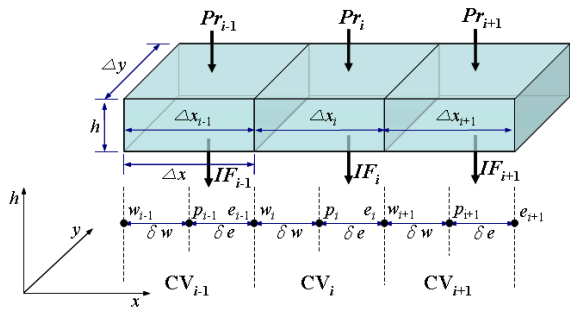


Fig. 5. Control Volumes for Discretization

식은 Eq. (5)와 같다. Eq. (5)를 적분하고 계산하고자 하는 검사체적  $i$ 의 중심점( $p_i$ )에서의  $j+1$  시간의 수심( $h_{ip}^{j+1}$ )으로 정리하면, Eq. (6)과 같은 지표면 흐름 해석을 위한 이산화방정식을 얻을 수 있다(최윤석 등, 2008). 본 연구에서는 격자 네트워크 해석법의 유한체적법 적용을 위한 수식화 과정에서 지표면 흐름을 중심으로 기술하고 있으며, 하도 흐름의 해석에도 동일한 방법을 적용할 수 있다.

$$\int_{w_i}^{e_i} \int_j^{j+1} \frac{\partial h}{\partial t} dt dx + \int_j^{j+1} \int_{w_i}^{e_i} \frac{\partial (uh)}{\partial x} dx dt = \int_j^{j+1} \int_{w_i}^{e_i} (Pr_i - IFr_i) dx dt \quad (5)$$

$$h_{ip}^{j+1} = h_{ip}^j - [\alpha \{ (\overline{uh})_{ie}^{j+1} - (\overline{uh})_{iw}^{j+1} \} + (1-\alpha) \{ (\overline{uh})_{ie}^j - (\overline{uh})_{iw}^j \}] \frac{\Delta t}{\Delta x_i} + \{ \alpha S_i^{j+1} + (1-\alpha) S_i^j \} \Delta t \quad (6)$$

여기서  $\Delta x_i$  : 검사체적  $i$ 의  $x$  방향 길이,  $j$  : 시간점자,  $S_i$  : 생성 항( $S_i = Pr_i - IFr_i$ ),  $\alpha$  : 시간 가중계수

## 5.2 직각 흐름

Fig. 5에서 임의의 검사체적( $CV_i$ )의  $x$  방향 거리( $\Delta x_i$ )는 중심점  $p$ 에서 상류측 검사체적면까지의 거리( $\delta w_i$ )와 하류측 검사체적면까지의 거리( $\delta e_i$ )의 합으로 나타낼 수 있다. 직각 흐름에서는 상류에서 유입되는 경로와 하류로 유출되는 경로가 모두 격자면에 직각인 방향을 가지게 되며, Fig. 4에서 3번, 18번, 23번, 25번 격자에 해당한다. 이러한 흐름에서는 검사체적 중심부에서 검사체적면까지의 거리는 모두 격자 크기의 1/2의 값을 가지게 되며, 따라서  $\Delta x_i$ 는 Eq. (7)과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= \delta w_i + \delta e_i \\ &= \Delta x \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\Delta x$  : 격자의  $x$  방향 길이

## 5.3 대각선 흐름

대각선 흐름은 임의의 검사체적으로 유입되는 경로와 유출되는 경로가 모두 대각선 방향인 경우이며, Fig. 4에서 9번 격자에 해당한다. 이러한 흐름에서는 검사체적 중심부에서 검사체적면까지의 거리는 모두 격자의 대각선 길이의 1/2의 값을 가지며, 따라서  $\Delta x_i$ 는 Eq. (8)과 같다. 이때 Eq. (6)의 생성항 계산에 이용되는 강우강도( $P$ )는 검사체적의  $x$  방향 길이( $\Delta x_i$ )에 균등하게 분포하고 있으며, 하나의 격자에 발생하는 강우량은 흐름방향에 관계없이 일정해야 하므로 Eq. (9)가 성립해야 한다. 따라서 대각선 흐름이 발생하는 격자에 대해서는 강우량 보존의 조건에 의해서 Eq. (10)로부터 계산된 강우량( $Pr_i^*$ )을 생성항 계산에 적용하여야 한다 (Eq. (11)).

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= \delta w_i + \delta e_i \\ &= \Delta x \sqrt{2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta x_i \times \Delta y \times Pr_i^* = \Delta x \times \Delta y \times Pr_i \quad (9)$$

$$Pr_i^* = \frac{Pr_i}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

$$S_i = Pr_i^* - IFr_i \quad (11)$$

여기서  $\Delta y$  : 격자의  $y$ 방향 길이

#### 5.4 직각과 대각선의 혼합흐름

임의의 검사체적에 인접해 있는 상류 격자가 두개 이상일 경우에는 상류 격자로부터 유입되는 경로는 직각 방향과 대각선 방향이 혼합되어 있을 수 있으며, Fig. 4에서 7번, 8번, 13번, 19번, 22번, 24번 격자에 해당하는 경우이다. 이때 직상류의 격자 중 유출이 발생하는 격자의 개수와 흐름방향에 따라서 자신의 검사체적에 대한  $x$  방향의 길이( $\Delta x_i$ )는 달라질 수 있다. 이와 같이 계산과정에서 변화하는  $\Delta x_i$ 를 하나의 검사체적에서 동일한 값으로 일괄적으로 적용하기 위해서 Eq. (12)와 같이 상류격자의 흐름방향과 개수를 이용하여 계산된 평균값을 이용할 수 있다. 이때 검사체적에서의 강우량 보존의 조건에 의해서 계산된 강우량은 Eq. (13)과 같고, Eq. (11)을 이용해서 생성항을 계산한다.

$$\Delta x_i = \frac{\sum_{n=0}^N (\delta w_i)_n}{N} + \delta e_i \quad (12)$$

$$Pr_i^* = \frac{Pr_i \times \Delta x}{\Delta x_i} \quad (13)$$

여기서  $N$  : 인접한 상류격자의 개수,  $(\delta w_i)_n$  : 인접한 상류격자 중  $n$ 번째 격자 방향으로의  $\delta w_i$

이때 Fig. 4의 15번 격자와 같이 인접한 상류격자가 하나이고, 직각 방향과 대각선 방향의 흐름이 혼합되어 있을 경우에는 Eqs. (12) and (13)은 각각 Eqs. (14) and (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= \delta w_i + \delta e_i \\ &= (1 + \sqrt{2}) \times \frac{\Delta x}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

$$Pr_i^* = \frac{2Pr_i}{1 + \sqrt{2}} \quad (14)$$

#### 5.5 검사체적의 유효길이

격자간의 흐름추적에서 임의의 격자로 유입되는 유

량은 상류 격자에서의 유출량 합과 유량보존 조건으로 계산하여야 한다. 이때 인접한 상류 격자 중 흐름이 발생되지 않는 격자는 검사체적의 유량증가에 기여하지 않게 되며, 따라서 흐름이 발생하는 상류격자에 의한 CV<sub>i</sub>의 유량 증가를 반영하기 위해서 검사체적의  $x$  방향 길이로 Eq. (16)과 같이 계산된  $\Delta x_{ei}$ 를 적용한다.

$$\Delta x_{ei} = \Delta x_i \times N_e \quad (16)$$

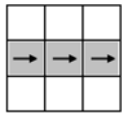
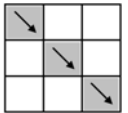
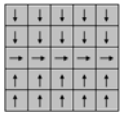
여기서  $\Delta x_{ei}$  : CV<sub>i</sub>의  $x$  방향 유효길이,  $N_e$  : 인접한 상류격자 중 CV<sub>i</sub>로의 유출이 발생하는 격자의 개수( $1 \leq N_e \leq 7$ )

### 6. 가상 유역에 대한 검토

본 연구에서 제안한 유역 격자의 네트워크 해석법이 적용된 GRM 모형을 가상의 유역에 적용하고, 그 결과를  $Vflo^{TM}$ (Vieux, 2004)의 모의결과와 비교하였으며, 이를 통해서 격자 네트워크의 해석 방법에 대한 타당성을 검토하고자 한다.  $Vflo^{TM}$ 은 GRM 모형에서와 같이 1차원 운동과 모형을 이용하여 지표 흐름을 해석하고 있으며, 격자 네트워크 해석은 유한요소법을 이용하고 있다.  $Vflo^{TM}$  모형은 Vieux and Vieux(2003)에 의해 홍수에 보에 적용된 바 있으며, 홍준범 등(2006)은 국내 유역에의 적용성을 평가하였다.

본 연구에서 적용한 가상 유역의 지형적 특성과 강우는 Table 3과 같다. Table 3에서 “Type 1” 유역은 일렬로 배열된 격자에서 직각 방향의 흐름만 있으며, “Type 2”는 일렬로 배열된 격자에서 대각선 방향의 흐름만 있는 유역이고, “Type 3”은 흐름경로가 합류되는

Table 3. Hypothetical Watersheds and Rainfall

Name	Type 1	Type 2	Type3
Flow type			
Grid count	20		21×20 (row×column)
Grid size	100m×100m		
Slope	0.001		
Roughness coefficient	0.015		
Flow type	Overland flow		
Infiltration	No infiltration		
Rainfall intensity	30mm/h		
Rainfall duration	1 hours		
Comp. time step	180 sec		

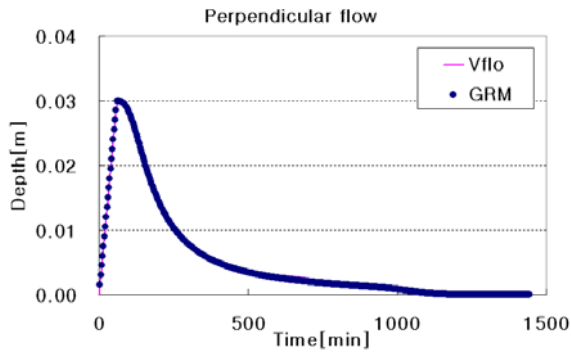


Fig. 6. Perpendicular Flow

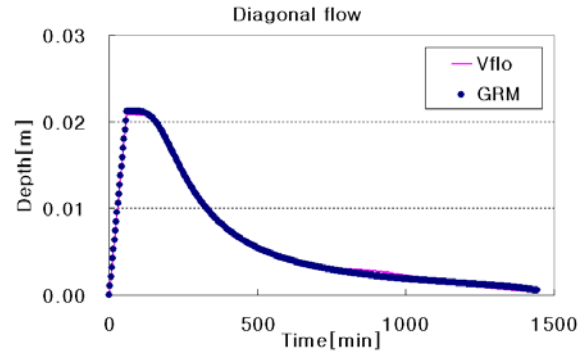


Fig. 7. Diagonal Flow

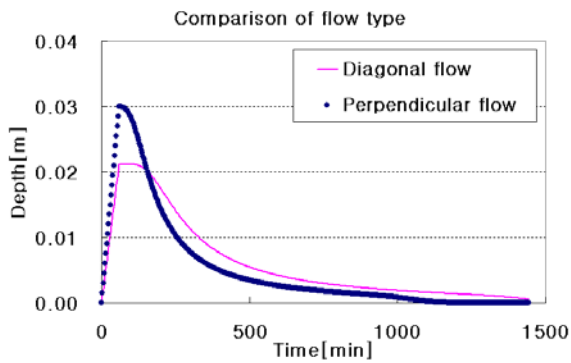


Fig. 8. Comparison of Flow Type-GRM

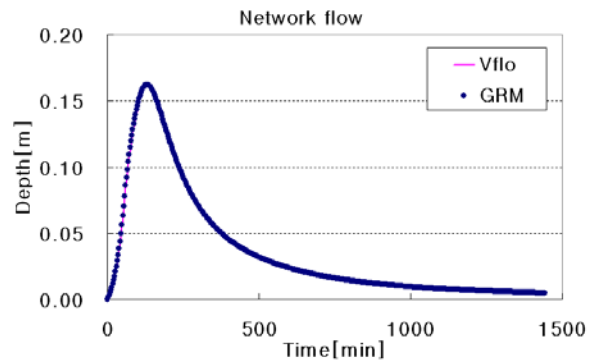


Fig. 9. Network Flow

네트워크 흐름을 가지는 유역이다. 이때 모든 격자에서의 경사와 조도계수는 각각 0.001과 0.015를 동일하게 적용하였으며, 침투는 없는 것으로 가정하였다. 이와 같은 3 가지 형태의 가상 유역에 30 mm/h의 강우강도로 1시간 동안 지속되는 강우를 계산 시간간격인 180초 간격으로 균등 분할하고, 이를 전체 격자에 대해서 균일하게 분포시켰다.

Figs. 6 and 7에서는 각각 직각 흐름과 대각선 흐름의 모의결과를 나타낸 것이다. 두 가지 형태의 흐름에서 모두  $Vflo^{TM}$ 의 모의결과와 유사한 값을 보여주고 있으며, 상관계수는 모두 0.99를 나타내었다. 또한 Fig. 8은 두 가지 형태의 흐름에 대해서 GRM 모형의 모의결과를 비교한 것이다. Fig. 8에서는 대각선 흐름이 직각 흐름에 비해서 침투수심이 낮고, 흐름의 도달시간이 늦어지는 경향을 보이고 있으며, 이는 대각선 흐름에 의해서 검사체적의  $x$  방향 길이가 길어지는 영향이 반영된 것임을 알 수 있다. Fig. 9는 격자간의 흐름경로가 합류되는 격자를 포함하고 있는 경우로서 GRM의 모의 결과는  $Vflo^{TM}$ 의 모의결과와 거의 일치되는 값을 보여주고 있으며, 상관계수는 0.99를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 제안된 격자간 흐름형태에 따른 흐름해석 및 격자 네트워크 해석법은 격자 기반의 유출해석에서 흐름특성을 적절히 반영하고 있는 것으로 나타났다.

## 7. 실제 유역의 적용

본 연구에서 제안된 격자 네트워크 해석법이 적용된 GRM 모형을 한강 수계 중랑천의 중랑교 상류 유역에 적용함으로써 실제 유역에 대한 적용성을 검토하였다. Fig. 10은 본 연구에서 적용한 중랑천 유역의 DEM을 이용하여 생성한 중랑천 유역의 기복도와 하천망 및 유역경계를 나타낸 것이다. 중랑교 상류 유역의 면적은 약 209  $km^2$ 이며, 2003년에 관측된 4개의 강우-유출 사상을 모형에 적용하였다.

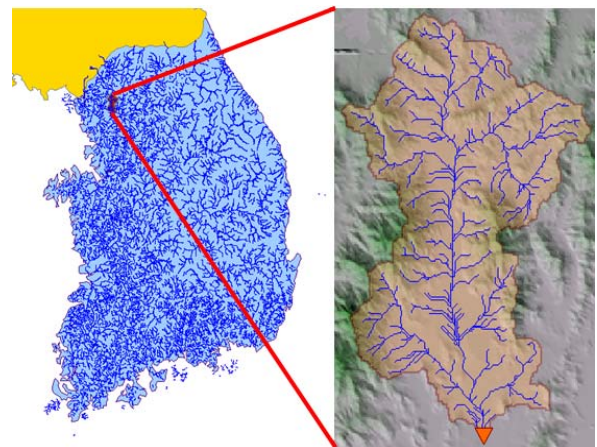


Fig. 10. Jungrangcheon Watershed

## 7.1 공간자료 구축

GRM 모형은 DEM으로부터 생성된 그리드 형태의 지형정보를 입력자료로 이용한다. 본 연구에서는 중랑천 유역의 1/25,000 수치지도의 고도 자료를 기반으로 ArcView 3.2a를 이용하여 생성한 100 m × 100 m 크기의 DEM을 이용하였다. 이와 같이 생성된 DEM을 HyGIS의 DEM 분석기능을 이용해서 DEM에 있는 sink와 flat area와 같은 오류를 보정하고, 흐름방향, 흐름누적수, 하천망, 경사, 유역경계 레이어를 100 m × 100 m 크기의 격자로 생성하였다. 이때 하천망 생성을 위한 최적흐름누적수는 24를 적용하였으며, 이는 중랑천 유역의 1/25,000 수치지도에서 추출한 하천망의 총연장과 가장 근접한 하천 총연장을 가지는 흐름누적수이다. 또한 유출모의 대상 격자인 유역경계 내부의 격자수는 20,927개로 생성되었다.

침투과정을 모의하기 위한 토양도는 중랑천 유역의 정밀토양도를 이용하였으며, 토양특성별 Green-Ampt 매개변수는 Chow *et al.*(1988)에 의해서 제안된 값을 적용하였다. 또한 토지피복도는 환경부의 토지피복도 대분류를 이용하였다. 본 연구에서 적용한 GRM 모형

의 입력 공간자료를 정리하면 Table 4와 같다.

## 7.2 수문사상

본 연구에서는 중랑천 유역의 6개 강우관측소(상계, 장암, 의정부, 퇴계원, 진접, 우이)와 1개의 수위관측소(중랑)에서 2003년에 관측된 30분 간격의 강우와 유량 자료 중 4개의 사상을 추출하여 GRM 모형에 적용하였다. GRM 모형에서는 분포형 강우의 입력을 위해서 텍스트 혹은 그리드 형태의 강우 자료를 이용할 수 있으며, 본 연구에서는 그리드 형태로 공간 분포된 강우자료를 적용하였다. 이를 위해서 6개 강우관측소에 대한 티센계수를 산정하고, 이를 이용하여 계산된 평균강우량을 공간자료와 동일한 크기인 100 m × 100 m 크기의 그리드 레이어로 전환하여 GRM 모형에 적용하였다. 본 연구에서 적용한 강우사상은 Table 5와 같다.

## 7.3 매개변수 보정

Table 5의 강우사상 중 강우기간이 비교적 짧고, 시간 분포가 단순한 “Event 3”을 이용해서 매개변수의 보정을 수행하였다. GRM 모형은 토양과 토지피복 및 하도에 대한 매개변수를 필요로 하고 있으며, 이에 대한

Table 4. Geographical Input Data of GRM

Input data	Description	Data source	Grid size
DEM	Preprocessed by HyGIS	1/25,000 digital map	100m×100m
Flow direction	From HyGIS using D-8 method	Preprocessed DEM	
Flow accumulation	From HyGIS	Flow direction grid layer	
Stream	From HyGIS applying flow accumulation 24	Flow accumulation grid layer	
Slope	From HyGIS using D-8 method	Preprocessed DEM	
Green-Ampt soil texture	Classified by National Institute of Agricultural Science and Technology(1992)	Detailed soil map from National Institute of Agricultural Science and Technology	
Soil depth	Classified by National Institute of Agricultural Science and Technology(1992)	Detailed soil map from National Institute of Agricultural Science and Technology	
Land cover	Classified by 7 classes	Land cover map from Ministry of Environment	

Table 5. Rainfall Events

Event number	Rainfall period	Total rainfall(mm)	Time interval(min)
Event 1	2003/05/07/10:00 - 05/07/21:30	85.85	30
Event 2	2003/07/22/01:30 - 07/23/07:30	197.74	30
Event 3	2003/08/06/23:30 - 08/07/07:00	71.06	30
Event 4	2003/09/18/04:00 - 09/19/00:00	148.24	30



설정 방법은 최윤석 등(2008)을 참고할 수 있다. GRM에서는 각 매개변수에 대하여 유역 전체에 걸쳐 특정 비율로 일괄적으로 보정할 수 있는 보정계수를 제공하고 있으며, 유역내 격자에 대해서 하나 혹은 여러 개의 격자를 선택하여 보정할 수도 있다. 토양과 토지피복의 특성에 따라서 설정되는 물리적 매개변수는 GRM에서 제안하고 있는 기본 값을 적용할 수 있으며, 사용자에게 의한 주요 보정대상 매개변수로는 하도의 조도계수와 선행강우와 하도의 초기 유량에 따라서 변화하는 초기 함수율과 건천차수이다.

본 연구에서는 하도의 조도계수로 Chow(1959)와 Chaudhry(1993)에 의해서 제안된 하도에서의 조도계수 범위인 0.04~0.05에서 중량천이 잘 정비된 하천입을 감안하여 0.04를 적용하였다. 하도 조도계수로 0.04를 적용하고, “Event 3”에 대해서 매개변수를 보정하지 않고 모의한 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 침투시간은 관측 유량을 잘 모의하고 있으나, 침투유출량이 매우 크게 모의되고 있으며, 전체적으로 도달시간이 짧게 모의되는 것으로 나타났다. 따라서 총유출량의 적합에 이용될 수 있는 매개변수인 토양심보정계수로 1.55를 적용하고, 초기함수율과 건천차수를 시행착오법으로 보정하여 각각 0.22와 2를 적용한 결과는 Fig. 12와 같다.

“Event 3”에 대해서 매개변수의 보정 전과 보정 후의 유출특성은 Table 6과 같다. Table 6에서 매개변수의 보정과정을 거친 모의결과와 실측유량의 비교결과

침투유량과 총유출량에서 각각 1.2%와 13.7%의 상대오차를 보이고 있으며, 침투시간은 11.1%의 상대오차를 보이고 있다. 이에 따라서 관측 유출량을 잘 모의하고 있는 것으로 나타났으며, 나머지 강우사상에 대해서도 하도조도계수로 0.04, 토양심 보정계수로 1.55를 각각 적용하였다.

#### 7.4 모의결과

Table 5의 강우사상 중 “Event 3”에 대해서 보정된 매개변수인 토양심 보정계수와 하도 조도계수를 각각 1.55와 0.04로 설정하여 다른 강우사상에 대한 유출모의를 수행하였다. 이때 초기함수율과 건천차수는 선행강우와 하도에서의 초기 유출량에 따라서 수문사상별로 달라지는 매개변수 이므로, 각 사상별로 다시 최적값을 도출하는 과정이 필요하다.

Fig. 13, 14 and 15와 Table 7은 “Event 1”, “Event 2” 및 “Event 4”의 강우사상에 대해서 GRM 모형의 모의결과를 나타낸 것이다. Fig. 13, 14 and 15에서 모의 결과는 관측 수문곡선의 유출 경향을 잘 반영하고 있으며, 강우에 대한 유출 반응 또한 적합한 것으로 나타났다. Table 7에서 각 사상은 총유출량에서 0.7%~10.7%의 상대오차를 보이면서 관측 유출량을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 또한 침투유량은 0.5%~15.8%의 상대오차를 보이고 있으며, 침투시간은 정확히 일치하거나 6.3% 이하의 상대오차를 보임으로써 관측유량을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다.

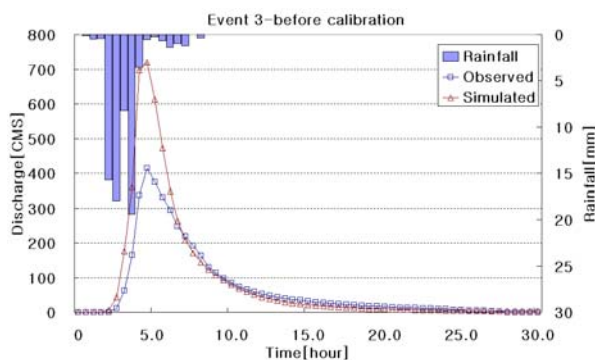


Fig. 11. Before Calibration - Event 3

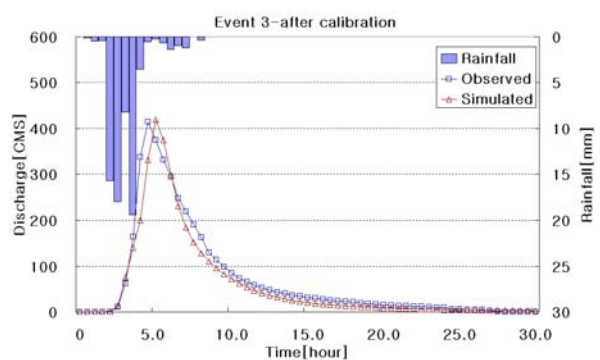


Fig. 12. After Calibration - Event 3

Table 6. Simulation Results(Event 3)

Event number	Com. time step (min)	Sim. duration (hour)	Running time (sec)	Parameters			Total discharge			Peak Discharge			Peak time		
				Initial saturation	Dry stream order	Channel roughness coeff.	Obs. <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> )	Sim. <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> )	Rel. error (%)	Obs. (m <sup>3</sup> /s)	Sim. (m <sup>3</sup> /s)	Rel. error (%)	Obs. (hour)	Sim. (hour)	Rel. error (%)
Before calibration	3	35	67	0	0	0.04	4,069	5,252	29.1	413.7	720.0	74.0	4.5	4.5	0
After calibration	3	35	69	0.22	2	0.04	4,069	3,509	13.7	413.7	418.8	1.2	4.5	5	11.1

Table 7. Simulation Results(Event 1, Event 2, Event 4)

Event number	Com. time step (min)	Sim. duration (hour)	Running time (sec)	Parameters			Total discharge			Peak Discharge			Peak time		
				Initial saturation	Dry stream order	Channel roughness coeff.	Obs. (m <sup>3</sup> )	Sim. (m <sup>3</sup> )	Rel. error (%)	Obs. (m <sup>3</sup> /s)	Sim. (m <sup>3</sup> /s)	Rel. error (%)	Obs. (hour)	Sim. (hour)	Rel. error (%)
Event 1	3	35	71	0	2	0.04	3,261	3,099	5.0	168.5	170.7	1.3	8	8.5	6.3
Event 2	3	50	110	0	2	0.04	13,714	13,816	0.7	649.6	752.4	15.8	23.5	23.5	0
Event 4	3	47	99	0	0	0.04	10,608	11,747	10.7	728.5	725.0	0.5	12	11.5	4.3

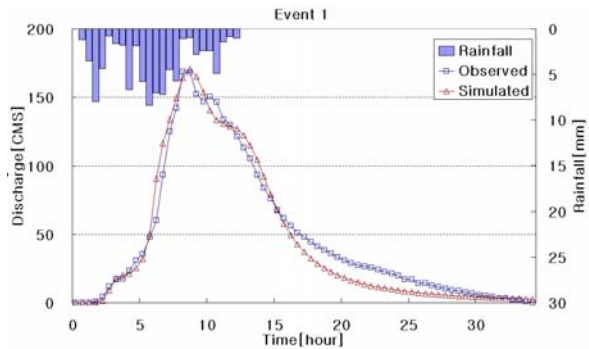


Fig. 13. Simulation Results - Event 1

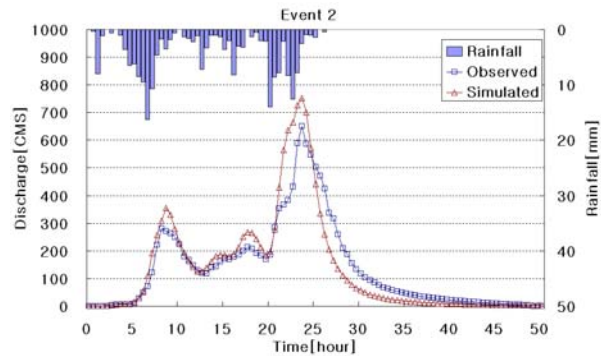


Fig. 14. Simulation Results - Event 2

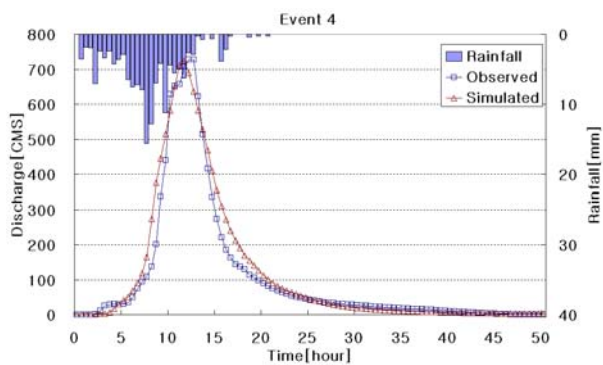


Fig. 15. Simulation Results - Event 4

## 8. 결론

본 연구에서는 격자 기반의 분포형 강우-유출 모의를 수행하기 위한 격자 네트워크 해석법을 제시하였으며, 이를 분포형 강우-유출 모형인 GRM에 적용하였다. 1차원 운동과 모형의 적용을 위한 유역 격자의 해석 순서를 설정하였으며, 격자간 연결 상태에 따라서 직각 흐름, 대각선 흐름 및 2개 이상의 인접한 상류 격자를 가지는 네트워크 흐름에 대한 유한체적법의 적용 방법을 제시하였다.

격자간 흐름관계에 따른 격자 네트워크 해석법의 타당성을 검토하기 위해서 흐름특성이 각각 다른 3개의 가상 유역을 설정하고, 이에 대한 모의결과를 Vflo™ 모형의 모의결과와 비교하였다. 가상 유역에 대한 모의 결과 격자간의 직각 흐름과 대각선 흐름의 해석법이 적

합한 것으로 나타났으며, 유출경로가 합류되는 격자에서의 해석 방법과 격자간의 계산 순서 또한 적합한 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 격자 네트워크 해석법의 실유역 적용성을 검토하기 위해서 GRM 모형을 중랑천 유역에 적용하였다. 매개변수의 보정과정을 거친 중랑천 유역의 4개 수문사상의 모의결과를 관측값과 비교하였을 때 총유출량은 0.7%~13.7%, 첨두유출량은 0.5%~15.8%의 상대오차를 보이고 있으며, 첨두시간은 정확히 일치하거나 11.1% 이내의 상대오차를 나타냄으로써 관측 유출을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다.

중랑천 유역은 유역 면적이 약 209 km<sup>2</sup>로 100 m × 100 m 크기의 격자로 모형화할 경우 20,927개의 격자로 구성된다. 이를 계산 시간간격 3분으로 모의하였을 때 1시간을 모의하는데 평균 약 2초가 소요되었으며, 중랑천 유역의 경우 “Event 2”에 대해서 최대 50 시간을 모의할 때 110초의 수행시간이 소요되었다. 따라서 본 연구에서 제안된 격자 네트워크 해석법은 격자 기반의 1차원 분포형 강우-유출모의에 적합하게 적용될 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 격자 네트워크 해석법은 1차원 운동과 모형을 이용하여 격자 기반의 강우-유출 모의를 수행할 때 유역 격자의 계산 순서 설정 및 유한체적법을 이용한 격자 네트워크 해석에 적합하게 적용할 수 있는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

- 김경탁, 최윤석 (2005). "DEM에서의 sink와 flat area 처리 알고리즘에 대한 비교 검토." **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제8권, 제4호, pp. 91-101.
- 농업기술연구소 (1992). 증보 한국토양총설. 토양조사자료 13. 농촌진흥청. pp. 283-290.
- 정인균, 신형진, 박진혁, 김성준 (2008). "격자기반의 운동과 강우유출모형 KIMSTORM의 개선." **2008년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 254-258.
- 최윤석, 김경탁, 이진희 (2008). "유한체적법을 이용한 격자 기반의 분포형 강우-유출 모형 개발." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp. 895-905.
- 한국건설기술연구원 (2007). HyGIS 개발. 과학기술부. pp. 11-63.
- 홍준범, 김병식, 윤석영 (2006). "Vflo™ 모형을 이용한 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성 평가." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제6B호. pp. 613-622.
- 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.
- 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.
- Patankar, S.V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation. pp. 42-66.
- Smith, M.B. and Brilly, M. (1992). "Automated Grid Element Ordering for GIS-Based Overland Flow Modelling." *Photogrammetric engineering and remote sensing*. Vol. 58, No.4, pp. 579-585.
- 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. (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.

(논문번호:08-96/접수:2008.09.01/심사완료:2008.10.08)