

격자기반의 도시유역 지표면 유출모형의 개발 및 적용

Development and Application of Grid-Based Urban Surface Runoff Model

김문모* / 이정우** / 이재응***
 Kim, Munmo / Lee, Jeongwoo / Yi, Jaeung

Abstract

A grid-based urban surface runoff model for simulating the temporal variation and spatial distribution of overland flow in a drainage area was developed. The process of routing of overland flow is modeled by the nonlinear storage equation which is composed of the continuity equation and the Manning's equation. For model operation, the drainage area is divided into grid areas, and spatially distributed topographical and hydrological information for model inputs is provided. Then overland flow is routed for each of the discretized cells of the area. In order to test the applicability of this model, temporal variations and spatial distributions of flow depth and overland flow was simulated in a fictitious and a real urbanized Kunja drainage area. Results indicate that the model can simulate reasonably well the urban runoff hydrograph.

keywords : grid-based urban surface runoff model, overland flow, nonlinear storage equation

요 지

본 연구에서는 지표면 유출의 시간적 변화와 공간적 분포를 모의할 수 있는 격자기반의 도시유역 지표면 유출모형을 개발하였다. 개발된 모형에서는 지표면 유출의 메카니즘을 연속방정식과 Manning식을 결합한 비선형저류방정식으로 표현하고 있으며, 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 개개의 격자마다 유출해석을 위한 지형정보와 수문정보를 입력하여 격자별 유출량을 계산·추적하게 된다. 본 모형을 이용하여 가상유역 및 실제 도시유역인 군자배수구역에 대해서 시공간적인 유출양상을 모의해 봄으로써 모형의 적용성을 검토하였다. 이동강우에 대한 유출량의 변화, 유입구 설치에 따른 유출양상의 변화, 확률강우량에 대한 Huff 분위별 유출양상의 변화 등 도시지역의 유출특성을 분석하여 그 결과를 제시하였다.

핵심용어 : 격자기반 도시유역 지표면 유출모형, 지표면 유출, 비선형저류방정식

1. 서 론

최근 들어 전 세계적으로 극심한 기후변화와 그에

따른 기상이변으로 국지적 집중호우나 이상호우로 인한 피해가 급증 및 반복되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 물리적 거동에 기초한 강우-유출현상에

* 신구대학 건설정보과 부교수
 Associate Prof., Dept. of Construction Information, Shingu College, Jungwongu, Seongnam 462-743, Korea
 (e-mail: munmo310@shingu.ac.kr)
 ** 한국건설기술연구원 수자원연구부 Post-Doc.
 Post-Doc, Dept. of Water Resources Research, KICT, Ilsangu, Goyang 411-712, Korea
 *** 아주대학교 환경건설교통공학부 건설시스템공학 전공 부교수
 Associate Prof., Div. of Environ., Const. and Trnst. Engrg., Ajou Univ., Paldalgu, Suwon, 443-749, Korea

관한 정교한 해석이 필요하게 되었고, 유출해석에 있어서 강우량의 시·공간적인 분포와 유출장인 유역사면특성의 공간분포의 중요성이 부각되고 있다. 최근 기상레이더 등에 의하여 점차 강우의 시·공간분포가 획득 가능하도록 되어 가고 있으며, 전산기기의 급속한 발전과 GIS의 구축으로 지형, 지질, 토양과 식생 등의 격자자료가 형성되는 등 분포형 유출모형에 필요한 이산형 입력자료의 구성이 용이하게 되었다. 이와 같이 유출현상의 입력과 발생 장에 관한 정보가 분포형으로 정비되어 감에 따라 이들의 정보를 이용한 다양한 수문해석의 결과도 격자화된 정보로의 분석이 요구되고 있다.

분포형 유출해석모형으로서 첫째, 유역을 관여 유입구를 기준으로 다수의 소유역들로 구분하고 각 소유역 내 지표면 흐름을 비선형저류방정식으로 표현하여 유출량을 산정하는 방법(SWMM, MOUSE), 둘째, 유역을 소유역보다 단순한 단위인 수문반응단위(Hydrological Response Units)로 구분하고 각 단위별로 수문량을 산정하고 이를 유역출구로 추적하여 수문량의 공간적 변이를 각 단위간의 변이에 의해서 표현하는 방법(SWAT(Arnold et al., 1993; Neitsch et al., 2001)), 셋째, 유역을 일정한 크기의 격자로 분할한 상태에서 각 격자의 유입·유출을 계산함으로써 주어진 시간 간격별로 유역 전체에 대한 물수지를 파악하는 격자 물수지식을 이용하는 방법(KIMSTORM(김성준, 1998a; 1998b)), 넷째, 운동과 또는 확산과 근사에 의한 수리학적 수치해석을 이용하는 방법(SHE(Abbott et al., 1986), 최계운 등(1992; 1993), 최현상과 한건연(2004a; 2004b)), 다섯째, 사면유출시 일어나는 표면유출과 기저유출을 분산형 변동 포화영역의 개념을 도입하여 유역내 각 지점에서의 지형지수를 이용하여 토양수분의 변화 및 지표 유출량을 계산하는 방법(TOPMODEL(Beven and Kirkby, 1979)) 등 여러 가지 모형이 있다. 본 연구에서

는 첫 번째 방법과 세 번째 방법을 결합하여 도시유역의 지표면 유출량을 산정하기 위한 격자기반의 분포형 지표면 유출해석 모형을 개발하는 것을 연구의 목적으로 하였다. 즉, 본 연구에서 개발한 유출모형은 지표면 유출의 메카니즘을 비선형저류방정식으로 표현한다는 점에서 SWMM의 방법을, 격자기반으로 유출량을 계산·추적한다는 점에서 김성준(1998a; 1998b)의 방법을 결합하여 사용한 것이다. 본 모형을 이용하여 가상 및 실제 유역에 대한 유출모의를 수행함으로써 모형의 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 제시하는 분포형 도시 유출해석모형은 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 개개의 격자마다 유출해석을 위한 지형정보와 수문정보를 입력하여 격자별 유출량을 계산·추적함으로써 유역의 임의의 위치에서의 유출량, 유출심의 시간적 변화와 공간적인 분포를 모의할 수 있다.

2. 격자기반 도시유역 지표면 유출해석 모형

본 모형에서는 지표면 유하흐름을 지배하는 유역특성치의 공간적 변화는 격자구조 내에서 정의되며, 특성치들은 하나인 격자 안에서는 균질하다고 가정하였다. 각 격자의 중심점에 할당된 고도 값에 기초하여 흐름이 지표면상에서 유출·추적된다. 지표면 흐름 과정을 나타내기 위해서 지표면 흐름이 하도의 흐름과 같이 중력과 마찰력에 의해 지배된다고 가정하여 운동파(kinematic wave) 근사법인 비선형 저류방정식을 사용하였다. 본 연구에서 개발한 격자기반 지표면 유출해석 모형의 알고리즘은 다음 Table 1과 같다.

지표면 유출량을 산정하기 위해서 우선적으로 DEM(digital elevation model) 자료로부터 대상유역을 격자구조로 나타내고 각 셀별로 할당된 표로부터 경사, 사면향 등 지형분석을 실시한다. 일반적으로 DEM 자료를 이용하여 경사를 구하는 방법으로 neighborhood

Table 1. Algorithm for grid-based urban surface runoff model

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Dividing drainage area into cells 2. Calculation of cell slope on the basis of elevations at the center of each cell 3. Calculation of main flow direction on the basis of cell slope 4. Inputting hydrological information of manning's roughness, initial depth, rainfall, etc. 5. Assigning location of inlets and inputting hydraulic parameters of inlet 6. Calculation of effective rainfall and loss rate 7. Calculation of flow depth, runoff at each cell by using nonlinear storage equation 8. Runoff routing per cell through water transfer to main directional neighbouring cell at each time step 9. Obtaining hydrographs of flow depth and runoff at each cell |
|--|

알고리즘, quadratic surface 알고리즘, maximum slope(최대경사) 알고리즘, maximum downhill slope(최대하향경사) 알고리즘 등 크게 4가지가 사용되고 있다. neighborhood 알고리즘은 경사를 구하고자 하는 셀의 인접 8개 셀을 모두 이용하여 분석하는 방법으로 현재 Arc/Info GRID(ESRI, 1995)에서 사용되고 있으며, quadratic surface 알고리즘은 Zevenbergen and Thorne(1987)에 의해 제안된 것으로 중심셀에 직교하는 인접셀만을 대상으로 분석하는 방법이다. 최대경사 알고리즘과 최대하향경사 알고리즘(Hickey et al., 1994)은 앞의 두 방식과는 다르게 주변 8개 셀 중에서 하나만을 선택하는 방법으로 전자는 중심셀과 인접 8개 셀에 대해 각각의 경사도를 계산하여 절대값으로 가장 큰 값을 택하게 되는 방식이며, 후자는 전자와 유사하지만 중심셀에서 인접셀을 뺀 다음 절대값을 취하지 않고 최대값을 선택하여 최대하향경사를 계산한다. 본 연구에서는 이 중에서 Eq. (1)과 같이 최대하향경사 알고리즘으로 경사분석을 하여 주흐름방향을 자동적으로 결정하도록 프로그래밍하였다.

$$\text{Slope} = \text{ATAN} \left(\max \frac{(z_0 - z_i)}{L_c} \right) 57.29578 \quad (1)$$

여기서, Slope는 경사각(degree), z_0 는 중심셀 표고, z_i 는 인접셀 표고, $i=1,2,3,\dots,8$, L_c 는 중심셀에서 인접셀까지의 거리이다. 경사분석이 완료되면 토지이용도를 이용해서 지표 피복 상태에 따른 조도계수를 셀별로 입력하며, 강우량, 초기수심 등의 수문정보 역시 셀별로 할당한다. 셀별로 유출해석을 위해서 연속방정식 Eq. (2)에 광폭인 경우의 Manning식인 Eq. (3)을 대입하여 유출깊이 y 에 관한 비선형 저류방정식을 구성하고, Newton-Raphson 방법을 이용하여 미지의 유출깊이 y 를 각각의 셀별로 계산한다. 셀별 유출깊이가 계산되면, 이를 Eq. (2)에 대입하여 유출량 Q 를 산정할 수 있다. Eq. (2)는 SWMM, MOUSE 등 소유역 기반의 유출모형에서 사용하고 있는 연속방정식에, 인접 셀로부터 해당 셀로의 유입량 Q_I 를 추가로 고려하여 나타낸 것이다. 본 모형에서는 셀 주변 8방향 셀과의 표고차 중에서 가장 낮은 표고차를 갖는 셀로 유출의 전이가 이루어지도록 하였으므로 해당 셀에서 발생한 유출량 Q 는 주흐름방향 인접셀에서는 유입량 Q_I 가 된다.

$$\frac{dy}{dt} A = I_{eff}(t) A + \sum Q_I - Q(t) \quad (2)$$

여기서, I_{eff} 는 총강우량에서 증발, 습윤, 침투, 표면저류 등 다양한 손실을 감한 유효우량이며, A 는 격자면적, Q_I 는 인접 셀로부터 해당격자로의 유입량, $Q(t)$ 는 시간 t 에서의 유출량, 그리고 y 는 유출깊이다. 중심셀을 기준으로 하나 이상의 인접셀로부터 유입되기에 Eq. (2)에서 $\sum Q_I$ 로 표현되었다.

$$Q(t) = \frac{1}{n} B S^{1/2} y(t)^{5/3} \quad (3)$$

여기서, n 은 Manning의 조도계수, B 는 유출폭, S 는 주흐름방향경사이다. 해당 셀에 빗물받이와 같은 우수의 유입구가 있는 경우에는 유입구를 오리피스로 간주하여 Eq. (4)와 같은 sink항을 Eq. (2)의 우변에 추가로 감하여 우수관거해석 모형과의 연계가 가능토록 확장하였다.

$$Q_o(t) = CA \sqrt{2g y(t)} \quad (4)$$

여기서, C 는 오리피스 유량계수, g 는 중력가속도이다. Eq. (2)로부터 유출심 y 를 구한 후 Eq. (3)과 Eq. (4)에 대입하여 각각 지형경사에 의해 인접 셀로 전달되는 유출량과 오리피스를 통해 우수관거로 유입되는 유출량을 구하게 된다.

3. 모형의 적용

3.1 가상 유역에 대한 유출해석

본 연구에서 개발한 분포형 유출모형을 이용하여 유역면적 300m×300m 크기의 정방형 가상 유역에 대해 유출해석을 수행하였다. Fig. 1은 유출해석을 위한 정방형 가상 유역의 격자망, 셀번호, 표고 등을 나타낸 것이다. 그림과 같이 셀 하나의 크기는 50m×50m로 하였고, 유출량 및 유출의 지체에 지배적인 인자인 조도계수 n 은 0.01로 각 셀별로 동일하게 부여하였다. 침투에 의한 손실을 고려하기 위해 Eq. (5)와 같이 Horton의 침투방정식을 이용하였다.

$$f_p = f_c + (f_o - f_c) e^{-kt} \quad (5)$$

여기서, f_p 는 임의 시간에 있어서의 침투능 (mm/hr), f_o 는 초기 침투능 (mm/hr), f_c 는 종기 침투능 (mm/hr), t 는 시간 (hr), k 는 토양의 종류와 식생피복에 따라 결정되는 상수이다. 본 유출모의에서는 초기 및 종

C31	C32	C33	C34	C35	C36
C25	C26	C27	C28	C29	C30
C19	C20	C21	C22	C23	C24
C13	C14	C15	C16	C17	C18
C7	C8	C9	C10	C11	C12
C1	C2	C3	C4	C5	C6

78	72	69	71	58	49
74	57	56	49	46	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12

(a) Cell Number

(b) Cell elevation

Fig. 1. Grid Structure (grid spacing: 50m)

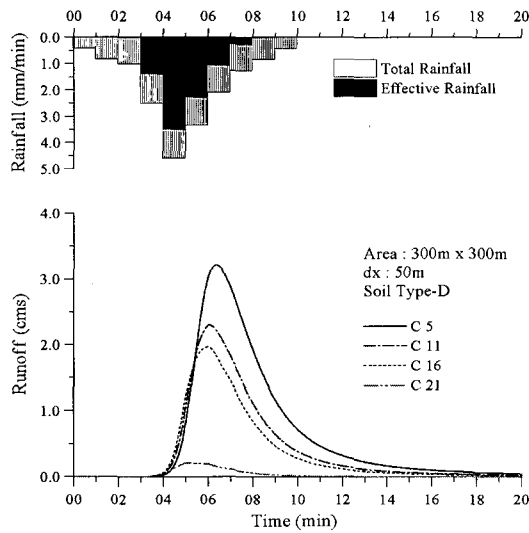


Fig. 2. Hydrographs at arbitrary cells

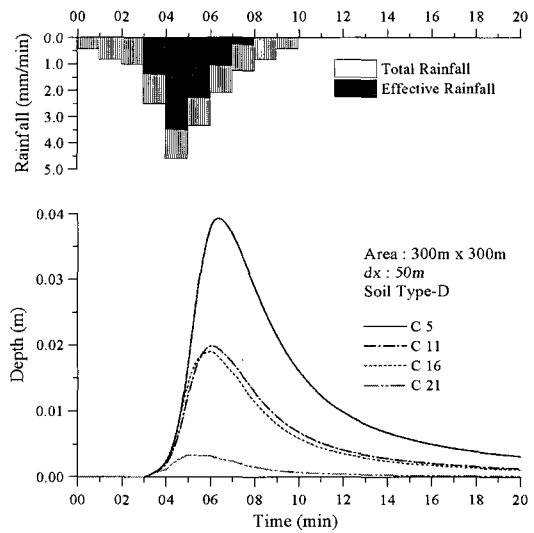


Fig. 3. Flow depths at arbitrary cells

기침투능, 감쇄계수 등의 매개변수는 SWMM에서 제시하는 토지피복 Type D형의 값인 $f_o = 76 \text{ mm/hr}$, $f_c = 2.5 \text{ mm/hr}$, $k = 2.0$ 을 사용하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 유역 출구부 C5와 상류방향으로 임의의 셀 C11, C16, C21에 대한 유출수분곡선 및 유출 깊이를 나타낸 것이다. 하류로 갈수록 유출량이 증가하며 침투 등 손실로 인해 유출 시작시간이 지체되고 첨두유량 발생 시각도 약간 지체되는 유출 특성을 나타내고 있다.

유출모형의 유효성을 검토하기 위해서 Fig. 2를 시간

에 대해 적분하여 셀별로 유출총량을 계산하고 이를 셀별 집수면적으로 나눈 단위면적당 유출총량과 유효우량(8.44mm)을 비교하였다. Table 2에서와 같이 상대오차가 0.2% 미만으로 mass balance가 잘 유지되고 있어 유출해석 결과가 합리적임을 알 수 있다.

Fig. 4는 정방향 가상 유역에 대해 강우의 중심이 유역 출구부 쪽으로 또는 그 역으로 이동하는 것과 같이 이동 강우에 대해 유출해석을 실시한 결과를 도시한 것이다. 이동 강우를 표현하기 위해서 총강우량과 분포양상은 동일하지만, 중방향 셀별로 강우발생 시점과 중점

Table 2. Comparison of effective rainfall and cumulative surface runoff

cell number	C5	C11	C16	C21
number of cumulative cells (EA)	36	24	20	8
cumulative area to cell (m^2)	$50 \times 50 \times 36$	$50 \times 50 \times 24$	$50 \times 50 \times 20$	$50 \times 50 \times 8$
cumulative surface runoff (m^3)	758.4	506.0	421.8	168.9
cumulative surface runoff per area(mm)	8.426	8.430	8.435	8.443
relative error (%)	0.14	0.07	0.03	0.09

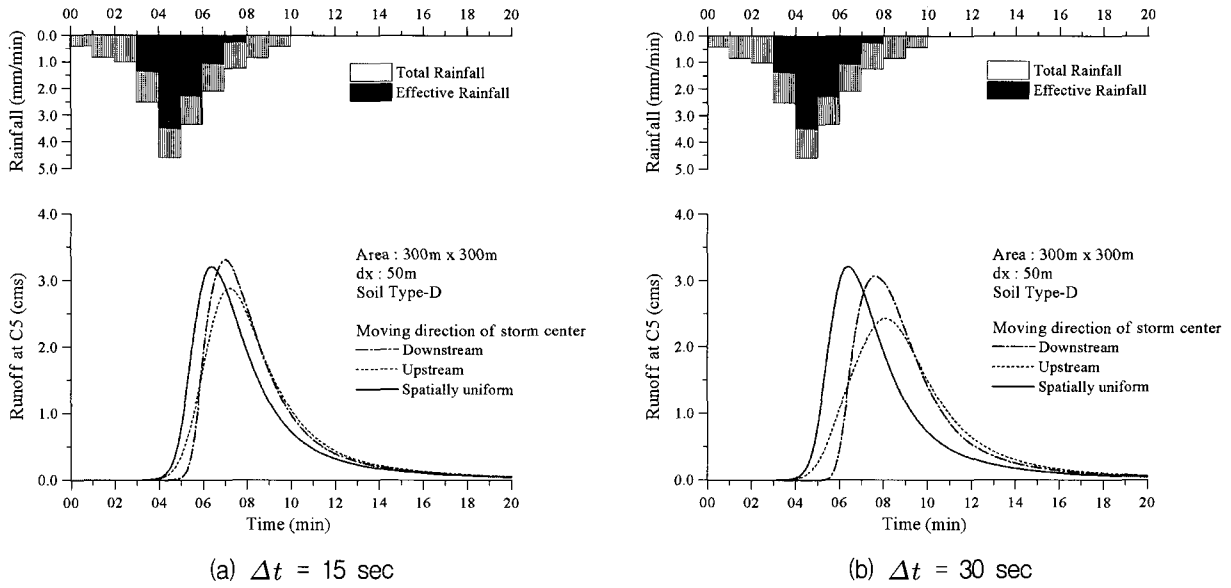


Fig. 4. Simulated hydrographs for moving storm

을 다르게 부여하였다. 예를 들어 C5셀의 강우 시작 시간이 t_0 라면, C11셀의 강우 시작 시간은 $t_0 \pm \Delta t$ 이다. 강우 중심이 상류 또는 하류로 이동하는 경우와 이동하지 않는 경우 총 3가지로 구분하고, 강우발생 시간차를 종방향 셀별로 15초 및 30초를 두고 유출모의를 실시하였다. Fig. 4(a)에서와 같이 강우중심이 하류로 이동하는 경우에는 강우의 이동방향과 유출의 방향이 같아 하류로 내려오면서 첨두유출량이 다소 증가하였으며, 강우중심이 상류로 이동하는 경우에는 그 반대의 양상을 보이고 있다. 첨두발생 시간은 유역면적이 크지 않아 강우중심이 공간적으로 균일한 경우가 가장 빠른 것으로 평가되었다. Fig. 4(b)는 강우발생 시간차를 종방향 셀별로 30초를 두고 유출모의를 한 결과이다. Fig. 4(a)와 유사한 양상을 보이고 있으나, 주목할 점으로서 강우가 하류로 이동할수록 첨두유출량이 커질 것이라는 예상과는 달리 강우중심이 공간적으로 균일할 경우가 첨두유출량이 가장 크게 산정되었다는 점이다. 이는 강우의 공간적인 이동속도와 지표면 유출의 이동속도의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 다시 말하면, 강우의 이동속도와 유출의 이동속도 차이가 거의 유사한 경우에 하류부에 유출의 증폭을 가져올 수 있으나, 강우와 유출 방향이 같던 상이하던 간에 두 수문량의 속도차이가 크면 지체효과로 인해 유출량이 공간적으로 균등강우에 비해 감소할 수 있음을 의미한다. 위와 같은 예제 해석처럼 본 연구에서 개발한 분포형 도시유역 지표면 유출 해석모형은 이동강우나 국지적인 집중호우 등 시공간적으로 변하는 유출 특성을 반영할 수 있다.

3.2 실제 유역에 대한 유출해석

본 연구에서 개발된 지표면 유출모형을 이용하여 군자 배수구역에서 발생하는 유출량 및 유출심을 예측하고 지표면 유출량의 전파특성을 분석하였다. 모형의 적용 유역인 군자 배수구역은 면적이 약 96.4ha 이며, 중앙천 좌안의 하류에 위치하고 있다. 지표면에서 발생하는 유출량은 하수관거를 통해 하천으로 배출되고 있으나, 본 모형의 적용에서는 하수관거가 설치되어 있지 않다고 가정하고, 발생한 지표면 유출량이 표고차를 따라 유출량이 전파되는 것으로 간주하여 유출모의를 수행하였다.

Figs. 5 and 6은 각각 군자배수구역의 DEM과 유출모의를 위한 20m 간격의 격자구조를 나타낸 것이며, Figs. 7 and 8은 군자 배수구역의 토지이용도와 토양의 수문학적 토양형을 나타낸 것이다. 군자 배수구역의 20% 정도는 녹지이며, 대부분의 지역은 주택지와 상업지, 아파트 단지 등으로 구성되어 있어 불투수 비율이 매우 높은 지역이다. 본 연구에서는 포장율이 높은 주택지, 상업지, 아파트 단지 등의 조도계수는 0.02로 설정하였고, 녹지의 조도계수는 0.06으로 설정하였다. Fig. 8에서와 같이 군자 배수구역의 토양형은 극히 일부지역을 제외하고는 B 타입으로 비교적 배수가 양호한 토양으로 구성되어 있다. 녹지에 대해서는 Horton의 침투방정식을 적용하여 손실량을 고려하였으며, 침투능 공식에서 사용되는 초기 및 종기침투능, 감쇠계수 등의 매개변수는 SWMM에서 제시하는 토양형 Type B의 값을 입력하였다.

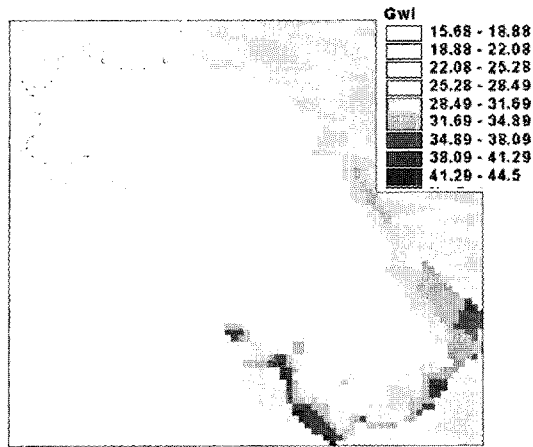


Fig. 5. DEM of Gunja drainage area

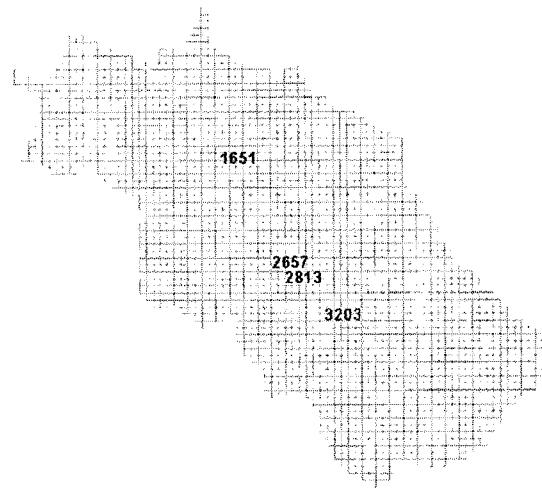


Fig. 6. Cell structure for runoff simulation

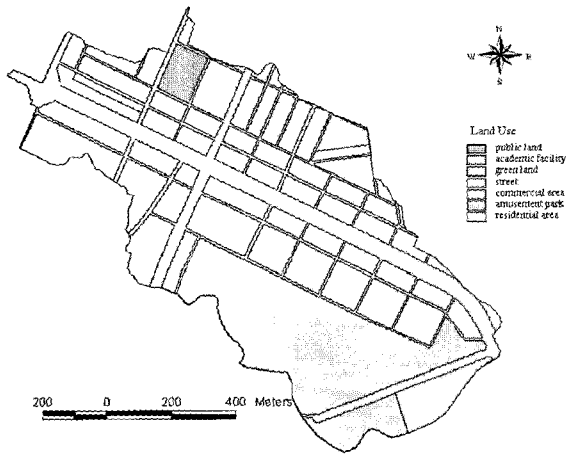


Fig. 7. Landuse of Gunja drainage area

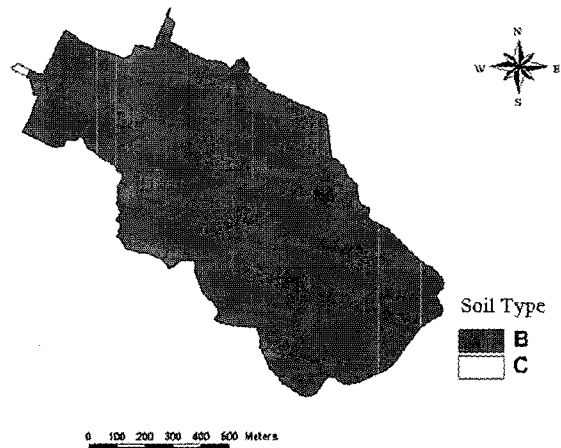


Fig. 8. Soil type of Gunja drainage area

(Fig. 7 and Fig. 8 are captured from Han et al., 2005)

비선형 저류방정식에 의해 지표면 유출량이 산정되기 때문에 조도계수가 유출량 및 유출의 지체를 결정하는 지배적인 인자이다. 따라서 조도계수 등 모형의 주요 매개변수에 대한 민감도 분석을 수행하여 Figs. 9 ~ 14에 나타내었다. 민감도 분석 대상은 지표면 유출량과 지표유출심으로 하였으며, 이를 위해서 Table 3과 같이 3가지 주요 매개변수 및 변동 범위를 설정하였다. 조도계수는 0.035를 기준으로 상하로 ± 0.005 만큼씩 변동하게 하여 15개 구간으로 구분(하한치는 0 대신에

0.001 사용)하였고, 초기침투능은 120mm/hr를 기준으로 상하로 ± 20 만큼씩 변동하게 하여 13개 구간(하한치는 0 대신에 중기침투능값인 6.4mm/hr 사용)으로, 중기침투능은 10mm/hr를 기준으로 상하로 ± 2 만큼씩 변동하게 하여 11개 구간으로 구분(하한치는 0 대신 0.1 mm/hr 사용)하여 민감도 분석을 수행하였다. 분석 결과는 Figs. 9 ~ 14와 같이 기준치 값으로 나누어 백분율로 나타내었다.

Fig. 9에서와 같이 지표면 유출량은 조도계수가 증가

Table 3. model parameters for sensitivity analysis

parameter	symbol	low level	upper level	basis value	variation
roughness	n	0.001	0.070	0.035	± 0.005
initial infiltration capacity	f_o	6.4	240	120	± 20
terminal infiltration capacity	f_c	0.1	20	10	± 2

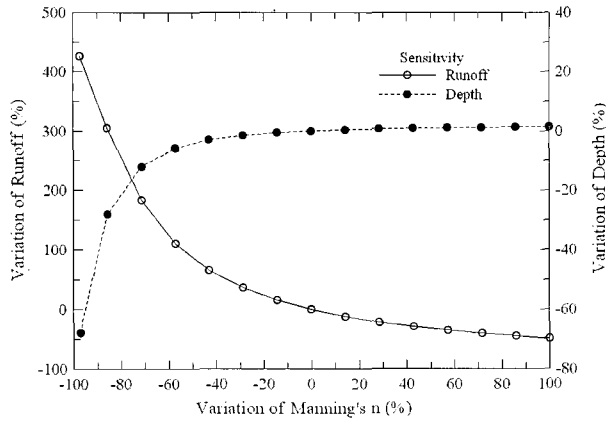


Fig. 9. Sensitivity of surface runoff with the variation of roughness

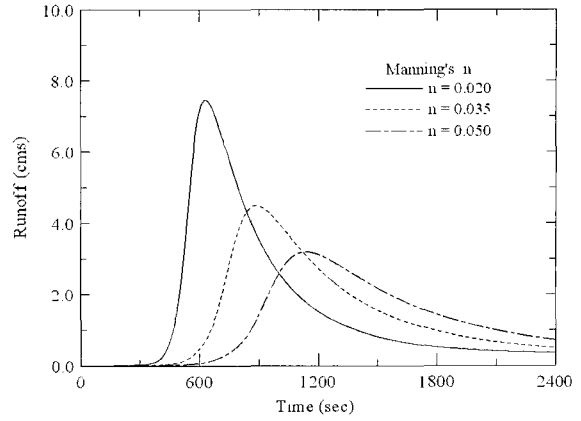


Fig. 10. Surface runoff hydrographs with the variation of roughness

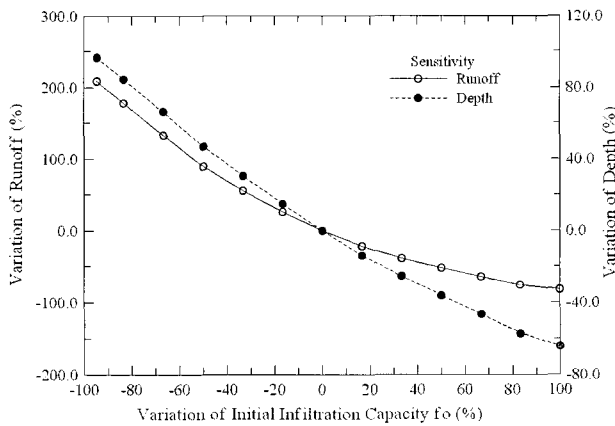


Fig. 11. Sensitivity of surface runoff with the variation of initial infiltration capacity

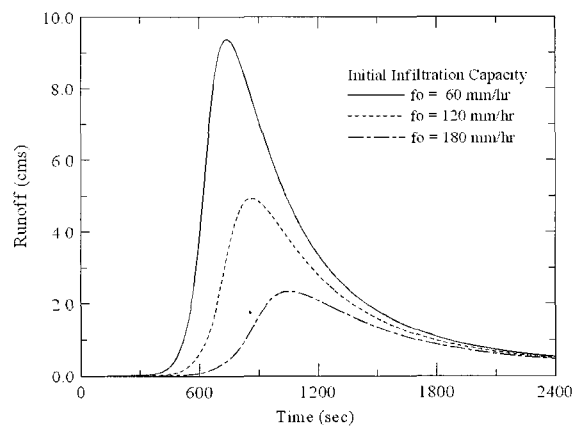


Fig. 12. Surface runoff hydrographs with the variation of initial infiltration capacity

함에 따라 지수함수적으로 감소하고 있으며, 조도계수 2배 증감에 따라 약 0.5배 증가에서 5배 감소의 양상을 나타내고 있다. 유출심은 이와는 반대의 양상으로 조도계수가 매우 작은 경우를 제외하고는 매우 완만한 증가를 보이고 있다. Fig. 10은 조도계수에 따른 임의 셀에서의 지표면 유출수문곡선을 도시한 것으로서 조도계수 증가에 따라 침투유출량의 감소 및 침투유출 발생시간의 지체 특성을 나타내고 있다.

Fig. 11은 초기 침투능 변화에 따른 지표면 유출량과 유출심의 민감도를 나타낸 그림으로서 초기 침투능 2배 증감에 따라 지표면 유출량은 약 2배 감소에서 약 4배 증가의 양상을 보이고 있으며, 유출심은 약 0.6배 감소에서 약 2배 증가의 양상을 나타내고 있다. 조도계수 변화에 따른 유출양상과 유사하게 초기 침투능 증가에 따라 침투유출량의 감소 및 침투유출 발생시간의 지체를 나타내고 있다. Figs. 13 and 14는 중기 침투능 변화에 따른 지표면 유출량과 유출심의 변화를 나타낸 것으로 조도계수와 초기 침투능 변화에 비해 상대적으로 매

우 적은 변화 양상을 보여주고 있다.

서울지역의 재현기간 10년, 지속시간 10분의 확률강우량을 Huff의 4분위법에 의해 시간적으로 분포시키고, 이를 본 연구에서 개발한 유출모형의 입력 자료로 활용하여 유출모의를 수행하였다. Figs. 15 ~ 18은 Huff 2분위의 10년 빈도, 10분 지속시간 강우에 대하여 유입구 설치 유무에 따른 유출량 및 유출심을 도시한 것이다. 시간이 경과함에 따라 유출심 및 유출량이 집중되는 지역이 분명하게 나타나고 있으며, 낮은 지표고를 지니는 지형상 특징으로 중앙부분에서 유출량 및 유출심이 크게 발생하고 있음을 볼 수 있다. 특히 급경사에서 완경사로 경사가 급변하는 지역에서 유출심이 급격히 증가하고, 유출량이 집중되는 양상을 보이고 있다.

유입구 설치에 따른 유출 양상을 분석하기 위해서 유입구를 셀 2개 (지배면적 800m²) 마다 1개씩 임의대로 배치하였다. 유입구의 크기는 0.5 m × 0.3 m로 설정하였으며, 오리피스 유량계수는 0.6으로 설정하였다. Figs. 15 ~ 18의 모의 결과에서 나타났듯이 유입구 설

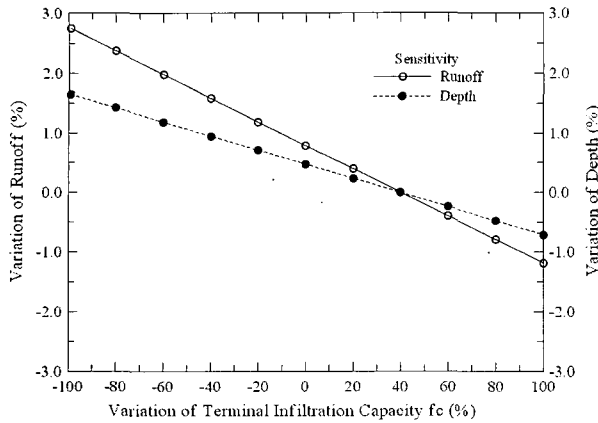


Fig. 13. Sensitivity of surface runoff with the variation of terminal infiltration capacity

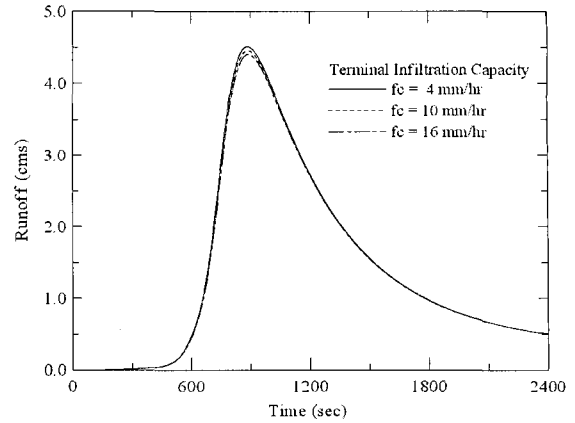
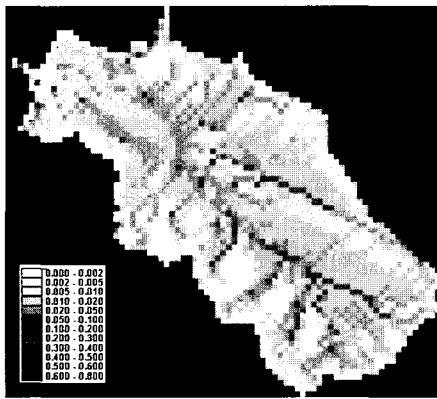
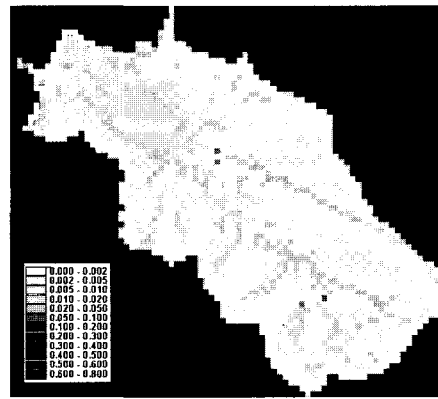


Fig. 14. Surface runoff hydrographs with the variation of terminal infiltration capacity

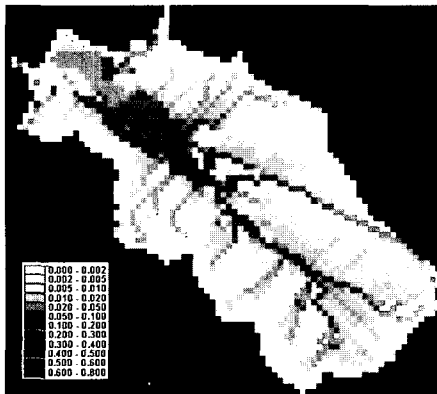


(a) without inlet

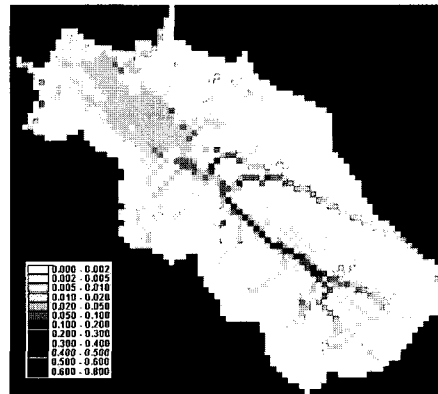


(b) with inlet

Fig. 15. Spatial distribution of simulated flow depth (elapse time: 5 min.)



(a) without inlet



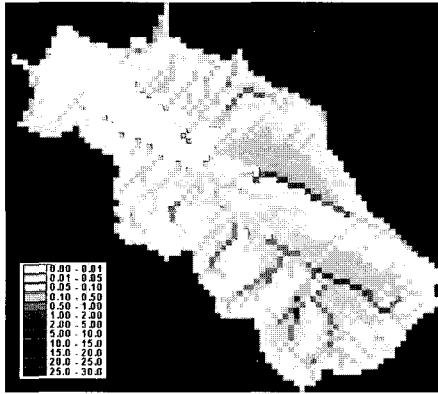
(b) with inlet

Fig. 16. Spatial distribution of simulated flow depth (elapse time: 10 min.)

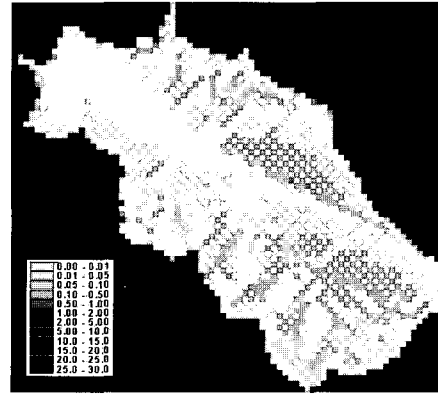
치로 인해 유출량 및 유출심이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이와 같이, 본 연구에서 개발한 분포형 유출모형은 유출의 공간적인 전과특성을 구현할 수 있을 뿐만 아니라, 지표면 유출이 집중되는 곳을 파악함으로써 지표면 유출량을 집중하게 되는 관거 유입구의 적정위치를 결정하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Figs. 19 and 20은 유출이 집중되는 임의 셀(셀 번

호: 1651, 2657, 2813, 3203)에서의 유출수문곡선과 유출심을 시간에 따라 도시한 것이다. 강우의 침투가 발생한 후 수분 이내에 침투유출이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림에서와 같이 유출심이 상대적으로 작더라도 유출량이 더 크게 발생한 셀이 있는데, 이는 셀의 주 흐름방향 경사가 급한데서 기인한 것으로 판단된다. 유출모의 결과, 유입구의 설치로 인해서 침투유출량은

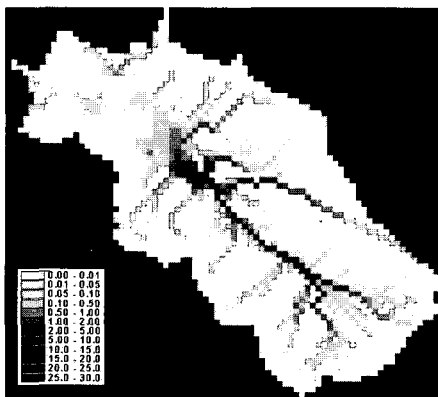


(a) without inlet

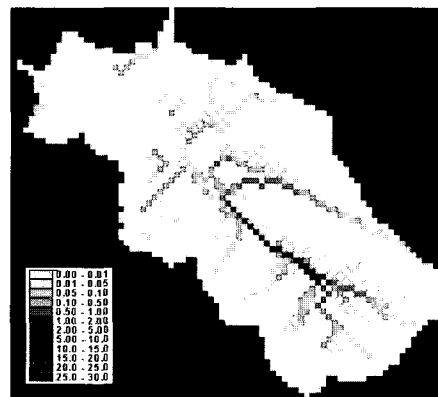


(b) with inlet

Fig. 17. Spatial distribution of simulated surface runoff (elapse time: 5 min.)

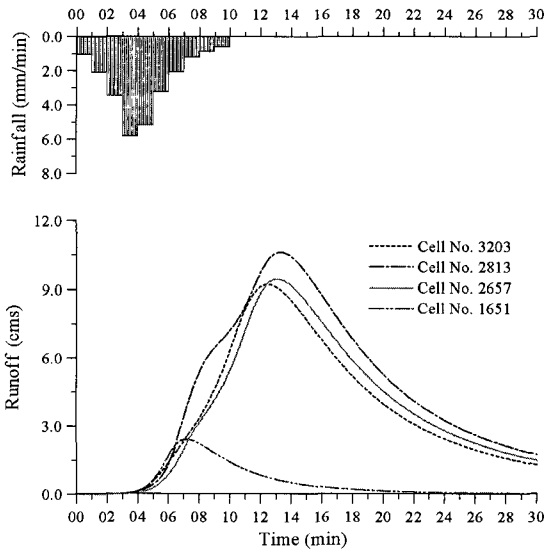


(a) without inlet

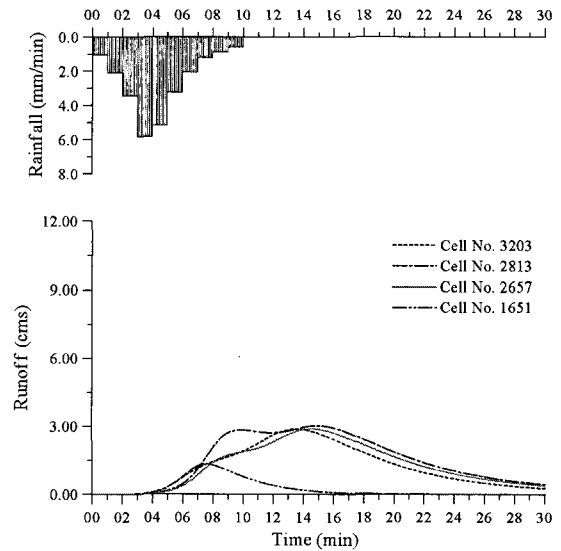


(b) with inlet

Fig. 18. Spatial distribution of simulated surface runoff (elapse time: 10 min.)



(a) without inlet



(b) with inlet

Fig. 19. Hydrographs at arbitrary cells

유입구 설치전에 비해 약 1/3배로, 최대유출량은 유입구 설치전에 비해 약 1/2배로 감소한 것으로 나타났다. 유입구의 위치나 설치밀도 등을 조정하여 유출량과 유

출량의 허용 기준치 이하로 조절할 수 있으며, 이러한 모의에 본 연구에서 개발한 분포형 지표면 유출모형이 활용될 수 있다.

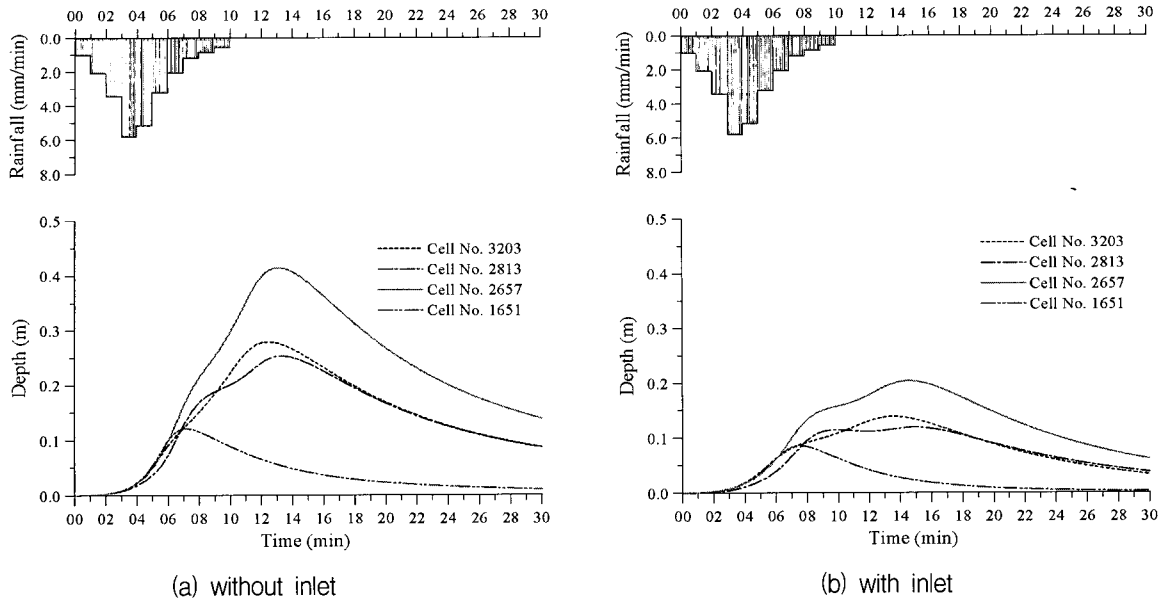


Fig. 20. Flow depths at arbitrary cells

Figs. 21 and 22는 앞선 모의조건과 동일하지만, 조도계수를 일괄적으로 0.01로 부여한 경우의 결과이다. 토지이용을 고려하여 조도계수를 입력하였을 때의 결과인 Figs. 19 and 20에 비해서 침투 유출량 및 유출심이 증가한 것을 알 수 있다. 또한, 침투발생시간이 단축되었고 유출수분곡선의 꼬리부분이 짧아진 것을 확인할 수 있다. 이는 도시화로 인해 지표면의 조도가 감소하였을 때 나타나는 전형적인 결과이다.

Fig. 23은 빗물받이 유입구와 같은 우수의 배수시설의 설치 개수에 따른 셀 번호 2813에서의 침투 유출량과 유출심을 산정하여 도시한 것이다. Fig. 17에서 No. of cells per sink는 배수시설의 설치밀도를 나타낸 것

으로 배수시설 1개가 담당하고 있는 셀의 개수를 나타낸 것이다. 예를 들어 이 값이 10이면, 셀 10개마다 1개의 유입구가 존재하는 것을 의미한다. 이 경우에는 1개의 셀 크기가 20m×20m 이므로, 1개의 유입구가 담당하는 집수면적은 4,000m²가 된다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이, 10개를 전후하여 침투유출량과 최대유출심이 급변하는 유입구 설치 개수가 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 모의를 통하여 유입구의 적정 설치밀도를 결정할 수 있다. 본 case study의 경우 셀 1개당, 즉 면적 400m²당 1개의 유입구를 설치하면, 발생한 우수유출수의 대부분을 유입구를 통하여 배출시킬 수 있는 것으로 모의되었다.

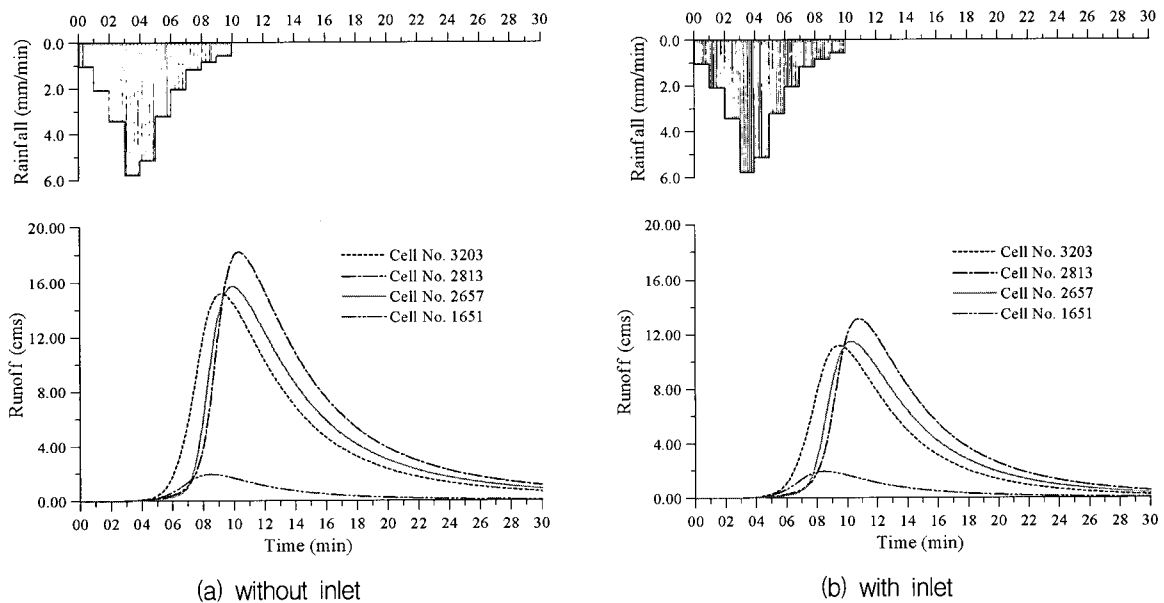


Fig. 21. Hydrographs at arbitrary cells (uniform roughness)

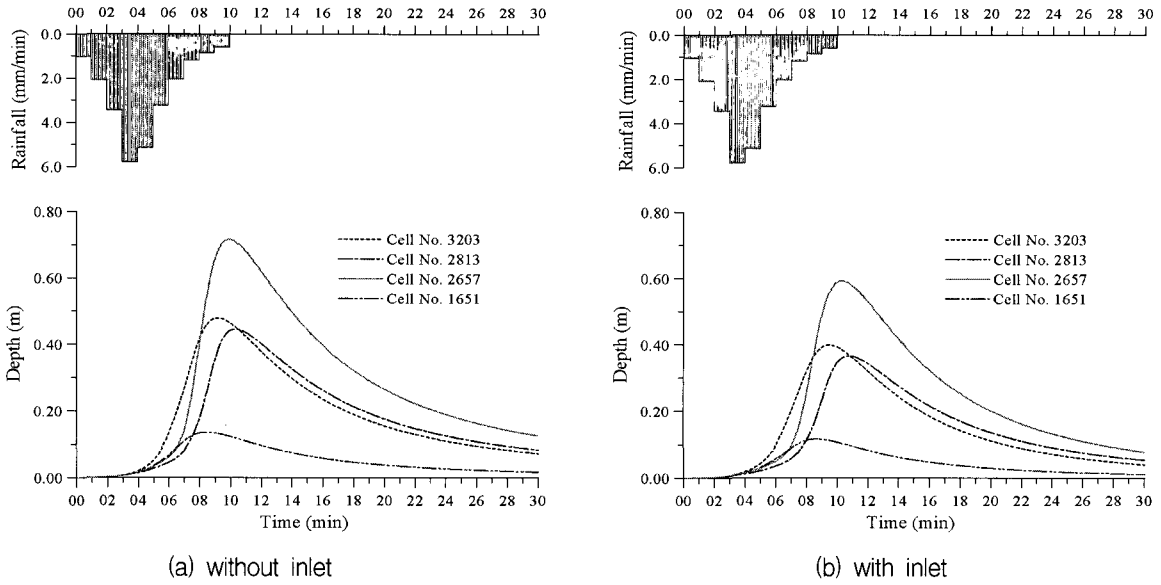


Fig. 22. Flow depths at arbitrary cells (uniform roughness)

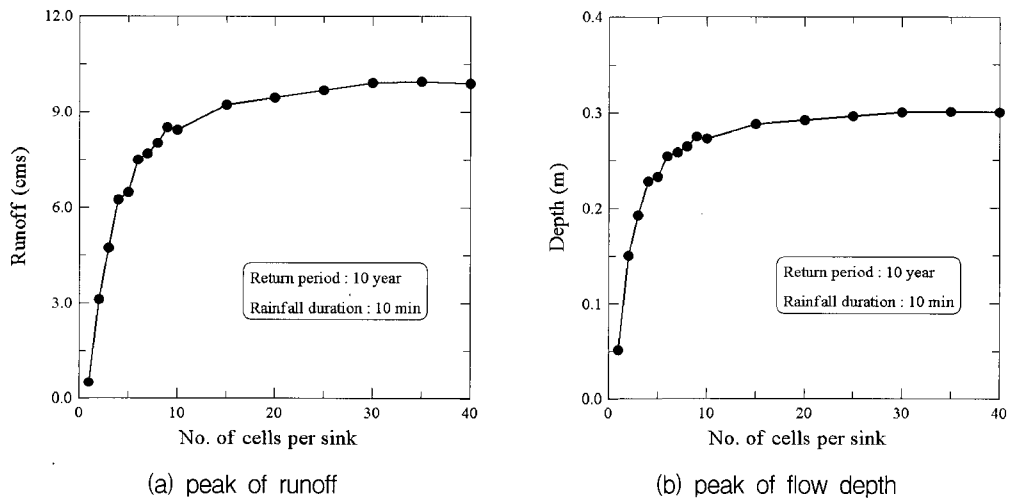


Fig. 23. Peaks of surface runoff and flow depth for various sink density (Cell No.2813)

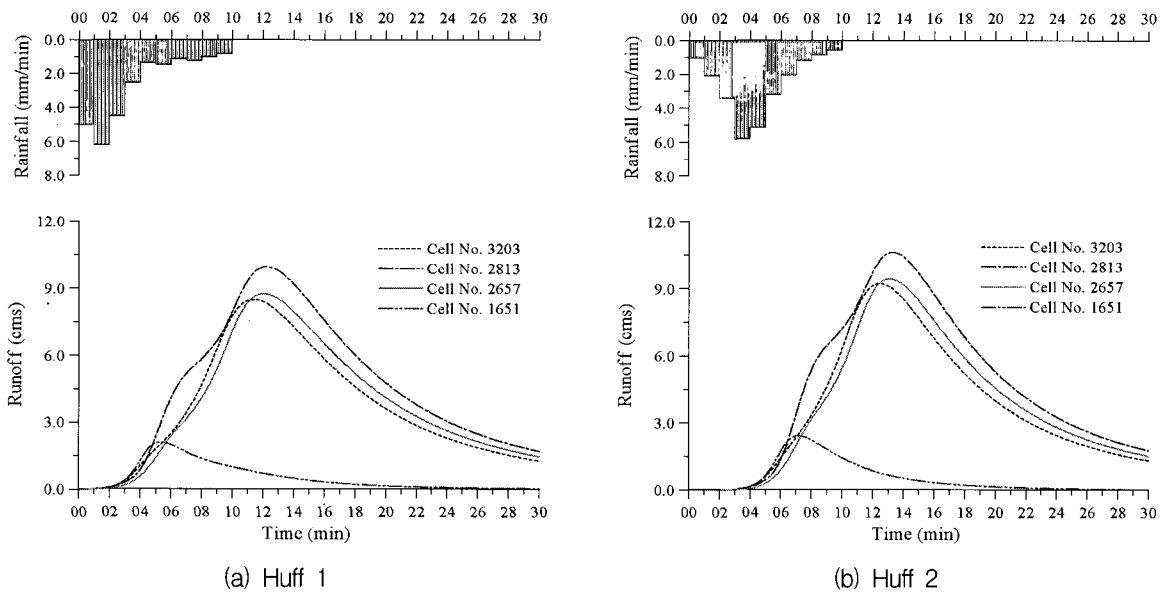
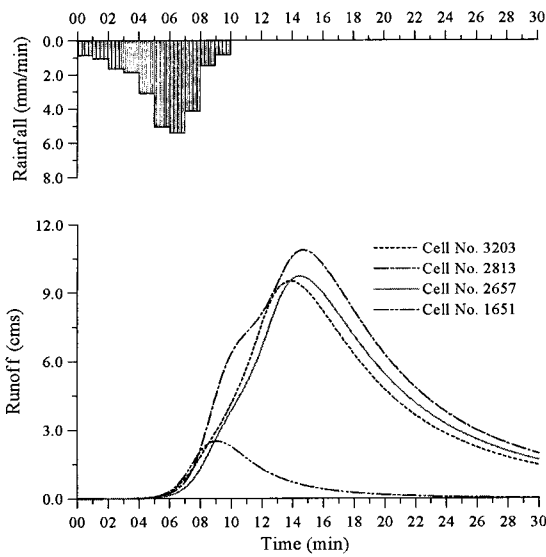
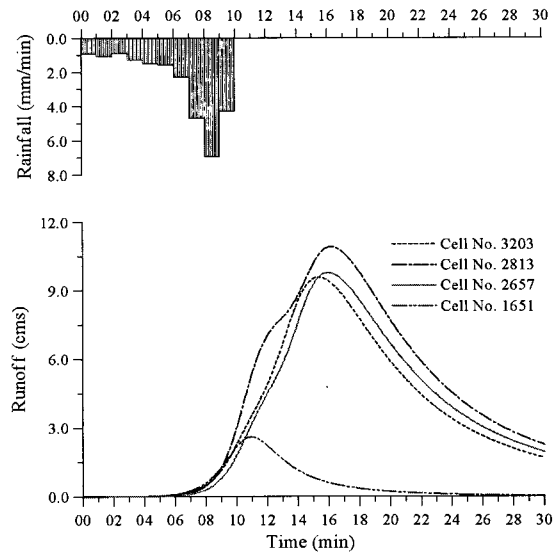


Fig. 24. Surface runoff hydrographs response to distributed rainfall by Huff method



(c) Huff 3

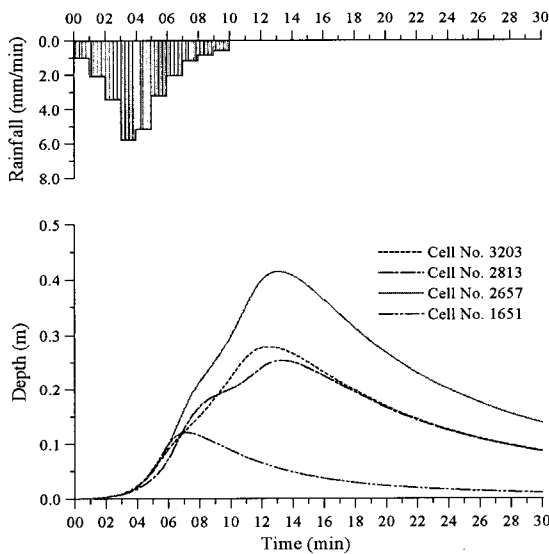


(d) Huff 4

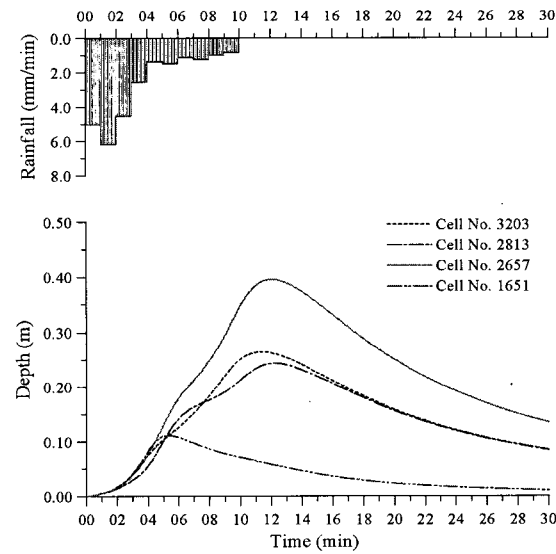
Fig. 24. Surface runoff hydrographs response to distributed rainfall by Huff method(continued)

Figs. 24 and 25는 서울지역의 재현기간 10년, 지속 시간 10분의 설계 강우에 대하여 Huff 분위에 따른 유출량과 유출심의 시간적 분포를 모의하여 나타낸 것이다. 분위별로 첨두 발생 시간에만 차이를 보이고 있으나, 수문곡선의 전반적인 형태는 분위별로 큰 차이를 나타내고 있지 않다. Huff 4분위인 경우가 첨두유출량과 최대유출심이 다른 분위의 경우보다 다소 큰 것으로 보인다.

셀 번호 2813에 대하여 지속시간별(10분, 20분, 30분, 60분), Huff 분위별 첨두 유출량과 최대 유출심을 산정하여 Fig. 26과 Table 4, Table 5에 나타내었다. 지속시간 20분일 때를 제외하고는 Huff 4분위일 때 첨두 유출량과 최대 유출심이 가장 큰 것으로 산정되었다. 첨두 유출량이 최대일 때의 강우지속시간을 임계지속시간으로 보면, 지속시간이 30분을 전후해서 임계지속시간이 결정될 것으로 보인다.

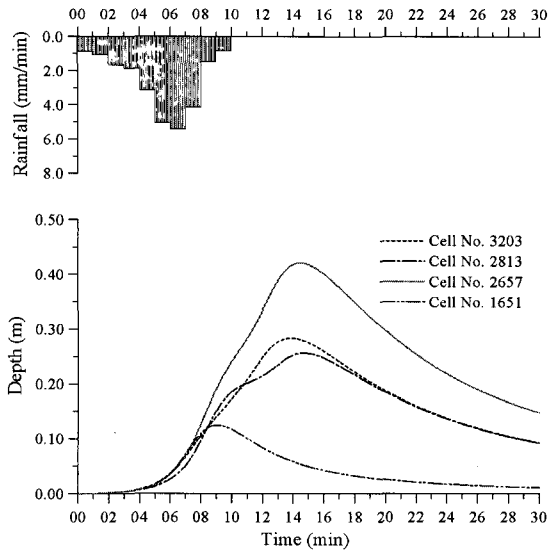


(a) Huff 1

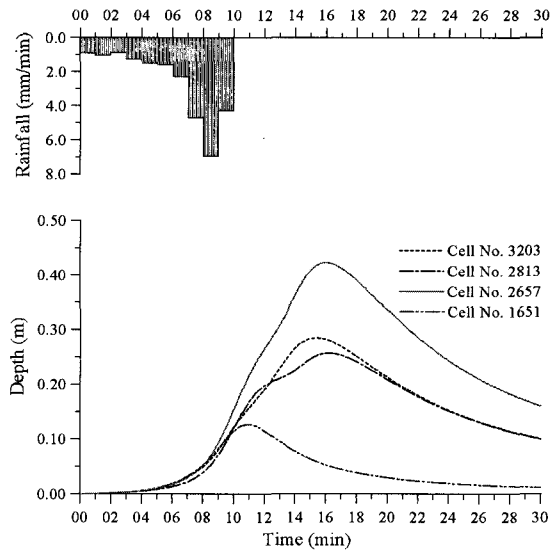


(b) Huff 2

Fig. 25. Flow depths response to distributed rainfall by Huff method

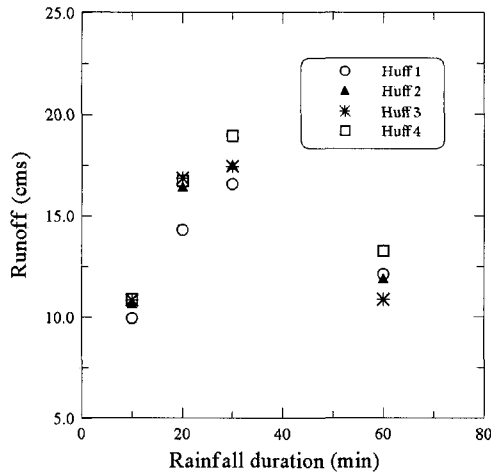


(c) Huff 3

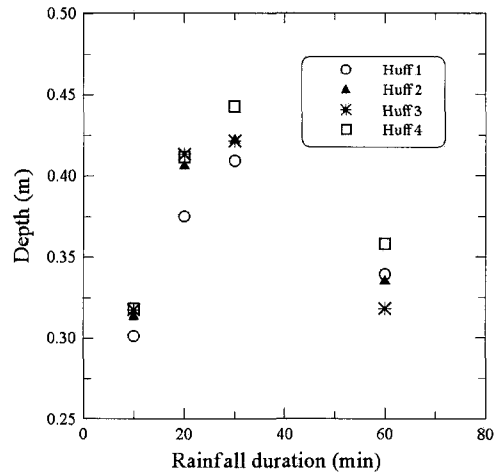


(d) Huff 4

Fig. 25. Flow depths response to distributed rainfall by Huff method(continued)



(a) Surface runoff



(b) Depth

Fig. 26. Peaks of surface runoff and flow depth for various duration time and distribution types of rainfall (No.2813)

Table 4. Peaks of surface runoff for various rainfall duration time (unit : cms)

Duration Time	Huff 1	Huff 2	Huff 3	Huff 4
10 min.	9.94	10.61	10.85	10.91
20 min.	14.35	16.37	16.87	16.74
30 min.	16.60	17.47	17.48	18.95
60 min.	12.15	11.88	10.90	13.29

Table 5. Peaks of flow depth for various rainfall duration time (unit : m)

Duration Time	Huff 1	Huff 2	Huff 3	Huff 4
10 min.	0.301	0.313	0.317	0.318
20 min.	0.375	0.406	0.413	0.411
30 min.	0.409	0.422	0.421	0.442
60 min.	0.339	0.335	0.318	0.358

4. 결 론

본 연구에서는 도시유역에서 적합한 격자기반의 지표면 유출해석 모형을 개발하고, 가상 유역 및 실제 유역인 군자 배수구역에 시범적으로 모형을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이동강우에 대하여 정방향 가상유역의 유출해석을 수행한 결과, 강우의 이동방향과 유출의 방향이 같고 그 이동속도 간에 차이가 작은 경우에는 하류부에 유출의 증폭을 가져올 수 있으나, 강우와 유출의 속도차이가 크면 지체효과로 인해 유출량이 공간적으로 균등강우의 경우에 비해 유출량이 감소할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 모형의 민감도 분석을 통하여 조도계수와 초기침투능이 지표면 유출량 및 유출의 지체를 지배하는 인자임을 확인하였다.
- 3) 빗물받이 유입구와 같은 우수의 배수시설의 설치 개수에 따른 유출모의를 통하여 침투유출량과 최대유출심이 급변하는 유입구 개수가 존재함을 보였으며, 군자배수구역에서 발생한 우수유출수의 대부분을 유입구를 통하여 배출시킬 수 있는 유입구의 적정 설치밀도를 제시하였다.
- 4) 서울지역의 재현기간 10년 확률강우에 대하여 지속시간별, Huff 분위별 유출모의를 수행한 결과, Huff 4분위인 경우가 침투유출량과 최대유출심이 가장 크며 지속시간 30분을 전후해서 임계지속시간이 결정될 것으로 분석되었다.

결론적으로, 가상 및 실제 유역에 대한 유출해석을 통하여 본 연구에서 개발한 모형은 이동강우나 국지적인 집중호우 등 시공간적으로 변하는 수문 특성을 반영할 수 있어 도시유역의 홍수방재관리에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구로서 관측자료 및 타 모형과의 비교를 통하여 본 연구에서 개발한 유출모형의 검증 및 우수관거해석 모형과의 연계가 가능토록 모형을 확장할 계획에 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

김성준 (1998a). "격자기반의 운동과 강우유출모형의 개발(I)." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권 제3호, pp. 303-308.

김성준 (1998b). "격자기반의 운동과 강우유출모형의 개발(II) -적용예(연천댐 유역을 대상으로)-." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권 제3호, pp. 309-315.

최계운, 이희성, 안상진 (1992). "분포형 모형을 이용한 유역내 이동강우(MOVING STORM)의 유출해석(I) -모델의 개발-" **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제25권 제1호, pp. 101-110.

최계운, 이희성, 안상진 (1993). "분포형 모형을 이용한 유역내 이동강우(MOVING STORM)의 유출해석(II) -모델의 적용-" **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제26권 제1호, pp. 81-91.

최현상, 한건연 (2004a). "GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발 (I) -이론 및 모형의 개발-" **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제4호, pp. 329-339.

최현상, 한건연 (2004b). "GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발 (II) -적용 및 분석-" **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제4호, pp. 341-352.

Abbott, M.B., Bathust, J.C., Cunge, J.O., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986). "An introduction to the European Hydrological System-System Hydrologique Europeen (SHE)." *J. of Hydrology*. Vol. 87, pp. 45-59.

Arnold, J.G., Allen P.M., and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *J. of Hydrology*. Vol. 142, pp. 47-69.

Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979). "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydro. Sci. Bull.*, Vol. 24, pp. 43-49.

ESRI (1995). Arc/Info Version 7 on-line user's manual. Redlands, CA.

Hicky, R., Smith, A., and Jankowski, P. (1994). "Slope length calculations from a DEM within Arc/Info GRID." *Computing, Environment and Urban Systems*. Vol. 18, No. 5, pp. 365-380.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001). *Soil and water assessment tool theoretical documentation*. Agricultural research service, Texas.

Zevenbergen, L.W., and Thorne, C.R. (1987). "Quantitative analysis of land surface topography." *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 12, pp. 12-56.

(논문번호:05-126/접수:2005.09.20/심사완료:2006.04.26)