

# GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우 -유출 모형의 개발 (II) - 적용 및 분석 -

## Development of Distributed Rainfall-Runoff Model by Using GIS and Uncertainty Analysis (II) - Application and Analysis -

최 현 상\* / 한 건 연\*\*

Choi, Hyun Sang / Han, Kun Yeun

### Abstract

In this study(II), the model developed in the previous study(I) has been tested on two cases of constant-slope areas to verify the model applicability. Firstly, an impervious one-dimensional runoff problem has been simulated. Secondly, an impervious two-dimensional runoff problem at a converging plain which consists of a V-shaped section plus a portion of the surface of a cone has been simulated. For each case, the simulation results have good agreements with the observed data.

And the model has been applied to actual watersheds, which were the Sulma watershed with 8km<sup>2</sup> and the Donggok watershed with 33.2km<sup>2</sup> drainage area, respectively. The simulated results agree with observed in terms of discharges at several stations. Monte Carlo simulation was also performed on the same watersheds and the modeling results have been evaluated. The suggested model can be used for real-time forecasting of rainfall-runoff analysis, and will contribute for basinwide flood control in the future.

**Keywords** : Distributed Model, GIS, Rainfall-Runoff, Uncertainty Analysis

### 요 지

본 연구(II)에서는 앞선 연구(I)에서 개발된 모형의 적용성을 증명하기 위해 2가지 등경사 가상유역에 대해 적용하였다. 먼저, 불투수조건의 1차원 흐름 추적에 대해 적용하고, 두 번째로 원추모양의 일부분처럼 되어있는 V자형 불투수 가상유역에 2차원 흐름추적을 적용하였다. 각각의 경우에서 모형의 결과와 관측치는 잘 일치하였다.

또한, 본 모형을 8km<sup>2</sup>의 유역면적을 가지는 설마천 유역과 33.2km<sup>2</sup>의 유역면적을 가지는 동곡 유역에 각각 적용하였고, 모의된 결과는 관측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. Monte Carlo 모의 역시 같은 유역에 적용하여 평가하였다. 본 모형은 향후 실시간 강우-유출해석 및 예보에 적극 사용될 수 있으며 유역단위 홍수조절에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료되었다.

**핵심용어** : 분포형모형, 지리정보시스템, 강우-유출, 불확실도 해석

\* 한국건설기술연구원 선임연구원

Senior Researcher, Korean Institute of Construction Technology, Koyang, Kyunggi 411-712, Korea  
(E-mail : hyunsang@kict.re.kr)

\*\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea  
(E-mail : kshanj@knu.ac.kr)

## 1. 서 론

지금까지 수문학자들의 지속적인 연구와 노력으로 물의 거동에 관한 연구들이 많은 진보를 이루어왔다. 강우-유출현상을 설명하기 위해 많은 모형들이 개발되고 적용되어 왔고, 관련 매개변수들이 제안되어 왔다. 그러나, 자연의 불확실성과 자연에 대한 불완전한 이해 등으로 인해 미래의 거동에 대한 예측은 아직까지 제한적으로만 가능할 뿐이다. 또한, 지금까지의 개념적 모형에 기반을 둔 강우-유출해석은 홍수예보에 있어 많은 불확실성을 포함하고 있으며, 물리적 거동에 기초한 새로운 강우-유출 모형의 도입이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

앞선 연구(I)에서 언급되었던 몇몇 분포형 모형의 특징들과 최근의 연구동향을 살펴보면, 우선 TOP-MODEL은 단순한 집중형 모형의 장점을 하천유량의 생성과 하도망을 통한 흐름추적의 변화수원면적(variable-source-area) 개념과 통합하여 고온다습한 지역에 적용할 수 있는 모형으로 유출에 대한 지형학적 영향과 깊이 연관된 모형이다. 그러나, TOPMODEL의 경우, 지형지수의 산정시에는 유역의 고도분포 등이 고려되어지나 실제의 강우-유출 해석과정에 있어서는 지형지수의 통계학적 분포에만 영향을 받고 실질적인 2차원 분포형 해석은 이루어지지 않는다. 이러한 점에서 분포형 모형으로 간주하기 어려우나 모형 적용의 용이성 등으로 인해 많은 유역에 대한 적용이 이루어지고 있고, 국내에서의 적용 또한 활발히 이루어지고 있다.

Beven(1989)은 실세계 모형화의 향후 개발과정을 연구하면서, 모형개발자들이 직면하고 있는 여러 가지 문제점들을 해결하기 위해서는 격자크기의 변동성과 수식, 실제 현상들간 조화의 필요성, 또한 모형 예측에 있어 정량적인 불확실도에 대해 깊이 고려해야 할 필요가 있다고 기술하였다.

Julien과 Saghafian(1995) 등이 제안한 분포형 모형은 강우의 지리학적 변동성과 지형의 지리학적 변화, 토양의 분포 등을 고려할 수 있는 모형으로 침투량을 손실량으로만 처리하였다. 이 모형에 관한 최근의 연구동향을 살펴보면, 유역면적에 따른 적용성에 관한 연구(Molnar와 Julien, 2000), 레이더 강우자료에 관한 불확실성에 관한 연구(Ogden등, 2000) 등이 이루어지고 있다. 그러나, 이 모형은 아직까지 유역에서의 증발량 산정이나 기저유출과 관련된 지하수 유출에 관한 연구는 이루어지지 않고 있어 유역에서의 유출 모의에는 한계를 보이고 있다. 또한, 조도계수나 강우량 자료 등 단일 자료에 포함된 불확실도 해석의 예는 있으나 모형전체

에 대한 불확실도 해석기법의 적용은 아직까지 이루어지지 않고 있어 연구가 필요한 시점이며, 산지 급경사 유역에 대한 적용에 관한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

Abbott 등(1986)이 제안한 모형은 영국 수문연구소(Institute of Hydrology)와 프랑스의 SOGREAH 및 덴마크의 DHI 등 세 기관의 공동연구에서 개발된 모형으로 강우, 차단, 증발산, 침투량에 대한 고려와 2차원 지표류 유출 해석, 지하수 유출 등 강우-유출 과정에 대한 거의 전분야를 포함하고 있는 모형이다. 현재는 MIKE SHE의 이름으로 DHI에서 지속적으로 보완되어지고 있다. 그러나, 이 모형의 경우에도 모형전체에 대한 불확실도 해석기법이 적용된 바 없으며, 현재까지는 확정론적 모형으로 구성되어 있는 실정이다.

앞선 연구(I)에서는 그동안 국내에서 이루어져 왔던 집중형 강우-유출모형이나 단순화한 분포형 모형이 아닌 2차원 분포형 강우-유출 모형과 불확실도 해석기법인 Monte Carlo 해석기법을 도입하여 추계학적 해석이 가능한 모형을 제시하였다. 이에 본 연구(II)에서는 연구(I)에서 개발된 모형의 검증과 실제 유역에 대한 적용성의 검토가 주 목적이다. 또한, 실제유역에 대한 적용에 있어 Monte Carlo 해석을 실시하여 매개변수들의 불확실성에 대해 검토하였다.

## 2. 분포형 모형의 검증

본 장에서는 지표류에 대한 2차원 분포형 모형의 적용성을 검토하기 위해 일방향 경사 유역과 부채꼴 유역에 대한 모의와 검증을 실시하였고, 모형에 대한 민감도 분석을 위한 방법론을 제시하기 위해 부채꼴 유역에 대한 Monte Carlo 모의를 실시하였다.

### 2.1 가상 유역에 대한 유출해석

#### 2.1.1 일방향 경사 유역에 대한 적용

일방향 경사의 흐름에 대한 가상유역은 Kawahara와 Yokoyama(1980)에 의해 제시된 가상유역을 채택하였다. 그림 1의 유역 3차원 표고에서 보는 바와 같이 길이 16 ft(4.88 m)와 폭 8 ft(2.44 m)의 유역에 적용하였다. 여기서,  $x$  방향으로의 경사는 0.0465이고  $y$  방향으로의 경사는 '0'이다. Kawahara와 Yokoyama(1980)에 의해 사용된 실험자료와 입력값을 일치시키기 위해 4분의 지속시간을 가진 1.07 in/hr(27 mm/hr)의 균일한 강우강도와 0.0125의 조도계수를 사용하였다. 모의수행결과는 Kawahara와 Yokoyama(1980)가 제시한 실험결과와 비교하였다. 그림 2는 모형 결과치와 실험치를 비교

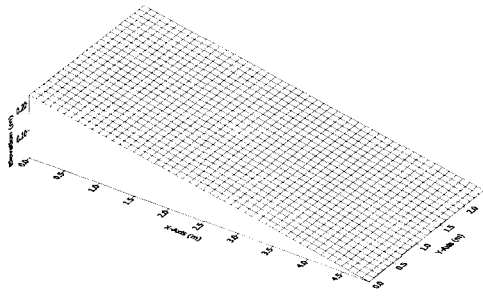


그림 1. 일방향 경사 구역의 고도분포도

한 것으로 침투유량의 결과는 실험치와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

### 2.1.2 부채꼴 구역에 대한 적용

이차원 경사 구역에 대한 적용성을 검토하기 위하여 그림 3과 같은 부채꼴 구역에 대한 강우-유출에 대하여 모의 수행을 실시하였다.

방사형 흐름에서의 지표유출에 관한 연속방정식은 Veal(1966)에 의하여 식 (1)과 같이 유도된 바 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u_r \frac{\partial h}{\partial x_r} + h \frac{\partial u_r}{\partial x_r} = e + \frac{u_r h}{L_0 - x_r} \quad (1)$$

여기서  $x_r$  = 부채꼴 중심방향,  $u_r$  = 부채꼴 중심방향으로의 평균속도를 나타낸다.

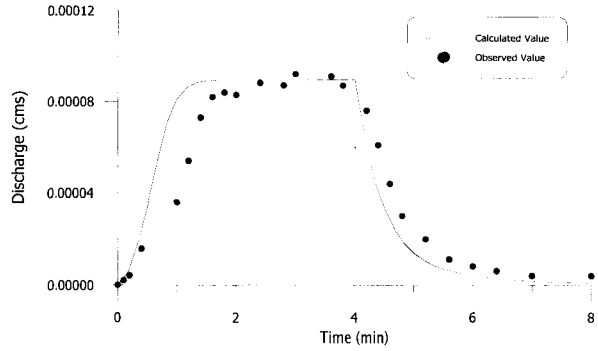


그림 2. 일방향 경사 구역에 대한 적용

모의수행은  $L_0 = 110 \text{ ft}$ ,  $r = 0.016$ ,  $S_0 = 0.05$ ,  $n = 0.015$ , 중심각  $120^\circ$ 의 경우에 대하여 수행하였다. 부채꼴 형상의 구역에 대한 2차원 분포형 모형을 적용하기 위하여  $1 \text{ m}$ 의 격자간격으로  $34 \times 51$ 개의 직사각형 격자망을 구성하였고, 부채꼴 외부는 경계로 처리하여 계산에서 제외하였다. 이 경우 강우강도와 지속시간은  $1.04 \text{ in/hr}$  ( $2.6416 \text{ cm/hr}$ )와 80초(Case I),  $2.39 \text{ in/hr}$  ( $6.0706 \text{ cm/hr}$ )와 75초(Case II)에 대하여 각각 수행하였으며 실험치는 Dickinson 등(1967)의 연구결과를 인용하였다.

관측값과 모의된 수문곡선은 그림 4, 그림 5에 나타나 있다. 강우강도가 적은 경우에는 실험치와 일치하나 강우강도가 상대적으로 큰 경우에는 침투유량이 실험치에 비해 크게 나타나는 경향이 나타났다.

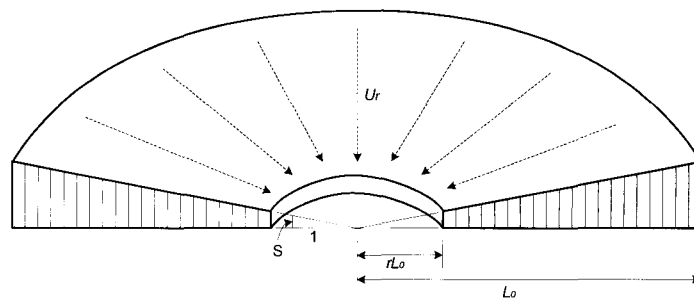


그림 3. 부채꼴 가상 구역

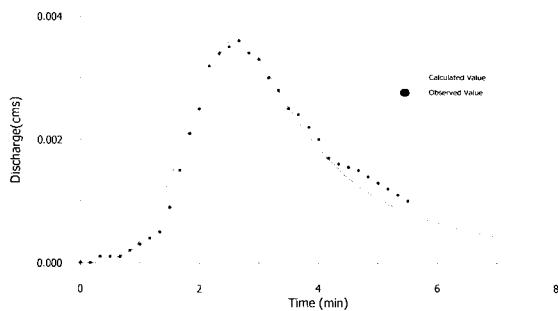


그림 4. 가상구역에 대한 적용 결과(Case I)

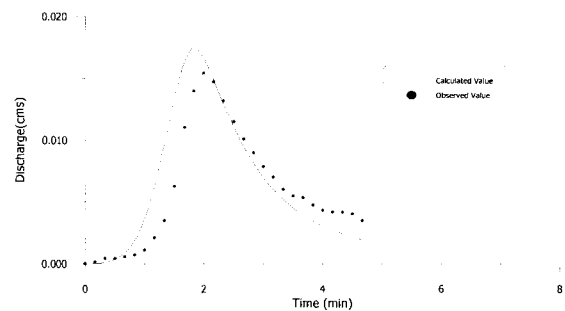


그림 5. 가상구역에 대한 적용 결과(Case II)

## 2.2 Monte Carlo 모의수행

본 모형의 유출 모의는 시간적으로는 지표면 유출과 하도 유출이 동시에 계산이 이루어지나 공간적으로는 지표면 유출과 하도 유출이 구분되어 계산이 수행되어진다. 입력자료의 구성 또한 지표면에 대한 자료와 하도 자료가 구분되어지며, 지표의 경우에는 지표면 조도계수와 침투량 산정을 위한 토양관련 계수가 주입력자료이고, 하도의 경우 하도 조도계수와 하폭, 지표면을 기준으로 한 하도의 깊이 등이 주 입력자료이다.

모형의 적용 대상유역에 따라 조도계수의 범위는 일반적으로 하도의 수리학적 계산에 사용되는 조도계수와는 큰 차이를 나타내게 된다. 특히, 산지유역의 지표류 흐름에 대한 조도계수는 하도에 비해 상당히 큰 값을 가지게 되며, 하도의 경우에도 산지유출이 발생하는 1, 2차 지류의 경우, 하류의 경우와 달리 큰 조도계수가 적용되어야 한다.

조도계수에 대한 값은 여러 연구에서 정의하고 있으나 지역마다 그 식생이나 토양의 조성 상태가 다르므로 연구자의 판단에 의존하는 경우가 거의 대부분이다. 표 1에 나타나 있는 값은 일반적으로 적용할 수 있는 조도계수에 대한 범위를 보여주고 있다. Gray(1970) 등의 연구 결과에 따르면 산림이 밀집한 산간지역의 경우 조도계수 0.10의 값도 그다지 큰 값은 아니다. 하도의

조도계수 역시 산지류의 경우 0.05가 평균적인 값으로 이러한 값은 일반적인 수리학적 하도추적에 사용하는 조도계수에 비하여 큰 값이나 산지류에서는 평균값으로 나타나 있다(Gray, 1970).

표 1에서와 마찬가지로 지표면의 조도는 큰 변동성과 불확실도를 내포하는 값이므로 향후 조도계수에 따른 민감도 분석이 필수적임을 보여주고 있다.

Monte Carlo 모의수행을 적용할 매개변수로는 우선 불투수 지표류 흐름추적에 있어 가장 큰 불확실도를 포함하고 있을 것으로 판단되는 지표면의 조도계수를 선정하였고, 모의수행의 대상유역은 부채꼴 형상의 가상유역을 선정하였다. 모의수행의 횟수는 500회를 실시하였고, 변동계수는 0.5를 사용하였고, 비교를 위해 기준치는 부채꼴 유역에 대한 적용예 가운데 첫 번째 예를 사용하였으며, 결과는 비교의 편의를 위하여 모의수행 500회에 대한 평균값과 표준편차를 도시하였다.

아래의 그림 6은 Monte Carlo 모의 결과에 대한 평균과 표준편차를 부채꼴 가상유역에 대한 첫 번째 예의 결과와 비교한 것이다. 그림 7은 조도계수의 최대값과 최소값에 의한 결과를 비교한 것이다.

표 2는 조도계수 변화에 따른 침투량과 침투시간의 편차를 보여주고 있다. 특히, 침투유량의 차이는 조도계수의 과대평가보다 과소평가로 인한 영향이 더 크다는 것을 보여주고 있다.

표 1. 하도와 지표면 조도의 적용 범위

하도와 지표면 조도의 적용 범위	최소	평균	최대
산지류, 하도에 식생이 없는 경우, 가파른 제방에 높은 수위에서 잠기는 나무가 있는 경우	0.040	0.050	0.070
홍수터, 중간규모의 식생분포, 여름철의 경우	0.070	0.100	0.160

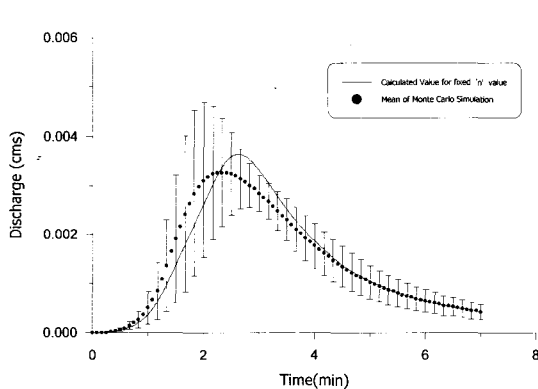


그림 6. Monte Carlo 모의에 의한 유출수문곡선 (평균과 표준편차)

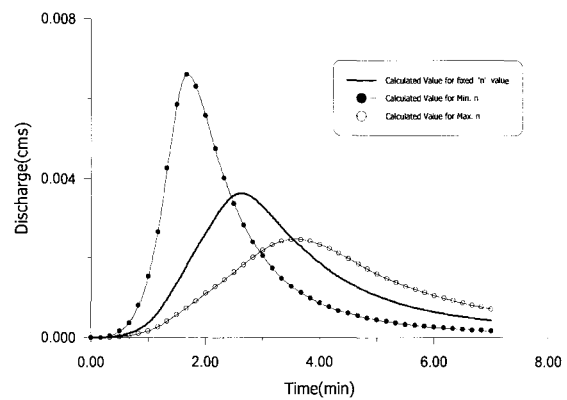


그림 7. 조도계수 최대·최소값에 의한 결과 비교

표 2. 침투발생시간과 침투유량의 편차

	조도계수	침투량 ( $m^3/s$ )	침투발생시간 (분)	침투량편차 (%)	침투시간편차 (%)
최소값	0.0075	0.0066	1.6833	81.32	36.08
최대값	0.0225	0.0025	3.5500	31.87	34.81
기준값	0.0150	0.0036	2.6333	-	-

### 3. 실제유역에 대한 적용

#### 3.1 대상유역의 선정

소규모 실제 유역에 대한 적용을 위하여 임진강 상류의 설마천 유역과 낙동강의 위천 대표시험유역의 동곡 소유역을 선정하였다. 설마천 유역은 1995년부터 한국건설기술원에 의해 운영되는 시험유역으로서 임진강 상류 46 km에 위치한 전형적인 산지유역으로서, 전체 유역면적 18.5 km<sup>2</sup>, 유로연장 11.3 km 인데, 이 중에서 영국군 전적비를 출구점으로 하는 소유역을 연구대상유역으로 선정하였다. 연구대상유역은 면적 8.5 km<sup>2</sup>, 유로연장 5.8 km로 절리와 엽리가 잘 발달하고 경사가 급하여 강우시 사면유출모의에 적합한 지형으로 판단된다. 우량관측소 5개, 수위관측소 2개가 설치되어 있으며, 10분 단위로 실시간 관측이 이루어지고 있다(한국건설기술연구원, 1998). 동곡유역은 행정지역으로는 경상북도 군위군에 위치하고 있다. 동곡유역의 유역면적은 33.14 km<sup>2</sup>, 유로연장은 8.0 km<sup>2</sup>, 고도분포 213 m~795 m인 지형으로 퇴적암이 대부분을 차지하는 산림지역이다.

#### 3.2 모형의 적용

##### 3.2.1 설마천 유역에 대한 적용

설마천 유역에 대한 지형자료의 구축은 1/25,000 지

형도를 사용하여 고도자료를 구축하였고, 강우자료는 2001년 7월 29일부터 2001년 8월 1일까지의 강우사상을 사용하였다. 그림 8은 설마천 소유역에 대한 3차원 지형형상과 하도망을 나타내고 있다. 설마천 시험유역에는 우량관측소 5개소, 수위관측소 2개소가 설치되어 있으며, 관측 시간단위는 10분으로 운영되고 있다(한국건설기술연구원, 2000).

설마천의 유역 면적은 18.5 km<sup>2</sup>, 유로연장은 11.25 km로서 임진강 유역의 약 0.23%를 차지하고 있고, 수계형상은 대체로 수지상의 모양으로 이루어져 있다. 이 가운데 전적비교를 유출구로 하는 8.5 km<sup>2</sup>를 대상유역으로 선정하였다(한국건설기술연구원, 1995).

설마천 시험유역에 대한 1/25,000 정밀 토양도를 확인한 결과 하천 주위를 따라 약간의 부분에 대해서만 조사되어 있을 뿐 전체적인 토양구분은 나와 있지 않았다. 그러나, 1995년 설마천 시험유역보고서에 따르면 그림 9에 나타나 있는 총 11개 측정점에 대한 자세한 토양조사가 이루어진 결과가 제시되어 있고 각 측정점에 대한 토양특성자료는 표 3에 나타나 있다(한국건설기술연구원, 1995). 침투와 관련한 계수는 11개 측정점을 기준으로 티센망을 구성하여 그 영역내에는 같은 토양으로 구성되어 있다는 가정을 통해 산정하였다. 투수계수, 모관흡인수두, 토양미흡량 매개변수 등의 계수값은 Rawls 등 (1983)의 연구에 의해 제시된 값을 사용하였다.

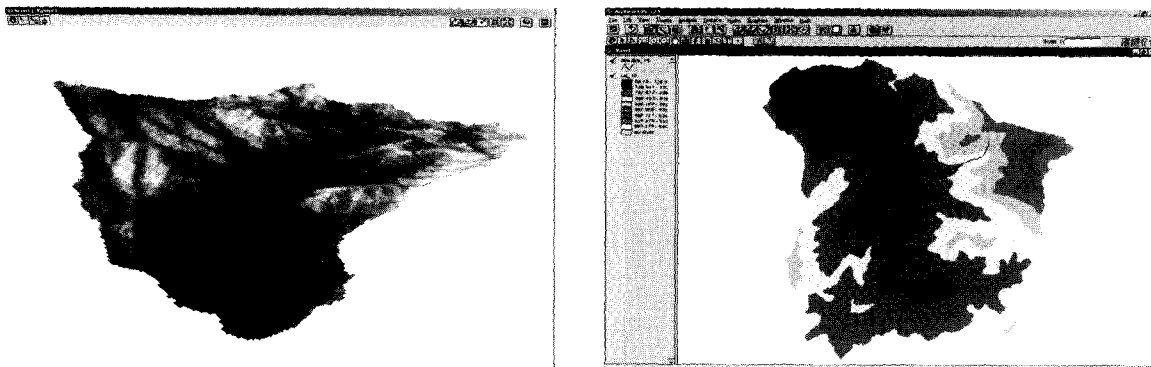


그림 8. 설마천 유역 지형형상과 하도망

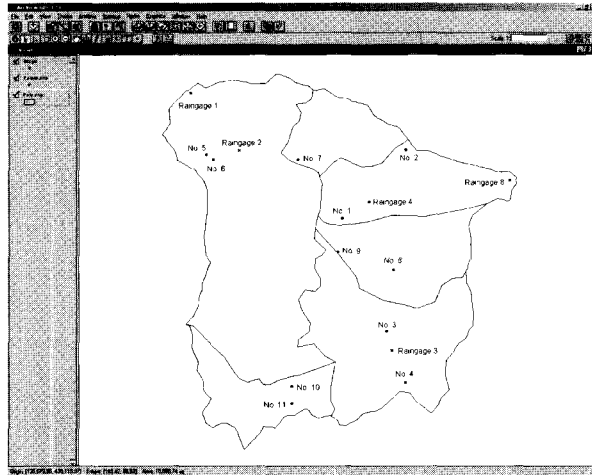


그림 9. 설마천 유역 토양조사 측정과 우량관측소의 위치

표 3. 설마천 유역 주변 산림 토양의 토양특성

조사구 번호	표토의 토성	표토층의 유기물 함량(%)	퇴적 양식	유층 두께 (cm)	평균포양깊도 (mm)		표토층의 용적밀도 ( $g/cm^3$ )	A층의 조공극용 (%)
					A층	B층		
1	SL	6.34	포행토	10	8.1	14.0	0.84	33.6
2	SL	5.09	포행토	20	9.9	15.9	0.78	34.8
3	LS	1.31	포행토	4	12.6	15.5	1.02	22.5
4	LS	1.41	포행토	6.5	9.0	12.8	1.08	22.5
5	SL	5.26	포행토	9	10.3	20.8	0.93	27.8
6	SL	4.19	포행토	14	9.0	16.1	1.03	38.9
7	L	7.95	포행토	10	12.1	20.2	0.63	45.3
8	SL	6.41	붕적토	13	9.3	20.0	1.07	23.9
9	SiL	6.95	포행토	8	9.0	14.3	0.72	41.4
10	SL	8.53	붕적토	12	6.1	14.8	0.63	39.4
11	SiL	4.86	붕적토	10	8.2	15.3	0.87	40.2

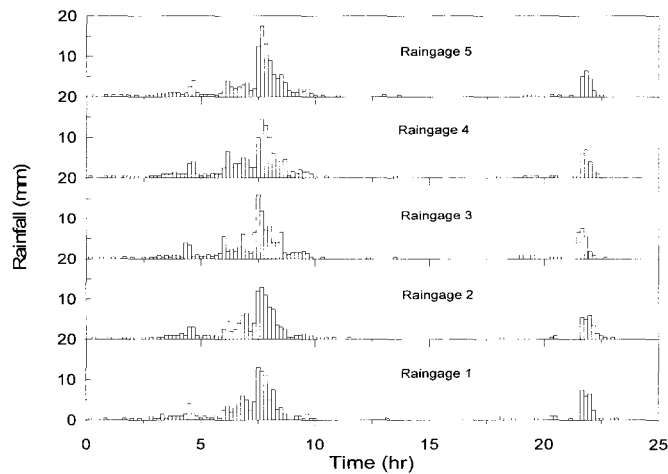


그림 10. 2001년 7월 29일 호우사상 우량주상도

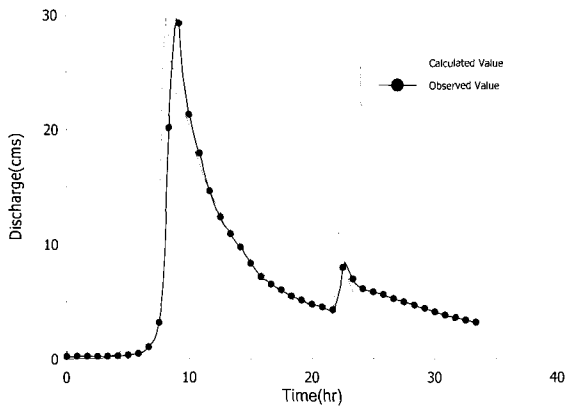


그림 11. 모의수행결과 (Case I)

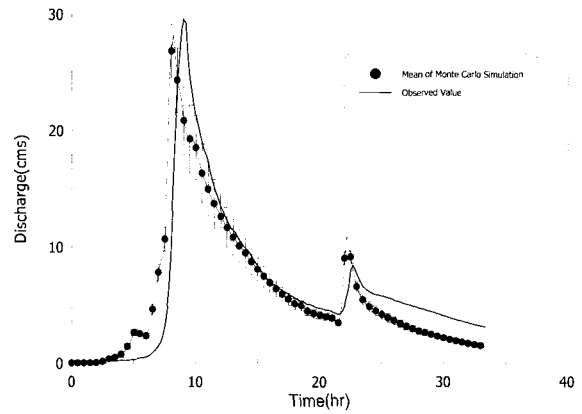


그림 12. Monte Carlo 모의수행결과(Case I)

표 4. Monte Carlo 모의를 위한 매개변수에 대한 통계값

매개변수	평균	표준편차	최대값	최소값	변동계수
조도계수	1.014798	0.138234	1.24336	0.768238	0.136218
투수계수(m/sec)	3.06E-07	3.35E-08	3.62E-07	2.47E-07	0.109293
모관흡인수두(m)	0.154439	0.04147	0.223008	0.080471	0.268521
토양미흡량(m)	0.154439	0.04147	0.223008	0.08047	0.268521

다음의 그림 10은 2001년 7월 29일 호우사상(Case I)에 대한 우량추상도로 우량계번호와 지명은 관측소 1~5번까지 각각 전적비교, 비룡포대, 설마리, 범륜사, 그리고 감악산 우량관측소이며, 10분 간격 관측 우량이다.

그림 11은 주어진 강우사상에 대해서 본 연구모형을 적용한 격자 간격 100 m에서의 확정론적 모의수행 결과이다. 전체 직사각형 대상구역의 크기는 37×35로 총 1,295개의 격자로 구성되었고, 계산수행 유효격자 수는 857개로 나타났고, 계산 시간간격은 2초, 총 모의시간은 2,000분(33.3시간)을 적용하였다. 그림 12는 동일한 강우사상에 지표면 조도계수, 투수계수, 모관흡인수두, 토양미흡량 매개변수 모두에 대해 변동성을 고려하여 100회의 Monte Carlo 모의수행한 결과의 평균과 표준편차를 도시한 것이고, Monte Carlo 모의를 위한 기준값은 표 4와 같다.

그림 13은 1999년 7월 11일 호우사상(Case II)에 대한 유역평균 우량추상도와 격자간격 30 m로 모의수행한 결과로 4방향 흐름해석에 의한 결과이다. 전체 직사

각형 대상영역은 122×130로 총 15,860개의 격자로 구성되어졌으나, 유역경계 바깥쪽에 있는 격자를 제외한 직접적인 계산수행 유효격자의 개수는 9,473개로 나타났고 계산 시간간격은 2초, 총 모의시간은 1,667분(27.8시간)을 적용하였다.

다음으로 앞선 연구(I)에서 밝힌 바 있는 1방향, 4방향, 8방향 흐름에 대한 적용결과를 비교·검토하였다. 다음의 그림 14는 Case II의 호우사상에 대한 각 흐름방향별 모의 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 계수값들을 사용하였음에도 흐름방향별 결과가 상이하게 나타나는 이유는 격자로부터의 흐름방향을 1, 4, 8방향으로 증가시킬수록 유출량이 분산되어 전체적인 유출경로가 길어지기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 차이는 격자 크기가 작아질수록 현저하게 나타난다. 다음의 표 5는 흐름방향별 침투유량과 침투시간, 계산 소요시간을 나타내고 있다.

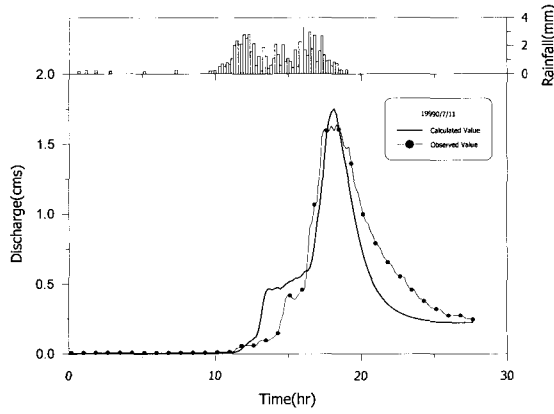


그림 13. 모의수행 결과 (Case II)

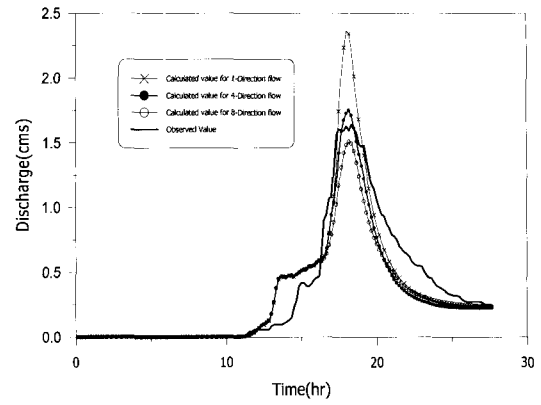


그림 14. 흐름방향별 유출해석 결과의 비교

표 5. 흐름방향별 모의결과의 비교

	침투수생시간(분)	침투속도 (m/s)	침투발생시간(분)
1 방향흐름	26.8분	2.37	1083.7
4 방향흐름	23.4분	1.75	1088.4
8 방향흐름	35.3분	1.51	1090.0

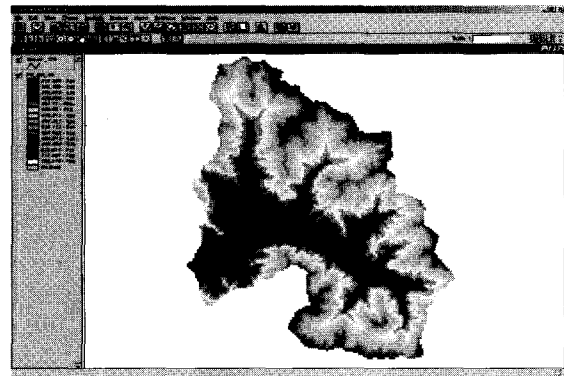


그림 15. 동곡 유역 3차원 지형형상과 하도망

### 3.2.2 동곡 유역에 대한 적용

대상유역은 낙동강의 위천 대표시험유역의 동곡 유역으로 1992년 8월 11일~12일, 1993년 9월 16일~17일 기간의 강우에 적용하였다. 행정구역상으로는 경상북도 군위군에 속하며, 1/5,000 축척의 수치지도와 Arc/Info에 의해 구해진 동곡 유역의 면적은 33.14  $km^2$ , 유로연장은 8.0  $km$ , 고도분포는 213  $m$ ~795  $m$ 인 지형으로서 퇴적암이 대부분을 차지하는 산림지역이다. 그림 15는 동곡 유역에 대한 3차원 지형형상과 하도망 분포도이다.

그림 16~17은 적용대상 기간에 대한 석산에서의 강우강도와 동곡지점에서 관측된 유출수문곡선을 나타내고 있다(건설부, 1992; 1993).

동곡소유역의 경우 하천관리대장의 부재로 인해 하도폭과 조도계수 등에 관한 자료가 미흡하여 현장조사를 통해 하도주변의 식생과 하도의 폭, 지표면을 기준으로 한 하도깊이 등을 실측하였다. 다음의 그림 18은 동곡 소유역 하천에 대한 현장사진이다.

실측을 통해 상류단으로 올라갈수록 하도의 조도가 매우 커지는 것을 실제로 확인할 수 있고, 하폭 역시 상당히 축소됨을 알 수 있었다. 이와 같은 현장조사를 토대로 동곡소유역에 대해 모의수행을 실시하였다. 그림 19와 그림 20은 모의수행에 따른 결과를 도시한 것이다. 아래에서 보는 바와 같이 침투유량의 값은 비교적 관측치에 부합하는 양상을 나타내고 있다. 1993년 9월 16일 강우의 경우 침투유량이 발생한 이후의 양상이 실측치와 상이하게 나타나고 있으나, 이는 그림 17의 우



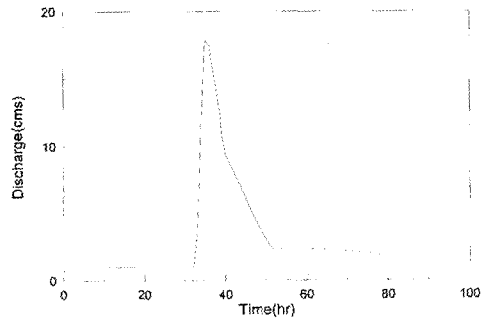
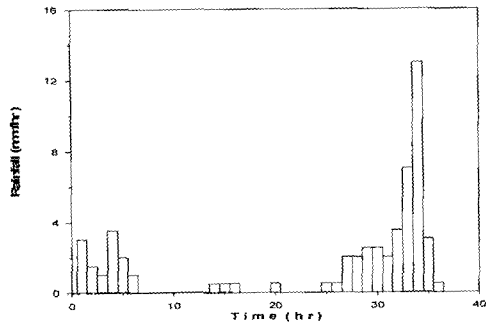


그림 16. 우량주상도 및 유출수문곡선 (1992년 8월 11일)

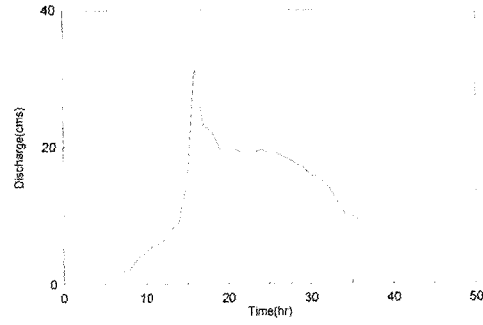
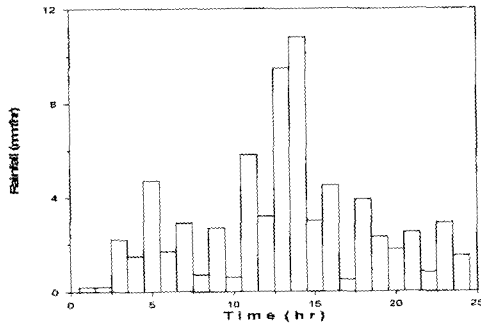


그림 17. 우량주상도 및 유출수문곡선 (1993년 9월 16일)

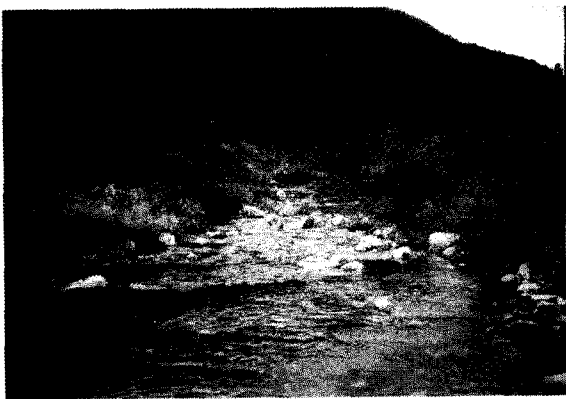


그림 18. 동곡 유역 하천 현황

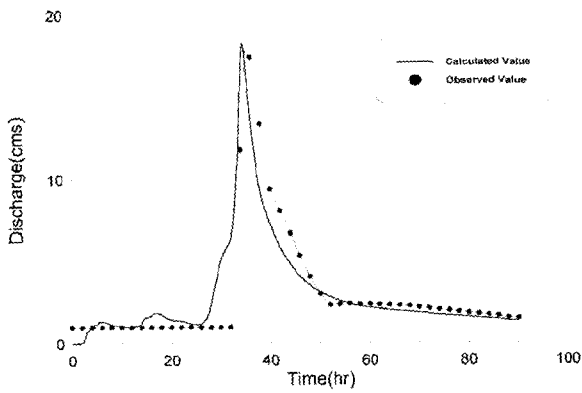


그림 19. 1992년 8월 11일 강우 모의 결과

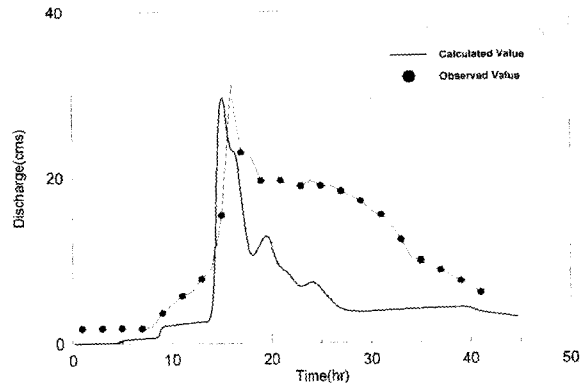
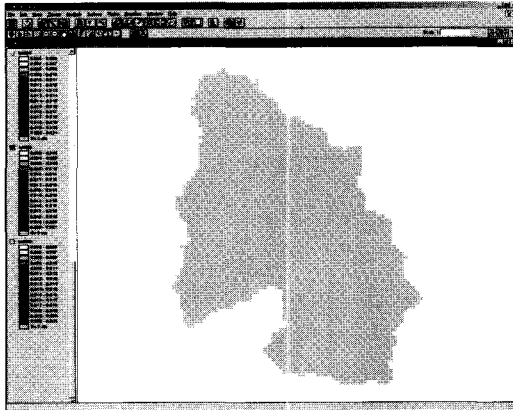


그림 20. 1993년 9월 16일 강우 모의 결과

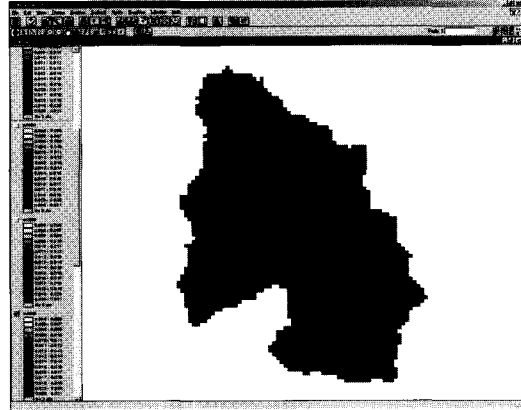
량주상도와 비교하여 보았을 때 관측상의 오차가 포함된 것으로 사료된다.

그림 21은 1992년 8월 11일 강우 사상에 대한 모의과정에서 구한 시간변화에 따른 침투량의 누가값을 나타내고 있다. 그림 16의 우량주상도에서 나타나는 바와 같이 강우시작 시간으로부터 약 30시간 이후에 본격적인 강우가 시작되고 있는 것을 알 수 있고, 약 30시간 이후부터 침투량이 크게 증가함을 알 수 있다.

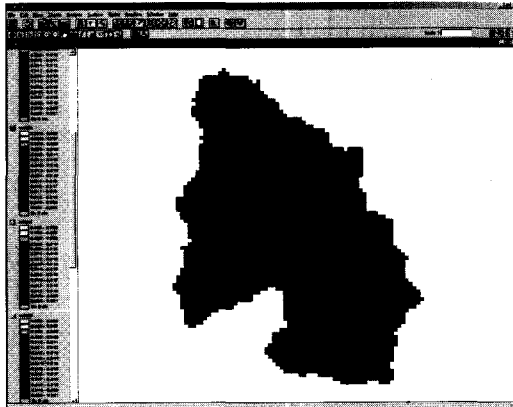
설마천 유역과 동곡 유역에 대한 적용에 있어 모의 결과로 나타난 유출수문곡선의 침투유량은 비교적 잘 일치하나, 수문곡선 상승시에는 크게, 하강시에는 작게 나타나는 현상이 발생하였다. 이는 산지유역의 조도계수 산정과 모의 실행에 있어서의 격자 크기에 따른 영향으로 판단되며, 이 부분의 개선을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.



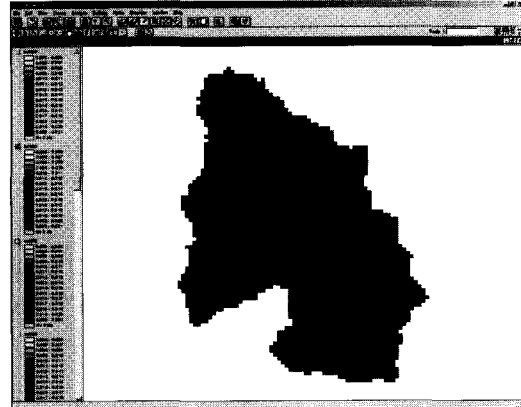
(a) 20시간 후



(b) 40시간 후



(c) 60시간 후



(d) 80시간 후

그림 21. 강우시간에 따른 누가침투량의 변화

#### 4. ArcView와 연계한 모의수행

앞선 연구(I)에서 밝힌 바와 같이 본 연구 모형은 ArcView와의 연계를 통해 사용자 편의시스템을 구축하였고, 그 주요 기능으로는 (1)수치지도 및 수치지형 자료의 관리기능, (2)강우-유출 자료의 관리를 위한 데이터베이스 처리기능, (3)강우-유출 모형과의 연계를 위한 인터페이스, (4)사용자 편의를 위한 기능 등이 있다. 모의수행을 위한 유역내의 고도자료, 하도망 자료,

지표면 조도계수, 토양군별 특성자료 등의 분포형 자료를 구축하고, 모의수행에 필요한 여러가지 선택사항들을 손쉽게 입력할 수 있고, 연계된 모형을 수행할 수 있다. 그림 22~24는 모의를 위한 격자형 입력자료 구축을 위한 메뉴이고, 그림 25~27은 확정론적 모의와 Monte Carlo 모의를 위한 입력자료를 위한 메뉴이다. 그림 28과 그림 29는 모의수행 과정과 모의결과 중 하나인 침투량을 도시한 그림이다.

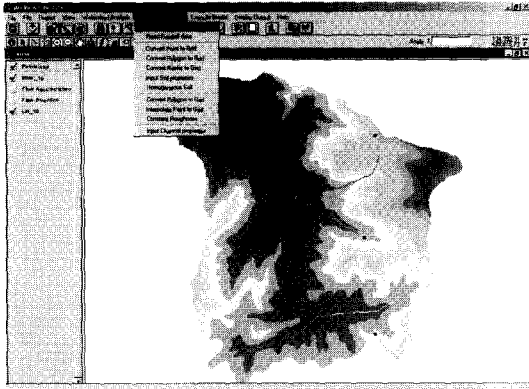


그림 22. 우량계 위치자료

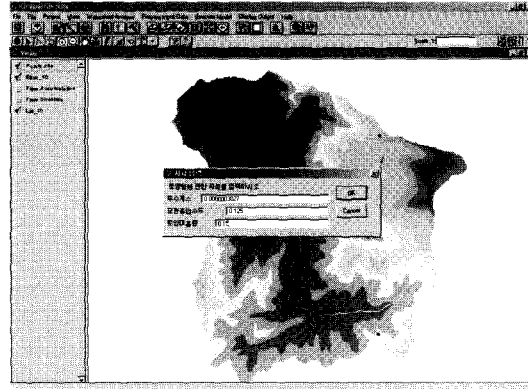


그림 23. 토양별 특성자료 입력

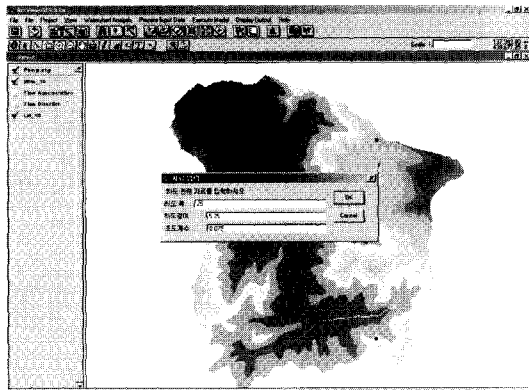


그림 24. 하도망 특성자료 입력

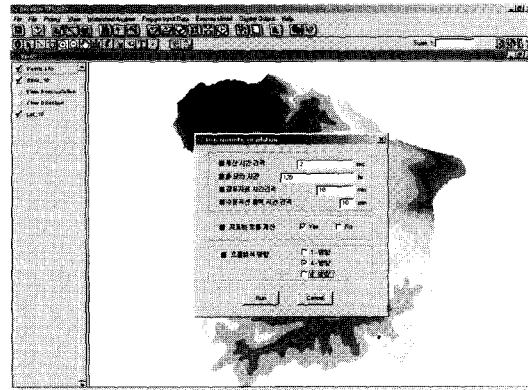


그림 25. 확정론적 모의를 위한 메뉴

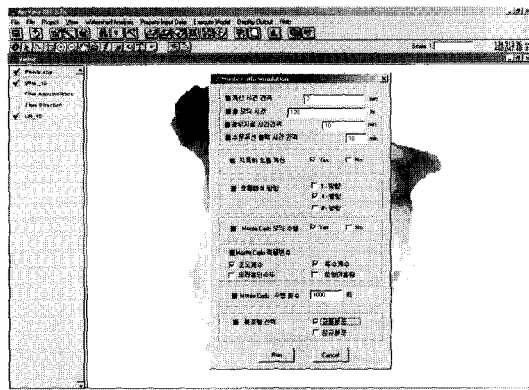


그림 26. Monte Carlo 모의를 위한 메뉴

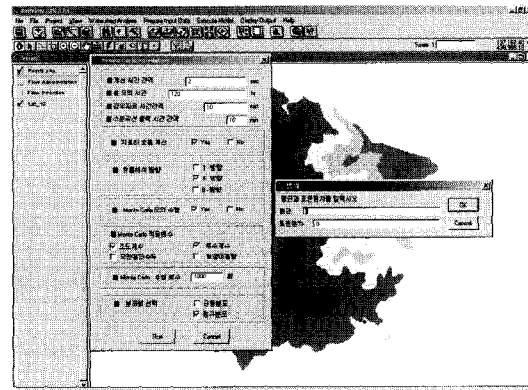


그림 27. 확률분포형 자료 입력 메뉴

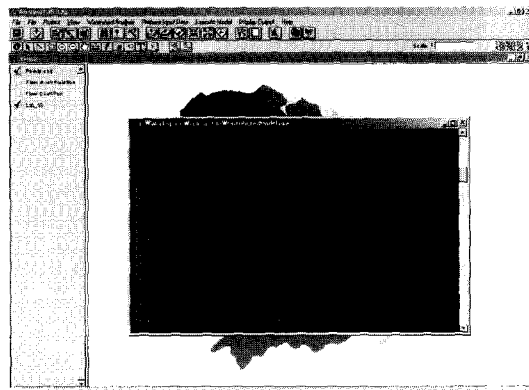


그림 28. ArcView와 연계한 모형의 수행

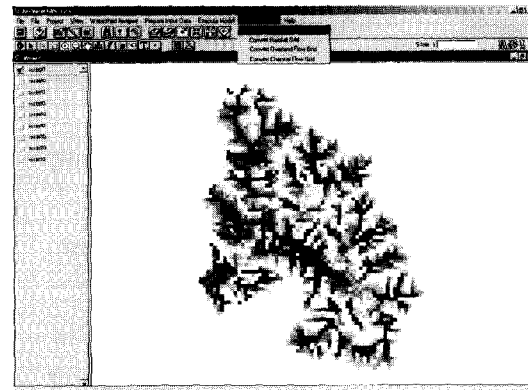


그림 29. 결과의 출력 (침투량)

## 5. 결 론

본 연구(II)에서는 연구(I)에서 개발한 2차원 분포형 모형을 검증하기 위해 일방향 기상유역 및 이방향 부채꼴 유역에서 지표류에 대한 강우-유출 해석을 실시하였고, 그 결과를 실험치와 비교하였다. 유역 출구부에서의 계산된 유출수문곡선은 실험치와 비교적 잘 일치하고 있었다. 모형의 매개변수 불확실도를 파악하기 위해 불투수성 기상유역에 대한 Monte Carlo 모의를 수행하여 불투수 조건하에서의 조도계수의 영향을 파악하였다.

또한, 연구모형의 실제 유역에 대한 적용성을 검증하기 위하여 유역면적이  $8 \text{ km}^2$ 인 설마천 유역과 유역면적이  $33 \text{ km}^2$ 인 동곡 유역에 대하여 적용하였고, 실제 유출사상과 비교하였다. 모의수행의 결과는 관측치와 비교적 잘 일치하였다. Monte Carlo 모의 수행 결과를 통해 매개변수의 불확실도를 정량화하여 제시하였다. 또한, 모의수행에 있어 흐름방향의 선택에 따른 모의결과값을 비교하여 정량화하였다.

본 연구모형은 강우-유출과정 중에서 지표류 및 조기지표하 유출에 중점을 두고 유출구에서의 유출량 산정에 그 초점을 맞추었다. 실제 수문학적 유출과정은 지하수 유출과 무강우 기간의 투수계수의 변화, 증발산 등의 복잡한 과정을 동시에 포함하고 있으므로, 향후 이에 대한 연구가 지속적인 실측자료의 수집과 함께 수행되어야 할 것으로 판단되었다. 본 연구에서 제시한 흐름방향에 따른 영향에 관한 연구가 계속되어질 필요가 있고, 실제 유역의 적용과정에서 나타난 각 방법간의 차이를 규명할 필요가 있다.

본 연구에서 제안한 2차원 분포형 모형은 실시간 강우-유출해석 및 예보에 사용될 수 있으며, 유역단위 홍수조절에도 기여 할 수 있을 것으로 사료되며, 향후 비점원 오염물의 이송·확산이나 산지유역 유사량 산정에 관한 연구 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-2-1)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

건설부 (1992). **국제수문개발계획(IHP) 연구보고서**, 제7장.  
건설부 (1993). **국제수문개발계획(IHP) 연구보고서**, 제7장.  
한건연, 이재영, 최현상 (2002). “지표홍수류 해석을 위한 2차원 유한요소모형의 개발”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제22권, 제4-B호, pp. 421-428.

한국건설기술연구원 (1995~2001). **시험유역의 운영 및 조사·연구**

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986). “An introduction to the European hydrological system-Système Hydrologique Européen(SHE), 2 : Structure of a physically based, distributed modeling system.”, *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 45-59.

Beven, K.J. (1989). “Changing ideas in hydrology—the case of physically-based models.”, *Journal of Hydrology*, Vol. 105, pp. 157-172.

Dickinson, W.T., Holland, M.E., and Smith, G.L. (1967). “An experimental rainfall-runoff facility”, *Hydrology Paper*, No. 25, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

ESRI (1998). *Advanced ArcView GIS*, ESRI

ESRI (1998). *Programming with Avenue*, ESRI

Kawahara, M. and Yokoyama, T. (1980). “Finite element methods for direct runoff flow.”, *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 106, No. HY4, pp. 519-534.

Molnar, D.K. and Julien, P.Y. (2000). “Grid-Size effects on surface runoff modeling.”, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 8-16.

Ogden, F.L., Sharif, H.O., Senarath, S., Smith, J.A., Baech, M.L., and Richardson, J.R. (2000). “Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997.”, *Journal of Hydrology*, Vol. 228, pp. 82-100.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Miller, N. (1983). “Green-Ampt infiltration parameters from soils data.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 1, pp. 62-70.

Saghafian, B. and Julien, P.Y. (1995). “Time to equilibrium for spatially variable watersheds.”, *Journal of Hydrology*, Vol. 172, pp. 231-245.

Woolhiser, D.A. (1975). “Simulation of unsteady overland flow”, *Chapter 12, Unsteady Flow in Open-Channels*, Edited by K. Mahmood and V. Yevjevich, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.

(논문번호:03-79/접수:2003.09.26/심사완료:2004.03.29)