

# 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형의 개발(Ⅲ)

- 자료의 구축 및 모형의 적용 -

## Development of a Cell-based Long-term Hydrologic Model Using Geographic Information System(Ⅲ)

- Data Construction and Model Application -

정 하 우\* · 최 진 용\*\* · 김 대 식\*\*\*  
Chung, Ha Woo · Choi, Jin Yong · Kim, Dae Sik

### Summary

A CELTHYM(CELL-based Long-Term HYdrologic Model), a pre-processor and a post-processor that can be integrated with geographic information system(GIS) were developed to predict the stream flow of the small watershed. The CELTHYM was calibrated and verified with measured runoff data at the WS#1 and WS#3 that are testing watersheds of Seoul Nat'l Univ., dept. of agricultural engineering, in Ansan city, Kyunggi province, South Korea. The results of tests are in good agreement with measured data and usable for other application, but the component of direct runoff and water balance on paddy fields need more study.

### I. 서 론

농촌에서의 수자원 개발은 주로 관개를 위한 농업용수 공급에 목적을 두고 개발되어 왔으나 최근에는 농촌지역의 환경개선과 소득향상을 위해 다양한 용수 수요를 고려하여 개발하고 있다. 따라서 이제 농촌에서의 수자원

개발은 관개용수 뿐만 아니라, 농촌 주민의 생활용수, 가축의 사양을 위한 축산용수, 농공 단지에 공급할 공업용수, 하천의 생태계 보전, 오염 방지와 오폐수의 희석을 위한 환경용수와 같은 다양한 용수 수요를 충족할 수 있어야 한다. 그러나 이러한 수요의 증가에 비해 가용 수자원은 수질 악화 등으로 인하여 상대

\* 서울대학교 농업생명과학대학

\*\* 서울대학교 농업개발연구소

\*\*\* 서울대학교 대학원

키워드 : 장기유출모형, 수문모형, 지리정보시스템

적으로 감소하고 있을 뿐 아니라, 기상이변에 따른 한발과 폭우의 빈번한 발생으로 농어촌 용수의 안정적인 확보가 위협 받고 있는 실정이다. 이와 같이 제한된 수자원으로 다양한 물의 수요를 충족시키기 위해서는 유역의 용수수급 해석과 지역내 수자원 부족량의 파악이 필요하고, 이를 위하여 수자원 공급의 근원이 되는 유역의 수수량을 포함한 물수지 파악이 선행되어야 할 것이다.

따라서 본 논문의 제3보에서는 제1보에서 개발된 장기유출 모형 CELTHYM(CELL-based Long-Term HYdrologic Model)과 제2보에서 개발된 입력자료 작성 전처리 시스템, 유역수문량의 공간적 현황 파악이 가능한 후처리 시스템의 적용성을 검토 하는데 목적이 있다.

## II. 자료의 구축 및 처리

### 1. 대상지구

본 연구에서 개발된 장기유출모형, CELTHYM의 보정과 검정을 위한 대상유역으로는 경기도 안산시 반월동에 위치한 서울대학교 농공학과 농지공학연구실의 반월시험유역을 선택하였다. 반월 유역의 북쪽은 군포시, 남쪽은 매송면, 동쪽은 수원시, 서쪽은 안산시와 접하고 있고, 개발제한 구역으로서 산림, 농경지의 훼손이 적으며, 자연부락이 산재되어 있는 전형적인 농촌유역이다. 반월 유역은 Fig. 1과 같이 여러개의 유역으로 분할되어 있으나, 본 연구에서는 WS#1 유역과 WS#3 유역의 일유출 자료를 이용하였다. 기상자료는 유역에서 8km 정도 떨어진 수원 측후소의 자료를 이용하였다.

### 2. 대상지구의 도형 자료 구축

본 연구에서 개발된 일유출모형의 적용을 위해서는 격자자료 형태의 고도자료, 토양자

**Table-1. Summary of runoff data used and weather data measuring station for model application**

Watershed		Weather data measuring station	Runoff data period and used	
			Calibration	Verification
Banwol	WS#1	Suwon	1986(4.1~9.30)	1987(4.1~9.30)
	WS#3	Suwon	1986(4.1~9.30)	1988(3.13~9.30)

**Table-2. Watershed characteristics**

Characteristics	Watershed	
	WS#1	WS#3
Areas(ha)	275	480
Stream length(km)	3.83	3.85
Shape factor	0.19	0.32
Relief ratio(m/m)	0.021	0.113
Channel slope(m/km)	13.77	31.4
Channel frequency (No. of channel/km <sup>2</sup> )	0.36	1.45

료, 토지이용자료가 필요하다. 이와 같은 자료를 구축하기 위하여 본 연구에서는 Table-3과 같이 국립지리원 1 : 25,000지형도와 국립식물환경연구소의 정밀토양도로 부터 등고선, 토지이용, 토양특성자료를 추출하여 벡터자료로 입력한 후 이를 격자자료로 변환하여 사용하였다. 본 연구에서는 자료의 구축과 처리를 위하여 GIS 소프트웨어인 ARC/INFO를 사용하였다.

#### 가. 격자고도자료(DEM)

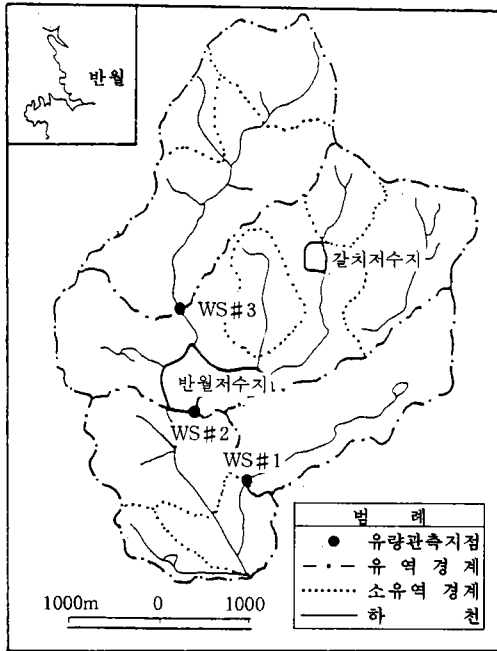
격자고도자료를 구축하기 위해서는 여러단계의 작업과정을 필요로 한다. Fig. 2와 같이 먼저 지형도로 부터 등고선을 트레이싱한 후, 이를 스캐닝하여 이미지 자료로 변환한다. 이때 복잡한 자료나 노이즈가 입력된 경우에는 별도의 래스터에디팅 작업을 필요로 한다. 스캐닝된 이미지자료를 벡터라이저를 이용하여 벡터자료로 변환한 후 실제 좌표계로 투영을 실시한다. 이 후 다시 한번 벡터자료 수정을 거친다. 수정된 벡터자료는 속성값을 입력한

**Table-3. Map source and extracted data**

Map	Data source	Scale	Vector map	Grid data
Topographic map	National Geographic Institute	1:25,000	Contour	DEM
			Land cover/use	Landuse
Soil map	National Plant Environmental Institute	1:25,000	Soil characteristics	Soil texture
			Drainage condition	Effective soil depth

**Table-4. DEM and grid data description**

Watershed	Number of grid with data	Grid size ( $\Delta x, \Delta y$ )	Number of col.	Number of row
WS#1	3053	30m	91	85
WS#3	1892	50m	53	68

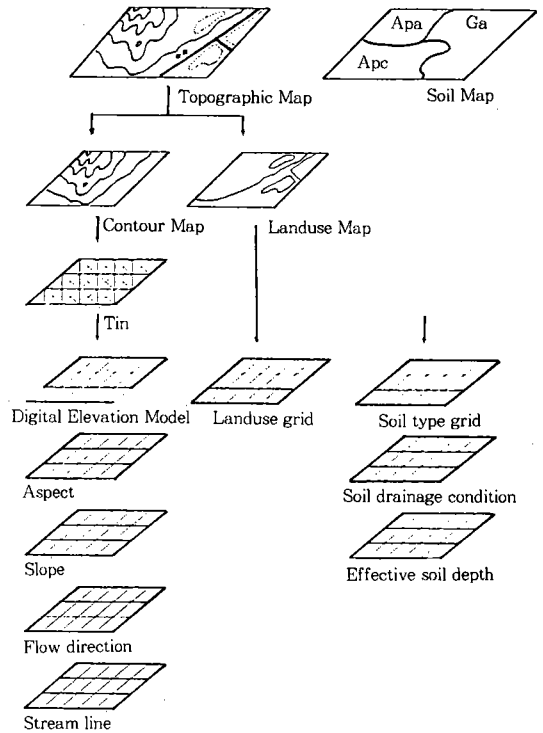


**Fig. 1. Location map of Banwol watershed**

다. 입력된 자료는 GIS에서 격자고도자료 (DEM)로 변환되어 본 연구에서 개발된 전처리 시스템의 입력자료로 사용된다.

**나. 격자자료**

토지이용도는 1 : 25,000 지형도에서 논,



**Fig. 2. Digital map construction procedure in GIS**

밭, 산림, 기타 및 주거지 등으로 분류하여 트래이싱한 후, 이를 스캐닝하여 벡터자료로 변환하여 벡터의 오류를 수정하고 속성을 입력하여 작성하였다. 토양도는 1 : 25,000 정밀도 양도를 트래이싱한 후, 이를 스캐닝하여 벡터자료로 변환하여 벡터의 오류를 수정하고 토양 속성을 입력하여 작성하였다. 입력된 자료는 GIS에서 격자자료로 변환되어 본 연구에서 개발된 전처리 시스템의 입력자료로 사용된다.

**3. 입력 도형 자료의 전·후처리**

모형을 보정하기 위하여 본 연구에서 개발된 자료의 전처리 시스템을 이용하여 입력자료를 작성하였으며, 모형의 계산결과는 후처리 시스템을 이용하여 처리하였다.

### III. 장기유출모형의 보정

본 연구에서는 보정 매개변수가 적으므로 시행착오법에 의하여 모형을 보정하였다. 개발된 일단위 유출모형은 초기조건으로서 토양 수분과 기저 유출심(Z)을 결정하여야 하며, 매개변수 보정은 기저유출을 계산하는 공식의 유출율(K)과 토양의 수분 저류량을 조절하는 토양수분저류계수(STC)를 보정하였다.

모형을 보정하기 위해서는 실측치와 계산치의 일치정도를 파악할 수 있는 기준이 필요하다. 이러한 기준은 통계적으로 설정하는 방법과 실측치와 계산치를 도표로 표시하여 결정하는 방법 등이 있을 수 있다. 본 연구에서는 실측 유출량과 모의 발생된 유출량의 일치 정도와 모형의 정확성을 판별하기 위해서 3가지의 통계적 변량을 이용하였다. 통계적인 연관성과 유의성을 판단하기 위한 기준으로는 실측치와 계산치와의 회귀분석에 의해 계산되는 결정계수( $R^2$ )를 사용하였고, 모형의 정확성을 파악하기 위한 기준으로는 Nash와 Sutcliffe(1970)<sup>10</sup>)가 제안한 모형의 효율(model efficiency,  $E^2$ )을 이용하였으며, 절대적인 오차 정도를 계산하기 위해서 RMSE를 이용하였다. Nash와 Sutcliffe가 제안한 모형의 효율을 계산하는 방법은 식 (1)과 같다.

$$E = \frac{\sum(\bar{Q}_o - Q_o)^2 - \sum(Q_c - Q_o)^2}{\sum(\bar{Q}_o - Q_o)^2} \dots\dots (1)$$

위에서  $Q_o$ 는 측정치,  $\bar{Q}_o$ 는 측정치의 평균,  $Q_c$ 는 계산치이다. 만약에 측정치와 계산치가 완벽하게 일치하면  $E^2$ 는 1.0이며,  $E^2$ 의 값이 0과 1.0사이에 있으면 계산치를 사용하는 것이 측정치의 평균을 사용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있는 정도를 나타내며, 음의 값을 나타내면 모형의 계산능력이 나쁘므로 계산된 값보다는 실측치의 평균값을 사용하는 것이

효과적이거나 실측 자료가 좋지 않은 것을 나타낸다.

본 연구에서는 매개변수인 유출율 K와 토양수분 저류계수 STC를 각각 0.06~0.9, 0.6~4.0까지 변화시키면서  $R^2$ 와  $E^2$ , RMSE, 실측 수문 곡선과의 일치되는 정도를 시각적으로 확인하여 최적치를 선정하였다. 보정순서는 먼저 STC를 1.0으로 고정시킨 후, 유출율 K를 변화시키면서  $R^2$ 와  $E^2$ 가 가장 크고, RMSE가 가장 작은 값을 선택한 후, K를 고정시키고 STC를 변화시키면서  $R^2$ 와  $E^2$ 가 가장 크고, RMSE가 가장 작은 값을 선택하였으며, 선택된 STC를 이용하여 다시 K를 보정하여 STC 최적치에서 K의 최적치를 만족할 때까지 반복하였다. 또한 장기유출모형은 무강우일의 유출이 중요하므로  $R^2$ 와  $E^2$ , RMSE를 일 유출량, 무강우일 유출량, 강우일 유출량에 대하여 각각 계산한 후 최적치가 일치하지 않을 경우에는 무강우일의 값을 선택하였다.

#### 1. 기저유출 매개변수의 보정

기저 유출 매개변수 K를 보정한 결과는 다음과 같다. WS#1에서는 K증가에 따라  $R^2$ 와 RMSE가 동시에 증가하였을 뿐 아니라  $E^2$ 가 음의 값을 나타내어 최적치의 선택이 어려웠으나 일 유출량의  $R^2$ 의 값이 가장 크고, 모의 발생한 무강우일의 유출량 총합과 실측 무강우일 유출량의 총합의 차가 가장 작은 값을 나타냈으며, 그래프로 비교한 결과 양호한 결과를 나타낸 0.5를 선택하였으며, WS#3에서는  $R^2$ 와  $E^2$ 가 크고 RMSE가 작은 값을 나타낸 0.5를 선택하였다.

#### 2. 토양수분저류계수의 보정

STC에 대한 보정결과는 다음과 같다. WS#1에서는 K를 결정한 기준과 같은 조건에서  $R^2$ 가 가장 값이 크고 RMSE가 가장 작은 0.6

을 보정치로 선택하였으며, WS#3은 일 유출량, 무강우일 유출량, 강우일 유출량에 대하여 모두 R<sup>2</sup>와 E<sup>2</sup>가 가장 값이 크고 RMSE가 가장 작은 1.8을 보정치로 선택하였다.

### 3. 초기조건

장기유출모형은 수 개월에서 수년에 이르는 긴 시간동안의 유출량에 대하여 계산하기 때문에 큰 강우의 발생이나 시간이 경과함에 따라 자동으로 초기화 되거나 일정한 값에 수렴하게 된다.

모형의 운영시 초기조건은 사용자의 경험에 의존하거나 실측치를 이용하여 결정된다. 본 연구에서 개발된 장기유출모형은 토양수분과 기저 유출심의 초기조건이 입력되어야 하는데 실측된 자료가 없으므로 여러가지의 초기조건을 변화시켜 입력하면서 적절한 초기조건 값을 결정하였으며 유역의 모든 격자에 같은 값을 입력하도록 하였다.

#### 가. 초기 토양수분

초기토양수분의 결정을 위하여 초기토양수분조건을 총유효토양수분의 10%, 30%, 50%, 70%, 90%로 바꾸어 입력하며 토양수분과 유출량의 변화를 살펴보았으며, 서로 다른 초기치라 할 지라도 모형의 운영중에 일정한 값에 수렴하는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 초봄에 해당하는 4월의 시기적 조건을 고려하고 극단적인 값을 피하여 중간값인 총유효수분량의 50%를 초기토양수분조건으로 선택하였다.

#### 나. 초기 기저 유출심

본 연구에서는 초기 기저 유출심 결정을 위하여 유역 평균 고도값으로부터 계산하도록 하였다. 즉 유역 평균 고도값의 1/5,000, 1/10,000, 1/15,000, 1/20,000, 1/30,000, 1/40,000의 값을 유역 초기 기저 유출심으로 바꾸어 입력하여 유출량의 변화를 살펴보았다. 초기 기저

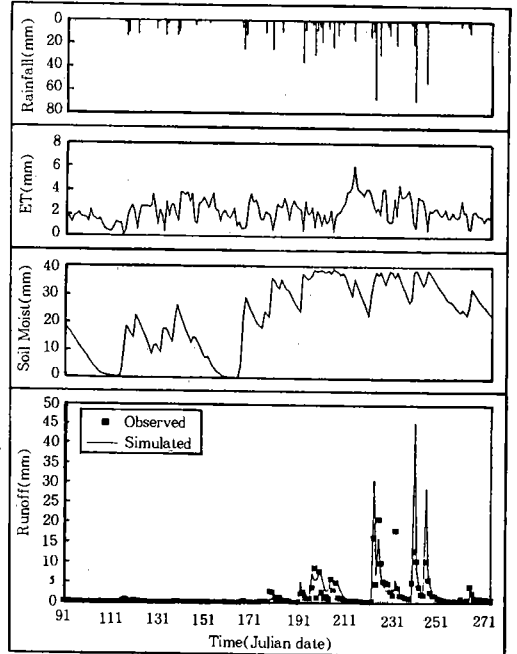


Fig. 3. Hydrograph of model calibration results in Banwol WS #1

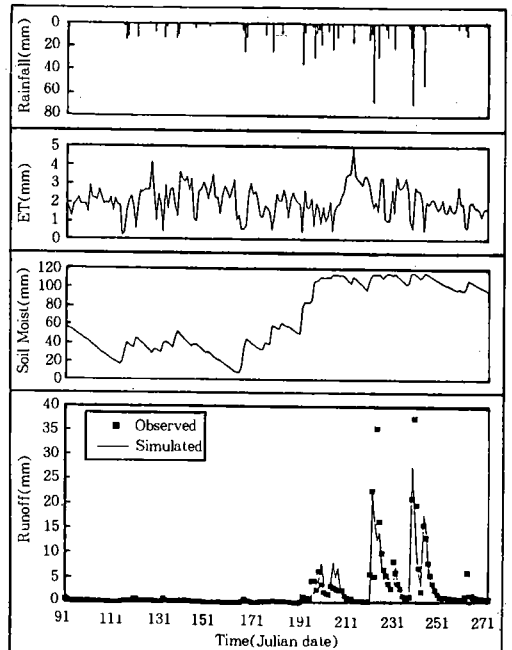


Fig. 4. Hydrograph of model calibration results in Banwol WS #3

**Table-5. CELTHYM calibration result**

Watershed	Total runoff			Runoff of no rainfall days			Runoff of rainfall days		
	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE
WS#1	0.578	-0.172	3.278	0.728	0.686	0.683	0.521	-0.512	5.550
WS#3	0.710	0.709	2.721	0.836	0.829	1.101	0.651	0.651	4.415

Watershed	Rainfall (mm)	Runoff(mm)						ET (mm)
		Total runoff		Runoff of no rainfall days		Runoff of rainfall days		
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	
WS#1	720.60	275.20	326.670	83.73	79.18	191.47	247.49	398.98
WS#3	720.60	382.14	319.70	136.17	104.311	245.98	215.39	374.91

유출심에 따른 유출량의 변화는 서로 다른 초기치라 할 지라도 모형의 운영중에 일정한 값에 수렴하는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 실측 수문곡선과 가장 잘 일치되는 유역평균고도값의 1/20,000의 값을 초기치 유출심으로 결정하였다.

이와 같이 위에서 결정된 초기조건과 유출을 K, 토양수분저류계수 STC를 이용하여 모형을 보정할 결과는 Table-5, Fig. 3, Fig. 4와 같다.

#### IV. 장기유출모형의 검정

##### 1. 모형의 검정

###### 가. 일 유출량

본 연구에서 개발된 장기 유출모형의 검정은 1987년 반월 WS#1, 1988년 반월 WS#3의 유출량 자료를 이용하였다. 모형의 검정은 이미 보정된 매개변수가 동일 유역의 다른 기간에 대하여 얼마나 일관된 결과를 모의 발생하여 주는가를 평가하는 것이다. 검정 방법은 모형의 보정에서 선정된 매개변수를 사용하여 유출량을 계산하고 R<sup>2</sup>와 E<sup>2</sup>, RMSE를 계산하여 보정치의 값과 비교하였다. 모형의 유역에 적용하여 검증한 결과는 Table-6, Fig. 5, Fig. 6과 같다.

반월 WS#1의 검정결과는 R<sup>2</sup>는 보정시 보

다 다소 작게 나타났으며 E<sup>2</sup>는 음의 값을 나타냈다. 이는 모의 발생한 유출량을 실측 유출량과 비교하여 유출의 경향이나 통계적 유의성은 인정되나 양적으로는 과다하게 계산된 것으로 분석할 수 있다. 하지만 무강우일 유출량은 Table-6에서 보는 바와 같이 비교적 실측치와 근사하게 계산됨을 알 수 있다.

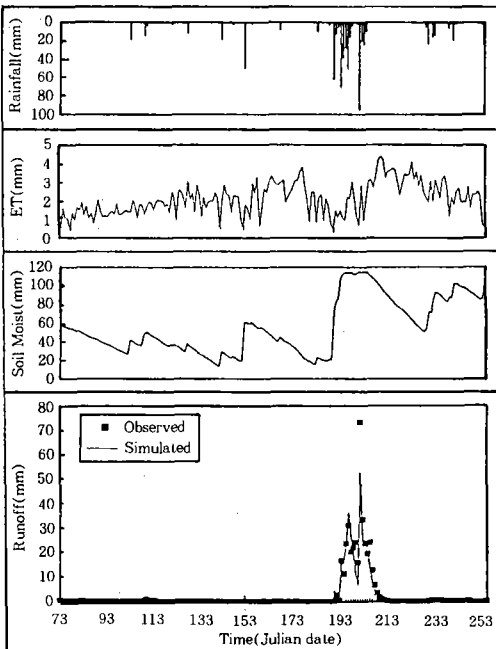
E<sup>2</sup>가 음의 값을 나타낸 것은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 강우의 발생이 큰 날에 모의 발생된 유출량의 값이 실측 유출량에 비하여 과대하게 계산되어 이로 부터 많은 오차가 발생하였기 때문으로 사려된다. 이를 물리적으로 살펴보면 반월 WS#1의 논 토지이용 비율이 35.4%로서 WS#3의 11.5%보다 3배 이상 크고, 실제로 논은 물꼬의 높이가 있어 이에 의하여 소류지 역할을 할 수 있으므로 사실상 유출이 예상보다 적게 발생할 수 있을 뿐 만 아니라 영농방식이나 시기에 따라 논물 가두기와 낙수가 반복적으로 행해지므로 논으로부터의 유출을 정확하게 해석하기는 한계가 있을 것으로 사려된다. 따라서 강우일의 유출량 모의발생 결과의 오차는 논에 대한 강우-유출 관계를 본 연구에서 개발된 장기유출모형이 적절히 모의 발생하여 주지 못한 결과임을 예견할 수 있을 것이다.

전체 강우량과 실측 유출량의 비를 살펴보면 다음과 같다. 반월 WS#1의 경우에는

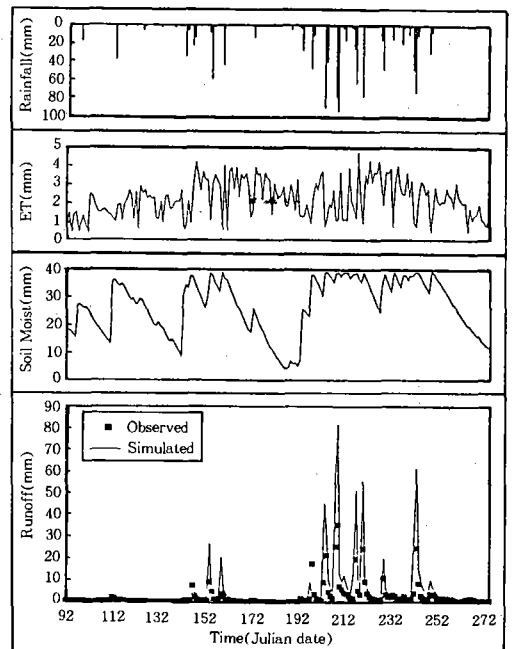
**Table-6. CELTHYM verification result**

Watershed	Total runoff			Runoff of no rainfall days			Runoff of rainfall days		
	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE
WS#1	0.398	-6.625	9.694	0.663	-0.595	1.482	0.300	-8.451	16.525
WS#3	0.922	0.908	2.229	0.958	0.781	1.399	0.928	0.917	3.475

Watershed	Rainfall (mm)	Runoff(mm)						ET (mm)
		Total runoff		Runoff of no rainfall days		Runoff of rainfall days		
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	
WS#1	1205.90	320.17	817.97	101.34	181.80	218.83	636.17	402.03
WS#3	1205.90	380.565	339.115	77.231	49.24	303.33	289.87	417.37



**Fig. 5. Observed and simulated runoff of model verification results in Banwol WS#1**



**Fig. 6. Observed and simulated runoff of model verification results in Banwol WS#3**

1987년도에 모의 발생 기간 동안 1,200mm 내외의 강우가 발생하였으나 실측 유출량은 320mm 내외로 나타나 880mm 정도가 유역 내에서 증발산량이나 지하수 함양, 토양수분 증가 등으로 사용된 반면, 모의 발생된 유출량은 817mm 정도가 계산되어 유출량의 차이도 비교적 크게 나타났음을 알 수 있다. 하지만 발생한 유출량의 대부분은 Fig. 5와 같이

폭우시 발생한 직접유출량에 기인한 것이고 수문곡선의 감수부는 모의 발생 수문곡선과 실측 유출량의 감수부가 같은 정도로 하강하므로 기저유출의 모의 발생은 적절히 계산됨을 알 수 있다.

반월 WS#3의 검정 결과는 Table-6에서와 같이 R<sup>2</sup>와 E<sup>2</sup>가 0.922, 0.908로 나타나 보정시 보다 향상된 결과를 보여 주었다. 유출량

에서도 모의 발생치와 실측치 380mm에 근사한 339mm로 나타나 본 연구에서 개발된 장기유출모형은 WS#3 유역과 같이 논의 토지 이용 비율이 적고 산림이 많은 농촌의 소유역과 기저유출의 계산에는 비교적 안정적으로 운영됨을 평가할 수 있었다.

무강우일의 유출은 양적으로는 강우일의 유출에 비하여 적으나 이수 목적에 이용되는 유출량이므로 장기유출 모형에서는 중요한 의미를 가지는 결과이다. 따라서 검정 결과에서 살펴보면 무강우일의 유출량에 대하여 실측치와 모의 발생된 값의  $R^2$ 와  $E^2$ 가 전체 유출량이나 강우일의 유출량에 비하여 크고 RMSE

는 작게 계산되었다. 따라서 본 모형은 기저유출의 모의 발생에 적절히 이용될 수 있다고 평가할 수 있다.

또한 장기유출 모형의 실측치에 대한 모의 발생치의 산포도를 나타내면 Fig. 7, Fig. 8과 같다. 그림에서 살펴보면 WS#1의 경우 보정시와 검정시의 산포도는 비슷한 형태를 나타내어 보정과 검정에서 일관된 결과를 나타낼 수 있으며, WS#3의 경우에는 산포도의 형태는 서로 다르게 나타났으나 1:1 선상에서 크게 벗어나지 않는 것으로 보아 본 연구에서 개발된 장기유출모형의 모의 발생은 유용한 결과임을 알 수 있었다. 또한 산포도

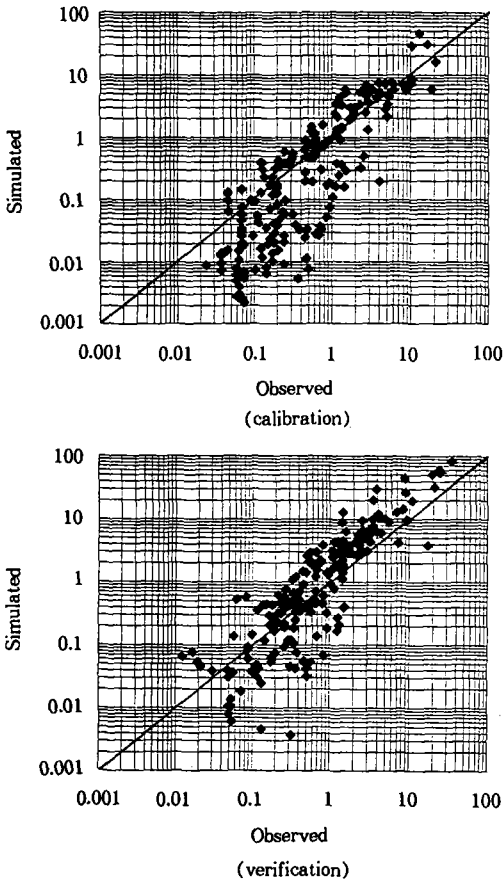


Fig. 7. Scattering diagram of observed and simulated runoff in WS#1

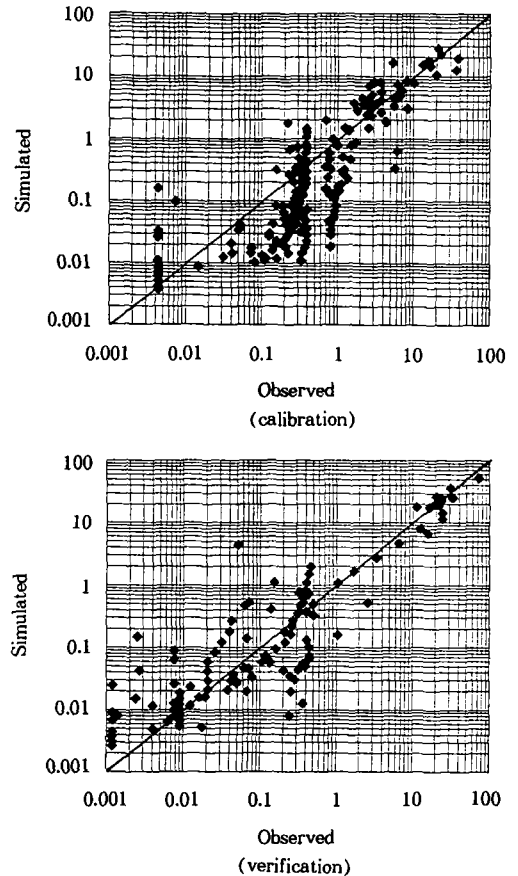


Fig. 8. Scattering diagram of observed and simulated runoff in WS#3



에서 보면 WS#1의 보정과 검정에서, WS#3은 보정에서 갈수기때의 유출량이 1:1 선의 아래 쪽에 집중적으로 분포하여 실측치에 비해 모의발생치가 적게 산정되는 것을 알 수 있으며 갈수기때의 유출량에 대한 보완과 보정에 대한 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

**나. 강우일의 유출량**

SCS CN법에 의하여 산정하는 강우일의 유출은 그 양이 클 뿐 아니라 강우에서 직접유출을 제외한 양은 침투량으로 계산되어 토양수분에 직접적인 영향을 미치므로 정확히 산정되어야 한다. 강우일의 유출은 SCS법에 의하여 결정론적으로 계산될 수 있으나 본 연구에서는 CN 값을 계산하는 선행토양수분조건을 토양수분의 함수로 표현하였으므로 이에 대한 타당성을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 직접유출이 발생하는 강우발생일에 대하여 본 연구에서 개발된 유효 토양수분에 의해 조정된 CN, SCS 선행강우조건에 따른 CN에 의해 계산된 유출량을 비교하여 검토하였다. 그 결과 WS#1에서는 Table-7과 같이 총 유출량과 강우일의 유출량, 무강우일의 유출량

**Table-7. Comparison of runoff for CN calculation methods in Banwol WS # 1**

SCS CN calculation method.	Total runoff (mm)	Runoff of no rainfall days (mm)	Runoff of rainfall days (mm)
Observed	320.17	101.337	218.830
Adjust with soil moisture	817.97	181.808	636.167
SCS CN	817.59	209.74	607.851

이 모두 실측치 보다 두 방법 모두 크게 나타났다. 하지만 무강우일의 유출량은 토양수분에 의해 조정된 CN은 비교적 실측치에 조금 더 가깝게 모의 발생하여 주었으나 SCS CN의 선행강우조건에 의한 방법은 그 값이 크게 나타났으며, Table-8에서 살펴보면 본 연구의 CN 계산 방법에 의해 E<sup>2</sup>가 크게 향상된 결과를 보여 주어 기저유출량 산정에 개선된 결과를 보여 줌을 알 수 있었다. WS#3에서는 두 방법간에 유출량 뿐만 아니라 R<sup>2</sup>, E<sup>2</sup>와 RMSE도 근소한 차이를 보여 주었으나, 두 유역 모두 본 연구에서 제시한 방법에 의해 계산된 결과가 보다 나은 결과를 보여 줌을 알 수 있다.

**Table-8. Comparison of R<sup>2</sup>, E<sup>2</sup> and RMSE for CN calculation methods in Banwol WS # 1**

SCS CN calculation method.	Total runoff			Runoff of no rainfall days			Runoff of rainfall days		
	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE
Adjust w/ SM	0.398	-6.625	9.694	0.663	-0.595	1.482	0.300	-8.451	16.525
SCS CN	0.390	-6.711	9.749	0.578	-2.021	2.040	0.301	-8.426	16.504

**2. 예민도 분석**

모형의 보정에서 선택된 최적 매개변수 값의 변화에 대한 모형의 반응과 유출량의 변화를 파악하기 위하여 예민도 분석을 실시하였다. 예민도 분석은 매개변수 변화에 대한 적합도 기준으로서 유출량에 영향을 미치는 중요 매개변수와 모의발생 결과를 분석하는데 도움을 준다. 특히 모형 매개변수의 예민도는

**Table-9. Comparison of runoff for CN calculation method in Banwol WS # 3**

SCS CN calculation method.	Total runoff (mm)	Runoff of no rainfall days (mm)	Runoff of rainfall days (mm)
Observed	380.57	77.23	303.33
Adjust with soil moisture	339.12	49.24	289.87
SCS CN	337.91	48.32	289.59

모형의 구조에 종속되어 있으므로 이는 모형

**Table-10. Comparison of R<sup>2</sup>, E<sup>2</sup> and RMSE for CN calculation method in Banwol WS#3**

SCS CN calculation method.	Total runoff			Runoff of no rainfall days			Runoff of rainfall days		
	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	RMSE
Adjust w/ SM	0.922	0.908	2.229	0.958	0.781	1.399	0.928	0.917	3.475
SCS CN	0.910	0.899	2.329	0.953	0.767	1.442	0.916	0.909	3.650

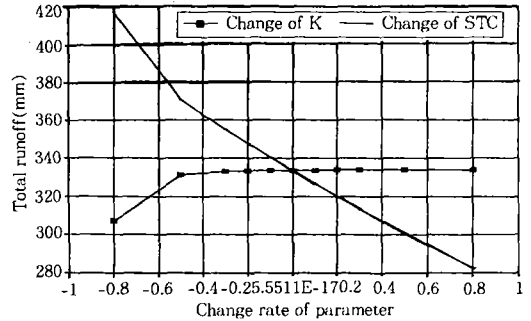
구조의 정량적 지표와 유역의 수문반응을 나타내기 위한 모형 능력의 지표로 사용될 수 있다. 따라서 예민도 분석의 결과를 이용하여 오차분석과 매개변수가 모형의 출력에 미치는 정도를 파악할 수 있을 것이다. 예민도 분석은 본 연구에서 개발된 CELTHYM의 매개변수인 K와 STC에 대하여 실시하였으며, 총유출량, 무강우일의 유출량, 강우일의 유출량으로 분류하여 각각의 매개 변수가 직접유출량과 기저유출량에 미치는 영향과 정도를 알 수 있도록 하였다. 예민도 분석은 총유출량과 강우일의 유출량, 무 강우일의 유출량에 대하여 좋은 결과를 나타낸 반월 WS#3의 보정결과에 대하여 실시하였다.

**가. 총유출량**

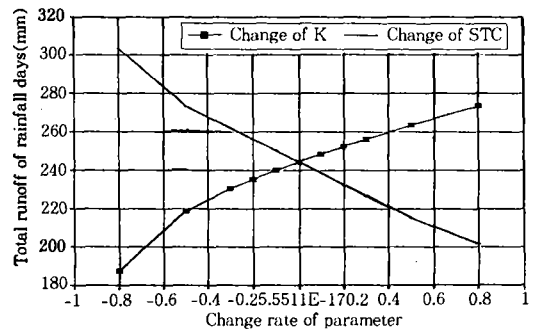
총유출량의 매개변수에 대한 예민도는 Fig. 9와 같다. 매개변수 K에 대한 총유출량의 변화는 K의 값이 0.0001 이상에서 큰 변화를 나타내지 않아 K의 변화에 대한 총 유출량의 변화는 둔감한 것으로 판단되었으나, 매개변수 STC에 대해서는 STC의 증가에 대하여 총 유출량이 비례적으로 감소함을 나타내어 총 유출량은 매개변수 STC에 보다 민감한 것을 알 수 있었다.

**나. 강우일의 유출량**

강우일의 유출량에 대한 매개변수 K와 STC의 예민도 분석 결과는 Fig. 10과 같다. 매개변수 K에 대해서는 K의 증가에 대하여 강우일의 유출량은 비례적으로 증가하였으나 STC에 대해서는 반비례하였다. 이는 K가 클수록 기저 유출심의 증가가 기저 유출에 지체



**Fig. 9. Sensitivity analysis for total runoff**



**Fig. 10. Sensitivity analysis for total runoff of rainfall days**

없이 나타나 강우일의 유출량의 증대에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, STC가 클수록 토양의 저류 능력이 커짐으로 인하여 강우의 침투율이 증가하여 직접유출이 적게 나타남을 보여 준다.

**다. 무강우일의 유출량**

무강우일의 유출량에 대한 매개변수 K와 STC의 예민도 분석 결과는 Fig. 11과 같다. 매개변수 K의 증가에 대하여 무강우일의 유출량은 반비례하였으며 STC에 대해서도 역시 반비례하였으나 그 민감한 정도는 K에 비하여 작게 나타났다. 이는 기저 유출심의 증가

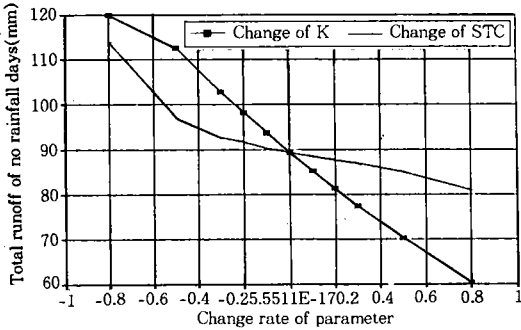


Fig. 11. Sensitivity analysis for total runoff of no rainfall days

에 따른 기저유출 증가량이 K가 클수록 강우일의 유출량으로 배제되는 양이 증가하고 이에 따른 기저 유출심의 감소로 무강우일의 유출량은 감소함을 알 수 있으며, STC가 클수록 토양의 저류 능력이 커짐으로 인하여 유효토심으로부터 지하배수량이 적게 발생하여 기저 유출이 적게 나타남을 보여 준다.

결국, 매개변수 K는 기저 유출량과 직접유출량을 직접적으로 조절할 수 있는 매개변수로서 이의 증가는 강우일의 유출량은 증가시키지만 무강우일의 유출량을 감소시켜 총 유출량에는 큰 변화를 주지 않는 것을 알 수 있다. 반면에 STC는 이의 증가가 토양의 수분저류 능력을 증대시켜 강우일의 유출량과 무강우일의 유출량을 모두 감소시키므로 인해 총유출량을 감소시킴을 알 수 있다. 이는 유효토심이 깊은 유역에서 유출이 적은 물리현상을 본 모형이 적절하게 재현하여 줄을 알 수 있으며, STC가 총유출량, 직접유출량, 기저유출량을 조절할 수 있는 중요 매개변수임을 보여 준다.

## V. 요약 및 결론

소유역의 일 유출량 추정을 위하여 지리정보시스템으로 부터 추출된 유역의 지상인자와 일 기상자료를 이용하여 유출량을 추정할 수 있는

격자형 장기유출 모형 CELTHYM(CELL-based Long-Term HYdrologic Model)과, 이 모형의 입력자료 작성을 위한 전처리 시스템, 출력자료의 처리를 위한 후처리 시스템을 개발하였다. 개발된 모형은 경기도 안산시 반월동 반월시험유역 WS#1, WS#3에서 적용성을 검토하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 개발된 장기유출모형 CELTHYM을 1986년 4월 1일 부터 9월 30일까지의 유출량 자료를 이용하여 기저유출의 유출율(K)와 토양수분저류계수(STC)를 보정하였으며, K는 WS#1, WS#3에서 0.5로 보정되었고, STC는 WS#1에서는 0.6, WS#3에서는 1.8로 보정되었다.

2. CELTHYM을 반월 WS#1에 대하여 1987년 4월 1일 부터 9월 30일까지의 유출량을 이용하여 검증한 결과,  $R^2$ ,  $E^2$ , RMSE가 0.398, -6.625, 9.694로 계산되었으며, 무강우일의 유출량에서는  $R^2$ ,  $E^2$ , RMSE가 0.663, -0.595, 1.482로 계산되어 무강우일의 유출량은 강우일의 유출량에 비하여 비교적 잘 모의 발생하여 줄을 알 수 있다. 반월 WS#3에 대하여 1988년 3월 13일 부터 9월 30일까지의 유출량을 이용하여 검증한 결과,  $R^2$ ,  $E^2$ , RMSE가 0.922, 0.908, 2.229로 계산되었으며, 보정시 보다 좋은 결과를 보여 주었다. 따라서 CELTHYM은 WS#3 유역과 같이 논의 토지이용 비율이 적고 산림이 많은 농촌의 소유역의 장기유출 계산에는 비교적 안정적으로 운영되는 것으로 평가할 수 있었다.

3. 본 연구에서 개발된 CELTHYM의 매개변수인 K와 STC에 대하여 예민도 분석을 실시한 결과, K가 클수록 무강우일의 유출량은 감소하고 강우일의 유출량은 증가하는 경향을 보여 총유출량에는 민감하지는 않았으나, STC는 값이 증가할 수록 유출량이 현저히 감소하고 무강우일의 유출량, 강우일의 유출량이 모두 감소하였다. 따라서 STC가 CELT-

HYM의 운영에 있어 민감하고 중요한 매개변수 임을 알 수 있었다.

4. 이와 같이 지리정보시스템을 이용한 격자형 일단위 장기유출모형을 개발하고, 이 모형을 이용하기 위한 자료의 전·후처리 시스템을 개발하여 적용한 결과, 유출량을 비교적 잘 재현해 주었으며, 효과적으로 유역 수문량의 공간적 분포를 파악할 수 있었다. 그러나 직접유출량의 과도한 모의 발생과 논의 물수지 등의 문제점을 보완되어야 할 것으로 사료되었으며, GIS와 통합·연계하여 수자원 관리 지리정보시스템 등에 운영할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 고덕구, 1989, 소유역 장기유출 예측을 위한 모의발생 수문모형의 개발, 서울대학교 박사학위 논문
2. 고재균, 정하우 외, 1993, 농어촌용수 이용 합리화계획 자료정보 D/B 구축연구(III), 농림수산부, 농어촌진흥공사
3. 노재경, 1991, 토양수분저류에 의한 일 유출량 유역 모형, 서울대학교 박사학위 논문
4. 박승우, 1984, 소유역 수문모형의 개발과 응용(I) -모형의 구성-, 한국농공학회지, Vol.26(2), pp.125-132
5. 정하우, 이정재, 이남호, 김성준, 최진용, 1995, 농어촌지역의 수자원시스템 계획을 위한 지리정보시스템의 활용, 한국 GIS 학회지, Vol.3(1), pp.39-46
6. 최진용, 1996, 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형의 개발에 관한 연구, 서울대학교 박사학위 논문집
7. Bergstr m, S., 1995, The HBV Model, Computer Models of Watershed Hydrology, Ed. Singh, V. P., Water Resources Publication, pp.452
8. Grayson, R. B., G. Bloschl, and I. D.

- Moore, 1995, Distributed Parameter Hydrologic Modelling using Vector Elevation Data:THALES and TAPWS-C, Computer Models of Watershed Hydrology, ed. Singh, V. P., Water Resources Publications, pp.669-696
9. Moore, I. D., J. C. Gallant, L. Guerra, and J. D. Kalma, 1993, Modelling the spatial variability of hydrological processes using GIS, HydroGIS 93: Application of Geographic Information System in Hydrology and Water Resources, IAHS Publ. no. 211, pp.161-169
10. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970, River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles, J. of Hydrology, Vol.10, pp.282-290
11. Refsgaard, J. C. and B. Storm, 1995, MIKE SHE, Computer Models of Watershed Hydrology, ed. Singh, V. P., Water Resources Publications, pp.809-846
12. Romanowicz, R., and K. Beven, J. Freer, and R. Moore, 1993, TOPMODEL as an application module within WIS, Hydro GIS 93: Application of Geographic Information System in Hydrology and Water Resources, IAHS Publ. no. 211, pp.211-223
13. Van Deursen, W. P. A., and J. C. J. Kwadijk, 1993, RHINEFLOW: an integrated GIS water balance model for the river Rhine, HydroGIS 93: Application of Geographic Information System in Hydrology and Water Resources, IAHS Publ. no. 211, pp.507-518
14. Zang, H., and C.T. Haan, 1990, Hydrologic modeling with GIS, ASAE, Vol.6(4).

(접수일자 : 1996년 11월 14일)