

현재까지 이루어진 국내에서의 GIS를 이용한 분포모형에 대한 연구는 초기단계에 있으며, 수치고도모형이나 수치지형모형(digital terrain model) 등에 의한 분포모형의 연구가 활발히 수행되어야 할 필요가 있다.

수치지형모형인 TOPMODEL은 유역의 강우에 대한 유출응답을 유역내 지하수위 및 토양내 흐름의 거동을 이용하여 유역사면의 분포특성으로 모의한 모형이며, 지형특성에 대한 해석이 주된 내용이 된다. 본 연구에서는 TOPMODEL의 국내 하천유역에 대한 적용성 검토에 주안점을 두었다. 이를 위해, 1995년부터 건설기술연구원에서 설치운영하고 있는 임진강수계의 설마천 시험유역을 선정하였으며 1/25,000지형도를 이용하여 기본수치지도를 작성하고, 50m의 grid로서 3차원 수치고도지도(digital elevation map)를 작성하였다. 수치고도 지도를 이용하여 지형지표인자(topographic index) 등의 공간적 분포해석을 실시하였으며, 1996년 설마천 유역의 강우 및 유량 측정성과를 이용하여 강우유출해석에 대한 TOPMODEL의 적용가능성을 검토하였다.

2. TOPMODEL의 기본이론

흙의 포화투수계수(saturated hydraulic conductivity)는 식 (1)과 같이 깊이에 대해 음의 지수함수로 나타낼 수 있다(그림 1 참조).

$$K_s(z) = K_o \exp(-fz) \quad (1)$$

여기서 z 는 토양내의 깊이, K_o 는 지표면에서 흙의 투수계수이고 전 유역에 대해서 일정하다. f 는 깊이 z 에 따른 K_s 변화를 나타내는 계수로서 전 유역에 대해서 일정하다. 포화층내의 동수경사는 유역의 지형경사(사면경사)로 표현할 수 있으며, 포화층내의 거동은 Darcy 법칙을 따른다.

$$q_i = T_i(z_i) \tan \beta_i \quad (\text{Darcy's Law}) \quad (2)$$

여기서 $\tan \beta_i$ 는 위치 i 지점에서의 지표면의 경사이고, $T_i(z_i)$ 는 투수량계수(transmissivity)이다. 그리고 q_i 는 단위폭당 유출량이다.

식 (2)의 $T_i(z_i)$ 의 값은 식 (1)을 적분하면 얻을 수 있으며, 식 (3)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} T_i(z_i) &= \int_{z_i}^{z(0)} K_s(x) dx \\ &= \frac{K_o}{f} [\exp(-fz_i) - \exp(-fz)] \\ &= \frac{1}{f} [K_s(z_i) - K_s(z)] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 z 는 포화구간의 기준면을 나타낸다.

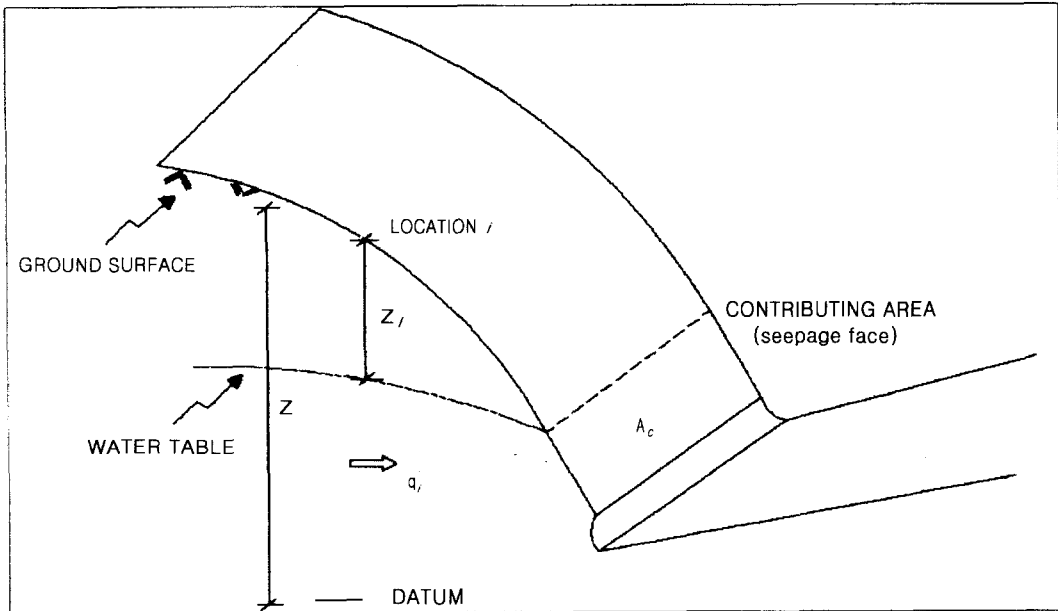


그림 1. TOPMODEL 구성도

일반적으로 깊이 z 가 클 때 포화투수계수 $K_s(z)$ 는 깊이 z_i 에서의 투수계수 $K_s(z_i)$ 에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i = \frac{K_0}{f} \tan \beta_i \exp(-fz_i) = T_0 \tan \beta_i \exp(-fz_i) \quad (4)$$

여기서 $T_0 = K_0/f$ 는 완전포화된 흙의 투수량계수이고, K_0 및 f 는 전유역에 대해서 일정한 것으로 가정하였다. 한편, 포화층내 흐름의 거동은 연속적인 정상상태로 표시할 수 있다.

$$q_i = a_i R = T_0 \tan \beta_i \exp(-fz_i) \quad (5)$$

여기서 R 은 지하수위로 유입되는 임의 시간에서 공간적으로 일정한 충전량이고, a_i 는 지점 i 를 통해 배수되는 단위등고선길이당 경사면의 면적이다.

식 (5)를 z_i 에 대해서 정리한 후, 전유역에 대한 평균치(\bar{z})를 구하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{z} = z_i - \frac{1}{f} \left[\lambda - \ln \frac{a_i}{T_0 \tan \beta_i} \right] \quad (6)$$

여기서 R 은 공간적으로 일정하다고 가정하였으며, $\ln(a_i/T_0 \tan \beta_i)$ 는 Beven의 토양지형지표이고, λ 는 식 (7)과 같다.

$$\lambda = \frac{1}{A} \sum \ln \frac{a_i}{T_0 \tan \beta_i} \quad (7)$$

투수량계수 T_0 가 일정하면 λ 는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda = \lambda^* - \ln T_0 \quad (8-1)$$

$$\lambda^* = E \left[\ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} \right] \quad (8-2)$$

여기서 $E[]$ 는 전유역에 대한 평균치를 나타낸다. 식 (8)을 식 (6)에 적용하면 식 (9)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} z_i &= \bar{z} - \frac{1}{f} \left[\ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} - (\lambda + \ln T_0) \right] \\ &= \bar{z} - \frac{1}{f} \left[\ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} - \lambda^* \right] \end{aligned} \quad (9)$$

즉, 식 (9)에서 알 수 있는 바와 같이 지하수위의 깊

이 z_i 는 인자 f 와 지형상수 $\ln(a/\tan \beta)$ 에 의해 결정할 수 있다. 따라서 \bar{z} 의 값이 주어지면, 식 (9)는 토양지형지표인 $a/T_0 \tan \beta$ 의 공간적 분포를 알고 있거나 또는 지형상수인 $a/\tan \beta$ 가 공간적으로 일정하다고 가정하여 전유역에 대한 지표수위 및 지하수위의 거동을 예측하는데 이용할 수 있다(Franchini 등, 1996). 한편, 토양지형인자 및 지형상수는 유역내 모든 흐름의 거동을 대표하는 인자로서, 동일한 값의 토양지형인자 및 지형상수를 갖는 모든 지점은 흐름의 거동이 같다는 것을 의미하므로 토양지형인자 및 지형상수의 값은 유역상호간의 수문학적 상사성을 판단할 수 있는 지표가 될 수 있다.

3. 지형특성분석

3.1 기본수치지도 작성

분석대상유역으로는 1995년부터 건설기술연구원에서 설치운영하고 있는 임진강수계의 설마천 시험유역을 선정하였으며, 1/25,000의 기본지형도를 이용하여 수치지도를 작성했다. 수치지도를 작성하는 개략적인 절차는 다음과 같다.

Scanner를 이용하여 기본지형도를 scanning한 후, vectorizing tool인 V-track(w/s용)을 이용하여 등고선 등을 vectorizing 한다. 그리고 autocad를 사용하여 각 등고선에 대한 표고값을 속성으로 부여함으로써 3차원 수치지도를 작성하였다(그림 2 참조). 그리고, 전술한 방법으로 만들어진 기본수치지

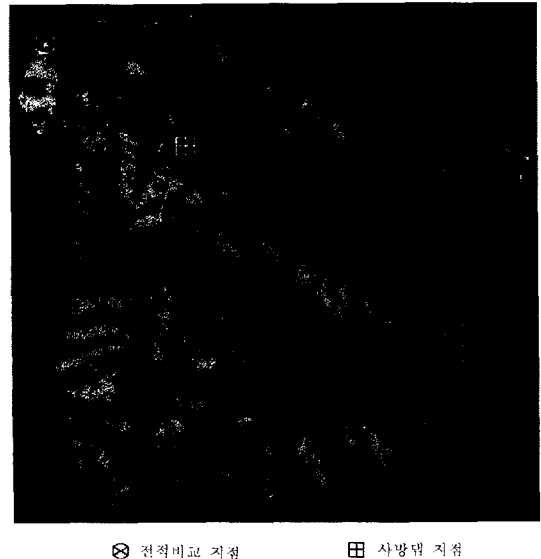


그림 2. 설마천 시험유역 유역도 (3-D Modeling)

도를 TOPMODEL에 적용시키기 위해서는 자료의 변형이 필요하다. TOPMODEL에서는 grid망으로 구성된 수치표고지도를 사용하고 있으므로, 50m의 grid에 대한 수치고도지도를 제작성하였다 (ARC/INFO활용).

3.2 지형지표인자 분석

TOPMODEL의 기본이론식 (9)에서 논의한 바와 같이, 토양내 지하수의 거동은 지형상수 $a/\tan\beta$ 또는

토양지형인자 $a/T_0\tan\beta$ 의 값에 의해 모의될 수 있다. 지형지수나 토양지형인자등은 수치지도의 해상도 및 Grid의 크기 등에 따라 적용상의 해석결과에 다소 차이를 나타내며, grid의 크기가 작을수록 적용성이 높은 것으로 알려져 있다. 설마천 유역내 사방댐지점(6.4 km²)과 전적비교지점(8.5 km²)에 대한 지형상수의 분포형은 그림 3 및 그림 4와 같다.

사방댐지점과 전적비교지점의 지형상수에 대한 평균

Selma-Cheon Catchment

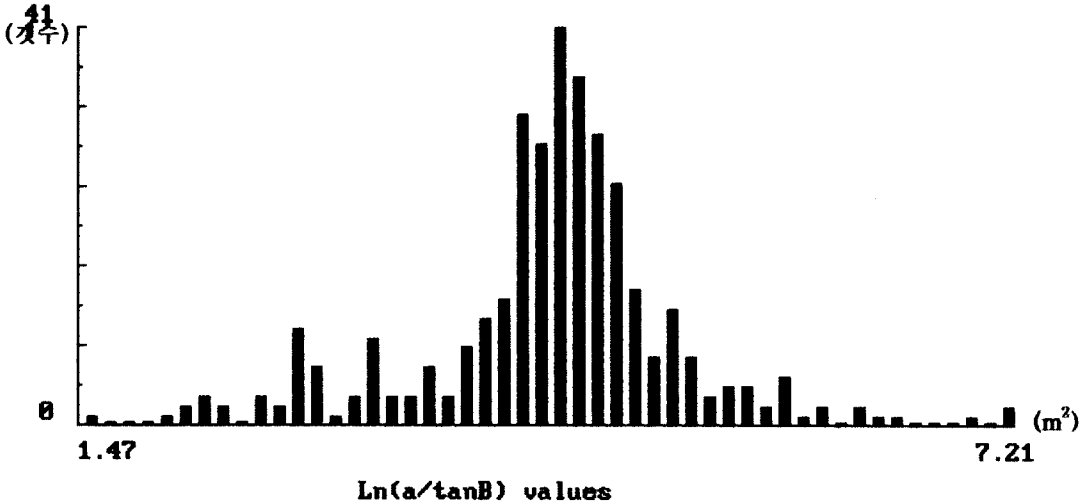


그림 3. 지형상수 분포도(사방댐 지점)

Selma-Cheon Catchment

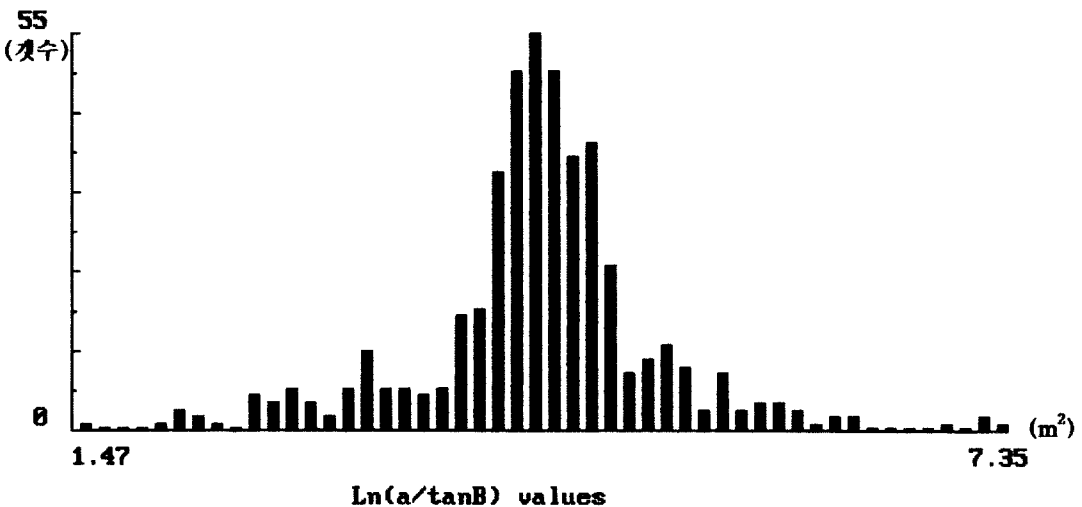


그림 4. 지형상수 분포도(전적비교 지점)

치는 4.25, 4.27이고 표준편차는 6.37, 6.74이다. 따라서, 두 유역의 지형상수 특성치가 서로 비슷하므로 두 지점에 대한 유역의 수문응답특성도 서로 상사성이 있을 것으로 판단된다.

4. TOPMODEL의 적용

4.1 대상유역 및 관측자료

설마천은 임진강 하구에서 약 46 km 상류인 경기도 파주시 적성면에 위치하고 있으며 전체 유역면적 18.5 km², 본류 유로연장 11.3 km인 소하천이다. 이 중에서 건설기술연구원에서 운영중인 시험유역은 유역 중류부의 전적 비교를 출구점으로하는 유역면적 8.5 km², 유로연장 5.8 km인 산지하천이다. 1/25,000 지형도를 이용하여 작성한 설마천의 기본수치지도는 그림 2와 같으며, 상류 유역은 유역면적 6.4 km², 본류 유로연장 3.5 km인 사방댐 유역이다. 본 연구에서 사용된 설마천 시험유역의 관측자료는 1996년에 강우 및 유출에 대한 관측이 처음 실시된 관계로 많은 자료를 획득할 수 없었다. 설마천 시험유역보고서(한국건설기술연구원, 1996)에 수록된 자료중 비교적 강우-유출의 관측 성과가 합리적이라고 판단되는 자료를 선택하여 본 모형의 적용성을 검토 하였다.

4.2 모형의 매개변수 결정

TOPMODEL은 전술한 바와 같이 토양내 지하수의 거동을 유역의 토양지형인자를 이용하여 모의함으로써 유역내 유출특성을 해석하는 모형이다. 지형지표인자는

표 1. 강우 유출사상별 최적매개변수

유역특성		f	$\ln(T_0)$	T_d	R_v	S_{max}	SR_0	비고
사방 댐	6/17~6/22	0.020	2.3	7.5	3600	0.05	0.002	저수 유출
	6/17~6/29	0.021	2.3	7.5	3600	0.05	0.002	
	6/26~6/29	0.022	2.3	8.0	3600	0.05	0.002	
전적 비교	7/26~7/29	0.013	1.7	50.0	3600	0.05	0.002	고수 유출

소유역이나 사면에서의 응답특성을 결정하는 주요변수이며, 지형지표인자를 비롯하여 본 모형을 이용한 유역 내에서의 물의 거동에 대한 모의에 영향을 주는 인자는 감소상수(f), 투수량계수(T_0), 비포화구간내의 지체시간(T_d) 등과 같이 모형에 포함된 변수와 주하천 및 소유역 하도내의 유속(R_v), 식생뿌리 구간내의 물 보유능력(S_{max}) 및 부족량(SR_0), 지표면상의 수리학적 투수계수 등을 변수로 고려할 수 있다. Beven(1996)은 본 모형의 주요 변수로서 감소상수, 투수량계수 비포화구간내의 지체시간, 주하천 및 소유역 하도내의 유속, 식생뿌리 구간내의 물 보유능력 및 부족량을 제안하였으며, 본 연구에서도 확인되었다.

따라서 주요변수를 중심으로 강우-유출사상에 대한 각 변수의 최적화를 실시하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 최적화는 각 변수의 민감도분석을 이용하여 모의된 전 수문곡선의 관측치에 대한 재현정도(Beven, 1996)로서 결정하였다. 여기서 재현정도(E)는 계산에 의해 모의된 전 수문곡선의 관측치에 대한 일치정도를 의미한다.

민감도 분석에 따른 매개변수 결정과정에 대한

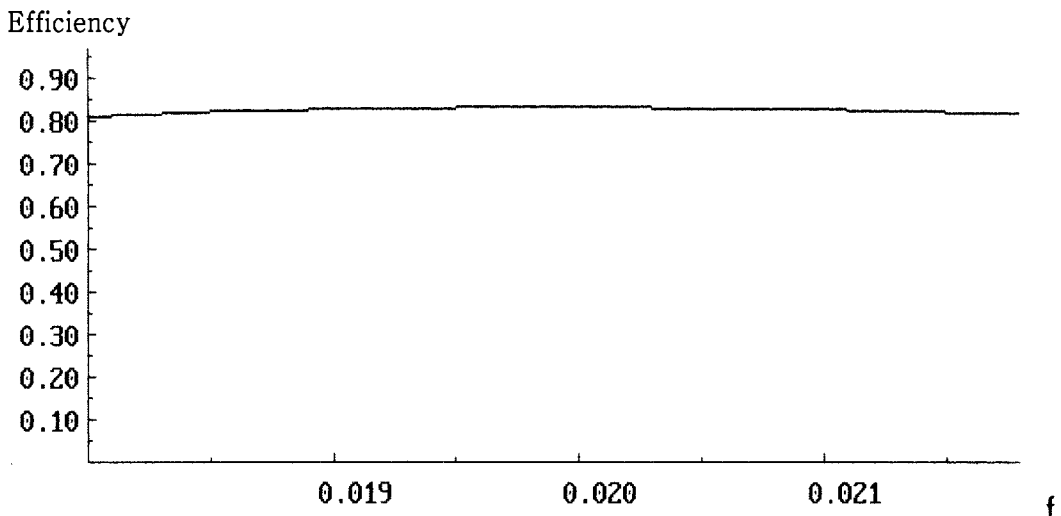


그림 5. 단일변수 감소상수(f)에 대한 대한 민감도 해석결과(저수유출 : 6/17~6/29)

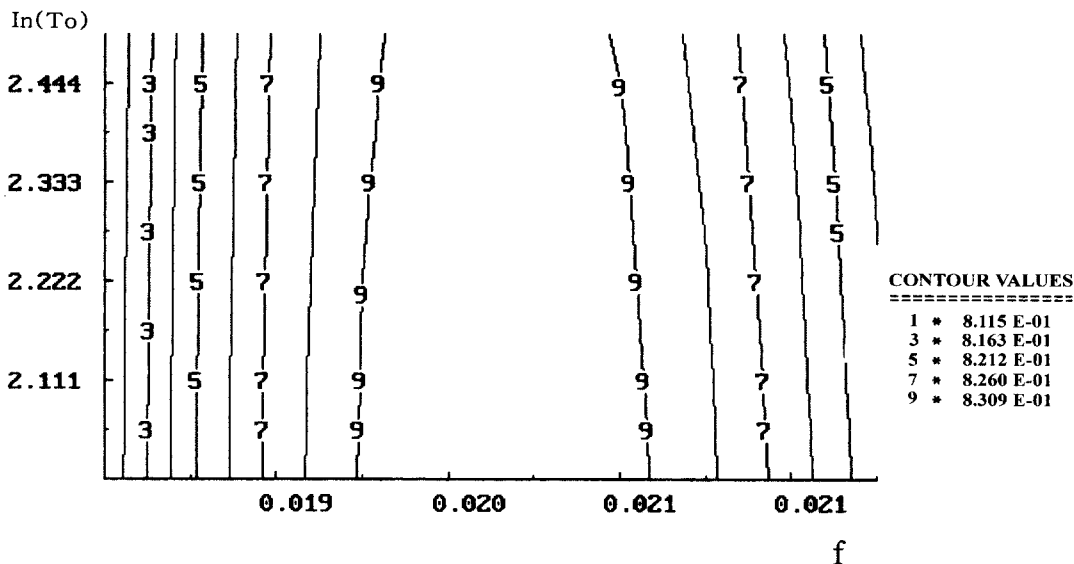


그림 6. 복합변수 감소상수(f) 및 투수량계수(T_0)에 대한 민감도 해석결과(저수유출 : 6/17~6/29)

예를 그림 5, 6에 나타내었다. 그림 5, 6은 각각 감소상수(f)에 대한 단일변수 및 감소상수(f) 및 투수량계수(T_0)의 복합변수에 대한 민감도분석 결과를 나타낸다.

4.3 적용에 및 결과 해석

전절에서 결정된 각 강우-유출사상에 대한 매개변수를 이용하여 모의한 계산치와 관측치와의 비교를 표 2와 그림 7, 8, 9에 나타내었다. 1996년 관측이 처음 실시된 관계로 표 2에 나타낸 바와 같이 많은 자료를 획득할 수 없었다. 그림 7, 8에서 보이는 바와 같이, 사방댐 지점의 저수유출은 침투유량 및 침투유량 발생시간에 대한 관측치와 계산치의 오차가 각각 0.0% ~ 9.09% 및 0.34% ~ 7.7%로서 거의 일치한다. 특히, 그림 8에서 보이는 바와 같이 두 강우사상을 합친 장기간의 복합강우에 대한 유출수문곡선의 재현성이 매우 뛰어난 것을 알 수 있다. 그리고

표 2 및 그림 9에 따르면, 전적비교 지점의 홍수유출은 침투유량에 대한 관측치와 계산치의 오차가 3.98%이며 침투유량의 발생시간은 관측치와 계산치의 오차가 4.76%로 나타났다. 침투유량 및 침투유량 발생시간에 대한 오차는 약 4% ~ 5%로서 높은 재현성을 나타냈지만, 전 유출수문곡선의 재현성은 그림 9에서 보이는 바와 같이 다소 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서 보다 많은 그리고 신뢰성 있는 관측자료로서 추가적인 검토가 필요한 것으로 판단된다. 그리고 그림 7, 8, 9에 나타낸 증발산량은 관측된 값을 나타내며, 포화면적 (saturated area)은 강우발생에 따른 포화면적으로서 전유역에 대한 비율을 나타낸다. 그림 7, 8은 강우강도가 작은 관계로 유역내에 포화된 구간이 거의 없음을 의미하며, 그림 9은 고수유출로서 비교적 큰 강우강도에 의해 유역내에 포화된 구간이 많았다는 것을 의미한다.

표 2. 관측치 및 계산치의 비교

유역 특성		침투유량			침투유량 발생시간			비고
지 점	일 자	관측치 (m/hr/m)	계산치 (m/hr/m)	오차 (%)	관측치 (hr)	계산치 (hr)	오차 (%)	
사방댐	6/17~6/22	0.00096	0.00096	0.00	26	28	7.70	저수유출
	6/17~6/29	0.0011	0.0012	9.09	298	299	0.34	저수유출
	6/26~6/29	0.0011	0.0011	0.00	58	58	0.00	저수유출
전적비교	7/26~7/29	0.0578	0.0555	3.98	21	22	4.76	고수유출

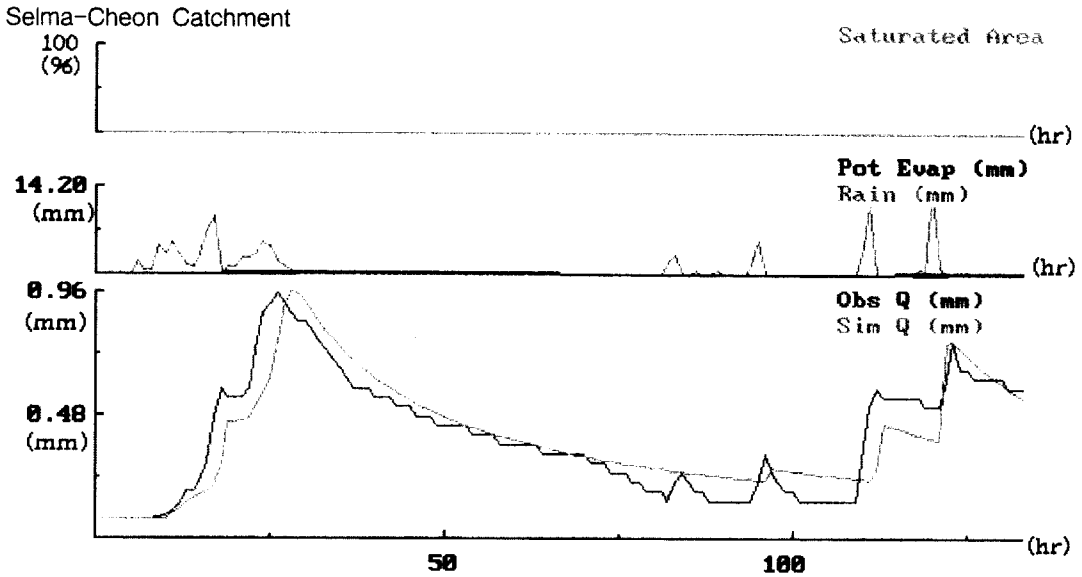


그림 7. 사방댐 지점 저수유출

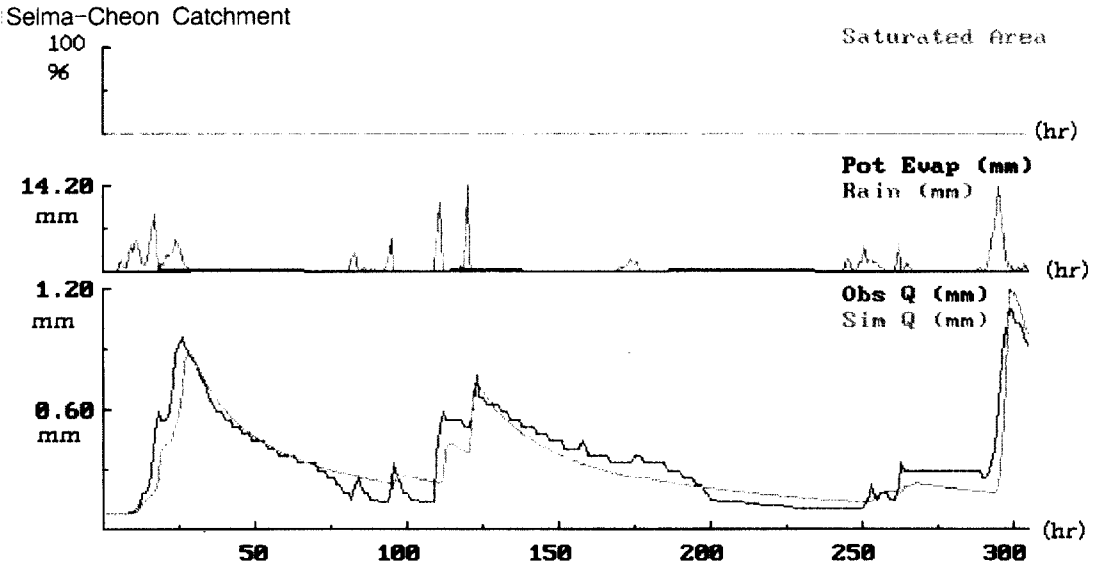


그림 8. 사방댐 지점 저수유출

4.4 민감도 분석

본 모형의 주요 변수의 변화에 따른 수문응답의 민감도를 검토하였다. 이를 위해, 각 강우-유출사상별로 결정된 바 있는 최적 매개변수에 대해 $\pm 5\%$ 및 $\pm 10\%$ 의 인위적 오차를 발생시켜 침투유량, 침투유량 발생시간 및 수문곡선에 대한 재현정도를 분석하였

다. 표 3~5는 침투유량 및 도달시간에 대한 오차를 나타내며, 그림 10은 수문곡선의 재현정도에 대한 결과의 예이다.

표 3~5 및 그림 10에 나타난 바와 같이, 수문응답은 감소상수에 대해서는 민감한 변화를 나타내지만 다른 변수들은 감소상수에 비하여 수문응답에 비교적 작은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

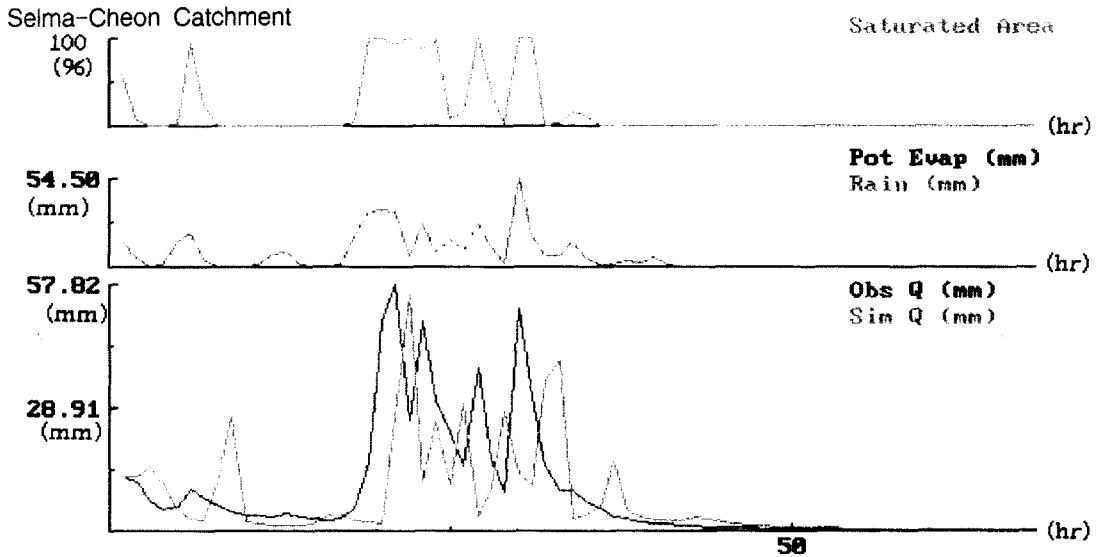


그림 9. 전적비교 지점 고수유출

표 3. 매개변수 변화(단일변수)에 따른 수문응답 특정치(Qp, tp)의 변화율

유출특성		f								ln(T ₀)								T _d							
지 점	일 자	-10%		-5%		+5%		+10%		-10%		-5%		+5%		+10%		-10%		-5%		+5%		+10%	
		ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp
사방댐	6/17~6/22	23.96	5.77	11.46	5.77	8.33	5.77	16.67	5.77	0.00	5.77	2.08	5.77	0.00	5.77	2.08	5.77	0.00	5.77	0.00	5.77	0.00	5.77	1.04	5.77
	6/17~6/29	30.00	0.67	19.09	0.67	1.82	0.67	0.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	9.09	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67
	6/26~6/29	23.36	0.00	12.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00
전적비교	7/26~7/29	5.19	4.76	6.57	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	5.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	3.98	4.76	5.42	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76

표 4. 매개변수 변화(단일변수)에 따른 수문응답 특정치(Qp, tp)의 변화율

유출특성		R _v								S _{rmax}								SR ₀							
지 점	일 자	-10%		-5%		+5%		+10%		-10%		-5%		+5%		+10%		-10%		-5%		+5%		+10%	
		ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp
사방댐	6/17~6/22	0.00	5.77	0.00	5.77	0.00	5.77	0.00	5.77	0.00	5.77	0.00	5.77	0.00	5.77	0.00	5.77	0.00	5.77	1.04	5.77	0.00	5.77	0.00	5.77
	6/17~6/29	10.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	9.09	0.67	9.09	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67
	6/26~6/29	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00	1.82	0.00	0.91	0.00	0.91	0.00
전적비교	7/26~7/29	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76	7.15	4.76

표 5. 매개변수 변화(복합변수)에 따른 수문응답 특정치(Qp, tp)의 변화율

유출특성		f와 ln(T ₀)								f와 T _d								ln(T ₀)와 T _d							
일 자		-10%		-5%		+5%		+10%		-10%		-5%		+5%		+10%		-10%		-5%		+5%		+10%	
		ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp	ΔQp	Δtp
6/17~6/29	(사방댐)	30.00	0.67	19.09	0.67	1.18	0.67	0.00	0.67	30.00	0.67	19.09	0.67	1.18	0.67	0.00	0.67	10.00	0.67	10.00	0.67	1.18	0.67	9.09	0.67

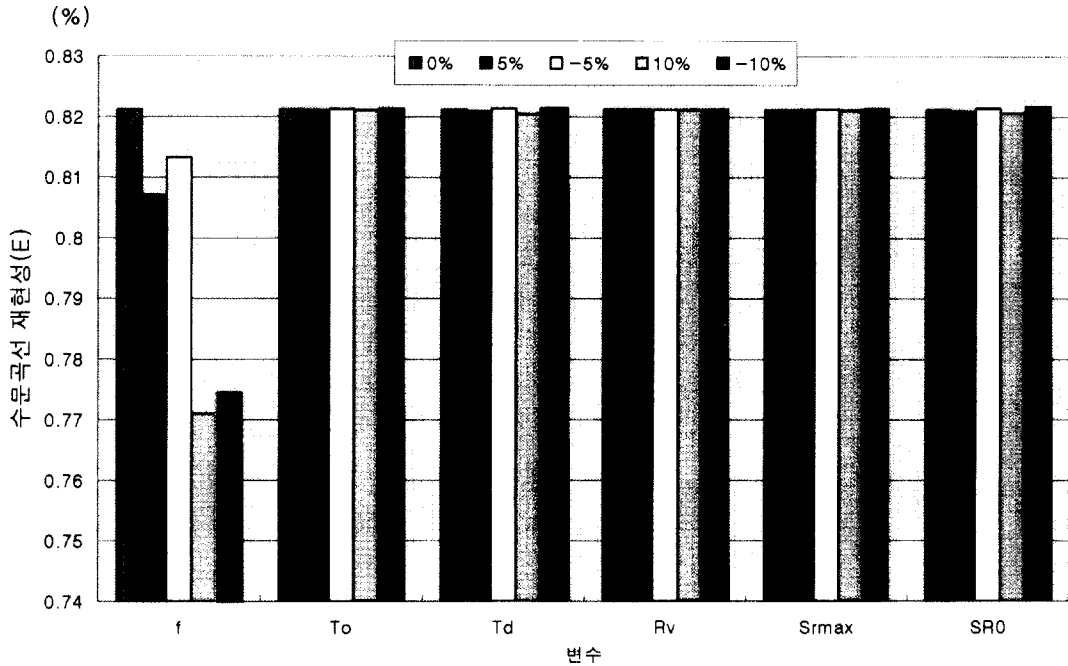


그림 10. 매개변수의 변화에 따른 수문곡선 재현정도 (6/17~6/22사상)

5. 결 론

건설기술연구원에서 설치운영중인 설마천 시험구역에 대해 물리적 분포모형인 TOPMODEL에 의한 강우-유출해석의 적용가능성을 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 설마천 시험구역에 대한 3차원 수치고도지도를 작성하여 TOPMODEL을 적용한 결과, 강우-유출해석에 대한 적용상의 우수성을 확인하였다.

(2) 저수유출 및 비교적 장기간의 복합유출수문곡선에 대한 본 모형의 재현성이 매우 우수하였다.

(3) 홍수유출의 첨두유량에 대한 본 모형의 재현성이 우수한 것으로 판단되지만 전 유출수문곡선의 재현성은 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 홍수유출에 대한 본 모형의 적용성을 검증하기 위해서는 추가적인 자료에 대한 분석이 필요하다.

(4) 사방댐지점과 전적비교지점의 유역에 대한 지형상수의 분포도가 서로 유사하므로 두 유역은 강우에 대한 수문응답특성이 서로 상사성이 있을 것으로 판단된다.

(5) 본 모형 주요 변수의 변화에 따른 수문응답의 민감도를 분석한 결과, 감소상수가 가장 민감한 변화를 나타내었으며 투수량계수를 비롯한 다른 변수들은 감소상수에 비하여 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 강성수, 장용구, 강인준 (1995). "GIS를 이용한 유출 해석에 관한 연구." 대한토목학회 1995년도 학술발표 논문집(III), pp. 109-112.
- 김상현, 한건연 (1996). "Tile Drain의 영향과 GIS를 연계한 농경지 유역에 대한 수문학적 모의." 한국수자원학회지, 제29권, 제6호, pp. 203-216.
- 김진택 (1995). 농업비점원 오염모형을 위한 지리정보시스템 호환모형의 개발 및 적용. 박사학위논문, 서울대학교.
- 김현준 (1996). 강우예보의 시공간 특성을 고려한 홍수에 보모형의 개발. 연구보고서, 한국건설기술연구원.
- 과학기술처 (1995). 수자원관리를 위한 GIS DB 구축 및 응용 소프트웨어 개발(II). UC N21930, 시스템공학연구소.
- 신사철 (1996). "분포형 강우-유출 모형에 의한 유출 해석." 한국수자원학회지, 제29권, 제6호, pp. 131-140.
- 최진용 (1996). 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형의 개발에 관한 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
- 한국건설기술연구원 (1996). 시험구역의 운영 및 수문

- 특성 조사·연구(설마천 시험유역). 연구보고서.
- 한국수자원공사 (1993). 지리정보시스템을 이용한 수 자원 관리 및 계획에 관한 연구. pp. 1-180.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986a). "An introduction to the European hydrological system-Systeme hydrologique Europeen 'SHE' 1: History and philosophy of a physically based distributed modeling system." *J. Hydrol.*, Vol. 87, pp. 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986b). "An introduction to the European hydrological system-Systeme hydrologique Europeen 'SHE' 2: Structure of a physically based distributed modeling system." *J. Hydrol.*, Vol. 87, pp. 61-77.
- Barling, R.D., Moore, I.D., and Grayson, R.B. (1994). "A quasidynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content." *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 4, pp. 1029-1044.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F., and Monke, E.J. (1980). "ANSWERS: A model for watershed planning." *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.*, Vol. 23, No. 4, pp. 938-944.
- Beven, K.J. (1986). "Runoff production and flood frequency in catchments of order n." *Scale problems in Hydrology*. Edited by Gupta, V. K., Rodriguez-Iturbide, I., Wood, E.F. and Reidel, D., Norwell, Mass.
- Beven, K.J. (1987). "Towards the use of catchment geomorphology in flood frequency predictions." *Earth Surf. Processes Landforms*, Vol. 12, pp. 69-82.
- Beven, K.J. (1996). *About TOPMODEL*. TOPMODEL Workshop, Lancaster University, March 1996.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1976). "Towards a simple physically-based variable contributing area model of catchment hydrology." *Working Paper 154*, School of Geography, University of Leeds
- Beven, K.J., Calver, A., and Morris, E.M. (1987). *The institute of hydrology distributed model*. Institute of Hydrology Report 98, Wallingford, UK.
- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. (1979). "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, pp. 43-69.
- Beven, K.J., and Wood, E.F. (1983). "Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas." *J. Hydrol.*, Vol. 65, pp. 139-158.
- Franchini, M., Wendling, J., Obled, C. and Todini, E. (1996). "Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL." *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 293-338.
- Garrote, L., and Bras, R.L. (1995a). "A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models." *J. Hydrol.*, Vol. 167, pp 279-306.
- Garrote, L., and Bras, R.L. (1995b). "An integrated software environment for realtime use of a distributed hydrologic model." *J. Hydrol.*, Vol. 167, pp. 307-326.
- Grayson, R.B., Blöschl, G. and Moore, I.D. (1995). "Distributed parameter hydrologic modeling using vector elevation data: THALES and TAPES-C." *Computer models of watershed hydrology*, Edited by Singh, V.P., Water Resources Publications, pp. 669-696.
- Iorgulescu I. and Jordan, J.P. (1994). "Validatin of TOPMODEL on a small Swiss catchement." *J. Hydrol.*, Vol. 159, pp. 255-273.
- Sivapalan, M., Wood, E.F., and Beven, K.J. (1990). "On hydrologic similarity:3. A dimensionless flood frequency model using a generalized geomorphologic unit hydrograph and partial area runoff generation." *Water Resour. Res.*, Vol. 26, No. 1, pp. 43-58.
- Troch, P.A., Mancini, M., Paniconi, M.C., and

- Wood, E.F. (1993). "Evaluation of a distributed catchment scale water balance model." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 6, pp. 1805-1817.
- Wolock, D.M. and McCabe, G.J., Jr. (1995). "Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 5, pp. 1315-1324.
- Wolock, D.M., Curtis, V.P. (1994). "Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography based watershed model." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 3041-3052.
- Wolock, D.M., Hornberger, G.M., and Musgrove, T.J. (1990). "Topographic effects on flow path and surface water chemistry of the Llyn Brianne catchments in Wales." *J. Hydrol.*, Vol. 115, pp. 243-259.
- Wood, E.F., Sivapalan, M., and Beven, K. (1990). "Similarity and scale in catchment storm response." *Rev. Geophys.*, Vol. 28, pp. 1-18.
- Young, R.A., Onstad, D.D., Boche, W.P. and Anderson, W.P. (1987). *AGNPS, Agricultural non-point source pollution model: A watershed analysis tool*. Conservation Research Report 35, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- 〈최종본 접수일 : 1997년 9월 1일〉