

TOPMODEL을 이용한 장기유출 해석 Long-term Runoff Analysis Using the TOPMODEL

조 홍 제* / 김 정 식** / 이 근 배**
Cho, Hong Je / Kim, Jung Sik / Lee, Kun Bae

Abstract

Monthly runoff was estimated using TOPMODEL which simulates ground water movement as well as surface runoff in the area of catchment. SAYUN dam which is being operated by Korea Water Resources Corporation was selected for the study, and the topographic factors of the watershed were analyzed using 1/5,000 digital map and GIS software(Arc/Info) The comparison shows good agreement between observed monthly runoff and the computation results simulated by using TOPMODEL. The catchment area of SAYUN dam was modeled by using various grid sizes in order to check the sensitivity of grid size, and the grid size of 180m was found most proper among 6 different sizes. TOPMODEL was also found superior to the existing monthly runoff models such as Kajiyama, KRIHS and Tank. Because the model requires limited number of parameters and considers topographic aspects, it is reckoned to be very useful for practical use.

keywords : TOPMODEL, monthly runoff, grid size, sensitivity analysis, topographic factors

요 지

유역사면 토양 내에서 지하수의 거동을 모의할 수 있는 TOPMODEL을 이용하여 월별 유출량을 추정하였다. 한국수자원공사에서 운영중인 사연댐 유역(124.5 km²)을 분석대상유역으로 선정하였으며, 국립지리원에서 작성한 1/5,000 수치지도와 지리정보시스템 도구인 Arc/Info를 이용하여 지형인자 등을 분석하였다. TOPMODEL을 이용한 월별 유출량에 대한 모의결과를 관측치와 비교할 때 재현성이 우수한 것으로 판단되었다. 격자 크기에 따른 영향을 검토하기 위하여 50m, 80m, 100m, 120m, 150m, 180m, 200m의 격자를 이용하여 TOPMODEL의 월별 유출량 수문곡선을 비교한 결과 격자간격이 180m 일 때 최적의 모의결과를 나타냈으며 200m 일 때 상대적으로 큰 오차가 나타났다. 매개변수 최적화로부터 침투능비례계수(m)는 격자의 크기에 다소 영향을 받았다. 기존의 월별 유출량 추정모형인 가지야마 공식, KRIHS 모형 및 Tank 모형을 이용하여 TOPMODEL과 비교하였다. 분석결과 TOPMODEL이 가장 우수하게 나타났으며, 타 모형에 비해 지형특성이 충분히 고려되고 모의를 위해 결정되어야 할 매개변수의 수가 비교적 작기 때문에 월별 유출량 산정에 있어 실무적용에 유용할 것으로 판단되었다.

핵심용어 : TOPMODEL, 월유출, 격자크기, 민감도분석, 지형특성

* 울산대학교 토목환경공학부 교수

Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Ulsan Univ., Ulsan 680-749, Korea
hjcho@uou.ulsan.ac.kr

** 울산대학교 토목환경공학부 박사과정

Doctoral Student, Dept. of Civil & Environment Eng., Ulsan Univ., Ulsan 680-749, Korea

** 울산광역시 시청 도시개발과

Urban Development Division, Metropolitan City of Ulsan, Ulsan 680-701, Korea

1. 서 론

국토의 종합개발계획에서 수자원의 개발은 대단히 중요한 요소이다. 우리나라의 자연적, 사회적 여건은 수자원을 활용하기에 결코 유리하지 않다. 강우가 6월부터 9월까지 장마기간에 집중되어 시간적 배분이 어려우며, 최근 각종 산업의 발달과 생활 수준의 향상에 따른 용수수요 증대는 용수부족 문제를 점점 심각하게 만들고 있다. 이수정책의 주된 내용은 부족한 물을 적기에 적절히 공급하는데 있으며, 부존 수자원의 이용을 극대화시키는데 주안점을 두어야 한다. 수자원 계획 등에서는 수개월에서 수년 또는 수십년이라는 장기간에 걸친 유출상황이 주된 인자가 된다. 즉 기쁨에 대한 대책, 저수지 설계 및 조작 등 장기용수수급계획 수립 시 가장 기본적인 자료는 연유출량 및 월유출량이며, 유역별 수자원 분포상태를 파악하는데 있어 가용수자원의 척도이다.

월별 유출량을 추정하는 방법에는 계측유역과 미계측유역에 대한 해석법으로 크게 나눌 수 있으며, 계측유역에 대한 해석방법으로는 확률론적 모형, 확률론적 및 추계학적 모형을 이용하는 방법이 있고 미계측유역에 대한 해석방법은 면적비법 및 유역평균유출고법 등과 가지야마 공식, KRIHS(Korea Research Institute for Human Settlements)모형 등 회귀모형에 의한 방법이 있다. 우리나라에서는 아직까지 연유출량 추정모형으로는 공식적으로 발표된 것이 없으나, 월 유출량 추정방법은 여러 기법이 있으며 중·소규모의 저수지 설계와 유역 물관리 등에서 이용되고 있다. 현재 실무에서 이용되는 기법으로서 대표적인 월유출량 추정모형으로는 기존의 가지야마 공식이 있으나 관측유량의 유출률이 200%까지 산정되는 등 많은 문제점이 있는 것으로 알려져 있다(노재경, 1999). 가지야마 공식의 문제점에 대한 보완연구로서 한국건설기술연구원(1989), 노재경(1999) 등의 연구가 있으며, 1987년 국토개발연구원에서는 우리나라 중소유역의 월별 유출량 추정을 위해 논란이 많았던 가지야마 공식의 대안으로서 KRIHS 모형을 개발한 바 있다. 최근에는 홍수유출모형인 Tank 모형을 이용한 월유출량 추정의 적용(한국수자원공사, 1996)이 시도되고 있다.

TOPMODEL은 Beven과 Kirkby(1979)가 제안하였으며, Beven과 Wood(1983), Sivapalan 등(1990), Wolock와 Curtus(1994), Iorgulescu와 Jordan(1994), Zhang과 Montgomery(1994), Quinn 등

(1995), Blazkova와 Beven(1995, 1997), Ambroise 등(1996), Lamb(1996), Franchin 등(1997), Holko와 Lepisto(1997)에 의해 주로 홍수유출해석이나 단기간의 유출해석 등에 적용한 바 있다. 국내에서는 김상현(1996)이 TOPMODEL 구조로부터 tile drain의 특성을 갖는 농경지 유역에서의 강우-유출 모델을 개발하였으며, 김상현(1997)은 인공배수유역의 강우-유출모의에 TOPMODEL의 적용성을 검토한 바 있다. 또한 조홍제 (1997, 1998)은 저수유출 및 홍수유출해석에 대한 적용성을 분석한 바 있으며, 김상현과 이지영(1999)은 TOPMODEL의 지형지수산정에 있어 수로형성면적과 구배역급수를 고려한 개선된 지형지수 산정알고리즘을 이용하여 적용성을 검토한 바 있다.

한편, 토양내 침투수 또는 지하수는 유역내의 장기 유출특성을 결정짓는 중요한 요소가 된다. TOPMODEL은 유역사면의 분포특성을 이용하여 사면내 지하수위 및 토양내에 침투한 흐류의 거동을 모의하는 모형으로서 기존의 회귀모형을 이용한 월유출량산정법보다 장기유출해석에 물리적인 타당성을 가진다고 판단된다. 이러한 장점에 착안하여 본 연구에서는 TOPMODEL의 월유출량 산정을 위한 장기유출해석 방법으로서의 적용 가능성 및 타당성을 검토하는데 주안점을 두었다. 이를 위해, 수자원공사에서 관리하고 있는 용수공급전용댐을 선정하였고, 1986~1995년간의 수도관리년보상의 실측자료를 이용하여 월유출량 산정에 대한 TOPMODEL의 적용가능성을 검토하였다. 지형인자 해석은 국립지리원에서 작성한 1/5,000 수치 지도를 이용하였고, 분석은 GIS 소프트웨어인 Arc/Info를 활용하였다.

2. 대상유역 및 관측자료

국내의 중소하천 유역에서 장기간의 유출량 관측자료를 획득하는 것은 매우 어려운 실정이다. 건설기술연구원에서 1996년부터 설치, 운영하고 있는 설마천 시험유역에서는 자료의 축적이 미흡하며, 건설교통부에서 설치, 운영하고 있는 위천, 보청천 및 평창강 등의 대표시험유역은 홍수유출자료 위주로 관측되었다. 반면에 수자원공사에서 운영하고 있는 주요 광업용수 전용댐에서는 비교적 장기간의 유출입량 자료를 구축하고 있다. 수도관리년보에 관리되고 있는 주요 용수공급댐 중에서 비교적 장기간(1986~1995)의 강우량, 증발산량, 유출입량의 자료가 구축되어 있는 사연댐 유역(그림 1)을 분석대상유역으로 선정하였다. 사연댐 유역은 울산

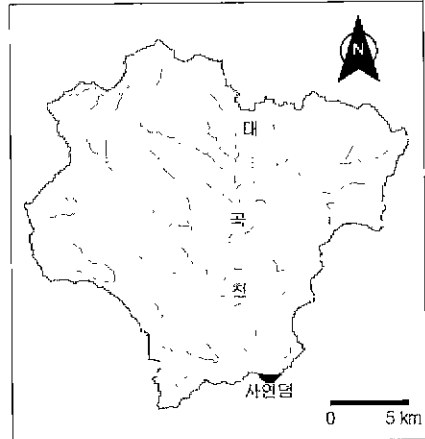


그림 1. 사연댐 유역도

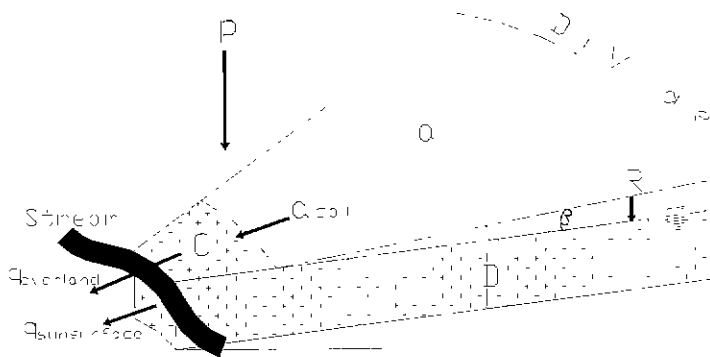


그림 2. 단일 사면에서 유출거동 모식도

광역시 대화강 상류에 위치하며 면적이 1245 km²이고, 유로연장이 23.5 km인 소유역이다. 분석대상 유역은 국립지리원에서 제작한 1/5,000의 수치지도를 Arc/Info의 TIN모듈을 이용하여 불규칙망을 구성하였고, TOPMODEL 적용을 위해 Arc/Info의 GRID모듈을 이용하여 격자간격을 50m, 80m, 100m, 120m, 150m, 180m 및 200m로 구성하고 격자망 구성시 발생하는 Sink를 제거하였다. 장기유출해석에 대한 TOPMODEL의 적용성 검토와 격자간격에 따라 월유출량 산정에 주요한 매개변수들의 선정 최적화를 위해 수도관리연보에 수록된 1986~1995년까지의 월강우량, 월유출량 및 증발산량 관측자료를 이용하였다.

3. TOPMODEL의 개요

TOPMODEL은 유역의 지형 및 토양에 따른 포화층에서의 흐름과 유출기여 면적에 대해 동적이며, 유역의 지형에 따른 지표수 및 토양에 따른 포화층에서 지하수의 동적인 유출기여면적을 고려한 반 분포형 모형이다. 본 모형은 그림 2에 나타낸 바와 같이 단일사면에 대하여 다음과 같은 세 가지의 기본 가정을 근거로 하여 구성된다(Blazkova과 Beven, 1997).

- 1) 유역내 포화층의 거동은 연속적인 정상상태로 표현될 수 있다.
- 2) 유역내 포화층의 동수정사는 지표면 경사인 \tan

β 로 표현될 수 있다. 여기서 β 는 사면의 경사이다.

3) 투수량계수(transmissivity)는 지표면으로부터 지하수면까지의 거리에 지수함수적으로 감소한다.

이와 같은 세 가지 가정으로부터 유역내 지하수면의 공간적 분포상태를 결정짓는 가장 중요한 인자는 토양 지형인자 $a/T_o \tan \beta$ 임을 알 수 있다. 여기서 a 는 등고선 단위길이당 사면의 누가면적, β 는 사면의 각, 그리고 T_o 는 흙이 포화되었을 때 횡방향의 투수량계수 (m^2/hr)이다.

즉, 임의 지점에 대한 포화층내의 횡방향 유출(q_i)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i = T_o \tan \beta e^{-fz_i} = T_o \tan \beta e^{-\frac{\Delta \theta_1}{m} z_i} \quad (1)$$

여기서 z_i 는 i 지점의 지하수위, f 는 모형의 매개변수, m 은 침투능비례계수 $\Delta \theta_1$ 은 중력배수에 의한 비포화 지역의 단위깊이당 수분의 변화량이다. 포화층내 흐름의 거동은 연속적인 정상상태로 표시하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i = a_i R = T_o \tan \beta_i e^{-fz_i} \quad (2)$$

여기서 R 은 지하수위로 유입되는 임의 시간에서 공간적으로 일정한 충전량이다. 식 (2)를 z_i 에 대해 정리한 후, 전 유역에 대한 평균치(\bar{z})를 구하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{z} = z_i - \frac{1}{f} \left[\lambda - \ln \frac{a_i}{T_o \tan \beta_i} \right] \quad (3)$$

여기서 $\ln(a_i/T_o \tan \beta_i)$ 는 Beven의 토양지형인자이고, λ 는 식 (4)와 같다.

$$\lambda = \frac{1}{A} \sum \ln \frac{a_i}{T_o \tan \beta_i} = \lambda^* - \ln T_o \quad (4)$$

위의 식과 가정조건들로부터 식 (5)와 같은 TOP-MODEL의 지배방정식을 얻을 수 있다

$$z_i - \bar{z} = \frac{1}{f} \left[\lambda - \ln \left(\frac{a_i}{\tan \beta_i} \right) \right] + \frac{1}{f} [\ln T_o - \ln T_a] \quad (5)$$

T_a 는 투수량계수의 평균값이다. 식 (5)로부터 유역의 평균지하수면과 유역 내 임의 지점에서 지하수면의 차는 지형지수의 평균값(λ)과 임의 지점에서 지형지수값의 차와 임의 지점에서 투수량계수와 평균투수량계수(T_a)의 차로 표현된다. 따라서 \bar{z} 값과 지형상수 $a/\tan \beta_i$ 의 공간적분포를 안다면 전유역에 대한 지표수위 및 지하수위의 거동을 예측하는데 이용할 수 있다 (Franchini 등, 1996). 한편, 토양지형인자 $a/T_o \tan \beta$ 의 값이 동일한 모든 지점의 유출거동은 모두 유사한 것을 의미하며, $a/T_o \tan \beta$ 의 값은 유역의 수문학적 상사성의 지표가 될 수 있다.

4. 기존 장기유출 해석모형

우리나라에서 현재 중소규모 댐이나 저수지 설계, 부존 수자원량 조사 등을 위해 주로 이용되고 있는 장기유출해석모형은 가지야마 공식, KRIHS 모형, Tank 모형, 면적비법, 평균 유출고법 등이 있다. 최근에는 지리정보시스템과 강수유출모형을 결합한 해석방법에 대한 연구가 시도되고 있으나 실측된 유량자료의 부족으로 모형의 검증 등에 어려움을 겪고 있어 연구성과가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 월별 유출량 추정모형인 가지야마 공식, KRIHS 모형, Tank 모형 등을 이용하여 TOPMODEL의 적용성에 대한 비교 검토를 시도하였으며, 각 모형의 기본이론은 다음과 같다

4.1 가지야마 공식

이 공식은 우리나라에서 가장 많이 이용되고 있는 월별 유출량 추정공식으로서 가지야마 공식을 들 수 있으며, 농업용 저수지 및 나목적 댐의 저수용량 결정에 이용되고 있다. 가지야마 공식은 다음 식 (6)과 같이 나타내어진다.

$$C = \sqrt{R^2 + (Kf + a)^2} - Kf + E \quad (6)$$

여기서 C 는 월유출고(mm), R 은 월강우량(mm), K 는 극한손실고(mm), a 는 최소유출고로서 월 강수의 유무를 막론하고 기저유량을 102mm로 한다. E 는 월별 보정치(mm)이고 f 는 유역의 연평균유출량에 따라 0.6 ~ 1.4의 범위를 가진다. 본 연구에서는 $f=1.0$ 을 사용하였다.

표 1. 월별유출계수

1월	2월	3월	4월	5월	6월
0.656	0.505	0.503	0.508	0.620	0.491
7월	8월	9월	10월	11월	12월
0.679	0.597	0.566	0.424	0.360	0.530

4.2 KRIHS(Korea Research Institute for Human settlements) 모형

이 방법은 유역물수지 개념으로 얻어진 회귀모형을 이용하여 월별 유출량을 추정하는 방법으로서 1987년 국토개발연구원에서 개발하였다. 이 모형은 전기와 우기의 수문반응이 서로 다르다고 가정하고, 식(7a) ~ (7b)와 같은 계절별 회귀분석식으로 구성하였다.

건기적용식:

$$R_o = 2.667 + 0.698P - 0.461ET - 0.671\Delta S \quad (7a)$$

우기적용식:

$$R_o = -15.553 + 1.037P - 0.920ET - 0.825\Delta S \quad (7b)$$

건기는 10월~3월까지이고 나머지 달은 우기에 해당된다. 그리고 R_o 는 월유출고(mm)로서 표 1에 제시된 유출계수를 이용하여 산정되며, P는 월평균 강우량(mm), ET는 유역실제 증발량(mm), ΔS 는 토양수분 변화량으로 식 (8)의 물수지 식에 의해 계산된다.

$$\Delta S = P - ET - R_o \quad (8)$$

4.3 Tank 모형

Tank 모형은 유역을 몇 개의 저류형 모형용기의 조합으로 개념화한 모형이며, 강우와 유출간의 관계를 비선형으로 해석하는 방법이다. Tank 모형에 필요한 입력자료 가운데 지형학적 자료는 유역면적(km²)이 있고 수문학적 자료는 일강우량(mm) 및 일증발산량(mm) 등이 있다 Tank 모형의 매개변수는 그림 3에서와 같이 각 탱크의 저류고(H₁, H₂, H₃, H₄), 각 탱크의 유출공 높이(HU₁, HD₁, HU₂, HU₃), 각 탱크의 유출계수(CU₁, CD₁, CU₂, CU₃, CU₄) 및 각 탱크의 침투계수(K₁, K₂, K₃) 등이 있다. 여기서 HU는 각단 탱크의 상부유출공의 높이, HD는 1단탱크 하부 유출

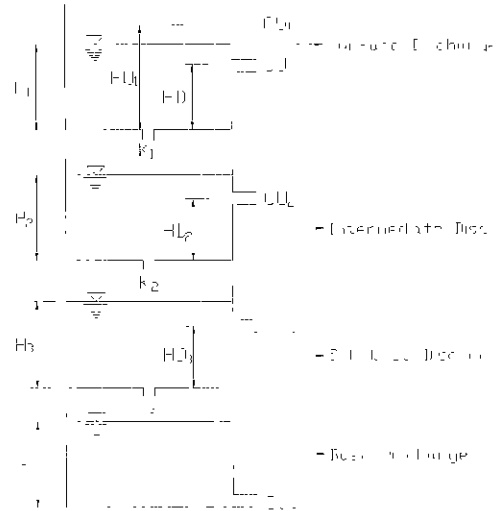


그림 3. 월유출해석을 위한 Tank-Model

공의 높이를 나타내고 CU는 각단 탱크의 상부유출공의 유출계수, CD는 1단 탱크의 하부 유출공의 유출계수를 나타낸다. 제1단 탱크는 지표면유출, 제2단 탱크는 중간유출, 제3 및 4단 탱크는 지하수 유출에 상당하게 된다. 임의 시간의 강우는 제1단 탱크로 유입되고, 저류수중 일부는 측벽공을 통해 유출되며 그 나머지는 바닥공으로부터 제2단 탱크로 유입한다. 제2단 및 제3단 탱크에서도 유출 및 침투가 최상단 탱크와 마찬가지로 이루어진다. 그러므로 구하고자 하는 유출량은 각단 탱크 유출량의 합이 된다. 표 2는 월유출량 산정을 위해 사용된 계수를 나타낸 것이다.

표 2. Tank model 계수

	CU		HD		H	k
	상	하	상	하		
1단	0.45	0.24	110	11.5	15.0	0.063
2단	0.005		3.7		250.0	0.004
3단	0.001		5.0		140.0	0.002
4단	0.001		0.0		170.0	0.001

표 3. 지형상수 통계분석결과

격자간격	50m	80m	100m	120m	150m	180m	200m
평균	6.8623	7.3485	7.6094	7.8160	8.0740	8.2606	8.4193
분산	4.8111	5.1248	5.3690	5.4452	5.6538	5.7473	5.8069
표준편차	2.1934	2.2638	2.3171	2.3335	2.3778	2.3974	2.9939
왜곡도	0.9939	1.0114	1.0672	1.0924	1.1345	1.1904	1.1966

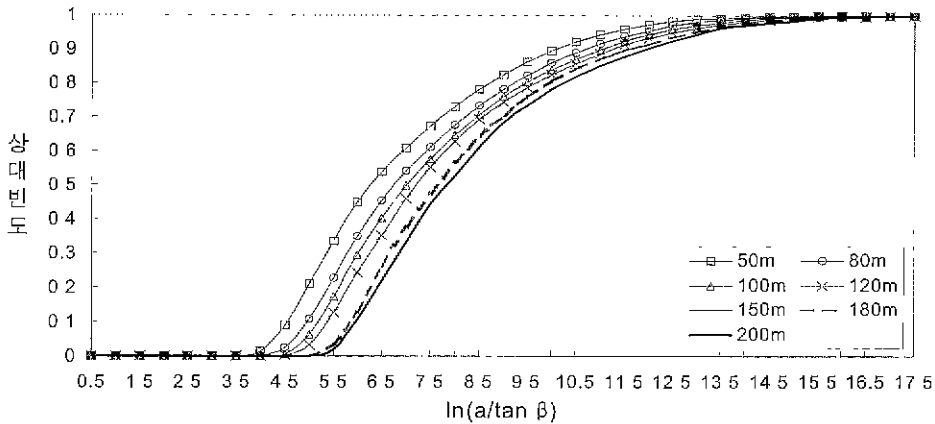


그림 4. 지형상수 누기분포도

5. TOPMODEL에 의한 월유출량 산정

5.1 모형매개변수 결정

TOPMODEL의 기본 이론식 (1)~(5)에서 논의한 바와 같이, 토양내 지하수의 거동은 지형상수 $a/\tan\beta$ 또는 토양지형인자 $a/T_0\tan\beta$ 의 값에 의해 모의될 수 있다. Zhang과 Montgomery(1994)에 따르면 지형상수나 토양지형인자 등은 수치지도의 해상도 및 격자의 크기 등에 따라 적용상의 해석결과에 다소 차이를 나타내며, 분석대상 유역을 다수의 격자망으로서 분할하는 경우 격자망의 크기에 따라 유역의 지형지표 및 강우-유출해석 결과가 달라지게 된다. 격자의 크기를 아주 작게 분할하는 경우 실유역의 지형특성을 비교적 정확하게 표현할 수 있겠으나 계산시간이 길어지고 지형분석에 필요한 작업효율이 떨어질 수 있다(Zhang과 Montgomery, 1994). 격자 크기를 너무 크게 분할하는 경우에는 실유역의 지형특성을 단순화시키는 위험이 따른다 특히 우리나라와 같이 산지지역이 유역의 대부분을 차지하고 있는 경우에는 적절한 크기의 격자

를 선택하는 것이 중요한 변수가 될 수 있다.

본 연구에서는 TOPMODEL의 적용상 한계 및 유역크기를 고려하여 사면면유역을 50, 80, 100, 120, 150, 180, 200m의 격자망을 선정하여 분석하였다. 각 격자크기별 지하수면의 공간적 분포상황을 나타내는 지형상수분포의 통계분석결과를 표 3에 나타내었다. 표 3에 제시된 바와 같이 격자간격이 증가할수록 지형상수($a/\tan\beta$)의 평균 및 분포범위가 증가함을 알 수 있다. 이는 유역을 구성하는 격자수가 많을 수록 강우시 사면에 일시적으로 발생하는 사면류의 흐름방향이 격자수가 적은 경우에 비해 폭넓게 분포하게 된다. 따라서 흐름방향에 대한 누기면적(a)은 작은 격자크기의 지형상수 값이 큰 격자크기로 구성된 유역의 지형상수 값 보다 작아지는 것으로 판단된다.

그림 4는 격자크기별 지형상수의 분포를 분석하기 위해 지형상수 값과 이들의 빈도를 유역을 구성하는 격자수로 나눈 누기상대빈도를 나타낸 것이다. 그림 4에 제시된 바와 같이 격자크기가 증가할수록 곡선이 오른쪽으로 치우치는 경향을 나타내며, 또한 유역을 구성하는 격자수가 감소할수록 작은 지형상수 값이 소멸

표 4. 최적 매개변수 및 효율, 오차

	50m	80m	100m	120m	150m	180m	200m
m	0.0114	0.0126	0.01339	0.0139	0.01484	0.01568	0.0095
T_0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.013
E	0.88063	0.88067	0.88069	0.88072	0.88074	0.88075	0.86338
R^2	0.96015	0.96009	0.96026	0.96015	0.96026	0.96361	0.96028

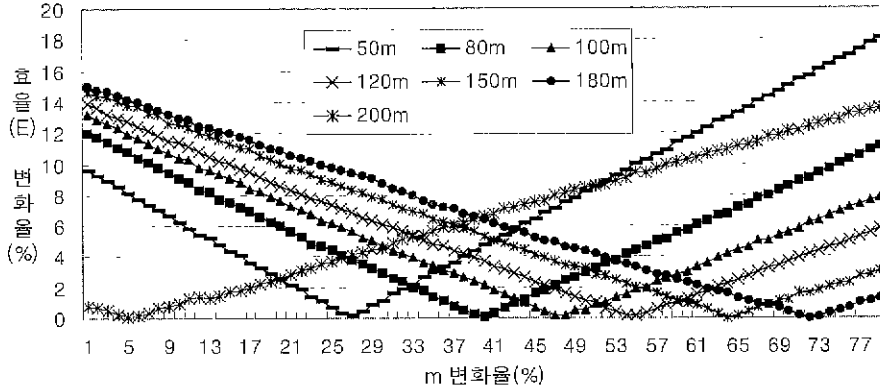


그림 5. m 변화율에 따른 효율의 민감도

되는 것을 알 수 있다. 이는 격자크기가 증가할수록 작은 지형상수 값을 가지는 고지대 부분이 무시되는 것을 알 수 있으며, 국토의 2/3가 산지인 우리나라를 고려할 때 격자크기를 선정함에 있어 충분한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

TOPMODEL은 전술한 바와 같이 토양내 지하수의 거동을 유역의 토양지형인자를 이용하여 모의함으로써 유역내 유출특성을 해석하는 모형이다. 지형상수는 소유역이나 사면에서의 응답특성을 결정하는 주요변수이며, 지형상수를 비롯하여 본 모형을 이용한 유역내에서의 물의 거동에 대한 모의에 영향을 주는 인자로서, 침투능비례계수, 횡방향 투수계수, 비포화구간의 지체시간, 주하천 및 소유역 하도내의 유속, 식생뿌리 구간내의 물 보유능력 및 부족량 등이 있다. 따라서 주요변수를 중심으로 민감도 분석을 실시하여 전 수문곡선에 대한 각 변수의 최적화를 시도하였으며, 모의되는 전 수문곡선의 관측치에 대한 일치정도로써 모형의 적합성을 판단하였다. 민감도 분석에 따르면 침투능비례계수(m), 횡방향 투수계수(T_0)가 월류출모의에 영향을 주었으며, 하도추적속도(R_v), 토양의 최대포화깊이(S_{rmax}), 초기토양수분부족량(K_0) 등은 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다. 격자망 크기에 따른

TOPMODEL의 모의재현성을 검토하기 위해 사용된 격자별 최적매개변수(m, T_0) 및 효율(E), 상관계수(R^2)를 표 4에 나타내었다. 표 4에서 제시된 바와 같이 격자크기가 180m 일 때 효율이 최대로 나타났으며, 격자크기 180m 까지 m 값은 격자크기의 증가에 따라 0~10%의 증가를 보였다. 반면 격자크기 200m에서는 m값이 39%감소하였다. 상관계수는 격자크기마다 거의 유사한 값을 보이고 있으나 격자크기 180m에서 가장 높게 나타났다.

그림 5와 6은 m 및 T_0 의 최적화를 실시하여 최적화된 값을 기준으로 두 매개변수가 효율(E)에 미치는 민감도를 분석하기 위해 각각 1%와 2%씩 증가시켜 효율의 변화정도를 나타낸 것이다. 그림 5에 보이는 바와 같이 직선의 기울기는 격자크기가 증가할수록 다소 감소하며, 효율에 미치는 영향이 감소한다는 것을 보이고 있다. 그림 6에서 T_0 는 작은 효율의 범위 내에 지속적인 반복을 보이며, 이는 m이 최적화된 조건 하에서 모의에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 의미한다.

효율(E)는 식(9)와 같이 정의 된다

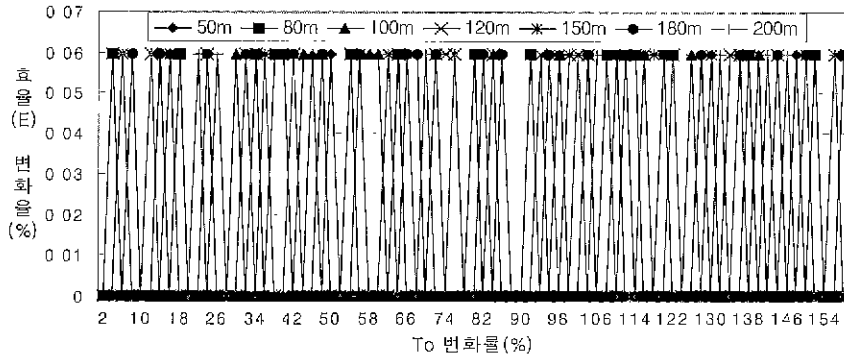


그림 6. T_0 변화율에 따른 효율의 민감도

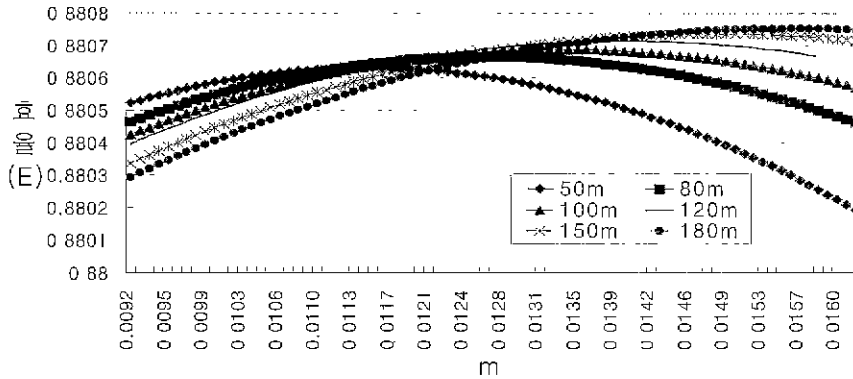


그림 7. m값 변화 따른 효율변화

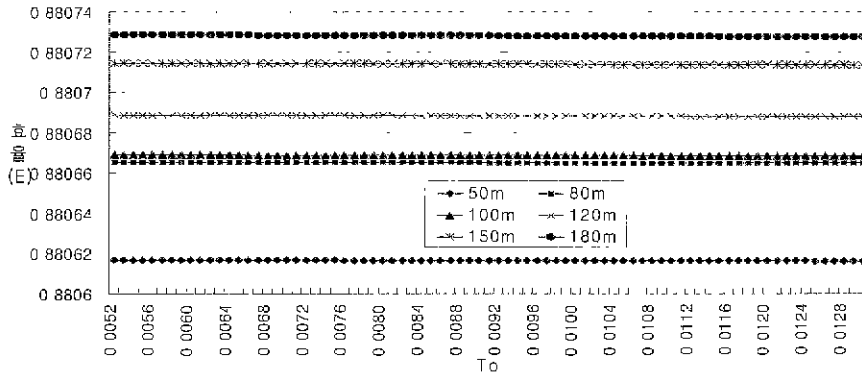


그림 8. T_0 변화에 따른 효율의 변화

$$E(\%) = \left[1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \times 100 \quad (9)$$

여기서 O_i 는 관측치, P_i 는 모의치, 그리고 \bar{O} 는 관측치 평균을 나타낸다.

그림 7과 그림 8은 최적화 과정에서 m 과 T_0 변화에 대한 효율의 변화를 보이고 있으며, 격자크기 200m일 경우에 대해서는 효율이 나머지 격자크기에

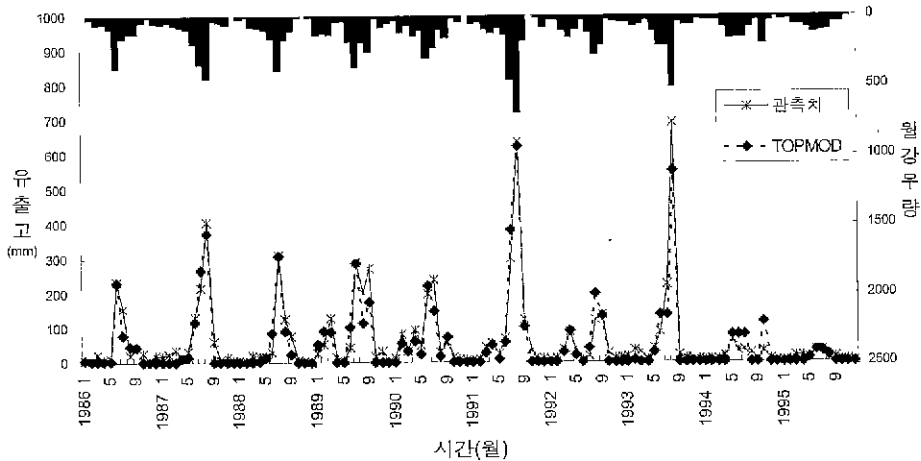


그림 9. TOPMODEL 모의결과 (격자크기 180m)

비해 상대적으로 매우 작아 나타나지 않았다. 특히 그림 8의 경우 m 이 최적화된 조건하에서 T_0 는 효율에 거의 영향을 미치지 않는 것을 나타내고 있다.

최적화된 매개변수와 격자크기 180m를 이용하여 TOPMODEL의 적용성을 검토해 본 결과는 그림 9와 같다. 그림 9에 제시된 바와 같이 TOPMODEL은 고수유출 및 저수유출 등 장기간의 전 수문곡선에 대한 재현성이 매우 우수함을 나타내고 있다.

5.2 월유출량 모형의 비교검토

격자크기 180m에 대한 TOPMODEL의 월유출량 모의결과와 현재 실무에서 많이 이용되고 있는 월유출량 모형에 대한 계산결과와 비교하였으며, 표 5에 나타내었다. 전반적으로 볼 때 TOPMODEL을 관측치에 대해 유출량이 다소 작게 산정되는 경향을 보이고 있다. 관측치에 대한 각 모형별 모의치의 오차정도를 살펴보면, 전 모의기간에 대해 TOPMODEL은 0.48~259%의 오차를 나타내었으나 Tank 모형은 0.82~615.38%, Kajiyama모형은 4.12~700%, 그리고 KRIHS모형은 1.6~515.38%로서 매우 큰 오차의 범위를 나타내었다. 특히 TOPMODEL은 소수를 제외하고는 100%이상의 과도한 오차를 나타내지 않았고 비교적 안정된 결과를 보였다. 저수유출(유출고 10mm 이하)의 경우 TOPMODEL은 평균오차 -83.4%, Tank모형은 194.2%, KRIHS모형 119.4%, 그리고 Kajiyama는 152.9%로 나타났으며, 고수유출(200mm 이상)에 있어서는 TOPMODEL -6.9%, Tank

-25.9%, KRIHS -23.3%. 그리고 Kajiyama는 -18.5%의 평균오차를 각각 나타내었다. 고수유출의 경우, 각 모형이 비교적 관측치에 근접한 값을 모의하는 것으로 나타났으나 TOPMODEL의 적용성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 정량적 분석을 위해 관측치와 계산된 모의결과에 대한 상관관계를 검토한 결과 TOPMODEL은 0.96361로서 가장 우수한 것으로 나타났고, Tank 모형은 0.9592, 지야마 공식은 0.9468, 그리고 KRIHS 모형은 0.9380로 유사하게 나타났다. 그러나 Tank 모형의 경우 매개변수 최적화에 대한 연구(박승우, 1991)에 따르면, 월유출량 추정시 저수유출에서 정확성이 떨어지며 매개변수 조정에 의해서는 모의에 한계성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 가지야마 공식은 실무에서 많이 적용되고 있으나 전술한 바와 같이 실제 적용상에서 길수유출에 대해 과도한 결과를 부여한다고 알려져 있어 대표적 월유출량 산정방법으로 다소 무리가 있다. 유출물이 너무 파대·파소하게 산정되는 점을 많은 관측자료로서 보정계수 및 각 인자에 대한 보안을 적절히 하는 경우 실무에 보다 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, KRIHS 모형은 가지야마 공식의 대체수단으로 실측자료를 이용하여 우리나라 월유출량 산정모형으로 개발되었으나, 토양수분변화량(식 (8))을 산정함에 있어 유출고의 추정은 유출계수에 의해 이루어진다. 이에 대한 적절한 선정이 모의에 중요한 관건이 되며, 실무적용상의 타당성에 대한 추가적 평가도 이루어져야 할 것으로 판단된다.

표 5. 모형의 모의결과 비교

(단위 mm)

시간 (월)	강우량	관측치	TOP - MODEL	오차 (%)	Tank	오차 (%)	Kaji - yama	오차 (%)	KRIHS	오차 (%)
1986 1	2.3	6.30	6.33	0.48	10.10	60.32	7.80	23.81	6.50	3.17
2	23.4	6.40	4.22	-34.06	10.20	59.38	10.70	67.19	14.20	121.88
3	59.2	23.00	3.22	-86.00	17.40	-24.35	21.50	-6.52	31.70	37.83
4	54.8	9.30	2.62	-71.83	13.20	41.94	27.70	197.85	13.50	45.16
5	84.6	10.80	2.65	-75.46	18.90	75.00	28.40	162.96	36.10	234.26
6	374.6	236.60	231.00	-2.37	170.70	-27.85	260.50	10.10	205.40	-13.19
7	157.2	155.70	78.70	-49.45	115.90	-25.56	77.90	-49.97	94.10	-39.56
8	124.2	21.90	45.70	108.68	67.50	208.22	55.20	152.05	58.10	165.30
9	122.7	43.20	44.20	2.31	87.70	103.01	64.70	-49.77	60.30	39.58
10	46.3	25.40	1.27	-95.00	51.40	102.36	21.00	-17.32	23.60	-7.09
11	11	6.00	1.18	-80.33	18.70	211.67	10.60	76.67	8.00	33.33
12	50.1	20.00	10.09	-49.55	22.70	13.50	18.40	-8.00	24.20	21.00
1987 1	58.7	19.10	10.02	-47.54	27.80	45.55	21.40	12.04	32.30	69.11
2	45.5	24.40	20.96	-14.10	24.20	-0.82	16.80	-31.15	21.90	-10.25
3	65.1	34.30	21.06	-38.60	21.30	-37.90	23.80	-30.61	32.10	-6.41
4	84.5	16.10	10.50	-34.78	25.00	55.28	41.70	159.01	31.20	93.79
5	93.3	33.40	14.90	-55.39	32.90	-1.50	31.80	-4.79	41.80	25.15
6	195.6	131.10	117.00	-10.76	97.30	-25.78	77.60	-40.81	92.60	-29.37
7	347.6	217.70	269.00	23.56	194.90	-10.47	239.50	10.01	241.60	10.98
8	451.4	405.00	373.00	-7.90	334.80	-17.33	336.70	-16.86	294.10	-27.38
9	26.3	62.80	40.67	-35.24	78.40	24.84	19.60	68.79	11.00	-82.48
10	43.7	9.70	0.64	-93.38	21.90	125.77	20.40	110.31	19.60	102.06
11	57.3	13.70	0.62	-95.50	35.30	157.66	20.90	52.55	20.10	46.72
12	0.2	6.20	0.59	-90.42	14.70	137.10	10.20	64.52	5.20	-16.13
1988 1	23.3	4.70	0.57	-87.83	9.50	102.13	10.70	127.66	15.50	229.79
2	9.5	3.80	0.55	-85.47	9.40	147.37	8.50	123.68	8.70	128.95
3	75.1	19.90	10.59	-46.78	22.20	11.56	28.10	41.21	32.90	65.33
4	83	18.90	2.23	-88.20	31.00	64.02	40.90	116.40	31.30	65.61
5	94.2	16.60	15.80	-4.82	37.70	127.11	32.20	93.98	45.30	172.89
6	162.7	30.70	84.30	174.59	33.30	8.47	55.00	79.15	76.10	147.88
7	387.8	310.60	309.00	-0.52	237.40	-23.57	276.80	-10.88	274.60	-11.50
8	170	126.70	91.60	-27.70	138.50	9.31	87.30	-31.10	91.50	-27.78
9	102.8	77.60	84.40	8.76	90.80	17.01	52.30	-32.60	47.40	-38.92
10	6.2	7.20	10.43	44.90	21.80	202.78	16.90	134.72	10.60	-47.22
11	0.1	1.50	0.42	-71.93	9.50	533.33	10.20	580.00	4.80	220.00
12	8.3	1.30	0.41	-68.38	9.30	615.38	10.40	700.00	8.00	515.38
1989 1	129.8	25.60	52.30	104.30	44.30	73.05	58.90	130.08	64.90	153.52
2	127.9	53.60	90.90	69.59	62.60	16.79	57.60	7.46	50.70	-5.41
3	132.9	128.10	86.80	-32.24	99.40	-22.40	60.90	-52.46	54.00	-57.85
4	37.4	14.10	0.37	-97.35	31.90	126.24	21.70	53.90	2.00	-85.82
5	34.3	4.50	0.36	-91.91	10.30	128.80	14.10	213.33	1.80	-60.00
6	183.5	44.30	104.00	134.76	41.30	-6.77	69.00	55.76	92.40	108.58
7	365.3	291.50	287.00	-1.54	199.00	-31.73	255.80	-12.25	256.70	-11.94
8	194.1	203.20	116.00	-42.91	144.00	-29.13	106.00	-47.83	111.10	-45.32
9	255.7	272.20	277.00	1.76	229.40	-15.72	165.90	-39.05	151.90	-44.20
10	13.5	18.30	10.33	-43.56	36.70	100.55	16.90	-7.65	11.30	-38.25
11	78.8	31.50	30.33	-3.72	47.10	49.52	29.80	-5.40	25.50	-19.05
12	50.1	4.00	0.32	-92.13	25.60	540.00	18.40	360.00	23.50	487.50
1990 1	27.1	11.00	0.31	-97.19	18.10	64.55	11.50	4.55	17.50	59.09
2	119.8	81.60	57.00	-30.15	47.70	-41.54	52.40	-35.78	48.20	-40.93
3	64	31.20	30.90	-0.96	41.90	34.29	23.40	-25.00	28.70	-8.01
4	139.4	94.40	61.40	-34.96	61.30	-35.06	71.40	-24.36	66.00	-30.08
5	101.3	50.00	22.90	-54.20	52.30	4.60	35.30	-29.40	50.80	1.60
6	303.8	200.90	225.00	12.00	142.70	-28.97	184.80	-8.01	162.90	-18.91
7	229.8	241.50	151.00	-37.47	167.80	-30.52	135.20	-44.02	149.40	-38.14
8	96.2	30.00	17.80	-40.67	58.30	94.33	38.60	28.67	40.50	35.00
9	152.9	59.50	74.50	25.21	89.10	49.75	85.80	44.20	81.70	37.31
10	16.2	15.00	0.27	-98.23	38.20	154.67	16.90	12.67	12.80	-14.67
11	43.6	9.90	0.26	-97.36	27.80	180.81	16.50	66.67	16.20	63.64
12	2	5.40	0.26	-95.24	10.90	101.85	10.20	88.89	5.20	-3.70

시간 (월)	강우량	관측치	TOP MODEL	오차 [%]	Tank	오차 [%]	Kaji vama	오차 [%]	KRIHS	오차 [%]
1991. 1	58.7	6.70	0.25	-96.22	13.60	102.99	21.40	219.40	31.60	371.64
2	41.8	7.80	0.25	-96.81	21.20	171.79	15.50	98.72	19.70	152.56
3	92.1	44.10	26.50	-39.91	34.20	-22.45	36.40	-17.46	39.00	-11.56
4	127.4	57.00	50.30	-11.75	62.40	9.47	64.50	13.16	59.40	-1.21
5	86.1	24.50	7.70	-68.57	33.00	31.69	29.00	18.37	38.30	56.33
6	136	69.20	57.60	-16.76	53.00	-23.41	38.50	-44.36	57.60	-16.76
7	460.1	301.00	382.00	26.91	257.30	-14.52	345.00	14.62	329.80	9.57
8	701.6	635.90	623.00	-2.03	514.30	-19.12	578.60	-9.01	467.30	-26.51
9	180.1	122.90	102.00	-17.01	239.30	94.71	106.60	-13.26	99.50	-19.04
10	0.1	33.90	0.22	-99.35	46.10	35.99	17.20	-49.26	7.30	-78.47
11	12.3	8.80	0.22	-97.50	12.50	42.05	10.70	21.59	8.30	-5.68
12	78.2	12.80	0.22	-98.30	24.50	91.41	29.50	130.47	35.00	173.44
1992. 1	28.7	8.40	0.21	-97.45	29.90	255.95	11.90	41.67	18.40	119.05
2	30.3	10.80	0.21	-98.05	16.50	52.78	12.30	13.89	16.30	50.93
3	104.7	39.00	29.70	-23.85	35.90	-7.95	43.30	11.03	44.20	13.33
4	157.1	88.80	90.30	1.69	74.30	-16.33	82.10	-7.55	78.40	-11.71
5	97.7	32.20	19.30	-40.06	55.50	72.36	33.70	4.66	46.40	44.10
6	27.8	6.80	0.20	-97.04	11.50	69.12	7.50	10.29	4.60	-32.35
7	119.1	17.70	40.50	128.81	32.30	82.49	52.00	193.79	62.50	253.11
8	278.2	123.00	200.00	62.60	157.20	27.80	176.90	43.82	170.70	38.78
9	213	139.00	135.00	-2.88	148.00	6.47	132.40	-4.75	127.50	-8.27
10	19.5	26.20	0.19	-99.27	55.70	112.60	17.10	-34.73	15.20	-41.98
11	33.4	11.40	0.19	-98.33	28.70	151.75	13.90	21.93	14.30	25.44
12	44.1	13.70	0.19	-98.63	27.00	97.08	16.60	21.17	21.40	56.20
1993. 1	47	16.60	0.19	-98.88	26.70	60.84	17.30	4.22	27.10	63.25
2	74.4	34.80	6.55	-81.18	29.60	-14.94	27.80	-20.11	31.70	-8.91
3	61.1	28.20	0.18	-99.35	31.00	9.93	22.30	-20.92	30.50	8.16
4	26.8	7.20	0.18	-97.50	10.60	47.22	18.90	162.50	3.80	-47.22
5	107.4	40.70	28.60	-29.73	32.60	-19.90	38.00	-6.63	54.70	34.40
6	215.1	89.00	137.00	53.93	55.20	-37.98	95.10	6.85	110.50	24.16
7	216.5	226.30	138.00	-39.02	112.50	-50.29	124.10	-45.16	145.30	-35.79
8	517	690.80	552.00	-20.99	432.10	-37.45	399.40	-42.18	342.30	-50.45
9	46.3	21.80	0.17	-99.22	59.50	172.94	25.10	15.14	10.80	-50.46
10	63.4	11.20	0.17	-98.48	31.80	183.93	25.70	129.46	25.00	123.21
11	68.9	12.70	0.17	-98.68	50.60	298.43	25.40	100.00	23.00	81.10
12	25.1	8.00	0.17	-97.93	31.10	288.75	12.30	53.75	14.10	76.25
1994. 1	31.9	5.70	0.17	-97.11	12.80	124.56	12.70	122.81	19.60	243.86
2	29.4	10.10	0.16	-98.39	13.50	33.66	12.00	18.81	15.70	55.45
3	31.8	8.80	0.16	-98.16	13.10	48.86	13.60	54.55	17.10	94.32
4	78.6	17.60	0.16	-99.08	22.10	25.57	38.60	119.32	29.60	68.18
5	159.1	65.60	79.60	21.34	51.70	-21.19	68.30	4.12	92.00	40.24
6	157.3	31.80	78.90	148.11	47.10	48.11	51.50	61.95	71.70	125.47
7	157.8	36.10	79.40	119.94	66.70	84.76	78.30	116.90	90.90	151.80
8	78.1	25.70	0.16	-99.40	74.20	188.72	29.50	14.79	26.80	4.28
9	31.7	7.00	0.15	-97.81	25.30	261.43	20.80	197.14	11.00	57.14
10	197	32.80	118.00	259.76	106.60	225.00	108.30	230.18	66.60	103.05
11	34.9	9.60	0.15	-98.43	45.80	377.08	14.20	47.92	13.90	44.79
12	8.1	4.40	0.15	-96.61	18.70	325.00	10.40	136.36	7.40	68.18
1995. 1	29.6	4.40	0.15	-96.64	9.80	122.73	12.10	175.00	18.30	315.91
2	19.1	6.50	0.15	-97.74	9.60	47.69	9.90	52.31	11.80	81.54
3	68.5	18.60	0.15	-99.22	19.30	3.76	25.20	35.48	30.80	65.59
4	65	18.90	0.14	-99.24	13.80	-26.98	32.00	69.31	22.50	19.05
5	90.3	10.30	11.00	6.80	24.10	133.98	30.60	197.09	43.50	322.33
6	115.1	36.40	36.70	0.82	32.50	-10.71	27.90	-24.35	48.70	33.79
7	110.3	34.50	31.90	-7.54	26.50	-23.19	46.60	35.07	60.20	74.49
8	99.9	11.60	21.50	85.34	25.70	121.55	40.60	250.00	43.00	270.69
9	45.5	14.50	0.14	-99.04	33.10	128.28	24.80	71.03	11.10	-23.45
10	47.6	5.30	0.14	-97.40	32.20	507.55	21.30	301.89	21.60	307.55
11	7.2	4.60	0.14	-97.02	10.60	130.43	10.40	126.09	6.80	47.83
12	0.2	4.36	0.14	-96.88	8.80	101.93	10.20	134.05	4.70	7.85

* 오차 = $\frac{(\text{모의치} - \text{관측치})}{\text{관측치}} \times 100(\%)$

TOPMODEL은 유역의 지형특성을 정확하고 쉽게
정량적으로 표현할 수 있는 수치지도(DEM)를 활용하

는 모형으로서, 수치지도로부터 본 모형의 주요인자인 지형상수를 추출하여 지역의 지형학적 상사성을 쉽게 판별할 수 있는 기준으로 활용할 수 있다. 또한 유출 해석에 있어 토양특성인자 및 토지이용도 등을 비롯한 지역특성인자들을 소수의 매개변수로서 정량화 할 수 있으므로 유출모의에 따른 매개변수의 결정이 타 모형에 비해 매우 용이하다. 그리고 물의 사면토양내의 침투거동을 기본이론으로 하는 모형이므로 이론적으로는 실 현상에 근접한 모형이라 할 수 있다. 따라서, 추가적인 연구를 통해서 본 모형의 월유출량 산정방법으로서의 타당성을 정착시킬 필요가 있다고 판단된다.

7. 결 론

본 연구에서는 TOPMODEL이 유역사면의 분포특성과 사면내 지하수위 및 토양내에 침투한 물의 거동을 모의하는 모형인 점을 착안하여 지하수위 이동이 유출에 중요한 요소인 월유출량 산정을 위한 장기유출해석 방법으로서의 적용가능성 및 타당성을 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1 TOPMODEL을 이용한 월유출량 모의에 주요한 매개변수는 침투능비례계수(m)와 평방향투수계수(T_0)로 나타났으며 T_0 는 m이 최적화된 이후 효율에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 격자크기는 50m ~ 180m 범위에서는 월유출량모의에 큰 영향을 미치지 못하였으며, 200m 이상의 격자에서는 모의 효율이 감소하는 것으로 나타났다.

2. 격자크기가 증가할 수록 지형상수 값은 증가하였으며, 작은 지형상수 값을 가지는 고지대가 충분히 고려되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 산지하천유역에 TOPMODEL을 적용시킬 경우 적절한 격자크기에 대한 검토가 요구된다.

3. TOPMODEL을 이용한 월유출량 모의결과 저수 유출에서 다소 작은 값을 부여하였으나 고수유출에서는 그 적용성이 매우 우수하였으며, 전체적으로 볼 때 장기유출해석 방법으로서 저수지 설계 등에 유용할 것으로 판단되었다.

4. 월유출량 모형에 대한 적용성의 비교결과 TOPMODEL이 가장 우수한 것으로 나타났고, Tank 모형, 가지야마공식, KRIHS모형은 유사한 결과를 보

였다. 그리고 TOPMODEL은 수치지도를 이용하여 전 유역 사면의 분포특성 및 지형특성 그리고 사면 토양내의 물의 거동을 모의할 수 있어 가장 적절히 실제 현상을 재현할 수 있는 방법인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 김상현 (1996). "Tile Drain의 영향과 GIS를 연계한 농경지 유역에 대한 수문학적 모의" 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제29권, 제 6호, pp. 203~215.
- 김상현 (1997). "인공배수유역에서의 TOPMODEL의 적용." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제 5호, pp. 539~548.
- 김상현, 이지영 (1999). "개선된 지형지수 산정 알고리즘의 적용에 관한 연구." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제4호, pp. 489~499.
- 노재경 (1999). "가지야마 월 유출량 공식의 일반화." '99 한국수자원학회 학술발표회논문집, 한국수자원학회, pp. 221~226
- 박승우 (1991). 수정 Tank 모형을 이용한 중소하천의 일유출량 추정. 국제수문개발계획(IHP) 연구 보고서.
- 조홍제, 조인를, 김정식 (1997). "TOPMODEL을 이용한 강우-유출에 관한 연구." 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 515~526.
- 조홍제, 조인를 (1998). "분포형 유출모형을 이용한 홍수유출해석" 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제31권, 제2호, pp. 199~208
- 최진용 (1996). 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형의 개발에 관한 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
- 한국건설기술연구원 (1989). 장기수자원계획을 위한 유역 물수지 추정방법 개발 (년 유출량 추정 방법 개발), 건설기술연구원
- 한국수자원공사 (1996). 울산권광역상수도사업 타당성조사 및 기본계획보고서부록.
- Ambrose, B., Beven, K.J., and Freer, J. (1996). "Application of a generalised TOP-MODEL to the small Ringelbach catchment." *Water Resour. Res* Vol 32, No. 7, pp. 2147~2159.

- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. (1979). "A physically based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrol.Sci. Bull.*, Vol. 24, No. 1, 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.
- Blazkova, S., and Beven, K.J. (1995). "Frequency version of TOPMODEL as a tool for assessing the impact of climate variability on flow sources and flood peaks." *J. Hydrol. Hydromech.*, Vol. 43, pp. 392~411
- Blazkova, S., Beven, K. (1997). "Flood frequency prediction for data limited catchments in the Czech Republic using a stochastic rainfall model and TOPMODEL." *Journal of Hydrology*, Vol. 195, pp. 256~278.
- Franchini, M., Wendling, J., Charles, O., and Ezio, T. (1996). "Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL." *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 293~338.
- Holko, L., and Lepistö, A. (1997). "Modelling the hydrological behaviour of a mountain catchment using TOPMODEL." *Journal of Hydrology*, Vol. 196, pp. 361~377.
- Iorgulescu, I., and Jordan, J.P. (1994). "Validation of TOPMODEL on a small Swiss catchment." *J. Hydrol.*, Vol. 159, pp. 255~273.
- Lamb, R. (1996). *Distributed hydrological prediction using generalised TOPMODEL concepts*. Ph.D. Thesis. Lancaster University, U.K.
- Quinn, P.F, Beven, K.J., and Lamb, R. (1995). "The $\ln(a/\tan)$ index : how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework." *Hydrol Process*, Vol. 9, pp. 161~182.
- 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, pp. 43~58.
- Wolock, D.M., and 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.
- Zhang, W., and Montgomery, D.R. (1994) "Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations." *Water Resour. Res.*, Vol. 30, pp. 1019~1028.

(논문번호:00-002/접수:2000.01.13/심사완료:2000.04.24)