

TOPMODEL의 단일유역 홍수예보능에 관한 연구

A Feasibility Study of TOPMODEL for a Flood Forecasting Model on a Single Watershed

배 덕 효* / 김 진 훈** / 권 원 태***
Bae, Deg-Hyo / Kim, Jin-Hoon / Kwon, Won-Tae

Abstract

The objective of this study is to test the flood forecasting capability of TOPMODEL on a single watershed in Korea. The selected study area is the Soyang River basin with outlet at Soyang Dam site. The three daily hydrographs and the three hourly flood events during 1990~1996 are selected for model calibrations and performance tests. The model parameters are estimated on 1990 daily event by manual fitting technique and the effects of topographic index distribution to river flow simulations are investigated on the study area. The model performance on correlation coefficient between the observed and the simulated flows for the verification periods are above 0.77 on the 95-, 96-daily events, while above 0.87 for 90-, 95-, 96-hourly events. By the consideration of flood flow characteristics in Korea, the physical interpretation of the model concept, and the model performance, it can be concluded that the TOPMODEL is feasible as a flood forecasting model in Korea.

keywords: TOPMODEL, DEM, Topographic Index, Flood Forecast, Soyang River Basin

요 지

본 연구의 목적은 물리적 분포형 모형인 TOPMODEL의 국내 단일유역에서의 홍수예보 능력을 검토하는데 있다. 이를 위해서 소양강댐 상류유역을 선정하였으며, 1990~1996년의 일 및 시 홍수사상을 선택하였다. 모형의 매개변수는 1990년의 일 호우사상을 이용하여 수동보정법으로 추정하였으며, 지형지수의 분포가 유출에 미치는 영향을 해석하였다. 모형의 매개변수 추정에 이용하지 않은 95년 및 96년 일 호우사상 및 90년, 95년, 96년 시 호우사상을 이용하여 TOPMODEL의 홍수예보능을 검토한 결과 관측유량과 계산유량의 상관계수가 일 홍수사상의 경우 0.77 이상, 시 홍수사상의 경우 0.87 이상으로 우수한 결과를 나타내었다. 국내의 홍수유출 특성과 모형의 개념 및 유량 산정 결과 등을 고려할 때 TOPMODEL의 홍수예보능은 우수한 것으로 판단된다.

핵심용어 : TOPMODEL, 수치고도모델, 지형지수, 홍수예보, 소양강 유역

-
- * 창원대학교 토목공학과 조교수
Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Changwon National Univ., Kyeongnam 641-773, Korea
 - ** 창원대학교 토목공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Changwon National Univ., Kyeongnam 641-773, Korea
 - *** 기상연구소 수문기상연구실 실장
Director, Hydrometeorology Res. Lab., Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea

1. 서 론

매년 전세계적으로 홍수에 의해 많은 피해를 입고 있고, 우리나라도 예외는 아니다. 국내의 경우 최근 10년간 호우 및 태풍으로 인해 연평균 140명의 인명과 3,904억원의 재산피해를 내고 있다(행정자치부, 1997). 수자원 전문가들은 홍수피해를 경감하기 위해서 댐, 제방 축조와 같은 구조적 대책과 홍수예경보 시스템의 설치 및 운영과 같은 비구조적 대책을 지속적으로 강구하고 있다. 실질적인 홍수피해를 줄이기 위해서는 구조적 대책 못지 않게 기상예보 능력 향상 및 홍수예경보 시스템의 개선과 같은 비구조적 대책도 중요한 일이다.

국내의 홍수예경보는 1974년 한강홍수예경보 시스템이 설치된 이후로 5대강 유역을 포함하여 주요 하천에 설치되어 운영하고 있다. 홍수 유량을 산정하기 위해서는 1961년 기무라에 의해 제안된 유역과 하도에 공히 적용할 수 있는 저류함수모형이 사용되고 있다. 이 방법은 모형의 구조가 간단하면서도 유출의 비선형성을 고려해 주는 방법이므로 선형모형보다 합리적인 것으로 알려져 있지만, 실무자들이 이 모형을 보다 효율적으로 사용하기 위해서는 지역화된 매개변수의 산정 문제 등이 요구되고 있는 실정이다. 국내 홍수예경보를 개선하려는 노력은 크게 두 방향으로 분류될 수 있다. 하나는 현재 사용중인 저류함수모형을 개선하려는 것으로 매개변수 산정 방법의 개선(심순보 등, 1992; 건설교통부, 1995)과 모형 시스템의 개선(배덕효, 1997) 등이 있다. 또 다른 하나는 국외에서 이미 그 우수성이 검증된 모형을 도입하여 국내의 적용성을 검토하는 것으로 최근의 연구로는 미국 홍수예경보로 사용되고 있는 Sacramento 모형을 도입하여 적용성을 검토한 것이다(배덕효와 조원철, 1995; 신용노, 1996; 이상호 등, 1997; 강경석과 서병하, 1998). 그러나 이 모형 역시 유역 고유의 매개변수 산정 문제로 수자원 계획에 이용될 수 있는 일 및 월 유출모의에 국한되어 있는 실정이다.

TOPMODEL은 Beven과 Kirkby(1976)에 의해 제안된 개념적 분포형 유출모형으로서 유역의 지형변화에 따른 토양내의 수분변화, 지표유출을 통한 유역구구의 유량을 산정할 수 있는 모형이다. 이 모형은 그 자체가 완성된 모형구조라기 보다는 각 지역적 특성에 따라 수정, 개발될 수 있는 유출 개념들의 집합체라 할 수 있어 그 응용 분야도 수문과정의 기상변화 영향

분석, 홍수 빈도해석, 유량 및 수질에 지형의 영향분석 등 매우 다양하다. 국내에서는 김상현 등(1996), 조홍제 등(1997), 김상현(1998), 조홍제와 조인철(1998) 등이 100 km^2 내외의 중소규모 유역에 모형의 적용성을 검토한 바 있다.

본 연구에서는 TOPMODEL이 국내 홍수예보 모형의 일부로서의 이용 가능성을 검토하기 위해서 이상적인 홍수예보 모형의 조건과 연계하여 비교적 유역규모가 큰 소양강 댐 상류를 대상으로 모형의 적용성을 검토하고자 한다.

2. 이상적인 홍수예보 시스템

이상적인 홍수예경보 시스템은 홍수시 급변하는 하천유량에 영향을 미칠 수 있는 모든 기상학적, 수문학적 변동 상황에 따라 즉각 대처할 수 있는 실시간 예경보 시스템이어야 하며, 그 중요한 요소들은 다음과 같다.

(1) 모형의 적절성 : 모형의 종류에는 단순한 통계적 모형에서부터 개념적, 물리적 모형에 이르기까지 매우 다양하며, 모형의 사용목적에 따라 선정 기준이 달라지지만 일반적으로 수문학적 현상을 잘 재현할 수 있는 물리적 모형이 적절한 것으로 알려져 있다.

(2) 매개변수의 적절성 : 유출모형은 자연현상을 수식화하는 과정에서 부득이 단순화하는 과정을 거치게 되며, 이에 따라 모형의 매개변수가 포함된다. 모형의 매개변수는 물리적 의미를 가지면서 그 수는 적을수록 유리하다.

(3) 자료의 신속성, 정확성, 다양성 : 홍수시에는 하천유량의 변동상황을 신속히 파악하여 위험하다고 판단될 때에는 예경보를 발령함으로써 귀중한 인명과 재산 피해를 줄일 수 있어야 한다. 이를 위해서는 앞으로 예상되는 유량을 정확히 예측할 수 있는 모형뿐만 아니라 모형 계산이나 그 밖의 여러 목적으로 사용될 수 있는 각종 기상 및 수문자료의 신속한 수집이 요구된다. 즉, 보다 효율적인 홍수예경보를 위해서는 하천유량에 영향을 미치는 모든 요소(기상 상태, 지표 및 토양수분 조건)를 고려할 수 있는 종합적인 모형체계와 정확하게 관측된 자료가 합리적으로 조화를 이룰 때 가능하다.

(4) 시스템의 일관성 : 정확한 홍수예측은 강수예측, 지표유출, 유역 및 하도 홍수추적 등 기상학적, 수문학적 모든 요소들이 효율적으로 운용될 때 가능한 하나의 종합적인 체계를 요구하기 때문에 시스템 자체의

일관성이 요구된다.

(5) 모형과 관측의 불확실성을 고려할 수 있는 실시간 예측 : 홍수시에는 여러 수문기상학적 상황이 돌발적으로 급변할 수 있으므로 이에 대처하기 위해서 모형과 관측 시스템은 불확실성을 고려할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 Modern Estimation Theory에 의한 Kalman 필터를 이용한 추계학적 상태·공간 형태의 모형이 적합한 것으로 알려져 있다.

(6) 확률론적 예측 : 실시간 홍수 예경보에서는 미래에 발생할 하천유량을 예측하는 것이므로 강수의 예측과 함께 예상되는 하천유량의 크기를 확률적으로 제시할 때 홍수예경보의 여러 목적상 유리하다.

3. TOPMODEL 이론

TOPMODEL에 대한 기본 개념은 1974년 Kirkby에 의해 제안되었으며, 이를 프로그래밍한 사람은 Beven이다(Beven 등, 1994). TOPMODEL의 특징 가운데 하나는 모형의 구조가 비교적 간단하고 지역의 특성에 따라 손쉽게 수정·개발하여 사용이 가능하도록 강우에 대한 유출현상에 영향을 미치는 제반 요소를 block화하여 제공하고 있다는 것이다. 따라서 전세계적으로 매우 다양한 형태의 모형이 존재하지만, 그 기본적인 골격은 지형지수(topographic index)의 산정, 토양수분의 변화 및 지표유출 등으로 구성되어 있다. 이 모형의 가정사항 및 기본개념을 기술하면 다음과 같다.

3.1 모형의 기본개념

강우에 의한 유출현상은 강우의 시공간적 변화성, 불균일한 지표조건, 토양깊이에 따른 수리학적 특성 차이 등으로 인해 매우 복잡한 수문현상을 나타낸다. 이들 모든 자연현상을 수학적으로 정확히 표현한다는 것은 불가능한 일이므로 대부분의 수문모형에서와 같이 TOPMODEL도 유출현상을 개념적으로 단순화하였으며, 기본 가정사항은 포화층의 흐름은 정상상태(steady state), 유역내 특정지점의 포화층 동수경사는 그 지점의 지표면 경사와 동일, 토양깊이에 따른 전도계수(transmissivity)의 변화는 지수감소 곡선을 갖는다는 것이다. 이와 같은 세 가지 기본 가정으로부터 특정지점의 지하수면 깊이는 다음 식 (1)로 표현될 수 있다.

$$z_i = -\frac{1}{f} \ln\left(\frac{ra}{T_0 \tan \beta}\right) \quad (1)$$

여기서 $f(m^{-1})$ 는 모형의 매개변수, $r(m/h)$ 은 특정 시간동안 유역전체의 지하수면으로 균일하게 유입되는 충전량, $a(m^2)$ 는 점 i 를 통해 유출되는 단위 등고선 길이당 사면의 면적, $T_0(m^2/h)$ 는 토양이 포화되었을 때 측면전도계수(lateral transmissivity), $\tan \beta$ 는 지표면 경사를 나타낸다. 식 (1)을 유역전체로 적분하면 유역평균 지하수면 깊이 \bar{z} 를 산정할 수 있고, 이를 저류량(storage) 형식으로 변환해서 특정 지점의 저류부족량(local storage deficit)과 함께 표현하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\frac{(\bar{S} - S_i)}{m} = \left[\ln \frac{a}{\tan \beta} - \frac{1}{A} \sum_i \ln \frac{a}{\tan \beta} \right] - \left[\ln T_0 - \frac{1}{A} \sum_i \ln T_0 \right] \quad (2)$$

여기서 $m(m)$ 은 모형의 매개변수이다. 우변 첫 번째 항 $\ln(a/\tan \beta)$ 는 지형지수(topographic index)라 하고, 두 번째 항은 유역평균 지형지수(λ), 네 번째 항은 유역평균 전도계수($\ln T_e$)를 나타낸다. 따라서 유역내 각 지점에서의 전도계수 및 지형지수를 알면 유역평균 지하수위 및 특정지점의 지하수위를 산정할 수 있다. 만약 지표로부터 지하수면까지의 깊이를 나타내는 z_i 가 0이 되는 지역은 토양이 완전히 포화되어 유입되는 강수는 전부 지표유출을 하게 된다. 이를 기여면적(contributing area)라 하며, TOPMODEL의 주요 특징 가운데 하나이다.

3.2 지형지수

TOPMODEL에서 중요한 역할을 하는 지형지수는 Kirkby(1975)에 의해 최초로 제안되었으며, 완전한 수문학적 모형으로는 Beven과 Kirkby(1976, 1979)에 의해 개발되었다. 유역내 각 지점의 지형지수 값은 유역의 수치고도모델로부터 지형정보시스템을 이용하여 손쉽게 산정할 수 있다.

유역내 특정지점의 지형지수 산정방법은 그림 1에서와 같이 특정 지점으로부터의 유출이 단 하나의 최고 급경사 방향으로만 발생한다는 SFD(Single Flow Direction) 방법과 경사가 낮은 모든 방향으로 유출이 발생한다는 MFD(Multiple Flow Direction) 방법이 있다. 본 연구에서는 MFD 방법을 사용하였으며, 그 개념은 상류로부터의 단위등고선 길이당 기여면적(a)

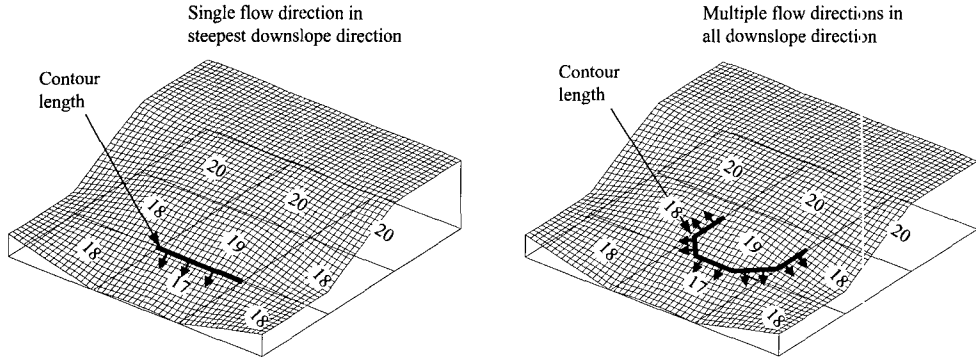


그림 1. 지형지수의 산정방법

을 경사도 ($\tan \beta$)로 나누어서 계산하며 다음 식 (3)으로 표현된다.

$$\ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right) = \ln \left[\frac{A_i}{\sum_{i=1}^4 \tan \beta_i C_i} \right] \quad (3)$$

여기서 $\tan \beta_i$ 는 흐름방향의 결정으로 인해 계산되는 두 격자 사이의 경사도이고, C_i 는 흐름 방향의 등고선 길이(contour length)로서 주방향 흐름일 때는 단위 격자간격의 50%를 대각방향 흐름일 때는 35.4%로 계산한다. 한편 sink의 처리는 격자 내 하도 구간이 존재한다는 가정하에 등고선 길이는 격자간격의 두배, 경사도는 sink 격자 내 평균경사도를 사용하여 지형지수를 산정한다.

식 (2)에서 알 수 있는 것처럼 유역의 토양 수리특성을 나타내는 전도계수가 같을 때 지형지수가 같은 입지의 점들의 흐름 특성은 같으므로 TOPMODEL이 분배형 모형이면서도 개념적 모형으로 계산할 수 있는 이점을 가지고 있다. 즉 유역내 각 지점에서 지형지수를 산정하고 이에 대한 분포곡선을 산정하여 그림 2와 같이 각 지형지수의 증분(discrete increment of topographic index)에 대해서 토양수분의 변화 및 지표 유출량을 산정할 수 있다.

3.3 토양수분의 변화

TOPMODEL에서 토양수분의 변화는 그림 2에서와 같이 지형지수의 변화에 따른 개념적 토양 저류고로 설명될 수 있다. 지표면에서 포화영역까지 수분이 이동하는 데는 일련의 저류고로 모형화가 가능하다. TOPMODEL 개발 초기의 토양모형(Beven과

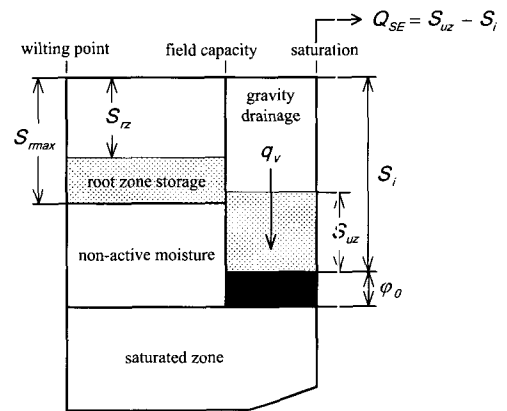


그림 2. TOPMODEL의 토양수분 변화 모식도

Kirkby, 1979)은 차단 저류고, 침투 저류고 및 포화 저류고로 구성되었는데, 이는 차단 저류고가 채워진 후 침투가 발생한다는 개념이었다. 그러나 이 모형구조에서는 침투된 모든 수분이 즉시 포화영역으로 이동하는 것으로 되어있기 때문에 증발에 의한 손실이 과소평가 되어 유량을 과대평가하는 것으로 나타났다. 특히 장기간의 무강수 후 발생하는 유출초기에 그 현상은 더욱 현저하였다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위해 도입된 것이 토양의 최대보수량(field capacity) 개념이며, 이 값은 수분이 포화영역으로 흐르기 전에 반드시 초과해야 되는 침투저류고의 하나의 값을 의미한다.

그림 2에서와 같이 수정된 토양모형은 불포화 영역과 포화 영역으로 나눌 수 있으며, 불포화 영역은 시들점(wilting point), 최대보수량 등 토양수분의 상태에 따라 식생영역(root zone storage), 중력배수영역(gravity drainage)으로 나눌 수 있다. 강우의 유입에

따른 토양수분의 변화를 계산하기 위해서는 각 지형지수마다 불포화층에서 토양수분의 기준이 되는 국지 저류부족량(local storage deficit) S_i 를 식 (2)로부터 계산한다. 이것은 부족량 개념의 저류고이므로 그 값이 0일 경우 토양이 포화됨을 의미한다. 지표로부터 유입된 경우는 먼저 토양식생영역으로 유입되어 식생영역의 저류부족량(S_{rz})은 감소하게 된다. 증발산은 단지 식생영역에서만 이루어지며, 증발량은 식생영역의 수분상태와 잠재 증발량의 함수로 표현된다. 만약 S_{rz} 가 0 이하인 경우 토양식생영역은 유입된 경우로 인해 완전 포화됨을 의미하므로 남는 양은 불포화층의 저류량(S_{uz})으로 저장되며 토양식생영역은 포화상태를 유지한다. 이때 S_{uz} 가 S_i 보다 크게 되면 불포화층은 완전포화 상태를 의미하므로 남는 양은 지표유출을 하게 된다. 또한, 불포화층에서 포화층으로의 중력배수는 다음 식 (4)로 표현된다.

$$a_v = \frac{S_{uz}}{S_i t_d} \quad (4)$$

여기서 t_d 는 시간 지체상수 매개변수로서 중력배수를 조절하는 역할을 한다.

한편, 포화영역에서의 흐름은 기저 유출량 Q_b 로 계산된다. 이것은 불포화층의 토양수분 변화처럼 각 지형지수의 중분마다 계산되는 것이 아니고 일종의 분배 개념으로 길이 l 의 m 개의 구간을 따라 흐르는 기저 유출량의 합으로 계산되며 다음 식 (5)와 같이 표현된다 (Beven 등, 1994).

$$Q_b = Q_0 \text{EXP} \left[-\frac{\bar{S}}{m} \right] \quad (5)$$

여기서 \bar{S} 는 유역내 평균 저류 부족량으로써 불포화층의 중력배수로 인해서 감소되거나 기저유출로 인해서 증가되는 양으로 매 시간간격마다 변화한다.

3.4 단일유역 홍수추적

대부분의 유역, 특히 유역면적이 큰 경우에는 하나의 계산시간 간격 내에서 모든 유량이 유역출구에 도달하지 못하므로 홍수추적 모형이 요구된다. Beven과 Kirkby(1979)는 유역내 어떤 특정지점으로부터 유역출구까지 도달하는 시간은 다음 식 (6)으로 산정할 수 있다는 개념에 착안하여 등거리 도달시간을 산정하고,

이와 같은 선형 홍수추적 알고리즘을 유역홍수추적 모형으로 사용하였다.

$$\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{v} \quad (6)$$

여기서 x_i 는 i 번째 흐름구간의 길이, N 은 유역출구에서 유역의 최원점까지의 거리 분할수, v (m/h)는 속도 매개변수로서 상수로 가정된다.

4. 사례연구

4.1 적용대상지역 및 기본자료

본 연구의 대상유역은 그림 3과 같이 2,703 km^2 의 유역면적을 갖는 소양강 댐 상류유역을 선정하였다. 소양강은 총 유로연장 166.2 km 로써 한강수계를 형성하는 북한강의 최대 지류이며 인북천 및 내린천의 두 지류로 구성되어 있다. 소양강은 오대산($EL. 1,563 m$) 부근에서 발원하여 남으로 유하하다가 춘천시 남북방에서 북한강과 합류한다. 소양강 댐은 북한강 합류지점에서 약 12 km 떨어진 소양강 계곡에 위치한 높이 123 m , 댐 길이 530 m , 체적 약 9,600,000 m^3 의 사력댐으로서 홍수기에 자연 유하량을 저류하여 갈수기에 서서히 유하시킬 수 있는 홍수조절 능력을 갖추고 있다.

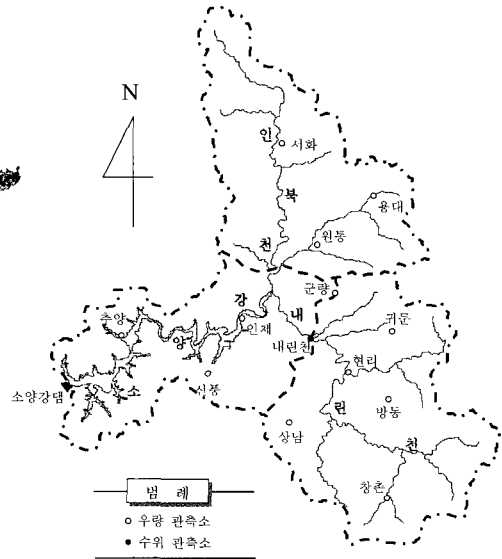


그림 3. 연구대상 유역

본 연구에서는 TOPMODEL의 홍수예보 능력을 검토하기 위해 1990년~1996년 동안 소양강 댐 상류유역에 발생한 일 및 시 수문곡선을 이용하였다. 모형에 필요한 수문 및 기상자료는 모형의 입력자료로 요구되는 강우량 및 증발량 자료, 모형의 계산 및 검증에 위한 유량자료가 요구된다. 본 연구대상 유역에는 한국수자원공사에서 운영하는 서화, 원통, 현리, 창촌, 인제, 추양, 용대, 군량, 상남, 신평, 귀둔, 방동 등 12개의 T/M 우량관측소가 있으며, 내린천 및 소양강댐 수위 관측소가 있다. 기상관련 자료를 수집하는 측후소는 인제 측후소 및 인접 춘천 측후소가 있다. 유역평균강우량은 유역내 존재하는 12개 T/M 관측소의 강우량을 티센의 가중법으로 산정하였으며, 증발량은 춘천 측후소 자료, 유량은 소양강 댐 유입유량을 이용하였다(한국수자원공사, 1990~1996).

4.2 매개변수의 추정 및 지형지수 분석

TOPMODEL을 이용하여 유량을 산정하기 위해서는 지형지수 분포의 산정 및 모형의 매개변수 추정이 선행되어야 한다. 모형의 매개변수 및 물리적 의미는 표 1과 같고, 매개변수 추정을 위해서 용설의 영향이 있는 동절기를 제외한 90년 5월 15일~10월 31일의 일 유출곡선을 선택하였다. 모형의 매개변수는 수동보정법에 의해 추정되었으며, 소양강 댐 상류 유역에 대

해서 추정된 매개변수 값은 표 1과 같다. 이들 매개변수에 대한 민감도는 조홍제 등(1997)에서 제시된 바 있다. 본 연구에서는 모형 계산에 필요한 지형지수의 분포를 산정하기 위하여 위·경도 3초 단위의 DEM 자료로부터 IDIRISI를 활용하여 격자간격 100 m의 정방형 DEM 자료를 생성하고, Z- 격자점에 대한 지형지수 값을 산정한 후 그 분포형을 산정하였으며, 그 결과는 그림 4(a)와 같다. 이들 매개변수와 지형지수의 분포를 이용하여 계산한 유량 및 관측유량은 그림 5와 같다. 이 기간동안에는 9월 9일~9월 11일간 402.3 mm의 집중호우로 소양강댐 유입량이 급격히 증가하여 댐수위가 9월 12일 01:00 환공이후 최고수위인 EL. 197.99 m를 기록한 기간을 포함하여 다수의 수문곡선이 존재하고 있다. 본 기간동안의 관측유량 및 모형의 계산치 사이의 통계 특성치는 표 2와 같다. 그림 5와 표 2에서 알 수 있는 것처럼 본 연구의 모형은 일부 소규모 수문곡선의 첨두유량은 과대평가하는 경향이 있지만 90년 9월 홍수를 포함하여 유량의 크기 및 발생시간을 비교적 잘 모의할 수 있음을 알 수 있다.

한편, 본 연구에서는 소양강 상류유역이 대유역이라는 점을 감안하여 전체유역을 그림 3에서와 같이 3 개의 소유역으로 분할하고 각 소유역의 지형지수 분포특성을 분석하였다. 이를 위해 인북천, 내린천, 소양강 그

표 1. TOPMODEL의 매개변수

기 호	설 명	추 정 치
m	지수형 전도계수 감소 상수 (m)	50.0
T_0	포화상태의 측면 전도계수 ($\ln(m^2/day)$)	5.0
S_{rmax}	식생 영역의 최대 저류고 (m)	25.0
t_d	불포화 영역의 시간지체 상수 (day)	2.08
ν	주하천 및 소유역 하도내의 유속 (m/day)	132,000

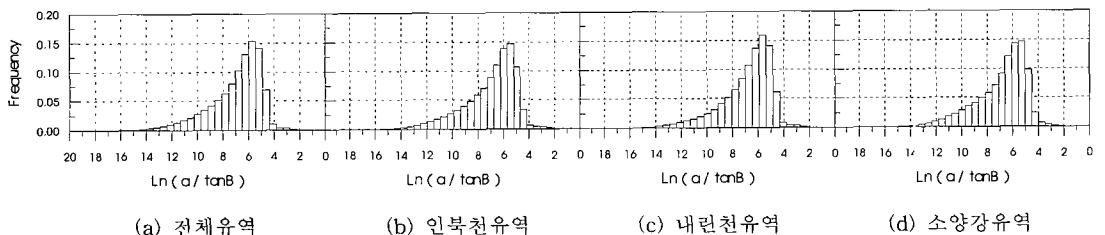


그림 4. 유역별 지형지수 빈도분포도

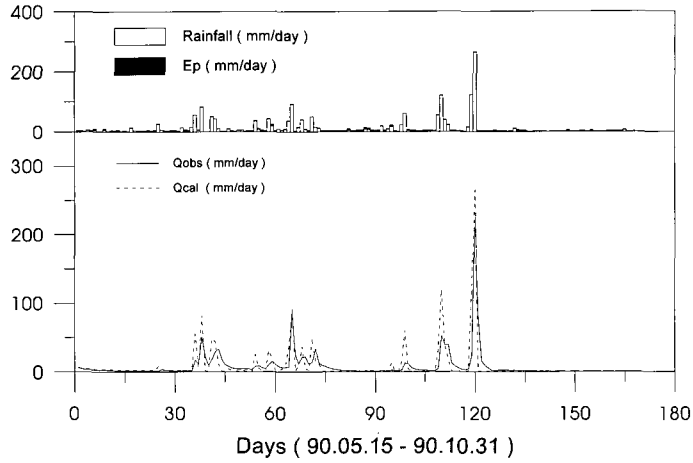


그림 5. 90년 일 사상 모의

표 2. 호우사상별 통계 특성치

호우	일 유 출									시 유 출								
	90년 사상 (5.15~10.31)			95년 사상 (6.16~9.15)			96년 사상 (6.1~8.31)			90년 사상 (9.9.01~9.18.24)			95년 사상 (8.23.01~8.31.24)			96년 사상 (7.26.01~7.28.24)		
항목	관측	계산	잔차	관측	계산	잔차	관측	계산	잔차	관측	계산	잔차	관측	계산	잔차	관측	계산	잔차
\bar{Q}	7.79	8.42	0.63	10.55	10.29	-0.26	4.53	4.75	0.21	1.61	1.69	0.08	2.12	1.91	-0.21	2.48	2.71	0.22
σ	20.73	26.91	14.43	21.60	24.13	14.98	11.90	15.74	10.06	3.11	3.70	1.11	2.12	2.36	0.96	1.66	2.12	1.06
Q_p	225.8	264.3	-	128.8	131.8	-	87.5	123.6	-	14.19	15.68	-	7.58	8.48	-	4.94	6.82	-
t_p	120	120	-	71	70	-	57	57	-	63	67	-	37	39	-	33	37	-
ARM	6.10			8.19			4.73			0.61			0.68			0.74		
ERMS	14.45			14.98			10.06			1.12			0.98			1.08		
CC	0.85			0.79			0.77			0.96			0.91			0.87		

주 : \bar{Q} 평균, σ 표준편차, Q_p 첨두유량, t_p 첨두유량시간, ARM 잔차절대치평균, ERMS 평균제곱오차, CC 상관계수

리고 소양강댐 상류 전체유역을 대상으로 각각의 격자 점에 대한 지형지수 값을 산정하고 분할된 소유역들과 전체유역과의 지형지수 분포를 그림 4와 같이 산정하여 차이를 비교하였다. 소양강댐 상류 전체유역, 인북천, 내린천 및 소양강 유역의 지형지수 값에 대한 통계적 분석 결과는 평균이 각각 7.23, 7.29, 7.16, 7.17, 표준편차가 10.27, 7.78, 7.05, 7.69, 왜곡도가 -0.67, -0.85, -0.91, -0.85로 나타나 서로 유사한 경향을 나타내었다. 또한 모형의 매개변수는 표 1의 값을 사용하고 그림 4의 각각의 지형지수 분포를 사용하여 소양강댐 상류유역에 대한 유출을 모의한 결과 인북천, 내린천, 소양강 유역의 전체유역에 대한 유출 상대오차는 총유출 용적의 경우 0.22%, 0.19%, 0.17%, 첨두유량

은 0.03%, 0.01%, -0.004%로 나타나 DEM 격자간 격의 영향을 받는 지형지수 빈도분포곡선의 유출에 대한 영향은 Franchini 등(1996)의 연구결과와 같이 본 연구유역에서도 미소한 것으로 판단되어 소양강댐 상류유역 전체에 대한 TOPMODEL의 홍수예보능을 검토하기로 하였다.

4.3 일단위 유출모형의 검증

그림 6과 7은 95년 사상(95.6.16~9.15)과 96년 사상(96.6.1~8.31)에 대한 관측유량과 추정된 매개변수를 이용하여 계산된 유량을 도시한 것이다. 95년 사상의 경우 7월 8일과 8월 5일의 두 번에 걸친 장마전선에 의한 호우와 8월 23일 태풍 제니스의 영향으로 호

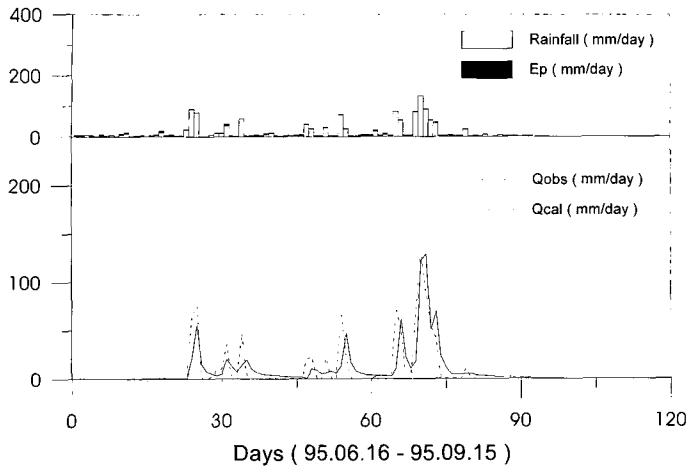


그림 6. 95년 일 사상 모의

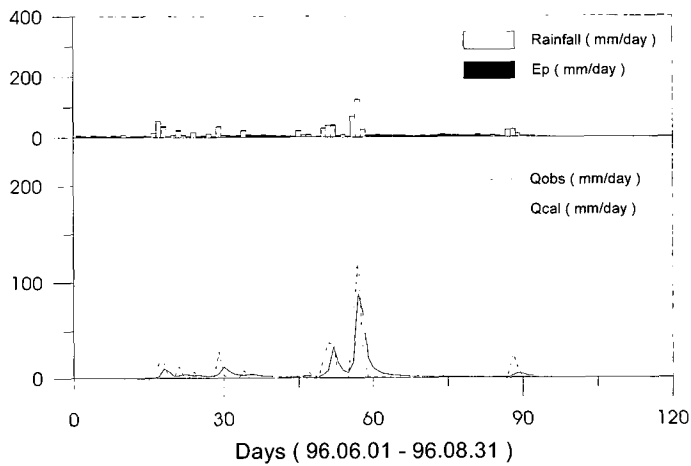


그림 7. 96년 일 사상 모의

우가 발생되었다. 96년 사상의 경우 6월 16일과 7월 20일의 두 번에 걸친 장마전선에 의한 집중호우가 발생한 경우이다. 그들 두 사상에 대한 모형의 유량계산 결과에 대한 통계치는 표 2에서와 같이 95년 사상의 경우 관측유량에 대한 계산유량의 침투유량 상대오차는 2.33%, 침투유량 발생시간 오차는 1일, 상관계수는 0.79로 나타났으며, 96년 사상의 경우 각각 41.26%, 0일, 0.77로 나타났다. 96년 사상의 경우 모형에 의한 침투유량이 과대평가된 것은 유역평균 강우량이 과대평가되었거나 혹은 앞에서 지적한 것처럼 장기간의 무강우 후 발생하는 강수에 대해서는 모형이 유출량을 과대평가하는 경향이 있는 것과 무관하지 않을 것으로 생각되나 보다 자세한 원인은 향후 연구되어야 할 것

이다. 이와 같이 관측유량과 계산유량 사이에는 국지적인 차이가 있지만 90년 사상을 이용하여 추정된 매개변수를 고정한 상태에서 95년, 96년 사상에 대한 관측강우량과 증발량을 이용하여 계산된 유량결과는 그림 6과 7, 표 2에서 알 수 있는 것처럼 관측치와 비교적 잘 일치됨을 알 수 있다.

4.4 시단위의 유출해석

표 1에 나타난 매개변수의 단위는 길이의 차원을 갖는 전도계수 감수상수, 식생영역의 최대 저류고와 단위시간당 길이의 차원을 갖는 포화상태의 측면 전도계수, 주하천 및 소유역 하도 내의 유속이 있다. 만약 이들 매개변수가 물리적 의미를 갖고 있다면 유역 고유의

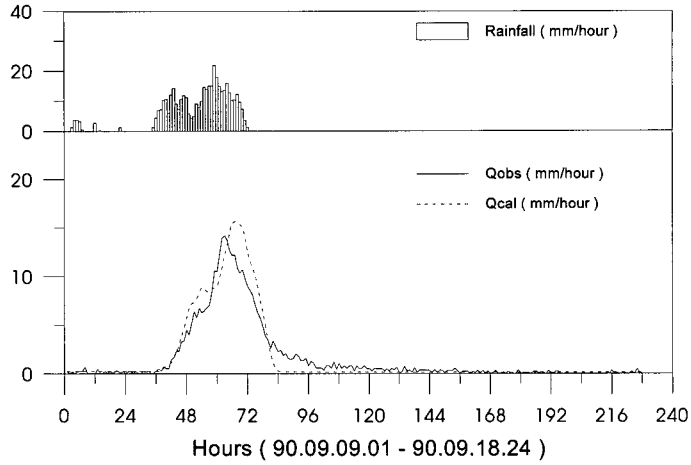


그림 8. 90년 시 사상 모의

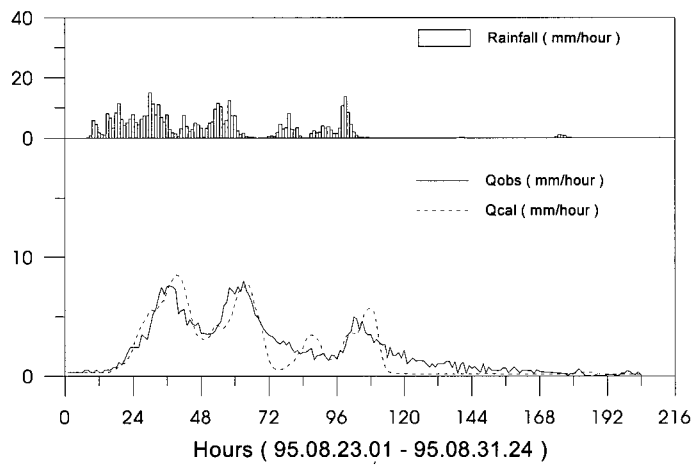


그림 9. 95년 시 사상 모의

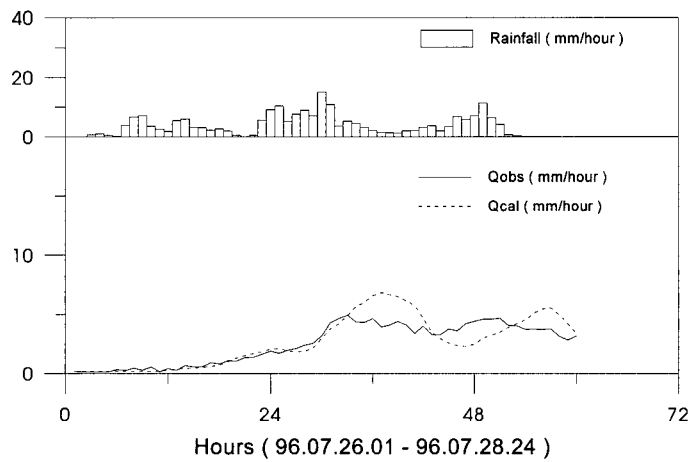


그림 10. 96년 시 사상 모의

매개변수를 산정할 수 있고, 계산시간 간격에 상관없이 사용될 수 있어야 한다. 본 연구에서는 90년 이후 소양강 댐 상류유역에 발생한 주요 시단위의 호우 사상을 선택하여 90년 일단위의 호우사상으로 추정된 매개변수를 단지 계산시간 간격의 변화에 따른 영향만을 고려하여 시단위의 유출해석을 수행하였다. 즉 길이의 차원을 갖는 매개변수는 동일하게 사용하고, 단위시간 당 길이의 차원을 갖는 매개변수는 m/day 를 m/hr 로 전환하기 위해서 추정치에 1/24를 곱하여 사용하였다. 그림 8~10은 각각 90년, 95년 및 96년 시단위 호우사상에 대한 관측유량과 모형에 의해 계산된 유량을 나타낸다. 이들 각각 사상에 대한 관측치와 계산치의 통계특성치는 표 2와 같이 첨두유량의 상대오차는 10.50%, 11.87%, 38.06%, 첨두유량의 발생시간 오차는 4시간, 2시간, 4시간, 상관계수는 0.96, 0.91, 0.87로 나타났다. 여기서 한가지 지적하고 싶은 것은 모형의 매개변수는 90년 일단위 사상을 이용하여 추정된 값을 사용하고 단지 모형의 입력치인 시강우량과 증발량 자료만을 이용하여 계산된 유출결과라는 것을 고려할 때 모형의 적용성은 매우 우수하다고 생각된다. 향후 유역을 조금 더 세분화하여 적정매개변수를 추정하고 유출량을 산정하면 보다 정확한 유출모의를 할 수 있으리라 판단된다.

5. 토의 및 결론

본 연구에서는 TOPMODEL의 홍수예보능을 검토하기 위해서 비교적 유역규모가 큰 소양강댐 상류유역을 대상으로 모형의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 90년~96년 사이에 발생한 주요 일 및 시단위의 호우 사상을 선택하였으며, 본 연구 결과를 이상적인 홍수예보 모형의 조건과 연계하여 해석하면 다음과 같다.

TOPMODEL은 지형의 변화에 따른 토양내 수분변화, 지표유출의 물리적 특성을 모형화한 물리적 분포형 유출모형으로 각 지역의 특성에 따라 수정·개발될 수 있는 모형이라 모형의 기본 구조는 적절한 것으로 생각된다. 또한 이 모형을 저류함수모형과 비교할 때 모형의 매개변수는 비슷한 수를 가지고 있으면서도 토양수분의 변화를 모의할 수 있어 연속유출해석이 가능한 장점을 가지고 있다.

TOPMODEL의 매개변수는 물리적 의미를 가지고 있고, 그림 5~10에서 알 수 있는 것처럼 일단위의 홍수사상을 이용하여 추정된 매개변수를 시단위의 홍수사상에도 이용 가능한 유역 고유의 매개변수를 산정하

기가 용이하다. 이는 실시간 홍수예보 모형으로서는 매우 중요한 요소이다. 왜냐하면 실시간 홍수예보모형에서는 과거의 사상을 모의하는 것이 아니라 현재의 지표 및 하천 상태에 기초하여 예상되는 미래의 강우, 증발산과 같은 기상자료를 입력으로 하여 미래의 하천 유량을 예측하는 것이 주목적이므로 모형에 포함된 매개변수가 사전에 결정되어야 한다.

그러나 본 연구에서 산정된 매개변수는 관측유량과 계산유량을 비교하여 선정된 것으로 물리적 의미를 갖는 유역 고유의 최적 매개변수라 할 수는 없다. 왜냐하면 모형의 매개변수 가운데 전도계수, 하천의 유속 등은 실측을 통해서 산정이 가능한 매개변수이고, 기타의 매개변수 역시 이들 매개변수의 영향을 받기 때문이다. 또한 Franchini 등(1996)이 언급한 것처럼 전도계수 등 특정 매개변수는 지형지수의 분포를 산정하기 위해서 사용된 DEM 격자간격과 밀접한 관련성이 있고, 격자간격이 커짐에 따라 이 값은 커지는 경향이 있기 때문에 때로는 물리적 의미를 갖는 구간 밖의 값(이를 Franchini 등은 artificial hydraulic conductivity라 함)으로 유출계산이 성공적으로 수행되는 경우도 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 살펴본 것처럼 90년 일단위의 홍수사상으로 추정된 매개변수를 이용하여 매개변수의 추정에 사용되지 않았던 95년 및 96년의 일단위 홍수사상을 비교적 정확히 모의할 수 있었던 것은 TOPMODEL의 특성이 비교적 얇은 토양층에 적합한 모형으로 알려져 있고 국내의 홍수유출 특성이 호우가 끝난 뒤 약 1~2일 이내에 평시의 수위로 되돌아가는 것에서 알 수 있는 것처럼 강우 초기에는 토양수분에 영향을 미치지 않지만 일단 호우가 지속되면 홍수유출을 지배하는 것은 지표유출이기 때문이라는 것을 알 수 있는데, 이와 같은 국내의 홍수 유출특성이 TOPMODEL의 조건에 적합하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 일단위의 홍수사상을 이용하여 추정된 매개변수를 시단위의 홍수사상에도 적용할 수 있었던 것은 모형의 매개변수가 물리적 의미를 가지고 있기 때문이다.

이와 같은 관점에서 TOPMODEL은 국내 홍수예보 모델의 일부로써 사용될 때 그 역할을 훌륭히 수행할 수 있을 것으로 판단되나, 모형의 지역적 적용범위, 물리적 매개변수의 추정, DEM의 격자간격과 지형지수 분포의 특성, 모형과 관측의 불확실성 해석 등 많은 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업의 일부로서 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 강경석, 서병하 (1998). "SAC-SMA 모형을 이용한 일 유출량 산정." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 146-152.
- 건설교통부 (1995). 낙동강수계 유출프로그램 개선. 낙동강 홍수통제소.
- 김상현 (1998). "확장 TOPMODEL의 영역화 민감도 분석." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 741-755.
- 김상현, 손광익, 한건연 (1996). "Tile Drain의 영향과 GIS를 연계한 농경지 유역에 대한 수문학적 모의." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제29권, 제6호, pp. 203-216.
- 배덕효 (1997). "저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형 개발." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 49-457.
- 배덕효, 조원철 (1995). "물리적·개념적 연속 유출 모형에 의한 유출해석." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 193-202.
- 신용노 (1996). 일 유출 모형(NWS-PC)의 매개변수 산정 및 적용. 석사학위논문, 충남대학교.
- 심순보, 김선구, 고석구 (1992). "최적화 기법에 의한 저류함수 유출 모형의 자동보정." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제12권, 제3호, pp. 127-137.
- 이상호, 김영성, 신용노 (1997). "한강수계 다목적댐 하류 일 유출 모의 연구." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 575-585.
- 조홍제, 조인률 (1998) "분포형 유출모형을 이용한 홍수유출해석." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제2호, pp. 199-208.
- 조홍제, 조인률, 김정식 (1997). "TOPMODEL을 이

용한 강우-유출해석에 관한 연구." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 515-526.

한국수자원공사 (1990~1996). 소양강 다목적댐 관리연보.

행정자치부 (1997). 재해연보, 중앙재해대책본부.

Beven, K., Quinn, P., Romanowicz, R., Freer, J., Fisher, J., and Lamb, R. (1994). *TOPMODEL and GRIDATB: A users guide to the distribution versions(94.03)*. CRES Technical Report TR110/94, Lancaster University, Lancaster, UK.

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., 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.

Franchini, M., Wendling, J., Obled, C., and Todini, E. (1996). "Physical Interpretation and Sensitivity Analysis of the TOPMODEL." *J. of Hydrology*, Vol. 175, pp. 293-338.

Kirkby, M.J. (1975). "Hydrograph Modelling Strategies." *Process in physical and human geography*, Edited by Peel, R., Chisholm M., and Haggett, P., Heinemann, pp. 69-90.

Quinn, P.F., Beven, K., Chevallier, P., and Planchon, O. (1991). "The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modelling Using Digital Terrain Models." *Hydrological Processes*, Vol. 5, pp. 59-79.

(논문번호:99-059/접수:1999.08.17/심사완료:1999.11.16)