

준분포형 TOPMODEL 개발

Development of Semi-Distributed TOPMODEL

배 덕 호* / 김 진 훈**

Deg-Hyo Bae / Jin-Hoon Kim

Abstract

The diversity of observed hydrologic data and the development of geographic information system leads significant progress for developing distributed runoff models in the world. One of the typical examples is TOPMODEL, but the spatial coverage of its application is limited on small headwater basins. The purpose of this study attempts to overcome its limitation and consequently develops a semi-distributed TOPMODEL. The developed model is composed of two components: a watershed runoff component for a lumped representation of hydrologic runoff process on the catchment scale and a kinematic wave type hydraulic channel routing component for routing the catchment outflows. The application basin is the 2,703km² upper Soyang dam site and several daily and hourly events are selected for model calibrations and verifications. The model parameters are estimated on 1990 daily event. The model performance on correlation coefficient between observed and computed flows are above 0.90 for the verification events. It is concluded that the developed model in this study can be used for flood analysis in large drainage basins.

keywords : TOPMODEL, Kinematic wave channel routing, Semi-distributed model, Topographic index, Soyang River basin

요 지

최근 국내외적으로 수문관측 자료의 다양성 및 지형정보시스템의 발달로 분포형 유출모형의 개발이 활발히 진행되고 있다. 그 대표적인 모형 가운데 하나인 TOPMODEL은 소유역에서만 적용될 수 있는 적용 유역면적의 제약성을 내포하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 공간적 제약성을 극복하기 위해서 준분포형 TOPMODEL을 개발하였으며, 개발된 모형은 소유역의 토양수분 변화 및 유출해석을 할 수 있는 유역 유출모형과 각 소유역들을 연결하여 상류에서 하류로 하도 홍수추적을 할 수 있는 운동파 하도 홍수추적 모형으로 구성하였다. 개발된 모형의 적용 대상지역은 2,703km²의 소양강 댐 상류유역을 선정하였고, 과거 주요 호우사상을 선택하여 1990년 일단위 사상은 모형의 매개변수 추정에 사용하였으며, 기타의 사상은 모형의 검증에 이용하였다. 그 결과 선택된 호우사상에 대해서 관측 유량과 계산유량의 상관계수가 0.9 이상으로 비교적 정확한 결과를 제시하였다. 따라서, 본 연구에서 개발된 준분포형 TOPMODEL은 대유역의 홍수해석에 유용하게 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : TOPMODEL, 운동파 하도추적, 준분포형 모형, 지형지수, 소양강 유역

* 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 부교수

Associate Professor, Water Resources Institute, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

** 세종대학교 토목환경공학과 박사과정

Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: jhcnu@sju.ac.kr)

1. 서론

강우에 의한 유출현상을 해석하기 위한 수단으로 수단의 일환으로 수자원 실무자들은 강우-유출모형을 사용해 왔다. 강우-유출모형은 그 적용분야의 다양성만큼 단순한 경험공식에서부터 총괄형 개념적 모형(lumped conceptual model) 및 물리적 분포형 모형(physical distributed model) 등 수많은 모형이 개발되었으며, 각 모형의 문제점을 개선하려는 노력이 계속되고 있다. 일례로 한국건설기술연구원(1993)에서 국내에 활용되고 있는 모형의 종류를 조사하기 위한 설문조사 결과에 의하면 계획 및 설계분야에는 합리식, 단위도, 합성단위도, 가지야마 홍수량 산정공식, TANK 모형 등이며, 도시유출의 설계 및 해석에는 ILLUDAS, RRL, ILSD 및 합리식 등이 이용되고 있으며, 홍수해석을 위해서는 HEC-1, HEC-2, SSARR, SWM, SWMM, USGS, DAMBRK, 저류함수법, Clark의 유출해석 모형 등이고, 홍수사상 해석을 위해서는 저류함수모형과 HEC-1 모형이 주로 단일 홍수사상 해석에 이용되고 있는 것으로 조사되었다.

이와 같이 과거에는 관측자료의 제약성, 모형 계산시간의 한계 등으로 인해 주로 개념적 강우-유출모형이 이용되었으나 최근에는 기상 및 수문 관측 자료의 다양성 및 지형정보시스템(Geographic Information System, GIS)의 발달로 분포형 모형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 대표적인 모형 가운데 하나가 TOPMODEL이다. TOPMODEL은 Beven and Kirkby (1976)에 의해 제안된 개념적 분포형 유출모형으로서 유역의 지형변화에 따른 토양내의 수분변화, 지표유출을 통한 유역출구의 유량을 산정할 수 있는 모형이다. 이 모형은 그 자체가 완성된 모형구조라기 보다는 각 지역의 특성에 따라 수정, 개발될 수 있는 유출에 영향을 주는 제반요소들의 집합체라 할 수 있어 그 응용분야도 수리, 수문, 수자원, 환경, 농토목, 임업, 기상 등 매우 다양하다(Beven, 1986; Band et al., 1991; Sivapalan et al., 1990; Wolock and Hornberger, 1991; Ijjasz-Vasquez et al., 1992; Stieglitz et al., 1997; Warrach et al., 2000; Chang et al., 2004). 국내에서도 김상현 등(1996), 조홍제와 조인률(1998) 등이 유역면적 100km² 내외의 중소규모 유역에 모형의 적용성을 검토하였으며, 배덕효 등(2000)은 TOPMODEL의 단일유역 홍수예보 모형으로서의 활용 가능성을 제시한 바 있다. 또한, 김경현 등(1999)은 TOPMODEL 유출계산에서 시간 스케일에 대한 영향을 분석하였으며, 이학수 등(2001)은 지표하류부에 이중 저류체계를 고려해 주는

수정 TOPMODEL의 적용성을 고찰하였고, 조홍제 등(2000)은 TOPMODEL의 장기유출 해석에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 이와 같은 기존의 TOPMODEL은 유역의 지하수면이 공간적으로 균등하고 유역의 반응 시간스케일에 관하여 정상상태의 비율로 채워진다는 가정사항 때문에 500km² 이내의 소유역에 적합한 모형으로 알려져 있어 한강과 같은 대유역의 유출해석 모형으로 활용하는 데는 한계가 있었다. 이러한 제한적 모델을 대유역에 적용하고자 Franchini et al.(1996)은 기존 TOPMODEL의 유역추적 알고리즘인 운동학적(kinematic) 기법 대신에 포물선 단위유량도(parabolic unit hydrograph) 기법을 도입하여 840km²의 Sieve 유역에 적용하였고, Takeuchi et al.(1999)은 기존 TOPMODEL과 Muskingum-Cunge 하도추적 기법을 결합한 분포형(block-wise) 모델의 미세측 유역 적용성을 소개한 바 있다.

본 연구에서는 TOPMODEL의 대유역 적용의 공간적 제약성을 극복하기 위해 하도 홍수추적 모형을 개발하고, 이를 기존의 TOPMODEL과 결합하여 유역 및 하도 홍수추적을 고려한 준분포형(semi-distributed) 모형의 국내유역 적용성을 검토하고자 한다.

2. 모형이론

본 연구의 모형은 소유역의 강우유입에 따른 토양수분의 변화 및 지표유출을 통한 유역출구에서의 유출 수문곡선을 산정할 수 있는 유역 유출모형과 각각의 소유역을 하도 홍수추적을 통해서 상류에서 하류로 연결하는 하도 홍수추적 모형으로 구성되어 있으며, 개발 모형의 구성과 각 성분 에 대해서 기술하면 다음과 같다.

2.1 모형의 구성

본 연구에서 개발한 모형은 기존의 TOPMODEL이 소유역에만 적용될 수 있는 모형의 한계를 극복하기 위한 모형으로 유역 홍수량 산정 모형과 하도 홍수추적 모형으로 구성되어 있다. 유역 홍수량 산정 모형에서 지형지수 계산, 토양수분의 변화 모의 및 유역 홍수추적은 기존 TOPMODEL의 개념과 동일하게 사용된다. 이렇게 모의된 상류 유역의 유출량은 하류유역으로 흘러 들어가 하도추적을 거치게 되는데, 하도 홍수추적을 위한 일반적인 방법은 운동파(kinematic wave) 방법, 확산파(diffusive wave) 방법, 동역파(dynamic wave) 방법이 있으나 본 연구에서는 운동파 방법에 의한 하도 홍수추적 모형을 선정·구축하였다.

이와 같은 유역 및 하도 홍수추적 모형을 특정지역에

적용하고자 할 때는 유역의 크기, 지형조건에 따라 다르지만, 일반적으로 Fig. 1과 같이 설명될 수 있다. 즉, 특정 유역을 강우의 분포특성이나 지형 및 토양조건 등이 비교적 균일하도록 몇 개의 소유역으로 분할하고 상류의 유량유입이 없는 headwater 유역 "1", "2"에 대한 유량을 유역 유출모형을 이용하여 계산한다. 그 후 각각의 소유역에서 계산된 유량의 시간적 분포를 합산하여 합류점 "A"에 대한 수문곡선을 계산한다. 또한, 합류점 "A"에 대한 수문곡선을 상류 유입조건으로 하도구간 "A-B"에 대한 하도홍수 추적을 실시하고 유역 "3"에 대한 유량을 유역 유출모형으로 계산하여 합산함으로써 유역 출구점 "B"에 대한 최종 수문곡선을 계산한다.

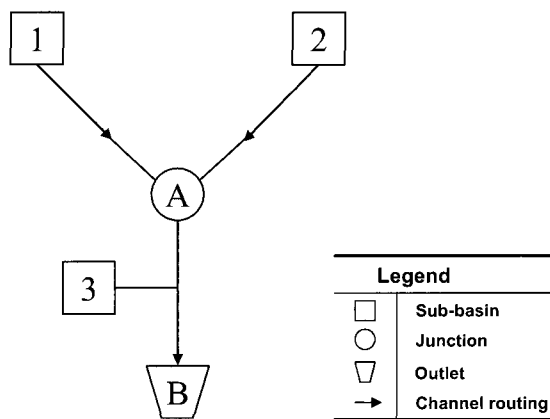


Fig. 1. Schematic diagram for combining basin and channel flow routing

2.2 유역 유출모형

소유역 출구에서의 유출량을 산정하는 유역 홍수추적 모형은 기존의 TOPMODEL에 근거한다. TOPMODEL의 기본 개념은 Kirkby(1975)에 의해 제안되었으며, 이 모형의 기본 이론은 여러 연구자들에 의해 소개되었으므로 구체적인 이론은 Beven et al.(1994)을 참고하기 바람, 여기서는 단지 본 연구의 준분포형 모형과 밀접한 관련이 있는 이론적 근거 및 모형의 매개변수와 관련된 부분만을 제시하고자 한다.

TOPMODEL은 전세계적으로 매우 다양한 형태의 모형이 존재하지만, 그 기본 요소는 지형지수(topographic index)의 산정, 토양수분의 변화 및 지표유출모의 등으로 구성되어 있다. 이 모형은 소유역내 강우 유입에 따라 지표유출이 형성되는 포화면적을 유역의 지형특성 및 토양특성으로부터 결정할 수 있는 모형으로써 다음과 같은 i) 포화층의 흐름은 정상상태(steady state), ii) 유역내 특정지점의 포화층 동수경사는 그 지점의 지표면 경사와 동일, iii) 토양깊이에 따른 전도계

수(transmissivity)의 변화는 지수감소 곡선을 갖는다는 가정사항으로부터 Eq. (1)과 같이 유역내 특정지점의 지하수면 깊이 z_i (m)를 산정할 수 있고, 이를 유역전체에 적분하여 산정한 유역평균 지하수면 깊이 \bar{z} 와의 관계를 나타내는 Eq. (2)를 유도할 수 있다(Beven and Kirkby, 1979).

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

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

여기서, $f(m^{-1})$ 는 측면 전도계수(lateral transmissivity)의 감쇠율을 나타내는 모형 매개변수로서 특정지점의 저류부족량(local storage deficit) S_i (m)와의 관계를 나타내면 Eq. (3)과 같다.

$$T = T_0 e^{-S_i/m} = T_0 e^{-fz_i} \quad (3)$$

Eq. (1)에서 T_0 (m^2/h)는 토양이 포화되었을 때 측면 전도계수, $\tan \beta$ 는 지표면 경사, r (m/h)는 특정 시간동안 유역전체에 균일하게 지하수면으로 유입되는 양, a (m^2)는 점 i 를 통해 유출되는 단위 등고선 길이 당 사면의 면적을 나타낸다. Eq. (2)의 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($\ln T_0$)를 나타낸다. 따라서 유역내 각 지점에서의 전도계수 및 지형지수를 알면 유역평균 지하수면 및 특정지점의 지하수위를 산정할 수 있다. 만약 지표로부터 지하수면까지의 깊이를 나타내는 z_i 가 0이 되는 지역은 토양이 완전히 포화되어 유입되는 강수는 전부 지표유출을 하게되는데(이를 기여면적 contributing area라 함) 기저유출량을 합하여 전체 유출량을 산정하게 된다. 이때 유역 홍수추적은 기존의 TOPMODEL의 경우 Clark(1945)의 시간-면적(time-area) 추적법(Valeo and Moin, 2000)과 같이 x_i 를 i 번째 흐름구간의 길이, 유역출구에서 유역의 최원점까지의 거리 분할수를 N , 속도 매개변수를 v (m/h)라 할때 유역내 어떤 특정지점으로부터 유역출구까지 도달하는 시간은 다음 Eq. (4)로 산정할 수 있다는 개념에 착안하여 등거리 도달시간을 산정하여 선형 홍수추적 알고

리듬으로 단일유역의 유역 홍수추적에 사용하였다 (Beven and Kirkby, 1979).

$$\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\nu} \quad (4)$$

한편, TOPMODEL에서 중요한 역할을 하는 각 지점의 지형지수는 유역의 수치고도모델(digital elevation model, DEM)로부터 산정될 수 있다. 지형지수의 산정 방법은 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 있으며(Wolock and McCabe, 1995), 본 연구에서는 MFD 방법을 사용하였다. Eq. (2)에서 알 수 있는 것처럼 유역의 토양 수리특성을 나타내는 전도계수가 같을 때 지형지수가 같은 임의의 점들의 흐름 특성은 같으므로 TOPMODEL이 분포형 모형이면서도 개념적 모형으로 계산할 수 있는 이점을 가지고 있다. 즉 유역내 각 지점에서 지형지수를 산정하고 이에 대한 분포곡선을 산정하여 각 지형지수의 증분(discrete increment of topographic index)에 대해서 토양수분의 변화 및 지표 유출량을 산정할 수 있다.

지표면에서 포화영역까지 수분이 이동하는 개념은 일련의 저류고로 설명될 수 있다. TOPMODEL 개발 초기의 토양모형은 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, 토양층을 불포화 영역과 포화영역으로 구분하고 불포화영역에는 시들점(wilting point), 최대보수량 등 토양수분의 상태에 따라 식생영역(root zone storage)과 중력배수영역(gravity drainage)으로 나눈다. 지표로부터 유입된 강우는 먼저 토양식생영역으로 유입되어 식생영역의 저류부족량은 감소하게 된다. 만약 강우 유입량이 저류부족량을 완전히 만족하게되면, 남은 양은 불포화층의 저류량으로 저장되며 추가적인 강우의 유입으로 불포화층의 저류량이 완전포화 상태가 되면 지표유출을 하게 된다. 기저 유출량은 포화영역에서의 흐름으로부터 산정

된다. 보다 구체적인 토양수분의 변화 개념은 베덕호 등(2000)을 참고하기 바란다.

2.3 하도 홍수추적 모형

하도 홍수추적은 상류 일지점에서의 유입 수문곡선으로부터 하류 일지점의 유출 수문곡선의 시간적, 공간적 변화를 예측하기 위한 것으로서 본 연구에서는 운동과 하도 홍수추적 모형을 사용하였다. 그 기본 이론은 다음과 같은 연속 방정식과 운동량 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (5)$$

$$S_0 = S_f \quad (6)$$

여기서, S_0 및 S_f 는 하도 및 마찰경사, A 는 하도 단면적, Q 는 유량, q 는 지류 유입량을 나타낸다. 이 경우 하천의 특정 지점에서의 유량은 다음 Eq. (7)과 같은 맨닝의 식으로 표현될 수 있으며, 이는 Eq. (8)과 같이 단순화될 수 있다.

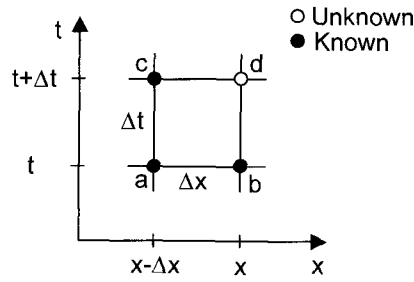
$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (7)$$

$$Q = \alpha A^\beta \quad (8)$$

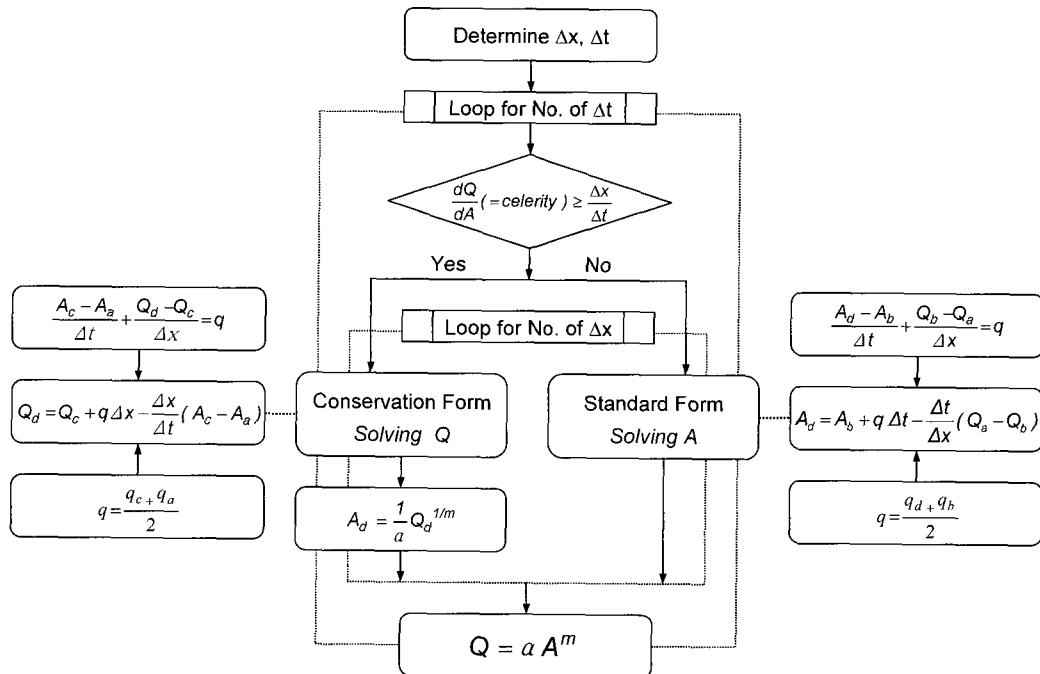
여기서, n 는 조도계수, R 은 동수반경을 나타내며, 계수 α 와 β 는 조도 및 하도의 형상에 따른 상수이다. Eq. (8)을 Eq. (5)에 대입하여 정리하면 운동과 하도 홍수추적의 지배방정식을 Eq. (9)와 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \alpha \beta A^{(\beta-1)} \frac{\partial A}{\partial x} = q \quad (9)$$

Eq. (9)에서 α , β 가 상수이므로 단지 A 만이 미지수로 남는다. Eq. (5) 및 (9)의 편미분 방정식은 유한차분 근사법으로 해석할 수 있으며, Fig. 2(a)와 같은 거리-시간에 대한 4점 유한차분격자를 형성하기 위해 Fig. 2(b)의 적용 알고리즘에 나타난 것처럼 Δx , Δt 를 결정한 다음 근사법의 안정성을 고려하기 위하여 차분화된 격자내에서 유량에 의한 운동과의 크기와 차분격자 $\Delta x/\Delta t$ 의 크기를 비교하여, 즉 $c\Delta t/\Delta x$ 로 정의되는 Courant 수가 1보다 크나 적으냐에 따라 보전형 및 표준형 기법을 적용한다(Miller, 1984; HEC, 1990).



(a) 4 point mesh-network



(b) Application flowchart

Fig. 2. Application diagram for the kinematic wave channel routing

3. 모형의 적용 및 해석

3.1 적용대상지역 및 기본자료

본 연구의 대상유역은 Fig. 3과 같이 2,703km²의 유역면적을 갖는 소양강 댐 상류유역을 선정하였다. 소양강은 총 유로연장 166.2km로써 한강수계를 형성하는 북한강의 최대 지류이며 인북천 및 내린천의 두 지류로 구성되어 있다. 소양강은 오대산(EL. 1,563m) 부근에서 발원하여 남으로 유하하다가 춘천시 남북방에서 북한강과 합류한다. 소양강 댐은 북한강 합류지점에서 약 12km 떨어진 소양강 계곡에 위치한 높이 123m, 댐 길이 530m, 체적 약 9,600,000m³의 사력댐으로서 홍수기에 자연 유하량을 저류하여 갈수기에 서서히 유하시킬 수 있는 홍수조절 능력을 갖추고 있다.

본 연구에서 개발된 모형의 적용성을 검토하기 위해

소양강댐 상류유역이 대유역이라는 점을 감안하여 유역면적의 크기, 하천수계의 구성형태, 수위 관측지점의 위치 등을 고려하여 Fig. 3과 같이 인북천(A=939.45km²), 내린천(A=1084.37km²) 및 소양강(A=679.18km²) 유역으로 구분하였으며, 1990~2000년 동안 소양강 댐 상류유역에 발생한 일 및 시 수문곡선을 이용하였다. 그러나 이 기간에 발생한 대표적인 홍수사상 중에서 각 지점의 관측 수문곡선 및 기상자료를 검토하여 부정확한 자료가 포함된 것으로 판단되거나 결측치가 많은 홍수사상은 적용대상에서 제외하였다.

모형에 필요한 수문 및 기상자료로는 모형의 입력자료로 요구되는 강우 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 12개

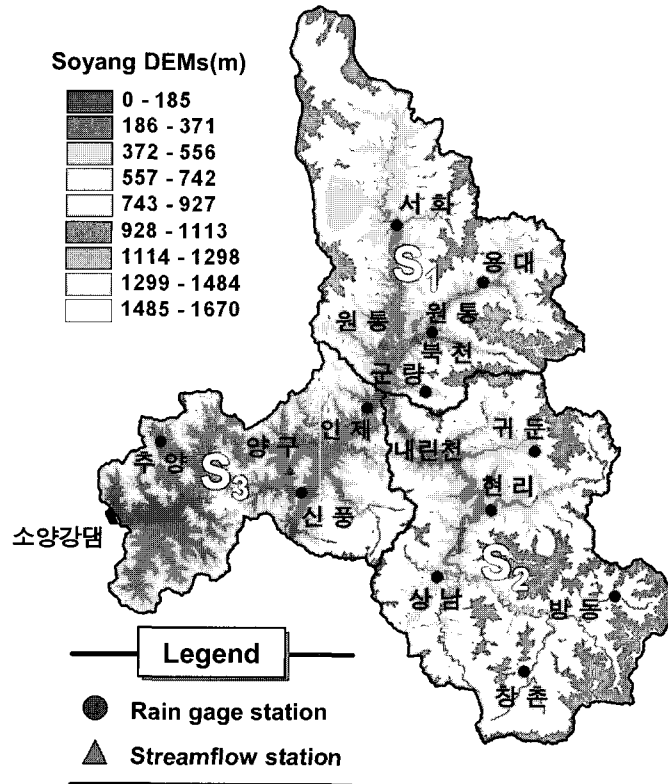


Fig. 3. Study area(S₁=Inpuk-cheon basin; S₂=Naerin-cheon basin; S₃=Soyang-river basin)

의 T/M 우량관측소가 있으며, 원통, 내린천, 양구, 인북천 등 4개의 수위관측소와 소양강댐이 존재한다. 기상 관련 자료를 수집하는 측후소는 인제 측후소 및 인접 춘천 측후소가 있다. 유역 평균강우량은 유역내 존재하는 12개의 T/M 관측소의 강우량을 티센의 가중법으로 산정하였으며, 증발량은 춘천 측후소 자료를 사용하였다. 한편 유량 자료는 원통 및 내린천 지점의 경우 관측된 수위자료와 수위-유량 관계곡선식(한국수자원공사, 1990~2000)을 이용하여 산정하였으며, 소양강댐 지점의 경우 댐 유입유량을 이용하였다.

3.2 지형지수 분석 및 매개변수 추정

소유역 유출모형인 TOPMODEL을 적용하기 위해서는 지형지수 분포의 산정이 선행되어야 한다. 이를 위해 Landsat TM 위성영상 자료로 추출된 DEM 자료로부터 격자간격 30m의 정방형 DEM 자료를 생성하여 인북천, 내린천, 소양강유역을 대상으로 각각의 격자점

에 대한 지형지수 값을 산정하여 분할된 소유역들 사이의 차이를 비교하였다. 각 유역의 지형지수 자료값에 대한 통계적 분석결과는 Table 1과 같이 평균, 표준편차, 왜곡도에 있어서 유사한 경향으로 나타났으며, 실제 소유역 유출모형의 입력치로 요구되는 빈도곡선은 Fig. 4에서와 같이 세 경우 모두 유사한 변동을 보이는 것으로 나타났다.

한편, 모형의 매개변수는 90. 6. 1~10. 31의 일 유출곡선을 이용하여 추정하였다. 매개변수 추정방법에는 수동보정법과 자동추적법 등이 이용되고 있으나, 본 연구에서는 수동보정법으로 추정하였다. 즉, 90년 일단위 수문사상을 대상으로 먼저 상류의 유입유량이 없는 내린천 유역의 매개변수를 내린천 수위지점의 유량자료를 이용하여 추정하였으며, 이를 고정한 상태에서 소양강댐 유입유량을 이용하여 나머지 소유역들에 대한 매개변수를 추정하였다. 소양강댐 상류유역의 각 소유역별 추정된 매개변수 값은 Table 2와 같고, 모형의 매개변

Table 1. Statistical results of topographic index for each sub-basin.

Item \ Basin	Inpuk	Naerin	Soyang
Mean	7.2878	7.1565	7.1734
Std. Dev.	7.7758	7.0504	7.6918
Skewness	-0.8542	-0.9071	-0.8506

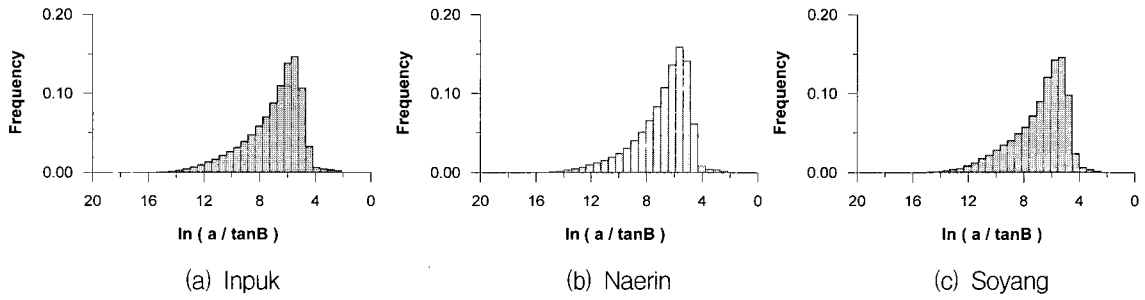


Fig. 4. Frequency distribution of topographic index for each sub-basin

Table 2. Estimated parameters for each sub-basin.

Paramter		Basin		
Symbol	Unit	Inpuk	Naerin	Soyang
m	[m]	0.0113	0.0118	0.0121
T ₀	[ln(m ² /day)]	5.128	5.408	5.688
S _{rmax}	[m]	0.053	0.050	0.051
S _{r0}	[m]	0.001	0.001	0.002
t _d	[day/m]	2.40	2.20	2.00

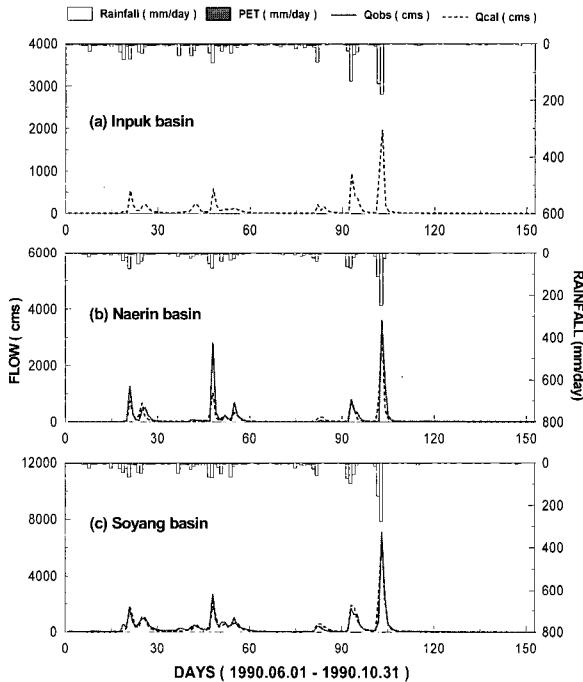


Fig. 5. Observed and simulated flows on 1990 daily event

수 추정에 사용된 90년 일단위의 유출수문곡선에 대한 모형의 계산결과는 Fig. 5와 같다. 이 기간 중에는 Fig. 5에서와 같이 9. 9~9. 11일간 402.3mm의 집중호우로 소양강댐 유입량이 급격히 증가하여 댐수위가 9. 12. 01:00에 준공이후 최고수위인 EL. 197.99m를 기록한 기간을 포함하여 다수의 수문곡선이 존재하고 있다.

3.3 일단위 유출해석

본 연구에서 개발된 모형의 적용성을 검토하기 위해 선택된 주요 일 및 시간위 수문사상 가운데 모형의 매개변수 추정에 사용된 1990년 사상을 제외한 나머지 사상은 모형의 검증에 이용하였다.

Fig. 6~9는 1995, 1996, 1999, 2000년의 일단위 호우 사상에 대한 각 소유역의 관측유량과 추정된 매개변수를 이용하여 계산된 유량을 도시한 것이다. 이들 유출 사상에 대한 모형의 유량계산 결과에 대한 통계치는 Table 3과 같다. 모형의 매개변수 추정에 사용된 1990년 사상의 경우 소양강댐에서의 관측유량에 대한 계산 유량의 유출용적 상대오차는 -2.80%, 침투유량 발생시간 오차는 0일, 상관계수는 0.95로 나타났고, 1995년 사상의 경우 -0.68%, -1일, 0.93, 1996년 사상의 경우 -3.88%, 0일, 0.95, 1999년 사상의 경우 12.83%, 0일, 0.97, 2000년 사상의 경우 7.32%, -2일, 0.94로 나타났다. 이와 같이 관측유량과 계산유량사이에는 국지적인 차이가 있지만 1990년 사상을 이용하여 추정된 매개변수를 고정된 상태에서 그 외 나머지 호우사상에 대한 관측 강우량과 증발량을 이용하여 계산된 소양강댐 지점에서의 유량결과는 Fig. 6~9 및 Table 3에서 알 수 있는 것처럼 관측치와 비교적 잘 일치됨을 알 수 있다.

한편, 소양강댐 상류 유역인 인북천 유역의 경우 Fig. 3에서와 같이 원통 및 북천 수위지점이 본 소유역에 포함되어 있어 유역분할에 따른 출구점과 일치하지 않

아 모형 검·보정 계산에서 활용하지 못하였다. 또한, 내린천 유역의 경우 선택된 일단위 강우사상에서 계산 및 관측유량 사이의 상관계수가 0.78~0.89로 나타나 최종 출구점이 소양강댐 지점보다 약간 낮은 상관성을 보

이는 것으로 나타났다. 다년간의 자료를 검토한 결과 내린천 수위지점 자료의 관측 불확실성 및 수위-유량 관계곡선식 산정의 불확실성이 다소 영향을 미친 것으로 사료된다.

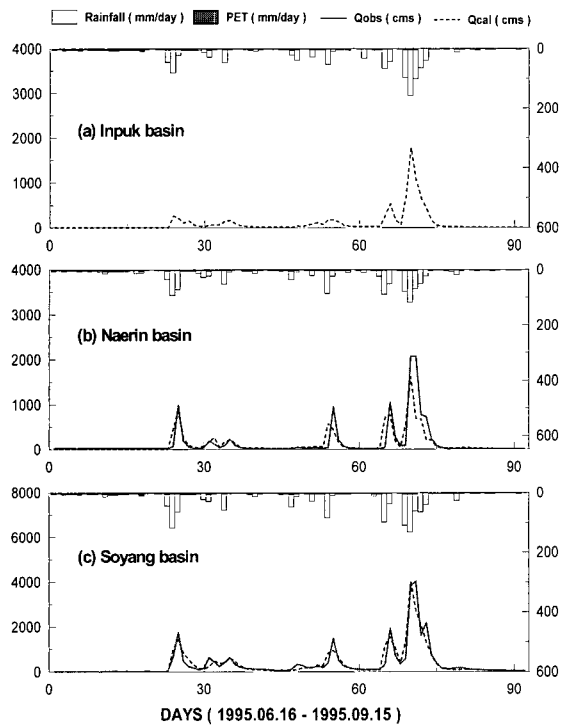


Fig. 6. Observed and simulated flows on 1995 daily event

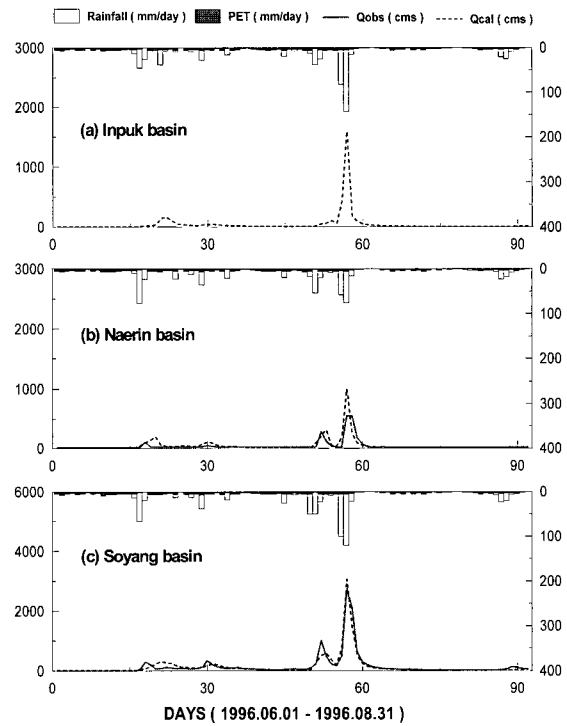


Fig. 7. Observed and simulated flows on 1996 daily event

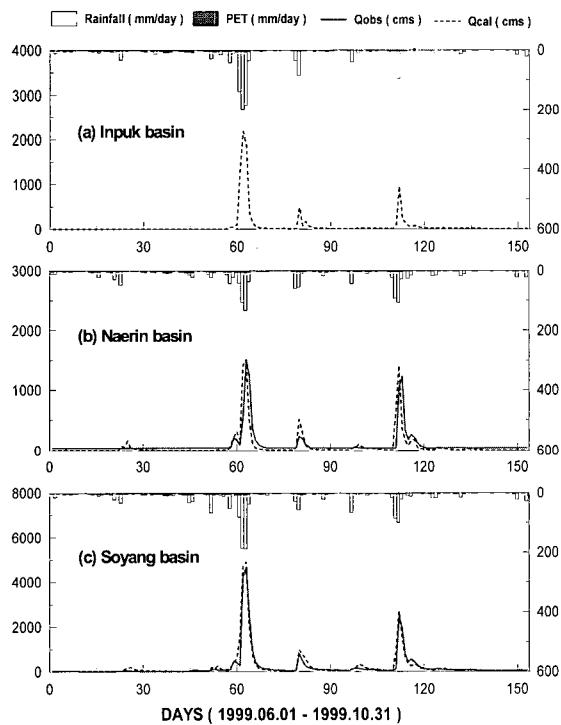


Fig. 8. Observed and simulated flows on 1999 daily event

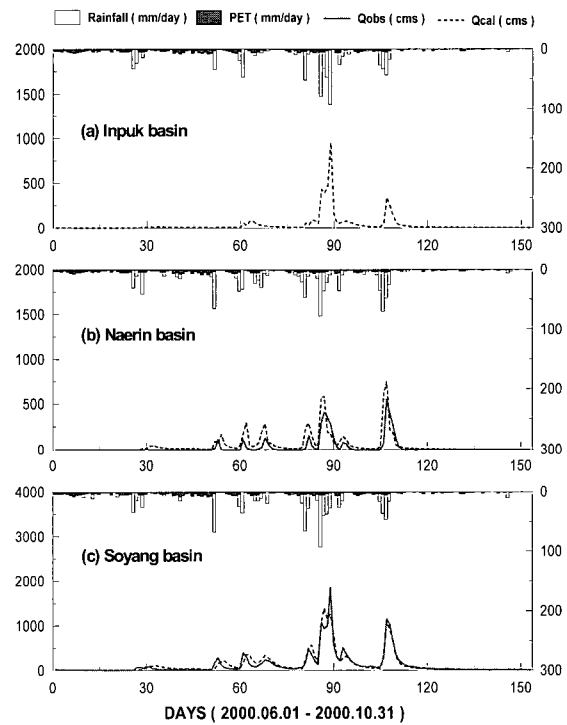


Fig. 9. Observed and simulated flows on 2000 daily event

Table 3. Statistical results between observed and simulated flows.

Periods	D/H	Item	Q_m	σ	Q_p	t_p	ARM	ERMS	CC
1990 (6.1~10.31)	Daily	Obs.	262.35	680.88	7062.60	103	83.17	210.06	0.95
		Cal.	255.00	674.84	6691.41	103			
		Res.	-7.35	209.93	-	-			
1995 (6.16~9.15)	"	Obs.	331.15	675.38	4029.40	71	111.71	247.63	0.93
		Cal.	328.91	614.67	4024.73	70			
		Res.	-2.23	247.62	-	-			
1996 (6.1~8.31)	"	Obs.	141.80	372.44	2737.40	57	49.56	112.42	0.95
		Cal.	136.30	362.47	3057.90	57			
		Res.	-5.49	112.29	-	-			
1999 (6.1~10.31)	"	Obs.	191.56	598.64	4665.30	63	63.52	161.30	0.97
		Cal.	216.14	630.81	4902.33	63			
		Res.	24.58	159.41	-	-			
2000 (6.1~10.31)	"	Obs.	121.34	249.01	1853.40	89	40.10	84.62	0.94
		Cal.	130.22	242.29	1391.96	87			
		Res.	8.88	84.15	-	-			
1990 (9.10.01~9.14.24)	Hourly	Obs.	2351.54	2865.67	10653.00	40	503.71	815.95	0.98
		Cal.	2459.12	3435.91	12368.20	43			
		Res.	107.58	808.82	-	-			
1995 (8.23.01~8.28.24)	"	Obs.	2142.19	1563.91	5661.00	38	301.25	396.06	0.97
		Cal.	2164.07	1669.40	6688.68	38			
		Res.	21.87	395.46	-	-			
1999 (7.30.01~8.5.24)	"	Obs.	1931.83	2031.18	7841.00	91	406.64	629.42	0.98
		Cal.	2232.63	2406.81	8955.39	92			
		Res.	300.80	552.89	-	-			
2000 (8.19.01~8.31.24)	"	Obs.	580.64	712.59	5874.00	225	331.93	503.12	0.88
		Cal.	850.13	872.52	4193.46	227			
		Res.	269.49	424.86	-	-			

Note: Obs. : Observed flow [m^3/s], Cal. : Computed flow [m^3/s], Res. : Residual between observed and computed flow, Q_m : Mean, σ : Standard deviation, Q_p : Peak flow, t_p : Peak time, rmse : Root mean square error, cc : Correlation coefficient

3.4 시단위 유출해석

Fig. 10~13은 각각 1990, 1995, 1999 및 2000년 시단위 호우사상에 대한 관측유량과 모형에 의해 계산된 유량을 나타낸 것이다. 이들 각각의 사상에 대한 소양강댐 지점에서의 유량 관측치와 계산치의 통계특성치는 Table 3과 같이 유출용적 상대오차는 4.57%, 1.02%, 15.57%, 46.41%로 나타났으며, 첨두유량의 발생시간 오차는 3시간, 0시간, 1시간, 2시간, 상관계수는 0.98, 0.97, 0.98, 0.88로 나타나 비교적 정확한 결과를 제시하였다. 소양강댐 상류의 내린천 유역의 유량 산정결과는 일단위 유출결과와 매우 유사한 경향을 보인다. 여기서 2000년 호우사상의 경우는 Fig. 13과 같이 관측자료의 불확실성이 다소 존재하여 비교적 낮은 정확도의 모형 계산결과를 제시하였다.

일 및 시단위 유출해석 결과를 전체적으로 살펴보면, 개발된 준분포형 TOPMODEL의 적용성은 매우 우수한 것으로 나타났고, 특히 1990년 일단위 사상으로 보정된

모형 매개변수를 단지 시간차원만 변환하여 시단위에 적용할 수 있는 TOPMODEL 매개변수의 물리적 특성은 배덕효 등(2000)의 연구에서처럼 매우 용이한 장점으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 TOPMODEL이 소유역에만 적용할 수 있는 제약성을 극복하기 위해 하도 홍수추적 모형을 개발하고, 이를 기존의 TOPMODEL과 결합하여 다수의 소유역이 존재하는 유역에 적용 가능한 준분포형 TOPMODEL을 개발하였다. 개발된 모형은 소유역 유출산정 모형과 각 소유역의 유량을 연결하는 하도 홍수추적 모형으로 구성되어 있다. 소유역 유출산정 모형의 경우 지형지수 산정, 토양수분 변화 모의 및 유역 홍수추적은 기존의 TOPMODEL에서 제시한 개념과 동일하고, 이들 각 소유역의 유량을 연결하기 위해 운동과 하도 홍수추적 모형을 사용하였다.

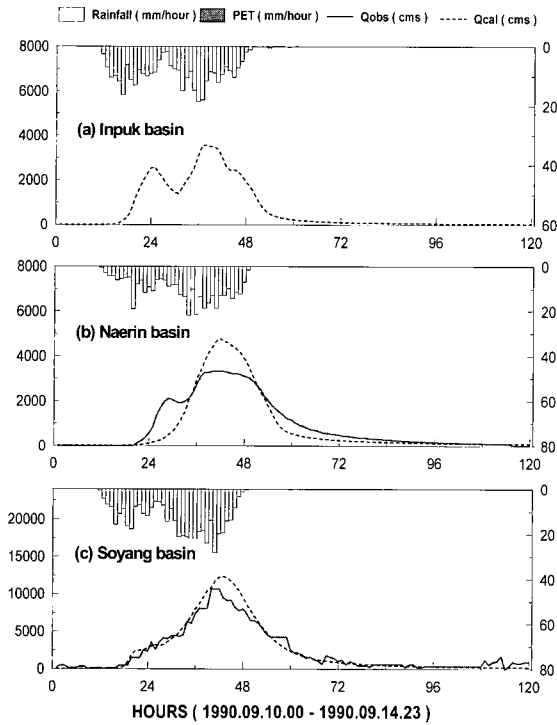


Fig. 10. Observed and simulated flows on 1990 hourly event

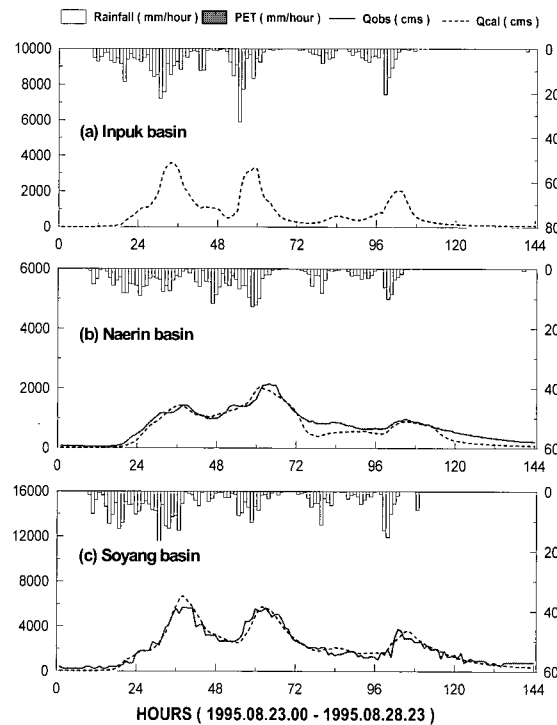


Fig. 11. Observed and simulated flows on 1995 hourly event

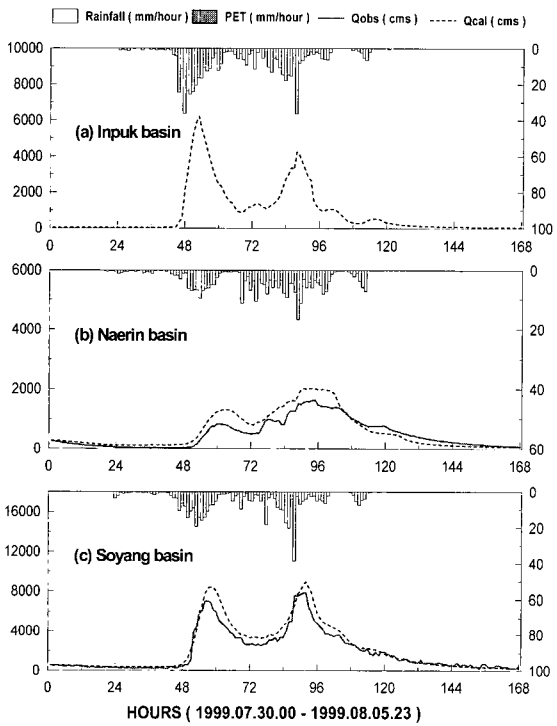


Fig. 12. Observed and simulated flows on 1996 hourly event

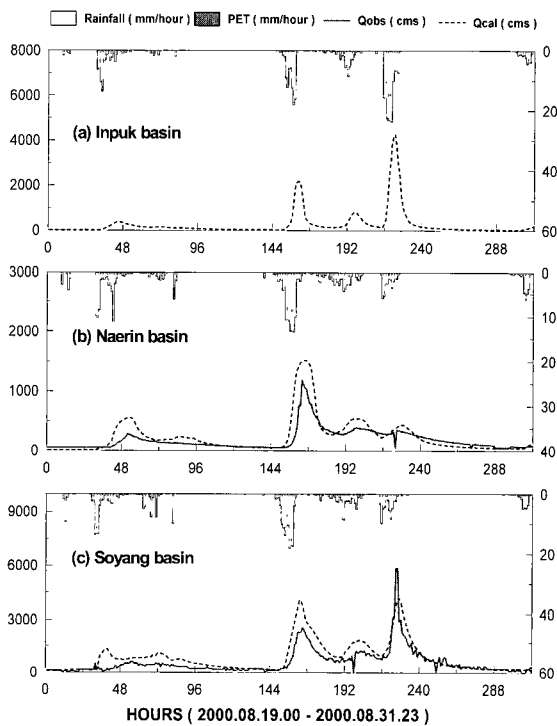


Fig. 13. Observed and simulated flows on 2000 hourly event

개발된 모형의 적용성을 검토하기 위해 소양강댐 상류 유역을 선정하여 하천수계의 구성형태, 수위 관측지점의 위치 등을 고려하여 인북천, 내린천, 소양강 등 세

유역으로 구분하고, 과거 주요 일 및 시단위의 유출사상을 이용하여 모형의 계산 및 검정을 수행하였다. 선택된 일 및 시 호우사상에 대하여 유출을 모의한 결과

관측유량과 계산유량 사이의 상관계수가 대부분 0.9이상으로 제시되어 비교적 정확한 결과로 나타났다. 이와 같이 본 연구의 개발모형은 기존의 TOPMODEL이 갖는 지역적 적용범위의 한계를 극복할 수 있어 한강과 같은 대유역의 홍수해석 등 여러 분야에 응용이 가능하리라 생각된다.

향후 개발된 모형의 보다 정확한 적용성을 위해서 대상 소유역 면적을 500km² 이하로 구분하고, 미계측 유역이 존재한다면 매개변수 전이화 기법 등을 활용하여 기존 TOPMODEL의 개념적 특성에 보다 부합된 모형적용을 수행해야 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 세부과제 한반도 약기상(집중호우) 감시 및 예측 기술개발로 수행된 것이며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

김경현, 이학수, 정성원, 김상현 (1999). "TOPMODEL 유출계산에서 시간 스케일에 대한 영향 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제2호, pp. 125-136.

김상현, 손광익, 한진연 (1996). "Tile Drain의 영향과 GIS를 연계한 농경지 유역에 대한 수문학적 모의." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제6호, pp. 203-216.

배덕효, 김진훈, 권원태 (2000). "TOPMODEL의 단일 유역 홍수예보능에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 87-97.

이학수, 한지영, 김상현 (2001). "지표하 흐름을 고려한 개선된 TOPMODEL의 유출분석 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 403-411.

조흥제, 김정식, 이근배 (2000). "TOPMODEL을 이용한 장기유출 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제4호, pp. 393-405.

조흥제, 조인률 (1998). "분포형 유출모형을 이용한 홍수유출해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제2호, pp. 199-208.

한국건설기술연구원 (1993). 수문모형 평가에 관한 연구: 강우-유출모형을 중심으로, 연구보고서, 건기연 92-WR-111-2.

한국수자원공사 (1990~2000). 소양강 다목적댐 관리 연보.

Band, L.E., Petersen, D.L., Running, S.W., Coughlan, J.C., Lammers, R.B., Dungan, J., and Nemani, R. (1991). "Forest ecosystem processes at the watershed scale: Basis of distributed simulation." *Ecol. Modell.*, Vol. 56, pp. 151-176.

Beven, K.J., 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. (1986). *Runoff production and flood frequency in catchments of order n: an alternative approach, in Scale problems in hydrology*, edited by V.J. Gupta, I. Rodriguez-Iturbe, and E.F. Wood, D. Reidel, Norwell, Mass.

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.*, 24(1), pp. 43-69.

Chang, K.-H., Kim, J.-H., Cho, C.-H., Bae, D.-H., and Kim, J. (2004). "Performance of a coupled atmosphere-streamflow prediction system at the Pyungchang River IHP basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 288, pp. 210-224.

Clark, C.O. (1945). "Storage and unit hydrograph." *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, pp. 1419-1446.

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.

HEC (1990). *HEC-1 Flood Hydrology Package. User's Manual*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Ijjasz-Vasquez, E.J., Bras, R.L., and Moglen, G.E. (1992). "Sensitivity of a basin evolution model to the nature of runoff production and to initial conditions." *Water Resources Research*, Vol. 28, pp. 2733-2741.

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.
- Miller, J.E. (1984). "Basic concepts of kinematic wave models." *USGS Prof. Paper* 1302, pp. 29.
- 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 Resources Research*, Vol. 26, pp. 43-58.
- Stieglitz, M., Rind, D., Famiglietti, J., and Rosenzweig C. (1997). "An Efficient approach to modeling the topographic control of surface hydrology for regional and global climate modeling." *Journal of Climate*, Vol. 10, pp. 118-137.
- Takeuchi, K., Ao, T., and Ishidaira, H. (1999). "Introduction of block-wise use of TOPMODEL and Muskingum-Cunge method for the hydro-environmental simulation of a large ungauged basin." *Hydrological Sciences*, 44(4), pp. 633-646.
- Valeo C., and Moin S.M.A. (2000). "Variable source area modeling in urbanizing watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 228, pp. 68-81.
- Warrach, K., Stieglitz, M., Mengelkamp, H.-T., and Raschke, E. (2000). "Advantages of a topographically controlled runoff simulation in a Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer model." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 3, pp. 131-148.
- Wolock, D.M., and Hornberger, G.M. (1991). "Hydrological effects of changes in atmospheric carbon dioxide levels." *Journal Forecast*, Vol. 10, pp. 105-116.
- Wolock, D.M., and McCabe Jr., G.J. (1995). "Comparison of Single and Multiple Flow Direction Algorithms for Computing Topographic Parameters in TOPMODEL." *Water Resources Research*, 31(5), pp. 1315-1324.

(논문번호:05-68/접수:2005.05.17/심사완료:2005.09.02)