

# 확률론적 중장기 댐 유입량 예측

## (I) 장기유출 해석

### Probabilistic Medium- and Long-Term Reservoir Inflow Forecasts (I) Long-Term Runoff Analysis

배 덕 효\* / 김 진 훈\*\*

Bae, Deg-Hyo / Kim, Jin-Hoon

#### Abstract

This study performs a daily long-term runoff analysis for 30 years to forecast medium- and long-term probabilistic reservoir inflows on the Soyang River basin. Snowmelt is computed by Anderson's temperature index snowmelt model and potential evaporation is estimated by Penman-combination method to produce input data for a rainfall-runoff model. A semi-distributed TOPMODEL which is composed of hydrologic rainfall-runoff process on the headwater-catchment scale based on the original TOPMODEL and a hydraulic flow routing model to route the catchment outflows using by kinematic wave scheme is used in this study. It can be observed that the time variations of the computed snowmelt and potential evaporation are well agreed with indirect observed data such as maximum snow depth and small pan evaporation. Model parameters are calibrated with low-flow(1979), medium-flow(1999), and high-flow(1990) rainfall-runoff events. In the model evaluation, relative volumetric error and correlation coefficient between observed and computed flows are computed to 5.64% and 0.91, respectively. Also, the relative volumetric errors decrease to 17% and 4% during March and April with or without the snowmelt model. It is concluded that the semi-distributed TOPMODEL has well performance and the snowmelt effects for the long-term runoff computation are important on the study area.

**keywords** : long-term runoff analysis, snowmelt model, potential evaporation, semi-distributed TOPMODEL

#### 요 지

본 연구에서는 소양강 유역을 대상으로 중장기 확률론적 댐 유입량 예측을 위해 30년 동안의 일단위 장기유출 해석을 수행하였다. 유출모형의 입력자료를 구축하기 위해 Anderson의 용설모형으로 적설에 대한 용설량을 계산하였고, Penman의 혼합기법으로 잠재증발량을 산정하였다. 또한, 기존 TOPMODEL의 적용 유역면적의 제약성을 극복하기 위해 대상유역을 적정 소유역으로 구분하고 운동과 하도홍수 추적기법을 통해 대유역 유출량을 계산할 수 있는 준분포형 TOPMODEL을 활용하였으며, 강수, 용설 및 잠재증발량을 유출모형에 입력하여 장기유출 해석을 수행하

\* 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@chol.com)

였다. 용설량 및 잠재증발량 계산결과는 관측자료의 부재로 그 정량적 평가는 수행할 수 없었지만 최대 적설깊이와 소형점시 증발량 자료와 같은 간접적 자료와의 시간적 변동성은 매우 잘 일치하였다. 이렇게 구축된 입력자료를 바탕으로 저수(1979년), 중수(1999년), 고수(1990년) 유출사상에 대한 모형의 최적 매개변수를 산정하고 준분포형 TOPMODEL의 일단위 장기유출 모의능력을 검토한 결과 계산유량과 관측유량 사이의 유출용적 상대오차가 5.64%, 상관관계수가 0.91로 계산되어 비교적 정확한 유출결과를 제시하였고, 용설고려 유무에 따라 3, 4월의 유출용적 상대오차가 17% 및 4%로 감소함으로써 장기유출 계산시 모형의 정확도 향상을 위해 용설모형의 적용이 매우 필요한 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 장기유출 해석, 용설모형, 잠재증발량, 준분포형 TOPMODEL

## 1. 서 론

인류의 역사와 더불어 한정된 수자원을 효율적으로 사용하고자 했던 노력은 계속되고 있다. 특히 도시의 발달과 인구증가로 인해 수자원 계획과 관리는 복잡성과 중요성이 더욱더 커지고 있다. 최근 우리나라를 비롯한 전 세계가 가뭄과 홍수 등, 물과 관련된 재해에 시달리고 있는 실정이다. 이러한 재해를 해결하기 위해서는 강우와 유량의 정확한 예측을 토대로 한 수자원의 계획과 관리가 이루어져야만 한다.

강수에 대한 이·치수 개념의 계절적 변동성이 뚜렷한 우리나라의 경우, 치수기의 단시간 홍수예측을 위한 홍수 예경보시스템이 운영되며, 이수기에는 댐 운영과 관리, 가뭄예측과 같은 물관리 개념의 중장기 수자원 관리시스템이 운영되고 있다. 여기서 댐은 수자원의 효율적인 관리와 안정적인 용수공급을 위해 건설된 것으로 댐 유역의 수문특성에 따라 유출량의 변화가 다양하게 이루어진다. 특히 홍수기에 저장된 물은 다음 홍수기까지 각종 용수로서 사용되는데, 안정적인 용수공급을 위해서는 댐 유역으로 유입되는 예측유입량을 파악하여 이를 근간으로 각종 용수에 대한 공급계획이 수립될 수 있을 것이다.

댐 유입량 예측을 위한 국외 연구사례를 살펴보면 기상예보 분야가 가장 발달한 미국은 정량적 강수량예보(Quantitative Precipitation Forecast, QPF)를 통한 단·중기 하천유출량 예측, 앙상블 유량예측(Ensemble Streamflow Prediction, ESP)과 확률론적 기상 예측자료를 연계한 중·장기 하천유출량 및 댐 유입량 예측을 수행하고 있으며, 이러한 결과는 수자원 분야 단독의 연구수행이 보다 나은 기상-수자원 연계기법을 통한 체계적 산출물이다. 내부적으로 NWSRFS(National Weather Service River Forecast System) 연속형 수문모형, 정량적 강수량 예보 기법, 통계적 방법에 근거한 확률 기상예보 등의 과정을 거쳐 홍수 예경보 및 수자원 관리에 그 활용성이 매우 높은 것으로 알려져 있다.

특히, 미국의 NWS(National Weather Service)에서는 ESP을 통해 과거의 하천유출량이 미래에 재현될 수 있다는 개념으로 다수의 수문곡선 형태로 하천유출량 예보를 생산하였다(Day, 1985). 이러한 개념의 ESP는 과거 기상자료를 활용한 기법으로 전환되어 확률론적 수문예측에 사용되고 있으며(Day, 1985; Smith et al., 1992), Croley(2000)는 확률론적 기상 예측자료를 이용하여 재현 가능한 하천유출량 앙상블에 가중치를 부여할 수 있는 연구를 수행하였고, Faber and Stedinger(2001)는 ESP 기법과 SSDP (Sampling Stochastic Dynamic Programming)를 연계하여 저수지 최적운영에 적용하였다. 또한 Franz et al.(2003)은 콜로라도 하천유출을 대상으로 물공급을 위한 ESP 결과를 평가하였고, Werner et al.(2005)은 기온 및 강수의 중기 기상 앙상블 자료를 입력으로 하는 ESP 기법의 적용성을 소개하기도 하였다.

국내에서도 중장기 하천유출량의 확률론적 예측을 위해 ESP 개념이 도입되었는데, 정대일과 김영오(2002)는 기상 예측자료를 이용한 Croley 및 PDF-ratio의 가중치 부여기법을 통해 충추댐 월유입량 예측에 관한 연구를 수행하였고, 정대일 등(2003a, b)은 신경망 기법을 활용한 강우-유출모델이 ESP 정확도에 미치는 영향을 다각적으로 분석하였다. 그러나 이러한 연구결과는 하천유출량의 월단위 및 계절적(이수기) 장기 확률예보에 초점을 두어 하천유출량이 시시각각 변하는 치수기에 1, 2주의 시간해상도를 가지는 중기 하천유출량 예측에 대한 연구가 이루어지지 않았고, ESP 예측에서 가중치 부여에 필요한 기상 예보자료의 부재로 과거 기상 관측자료를 바탕으로 인위적 기상 확률예보자료를 생산하여 그 적용성을 검토(정대일과 김영오, 2002)하였기 때문에 예측이 필요한 임의시점에서 기상 예보자료를 이용하여 미래에 발생할 수 있는 하천유출량 예측이 불가능한 실정이다.

본 연구에서는 이와 같은 국내·외 실정을 고려하여 국내 수문기상학적 특성에 부합하는 중장기 확률론적

하천유출량 예측에 관한 연구를 수행하고자 한다. 본 예측에서는 연속형 모델인 TOPMODEL(Beven et al., 1994)을 이용하여 일단위 ESP 연산을 수행하고, 국내 기상청에서 매일 12UTC에 생산되는 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System) 중기 대기 수치모델의 강수 예측자료로 하천유출량 앙상블에 가중치를 부여할 수 있도록 구성하였다. 여기에 사용된 강우-유출모델은 기존 TOPMODEL의 적용 유역면적의 제약성을 극복하기 위해 대상유역을 적정 소유역으로 구분하고 운동파(kinematic wave) 하도홍수 추적기법을 통해 대유역 유출량을 계산할 수 있도록 개발된 준분포형(semi-distributed) TOPMODEL(Bae et al., 2000)로써 본 모형에 대한 장기유출 모의능력 또한 검토되어야 할 것이다. 조홍제 등(2000)은 기존 TOPMODEL의 월단위 장기유출 해석에 관한 연구를 수행하였으나 본 연구에서와 같이 중장기 ESP 확률예보를 위한 일단위 시간해상도의 장기유출 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 소양강댐 상류유역을 대상으로 확률론적 댐유입량을 실시간(일단위) 개념으로 예측할 수 있도록 (a) 준분포형 TOPMODEL의 30년 일단위 장기유출 해석을 수행하고; (b) 장기유출해석 결과, ESP 기법 및 GDAPS 수치예보자료를 활용하여 확률론적 중장기 댐 유입량을 예측하고 관측유출량과 비교·분석할 수 있는 두 개의 연속논문으로 구성하였다.

본 논문은 그 첫 번째 논문으로서, 2장에서는 장기유출 해석을 위한 용설량 및 잠재증발량 계산 이론과 준분포형 TOPMODEL의 기본이론을 기술하고, 3장에서는 수문기상 입력 자료로부터 유출모형의 매개변수 추정 및 검증 결과를 다각적으로 제시하여 이들의 요약 및 결론을 4장에 기술하였다.

## 2. 모형이론

### 2.1 강우-유출모형 입력자료 생성

#### 2.1.1 용설량 계산

우리나라의 경우 이른 봄 쌓여 있던 눈이 녹아 하천에 미치는 영향은 홍수기 하천유출에 비해 상대적으로 적어 용설에 관한 연구는 덜 중요하게 인식되었다. 그러나 수자원 계획, 갈수량 분석 및 가뭄 연구 등 여러 가지 이수, 치수 목적으로 이용될 수 있는 수년 혹은 수십년의 장기간에 걸친 연속적인 유출해석을 하기 위해서는 용설에 관한 연구가 필수적이다. 왜냐하면 강우-유출 모형에서 일반적으로 입력치로 요구되는 강수량(precipitation)의 형태가 강우(rainfall)나 아니면 강설(snow)이나에 따라 유출계산에 미치는 영향은 매우 다

르기 때문이다. 강우는 지표면에 도달하자마자 일부는 지하로 침투하여 지하수를 형성하고 나머지는 지표유출을 통해 하천의 유출량에 바로 영향을 미치지만, 강설은 지표면에 쌓여 있다가 대기의 온도가 영상으로 상승함에 따라 서서히 녹아 하천 유출량에 영향을 미치기 때문이다.

용설현상을 규명하기 위해서 용설모형을 사용하고자 할 때, 모형의 선정 기준은 모형의 사용목적, 결과의 정확성, 모형의 간결성, 입력자료의 가용성 및 사용의 용이성 등을 고려하여야 한다. 모형의 형식이 용설현상의 물리적 과정을 표현할 수 있고, 입력자료가 풍부하고 정확할수록 모형의 결과는 정확할 것임은 분명하나 국내에서는 용설의 물리적 과정을 표현하면서도 모형의 입력자료가 비교적 간단한 총괄형(lumped) 개념적(conceptual) 모형이 적절한 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 용설의 물리적 과정을 표현하면서도 모형의 입력자료가 비교적 간단한 총괄형 개념적 모형인 미국 NWS의 온도지수 용설모형(temperature index snowmelt model)을 선정하였다. Anderson(1973)에 의해서 개발된 이 모형은 전세계적으로 가장 우수한 온도지수 용설모형 중의 하나로 알려져 있다(배덕효, 오재호, 1998).

Anderson 용설모형은 적설(snow cover)의 에너지 평형과 연속방정식을 만족시키기 위해 대기온도자료를 사용하는데, 이것은 눈-대기 사이의 상호작용을 위한 에너지 순환의 지표로 사용된다. 이러한 최대 및 최소 기온자료는 하루의 기온변동성을 표현하는 sine함수를 최적화시키기 위해 사용되었다. 또 다른 중요 기상변수인 일 강수량 자료는 하루 24시간을 4등분하여 분포시켰으며, 여기에 사용된 분포방법은 한반도의 시간강수량의 변동성을 연구한 Lim and Kwon(1998)의 결과를 활용하였으며 일강수량 체적의 분포비율은 (a) Midnight-6am=0.30; (b) 6am-Noon=0.27; (c) Noon-6pm=0.25; (d) 6pm-Midnight=0.18이다.

본 연구에서 사용한 용설모형은 6시간 단위로 계산되고 시작시점마다 다음과 같은 변수들을 계산한다: St, 적설물당량(snow cover water equivalent); Dt, 단위면적당 mme(0°C나 약 8cal/cm<sup>2</sup> 상태에서 1mm 얼음이나 물을 녹이거나 얼리는데 필요한 에너지) 또는 mm 에너지 단위를 가지는 적설열부족량(snow pack heat deficit); At, 눈속의 선행온도지수(≤0°C). 유역평균 지표온도(Tt) 및 강우량(Pt) 자료를 적용한 모델 방정식은 다음 Eq. (1)과 같다.

$$S_{t+1} = S_t + P_{x_t} - M_t \quad (1)$$

$$A_{t+1} = A_t + C_4 (T_t - A_t); A_t \leq 0 \text{ for all } t \quad (2)$$

$$D_{t+1} = D_t + C_{5_i} (T_t - A_t) + \frac{P_{x_i} T_t}{160} + M_t^F; D_t \leq 0 \quad (3)$$

여기서,  $P_{x_i}$ 는 6시간  $t$ 동안 조정된 강설량,  $M_t$ 는 용설량,  $M_t^F$ 는 적설속에서 다시 얼려진 용설량,  $C_4$ ,  $C_{5_i}$ 는 매개변수이다. 또한 Eq. (3)에 포함된  $P_{x_i}$ 는  $T_t \leq 0^\circ\text{C}$  상태에서의 새로운 적설량이다. 매개변수  $C_4$ 는 0.1~1.0의 범위를 가지고 있으며  $T_t = A_t$  조건일 때 1.0의 값을 가진다. Eqs. (1)~(3)을 고려함에 있어서 용설은 주어진 6시간 단위로 계산되지만 만약 열부족량이 0보다 작을 때는 동일 6시간동안 전체 혹은 부분적으로 다시 얼려질 수 있다.

본 모형에서 강우-적설이 함께 발생하는 기간 및 무강수 기간의 용설량은 다음 Eq. (4)로 계산한다.

$$M_t = M_{f_i} (T_t - T_t^0) \quad (4)$$

여기서,  $T_t^0$ 는 상수이고,  $M_{f_i}$ 는 6시간 단위로 변하는 용설요소(melt factor,  $\text{mm}/^\circ\text{C}$ )이다. 기온  $T_t^0$ 는 6시간 자료간격마다  $0^\circ\text{C}$ 로 산정하였다.

### 2.1.2 잠재증발량 계산

증발산으로 발생한 증기는 구름이나 안개의 형성으로 대기 중의 액체나 고체로 전환된다. 이 현상이 보다 진전되면 습기찬 공기가 폭풍우의 메커니즘에 의해 계속적인 응축을 야기하고 강수를 발생시켜 다시 지표면으로 환원한다. 본 연구에서는 이러한 대기과 지표면의 상호작용을 통한 증발량 계산을 위해 공기동역학(aerodynamic) 및 에너지 평형(energy balance) 이론의 혼합기법인 Penman 기법(Chow et al., 1988)을 적용하였다. 본 기법에서 잠재증발량  $E_p$ 는 개수면(open water surface)에서 에너지항  $E_r$ 과 공기동역항  $E_a$ 의 가중치 합으로 표현된다.

$$E_p = \frac{\frac{4098 e_s}{(237.3 + T)^2}}{\frac{4098 e_s}{(237.3 + T)^2} + \frac{C_p p}{0.622 \lambda}} E_r + \frac{\frac{C_p p}{0.622 \lambda}}{\frac{4098 e_s}{(237.3 + T)^2} + \frac{C_p p}{0.622 \lambda}} E_a \quad (5)$$

여기서  $(4098 e_s / (237.3 + T)^2)$ 항은 온도에 대한 포화증기압 곡선의 경사( $\text{Pa}/^\circ\text{C}$ ),  $(C_p p / 0.622 \lambda)$ 는 psychrometric 상수( $\text{Pa}/^\circ\text{C}$ )를 나타내고,  $T$ 는 기온( $^\circ\text{C}$ ),  $e_s$ 는 온도  $T$ 에서 포화증기압( $\text{Pa}$ ),  $C_p$ 는 등압비열( $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$ ),  $p$ 는 기압( $\text{Pa}$ ),  $\lambda$ 는 기온의 함수로 결정(Chow et al, 1998)되는 기화잠열( $\text{J}/\text{kg}$ )이다. 본 연구에서 포화증기압은 Pruppacher and Klett(1980)의 연구결과를 이용하였다.

Chow et al.(1988)은 공기동역항 구성요소  $E_a$ 를 Eq. (6)과 같이 표현하였다.

$$E_a = \frac{0.622 k^2}{p \rho_w [\ln(z_2/z_0)]} \rho_a u_2 (e_s - e_a) \quad (6)$$

여기서  $k$ 는 Karman 상수( $=0.4$ ),  $\rho_a$ 와  $\rho_w$ 는 공기와 물의 밀도,  $u_2$ 와  $e_a$ 는 증발표면상 높이 2m에서의 풍속 및 증기압,  $z_2=2\text{m}$ ,  $z_0$ 은 지표 조도높이(Garratt, 1992)를 나타낸다. 한편, 현열과 지열(ground heat) 플럭스(flux)의 기여를 무시한다면 개수면에서 에너지항은 다음과 같이 표현된다.

$$E_r = \frac{S_n + L_n}{\lambda \rho_w} \quad (7)$$

여기서 분자항의 순복사량( $\text{W}/\text{m}^2$ )은 태양복사( $S_n$ )의 유입 및 반사에 따른 차이와 장파복사( $L_n$ )의 유출입에 따른 차이의 합으로 표현된다. 순태양복사는 단파에너지의 총량( $S_t$ )과 알베도(albedo,  $\alpha$ )의 함수로 나타낼 수 있다.

$$S_n = S_t (1 - \alpha) \quad (8)$$

여기서 알베도는 태양광선 방향, 발산복사(diffuse radiation) 및 토양피복의 함수이지만 본 연구에서는 평균값인 1을 사용하였다. 장파 에너지 요소인  $L_n$ 은 지구 밖으로 유출되는 복사가 지표기온의 함수로 가정되어 다음과 같이 계산된다(Carpenter and Georgakakos, 2004).

$$L_n = L_i - [-f \epsilon \sigma (T + 273.2)^4] \quad (9)$$

여기서  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수( $=5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ),  $\epsilon$ 는 지표 방사율(emissivity),  $f$ 는 구름층(cloud cover)에 대한 보정계수로써 1로 가정하였다.

## 2.2 유출모형 이론

본 연구에서 사용한 모형은 기존의 TOPMODEL (Beven et al., 1994)이 소유역에만 적용될 수 있는 모형의 한계를 극복하기 위한 모형으로 유역 홍수량 산정 모형과 하도 홍수추적 모형으로 구성되어 있는 준분포형(semi-distributed) TOPMODEL(배덕효, 김진훈, 2005)을 이용하였다. 유역 홍수량 산정 모형에서 지형지수 계산, 토양수분의 변화 모의 및 유역 홍수추적은 기존 TOPMODEL의 개념과 동일하게 사용된다. 이렇게 모의된 상류 유역의 유출량은 하류유역으로 흘러 들어가는 하도추적을 거치게 되는데, 본 연구에서는 운동파(kinematic wave; Miller, 1984; HEC, 1990) 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 하

도구간 "A-B"에 대한 하도홍수 추적을 실시하고 유역 "3"에 대한 유량을 유역 유출모형으로 계산하여 합산함으로써 유역 출구점 "B"에 대한 최종 수문곡선을 계산한다.

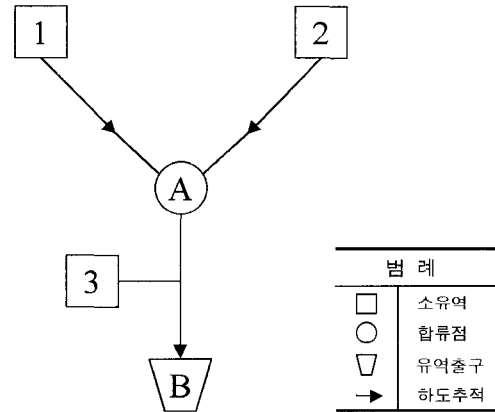


Fig. 1. Schematic diagram to combine basin and channel flow routing

## 3. 모형의 적용 및 해석

### 3.1 적용대상지역 및 기본자료

본 연구의 대상유역은 Fig. 2와 같이 2,703km<sup>2</sup>의 유역면적을 갖는 소양강 댐 상류유역을 선정하였다. 소양강은 총 유로연장 166.2km로써 한강수계를 형성하는

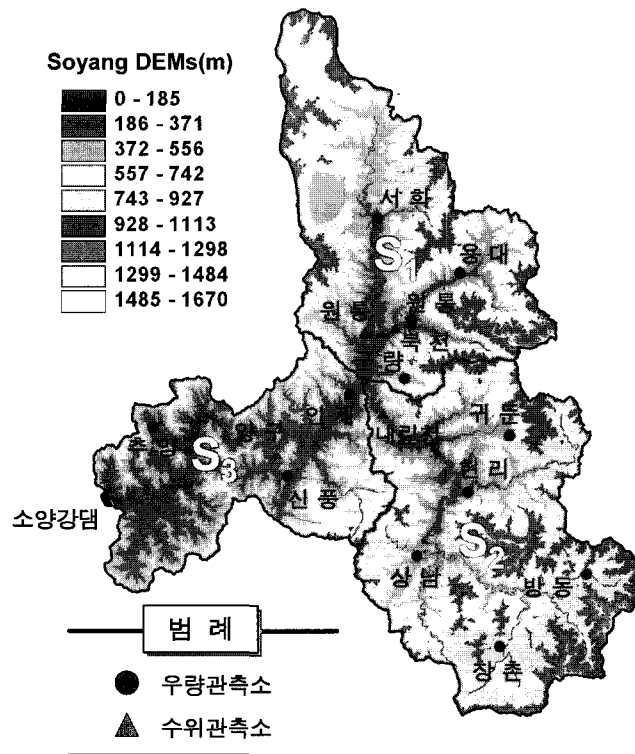


Fig. 2. Study area(S<sub>1</sub>=Inpuk-cheon basin; S<sub>2</sub>=Naerin-cheon basin; S<sub>3</sub>=Soyang-river basin)

북한강의 최대 지류이며 인북천 및 내린천의 두 지류로 구성되어 있다. 소양강은 오대산(EL. 1,563m) 부근에서 발원하여 남으로 유하하다가 춘천시 동북방에서 북한강과 합류한다. 소양강 댐은 북한강 합류지점에서 약 12km 떨어진 소양강 계곡에 위치한 높이 123m, 댐 길이 530m, 체적 약 9,600,000m<sup>3</sup>의 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. 2와 같이 인북천(A=939.45km<sup>2</sup>), 내린천(A=1084.37km<sup>2</sup>) 및 소양강(A=679.18km<sup>2</sup>) 유역으로 구분하였다. 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 12개의 T/M 우량관측소가 있으며, 원통, 내린천, 양구, 인북천 등 4개의 수위관측소와 소양강댐이 존재한다. 또한, 본 연구에서 용설량 및 잠재증발량을 계산하기 위한 기상관련 자료는 인접 춘천 기상관측소에서 수집하였다. 유역 평균강우량은 유역내 존재하

는 12개의 T/M 관측소의 강우량으로 Thiessen의 가중법을 이용하여 산정하였으며, 이렇게 산정된 유역 평균강우량은 춘천 기상관측소의 기온자료와 함께 용설량 계산에 이용되어 강수와 용설량이 합산된 강수량 자료가 사용된다. 한편 유량 자료는 소양강댐 지점의 댐 유입유량을 이용하였다.

### 3.2 용설량 및 잠재증발량 산정

#### 3.2.1 용설량 계산결과

상술된 이론을 바탕으로 계산된 용설 결과를 소양강댐 직상류 유역(S<sub>3</sub>)의 입력 및 출력결과를 나타내면 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a), (b)는 용설모형에 사용된 입력자료로써, 1971~2000년 사이의 일강우 체적분포비율(Lim and Kwon, 1998)에 따른 강수량 및 온도의 유역평균값(6시간 간격)을 나타낸 것이고, Fig. 3(c)는 Anderson 용설모형으로부터 계산된 용설량 시계열 자료이다. 이와 같이 계산된 용설량 결과는 국내 실정상 용설요소를 정량적으로 평가할 수 있는 관측자료가 부족하기 때문에 정량적 검토는 불가능하지만, Fig. 3(b)의 기온자료와 Fig. 3(d)의 최대 적설깊이에 따른 간접적 분포를 검토한 결과 그 시간적 변동성은 잘 일치함을 알 수 있다. 즉 눈이 쌓인 시기에서 기온이 0°C 이상으로 증가할 때 용설량이 적절히 반응함을 알 수 있다.

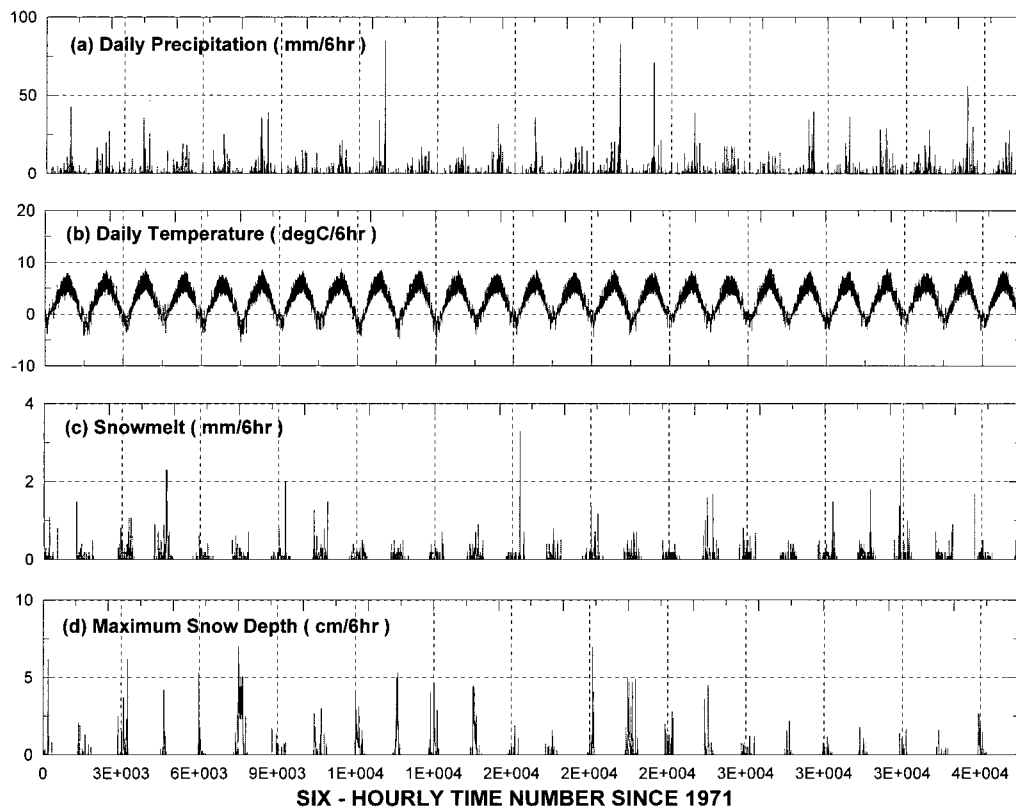


Fig. 3. Snowmelt model results: (a) daily precipitation; (b) daily temperature; (c) snowmelt; (d) maximum snow depth

본 연구에서 계산된 용설결과는 준분포형 TOP-MODEL 적용시 유역평균 강우자료에 용설량이 합산되어 입력되며, 용설량은 겨울철 토양수분 모의에 보다 정확한 강수조건을 제공하여 다음절에 계산될 장기유출 계산시 겨울철에서 봄철로 넘어가는 시기의 저유량 계산에 아주 유용하게 활용된다. 이러한 유용성 평가는 3.4절에 제시하였다.

### 3.2.2 잠재증발량 계산결과

본 연구의 잠재증발량 계산을 위해 수집된 기상관측소 자료 중 춘천관측소 일사량 자료가 다수의 결측 및 이상치를 포함하는 것으로 검토되었다. 춘천 기상관측소는 자료의 보유기간 및 설치위치를 감안했을 때 소양강 상류유역을 대표할 수도 있는 중요한 지점이므로 일사량에 대한 보다 정확한 자료의 사용이 요구되었다. 따라서 본 연구에서는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction) 재분석(reanalysis) 자료를 수집하여 잠재 증발산량 계산에 이용하였다. NCEP 재분석 자료의 격자점(200×200km) 중 소양강 상류유역을 대표할 수 있는 지점을 선택하여 일사량 자료로 활용하였다. 대상 격자점의 일사량 자료를  $W/m^2$  단위로 표현하면 Fig. 4(a)와 같고, 그 양은 100~400 $W/m^2$ 의 범위를 보이며 계절별 차이가 뚜렷이 구별된다. 또한, 공기 동역학 및 에너지 평형 이론의 혼합기법인 Penman 방법으로 계산된 춘천 기상관측소의 잠재 증발량 일자료를 1971~2000년까지 나타내면 Fig. 4(b)와 같다. 이들 값의 통계치를 계산한 결과 평균이 2.70mm, 표준편차가 2.17mm로 계산되었다.

이렇게 계산된 잠재증발량에 대한 소양강 상류유역 월별 평균값을 계산하여 표현하면 Fig. 5와 같다. 그림은 1971~2000년 동안의 일단위 월별 평균값을 나타낸

것으로 유역 물순환의 주요 요소들인 관측 강수량 및 유출량을 함께 표현한 것이다. Fig. 5의 월별 변동성에 따르면, 우리나라의 계절별 변동성을 뚜렷하게 확인할 수 있고, 계산된 잠재증발량의 경우 소형 증발접시 (small pan) 증발량과 그 시간적 변동성이 매우 잘 일치하고 4~8월까지 그 값이 증가하면서 동절기엔 낮은 경향을 보인다. 또한, 강수량의 경우 강우와 용설의 영향이 동시에 고려된 것으로 하절기에 집중되는 것을 볼 수 있고 이에 대한 유출량 또한 강수량과 유사한 패턴을 보이면서 3, 4, 5월에는 용설의 영향이 지배적인 것으로 나타났다.

Penman의 혼합기법으로 산정된 잠재증발량은 개수면에 충분한 물이 공급될 때 발생하는 증발량으로 유출 모델에 필요한 실제 증발산량(evapotranspiration)과는 다소 차이가 나는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 기존 TOPMODEL에서는 증발산에 관계된 물순환 과정이 식생영역(root zone)에서만 발생한다는 개념하에 실제 증발산량  $E_{act}$ 는 잠재증발량  $E_p$ 를 입력으로 하여 토양내 식생영역의 최대 보유가능 저류량(storage)에 대한 모의 저류량의 비율로 보정하여 유역내 떨어진 강수에 대한 유출발생을 조절할 수 있도록 다음 Eq. (10)를 이용한다(Beven et al., 1994).

$$E_{act} = E_p \frac{S_{rz}}{S_{rmax}} \quad (10)$$

여기서 변수  $S_{rz}$ 와  $S_{rmax}$ 는 각각 식생영역의 저류량(m) 및 최대 보유저류량(m)을 의미한다. Fig. 5에는 이렇게 계산된 모델기반의 실제 증발산량을 함께 표시하였다.

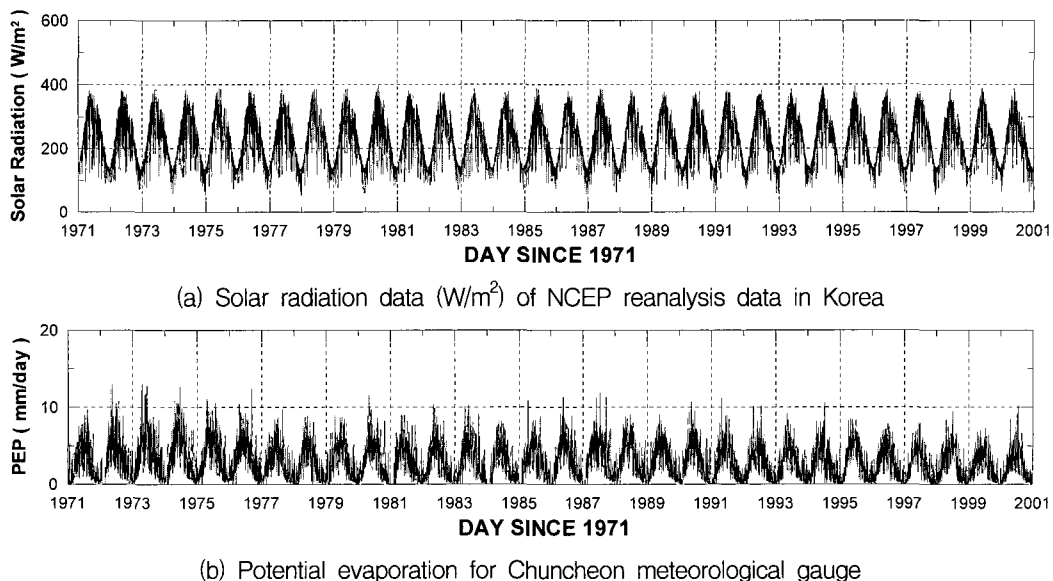


Fig. 4. Solar radiation and calculated results of potential evaporation

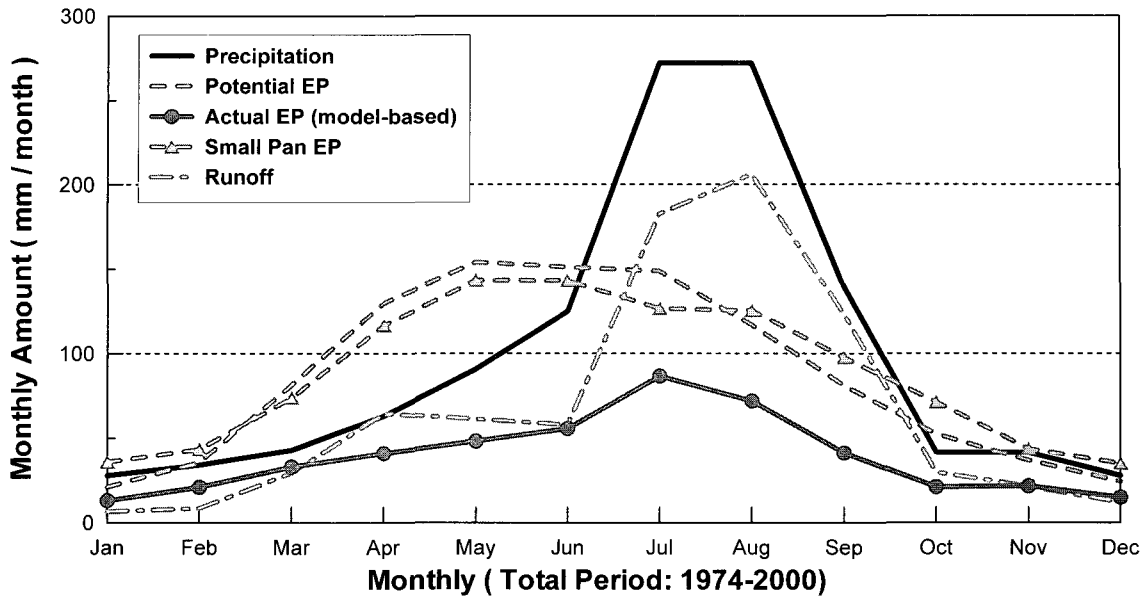


Fig. 5. Monthly variation of precipitation, potential evaporation, model-based actual evapotranspiration, small pan evaporation and runoff for the Soyang River basin

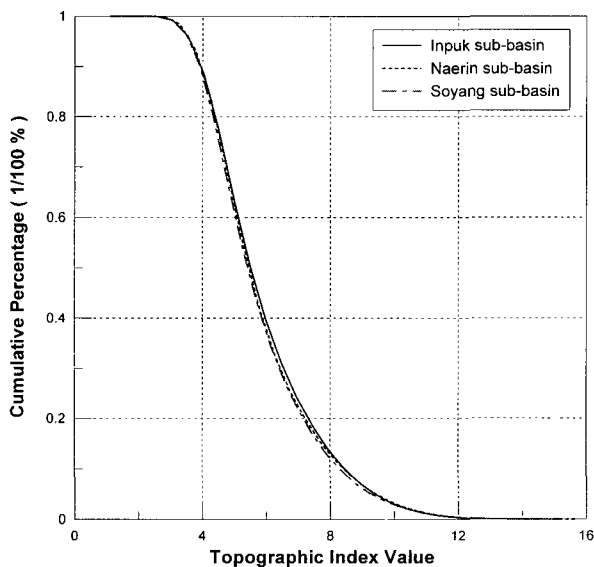


Fig. 6. Distribution of topographic index for each sub-basin

### 3.3 지형지수 분석 및 매개변수 추정

소유역 유출모형인 TOPMODEL을 적용하기 위해서는 지형지수 분포의 산정이 선행되어야 한다. 이를 위

해 Landsat TM 위성영상 자료로 추출된 DEM 자료로부터 격자간격 30m의 정방형 DEM 자료를 생성하여 인북천, 내린천 소양강유역을 대상으로 각각의 격자점에 대한 지형지수 값을 산정하여 분할된 소유역들 사이의 차이를 비교하였다. 각 유역의 지형지수 자료값에 대한 통계적 분석결과는 Table 1과 같이 평균, 표준편차 및 왜곡도에 있어서 유사한 경향으로 나타났으며, 실제 소유역 유출모형의 입력치로 요구되는 빈도곡선은 Fig. 6에서와 같이 세 경우 모두 유사한 변동을 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 소유역 유출모형인 TOPMODEL의 매개변수를 추정하기 위해 저수유출(low flow), 중수유출(medium flow) 및 고수유출(high flow) 연도를 선택하여 3경우의 관측유량 결과를 동시에 만족시키도록 수동 보정법으로 매개변수를 추정하였다. 매개변수 추정 과정에서 소양강댐 상류유역인 인북천 및 내린천 유역의 매개변수를 먼저 추정하여 고정한 후 최종적으로 소양강 댐유입량을 바탕으로 각 소유역의 매개변수를 선별하였다. 추정된 매개변수는 Table 2와 같고 매개변수 추정을 위해 선택된 각 연도의 유출량 계산결과는 Fig. 7~9와 같다. 또한, 하도홍수추적이 적용된 소양강 유역

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

통계치	유역	인 북 천	내 린 천	소 양 강
평균		5.8991	5.8597	5.7998
표준편차		5.8654	4.7090	6.1485
왜곡도		-0.8991	-1.0130	-0.8299



Table 2. Estimated parameters for each sub-basin

변 수		유 역		
기 호	단 위	인북천유역	내린천유역	소양강유역
m	[m]	0.0113	0.0118	0.0121
T <sub>0</sub>	[ln(m <sup>2</sup> /day)]	5.128	5.408	5.688
S <sub>rmax</sub>	[m]	0.053	0.050	0.051
S <sub>r0</sub>	[m]	0.001	0.001	0.002
t <sub>a</sub>	[day/m]	2.10	1.60	2.00

(S<sub>3</sub>)의 하도구간에 대한 운동과 모형의 측정 가능한 지형학적 매개변수들은 GIS 프로그램을 활용하여 산정하였으며, 그 주요 매개변수로 주하도 연장 L은 61.23km, 하도경사 S는 0.00023, Manning의 조도계수 n은 0.04를 사용하였고, 하도형상은 제형단면으로 평균 하폭(바다)은 150m로 가정하였다.

Fig. 7~9는 각각 저수(1979년), 중수(1999년), 고수(1990년) 유출사상에 대한 모형의 매개변수 보정결과이다. 각 그림의 상단에는 유역평균 강우량("Rainfall") 및 잠재증발량("Evap")을 나타내었고, 관측(실선) 및 계산

(파선) 유출량을 그래프 하단에 표시하였다. Table 3은 관측 및 계산유량 사이의 통계 특성치를 계산한 결과로써, 저수, 중수, 고수유출 각각에 대한 유출용적 상대오차가 -6.56, 17.45, -5.42%로 나타났고, 평균제곱오차(ERMS)가 93.85, 107.60, 130.72cms, 상관계수(CC)가 0.82, 0.97, 0.96으로 계산되었다. 이들 결과에 따르면 준분포형 TOPMODEL의 유출량 모의치는 관측유량과 비교하여 그 시간적 변동성이 매우 잘 일치함을 알 수 있고, 정량적 정확도 또한 우수한 결과를 제시하는 것으로 나타났다.

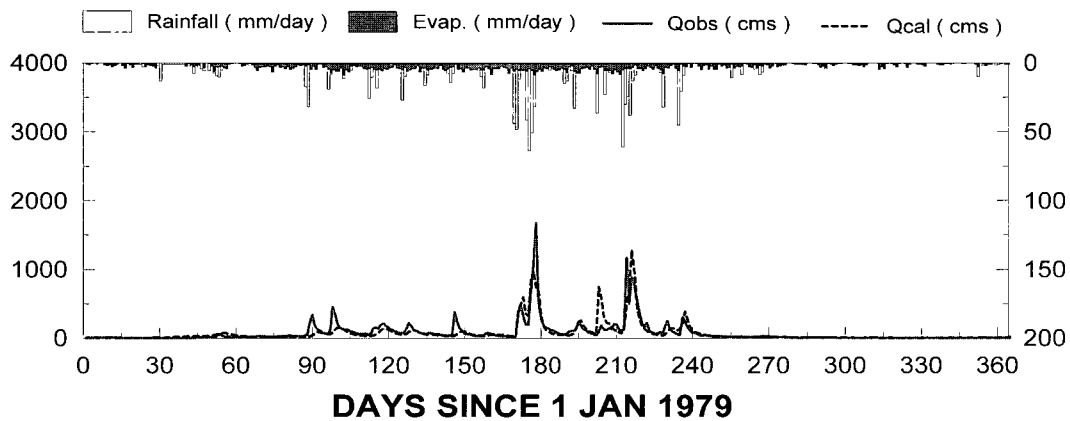


Fig. 7 Observed and calculated flow for low flow case

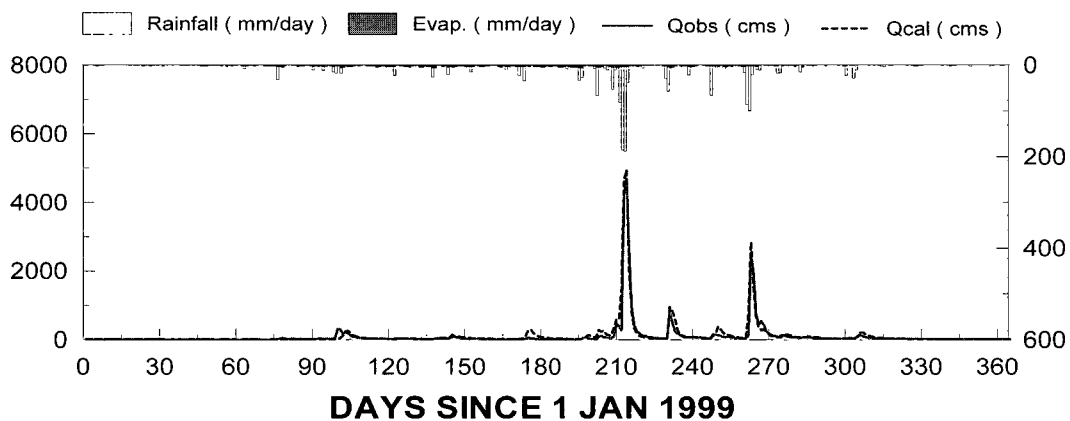


Fig. 8. Observed and calculated flow for medium flow case

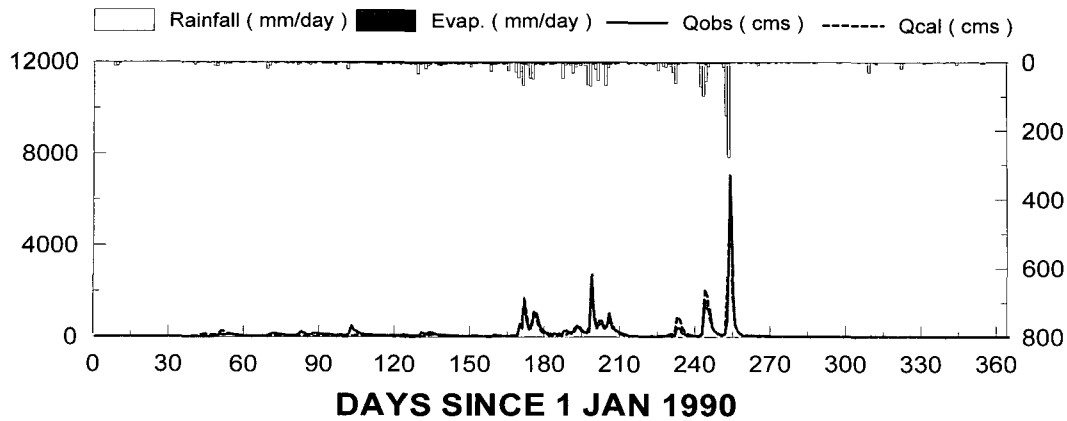


Fig. 9. Observed and calculated flow for high flow case

Table 3. Statistical results between observed and calculated flow

(Unit: cms)

호	우	항목	$\bar{Q}$	$\sigma$	$Q_p$	$t_p$	ARM	ERMS	CC
사	저 수 (1979년)	관측	75.44	158.31	1674.90	178			
		계산	70.49	148.33	978.48	177	33.98	93.85	0.82
		잔차	-4.95	93.72	-	-			
상	중 수 (1999년)	관측	96.57	397.08	4665.30	214			
		계산	113.42	421.47	4949.20	214	38.38	107.60	0.97
		잔차	16.86	106.27	-	-			
상	고 수 (1990년)	관측	139.72	455.17	7062.60	254			
		계산	132.15	445.15	6702.02	254	53.84	130.72	0.96
		잔차	-7.57	130.50	-	-			

주:  $\bar{Q}$  평균,  $\sigma$  표준편차,  $Q_p$  첨두유량,  $t_p$  첨두유량 도달시간, ARM 잔차절대치평균, ERMS 평균제곱오차, CC 상관계수

### 3.4 장기유출 해석결과

본 장에서는 매개변수 추정결과를 바탕으로 30(1971~2000)년 동안의 준분포형 TOPMODEL의 일단위 장기유출 모의능력을 검토하였다. 여기에 사용된 입력자료는 상술된 강우-윤설자료 및 잠재증발량 자료이고, 추정된 매개변수는 모의 전구간에 동일하게 적용하였다. Fig. 10은 장기유출 결과를 나타낸 것으로 상단부터 유역평균 강수량 및 잠재증발량, 관측유량, 계산유량을 표시한 것이다. 또한, Fig. 11은 장기유출 계산결과를 보다 잘 파악하기 위해 관측 및 계산유량의 산포도(scatter diagram)를 나타낸 것이다. 본 결과에서 유출 모의 기간은 30년이지만 소양강댐 완공 시기가 1974년이기 때문에 관측유량은 이 시기부터 존재한다. 이렇게 계산된 계산유량과 관측유량 사이의 통계특성치를 계산한 결과, 첨두유량 및 발생시간이 관측유량에서 7,401cms, 3,898일(1984년 9월 2일), 계산유량에 7,606cms, 3,897일로 검토되었고 이들의 상관계수가 0.91로 계산되어 장기유출계산이 비교적 우수하게 수행된 것으로 판단된다. 또한 관측 및 계산유량 사이의 유출용적

상대오차가 5.64%, 평균제곱오차가 95.19cms로 검토되어 계산유량이 관측유량에 비해 약간 과다모의 되는 것으로 평가되었다.

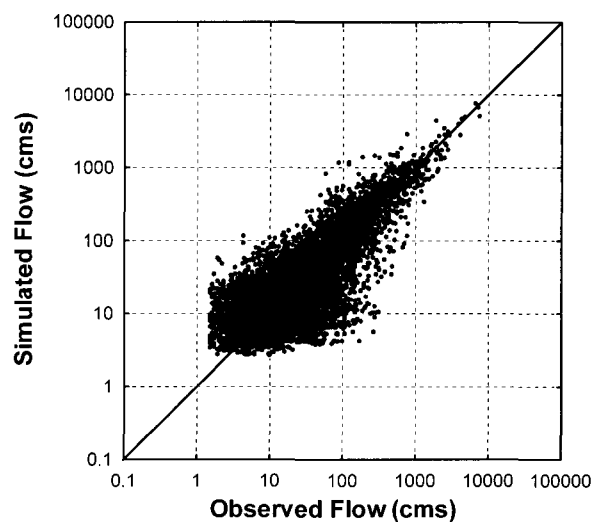


Fig. 11. Observed versus simulated flows(solid line represents one-to-one agreement)

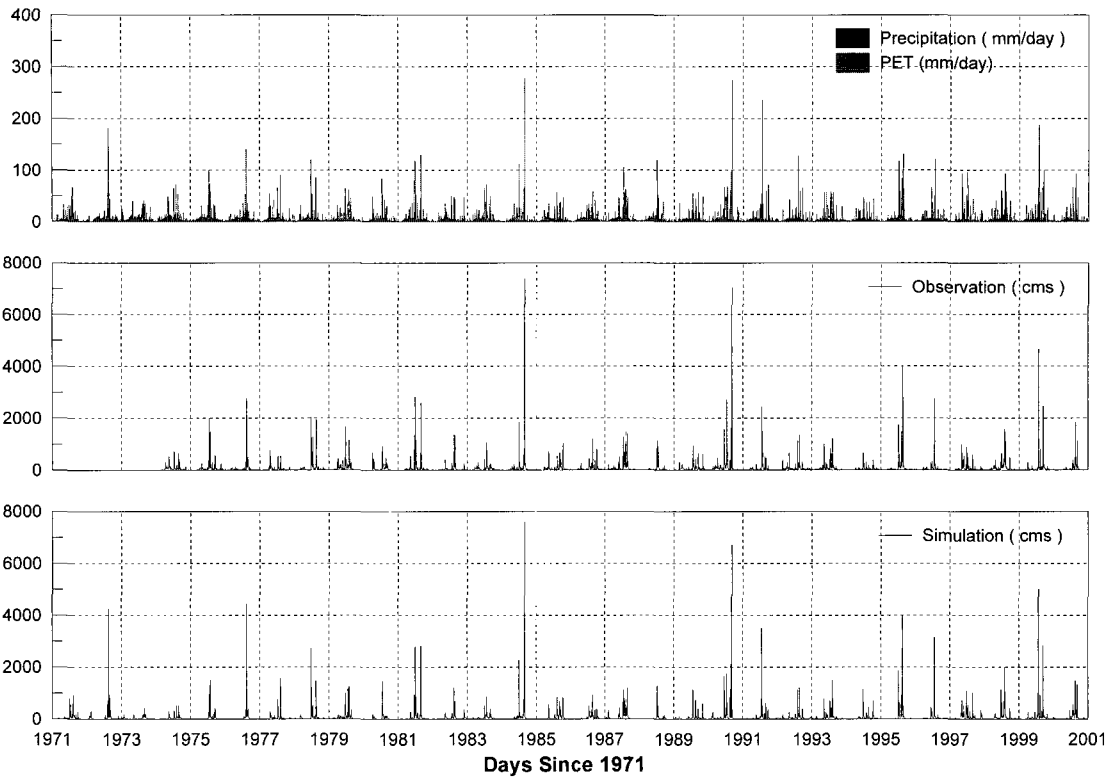


Fig. 10. Long-term runoff results for the Soyang River basin

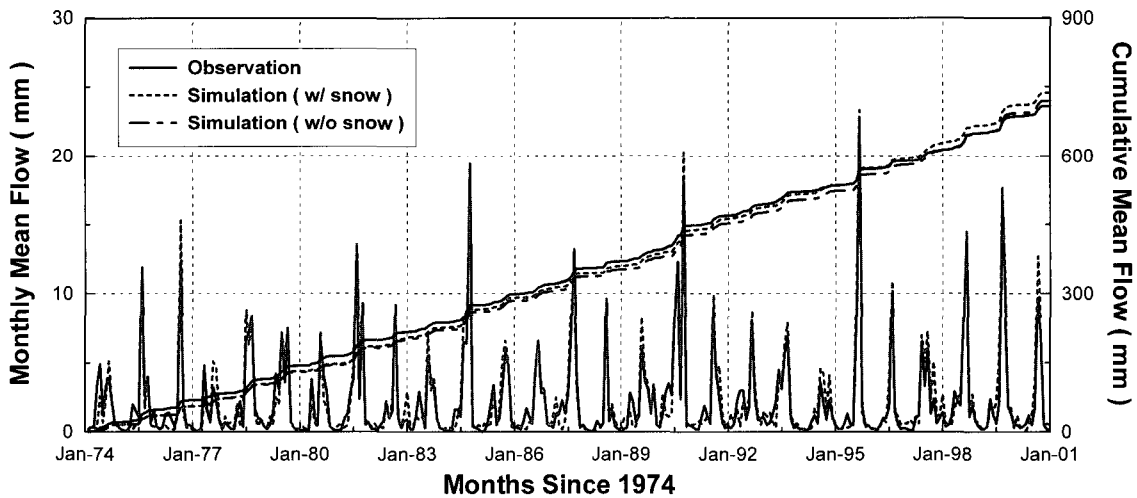


Fig. 12. Monthly mean and cumulative mean flow computed by daily results

Fig. 12는 일단위 유출량 결과를 월평균 유량으로 변환하여 그 누적값과 함께 나타낸 것이다. 월평균 계산유량도 일단위 유출량 결과와 동일하게 우리나라의 계절적 변동성을 잘 반영하는 것으로 나타났고, 누적 월평균 유량 또한 관측유량에 비교적 잘 일치하면서 1995년 전후로 모의 유출량 경향이 과소에서 과다모의하는 미미한 정량적 차이를 보이고 있다. Table 4는 이들 결과에 대한 월 통계특성치를 계산한 것으로 30년 동안의 일단위 계산결과를 바탕으로 관측유량과 비

교하여 유출모형의 계절적 모의능력을 검토하고자 하였다. 그 결과 유출용적오차의 경우 겨울철(12, 1, 2월)에는 58~160%의 범위로 과다모의, 봄철(3, 4, 5월)에는 -14~-62% 범위를 가지면서 과소모의, 여름과 가을철에는 다시 과다모의하는 것으로 검토되었다. 또한, 상관계수의 경우 1, 4월의 상관계수가 0.37로 계산유량의 시간적 변동성이 가장 일치하지 않는 것으로 나타났고, 5월 이후로는 0.8이상으로 그 상관성이 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 4. Monthly statistical results between observed and calculated flow with snowmelt

월	평균( $\bar{Q}$ )			표준편차( $\sigma$ )			ARM	ERMS	CC
	관 측	계 산	잔 차	관 측	계 산	잔 차			
JAN	6.61	17.21	10.60	5.10	13.92	12.96	11.51	16.74	0.37
FEB	10.74	20.17	9.42	26.00	30.33	24.70	12.89	26.43	0.63
MAR	31.72	19.11	-12.62	35.92	21.37	34.23	20.91	36.48	0.37
APR	66.21	24.86	-41.35	69.86	34.62	60.51	44.24	73.29	0.50
MAY	58.01	49.80	-8.21	93.99	83.59	54.90	25.98	55.51	0.82
JUN	65.77	86.51	20.75	183.15	207.70	89.96	35.99	92.32	0.90
JUL	184.95	211.29	26.34	346.75	370.32	161.43	76.68	163.57	0.90
AUG	224.54	250.44	25.91	476.09	516.26	198.99	87.34	200.67	0.92
SEP	114.23	120.45	6.22	426.48	386.12	145.56	44.54	145.69	0.94
OCT	29.96	35.34	5.38	65.74	71.85	45.57	15.12	45.89	0.78
NOV	21.65	24.43	2.77	35.40	48.44	28.15	11.36	28.29	0.82
DEC	11.88	18.80	6.93	11.06	28.24	21.71	10.35	22.78	0.72

주:  $\bar{Q}$  평균[cms],  $\sigma$  표준편차[cms], ARM 잔차절대치평균[cms], ERMS 평균제곱오차[cms], CC 상관계수

Table 5. Monthly statistical results between observed and calculated flow without snowmelt

월	평균( $\bar{Q}$ )			표준편차( $\sigma$ )			ARM	ERMS	CC
	관 측	계 산	잔 차	관 측	계 산	잔 차			
JAN	6.61	13.21	6.60	5.10	10.85	10.42	8.06	12.34	0.32
FEB	10.74	15.35	4.61	26.00	22.14	26.36	10.49	26.76	0.41
MAR	31.72	13.73	-17.99	35.92	14.21	32.63	21.09	37.26	0.42
APR	66.21	22.43	-43.78	69.86	33.70	60.84	46.03	74.96	0.49
MAY	58.01	48.90	-9.11	93.99	83.10	55.45	26.31	56.19	0.81
JUN	65.77	86.34	20.58	183.15	207.68	89.96	35.96	92.29	0.90
JUL	184.95	211.23	26.28	346.75	370.18	161.31	76.64	163.43	0.90
AUG	224.54	250.44	25.91	476.09	516.26	198.99	87.34	200.67	0.92
SEP	114.23	120.45	6.22	426.48	386.12	145.56	44.54	145.69	0.94
OCT	29.96	35.28	5.32	65.74	71.85	45.59	15.14	45.90	0.78
NOV	21.65	22.98	1.33	35.40	46.35	26.47	10.76	26.51	0.82
DEC	11.88	15.99	4.11	11.06	24.60	18.31	8.38	18.77	0.72

주:  $\bar{Q}$  평균[cms],  $\sigma$  표준편차[cms], ARM 잔차절대치평균[cms], ERMS 평균제곱오차[cms], CC 상관계수

한편, 본 연구에서는 Anderson의 온도지수 모형으로 계산된 용설량이 준분포형 TOPMODEL의 장기유량 계산에 미치는 영향을 분석하기 위해 용설량이 고려되지 않은 순수 강수량 자료를 입력하여 그 차이를 비교하였다. Fig. 12에는 유출모의 결과 중 용설의 영향이 고려되지 않은 계산결과("w/o snow")의 월평균 유량 누적치가 함께 표시되어 있는데, 그 변동성이 용설이 고려된 유량결과보다 아래에 치우쳐 있어 정량적으로 약간 적게 유량모의가 수행됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 3(c)의 용설량이 강수 입력자료에 고려됨으로써 겨울철에서 봄철로 넘어가는 기간동안 적설이 녹으면서 발생하는 용설의 영향이 어느 정도 반영된 결과로 해석된다. 본 결과에 대한 통계학적 해석

을 위해 용설량이 고려되지 않은 강수 입력자료로 계산된 유출결과에 대한 월별 통계특성치를 Table 5에 제시하였다. Table 4 및 5에 따르면 소양강 상류유역에서 용설의 영향이 가장 크게 영향을 미치는 3, 4월의 경우 용설고려 유무에 따라 각월의 유출용적 상대오차가 17% 및 4%로 감소하는 것으로 나타나 동절기 용설량의 고려는 장기유출 계산시 매우 필수적 구성요소로 작용될 수 있음을 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 소양강댐 상류유역을 대상으로 중장기 확률론적 댐유입량 예측을 위해 30년 동안의 일단위 장기유출 해석을 수행하였다. 유출모형의 입력자료를

구축하기 위해 Anderson의 온도지수 용설모형으로 적설에 대한 용설량을 계산하였고, Penman의 공기동역학 및 에너지 평형이론의 혼합기법으로 잠재증발량을 산정하였다. 또한, 기존 TOPMODEL의 적용 유역면적의 제약성을 극복하기 위해 대상유역을 적정 소유역으로 구분하고 운동과 하도홍수 추적기법을 통해 대유역 유출량을 계산할 수 있는 준분포형 TOPMODEL을 활용하였으며, 강수, 용설 및 잠재증발량을 입력으로 한 본 유출모형의 장기유출 계산결과를 요약하면 다음과 같다.

유출모형의 입력자료로 계산된 용설량 및 잠재증발량 계산결과는 관측자료의 부재로 그 정량적 평가는 수행할 수 없지만, 용설량의 경우 기온 및 최대 적설 깊이 자료를 바탕으로 시간적 변동성에 대한 일치성을 살펴볼 수 있었고, 잠재증발량 계산결과 또한 소형 증발접시에서 관측된 증발량과 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이렇게 계산된 유출모형의 입력자료를 바탕으로 저수(1979년), 중수(1999년), 고수(1990년) 유출사상에 대한 모형의 최적 매개변수를 산정하고 준분포형 TOPMODEL의 일단위 장기유출 모의능력을 검토하였다. 본 결과에 대한 계산유량과 관측유량 사이의 유출용적 상대오차가 5.64%, 상관계수가 0.91로 계산되어 장기유출계산이 비교적 우수하게 수행된 것으로 판단된다.

한편, 일단위 유출량 결과를 월평균 유량으로 변환하여 분석한 결과 우리나라의 계절적 변동성을 잘 반영하였지만 겨울철(12, 1, 2월)에서 봄철(3, 4, 5월)로 이어지는 이수기에는 치수기에 비해 그 정확도가 다소 미흡한 것으로 나타났다. 하지만 이러한 결과는 용설고려 유무에 따라 3, 4월의 유출용적 상대오차가 17% 및 4%로 감소하는 것으로 나타나 용설모형의 적용은 장기유출 계산시 모형의 정확도를 개선시키는 측면에서 매우 중요한 구성요소가 될 수 있음을 제시하였다.

향후 용설량 및 잠재증발량 관측자료가 존재한다면 본 연구에서 수행한 장기유출 해석의 신뢰도를 더욱 높일 수 있을 것이고, 나아가 신뢰성 높은 장기유출결과는 이치수기 불관리 측면에서 매우 귀중한 자료로 사용되어 질 수 있다. 또한, ESP 기법을 활용하여 중장기 확률론적 댐 유입량을 예측하고자 하는 본 연구의 목적에 비추어 보다 합리적인 수문기상학적 자료의 구축은 ESP 기법의 정확도 향상에 중요한 기반자료로 적용될 수 있다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사

업의 세부과제 한반도 악기상(집중호우) 감시 및 예측 기술개발로 수행된 것이며 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 배덕효, 김진훈, 권원태 (2000). "TOPMODEL의 단일 유역 홍수예보능에 관한 연구." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 87-97.
- 배덕효, 김진훈 (2005). "준분포형 TOPMODEL 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제10호, pp. 895-906.
- 배덕효, 오재호 (1998). "장기 유출해석에서의 용설영향에 관한 기초 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 833-844.
- 정대일, 김영오 (2002). "양상불 예측을 이용한 충주댐의 월 유입량 예측." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22호, 제3-B호, pp. 321-331.
- 정대일, 김영오, 조성준, 신현정 (2003a). "양상불 유량 예측의 정확도 향상을 위한 강우-유출모형에 대한 연구 - I. 신경망 강우-유출모형." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제23호, 제6B호, pp. 521-530.
- 정대일, 김영오, 고익환 (2003b). "양상불 유량 예측의 정확도 향상을 위한 강우-유출모형에 대한 연구 - II. 강우-유출모형의 결합." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23호, 제6B호, pp. 531-540.
- 조흥제, 김정식, 이근배 (2000). "TOPMODEL을 이용한 장기유출 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제4호, pp. 393-405.
- Anderson, E. A. (1973). *National Weather Service River Forecast System-Snow accumulation and ablation model*. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-17, Office of Hydrology, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD.
- Bae, D.-H., Kim, J.-H., and Miller, N. L. (2000). "An Extended TOPMODEL for Flow Forecasting in Large Drainage Basins", *Proceedings of the 4th International Conference on Hydro-Science & -Engineering*, pp. 95.
- 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.
- 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.
- Carpenter, T. M., and Georgakakos, K. P. (2004). "Continuous streamflow simulation with the HRCDHM distributed hydrologic model." *Journal of Hydrology*, Vol. 298, pp. 61-79.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, pp. 572.
- Clark, C. O. (1945). "Storage and unit hydrograph." *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, pp. 1419-1446.
- Croley, T. E. (2000). *Using meteorology probability forecasts in operational hydrology*, ASCE press. pp. 206.
- Day, G. N. (1985). "Extended streamflow forecasting using NWSRFS." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vo. 111(2), pp. 147-170.
- Faber, B. A., and Stedinger, J. R. (2001). "Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction(ESP) forecast." *Journal of Hydrology*, Vol. 249, pp. 113-133.
- Franz, K. J., Hartmann, H. C., Sorooshian, S., and Bales, R. (2003). "Verification of National Weather Service Ensemble Streamflow Predictions for Water Supply Forecasting in the Colorado River Basin." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 4, pp. 1105-1118.
- Garratt, J. R. (1992). *The Atmospheric Boundary Layer*, Cambridge University Press, New York, pp. 316.
- HEC (1990). *HEC-1 Flood Hydrology Package. User's Manual*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- 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.
- Lim, G.-H., and Kwon, H.-J. (1998). "Diurnal Variation of Precipitations over south Korea and its Implication." *J. Korean Meteor. Soc.*, Vol. 28, pp. 269-282.
- Miller, J. E. (1984). "Basic concepts of kinematic wave models." *USGS Prof. Paper* 1302, pp. 29.
- Pruppacher, H. R., and Klett, J. D. (1980). *Microphysics of Clouds and Precipitation*, D. Reidel Publishing Company, Boston, MA, pp. 714.
- Smith, J. A., Day, G. N., and Kane, M.D. (1992). "Nonparametric framework for long-range streamflow forecasting." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 118(1), pp. 82-92.
- Valeo C., and Moin S. M. A. (2000). "Variable source area modeling in urbanizing watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 228, pp. 68-81.
- Werner, K., Brandon, D., Clark, M., and Gangopadhyay, S. (2005). "Incorporating Medium-Range Numerical Weather Model Output into the Ensemble Streamflow Prediction System of the National Weather Service." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 6, pp. 101-114.
- 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:05-95/접수:2005.07.14/심사완료:2006.02.09)