

## 준 분포형 수문모형 SLURP에서 용설매개변수 적용 및 영향 평가

### Application of Snowmelt Parameters and the Impact Assessment in the SLURP Semi-Distributed Hydrological Model

신 형 진\* / 김 성 준\*\*

Shin, Hyung Jin / Kim, Seong Joon

#### Abstract

The purpose of this paper is to prepare snowmelt parameters using RS and GIS and to assess the snowmelt impact in SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Process) model for Chungju-Dam watershed (6,661.5 km<sup>2</sup>). Three sets of NOAA AVHRR images (1998-1999, 2000-2001, 2001-2002) were analyzed to prepare snow-related data of the model during winter period. Snow cover areas were extracted using 1, 3 and 4 channels, and the snow depth was spatially interpolated using snowfall data of ground meteorological stations. With the snowmelt parameters, DEM (Digital Elevation Model), land cover, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and weather data, the model was calibrated for 3 years (1998, 2000, 2001), and verified for 1 year (1999) using the calibrated parameters. The average Nash-Sutcliffe efficiencies for 4 years (1998-2001) discharge comparison with and without snowmelt parameters were 0.76 and 0.73 for the full period, and 0.57 and 0.19 for the period of January to May. The results showed that the spatially prepared snow-related data reduced the calibration effort and enhanced the model results.

**keywords** : SLURP, NOAA AVHRR, Snow cover areas, Snow depth, Snowmelt

#### 요 지

본 연구는 충주댐 유역을 대상으로 SLURP 모형에서 RS, GIS를 이용한 용설매개변수 적용 및 영향을 평가하고자 한다. 모형의 용설 관련 매개변수 준비를 위해 3 set (1998-1999, 2000-2001, 2001-2002)의 NOAA AVHRR 위성영상을 분석하였다. 적설분포면적은 채널 1번, 3번, 4번을 이용하여 추출하였고, 적설심은 지상기상관측소의 적설심 자료를 이용하여 공간적으로 내삽하여 추출하였다. 용설 매개변수와 DEM, 토지피복도, NDVI, 수문기상자료를 이용하여 3개년도(1998, 2000, 2001)의 일별유출량을 모의하여 보정하였다. 그리고 보정된 매개변수를 이용하여 1개년도(1999)를 검증하였다. 4년(1998-2001)동안의 유량 비교 결과, 평균 Nash-Sutcliffe의 모형 효율은 0.76이고 적설 및 용설 기간(1월~5월)동안의 평균 모형 효율은 0.57이다. 용설매개변수 미고려시 평균 Nash-Sutcliffe의 모형 효율은 0.73이고 적설 및 용설 기간(1월~5월)동안의 평균 모형 효율은 0.19이다. 용설매개변수를 포함한 유출량이 용설매개변수를 포함하지 않은 경우보다 관측유량의 수문시계열적 특성을 잘 표현하는 결과를 보였다.

**핵심용어** : SLURP, NOAA AVHRR, 적설분포면적, 적설심, 용설

\* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사과정

Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Environ. Sys. Engrg., Konkuk Univ., Seoul 143-701, Korea

\*\* 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과 교수

Associate Professor, Dept. of Civil and Environ. Sys. Engrg., Konkuk Univ., Seoul, 143-701, Korea

Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3749, (e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr)

## 1. 서론

우리나라의 경우 여름철 하천유량에 비해 봄철 용설량의 양이 상대적으로 적기 때문에 국내유역 유출모의에서 적설 및 용설 모의는 무시되어왔으나 지형적으로 70%정도가 산악지역인 점을 감안할 때 지형적영향에 의해 국지 규모의 다양한 기후 특성과 수문변화가 나타나고 북동부 산악지형의 경우, 강수의 빈도 및 수량이 계절적 특성에 따라 현격한 차이가 발생함에 따라 수자원의 양적측면의 평가에서 겨울철 적설과 봄철 용설 영향에 대한 연구가 필수적이다. 이는 특히 최근 겨울에 발생한 바 있는 영동 및 중부지방의 폭설에 의한 피해도 경감시킬 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것으로 생각된다.

장기 유출 모형으로 용설에 의한 유출분석을 하기 위하여 용설모형의 매개변수 구축이 필요하다. 국내와 같이 적설 및 용설에 대한 관측자료가 미흡한 실정에서는 관측자료 이외의 용설에 대한 매개변수를 선정 및 추정하는 방법이 고려되어야 한다. 따라서 기존의 관측 자료를 토대로 GIS, RS 기법을 적용하여 변수들을 추정 및 선정하는 방안을 고려하였다.

최근, 국내에서 용설에 대한 유출 영향 분석은 배덕효 등(1998)이 내린천 유역을 대상으로 장기 유출모형(NWS)을 이용하여 용설의 영향에 대해 연구한 바, 장기유출 모의시 용설의 영향이 중요한 것으로 분석하였으며, 하천 봄철의 하천유출량의 정확한 모의를 위해서는 용설모형의 도입이 필수적이라고 제안한 바 있고, 이상호 등(2003)은 소양강댐 및 충주댐을 대상 유역으로 탱크모형에 적설 및 용설을 매개변수로 선정하여 모의한 바, 소양강댐 유역의 3~4월 기간의 8년 평균을 비교할 때 용설 유출을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 유출량이 크게 모의되었으며, 그 양은 관측 유출량의 약 1/5에 이른다고 분석하였다. 임혁진 등(2004)은 소양강 유역을 대상으로 SLURP 모형을 이용하여 유출수문분석과 그중 용설에 의한 모의 유출량을 분석한 바 있다.

국외의 경우, GIS 및 RS 를 이용한 용설 매개변수 추정이 1970년대 부터 활발히 이루어지고 있다. Rango et al.(1976)은 Landsat MSS 인공위성자료를 사용하여 적설분포지역을 감독, 무감독 분류하여 원격탐사에 의한 고해상도의 적설분포면적 추출을 가능하게 하였다. Baumgartner et al.(1987)은 Landsat 자료와 NOAA AVHRR 자료를 사용하여 개선된 적설분포 지역을 추출하였다. Baglio et al.(1989)은 NOAA AVHRR 자료를 사용하여 적설분포 매핑 시스템을 시험하였다.

Kazama et al.(1995)은 NOAA AVHRR 자료를 사용하여 밴드의 특성으로 적설분포를 추출하는 것을 연구하였다. Ranzi et al.(1999)은 알프스 남부지역을 대상으로 NOAA AVHRR 영상, 지표자료 그리고 수문학적 자료를 사용하여 10년 동안 적설에 관한 모니터링을 하였다. Simic et al.(2004)은 캐나다 관측소의 적설심 자료를 바탕으로 SPOT-4, MODIS, NOAA 위성들의 적설분포를 비교 분석하였으며, GIS, RS 기법으로 추정된 용설 매개변수를 이용하여 장기유출모형에 의한 용설의 영향분석 연구에 대해서 Seidel et al.(2002)은 NOAA AVHRR 영상에서 나온 적설분포를 기반으로 용설을 고려하는 유출 SRM모형을 갠지스 강과 브라마푸트라강, 두 강을 대상으로 비교 하고 유출 모의를 하였다. Tekeli et al.(2005)은 MODIS의 적설분포 Map을 이용하여 터키 동부 지역을 대상으로 지상 관측소의 자료와 MODIS 영상의 Snow cover maps를 비교 분석하고 SRM 모형을 사용하여 용설 모의하였다.

본 연구에서는 충주댐 유역을 대상으로 용설 수문변화를 모의하기 위해서 GIS와 RS 기법을 통해 용설 매개변수를 구축한 후 이를 준분포형 장기 유출해석 모형인 SLURP 모형을 이용하여 대상유역의 매개변수를 최적화하였고 이 매개변수로 모형을 검증하여 용설 수문변화에 대한 모형의 적용성을 검토 하였다.

## 2. 유출모형 및 대상유역

### 2.1 SLURP모형의 개요

SLURP 모형은 미육군공병단에서 SSARR 모형과 같은 복잡한 모형의 대안으로서 캐나다의 중·대규모유역에 사용하기 위하여 1975년에 처음 Simple Lumped Reservoir Parametric으로 개발되었으며 이후 Semi-distributed Land-Use Runoff Process model (Kite, 1998)로 발전되었다. SLURP 모형은 준 분포형 모형의 형태를 띠고 있지만 분포형 모형에 사용가능한 개념적 모형이다. 이는 집중형 모형과 같이 모의에 필요한 물리적 현상을 단순하게 통합하며 분포형 모형을 사용하였을 때 오는 자료의 손실과 초과에 대한 유역특성을 모의할 수 있는 물리적 해석 모형이다. 입력자료의 구축시 GIS와 RS 자료를 최대한 활용할 수 있게 설계되어 있어 GIS와 RS로 구축된 용설관련 매개변수를 이용하여 용설을 모의할 수 있다.

SLURP 모형은 토지피복별로 세분화되는 ASAs (Aggregated Simulation Area)로 알려진 공간 단위로 부터 일단위 강수-유출을 해석하며, 입력자료로는 지형자료(ASA 평균고도값, 수로연장, 토지피복상태 등), 시

계열자료(기온, 강수 등), 물리적 매개변수(조도계수, 차단계수)등을 이용한다. 지형자료의 경우 GIS와 수치지형을 분석하여 획득할 수 있다.

지표면에서의 연직방향물수지의 구조는 토지피복상태 중 'water'를 제외한 모든 피복상태에 대하여 수관저류량, 강설초기 저류량, 지표면저류, 지표하 저류로 대표되는 4단 탱크개념을 이용하여 수직적인 물수지를 모의한다. 연직방향물수지의 기본 알고리즘과 수식은 다음과 같다(Fig. 1).

강설은 강우-유출 모형에서 일반적으로 입력치로 요구되는 강수의 형태가 강우이나, 강설이나에 따라 유출 계산에 미치는 영향은 매우 다르다. 강우는 지표면에 도달하자마자 일부는 지하로 침투하여 지하수를 형성하고 나머지는 지표유출로 전환하여 하천의 유출량에 바로 영향을 미치지만, 강설은 지표면에 쌓여 있다가 대기의 온도가 상승함에 따라 서서히 녹아 하천 유출량에 영향을 미치기 때문이다. SLURP 모형에서는 일평균기온( $T_a$ )이 임계온도( $T_c$ )미만일 경우 강수는 강설의 형태로 발생하게 되고, 그 양은 두 번째 탱크인 Snowpack에 저장된다. 만일 시간이 경과한 뒤, 일평균기온이 임계온도 이상으로 상승될 경우 강수는 다시 강우의 형태로 발생하게 되며, Snowpack에 저장되어 있던 양은 승화하거나 유출되게 된다(Fig. 2).

### 2.1.1 단순 온도-일 방법

이 접근방법은 순일사량자료가 요구되지 않고, 단지 용설률( $R_1$ )과 임계온도( $T_c$ )에 의해서 결정된다. SLURP 모형에서  $R_1$ 은 각각의 피복상태에 대하여 1월 1일과 7월 1일의 값을 이용하여 포물선 내삽법(parabolic interpolation)으로 구하며, 대개  $0.35 \sim 0.60(\text{cm}/^\circ\text{C}/\text{d})$ 의

값을 취한다. 이 방법은 그 적용방법이 단순함에도 불구하고, 전반적인 에너지 수지 접근방법에 근접한 결과를 얻을 수 있다. (Tarboten, 1991; Rango and Martinec, 1995).

$$M = R_1(T_a - T_c) \quad (1)$$

여기서  $R_1$ : 온도-일 용설률

### 2.1.2 제한된 온도-일 방법

Kustas(1994)가 제안한 이 방법은 순일사량자료가 충분할 경우에 사용되며,  $R_2$ 는 상수로서 계절에 따라 다르기 때문에 일조량을 이용하여 용설률을 산정한다. 용설률이 유출량의 주요 부분을 차지하는 산지에서 유출량을 예측할 목적으로 Martinec(1983)에 의해서 제안된 SRM (Snowmelt Runoff Model)에서도 이와 같은 제한된 온도-일 방법을 이용하고 있다(Brubaker, 1996).

$$M = R_2(T_a - T_c) + aQ_n \quad (2)$$

여기서  $R_2$ : 제한된 온도-일 용설률

$Q_n$ : 순일사량( $\text{Mj}/\text{m}^2/\text{day}$ )

$a$ : 전환율

SLURP모형에서는 일조시간이나 태양복사량을 이용하고, 용설률을 계산하는데 요구되는 순일사량은 계산되어진다. 그리고 Snowpack에 대해서 언급하는 과정에서 SEW (Snow Water Equivalent)를 선택적으로 고려할 수 있다.

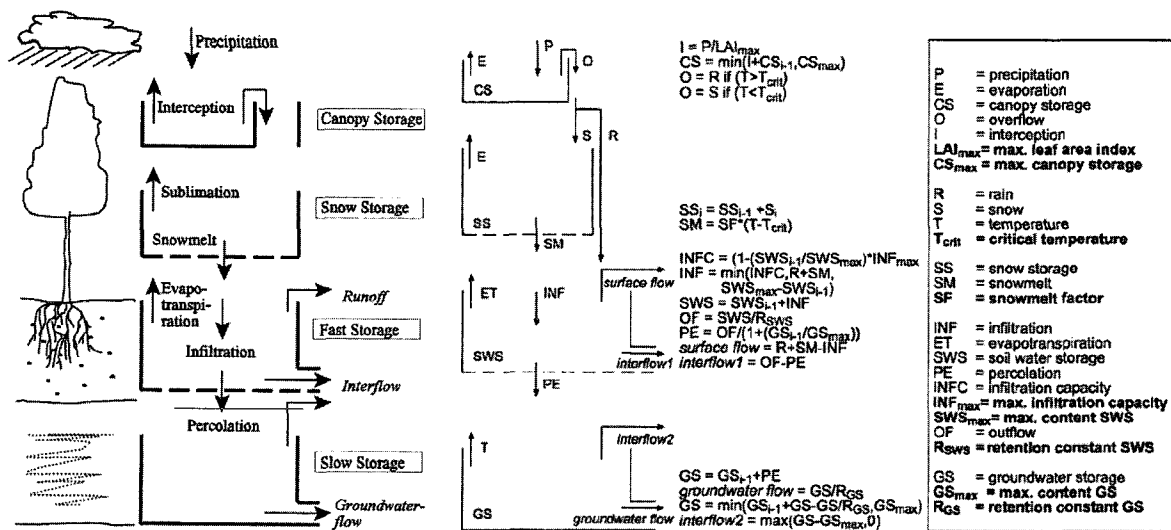


Fig. 1. The Vertical Water Balance Applied to Each Land Class within ASAs (Sandra and Woo, 2003)

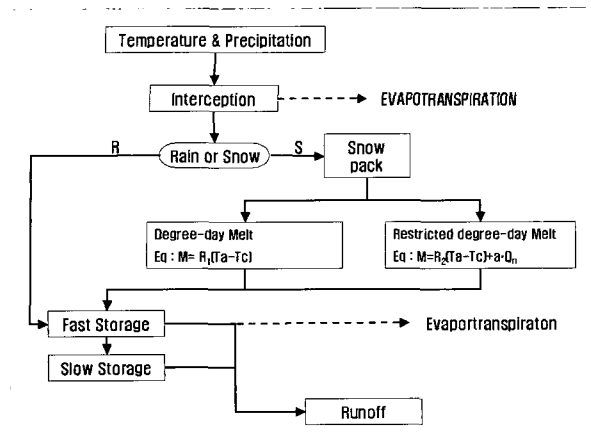


Fig. 2. Algorithm of Snowmelt Simulation, SLURP Model

## 2.2 대상유역의 개요

충주댐 수위관측소를 유역출구로 하는 충주댐 유역은 유역면적은 6,661.5km<sup>2</sup>이며 유역둘레는 471.6km, 유역평균폭은 23.5km, 유역평균표고는 609.1m, 유역평균경사는 34.9%로 국내 북동부 산악지역에 위치해있으며 산림면적은 5,481.7km<sup>2</sup>으로서 유역면적의 83.0%에 이른다(Fig. 3). 따라서 인위적인 토지이용현황 상태가 적어 이·치수 및 용수 재이용량이 적고 자연적인 강수-수문상태의 회귀수량 역시 댐 지점을 유역출구로 하기 때문에 자연유출량에 가깝다고 할 수 있다. 이는 충주댐 수위관측소의 유입량은 곧 자연적인 수문패턴을 가지고 유출이 발생한다고 볼 수 있어 자료의 신뢰성이 우수하다고 판단된다.

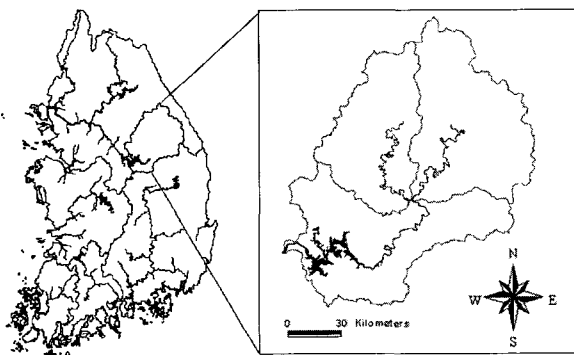


Fig. 3. Study Area

## 3. 대상유역의 입력자료 구축

### 3.1 수문·기상자료

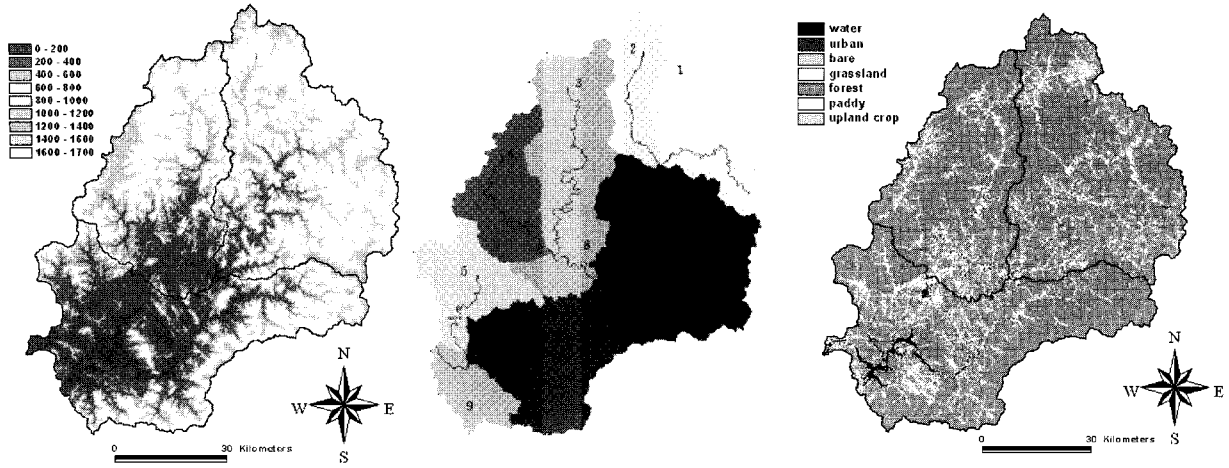
SLURP 모형의 기상자료는 일별 강우량, 평균기온, 이슬점온도 또는 상대습도, 일조시간 또는 태양복사량 등이 기본적으로 이용되며 그 외의 일 평균풍속, 구름

분포정도, 강설량, 저수지 수위, 일 평균유출량, 연평균 강수량 등이 필요에 따라 선택적으로 사용된다. SLURP 모형에서는 ASAs 소유역 각각에 대한 기상자료가 입력자료로 요구되나 이런 지역적 자료를 획득하기가 어렵기 때문에 유역내 근거리 기상관측소의 기상자료를 이용하여 Thiessen 가중법에 의해 각각의 ASAs 소유역에 해당하는 기상자료로 변환되어 사용된다. 본 연구에서 기상자료는 기상청에서 제공하는 일 자료 중에서 충주댐 유역에 위치하고 있는 관측소 7개소(춘천, 홍천, 대관령, 영월, 태백, 제천, 영주)의 자료를 사용하여 1998년부터 2001년까지의 기상자료를 획득하였다. SLURP 모형에서는 고도가 증가함에 따른 기온 및 강수량의 변화와 위도에 따른 입사복사량의 변화를 고려한다. 본 연구에서는 고도에 따른 온도 변화율을 고려하기 위해 충주댐 유역의 10개 관측소에 대한 10년(1996-2005년)동안의 기상관측자료를 토대로 온도 변화율을 산정한 결과 0.62°C/100m 가 감소하는 것으로 나타났다. 강우의 경우 강수가 평균대기온도에 따라서 강우와 강설로 구분되기 때문에 기온의 감소율과 모형의 default 값인 강우 5%/100m의 변화율을 고려하였고 이슬점 온도의 경우 기온감소율의 20%를 이용하였다.

### 3.2 DEM 및 소유역 분할

DEM은 일반적으로 지형의 표고를 나타내는데 가장 많이 이용되며 수문모형에서 입력 자료로 사용되어 지형 및 지표면의 특성을 분석함으로써 지형적 매개변수를 결정하는 방법으로 이용된다. 즉, 유역의 지표면 경사, 경사향 등의 매개변수를 결정하여 수문모형에 활용, 정확한 유출량 등을 예측한다. 본 연구에서는 1:5,000 NGIS 수치지도를 사용하여 공간해상도 200m × 200m의 DEM을 구축하였다(Fig. 4).

SLURP 모형에서의 하천흐름은 유역의 토지피복별 상태에 따라 분할된 ASAs 소유역에 대해 각 지점 유역 출구점까지의 하천의 고도변화·평균거리를 이용하여 유역을 추적하게 된다. 대상유역은 지형적 특성에 따라 하천분기점을 기준으로 유역이 분할되며 이것은 다시 ASAs 소유역내에서 같은 토지피복상태를 갖는 지역으로 세분화된다. SLURP 모형에서는 작성된 DEM으로부터 지형분석프로그램인 TOPAZ를 통하여 배수구역정의 및 하천망을 생성한다. TOPAZ를 이용하여 수리지형분할 및 하천망 생성을 위해 사용되는 중요한 매개변수인 임계수역(CSA)과 최소하천연장(MSCL)에 따라 분할된 소유역의 개수는 9개이다.



(a) DEM of Chungju-Dam Watershed (b) Division of ASAs Sub-Basins (c) Landcover Map  
 Fig. 4. DEM, Division of ASAs Sub-Basins and Landcover Map.

Table 1. Landuse Data of Chungju-Dam Watershed (2000yr)

Area	Water	Urban	Bare	Grass	Forest	Paddy	Upland	Total
km <sup>2</sup>	66.2	50.7	74.0	183.6	5,481.7	688.5	116.8	6,661.5
(%)	(1.0)	(0.8)	(1.1)	(2.8)	(82.2)	(10.3)	(1.8)	(100)

### 3.3 토지피복도

Landsat TM 위성영상을 사용하여 기하보정 등의 전처리 과정을 거쳐 2000년 토지피복도를 7개의 항목(수역, 시가지, 나지, 초지, 산림, 논, 밭)으로 감독분류하여 생성하였다(Fig. 5). 각 유역의 토지피복상태의 면적은 Table 1과 같다. 시간의 경과에 따른 피복상태의 변화에 대하여 고려 가능하지만, 본 연구에서는 대상기간(1998년-2001년)이 토지피복상태의 변화가 있을 만큼 길지 않아 장기간에 걸친 피복상태의 변화를 고려할 필요가 없으므로 2000년 토지피복도를 대상기간에 적용하였다.

### 3.4 정규식생지수 (NDVI)

1960년대 이래 원격탐사 자료로부터 식생의 생물리학적 특성을 나타내는 다양한 인자들을 밝혀내고자 노력해왔으며, 이러한 노력의 대부분은 식생지수의 개발이 이어져 왔다. 식생지수는 단위가 없는 복사 값으로서 녹색식물의 상대적 분포량과 활동성, 엽면적지수, 엽록소함량, 엽량 및 광합성 흡수복사량등과 관련된 지표로 사용된다. 가장 널리 사용되는 식생지수는 정규식생지수이다.

$$NDVI = \frac{Nir - Red}{Nir + Red} \quad (3)$$

여기서, Nir : 근적외밴드의 분광반사, Red : 적색밴드의 분사반사도

이와 같은 Eq. (3)으로 구한 NDVI는 -1에서 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 식생활력도가 높음을 의미한다. 본 연구에서는 1998년부터 2001년까지 4개년에 걸친 적설의 영향이 없는 3월부터 11월까지의 NOAA AVHRR 위성영상으로부터 토지피복별 NDVI를 생성하였다. 모형의 입력자료 구축을 위하여 일 NDVI로부터 1개월간의 최대치를 선택하여 월 대표 NDVI를 작성하였다. SLURP 모형에서는 NDVI를 사용하여 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)를 산출함으로써 작물에 의한 강우차단, 토양과 일 표면으로부터의 증발량과 식생으로부터의 증산량을 분리할 수 있다.

### 3.5 용설매개변수 구축

#### 3.5.1 적설분포도 추출 방법

NOAA 위성자료는 하루에 2회 이상 촬영되기 때문에 대상기간에 포함되어 있는 영상은 매우 많지만 AVHRR 센서는 광학센서 이기에 대상지역이 구름으로 많이 덮여 있는 경우 정보를 얻을 수 없다. 그래서 구름의 양이 적고 비교적 맑은 날의 영상을 획득해야 하므로 실제적으로 사용할 수 있는 영상은 많지 않다. Kazama et al.(1995)에 의하면 알베도 값으로 변환된 채널 1번으로부터 임계값을 이용하여, 구름, 얼음, 및

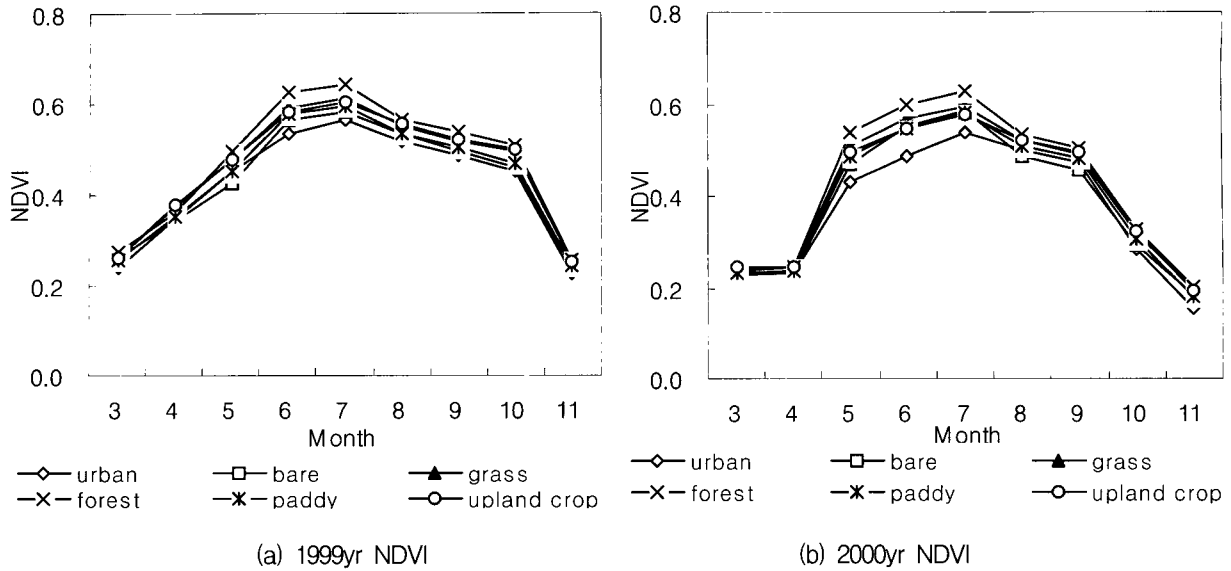


Fig. 5. Monthly NDVI of Landuse Class

Table 2. Threshold Range and Average Value

Data set	Threshold value						No. of image
	Range			Average			
	ch1	ch4	ch3	ch1	ch4	ch3	
97-98	5~8	-14~-3	-6~10	7	-8	4	17
99-00	2~5.5	-14~0	-1~15	4	-8	3	8
00-01	4~20	-20~30	-15~14	8	-5.5	7	7

적설지역을 추출하였다. 임계값 선정은 시행착오법에 의한 수동보정방법을 사용하여 각각의 영상마다 값을 결정하였다. 알베도를 나타내는 채널 1번은 임계값을 기준으로 높은 알베도 값을 가지는 바다, 구름, 얼음, 적설지역과 대비되는 육지를 분리하였다. 육지가 제거된 영상을 다시 채널 4번의 영상과 합성한 후 다시 임계값을 결정하여 높은 구름을 제거한다. 습도값으로 변환된 채널 3번영상 중 채널 1번, 4번에서 선정된 지역을 대상으로 임계값을 결정하여 낮은 구름을 제거하여 최종 적설분포지역을 추출하였다. 각 영상에서 사용된 임계값과 영상의 수는 Table 2 에 정리하였다.

### 3.5.2 적설심 분포도 추출 방법

본 연구의 대상유역에 대해 적설심을 추출하기 위해 먼저 우리나라 한강 상류지역에 위치한 속초, 춘천, 홍천, 인제, 대관령, 강릉, 원주, 영월, 태백, 제천, 영주의 11개 관측소의 최심적설심 자료를 사용하여 IDW (Inverse distance weighting) 보간법을 이용하여 GIS 자료를 구축하였다. 이 방법을 통해 point 데이터를 연속적인 surface로 만들어서 각각의 픽셀에 속성값을 부여했다. 구축된 GIS자료와 앞에서 추출된 적설분포지역

을 중첩하여 대상유역의 적설심을 추출하였다(Fig.6). 그 결과 Fig. 7과 같이 1998년 충주댐 유역의 적설분포지역에 대한 적설심 값의 분포도를 구축하였다.

### 3.5.3 적설분포면적, 유역평균적설심 추출 결과

용설모형의 입력 자료인 적설분포면적은 구축된 적설분포도에서 각 대상유역의 적설분포면적(km<sup>2</sup>)을 구하였고, 구축된 적설심 공간분포도에서 대상유역의 평균 적설심(cm)을 추출하였다. Fig. 8은 적설분포면적의 감소되는 비율 및 기간만을 나타내주는 감소곡선이며 적설분포의 면적이 감소되기 시작하는 시점과 기간 감소와 적설면적에 대한 평균 적설심이다. 대상유역은 눈이 많이 내리는 북동부 산악지역에 위치하여 다른 유역보다 적설량이 많고 고도가 높기 때문에 적설분포면적이 큰 것을 알 수 있었다.

## 4. 모형의 보정 및 검증

모형을 이용하여 최적의 결과를 얻기 위해서는 모형의 매개변수 보정이 필요하다. 이를 위하여 적절한 수문자료가 요구되며, 자료 기간의 범위는 중요하게 고려되어야 한다. 본 연구에서는 평수년과 갈수년으로 판단

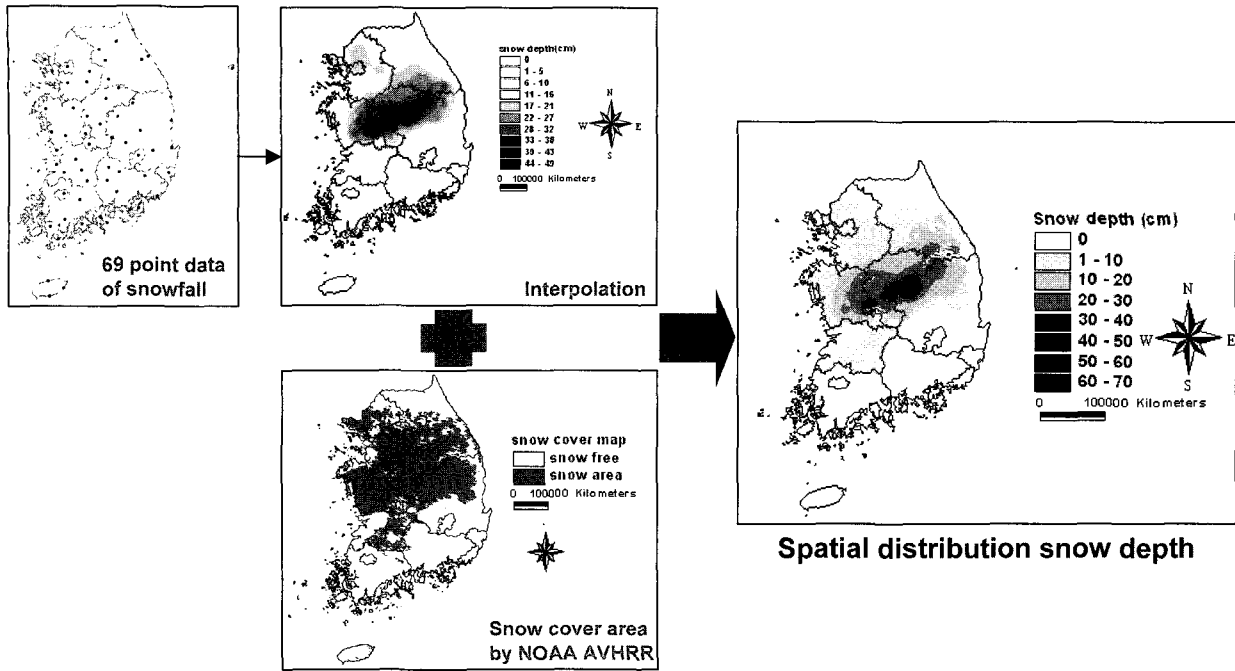


Fig. 6. Distribution Snow Depth from GIS Data and Snow Cover Area (SCA)

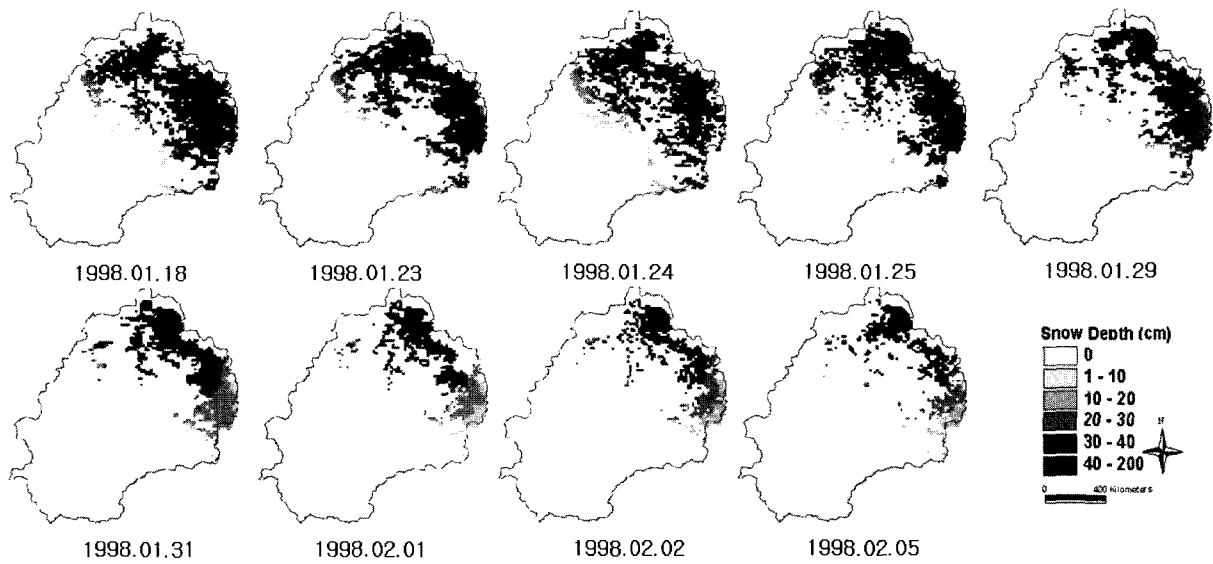


Fig. 7. Spatial Distribution 1998 Snow Extent and Snow Depth

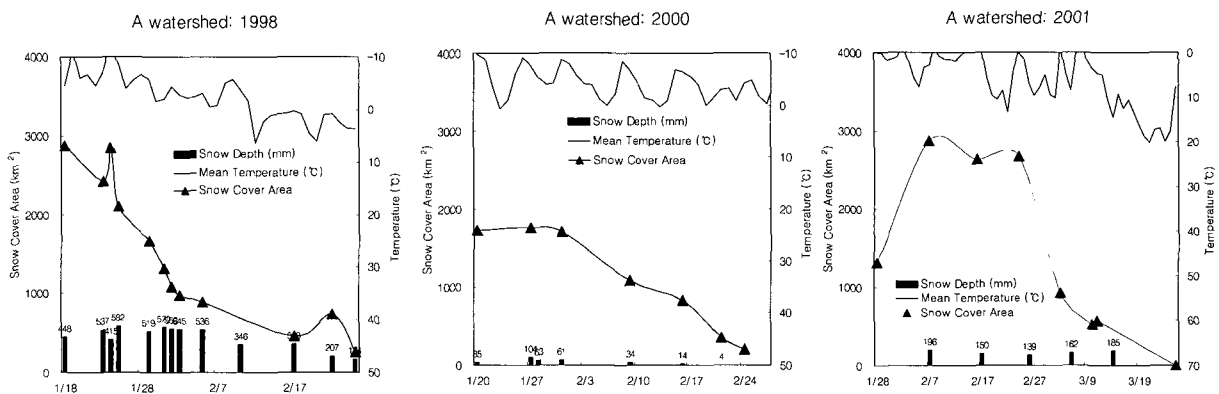


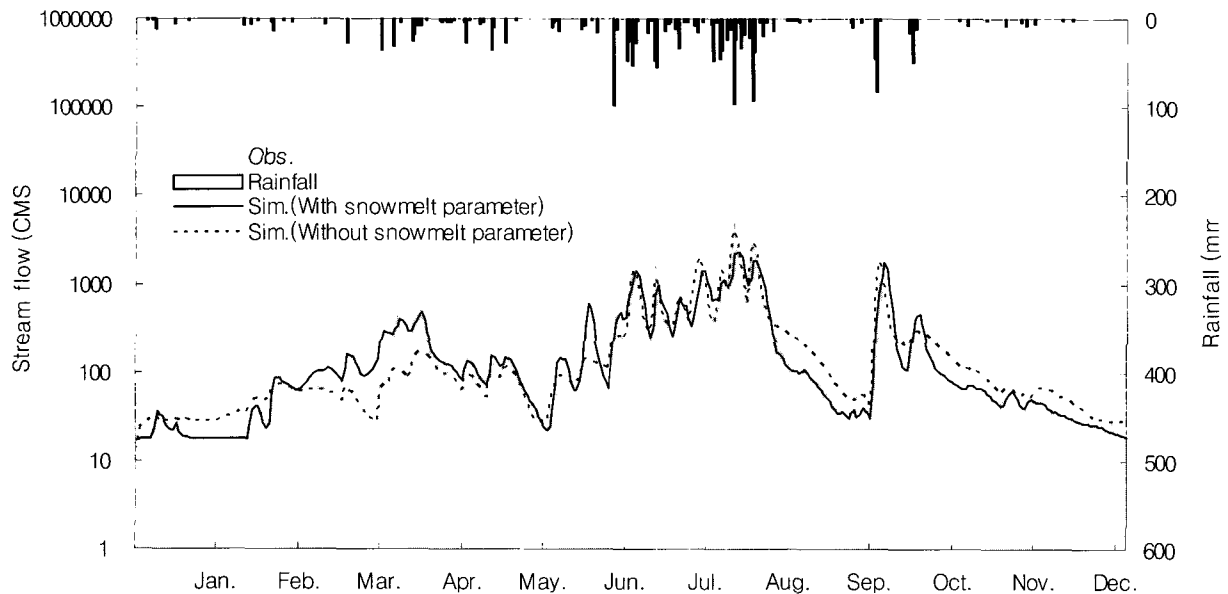
Fig. 8 The Temporal Variation of Snow Cover Area and Snow Depth

되는 대상기간(1998년, 2000년, 2001년)과 풍수년으로 판단되는 대상기간(1999년)을 가지고 보정과 검증을 실시하여 각각에 대한 매개변수를 추정하였다. 모의 결과에 대한 적합성을 판단하는 과정에서는 어떤 목적 함수를 사용하느냐가 중요하게 고려된다. 본 연구에서는 자료의 개수에 관계없이 절대적으로 평가할 수 있는 Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970) 모형효율과 자료의 개수에 무관하고 차원이 해석하고자하는 변량과 같은 차원을 나타내는 장점을 지닌 RMSE

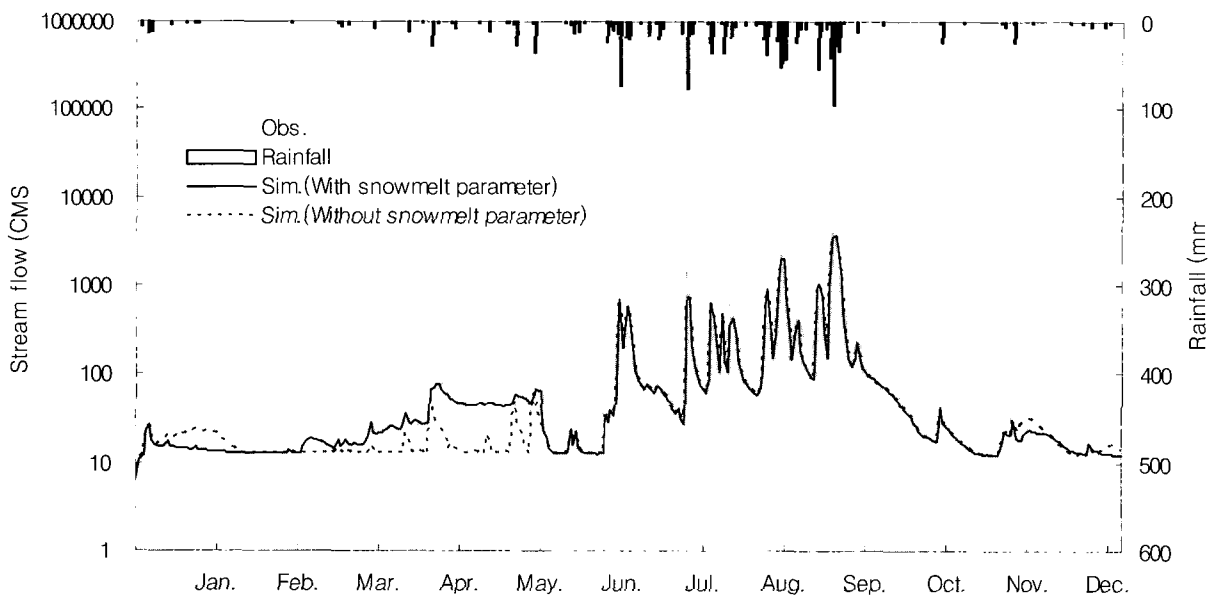
(Root Mean Square Error)를 사용하여 모형의 정확성을 검토하였다.

#### 4.1 모형의 보정과 매개변수 결정

본 연구에서는 충주댐 유역에 대해 1998, 2000, 2001 3년간의 유출량 자료와 용설매개변수를 고려하여 모형을 보정하였다(Fig. 9). 용설매개변수의 모형 적용성 분석을 위해 용설매개변수를 고려한 유출 모의와 용설매개변수를 고려하지 않은 유출모의를 하였다.



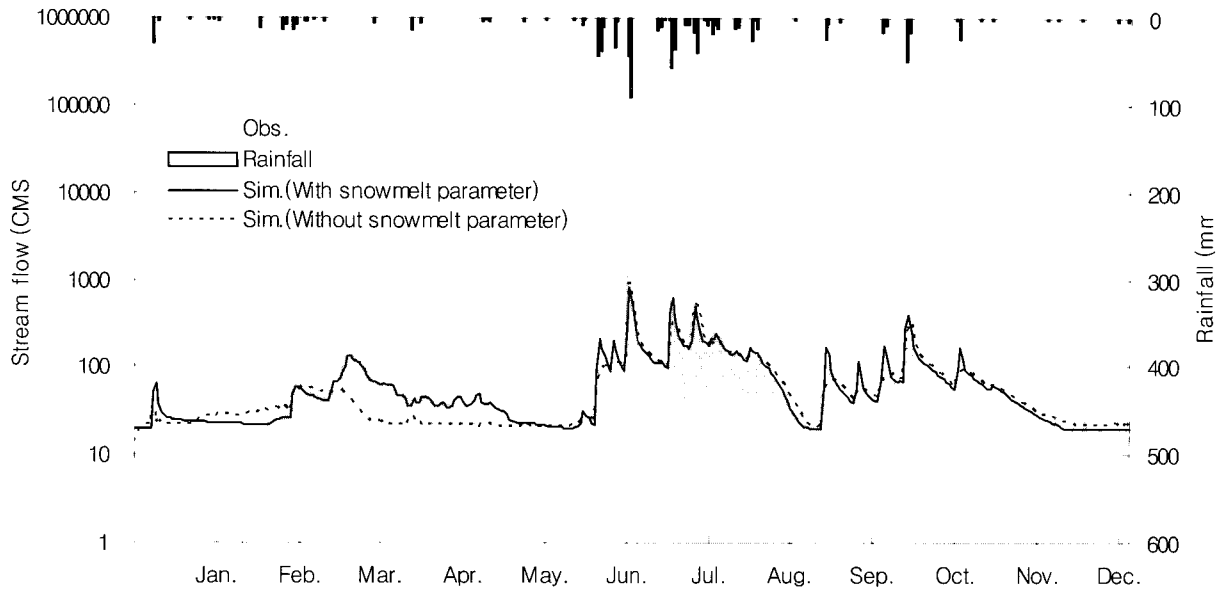
(a) Comparison Simulated Result with Observed Streamflow in 1998yr (Calibration)



(b) Comparison Simulated Result with Observed Streamflow in 2000yr (Calibration)

Fig. 9. Comparison Simulated Result with Observed Streamflow in 1998, 2000, 2001yr (Calibration)





(c) Comparison Simulated Result with Observed Streamflow in 2001yr (Calibration)

Fig. 9. Comparison Simulated Result with Observed Streamflow in 1998, 2000, 2001yr (Calibration) (continued)

SLURP 모형의 매개변수 최적화를 위해 민감도분석과 SCE-UA 최적화기법을 이용하였으며 매개변수추정의 최적화 척도로 Nash-Sutcliffe 모형효율, RMSE 값을 사용하였다. 매개변수는 각 토지이용별로 산정되는데 수문반응시간과 유출량에 가장 많은 영향을 미치는 매개변수는 각 토지이용상태에 따른 지표저류상수, 최대지표저류량, 지표하저류상수 및 최대지표하저류량이다. 특히 토양에 따른 입력자료가 토성의 비율에 따른 추정값을 사용하기 때문에 기저유출에 대한 지표하저류상수가 크게 나타난다. 각각의 사상들에 의해 추정된 매개변수의 평균값은 Table 3와 같고 용설 관련 매개변수인 초기 적설량인 1번은 구축한 적설심을 사용하였고

강수와 강설을 구분하는 온도인 10번 매개변수는 0°C로 일정한 값을 주었다.

#### 4.2 모형의 검증

각각의 사상들에 대한 매개변수의 평균값들을 통해 1999년 유출량을 모의한 결과는 다음과 같으며 검증기간에 대한 강우-유출 모의는 그 양과 경향을 잘 반영하고 있다(Fig. 10).

모의 결과 강수량이 커지면 유출량도 늘어나는 것을 알 수 있고, 보정기간의 용설량도 강수량이 늘어남에 따라 늘어나는 것을 알 수 있다. 검증기간의 용설량은 강수량에 비해 낮은 값을 갖는 이유는 겨울철 눈이 다

Table 3. Summary of Model Calibration and Its Mean Parameters

No.	Description	Water	Urban	Bare-ground	Grass	Forest	Paddy	Upland crop
1	Initial contents of snow store (mm)	0.00	703.87	437.73	550.87	54.59	239.52	554.00
2	Init. contents of slow store (% of max)	50.00	79.75	84.32	55.06	39.11	44.41	32.99
3	Maximum infiltration rate (mm/day)	200.00	49.19	99.07	120.80	150.00	130.54	112.53
4	Manning roughness, n	0.00	0.02	0.00	0.07	0.04	0.07	0.00
5	Retention constant for fast store	1.00	17.33	36.04	33.67	45.65	47.82	22.39
6	Maximum capacity for fast store (mm)	0.00	218.87	194.85	413.67	148.31	337.05	291.63
7	Retention constant for slow store	39860	51797	20460	47037	68800	40317	63123
8	Maximum capacity for slow store (mm)	35495	61517	34183	33803	34557	61490	55620
9	Precipitation factor	1.00	1.50	1.03	1.27	0.91	1.10	1.46
10	Rain/snow division temperature (°C)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

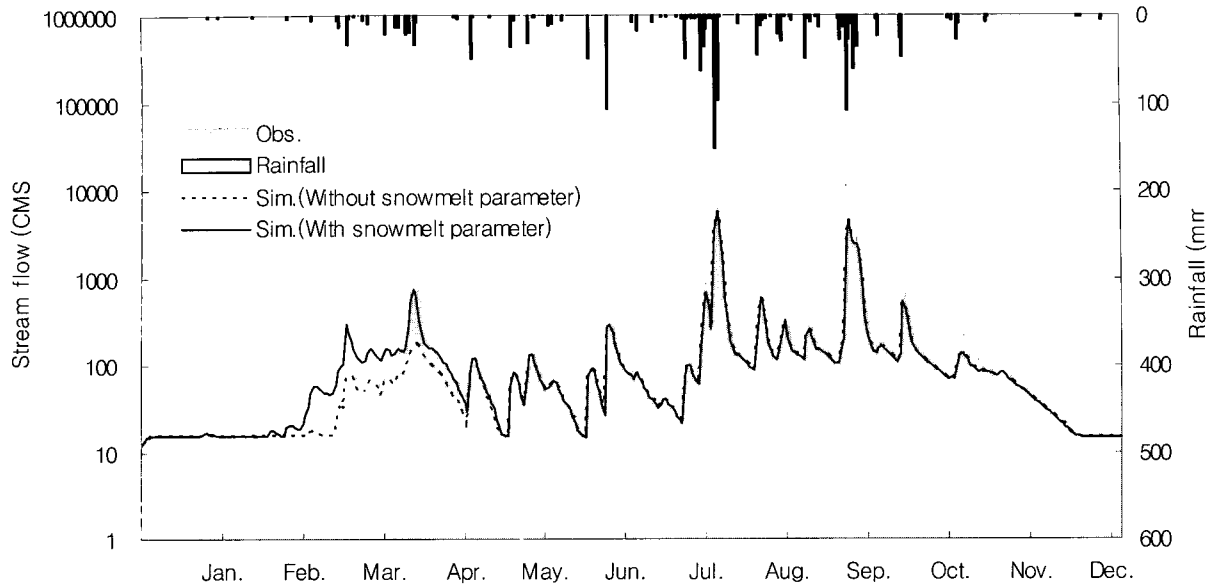


Fig. 10. Comparison simulated result with observed streamflow in 1999yr (Verification)

Table 4. Comparison Simulated Results with Observed Discharge

	Year	Observation		Simulation				Statistical summary				note
		Precipitation (mm)	Stream-flow (mm)	Precipitation (mm)	Stream-flow (mm)	Snowmelt (mm)	Runoff ratio	RMSE		Nash-Sutcliffe efficiency		
								full period	January to May	full period	January to May	
A	1998	1743	1075	1964	1199	136	0.61	0.41	0.48	0.83	0.69	C
	2000	1331	678	1097	564	90	0.51	0.40	0.45	0.84	0.54	C
	2001	908	337	830	337	94	0.41	0.41	0.36	0.52	0.57	C
	1999	1703	913	1628	823	64	0.51	0.35	0.61	0.84	0.47	V
B	1998	1743	1075	1964	1119	36	0.61	0.43	0.43	0.82	0.30	C
	2000	1331	678	1097	559	37	0.51	0.40	0.54	0.84	0.00	C
	2001	908	337	862	321	72	0.37	0.49	0.60	0.40	0.10	C
	1999	1703	913	1517	802	0	0.53	0.32	0.51	0.87	0.36	V

Note) A:With snowmelt parameter, B:Without snowmelt parameter, V:Verification, C:Calibration

음해에 비해 아주 적게 내렸기 때문이다. 여름철에 강수량이 집중적으로 내리므로 풍수년의 유출률이 70%로 평수년과 갈수년에 비해 높다. 보정 결과 모형효율은 0.52에서 0.84로 모의되었으며 검정 결과 모형 효율은 0.84로 유출량을 효과적으로 반영한 것으로 판단된다 (Table 4). 용설매개변수를 고려하지 않은 유출 모의시 총 유출량에 미치는 영향은 미미하나, 용설기간인 1월~5월 사이의 용설량이 급격히 감소하였고 모형 효율이 0~0.36으로 용설의 영향을 거의 반영하지 못하는 것으로 나타났다.

### 5. 요약 및 결론

본 연구는 충주댐 지역의 용설에 의한 수문변화 양

상을 분석하기 위해 용설 매개변수인 적설심과 적설분포면적을 NOAA AVHRR 위성영상과 지상기상관측소의 적설심 자료를 이용하여 GIS와 RS기법으로 각각 추정하였다. 그 외 모형 입력 자료인 DEM, 토지피복도, NDVI, 수문기상자료를 이용하여 준분포형 장기유출모형인 SLURP 모형에 적용하였다. 1998, 2000, 2001년에 대해 각각 용설 유출을 고려하여 보정한 매개변수를 이용 1999년을 검증하였다. 그 결과 평균 Nash-Sutcliffe 모형효율이 1월 부터 12월까지의 0.76이고 용설의 영향을 주는 1월부터 5월까지의 0.57로 양호한 값을 나타내고 있다. 용설매개변수를 고려하지 않은 유출 모의시 총 유출량에 미치는 영향은 미미하나, 용설기간인 1월~5월 사이의 용설량이 급격히 감소하였고 모형 효율이

0~0.36으로 용설의 영향을 거의 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 용설 매개변수 적용, 미적용시 수문 거동의 차이를 고려할 때 장기유출모의를 통한 정확한 수문 해석을 위해서는 용설 매개변수의 적용이 필히 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-9-3)에 의해 수행되었으며, 연구에 사용된 NOAA AVHRR 인공위성 자료는 기상청으로부터 제공받았습니다.

### 참고 문헌

- 배덕호, 오재호 (1998). "장기 유출해석에서의 유설영향에 관한 기초 연구." *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 833-844.
- 이상호, 안태진, 윤병만, 심명필 (2003). "적설 및 용설 모의를 포함한 탱크모형의 소양강댐 및 충주댐에 대한 적용." *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제36권, 제5호 pp. 851-861.
- 임혁진, 권형중, 장철희, 김성준 (2004). "SLURP 모형을 이용한 유출수문분석 : 소양강댐 유역을 대상으로." *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제37권, 제8호, pp. 631-641.
- Baglio, J.V., and Holroyd, E.W. (1989). "Methods for Operational Snow Cover Area Mapping Using the Advanced Very High Resolution Radiometer San Juan Mountain Test Study." *Research Technical Report*, USGS EROS Data Center, Sioux Falls, South Dakota, March 1989 : 820
- Baumgartner, M.F., Seidel, K., and Martinec, J. (1987). "Toward Snowmelt Runoff Forecasting Based on Multisensor Remote Sensing Information." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-25, NO. 6.
- Brubaker, K., Rango, A. and Kustas, W. (1996). "Incorporating radiation inputs into the Snowmelt Runoff Model." *Hydrological Processes*, 464.
- Kazama, S. (1995). *Study on Water Cycle in Middle Scale Region*, Dept. Civil Engrg. Tohoku University, Japan.
- Kite, G.W. (1998). "Land surface parameterizations of GCMs and macroscale hydrological models." *Journal American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 6, pp. 1247-1254.
- Kustas, W.P., Rango, A., and Uijlenhoet, R. (1994). "A simple energy budget algorithm for the snowmelt runoff model." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 5, pp. 1515-1527.
- Martinec, J., Rango, A., and Major, E. (1983). *The Snowmelt-Runoff Model (SRM) : User's Manual (NASA Reference Publication No. 1100)*, Scientific and Technical Information Branch, NASA, Washington, DC.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models; Part 1 - A discussion of principles." *J. Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Rango, A., and Itten, K.I. (1976). "Satellite Potentials in Snowcover Monitoring and Runoff Prediction." *Nordic Hydrology*, Vol. 7, pp. 209-230.
- Rango, A. and Martinec, J. (1995). "Revisiting the degree-day method for snowmelt conditions." *Wat. Res. Bull.*, 31, 4, 657-669.
- Ranzi, R., Grossi, G., and Bacchi, B. (1999). "Ten Years of Monitoring Areal Snowpack in the Southern Alps Using NOAA-AVHRR Imagery, Ground Measurements and Hydrological Data." *Hydrological Process*, Vol. 13, pp. 2079-2095.
- Sandra, L., and Woo, M.K. (2003). "Application of hydrological model with increasing complexity to subarctic catchments." *Journal of Hydrology*, Vol. 270, pp. 145-157.
- Seidel, K., and Martinec, J. (2002). "NOAA/AVHRR Monitoring of Snow Cover for Modelling Climate-Affected Runoff in Ganges and Brahmaputra Rivers." *Proceeding of EARSeL eProceedings*, NO. 2, pp. 188-200.
- Simic, A., Fernandes, R., Brown, R., Romanov, P., and Park, W. (2004). "Validation of VEGETATION, MODIS, and GOES+SSM/I Snow-Cover Products over Canada Based on Surface Snow Depth Observations." *Hydrological Process*, Vol. 18, pp. 1089-1104.
- Tarboten, D.G., Al-Adhami, M.J. and Bowles, D.S. (1991). "A preliminary comparison of snowmelt models for erosion prediction." *Proceedings of the 59th Annual Western Snow Conference*, 12-15

April, 1991, Juneau, Alaska, 79-90.  
Tekeli A.E., Akyurek, Z., Sorman, A.A., Sensoy, A.,  
and Sorman, A.U. (2005). "Using MODIS Snow  
Cover Maps in Modeling Snowmelt Runoff

Process in the Eastern Part of Turkey." *Remote  
Sensing of Environment*, Vol. 97, pp. 216-230.

(논문번호:06-45/접수:2006.04.14/심사완료:2007.07.30)