

# SLURP 모형을 이용한 유출수문분석

## - 소양강댐 유역을 대상으로 -

### Hydrological Analysis in Soyanggang-dam Watershed Using SLURP Model

임 혁 진\* / 권 형 중\*\* / 장 철 희\*\*\* / 김 성 준\*\*\*\*

Lim, Hyuk Jin / Kwon, Hyung Joong / Jang, Cheol Hee / Kim, Seong Joon

#### Abstract

The objective of this study is to test the applicability of SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Process) on Soyanggang-dam watershed. SLURP model is a conceptual semi-distributed form model that can be used to examine irrigation plan and the effects of proposed changes in water management within a basin or to see what effects external factors such as climate change or changing land cover might have on various water users. Topographical parameters were derived from DEM using TOPAZ and SLURPAZ. Monthly NDVIs were calculated from multi-temporal NOAA/AVHRR images during four years (1998 ~ 2001). Weather elements (dew-point temperature, solar radiation, maximum/minimum temperature and relative humidity) were obtained from five meteorological stations within and near the study area. To simulate daily hydrograph during 1998 ~ 2001, the model parameters of each land cover class were optimized by sensitivity analysis and SCE-UA method. Test result of SLURP was summarized by various statistics method (WMO volume error, Nash-Sutcliffe efficiency, mean error and coefficient of variation).

**Keyword** : SLURP, TOPAZ, SLURPAZ, SCE-UA, NOAA, NDVI

#### 요 지

본 연구는 개념적 준분포형 모형인 SLURP 모형의 소양강댐유역의 적용가능성에 대해 다루었다. SLURP 모형은 강우의 시공간적 변화를 반영하여 강우-유출을 해석하여 관계계획 및 수자원 관리 효과를 판단할 수 있는 준분포형 모형이다. DEM으로부터 지형분석프로그램인 TOPAZ/SLURPAZ와 연계하여 빠르고 쉽게 지형매개변수와 지형자료를 획득할 수 있다. NOAA/AVHRR 위성영상을 이용하여 월별 NDVI를 산출하였으며, 대상유역 주변의 5개의 기상 관측소를 통해 일별 수문기상자료(이슬점, 일사량, 최대·최소 대기 기온, 상대습도 등)을 얻었다. DEM, NDVI, 수문 기상자료를 이용하여 1998년부터 2001년까지 4 개년도의 일별유출량을 모의하였다. 매개변수 최적화를 위하여 민감도 분석 및 SCE-UA 방법을 사용하였으며 대상기간의 Nash-Sutcliffe의 모형효율과 WMO 통계량을 통해 소양강댐

\* 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과 석사과정  
Graduate Student, Dept. of Rural Engrg., Univ., Seoul, 143-701, Korea

\*\* 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과 박사과정  
Doctoral Student, Dept. of Rural Engrg., Univ., Seoul, 143-701, Korea

\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원  
Water Resources & Environmental Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, 411-712, Korea

\*\*\*\* 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학전공 부교수  
Associate Professor, Dept. of Rural Engrg., Konkuk Univ., Seoul, 143-701, Korea  
Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3749, E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr.

유역의 SLURP모형의 적용성을 검증하였다.

핵심용어 : SLURP, TOPAZ, SLURPAZ, SCE-UA, NDVI

## 1. 서론

우리나라의 강우는 여름철에 집중되므로, 대부분의 지역에서 봄철 관개용수의 확보에 어려움이 많다. 따라서, 농업용수 공급에 있어 용수의 확보 및 분배가 크게 대두되고 있다. 수문모형은 강수가 유출로 변화하는 물리적 과정을 모의함으로써 기후 및 토지피복 등의 외적인 요소의 영향과 유역 내의 물관리 변화의 영향을 평가하는데 사용하여 용수의 이·치수 및 관개계획을 수립하는데 있어 유용하다. 국지적 유역 내에서 자연 유출은 집중형 모형을 사용하여도 단순 유출수문곡선의 모의와 예측의 적용성이 적합하나 좀더 과학적으로 분석하기 위해서는 SHE (Systeme Hydrologique European) 모형과 같은 물리적 기초이론에 근거한 분포형 모형을 사용할 필요가 있다(Abbott 등, 1986). 특히 우리나라의 홍수사상에 대한 유출모형은 저류함수법의 집중형 모형을 대부분 사용하고 있으나 이것은 강우의 시공간적 변화를 반영하기에는 부적합하다. 이에 반해 분포형 모형은 시공간적 변화를 효과적으로 고려하지만, 중규모이상의 대유역에서 신뢰성있는 하천 유출량을 모의하기 위한 입력자료 구성이 어렵다는 단점이 있다. 외국에서 개발되어 국내에 소개되어 이용되고 있는 장기 강우-유출 모형으로는 SWM-IV, HSP, NWSRFS, API, SSARR, TANK, USDAHL-74, SHE, TOPMODEL 모형 등이 있으며, 이중 분포형 모형으로는 USDAHL-74, TOPMODEL, SHE모형 등이 있다. 권순국과 고덕구(1987)에 의해 USDAHL-74 모형이 일부 수정되어 적용성 검증이 이루어진 바 있으며 고덕구(1989)는 이를 보완시켜 발전시킨 분포형 연속 하천흐름모형을 개발하여 일유출량을 해석하고 유역 물수지를 분석한 바 있다. SHE 모형은 USDAHL-74 모형과 같이 각 수문과정을 성분 모형에 의해 모의 발생시킬 수 있도록 한다는 완전 분포형 모형이다. 한편 국내에서도 최근에 Kim 등(2003)이 C-언어를 이용한 격자기반의 일단위 토양수분 추적모형(GRISMORM: Grid-based Soil Moisture Routing Model)을 개발하였는데, 이 모형은 특히 논의 물수지를 고려하고 있다.

최근 지리정보시스템(GIS)의 도입과 인공위성 자료의 이용으로 유출해석에 필요한 신뢰성있는 입력자료를 빠르고 쉽게 구축함으로써 유역의 수문과정을 보다 정확하게 모의할 수 있게 되었다. GIS의 도입은 수문

모형을 위한 수치지형분석모형기법에 적용됨으로써 분포형모형의 지형학적 매개변수의 추정과 최적화에 따른 입력자료 구축에 있어 자료와 비용의 한계성을 극복하였다.

본 연구에서 사용된 준분포형 수문모형인 SLURP는 국지적인 기상자료와 위성영상을 이용하여 획득한 토지피복도와 NDVI(Normalized Difference Vegetation-Index)를 이용하여 물수지를 모의하고 지형분석프로그램인 TOPAZ (TOPographic PARAMeteriZation) (Garbrecht와 Martz, 1993)로 분할된 ASAs (Aggregated Simulation Areas) 소유역내 토지피복 상태에 따라 증발, 증산, 지표유출, 중간·지하수 유출, 저류용량변화를 적절한 과정을 통하여 강우추적을 하게 된다. 특히, 강수를 강우사상과 강설사상으로 분리하여 용설에 대한 유출을 고려함으로써 장기유출모형의 수문해석의 정확성을 높이고 있다. 국내에서는 김성태(2003)가 용담댐유역의 일 하천유출량을 모의하여 TOPMODEL과 TANK 모형에 의해 모의된 일 유출 수문곡선과 비교 분석하여 SLURP 모형의 일 유출량 모의 적용성의 타당성을 밝힌 바 있다.

본 연구의 목적은 준분포형 모형인 SLURP 모형을 이용하여 소양강댐유역에 대하여 지형적 특성을 반영하여 장기유출 수문해석을 모의함으로써 모형의 매개변수 추정과 장기유출해석의 적용성을 검토하는데 있다.

## 2. 모형의 기본이론

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 준분포형 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 모형이므로 특히, 강우사상을 강우사상과 강설사상으로 분리하여 모의함으로써 용설에 대한 수문특성을 반영한다. SLURP 모형은 토지피복별로 세분화되는 ASAs로 알려진 공간 단위로부터 일단위 강우-유출의 수문해석하며, 입력자료는 지형자

료(ASA 평균고도값, 수로연장, 토지피복상태 등), 시계열자료(기온, 강수 등), 물리적 매개변수(조도계수, 차단계수)등을 이용한다. 지형자료의 경우 GIS와 수치지형분석모형기법을 사용하여 획득할 수 있다. 시계열 자료는 기상관측소에서 실측값을 사용하며 매개변수들은 측정·추정·보정된 값을 사용한다. 모형의 유출모의는 각각의 토지피복별 격자매트릭스와 ASAs 소유역에 대한 연직방향 물수지해석에 의하여 이루어지며 이는 수관저류, 강설초기저류, 급속저류(지표면 저류, 토양층저류 등), 완속저류(지표하 저류 등)의 네 가지 수직구조로 구성된다.

### 2.1 모형의 소유역 분할

수문모형에 사용되는 분포형 모형 및 준분포형 모형의 개념들은 유역내 수문학적 특성이 일치하는 소유역으로 세분하여 적용하는데 다양한 개념이 적용된다. Rango(1995)는 대유역에 토지피복상태, 토양종류, 경사 및 방향 등으로 소유역을 구분한 HRU(Hydrological Response Unit) 사용하여 산악지역을 모의하는데 대표적으로 사용하였다. SWIM 모형(Krysanova 와 Becker, 1996)의 경우 'Hydrotops'이라는 소유역 구분 개념을 이용하여 토지 이용상태와 토양 종류에 따라 전체 유역을 분할하였으며, 유사한 개념으로 Kouwne 등 (1995)은 GRU (Grouped Response Unit)라는 동질의 토지피복상태를 가지는 지역을 통합하여 격자형 모형에서 사용하

는 GRUs를 사용하였다. SLURP 모형은 Kouwen의 'GRUs' 와 Krysanova의 'Hydrotops'과 비슷한 개념으로 전체유역을 같은 ASAs라는 소유역으로 분할하고 이를 토지피복상태에 따라 각 소유역별로 더 세분화한다. 본 연구에서는 지형분석프로그램인 TOPAZ를 사용하여 전체유역을 ASAs 소유역으로 분할하였다.

### 2.2 연직방향물수지(vertical water balance)

개념적 준분포형 모형인 SLURP 모형은 중규모 또는 대단위 유역의 일별 유출량해석에 있어서 연직방향 물수지 연구에 적합하다. SLURP 모형은 지형자료, 시계열자료, 강우·용설과 토양수분의 매개변수를 입력자료로 사용하여 수관 저류량, 강설초기 저류량, 지표면저류, 지표하 저류로 대표되는 4단 탱크개념을 이용하여 수직적인 물수지를 모의한다. 연직방향물수지의 기본 알고리즘과 수식은 다음과 같다(그림. 1).

SLURP 모형에서 지상학적 매개변수는 지형분석프로그램과 연계하거나 수작업으로 신뢰성있는 자료를 구축할 수 있다. 각 층에 대한 입력자료와 매개변수는 다음 표와 같다(표 1).

### 2.3 홍수 추적

#### 2.3.1 ASAs 소유역내 홍수추적

토지피복상태에 따라 유출은 가장 가까운 하천으로 이동하고, 하천의 흐름에 따라 소유역의 출구에 도달하

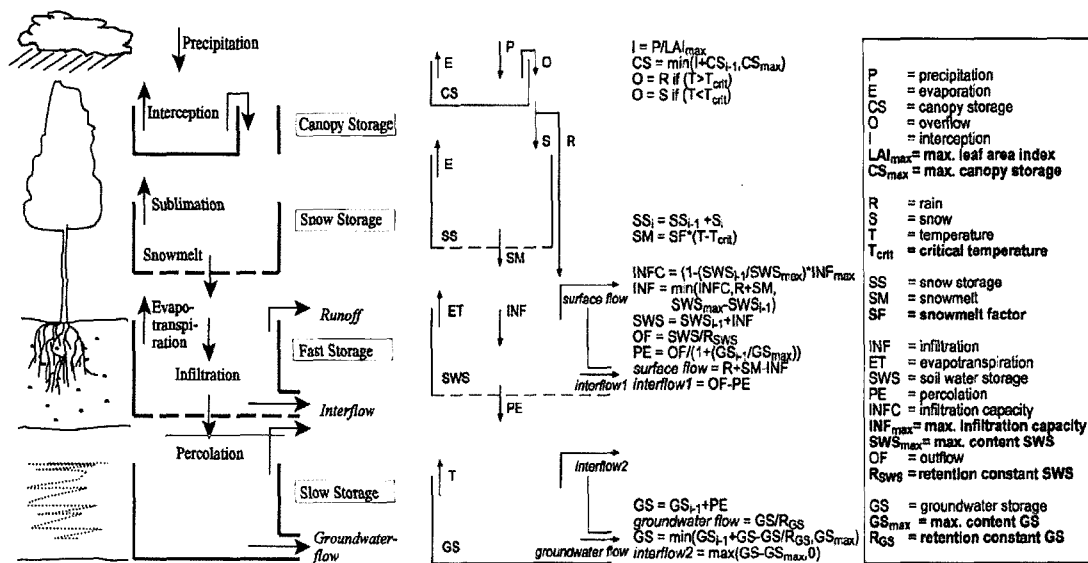


그림 1. 연직방향 물수지 모식도 (Sandra와 Woo, 2003)

표 1. SLURP 모형의 입력자료 및 매개변수 (Sandra와 Woo, 2003)

SLURP(입력자료 및 매개변수)	
입력자료	
강수 모듈	강수 기온
증발산 모듈	이슬점 온도 일조 시간
매개변수	
강수 모듈	임계 온도 강수 변화율
용설 모듈	용설 인자
토양수분 모듈	최대 침투율 최대 저류능 지체 상수
증발산 모듈	Priestly Taylor $\alpha$ 증발 상수 $\beta$ 포장용수량 위조점 알베도 토양 잠열

게 된다. SLURP 모형은 토지피복상태에 따른 소유역 내 하천까지의 최단거리와 ASAs 소유역 출구점까지의 거리에 대한 정규분포 모멘트를 계산하여 유출에 대한 추적을 실시한다. 지형분석프로그램인 TOPAZ를 이용하여 토지피복상태별 하천까지의 최단거리에 대한 평균과 표준편차, 소유역 출구점까지의 거리에 대한 평균과 표준편차, 고도차에 대한 하천과 ASAs 소유역 출구점까지의 평균( $\mu$ )과 표준편차( $\sigma$ )와 같은 지형자료를 획득한 후 ASAs 소유역내 하천흐름의 최단거리에 대한 하천 유속을 추정하여 하천 흐름에 대한 도달시간을 계산한다. 도달시간에 따른 최소·최대거리는 다음 식 (1)과 같다.

$$L_{min} = \mu - 2\sigma, L_{max} = \mu + 2\sigma \quad (1)$$

### 2.3.2 ASAs 소유역간의 홍수추적

SLURP 모형의 ASAs 소유역간의 홍수추적은 McCarthy의 저류방정식에 근거를 둔 Muskingum 방법을 이용하여 매개변수와 하도의 홍수추적을 실시하게 된다. 가중계수  $x$ 는 초기 0.25의 값을 가지며, 저류상수  $K$ 는 모형내에서 고도가 낮아질 때마다 추정되며 직경 ( $D$ )의 함수로 표현한다(Institute of Hydrology, 1995).

$$K = 1.5e^{-D/250} \quad (2)$$

### 2.4 모형의 연계

SLURP 모형은 지형분석프로그램인 TOPAZ/SLUR-PAZ와 연계하여 신뢰성있는 지상학적 매개변수와 지형 자료를 추출하여 별도의 가공없이 입력자료로 사용할 수 있다. 각 모형의 연계과정은 다음과 같다(그림 2).

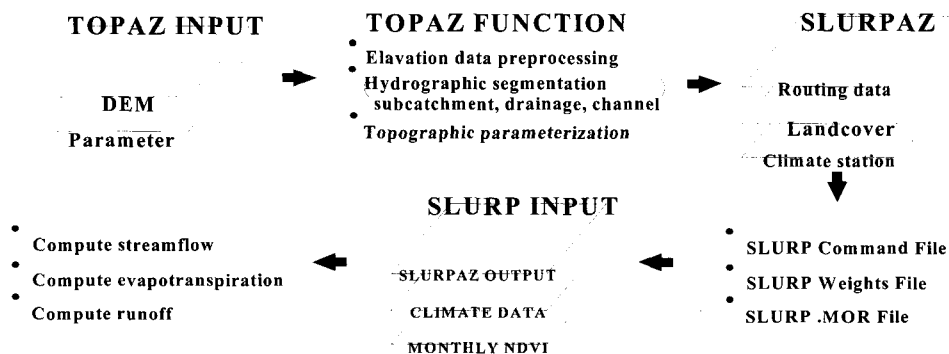


그림 2. TOPAZ/SLURPAZ와 SLURP 모형의 연계과정

### 2.4.1 TOPAZ

지형분석프로그램인 TOPAZ는 수문학적 모델링과 분석을 지원하여 지형적 평가와 유역 매개변수 결정을 보조하도록 설계되었으며, DEM으로부터 획득된 자료와 초기 입력 지형, 지표면에서의 물리학에 기초가 되는 함몰지와 물의 흐름과정 사이의 일관성을 유지하는 것을 강조하여 전면적인 평가를 제공한다. 함몰지와 평지면 위의 배수 규명에 관하여 현재 DEM 처리 방법들에 있는 대다수의 취약점을 극복했고 다수 새로운 특징들은 상세한 수문학과 수리적 필요성을 능숙하게 하기 위해 추가되었다. TOPAZ 모형의 세 가지 주요기능은 다음과 같다.

- (1) 고도 데이터의 처리(함몰지와 평지의 처리)
- (2) 수리학적 구분(표면 배수, 하천망과 소유역의 정의)
- (3) 지형적 매개변수  
(네트워크와 소유역 특성 및 매개변수들의 정량화)

TOPAZ에 의해 획득한 지형자료들은 SLURPAZ 작업환경에서 SLURP 모형의 입력자료로 변환되어 사용된다(표 2).

TOPAZ는 DEM으로부터 유출과정에 사용되는 지형·지리자료의 다양한 물리적 인자(지형형태, 매개변수 추정, 지표배수구 정의, 소유역의 배수계 분할, 신뢰성 있는 배수망, 소유역집수점 매개변수)를 획득할 수 있다(Garbrecht 와 Campbell, 1997).

### 2.4.2 SLURPAZ interface

SLURPAZ 인터페이스(Lacroix 와 Martz, 1997)는

TOPAZ 모형과 SLURP 모형을 연계시켜주는 작업환경으로 수문학자 또는 수자원연구자들에게 하천흐름의 예측과 홍수예측분석을 빠르게 해주어 배수망 유역분석에 생산성을 높여주는 이점이 있다.

## 3. 재료 및 방법

### 3.1 입력자료의 구축

#### 3.1.1 DEM

소양강댐 상류유역을 대상으로 1:5,000 NGIS 수치지도를 이용하여 100m×100m 해상도의 DEM을 구축하였다(그림 3). 본 대상유역은 소양강댐수위관측소를 유역출구로 하는 11개의 소유역으로 구성되는 유역면적 2,694km<sup>2</sup>의 중규모 규모의 유역으로 평균고도와 경사는 각각 650m, 23°이며, 전체 면적의 90%이상이 산림으로 이루어진 산악지역이다.

#### 3.1.2 ASAs 소유역 분할

SLURP 모형에서의 하천흐름은 유역의 토지피복별 상태에 따라 분할된 ASAs 소유역에 대해 각지점 유역출구점까지의 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 모형에서의 ASAs 소유역의 분할은 지형분

표 2. TOPAZ와 SLURPAZ 모형의 입·출력 자료 (Lacroix 등, 2002)

<p>TOPAZ inputs</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- File containing parameters describing the DEM raster characteristics, the DEM processing options</li> <li>- File containing the DEM</li> <li>- File containing raster processing options</li> </ul> <p>TOPAZ outputs/SLURPAZ inputs</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- General TOPAZ parameters</li> <li>- Table of channel link properties</li> <li>- Table of subcatchments properties</li> <li>- Raster image of subcatchments for each channel link</li> <li>- Raster image of distances to nearest channel</li> <li>- Raster image of distances to ASA outlet</li> <li>- Raster image of relief corrected DEM elevations</li> <li>- Raster image of change in elevation to nearest channel</li> <li>- Raster image of change in elevation to ASA outlet</li> <li>- Channel link properties for the binary drainage network</li> </ul> <p>SLURPAZ inputs</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Raster of land cover classifications</li> <li>- Routing information(roughness, width, depth, Alpha and Beta)</li> <li>- Climate station number, name, easting, northing, elevation and long term mean annual precipitation</li> </ul>
--

석 프로그램인 TOPAZ를 이용한다. TOPAZ는 DEM 으로부터 하향경사흐름의 순서를 정하는 개념 (O'Callaghan과 Mark, 1984)과 임계수역(CSA) 개념에 근거하여 주하천이 지속되는 최소의 유역면적을 정의하는 프로그램이다(Martz와 Garbrecht, 1992).

TOPAZ를 이용하여 수리지형분할 및 하천망 생성을 위해 사용되는 중요한 매개변수인 임계수역과 최소하천연장(MSCL)에 따라 분할된 소유역의 개수는 표 3과 같다.

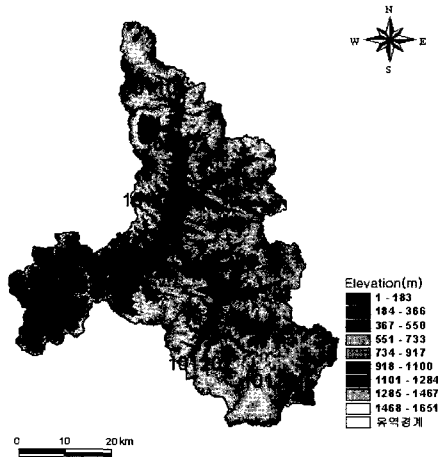


그림 3. 수치고도모델

표 3. 임계수역 및 최소하천연장 매개변수 변화에 따른 소유역 분할

No.	CSA(ha)	MSCL(m)	No. ASA
1	10000	3000	9
2	9000	3000	9
3	8000	3000	15
4	7000	3000	15
5	6000	3000	21
6	5000	3000	27

### 3.1.3 토지피복도

환경부의 1:250,000 토지피복도(그림 5)를 이용하여 분할된 9개의 ASAs 소유역에 대한 토지피복상태별 면적비(%)는 표 4와 같다.

표 4. 소유역별 토지피복 현황(%)

ASA No.	물	도시	나지	초지	산림	경작지	ASA No.	물	도시	나지	초지	산림	경작지
1	0.00	0.30	0.30	1.20	85.50	12.70	6	0.00	0.10	0.00	0.20	91.90	7.80
2	0.00	0.40	0.30	0.60	95.60	3.10	7	0.00	0.10	0.00	0.30	95.50	4.10
3	0.09	0.20	0.49	1.30	91.61	6.29	8	0.20	0.10	0.20	0.60	93.20	5.70
4	0.00	0.00	0.10	0.50	96.20	3.20	9	5.00	0.10	0.30	0.70	89.00	4.90
5	0.00	0.00	0.50	0.50	89.70	9.30							

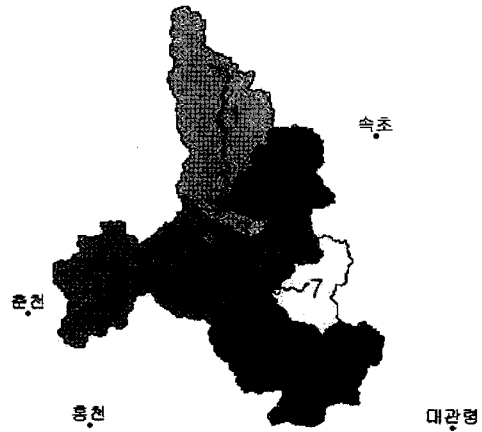


그림 4. ASAs 소유역 분할

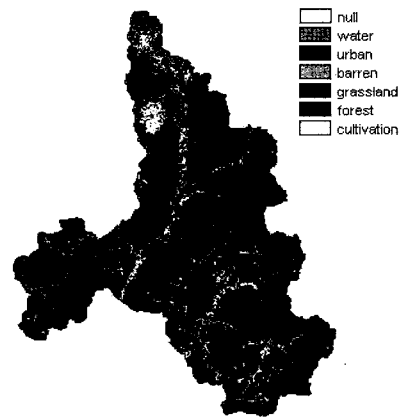


그림 5. 토지피복도

### 3.1.4 NDVI, LAI 자료구성

NDVI는 유역의 식생의 양과 활력도를 정량적으로 표현할 수 있는 정규식생지수로써 NOAA위성으로부터 획득할 수 있다. SLURP 모형에서는 NDVI를 이용하여 LAI(Leaf Area Index)를 산출함으로써 작물에 의한 강우차단, 토양과 잎 표면으로부터의 증발량과 식생으로부터의 증산량을 분리할 수 있다.

본 연구에서는 1998년 ~ 2001년 NOAA/AVHRR 인공위성영상 자료를 이용하여 월별 NDVI를 산출하였으

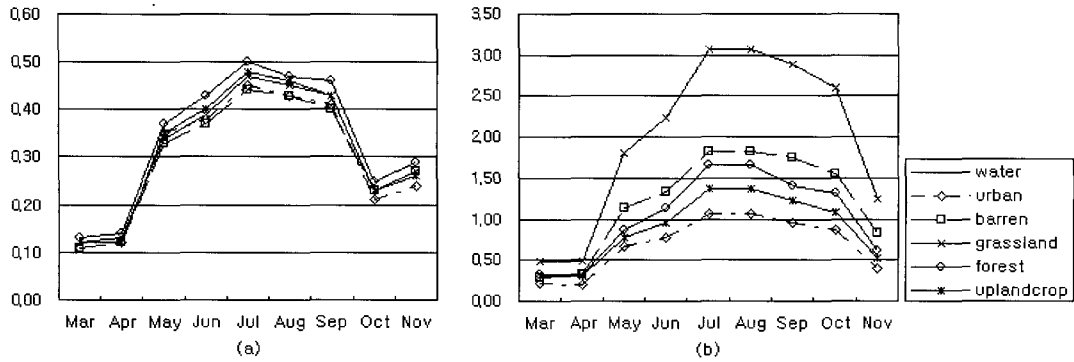


그림 6. 2001년 토지피복별 식생지수(a) 및 엽면적지수(b)

며(그림. 6), 증발산량의 추정방법에는 모형에서 제공되는 5가지 방법 중 FAO Penman-Monteith 방법을 이용하였다. 소양강댐유역과 같이 넓은 지역을 대상으로 하는 경우 구름의 영향이 전혀 없는 날의 위성자료를 얻는다는 것은 불가능하다. 그러나 지표면의 물리적 특성을 파악하고자하는 분석에서는 어떠한 방법에 의해서든 구름의 영향을 제거한 NDVI를 작성할 필요가 있다. 만약 동일지점의 NDVI가 단기간에 급격하게 저하하는 경우 그 자료는 구름의 영향을 받는 것이라 생각할 수 있다. 반대로 일정기간 동안의 NDVI가 가장 크게 나타난 자료가 가장 구름의 영향을 받지 않은 것이라 생각할 수 있다. 따라서 복수의 NDVI로부터 각 화소별를 최대치를 선택함으로써 구름의 영향을 최소화한 NDVI 자료를 얻을 수 있다. 모형의 입력자료 구축을 위하여 일 NDVI로부터 1개월간의 최대치를 선택하여 월대표 NDVI를 작성하였다(국립방재연구소, 2003).

본 연구에서는 적설의 영향으로 인해 자료의 획득이 어려운 겨울철 자료는 분석에서 제외하고 대상기간의 3월부터 11월까지의 월별 NDVI를 산출하였다.

### 3.2 수문기상자료

SLURP 모형에서 사용되는 기상자료는 일별강수량, 일평균기온, 이슬점온도 또는 상대습도, 일조시간 또는 태양복사량 등이 기본적으로 이용되며 그 외의 일평균 풍속, 구름분포정도, 강설량, 저수지 수위, 일평균유출량, 연평균강수량 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 연구에서는 대상유역 주위의 5개 기상관측소(속초, 인제, 홍천, 대관령, 춘천)를 사용하여 기상자

료를 획득하였다. SLURP 모형에서는 ASAs 소유역내에서 각 기상관측소의 고도차에 의한 기온, 이슬점, 강우의 변화를 고려한다. 본 연구에서는 기온  $-0.75^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , 이슬점  $-0.15^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  변화율을 고려하며, 강우의 경우 강수가 평균대기온도에 따라서 강우와 강설로 구분되기 때문에 기온의 감소율과 같이 강우  $-2\%/100\text{m}$ 의 변화율을 고려하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 모형의 적용

#### 4.1.1 모형의 보정과 매개변수 결정

본 연구에서는 갈수년, 평년, 홍수기로 대변되는 각각의 사상들에 대해 1999년 1월 1일부터 2001년 12월 31일까지의 3년간의 유출량 자료를 이용하여 모형 보정을 실시하였다(그림 7, 8, 9).

SLURP 모형의 매개변수 최적화를 위해 민감도분석과 SCE-UA 최적화기법(Duan 등, 1994)을 이용하였으며 매개변수추정의 최적화 척도로 Nash-Sutcliffe (Nash와 Sutcliffe, 1970) 모형효율, WMO 통계값을 사용하였다. 각각의 사상들에 의해 추정된 매개변수의 평균값은 표 5와 같다.

### 4.2 모형의 검증

각각의 사상들에 대한 매개변수의 평균값들을 통해 1998년 유출량을 모의한 결과는 다음과 같으며 검증기간에 대한 강우-유출 모의는 그 양과 경향을 잘 반영하고 있다(그림. 10).

DEM, 토지피복도, NDVI, 수문기상자료를 이용하여 1998년부터 2001년까지 SLURP 모형을 이용하여 일별 유출량을 모의한 결과는 표 6과 같다.

각각의 대상기간에 따른 음설에 의한 모의유출량은 표 7과 같다.

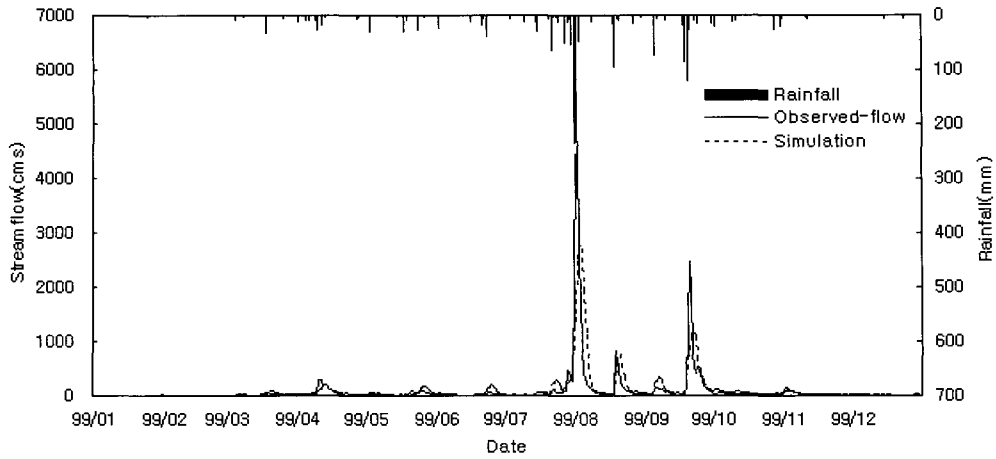


그림 7. 1999년 모의 결과 (보정)

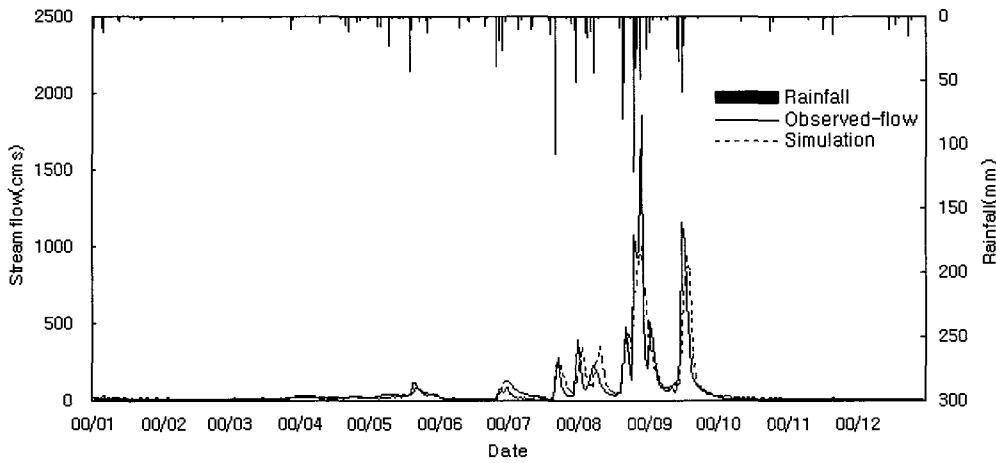


그림 8. 2000년 모의 결과 (보정)

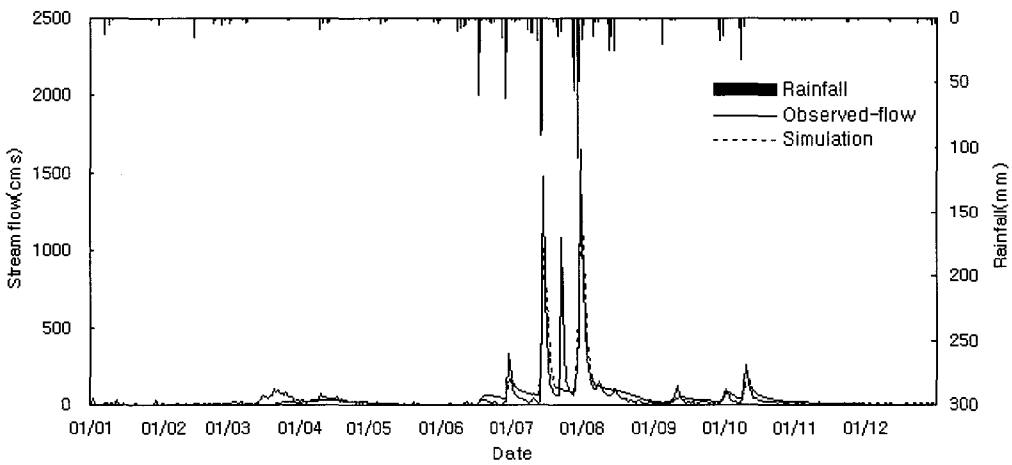


그림 9. 2001년 모의 결과 (보정)



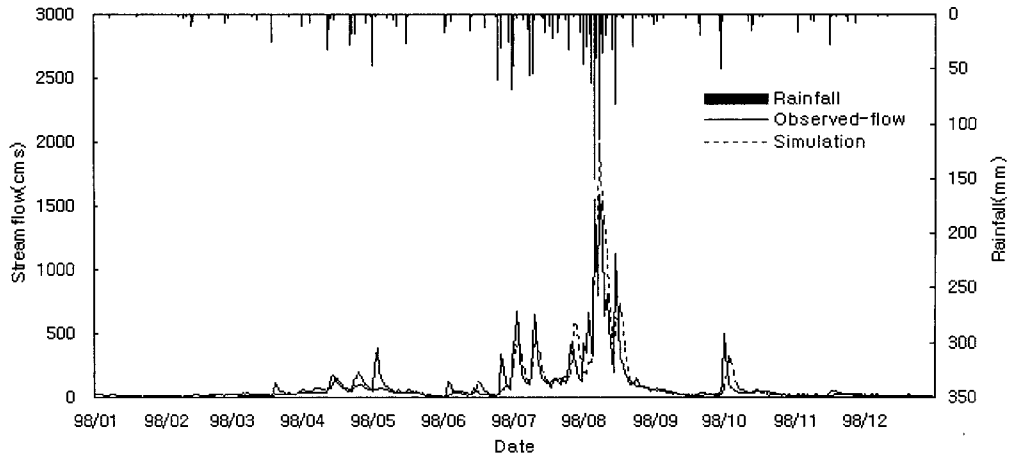


그림 10. 1998년 모의 결과 (검증)

표 5. 모형 보정에 의해 산정된 매개변수

No.	Description	물	도시	나지	초지	산림	경작지
1	Initial contents of snow store(mm)	0.00	689.62	368.31	265.98	480.6	594.16
2	Init. contents of slow store (% of max)	50.00	33.07	52.00	60.67	25.07	59.13
3	Maximum infiltration rate (mm/day)	200.00	148.52	95.82	46.21	160.03	123.30
4	Manning roughness, n	0.00	0.03	0.02	0.03	0.10	0.04
5	Retention constant for fast store	1.00	35.53	40.70	7.32	22.28	24.88
6	Maximum capacity for fast store(mm)	0.00	131.20	89.81	154.38	103.40	180.52
7	Retention constant for slow store	150000.00	68552.63	99879.72	47607.06	56718.82	65106.23
8	Maximum capacity for slow store(mm)	52300.08	27988.45	52630.58	68334.88	41514.17	37313.49
9	Precipitation factor	1.00	1.09	1.07	1.11	0.96	0.90
10	Rain/snow division temperature (°C)	0.67	0.17	1.33	1.33	1.28	0.70

표 6. 년도별 모의 결과

년도	관측강수량 (mm)	보정강수량 (mm)	관측유출고 (mm)	모의유출고 (mm)	모의유출률 (%)	증발산량 (mm)	평균오차	변동계수	모형효율	WMO체적 오차(%)	비고
2001	1090.0	1245.0	537.73	558.37	51.23	648.5	1.76	3.36	0.77	-3.85	보정
2000	1282.0	1173.0	699.68	739.07	57.65	591.7	3.50	2.87	0.75	-5.92	보정
1999	1778.0	1448.0	1139.04	1168.65	65.73	486.5	2.51	4.18	0.59	2.60	보정
1998	1770.0	1700.0	1092.85	1075.23	60.75	626.4	-1.50	2.02	0.72	1.62	검증

표 7. 용설에 의한 모의 유출량

년 도	1998	1999	2000	2001
총 관측유출량(m <sup>3</sup> /yr)	33819.70	35246.80	21656.30	16638.64
총 모의유출량(m <sup>3</sup> /yr)	33271.51	36162.28	22933.94	17280.12
용설량(m <sup>3</sup> /yr)	6401.95	6445.40	6029.26	4592.61
모의 용설유출률(%)	19.24	17.82	26.29	26.58

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 SLURP 모형의 소양강댐 유역에 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 갈수년(2001), 평년(2000), 풍수년(1999)의 보정기간에 대해 민감도 분석과 SCE-UA 방법으로 보정된 평균 매개변수를 사용하여 풍수년(1998)에 대하여 검증을 실시한 결과, 체적오차 및 Nash-Sutcliffe 모형효율이 1.62% 및 0.72로 양호한 값을 나타내고 있다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 수치지형분석모형기법을 이용하여 DEM으로부터 수문모형에 이용되는 매개변수와 지형자료를 획득함으로써 보편화되고 신뢰성 높은 지형자료를 빠르게 구축할 수 있었으며 이는 앞으로 분포형 모형에 GIS와 RS자료의 도입에 있어 장기수문 유출해석에 필요한 자료구성 및 기후 및 토지피복 등의 외적인 요소의 영향과 유역 내의 물관리 변화의 영향을 평가하는데 있어 매우 유용하다고 판단된다.
2. 대상기간에 따른 용설이 모의유출량에 미치는 영향을 살펴보았을 때, 전체적으로 각각의 호우사상들에 대해서 20%내외의 값을 나타내고 있다. 이는 중규모이상 산악지역의 강설에 의한 강우-유출해석에 있어 용설의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다.
3. DEM, NDVI, 수문기상자료를 이용하여 4개년도에 SLURP 모형을 적용하여 일유출량을 모의한 결과 각각의 대상기간에 대해 유출량 및 Nash-Sutcliffe의 모형효율은 1.5%~5% 및 0.59~0.77의 범위를 보이며 유출의 양적인 측면과 경향을 잘 반영한다고 말할 수 있다. 보정기간의 갈수년에 해당하는 2001년의 경우, 보정강수량이 다소 과대평가 되었는데 SLURP 모형의 SCE-UA 방법의 매개변수 보정시 모의유출량을 높이기 위해 강수량이 과대평가되었다고 생각된다. 이는 검증기간(1998)에 대해 보정기간의 평균 매개변수를 이용하여 모형을 모의한 결과, 관측강수량과 모의강수량의 차이 및 유출량의 체적오차가 70mm 및 1.62%로 매우 미약하게 나타난 것으로 알 수 있다.

다음과 같은 결론을 종합해보면 준분포형 모형인 SLURP 모형의 소양강댐유역의 적용은 모형효율의 값이 양호하며 유출량, 유출경향이 잘 일치하고 있어 중규모 이상의 산악지역은 소양강댐유역의 장기유출 수문해석에서 적용가능성을 높게 나타내고 있다고 판단된다.

## 참고 문헌

- 김상현, 손광익, 한건연 (1996). "Tile drain의 영향과 GIS를 연계한 농경지 유역에 대한 수문학적 모의", **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, Vol. 29(6), pp. 203-215.
- 김성태 (2003). SLURP를 이용한 하천 유출량 모의. 석사학위논문, 인하대학교.
- 고덕구 (1989). 소유역 장기유출 예측을 위한 모의발생 수문모형의 개발. 박사학위논문, 서울대학교.
- 국립방재연구소 (2003). 위성자료를 이용한 가뭄예상지도의 개발. 행정자치부, pp. 28-36.
- 권순국, 고덕구 (1987). "산지유역에 대한 USDHAL-74 유역수문모형의 장기유출 해석 적용", **한국농공학회지**, 한국농공학회, Vol. 29(2), pp. 53-63.
- Abbott, I.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986). "An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, (SHE), 1: History and philosophy of a physically-based distributed modelling system." *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 45-59.
- Duan, Q., Sorooshian, S.S., and Gupta, V.K. (1994). "Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models." *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 265-284.
- Garbrecht, J., and Campbell, J. (1997). *TOPAZ version 1.20: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parameterization*. In: *TOPAZ User Manual*. Rep.# GRL 97-4. Grazinglands Research Laboratory, USDA, Agricultural research Service, El Reno, Oklahoma.
- Garbrecht, J., and Martz, L.W. (1993). "Network and subwatershed parameters extracted from digital elevation models: the Bill's Creek experience." *Water Resources Research*, Vol. 29, pp. 909-916.
- Institute of Hydrology. (1995). *Assessment of global water resources, preliminary report*. ODA Report 95(2), Report to the Overseas Development Administration.
- Kim, S.J., Chae, H.S., Yoo, C.S., and Shin, S.C. (2003). "Stream discharge Prediction via a grid-based soil water routing with paddy

- fields." *Journal American Water Resources Association*, Vol. 39(5), pp. 1143-1155.
- Kite, G.W. (1998). "Land surface parameterizations of GCMs and macroscale hydrological models." *Journal American Water Resources Association*, Vol. 34(6), pp. 1247-1254.
- Kite, G.W. (2002). *Manual for the SLURP hydrological model Version 12.2*. Hydrologic-Solutions.
- Krysanova, V., and Becker, A. (1996). *Integrated Modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds*. Proc. Third Int. Conf. on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico, pp. 21-25.
- Kouwen, N., Seglenieks, F., and Soulis, E.D. (1995). *The use of distributed rainfall data and distributed hydrologic models for the estimation of peak flows for the Columbia River Basin*. Progress Report 2, Waterloo Research Institute, Waterloo.
- Lacroix, M.P., Martz, L.W., Kite, G.W., and Garbrecht, J. (2002). "Using digital terrain analysis modeling techniques for the parametrization of hydrologic model." *Journal of Hydrology*, Vol. 217, pp. 127-136.
- Martz, L.W., and Garbrecht, J. (1992). "Numerical definition of drainage network and subcatch elevation models." *Computers & Geosciences*, Vol. 18, pp. 747-761.
- Lacroix, M.P., Martz, L.W., Kite, G.W., and Garbrecht, J. (2002). "Using digital terrain analysis modeling techniques for the parameterization of a hydrologic model". *Environmental Modelling & Software*, Vol. 17, pp. 127-136.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models; Part 1 - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10(3), pp. 282-290.
- O'Callaghan, E.M., and Mark. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Computer Vision Graphics and Image Processing*, Vol. 28, pp. 323-344.
- Rango, A., and Martinec, J. (1995). "Revisiting the degree-day methods for snowmelt condition." *Wat. Res. Bull.*, Vol. 31(4), pp. 657-669.
- Sandra, L. and Woo, M.K. (2003). "Application of hydrological models with increasing complexity to subarctic catchments." *Journal of Hydrology*, Vol. 270, pp145-157.
- (논문번호:04-24/접수:2004.03.10/심사완료:2004.07.13)