

# SLURP 모형을 이용한 하천 유출량 모의

○김병식\* 김성태\*\* 서병하\*\*\* 김형수\*\*\*\* 김남원\*\*\*\*\*

## 1. 서론

본 연구에서 이용한 SLURP(Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes) 모형은 저수지, 댐, 조절장치, 관개계획에 의한 효과를 고려하여 강수에서 유출까지의 물의 순환을 모의하는 물리적인 모형으로서 유역내 수자원 관리방법의 변화에 대한 효과를 평가하고, 기후변화와 토지피복상태의 변화와 같은 외부적인 요인들이 이수측면에 얼마나 영향을 미치는지에 관해서 판단할 수 있는 모형이다. Kite(1978)는 집중형 모형으로 개발된 초기 SLURP 모형과 SSARR 모형을 캐나다 유역에 적용하여 비교·분석하였으며, Kite(1993)는 기후변화시나리오와 연계하여 유설에 대한 영향을 많이 받는 미국 Rocky 산맥에 적용하기도 했다. 준분포형 모형로 변환되면서 Kite와 Droogers(1999)는 Turkey의 Gediz유역에, Kite(2000)는 동남아시아의 Mekong강유역에, Kite와 Droogers(2001)는 Mendres유역에 적용한 바 있다. Lacroix와 W.Martz(2002)는 캐나다의 Creek유역에 적용하여 SLURP 모형의 적합성을 증명한 바 있다. SLURP 모형은 0.01km<sup>2</sup> ~ 250km<sup>2</sup>의 소규모 유역(Sabourin, 1996), 7,500km<sup>2</sup> ~ 35,000km<sup>2</sup>의 중규모 유역(Kite, 1993) 그리고 1,800,000km<sup>2</sup>의 대규모 유역(Kite et al., 1994)에 적용된 사례가 있는 만큼 유역의 크기에 상관없이 여러 유역에 적용이 가능하다.

본 논문의 목적은 SLURP 모형을 분석하고 우리나라 유역에 적용, 장기 일 유출모의를 실시하여 그 적용가능성 여부를 파악하는데 있다. 이를 위해서 TOPAZ(TOpographic PArameterization) 모형 (Garbrecht 등, 1997; Martz 등, 1993)과 연계하여 DEM, 토지피복도 그리고 토양도 등과 같은 영상자료를 이용하여 용담형 유역을 ASA(Aggregated Simulation Area)으로 분할하였으며 각각의 ASA에 대한 지상학적 인자들을 추출하였다. 실제 증발산량을 산정하기 위해 FAO-Penman Monteith 방법과 CRAE(Complementary Relationship Areal Evaporation) 방법을 이용하였으며 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona)방법을 이용하여 SLURP 모형의 매개변수를 보정하였다.

## 2. SLURP 모형의 이론

### 2.1 모형의 개요

SLURP 모형은 SSARR 모형과 같은 복잡한 모형의 대안으로서 중규모 유역에 사용하기 위해 1975년에 처음 개발되었으며 그 이후 12차례에 걸쳐 개선되어 왔다.(Kite 등, 2000) 초기에는 SLURP(Simple Lumped Reservoir Parametric)으로 개발되었으나, SLURP(Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes)의 준 분포형 모형으로 변환되었으며 SLURP는 준 분포형 모형이지만, 분포형 모형으로 사용이 가능한 물리적 해석 모형으로써 강수사상을 강우사상과 강설사상으로 분리하여 고려할 수 있다.

### 2.2 모형의 소유역 분할

SWIM 모형(Krysanova 등., 1996)은 hydrotops라는 소유역 분리 개념을 이용하여 토지 이용상태와 토양 상태에 따라서 전체유역을 분할하였으며, WATFLOOD 모형(Kouwen 등, 1995)은 GRU(Grouped Response Unit)라는 소유역 분리 개념을 이용하여 유사한 토지피복상태를 가지는 지역을 통합하여 하나의 소유역으로 구성하였다. PRMS 모형과 SWAT 모형은 토지이용상태, 토양상태, 경사, 방향에 따라 수문학적 반응단위를 가지는 동질 유역으로 정의되는 HRU(Hydrological Response Unit)라는 소유역 분리개념을 이용하였다(Leavesley 등, 1983). 초기의 SLURP 모형은

\* 인하대학교 환경토목공학부 박사과정 (E-mail: hydrokbs@orgio.net)

\*\* 인하대학교 환경토목공학부 석사졸업 (E-mail: k-s-t@hanmil.net)

\*\*\* 인하대학교 환경토목공학부 교수 (E-mail: seohydro@inha.ac.kr)

\*\*\*\* 인하대학교 환경토목공학부 교수 (E-mail: sookim@inha.ac.kr)

\*\*\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원 (E-mail:nwkim@kict.re.kr)

GRU 개념으로 소유역을 분할하였으나, GIS를 이용한 준 분포형으로 변화하면서 ASA라는 소유역 개념을 도입하여 전체유역을 분할하였다. 전체유역은 지형에 따라 ASA라는 소유역으로 분리되고, 이는 토지피복상태에 따라 각 소유역별로 더 세분화된다. 그림 1은 ASA의 개념을 나타내고 있다.

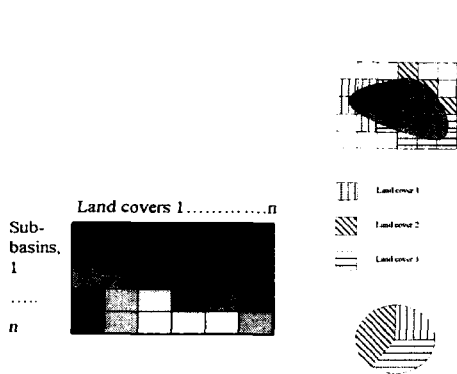


그림 1. ASA의 개념

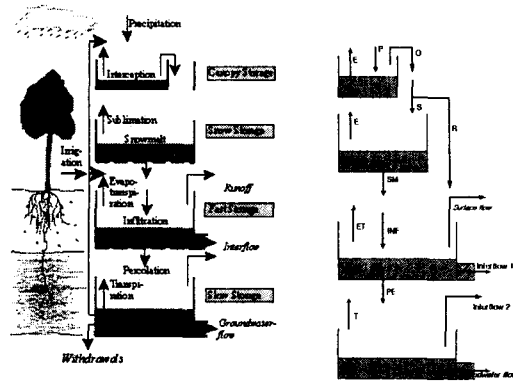


그림 2. SLURP 모형의 연직방향 물수지 구조

## 2.3 모형의 구조

### 2.3.1 연직방향 물수지

SLURP 모형은 전체유역을 ASA라는 소유역으로 구분하여 모의하는 일 단위(daily time step) 유출 모형이며 지상학적 매개변수(ASA의 평균고도, 하도길이, 토지피복특성 등), 시계열 자료(온도, 강수 등) 그리고 물리적 매개변수(Manning 계수, 침투율 등)를 입력자료로 이용한다. 특히, 지상학적 매개변수들은 수작업 또는 digital terrain analysis 모형을 이용하여 추출할 수 있다. SLURP 모형의 유출모의는 ASA별로 연직방향 물수지(vertical water balance)분석을 실시한 후 다시 각각의 ASA들에 대하여 하도 추적을 통해 전체유역의 출구지점에서의 유출량을 얻게 된다. SLURP 모형의 연직방향 물수지는 4개의 층 구조로 구성되어 있으며, 주요 매개변수는 강설 초기 저류량, 지표하 초기 저류량, 최대 침투율, Manning's n, 지표수 보존상수와 지표하 보존상수 및 최대 저류량, 강수 보정계수, 응결온도 등이 있다. 그림 2는 SLURP 모형의 연직방향물수지 구조를 나타낸 것이다.

## 3. 적용 및 결과

### 3.1 대상유역 선정 및 수문기상자료

본 연구에서는 SLURP 모형이 우리나라 유역에 적용이 가능한지를 검토하기 위하여 대상유역을 용담댐 유역으로 선정하여 일 유출 모의를 실시하였다. 용담댐 유역은 한국수원공사의 시험유역으로서 운영 및 관리되고 있기 때문에 SLURP 모형의 입력 자료를 충분히 만족시켜줄 수 있는 자료들을 얻을 수 있으며 특히, DEM과 위성으로부터의 토지이용도를 얻기가 용이한 지역이기에 본 연구에서 대상유역으로 선정하였다. 용담수위표 지점은 35년 이상의 수위자료를 보유하고 있으며 수위-유량 관계곡선 식이 작성되어 있고 유역내에 진안, 무주, 계북, 장수 등 4개의 유량관측소가 분포되어 있다. 본 연구는 용담수위표지점의 1995년 1월~1997년 12월간의 일 수위자료(한국 건설기술연구원 수문D/B), 진안, 무주, 계북, 장수 지점의 일 강수량, 전주측후소의 기상자료를 이용하였다.

### 3.2 관측 유출량자료의 산정

본 연구 대상지점의 수위-유량 관계곡선식은 수문조사년보, 유량측정조사보고서, 홍수량 측정 조사 보고서, 유역 조사보고서, 수문자료집 등에 수록된 것을 실제 수위자료에 적용하고 실측유량과 비교하여 가장 적절하다고 판단되는 식 (19)를 선정하였다(서병하 등, 1996).

$$Q = 54.571(h + 0.282)^{2.428} \quad (19)$$

여기서  $h$  = 수위,  $Q$  = 유출량

### 3.3 ASA의 분할

현재까지 국내에서 분포형 모형의 지상학적 매개변수 등을 추출하기 위해서 Arc-View와 Arc-Info를 이용한 수작업이 일반적이지만 이러한 방법은 많은 시간이 소요되고 다른 유역에 다시 적용할 때 작업의 효율성이 떨어진다. 본 연구에서는 대상유역을 ASA로 분할하고 SLURP 모형의 지상학적 매개변수(ASA의 평균고도, 하도길이, 물리적 매개변수)를 추출하기 위해 IDRISI32와 수치지형분석모형(digital terrain analysis model)인 TOPAZ(Garbrecht 등, 1997; Martz 등, 1993)을 이용하였다. 분석을 위해 이용된 GIS 자료는 축척 1:25,000의 DEM과 토지피복도이다.

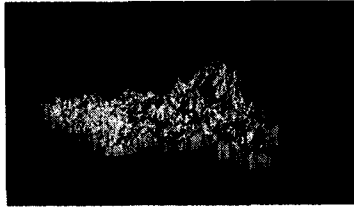


그림 3. 3차원 용담댐 유역도

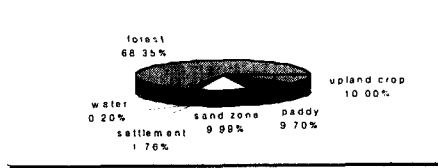


그림 4. 용담댐 유역의 토지피복상태 분포

LANDSAT 위성영상을 이용하여 기하보정 등의 전처리 과정을 거쳐 구축된 토지피복도는 피복상태에 따라 6가지로 분류되었으며, 이렇게 얻어진 토지피복도는 ASA 소유역별로 다시 고려된다. 그림 4에서 볼 수 있는 것처럼 용담댐 유역은 산림지역이 68.35%로 이루어진 산지유역임을 알 수 있다. 본 연구에서는 TOPAZ를 이용하여 용담댐 유역을 25개의 ASA로 분할하였으며 그림 5은 용담댐 유역의 ASA 분할과 관측소의 위치를 나타낸 것이다.

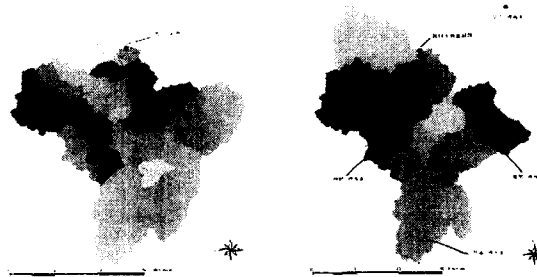


그림 5. 용담댐 유역의 ASA 분할과 관측소의 위치

### 3.4 NDVI과 LAI 자료 구성

증발산을 지배하는 많은 인자들은 그 유역의 식생조건에 의해 잘 반영된다고 생각될 수 있으며, 그 유역의 식생의 양과 활성도를 정량적으로 표현할 수 있는 지표로서 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)를 들 수 있으며, 이는 인공위성 NOAA에 탑재되어 있는 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)로부터 구할 수 있다. SLURP 모형에서는 작물에 의한 강수의 차단정도를 고려하고, 토양과 작물로부터의 증발량과 작물로부터의 증산을 분리하기 위해서 LAI(Leaf Area Index)를 사용하며, 이는 SiB(Simple Biosphere Model) 작물 계수에 의해서 분류된 월별 NDVI로부터 모형 내에서 계산된다(Kite, 1995). NDVI의 값이 클수록 그 지점에서의 식물의 양이 많으며, 활성도가 높은 것을 의미한다. 그림 6은 용담댐 유역의 NDVI를 나타낸 것이다.

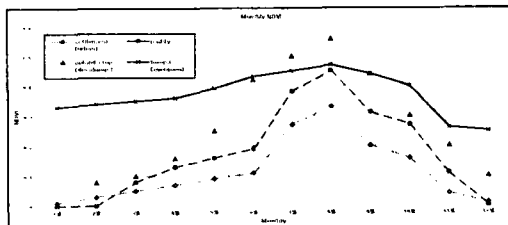


그림 6. 용담댐 유역의 NDVI

### 3.5 SLURP 모형의 실행

지금까지 앞에서 구한 모든 수문기상 및 지형자료들을 이용하여 SLURP 모형을 실행하였다. 먼저 매개변수들 보정(calibration)을 위해 1995년 1월 1일부터 1995년 12월 31일까지 1년 간의 자료를 이용하였으며 이때, 매개변수들을 최적화하기 위해 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) 방법을 사용하였다. 본 논문에서 SCE-UA을 최적화 방법에 대한 설명은 생략하였다. 여기서 결정된 최적 매개변수를 1996년, 1997년, 1997년에 적용하여 매개변수를 검증(verification)하였다. 매개변수 보정결과 월 평균 계산 일 유출량(monthly mean computed daily flow)은  $16.816 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 일 평균 관측 유출량(monthly mean recorded daily flow)은  $16.816 \text{ m}^3/\text{sec}$ , Nash의 효율계수는 0.67 Garrick 효율계수는 0.58 그리고 WMO 통계량은 -000.34480 이었으며, 이때의 일 유출량 수문곡선을 나타내면 그림 7과 같다.

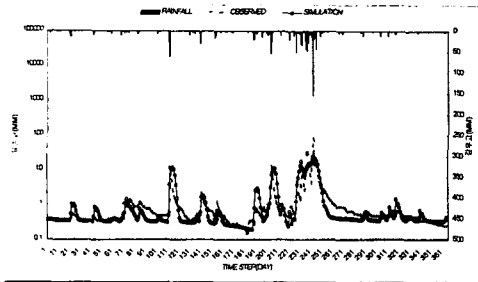


그림 7. 용담댐 지점의 1995년 일 유출 수문곡선(검정)

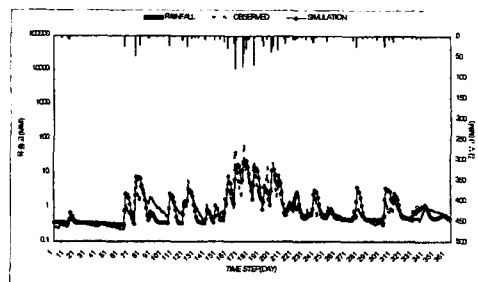


그림 8. 용담댐 지점의 1996년 일 유출 수문곡선(검증)

그림 8은 1995년 자료를 이용하여 검정된 매개변수를 1996년에 적용하여 구한 일 유출량 수문곡선의 검증 결과이며, 그림을 통해 알 수 있듯이 SLURP 모형에 의한 유출모의는 유출의 양과 경향, 그리고 통계치의 경우 관측 유출량을 잘 재현하고 있다. 효율계수의 경우, 기존의 연구 결과들과 비교해 볼때 집중형 모형(lumped model)의 모의결과에 비해 다소 낮은 효율 값을 보이고 있으나, 다른 분포형 모형의 결과와 비교해 볼때는 약 0.6의 효율계수 값을 비교적 양호한 결과라고 할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 준분포형 강우-유출 모형인 SLURP 모형을 용담댐 유역에 적용하여 일 유출량을 산정하였으며 그 적용성을 검토하고자 하였다. TOPAZ을 이용하여 용담댐 유역을 25개의 ASA로 구분하였고 모형의 지상학적, 물리적 매개변수를 추출하였다. 모형의 매개변수를 최적화하기 위해 SCE-UA 알고리즘을 이용하였으며 보정된 매개변수를 이용하여 용담유역의 일 유출모의를 실시하였다. 또한, 본 연구에서는 유출량 이외에도 강수량, 잠재 증발산량의 유역에서의 시공간적인 분포를 추정해 보았다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구를 통해 지형정보 자동추출 모형인 TOPAZ 모형을 이용하여 빠르고 쉽게 분포형 모형에 필요한 지형자료들을 얻을 수 있었다. 이 방법을 이용한다면 유역이 변경 되더라도 짧은 시간내에 객관적이고 보편화된 지형 인자를 얻을 수 있을 것이다.
- (2) 용담수위표 지점의 1995년의 자료를 이용하여 모형의 매개변수를 보정한 후 1996년, 1997년의 관측 일 유출량에 대하여 검정해 본 결과 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 SLURP 모형이 우리나라 유역에서 장기유출모형으로써의 활용이 가능함을 확인할 수 있었다.
- (3) 강수량, 잠재증발산량, 유출량의 시공간적 분포를 통해 특정년 및 특정일에 대한 수문성분들의 현황을 파악할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 “수자원의 지속적 확보기술 개발사업단”의 연구비 지원(2-2-1)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

Kite, G.W. (2001). Modelling the Mokong: hydrological simulation for environmental impact studies, *Journal of Hydrology*, Vol. 253, pp. 1~13.