

# 용담댐 유역의 장기-유출 분석을 위한 AVSWAT 2000 모형의 적용

○장 철 희\* · 김 현 준\*\* · 김 남 원\*\*\*

## 1. 서론

장기 강우-유출 모형(Continuous Rainfall-Runoff Model)은 수자원계획과 효율적 물관리를 위하여 중요하다. 장기간의 유출량 자료는 저수지와 댐의 용량 결정, 한발대책의 수립, 하천유지유량 결정 등의 이수계획과 용수공급을 위한 댐 및 저수지의 물관리, 수리권의 허가 및 조정, 용수 분쟁 조정 등의 하천 물관리 실무에 필수적이다.

유역에서 장기 유출을 모의할 수 있는 수문 모형들이 1960년대 이후 국내·외에서 지속적으로 개발되어 적용되어 오고 있다. 장기 유출 모형과 관련된 국내의 기술개발은 1980년대에 TANK 모형의 적용으로부터 시작되어 DAWAST(노재경, 1991)와 다중감수수문모형(김현준 등, 1993) 등의 순수한 국내모형의 개발에서부터 SSARR, NWS-PC, TOPMODEL 등의 적용에까지 이르게 되었다. 최근에는 선진 외국의 경우와 같이 GIS와 RS를 이용한 모형의 적용을 시도하고 있으나, 아직까지 그 적용 사례는 많지 않다. 국외의 경우 과거에 개발된 개념형 모형을 준분포형 모형으로 확장하고 GIS/RS와 연계하여 모형을 적용하고 있으며(Kite, 1995), 이러한 경향은 이미 보편화되어 있다.

유역의 다양한 수문 성분을 적절하게 해석하고, 유역내의 토지이용변화 등을 고려하기 위해서는 유역을 토지이용단위, 토양특성, 지형경사 등을 기준으로 세분하고 각 단위지역의 물리적 특성을 반영할 수 있는 분포형 또는 준 분포형 모형을 선정하는 방법이 최선이며 분포형 모형의 적용이 필요하다고 판단된다. 이러한 모형들 중에는 AnnAGNPS, ANSWERS2000, HSPF, PRMS, SLURP, SWAT 등이 있다. 이 중에서도 AnnAGNPS와 ANSWERS2000의 경우는 최근에 개발되어 그 적용성에 있어 검증이 미비한 상태며, HSPF의 경우는 소유역보다 세밀한 유역(단위구역)으로의 구분이 어렵고, SLURP는 많은 적용사례가 있지만, 매개변수의 결정에 있어서 제한점이 있고 비교적 대 유역에 대한 적용이 유리하다. 반면에 PRMS와 SWAT의 경우는 유역을 소유역으로 구분하고 소유역은 수십~수백 개의 수문반응단위(HRU)로 구성하여 유역의 물리적 반응을 보다 잘 재현할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 PRMS와 SWAT 모형 중 보다 보편적으로 사용되고 있는 SWAT 모형을 선정하여 용담댐 유역을 대상으로 그 적용성을 검증하였다. 본 연구는 “21세기 프론티어 연구개발사업”의 일환인 장기-강우유출모형의 개발 연구의 기초단계로서 SWAT 모형이 국내유역의 토지이용 및 토양특성을 적절히 반영하는가에 대한 평가에 그 의의가 있다. 국내의 SWAT 모형의 적용은 김(1998) 등이 GIS Tool인 GRASS와 연계하여 농촌유역인 북하천유역의 오염부하량을 예측한 예가 있으며, 권(2000) 등의 WASP 모형과 연계한 농촌하천유역(북하천)의 오염부하량 예측 연구 및 강(2002) 등의 발안저수지 유역을 대상으로 한 오염총량추정 연구의 예가 있다.

본 연구에서는 용담댐 유역에 SWAT 모형을 적용하고 적용결과와 실측자료를 통해 모형의 보정 및 검정을 실시하여 국내 유역에 있어서의 장기-유출 특성을 평가하였다.

## 2. SWAT 모형의 개요

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발된 유역모델로서 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형이다.

\* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원  
\*\* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원  
\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원

SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 장기-강우유출모형으로서 4가지의 부모형으로 구성되어 있다. 즉 수문 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형으로 구분된다. 이 중에서 수문 부모형은 저류방정식에 의해 일 단위로 물수지를 산정하며, 차단, 지표면 유출, 측방유출(중간유출), 침투, 기저유출, 수로손실, 증발산 등으로 구성되어 있다.

SWAT에서 일별 지표면 유출량은 SCS 방법을 이용하여 산정하며, 측방유출량은 Kinematic Storage Model(Sloan et al.)을 이용하고 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 또한 SWAT은 지하수를 두 개의 대수층으로 구분하였다. 즉 유역의 하천에 회귀수를 공급하는 얇은 비피압 대수층과 유역 밖의 하천에 대한 회귀수에 기여하는 깊은 피압 대수층으로 나누어 물수지에 의해 계산된다.(Arnold et al., 1993). 모형에서는 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves (Hargreaves et al., 1985), Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972)와 Penman-Monteith (Monteith, 1965) 방법을 제공하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritche 법(1972)을 이용한다.

SWAT 모형의 입력자료는 GIS를 통해 자동으로 구성되는 유역 전체의 일반적인 유역자료와 토양자료, 작물자료가 있고 수동 입력을 통해 작성되는 기상, 하도추적, 농업관리, 지하수 등의 자료, 그리고 GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분된다. 또한 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU)별 출력자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과치로 구분된다.

### 3. 모형 적용 및 결과

#### 3.1 적용유역

본 연구에서는 용담댐 유역을 적용유역으로 선정하였다. 용담댐 유역은 현재 “21세기 프론티어 연구개발사업”의 시험유역으로 선정되어 한국수자원공사에서 양질의 수문자료를 구축 중에 있으며, 북위 36°00′ - 35°35′, 동경 127°20′ - 127°45′에 해당하는 금강유역의 최상류 지역에 위치한다. 유역 면적은 930km<sup>2</sup>로 금강유역면적 9,886km<sup>2</sup>의 약 9.45%를 점유하고, 용담댐 유역 내에는 장수군, 진안군, 무주군의 3개군 2개 읍 12개 면이 위치하고 있으며 이들의 총면적은 1,164km<sup>2</sup>으로서 농경지 1농경지 158.5km<sup>2</sup>(13.6%), 임야 920.9km<sup>2</sup>(79.1%), 기타 85.3km<sup>2</sup>(7.3%)로 구성되고, 대부분 임야지역인 산악지대로 분류되고, 농경지는 수계를 따라서 분포한다.

모형의 적용을 위한 입력자료는 3가지로 구분된다. 즉 지형자료, 지형자료의 속성과 연결된 데이터, 그리고 기상 및 유역관리에 관련된 자료이다. 지형자료는 수자원단위지도 상의 유역경계와 토지이용도, 수치고도모형(DEM), 토양도 등이 사용된다. 공간정보의 기본적인 틀을 제공하는 기본도인 수치고도모형(DEM)은 환경부에서 구축한 1" 간격(약 30m)을 이용하여 추출하였고, 한국건설기술연구원(2000)에서 NGIS 주제도 사업의 일환으로 1:25,000 수치지형도 제작에 사용되는 1:37,500 항공사진과 1:5,000 수치지형도를 혼합 활용하여 구축된 1:25,000 토지이용현황도를 사용하였다. 또한, 토양도는 정밀토양도의 경우 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 정밀토양도를 사용하였고, 개략토양도의 경우는 농촌진흥청의 1:50,000 개략토양도를 사용하였다. 용담댐 유역의 토양통은 총 22가지로 구분되었으며, 석토통, 안 룡통, 칠곡통, 풍천통이 대부분을 차지하였다.

현재 용담댐 유역의 수문자료는 7개소의 우량관측소에서 시간우량 및 일우량을 측정하고 있으며, 4개 수위관측소에서 시간수위, 일수위를 측정하고 있으나 자료의 기록보유기간이 2년 미만으로 장기강우-유출관계를 해석하기에는 미흡한 점이 있어 본 연구에서는 용담수위표 지점을 중심으로 1990~1996년까지의 자료를 적용하였다. 모형의 적용에 앞서 용담수위표 지점의 년 유출율을 산정하여 적용가능 년도를 선정하여 모형에 적용하였다. 강우량 자료는 진안, 장수(이상 한국수자원공사 강우관측소)와 원통사, 안성장, 진안, 대불, 장수(이상 건설교통부 강우관측소)의 자료를 면적평균하여 적용하였고, 기상자료는 기상청 관측소 거창, 임실, 전주, 금산 4개 관측소의 최대·최저 온도, 풍속, 습도, 태양복사량 자료를 이용하였다. 표 3은 용담수위표 지점의 년 유출율을 산정한 결과이다.

표 2. 용담수위표 지점의 년 유출율

년도	강수량(mm)	유출량(mm)	유출율(%)
1990	1519.8	1196.7	78.7
1991	1328.0	1205.7	90.8
1992	1088.2	725.6	66.7
1993	1213.7	1171.2	96.5
1994	799.0	400.8	50.2
1995	1024.5	583.8	57.0
1996	1228.2	714.2	55.4

### 3.2 모형 적용

본 연구에서는 용담댐 유역의 용담수위표 지점에서의 장기 유출특성을 모의하고, 매개변수를 보정하여 실측치와 비교하였다. 모형 적용을 위한 소유역의 구분은 하천망의 Threshold 조정으로 분할된다. 용담댐 유역의 소유역 분할은 수자원단위지도 상의 기존 하천망을 표현할 수 있는 최적의 Threshold 값을 시행착오법을 적용하여 산정하였다. 즉 Threshold 값을 500으로 했을 때 유역 내의 하천을 최적으로 표현하였으며, 용담댐 본류와 대표적인 큰 지류하천의 합류점을 출구지점으로 소유역 분할을 실시한 결과 총 11개의 소유역을 분할할 수 있었다. 이렇게 분할된 소유역을 기준으로 각 토지이용에 따른 토양 종류별 143개의 수문반응단위(HRU)를 세분화하였다.

### 3.3 모형의 보정 및 검정

모형의 보정은 유역의 최종 출구지점인 용담수위표 지점의 1996년 유출량 자료를 이용하였고, 검정은 1995년도의 자료를 이용하였다. 용담수위표는 1997년 용담댐 건설과 함께 폐쇄되었으며, 이로 인해 용담수위표의 수위-유량곡선식은 1994년도 수자원관리기법개발연구조사(건설교통부)에 수록된 1987년의 식을 1990년 대까지 연장하여 실측유량을 산정하였다.

모형의 보정순서는 먼저 유역 출구 지점에서의 총 유출량을 보정한 후 기저유출량을 보정하였다. 보정을 위한 모형평가 기준으로는 결정계수( $R^2$ ), RMSE, 모형 효율성계수인 ME(Nash & Sutcliffe, 1970)를 이용하였다. 그림 3은 유역 출구 지점인 용담수위표에서의 실측유출량과 모의유출량을 비교한 결과이며, 그림 4는 1996년의 실측자료에 대한 보정결과를 나타낸다.

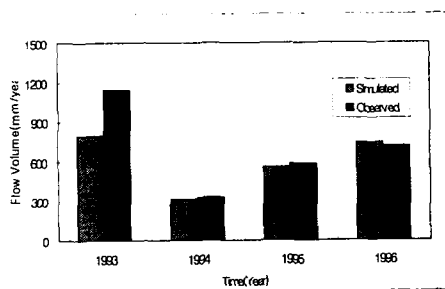


그림 3 실측치와 모의치의 연 유출량 비교

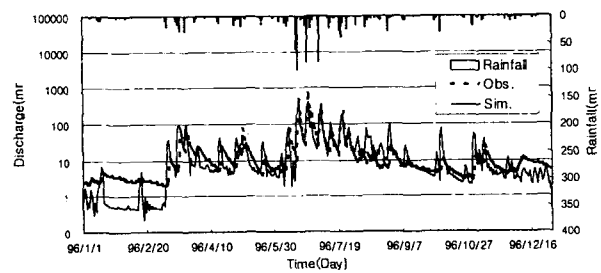


그림 4 Calibration results at the outlet of watershed(1996)

모의기간 동안의 총유출량은 보정과 검정시 모두 실측치와 근사함 값을 보였다. 96년의 경우 1228mm의 강우에 대해 실측 유출량은 714mm였고, 모의 유출량은 740mm로 26mm의 차이가 났고, 95년의 경우는 1025mm의 강우에 대해 실측유출량은 584mm였고, 모의 유출량은 561mm로 23mm의 차이를 보였다. 모형의 효율성 계수는 96년에 0.92, 95년에 0.94로 나타났고, 결정계수( $R^2$ )는 96년도에 0.82, 95년도에 0.92로 모의치의 80% 이상이 실측치와 유의성을 가진 것으로 나타났다. 이상과 같은 결과로 볼 때 모형이 장기 유출특성

을 비교적 적절히 모의함을 알 수 있었다.

표 2 SWAT 적용 결과

년도	강우 (mm)	지표면 유출량 (mm)	측방 유출량 (mm)	지하수 유출량 (mm)	침투 (mm)	유효토양 수분량 (mm)	증발산 (mm)	모의유출 총량 (mm)	실측유출 총량 (mm)
1993	1340.3	142.7	561.6	89.9	113.4	170.0	454.6	793.7	1147.5
1994	774.5	51.2	232.6	31.8	34.6	130.2	497.6	315.3	332.2
1995	1024.5	106.6	377.6	77.0	94.7	140.6	430.2	560.7	583.8
1996	1228.2	154.7	472.8	113.9	139.3	166.8	437.4	740.7	714.2

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 “21세기 프론티어 연구개발사업”의 일환인 장기-강우유출모형의 개발 연구의 기초단계로서 SWAT 모형이 국내유역의 토지이용 및 토양특성을 적절히 반영하는가에 대한 평가를 위하여 용담댐 유역에 SWAT 모형을 적용하고 적용결과와 실측자료를 통해 모형의 보정 및 검정을 실시하여 국내 유역에 있어서의 장기-유출 특성을 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 용담댐 유역내의 각 수문반응단위별 토양특성 데이터베이스를 구축한 결과, 총 22개의 토양통으로 구분되었으며, 대부분 자갈이 섞인 사양토(Sansy Loam)로 주로 산록경사지의 특성을 나타내는 석토통, 안룡통, 칠곡통, 풍천통이 주를 이루었다.

2. 용담댐 유역에서 수자원단위지도 상의 기존 하천망을 표현할 수 있는 최적의 Threshold 값을 시행착오법을 적용하여 산정하였다. 그 결과 Threshold 값을 500으로 했을 때 유역 내의 하천을 최적으로 표현하였으며, 용담댐 본류와 대표적인 큰 지류하천의 합류점을 출구지점으로 소유역 분할을 실시한 결과 총 11개의 소유역을 분할할 수 있었으며, 각 소유역의 토지이용에 따른 토성별 143개의 수문반응단위(HRU)를 세분화할 수 있었다.

3. 모형의 보정은 유역의 최종 출구지점인 용담수위표 지점의 1996년 유출량 자료를 이용하였고, 검정은 1995년도의 자료를 이용하였다. 그 결과, 모의기간 동안의 총유출량은 보정과 검정시 모두 실측치와 근사함 값을 보였다. 96년의 경우 1228mm의 강우에 대해 실측 유출량은 714mm였고, 모의 유출량은 740mm로 26mm의 차이가 났고, 95년의 경우는 1025mm의 강우에 대해 실측유출량은 584mm였고, 모의 유출량은 561mm로 23mm의 차이를 보였다. 모형의 효율성 계수는 96년에 0.92, 95년에 0.94로 나타났고, 결정계수( $R^2$ )는 96년도에 0.82, 95년도에 0.92로 모의치의 80% 이상이 실측치와 유의성을 가진 것으로 나타났다. 이상과 같은 결과로 볼 때 모형이 장기 유출특성을 비교적 적절히 모의함을 알 수 있었다.

#### 5. 향후 연구과제

우리나라를 비롯한 동아시아 지역의 유출 특성에서 간과할 수 없는 것은 논관개지역에 대한 유출 특성의 변화를 반영하는 것이다. 일반적으로 관개논의 경우 홍수량을 줄이는 효과가 있다고 알려져 있으나, 관개시기 별로 담수심의 변화에 따라서 유출특성이 다를 수 있다.

미국이나 유럽 등지에서 개발된 장기 강우-유출 모형은 이러한 논관개지역의 특성이 반영되어 있지 않다. 따라서, 국내의 강우-유출 특성을 정확히 파악하기 위해서는 논관개지구의 특성이 모형에 반영되어 적용되어야 할 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

- 1 강문성, 2002, 인공신경망 원격탐사기법과 비점오염모형을 이용한 오염총량모의시스템의 개발, 서울대학교 박사학위논문.
- 2 권명준, 2000, 농촌유역 하천의 수질예측을 위한 SWAT모형과 WASP모형의 연계운영, 서울대학교 석사학위논문.
- 3 김지훈, 1998, 지리정보시스템을 이용한 SWAT/GRASS 모형의 적용, 서울대학교 석사학위 논문.
- 4 SWAT users manual(version 2000) : S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams. April, 2001
5. Neitsch, S. L., et ai., 2001, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000, Grassland, ARS, Temple, Texas.