

청계천 유역에 대한 SWAT 모형의 적용

Application of SWAT model for Cheonggecheon watershed

장철희*, 김현준**, 노성진***

Cheol Hi Chang, Hyeon Jun Kim, Seong Jin Noh,

요 지

도시 개발에 의해 우수의 불투수지역 확대, 하천부지의 축소, 산림 및 우수지의 감소 등이 급속히 진행되어 하천유량의 변화, 지하수위의 저하, 용수의 고갈, 생태계의 파괴 등이 발생되어 왔다. 도시지역은 도시형 수해발생, 갈수시의 급수안전도 저하, 평시 하천유량의 감소, 공공수역의 수질악화, 지하수 오염 등 여러 가지 문제에 직면하고 있다. 이러한 문제들은 서울의 경우도 예외는 아니며 청계천 복원 사업과 더불어 그동안 방치되었던 도시유역의 물순환 체계를 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 SWAT 모형을 이용하여 도시하천 유역의 물순환을 해석하였다. SWAT모형은 미국 농무성 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 모델로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발되었다. SWAT 모형은 물리적 이론에 근거한 연속모형으로 준분포형(Semi-Distributed) 모형이다.

본 연구는 도시하천 유역의 물순환체계 변동에 고려한 물순환 정상화 기술을 개발하기 위한 기초단계로서, 청계천 유역에 대해 모형을 적용하였다. 청계천은 중랑천의 제1지류인 지방2급 하천으로 유역면적 50.96 km², 유로연장 13.75km이며, 2003년 7월부터 5.9km의 본류구간에 대한 복원공사가 진행 중이다.

적용유역의 수문·기상·지하수 자료는 1993년 1월 1일 ~ 2002년 12월 31일까지의 서울 기상청 자료를 이용하였으며, 지형, 토양, 토지이용 자료는 기존에 구축된 GIS 자료를 이용하였다.

모형 적용결과, 도시하천 유역에 대한 SWAT 모형의 적용성을 확인할 수 있었으며 유역의 물순환계를 구성하는 강수, 지표수, 토양수, 지하수 및 하천수 등의 상호 관계 분석을 통해 장기간의 유역 물순환체계 변화를 분석할 수 있었다.

핵심용어 : SWAT 모형, 청계천유역, 물순환체계

1. 서론

도시화에 의한 불투수지역의 확대는 우수의 지하침투를 감소시키는 반면 지표면유출을 증가시키며 또한 그 유출을 인위적인 하수도정비에 의해 지하관로를 통하여 흐르게 한다. 장기적인 측면에서 볼 때, 불침투수역의 확대는 지하수가 저하됨으로 인하여 하천수위보다 낮은 지하수위를 유지하게 된다. 또한 도시화가 계속 진행될지라도 지하수의 충전이 거의 일어나지 않기 때문에 지하수의 지속적인 하강은 지속적으로 이루어진다고 할 수 있다. 이러한 요인들에 의해 평시 하천유량의 감소가 진행되어 강우 시에는 빠른 유출이 진행되는 반면, 평시에는 하천의 유량이 감소되어 건천화를 이룬다고 할 수 있다(雨水貯留浸透技術協會, 2000).

도시하천 유역에 있어서 하천 유량은 강수의 우수에 의한 유출 성분뿐만 아니라 각종의 용·배수에 의한 인공적인 영향을 크게 받는다. 또 지하수에 있어서도 상수도의 누수, 하수관에서의 침출, 생활용수, 농업용수, 공업용수의 우물취수 등의 영향을 받아 매우 복잡한 구조로 되어 있다. 유역의 토지이용 변화나 하천·하수

* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : chjang@kict.re.kr

** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : hjkim@kict.re.kr

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : sjnoh@kict.re.kr

도 등의 정비상태에 따라 하천에의 유량이나 지하수위를 시작으로 유역의 수환경이 크게 변화한다.

이처럼 자연적인 요소와 인공적인 요소가 복잡하게 조합되어있는 도시지역의 물 순환을 파악하기 위해서는 모델링이 필수 불가결하다.

도시하천유역에서 표면화되어 버린 도시형 수해, 하천수질·생태계의 악화, 평상시 하천유량의 감소 등의 다양한 문제는 유역의 급격한 변화가 물순환계에 초래한 영향에 의하여 발생하는 것이다. 이러한 문제들은 물순환계 전체에 밀접하게 관련되어 있기 때문에 이와 같은 문제의 해결책을 찾아내기 위해서는 문제를 개별적으로 다루어서 대책을 수립하기보다 유역의 물순환계 전체에서 정량적으로 생각할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 SWAT 모형을 이용하여 건전화된 도시유역의 물순환체계 변화를 정량적으로 분석하였다.

2. SWAT 모형

2.1 SWAT 모형의 개요

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국 농무성의 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 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.

SWAT에서 일별 지표면 유출량은 SCS 방법을 이용하여 산정하며, 측방유출량은 Kinematic Storage Model을 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).

잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves 방법, Priestley-Taylor 방법과 Penman-Monteith 방법을 제공하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritchie 방법을 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.

국내의 SWAT 모형의 적용은 김(1998) 등이 GIS Tool인 GRASS와 연계하여 농촌유역인 북하천유역의 오염부하량을 예측한 예가 있으며, 권(2000) 등은 WASP 모형과 연계한 농촌하천유역(북하천)의 오염부하량 예측을 연구한 바가 있고, 강(2002) 등은 발안저수지 유역을 대상으로 한 오염총량추정을 한 바가 있다. 또한 김(2003) 등은 용담댐 유역과 보청천 유역에 대해 SWAT 모형을 적용한 바가 있다.

2.2 SWAT 모형에서의 도시유출 개요

SWAT에서는 도시지역의 유출을 계산하기 위하여 SCS 유출곡선지수법 또는 Green & Ampt 방법을 이용한다. 도시지역은 불투수면적의 비율이 농촌지역과는 다르다. 빌딩, 주차장, 포장도로의 건설로 인해 유역 내 불투수 피복은 증가하고, 침투는 감소된다. 개발로 인해, 유수의 공간 흐름 형태가 바뀌고, 인공수로, 연석 재료(curbing), 호우 배수/집수시스템을 통해 흐름의 수리효율이 증가된다. 이러한 변화로 유출 체적과 유속이 증가하고, 대규모의 침투 홍수가 나타나고 있다.

SWAT 모형에서의 불투수지역은 수리학적으로 배수시스템에 연결된 지역과 직접 연결되지 않은 지역의 두 가지 그룹으로 구분될 수 있다. 예로서, 지붕으로부터의 유출이 마당으로 흘러 토양으로 침투되는 그런 마당으로 둘러싸여 있는 집이 있다. 지붕 위는 불투수이지만, 수리학적으로 배수시스템에 연결되어 있지 않

다. 반대로, 유출량이 호우 배수시설로 유입하는 주차장은 수리학적으로 연결되어 있다.

SWAT 모형에서의 도시지역 지표면 유출은 배수시스템에 직접 연결된 불투수지역과 연결되지 않은 불투수/투수지역으로 구분하여 산정한다. 직접 연결된 불투수지역에 대해, CN값은 항상 98을 사용하며, 그 외 지역에 대해서는 합성된 CN 값을 적용한다. 합성 CN을 산정하는 식은 다음과 같다(Soil Conservation Engineering Division, 1986).

$$CN_c = \frac{CN_p \cdot (1 - imp_{tot} + \frac{imp_{dcom}}{2}) + 98 \cdot (\frac{imp_{dcom}}{2})}{1 - imp_{com}} \quad \text{if } imp_{tot} \leq 0.30 \quad (\text{식 1})$$

$$CN_c = \frac{CN_p \cdot (1 - imp_{tot}) + 98 \cdot imp_{dcom}}{1 - imp_{com}} \quad \text{if } imp_{tot} > 0.30 \quad (\text{식 2})$$

여기서, CN_c : 선행토양함수조건 II에 대한 합성 CN, CN_p : 투수지역의 II조건에 대한 CN, imp_{tot} : HRU의 불투수 면적 비율(직접 연결과 연결되지 않은 지역 모두), imp_{com} : 불투수이고, 배수시스템에 수리학적으로 연결되어 있는 HRU의 면적 비율, imp_{dcom} : 불투수이고, 배수시스템에 연결되어 있지 않은 HRU의 면적 비율이다.

3. 모형적용 및 물수지 분석

3.1 적용구역

청계천은 중랑천의 제1지류인 지방2급하천이며 유역의 서북쪽인 인왕산과 북한산 기슭에서 발원하여 동남쪽으로 유하하여 흐르는 도시하천이다. 서울의 강북도심부를 관류하여 좌안으로 성북천 및 정릉천과 차례로 만난 후, 중랑천의 우안에 합류한다. 청계천 유역의 개략적인 모습은 그림 1과 같다.

청계천 유역은 유역면적 50.96 km^2 , 유로연장 13.75 km 로 서울시의 중심가에 위치하고 있다. 유역내의 행정구역은 강북구, 동대문구, 성동구, 성북구, 종로구, 중구의 총 6개구 86개동에 달한다. 지천으로 성북천과 정릉천을 포함하는 청계천의 하상경사는 $1/310 \sim 1/510$ 정도이다(서울특별시, 2003). 유역의 평균고도는 $\text{El. } 70.1\text{m}$ 이며, 유역의 평균 경사는 7% 정도이다.

청계천 유역의 토양특성을 보면 사질토 1.0%, 암석 4.0%, 미사질양토 25.3%, 미사질식양토 33.0%, 식양질토 35.9%, 식토 0.9%로 대부분이 양토(loam)로 이루어져 있으며, 청계천 복원구간 및 대부분의 하천은 식양질토(clay loam)로 구성되어 있고, 북한산 일대 및 남산의 일부지역 등과 같은 산지 분포지역은 대부분 사질양토(sandy loam)으로 구성되어 있다(그림 2). 토지이용 현황은 산림지역이 23.2%(침엽수 17.7%, 혼합림 2.7%, 기타임야지 2.8%)를 차지하며, 도시지역이 75.9%(주거지 42.6%, 상업지 9.4%, 교통시설 12.3%, 공공시설물 11.6%)로 대부분이 주거지역이며, 이 외에 내대지가 0.5%, 하천 0.5%, 미세한 초지 등으로 나타났다(그림 3).

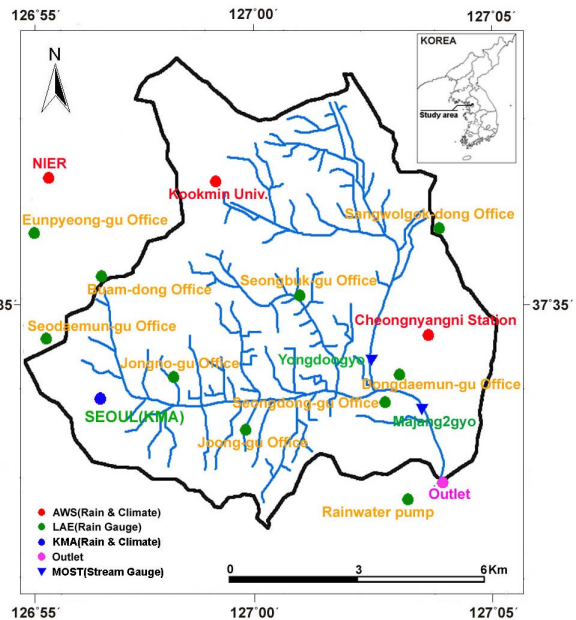


그림 1. 청계천 유역 개황

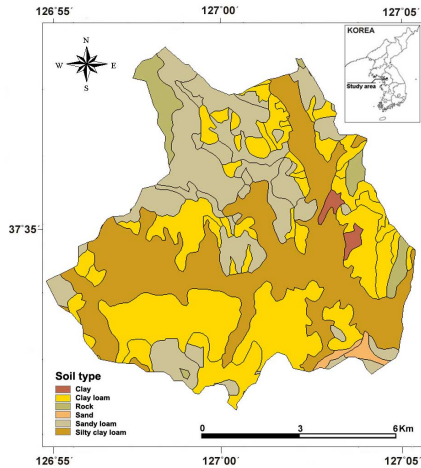


그림 2. 청계천 유역 토양종류

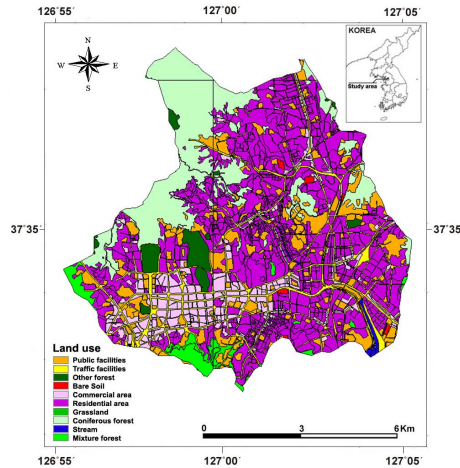


그림 3. 청계천 유역 토지이용현황

3.2 모형의 입력자료 구축

모형의 적용을 위한 입력자료는 3가지로 구분된다. 즉 지형자료, 지형자료의 속성과 연결된 데이터, 그리고 기상 및 유역관리에 관련된 자료이다. 지형자료는 수자원단위지도 상의 유역경계와 토지이용도, 수치고도 모형(DEM), 토양도 등을 사용하였다. 공간정보의 기본적인 틀을 제공하는 기본도인 수치고도모형(DEM)은 환경부에서 구축한 1" 간격(약 30 m)을 이용하여 추출하였고, 한국건설기술연구원(2000)에서 NGIS 주체도 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 농촌진흥청의 1:50,000 개략토양도를 사용하였다.

강우 및 기상 자료는 1993년 1월 1일 ~ 2002년 12월 31일까지의 서울 기상청의 최대·최저 온도, 풍속, 습도, 태양복사량 자료를 이용하였다.

3.3 모형의 적용

최하류인 중랑천 합류부 지점에서의 장기유출 특성을 모의하였으며 매개변수를 보정하여 실측치와 비교하였다. 모형적용을 위한 소유역의 구분은 청계천유역의 복개된 하천망을 디지털화하여 생성한 후, 각 지류의 합류점을 소유역출구로 정하여 총 8개의 소유역으로 구분하였다(그림 4). 이렇게 분할된 소유역을 기준으로 각 토지이용에 따른 토양별 138개의 수문반응단위(HRU)로 세분화하였다.

모형의 보정은 2002년의 자료를 이용하였으며, 검정은 유역의 최종 출구지점인 중랑천 합류부에서 약 2 km 상류부에 위치한 마장2교 지점의 2000~2001년까지의 실측 유량자료를 면적비로 확장하여 이용하였다. 마장2교 수위관측소의 관측자료 부족으로 2000년~2002년까지의 실측 홍수량 자료만을 이용하는 문제점이 있었으며, 이 자료 또한 홍수기의 시간별 자료이기 때문에 갈수기의 지속적인 관측자료가 부족하여 장기유출특성 모의를 위한 참고자료로는 한계가 있음을 알 수 있었다.

모형 적용결과, 도시유역인 청계천 유역의 물순환 양상을 확인할 수 있었다. 또한 유역의 물순환계를 구성하는 강수, 지표수, 토양수, 지하수 및 하천수 등의 상호 관계 분석을 통해 유역의 물순환체계 변동을 고려

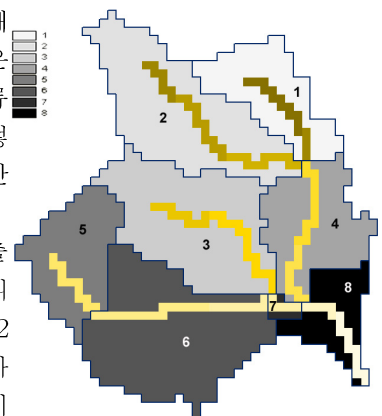


그림 4. 소유역 구분

한 물순환 정상화 기술개발을 위한 계획수립에 도움이 될 것으로 사료된다. 그림 5는 2002년의 보정결과이고, 그림 6은 2001년의 검정결과를 나타낸 것이다.

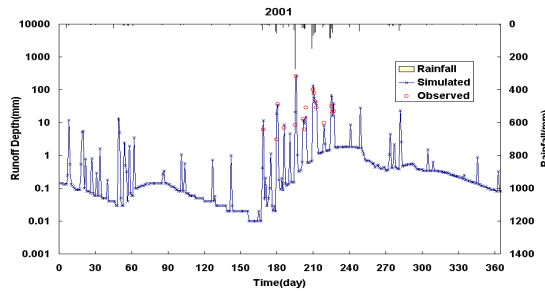


그림 5. 검정결과(2001년)

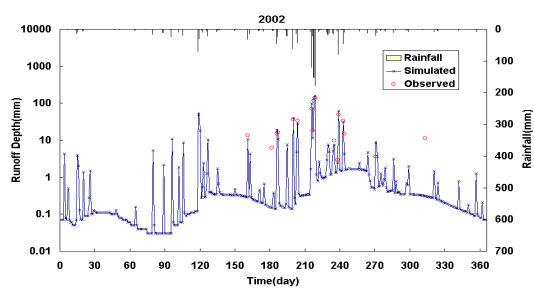


그림 6. 보정결과(2002년)

4. 결과 및 고찰

본 연구는 SWAT 모형을 이용하여 건천화된 도시유역의 물순환계를 구성하는 강수, 지표수, 토양수, 지하수 및 하천수 등의 상호 관계 분석을 통해 유역의 물순환체계 변동을 고려한 물순환 정상화 기술개발을 위한 계획수립의 기초단계로서, 프론티어사업의 일환으로 추진 중인 청계천 유역에 대해 모형을 적용하였다.

청계천 유역에 대한 저수위의 수위 관측 자료가 없는 관계로 홍수기에 관측된 일부 자료를 이용하여 모형의 보정 및 검정을 실시하였으며, 실측치와 유사한 결과를 얻었다. 또한, 모의 기간동안의 유출량은 2002년의 경우, 1,388mm의 강우에 대해 총 유출량은 925mm이었고, 직접유출량은 799mm로 나타났으며, 2000년과 2001년의 경우, 각각 1187mm, 1,386mm의 강우에 대해 총 유출량이 788mm, 1,012mm이었으며, 직접유출량은 각각 666mm, 890mm로 나타났다(표 1).

표 1. SWAT 모형 적용결과

Year	Rainfall (mm)	Surface Flow(mm)	Lateral Flow(mm)	Groundwater Flow(mm)	Percolate Flow(mm)	Evapo-transpiration (mm)	Runoff Depth (mm)	Runoff Ratio (%)
2000	1,187	666	8	115	157	357	789	66.4
2001	1,386	890	8	114	170	322	1,012	73.0
2002	1,388	799	9	118	176	404	926	66.6

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 6-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 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 Kim, Chul Gyum, Kim Hyeon Jun, Jang Cheol Hee, Kim Nam Won, 2003, Runoff estimation from two Mid-Size watersheds using SWAT model, Korea Water Resources Association, Vol. 4, No. 4 October 2003
- 5 Neitsch, S. L., et al., 2001, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000, Grassland, ARS, Temple, Texas.