

CAT 모형의 수문해석모듈 개발

Development of Hydrologic Components of CAT (Catchment hydrologic cycle Assessment Tool)

노성진*, 김현준**, 장철희***,이용준****
Seongjin Noh, Hyeonjun Kim, Cheolhee Jang, Yongjun Lee

요 지

CAT(Catchment hydrologic cycle Analysis Tool)은 기존 개념적 매개변수 기반의 집중형 수문모형과 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형의 장점을 최대한 집약하여, 도시유역 개발 전·후의 장·단기적인 물순환 변화 특성을 정량적으로 평가하고 물순환개선시설의 효과적인 설계를 지원하기 위한 물순환 해석 모형이다. CAT은 수문학적으로 균일하게 판단되는 범위를 소유역으로 분할하여 지형학적 요인에 의한 유출 특성을 객관적으로 반영할 수 있으며, 개발 공간 단위별로 침투, 증발, 지하수 흐름 등의 모의가 가능하도록 하는 Link-Node 형식으로 개발되었다. 모형의 UI(User Interface)는 사용자가 손쉽게 모형을 적용·관리하고, 여러 시나리오를 동시에 효과적으로 모의하여 분석할 수 있도록 설계되었다. 또한 모든 입력 출력 자료를 Excel이나 텍스트 형식과 연동되도록 하여 프로젝트별 매개변수 관리가 용이하도록 개발하였다.

CAT의 수문해석모듈로 증발산, 침투, 유역 유출, 지하수 유거, 하도추적 등의 모듈을 개발하였다. 증발산은 기준 증발산을 외부에서 직접 입력하거나, Penman-Monteith 방법을 선택할 수 있으며, 침투는 토양의 수리전도도에 따른 연직방향 침투 및 사면방향 복귀류를 고려할 수 있다. 노드의 지하수 유거를 고려하여 기존 노드-링크 방식 모형의 장기 유출 해석시 제한점을 보완하였으며, 하도추적을 위해 Muskingum, Muskingum-Cunge, Kinematic wave 방법 등의 해석법을 제공하였다. CAT의 수문모듈을 이용하여 설마천 유역을 단일노드 및 멀티노드로 개념화하여 모의하였으며, 모의결과를 관측유량과 비교한 결과, 두 경우 적절한 범위내의 결과임을 확인할 수 있었다. CAT의 안정적인 수문해석 기능을 바탕으로 향후 물순환개선시설 모듈과의 결합을 통해 장기 물순환 해석에 광범위하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지속가능한 도시 환경, 물순환 해석, CAT, 수문해석모듈

1. 서론

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 여러가지 문제에 직면하고 있다. 개발이 수환경에 미치는 피해를 최소화하고 지속가능한 도시 환경을 구축하기 위해서는 도시개발의 영향을 평가하고 물순환개선시설의 적절한 배치를 설계하기 위한 물순환 해석 모형이 필수적이다. 하지만, 개념적 매개변수를 사용하는 기존의 분포형 수문모형으로는 도시개발로 인한 토지이용 변화 등의 유역 특성 변화를 적절히 모의하는데 한계가 있으며, 최근 활발히 연구되고 있는 WEP(Jia, 2006; 노성진 등, 2005), MIKE SHE 등의 분포형 수문모형은 입력자료 구축 및 모형구동에 많은 시간과 노력이 필요하여 다양한 도시설계 대안을 평가하기에는 적절하지 못한 것이 사실이다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : sjnoh@kict.re.kr
** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원 · E-mail : hjkim@kict.re.kr
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : chjang@kict.re.kr
**** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : dydwns@kict.re.kr

본 연구에서는 기존 집중형 수문모형과 분포형 수문모형의 장점을 최대한 조합하여 도시구역 개발 전·후의 장·단기적인 물순환 변화 특성을 정량적으로 평가하고 물순환개선시설의 효과적인 설계를 지원하기 위해 개발된 물순환 해석 모형인 CAT(Catchment hydrologic cycle Analysis Tool)의 수문모듈 특성과 국내구역에 대한 적용 결과를 살펴보고자 한다.

2. CAT 수문모듈

본 연구에서 개발하고자 하는 도시 물순환 해석 모형의 목표는 도시 개발 지역 혹은 기존의 도시 구역에서 장기간에 걸친 물순환의 변화를 예측하고 물순환을 개선시키는 대안 시설의 효과를 사전에 평가하는 것이다. 이와 같은 도시구역의 물순환 해석 모형은 기존에 개발된 모형을 사용할 수도 있다(표 1). 그러나, 기존의 개발된 모형은 다음과 같은 사용상의 제한점을 가지고 있기 때문에 사용자가 보다 신속하고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 모형을 목표로 개발 되었다.

표 1 기존 도시 물순환 해석 모형의 장단점

모형	장점	단점
MUSIC	<ul style="list-style-type: none"> - 개념적 강우-유출모형 적용 - 다양한 물순환 개선 시설 평가 - 사용자편의시스템(GUI) 제공 	<ul style="list-style-type: none"> - 홍수유출의 수량 및 수질 관리 - 매개변수의 최적화 필요 - 호주 이외 사용사례 적음
SHER	<ul style="list-style-type: none"> - 물리적 매개변수 - 사용자가 익숙한 엑셀 시트 - 지하수와 지표수 상호작용 해석 - 침투 및 저류시설 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 매개변수의 불확실성 - 소유역의 제한 - 다양한 정보 제공 - 사용자 편의시스템 부재
SWMM	<ul style="list-style-type: none"> - 물리적 매개변수 - 홍수유출해석 가능 - 많은 사용자 및 개발 이력 - 지하수와 지표수 상호작용 해석 - 저류시설 평가 - 사용자편의시스템(GUI) 제공 	<ul style="list-style-type: none"> - 증발산 산정의 제한 - 매개변수의 불확실성 - 침투시설 평가 업슴
WEP	<ul style="list-style-type: none"> - 물리적 매개변수 - 공간적 해석 - 지하수와 지표수 상호작용 해석 - 침투 및 저류시설 평가 - 사용자편의시스템(GUI) 제공 <p>(WEP+, 한국건설기술연구원 개발)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 입력 자료 과다 - 연산 시간 과다 - 매개변수의 불확실성

CAT(Catchment hydrologic cycle Analysis Tool)은 도시구역 개발 전·후의 장·단기적인 물순환 변화 특성을 정량적으로 평가하고 물순환개선시설의 효과적인 설계를 지원하기 위해 개발된 물순환 해석 모형이다. CAT은 수문학적으로 균일하게 판단되는 범위를 소유역으로 분할하여 지형학적 요인에 의한 유출 특성을 객관적으로 반영할 수 있으며, 개발 공간 단위별로 침투, 증발, 지하수 흐름 등의 모의가 가능하도록 하는 Link-Node 형식으로 개발되었다(한국건설기술연구원, 2008). 수문모듈의 기본 형태는 일본에서 개발된 SHER 모형(일본국토교통성, 2001)의 방식을 따랐으며, 투수지역, 불투수지역, 논지역으로 토지이용을 구분하여 해석한다.

투수지역에서의 모의 개념도는 다음의 그림 1과 같으며, 그림 2의 계산 흐름에 의해 각 수문요소가 순차적으로 해석된다. CAT은 물리적 매개변수를 사용하는 SHER 모형의 특성을 최대한 활용하되 SHER 모형 내에서 충분히 반영하지 못하는 증발산 및 하도추적 모듈을 추가하고, 물순환 개선 시설의 범위를 다양화하여 기존 모형과 차별점을 두었다. 토양과 식생피복으로부터의 증발, 증산, 승화, 지표부터의 증발을 모두 포함하는 기준 증발산(Reference Evapotranspiration)은 Penman-Monteith 방법을 사용하며 사용자가 외부 측정

자료를 별도로 입력할 수도 있다. 하도 추적(Channel routing)은 하도구간으로 들어오는 유입수문곡선을 유출 수문 곡선으로 전환하는 절차로서 Muskingum, Muskingum-Cunge과 Kinematic wave 방법을 적용할 수 있도록 구성되었다.

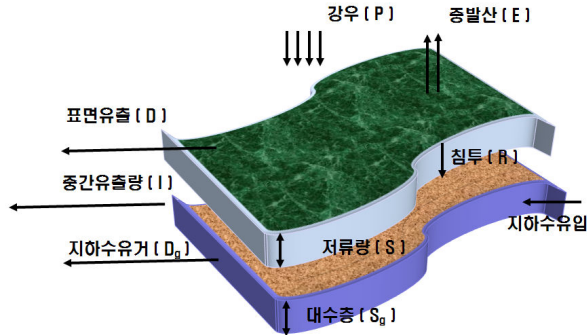


그림 1. 투수지역 모형의 개념



그림 2. 투수지역 모형의 계산 흐름

지하수층과 하천 간의 수분 이동과 하천수위와 지하수위와의 상호관계는 식 (1)과 식 (2)를 사용한다. 식 (1)은 하천수위가 그 부근의 지하수위보다 높은 경우이며, 하천수위가 지하수위보다 높아서 하천에서 대수층으로 함양이 일어나게 되는 경우에는 식 (2)를 적용한다. 단, 하천의 수량 이상으로 함양이 발생하지 않도록 상한을 설정하며, 유역 특성에 따라 함양유역과 유출 기여역으로 분할하여 대수층간 수평방향 흐름 이동을 고려할 수 있도록 모형을 구성하였다.

$$Q_d = k_0 A_{bed} \quad (1)$$

$$Q_d = k_0 \frac{h - H_{rivbed}}{b_{bed}} A_{bed} \quad (2)$$

여기에서 Q_d : 하천에의 침투(Exfiltration) 또는 하천으로부터의 함양(Recharge)(m³/s), k_0 : 하상재료 포화수리전도도(m/s), A_{bed} : 침윤면적(m²), b_{bed} : 하상재료두께(m) H_{rivbed} : 하상표고(m) 이다.

또한 지하수 이동은 각 소유역의 대수층간의 수분이동을 통한 지하수위 변동을 분석할 때, 유역 경사나 특성이 다르기 때문에 아래 그림과 같이 함양역과 기수역을 구분하여 분석할 수 있도록 모형을 구성하였다 (그림 3).

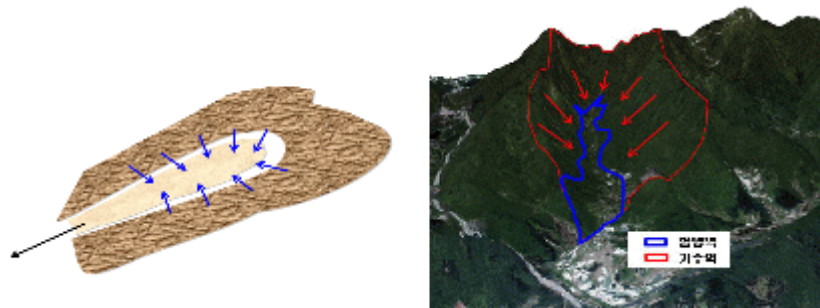


그림 3. 함양역과 기수역

2. CAT UI

모형의 UI(User Interface)는 사용자가 손쉽게 모형을 적용·관리하고, 여러 시나리오를 동시에 효과적으로 모의하여 분석할 수 있도록 설계되었으며, 노드 뷰(Node view)의 기본 형식은 다음의 그림 4와 같다.

CAT 모형의 메인 화면은 크게 아래 그림과 같이 Main View, Mini View와 Project View 창으로 구분되며, 분석에 사용될 도구에는 Main menu, Toolbar, Icon이 있다. Attribute 창은 노드의 속성을 나타내어 선택된 노드의 변수들을 나타내고 있다.

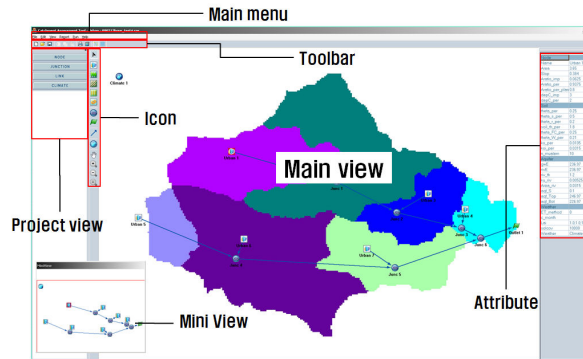


그림 4. CAT의 기본 화면(노드 뷰)

모든 입력 출력 자료를 테이블 뷰(Table view) 형태로 조회할 수 있으며 Excel이나 텍스트 형식과 연동되도록 하여 프로젝트별 매개변수 관리가 용이하도록 하였으며, 기상관측소의 정보를 티센망을 적용할 수 있도록 구성하였다. 또한 출력 부분에 있어서는 노드별, 정선별 각 수문 성분, 지하수위, 토양수분 등을 자유롭게 비교 할 수 있도록 하여 분석시 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 물론지 내용 또한 따로 출력이 가능하도록 UI를 구성하였다.

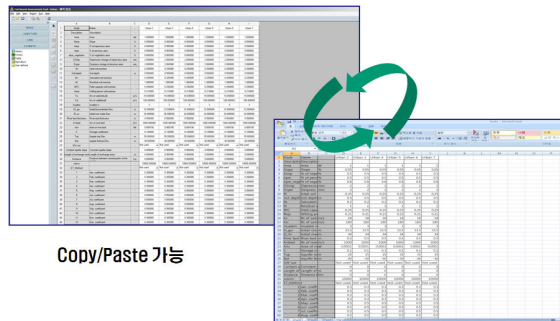


그림 5. 테이블 뷰

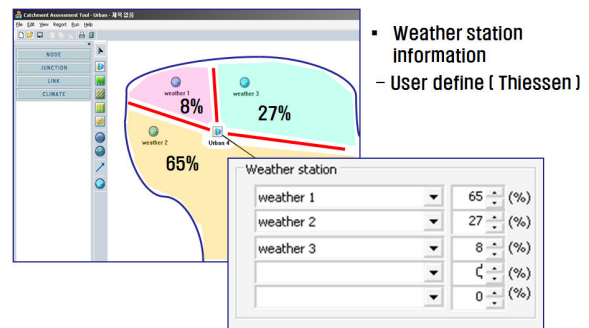
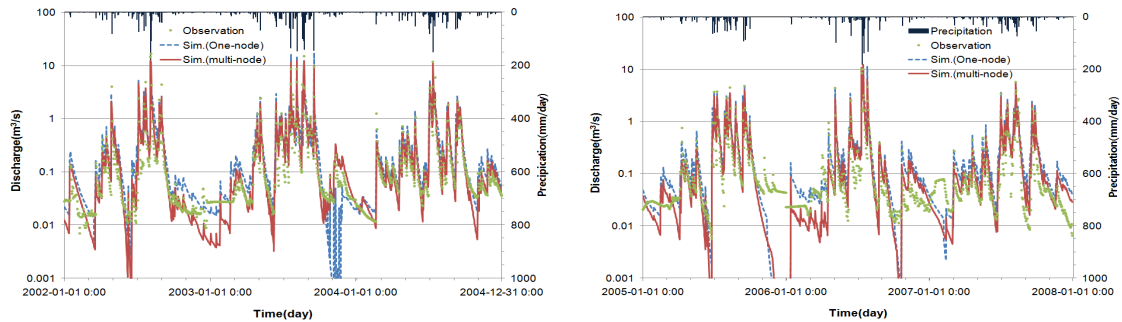


그림 6. 기상 관측소

3. CAT 모형의 시험 적용

설마천 유역에 대해 CAT을 시험 적용하여 모의 능력을 평가하였다. 임진강 상류부에 위치하고 있는 설마천 유역 유역면적은 약 8.5 km²이다(한국건설기술연구원, 2008). 입력자료로는 지형특성자료, 토양자료, 대수층자료, 기상자료, 지하수유거자료를 구축하였다. 모의 기간은 2002~2007년까지 일단위로 수행되었으며, 모의결과, 모의하천유출이 관측결과와 비교하여 적절하게 해석되었음을 다음의 그림 7에서 확인할 수 있었으며, 일정 정도 이상의 결과를 얻을 수 있어 유용하게 활용될 것으로 판단된다. 향후 다양한 모의시간 간격 및 토지이용 조건에 대한 적용성 검토가 추가적으로 요구된다.



(a) 보정기간(2002 ~ 2004년) (b) 검정기간(2005 ~ 2007년)
 그림 7. 설마천 하천 유출 비교

표 2. 설마천 유역 모의 결과 통계값 비교

		Calibration(2002-2004)	Validation(2005-2007)
1 node	NSE	0.533	0.712
	RMSE	0.776	0.383
Multi node	NSE	0.865	0.896
	RMSE	0.417	0.230

4. 결론

기존 개념적 매개변수 기반의 집중형 수문모형과 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형의 장점을 최대한 결합하여, 도시유역 개발 전·후의 장·단기적인 물순환 변화 특성을 정량적으로 평가하고 물순환개선시설의 효과적인 설계를 지원하기 위해 CAT을 개발하였다. 노드 단위로 강우, 침투, 증발, 유출, 지하수-지표수 교환, 지하수 유거가 모의되고 링크별로 하도추적이 가능한 수문모형을 개발하여 설마천 유역에 시험 적용하였다. 설마천 유역의 물리적 매개변수를 이용하여 최소한의 보정을 통해 모의하여 관측자료와 비교한 결과, 만족할 만한 해석 결과임을 확인할 수 있었다. 향후 다양한 토지이용, 모의시간간격 등에 대한 추가적인 검증과 물순환개선시설 해석 모듈개발을 통해 CAT의 활용 범위와 신뢰성이 향상될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-6-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

노성진, 김현준, 장철희 (2005). "청계천 유역에 대한 WEP 모형의 적용". 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제 38권, 제 8호, pp. 645-653.

일본국토교통성, SHER Model User`s Manual, 2001.7.

한국건설기술연구원 (2008). 시험유역의 운영 및 수문특성 조사, 한국건설기술연구원.

한국건설기술연구원 (2009). 도시유역 물순환 해석모형의 개발 및 적용(2차년도), 한국건설기술연구원.

Jia, Y., Wang, H., Zhou, Z., Qiu, Y., Luo, X., Wang, J., Yan, D., and Qin, D. (2006). "Development of the WEP-L distributed hydrological model and dynamic assessment of water resources in the Yellow River basin." *Journal of Hydrology*, Vol 331, pp. 606-629.