

도시화에 따른 물순환 영향 평가 모형의 개발 및 적용(I) - 모형 개발 -

Development and Application of the Catchment Hydrologic Cycle Assessment Tool Considering Urbanization (I) - Model Development -

김 현 준* / 장 철 희** / 노 성 진***

Kim, Hyeon Jun / Jang, Cheol Hee / Noh, Seong Jin

Abstract

The objective of this study is to develop a catchment hydrologic cycle assessment model which can assess the impact of urban development and designing water cycle improvement facilities. Developed model might contribute to minimize the damage caused by urban development and to establish sustainable urban environments. The existing conceptual lumped models have a potential limitation in their capacity to simulate the hydrologic impacts of land use changes and assess diverse urban design. The distributed physics-based models under active study are data demanding; and much time is required to gather and check input data; and the cost of setting up a simulation and computational demand are required. The Catchment Hydrologic Cycle Assessment Tool (hereinafter the CAT) is a water cycle analysis model based on physical parameters and it has a link-node model structure. The CAT model can assess the characteristics of the short/long-term changes in water cycles before and after urbanization in the catchment. It supports the effective design of water cycle improvement facilities by supplementing the strengths and weaknesses of existing conceptual parameter-based lumped hydrologic models and physical parameter-based distributed hydrologic models. the model was applied to Seolma-cheon catchment, also calibrated and validated using 6 years (2002~2007) hourly streamflow data in Jeonjeokbigyo station, and the Nash-Sutcliffe model efficiencies were 0.75 (2002~2004) and 0.89 (2005~2007).

Keywords : catchment hydrologic cycle assessment tool (CAT), lumped hydrologic model, distributed hydrologic model, water cycle improvement facilities, urban development

요 지

본 연구의 목적은 도시개발의 영향을 평가하고 물순환 개선시설의 적절한 배치를 설계하기 위한 물순환 해석 모형을 개발하는 것이다. 개념적 매개변수를 사용하는 기존의 집중형 수문모형으로는 도시개발로 인한 토지이용 변화 등의 유역 특성 변화를 적절히 모의하는데 한계가 있으며, 최근 활발히 연구되고 있는 분포형 수문모형은 입력자료 구축 및 모형구동에

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 연구위원 (e-mail: hjkim@kict.re.kr)

Corresponding author, Research Fellow, Water Resource Research Division, Water Resource & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Ilsan 411-712, Korea

** 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 수석연구원

Research Specialist, Water Resource Research Division, Water Resource & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Ilsan 411-712, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 전임연구원

Research Specialist, Water Resource Research Division, Water Resource & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Ilsan 411-712, Korea

많은 시간과 노력이 필요하여 다양한 도시설계 대안을 평가하기에는 적절하지 못하다. 유역 물순환 해석 모형(Catchment hydrologic cycle Analysis Tool, 이하 CAT)은 이러한 배경을 토대로 개발된 물리적 매개변수 기반의 링크-노드 방식의 물순환 정량화 모형이다. CAT은 기존 개념적 매개변수 기반의 집중형 수문모형과 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형의 장단점을 최대한 보완하여, 도시유역 개발 전·후의 장·단기적인 물순환 변화 특성을 정량적으로 평가하고 물순환 개선시설의 효과적인 설계를 지원하기 위한 물순환 해석 모형이다. 개발된 모형의 평가를 위하여 설마천 유역을 대상으로 모의를 수행하였으며 출구점인 전적비교의 6개년(2002~2007) 동안의 시간별 하천 유출량 자료를 이용하여 모형의 보정(2002~2004)과 검정(2005~2007)을 실시한 결과, 보정과 검정기간의 Nash-Sutcliffe 모형효율계수는 각각 0.75와 0.89로 나타났다.

핵심용어 : 유역 물순환 해석모형, 집중형 수문모형, 분포형 수문모형, 물순환 개선시설, 도시개발

1. 서 론

최근 녹색도시를 지향하면서 도시 내에서의 물의 순환에 대한 관심이 높아지고 있으며 도시계획 단계에서부터 물의 순환을 고려하려는 시도가 이루어지고 있다. 국토해양부, 환경부, 소방방재청 및 지방자치단체들은 법령, 기준, 지침 및 조례 등을 제정하여 물순환을 도시개발 이전의 상태가 될 수 있도록 시설 설치를 유도하고 있다. 그러나 개별시설들의 조합이 유역규모의 물순환에 미치는 영향 평가는 이루어지고 있지 못한 실정이다.

종래에는 홍수저감을 목적으로 홍수저류지와 침투시설에 대하여 설계하고 시공을 하였으나 장기적인 관점에서 물순환 개선시설의 효과를 평가하여 도시 계획 단계에서 반영하지는 못하였다. 그리고 이들 개별 물순환 개선시설(침투, 저류 등)에 대한 단위시설의 규모 설계에 그치고 있어 개선 시설이 다중으로 조합되어 분산 계획되었을 경우, 유역 규모에서 물순환의 긍정적인 변화를 판단하기는 어려운 형편이다. 따라서 도시개발이 하천환경에 미치는 피해를 최소화하고 지속가능한 도시 환경을 구축하기 위해서는 인위적 개발이 물의 순환에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고 물순환 개선시설의 적절한 시설규모와 배치 계획을 위한 장기적이고 통합적인 물순환 해석이 필요하다.

과거와 현재의 물순환계의 상태를 파악함으로써 장래의 물순환계의 상태를 추정하는 경우에는 물순환 해석 모형을 활용하는 것이 유용하다. 모형은 물리적인 지배방정식에 근거하는가의 여부로 물리적 모형과 개념적 모형으로 나눌 수 있다. 개념적 모형으로는 TANK 모형이 국내에서 많이 활용되고 있다. TANK 모형은 Suwagara(1967)에 의하여 개발된 단일 탱크의 선형시스템 모형으로 홍수유출이나 장기유출에 다양하게 적용되었다. 한상욱과 정중

수(1976)에 의해 영산강의 장기유출해석에 처음 도입된 이후로 많은 연구자들과 실무분야에서 활발하게 사용되고 있다. 박승우(1993)는 중소하천의 일유출량 추정을 위한 TANK 모형 셸프프로그램을 개발하였다. DAWAST(DAILY Watershed Streamflow model) 모형은 노재경(1991)과 김태철(1996)에 의해서 국내에서 개발된 모형으로서 유역의 토양층을 불포화층과 포화층 2개의 저수층으로 단순화한 대표적인 집중형 모형이다. 또한, 호주의 주요 도시 및 개발지역에서 우수유출 및 수질저감 대책 평가를 위하여 MUSIC(Modeling of Urban Stormwater Improvement Conceptualisation) 모형이 개발되었다. MUSIC 모형은 2개의 저류층으로 구성된 모형으로 사용자의 편의를 고려하여 노드-링크의 표현 방식으로 개발되었으며, 우수 및 수질 관리를 위한 적절한 처리시설(습지, 저류지, 유사저류지, 침투시설, 오물트랩, 완충지, 바이오저류, 식생수로, 빗물저류 등)의 효과를 평가할 수 있도록 되어 있다(CRCCH, 2005). 임장혁 등(2007)은 MUSIC 모형을 이용하여 홍제천 유역에 대한 유출 및 매개변수 민감도 분석을 수행한바 있으며 연지웅(2007)은 MUSIC 모형을 이용한 침투-저류 시스템의 유출저감효과를 해석하였다. 박기정 등(2010)은 군자배수구역에 대한 MUSIC 모형의 적용성을 분석하였고, 김덕우(2011)는 MUSIC 모형의 수문관련 매개변수에 대한 불확실성 평가를 GLUE(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) 방법을 이용하여 분석하였다.

한편 물리적 모형은 기본적으로는 대상유역의 물리적 특성값을 부여할 수 있다. 이는 물순환계의 장래추정과 대책의 효과 평가에 있어도 물리적 모형의 모의결과의 일정 신뢰성을 얻을 수 있는 것을 의미한다. 그러면서도 물리적 모형 구축에 필요한 자료와 비용은 막대한 것으로 실무상의 과제가 되어 있다. 도시지역에서의 물순환 해석

을 위한 물리적 모형으로는 WEP (Water and Energy transfer Process) 모형과 SWMM (Storm Wastewater Management Model), SHER (Similar Hydrologic Element Response) 모형 등이 있다. WEP 모형은 복잡한 토지이용이 이루어지고 있는 도시하천 유역에 대한 물순환의 정량화를 목적으로 일본의 토목연구소에서 개발된 물리적 기반의 공간분포형 모형이다(Jia. Y., 1997). WEP 모형의 모의는 WEP+를 통해 수행될 수 있는데, WEP+는 WEP 모형의 방대한 양의 입력자료를 효과적으로 구축하고, 다양한 시계열 및 공간분포 출력자료를 효과적으로 분석할 수 있는 인터페이스를 지닌 전·후처리 프로그램으로 개발되었다(한국건설기술연구원, 2008). 김현준 등(2008)은 판교신도시, 행정중심복합도시, 파주 운정신도시 및 남양주시 등 다수의 신도시 개발지역에 대하여 WEP 모형을 적용하였으며 침투시설, 저류시설 등에 의한 물순환 개선 효과를 분석하였다(한국건설기술연구원, 2009). SWMM 모형은 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서 개발된 모형으로 도시유역 내에서 우기 및 건기의 지표 유출과 지하수유출, 배수관망내의 유출량 추적, 수질모의, 오염물질에 대한 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다(Rossmann, 2007). 최근 SWMM 5.0을 확장하여 LID (Low Impact Development) 기술(투수성 포장, 침투녹지, 빗물정원, 옥상녹화, 빗물탱크, 침투트렌치 등)의 평가를 해석할 수 있는 SWMM 5.0.022 버전이 출시되었다. 박준호 등(2008)은 SWMM 모형을 이용하여 춘천 거두지구를 대상으로 LID 기술 적용으로 인한 유출 감소 특성을 분석하였으며 주명호(2009)는 불투수면 저감 기법에 대한 적용 효과를 분석하였고, 최환규(2011)는 불투수면의 변화에 따른 도시유역의 강우-유출과 수질에 미치는 영향을 연구하였다. SHER 모형은 일본에서 개발된 모형으로 불포화 투수현상의 물리 과정을 가능한 범위 내에서 수치계산을 충분히 하여 모형 매개변수의 물리적인 근거를 명확히 하였다. 이 모형은 신도시 개발을 시작으로, 최근 십 수년간 일본 내의 여러 유역에 적용되어 높은 재현정밀도가 확인되어, 물순환계의 해석방법으로 널리 사용되고 있다(일본국토교통성, 2001). 국내에서는 서울시정개발연구원에서 중랑천, 안양천, 탄천, 홍제천, 성내천, 고덕천 및 사당천 등 여러 하천유역에 대하여 일 유출량을 모의 분석한바 있다(황성환과 김영란, 2006).

최근 도시지역에서의 물순환 해석을 위하여 독일, 호주 및 미국에서는 STORM, Urban Developer, SUSTAIN (System for Urban Stormwater Treatment, and Analysis INtegration) 등의 모형을 개발하여 발표한바 있다.

STORM 모형은 독일에서 개발된 모형으로서 물수지 및 오염물질 유출부하량 산정을 통해 합류식 하수관거 시스템 및 우수저류침투시설의 계획·설계에 활용하기 위해 개발된 모형이다. 이 모형은 옥상녹화, 습지, 저류조, 트렌치, 표면 침투시설 등 다양한 우수배수 시스템 설계 및 효과분석이 가능한 것이 특징이다(IPS, 2009). 김이호 등은 인천청라지구 및 상도동 공동주택단지에서 STORM 모형을 적용하여 이·치수적, 환경적, 물순환 측면에서 효율적인 우수저류침투시설의 규모를 평가한바 있다(한국건설기술연구원, 2007). 호주에서는 통합 도시 물관리(IUWM, Integrated Urban Water Management)를 목적으로 물관리 대안시설 및 서비스 제공 전략을 기반으로 시스템을 평가하고 모델링 할 수 있는 Urban Developer를 개발하였다. 이 모형은 정책입안자가 시간적/공간적으로 다양한 설계 요소들 간의 상호관계를 규명하도록 하며 또한, 물부족, 수문학적 영향이 생태적 지속성 등에 미치는 영향의 측면에서 급배수관망과 대안시설에 의한 공급 사이의 최적의 균형을 이루는 방법이 무엇인가와 같은 해결책을 이끌어 내도록 한다(CRCCH, 2011). 미국 EPA (Environment Protection Agency)에서는 SUSTAIN(System for Urban Stormwater Treatment, and Analysis INtegration) 모형을 개발하여 LID 요소기술의 효과를 분석하는 틀을 제공하고 있다. SUSTAIN의 수문해석 및 오염물질 해석 모듈은 EPA의 SWMM 5.0모형의 알고리즘을 채택하였고, 유사 관련 해석은 HSPF (Hydrological Simulation Program-FORTRAN)의 알고리즘을 채택하여 운영되며 비용-편익 분석 기능도 제공하고 있다(U.S. EPA, 2009).

도시지역에서의 물순환 및 물질순환, 열순환 해석 등과 관련된 연구가 활발하게 추진되고 있으며, 관련된 설계 및 계획 프로그램들이 출시되고 실무에 사용되고 있다. 그러나, 해외에서 개발된 기술은 국내의 유역 환경을 충분히 반영하기 어렵다. 저수지 혹은 하천에서의 취수 등과 같이 국내의 복잡한 물순환 형태를 반영하는데 한계가 있으며, 필요시 적절한 소스 코드의 수정이 어렵다. 또한, 기존의 물순환 해석모형에 의한 LID 시설을 계획하는 방법은 홍수저감에 국한되어 있고, 하천 유량이나 지하수위 측정 자료가 부족한 대상지역에 대한 장기적인 유역 물순환 및 도시 개발과 같은 토지이용 변화가 물순환에 미치는 영향을 해석하는데 있어 제한이 있으며, 개별적으로 설치된 LID 시설들이 유역의 물순환을 개선하는 효과를 종합적, 정량적으로 구현하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 도시 개발 지역 혹은 기존의 도시 유역에서 장기간에 걸친 물순환의 변화를 예측하고 물순환을 개

선시키는 대안 시설의 효과를 사전에 평가하는 것을 목표로 유역 물순환 해석 모형인 CAT (Catchment hydrologic cycle Assessment Tool)을 개발하였다. 기존의 개념적 매개변수 기반의 집중형 수문모형은 자료구축이 간편하다는 장점이 있으나 경험적 매개변수를 사용하기 때문에 매개변수의 최적화가 필요하며 미세측 유역에 대한 매개변수의 추정어 어려운 단점이 있다. 한편, 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형은 물리적인 매개변수를 적용함으로써 도시개발 등과 같은 인위적인 유역의 토지이용 및 토양특성의 변화가 물순환계에 미치는 영향을 공간적으로 해석할 수 있는 장점이 있는 반면 물리적 모형 구축에 필요한 시간과 자료의 양이 방대하여 과다한 노력이 필요한 것이 사실이다. CAT은 기존의 개념적 매개변수 기반의 집중형 수문모형과 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형의 장점을 최대한 집약하여, 도시유역 개발 전·후의 장·단기적 물순환 변화특성을 정량적으로 평가하고 물순환 개선시설의 효과적인 설계를 지원하기 위한 물순환 해석 모형이다. 특히, 도시개발 등 유역의 인위적 개발에 있어서 물순환의 변화를 최소화 하고자 물순환을 정량적으로 해석하고, 개선시설의 분산 배치에 따른 영향을 평가하는 장점이 있다. 개발된 모형은 노드와 링크로 연결되는 시스템으로 구성되었으며, 물순환 개선시설들의 선택 폭을 다양하게 제시하도록 하였고, 모형의 인터페이스는 사용자가 손쉽게 모형을 적용·관리하고, 여러 시나리오를 동시에 효과적으로 모의하여 분석할 수 있도록 설계되었다.

2. 모형의 기본이론

CAT은 유역에서의 강우-유출 과정을 물리적 매개변수를 이용하여 해석한다. 투수지역과 불투수지역으로 유역을 구분하였으며, 우리나라 유출 특성중 하나인 논에서의 유출 과정을 반영하였다. 또한, 외부에서의 물공급과 상수도 관망 등에서의 누수도 고려하였다. 투수지역은 1개의 토양층과 1개의 불압대수층으로 구성되었고, 유출기여역과 함양역으로 유역을 분할하여 적용할 수 있도록 하였으며, 대수층을 통하여 지하수의 흐름을 산정할 수 있게 하였다. 또한, 물순환 개선시설들의 선택 폭을 다양하게 제시할 수 있게 하였으며, 도시유역 물순환 해석에 필수적인 침투시설, 저류시설 등을 고려하여 보다 현실에 가까운 모의가 가능하도록 하였다 (Fig. 1).

2.1 모형의 기본구조

CAT에서의 물의 순환과정은 투수지역과 불투수지역으로 구분되며, 각 공간 단위별로 침투, 증발, 지하수 흐름 등의 모의가 가능하다. 토양층 및 대수층을 각각 한 개의 층으로 모형화 하였고, 대수층으로부터의 지하수 취수를 고려하였다.

CAT의 물순환 해석모듈로는 증발산, 침투, 유역 유출, 지하수 유거, 하도추적 등이 있다. 증발산은 잠재 증발산량을 외부에서 계산하여 입력하거나, Penman-Monteith 방법(Smith et al., 1998)을 선택할 수 있으며, 침투는 Rainfall Excess(일본국토교통성, 2001; Maidment, 1992), Green & Ampt (Green & Ampt, 1911; Mein and Larson,

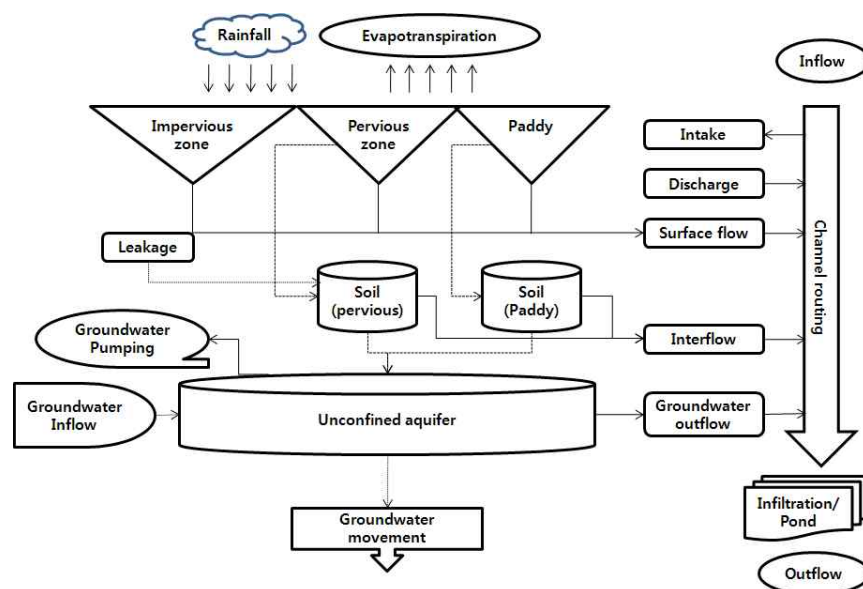


Fig. 1. Schematic Diagram for Hydrologic Cycle Analysis

1973; Chu, 1978), Horton (Horton, 1933) 방법 등이 제공된다. 또한, 인접 유역간의 지하수 이동을 고려할 수 있으며, 하도추적을 위해 Muskingum, Muskingum-Cunge, Kinematic wave 방법 등이 제공된다(Ponce, 1988).

2.1.1 유출

CAT은 불투수역과 투수역을 구분하여 유역 유출성분을 모의한다. 불투수역의 경우는 강우량과 지면저류량(depression storage)을 비교하여 강우량이 많으면 그 잉여분을 지표면유출로 한다(Fig. 2). 불투수역의 지배방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$(1) \quad \frac{dS_{imp}}{dt} = P - D_{imp} - E_{imp}$$

여기서, P는 강우량(mm/hr), S_{imp} 는 불투수역 지면저류량(mm), D_{imp} 는 불투수역으로부터의 지표면유출(mm/hr), E_{imp} 는 불투수역 지면증발량(mm/hr)이다.

또한, 투수역의 경우는 토양의 수분량을 고려하여 각 유출성분을 모의하게 된다. 즉, 표층토양 내에서는 토양의 수분전달특성을 Richards 식을 기초 식으로 표현하고, 간단한 수치해석법으로 수분량을 추적한다. 투수역에서는 저류량을 지면, 표층 토양 및 지하수층 등의 세 종류로 나누어 고려하고 Eqs. (2)~(4)를 기초로 한다.

$$\frac{dS_1}{dt} = U_s - E_1 - D_s \quad (2)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = P - E_2 - R - U_s + P_{a1} \quad (3)$$

$$\frac{dS_g}{dt} = R - D_g - P_{a2} \quad (4)$$

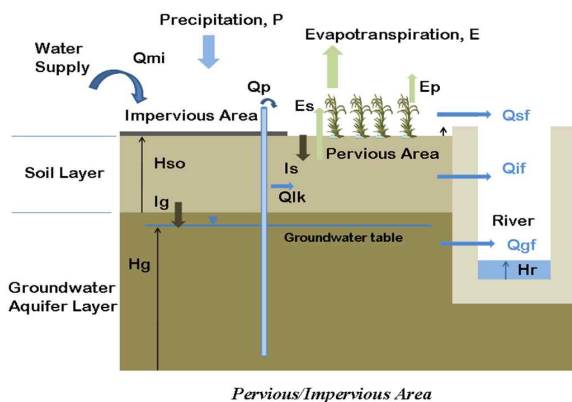


Fig. 2. Hydrological Processes in CAT

여기서, S_1 은 지면저류량(mm/hr), S_2 는 표층토양내의 저류량(mm/hr), S_g 는 지하수층내 저류량(mm/hr), D_s 는 지표면유출량(mm/hr), E_1 은 지면으로부터의 증발량(mm/hr), E_2 는 표층 토양내로부터의 증발량(mm/hr), P는 토양으로의 침윤량(강수량)(mm/hr), R은 지하수 함양량(강하 침투량)(mm/hr), I는 중간 유출량(측방 침투류)(mm/hr), U_s 는 지표면에의 복귀량(mm/hr), D_g 는 지하수 유출량(mm/hr), P_{a1} 은 관개수량이나 상수도 누수량과 같은 표층 토양에 침입하는 인공계 물 순환수량(mm/hr), P_{a2} 는 양수량이나 하수관거로의 침입수량과 같은 대수층으로부터 뽑아지는 인공계 물 순환수량(mm/hr)을 나타낸다.

2.1.2 침투

CAT에서는 투수역의 침투량을 계산하기 위하여 세 가지 방법이 제공된다. 첫 번째는 연직방향과 사면방향의 불포화투수계수를 사용하여 지하수층이 포화할 때 까지 무조건 침투가 발생하는 것으로 하고, 강수량과 지면저류량의 초과 수분량은 모두 지표면을 통과하여 토양함수량이 증가하는 것으로 계산하는 Rainfall Excess 방법이다. 두 번째는 경험적 값을 이용하여 시간의 함수로 침투량을 산정하는 Horton 공식을 사용하는 방법이며, 세 번째는 토양의 물리적 특성값을 사용하여 침투량을 계산하는 Green & Ampt 방법이다.

2.1.3 지하수

하천수위와 지하수위와의 상호관계는 Eqs. (5) and (6)을 사용한다. Eq. (6)은 하천수위가 그 부근의 지하수위보다 높은 경우이며, 다른 경우에는 Eq. (5)를 사용한다.

$$Q_d = k_0 A_{bed} \quad (5)$$

$$Q_d = k_0 \frac{h - H_{rivbed}}{b_{bed}} A_{bed} \quad (6)$$

여기서, Q_d 는 하천으로의 침투 또는 하천으로부터의 함양량(m^3/s), K_0 는 하상재료 포화투수계수(m/s), A_{bed} 는 침윤면적(m^2), b_{bed} 는 하상재료두께(m), H_{rivbed} 는 하상표고(m)이다.

대수층을 통한 지하수의 이동을 고려할 수 있는데 지하수 유동량은 Eq. (7)을 이용한다.

$$Q_g = K_0 \frac{\partial h}{\partial x} \cdot l \cdot T \quad (7)$$

여기서, Q_g 는 지하수유동(m^3/s), K_0 는 대수층의 투수계

수(m/hr), $\frac{\partial h}{\partial x}$ 는 지하수위의 경사, l 는 분할구역간의 접속선의 길이(m), T는 구역내의 평균대수층 두께(m)이다.

$$A \cdot S \frac{dh}{dt} = Q_{IN} - Q_{OUT} \quad (8)$$

여기서, Q_{IN} 은 대수층으로의 유입(m^3/s), Q_{OUT} 은 대수층으로부터의 유출(m^3/s), A는 구역면적(m^2), S는 저류계수, h는 지하수위(m)를 나타낸다.

2.1.4 논 유출 해석

CAT에서는 논에서의 유출과정을 반영할 수 있는 방법을 제시하였다. 논에서의 유출은 물꼬를 통하여 배수되며, 물꼬는 논에서의 담수심을 조절하는 역할을 하는데, 시기별로 조정이 가능하다. 본 연구에서는 논에서의 유출과정을 모의하기 위하여 토양층과 지하수층으로 구분하였다. 논에서의 암거배수를 반영하기 위하여 인공적인 배수시설을 토양층에 포함하였고, 지표면의 유출은 논에서 물꼬관리를 통하여 이루어지는 점을 반영하여 월별 물꼬높이를 지정하도록 하였다(Fig. 3).

논에서의 물꼬높이에 따른 지표면 배수량은 Eq. (9)를 이용하여 계산된다.

$$Q_s = \alpha_0 \sqrt{(H_s - H_p)} \quad (H_s > H_p) \quad (9)$$

$$Q_s = 0 \quad (H_s \leq H_p)$$

여기서, Q_s 는 지표면 배수량(m^3/sec), α_0 는 물꼬 배수계수($mm^{0.5}/hr$), H_s 는 논외의 담수심(m), H_p 는 논외의 물꼬높이(m)를 나타낸다. Eq. (9)에서 보면 논외의 담수심이 물꼬높이보다 클 경우 지표면 배수량이 계산되며 담수심이 물꼬높이보다 작으면 지표면 배수는 발생하지 않는다. 또한, 논에서의 암거배수와 관련된 식은 Eq. (10)과 같다(Jia, 2002).

$$Q_{sd} = \min(K(\theta), \alpha_p \sqrt{H_s + H_{so}}) \quad (10)$$

여기서, Q_{sd} 는 암거 배수량(m^3/sec), $K(\theta)$ 는 토양함수율에 따른 투수계수(mm/hr), α_p 는 암거배수의 유출계수($mm^{0.5}/hr$), H_s 는 논외의 담수심(m), H_{so} 는 논외의 토양층 두께(m)이다. 또한, 우리나라 일부 지역에서는 물꼬배수와 병행하여 파이프를 통한 배수를 사용하고 있다. 파이프 배수의 개념은 Fig. 4 and Eq. (11)과 같다.

$$Q_{sorf} = \sqrt{2gH_s} \cdot A_{sorf} \cdot C_A \cdot C_{sorf} \quad (11)$$

여기서, Q_{sorf} 는 파이프를 통한 배수량(m^3/sec), g는 중력 가속도(m/sec^2), H_s 는 논외의 담수심(m), A_{sorf} 는 파이프를 흐르는 물의 배수면적(m^2), C_A 는 파이프 계수, C_{sorf} 는 파이프 유출 계수이다.

2.1.5 물순환 개선시설

CAT은 사용자의 목적에 맞는 다양한 물순환 개선시설(침투시설, 저류지, 습지, 빗물저장시설, 리사이클 및 외부급수 등)의 구현 및 모의가 가능하도록 개발하였다. 여기서, 물순환 개선시설이란 빗물을 흡수하고 저류할 수 있는 도시녹지시설 혹은 구조물로서 도심 내의 불투수면을 저감시키고 유출수를 줄이면서 동시에 녹지를 확보하여

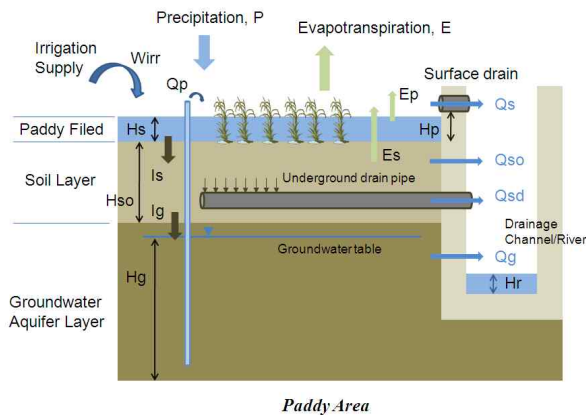


Fig. 3. Hydrological Processes in Paddy Area

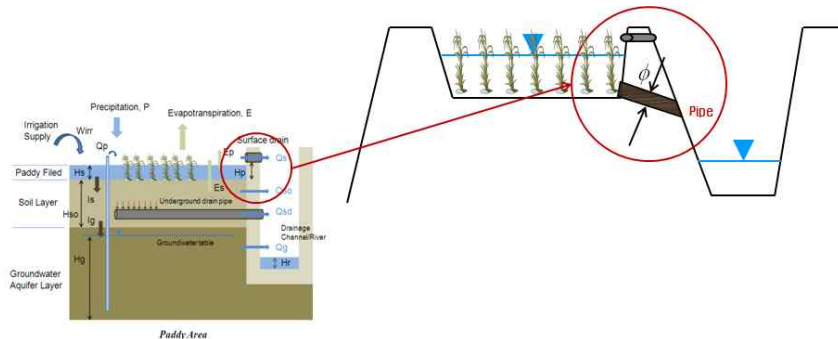









Fig. 4. Pipe Drainage in Paddy Area

Table 1. Improvement Facilities in CAT

Improvement Facilities	Icon	Description
Infiltro		Infiltration facilities to calculate infiltration into soil and movements into groundwater
Bioretention		Control the rate and pathway of infiltrated water from these systems such that the effect of infiltrated stormwater on adjoining structure(eg. buildings or road pavements) can be avoided
Pond (online/offline)		A pond that temporarily stores the flood discharge in the catchment which is composed of online ponds installed in the river and offline ponds installed outside the river
Wetland		wetlands in catchments
RainTank		A Rain Tank that stores and utilizes rainwater flowing in from impervious zones
Recycle		Facilities that intake water from rivers and supply it to regions that require water
Import		Water supply to catchment from the outside

효과적인 물순환 기능에 영향을 미치는 시설들이다. 이러한 물순환 개선시설은 신도시 및 지역 혁신도시 개발 등의 대규모 토지이용변화가 예상되는 개발지역에 대한 평가 및 개선 기술을 제공하여 물순환 건전화를 위한 설계에 직접적으로 활용될 수 있는 큰 장점을 지니고 있다. Table 1은 CAT에서 제공되는 물순환 개선시설의 종류 및 기능을 나타내고 있다.

(1) 침투시설

빗물침투시설(침투통, 침투 트렌치 등)은 모두 침투시설의 면적으로 환산하여 모의한다. 미리 설정한 침투 면적으로부터의 유출량을 침투시설로 유입시킨 후 계획침투량을 침투시키도록 한다 (Fig. 5). 침투시설 내의 연속 방정식은 Eq. (12)와 같다.

$$\frac{dS_t}{dt} = Q_t - Q_{co} - Q_{tof} \quad (12)$$

여기서, S_t 는 침투시설 내 저류량(m^3), Q_t 는 침투 트렌치의 유입량(m^3/s), Q_{inf} 는 침투 시설로부터 피압대수층으로의 함양량(m^3/day), Q_{tof} 는 침투시설로부터의 월류량($Q_t > Q_{inf}$ 일 때 $Q_{tof} = Q_t - Q_{inf}$)(m^3/s)을 나타낸다.

(2) 침투녹지

일반적으로 알려져 있는 침투녹지(Bioretention) 시스템은 우수를 필터 매개체를 통과시킴으로 용해성 혹은 입자성 오염을 제거하는 설비이다. 최근에 와서는 인접한 구조물(빌딩이나 도로 등)로부터의 유출수를 침투시키고 침투된 물의 양과 흐름 경로를 제어하는 방향으로 접근이

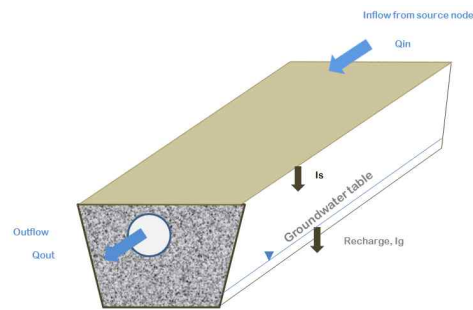


Fig. 5. Infiltration System

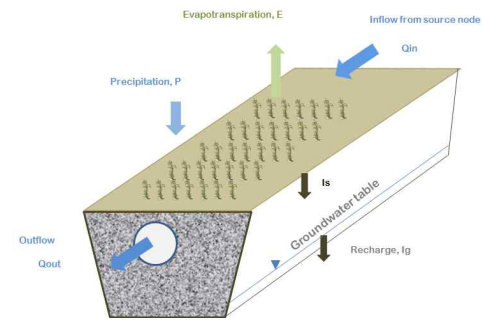


Fig. 6. Bioretention

활발하다. 기본적으로 침투시설과 개념을 같이 하되 설계 면적에 내린 강우와 토양 및 식생의 증발을 고려할 수 있도록 하였다(Fig. 6). 침투녹지의 연속방정식은 Eq. (13)과 같다.

$$\frac{dS_{Br}}{dt} = Q_{Br} - Q_{Binf} - Q_{Brof} + R - ET \quad (13)$$

여기서, S_{Br} 는 침투녹지 내 저류량(m^3), Q_{Br} 는 침투녹지의

유입량(m^3/s), Q_{Binf} 는 침투녹지로부터 피압대수층으로의 함양량(m^3/day), Q_{Brovf} 는 침투녹지로부터의 월류량($Q_{Br} > Q_{Binf}$ 일 때 $Q_{Brovf} = Q_{Br} - Q_{Binf}$)(m^3/s), R 은 침투녹지의 강우량(mm), ET 는 침투녹지의 증발산량(mm)이다.

(3) 저류시설

저류시설은 하도 내에 위치한 유역내 저류지(Online pond)와 하도 외에 위치하는 유역의 저류지(Offline pond)로 구분된다. 저수지 수면의 증발량과 취수량을 고려하며, 방류구를 통한 방류량을 반영한다(Fig. 7). 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dS_s}{dt} = Q_s - Q_{dis} - Q_{sovf} + R - E \quad (14)$$

여기서, S_s 는 저류시설 저류량(m^3), Q_s 는 저류시설 유입량(m^3/s), Q_{dis} 는 저류시설 유출량(m^3/s), Q_{sovf} 는 저류시설로부터의 월류량(m^3/s), R 은 저류지 수면으로의 강우량(mm), E 는 수면으로부터의 증발량(mm)이다.

유역의 저류지의 경우는 하도 내의 흐름의 규모에 따라서 일정량을 넘는 경우만 유역의 저류지로 유입될 수 있는 양을 산정하도록 하였으며, 저류지에서 하류 하천으로의 방류를 반영하여 홍수 후에 저류지가 비워지도록 하였다(Fig. 8).

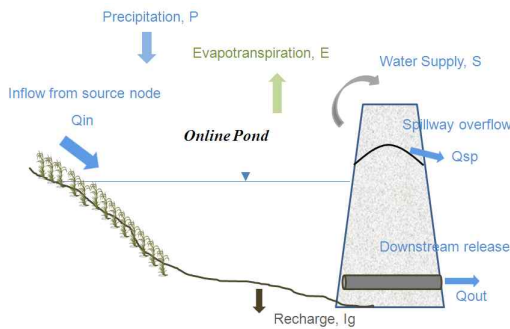


Fig. 7. Online pond

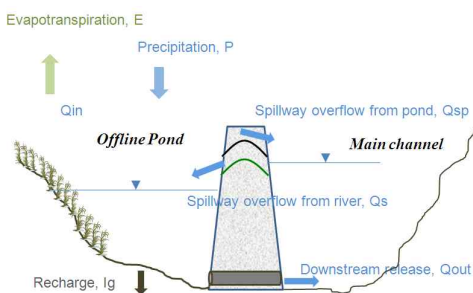


Fig. 8. Offline pond

$$Q_{s_off} = (Q_{inf} - Q_{off_max}) \times Q_{off_ratio} \quad (Q_{inf} > Q_{off_max}) \quad (15)$$

$$Q_{dn_off} = Q_{inf} - Q_s$$

여기서, Q_{s_off} 는 유역의 저류지 유입량(m^3/s), Q_{inf} 는 본류 유입 유량(m^3/s), Q_{off_max} 는 유역의 저류지 유입량 임계치(m^3/s), Q_{off_ratio} 는 유역의 저류지 유입량의 본류 유입 비율($0 \sim 1.0$), Q_{dn_off} 는 유역의 저류지로 유입되지 않는 본류유량(m^3/s)

(4) 습지

유역 내의 습지는 식생과 수면에서의 증발산을 반영한다. 습지의 저류 능력을 넘는 양은 모두 월류 되어 하류로 유출되는 것으로 하였다. 또한, 습지에서 하류로 일정기준에 의해 방류가 될 수 있도록 하였다(Fig. 9). 습지의 지배방정식은 유역내 저류지와 유사하다.

$$\frac{dS_w}{dt} = Q_w - Q_{wdis} - Q_{wovf} + R - E \quad (16)$$

여기서, S_w 는 습지 저류량(m^3), Q_w 는 습지 유입량(m^3/s), Q_{wdis} 는 습지 유출량(m^3/s), Q_{wovf} 는 습지로부터의 월류량(m^3/s), R 은 습지 수면으로의 강우량(mm), E 는 습지 수면으로부터의 증발량(mm)이다.

(5) 빗물저장시설

건축물에서 활용되고 있는 빗물저장시설을 반영하였다. 빗물저장시설로의 초기우수와 같은 일정량 이하의 유입량과 시설용량을 초과하는 양은 모두 방류하는 것으로 하였고, 물 사용량을 반영하였다.

(6) 재이용 및 외부급수

하천 내에서 취수하여 유역으로 공급할 수 있도록 재이

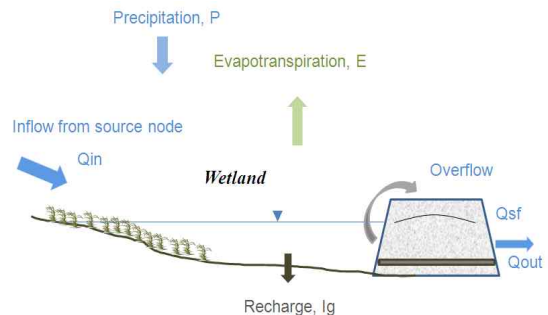


Fig. 9. Wetland

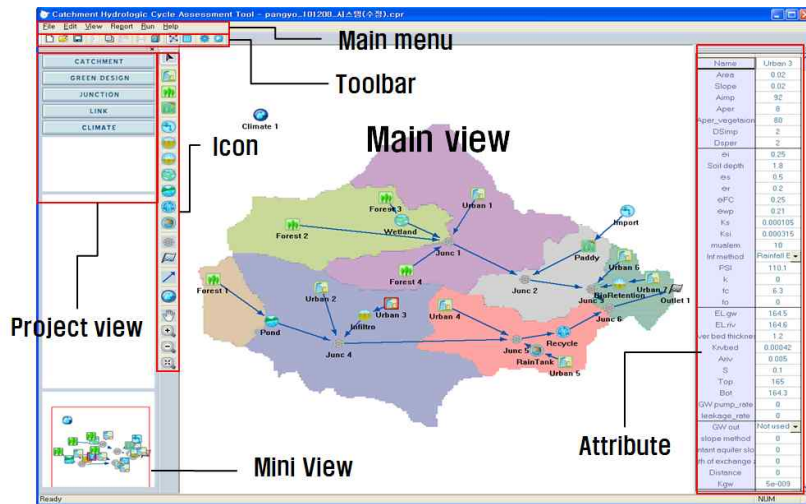


Fig. 10. Graphical User Interface of CAT

용 시설을 계획하였다. 재이용(Recycle)은 용수 이용 목적에 따라 필요지역으로 공급되는 것으로 하였으며, 하천 유지용수의 목적으로 취수되어 상류 혹은 하류의 임의 지역으로 공급되는 것을 포함하였다. 또한, 유역 외부로부터 광역으로 급수되는 공급량(Import)도 반영하도록 하였다.

3. 모형의 GUI(Graphical User Interface)

모형의 인터페이스는 사용자가 직관적으로 시스템을 구축하고, 여러 시나리오를 동시에 효과적으로 모의하여 분석할 수 있도록 설계되었다. 모든 입력 출력 자료를 Microsoft Excel이나 텍스트 형식과 연동되도록 하여 프로젝트별 매개변수 관리가 용이하도록 하였다. 모형의 결과들은 다양한 방법으로 제시된다. 해당 유역 노드나 개선편 시설 노드에서 유출 성분별로 다양한 속성을 그래프로 출력할 수 있으며, 시계열 자료로 저장 가능(Fig. 10). 본 모형은 웹사이트(www.watercycle.re.kr)를 운영 중에 있으며 이를 통해 매뉴얼 및 베타버전을 다운로드 받을 수 있다.

4. 모형 적용

4.1 대상유역 및 입력자료

개발된 모형의 적용을 위하여 임진강 상류부의 설마천 유역을 대상유역으로 선정하였다. 유역면적은 약 9.0 km²이며, 토지이용은 산지가 99.5%로 유역의 대부분이 산악 지형으로 이루어져 있다(한국건설기술연구원, 2008). 유역내 수문관측망은 Fig. 11과 같이 우량관측소 6개소(전적비교, 비룡포대, 설마리, 범륜사, 빈베이), 수위관측소 2

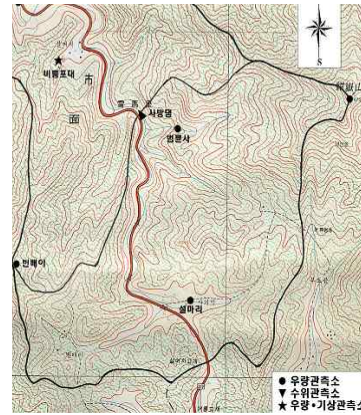


Fig. 11 Catchment Characteristics

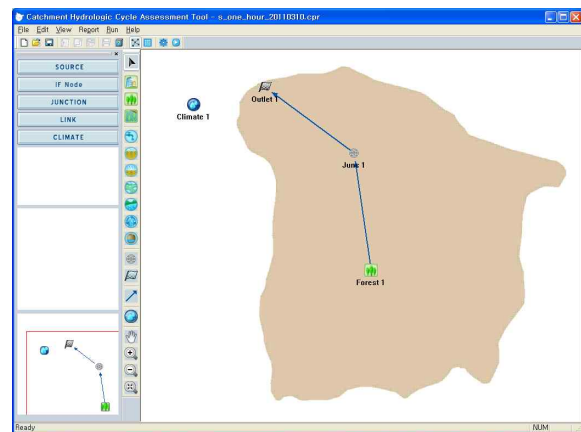


Fig. 12. System Construction for the Seolma-cheon Catchment

개소(전적비교, 사방댐) 및 기상관측소 1개소(비룡포대)가 설치되어 있으며 10분 단위로 관측·운영되고 있다.

본 연구에서는 설마천 유역을 소유역 구분 없이 단일노

드의 형태로 입력자료를 구축하여 적용하였다. 모형의 시스템 구성은 Fig. 12와 같으며 모형의 입력자료로는 지형 특성, 토양, 대수층 및 기상자료가 필요하다.

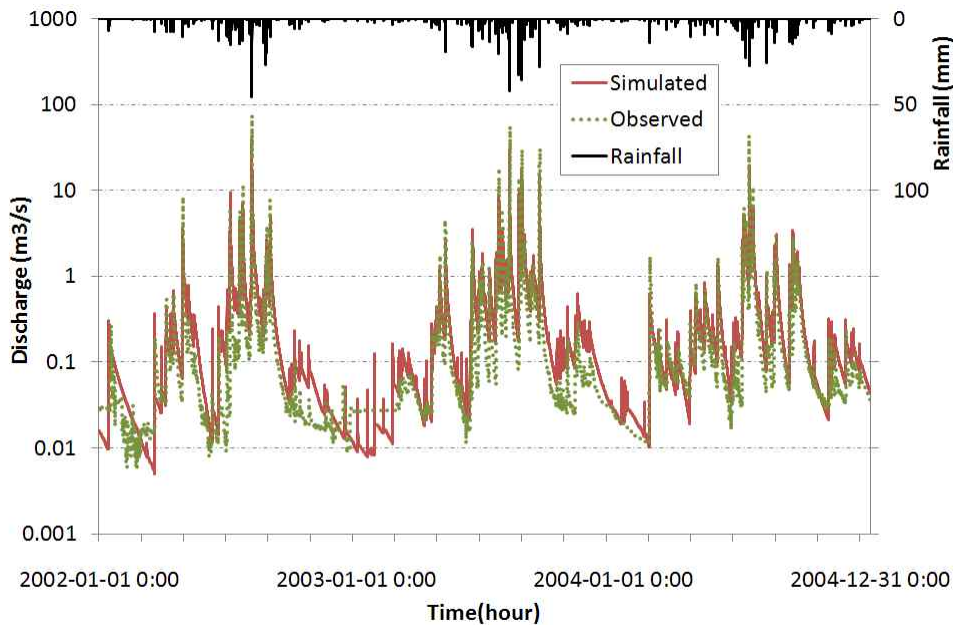
4.2 모의 조건

2001년 1월1일부터 2007년 12월 31일까지 1시간 간격으로 7년을 모의하였다. 이 중 2001년은 초기토양수분 등 초기조건의 영향을 고려하여 비교에서 제외하였으며,

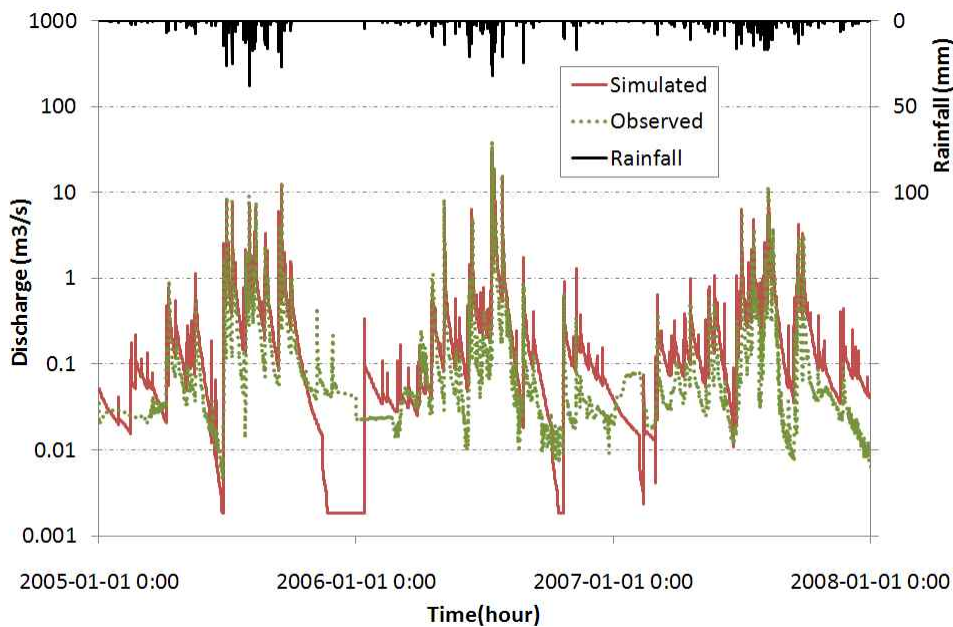
2002~2004년까지는 보정기간으로, 2005~2007년까지는 검정기간으로 설정하였다. 모의결과는 설마천 유역의 최하류 지점인 전적비교의 1시간 간격의 유량자료를 이용하여 비교하였다.

4.3 모의 결과

하천 유출 결과를 살펴보면 Fig. 13과 같다. 결과에서 나타나듯이 관측유량과 비슷한 양상으로 적절히 모의되



(a) Calibration (2002~2004)



(b) Validation (2005~2007)

Fig. 13. Observed and Simulated Streamflows in the Seolma-cheon Catchment

Table 2. Statistical Criteria for the Calibration and Validation Results

	Calibration (2002-2004)	Validation (2005-2007)
NSE	0.75	0.89
RMSE	0.77	0.31

NSE, Nash-Sutcliffe Efficiency; RMSE, Root Mean Square Error.

Table 3. Comparison of Annual Water Budget for the Calibration and Validation Results

			Calibration (2002~2004)	Validation (2005~2007)
Precipitation (mm)			1,604	1,285
Runoff	Total (mm)	Obs.	1,130	808
		Sim.	1,375	1,056
	Runoff ratio (%)	Obs.	70.4	62.9
		Sim.	85.7	82.2

있음을 알 수 있다. 다만, 보정 및 검정기간에서 비강우시 수문곡선의 감쇄부분이 다소 과대하게 모의되었는데 이는 소유역 구분을 통해 유역의 공간적 특성을 고려한다면 향상된 결과를 나타낼 것으로 판단된다. Nash-Sutcliffe 모형 효율(NSE) 및 평균제곱근오차(RMSE)를 비교한 결과 NSE가 보정기간(2002~2004)에 대해 0.75, 검정기간(2005~2007)에 대해 0.89를 나타냈으며, RMSE는 보정기간 0.77에서 검정기간 0.31로 적절한 해석 결과를 나타냈다.

또한, 연평균 물수지를 살펴보면 보정기간의 관측 및 모의 유출률은 70.4%, 85.7%였으며 검정기간에서는 62.9%, 82.2%로 관측에 비해 모의 유출률이 약 15~20% 가량 높게 나타났다. 이는 모형 보정시 목적함수로 연간 물수지를 활용하지 않았기 때문이며 매개변수의 추가보정을 통해 조정이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 도시 개발 지역 혹은 기존의 도시 유역에서 장기간에 걸친 물순환의 변화를 예측하고 물순환을 개선시키는 대안 시설의 효과를 사전에 평가하는 것을 목표로 유역 물순환 해석 모형인 CAT (Catchment hydrologic cycle Assessment Tool)을 개발하였고, 개발된 모형의 적용성 평가를 위하여 자연유역인 설마천 유역에 적용하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) CAT은 기존의 개념적 매개변수 기반의 집중형 수문모형과 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형의 장점을 최대한 집약하여, 도시유역 개발 전·후

의 장·단기적 물순환 변화특성을 정량적으로 평가하고 물순환 개선시설의 효과적인 설계를 지원하기 위한 물순환 해석 모형이다.

- 2) CAT에서의 물의 순환과정은 투수역과 불투수역으로 구분되며, 각 공간 단위별로 침투, 증발, 지하수 흐름 등의 모의가 가능하도록 하였다. 토양층 및 대수층을 각각 한 개의 층으로 모형화 하였고, 대수층으로부터의 지하수 취수를 고려하도록 하였다.
- 3) CAT의 물순환 해석모듈로는 증발산, 침투, 유역 유출, 지하수 유거, 하도추적 등이 있다. 증발산은 잠재 증발산량을 외부에서 계산하여 입력하거나, Penman-Monteith 방법을 선택할 수 있으며, 침투는 Rainfall Excess, Green & Ampt, Horton 방법 등이 제공된다. 또한, 인접 유역간의 지하수 이동을 고려할 수 있으며, 하도추적을 위해 Muskingum, Muskingum-Cunge, Kinematic wave 방법 등이 제공된다.
- 4) 특히, 도시개발 등 유역의 인위적 개발에 있어서 물순환의 변화를 최소화 하고자 물순환을 정량적으로 해석하고, 개선시설의 분산 배치에 따른 영향을 평가하는 장점이 있다. 개발된 모형은 노드와 링크로 연결되는 시스템으로 구성되었으며, 물순환 개선시설들의 선택 폭을 다양하게 제시하도록 하였고, 모형의 인터페이스는 사용자가 손쉽게 모형을 적용·관리하고, 여러 시나리오를 동시에 효과적으로 모의하여 분석할 수 있도록 설계되었다.
- 5) 개발된 CAT 모형을 자연유역인 설마천 유역에 적용하여 2001년부터 2007년까지 7년간 1시간 간격으

로 모의하였다. 유역 출구점인 전적비교의 관측유량과 비교한 결과 NSE가 보정기간(2002~2004)에 대해 0.750, 검정기간(2005~2007)에 대해 0.888을 나타냈으며, RMSE는 보정기간 0.765에서 검정기간 0.306으로 적절한 해석 결과를 나타냈다. 또한, 보정기간의 관측 및 모의 유출률은 70.4%, 85.7%였으며 검정기간에서는 62.9%, 82.2%로 관측에 비해 모의 유출률이 약 15~20% 가량 높게 나타났는데, 이는 모형 보정 시 목적함수로 연간 물수지를 활용하지 않았기 때문이며 매개변수의 추가보정을 통해 조정이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발된 CAT 모형을 사용하여 도시유역의 물순환 체계를 진단하고, 물순환 개선시설의 효과를 평가할 수 있게 됨으로써 향후 도시유역에 대한 물순환 정상화를 실현하기 위한 정책 수립에 기초자료를 제공하고, 설계 실무에 활용될 수 있게 되었다. 또한, 신도시개발, 지역혁신도시 개발 등의 대규모 토지이용변화가 예상되는 개발지역에 대한 물순환 평가 및 개선 기술을 제공함으로써 신도시 지역의 물순환 건전화를 위한 설계에 직접적으로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-6-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김덕우(2011). GLUEWIN을 이용한 MUSIC 모형 유출관련 매개변수의 불확실성 분석. 석사학위논문, 고려대학교, pp. 23-44.
- 김태철, 박승기, 안병기(1996). "한국 하천의 일 유출량 모형." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제5호, pp. 223-233.
- 김현준, 장철희, 노성진(2008). 도시유역 물순환 해석기술 지침서. 기술보고서(TR2008-05), 수자원의지속적확보 기술개발사업단. pp. 18-127.
- 노재경(1991). 토양수분저류에 의한 유역 일 유출량 모형. 박사학위논문, 서울대학교, pp. 17-29.
- 박기정, 김덕우, 정민재, 박정훈, 윤재영, 백경록(2010). "군자배수구역에 대한 Aquacycle과 MUSIC 모형의 적용성 분석." **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 1585-1588.
- 박승우(1993). "Tank 모형 셀프로그램을 이용한 중소하천의 일유출량 추정." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제26권, 제3호, pp. 47-61.
- 박준호, 유용구, 박영곤, 윤희택, 김종건, 박윤식, 전지홍, 임경재(2008). "SWMM을 이용한 춘천 거두1지구의 LID 개념 적용으로 인한 유출감소 특성 분석." **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, 제6호, pp. 805-815.
- 연지웅(2007). MUSIC 모형을 이용한 침투-저류시스템의 저감효과 연구. 석사학위논문, 홍익대학교, pp. 13-39
- 日本國土交通省河川局河川環境課 (2001). SHER モデル ユーザーズマニュアル(案), pp. 2-25.
- 日本土木研究所(2001), WEP モデル 解説書, pp. 2-25.
- 임장혁, 연지웅, 박성식, 송재우(2007). "MUSIC 모형의 매개변수에 관한 민감도 분석." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 236-240.
- 주명호(2009). 도시 소유역에서의 우수에 의한 오염부하 산정을 위한 자동 Monitoring System의 구축과 SWMM의 적용. 석사학위논문, 충남대학교, pp. 21-58.
- 최환규(2011). 도시유역 불투수면 저감기법 적용에 따른 강우-유출 및 수질 영향 분석. 석사학위논문, 충북대학교, pp. 82-93.
- 한국건설기술연구원(2007). 우수 저류 및 활용 시스템 적용. 2단계 연구보고서, 교육과학기술부, pp. 123-198.
- 한국건설기술연구원(2008). 건강한 물순환체계 구축을 위한 유역진단기법 개발. 요약보고서, 건기연 2008-039, pp. 97-101.
- 한국건설기술연구원(2009). 도시유역 물순환 해석모형 개발 및 적용. 2차년도 연구보고서, 교육과학기술부, pp. 34-89.
- 한상욱, 정중수(1976). "영산강의 장기유출량에 관한 고찰." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제18권, 제3호. pp. 4184-4194.
- 황성환, 김영란(2006). "물순환 모형을 이용한 불투수율과 기저유출량 관계 분석." **대한상하수도학회·한국물환경학회 2006공동 추계 학술발표회 논문집**, 한국물환경학회, pp. 126-133.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill
- Chu, S.T. (1978). "Infiltration during an Unsteady Rain." *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 461-466.
- Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology (CRCCH) (2005). MUSIC 3.0 User Guide. eWater

- Cooperative Centre, Canberra, pp. 154-199.
- Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology (CRCCH)(2011). Urban Developer 0.4.0 User Guide, eWater Cooperative Centre, Canberra, pp. 81-102.
- Green, W.H., and Ampt, G.A. (1911). "Studies on Soil Physics. Part I. The Flow of Air and Water through Soils." *Journal of Agricultural Sciences*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-24.
- Horton, R.E. (1933). "The role of infiltration in the hydrologic cycle." *American Geophysical Union, Transaction*, 14, pp. 446-460.
- Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (2009). STORM User Manual, pp. 147-187.
- Jia, Y. (1997). Interated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model. Ph.D. dissertation, University of Tokyo, Japan.
- Maidment, D.R. (1992). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc., pp. 127-174.
- Mein, R.G., and Larson, C.L. (1973). "Modeling Infiltration during a Steady Rain." *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 384-394.
- Ponce, V.M. (1988). *Engineering Hydrology-Principles and Practices*. Prentice Hall.
- Rossman, L.A. (2007). *Storm Water Management Model Version 5.0 User's Manual*, Report 05, No. 040, U.S. EPA, Cincinnati, OH., pp. 55-61.
- Smith, M., Allen, R.G., Periera, L.S., and Raes, D. (1998). *Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop requirements, Irrigation and Drainage Paper No. 56*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, pp. 17-64.
- Sugawara, M. (1967). "The flood forecasting by a series storage type model." *In Proceedings of the international symposium on floods and their computation*, Leningrad, USSR, pp. 1-6.
- U.S. Environmental Protection Agency (2009). *SUSTAIN (System for Urban Stormwater Treatment, and Analysis INtegratration) -A Framework for Placement of Best Management Practices in Urban Watersheds to Protect Water Quality*: Report 09, No. 095, U.S. EPA, Cincinnati, OH., pp. 14-24.

논문번호: 11-117	접수: 2011.10.24
수정일자: 2011.11.28/12.29	심사완료: 2011.12.29