



# 유역 물순환 건전화를 위한 기업



김 현 준 |

한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부  
수자원연구실 연구위원  
hjkim@kict.re.kr



장 철 희 |

한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부  
수자원연구실 연구위원  
chjang@kict.re.kr

물순환계는 치수, 각종 용수와 재생 가능한 에너지 원으로서의 이용 등 안전하고 쾌적하며 풍요로운 인간생활을 위하여 이용되고 있다. 그러나 도시로의 급격한 인구 및 산업의 집중과 도시지역의 팽창, 산업구조의 변화, 인구의 증가 및 고령화, 기상 이변, 유역의 무계획적인 개발 등의 이유로 물순환계가 영향을 받고 있다.

21세기의 지속가능한 발전을 위해서는 건전한 물순환계를 구축하는 것이 중요한 과제이다. 이를 위해서는 안전하고 쾌적한 생활 및 건전한 생산활동을 실현하고 환경의 보전에 도움이 되는 물의 기능을 확보하는 등 인간의 각 활동과 물순환계의 조화를 도모하는 것이 중요하다.

우리나라의 하천관리와 유역관리 주체는 다양하다. 하천관리만 하여도 국가하천과 지방하천, 소하천으로 관리 주체가 구분되어 있고, 유역의 70%를 차지하고 있는 산지 지역에 대한 관리는 지자체와 산림청 및 개인으로 나누어져 있다. 또한, 환경부는 수변보호구간을 설정하여 하천 인접 지역에 대한 수질관

## 1. 서론

물이 존재하는 방법의 가장 큰 특징은 순환하는 것이다. 인간은 그 순환 과정의 물과 행동을 같이 하고 있다. 인간 활동이 물순환에 변화를 가하고, 변화를 받는 물순환계가 인간이나 자연/생태계에 영향을 다시 미치므로, 그 대책이 필요하게 된다. 인간과 물순환계는 이러한 역동적인 상호작용 관계에 있다.

1) 1992년 브라질의 리우데자네이루에서 개최된 UN 환경개발회의(UNCED)에서 “환경과 개발에 관한 리우선언”을 채택하고「환경적으로 건전하고 지속가능한 개발(ESSD: Environmentally Sound and Sustainable Development)」을 실현하기 위한 27개의 행동원칙을 제시한 바 있다. 그중 제1원칙은 “인류는 자연과 조화를 이루면서 건강하고 생산적인 생활을 할 권리가 있다”는 것이며, 제17원칙에서 각 나라는 환경에 심각한 악영향을 초래할 가능성이 있으며 관한 국가당국의 의사결정을 필요로 하는 사업계획에 대하여 환경영향평가를 국가제도로서 실시할 것을 제안하고 있다(국내에서도 환경영향평가와 재해영향평가제도가 있음). 여기서, “지속가능한”이란 의미와 “건전한”이라는 의미를 되새겨 볼 필요가 있다. 지속가능한(sustainable)이란 미래 세대가 그들 스스로의 필요를 충족시킬 수 있도록 하는 능력을 저해하지 않으면서 현재 우리 세대의 필요를 충족시키는 의미이며, “건전한”이라는 의미는 인간의 영위와 환경을 위한 필요 사이에 적절한 균형을 갖는 것으로 해석할 수 있다. 즉, 건전한(건전한) 물순환계란 유역의 물순환의 과정에서 인간사회의 활동과 환경의 보전을 위한 물의 기능이 적절한 균형하에 확보되어 있는 상태를 의미한다.

리를 강화하고 있다. 이처럼 유역과 하천이 여러 기관과 조직에 의하여 구분되어 관리되고 있는 형편이어서 유역을 상류지역부터 하류지역까지 종합적으로 관리하기는 어려운 실정이다.

하천 연안지역의 토지이용이 고도화됨에 따라 '80년대 중반 이후, 홍수피해가 급격히 증가하고 있다. 과거에는 농경지 피해가 중심이었으나, 최근에는 홍수피해 잠재능이 높은 도시지역의 내수 침수가 중심이 되는 등 피해 양상이 바뀌게 되었으며, 특히 최근에는 공공시설에 대한 피해가 급격히 증가하였다. 치수 위주의 하천 정비는 제한된 토지에서 최대한의 사회·경제 활동을 보장하기 위하여 유역에서 발생한 홍수량을 신속히 하류로 배출하는데 주안점을 두고 지속되어 왔다. 그러나 홍수터가 줄어들고, 하천이 직강화되어 하류지역에서는 홍수가 커지는 부작용이 나타나고 있으며, 하천 환경과 생태계의 보전 등에 대한 국민들의 요구가 증대되어 새로운 하천관리기술의 도입이 절실히 필요하게 되었다.

따라서 유역을 살아있는 유기체로 보고 상류지역부터 하류지역까지 면(토지)과 선(하천)을 동시에 고려하고, 수량(홍수, 가뭄)과 환경(오염, 생태계 등)을 동시에 진단할 수 있는 기법의 개발이 필요한 시점이다.

이러한 새로운 유역 물 관리의 방향성 안에서, 선행적으로 몇몇 도시 하천 유역에서 물순환계 재생을 위한 종합 계획 작성이나 사업이 추진되고 있다. 종합 계획 작성 사업의 추진 과정에는 각종 행정 부처와 지역 주민 등을 포함한 다양한 사람들이 관여하고 있다. 이러한 서로 다른 배경을 가진 사람들이 공통의 인식을 가지기 위해서는, 물순환계의 실태와 다양한 대체안의 효과를 가시적으로 보이는 것이 매우 중요하다. 이러한 의사 결정 지원 도구로서, 모니터링과 모형화가 불가결하다.

수치 모형 모의에 대해서는, 일부 과민 반응이나

오해가 있다고 생각된다. 그 원인으로는 모형의 신뢰성이 일반인들에게는 이해되지 않는 것, 어떤 시기 컴퓨터가 만든 결과라고 해서 일종의 권위적으로 이용되어 온 것에 대한 반발 등을 생각할 수 있다. 대상이 되는 현상을 파악하기 위해서는, 먼저 관련 자료의 취득(모니터링)이 불가결하다. 그러나, 물순환계와 같이 자연적인 요소와 인공적인 요소가 복잡하게 얽혀 있는 시스템에 있어서는, 자료를 살펴보는 것만으로는 현상의 구조는 풀 수 없으며, 구성 요소의 일부가 변화된 경우의 영향을 평가하는 것이 곤란하다.

구성 요소 사이의 체계적인 관계를 짓는 것, 이것이 모형화이며, 모형은 대상의 구조를 명확히 하기 위한 수단이다. 이런 의미에서 모형은 현상의 이해에 없어서는 안되는 도구라고 말할 수 있다. 단, 모형을 개선하고, 그 신뢰성을 높이는 데는 자료와의 적합성이 불가결한 것을 새겨두지 않으면 안될 것이다.

현재 우리의 유역진단을 위한 기술 수준은 선진국에 비하여 열악한 실정이다. 그동안 홍수해석 위주의 연구와 기술개발로 인하여 유역의 물순환체계를 해석하려는 노력은 상대적으로 소홀하여 왔다. 수문계측도 홍수위와 홍수량 관측에 치중하였기 때문에 유역 물순환체계 해석에 절대적으로 필요한 평수위 이하의 유출 자료의 신뢰도는 매우 낮다.

최근 들어 우리나라에서도 유역의 물순환체계 해석을 위한 연구가 진행중이다. 교육과학기술부에서 주관하는 21세기 프론티어연구개발 사업의 일환인 “도시유역 물순환 해석 모형의 개발 및 적용”을 통하여 도시개발에 따른 물순환의 변화를 예측하고 대안시설에 대한 평가와 관련된 기술개발에 주력하고 있다.

본 고에서는 위와 같은 배경을 토대로 개발된 도시유역 물순환 해석 모형(Catchment hydrologic cycle Assessment Tool, CAT)에 대하여 간략히 소개하고자 한다.



## 2. 도시유역 물순환 해석모형 개발

도시 개발에 의해 우수의 불투수 지역 확대, 하천 부지의 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. 도시 개발이 수환경에 미치는 피해를 최소화하고 지속가능한 도시 환경을 구축하기 위해서는 도시개발의 영향을 평가하고 물순환 개선시설의 적절한 배치를 설계하기 위한 물순환 해석 모형이 필수적이다. 하지만, 개념적 매개변수를 사용하는 기존의 수문모형으로는 도시 개발로 인한 토지이용 변화 등의 유역 특성 변화를 적절히 모의하는데 한계가 있으며, 최근 활발히 연구되고 있는 분포형 수문모형은 입력자료 구축 및 모형 구동에 많은 시간과 노력이 필요하여 다양한 도시설계 대안을 평가하기에는 적절하지 못하다.

도시유역 물순환 해석 모형(Catchment hydrologic cycle Analysis Tool, 이하 CAT)은 이러한 배경을 토대로 개발된 물리적 매개변수 기반의 링크-노드 방식의 물순환 정량화 모형으로 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 본 모형은 사용자의 목적에 맞는 다양한 물순환 개선시설(침투시설, 저류지, 습지, 빗물저장시설, 리사이클 및 외부급수 등)의 구현 및 모의가 가능하도록 개발되었다. 여기서, 물순환 개선시설이란 빗물을 흡수하고 저류할 수 있는 도시녹지시설 혹은 구조물로서 도심 내의 불투수면을 저감시키고 유출수를

줄이면서 동시에 녹지를 확보하여 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.

## 3. 도시유역 물순환 해석 모형 개요

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. 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 링크-노드 형식으로 개발되었다. 모형의 인터페이스는 사용자가 손쉽게 모형을 적용·관리하고, 여러 시나리오를 동시에 효과적으로 모의하여 분석할 수 있도록 설계되었다. 모든 입력 출력 자료를 엑셀이나 텍스트 형식과 연동되도록 하여 프로젝트별 매개변수 관리가 용이하도록 하였다.

### 3.1 도시유역 물순환 해석모형의 구성

CAT의 수문해석모듈로 증발산, 침투, 유역 유출, 지하수 유거, 하도추적 등의 모듈이 개발되었다. 증발산은 잠재 증발산량을 외부에서 직접 입력하거나, Penman-Monteith 방법을 선택할 수 있으며, 침투는 토양의 수리전도도에 따른 연직방향 침투 및 사면

방향 흐름을 고려할 수 있다. 노드의 지하수 유거를 고려하여 기존 노드-링크 방식 모형의 장기 유출 해석 시 제한점을 보완하였으며, 하도추적을 위해 Muskingum, Muskingum-Cunge, Kinematic wave 방법 등의 해석법이 제공된다. 또한 논에서의 유출과정과 침투시설, 저류시설, 습지, 빗물이용시설 및 하천에서의 취수와 도수에 의한 물순환의 변화를 해석할 수 있도록 지원한다. 이상의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- ▶ 물리적 매개변수 기반의 링크-노드 방식 모형
- ▶ 개발 전·후의 장·단기적인 물순환 변화 특성을 정량적으로 평가
- ▶ 투수지역과 불투수지역을 구분한 유출 모의
- ▶ 토양층, 지하대수층에 따른 침투, 증발, 지하수 흐름해석 및 하도추적 모의
- ▶ 우리나라 논 특성을 반영한 논 유출 모의
- ▶ 물순환 개선시설의 설계 및 평가에 대한 다양한 정보의 제공
- ▶ 간단하고 실용적으로 쉽게 접근 가능
- ▶ 최소한의 자료와 노력으로 만족할 만한 결과 보장
- ▶ 대상지역에 대한 공간적 해석 가능
- ▶ 물리적 매개변수의 사용으로 도시개발에 따른

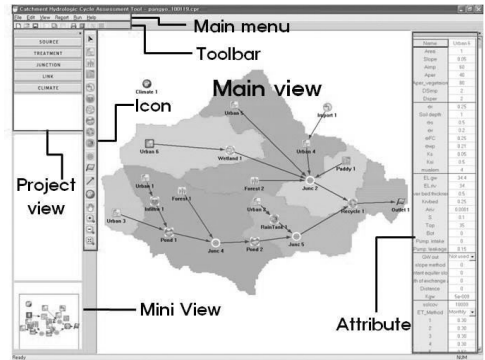


그림 1. 도시유역 물순환 해석 모형(CAT)의 구성

- ▶ 매개변수의 정량적 추정 가능
- ▶ 손쉬운 사용자 편의 시스템(GUI)
- ▶ 다양한 형태의 표와 그림으로 결과 제공

### 3.2 물순환 개선시설

사용자의 목적에 맞는 다양한 물순환 개선시설(침투시설, 저류지, 습지, 빗물저장시설, 리사이클 및 외부급수 등)의 구현 및 모의가 가능하도록 개발하였다.

침투시설은 계획침투량을 반영하며 토양으로의 침투량과 지하수로의 이동을 모의한다. 저류시설은 하도 내에 위치한 online 저류지와 하도 외에 위치한 offline 저류지로 구분하고 저류지 수면의 증발량과

표 1. 물순환 개선시설

개선시설명	기호(ICON)	기 능
Infiltro		침투시설로 계획침투량을 반영하여 토양속으로의 침투량과 지하수로의 이동을 계산한다.
Pond (online/offline)		유역내의 홍수량을 일시 저류시키는 저류지로서 하천내에 설치되는 online 저류지와 하천외에 설치되는 offline 저류지로 구성된다.
Wetland		유역내의 습지를 반영한다.
RainTank		빗물저장시설로서 불투수면으로부터 유입되는 빗물을 저류하여 활용한다.
Recycle		하천내에서 취수하여 필요한 지역으로 공급하는 시설을 반영한다.
Import		외부에서 유역내로 공급되는 수량을 반영한다.



취수량을 고려하며, 방류구를 통한 방류량을 반영하였다. offline 저류지의 경우는 하도 내의 흐름의 규모에 따라서 일정량을 넘는 경우만 offline 저류지로 유입될 수 있는 양을 산정하도록 하였으며 하류 하천으로의 방류를 반영하여 홍수 후에 저류지가 비워지도록 하였다. 유역 내의 습지는 식생과 수면에서의 증발산을 반영하였다. 습지의 저류능력을 넘는 양은 월류 되어 하류로 유출되며, 방류구를 통한 방류량을 반영하였다. 빗물저장시설의 경우는 초기우수와 같은 일정량 이하의 유입량과 시설용량을 초과하는 양은 방류하도록 하였고, 물 사용량을 반영하였다. 리사이클은 하천 내에서 취수하여 용수 이용 목적에 따라 필요지역으로 공급되는 것으로 하였으며, 하천유지용수의 목적으로 취수되어 상류 혹은 하류의 임의 지역으로 공급되는 것을 포함하였다. 또한, 유역외부로부터 광역으로 급수되는 공급량도 반영하도록 하였다.

#### 4. 맺음말

도시화로 인한 인구와 산업의 집중, 도시지역의 확대, 산업구조의 변화, 인구감소, 고령화 등의 진행, 근래의 기상변화 등을 배경으로 평상시 하천유량의 감소, 용출수의 고갈, 각종 배수에 의한 수질오염, 불침투면적의 확대에 의한 도시형 수해 등의 문제가 현격해지고 있다. 이들의 문제는 침투기능의 저하와 지표수와 지하수의 연속성의 저해 등이라는 물순환계의 건전성을 잃어가고 있는 것에 기인하여 유역전체를

고려한 물순환계의 건전화에의 조속한 대응이 요구되고 있다. 이러한 물순환 문제를 해결하기 위하여, 도시유역 물순환의 과거·현재·장래에 대한 상태를 파악하는 것은 매우 중요하다.

이처럼 자연적인 요소와 인공적인 요소가 복잡하게 조합되어있는 도시지역의 물순환의 상태를 파악하기 위해서는 유역의 자연특성과 사회특성 등에 관한 기초 자료의 수집이 선행되어야 하며, 다음으로 다양한 관측결과를 기초로 물 순환계의 구조, 인과관계를 알기 위해, 또 물순환계 구성요소의 일부가 변화한 경우 다른 부분에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 평가도구인 모형이 필요하다.

본 고에서는 이러한 배경을 토대로 개발된 도시유역 물순환 해석 모형(Catchment hydrologic cycle Assessment Tool, CAT)에 대하여 소개하였으며, 향후 물순환 건전화를 위한 개선시책의 효과를 평가하고, 그 결과를 시각적으로 나타냄으로써 정책의 입안에 관계하는 사람들에 있어 공통의 의사결정 도구가 되기를 기대한다(www.watercycle.re.kr).

#### 감사의 글

도시유역 물순환 해석모형(Catchment hydrologic cycle Assessment Tool)의 개발은 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의지속적확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 2-6-3)에 의해 수행되었습니다. ☺

#### 참고문헌

1. 교육과학기술부, 2005. 안양천 유역의 물 순환 건전화 기술 개발 연구보고서, 서울대학교.
2. 교육과학기술부, 2005. 우수저류 및 활용기술개발 연구보고서, 한국건설기술연구원.
3. 교육과학기술부, 2005. 지표수 수문성분 해석기술 개발 연구보고서, 한국건설기술연구원.

4. 교육과학기술부, 2009. 도시유역 물순환 해석모형 개발 및 적용 연구보고서, 한국건설기술연구원.
5. 교육과학기술부, 2008. 도시유역 물순환 해석기술 지침서, SWRRC, TR 2008-05.
6. 교육과학기술부, 2008. 도시유역 물순환계 정량화 방법, SWRRC, TR 2008-15.
7. 서울특별시, 2004. 서울시 물순환기본계획 연구.
8. 일본국토교통성, 2001. SHER User's Manual.
9. 한국건설기술연구원, 2008. 건강한 물순환체계 구축을 위한 유역진단기법 개발연구2008-039.
10. Arnold, J.G., Williams, J.R., Nicks, A.D., and Sammons, N.B., 1990, SWRRB: A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management, Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.
11. Beston, R. P., 1964. "What is watershed runoff?" Journal of Geophysical Research, 69, pp.1514-1551.
12. Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W., 1988, Applied hydrology. McGraw-Hill.
13. Chu, S.T., 1978. "Infiltration during an Unsteady Rain." Water Resources Research, Vol. 14, No. 3, pp. 461-466.
14. DeVries, J. J. and T. V. Hromadka, 1993. "Chapter 21 Computer Models for Surface Water," in Handbook of Hydrology (D.R. Maidment, Ed.), McGraw-Hill.
15. Hereth, S. and Kusiake, K., 1994. Simulation of Basin Scale Runoff Reduction by Infiltration Systems, Wat. Sci. Tech., Vol. 29, No.1-2, pp.267-276.
16. Horton, R. E., "The role of infiltration in the hydrologic cycle," American Geophysical Union, Transaction, 14, pp.446-460.
17. Mein, R. G., and Brown, B. M., 1978. "Sensitivity of Optimized Parameters in Watershed Models." Water Resources Research, Vol. 14, No. 2, pp. 299-303.
18. Nakamura, S., Saito, M. and Herath, S., 1998. Development and Applications of a Physically Based Distributed Catchment Model in Urban Area, 21世紀におけるアジアの都市工学國際學會.
19. Ponce, V. M., 1988. Engineering Hydrology - Principles and Practices. Prentice Hall.
20. Singh, V. P., 1995. Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications (USA).