

# 도시유역 물순환 해석 모형의 물순환 개선시설 모듈 개발

## Development of treatment facilities for improving water cycle in the water cycle analysis model for the urban catchment

장철희\*, 김현준\*\*, 노성진\*\*\*

Cheol Hee Jang, Hyeon Jun Kim, Seong Jin Noh

### 요 지

도시유역 물순환 해석 모형(Catchment hydrologic cycle Analysis Tool, CAT)은 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. 이 모형은 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 방식으로 개발되었다. 모형의 UI(User Interface)는 사용자가 손쉽게 모형을 적용/관리하고, 여러 시나리오를 동시에 효과적으로 모의하여 분석할 수 있도록 설계되었다. 또한, 모든 입/출력 자료를 엑셀이나 텍스트 형식과 연동되도록 하여 프로젝트별 매개변수 관리가 용이하도록 개발하였다.

특히 본 모형에서는 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 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. 먼저 침투 시설은 계획침투량을 반영하며 토양으로의 침투량과 지하수로의 이동을 모의한다. 저류시설은 하도 내에 위치한 online 저류지와 하도 외에 위치한 offline 저류지로 구분하고 저류지 수면의 증발량과 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 월류되어 하류로 유출되며, 방류구를 통한 방류량을 반영하였다. 빗물저장시설의 경우는 초기우수와 같은 일정량 이하의 유입량과 시설용량을 초과하는 양은 방류하도록 하였고, 물 사용량을 반영하였다. 또한, 본 모형에서는 하천 내에서 취수하여 유역으로 공급할 수 있도록 리사이클 처리노드를 계획하였다. 리사이클은 용수 이용 목적에 따라 필요지역으로 공급되는 것으로 하였으며, 하천유지용수의 목적으로 취수되어 상류 혹은 하류의 임의 지역으로 공급되는 것을 포함하였다. 또한, 유역외부에 광역으로 급수되는 공급량도 반영하도록 하였다.

**핵심용어** : 도시유역 물순환 해석 모형, CAT, 물순환 개선시설, 신도시 개발

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원 · E-mail : [chjang@kict.re.kr](mailto:chjang@kict.re.kr)  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 책임연구원 · E-mail : [hjkim@kict.re.kr](mailto:hjkim@kict.re.kr)  
\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원 · E-mail : [sjnoh@kict.re.kr](mailto:sjnoh@kict.re.kr)

## 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. 물순환계는 치수, 각종 용수와 재생가능한 에너지원으로서의 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. 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 토지 이용 변화나 하천·하수도 등의 정비상태에 따라 하천의 유량이나 지하수위를 시작으로 유역의 수환경이 크게 변화한다. 이처럼 자연적인 요소와 인공적인 요소가 복잡하게 조합되어있는 도시지역의 물 순환을 파악하기 위해서는 모니터링과 모델링이 필수 불가결하다. 우선 물 순환 경로에서 물은 어떻게 이동하는가의 물 순환 실태를 파악하기 위해서 모니터링은 가장 기본적인면서도 확실한 수단이다. 다음으로 다양한 관측결과를 기초로 물 순환계의 구조, 인과관계를 알기 위해, 또 물 순환계 구성요소의 일부가 변화한 경우 다른 부분에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 모델링이 필요하다. 또한 이 같은 해석 모델을 이용하여 여러 가지 물 순환 개선 정책의 효과를 평가하고 그 결과를 시각적으로 나타내는 것이 가능하다면 정책의 입안에 관계하는 사람들에 있어 공통의 의사결정 지원 도구가 될 것이다.

본 연구를 통하여 도시유역의 물순환 체계에 대한 진단 기법을 개발·적용하고 대안에 따른 평가를 가능하게 함으로써 향후 도시유역에 대한 물순환 정상화를 실현하기 위한 정책의 수립에 기초 자료를 제공할 수 있다. 또한, 신도시개발, 지역혁신도시 개발, 행정중심복합도시 개발 등의 대규모 토지이용변화가 예상되는 개발지역에 대한 물순환 평가 및 개선 기술을 제공함으로써 신도시 지역의 물순환 건전화화를 위한 설계에 직접적으로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 도시유역 물순환 해석모형(Catchment hydrologic cycle Assessment Tool, CAT)

도시유역 물순환 해석 모형(Catchment hydrologic cycle Analysis Tool, CAT)은 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. 이 모형은 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 방식으로 개발되었다. 모형의 UI(User Interface)는 사용자가 손쉽게 모형을 적용/관리하고, 여러 시나리오를 동시에 효과적으로 모의하여 분석할 수 있도록 설계되었다. 또한, 모든 입/출력 자료를 엑셀이나 텍스트 형식과 연동되도록 하여 프로젝트별 매개변수 관리가 용이하도록 개발하였다.

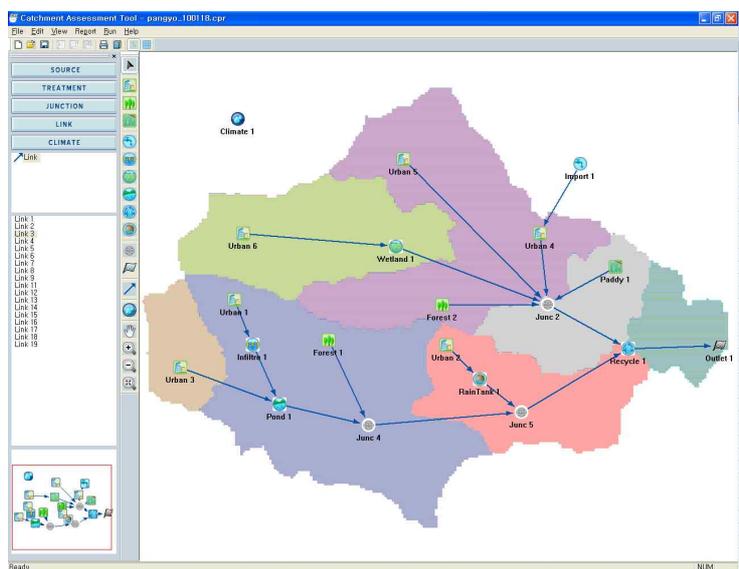


그림 1. 도시유역 물순환 해석 모형(CAT)의 기본 화면

### 3. 물순환 개선시설 모듈 개발

도시유역 물순환 해석 모형에서는 특히 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 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.

표 1. 물순환 개선시설

처리설비명	기호(ICON)	기 능
Infiltro		침투 트렌치로 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		빗물저장시설로써 불투수면으로부터 유입되는 빗물을 저류하여 활용한다.
Recycle		하천내에서 취수하여 필요한 지역으로 공급하는 시설을 반영한다.
Import		외부에서 유역내로 공급되는 수량을 반영한다.

#### 3.1 침투시설

빗물침투시설(침투통, 침투 트렌치 등)은 모두 침투 트렌치의 면적으로 환산하여 모델링 한다. 미리 설정한 집수 면적으로부터의 유출량을 침투시설로 유입시킨 후 계획침투량을 침투시키도록 한다. 침투 트렌치내의 연속식은 다음 식 1-18과 같다.

$$\frac{dS_t}{dt} = Q_t - Q_{inf} - Q_{tovf} \quad (\text{식 1-18})$$

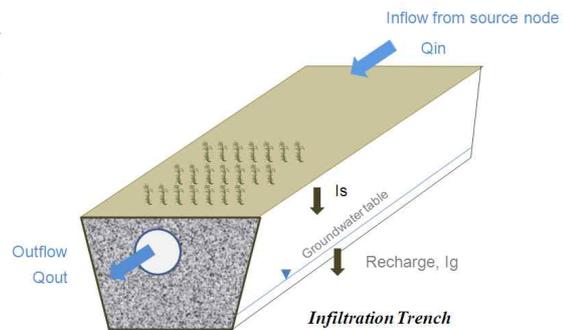


그림 2. 침투 트렌치

- 여기에서  $S_t$  : 침투 트렌치내 저류량 ( $m^3$ )  
 $Q_t$  : 침투 트렌치의 유입량 ( $m^3/s$ )  
 $Q_{inf}$  : 침투 트렌치로부터 피압대수층의 함양량(계획능력치) ( $m^3/day$ )  
 $Q_{tovf}$  : 침투 트렌치로부터의 월류량( $Q_t > Q_{inf}$  일 때  $Q_{tovf} = Q_t - Q_{inf}$ ) ( $m^3/s$ )

### 3.2 저류시설

저류시설은 하도내에 위치한 online 저류지와 하도외에 위치하는 offline 저류지로 구분된다. 저수지 수면의 증발량과 취수량을 고려하며, 방류구를 통한 방류량을 반영한다. 지배방정식은 다음과 같다.

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

(식 1-19)

- 여기에서  $S_s$  : 저류시설 저류량 (m<sup>3</sup>)
- $Q_s$  : 저류시설 유입량 (m<sup>3</sup>/s)
- $Q_{dis}$  : 저류시설 유출량 (m<sup>3</sup>/s)
- $Q_{sovf}$  : 저류시설로부터의 월류량 (m<sup>3</sup>/s)
- $R$  : 저류지 수면으로의 강우량 (mm)
- $E$  : 저류지 수면으로부터의 증발량 (mm)

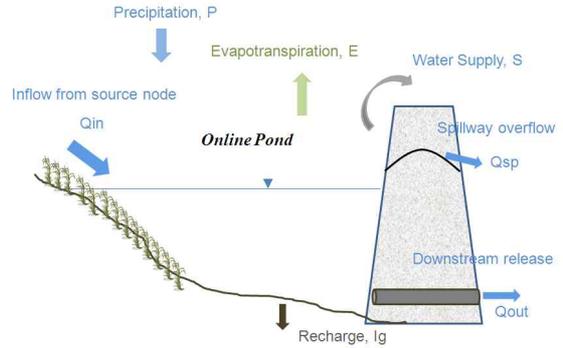


그림 3. online 저류지

offline 저류지의 경우는 하도내의 흐름의 규모에 따라서 일정량을 넘는 경우만 offline 저류지로 유입될 수 있는 양을 산정하도록 하였으며, 저류지에서 하류 하천으로의 방류를 반영하여 홍수후에 저류지가 비워지도록 하였다.

$$Q_{s\_off} = \begin{cases} (Q_{inf} - Q_{off\_max}) \times Q_{off\_ratio} & (Q_{inf} > Q_{off\_max}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

(식 1-20)

$$Q_{dn\_off} = Q_{inf} - Q_{s\_off}$$

- 여기에서  $Q_{s\_off}$  : offline 저류지 유입량 (m<sup>3</sup>/s)
- $Q_{inf}$  : 본류 유입 유량 (m<sup>3</sup>/s)
- $Q_{off\_max}$  : offline 저류지 유입량 임계치 (m<sup>3</sup>/s)
- $Q_{off\_ratio}$  : offline 저류지 유입량의 본류유량 비율 (0~1.0)
- $Q_{dn\_off}$  : offline 저류지로 유입되지 않는 본류유량 (m<sup>3</sup>/s)

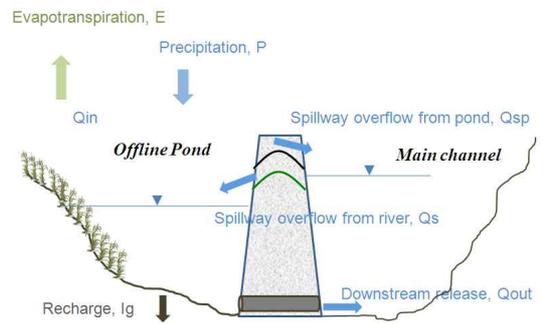


그림 4. offline 저류지

### 3.3 습지

유역내의 습지는 식생과 수면에서의 증발산을 반영한다. 습지의 저류 능력을 넘는 양은 모두 월류되어 하류로 유출되는 것으로 하였다. 또한, 습지에서 하류로 일정기준에 의해 방류가 될 수 있도록 하였다. 습지의 지배방정식은 online 저류지의 식과 거의 유사하다.

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

(식 1-21)

- 여기에서  $S_w$  : 습지 저류량 (m<sup>3</sup>)
- $Q_w$  : 습지 유입량 (m<sup>3</sup>/s)
- $Q_{wdis}$  : 습지 유출량 (m<sup>3</sup>/s)
- $Q_{wovf}$  : 습지로부터의 월류량 (m<sup>3</sup>/s)
- $R$  : 습지 수면으로의 강우량 (mm)
- $E$  : 습지 수면으로부터의 증발량 (mm)

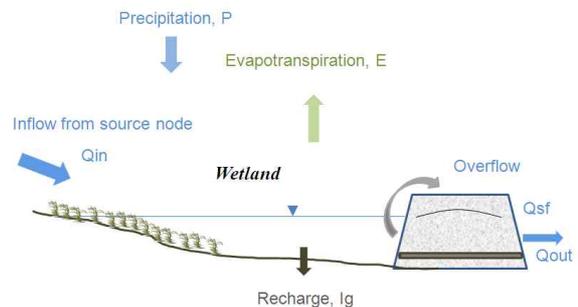


그림 5. 습지

### 3.4 빗물저장시설

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

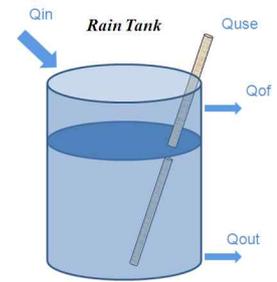


그림 6.  
빗물저장시설

### 3.5 리사이클 및 외부급수

본 모형에서는 하천 내에서 취수하여 유역으로 공급할 수 있도록 리사이클 처리노드를 계획하였다. 리사이클은 용수 이용 목적에 따라 필요지역으로 공급되는 것으로 하였으며, 하천유지용수의 목적으로 취수되어 상류 혹은 하류의 임의 지역으로 공급되는 것을 포함하였다. 또한, 유역외부에 광역으로 급수되는 공급량도 반영하도록 하였다.

## 3. 요약

본 연구에서는 도시유역 개발 전/후의 장/단기적 물순환 변화특성을 정량적으로 평가하고 물순환 개선시설의 효과적인 설계를 지원하기 위한 도시유역 물순환 해석 모형(Catchment hydrologic cycle Analysis Tool, CAT)을 개발하였다. 특히, 사용자의 목적에 맞는 다양한 물순환 개선시설(침투시설, 저류지, 습지, 빗물저장시설, 리사이클 및 외부급수 등)의 구현 및 모의가 가능하도록 개발하였다.

물순환 개선 시설 중 침투시설은 계획침투량을 반영하며 토양으로의 침투량과 지하수로의 이동을 모의한다. 또한, 저류시설은 하도 내에 위치한 online 저류지와 하도 외에 위치한 offline 저류지로 구분하고 저류지 수면의 증발량과 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 월류되어 하류로 유출되며, 방류구를 통한 방류량을 반영하였다. 빗물저장시설의 경우는 초기우수와 같은 일정량 이하의 유입량과 시설용량을 초과하는 양은 방류하도록 하였고, 물 사용량을 반영하였다. 또한, 본 모형에서는 하천 내에서 취수하여 유역으로 공급할 수 있도록 리사이클 처리노드를 계획하였다. 리사이클은 용수 이용 목적에 따라 필요지역으로 공급되는 것으로 하였으며, 하천유지용수의 목적으로 취수되어 상류 혹은 하류의 임의 지역으로 공급되는 것을 포함하였다. 또한, 유역외부에 광역으로 급수되는 공급량도 반영하도록 하였다.

## 감 사 의 글

본 연구는 수자원의 지속적 확보기술개발사업의 세부과제인 ‘도시유역 물순환 해석모형의 개발 및 적용(과제번호 : 2-6-3)’의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 일본국토교통성, SHER Model User's Manual, 2001.7.
2. 한국건설기술연구원, 건강한 유역진단체계 구축을 위한 유역진단기법 개발 연구(5차년도). 2007. 12.
3. S. Hereth and K. Kusiake, Simulation of Basin Scale Runoff Reduction by Infiltration Systems, Wat. Sci. Tech., Vol. 29, No.1-2, pp.267-276, 1994.
4. S. Nakamura, M. Saito, S. Herath, 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, 1998. 11.
5. 土木研究所, WEP 모델 解説書, 2002. 10.