

# 도시유역 물순환 해석 기술지침 개발

Development of technical guidelines for hydrologic cycle in urban catchment

김현준\*, 장철희\*\*, 노성진\*\*\*, 조한범\*\*\*\*

Hyeon Jun Kim, Cheol Hee Jang, Seong Jin Noh, Han Bum Cho

## 요    지

도시유역에서의 장기간에 대한 물순환 해석 기술은 도시하천의 복원 및 건천화 방지 사업의 점증적인 요구에 따라 필수적으로 확보하여야 하는 기술이지만, 관련 연구와 실무에서의 이해도는 미진하다. 따라서, 사업의 계획과 실무 설계를 위하여 도시유역의 물순환에 대한 이해와 기술을 지원할 수 있는 체계적인 지침이 필요하다.

외국의 사례를 살펴보면 일본의 경우 1995년 건설성의 주요 정책으로 “도시에서 적정한 물순환계 재생에의 노력”을 추진하였으며, “도시의 물순환 재생 구상 책정 매뉴얼”을 작성하여 사례 연구로 6개 유역을 대상으로 검토하였고, 2000년에는 “도시유역 물순환계의 정량화 방안”을 우수저류침투기술협회에서 주관하여 물순환계 재생구상 또는 물순환계 마스터플랜을 수립함에 있어서 필요로 하는 물순환계의 해석적인 평가방법의 해설서를 발간하였다. 호주의 경우는 1999년부터 WSUD(Water Sensitive Urban Design)란 개념을 도입하여, 정부 및 각 지방별로 프로그램을 진행하고 있으며, 지침서와 기술지도서를 작성하여 교육을 하고 실무에 활용하고 있고, 사례 연구와 학술회의를 통하여 기술 교류를 활발히 하고 있다.

자연적인 요소와 인공적인 요소가 복잡하게 조합되어있는 도시지역의 물순환의 상태를 파악하기 위해서는 유역의 자연특성과 사회특성 등에 관한 기초 자료의 수집이 선행되어야 하며, 다양한 관측결과를 기초로 물 순환계의 구조, 인과관계를 알기 위해, 또 물순환계 구성요소의 일부가 변화한 경우 다른 부분에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 모델링이 필요하다. 또한 이 같은 해석 모형을 이용하여 여러 가지 물순환 개선 정책의 효과를 평가하고 그 결과를 시각적으로 나타내는 것이 가능하다면 정책의 입안에 관계하는 사람들에 있어 공통의 의사결정 지원 도구가 될 것이다.

따라서, 본 연구에서는 도시유역의 물순환 해석을 위한 일련의 과정, 즉 자료의 조사 및 취득에서부터 물순환 해석 모형을 이용한 정량적 현황파악, 물순환 개선 기법 및 평가를 수행함에 있어 주요 착안점 및 실무에서의 기술적 가이드를 제공하고자 하였으며, 보다 세밀한 도시유역의 물순환 해석을 위하여 우리나라와 일본에서 적용이 활발한 물리적 기반의 분포형 모형(WEP, SHER, SWMM)의 적용사례를 통하여 국내 도시하천의 물순환 해석에 활용함에 있어서의 실질적인 적용절차 등을 제시하고자 하였다.

핵심용어 : 기술지침, 도시유역, 물순환 해석, 분포형 모형, WEP, SHER, SWMM

## 1. 서 론

물순환계는 치수, 각종 용수와 재생가능한 에너지원으로서의 이용 등, 안전하고 깨끗하며 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 있

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : [hjkim@kict.re.kr](mailto:hjkim@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : [cjang@kict.re.kr](mailto:cjang@kict.re.kr)

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

\*\*\*\*정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : [hbcho@kict.re.kr](mailto:hbcho@kict.re.kr)

다. 도시화가 물순환계에 끼친 영향을 요약하면 ①도시지역의 확대에 따른 홍수형태의 변화와 홍수피해의 증가, ②평시 하천유량의 감소, ③수질오염과 새로운 수질문제의 발생, ④생태계의 변화, ⑤도시기후의 변화, ⑥감수 피해요소의 증가, ⑦방재대책상의 물부족 등을 꼽을 수 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 토지이용 변화나 하천·하수도 등의 정비상태에 따라 하천의 유량이나 지하수위를 시작으로 유역의 수환경이 크게 변화한다.

도시유역의 물순환 해석은 물 순환성분 중 왜곡이 있거나 순환구조의 변동이 이루어지는 대상에 대해서 이를 정상적인 상태로 되돌리기 위하여 또는 수정된 물순환구조를 유지하기 위해서 이루어진다. 다시 말해서 특별한 목적을 가질 때 문제를 해결하기 위해서 물순환의 해석이 이루어지기 때문에 주어진 목적이 명확해야 하며 다른 형태로 그 해석방향을 미리 결정하기는 어렵다. 그러나 도시지역은 앞서 고찰한바 있듯이 인구가 집중되어 있고, 이로서 집중화된 대량의 용수가 필요하며 지반이 불투수층으로 만들어져 있음으로서 자연적인 물 순환구조와는 완전히 다른 구조를 가지고 있으며 이로 인하여 물순환 구조는 왜곡되어 있다. 따라서 이러한 왜곡된 물순환 구조를 전제로 도시유역 물순환의 과거·현재·장래에 대한 상태를 파악하는 것은 매우 중요하다(김남원, 2003).

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 물순환 구성요소의 일부가 변화한 경우 다른 부분에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 모델링이 필요하다. 또한 이 같은 해석 모형을 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.

이와 같이 도시유역의 물순환 해석을 위한 과정에서 선행되는 사항은 물순환의 현황 파악으로 먼저, 유역의 개요(지형·지질, 도시화의 동향)를 조사하고, 물순환과 관련된 사항(강수량, 유량, 수질, 지하수, 물의 이용과 공급, 하천, 하수도)등을 조사한다. 다음은 물순환의 문제점을 도출하기 위하여 물순환 해석 모형을 사용하여 현재의 상황과 향후의 물순환계의 변화를 추정한다.

따라서, 본 연구에서는 도시유역의 물순환 해석을 위한 일련의 과정, 즉 자료의 조사 및 취득에서부터 물순환 해석 모형을 이용한 정량적 현황파악, 물순환 개선 기법 및 평가를 수행함에 있어 주요 착안점 및 실무에서의 기술적 가이드를 제공하고자 하였으며, 보다 세밀한 도시유역의 물순환 해석을 위하여 우리나라와 일본에서 적용이 활발한 물리적 기반의 분포형 모형(WEP, SHER, SWMM)의 적용사례를 통하여 국내 도시하천의 물순환 해석에 활용함에 있어서의 실질적인 적용절차 등을 제시하였다.

도시유역 물순환 해석 기법과 적용 중 안양천 유역에 대한 SWMM 모형의 적용은 과기부 프론티어 연구과제인 ‘안양천 유역의 물순환 전문화 기술 개발’의 연구 결과의 일부이다. 서울 중랑천 유역에 대한 SHER 모형의 적용은 서울시정개발연구원의 ‘서울시 물순환기본계획 연구’ 과제의 성과이다.

도시유역 물순환 개선 기법으로 제시된 침투시설과 저류시설은 과기부 프론티어 연구 과제 중 ‘우수저류 활용기술 개발’ 연구의 성과를 활용하였다.

## 2. 도시유역 물순환 해석 지침 개발

### 2.1 기초 자료의 취득 및 정리

도시유역 물순환계의 과거·현재·장래에 대한 상태파악을 수행하기 위한 기초 조사로서는 유역의 자연특성과 사회특성 등에 관한 기초 자료 수집이 무엇보다 중요하다. 기초 자료는 수문·기상정보, 수리지질 특성 등의 「자연특성」과 함께, 토지이용의 상황, 물이용의 동향, 상하수도와 하천 등의 정비 상황, 지역의 물문화 등의 「사회특성」에 관하여 수집한다. 이들의 기초 데이터는 물순환계의 변천을 파악하기 위하여 최신의 상황 뿐만 아니라 과거로 거슬러 수집하는 것도 중요하다. 또한, 물순환계의 장래상을 검토하기 위해서는 인구, 토지이용, 물이용 등에 관한 장래의 구조도 파악해 둘 필요가 있다.

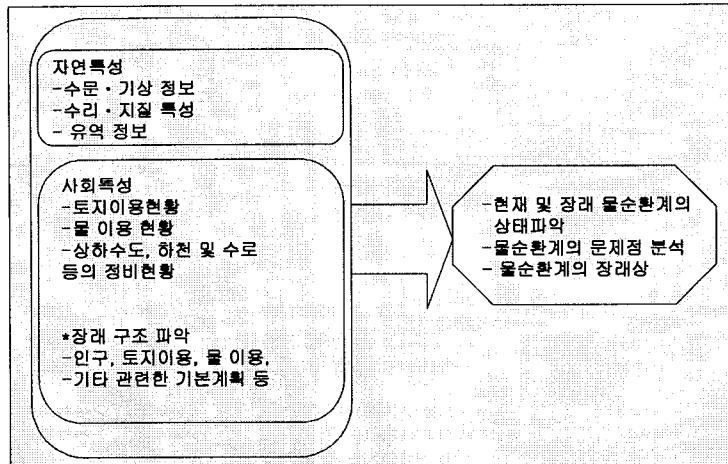


그림 1. 기초 자료의 개요

## 2.2 도시유역 물순환 해석 기법

도시유역의 물순환계는 강우가 지표에 도달한 후 바로 수로와 하천에 유출하는 것과 지하에 침투하여 서서히 하천에 유출하는 자연 경로와, 상수도 등에 의해 공급된 물이 이용된 후에 하수도에 배수되거나 혹은 강우처럼 하수도를 통해 하천 등에 배수되는 것과 같은 인공적 경로에 의해 형성되고 있다. 자연계와 인공계의 물순환 경로는 복잡하게 얹혀있다. 그 과정에서 흐르는 수량과 수질이 상호 영향을 미치면서 다양한 물문제를 발생하고 있다.

자연의 물순환계에 있어 삼림에 내린 비의 많은 부분은 수목과 토양에 일시 저류되어 일부는 증발산되어 대기로 돌아가고, 일부는 지하에 침투하여 지하수가 되어 서서히 하천에 유출됨으로서 유량을 평준화한다. 그리고 이 과정에서 토양의 수질정화작용에 의해 수질이 개선된다. 농지에서는 논에서의 저류, 침투 기능과 밭의 보수기능에 의해 흥수의 유출방지, 경감하는 역할이 있음과 동시에 지하수 함양에도 기여하고 있다. 또 하천변의 논에서는 하천으로부터의 범람수와 하천에 유출하지 못하는 내수범람을 일시적으로 저류하는 유수기능을 하고 있다. 유역으로부터 물이 모이는 하천과 호소는 인간이 물을 이용하거나 친수공간으로 하는 외에 수생생물의 귀중한 생식장이다. 또 하천에서는 유하하는 과정에서 수질을 정화하거나, 호소에서는 저류효과에 의해 흥수조절이 이루어진다. 한편 시가지에서는 도로나 건물 등에 의해 지표면이 폐복되어 본래 지표가 갖는 보수, 침투, 증발산 기능을 잃고 있다.

인공의 물순환계는 하천 등의 자연의 물순환계로부터 분기하여 다시 자연의 물순환계에 합류하는 인위적 시스템이다. 구체적으로는 상수도, 공업용수도, 하수도, 농업용수로 등의 네트워크에 의해 구성되고 물이용의 말단인 가정, 공장, 농지 등도 이들 시스템의 일부를 구성하고 있다. 인공계의 물순환은 자연의 물순환계에 수량과 수질 양면에 있어 영향을 미친다. 상수도와 공업용 수도는 하천, 호소, 지하수를 수원으로 하고 정수장에서 정화된 물은 가정, 사업소, 공장 등에 급수된다. 이용되어 오염된 물은 하수처리장에서 정화되어 공공용 수역에 배수된다. 이 급배수 시스템은 물의 정화와 오염을 인공적으로 반복함과 동시에 취수지점과 배수지점이 다름에 의해 하천유량 등에 영향을 미치는 경우도 있다. 또 하수도는 빗물을 안전하게 배제하는 역할도 갖고 있다. 농업용수는 상수도와 공업용수도와 함께 하천, 호소, 지하수를 수원으로 하여 농지 등에 배수되어 영농활동을 통해 오염과 토양침투에 의해 정화를 거친 후 그 대부분이 하천에 복원되고 또는 지하에 침투하는데 취수지점과 배수지점이 다름에 의해 하천유량 등에 영향을 미치는 경우도 있다.

도시유역 물순환 해석지침(안)에서는 이러한 문제점을 내포하고 있는 도시유역 내의 물순환계 상태를 파악하기 위하여 과제를 명확히 하는 지표와 물순환계를 통해 나타나는 평상시의 수량·수질·우천 시의 유출 등이라는 과거, 현재, 장래의 상태를 파악하는 방법을 중심으로 설명하고자 하였다.

### 2.3 도시유역 물순환 개선 기법

과거 도시지역에 발생한 우수의 처리방안은 일반적으로 가능한 빨리 해당지역 내에서 배수처리 하는데 그 목적을 두고 있었다. 그러나 신속하게 배수처리된 우수는 실제로는 하류부 지역에 그대로 유하되어 하류부 침수피해에 많은 영향을 주었으며, 경우에 따라서는 상하류 자치단체의 분쟁의 요소가 되기도 하였다.

특히 개발사업의 규모에 따라 하류부 하천에 부하되는 유출증가량이 계획홍수위에 미치는 영향을 분석한 연구결과를 살펴보면 개발사업 규모에 따라 증가하는 유출총량은 도시지역의 경우 1ha 당 110 ~ 133m<sup>3</sup>으로 분석되었고(심재현, 1994), 1.8km<sup>2</sup>의 사업으로 인해 증가하는 첨두유량이 61m<sup>3</sup>/s 증가되고, 전국 주요 지방 및 준용하천의 수위가 대부분 2m 정도 상승하는 등 개발사업에 의해 하류부에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타났다(심재현, 1996).

따라서 이러한 우수의 집중적인 유출을 억제하고 보수(保水)와 저류기능을 강화하여, 도시화로 인한 홍수 증가, 수원함양기능 저하, 수자원환경의 악화 등을 억제하는 기술을 추진하는 구체적인 시설들을 우수유출 저감시설이라 한다. 이러한 시설들은 우수를 일시적으로 저류시켜 첨두유출을 줄이는 저류형과 지표면을 통해 저하로 침투시키는 침투형으로 구분된다(김갑수, 1998).

침투형 시설물은 기존의 침투가능 지역 즉, 정원, 공원, 녹지 등을 이용하여 침투율을 증진시키는 방법과 보도, 주차장 등 기존의 불투수면에 대해 지속적으로 침투시키기 위한 구조개선과 표면을 투수성 재료로 포장하여 침투가 가능하도록 하는 방법들이 있다. 또한 우수관거로 유입된 빗물이 수로를 따라 흐를 때, 저하로 최대한 침투할 수 있도록 유도하는 침투트렌치, 침투축구, 침투통 등의 시설물이 있다(서울특별시, 2000). 저류시설은 빗물이 떨어지는 지점에서 소규모 단위로 처리하는 지역내 저류(on-site)와 유역내 분합된 일정 소유역의 출구나 유역출구에 유수지, 저류지 등을 설치하여 유출수를 저장하는 지역외 저류(off-site)로 세분된다. 지역내 저류시설로는 공원, 학교운동장, 광장과 같은 공공시설에 저류시설을 설치하는 경우와 주택단지의 경우 건물과 건물사이, 주차장 등에 저류하는 경우로 나누어 고려할 수 있으며, 단독주택의 경우에도 지상화단이나 우수관거로 유입되기 이전에 소규모 저류효과를 나타낼 수 있는 시설을 설치할 수 있다. 또한 이런 시설물들은 저류효과뿐만 아니라 지하로의 침투도 함께 유도하는 방향으로 발전되고 있다.

미국이나 유럽과 같이 땅이 넓은 지역에서는 유수지, 저류지와 같은 지역외 저류시설이 많이 발달되어 있으며, 일본의 경우에는 지역외 저류시설도 함께 활용하지만 단지의 토지가 고가이므로 침투에 관한 시설물과 지역내 저류시설을 최대한 활용하고 있다(소방방재청, 2005)

위에서 언급한 우수유출 저감시설은 개발하여 활용하고 있는 나라마다 지역적, 사회적 배경으로 인하여 다소 차이가 있다. 미국이나 유럽은 홍수량 조절은 위해 저류형 시설에 해당하는 유수지, 저류지가 많으며, 유수지에 저장된 빗물도 저수지 바닥과 저수지 제방을 통해 최대한 저하로 침투하도록 유도하고 있다. 또한 도시유역의 초기 우수유출수에서 문제가 되는 오염물질을 제거하기 위하여 유수지와 저류지내에 수생식물을 식생하여 수질문제를 해결하고 있다. 일본의 경우 미국이나 유럽에서 유수지나 저류지의 기능을 담당하는 시설을 방재조절지 혹은 방재조정지라는 이름으로 부르고 있으며, 수질개선 뿐만 아니라 도시유역과 수변공간을 갖고 있는 이런 시설물을 생물이 서식할 수 있는 공간으로 개발하여 시민들의 휴식공간으로 활용하고 있다(서울특별시, 2000)

### 2.4 도시유역 물순환 해석 적용사례

건전한 물순환계를 구축하기 위해 물순환계 회복을 구상하거나 물순환계 종합계획을 수립할 때에 대상 지역의 물순환계에 관하여 과거 및 현재의 상태, 장래예측, 각종 대책의 효과를 정량적으로 파악하여야 한다. 이를 위해서는 인구, 토지이용 등 도시화의 상황, 지형·지질, 지하수위, 강우량, 상하수도에 의한 총배출량, 하천수·지하수의 수량 등 기본적인 자료가 필요하다. 특히 강우량, 하천유출량, 지하수위 등은 지속적으로 관측하여 물순환계의 실태를 정확하게 이해하는 것이 중요하다. 그러나 도시화된 지역에서 지하수위나 하천 유출량 등의 실측자료가 없는 경우가 많으며, 또한 장래예측이나 물순환 회복사업의 효과는 계획단계에서 예측하는 것이 거의 불가능하다. 이와 같이 실측자료를 얻을 수 없는 상황을 보충하고 실태를 보다 정확하게 파악하기 위해서는 물순환계의 각 기구를 모형화하고 해석적인 모의를 수행하는 것이 필요하다. 이러한 물순

환경의 정확한 실태파악 과정에 의하여 물순환 회복을 위한 목표를 설정하고 사업을 추진하게 된다(서울특별시, 2004).

그러므로 본 절에서는 도시유역의 물순환계를 전체적으로 파악하기 위하여 하천유역단위로 물수지분석을 실시한 사례를 조사하였다. 이를 위하여 도시지역의 물순환 해석을 위해 우리나라와 일본에서 적용이 활발한 물리적 기반의 분포형 모형인 WEP 모형과 액셀기반의 간편 모형인 SHER 모형, 도시 우수관거 설계에 많은 적용사례가 있는 SWMM 모형 등의 적용사례를 통하여 국내 도시하천의 물순환 해석에 활용하고자 하였다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 수자원의 지속적 확보기술개발사업의 세부과제인 '청계천 복원공사 모니터링 및 물순환 해석기술 적용(2006-0117-1-2)'의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 국립방재연구소, 우수유출저감시설 설치방법 연구(종합보고서), 2005.12.
2. 과학기술부, 안양천 유역의 물 순환 건전화 기술 개발 연구보고서, 서울대학교, 2005.
3. 과학기술부, 우수저류 및 활용기술개발 연구보고서, 한국건설기술연구원, 2005.
4. 김갑수, 김영란, 우수유출저감시설 기준연구, 서울시정개발연구원, 1999.
5. 서울특별시, 서울시 물순환기본계획 연구, 2004.12.
6. 일본국토교통성, SHER Model User's Manual, 2001.7.
7. 이정민, 이상호, 이길성, 김영오, "안양천 유역의 물순환 모의." 2004년도 대학토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 2183-2188, 2004.
8. 이정민, 이상호, 이길성, "SWMM을 이용한 도립천 장기유출 연속모의." 2004년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 4074-4079, 2004.
9. Kresin, C., Long-Term Stormwater Infiltration Through Concrete Pavers. M.Sc. thesis, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada, 1996.
10. Raghunath Jha, A.S. Herath, Katumi Musiake, Application of SHE Model to the Japanese Catchment, 水文・水資源學會 1995年 研究發表會要旨集, pp.162-164.
11. S. Hereth and K. Kusiale, Simulation of Basin Scale Runoff Reduction by Infiltration Systems, Wat. Sci. Tech., Vol. 29, No.1-2, pp.267-276, 1994.
12. 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學國際學會, 1998. 11.
13. 土木研究所, WEP モデル 解説書, 2002. 10.
14. 土木學會水理委員會, 水理公式集改訂小委員會, 水理公式集[平成11年版], pp.16-18, 1999.
15. 土屋十閑, 都市中小河川の水文環境(その3), 水利科學, No.247, pp.65-84, 水利科學研究所, 1999.
16. 海老川流域水循環再生構想検討協議會, 海老川流域水循環再生構想, 千葉縣土木部都市河川課, 平成10年3月 參照.