

## 녹색도시 물순환 계획요소 및 수문순환 모의

# The Urban Water Cycle Planning Elements and Hydrologic Cycle Simulation for Green City

이정민<sup>1</sup> · 김종림<sup>2</sup>

Jung-Min Lee<sup>1</sup> and Jong-Lim Kim<sup>2</sup>

(Received June 21, 2012 / Revised July 25, 2012 / Accepted July 26, 2012)

### 요 약

전 지구적인 기후변화와 지구 온난화에 따라 서구 선진 국가들을 중심으로 저탄소 녹색성장(green growth)이 이슈로 등장하고 있고 이 전략은 미래의 성장동력으로까지 발전되고 있다. 저탄소 사회를 달성하기 위하여 세계 각국은 교토의정서를 체결하고 온실가스배출량을 2008년부터 2012년까지 1990년도 수준의 5.2%까지 줄이도록 선언하였다. 한편 급속한 도시개발과 불투수면적의 증가는 도시의 물순환의 변화를 초래한다. 본 연구에서는 녹색도시 개념을 검토하고 기존의 연구를 바탕으로 도시 및 단지수준에 적합한 물순환 계획요소를 검토하였다. 추가적으로 본 연구에서는 SWMM5-LID 수문모형을 이용하여 시범유역에 물순환 효과를 분석하였다. 물순환 분석은 개발전, 개발후, 녹색도시계획요소적용후(LID시설 적용후)에 대한 시범유역의 도시유출연속모의를 통하여 수행되었다.

**주제어 :** 녹색도시, 물순환, SWMM5-LID, 수문순환, 계획요소

### ABSTRACT

The climate change and global warming has been a world-wide issue. Also, the green growth has been a widely adopted strategy for national and regional development. In particular, after the Kyoto Protocol to United Nations Framework Convention on Climate Change was declared, the low carbon society was inevitable phenomenon. The hydrologic cycle in urban catchment has been changed due to the expansion of impervious area by rapid urban development. This paper has examined the Water cycle planning elements for green city in the scale of urban planning as well as site planning including housing site. In this study, the SWMM5-LID (Storm Water Management Model5-LID) model was used to simulate the hydrologic cycle of the test catchment as a typical urban catchment. We performed continuous simulation on urban runoff before and after the development of the test catchment and after the installation of Green city planning Elements.

**Key words:** Green City, Water Cycle, SWMM5-LID (Storm Water Management Model5-LID), Hydrologic Cycle, Planning Elements

## 1. 서론

최근 기후변화문제와 에너지위기에 대응하기 위하여 지속 가능한 녹색도시를 개발하려는 노력이 선진국을 중심으로 이루어지고 있다. 또한 산업혁명 이후 도시화가 지속되고 화석 연료를 사용하는 인간의 경제활동이 공간적으로 집적됨에 따라 도시공간은 온실가스 감축을 실천하는 데 있어서 중요한 무대라고 할 수 있다.

에너지 절감 및 탄소 감축에 있어서 도시의 중요성은 이미

1970년대부터 제기되었다. 1972년 로마클럽의 ‘성장의 한계(The Limits to Growth)’ 보고서는 도시가 산업화를 동반한 경제적 혜택과 생활의 편리성 등 인간 욕구 충족을 위해 성장위주의 발달을 거듭해 왔기에, 도시의 성장은 한계가 있음을 지적하고 있다(대한주택공사, 2009). 구미 선진국에서는 2000년 이전부터 탄소배출량을 줄이고 기후변화에 적응하는 지속가능한 주거단지 및 도시공간의 개발을 시도해 왔으며, 최근에는 이러한 사례들이 가시적인 성과를 내면서 주목받기 시작하고 있다. 이러한 선진국의 저탄소 녹색도시 실현사례

본 논문은 ‘LH 녹색도시 계획요소의 경제적 적용방안 연구(한국토지주택공사, 2011a)’중 일부를 인용 및 정리한 것임.

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: andrew4502@lh.or.kr)

2) 한국토지주택공사 토지주택연구원 선임연구원

로는 캐나다 빅토리아의 도크사이드 그린(Dockside Green, Victoria), 영국 서튼의 베드제드(BedZED, Sutton), 독일 프라이부르크의 보봉(Vauban, Freiburg)과 리젤펠트(Rieselfeld, Freiburg), 뮌헨의 림(Riem, München), 스웨덴 스톡홀름의 함마르비(Hammarby Sjostad, Stockholm)와 말뫼 서부항만구역(Västra Hamnen, Malmö) 등이 있다. 최근에는 전세계적으로 온실가스 감축의 시급성에 대한 인식이 확산되면서 UAE 아부다비의 마스다르(Masdar)나 중국 충밍섬의 동탄(Dongtan)과 같이 탄소중립(Carbon Neutral) 또는 탄소제로화(Carbon-Zero)를 목표로 내세우고 과감하고 이상적인 도시개발구상이 제안되기도 하였다.

한편 정부의 저탄소 녹색성장 정책 추진과 함께 건축물, 교통, 물순환 부문의 탄소배출 감축압력이 증대됨에 따라 각종 도시개발 사업에서 녹색도시 특화전략을 수립하는 등 적극적인 대응이 불가피하게 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저 경제적 녹색도시 조성을 위해 물순환 부문 계획요소를 검토하고자 하였다. 먼저 선행연구에서 선정한 녹색도시 계획요소 중 물순환, 수자원, 자원순환 등 물과 관련된 계획요소를 추출하여 검토하였다. 이를 통하여 본 연구에서는 물순환 계획요소를 크게 도시수도순환(상·하수도), 도시수문순환(자연계물순환), 도시인공순환(실개울, 호수공원, 인공하천 등)으로 분류하였다. 이를 연구대상지구인 하남미사 사업지구에 적용을 하여 도시수도순환 부분에서 상·하수 통계를 기반으로 일일 상수 및 하수의 발생량을 예측하고, 상·하수 처리에 대한 에너지사용량을 바탕으로 이산화탄소 배출량을 산정하였다. 도시수문순환과 인공순환 부분에서는 최근 새롭게 개선개발된 SWMM5-LID 물순환 모형을 이용하여 도시수문순환과 도시인공순환 부문에 대한 수문순환분석효과를 모델링하였다.

LID(Low Impact Development) 기법은 강우유출수의 배제를 위한 획일적, 중앙집중식 관거의 배치, 대규모 지하 시설물 등의 기존 강우유출수 관리 시스템과 비교하면 비용측면에서 장점이 있다. 또한, 자연형 시설 및 식생공간의 확보 등을 통한 쾌적한 도시 공간에서 얻을 수 있는 생활 공간의 가치향상, 심미적인 측면 등을 통한 삶의 질 향상 측면에서 장점을 가지고 있다. 이러한 LID 기법의 장점은 도시 공간의 가치 증대, 재개발 잠재력 확보, 새로운 성장동력 확보, 생태서식처 제공, 도시화로 인한 열섬효과 감소, 에너지 절감, 스모그 감소, 습지 보존, 홍수 방지 등에서 다양하게 찾을 수 있다(강두기, 2009). SWMM모형과 물순환에 관련된 국내의 연구로는 이정민 등(2006)은 침투저류지와 매커니즘이 유사한 침투트렌치에 대하여 실험을 통해 유출 양상을 검토한 바 있으며, 이정민(2007)은 투수성포장과 침투트렌치의 기능이 추가된 SWMM-GE(Storm Water Management Model-Groundwater Enhanced)를 개발한 사례가 있다. 본 연구에서는 기 전술한

LID 기법을 이용하여 도시수문순환 및 도시인공순환 효과를 분석하였다. 물순환 계획요소 적용에 따른 도시수문순환 분석효과 중 물수지 부분에서는 지표유출량, 지하유출량, 침투량, 증발량 등의 변화를 정량적으로 분석하였으나 온실가스 감축관계 부분에서는 직접적으로 제시하지 못하였다. 아직 현재여건으로 도시수문순환 및 도시인공순환의 지표유출량, 침투량, 증발량 등의 일부요소와 탄소배출량과 정량적인 관계를 직접적으로 규명하기엔 추가적인 연구가 필요한 실정이다. 추후 본 연구의 분석내용을 토대로 물순환 계획요소와 이산화탄소 배출량과의 관계 및 향후 녹색도시 조성 시 경제적으로 물순환 계획요소를 적용할 수 있는 방안을 모색한다면 보다 효율적인 방법론 개발이 가능할 것으로 사료된다.

## 2. 녹색도시 물순환 계획 요소 및 기법

### 2.1 물순환관련 기존 선행연구 검토

본 연구에서는 녹색도시 물순환 부문 계획요소를 검토하기 위해 먼저 선행연구에서 선정한 녹색도시 계획요소 중 물순환, 수자원, 자원순환 등 물과 관련된 계획요소를 추출하여 검토하였다. 검토한 선행연구 녹색도시 계획요소의 물관련 계획요소는 다음과 같다.

반영운(2008)은 기후변화에 대응한 국토 및 도시개발전략 연구에서 기후변화에 대응한 국토 및 도시개발전략을 개괄적으로 살펴본 결과 총 97개의 거시적인 탄소중립도시를 위한 계획요소를 도출하였으며, 이를 기초로 탄소저감효과, 조성비용, 적용가능성 등을 고려하여 탄소를 저감하거나 흡수하는 직접적인 탄소중립도시 27개의 세부 계획요소를 개발하였다.

이재준 등(2009)의 저탄소 녹색도시 연구사례에서는 ① 토지이용계획, ②녹색교통, ③신재생에너지, ④에너지저감, ⑤자원순환, ⑥공원녹지, ⑥생태공간 등 분야별로 계획요소를 제시하였다. 이중 물관련 계획요소는 중수활용, 우수활용, 생태연못조성, 생물서식처 조성, 저습지조성, 자연형하천, 실개천조성, 잔디도랑, 투수성포장, 생태면적률, 자연지반 보존 등이다.

이은엽 등(2009)은 저탄소·녹색성장 구현을 위한 녹색도시 조성기법연구에서 국내·외 사례분석과 연구자문회의와 연구진 브레인스토밍(Brainstorming)과정 등의 연구집담회로 국내에 적용 가능한 녹색도시 계획요소들을 도출하였다. 이를 통해 녹색도시 실현에 필수적인 핵심계획 요소로 토지이용 및 공간구조, 그린에너지, 저탄소주택(그린홈), 물·자원순환, 녹색교통, 공원녹지, 생태공간 등 7개 부문 32개 요건을 주요 계획요소로 도출하였다. 이중 물관련 계획요소는 우수활용 및 수자원 이용, 우수재활용 시설설치, 중수재활용 시스템 도입, 투수성포장재 도입, 자연형 하천도입, 실개울조성, 생태면적률 증대, 수생비오톱 도입 등이다.

## 2.2 물순환 계획기법 선정기준

선행연구를 종합적으로 살펴보면, 저탄소 녹색도시 조성에 요구되는 핵심적인 계획요소의 경우 연구자 및 계획사례별로 세부적인 계획요소에서 일부 차이를 보이고 있지만 핵심적인 계획요소는 틀과 내용에서 큰 차별성을 보이지 않고 거의 유사한 것을 알 수 있다. 그러나 기존의 녹색도시 계획요소의 도출과정 및 계획요소에서 물순환 부분의 경우 녹색도시 물순환 관점에서 본 연구의 방향과 차이점이 있다. 그 차이점은 첫째, 물순환, 수자원, 수환경 등 여러 가지 명칭으로 계획요소를 분류하고 있으나 이러한 명칭의 분류가 근본적인 방향성 및 기준을 가지고 분류된 것이 아니라는 것이다. 둘째, 도출된 계획요소가 포괄적인 요소는 매우 포괄적이며, 세부적인 부분은 아주 세부적으로 계획요소의 단계가 상위단계에서 하위단계까지 분류가 난해하다는 것이다. 이러한 부분은 각 계획요소 실행의 난해성, 사업성적인 측면 등의 고려가 부족하다고 할 수 있다. 셋째, 물관련 계획요소의 경우 탄소배출 관련 정량화가 거의 희소하다고 할 수 있다. 이를 바탕으로 기존연구의 경우 탄소저감 및 흡수, 배출 관련된 조사 및 분석사례가 부족하다는 것을 알 수 있다.

본 연구의 내용은 선행연구 및 국내외 사례분석을 통해 녹색도시 계획요소 중 주요 계획요소를 선정하여 경제적이고 합리적인 적용방안을 도출하는 것이다. 이러한 본 연구의 취지에 맞추어 물과 관련된 계획요소의 선정기준과 적용대상 공간유형을 다음과 같이 결정하였다.

1. 물관련 계획요소의 대분류 명칭은 타부문과의 중복성, 영역의 포괄성, 연구기간 및 난해도 등을 고려하여 물순환으로 정하며, 관련계획요소도 물순환 관련된 부분으로 한정한다.
2. 대분류인 물순환 부분을 근간으로 세부적인 계획요소는 대분류, 중분류, 소분류, 세 분류로 나눌 수 있으나 본 연구의 두 가지 탄소배출정량화와 사업성분석의 실행연구에 맞추어 세부계획요소의 분류를 결정한다.
3. 본 연구의 연구기간 및 방향을 고려하여 녹색도시라는 개념과 방향이 제시되기 이전부터 적용된 계획요소, 예를 들어 생태도시, 지속가능도시 등에서 이미 연구되고 실행된 계획요소의 경우 반드시 필요한 경우 외에는 중복적인 요소를 고려하여 탄소배출정량화 및 사업성분석에 선별적으로 적용하거나 배제한다. 녹색도시 계획요소의 적용대상은 분야에 따라 도시, 단지, 주택으로 공간유형을 분류할 수 있으나 물순환 계획요소의 경우 단지를 포함한 도시로 공간유형을 한정한다.

본 연구에서는 위에서 전술한 3가지 선정기준을 가지고 현재까지 검토된 선행연구결과 및 기타 고려해야 될 계획선정

요소를 분류하였으며, 분류과정에서 타분야와의 중복성 및 관련성을 검토하였다. 물순환을 크게 자연계물순환, 인공계물순환으로 분류하고 있으나 본 연구에서 계획요소도출에서 보다 명확한 구분을 위하여 도시수도순환(상·하수도), 도시수문순환(자연계물순환), 도시인공순환(실개울, 호수, 인공하천, 펌핑 등)으로 분류하였다. 본 연구에서 검토하고 분류된 물순환 계획요소에 대한 자세한 내용은 지면관계상 생략하였으며, 자세한 내용은 “LH 녹색도시 계획요소의 경제적 적용방안 연구 보고서(한국토지주택공사, 2011a)”를 참고할 수 있다.

## 3. 온실가스 배출량 추정

### 3.1 온실가스 배출량 추정 관련 기존 선행연구 검토

물순환 계획요소의 CO<sub>2</sub> 배출량 측정방안을 모색하기 위하여 국내외 선행연구자료를 검토하였으나 국내연구에서는 물순환 계획요소와 CO<sub>2</sub>와 연관관계를 어느정도 정성적인 측면에서 기술하고 있으나 정량적으로 제시한 연구는 희소한 실정이다.

본 연구에서 물순환 계획요소를 크게 도시수도순환, 도시수문순환, 도시인공순환의 3가지로 분류하였다. 도시수도순환의 경우 일본 사단법인 일본수도공업단체연합회에서 “수도권의 저탄소화를 목표로 한 물순환 시스템 실증모델사업(2010)”이라는 연구보고서에서 상수도를 중심으로 CO<sub>2</sub>와 물순환과의 관계를 정량적으로 제시한 사례가 있다. 이 보고서에서는 기준년 2005년, 목표년을 2050년으로 설정하여, 목표년의 CO<sub>2</sub> 총 배출량 60~80%의 삭감을 목표로 수도권을 대상으로 한 수도시스템 즉, 물순환 시스템 수송 가공공정 효율화 관점에서 시스템을 검토하고 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

전술한 바와 같이 도시수문순환 및 도시인공순환 부분의 CO<sub>2</sub> 배출량 정량화연구는 거의 희소하여 관련 조사 및 분석사례가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 동 보고서에서 제시한 산출방법 및 산출량을 고찰하고 적용 방안에 대해 검토하였으며, 이러한 방법을 토대로 도시수문순환과 도시인공순환의 세부계획요소에 적용할 수 있는 방안을 검토하였다.

### 3.2 온실가스 배출량 추정방법

일본의 선행연구사례를 분석하여 도시수도순환관련 계획요소 중 상수도와 대체수자원 등과의 인과관계를 통해 CO<sub>2</sub> 배출량 감축효과를 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 모색할 수 있었다. 이러한 부분은 결국 도시수문순환의 정량적인 평가를 통해서 이루어 질수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 도시수문순환의 정량적인 분석을 수문순환분석 모델을 이용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 바탕으로 도시수도순환 계획요소와 연계하여 CO<sub>2</sub>배출량 감축효과를 추정하고자 한다.

본 연구는 선행연구 및 국내외 사례분석을 통해 녹색도시 계획요소 중 주요 계획요소를 선정하여 경제적이고 합리적인 적용방안을 도출하는 것이다. 이러한 본 연구의 취지에 맞추어 물순환 분야 계획요소의 Baseline은 녹색도시계획요소 적용 전과 적용 후로 본 연구에서는 결정하였다.

#### 4. 대상지구 도시수문순환 및 도시인공순환 분석

##### 4.1 하남미사 현황 및 개요

본 연구대상지구는 하남시에 속하며 국토공간상 한반도의 중서부, 경기도의 중앙부에 위치하고 있으며, 서울 15km, 성남 12km, 남양주 10km 반경 내에 위치한다. 하남시의 총 면적 98.03km<sup>2</sup>로서 서울 강동구·송파구와 접하고 있는 수도권 도시이며, 성남시, 구리시 등 6개 시·군과 인접하여 있다. 하남시의 교통은 하남에서 시작하여 청주를 잇는 중부고속도로와 서울외곽순환고속도로가 시를 관통하고 있으며, 하남시와 남양주시를 연결하는 팔당대교의 완공과 함께 교통 요충지 역할을 하고 있다. 하남미사지구의 위치 및 현황도는 그림 1 및 그림 2와 같다.

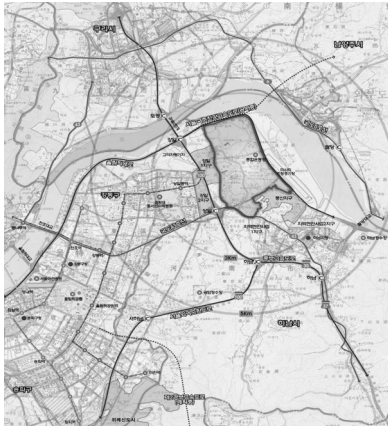


그림 1. 하남미사지구 위치도



그림 2. 하남미사지구 현황도

표 1. 하남미사 상·하수부문 온실가스 발생량

상수사용량 (ℓ/인·일)	상수사용량 (m <sup>3</sup> /인·년)	상수처리공급 전력사용량 (kwh/인·년)	온실가스 발생량 (kg CO <sub>2</sub> /인·년)	총 온실가스 발생량 (t CO <sub>2</sub> /년)
275.7	100.6	23.2	9.8	923
하수발생량 (ℓ/인·일)	하수발생량 (m <sup>3</sup> /인·년)	하수처리 전력사용량 (kwh/인·년)	온실가스 발생량 (kg CO <sub>2</sub> /인·년)	총 온실가스 발생량 (t CO <sub>2</sub> /년)
343.0	125.2	37.6	15.9	1,497

##### 4.2 하남미사지구 도시수도순환 분석

인천 검단지역의 상·하수 처리에 따른 이산화탄소 배출량을 산정한 국내 선행연구사례를 기초로 하여, 본 연구대상지구인 하남미사 사업지구에 적용을 하여 온실가스배출량을 산정해 보았다. 상·하수 통계를 기반으로 일일 상수 및 하수의 발생량을 예측하고, 상·하수 처리에 대한 에너지사용량을 바탕으로 이산화탄소 배출량을 산정하였다. 2010년 1년 동안의 하남시의 상수사용량은 1495만톤이고, 하수배출량은 1860만톤, 인구수는 하남미사 사업지구의 수용인구 기준 94,196인을 기준으로 하였다(한국토지주택공사, 2010). 하남시의 통계를 기본으로 하여 하남미사 지구의 상·하수 처리에 따른 온실가스 배출량을 산정하였고 그 값은 2,420CO<sub>2</sub>/년으로 추정되었다. 상·하수도관련 온실가스 발생량 산정과정의 요약된 내용은 표 1과 같다.

##### 4.3 하남미사지구 물순환 계획배경 및 목적

본 연구에서는 용인동백지구, 부천상동지구, 파주운정지구, 아산탕정지구, 하남미사지구 등 공사에서 완료하였거나 진행중인 사업지구를 대상으로 선정된 녹색도시 계획요소의 적용타당성과 경제적 적용방안을 도출하기 적당한 대상지를 검토한 결과 하남미사지구를 선정하였다. 본 연구대상지구는 서울과 접해 있고 서울외곽순환고속도로·올림픽대로·국도 43호선·지하철5호선에 의한 도심 접근성이 양호한 지역이며, 검단산과 한강 등 쾌적한 자연환경 요소를 지니고 있는 지역으로서 도시발전을 위한 최적의 여건을 갖추고 있고, 빌딩하우스·공장·창고 등이 밀집되어 개발제한구역으로서 보전가치가 낮고 기존 기반시설 활용 등을 통한 저렴한 주택공급이 가능하며, 무주택서민과 저소득층의 주거문제를 해결하고 쾌적한 주거환경을 조성하고자 한다. 하남미사지구내 물순환 계획의 배경을 살펴보면 도시내 친수공간의 기본적 기능의 여가, 휴게공간을 겸한 생태공원의 필요성이 대두됨에 따라 신도시 개발시 친수(생태)환경시설의 조성이 증가하는 추세임을 알 수 있다. 이에 망월천의 친환경적인 수변경관 조성이 필요한 실정으로 하천(망월천)정비사업과 실개울 및 호수공원 친수(생태)공간에 공급될 수자원의 안정적 공급방안을

제시하는데 그 배경이 있다. 공급될 수자원의 안정적 공급방안은 기존의 산재된 저류지 4개소를 하천 내 저류지로 통합한 뒤, 그 통합된 저류지를 호수화 시켜 주변 공원계획과 연계하여 지역주민의 휴식공간을 제공하고자 하는 계획이 있다.

#### 4.4 적용시나리오

본 연구에서는 물순환 계획요소를 도시수도순환(상·하수도), 도시수문순환(자연계물순환), 도시인공순환(실개울, 호수, 인공하천, 펌핑 등)으로 분류하였다. 앞서 언급하였듯이 일본의 선형연구사례를 종합할 때 도시수도순환관련 계획요소 중 상수도와 대체수자원 등과 인과관계를 통해 CO<sub>2</sub> 배출량 감축효과를 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 모색할 수 있으며 이러한 부분은 결국 도시수문순환의 정량적인 평가를 통해서 이루어질 수 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 도시수문 및 인공순환의 정량적인 분석을 미국 EPA(미환경보호국)에서 개발되어 도시 물순환 분석 모델로 널리 사용되는 SWMM5 모형의 여러 가지 기능 중 최근 분산형 빗물관리시설을 모의할 수 있도록 물순환 계획요소 분석기능이 추가된 SWMM5-LID 모형을 이용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 바탕으로 도시수도순환 계획요소와 연계하여 CO<sub>2</sub> 배출량 감축효과를 추정하고자 하였다.

대상지역인 하남미사지구의 도시수문순환 분석을 위해 대상유역 개발 전·후 토지이용 변화 분석을 수행하였다. 물순환 개선 계획요소의 설치(침투정, 침투트렌치, 침투저류조, 인공습지, 등)에 따른 효과분석을 위하여 SWMM5-LID 모형을 이용하여 도시수문순환 분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

### 5. 하남미사지구 도시수문순환 및 도시인공순환 모델링 적용

#### 5.1 토지이용현황 및 계획

본 연구대상 시범지구가 속하는 하남시의 토지이용에 대해 지목별 현황을 살펴보면 임야가 49,90km<sup>2</sup>(53.6%)로 가장 많으며, 답 8.95%, 전 8.21%, 대지 4.00% 순으로 구성되어 있다. 하남미사지구의 토지이용현황은 답이 전체면적 5,462,689m<sup>2</sup>의 31.9%인 1,742,146m<sup>2</sup>로 가장 많고, 전이 16.1%인 879,699m<sup>2</sup>, 임야는 586,725m<sup>2</sup>, 대지는 442,292m<sup>2</sup>, 도로는 280,167m<sup>2</sup>, 하천은 85,756m<sup>2</sup> 등으로 구성되어 있다(한국토지주택공사, 2011b, c).

하남미사지구 사업부지 내 토지이용계획에 따른 토지이용계획도를 살펴보면, 전체 대상지구 면적은 5,462,689m<sup>2</sup>으로, 보금자리주택사업과 훼손지 복구사업으로 나뉘어서 토지이용을 계획하였다. 보금자리주택사업은 총 면적의 91.6%인 5,003,201m<sup>2</sup>으로 주택건설용지와 공공시설용지를 포함하고 있다. 공공시설용지에는 시설별로 상업업무 시설, 공원녹지 시설, 공급시설, 교육시설, 공공시설, 도로 등이 있다. 훼손지

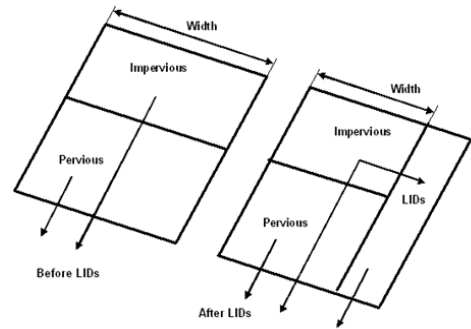


그림 3. SWMM5-LID 모형의 유출개념도

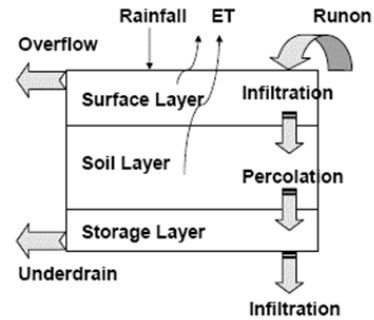


그림 4. Bio-Retention Cell의 개념도

복구사업은 총 면적의 8.4%인 459,488m<sup>2</sup>이며 공공시설용지로 공원 녹지시설, 공급설비시설, 공공시설 등이 있다.

대상지구 전체면적에 대한 불투수면적의 비율을 비교하여 보면, 개발 전 31.6%에서 64.2%로 증가한 것으로 분석되었다.

#### 5.2 SWMM5-LID모형의 개요

본 연구에 적용된 SWMM5-LID 모형은 SWMM5 모형에 LID 빗물관리시설의 수문영향분석이 가능하도록 추가 수정 개발된 것으로 모형은 미국 EPA(미환경보호국)에서 기존 SWMM5 모형에 빗물정원, 습지, 침투트렌치, 침투정, 식생도랑, 투수성포장, 빗물정원 등의 LID 시설 모의가 가능하도록 개발(2010년)된 모형으로 유출개념도 및 Bio-Retention cell의 개념도는 그림 3 및 그림 4와 같다.

#### 5.3 개발 전·후의 SWMM 모의 결과

##### 5.3.1 개발 전 유출특성 분석

하남미사지구의 SWMM5 모형의 각 항목별 입력데이터를 이용하여 본 연구대상유역의 Thiessen망 작도 결과, 채택된 서울관측소의 1998년에서 2008년까지 장기연속유출모의를 수행하였다. 하남미사지구의 개발 전·후 그리고 물순환 계획요소 적용 후의 지표수 유출특성과 지하수 유출특성에 관해서 비교하였다.

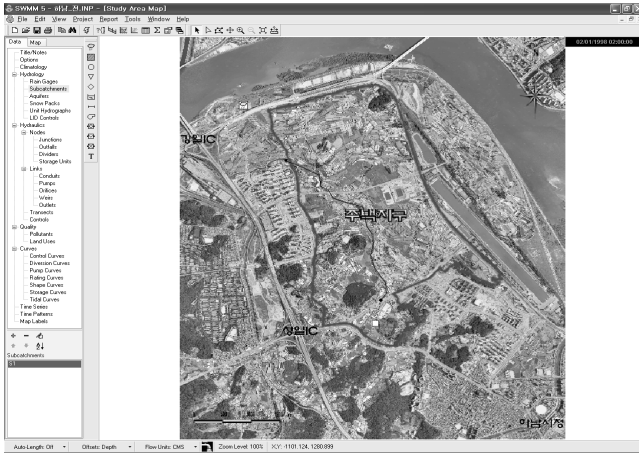


그림 5. SWMM5-LID 모형을 이용한 대상구역의 개발 전 유출모형

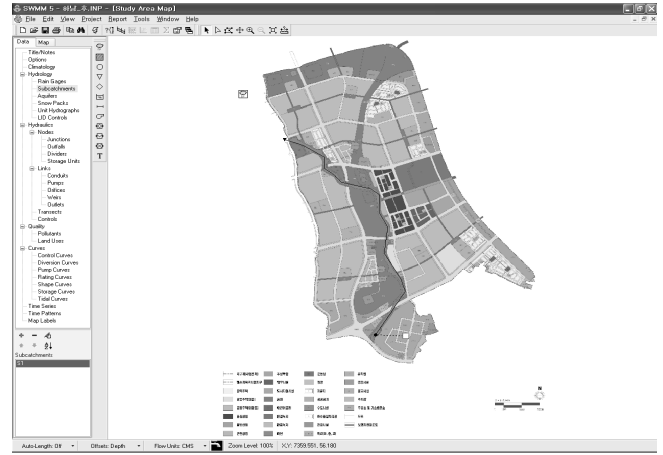


그림 8. SWMM5-LID 모형을 이용한 대상 구역의 개발 후 유출 모형

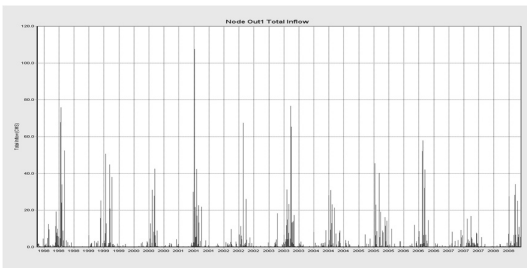


그림 6. 개발전 지표유출량(1998~2008)

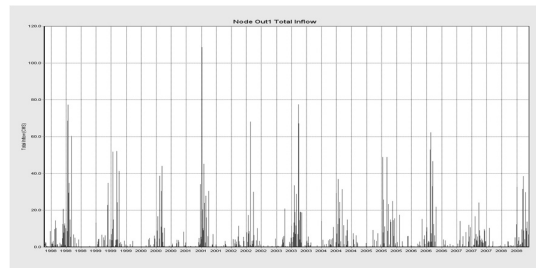


그림 9. 개발후 지표 유출량(1998~2008)

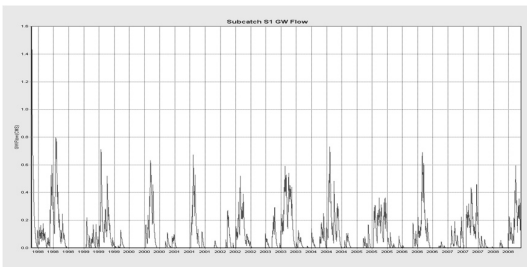


그림 7. 개발전 지하수 유출량(1998~2008)

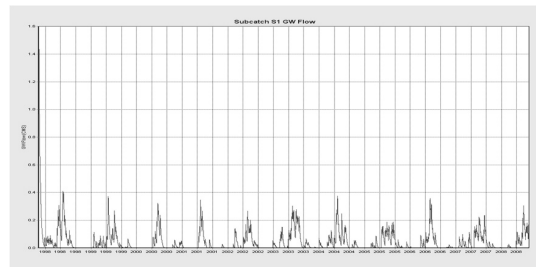


그림 10. 개발후 지하수 유출량(1998~2008)

먼저, 하남미사지구의 개발 전 유출특성에 관해 분석하였는데, SWMM5-LID 모형을 이용하여 모의한 대상구역의 개발 전 유출도 및 개발 전의 지표유출량, 지하수유출량 그래프는 각각 그림 5, 그림 6 및 그림 7과 같다.

### 5.3.2 개발 후(물순환 계획요소 적용 전) 유출특성 분석

본 연구대상구역에 관하여 개발 후 유출특성을 분석하기 위해 개발 전과 달라진 토지이용계획의 불투수면적을 달리하여 SWMM5-LID 모형으로 모의하였다. 개발 후 유출특성을 모의한 대상구역의 개발 후 유출도 및 개발 전의 지표유출량, 지하수유출량 그래프는 각각 그림 8에서 그림 10과 같다.

### 5.3.3 개발 후 물순환 계획요소 적용 후 모형 모의

본 연구대상지구에 물순환 계획요소 적용 후의 유출특성

을 분석하기 위하여, 개발 후 입력자료에 물순환 시스템을 추가하여 물순환분석을 수행하였다. 이는 LID 시설 적용 후에 유출량 값의 변화를 검토하기 위한 분석으로 본 대상구역에 필요한 물순환 시스템 중 개략적으로 침투트렌치와, 침투통, 빗물도랑만을 추가하여 물순환분석을 수행하였다. 물순환 시스템을 설치 후 유출특성을 모델링한 결과, 지표유출량과 지하수유출량 그래프는 각각 그림 11 및 그림 12와 같다.

## 5.4 효과분석

본 연구대상구역인 하남미사지구의 개발 전·후와 개발 후 물순환 계획요소를 적용한 후의 지표수, 지하수유출 및 수문순환인자에 대한 변화를 살펴보고자 물순환 분석을 수행하였다. 모든 값은 10년 평균치로 나타내었으며, 먼저 개발 전 지표유출량을 살펴보면, 강우량 1,704.4mm에 침투량은 전체

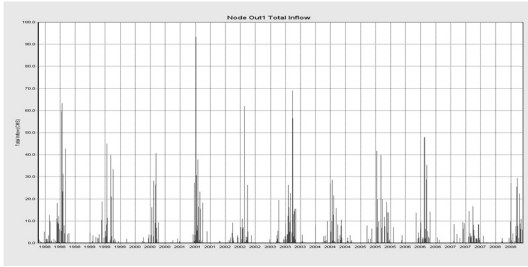


그림 11. 개발 후 LID 시설 적용 지표 유출량(1998~2008)

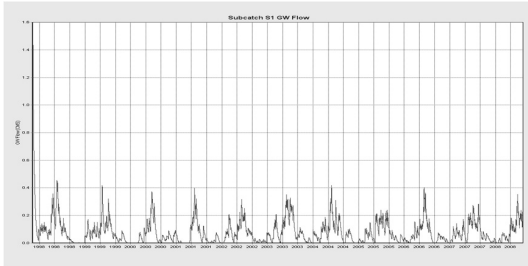


그림 12. 개발 후 LID 시설 적용 지하수 유출량(1998~2008)

강우량의 43.2%인 735.7mm, 지표증발량은 133.3mm, 지표 유출량은 49.0%인 335.2mm이다. 개발 후 침투량은 전체 강우량의 22.4%인 380.9mm이며, 지표증발량은 187.3mm, 지표 유출량은 1136.9mm이다. 지하수 유출량을 살펴보면, 개발 전 지하수 침투량과 유출량은 각각 735.7mm, 455.1mm, 저류량은 22.1mm, 상·하층부 증발산량은 257.5mm이고, 대수층 침투량은 0.8mm이다. 개발 후 지하수 침투량은 380.9mm, 유출량은 223.3mm이며, 저류량은 23.5mm, 상·하층부 증발산량과 대수층 침투량은 각각 133.9mm, 0.8mm로 나타났다. 토지이용에 따른 유출변화를 살펴보면 지표 유출량은 개발 전은 49.0%에서 개발 후 66.6%로 증가하였고, 지하수 유출량은 개발 전 43.2% 비해 개발 후 22.4%로 감소하였다.

본 연구에 적용한 SWMM5-LID 모형의 물순환 계획요소의 규모를 살펴보면, 먼저 침투통(Rain Barrel)은 집수정을 대신하여 본체 바닥이나 그 측면을 쇠석으로 충전하고, 바닥의 쇠석 밑에 모래를 포설하여 빗물을 측면과 저면으로 침투시키는 구조물로서 본 대상지구 전체 유역 5,462,689m<sup>2</sup>에 총 4,000개 설치를 하였고, 설계를 통한 총 저류량을 살펴보면 56m<sup>3</sup>(저류량 =  $\pi r^2 \times h \times \text{공극률} \times \text{갯수} = \pi \times 0.152 \times 0.5 \times 0.4 \times 4,000 \text{개} = 0.56 \text{ m}^3$ )가 저류 가능하다. 빗물도랑(Bio-Retention)은 개울의 작은 형태로 잔디와 그 외 식물, 자갈 또는 판석 등을 이용하여 빗물의 배수와 침투를 원활하게 하는 시설로, 지름 10m, 깊이 0.3m로 설계하였고, 연구대상지구 전체에 40개를 설치하였다. 빗물도랑의 총 면적은 3,141m<sup>2</sup>(총면적 =  $\pi r^2 \times 40 \text{개} = 3,141 \text{ m}^2$ )이며, 설계를 통한 총 저류량을 살펴보면 942m<sup>3</sup>(총저류량 =  $3,141 \text{ m}^2 \times 0.3 \text{ m} = 942 \text{ m}^3$ )이다.

침투트렌치(Infiltration Trench)는 관의 유공을 통해 측면

및 저면의 쇠석으로 빗물을 통과한 후 저류, 침투시키는 시설이다. 침투트렌치의 토피고를 150mm로 설계하였고, 설계수두는 1.5m, 시설의 폭은 1.5m이며, 전체 유역에 200개를 설치하는 것으로 하였다.

위에 서술한 물순환 계획시설을 본 대상 유역에 적용한 뒤 SWMM5-LID 모형을 수행하였다. 물순환 분석 결과를 살펴보면, 강우량 1,704.4mm에 침투량은 전체 강우량의 24.7%인 420.5mm, 지표증발량은 10.9%인 185.2mm, 지표 유출량은 64.5%인 1,099.3mm이다. 지하수 유출량을 살펴보면, 지하수 침투량과 유출량은 각각 420.5mm, 298.2mm, 저류량은 23.2mm으로 나타났다. 본 모델링의 분석결과는 추후 대상유역에 대한 유출 모니터링 및 모형의 보정 및 검증을 통하여 보다 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 사료되며, 본 논문에서는 녹색도시 물순환 계획요소와 수문모형을 이용한 물순환 분석과의 연관성 도출하고 물순환 모형을 활용한 탄소배출량 산정 방법론 제시에 주안점을 두고자 하였다.

## 6. 결론

과거에는 빗물은 주로 대규모 강우에 대응하는 관거 및 저류지 위주로 관리하여 왔다. 도시 개발에 따른 불투수면의 증가와 더불어 빗물을 도시 외부로 밀어내는 방식으로 빗물을 관리한 것이다. 이는 빗물 순환의 왜곡으로 이어져 증발산량 감소, 지하수위 하강, 건천화 및 비점오염원 증가 등 개발 이전과는 매우 다른 도시 환경을 만든다. 열섬현상도 증가하는 등 도시 공간의 열순환 악화로 이어져 도시 온도가 상승하기도 한다. 이제는 자연스런 빗물순환이 이루어지고, 빗물순환에서 더 나아가 상·하수도 인공순환이 이루어지는 도시 개발을 고민할 시점이다.

본 연구에서는 SWMM5-LID 모형을 이용하여 도시수문순환 및 도시인공순환 효과를 분석하였다. 물순환 계획요소 적용에 따른 도시수문순환 분석효과는 물수지 부분에서는 지표 유출량, 지하유출량, 침투량 등을 정량적으로 제시할 수 있는 방법론을 제시하였으나 온실가스 감축과 관련된 부분은 보다 직접적으로, 그리고 정량적으로 제시하진 못하였다. 현재 연구개발 여건으로 도시수문순환 및 도시인공순환의 지표유출량, 침투량, 증발량 등의 일부요소와 탄소배출량과 정량적인 관계를 직접적으로 규명하기엔 추가적인 연구가 필요한 실정이다. 전과정평가(LCA) 기법과 같은 방법과 연결을 시도한다면 보다 직접적인 탄소배출과의 관계를 효율적으로 평가할 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 기 전술한 바와 같이 물순환 계획요소를 적용하여 빗물이용 등을 통해 상하수도 시스템에서 발생하는 탄소배출량을 대체수자원의 이용을 통한 탄소감축으로 연결할 수 있으며, 물순환 계획요소 적용을 통한 홍수저감효과 분

석은 녹색도시 조성 시 우수관거 및 저류지 등 홍수방재시설의 규모를 설정하는 것으로 적용이 가능하다. 추후 본 연구에서 제시한 방안 및 사례에 대하여 추가적인 연구와 분석이 이루어진다면 보다 정량적으로 녹색도시 조성의 경제성을 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 결론적으로 LID 기법과 같은 효율적인 물순환 계획요소의 도입 및 정량적인 물순환 수문 분석은 경제적 녹색도시 조성의 근본적인 적용접근법이 아닐까 사료된다.

### 참고문헌

1. 강두기(2009), “저영향개발”, 대한토목학회지, 57(7): 100.
2. 대한주택공사(2009), 「저탄소 녹색도시 모델구상」, 주택도시연구원 연구보고서.
3. 반영운(2008), “기후변화에 대응한 국토 및 도시개발전략”, 「대한국토도시계획학회 도시정보」, 318: 3~17.
4. 이정민, 이상호, 이길성(2006), “물 환경 건전화를 위한 도시하천의 물 순환 모의 (I) -안양천 유역-”, 「수질보전 한국물환경학회지」, 22(2): 349~357.
5. 이정민(2007), 「투수성 포장과 침투 트렌치를 고려한 수정 SWMM의 개발 및 적용」, 박사학위 논문, 부경대학교.
6. 이은엽, 조영태, 최민아, 강명수, 박선희(2009), 「저탄소 녹색성장 구현을 위한 녹색도시 조성기법 연구」, 토지주택연구원.
7. 이재준, 구자훈, 이상문(2009), 「탄소저감을 위한 도시공간구조의 계획적 전환체계 수립 연구」, 한국토지주택공사.
8. 일본수도공업단체연합회(2010), 「수도권의 저탄소화를 목표로한 물순환 시스템 실증모델사업」.
9. 한국토지주택공사(2010), 「검단신도시 인벤토리 구축 연구」.
10. 한국토지주택공사(2011a), 「LH 녹색도시 계획요소의 경제적 적용방안 연구」, 토지주택연구원 연구보고서.
11. 한국토지주택공사(2011b), 「하남미사보급자리 지구단위계획」.
12. 한국토지주택공사(2011c), 「하남미사지구 보급자리 주택개발사업 경영투자심사위원회 심의자료」.