

분포형 수문모형을 이용한 도시지역 옥상녹화에 따른 물 및 열순환 영향 평가

Assessing the Effect of Water and Heat Cycle of Green Roof System using Distributed Hydrological Model in Urban Area

장 철 희*
Jang, Cheol Hee

김 현 준**
Kim, Hyeon Jun

김 연 미***
Kim, Yeon Mee

남 미 아****
Nam, Mi A

Abstract

The impervious area on the surface of urban area has been increased as buildings and artificial land cover have continually been increased. Urban development has gradually decreased the green zone in downtown and alienated the city from the natural environment on outskirts area devastating the natural ecosystem. There arise the environmental problems to urban area including urban heat island phenomenon, urban flood, air pollution and urban desertification. As one of urban plans to solve such problems, green roof system is attracting attentions.

The purpose of this study was to investigate flood discharge and heat reduction effect according to the green roof system and to quantify effect by analyzing through simulation water and heat cycle before and after green roof system. For the analysis, Distributed hydrologic model, WEP (Water and Energy transfer Processes) and WEP+ model were used. WEP was developed by Dr. Jia, the Public Works Research Institute in Japan (Jia et al., 2005), which can simulate water and heat cycle of an urban area with complex land uses including calculation of spatial and temporal distributions of water and heat cycle components. The WEP+ is a visualization and analysis system for the WEP model developed by Korea Institute of Construction Technology (KICT).

키워드 : 옥상녹화, 물순환, 열순환, 분포형 수문모형, 도시화, 열섬

Keywords : Green Roof, Water Cycle, Heat Cycle, Distributed Hydrological Model, Urbanization, Heat Island, WEP

1. 서 론

1.1. 연구의 배경 및 목적

도시화에 따라 지표면 피복이 변하고 녹지와 수면이 적어지면서 증발에 의한 잠열이 감소하게 되면 대기 중으로 열이 축적된다. 또한 인구 밀집에 의한 많은 에너지 소비로 인공열이 증가되어 대기로의 현열 및 복사가 증가함으로써 도시지역에서는 주야간에 걸쳐 고온화 현상이 나타나게 된다. 도시의 열환경을 결정하는 요인과 요소는 여러

가지가 있다. 위도와 해발고도, 해안으로부터의 거리, 식생의 유무 등의 자연적인 요인과 도시기능의 차이 등 사회적인 요인에 의해 도시의 열환경이 달라지며, 대기오염 등에 의한 일사환경, 인공배열 등에 의한 온도환경, 강수, 증발 등의 수문환경을 포함한 각 기상요소가 도시의 열환경을 더욱 복잡하게 하고 있다. 뿐만 아니라 도시 개발에 의해 우수의 불투수지역 확대, 하천부지의 축소, 산림 및 유수지의 감소 등이 급속히 진행되어 하천유량의 변화, 지하수위의 저하, 용수의 고갈, 생태계의 파괴 등이 발생되어 왔다. 도시지역은 도시형 수해발생, 갈수지의 급수안전도 저하, 평시 하천유량의 감소, 공공수역의 수질악화, 지하수 오염 등 여러 가지 문제에 직면하고 있다.

이처럼 도시의 고밀도 개발 및 거대화, 집중화에 따라서 녹색성장과 함께 쾌적하고 생태적으로 건강한 도시에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 요구를 바탕으로 옥상녹화를 통한 도시 열섬 조절효과, 물순환 개선효과 등과 같은 도시기후의 조절효과를 정량적으로 분석할 필요가 있다.

옥상녹화에 의한 열섬완화 효과 검증 연구는 국내외적으로 비교적 많이 이루어진 편이다. 김현수 등(1999)은 옥상녹화시스템의 개발과 열 성능에 관한 기초 연구에서 토양층의 깊이와 지피식물 및 초본식물을 적용한 녹화시스

* Corresponding author, Senior Researcher, Water Resource Research Division, Water Resource & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, 411-712, South Korea (chjang@kict.re.kr)

** Research Fellow, Water Resource Research Division, Water Resource & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, 411-712, Korea (hjkim@kict.re.kr)

*** Research Fellow, Advanced Building Research Division, Building Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, 411-712, South Korea (yeonmeekim@kict.re.kr)

**** Research Specialist, Advanced Building Research Division, Building Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, 411-712, South Korea (moly212@kict.re.kr)

템을 실험구로 하여 열성능을 측정된 결과, 콘크리트면의 온도가 23~44°C로 나타났고 녹화시스템이 적용된 온도가 26~28°C로 나타나 최고 16°C의 차이를 보이는 것으로 보고한바 있다. 이동근 등(2005)은 서울대학교 실험구를 대상으로 옥상녹화에 따른 온도저감효과에 관한 연구에서 피도가 높고 식물이 조밀하게 식재되어 있는 옥상 실험구가 식생이 없이 토양만 있거나 피도가 낮은 실험구보다 표면온도가 평균적으로 1~2°C 정도 낮은 것으로 보고하였다. 오승환(2007)은 저관리·경량형 옥상녹화의 온도저감효과 분석 연구에서 식생이 있는 실험구가 식생이 없는 실험구보다 일간 토양 평균표면온도가 11.1~13.4°C 낮게 나타남을 확인하였다. 또한 콘크리트 옥상에 비해 토양 10cm 부설시 9.3°C, 식재+토양 10cm는 21.1°C, 식재+토양 15cm는 22.0°C, 식재+토양 20cm는 22.7°C를 저감하는 것으로 나타나 토양깊이 10cm 정도로만 옥상녹화를 해도 열섬완화 효과가 충분히 크게 나타나는 것을 보여주었다. 또한, 서울시정개발연구원의 옥상에 조성된 옥상녹화지에서 김원주(2009)가 온도 차이를 측정된 결과에 따르면, 8월 녹화지의 경우 31.3°C, 비녹화지는 48.3°C로 약 17°C 정도의 차이가 나는 것으로 나타났다. 환경부(2008)는 도시 인공지반의 자연생태계 복원을 위한 기술개발 연구에서 옥상녹화의 유형별 실험구에 따라 온도저감효과를 측정하였다. 그 결과 식재 없이 토양만 존재하여도 5°C 정도 온도저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 토양심도가 10cm인 실험구보다 20cm인 실험구가 장기적인 관점에서 온도저감효과가 더 좋은 것으로 나타났다. 미국 DOE의 보고서(2004)에 따르면, 시카고에서 8월 옥상녹화지 표면의 온도는 33~48°C인 반면 바로 옆에 어두운 색의 보통 옥상 표면 온도는 76°C까지 상승하였고, 옥상 위의 대기 온도 또한 4°C 차이가 있음을 보여주었다. 플로리다에서 진행된 유사한 연구(Cummings et al., 2007)에서도 옥상녹화지 30°C, 바로 옆 밝은 색의 보통 옥상 57°C로 큰 차이가 있어 옥상녹화에 의한 건물표면의 온도저감 효과는 매우 크게 나타나는 것으로 보고되었다. 이와 같이 옥상녹화에 의한 건물표면 온도의 저감이 실제 도시 전체 대기 온도의 저감에 어느 정도 기여하는지에 대해서는 몇몇 미기상 모델링 연구 접근에 의해 예측되었다. Liu and Bass(2005)가 캐나다 토론토를 대상으로 한 연구에 따르면, 도심지에서 건물 옥상의 50%를 녹화할 경우 도시 전체 기온은 0.8~1.0°C 감소하는 것으로 예측하였고, 옥상녹화지에 관수를 해줄 경우 추가적인 증발에 의해 2°C까지 도심의 대기온도가 더 내려갈 것으로 예측했다. Rosenzweig and Solecki(2006) 또한 뉴욕시에서 전체 가용한 옥상면적을 모두 녹화한다고 가정하고 옥상으로부터 2m 상공의 대기 온도를 시뮬레이션 한 결과, 도시 전체의 하루 평균온도가 0.2°C 감소하고, 오후 3시 온도는 0.4°C 감소하였으며, 일부 높은 감소를 보이는 구역들은 최대 1.0°C까지 감소하는 것으로 보고하였다.

이상과 같이 옥상녹화에 의한 열섬완화 효과에 대한 연구는 비교적 꾸준히 지속되는 반면, 물순환 개선효과의 정량적 분석에 대한 연구는 그다지 많지 않은 편이다. 물순

환 개선효과의 연구 동향을 살펴보면 Moran et al.(2004)과 VanWeert et al.(2005)는 옥상녹화의 다양한 토심에 따른 우수유출량 저감효과에 대한 연구를 수행한바 있으며, 국내에서는 이재형 등(2006)이 옥상녹화 시 식생 종류에 따른 유출량 예측에 관한 연구를 수행하였으며, 한무영 등(2003)은 장마기간 동안의 옥상녹화를 통한 빗물의 수량 및 수질 특성에 대한 연구를 수행하였고, 이동근 등(2006)은 옥상녹화 조성 시 토심과 식생의 유무에 따른 우수유출량 저감효과에 대한 연구를 수행한바 있다. 이러한 연구 사례들은 특정 실험구에 대한 토심별, 식생종류별 효과 분석이 대부분이며 토양의 물리적 특성과 수문학적 특성을 고려한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구의 목표는 옥상녹화가 갖는 다양한 효과 중에서도 수문학적 측면에서의 물순환 및 열순환 개선효과에 대한 정량적 평가를 통해 도시 환경문제를 효과적으로 완화시키기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

1.2. 연구방법 및 범위

본 연구는 옥상녹화의 유형별 물순환 및 열순환 개선효과를 정량적으로 평가하여 환경성능계수를 개발함으로써 정부 및 지자체의 도시계획 및 환경생태계획에 활용 가능한 옥상녹화 환경성능 원단위 자료를 제공하고자 한다. 이를 위하여 격자기반의 정밀분포형 물순환 및 열순환 해석모형을 이용하여 녹화토양의 토심 및 물리적 특성에 기반한 녹화유형별 물-열순환 성능효과를 정량적으로 평가할 필요가 있다.

수문모형은 물순환 과정에서의 유역의 유출현상을 모의하는 수확 모형으로서 유출 거동 모의 방법과 유역의 공간적 특성변화를 고려하는 방법에 따라 크게 집중형 수문모형(Lumped hydrological model)과 분포형 수문모형(Distributed hydrological model)으로 구분할 수 있다. 최근 들어 지리정보시스템(Geographic Information System)의 등장과 컴퓨터 계산 능력의 두드러진 발달과 더불어 수문모형도 집중형 모형에서 분포형 모형으로 발전하고 있는 추세이다. 특히, 분포형 수문모형에 관한 연구는 2000년대에 들어 인공위성자료나 레이더 자료의 활용성이 높아지면서 활발해지기 시작하였으며 많은 발전을 이룩하였다. 분포형 수문모형은 경험적 지배방정식을 사용하는 집중형 수문모형과는 달리 수치지형자료 및 물리적 특성치를 사용하기 때문에 유역 내부의 어느 점에서든지 유출모의가 가능하며 인접 격자의 강우, 침투 등의 계산치를 이용하여 물수지를 계산하게 된다. 분포형 수문모형은 지형, 토지이용 및 토양 등에 대한 정보가 없이는 유출량의 공간적 분포를 예측하는 것이 어렵다.

국외에서는 이미 적용성을 평가 받은 다수의 분포형 수문모형들이 있으며 유역이 지닌 특성을 충분히 고려할 수 있도록 지리정보시스템을 도입하는 경우도 증가하고 있다. Julien and Saghafian(1991)은 강우와 지형의 지리학적 변화, 토양의 분포 등을 모의할 수 있는 모형을 제안한 후 Molnar and Julien(2000)이 유역면적에 따른 적용성을 검

토하였으며, Sharif et al.(2002)은 레이더 강우자료에 관한 불확실성에 관한 연구를 수행하였다. Abbott et al.(1986a, b)은 강우, 차단, 증발산, 침투량에 대한 고려와 2차원 지표류 유출해석, 지하수 유출을 포함한 강우-유출 모형을 제시하였으며, 이 모형은 현재 MIKE SHE의 이름으로 개발되었다.

최근 도시지역에서의 효과적인 물순환 해석을 위하여 미국, 일본 등에서 적용이 활발한 분포형 수문모형으로는 SWMM(Storm Wastewater Management Model), SHER (Similar Hydrologic Element Response), WEP(Water and Energy transfer Process) 모형 등이 있다.

SWMM 모형은 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서 개발된 모형으로 도시구역 내에서 우기 및 건기의 지표유출과 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 등(2009)은 불투수면 저감기법에 대한 적용 효과를 분석하였고, 최환규(2010)는 불투수면의 변화에 따른 도시구역의 강우-유출과 수질에 미치는 영향을 연구하였다. SHER 모형은 일본에서 개발된 모형으로 불포화 투수현상의 물리과정을 가능한 범위 내에서 수치계산을 충분히 하여 모형 매개변수의 물리적인 근거를 명확히 하였다. 이 모형은 신도시 개발을 시작으로, 최근 십 수년간 일본 내의 여러 지역에 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(황성환 등, 2006). WEP 모형은 복잡한 토지이용이 이루어지고 있는 도시하천 유역에 대한 물순환의 정량화를 목적으로 일본의 토목연구소에서 개발된 물리적 기반의 공간분포형 모형이다(Jia, Y., 1997).

WEP 모형은 다양한 물순환 과정의 물리 표현을 직접 해석하기 때문에 과거의 유량 자료나 검증이 없이 높은 정밀도의 예측이 가능한 분포형 물리 모형의 특징을 가지고 있으며 침투, 증발산, 하천으로의 표면유출, 지하수 유출, 지하수 유동, 열순환 등에 대한 시공간 분포를 유역 단위에서 모의할 수 있다. 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(김현준 등, 2007). 김현준 등은 판교신도시, 행정중심복합도시, 파주 운정신도시 및 남양주시 등 다수의 신도시 개발지역에 대하여 WEP 모형을 적용하였으며 침투시설, 저류시설 등

에 의한 물순환 개선효과를 분석하였다(한국건설기술연구원, 2009).

본 연구에서는 녹화토양의 토심 및 물리적 특성에 기반한 녹화유형별 물-열순환 성능효과를 정량적으로 평가하기 위한 해석모형으로 WEP 모형을 선정하였다. WEP 모형은 다른 모형과 달리 물순환 뿐만 아니라 연직 1차원의 열수지도 동시에 해석할 수 있는 장점이 있다. 또한, 토양-식물-대기간의 상호작용을 모형화하고 있다.

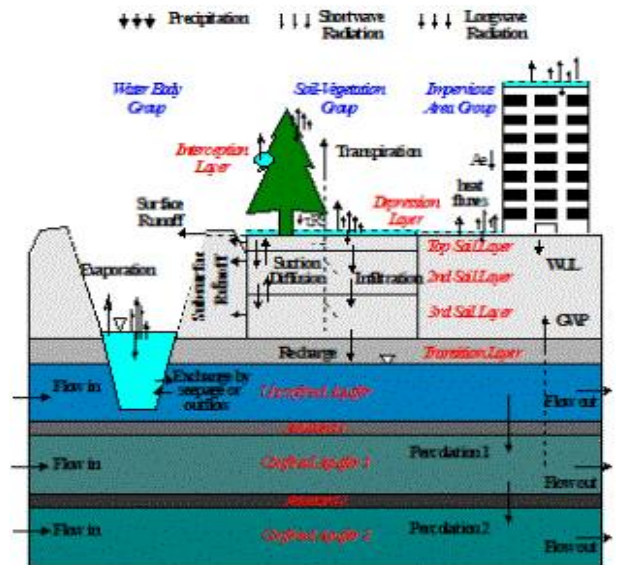


Fig. 1. Vertical structure in a grid cell and horizontal structure of WEP model (Jia, 2005)

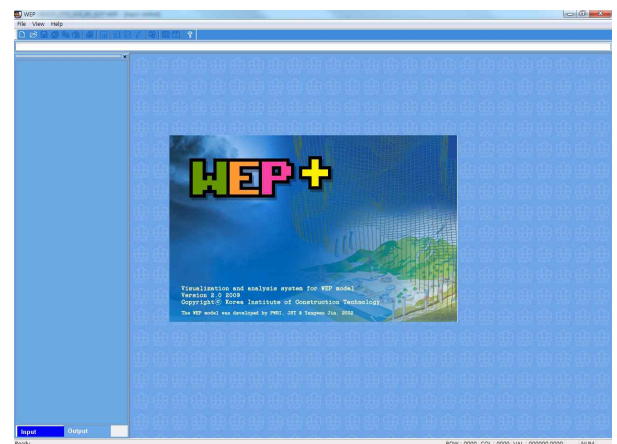


Fig. 2. WEP+ System

2. 옥상녹화에 따른 물-열순환 영향 평가

2.1. 대상지역

본 연구는 옥상녹화 토양의 토심 및 물리적 특성(투수계수)에 따른 환경성능계수의 도출을 목적으로 기존의 녹화 연구지역을 대상으로 토심의 변화, 투수계수의 변화에 따른 녹화효과를 정량적으로 평가하고자 하였다. 따라서 연구 대상지역은 「건축물녹화 마스터플랜 수립 연구」

(한국건설기술연구원, 2011)에서 적용된 서울 중구의 옥상 녹화 지역을 선정하였다. 이 지역은 기존 연구에서 토심 20cm의 저관리/경량형 녹화유형에 대한 옥상녹화 전/후의 수문학적 특성의 변화량을 추정한 지역이다.



Fig. 3. Study Area (Joong-GU in the middle of Seoul Metropolis in Korea)

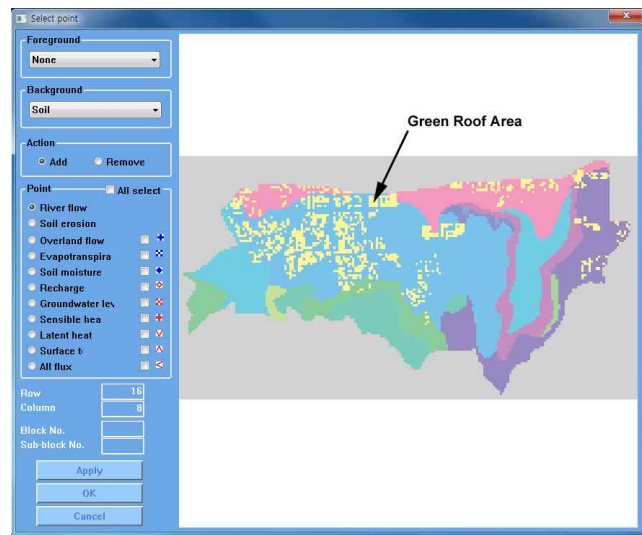


Fig. 4. Green Roof Area in Joong-GU (Grid Cell)

2.2. WEP 모형 입력자료 구축

분포형 강우-유출 모형인 WEP 모형은 각각의 수문요소를 물리적으로 모의하기 위해 대상구역, 기상조건, 지표면 조건, 표층토양, 하천 지하대수층 등 다양한 입력 자료가 필요하다. 본 연구에서 구축된 입력 자료를 살펴보면 다음과 같다.

1) 지형

대상 구역인 중구 구역(면적: 약 10 km²)의 물순환 해석을 위해, 가로, 세로 30m 크기의 격자를 수문 모의의 기본 단위로 사용하였으며, 가로방향 196개, 세로방향 105개의

격자망으로 유역을 재구성하였다. 구축된 지형자료와 소유역 경계 자료를 바탕으로 지형 및 하천의 방향을 고려하여 흐름방향 및 흐름 누적 자료를 구축하였다.

Table 1. Input Parameters for WEP Model

Item	Input data
Watershed	Population, Dividing watershed
Climate conditions	Location and elevation of station, Climate data(rainfall, Wind speed, Solar radiation, Temperature, Humidity)
Topography	Surface elevation, Slope, Flow direction, Flow accumulation, Land use, Impervious area
Soil	Soil type, Vegetation
Stream	Location of stream, Length of reach, Depth of channel bed
Aquifer	Depth of aquifer, Hydraulic Conductivity, Storage Coefficient
Water use	Irrigation supply, Import water, Recycle water, municipal water supply and leakage rate
Energy	Distribution of energy consumption
Initial conditions	The initial conditions for Streamflow, Spatial Soil Moisture, and Groundwater level

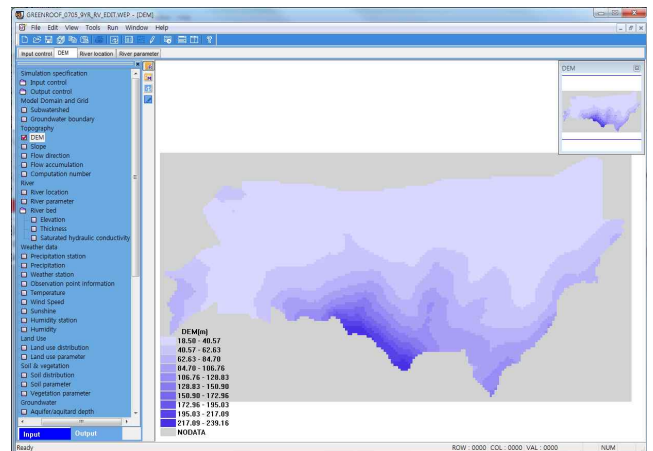


Fig. 5. Digital Elevation Model of Joong-GU

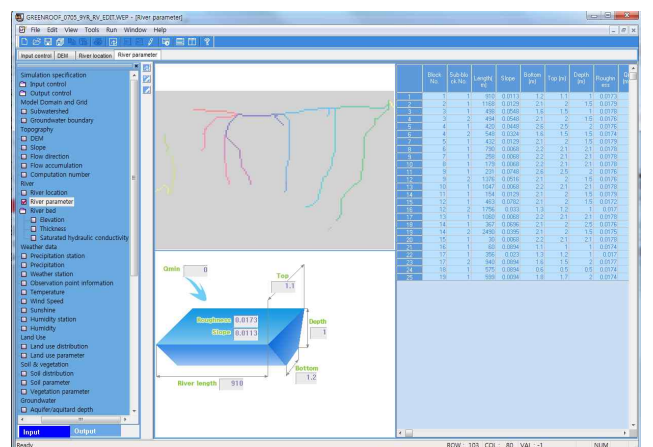


Fig. 6. Stream Characteristics

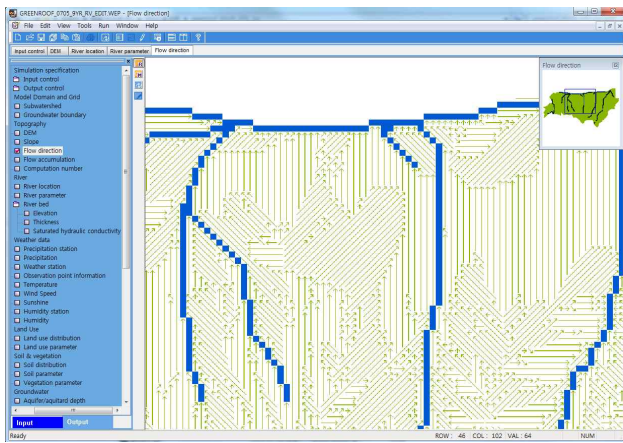


Fig. 7. Flow Direction and Accumulation

2) 토지이용

옥상녹화에 따른 물-열순환 해석을 위해서는 토지이용 및 토양 관련 매개변수의 설정이 중요하다. WEP 모형에서는 15가지로 토지이용을 구분하는데, 옥상녹화 시스템에 대한 토지이용의 특성을 반영하기 위하여 추가로 녹화 대상지의 토지이용을 설정하여 입력 자료를 구성하였다.

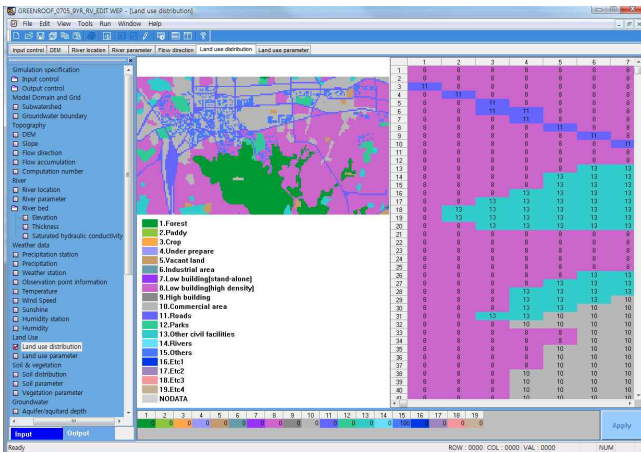


Fig. 8. Land use

3) 토양

WEP 모형에서는 토양에서의 침투 및 증발산 등을 토양의 물리적 특성에 기반하여 해석하며, 이를 위해서는 표층토양의 공간적 분포와 각 토양에 대한 매개변수 자료가 구축되어야 한다. 토양관련 매개변수는 토심, 투수계수, 잔류수분율, 포화수분율, 포장용수량, 단분자수분율, α , β , n 이다. α , β , n 등은 침투 관련 방정식에서 토양수분과 흡인압 관계 및 토양수분과 불포화투수계수의 관계를 나타내는 다음의 Haverkamp 식 및 Mualem 식의 상수이다.

$$\theta = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r)}{\alpha + (\ln(\phi))^\beta} + \theta_r \quad \text{Eq. (1)}$$

여기서, θ : 체적함수율 [cm^3/cm^3], θ_s : 포화수분율 [cm^3/cm^3], θ_r : 잔류수분율 [cm^3/cm^3], ϕ : 흡인압 [$\text{cm}/\text{H}_2\text{O}$], α , β : 상수

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^n \quad \text{Eq. (2)}$$

여기서, K_s : 포화투수계수 [cm/s], K : 불포화 투수계수 [cm/s], n : 상수

본 연구에서는 옥상녹화 토양의 토심 및 투수계수의 변화에 따른 환경성능평가를 위하여 녹화토양의 토심을 10 cm, 20cm 및 60cm의 세 개의 시나리오로 구분하였고, 투수계수를 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ 에 대해 세 개의 시나리오(10^{-1} , 10^{-3} , 10^{-5})로 나누어 구분하였다. 따라서 토심 및 투수계수 각 시나리오를 고려하여 총 9개의 시나리오에 대한 환경성능 효과를 평가하였다.

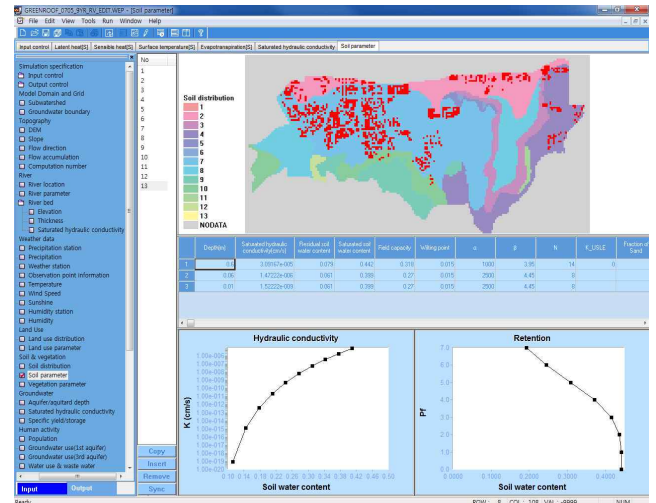


Fig. 9. Soil parameters concerning green roof systems in WEP model

4) 식생 (증발산 관련)

식생관련 매개변수는 식생률, 엽면적지수, 식생높이, 뿌리깊이 등이 있으며, 증발산 모의에 영향을 준다. 각각의 매개변수는 월 단위로 적용된다. WEP 모형에서 모의 가능한 식생의 종류는 산림, 초지, 도시수목, 농작물 등의 네 가지로 구분하고 있으며, 모의 시 적용된 매개변수는 다음의 그림과 같으며, 기존 WEP 모형의 매개변수를 활용하였다.

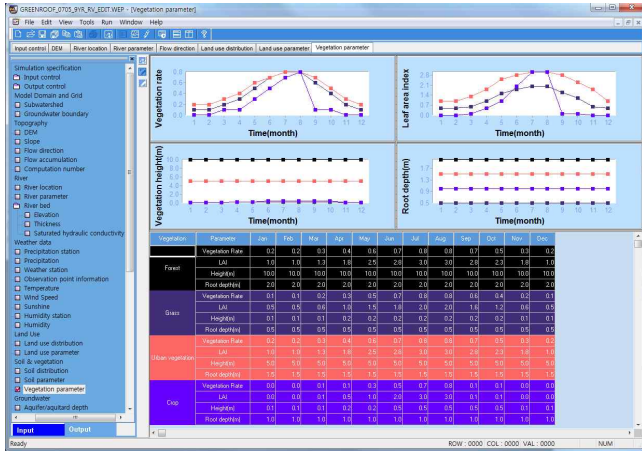


Fig. 10. Vegetation parameters

WEP 모형의 모의는 1999년부터 2008년까지 기상청 서울측후소의 1시간 간격의 기상자료(강수량, 온도, 풍속, 일조시간 및 습도)를 이용하여 총 10년간 모의하였으며, 모의된 결과는 녹화 대상지역에 대한 수문학적 특성인 직접유출량, 증발산량과 열 순환 모의결과인 지표면 온도, 현열 및 잠열, 그리고 현열과 잠열의 비인 Bowen ratio를 비교-분석하여 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 물순환 영향 평가

옥상녹화 토양의 토심 및 투수계수의 변화에 따른 각 시나리오별 물순환 효과 분석 결과는 Table 2, Table 3과 같다. 증발산량의 변화에 대해 살펴보면 동일한 투수계수에 대하여 토심이 깊어질수록 증가하는 양상을 나타냈다. 이는 토양층이 두꺼워짐에 따라 토양층이 흡수한 수분량이 증가하고 이 양이 토양을 통해 증발함에 따라 증가하는 것으로 볼 수 있다. 또한, 동일한 토심에 대해서 10^{-3} 의 투수계수일 경우는 증발산량이 현저히 증가하나 10^{-5} 의 경우는 거의 같거나 반대로 감소하는 양상을 나타냈다. 즉, 토심이 일정한 경우에는 투수계수가 어느 정도까지 감소하면 지표면 저류효과로 인한 증발산량의 증가가 크지만, 투수계수가 크게 감소하면 지표면 저류효과보다는 직접유출량으로 빠져나가는 양이 더욱 증가하게 되어 증발산량은 감소하게 됨을 알 수 있다. 이러한 양상은 Table 3의 직접유출량의 변화를 보면 알 수 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 증발산량의 경우와는 반대로 동일한 토심에 대해서 투수계수가 10^{-3} 에서 감소하지만 10^{-5} 의 경우는 증가하는 것을 확인할 수 있다. Figure 11과 Figure 12는 투수계수의 변화에 따른 토심별 증발산량 및 직접유출량의 변화량을 나타낸 것이다.

Table 2. Evapotranspiration changes at each soil depth considering hydraulic conductivity (Unit: mm)

Soil Depth (cm)	Hydraulic Conductivity (cm/s)		
	3.1×10^{-1}	3.1×10^{-3}	3.1×10^{-5}
10	461	553	554
20	512	581	570
60	563	658	655

* The amount of evapotranspiration is average rainfall for 10 years (1999-2008); 1,337mm

Table 3. Direct Runoff changes at each soil depth considering hydraulic conductivity (Unit: mm)

Soil Depth (cm)	Hydraulic Conductivity (cm/s)		
	3.1×10^{-1}	3.1×10^{-3}	3.1×10^{-5}
10	869	783	787
20	825	757	770
60	785	698	709

* The amount of direct runoff is average rainfall for 10 years (1999-2008); 1,337mm

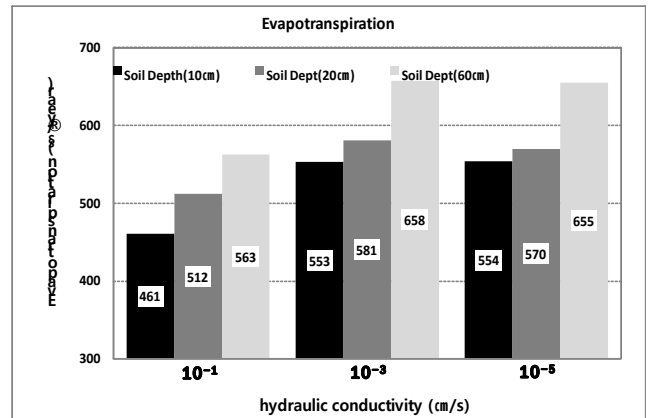


Fig. 11. Evapotranspiration changes at each soil depth considering hydraulic conductivity

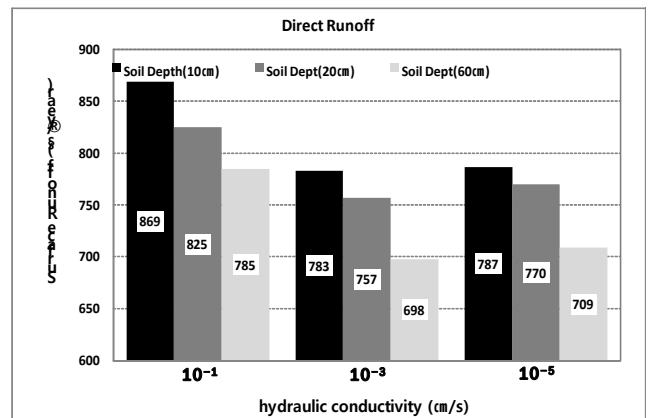


Fig. 12. Direct Runoff changes at each soil depth considering hydraulic conductivity

3.2. 열순환 영향 평가

옥상녹화 토양의 토심 및 투수계수의 변화에 따른 각 시나리오별 열순환 효과 분석 결과는 Table 4~Table 6과 같다. 지표면온도의 변화를 살펴보면 동일한 투수계수에 대하여 토심이 깊어짐에 따라 감소하지만 감소폭은 크지 않은 것으로 나타났다. 투수계수가 가장 큰 10^{-1} 의 경우 토심이 깊어져도 지표면온도의 감소폭이 크지 않았는데 이는 큰 투수계수로 인해 수분이 급격히 토양을 통과하여 빠져나감에 따라 온도의 저감효과가 미미함을 알 수 있다. 그러나 투수계수가 감소할수록 토양수분이 증가하여 지표면 온도의 저감효과는 상대적으로 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 반면에 동일한 토심에 대해서는 투수계수의 감소에 따라 지표면온도의 감소가 현저하게 나타났으나, 10^{-3} 이하의 투수계수에서는 온도의 저감효과가 나타나지 않았다. 즉, 어느 정도의 투수계수에서 토양이 포화가 되면 이후의 온도저감효과는 나타나지 않는다.

본 연구에서는 열환경과 밀접한 연관이 있는 현열(sensible heat)과 잠열(latent heat)의 변화 양상을 분석하였다. 또한, 대기 중의 열의 분배를 나타내는 현열과 잠열의 비인 보웬비(Bowen ratio)를 추출하여 열환경 상태를 분석하였다. 보웬비는 현열에 대한 잠열의 비로서 다음의 식으로 표현된다.

$$B = \frac{Q_h}{Q_e} \quad \text{Eq. (3)}$$

여기서, B는 보웬비(Bowen ratio), Q_h 는 현열(sensible heat), Q_e 는 잠열(latent heat)이며, 보웬비는 증발율과 밀접한 관련이 있는데 증발율은 다음 식으로 표현하기도 한다.

$$EF = \frac{Q_e}{Q_e + Q_h} = \frac{1}{1 + B} \quad \text{Eq. (4)}$$

여기서, EF는 증발율이다. 즉, 보웬비가 크다는 것은 증발율이 감소하여 열환경 상태가 좋지 않음을 나타내며, 반대로 보웬비가 작으면 증발율이 증가하여 열환경 상태가 양호함을 나타낸다. 종합하면 잠열이 높고 현열이 낮을수록 쾌적한 열환경 상태라 할 수 있다.

Table 7에서 나타난 바와 같이 옥상녹화 토심이 증가할수록 보웬비가 감소하여 쾌적한 열환경 상태를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한, 동일 토심에 대한 결과에서 투수계수가 10^{-3} 에서 10^{-5} 으로 감소하였으나 보웬비가 미미하게 증가하는 양상은 증발산량의 변화 결과에서 확인한 바와 같다. Figure 13, Figure 14는 투수계수의 변화에 따른 토심별 지표면온도 및 보웬비의 변화 양상을 나타낸 것이다.

Table 4. Surface Temperature changes at each soil depth considering hydraulic conductivity (Unit: mm)

Soil Depth (cm)	Hydraulic Conductivity (cm/s)		
	3.1×10^{-1}	3.1×10^{-3}	3.1×10^{-5}
10	15.3	14.9	14.9
20	15.2	14.8	14.8
60	15.2	14.6	14.6

Table 5. Sensible Heat changes at each soil depth considering hydraulic conductivity (Unit: mm)

Soil Depth (cm)	Hydraulic Conductivity (cm/s)		
	3.1×10^{-1}	3.1×10^{-3}	3.1×10^{-5}
10	456	289	293
20	404	275	287
60	307	143	154

Table 6. Latent Heat changes at each soil depth considering hydraulic conductivity (Unit: mm)

Soil Depth (cm)	Hydraulic Conductivity (cm/s)		
	3.1×10^{-1}	3.1×10^{-3}	3.1×10^{-5}
10	1,148	1,359	1,356
20	1,247	1,426	1,399
60	1,382	1,618	1,611

Table 7. Bowen Ratio changes at each soil depth considering hydraulic conductivity (Unit: mm)

Soil Depth (cm)	Hydraulic Conductivity (cm/s)		
	3.1×10^{-1}	3.1×10^{-3}	3.1×10^{-5}
10	0.40	0.21	0.22
20	0.32	0.19	0.21
60	0.22	0.09	0.10

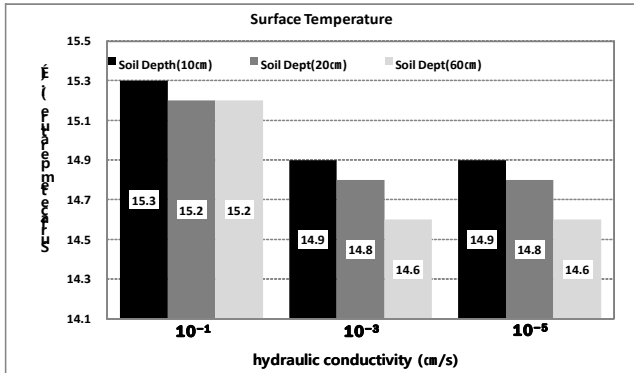


Fig. 13. Surface Temperature changes at each soil depth considering hydraulic conductivity

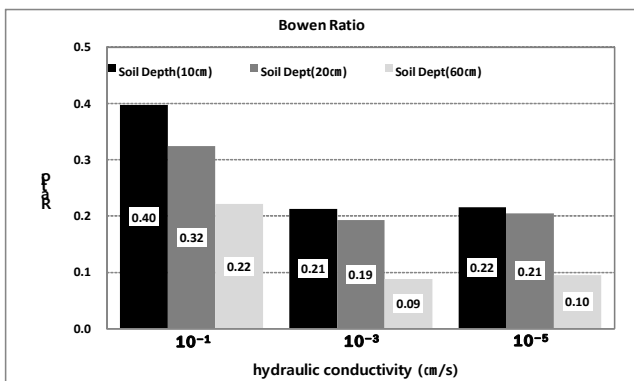


Fig. 14. Bowen Ratio changes at each soil depth considering hydraulic conductivity

4. 결론

본 연구는 격자기반의 정밀분포형 물순환 및 열순환 해석모형을 이용하여 옥상녹화 토양의 토심 및 물리적 특성에 기반한 녹화유형별 물-열순환 성능효과를 정량적으로 평가하였다.

옥상녹화 토양의 토심 및 투수계수의 변화에 따른 영향 평가를 위하여 토심을 10cm, 20cm 및 60cm의 세 개의 시나리오로 구분하였고, 투수계수를 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ 에 대해 세 개의 시나리오(10^{-1} , 10^{-3} , 10^{-5})로 나누어 구분하였다. 따라서 토심 및 투수계수 각 시나리오를 고려하여 총 9개의 시나리오에 대한 효과를 평가하였다. 모형의 모의는 1999년부터 2008년까지 기상청 서울측후소의 1시간 간격의 기상자료를 이용하여 총 10년간 모의하였으며, 모의된 결과는 녹화 대상지역에 대한 수문학적 특성인 직접유출량, 증발산량과 열순환 모의결과인 지표면 온도, 현열 및 잠열, 그리고 현열과 잠열의 비인 Bowen ratio를 비교-분석하여 제시하였다. 그 결과, 증발산량의 경우에 동일한 투수계수에 대하여 토심이 깊어질수록 증가하는 양상을 나타내는데 이는 토양층이 두꺼워짐에 따라 토양층이 흡수한 수분량이 증가하고 이 양이 토양을 통해 증발함에 따라 증가하는 것으로 볼 수 있다. 반면, 토심이 일정한 경우에는 투수계수가 어느 정도까지 감소하면 지표면 저류효과로 인한 증발산량의 증가가 크지만, 투수계수가 크게 감소하면

지표면 저류효과보다는 직접유출량으로 빠져나가는 양이 더욱 증가하게 되어 증발산량은 감소하게 됨을 알 수 있다. 직접유출량의 변화는 증발산량의 경우와는 반대의 양상을 나타냈다.

열순환 영향 평가 중 지표면온도의 변화를 살펴보면 동일한 투수계수에 대하여 토심이 깊어짐에 따라 감소하지만 감소폭은 크지 않은 것으로 나타났다. 투수계수가 가장 큰 경우 토심이 깊어져도 지표면온도의 감소폭이 크지 않았는데 이는 큰 투수계수로 인해 수분이 급격히 토양을 통과하여 빠져나감에 따라 온도의 저감효과가 미미함을 알 수 있다. 그러나 투수계수가 감소할수록 토양수분이 증가하여 지표면 온도의 저감효과는 상대적으로 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 반면에 동일한 토심에 대해서는 투수계수의 감소에 따라 지표면온도의 감소가 현저하게 나타났으나, 10^{-3} 이하의 투수계수에서는 온도의 저감효과가 나타나지 않았다. 즉, 어느 정도의 투수계수에서 토양이 포화가 되면 이후의 온도저감효과는 나타나지 않는다. 또한, 옥상녹화 토심이 증가할수록 보웬비가 감소하여 쾌적한 열환경 상태를 나타냄을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 사용된 정밀분포형 수문모형은 집중형 수문모형과는 달리 모형의 매개변수를 평균화하는 것이 아니라 지역의 특성을 충실히 표현할 수 있도록 입력자료를 구성한다. 이는 물순환 체계의 장래추정과 대책의 효과 평가에 있어도 분포형 모형의 모의결과의 일정 신뢰성을 얻을 수 있는 것을 의미한다. 그러면서도 물리적 기반의 분포형 수문모형은 일반적으로 집중형 수문모형에 비해 많은 계산시간이 필요하고, 우리나라 산악지역의 자연유역처럼 수문자료가 불충분하거나 미계측 유역이 존재하는 경우에는 실무에서 유출해석을 하는데 있어 많은 한계와 어려움이 있는 것은 사실이다.

향후, 옥상녹화의 다양한 유형별 물순환 및 열순환 개선 효과를 정량적으로 평가하여 환경성능계수를 개발함으로써 정부 및 지자체의 도시계획 및 환경생태계획에 활용 가능한 옥상녹화 환경성능 원단위 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 환경기술개발사업(차세대에코이노베이션기술개발사업: 건축물구조에 따른 입체녹화 시스템 개발 과제번호 : 403-112-006)의 지원에 의해 수행되었음.

References

[1] Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986a). An introduction to european hydrological system—systeme hydrologique european, 'SHE'. 1. History and philosophy of a physically-based distributed modeling system, Journal of Hydrology, Vol. 87, pp. 45-59.

[2] Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the european hydrological system—systeme hydrologique european, 'SHE'. 2.

- Structure of a physically based distributed modelling system, Journal of Hydrology, Vol. 87, pp. 61-77.
- [3] Choi, H.G. (2011). Effect of Impervious Cover Reduction Measures on the Rainfall-Runoff and Water Quality in Urban Watershed, the degree of master, University of Chungbuk, pp. 82-93.
- [4] Cumming, J., C. Withers, J. Sonne, D. Parker, and R.Vieira.(2007). UCF Recommissioning, Green Roofing Technology, and Building Science Training; Final Report : FSEC-CR-1718-07.
- [5] Han, M.Y., Kim, J.G. and Park, S.C. (2003). The characteristic of the quantity and quality of rainfall through greening roof during rainy season, Journal of Korean Society on Water Quality, pp. 53-56.
- [6] Hwang, S.H. and Kim, Y.L. (2006). Analysis of relationship between impervious rate and base flow by SHER model, urnal of Korean Society on Water Quality, pp. 126-133.
- [7] Jia, Y. (1997). *Iterated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model*. Ph.D. dissertation, University of Tokyo, Japan.
- [8] Jia, Y., Kinouchi, T. and Yoshitani, J.(2005). Distributed hydrologic modeling in a partially urbanized agricultural watershed using water and energy transfer process model. J. of hydrologic engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 253~ 263.
- [9] Jia, Y., Wang, H., Zhou, Z., Qiu, Y., Luo, X., Wang, J., Yan, D. and Qin, D.(2006). Development of the WEP-L distributed hydrological model and dynamic assessment of water resources in the Yellow River basin. J. of hydrology, Vol. 331, pp. 606~ 629.
- [10] Joo, M.H. (2009). Application of SWMM and establishment of anto monitoring system to evaluate small urban nonpoint source pollutant, the degree of master, University of Chungnam, pp. 21-58.
- [11] Julien, P.Y., and Saghafian, B. (1991). CASC2D Users Manual-A Two Dimensional Watershed Rainfall-Runoff Model, Civil Engr. Report, CER90-91PYJBS-12. Colorado State University, Fort Collins
- [12] Kim, H.J. and Jang, C.H. (2009). Development and application of the water cycle analysis model for the urban catchment, Korea Institute of Construction Technology, Report No. 2-6-3.
- [13] Kim, H.S., Kang, J.S. and Byeon, H.S.(1999). A Study on the Development of Roof-planting System and its Thermal Performance, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 127-134.
- [14] Kim, W.J. and Cho, Y.M. (2009). Plans to Encourage Green Roofs for Energy Saving and Monitoring Thereof, The Seoul Institute, Report No. 2008-PR-47
- [15] Kim, W.T., Park, B.J. and Yoon, Y.H. (2008). Comparative Study on Construction and Support System of Building Rooftop Greening in Korea and Japan, Journal of Korea Society for Plants People and Environment, Vol. 11, No. 2, pp. 1-7.
- [16] Lee, D.G., Yoon, S.W., Oh, S.H. and Jang, S.W. (2005). The Effect of Temperature Reduction as Influenced by Rooftop Greening, Journal of Korean Environmental Restoration Technology, Vol. 8, No. 6, pp. 34-44.
- [17] Lee, D.G., Yoon, S.W., Oh, S.H. and Jang, S.W. (2006). A Field Study to Evaluate Greenroof Runoff Reduction and Delay, Journal of Korean Environmental Restoration Technology, Vol. 9, No. 6, pp. 117-122.
- [18] Lee, J.H., Kim, B.G., Cho, D.J., Kim, J.G. and Lee, B.C. (2006). A Simulation of Runoff by a greening roof for Rainfall Runoff Retardation, Journal of Korean Society on Water Quality, pp. 981-990.
- [19] Liu, K and B. Bass(2005). Performance of Green Roof Systems. National Research Council Canada, Report No. NRCC-47705 : Toronto, Canada.
- [20] Molnar, D.K., and Julien, P.Y. (2000). Grid size effects on surface water modeling, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 5, pp. 8-16.
- [21] Moran A. et al.(2004), Biological and agricultural engineering, the degree of master of science.
- [22] Oh, S.H. (2007). Temperature reduction effect in different types of extensive Green Roof, he degree of master, The Seoul National University, pp. 49-85.
- [23] Park, J.H., Yoo, Y.G., Park, Y.K., Yoon, H.T., Kim, J.G., Park, Y.S., Jeon, J.H. and Lim, K.J. (2008). Analysis of Runoff Reduction with LID Adoption using the SWMM, Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 24, No. 6, pp.805-815.
- [24] Park, J.H., Joo, J.H. and Yoon, Y.H. (2010). Effect on the Growth of Plliolblastus pygmaed and Soil Characteristics as Affected by Difference of Soil Thickness and Soil Mixture Ratio in the Shallow-Extensive Green Roof Module System, Journal of the environmental sciences, Vol. 9, No. 7, pp. 871-877.
- [25] Park, J.S., Park, J.H., Joo, J.H. and Yoon, Y.H. (2010). Change Soil Water and Evaluation with Respect to Shallow-Extensive Green Roof System, Journal of the environmental sciences, Vol. 19, No. 7, pp. 843-848
- [26] Rosenzweig, C., and W. Solecki(2006). "Mitigating New York City's Heat Island with Urban Forestry, Living Roofs, and Light Surfaces", Sixth Symposium on the Urban Environment and Forum on Managing our Physical and Natural Resources, American Meteorological Society, Athlanta, GA.
- [27] Sharif, H.O., Ogden, F.L., Krajewski, W.F., and Xue, M. (2002). Numerical simulations of radar rainfall error propagation, Water Resources Research, Vol. 38, No. 8.
- [28] VanWeort N. et al.(2005), Green roof stormwater retention : Effects of roof surface, slope, and media depth, Journal of Environmental Quality, No. 34, pp.1036-1044.
- [29] Washington, D.C.(2004). Department of Energy 2004. Federal Technology Alert : Green Roofs. DOE/EE-0298 : Washington, D.C., U.S.A.
- [30] 日本国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.
- [31] 日本土木研究所, (2001), *WEP モデル 解説書*, pp. 2-25.

투고(접수)일자: 2013년 8월 1일

수정일자: (1차) 2013년 8월 22일

수정일자: (1차) 2013년 8월 27일

게재 확정일자: 2013년 8월 27일