

# 시뮬레이션을 통한 인공지반 교목의 탄소저장량 변화<sup>†</sup>

유수진\* · 송기환\* · 박사무엘\* · 김세영\*\* · 전진형\*\*\*

\*고려대학교 대학원 환경생태공학과 · \*\*한국농어촌공사 전북지역본부 사업계획부 · \*\*\*고려대학교 환경생태공학부

## Simulating Carbon Storage Dynamics of Trees on the Artificial Ground

You, Soo-Jin\* · Song, Ki-Hwan\* · Park, Samuel\* · Kim, Se-Young\*\* · Chon, Jin-Hyung\*\*\*

\*Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University

\*\*Korea Rural Community Corporation

\*\*\*Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

### ABSTRACT

To successfully create a low-carbon landscape in order to become a low-carbon city, it is necessary to understand the dynamics of artificial greening's resources on a multi-scale. Additionally, the effects of carbon storage should be quantitatively evaluated. The purpose of this study is to simulate and evaluate the changes in carbon storages of artificial ground trees using system dynamics throughout a long-term period. The process consisted of analyzing the dynamics of the multi-scale carbon cycle by using a casual loop diagram as well as simulating carbon storage changes in the green roof of the Gangnam-gu office building in 2008, 2018, 2028, and 2038. Results of the study are as follows. First, the causal loop diagram representing the relationship between the carbon storage of the artificial ground trees and the urban carbon cycle demonstrates that the carbon storage of the trees possess mutual cross-scale dynamics. Second, the main variables for the simulation model collected 'Biomass,' 'Carbon storage,' 'Dead organic matter,' and 'Carbon absorption,' and validated a high coefficient of determination, the value being ( $R^2=0.725$ ,  $p<0.05$ ). Third, as a result of the simulation model, we found that the variation in ranking of tree species was changing over time. This study also suggested the specific species of tree—such as *Acer palmatum* var. *amoenum*, *Pinus densiflora*, and *Betula platyphylla*—are used to improve the carbon storage in the green roof of the Gangnam-gu office building. This study can help contribute to developing quantitative and scientific criteria when designing, managing, and developing programs on low-carbon landscapes.

*Key Words: Low Carbon Landscape, Multi-Scale, System Dynamics, Causal Loop Diagram, Stock-Flow Diagram*

### 국문초록

저탄소 도시 실현의 대안으로써 저탄소경관을 창출하기 위해서는 다중 스케일 차원에서 디자인 요소들의 동태성을

<sup>†</sup>: 이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A-2013456). 또한 2016년도 중소기업기술혁신개발사업 혁신기업기술개발(S2404606)의 지원을 받아 수행되었음.

**Corresponding author:** Jin-Hyung Chon, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea, Tel.: +82-2-3290-3048, E-mail: jchon@korea.ac.kr

이해해야 하며, 탄소 저장효과를 정량적으로 평가할 수 있어야 한다. 본 연구의 목적은 시스템 다이내믹스를 활용하여 인공지반 교목의 탄소저장량 변화를 장기적인 측면에서 시뮬레이션하고 평가하는 것이다. 연구의 과정은 인과지도를 통해 다중 스케일 측면에서 탄소순환의 동태성을 분석하고, 강남구청 본관 옥상공원의 탄소저장량에 대하여 2008년, 2018년, 2028년, 2038년의 변화를 시뮬레이션하였다. 연구의 결과는 다음과 같다. 첫째, 인공지반 교목과 도시 탄소순환 탄소저장량의 관계에 대한 인과지도 분석결과, 다중 스케일간의 관계성이 확인되었다. 둘째, 시뮬레이션 모델의 주요 변수는 ‘바이오매스’, ‘탄소저장량’, ‘고사유기물’, ‘탄소흡수량’이 선정되어 모델에 활용되었으며, 적합도는  $R^2=0.725$  ( $p<0.05$ )로 유의한 것으로 나타났다. 셋째, 시뮬레이션 모델 결과, 인공지반 교목의 탄소저장량은 시간의 흐름에 따라 수종의 순위가 다양하게 변화하였다. 이에 따라 본 연구에서는 홍단풍, 소나무, 자작나무와 같은 수종을 강남구청 본관 옥상공원의 탄소저장량 향상을 위한 수종으로 제안하였다. 이러한 연구 결과는 저탄소경관 계획 시 식재계획의 기준안 또는 수종 선택에 기여할 수 있을 것이다.

주제어: 저탄소경관, 다중 스케일, 시스템 다이내믹스, 인과지도, 저장-유량 다이어그램

## 1. 서론

신기후체제를 알리는 파리협정에서는 과학적 기반을 바탕으로 완화와 적응에 초점을 맞추며 저탄소 배출과 기후 탄력적 개발이라는 장기 목표를 제시하였으며, 이에 대응하여 우리 사회는 저탄소 도시를 실현시키기 위한 다양한 연구 및 사업들을 진행해오고 있다. 특히 조경공간은 다양한 식물재료와 토양재료를 활용하여 옥상녹화에서부터 공원 및 도시 전반의 녹지체계까지 다중 스케일의 저탄소경관을 제공하고 있다(Demuzere *et al.*, 2014). ‘저탄소경관’이란 탄소저장량을 증가시켜줄 수 있는 요소들로 이루어진 경관을 의미하며(Kim *et al.*, 2010; Zhang and Sui, 2010; Beringer *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2014; You *et al.*, 2015), 다중 스케일 측면에서 도시내 생태 네트워크가 작동하게 할 뿐 아니라, 탄소흡수원으로 써도 중요한 역할을 하고 있다(Demuzere *et al.*, 2014; Wilkinson and Dixon, 2016).

최근에는 옥상녹화와 같은 인공지반 녹화를 통해 저탄소경관을 조성하여 생태적 기능과 함께 기후변화 적응 가능성을 실험하는 연구(Choi *et al.*, 2004; Kim and Nam, 2014; Lee *et al.*, 2015)와 도시내 탄소흡수원 확충 차원에서 수목 및 토양재료의 탄소저장량과 흡수량을 정량적으로 평가하는 연구들이 활발히 진행되고 있다(Ahn *et al.*, 2011; Jeong *et al.*, 2013; Orsini *et al.*, 2014; Whittinghill *et al.*, 2014). 특히 옥상녹화 교목은 초본식물 및 생산작물에 비해 탄소저장 능력 및 대기오염 완화 등에 효과적인 것으로 나타나, 저탄소 도시 구현에 중요한 요소로 강조되고 있다(Oberndorfer *et al.*, 2007; Currie and Bass, 2008). 이에 따라 옥상녹화 유형 중 교목의 식재가 가능한 혼합형 및 증량형 옥상녹화는 경량형 옥상녹화보다 경제성이 낮음에도 불구하고(Castleton *et al.*, 2010), 지속적으로 연구가 수행되고 있다(Jim and Tsang, 2011; Bianchini and Hewage,

2012). 게다가 도시공원과 가장 유사한 환경으로 교목 식재가 가능하기 때문에, 시민들에게 사회적, 환경적 서비스를 제공함에 따라 다중 스케일 차원에서 연구범위가 점차 확대되고 있는 추세이다(<https://www.archtoolbox.com/materials-systems/site-landscape/green-roofs.html>; Mesimäkia *et al.*, 2016). 도시공원 내 인공지반의 경우, 교목을 대상으로 탄소저장량을 측정 한 연구들이 주로 수행되고 있지만(Korea Environment Institute, 2009; Riwako *et al.*, 2014), 옥상녹화의 경우에는 주로 초본식물, 생산작물 등을 대상으로 탄소저장량을 평가하고 있는 실정이다(Ahn *et al.*, 2011; Jeong *et al.*, 2013; Orsini *et al.*, 2014). 그러나 초본식물과 교목의 탄소저장량 단위가 서로 상이하기 때문에, 초본식물의 연구결과를 토대로 교목의 탄소저장량 효과를 비교하기 어려우며, 다중 스케일 차원에서 각기 다른 스케일의 변수 간 상호작용을 분석할 수 없는 한계를 가지고 있다. 옥상녹화는 도시내에서 저탄소경관을 창출할 수 있는 작은 단위의 대상지이기 때문에, 탄소저장량에 대한 공간 스케일 별 상호작용을 분석하기 위해서는 옥상녹화 교목을 대상으로 연구가 수행되어야 할 것이다. 또한 옥상녹화 교목의 탄소저장량을 평가하기 위해서는 시간에 따른 교목의 생장과 인공지반이 가지고 있는 특성을 동시에 이해해야 한다. 교목은 식재된 공간의 특성 및 시간의 흐름에 따라 생장이 변화되는 특성이 있다. 특히 수종에 따라 20년 이상의 시간이 경과하게 되면 교목의 생장량은 줄어들 수 있으며(Jo and Ahn, 2000), 탄소저장량에도 영향을 주기 때문에 장기적인 측면에서 교목 탄소저장량의 변화를 파악할 수 있어야 한다(Jo and Ahn, 2000; Mcpherson and Peper, 2012). 건축물은 수십년 단위로 수명이 결정되기 때문에 옥상녹화 탄소순환 시스템을 분석하기 위해서는 1~2년의 단기적인 변화보다도 중·장기적인 관점에서 시스템의 동태성을 분석해야 한다(Guo *et al.*, 2001; Stave, 2002; Moon, 2007; Duran and Paucar, 2009; Fong *et*

al., 2009; Han et al., 2009). 하지만, 그 동안 진행되었던 선행 연구들에서는 시간의 흐름에 따른 수종별 탄소저장량은 제대로 고려하지 못하였다. 따라서 도시내 저탄소경관을 창출하기 위해서는 기존의 실험연구가 아닌, 다중 스케일 차원에서 변수들 간의 상호작용을 분석할 수 있는 새로운 방법이 적용되어야 할 것이다. 옥상녹화의 탄소순환 시스템 내에서 작용하는 다중 스케일의 변수들의 피드백 관계를 분석하고, 탄소저장량의 변화를 중·장기적으로 예측하기 위한 적합한 연구방법으로 시스템 다이내믹스(System dynamics)가 많이 활용되고 있다(Bennett et al., 2005).

본 연구의 목적은 다중 스케일 차원에서 저탄소경관 창출을 위해 시스템 다이내믹스를 이용하여 인공지반 교목이 가지고 있는 탄소순환 시스템의 동태성을 분석하고, 탄소저장량 변화를 장기적인 측면에서 시물레이션 평가하는 것이다. 연구의 세부 목적은 첫째, 다중 스케일 차원에서 시간변화에 따른 인공지반 교목과 토양의 탄소저장관계에 대해 시스템 사고로 분석한 뒤, 컴퓨터 모델링을 위한 변수를 도출하는 것이다. 둘째, 도출된 변수를 바탕으로 인공지반 교목 탄소저장량 시물레이션 모델을 구축하는 것이다. 셋째, 장기적인 측면에서 인공지반 교목의 수종별 탄소저장량 변화를 시물레이션하고 평가하는 것이다. 본 연구의 결과는 인공지반 교목의 시간의 흐름에 따른 탄소저장량 변화 정보를 파악함으로써 다중 스케일 차원에서 장기적으로 저탄소경관을 창출하기 위한 구체적인 수종을 선정하는데 기여할 것이다.

## II. 연구방법

### 1. 연구범위

#### 1) 공간적 범위

본 연구에서는 다중 스케일 차원에서 저탄소경관을 조성하기 위하여 옥상녹화 중에서도 도시공원 내 인공지반의 환경과 가장 유사하게 조성될 수 있는 혼합형 및 중량형 옥상녹화의 교목을 대상으로 탄소저장량을 산정하였다. 구체적인 대상지는 2008년 준공된 강남구청 본관 옥상공원으로 선정하였다. 강남구청 본관 옥상공원은 혼합형 옥상녹화로, 녹지구적도에 따르면 부지면적 1,696.0m<sup>2</sup> 중, 80.2%인 1,360.2477m<sup>2</sup>가 녹지로 구성돼 있으며, 홍단풍(*Acer palmatum* var. *amoenum*), 청단풍(*Acer palmatum* Thunb.), 자작나무(*Betula platyphylla*), 산딸나무(*Cornus kousa*), 산수유(*Cornus officinalis*), 백송(*Pinus bungeana*), 소나무(*Pinus densiflora*), 살구나무(*Prunus armeniaca* var. *ansu* Max), 때죽나무(*Styrax japonica*), 황금측백(*Thuja orientalis* for. Aurea Nana) 10종의 교목이 총 53주 식재되어 있다. 또한 식재 기반층은 총 291m<sup>3</sup> 중 펠라이트가 232.8m<sup>3</sup>(약

80%), 팜소일이 58.2m<sup>3</sup>(약 20%)인 인공토양으로 구성되어 있다. 그 밖에 공간은 데크, 회랑, 파고라, 야외무대, 휴게데크, 습지, 제주석 판석, 디딤석 등으로 이루어져 있다. 강남구청 본관 옥상공원은 스프링클러를 통해 오전 7시에 자동으로 1시간 동안 살수하여 관수관리를 실시하고 있다. 또한, 제초 및 정지, 전정 관리는 구청 내부에서 비정기적으로 수행되고 있어 일반적인 인공지반환경과 유사한 관리행태를 나타내고 있다.

#### 2) 시간적 범위

시물레이션 모델의 시간적 범위는 건축물의 수명을 고려하기 위하여 「서울특별시 도시 및 주거환경 정비조례」를 기준으로 설정하였다. 조례에 따라 공동주택 이외의 철근 콘크리트 건축물의 노후·불량건축물 기준인 30년을 적용하였으며, 강남구청 본관 옥상녹화가 조성된 2008년을 기준으로 2018년, 2028년, 2038년까지 10년 단위로 시간의 흐름에 따른 수종별 탄소저장량 변화 추이와 연도별 탄소저장량의 순위변화를 분석하였다.

## 2. 연구흐름

시스템 다이내믹스는 Forrester(1961)에 의해 소개된 연구방법으로 시스템의 행태에 대하여 시간의 흐름이 변수 간의 상호관계에 따라 어떠한 피드백 관계가 성립되어 시스템의 성장과 안정성에 영향을 주는지 밝히는 데에 목적이 있다(Kim et al., 1999). 또한 시스템 다이내믹스는 질적방법과 양적방법을 융합한 방법론으로, 질적방법으로써 인과지도 작성을 통한 시스템의 동태성 분석 단계가 있으며, 양적방법으로써 시물레이션 모델링 단계가 있다. 본 연구에서는 시스템 다이내믹스 과정에 따라 옥상녹화 수목의 탄소저장량 변화를 시물레이션 평가하고자 하였다. 첫째, 옥상녹화 교목의 탄소저장능력이 다중 스케일 차원에서 도시의 탄소순환과 어떠한 인과순환 관계를 형성하는지 분석하기 위해 Vensim PLEx32를 활용하여 인과지도를 작성하고, 모델에 적용 가능한 변수를 도출하였다. 둘째, 도출된 변수를 산출할 수 있는 수식을 STELLA 10.0.4(©iseesystems)를 활용하여 시물레이션 모델로 구축하고, SPSS 23.0을 활용하여 모의값과 실측값에 대한 적합도 검증을 시행하였다. 셋째, 검증된 시물레이션 모델을 활용하여 시간의 흐름에 따른 수종별 탄소저장량 변화를 시물레이션하였다.

### 3. 탄소저장량과 도시 탄소순환 동태성 분석방법

시스템 다이내믹스의 질적방법으로써 인과지도는 변수 간의 인과관계를 도식화하여 다중 스케일 측면에서 시스템의 피드백 구조를 분석할 수 있다(Kim et al., 1999). 인과지도 상의 변수들은 화살표로 연결되며, 변수 간의 인과관계가 같은 방향으

로 변화할 경우, (+)표시를, 원인 변수가 감소하거나 증가할 때 결과 변수가 그 반대의 방향으로 움직일 경우, (-)표시를 나타낸다(Kim, 2000; Moon, 2007). 또한 시간지연의 효과로 현상이 늦게 나타나는 경우, 화살표 중앙에 (=)의 기호를 표시하게 된다(Kim, 2000). 이들 관계는 시스템이 지속적으로 증가하거나 감소하는 강화루프(Reinforcing Loop)와 시스템이 증감을 반복하는 패턴을 나타내는 균형루프(Balancing Loop)로 표현된다(Kim, 2000).

본 연구에서는 다중 스케일 측면에서 인공지반 교목의 탄소 저장량과 도시의 탄소순환 관계에 대한 시스템 범위를 설정하고 동태성을 분석하기 위하여 첫째, 교목 및 고사 유기물 축적에 의한 탄소저장량 기작과 관련된 문헌을 분석하였다. 둘째, 공간 스케일에서 인공지반의 탄소저장 능력이 대기 중 탄소량에 미칠 수 있는 영향에 대한 사례를 분석하였다. 셋째, 도시 스케일에서 저탄소 도시의 실현을 위해 저탄소경관이 미칠 수 있는 파급효과와 관련된 문헌을 바탕으로 인과지도를 작성하였다.

#### 4. 탄소저장량 시뮬레이션 모델의 분석방법 및 입력 자료

시스템 다이내믹스의 양적방법으로써 시뮬레이션 모델링은 시스템의 주요 현상을 정량적으로 평가하기 위한 단계이다(Kim *et al.*, 1999). 인과지도 중 모델링에 활용 가능한 변수들의 세부적인 관계를 파악하여 저장-유량 다이어그램(Stock-Flow Diagram)을 작성함으로써 모델 구조를 정립한다. 저장-유량 다이어그램은 행위의 결과로 저장되는 변수를 의미하는 저장변수(Stock variable), 저장변수의 값을 변화시키는 역할을 하는 유량변수(Flow variable), 그 밖의 상수를 의미하는 보조변수(Parameter)로 구분하여 모형화 시킴으로써 시뮬레이션할 수 있다(Costanza *et al.*, 1998). 본 연구에서는 시간의 흐름에 따른 인공지반 교목의 수종별 탄소저장량과 고사 유기물에 의한 탄소흡수량을 예측하기 위하여 관련 수식을 고찰하고, 모델 입력 자료로 활용하였다. 또한 다중 스케일 차원에서 인공지반 교목 식재 사례로 옥상녹화를 선정하였으며, 다음과 같은 전제하에 관련 수식을 탐색하였다. 첫째, 인공지반 교목의 식재 초기에는 자연지반과 성장률에 차이가 거의 없는 것으로 전제한다(Cho, 2010; Suchocka, 2013). 둘째, 인공지반과 자연지반 토양의 품질 수준은 동일한 것으로 가정한다(Kang *et al.*, 2015).

강남구청 본관 옥상공원은 2008년부터 현재까지 운영되고 있으며, 직원, 주민 등의 이용이 많은 공간이기 때문에 교목의 직접분해를 통한 탄소저장량 측정이 불가능하였다. 흉고직경을 중심으로 탄소저장량을 산출하는 방법은 교목을 훼손시키지

않고 탄소저장량을 측정할 수 있는 적절한 방법이기 때문에 Lee(2003)와 Park and Kang(2010)에서 활용한 수식을 선정하였다. 이 수식은 수목의 흉고직경을 측정한 뒤 활엽수와 침엽수로 구분하여 상수를 적용함으로써 교목의 바이오매스량을 도출할 수 있으며(식 1 참조), 탄소전환계수를 적용하여 탄소저장량을 산출할 수 있다(식 2 참조).

$$W = a \times (DBH_i)^b \quad (\text{식 1})$$

여기서,  $W$  = 바이오매스 성장량  
 $DBH_i$  = 수목  $i$ 의 흉고직경  
 $a$  = 상대성장식 계수(침엽수: 0.1915, 활엽수: 0.1403)  
 $b$  = 상대성장식 계수(침엽수: 2.1436, 활엽수: 2.4595)

$$Y = CF \times \sum (x_i \times w_i) \quad (\text{식 2})$$

여기서,  $Y$  = 교목의 탄소저장량  
 $CF$  = 바이오매스에 대한 탄소전환계수  $\left(0.5 \times \frac{12}{44}\right)$   
 $x_i$  =  $i$ 수목의 개체수  
 $w_i$  =  $i$ 수목의 평균바이오매스

한편, 고사 유기물에 의한 탄소흡수량 산출식은 Yi *et al.* (2013)가 개발한 한국형 산림토양 탄소모델(KFSC Model: Korean Forest Soil Carbon Model)을 적용하여 도출하였다. KFSC 모델(Yi *et al.*, 2013)은 수목의 생장부터 고사 및 분화 과정을 거쳐 토양까지의 탄소 이동을 추정할 수 있는 장점을 가진 모델로서, 수목의 바이오매스 저장고와 고사 유기물 저장고로 나누어 탄소 시스템을 설명하고 있다. 여기서 수목의 바이오매스는 임목을 줄기(Stem), 가지(Branch), 잎(Foliage), 굵은뿌리(Coarse roots), 잔뿌리(Fine roots)로 세분화하여 분석된다. 다음으로 고사 유기물은 1차 저장고인 지상부 목질쇄설물(AWD: Aboveground Woody Debris), 지하부 목질쇄설물(BWD: Belowground Woody Debris), 지상부 리터(ALT: Aboveground Litter), 지하부 리터(BLT: Belowground Litter) 등으로 구분한다. 탄소 중 일부는 기체 형태로 대기 중으로 유실되며, 그 과정에서 축적되는 고사 유기물의 탄소흡수량을 도출할 수 있다(식 3 참조, 식 4 참조).

$$\frac{dHUM_t}{dt} = AWD_{t-1} \cdot (1 - E_{AWD}) \cdot D_{AWD} + ALT_{t-1} \cdot (1 - E_{ALT}) \cdot D_{ALT} + BWD_{t-1} \cdot (1 - E_{BWD}) \cdot D_{BWD} + BLT_{t-1} \cdot (1 - E_{BLT}) \cdot D_{BLT} - HUM_{t-1} \cdot D_{HUM} \quad (\text{식 3})$$

여기서,  $HUM_t$  =  $t$ 시간의 부엽토 탄소저장량  
 $D_i$  =  $i$ 의 감소율  
 $E_i$  =  $i$ 의 대기중으로 배출되는 탄소량

$$\frac{dHUM_t}{dt} = HUM_{t-1} \cdot (1 - E_{HUM}) \cdot D_{HUM} - SOC_{t-1} \cdot D_{ms} \quad (\text{식 4})$$

여기서,  $SOC_t = t$ 시간의 토양유기물 탄소저장량  
 $HUM_t = t$ 시간의 부엽토 탄소저장량  
 $D_i = i$ 의 감소율  
 $E_i = i$ 의 대기 중으로 배출되는 탄소량

위의 수식을 활용하여 강남구청 본관 옥상공원의 탄소저장량 초기값을 도출하기 위해 2008년 강남구청 본관 옥상공원 준공도면을 바탕으로 2015년 6월 5일 현장조사를 통해 분석 가능한 수종을 선정하였다. 현장조사 결과, 준공도면에 제시된 수고와 현장조사에서 확인된 수고가 상이하거나, 측정이 불가능한 9주를 제외한 7종의 수목 44주를 분석에 활용하였다. 여기서 실제 자연지반과 옥상녹화에 활용된 인공지반의 환경에 따른 수종별 성장패턴이 상이하기 때문에 강남구청 본관 옥상공원 교목의 흉고직경을 2015년 6월 5일, 2016년 11월 9일 실측하여 선형회귀식을 통해 성장률(Growth Rate)을 도출하였다. 또한 건축물의 하중을 고려하기 위하여 수목생장의 최대치를 의미하는 수용력(Carrying Capacity)값을 지정하였다(Table 1 참조). 수용력은 현재 옥상공원에 식재된 수종의 비율에 식재기반층 하중을 곱하여 최대 수목의 중량(MTW: Maximum Tree Weight)을 지정하였으며(식 5 참조), 이를 나무 중량 계산프로그램 Tree weight(삼성에버랜드)를 활용하여 최대 수목 중량과 근사값을 흉고직경 값으로 환산하여 도출하였다.

$$MTW = \frac{A_i}{TA} \times (G \times RL) \quad (\text{식 } 5)$$

여기서,  $MTW$  = 최대수목의 중량  
 $TA$  = 전체 수목 본 수  
 $A_i = i$  수목의 본 수  
 $G$  = 식재기반층 면적( $m^2$ )  
 $RL$  = 면적당 최대설계하중( $Kg/m^2$ )

수종별 탄소량의 초기값은 2008년 강남구청 본관 옥상공원 준공도면의 규격을 활용하여 산출하였다. 토양 탄소량의 초기값은 2008년 강남구청 본관 옥상공원 준공도면에 명시된 토양과 동

일한 제곱을 확보하여 토양 중 유기물 함량 측정법인 Walkley-Black법(Walkley and Black, 1934)을 통해 측정하였다.

한편, 저장-유량 다이어그램을 통해 구축된 모델은 적합도(Goodness of fit) 평가를 통해 모델 결과가 현실 시스템의 행태와 동일한 통계적 특성을 지니는지를 분석하고, 타당성을 검증해야 한다(Kim *et al.*, 1999). 본 연구에서는 옥상녹화 수종별 탄소저장량 시뮬레이션 모델에서 도출된 모의값과 실측값 간의 결정계수(Coefficient of determination)를 도출함으로써 적합도 검정을 실시하였다(Kim, 1999; Piñeiro *et al.*, 2008). 실측값은 2015년 6월 5일, 2016년 11월 9일 현장조사를 실시하여 식재된 교목의 흉고직경을 측정하였다. 결정계수는 0부터 1까지의 범위에서 표본회귀식에 의해 설명된 제곱합(Explained sum of squares)이 총제곱합(Total sum of squares)에서 차지하는 상대적 크기를 나타낸 것으로  $R^2$ 으로 표기하였다(Lee and Kang, 2009). 위와 같은 입력자료를 활용한 시뮬레이션 모델은 Figure 1과 같은 과정으로 수행되었다.

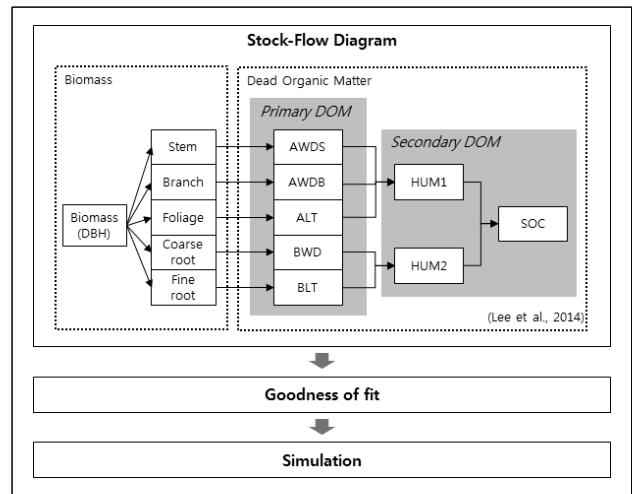


Figure 1. Simulation model process

Table 1. Plant lists of rooftop park in Gangnam-gu office(2008) and DBH in 2008, 2015, and 2016

No.	Korean name	Scientific name	Amount	Size	DBH(cm)			Carrying capacity	Growth rate (cm/yr)
					2008	2015	2016		
1	매죽나무	<i>Styrax japonica</i>	10	H2.0×R5.0	5.00	5.09	5.47	16.55	0.04
2	백송	<i>Pinus bungeana</i>	2	H2.0×R5.0	6.67	14.32	15.79	15.79	1.12
3	산딸나무	<i>Cornus kousa</i>	1	H4.0×R20.0	4.17	5.73	6.41	10.82	0.26
4	소나무	<i>Pinus densiflora</i>	4	H2.5×B4.0	12.50	16.36	18.43	28.65	0.66
5	자작나무	<i>Betula platyphylla</i>	9	H2.0×R5.0	3.67	7.96	10.85	18.14	0.77
6	청단풍	<i>Acer palmatum</i> Thunb.	3	H2.0×W0.9×R5.0	4.17	5.73	6.18	14.01	0.24
7	홍단풍	<i>Acer palmatum</i> var. <i>amoenum</i>	1	H2.5×W1.5×R8.0	4.17	6.21	6.83	23.87	0.31
Total			30	-	-	-	-	-	-

(Source: Gangnam-gu office, 2008)

### III. 연구결과 및 고찰

#### 1. 탄소저장량과 도시 탄소순환과의 동태성 분석

본 연구에서는 다중 스케일 측면에서 교목의 탄소순환 기작, 옥상녹화 공간의 탄소저장량, 도시 대기 중 탄소저장량을 시스템 범위로 강남구청 본관 옥상공원의 교목 수종별 탄소저장량과 도시 탄소순환과의 동태성을 분석하였다(Figure 2 참조).

균형루프 B1은 교목과 고사 유기물 간의 관계를 설명한 것으로, 교목의 바이오매스와 고사 유기물의 양이 증가할수록 교목과 토양의 탄소저장량과 탄소흡수량이 증가하는 피드백 구조를 설명하고 있다. 이는 장기적인 측면에서 교목의 바이오매스와 고사 유기물이 대기 중 탄소농도를 감소시켜 대기 중 탄소량의 균형을 유지할 수 있음을 의미한다(Matlock and Morgan, 2011; Park *et al.*, 2013; Yi *et al.*, 2013). 옥상녹화 스케일에서 수목과 토양의 탄소저장량의 변화를 살펴본 균형루프 B2는 장기적인 측면에서 인공지반 녹화에 축적된 탄소저장량이 대기 중의 탄소량을 저감시켜주는 기능을 하는 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 2010; Wilkinson and Dixon, 2016). 균형루프 B3는 옥상녹화 공간이 도시내에 증가하였을 때 탄소저장량은 증가하며, 대기 중 탄소량을 감소시킬 수 있는 피드백 구조를 설명하고 있다(Choi *et al.*, 2004; Wilkinson and Dixon, 2016). 이처럼 교목 한 그루의 탄소저장량은 다중 스케일 차원에서 도시

전체의 탄소저장량을 증가시킬 수 있음을 의미하며, 저탄소경관을 창출할 수 있음을 시사하고 있다. 인과지도를 분석한 결과, 인공지반 녹화에서 저장하는 탄소의 양이 대기의 탄소농도에 영향을 주는 시스템을 파악할 수 있었다. 이를 바탕으로 인과지도 내에서 주요 변수는 '바이오매스', '탄소저장량', '고사 유기물', '탄소흡수량'으로 도출되었으며, 이는 인공지반 내에서 수목이 탄소를 얼마나 저장할 수 있는지 정량적으로 파악하기 위한 모델을 구축하는데 활용되었다.

#### 2. 탄소저장량 시뮬레이션 모델 구축

강남구청 본관 옥상공원 교목의 탄소저장량 시뮬레이션 모델을 구축하기 위해 먼저 수목의 탄소저장 시스템과 토양의 탄소저장 시스템 각각에서 저장변수, 유량변수, 보조변수를 도출하여 저장-유량 다이어그램을 구성하였다(Figure 3 참조).

수목의 탄소저장 시스템에서는 저장변수로 흉고직경과 바이오매스를 선정하였으며, 유량변수로 흉고직경 변화량과 바이오매스 증가량이 활용되었다. 보조변수로는 수목 성장율, 수용력, 줄기 바이오매스, 가지 바이오매스, 잎 바이오매스, 뿌리 바이오매스 등이 활용되었다. 고사 유기물에 의한 토양 탄소저장 시스템은 저장변수는 줄기, 가지, 잎, 뿌리의 사체, 부엽토, 토양 탄소저장량으로 선정하였으며, 유량변수로 줄기 고사량, 가지의 자연간벌, 잎 분해, 굵은뿌리 고사량, 잔뿌리 고사량, 1차

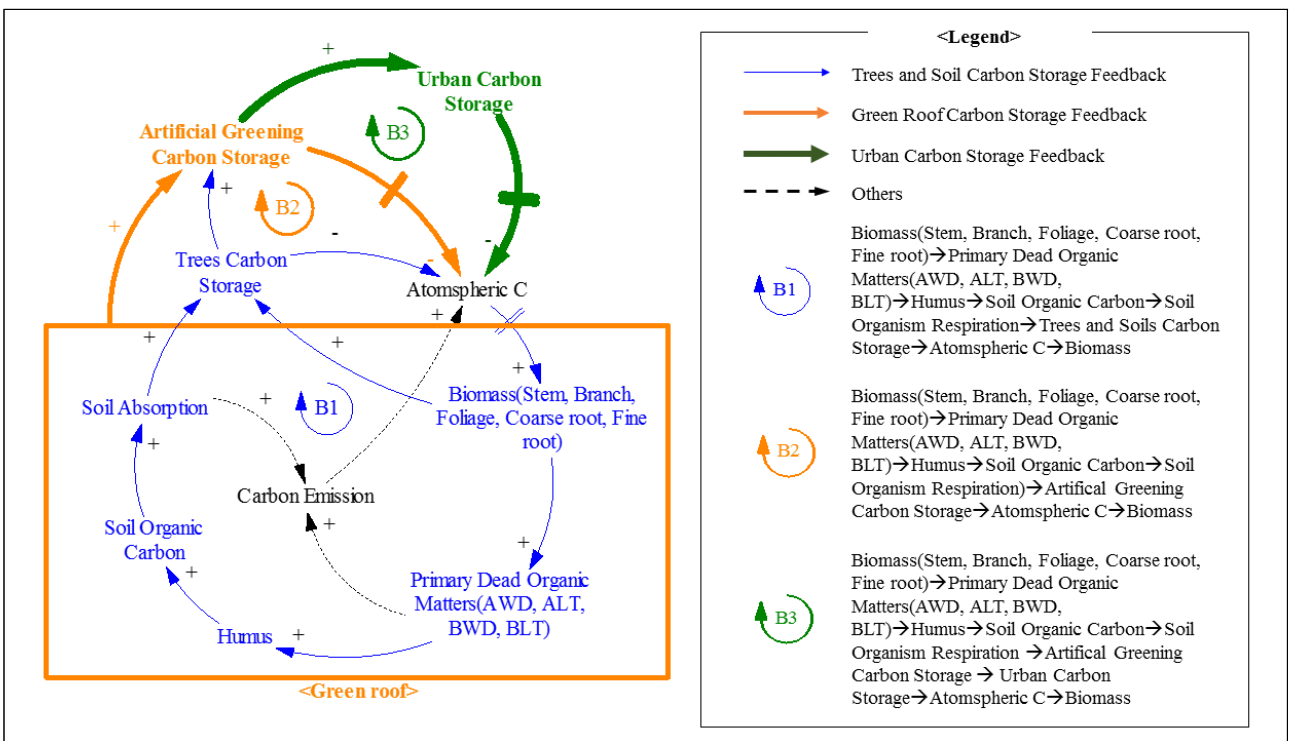


Figure 2. Dynamics of carbon storage on green roof

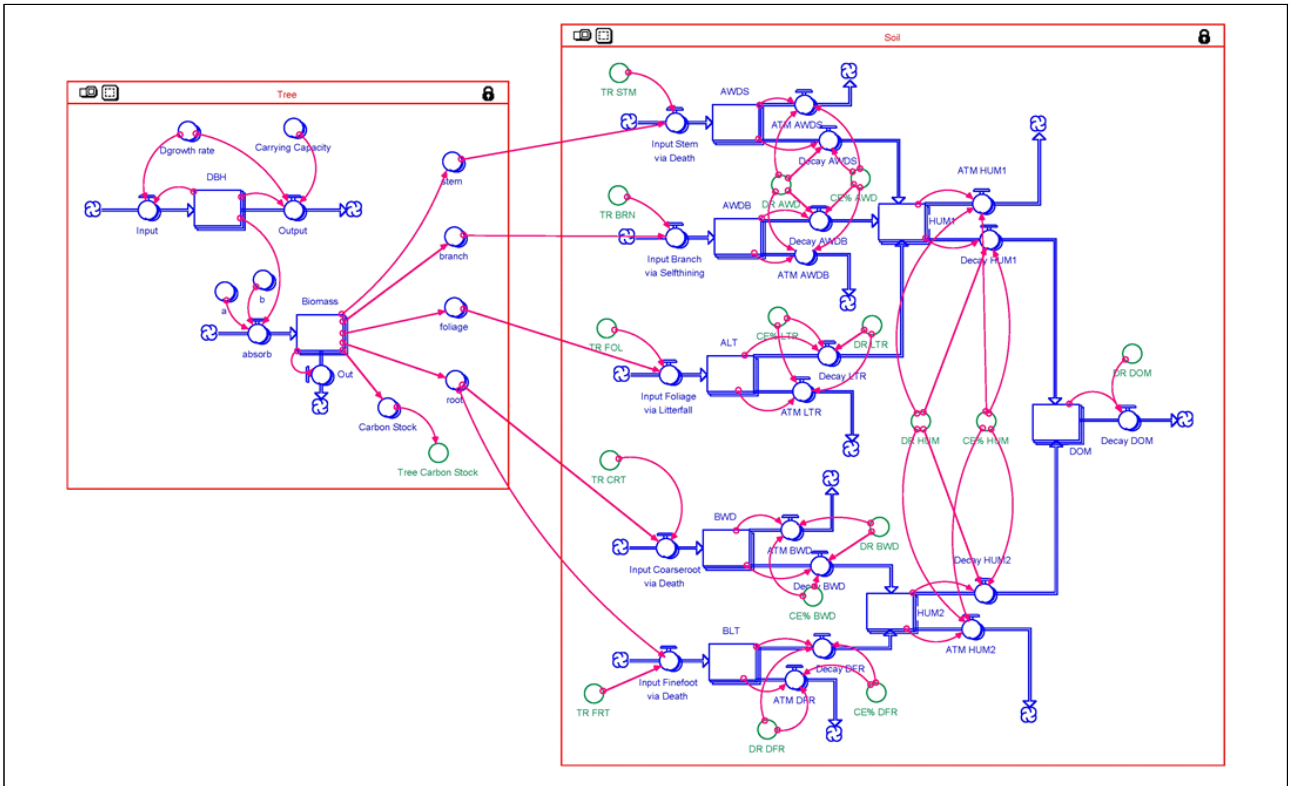


Figure 3. Stock-flow diagram

Legend: □ Stock    → Flow    ○ Parameter    ▭ Sector

유실, 1차 고사 유기물 전환, 2차 유실, 부식 및 토양 유입, 부패가 활용되었다. 보조변수는 고사율, 자연간벌, 낙엽, 부식상수, 부식과정 동안 대기로 손실되는 탄소로 선정하여 저장-유량 다이어그램을 작성하였다. 그 밖에 구체적인 저장-유량 다이어그램에 적용된 데이터 값은 [Appendix]에 제시하였다. 본 모형에 대한 적합도는 7개의 수종별 흉고직경 평균의 2015년과 2016년의 모의값에 대한 실측값의 표본회귀분석을 실시하여 검증하였다. 분석결과,  $R^2$ 는 0.725( $p < 0.05$ )로, 본 연구에서 정립한 모형은 실제 식물생장량 변화에 대한 72.5%의 설명력을 갖는 것으로 나타났다.

### 3. 탄소저장량 시뮬레이션 및 평가

장기적인 측면에서 강남구청 본관 옥상공원에 식재된 교목의 연도별 탄소저장량 변화에 대한 시뮬레이션 모델 분석결과 (Table 2 참조), 2008년부터 2038년까지 30년 동안 수종별 탄소저장량은 모두 증가하는 추세를 보였다. 하지만, 수종에 따라 일정 수준에서는 저장량이 유지되었으며, 탄소저장량 순위에서 차이가 나타났다. 먼저 2008년의 탄소저장량 순위는 '소나무>백송>매죽나무>홍단풍=청단풍=산딸나무>자작나무' 순이었지만, 2018년의 탄소저장량은 '소나무>홍단풍>자작나무>백

Table 2. Predicted carbon storage of biomass in 2008, 2018, 2028 and 2038(kgC/tree/yr)

Ranking	Korean name	Scientific name	Carbon storage			
			2008	2018	2028	2038
1	소나무	<i>Pinus densiflora</i>	5.86(-)	34.68(-)	34.70(↓1)	34.70(↓1)
2	백송	<i>Pinus bungeana</i>	1.52(-)	9.68(↓2)	9.68(↓3)	9.68(↓3)
3	매죽나무	<i>Styrax japonica</i>	1.00(-)	1.73(↓4)	2.92(↓4)	4.52(↓4)
4	홍단풍	<i>Acer palmatum</i> var. <i>amoenum</i>	0.64(-)	25.10(↑2)	46.00(↑3)	46.82(↑3)
5	청단풍	<i>Acer palmatum</i> Thunb.	0.64(-)	7.03(-)	12.07(↑1)	12.59(↑1)
6	산딸나무	<i>Cornus kousa</i>	0.64(-)	4.78(-)	6.56(-)	6.68(-)
7	자작나무	<i>Betula platyphylla</i>	0.52(-)	23.84(↑4)	23.84(↑4)	23.84(↑4)

Ranking change compared to 2008: (-) Maintain the ranking; (↑n) Increase the ranking; (↓n) Decrease the ranking



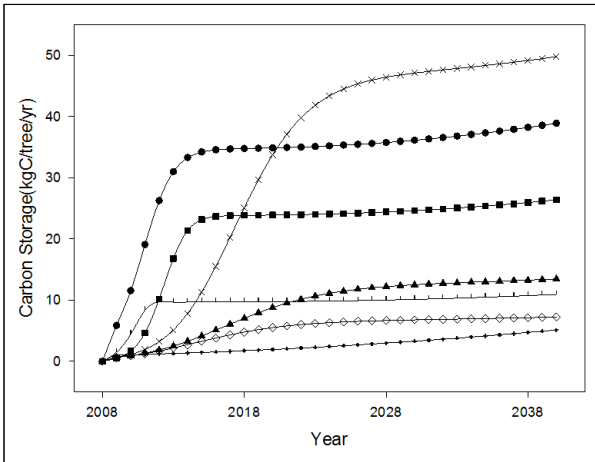


Figure 4. Carbon storage of green roof trees dynamics simulation(kgC/tree/yr)

Legend: ● *Pinus densiflora* ■ *Pinus bungeana* ▲ *Betula platyphylla*  
 × *Acer plamatum var. amoenum* ○ *Cornus kousa*  
 □ *Acer plamatum* Thunb. △ *Styryx japonica*

송>청단풍>산딸나무>매죽나무'로 홍단풍과 자작나무의 탄소 저장량에 대한 상대적 순위가 증가하였다. 2028년과 2038년의 탄소저장량은 '홍단풍>소나무>자작나무>청단풍>백송>산딸나무>매죽나무'순으로 홍단풍의 탄소저장량에 대한 상대적 순

위가 높아지는 것으로 나타났다. 특히 백송과 자작나무는 2018년 급격히 탄소저장량이 증가하지만, 이후로 더 이상 증가하지 않는 것으로 나타났다. 반면, 소나무, 매죽나무, 홍단풍, 청단풍, 산딸나무는 2038년까지 지속적으로 탄소저장량이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 장기적인 측면에서 수목의 탄소저장량의 변화추이를 확인할 수 있었다. 다음으로 수종별 고사유기물로 인해 토양에 축적되는 탄소흡수량에 대한 시뮬레이션 모델을 분석하였다(Table 3 참조).

연도별 고사 유기물의 탄소흡수량 변화를 분석한 결과, 탄소흡수량 값은 매우 미비하였지만, 2008년부터 2038년까지 탄소흡수량은 증가하는 추세를 보였다. 이는 인공지반 교목은 고사 유기물에 의한 탄소흡수량의 영향을 적게 받는 것으로 해석할 수 있다. 연도별 수목탄소량의 순위를 살펴보면 2008년의 탄소흡수량은 없으며, 2018년 순위는 '소나무>백송=자작나무>홍단풍=청단풍=산딸나무=매죽나무'로 나타났다. 2028년에는 '소나무>자작나무>홍단풍>백송>산딸나무>청단풍>매죽나무'순서로 탄소흡수량이 예측되었으며, 자작나무와 홍단풍의 탄소흡수량이 많아지기 시작한 시기로 볼 수 있다. 마지막으로 2038년의 탄소흡수량 순위는 '소나무>홍단풍>자작나무>백송>산딸나무>청단풍>매죽나무'로 2028년과 대비하여 자작나무와 홍단풍 사이에 순위변화가 있을 것으로 예상되었다. 이차

Table 3. Predicted carbon absorption of primary dead organic matters in 2008, 2018, 2028 and 2038(kgC/tree/yr)

Ranking	Korean name	Scientific name	Carbon absorption			
			2008	2018	2028	2038
1	소나무	<i>Pinus densiflora</i>	0(-)	0.08(-)	1.06(-)	3.52(-)
2	백송	<i>Pinus bungeana</i>	0(-)	0.03(-)	0.33(↓2)	1.06(↓2)
3	자작나무	<i>Betula platyphylla</i>	0(-)	0.03(-)	0.58(↑1)	2.12(-)
4	홍단풍	<i>Acer palmatum var. amoenum</i>	0(-)	0.01(-)	0.43(↑2)	2.35(↑2)
5	청단풍	<i>Acer palmatum</i> Thunb.	0(-)	0.01(-)	0.11(↓1)	0.45(↓1)
6	산딸나무	<i>Cornus kousa</i>	0(-)	0.01(-)	0.14(↑1)	0.68(↑1)
7	매죽나무	<i>Styryx japonica</i>	0(-)	0.01(-)	0.06(-)	0.21(-)

Ranking change compared to 2008: (-) Maintain the ranking; (↑n) Increase the ranking; (↓n) Decrease the ranking

Table 4. Predicted carbon storage of green roof trees in 2008, 2018, 2028 and 2038(kgC/tree/yr)

Ranking	Korean name	Scientific name	Carbon storage			
			2008	2018	2028	2038
1	소나무	<i>Pinus densiflora</i>	5.86(-)	34.76(-)	35.76(↓1)	38.22(↓1)
2	백송	<i>Pinus bungeana</i>	1.52(-)	9.71(↓2)	10.01(↓3)	10.74(↓3)
3	매죽나무	<i>Styryx japonica</i>	1.00(-)	1.74(↓4)	2.98(↓4)	4.73(↓4)
4	홍단풍	<i>Acer palmatum var. amoenum</i>	0.64(-)	25.11(↑1)	46.43(↑3)	49.17(↑3)
5	산딸나무	<i>Cornus kousa</i>	0.64(-)	4.79(↓1)	6.67(↓1)	7.13(↓1)
6	청단풍	<i>Acer palmatum</i> Thunb.	0.64(-)	7.04(↑1)	12.21(↑2)	13.27(↑2)
7	자작나무	<i>Betula platyphylla</i>	0.52(-)	23.87(↑4)	24.42(↑4)	25.96(↑4)

Ranking change compared to 2008: (-) Maintain the ranking; (↑n) Increase the ranking; (↓n) Decrease the ranking



본 연구에서는 옥상녹화에 식재된 교목의 탄소저장량과 토양의 탄소흡수량의 변화를 시간의 흐름에 따라 시뮬레이션 모델을 통해 예측해 보았다. 수목의 바이오매스에 따른 탄소저장량은 현재 또는 예측 시점까지 수목 자체가 보유하는 탄소량이며, 고사 유기물에 의한 탄소흡수량은 해당연도에 토양으로 흡수되는 연간 탄소량을 의미한다(Korea Environment Institute, 2010). 교목 수종별 바이오매스의 탄소저장량과 토양의 탄소흡수량 값을 합하여 시뮬레이션 한 결과, 옥상녹화 교목의 탄소저장량은 2008년부터 2038년까지 지속적으로 증가하는 추이를 나타냈다(Figure 4 참조, Table 4 참조). 연도별 교목의 탄소저장량 순위를 살펴보면 2008년의 순위는 '소나무>백송>매죽나무>홍단풍>산딸나무=청단풍>자작나무'로 나타났다. 2018년의 탄소저장량 순위는 '소나무>홍단풍>자작나무>백송>청단풍>산딸나무>매죽나무'로 홍단풍과 자작나무의 탄소저장량 상승폭이 두드러질 것으로 예측되었다. 2028년과 2038년의 탄소저장량에 대한 모델링 결과치는 '홍단풍>소나무>자작나무>청단풍>백송>산딸나무>매죽나무'의 순위로 나타났으며, 홍단풍의 탄소저장량이 가장 높은 시기로 볼 수 있다.

시뮬레이션 모델 결과를 종합분석하였을 때, 강남구청 본관 옥상공원 교목 중 홍단풍, 소나무, 자작나무는 장기적으로 탄소저장량이 증가함으로 저탄소경관 조성에 적합한 수종으로 분석되었다. 한편, 강남구청 본관 옥상공원에 식재된 교목은 시간의 흐름에 따라 탄소저장량의 순위가 2008년부터 2018년까지는 빠르게 증가하다가 30년 이후부터는 천천히 증가하는 현상을 나타냈다. 따라서 장기적으로 옥상녹화의 탄소저장량을 증가시키기 위해서는 10년 단위로 수목의 탄소저장량을 측정하여 수목관리를 해야 할 것이다. 특히 30년 이후에는 탄소저장량이 천천히 증가하기 때문에 건축물 리모델링 시기와 함께 식재설계를 실시함으로써 탄소저장량을 향상시키도록 해야 할 것이다.

## V. 결론

저탄소경관은 다중 스케일 차원에서 기후변화 시대에 저탄소 도시를 실현시킬 수 있는 중요한 개념이다. 특히 인공지반에 식재되는 교목은 탄소저장 능력이 우수하여 도시내 탄소흡수원으로써 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구는 도시내 저탄소경관을 창출하기 위한 기초 연구로써 시간의 흐름에 따른 인공지반 탄소저장 시스템의 동태성을 분석하고, 시뮬레이션 모델을 통해 수종별 탄소저장량의 변화를 정량적 데이터로 도출하기 위하여 강남구청 본관 옥상공원을 대상으로 시스템 다이내믹스를 활용하여 연구를 수행하였다. 먼저 인과지도를 통해 옥상녹화 교목의 탄소저장량과 도시 탄소순환 시스템의 동태성을 분석한 결과, 다중 스케일 측면에서 교목의 탄소저장량

변화는 옥상녹화와 같은 작은 공간부터 대기 중 탄소량까지 영향을 주는 피드백 관계가 성립하는 것으로 나타났으며, 인과지도 결과를 바탕으로 '바이오매스', '탄소저장량', '고사 유기물', '탄소흡수량'과 같은 모델 변수를 도출하였다. 다음으로 선행연구 및 현장조사를 통하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 특히 교목의 생장률은 강남구청 본관 옥상공원 교목의 흉고직경을 실측하여 선형회귀식을 통해 도출하였으며, 수용력 값은 교목의 하중을 고려하여 도출하였다. 이와 같은 방법으로 도출된 시뮬레이션 모델은 적합도 검증을 통해 통계적 유의성을 확인하였다( $R^2=0.725$ ,  $p<0.05$ ). 시뮬레이션 모델 결과, 2008년, 2018년, 2028년, 2038년도의 옥상녹화 교목의 수종별 탄소저장량 추이는 10년 주기로 순위가 변화하고 있음을 발견하였다. 특히 홍단풍, 소나무, 자작나무는 탄소저장량이 빠르게 증가하는 것으로 나타났다. 그 밖에도 모든 수종이 지속적으로 탄소저장량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 기존 강남구청 본관 옥상공원에 식재된 교목의 수량은 소나무 15주, 홍단풍 10주, 산딸나무 9주, 자작나무 4주, 매죽나무 3주, 청단풍 3주, 백송 1주로, 연구 결과에서 도출된 수종별 탄소저장량 순위와는 상이하게 나타났다. 이는 조경 식재 기준이 탄소저장량보다는 생태적 영속성, 종다양성, 계절감, 경관가치 등에 초점이 맞춰져 있기 때문으로 해석할 수 있다(Seoul, 2011). 따라서 강남구청 본관 옥상공원에 저탄소경관을 창출하기 위해서는 수목관리 측면에서 홍단풍, 소나무, 자작나무를 중심으로 식재해야 할 것이다.

한편, 본 연구는 다중 스케일 차원에서 다양한 공간스케일에서 저탄소경관을 창출하기 위한 기초단계의 연구로써, 시간의 흐름에 따른 변수를 고려함에 있어 옥상녹화 특성에 맞는 기후자료는 배제하고, 인공지반 수목의 생장량에만 초점을 두었다는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 인공지반 교목의 탄소저장량의 시뮬레이션 모델을 토대로 저탄소경관 조성을 위한 식재 설계 측면에서 대안을 제시했다는 데 의의가 있다. 이와 같이 시뮬레이션 모델을 통한 설계기법의 개발은 기후변화로 부터 회복력 있는 저탄소경관을 창출하고, '실천에 의한 학습(Learning by doing)' 등의 지속적인 운영 및 유지관리 방안을 개발하는데 기여할 것이다. 향후 연구에서는 인공지반 모델의 심화 단계로써 기후자료 및 일조, 흙서, 우수, 습도, 바람 등 옥외환경을 고려한 환경변수를 고려할 수 있는 모델 개발이 이루어져야 할 것이다.

## References

1. Ahn, G. Y., S. W. Han and E. H. Lee(2011) The analysis of instantaneous CO<sub>2</sub> uptake and evapotranspiration of herbaceous plants for artificial roof greening. Korean Journal of Environment and Ecology 25(1): 91-101.
2. Bennett, E., G. Cumming and G. Peterson(2005) A systems model approach to determining resilience surrogates for case studies. Eco-

- systems 8(8): 945-957.
3. Beringer, J., L. B. Hutley, J. M. Hacker, B. Neiniger and U. K. T. Paw (2011) Patterns and processes of carbon, water and energy cycles across northern Australian landscapes: From point to region. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(11): 1409-1416.
  4. Bianchini, F. and K. Hewage(2012) How "Green" are the green roofs? lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment* 48: 57-65.
  5. Castleton, H. F., V. Stovin, S. B. M. Beck and J. B. Davison(2010) Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*. 42: 1582-1591.
  6. Cho, S. H.(2010) Comparative Study on the Growth Condition of Landscape Woody Plants according to the Ground Structure of Apartment Complex, Incheon, Korea. Masters Thesis, Graduate School of Urban Science University of Seoul, Korea.
  7. Choi, H. S., K. G. Kim and S. Y. Hong(2004) A study of selecting target species for rooftop greening construction from urban ecological network point of view. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* 32(3): 18-31.
  8. Costanza, R., D. Duplisea and U. Kautsky(1998) Ecological modelling on modelling ecological and economic systems with stella. *Ecological Modelling* 110: 1-4.
  9. Currie, B. A. and B. Bass(2008) Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystem* 11(4): 409-422.
  10. Demuzere, M., K. Orru, O. Heidrich, E. Olazabal, D. Geneletti, H. Orru, A. G. Bhawe, N. Mittal, E. Feliu and M. Faehnle(2014) Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management* 146: 107-115.
  11. Duran, E. J. A. and C. A. Paucar(2009) System dynamics urban sustainability model for puerto aura in Puebla, Mexico. *Systemic Practice and Action Research* 22: 77-99.
  12. Fong, W. K., H. Matsumoto and Y. F. Lun(2009) Application of system dynamics model as decision making tool in urban planning process toward stabilizing carbon dioxide emissions from cities. *Building and Environment* 44: 1528-1537.
  13. Forrester, J. W.(1961) *Industrial Dynamics*. Cambridge: The MIT Press.
  14. Gangnam-gu Office(2008) Plant Lists of Rooftop Park, Planting Plan Map.
  15. Guo, H. C., L. Liu, G. H. Huang, G. A. Fuller, R. Zou and Y. Y. Yin(2001) A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the lake Erhai Basin. *Journal of Environmental Management* 61: 93-111.
  16. Han, J., Y. Hayashi, X. Cao and H. Imura(2009) Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning* 91(3): 133-141.
  17. Jeong, M., S. W. Han, J. S. Kim and J. S. Song(2013) Selection of native herbal plants capable to survive year-round in roof garden adopting extensive green roof system in the central district of Korea. *Flower Research Journal* 21(4): 172-181.
  18. Jim, C. Y. and S. W. Tsang(2011) Ecological energetics of tropical intensive green roof. *Energy and Buildings* 43: 2696-2704.
  19. Jo, H. K. and T. W. Ahn(2000) Indicators of carbon storage and uptake by tree growth in natural ecosystem. *Korean Journal of Environmental Ecology* 14(3): 175-182.
  20. Kang, M. S., E. Y. Lee, J. M. Lee, and M. N. Kim(2015) Improvement of soil quality for artificial planting's ground with large integrated underground parking lot in apartment complex. *LHI Journal* 6(1): 31-39.
  21. Korea Environment Institute(2009) *Low Carbon Land Use Planning Strategies Taking into Account Carbon Sinks such as Vegetation and Soils (I)*. Research Report to Korea Environment Institute.
  22. Korea Environment Institute(2010) *Low Carbon Land Use Planning Strategies Taking into Account Carbon Sinks such as Vegetation and Soils (II)*. Research Report to Korea Environment Institute.
  23. Kim, J. and Y. Nam(2014) A study on the planning factors of domestic and foreign carbon neutral city for carbon reduction. *Korean Institute of Spatial Design* 9(10): 103-112.
  24. Kim, D. H.(2000) A simulation method of causal maps: NUMER. *Korean System Dynamics Review* 1(2): 91-111.
  25. Kim, D. H., T. H. Moon and D. H. Kim(1999) *System Dynamics*. Seoul: Daeyoung.
  26. Kim, W., W. Kim, Y. Byun and J. Kim(2010) *A Study on Ensuring Carbon Reservoir and Reducing Carbon Emissions Plan*. Research Report to Seoul Development Institute.
  27. Lee, G. G.(2003) *Sustainability Indicators of Greenspace in Apartment Sites*. Ph. D. Dissertation, The Graduate School Seoul National University, Korea.
  28. Lee, H. S. and H. M. Kang(2009) *Inside Statistic Analysis & SPSS*. Paju: Idambooks.
  29. Lee, S. J., G. S. Park, D. K. Lee, S. W. Jang, H. G. Lee and H. W. Park(2015) A comparative study on carbon storage and physicochemical properties of vegetation soil for extensive green rooftop used in Korea. *Korea Journal of Environmental Restoration Technology* 18(1): 115-125.
  30. Matlock, M. D. and R. A. Morgan(2011) *Ecological Engineering Design: Restoring and Conserving Ecosystem Services*. New Jersey: Wiley & Sons.
  31. McPherson, E. G. and P. J. Peper(2012) Urban tree growth modeling. *Arboriculture and Urban Forestry* 38(5): 172-180.
  32. Mesimäki, M., K. Hauru, D. J. Kotze and S. Lehvävirta(2016) Neo-spaces for urban livability? Urbanites' versatile mental images of green roofs in the Helsinki metropolitan area, Finland. *Land Use Policy* 61: 587-600.
  33. Moon, T. H.(2007) *A Sustainable City through System Thinking*. Paju: Jipmoon.
  34. Oberndorfer, E., J. Lundholm, B. Bass, R. R. Coffman, H. Doshi, N. Dunnett, S. Gaffin, M. Kohler, K. K. Y. Liu and B. Rowe(2007) Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience* 57(10): 823-833.
  35. Orsini, F., D. Gasperi, L. Marchetti, C. Piovene, S. Draghetti, S. Ramazzotti, G. Bazzocchi and G. Gianquinto(2014) Exploring the production capacity of rooftop gardens(Rtgs) in urban agriculture: The potential impact on food and nutrition security, biodiversity and other ecosystem services in the city of bologna. *Food Security*. 6(6): 781-792.
  36. Park, E. J. and K. Y. Kang(2010) Estimation of C storage and annual CO<sub>2</sub> uptake by street trees in Gyeonggi-do. *Korean Journal of Environment and Ecology* 24(5): 591-600.
  37. Park, C. W., J. Lee, M. Yi, C. Kim, G. S. Park, R. H. Kim, K. H. Lee and Y. Son(2013) Estimation of change in soil carbon stock of pinus densiflora forests in Korea using KFSC model under RCP 8.5 climate change scenario. *Climate Change Research* 4(2): 77-93.
  38. Park, H. S., K. Oh and S. Lee(2014) Analysing effects of CO<sub>2</sub> absorption capability through enhancing urban green infrastructure in Seoul. *Journal of the Korean Urban Management Association* 27(4): 1-23.
  39. Piñeiro, G., S. Perelman, J. P. Guerschman and J. Paruelo(2008) How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed?.

- Ecological Modelling 216: 316-322.
40. Riwako, T., Y. J. Kim, H. K. Ryoo and D. K. Lee(2014) Analyzing the influence of biomass and vegetation type to soil organic carbon. *Journal of Korean Environmental Restoration Technology* 17(1): 123-134.
  41. Seoul(2011) Green Roof System Standard Detailing Manual. Research Report to Seoul.
  42. Stave, K. A.(2002) Using system dynamics to improve public participation in environmental decisions. *System Dynamics Review* 18(2): 139-167.
  43. Suchocka, M.(2013) Structural soils and other ways of facilitating tree growth in the difficult habitat conditions of cities. T. Bergier, J. Kronenberg, and P. Lisicki eds., *Sustainable Development Applications* 4, Krakow: The Sendzimir Foundation, pp. 39-49.
  44. Walkley, A. and I. A. Black(1934) An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
  45. Whittinghill, L. J., D. B. Rowe, R. Schutzki and B. M. Cregg(2014) Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. *Landscape and Urban Planning* 123: 41-48.
  46. Wilkinson S. and T. Dixon(2016) *Green Roof Retrofit Building Urban Resilience*. UK: Wiley Blackwell.
  47. Yi, K., C. W. Park, S. R. Ryu, K. H. Lee, M. J. Yi, C. Kim, G. S. Park, R. Kim and Y. Son(2013) Simulating the soil carbon dynamics of pinus densiflora forests in central Korea. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28(3): 241-256.
  48. You, S., K. H. Song and J. Chon(2015) A study on the carbon cycle system of urban green roof: Using system dynamics. *Proceedings of the 2015 Symposium on the Korean Institute of Landscape Architecture and the Korea Society of Environmental Restoration Technology*. Cheonan: The Korean Institute of Landscape Architecture and the Korea Society of Environmental Restoration Technology pp. 139-140.
  49. Zhang, J. and Y. H. Sui(2010) Research on low-carbon aesthetics built up by landscape design. *Proceedings of the 2010 International Conference on Environmental Engineering and Applications*. New York: S. Baby and Y. Dan, pp. 510-512.
  50. Zhou, Y., T. Shi, Y. Hu, C. Gao, M. Liu, S. Fu and S. Wang(2011) Urban green space planning based on computational fluid dynamics model and landscape ecology principle: A case study of liaoyang city. *Northeast China Chinese Geographical Science* 21(4): 465-475.
  51. <https://www.archtoolbox.com/materials-systems/site-landscape/green-roofs.html>

---

Received : 28 December, 2016

Revised : 18 January, 2017 (1st)

24 February, 2017 (2nd)

Accepted : 24 February, 2017

4인익명 심사필

(Appendix)

시스템	변수 유형	변수명	수식 및 값	참고문헌 및 자료		
수목	저량변수	흉고직경	DBH	측정 초기값	Table 1 참조	
		바이오매스	Biomass	0,000		-
	유량변수	흉고직경 변화량	Input	Dgrowth rate×DBH	Park and Kang(2010)	
			Output	(Dgrowth rate×DBH <sup>2</sup> )/Carrying capacity		
		바이오매스 증가량	absorb	a×(DBH) <sup>b</sup>		
	보조변수	수목 생장율	Dgrowth rate	측정값	Table 1 참조	
			한계 수용력	Carrying capacity	측정값	Table 1 참조
		바이오매스 산정변수	a	침엽수: 0.1915, 활엽수: 0.1403	Park and Kang(2010)	
			b	침엽수: 2.1436, 활엽수: 2.4595		
		줄기 바이오매스	Stem	Biomass	Yi <i>et al.</i> (2013)	
		가지 바이오매스	Branch	Biomass×0.15		
		잎 바이오매스	Foliage	Biomass×0.25		
		뿌리 바이오매스	Root	Biomass×0.15		
		수종별 탄소저장량	Carbon stock	Biomass×0.5×12/44		
수목 총 탄소저장량		Tree carbon stock	SUM(Carbon stock)	-		
토양	저량변수	각 부위 사체	AWDS	측정 초기값	-	
			AWDB	측정 초기값		
			ALT	측정 초기값		
			BWD	측정 초기값		
			BLT	측정 초기값		
		부엽토	AHUM	측정 초기값		
			BHUM	측정 초기값		
			SOC	측정 초기값		
	유량변수	줄기 고사량	Input stem via death	TR_STM×stem	Yi <i>et al.</i> (2013)	
			가지의 자연간벌	Input branch via selfthinning		branch×TR_BRN
			잎 분해	Input foliage via litterfall		foliage×TR_FOL
			굵은뿌리 고사량	Input coarseroot via death		(root×0.8)×TR_CRT
			잔뿌리 고사량	Input fine root via death		(root×0.2)×TR_FRT
		1차 유실	ATM AWDS	AWDS×(1-exp(-DR_AWD))×CE%_AWD		
			ATM AWDB	AWDB×(1-exp(-DR_AWD))×CE%_AWD		
			ATM LTR	ALT×(1-exp(-DR_LTR))×CE%_LTR		
			ATM BWD	BWD×(1-exp(-DR_BWD))×CE%_BWD		
			ATM DFR	BLT×(1-exp(-DR_DFR))×(1-CE%_DFR)		
		1차 고사 유기물 전환	Decay AWDS	AWDS×(1-exp(-DR_AWD))×(1-CE%_AWD)		
			Decay AWDB	AWDB×(1-exp(-DR_AWD))×(1-CE%_AWD)		
			Decay LTR	ALT×(1-exp(-DR_LTR))×(1-CE%_LTR)		
			Decay BWD	BWD×(1-exp(-DR_BWD))×(1-CE%_BWD)		
			Decay DFR	BLT×(1-exp(-DR_DFR))×(1-CE%_DFR)		
		2차 유실	ATM AHUM	AHUM×(1-exp(-DR_HUM))×CE%_HUM		
			ATM BHUM	BHUM×(1-exp(-DR_HUM))×CE%_HUM		
	부식 및 토양 유입	Decay AHUM	AHUM×(1-exp(-DR_HUM))×(1-CE%_HUM)			
		Decay BHUM	BHUM×(1-exp(-DR_HUM))×(1-CE%_HUM)			
	부패	Decay SOC	SOC×(1-exp(-DR_SOC))			
보조변수	고사율( $yr^{-1}$ )	Stem	0.002	Yi <i>et al.</i> (2013)		
		Coarse roots	0.020			
		Fine roots	1.547			
	자연간벌( $yr^{-1}$ )	Branch	0.080			
	낙엽( $yr^{-1}$ )	Foliage	0.40			
	부식 상수( $yr^{-1}$ )	AWD	0.137			
		BWD	0.137			
		ALT	0.460			
		BLT	0.460			
		HUM	0.010			
		SOC	0.001			
	부식과정 동안 대기로 손실되는 탄소(%)	AWD, BWD, BLT, HUM	83,000			
	ALT	81,500				