pISSN: 1226-7147, eISSN: 2383-9171
https://doi.org/10.17208/jkpa.2022.02.57.1.128

Journal of Korea Planning Association Vol.57, No.1 (2022)
대한국토·도시계획학회지「국토계획」제57권 제1호 pp.128-144

Check for updates

도시생태계 서비스 현황과 잠재성 파악을 위한 도시 탄소저장량 계산 및 옥상녹화 시뮬레이션 모듈 연구
: 수원시를 대상으로*

Study on Carbon Storage Calculation and Green Roof Simulation Modules to Understand the Current Status and Potential of Urban Ecosystem Services
: In case of Suwon-si in Korea

김인현** · 양아란*** · 김선웅**** · 한동훈***** · 신규선****** · 박성진******* · 김호영******** · 김영미*********
Kim, In Hyun · Yang, Aran · Kim, Seon-Ung · Han, Dong-Hoon · Shin, Gyu-Sun · Park, Sung-Jin · Kim, Ho-Yeong · Kim, Young-Mi

Abstract

Carbon reduction in urban ecosystems is increasingly important. Recently, national strategies for sustainable development in response to climate change were launched. To enhance the effectiveness of urban ecosystem services, a practical carbon storage calculation tool is needed that can calculate the current carbon storage and simulate the carbon storage potential of unoccupied urban space. In this study, the current status and potential for carbon storage in Suwon-si, Korea were evaluated by developing carbon storage and green roof simulation modules. These modules were designed to ensure that the spatial unit for calculation and simulation could be set as lot or grid units, and multiple areas could be selected at the same time. Evaluation of these modules resulted in a carbon storage of 426,142 tC (tonnes of carbon dioxide), which can be further improved by 4,574 tC through rooftop greening. These results are highly useful for evaluating carbon storage. As the modules allow for various area (i.e., city, district, lot, and grid) units to be set, they can be utilized in establishing the direction of development. Additional research on the indicators and improvement options for urban ecosystem services can be used to further develop this tool.

주제어 도시생태계 서비스, 탄소저장량, 옥상녹화, 공간정보시스템, 인트라맵
Keywords Urban Ecosystem Services, Carbon Storage, Green Roof, GIS (Geographic Information System), IntraMap

* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성증진 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020002780001).
** CEO, Korea Spatial Information & Communication CO., LTD. (First Author: ihkim@ksic.net)
*** Assistant Manager, Korea Spatial Information & Communication CO., LTD. (Corresponding Author: arany@ksic.net)
**** Assistant Manager, Korea Spatial Information & Communication CO., LTD. (sukim@ksic.net)
***** Senior Executive Director, Korea Spatial Information & Communication CO., LTD. (dhhan@ksic.net)
****** Executive Director, Korea Spatial Information & Communication CO., LTD. (gsshin@ksic.net)
******* Assistant Manager, RSQUARE (psj2716@gmail.com)
******** Assistant Manager, Korea Spatial Information & Communication CO., LTD. (khy7206@ksic.net)
********* Executive Manager, Korea Spatial Information & Communication CO., LTD. (ymkim@ksic.net)

Ⅰ. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

대한민국의 도시생태계 관련 정책, 연구는 전환기를 맞이하고 있다. 내부적으로 도시화 진행이 성숙기에 접어들어 안정화되며 도시 내 문제에 대해서 지속가능한 대응방안이 요구되고 있으며, 대외적으로 기후변화 저지를 위한 탄소 발생 저감에 대한 구체적 달성방안이 요구되어 탄소중립 관련 전략이 수립되고 수행이 본격화되고 있다. 내외적 배경에 의해 도시 내부에 존재하는 생태계의 역할의 중요성이 다시금 주목받고 있다. 도시생태계는 그 자체로 보존할 가치가 있을 뿐만 아니라 문화, 건강, 경제, 회복력 측면에서 도시 삶의 질 향상에 기여할 수 있으므로(Gómez-Baggethun et al., 2013), 잠재된 도시생태계 서비스 가치의 적극적 발굴이 필요하다. 특히 도시 생태계의 탄소저감능력은 지속가능성과 기후 변화 이슈와 관련성이 높은 도시생태계 서비스로써 의의가 크다.

2021년 7월 발표된 한국토지주택공사의 「2020 도시계획현황」 통계에 따르면 2020년 기준 용도지역상 도시지역 비율은 전 국토의 16.7%이며 도시지역에 거주하는 인구는 전체 인구의 91.8%로 나타났다. UN 경제사회국의 「World Urbanization Prospects」(UN ECOSOC, 2019)에서 대한민국의 도시화 정도를 행정구역상 동 거주 인구비율을 기준으로 하여 82%로 산정한 사례도 있다. 기준을 달리하더라도 한국은 80% 이상 인구가 도시에 거주하는 국가이며, 1990년대 이전 급격한 도시화 이후 현재 도시화 진행 정도는 안정기, 정착기에 도달했다(한국토지주택공사, 2021).

현재 도시 개발, 관리에 대해 가장 주요한 거시적 관점 중 하나는 지속가능성이다. UN의 SDGs(Sustainable Development Goals)이 2030년까지 달성을 목표로 2016년부터 이행 중으로 대한민국은 국내 실정에 맞춘 K-SDGs을 수립하고 2021년 「제4차 지속가능발전 기본계획」을 발표해 추진하고 있다(대한민국정부, 2021a). 제 4차 지속가능성 기본계획은 도시생태축 보전 및 구축을 과제로 포함해 기존 도시생태계를 확충하고자 하고 있다.

기후변화에 대한 논의는 지속가능성에 대한 국제적 주요 논의 상 포함됨과 동시에 사안의 중대성으로 인해 독립적으로 다뤄지고 있으며 도시 관련 정책에 영향을 미치고 있다. 2015년 파리 협정에 의한 국가별 탄소 저감 전략 수립, 추진이 본격화됨에 따라 한국 정부는 2020년 「2050 탄소중립 추진전략」과 「LEDS(장기저탄소발전전략)」을 확정하였으며 2021년 발표된 한국판 뉴딜 2.0 중 그린뉴딜 부문에 탄소중립 과제를 신설해 탄소 저감을 위한 기반을 강화하고자 하고 있다(대한민국정부, 2021b). 그린뉴딜과 탄소중립 전략은 생태계의 탄소흡수원으로써 역할에 주목하여 도시생태계 확충에 대한 내용을 포함하고 있다.

종합적으로 지속가능한 도시를 실현하고 기후 변화에 대응하기 위해서는 도시생태계를 보전하고 복원해 탄소흡수원으로써 기능을 강화해야 한다. 도시생태계의 탄소저감능력 강화를 위한 실천적 사업 수립에 전제되어야 하는 단계는 도시생태계 현황 파악이며 나아가 도시를 구성하는 건물에 대한 녹색건물 인증을 강화해 건물의 탄소 배출 일부를 상쇄하고자 하는 노력이 지속 중인 만큼 건물 옥상 등 잠재된 공간의 녹지 개발을 통한 탄소저감능력 증대 효과도 중요하게 살펴볼 필요가 있다.

본 연구에서는 GIS 기반 도시생태계 탄소저장량 계산 및 옥상녹화 시뮬레이션 모듈 개발을 통해 도시생태계 탄소저감능력 현황과 잠재성을 파악하고자 한다. 도시와 생태계가 유기적으로 내부 구성요소 간, 외부 환경 간 상호작용을 통해 유기적 네트워크를 구성한다는 특성을 고려할 때 공간정보 기반의 현황 및 잠재성 파악이 더욱 강조된다. 도시생태계 확충 관련 정책 및 사업에 활용할 수 있도록 개별 공원 부지, 상업용/거주용 건물 필지 등 도시 구성 요소별 탄소저감능력의 공간적 분포를 확인할 수 있는 시스템이 필요하나 국내 기존 연구 성과의 실제 환경에 대한 적용 연구가 부족한 실정이다. 따라서 국내외 도시생태계 탄소저감능력 평가에 대한 연구 동향을 확인하고 한계를 파악함으로써 의사결정에 활용 가능한 실용성 있는 도시생태계 탄소저감능력 평가 모듈을 개발하고자 하였으며 국내 가용 데이터와 기존 방법론의 적용 가능성을 고려해 공간적으로 거시적, 미시적 평가를 실현할 수 있는 모듈 구현을 목표로 하였다. 생태계의 탄소저감능력을 평가하는 지표는 현황 파악이라는 목적에 중점을 두어 탄소저장량 사용하였으며 토양과 식생의 탄소저장량을 나누어 산정할 수 있도록 구성되었다.

도시생태계 탄소저장량 계산 및 옥상녹화 시뮬레이션 모듈 개발 연구 대상지로 수원시를 선정하여 연구를 진행하였다. 용도지역 기준 행정구역 전부가 도시지역으로 구성된 기초지방자치단체는 특별시 및 광역시의 일부 구를 제외할 경우 경기도 수원시, 성남시, 부천시, 안양시, 의정부시, 시흥시, 광명시, 군포시, 오산시, 구리시, 의왕시, 하남시, 과천시이며 이 중 수원시는 경기도청 소재지일 뿐만 아니라 개중 가장 많은 인구가 거주하는 도시로 연구 결과에 대한 파급효과가 클 것으로 기대된다.

Ⅱ. 도시생태계 탄소저장량 관련 선행연구

1. 기존 연구 동향

본 연구와 유관한 선행 연구는 도시생태계 현황 및 생태계 서비스 관련 연구, 식생 및 토양탄소저장량 평가 관련 연구, 옥상녹화 관련 연구로 구분될 수 있다.

도시생태계 중요성이 부각됨에 따라 도시생태계 현황을 생태면적율(김인현 외, 2020), 비오톱지도(김한수 외, 2020) 등의 다양한 방식으로 파악하고자 하는 연구가 수행되었다. 국가적 측면

에서도 국가환경성평가지도, 국립생태포털시스템 구축을 통해 생태계 현황 파악의 노력을 지속하고 있다. 앞으로의 도시 발전 방향을 설정하기 위해선 이러한 연구와 성과를 바탕으로 생태계 현황에 더해 인간 활동과 생태계 간 상호 작용, 이를 통한 편익(도시생태계 서비스)에 대한 연구가 수행될 필요가 있다. 도시생태계 서비스에 대한 연구 사례로 송인주와 윤초롱(2019)의 서울시 대상 생태계서비스 평가체계 구축에 대한 연구가 존재하며 국내외 생태계서비스 평가 연구가 일반적으로 국가적으로 이뤄진 점을 지적해 정책 관련 활용의 실효성을 위해 소규모 연구 역시 필요함을 강조하였다. 해당 연구는 서울시 비오톱지도(도시생태현황도)를 중심으로 수행되어 토지이용단위로 구성되어 실제 도시계획 사업지에 대한 분석을 수행하기에 필지 단위에 비해 활용의 유연성이 낮다는 한계가 존재한다.

도시생태계 탄소저장량 산정은 온실가스 배출량 산정 과정과 연관되어 있다. 현재 국내 온실가스 인벤토리는 에너지, 산업공정, 농업, LULUCF(Land Use, Land Use Change and Forestry, 토지이용 변화 및 임업), 폐기물의 5개 분야로 구분되어 산정되고 있는데 도시생태계는 행정구역 내 산림, 도시 녹지, 초지, 농경지 등 다양한 공간으로 구성되며 LULUCF의 대상에 포함된다고 볼 수 있고 해당 부문의 온실가스 배출량은 식생 축적의 변화, 토지 이용의 변화가 주요한 배출 요인 중 하나로 작용하여 시간에 따른 탄소저장량 변화를 통해 산정될 수 있기 때문이다.

이에 따라 온실가스 배출량 산정을 전제로 한 식생 및 토양의 탄소저장량 관련 연구가 국가 유관기관에서 진행되어왔다. 국립산림과학원에서는 임상 및 수종별 배출계수를 개발하고 이에 따른 주요 산림수종 표준 탄소흡수량을 산정하여 2012년, 2013년을 거쳐 2019년 「주요 산림수종의 표준 탄소 흡수량 (ver. 1.2)」(이선정 외, 2019)을 발표하였으며 바이오매스 상대생장식과 관련해서는 2014년 「한국 주요 수종별 탄소배출계수 및 바이오매스 상대생장식」(손영모 외, 2014)을 발표한 바 있다. 토양탄소저장량 산정에 대한 내용은 한국환경공단의 「지자체 온실가스 배출량 산정지침 (ver. 4.1)」(신동석 외, 2017)의 AFOLU(Agriculture, Forestry and other Land Use) 부문의 통합 산정 항목과 국립산림과학원의 「기후변화협약 대응 산림부문 온실가스 통계체계 구축 보고서」(이경학 외, 2006)에서 다뤄진 바 있다.

유관기관의 온실가스 배출량 산정을 위한 계수 개발 연구 외에 국내 도시생태계의 탄소저장량에 대한 연구는 식생 측면의 연구와 토지이용 측면 연구로 구분할 수 있다. 식생 측면 연구는 주로 특정 수종을 대상으로 하는 연구(박은진·강규이, 2010; 조현길·안태원, 2012)와 개별 수종에 대한 연구가 발전해 특정 공원을 대상으로 해당 공원에 포함되는 수종들의 탄소저장량, 흡수량을 추정하는 하는 연구(이나연, 2011; 한미경 외, 2014; 양금철·김정섭, 2020; 채진해·김원주, 2020)가 진행되어 왔다. 토지 이용 측면 연구는 토지피복도를 사용한 연구(노영희 외, 2016; 김성훈 외, 2018; 추인교 외, 2021)와 위성영상을 사용한 연구(김기태 외, 2011; 김성훈·장동호, 2014; 이정희 외, 2015)로 분류될 수 있으며 토지피복도에 대한 연구는 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 모델의 탄소 모듈과 같이 이미 개발된 연구 결과를 적용하거나 새로운 계수를 개발하여 적용하고 검증하는 연구가 주로 이뤄져 왔다. 이창훈 외(2016)의 연구보고서에서도 토지피복도와 기존 연구의 탄소저장계수를 종합하여 탄소풀 자료를 작성한 후 전국 탄소저장량을 산출하고 InVEST 모델을 통해 토지피복 변화에 따른 탄소저장량 변화량을 추정하였으며 해당 연구 결과는 한국환경정책·평가연구원의 EVIS(환경가치종합정보시스템, http://evis.kei.re.kr/)의 가치평가 toolkit 중 탄소흡수·저장 부문으로 구현되어 2009년 중분류 토지피복도 기준 기초지방자치단체별 탄소흡수 및 저장량 산출이 가능하도록 구현되었다.

기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)은 부속서 I(Annex I)에 해당하는 국가에 대해 국가 인벤토리 보고서를 의무적으로 제출하도록 요구하고 있어 이에 해당하는 국가들은 IPCC 기준을 적용하거나 국가 자체 수종별 탄소배출계수를 개발해 온실가스 배출량 산정에 적용하고 있으며 수종별 자체 계수를 보유한 국가는 일본, 영국 독일 등이 있다(손영모 외, 2014). 미국의 경우에는 수종별 바이오매스 상대생장식에 대한 연구가 1980년대부터 활발히 이뤄졌고(Nowak, 1994), 이를 이용해 미국 내 도시 식생에 의한 탄소저장량 및 흡수량을 산정한 연구(Nowak and Crane, 2002; Nowak et al., 2013)가 지속적으로 수행되었다. 영국에서도 기존에 연구 개발된 바이오매스 상대생장식을 통해 도시 식생의 탄소저장량을 도시 기준으로 산정한 연구가 수행되었다(Davies et al., 2011).

국외의 도시생태계 탄소저장량 분야에 대한 연구는 국내에 비해 앞서 수행되어 연구 결과를 바탕으로 InVEST 모델과 i-Tree Eco와 같은 평가 시스템 및 소프트웨어가 개발되었다. InVEST 모델은 생태계서비스 기반 의사결정지원 모델로 The Natural Capital Project를 통해 개발되었으며 생태계서비스 평가를 위해 널리 사용되고 있다(노영희, 2016). InVEST 모델의 Carbon 모듈은 토지피복도와 탄소풀을 입력자료로 하여 탄소저장량 추정 결과를 제공한다. i-Tree는 USDA(United State Department of Agriculture) Forest Service에서 개발된 소프트웨어 제품군으로 i-Tree Eco는 수종, 수고, 흉고직경, 수관폭 등 현장조사 입력자료를 통해 도시숲의 구조, 생태계서비스, VOCs, 탄소흡수 및 저장량 평가값을 제공한다(국립산림과학원, 2020).

현대적 관점에서의 옥상녹화가 건물 에너지 소비 절약을 위해 1960년대 독일에서 시작된 유출 저감을 통한 재해 방지, 열섬 현상 완화 및 에너지 절약 효과, 대기질 개선 효과와 생태, 사회, 경제적 부문의 이점에 대한 다양한 연구가 수행되었다(Shafique et

al., 2018). 여규동과 정영훈(2013)에 의한 유출저감 효과에 대한 연구, 경기개발연구원에서 발간된 박은진 외(2010) 연구진의 「도시열섬 완화를 위한 옥상녹화 활성화 방안」 보고서 등이 국내 사례 옥상녹화 관련 연구 사례이며 옥상녹화와 탄소저장량 효과에 집중한 연구는 이상진 외(2015)와 같이 옥상녹화 구성요소의 탄소고정량 연구가 소수 존재하여 타 효과에 비해 탄소저장량 관련한 연구는 상대적으로 적다. 연구 대상지의 옥상녹화 가능 면적을 추산한 연구 사례는 박은진 외(2012)가 있으며 해당 연구에서 제시된 판별 기준을 적용해 서울시를 분석한 연구 사례(고영호·조상규, 2015)가 존재한다. 국외의 경우에도 직접적으로 옥상녹화에 국한해 탄소저장량을 산정한 연구는 열섬 현상 저감, 에너지 저감 등 연구에 비해 상대적으로 적으며 특정 연구 대상지에 식재된 식생을 중심으로 탄소저장량을 산정한 연구 사례(Getter et al., 2009)가 있다.

2. 적용 방법론 결정

본 연구의 목적을 달성하기 위해서는 가용 자료를 활용하여 연구 대상지의 탄소저장량을 전역적으로 평가하여 산출하고 이에 더해 연구 대상지 건물에 대하여 옥상녹화 가능 여부를 판별하여 옥상녹화를 통해 개선 가능한 탄소저장량을 도출할 수 있는 방법론을 선정해 적용해야 한다. 본 연구의 모듈개발에 있어서 방법론을 선정할 때 주요하게 고려되어야 하는 사항은 개발된 모듈의 보편적 적용 가능성이다. 고도화된 방법론은 입력자료의 복잡성이 높아 광역적으로 구축된 필요 자료의 부재로 인해 실제 적용이 어려울 수 있다는 점을 고려할 때 취득이 용이한 입력자료를 통해 탄소저장량을 산출할 수 있는 일반화된 방법론을 선정하는 것이 본 연구 목적에 부합하여 경제적이며 활용성 높은 모듈 구축을 위해 적절하다. 실제로 국립산림과학원에서 개발한 주요 수종별 배출계수가 존재함에도 불구하고 입력자료의 상세정보 부족으로 수종 유형별로 단순화된 계수를 적용해 입목바이오매스 부문에 대한 온실가스 인벤토리가 작성된 사례가 존재한다(산림청, 2016). 국외에서 개발된 탄소배출계수의 경우에는 식생 및 토양환경이 국내와 상이해 직접적 적용이 어렵다. 따라서 기존의 방법론 중 입력자료의 복잡성이 도시 규모 산정을 저해할 정도로 높지 않으며 기 구축된 자료를 활용할 수 있는 국내 방법론의 선정이 필요하다.

기존 국내외 탄소저장량 산정 관련 시스템, 모델 및 프로그램 예시로 EVIS, InVEST, i-Tree Eco가 있으며 이 중 i-Tree Eco는 구체적 현장조사 자료를 요구하므로 본 연구에서 개발하고자 하는 목적에 부합하지 않는다. EVIS와 InVEST 모델은 둘 다 입력자료로 토지피복도와 탄소저계수 혹은 탄소 풀을 요구한다는 공통점을 갖으나 InVEST 모델 사용을 위해서는 국내 실정에 적합한 탄소 풀이 전제되어 있어야 한다. EVIS 시스템은 해당 탄소저장량 계수를 자체 선행연구의 취합 자료로 사용하고 있으나 사용하는 토지피복도가 제작 후 10년 이상 경과했고 토지피복도만을 사용해 식생 현황에 의한 탄소저장량 반영에 한계를 갖는다. 또한 산출 형식이 기초지방자치단체별 산출값으로 탄소저장량의 공간적 분포를 세부적으로 확인하기 어렵다는 한계가 존재하나 EVIS가 갖는 한계에도 불구하고 해당 결과는 사용자가 간단하게 원하는 지역의 탄소저장량 확인이 가능하도록 구성되어 있어 본 연구에서 개발된 모듈의 결과 검증을 위해 사용될 수 있다.

기 구축된 프로그램 외 선행 연구 중 식생에 중점을 맞춘 연구는 산정방법에 따라 임상 및 수종별 배출계수를 사용하는 방법과 바이오매스 상대생장식을 사용하는 방법으로 구분될 수 있으며 전자의 경우 목재기본밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리함량비 등 다양한 계수가 포함되어 계수 개발 과정에서 불확도가 가중될 수 있으나 후자는 상대적으로 단순한 구조로 불확도를 줄일 수 있다는 장점이 있다(산림청, 2016). 대부분의 연구는 전자의 방법을 취해 수목별 특성과 조경적 부분에 집중하여 상세 수종에 대한 정보를 전제로 하기 때문에 i-Tree Eco와 마찬가지로 도시 규모 적용을 위해서는 도시의 산림, 도시공원, 가로수 등에 대한 상세 입력자료가 확보되어 있어야 한다는 한계를 갖는다. 바이오매스 상대생장식을 사용한 연구 중 세부 수종에 대해 상태생장계수가 제시된 손영모 외(2014)의 연구 역시 세부 수종 정보가 필요하므로 적용이 어려울 수 있으나 박은진과 강규이(2009)의 보고서에서 침엽, 활엽으로 구분된 바이오매스 상대생장식을 적용한 부분은 이후 언급될 도시생태현황지도(비오톱지도)상에 포함되는 정보를 적용할 수 있으므로 광역적 적용이 가능하도록 일반화되어 있다고 볼 수 있다.

토지피복도를 사용한 탄소저장량 연구의 경우 공간자료가 입력자료로 사용되어 일반적으로 산출물 역시 공간자료로서 도시 내 탄소저장량 분포를 확인하고 활용하기 용이하지만 토지피복 카테고리에 의해 계산되므로 지표상의 식생에 대한 반영 면에서 한계를 갖는다. 이러한 한계를 극복하기 위해 도시생태현황지도를 사용한 탄소저장량 계산을 통한 방법론이 제안된 바 있다(김성훈 외, 2018). 또한 토지피복도 기반의 기존 연구는 산출 단위에 대한 고려가 부재해 연속적 토지피복이 결과의 공간적 단위가 되어 도시계획과의 즉각적 연계 활용이 어렵다는 제약이 존재할 수 있다. 토지피복도를 활용해 토양탄소저장량을 산정하는 방법 간 비교 연구(황상일 외, 2014)에 따르면 국립산림과학원의 이경학 외(2006)의 토지피복도와 토양 탄소저장계수를 사용한 방법과 한국환경공단의 신동석 외(2017)의 토양도, 토지피복도와 토양 탄소저장계수를 사용한 방법을 비교해 후자의 방법이 탄소저장량 원단위 차이에 의해 1.2~1.4배 높게 산정되며 IPCC 지침에 부합하는 방법으로서 권장된다고 결론지었다. 하지만 전자의 토지 분류 기준에서는 기타 유형이 대부분 도로, 택지 등 도시적 용도의 구역임을 명시한 것과 달리 후자는 토지 분류 시 기타 부분

이 과수원 및 초지로 도시생태계를 중점적으로 다룰 시에는 전자의 방법이 도시지역에 대한 누락을 방지할 수 있다고 생각된다. 이와 같이 식생과 토양탄소저장량을 따로 산정한 후 합해 총탄소저장량을 추정해 사용한 연구 사례로 이동근 외(2010) 연구가 존재한다.

옥상녹화에 대한 연구의 경우 도시의 옥상녹화 가능지역 선정, 탄소저장량 산출 관련 연구가 적어 다양한 연구 결과를 분석해 적합한 방법론을 선정하는 데 어려움이 있으나 박은진 외(2012)의 연구에서 경기도 내 옥상녹화 가능 면적을 산출한 사례가 존재하고 해당 연구의 판별 기준은 고영호와 조상규(2015)에 의해 인용되어 활용되기도 하여 유용하게 참고 가능하다. 옥상녹화를 통한 편익과 비용을 동시에 고려한 연구 사례로 여규동과 정영훈(2013)이 존재하며 해당 연구에서 옥상녹화 사업비용에 대한 회귀식을 제안한바 있으며 이는 옥상녹화 면적에 따른 사업비를 추정하는 데 적용할 수 있다. 옥상녹화를 통한 탄소저장량 추정은 옥상녹화 유형의 결정을 통한 세부 식생 정보가 존재할 경우 세부화할 수 있으나 옥상녹화 유형의 결정을 위해서는 광역적 취득이 어려운 건물 내하중 정보가 요구되므로 본 연구에서는 보수적으로 토양탄소저장량 증가를 통한 산정을 수행하였다.

종합적으로 도시 관리 및 계획 측면에서 도시생태계의 탄소저장량을 실용적으로 활용할 수 있도록 하기 위해서는 취득 가능한 자료를 사용한 경제적 산출 방법론 적용이 요구되며 토양 및 식생에 대한 통합적 탄소저장량 계산이 가능해야 하고 결과의 자료 형식 및 단위와 도시 관리 및 계획에 유용하게 활용될 수 있도록 유연한 공간적 단위로 산출되어야 한다. 따라서 본 연구에 적용하고자 하는 최종적 방법론은 〈표 1〉과 같으며 탄소저장량 산출 방법은 토양과 식생탄소저장량 산출이 각각 선정되었고 용이하게 취득 가능한 입력자료를 요구하는 방법론이 우선적으로 선정되었다. 옥상녹화 시뮬레이션을 위한 방법론의 경우 한정된 선행연구 중 타 연구에 인용되어 활용되어 유용성이 확인된 방법을 선택하였다. 최종 산출값의 공간적 단위에 있어서는 도시 관리 및 계획에의 활용을 고려하여 필지 단위와 격자 단위로 사용자 편의에 따라 선택될 수 있도록 유연하게 구성하고자 한다.

Ⅲ. 본론

1. 연구대상 지역

수원시는 경기도 중남부에 위치해 있으며 경기도청의 소재지로 경기도 행정의 중심도시이다. 2021년 6월 기준 수원시 인구는 1,217,981명으로(경기도, 2021a), 경기도 전체 인구의 약 8.79%를 차지하여 도내에서 가장 인구가 많은 행정구역임과 동시에 전국 기초지방자치단체 기준으로도 가장 인구가 많은 행정구역이다. 경기도 시군별 장래인구 특별 추계(경기도, 2020)에 따르면 수원시 인구는 향후 증가하여 2037년 약 130만 명에 이를 것으로 전망된다. 수원시의 면적은 2019년 기준 약 121.1km^2이며 경기도 전체 면적의 약 1.19%이다(경기도, 2021b). 수원시 인구와 면적을 동시에 고려하였을 때 수원시는 인구밀도가 높은 도시로 행정안전부에서 발간한 2020 한국도시통계(행정안전부, 2020)에 따르면 2018년 수원시 인구밀도는 9,922.89명/km^2으로 전국 226개 기초지방자치단체 중 36위였다. 향후 10여 년 이상 인구증가가 예상되는 만큼 수원시 인구 과밀화는 심화될 것이며 이로 인해 야기되는 각종 도시 문제 역시 증가할 것으로 예상된다.

수원시의 지리적 특성을 살펴보면 북쪽에 산지가 발달하고 남쪽은 평탄한 지형으로 의왕시, 용인시가 접해 있는 북부에 상대적으로 고도가 높은 백운산(566m), 광교산(581m)이 위치해 있으며 서쪽에 고도가 낮은 칠보산(239m), 중심부에 여기산(104m)과 숙지산(124m), 팔달산(146m)이 위치한다. 북쪽 광교산 일대에서 발원한 수계가 저수지를 지나 수원을 남북으로 가로지르는 수원천, 원천리천을 형성한다(그림 1).

수원시는 용도지역 기준으로 전 지역이 도시지역으로 분류된다. 도시지역을 구성하는 녹지지역의 비중이 지속적으로 감소해왔으며 2020년 기준 53.9km^2가 녹지지역으로 지정되어 있다(한국토지주택공사, 2021)(그림 2). 녹지지역 북부와 서부 지역 일부는 개발제한구역(약 28.5km^2)으로 지정되어 도시의 무분별한 확장을 저지하고 있다. 수원시의 녹지지역 비율은 전국 녹지지역 비율의 약 3/4 수준이며 전국적 녹지지역 비율 감소세에 비해 상

Table 1. Methodology selection & spatial unit of results

Category		Methodology	Input data	Reference
Carbon storage	Vegetation	Biomass allometric equation	Biotope map Allometric coefficient by forest type	Park and Kang, 2009
	Soil	Carbon storage per land cover area	Land cover map Carbon storage coefficient	Lee, 2006
Green roof	Availability	Criteria	Roof type Permission date of buildings	Park et al., 2010
	Cost	Regression equation	Area of roofs	Yeo and Jung, 2013
Spatial unit of results	Lot Grid	$C_{lot/grid} = \sum_{i=1}^{n}(\frac{area_i}{area_{lot/grid}} \times C_i)$	C: carbon storage of vegetation/soil i: each class of biotope/land cover in lot/grid	-

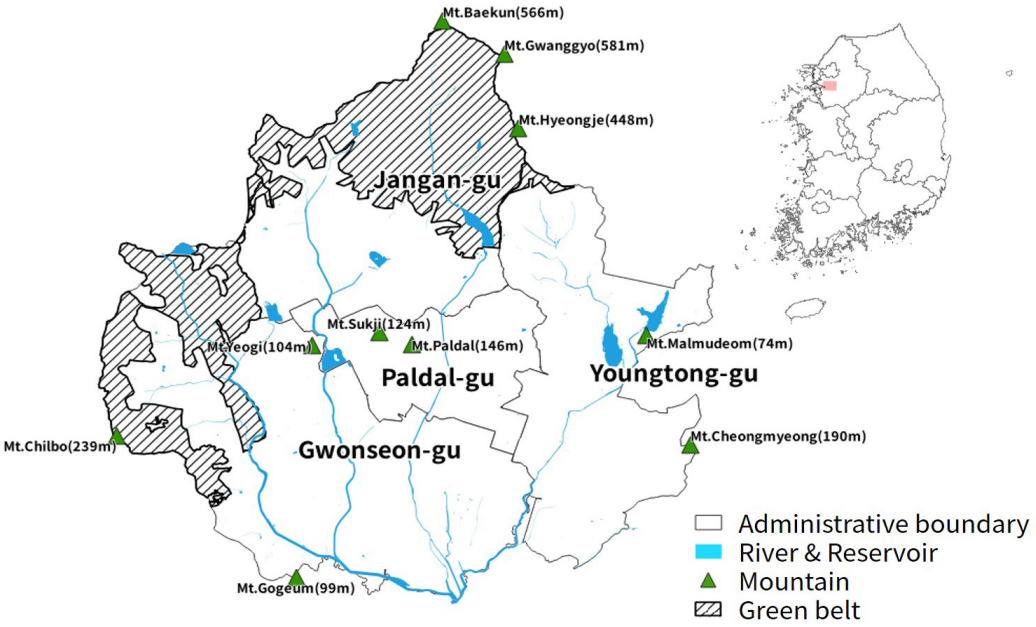


Figure 1. Study site (Suwon-si)

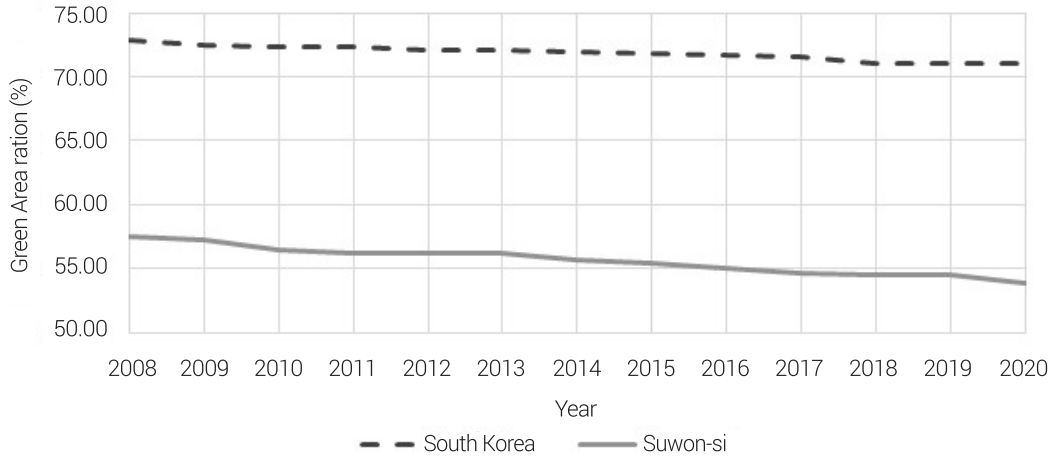


Figure 2. Annual green area ratio (LH, 2021)

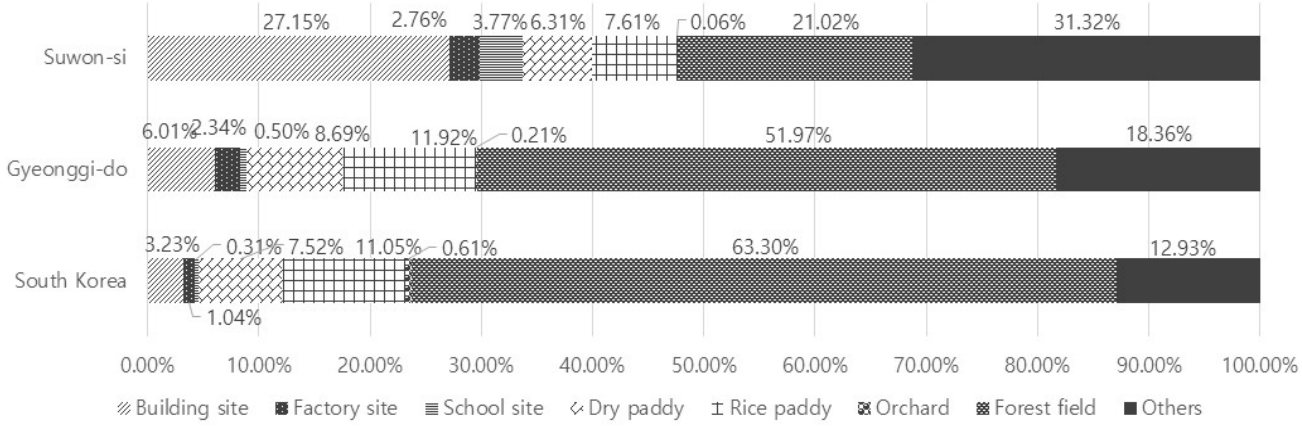


Figure 3. Land status by land use designation in 2020 (LH, 2021)

대적으로 빠르게 녹지가 감소하고 있다. 용도지역 기준이 아닌 토지이용 측면에서 현황을 살펴볼 경우, 2020년 지목별 토지현황에 따르면 수원시는 경기도, 전국 등 지목별 토지현황에 비해 대지, 기타 토지 비중이 높고 전, 답, 과수원 등 농지와 임야의 비중이 낮다(그림 3).

수원시를 포함하는 경기도의 주요 도시 정책에 대한 연구 방향

은 2010년 후반에 들어서 생태 부분이 강조되고 있다. 경기지역의 대표적 정책 관련 연구 수행 기관인 경기연구원에서 발표된 보고서 중 2020년 발표된 「경기도 생태(生態) 분야 그린뉴딜 정책연구」(이양주 외, 2020), 「광역 비오톱지도 작성기준에 관한 연구」(김한수 외, 2020), 「경기도 기초지자체 도시생태현황지도 작성 및 운영방법에 관한 연구」(김한수·이양주, 2020)를 그러한 경향을 보여주는 연구 사례로 꼽을 수 있다.

종합적으로 수원시는 국내 도시 중 인구 밀도가 높고 향후 인구가 증가하여 도시문제가 증가할 가능성이 높은 지역이다. 전 면적이 도시지역이며 토지 중 농업, 임업과 관련된 면적이 적은 전형적 도시 환경으로 지역 내 비도시지역이 없고 녹지면적이 감소중인 만큼 도시생태계 현황 파악이 중요하며 지속가능한 도시 실현을 위해 도시생태계 서비스 중 탄소저장량 잠재성을 최대한 활용하여 건강성을 증진할 필요가 있다. 도시 관련 정책 측면에서도 도시생태계에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있어 도시생태현황지도 등 유관 자료의 생성이 기대되며 이를 활용한 도시생태계 서비스 연구가 활성화되기 유리한 조건을 갖추고 있다.

2. 방법론 및 데이터

1) 탄소저장량 계산

도시생태계의 탄소저감효과는 토양과 식생에 의한 탄소저장량을 통해 정량적으로 계산될 수 있다(식 1).

$$C_i = C_{soil,i} + C_{vegetation,i} \quad (1)$$
$$i : a\ specific\ lot\ or\ grid$$

본 연구에서 탄소저장량 계산을 위해 사용된 공간단위는 도시계획 및 관리에 활용 가능하도록 필지와 래스터 격자(60m×60m)

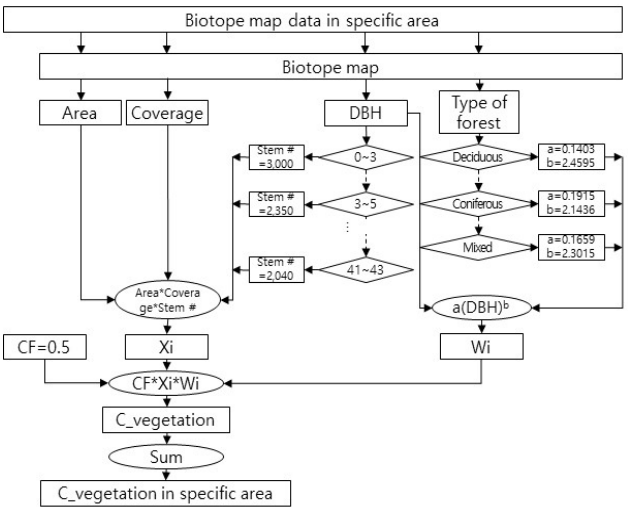


Figure 4. Vegetation carbon storage calculation flow chart in specific area

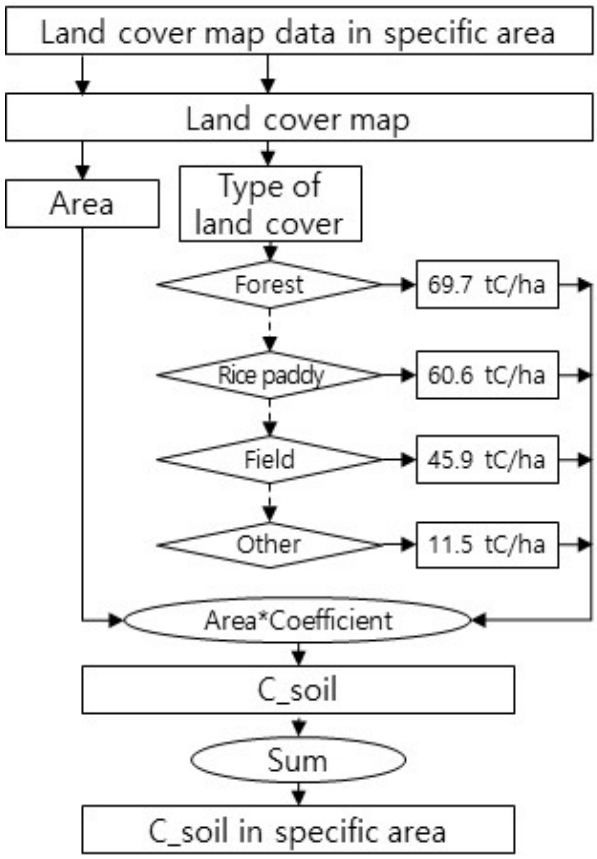


Figure 5. Soil carbon storage calculation flow chart in specific area

단위이다. 개별 필지 혹은 개별 격자의 특정 영역에서의 탄소저장량(C)은 식생탄소저장량(그림 4)과 토양탄소저장량(그림 5)으로 구분되며 계산되었다.

식생탄소저장량 계산을 위한 산정식은 경기연구원에서 발간한 「도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안」 보고서(박은진·강규이, 2009)에서 제시된 대표 수종별 바이오매스 산정식을 활용하였으며 특정 영역에서의 식생탄소저장량은 비오톱유형도 데이터를 기반으로 식피율과 임목본수(DBH에 의해 산정), DBH(Diameter of Breast Height, 흉고직경), 식생범례와 식생범례별 면적에 의해 계산되며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{vegetation,i} = \sum_n CF \times X_{i,n} \times W_{i,n} \quad (2)$$
$$CF\,(carbon\ conversion\ factor) = 0.5$$
$$X_{i,n} = Area_{i,n} \times Coverage_n \times Stem\ Number_n$$
$$W_{i,n} = a_n\,(DBH_n)^{b_n}$$
$$Stem\ Number_n = \begin{cases} 3000\,(0 < DBH_n \leqq 3) \\ 2350\,(3 < DBH_n \leqq 5) \\ \cdots \\ 2040\,(41 < DBH_n \leqq 43) \end{cases}$$

$$n : type\ of\ forest$$
$$= \begin{Bmatrix} Deciduous\ forest : a = 0.1403,\ b = 2.4595 \\ Coniferous\ forest : a = 0.1915,\ b = 2.1436 \\ Mixed\ forest : a = 0.1659,\ b = 2.3015 \end{Bmatrix}$$

토양탄소저장량 산정을 위한 토지 피복별 토양탄소저장 계수는 국립산림과학원에서 발간한 「기후변화협약 대응 산림부문 온실가스 통계체계 구축」(이경학 외, 2006)에 제시된 무기토양의 토양탄소변화 도표상의 토양탄소 값을 사용하였다. 특정 영역에서의 토양탄소저장량은 토지피복도 데이터를 기반으로 토지피복 유형과 유형별 면적에 의해 계산되며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{soil,i} = \sum_{m} Area_{i,m} \times Carbon\ storage\ factor_{m} \quad (3)$$

$$m : type\ of\ land\ cover$$
$$= \begin{Bmatrix} Forest : 69.7\ tC/ha \\ Rice\ paddy : 60.6\ tC/ha \\ Field : 45.9\ tC/ha \\ Others : 11.5\ tC/ha \end{Bmatrix}$$

2) 옥상녹화 시뮬레이션

옥상녹화는 건축물 옥상에 대해 식생을 식재함으로써 강우에 대한 완충력을 강화하고, 에너지를 절약하고, 열섬 현상을 완화시킬 뿐만 아니라 식생과 토양을 통해 탄소를 저장하는 효과를 가질 수 있다(Getter et al., 2009).

현재 정부와 지방자치단체에서는 탄소중립 달성을 위해 녹색건축물 인증 대상과 인센티브를 확대 중이며 인증 기준 중 생태환경 항목의 생태면적율 부문에서 옥상녹화 공간 유형이 포함되어 주목할 만한 탄소저장량 개선 옵션이다.

본 연구의 옥상녹화 시뮬레이션은 크게 건물의 옥상녹화 가능 여부 판별, 옥상면적에 따른 옥상녹화 예산을 고려한 옥상녹화 수행 가능 여부 판별, 옥상녹화에 의한 탄소저장량 개선량 평가로 구분된다.

박은진 외(2010)는 건축물에 따른 옥상녹화 가능 판별 기준을 건물노후도(1980년 이후 사용승인일), 녹화 용이성(평지붕), 녹화 효과성(주거, 교육, 공공, 의료, 업무, 판매 시설)의 3가지 기준에 의해 제시한바 있다. 본 연구에서는 건물노후도와 녹화 용이성 기준을 반영하되 연구 시점을 고려하여 옥상녹화 가능 건물 판별 기준을 지붕 유형(철근 콘크리트-평지붕), 사용승인 후 경과연도(30년 이내)로 설정하였다. 이에 따라 기와, 슬리브 지붕과 사용승인 후 30년이 초과한 건물은 옥상녹화 대상에서 제외되었다.

옥상녹화 예산은 여규동과 정영훈(2013)에 의해 식 (4)와 같이 제시된 바 있으며 본 연구에서는 해당 회귀식을 활용하여 시뮬레이션 모듈 개발을 진행하였다. 옥상녹화에 의한 탄소저장량 개선량은 옥상녹화에 의해 녹지가 조성된 상황을 상정하고 기타 녹지에 대한 탄소저장계수를 활용하여 토양탄소저장량을 추정하였다.

$$C_{GR} = 560,546.40 A_{GR}^{0.87105} \quad (4)$$
$$C_{GR} : Total\ operation\ expenses(won)$$
$$A_{GR} : Areaof\ roof\ greening(m^2)$$

옥상녹화 시뮬레이션 구현을 위해 필지 선택 후 필지 내 포함되는 건물들에 대해 건물 지붕 및 노후 특성을 고려하여 옥상녹화 가능 여부를 판단한 후 사용자가 입력한 예산 내에서 옥상녹화 수행 시 개선되는 탄소저장량을 산출하는 알고리즘을 구현하였다(그림 6). 이를 통해 사용자는 복수의 필지에 대해 주어진 예산 내 옥상녹화 가능 여부와 개선 탄소저장량을 얻을 수 있다.

단일 혹은 복수 필지에 대해 다수의 건물이 포함되는 경우 면적이 큰 건물의 옥상 순으로 건축물대장 정보상의 지붕 유형 및 사용승인일 기준으로 옥상녹화 가능 여부를 판단하게 되며 옥상녹화가 가능한 건물일 경우 면적을 고려하여 소요비용을 산정한다. 산정된 소요비용이 초기에 입력한 예산보다 작을 경우 탄소저장량을 계산하고 잔여 예산과 남은 건물 옥상에 대해 반복 수행을 통해 최종 옥상녹화 시뮬레이션 결과를 얻게 된다.

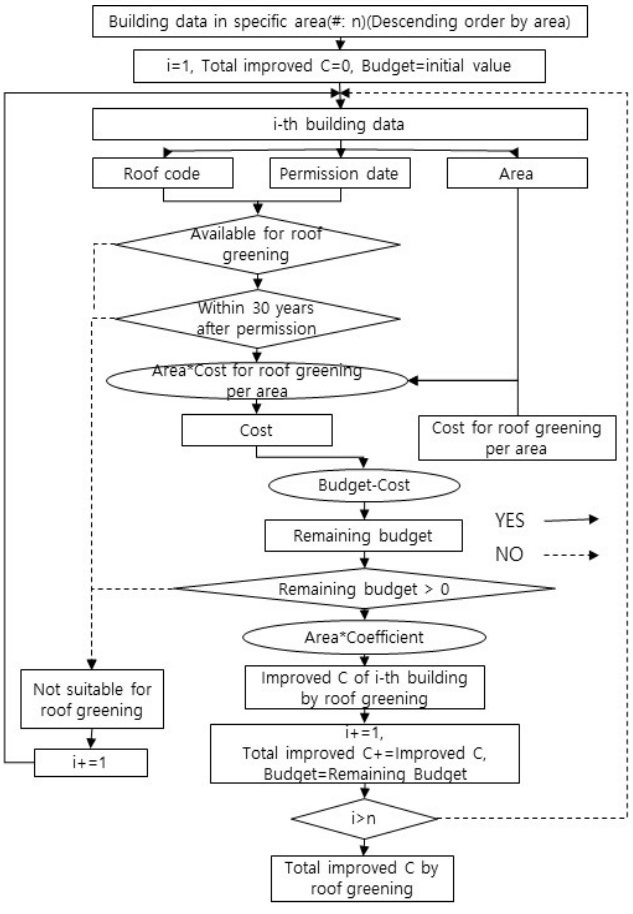


Figure 6. Green roof simulation algorithm

3) 데이터

본 연구에서 탄소저장량 계산 및 옥상녹화 시뮬레이션을 위해 사용한 데이터는 연속지적도, 도로명주소 건물데이터, 건축물대장, 실폭도로 데이터, 비오톱지도(도시생태현황지도), 토지피복도이며 건축물대장을 제외하고 모두 벡터 형식 공간정보이다(표 2). 건축물대장의 경우, 도로명주소 건물데이터와 연계하여 건물 공간정보에 지붕 및 사용승인일 정보를 보강하기 위해 사용되었다.

모든 데이터는 연구 대상 지역인 수원시에 행정경계에 맞춰 가공되었으며 연속지적도, 도로명주소 건물데이터는 분석에 활용되었을 뿐만 아니라 실폭도로 데이터와 함께 가시화를 통해 모듈 UI상 지도로 활용되었다.

3. 모듈 구현

본 연구에서 사용된 GIS엔진은 한국공간정보통신의 IntraMap/Server와 IntraMap/Web이며 모듈개발을 위해 Java, Java Script, C 언어가 사용되었다. 취득된 공간정보를 가공하기 위해서 사용된 GIS 소프트웨어는 오픈소스 GIS 소프트웨어인 QGIS 3.14이다. 본 연구를 통해 구축된 수원시 탄소저장량 및 옥상녹화 시뮬레이션 모듈의 UI는 〈그림 7〉과 같으며 크게 7개의 기능으로 구성되어 있다.

① 메인 화면

메인 화면은 연속지적도의 필지, 도로명주소 건축물데이터의 건물, 실폭도로 데이터의 도로를 가시화해 나타낸 지도를 보여주며 추가적으로 행정경계를 표출할 수 있다.

② 현황 보기

현황 보기 메뉴는 벡터 데이터(필지, 건물, 도로)와 행정경계, 생태면적율 레이어를 사용자가 선택해 가시화할 수 있도록 한다.

③ 통합지표 보기

통합지표 보기 메뉴는 도시생태계 서비스 중 탄소저감능력 지표인 탄소저장량을 탄소저장량 버튼을 통해 표출할 때 단위 기준을 설정할 수 있도록 하며 사용자는 필지 혹은 30m 격자 단위로 지표를 가시화할 수 있다.

④ 탄소저장량 버튼

탄소저장량 버튼을 통해 사용자는 메인 화면상에 탄소저장량이 표출되도록 설정할 수 있다.

⑤ 개선요소 입지 가능지

개선요소 입지 가능지 메뉴는 옥상녹화 시뮬레이션을 위한 메뉴로 필지 선택 후 활성화해 예산 및 옥상녹화 옵션을 선택하여 선택 필지 내 포함되는 건물 옥상에 대한 옥상녹화 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

⑥ 시뮬레이션 범례

시뮬레이션 범례는 화면상에 표시되는 선택된 필지 표시와 옥상녹화 가능, 예산 부족으로 인한 옥상녹화 불가능, 지붕 및 사용승인일시 경과로 인한 옥상녹화 불가능 등 시뮬레이션 결과에 대한 설명을 제공한다.

⑦ 지도 옵션

우상단 지도옵션을 통해 사용자는 배경지도로서 항공사진 선택이 가능하며 항공사진을 통한 시설, 건물 확인이 가능하다. 배경 없음 옵션을 통해 항공사진 배경 없이 벡터타일, 행정경계, 생태면적률, 탄소저장량 및 필지 선택 여부, 시뮬레이션 결과 레이어 확인이 가능하다.

1) 탄소저장량 계산 모듈

본 연구에서 개발된 탄소저장량 계산 모듈을 통해 사용자는 수

Table 2. Study data

Data	Source	Data	Variable	Explanation
Cadastral map	MOLIT	2021/02	Area	Calculated from geospatial data
Building data	MOIS	2021/02	Rooftop area	Calculated from geospatial data
Legisters of building	Architecture data open system	2021/02	Roof code	Used for determination of availability
			Roof type	Used for determination of availability
			Roof type (other)	Used for determination of availability
			Permission date	Used for determination of building age
Road data	MOLIT	2021/02	-	Used for visualization of map
Biotope map	Suwon-si	2020	DBH	Average DBH of vegetation
			Coverage	Cover ratio of vegetation
			Stem number	Calculated from DBH
			Type of forest	Major type of forest
			Area of vegetation type	Calculated from geospatial data
Land cover map	MOE	2019	Land cover (level 2)	Used for determination of carbon storage coefficient

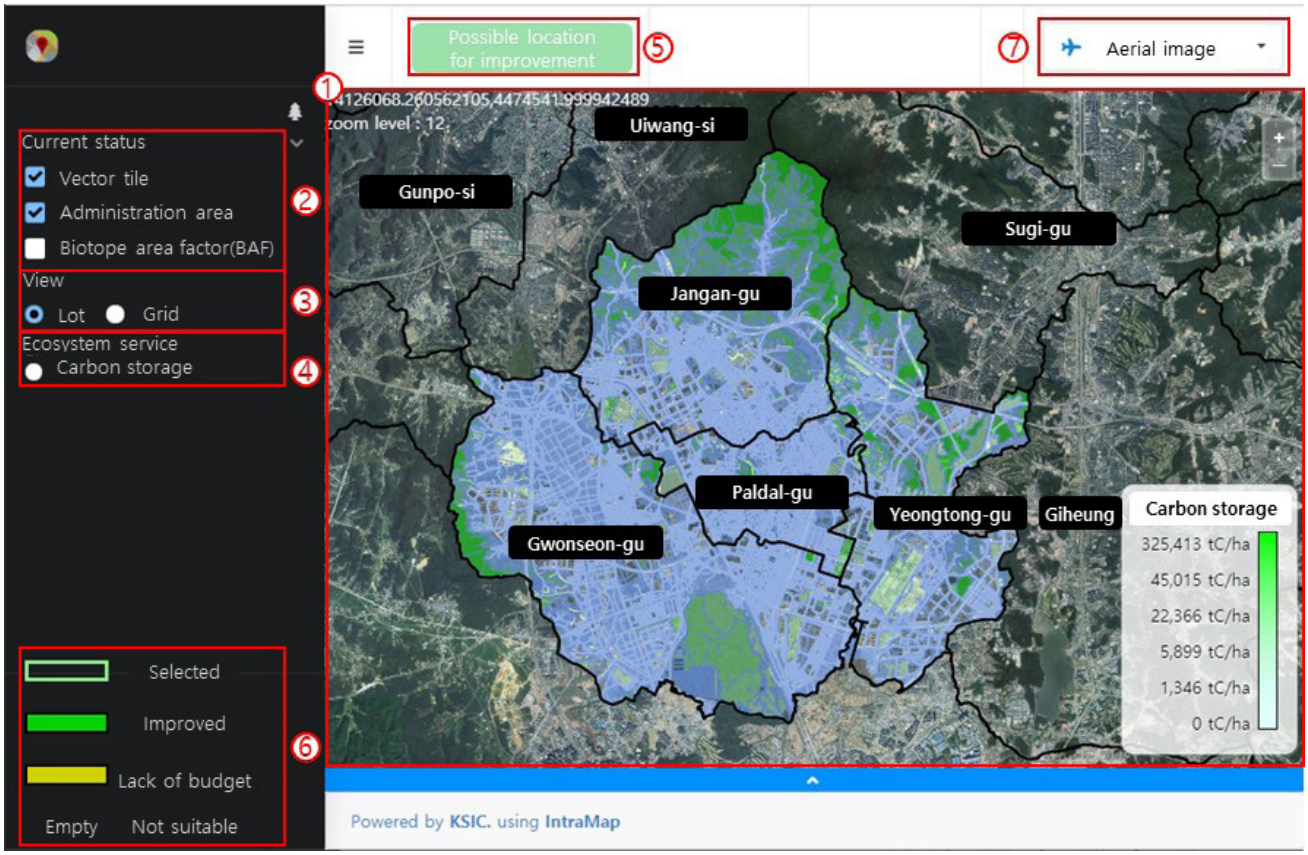


Figure 7. The UI of carbon storage calculation and green roof simulation modules

원시 탄소저장량의 공간적 분포를 필지 단위, 격자 단위로 확인할 수 있다. 또한 개별 필지, 격자의 선택을 통해 해당 구역에 한정한 탄소저장량을 토양 및 식생 탄소저장량으로 구분해 획득할 수 있다. 이를 통해 사용자는 시 단위의 전체적 분포를 확인할 수 있을 뿐만 아니라 사용자 지정에 의한 관심지역에 대한 세부 정보를 얻을 수 있다.

〈그림 8〉은 수원시 장안구 조원동 일대의 탄소저장량 계산 결과가 모듈 메인 화면에 표출된 사례이다. (a)와 (b)는 각각 전체 탄소저장량에 대한 필지 단위, 격자 단위 표출 결과로 탄소저장량 분포를 파악하기 용이하다. 화면상의 우상단은 수원 북부 산림과 인접해 상대적으로 식생이 풍부하여 좌하단 주택가에 비해 높은 탄소저장량 값을 보인다. 필지 단위로 확인하였을 때 필지에 따른 토지 사용에 통일성이 있어 탄소저장량의 분포 편차가 시각적으로 뚜렷하게 드러난다. 화면 중앙의 아파트 단지는 단지 내 조경에 의한 녹지가 조성되어 단독주택들에 비해 탄소저장량이 높음을 알 수 있다. (c)는 아파트 단지를 포함하는 필지를 선택했을 때의 화면으로 우측에 해당 필지에 대한 상세한 탄소저장량 및 면적, 녹지 정보가 제공된다. 〈그림 8〉의 (d)는 복수 필지 선택 시의 탄소저장량계산 결과를 나타낸다. 식생이 분포하는 영역이 선택 필지들에 포함되어 식생탄소저장량이 크게 늘었음이 확인된다.

2) 옥상녹화 시뮬레이션 모듈

옥상녹화 시뮬레이션 수행을 위해서 분석 대상 필지를 선택하고 개선요소 입지 가능지 메뉴를 활성화하면 〈그림 9〉 좌하단과 같이 옥상녹화 시뮬레이션 옵션인 예산 설정이 가능하다. 예산 입력 후 계산을 수행하면 메인 화면상에 선택 필지 내 건물에 대해 주어진 예산범위 내에서 옥상녹화 수행이 가능할 경우 초록색, 예산범위를 초과할 경우 노란색으로 건물이 표출되며 지붕 형태 및 노후도로 인해 옥상녹화가 불가능할 경우 건물에 색상이 표출되지 않는다(그림 9). 〈그림 9〉의 시뮬레이션 사례의 경우 예산 내에서 초등학교 건물을 비롯하여 3개 건물에 대해 옥상녹화가 가능하며 옥상녹화를 통해 개선된 탄소저장량은 토양탄소저장량으로 4.58 tC/ha이다. 그 외 일부 연구소 옥상에 옥상녹화가 가능하나 예산 부족으로 수행되지 못한 건물 2개 동을 확인할 수 있다. 예산 부족 정보 확인을 통해 사업 예산을 조정하여 특정 건물에 대한 옥상녹화 소요 예산을 파악 가능하다.

4. 결과 및 분석

본 연구는 수원시를 대상으로 도시생태계 탄소저장량 계산 모듈과 옥상녹화 시뮬레이션 모듈을 개발하였으며 사용자 편의와 도시계획 및 관리 부분 실용성을 고려하여 표출 단위 및 방법을

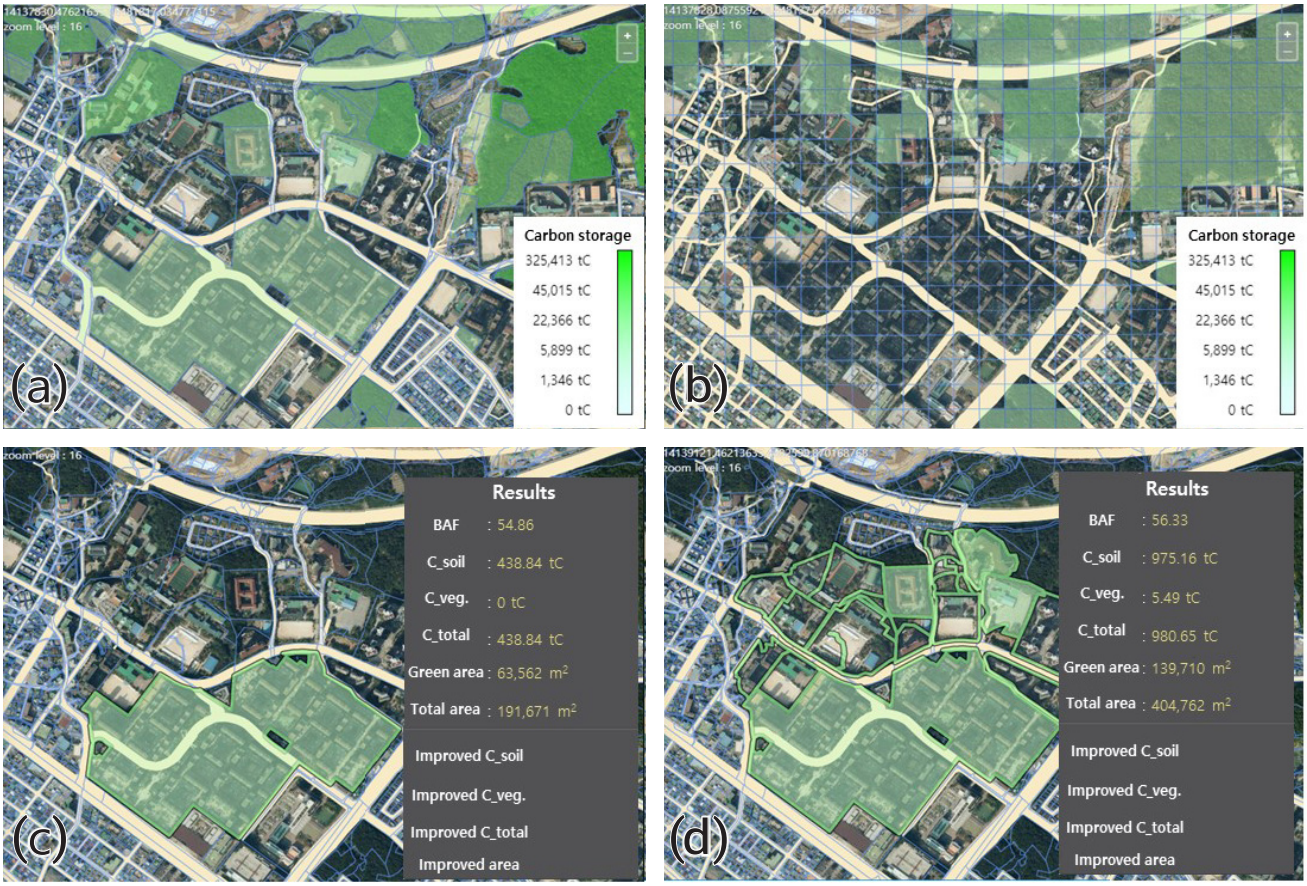


Figure 8. Carbon storage calculation results in the Jowon-dong, Suwon-si
(a) Lot unit, (b) Qrid unit, (c) Selection of a lot, (d) Selection of lots

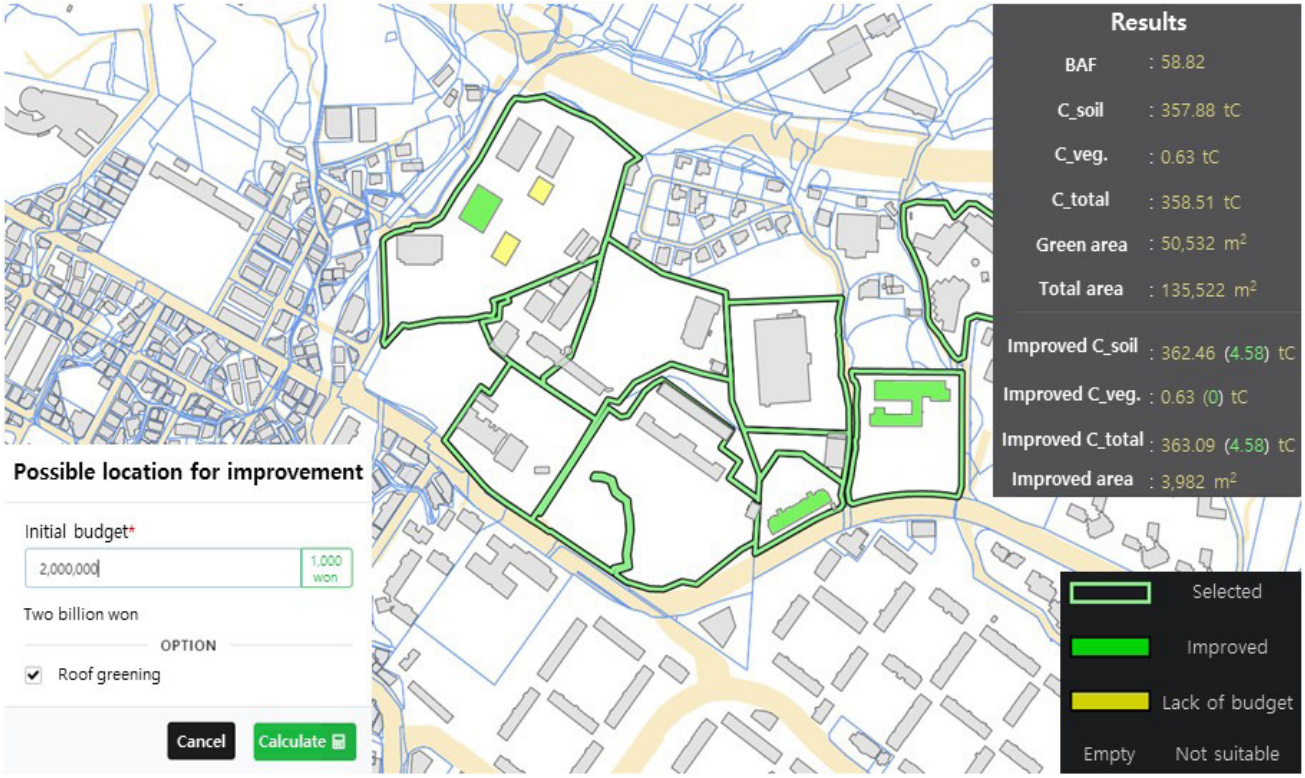


Figure 9. Green roof simulation options and results for multiple lots

선택 가능하도록 구현하였다. 본 연구에서 개발된 모듈에 의한 수원시 탄소저장량 및 옥상녹화에 의한 개선 가능 탄소저장량은 〈표 3〉과 같다.

수원시 전체의 탄소저장량은 약 43만 tC로 계산되었으며 이를 수원시 전체 면적으로 나눠 단위면적당 탄소저장량으로 변환할 경우 35.95tC/ha이다. 박은진과 강규이(2009)에 의해 제시된 경기도 산림, 가로수, 도시공원 등 주요 식생의 탄소저장량이 각각 21.65MtC, 135,176tC, 67,637tC이고 추인교 외(2021)가 산정한 경기도 토양탄소저장량이 34.986MtC임을 고려할 때 경기도 면적은 10,192.5km^2(경기도, 2021b)이므로 경기도 평균 단위면적당 총탄소저장량은 약 55.76tC/ha로 추정할 수 있다. 수원시는 경기 북부 산림이 풍부한 시군구에 비해 산림이 적고 도시화가 완료된 행정구역이므로 경기도 전체 평균 단위면적당 탄소저장량보다 낮은 수치를 보인다.

수원시 내 구별 단위면적당 탄소저장량은 장안구가 가장 높은 값을 보였다. 장안구는 수원시 북부에 위치한 구로 수원시의 지리적 특성상 북부에 산지가 많이 분포하고 녹지가 발달해 장안구가 타 구에 비해 탄소저장량 측면에서 강점을 갖는다고 해석이 가능하다. 팔달구는 공간적으로 수원시의 중심에 위치해 있으며 가장 면적이 작은 구이지만 건물밀도가 높아 총 건물 옥상면적은 상대적으로 크다. 팔달구는 건물 밀집으로 인해 식생이 적고 토지피복도 인공 시설물이 많아 수원시 내에서 가장 탄소저장량이 적다.

건축물대장 데이터와 도로명주소 건물 데이터를 활용하여 수원시 내 건물 옥상면적을 추정한 결과 14.35km^{2}로 계산되었으며 이중 녹화 용이성, 노후도 조건을 만족하는 옥상녹화 가능 옥상면적은 3.98km^{2}로 추정되었다.

박은진 외(2012) 연구에서 수원시 총 건축 면적은 10.22km^{2}이고 옥상녹화 가용면적은 2.5km^{2}로 분석된 결과와 비교할 때 본 연구에서 추정한 옥상녹화 가능 면적과 과거 연구의 추정치 간 차이는 사용데이터상의 원천적 한계와 연구 시점 변동에 의한 수원시 건물 노후화 진행 및 신축에 기인할 수 있다.

본 연구에 사용된 건물 정보는 71,624건이며 이 중 28.53%의 건물에 사용승인일 혹은 지붕 정보가 부재한다. 정보가 부재하는 건물들은 주로 2010년 이후 신규 건축된 아파트 단지와 산업단지, 광교 신도시 일대에 많이 분포하는 특성을 보인다. 2010년 연구 결과의 전체 옥상면적 중 옥상녹화 가능 면적 비가 24.46%이고 본 연구에서 전체 옥상면적에 대한 옥상녹화 가능 면적 비가 27.72%임에 반해 옥상녹화 가능여부 판별 정보가 부재하는 건물 옥상면적을 제외하고 옥상녹화 가능 면적 비를 산정할 경우에는 36.34%가 옥상녹화가 가능하다고 추정된다(표 4). 다른 측면에서 박은진 외(2012)의 연구의 노후도 기준은 1980년 이후 사용승인을 받은 건물로 본 연구에 적용한 기준인 사용승인 후 경과연도 30년 이내와 차이가 존재한다. 건물이 신축되는 반면 노후화되어 옥상녹화에 부적합한 건물 역시 증가하고, 모든 신축 건물이 옥상녹화에 적합한 지붕 형태로 건축되는 것이 아니기 때문에 옥상면적 증가와 옥상녹화가능 옥상면적 증가는 비례하지 않는다.

옥상녹화를 통해 개선 가능한 수원시 탄소저장량은 4,574tC로 현재 수원시 탄소저장량의 1.07%이며 이를 수원시 단위면적당 탄소저장량을 사용해 면적으로 환산하면 1.27km^{2}이다. 구별 면적을 사용해 단위면적당 옥상녹화를 통해 개선 가능한 탄소저장

Table 3. Carbon storage calculation and green roof simulation results

Administrative division	Area[1] (km^2)	Carbon storage (tC)	Carbon storage per area (tC/ha)	Total area of roof[2] (km^2)	Total roof greening available area (km^2)	Improved carbon storage (tC)	Improved carbon storage per area (tC/ha)
Suwon-si	121.09	426,142	35.95	14.35 (10.94)	3.98	4,574	0.38
Jangan-gu	33.34	148,562	45.27	3.01 (2.56)	0.86	991	0.30
Gwonseon-gu	47.17	168,521	36.51	4.80 (3.31)	1.23	1,410	0.30
Paldal-gu	12.86	26,044	20.24	2.86 (2.33)	0.78	4,892	0.69
Yeongtong-gu	27.72	83,015	31.10	3.67 (2.74)	1.11	1,281	0.46

Table 4. Green roof simulation results analysis

Administrative division	Ratio of total area of roof to division area (%)	Ratio of total roof greening available area to division area (%)	Ratio of total roof greening available area to total area of roof (%)	Ratio of total roof greening available area to total area of roof with roof info. (%)
Suwon-si	11.85	3.28	27.72	36.34
Jangan-gu	9.04	2.58	28.59	33.72
Gwonseon-gu	10.18	2.60	25.54	37.00
Paldal-gu	**22.25**	**6.03**	**27.10**	**33.27**
Yeongtong-gu	13.25	4.02	30.33	40.60

량을 계산할 경우 팔달구의 단위면적당 옥상녹화를 통한 탄소저장량 개선 잠재성이 높다고 분석된다. 〈표 4〉의 지역 면적 및 옥상면적 대비 옥상녹화 가능 면적과 함께 단위면적당 옥상녹화를 통한 탄소저장량을 함께 해석함으로써 지역별 건물 분포 특성에 대한 이해가 가능하다. 팔달구는 다른 구에 비해 지역 면적 대비 총 건물 옥상면적 비가 22.25%로 크다. 동시에 지역 면적 대비 옥상녹화 가능 옥상면적 비 또한 타 지역에 비해 1.5배에서 2.3배가량 큰 것으로 확인된다. 따라서 높은 건물 밀도가 옥상녹화를 통한 탄소저장량 개선 잠재성이 큰 결과의 주요 요인 중 하나로 확인된다. 반면에 옥상녹화 가능 여부가 판별 가능한 건물의 옥상면적에 대한 옥상녹화 가능 면적 비는 33.27%로 수원시내 구 중 가장 작다. 이는 팔달구에 옥상녹화가 불가한 유형의 건물이 상대적으로 많음을 시사한다. 사용승인 후 30년이 초과했거나 경사지붕, 기와 등 지붕 형태를 갖는 건물 비중이 높은 것이다. 실제로 2021년 6월 25일 기준 '수원시 주택재개발정비사업 추진현황'(수원시, 2021)에 따르면 총 21개 사업 중 8개 사업이 팔달구 지역에 속하며 전체 사업 면적 1,803,968m^2 중 48.99%의 면적이 팔달구 사업에 해당한다. 앞으로 팔달구 지역 재개발을 통해 신축 건물 증가가 예상되며 이때 옥상녹화 도입이 확대될 수 있다면 탄소저장량 개선 잠재성이 더욱 증대될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구 결과를 통해 수원시와 수원시를 구성하는 4개 구의 탄소저장량 및 옥상녹화를 통해 개선 가능한 탄소저장량을 확인하였다. 수원시는 도시화가 완전히 진행된 행정구역으로 경기도 전체에 비해서 식생에 의한 탄소저장량은 적으나 많은 건물이 존재하여 옥상녹화 잠재성이 상대적으로 높을 수 있다. 본 연구는 옥상녹화 시뮬레이션을 통해 도시 내 옥상녹화 잠재성에 대해 정량적 평가를 수행하였으며 포화된 도시 내에서 탄소 저장량을 최대화하기 위해서는 접근 가능하며 개선 가능한 도시생태계 잠재성을 파악하였다.

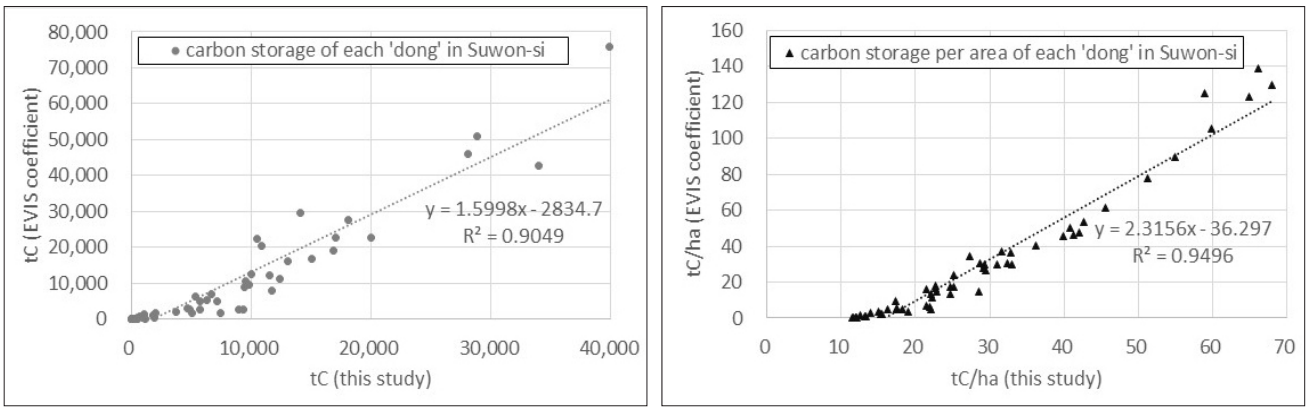
5. 검증

본 연구에서 개발된 도시생태계 탄소저장량 계산 모듈 검증을 위해 선행 연구 중 EVIS 가치평가 toolkit의 탄소저장량 기본계수로 사용되는 이창훈 외(2016)의 탄소저장량 계수를 통해 수원시 탄소저장량을 계산해 비교 분석을 수행하였다. 세부적 비교를 위해 구별 결과만 제공하고 2009년 토지피복도를 사용하여 결과를 산출하는 EVIS를 직접적으로 사용하지 않고 EVIS 시스템에 적용된 이창훈 외(2016) 계수와 최신 토지피복도를 사용해 수원시 전역에 대한 탄소저장량을 산정하고 이를 공간처리를 통해 동 단위로 나눠 본 연구 모듈에서 산정된 수원시 탄소저장량을 동 단위로 산출한 것과 비교하였다. 각 방법에 대해 단위면적당 탄소저장량 역시 동 단위로 산출해 비교 검증을 수행하였다.

산점도를 통해 각 결과치에 대해 비교한 결과는 〈그림 10〉과 같다. EVIS 계수를 통해 평가된 수원시 동별 탄소저장량과 본 연구의 탄소저장량 계산 모듈의 수원시 동별 탄소저장량의 결정계수는 약 0.90로 매우 높은 상관성을 가지며 EVIS를 통한 결과가 약 1.6배 크게 탄소저장량을 산정하는 것으로 확인되었다.

이는 탄소저장량 원단위 차이로부터 기인하는 것으로 황상일 외(2014) 연구에서도 원단위 차이로 인한 탄소저장량 산정 결과 차이에 대해 다뤄진바 있다. 단위면적당 탄소저장량의 경우 비교 데이터와 본 연구 모듈로 산정된 값의 결정계수가 약 0.95로 마찬가지로 매우 높은 상관성을 갖는 것으로 확인되었으며 EVIS 계수를 통해 산정되는 값이 본 연구 결과보다 약 2.3배 크게 산정되는 것으로 확인되었다.

검증 결과 비교 대상 결과와 차이가 발생하는 주된 이유는 탄소저장량 원단위 차이에서 기인하는 것으로 본 연구에서는 도시 단위 광역적 적용을 위해 보수적이고 일반화 가능한 방법론을 적용해 탄소저장량 원단위 차이로 인해 비교 데이터와 결괏값의 차이가 존재하나 상관성이 매우 높아 공간적 탄소저장량 분포에 대해 유의미한 결과를 도출한다고 볼 수 있다. 비교 대상 연구가 토지피복도만을 사용한 것과 다르게 본 연구에서는 비오톱지도를 통



Carbon storage (tC) Carbon storage per area (tC/ha)

Figure 10. Comparative verification with the results of using the EVIS coefficient

해 식생탄소저장량을 산출한 후 토지피복도를 통해 계산된 토양 탄소저장량과 합해 결과 비교 시 데이터의 분산을 야기한다고 생각될 수 있지만 EVIS 계수를 통한 산출값과 본 모듈을 통한 토양 탄소저장량만을 비교한 결과 결정계수가 약 0.75로 총탄소저장량과 비교한 것에 비해 상관성이 상대적으로 낮았다. 이는 EVIS 계수 중 산림 부문 계수에 바이오매스에 의한 탄소저장량을 활엽수림 64.31tC/ha, 침엽수림 42.87tC/ha로 포함하여 최종적으로 산림 피복에 대한 계수가 106.64~153.27tC/ha로 매우 크게 적용되어 있기 때문이다. 즉, 토지피복에 따른 탄소저장량계수 산정 시 피복에 따른 바이오매스, 토양 탄소, 낙엽층/고사목 항목별 탄소저장량 계수를 적용하는 것과 토양 탄소저장과 식생탄소저장량을 따로 산정한 후 합해 최종 탄소저장량을 산출하는 것이 서로 같은 방향성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 하지만 전자의 방법은 개괄적인 토지피복 분류 결과에 의존하므로 실제 식생의 밀도, 생장 정도 등 변수에 영향을 받지 않으며 식생탄소저장량을 일괄적으로 면적에만 의존해 산정하므로 미시적 현장 특성을 반영하는 데 불리할 수 있다.

검증 과정을 통해 본 연구 결과의 공간적 분포 특성이 기존 연구 결과와 비교했을 때 유효하며 원단위 차이로 인해 상대적으로 낮은 산정값을 가짐을 확인하였다. 또한 토양, 식생탄소저장량을 따로 산정해 합산함이 기존 연구 결과와 같은 방향성의 결과를 도출하며 기존 연구 결과보다 세부적으로 평가 가능함을 확인하였다.

Ⅳ. 요약 및 결론

본 연구에서는 도시생태계 관련 국내외 동향을 살펴보고 지속가능성과 기후변화에 대한 대응 측면에서 도시생태계 서비스 중 탄소저장량이 특히 강조됨을 확인하였다. 국내 도시는 발전기를 지나 안정기에 접어들었으므로 한정된 도시생태계를 효율화하기 위해 현재 도시 현황에 대해 파악하고 잠재된 도시생태계 서비스를 발굴함으로써 건강성을 증진하는 것이 중요하다. 본 연구는 대표적 도시인 경기도 수원시를 대상으로 탄소저장량 계산 및 옥상녹화 시뮬레이션 모듈을 개발함으로써 도시생태계 탄소저장량 현황 및 잠재된 개선 잠재성을 확인하였다.

수원시 전체 탄소저장량은 약 43만 tC로 계산되었으며 전체 옥상녹화를 통해 개선 가능한 탄소저장량은 약 3천 tC로 산정되었다. 탄소저장량 및 개선 탄소저장량은 수원시 구별로 지리적, 기능적 특성에 따라 상이한 값을 보였으며 이를 통해 각 구의 탄소저장량 측면 특성을 파악할 수 있고 최적화된 도시생태계 관리 전략 수립을 지원할 수 있다. 계산 및 시뮬레이션 모듈은 계산 기준 공간 단위를 필지 및 격자로 선택 가능하도록 설계되었으며 토양과 식생탄소저장량을 동시에 고려할 수 있도록 구현되어 도시계획 및 관리에 활용되기 적합하다는 면에서 의의를 갖는다.

개별 필지에 대한 평가가 가능하므로 탄소중립 관점에서 건축물 탄소배출량에 대한 연구(배은석·오규식, 2015)와 결합을 통해 재건축 우선 대상 건물 선정 등에 활용될 수 있다. 나아가 본 연구 결과는 공편익 분석을 위한 기초자료로써 활용할 수 있으며 도시계획 및 관리, 정비사업 평가에 활용할 수 있도록 연구를 발전시킬 수 있다.

연구 과정에서 데이터의 한계로 인해 옥상녹화를 통한 탄소저장량 개선 잠재량이 과소평가되었을 것으로 추정되는 부분을 개선하기 위해서 항공영상을 활용하여 건물 옥상을 탐지하고 옥상녹화 가능 여부를 판별하는 원격탐사 분야 방법론 적용이 가능할 것으로 기대된다. 앞으로 옥상녹화를 통한 도시생태계 건강성 증진 가능성에 대한 연구를 고취하고 옥상녹화 도입을 활성화시키기 위해서 건물 정보 작성의 개선이 요구된다.

내용 측면에서 도시생태계 서비스 지표 부문, 개선 시뮬레이션 부분에 대한 후속연구가 가능하다. 본 연구는 탄소중립에 대한 정책적 동향을 고려하여 도시생태계 서비스 중 탄소저장량에 대한 연구를 수행하였으나 도시생태계는 탄소 저장량 외 열저감능력, 완충능력 등 방재와 삶의 질 향상과 직결된 서비스를 제공한다. 기후 변화에 대한 도시의 대응력인 회복력 역시 향후 중요성이 증대될 주요한 도시생태계 서비스이므로 탄소저장량 외 도시생태계 서비스에 대한 통합적 분석 및 계산 모듈에 대한 연구 개발이 요구된다. 도시생태계 서비스에 대한 통합 지표 구현에 이어서 도시생태계 변화에 따른 도시생태계 서비스의 상승 및 상충효과를 고려하여 최적의 옥상녹화 적지를 선정하는 역시뮬레이션 기능에 대한 후속연구가 가능하다. 생태계가 가변하는 속성을 지녔음을 고려할 때 모듈이 토지, 식생의 시계열적 변화를 반영할 수 있도록 연구를 고도화한다면 도시생태계에 대한 이해의 심도를 높일 수 있을 것이다. 시계열적 분석을 위해 적용 가능한 방법은 최신 입력자료를 적용한 모듈 갱신, 식생 부문에 있어서 연차별 흉고직경 증가 연구 결과의 반영, 국소적 토지피복 수정 자료의 업로드 분석 기능 추가로 구분될 수 있다. 생태계 중요성에 대한 관심이 증대됨에 따라 환경부 토지피복도가 지속적으로 신규 작성되고 있고 각 지자체별 비오톱지도 작성 및 갱신이 증가할 것으로 추정되는 바, 최신 입력자료를 통한 모듈 갱신은 시계열적 결과 도출을 위해 가장 효율적 방법으로 사료된다. 식생의 연차별 흉고직경 증가에 대한 선행연구를 반영하기 위해서는 비오톱지도 작성 시 대푯값으로 평균 흉고직경이 적용되는 점을 고려해 불확실성 저감을 위해 평균 흉고직경과 개별 수종의 생장에 대한 추가연구가 필요하다. 국소적 토지피복 수정 자료를 업로드해 분석할 수 있는 기능 추가는 모듈 업데이트의 일부로 후속연구 진행이 가능하다.

또한 개선 시뮬레이션 부문에 있어서 옥상녹화 이외 개선 방안에 대한 고려가 추가될 수 있다. 본 연구 결과에 따르면 옥상녹화를 통해 현재 수원시 탄소저장량의 0.7%를 추가적으로 개선 가능하다. 박효석 외(2014)는 서울시를 대상으로 도시 그린인프라 확

충을 통해 이산화탄소 흡수량을 약 2.2% 증가시킬 수 있을 것이라 분석하여 제시하였다. 해당 연구 내용을 발전시켜 옥상녹화 외 가로수 식재 등 그린인프라 확충 방식을 다양하게 도입해 후속 연구 수행이 가능하며 이와 결부한 개선 옵션 고도화 역시 연구될 필요가 있다. 옥상녹화의 경우 옥상녹화 유형에 따라 소요 예산이 상이할 수 있으며 식재되는 식생이 상이하므로 이를 구체화하여 개선 탄소저장량 추정을 정밀화할 수 있다. 이를 위해서는 개별 건물의 내하중 정보를 효율적으로 습득할 수 있는 방안이 선행되어야 한다.

본 연구 결과는 공간적으로 유연한 결괏값을 도출하는 도시생태계 탄소저장량 계산 및 옥상녹화 시뮬레이션 모듈 개발 사례와 수원시 탄소저장량 산정값을 제공할 뿐만 아니라 향후 도시생태계 서비스 평가 도구의 발전을 위해 확충되어야 하는 데이터에 대한 시사점을 제공하며 유사한 모듈 개발 방향에 대한 참고자료로 활용될 수 있다는 점에서 의의가 있다.

주1. 경기도수원시기본통계(수원시, 2020).

주2. 괄호 안 숫자는 옥상녹화 가능 여부 판별을 위한 정보가 존재하는 건물에 한한 면적을 의미한다.

인용문헌
References

1. 경기도, 2020.「경기도 시군별 장래인구 특별추계 [2017-2037]」, 수원.
   Gyeonggi-do, 2020. *Special Population Projections by City, County, Gyeonggi-do [2017-2037]*, Suwon.
2. 경기도, 2021a.「주민등록인구통계」, 수원.
   Gyeonggi-do, 2021a. *Resident Registration Statistics*, Suwon.
3. 경기도, 2021b.「경기도기본통계」, 수원.
   Gyeonggi-do, 2021b. *Gyeonggi-do Basic Statistics*, Suwon.
4. 고영호·조상규, 2015.「건축물 옥상공간의 이용활성화 방안 연구 –서울시 사례를 중심으로」, 세종: 건축공간연구원.
   Ko, Y.H. and Cho, S.K., 2015. *A Study for the Building Rooftop Utilization –Focusing on the Rooftop Space in Seoul*, Sejong: Architecture & Urban Research Institute.
5. 국립산림과학원, 2020.「i-Tree Eco 기반 도시숲의 가치 평가 및 조사 방법」, 서울.
   National Institute of Forest Science, 2020. *Introduction of Urban Forest Valuation and Inventory Method Based on i-Tree Eco*, Seoul.
6. 김기태·조진우·유환희, 2011. "KOMPSAT-2호 위성영상을 이용한 도시지역 탄소저장량 추정",「한국지형공간정보학회지」, 19(2): 49-54.
   Kim, K.T., Cho, J,W., and Yoo, H.H., 2011. "Carbon Storage Estimation of Urban Area Using KOMPSAT-2 Imagery", *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, 19(2): 49-54.
7. 김성훈·박은진·김일권, 2018. "환경공간정보를 활용한 도시녹지의 탄소흡수량 추정 –안산시를 대상으로–",「한국환경복원기술학회지」, 21(3): 13-26.
   Kim, S.H., Park, E.J., and Kim, I.K., 2018. "Estimation of Carbon Sequestration in Urban Green Spaces Using Environmental Spatial Information – A Case Study of Ansan City –", *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 21(3): 13-26.
8. 김성훈·장동호, 2014. "Landsat 위성영상을 이용한 충청남도임상 분석 및 산림 탄소저장량 추정",「한국지역지리학회지」, 20(2): 206-216.
   Kim, S.H. and Jang, D.H., 2014. "Analysis of Forest Types and Estimation of the Forest Carbon Stocks Using Landsat Satellite Images in Chungcheongnam-do, South Korea", *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, 20(2): 206-216.
9. 김인현·한동훈·신규선·전홍규·김영미·박성진·김호영·김선웅, 2020. "도시 생태면적율 자동계산 모듈 개발에 관한 연구", 2020 대한국토·도시계획학회 추계학술대회, 온라인.
   Kim, I.H., Han, D.H., Shin, G.S., Jeon, H.K., Kim, Y.M., Park, S.J., Kim, H.Y., and Kim, S.U., 2020. "A Study on the Development of Urban Ecological Area Ratio Calculation Module", Paper presented at the Fall Congress of Korea Planning Association, Online.
10. 김한수·김연미·김세한, 2020.「광역 비오톱지도 작성기준에 관한 연구」, 수원: 경기연구원.
    Kim, H.S., Kim, Y.M., and Kim, S.H., 2020. *Study of the Method of Drawing up a Regional Biotope Map*, Suwon: Gyeonggi Research Institute.
11. 김한수·이양주, 2020.,「경기도 기초지자체 도시생태현황지도 작성 및 운영방법에 관한 연구」, 수원: 경기연구원.
    Kim, H.S. and Lee, Y.J., 2020. *A Study on the Methods for the Preparation and Operation of a Biotope Map by Lower-Level Local Governments in Gyeonggi-Do*, Suwon: Gyeonggi Research Institute.
12. 노영희, 2016. "탄소저장량 및 공간분포 추정 기법 소개 - 기후변화 정책 지원을 위한 기반 자료의 구축",「과학기술정책」, 26(5): 46-51.
    Roh, Y.H., 2016. "Introduction of Carbon Storage and Spatial Distribution Estimation Techniques - Establishment of Base Data for Climate Change Policy Support", *Science & Technology Policy*, 26(5): 46-51.
13. 노영희·김충기·홍현정, 2016. "제주 생태계 조절서비스의 시계열적 변화: 탄소고정량 추정 및 경제성 평가를 중심으로",「환경정책」, 24(2): 29-44.
    Roh, Y.H., Kim, C.K., and Hong, H.J., 2016. "Time-Series Changes to Ecosystem Regulating Services in Jeju: Focusing on Estimating Carbon Sequestration and Evaluating Economic Feasibility", *Journal of Environmental Policy and Administration*, 24(2): 29-44.
14. 대한민국정부, 2021a.「제4차 지속가능발전 기본계획(2021-2040)」, 세종.
    The Government of the Republic of Korea, 2021a. *The 4th Basic Plan for Sustainable Development (2021-2040)*, Sejong.
15. 대한민국정부, 2021b.「한국판 뉴딜 2.0 –미래를 만드는 나라 대한민국」, 세종.

The Government of the Republic of Korea, 2021b. *Korean New Deal 2.0 – Korea, the Country that Creates the Future*, Sejong.

16. 박은진·강규이, 2009.「도시 수목의 이산화탄소 흡수량, 산정 및 흡수효과 증진 방안」, 수원: 경기연구원.
Park, E.J. and Kang, K.Y., 2009. *Quantification of CO_2 Uptake by Urban Trees and Greenspace Management for C Sequestration*, Suwon: Gyeonggi Research Institute.

17. 박은진·강규이, 2010. "경기도 도시가로수의 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량 산정",「한국환경생태학회지」, 24(5): 591-600.
Park, E.J. and Kang, K.Y., 2010. "Estimation of C Storage and Annual CO_2 Uptake by Street Trees in Gyeonggi-do", *Korean Journal of Environment and Ecology*, 24(5): 591-600.

18. 박은진·남미아·강규이, 2010.「도시열섬 완화를 위한 옥상녹화 활성화 방안」, 수원: 경기연구원.
Park, E.J., Nam M.A., and Kang, K.Y., 2010. *Green Roof Strategy for Mitigating the Urban Heat Island Effect*, Suwon: Gyeonggi Research Institute.

19. 박은진·남미아·강규이, 2012. "경기도의 옥상녹화 가용면적 추정과 이의 정책적 함의",「한국환경복원기술학회지」, 15(1): 107-117.
Park, E.J., Nam M.A., and Kang, K.Y., 2012. "Estimation of the Potential Area for Roof Greening in Gyeonggi-do and Its Implications", *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 15(1): 107-117.

20. 박효석·오규식·이상헌, 2014. "도시 그린인프라 확충에 따른 탄소저감 증진효과 분석 –서울시를 대상으로",「도시행정학보」, 27(4): 1-23.
Park, H.S., Oh, K.S., and Lee, S.H., 2014. "Analysing Effects of CO_2 Absorption Capability through Enhancing Urban Green Infrastructure in Seoul", *Journal of the Korean Urban Management Association*, 27(4): 1-23.

21. 배은석·오규식, 2015. "전과정평가에 기반한 서울시 아파트의 이산화탄소 배출량 분석",「국토계획」, 50(3): 335-354.
Bae, E.S. and Oh, K.S., 2015. "An Analysis of Carbon Dioxide Emission from Apartment Housings in Seoul by Life Cycle Assessment", *Journal of Korea Planning Association*, 50(3): 335-354.

22. 산림청, 2016.「제6차 국가산림자원 보고서」, 원주.
Korea Forest Service, 2016. *The 6th National Forest Resources Report*, Wonju.

23. 손영모·김래현·이경학·표정기·김소원·황정순·이선정·박현, 2014.「한국 주요 수종별 탄소배출계수 및 바이오매스 상대생장식」, 서울: 국립산림과학원.
Son, Y.M., Kim, R.H., Lee, K.H., Pho, J.K., Kim, S.W., Hwang, J.S., Lee, S.J., and Park, H., 2014. *Carbon Emission Factors and Biomass Allometric Equations by Species in Korea*, Seoul: National Institute of Forest Science.

24. 송인주·윤초롱, 2019.「서울시 생태계서비스 평가체계 구축과 활용방안」, 서울: 서울연구원.
Song, I.J. and Yoon, C.R., 2019. *Establishment and Utilization of Ecosystem Service Assessment in Seoul*, Seoul: Seoul Institute.

25. 수원시, 2020.「제60회 수원기본통계」, 수원.
Suwon-si, 2020. *The 60th Suwon-si Basic Statistics*, Suwon.

26. 수원시, 2021.「수원시 주택재개발정비사업 추진현황(2021.06.25. 기준)」, 수원.
Suwon-si, 2021. *Suwon City Housing Redevelopment and Maintenance Project Status (2021.06.25.)*, Suwon.

27. 신동석·정득종·김형석·황재운·박지희·신유경·빈은미·최진호·김재란·이미나, 2017.「지자체 온실가스 배출량 산정지침」, 인천: 한국환경공단.
Shin, D.S., Jung, D.J., Kim, H.S., Hwang, J.W., Park, J.H., Shin, Y.K., Bin, E.M., Choi, J.H., Kim, J.R., and Lee, M.N., 2017. *Guidelines for Local Government Greenhouse Gas Inventories*, Incheon: Korea Environment Corporation.

28. 양금철·김정섭, 2020. "불암산 도시자연공원 생태복원지와 식생보전지 수목의 탄소저장량 및 흡수량",「응용생태공학회 논문집」, 7(4): 284-293.
Yang, K.C. and Kim, J.S., 2020. "Carbon Storage and Absorption of Trees in the Ecological Restoration Area and Vegetation Conservation Area of Bulamsan Urban Nature Park", *Ecology and Resilient Infrastructure*, 7(4): 284-293.

29. 여규동·정영훈, 2013. "도시지역의 옥상녹화에 따른 유출저감효과 분석과 비용 산정",「서울도시연구」, 14(2): 161-177.
Yeo, K.D. and Jung, Y.H., 2013. "An Analysis of Effect of Green Roofs in Urbanized Areas on Runoff Alleviation and Cost Estimation", *Seoul Studies*, 14(2): 161-177.

30. 이경학·손영모·서정호·김래현·박인협·손요환·이영진, 2006.「기후변화협약 대응 산림부문 온실가스 통계체계 구축」, 서울: 국립산림과학원.
Lee, K.H., Son, Y.M., Seo, J.H., Kim, R.H., Park, I.H., Son, Y.H., and Lee, Y.J., 2006. *Establishment of Greenhouse Gas Statistics System in Forest Sector in Response to Climate Change Agreement*, Seoul: National Institute of Forest Science.

31. 이나연, 2011. "북한산국립공원 낙엽활엽수림의 탄소저장량 평가",「국립공원연구지」, 2(2): 53-57.
Lee, N.Y., 2011. "Estimation of Carbon Storage in Three Cool-Temperate Broad-Leaved Deciduous Forests at Bukhansan National Park, Korea", *Journal of National Park Research*, 2(2): 53-57.

32. 이동근·박진한·박찬, 2010. "도시 녹지 가치 평가를 위한 탄소흡수량 추정 –서울시를 대상으로",「환경영향평가」, 19(6): 607-615.
Lee, D.K., Park, J.H., and Park, C., 2010. "Estimation of Carbon Uptake for Urban Green Space: A Case of Seoul", *Journal of Environmental Impact Assessment*, 19(6): 607-615.

33. 이상진·박관수·이동근·장성완·이항구·박환우, 2015. "국내 저관리 경량형 옥상녹화용 식생기반재의 이화학적 특성 및 탄소고정량 비교 분석",「한국환경복원기술학회지」, 18(1): 115-125.
Lee, S.J., Park, G.S., Lee, D.K., Jang, S.W., Lee, H.G., and Park, H.W., 2015. "A Comparative Study on Carbon Storage and Physicochemical Properties of Vegetation Soil for Extensive Green Rooftop Used in Korea", *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 18(1): 115-125.

34. 이선정·임종수·강진택, 2019. "주요 산림수종의 표준 탄소흡수량(ver.1.2)",「NIFoS 산림정책이슈」, 129: 1-17.
Lee, S.J., Yim, J.S., and Kang, J.T., 2019. "Standard Carbon Sequestration of Major Forest Species (ver.1.2)", *NIFoS Forest*

Policy Issues, 129: 1-17.

35. 이양주·장누리·조진현, 2020.「경기도 생태(生態) 분야 그린뉴딜 정책연구」, 수원: 경기연구원.
Lee, Y.J., Jang, N.R., and Cho, J.H., 2020. *A Study on Green New Deal Policy in the Ecological Field of Gyeonggi-do*, Suwon: Gyeonggi Research Institute.

36. 이정희·임정호·김경민·허준, 2015. "다시기 Landsat TM 영상과 기계학습을 이용한 토지피복변화에 따른 산림탄소저장량 변화 분석",「한국지리정보학회지」, 18(5): 81-99.
Lee, J.H., Im, J.H., Kim, K.M., and Heo, J., 2015. "Change Analysis of Aboveground Forest Carbon Stocks According to the Land Cover Change Using Multi-Temporal Landsat TM Images and Machine Learning Algorithms", *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 18(5): 81-99.

37. 이창훈·곽소윤·김충기·배현주·서양원·안소은·강완모·김지은·신정우, 2016.「환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구」, 세종: 한국환경정책·평가연구원.
Lee, C.H., Kwak, S.Y., Kim, C.K., Bae, H.J., Suh, Y.W., Ahn, S.E., Kang, W.M., Kim, J.E., and Shin, J.W., 2016. *An Integrated Approach to Environmental Valuation*, Sejong: Korea Environment Institute.

38. 조현길·안태원, 2012. "도시 낙엽성 조경수종의 탄소저장 및 흡수",「한국조경학회지」, 40(5): 160-168.
Jo, H.K. and Ahn, T.W., 2012. "Carbon Storage and Uptake by Deciduous Tree Species for Urban Landscape", *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 40(5): 160-168.

39. 채진해·김원주, 2020. "탄소저장량 측정을 통한 근린공원의 생태적 가치 평가와 관리 방안 연구 –서울시를 대상으로–",「한국경관학회지」, 12(2): 217-231.
Chae, J.H. and Kim, W.J., 2020. "A Study on Assessment of Ecological Value and Management Plans for Neighborhood Parks through CO_2 Storage Measurement in Seoul", *Journal of the Korea Landscape Council*, 12(2): 217-231.

40. 추인교·성연정·Bastola Shiksha·정영훈, 2021. "토지피복변화에 따른 행정구역별 토양 탄소 변화량 산정",「한국지반환경공학회 논문집」, 22(3): 37-43.
Choo, I.K., Seong, Y.J., Shiksha, B., and Jung, Y.H., 2021. "Calculation of Soil Carbon Changes by Administrative District with Regard to Land Cover Changes", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 22(3): 37-43.

41. 한국토지주택공사, 2021.「2020 도시계획현황」, 진주.
Korea Land & Housing Corporation (LH), 2021. *2020 Urban Planning Status*, Jinju.

42. 한미경·김경진·양금철, 2014. "도시공원 식재유형별 탄소저장량, 연간 탄소흡수량 및 토양호흡량 비교 –천안시 두정공원을 중심으로–",「한국환경생태학회지」, 28(2): 142-149.
Han, M.K., Kim, K.J., and Yang, K.C., 2014. "Comparison of Carbon Storages, Annual Carbon Uptake and Soil Respiration to Planting Types in Urban Park – The Case Study of Dujeong Park in Cheonan City–", *Korean Journal of Environment and Ecology*, 28(2): 142-149.

43. 행정안전부, 2020.「2020 한국도시통계」, 세종.
Ministry of the Interior and Safety, 2020. *2020 Korea City Statistics*, Sejong.

44. 황상일·박선환·전영봉·황정배·강선홍·김진홍, 2014. "개발사업 환경성평가에서의 토양 탄소저장량 산정방법 비교 연구",「환경영향평가」, 23(6): 445-452.
Hwang, S.I., Park, S.H., Jeon, Y.B., Hwang, J.B., Kang, S.H., and Kim, J.H., 2014. "A Comparative Study for Estimation Methodologies of Soil Organic Carbon Stocks for Environmental Assessment on Development Projects", *Journal of Environmental Impact Assessment*, 23(6): 445-452.

45. Davies, Z.G., Edmondson, J.L., Heineneyer, A., Leake, J.R., and Gaston, K.J., 2011. "Mapping an Urban Ecosystem Service: Quantifying Above-ground Carbon Storage at a City-wide Scale", *Journal of Applied Ecology*, 48(5): 1125-1134.

46. Getter, K.L., Rowe, D.B., Robertson, G.P., Cregg, B.M., and Andresen, J.A., 2009. "Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs", *Environmental Science & Technology*, 48(19): 7564-7570.

47. Gómez-Baggethun, E., Gren, Å., Barton, D.N., Langemeyer, J., McPhearson, T., O'Farrell, P., Andersson, E., Hamstead, Z., and Kremer, P., 2013. "Urban Ecosystem Services." in *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*, edited by Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., Güneralp, B., Marcotullio, P.J., McDonald, R.I., Parnell, S., Schewenius, M., Sendstad, M., Seto, K.C., and Wilkinson, C., 175-252. Cham: Springer Nature.

48. Nowak, D.J., 1994. "Atmospheric Carbon Dioxide Reduction by Chicago's Urban Forest." in *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*, edited by Gregory E. McPherson, David J. Nowak, Rowan A. Rowntree, 63-82. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.

49. Nowak, D.J. and Crane, D.E., 2002. "Carbon Storage and Sequestration by Urban Trees in the United States", *Environmental Pollution*, 116(3): 381-389.

50. Nowak,, D.J., Greenfield, E.J., Hoehn, R.E., and Lapoint, E., 2013. "Carbon Storage and Sequestration by Trees in Urban and Community Areas of the United States", *Environmental Pollution*, 178: 229-236.

51. Shafique, M., Kim, R., and Rafiq, M., 2018. "Green Roof Benefits, Opportunities and Challenges – A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90: 757-773.

52. UN ECOSOC, 2019. *World Urbanization Prospects*: *The 2018 Revision*, New York.

53. 한국환경정책·평가연구원, "생태계서비스/가치평가 toolkit", 2021.12.20. 읽음. 환경가치종합정보시스템 EVIS, http://evis.kei.re.kr
Korea Environment Institute, "Ecosystem Service/Valuing toolkit", Accessed December 20, 2021. Environmental Valuation Information System EVIS, http://evis.kei.re.kr

Date Received 2021-10-28
Date Reviewed 2021-12-05
Date Accepted 2021-12-05
Date Revised 2022-01-06
Final Received 2022-01-06