

탄소저감설계 지원을 위한 수목 탄소계산기 개발 및 적용^{†,††}

Development of Tree Carbon Calculator to Support Landscape Design for the Carbon Reduction^{†,††}

하지아*, 박재민**

*(주)본시구도 기업부설 연구소장, **청주대학교 조경도시계획전공 조교수

Ha, Jee-Ah*, Park, Jae-Min**

*Director, Research Institute (Attached), Bonsigudo Landscape Architecture Design, Inc.

**Assistant Professor, Department of Human Environment Design, Cheongju University

Received: January 13, 2023

Revised: January 25, 2023 (1st)

Accepted: January 25, 2023

3인인명 심사필

Corresponding author :

Jae-Min Park

Assistant Professor, Department
of Human environment Design,
Cheongju University, Cheongju
28503, Korea

Tel.: +82-43-229-8508

E-mail: jm018@cju.ac.kr

국문초록

지구온난화로 인한 세계적 기후 위기를 맞아 탄소성능 정량화에 기반한 정책들이 빠르게 도입되면서, 신규 조성되는 도시녹지 계획안의 탄소성능을 예측할 수 있는 방법론이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 조경분야에서 탄소저감설계를 위해 활용할 수 있는 수목 탄소계산기를 개발하고, 조경설계 실무에서의 효용성을 검증하고자 하였다. 설계 현장에서의 운용성 확보를 위해 범용성 높은 MS Excel을 포맷으로 선정하고, 식재설계의 업무적 특성을 반영할 수 있도록 대표 수종 93종을 대상으로 수종별, 규격별 탄소흡수량과 저장량을 추출하였다. 특히 실무에서 비용적 한계를 반영할 수 있도록 수목 단가를 포함한 데이터베이스를 구축하였다. 수목 탄소계산기의 성능 검증을 위한 식재 실험설계는 조경설계 전문가 4인을 대상으로 중부지방 소공원에 대한 설계 시뮬레이션을 시행하였고, 전후로 반구조적 인터뷰를 진행하여 그 인과관계를 분석하였다. 그 결과 수목 탄소계산기를 사용한 설계안의 탄소흡수량과 탄소저장량이 각각 약 17-82%, 약 14-85% 높게 나타났다. 탄소성능 효율이 높아진 이유는 탄소성능 우수종으로의 교체와 더불어, 예산 범위 내에서 적극적인 추가 식재로 인한 것임을 확인하였다. 설계가들은 사전 인터뷰에서 수목 탄소계산기에 대한 불신과 새로운 프로그램에 대한 부담감을 가졌으나, 사용 후 유용성 및 편의성에 대해 긍정적으로 평가하며 인식의 변화를 보여주었다. 추후 조경분야 탄소저감설계의 본격적인 도입을 위해서는 수목뿐 아니라 조경성능 전반에 대한 탄소계산기로 발전할 필요가 있다. 본 연구는 조경설계 분야에서 본격적으로 정량적 데이터에 입각한 탄소저감설계를 도입하는 데 있어 유용한 방향성을 제시해 줄 것으로 기대된다.

주제어: 탄소성능, 조경성능, 탄소종립, 기후위기, i-Tree Eco

ABSTRACT

A methodology to predict the carbon performance of newly created urban greening plans is required as policies based on quantifying carbon performance are rapidly being introduced in the face of the climate crisis caused by global warming. This study developed a tree carbon calculator that can be used for carbon reduction designs in landscaping and attempted to verify its effectiveness in landscape design. For practical operability, MS Excel was selected as a format, and carbon absorption and storage by tree type and size were extracted from 93 representative species to reflect plant design characteristics. The database, including tree unit prices, was established to reflect cost limitations. A plantation experimental design to verify the performance of the tree carbon calculator was conducted by simulating the design of parks in the central region for four landscape design, and the causal relationship was analyzed by conducting semi-structured interviews before and after. As a result, carbon absorption and carbon storage in the design using the tree carbon calculator were about 17-82% and about 14-85% higher, respectively, compared to not using it. It was confirmed that the reason for the increase in carbon performance efficiency was that additional planting was actively carried out within a given budget, along with the replacement of excellent carbon performance species. Pre-interviews revealed that designers distrusted data and the burdens caused by new programs before using the arboreal carbon calculator but tended to change positively because of its usefulness and ease of use. In order to implement carbon reduction design in the landscaping field, it is necessary to develop it into a carbon calculator for trees and landscaping performance. This study is expected to present a useful direction for

[†]본 논문은 저자의 석사 학위 논문인 “조경분야 최적화 설계 지원을 위한 수목 탄소계산기 개발 및 적용”의 내용 중 일부를 정리한 연구임.

^{††}본 논문은 2022년 한국조경학회 추계학술대회에 발표된 동일 제목의 연구를 정리한 것임.

introducing carbon reduction designs based on quantitative data in landscape design.

Keywords: Carbon Performance, Landscape Performance, Net Zero, Climate Crisis, i-Tree Eco

1. 서론

지구온난화로 인한 세계적 기후 위기가 심각해지면서 정부도 온실가스 감축을 위한 제도적 기반과 구체적 로드맵을 마련하고 있다. 2021년 10월 의결된 「2030 국가 온실가스(NDC) 감축목표 상향안」에서는 지속적인 산림면적 및 연간 임목생장량 감소에 대한 보완재로 도시녹지에 주목하고, 탄소흡수원 총량 관리제 도입 등 도시지역 배출상쇄분 확충을 제안하고 있다. 감소하는 탄소흡수원에 대한 대책으로 온실가스 상쇄제도 역시 도입되고 있는데, IPCC 우수실행지침(GPG2003)에서도 도시 내 식생복구 사업의 경우 도시공원과 녹지공간을 우수사례로 제시하고 있다(국립산림과학원, 2016). 국토계획에도 탄소중립 요소가 반영되기 시작하였다. 국토교통부는 2021년 12월 보도자료를 통해 「도시·군기본계획수립지침」 및 「도시개발업무지침」을 개정·시행하여 도시별 온실가스 감축목표를 설정하고 공원녹지 등 부문별 계획에 탄소중립 계획요소를 반영토록 하겠다고 발표하였다(http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95086382). 이러한 제도들은 모두 도시녹지의 탄소흡수원 기능에 중점을 두고 있으며 탄소성능의 정량화를 전제로 하고 있다.

현재 국내 조경분야의 탄소성능 연구는 아직 초기 단계이다. 이미 조성된 산림 및 공원의 경우 국가산림지도와 영급별 CO₂ 저장계수를 활용하거나 수목 바이오매스 산정을 통해 탄소성능을 구하고 있으며(황상일과 박선환, 2011; 박은진, 2009), 주요 산림 수종별 국가 탄소배출 계수를 개발하는 등 고도화 연구를 진행하고 있다(손영모 등, 2014). 반면 신규 녹지공간의 조성 전 계획·설계 단계에서 탄소성능을 예측하는 방법은 아직 마련되지 않고 있다. 국토 단위에서의 탄소 관리가 도입되고 개별 도시녹지 계획안의 탄소성능 인증이 본격적으로 요구되기 시작하면 대다수 설계 현장에서는 대응할 방법이 없는 실정이다. 따라서 조정설계 단계에서 계획안의 탄소성능을 정량적으로 산정할 수 있는 새로운 도구가 필요하다.

국외에서는 이미 광범위한 수목 탄소성능 데이터를 바탕으로 프로젝트 계획단계에서의 탄소성능을 가능하기 위해 Pathfinder, Carbon Conscience 등의 탄소계산기를 개발하여 사용 중에 있다. 국내의 경우 도시숲의 대표 수종에 대한 연구(국립산림과학원, 2012)를 바탕으로 2012년 ‘탄소나무스쿨 v1.0’이 교육용 웹 프로그램으로 개발되었지만, 현재는 운영되지 않고 있다. 인접분야에서 현장조사를 기반으로 한 연구(산림청, 2020)를 통해 도시수목 일부 수종에 대해 탄소성능 산정식을 발표하였으나, 수종 범위가 한정적이고 수목의 규격 기준이 조경수와 상이하여 조경분야에 적용하기에 적합하지 않다. 식생복구사업의 온실가스 감축량 산정 방식(온실가스정보센터, 2022)도 수목의 임령을 기준으로 하고 있어 조정수 규격과 호환되지 않아 국내 설계 현장에서 직접 활용하기에는 어려운 실정이다.

조정설계 과정에 사용할 탄소계산기는 그 특수성을 반영할 필요가 있다. 조정 설계기는 복잡한 도시환경 속에서 도시민의 생활공간을 만들기 위해 탄소뿐 아니라 경관미, 유지 관리성 등 다양한 변수를 고려해야 한다. 계획안의 탄소성능을 향상시키기 위한 가장 1차원적인 방법은 수목 투입을 양적으로 극대화하는 것이지만, 예산의 제한이라는 현실적인 한계가 있다. 또한 조정수의 경우 많은 수종이 유통과 적산을 위해 정형화된 규격으로 각각 구분되어 있어 광범위한 데이터베이스를 필요로 한다. 이러한 의미에서 조경분야의 탄소저감설계를 지원하는 보조도구는 여러 대안을 비교하기 쉽도록 구동이 간편해야 하고, 탄소성능과 비용을 함께 고려할 수 있는 기능을 갖추어야 하며, 지원 범위 역시 폭넓은 조정수 전반을 포괄해야 누락되는 수종 없이 온전한 탄소성능을 산출할 수 있다.

본 연구에서는 조정설계 과정에서 수목 탄소계산기를 활용한 탄소저감설계의 구현 가능성을 알아보고자 하였다. 이를 위해 우선 도시녹지 계획안의 탄소성능을 정량화할 수 있는 도구로서 실무자들을 위한 수목 탄소계산기를 개발하였다. 실무 현장에서 사용하기 쉽도록 범용성 높은 프로그램으로 기획하고, 조정설계에 주로 사용하는 대표 수종에 대하여 탄소성능값과 비용을 함께 산출할 수 있도록 제작하였다. 개발한 수목 탄소계산기의 효용성을 검증하기 위해 조정설계 전문가를 대상으로 실험설계를 시행하였다. 수목 탄소계산기를 활용한 탄소저감 프로세스의 수치적 효과를 알아보기 위해 설계 시뮬레이션을 진행하고, 인터뷰를 통해 수목 탄소계산기의 사용 편의성 및 효용성에 대한 사후평가를 시행하였다. 이를 기반으로 수목 탄소계산기의 발전을 위한 필요 요소를 알아보고, 조정설계 분야에서 탄소저감설계를 본격적으로 도입하는 데 있어 개략적인 방향성을 제시하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 도시수목 탄소성능 정량화 관련 연구 동향

수목은 바이오매스 안에 탄소를 축적하여 격리시킨다. 탄소격리란 수목이 광합성을 통해 탄소를 고정하고 잉여 탄소를 바이오매스에 저장하는 과정(Nowak and Crane, 2002)이므로 탄소저장의 정량화 방법은 기본적으로 바이오매스와 성장추정치를 기반으로 한다(McPherson, 1998; Nowak, 1993). 바이오매스 측정을 위한 가장 확실한 방법은 수목을 채취하여 건중량을 구하는 것이지만, 보편적 시행에 제한이 있으므로 흉고직경(DBH), 수고 등 수목 상태를 기반으로 수종별 상대생장식을 적용하는 방법이 일반적으로 활용되고 있다(Aguaron and McPherson, 2012). 연간 탄소격리량은 X 년과 $X+1$ 년에 추정된 탄소저장량 간의 차이를 통해 구할 수 있는데(Nowak and Crane, 2002) 이 중 총 탄소격리량은 연간 고사율과 부후에 의한 탄소배출분까지 포함하며, 순 탄소격리량은 이 탄소배출분을 제외한 값을 뜻한다(Nowak, 2021). 본 연구에서는 연간 총 탄소격리량을 탄소흡수량, 즉 수목이 한 해 동안 고정한 탄소량(조현길 등, 2020)으로 지칭하였다.

산림의 경우 매년의 임목축적 변화량으로 탄소흡수량을 산정할 수 있으나, 도시녹지의 경우 임목축적량 자료가 없고 개체별로 관리되므로 상대생장식을 활용하여 탄소저장량과 탄소흡수량을 추정한다(박은진, 2009). 도시수목에 대한 상대생장식 구축은 높은 조사비용과 장기적 데이터 축적을 요하는 일임으로 다른 국가보다 미국 도시에서 많이 진행되었으며, 구축된 상대생장식에 기후대 정보를 포함한 수목 인벤토리 데이터는 CTCC(CUFR Tree Carbon Calculator)와 i-Tree 프로그램을 통해 제공되고 있다(Weissert et al, 2014).

국내에서도 최근 탄소성능 측정 및 증진 방법에 대한 다양한 연구¹⁾가 진행되고 있다. 이관규(2003)는 선행연구(조현길과 안태원, 2000; 2001)를 분석하여 교목, 관목, 침엽, 활엽에 대한 CO₂ 흡수량 및 저장량 산정식을 도출하였다. 국립산림과학원(2012)은 「탄소저감이 도시숲」을 발간하고 도시수목 대표 수종의 탄소계정을 위한 환산표를 게재하였다. 산림청(2020)은 기존 도시수목의 탄소성능 연구(조현길 등, 2013; 2014)와 전국 5개 도시 현장조사를 통해 22개 수종에 대한 탄소흡수 및 저장량 산정 계량모형을 발표하였다. 이러한 연구를 통해 현재 국내의 도시수목 탄소성능 정량화는 조성된 녹지에 대한 개략적인 추정과 주요 수종에 대한 계정이 가능한 상태이다.

2.2 국내외 수목 탄소계산기 개발 현황

미국 조경재단(Landscape Architecture Foundation: LAF)은 조경성능(landscape performance)에 대해 설계된 조경이 당초 의도한 목적을 달성하고 지속가능성에 기여하는 효율성의 척도라고 정의하고, 이를 검증하기 위해 2010년 조경성능 시리즈(landscape performance series, LPS)를 시작했다. LPS는 지속가능한 경관 솔루션의 사례를 찾고, 그 가치를 입증하기 위해 환경·사회·경제적 편익을 정량화하는 방법과 측정 기준을 지속적으로 모색하고 있다(Yang, 2019). 이에 환경성능 계산기를 비롯한 정량화 도구를 정리하여 Benefits Toolkit으로 제시하고 있다(www.landscapeperformance.org/benefits-toolkit).

현재 상용화된 환경성능 계산기는 대부분 수목의 탄소성능과 에너지, 산소, 대기질, 강우 등을 함께 다루고 있다. 미 산림청(USDA)이 개별 수목의 환경성능을 알아보기 위해 개발한 CTCC, 이를 웹서비스 형식으로 전환 제작한 ecoSmart Landscape, 약 1,585종에 대해 수종별 개별목의 탄소성능을 비롯한 환경성능을 제공해주는 i-Tree Eco, 수목의 환경성능을 경제적 추정치로 환산해주는 NTBC 등이 대표적이다. 이 중 CTCC는 Excel 기반 계산기로 2008년 이후 업데이트가 중지되었으며, 2006년에 보다 향상된 산정 방식인 UFORE Methods를 도입한 i-Tree 제품군을 출시하였다. i-Tree는 별도의 app을 통해 구동할 수 있도록 인터페이스를 발전시켰다. 수목 환경성능 데이터의 기본이 되는 i-Tree Eco를 중심으로 i-Tree Canopy, i-Tree MyTree 등의 프로그램을 운영 중이며, NTBC 등 여타 계산기의 데이터소스로 활용되고 있다²⁾. 또한 UFIA(urban forest inventory and analysis) 프로그램에 투입되어 도시 수목 및 숲을 모니터링하고 있으며, 2019년부터 한국도 서비스 지역에 포함되었다(Nowak, 2021).

조경공정 전반의 탄소성능을 예측할 수 있는 계산기로 Pathfinder와 Carbon Conscience가 있다. 2019년 LAF의 지원으로 설립된 연구 이니셔티브 climate positive design(CPD)은 조경설계를 위한 탄소계산기 Pathfinder를 내놓았다(<https://climatepositivedesign.com>). 프로젝트 초기 단계에서 대안별 기후변화 기여도 비교분석을 목적으로 개발된 Pathfinder는 material, plants, operations의 세 항목별 소요량을 기입하면 프로젝트의 탄소중립까지 도달시간을 알려준다(Carbon Positive Design, 2020). 수목 탄소성능의 경우 Plants 항목 입력을 통해서 개별목이 아닌 침엽, 활엽 및 크기에 따른 개략적인 탄소성능을 산출할 수 있다. Carbon Conscience는 2021년 Sasaki 재단이 개념 스케치 단계에서의 의사 결정을 지원하기 위해 내놓은 분석 도구이다(Sasaki Associates, 2021). 위성지도에 연동된

자체 페인팅 툴(<https://vimeo.com/646929754>) 또는 Acad 선형을 가져와서 토지이용별 면적을 산출하고, 단위 면적당 탄소성능을 적용하여 계획안의 예상 탄소배출량, 격리량 및 저장량이 산출된다(<https://carbon-conscience.web.app>). Carbon Conscience의 경우는 수목이 아닌 녹지 타입별 탄소성능을 적용하므로 별도로 개별목의 탄소성능을 구하기에는 적합하지 않다. 이상의 탄소계산기 중 Pathfinder와 Carbon Conscience를 제외하고 모두 개별목의 탄소성능 산출이 가능하며, 변수로서 수종 및 크기(DBH) 입력이 필수적임을 알 수 있다(Table 1 참조).

국내의 경우 「탄소지킴이 도시숲」의 데이터소스가 2012년 운영되었던 '탄소나무스쿨 v1.0'의 기반이 되었으며, 2022년 식생복구 사업의 방법론에도 적용되었다. 식생복구 사업의 사업계획서에 수록된 온실가스 감축량 산정시트는 수목의 크기와 식재본수를 입력하면 CO₂ 흡수량과 사업 후 탄소저장량을 산출해 주지만, 크기 기준이 식재 시 임령(년)으로 입력하도록 설정되어 있다(온실가스정보센터, 2022). 2020년 산림청에서 제시한 도시수목 22종의 탄소계정 산정식은 해당 수종의 탄소흡수량 및 저장량을 계산할 수 있으나, 이 역시 크기 기준이 흉고직경(DBH)에 맞춰져 있다. 국내 조정수 규격은 수고(H)와 근원직경(R), 수관폭(W), 흉고직경(B) 등 다양한 표기법을 채택하고 있다. 따라서 현재 사용되는 수목 탄소계산기는 별도의 단위 환산 없이 직접 조정분야에 활용하기에는 어려움이 있다. 또한 현재까지 국내 연구 결과 역시 조정에 사용되는 폭넓은 수종을 지원하지 못해 식재계획 내용을 정밀하게 반영할 수 없는 한계가 있다.

3. 연구 방법

3.1 수목 탄소계산기 개발

3.1.1 개발 방향

본 연구의 수목 탄소계산기는 현장 운용성에 중점을 두어 개발을 진행하였다. 이를 위해 다양한 수종을 다루는 조정설계의 특성을 반영하여 데이터베이스의 수종 범위를 가능한 한 넓게 확보할 필요가 있다. 수종별 탄소성능 추

Table 1. 국내외 수목 탄소계산기

명 칭	설 명	대 상	형 식	개 발 처
CUFR Tree Carbon Calculator (CTCC)	수종별 바이오매스 추정식으로 탄소량 및 건물 에너지 절감효과 산정 (변수) 위치 / 기상정보 / 종 / 수령 or 수목 크기(DBH)	탄소, 에너지	MS Excel	Center for Urban Forest Research
	자료: www.fs.usda.gov/ccrc/tool/cufr-tree-carbon-calculator-ctcc			
ecoSmart Landscape (eSL)	주거지 필지 규모에서 GI 영향에 대한 정량적 평가 도출 (변수) 위치 / 종 / 수목 크기(DBH)	탄소, 에너지	웹서비스 HTML	U.S. Forest Service
	자료: www.fs.usda.gov/ccrc/tool/ecosmart-landscapes			
i-Tree Eco	약 1,585종에 대해 개별목이 제공하는 생태계 서비스(환경성능) 산출 (변수) 종 / 수목 크기(DBH) / 건물로부터의 방향 및 거리	탄소, 산소, 대기질, 강우	Desktop app	U.S. Forest Service
	자료: www.itreetools.org/			
National Tree Benefit Calculator (NTBC)	수목의 환경 및 경제적 추정치 환산 (변수) 위치 / 종 / 수목 크기(DBH) / 토지이용 유형	탄소, 에너지, 강우, 대기질	웹서비스 HTML	Davey Tree Expert Co. & Casey Trees
	자료: www.treebenefits.com/calculator/			
Pathfinder: Landscape Carbon Calculator	조경프로젝트의 탄소 발자국과 탄소 중립에 대한 시간 예측 (변수) Materials / Operations / Plants-침엽, 활엽, 관목, 지피(크기-대중소, 면적)	탄소	웹서비스 HTML	Climate Positive Design
	자료: app.climatepositivedesign.com/			
Carbon Conscience	토지이용 별 탄소성능 적용, 디자인의 탄소성능 예측 (변수) 토지이용 / 자재 및 공법 / 녹지 타입 및 밀도	탄소	웹서비스 HTML	Sasaki Associates, Inc.
	자료: carbon-conscience.web.app/			
온실가스 감축량 산정계산기 (식생복구 사업의 방법론-사업계획서)	온실가스 배출권거래제상쇄제도 외부사업 중 식생복구 사업의 사업계획서 내 온실가스 감축량 계산기 탑재 탄소지킴이 도시숲의 데이터소스 이용 (변수) 종, 수량, 크기(식재 시 임령)	탄소	MS Excel	온실가스 종합정보센터 (2022)
탄소나무 스쿨 v1.0 (현재 미운영)	도시숲 수목을 활엽수 11개 그룹, 침엽수 6개 그룹으로 구분 그룹별 대표 수종의 탄소성능 제시 (변수) 유형 / 종 / 크기(DBH) / 임령	탄소, 산소	웹서비스 HTML	국립산림과학원 (2012)

출 도구로서 국내 선행연구의 산정식을 사용하는 경우 지역적, 기후적 특성이 반영된 정확도 높은 데이터를 얻을 수 있겠지만, 그 범위가 몇몇 수종에 제한되는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 데이터의 정확도는 다소 떨어지더라도 광범위한 수종에 대하여 개별목의 탄소성능을 구하기 적합한 i-Tree Eco를 채택하였다. 수목 탄소계산기의 포맷은 구매, 교육, 설치의 부담 없이 쉽게 이용할 수 있어야 현장에서의 진입장벽이 낮으므로, 범용성 높은 프로그램인 MS Excel을 선정하였다.

조경 프로젝트의 탄소성능을 높이기 위한 가장 확실한 방법은 녹지 면적을 확대하고 탄소흡수율이 높은 우수종을 양적으로 최대한 많이 심는 것이겠지만, 설계 컨셉 유지, 경관성 확보, 유지 관리성 및 예산을 고려하면 현실적인 방법이라 하기 어렵다. 본 연구에서는 탄소계산기를 활용해 탄소성능을 극대화하면서도 현실적 한계를 함께 반영할 수 있도록 수목 단가를 연동하였다.

3.1.2 데이터베이스 구축

수목 탄소계산기의 범위는 한국토지주택공사 수목 일위대가(2022. 02. 기준) 중 교목 93종을 대상으로 선정하였다. 우선 국내 수종들과 i-Tree Eco 라이브러리를 매칭한 후 종 수준에서 일치하지 않는 경우 상위 속 수준에서 데이터를 취득하였는데, 총 93종 중 5종(애기동백나무, 겹벚나무, 꽃사과, 모과나무, 물푸레나무)을 속 수준으로 대체하였다. 조형수의 경우 자연 수형을 인위적으로 다듬어 만들어낸 것으로서 사실상 동일 수종이므로 규격 변수만 다르게 적용하고 조형수 생산 과정에서의 탄소 배출분은 고려하지 않았다.

데이터베이스 구축의 가장 중점적인 작업은 조경수 규격을 i-Tree Eco의 필수 입력변수인 DBH로 전환하는 변수환산 과정이었다. 국내 조경수 규격은 성상에 따라 수고(H) × 근원직경(R), 수고(H) × 수관폭(W), 수고(H) × 흉고직경(B) 등 다양하게 표기하고 있으므로, 흉고직경 표기법을 제외하고는 모두 변환작업이 필요하였다. 이를 위해 국토교통부 조경 설계기준(2019) 중 수목식재(KDS 34 40 10)에 제시된 이식을 위한 수목규격 환산 기준표와 근원직경과 흉고직경 간 규격 환산식($R = 1.2B$)를 근거로 조경수 규격을 모두 흉고직경(DBH) 기준으로 변환하였다(Figure 1, Table 2 참조). 수고와 수관폭으로 표기하는 경우는 수고를 기준으로 환산표를 적용하였으며, 근원직경 또는 수관폭과 근원직경을 함께 표기하는 경우에는 근원직경을 흉고직경의 1.2배로 적용하여 입력변수인 DBH로 통일하였다.

이렇게 정리된 수종과 규격을 입력하여 i-Tree Eco를 구동하였다. 공간적 범위는 도시지역으로서 화성시 동탄 6동, 수원 기상관측소를 기준으로 하였으며, 시간적 범위는 2002년부터 2019년까지 데이터 중 기상 및 오염데이터가 모두 수집된 2018년을 지정하였다. i-Tree Eco를 통해 얻을 수 있는 탄소데이터는 연간 총 탄소격리량(gross carbon sequestration, kg/yr)과 순 탄소격리량(net carbon sequestration, kg/yr), 탄소저장량(carbon storage, kg)이다. 이 중 연간 총 탄소격리량을 탄소흡수량 데이터로 채택하고, 추출한 수종별 규격별 연간 탄소흡수량, 탄소저장량 및 일위대가 상의 수목 단가를 적용하여 최종적으로 데이터베이스를 완성하였다.

3.2 식재 실험설계를 이용한 프로그램 타당성 검증

3.2.1 식재 실험설계 개요

수목 탄소계산기의 탄소저감설계에 대한 효용성을 정량적, 정성적으로 검증하기 위해 설계 시뮬레이션과 심층 인터뷰로 구성된 실험설계를 진행하였다. 설계 시뮬레이션은 Table 3과 같이 중부지방 도시지역, 대지면적 2,179㎡



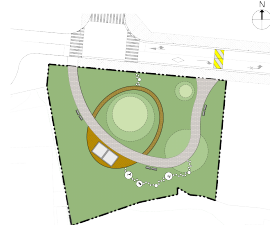
Figure 1. 조경수 규격과 i-Tree Eco 입력변수 간 환산과정

Table 2. 이식을 위한 수목규격 환산 기준

근원직경 (cm)	흉고직경 (cm)	수고 (m)	근원직경 (cm)	흉고직경 (cm)	수고 (m)	근원직경 (cm)	흉고직경 (cm)	수고 (m)
6	5	2.0	20	17	5.0	40	33	10.0
8	7	2.5	22	19	5.5	45	38	12.0
10	9	3.0	25	21	6.0	50	42	14.0
12	10	3.5	28	23	7.0	60	50	16.0
15	13	4.0	30	25	8.0	70	56	18.0
18	15	4.5	35	29	9.0	80	65	21.0

Source: 국토교통부, 2019

Table 3. 식재 실험설계 참여 조정 설계가 및 대상지

대상자	경력(년)	자격 사항	대상지
A	11	조경기사 특급, 생태복원기사	 <ul style="list-style-type: none"> · 중부지방 도시지역 · 도시공원법상 소공원 · 대지면적 2,179㎡ · 녹지면적 1,773.8㎡ · 시설율 18.6%
B	12	조경기사 고급	
C	11	조경기사 고급	
D	9	조경기술사	

의 소공원을 선정하여 조정설계 전문가 4인을 대상으로 실시하였다. 실험설계에 참여한 4인의 조정 설계가는 식재 설계를 비롯한 조정설계 과정 전반에 대한 이해도가 높은 경력 10년 전후의 전문 자격인으로 선정하였다. 설계 시물레이션은 참여 설계가들에게 수목 탄소계산기를 활용한 식재설계를 체험하게 하고, 활용 전후 탄소성능 수치를 비교하여 증감을 확인하였다. 심층 인터뷰는 실제 업무 과정에서의 사용성을 평가하고 기대 효과 및 발전 방향에 대한 의견을 알아보기 위해 사전, 사후로 나누어 실시하였으며, 이를 위해 인터뷰 대상자의 구체적 답변을 이끌어 내기 적합한 반구조적 인터뷰로 진행하였다.

3.2.2 식재 실험설계 프로세스

실험설계는 사전 인터뷰, 설계 시물레이션, 사후 인터뷰의 총 3단계로 구성하였다. 먼저 사전 인터뷰는 기후 위기 대응 및 탄소저감설계에 대한 인식과 탄소계산기에 대한 기대치를 조사하였다. 탄소저감설계의 정량적 효과를 알아보기 위한 설계 시물레이션 과정은 Figure 2와 같다. 우선 수목 탄소계산기 없이 1차 설계를 진행한 후, 탄소계산기를 이용해 1차 안의 탄소성능과 재료비를 확인하였다. 다음으로 탄소계산기를 활용한 1차 안 변경과정을 거쳐 2차 안을 작성 후 다시 최종 탄소성능을 도출하였다. 원활한 진행을 위해 수목 탄소계산기의 라이브러리에 없는 수종의 선택을 제한하고자 1차 설계 시 93종의 수목 리스트를 제공하였다. 수목의 탄소성능에 대한 사전 지식이 부족한 설계가들이 참고할 수 있도록 2차 설계 시에는 조경수 규격별 탄소흡수량 순위표를 탄소계산기와 함께 제공하여 비슷한 규격 안에서 대체목을 선정할 수 있도록 하였다. 또한 탄소성능 향상만을 위한 무리한 수량 투입을 방지하는 장치로서 1차 안의 재료비 총액이 2차 설계의 예산으로 적용되도록 설정하였다. 이러한 비용 상한선 장치

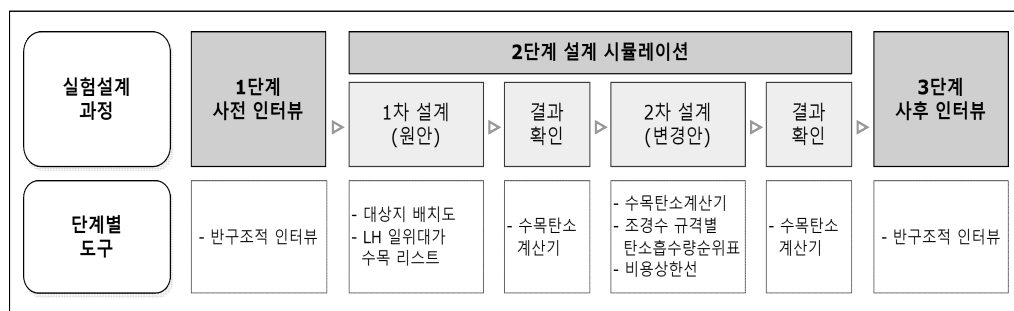


Figure 2. 실험설계의 과정 및 단계별 도구

를 통해 실제 설계에서의 금액 제한이 실험 내에서 구현되도록 하였다. 참여 설계가들은 설계 시물레이션을 통해 작성한 1, 2차 설계안과 각각의 수목 탄소계산기 산출 화면을 제출하였다. 마지막으로 사후 인터뷰를 통해 수목 탄소계산기 및 탄소저감설계 프로세스에 대한 평가를 수집하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수목 탄소계산기의 구조 및 작동

본 연구의 수목 탄소계산기는 설계과정에서 실시간 피드백이 가능하도록 최대한 가볍고 직관적인 인터페이스를 채택하였다. 작동방식은 수종과 규격을 드롭다운 방식으로 선택하고 계획수량을 입력하면 미리 구축해 놓은 데이터베이스 내에서 검색하여 결과값을 출력하는 구조로 구성하였다(Figure 3 참조). 출력화면은 계획안의 총 탄소성능과 가격을 한눈에 보면서 수종과 수량 조정이 가능하도록 수종별 및 프로젝트 전체의 탄소흡수량, 탄소저장량, 재료비 총액의 항목으로 구성하였다(Figure 4 참조).

설계과정에서 식재 계획안의 탄소성능을 빠르게 확인할 수 있으면 프로그램이 가볍고 안정적으로 작동하여야 한다. 이를 위해 Excel 자체에 내장된 개발도구인 VBA(visual basic application)를 사용하여 데이터베이스와 스킨을 연동시켰다. 데이터베이스와 계산기 화면을 시트로 정리하고 이를 이어주는 코드를 작성한 후 입력 UI를 실행시키는 모듈과 입력변수에 따른 탄소값을 찾아서 계산해주는 모듈을 작성하여 프로그램을 완성하였다.

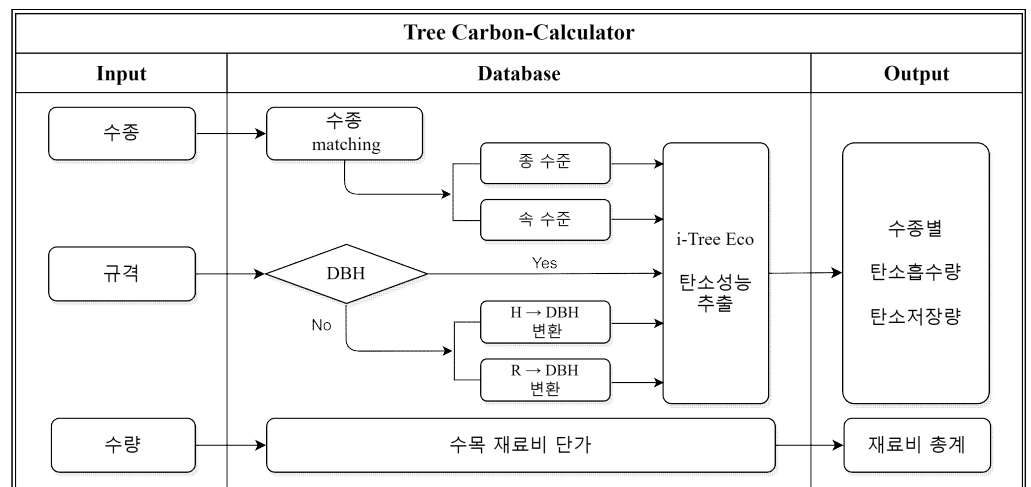


Figure 3. 수목 탄소계산기의 알고리즘

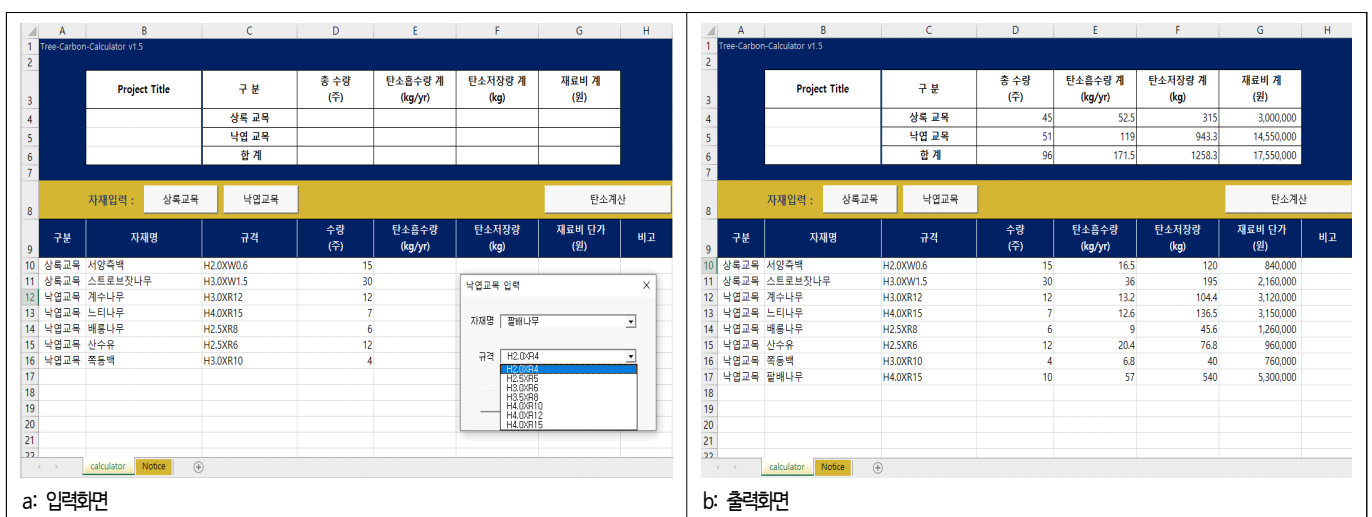


Figure 4. 수목 탄소계산기의 입출력 화면

4.2 설계 시뮬레이션 분석

설계가 4인이 제출한 설계안은 공통적으로 1차 설계의 수목 리스트에서 탄소성능이 낮은 수종을 우수 수종으로 교체하는 방식을 보여주었다(Table 4, 5 참조). 설계가 B를 제외하고는 모두 원안의 수목 수량을 그대로 유지하며 수종만을 변경하여 1차 안보다 재료를 절감하였다. 설계가 B는 탄소성능이 높으면서 단가가 낮은 수종으로 교체

Table 4. 설계가 A, B의 설계 시뮬레이션 결과

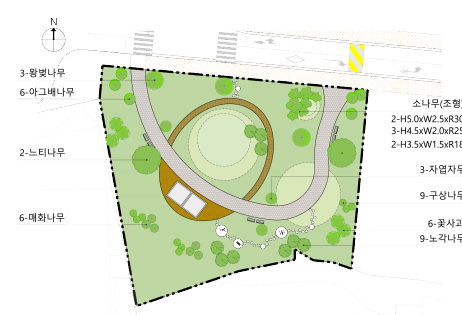
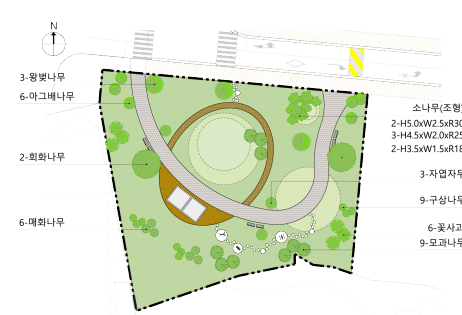

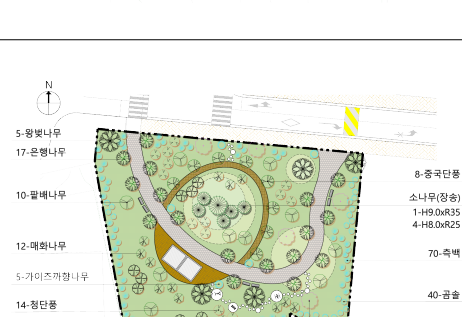
	구분	계획안	수목 탄소계산기의 탄소성능 산출 결과																																																																																																																																								
설계가 A	1차 설계	 <p>3-왕벚나무 6-아그베나무 2-노티나무 6-매화나무 소나무(조형) 2-H5.0W2.5XR30 3-H4.5W2.0XR25 2-H3.5W1.5XR18 3-자엽자두 9-구상나무 6-꽃사과 9-노각나무</p>	<div>Tree-Carbon-Calculator v1.3</div> <table> <tr> <th>Project Title</th><th>구 분</th><th>종 수량 (주)</th><th>탄소흡수량 계 (kg/yr)</th><th>탄소저장량 계 (kg)</th><th>재료비 계 (원)</th></tr> <tr> <td></td><td>상록 교목</td><td>16</td><td>62</td><td>551.7</td><td>29,920,000</td></tr> <tr> <td></td><td>낙엽 교목</td><td>35</td><td>88.1</td><td>835.7</td><td>14,626,000</td></tr> <tr> <td></td><td>합 계</td><td>51</td><td>150.1</td><td>1387.4</td><td>44,546,000</td></tr> </table> <div>자재입력 : 상록교목 낙엽교목 탄소계산</div> <table> <tr> <th>구분</th><th>자재명</th><th>규격</th><th>수량 (주)</th><th>탄소흡수량 (kg/yr)</th><th>탄소저장량 (kg)</th><th>재료비 단가 (원)</th><th>비고</th></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>소나무(조형)</td><td>H5.0W2.5XR30</td><td>2</td><td>7.4</td><td>151.4</td><td>11,000,000</td><td></td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>소나무(조형)</td><td>H4.5W2.0XR25</td><td>3</td><td>8.7</td><td>147.9</td><td>12,000,000</td><td></td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>소나무(조형)</td><td>H3.5W1.5XR18</td><td>2</td><td>3.6</td><td>45.4</td><td>4,760,000</td><td></td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>구상나무</td><td>H2.5W1.0</td><td>9</td><td>42.3</td><td>207</td><td>2,160,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>노티나무</td><td>H5.0XR30</td><td>2</td><td>8.6</td><td>181.4</td><td>4,600,000</td><td>변경 전</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>매화나무</td><td>H3.0XR8</td><td>6</td><td>11.4</td><td>57</td><td>600,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>노각나무</td><td>H3.5XR12</td><td>9</td><td>24.3</td><td>261.9</td><td>4,050,000</td><td>변경 전</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>아그베나무</td><td>H3.0XR10</td><td>6</td><td>12</td><td>73.2</td><td>1,500,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>꽃사과</td><td>H3.0XR8</td><td>6</td><td>8.4</td><td>42.6</td><td>636,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>왕벚나무</td><td>H4.5XR15</td><td>3</td><td>11.7</td><td>109.8</td><td>2,040,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>자엽자두</td><td>H3.5XR15</td><td>3</td><td>11.7</td><td>109.8</td><td>1,200,000</td><td></td></tr> </table>	Project Title	구 분	종 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)		상록 교목	16	62	551.7	29,920,000		낙엽 교목	35	88.1	835.7	14,626,000		합 계	51	150.1	1387.4	44,546,000	구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고	상록교목	소나무(조형)	H5.0W2.5XR30	2	7.4	151.4	11,000,000		상록교목	소나무(조형)	H4.5W2.0XR25	3	8.7	147.9	12,000,000		상록교목	소나무(조형)	H3.5W1.5XR18	2	3.6	45.4	4,760,000		상록교목	구상나무	H2.5W1.0	9	42.3	207	2,160,000		낙엽교목	노티나무	H5.0XR30	2	8.6	181.4	4,600,000	변경 전	낙엽교목	매화나무	H3.0XR8	6	11.4	57	600,000		낙엽교목	노각나무	H3.5XR12	9	24.3	261.9	4,050,000	변경 전	낙엽교목	아그베나무	H3.0XR10	6	12	73.2	1,500,000		낙엽교목	꽃사과	H3.0XR8	6	8.4	42.6	636,000		낙엽교목	왕벚나무	H4.5XR15	3	11.7	109.8	2,040,000		낙엽교목	자엽자두	H3.5XR15	3	11.7	109.8	1,200,000																	
Project Title	구 분	종 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)																																																																																																																																						
	상록 교목	16	62	551.7	29,920,000																																																																																																																																						
	낙엽 교목	35	88.1	835.7	14,626,000																																																																																																																																						
	합 계	51	150.1	1387.4	44,546,000																																																																																																																																						
구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고																																																																																																																																				
상록교목	소나무(조형)	H5.0W2.5XR30	2	7.4	151.4	11,000,000																																																																																																																																					
상록교목	소나무(조형)	H4.5W2.0XR25	3	8.7	147.9	12,000,000																																																																																																																																					
상록교목	소나무(조형)	H3.5W1.5XR18	2	3.6	45.4	4,760,000																																																																																																																																					
상록교목	구상나무	H2.5W1.0	9	42.3	207	2,160,000																																																																																																																																					
낙엽교목	노티나무	H5.0XR30	2	8.6	181.4	4,600,000	변경 전																																																																																																																																				
낙엽교목	매화나무	H3.0XR8	6	11.4	57	600,000																																																																																																																																					
낙엽교목	노각나무	H3.5XR12	9	24.3	261.9	4,050,000	변경 전																																																																																																																																				
낙엽교목	아그베나무	H3.0XR10	6	12	73.2	1,500,000																																																																																																																																					
낙엽교목	꽃사과	H3.0XR8	6	8.4	42.6	636,000																																																																																																																																					
낙엽교목	왕벚나무	H4.5XR15	3	11.7	109.8	2,040,000																																																																																																																																					
낙엽교목	자엽자두	H3.5XR15	3	11.7	109.8	1,200,000																																																																																																																																					
2차 설계	 <p>3-왕벚나무 6-아그베나무 2-회화나무 6-매화나무 소나무(조형) 2-H5.0W2.5XR30 3-H4.5W2.0XR25 2-H3.5W1.5XR18 3-자엽자두 9-구상나무 6-꽃사과 9-모과나무</p>	<div>Tree-Carbon-Calculator v1.3</div> <table> <tr> <th>Project Title</th><th>구 분</th><th>종 수량 (주)</th><th>탄소흡수량 계 (kg/yr)</th><th>탄소저장량 계 (kg)</th><th>재료비 계 (원)</th></tr> <tr> <td></td><td>상록 교목</td><td>16</td><td>62</td><td>551.7</td><td>29,920,000</td></tr> <tr> <td></td><td>낙엽 교목</td><td>35</td><td>113.2</td><td>1070.5</td><td>12,756,000</td></tr> <tr> <td></td><td>합 계</td><td>51</td><td>175.2</td><td>1622.2</td><td>42,676,000</td></tr> </table> <div>자재입력 : 상록교목 낙엽교목 탄소계산</div> <table> <tr> <th>구분</th><th>자재명</th><th>규격</th><th>수량 (주)</th><th>탄소흡수량 (kg/yr)</th><th>탄소저장량 (kg)</th><th>재료비 단가 (원)</th><th>비고</th></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>소나무(조형)</td><td>H5.0W2.5XR30</td><td>2</td><td>7.4</td><td>151.4</td><td>11,000,000</td><td></td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>소나무(조형)</td><td>H4.5W2.0XR25</td><td>3</td><td>8.7</td><td>147.9</td><td>12,000,000</td><td></td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>소나무(조형)</td><td>H3.5W1.5XR18</td><td>2</td><td>3.6</td><td>45.4</td><td>4,760,000</td><td></td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>구상나무</td><td>H2.5W1.0</td><td>9</td><td>42.3</td><td>207</td><td>2,160,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>회화나무</td><td>H5.0XR30</td><td>2</td><td>20.2</td><td>396.4</td><td>4,800,000</td><td>변경 후</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>매화나무</td><td>H3.0XR8</td><td>6</td><td>11.4</td><td>57</td><td>600,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>모과나무</td><td>H3.5XR12</td><td>9</td><td>37.8</td><td>281.7</td><td>1,980,000</td><td>변경 후</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>아그베나무</td><td>H3.0XR10</td><td>6</td><td>12</td><td>73.2</td><td>1,500,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>꽃사과</td><td>H3.0XR8</td><td>6</td><td>8.4</td><td>42.6</td><td>636,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>왕벚나무</td><td>H4.5XR15</td><td>3</td><td>11.7</td><td>109.8</td><td>2,040,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>자엽자두</td><td>H3.5XR15</td><td>3</td><td>11.7</td><td>109.8</td><td>1,200,000</td><td></td></tr> </table>	Project Title	구 분	종 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)		상록 교목	16	62	551.7	29,920,000		낙엽 교목	35	113.2	1070.5	12,756,000		합 계	51	175.2	1622.2	42,676,000	구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고	상록교목	소나무(조형)	H5.0W2.5XR30	2	7.4	151.4	11,000,000		상록교목	소나무(조형)	H4.5W2.0XR25	3	8.7	147.9	12,000,000		상록교목	소나무(조형)	H3.5W1.5XR18	2	3.6	45.4	4,760,000		상록교목	구상나무	H2.5W1.0	9	42.3	207	2,160,000		낙엽교목	회화나무	H5.0XR30	2	20.2	396.4	4,800,000	변경 후	낙엽교목	매화나무	H3.0XR8	6	11.4	57	600,000		낙엽교목	모과나무	H3.5XR12	9	37.8	281.7	1,980,000	변경 후	낙엽교목	아그베나무	H3.0XR10	6	12	73.2	1,500,000		낙엽교목	꽃사과	H3.0XR8	6	8.4	42.6	636,000		낙엽교목	왕벚나무	H4.5XR15	3	11.7	109.8	2,040,000		낙엽교목	자엽자두	H3.5XR15	3	11.7	109.8	1,200,000																		
Project Title	구 분	종 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)																																																																																																																																						
	상록 교목	16	62	551.7	29,920,000																																																																																																																																						
	낙엽 교목	35	113.2	1070.5	12,756,000																																																																																																																																						
	합 계	51	175.2	1622.2	42,676,000																																																																																																																																						
구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고																																																																																																																																				
상록교목	소나무(조형)	H5.0W2.5XR30	2	7.4	151.4	11,000,000																																																																																																																																					
상록교목	소나무(조형)	H4.5W2.0XR25	3	8.7	147.9	12,000,000																																																																																																																																					
상록교목	소나무(조형)	H3.5W1.5XR18	2	3.6	45.4	4,760,000																																																																																																																																					
상록교목	구상나무	H2.5W1.0	9	42.3	207	2,160,000																																																																																																																																					
낙엽교목	회화나무	H5.0XR30	2	20.2	396.4	4,800,000	변경 후																																																																																																																																				
낙엽교목	매화나무	H3.0XR8	6	11.4	57	600,000																																																																																																																																					
낙엽교목	모과나무	H3.5XR12	9	37.8	281.7	1,980,000	변경 후																																																																																																																																				
낙엽교목	아그베나무	H3.0XR10	6	12	73.2	1,500,000																																																																																																																																					
낙엽교목	꽃사과	H3.0XR8	6	8.4	42.6	636,000																																																																																																																																					
낙엽교목	왕벚나무	H4.5XR15	3	11.7	109.8	2,040,000																																																																																																																																					
낙엽교목	자엽자두	H3.5XR15	3	11.7	109.8	1,200,000																																																																																																																																					
1차 설계	 <p>5-왕벚나무 17-은행나무 7-산딸나무 12-매화나무 5-주목 14-청단풍 3-꽃사과 8-계수나무 소나무(장송) 1-H9.0XR35 4-H8.0XR25 50-스트로브릿나무 30-굴송 6-목련</p>	<div>Tree-Carbon-Calculator v1.3</div> <table> <tr> <th>Project Title</th><th>구 분</th><th>종 수량 (주)</th><th>탄소흡수량 계 (kg/yr)</th><th>탄소저장량 계 (kg)</th><th>재료비 계 (원)</th></tr> <tr> <td></td><td>상록 교목</td><td>90</td><td>113.8</td><td>830.9</td><td>22,930,000</td></tr> <tr> <td></td><td>낙엽 교목</td><td>72</td><td>118</td><td>1045.1</td><td>18,486,000</td></tr> <tr> <td></td><td>합 계</td><td>162</td><td>231.8</td><td>1876</td><td>41,416,000</td></tr> </table> <div>자재입력 : 상록교목 낙엽교목 탄소계산</div> <table> <tr> <th>구분</th><th>자재명</th><th>규격</th><th>수량 (주)</th><th>탄소흡수량 (kg/yr)</th><th>탄소저장량 (kg)</th><th>재료비 단가 (원)</th><th>비고</th></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>굴송(예송)</td><td>H3.0XW1.0XR6</td><td>30</td><td>33</td><td>132</td><td>2,100,000</td><td>변경 전</td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>소나무(장송)</td><td>H9.0XR35</td><td>1</td><td>4.8</td><td>118.9</td><td>4,220,000</td><td></td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>소나무(장송)</td><td>H8.0XR25</td><td>4</td><td>12</td><td>218</td><td>8,760,000</td><td></td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>스트로브릿나무</td><td>H3.0XW1.5</td><td>50</td><td>60</td><td>325</td><td>3,600,000</td><td>변경 전</td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>주목(선주목)</td><td>H2.5XW1.2</td><td>5</td><td>4</td><td>37</td><td>4,250,000</td><td>변경 전</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>계수나무</td><td>H2.5XR8</td><td>8</td><td>5.6</td><td>26.4</td><td>960,000</td><td>변경 전</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>꽃사과</td><td>H3.0XR8</td><td>3</td><td>4.2</td><td>21.3</td><td>318,000</td><td>변경 전</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>매화나무</td><td>H3.0XR8</td><td>12</td><td>22.8</td><td>114</td><td>1,200,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>목련</td><td>H3.5XR15</td><td>6</td><td>21.6</td><td>205.2</td><td>3,000,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>산딸나무</td><td>H3.5XR10</td><td>7</td><td>15.4</td><td>149.1</td><td>1,750,000</td><td>변경 전</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>왕벚나무</td><td>H4.5XR20</td><td>5</td><td>29</td><td>369</td><td>5,400,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>은행나무</td><td>H4.0XR10</td><td>17</td><td>6.8</td><td>66.3</td><td>4,080,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>청단풍</td><td>H2.5XR8</td><td>14</td><td>12.6</td><td>93.8</td><td>1,778,000</td><td></td></tr> </table>	Project Title	구 분	종 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)		상록 교목	90	113.8	830.9	22,930,000		낙엽 교목	72	118	1045.1	18,486,000		합 계	162	231.8	1876	41,416,000	구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고	상록교목	굴송(예송)	H3.0XW1.0XR6	30	33	132	2,100,000	변경 전	상록교목	소나무(장송)	H9.0XR35	1	4.8	118.9	4,220,000		상록교목	소나무(장송)	H8.0XR25	4	12	218	8,760,000		상록교목	스트로브릿나무	H3.0XW1.5	50	60	325	3,600,000	변경 전	상록교목	주목(선주목)	H2.5XW1.2	5	4	37	4,250,000	변경 전	낙엽교목	계수나무	H2.5XR8	8	5.6	26.4	960,000	변경 전	낙엽교목	꽃사과	H3.0XR8	3	4.2	21.3	318,000	변경 전	낙엽교목	매화나무	H3.0XR8	12	22.8	114	1,200,000		낙엽교목	목련	H3.5XR15	6	21.6	205.2	3,000,000		낙엽교목	산딸나무	H3.5XR10	7	15.4	149.1	1,750,000	변경 전	낙엽교목	왕벚나무	H4.5XR20	5	29	369	5,400,000		낙엽교목	은행나무	H4.0XR10	17	6.8	66.3	4,080,000		낙엽교목	청단풍	H2.5XR8	14	12.6	93.8	1,778,000		
Project Title	구 분	종 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)																																																																																																																																						
	상록 교목	90	113.8	830.9	22,930,000																																																																																																																																						
	낙엽 교목	72	118	1045.1	18,486,000																																																																																																																																						
	합 계	162	231.8	1876	41,416,000																																																																																																																																						
구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고																																																																																																																																				
상록교목	굴송(예송)	H3.0XW1.0XR6	30	33	132	2,100,000	변경 전																																																																																																																																				
상록교목	소나무(장송)	H9.0XR35	1	4.8	118.9	4,220,000																																																																																																																																					
상록교목	소나무(장송)	H8.0XR25	4	12	218	8,760,000																																																																																																																																					
상록교목	스트로브릿나무	H3.0XW1.5	50	60	325	3,600,000	변경 전																																																																																																																																				
상록교목	주목(선주목)	H2.5XW1.2	5	4	37	4,250,000	변경 전																																																																																																																																				
낙엽교목	계수나무	H2.5XR8	8	5.6	26.4	960,000	변경 전																																																																																																																																				
낙엽교목	꽃사과	H3.0XR8	3	4.2	21.3	318,000	변경 전																																																																																																																																				
낙엽교목	매화나무	H3.0XR8	12	22.8	114	1,200,000																																																																																																																																					
낙엽교목	목련	H3.5XR15	6	21.6	205.2	3,000,000																																																																																																																																					
낙엽교목	산딸나무	H3.5XR10	7	15.4	149.1	1,750,000	변경 전																																																																																																																																				
낙엽교목	왕벚나무	H4.5XR20	5	29	369	5,400,000																																																																																																																																					
낙엽교목	은행나무	H4.0XR10	17	6.8	66.3	4,080,000																																																																																																																																					
낙엽교목	청단풍	H2.5XR8	14	12.6	93.8	1,778,000																																																																																																																																					
설계가 B	2차 설계	 <p>5-왕벚나무 17-은행나무 10-말배나무 12-매화나무 5-가이즈까향나무 14-청단풍 9-실구나무 8-중국단풍 소나무(장송) 1-H9.0XR35 4-H8.0XR25 70-목련 40-굴송 6-목련</p>	<div>Tree-Carbon-Calculator v1.3</div> <table> <tr> <th>Project Title</th><th>구 분</th><th>종 수량 (주)</th><th>탄소흡수량 계 (kg/yr)</th><th>탄소저장량 계 (kg)</th><th>재료비 계 (원)</th></tr> <tr> <td></td><td>상록 교목</td><td>120</td><td>260.8</td><td>2295.4</td><td>20,850,000</td></tr> <tr> <td></td><td>낙엽 교목</td><td>81</td><td>159.9</td><td>1227.8</td><td>19,188,000</td></tr> <tr> <td></td><td>합 계</td><td>201</td><td>420.7</td><td>3523.2</td><td>40,038,000</td></tr> </table> <div>자재입력 : 상록교목 낙엽교목 탄소계산</div> <table> <tr> <th>구분</th><th>자재명</th><th>규격</th><th>수량 (주)</th><th>탄소흡수량 (kg/yr)</th><th>탄소저장량 (kg)</th><th>재료비 단가 (원)</th><th>비고</th></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>굴송(예송)</td><td>H3.0XW1.0XR6</td><td>40</td><td>44</td><td>176</td><td>2,800,000</td><td>변경 후</td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>소나무(장송)</td><td>H9.0XR35</td><td>1</td><td>4.8</td><td>118.9</td><td>4,220,000</td><td></td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>소나무(장송)</td><td>H8.0XR25</td><td>4</td><td>12</td><td>218</td><td>8,760,000</td><td></td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>목련나무</td><td>H3.0XW1.0</td><td>70</td><td>189</td><td>1729</td><td>4,410,000</td><td>변경 후</td></tr> <tr> <td>상록교목</td><td>가이즈까 향나무</td><td>H2.5XW1.0</td><td>5</td><td>11</td><td>53.5</td><td>660,000</td><td>변경 후</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>중국단풍</td><td>H3.0XR8</td><td>8</td><td>14.4</td><td>76</td><td>680,000</td><td>변경 후</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>실구나무</td><td>H3.0XR8</td><td>9</td><td>20.7</td><td>103.5</td><td>990,000</td><td>변경 후</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>매화나무</td><td>H3.0XR8</td><td>12</td><td>22.8</td><td>114</td><td>1,200,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>목련</td><td>H3.5XR15</td><td>6</td><td>21.6</td><td>205.2</td><td>3,000,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>말배나무</td><td>H4.0XR10</td><td>10</td><td>32</td><td>200</td><td>2,060,000</td><td>변경 후</td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>왕벚나무</td><td>H4.5XR20</td><td>5</td><td>29</td><td>369</td><td>5,400,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>은행나무</td><td>H4.0XR10</td><td>17</td><td>6.8</td><td>66.3</td><td>4,080,000</td><td></td></tr> <tr> <td>낙엽교목</td><td>청단풍</td><td>H2.5XR8</td><td>14</td><td>12.6</td><td>93.8</td><td>1,778,000</td><td></td></tr> </table>	Project Title	구 분	종 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)		상록 교목	120	260.8	2295.4	20,850,000		낙엽 교목	81	159.9	1227.8	19,188,000		합 계	201	420.7	3523.2	40,038,000	구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고	상록교목	굴송(예송)	H3.0XW1.0XR6	40	44	176	2,800,000	변경 후	상록교목	소나무(장송)	H9.0XR35	1	4.8	118.9	4,220,000		상록교목	소나무(장송)	H8.0XR25	4	12	218	8,760,000		상록교목	목련나무	H3.0XW1.0	70	189	1729	4,410,000	변경 후	상록교목	가이즈까 향나무	H2.5XW1.0	5	11	53.5	660,000	변경 후	낙엽교목	중국단풍	H3.0XR8	8	14.4	76	680,000	변경 후	낙엽교목	실구나무	H3.0XR8	9	20.7	103.5	990,000	변경 후	낙엽교목	매화나무	H3.0XR8	12	22.8	114	1,200,000		낙엽교목	목련	H3.5XR15	6	21.6	205.2	3,000,000		낙엽교목	말배나무	H4.0XR10	10	32	200	2,060,000	변경 후	낙엽교목	왕벚나무	H4.5XR20	5	29	369	5,400,000		낙엽교목	은행나무	H4.0XR10	17	6.8	66.3	4,080,000		낙엽교목	청단풍	H2.5XR8	14	12.6	93.8	1,778,000	
Project Title	구 분	종 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)																																																																																																																																						
	상록 교목	120	260.8	2295.4	20,850,000																																																																																																																																						
	낙엽 교목	81	159.9	1227.8	19,188,000																																																																																																																																						
	합 계	201	420.7	3523.2	40,038,000																																																																																																																																						
구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고																																																																																																																																				
상록교목	굴송(예송)	H3.0XW1.0XR6	40	44	176	2,800,000	변경 후																																																																																																																																				
상록교목	소나무(장송)	H9.0XR35	1	4.8	118.9	4,220,000																																																																																																																																					
상록교목	소나무(장송)	H8.0XR25	4	12	218	8,760,000																																																																																																																																					
상록교목	목련나무	H3.0XW1.0	70	189	1729	4,410,000	변경 후																																																																																																																																				
상록교목	가이즈까 향나무	H2.5XW1.0	5	11	53.5	660,000	변경 후																																																																																																																																				
낙엽교목	중국단풍	H3.0XR8	8	14.4	76	680,000	변경 후																																																																																																																																				
낙엽교목	실구나무	H3.0XR8	9	20.7	103.5	990,000	변경 후																																																																																																																																				
낙엽교목	매화나무	H3.0XR8	12	22.8	114	1,200,000																																																																																																																																					
낙엽교목	목련	H3.5XR15	6	21.6	205.2	3,000,000																																																																																																																																					
낙엽교목	말배나무	H4.0XR10	10	32	200	2,060,000	변경 후																																																																																																																																				
낙엽교목	왕벚나무	H4.5XR20	5	29	369	5,400,000																																																																																																																																					
낙엽교목	은행나무	H4.0XR10	17	6.8	66.3	4,080,000																																																																																																																																					
낙엽교목	청단풍	H2.5XR8	14	12.6	93.8	1,778,000																																																																																																																																					

Table 5. 설계가 C, D의 설계 시뮬레이션 결과

구분

계획안

수목 탄소계산기의 탄소성능 산출 결과

1차 설계

21-왕벚나무

1-팽나무

5-메화나무

2-모과나무

13-산수유

16-느티나무

4-주목

소나무

10-H5.5xW2.5xR25

12-H5.0xW2.5xR20

28-스트로브잣나무

8-꽃사과

8-배롱나무

4-백목련

Free-Carbon-Calculator v1.3

Project Title	구분	총 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)
	상록 교목	54	85	1024.2	30,924,000
	낙엽 교목	78	156.4	1009.4	18,708,000
	합 계	132	241.4	2033.6	49,632,000

자재입력 : 상록교목 낙엽교목 탄소계산

구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고
상록교목	소나무	H5.0XW2.5XR20	12	26.4	364.8	10,200,000	
상록교목	소나무	H5.5XW2.5XR25	10	29	509	13,900,000	
상록교목	스트로브잣나무	H2.5XW1.2	28	25.2	100.8	1,624,000	
상록교목	죽죽(신죽)	H3.0XW1.5	4	4.4	49.6	5,200,000	변경 전
낙엽교목	꽃사과	H3.0XR8	8	11.2	56.8	848,000	
낙엽교목	느티나무	H4.0XR12	16	22.4	192	3,680,000	변경 전
낙엽교목	메화나무	H3.5XR10	5	13	81	800,000	변경 전
낙엽교목	모과나무	H3.0XR10	2	6.4	40	360,000	
낙엽교목	백목련	H3.0XR10	4	6.8	45.2	760,000	
낙엽교목	배롱나무	H3.0XR10	8	16	103.2	2,640,000	
낙엽교목	산수유	H2.5XR8	13	32.5	165.1	2,080,000	
낙엽교목	왕벚나무	H4.0XR10	21	46.2	285.6	5,040,000	변경 전
낙엽교목	팽나무	H6.0XR30	1	1.9	40.5	2,500,000	

2차 설계

21-이팝나무

1-팽나무

5-갸갸나무

2-모과나무

13-산수유

16-목백합(류림나무)

4-주목

소나무

10-H5.5xW2.5xR25

12-H5.0xW2.5xR20

28-죽죽

8-꽃사과

8-배롱나무

4-백목련

Free-Carbon-Calculator v1.3

Project Title	구분	총 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)
	상록 교목	54	135.4	1615	31,064,000
	낙엽 교목	78	186.6	1159.1	17,878,000
	합 계	132	322	2774.1	48,942,000

자재입력 : 상록교목 낙엽교목 탄소계산

구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고
상록교목	소나무	H5.0XW2.5XR20	12	26.4	364.8	10,200,000	
상록교목	소나무	H5.5XW2.5XR25	10	29	509	13,900,000	
상록교목	죽죽나무	H3.0XW1.0	28	75.6	691.6	1,764,000	변경 후
상록교목	죽죽(신죽)	H3.0XW1.5	4	4.4	49.6	5,200,000	
낙엽교목	꽃사과	H3.0XR8	8	11.2	56.8	848,000	
낙엽교목	목백합(류림나무)	H4.5XR12	16	40	230.4	3,840,000	변경 후
낙엽교목	갸갸나무	H3.0XR10	5	13	81	650,000	변경 후
낙엽교목	모과나무	H3.0XR10	2	6.4	40	360,000	
낙엽교목	백목련	H3.0XR10	4	6.8	45.2	760,000	
낙엽교목	배롱나무	H3.0XR10	8	16	103.2	2,640,000	
낙엽교목	산수유	H2.5XR8	13	32.5	165.1	2,080,000	
낙엽교목	이팝나무	H3.5XR10	21	58.8	396.9	4,200,000	변경 후
낙엽교목	팽나무	H6.0XR30	1	1.9	40.5	2,500,000	

1차 설계

19-메타세콰이어

7-자작나무

5-왕벚나무

22-말뚝나무

26-정단목

5-팽나무

67-스트로브잣나무

Free-Carbon-Calculator v1.3

Project Title	구분	총 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)
	상록 교목	67	134	1058.6	16,750,000
	낙엽 교목	84	188.3	2206.7	48,588,000
	합 계	151	322.3	3265.3	65,338,000

자재입력 : 상록교목 낙엽교목 탄소계산

구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고
상록교목	스트로브잣나무	H4.0XW2.0	67	134	1058.6	16,750,000	
낙엽교목	메타세콰이어	H5.0XB12	19	26.6	174.8	5,700,000	
낙엽교목	왕벚나무	H4.0XB12	5	14	106.5	1,950,000	변경 전
낙엽교목	자작나무	H3.5XB8	7	12.6	45.5	1,050,000	변경 전
낙엽교목	정단목	H4.0XB20	26	72.8	1422.2	24,440,000	변경 전
낙엽교목	말뚝나무	H3.5XR8	22	52.8	255.2	2,948,000	
낙엽교목	팽나무	H6.0XR30	5	9.5	202.5	12,500,000	변경 전

2차 설계

19-메타세콰이어

7-계수나무

5-이팝나무

22-말뚝나무

26-복자기

5-대항참나무

67-스트로브잣나무

Free-Carbon-Calculator v1.3

Project Title	구분	총 수량 (주)	탄소흡수량 계 (kg/yr)	탄소저장량 계 (kg)	재료비 계 (원)
	상록 교목	67	134	1058.6	16,750,000
	낙엽 교목	84	252.2	2664	26,898,000
	합 계	151	386.2	3722.6	43,648,000

자재입력 : 상록교목 낙엽교목 탄소계산

구분	자재명	규격	수량 (주)	탄소흡수량 (kg/yr)	탄소저장량 (kg)	재료비 단가 (원)	비고
상록교목	스트로브잣나무	H4.0XW2.0	67	134	1058.6	16,750,000	
낙엽교목	메타세콰이어	H5.0XB12	19	26.6	174.8	5,700,000	
낙엽교목	이팝나무	H4.0XR15	5	23	237	3,150,000	변경 후
낙엽교목	계수나무	H3.5XR15	7	10.5	103.6	3,500,000	변경 후
낙엽교목	복자기	H3.5XR15	26	111.8	1635.4	9,100,000	변경 후
낙엽교목	말뚝나무	H3.5XR8	22	52.8	255.2	2,948,000	
낙엽교목	대항참나무	H4.0XR15	5	27.5	258	2,500,000	변경 후

후 비용의 여유를 확보한 만큼 적극적으로 추가 식재하여 162주에서 201주로 총 수량을 증가시켰다. 설계기들은 탄소성능 향상을 목적으로 수종을 교체할 때 대체로 원안의 디자인 의도에 따라 선정하는 것으로 나타났다. 대체목 선정 사유는 수형, 단풍, 화목 등 원안의 의도와 유사한 수종 중에서 선택되되, 소나무, 왕벚나무 등 대중적 기호 수종이거나 설계 컨셉을 위해 반드시 필요한 수목인 경우 그대로 유지하려는 경향을 보였다. 설계가 D의 경우 1차 설계에서 다른 설계가에 비해 적은 수종을 사용하여 간결하게 디자인하였으므로 변경의 여지가 많지 않았다. 설계가 D는 2차 설계에서 총 7종 중 4종을 교체하였는데, 디자인의 축이 되는 메타세콰이아 가로수와 경계부 스트로브 잣나무 열식을 고수함으로써 탄소저감을 위해 이 두 수종을 제외한 거의 대다수를 교체했음을 알 수 있다.

4.3 탄소성능 변화 분석

설계 시뮬레이션 결과 4인의 참여 설계가 모두 1차 안 대비 탄소성능이 증가한 2차 안을 제출하였다. 2차 안의 탄소흡수량은 약 16.7~81.5%, 탄소저장량은 약 14.0~84.6% 증가하였다(Table 6 참조). 이 중 가장 높은 증가율을 보여준 설계가 B의 경우 비용 한계 내에서 적극적으로 추가 식재하여 81.5%의 탄소흡수량 증가뿐 아니라 탄소흡수량 kg당 재료비 역시 46.7%를 절감하였다. 또한 총 식재 수량 및 녹지면적당 식재밀도 항목에서 설계가 B가 1차, 2차 모두 가장 높은 수치를 보였으나, 1차 안의 탄소성능은 이에 비례하지 않았던 반면 2차 안에서 큰 폭으로 향상되었다. 일반적인 설계과정을 적용한 1차 설계에서는 식재밀도와 탄소흡수량이 비례하지 않지만, 탄소계산기를 활용한 2차 설계에서는 식재밀도에 따라 탄소흡수량이 증가하는 경향성을 확인할 수 있었다.

설계가 4인 간 탄소성능의 차이는 1, 2차 설계 모두에서 볼 수 있었다. 특히 설계가 A와 설계가 D는 탄소흡수량에 있어 약 2배 이상 차이가 나며, 이는 기본적으로 식재 수량의 차이에 의한 것임을 알 수 있다. 실제로 도시공원 설계 시 식재 계획수량에 법적 제한이 없고 설계가 재량에 맡겨지는 경우가 일반적이기 때문에, 디자인 컨셉이나 스타일에 따라 수량 차이가 발생한 것으로 보인다.

1차 안의 재료비 총액을 2차 설계의 비용 상한선으로 설정했던 실험 조건에 대해서는 모두 제한선 이하의 비용으로 변경안을 완성하였으며, 약 1.4~33.2%의 절감 효과를 보였다. 전반적인 탄소흡수량이 증가함에도 재료비는 감소하였으므로 탄소흡수량 kg당 재료비 역시 17.9~46.7% 감소하였다.

Table 6. 설계기별 탄소성능 및 재료비 증감

구 분		설계가 A	설계가 B	설계가 C	설계가 D
총 수량 (주)	1차	51	162	132	151
	2차	51	201	132	151
	증감	변동 없음	39주 증가	변동 없음	변동 없음
녹지면적당 식재밀도 (주/㎡)	1차	0.03	0.09	0.07	0.09
	2차	0.03	0.11	0.07	0.09
	증감	변동 없음	0.02주 증가	변동 없음	변동 없음
총 탄소흡수량 (kg/yr)	1차	150.1	231.8	241.4	322.3
	2차	175.2	420.7	322.0	386.2
	증감	16.7% 증가	81.5% 증가	33.4% 증가	19.8% 증가
총 탄소저장량 (kg)	1차	1,387.4	1,876.0	2,033.6	3,265.3
	2차	1,622.2	3,523.2	2,774.1	3,722.6
	증감	16.9% 증가	87.8% 증가	36.4% 증가	14.0% 증가
녹지면적당 탄소흡수량 (kg/㎡)	1차	0.08	0.13	0.14	0.18
	2차	0.1	0.24	0.18	0.22
	증감	25% 증가	84.6% 증가	28.6% 증가	22.2% 증가
녹지면적당 탄소저장량 (kg/㎡)	1차	0.78	1.06	1.15	1.84
	2차	0.91	1.99	1.56	2.10
	증감	16.7% 증가	87.7% 증가	35.7% 증가	14.1% 증가
총 재료비 (원)	1차	44,546,000	41,416,000	49,632,000	65,338,000
	2차	42,676,000	40,038,000	48,942,000	43,648,000
	증감	4.2% 감소	3.3% 감소	1.4% 감소	33.2% 감소
탄소흡수량 kg당 재료비 (원)	1차	296,775	178,671	205,601	202,724
	2차	243,584	95,170	151,994	113,019
	증감	17.9% 감소	46.7% 감소	26.1% 감소	44.2% 감소

4.4 인터뷰 결과 분석

4.4.1 수목 탄소계산기에 대한 기대 및 평가

사전 인터뷰에서 참여 설계가들은 수목 탄소계산기의 필요성을 인식하면서도 데이터베이스의 범위 및 정확성에 대한 불신과 프로그램에 대한 부담감을 나타냈다. 수목 탄소계산기가 주요 조정수를 위주로 최대한 폭넓은 데이터를 포괄해야 실무 현장에서 외면받지 않을 것이며, 생육환경이나 기후적 특성까지 반영한 정확한 데이터를 제공하지 않는다면 대관 업무 시 오히려 특정 수종에 대한 부적절한 강요를 초래할 수도 있다는 의견이 제시하였다. 새로운 프로그램 추가는 업무 부담 가중뿐 아니라 프로그램 비용 문제도 걸림돌이 될 수 있다는 지적도 있었다. 이러한 우려들은 설계 시뮬레이션을 거친 후 상당 부분 완화되었다. 사후 인터뷰에서 설계가들은 기능적 유용성을 높게 평가하여, 계획안의 탄소성능을 가시화시켜 디자인에 설득력을 부여할 새로운 도구의 가능성에 기대감을 나타냈다. 사용 편의성 역시 예상보다 직관적이어서 고숙련자가 아니라도 쉽게 이용할 수 있으며, 따라서 디자인 변경과정과 탄소저감 프로세스가 효율적으로 연결될 수 있다고 평가하였다.

실험설계 결과는 기본적으로 식재밀도가 중요함을 확인시켜 주었다. 수목 탄소계산기를 활용한 변경 설계를 거치며 모든 안의 탄소성능이 개선되었지만, 설계가 A의 경우에서 보이듯이 원안의 식재밀도 격차가 큰 경우는 개선된 후에도 그 격차를 줄이지 못하였다. 이는 탄소성능 우수종을 적용하더라도 결과적으로 전체 수량이 적으면 개선에 한계가 있다는 것을 의미한다. 거시적 관점에서 도시녹지의 탄소성능을 향상시키려면, 개별 녹지의 탄소감축에 우선하여 그린인프라의 양과 식재밀도를 보장하는 법적 규제가 필요하다고 할 수 있다.

또한 본 연구의 수목 탄소계산기 개발 과정에서도 보여지듯이 타 분야의 정량화 연구 결과를 조정분야에서 활용하기 위해 학제 간 접근이 필요하다. 탄소계산기와 같은 설계 보조도구는 조정분야의 특수성을 반영하여 개발되어야 하지만, 기본이 되는 데이터를 확보하고 보다 유용하게 활용하기 위해서 인접 분야와의 접점을 확대해야 할 필요가 있다. 데이터 간 상호 호환이 가능하도록 단위 통일과 환산 기준에 대해 분야 간 공동의 연구가 요구된다.

4.4.2 탄소저감설계에 대한 인식 및 전망

참여 설계가들은 모두 기후 위기 대응의 시급성과 이를 위한 탄소저감설계의 필요성에 공감하였다. 그러나 현재 각종 환경 관련 인증제 내에서 조정의 역할은 생태면적률로 구색 맞추기에 국한되고 있어 탄소저감을 위한 근본적인 역할 검토가 필요하다는 지적이 있었다. 설계가들은 아직 조정분야가 위기감을 많이 느끼지 않고 있으므로 적극적인 탄소저감설계 시행을 위해서는 제도부터 도입되어야 한다고 보았다. 산림의 면적에 비해 조경이 담당하는 면적은 상대적으로 작기 때문에 국가적인 단위에서 조정의 탄소저감이 어느 정도 비율을 차지하는지도 살펴봐야 한다는 의견이 제기되었다. 탄소저감설계라는 부가적인 업무가 실행에 옮겨지려면, 지역별 가이드라인이 주어지고 대상지의 탄소저감 목표치가 정해진 후 조정의 기여도를 따져야 좀 더 동기 부여가 될 것이라는 견해도 있었다.

사후 평가에서 설계가들은 탄소성능 검토와 조정이라는 부가적인 업무가 추가되는 것에 대해서는 예상보다 부담이 크지 않으며, 이는 수목 탄소계산기의 사용에 어려움이 없기 때문이라고 답했다. 다만 이 프로세스가 반복되면 학습을 통해 탄소성능 상위 수종으로 선택이 편중되어 생태적 다양성 저하로 이어질 우려가 제기되었다. 1차 설계에서 비교적 개성적인 디자인을 제시했던 설계가 D는 탄소저감을 위해 디자인적인 제한이 발생하는 경우가 많아질 것을 우려하였다. 이러한 제한적 요소에도 불구하고, 설계가들이 탄소성능 우수종으로의 교체뿐 아니라 추가적인 식재를 하거나 디자인 컨셉을 조정하는 등의 변화를 시도함으로써 주어진 예산 범위 내에서 최적의 대안을 찾는 모습을 확인할 수 있었다. 탄소저감설계가 가질 수밖에 없는 기본적인 제한성을 극복하기 위해 설계가들이 다양한 대안을 실험하고, 새로운 돌파구를 찾을 것으로 기대된다.

5. 결론

국토계획에 직접적인 실천성을 가지는 조정분야에 있어 탄소저감설계의 필요성이 빠르게 확대되고 있다. 본 연구에서는 수목의 탄소성능을 수치화하여 탄소저감설계를 지원할 수 있는 수목 탄소계산기를 개발하고, 실제 설계 과정에 적용하여 효용성을 검증하고자 하였다. 설계 현장에서 사용 편의성을 고려하여 수목 수량표를 입력하면 계획안의 탄소성능이 수치적으로 출력되는 구조를 채택하고, 한국토지주택공사 일위대가의 교목 93종을 대상으로 수종별 규격별 탄소성능 데이터베이스를 구축하였다. 현재 국내 수목의 탄소성능에 관한 연구들은 타 분야 중심이며 일부 수종에 국한되어 있어 폭넓은 조정수의 수종과 규격을 포괄하기 어려우므로, 기후적 정밀도는 다소 저하되더라도 광범위한 수종의 데이터소스를 얻기 위해 미 산림청 주도로 개발한 i-Tree Eco를 이용하였다. 또한 국내 조

경수의 다양한 규격은 데이터 추출 단계의 필수 입력변수인 DBH와 호환이 어려우므로 국토교통부 조정설계 기준의 규격 환산 기준에 의하여 모든 규격을 변환하였다. 이러한 과정을 거쳐 계획안의 탄소성능을 산정할 때 누락되는 수종이 없도록 폭넓은 조정수 데이터베이스를 구축하고, MS Excel 형식의 수목 탄소계산기로 제작하여 이를 설계과정에 접목하는 모델을 제안하였다. 4인의 설계가들을 대상으로 한 실험설계는 신규 녹지의 탄소성능을 정량화할 수 있을 뿐 아니라 나아가 증가시킬 수 있음을 증명하였다. 즉, 탄소계산기라는 정량화 도구를 활용하여 탄소저감설계를 구현할 수 있음을 보여주었다.

탄소를 비롯한 환경성능에 대한 요구가 커지고 각종 정량화 도구들이 출시되면, 필연적으로 이를 설계과정에 녹여내는 작업이 늘어날 것으로 전망된다. 각기 다른 수치 데이터를 효과적으로 디자인에 반영하기 위한 도구와 프로세스에 대한 필요성 역시 커질 것이다. 건설분야에서 진행되고 있는 BIM 전환이 확산된 후에는 데이터 기반 설계가 보다 용이해질 것이므로, 탄소계산기와 BIM을 함께 활용한다면 더욱 시너지가 날 것이다. 수목 탄소계산기는 설계분야 외에도 도시적 규모에서 신규 녹지의 개략적인 탄소성능을 가늠하여 필요한 녹지 규모를 산정하는데 사용될 수 있다. 무엇보다 조정 설계가들이 기후 위기에 대응하는 저탄소 디자인을 실험하는 도구로 활용할 수 있다.

본 연구의 수목 탄소계산기는 국내 설계 현장에서의 효용성 파악을 목적으로 개발하였으므로 선행연구에서 살펴본 여타 탄소계산기와 비교했을 때 내용적, 기능적 측면에서 보완할 부분이 적지 않다. 국내 수목조사에 기반한 데이터가 아닌 i-Tree로부터 추출한 데이터를 채택했으므로 수치적 정확성이 떨어질 수 있다. 또한 추출 시 공간적 범위를 경기도 화성시 동탄이라는 특정 지점을 기준으로 하였기 때문에, 남부지방 등 타 지역에 적용할 경우 해당 지역의 기후적 특성을 반영할 수 없는 한계를 가진다. CPD의 Pathfinder나 Sasaki 재단의 Carbon Conscience가 시설물, 포장까지 포함한 조정 프로젝트 전체의 탄소성능을 다루는 데 비하여 본 연구의 수목 탄소계산기는 수목의 탄소흡수량, 저장량만을 산출할 수 있으므로 기능적으로도 부족하다. 설계가들이 지적인 보완점에 선행연구를 대응시켜 정리한 수목 탄소계산기의 향후 발전 방향은 다음과 같다.

첫째, 정확도 향상을 위해 데이터베이스의 고도화 및 변수의 다양화가 필요하다. 수목 탄소 데이터는 국내 지역별, 생육환경별 특성을 반영하여 정확도를 향상시킬 필요가 있다. 교목뿐 아니라 관목, 지피류까지 범위를 넓히고 유지관리에 의한 탄소 발생과 토양에 의한 탄소격리, 나아가 시설, 포장 등 다양한 변수에 대한 데이터베이스 구축이 필요하다. 이러한 이슈들은 인접 분야 및 학계와의 밀접한 소통을 통해 보완하고 개선해 나가야 할 부분이다. 하나의 계획안에 대한 온전한 탄소성능을 산출하기 위해 필요한 변수를 모두 채워 넣는 것은 단기간에 얻어질 수 있는 성과가 아니다. 가능한 부분에 대한 합의를 바탕으로 차츰 확대해가는 현실적 대응이 요구된다.

둘째, 조정설계 업무와의 정합성을 제고하여야 한다. 기후 위기 대응을 위한 탄소저감은 몇몇 대상지에만 국한되는 문제가 아니다. 업계의 공감대를 바탕으로 다양한 제도적 규제가 필요하다. 이미 건설분야는 건물 온실가스 총량제의 민간 확대를 논의 중이고(황인창과 백종락, 2021), 온실가스 배출권 거래제 역시 매년 거래량을 늘려가고 있다. 참여 설계가들은 제도부터 마련되어야 조정설계 현장에도 탄소저감설계가 빠르게 도입될 수 있을 것이라는데 공감하였다. 탄소 규제 정책 및 제도에 대비하여 정량화된 탄소성능을 설계 단계에 녹여낼 수 있는 도구인 수목 탄소계산기의 활용성을 더욱 발전시킬 필요가 있다. 이러한 연구와 법제 간 연결이 조정성능을 더욱 강화시킬 수 있을 것으로 보인다.

마지막으로 업계 전반의 신뢰를 구축할 필요가 있다. 수목 탄소계산기가 자리 잡기 위해서는 지속적인 관리 및 접근성 향상에 대한 고민이 요구된다. 프로그램 관리 측면에서 수목 단가와 같은 변동성 데이터가 꾸준히 갱신되고, 지원 수종도 확대되어야 설계 업무에서 외면받지 않는다. 이러한 업무를 관할 할 수 있는 공신력 있는 기관에 의해 장기적으로 관리되는 것이 가장 바람직하다. 실제로 i-Tree 제품군은 미 농무부 산림청에서 주도하여 다수의 학회 및 협력사와 함께 개발, 관리하고 있으며 세계적으로 사용할 수 있는 국제적인 프로그램으로 발전시켜 나가고 있다. 이처럼 지속적인 관리와 개발이 전제되어야 탄소계산기의 신뢰도를 유지할 수 있다.

궁극적으로 조정설계 분야에서 사용하기 위한 탄소계산기는 수목뿐 아니라 시설물, 포장 등 조정 공종 전반을 포괄할 수 있어야 한다. 따라서 추후 연구로서 수목뿐 아니라 시설물, 포장, 운송, 관리 등 여러 영역에 걸친 탄소성능 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다. 그 결과를 바탕으로 비로소 현장에서 유용하게 쓰일 수 있는 조정성능 탄소계산기 구축이 가능하다. 이러한 측면에서 본 연구는 탄소성능 정량화 도구 개발의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 조정분야에 탄소저감설계 도입을 위해 필요 요소를 파악하고, 방향성을 정립하는데 유용한 참고 자료로서 의의를 가진다.

주 1. 한국토지주택공사를 비롯한 18개 연구기관으로 구성된 국토도시온실가스연구단이 온실가스 저감을 위한 국토도시공간

계획 및 관리기술 개발 R&D 연구(2020.-2024.)를 수행 중이다. 또한 한국토지주택공사는 청주대학교와 함께 탄소중립 녹색공간 지표 및 인증제도 도입 방안 연구(2023.)를 진행하고 있다.

- 주 2. i-TREE가 도시숲과 수목 성능을 정량화하기 위해 UFORE methods를 채택하고 있으며, 이 중 UFORE-C 모델이 탄소저장 및 격리 계산에 적용된다(Nowak, 2005). 수목의 탄소저장량과 연간 총 탄소격리량을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\text{탄소저장량(kg)} = \text{총 건중량} \times 0.5$$

$$\text{연간 총 탄소격리량(kg/yr)} = \text{X+1년의 탄소저장량} - \text{X년의 탄소저장량}$$

References

1. 국립산림과학원(2012) 탄소지킴이 도시숲-기후변화의 시대, 탄소흡수원 도시숲 이야기.
2. 국립산림과학원(2016) Post-2020 대응 산림탄소계정 체계 고도화 보고서.
3. 국토교통부(2019) 수목식재(KDS 34 40 10). 조정 설계기준.
4. 박은진(2009) 도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진방안. 경기개발연구원 연구보고서.
5. 산림청(2020) 신기후체제 대응을 위한 생활권 도시림의 탄소흡수원과 다원편의 증진을 위한 조성·관리·평가 모델 및 기술개발 보고서.
6. 손영모, 김래현, 이정학, 표정기, 김소원, 황정순, 이선정, 박현(2014) 한국 주요 수종별 탄소배출계수 및 바이오매스 상대생장식. 국립산림과학원 연구보고서.
7. 온실가스종합정보센터(2022) 식생복구 사업의 방법론.
8. 조현길, 안태원(2000) 자연생태계 수목의 생장에 따른 탄소저장 및 흡수량 지표. 한국환경생태학회지 14(3): 175-182.
9. 조현길, 안태원(2001) 도시 침엽수에 의한 연간 CO₂ 흡수 및 대기정화-소나무와 잣나무를 대상으로-. 한국생태학회지 15(2): 118-124.
10. 조현길, 김진영, 박혜미(2013) 도시 상록 조경수의 탄소저장 및 흡수-소나무와 잣나무를 대상으로-. 한국환경생태학회지 27(5): 571-578.
11. 조현길, 김진영, 박혜미(2014) 도시 조경수의 탄소저감 효과와 계량모델 개발-5개 향토수종을 대상으로-. 한국조경학회지 42(5): 13-21.
12. 조현길, 박혜미, 김진영(2020) 공공용지 녹지의 탄소저감과 증진방안. 한국조경학회지 48(4): 1-7.
13. 이관규(2003) 아파트단지의 녹지 지속가능성 지표 개발. 서울대학교 대학원 박사학위논문.
14. 탄소중립 녹색성장위원회(2021) 2030 국가 온실가스(NDC) 감축목표 상향안.
15. 황상일, 박선환(2011) 개발사업 환경영향평가시 식생의 탄소저장 및 흡수량 산정법에 대한 비교. 환경영향평가 20(4): 477-487.
16. 황인창, 백종탁(2021) 시장메커니즘에 기반한 건물 온실가스 총량관리제 도입. 서울연구원 정책보고서.
17. Aguaron, E. and E. G. McPherson(2012) Comparison of Methods for Estimating Carbon Dioxide Storage by Sacramento's Urban Forest. Carbon Sequestration in Urban Ecosystems. Springer. pp. 43-71.
18. Climate Positive Design(2020) Landscape Carbon Calculator, Pathfinder-Methodology, Data Sources and Metrics Summary.
19. McPherson, E. G.(1998) Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. Journal of Arboriculture 24(4): 215-223.
20. Nowak, D. J.(1993) Atmospheric carbon reduction by urban trees. Journal of Environmental Management 37(3): 207-217.
21. Nowak, D. J. and D. E. Crane(2002) Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. Environmental Pollution 116(3): 381-389.
22. Nowak, D. J.(2005) UFORE Methods. Report to USDA Forest Service.
23. Nowak, D. J.(2021) Understanding i-Tree: 2021 Summary of Programs and Methods. Report to USDA Forest Service.
24. Sasaki Associates(2021) Carbon Conscience White Paper.
25. Weissert, L. F., J. A. Salmond and L. Schwendenmann(2014) A review of the current progress in

- quantifying the potential of urban forests to mitigate urban CO₂ emissions. Urban Climate 8: 100-125.
26. Yang, B.(2019) Landscape Performance-Ian McHarg's Ecological Planning in the Woodland, Texas. New York, NY: Routledge.
27. <http://app.climatepositivedesign.com>
28. <https://carbon-conscience.web.app>
29. <https://climatepositivedesign.com>
30. <https://vimeo.com/646929754>
31. <http://www.fs.usda.gov/ccrc/tool/cufr-tree-carbon-calculator-ctcc>
32. <http://www.fs.usda.gov/ccrc/tool/ecosmart-landscapes>
33. <http://www.itreetools.org>
34. <https://www.landscapeperformance.org/benefits-toolkit>
35. http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95086382
36. <http://www.treebenefits.com/calculator>