

i-Tree Eco 기반 도시숲 탄소격리 및 기업의 온실가스 상쇄율 분석[†]

- 선정릉을 중심으로 한 TCFD 연계 가능성 평가 -

Analysis of Urban Forest Carbon Sequestration and Corporate Greenhouse Gas Offsetting Using i-Tree Eco[†]
- Assessment of TCFD Integration Potential: A Case Study of Seonjeongneung -

김예진*, 손영혜**, 이재영**, 김태한***

*상명대학교 그린스마트학과 석사과정, **상명대학교 그린스마트학과 박사과정, ***상명대학교 그린스마트시티학과 교수

Kim, Ye-Jin*, Son, Young-Hye**, Lee, Jae-Young**, Kim, Tae-Han***

*Master's Student, Dept. of Green Smart, Sangmyung University

**Ph.D. Student, Dept. of Green Smart, Sangmyung University

***Professor, Dept. of Green Smart City, Sangmyung University

Received: November 4, 2025
Revised: December 26, 2025 (1st)
January 15, 2026 (2nd)
Accepted: January 15, 2026
3인익명 심사필

Corresponding author :

Tae-han Kim
Professor, Dept. of Green Smart
City, Sangmyung University,
Cheonan 31066, Korea
Tel.: +82-41-550-5303
E-mail: taehankim@smu.ac.kr

국문초록

본 연구는 도시숲의 탄소격리 기능을 기업의 기후관련 재무정보 공개 테스크포스(TCFD) 권고안의 핵심 항목인 '전략' 및 '지표 및 목표'와 연계하여 평가하였다. 특히, 기업의 온실가스 감축 노력 후에도 불가피하게 남는 잔여배출(residual emissions)을 관리하기 위한 자연기반해법(NbS)으로서 도시숲의 활용 가능성을 검토하였다. 이를 위해 국내 주요 8개 기업을 산업별(철강, 반도체, 화학, IT)로 구분하여 Scope 1·2·3 배출 특성을 분석하였으며, 도시숲 기능을 수행하는 역사경관림인 선정릉을 대상으로 i-Tree Eco Forecast 모델을 적용하여 2024-2050년의 탄소격리량을 시나리오별로 예측하였다. 시뮬레이션 결과, 관리 수준 개선과 식재 확대를 병행할 경우 2024년 연간 최대 탄소격리량은 2050년에 37.5tCO₂eq/yr 증가하여, 관리 강화와 식재 확충이 장기적인 탄소격리 잠재력 향상에 중요한 요인임을 확인하였다. 한편, 기업의 배출량 대비 도시숲의 탄소격리 잠재력을 비교한 상쇄율 분석 결과, 철강 및 화학 등 대규모 배출 산업에서는 그 비중이 0.001% 미만으로 미미하였으나, Scope 1 배출 규모가 상대적으로 작은 IT 산업에서는 7-10% 수준의 상대적으로 높은 비중이 확인되었다. 이는 도시숲이 제도적 상쇄를 직접적으로 대체한다는 의미보다는 업종별 배출 구조에 따라 도시숲 탄소격리 지표가 갖는 상대적 기여 규모가 다르게 해석될 수 있음을 시사한다. 결론적으로 도시숲은 난감축(hard-to-abate) 산업의 잔여배출 관리를 위한 보완적 수단으로 활용할 수 있으며, 기업의 TCFD 기반 공시에서 기후 리스크 대응과 기회 요인을 설명하는 보조적 지표로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

주제어: 탄소중립, 기후리스크, 잔여배출, 자연기반해법, ESG 경영

ABSTRACT

Urban forests have increasingly been recognized as nature-based solutions (NbS) that contribute to climate change mitigation by providing ecosystem services, such as carbon sequestration. However, their potential within corporate climate strategies and climate-related financial disclosure frameworks remains insufficiently explored. This study evaluates the carbon sequestration function of urban forests by explicitly linking them to the core elements of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) recommendations, with a particular focus on the Strategy and Metrics and Targets pillars. Rather than positioning urban forests as substitutes for direct emission-reduction measures, this study examines their applicability as a complementary tool for managing residual emissions that persist despite corporate mitigation efforts. The analysis targets eight major Korean companies, classified into four industrial sectors: steel, semiconductors, chemical, and information technology (IT). Corporate greenhouse gas (GHG) emissions were examined by Scope 1, Scope 2, and Scope 3 categories to reflect differences in emission structures across industries. As a representative urban forest, the Seonjeongneung historical landscape forest, a UNESCO World Heritage site located in central Seoul, was selected as the study area. The i-Tree Eco Forecast model was applied to estimate carbon sequestration from 2024 to 2050 under multiple management scenarios, accounting for variations in tree mortality rates, management intensity, and planting expansion. Simulation results indicated that carbon sequestration potential

[†]본 연구는 2024년도 환경부(MOE)의 재원으로 한국환경산업기술원(KETRI)의 「녹색백업 특성화대학원 전문인력 양성사업」 및 농촌진흥청연구사업(세부과제번호 PJ0170712022)의 지원으로 수행되었습니다.

is highly sensitive to long-term management conditions. When both management improvement and planting expansion are implemented simultaneously, annual carbon sequestration was projected to increase steadily, reaching a maximum of 158.4 tCO₂ eq/yr by 2050. These findings demonstrate that enhanced management practices and strategic planting play a critical role in strengthening the long-term mitigation capacity of urban forests, even within spatially constrained historical landscapes. An offset ratio analysis was conducted by comparing projected urban forest carbon sequestration with corporate emissions. The results show that, for high-emission industries, such as steel and chemical manufacturing, the relative contribution of urban forest sequestration remains negligible, accounting for less than 0.001% of total emissions. In contrast, in the IT sector—characterized by relatively low Scope 1 emissions—the same level of carbon sequestration corresponds to a higher relative proportion, ranging from approximately 7% to 10%. This disparity highlights the importance of interpreting carbon sequestration indicators in relation to industry-specific emission structures rather than absolute mitigation capacity. Importantly, the results do not suggest that urban forests can replace formal carbon offset mechanisms or achieve direct emission reductions in carbon-intensive industries. Instead, they indicate that urban forest carbon sequestration can serve as a supplementary indicator for residual-emission management, particularly in sectors with limited direct emissions. From a TCFD perspective, urban forests may contribute to corporate climate disclosures by supporting narrative explanations of climate-related risks, adaptation strategies, and transition opportunities. Overall, this study provides empirical evidence that urban forests can function as a complementary NbS within TCFD-aligned climate strategies, while underscoring their limitations and context-dependent significance across different industrial sectors.

Keywords: Carbon Neutrality, Climate Risk, Residual Emissions, Nature-based Solutions, ESG Management

1. 서론

전 세계적으로 온실가스 배출의 지속적인 증가로 인해 기후변화가 가속화되면서, 지구 평균기온 상승, 폭염, 집중호우 등 극한 기상 현상의 빈도와 강도가 확대되고 있다(IPCC, 2023; WMO, 2024). 이에 대해 국제사회는 2015년 파리협정을 통해 지구 평균기온을 산업화 이전 대비 2°C 미만으로 유지하고, 1.5°C 수준까지 제한하기 위한 공동 목표를 설정하여 각국이 자발적으로 국가 온실가스 감축 목표(NDC)를 설정하고 이행하도록 하는 국제법적 기반을 마련하였다(United Nations, 2015). 한편, 국내에서는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」을 통해 2050년 탄소중립 비전을 법제화하고, 2030년 NDC를 2018년 대비 40% 감축으로 설정하는 등 탄소중립 사회로의 이행을 위한 정책적 기반을 마련하였다. 정부는 설정한 목표 달성을 위해 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획」을 수립하여, 배출권 거래제 고도화, 원전과 재생에너지의 활용을 통한 에너지 전환, 기업 환경 정보 공개 대상 확대 등 다양한 정책 수단을 추진하고 있다(관계부처 합동, 2023).

기업은 이러한 정책적 흐름에 대응하여 ESG(Environmental, Social, Governance) 경영을 강화하고 탄소중립 목표를 선언하며, 지속가능경영보고서를 통해 기후변화 대응 전략을 공시하는 사례가 증가하고 있다. 특히, 기후관련 재무정보 공개 태스크포스(Task Force on Climate-related Financial Disclosures, TCFD)의 권고안은 기후변화 리스크 공시의 국제 표준으로 활용되고 있는데, 지배구조(governance), 전략(strategy), 위험관리(risk management), 지표 및 목표(metrics & targets)의 영역에서 체계적이고 투명한 보고를 요구한다(TCFD, 2017).

TCFD 권고안 중 ‘지표 및 목표(metrics & targets)’ 항목은 Scope 1·2·3 배출량뿐만 아니라, 저탄소 제품·서비스, 프로젝트에 대한 투자와 성과 등 기후변화 대응과 관련된 기회(opportunity) 지표의 공시도 요구하고 있다(TCFD, 2017). 그러나 현재 기업의 공시는 주로 에너지 효율 개선 등 기술적 감축 수단에 집중되어 있어, 감축 노력 후에도 불가피하게 남는 잔여배출(residual emissions)을 관리하기 위한 정량적 논의는 부족한 실정이다.

최근 기업의 ESG 경영 공시를 위한 다면적 요구에 대응하기 위해 자연기반해법(Nature-based Solutions, NbS)이 주목받고 있다. NbS는 생태계의 보호, 관리 및 복원을 통해 기후변화 대응과 동시에 생물다양성 증진, 사회·경제적 편익을 창출하는 접근법으로 정의된다(Griscom et al., 2017; IUCN, 2023). NbS는 TCFD뿐만 아니라 TNFD(Taskforce on Nature-related Financial Disclosures), WBCSD(World Business Council for Sustainable Development) 등 주요 국제 이니셔티브에서 기업의 기후리스크 관리와 ESG 전략과의 연계를 제안하고 있다(IUCN, 2023). 대표적인 NbS인 도시숲은 탄소격리, 대기질 개선, 열섬 완화, 생물다양성 증진 등 다양한 생태계 서비스를 제공함으로써 도시회복력과 인간 복

지를 증진하는 데 중요한 역할을 수행하는 것으로 보고되고 있다(Zhao et al., 2024). 이러한 기능을 장기적으로 유지 및 강화하기 위해서는 계획적인 조성과 관리가 필수적이며, 기업과 공공기관 등의 참여는 사회적·환경적 편익을 확대하고 도시 차원의 지속가능성을 강화하는 수단이 될 수 있다(Hansmann et al., 2016).

도시숲의 탄소 저장 및 탄소 격리 기능에 관한 연구는 최근 활발히 이루어지고 있으며, 도시숲의 면적, 식생 구성, 관리 수준에 따라 기후변화 완화에 대한 기여 정도가 상이하게 나타날 수 있음이 보고되고 있다(Hutt-Taylor and Ziter, 2022; Wang et al., 2023). 도시숲은 단위면적당 탄소격리량이 일반 산림에 비해 상대적으로 낮을 수 있으나, 인구와 에너지 소비가 집중된 도시공간에서 장기적인 탄소 저장과 온실가스 배출 상쇄에 기여하는 대표적인 자연기반해법(NbS)으로 평가되고 있다(Adetoye et al., 2018; Wang et al., 2023).

이러한 도시숲의 기능을 정량적으로 평가하기 위해 다양한 분석 도구가 활용되었으며, 그중 대표적인 모델이 미국 산림청(USDA Forest Service)이 개발한 i-Tree Eco이다. i-Tree Eco는 현장 실측 자료에 기반한 개체목 단위 분석을 통해 식재 구조와 관리 이력이 불균질한 도시숲의 공간적 이질성을 정밀하게 반영할 수 있으며(Nowak et al., 2008; Sharma et al., 2025), 전 세계 131개국 이상에서 활용되고 있는 검증된 도시숲 평가 도구이다(Nowak et al., 2018). 또한, 단일 수목부터 도시 전체까지 다양한 공간 규모에 적용할 수 있으며, 탄소 저장 및 격리, 대기 질 개선 등 생태계 서비스의 물리적 효과와 경제적 가치를 함께 산정할 수 있어 도시숲 관련 정책 및 예산 의사결정을 지원하는 정량적 평가 도구로서의 활용 가능성이 선행연구를 통해 입증된 바 있다(Rogers et al., 2015; Ross et al., 2020; 나영린 등, 2022; Forest Research, 2022; 김중환 등, 2024; Soni, 2025).

한편, 기존의 i-Tree Eco 기반 도시숲 연구는 특정 공간 단위를 대상으로 수목 구조와 탄소 저장량 및 연간 탄소격리량을 산정하여 도시숲의 기후변화 완화에 대한 기여 규모를 제시하는 데 주로 초점을 두어 왔다(Ross et al., 2020; Szkop, 2020). 일부 연구에서는 산정 결과를 토지이용 계획이나 도시숲 관리계획과 연계하여 지역 또는 시설 단위의 탄소 상쇄 가능성을 논의하였으나(Raum et al., 2019; Shen et al., 2023; Sjoman et al., 2024), 도시숲의 탄소격리량을 기업의 온실가스 배출 구조와 동일한 기준에서 비교하고, 기업 탄소중립 이행 과정에서 잔여배출 상쇄 수단으로 활용 가능한 수준을 정량적으로 평가한 연구는 제한적이다. 또한, 기업 온실가스 배출 연구에서는 Scope 1·2·3 체계를 기반으로 업종별 배출 구조와 감축 한계를 분석하고, 기술적 감축 이후 남은 잔여배출을 관리하기 위한 보조적 수단으로 자연기반해법(NbS)의 활용 필요성이 제시되고 있다(Seymour and Langer, 2021; Korthuis et al., 2024). 그러나 이러한 논의에서도 도시숲의 탄소격리 기능을 기업별 Scope 구조와 직접 연결하여 상쇄율을 산정하는 실증적 분석에 대한 논의는 충분하지 않은 상황이다.

따라서 본 연구는 i-Tree Eco 모델을 활용하여 도시숲의 기능을 수행하는 대표적 역사경관림인 선정릉의 탄소격리 잠재량을 정량화하고, 이를 국내 주요 기업의 Scope 1·2·3 배출 특성과 비교하여 상쇄율을 산정하였다. 특히, 도시숲이 대규모 배출 산업의 직접 감축을 대체하기보다 기술적 감축 이후 불가피하게 남은 잔여배출을 보완 관리하거나, 배출 규모가 상대적으로 작은 업종에 초점을 맞추어 상쇄 기여도를 분석하였다. 이를 통해 도시숲이 업종별 배출 구조에 따라 어느 정도의 상쇄 기여를 제공할 수 있는지 확인하고, 기업의 탄소중립 전략 및 TCFD 기반 기후리스크 관리 측면에서 잔여배출 관리에 유효한 NbS 수단으로서 활용 가능성을 검토하고자 한다. 이로써 도시숲의 탄소격리 효과가 TCFD 권고안 중 전략, 지표 및 목표 항목에서 기업의 기후변화 대응 전략과 성과에 대한 의사결정 지원 자료로의 적용 수준을 논의하려 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 기후변화대응 측면에서 선정릉과 같은 도시숲이 기업 공시자료로의 활용 가능여부를 검토하기 위해 TCFD 권고안의 핵심 항목인 전략(strategy)과 지표 및 목표(metrics & targets)에 중점을 두어 설계하였다. 이를 위해 우선, 국내 주요 기업의 Scope 1·2·3 온실가스 배출량과 선행연구를 활용하여 업종별 배출 특성을 분석하였다. 도출된 온실가스 배출량을 기반으로, i-Tree Eco 모델을 활용하여 도시숲의 탄소격리 잠재량을 산정하였다. 마지막으로 기업의 온실가스 배출량을 도시숲의 격리량에 의한 상쇄율을 산출함으로써 도시숲이 기업의 탄소중립 목표 달성 과정에서 불특정하게 발생하는 잔여배출 관리를 위한 보완적 기능 측면의 활용 가능성에 대한 검토를 수행하고자 하였다.

2.1 기업의 온실가스 배출 특성 분석

기업은 국제적으로 통용되는 GHG Protocol과 TCFD 권고안 등에 따라 Scope 1, Scope 2, Scope 3 배출량을

구분해 공시하고 있다. 여기서, Scope 1은 기업이 직접 소유하거나 통제하는 설비에서의 연료 연소나 공정 과정에서 발생하는 직접배출, Scope 2는 구매한 전기, 열, 증기 등 에너지 사용으로 인한 간접배출, Scope 3은 공급망, 물류, 제품 사용 및 폐기 등 가치사슬 전반에서 발생하는 기타 간접배출을 의미한다(WRI and WBCSD, 2024).

본 연구에서는 국내 주요 기업의 온실가스 배출 특성과 잔여 배출 관리 전략을 비교하고 분석하기 위해 기업별 배출 자료를 수집하고 정리하였다. 우선, 환경부 산하의 온실가스 종합정보센터(Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, GIR)에 제출된 명세서를 기초 자료로 활용하였다. 해당 명세서에 포함된 기업은 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」에 따라 연간 약 125,000tCO₂eq 이상을 배출하는 배출권거래제 할당 대상 업체와 이보다 배출 규모가 작은 목표관리업체로 구분된다.

기업의 온실가스 배출량을 분석한 선행연구(이재영 등, 2017; 박년배, 2023)를 참조하여, 2022년부터 2024년까지 최근 3년간 연속으로 온실가스 배출량 상위권에 속한 기업 중에서 2025년에 발간한 지속가능경영보고서를 통해 해당 기간의 Scope 1·2·3 배출량을 모두 공시한 6개 기업(포스코, 현대제철, 삼성전자, SK하이닉스, LG화학, 롯데케미칼)을 1차 분석 대상으로 선정하였다. 다만, 기존 연구가 주로 온실가스 배출량이 많은 제조업에 편중되어 있어 도시숲의 탄소격리량을 적용했을 때, 상쇄 기여 효과가 과소 평가될 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 총 배출량이 상대적으로 낮은 IT 업종(SK브로드밴드, 네이버)을 추가하여 분석 대상을 확대하였다.

2.2 i-Tree Eco 기반 도시숲의 탄소격리량 산정

대상지는 서울특별시 강남구에 위치한 선정릉 역사경관림으로 유네스코 세계문화유산에 등재된 대표적인 조선 왕릉이자 도심 내 위치한 대규모 녹지공간이다. 전체 면적 약 24ha 중 85% 이상이 숲으로 구성되어 있으며, 주 우점종은 소나무(*Pinus densiflora*, 35.2%), 오리나무(*Alnus japonica*, 18.9%), 갈참나무(*Quercus aliena*, 17.2%)로, 이들 상위 3개 수종이 전체의 약 71.3%를 차지하는 산림형 식재 구조이다(Kim et al., 2016). 특히 흉고직경(DBH) 15.2~61cm 범위의 수목이 전체의 3분의 2 이상을 차지하는 성숙한 수목 우점 구조를 보이며, 일반 가로수나 도시 공원 녹지에 비해 단위 면적당 높은 탄소 격리 잠재력을 보유한 것으로 평가된다(Nowak et al., 2013; Hand et al., 2019; 이재영 등, 2024). 이러한 특성을 바탕으로 본 연구는 선정릉 역사경관림을 이론적 적용 가능성을 검토하기 위한 탐색적 단일 사례로 설정하였으며(Yin, 2014), 도시숲 지표를 기업의 잔여배출 관리 논의에 활용 가능한 보조적·지표적 수단으로서 탐색적으로 제시하고자 하였다(GRESB, 2021).

수목 인벤토리 자료는 선행연구(이재영 등, 2024)를 참조하여 문화재청에서 수행한 ‘조선왕릉 수목 실측조사 자료’와 ‘조선왕릉 역사문화 경관림 자원조사 자료’를 기반으로 구성하였다(최종희 등, 2016; 박용암 등, 2021). 해당 자료는 연구 시점 기준 선정릉 대상지에 대해 구축된 가장 최신의 공신력 있는 수목 실측 데이터로, 이후 이를 대체할 수 있는 추가적인 공식 수목 조사나 인벤토리 갱신 자료가 발표되지 않아 본 연구에서는 이를 2024년 기준 시물레이션의 기초 입력 자료로 활용하였다.

탄소격리량 산정에는 i-Tree Eco v6.1의 Forecast 모델을 활용하였다. 본 모델은 미국 산림청(USDA Forest Service)이 개발하여 전 세계 131개국에서 활용되는 등 국제적 신뢰성을 확보하고 있다(Nowak et al., 2018). 기존의 원격탐사 기반 면적 단위 산정 방식과 달리 현장 실측 기반의 개체목 단위 분석을 수행하여 식재 패턴이 불규칙한 도시숲의 이질성을 정밀하게 반영할 수 있으며(Nowak et al., 2008; Sharma et al., 2025), Forecast 모듈은 수목의 단순 생장뿐만 아니라 고사, 신규 식재 등 다양한 변화를 복합적으로 고려한 시물레이션에 최적화된 도구로서 본 연구의 장기 예측 목적에 적합하다(Nowak et al., 2018). 해당 모델은 수종별 흉고직경(DBH), 분포, 생장률, 연간 고사율(Annual Mortality Rate, AMR) 등을 주요 입력 변수로 하여 수목 생장과 수관 구조 변화를 반영한 도시숲의 탄소 저장량 및 연간 탄소격리량을 예측할 수 있다. 분석은 인벤토리 자료를 기반으로 2050년까지 장기 예측을 수행하였으며, 시물레이션 결과 중 2024년 값을 기준 시점으로 활용하였다. 시나리오는 도시숲의 확충과 관리 수준에 따른 탄소격리 효과를 예측하기 위해 식재 확대와 AMR 조건을 변수로 설정하여 설계하였다(표 1 참조). 본 연구에서 분석 대상으로 선정한 선정릉은 도시숲의 구조와 기능을 실증적으로 분석하기 위한 대표 사례로 활용되었으나, 유네스코 세계유산이자 문화재 보호구역이라는 특성상 대규모 신규 식재나 공간 구조 변경에는 제도적이고 물리적 제약이 존재한다(UNESCO, 2002). 이에 따라 본 연구에서 설정한 시나리오는 실제 관리 계획이나 실행 가능성에 대한 검증보다 도시숲의 관리 수준 및 식재 규모 변화가 탄소격리 잠재력에 미치는 상대적 영향을 탐색적으로 비교하고 이해하기 위한 가정적 분석 조건으로 설정되었다(Hilbert et al., 2019).

구체적인 시나리오는 추가 식재를 고려하지 않은 ‘기준(baseline)’과 탄소흡수 잠재력 확대를 가정한 ‘식재 확대(S1: +10%, S2: +20%)’로 구분하였으며, 선행연구를 참고하여 관리 수준을 반영하는 변수로 연간 고사율(AMR)

표 1. 시나리오별 관리 수준 및 식재 비율 설정값(2024-2050년 적용)

시나리오	연간 고사율(%)	추가 식재 비율(%)	적용 기간
Baseline-A	3	0	2024-2050
S1-A	3	+10	2024-2050
S2-A	3	+20	2024-2050
Baseline-B	1	0	2024-2050
S1-B	1	+10	2024-2050
S2-B	1	+20	2024-2050

을 적용하였다(Singran, 2025). AMR 1%는 상대적으로 양호한 관리가 유지되는 조건을, AMR 3%는 관리 미흡 또는 병해충, 가뭄, 폭염 등 외부 스트레스 요인에 노출된 조건을 가정한 값으로 설정하였다. 이 값은 국내 도시숲 또는 왕릉림의 실제 고사율을 직접 재현하기 위한 수치라기보다 도시 수목 고사율 범위(약 1-3%)를 참고하여 관리 수준 차이에 따른 탄소격리 경향을 비교하기 위한 가정적 시나리오 변수로 적용되었다(Nowak et al., 2018; Hilbert et al., 2019).

이에 따라 Baseline 시나리오는 식재 확대가 이루어지지 않은 상태에서 관리 수준 차이에 따른 장기적인 탄소격리 효과를 분석하였다. 이때 Baseline-A는 AMR 3%를 적용하여 관리가 미흡한 상황을, Baseline-B는 AMR 1%를 적용하여 양호한 관리 상황을 모의하였다. S1, S2 시나리오는 기존 수목을 기준으로 2024년부터 2050년까지 매년 균등하게 분산하여 추가 식재하는 것으로 설정하였다. S1은 총 수목 대비 10%의 확충을, S2는 20%의 확충을 가정하여 식재 규모 차이에 따른 탄소흡수 잠재력을 분석하였으며, 각 식재 확대 시나리오는 AMR 3%(S1-A, S2-A)와 AMR 1%(S1-B, S2-B) 조건을 적용하여 관리 수준에 따른 차이를 동시에 고려하였다.

2.3 기업 배출량의 도시숲에 의한 상쇄율 분석

본 연구는 기업이 기술적 온실가스 감축 이후에도 불가피하게 남게 되는 잔여배출에 대해 도시숲이 보완적으로 기여할 수 있는 가능성을 검토하고자 기업의 Scope별 온실가스 배출량 대비 상쇄율을 산정하였다. 상쇄율(%)은 도시숲 탄소흡수량을 기업의 Scope별 온실가스 배출량으로 나눈 값에 100을 곱하여 산정하였다(Hong et al., 2024). 상쇄율 분석을 위해 분석 대상 기업의 2024년 Scope 1, Scope 2, Scope 3 배출량(tCO₂eq)을 기준으로 i-Tree Eco Forecast 모듈을 활용하여 선정된 2024년 및 2050년 시점의 연간 탄소격리량을 각각 추정하고, 총배출량 대비 도시숲에 의한 상쇄율을 산출하였다. 이때 2050년 상쇄율 산정 시, 불확실성이 큰 장기 배출 예측치를 도입하기보다 검증된 2024년 배출량을 기준으로 고정된 상태에서 도시숲의 2050년 탄소격리 잠재력을 평가하는 보수적 접근법을 채택하였다(IPCC, 2018; IEA, 2021). 이를 통해 현재의 배출 수준을 기준으로 미래 시점의 도시숲이 제공할 수 있는 상대적 기여도를 평가하고자 하였다.

본 연구에서 사용한 '상쇄율'의 개념은 배출권거래제나 자발적 탄소시장과 같이 공식적인 탄소상쇄(오프셋) 크레딧을 산정하는 것과는 다르며, 해당 지표는 기업의 Scope별 온실가스 배출량 대비 단일 도시숲이 제공하는 연간 탄소격리량이 차지하는 상대적 규모를 파악하기 위한 비교용 지표로 정의된다(Zhao et al., 2010; Hong et al., 2024). 따라서 본 연구의 상쇄율은 실제 제도적 상쇄량이나 감축 실적을 의미하지 않는 가상적 지표이며, 추가성, 영구성, 누출 방지 및 MRV 검증 등 탄소크레딧 발급 요건은 평가 범위에서 제외하였다(Chen et al., 2020).

3. 연구 결과

3.1 기업별 온실가스 배출 특성

2022년부터 2024년까지 3개년 동안 국내 주요 기업을 대상으로 Scope 1, Scope 2, Scope 3로 구분된 온실가스 배출량을 집계하고 배출 특성을 분석하였다. 여기서, 각 기업의 연도별 절대 배출량 변화를 정량화하였으며, 기업의 Scope별 구성비를 시각화하여 업종 간 배출 구조의 차이를 비교할 수 있도록 정리하였다(표 2, 그림 1 참조).

첫째, 철강 산업은 전 세계적으로 온실가스 배출량이 가장 많은 산업 중 하나로 주로 제조 공정에서 사용되는 코크스(cokes)를 포함한 원료 및 연료의 연소 과정에서 배출이 발생한다(IEA, 2020; Kim et al., 2022). 이는 기업

표 2. 주요 산업 분야별 기업의 온실가스 배출량(2022-2024년)

(단위: tCO₂e)

분야	기업명	Scope	2022	2023	2024
철강	포스코	Scope 1+2	70,185,623	71,971,900	71,065,170
		Scope 1	68,305,993	70,588,012	69,665,353
		Scope 2	1,879,630	1,383,895	1,399,825
		Scope 3	7,107,502	7,419,787	7,216,788
		Total	77,293,125	79,391,694	78,281,966
	현대제철	Scope 1+2	28,501,000	29,269,000	28,818,000
		Scope 1	25,907,000	26,679,000	26,580,000
		Scope 2	2,594,000	2,590,000	2,238,000
		Scope 3	2,491,000	3,487,000	5,909,000
		Total	30,993,000	32,756,000	34,727,000
반도체	삼성전자	Scope 1+2	15,053,000	13,291,000	14,889,000
		Scope 1	5,972,000	3,733,000	4,725,000
		Scope 2	9,081,000	9,558,000	10,164,000
		Scope 3	115,960,000	106,971,000	105,612,000
		Total	131,013,000	120,262,000	120,501,000
	SK하이닉스	Scope 1+2	9,082,634	7,324,980	7,574,703
		Scope 1	2,942,757	2,338,090	3,762,584
		Scope 2	6,139,877	4,986,890	3,812,119
		Scope 3	3,537,388	2,951,027	3,732,101
		Total	12,620,022	10,276,007	11,306,804
화학	LG화학	Scope 1+2	8,567,697	8,072,360	8,310,445
		Scope 1	5,489,586	5,031,867	5,492,228
		Scope 2	3,078,111	3,040,492	2,818,217
		Scope 3	1,227,864	11,471,953	19,260,472
		Total	9,795,561	19,544,312	27,570,917
	롯데케미칼	Scope 1+2	6,214,656	6,158,540	5,903,386
		Scope 1	4,187,396	3,999,341	3,808,952
		Scope 2	2,027,266	2,159,203	2,094,441
		Scope 3	11,579,412	8,078,185	13,231,056
		Total	17,794,074	14,236,729	19,134,449
IT	SK브로드밴드	Scope 1+2	394,402	423,633	455,962
		Scope 1	2,270	1,917	1,677
		Scope 2	392,169	421,752	454,327
		Scope 3	856,412	939,437	827,899
		Total	1,250,851	1,363,106	1,283,903
	네이버	Scope 1+2	86,991	89,505	121,186
		Scope 1	893	2,048	1,493
		Scope 2	86,100	87,459	119,697
		Scope 3	209,708	78,706	124,601
		Total	296,701	168,213	245,791

자료: 포스코(2025: 139); 현대제철(2025: 25); 삼성전자(2025: 68); SK하이닉스(2025: 72); LG화학(2025: 103); 롯데케미칼(2025: 148); SK브로드밴드(2025: 137); 네이버(2025: 202)

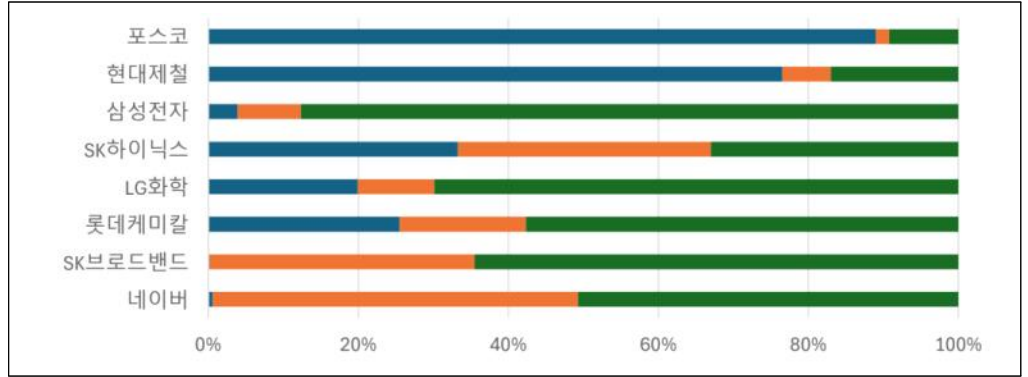


그림 1. 주요 기업의 Scope별 온실가스 배출 구성비
범례: ■ Scope 1, ■ Scope 2, ■ Scope 3

의 생산 활동에서 직접적으로 발생하기 때문에 다른 업종에 비해 Scope 1의 비중이 높게 나타나는 특징이 있다. 본 연구의 분석 결과에서도 이와 같은 경향이 확인되었는데, 포스코의 2024년 총배출량 7,828만 tCO₂eq 중 약 89%(6,966만 tCO₂eq)가 Scope 1에서 발생했으며, 현대제철은 총배출량 3,472만 tCO₂eq 중 약 77%(2,658만 tCO₂eq)가 Scope 1에 해당하여 직접배출 위주의 특성이 기존 연구와 일치함을 확인할 수 있었다.

둘째, 반도체 산업은 선행연구에서 2021년 전 세계 반도체 기기에서 발생한 약 5억 tCO₂eq 중에서 약 80%가 재료 및 장비(Scope 3 Upstream), 사용 및 폐기(Scope 3 Downstream) 단계에서 발생하는 것으로 보고된 바 있으며, 이로 인해 Scope 3 배출의 비중이 높은 산업으로 지적되고 있다(Tembey et al., 2023). 본 연구에서도 삼성전자의 2024년 총배출량은 약 1억 2,050만 tCO₂eq 중, 약 84%(105,612,000tCO₂eq)가 Scope 3에서 발생하였다. 또한, SK하이닉스도 총 1,130만 tCO₂eq 가운데 약 33%(3,732,101tCO₂eq)가 동일 범주에 해당하여, 해당 산업 분야의 경우, 기업의 가치사슬 전반에 발생하는 간접배출 비중이 높은 것으로 확인되었다.

셋째, 화학 산업의 경우, 기존 연구에서는 배출량의 70% 이상이 Scope 3에서 발생하는 것으로 보고되고 있으며(CDP, 2022; Khemani et al., 2022), 이는 공급망 전반에서 다양한 배출원이 집중되어 있음을 보여준다. 본 연구 결과 또한 이와 유사한 경향을 나타내었다. LG화학의 2024년 총 배출량은 약 2,757만 tCO₂eq이며, 이 중 Scope 3가 약 70%(19,260,472tCO₂eq)를 차지하였다. 롯데케미칼은 총 1,913만 tCO₂eq 중 69%(13,231,056tCO₂eq)가 Scope 3에서 발생하여, 두 기업 모두 공급망 기반의 배출 관리가 중요한 업종임을 확인할 수 있었다.

넷째, IT 산업은 선행연구에서도 Scope 1 배출은 미미하나, 데이터센터 전력 소비에 따른 Scope 2와 장비 제조, 이용, 폐기에 따른 Scope 3가 주요 배출원으로 지적된 바 있다(Freitag et al., 2021; World Bank and ITU, 2024). 본 연구에서도 이러한 경향이 확인되었다. SK브로드밴드의 2024년 총배출량은 약 128만 tCO₂eq로 나타났으며, 이 중 Scope 2, 약 35%(454,327tCO₂eq), Scope 3, 약 64%(827,899tCO₂eq)를 차지하고, 네이버 또한 총배출량 약 25만 tCO₂eq 중 Scope 2, 49%(119,697tCO₂eq), Scope 3, 51%(124,601tCO₂eq)로 집계되어 두 기업 모두 간접배출이 주를 이루었다. 이에 따라 IT 업종의 탄소배출 구조는 전력 사용과 공급망 활동에 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 도시숲 탄소격리량 시나리오 분석

i-Tree Eco Forecast 모델을 활용하여 선정릉의 연간 탄소격리량을 예측한 결과, 관리 수준(AMR)과 식재 확대 비율에 따라 현저한 차이가 나타났다(표 3, 그림 2 참조). Baseline-A 조건에서 2024년 연간 탄소격리량은 120.7tCO₂eq/yr로 추정되었으며, 2050년에는 145.8tCO₂eq/yr까지 증가하였다. 동일 관리 조건에서 10% 식재를 반영한 S1-A는 2050년 151.5tCO₂eq/yr, 20% 식재를 반영한 S2-A는 157.7tCO₂eq/yr으로 나타났다. 반면, 관리 수준을 개선하여 AMR을 1%로 낮춘 Baseline-B 조건에서는 2050년 탄소격리량이 151.6tCO₂eq/yr으로 증가하였고, 같은 조건에서 10%와 20% 식재를 반영한 S1-B와 S2-B는 각각 152.2tCO₂eq/yr, 158.4tCO₂eq/yr으로 가장 높은 격리량을 기록하였다.

관리 수준이 동일할 경우, 식재 비율이 높을수록 2050년 탄소격리량이 점진적으로 증가했으며, 동일한 식재 비율에서 관리 수준을 개선한 B 계열이 A 계열보다 높게 집계되었다. 또한, 연도별 변화율의 경우, Baseline-A 대비 탄소격리량 증가폭이 시간에 따라 점진적으로 확대되었으며, 특히 S2-B 시나리오에서 가장 크게 확대되어 관리 개

표 3. 관리 수준 및 식재 비율 변화에 따른 시나리오별 연간 탄소격리량(2024-2050년)

시나리오	연간 고사율(%)	추가 식재 비율(%)	2024 연간 격리량(tCO ₂ eq/yr)	2050 연간 격리량(tCO ₂ eq/yr)
Baseline-A	3	0	120.7	145.8
S1-A	3	+10	120.7	151.5
S2-A	3	+20	120.8	157.7
Baseline-B	1	0	120.8	151.6
S1-B	1	+10	120.9	152.2
S2-B	1	+20	120.7	158.4

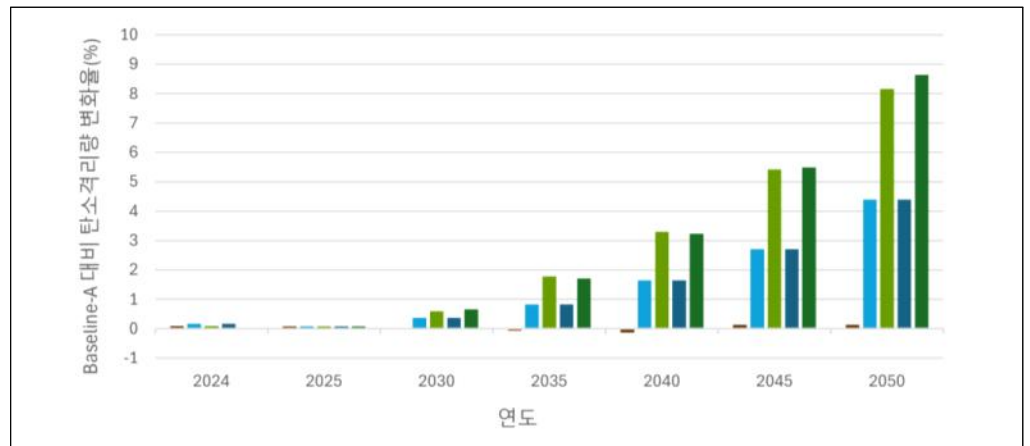


그림 2. Baseline-A 대비 연도별 탄소격리량 변화율
 범례: ■ Baseline-B, ■ S1-A, ■ S2-A, ■ S1-B, ■ S2-B

선과 식재 확대를 병행할 경우, 시간이 경과함에 따라 누적 탄소격리 효과가 증가함을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 고사율이 높을 경우, 식재가 효과적임을 보여주며(Widney et al., 2016), 식재와 관리 수준 개선이 장기적 탄소흡수 잠재력 확보에 중요한 요인임을 시사한다. 다만, 본 연구에서 적용한 식재 확대 시나리오는 문화재 보호구역이라는 대상지의 현실적 제약을 고려할 때 즉각적인 실행 계획이라기보다는, 도시숲의 관리 강화와 확충이 탄소격리 효율에 미치는 영향을 비교하기 위한 탐색적 결과로 해석하는 것이 바람직하다. 이를 통해 기업은 기후변화 대응 전략 측면에서 도시숲의 관리 강화를 잔여배출 관리 수단으로 고려할 수 있으며, 이는 구조적 식재 설계 요인과 병행될 때 효과가 극대화될 것으로 판단된다(Jo et al., 2023; Kim et al., 2024).

3.3 도시숲에 의한 기업별 상쇄율

본 연구에서는 선정문의 연간 탄소격리량을 기준으로 가장 높은 격리량이 산정된 S2-B 시나리오(158.4 tCO₂eq/yr)를 기준으로, 기업별 Scope 1·2·3 배출량 대비 상쇄율을 산정하였다(표 4 참조). 철강 산업의 경우, 포스코와 현대제철은 2050년 기준 Scope 1 상쇄율이 각각 약 0.0002%, 0.0006%로 집계되어 상쇄율이 낮게 나타났다. 반도체 산업의 경우, 삼성전자는 Scope 3 배출이 전체의 88% 이상을 차지해 총배출량 대비 상쇄율이 약 0.0001%에 불과하였으며, SK하이닉스는 Scope 1 배출량이 3,762,584tCO₂eq으로 2024년 약 0.0032%, 2050년 약 0.0042% 수준의 상쇄율을 보였다. 화학 산업의 LG화학과 롯데케미칼은 Scope 1·2·3 전 범위에서 배출량이 높아 상쇄율이 약 0.002-0.007% 수준에 머물렀다. IT산업의 SK브로드밴드는 Scope 1 기준 2024년 7.2%, 2050년 9.4%의 상쇄율을 보였으며 네이버는 2024년 8.1%, 2050년 10.6%로 상대적으로 높은 상쇄율을 기록하였다.

선행연구에 따르면 철강 및 화학 산업은 난감축(hard-to-abate) 부문으로서 배출량을 완전히 상쇄하는 데 기술적 한계가 존재하며, 단일 도시숲이 직접적인 감축 수단이 되기에는 규모적 한계가 있어 잔여배출을 관리하는 상징적 NbS로서 의미를 가진다(IPCC, 2023; IUCN, 2023). 한편, IT 산업의 SK브로드밴드는 Scope 1 기준 2024년 7.2%, 2050년 9.4%의 상쇄율을 보였으며, 네이버는 2024년 8.1%, 2050년 10.6%로 상대적으로 높은 상쇄율을 기록하였다. 이는 IT 산업과 같이 총배출량 규모가 상대적으로 작거나 Scope 1 배출 비중이 낮은 업종에서 도시숲

표 4. 2024년 대비 2050년 기업 배출량 시나리오별 Scope 탄소상쇄율 변화(2024-2050년)

기업명	시나리오 연도	Scope 1 상쇄율(%)	Scope 2 상쇄율(%)	Scope 3 상쇄율(%)
포스코	2024	0.000173	0.008623	0.001672
	2050	0.000227	0.011316	0.002195
현대제철	2024	0.000454	0.005393	0.002043
	2050	0.000596	0.007078	0.002681
삼성전자	2024	0.002554	0.001188	0.000114
	2050	0.003352	0.001558	0.000150
SK하이닉스	2024	0.003208	0.003166	0.003234
	2050	0.004210	0.004155	0.004244
LG화학	2024	0.002198	0.004283	0.000627
	2050	0.002884	0.005621	0.000822
롯데케미칼	2024	0.003169	0.005763	0.000912
	2050	0.004159	0.007563	0.001197
SK브로드밴드	2024	7.197376	0.026567	0.014579
	2050	9.445438	0.034865	0.019133
네이버	2024	8.084394	0.100838	0.096869
	2050	10.609511	0.132334	0.127126

탄소격리 지표가 상대적으로 크게 나타날 수 있음을 보여주며, 도시숲 탄소격리 지표가 업종별 배출 특성에 따라 상대적으로 해석될 수 있음을 시사한다(Zhao et al., 2010).

도시숲의 상쇄율은 기업의 탄소중립 전략이나 TCFD 기반 공사에서 기술적 감축 이후의 잔여배출 관리에 대해 기업이 어느 정도의 노력을 기울이고 있는지를 설명하는 '보완적 지표'로서의 가치를 지닌다. 따라서 도시숲은 업종별 배출 특성에 따라 직접 감축의 한계를 보완하면서 기업 기후전략 내 잔여배출 관리의 보완적 수단으로 의미 있는 역할을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 TCFD 권고안의 전략과 지표 및 목표 항목을 중심으로 도시숲으로 분류할 수 있는 도심 내 역사경관림과 같은 도시숲의 탄소격리 기능을 국내 주요 기업의 Scope 1·2·3 배출 특성과 연계하여 상쇄율을 산정하였다. 이를 통해 도시숲이 기업의 탄소중립 전략에서 잔여배출 관리를 위한 보완적 수단으로의 활용 가능 여부를 정량적으로 평가하였다.

분석 결과, 철강·화학 등 탄소 다배출 업종에서는 도시숲의 상쇄 기여도가 미미하였으나, IT 산업과 같이 총배출량 규모가 상대적으로 작거나 특히 운영 단계에서의 Scope 1 직접배출 비중이 낮은 기업에서는 동일한 도시숲 탄소격리량이 배출 대비 상대적으로 큰 비율로 나타날 수 있음을 확인하였다(World Bank, 2019; ITU and WBA, 2022; ITU and WBA, 2025). 글로벌 디지털 기업 사례 분석에서도 Scope 3 간접배출이 전체 배출의 대부분을 차지하는 반면, Scope 1 배출은 제한적인 수준에 머무는 것으로 보고되어, IT 산업의 배출 구조가 제조업과 구조적으로 상이함을 보여준다(ITU and WBA, 2025).

본 연구에서 SK브로드밴드와 네이버의 Scope 1 기준 상쇄율이 각각 약 9.4%와 10.6%로 나타난 결과는 단일 도시숲의 탄소격리량이 기업 배출을 제도적으로 상쇄함을 의미하기보다는, 업종별 배출 구조 차이에 따라 도시숲 탄소격리 지표의 상대적 해석이 달라질 수 있음을 보여주는 사례로 해석된다(Zhao et al., 2010; Chen et al., 2020). 시나리오 분석을 통해 관리 수준 개선과 식재 확대를 병행할 경우, 2050년 기준 연간 탄소격리량이 유의미하게 증가함을 확인하였다. 이는 기업의 기후전략 차원에서 도시숲의 유지 및 관리와 추가 조성이 장기적인 탄소격리 잠재력 확대에 중요한 요인임을 시사한다. 또한, TCFD 관점에서 도시숲의 활용은 단순한 탄소상쇄를 넘어 폭염

및 집중호우와 같은 물리적 기후 리스크를 완화함으로써 사업 중단 및 자산 손실 위험을 낮추고, 환경책임 이행을 통해 기업의 평판과 브랜드 가치를 제고하는 등 간접적인 재무적 기회 요인으로 작용할 수 있다(WEF, 2021).

한편, 도시숲은 기술적 감축 이후에도 불가피하게 남은 잔여배출(residual emissions)을 보완적으로 관리할 수 있는 자연기반해법(NbS)으로 해석될 수 있다. 도시숲의 탄소격리량을 기업의 Scope 1·2·3 배출량과 동일한 온실가스 단위에서 제시함으로써 도시숲 기반 NbS 투자의 성과는 TCFD 권고안의 '지표 및 목표' 항목에서 기업의 기후 대응 전략 이행 수준을 보완적으로 설명하는 정량 지표로 활용이 가능하다. 선행연구에서는 도시숲의 탄소격리량을 산업 또는 미래 배출량과 직접 비교하여 상세 잠재력을 정량화한 사례가 보고된 바 있으며(Zhao et al., 2010), WRI는 NbS 기반 탄소격리 성과를 기업의 잔여배출 관리를 위한 기후 기회 지표로 TCFD 공시에 포함할 것을 권고하고 있다(Seymour and Langer, 2021). 또한, 실제 기업 공시 사례에서도 도시숲 및 나무심기 활동을 통해 발생한 탄소상쇄량을 Scope 1·2·3 감축목표와 연계하여 '지표 및 목표' 성과 지표로 활용한 사례가 확인되고 있다(SK텔레콤, 2024; J.Front Retailing, 2024). 이를 통해 도시숲은 단순한 환경 관리 요소를 넘어 기후 리스크 대응과 기회 창출을 동시에 고려하는 전략적 자산으로 해석할 수 있다(WEF, 2021).

다만, 본 연구는 다음과 같은 한계점을 지닌다. 첫째, 본 연구는 선정릉 인근 기상관측소 자료를 활용하여 분석을 수행하였으며, 도시숲의 탄소격리 및 생태계 서비스가 국지적인 미기후 조건에 따라 공간적 이질성을 보일 수 있다는 점을 충분히 반영하지 못하였다(Yang et al., 2023). 이에 기반한 상세율은 기업의 잔여배출에 대한 잠재적 기여 수준을 정량적으로 비교하기 위한 가상적 지표(Nowak et al., 2013)이므로, 이를 일반화하여 해석하는 데에는 주의가 필요하다. 둘째, 기업 단위의 총배출량과 단일 도시숲의 탄소격리량 간의 비교는 도심 내 도시숲이 제공하는 탄소격리 효과에 대한 상대적 규모를 탐색하기 위한 지표적 설정(Nowak et al., 2013)으로 공간적, 규모적 해석의 한계가 존재한다. 셋째, 본 연구는 2024년 기준 분석을 위해 2016년 및 2021년에 구축된 수목 인벤토리를 활용하였다. 최신 공식 자료의 부재로 인해 수목의 최근 생장 및 구조 변화가 충분히 반영되지 못했을 가능성이 있어(Esperon-Rodriguez et al., 2023), 향후 신뢰도 높은 평가를 위한 정기적인 수목 인벤토리 갱신 체계가 요구된다(Lin et al., 2021). 넷째, 본 연구에서 활용한 i-Tree Eco Forecast 결과는 수목 생장, 연간 고사율, 신규 식재 등 장기 예측 입력 변수에 내재한 불확실성이 시뮬레이션 과정에서 누적되는 구조를 가지며, 이에 따라 미래 시점의 결과를 실제 관측값에 의한 검증에 한계를 지닌다(Roman et al., 2016; Lin et al., 2021). 선행연구에 따르면 i-Tree Eco 기반 잎 면적, 탄소 저장 및 탄소격리량 추정치는 입력자료의 한계, 샘플링 오차, 모형 구조적 가정 등에 따라 평균 11-13% 수준의 변동 범위를 보이는 것으로 보고되고 있으며(Lin et al., 2021), 특히 도시수목의 연간 고사율 가정은 장기 탄소저장 및 생태계서비스 예측 결과에 매우 민감하게 작용하는 핵심 요인으로 지적되고 있다(Roman et al., 2016; Bugmann et al., 2019). 이러한 불확실성 요인을 고려할 때, 본 연구의 i-Tree Eco Forecast 결과는 미래 탄소격리량의 절대적 규모를 확정적으로 제시하기보다는 고사율과 식재 수준 등 관리 및 확충 조건의 차이에 따른 탄소격리와 관련된 도시숲 정책 수립을 위한 의사결정 지원 자료로 해석하는 것이 타당하다. 이는 장기 도시숲 및 산림 시뮬레이션 연구에서 개별 수치의 정확성보다 시나리오 간 상대적 차이와 경향을 통해 정책적 및 관리적 시사점을 도출할 것을 권고하는 기존 연구의 접근과도 일치한다(Seidl and Lexer, 2013; Maxwell et al., 2022). 마지막으로 최근 기후재무보고에서는 탄소를 자산의 관점에서 접근하려는 논의가 이루어지고 있어(Tripathy, 2024; Olbert et al., 2025), 도시숲의 탄소격리 기능이 기업의 자연자산 관리 전략과 연계될 잠재적 가능성도 제기된다. 다만, 본 연구 결과에서는 도시숲을 재무 및 회계적인 자산으로 실증적으로 계상하기보다는 해당 논의의 개념적 확장 가능성을 탐색하는 수준에 머무는 점에서 한계를 지니며, 절대적 수치보다는 도시숲 탄소격리 지표를 기업의 TCFD 기반 기후리스크 및 기회 요인 공시에 적용 가능한 경로와 논리적 프레임워크를 제시하는 데 연구의 초점을 둔다(GRESB, 2021; C2ES, 2022).

따라서 본 연구는 도시숲의 탄소격리 기능을 기업 배출 구조 및 TCFD 공시 체계와 연계하여 정량적으로 분석함으로써, 도시숲이 대규모 배출 감축 수단을 대체하기보다는 잔여배출 관리를 위한 보완적 전략 수단으로 활용될 수 있음을 실증적으로 제시하였다. 특히 업종별 배출 특성에 따라 도시숲 탄소격리 지표의 상대적 의미가 달라질 수 있음을 보여줌으로써 향후 기업의 기후전략 수립과 TCFD 기반 기후리스크 관리에서 NbS를 보다 전략적으로 해석하여 활용할 수 있는 가능성을 시사한다. 이러한 관점에서 본 연구는 도시숲의 생태적 기능을 기후재무 논의와 연계하여 후속 연구를 위한 분석 틀과 논의의 출발점을 제공한다는 점에서 의의를 가진다.

References

1. 관계부처 합동(2023) 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획(중장기 온실가스 감축목표 포함).

대한민국 정부 보고서.

2. 김종환, 김중윤, 강완모(2024) 도시의 대학 캠퍼스숲 구조와 생태계서비스 평가: 국민대학교를 사례로. 한국지적정보학회지 26(2): 138-156.
3. 나영린, 이도균, 김태진(2022) 가로수의 생태학적 평가를 위한 i-Tree Eco 적용. 한국방재학회논문집 22(2): 15-25.
4. 네이버(2024) 네이버 통합보고서. 네이버 보고서.
5. 롯데케미칼(2025) 2024 롯데케미칼 ESG Report. 롯데케미칼 보고서.
6. LG화학(2025) LG화학 지속가능경영보고서 2024. LG화학 보고서.
7. 박년배(2023) 탄소중립 선언한 국내 주요 기업의 온실가스 배출량 변화 분해분석. 에너지공학 32(2): 23-37.
8. 박용암, 손재진, 최고미, 김지운, 고은진, 김지선, 한성만(2021) 조선왕릉 중부지구 수목실측조사 연구보고서. 문화재청 보고서.
9. 삼성전자(2025) 삼성전자 지속가능경영보고서 2025. 삼성전자 보고서.
10. SK브로드밴드(2025) SK브로드밴드 지속가능경영보고서. SK브로드밴드 보고서.
11. SK텔레콤(2024) SK텔레콤 지속가능경영 보고서. SK텔레콤 보고서.
12. SK하이닉스(2025) SK하이닉스 지속가능경영보고서 2025. SK하이닉스 보고서.
13. 이세림, 조용성, 이수경(2017) 온실가스·에너지 목표관리제 및 배출권거래제 대상 기업의 명세서를 이용한 온실가스 감축 실적 분석. 한국기후변화학회지 8(3): 221-230.
14. 이재영, 한정훈, 손영혜, 김태한(2024) 선릉과 정릉 역사경관림의 i-Tree Eco 기반 탄소중립 효과 분석. 인간식물환경학회지 42(2): 47-55.
15. 최중희, 남궁원, 홍문표, 한갑수, 백인환, 백문기, 이기열, 황규만(2016) '16년 조선왕릉 역사문화경관림 자원조사 연구. (사)한국전통조경학회 보고서.
16. 포스코(2025) 2024 포스코 지속가능경영보고서. 포스코 보고서.
17. 현대제철(2025) 현대제철 2025 지속가능경영보고서. 현대제철 보고서.
18. Adetoye, A. M., L. O. Okojie and D. Akerele(2018) Forest carbon sequestration supply function for African countries: An econometric modelling approach. Forest Policy and Economics 90: 59-66.
19. Bugmann, H., R. Seidl, F. Hartig, F. Bohn, J. Brúna, M. Cailleret, L. François, J. Heinke, A.J. Henrot, T. Hickler, L. Hülsmann, A. Huth, I. Jacquemin, C. Kollas, P. Lasch-Born, M. J. Lexer, J. Merganič, K. Merganičová, T. Mette, B. R. Miranda, D. Nadal-Sala, W. Rammer, A. Ramnig, B. Reineking, E. Rödig, S. Sabaté, J. Steinkamp, F. Suckow, G. Vacchiano, J. Wild, C. Xu and C. P. O. Reyer(2019) Tree mortality submodels drive simulated long-term forest dynamics: Assessing 15 models from the stand to global scale. Ecosphere 10(2): e02616.
20. Carbon Disclosure Project (CDP)(2022) CDP Technical Note: Relevance of Scope 3 Categories by Sector. Technical Note to CDP Worldwide.
21. Center for Climate and Energy Solutions (C2ES)(2022) Recommendations for Improving Disclosure of climate-related opportunities. Arlington, VA: Center for Climate and Energy Solutions.
22. Chen, G., K. K. Singh, J. Lopez and Y. Zhou(2020) Tree canopy cover and carbon density are different proxy indicators for assessing the relationship between forest structure and urban socioecological conditions. Ecological Indicators 113: 106279.
23. Esperon-Rodriguez, M., D. Quintans and P. D. Rymer(2023) Urban tree inventories as a tool to assess tree growth and failure: The case for Australian cities. Landscape and Urban Planning 233: 104705.
24. Forest Research(2022) i-Tree Eco Sample Survey of Belfast's Urban Forest 2020-2021. Farnham, Forest Research.
25. Freitag, C., M. Berners-Lee, K. Widdicks, B. Knowles, G. Blair and A. Friday(2021) The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations. arXiv preprint, arXiv:2102.02622.
26. GRESB(2021) GRESB Infrastructure Update. ESG Strategy Series.
27. Griscom, B. W., J. Adams, P. W. Ellis, R. A. Houghton, G. Lomax, D. A. Miteva, W. H. Schlesinger, D. Shoch, J. V. Siikamäki, P. Smith, P. Woodbury, C. Zganjar, A. Blackman, J. Campari, R. T. Conant, C. Delgado, P. Elias, T. Gopalakrishna, M. R. Hamsik, M. Herrero, J. Kiesecker, E. Landis, L. Laestadius, S.

- M. Leavitt, S. Minnemeyer, S. Polasky, P. Potapov, F. E. Putz, J. Sanderman, M. Silvius, E. Wollenberg and J. Fargione(2017) Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(44): 11645–11650.
28. Hand, K. L., K. J. Doick and J. L. Moss(2019) Ecosystem services delivery by large stature urban trees. Research Report. Edinburgh: Forest Research.
 29. Hansmann, R., I. Whitehead, S. Krajter Ostoić, I. Živojinović, M. Stojanovska, N. Jones, A. Bernasconi, S. Benamar, C. Lelieveld and J. Barstad(2016) Partnerships for urban forestry and green infrastructure delivering services to people and the environment: A review on what they are and aim to achieve. *South-east European Forestry* 7(1): 9–19.
 30. Hilbert, D. R., L. A. Roman, A. K. Koeser, J. Vogt and N. S. van Doorn(2019) Urban tree mortality: A literature review. *Arboriculture & Urban Forestry* 45(5): 167–200.
 31. Hong, W., Z. Ren, Y. Guo, C. Wang, F. Cao, P. Zhang, S. Hong and Z. Ma(2024) Spatiotemporal changes in urban forest carbon sequestration capacity and its potential drivers in an urban agglomeration: Implications for urban CO₂ emission mitigation under China's rapid urbanization. *Ecological Indicators* 159: 111601.
 32. Hutt-Taylor, K. and C. D. Ziter(2022) Private trees contribute uniquely to urban forest diversity, structure and service-based traits. *Urban Forestry & Urban Greening* 78: 127763.
 33. International Energy Agency (IEA)(2020) Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking. Technology Report to the International Energy Agency.
 34. International Energy Agency (IEA)(2021) Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. IEA. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
 35. International Telecommunication Union (ITU) and World Benchmarking Alliance (WBA)(2022) Greening Digital Companies: Monitoring Emissions and Climate Commitments. Geneva: International Telecommunication Union.
 36. International Telecommunication Union (ITU) and World Benchmarking Alliance (WBA)(2025) Greening Digital Companies 2025: Monitoring Emissions and Climate Commitments. Geneva and Amsterdam: International Telecommunication Union and World Benchmarking Alliance.
 37. International Union for Conservation of Nature (IUCN)(2023) Nature-based solutions for corporate climate targets. IUCN Report.
 38. IPCC(2018) Summary for Policymakers. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor and T. Waterfield eds., *Global Warming of 1.5°C*. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 3–24.
 39. IPCC(2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. IPCC.
 40. J. Front Retailing(2024) TCFD Report 2024. Tokyo: J. Front Retailing.
 41. Jo, H. K., H. M. Park and J. Y. Kim(2023) Carbon offset service of urban park trees and desirable planting strategies for several metropolitan cities in South Korea. *Forests* 14(2): 278.
 42. Khemani, K., A. Walberer, S. Sahoo and C. Etienne(2022) How Chemical Companies Can Reduce Scope 3 Emissions Now. Report to Kearney.
 43. Kim, G. H., Y. G. Lee, D. G. Lee and B. J. Kim(2016) Analyzing the cooling effect of urban green areas by using the multiple observation network in the Seonjeongneung region of Seoul, Korea. *Journal of Environmental Science International* 25(11): 1475–1484.
 44. Kim, J., B. K. Sovacool, M. Bazilian, S. Griffiths, J. Lee, M. Yang and J. Lee(2022) Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research & Social Science* 89: 102565.
 45. Kim, J., Y. Kang, D. Kim, S. Son and E. J. Kim(2024) Carbon storage and sequestration analysis by urban park grid using i-Tree Eco and drone-based modeling. *Forests* 15(4): 683.
 46. Lin, J., C. N. Kroll and D. J. Nowak(2021) An uncertainty framework for i-Tree Eco: A comparative study of 15 cities across the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* 60: 127062.

47. Maxwell, C., R. M. Scheller, J. W. Long and P. Manley(2022) Forest management under uncertainty: The influence of management versus climate change and wildfire in the Lake Tahoe Basin, USA. *Ecology and Society* 27(2): 15.
48. Nowak, D. J., A. R. Bodine, R. E. Hoehn III, A. Ellis, S. Hirabayashi, R. Coville, D. S. N. AuyEung, N. F. Sonti, R. A. Hallett, M. L. Johnson, E. Stephan, T. Taggart and T. Endreny(2018) The Urban Forest of New York City. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station Report.
49. Nowak, D. J., D. E. Crane, J. C. Stevens, R. E. Hoehn, J. T. Walton and J. Bond(2008) A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. *Arboriculture & Urban Forestry* 34(6): 347-358.
50. Nowak, D. J., E. J. Greenfield, R. E. Hoehn and E. Lapoint(2013) Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution* 178: 229-236.
51. Olbert, F., M. Kremer, P. Kirkpatrick and J. H. van Lengerich(2025) Carbon as an asset class. Industry Insight Report jointly published by Ernst & Young Ltd and CarbonPool.
52. Raum, S., K. L. Hand, C. Hall, D. M. Edwards, L. O'Brien and K. J. Doick(2019) Achieving impact from ecosystem assessment and valuation of urban trees: The case of i-Tree Eco in Great Britain. *Landscape and Urban Planning* 190: 103590.
53. Rogers, K., K. Sacre, J. Goodenough and K. J. Doick(2015) Valuing London's Urban Forest: Results of the London i-Tree Eco Project. Forestry Commission England Report.
54. Roman, L. A., J. J. Battles and J. R. McBride(2016) Urban Tree Mortality: A Primer on Demographic Approaches. General Technical Report NRS-158. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station.
55. Ross, S., S. Jean-Philippe, W. Clatterbuck, N. Giffen, J. Herold and J. Zobel(2020) i-Tree Eco analysis of landscape vegetation on remediated areas of Oak Ridge National Laboratory. *Open Journal of Forestry* 10: 412-427.
56. Soni, M.(2025) Urban forest assessment and management using i-Tree tools: A case study of New Delhi, India. M. S. Dissertation, TERI School of Advanced Studies.
57. Seidl, R. and M. J. Lexer(2013) Forest management under climatic and social uncertainty: Trade-offs between reducing climate change impacts and fostering adaptive capacity. *Journal of Environmental Management* 114: 461-469.
58. Seymour, F. and P. Langer(2021) Consideration of Nature-Based Solutions as Offsets in Corporate Climate Change Mitigation Strategies. World Resources Institute Working Paper.
59. Sharma, G., J. Morgenroth, D. R. Richards and N. Ye(2025) Advancing urban forest and ecosystem service assessment through the integration of remote sensing and i-Tree Eco: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening* 104: 128659.
60. Shen, G., Z. Song, J. Xu, L. Zou, L. Huang and Y. Li(2023) Are ecosystem services provided by street trees at parcel level worthy of attention? A case study of a campus in Zhenjiang, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20: 880.
61. Singkran, N.(2025) Greening improvement scenarios for assessing the potential of urban carbon sinks and runoff reduction. *Scientific Reports* 15(1): 20801.
62. Sjöman, J. D., E. M. Tuhkanen, M. Mänttari, Ž. Cimbuřová, S. Stålhammar, D. N. Barton and T. B. Randrup(2024) Expectations of i-Tree Eco as a tool for urban tree management in Nordic cities. *Frontiers in Sustainable Cities* 5: 1325039.
63. Szkop, Z.(2020) Evaluating the sensitivity of the i-Tree Eco pollution model to different pollution data inputs: a case study from Warsaw, Poland. *Environmental Socio-Economic Studies* 8(3): 1-23.
64. Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD)(2017) Final Report: Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures. Financial Stability Board.
65. Tembey, G., T. Sexton, C. Richard, R. Palma and J. H. Mohr(2023) A Net Zero Plan for the Semiconductor Industry. Research Report to the Boston Consulting Group.

66. Tripathy, A.(2024) MCSC Corporate Climate Finance Primer. Research Report to the Massachusetts Institute of Technology. MIT Climate & Sustainability Consortium, Massachusetts Institute of Technology.
67. UNESCO(2002) Report of the Twenty-fifth Session of the World Heritage Committee. WHC-01/CONF.208/24. UNESCO.
68. United Nations(2015) Paris Agreement. United Nations.
69. Korthuis, A., B. Drion, M. Gerhard, M. van den Biggelaar, P. Dingkuhn, S. Mikolajczyk, F. Tonneijck and E. Mudyazvivi(2024) Responsible use of carbon credits: Guidance for mobilising and vetting buyers. VCM Global Dialogue.
70. Wang, H., Y. Feng and L. Ai(2023) Progress of carbon sequestration in urban green space based on bibliometric analysis. *Frontiers in Environmental Science* 11: 1196803.
71. World Economic Forum (WEF)(2021) Investing in forests: The business case. Insight Report. World Economic Forum.
72. Widney, S., B. C. Fischer and J. Vogt(2016) Tree mortality undercuts ability of tree-planting programs to provide benefits: Results of a three-city study. *Forests* 7(3): 65.
73. WMO(2024) State of the Global Climate 2024. WMO.
74. World Bank and International Telecommunication Union (ITU)(2024) Measuring the Emissions and Energy Footprint of the ICT Sector: Implications for Climate Action. ITU/WB Report.
75. World Bank(2019) Natural Asset and Biodiversity Valuation in Cities. Washington, D.C.: World Bank.
76. World Resources Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)(2024) The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.
77. Yang, Y., J. Ma, H. Liu, L. Song, W. Cao and Y. Ren(2023) Spatial heterogeneity analysis of urban forest ecosystem services in Zhengzhou City. *PLOS ONE* 18(6): e0286800.
78. Yin, R. K.(2014) Case study research: Design and methods. 5th ed. Thousand Oaks, CA: Sage.
79. Zhao, M., Z. Kong, F. J. Escobedo and J. Gao(2010) Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *Journal of Environmental Management* 91: 807-813.
80. Zhao, Q., X. Lin and Y. Wang(2024) Urban forests as nature-based solutions for climate change mitigation and adaptation. *Sustainability* 16(2): 1152.