Journal of Environmental Science International
34(10); 599~610; October 2025
pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2025.34.10.599

ORIGINAL ARTICLE

# i-Tree Eco를 활용한 캠퍼스숲 생태계서비스 가치 평가

**조서영 · 김명성[1)] · 타미랏 솔로몬[2)] · 문현식[3)*]**
경상국립대학교 산림자원학과, [1)]경상국립대학교 산림환경자원학과, [2)]월라이타소도대학 천연자원관리학과,
[3)]경상국립대학교 농업생명과학연구원

# Campus Forest Ecosystem Services Assessment Using i-Tree Eco

**Seo-Yeong Jo, Myung-Sung Kim[1)], Tamirat Solomom[2)], Hyun-Shik Moon[3)*]**
*Department of Forest Resources, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea*
*[1)]Department of Forest Environmental Resources, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea*
*[2)]Department of Natural Resources Management, Wolaita Sodo University, Ethiopia*
*[3)]Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea*

## Abstract

This study evaluated campus forest ecosystem services using an i-Tree Eco at the College of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University. In total, 385 trees were surveyed, with *Diospyros kaki*, *Acer palmatum*, and *Chamaecyparis pisifera* as the most frequent species. The forest removed an estimated 38.2 kg of air pollutants annually, valued at 662,380 KRW, with $O_3$ accounting for the largest share (48.2%) and $PM_{2.5}$ contributing to the second-highest economic value despite the lower removal amounts. Carbon storage and sequestration were estimated at 104.6 tons and 2.767 tons/yr, respectively, equivalent to 72.2 and 1.91 million KRW, respectively. *Liriodendron tulipifera* contributed the most, representing 13.9% of total storage and 19.9% of annual sequestration. An estimated 7.37 ton/yr of $O_2$ was produced. The stormwater runoff reduction effect was estimated at 67.5 $m^3$/yr (12.1 $m^3$/ha). The predominance of ornamental species may partially explain the relatively modest runoff regulatory capacity per unit area. These findings provide useful insights for campus landscape management and may inform urban forest planning strategies aimed at enhancing ecosystem services in highly urbanized areas.

Key words: Air pollutant, Campus forest, Carbon storage, I-Tree Eco, Stormwater runoff

## 1. 서 론

전 세계적으로 도시화가 지속되면서, 현재 인류의 약 55%(40억명)는 도시에 거주하고 있는 것으로 보고되고 있다(UN, World Urbanization Prospects, 2018). 도시의 인구 밀도가 높아지고, 농업지역은 도시지역으로 확장되어 도시의 경계가 점점 넓어지고 있다. 이렇게 개발된 도시들은 주변 지역보다 높은 기온을 유발해 도시열섬 현상이 나타나기도 하며(Kim et al., 2024). 이러한 도시 환경의 변화는 기후변화를 수반하며, 도시 내열 환경을 조절할 수 있는 수단이 필요하다. 그 대응책 중 하나인 도시숲은 도시에 식재된 식생 또는 넓은 의미로는 인접지역에 위치한 산림을 말한다(Miller, 1997). 국내의 도시숲은 도시민이 일상적으로 이용할 수 있는 도시지역 내 도시공원과 산림을 포괄하는 개념으로(Lee et al., 2008), 도시숲은 도시열섬 완화를 포함해

Received 1 September, 2025; Revised 2 October, 2025;
Accepted 14 October, 2025
*Corresponding author : Hyun-Shik Moon, Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea
Phone : +82-55-772-1855
E-mail : hsmoon@gnu.ac.kr

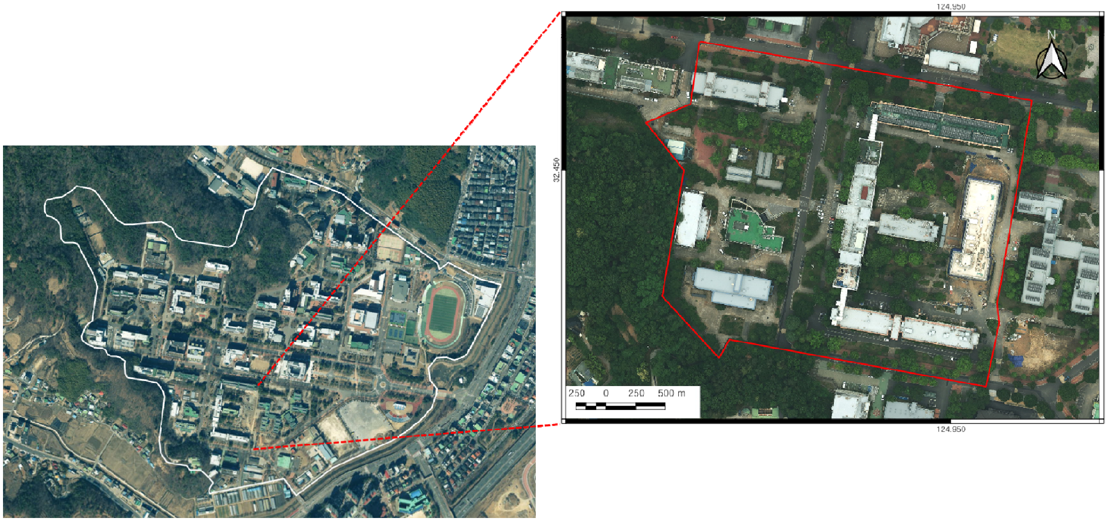


Fig. 1. Study area for this study.

기후완화, 소음 및 미세먼지 저감 등 다기능적 역할을 수행하고 있다(Korea Rural Economic Institute, 2009). 또한 Korea Institute of Science and Technology(2023)에 따르면, 여름철에 도시숲은 평균 기온을 3~7℃ 낮추며, 평균 습도는 9~23% 높이고, 연간 상당량의 $CO_2$ 흡수로 기후 조절 기능이 있는 것으로 알려지고 있다.

도시숲의 다양한 생태계서비스(기후조절, 탄소저장, 오염물질 제거, 열섬완화 등)를 수치로 평가하려는 연구는 국외에서 활발히 진행되어 왔으며, 특히 도시숲의 구조와 기능 관계를 규명하는 데 초점이 맞추어져 있다(Nowak et al., 2002, 2013). Tan et al.(2021)은 일본 교토시의 가로수에 i-Tree Eco 모델을 적용해 서비스 기능을 정량화하고 항목별 경제 가치를 산정하였다. 국내에서도 관련 연구가 점차 늘고 있으며, Lee et al.(2017)은 수도권 도시림의 수자원 공급과 기후 완화 기능을 분석하였고, Kim et al.(2022)은 주요 관목 수종의 탄소 흡수 계수를 산정해 수종별 기능 차이를 제시하였다. 또한, Choi et al.(2025)의 산림미세먼지측정망 거점 주변 산림 및 도시숲, Na et al.(2022)의 도심 가로수, Lee et al.(2024)의 역사경관림과 같이 특정 공간을 대상으로 수행되어 왔다. 그러나 이러한 대상지는 생활권 접근성이 제한적이거나 실제 이용 측면에서 한계가 있다.

대학 캠퍼스숲은 보다 넓은 면적과 일반 도시공원과는 다른 구조적 특성과 기능을 가지며, 이에 따라 일반적인 도시숲과는 상이한 이용과 함께 지역 주민들에게 충분한 녹지와 휴식공간을 제공한다(Kim et al,. 2024). 따라서 도시 환경 내에서 생태자산으로 기능할 수 있는 캠퍼스숲의 구조와 생태계서비스 기능을 실증적으로 분석할 필요가 있으나 관련 연구는 드물며, 국내에서는 국민대학교 캠퍼스를 대상으로 한 Kim et al.(2024)의 연구뿐이다.

본 연구는 대학 캠퍼스숲을 도시숲의 한 유형으로 간주하고, i-Tree Eco를 활용하여 조절서비스 기능을 중심으로 그 구조와 생태적 가치를 정량적으로 규명하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 연구대상지

본 연구는 경상남도 진주시 가좌동에 위치한 경상국립대학교 가좌캠퍼스 내 농업생명과학대학 일대(35°09′13″N 128°06′06″E, 5.6ha)에서 수행되었다(Fig. 1). 대상지가 위치한 진주시는 해발 200 m 내외의 완만한 야산으로 둘러싸인 내륙 분지형이며, 남부 내륙인 온대기후 지역으로, 봄과 가을은 대륙성 고기압과 이동성 고기압의 영향을 받아 기온 변화가 크고 일교차가 뚜렷하다. 최근 30년간의 연평균 기온은 약 13.4℃이며,

연강수량은 1,518 mm 정도이다. 계절별로는 여름철 평균 기온 24.9℃로 일사에 의한 최고기온 상승효과가 높고, 겨울철 평균 기온은 1.7℃로 맑고 건조한 날씨를 나타난다(Korea Meteorological Administration, 2025).

경상국립대학교는 1948년 ‘경남도립 초급 농과대학’으로 출발하여 2025년 기준 30,000명의 학생과 교직원이 생활하는 거점국립종합대학으로 발전하였다(Gyeongsang National University, 2025). 이 중 가좌캠퍼스는 약 159.2 ha의 면적으로 전국 대학 캠퍼스 중 상위 10% 이내의 규모에 해당한다. 면적 약 56,588 $m^2$인 농업생명과학대학은 경상국립대의 뿌리와 정체성을 보여주는 상징적 공간으로, 본 연구는 이 캠퍼스 숲을 연구 대상지로 선정하였다.

## 2.2. 현장조사 및 자료수집

농업생명과학대학 주변에 식재되어 있는 교목성 수종을 대상으로 2025년 4월부터 5월까지 1개월간 매목조사를 실시하였다. 조사 항목은 i-Tree Eco 모델 입력자료와 ‘한국형 i-Tree Eco를 활용한 산림미세먼지 측정넷 조사지의 환경·생태적 가치 평가(Choi et al., 2025)’를 기반으로 수종, 흉고직경, 수고, 토지이용, 수관크기, 수관활력도, 수관채광도 등을 포함하였다. 조사 대상목의 수고와 수관기저고는 Haglöf Vertex IV를, 흉고직경은 직경테이프를 사용하여 측정하였다. 수관폭은 동서남북 방향의 수관 끝을 기준으로 줄자를 이용해 측정한 값의 평균으로 사용하였다. 수관활력도는 National Institute of Forest Science(2022)의『제8차 국가산림자원조사 및 산림의 건강·활력도 현지조사 지침서』에 명시된 기준을 적용하여 죽은 가지와 수관의 비율과 잎의 변색 정도를 종합적으로 고려하여 5등급으로 분류하여 평가하였다. 또한 수관채광도를 객관적으로 측정하기 위해 수관 밑에서 어안렌즈로 측정 후 이미지를 Gap Light Analyzer 소프트웨어로 분석하여 수관채광도를 산출했다. 이 방법은 조사자의 주관적 판단 보다 수관 내부 광환경의 구조적 특성을 반영하기 위한 것이다. 수집된 수목의 위치정보는 QGIS 3.42.3 (QGIS Development Team, 2025)을 이용해 수목의 분포 현황을 식생맵으로 나타내었다.

## 2.3. 생태계서비스 가치 평가 방법

본 연구에서 미국 산림청(U.S. Forest Service)과 Davey Institute가 숲의 가치를 평가하기 위해 개발한 i-Tree 프로그램 가운데 i-Tree Eco 모델을 활용하였다. 또한 국립산림과학원은 미 농림부와 함께 협력하면서 국내 도시 환경과 수목 특성을 반영하기 위해 대상지의 위치, 수종별 자료, 기상 정보, 대기오염물질 농도 등을 i-Tree Eco 분석에 적용하였다(Choi et al., 2025). 이 프로그램은 광역 지자체뿐만 아니라 시·군·구 단위 또는 소규모 도시녹지에도 적용 가능하도록 설계되었으며, 각 생태계서비스 항목별로 필요한 수목 구조와 대기·기후 정보를 입력하면 자동으로 관련 산출값을 도출한다(Choi et al., 2025).

본 연구에서는 대기오염물질 저감량, 탄소 저장 및 흡수량, 산소 생산량, 유수 유출 저감량 항목을 통해 대상지의 연간 생태계서비스 가치와 그에 따른 경제적 가치를 산정하였다.

### 2.3.1. 대기오염물질 저감량

본 연구에서는 도시 캠퍼스숲의 생태계서비스 중 대기 중 오염물질을 포집하고 제거하여 대기질을 개선할 수 있는 수목의 대기정화 기능을 정량화하기 위해 i-Tree Eco의 산정 방식을 활용하였다(Nowak et al., 2024). i-Tree Eco 오염물질 제거량 항목은 오존($O_3$), 이산화황($SO_2$), 일산화탄소(CO), 이산화질소($NO_2$), 미세먼지($PM_{10}$), 초미세먼지($PM_{2.5}$)이다. 오염물질 제거량($F$, g/$m^2$/s)은 오염물의 농도($C$, g/$m^3$)와 침강속도($V$_d, m/s)의 곱으로 계산된다(Hicks et al., 1989).

$$F = C \times V_d$$

침강속도($V_d$)는 공기역학적 저항($R_a$), 경계층 저항($R_b$), 수관 저항($R_c$)의 합을 역수로 산정된다.

$$\text{오염물질 침강속도}(V_d) = V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c}$$

각 저항값은 기존의 선행연구(Baldocchi et al., 1987; Lovett, 1994)를 참고하여 설정하였으며, $PM_{2.5}$의 경우 풍속에 따른 침강속도 및 재부유율(resuspension rate)을 반영하였다. $PM_{2.5}$의 침강속도는 Nowak et al.(2013)의 자료를 참고하였다. 풍속별 수목 엽면 값으로 계산하여 특정 구간 값이 없는 경우에

**Table 1.** Number of trees and leaf area of dominant species

| Species | Number of trees | Population percentage | Leaf area percentage | Importance value |
|---|---|---|---|---|
| *Liriodendron tulipifera* | 24 | 6.2 | 16.8 | 23.0 |
| *Chamaecyparis pisifera* | 26 | 6.8 | 15.1 | 21.8 |
| *Acer buergerianum* | 25 | 6.5 | 11.7 | 18.1 |
| *Diospyros kaki* | 62 | 16.1 | 1.7 | 17.8 |
| *Quercus myrsinifolia* | 24 | 6.2 | 9.4 | 15.6 |
| *Chionanthus retusus* | 23 | 6.0 | 6.6 | 12.5 |
| *Zelkova serrata* | 14 | 3.6 | 8.6 | 12.2 |
| *Acer palmatum* | 28 | 7.3 | 3.3 | 10.6 |
| *Prunus x yedoensis* | 17 | 4.4 | 5.3 | 9.7 |
| *Magnolia kobus* | 11 | 2.9 | 3.0 | 5.8 |
| Other species | 131 | 34.0 | 18.5 | 52.3 |
| Total | 385 | 100 | 100 | 199.4 |

는 인접 풍속 사이의 선형 보간법으로 통해 산정하였다. 또한 풍속이 10 m/s 이상일 경우 10 m/s 구간 값을, 풍속이 0 m/s일 때는 침강속도를 0으로 설정하였다.

최종 오염물질 제거량은 지역별 풍속 및 강수량 등 시간 단위 기상자료를 기반으로 시간당 제거량을 누적 계산하고, 각 시간대별 재부유량을 반영하여 산정하였다(Nowak et al., 2013). 하루 제거량은 시간별 제거량의 총합에서 재부유량을 차감한 값으로 계산되었으며, 이를 연간 단위로 환산하여 도시림의 대기정화 기능을 정량화하였다.

### 2.3.2. 탄소 저장 및 격리량 산정

탄소 저장(carbon storage)은 수목의 줄기, 가지, 잎, 뿌리 등 생체조직 및 토양 내에 장기적으로 저장된 탄소의 양이고, 탄소 격리(carbon sequestration)는 광합성을 통해서 대기 중 이산화탄소를 제거하는 과정을 의미한다. 즉, 수목은 광합성을 통해 이산화탄소를 흡수하고, 산소를 방출하며, 이를 지상부(줄기, 가지, 잎) 및 지하부(뿌리) 바이오매스에 저장한다(Choi et al., 2025). 본 연구는 수목의 생체량에서 총 건중량을 추정한 후, 여기에 탄소 전환계수(0.5)를 곱해 탄소 저장량을 산출하였다(Chow and Rolfe, 1989). 개방형 환경에서 자라는 수목의 과대 추정을 방지하기 위해 산림형 바이오매스 방정식을 적용하되, 보정계수(0.8)를 곱하여 총 건중량을 보정하였다(Nowak, 1994).

탄소 저장량과 격리량의 경제적 가치는 해당 국가 또는 지역의 탄소 단가를 기반으로 환산된다. 국내에서는 U.S. Environmental Protection Agency(2015)의 사회적 탄소 비용(Social Cost of Carbon)을 적용한 뒤 환율에 고려하여 환산한다.

### 2.3.3. 산소 생산량

산소 생산은 탄소저장에 기반하여 계산되었으며, i-Tree Eco에서 제공하는 수종별 생체량 방정식과 고사율, 생장률 등을 고려한 보정 과정을 통해 연간 순산소생산량이 도출되었다(Nowak et al., 2007).

$$\text{순산소생산량}(kg/yr) = \text{순탄소흡수량}(kg/yr) \times \frac{32}{12}$$

여기서, 32는 산소 분자($O_2$)의 분자량, 12는 탄소(C)의 원자량을 나타낸다. 이는 광합성 반응식에서 도출된 비율에 해당한다. 해당 산출값은 수목별 흡수량을 기준으로 하며, 산소 생산의 경제적 가치는 국가별 단위 산소 가격 또는 사회적 편익 단가를 곱하여 추정한다(Choi et al., 2025).

### 2.3.4. 유수 유출 저감량

수목의 수관은 강우 시 빗물을 일시적으로 차단하고 저장하여, 이후 증발산 작용을 통해 강우 유출량을 감소시키는 역할을 수행하면서, 도시 수문 조절에 중요한 기


Fig. 2. Tree distribution map of the study area generated using QGIS.

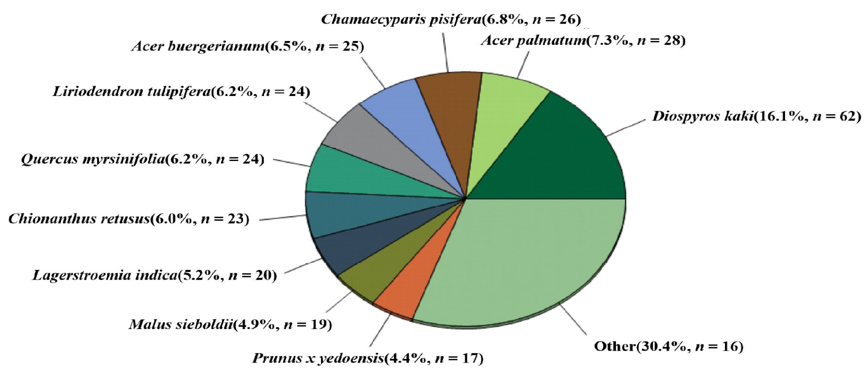


Fig. 3. Tree species composition in the study site.

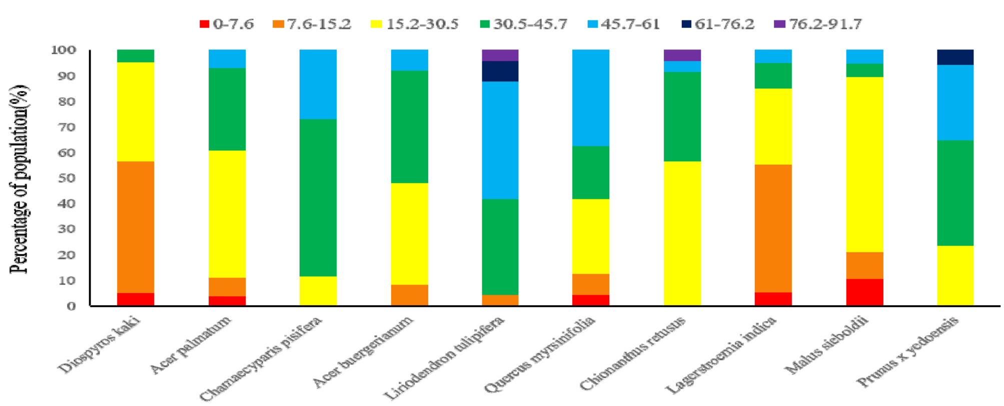


Fig. 4. Distribution of tree DBH classes in the study area.

Table 2. Estimated annual air pollutant removal by species in the study area

| Species | Total tree number | Annual air quality effects(g/yr) | | | | | | Total value (₩/yr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | CO | $O_3$ | $NO_2$ | $SO_2$ | $PM_{10}$ | $PM_{2.5}$ | |
| *Diospyros kaki* | 62 | 6.9 | 316.7 | 33.2 | 6.6 | 232.6 | 7.6 | 11,375 |
| *Acer palmatum* | 28 | 13.1 | 616.5 | 63.6 | 12.2 | 452.8 | 14.7 | 22,141 |
| *Chamaecyparis pisifera* | 26 | 57.8 | 2778.9 | 286.7 | 55.3 | 2041.2 | 66.0 | 99,786 |
| *Acer buergerianum* | 25 | 44.6 | 2149.5 | 222.0 | 42.8 | 1579.1 | 51.2 | 77,190 |
| *Liriodendron tulipifera* | 24 | 64.9 | 3096.4 | 319.3 | 61.5 | 2274.5 | 73.4 | 111,181 |
| *Quercus myrsinifolia* | 24 | 36.0 | 1729.1 | 178.2 | 34.4 | 1270.3 | 40.7 | 62,092 |
| *Chionanthus retusus* | 23 | 25.2 | 1211.9 | 124.8 | 24.2 | 890.3 | 28.8 | 43,518 |
| *Lagerstroemia indica* | 20 | 1.2 | 68.7 | 7.2 | 1.2 | 50.8 | 1.5 | 2,473 |
| *Malus sieboldii* | 19 | 3.4 | 160.2 | 16.5 | 3.2 | 117.7 | 3.8 | 5,753 |
| *Prunus x yedoensis* | 17 | 20.2 | 971.2 | 100.1 | 19.3 | 713.6 | 23.2 | 34,871 |
| Other species | 117 | 111.1 | 5347.3 | 552.0 | 106.2 | 3928.4 | 127.0 | 192,000 |
| Total | 385 | 384.4 | 18446.4 | 1903.6 | 366.9 | 13551.3 | 437.9 | 662,380 |

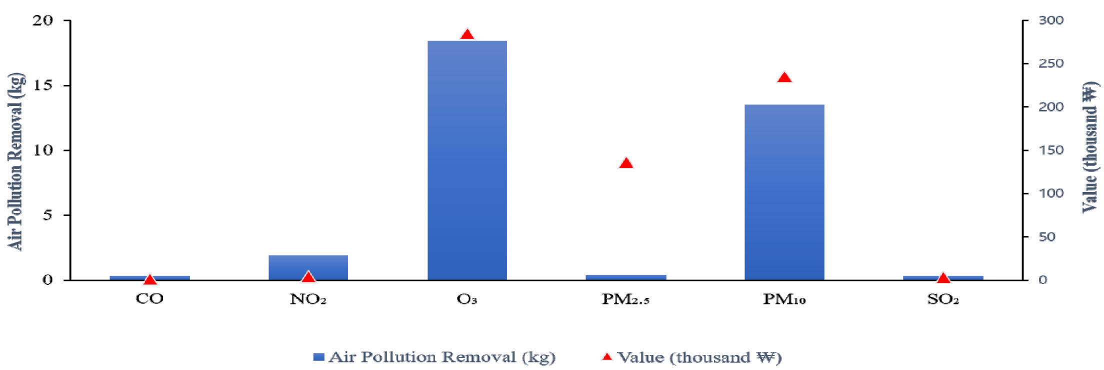


Fig. 5. Annual removal and economic value of air pollutants by urban trees in the study area.

능을 한다(Kim et al., 2024).

i-Tree Eco 프로그램에서는 수종, 수고, 수관폭 등의 수목 구조 정보와 대기 중 관측된 강우량 및 지역 기상 자료를 입력자료로 활용하며, 수목의 유무 간 유출량($m^3$/yr)의 차이를 기준으로 연간 유수 유출 방지량을 산정한다(Choi et al., 2025). 산출된 유수 유출 방지량은 지역별 단위 비용 또는 미국의 평균 단가를 적용하여 경제적 가치로 환산되며, 해당 값은 국가 통화에 맞추어 변환된다(McPherson et al., 2010).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 캠퍼스숲의 구조

본 연구는 경상국립대학교 농업생명과학대학 일대를 대상으로 현장조사를 실시하였다. 현장조사 결과를 바탕으로 QGIS 기반 식생 맵핑을 통해 캠퍼스숲의 공간구조와 수종 분포를 나타내었다(Fig. 2). 총 43종, 385본의 교목이 대상지에 분포하였고, 수관면적은 약 4,274 $m^2$로 나타났다. 캠퍼스숲을 구성하는 43종 중 주요 10종이 전체 수목의 약 69.6%를 차지하였다(Fig. 3). 감나무(*Diospyros kaki*)가 전체의 16.1%로 가장 많았고, 단풍나무(*Acer palmatum*, 7.3%), 화백(*Chamaecyparis pisifera*, 6.8%), 중국단풍(*Acer buergerianum*, 6.5%) 등으로 나타났다(Fig. 3). 개체수 상위 10종 중 8종은 낙엽활엽수로 전체 수목의 56.3%를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

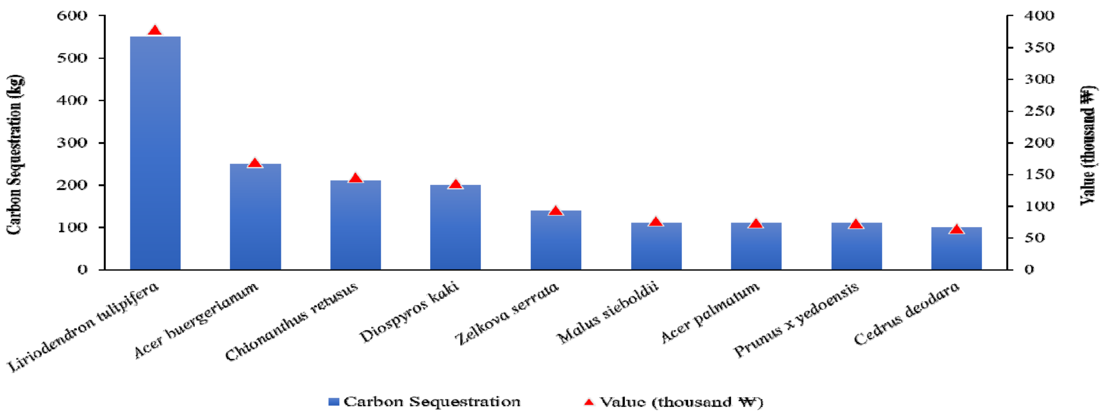


Fig. 6. Carbon sequestration and economic value by species in this study.

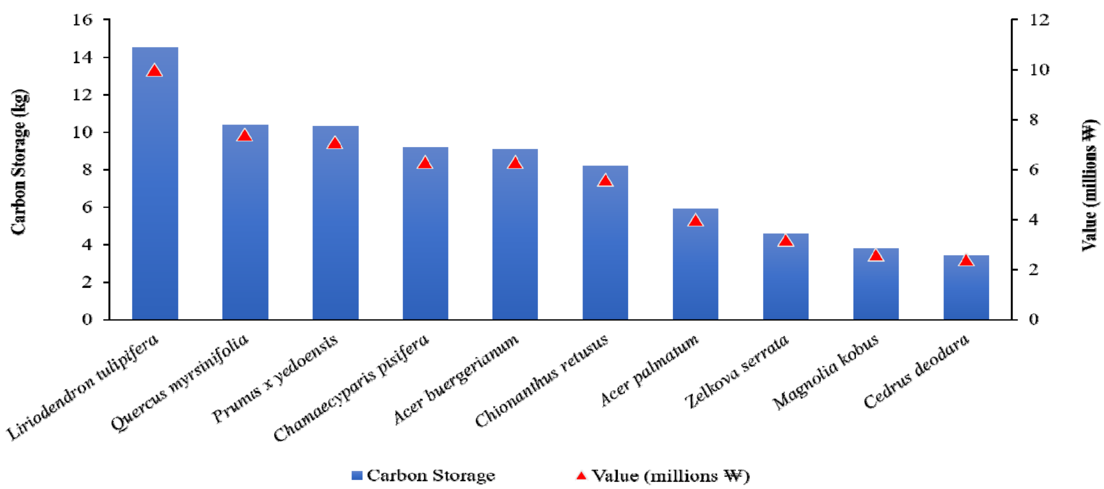


Fig. 7. Carbon storage and economic value by species in this study.

수관면적기준 우점도(LAP)는 수관면적 중에서 주요 우점 수종들이 차지하는 비율로, 상위 우점 수종 10개가 차지하는 수관면적이 81.5%로, 주요 수종이 도시숲의 구조와 기능에 크게 기여하고 있음을 시사한다. 총 중요도지수(IV)는 147.1로 평균 14.71이다. 백합나무(*Liriodendron tulipifera*, 23.0)와 화백(*Chamaecyparis pisifera*, 21.8)의 기여도가 높게 나타났다(Table 1). 이는 국민 대학교의 주요 수종이 은행나무(Ginkgo biloba, IV 24.5), 평균 9.1으로 한 수종에 집중된 구조(Kim et al., 2024)와는 대조적으로, 다양한 수종이 생태계 서비스 제공에 기여하고 있음을 보여준다. 수목의 직경급 분포는 주로 DBH 15.2~30.5 cm 구간에 집중되어 있으며, 해당 구간이 전체의 약 35%를 차지하였다(Fig. 4). 대경목(61 cm이상)의 비율은 5% 미만으로 나타났으며, 이는 도심 환경에서의 경관 관리 용이성을 반영한 식재 전략으로 판단된다.

## 3.2. 캠퍼스숲의 생태계서비스 평가

### 3.2.1. 대기오염물질 저감량

대상지의 수목은 연간 약 35 kg의 대기오염물질을 제거하며, 경제적 가치로는 662,380원 정도이다. 대기

오염물질 총량은 약 18.4 kg의 $O_3$, 13.6 kg의 $PM_{10}$, 1.9 kg의 $NO_2$, 0.4 kg의 $SO_2$, 0.44 kg의 CO, 0.44 kg의 $PM_{2.5}$로, 총 38.2 kg에 달하며, 이에 따른 연간 경제적 가치는 약 662,380원으로 나타났다(Table 2). 오존($O_3$) 제거량이 전체의 절반 이상(48.2%)을 차지하며 가장 높았으며 그에 따른 경제적 가치 역시 약 290,000원으로 나타났다. $PM_{2.5}$(초미세먼지)의 제거량은 약 0.4 kg에 불과하였으나, 단위 질량당 경제 가치가 높아 약 136,000원의 가치가 산정되었다.

수종별 대기오염물질 제거량을 경제적 가치로 환산했을 때 백합나무가 연간 111,181원으로 가장 높게 나타났다. 수목의 특성과 잎의 구조에 따라 오염물질 저감능력이 달라질 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 국민대학교 캠퍼스숲의 경우, 대기정화 기능이 입증된 수종 중 은행나무와 양버즘나무(*Platanus occidentalis*)가 주요 우점 수종으로 식재되어, 2017년 대비 2022년의 연간 오염물질 저감량이 약 23% 증가한 바 있다(Kim et al., 2024). 반면, 본 캠퍼스숲에는 감나무(연간 11,375원), 단풍나무(연간 22,141원) 등 대상지의 우점 수종들이 상대적으로 대기정화 기능이 낮은 수종이 많이 분포해 오염물질 저감 효과가 제한적으로 나타났다. 따라서 향후 캠퍼스숲이나 도시숲 조성 시 오염물질의 저감 효과 기능 차이를 고려한 수목 식재 설계 전략이 필요하다.

#### 3.2.2. 탄소 저장 및 격리량

연구 대상지의 연간 탄소 격리량은 약 2,767 kg으로 1,910,000원의 경제적 가치를, 현재까지 축척된 총 탄소 저장량은 약 104,600 kg으로 72,200,000원의 가치로 나타났다(Fig. 6-7). 탄소관련 생태계 서비스는 특정 수종에 편중되는 경향을 보이며, 전체 수종 중 백합나무 24본은 전체 격리량의 19.9%(550 kg, 378,942원), 저장량의 13.9%(14.5 ton, 10,010,542원)로 탄소 저장과 격리량 모두 높은 수치를 나타났다. 이러한 결과는 기존 선행연구와도 일치하였다. Park and Kang(2010)의 분석에 따르면, 대표 가로수 9개 수종 중 백합나무가 개체당 평균 바이오매스와 탄소 저장량이 가장 높았으며, 타 수종 대비 최대 2배 이상 높은 수치가 보였다. 30년생 백합나무의 탄소 흡수량은 6.8 ton ha/yr로, 소나무나 일본잎갈나무 등 국내 주요 조림수종에 비해 약 1.6~2.2배 높은 수준으로 보고된 바 있다(National Institute of ForestScience, 2008). 하지만 대상지 내에서 가장 많은 개체수를 차지한 감나무 62본의 탄소격리량은 200 kg, 136,348원, 탄소저장량은 2.39 ton, 1,648,313원으로 개체수 대비 단목당 탄소격리량과 저장량이 백합나무에 비해 현저히 낮은 수준으로 이는 수종의 따라 생리적 특성과 생장 능력이 탄소격리 및 저장능력이 크게 달라질 수 있음을 보여준다. 수종 구성의 생태적 기능 차이가 캠퍼스숲의 탄소 기능에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 도시 녹지나 캠퍼스 숲 조성시에 수종별 생태계 서비스 능력을 고려하여 고기능성 수종의 전략적 식재와 기능 균형 확보가 필요하다.

#### 3.2.3. 산소 생산량

나무는 광합성을 통해 산소를 만들며, 한 그루의 나무가 연간 생산하는 산소의 양은 나무가 고정한 탄소량과 직접적으로 관련된다. 이는 수목 생체량의 축적과 연결된다. 대상지의 수목들은 연간 약 7.37 ton의 산소를 생산하는 것으로 나타났다. 탄소저장 및 격리량에서 가장 높게 나타났던 백합나무는 연간 약 1,465.44 kg의 산소를 생산하여 역시 높은 산소 생산량을 보였다(Table 3). 그 뒤를 이어 중국단풍, 화백, 감나무 등은 각각 1,000 kg 내외의 산소를 생산하며 상위에 포함되었으나, 식재량에 비해 산소 생산효율이 낮게 나타났다. 이러한 결과는 개체수보다는 수관면적과 탄소 축적량이 산소 생산량과 밀접한 상관관계를 보였으며, 특히 수관면적이 넓고 생장량이 큰 수종일수록 산소 생산량이 높게 나타났으며. 따라서 광합성 작용이 잎의 수와 면적에 의해 크게 좌우되기 때문이다. 넓은 수관은 더 많은 햇빛을 받아 광합성 총량을 증가가 산소 생산량과 탄소 축적량의 증가로 이어진다.

#### 3.2.4. 유수 유출 저감량

우리나라 대부분의 도시는 고밀도 토지 이용으로 인해 녹지가 제한적으로 존재해  불투수율이 매우 높고 녹지율이 낮아 강우 시 빗물이 지면에 흡수되지 못하고 지표면을 따라 흘러가 유출수가 증가하는 경향을 보인다(Park et al., 2008). 본 연구에서는 연간 약 67.5 ㎥의 유출수가 저감되는 것으로 분석되었으며(Table 8), 이는 약 190,000원의 경제적 가치로 환산된다. 국민대학교 캠퍼스(19.2 ha 기준)의 연간 유출수 저감량 469.5 ㎥, ha당 유출수 저감량 24.5 ㎥(Kim et al., 2024)과

Table 3. Annual oxygen production and structural attributes of major tree species

| Species | Oxygen (kg) | Gross carbon sequestration (kg/yr) | Number of trees | Leaf area (ha) |
|---|---|---|---|---|
| *Liriodendron tulipifera* | 1,465.44 | 549.54 | 24 | 0.39 |
| *Acer buergerianum* | 654.86 | 245.57 | 25 | 0.27 |
| *Chionanthus retusus* | 565.86 | 211.99 | 23 | 0.15 |
| *Diospyros kaki* | 526.16 | 197.31 | 62 | 0.04 |
| *Chamaecyparis pisifera* | 522.63 | 195.99 | 26 | 0.35 |
| *Zelkova serrata* | 363.54 | 136.33 | 14 | 0.20 |
| *Malus sieboldii* | 298.13 | 111.80 | 19 | 0.02 |
| *Acer palmatum* | 289.34 | 108.50 | 28 | 0.08 |
| *Prunus x yedoensis* | 284.85 | 106.82 | 17 | 0.12 |
| *Cedrus deodara* | 254.63 | 95.48 | 4 | 0.09 |

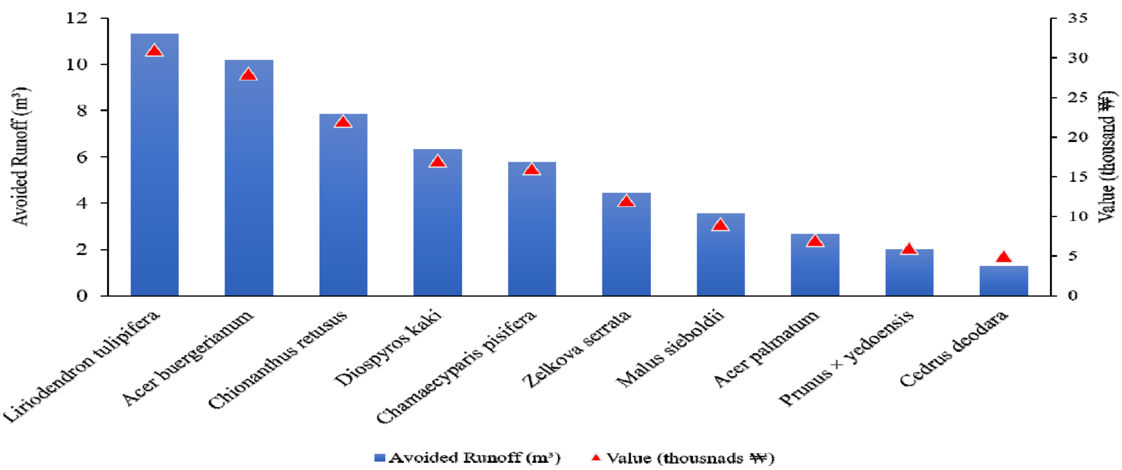


Fig. 8. Avoided runoff and its economic value by tree specie.

비교하면, 본 대상지의 면적은 약 3.4배 작은데 비해 총 유출수 저감량은 약 7배 낮은 것으로 나타났다. 또한 ha당 유출수 저감량 역시 12.1 ㎥로 국민대학교보다 약 2배 낮은 수준이었다. 이러한 유수 유출 저감 효과의 차이는 주로 수목의 구조적 특성, 즉 흉고직경, 수관폭, 엽면적과 같은 요인과 관련된다. 본 연구 대상지에서는 감나무, 단풍나무, 화백이 주요 수종으로 나타났으며, 이는 국민대학교 사례에서 확인된 은행나무와 양버즘나무 등 대형 활엽수에 비해 크기가 상대적으로 작아 단위 면적당 저감 효과가 낮게 산정된 것으로 보인다.

본 연구에서는 백합나무의 연간 유출 저감량이 11.33 ㎥으로 가장 많았으며, 화백(10.17 ㎥), 중국단풍(7.87 ㎥), 가시나무(6.33 ㎥) 등의 수종이 그 뒤를 이었다. 수종들은 상대적으로 넓은 수관면적과 잎의 피복률이 높아 강수 차단 및 토양 침투 유도 효과가 뛰어난 것으로 나타난다. 유수 유출 저감효과는 전반적으로 넓은 수관과 풍부한 엽면적에 기인하는 활엽수에서 높게 나타났다. 그러나 화백과 같이 수관이 치밀한 일부 침엽수도 높은 저감 효과가 나타난 것으로 보아 수종 특성과 구조적 요인을 종합적으로 고려한 도시녹지 설계가 필요하다. 이러한 경향은 중국 Uohe city 도시녹지 사례에서도 확인되었는데, 해당 지역에서는 포플러류,

버드나무, 회화 등 활엽수가 주요 우점 수종으로 보고되었으며, 넓은 수관 구조를 기반으로 1 ha당 약 51 ㎥/yr의 유출 저감 효과가 나타났다(Song et al., 2020). 따라서 본 연구에는 조경 중심, 미감 중심의 식재에서 비롯되어 낮은 저감 효과가 나타났으며, 향후 캠퍼스 숲 관리에서 미적 효과만을 고려한 식재에서 벗어나 활엽수종의 도입과 구조적 개선을 통해 유출 저감 기능을 증진하는 관리 전략이 요구된다.

## 4. 결 론

본 연구는 경상국립대학교 농업생명과학대학 캠퍼스를 대상으로 i-Tree Eco를 활용하여 생태계서비스 기능(대기오염물질 저감량, 탄소 격리량 및 저장량, 산소 생산량, 유수 유출 저감)을 평가하였다. 총 385주의 교목이 출현하였으며, 감나무(*Diospyros kaki*), 단풍나무(*Acer palmatum*), 화백(*Chamaecyparis pisifera*) 등의 개체수가 많은 것으로 나타났다. 캠퍼스숲은 연간 약 38.2 kg의 대기오염물질을 제거하며, 경제적 가치는 약 662,380원으로 산정되었다. 대기오염물질 중 오존은 전체 제거량의 48.2%로 가장 큰 비중을 차지했다. $PM_{2.5}$는 제거량은 적었으나 높은 단위 가치로 두 번째로 높은 경제적 기여를 나타냈다. 탄소 저장량과 흡수량은 각각 104.6 ton, 2.767 ton으로 추정되었으며, 각각 72백만 원, 1백만 원의 경제적 가치로 환산되었다. 백합나무는 총 저장량의 13.9%, 흡수량의 19.9%를 차지하여 가장 높은 기여도를 나타냈다. 연간 산소생산량은 총 7.37 ton으로, 그중 백합나무가 약 1.5 ton으로 가장 높은 값을 보였다. 연간 유출수 저감량은 67.5 ㎥이었으며, 면적당 환산 시 12.1 ㎥/ha의 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 다만 본 연구 대상지는 감나무, 단풍나무, 화백 등 조경성 수종의 비중이 높아 단위면적당 저감 효과가 상대적으로 낮게 나타난 것으로 해석된다.

본 연구는 경상국립대학교 캠퍼스 전체가 아닌 일부 구역을 대상으로 하였으므로, 결과 해석은 해당 구역의 특성에 국한된다. 이 구역은 감나무, 단풍나무, 화백 등 단순 조경용 수종이 다수를 차지하고 있으며, 따라서 향후에는 생태계서비스 기능을 강화할 수 있는 수종 구성으로의 개선이 요구된다.

## REFERENCES


Baldocchi, D. D., Hicks, B. B., Camara, P., 1987, A Canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces, Atmos. Environ., 21(1), 91-101.

Choi, S. M., Yeo, J. H., Kim, C. W., Park, C. R., 2025, Estimation of the environmental & ecological value of Asian Initiative for Clean Air Networks (AiCAN)' sites using Korean i-Tree Eco, J. Korean For. Sci., 114(1), 1-17.

Chow, P., Rolfe, G. L., 1989, Carbon and hydrogen contents of short-rotation biomass of five hardwood species, Wood & Fiber Sci., 30-36.

Gyeongsang National University, 2025, Academic handbook, https://www.gnu.ac.kr/ pub/gnu2025/ VRiBooks.htm?0.

Hicks, B. B., Matt, D. R., McMillen, R. T., 1989, A Micrometeorological investigation of surface exchange of $O_3$, $SO_2$ and $NO_2$: A Case study, Boundary-Layer Meteorology, 47(1-4), 321-336.

Kim, H. K., Kim, H. S., Hong, Y. S., Yun, I. S., Lim, Y. K., Kang, S. K., Kim, C. B., 2022, Sequestration factors development and comparison of carbon storage and uptake by shrubs for urban forests and gardens-*Buxus sinica*, *Euonymus alatus*, *Euonymus japonicus*, *Rhododendron yedoense* and *Spiraea prunifolia*-, J. Kor. Insti. For. Recre., 26(4), 131-139.

Kim, J. H., Kim, J. Y., Kang, W. M., 2024, Assessment of the structure and ecosystem services of an urban campus forest: Focused on Kookmin university, J. Kor. Cadastre Inform. Assoc., 26(2), 138-156.

Kim, J. S., Song, S. K., Lee, S. B., Cho, S. B., 2024, Long-term variations and relationships between urban heat island and air pollutants in Seoul over the past 20 years, J. Kor. Atmos. Environ., 40(2), 209-224.

Korea Forest Service, 2022, Field survey guidelines for the 8th national forest inventory and forest health & vitality.

Korea Forest Service, 2022, The 8th national forest inventory and forest health & vitality field survey guideline, https://www.forest.go.kr.

Korea Institute of Science and Technology, 2023, The role of urban forests in the era of climate crisis, KIST Clean Air Center, Seoul, Korea.

Korea Meteorological Administration, 2025, Weather information portal, https://www.kma.go.kr/neng/index.do.

Korea Rural Economic Institute, 2009, Agricultural outlook 2009: Challenges and new hopes for Korean agriculture and rural communities, KREI, Naju, Korea.
Lee, D. G., Kim, D. H., Kim, E. Y., Ji, C. J., Oh, Y. C., Joo, S. H., Kim, K. M., 2008, Evaluation indicators for creation and management of Urban forest, J. Kor. Environ. Restor. Tech., 11(5), 104-113.
Lee, J. Y., Han, J. H., Son, Y. H., Kim, T. H., 2024, Analysis of the carbon neutrality effects of the Joseon Royal Tombs historical landscape forests based on i-Tree Eco, J. Kor. Insti. Trad. Lands. Architec., 42(2), 47-55.
Lee, S. J., Yoo, S. M., Ham, B. Y., Lim, C. H., Song, C. H., Kim, M. N., Kim, S. J., Lee, W. K., 2017, Ecosystem service assessment of urban forest for water supply and climate mitigation of Seoul metropolitan area, Kor. J. Rem. Sens., 33(6), 1119-1137.
Lovett, G. M., 1994, Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North American, Ecol. Applic., 4(4), 629-650.
McPherson, E. G., Simpson, J. R., Peper, P. J., Crowell, A. M. N., Xiao, Q., 2010, Northern California coast community tree guide: benefits, costs, and strategic planting, PSW- GTR-228, Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-228, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.
Miller, R. W., 1997, Urban forestry planning and management urban greenspace, 2nd Ed., Prentice Hall.
Na, Y. R., Lee, D. G., Kim, T. J., 2022, Application of i-Tree Eco for ecological evaluation of street trees, Jour. Kor. Hazard Mitig., 22(2), 15-25.
National Institute of Forest Science, 2008, White Birch, the champion of securing carbon emissions rights, Seoul, Korea.
National Institute of Forest Science, 2022, Field survey guideline for the 8th national forest inventory and forest health and vitality.
Nowak, D. J., 1994, Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest, in: McPherson, E. G., Nowak, D. J., Rowntree, R. A., (eds.), Chicago's urban forest ecosystem: Results of the Chicago urban forest climate project, Gen. Tech. Rep. NE-186, Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, 83-94.
Nowak, D. J., Crane, D. E., Dwyer, J. F., 2002, Compensatory value of urban trees in the United States, J. Arboric., 28(4), 194-199.
Nowak, D. J., Hoehn, R., Crane, D., 2007, Oxygen production by urban trees in the United States, Arboric, Urb, For., 33(3), 220-226.
Nowak, D. J., Crane, D., Stevens, J., Hoehn, R., Walton, J., Bond, J., 2008, A Ground -based method of assessing urban forest structure and ecosystem services, Arboric, Urb, For., 34, 347-358.
Nowak, D. J., Hoehn, R. E., Bodine, A. R., Greenfield, E. J., O'Neil-Dunne, J., 2013, Urban forest structure, ecosystem services and change in Syracuse, NY, Urban Ecos., 1-23.
Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., Hoehn, R., 2013, Modeled $PM_{2.5}$ removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects, Environ. Pollut., 178, 395-402.
Nowak, D. J., 2024, Understanding i-Tree: 2023 summary of programs and methods, General technical report NRS-200-2023, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 103, doi.10.2737/NRS-GTR-200-2023.
Park, E. J., Kang, K. Y., 2010, Estimation of C storage and annual $CO_2$ uptake by street trees in Gyeonggi-do, Kor. J. Env. Eco., 24(5), 591-600.
Park, E. J., Kang, K. Y., Lee, H. J., 2008, A Comparative analysis of stormwater runoff with regard to urban green infrastructure-A Case study for Bundang newtown, SungNam-, J. Korean Env. Res. Reveg. Tech., 11(6), 1-10.
QGIS home page, http://www.qgis.org/ko/site/.
Song, I. J., Yoon, C. R., 2019, Establishment and utilization of ecosystem service assessment in Seoul, The Seoul Institute.
Song, P., Kim, G., Mayer, A., He, R., Tian, G., 2020, Assessing the ecosystem services of various types of urban green spaces based on i-Tree Eco. Sustainability, 12, 1619.
Tan, X., Hirabayashi, S., Shibata, S., 2021, Estimation of ecosystem services provided by street trees in Kyoto, Japan, Forests, 12(3), 311-332.
United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2018, The World's Cities in 2018: Data booklet (ST/ESA/SER.A/417), United Nations, New York.
U.S. Environmental Protection Agency, 2015, The social cost of carbon, http://www.epa.gov/climatechange/EPAactivities/economics/scc.html.
University Information Disclosure System, 2025, Higher education statistics portal, https://www.academyinfo.go.kr/index.do.

• Master course, Seo-Yeong Jo
Department of Forest Resources, Gyeongsang National University
whtjdud010@gnu.ac.kr
• Undergraduate Student, Myung-Sung Kim
Department of Forest Resources, Gyeongsang National University
kms010421@naver.com
• Assistant Professor, Tamirat Solomon
Department of Natural Resources Management, Wolaita Sodo University
tamiratsolomond@gmail.com
• Professor, Hyun-Shik Moon
Department of Forest Resources, Gyeongsang National University
hsmoon@gnu.ac.kr