

도시공원과 도로변 녹지의 식물체 탄소량 비교 및 순일차생산량과 기후요인인 기온과 강수량과의 관계

이응필 · 정현모 · 강성룡 · 장인영**

국립생태원

Comparison of Standing Carbon in Urban Park and Roadside Green Space, and Their Relationship with Net Primary Production and Climatic Factors, Temperature and Precipitation

EungPill Lee · HeonMo Jeong · Sung-Ryong Kang · Inyoung Jang**

National Institute of Ecology, Seochon, Korea

(Received : 23 October 2024, Revised : 11 November 2024, Accepted : 11 November 2024)

요약

본 연구는 대표적인 도시림인 도시공원과 도로변 녹지의 주요 탄소저장고인 식물체 탄소량의 비교 및 기후요인인 온도와 강수량이 순일차생산량에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 선행연구 결과를 분석하였다. 그 결과 선행연구는 도시공원이 도로변 녹지보다 더 많은 연구가 진행되었다. 그리고 식물체 탄소량, 순일차생산량, 식재밀도, 용적밀도는 도시공원이 도로변 녹지보다 각각 약 1.8 배, 약 3.0 배, 약 6.5 배, 약 1.3 배 높았지만, 석력함량은 도로변 녹지가 도시공원보다 약 1.2 배 높았고, 흉고직경은 도시공원과 도로변 녹지가 차이가 없었다. 또한, 순일차생산량은 연평균기온($R^2=0.0926$, $p=0.0355$), 생육 초기 평균 기온($R^2=0.1169$, $p=0.0174$), 생육 말기 월평균 적산 강수량($R^2=0.1817$, $p=0.0025$)과 유의한 관계가 있었다. 본 연구 결과를 종합적으로 보았을 때 기후요인 중 연평균 기온, 봄철 기온 및 가을철 강수량은 생태계 서비스 감소와 관련이 있음을 확인하였으며, 이러한 영향은 다른 도시림 유형에서도 유사할 것이다. 따라서 순일차생산량 증진을 위해서는 수분 스트레스를 완화할 수 있는 토양 관리가 필요함을 시사한다.

핵심어 : 정주지, 선행연구, 탄소 저장량, 순일차생산량, 환경요인

Abstract

In this study, we analyzed previous research to compare the standing carbon, which are the major carbon reservoirs, in urban park and roadside green space, representative urban forests. We also investigated how climatic factors, such as temperature and precipitation, affect net primary production. The analysis revealed that more research has been conducted on urban park compared to roadside green space. The standing carbon, net primary production, planting density, and bulk density were approximately 1.8 times, 3.0 times, 6.5 times, and 1.3 times higher in urban park than in roadside green space, respectively. However, the gravel content was about 1.2 times higher in roadside green space, and there was no significant difference in the diameter at breast height between urban park and roadside green space. Additionally, net primary productivity was significantly related to the annual average temperature ($R^2=0.0926$, $p=0.0355$), average temperature during the beginning of growth ($R^2=0.1169$, $p=0.0174$), and monthly average of sum of daily precipitations during the end of growth ($R^2=0.1817$, $p=0.0025$). The study confirmed that among the climatic factors, the annual average temperature, spring temperature, and autumn rainfall are related to the reduction of ecosystem services, and this effect is likely to be similar across other types of urban forests. Therefore, it suggests that soil management to alleviate water stress is necessary to enhance net primary production.

Key words : Settlement, Previous Studies, Carbon Storage, Net Primary Production, Environmental Factors

*To whom correspondence should be addressed.
National Institute of Ecology, Seochon, Korea
E-mail : iyjang@nie.re.kr

- EungPill Lee National Institute of Ecology / Associate Researcher (ecomant1@nie.re.kr)
- HeonMo Jeong National Institute of Ecology / Researcher (eimple01@nie.re.kr)
- Sung-Ryong Kang National Institute of Ecology / Team Leader (srkang@nie.re.kr)
- Inyoung Jang National Institute of Ecology / Senior Researcher (iyjang@nie.re.kr)

1. 서론

인간의 활동으로 인한 인위적으로 배출된 CO₂ 농도는 2000년부터 10년에 20ppm씩 증가하면서 2021년 기준 전 세계의 대기 중 약 410ppm 수준으로 나타났고, 2022년에는 일부 지역에서 최대 430ppm 수준까지 나타나면서 지속적으로 증가하고 있는 추세이다(IPCC, 2022; IPCC, 2023). 그리고 지구의 온도는 최근 10년(2011~2020)이 산업화 이전(1850~1990)보다 1.09°C 상승하였고, 2100년에는 온도가 2.2°C에서 최대 3.5°C까지 상승될 것이라 전망하였다(IPCC, 2022; IPCC, 2023).

이에 따라 전 세계는 기후변화를 막기 위해 지구의 온도 상승을 산업화보다 2°C 아래로 억제하여 더 나아가 1.5°C를 달성하도록 촉구하는 파리협정을 체결하였고, UNFCCC(유엔기후변화협약)의 글래스고 기후합의와 우리나라의 「2050 장기저탄소발전전략」은 탄소중립 달성을 위해 자연생태계의 역할을 강조하였다(Jang *et al.*, 2023). 특히 농업, 산림 및 기타 토지 이용(Agriculture, Forestry, and Other Land Use, AFOLU)은 탄소중립을 위한 방안으로 활용되며, 주요 내용은 지속 가능한 농업과 산림, 생태계 보호를 통한 탄소 저장고의 확대이다(IPCC, 2014).

기후변화에 관한 정부간 협의체 보고서(IPCC)의 산정대상인 산림, 초지, 습지, 농경지는 육상생태계에 속하며, 이러한 육상생태계를 대상으로 탄소의 저장량과 흡수량을 정량화하는 연구가 전 세계적으로 이루어지고 있다(Baldocchi *et al.*, 2001; Baldocchi, 2008). 육상생태계 중 산림생태계는 가장 큰 탄소저장고이며, 특히 국내의 경우에는 산림생태계가 많은 면적을 차지하는 만큼 대부분의 연구가 산림생태계를 대상으로 탄소의 저장량과 흡수량을 산정하는 연구들이 진행되었으며, 최근에는 다양한 생태계에서의 탄소 순환이 강조됨에 따라 탄소수지 연구가 활발히 진행되고 있다(McCarl and Schneider, 2001; Jang *et al.*, 2023). 그리고 토지이용변화 및 임업(Land Use-Land Use Change and Forestry, LULUCF) 분야에서는 산림흡수원을 포함하여 정주지의 토지이용을 통한 이산화탄소 감축분을 인정함에 따라 정주지의 이산화탄소 흡수 능력에 대한 중요성이 높아지고 있어 이에 대한 연구가 필요한 실정이다(Korea Environment Institute, 2019).

식물군락의 탄소 흡수 기능을 이해하기 위해서는 현존량(biomass)과 순일차생산량(Net Primary Production, NPP)의 개념이 중요한데 총일차생산량(Gross Primary Production, GPP)은 식물이 광합성을 통해 이산화탄소를 흡수하여 생성한 전체 유기물의 양을 의미하며, 총일차생산량에서 식물 호흡(autotrophic respiration, Ra)에 의해 소비된 양을 제외한 것이 순일차생산량이다(Lee, 2010). 순일차생산량은 식물이 실제로 고정한 탄소의 양을 나타내며, 이는 생태계 내에서 생산자의 생물량을 결정하는 중요한 요소이다(Lee, 2010). 따라서 현존량은 순일차생산량의 결과로 축적된 식물체의 유기물 양을 의미하며, 이는 생태계의 탄소 저장 기능을 이해하는데 핵심 개념이다(Curtis *et al.*, 2002).

전 세계적으로 도시의 면적은 전체 토지 면적의 약 2%를 차지하고 있어 비율은 낮지만, 전 세계 인구의 절반에 가까운 약 39억 명이 도시지역에 거주하고 있고, 국내의 경우에는 급격한 경제성장 이후 전체 인구 중 약 90%가 도시지역에 거주하고 있다(O' Meara, 1999). 그리고 이처럼 많은 유동 인구나 도시경관 요소의 증가는 정주지의 탄소수지에 변화를 주었고, 도시지역은 인간의 활동으로 인하여 79%~98%의 이산화탄소를 배출하고 있다(O' Meara, 1999).

도시공원과 도로변 녹지는 다른 도시림의 형태인 하천변 녹지, 학교숲, 담장 녹화지, 옥상·벽면 녹화 등에 비해 면적이 넓고 관리가 용이한 대표적인 도시림으로 간주되고 있고, 도시공원과 도로변 녹지 내 수목의 식재는 식물체 내 이산화탄소를 고정함으로써 대기 중의 이산화탄소 농도를 저감하기 위한 효과적인 수단으로 보고되고 있다(Laclau, 2003; Son *et al.*, 2016).

최근 이산화탄소 농도 증가에 따른 온도와 강수량의 패턴 변화를 고려하면 식물의 생산력의 정확한 예측은 어려우나 식물의 생산력에 영향을 미치는 환경요인들을 이해하는 것은 식물군락의 탄소 순환과 기후변화 사이의 상호작용을 파악하는 데 중요하며, 식물군락의 지속가능성과 관련하여 그 중요성이 더욱 커지고 있는 실정이다(Vitousek *et al.*, 1986; Cole and Lorimer, 1994; Choi *et al.*, 2001).

따라서 본 연구에서는 대표적인 도시림인 도시공원과 도로변 녹지를 대상으로 식물체 탄소량과 순일차생산량을 산정한 선행연구를 목록화 하고, 관련 연구 결과를 정리하여 정주지의 탄소 저장량 및 순일차생산량 현황을 파악하였다. 또한, 도시공원과 도로변 녹지의 식물체 탄소량 및 순일차생산량의 차이를 확인하고, 순일차생산량과 기후요인 간의 관계를 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 선행연구 수집 및 정리

IPCC GL 상의 정주지 범주에 속해 있는 대표적인 도시림인 도시공원 및 도로변 녹지의 탄소 저장량 및 순일차생산량을 평가하기 위해 국내 연구들을 수집하여 목록화 하였다.

선행연구 검색은 학술연구정보서비스(www.riss.kr), 구글 스칼라(scholar.google.com) 등 검색엔진을 통해 수행하였으며, 검색어는 도시공원, 도로변 녹지, 식물체, 탄소 등을 활용하였다. 그리고 검색된 결과 중 신뢰성 있는 결과의 획득을 위해 동료 평가가 완료되어 발간된 문헌을 분석에 활용하였다.

수집된 선행연구는 크게 저장량 산정 연구와 순일차생산량 산정 연구로 구분하였고, 도시공원과 도로변 녹지의 탄소 저장량 및 순일차생산량과 서식지 환경 특성의 비교를 위해 식물체 탄소량의 결과값과 순일차생산량의 결과값 및 서식지 환경요인(생물적 요인: 식재밀도(tree/ha), 흉고직경(cm), 비생물적 요인: 석력함량(%), 용적밀도(g/cm³))의 결과값을 정리하였다(Table 1).

수집된 연구들을 대상으로 일정한 결과값들을 산출하기 위해서는 통일된 단위가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 저장량 산정에는 ton C ha^{-1} 의 단위로 통일하였고, 순일차생산량을 대상으로 한 연구의 경우에는 시간을 고려하여 $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 의 단위값을 사용하였다. 또한, 위의 단위값 통일을 위해서 선행연구 중 식물체 탄소량 및 순일차생산량이 면적 단위로 제시된 연구들만 활용하였다.

2.2 도시공원 및 도로변 녹지의 식물체 탄소량과 순일차생산량 및 서식지 환경 특성

도시공원 및 도로변 녹지의 식물체 탄소량과 순일차생산량 및 서식지 환경 특성의 차이를 확인하기 위하여 수집한 자료의 정규분포 여부를 확인하기 위해 Kolmogorov-smirnov test를 실시하였고, 정규분포를 따르지 않아($p < 0.05$) 비모수 통계분석(nonparametric analysis)을 사용하였다(No and Jeong, 2002). 환경 구배별 차이의 유의성은 Mann-Whitney U Test와 Median Test로 확인하였다(No and Jeong, 2002). 통계분석의 유의확률은 0.05로 설정하였고, 모든 통계적 분

석은 STATISTICA 7(Statsoft, Inc., Tulsa, OK, USA)을 사용하였다(No and Jeong, 2002).

2.3 순일차생산량과 기후요인과의 관계

도시공원 및 도로변 녹지의 순일차생산량($\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)을 기후변화요소(연평균기온($^{\circ}\text{C}$), 생육 초기 평균 기온($^{\circ}\text{C}$), 생육 중기 평균 기온($^{\circ}\text{C}$), 생육 말기 평균 기온($^{\circ}\text{C}$), 연강수량(mm), 생육 초기 월평균 적산 강수량(mm), 생육 중기 월평균 적산 강수량(mm), 생육 말기 월평균 적산 강수량(mm))와 연결시켜 기후요인이 순일차생산량에 미치는 영향을 알아 보았다(Table 2).

순일차생산량은 선행연구에서 수집한 도시공원과 도로변 녹지의 모든 순일차생산량의 결과값을 사용하였고, 기후요인은 기상청의 방재기상연보 자료를 사용하였다. 특히 식물의 생육단계별 기후요인이 순일차생산량에 미치는 영향을 알아보기 위해 기온과 강수량은 생육 초기(3월부터 5월까지), 생육 중기(6월부터 8월까지), 생육 말기(9월부터 11월까지)로 나누었고, 기온은 각 기간 동안의 평균값을, 강수량은

Table 1. Categories of carbon storage, net primary production, and habitat environmental characteristics from previous studies

| Category | Carbon storage | Net primary production |
|-------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| Result | Standing carbon | Net primary production |
| Habitat environment characteristics | Biotic factor | Planting density |
| | | Diameter at breast height |
| | Abiotic factor | Gravel content |
| | | Bulk density |

Table 2. Data collection of climate factors

| Climate factors | Unit | Methods | Source of data | Period used data |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Annual average temperature | °C | Calculate the average for the monthly average temperatures from january to december | Annual report of automatic weather station data | The period of execution of previous research |
| Average temperature during the beginning of growth | | Calculate the average for monthly average temperature from march to may | | |
| Average temperature during the middle of growth | | Calculate the average for monthly average temperature from june to august | | |
| Average temperature during the end of growth | | Calculate the average for monthly average temperature from september to november | | |
| Annual precipitation | mm | Sum the precipitation from january to december | | |
| Monthly average of sum of daily precipitations during the beginning of growth | | Calculate the monthly average of the sum of daily precipitation from march to may | | |
| Monthly average of sum of daily precipitations during the middle of growth | | Calculate the monthly average of the sum of daily precipitation from june to august | | |
| Monthly average of sum of daily precipitations during the end of growth | | Calculate the monthly average of the sum of daily precipitation from september to november | | |

각 기간 내 월별로 적산값을 구한 후 이를 이용하여 월평균 적산값을 산출하였다.

순일차생산량과 기후변화요소와의 상관관계를 알아보기 위해 단순회귀분석을 시행하였고, 통계분석의 유의확률은 0.05로 설정하였다(No and Jeong, 2002). 이상의 통계학적 분석은 STATISTICA 7(Statsoft, Inc., Tulsa, OK, USA)를 이용하였고, 선형회귀식은 엑셀프로그램(Microsoft Office, 2016)에서 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 선행연구 현황

검색엔진을 통해 수집된 도시공원과 도로변 녹지의 식물체 탄소량과 순일차생산량 및 서식지 환경 특성의 선행연구는 총 10건이었고, 선행연구는 도시공원(10건, 83.3%)이 도로변 녹지(2건, 16.7%)보다 더 많은 연구가 진행되었다(Table 3).

수집된 선행연구 중 식물체 탄소량과 순일차생산량 결과값의 데이터 수는 총 128개(저장량: 80개(62.5%), 생산량:

48개(37.5%)) 이었고, 도시공원(저장량: 60개(75.0%), 생산량: 43개(89.6%))이 도로변 녹지(저장량: 20개(25.0%), 생산량: 5개(10.4%))보다 많았다(Table 3). 또한, 서식지 환경 특성 결과값의 데이터 수는 총 209개(생물적 요인: 98개(46.9%), 비생물적 요인: 111개(53.1%)) 이었고, 생물적 요인 결과값의 데이터 수는 도시공원(식재밀도: 59개(92.2%), 흉고직경: 29개(85.3%))이 도로변 녹지(식재밀도: 5개(7.8%), 흉고직경: 5개(14.7%))보다 많았다(Table 3). 그리고 비생물적 요인에서 석력함량 결과값의 데이터 수는 도로변 녹지(31개(63.3%))가 도시공원(18개(36.7%))보다 많았고, 용적밀도 결과값의 데이터 수는 도시공원과 도로변 녹지 모두 31개로 같았다(Table 3).

국내에서 생태계 유형별 탄소 연구는 산림, 농경지, 습지, 초지에서 각각 82건, 20건, 10건, 6건으로 산림에서 가장 많은 연구가 진행되었고(Jang *et al.*, 2023), 본 연구에서 정주지에 속하는 도시공원과 도로변 녹지는 총 12건으로 습지와 초지보다는 많았지만, 산림과 농경지보다는 적었다. 이러한 결과는 산림생태계가 다른 생태계를 모두 합친 연구보다 많은 것으로 보아 이는 산림생태계 아닌 다른 생태계에 대한 탄소 연구의 수행이 필요하다는 것을 의미하고 있다. 특히

Table 3. Results of previous studies on carbon storage and net primary production, and habitat environment characteristics by urban park and roadside green space used in analysis (SC: Standing Carbon (ton C ha⁻¹), NPP: Net Primary Production (ton C ha⁻¹ yr⁻¹), PD: Planting Density (tree/ha), DBH: Diameter at Breast Height (cm), GC: Gravel Content (%), BD: Bulk Density (g/cm³))

| Ecosystem types | Result | | Habitat environmental factor | | | | Reference |
|----------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | Carbon storage | Net primary production | Biotic factor | | Abiotic factor | | |
| | SC | NPP | PD | DBH | GC | BD | |
| Urban park | 9.9-46.5 (n=4) | - | 147-675 (n=4) | 12.9-17.7 (n=4) | - | - | Gyeonggi Research Institute, 2009 |
| | 58.4 (n=1) | - | 632 (n=1) | 16.2 (n=1) | - | - | Kim, 2011 |
| | 11.6 (n=1) | 0.2 (n=1) | - | - | - | - | Hwang, 2012 |
| | - | 4.8-5.4 (n=2) | 1,012-1,088 (n=2) | 14.1-15.6 (n=2) | - | - | Jung, 2016 |
| | 17.4-115.4 (n=4) | 1.0-6.5 (n=4) | 119-611 (n=4) | 14.7-43.4 (n=4) | - | - | Kim, 2013 |
| | 15.8-18.3 (n=2) | - | - | - | 7.3-39.0 (n=18) | 0.9-1.4 (n=18) | Seo, 2015 |
| | 24.4-38.3 (n=5) | 2.4-3.5 (n=5) | 300-420 (n=5) | 16.5-19.2 (n=5) | - | - | Korea Forest Service, 2020 |
| | 70.2 (n=1) | 3.0 (n=1) | 1,350 (n=1) | 21.8 (n=1) | - | 1.3 (n=1) | Lee, 2020 |
| | 7.7-70.2 (n=12) | - | 164-499 (n=12) | 9.1-17.1 (n=12) | - | 1.2-1.5 (n=12) | Jang, 2022 |
| | 3.5-43.6 (n=30) | 0.4-4.2 (n=30) | 237-2,209 (n=30) | - | - | - | Lee, 2024 |
| Roadside green space | 5.5-31.8 (n=15) | - | - | - | 18.7-50.3 (n=31) | 0.6-1.2 (n=31) | Seo, 2015 |
| | 7.1-12.1 (n=5) | 0.5-0.7 (n=5) | 80-140 (n=5) | 16.5-19.2 (n=5) | - | - | Korea Forest Service, 2020 |

정주지는 도시화로 인한 유입 인구 증가로 인해 면적이 확대되고 있으며(Elvidge *et al.*, 2004; Gallo *et al.*, 2004; Theobald, 2004), 인간의 필요에 따른 토지 이용으로 다양한 도시림 유형이 형성되었으므로 다양한 유형의 도시림을 대상으로 탄소수지 연구가 필요하다.

선행연구에서 도시공원은 도로변 녹지보다 식물체 탄소량과 순일차생산량 그리고 서식지 환경 특성인 생물적 요인 결과값의 데이터 수가 많았지만, 비생물적 요인 결과값의 데이터 수는 적었다. 식물군집의 생산력은 생물적 요인과 비생물

적 요인 등 다양한 환경요인에 의하여 영향을 받으며, 이러한 식물군집의 생산력을 이해하기 위해서는 식물의 생장에 영향을 미치는 환경요인을 파악하는 것이 필수적이기 때문에(Chapin *et al.*, 1987; Bichsel *et al.*, 2008; Klanderud, 2008; Cho *et al.*, 2016) 도시공원과 도로변 녹지의 식물체 탄소량과 순일차생산량을 정확히 산정하기 위해서는 서식지 환경 특성에 대한 부족한 데이터를 확보해야 한다.

3.2 도시공원 및 도로변 녹지의 식물체 탄소량과 순일차생산량 및 서식지 환경 특성

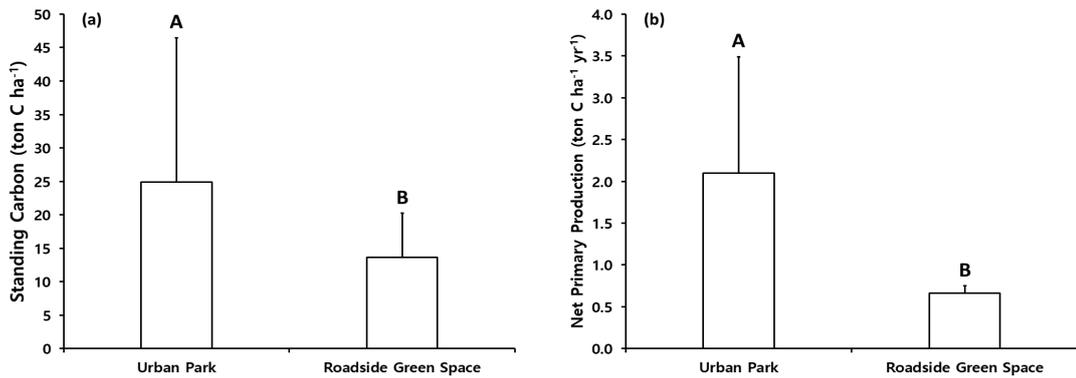


Fig. 1. Standing carbon (ton C ha⁻¹) (a) and net primary production (ton C ha⁻¹ yr⁻¹) (b) measured under urban park and roadside green space. alphabets on the bars mean significant difference among urban park and roadside green space ($p < 0.05$). above bars on the graph mean standard deviation.

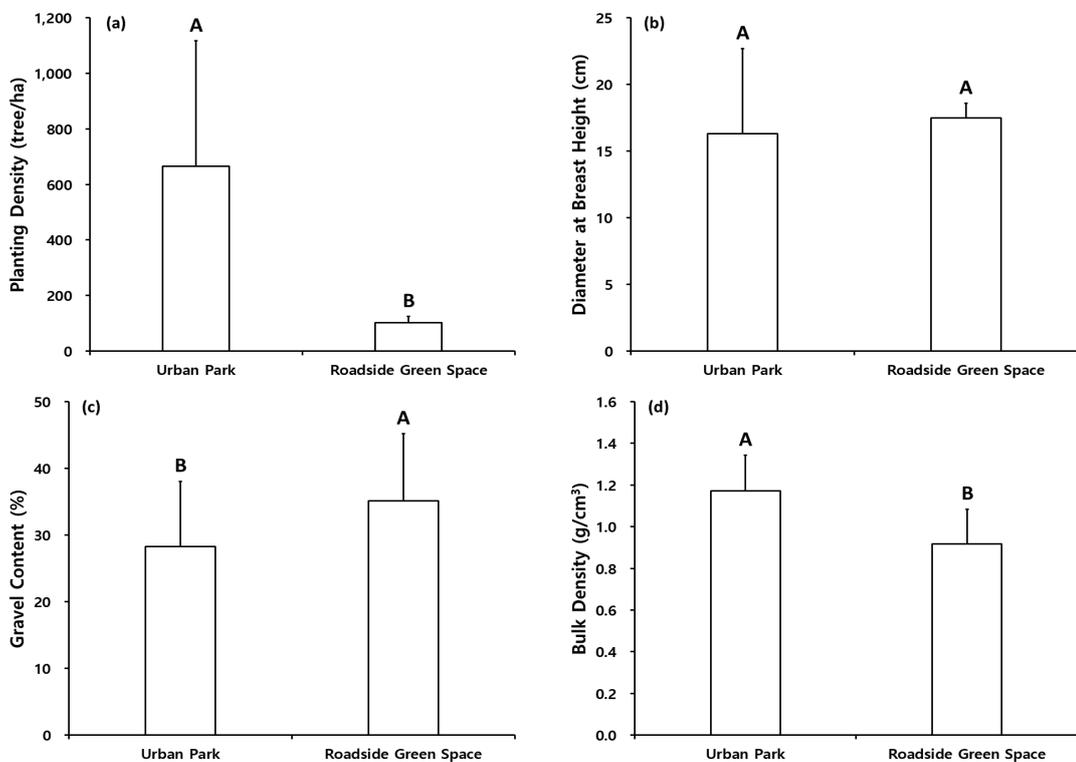


Fig. 2. Planting density (tree/ha) (a), diameter at breast height (cm) (b), gravel content (%) (c), bulk density (g/cm³) (d) measured under urban park and roadside green space. alphabets on the bars mean significant difference among urban park and roadside green space ($p < 0.05$). above bars on the graph mean standard deviation.

식물체 탄소량과 순일차생산량은 모두 도시공원(식물체 탄소량: $24.9 \pm 21.6 \text{ ton C ha}^{-1}$, 순일차생산량: $2.1 \pm 1.4 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)이 도로변 녹지(식물체 탄소량: $13.6 \pm 6.6 \text{ ton C ha}^{-1}$, 순일차생산량: $0.7 \pm 0.1 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)보다 높았다(Fig. 1(a), 1(b)).

그리고 서식지 환경 특성에서 식재밀도와 용적밀도는 도시공원(식재밀도: $666 \pm 451 \text{ tree/ha}$, 용적밀도: $1.2 \pm 0.2 \text{ g/cm}^3$)이 도로변 녹지(식재밀도: $102 \pm 23 \text{ tree/ha}$, 용적밀도: $0.9 \pm 0.2 \text{ g/cm}^3$)보다 높았지만(Fig. 2(a), 2(d)), 석력함량은 도로변 녹지($35.1 \pm 10.1\%$)가 도시공원($28.3 \pm 9.8\%$)보다 높았다(Fig. 2(c)). 또한, 흉고직경은 도시공원($16.3 \pm 6.4 \text{ cm}$)과 도로변 녹지($17.5 \pm 1.1 \text{ cm}$)에서 차이가 없었다(Fig. 2(b)).

본 연구에서 식물체 탄소량과 식재밀도는 도시공원이 도로변 녹지보다 각각 약 1.8 배, 약 6.5 배 높았고, 흉고직경은 도시공원과 도로변 녹지가 차이가 없었다. 식물체는 대기 중의 이산화탄소를 광합성을 통해 식물체에 고정하고, 현존량은 흉고직경이 증가함에 따라 증가하는데(Kimmins, 1987; Curtis *et al.*, 2002), 식재밀도는 도시공원이 도로변 녹지보다 더 높지만, 흉고직경은 도시공원과 도로변 녹지가 차이가 없는 것으로 보아 도시공원의 더 많은 식물체가 광합성을 통해 대기 중의 이산화탄소를 식물체에 고정하였기 때문에 식물체 탄소량은 도시공원이 도로변 녹지보다 더 높은 것으로 판단된다.

또한, 순일차생산량과 용적밀도는 도시공원이 도로변 녹지보다 각각 약 3.0 배, 약 1.3 배 높았지만, 석력함량은 도로변 녹지가 도시공원보다 약 1.2 배 높았다. 최적 분배모델(Optimal partitioning model)에 의하면 식물은 환경요인의 변화에 반응하여 최적의 생장을 나타내기 위해 식물의 기관 또는 구조에 물질을 분배하고(Beranacchi *et al.*, 2000), 특히 토양의 물리적 성질은 식물의 생산성을 결정하는데 중요한 역할을 한다(Jenny, 1980; Chung *et al.*, 1990).

토양의 물리적 요인 중 석력함량과 용적밀도는 공극량, 토양의 양분 및 수분 저장 능력 특성과 관련이 있고, 식물체의 뿌리 발달과 양분이용성 등에 영향을 미친다(Lapen *et al.*, 2001; Dam *et al.*, 2005). 석력함량은 토양 내에서 35% 이상이면 식물체 뿌리의 신장과 토양의 수분 및 영양분 보유 능력이 감소하게 되고, 용적밀도는 사질토양, 식양토, 양질사토에서 각각 1.4 g/cm^3 , 1.6 g/cm^3 , 1.3 g/cm^3 일 때 식물이 최적의 생장을 보인다(Alameda *et al.*, 2012; Tracy *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2015).

본 연구의 결과를 종합적으로 보았을 때 도시공원은 도로변 녹지보다 식물체에 더 많은 탄소를 고정하였다. 이는 식재밀도와 함께 토양의 물리적 환경요인의 차이 때문이고, 특히 도로변 녹지는 석력함량이 높은 토양 특성이 식물의 생장과 탄소 고정 능력을 제한하는 주요 원인으로 판단된다.

3.3 순일차생산량과 기후요인과의 관계

도시공원 및 도로변 녹지의 순일차생산량 평균값은 $2.0 \pm 1.4 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었고, 생육시기별 온도 및 강수량을 비교

하였을 때 온도는 생육 중기 평균 기온($24.6 \pm 0.7^\circ\text{C}$)이 가장 높았고, 생육 말기 평균 기온($14.3 \pm 1.0^\circ\text{C}$), 연평균기온($12.7 \pm 1.0^\circ\text{C}$)과 생육 초기 평균 기온($12.7 \pm 0.9^\circ\text{C}$) 순이었다(Table 4). 그리고 강수량은 연강수량($1435.8 \pm 229.1 \text{ mm}$)이 가장 높았고, 생육 중기 월평균 적산 강수량($307.9 \pm 64.2 \text{ mm}$), 생육 말기 월평균 적산 강수량($95.5 \pm 23.5 \text{ mm}$), 생육 초기 월평균 적산 강수량($57.3 \pm 12.4 \text{ mm}$) 순이었다(Table 4).

또한, 도시공원 및 도로변 녹지의 순일차생산량과 통계적으로 유의한 관계를 보인 것은 연평균기온($R^2=0.0926$, $p=0.0355$), 생육 초기 평균 기온($R^2=0.1169$, $p=0.0174$), 생육 말기 월평균 적산 강수량($R^2=0.1817$, $p=0.0025$) 이었다(Fig. 3(a), 3(b), 3(h)). 이러한 결과는 순일차생산량과 봄철의 평균 기온 및 가을철의 평균 강수량이 증가할수록 감소한다는 것을 의미한다.

온도와 강수는 생태계의 탄소 순환과 관련된 기작들을 조절하는 중요한 인자이고, 특히 식물의 생장에 있어 온도와 강수는 가장 중요한 제한 인자로 작용하고 있다(Walther *et al.*, 2002; Allen *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2011). 그리고 온도는 식물의 광합성 반응을 수행하는 효소에 활성을 부여하고 있고, 수분은 식물 생장에 필요한 물질 중 가장 많이 요구되는 요소이지만, 가장 쉽게 결핍될 수 있는 자원이기도 하다(Otto, 1994; Way and Oren, 2010).

본 연구에서 연평균기온과 봄철의 평균 기온이 증가할수록 순일차생산량은 감소하였는데 이는 일반적으로 생장이 시작되는 시점의 온도의 상승은 식물체의 생장을 촉진시키지만(Zimmerman and Brown, 1971; Ginter-Whitehouse *et al.*, 1983; Graumlich, 1993), 이러한 생육 초기의 온도 상승은 증발산을 증가시켜 토양 내 수분 부족을 초래할 수 있다. 이로 인해 식물체의 생장에 필요한 수분 공급이 어려워지며, 결과적으로는 수분스트레스가 발생해 순일차생산량이 감소하는 것이다. 특히 온대 기후에서는 토양 수분 부족이 식물의 당해년도 생장뿐만 아니라 다음 해의 생장에도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Jones *et al.*, 1993; Yeh and Wensel, 2000).

또한, 순일차생산량은 가을철의 평균 강수량이 증가할수록 감소하였다. 이는 식물의 생활사가 끝나는 가을철에 온도가 낮아지면서 광합성을 비롯한 생리적 활동이 저하되는데 이러한 상황에서 토양 내 과도한 수분 공급은 토양의 공극을 포화시켜 뿌리 세포가 산소를 충분히 이용하지 못하게 하고, 이로 인해 뿌리 부식이 발생하여 식물의 생산량이 감소하기 때문이다(Mihailović *et al.*, 1997; Yordanov *et al.*, 2000; Baquedano and Castillo, 2006; Bailey-Serres and Voisenek, 2008; Wu *et al.*, 2008).

이처럼 온도와 강수량의 변화는 식물의 생산량에 직결되는 환경인자이기 때문에 이산화탄소 증가로 인한 온도와 강수의 변화에 따른 식물의 생산량 변화를 파악해야 한다(Allen *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2011). 특히 순일차생산량은 순생태계생산량을 결정짓는 주요한 요인 중 하나이다(Liang *et al.*, 2003; Litton *et al.*, 2004).

Table 4. Data of net primary production and climate factors by urban park and roadside green space used in analysis (NPP: Net Primary Production (ton C ha⁻¹ yr⁻¹), AAT: Annual Average Temperature (°C), TBG: Average Temperature during the Beginning of Growth (°C), TMG: Average Temperature during the Middle of Growth (°C), TEG: Average Temperature during the End of Growth (°C), AP: Annual Precipitation (mm), PBG: Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the Beginning of Growth (mm), PMG: Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the Middle of Growth (mm), PEG: Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the End of Growth (mm))

| Ecosystem types | Study period | Result NPP | Weather station | Climate factor | | | | | | | | Reference |
|----------------------|--------------|------------|-------------------|----------------|------|------|--------|--------|-------|-------|-------|----------------------------|
| | | | | AAT | TBG | TMG | TEG | AP | PBG | PMG | PEG | |
| Urban park | 2009–2018 | 3.0 | Junggu | 11.8 | 11.5 | 24.1 | 13.8 | 922.0 | 43.4 | 195.2 | 56.1 | Lee, 2020 |
| | 2011–2012 | 1.0 | Jiksan | 12.2 | 11.7 | 25.0 | 14.3 | 1572.3 | 69.7 | 353.5 | 83.8 | Kim, 2013 |
| | | 2.1 | | | | | | | | | | |
| | | 3.7 | | | | | | | | | | |
| | 2011–2012 | 6.5 | Junggu | 11.1 | 10.7 | 23.8 | 13.6 | 1496.0 | 47.8 | 389.9 | 54.1 | Jung, 2016 |
| | | 4.8 | | | | | | | | | | |
| | | 5.4 | | | | | | | | | | |
| | 2017–2019 | 0.2 | Gapyeong bukmyeon | 10.6 | 11.0 | 23.8 | 11.2 | 1202.3 | 66.6 | 252.7 | 67.5 | Korea Forest Service, 2020 |
| | | 2.4 | | | | | | | | | | |
| | | 2.5 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | | 2.6 | | | | | | | | | | |
| | 2022–2023 | 2.2 | Hanam | 12.4 | 13.1 | 24.0 | 13.8 | 1618.8 | 57.0 | 348.6 | 115.6 | Lee, 2024 |
| | | 2.2 | | | | | | | | | | |
| | | 2.2 | | | | | | | | | | |
| | | 2.2 | | | | | | | | | | |
| | | 2.2 | | | | | | | | | | |
| | | 2.2 | | | | | | | | | | |
| | | 2.2 | | | | | | | | | | |
| | | 2.2 | | | | | | | | | | |
| 2.2 | | | | | | | | | | | | |
| 2.2 | | | | | | | | | | | | |
| 2.2 | | | | | | | | | | | | |
| 2.2 | | | | | | | | | | | | |
| 2.2 | | | | | | | | | | | | |
| 2.2 | | | | | | | | | | | | |
| Roadside green space | | 2.2 | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| | 2.2 | | | | | | | | | | | |
| Mean | 2.0 | - | 12.7 | 12.7 | 24.6 | 14.3 | 1435.8 | 57.3 | 307.9 | 95.5 | - | |
| S.D. | 1.4 | - | 1.0 | 0.9 | 0.7 | 1.0 | 229.1 | 12.4 | 64.2 | 23.5 | - | |

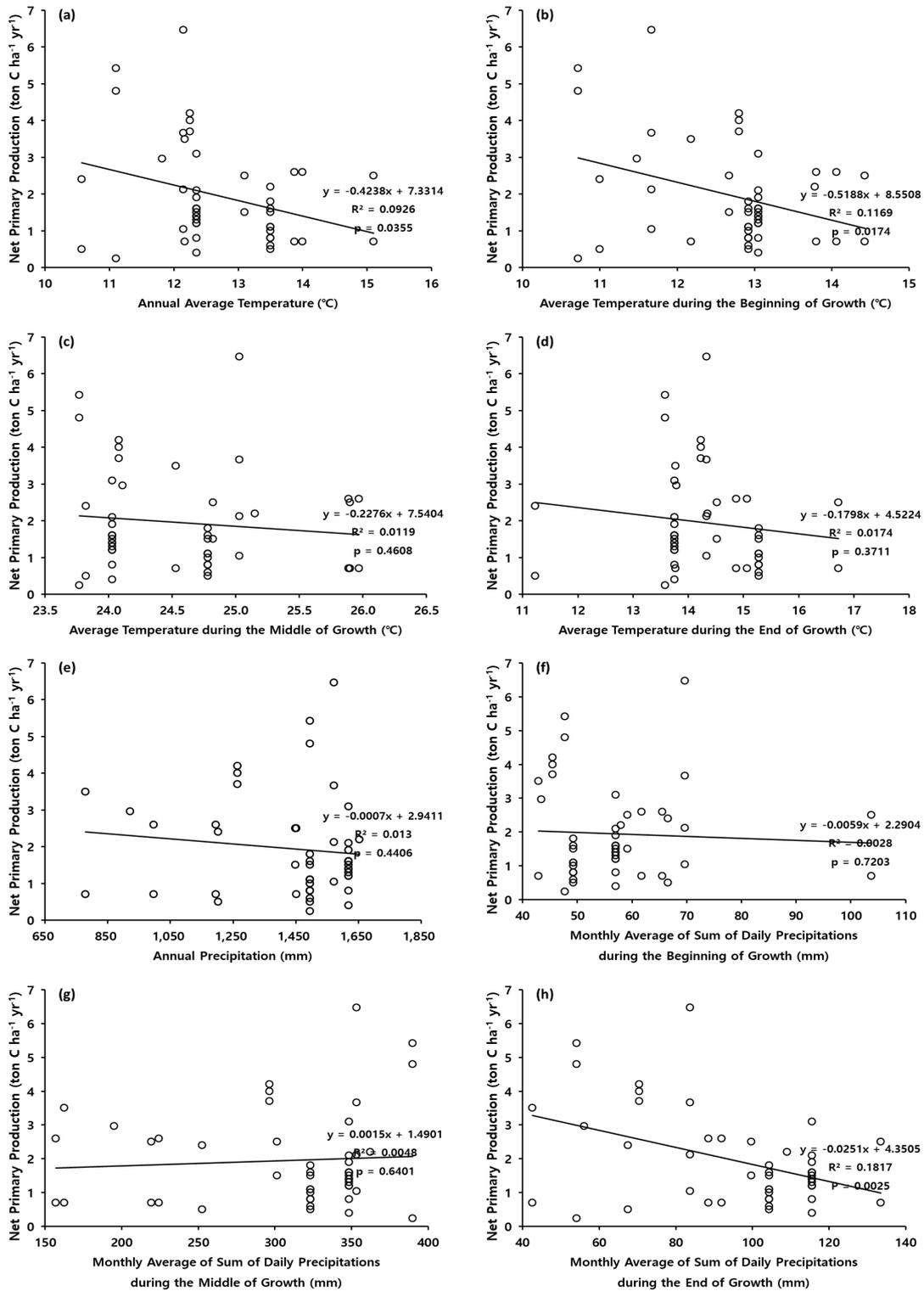


Fig. 3. The relationship among net primary production (ton C ha⁻¹ yr⁻¹) and climate factors (Annual Average Temperature (°C) (a), Average Temperature during the Beginning of Growth (°C) (b), Average Temperature during the Middle of Growth (°C) (c), Average Temperature during the End of Growth (°C) (d), Annual Precipitation (mm) (e), Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the Beginning of Growth (mm) (f), Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the End of Growth (mm) (g)).

따라서 도시공원 및 도로변 녹지의 순일차생산량은 연평균기온과 봄철의 평균 기온 및 가을철의 평균 강수량과 관련이 있었고, 이러한 결과를 바탕으로 연평균기온과 봄철의 평균 기온 및 가을철의 평균 강수량의 평균값 및 표준편차 값을 고려하였을 때 도시공원 및 도로변 녹지의 순일차생산량은 봄철인 3월부터 5월까지의 평균 기온이 최소 11.7°C 이상, 가을철인 9월부터 11월까지의 평균 강수량이 최소 72mm 이상이 되면 순일차생산량은 감소하게 될 것이다.

본 연구에서는 환경요인 중 연평균기온과 봄철의 기온 및 가을철에 내리는 강수량이 정주지의 생태계서비스 감소에 관련되어 있음을 확인하였고, 이처럼 도시공원과 도로변 녹지에서 받는 환경요인의 영향은 대도시에서 조성된 다른 도시림 유형에서도 유사할 것이다. 따라서 이러한 도시 내 수목의 순일차생산량을 증진하기 위해서는 식물체의 수분스트레스를 줄이기 위한 토양 관리가 필수적임을 뜻한다(Mun and You, 2019). 또한, 도시 내 녹지 관리 및 조성 시 서식지 환경의 생물적 요인과 비생물적 요인에 대한 세심한 관리가 탄소 고정 및 생태적 기능 증진에 중요한 역할을 한다는 점을 시사한다.

4. 결론

본 연구는 대표적인 도시림인 도시공원과 도로변 녹지의 주요 탄소저장고인 식물체 탄소량의 비교 및 기후요인인 온도와 강수량이 순일차생산량에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 선행연구 결과를 분석하였다.

그 결과 선행연구는 도시공원이 도로변 녹지보다 더 많은 연구가 진행되었지만, 정주지는 인간의 필요에 따른 토지 이용으로 다양한 도시림 유형이 형성되었으므로 다양한 유형의 도시림을 대상으로 탄소수지 연구가 진행되어야 한다. 그리고 식물체 탄소량, 순일차생산량, 식재밀도, 용적밀도는 도시공원이 도로변 녹지보다 각각 약 1.8 배, 약 3.0 배, 약 6.5 배, 약 1.3 배 높았지만, 석력함량은 도로변 녹지가 도시공원보다 약 1.2 배 높았고, 흉고직경은 도시공원과 도로변 녹지가 차이가 없었다. 따라서 도시공원은 도로변 녹지보다 식물체에 더 많은 탄소를 저장하고, 순일차생산량이 높았는데 이는 식재밀도와 함께 토양의 물리적 환경요인의 차이 때문이고, 특히 도로변 녹지는 석력함량이 높은 토양 특성이 식물의 생장과 탄소 고정 능력을 제한하는 주요 원인으로 판단된다. 또한, 순일차생산량은 연평균기온과 봄철의 평균 기온 및 가을철의 평균 강수량이 증가할수록 감소한다는 것을 확인하였지만, 기후요인과의 관계에서 분석에 사용된 대부분의 순일차생산량 데이터는 도시공원의 것을 고려해야 될 필요가 있다.

본 연구의 결과를 종합적으로 보았을 때 기후요인 중 연평균기온과 봄철의 기온 및 가을철에 내리는 강수량은 정주지의 생태계서비스 감소에 관련되어 있음을 확인하였고, 이처럼 도시공원과 도로변 녹지에서 받는 환경요인의 영향은 다른 도시림 유형에서도 유사할 것이다. 따라서 이러한 도시 내 수목의 순일차생산량을 증진하기 위해서는 식물체의 수분

스트레스를 줄이기 위한 토양 관리가 필수적임을 뜻한다. 또한, 도시 내 녹지 관리 및 조성 시 서식지 환경의 생물적 요인과 비생물적 요인에 대한 세심한 관리가 탄소 고정 및 생태적 기능 증진에 중요한 역할을 한다는 점을 시사한다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2024-16).

References

- Alameda, D., Anten, N. P. R. and Villar, R. (2012). Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. *Soil and Tillage Research*, Vol. 120, pp. 121-129, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.11.013>
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Venetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A. and Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, Vol. 259(4), pp. 660-684, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Bailey-Serres, J. and Voesenek, L. A. C. J. (2008). Flooding stress: acclimations and genetic diversity. *Annual Review of Plant Biology*, Vol. 59, pp. 313-339, DOI : [10.1146/annurev.arplant.59.032607.092752](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092752)
- Baldocchi, D. (2008). Breathing of the Terrestrial Biosphere: Lessons Learned from a Global Network of Carbon Dioxide Flux Measurement Systems. *Australian Journal of Botany*, Vol. 56, pp. 1-26, DOI : <https://doi.org/10.1071/BT07151>
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, Ch., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, U. K. T., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K. and Wofsy, S. (2001). FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem - Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 82(11), pp. 2415-2434, DOI : [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2)
- Baquedano, F. J. and Castillo, F. J. (2006). Comparative

- ecophysiological effects of drought on seedlings of the Mediterranean water-saver *Pinus halepensis* and water-spenders *Quercus coccifera* and *Quercus ilex*. *Trees*, Vol. 20(6), pp. 689–700, DOI : <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0084-0>
- Beranacchi, C. J., Coleman, J. S., Bazzaz, F. A. and McConnaughay, K. D. M. (2000). Biomass allocation in old-field annual species grown in elevated CO₂ environments: no evidence for optimal partitioning. *Global Change Biology*, Vol. 6, pp. 855–863, DOI : <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00370.x>
- Bischel, R. G., Starman, T. W. and Wang, Y. (2008). Nitrogen, phosphorus, and potassium requirements for optimizing growth and flowering of the nobile dendrobium as a potted orchid. *Hortscience*, Vol. 43, pp. 328–332, DOI : <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.2.328>
- Chapin, F. S., Bloom, A. J., Field, C. B. and Waring, R. H. (1987). Plant responses to multiple environmental factors. *BioScience*, Vol. 37, pp. 49–57, DOI : <https://doi.org/10.2307/1310177>
- Cho, L. H., Yoon, J. and An, G. (2016). The control of flowering time by environmental factors. *The Plant Journal*, Vol. 90, pp. 708–719, DOI : <https://doi.org/10.1111/tbj.13461>
- Choi, J. K., Lorimer, C. G., Vanderwerker, J., Cole, W. G. and Martin, G. L. (2001). A crown model for simulating long-term stand and gap dynamics in northern hardwood forests. *Forest Ecology and Management*, Vol. 152, pp. 235–258, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00606-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00606-X)
- Chung, Y. G., Carl, W. and Ramm, C. E. (1990). Relationship between soil-site properties and bamboo (*Phyllostachys bambusoides*) growth. *Journal of Korean Society of Forest Science*, Vol. 79(1), pp. 16–20. [Korean Literature]
- Cole, W. G. and Lorimer, C. G. (1994). Predicting tree growth from crown variables in managed northern hardwood stands. *Forest Ecology Management*, Vol. 67, pp. 159–175, DOI : [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)90014-0)
- Curtis, P. S., Hanson, P. J., Bolstad, P., Barford, C., Randolph, J. C., Schmid, H. P. and Wilson, K. B. (2002). Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 113, pp. 3–19, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00099-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00099-0)
- Dam, R. F., Mehdi, B. B., Burgess, M. S. E., Madramootoo, C. A., Mehuys, G. R. and Callum, I. R. (2005). Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil and Tillage Research*, Vol. 84, pp. 41–53, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.006>
- Elvidge, C. D., Milesi, C., Dietz, J. B., Tuttle, B. T., Sutton, P. C., Nemani, R. and Vogelmann, J. E. (2004). U.S. constructed area approaches the size of Ohio. *EOS-Transactions of the American Journal*, Vol. 85, pp. 233–234, DOI : <https://doi.org/10.1029/2004EO240001>
- Gallo, K. P., Elvidge, C. D., Yang, L. and Reed, B. C. (2004). Trends in night-time city lights and vegetation indices associated with urbanization within the conterminous USA. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, 2003–2007, DOI : <https://doi.org/10.1080/01431160310001640964>
- Ginter-Whitehouse, D. L., Hinckley, T. M. and Pallardy, S. G. (1983). Spatial and temporal aspects of water relations of three tree species with different vascular anatomy. *Forest Science*, Vol. 29, pp. 317–329, DOI : <https://doi.org/10.1093/forestscience/29.2.317>
- Graumlich, L. J. (1993). Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 23, pp. 133–143, DOI : <https://doi.org/10.1139/x93-020>
- Gyeonggi Research Institute. (2009). Quantification of CO₂ Uptake by Urban Trees and Greenspace Management for C Sequestration. Gyeonggi Research Institute. Suwon.
- Hwang, J. W. (2012). A study on the effectiveness of carbon dioxide sequestration of urban park: the case study of Seoul Forest Park. Master thesis, Hanyang University, Seoul.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Pachauri, R. K. and Meyer, L. A. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. pp. 151.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D., Pathak, M., Some, S., Vyas, P., Fradera, R., Belkacemi, M., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S. and Malley, J. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working

- Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. pp. 1–34.
- Jang, I. Y., Jeong, H. M., Han, S. H., Ahn, N. H., Kim, D. Y. and Kang, S. R. (2023). Estimation of Carbon Storages and Fluxes by Ecosystem Type in Korea. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 25(4), pp. 417–425, DOI : <https://doi.org/10.17663/JWR.2023.25.4.417> [Korean Literature]
- Jang, J. H. (2022). A Study on the Restoration of Carbon Storage in Urban Parks due to Urban Development. Ph. D. dissertation, Dankook University, Yongin.
- Jenny, H. (1980). The soil resource: origin and behavior. Springer-Verlag, New York. pp. 377.
- Jones, E. A., Reed, D. D., Mroz, G. D., Liechty, H. O. and Cateelino, P. J. (1993). Climate stress as a precursor to forest decline: paper birch in northern Michigan, 1985–1990. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 23, pp. 229–233, DOI : <https://doi.org/10.1139/x93-030>
- Jung, S. H. (2016). The Estimation of Carbon Budget in Urban Forests. Master thesis, Seoul Women's University, Seoul.
- Kim, C. (2011). Research on Carbon Sequestration of Urban Park: In the Case of Nadry Park in Pangyo. Master thesis, Kyungwon University, Seongnam.
- Kim, K. J. (2013). Characteristics of Carbon Budget According to Planting Types in Urban Park: The Case Study of Dujeong Park. Master thesis, Kongju National University, Kongju.
- Kimmins, J. P. (1987). Forest Ecology. MacMillan Publishing Company, New York. pp. 531.
- Klanderud, K. (2008). Species-specific responses of an alpine plant community under simulated environmental change. *Journal of Vegetation Science*, Vol. 19, pp. 363–372, DOI : [10.3170/2008-8-18376](https://doi.org/10.3170/2008-8-18376)
- Korea Environment Institute. (2019). The Transformation of Urban Park and Green Space Policy for Sustainability. Korea Environment Institute. Sejong.
- Korea Forest Service. (2020). The development of models, technologies, and management/evaluation systems for enhancing carbon sinks and multiple benefits of urban forests in living areas in response to the new climate regime. Korea Forest Service. Daejeon.
- Laclau, P. (2003). Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, Vol. 180, pp. 317–333, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00580-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00580-7)
- Lapen, D. R., Topp, G. C., Gregorich, E. G., Hayhoe, H. N. and Curnoe, W. E. (2001). Divisive field-scale associations between corn yields, management, and soil information. *Soil and Tillage Research*, Vol. 58, pp. 193–206, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00168-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00168-9)
- Lee, E. P. (2020). Studies on Carbon Cycle, Valuation of Ecosystem Services and Relationship with Climate Factors in Conifer Forests of Metropolis and Subalpine Zone in Korea. Ph. D. dissertation, Kongju National University, Kongju.
- Lee, N. Y. (2010). Carbon Cycle in Terrestrial Ecosystems: Net Ecosystem Production (NEP) in a Forest. *Journal of National Park Research*, Vol. 1(3), pp. 163–168. [Korean Literature]
- Lee, T. G. (2024). Analysis of tree carbon sequestration and storage by type of urban park. Master thesis, Cheongju University, Cheongju.
- Liang, N., Inoue, G. and Fujinuma, Y. (2003). A multi-channel automated chamber system for continuous measurements of forest soil CO₂ efflux. *Tree Physiology*, Vol. 23(12), pp. 825–832, DOI : <https://doi.org/10.1093/treephys/23.12.825>
- Litton, C.M., Ryan, M. G. and Knight, D. H. (2004). Effects of tree density and stand age on carbon allocation patterns in postfire lodgepole pine. *Ecological Applications*, Vol. 14(2), pp. 460–475, DOI : <https://doi.org/10.1890/02-5291>
- Liu, W., Liu, J., Dongxue, Y. and Zhao, X. (2015). Influence of ecological factors on the production of active substances in the anti-cancer plant *Sinopodophyllum hexandrum* (Royle) T.S. Ying. *PLoS One*, Vol. 10(4), pp. e0122981, DOI : [10.1371/journal.pone.0122981](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122981)
- McCarl, B. A. and Schneider, U. A. (2001). Greenhouse Gas Mitigation in U.S. Agriculture and Forestry. *Science*, Vol. 294, pp. 2481–2482, DOI : [10.1126/science.1064193](https://doi.org/10.1126/science.1064193)
- Mihailović, N., Lazarević, M., Dželetović, Z., Vučković, M. and Durđević, M. (1997). Chlorophyllase activity in wheat, *Triticum aestivum* L. leaves during drought and its dependence on the nitrogen ion form applied. *Plant Science*, Vol. 129(2), pp. 141–146, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(97\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(97)00189-1)
- Mun, H. T. and You, Y. H. (2019). Soil Environmental Science. Gongju University Press. Gongju.
- No, H. J. and Jeong, H. Y. (2002). Well-Defined Statistical Analysis according to Statistica. Hyeonseol Publisher, Seoul.
- O' Meara, M. (1999). Reinventing Cities for People and the Planet. Worldwatch. Washington.
- Otto, H. J. (1994). Waldökologie. Ulmer-Verlag. Stuttgart. pp. 391.

- Seo, K. W. (2015). Estimation of soil carbon storage by urban green spaces. Ph. D. dissertation, Korea University, Seoul.
- Son, Y. M., Kim, K. N. and Pyo, J. K. (2016). Developing volume equation of street tree and its carbon stock for urban forest in Seoul. *Journal of Agriculture & Life Science*, Vol. 50(1), pp. 95–104, DOI : 10.14397/jals.2016.50.1.95 [Korean Literature]
- Theobald, D. M. (2004). Placing exurban land-use change in a human modification framework. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Vol. 2, pp. 139–144, DOI : [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0139:PELCIA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0139:PELCIA]2.0.CO;2)
- Tracy, S. R., Black, C. R., Roberts, J. A. and Mooney, S. J. (2013). Exploring the interacting effect of soil texture and bulk density on root system development in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 91, pp. 38–47, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.03.003>
- Vitousek, P. M., Ehrlich, P. R., Ehrlich, A. H. and Matson, P. A. (1986). Human Appropriation of the Products of Photosynthesis. *BioScience*, Vol. 36(6), pp. 368–373, DOI : <https://doi.org/10.2307/1310258>
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J., Fromentin, J., Hoegh-Guldberg, O. and Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, Vol. 416, pp. 389–395, DOI : <https://doi.org/10.1073/pnas.1017352108>
- Way, D. A. and Oren, R. (2010). Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: A review and synthesis of data. *Tree Physiology*, Vol. 30(6), pp. 669–883, DOI : <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq015>
- Wu, F. Z., Bao, W. K., Li, F. L. and Wu, N. (2008). Effects of water stress and nitrogen supply on leaf gas exchange and fluorescence parameters of *Sophora davidii* seedlings. *Photosynthetica*, Vol. 46(1), pp. 40–48, DOI : <https://doi.org/10.1007/s11099-008-0008-x>
- Wu, Z., Dijkstra, P., Koch, G. W., Peñuelas, J. and Hungate, B. A. (2011). Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, Vol. 17(2), pp. 927–942, DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02302.x>
- Yeh, H. Y. and Wensel, L. C. (2000). The relationship between tree diameter growth and climate for coniferous species in northern California. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 30, pp. 1463–1471, DOI : <https://doi.org/10.1139/x00-074>
- Yordanov, I., Velikova, V. and Tsonev, T. (2000). Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance. *Photosynthetica*, Vol. 38(1), pp. 171–186, DOI : <https://doi.org/10.1023/A:1007201411474>
- Zimmerman, M. H. and Brown, C. L. (1971). *Trees: Structure and function*. Springer-Verlag, New York. pp. 336.