

Study Note

국립세종수목원 교목 4종의 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량 평가*

– 소나무, 메타세쿼이아, 칠엽수, 이팝나무를 대상으로 –

김학구** · 홍용식** · 임윤경** · 윤이슬** · 도기석*** ·
정찬형**** · 이지문**** · 노회은** · 강신구** · 김찬범**

한국수목원정원관리원 도시생물다양성연구실**, (주)카탈로닉스****, 에스케이임업 주식회사****

Estimation of Carbon Stock and Annual CO₂ Uptake of Four Species at the Sejong National Arboretum*

– *Pinus densiflora*, *Metasequoia glyptostroboides*, *Aesculus turbinata*, *Chionanthus retusus* –

Hak Koo Kim** · Yong Sik Hong** · Yun Kyung Lim** · I Seul Yun** ·
Ki Seok Do*** · Chan Hyung Jung**** · Chi Mun Lee**** · Hoi Eun Roh** ·
Sin Koo Kang** · Chan-Beom Kim**

Division of urban biodiversity research, Korea Arboretum and Gardens Institute**
Catalonix Co., Ltd.***
SK Forest Co., Ltd.****

요약: 본 연구는 세종특별시의 주요 도심 녹지인 국립세종수목원을 대상으로 신규 탄소흡수원으로서의 가능성을 확인하기 위해 수행되었다. 흉고직경 5.5cm 이상 소나무 794본과 가로수로 식재된 이팝나무 154본, 메타세쿼이아 216본, 칠엽수 172본 등 총 1,336본의 수목을 대상으로 4월부터 11월까지 현장조사와 지상 라이다 측정을 수행하였다. 조사 결과를 바탕으로 산림탄소상쇄제도에서 사용하고 있는 연간 이산화탄소 흡수량 추정식을 사용하여 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량을 산정하였다. 주요 수목 4종이 가장 많이 분포하는 흉고직경 12cm 직경급의 탄소 저장량을 비교해본 결과, 이팝나무(0.0136tC/본), 소나무(0.0126tC/본), 메타세쿼이아(0.0092tC/본), 칠엽수(0.0076tC/본) 순으로 나타났다. 그리고 20본을 대상으로 지상라이다 측정자료와 비교해 본 현장조사 자료는 수고 10.0cm, 흉고직경은 1.7cm 차이를 보였다

* 본 연구는 산림청 '생활밀착형 조성사업'의 일환으로 수행된 연구결과임.

First Author: Hak Koo Kim, Tel: +82-44-251-0218, E-mail: hakkoo1@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0002-4300-7590

Corresponding Author: Chan-Beom Kim, Tel: +82-44-251-0211, E-mail: misdb83@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0002-3373-2000

Co-Authors: Yong Sik Hong, Tel: +82-44-251-0216, E-mail: hongfin@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0003-3622-3110

Yun Kyung Lim, Tel: +82-44-251-0220, E-mail: dbrud0224@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0001-8723-3269

I Seul Yun, Tel: +82-44-251-0219, E-mail: yundew@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0001-6115-7050

Ki Seok Do, Tel: +82-70-4355-6042, E-mail: catalonix@catalonix.com, ORCID: 0000-0002-8626-3447

Chan Hyung Jung, Tel: +82-31-637-3606, E-mail: jch@sk.com, ORCID: 0000-0002-8085-6823

Chi Mun Lee, Tel: +82-31-637-3606, E-mail: cm-lee@sk.com, ORCID: 0000-0003-4181-4783

Hoi Eun Roh, Tel: +82-44-251-0281, E-mail: kingsejong@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0002-8538-356X

Sin Koo Kang, Tel: +82-44-251-0197, E-mail: treewor@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0002-7865-2709

Received: 1 December, 2022. Revised: 27 December, 2022. Accepted: 27 December, 2022.

($p < 0.05$). 추후 정확하고 효율적인 측정방법에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 수목원에 식재된 다른 종의 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량을 추가로 구축하면 수목원의 탄소흡수 효과를 홍보하고 국가 NDC 달성에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 장기적으로 도시숲 및 정원에 주로 사용되는 수종의 정확한 탄소 저장량 산정을 위해 주로 사용되는 교목이나 관목의 탄소흡수계수개발도 필요할 것으로 사료된다.

주요어: 탄소 저장량, 탄소 흡수량, 지상라이다

Abstract: This study was conducted to confirm the possibility of a new carbon stock in the Sejong National Arboretum, a major urban greenspace in Sejong-si. This study involved field and ground surveys of 1,336 trees, including 794 *Pinus densiflora* trees with a diameter at breast height (DBH) of above 5.5cm, which are the most planted in the Sejong National Arboretum, *Chionanthus retusus* 154 trees planted, *Metasequoia glyptostroboides* 216 trees, and *Aesculus turbinata* 172 trees as street trees. Measurements were performed from April to November. Based on the results of the survey, the carbon storage and annual carbon stock were calculated using the annual carbon stock estimation equation used in the forest carbon offset projects. As a result of comparing the carbon stock of the 12cm diameter class, which is the most distributed of four major trees, it was found in the order of *C. retusus* (0.0136tC/tree), *P. densiflora* (0.0126tC/tree), *M. glyptostroboides* (0.0092tC/tree), and *A. turbinata* (0.0076tC/tree). In addition, the field survey measurement data compared with terrestrial LiDAR measurement data for 20 trees showed a difference of 10.0cm in tree height and 1.7cm in diameter at breast height ($p < 0.05$). In the future, additional carbon stock and annual uptake of other species planted in the arboretum are expected to promote the carbon uptake effect of the arboretum and contribute to the achievement of the national NDC. In the long term, it is also necessary to develop the carbon uptake factor of trees and shrubs mainly used to calculate the exact carbon uptake amount of trees mainly used in urban forests and gardens.

Keywords: Carbon stock, Carbon uptake, Terrestrial LiDAR

I. 서론

기후위기 시대에 탄소저장 및 흡수원을 늘리기 위한 활동이 의무적으로 시행되고 있으며, 제21차 유엔 기후변화협약(UNFCCC) 당사국 총회 파리협정 이후 온실가스 감축은 전 세계적 흐름이다(Lukas 2015; IPCC 2014; IPCC 2018). 국내에서도 2021년 7월 탄소중립 추진기반 구축 내용이 들어간 한국판 뉴딜 2.0 추진계획을 발표하였으며, 국가 온실가스 감축목표를 달성할 수 있는 기반을 마련하였다. 또한 정부는 2021년 12월에 ‘2050년 대한민국 탄소중립 비전’을 선언하였다. 산림청에서는 2030년까지 산림 부분에서 3,200만톤 흡수에 기여하기로 했으며, 신규 탄소흡수원으로 유휴부지에 도시숲과 정원을 늘리는 계

획을 수립하였다(KFS 2022). 이와 함께 현재까지 탄소흡수원으로 산정되지 않은 수목원들은 신규 탄소흡수원의 한 대안이 될 수 있다. 우리나라의 수목원은 총 71개, 15,269.8ha로 전체 산림면적의 0.2%를 차지하고 있으며, 국립수목원 4개(6,378.0ha), 공립수목원 36개(6,829.8ha), 사립수목원 28개(440.0ha), 학교수목원 3개(1,622.0ha)가 운영 중이다(Korea Forest Service 2022). 수목원은 대부분 녹지로 이루어져 있으며, 다양한 교목과 관목들이 식재되어 있어 탄소흡수원으로 충분히 역할을 할 수 있다.

정원과 도시숲 그리고 수목원은 국가가 운영하는 제도권 안에서 충분히 탄소흡수원으로 인정받을 수 있다. 현재 국가에서 운영 중인 의무적 감축목표 달성을 위한 온실가스배출권거래제와 자발적 탄소시장

에 탄소크레딧을 매매할 수 있는 산림탄소상쇄제도를 활용하게 된다면 수목원을 비롯하여 도시숲과 정원은 탄소흡수원 유지 및 증진활동을 활발하게 하는 교두보가 될 수 있을 것이다. 탄소흡수원을 관리하고 증진시키기 위해 만들어진 산림탄소상쇄제도는 기업, 산주 등이 자발적으로 탄소흡수원 유지 및 증진활동을 하고, 확보된 이산화탄소 흡수량을 산림청에서 인증해 주는 제도이며, 산림을 이용한 탄소 저감활동을 위해 '탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률'을 제정하고 이를 근간으로 2013년부터 운영하고 있다(Korea Forest Service 2013). 또한 인증받은 이산화탄소 흡수량은 시장에서 거래할 수 있는 거래형과 기업 홍보 등에 활용할 수 있는 비거래형으로 참여가 가능하며, 도시지역에서는 식생복구 사업 유형으로 수행할 수 있다(Sa et al. 2022).

국립세종수목원은 장남평야 논 지역을 수목원으로 식생복구한 사례로서 '저탄소 녹색성장 기본법' 시행일인 2010년 4월 14일 이후에 추진된 식생복구사업으로 신규 탄소흡수원으로 등록이 가능하다. 이러한 식생복구 지역은 탄소흡수원 기능을 하고 있으나 정확한 측정·보고·검증이 이루어지고 있지 않아 탄소흡수원 지표통계에 누락되고 있다. 또한 수목의 탄소 저장량 및 이산화탄소 흡수량 산정은 지금까지 산림자원을 정확화하는데 사용되는 산림자원조사의 현장조사 방식이 이용되었다(Bauwens et al. 2016). 산림자원조사는 개체목 측정에 많은 시간이 필요하고 노동 집약적이므로 비용이 많이 든다(Ko et al. 2021). 이러한 기존의 현장조사 방식, 즉 인력을 이용한 전수조사 방법은 비효율적인 방법이다(Hyyppa et al. 2020). 이에 대안으로 산림자원조사의 효율성을 개선할 수 있는 LS(Laser scanning) 기술을 활용하는 방법이 개발되고 있다(Maltamo et al. 2014). 이러한 상황을 개선하기 위해 도시지역에서 산림조사방법에 따른 차이를 비교해보고 가능성을 확인해 볼 필요가 있다.

이 연구는 생물다양성 보전의 방주 역할도 하지만 확실한 이력관리를 통해 탄소흡수원 모범사례가 될 수 있는 수목원을 대상으로 수행되었다. 특히 신규 탄소흡수원으로 등록되기 위한 수목원의 탄소 저장량과

연간 이산화탄소 흡수량을 분석하고 ICT 기술 기반의 LS기술을 이용한 측정 방법의 활용 가능성을 알아보고자 수행되었다.

II. 연구방법

1. 연구 대상지

본 연구는 국내 3번째의 국립수목원으로서 도시 내 조성된 최초의 도심형수목원인 국립세종수목원을 대상으로 수행되었다. 국립세종수목원은 세종특별자치시 연기면 수목원로 136에 위치하고 있으며, 온대 중부권역의 산림생물자원 보전과 국민들에게 산림생물자원의 중요성을 알리는 역할을 담당해 왔다(Korea Forest Service 2020). 총 65.0ha 면적에 전시원 25개, 식물 3,759종 172만본이 식재되어 있다(Figure 1). 주변에는 금강이 위치하고 있으며, 세종호수공원, 중앙공원과 함께 세종시의 중심에서 주요 녹지공간으로 조성되어 있다. 특히 장남평야 논 지역에서 식생복구를 통해 도심 내 산림을 조성하여 온실가스 배출원에서 도심 내 탄소흡수원으로 기능을 담당하고 있다.

국립세종수목원 기상자료는 산림청에서 운영 중인 국가산악기상관측망이 2021년 10월부터 실시간으로 측정하고 자료를 공개하고 있으며(<http://mw.nifos.go.kr/Main/>), 2021년 11월부터 2022년 10월까지 연평균 기온은 12.9°C였다. 월 평균 기온은 1월 -2.1°C, 7월 26.6°C였으며, 평균 풍속은 1월 0.6m/s에서 6월 1.2m/s로 측정되었다. 연 강우량은 456.8mm로 15년(2005년-2019년) 연 평균 강우량 1183.0mm의 절반보다 낮은 강우량을 보였다. 2022년 발생한 극심한 가뭄은 식물생육에 매우 불리한 환경이 되었으나 수목원은 전시원 관리인력과 예산을 보유하고 있어 자동 관수 시스템 구축 등 적절하게 대응하여 연구대상지 수목의 고사 피해는 거의 나타나지 않았다.

2. 재료 및 방법

국립세종수목원에 식재된 다양한 교목 중 연구대상 수목으로 이력 표찰이 있는 소나무(*Pinus densiflora*), 메타세쿼이아(*Metasequoia glyptostroboides*), 칠엽수(*Aesculus turbinata*), 이팝나무(*Chionanthus*

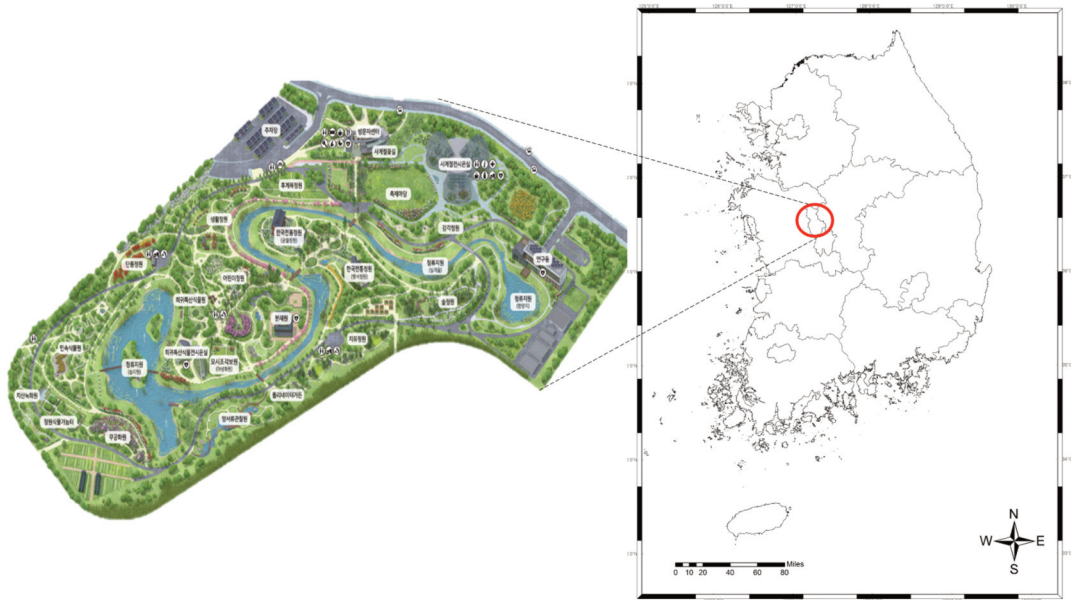


Figure 1. Location of study area.

retusus)를 선정하였다. 대상종은 다음 기준에 따라서 선정하였다. 첫 번째 수목원 내 식재 수량 상위 10종, 두 번째 특정지역 집중적으로 식재되어 모니터링이 적합한 종, 세 번째 식재 규격이 다양하여 데이터의 정확도를 높여주는 종, 네 번째 식재수량 50본 이하이거나 생육상태 불량한 수종은 제외하였다. 마지막으로 이식계획이 없는 수종을 선별하였다.

교목의 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량은 현재 산림탄소상쇄제도에서 사용하고 있으며, 국립산림과학원에서 개발한 추정식(KFRI 2012)을 활용하였다. 도시림, 생활림, 가로수와 같은 도시권역 식생은 일반 산림의 성장량과 상이하여 도시수목전환계수를 통해 결과를 보정하였다(식 1). 연간 이산화탄소 흡수량은 국립세종수목원의 모니터링 기간을 30년으

로 산정하고 추정식을 통해 산정하였다(식 2). 교목 4종에 사용된 재적식 상수, 목재기본밀도, 바이오매스 확장계수, 도시수목전환계수, 뿌리-지상부 비율은 Table 1에 정리하였다(KFRI 2012).

산림자원 측정 방법에 따른 비교분석을 위해서 지상라이다 측정과 현장조사를 11월에 수행하였다. 지상라이다(Trimble X7, Trimble, Colorado, USA)를 사용하여 이팝나무, 칠엽수 20본을 측정하였으며, 수고와 1.2m 높이에서 흉고직경을 추출하여 현장조사 자료와 비교하였다. 모든 자료는 통계프로그램(SPSS version 22.0, IBM Corp, USA)을 사용하여 분석하였다. 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정되었으며, 조사 대상목을 기준으로 측정방법에 따른 차이를 비교하기 위해 Paired t-test를 실시하였다.

$$\text{Carbon storage(kg C)} = (a \times (\text{DBH})^b) \times D \times \text{BEF} \times \text{UCF} \times (1 + R) \times \text{CF} \quad (1)$$

a, b : 재적식 상수, DBH : 흉고직경, D : 목재기본밀도, BEF : 바이오매스 확장계수
UCF : 도시수목전환계수, R : 뿌리-지상부 비율, CF : 탄소분율(IPCC 기본값 적용 0.5)

$$\text{Annual CO}_2 \text{ uptake(kg CO}_2\text{)} = (\text{Carbon storage A} - \text{Carbon storage B}) \times \text{CO}_2\text{/C} \div \text{N} \quad (2)$$

Carbon storag A : N년후 탄소 저장량, Carbon storage B : 현재 탄소 저장량
 $\text{CO}_2\text{/C} = \text{C}$ 일자량(12)에 대한 CO_2 의 분자량(44)의 비를 적용, N: 모니터링 기간

Table 1. Applicable carbon emissions factors for tree group in urban forests

Species	D (kg/m ³)	BEF	UCF	R	V(m ³) = aDBH(cm) ^b	
					a	b
<i>Pinus densiflora</i>	445	1.44	0.8	0.26	0.00009	2.45596
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	370	1.44	0.8	0.26	0.0006	2.53763
<i>Aesculus turbinata</i>	605	1.45	0.8	0.26	0.00009	2.17249
<i>Chionanthus retusus</i>	514	1.45	0.8	0.26	0.00015	2.14570

D : Basic wood density, BEF : Biomass expansion factor, R: Root to shoot ratio

III. 결과 및 고찰

1. 현장조사를 통한 교목 4종 생육특성

교목 4종의 현장조사를 통해 흉고직경급 최대 78cm부터 최소 6cm까지 20개 직경급으로 2cm 단위로 분류가 되었으며, 흉고직경 10cm부터 14cm까지 804본이 분포되어 전체 조사 수목의 60.18%가 이 범위에 속해 있는 것으로 분석되었다. 가장 많은 직경급은 12cm 구간으로 290본(21.71%)이 분포되어 있었다 (Table 2).

대상종의 수고를 비교해 본 결과, 평균 수고는 메타세쿼이아(10.5±4.3m)가 가장 높았으며, 이팝나무(5.4±0.6m)가 가장 낮았다. 소나무는 다양한 직경급이 분포하여 최대수고 36.9m부터 최저수고 1.7m까지 분포하고 있었다. 평균 흉고직경은 소나무(17.4±8.2cm)가 가장 높았으며, 칠엽수(10.5±1.8cm)가 가장 낮았다. 최대 흉고직경은 메타세쿼이아가 최대 78.0cm로 나타났으며, 최저는 5.5cm로 소나무, 칠엽수 등이 분포하고 있었다(Figure 2). 평균 근원직경은 메타세쿼이아(23.7±7.6cm)가 가장 높았으며,

Table 2. Distribution by diameter at breast height according to species

DBH(cm)	<i>P. densiflora</i>	<i>M. glyptostroboides</i>	<i>A. turbinata</i>	<i>C. retusus</i>	Total(%)
78		1			1(0.07)
42	1				1(0.07)
40	2				2(0.15)
38	8				8(0.60)
36	6				6(0.45)
34	10				10(0.75)
32	30				30(2.25)
30	34	1			35(2.62)
28	36	1			37(2.77)
26	41	6			47(3.52)
24	44	5			49(3.67)
22	50	16			66(4.94)
20	26	8			34(2.54)
18	12	4			16(1.20)
16	39	23	2		64(4.79)
14	91	127	17	1	236(17.66)
12	132	24	91	43	290(21.71)
10	131		58	89	278(20.81)
8	76		4	3	83(6.21)
6	25			18	43(3.22)
Total(%)	794(59.43)	216(16.17)	172(12.87)	154(11.53)	1,336(100)

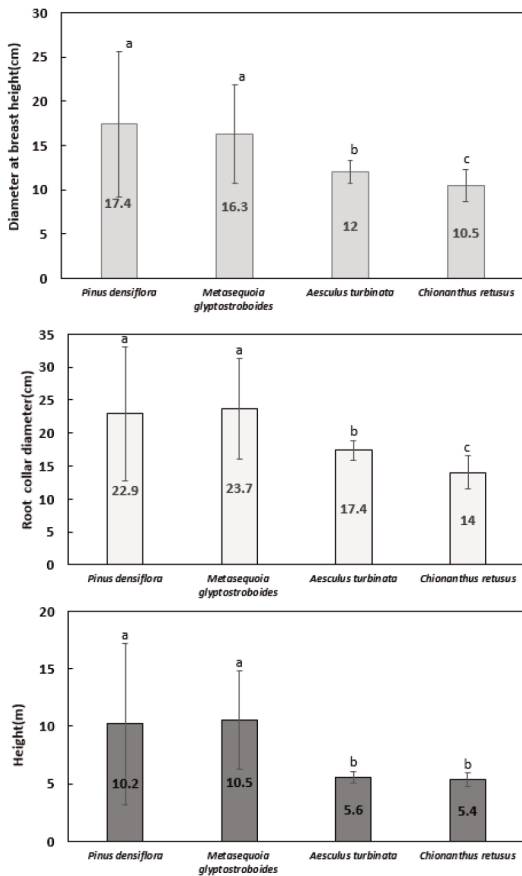


Figure 2. Growth characteristics (Height, RCD, DBH) of each species.

칠엽수(14.0 ± 2.5 cm)가 가장 낮았다. 최대 근원직경은 메타세쿼이아로 91.0cm로 나타났으며, 최저 근원직경은 소나무로 6.2cm로 조사되었다.

일반적으로 도시 수목은 인위적 관리, 경합조건 등 생육환경이 자연산림과 차이가 있다(Jo et al., 2014). 국립세종수목원은 2019년부터 수목을 식재하여 식재 초기 상태로 생장보다는 적응 및 생존에 집중하는 경향을 보였으며, 3년 차인 2022년에도 극심한 가뭄으로 수목생장보다는 적응 및 생존에 집중한 것으로 판단된다.

2. 교목 4종의 탄소 저장량, 연간 이산화탄소 흡수량 및 순 흡수량 추정

교목 4종의 현재 탄소 저장량을 추정한 결과, 소나무는 794본은 33.4ton C, 메타세쿼이아 216본은 5.1ton C, 칠엽수 172본은 1.2ton C, 이팝나무는 1,336

본 1.5ton C으로 총 41.2ton C을 저장하고 있는 것으로 추정하였다. 30년간 수목원을 유지한다는 가정으로 연간 이산화탄소 흡수량을 추정한 결과, 교목 4종은 총 1,268.0ton CO₂-eq를 흡수하고 연 평균 42.3ton CO₂-eq을 흡수하는 것으로 나타났다. 이를 기준으로 30년간 순 흡수량을 추정한 결과, 사업배출량 63.4ton CO₂-eq과 누출량 25.4ton CO₂-eq으로 총 88.8ton CO₂-eq이 손실되어 순 흡수량은 1,179.2ton CO₂-eq 추정되었다.

현재 가장 많이 분포하고 있는 흉고직경 12cm급을 기준으로 탄소저장이 가장 뛰어난 종은 이팝나무가 한그루당 13.6kg C으로 가장 높았으며, 소나무 12.5kg C, 메타세쿼이아 9.2kg C, 칠엽수 7.6kg C 순으로 나타났다. 하지만 나무의 흉고직경이 두 배인 24cm가 되면 소나무가 68.4kg C로 가장 높고 이팝나무 60.3kg C, 메타세쿼이아 53.7kg C, 칠엽수 34.4kg C 순으로 탄소 저장량이 높은 수종이 변화하는 것으로 나타났다(KFRI 2012).

국립세종수목원의 주요 교목 4종의 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량을 분석하면서 수목 생장특성에 따라 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량이 높아지는 시기가 수종마다 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다(Park & Kang 2010; Jo 2013; Kang 2017). 따라서 신규 탄소흡수원으로 도시숲이나 정원을 조성하게 될 때 생육시기에 따라서 이산화탄소 흡수량이 증진될 수 있도록 수종 선정에 대한 검토와 고민이 필요할 것으로 사료된다(Lee et al., 2022).

3. 조사방법에 따른 생육특성 및 탄소 저장량 비교

칠엽수와 이팝나무 동일 수목 20본을 대상으로 하여 수고, 흉고직경 등 현장조사 결과와 지상라이다 측정결과를 비교 분석하였다. 현장조사 결과 측정방법에 따라 평균 수고는 현장조사 5.6 ± 0.2 m, 지상라이다는 5.5 ± 0.2 m로 나타났다. 평균 흉고직경도 현장조사는 11.1 ± 1.1 cm, 지상라이다는 12.8 ± 6.7 cm로 수고와 흉고직경 둘 다 차이를 보였다($p < 0.05$).

산림탄소상쇄제도에 활용하고 있는 탄소 저장량 추정식은 흉고직경급을 기반으로 산정된다. 현장조사 결과는 칠엽수는 11.6cm 평균 흉고직경을 가지고 있

며 이를 추정식을 활용 산정하면 한그루당 7.1kg C 저장하게 된다. 반면 지상라이다 측정결과를 대입하면 평균 흉고직경 12.2cm로 한그루당 7.9kg C 저장하게 되어 0.8kg C 오차가 발생하게 된다. 이팝나무의 경우 지상라이다는 평균 흉고직경 13.3cm로 한그루당 9.5kg C으로 추정되며, 현장조사 평균 흉고직경은 10.6cm로 5.8kg C의 탄소 저장량으로 조사방법으로 인한 차이는 한그루당 3.7kg C 이상 나타나게 된다.

수고와 흉고직경은 측정방법에 따라서 차이를 보였으며 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량에 오차가 발생하게 되는 것으로 분석되었다. 지상라이다를 활용한 방법은 시간과 인력을 아낄 수 있는 방법이지만(Ko et al. 2021) 탄소 저장량의 정확한 산정을 위해서는 오차를 줄일 수 있는 방법론을 찾아야 할 것으로 보인다. 따라서 지상라이다 활용성을 강화하기 위해서는 산림지역과 마찬가지로 도시숲이나 정원에서 분석방법론이나 측정방법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다(Cho 2012; Choi 2022)

IV. 결론 및 제언

기후위기 시대의 탄소흡수원에 대한 측정, 보고, 검증 과정은 매우 중요해지고 있다. 단순 측정과 이산화탄소 흡수량 산정을 벗어나서 이산화탄소 흡수량을 직접적으로 활용할 수 있는 온실가스거래제도나 산림탄소상쇄제도들이 구축되고 있으며, 기업들은 ESG 경영에 활용하고자 하고 있다.

이 연구는 수목원을 대상으로 탄소흡수원인 개체 수목을 측정하고, 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량을 산정하였으며, 기존의 현장조사 방법과 지상라이다 측정 방법을 비교하여 분석하여 활용성을 확인해 보았다. 앞으로 탄소흡수원의 검증 및 보고에 가장 중요한 모니터링을 실시하는데 있어서 수목원의 이력관리시스템을 활용하는 방안을 검토해 봐야 할 것이다. 수목원은 각 개체목에 대한 이력관리시스템을 구축하고 있어 이를 활용하면 탄소흡수원을 관리하는데 모범사례가 될 수 있을 것이다.

또한 국립세종수목원은 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량을 추정하면서 수목에 따라 탄소 저장

량이 높아지는 시기에 차이가 있는 것을 확인하였다. 도시숲이나 정원 그리고 수목원을 신규 탄소흡수원으로 조성하게 된다면 수종별 생육단계를 고려한 식재를 통해 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

그리고 지상라이다 측정기술은 이 연구에서 현장조사 방법과 차이가 발견되었지만 탄소흡수원의 개체목 측정과 검정을 하는데 필요한 인력과 시간을 획기적으로 감소시킬 수 있는 기술이다. 따라서 추가적인 연구를 통해 도시환경에 맞는 측정 방법이나 적정 범위 내로 오차를 줄일 수 있는 방법 등의 개발이 필요할 것이다.

마지막으로 수목원에 식재된 다른 종의 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량을 추가로 구축하면 수목원의 탄소흡수 효과를 홍보하고 국가 NDC 달성에 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 장기적으로 도시숲 및 정원에 주로 사용되는 수종의 정확한 탄소 저장량 산정을 위해 주로 사용되는 교목이나 관목의 탄소흡수계수개발도 필요할 것으로 사료된다.

References

- Bauwens S, Bartholomeus H, Calders K, Lejeune P. 2016. Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and handheld mobile laser scanning. *Forests* 7(6): 127.
- Cho DY, Kim EM. 2012. Extraction of Street Tree Information Using Airborne LIDAR Data. *Journal of Korea Spatial Information Society* 20(6): 45-57. [Korean Literature]
- Choi SW, Kim TG, Kim JP, Kim SJ. 2022. Assessment on the Applicability of a Handheld LiDAR for Measuring the Geometric Structures of Forest. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 25(2): 48-58.
- Hyyppä E, Yu X, Kaartinen H, Hakala T, Kukko A, Vastaranta M, Hyyppä J. 2020. Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV,

- and above-canopy UAV laser scanning for field reference data collection in boreal forests. *Remote Sense* 12(20): 3327.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. 2018. *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*.
- Jo HK, Kim JY, Park HM. 2013. Carbon Storage and Uptake by Evergreen Trees for Urban Landscape – For *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis* –. *Korean Journal of Environment and Ecology* 27(5): 571-578. [Korean Literature]
- Jo HK, Kim JY, Park HM. 2014. Carbon Reduction Effects Urban Landscape Trees and Development of Quantitative Models. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 42(5): 13-21. [Korean Literature]
- Kang JT, Son YM, Jeon JH, Lee SJ. 2017. Assessment of Carbon Stock and Uptake by Estimation of Stem Taper Equation for *Pinus densiflora* in Korea. *Journal of Climate Change Research* 8(4): 415-424. [Korean Literature]
- Ko CU, Yim JS, Kim DG, Kang JT. 2021. Analysis of Optimal Pathways for Terrestrial LiDAR Scanning for the Establishment of Digital Inventory of Forest Resources. *Korean Journal of Remote Sensing* 37(2): 245-256. [Korean Literature]
- Korea Environment Institute. 2020. *Korea Environment Institute Focus* 8(15): 1-23. [Korean Literature]
- Korea Forest Research Institute. 2012. *Carbon Keeper Urban Forests*. Seoul, Korea. p. 163. [Korean Literature]
- Korea Forest Service. 2013. *Operating standard for social contribution type forest carbon offset*. Daejeon, Korea. [Korean Literature]
- Korea Forest Service. 2020. *The Story of Sejong National Arboretum Construction*. Sejong, Korea, p. 291. [Korean Literature]
- Korea Forest Service. 2022. *'Forest Renaissance' promotion strategy*. Daejeon, Korea, p. 31. [Korean Literature]
- Korea Forest Service. 2022. *Statistical yearbook of forestry*. Daejeon, Korea, pp. 80-86. [Korean Literature]
- Lee MK, Lee HI, Lee CB. 2022. Aboveground biomass and the drivers depending on the strata of urban forests. *Journal of the Korean Data & Information Science Society* 33(4): 677-690. [Korean Literature]
- Lukas H, Wolfgang O, Hermann E, Christiane B. 2017. UNFCCC before and after Paris - what's necessary for an effective climate regime. *Climate Policy* 17(2): 150-170.
- Maltamo M, Naesset E, Vauhkonen J. 2014. *Forestry applications of airborne laser scanning, concepts and case studies*, Dordrecht, NL. p. 333.
- Park EJ, Kang KY. 2010. Estimation of C Storage and Annual CO₂ Uptake by Street Trees in Gyeonggi-do. *Korean Journal of Environment and Ecology* 24(5): 591-600.
- Sa YJ, Woo HS, Kim JS. 2022. Investigation of Korean forest carbon offset program: Current status and cognition of program participants. *Journal of Korean Society of Forest Science* 111(1): 165-176. [Korean Literature]