

불암산 도시자연공원 생태복원지와 식생보전지 수목의 탄소저장량 및 흡수량

Carbon Storage and Absorption of Trees in the Ecological Restoration Area and Vegetation Conservation Area of Bulamsan Urban Nature Park

양금철^{1*} · 김정섭²

¹공주대학교 건설환경공학부 교수, ²강원연구원 연구실 연구원

Keum Chul Yang^{1*} and Jeong Seob Kim²

¹Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea

²Researcher, Research Institute for Gangwon, Gangwon 24461, Korea

Received 17 November 2020, revised 2 December 2020, accepted 2 December 2020, published online 31 December 2020

ABSTRACT: We present a quantitative survey of the carbon storage and absorption capacity of tree species in the vegetation conservation and ecological restoration areas of Bulamsan urban nature park in Nowon-gu, Seoul. The density of the sawtooth oak (*Quercus acutissima*) community in the ecological conservation area is approximately 30 individuals/225 m², while a further 20 species, such as Japanese snowbell (*Styrax obassia*), galcham oak (*Quercus aliena*), Asian Sweetleaf (*Symplocos chinensis* f. *pilosa*), East Asian ash (*Fraxinus rhynchophylla*), and Korean rhododendron (*Rhododendron mucronulatum*) are sparsely distributed. In contrast, the ecological restoration sites typically comprised Mongolian oak (*Quercus mongolica*), jolcham oak (*Quercus serrata*), and East Asian ash (*Fraxinus rhynchophylla*) plantations, with planting densities of 8.3, 7.7, and 14.3 individuals/25 m², respectively. Approximately 10 species, including Amur maple (*Acer tataricum* subsp. *ginnaia*), Korean mountain ash (*Sorbus alnifolia*), Japanese spice bush (*Lindera obtusiloba*), and Korean rhododendron (*Rhododendron mucronulatum*) were identified in the ecologically restored area. The total amounts of carbon stored by the trees in the vegetation conservation and ecological restoration sites are 250.77 and 19.3 t C ha⁻¹, respectively, and the total annual carbon uptakes are 10.28 and 2.33 t C ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. The survey results are expected to provide important basic data for monitoring the carbon absorption capacity and carbon balance of green areas in the city.

KEYWORDS: Carbon storage, Carbon uptake, Urban natural park

요 약: 본 연구는 2013년 7월 부터 2015년 7월 까지 서울시 노원구 불암산 도시자연공원의 잔존림으로 남아있는 식생보전지와 교란 후 복원된 생태복원지에서 수목의 흉고직경을 측정하여 탄소 저장량 및 흡수량을 산정하여 비교, 분석하였다. 상수리나무군락을 중심으로 한 생태보전지의 수목의 밀도는 약 30 개체/225 m²로 쪽뽕나무, 갈참나무, 노린재나무, 물푸레나무, 진달래 등 약 20여종의 수종이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 그 외 생태복원지는 대표적으로 신갈나무군락, 졸참나무군락, 물푸레나무군락 등으로 조성되었고, 식재밀도는 각각 8.3, 7.7, 14.3 개체/25 m²로, 신나무, 팔배나무, 생강나무, 진달래 등 약 10여 종의 식생이 분포하는 것으로 조사되었다. 식생보전지와 생태복원지에서 식생에 의해 저장되는 전체 탄소량은 각각 250.77, 19.3 ton C ha⁻¹로, 연간 전체 탄소흡수량은 각각 10.28, 2.33 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 분석되었다. 이는 도시내 녹지의 탄소흡수능 및 탄소수지 모니터링의 중요한 기초 자료를 제공할 것으로 판단된다.

핵심어: 탄소 저장량, 탄소 흡수량, 도시자연공원

*Corresponding author: yangkc@kongju.ac.kr, ORCID 0000-0002-8348-6899

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 산업의 발달 및 인구 증가로 인하여 도시화가 빠르게 진행되고 있으며, 도시의 규모도 점차 거대해져 가고 있다 (Kwon 2002). 지난 100여 년간 전 세계적으로 산업화와 도시화가 빠르게 진행되면서 도시 인구가 급증하게 되었고, 도시의 규모도 점차 거대해지면서 과밀화와 도시 내 녹지 공간의 감소가 수반되고 있는 실정이다 (Kim 2015). 도시화는 국가 경제의 성장과 개인 부가가치를 높이는 긍정적인 효과도 있는 반면 도시화와 함께 야기되는 자연환경의 질 저하는 심각한 도시문제를 일으키고 있다 (Kim 2007). 현재 도시 녹지는 인간의 교란으로 인한 파편화, 고립화 등으로 서식지로서의 가치보다는 개발로 인하여 훼손되거나 소멸되고 있으며 (Kim et al. 2000), 조경위주의 도시 녹지 공간 조성으로 자연생태와 이질적인 형태를 보이고 있다 (Choung et al. 2007). 특히, 환경오염 및 도시화의 가속에 따른 도시 산림생태계 내 자생식물군집의 파괴로 인하여 생물종 다양성이 낮아지고, 식생구조의 불균형이 초래되고 있으며 단일 수종으로 우점되는 현상이 나타나고 있다 (Hough 1983).

우리나라의 경우, 도시화율이 지난 10년 사이에 80%에서 83% (2000 - 2010년)로 증가하였으며 2020년에는 약 85.4%로 추정하고 있다 (Kim 2013). 또한, 도시화에 따른 인구이동, 주거지 및 건물의 등장, 도로의 확장 등으로 인하여 도시 생태계의 탄소수지에 큰 영향을 주고 있으며, 도시지역에서 배출되는 이산화탄소의 양은 전체 인구가 배출하는 이산화탄소량의 약 78 - 97%를 배출하는 것으로 알려져 있다 (O'Meara 1999, IPCC 2000). Kim et al. (2011)은 전 지구적 기후변화인 지구 온난화의 주원인으로 주목되고 있는 온실가스는 공간적으로 주로 도시에서 발생하고 있기 때문에 도시차원에서 대책이 무엇보다 필요하다고 보고하였고, 기후변화로 인해 각 국가 및 도시는 이산화탄소 발생을 저감시키고 이산화탄소 흡수원을 증진시키기 위한 노력이 중요한 정책으로 받아들여지면서 도시 수목과 녹지의 기후변화 대응 관련 기능이 더욱 강조되고 있다 (Park and Kang 2010). 이에 따라 도시 내 녹지의 탄소흡수능 및 탄소수지 모니터링은 중요성이 대두되고 있으며, IPCC (2006)에서는 도시지역의 CO₂ 흡수량을 산정하여 보고하도록 요구하고 있다. 따라서 탄소배출원인 도

시 내 녹지의 기능을 개선하고 탄소수지 평가를 통한 탄소 발생원과 고정원의 구분이 필요하며, 이에 대한 개선방안 도출이 요구된다. 현재까지의 탄소수지 개선방안은 탄소 발생원을 줄이는 공학적 접근법이 주가 되었으나, 탄소수지 개선을 위해 생태계 기능에 토대를 두므로써 탄소 고정원을 늘리는 생태적 접근방법도 필요할 것으로 판단된다 (Kim et al. 2014b).

탄소수지에 관한 연구로 국내에서 Jo (1999)가 강원도 일부도시의 녹지에 의한 탄소흡수와 에너지소비에 의한 탄소배출량을 산정하였으며, Jo and Cho (1998)는 도시 주요조경수종의 연간 CO₂ 흡수량을 산정하였고, Han (2008)는 수도권매립지 수목에 의한 CO₂ 흡수량 산정 및 증대를 위한 식생관리 방안 연구를 진행한 바 있다. Park (2009)은 도심지 수목의 연간 단위면적당 CO₂ 흡수량은 1.9 - 2.9 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹라고 보고한 바 있고, Choi et al. (2009)은 기후변화에 따른 우리나라 식생분포 변화 및 육상 탄소 분포 변화를 예측하였다. Park and Kang (2010)는 경기도 도시 가로수의 탄소 저장량 및 흡수량을 산정하였고, Kim (2011)은 판교나들이공원에서 수목의 탄소저장량 및 흡수량을, Lee (2011)은 북한산국립공원 낙엽활엽수림의 탄소저장량을 평가하였으며, Hwang (2012)은 서울 숲 수목의 탄소저장량 및 흡수량을 산정하는 등 탄소흡수원으로서 도시공원에 관한 연구가 수행되었다. Lee (2012)은 항공 LiDAR 데이터를 이용하여 산림의 이산화탄소 저장량을 추정하는 방법에 대해 연구한 바 있고, Kim (2013)은 천안시 도시공원을 중심으로 식재유형별 탄소수지 특성에 관한 연구를, Seo (2015)은 도시 녹지유형별 토양탄소 저장량을 추정하는 등의 연구가 수행되었다.

본 연구는 서울시 노원구 불암산 도시자연공원 생태복원지의 식물군락을 대상으로 수목의 탄소 저장량 및 흡수량을 산정하여 잔존림으로 남아있는 식생보전지와 비교하여 도시공원의 탄소흡수원으로서의 기초 자료를 제공하는데 목적이 있다.

2. 연구 방법

2.1 조사지 개황

도시공원 생태복원지와 식생보전지의 탄소 저장량 및 흡수량을 비교·분석하기 위하여 서울시 노원구 중

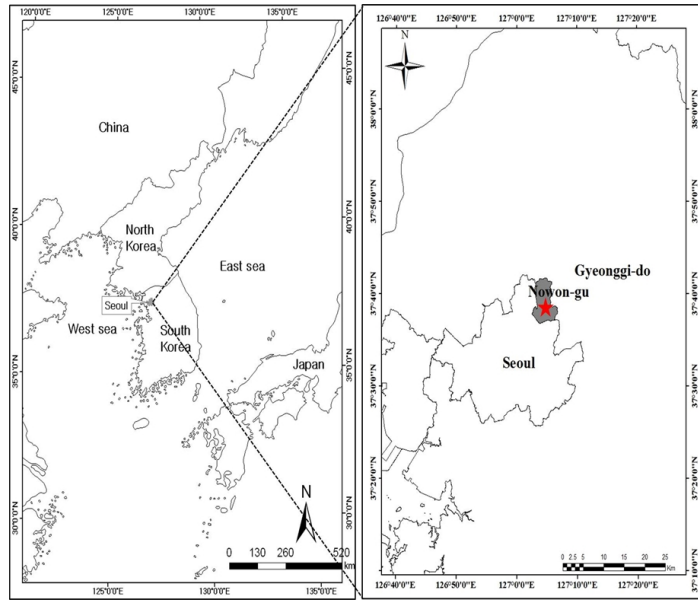


Fig. 1. Location of the study site, Mt. Bulam in Seoul city, Korea (from Kim et al. 2014b).

계동에 위치한 불암산 도시자연공원을 대상으로 하였다 (Fig. 1). 불암산 도시자연공원은 불암산 주봉 능선부의 서쪽지역으로 북쪽으로 수락산과 인접하고 서쪽으로 북한산과 마주보고 있으며, 경도 $127^{\circ} 04' 42'' E - 127^{\circ} 04' 58'' E$, 위도 $37^{\circ} 39' 26'' N - 37^{\circ} 39' 10'' N$ 에 위치하고 있다. 총 면적은 $78,125 m^2$ 으로 1977년 도시자연공원구역으로 지정되었다 (Kim et al. 2014a). 불암산 일대는 도심과 공원의 경계를 중심으로 산림 이용 압력이 높은 편이고, 대상지 일부에 보전이 잘된 상수리나무군락을 제외하고는 과수원, 경작지, 나대지 및 시설지 등의 산림훼손이 있으며, 이차림 및 식재림이 주로 분포하고 있다. 생물종 다양성 증진을 위한 생물서식공간조성으로 인간과 자연이 조화된 도시생태공간으로의 조성이 필요하다. 현지조사 결과 보전이 잘된 상수리나무군락 등의 일부 산림은 식생보전지로서 유지되었고, 식재밀도는 약 30 개체/ $225 m^2$ 로, 쪽동백나무, 갈참나무, 노린재나무, 물푸레나무, 진달래 등 약 20여종의 수종이 함께 분포하고 있는 것으로 나타났다. 그 외 복원 이전의 아까시나무, 배나무밭 지역은 신갈나무군락, 졸참나무군락, 물푸레나무군락 등으로 조성되었고, 식재밀도는 각각 8.3, 7.7, 14.3 개체/ m^2 로, 신나무, 팔배나무, 생강나무, 진달래 등 약 10여 종이 함께 분포하는 것으로 조사되었다.

서울기상대의 1986 - 2015년 (30년) 자료에 의하면,

이 지역의 연평균 기온은 $12.7^{\circ}C$, 강수량은 $1,468.0 mm$ 이고, 강수량의 대부분은 6 - 9월에 집중되는 하계다우형의 전형을 보이고 있다 (Fig. 2). 연구대상지내 토양은 대부분 사방지토양 (Er-C)과 갈색건조산림토양 (B1)으로 토성은 양질사토와 사양토로 이루어져 있다 (산림공간정보서비스, <http://fgis.forest.go.kr/fgis/>). 토양 pH는 식생보전지와 생태복원지에서 각각 4.47 ± 0.15 , 5.34 ± 0.14 , 유기물함량은 각각 6.47 ± 0.24 , $5.07 \pm 0.14\%$ 로 조사되었다.

2.2 조사지의 미기상 특성 조사

생태복원지와 식생보전지의 방형구 인근에 Data logger (WatchDog 1000 Series, Spectrum Technologies Inc)를 설치하여 10 cm 깊이 지중온도와 토양수분함량, 1.5 m 높이에서의 기온과 일사량 (solar radiation)을 2015년 1월 1일부터 2015년 12월 31일까지 30분 간격으로 자동 측정하였다.

2.3 조사지 식생조사 및 생장 조사

불암산 도시자연공원에서 식생보전지의 대표식생인 상수리나무군락에 $15 m \times 15 m$ 의 크기의 방형구를 설치하였으며, 생태복원지에서는 신갈나무군락, 졸참나무군락, 물푸레나무군락에 각각 $5 m \times 5 m$ 의 크기의

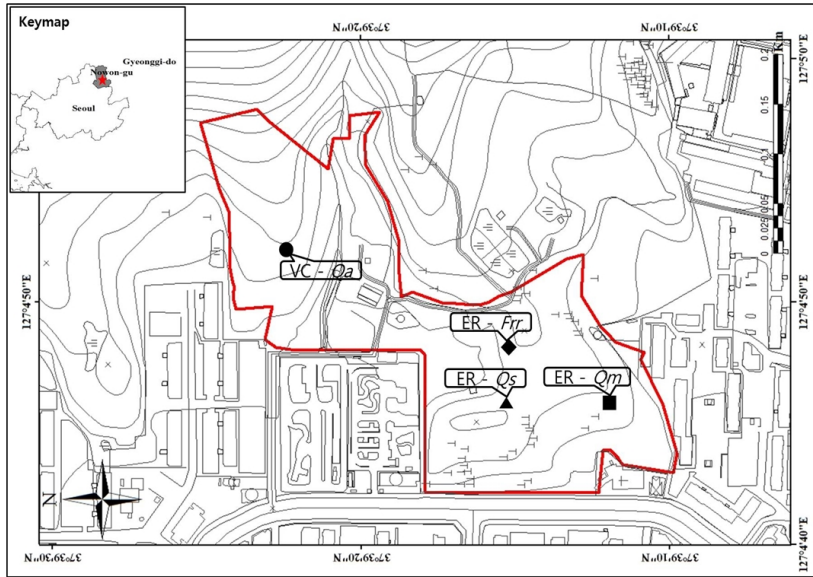


Fig. 2. Location of vegetation conservation site and ecological restoration sites in Mt. Bulam in Seoul, Korea (from Kim 2016).

(●: Vegetation Conservation site - *Quercus acutissima*, ■: Ecological Restoration site - *Quercus mongolica*, ▲: Ecological Restoration site - *Quercus serrata*, ◆: Ecological Restoration site - *Fraxinus rhynchophylla*)

방형구를 설치하여 관목이상의 수목에 대하여 매목 조사를 실시하였다 (Fig. 2). 수목의 성장을 조사하기 위하여 식생보전지에서는 경우 2013년부터 2015년까지 3년에 걸쳐 매년 활발한 7월에 교목의 흉고직경 (Diameter at breast height; DBH)을 측정하였고, 관목은 지상 15 cm 높이에서 직경이 1 cm 이상인 개체를 대상으로 하여 기저직경 (Diameter at aboveground 15 cm height; DAG₁₅)을 측정하였다. 생태복원지에서는 수목의 식재가 완료된 시점인 2015년 4월에 지상으로부터 15 cm 높이에서 직경이 1 cm 이상인 목본을 대상으로 하여 기저직경을 1차 측정하였으며, 2016년 4월에 같은 수목을 대상으로 2차 측정을 실시하였다.

2.4 식생보전지와 생태복원지 수목의 탄소 저장 및 흡수량 산정

본 연구에서 수목 성장에 따른 탄소의 저장량과 흡수량 산정은 아래 Eq. 1과 Eq. 2에 제시한 Lee (2003)의 성장회귀식을 이용하여 추정하였다. Lee (2003)은 교목활엽수, 교목침엽수, 관목활엽수, 관목침엽수로 단순화시킨 후 교목의 경우에는 흉고직경 (DBH)을, 관목의 경우에는 지상부의 15 cm 높이의 근원직경 (DAG₁₅)의 증가를 이용하여 수종별 CO₂ 저장량 및 흡수량을 산

정하였다. 대부분의 초본은 매년 흡수와 분해를 반복하여 탄소 저장 및 흡수량이 극히 소량이므로 산정대상에서 제외 하였다 (Jo 1999).

탄소저장량 산정식 (Eq. 1)

CO₂ storage (kg CO₂/tree)

Broad-leaved tree $Y = 0.2572 DBH_{aver}^2 + 2.4595$

Needle-leaf tree $Y = 0.3510 DBH_{aver}^2 + 2.1436$

Broad-leaved shrub $Y = 0.1800 DAG_{aver} + 1.9494$

Needle-leaf shrub $Y = 0.1608 DAG_{aver} + 2.1892$

탄소흡수량 산정식 (Eq. 2)

CO₂ Sink (kg CO₂/tree/yr)

Broad-leaved tree $Y = -4.2136 + 1.9006 DBH_{aver} - 0.0068 DBH_{aver}^2$

Needle-leaf tree $Y = -2.7714 + 0.9714 DBH_{aver} - 0.0225 DBH_{aver}^2$

Broad-leaved shrub $Y = 0.0333 DBH_{aver}^{1.5823}$

Needle-leaf shrub $Y = 0.0568 DBH_{aver}^{1.3350}$

DBH_{aver}: Average diameter at breast height (5 - 40 cm), DAG_{aver}: Average diameter at aboveground 15 cm height (1 - 4 cm).

3. 결과 및 고찰

3.1 생태복원지와 식생보전지의 미기상 특성

토양온도는 식생보전지에서 $-0.1 - 24.2^{\circ}\text{C}$ 의 범위로, 연 평균 $11.41 \pm 7.08^{\circ}\text{C}$ 로 조사되었다. 생태복원지는 $-6.6 - 28.7^{\circ}\text{C}$ 의 범위로, 연 평균 $12.41 \pm 9.73^{\circ}\text{C}$ 로 조사되었다 (Table 1). 7월과 8월에 가장 높은 값을 나타내며, 12월 - 1월에 가장 낮은 값을 나타내었다 (Fig. 3). 기온은 식생보전지에서 $-15.6 - 33.8^{\circ}\text{C}$ 로서 연 평균 $18.5 \pm 4.1^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 생태복원지에서 $-13.9 - 34.4^{\circ}\text{C}$ 의 범위로, 연 평균 $12.5 \pm 9.4^{\circ}\text{C}$ 로 조사되었으며, 토양온

도의 변화양상과 유사한 변화를 보였다 (Fig. 4). 토양 수분함량은 식생보전지에서 $5.8 - 46.7\%$ 의 범위로, 연 평균 $18.5 \pm 4.1\%$ 로 나타났다. 생태복원지에서는 $2.9 - 54.9\%$ 의 범위로, 연 평균 $18.3 \pm 7.0\%$ 로 조사되었으며, 두 지역 모두 계절적 변화와 큰 관계는 나타내지 않았다 (Fig. 5). 일사량은 식생보전지에서 $0 - 762 \text{ wat}\cdot\text{m}^{-2}$ 의 범위로, 연 평균 $22.93 \pm 22.13 \text{ wat}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 나타났다. 생태복원지에서는 $0 - 1,207 \text{ wat}\cdot\text{m}^{-2}$ 의 범위로, 연 평균 $126.76 \pm 62.29 \text{ wat}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 조사되었으며, 식생보전지역의 경우 잎이 무성한 여름에 낮게 나타나고, 겨울에 높게 나타났으나, 생태복원지역의 경우 식생보전지역과 반대의 경향을 보였다 (Fig. 6).

Table 1. Monthly mean meteorological characteristics in the study sites from January 2015 to December 2015

Factor, Site Month	Soil moisture (%)		Solar radiation (wat/m^2)		Soil temperature ($^{\circ}\text{C}$)		Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	
	Vegetation conservation	Ecological restoration	Vegetation conservation	Ecological restoration	Vegetation conservation	Ecological restoration	Vegetation conservation	Ecological restoration
January	20.79 ± 2.13	6.64 ± 3.91	31.21 ± 56.97	55.02 ± 95.94	2.04 ± 15.80	-2.58 ± 1.49	-0.65 ± 15.19	-1.84 ± 4.20
February	22.58 ± 1.95	17.58 ± 15.79	44.14 ± 81.20	78.83 ± 137.09	2.80 ± 15.15	-1.40 ± 1.60	1.90 ± 15.79	0.25 ± 4.58
March	20.87 ± 1.34	16.51 ± 6.67	69.71 ± 119.75	136.49 ± 204.25	4.30 ± 6.83	3.87 ± 3.48	5.68 ± 9.46	5.60 ± 6.16
April	23.23 ± 2.11	27.69 ± 13.47	56.78 ± 105.89	164.42 ± 262.50	9.87 ± 1.68	11.53 ± 3.29	13.05 ± 5.66	12.55 ± 5.23
May	18.51 ± 2.82	12.74 ± 9.16	7.19 ± 22.70	219.50 ± 316.32	13.24 ± 0.91	19.05 ± 3.12	17.58 ± 4.52	18.23 ± 5.14
June	10.69 ± 3.11	12.32 ± 10.38	4.35 ± 14.89	230.06 ± 317.14	16.98 ± 1.29	23.19 ± 1.31	21.88 ± 3.99	22.49 ± 4.15
July	14.32 ± 5.64	21.06 ± 14.67	4.89 ± 9.19	170.49 ± 264.08	20.11 ± 1.30	24.55 ± 1.15	23.70 ± 3.20	24.48 ± 3.32
August	23.93 ± 4.66	21.61 ± 6.88	4.60 ± 7.33	165.52 ± 253.32	22.62 ± 5.93	25.04 ± 1.43	25.32 ± 6.34	24.70 ± 3.42
September	17.09 ± 3.45	8.47 ± 2.82	5.85 ± 24.69	128.73 ± 226.68	19.17 ± 1.33	20.19 ± 1.67	20.28 ± 3.21	20.46 ± 3.90
October	15.45 ± 4.60	20.97 ± 10.45	2.85 ± 7.87	74.90 ± 130.93	13.97 ± 1.56	14.32 ± 2.30	13.47 ± 4.15	13.92 ± 5.19
November	13.72 ± 2.52	30.63 ± 5.68	15.74 ± 32.68	49.13 ± 85.50	9.37 ± 1.82	8.94 ± 2.28	7.68 ± 4.47	7.94 ± 5.07
December	20.64 ± 1.11	23.14 ± 7.97	27.85 ± 51.04	48.08 ± 80.88	2.44 ± 9.22	2.19 ± 1.40	-3.50 ± 7.78	0.75 ± 4.43
Mean	18.49 ± 4.05	18.28 ± 7.03	22.93 ± 22.13	126.76 ± 62.29	11.41 ± 7.08	12.41 ± 9.73	12.20 ± 9.47	12.46 ± 9.36

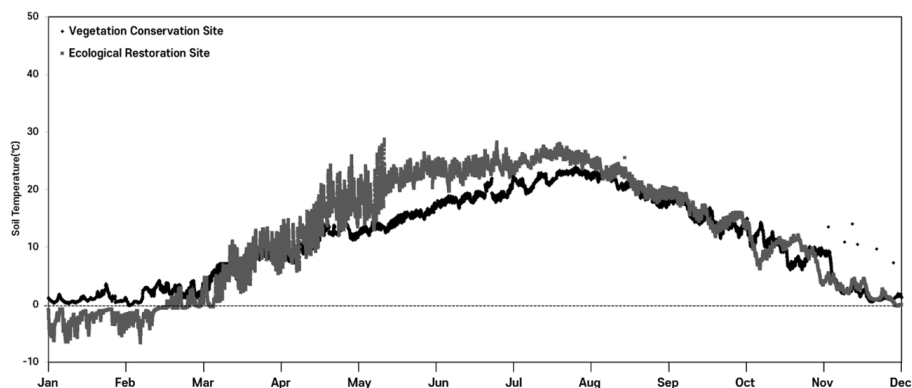


Fig. 3. Changes in soil temperature ($^{\circ}\text{C}$, -10 cm depth of soil) in the study sites from January 2015 to December 2015 (from Kim 2016).

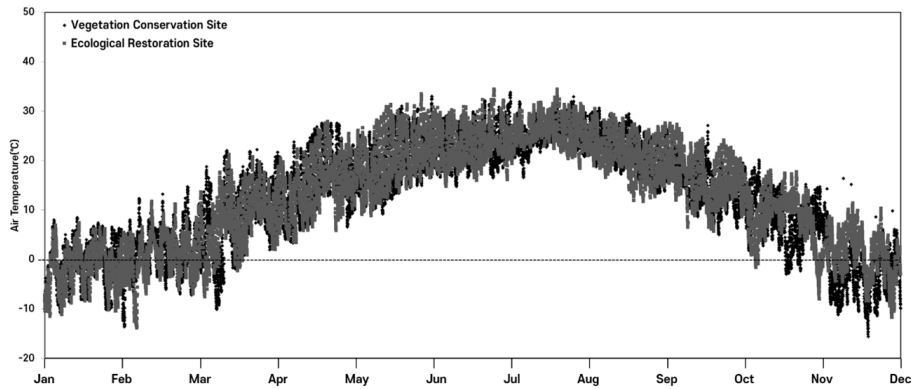


Fig. 4. Changes in air temperature ($^{\circ}\text{C}$) in the study sites from January 2015 to December 2015 (from Kim 2016).

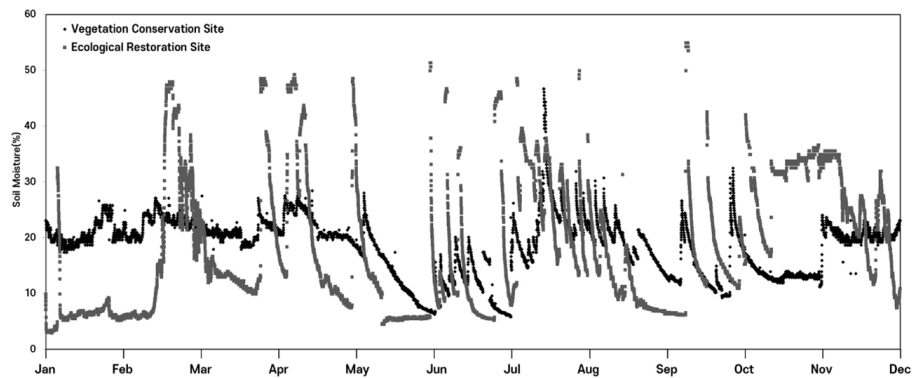


Fig. 5. Changes in soil moisture content (%) in the study sites from January 2015 to December 2015 (from Kim 2016).

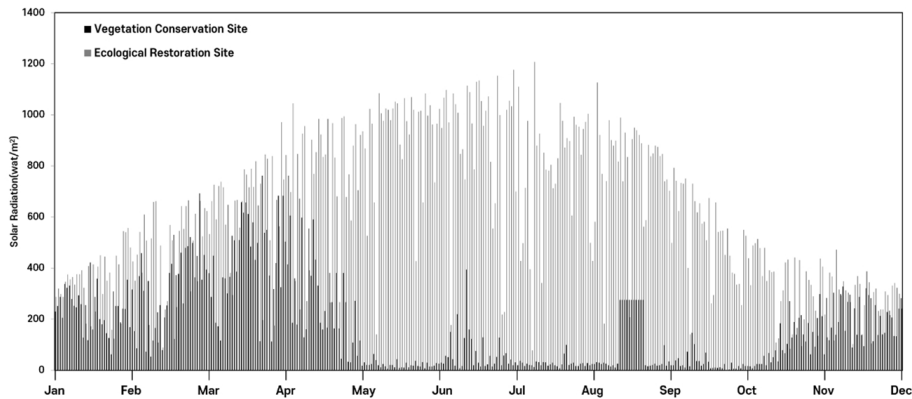


Fig. 6. Changes in solar radiation (wat/m^2) in the study sites from January 2015 to December (from Kim 2016).

3.2 생태복원지와 식생보전지의 식생

본 도시공원은 보전이 잘되어 온 상수리나무군락 등 일부 산림은 식생보전지로서 유지되었고, 복원 이전에 야까시나무, 배나무발 등의 훼손지역은 생태복원지에서 신갈나무, 졸참나무, 물푸레나무 식재림 군락으로

조성되었다.

식생보전지의 상수리나무군락의 층위구조는 4층 구조로 이루어져있으며, 상수리나무, 신갈나무, 갈참나무, 노린재나무, 누리장나무, 밤나무 등이 함께 분포하고 있는 것으로 조사되었다. 생태복원지는 2015년 5월에 수목이 식재되었으며, 관목성의 수목이 함께 분포

Table 2. Physical structure of vegetation in the study sites

Community		Tree-DBH (cm)			Shrubs-DAG15 (cm)			Plant density
		Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	
Vegetation Conservation	<i>Quercus acutissima</i>	28.62 ± 8.26	42.34	22.54	3.71 ± 3.07	14.23	1.23	29.67 ± 6.11 ea/225 m ²
Ecological Restoration	<i>Quercus mongolica</i>	-	-	-	2.94 ± 0.85	4.06	1.04	8.33 ± 1.53 ea/25 m ²
	<i>Quercus serrata</i>	-	-	-	2.61 ± 0.79	4.30	1.70	7.67 ± 0.58 ea/25 m ²
	<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	-	-	-	3.12 ± 0.82	4.40	1.70	14.33 ± 0.58 ea/25 m ²

DBH: Diameter at breast height, DAG15: Diameter at aboveground 15 cm height.

Table 3. Carbon storage and carbon absorption of each tree species in the ecologically restored site in Bulamsan urban natural park

Community	Species	Carbon storage (ton C ha ⁻¹)	Carbon absorption (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
<i>Quercus mongolica</i>	<i>Quercus mongolica</i>	3.65 ± 0.94	0.44 ± 0.11
	<i>Acer ginnala</i>	0.17	0.03
	<i>Quercus serrata</i>	1.04 ± 0.83	0.12 ± 0.09
	<i>Sorbus alnifolia</i>	1.34 ± 1.39	0.16 ± 0.16
<i>Quercus serrata</i>	<i>Quercus mongolica</i>	0.13 ± 0.03	0.02 ± 0.00
	<i>Acer ginnala</i>	0.69	0.09
	<i>Quercus serrata</i>	3.19 ± 0.31	0.40 ± 0.04
<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	7.98 ± 1.75	0.95 ± 0.19
	<i>Quercus mongolica</i>	0.84	0.10
	<i>Quercus serrata</i>	1.51 ± 0.66	0.17 ± 0.07

하고 있다. 신갈나무군락에는 신갈나무, 신나무, 졸참나무, 팔배나무 등, 졸참나무군락에는 졸참나무, 신나무 등, 물푸레나무군락에는 물푸레나무, 신갈나무, 졸참나무 등이 분포하고 있는 것으로 조사되었다.

각 군락에 분포하고 있는 식생을 대상으로 흉고직경 (DBH), 근원직경 (DAG₁₅), 수목의 밀도를 Table 2에 나타내었다. 식생보전지 상수리나무군락 교목의 흉고직경 (DBH)은 22.54 - 42.34 cm의 범위로, 평균 28.62 ± 8.26 cm로 분포하였고, 관목의 근원직경 (DAG₁₅)은 1.23 - 14.23 cm의 범위로, 평균 3.71 ± 3.07 cm를 나타내었다. 수목의 밀도는 29.67 ± 6.11 개체/225 m²로 나타났다. 생태복원지 신갈나무군락의 경우 DAG₁₅는 1.04 - 4.06 cm의 범위로, 평균 2.94 ± 0.85 cm였으며, 밀도는 8.33 ± 1.53 개체/25 m²로 조사되었다. 생태복원지의 졸참나무군락의 경우 DAG₁₅는 1.70 - 4.30 cm의 범위로, 평균 2.61 ± 0.79 cm였으며, 수목의 밀도는

7.67 ± 0.58 개체/25 m²로 조사되었다. 생태복원지의 물푸레나무군락은 DAG₁₅ 1.70 - 4.40 cm의 범위로, 평균 3.12 ± 0.82 cm였으며 수목의 밀도는 14.33 ± 0.58 개체/25 m²로 조사되었다.

3.3 수목의 탄소저장량 및 흡수량

각 군락에서 조사된 수목을 이용하여 Lee (2003)의 상대생장식으로 추정된 탄소저장량과 연간 탄소흡수량을 Tables 3 - 5에 나타내었다.

생태복원지에서 수종별 탄소저장량은 신갈나무군락에서 신갈나무, 팔배나무 순으로 각각 3.65 ± 0.94, 1.34 ± 1.39 ton C ha⁻¹로 나타났다. 졸참나무군락에서는 졸참나무, 신나무 순으로 각각 3.19 ± 0.31, 0.69 ton C ha⁻¹로, 물푸레나무군락에서 물푸레나무, 졸참나무 순으로 각각 7.98 ± 1.75, 1.51 ± 0.66 ton C ha⁻¹로 조사되었다 (Table 3). 식생보전지인 상수리나무군락에서

Table 4. Species carbon storage and absorption of vegetation conservation site during the experiment in the vegetation conservation site in Bulamsan urban natural park

Community	Species	Carbon storage (ton C ha ⁻¹)	Carbon absorption (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
<i>Quercus acutissima</i>	<i>Quercus aliena</i>	116.30	3.00
	<i>Symplocos chinensi</i>	0.11	0.01
	<i>Clerodendron trichotomum</i>	0.03	0.01
	<i>Castanea crenata</i>	25.89	1.68
	<i>Prunus sargentii</i>	0.03	0.00
	<i>Quercus acutissima</i>	108.01	5.52
	<i>Quercus mongolica</i>	0.14	0.02
	<i>Robinia pseudo-acacia</i>	0.15	0.02
	<i>Rosa multiflora</i>	0.12	0.02

Table 5. Comparison of carbon storage and absorption between vegetation conservation and ecological restoration site in Bulamsan urban natural park

Community		Carbon storage (ton C ha ⁻¹)	Carbon absorption (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
Vegetation Conservation	<i>Quercus acutissima</i>	250.77	10.28
Ecological Restoration	<i>Quercus mongolica</i>	5.29 ± 2.05	0.64 ± 0.24
	<i>Quercus serrata</i>	3.96 ± 0.60	0.50 ± 0.06
	<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	10.05 ± 1.87	1.19 ± 0.19

수종별 탄소저장량은 갈참나무, 상수리나무, 밤나무 순으로 각각 116.30, 108.01, 25.89 ton C ha⁻¹로 나타났다 (Table 4). 생태복원지의 수종별 탄소흡수량은 신갈군락에서 신갈나무, 팔배나무 순으로 각각 0.44 ± 0.11, 0.16 ± 0.16 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 나타났으며, 졸참나무군락에서 졸참나무, 신나무 순으로 각각 0.40 ± 0.04, 0.09 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로, 물푸레나무군락에서 물푸레나무, 졸참나무 순으로 각각 0.95 ± 0.19, 0.17 ± 0.07 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 이었다 (Table 3). 식생보전지 상수리나무군락의 수종별 연간 탄소흡수량은 상수리나무, 갈참나무, 밤나무 순으로 각각 5.52, 3.00, 1.68 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 이었다 (Table 4). 따라서 생태복원지의 신갈나무군락, 졸참나무군락, 물푸레나무군락의 전체 탄소저장량은 19.3 ton C ha⁻¹, 연간 전체 탄소흡수량은 2.33 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 이었다. 식생보전지의 상수리나무군락의 전체 탄소저장량은 250.77 ton C ha⁻¹, 연간 전체 탄소흡수량은 10.28 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 이다 (Table 5).

도시림의 탄소저장량의 경우 Kim (2011)은 판교나들이공원에서 58.4 ton C ha⁻¹, Park (2009)은 분당 중앙공원, 과천 중앙공원, 수원 효원공원, 안양 병목안 시민

공원에서 각각 43.2, 46.5, 9.9, 18.5 ton C ha⁻¹ 를 보고하였고, Kim (2013)이 천안시 두정공원에서 탄소저장량이 3.93 - 115.19 ton C ha⁻¹라 보고한 바 있다. 본 연구의 불암산 생태복원지의 경우 수원 효원공원과는 유사하게, 타 지역보다는 다소 낮은 수치를 나타내었다. 이는 공원별 식재 밀도의 차이와 성장 정도에 의한 것으로 판단된다 (판교나들이공원: 632 tree/ha, 수원 효원공원: 147 tree/ha). 또한, Kim (2013)은 천안시 두정공원에서 측정한 연간탄소흡수량이 0.46 - 6.45 ton C ha⁻¹ yr⁻¹의 범위라 보고하였으며, Hwang (2012)은 서울숲에서 0.77 - 2.39 ton C ha⁻¹ yr⁻¹의 범위, Park and Kang (2010)은 2.07 - 27.03 ton C ha⁻¹ yr⁻¹의 범위라 보고한 연구결과보다 불암산의 생태복원지의 연간탄소흡수량 또한 다소 낮게 값을 나타냈다. 이는 탄소저장량과 마찬가지로 수목의 밀도의 차이와 수목의 성장 정도에 의한 것으로 판단된다.

4. 결론 및 제언

불암산 도시자연공원에서 식생보전지와 생태복원

지에서 수목식생에 의해 저장되는 전체 탄소량은 각각 250.77, 19.3 ton C ha⁻¹로, 연간 전체 탄소흡수량은 각각 10.28, 2.33 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 측정되었다. 생태복원지의 경우 아직은 복원 초기이기 때문에 식생에 의해 흡수되는 탄소량이 매우 적은 것으로 산출되었다. 이는 생태복원지에서 아직은 다층구조의 식생구조를 형성하지 못한 관목성의 단층구조로 이루어져 있기 때문으로 판단된다. 특히 다층의 식생구조에서 아교목층 및 관목층의 높은 밀도와 생장률은 수목에 의해 흡수되는 탄소양의 증가에 기여하여 지소의 탄소흡수능에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

또한 탄소 저장량 및 흡수량 산정을 위해 활용한 상대생장식의 경우 각 수종에 맞는 상대생장식을 활용할 필요가 있으며, 보다 정확한 산정을 위하여 3D 스캐너를 활용하는 등의 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

References

- Choi, S.H., Lee, W.K., Yoo, S.J., Park, S.M., Byun, J.G., and Choi, G.S. 2009. Simulation on vegetation cover and terrestrial carbon distribution by climate change in Korea. 2009 GIS Joint Autumn Conference 138-139. (in Korean)
- Choung, H.L., Kwon, Y.H., Choi, J.K., Rho, P.H., Lee, H.W., and Park, H.N. 2007. Native plant community restoration based on phytosociology. Korea Environment Institute. (in Korean)
- Han, J.S. 2008. A study on planting management method for enlargement and quantity of CO₂ uptake by tree in the landfill site of metropolitan area, Korea. Master's Thesis, University of Seoul. (in Korean)
- Hough, M. 1983. City from and natural process. Croom Helm, London. 281pp.
- Hwang, J.W. 2012. A study on the effectiveness of carbon dioxide sequestration of urban park: the case study of seoul forest park. Master's Thesis, Hanyang University. (in Korean)
- IPCC. 2000. IPCC special report on emissions scenarios. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. (Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. eds.). the Institute for Global Environmental Strategies, Hayama.
- Jo, H.K. 1999. Carbon uptake and emissions in urban landscape, and the role of urban greenspace for several cities in Kangwon province. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 27: 39-53. (in Korean)
- Jo, H.K. and Cho, D.H. 1998. Annual CO₂ uptake by urban popular landscape tree species. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 26: 38-53. (in Korean)
- Kim, C. 2011. Research on carbon sequestration of urban park - In the Case of Nadry park in Pangyo. Master's Thesis, Kyungwon University. (in Korean)
- Kim, C.H. 2015. Study on the vegetation structure and biodiversity improvement of urban park buffer strips considering climate change: focused on Seoul. Ph.D. Thesis, Dankook University. (in Korean)
- Kim, G.S., Lim, Y.K., An, J.H., Lee, J.S., and Lee, C.S. 2014a. Carbon budget in campus of the national institute of ecology. Korean Journal of Ecology and Environment 47: 167-175. (in Korean)
- Kim, I.H., Oh, K.S., and Jeong, S.H. 2011. An analysis of relationship between carbon emission and urban spatial patterns. Spatial Information Research 19: 61-72. (in Korean)
- Kim, J.S. 2016. A study on the development of multi-layer planting model by climate change and estimation of carbon budget in ecological restoration site at urban park. Ph.D. Thesis, Kongju National University. (in Korean)
- Kim, J.S., Kong, S.J., and Yang, K.C. 2014b. A study on the soil CO₂ efflux in *Quercus acutissima* stand at Mt. Bulam urban nature park. Korean Journal of Environment and Ecology 28: 762-768. (in Korean)
- Kim, K.G., Cho, D.G., Kim, N.C., and Min, B.M. 2000. A study on the development of techniques for urban forest restoration and management- focus on the restoration of origin vegetation and improvement of biodiversity. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology 3: 27-37. (in Korean)
- Kim, K.J. 2013. Characteristics of carbon budget according to planting types in urban park - The case study of Dujong park. Master's Thesis, Kongju National University. (in Korean)
- Kim, U.S. 2007. Practicable reviews on environmental aspects in urban management planning in Seoul. Seoul Development Institute. (in Korean)
- Kwon, Y.A. 2002. The influence of urban green areas on ambient air temperature in Seoul. Ph.D. Thesis, Konkuk University. (in Korean)
- Lee, N.Y. 2011. Estimation of carbon storage in three cool-temperate broad-leaved deciduous forests at Bukhansan national park, Korea. Journal of National Park Research 2: 53-57. (in Korean)
- Lee, K.K. 2003. Sustainability indicators of greenspace in apartment sites. Ph.D. Thesis, Seoul National University. (in Korean)
- Lee, S.J. 2012. A study on estimation method of the carbon dioxide storage capacity using airborne LiDAR data in managed forests. Master's Thesis, University of

- Seoul. (in Korean)
- O'Meara, M. 1999. Reinventing cities for people and the planet. Worldwatch, Washington.
- Park, E.J. 2009. Quantification of CO₂ uptake by urban trees and greenspace management for C sequestration. Gyeonggi Research Institute. (in Korean)
- Park, E.J. and Kang, K.Y. 2010. Estimation of C storage and annual CO₂ uptake by street trees in Gyeonggi-do. Korean Journal of Environment and Ecology 24: 591-699. (in Korean)
- Seo, K.W. 2015. Estimation of soil carbon storage by urban green spaces. Ph.D. Thesis, Korea University. (in Korean)