

산림관리에 따른 기초지자체 규모의 탄소중립 가능성 평가* - 파주시와 고성군을 대상으로 -

이도형^{1),2)} · 최혜영^{3),4)} · 김주영⁵⁾ · 정유경⁶⁾ · 김승호⁷⁾

- ¹⁾ 한국기후변화연구원 에너지환경연구실 주임연구원 · ²⁾ 강원대학교 조경학과 학생 ·
³⁾ 서울대학교 농림생물자원학부 교수 · ⁴⁾ 서울대학교 농업생명과학연구원 겸무연구원 ·
⁵⁾ 서울대학교 산림과학부 학생 · ⁶⁾ 한국기후변화연구원 에너지환경연구실 부연구위원 ·
⁷⁾ 강원대학교 생태조경디자인학과 교수

Carbon neutrality potentials in local governments under different forest management*

- The Study Case of Paju and Goseong -

Lee, Do-Hyung^{1),2)} · Choe, Hye-Yeong^{3),4)} · Kim, Joo-Young⁵⁾ ·
Cheong, Yu-Kyong⁶⁾ and Kil, Sung-Ho⁷⁾

- ¹⁾ Dept. of Energy&Environment Research, Korea Research Institute on Climate Change, Associate Researcher,
²⁾ Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University, Student,
³⁾ Dept. of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, Professor,
⁴⁾ Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Adjunct Researcher,
⁵⁾ Dept. of Forest Sciences, Seoul National University, Student,
⁶⁾ Dept. of Energy&Environment Research, Korea Research Institute on Climate Change, Senior Researcher,
⁷⁾ Dept. of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University, Professor.

ABSTRACT

* 본 연구는 2021년도 한국환경복원기술학회 추계학술대회에서 발표한 ‘산림관리 방안에 의한 산림 탄소흡수량 변화 산정’을 발전시킨 것으로, 산림청의 재원으로 ‘숲속의 한반도 탄소중립 실현을 위한 평화도시 조성 기반 구축’ 연구의 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 이에 감사드립니다.

First author : Lee, Do-Hyung, Dept. of Energy&Environment Research, Korea Research Institute on Climate Change
Dept. Landscape Architecture, Kangwon National University, Student,
Tel : +82-33-259-0166, Email : dhl@kric.re.kr

Corresponding author : Choe, Hye-Yeong, Dept. of Agriculture, Forestry and Bioresources, Research Institute of
Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Professor,
Tel : +82-2-880-4756, Email : hy.choe@snu.ac.kr

Received : 21 March, 2022. **Revised** : 30 May, 2022. **Accepted** : 23 May, 2022.

We evaluated the effect of CO₂ offsetting by estimating changes in carbon uptake under various forest management scenarios and proposed forest management strategies to achieve carbon neutrality. Paju and Goseong, which have relatively large forest areas but different industrial characteristics, were selected for the study sites. The current state of forest distribution was analyzed using forest type maps and aerial photographs, and the amount of carbon uptake was calculated using the equation presented by the IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories and the national emission/absorption coefficients from the Korea National Greenhouse Gas Inventory Report. As of 2015, the forest carbon absorption in Paju and Goseong was 49,931 t/yr and 94,225 t/yr, respectively, and the annual carbon absorption per unit area was 2.28 t/ha/yr and 2.16 t/ha/yr. Under the forest management scenarios, the annual maximum carbon absorption per unit area is estimated to increase to 5.68 t/ha/yr in Paju and 4.22 t/ha/yr in Goseong, and this absorption would increase further if urban forests were additionally created. Even if the current forests of Paju and Goseong are maintained as they are, emissions from electricity use can be sufficiently offset. However, by applying appropriate forest management strategies, emissions from sectors other than electricity use could be offset. This study can be applied to the establishment of carbon absorption strategies in the forest sector to achieve carbon neutrality.

Key Words : *Climate Change, Carbon Uptake, Renewal of Tree Species, Renewal of Tree AGE Class, CO₂ Offset*

I. 서 론

지구온난화로 인하여 전 세계적으로 산불, 홍수, 이상 기후 등 다양한 기후변화 문제가 발생하고 있다(Lee and Park, 2009). 최근 발표된 IPCC 6차 보고서(IPCC, 2021)에 따르면 대기 속 CO₂ 농도는 산업혁명 이전 280ppm에서 410ppm으로 지속적으로 증가하였으며, 지난 20년 동안(2001-2020) 지구 평균기온이 1850-1990년에 비해 0.99℃ 상승하였다. 이에 따라 인간의 활동으로 인해 야기되는 지구온난화를 최소화하기 위해 유엔 기후행동 정상회의, 유엔기후변화협약 당사국총회에서 미국, 영국, 유럽연합, 일본 등 세계 주요 국가들은 2050년까지 온실가스 순배출량을 제로로 하는 탄소중립을 선언하고 있다. 우리나라 또한 2018년 기준 세계 8위의 온실가스 다배출 국가로서 심각성을 인지하고 ‘국가 2050 탄소중립’¹⁾을 선언하였다. 국가

2050 탄소중립 선언에서는 경제구조의 저탄소화, 신유망 저탄소산업 생태계 조성, 탄소중립 사회로의 공정전환 등의 3대 정책방향을 수립하였고, 특히 10대 과제 중 도시·국토 저탄소화 및 지역중심의 탄소중립 실현 등을 제시하여 국토의 흡수능력 강화와 함께 지역주도 탄소중립을 촉진하며 지자체의 책임 및 역할 강화 필요성을 강조하고 있다(Ministry of Environment, 2021).

산림은 탄소흡수 및 저장소로서의 기능으로 인해 자연 기후 솔루션(Natural Climate Solutions, NCS) 기반의 탄소중립을 달성하기 위한 여러 방안 중 하나로 주목되고 있다(Choe and Thorne, 2017; Mitchard, 2018). 특히 2021년 11월에 개최되

1) 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 (약칭 : 탄소중립기본법) 2조 3항에서는 탄소중립을 다음과 같이 정의한다. “탄소중립”이란 대기 중에 배출·방출 또는 누출되는 온실가스의 양에서 온실가스 흡수의 양을 상쇄한 순배출량이 영(零)이 되는 상태를 말한다.

있던 COP26에 참가한 127개국이 서명 채택한 ‘산림·토지 이용 선언(Glasgow leaders declaration on forest and land use)’에는 지속 가능한 산림 관리, 산림 보존 및 복원 등의 내용이 포함되었다. 우리나라의 산림면적은 2015년 기준 6,334,615ha로 국토면적의 약 63%이다. 효율적인 관리에 따라 흡수원으로 큰 역할을 할 수 있는 잠재성을 갖고 있어 국내에서도 「2050 탄소중립 추진전략」(Ministry of Environment, 2020), 「2050 탄소중립 산림부문 추진전략」(Korea Forest Service, 2021) 등에서 산림의 탄소흡수 기능 강화를 계획하고 있다. 이 전략안에서 산림청은 불균형한 산림의 영급 구조 개선, 벌기령 조정, 탄소흡수 능력과 환경적응력이 우수한 수종의 조림 확대, 도시, 섬, 유희토지 등에 신규 산림 조성 등의 사업을 계획하고 있으며, 이 계획들을 통해 탄소흡수 효율을 극대화하기 위해서 다양한 방안 에 대한 정량적인 평가 자료가 필요하다.

해외에서는 다양한 산림관리 방안 에 따른 탄소저장량과 생태계서비스간의 차이를 파악하기 위해 다양한 연구가 진행되었다. Bottalico et al.(2016)은 이탈리아 Molise 지역을 대상으로 세 가지 산림관리 시나리오에 따른 탄소저장과 목재 생산 간에 트레이드오프가 어떠한 양상으로 나타나는지 평가하였고, Trivino et al.(2015)은 7가지 산림관리 시나리오에 따른 50년간의 목재 생산과 탄소고정량 변화를 추정하였으며, Creutzburg et al.(2017)은 미국 오레곤주 서부 해안가 지역을 대상으로 다양한 산림관리 시나리오에 따른 90년간의 목재 생산량과 탄소저장량의 변화를 추정하는 연구를 진행하였다. 국내에서도 산림관리 또는 녹지관리를 통한 탄소저장 및 흡수 방안과 관련된 연구가 진행되었다. Cho et al.(2020)은 도시의 공공녹지에 의한 탄소의 연간 흡수 및 저장을 계량화하고, 탄소저감 효과를 증진하기 위한 녹지구조의 개선방안을 제시하였고, Kim et al.(2021)은 홍천 가리산을 대상으로 산림관리 최적화 방안과 목재생산·

탄소저장·수원함양 가치 사이의 상호관계를 분석하였다. Lee and Lee(2012)는 163개의 지방자치단체를 대상으로 지역 산림의 탄소저장량을 이용하여 지방자치단체의 탄소중립수준을 평가하였고, Lee et al.(2019)은 서울시 도시녹지의 탄소저장량 및 흡수량을 지도화하여 지역에 따른 도시녹지 확대 필요성을 제시하였다. 이처럼 다양한 연구가 진행되고 있지만, 기존의 연구들은 주로 지자체의 산림과 녹지 면적 확대 필요성에 대해 강조하고 있어 수종 및 영급 갱신 등의 산림관리 방안 에 대한 탄소흡수량 변화를 파악하는 연구는 상대적으로 미흡하다.

따라서 본 연구의 목적은 지자체 중심의 탄소중립 실현을 위해 산림의 수종 및 영급 갱신 등의 산림관리 시나리오를 통해 확보할 수 있는 미래 탄소흡수량 변화를 추정하여 산림관리 방안의 효과를 평가하고, 필요한 탄소흡수량 확대 정책으로서의 활용방안을 제시하는 것이다.

II. 연구방법

본 연구는 지자체의 산업 구조와 산림 분포 등을 고려하여 성격이 다른 두 지자체를 선택하였으며, 선택된 경기도 파주시와 강원도 고성군 두 지역을 대상으로 수종 및 영급 갱신 등의 산림관리 시나리오에 따른 연간 탄소흡수량의 변화를 파악하였다. 산림관리 시나리오는 「2050 탄소중립 산림부문 추진전략」(Korea Forest Service, 2021)에서 제시하는 주요 전략 중 유지, 갱신, 신규 조성 등 세 가지 방향을 선택하여 현재 산림을 그대로 유지하는 경우, 수종 및 영급 갱신을 할 경우 및 타토지에서 녹지로 전환할 경우 등으로 시나리오를 설정하여 산림 및 도시 녹지의 흡수량 변화를 추정하였다. 그 후 본 연구에서 산정한 산림의 탄소흡수 변화량을 2015년 기준 대상지의 탄소배출량과 비교하여 산림관리 시나리오에 따른 탄소흡수 효율성을 평가하였다.

1. 연구대상지 선정

본 연구는 기존에 한반도 탄소중립특구의 실현 가능성을 탐색하고자 평화의 숲 등 신규 산림 조성에 적극적인 지자체 중 시 단위와 군 단위 규모의 성격을 각각 파악하기 위해 파주시와 고성군을 대상지로 선정하였다. 파주시는 지속적으로 도시화가 진행되고 있으나 도시계획 수립 시 생태계 보전, 지속가능성 및 탄소저감을 중요하게 고려하고 있고(Paju, 2017), 각 개발 사업 계획 시 녹지를 확충할 예정으로 산림관리 시나리오를 적용하여 다양한 관리 방식의 결과를 예측하고자 하였다.

고성군은 도심 대부분 지역이 산림지역이나 2020년 큰 산불로 인한 피해를 복원하기 위하여 3년 전부터 조림 사업을 실시하고 있고, 이외에도 동해안 해안방재림, 탄소상쇄 평화의 숲, 산불예방 숲 가꾸기 등 다양한 조림 계획을 수립하고 있다(Dept. of Forestry Goseong, 2021). 하지만 신규 조림이 가능한 면적이 넓지 않아 신규 녹지 조성보다는 간벌과 수종갱신 등의 산림관리 시나리오를 적용하여 탄소흡수원 확대 가능성을 예측하고자 하였다.

2. 산림관리 시나리오 수립

1) 대상지 현황 분석

대상지의 산림 분포 현황을 분석하기 위해 임상, 수종, 영급 등 다양한 속성 정보를 포함하고 있는 임상도를 이용하여 파주시와 고성군의 산림 현황을 분석하였다. 전체를 9등급으로 나누어 10년 단위로 각 산림 단위의 수관점유 비율이 50% 이상인 임령 정보를 획득하여 각 영급 등급에 속하는 산림면적을 계산하였고, 주요 수종 분포 면적, 비율 및 각 수종에 대한 영급 분포 비율을 파악하였다. 파주시의 경우 구도심 지역의 도시숲 신규 조성 가능 면적을 산정하기 위해 지도 애플리케이션의 항공사진을 활용하여 나지와 초지를 파악하였고, 접경지역으로 항

공사진이 제공되지 않는 금촌의 북서부 지역은 대상지에서 제외하였다.

2) 파주시 산림관리 시나리오

(1) 수종 갱신 시나리오

파주시에 넓게 분포하는 리기다소나무는 과거 연료용 또는 토사 유출 방지를 위한 사방용으로 주로 식재되었으나, 수령이 40년 이상이 되면 푸사리움가지마름병에 감염되어 피해를 입을 수 있고 4영급이 되면 임분 생장이 둔화된다(Lee, 2013). 따라서 산림관리 시나리오에 리기다소나무 갱신을 포함하였으며, 리기다소나무 대신 식재하는 수종은 「주요 산림수종의 표준 탄소흡수량」(Korea Forest Research Institute, 2012)에 따라 리기다소나무보다 단위면적 당 연평균 탄소흡수 효율이 약 2배 이상 높은 신갈나무로 선정하였다. 최종적으로 4영급 이상의 리기다소나무를 2영급의 신갈나무로 갱신하는 산림관리 시나리오를 수립하였다.

(2) 도시 유희부지 이용 신규 조림 시나리오

파주시는 신도심 지역의 경우 대부분 녹지계획이 잘 되어있어 신규 도시숲 가용부지가 거의 없기 때문에 본 연구에서는 운정신도시의 북동쪽에 인접한 금촌 구도심을 대상으로 도시숲을 신규 조성하는 시나리오를 수립하였다. 2018년 기준의 항공사진을 이용하여 도시숲 신규 조성 가능 지역을 파악하였으며, 하천변과 도로변 등의 나지와 초지를 디지털타이핑하여 신규 조성 가능 면적을 산출하였다. 파악한 도시숲 신규 조성 가능 지역에 2영급의 혼효림을 조성하는 산림관리 시나리오를 적용하였다(Figure 1).

3) 고성군 산림관리 시나리오

고성군은 신규 조림이 가능한 면적이 적어 탄소흡수 효율을 높일 수 있는 산림관리 방안으로 수종 및 영급 갱신 시나리오를 적용하였다. 첫째, 수종을 유지하면서 영급을 갱신하는 시나리

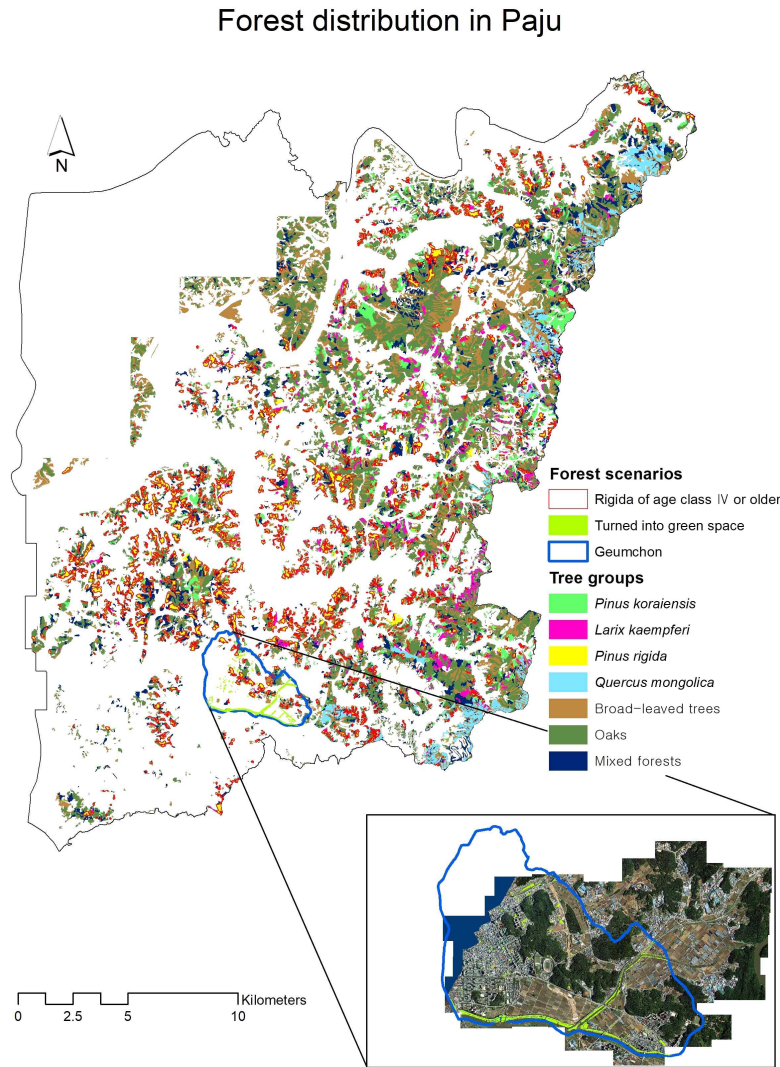


Figure 1. Forest distribution and barren area in Paju

오로 탄소흡수량에 충분한 차이가 있는 영급을 선택하기 위해 약 2배의 탄소흡수량 차이가 있는 소나무 7영급과 3영급을 선택하였고(Lee et al, 2019), 10년마다 7영급 이상의 소나무를 3영급으로 갱신하는 시나리오를 수립하였다. 둘째, 수종 갱신 시나리오는 고성군 전체 소나무림의 58.4%를 차지하는 5영급 이상의 소나무를 10년마다 지위지수²⁾가 높은 2영급의 신갈나무로 갱

신하는 시나리오를 수립하였다(Figure 2).

3. 탄소흡수량 산정

대상지 산림의 연간 탄소흡수량을 산정하기 위하여 「국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한

2) 지위를 판정하기 위하여 수종별, 지역별로 기후, 지세, 토양조건 등의 환경요인을 조사하고 점수화한 것을 말한다.

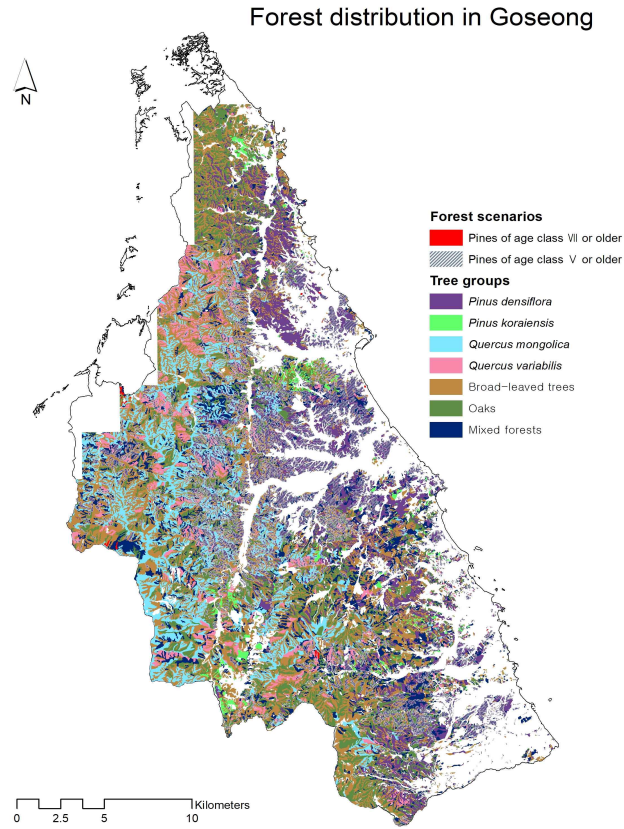


Figure 2. Forest distribution and in Goseong

2006 IPCC 가이드라인」(IPCC, 2006)에서 제시하는 식(1)을 활용하였다. 지위지수는 선행연구의 수종별 지위지수를 적용하였고(Lee, 2013), 지위지수가 개발되지 않은 수종에 대해서는 국내 산림의 평균 지위지수인 12를 적용하였다. 영급은 Ryu et al.(2016)이 사용한 방법을 참고하여 2015년부터 2045년까지 10년마다 임상도의 임분별 영급을 한 영급씩 증가시켰다. 이러한 지위지수와 영급을 바탕으로 KFRI(2018)의 「입목재적·바이오매스 및 임분수확표」를 활용하여 수종 및 영급별 정기평균성장량(m^3/ha)을 결정하였다. 국내 산림부문의 온실가스 인벤토리는 Tier 2 수준에서 산정되고 있으나, IPCC

가이드라인에서는 Tier 2 수준의 계수에 대한 기본값이 제공되지 않기 때문에 NIR(2020)에서 제시하는 국가고유 배출·흡수계수를 활용하여 (Table 1) 수종별 영급별로 면적 단위당 흡수량($t/ha/yr$)을 산정하였다. 파주시의 도시 유희부지를 이용한 신규 조림 시나리오에서 도시림은 산림과 성장환경이 다르기 때문에 탄소흡수량 산정방법은 산림과 동일하나 바이오매스 확장계수가 산림수목을 대상으로 개발된 수치이므로, 도시수목 전환계수 0.8을 곱하여 보수적으로 산정하였다(Nowak and Crane, 2002). 탄소중립 실현을 위한 산림관리 전략 효과를 파악하기 위해 본 연구에서는 산림의 탄소흡수로 범위를 한정

Table 1. National specific expansion factors in the forest land(GIR, 2020)

Forest type	Tree species	Basic wood density (D)	Biomass expansion factor (BEF)	Root to shoot ratio (R)	Carbon fraction
Coniferous	<i>Pinus densiflora</i> in Kangwon	0.42	1.48	0.26	0.51
	<i>Pinus densiflora</i> in Central area	0.47	1.41	0.25	
	<i>P. koraiensis</i>	0.41	1.74	0.28	
	<i>Larix kaempferi</i>	0.45	1.34	0.29	
	<i>P. rigida</i>	0.50	1.33	0.36	
	Other coniferous	0.46	1.43	0.27	
Deciduous	<i>Q. acutissima</i>	0.72	1.45	0.31	0.48
	<i>Q. mongolica</i>	0.66	1.60	0.39	
	Other deciduous	0.68	1.51	0.36	
Mixed forest		0.57	1.47	0.63	0.50

Table 2. Estimation of greenhouse gas emissions from electricity uses(unit : KtCO2eq)

Cities	2005	2015	2025	2035	2045
Paju	984.4	3,656.9	6,493.3	9,188.3	11,883.3
Goseong	95.6	119.7	145.1	168.5	191.8

하였다.

$$\Delta C = A \cdot V \cdot BEF \cdot D \cdot (1 + R) \cdot CF \quad (1)$$

ΔC : Carbon uptake(tC/ha·yr)

A : Area(ha)

V : Volume(m³/ha)

BEF : Biomass expansion factor

D : Basic wood density(td.m./m³)

R : Root to shoot ratio

CF : Carbon fraction

4. 지역별 전력 소비에 따른 CO₂ 배출 전망

산림관리 시나리오를 통하여 확보한 탄소흡수량이 지역 CO₂ 배출 상쇄에 기여하는 정도를 파악하기 위해 국립환경공단이 산정하고 경기도(2020)와 강원도(2020)에서 제공한 ‘기초지자체 온실가스 배출량’을 이용하였다. 배출량이 계속하여 증가하고 있는 전력사용량을 대상으로 기준년도를 2005년으로 하여 30년간의 배출

량을 인용 및 추정하였다. 추정은 기존에 산정된 2005년~2017년도의 배출량을 대상으로 2045년까지의 배출 추정량을 선형회귀분석을 이용하였다. 배출량 추정에 해당 기간 동안 CO₂ 배출은 감축을 위한 노력이 전혀 이루어지지 않는다는 것을 전제하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 연구대상지 현황

임상도를 이용하여 두 대상지의 영급 분석 결과, 파주시와 고성군 모두 4영급과 5영급 산림이 각각 88%, 77%로 산림 면적의 대부분을 차지하였다(Table 3). 파주시의 산림 면적은 27,188ha이며, 전체 면적 67,289ha 중 40.4%를 차지하였고, 주요 수종으로는 기타참나무류(Oaks, 34.3%), 기타활엽수(Broad-leaved trees, 21.9%), 리기다소나무(*Pinus rigida*, 9.3%) 등이었다(Table 4).

고성군의 전체 면적은 66,111ha이고, 산림 면적은 52,098ha로 전체 면적의 78.8%에 해당하는

Table 3. The ratio of main tree species by age class in study areas

Cities	Tree species	Area (ha)	Age class(%)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Paju	Oaks	8,399.4	-	0.4	0.6	44.0	54.8	0.2	-	-	-
	Broad-leaved trees	5,363.4	3.2	3.9	10.2	60.1	22.4	0.2	-	-	-
	Mixed forests	2,628.7	1.1	0.7	2.0	54.1	41.8	0.2	-	-	-
	<i>Pinus rigida</i>	2,261.9	0.8	0.0	3.2	55.3	40.5	0.3	-	-	-
	<i>Pinus koraiensis</i>	1,404.5	13.9	6.1	23.7	53.0	3.2	0.1	-	-	-
	<i>Quercus mongolica</i>	1,010.8	-	-	-	33.7	61.8	4.5	-	-	-
	<i>Larix kaempferi</i>	872.1	9.3	0.5	6.5	80.8	3.0	-	-	-	-
Go seong	Broad-leaved trees	12,474.0	1.5	2.1	8.8	41.6	39.0	5.9	1.2	-	-
	<i>Pinus densiflora</i>	11,561.2	2.0	4.7	5.1	29.8	37.8	20.4	0.2	-	-
	Oaks	6,890.2	4.1	2.6	7.3	53.3	30.1	2.3	0.3	-	-
	<i>Quercus mongolica</i>	5,758.7	-	0.9	10.6	74.6	13.0	0.2	0.7	-	-
	<i>Quercus variabilis</i>	1,989.6	0.1	1.8	12.3	61.9	21.3	2.6	-	-	-
	Mixed forests	4,452.2	0.3	1.6	12.1	39.0	39.8	6.5	0.7	-	-
	<i>Pinus koraiensis</i>	543.3	10.9	27.1	25.7	36.3	0.0	-	-	-	-

Table 4. Main tree species and its area in study areas

Paju			Goseong		
Tree Species	Area (ha)	Ratio (%)	Tree Species	Area (ha)	Ratio (%)
Oaks	8,399	34.3	Broad-leaved trees	12,474	27.9
Broad-leaved trees	5,363	21.9	<i>Pinus densiflora</i>	11,561	25.9
<i>Pinus rigida</i>	2,262	9.3	Oaks	6,890	15.4
Mixed forests	2,629	10.8	Mixed forests	4,452	9.9

다. 군 서부에는 백두대간을 따라 남쪽부터 신선봉, 미시령, 마산, 향로봉 등이 분포하고, 고성군 산림을 구성하는 주요 수종으로는 기타활엽수(Broad-leaved trees, 27.9%), 소나무(*Pinus densiflora*, 25.9%), 기타 참나무류(Oaks, 15.4%) 등이 분포하고 있다(Table 4).

2. 산림관리 시나리오에 따른 탄소흡수량 변화

1) 파주시

(1) 수종 및 영급 갱신 없이 현재 산림을 유지할 경우

수종 및 영급 갱신 없이 현재 산림을 그대로 유지할 경우 파주시의 산림 탄소흡수량은 2015년에 49,931t/yr에서 2045년에 40,436t/yr으로 약 23% 감소하였고, 단위 면적당 탄소흡수량은 2015년 2.28t/ha/yr에서 2045년 1.84t/ha/yr으로

감소하는 것으로 나타나 영급 및 수종갱신 없이 현재 산림을 유지할 경우 시간이 지남에 따라 탄소흡수량이 점차 감소할 것으로 추정되었다.

(2) 도시 유휴부지를 이용하여 2영급 혼효림을 조성할 경우

도시 유휴부지를 이용하여 도시숲을 조성할 수 있는 면적은 28.1ha이었다. 이 지역에 2영급의 혼효림을 조성할 경우 2015년~2045년 기간 연간 흡수량은 54.1~81.9tC/yr 증가하고, 단위 면적당 탄소흡수량은 1.93~2.91t/ha/yr 증가시킬 수 있을 것으로 추정되었다.

(3) 리기다소나무 4영급 이상을 신갈나무 2영급으로 갱신할 경우

파주시의 리기다소나무 4영급 이상(2,262ha)

Table 5. Changes in carbon uptake in case current forests are maintained

Carbon uptake	Year	Paju		Goseong	
		t/yr	t/ha/yr	t/yr	t/ha/yr
	2015	49,931	2.28	94,255	2.16
	2025	45,599	2.08	85,418	1.96
	2035	42,286	1.93	78,025	1.79
	2045	40,436	1.84	73,082	1.67

Table 6. Changes in carbon uptake under different forest management scenarios

Cities	Scenario	Year	Maintain (t/yr)	Carbon uptake (t/ha/yr)	Renewal (t/yr)	Carbon uptake (t/ha/yr)
Paju	Renewing <i>Pinus rigida</i> with <i>Quercus mongolica</i>	2015	5,174	2.29	12,855	5.68
		2025	3,558	1.57	8,504	3.76
		2035	2,564	1.13	6,194	2.74
		2045	1,939	0.86	5,301	2.34
	Creating urban forest in barren areas	2015	-	-	81.9	2.91
		2025	-	-	72.2	2.56
		2035	-	-	62.1	2.21
		2045	-	-	54.1	1.93
Goseong	Renewing the 7-age-class <i>Pinus densiflora</i> to the 3-age-class	2015	20,517	1.77	20,544	1.78
		2025	17,838	1.54	20,520	1.78
		2035	14,710	1.27	22,325	1.93
		2045	12,066	1.04	23,117	2.00
	Renewing <i>Pinus densiflora</i> with <i>Quercus mongolica</i>	2015	20,517	1.77	48,754	4.22
		2025	17,838	1.54	48,502	4.20
		2035	14,710	1.27	36,571	3.16
		2045	12,066	1.04	31,104	2.69

을 지위지수가 높은 신갈나무 2영급으로 갱신할 경우 탄소흡수량은 2015년 기준 5,174t/yr에서 12,855t/yr으로 60% 정도 증가하고, 면적당 탄소흡수량도 2.29t/ha/yr에서 5.68t/ha/yr으로 갱신하지 않는 경우와 비교하면 탄소흡수 효율이 2배 이상 높은 것으로 추정되었다.

2) 고성군

(1) 수종 및 영급 갱신 없이 현재 산림을 유지할 경우

고성군 산림을 현재 그대로 유지할 경우 탄소흡수량과 면적당 탄소흡수량은 2015년 94,255t/yr, 2.16t/ha/yr에서 2045년 73,082t/yr, 1.67t/ha/yr으로 각각 약 22% 감소하였다. 파주시와 마찬가지로

영급 및 수종갱신 없이 현재 산림을 유지할 경우 시간이 지남에 따라 탄소흡수량이 점차 감소하는 것으로 확인되었다.

(2) 소나무 7영급 이상을 3영급으로 조림할 경우 소나무 중 7영급 이상을 베고 동일 수종 3영급으로 조림할 경우 초기에는 7영급 이상 소나무림의 면적이 작아 영급갱신에 따른 탄소흡수량 증가가 적었으나, 시간이 경과함에 따라 갱신되는 면적이 증가하여 탄소흡수량이 증가하는 경향을 나타냈다. 2045년 기준 현재 산림이 그대로 유지될 경우 탄소흡수량은 12,066t/yr이나 영급 갱신을 할 경우 23,177t/yr으로 흡수량은 48% 증가하였고, 단위 면적당 탄소흡수량은

1.04t/ha/yr에서 2.00t/ha/yr으로 증가할 것으로 예상되었다.

(3) 소나무 5영급 이상을 신갈나무 2영급으로 갱신할 경우

소나무 중 5영급 이상을 지위지수가 높은 2영급의 신갈나무로 갱신할 경우 탄소흡수량의 증가 차이가 크게 나타났다. 그 이유는 5영급 이상의 소나무 면적이 차지하는 비율이 전체 소나무림의 약 58%로 갱신되는 면적이 넓었기 때문이다. 시간이 지남에 따라 탄소흡수량은 점차 감소하였으나, 2045년에도 현재 산림을 그대로 유지한 경우보다 약 2.6배 많은 탄소흡수량을 보였다.

3. 산림관리 시나리오에 따른 CO₂ 배출 상쇄 효과 추정

파주시의 산림은 2015년 기준 전력사용량의 5.0%의 CO₂ 배출 상쇄 효과가 있으나, 2045년까지 현재 산림을 그대로 유지하면 그 상쇄 효과가 1.2%까지 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 리기다소나무 수종갱신 시나리오를 적용할 경우 상쇄 효과는 2015년과 2045년 각각 5.8%와 1.4%로 증가하고, 나지를 도시숲으로 조성할 경우 198.4~300.3t의 CO₂를 흡수할 수 있을 것으로 추정되었다. 고성군의 경우 인구는 적으나 산림 면적이 넓기 때문에 현재 산림을 유지하여도 전력사용으로 인한 CO₂ 배출을 2015년부터 2045년까지 이미 139.7~288.7%를 상쇄하고 있으나, 소나무 영급 갱신 시나리오 적용 시에는 176.1~375.2%의 상쇄 효과를 보여 전력사용으로 인한 CO₂ 외 타 부문에서 배출되는 CO₂도 흡수할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결 론

기후위기 해결을 위해 국제적으로 탄소중립

에 대한 관심이 높아지고 있고, 탄소중립 실행 주체로서 지자체의 의무와 역할이 강조되고 있다. 본 연구에서는 지자체 단위의 탄소중립 실현을 위한 흡수량 확대 방안 중 하나로 산림이 넓게 분포하고 있는 지자체 중 성격과 규모가 상이한 파주시와 고성군을 대상으로 수종 및 영급 갱신 시나리오에 따른 탄소흡수량 변화 추정 및 상쇄 효과를 분석하였다.

파주시와 고성군이 현재 산림을 유지할 경우 2015년 기준 탄소흡수량은 각각 49,931t/yr, 94,255t/yr이고 단위면적당 탄소흡수량은 각각 2.28t/ha/yr, 2.16t/ha/yr으로, 2015년 각 도시에서 소비되는 전력사용량 배출량의 5.0%와 288.7%를 상쇄하고 있다. 하지만 수종 및 영급 갱신 시나리오를 적용하여 산림을 관리할 경우 최대 5.8%(파주시)와 375.2%(고성군)의 상쇄 효과를 얻을 수 있고, 파주시의 경우 잠재 식재공간을 활용하면 최대 81.9t/yr까지 흡수원을 확보할 수 있을 것으로 확인되었다. 현재 산림의 양에 기초하여 지자체 규모의 탄소중립수준을 평가한 Lee and Lee (2012)의 연구에서 파주시와 성격이 유사한 고양시의 탄소중립수준을 0.09%로 평가하여 본 연구의 파주시의 결과와 큰 차이가 없었고, 고성군의 탄소중립수준은 100%를 초과하는 것으로 평가하여 본 연구와 유사한 결과를 도출하였다. 그러나 Lee and Lee (2012)의 연구는 현재의 산림면적에 한정하여 탄소중립 가능성을 평가하였으며, 본 연구는 다양한 산림관리 시나리오에 따라 탄소흡수량의 차이를 평가하고 향후 탄소흡수 효율 향상을 위한 산림관리 전략을 제안하였다는 점에서 의의가 있다.

본 연구는 다음의 한계를 갖고 있다. 첫째, 산림은 대부분 다층식재로 이루어져 있으나 임상도의 주요 수종 구분에 한정하여 탄소흡수량을 산정하였으며, 밀도나 경급 등 본 연구에서 고려하지 못한 요인들에 대한 보완이 필요하다. 둘째, 연구대상 수종을 참나무, 소나무 등 우점군락 유형으로만 한정지어 탄소흡수량을 산정

하였기 때문에 다양한 수종을 고려한 시나리오의 비교 연구가 필요하다. 셋째, 도시지역의 수목은 산림의 수목과 성장환경이 다르기 때문에 개체목의 성장량을 적용하는 것이 바람직할 것이다. 마지막으로 벌채와 조림 시 수반되는 수송, 임도 건설 및 식재 시 배출되는 CO₂ 배출량과 토지이용변화에 따른 잠재적 손실을 포괄하여 평가하거나 기후변화에 따라 산림 자체의 탄소저장 및 흡수 능력에 변화가 올 가능성(Choe and Thorne, 2019)을 고려한다면 본 연구의 결과와 다른 방향의 결과가 도출될 수도 있을 것이다.

References

- Bottalico F, L Pesola, M Vizzarri, L Antonello, A Barbati, G Chirici, P Corona, S Cullotta, V Garfi, V Giannico, R Laforzezza, F Lombardi, M Marchetti, S Nocentini, F Riccioli, D Travaglini and L Sallustio. 2016. Modeling the influence of alternative forest management scenarios on wood production and carbon storage: A case study in the Mediterranean region. *Environmental Research*. 144 : 72-87.
- Choe H and Thorne JH. 2017. Integrating climate change and land use impacts to explore forest coservation policy, *Forest* 8(9) : 321.
- Choe H and Thorne JH. 2019. Climate exposure of East Asian temperate forests suggests transboundary climate adaptation strategies are needed, *Climatic Change* 156(1) : 51-67.
- Creutzburg, MK, RM Scheller, MS Lucash, SD LeDuc and MG Johnson. 2017. Forest management scenarios in a changing climate: trade-offs between carbon, timber, and old forest. *Ecological Applications*. 27(2) : 503-518.
- Dept. of Forestry Goseong. 2021. Goseong begins forestry projects to restore areas damaged by forest fires. (https://www.gwgs.go.kr/prog/bbsArticle/BBSMSTR_00000000487/view.do?nttId=B000000041146Fm7wA0z, accessed by May 30, 2022)
- Gangwondo. 2020. Goseong greenhouse gas emission. (Unpublished data)
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center. 2020. National greenhouse gas inventory report of Korea. (in Korean)
- Gyeonggido. 2020. Paju Greenhouse Gas Emission. (Unpublished data)
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC. 2021. Climate Change 2021 : The Physical Science Basis.
- Jo HK, Park HM and Kim JY. 2020. Carbon reduction and enhancement for greenspace in institutional lands. *Journal of the Korean Institue of Landscape Architecture*. 48(4) : 1-7. (in Korean with English summary)
- Kim DY, Han H and Chung JS. 2021. Management for improving economic and public functions in Mt.Gari leading forest management zone. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 110(4) : 665-677. (in Korean with English summary)
- Korea Forest Service. 2021. 2050 Carbon neutral promotion strategies in Forest Sector. (in Korean)
- Korea Forest Research Institute. 2012. Carbon-protected urban forest. (in Korean)
- Korea Forest Research Institute. 2012. Standard carbon removal of major forest species. (in Korean)
- Korea Forest Research Institute. 2018. Standing timber·Biomass and The collection table of

- forest fraction. (in Korean)
- Lee DH, Kil SH, Jo HK and Choi BG. 2019. Spatial distribution of carbon storage and uptake of urban forests in Seoul, South Korea. *Sensors and Materials*. 31(11) : 3811-3826.
- Mitchard ETA. 2018. The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature* 559 : 527-534.
- Ministry of Environment. 2020. 2050 Carbon neutral promotion strategies. (in Korean)
- Ministry of Environment. 2021. 2021 Carbon neutral implementation plan. (in Korean)
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center. 2020. National Greenhouse Gas Inventory Report. (in Korean)
- Nowak DJ and DE Crane. 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the United States. *Environmental Pollution*. 116(3) : 381-389.
- Lee DK and Park C. 2009. The analysis of potential reduction of CO₂ emission in soil and vegetation due to land use change. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*. 12(2) : 95~105. (in Korean with English summary)
- Lee JH and Lee GG. 2012. Carbon-neutrality assessment of local government's area based on forest carbon storage capacity. *The Journal of Korea Planners Association*. 47(2) : 203-213.
- Lee SK. 2013. A study on the estimation of carbon potential from forest management activities in Korea - Focusing on the introduction of REDD+ scheme. Ph.D dissertation, Korea University. (in Korean)
- Lee SJ, Lim JS and Kang JT. 2019. NIFoS Forest Policy Issues No.129 : Standard carbon uptake of major forest species(ver.1.2). NIFS. (in Korean)
- Paju City. 2017. 2030 Paju Urban Basic Plan. Research report to Paju City. (in Korean)
- Ryu, DH, Lee, WK, Song, CH, Lim, CH, Lee, SG and Piao, DF. 2016. Assessing effects of shortening final cutting age on future CO₂ absorption of forest in Korea. *Journal of Climate Change Research*. 7(2) : 157-167. (in Korean with English summary)
- Trivino M, A Juutinen, A Mazziotta, K Miettinen, D Podkopaev, P Reunanen and M Monkkonen. 2015. Managing a boreal forest landscape for providing timber, storing and sequestering carbon. *Ecosystem Services*. 14 : 179-189.