

접경지역 임상도 자료를 활용한 민북지역 산림의 탄소흡수량 추정 및 분석

김지은 · 홍문현^{ID*} · 염규진 · 류재철 · 김정한 · 임상섭

한국산지보전협회

Estimation and Analysis of Carbon Absorption in the Civilian Control Zone Using Border-Area Forest Type Maps

Ji-Eun Kim, Moon-Hyun Hong^{ID*}, Kyu-Jin Yeom, Jae-Chul Ryu,
Jeong-Han Kim and Sang-Seop Lim

Korea Forest Conservation Association, Daejeon 35262, Korea

요약: 최근 접근 제한으로 임상자료가 구축되지 않았던 민북지역의 임상도가 구축되었으며, 이를 활용하여 민북지역 산림의 탄소흡수량을 산정하고 정량적 분석을 수행하였다. 탄소순흡수량 계산에는 22개 수종별 국가고유계수와 8종의 임목생장량 표가 사용되었으며, 대응되지 않는 수종의 경우 대체수종을 적용하였다. 민북지역의 탄소순흡수량은 전국 평균 및 기후와 산림생태계 조건이 유사한 접경지역과 비교분석되어 민북지역 산림의 구조적·사회적 특성이 탄소흡수능력에 미치는 영향을 고찰하였다. 연구 결과, 민북지역 산림의 연간 평균탄소순흡수량은 약 8.88 톤으로 산정되어, 우리나라 전체 산림의 평균 대비 약 1.42배 높은 수준으로 나타났다. 또한, 접경지역과의 비교에서도 민북지역의 탄소순흡수량이 약 13.3% 높게 나타났다. 이는 활엽수림 비율과 3~4영급 산림 비중이 높은 임상 구조적 특성에 기인한 것으로 분석되었다. 이러한 임상 구조는 장기간 벌채 및 산림경영이 제한된 민북지역의 사회적·제도적 환경 속에서 자연천이에 따른 임분 성숙 과정이 지속된 결과로 판단된다. 이를 바탕으로, 민북지역 산림의 탄소흡수 기능을 정량적으로 분석하였으며, 향후 민북지역의 산림 관리 및 보전에 관한 정책 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: A forest type map for the Civilian Control Zone (CCZ) in the northern border area of South Korea, where access restrictions had long hindered the acquisition of forest inventory data, has been newly established. Using this updated forest type map, this study quantified and examined the forest carbon sink capacity of CCZ. Carbon net uptake was estimated using nationally developed species-specific coefficients for 22 tree species and growth tables for 8 representative species, with ecologically similar substitute species applied where direct correspondence was unavailable. To investigate the effects of social factors on the carbon sequestration capacity, the estimated net carbon sequestration of CCZ forests was compared with the national forest average and adjacent border regions characterized by similar climatic and forest ecosystem conditions. Results indicated a mean annual carbon net uptake of approximately 8.88 CO₂/ha/yr in the forests of CCZ, which is approximately 1.42 times higher than the national forest average. Furthermore, the net carbon sequestration in CCZ was approximately 13.3% higher than that in the adjacent border regions. This difference was primarily attributed to the structural characteristics of forests, including a higher proportion of deciduous forests and a greater dominance of age class III-IV forest stands. These structural attributes are interpreted as the outcome of sustained natural succession and stand maturation processes under long-term social and institutional conditions that have restricted logging and forest management activities in CCZ.

Key words: civilian control zone, access-restricted area, forest carbon sequestration, forest type map

* Corresponding author
E-mail: homh12@naver.com

ORCID
Moon-Hyun Hong ^{ID} https://orcid.org/0000-0002-1087-8293

서론

최근 IPCC 종합보고서에서는 온실가스 감축의 지원이 장기적인 비가역적 위험을 증가시키고 있으며, 산림과 같은 탄소흡수원의 역할이 기후변화 완화의 핵심적인 요소임을 다시 한번 강조하고 있다(Pan et al., 2011; IPCC, 2023). 산림은 탄소를 흡수·저장하는 중요한 자연적 완충재로서 탄소중립 및 국가 온실가스 인벤토리에서 우선적으로 고려되고 있다. 산림의 탄소흡수능력은 단순히 면적에 의해 결정되는 것이 아니라 수종, 임분, 임령 등 복합적인 요인의 영향을 받는다. 또한, 토지이용 및 토지피복의 변화와 산지 관리는 탄소순환과 기후 시스템에 중대한 영향을 미치는 주요 요인으로 지적되어 왔다(Foley et al., 2005). 이러한 요인들은 지역별로 크게 달라질 수 있으며, 지역 단위의 정밀한 산림 탄소흡수량 분석이 국가적 관리와 정책 수립에 필수적이다. IPCC의 지침에서는 국가 수준의 산림 탄소흡수량 추정을 위한 표준 방법론을 제시하고 있으며, 국가 및 지역 특성을 반영할 것을 권장하고 있다(IPCC, 2006). 우리나라의 국가 온실가스 인벤토리에 따르면, 산림은 LULUCF(Land-Use, Land-Use Change and Forestry) 부문에서 가장 중요한 탄소흡수원으로 기능하고 있으며, 최근 보고된 연간 산림 탄소 순흡수량은 약 3,900만 톤 수준으로 평가된다(UNFCCC, 2024).

산림의 바이오매스와 탄소저장량은 표본조사를 통해 도출된 임목생장량 표와 벌채 자료를 기반으로 추정되는 것이 일반적이다. 그러나 탐사 비용과 안전 문제로 인해 많은 지역에서 표본조사가 제한적이며, 특히, 접근 제한 지역에서는 대체 자료의 활용이 필수적이다. 최근에는 위성 기반 원격탐사, 공간 LiDAR, 항공 LiDAR 등의 결합을 통해 대규모 산림생체량 추정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국가별 보정

계수의 도입을 통해 불확실성을 줄이는 연구 또한 진행되고 있다(Chave et al., 2014; FAO, 2020; Kemigisha et al., 2025). 최신 연구에서는 접근 제한 지역의 대면적 산림평가에서 원격탐사 기반의 보완 방법과 국가고유계수의 통합 적용을 다루고 있다(Lee et al., 2025; Thapa et al., 2025).

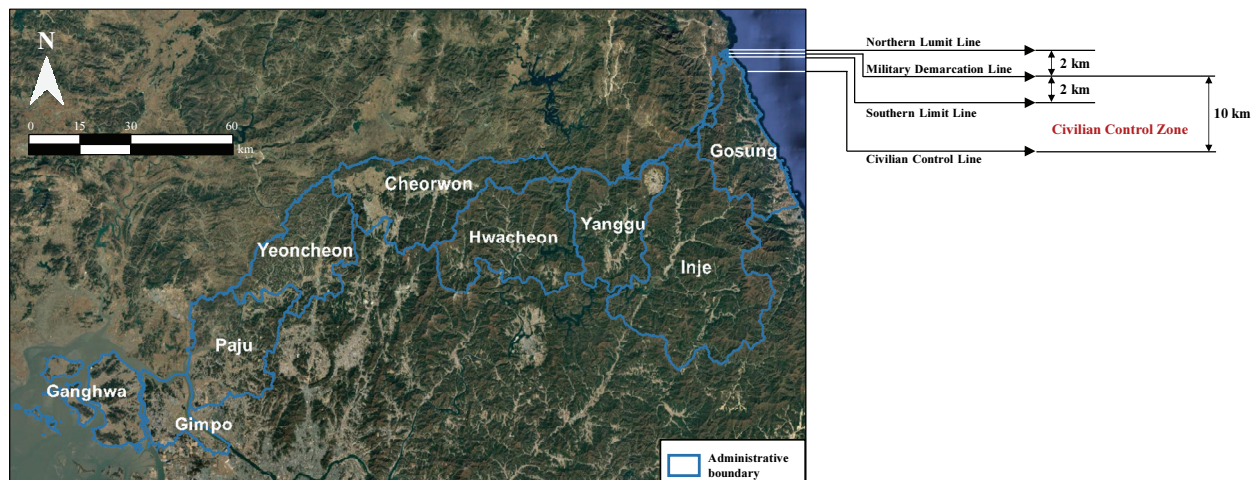
민북지역(Civilian Control Zone, CCZ)은 민간인통제선(Civilian Control Line, CCL) 이북 지역으로 한국전쟁 이후 민간인의 출입이 제한되어 있어 오랜 기간 인위적 이용·관리가 비교적 제한되어 왔고, 이는 산림의 자연천이와 임분 성숙이 상대적으로 온전히 진행될 수 있는 조건을 조성했다(Kim et al., 2021). 결과적으로 민북지역과 인접 DMZ 일대는 높은 생물다양성을 보전하여 국내외에서 ‘무인보전지역(involutary park)’로 주목되어 왔다(Bak et al., 2023). 또한, DMZ를 포함한 생태축의 핵심 구간으로, 산림의 연속성과 자연성이 상대적으로 잘 유지된 것으로 평가된다(Lim et al., 2024).

이에 민북지역의 최신 임상도, 임목생장량 표 및 국가고유계수 활용하여 민북지역 산림의 탄소흡수량을 산정하고, 이를 전국 평균 및 기후·생태적 조건이 유사한 접경지역과 비교함으로써 (1) 산림 분포(수종 및 영급)가 탄소흡수 기능에 미치는 영향과 (2) 접근 및 개발 제한과 같은 사회적 요인이 산림 분포에 미친 장기적 효과를 분석하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상지역

연구대상지역은 Figure 1과 같이 군사분계선(Demilitarized Zone, DMZ)으로부터 남측으로 약 2 km에 위치한 남방한계선과 민간인통제선 사이의 민북지역(민간인통제선 이북 지역)으로, 군사적 보안을 위해 일반인의 출입과 정보 공개



* Specific location information has been removed for military security reasons.

Figure 1. Description of Civilian Control Zone.

가 제한되어 있어 구체적인 위치를 확인할 수 있는 자료는 공개하지 않는다. 민간인통제선은 『군사기지 및 군사시설 보호법』에 따라 군사분계선으로부터 10 km 범위 내에서 지정되며, 군사분계선을 접하는 시·군을 총칭하는 접경지역과 구분된다.

민북지역의 산림은 벌채, 조림, 숲가꾸기 등 산림경영 활동에 따른 토지이용 변화가 제한되어 상대적으로 높은 임분밀도와 안정적인 성장구조를 보이는 것으로 보고되고 있다(NiFoS, 2015; 2019). 이러한 특성으로 민북지역의 산림은 탄소 저장 및 흡수에 대한 잠재적 가치가 높은 지역으로 평가된다. 기후는 한반도 중부 내륙형 기후 특성을 보이며, 다른 지역에 비해 연교차가 크게 나타난다. 강수량은 여름철에 집중되는 전형적인 몬순 기후 특성을 가지며, 최근 극한 강수 및 이상기온의 발생 빈도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 보고된다(KMA, 2020). 민북지역의 생태계는 인위적 간섭이 제한된 영향으로 다양한 산림과 야생동물의 서식지가 보전된 지역으로 알려져 있다. 특히, DMZ와 접경지역 일대에는 멸종위기종을 포함한 다양한 동·식물이 분포하는 것으로 보고되어 있어 생물다양성 보전 측면에서 매우 중요한 지역으로 평가된다(NIE, 2018).

2. 연구 방법

산림의 탄소순흡수량(tCO_2)은 산림이 광합성을 통해 대기 중의 이산화탄소를 흡수한 후 다시 배출하는 양을 제외한 순수한 이산화탄소 흡수량을 의미하며, 식 1과 같이 계산된다(IPCC, 2006).

$$tCO_2 = \Delta V \times D \times BEF \times (1 + R) \times CF \times 44/12 \quad (1)$$

여기서, ΔV 는 임목 순생장량(m^3), D 는 목재기본밀도, BEF 는 바이오매스 확장계수, R 은 뿌리함량비로 지상부 바이오매스 대비 지하부 바이오매스의 비율을 의미하며, 생태계 유형 및 수종 특성에 따라 달라진다(Mokany et al., 2006). CF 는 탄소전환계수, $44/12$ 는 이산화탄소 전환계수로 약 12의 원자량을 갖는 탄소(C)가 연소되면 약 16의 원자량을 갖는 산소(O) 원자 2개와 결합하여 약 44의 분자량을 갖는 이산화탄소(CO_2)가 배출되기 때문에 이를 고려하여 계산한다.

임목 순생장량은 표본조사 지점에서 반복 측측을 통해 임목축적의 변화를 계산하여 결정할 수 있으며, 목재기본밀도, 바이오매스 확장계수 및 뿌리함량비의 경우 벌채조사를 기반으로 결정하는 것이 가장 표준적이고 정확한 방법이다(Chave et al. 2014). 다만, 민북지역의 경우 유실지피로 인한 안전상의 문제와 군사적 보안상 접근이 제한되어 표본조사와

벌채조사의 수행이 현실적으로 불가능하다. IPCC와 국립산림과학원에서는 표본조사가 불가능한 지역에 대하여 국가고유계수와 수종별 임목생장량 표와 같은 자료의 활용을 허용하고 있다. 이에 따라 임상도에서 제공되는 수종 및 영급 정보를 기반으로 국가고유계수(목재기본밀도, 바이오매스 확장계수 및 뿌리함량비), 탄소전환계수 및 임목생장량 표를 활용하여 민북지역 산림의 탄소흡수량을 산정하였다.

탄소흡수량 산정에 활용된 임상도 자료는 2023년에서 2024년에 걸쳐 수행된 『접경지역 임상도 현행화 사업』을 통해 구축된 최신 임상도이며, 2023년도에는 서부-중부권역이, 2024년도에는 중부-동부권역이 구축되었다. 과거 임상도의 경우 접근 제한, 현장조사 불능의 사유로 민북지역의 임상도가 누락되었으나 위 사업을 통해 Figure 2에 제시된 바와 같이 민북지역을 포함하는 산림공간정보가 새롭게 제작되었다. 임상도 자료는 Figure 2와 같이 수종, 영급 등의 자료를 포함하는 공간정보로 이 연구에서 활용된 정보 외에도 임상과 관련된 다양한 정보를 담고 있다. 민북지역에는 총 27종의 수종이 분포(침활혼효림 포함)하며, 침엽수림에는 10개 수종, 활엽수림에는 16개 수종이 포함되었다.

임상도를 기반으로 민북지역의 영급별 산림면적을 분석한 결과, 무림목지와 제지를 제외한 민북지역의 행정구역별 산림면적은 Table 1과 같고, 전체 산림 면적(약 85,968 ha)의 약 83.1%가 4영급 이상으로 나타났으며, 특히 김포시의 경우 5영급이 약 70.9%, 화천군은 6영급이 약 18.5%로 나타나 장령림 비율이 비교적 높은 것으로 분석되었다. 임상별 면적 비율을 비교하면, 활엽수림이 전체 산림의 약 78.0%로 우세하였고, 침엽수림은 약 11.6%, 혼효림은 약 10.4%로 나타났다.

NiFoS(2019)은 산림 수종의 표준탄소흡수량 산정을 위해 소나무, 참나무 등 8개 수종에 대한 성장정보를 기반으로 Table 2와 같이 임목생장량 표를 제시하였으며, 임목 순생장량(ΔV)을 결정하기 위해 활용되었다. 임목생장량 표에 없는 수종은 국립산림과학원에서 제시한 기준에 따라 Table 3과 같이 대체수종을 적용하고, 침활혼효림의 임목생장량에는 소나무(평균)과 참나무(평균)의 중간값을, 명확한 대체수종이 없는 경우에는 IPCC(2006)이 제시한 기준에 따라 생태적으로 유사한 수종 또는 기본값을 적용하였다.

국립산림과학원에서는 LULUCF 분야의 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위해 우리나라 주요 산림의 수종별 국가고유계수를 개발하여 공시하고 있다. 현재 22개 수종에 대한 계수가 개발되어 국가고유계수로 등록되었으며 산림의 탄소흡수량 분석 등의 기초자료로 활용되고 있다. 민북지역 산림의 탄소순흡수량 계산에 사용된 국가고유계수는 Table 4와 같이 22개 수종의 목재기본밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리

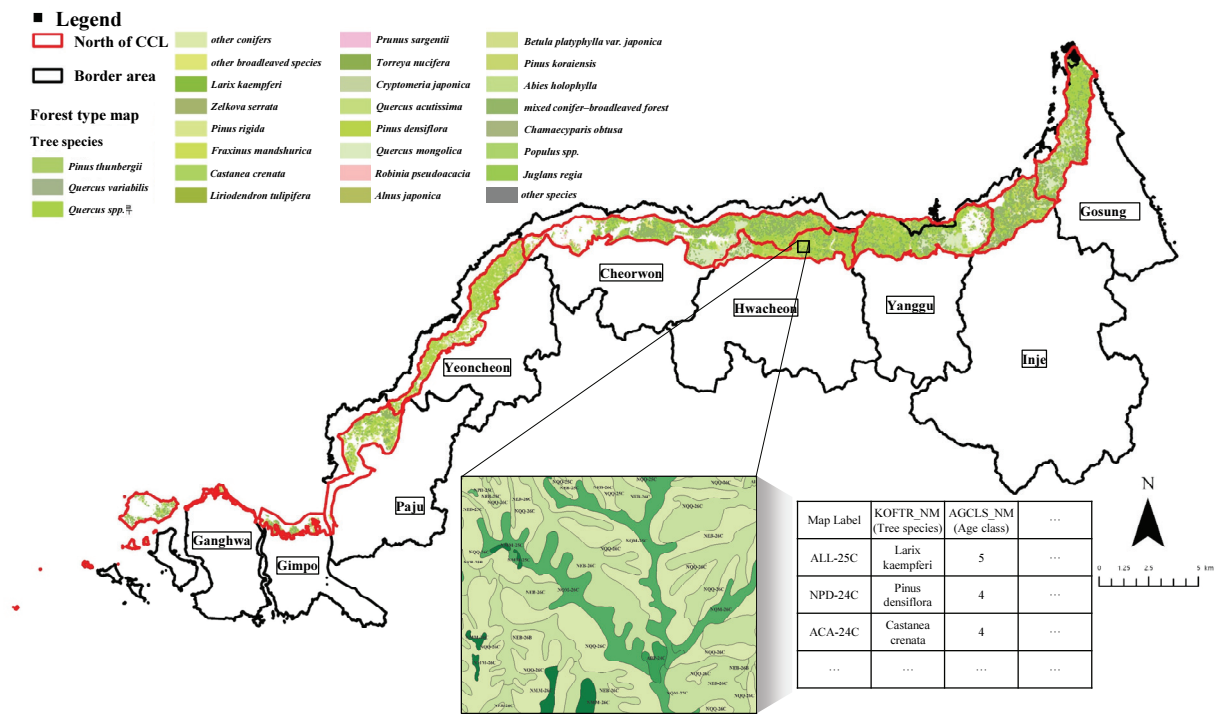


Figure 2. Tree species distribution in the CCZ and an example of forest type map.

Table 1. Forested Area by Administrative District in the CCZ.

Category	Ganghwa	Gimpo	Paju	Yeoncheon	Cheorwon	Hwacheon	Yanggu	Inje	Gosung
Carbon uptake	1,405.28	1,018.27	4,233.12	8,153.90	18,519.71	12,406.20	16,080.81	9,731.15	14,419.60

unit : ha

*Forest area, excluding unstocked and excluded land.

Table 2. Stand yield table of major tree species.

Tree species	1	2	3	4	5	6
<i>Pinus densiflora</i> (Gangwon State)	5.13	6.92	6.56	5.64	4.61	3.66
<i>Pinus densiflora</i> (Korea's central area)	2.22	4.41	7.92	4.11	2.1	1.16
<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.(mean)	3.68	5.67	7.24	4.88	3.36	2.41
<i>Pinus koraiensis</i> Siebold & Zucc	3.19	6.94	6.38	5.35	4.48	3.38
<i>Larix kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	6.29	7.2	6.48	5.82	5.38	5.11
<i>Pinus rigida</i> Mill	2.65	8.16	7.29	5.09	3.42	2.41
<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Siebold & Zucc.) Endl	4.01	6.82	6.32	5.09	3.98	3.18
<i>Quercus acutissima</i> Carruth	4.66	6.57	5.78	5.1	4.54	4.06
<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.	3.33	5.78	3.6	3.25	2.89	2.62
<i>Quercus spp.</i> (mean)	4	6.18	4.69	4.18	3.72	3.34
mixed stand; e.g. <i>Pinus spp.</i> - <i>Quercus spp.</i>	3.84	5.925	5.965	4.53	3.54	2.875

NIFoS(2019). For mixed stands, the average values of pine and oak were applied

 Unit : m³/ha/yr

Table 3. Substitute species for major tree species in the stand yield table.

Major species	Substitute species	Major species	Substitute species
<i>Abies holophylla</i> Maxim.	<i>Larix kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	<i>Betula platyphylla</i> var. <i>japonica</i> (Miq.) Hara	<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.
<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L.f.) D.Don		<i>Castanea crenata</i> Siebold & Zucc.	
<i>Pinus thunbergii</i> Parl.	<i>Pinus koraiensis</i> Siebold & Zucc	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	
<i>Torreya nucifera</i> (L.) Siebold & Zucc.		<i>Prunus sargentii</i> Rehder	
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	<i>Quercus acutissima</i>	Other broadleaved species (various spp.)	
<i>Alnus japonica</i> (Thunb.) Steud.		<i>Populus</i> spp.	
<i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino		<i>Juglans regia</i> L.	
<i>Fraxinus mandshurica</i> Rupr.		<i>Quercus variabilis</i> Blume	<i>Quercus</i> spp.(mean)

For tree species without stand growth and yield table values values from the volume table of a similar species (National Institute of Forest Science) were used as substitutes

Table 4. National default factors and carbon conversion factors for major tree species.

Tree species	Basic wood density (D)	Biomass expansion factor (BEF)	Root-to-shoot ratio (R)	Carbon conversion factor
<i>Quercus variabilis</i> Blume	0.72	1.34	0.32	0.48
<i>Quercus acutissima</i>	0.72	1.45	0.31	
<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.	0.66	1.60	0.39	
<i>Quercus serrata</i>	0.66	1.55	0.43	
<i>Quercus acuta</i> Thunb.	0.83	1.70	0.19	
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0.64	1.47	0.48	
<i>Betula platyphylla</i> var. <i>japonica</i> (Miq.) Hara	0.55	1.30	0.29	
<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	0.46	1.24	0.23	
<i>Populus</i> × <i>tomentiglandulosa</i> T.B.Lee	0.36	1.17	0.16	
<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Siebold & Zucc.) Endl	0.51	2.63	0.50	
evergreen broad-leaved species (various spp.)	0.70	2.29	0.30	0.51
Other broadleaved species (various spp.)	0.68	1.51	0.36	
mixed stand; e.g. <i>Pinus</i> spp.– <i>Quercus</i> spp.	0.57	1.47	0.315	
<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.(Gangwon State)	0.42	1.48	0.26	
<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.(Korea's central area)	0.47	1.41	0.25	
<i>Larix kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	0.45	1.34	0.29	
<i>Pinus rigida</i> Mill	0.50	1.33	0.36	
<i>Pinus thunbergii</i> Parl.	0.48	1.52	0.29	
<i>Pinus koraiensis</i> Siebold & Zucc.	0.41	1.74	0.28	
<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L.f.) D.Don	0.35	1.31	0.23	
<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Siebold & Zucc.) Endl.	0.43	1.34	0.20	0.27
Other conifers (various spp.)	0.46	1.43	0.27	

Using the national greenhouse gas emission and removal factors for 22 species for mixed stands, the average values of pine and oak were applied

Table 5. Substitute species for national default factors and carbon conversion factors.

Major species	Substitute species	Major species	Substitute species
<i>Torreya nucifera</i> (L.) Siebold & Zucc.	<i>Pinus thunbergii</i> Parl.	<i>Castanea crenata</i> Siebold & Zucc.	<i>Quercus mongolica</i>
<i>Abies holophylla</i> Maxim.	<i>Larix kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	<i>iriodendron tulipifera</i> L.	
<i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino	<i>Quercus acutissima</i>	<i>Prunus sargentii</i> Rehder	
<i>Fraxinus mandshurica</i> Rupr.		<i>Quercus</i> spp.	
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.		<i>Populus</i> spp.	
<i>Alnus japonica</i> (Thunb.) Steud.		<i>Juglans regia</i> L.	

For species without coefficient values, the volume table of a similar species (National Institute of Forest Science) was used as a substitute

함량비 및 탄소전환계수이며, 임목생장량 산정과 동일한 기준으로 필요 시 Table 5와 같이 대체수종을 적용하였다. 탄소전환계수의 경우 국제적으로는 0.5를 적용하는 것이 일반적이나(IPCC, 2006; Chave et al., 2014), 국가고유계수에 따라 수종별 차등 값을 적용하여 국내 수종의 생체량 특성을 반영하였다.

결과 및 고찰

민북지역의 탄소순흡수량은 Figure 3과 같이 산정되었다. 민북지역의 연간 탄소흡수량은 약 763,816 톤, 임상도 기준 민북지역 산림 면적은 약 85,968 ha로 탄소순흡수량의 평균

은 약 $8.88 \text{ tCO}_2/\text{ha}/\text{yr}$ 로 분석되었다. 2020년 말 기준 우리나라의 산림 면적은 약 6.29 백만 ha로 전체 국토의 약 62.6%를 차지하며, 환경부 온실가스종합정보센터 및 국가 온실가스 인벤토리에 따르면 우리나라 산림탄소순흡수량이 약 3,930만 톤 내외로 보고되어 우리나라 산림의 연간 평균탄소순흡수량은 약 $6.24 \text{ tCO}_2/\text{ha}/\text{yr}$ 수준으로 평가할 수 있다. 전국 산림 평균 대비 민북지역의 탄소순흡수량 평균은 약 1.42배 높게 나타났으며, 이러한 차이는 민북지역 산림의 수종 및 영급 분포에 따른 영향과 접근 및 개발 제한 등의 사회적 요인이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

사회적 요인에 대한 집중 분석을 위해 민북지역과 연결하여 기후와 산림생태계가 유사한 접경지역의 탄소순흡수량과 비교하였다. 접경지역의 범위는 『접경지역 지원 특별법 시행

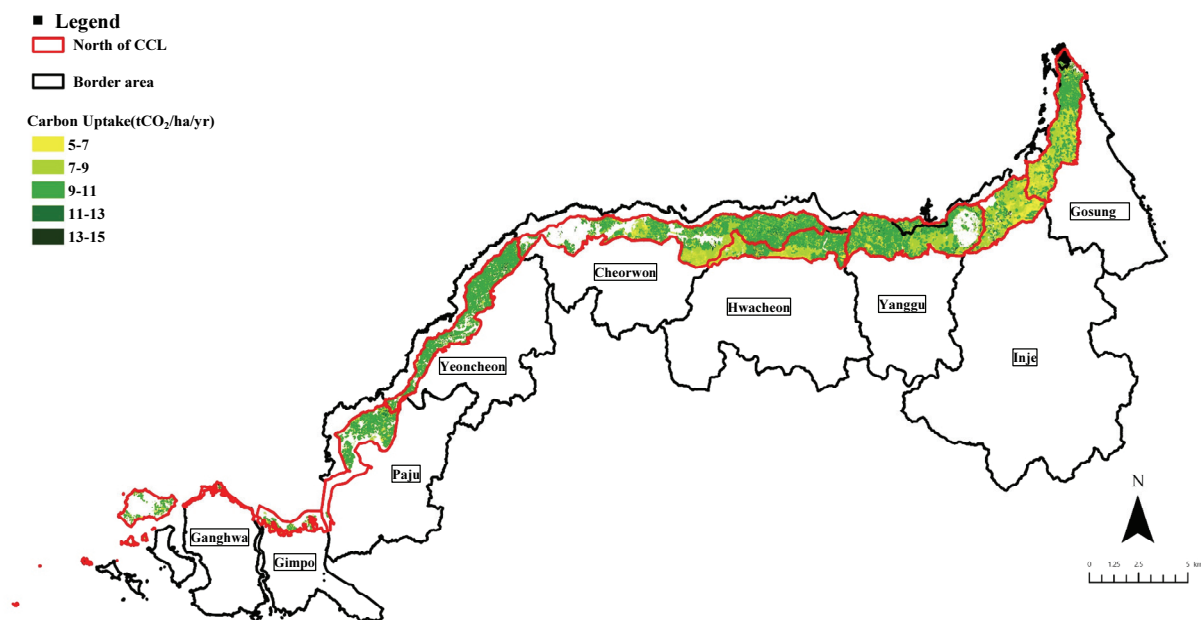


Figure 3. Carbon sequestration capacity of forests in the CCZ.

령』상 비무장지대 또는 해상의 북방한계선과 잇닿아 있는 시·군과 대통령령으로 정하는 시·군을 말하며, 본 연구에서는 Figure 4와 같이 북방한계선과 접하면서 민북지역을 포함하는 9개 시·군(강화군, 김포시, 파주시, 연천군, 철원군, 화천군, 양구군, 인제군 및 고성군)으로 정한다. 접경지역의 탄소순흡수량 산정에는 접경지역 임상도 자료가 활용되어 민북지역 탄소순흡수량 산정과 동일한 방법이 적용되었다. 접경지역 산림의 탄소순흡수량은 Figure 5와 같고, 평균은 약 $7.84 \text{ tCO}_2/\text{ha}/\text{yr}$ 로 분석되었다. 결과적으로 민북지역의 탄소순흡수량 평균이 접경지역에 비해 약 13.3% 높게 나타났으며, 이는 단순한 기후와 산림생태계의 차이보다는 토지 이용의 이력에 따른 차이에 기인한 결과로 해석될 수 있다. 분석에 활용된 임상도 자료를 기반으로 민북지역과 접경지역의 산림 현황을 비교하면, 임상별·영급별 면적 비율이 Table 6과 같이 나타났다. 민북지역의 산림은 접경지역에 비해 활엽수림 면적 비율이 높고, 3~4영급 산림의 비율이 상대적으로 크게 나타났다. 3~4영급 산림은 임목축적이 높고 연간생장량이 안정적으로 유지되는 특성을 가지며, 활엽수림은 침엽수림에 비해 목재기본밀도가 높고 단위 면적당 지상부 및 지하부 바이오매스가 크게 형성되는 경향이 있다(IPCC, 2006; NIFoS, 2019). 이러한 임상 구조적 차이가 결과적으로 민북지역의 상대적으로 높은 탄소순흡수량의 주요 원인이 된 것으로 판단된다. 민북지역과 접경지역의 임상 구조 차이와 민북지역이 지닌 사회적·제도적 특성 사이의 관계를 종합하면, 민북지역의 경우 보안 및 안전상의 이유로 산림경영 활동

에 따른 인위적 개입이 장기간 제한된 지역이 많아 비교적 산림의 자연적 발달 과정이 지속적으로 유지되었을 것으로 판단된다. 선행연구 결과에 따르면, 한반도 중부지역의 산림에서 인위적 교란이 장기간 억제되었을 경우 침엽수림의 유지보다는 활엽수림 또는 침활혼효림으로의 전이가 촉진되는 경향이 보고되었다(NIFoS, 2015). 즉, 민북지역에서 평가된 높은 탄소순흡수량은 자연천이에 따른 임분 성숙 과정과 장기간 접근 및 개발 제한이라는 사회적 요인이 결합되어 형성된 산림 구조의 결과로 해석될 수 있다. 이러한 결과는 민북지역 산림이 지닌 구조적 특성이 탄소흡수 기능에 실질적인 영향을 미치고 있음을 시사하며, 접근 및 개발 제한 지역의 산림이 갖는 기후변화 완화 기능에 대한 정책적 검토의 필요성을 제기한다.

민북지역에 위치하는 9개 시·군에 대하여 행정구역별 산림 탄소순흡수량을 비교하면 Table 7과 같다. 탄소순흡수량의 행정구역별 평균을 분석한 결과, 연천군과 파주시가 각각 $9.96, 9.30 \text{ tCO}_2/\text{ha}/\text{yr}$ 로 높고 인제군과 화천군이 각각 $8.42, 8.45 \text{ tCO}_2/\text{ha}/\text{yr}$ 로 낮게 나타났다. 행정구역별 임상 구조를 분석하면, 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림 면적 비율은 Table 8과 같고, 영급별 면적 비율은 Table 9와 같다. 연천군과 파주시는 활엽수림의 면적 비율이 각각 91.7%, 84.5%로 매우 높고 4영급 비율이 각각 58.1%, 57.4%로 활엽수림의 생장이 매우 활발한 것으로 분석된다. 화천군은 활엽수림의 면적 비율이 83.8%로 높음에도 연간 생장량이 저하되는 5영급 이상의 면적 비율이 60.0%로 높기 때문에 탄소순흡수량이

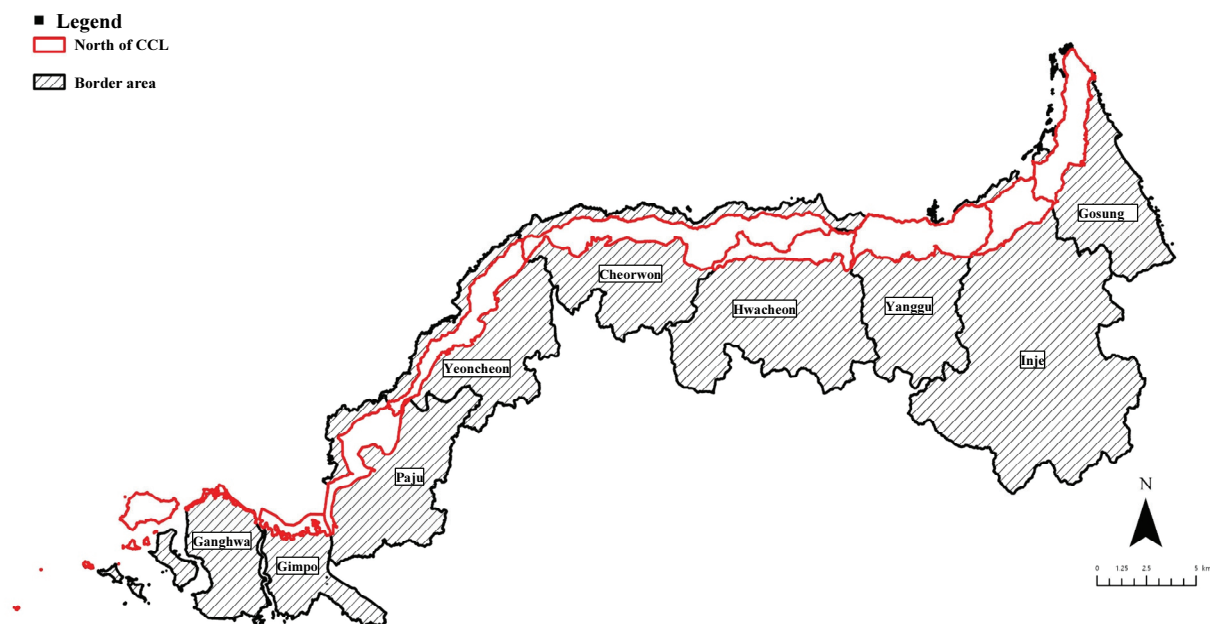


Figure 4. Description of the CCZ and the border area.

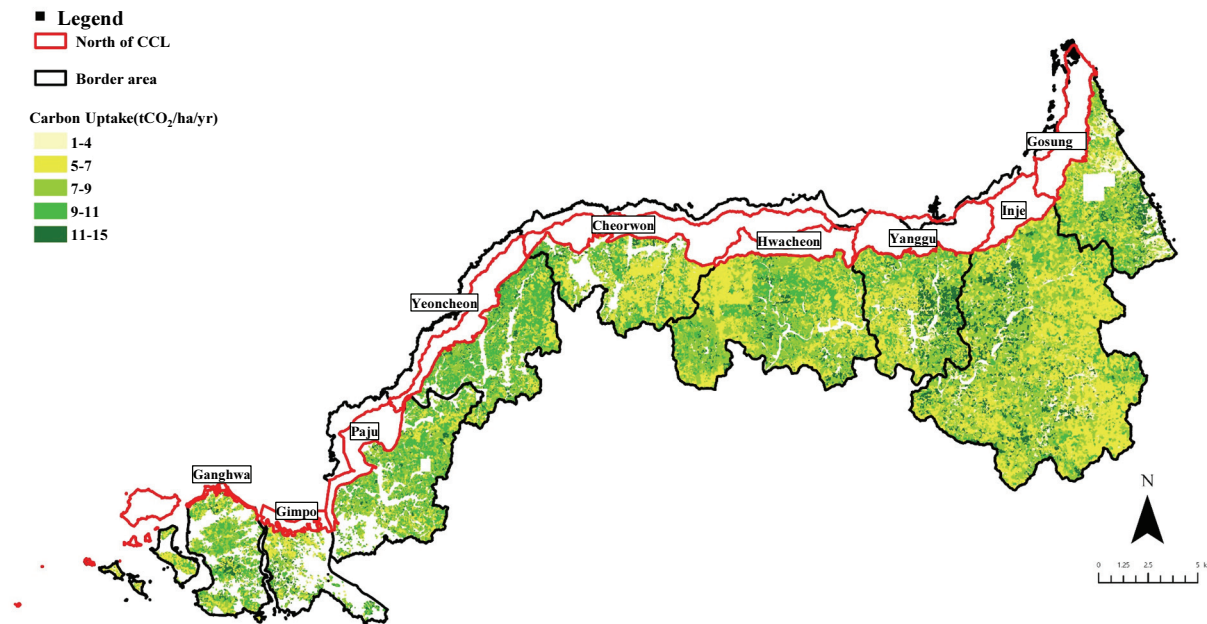


Figure 5. Carbon sequestration capacity of forests in the border area.

Table 6. Comparison of forest-type and age-class area proportions between the CCZ and the border area.

Category	Coniferous forest	Broadleaved forest	Mixed forest	Age class 1	Age class 2	Age class 3	Age class 4	Age class 5	Age class 6
CCZ	26.66	61.21	12.13	0.73	2.64	13.50	49.64	26.87	6.63
Border area	11.63	77.96	10.42	2.50	1.93	12.44	31.37	38.43	13.34

unit : %

Table 7. Net forest carbon sequestration by administrative district.

Category	Ganghwa	Gimpo	Paju	Yeoncheon	Cheorwon	Hwacheon	Yanggu	Inje	Gosung
Carbon uptake	8.71	8.53	9.30	9.95	9.05	8.44	8.94	8.42	8.59

 unit : tCO₂/ha/yr

Table 8. Forest-type area proportions by administrative district.

Category	Ganghwa	Gimpo	Paju	Yeoncheon	Cheorwon	Hwacheon	Yanggu	Inje	Gosung
Coniferous forest	21.59	12.59	2.90	6.90	6.58	11.26	11.13	21.73	16.33
Broadleaved forest	58.85	59.83	84.46	91.69	79.89	83.76	79.54	59.77	74.41
Mixed forest	19.54	27.56	12.63	1.39	13.52	4.96	9.315	18.49	9.25

unit : %

Table 9. Area proportions by age class and administrative district.

Category	Ganghwa	Gimpo	Paju	Yeoncheon	Cheorwon	Hwacheon	Yanggu	Inje	Gosung
Age class 1	0.55	1.89	0.49	4.59	0.43	0.35	0.27	0.15	0.15
Age class 2	1.00	6.90	2.01	9.45	2.11	0.47	1.84	2.15	2.61
Age class 3	3.15	2.38	12.09	12.77	11.41	11.27	20.20	15.95	11.57
Age class 4	54.09	17.86	57.37	58.09	57.52	27.95	53.00	47.38	50.74
Age class 5	40.79	70.88	28.05	14.92	25.40	41.48	17.34	24.95	30.05
Age class 6	0.41	0.10	0.00	0.18	3.13	18.47	7.35	9.42	4.87

unit : %

Table 10. Annual total forest carbon sequestration by administrative district.

Category	Ganghwa	Gimpo	Paju	Yeoncheon	Cheorwon	Hwacheon	Yanggu	Inje	Gosung
Carbon uptake	12,243.85	8,694.26	39,385.67	81,194.35	167,691.20	104,827.02	143,811.55	81,963.20	124,005.31

unit : tCO₂/yr

낮은 것으로 분석되었으며, 인제군의 경우 활엽수림의 면적 비율이 59.8%로 상대적으로 낮아 탄소순흡수량이 낮은 것으로 분석되었다. 행정구역별 연간 탄소흡수량은 Table 10과 같고, 산림 면적이 가장 넓은 철원군이 약 167,691 tCO₂/yr로 민북지역 내에서 가장 많은 산림탄소흡수량을 갖는 지역으로 분석되었다.

결론

민북지역은 접근 제한으로 산림공간정보 확보가 어려웠으나 최근 접경지역 임상도 현행화를 통해 민북지역의 임상도 제작이 완료되어, 이를 활용한 민북지역 산림탄소흡수량의 정량적 평가와 더불어 전국 평균 및 인접 접경지역과 비교함으로써 민북지역의 사회적 요인과 산림 구조적 특성이 탄소흡수 기능에 미치는 영향을 분석하였다.

연구 결과, 민북지역 산림의 연간 평균탄소순흡수량은 약 8.88 tCO₂/ha/yr로 산정되어, 우리나라 전체 산림 평균(약 6.24 tCO₂/ha/yr) 대비 약 1.42배 높게 나타났다. 또한 기후 및 생태적 조건이 유사한 접경지역과 비교하였을 때에도 민북지역의 탄소순흡수량이 약 13.3% 높게 산정되었으며, 이는 단순한 환경적 차이보다는 산림의 임상 구조 차이에 기인한 결과로 해석된다. 이러한 결과는 민북지역 산림이 장기간 벌채, 조림, 숲가꾸기 등 인위적 개입이 제한된 사회적·제도적 환경 속에서 자연천이에 따른 임분 성숙 과정이 지속적으로 진행되는 것으로 해석될 수 있다. 선행연구에서 보고된 바와 같이, 인위적 교란이 억제된 중부지역 산림에서 활엽수

림 또는 침활혼효림으로의 천이가 촉진되는 경향을 고려할 때, 민북지역의 높은 탄소순흡수량은 자연적 산림 발달 과정과 접근 및 개발 제한이라는 사회적 요인이 결합된 결과로 판단된다. 또한, 민북지역 내 행정구역별 분석 결과, 연천군과 파주시의 탄소순흡수량 평균이 타 지역보다 높게 나타났으며, 이는 활엽수림 비율이 높고 3~4등급 산림이 우세한 지역이기 때문으로 분석되었다.

국가고유계수와 임목생장량 표를 기반으로 탄소순흡수량을 산정한 것은 임분 구조의 이질성, 수종별 성장 특성의 지역적 차이, 단년도 자료를 활용한 분석이라는 한계를 내포하고 있으나 접근 제한 지역을 대상으로 현실적인 분석 방법을 적용함으로써 접근 및 개발 제한 지역의 산림이 단순한 보전 대상에 그치지 않고, 기후변화 완화 측면에서 실질적인 탄소흡수 기능을 수행하고 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 민북지역의 산림이 접근 제한 지역을 넘어, 국가온실가스 감축 목표 달성을 위한 중요한 잠재적 흡수원임을 시사하고 있으며, 자료의 부재로 인해 과소평가되었던 민북지역 산림의 기후적 가치를 정량화함으로써 향후 국토의 효율적 관리와 탄소중립 실현을 위한 정책적 의사결정의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 산지정책과 「민북지역 산지관리를 위한 모니터링」 사업(No. R25TA0036503400)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Bak, G. et al. 2023. Vascular flora near the iron fences in South Korea's Demilitarized Zone. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity* 16(1): 20-26
- Chave, J. et al. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 20(10): 3177-3190.
- FAO. (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Foley, J.A. et al. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309(5734): 570-574.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. 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.
- IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). Intergovernmental Panel on Climate Change. Hayama, Japan.
- Kemigisha, F., Gadow, K. von, Radtke, P.J., Kändler, G., Pretzsch, H. and Kleinn, C. 2025. Quantifying forest aboveground biomass: a critical review of methods and uncertainties. *Forest Ecology and Management* 557: 121740.
- Kim, J.H., Lee, W.K., Lim, C.H., Song, C., Park, T. and Kim, M. 2021. Long-term land cover changes in the western part of the Korean Demilitarized Zone. *Land* 10(6): 567.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2020. Climate Change Monitoring Report. Korea Meteorological Administration. Seoul, Republic of Korea.
- Lee, S., Kim, J.H., Park, T., Lim, C.H., Song, C., Lee, W.K. and Choi, S. 2025. Forest aboveground biomass estimation by integration of GEDI and National Forest Inventory data in South Korea. *Journal of Korean Forest Society* 114: 123-136.
- Lim, C.H., Kim, J.H., Song, C., Lee, W.K., Choi, H.A., Jeon, S.W. and Kim, S. 2024. Establishing an ecological network to enhance forest connectivity in the Demilitarized Zone of the Korean Peninsula. *Land* 13(1): 106.
- Mokany, K., Raison, R.J. and Prokushkin, A.S. 2006. Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* 12(1): 84-96.
- NIE (National Institute of Ecology) . 2018. Ecological Survey Report of the DMZ and Adjacent Areas. National Institute of Ecology. Seochon, Republic of Korea.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2015. Analysis of Forest Ecosystem Characteristics in the DMZ and Border Areas. National Institute of Forest Science. Seoul, Republic of Korea.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2019. Standard Carbon Uptake of Major Forest Tree Species in Korea (ver. 1.2). National Institute of Forest Science. Seoul, Republic of Korea.
- Pan, Y. et al. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333(6045): 988-993.
- Thapa, N., Asner, G.P., Mascaro, J. and Knapp, D.E. 2025. Forest aboveground biomass estimation using airborne LiDAR: advances and challenges. *Remote Sensing of Environment* 305: 113137.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2024. National Inventory Document 2024: Republic of Korea. United Nations Framework Convention on Climate Change. Bonn, Germany.

Manuscript Received : December 31, 2025

First Revision : February 3, 2026

Second Revision : February 25, 2026

Accepted : February 27, 2026