

폐탄광 산림복원지와 자연식생지의 탄소저장량 비교*

김소진¹⁾ · 정유경¹⁾ · 박기형²⁾ · 김주은¹⁾ · 배정현³⁾ · 강원석²⁾

¹⁾국립산림과학원 산림생태연구과 석·박사연구원 · ²⁾국립산림과학원 산림생태연구과 연구사 ·
³⁾국립산림과학원 산림생태연구과 석사 학연산협동과정생

Comparison of Carbon Storage between Forest Restoration of Abandoned Coal Mine and Natural Vegetation Lands*

Kim, So-Jin¹⁾ · Jung, Yu-Gyeong¹⁾ · Park, Ki-Hyung²⁾ · Kim, Ju-Eun¹⁾ ·
Bae, Jeong-Hyeon³⁾ and Kang, Won-Seok²⁾

¹⁾Division of Forest Ecology, National Institute of Forest Science, Researcher Fellow,

²⁾Division of Forest Ecology, National Institute of Forest Science, Research Scientist,

³⁾Division of Forest Ecology, National Institute of Forest Science, Master's Degree Cooperative Student.

ABSTRACT

In this study, carbon storage in the aboveground biomass, litter layer, and soil layer was calculated for abandoned mining restoration areas to determine the level of carbon storage after the restoration project through comparison with the ecological reference. Five survey sites were selected for each abandoned mining restoration area in Boryeong-si, Chungcheongnam-do, and the ecological reference that can be a goal and model for the restoration project. The carbon storage in the restoration area was 0~21.3Mg C ha⁻¹, the deciduous layer 3.3~6.0Mg C ha⁻¹, and the soil layer(0-30cm) 8.3~35.1Mg C ha⁻¹, showing a significant difference in carbon storage by target site. The total carbon storage was between 6.1 and 35.3% of the ecological reference, with restoration area ranging from 14.0 to 62.4 Mg C ha⁻¹. The total carbon storage in the restoration area and the ecological reference differed the most in the aboveground biomass and was less than 12%. Based on these results, forest restoration area need to improve the carbon storage of forests through continuous management and

*본 논문은 국립산림과학원의 산림훼손지 복원을 통한 탄소저장·흡수량 추정 연구(FE0100-2022-01-2023)의 지원으로 수행되었습니다.

First author : Kim, So-Jin, Division of Forest Ecology, National Institute of Forest Science, Researcher Fellow, Seoul 02455, Korea,

Tel : +82-2-961-2928, E-mail : thwls2264@korea.kr

Corresponding author : Park, Ki-Hyung, Division of Forest Ecology, National Institute of Forest Science, Research Scientist, Seoul 02455, Korea,

Tel : +82-2-961-2622, E-mail : bear1127@korea.kr

Received : 5 September, 2023. **Revised** : 13 October, 2023. **Accepted** : 18 September, 2023

monitoring so trees can grow and restore productivity in the early stages of the restoration project. The results of this study can be used as primary data for preparing future forest restoration indicators by identifying the storage of abandoned mining restoration areas.

Key Words: *Mining, Biomass, Soil Carbon, Carbon Stock, Climate Change*

I. 서 론

산림은 생태계 조절, 생물다양성 보호 및 탄소 순환 등 기후변화 완화에 필수적인 역할을 하는 천연자원이다(IUCN, 2021). 2020 산림자원평가보고서(FAO, 2020)에 따르면, 전 세계 산림면적은 40.6억 ha로 전 세계 육지 면적의 약 30.8%를 차지하고 있다. 그러나 총 토지 면적 대비 산림면적은 1990년부터 2020년까지 30년 동안 지속적으로 감소하였다. 전 세계의 산림은 산림전용 및 산림황폐화 등으로 인한 심각한 훼손에 직면하고 있으며, 기후변화 완화, 생물다양성 회복을 포함한 여러 목표를 달성하기 위해 산림복원 계획이 전 세계적으로 시행되고 있다(Erbaugh et al, 2020; Andoh et al, 2022; Barragan et al, 2022; Hua et al, 2022).

국내에서는 산림청이 2006년부터 2021년까지 백두대간지역, 민북지역, 도서지역, 일반산림지역 등 전국에서 약 690ha 면적의 산림복원 사업을 실시하였다(Korea Forest Service, 2022). 특히, 2019년도에는 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」 개정을 통해 산림복원내용을 반영하면서 산림복원사업뿐만 아니라 산림복원정책 강화에도 힘쓰고 있다. 또한, 산림생태계 보전 및 복원이 국가 기후변화 적응대책의 주요 정책으로 포함되는 등 산림복원의 관심과 중요성은 높아지고 있다.

산림은 지상부 바이오매스, 지하부 바이오매스, 고사목을 포함한 낙엽층 및 토양 유기물 형태로 많은 양의 탄소를 저장하고 있지만(IPCC, 2003; Pan et al, 2011), 산림훼손 면적 증가로 인해 산림 탄소흡수 기능이 저하되고 있다. 그

중 광산 활동(Mining)은 모든 동·식물의 생물 다양성, 산림 피복도 감소, 토지 황폐화 및 환경오염과 더불어 지질학적 환경을 변화시킬 뿐만 아니라(Martins et al, 2020; Worlanyo and Jiangfeng, 2021; Ahirwal and Maiti, 2022), 채굴과정에서 바이오매스 및 토양 탄소 등을 손실시키는 것으로 알려져 있다(Feng et al, 2019). 이에 따라 채석 및 채굴과정에서 훼손된 식생, 토양, 지형 등을 회복시키기 위해 복원사업이 계속해서 진행되고 있다. 그러나 복원사업 이후 탄소 저장량의 파악과 그 증가량을 극대화하기 위한 지속적인 관리와 모니터링은 미흡한 실정이다.

국내의 경우 폐탄광 복원지에서 수행된 연구는 중금속 오염 및 토양 특성 변화 등에 관한 연구가 대부분이었다(Kim et al, 2003; Jung et al, 2010; Jung et al, 2021). 탄소 저장량과 관련된 연구는 폐탄광 산림복구지의 수종별 탄소 저장량 추정 연구(Kim et al, 2020), 폐탄광 산림복구지 관리방안 도출을 위한 산림복구 후 시간 경과에 따른 임분 탄소저장량 평가한 연구(Jung et al, 2023) 등으로 폐탄광 산림복원지를 대상으로 한 탄소 저장량 연구는 여전히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 보령시의 폐탄광 산림복원지를 대상으로 지상부, 낙엽층 및 토양의 탄소 저장량을 참조생태계와 비교 분석하여 산림복원지의 탄소 저장량을 파악하고, 산림복원지의 탄소 저장 능력 증진 및 사후 관리 방안 수립에 필요한 기초자료 제공을 목적으로 하였다.

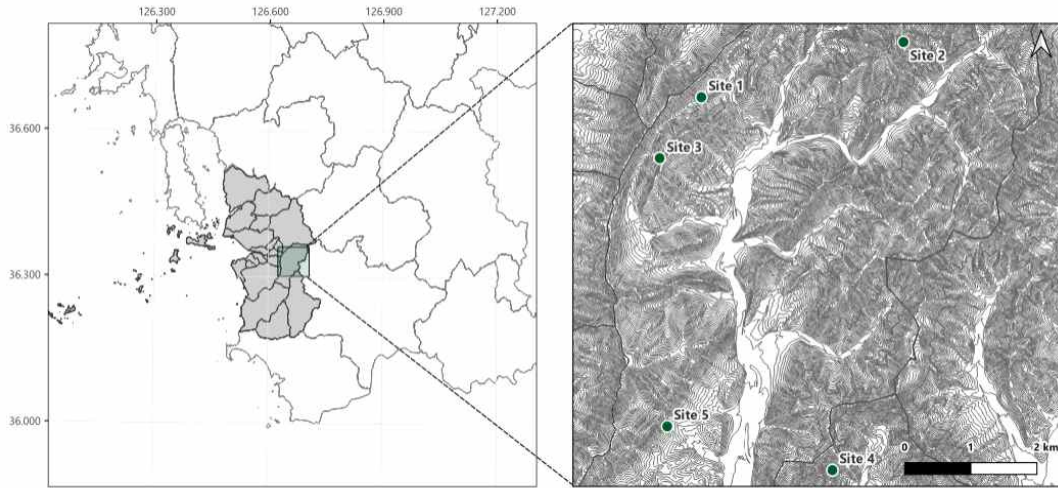


Figure 1. Location of study sites in Boryeong-si

Table 1. General characteristic of the study sites

Site	Restoration year	Restoration method	Planted species	Distance* (m)
1	2016	topography, vegetation	<i>Chamaecyparis obtusa</i> , <i>Pinus thunbergii</i>	119.7
2	2017	topography, vegetation	<i>Quercus acutissima</i> , <i>Aria alnifolia</i>	143.7
3	2018	topography, vegetation	<i>Chamaecyparis obtusa</i> , <i>Quercus acutissima</i>	72.4
4	2018	slope revegetation, vegetation	<i>Chamaecyparis obtusa</i> , <i>Quercus acutissima</i>	238.0
5	2018	topography, vegetation	<i>Alnus japonica</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i>	84.8

*Distance between restoration area and Ecological reference

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

연구대상지는 산림청에서 실시한 산림복원사업 중 충청남도 보령시 미산면과 성주면에 위치한 폐탄광 산림복원지를 대상으로 하였다 (Figure 1). 복원사업 시 목표 및 모델이 될 수 있는 참조생태계는 지리·지형, 생태성, 복원방향 등을 고려하여 산림복원지 인근의 자연식생지로 선정하였다. 충청남도는 우리나라에서 흑

색사암(오석) 석재자원이 생산되는 유일한 지역이고, 이 석재는 충남탄전을 이루고 있는 대동누층군내 분포하는 사암층을 대상으로 주로 보령 지역 일대에 흑색사암 석재가 분포하고 있다 (Park et al, 2004, Lee et al, 2006). 이러한 지질학적 암층 특성에 따라 보령시는 광산업 발달의 기반이 되어 폐탄광지가 많은 것으로 나타났다.

대상지별 특성은 Table 1과 같다. 산림복원지의 경우 Site 1은 2016년, Site 2는 2017년, Site 3, Site 4, Site 5는 2018년에 복원사업이 완료되

었다. Site 4를 제외한 모든 산림복원지에서 지형복원과 식생복원이 실시되었고, Site 4의 경우, 비탈면 녹화와 식생복원이 실시되었다. 산림복원지에 식재된 주요 수종을 살펴보면, Site 1에는 편백, 곰솔 등이 식재되었고, 식재 수종 중 일부만 생육상태가 양호하였다. Site 2에는 상수리나무, 팔배나무 등이 식재되었으나, 현재 외부에서 유입된 아까시나무가 우점하는 상태였다. Site 3과 Site 4에는 편백, 상수리나무 등이 식재되었으며, Site 3의 경우 식재된 수종의 활착 및 생장이 낮은 상태였고, Site 4의 경우 편백의 생장이 양호한 상태였다. Site 5에는 오리나무, 아까시나무 등이 식재되었고, 복원 경과년수에 비해 저조한 성장을 보였다.

2. 시료 채취 및 분석

본 연구의 현지조사 및 시료 채취는 2022년 8월 21일부터 10월 7일까지 실시하였다. 선정된 대상지별 20m × 20m 크기의 1개 조사구를 설치하고, 조사구 내 흉고직경 1cm 이상의 임목에 대해서 흉고직경을 측정하였다. 지상부 탄소 저장량은 국립산림과학원(2014)에서 제시한 흉고직경(DBH)을 활용한 바이오매스 상대성장식에 탄소 전환계수(0.5)를 곱하여 탄소 저장량을 산출하였다(Equation 1). 낙엽층 시료는 조사구 내 임의로 3개의 지점을 선정하여 30cm×30cm의 방형틀을 설치하여 시료(총 30점: 2처리구(산림복원지 5개소, 참조생태계 5개소)× 3반복)를 채취한 후 지퍼백에 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 채취한 시료는 건조기에서 105°C로 향량에 도달할 때 까지 건조시킨 후 건중량을 측정하였고, 분석용 시료를 조제한 후에 원소분석기를 이용하여 탄소 농도(%)를 구하였다. 낙엽층의 탄소 저장량은 국립산림과학원(2007)에서 제시한 건중량과 탄소 농도를 이용하여 산출하였다(Equation 2). 또한, 원통형 채취기를 이용하여 0~30cm 깊이의 토양을 10cm 간격으로 하여 토양 용적밀도 시료(총 90점: 2처리구(산림복원지 5개소, 참조생태계 5개소)×

3깊이× 3반복)를 채취하였다. 채취한 시료는 건조기에서 105°C로 향량에 도달한 후 2mm체로 선별하여 토양용적밀도를 측정하였고, 탄소 농도는 원소분석기를 이용하여 측정하였다. 국립산림과학원(2007)에서 제시한 토양용적밀도, 석력함량, 토양 탄소 농도 등을 이용하여 토양층의 탄소 저장량을 산출하였다(Equation 3).

$$\text{지상부 탄소 저장량(Mg C ha}^{-1}\text{)} = a(\text{DBH})^b \times 0.5 \quad (1)$$

0.5: 탄소전환계수

$$\text{낙엽층 탄소 저장량(Mg C ha}^{-1}\text{)} = \text{Dry weight(g/m}^2\text{)} \times \text{TC}(\%)/100 \quad (2)$$

TC: 총탄소량

$$\text{토양 탄소 저장량(Mg C ha}^{-1}\text{)} = T \times \text{BD} \times C \times (1 - \text{CF}) \quad (3)$$

T: 토양 깊이(cm), BD: 토양 용적밀도(g/cm³), C: 유기탄소 함량, CF: 석력함량

3. 통계분석

폐탄광 산림복원지와 참조생태계의 낙엽층 탄소 저장량 비교는 $P < 0.05$ 수준에서 Mann-Whitney U test로, 폐탄광 산림복원지 간의 토양 탄소 저장량 차이 검증은 Kuruskal-Wallis test로 실시하였다. 통계분석을 위해 IBM SPSS Statistics 22.0을 활용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 임분 현황 및 지상부 탄소 저장량

연구대상지별 흉고직경, 수고, 우점종, 지상부 탄소 저장량 및 흉고직경 6cm 이하의 수목 비율 등을 Table 2에 나타냈다. Site 4의 산림

Table 2. Stand characteristic and carbon storage in aboveground biomass in treatments

Site	Treatment	DBH (cm)	Height (m)	Dominant species*	Carbon storage (Mg C ha ⁻¹)	Trees < 6cm in DBH (%)
1	Restoration area	7.0 (1.0)	2.1 (0.2)	Co	8.3	9.5
	Ecological reference	22.1 (12.4)	9.3 (3.9)	Pd	75.8	-
2	Restoration area	4.4 (2.5)	2.2 (1.1)	Rp	1.4	80.0
	Ecological reference	23.5 (10.6)	9.8 (3.2)	Qv	117.1	-
3	Restoration area	4.3 (0.9)	2.8 (1.1)	Co	0.7	92.0
	Ecological reference	16.7 (8.0)	7.2 (1.8)	Qm	56.7	-
4	Restoration area	8.9 (2.5)	5.8 (0.6)	Co	21.3	10.3
	Ecological reference	24.5 (7.4)	10.8 (2.4)	Qv	181.5	-
5	Restoration area	1.7 (0.7)	1.7 (0.5)	Rp	-	100.0
	Ecological reference	18.4 (8.1)	8.4 (2.5)	Qv	93.9	-

Values in parenthesis are standard deviation

*Co: *Chamaecyparis obtusa*, Pd: *Pinus densiflora*, Qm: *Quercus mongolica*, Qv: *Quercus variabilis*, Rp: *Robinia pseudoacacia*

복원지는 평균 흉고직경과 수고가 각각 8.9cm, 5.8m로 복원 경과년수가 5년 이상 지난 다른 대상지보다 큰 것으로 나타났다. 산림복원지의 우점종은 Site 1, Site 3, Site 4의 경우 편백으로 나타났고, Site 2와 Site 5의 경우 아까시나무가 우점하였다. Site 2의 산림복원지는 복원 사업 완료 후 5년이 경과한 시점에 식재종이 아닌 아까시나무가 우점하고 있었다. 이는 산림복원지의 식재목이 주변 식생과의 경쟁에서 밀리면서 자연스러운 식생 변화로 이어진 것으로 판단된다.

산림복원지의 지상부 탄소 저장량은 0~21.3Mg C ha⁻¹의 범위였으며, Site 4의 산림복원지 탄소 저장량이 가장 높게 나타났다. 다른 산림복원지에 비해 지형 훼손이 적어 식재목의 활착 및 생장이 원활하여 탄소 저장량이 높게 나타난 것으로 판단된다. 반면, Site 5의 산림복원지는 탄소 저장량 산출이 불가능하였다. 탄소 저장량 산출 시 사용되는 상대성장식은 흉

고직경 6cm 이상의 수목을 대상으로 적용되고 있으며, 본 연구의 산림복원지는 흉고직경 6cm 이하의 수목 비율이 Site 1과 Site 4를 제외한 산림복원지에서 80~100%로 높은 것으로 나타났다. Moon et al.(2020)의 연구에서 입목이 흉고직경 6cm에 도달하려면 평균 12년이 소요된다는 결과를 보면 복원사업 후 초기의 탄소 저장량은 현재 상대성장식을 활용해서 산출이 불가하거나 산출하더라도 오차가 클 것으로 판단된다.

2. 낙엽층 탄소 저장량

연구대상지별 낙엽층의 탄소 농도는 산림복원지가 38.1~48.0%였으며, 참조생태계가 44.4~49.1%로 나타났다(Table 3). 낙엽층 탄소 저장량은 산림복원지가 3.3~6.0Mg C ha⁻¹의 범위였으며, Site 4의 산림복원지가 6.0Mg C ha⁻¹로 탄소 저장량이 가장 높게 나타났다. 이는 다른 산림복원지에 비해 상대적으로 지상부 식생의

Table 3. Carbon concentration and carbon storage in litter layer of treatments

Site	Treatment	Carbon concentration(%)	Carbon storage (Mg C ha ⁻¹)	A/B* (%)
1	Restoration area	38.1 (12.3)	4.8 (0.9)a	69.6
	Ecological reference	48.0 (3.1)	6.9 (0.5)b	
2	Restoration area	48.0 (4.2)	4.3 (0.5)a	75.4
	Ecological reference	49.1 (2.6)	5.7 (0.5)b	
3	Restoration area	46.2 (5.0)	3.5 (0.4)a	48.6
	Ecological reference	46.1 (7.5)	7.2 (0.5)b	
4	Restoration area	47.5 (8.6)	6.0 (0.3)a	98.4
	Ecological reference	44.4 (6.8)	6.1 (0.6)a	
5	Restoration area	38.1 (3.0)	3.3 (0.3)a	64.7
	Ecological reference	48.6 (5.6)	5.1 (0.2)b	

Values in parenthesis are standard deviation

Values with the same letters were not statistically different at $P > 0.05$

*A/B: ratio of carbon storage between Restoration area (A) and Ecological reference (B)

평균 흉고직경이 크고, 생육상태가 양호하여 지상부로부터 낙엽낙지가 유입되어 낙엽층 형성이 잘 되어 탄소 저장량이 높았던 것으로 판단된다. 반면, Site 5의 산림복원지는 탄소 저장량이 3.3Mg C ha⁻¹로 탄소 저장량이 가장 낮게 나타났다. 산림복원지와 참조생태계의 탄소 저장량을 비교한 결과, Site 4는 98.4%로 탄소 저장량의 차이가 거의 없었으며, 그 외의 연구대상지는 48.6~75.4%의 결과가 나타났다. 산림복원사업 완료 후에 초기에는 지상부 식생의 발달이 더디고 낙엽량이 적어 유기물 축적이 부족하여 탄소 저장량이 적다고 알려져있다 (Šourková et al, 2005; Jung et al, 2010). 본 연구 결과 역시 산림복원지의 탄소 저장량이 참조생태계에 비해 낮게 나타났다. 낙엽층은 토양 유기탄소 및 식물 영양 순환의 주요 공급원이며, 식물과 토양의 상호작용에 직접적인 영향을 준다(Vitusek, 1982; Cuevas and Lugo, 1998). 하지만, 산림복원지는 외부에서 토양을 반입하여 인위적으로 생육기반을 조성하였기

때문에 입분 생장에 필요한 유기물과 필수적인 양분이 부족하여 생육이 원활하지 않을 수 있다(Jung et al, 2021; Jung et al, 2023). 따라서, 산림복원사업 초기에 부족한 토양 양분을 적절하게 시비하는 등 지속적인 관리를 통해 산림복원지의 식생 초기 활착률과 생장량 증진이 필요할 것으로 보인다. 또한, 산림복원 사업 초기 관리는 식생 생장뿐만 아니라 낙엽층 형성에도 도움이 되어 산림의 탄소 저장량 증진에 직·간접적으로 영향을 줄 것으로 판단된다.

3. 토양의 이·화학적 성질 및 탄소 저장량

1) 토양의 이·화학적 성질

연구대상지별 용적밀도, 총유기탄소, 석력함량 등을 Table 4에 나타냈다. 산림복원지의 깊이별 토양용적밀도는 0-10cm 1.19~1.30g/cm³, 10-20cm 1.23~1.35g/cm³, 20-30cm 1.20~1.36g/cm³의 범위였으며, 산림복원지가 참조생태계에 비해 높은 경향을 보였다(Table 4). 높은 토양용적밀도는 식물이 뿌리를 내리기가 어려운 식물의

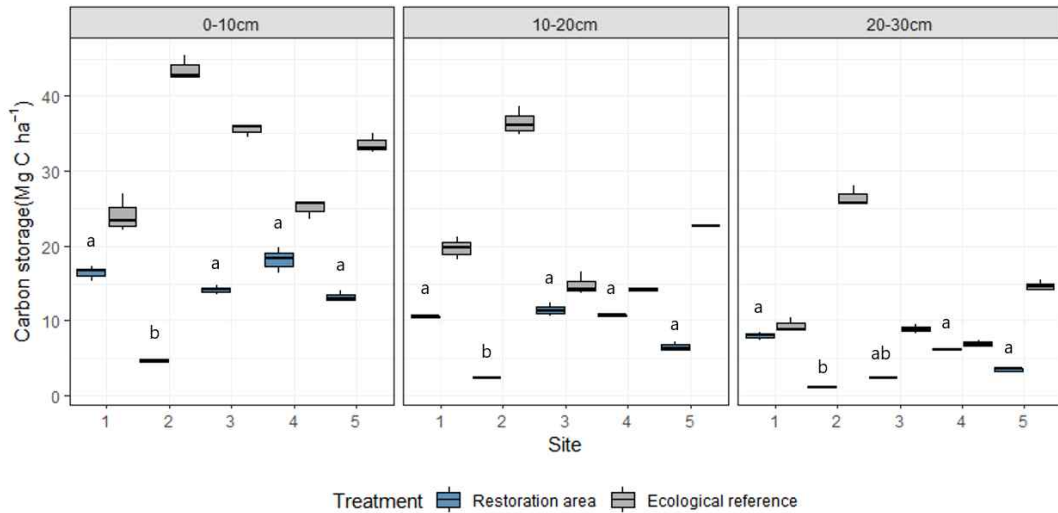


Figure 2. Carbon storage of soil by depth in restoration areas and ecological reference treatments. Values with the same letters were not statistically different at $P > 0.05$.

뿌리 생장이 억제되며, 이는 식물이 수분 흡수를 어렵게 만드는 것으로 알려져 있다(Wang et al, 2020). Wang et al(2019)의 연구에서 식생이 잘 형성된 지역의 용적밀도가 식생이 열악한 지역보다 용적밀도가 낮다는 결과와 마찬가지로, 본 연구의 산림복원지는 식생의 활착과 생육이 원활하지 못한 상황이며, 이러한 영향이 토양용적밀도에 영향을 주었을 것이라 판단된다. 토양 내 유기물을 나타내는 지표인 총유기탄소(TOC)는 산림복원지 0-10cm 0.66~2.26%, 10-20cm 0.34~1.53%, 20-30cm 0.24~1.06%의 분포를 보였으며, 참조생태계와 비교하였을 때 총유기탄소가 낮은 경향을 보였다. 산림복원지 0-10cm 깊이의 평균 총유기탄소는 1.65%로 같은 지역의 폐탄광 복원지를 대상으로 한 Jung et al(2015)의 연구 결과(1.5%)와 유사하였으며, 10-20cm와 20-30cm 깊이의 경우 각각 1.19%, 0.65%로 낮은 결과가 나타났다. 총유기탄소는 지상부 식생으로부터 발생한 낙엽이 부식되어 토양에 축적되는 유기물이 주 공급원이지만(Jung et al, 2011), 산림복원지는 지상부의 식생 발달이 느려서 총 유기탄소 함량이 낮은 결

과가 나타난 것으로 판단된다. 총유기탄소 함량은 천천히 변하며 단기간의 식생복원에 크게 영향을 주지 않는다(Wu et al, 2019). 따라서 복원 초기에 식생 안정에 도움이 되는 양분 시비 등 총 유기탄소 함량이 증가할 수 있도록 훼손된 토양의 지속적인 관리가 필요할 것으로 보인다. 산림복원지의 깊이별 석력함량은 0-10cm 0.32~0.46g g⁻¹, 10-20cm 0.35~0.61g g⁻¹, 20-30cm 0.42~0.63g g⁻¹의 범위였으며, 참조생태계에 비해 석력함량이 높게 나타났다. 높은 석력함량은 수목의 뿌리가 이용할 수 있는 토양의 감소를 초래하고, 영양소 및 수분보유능력이 떨어지며, 석력함량이 60% 미만일 경우, 수목 생장 및 생산성 회복에 도움이 된다고 보고되었다(Rodrigue and Burger; 2004, Zipper et al.; 2011). 본 연구에서 산림복원지의 석력함량은 대부분 60% 미만으로 나타났으며, 수목의 생육에 크게 문제가 없는 것으로 판단된다.

2) 토양 탄소 저장량

산림복원지의 깊이별 토양 탄소 저장량은 0-10cm 4.7~18.2Mg C ha⁻¹, 10-20cm 2.4~ 11.5Mg

Table 4. Physico-chemical properties at three soil depth in treatments

Depth (cm)	Site	Treatment	Bulk density (g/cm ³)	TOC (%)	Coarse fragment (g g ⁻¹)
0-10	1	Restoration area	1.26	2.06	0.37
		Ecological reference	1.16	2.74	0.24
	2	Restoration area	1.31	0.66	0.46
		Ecological reference	0.83	6.62	0.21
	3	Restoration area	1.30	1.61	0.32
		Ecological reference	0.98	4.85	0.25
	4	Restoration area	1.19	2.26	0.32
		Ecological reference	1.01	4.06	0.39
	5	Restoration area	1.24	1.67	0.36
		Ecological reference	0.96	4.77	0.27
Ave.	Restoration area	1.26	1.65	0.37	
	Ecological reference	0.99	4.61	0.27	
10-20	1	Restoration area	1.27	1.41	0.41
		Ecological reference	1.19	2.64	0.37
	2	Restoration area	1.35	0.34	0.48
		Ecological reference	0.96	4.84	0.21
	3	Restoration area	1.32	1.35	0.35
		Ecological reference	1.22	2.06	0.41
	4	Restoration area	1.23	1.53	0.43
		Ecological reference	1.21	2.25	0.48
	5	Restoration area	1.25	1.34	0.61
		Ecological reference	1.10	3.06	0.32
Ave.	Restoration area	1.28	1.19	0.46	
	Ecological reference	1.14	2.97	0.36	
20-30	1	Restoration area	1.31	1.06	0.42
		Ecological reference	1.26	1.28	0.42
	2	Restoration area	1.36	0.24	0.63
		Ecological reference	1.04	3.87	0.34
	3	Restoration area	1.35	0.31	0.42
		Ecological reference	1.28	1.19	0.42
	4	Restoration area	1.20	1.04	0.50
		Ecological reference	1.24	1.28	0.56
	5	Restoration area	1.28	0.60	0.54
		Ecological reference	1.20	1.82	0.33
Ave.	Restoration area	1.30	0.65	0.50	
	Ecological reference	1.20	1.89	0.41	

C ha⁻¹, 20-30cm 1.2~8.0Mg C ha⁻¹의 범위로 나타났다. 참조생태계의 경우, 0-10cm 24.1~43.6Mg C ha⁻¹, 10-20cm 14.2~36.5Mg C ha⁻¹, 20-30cm 7.0~26.5g C ha⁻¹로 나타났다. 모든 깊이에서 Site 2의 산림복원지가 다른 산림복원지에 비해 탄소 저장량이 유의적으로 낮은 값을 보였다

(Figure 2). Site 2의 산림복원지는 토양 탄소 저장량에 영향을 미치는 용적밀도, 석력함량이 다른 산림복원지에 비해 높은 수치였으며, 이러한 영향으로 인해 토양 탄소 저장량이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 대상지별 참조생태계와 비교한 결과, Site 4의 산림복원지가 모든 깊이에서

Table 5. Total carbon storage in Restoration area and Ecological reference treatments

Site	Treatment	Carbon storage(Mg C ha ⁻¹)			
		Aboveground biomass	Litter	Soil (0-30cm)	Total
1	Restoration area	8.3 (17.3%)	4.8 (10.0%)	34.9 (72.7%)	48.0 (100.0%)
	Ecological reference	75.8 (55.8%)	6.9 (5.1%)	53.2 (39.1%)	135.9 (100.0%)
2	Restoration area	1.4 (10.0%)	4.3 (30.7%)	8.3 (59.3%)	14.0 (100.0%)
	Ecological reference	117.1 (51.0%)	5.7 (2.5%)	106.6 (46.5%)	229.4 (100.0%)
3	Restoration area	0.7 (2.2%)	3.5 (10.9%)	28.0 (87.0%)	32.2 (100.0%)
	Ecological reference	56.7 (46.0%)	7.2 (5.8%)	59.3 (48.1%)	123.2 (100.0%)
4	Restoration area	21.3 (34.1%)	6.0 (9.6%)	35.1 (56.3%)	62.4 (100.0%)
	Ecological reference	181.5 (77.6%)	6.1 (2.6%)	46.2 (19.8%)	233.8 (100.0%)
5	Restoration area	- (-)	3.3 (12.4%)	23.3 (87.6%)	26.6 (100.0%)
	Ecological reference	93.9 (55.3%)	5.1 (3.0%)	70.9 (41.7%)	169.9 (100.0%)
Ave.	Restoration area	7.9	4.4	25.9	36.6
	Ecological reference	105.0	6.2	67.2	178.4

참조생태계의 72.3~89.2% 수준으로 가장 높은 편이었다. 이는 훼손이 적고 식생 발달 및 낙엽층 형성이 잘 되어 토양층에도 영향을 준 것으로 판단된다. 반면, Site 2의 산림복원지는 참조생태계의 4.5~10.7%로 가장 낮은 수준이었다. 산림복원지의 토양은 참조생태계에 비교하면 토양의 물리적·이화학적 특성이 변화된 상태이다. 이러한 변화된 토양 특성은 토양 건강성 및 기능에 부정적인 영향을 주며, 생태계 생산성 유지 능력에도 영향을 미칠 수 있다(Stutler et al, 2022). 복원된 토양은 영양분 및 유기물 순환에 필수적이며, 식물의 생산성 보장과 생물다양성을 유지하는 영양공급원 및 수분 균형을 생성하는 데 필수적이다(Dominati et al, 2010). 따라서, 복원과정 초기에 토양 유기물 함량 변화 및 토양 내 영양분 등에 대한 모니터링은 식생복원과 토양의 상태를 예측하기 위해서 필수적인 것으로

판단된다.

5. 총 탄소 저장량

지상부, 낙엽층 및 토양층의 탄소 저장량을 합한 총 탄소 저장량은 산림복원지에서는 14.0~62.4Mg C ha⁻¹의 범위였으며, 참조생태계의 6.1~35.3% 수준으로 나타났다(Table 5). 산림복원지에서는 토양층의 총 탄소 저장량 비중이 가장 높았으며, 참조생태계는 지상부의 비중이 가장 높게 나타났다. 산림복원지의 지상부 탄소 저장량은 참조생태계의 약 12% 이하 수준으로 산림복원지와 참조생태계의 총 탄소 저장량에서 가장 큰 차이가 나타났다. 식물군집의 발달은 토양 질소와 유기물과 같은 토양의 화학적 성질이 개선된 토양에서 일어나지만(Hao et al, 2019), 산림복원지의 경우 토양의 물리·화학적 성질이 회복되지 않은 상태이다. 광산 지역의

생태계에서 식생과 토양은 상호 의존적인 요소이다(Gao et al, 2022). 산림복원지의 탄소 저장량을 복원 목표로 하는 참조생태계 수준으로 회복시키기 위해서는 토양 회복이 필수적인 것으로 보인다. 토양이 회복되면 식재목의 활착률 증진 및 성장량 등 지상부 식생의 발달이 원활하여 복원이 안정적으로 이루어질 것이다. 성공적인 복원을 위해서는 산림복원지의 입지환경 뿐만 아니라 식재 수종, 다양한 기술 적용 및 산림의 천이 과정 등에 대한 모니터링 자료가 축적되어야 한다. 이를 통해 지속적인 관리가 이루어진다면 산림복원지의 탄소 저장량 파과과 예측이 가능해질 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 폐탄광 산림복원지를 대상으로 지상부, 낙엽층 및 토양층의 탄소 저장량을 산출하고, 복원사업 이후 탄소 저장량을 파악하고자 하였다. 충청남도 보령시의 폐탄광 산림복원지와 복원사업 시 목표 및 모델이 될 수 있는 참조생태계를 조사하였다. 산림복원지와 참조생태계의 총 탄소 저장량은 지상부에서 가장 큰 차이가 났다. 폐탄광 산림복원지는 인위적으로 생육 기반을 조성하였기 때문에 식생의 발달에 필요한 양분이 부족하여 생육이 원활하지 못한 상황이다. 특히, 식생과 토양은 긴밀하게 영향을 주고받기 때문에 토양의 영양분 및 유기물 순환이 이루어져야 지상부의 탄소 저장량도 증진될 수 있다. 따라서 복원사업 초기에 수목의 성장 및 생산성 회복을 위해 토양 회복에 더 집중할 필요가 있다.

2016 파리협정 목표를 달성하기 위해 ‘2050 탄소중립’이 필수적인 상황에서 유럽, 영국 등 많은 국가에서 탄소중립 선언 및 법제화하여 추진되었으며, 우리나라에서도 2020년 12월 탄소중립 추진전략을 발표하면서 ‘탄소중립’ 달성에 대한 역할이 중요해졌다. 훼손된 산림의

복원을 통한 산림생태계 및 생물다양성 증진뿐만 아니라 탄소흡수·저장 기능도 중요하다. 지금까지의 복원사업은 훼손된 산림을 단순한 조림사업 형태로 추진되고 있지만, 복원사업 시 탄소 저장량 증진을 위한 수종 선정 및 복원공법 등을 고려한 세부 기준 마련이 필요할 것으로 보인다.

References

- Ahirwal J and Maiti SK. 2022. Restoring coal mine degraded lands in India for achieving the United nations-sustainable development goals. *Restoration Ecology* 30(5): e13606.
- Andoh J·Oduro KA·Park J and Lee Y. 2022. Towards REDD+implementation: Deforestation and forest degradation drivers, REDD+ financing, and readiness activities in participant countries.
- Barragán G·Wang T and Rhemtulla JM. 2022. Trees planted under a global restoration pledge have mixed futures under climate change. *Restoration Ecology* e13764.
- Cuevas E and Lugo AE. 1998. Dynamics of organic matter and nutrient return from litterfall in stands of ten tropical tree plantation species. *Forest Ecology and Management* 112: 263-279.
- Dominati E·Patterson M and Mackay A. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological economics* 69(9): 1858-1868.
- Erbaugh JT·Pradhan N·Adams J·Oldekop JA·Agrawal A·Brockington D·Pritchard R and Chhatre A. 2020. Global forest restoration and the importance of prioritizing local communities. *Nature Ecology & Evolution* 4(11): 1472-1476.

- FAO. 2020. Global forest resources assessment 2020-main report. Food and Agriculture Organization(FAO). Rome.
- Feng Y·Wang J·Bai Z and Reading L. 2019. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. *Earth-Science Reviews* 191: 12-25.
- Gao R·Ai N·Liu G·Liu C·Qiang F·Zhang Z·Xiang T and Zang K. 2022. The Coupling Relationship between Herb Communities and Soil in a Coal Mine Reclamation Area after Different Years of Restoration. *Forests* 13(9): 1481.
- Gwon JH·Seo HY·Lee KS·You BO·Park YB·Jeong JY and Kim CS. 2014. Allometric equations and biomass expansion factors by stand density in *Cryptomeria japonica* plantations. *Journal of Korean Society of Forest Science* 103(2): 175-181.
- Hao J·Guo DG·Li HY and Meng WQ. 2019. Ecological restoration status index for evaluating the restored coal gangue pile: a chronosequence study based on the plant-soil system in the Shanxi mining area, China. *Applied Ecology & Environmental Research* 17(5).
- Hua F·Bruijnzeel LA·Meli P·Martin PA·Zhang J·Nakagawa S·Miao X·Wang W·Mcevoy C·Pena-arancibia JL·Brancalion P.H.S·Smith P·Edwards DP and Balmford A. 2022. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches. *Science* 376(6595): 839-844.
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- IUCN. 2021. Forest and climate change. International Union for Conservation of Nature(ICUN). Gland. Switzerland.
- Jung MH·Ko JI·Bak GI and Ji WH. 2021. Analysis of soil chemical characteristic changes according to elapsed time after the forest rehabilitation for drawing management of abandoned coal mine forest rehabilitation areas in Gangwon-do. *The Korean Society of Economic and Environmental Geology* 54(4): 457-464.
- Jung MH·Ko JI·Bak·GI and Ji WH. 2021. Analysis of soil chemical characteristic changes according to elapsed time after the forest rehabilitation for drawing management of abandoned coal mine forest rehabilitation areas in Gangwon-do. *Economic and Environmental geology* 54(4): 457-464.
- Jung MH·Kwon HH·Kim TH·Choi GS and Kim SL. 2010. Characteristic of soil chemical and microbiological properties in abandoned coal mine forest rehabilitation areas. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 43(5): 424-429.
- Jung MH·Kwon HH·Kim TH·Choi GS and Kim SL. 2010. Characteristics of Soil Chemical and Microbiological Properties in Abandoned Coal Mine Forest Rehabilitation Areas. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 43(5): 546-551.
- Jung MH·Park KI·Kim JH and Ji WH. 2023. Assessment of carbon storage capacity of stands in abandoned coal mine forest rehabilitation areas over time for its development of management strategy. *Journal of Environmental Science International* 32(4): 233-242.
- Jung MH·Shim YS and Kim TH. 2011.

- Characteristics of soil chemical properties in abandoned coal mine forest rehabilitation areas in Hwasun, south Jeolla province. Korean Society of Soil Science and Fertilizer 44:1010-1015.
- Jung MH·Shim YS·Kim YS·Park MJ and Jung KH. 2015. Characteristics of soil chemical properties in abandoned coal mine forest rehabilitation areas in Boryeong city, Chungcheongnam-do. Korean Society of Soil Science and Fertilizer 48: 744-750.
- Kang JT·Son YM·Yim JS and Jeon JH. 2016. Estimation of carbon stock and uptake for *Larix kaempferi* Lamb. Journal of Climate Change Research 7(4): 499-506.
- Kim C·Son Y·Lee WK·Jeong J and Noh NJ. 2009. Influences of forest tending works on carbon distribution and cycling in a *Pinus densiflora* S. et Z. stand in Korea. Forest Ecology and Management 257(5): 1420-1426.
- Kim CS·Lee KS·Son YM and Cho HS. 2013. Allometric equations and biomass expansion factors in an age-sequence of Black Pine (*Pinus thunbergii*) stands. Journal of Korean Society of Forest Science 102(4): 543-549.
- Kim GE·Kim SJ·Kim HJ·Chang HN·Kim HS·Park YH and Son YH. 2020. Estimation of carbon storage in reclaimed coal mines: focus on *Betula platyphylla*, *Pinus koraiensis* and *Pinus* spp. plantations. Korean Journal of Environmental Biology 38(4): 733-743.
- Kim HJ·Yang JE·Lee JY·Choi SI and Jun SH. 2003. Fraction and soil pollution assesment index of heavy metals in cultivated land soils near the abandoned mine. Journal of Soil and Groundwater Environment 8(4): 53-63.
- Kim MI·Park TJ·Ko YJ·Choi GM·Son SC·Kang YJ·Yoo JH· Kim MY·Park HJ and Lee WK. 2023. Analysis of changes in tree height-diameter allometry for major tree species in South Korea. Journal of Korean Society of Forest Science 112(1): 71-82.
- Korea Forest Service. 2022. Forest Restoration Implementation Plan.
- Lee CO·Hong SS·Lee BT·Kim GS and Yun HS. 2006. Spatial distribution of the dimension stone quarries in Korea. The Journal of the Petrological Society of Korea 15(3): 154-166.
- Lee SK·Son Y·Noh NJ·Heo SJ·Yoon TK·Lee AR·Abdul Razak S and Lee WK. 2009. Carbon storage of natural pine and oak pure and mixed forests in Hoengseong, Kangwon. Journal of Korean Society of Forest Science 98(6): 772-779.
- Lee ST·Chung SH and Kim CS. 2022. Carbon Stocks in Tree Biomass and Soils of *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands. Journal of Korean Society of Forest Science 111(3): 365-373.
- Lim JH·Shin JH·Kim GT·Chun JH and Oh JS. 2003. Forest stand structure, site characteristics and carbon budget of the Kwangneung natural forest in Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 5(2): 101-109.
- Martins W.B.R·Lima M.D.R·Junior U.D.O.B·Amorim, L.S.V.B·de Assis Oliveira F and Schwartz G. 2020. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystem after mining: a global literature review. Ecological Engineering 145:105707.
- Moon GH·Moon NH·Yim JS and Kang JT. 2020. Methodological Consideration for Estimating Growing Stock of Young Forests based on Early Growth Characteristics of Standing Trees in Korea. Journal of Korean Society of Forest

- Science 109(3): 300-312.
- Moon GH·Yim JS and Kang JT. 2022. Estimation of Carbon Stocks in Coarse Woody Debris Using Permanent Sample Plot Data from the Korean National Forest Inventory. *Journal of Korean Society of Forest Science* 13(1): 107-115.
- Mun HJ·Kol JI·Bak GI and Ji WH. 2021. Analysis of Soil Chemical Characteristics Changes According to Elapsed Time after the Forest Rehabilitation for Drawing Management of Abandoned Coal Mine Forest Rehabilitation Areas in Gangwon-do. *Economic and Environmental Geology* 54(4): 457-464.
- National Institute of Forest Science. 2007. Survey manual for forest biomass and soil carbon. National Institute of Forest Science. Seoul.
- National Institute of Forest Science. 2014. Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea. National Institute of Forest Science. Seoul.
- Pan Y·Birdsey RA·Fang J·Houghton R·Kauppi PE·Kurz WA·Phillips OL·Shvidenko A·Lewis SL·Canadell JG·Ciais P·Jackson RB·Pacala SW·McGuire AD·Piao S·Rautiainen A·Sitch S and Hayes D. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988-993.
- Park DW·Hong SS·Kim CJ·Lee CO·Lee BT and Yun HS. 2004. Geology and occurrence of black sandstone and black shale dimension stones, The Korea Society of Economic and Environmental Geology 37(6): 585-601.
- Rodrigue JA and Burger JA. 2004. Forest soil productivity of mined land in the midwestern and eastern coalfield regions. *Soil Science Society of America Journal* 68(3): 833-844.
- Seo YO·Park SM and Lee YJ. 2012. Analysis of growth and carbon storage for *Quercus variabilis* stands in Yangpyeong and Gangneung regions. *Journal of Agriculture & Life Science* 46(1): 43-51.
- Shrestha RK and Lal R. 2011. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. *Geoderma* 161(3-4): 168-176.
- Son YM·Kim SW·Lee SJ and Kim JS. 2014. Estimation of stand yield and carbon stock for *Robinia pseudoacacia* stands in Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 103(2): 264-269.
- Son YM·Lee KH and Pyo JK. 2011. Development of biomass allometric equations for *Pinus densiflora* in central region and *Quercus variabilis*. *Journal of Agriculture & Life Science* 45(4): 65-72.
- Šourková M·Frouz J and Šantrůčková H. 2005. Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic). *Geoderma* 124: 203-214.
- Stutler K·Pena-Yewtukhiw E and Skousen J. 2022. Mine soil health on surface mined lands reclaimed to grassland. *Geoderma*. 413. 115764.
- UNCCD 2022. Global Land Outlook Second edition, Secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification. Bonn.
- Vitousek PM. 1982. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *American Naturalist*. 119: 553-572.
- Wang F·Wang J and Wang Y. 2019. Using multi-fractal and joint multi-fractal methods to characterize spatial variability of reconstructed soil properties in an opencast coal-mine dump

- in the Loess area of China. *Catena*, 182, 104111.
- Wang S·Cao Y·Pietrzykowski M·Zhou W·Zhao Z and Bai Z. 2020. Spatial distribution of soil bulk density and its relationship with slope and vegetation allocation model in rehabilitation of dumping site in loess open-pit mine area. *Environmental Monitoring and Assessment* 192: 1-18.
- Worlanyo AS and Jiangfeng L. 2021. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. *Journal of Environmental Management* 279: 111623.
- Wu X·Fu D·Duan C·Huang G and Shang H. 2022. Distributions and influencing factors of soil organic carbon fractions under different vegetation restoration conditions in a subtropical mountainous area. SW China. *Forests* 13(4): 629.
- Zipper CE·Burger JA·Skousen JG·Angel PN·Barton CD·Davis V·Franklin JA. 2011. Restoring Forests and Associated Ecosystem Services on Appalachian Coal Surface Mines. *Environmental Management* 47(5): 751-765.