

ORIGINAL ARTICLE

## 폐탄광 산림복구지 관리방안 도출을 위한 산림복구 후 시간경과에 따른 임분탄소저장량 평가

정문호<sup>1,3)</sup> · 박관인<sup>2)</sup> · 김지혜<sup>2)</sup> · 지원현<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국광해광업공단 해외협력처, <sup>2)</sup>한국광해광업공단 기술개발처, <sup>3)</sup>호서대학교 에너지기후환경융합기술학과, <sup>4)</sup>호서대학교 창의교양학부

### Assessment of Carbon Storage Capacity of Stands in Abandoned Coal Mine Forest Rehabilitation Areas over time for its Development of Management Strategy

Mun Ho Jung<sup>1)3)</sup>, Kwan In Park<sup>2)</sup>, Ji Hye Kim<sup>2)</sup>, Won Hyun Ji<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of International Cooperation, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation, Wonju 26464, Korea

<sup>2)</sup>Department of Technology Development, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation, Wonju 26464, Korea

<sup>3)</sup>Department of Energy & Climate Environment Fusion Technology, Hoseo University, Asan 31499, Korea

<sup>4)</sup>Department of General Education for Human Creativity, Hoseo University, Asan 31499, Korea

#### Abstract

The objective of this study was to develop a management strategy for the recovery of carbon storage capacity of abandoned coal mine forest rehabilitation area. For the purpose, the biomass and stand carbon storage over time after the forest rehabilitation by tree type for *Betula platyphylla*, *Pinus densiflora*, and *Alnus hirsuta* trees which are major tree species widely planted for the forest rehabilitation in the abandoned coal mine were calculated, and compared them with general forest. The carbon storage in abandoned coal mine forest rehabilitation areas was lower than that in general forests, and based on tree species, *Pinus densiflora* stored 48.9%, *Alnus hirsuta* 41.1%, and *Betula platyphylla* 27.0%. This low carbon storage is thought to be caused by poor growth because soil chemical properties, such as low TOC and total nitrogen content, in the soil of abandoned coal mine forest rehabilitation areas, were adverse to vegetation growth compared to those in general forests. DBH, stand biomass, and stand carbon storage tended to increase after forest rehabilitation over time, whereas stand density decreased. Stand' biomass and carbon storage increased as DBH and stand density increased, but there was a negative correlation between stand density and DBH. Therefore, after forest rehabilitation, growth status should be monitored, an appropriate growth space for trees should be maintained by thinning and pruning, and the soil chemical properties such as fertilization must be managed. It is expected that the carbon storage capacity the forest rehabilitation area could be restored to a level similar to that of general forests.

**Key words** : Abandoned coal mine, Stand carbon storage, *Betula platyphylla*, *Pinus densiflora*, *Alnus hirsuta*

Received 3 February, 2023; Revised 28 March, 2023;

Accepted 28 March, 2023

\*Corresponding author : Won Hyun Ji, Department of General Education for Human Creativity, Hoseo University, Asan, 31499  
Phone : +82-41-540-9664  
E-mail : greenidea@hoseo.edu

© The Korean Environmental Sciences Society. 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.

본 논문은 2022년도 호서대학교의 박사 학위논문의 축약본(일부)입니다.

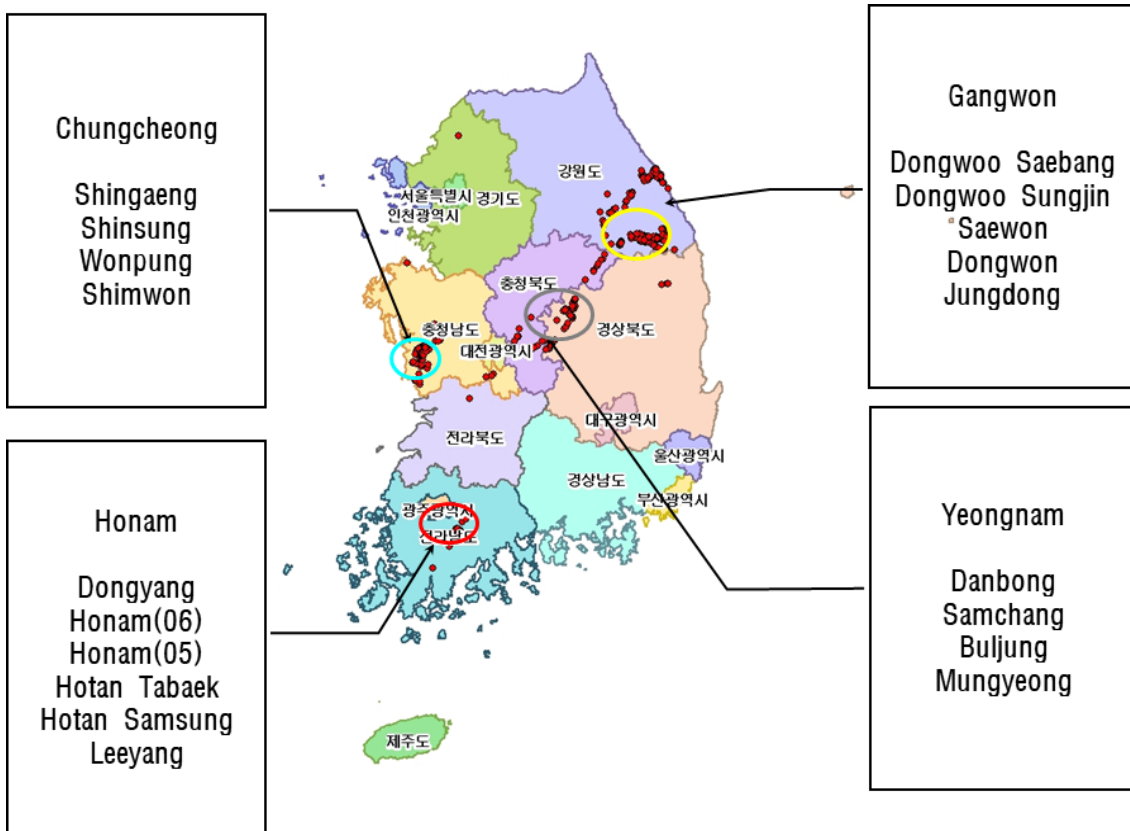


Fig. 1. Locations of study sites.

## 1. 서론

산림은 육상 생태계 발달과 유지 등의 기능을 가지고 있을 뿐만 아니라 전 지구적 탄소순환의 중요한 요소이다(Lee et al., 2015a; Lee et al., 2015b; Kang et al., 2017; Jung, 2022). 산림에 존재하는 임목은 광합성을 통해 대기 중의 탄소를 고정하는 역할을 하는데, 임목이 고정한 탄소는 낙엽 및 낙지와 같은 유기물 형태로 토양에 유입되어 축적되며(Lee, 2011; Kim et al., 2020), 이러한 임목 탄소 저장량은 시간 경과에 따라 증가하는 경향을 보인다(Kim et al., 2014a; Lee et al., 2015a; Kim et al., 2020). 산림의 이러한 기능과 중요성에 따라 1997년 제 3차 기후변화협약 당사국 총회에서 교토의정서를 채택하는 과정에서 산림을 온실가스 흡수원으로 인정하기 시작하였다(Jang et al., 2011; Lee et al., 2015b; Kang et al., 2017). 우리나라의 경우 산림이

차지하는 면적은 국토의 64%를 차지하여 산림을 기후 변화대응을 위한 탄소흡수원으로 활용하기 위해 정부차원에서 과학적·정책적으로 다양한 노력을 하고 있는데(Lee et al., 2015b; Kang et al., 2017), 그 일환으로 폐탄광의 산림훼손지를 지속적으로 복구하고 있다.

우리나라는 1960년대와 1970년대 난방과 취사용으로 석탄을 사용하면서 탄광개발이 활발하게 이루어졌다(Min et al., 2004; Yang et al., 2007). 하지만 석탄을 채광하는 과정에서 폐석이 발생하고 토양이 유실되는 등 많은 면적의 산림이 훼손되었는데(Min et al., 2004; Kwon et al., 2007; Yang et al., 2007; Jung et al., 2011), 탄광지역의 훼손된 산림은 대부분 토양이 유실되어 식생이 생육하기 위한 기반이 존재하지 않는다(Jung et al., 2021). 따라서 산림복구를 위해서는 우선 식생이 생육할 수 있는 기반을 조성해야 하는데, 현재 복구 방식은 외부에서 토양을 반입하여 인위적으로

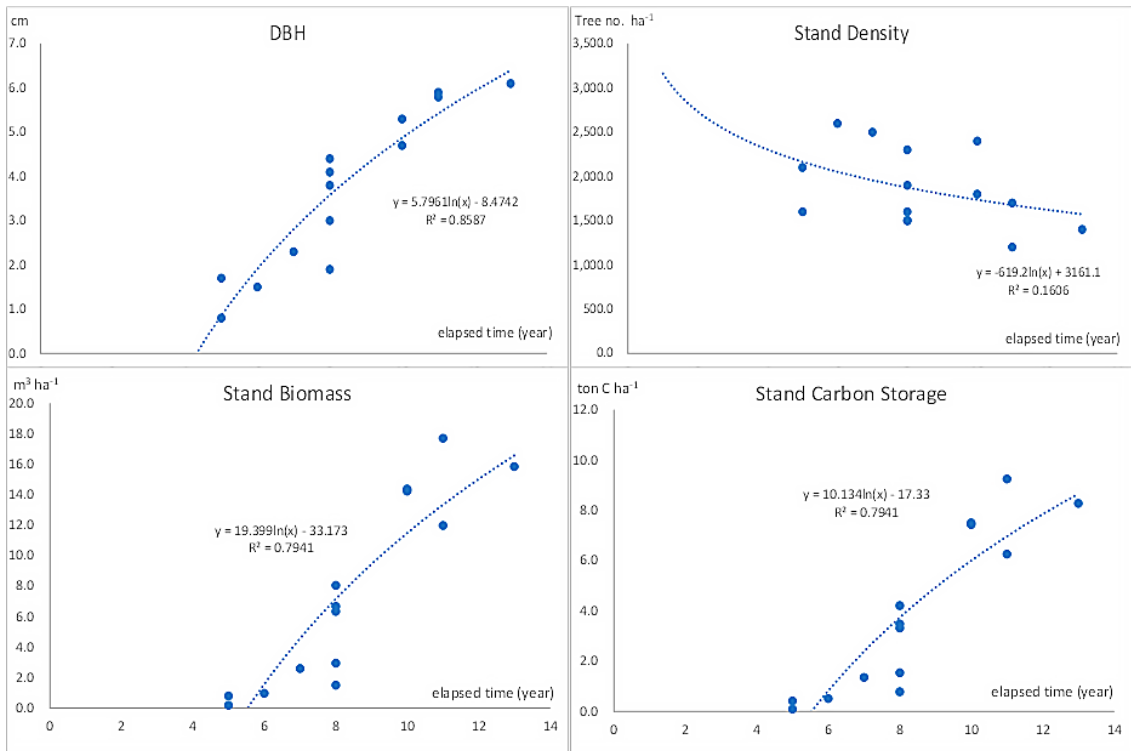


Fig. 2. Relationship between DBH, stand density, stand biomass, stand carbon storage, and elapsed time after rehabilitation *B. platyphylla* planted areas.

생육기반을 조성하고 있다(Jung et al., 2012; Jung et al., 2015). 문제는 외부에서 반입한 토양은 표토보다 심토가 많기 때문에 식생생육에 유기물과 필수 양분이 부족하여 식생생육이 불량한 경우가 많다(Costigan, 1981; Woo, 2000; Jung et al., 2012; Jung et al., 2015). 따라서 식생 생육을 원활히 하기 위해서는 산림복구사업이 완료된 이후에도 식생생육과 토양 화학적 특성에 대한 모니터링을 바탕으로 지속적인 사후관리를 해야 한다(Jung et al., 2021).

외국의 경우 폐광지역에서 산림복구사업 후 식생생육 변화에 대한 연구가 많이 진행되었다(Bradshaw, 1983; Jochimsen, 1996; Šourková, 2005; Shrestha and Lal, 2010). 하지만 국내의 경우 산림복구지에서 식생생육에 대한 연구가 거의 진행된 바 없다(Jung and Kim, 2008; Jung et al., 2010; Jung et al., 2011). 또한 일반산림에서 수종 및 시간에 따른 탄소 저장량의 변화는 일부 밝혀졌으나(Kim and Jang, 2014; Lee et

al., 2015a), 폐탄광 산림복구사업지에서 시간경과에 따른 식생생육 및 탄소 저장량에 관한 기초자료는 부족한 실정이다(Lee et al., 2009; Choo and Lee, 2019; Kim et al., 2020).

본 연구의 목적은 폐탄광 산림복구에 많이 식재되는 자작나무, 소나무, 물오리나무를 대상으로 폐탄광 산림복구지의 탄소저장능 회복을 위한 사후관리방안을 마련하기 위해 산림복구지의 탄소저장능을 평가하는데 있다. 이를 위해 수종별 시간경과에 따른 흉고직경 성장량, 임분밀도와 임분바이오매스 및 임분탄소저장량 변화를 분석하고 일반산림과 비교하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 연구대상지

연구대상지는 강원도 영월군과 정선군에서 5개소, 충청남도 보령군에서 4개소, 경상북도 문경시에서 4개

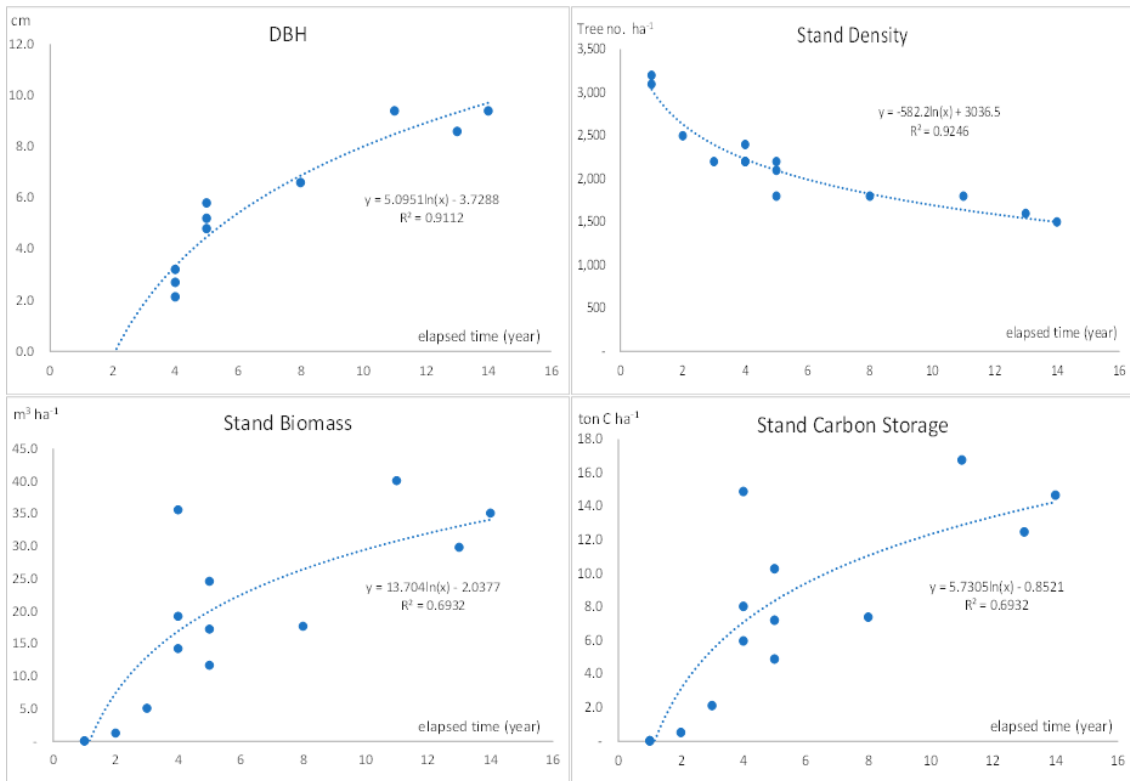


Fig. 3. Relationship between DBH, stand density, stand biomass, stand carbon storage, and elapsed time after rehabilitation *P. densiflora* planted area.

소, 전라남도 화순군에서 6개소 등 폐탄광 산림복구지 29개소에서 총 43회를 조사하였다. Fig. 1에 조사대상지 위치를, Table 1에 개황을 나타냈다. 방위로는 대부분 북사면이었으나 강원지역의 동우세방, 충청지역의 원풍과 심원, 호남지역의 호탄삼성과 이양탄광은 남사면에 위치하였다. 경사는 정동탄광은 평지였으며 나머지 대상지는 25~38°에 위치하고 있었다. 대부분 사면이었는데 강원지역의 동원, 영남지역의 단봉, 호남지역의 호탄삼성탄광은 계곡사면, 영남지역의 불정탄광은 능선, 호남지역의 동양탄광은 능선사면으로 나타났다.

## 2.2. 조사 및 분석 방법

각 대상지의 임목생육현황을 조사하기 위해 10 m × 10 m 크기의 조사구를 설치하고, 조사구내 임목의 흉고직경 혹은 근원경을 측정하였으며, 측정된 흉고직경(근원경) 및 수고와 상대생장식(식 (1))을 이용하여 임

목의 부위별 바이오매스를 산출하고 이를 합산하여 임목의 전체 바이오매스를 추정하였다(Son et al., 2014). 임목 바이오매스 산출을 위한 부위별 산출 계수는 Table 2와 같다. 그리고 임목의 바이오매스와 임분밀도를 곱하여 임분바이오매스를 산출하였다. 물오리나무의 바이오매스 상대생장식과 탄소배출계수는 자작나무의 상대생장식 및 탄소배출계수를 적용하였다. 각 수종의 상대생장식과 탄소배출계수는 임목재적 바이오매스 및 임분수확표를 통해 개발되는데, 물오리나무의 경우 임목재적 바이오매스 및 임분수확표가 개발되지 않았으며, 산림청에서 배포한 '임목재적·바이오매스 및 임분수확표'에 물오리나무에 적용하기 위한 재적표를 자작나무로 명시하여 자작나무의 상대생장식 및 탄소배출계수를 적용하였다(Korea Foret Service, 2021).

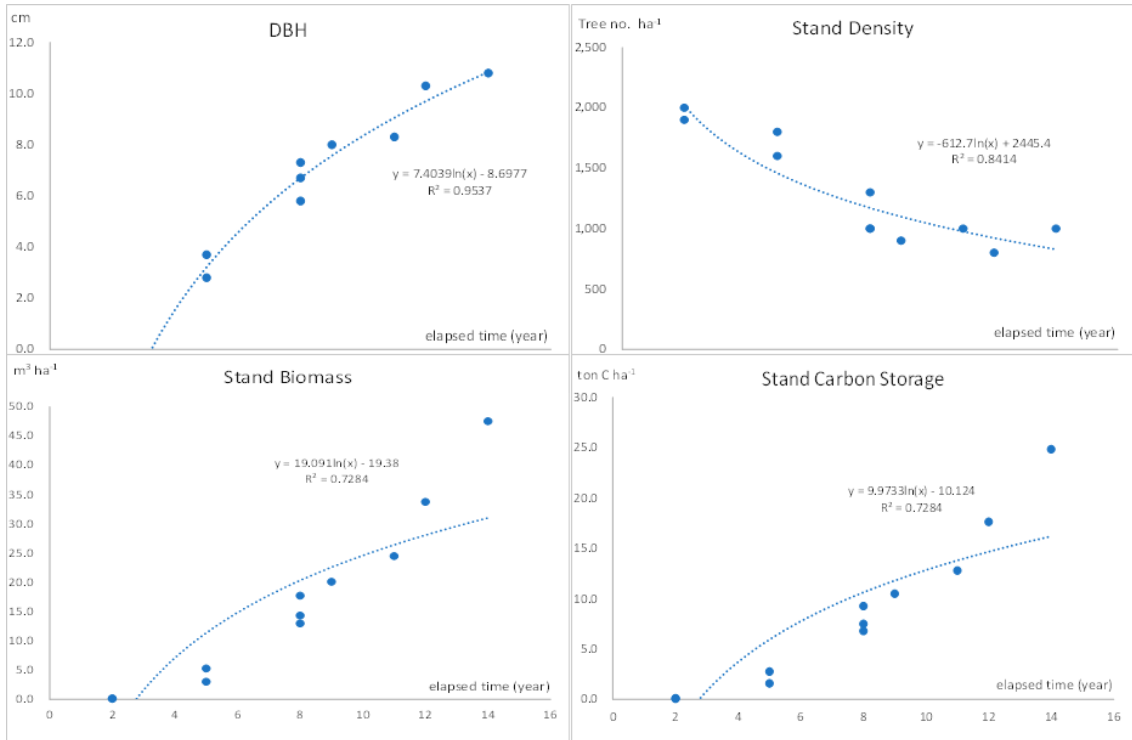


Fig. 4. Relationship between DBH, stand density, stand biomass, stand carbon storage, and elapsed time after rehabilitation *A. hirsuta* planted areas.

$$V = a (DBH)^b \quad (1)$$

$V$  = Mean tree biomass  
 $a, b$  = Relative growth factor  
 $DBH$  = Mean diameter of basal height (cm)

임분탄소저장량은 임분바이오매스를 산출한 후 식 (2)를 적용하여 추정하였다(Kang et al., 2017).

$$C = \sum_j (V_j \cdot D_j \cdot BEF_j) \cdot (1 + R_j) \cdot CF \quad (2)$$

$C$  : Carbon storage (tC)  
 $V$  : Volume (m<sup>3</sup>)  
 $D$  : Basic wood density (t·dm/m<sup>3</sup>)  
 $BEF$  : Biomass expansion factor  
 $R$  : Root to shoot ration  
 $CF$  : Carbon fraction  
 $j$  : 1 ~ n (No. of sample)

여기서,  $V$ 는 재적(m<sup>3</sup>/ha),  $BEF$ 는 바이오매스 확장계수,  $D$ 는 목재기본밀도(t·dm/m<sup>3</sup>),  $R$ 은 뿌리함량비,  $CF$ 는 탄소전환계수 (0.5)이며 (IPCC, 2003), 탄소 배출계수는 Table 3과 같다.

### 2.3. 통계 분석

시간경과에 따른 수종별 흉고직경 성장, 임분밀도 변화, 임분바이오매스 축적 및 임분탄소저장량 변화를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 각 통계분석은  $p < 0.05$  수준에서 처리구간 유의성을 검증하였으며, 통계분석은 SPSS 26 (Embedded on SPSS Statistics 26 Professional, SPSS Inc.) 통계 프로그램을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 복구후 시간경과에 따른 탄소저장량 변화

Table 1. Characteristics of study sites

Area	Mine	Aspect	Slope (°)	Topography	Rehabilitation year / Elapsed time (year)	Species
Gangwon	Dongwoo Saebang	S 20 E	35	Slope	2009 / 1, 3	BP, PD
	Dongwoo Sungjin	N 15 E	30	Slope	2009 / 1, 4	PD
	Saewon	N 24 E	34	Slope	2005 / 5, 8	BP, PD
	Dongwon	N 10 W	38	Valley-Slope	2005/ 6, 7, 8	BP
	Jungdong	N 13 W	32	Flat land	1999 / 11	BP, AH
Yeongnam	Danbong	N 24 E	34	Valley-Slope	2009 / 2, 3	BP, AH
	Samchang	N 13 W	32	Slope	2009 / 2, 3, 5	PD, AH
	Buljung	N 18 E	28	Ridge	2001 / 10, 13	BP
	Mungyeong	N 66 E	28	Slope	2000 / 11	BP
Chungcheong	Shingaeng	N 70 E	37	Slope	2005 / 5	PD
	Shinsung	N 20 E	33	Slope	2000 / 10	BP
	Wonpung	S 75 W	28	Slope	1999 / 11	PD
	Shimwon	S 60 E	0	Slope	1996 / 13, 14	PD
Honam	Dongyang	N 20 E	30	Ridge-Slope	2008 / 2	PD
	Honam(06)	N 66 E	28	Slope	2006 / 4	BP, PD
	Honam(05)	N 60 W	35	Slope	2005 / 5, 8	BP, PD, AH
	Hotan Tabaek	N 40 W	25	Slope	2002 / 8	BP, PD, AH
	Hotan Samsung	S 40 E	33	Valley-Slope	2001 / 9, 12	AH
	Leeyang	S 46 W	42	Slope	1996 / 14	AH

\* BP : *B. platyphylla*, PD : *P. densiflora*, AH : *A. hirsuta*

식재수종별 복구사업후 시간경과에 따른 흉고직경, 임분밀도, 임분바이오매스, 임분탄소저장량 변화를 각각 Fig. 2, 3, 4에 나타냈다. 자작나무의 흉고직경은 0.8 ~ 6.1 cm(평균 3.5 cm)의 범위를 보였으며, 임분밀도는 1,200 ~ 3,900 본/ha로 평균은 2,133 본/ha이었다. 이를 바탕으로 임분바이오매스, 임분탄소저장량을 산출한 결과 임분 바이오매스는 0.02 ~ 17.72 m<sup>3</sup>/ha(평균 5.8 m<sup>3</sup>/ha) 임분탄소저장량은 0.01 ~ 9.26 ton C/ha(평균 3.04 ton C/ha)으로 나타났다. 소나무의 흉고직경의 범위는 0.8 ~ 9.4 cm로 평균은 5.3 cm, 임분밀도는 1,500 ~ 3,100 본/ha(평균 2,186 본/ha), 임분 바이오매스는 0.03 ~ 59.65 m<sup>3</sup>/ha(평균 18.56 m<sup>3</sup>/ha)이었다. 이를 통해 계산된 임분 탄소저장량은 0.01 ~ 24.94 ton C/ha(평균 7.76 ton C/ha)였다. 물오리나무의 평균 흉고직경은 7.14 cm(2.8 ~ 10.8 cm), 임분밀도는 800 ~ 2,000 본/ha(평균 1,300 본/ha)의 범위를 보였으며, 임분 바이오매스는 0.09 ~ 47.53 m<sup>3</sup>/ha(평균 16.31 m<sup>3</sup>/ha), 임분탄소저장량은 0.05 ~ 24.83 ton C/ha(평균 8.52 ton C/ha)으

로 나타났다. 수종별 흉고직경과 임분밀도, 임분바이오매스 및 임분탄소저장량의 시간경과에 따른 변화양상을 분석한 결과 세 수종 모두 같은 경향을 보였다. 흉고직경은 시간경과에 따라 점진적인 증가경향을 보였으며, 임분밀도는 감소경향을 보였다. 흉고직경과 임분바이오매스, 임분탄소저장량의 증가와 임분밀도의 감소 경향은 로그함수형태로 나타나 복구사업후 초기에는 증가 및 감소 속도가 상대적으로 빠르나, 시간이 경과하면서 점차 속도가 감소하는 경향을 보였다. Lee and Lim(2021)에 따르면 시간 경과에 따라 임목의 직경과 수고는 증가하지만 임분밀도는 감소하는 특성을 지닌다고 하였는데 본 연구의 결과도 이와 유사한 결과를 보였다.

### 3.2. 폐탄광 산림복구지와 일반산림 탄소저장량 비교

각 항목에 대해 회귀식을 적용하여 식재수종별 사업 후 20년 경과시의 수치를 계산한 결과와 지위지수 14와 임령 20년을 기준으로 하는 일반산림의 수치를 Table 4에 나타냈다. 일반산림의 지위지수를 14로 비

**Table 2.** Applied factors of relative biomass of two species

Species	Part	a	b
<i>B. platyphylla</i>	Stem	0.076	2.503
	Branch	0.023	2.387
	Leaf	0.039	1.688
	Root	0.009	2.916
<i>P. densiflora</i>	Stem	0.235	2.071
	Branch	0.004	2.748
	Leaf	0.054	1.561
	Root	0.031	2.279

교한 것은 Kim et al.(2020)에 따르면 임분 수확표 지 위치수 구간 중 14가 평균에 해당되기 때문이다. 식재 수종별 수치는 자작나무는 흉고직경 8.9 cm, 임분밀도 1,306 본/ha, 임분바이오매스 24.9 m<sup>3</sup>/ha, 임분탄소저장량은 13.0 ton C/ha이며, 소나무는 흉고직경 11.5cm, 임분밀도 1,292 본/ha, 임분바이오매스 39.0 m<sup>3</sup>/ha, 임분탄소저장량 16.3 ton C/ha, 물오리나무는 흉고직경 11.8 cm, 임분밀도 610 본/ha, 임분바이오매스 37.8 m<sup>3</sup>/ha, 임분탄소저장량은 19.8 ton C/ha으로 나타났다. 일반산림의 경우 자작나무는 평균 흉고직경 11.9 cm, 임분밀도 1,500 본/ha, 임분바이오매스 92.2 m<sup>3</sup>/ha, 중부지방 소나무는 평균 흉고직경 11.4 cm, 임분밀도 1,679 본/ha, 임분바이오매스 79.7 m<sup>3</sup>/ha,로 나타났다. 이를 이용해 계산한 임분탄소저장량은 자작나무 48.2 ton C/ha, 소나무 33.3 ton C/ha이었다. 폐탄광 산림복구지와 일반산림을 비교할 때 소나무의 흉고직경만 거의 비슷한 값을 보였으며, 나머지 항목은 27.0 ~ 87.7%로 낮은 값을 보였다. 바이오매스와 탄소저장량이 일반 산림에 비해 가장 저조한 수치를 보인 수종은 자작나무(일반산림 대비 27.0%)였으며, 소나무가 일반산림 48.9%로 가장 높은 비율을 보였다. Kim et al.(2020)은 소나무류, 자작나무가 식재된 폐탄광 산림복구지에서의 탄소저장량과 일반 산림을 비교한 결과 소나무류는 일반산림에 비해 높고 자작나무는 낮다고 하였는데 본 연구결과에서는 소나무 식재지역도 일반산림에 비해 낮게 나타났다. 이는 산림복구지에서 수목의 직경생장이 일반산림에 비해 저조하거나 고사목 발생 등으로 인해 바이오매스와 탄소저장량이 낮기 때문인 것으로 판단된다(Jung, 2022). 본 연구결과에 따르면 산림복구지 탄소저장능 확대를 목표로 할 경우 소나

무를 식재하는 것이 다른 두 수종에 비해 유리할 것으로 나타났다.

본 연구에서 산림복구지내 임목생장이 일반산림에 비해 불량한 것은 산림복구지의 토양 화학적 특성에 기인한 것으로 판단된다. 일반적으로 폐탄광 산림복구지의 토양은 일반산림에 비해 토양내 양분이 부족하여 식물생육에 불리하다(Jung et al., 2010). 폐탄광 산림복구지에서 토양 특성을 분석한 기존 사례들을 보면 Šourková et al.(2005)은 체코의 폐탄광 산림복구지에서 복구 초기 단계에 유기물 함량이 낮다고 하였으며, Jung(2022)은 우리나라 폐탄광 산림복구지에서 복구 후 인위적인 시비가 없을 경우 약 8년 정도가 경과해야 TOC 및 총질소가 일반 산림 수준으로 회복된다고 하였다. 산림복구사업 완료후 초기에는 지상부 식생의 발달이 더디고 낙엽량이 적어 유기물 축적이 부족하다(Šourková et al., 2005; Jung et al., 2011). 하지만 시간이 경과함에 따라 식생이 발달하면 낙엽량과 유기물 축적이 많아지기 때문에 TOC와 총질소가 증가하는 것으로 사료된다(Cole, et al., 1993; Jung et al., 2015). TOC로 나타내는 토양내 유기물은 식생과 상호작용을 하는 토양 미생물의 서식처의 역할을 할 뿐만 아니라, 식물생육에 필요한 각종 양분을 공급하는 한편, 토양의 보습, 보온 등 산림생태계가 유지되기 위해 중요한 역할을 하고 있다(Jin et al., 1994; Jung, 2022). 또한 총질소는 성장속도가 빠른 초기에 질소 요구량이 많은데 비해, 자연상태에서는 대부분 유기태로 존재하며 무기화 하는 속도가 느리다(Jin et al., 1994). 이러한 특성으로 산림복구사업 초기에 유기물 뿐만 아니라 질소 시비를 통해 토양 양분을 적정 수준으로 유지하는 관리가 필요하다.

**Table 3.** Carbon emission factors of two species (Son, et al., 2014)

Species	<i>B. platyphylla</i>	<i>P. densiflora</i>
Basic wood density	0.558	0.472
Biomass expansion factor	1.388	1.413
Root to shoot ratio	0.349	0.254

**Table 4.** Comparison of stand characteristics between forest rehabilitation and general forest †

Species	Stand characteristics	Forest rehabilitation (A)	General forest (B)	A / B (%)
<i>B. platyphylla</i>	DBH (cm)	8.9	11.9	74.8
	Stand density (Tree no./ha)	1,306	1,500	87.1
	Stand biomass (m <sup>3</sup> /ha)	24.9	92.2	27.0
	Stand carbon storage (ton C/ha)	13	48.2	27.0
<i>P. densiflora</i>	DBH (cm)	11.5	11.4	100.9
	Stand density (Tree no./ha)	1,292	1,679	77.0
	Stand biomass (m <sup>3</sup> /ha)	39	79.7	48.9
	Stand carbon storage (ton C/ha)	16.3	33.3	48.9
<i>A. hirsuta</i>	DBH (cm)	8.4	11.9	70.6
	Stand density (Tree no./ha)	1,044	1,500	69.6
	Stand biomass (m <sup>3</sup> /ha)	37.8	92.2	41.0
	Stand carbon storage (ton C/ha)	19.8	48.2	41.1

† The site index of general forest was 14.

임분의 바이오매스와 탄소저장량은 임목의 흉고직경과 임분밀도에 의해 결정되는데 흉고직경과 임분밀도는 음의 상관관계를 보이는 것으로 알려졌다(Lee et al., 2009). 이는 임분밀도가 높은 경우 임목간 거리가 가까워 토양내 양분과 수분, 수관 생장을 위한 공간 등 생육에 필요한 자원에 대한 경쟁이 강해지기 때문이다(Yoshida and Kamitani, 2000; Jose et al., 2006; Lee et al., 2009; Jung, 2022). 따라서 탄소저장량을 증가시키기 위해서는 간벌과 가지치기 등으로 적절한 임분밀도 유지 및 임목의 생육공간을 확보함으로써 안정적으로 생육할 수 있게 해야 한다(Park et al., 2017; Jung, 2022).

폐탄광 산림복구지의 이러한 특성을 고려해 볼 때, 탄소저장량을 증진시키기 위해서는 사업후 흉고직경과 임분밀도 등 생육현황과 토양 화학적 특성을 장기간 지속적으로 모니터링하고 이를 바탕으로 간벌, 가지치기,

시비 등 종합적인 사후관리를 실시해야 한다(Jung, 2022).

#### 4. 결론

본 연구는 폐탄광 산림복구에 널리 식재되는 주요 수종인 자작나무, 소나무, 물오리나무를 대상으로 수종별 시간경과에 따른 바이오매스와 임분탄소저장량을 산출하고 이를 일반 산림과 비교하여 폐탄광 복구지 산림 탄소저장능을 확대하기 위한 관리방안을 마련하기 위해 수행하였다.

1. 폐탄광 산림복구지의 탄소저장량은 소나무와 물오리나무, 자작나무 식재지가 일반 산림 대비 각각 48.9%, 물오리나무 41.1%, 자작나무 27.0%로 낮았으며, 시간경과에 따라 증가하는 경향을 보였다.



2. 폐탄광 산림복구사업시 탄소 저장량 확대를 목표로 할 경우 자작나무와 물오리나무보다 소나무가 더 유리할 것으로 사료된다.
3. 폐탄광 산림복구지의 탄소저장능 증가를 위해 복구 후 생육 상황에 대한 모니터링을 실시하고 이를 바탕으로 간벌, 가지치기 등으로 임목의 적절한 생육 공간을 확보하고 임목 밀도를 일반산림과 유사한 수준으로 유지하는 한편, 시비 등을 통해 토양 화학적 특성을 개량해야 한다.

### 감사의 글

본 논문은 2020년도 한국광해방업공단의 기술개발 사업 ‘기후변화 대응 산림복구지 탄소저장량 평가 및 적합 수종 DB 구축’ 과제의 지원에 의한 연구임을 밝힙니다.

### REFERENCES

- Bradshaw, A. D., 1983, The reconstruction ecosystems: Presidential address to the british ecological society, December 1982, J. Appl. Ecol., 20, 1-17.
- Choo, C. O., Lee, J. K., 2019, Characteristics of water contamination and precipitates of acid mine drainage, Bongyang reclaimed coal mine, Danyang, Chungbuk Province with emphasis on Fe and Al behaviors, Korean J. Eng. Geol., 29, 163-183.
- Cole, C. V., Paustian, K., Elliott, E. T., Metherell, A. K., Ojima, D. S., Parton, W. J., 1993, Analysis of agroecosystem carbon pools, Water Air Soil Poll., 70, 357-371.
- Costigan, P. A., Bradshaw, A. D., Gemmill, R. P., 1981, The reclamation of acid colliery spoil. I. Acid production potential, J. Appl. Ecol., 18, 865-878.
- Jang, K. M., Won, H. K., Kim, Y. H., Tak, K. L., Shin, M. Y., Lee, K. H., 2011, Application of CBM-CFS3 Model to Assess carbon stock and age class changes over long term forest planning in a Korea's national forest, Jour. Korean For. Soc., 100, 591-597.
- Jin, H. O., Lee, M. J., Shin, Y. O., Kim, J. J., Jun, S. K., 1994, Forest soil, 1<sup>st</sup> ed., Hyangmoonsa, Seoul, 156-188.
- Jochimsen, M. E. A., 1996, Reclamation of colliery mine spoil founded on natural succession, Water Air Soil Poll., 91, 99-108.
- Jose, S., Williams, R., Zamora, D., 2006, Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations, Forest Ecol. Manag., 233, 231-239.
- Jung, M. H., 2022, A Study on the optimal forest rehabilitation for the recovery of carbon absorption capacity of degraded forests in abandoned mine, Ph. D. Dissertation, Hoseo University, Chungcheongnam-do, Korea.
- Jung, M. H., Kim, T. H., 2008, Physical and chemical characteristics of Planted *Betula platyphylla* seedlings and soils in abandoned Dongwon and Sewon mine areas, Jour. Mine Recl. Tech., 2, 193-201.
- Jung, M. H., Ko, J. I., Pak, G. I., Ji, W. H., 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, Econ. Environ. Geol., 54, 457-464.
- Jung, M. H., Kwon, H. H., Kim, T. H., Choi, G. S., Kim, S. L., 2010, Characteristics of soil chemical and microbiological properties in abandoned coal mine forest rehabilitation areas, Korean J. Soil Sci. Fert., 43, 424-429.
- Jung, M. H., Shim, Y. S., Kim, T. H., 2011, Characteristics of soil chemical properties in abandoned coal mine forest rehabilitation areas in Hwasun, south Jeolla province, Korean J. Soil Sci. Fert., 44, 1010-1015.
- Jung, M. H., Shim, Y. S., Kim, Y. S., Park, M. J., Jung, K. H., 2015, Characteristics of soil chemical properties in abandoned coal mine forest rehabilitation areas in Boryeong city, Chungcheongnam-do, Korean J. Soil Sci. Fert., 48, 744-750.
- Jung, M. H., Shim, Y. S., Kim, T. H., Oh, J. Y., Jung, Y. S., 2012, Characteristics of soil chemical properties in abandoned coal mine forest rehabilitation areas in Mungyeong, Gyeongsangbuk-do, Korean J. Soil Sci. Fert., 45, 733-737.
- Kang, J. T., Son, Y. M., Jeon, J. H., Lee, S. J., 2017, Assessment of carbon stock and uptake by estimation of stem taper equation for *Pinus densiflora* in Korea, J. Climate Change Res., 8, 415-424.
- Kim, G. E., Kim, S. J., Kim, H. J., Chang, H. N., Kim, H. S., Park, Y. H., Son, Y. H., 2020, Estimation of carbon storage in reclaimed coal mines: focused on *Betula platyphylla*, *Pinus koraiensis* and *Pinus* spp. plantations, Korean J. Environ. Biol., 38, 733-743.
- Kim, M. S., Min, H. G., Lee, B. J., Chang, S. I., Kim, J. G., Koo, N. I., Park, J. S., Park, G. I., 2014a, The applicability of the acid mine drainage sludge in the heavy Metal stabilization in soils, Korean J. Environ.

- Agric., 33, 78-85.
- Kim, S. H., Jang, D. H., 2014, Analysis of forest types and estimation of the forest carbon stocks using landsat satellite images in Chungcheongnamdo, south Korea, Jour. The Korean Asso. Reg. Geog., 20, 206-216.
- Korea Forest Service, 2021, Standards for assessing the estimated sale price of state-owned forest products, KFS Report 979, publication No. 11-1400377-001387-01, KFRI, Daejeon, Korea.
- Kwon, H. H., Shim, Y. S., Lee, J. S., Kim, T. H., Kim, J. A., Yoon, S. H., Nam, K. S., 2007, Cause and countermeasure of mine hazard, Mine Rec. Tech., 1, 5-25.
- Lee, H. S., Lim, S. R., 2021, A Methodology to estimate the potential production of bioenergy based on the species, cultivation area conditions, and period of forest trees, J. Korean Soc. Environ. Eng., 5, 377-389.
- Lee, J. Y., Han, S. H., Kim, S. J., Lee, S. H., Son, Y. M., Son, Y. H., 2015a, A Meta-analysis on the effect of forest thinning on diameter growth and carbon stocks in Korea, Jour. Korean For. Soc., 104, 527-535.
- Lee, N. Y., 2011, Estimation of carbon storage in three cool-temperate broad-leaved deciduous forests at Bukhansan National Park, Korea, Korean Jour. Nat. Park Res., 2, 53-57.
- Lee, S. J., Yim, J. S., Son, Y. M., Kim, R., 2015b, Estimation of the carbon stock and greenhouse gas removals by tree species and forest types in Gangwon province, J. Climate Change Res., 6, 303-310.
- Lee, S. K., Son, Y. H., Noh, N. J., Heo, J. J., Yoon, T. K., Lee, A. R., Sarah, A. R., Lee, W. K., 2009, Carbon storage of natural pine and oak pure and mixed forests in Hoengseong, Kangwon, Jour. Korean For. Soc., 98, 772-779.
- Min, J. G., Lee, J. H., Woo, S. Y., Kim, J. K., Moon, H. S., 2004, Vegetation structure of some abandoned coal mine lands in Taebaek area, Gangwon province, Korean J. Agric. For. Meteorol., 6, 256-264.
- Park, J. H., Jung, S. Y., Yoo, B. O., Lee, K. S., Park, Y. B., Kim, H. H., 2017, The production objectives and optimal standard of density control using stand density management diagram for *Pinus densiflora* forests in Korea, Jour. Korean For. Soc. 106, 457-464.
- Shrestha, R. K., Lal, R., 2010, Carbon and nitrogen pools in reclaimed land under forest and pasture ecosystem in Ohio, USA, Geoderma, 157, 196-205.
- Son, Y. M., Kim, R. H., Lee, K. H., Pyo, J. K., Kim, S. W., Hwang, J. S., Lee, S. J., Park, H., 2014, Carbon emission factors and biomass allometric equation by species in Korea, Report 14-08, publication No. 11-1400377-000694-01, KFRI, Seoul, Korea.
- Šourková, M., Frouz, J., 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.
- Woo, B. M., 2000, Evaluation for rehabilitation countermeasures of coal-mined spoils and denuded lands, J. Korean. Env. Res. & Reveg. Tech., 3, 24-34.
- Yang, J. E. Ok, Y. S., Park, Y. H., 2007, Rehabilitation ecological engineering rehabilitation of degraded mine areas, Mine Rec. Tech., 1, 67-75.
- Yoshida, T., Kamitani, T., 2000, Interspecific competition among three canopy-tree species in a mixed-species even-aged forest of central Japan, Forest Ecol. Manag., 137, 221-230.

- 
- Ph.D. Mun-Ho Jung  
Department of International Cooperation, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corp.  
jungmh2@komir.or.kr
  - Director. Kwan-In Park  
Department of Technology Development, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corp.  
kipark@komir.or.kr
  - Senior Manager. Ji-Hye Kim  
Department of Technology Development, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corp.  
jihyekim@komir.or.kr
  - Professor. Won-Hyun Ji  
Department of General Education for Human Creativity, Hoseo University  
greenidea@hoseo.edu