Korean Journal Of Agricultural Science

pISSN : 2466-2402
eISSN : 2466-2410

PLANT&FOREST

Effect of forest restoration treatment on *Abies holophylla* growth and soil condition: Focusing on the Daegwallyeong alpine pastures

Ju-Eun Kim[1,†], Jeong-Hyeon Bae[2,3,†], So-Jin Kim[1], Ki-Hyung Park[1], Namin Koo[1], Won-Seok Kang[4], Yu-Gyeong Jung[2,*]

[1]Forest Ecology Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea
[2]Forest Fire Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea
[3]Department of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul 20841, Korea
[4]Departmernt of Horticulture & Forestry, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

[†]These authors equally contributed to this study as first author.
[*]Corresponding author: avaforest64@korea.kr

Abstract

This study aimed to determine a method for restoring grasslands to forests in mountainous areas. The study was conducted in an area damaged by trampling due to construction activity and herding. Additionally, there were concerns of hindered tree growth due to the alpine region climate, characterized by the low temperatures, drying, and strong winds. Therefore, forest restoration treatments such as tillage, furrow, and shading were performed to improve growth conditions. From July 2021 to April 2023, soil temperature and moisture were monitored for each treatment plot, and changes in the initial growth and survival rate of *Abies holophylla* were investigated. Both soil temperature and soil moisture showed significantly higher values during the four seasons in the grassland-furrow treatment plot ($p < 0.05$). Compared to the grassland-control plot, the average soil temperature in winter was as high as 1.1°C, and the soil moisture in summer was as high as 20.3%. Additionally, the survival rate and relative growth rate were the largest in the grassland-furrow treatment plot. The survival rate was 87.5%, the relative growth rate in terms of height was 0.013, and the relative growth rate in terms of diameter at root collar was 0.023, indicating that furrow treatment had a positive effect on the initial survival and growth of seedlings. These results suggest that furrow treatment may be an appropriate restoration method when implementing forest restoration projects in areas where tree growth is challenged.

Keywords: forest restoration, furrow, relative growth rate (RGR), restoration treatment, soil temperature and moisture

Check for updates

OPEN ACCESS

Citation: Kim JE, Bae JH, Kim SJ, Park KH, Koo N, Kang WS, Jung YG. 2024. Effect of forest restoration treatment on Abies holophylla growth and soil condition: Focusing on the Daegwallyeong alpine pastures. Korean Journal of Agricultural Science 51:25-39. https://doi.org/10.7744/kjoas.510103

Received: September 18, 2023
Revised: November 07, 2023
Accepted: November 13, 2023

Copyright: © 2024 Korean Journal of Agricultural Science

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

2020년 기준 우리나라는 전국토의 63%가 산림으로 이루어져 있다. 우리나라 산림 602만 ha 중 미립목지는 115,899 ha이며, 그 중 목축을 위해 초지로 대부된 면적은 2,780 ha로 2.4%에 해당된다(KFS, 2020). 1970년대 강원도 백두대간 일대 국유림을 대부하여 초지로 개간하고 목장을 조성하였으나, 산업의 발달로 인해 1985년부터 2019년까지 지난 35년 간 축산 농가 수가 연평균 1.4% 감소하는 등(Statistics Korea, 2020) 목축업이 쇠퇴하면서 목장 용지로 대부되었던 국유림이 반환되는 추세이다.

목초지는 가축의 먹이로 외래식물들을 주로 도입하고 있어(Jung, 2014), 주변 산림이나 국립공원의 양호한 생태계가 크게 교란 받고 있다(Lee at al., 2017). 목초지의 토양은 지속적으로 답압이 발생하여 토양 공극의 감소가 발생하고(Betteridge et al., 1999; Drewry and Paton, 2000), 이는 임목의 생육 저하를 야기할 수 있다(Pande et al., 2000). 토양은 한번 훼손되면 회복되는데 적게는 1년에서 45년까지도 소요된다(Drewry, 2006). 또한 대관령의 목초지는 1,100 m 이상의 고산지대에 위치하고 있다. 해당 지역은 연중 기온이 낮고, 바람이 많이 불며, 적설량이 많아 상대적으로 식물이 생육하기에 열악한 환경이다. 이에 산림청은 지난 2001년부터 백두대간 자연생태계를 보전하고 훼손지에 대한 복원을 추진하고 있으며, 그 중 반환된 목초지를 건강한 자연생태계로 회복시키기 위한 다양한 사업들을 시행하고 있다(KFS, 2001, 2015a, 2020).

국내의 경우 산림 복원에 주로 묘목을 활용한 조림을 시행하는데, 묘목은 토양 온·습도, 빛, 영양분, 초식동물에 의한 포식 강도 등 주변 환경의 시공간적 변화에 따라 큰 영향을 받는다(Khurana and Singh, 2001). 특히 토양온도는 식물 뿌리의 기능에 영향을 미칠 수 있으며, 토양온도가 일정수준까지 증가할 때 식물의 뿌리생장이 최대로 활발해진다(Pregitzer et al., 2000). 또한 토양습도의 감소는 내건성이 없는 수종의 묘목 활착률과 생장량을 감소시키며(Kwon and Lee, 1994; Caspersen and Kobe, 2011), 토양습도의 증가는 식물의 양분의 흡수와 생장을 증가시킨다(Lee et al., 1978). 식재조림을 통한 산림 복원에서 성공 여부의 평가에는 생장뿐만 아니라 활착 역시 매우 중요하다(Óskarsson and Ottósson, 1990; Hau and Corlett, 2003). 따라서 적절한 복원 기술을 적용을 통한 생육 환경의 개선을 통해 식재하는 묘목의 활착과 생장에 도움을 줄 필요가 있다.

원활한 산림 복원을 위한 기존의 선행 사례들은 토양 개선, 미기후 조절 등 생육에 영향을 미치는 요소들을 개선하는 여러 복원 기술을 시행하였다. Won 등(2006)은 강원도 고성 산불피해지의 토양 안정화를 위해 복합비료, 산림용고형복합비료의 시비 처리를 진행하였다. 또한 Kim (2020)은 경북 포항 해안방재림의 염분지의 양분 공급을 위한 우드칩 처리, 미얀마 반건조지 조림지에서 토양 황폐화를 극복하기 위해 시비 처리를 진행하였다. 한-몽 그린벨트 사업(2007-2016)에서는 몽골의 건조한 기후와 척박한 토양을 극복하기 위해서 구덩이 식재와 골파기 식재 기법을 활용하였다(KFS, 2015b). RDA (2008)은 차광막을 활용하여 육묘를 진행하고, Wall과 Stobbe (1984)는 토양온도와 작물 생육 증진을 위해 경운 처리를 시행하였다.

이에 본 연구는 대상지인 하늘목장 목초지의 토양 답압과 고산지대의 건조, 저온, 강풍의 기후적 생육 저해 요인을 개선하기 위해 여러 복원 기술 중 경운, 골파기, 차광막 처리를 시행하였다. 그 후 각 처리구의 토양온도와 토양습도 데이터를 이용하여 복원 기술 적용에 따른 생육 환경에 대한 영향을 분석하였다. 또한 묘목의 활착률과 생장량 데이터를 이용하여 묘목의 초기 생장 추세를 분석하였다. 이를 통해 타 복원 사업 시행 시 여러 복원 기술의 활용방안을 제시하고자 한다.

Materials and Methods

연구대상지

본 연구는 강원도 평창군 대관령면 하늘목장 내 해발 1,120 m 고산지대에 위치한 산림 복원 사업지에서 수행되었다(북위 37°43′15.78″, 동경 128°44′21.08″). 5년 간(2018 - 2022년)의 연평균기온은 6.0°C, 연강수량은 1,414.84 mm, 연적설량은 71.5 cm, 연평균풍속은 7.0 m/s, 최대풍속은 75.0 m/s이다(NIFS, 2023). 대관령은 한국에서 가장 먼저 서리가 내리는 지역이며(KMA, 2021), 전국 연평균기온(13.3°C), 평균풍속(2.1 m/s)과 비교했을 때 기온은 낮고, 풍속이 강한 지역에 속한다. 고산지대라는 지역적 특성으로 인해 일반 산림에 비해 수목 생육이 어려운 기후 특성을 지닌다. 본 대상지는 1914년에 기존 산림을 벌채하고 강원 우정청 건물이 세워졌으며, 1976년부터 2005년까지는 영월 우체국 안테나 기지로 이용되었다. 이후 건물을 철거하고 산림청 소관의 국유림으로 전환 후 토지 대부를 통해 목초지로 활용되어오다가 2014년에 다시 국유림으로 반환되었다(Fig. 1).

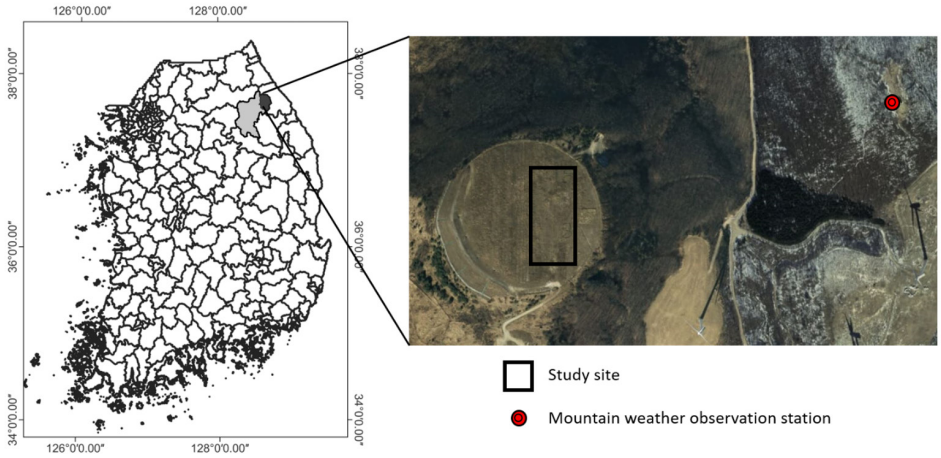

Fig. 1. Status of study site.

연구설계

본 대상지는 과거에 건물부지 및 목초지로 활용된 이력이 있는 고산 초원지대로 답압, 강풍, 건조, 저온 등으로 인한 식생의 생육 저해가 우려되는 지역이다. 답압에 의한 토양의 물리적 환경을 개선하기 위해 경운을 실시하였으며, 굴착기를 이용하여 50 cm 깊이로 지면을 고르는 작업을 수행하였다. 반면 초지 처리구는 원상태를 유지하였으며 현존식생은 목초인 큰조아재비를 비롯하여, 소리쟁이, 개망초, 가시상추, 붉은토끼풀의 외래식물과 산쑥, 큰기름새, 개여뀌, 엉겅퀴 등의 자생식물이 분포하고 있다. 경운 처리에 따른 생장 증진 효과를 비교하고자 경운 처리구와 초지 처리구는 동일하게 20 m × 20 m로 조성하였으며, 강풍과 건조 피해 저감을 위해 처리구 내에 골파기와 차광막을 처리하였다. 골파기는 30 cm 깊이의 고랑을 대(帶)형으로 조성하였고, 고랑의 양옆으로 흙을 쌓은 후, 흘러내리지 않도록 다짐작업을 시행하였다. 차광막은 폴리에스테르 소재의 검은색 그물막을 0.5 m 높이로 설치하였으며, 차광 및 방풍 효과를 높이기 위해 조사구의 경계를 따라 4 겹으로 설치하였다. 식재수종은 주변 참조생태계를 고려하여 우점종 중 하나인 전나무(*Abies holophylla*)를 선정하였으며, 양묘방식에 따른 활착 및 생장의 차이를 확인하고자 용기묘 6년생 120 본과 노지묘 6년생 120 본 총 240 본을 1 m 간격으로 식재하였다. 묘목은 경기도

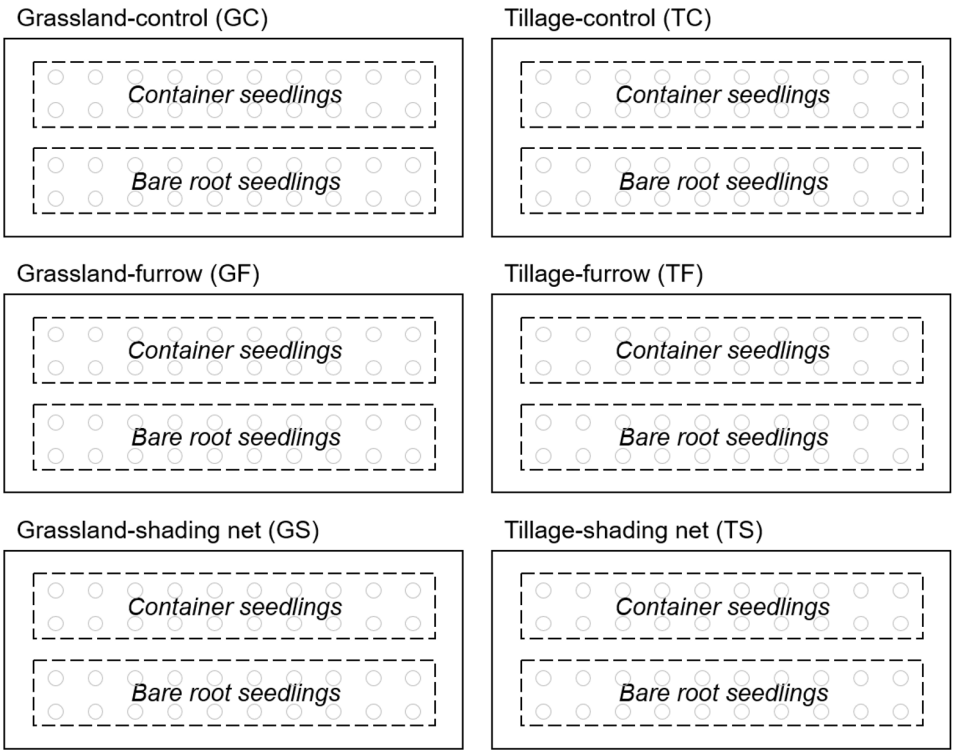

Fig. 2. Detail designs of study site.

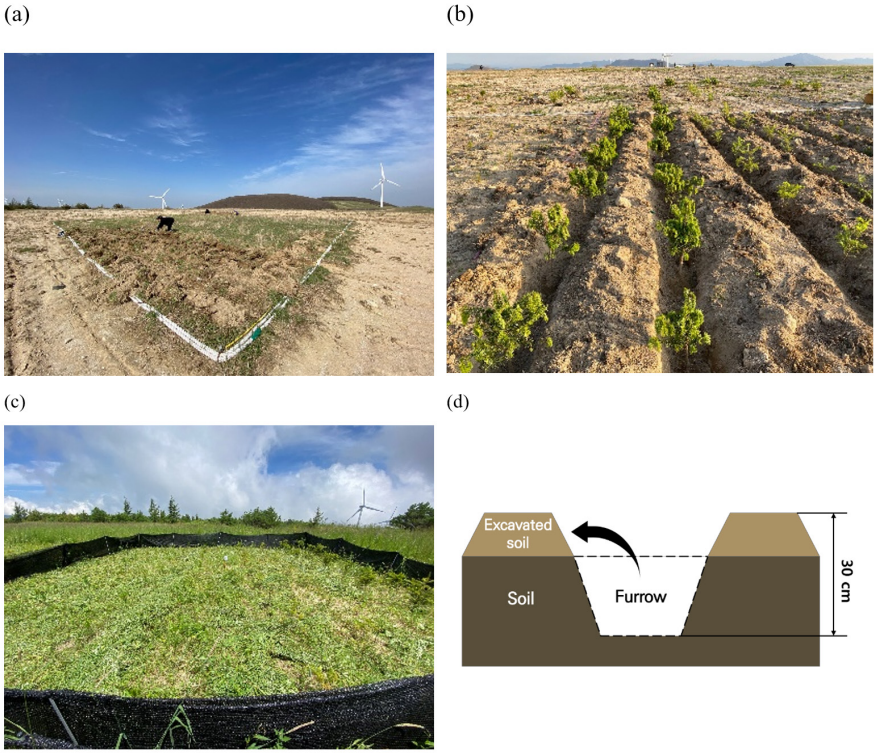

Fig. 3. A figure of the treatments (a) tillage plot, (b) furrow plot, (c) shading net plot, (d) schematic diagram of furrow plot.

포천에 위치한 국립산림과학원 산림기술경영연구소에서 생산되었다. 최종적으로 조성된 처리구는 경운구와 경운하지 않은 초지구로 크게 구분되고, 세부적으로 대조구, 골파기 처리구, 차광막 처리구로 구분되어 다음과 같이 초지 대조구(grassland-control, GC), 초지 골파기 처리구(grassland-furrow, GF), 초지 차광막 처리구(grassland-shading net, GS), 경운 대조구(tillage-control, TC), 경운 골파기 처리구(tillage-furrow, TF), 경운 차광막 처리구(tillage-shading net, TS)로 총 6개 처리구로 구분된다(Fig. 2 and 3).

본 연구는 2021년 7월에 대상지를 조성하였으며, 토양 온·습도 데이터 및 생육데이터 수집은 2021년 7월부터 2023년 4월까지 수행되었다.

토양 온·습도 데이터 수집 및 분석

토양 온·습도 모니터링을 위해 각 처리구마다 토심 10 cm 깊이에 토양온도계(External Temperature Sensors, Spectrum Technologies, USA)와 토양습도계(WaterScout SM 100, Spectrum Technologies, USA)를 설치하였다. 토양 온·습도 데이터는 전체 연구기간동안 수집되었으며 1시간 단위로 데이터를 수집하였다. 토양온도와 토양습도는 계절별로 나누어 처리구간의 차이를 비교·분석하였다.

추가적으로 토양습도는 강수의 패턴에 따라 일정한 순환의 형태를 가지기 때문에(Han et al., 2009), 강우 후 48시간 동안 토양습도 값과 토양습도 감소율의 변화 패턴을 함께 분석하였다. 강우 데이터는 대상지에서 직선거리 약 500 m 떨어진 지역에 위치한 선자령 산악기상망 데이터를 이용하였다. 패턴 분석은 강우 종료 후 48시간 동안 토양습도의 감소량과 감소율 변화 추세를 분석하였다. 대관령의 기후적 특성을 고려하였을 때, 11월부터 3월까지 강설이 발생하고, 3월에는 적설되어 있던 눈이 녹으면서 강우와 관계없이 토양습도의 급증과 같은 현상이 발생한다. 따라서 강우에 따른 토양습도 변화 패턴 분석에는 4월부터 10월까지의 관측 데이터를 활용하였다. 토양습도 감소량은 관측된 토양습도 데이터로 분석하였으며 토양습도 감소율은 식(1)을 활용하여 산출한 후 분석하였다.

$$t'_n = \frac{t_n - t_0}{t_0} \times 100(\%) \tag{1}$$

여기서, t'_n: The soil moisture reduction rate after n hours of rainfall

t_n: The soil moisture after n hours of rainfall

t_0: The soil moisture at the end of rainfall

생육 데이터 수집 및 분석

산림 복원 기술 적용에 따른 수목의 생육 정도를 분석하기 위해 2021년 7월과, 2023년 4월에 활착률 조사와 생장량 측정을 시행하였다. 두 조사 시기 달이 일치하지 않으나, 본 연구에서는 개월 단위를 활용한 상대생장량 분석을 실시함에 따라 본 조사 데이터의 활용이 적합하다고 판단하였다. 활착률은 잎의 갈변 여부를 확인하여 모든 잎에 갈변이 발생하였을 때 고사로 판정하였다. 이후 전체 본 수 중 고사가 발생한 본 수를 제외한 활착을 백분율로 나타내었다. 생장량은 각 개체목별 수고와 근원경을 측정하여 기록하였다. 수고의 경우 절척을 이용하여 1 cm 단위로 측정하였으며 근원경의 경우 디지털 켈리퍼스(CD-20APX, Mitutoyo Corporation, Japan)를 이용하여 0.01 mm 단위로 측정하였다. 수고와 근원경은 각각 기간을 고려한 생장 정도를 파악하기 위해 식(2)를 통해 상대생장량(relative growth rate, RGR)을 계산하여 데이터를 가공한 후 비교·분석하였다.

$$RGR = \frac{\ln S_2 - \ln S_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

여기서, t_1: Time one (in months)

t_2: Time two (in months)

S_1: Size at time one

S_2: Size at time two

*unit:

- Tree height: ln (cm)/month
- Root collar diameter: ln (mm)/month

통계 분석

사전 분석에서 Shapiro-Wilk test와 Levene's test를 통해 각 데이터들이 정규성과 등분산성이 없음을 확인하였다. 따라서 각 처리구별 차이를 확인하기 위해 비모수적 통계 분석 방법인 Kruskal-Wallis H test로 분석하였고 사후검정으로 Dunn's test를 시행하여 각 처리구 간의 유의성을 확인하였다. 모든 통계 분석은 R (version 4.3.0, R foundation, https://www.r-project.org/)을 이용하여 유의수준 0.05에서 수행하였다.

Results and Discussion

복원 기술 처리에 따른 토양온도 분석

처리구별 토양온도를 비교한 결과, 모든 계절에서 처리구간 유의미한 차이가 존재하는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 사후검정에서는 봄의 모든 처리구간에 유의미한 차이가 나타났다($p < 0.05$). 각 처리구별 토양온도의 평균값은 GC에 비해 GF, TS, TC에서 평균 기온이 1°C 이상 높게 나타났으며, GS와 TF는 GC보다 낮은 온도를 나타내었다. 여름의 경우 GF와 TS가 GC에 비해 유의미하게 높은 차이를 나타내었다($p < 0.05$). 반면 TC, GS, TF는 GC와 비교하여 유의미한 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$). 봄, 여름의 토양온도는 동일한 골파기를 시행했음에도 GF는 가장 높은 값, TF는 가장 낮은 값이 나타나는 등 복원 기술의 복합적 시행 여부에 따라 영향이 다르게 나타났다. 가을에는 GF에서만 GC보다 토양온도가 유의미하게 높았으며($p < 0.05$), 나머지 처리구들은 GC 보다 약 0.5°C 낮고 서로 유의미한 차이를 나타내지 않았다($p > 0.05$). 겨울에는 GC에 비해 GF와 TF에서 유의미하게 높은 토양온도가 나타났으며($p < 0.05$), 특히 GF의 토양온도가 1.3°C 높게 나타나 겨울철에 토양온도를 유지하기 위해서는 골파기 식재 기술이 효과적인 것으로 판단된다.

결과적으로 초지에 골파기를 처리한 GF에서 사계절 내내 가장 높은 온도가 나타났으며, 골파기 처리가 토양온도의 변화를 안정화시키고(Wang et al., 2011), 높은 토양온도를 가진다는 선행 연구와 일치하는 결과를 보였다(Zhou et al., 2009) (Table 1; Fig. 4).

Table 1. Max, min, mean, median and standard deviation (Std) of soil temperature (°C) for six treatment plots in four seasons.

Type of treatment plot	Spring					Summer				
	Max	Min	Mean	Median	Std	Max	Min	Mean	Median	Std
GC	16.1	-3.6	2.6	0.6	4.1	24.4	9.9	18.8	19.6	2.8
GF	22.2	-4.8	3.6	1.9	4.5	26.5	10.8	19.4	20.0	2.6
GS	17.3	-4.1	2.4	0.5	4.1	27.0	9.7	18.8	19.3	3.0
TC	21.2	-6.0	3.8	2.8	5.1	27.2	9.8	19.0	19.3	2.9
TF	16.3	-5.1	2.5	-0.2	4.3	25.7	9.7	18.6	19.2	2.8
TS	22.1	-5.1	4.0	2.6	5.1	30.4	9.8	19.4	19.7	3.2
Type of treatment plot	Autumn					Winter				
	Max	Min	Mean	Median	Std	Max	Min	Mean	Median	Std
GC	19.0	-0.2	9.3	8.1	4.8	1.5	-8.5	-2.7	-2.5	1.8
GF	19.3	-0.2	9.7	8.9	4.9	2.6	-8.0	-1.6	-1.4	1.9
GS	19.2	-0.6	8.8	7.8	4.9	0.9	-9.1	-3.0	-2.8	1.8
TC	19.0	-1.5	8.7	7.7	5.0	0.8	-10.1	-3.1	-2.8	2.0
TF	17.5	-0.2	8.8	7.6	4.8	1.9	-8.5	-2.6	-2.3	2.0
TS	19.7	-1.8	8.8	7.9	5.1	0.7	-10.8	-3.3	-2.9	2.2

GC, grassland-control; GF, grassland-furrow; GS, grassland-shading net; TC, tillage-control; TF, tillage-furrow; TS, tillage-shading net.

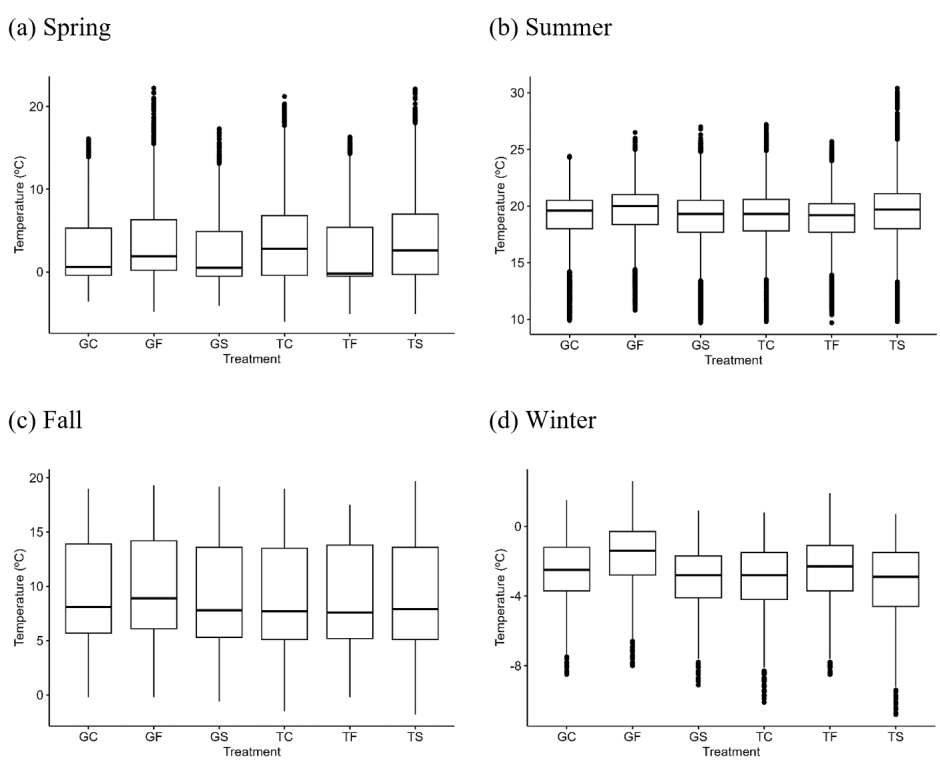

Fig. 4. Boxplots for soil temperature of six treatment plots in four seasons: Median, lower and upper quartile, whiskers = 1.5 interquartile length, dots = outliers > 1.5 interquartile length. GC, grassland-control; GF, grassland-furrow; GS, grassland-shading net; TC, tillage-control; TF, tillage-furrow; TS, tillage-shading net.

복원 기술 처리에 따른 토양습도 분석

계절마다 처리구별 토양습도를 비교한 결과, 모든 계절에서 처리구간 유의미한 차이가 존재하는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 사후검정 결과 봄에는 GF, TC, TS, GS, TF, GC 순으로 토양습도가 높아 모든 복원 기술 처리가 봄철 토양습도를 높게 유지하는 데에 도움이 되는 것으로 나타났다. 특히 GF가 GC에 비해 약 13% 더 높은 평균 토양습도를 가지는 것으로 나타났다. Fig. 5a를 보면 GF의 제1사분위수가 다른 처리구와 유사한 반면 제3사분위수는 높게 나타나는데, 이는 봄철 기온 상승으로 눈이 녹으며 50% 이상으로 급격히 증가한 토양습도가 GF에서만 계속 유지되어 나타나는 결과로 보인다. 이는 골파기 처리를 통한 집수, 증발량 감소, 토양 수분 침투 작용으로 토양습도 유지효과가 나타난 선행 사례들과 일치하는 결과이다(Li et al., 2001; 2013). 여름에는 GS를 제외한 모든 처리구의 토양습도가 GC보다 높게 나타났다. 특히 GF의 토양습도가 GC보다 약 20% 더 높았으며 TC, TS, TF의 토양습도는 약 4 - 7% 높게 나타났다. 가을에도 GF에서 39.5%로 가장 높은 토양습도 값이 나타났으며 경운 처리를 한 TS, TC, TF에서 22 - 24%, GS, GC에서 17 - 18%의 토양습도 값이 나타났다. 여름과 가을의 토양습도의 경우 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 복원 기술 처리에 따라 크게 GF, 경운 처리구(TC, TF, TS), 나머지 초지 처리구(GC, GS)의 세 그룹으로 나눠지는 양상이 나타났다. 겨울에는 모든 처리구들이 4 - 11%의 낮은 토양습도를 나타냈다. 이는 겨울 동안의 강수가 낮은 기온으로 인해 그대로 얼어붙고 적설 되어 토양에 수분이 공급되지 않은 결과로 보인다. 반면 Fig. 5d를 보면 다른 계절에 비해 많고, 10 - 50%까지 나타나는 이상치들을 점들로 확인할 수 있는데, 이는 2023년 1월 8일부터 14일까지 약 1주 간 대관령의 기온이 영상으로 상승하면서 적설 되어 있던 눈이 녹으며 토양습도가 일시적으로 상승한 결과로 보인다.

사계절 전반적으로 GS를 제외한 골파기, 경운, 차광막 처리의 적용이 높은 토양습도를 유지하는데 긍정적 영향을 미친 것으로 나타났다. 경운 처리구들(TC, TF, TS)이 GC보다 높은 토양습도를 나타내는 결과는 Chang과 Lindwall (1989, 1990, 1992)이 보고한 경운지 대비 비경운지의 표토가 낮은 수분보유능을 나타냈다는 결과와 일치

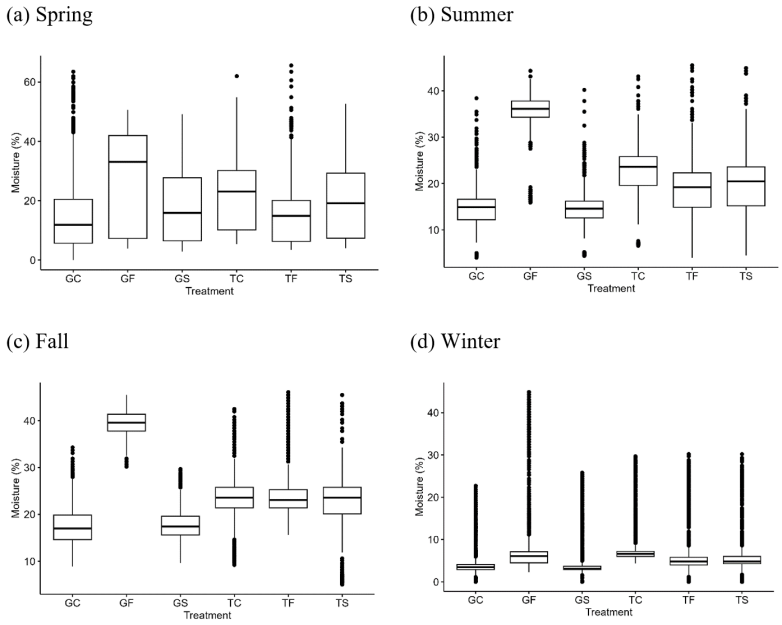

Fig. 5. Boxplots for soil moisture of six treatment plots in four seasons: Median, lower and upper quartile, whiskers = 1.5 interquartile length, dots = outliers > 1.5 interquartile length. GC, grassland-control; GF, grassland-furrow; GS, grassland-shading net; TC, tillage-control; TF, tillage-furrow; TS, tillage-shading net.

한다. 골파기 식재의 경우 모든 계절에서 전반적으로 높은 토양습도가 나타났다. 또한 토양온도 결과와 마찬가지로 GF가 TF보다 항상 높은 토양습도 결과가 나타나, 경운을 함께 시행하는 것보다 골파기만 시행하는 것이 높은 토양습도를 유지하는데 더 효과적일 것으로 판단된다(Table 2).

Table 2. Max, min, mean, median and standard deviation (Std) of soil moisture (%) for six treatment plots in four seasons.

Type of treatment plot	Spring					Summer				
	Max	Min	Mean	Median	Std	Max	Min	Mean	Median	Std
GC	63.5	0.0	14.8	11.9	12.0	38.4	4.0	14.8	14.9	4.3
GF	50.6	3.9	28.2	33.1	16.1	44.3	15.9	35.1	36.1	4.6
GS	49.2	2.9	19.2	15.9	13.6	40.2	4.4	14.5	14.6	3.7
TC	62.0	5.4	22.3	23.1	11.6	43.1	6.6	22.3	23.6	5.7
TF	65.6	3.5	14.4	14.9	9.1	45.5	4.0	18.7	19.2	5.8
TS	52.7	4.0	20.1	19.2	12.2	44.9	4.5	19.3	20.5	6.3
Type of treatment plot	Autumn					Winter				
	Max	Min	Mean	Median	Std	Max	Min	Mean	Median	Std
GC	34.3	8.9	17.3	17.0	3.9	22.7	0.0	4.3	3.5	3.2
GF	45.5	30.2	39.5	39.6	2.7	44.9	2.3	10.1	6.1	11.4
GS	29.7	9.6	17.7	17.4	3.3	25.8	0.0	4.2	3.1	3.7
TC	42.5	9.2	23.8	23.6	4.3	29.7	4.4	7.7	6.6	3.8
TF	46.1	15.6	23.9	23.1	4.0	30.2	0.0	7.0	4.8	5.9
TS	45.5	5.0	22.8	23.6	5.0	30.2	0.0	6.0	4.8	4.3

GC, grassland-control; GF, grassland-furrow; GS, grassland-shading net; TC, tillage-control; TF, tillage-furrow; TS, tillage-shading net.

강우 후 토양습도 변화 패턴 분석

처리구별 토양습도의 차이를 명확하게 파악하고자 토양습도 감소량과 감소율 변화 패턴을 분석하였다(Fig. 6).

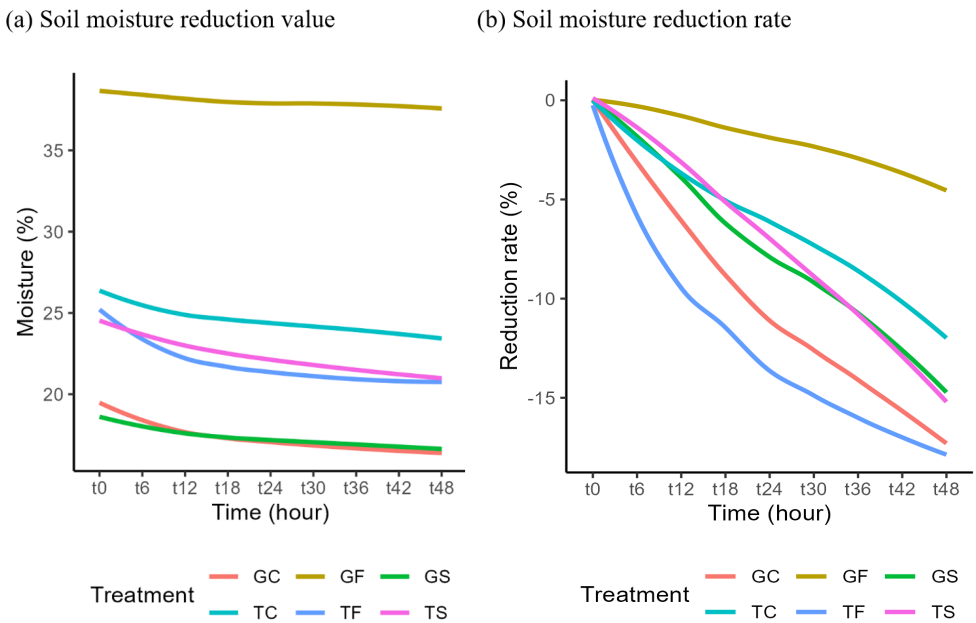

Fig. 6. Post-rainfall soil moisture reduction pattern of value (a) and rate (b) for six treatment plots in April to October. GC, grassland-control; GF, grassland-furrow; GS, grassland-shading net; TC, tillage-control; TF, tillage-furrow; TS, tillage-shading net.

토양습도 감소량 그래프(a)에서는, Fig. 5의 여름, 가을과 유사하게 세 그룹으로 나눠져 GF에서는 상대적으로 높은 토양습도, 경운 처리구들(TS, TC, TF)에서는 중간, 나머지 초지 처리구들(GS, GC)에서는 상대적으로 낮은 토양습도를 띄는 경향이 나타났다. GF에서는 강우 종료 직후인 t0 (38.6 ± 3.9%)와 48시간 후인 t48 (37.5 ± 4.0%)의 토양습도 차이가 약 1% 차이로 적은 감소량을 나타내었다. 반면 TC, TF, TS에서 t0에서는 24 - 27%였던 토양습도가 t48에서는 20 - 24%로 3 - 4%정도의 비교적 큰 감소량을 나타내었다. 마지막으로 GC와 GS는 t0에서는 18 - 20%의 토양습도를 나타내다 t48에서는 16 - 17%로 2 - 3%정도의 비교적 작은 감소량을 나타내었다.

토양습도 감소율 그래프(b)를 보면, GF의 경우 가장 완만한 곡선을 그리며 최종적으로 -4.6 ± 3.2%의 가장 작은 감소율을 보였다. 그 다음으로는 TC (-12.3 ± 10.4%)가 GF 대비 약 2.6배 더 큰 감소율을 보였다. 다음으로는 방풍 처리구들(TS: -15.6 ± 10.1%, GS: -15.1 ± 11.1%)이 뒤를 이었으며, GC (-17.7 ± 11.7%)의 경우 시간에 따라 꾸준한 감소율을 나타내어 거의 직선에 가까운 추세선이 그려지는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 TF (-18.16 ± 10.5%)의 경우 가장 큰 감소율을 보였으며 강우 종료 후 다른 처리구들 대비 매우 급격한 감소율을 보이다 t6이후로 감소율이 비교적 완만해지면서 t48에는 초지 대조구와 유사한 감소율을 나타내었다. 이러한 결과를 보면 GF가 강우 후 작은 토양습도 감소율을 가지기 때문에 강우에 의해 상승한 토양습도를 비교적 장기간 유지하기에 유리한 것으로 판단된다. 본 결과와 동일하게 선행 연구에서도 고랑이나 구덩이 처리는 토양수분 손실률을 줄이고(Mcginnies, 1959), 개선하여(Jin et al., 2010), 높은 토양수분 유지와 묘목의 생장을 증가시킬 수 있다고 보고된 바 있다(Jo and Park, 2017). 반면 경운과 골파기 처리를 복합적으로 처리한 TF가 가장 큰 감소율을 나타낸 것은 경운 처리가 토양의 배수성과 통기성을 높여(Nam et al., 2012), 강우로 공급된 수분이 빠르게 빠져나갔기 때문으로 보인다.

복원 기술 처리에 따른 초기 활착률 분석

복원 기술 시행을 통한 묘목 초기 활착률 분석 결과, 전체 240 주 중 179 주 생존으로 72%의 묘목이 활착에 성공한 것으로 나타났다. 전국 조림지 평균 활착률은 84 - 94% 수준인데(KFS, 2022), 해당 수치는 전국의 모든 조림지의 조성 약 1년차 결과로 환경이 비교적 열악한 해당 지역의 3년차 활착 상황은 비교적 양호한 것으로 판단된다. 처리구별 활착률 비교·분석 결과, 기준이 되는 대조구인 GC에서는 77.5%의 활착률이 나타났으며 차광막을 설치한 TS (50%), GS (65%)에서 상대적으로 낮은 수준의 활착이 나타났다. 반면 골파기를 시행한 GF, TF에서는 두 처리구 모두 87.5%의 높은 활착률 결과가 나타났다. 경운만 시행한 TC에서도 80%로, GC보다 높은 활착률이 나타났다. 이에 본 복원 대상지 묘목의 초기 3년 간 활착에 차광막이 부정적 영향, 골파기 기술이 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 단순히 경운만 시행했을 때, 활착에 일부 도움을 준 것으로 판단되지만 경운과 다른 복원 기술을 복합적으로 적용하는 경우 기술마다 다른 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다. 특히 본 대상지에서는 경운과 차광막을 동시에 시행하였을 때 초기 활착률에 부정적 영향을 미친 것으로 나타났다. 차광막 설치 시 대상지에 차광 및 방풍 효과를 기대하였으나, 직사광선에 삭고 강풍에 파손된 차광막의 잔해가 흩어져 묘목에 감기는 등 관리의 어려움이 존재하였으며 이로 인해 생육에 긍정적 효과를 미치지 못한 것으로 보인다. 묘목 종류별 활착률을 분석한 결과 120 주 중 용기묘, 노지묘 각각 78, 101 주 생존으로 65, 84%의 묘목이 활착해 노지묘의 활착률이 더 큰 것으로 나타났다(Table 3).

Table 3. Survival rate of *Abies holophylla* in 3rd year of implementation of restoration treatment (number of tree [%]).

Item	GC	GF	GS	BC	BF	BS	Total
Container seeding	14 (70.0)	17 (85.0)	9 (45.0)	15 (75.0)	18 (90.0)	5 (25.0)	78 (65.0)
Bare root seeding	17 (85.0)	18 (90.0)	17 (85.0)	17 (85.0)	17 (85.0)	15 (75.0)	101 (84.0)
Total	31 (77.5)	35 (87.5)	26 (65.0)	32 (77.5)	35 (87.5)	20 (50.0)	179 (74.5)

GC, grassland-control; GF, grassland-furrow; GS, grassland-shading net; TC, tillage-control; TF, tillage-furrow; TS, tillage-shading net.

복원 기술 처리에 따른 초기 생장량 분석

생장량 분석 결과, 2021년 7월부터 2023년 4월까지 처리구간 수고 상대생장량과 근원경 상대생장량에 유의한 차이가 존재하는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 처리구별 수고 상대생장량의 평균값 비교 결과, GC보다 TS (0.005 ln [cm]/month), TC (0.004 ln [cm]/month), TF (0.003 ln [cm]/month), GS (0.002 ln [cm]/month)에서 상대적으로 낮은 결과가 나타났다. GF (0.013 ln [cm]/month)는 GC보다 높은 수고 상대생장량이 나타났다. 모든 골파기 처리구에서 높은 값이 나타난 활착률과 달리, GF에서만 수고 생장량 값이 높게 나타났다. 이러한 수고 상대생장량의 처리구별 비교 결과는 토양온도와 유사한 경향을 보인다. 봄은 수목의 본격적으로 생장이 시작되는 계절로, 여러 침엽수종이 토양온도가 3 - 6℃일 때 뿌리 생장을 시작한다고 보고된 바 있다(Lyr and Hoffmann, 1967; Kaufmann, 1977; Tryon and Chapin, 1983; Korotaev, 1987; Lopushinsky and Max, 1990). 따라서 봄철 토양온도가 상대적으로 높게 나타난 GF와 TS, TC에서 생장이 우세했을 것으로 판단되며 수고 상대생장량에 영향을 미친 것으로 판단된다. 동시에 겨울철 토양온도가 TC, GS, TS에서 비교적 낮게 나타났다. 겨울에는 장기간 적설된 눈으로 인해 빛이 차단되어 식물이 약화되며(Sakai and Larcher, 2014), 묘목 뿌리가 낮은 토양온도에 노출되면 미세한 동해를 입어 수분과 질소 흡수 감소가 발생하고 이는 이후 봄철 생장 감소 및 고사로 이어진다(Bigras and Dumais, 2005). 이에 겨울철 낮은 토양온도가 수고 상대생장량에 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, TS와 TC의 경우 대관령의 연중 낮은 기온으로 인해 봄철 높은 토양온도보다 겨울철 낮은 토양온도가 생장에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

처리구별 근원경 상대생장량의 평균값 비교 결과, 모든 처리구에서 GC보다 상대생장량이 높게 나타났으며 GF (0.023 ln [mm]/month), TC (0.018 ln [mm]/month), GS (0.015 ln [mm]/month), TS (0.008 ln [mm]/month), TF (0.004 ln [mm]/month) 순으로 크게 나타났다. 활착률, 수고 결과와 동일하게 GF가 가장 높은 값이 나타났고 수고 결과와는 달리 TF를 비롯한 타 처리구에서 근원경 상대생장량에 유의한 영향을 미친 것으로 나타났다. 이러한 근원경의 상대생장량 비교 결과는 토양습도 결과와 유사한 양상인데, 특히 봄철 토양습도 분석 결과와 비슷하게 나타났다. 바람이 많이 부는 지역에서는 봄철 쌓인 눈이 녹으며 잠재적인 토양 수분 부족 해소에 도움을 주는데(Litaor et al., 2008), 토양습도가 상대적으로 높았던 처리구들에서 근원경의 상대생장량도 우세하게 나타난 것으로 판단된다. 또한 토양습도의 감소 추세 분석 결과 감소율이 낮았던 GF, TC, TS, GS에서 근원경 상대생장량도 높은 것으로 나타났다.

결과적으로 수고 상대생장량과 근원경 상대생장량 모두 GF가 가장 높게 나타났으며 토양 온·습도 결과 역시 가장 높은 것으로 나타나 단순 골파기를 시행하는 것이 본 대상지에서 가장 효과적인 산림 복원 기술로 판단된다. 일부 결과들에서 생장이 감소하는 양상이 나타났는데, 이는 건조지 묘목의 수분 부족 시 나타나는 초두부 잎 마름으로 인한 수고 손실(Jin et al., 2017), 강풍으로 인한 부러짐(Virot et al., 2016)과 같은 현상의 결과로 판단된다.

양묘 방식에 따른 상대생장량의 차이를 분석한 결과, 수고의 경우 용기묘, 노지묘 각각 0.0055, 0.0061 ln [cm]/month로 노지묘 생장이 더 크게 나타났으며 근원경의 경우 각각 0.011, 0.009 ln [cm]/month로 용기묘 생장이 더 크게 나타났다. 용기묘는 이식 시 뿌리, 수관 등 손상을 줄여 초기 활착에 도움을 주는 효과가 있으며(Wilson et al., 2007), 선행 연구 결과에서도 용기묘가 노지묘보다 활발한 세근 발달과 초기 활착률, 상대생장량이 우세하게 나타났다(Song, 2012). 하지만 본 연구에서는 노지묘의 활착률과 수고 상대생장량이 더 높게 나타났는데, 이는 본 연구에서 사용된 용기묘가 6년 간 동일 포트에서 생장하여 뿌리 기형과 같은 생육 부진에 의한 결과로 판단되며 식재 초기 용기묘, 노지묘의 수고 43.5, 53.2 cm, 근원경 1.4, 4.3 mm으로 생장 정도의 차이가 존재하였기 때문으로 판단된다. 향후 묘목 식재 시 용기묘를 식재하더라도 생육 상태에 따라 활착 및 생장에 불리할 수 있으며 묘목의 활력을 확인한 후 식재할 필요가 있을 것으로 판단된다(Fig. 7).

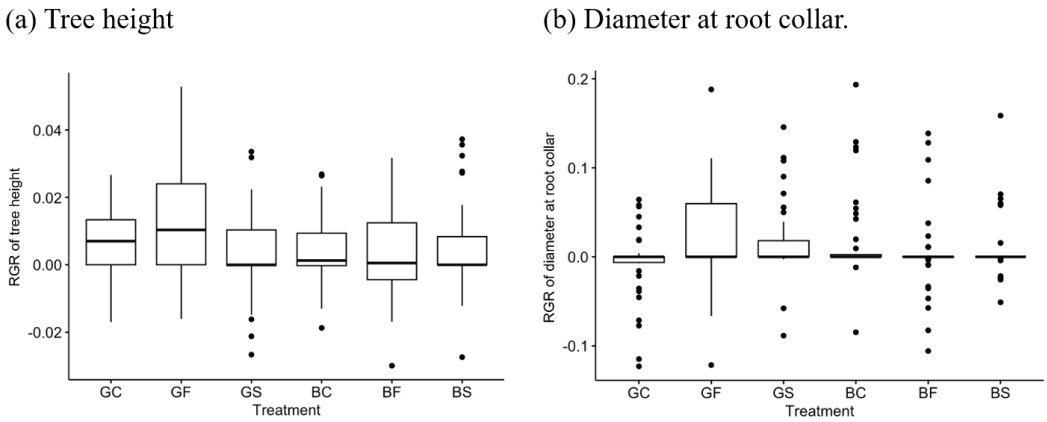

Fig. 7. Relative growth rate analysis results (a) Tree height, (b) Diameter at root collar. RGR, relative growth rate; GC, grassland-control; GF, grassland-furrow; GS, grassland-shading net; TC, tillage-control; TF, tillage-furrow; TS, tillage-shading net.

Conclusion

본 연구는 대관령 초지 반환지의 산림 복원을 위해 다양한 복원 기법을 적용하여 환경적 변화에 따른 묘목의 활착 및 생장 증진 효과를 평가하고자 하였다. 결과적으로 경운 처리를 시행했을 때 보다, 초지 상태를 유지하였을 때 생장량이 양호한 것으로 나타났다. 이는 초지에서 상대적으로 피복률이 높아지면서 비교적 높은 토양 온·습도 값을 유지하였기 때문으로 판단된다. 또한, 골파기 처리는 봄철과 겨울철 토양의 급격한 온도 변화를 방지하고, 높은 습도를 지속해주는 것으로 나타나, 그 효과성을 입증할 수 있었다. 골파기는 몽골이나 중국 서부와 같은 건조지에서 시행되는 복원 기술로 산의 능선부, 산정부, 고산지대처럼 건조하거나 산불피해지와 같이 교란으로 인해 토양이 척박한 훼손지처럼 토양조건이 열악한 지역에서 적용가능한 복원 기술로 제시될 수 있다. 차광막 처리는 1년 정도 유지되었으나, 계속되는 강풍 및 직사광선에 의해 제재가 소실되는 것으로 나타나 지속적인 유지관리가 필요한 방법으로 보인다. 또한, 대관령 고산지대는 바람이 많은 부는 지역으로 강풍에 의한 피해가 많은 만큼 처리구별 풍향, 풍속 저감 효과에 대해 분석하지 않은 것은 본 연구의 한계점으로 지적될 수 있다. 다만, 바람의 방향과 속도는 매우 다양하게 변하기 때문에 그 변화 경향을 분석하는 것은 쉽지 않다. 그리고 묘목을 이식한 후 활착률은 안정화되기 위해 장기적으로 7 - 15년이 필요하기 때문에(Albrecht et al., 2022), 향후 연구에서는 장기적인 모니터링과 더불어 바람에 대한 영향 분석 및 다양한 수종, 양묘 방식을 고려한 연구를 통해 그 적용 범위를 확대해 볼 필요성이 있다.

Acknowledgements

본 연구는 국립산림과학원 연구과제 “DMZ 및 산림훼손지 유형별 복원평가 및 산림복원 기술 개발”(FE0100-2020-02-2024)의 지원으로 수행되었습니다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Authors Information

Ju-Eun Kim, https://orcid.org/0009-0004-2617-6976
Jeong-Hyeon Bae, https://orcid.org/0009-0008-4633-2840
So-Jin Kim, https://orcid.org/0000-0002-1525-0649
Ki-Hyung Park, https://orcid.org/0000-0003-2278-6393
Namin Koo, https://orcid.org/0000-0002-9893-7517
Won-Seok Kang, https://orcid.org/0000-0002-0915-2276
Yu-Gyeong Jung, https://orcid.org/0000-0001-5006-2953

References

Albrecht C, Contreras Z, Wahl K, Sternberg M, Christoffersen B. 2022. Winners and losers in dryland reforestation: Species survival, growth, and recruitment along a 33-year planting chronosequence. Restoration Ecology 30:e13559.

Betteridge K, Mackay AD, Shepherd TG, Barker DJ, Budding PJ, Devantier BP, Costall DA. 1999. Effect of cattle and sheep treading on surface configuration of a sedimentary hill soil. Australian Journal of Soil Research 37:743-760.

Bigras FJ, Dumais D. 2005. Root-freezing damage in the containerized nursery: Impacts on plantation sites-A review. New Forests 30:167-184.

Caspersen JP, Kobe RK. 2011. Interspecific variation in sapling mortality in relation to growth and soil moisture. Oikos 92:160-168.

Chang C, Lindwall CW. 1989. Effect of long-term minimum tillage practices on some physical properties of a Chernozemic clay loam. Canadian Journal of Soil Science 69:443-449.

Chang C, Lindwall CW. 1990. Comparison of the effect of long-term tillage and crop rotation on physical properties of a soil. Canadian Agricultural Engineering 32:53-55.

Chang C, Lindwall CW. 1992. Effects of tillage and crop rotation on physical properties of a loam soil. Soil and Tillage Research 22:383-389.

Drewry JJ. 2006. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: A review. Agriculture, Ecosystems and Environment 114:159-169.

Drewry JJ, Paton RJ. 2000. Effects of cattle treading and natural amelioration on soil physical properties and pasture under dairy farming in Southland, New Zealand. New Zealand Journal of Agricultural Research 43:377-386.

Han SH, Ahn JH, Kim SD. 2009. The stochastic behavior of soil water and the impact of climate change on soil water. Journal of Korea Water Resources Association 42:433-443. [in Korean]

Hau BCH, Corlett RT. 2003. Factors affecting the early survival and growth of native tree seedlings planted on a degraded hillside grassland in Hong Kong, China. Restoration Ecology 11:483-488.

Jin EJ, Cho MG, Bae EJ, Park JH, Lee KS, Choi MS. 2017. Physiological responses to drought stress of seven evergreen hardwood species. Journal of Korean Forest Society 106:397-407. [in Korean]

Jin YH, Zhou DW, Jiang SC. 2010. Comparison of soil water content and corn yield in furrow and conventional ridge sown systems in a semiarid region of China. Agricultural Water Management 97:326-332.

Jo HK, Park HM. 2017. Effects of pit plantings on tree growth in semi-arid environments. Forest Science and Technology 13:66-70.

Jung SY. 2014. A study on the distribution characteristics of invasive alien plant (IAP) in South Korea. Ph.D. dissertation, Andong National Univ., Andong, Korea. [in Korean]

Kaufmann MR. 1977. Soil temperature and drought effects on growth of Monterey pine. Forest Science 23:317-325.

KFS (Korea Forest Service). 2001. Research on wats to conserve natural ecosystem and restore damaged areas in the Baekdudaegan. p. 98. KFS, Daejeon, Korea. [in Korean]

KFS (Korea Forest Service). 2015a. 2015 Baekdudaegan protection implementation plan. p. 21. KFS, Daejeon, Korea. [in Korean]

KFS (Korea Forest Service). 2015b. Korea-Mongolia green belt development project 2007-2016. pp. 171-200, 260-266, 391-396. KFS, Daejeon, Korea. [in Korean]

KFS (Korea Forest Service). 2020. The 1st forest restoration basic plan (2020-2029). p. 44. KFS, Daejeon, Korea. [in Korean]

KFS (Korea Forest Service). 2022. Statistical yearbook of forestry. pp. 41-42, 80-81, 170-171, 242-243. KFS, Daejeon, Korea. [in Korean]

Khurana E, Singh JS. 2001. Ecology of seed and seedling growth for conservation and restoration of tropical dry forest: A review. Environmental Conservation 28:39-52.

Kim CB. 2020. A study on the limiting factors for survival and growth of planted trees in restoration area on degraded land. Ph.D. dissertation, Korea Univ., Seoul, Korea. [in Korean]

KMA (Korea Meteorological Administration). 2021. Climate characteristics by region in Korea. Accessed in https://www.weather.go.kr/ on 24 August 2023. [in Korean]

Korotaev AA. 1987. Effect of soil temperature and moisture content on root growth in coniferous cultures. Lesovedenie 1987:50-58.

Kwon KW, Lee JH. 1994. Growth performance and physiological responses of *Quercus* spp. and *fraxinus rhynchophylla* subjected to different soil moisture regimes and nutrition levels. Journal of Korean Society of Forest Science 83:164-174. [in Korean]

Lee NS, Kim CH, Choi YE, Doo HE, Park YB. 2017. A study on the flora and life-form composition of pasture in the Odaesan National Park, Korea. pp. 73-74. In Proceeding of Korean Society of Environment and Ecology 2017. [in Korean]

Lee SW, Kim CM, Song HK. 1978. Soil moisture influence on growth and nutrient uptake of seedling in denuded forest land. Journal of Korean Society of Forest Science 38:46-54. [in Korean]

Li R, Hou X, Jia Z, Han Q, Ren X, Yang B. 2013. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China. Agricultural Water Management 116:101-109.

Li XY, Gong JD, Gao QZ, Li FR. 2001. Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid conditions. Agricultural Water Management 50:173-183.

Litaor MI, Williams M, Seastedt TR. 2008. Topographic controls on snow distribution, soil moisture, and species diversity of herbaceous alpine vegetation, Niwot Ridge, Colorado. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 113:G02008.

Lopushinsky W, Max TA. 1990. Effect of soil temperature on root and shoot growth and on budburst timing in conifer seedlings transplants. New Forest 4:107-124.

Lyr H, Hoffmann G. 1967. Growth rates and growth periodicity of tree roots. International Review of Forestry Research 2:181-236.

McGinnies WJ. 1959. The relationship of furrow depth to moisture content of soil and to seedling establishment on a range soil. Agronomy Journal 51:13-14.

Nam JS, Kang DS, Kang YS, Kim KU, Kim DC. 2012. Crank type rotavator with rotary type rotavator. pp. 116-119. In Proceeding of Korean Society for Agricultural Machinery 2023 Spring. [in Korean]

NIFS (National Institute of Forest Science). 2023. Mountain meteorology observation system. Accessed in http://mw.nifos.go.kr/ on 24 August 2023. [in Korean]

Óskarsson Ú, Ottósson JG. 1990. Plantation establishment success of *pinus contorta* dougl. ex loud, and *larix sibirica* (Munchh.) Ledeb. using various methods and stock. Scandinavian Journal of Forest Research 5:205-214.

Pande TN, Valentine I, Betteridge K, Mackay A, Horne D. 2000. Pasture damage and regrowth from cattle treading. Proceedings of New Zealand Grassland Association 62:155-160.

Pregitzer KS, King JS, Burton AJ, Brown SE. 2000. Responses of tree fine roots to temperature. New Phytologist 147:105-115.

RDA (Rural Development Administration). 2008. Agricultural soil management technology. pp. 43-93. RDA, Jeonju, Korea. [in Korean]

Sakai A, Larcher W. 2014. Frost survival of plants: Responses and adaptation to freezing stress. pp. 2-3. Springer, Berlin, Germany.

Song KS, Cha YG, Choi JY, Kim JJ. 2012. Comparison of growth characteristics of 1- and 2-year-old bare root and container seedling of *Chamaecypatis obtusa*. Journal of Korean Forest Society 101:317-323. [in Korean]

Statistics Korea. 2020. Changes in livestock industry structure seen through statistics. p. 1. Statistics Korea, Daejeon, Korea. [in Korean]

Tryon PR, Chapin FS III. 1983. Temperature control over root growth and root biomass in taiga forest trees. Canadian Journal of Forest Research 13:827-833.

Virot E, Ponomarenko A, Dehandschoewercker É, Quéré D, Clanet C. 2016. Critical wind speed at which trees break. Physical Review E 93:023001.

Wall DA, Stobbe EH. 1984. The effect of tillage on soil temperature and corn (*Zea mays* L.) growth in Manitoba. Canadian Journal of Plant Science 64:59-67.

Wang Y, Xie Z, Malhi SS, Vera CL, Zhang Y, Guo Z. 2011. Effects of gravel-sand mulch, plastic mulch and ridge and furrow rainfall harvesting system combinations on water use efficiency, soil temperature and watermelon yield in a semi-arid Loess Plateau of northwestern China. Agricultural Water Management 101:88-92.

Wilson ER, Vitols KC, Park A. 2007. Root characteristics and growth potential of container and bare-root seedlings of red oak (*Quercus rubra* L.) in Ontario, Canada. New Forests 34:163-176.

Won HK, Lee YY, Jeong JH, Koo KS, Lee CH, Lee SW, Jeong YH, Kim CS, Kim HH. 2006. Fertilization effects on soil properties, understory vegetation structure and growth of *Pinus densiflora* seedlings planted after forest fires. Journal of Korean Forest Society 95:334-341. [in Korean]

Zhou LM, Li FM, Jin SL, Song Y. 2009. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China. Fild Crops Research 113:41-47.