

산불피해지 복원을 위한 바이오차 처리가 굴참나무 묘목 생육에 미치는 영향

정유경 · 김소진 · 김주은 · 배정현 · 강원석^{ID*} · 이영근 · 박기형
국립산림과학원 산림생태연구과

Effect of Biochar Treatment on the Growth Characteristics of *Q. variabilis* for the Restoration of Post-fire Forest Areas

Yu Gyeong Jung, So Jin Kim, Ju Eun Kim, Jeong Hyeon Bae,
Won Seok Kang^{ID*}, Young Geun Lee and Ki Hyung Park

Division of Forest Ecology, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약: 본 연구는 산불피해지에 바이오차를 처리하여 굴참나무의 초기 생장특성 변화를 살펴보고, 임목생장에 영향을 주는 인자를 파악하는데 그 목적이 있다. 굴참나무를 식재한 지역에 바이오차 처리방법(도포, 식혈)과 처리량에 따른 효과를 정량적으로 평가하기 위해 처리구를 조성하였다. 굴참나무의 활착률은 무처리구에 비해 도포와 식혈처리구에서 20% 높게 나타났으며, 도포처리구에서는 북사면, 식혈처리구는 남사면의 활착률이 더 높게 나타났다. 바이오차 처리방법에 따른 상대생장률은 식혈처리구에서 더 높게 나타났고, 근원경 생장에서 유의한 차이를 보였다. 사면향별로는 북사면의 상대생장률이 더 높았고, 수고생장에서 유의한 것으로 나타났다. 이는 바이오차의 처리용량이나 살포방법에 따라 생장량 증진효과가 다르게 나타날 수 있음을 시사한다. 사면향이나 처리방법이 토양의 건조조건에 영향을 주어 수분함량이나 양분동태에 영향을 준 것으로 보여진다. 연구결과를 활용하여 생육목적에 맞는 바이오차의 처리기준을 제시할 수 있으며, 산림사업에 적용하여 바이오매스 증진 및 산불피해지 조기 복원의 효과적인 대안이 될 것으로 판단된다.

Abstract: The aim of this study was to examine the changes in the initial tree growth characteristics of *Q. variabilis* planted in forest fire-damaged areas treated with soil moisturizers such as biochar and to identify the factors that affect tree growth. To evaluate the effectiveness of soil moisture treatment in the area planted with *QV*, an experimental plot was created according to the treatment method (spread and mix) and treatment ratio (0, 4, and 40 t/ha). The survival rate of *QV* was 20% higher in the treatment plot than in the control plot. The height and root collar diameter (RCD) growths of *QV* were high on the northern slope with spread treatment and on the southern slope with mix treatment. The relative growth rate (RGR) according to the soil moisturizer treatment method was higher in the mix treatment, showing a significant difference in RCD. The northern slope had a higher RGR and significant growth rate. This suggests that the growth improvement effect may depend on the soil moisturizer treatment method. The aspect or treatment method affects the drying conditions of the soil, which in turn affects its moisture content or nutrient dynamics. The present research results can be used to establish soil moisturizer treatment standards that are suitable for growth purposes. In addition, this study demonstrates that biochar treatment can be considered as an effective alternative to boost biomass and facilitate early restoration of forest fire-damaged areas.

Key words: restoration, biochar, treatment criteria, soil moisture

서론

산불은 산림을 교란시키는 다양한 요인 중 피해규모와

빈도 면에서 전 세계적으로 주요한 요인 중 하나이다 (Chandler et al., 1983, Whelan, 1995). 우리나라의 최근 10년(11~20년) 평균 산불 발생 횟수는 474건이며, 1,120 ha의 산림이 소실되었다(KFS, 2021). 산불이 발생하면 식생이 제거되며, 서식지 파괴로 인한 생물량 감소와 더불어 강우로 인한 토사 유출의 급격한 증가 등 이차적인 피해를 야기한다(Kim et al., 2006). 식생과 낙엽, 유기물층의 유실

* Corresponding author

E-mail: wons4457@korea.kr

ORCID

Won Seok Kang ^{ID} https://orcid.org/0000-0002-0915-2276

로 인해 불투수층이 형성되고, 토양 피복도 감소로 인하여 노출된 토양층은 빗물에 의해 토양유실이 발생하게 되며, 유기물이 유출되어 토양의 보수력과 양분의 소실로 인한 비옥도가 크게 떨어진다고(Certini, 2005, Hosseini, 2018; Stoof et al., 2015). 토양이 산불피해를 입게되면, 발수성이 생겨 토양의 수분 보유능이 저하되고 침식위험이 증가되며, 식생의 생육에 영향을 주게 된다(Debano, 2000).

교란된 환경에서 식생의 초기 생장은 산림의 복원에 있어 매우 중요하다(Brooker et al., 2008; Taboada et al., 2017). 산불의 피해를 입은 토양은 미생물 군집이 변화하고 물리화학적 특성이 변형되어 식생이 자라는데 적합하지 않다(Agbeshie, 2022; Cavard et al., 2019; Knicker, 2007; Romeo et al. 2020). 특히, 산불피해지에서는 건조스트레스가 심화되어 식물활착을 위한 토양보습의 중요성이 강조되고 있다(Letey, 2001; Li et al., 2018). 바이오차는 바이오매스를 혐기조건에서 열분해시킨 후 얻어지는 물질로, 탄소의 격리를 통한 온실가스 저감, 에너지 생산, 폐기물 관리, 토양의 개선 등 다양한 측면에서 효과가 있으며(Kim et al., 2015; Lehmann, 2007; Seo et al., 2012), 토양에 적용 시 식물의 양분 이용 효율에 영향을 주는 토양 산도와 양이온 치환용량의 증가와 보수력 증진 등 토양 환경 변화를 통해 식물의 생육환경 개선하는 등 토양보습제로서의 효과를 가지고 있다(Kang et al., 2017; Kim et al., 2020; Woo, 2013).

바이오차는 생태계에서 탄소격리를 높이기 위한 방법으로 많이 활용되고 있으며, 토양 비옥도와 토양의 보수력을 개선하는 수단으로 알려져 있다(Carvalho et al., 2013; Imoro et al., 2012). 특정한 토양조건을 개선하기 위해 이용하기도 하며(Lehmann and Joseph 2009; Novak et al., 2009; Woolf et al., 2010), 다른 형태의 유기물을 대체하거나 높은 양이온 치환용량, 음이온의 용탈 저감, 독성물질이나 염기의 흡착 가능성 등 다양한 이점을 가지고 있다(Thomas and Gale, 2015). 바이오차의 적용은 토양수분의 저장능을 높이거나 식물의 생장을 촉진한다고 알려져 있어 농업의 작물생산에서 산림에 이르기까지 적용범위를 넓혀가고 있다(Adeyemi and Idowu, 2017; Wasfy and

Khawaga, 2008). 지금까지의 선행연구들은 작물이나 식물의 성장량 증진의 효과를 검증하였고, 대부분 바이오차의 종류나 토양의 물리화학적 변화에 초점을 맞추어 연구가 진행되어왔다. 산림생태계에서 바이오차의 현장 적용성에 관한 연구는 극히 드물고, 산불피해지와 같은 훼손지의 복원에 활용된 사례는 거의 없다.

산불의 피해를 입은 토양은 양분의 손실로 인해 식생이 잘 자라지 못하게 되는데, 과거에는 식생의 정착을 위해 경운을 하거나 점토와 같은 습윤성 물질을 이용하여 수분스트레스를 줄이기 위한 시도가 이루어졌다(Harper et al., 2000; Blanco-Canqui, 2011; Harper and Gilkes 1994). 최근에는 수분 보충 및 양분을 공급을 위해 바이오차의 사용이 증가하고 있다. 토양의 기공분포를 변화시켜 침투율, 건조환경 등을 조절할 수 있기 때문에 습기를 유지시키고, 토양 양분동태에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Wong et al., 2017; Zong et al., 2014; Hussain et al., 2020). 바이오차는 탄화온도, 재료의 종류에 따라 효능을 달리하기 때문에 현장적용성을 증가시키기 위해서는 적절한 적용기준을 마련하고, 입지환경에 따른 효과를 정량적으로 평가하는 것이 필요하다.

본 연구는 산불피해지에 바이오차 처리가 수목 생장에 미치는 영향을 분석하고, 초기 생장에 영향을 주는 인자를 파악하여 추후 현장 적용을 위한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 대상지 개황

연구대상지는 강원도 강릉시 옥계면 천남리 산 28(북위 37°35'51.55", 동경 129°02'14.66") 일원에 위치하고 있다(Figure 1). 본 연구지는 산불피해를 입은 지역으로 2019년 4월 4일에 발발한 산불로 피해면적이 1,033 ha에 이르렀으며, 피해목을 벌채 후 산불저감을 위해 내화력이 강한 굴참나무를 식재하였다(Figure 2). 연구대상지의 조성면적은 1.8 ha이며, 식재시기는 2019년 10월이다. 인근의 산악 기상망(강릉시 피래산) 데이터를 이용하여 조사기간 동안

Table 1. The soil properties of experimental site in forest fire damage

| Dir | Grain size analysis | | | | pH | OM % | TN % | AP mg kg ⁻¹ | CEC cmol _c kg ⁻¹ | Exchangeable cation | | | | EC dS m ⁻¹ |
|-------|---------------------|----------|----------|-------|-----|---------|---------|---------------------------|---|---------------------|-----------------|------------------|------------------|--------------------------|
| | Sand (%) | Silt (%) | Clay (%) | Total | | | | | | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | |
| North | 54.5 | 32.3 | 13.2 | 100 | 6 | 2.26 | 0.103 | 12.2 | 7.41 | 0.22 | 0.08 | 3.93 | 0.58 | 0.19 |
| South | 58.3 | 30.6 | 11.1 | 100 | 6.4 | 1.94 | 0.098 | 12.9 | 6.23 | 0.23 | 0.07 | 3.97 | 0.56 | 0.2 |

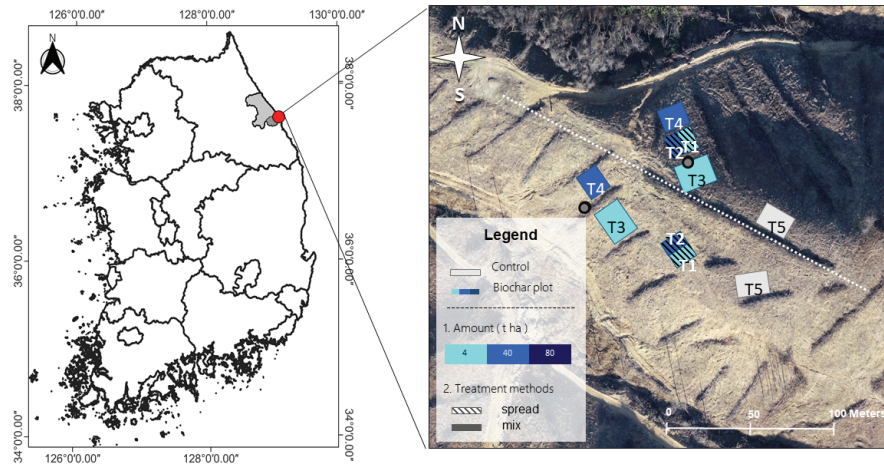


Figure 1. Location of the experimental site.



Right after at forest fire



After 3 years at forest fire

Figure 2. View of experimental site right after and after 3 years the forest fire.

의 환경특성을 파악한 결과, 연평균기온은 14.4°C 이며, 연평균강우량은 약 $1,400\text{ mm}$ 이었다. 연구대상지의 해발고도는 평균 $100\sim 140\text{ m}$ 로 나타났고 경사도는 $20\sim 30^{\circ}$ 로 나타나 급경사지가 많이 분포하고 있었다. 산불피해지의 복원을 위해 바이오차를 처리하기 전 사면방향별 토양특성을 Table 1에 나타내었다. 연구대상지 토양은 사질토양으로 분류되었고, 토양산도는 pH 6 정도로 약산성이었다. 유기물 함량은 $1.9\sim 2.2\%$ 로 나타났으며, 사면방향별 토양특성 차이는 나타나지 않았다.

2. 실험설계

이 연구는 산불이 발생한 후 굴참나무를 식재한 지역에 바이오차 처리의 효과를 정량적으로 평가하기 위해 살포방법(도포처리, 식혈처리)과 처리비율($0, 4, 40\text{ t ha}^{-1}$)에 따라 처리구를 조성하였다. 도포처리는 바이오차를 표토층 위에 뿌리는 형태로 살포하였고, 식혈처리는 식재묘목 주변의 토양을 고리형태로 20 cm 정도 판 후, 토양과 바이오차를 섞어주었다. 처리구의 설계는 사면향(N, S)별로 처리

구를 반복하여 조성한 후, 무작위 배열을 통해 도포처리구 4개, 식혈처리구 4개를 설계하였다. 처리구당 20~22본의 굴참나무(2-0 용기묘)가 1.8 m (ha당 5,000본)의 식재간격으로 식재되었다.

3. 데이터의 수집

이 연구는 산불이 발생한 후 굴참나무를 식재한 지역을 대상으로 2019년 10월부터 2022년 10월까지 3년간의 생장데이터를 측정하였다. 생장량은 총 3회 측정하였으며, 측정시기는 2019년 10월, 2021년 3월, 2022년 10월이었다. 연구기간 동안 각각 처리구의 묘목의 수고와 근원직경을 측정하였다. 수고는 절척을 이용하였으며, 근원경 측정은 버니어캘리퍼스를 이용하여 측정하였다. 측정된 생장량을 시간의 경과에 따른 생장량 추이를 파악하고자 상대생장량을 산출하였다. 상대생장량의 계산은 다음의 식 1을 이용하였다. 여기서 G1과 G2는 시간(T1, T2)에서 측정된 생장량이다. 생장량을 자연로그 값을 취해 증가량을 계산하고 시간단위로 나누어서 상대생장량을 산출하였다. 활

착물은 처리별 식재된 총 임목본수를 활착한 임목본수로 나누어 값으로 산출하였다. 사면향별 수분함량을 파악하기 위해 토양수분을 측정하였으며, 동일한 시기와 계절별 토양수분량을 비교하기 위해 결측된 구간을 제외하고 연속적으로 관측이 이루어진 2021년 3월부터 2022년 5월 까지의 데이터를 이용하였다. 토양수분계는 Spectrum사의 WaterScout SM 100을 이용하였고, 토심 10~15 cm 깊이에 토양수분계를 설치하여 1시간 간격으로 데이터를 수집하였다.

상대성장식(RGR, Relative growth rates)

$$RGR = \frac{\ln(G_2) - \ln(G_1)}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

4. 통계분석

현장에서 수집한 데이터는 분석을 수행하기 전에 Shapiro-Wilk test를 통해 정규성을 확인하였으며, 정규성을 충족하지 않는 데이터는 비모수 통계기법인 Mann-Whitney test를 통해 비교하였다. 바이오차 처리방법 및 사면향이 굴참나무 성장량에 미치는 영향을 살펴보기 위해 이원분산분석(two way ANOVA)을 실시하였다. 또한, 바이오차 처리에 관련된 인자인 처리방법과 처리량, 사면향 간의 연관성을 알아보기 위해 χ^2 검정과 상관분석을 실시하였다. 검정 결과, 기대빈도가 5 이상으로 나타나 fisher의 정확도 검증은 수행하지 않았다. 분석에 이용된 데이터는 유의수준을 결정하기 위해 95% 신뢰수준에서 검증하였으며, 모든 통계분석은 Minitab 21과 SPSS 21을 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 바이오차 처리에 따른 생장특성

1) 바이오차 처리방법별 활착률

바이오차 처리별 활착률을 측정한 결과, 무처리구에 비해 처리구의 활착률이 더 높았으며, 처리방법(도포처리, 식혈처리)에 따라 활착률이 차이를 보였다(Table 2). 도포처리구에서는 북사면의 활착률이 더 높았으며, 식혈처리구는 남사면의 활착률이 더 높아 반대의 경향을 보였다. 사면향별로는 남사면에서 식혈처리구의 활착률이 20% 정도 더 높게 나타났으며, 도포처리구는 무처리구와 거의 차이를 보이지 않았다.

조사시기별 고사율 변화를 보면, 도포처리구는 남사면이 더 높았고, 식혈처리구는 북사면이 더 높게 나타나 반대의 경향을 보였다. 무처리구에서는 북사면과 남사면 모두 2차 조사 시 고사율이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 도포처리구는 고사율 7%, 식혈처리구는 고사율 5%

상승하는 것으로 나타났고, 무처리구는 20%로 고사율이 급증하는 것으로 나타났다. 바이오차의 처리 초기에는 활착률에 미치는 영향이 미미했으나 2~3년 정도 경과 후부터는 무처리구와 차이가 컸고 식재수종인 굴참나무의 활착률이 효과를 발휘한 것으로 보여진다. Gundale(2016)은 도포처리가 식생 생장에 거의 영향을 미치지 않으며, 토양과 섞는 형태의 식혈처리를 했을 때, 피복도가 감소하고 묘목의 생존율이 증가했다고 보고한 바 있다. 사면향에 따라 생존율에 영향을 주는 처리방법이 차이를 보이는 것으로 보여진다. 대조구에서는 사면향별 차이가 거의 나타나지 않았으나, 바이오차 처리구에서는 북사면에서 생존율이 더 높았다. 북사면은 일조량이 적어 환경조건에서 남사면과 차이를 보였고(Wang et al., 2011), 일조량의 차이는 임목의 생육을 결정하는 중요한 인자로서 토양수분 함량이나 뿌리의 활착에 영향을 주어 임목 활착률 변화에 기인한 것으로 판단된다(Arena et al., 2016; Sternberg et al., 2001; Yoon et al., 2022). 남사면은 광량에 의해 수분의 증발이 많으나, 토양에 혼합된 바이오차가 직접적으로 물을 흡수하거나 물에 접촉하는 표면적을 넓혀 토양수분 증가에 영향을 준 것으로 보여진다(Hallin et al., 2015). 북사면은 남사면에 비해 광량이 적기 때문에 비가 오더라도 빗물이 토층 내부로 침투되기 전까지 바이오차의 층을 통과하면서 습기가 오랜시간 유지되어 활착에 유리한 것으로 판단된다.

2) 바이오차 처리 후 경과년수 별 생장변화

바이오차 처리별 성장량은 무처리구에 비해 처리구의 생장이 더 높게 나타났으며, 처리량이 많을수록 성장량이 높았다(Figure 3). 수고는 처리방법별 차이가 크지 않았으나, 근원경은 도포처리구에 비해 식혈처리구에서 처리량에 따

Table 2. The survival rate of *Quercus variabilis* according to direction(North, South) and treatment methods(spread, mix) in experimental site.

| Treatment | | Survival rate(%) | |
|-----------|-----|------------------|--------|
| | | North | South |
| Spread | 1st | 100.00 | 100.00 |
| | 2nd | 97.50 | 90.48 |
| | 3rd | 95.00 | 78.57 |
| Mix | 1st | 100.00 | 100.00 |
| | 2nd | 97.37 | 100.00 |
| | 3rd | 89.49 | 97.22 |
| Control | 1st | 100.00 | 100.00 |
| | 2nd | 94.44 | 100.00 |
| | 3rd | 77.78 | 76.47 |

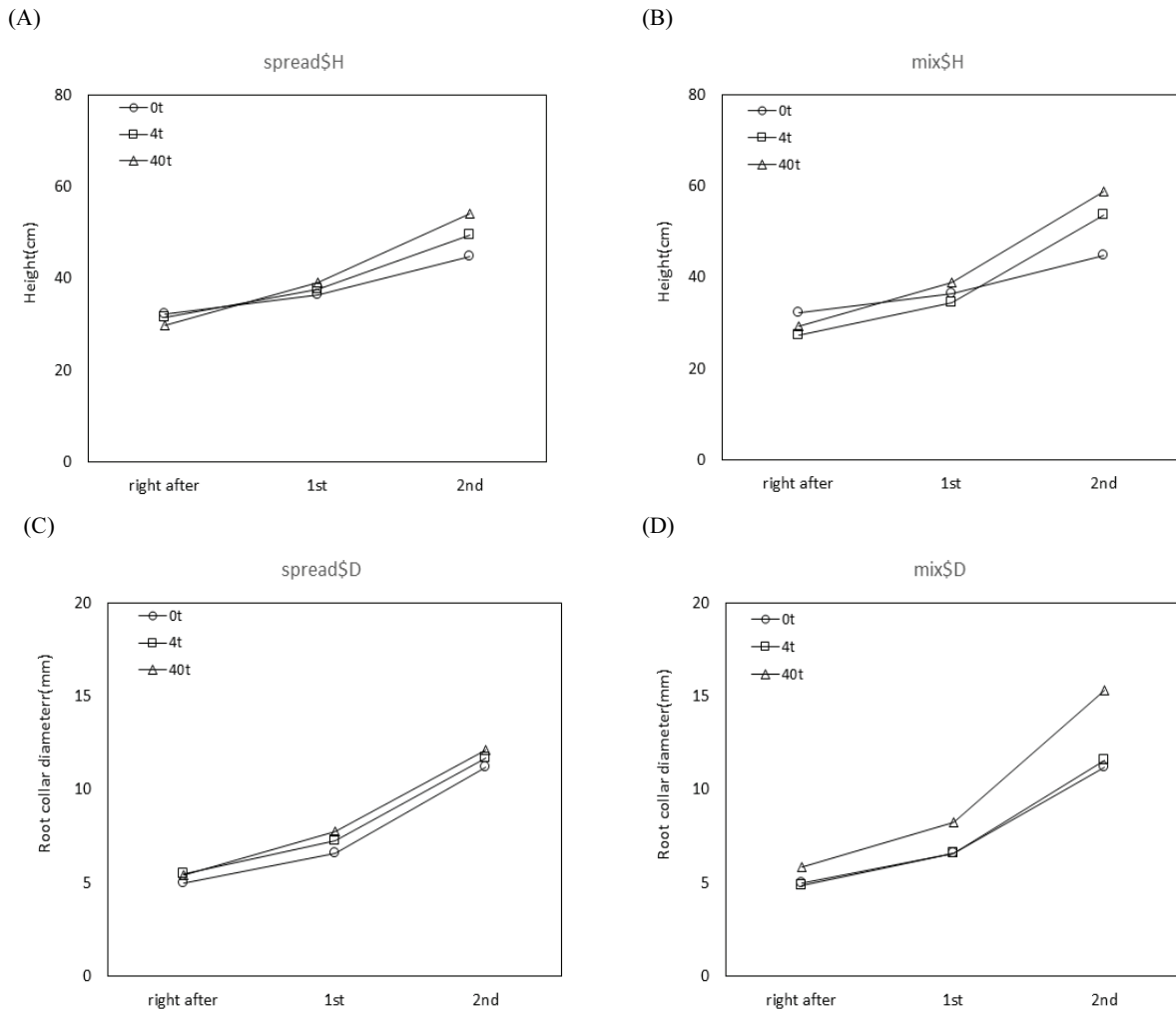


Figure 3. Change of tree growth (height, RCD: Root collar diameter) of *Quercus variabilis* for soil moisturizer as a treatment methods (A and C: spread treatment, B and D: mix treatment).

른 변화가 크게 나타났다. 도포처리는 토양표면 위에 처리되어 표토층의 직접적인 노출을 줄여 수분증발을 저감시키는 효과를 발휘하나 직접적인 생육에 미치는 영향이 적었고, 식혈처리는 토양 내에 영양분 공급을 통해 성장촉진에 더 유리한 것으로 생각된다. 식혈처리는 2차 조사에서 근원경의 증가폭이 더 컸으며, 바이오차가 분해되면서 토양미생물 활동에 영향을 준 것으로 보인다. 바이오차 처리 후 경과 연수가 0.5년 미만일 때, 분해율이 가장 높고 그 이후로는 장기간 분해율이 유지되면서 탄소격리효과를 발휘하는 특징이 있다(Wang et al., 2016). 대부분의 바이오차는 토양에 섞는 식혈의 형태로 사용되는데, 토양과 혼합된 바이오차는 인과 칼륨의 가용성을 개선하고, 분해하는 과정을 통해 토양미생물의 활동 촉진 및 토양호흡량을 증가시켜 양분공급에 유리한 조건을 조성하기 때문으로 보여진다(Dempster et al., 2012; Song et al., 2018; Haefele et al., 2011).

2. 임목 생장에 영향을 미치는 예측요인

1) 바이오차 처리방법별 성장특성 비교

처리방법에 따른 상대성장률은 식혈처리구에서 더 높게 나타났으며, 근원경 성장량에 유의미한 차이(W=3,335.0 p=0.000)를 보였다(Figure 4). 처리용량별로 4 t 처리구의 근원경 상대성장량이 유의한 차이(W=5,576.0, p<0.01)를 보였으며, 4 t 처리 시 식혈처리에 비해 도포의 성장량이 더 높게 나타났다(Figure 5). 적은 양의 바이오차를 이용하였을 때, 도포처리 방법이 효과를 보였는데, 이는 바람에 대한 저항성을 높였기 때문으로 판단된다. 산불피해를 입은 임목을 벌채하고 조림을 실시하면 복원 초기에 묘목들은 바람의 영향을 많이 받게 된다. 선행연구에 따르면, 임목이 풍력이나 역학적인 힘에 노출되었을 때, 수간의 높이나 엽면적은 감소하였지만, 흉고직경생장이 증가한다고 보고하였다(Jaffe and Forbes, 1993; De Langre, 2008). 표층

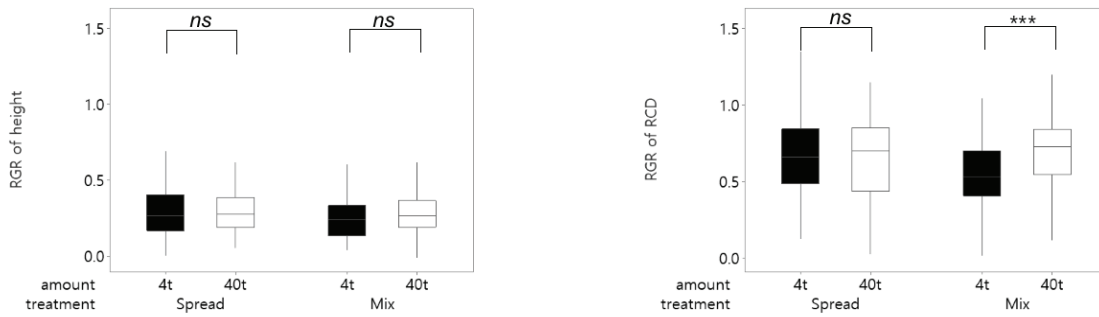


Figure 4. Mann-Whitney U-test results comparing significance of difference in the RGRs by treatment method of *Quercus variabilis* within the plots.

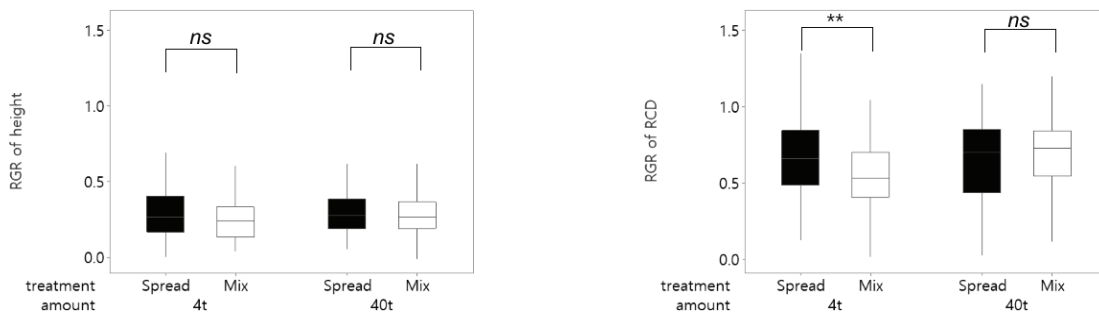


Figure 5. Mann-Whitney U-test results comparing significance of difference in the RGRs by biochar amount according to treatment of *Quercus variabilis* within the plots.

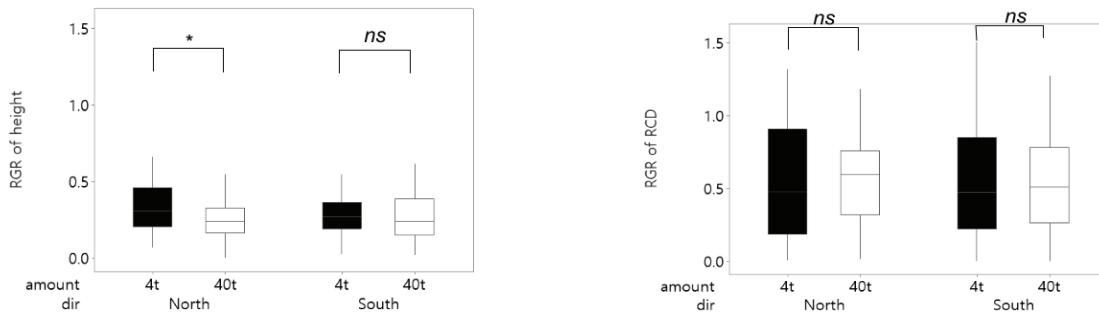


Figure 6. Mann-Whitney U-test results comparing significance of difference in the RGRs by direction of *Quercus variabilis* within the plots.

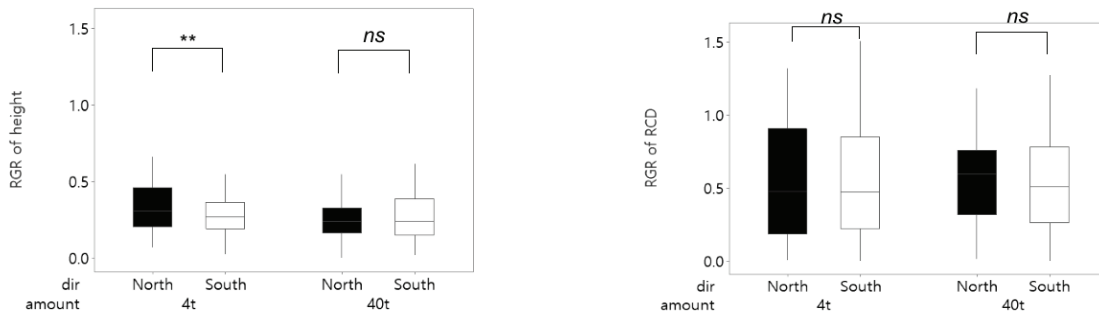


Figure 7. Mann-Whitney U-test results comparing significance of difference in the RGRs by biochar amount according to direction of *Quercus variabilis* within the plots.

위에 도포된 바이오차가 덮개 역할을 하여 근원부의 고정 효과를 발휘하였고, 바람에 의한 흔들림이 감소하면서 근원경 생장에 영향을 준 것으로 보여진다. 바람에 의한 임목의 흔들림은 형태적 변형을 유발하게 되어 수고생장보다는 직경생장에 민감하게 반응한 것으로 보여진다(Collet et al., 2001). 40 t 처리구에서는 식혈방법의 생장이 더 양호하였는데, 토양과 혼합된 바이오차가 기공을 증가시켜 수분함유율이 높아졌기 때문으로 판단된다. 바이오차의 내부 기공으로 물이 침투되고, 공극에 더 많은 양의 물을 보유하여 수분 보유능이 상승한 것으로 보여진다(Blanco-Canqui, 2017; Liu et al., 2017)

2) 사면향별 성장특성 비교

사면향별 상대성장률은 북사면에서 더 높았으며, 수고생장량이 유의미한 차이를 보였다(Figure 6). 4 t 처리구가 대조구에 비해 12.8% 더 높았으며, 처리량이 적을수록 생장량 차이가 유의하게 나타났다(W=4,994, p<0.05). 사면향은 태양복사열과 관련하여 토양온도, 토양수분 등을 변화시켜 생장에 직접적인 영향을 준 것으로 판단된다. 북사면의 생장량이 더 높은 것은 다수의 연구에서 보고된 바 있으며, 건조한 산림지역에서는 북사면에서 바이오매스량, 수고, 피복도가 더 높았다고 한 선행연구 결과(Yang et al., 2020)로 미루어 볼 때, 광조건에 따른 토양 수분스트레스 차이에 의한 것으로 보여진다. Ma et al.(2021)는 북사

면에서 수고와 직경생장량이 더 큰 반면, 남사면에서는 뿌리의 발달이 더 양호했다는 연구결과를 보고하였으며, Dutca et al.(2022)은 사면향이 유럽 너도밤나무(*Fagus sylvatica* L.)의 생장에 영향을 주며, 북사면의 직경이 더 작다고 한 연구결과와는 차이를 보였다. 이는 사면향이 일사량 차이에 의한 성장기의 토양수분량을 결정하기 때문이라고 보고되었다. 처리용량별 사면향 비교에서는 4 t 처리구에서 유의한 차이(W=24,666.0 p<0.05)를 보였으며, 4 t 처리구에서 남사면에 비해 북사면에서 수고생장량 증가가 뚜렷하게 나타났다(Figure 7). 일조량이 많은 남사면의 토양건조 개선에는 뚜렷한 효과를 발휘하지 못하는 것으로 보여진다.

3) 사면향별 토양수분 비교

북사면과 남사면의 토양수분함량을 비교한 결과, 북사면의 토양수분량은 대조구 30%, 바이오차 처리구 56%정도 더 높았으며, 대조구에 비해 바이오차 처리구의 토양수분 함량이 더 높게 나타났다(Figure 8, Table 3). 북사면의 바이오차 처리량별 토양수분량은 대조구 19.0%, 4 t 처리구 25.0%이었고, 남사면은 대조구 6.0%, 4 t 처리구 14.0%로 나타나 바이오차 처리구의 수분보유능이 높은 것으로 나타났다. 대조구와 바이오차 처리구는 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.001).

계절별 비교에서는 가을철의 토양수분량이 가장 높았

Table 3. Change of seasonal soil moisture content by biochar treatment to direction of *Quercus variabilis* within the plots.

| Season | North (%) | | South (%) | |
|--------|-----------|----------|-----------|----------|
| | Control | 4t | Control | 4t |
| Spring | 20.0±3.0 | 25.0±4.0 | 6.0±2.0 | 14.0±3.0 |
| Summer | 19.0±4.0 | 25.0±6.0 | 6.0±3.0 | 13.0±5.0 |
| Fall | 26.0±3.0 | 32.0±5.0 | 7.0±3.0 | 17.0±5.0 |
| Winter | 18.0±5.0 | 26.0±2.0 | 4.0±0.0 | 12.0±4.0 |

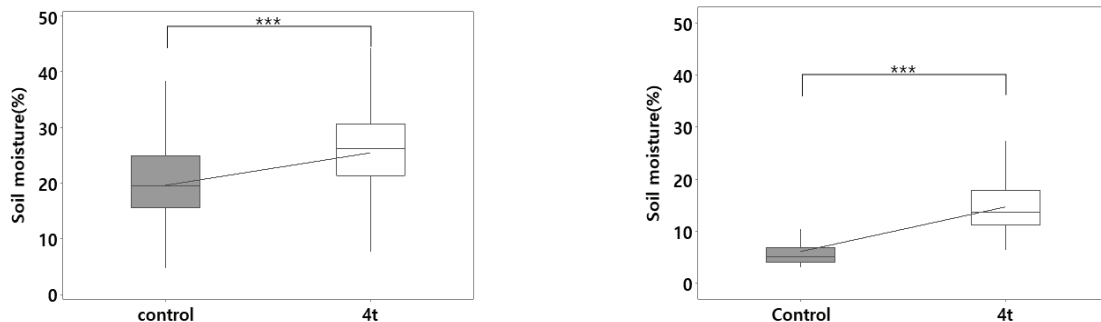


Figure 8. Comparing significance of difference in the Soil moisture by biochar treatment to direction of *Quercus variabilis* within the plots (A: North slope, B: South slope).

고, 겨울철이 가장 낮게 나타났다. 사면향별로는 북사면의 값이 더 높았으며, 대조구와 바이오차 처리구는 유의한 차이를 보였다. 바이오차의 처리는 묘목의 성장기의 토양수분을 유지시켜 생육에 유리하게 작용하였을 것으로 보여진다(Baidoo et al., 2016). 선행연구(Mwadalu et al., 2021)에 의하면 바이오차를 처리했을 때, 토양수분이 108%까지 증가하였고, 물리적 특성을 향상시켜 *Casuarina ezusetifolia*의 성장량 향상에 영향을 주었다고 보고하였다.

3. 처리인자간의 관련성

1) 처리간 상호작용 효과

처리방법과 처리용량, 사면향의 상호작용효과가 있는지 알아보기 위해 이원 분산분석을 실시한 결과, 처리방법과 사면향은 상호작용이 나타났다($p=0.016$)(Table 4). 따라서

귀무가설을 기각하고 대립가설이 채택되어 처리방법과 사면향 간의 상호작용효과가 있다고 할 수 있다. 처리방법에 대한 근원경 성장량은 사면향에 따라 차이를 보였는데, 모든 처리방법에서 남사면보다 북사면의 성장량이 더 높은 것으로 나타났다. 북사면과 남사면은 일조시간과 광량이 다르기 때문에 토양의 수분 조건이 차이를 보인다(Xue et al., 2018; Yang et al., 2020).

2) 인자간 상관관계

묘목의 성장량과 처리 변수간의 관계를 알아보기 위해 수고와 근원경 성장량과 사면향, 처리용량, 처리방법 간의 상관분석을 실시하였다. 그 결과, 성장량은 사면향과 음의 상관을 보이는 것으로 나타났으며, 인자간의 상관관계는 나타나지 않았다(Table 5).

Table 4. Analysis of interactions between factors(treatment, dir, amount) for tree growth of *Quercus variabilis*.

| | Source | df | Mean Square | F-value | p |
|--------|------------------|----|-------------|---------|---------|
| Height | treatment | 1 | .072 | 414.491 | .024* |
| | amount | 1 | .005 | 5.234 | .545 |
| | treatment×amount | 1 | .006 | .368 | .995 |
| | dir | 1 | .187 | 14.642 | .000*** |
| | amount | 1 | .001 | .078 | .781 |
| | dir×amount | 1 | .013 | 1.027 | .313 |
| | dir | 1 | .216 | 17.828 | .000*** |
| | treatment | 1 | .085 | 6.988 | .009** |
| | dir×treatment | 1 | .012 | .962 | .329 |
| RCD | treatment | 1 | .029 | 2.043 | .155 |
| | amount | 1 | .000 | .014 | .906 |
| | treatment×amount | 1 | .010 | .737 | .392 |
| | dir | 1 | .159 | .008 | .929 |
| | amount | 1 | .000 | 12.088 | .001** |
| | dir×amount | 1 | .006 | .464 | .497 |
| | dir | 1 | .168 | 13.604 | .000*** |
| | treatment | 1 | .042 | 3.436 | .066 |
| | dir×treatment | 1 | .073 | 5.953 | .016** |

* $p<.05$, ** $p<.01$, *** $p<.001$

Table 5. Correlation coefficients between tree growth and other factors.

| | Dead | Dir | Treatment | Amount |
|--------|--------|---------|-----------|--------|
| Height | -0.100 | -.324** | .196* | .054 |
| RCD | 0.001 | -.282** | .128 | .013 |

* Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

** Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed)

Table 6. Relation characteristics of between survival and treatment criteria.

| Variables | n (%) | | | χ^2 (p-value) |
|-----------|---------------|---------------|----------------|-----------------------|
| | 4t | 40t | Total | |
| Treatment | | | | |
| Mix | | | | |
| Survival | 33 (45.2%) | 40 (54.8) | 73 (100.0%) | |
| Dead | 5 (100.0%) | 0 (0.0%) | 5 (100.0%) | 5.624 (p=0.024*) |
| Total | 38 (48.7%) | 40 (51.3%) | 78 (100.0%) | |
| Direction | | | | |
| South | | | | |
| Survival | 35 (47.9%) | 38 (52.1%) | 73 (100.0%) | |
| Dead | 11 (84.6%) | 2 (15.4%) | 13 (100.0%) | 5.964 (p=0.017*) |
| Total | 46 (53.5%) | 40 (46.5%) | 86 (100.0%) | |

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

또한, 산불피해지의 바이오차 처리 변수간 연관성을 파악하기 위해 묘목의 생존여부와 처리량, 사면향, 처리용량 간의 χ^2 검증을 실시하였다(Table 6). 도포처리에서는 통계적으로 유의한 결과가 나타나지 않았으며, 식혈처리에서 묘목의 생존여부와 처리량 간의 유의성이 나타났다($\chi^2=5.624$, $p=0.024$). 식혈처리는 토양과 직접적으로 혼합되어 용적밀도의 감소나 공극률 증가와 같은 물리적 영향과 pH 증가 및 치환성 양이온 증가와 같은 물리화학적 영향을 주기 때문에 생존에 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다(Blanco-Canqui, 2017; Cheng et al., 2006; Ding et al., 2016). 북사면에서는 인자간 유의한 결과를 보이지 않았으며, 남사면에서 묘목의 생존여부와 처리량 간의 상관성이 높게 나타났고, 처리량이 많을수록 고사율이 적어졌다. 임목의 고사율은 사면향과 관련이 있는데 앞서 언급한 바와 같이 일조량과 연관되어 광합성, 증발산량, 토양 수분함량 등을 변화시키고, 종풍부도, 생물량 등에 직접적으로 영향을 줄 수 있다(Egli et al., 2006; Carletti et al., 2009; Badano et al., 2005).

결론

본 연구는 산불피해지에 바이오차 처리를 통한 굴참나무의 성장변화를 알아보고 초기생장에 영향을 주는 인자를 파악하고자 하였다. 바이오차를 처리한 조사구의 활착률이 대조구에 비해 20%정도 더 높게 나타났으며, 처리방

법이나 사면향에 따라 활착률이 차이를 보였다. 북사면에서는 도포처리가 유리했고, 남사면은 식혈처리를 한 묘목의 활착률이 더 높았다. 이는 사면향에 따른 일조량 차이와 빗물의 침투과정에 영향을 주었기 때문으로 보여지는데, 사면향이나 바이오차 살포방법 등에 따라 증발산이나 공극률에 대한 비교연구를 통해 정량적으로 근거제시가 필요하다.

바이오차의 처리방법은 근원경의 생장에 영향을 미쳤으며, 처리용량이 작을수록 유의한 결과를 보였다. 사면향은 북사면의 성장량이 더 높았고 수고의 생장에 유의미한 것으로 나타났다. 사면향과 처리방법은 통계적인 관련성이 높았으며, 바이오차의 처리기준에 따라 성장량의 증진 효과가 상호적으로 작용할 수 있다고 보여진다. 바이오차의 기공을 통해 수분을 흡착시켜 건조를 완화시켜 주지만, 건조 스트레스에 따라 성장량에 영향을 미치는 정도가 다를 수 있어 사면향 별로 다른 처리방법을 적용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 남사면의 경우, 건조 스트레스에 대비하여 바이오차를 식혈처리하되, 살포량은 토양의 5% 이내로 조절하여 주는 것이 필요하다. 북사면은 도포처리를 하여 묘목 성장을 도모할 수 있으나, 도포형식의 살포는 대면적 복원에 주로 이용되므로, 경제적 여건을 고려하여 복원방법을 선택하는 것이 바람직하다. 바람이 많이 부는 지역이라면 도포보다는 식혈형식으로 살포하고, 도포처리를 할 경우에는 방풍책이나 고정막 등을 함께 설치하여 바이오차의 표락을 방지할 필요가 있다.

토양보습제인 바이오차는 많은 연구에서 식물의 생산량 증진에 효과성이 증명되었다(Bonanomi, 2017; Dai et al., 2020; Jirka and Tomlinson, 2015; Shetty, 2020). 본 연구에서도 황폐화된 산불피해지에 바이오차를 통한 성장량 증진 효과가 확인되었지만 토양의 조건에 따라 효과성이 차이를 보일 수 있어 환경의 조건을 면밀히 파악하는 것이 매우 중요하다. 바이오차의 적용은 토양미생물의 군집구성을 변화시킬 수 있고, 토양의 산도나 인, 칼슘 등의 양분 농도에 영향을 주기 때문에 토양의 물리화학적 특성이 고려되지 않은 것은 본 연구의 한계점이 될 수 있다(Castaldi et al., 2011; Khodadad et al., 2011; Warnock et al., 2010). 바이오차의 현장적용에 관한 연구는 다양한 환경조건에 영향을 받기 때문에 본 연구결과를 이용하여 여러 유형의 산불피해지에 적용하기에는 제약이 따를 수 있기 때문이다(Nair et al., 2017; Nair et al., 2023).

산불피해지라는 황폐한 조건 하에서 대조구에 비해 바이오차 처리구의 활착률이 15% 증가한 것은 주목할 만한 연구결과로 보여진다. 산불복원을 실시할 때, 사면방향이 나 토양습도 등의 환경조건에 따른 바이오차의 적정 처리 기준을 제시함으로써 초기 묘목의 생육환경을 개선시켜 복원의 효율성을 높일 수 있다. 본 연구의 결과는 산불피해지의 복원계획 단계에서 기초자료로 활용도가 높을 것으로 보여지며, 탄소흡수원 증진 차원에서 초기 성장량의 향상을 통한 바이오매스 축적의 효과적인 방안이 될 것으로 판단된다. 또한, 산불피해지에 바이오차를 이용한 굴참나무 활착 증진효과는 향후 내화성이 높은 숲조성을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원의 ‘산불피해지 복원 프로세스 및 내화숲 기능증진 연구’(과제번호 FE0100-2022-02-2023)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Adeyemi, T.O.A. and Idowu, O.D. 2017. Biochar: promoting crop yield, improving soil fertility, mitigating climate change and restoring polluted soils. *World News of Natural Sciences* 8: 27-36.
- Agbeshie, A.A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T. and Awuah, R. 2022. A review of the effects of forest fire in soil properties. *Journal of Forestry Research* 33(2): 1419-1441.
- Arena, C., Tsoney, T., Doneva, D., De Micco, V., Michelozzi, M., Brunetti, C., Centritto, M., Velikova, V. and Loreto, F. 2016. The effect of light quality on growth, photosynthesis, leaf anatomy and volatile isoprenoids of monoterpenemitting herbaceous species (*Solanum lycopersicum* L.) and an isoprene-emitting tree (*Platanus orientalis* L.). *Environmental and Experimental Botany* 130: 122-132.
- Badano, E.I., Cavieres, L.A., Molina-Montenegro, M.A. and Quiroz, C.L. 2005. Slope aspect influences plant association patterns in the Mediterranean matorral of central Chile. *Journal of Arid Environments* 62(1): 93-108.
- Baidoo, I., Sarpong D. and Solwig, S. 2016. Biochar amended soils and crop productivity: a critical and meta analysis of literature. *International Journal of Development and Sustainability* 5(9): 414-423.
- Blanco-Canqui, H. 2011. Does no-till farming induce water repellency to soils? *Soil Use and Management*, 27(1): 2-9.
- Blanco-Canqui, H. 2017. Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal* 81(4): 687-711.
- Bonanomi, G., Ippolito, F., Cesarano, G., Nanni, B., Lombardi, N., Rita, A., Saracino, A. and Scala, F. 2017. Biochar as plant growth promoter: better off alone or mixed with organic amendments? *Frontiers on Plant Science* 8: 1570.
- Brooker, R.W. et al. 2008. Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future. *Journal of Ecology* 96: 18-34.
- Carletti, P., Vendramin, E., Pizzeghello, D., Concheri, G., Zanella, A., Nardi, S. and Squartini, A. 2009. Soil humic compounds and microbial communities in six spruce forests as function of parent material, slope aspect and stand age. *Plant Soil* 315: 47-65.
- Carvalho, M.T.M., Madari, B.E., Bastiaans, L., Oort, P.A.J., Heinemann, A.B. and Meinke, H. 2013. Biochar improves fertility of clay soil in Brazilian Savannah: short term effects and impacts on rice yield. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics* 114(2): 101-107.
- Castaldi, S., Riondino, M., Baronti, S., Esposito, F.R., Marzaioli, R., Rutigliano, F.A., Vaccari, F.P. and Miglietta, F. 2011. Impact of biochar application to a mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes. *Chemosphere* 85(9): 1464-1471.
- Cavard, X., Bergeron, Y., Paré, D., Nilsson, M.C. and Wardle, D.A. 2019. Disentangling effects of time since fire, overstory composition and organic layer thickness on nutrient availability in Canadian boreal forest. *Ecosystems* 22(1): 33-48.
- Certini, G. 2005. Effects of Fire on Properties of Forest Soils: A Review. *Oecologia* 143: 1-10.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L. and

- Williams, D. 1983. Fire in forestry. New York Wiley Interscience.
- Cheng, C.H., Lehman, J., Thies, J.E., Burton, S.D. and Engelhard, M.H. 2006. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry* 37(11): 1477-14880.
- Collet, C., Lanter, O. and Pardos, M. 2001. Effects of canopy opening on height and diameter growth in naturally regenerated beech seedlings. *Annals of Forest Science* 58(2): 127-134.
- Dai, Y., Zheng, H., Jiang, Z. and Xing, B. 2020. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: a meta-analysis. *Science of The Total Environment* 713: 136635.
- De Langre, E. 2008. Effects of wind on plants. *Annual Review of Fluid Mechanics* 40: 141-168.
- Debano, L. 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology* 231-232: 195-206.
- Dempster, D.N., Gleeson, D.B., Solaiman, Z.M., Jones, D.L. and Murphy, D.V. 2012. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. *Plant Soil* 354: 311-324.
- Ding, Y., Liu, Y.G., Liu, S.B., Li, Z.W., Tan, X.F., Huang, X., Zeng, G., Zhou, L. and Zheng, B. 2016. Biochar to improve soil fertility: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 36: 36. DOI: 10.1007/s1359-016-0372-z
- Dutca, I., Cernat, A., Stancioiu, P.T., Ioras, F. and Nita, M.D. 2022. Dose slope aspect affect the aboveground tree shape and volume allometry of Europe Beech (*Fagus sylvatica L.*) trees? *Forests* 13(7): 1071.
- Egli, M., Mirabella, A., Sartori, G., Zanelli, R. and Bischof, S. 2006. Effect of north and south exposure on weathering rates and clay mineral formation in Alpine soils. *Catena* 67(3): 155-174.
- Gundale, M.J., Nilsson, M.C., Pluchon, N. and Wardle, D.A. 2016. The effect of biochar management on soil and plant community properties in a boreal forest. *Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy* 8(4): 777-789.
- Haefele, S.M., Konboon, Y., Wongboon, W., Amarante, S., Maarifat, A.A. and Pfeiffer, E.M. 2011. Effects and fate of biochar from rice residues in rice based systems. *Field Crops Research* 121(3): 430-440.
- Hallin, I., Douglas, P., Doerr, S. and Bryant, R. 2015. The effect of addition of a wettable biochar on soil water repellency. *European of Soil Science* 66(6): 1063-1073.
- Harper, R. and Gilkes, R. 1994. Soil attributes related to water repellency and the utility of soil survey for predicting its occurrence. *Australian Journal of Soil Science* 32(5): 1109-1124.
- Harper, R., McKissock, I., Gilkes, R., Carter, D. and Blackwell, P. 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and landuse on water repellency. *Journal of Hydrology* 231-232: 371-383.
- Hosseini, M. 2018. Effect of fore occurrence and frequency on topoil properties and soil (fertility) losses by runoff. Wageningen, N.L. Wageningen University.
- Hussain, R., Bordoloi, S., Gupta, P., Garg, A., Ravi, K., Sreedeeep, S. and Sahoo, L. 2020. Effect of biochar type on infiltration, water retention and desiccation crack potential of silty sand. *Biochar* 2: 465-478.
- Imoro, A.W., Sackey, M. and Abubakari, A.H. 2012. Preliminary Study on the effects of two different sources of organic manure on he growth performance on *Moringa oleifera*. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare* 2(10): 147-158.
- Jaffe, M.J. and Forbes, S. 1993. Thigmomorphogenesis: the response of plant growth and development to mechanical simulation. *Planta* 114: 143-157.
- Jirka, S. and Tomlinson, T. 2015. State of the Biochar Industry 2014: A Survey of Commercial Activity in The Biochar Sector. *International Biochar Initiative* pp. 77.
- Kang, S.W., Kim, S.H., Park, J.H., Seo, D.C. and Cho, J.S. 2017. Selection of optimal application of corn waste biochar for improvement of corn growth and soil fertility. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 50(5): 452-461.
- Khodadad, C.L.M., Zimmerman, A.R., Green, S.J., Uthandi, S. and Foster, J.S. 2011. Taxa specific changes in soil microbial community composition induced by pyrogenic carbon amendments. *Soil Biology and Biochemistry* 43(2): 385-392.
- Kim, D., Yoshikawa, K. and Park, K. 2015. Characteristics of biochar obtained by hydrothermal carbonization of cellulose for renewable energy. *Energies*. 8(12): 14040-14048.
- Kim, M., Kim, H., Yun, S.I., Lee, C., Par, D., Kim, M. and Shin, J.D. 2020. Growth responses and changes of soil chemical properties with application rate of supplemented biochar pellet as slow release fertilizer during tomato cultivation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 53(3): 268-276.
- Kim, C.G., Choung, Y.S., Joo, K.Y. and Lee, K.S. 2006. Effects of hillslope treatments for vegetation development and soil conservation in burned forests. *Journal of Ecology*

- and Environment 23(3): 395-303.
- Knicker, H. 2007. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. Biogeochemistry 85(1): 91-118.
- Korea Forest Service (KFS). 2021. Annuals of Forest Fire Statistics. Korea Forest Service. Daejeon, Korea. pp. 281.
- Lehmann, J. 2007. A handful of carbon. Nature 447(10): 143-144.
- Lehmann, J. and Joseph, S. 2009. Biochar for environmental management: Science and technology, first ed. Earthscan, London, U.K. and U.S.A.
- Letey, J. 2001. Causes and consequences of fire induced soil water repellency. Hydrological Processes 15(15): 2867-2875.
- Li, X., et al. 2018. Effects of forest fires on the permafrost environment in the north Da Xing'anling (Hinggan) mountains, Northeast China. Permafrost and Periglacial Process 30: 163-177.
- Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C.A. and Gonnermann, H.M. 2017. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. PLOS ONE 12(6): e0179079. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0179079>.
- Ma, L., Liu, X., Chai, J., Wang, Y. and Yang, J. 2021. Effects of slope aspect and rainfall on belowground deep fine root traits and above ground tree height. Frontiers in Plant Science 12: 684468.
- Mwadalu, R., Mochoge, B. and Danga, B. 2021. Assessing the potential of biochar for improving soil physical properties and tree growth. International Journal of Agronomy 2021: 6000184.
- Nair, V.D. and Mukherjee, A. 2023. The use of biochar for reducing carbon footprints in land use systems: prospects and problems. Carbon Footprints 2: 6.
- Nair, V.D., Nair, P.K.R., Dari, B., Freita, A.M., Chatterjee, N. and Pinheiro, F.M. 2017. Biochar in the agroecosystem-climate change sustainability nexus. Frontiers in Plant Science 8: 2051.
- Novak, J.M., Lima, I. and Gaskin, J.W. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. Annuals of Environmental Science 3: 195-206.
- Romeo, F., Marziliano, P.A., Turrión, M.B. and Muscolo, A. 2020. Short-term effects of different fire severities on soil properties and *Pinus halepensis* regeneration. Journal of Forestry Research 31(4): 1271-1282.
- Seo, Y.H., Kim, S.W., Choi, S.C., Kim, I.J., Kim, K.H. and Kim, G.Y. 2012. Effect of green manure crop and biochar on nitrous oxide emission from red pepper field. Korean Society of Soil Science and Fertilizer 45(4): 540-543.
- Shetty, R. and Prakash, N.B. 2020. Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. Scientific Reports 10(1): 12249.
- Song, D., Tang, J., Xi, X., Zhang, S., Liang, G. and Zhou, W. 2018. Responses of soil nutrients and microbial activities to additions of maize straw biochar and chemical fertilization in a calcareous soil. European Journal of Soil Biology 84: 1-10.
- Sternberg, M. and Shoshany, M. 2001. Influence of slope aspect on mediterranean woody formations: comparison of a semiarid and an arid site in Israel. Ecological Research 16: 335-345.
- Stoof, C.R., Ferreira, A.J.D., Mol, W., Van den Berg, J., De Kort, A., Drooger, S., Slingerland, E.C., Mansholt, A.U., Ferreira, C.S.S. and Ritsema, C.J. 2015. Soil surface changes increase runoff and erosion risk after a low-moderate severity fire. Geoderma 239-240: 58-67.
- Taboada, A., Tarrega, R., Marcos, E., Valbuena, L., Seoane, S. and Leonor, C. 2017. Fire recurrence and emergency post fire management influence seedling recruitment and growth by altering plant interactions in fire prone ecosystems. Forest Ecology and Management 402: 63-75.
- Thomas, S.C. and Gale, N. 2015. Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. New Forests 46(5): 931-946.
- Wang, J., Xiong, Z. and Kuzyakov, Y. 2016. Biochar stability in soil: meta analysis of decomposition and priming effects. Bioenergy 8(3): 512-523.
- Wang, L., Wei, S., Horton, R. and Shao, M. 2011. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the loess plateau of China. Catena 87(1): 90-100.
- Warnock, D.D., Mummey, D.L., McBride, B., Major, J., Lehmann, J. and Rillig, M.C. 2010. Influences of non heraceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots soils: Results from growth chamber and field experiments. Applied Soil Ecology 46(3): 450-456.
- Wasfy, M.M.A. and Khawaga, A.S. 2008. Effect of organic fertilizer on growth yield and fruit quality of Zaghoul date palm growing in sandy soil. Assiut Journal of Agricultural Sciences 39(1): 121-133.
- Whelan, R.J. 1995. The ecology of fire. Cambridge University press. Cambridge, U.K.
- Wong, J.T.F., Chen, Z., Chen, X., Ng, C.W.W. and Wong, M.H. 2017. Soil-water retention behavior of compacted biochar amended clay: a novel landfill final cover material.

- Journal of Soil Sediment 17(2): 590-598.
- Woo, S.H. 2013. Biochar for soil carbon sequestration. *Clean Technology* 19(3): 201-211.
- Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J. and Joseph, S. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* 1(5): 56.
- Xue, R., Yang, Q., Miao, F., Wang, X. and Shen, Y. 2018. Slope aspect influences plant biomass, soil properties and microbial composition in alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 18(1): 1-12.
- Yang, J., El-Kassaby, Y.A. and Guan, W. 2020. The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountainous dry valley, Southwest China. *Scientific Reports* 10(1): 16465.
- Yoon, A.R., Park, J.E., Oh, H.E. and Park Y.G. 2022. Light intensity and rooting substrates are important for rooting growth and development of *Zabelia tyaihyonii* cuttings. *Rhizosphere* 21: 100467.
- Zong, Y., Chen, D. and Lu, S. 2014. Impact of biochars on swell-shrinkage behavior, mechanical strength and surface cracking of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177(6): 920-926.
-
- Manuscript Received : March 14, 2023
First Revision : May 22, 2023
Second Revision : June 20, 2023
Accepted : June 21, 2023