

연구논문

## 폐금속광산 산성토양에서 폐석회/굴패각을 이용한 토양중화제 처리가 소나무 묘목 및 초본 생육에 미치는 영향

정문호<sup>1,2</sup>, 지원현<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>한국광해광업공단 기술연구원 연구기획팀 과장, <sup>2</sup>호서대학교 에너지기후환경융합기술학과 박사과정,

<sup>3</sup>호서대학교 창의교양학부 교수

## Effect of Neutralizing Treatments Using a Waste-lime and Oyster Mix on the Growth of *Pinus densiflora* Seedlings and Herbaceous Vegetation in the Acid Soil of an Abandoned Metal Mine

Mun Ho Jung<sup>1,2</sup> and Won Hyun Ji<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Senior Manager, Technology Planning Team, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corp., Wonju, Korea

<sup>2</sup>Ph.D Course, Department of Energy & Climate Environment Fusion Technology, Hoseo University, Asan, Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of General Education for Human Creativity, Hoseo University, Asan, Korea

\*Corresponding Author. Won Hyun Ji, [greenidea@mireco.or.kr](mailto:greenidea@mireco.or.kr), Department of General Education for Human Creativity, Hoseo University, Asan, Korea

Received

2 December 2021

Final version Received

16 December 2021

Accepted

27 December 2021

Abstract

The objective of this study was to select a proper mixing ratio of soil neutralizer (waste-lime and oyster mix) by assessing treatment effect on the root collar diameter (RCD) growth of *Pinus densiflora* seedlings, the inflow of herbaceous vegetation from the forest edge, and soil characteristics in the acid soil of abandoned metal mines to increase carbon uptake. The mixing ratios of the soil neutralizer were 0.6%, 1.0%, 1.2%, and 1.6% in comparison with the soil weight. All soil neutralizer treatments promoted RCD growth and survival of *P. densiflora* seedlings and the inflow of herbaceous vegetation from the forest edge. In addition, soil pH was improved by the soil neutralizer treatment. Treatment with 1.6% soil neutralizer resulted in increased RCD growth of *P. densiflora* seedlings, total population of herbaceous plants from around the forest, TOC, and total N. In this study, the mixing ratio showed a positive correlation with RCD growth and survival of *P. densiflora* seedlings, the inflow of herbaceous vegetation, soil pH, and TOC. The results of this study indicated that treatment with soil neutralizer at a ratio of 1.6% is applicable for rehabilitation in this abandoned metal mine considering the growth of *P. densiflora* seedlings and herbaceous vegetation, soil chemical characteristics, and economic feasibility. However, it is necessary to conduct field experiments to select a proper mixing ratio of soil neutralizers to apply in other abandoned metal mines.

**Key words** : abandoned metal mine, acid soil, *Pinus densiflora* seedlings, inflow of herbaceous vegetation, soil neutralizer

요약

본 연구는 폐금속광산 산성토양에서 탄소흡수량 증가를 위해 폐석회와 굴패각을 혼합한 토양중화제가 소나무 묘목 근원경 성장과 주변 산림으로부터의 초본 유입 및 토양특성에 미치는 영향을 평가하여 토양중화제의 적정 혼합비율을 선정하기 위해 수행되었다. 토양중화제 혼합비율은 토양중화제 대비 0.6%, 1.0%, 1.2%, 1.6%였다. 모든 중화제 처리구의 혼합비율에서 소나무 묘목의 근원경

생장과 초본 유입이 촉진되었다. 또한, 토양 pH가 중화제 처리에 따라 개선되었다. 1.6% 처리구가 소나무 묘목 근원경 성장량과 주변 산림에서 유입된 초본의 총개체수, 토양내 TOC와 총질소 함량이 다른 처리구에 비해 높았다. 본 연구에서 중화제 혼합비율은 소나무 묘목의 근원경 성장량과 생존률, 주변 산림으로부터 초본 유입과 토양 pH, TOC 함량과 정의 상관관계를 보였다. 이러한 결과로 폐금속광산에서 소나무 묘목과 초본 생육, 토양 화학적 특성, 중화제 비율에 따른 경제성 등을 고려할 때, 본 연구 대상지인 폐금속광산에서 산림복구를 위해 1.6% 처리가 적합하다. 하지만 다른 폐금속광산에 토양 중화제를 적용하기 위해서는 현장실험을 통해 적정 중화제 혼합비율을 선정해야 한다.

**주요어**: 폐금속광산, 산성토양, 소나무 묘목, 초본 식생, 토양 중화제

## 서론

산림은 육상 생태계 발달과 유지 등의 기능을 가지고 있을 뿐만 아니라 전 지구적 탄소순환의 중요한 요소이다(Kang *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2015a; Lee *et al.*, 2015b). 산림에 존재하는 임목은 광합성을 통해 대기 중의 탄소를 고정하는 역할을 한다. 임목이 고정한 탄소는 낙엽 및 낙지와 같은 유기물 형태로 토양에 유입되어 축적되며(Kim *et al.*, 2020; Lee, 2011), 이러한 임목 탄소 저장량은 시간 경과에 따라 증가하는 경향을 보인다(Lee *et al.*, 2015a; Kim *et al.*, 2014). 산림의 이러한 기능과 중요성에 따라 1997년 제 3차 기후변화협약 당사국 총회에서 교토의정서를 채택하는 과정에서 산림을 온실가스 흡수원으로 인정하기 시작하였다(Jang *et al.*, 2011; Kang *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2015b). 우리나라의 경우 산림이 차지하는 면적은 국토의 64%를 차지하는데, 이에 따라 산림을 기후변화대응을 위한 탄소흡수원으로 활용하기 위해 정부차원에서 과학적·정책적으로 다양한 노력을 하고 있다(Kang *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2015b; The Republic of Korea, 2011).

우리나라에 존재하는 폐광산은 2020년 현재 2,405개소이며, 폐금속광산은 절반 이상인 1,217개소가 있다(MIRECO, 2020). 광종으로는 금은광산이 1,001개소로 가장 많으며, 그밖에 동, 아연, 몰리브덴, 철 등이 존재한다. 금속광산은 광물을 채굴하는 과정에서 선별, 제련 등의 과정을 거치면서 광폐석이 발생하며, 대부분 광산지역 인근 산림에 적치를 해왔다. 이에 따라 광폐석이 적치된 지역은 임목이 제거되고 광폐석으로부터 오염물질이 발생하여 산림토양이 오염되는 등(De Bartolomeo *et al.*, 2004; Miro *et al.*, 2004; Jung *et al.*, 2020) 산림이 훼손되는 원인이 되는데, 이는 결국 산림의 탄소흡수량을 감소시키는 결과를 가져 온다(Kwon, *et al.*, 2005). 따라서 폐금속광산에서 광폐석으로 인해 훼손된 광산지역에서 식생을 도입하여 산림을 복구하여 산림의 탄소흡수원으로서의 기능을 할 수 있게 하는 것이 필요하다.

폐금속광산의 광폐석은 토양 pH가 낮은 산성토양이 대부분이다(Jung *et al.*, 2016). 토양 pH가 낮은 산성토양의 경우 대부분  $Al^{3+}$  이온이 높기 때문에 토양내 양분이 쉽게 용탈되고(Park *et al.*, 2011; Oh *et al.*, 2012), 식물의 양분유효도가 낮기 때문에(Troug, 1947) 임목을 식재해도 고사하거나 생육이 불량하고, 주변으로부터 식생의 유입도 어렵다(Jung, *et al.*, 2020). 따라서 광폐석으로 훼손된 산림을 복구하기 위해서는 산성토양을 중화하여 식생이 생육할 수 있는 토양환경으로 조성해야 한다(Jung, *et al.*, 2020).

최근 산성토양을 중화시키는 물질에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있는데, 폐석회와 굴폐각도 그중 하나이다. 폐석회는 대표적으로 솔베이(solva)법에 의하여 염화나트륨(NaCl) 중의 나트륨(Na)과 석회( $CaCO_3$ ) 중의  $CO_2$ 를 반응시켜 소다회( $Na_2CO_3$ )를 제조하는 공정에서 발생하는데(Oh *et al.*, 2012), 폐기물관리법시행규칙 ‘제4조의2’에 의거하여 공유수면매립지의 매립재와 폐기물매립시설의 복토재로 용도 지정되어 토양개량제로의 활용이 가능하다(Ministry of Environment, 2021; Oh *et al.*, 2012). 굴폐각은 비표면적이 크고, 다량의 칼슘성분( $Ca^{2+}$  40.36%,  $P_2O_5$  0.28%,  $Mg^{2+}$  0.39%)을 가지고 있으며(Oh *et al.*, 2012; Yim *et al.*, 1998), 광물자원의 절약과 폐기물 재활용 측면에서도 가치가 있다(Oh *et al.*, 2012). 이러한 활용성으로 폐석회와 굴폐각을 혼합한 토양중화제(폐석회+굴폐각)를 산성토양에 적용하여 실험한 결과 토양 중화에 효과가 있는 것으로 나타났다(Jung *et al.*, 2016; Jung *et al.*, 2020). 하지만 광산지역마다 토양특성이 상이할 수 있으므로 토양중화제를 실제 현장에 적용하기 위해서는 현장을 대상으로 중화제의 적정 사용량을 사전에 산출할 필요가 있다.

한편, 소나무는 우리나라의 기상조건과 환경에 적응력이 높아서 가장 넓은 면적에 가장 많이 자라고 있으며(Kang *et al.*, 2017), 광산지역 산림복구를 위해 많이 식재되고 있는 수종 중 하나이다(Kim *et al.*, 2020). 또한 식물에 의한 탄소흡수는 목본뿐만 아니라 초본도 그 기능을 하고 있다. Kim and Sung(2010)에 따르면 낙동강 중·하류지역에서 초본

이 식재된 지역의 순 이산화탄소 흡수량은 활엽수림의 약 23.2%, 침엽수림의 약 43.3%에 달하는 것으로 보고되어, 초본 역시 산림생태계에서 탄소흡수원으로서의 역할이 크다.

따라서 본 연구는 전라북도 장수군에 위치하고 있는 폐금속광산 광폐석장의 산성토양을 대상으로 폐석회+굴폐각을 비율별로 처리한 후 각 처리비율에 따른 토양특성 변화와 소나무의 생육특성, 그리고 주변으로부터의 초본유입현황을 평가하여 대상 현장의 산림복구에 적용하기 위한 적정 토양중화제 사용량을 산출하는데 목적이 있다.

## 재료 및 방법

### 실험 방법

실험대상지는 전라북도 장수군 장수읍 대성리에 위치하고 있는 폐금속광산 광폐석장이다. 광종은 금, 은, 동이며 일제 강점기(1920~1930년)에 개발되어 70년대에 폐광되었다. 80년대 후반에 일부개발 시도했으나 현재는 폐광되어 2008년에 (주) 명화토건에서 광해방지 산림복구사업을 실시하였다. 산림복구시 오리나무를 식재하고 초본을 파종하였으나 모든 식재묘목이 고사하였다. Table 1에 대상지 토양의 이화학 특성 평균 값을 나타냈다. 토성은 모래와 미사, 점토가 각각 37.9%, 58.1%, 4.0% 였으며, 삼상은 고상 61.0%, 액상 16.2%, 기상 22.8%였다. 토양 pH는 3.48이였으며, TOC와 총질소는 각각 0.39%, 0.01%였다. 이를 통해 계산한 탄질률은 2.75였다. 토양중화제는 폐석회와 굴폐각을 혼합해서 사용하였는데, 혼합비율은 Oh *et al.*(2012)이 폐석회와 굴폐각을 다양한 비율로 혼합하여 산성토양 중화 실험을 한 결과 9:1의 비율에서 최적의 효율을 나타냈다고 한 바 있기 때문에 9:1로 선정하였다. 시험구 처리비율은 토양중화제의 처리비율은 0.0%(중화제 처리 없이 퇴비만 처리), 0.6%, 1.0%, 1.2%, 1.6%였다. 폐석회는 강원도 영월군에 위치한 영동탄광에서 채취하였으며, 굴폐각은 시중에서 판매하고 있는 비료를 사용하였다. 식재시 토양 내 양분 보충을 위해 유기물 30% 함량의 퇴비를 같이 시비하였다.

토양중화제 비율별 처리구 조성을 위해 각 처리구를 깊이 50 cm로 터파기를 실시하고, 토양중화제를 토양과 배합비에 맞게 혼합한 후 다시 복토하였다. 토양중화제 각 비율별로 3반복으로 처리구를 조성하였으며, 대조구를 제외한

토양중화제 처리구는 퇴비 를 토양 중량대비 3.4% 비율로 처리하였다. 이에 따라 토양중화제와 퇴비를 모두 처리하지 않은 대조구를 포함하여 총 18개 처리구를 조성하였다. 소나무 묘목 식재는 토양중화제 처리후 1-0묘를 포트묘로 각 처리구마다 18주를 식재하여 총 324주를 토양중화제 처리후 2주 지난 뒤 식재하였다.

### 조사 및 분석

각 처리구에 식재된 소나무 묘목의 근원경을 조사하고 토양특성을 분석하기 위해 토양을 채취하였다. 조사 시기는 처리구 조성 직후, 1년 경과, 2년 경과, 7년 경과 총 4회 실시하였으며, 토양시료는 시험구 조성 전과 7년 경과 후 2회 채취하였다. 채취한 토양시료는 실험실에서 48시간 동안 풍건한 후 2 mm 체로 쳐 분석용 시료로 이용하였다. 분석항목은 토양 pH, 총유기탄소(TOC), 총질소 등이었다. 토양 pH 측정은 토양시료를 증류수와 1:5 비율로 혼합하여 30분 동안 진탕한 후 여과하여 pH meter(Orion 3STAR, THERMO, USA)를 이용하여 측정하였다. TOC 함량은 Walkley-Black법(Peech *et al.*, 1947; Walkley, 1947)에 의해 분석하였다. 토양시료를 1N-K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 용액 및 진한 황산과 혼합한 다음, 지시약(0.025M o-Phenanthroline-ferrous Complex)을 넣었다. 이를 0.5N-FeSO<sub>4</sub>로 적정하여 총유기탄소 함량을 구하였다. 총질소 함량은 Micro Kjeldahl법(Kjeldahl, 1883)으로 정량하였다. 토양시료를 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CuSO<sub>4</sub> 혼합촉매와 진한 황산과 혼합한 뒤 약 4시간 동안 가열하여 분해시켰다. 이후, 분해액을 증류수로 희석하고 증류 플라스크에서 증류한 다음 표준 황산용액으로 적정하여 질소함량을 구하였다.

처리구별 소나무 묘목 생육과 초본 유입에 따른 종다양성지수 및 토양특성을 비교하기 위해 분산분석과 던컨의 다중검정을 실시하였다. 각 통계분석은 SPSS 26(Embedded on SPSS Statistics 26 Professional., SPSS Inc.) 통계 프로그램을 사용하여  $p < 0.05$  수준에서 처리구간 유의성을 검증하였다.

## 결과 및 고찰

### 토양중화제 처리에 따른 토양특성 변화

토양중화제 처리구별 토양 화학적 특성을 Fig. 1에 나타

Table 1. Soil physio-chemical characteristics of the study area

sand	silt (%)	clay (%)	solid (%)	liquid (%)	gaseous (%)	soil pH	TOC (%)	Total N (%)	C/N ratio
37.9	58.1	4.0	61.0	16.2	22.8	3.48	0.39	0.01	28.1

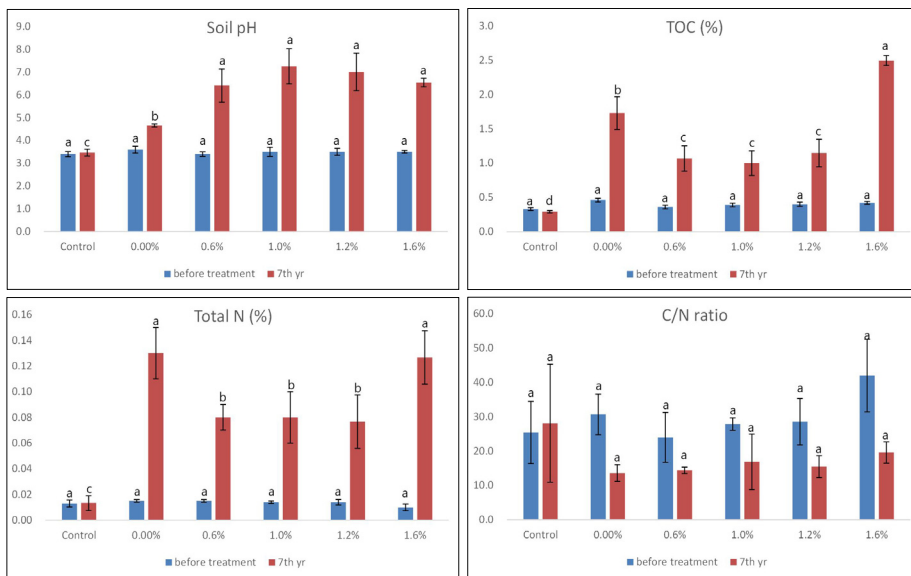


Fig. 1. Soil chemical characteristics according to soil neutralizer treatments.

\*Different letters (a, b, and c) indicate differences at a 5% significance level (Duncan's multiple range test)

냈다. 중화제 처리 전 토양 pH는 3.6 이하의 강산성이었으며, TOC는 0.33 ~ 0.46%, 총질소는 0.01 ~ 0.02%, 탄질률은 17.33 ~ 27.00의 범위를 보여, 토양양분도 열악한 상태였다. 각 처리구간 유의한 차이는 없었다. 중화제 처리후 7년 경과한 시점에서 대조구의 토양 pH는 3.5 이하의 강산성으로 토양 pH의 변화가 없었다. 퇴비만 처리한 0.0% 처리구는 4.66으로 처리구 중 가장 낮았으나 대조구보다 높았으며, 처리구 조성전에 비해 약 pH 1.0이 상승하여 다소의 중화효과가 있었다. 나머지 4개 토양중화제 처리구에서는 pH 6.41 ~ 7.26의 범위를 보여 중화제 처리 전과 비교하면 pH 1.06 ~ 3.76이 증가하였으며, 대조구 및 0.0% 처리구에 비해 높은 토양중화 효과를 보였다. 처리구간 유의한 차이는 보이지 않았다. 식생이 발달함에 따라 토양 pH가 낮아지는 원인에 대해 Hur *et al.*(2009)은 양이온 흡수량은 증가하지만 수소이온의 방출량이 많아지기 때문에 발생한다고 하였다. 이로 미루어 볼 때 1.6% 처리구는 Table 2와 Fig. 2에서 나타났듯이 타 처리구에 비해 소나무 성장량이 많았을 뿐만 아니라 주변으로부터 초본이 더 많이 유입되어 식생이 발달하면서 이에 대한 영향을 받은 것으로 사료된다. 다만 전라북도 산림토양 평균 pH는 A층에서 5.10, B층에서 5.25로 보고된 바 있으며(Jeong *et al.*, 2002), 국가표준(KSC, 2021)에서 폐탄광 산림복구를 위한 복토재의 품질기준으로 권장하는 토양 pH 범위(pH 5.6 ~ 7.3)와 비교하면 처리구별 토양 pH는 식생 생육에 악영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 하지만 산림복구사업후 토양 pH는 시

간이 경과하면서 감소하는 경우도 있기 때문에(Jung, *et al.*, 2021) 이에 대한 지속적인 모니터링을 실시하여 토양 pH가 식생생육 범위보다 감소할 경우 추가적으로 토양중화제를 처리하는 방안을 검토해야 한다.

각 처리구별 TOC를 비교한 결과 대조구를 제외한 나머지 5개 처리구는 시험구 조성전에 비해 TOC 함량이 증가하였다. 7년 경과시점에서 1.6% 처리구가 2.50% 가장 높았으며, 0.0% 처리구가 1.73%로 두 번째로 높았다. 0.6%와 1.0%, 1.2% 처리구는 각각 1.07%, 1.00%, 1.15%로 서로간 차이는 없었으며, 대조구(0.29%)보다 높았다. 총질소도 TOC와 비슷한 경향을 보여 대조구를 제외한 나머지 5개 처리구에서 시험구 조성 전보다 총질소 함량이 증가하였으며, 7년 경과시점에서 1.6% 처리구(0.13%)와 0.0% 처리구(0.13%)에서 가장 높고, 대조구(0.01%)에서 가장 낮았다. 나머지 3개 처리구는 0.08%로 동일한 결과를 보였다. TOC와 총질소값으로 탄질률을 계산한 결과 대조구와 중화제 처리구간 유의한 차이는 없었다.

일반적으로 폐광산지역에서 산림복구사업후 시간 경과에 따라 TOC와 총질소는 점차 증가하는 것으로 알려졌다(Cole *et al.*, 1993; Jung *et al.*, 2015; Shrestha and Lal, 2010; Singh *et al.*, 2004). 또한 토양내 총질소 함량은 일반적으로 토양 유기물과 밀접한 관계를 보이는 것으로 보고되었다(Kim, *et al.*, 1991). 이는 지상부 식생이 발달하면서 토양으로 유입되는 낙엽량이 증가하면서 산림토양에 지속적으로 축적되기 때문이다(Jung *et al.*, 2011; Jung *et al.*,

2021). 산림복구지에서 양분유입은 인위적인 시비를 제외하면 이와 같은 경로로 유입되기 때문에 지상부 식생이 발달하면 할수록 유기물 공급량이 많아지고, 이를 통해 토양 특성이 개선되어 식생발달에 더 유리하게 된다.

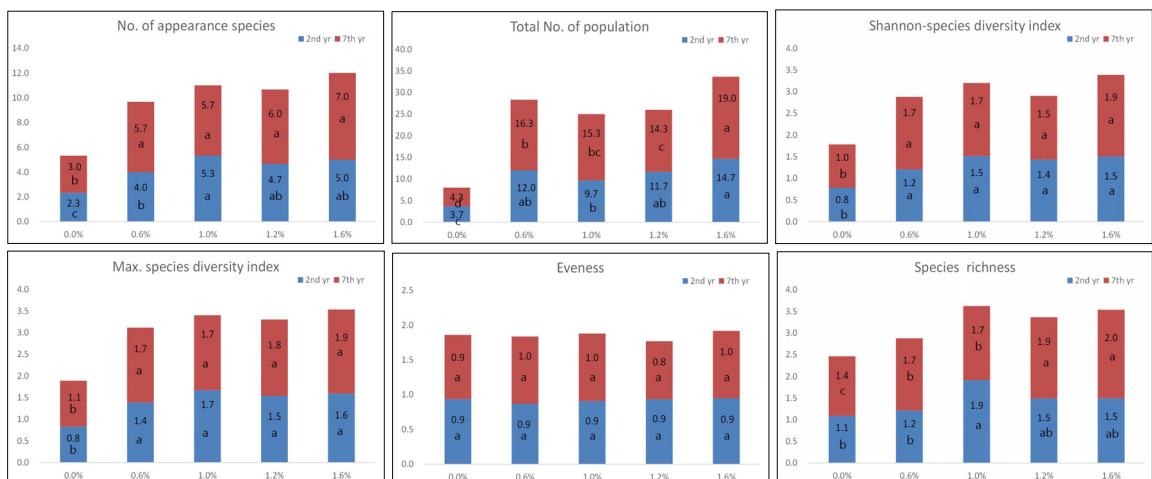
한편, 1.6% 처리구에서 다른 처리구에 비해 TOC와 총질소 값이 높은 것은 소나무 묘목의 성장량과 주변으로부터의 식생 유입이 다른 처리구에 비해 많기 때문에 이를 통한 유기물 유입량이 증가한 것으로 사료된다. 0.0% 처리구에서 TOC와 총질소값이 높은 이유는 지상부 식생이 발달하지 못했지만 주변 산림과의 거리가 상대적으로 가까운 관계로 주변 산림으로부터 낙엽이 바람에 의해 유입되어 유기물 유입량이 증가한 것으로 판단된다. 이러한 사례로 볼 때 산림복구사업시 주변 산림 토양에서 발생하는 낙엽을 대상지 토양의 보온, 보습 및 유기물 공급을 위한 멀칭재로 사용한다면 초기 식생활착 및 생육촉진에 효과적일 것으로 기대된다.

TOC는 토양내 유기물을 나타내는 지표이다(Jung *et al.*, 2021). 토양 내 유기물은 식생과 상호작용을 하는 토양 미생물의 서식처 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 *et al.*, 2021). 질소의 경우 식생의 초기 단계에는 성장속도가 빠르기 때문에 질소 요구량이 많다(Jung *et al.*, 2021). 이에 비해 산림토양에서 질소의 형태는 대부분 유기태로 존재하며 무기화하는 속도가 느리기 때문에(Jin, *et al.*, 1994) 식생생육의 제한인자로 작용한다(Jin, *et al.*, 1994; Jung *et al.*, 2012). 이러한 중요성으로 TOC와 총질소는 토양 pH와 마찬가지로 국가표준의 폐탄광 산림복구를 위한 복토제의 품질기준에 포함되어 있는데 TOC는 1.2% 이상, 총질소는 0.09% 이상이 기준치이다. 이 기준치와 비교한다면 0.6%, 1.0%, 1.2% 처리구는 이보다 낮았다.

**Table 2.** Changes in root collar diameter growth of *Pinus densiflora* seedlings according to soil neutralizer treatments (mm)

	0 ~ 1 <sup>st</sup> yr	1 <sup>st</sup> ~ 2 <sup>nd</sup> yr	3 <sup>rd</sup> ~ 7 <sup>th</sup> yr	Total	Average
Control	0.00 <sup>b</sup>	0.00 <sup>c</sup>	0.00 <sup>d</sup>	0.00 <sup>d</sup>	0.00 <sup>d</sup>
0.0%	0.64 <sup>a</sup>	1.77 <sup>b</sup>	19.65 <sup>c</sup>	22.06 <sup>c</sup>	3.15 <sup>c</sup>
0.6%	0.57 <sup>a</sup>	4.40 <sup>a</sup>	26.10 <sup>b</sup>	31.06 <sup>b</sup>	4.44 <sup>b</sup>
1.0%	0.60 <sup>a</sup>	4.72 <sup>a</sup>	26.74 <sup>b</sup>	32.06 <sup>b</sup>	4.58 <sup>b</sup>
1.2%	0.64 <sup>a</sup>	5.05 <sup>a</sup>	28.61 <sup>b</sup>	34.30 <sup>b</sup>	4.90 <sup>b</sup>
1.6%	0.57 <sup>a</sup>	5.17 <sup>a</sup>	47.09 <sup>a</sup>	52.83 <sup>a</sup>	7.55 <sup>a</sup>

\*Different letters (a, b, and c) indicate differences at a 5% significance level (Duncan's multiple range test)



**Fig. 2.** Species diversity index according to soil neutralizer treatments.

\*Different letters (a, b, and c) indicate differences at a 5% significance level (Duncan's multiple range test)

### 토양중화제 처리에 따른 소나무 생육

중화제 처리구별 소나무 근원경의 0~1년간 생장량, 1~2년간 생장량, 3~7년간 생장량 및 7년간 총생장량을 Table 2에 나타냈다. 대조구는 1년 경과한 시점에서 모두 고사하였으며, 초기 1년간 생장량은 0.0% 0.64 mm, 0.6% 0.57 mm, 1.0% 0.60 mm, 1.2% 0.64 mm, 1.6% 0.57 mm로 처리구별 차이가 없었다. 2년차 생장량은 토양중화제 처리구 0.6%~1.6% 처리구에서 4.40 mm~5.17 mm의 범위를 보였는데 처리구간 차이는 없었으며, 0.0% 처리구는 1.77 mm로 다른 처리구에 비해 낮았다. 3~7년간 생장량은 1.6% 처리구에서 47.09 mm로 가장 많았으며, 0.0% 처리구가 19.65 mm 가장 적었다. 나머지 3개 처리구는 26.10 mm~28.61 mm로 서로 차이가 없었다. 이에 따라 7년간 전체 생장량은 3~7년간 생장량과 비슷한 경향을 보여 1.6% 처리구가 52.83 mm로 가장 많았으며, 0.0% 처리구는 22.06 mm 가장 적었다. 0.6%, 1.0%, 1.2%는 각각 31.06 mm, 32.06 mm, 34.30 mm로 차이가 없었다. 1년차 생장때 0.0% 처리구와 다른 처리구간 생장량 차이가 없었던 것은 소나무의 경우 당년에 자랄 모든 줄기의 원기가 전년도에 형성된 동아 속에 미리 형성되어 있다가 봄에 개엽을 하는 고정생장을 하기 때문에(Lee, 2001) 생장량 차이가 없었던 것으로 판단된다.

Table 3에 7년 경과후 중화제 처리구별 소나무 묘목 생존률을 나타냈다. 아무처리를 하지 않은 대조구에서는 생존한 소나무 묘목이 없었다. 대조구를 제외한 중화제 처리구는 최초 2년간은 생존률이 98.9%로 차이가 없었으나, 7년 경과한 시점에서 0.0% 처리구에서 생존률이 37.0%로 다른 처리구에 비해 낮았다. 0.6%~1.6% 처리구 생존률은 59.3%~75.9%의 범위를 보였으나 처리비율별 유의한 차이를 보이지는 않았다.

Byun, *et al.*(2007)은 시비처리에 따른 소나무 묘목의 근원경 생장변화에 대해 조사하였는데, 무시비구는 3년간 약 0.5 cm, 시비처리구에서는 2~2.6 cm 생장하여 무시비구는 연평균 약 0.17 cm, 시비처리구는 약 0.67~0.87 cm 생장하였다. 또한 Cho *et al.*(2010)은 경기도 포천 산림생산기술연구소 시험림과 강원도 홍천, 전라북도 진안 등 3개 지역에서 소나무 용기묘의 생장량을 조사한 바 있는데, 이 연구에서의 3년간 근원경 생장량은 약 0.6~2 cm로 연평균 약 0.2~0.7 cm 생장하였다. 본 연구결과를 이와 비교한다

면, 0.0% 처리구는 연평균 약 0.31 cm로 Byun, *et al.*(2007)의 연구결과에서 무시비구보다는 높았으나 시비처리구와 Cho *et al.*(2010)의 연구결과보다는 연평균 생장량이 다소 낮았다. 이에 비해 1.6% 처리구는 연평균 약 0.76 cm로 두 선행연구결과와 비교하였을 때 다소 높은 생장량으로 나타났다. 나머지 3개 처리구는 연평균 생장량이 약 0.44~0.49 cm로 Byun, *et al.*(2007)의 연구결과에서 무시비구보다 높고, Cho *et al.*(2010)의 연구결과와 비교하면 중간값을 보여, 본 연구에서 토양중화제 처리가 소나무 묘목의 생육 촉진에 다소 효과가 있으며, 소나무의 생존률 향상에도 효과가 있는 것으로 사료된다.

### 토양중화제 처리에 따른 초본 유입

중화제 처리구별 주변으로부터 유입된 초본의 종다양성 지수를 Fig. 2에 나타냈다. 대조구의 경우 주변으로부터 유입된 초본이 없었다. 출현종수와 종다양성지수, 최대다양성지수는 유사한 경향을 보여 0.0% 처리구가 가장 낮았으며, 나머지 4개 처리구는 유의한 차이를 보이지 않았다. 총 개체수의 경우 가장 적은 처리구는 0.0% 처리구로 2년차에서 3.7개, 7년차에서 4.3개를 보인데 비해, 가장 높은 값은 보인 1.6% 처리구는 2년차때 14.7개, 7년차때 19.0개였다. 나머지 3개 처리구는 유의한 차이를 보이지 않았다. 1.6% 처리구에서 다른 처리구에 비해 식생유입이 활발한 이유는 다른 처리구에 비해 토양내 유기물과 총질소 함량 등이 높고 소나무 묘목의 생장활동이 활발하여 지표면에 낙엽낙지 유입량이 많아 초본의 종자가 발아하기 쉬운 환경이기 때문인 것으로 사료된다. 이에 비해 0.0% 처리구는 1.6% 처리구와 마찬가지로 TOC와 총질소 함량이 높았음에도 불구하고 토양 pH가 5.0 이하의 산성토양(Fig. 2)으로 식생생육에 불리한 조건이었기 때문에 초본유입이 저조한 것으로 판단된다. 균재도와 중풍부도는 모든 처리구에서 유의한 차이를 보이지 않았다. 균재도를 제외한 나머지 5개 다양성 지수는 2016년에 비해 2021년에서 다소 증가하는 경향을 보였다. Cho *et al.*(1995)이 폐탄광에서 산림복구사업후 시간경과에 따른 식생복원을 조사한 결과에 따르면 식물의 출현종수와 종다양성지수는 9년이 경과하기까지 증가하는 경향을 보였고, 균재도는 뚜렷한 변화를 보이지 않았다고 했는데 본 연구결과도 이와 유사한 결과를 보였다.

**Table 3.** Mean survivability coefficient after 7 years from planting according to soil neutralizer treatments (%)

Year	Control	0.0%	0.6%	1.0%	1.2%	1.6%
2 <sup>nd</sup> yr	0.0 <sup>b</sup>	98.9 <sup>a</sup>	98.9 <sup>a</sup>	98.9 <sup>a</sup>	98.9 <sup>a</sup>	98.9 <sup>a</sup>
7 <sup>th</sup> yr	0.0 <sup>c</sup>	37.0 <sup>b</sup>	75.9 <sup>a</sup>	59.3 <sup>a</sup>	64.8 <sup>a</sup>	64.8 <sup>a</sup>

\*Different letters (a and b) indicate differences at a 5% significance level (Duncan's multiple range test).

Table 4는 토양중화제 처리비율과 토양특성, 소나무 묘목의 7년간 근원경 성장량 및 생존률, 주변산림으로부터 유입된 초본의 각 종다양성 지수 간의 상관관계를 나타낸 표이다. 토양중화제 처리비율에 따라 토양 pH와 TOC, 소나무 묘목의 근원경 성장량 및 생존률, 그리고 초본의 각 종다양성 지수가 정의 상관관계를 보여, 토양중화제 처리가 토양특성 개량과 식생생육 촉진에 효과적인 것으로 나타났다. 또한 소나무 묘목의 근원경 성장량과 초본의 각 종다양성 지수는 토양 pH, TOC, 총질소와 정의 상관관계를 보여 토양특성에 대한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 일반적으로 식물의 양분유효도가 가장 높은 토양 pH 범위는 5.6 ~ 7.3(Troug, 1947)이며, 소나무의 경우 토양 pH 4.6 ~ 6.4 범위에서 생육하는 것으로 알려졌다(Han, *et al.*, 2019). 이러한 선행 연구결과와 비교하면 본 연구결과에서 토양중화제 처리에 따른 토양 pH 변화는 초본이 생육하기에 적절한 범위지만 소나무 생육조건으로는 일부 처리구에서 토양 pH가 다소 높은 경향이 있다. 하지만 본 연구대상지의 원토

양이 토양 pH 3.5 미만의 강산성 토양이었기 때문에 소나무 묘목의 근원경 성장량이 토양 pH 증가에 따라 정의 상관관계를 보인 것으로 판단된다. 향후 실제 산림복구사업시 이러한 적정 토양 pH 범위를 고려하여 중화제 비율을 선정해야 한다. 토양 pH에 대한 장기모니터링을 통해 중화효과의 지속여부를 확인하고 중화효과 감소시 및 소나무 묘목과 초본의 생육불량 현상 발생시 중화제 추가 처리 등 사후 대책방안을 마련해야 할 것이다. TOC의 경우 중화제 처리 비율, 소나무 묘목의 성장 및 초본의 총출현개수와 정의 상관관계를 보였는데, 이는 중화제 처리 비율에 따라 토양 pH가 중화되어 소나무 묘목의 성장량과 주변으로부터 유입된 초본의 총개체수가 증가하면 낙엽낙지 발생량 및 이에 의한 유기물 공급이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다. 총질소 함량은 일반적으로 토양 유기물과 밀접한 관계를 보이는데(Kim, *et al.*, 1991), 본 연구에서도 TOC 정의 상관관계를 보였다. 이는 산림토양에서 총질소의 주 공급원이 유기물이기 때문이다. 다만 0.6% 처리구의 경우 1.0% 및

**Table 4.** Correlation between neutralizer treatment ratio, growth of *Pinus densiflora* seedlings, soil chemical characteristics, and species diversity index

	Neutralizer treatment ratio	Root collar diameter growth	Survivability coefficient	Soil pH	TOC	Total N	C/N ratio	No. of appearance species	Total No. of population	Shannon-species diversity index	Max. species diversity index	Evenness	Species richness
Neutralizer treatment ratio	1	0.884**	0.684**	0.791**	0.539*	0.369	0.138	0.840**	0.882**	0.778**	0.805**	0.570*	0.708**
Root collar diameter growth		1	0.784**	0.808**	0.678**	0.633**	-0.024	0.884**	0.896**	0.869**	0.881**	0.791**	0.807**
Survivability coefficient			1	0.809**	0.420	0.478*	-0.249	0.852**	0.863**	0.869**	0.887**	0.829**	0.798**
Soil pH				1	0.234	0.294	-0.206	0.837**	0.880**	0.824**	0.862**	0.727**	0.737**
TOC					1	0.841**	0.141	0.533*	0.468*	0.593**	0.556*	0.643**	0.590**
Total N						1	-0.239	0.512*	0.396	0.594**	0.564*	0.759**	0.610**
C/N ratio							1	-0.095	-0.049	-0.141	-0.152	-0.296	-0.150
No. of appearance species								1	0.934**	0.970**	0.984**	0.823**	0.951**
Total No. of population									1	0.926**	0.929**	0.759**	0.799**
Shannon-species diversity index										1	0.989**	0.904**	0.945**
Max. species diversity index											1	0.895**	0.955**
Evenness												1	0.862**
Species richness													1

1.2% 처리구와 소나무 성장량과 초본 유입이 비슷함에도 불구하고 TOC와 총질소 함량은 높은 것으로 나타났는데, 이는 지속적인 모니터링을 통해 원인을 분석하여 향후 산림복구방안 수립에 반영해야 할 것이다.

산림생태계에서 토양은 식생생육기반이 될 뿐만 아니라 탄소저장고로서의 역할을 하고 있다(Lee *et al.*, 2009). 하지만 폐금속광산 산림훼손지의 경우 지형이 대부분 평지가 아닌 비탈면으로 이루어져 있기 때문에 강우에 의한 유실이 발생하기 쉽다. 따라서 산림복원사업에서 산림의 탄소저장고로서의 기능 회복과 식생복원을 위해 토양유실을 방지하는 것은 중요하다. 강우에 의한 토양유실은 강우가 토양을 강타하면서 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해서는 지피식생으로 피복을 하여 빗물의 직접적인 토양접촉을 방지해야 한다(Kim and Kim, 2018). Ahn and Choi(2013)이 연구한 바에 따르면 비탈면에서 조기녹화 및 비탈면 침식 방지는 자생초화류가 효과가 있다고 하였으며, Woo and Kim(1997)도 초본에 의한 토사유출 억제효과가 크다고 하였다. 특히 Kim *et al.*(2004)에 따르면 어린 묘목보다 자생초화류의 땃장형성이 더 우수하여 비탈면 침식방지에 효과적이라고 하였다. 따라서 산림복구사업지에서 토양유실을 방지하려면 주변으로부터 초본이 유입되어 피복이 이루어져야 한다. 본 연구결과에서는 토양중화제 처리가 주변으로부터 초본유입을 촉진시켜 산림복구지를 자생 식생으로 복원하는 한편, 초본 자체가 가지는 탄소흡수능 뿐만 아니라 산림복구지의 토양유실방지를 통한 산림토양의 탄소저장기능 유지에도 효과적인 것으로 사료된다.

### 토양중화제 비율 선정

적정 중화제 선정을 위해 Jung *et al.*(2020)이 역새를 이용하여 폐금속광산 산성토양을 산림복구하기 위한 중화제 선정 방법을 이용하여 소나무 묘목 성장과 주변산림으로부터 유입된 초본의 종다양성지수, 토양 특성 중 처리구간 유

의한 차이를 보인 6개 인자와 중화제 처리 비율에 따른 경제성에 대해 순위를 선정하고 이를 합산한 점수를 Table 5에 나타냈다. 토양 pH의 경우 처리구간 통계적으로 유의한 차이를 보이진 않았으나, 소나무의 적정 생육 범위를 기준으로 범위 안의 값을 보인 0.6% 처리구는 1순위를, 범위보다 높은 pH 값을 보인 나머지 3개 처리구는 2순위를 부여하였다. 이 결과는 순위의 합산이기 때문에 가장 낮은 값이 소나무 묘목 생육과 초본 유입에 가장 좋은 효과를 의미한다. 이에 따라 최종 합산 점수가 11점인 1.6%가 가장 효과적인 비율로 선정되었으며, 2순위로는 12점인 0.6%가 선정되었다. 다만 이 결과는 본 연구대상지에 대한 실험을 토대로 도출한 결과이므로 다른 폐광산지역의 산성토양에 중화제를 처리하기 위해서는 그 지역 토양을 대상으로 중화실험을 통해 적정 비율을 산출해야 할 것이다.

## 결론

본 연구는 폐금속광산 산성토양 산림복구를 위해 토양중화제 처리 비율별로 소나무 묘목 생육과 주변으로부터 초본 유입 및 토양특성에 미치는 영향을 규명하여 적정 비율을 선정하기 위해 수행하였다.

- (1) 폐석회와 굴패각을 혼합한 토양중화제를 비율별 (0.6%, 1.0%, 1.2%, 1.6%)로 처리한 결과 중화제 처리가 토양 pH 중화 및 소나무 묘목 성장량과 생존률, 그리고 주변으로부터 초본 유입 증가에 효과가 있었으며, 정의 상관관계를 보였다.
- (2) 중화제 처리 비율별 소나무 생육과 초본 유입, 토양 pH 중화 효과, 그리고 비율에 따른 경제성 등을 고려한 결과 1.6%를 적정 비율로 선정하였다.

다만, 중화제 처리후 토양 pH가 적정 범위를 유지하는지 여부에 대해 지속적인 토양 특성 모니터링이 필요하다. 또한 다른 폐광산지역 사업에 본 중화제를 적용할 경우 토양

**Table 5.** Total score of each treatment according to the growth of *Pinus densiflora* seedlings, soil chemical characteristics, inflow of vegetation from the forest edge, and economic feasibility according to the soil neutralizer ratio

	0.6%	1.0%	1.2%	1.6%
Root collar diameter growth	2	2	2	1
Total No. of population	2	2.5	3	1
Species richness	2	2	1	1
Soil pH	1	2	2	2
TOC	2	3	3	1
Total N	2	2	2	1
Economic feasibility	1	2	3	4
Total	12	15.5	16	11



중화 및 식생에 대한 영향이 다를 수 있으므로 현장실증시험을 통해 적정 비율을 산출해야 한다.

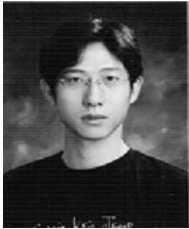
## 사 사

이 논문은 2020년 한국광해관리공단으로부터 기술개발사업비를 지원받아 수행되었습니다.

## References

- Ahn, B.G. and Choi, J.S., 2013. Effect of turfgrasses to prevent soil erosion, *Weed & Turfgrass Science*, 2(4), p.381-386.
- Byun, J.K., Kim, Y.S., Yi, M.J., Son, Y.H., Kim, C.S., Jeong, J.H., Lee, C.Y., and Jeong, Y.H., 2007. Growth response of *Pinus densiflora*, *Larix leptolepis*, *Betula platyphylla* var. *japonica* and *Quercus acutissima* seedling at various levels of fertilization, *Journal of Korean Forest Society*, 96(6), p.693-698.
- Cho, H.J., Lee, C.S., Cheong, Y.H., Kim, J.Y., and Oh, J.S., 1995. Ecological study for restoration of vegetation on abandoned coal-mined land, *Journal of Korean Forest Society*, 51, p.14-24.
- Cho, M.S., Kim, G.N., Kwon, K.W., and Lee, S.W., 2010. Effect of planting season and vegetation competition on growth performance of containerized seedling of *Pinus densiflora*, *Journal of Korean Forest Society*, 99(3), p.359-367.
- Cole, C.V., Paustian, K., Elliott, E.T., Metherell, A.K., Ojima, D.S., and Parton, W.J., 1993. Analysis of agroecosystem carbon pools, *Water, Air & Soil Pollution*, 70, p.357-371.
- De Bartolomeo, A., Poletti, L., Sanchini, G., Sebastiani, B., and Morozzi, G., 2004. Relationship among parameters of lake polluted sediments evaluated by multivariate statistical analysis, *Chemosphere*, 55, p.1323-1329.
- Han, S.H., Kim, J.H., Kang, W.S., Hwang, J.H., Park, K.H., and Kim, C.B., 2019. Monitoring soil characteristics and growth of *Pinus densiflora* five years after restoration in the Baekdudaegan Ridge<sup>1a</sup>, *Korean Journal of Environment and Ecology*, 33, p.453-461.
- Hur, T.C., Joo, S.H., and Cho, H.T., 2009. A comparison of the soil physiochemical properties of the forest stands in the young-il erosion control district, *Journal of Korean Forestry Society*, 98(4), p.444-450.
- Jang, K.M., Won, H.K., Kim, Y.H., Tak, K.I., Shin, M.Y., and 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, *Journal of Korean Forest Society*, 100, p.591-597.
- Jeong, J.H., Koo, K.S., Lee, C.H., and Kim, C.S., 2002. Physico-chemical Properties of Korean Forest Soils by Regions, *Journal of Korean Forest Society*, 91(6), p.694-700.
- Jin, H.O., Lee, M.J., Shin, Y.O., Kim, J.J., and Jun, S.K., 1994. *Forest Soil*. Hyangmoonsa, Seoul, Korea.
- Jung, M.H., Ko, J.I., Bak, G.I., and 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, *Economic and Environmental Geology*, 54(4), p.457-464.
- Jung, M.H., Lee, J.S., and Ji, W.H., 2020. Soil neutralizer selection for rehabilitation in the acid soil of abandoned metal mine using *Miscanthus sinensis* Anderss., *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 53, p.237-246.
- Jung, M.H., Lee, S.H., Kim, Y.S., and Park, M.J., 2016. Effects of soil neutralizing treatments to soil characteristics and growth of *Aster koraiensis* in the acid soil of abandoned metal mine, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 49(3), p.287-292.
- Jung, M.H., Shim, Y.S., and Kim, T.H., 2011. Characteristics of soil chemical properties in abandoned coal mine forest rehabilitation areas in Hwasun, south Jeolla Province. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 44, p.1010-1015.
- Jung, M.H., Shim, Y.S., Kim, T.H., Oh, J.Y., and Jung, Y.S., 2012. Characteristics of soil chemical properties in abandoned coal mine forest rehabilitation areas in Mungyeong, Gyeongsangbuk-do, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45, p.733-737.
- Jung, M.H., Shim, Y.S., Kim, Y.S., Park, M.J., and Jung, K.H., 2015. Characteristics of Soil Chemical Properties In Abandoned Coal Mine Forest Rehabilitation Areas In Boryeong City, Chungcheongnam-do, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 48, p.744-750.
- Kang, J.T., Son, Y.M., Jeon, J.H., and Lee, S.J., 2017. Assessment of carbon stock and uptake by estimation of stem taper equation for *Pinus densiflora* in Korea, *Journal of Climate Change Research*, 8(4), p.415-424.
- Kim, B.R. and Sung, K.J., 2010. Design of riparian areas for the carbon sequestration and diffused pollutants control, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32(11), p.1030-1037.
- Kim, G.E., Kim, S.J., Kim, H.J., Chang, H.N., Kim, H.S., Park, Y.H., and Son, Y.H., 2020. Estimation of carbon storage in reclaimed coal mines: Focused on *Betula platyphylla*, *Pinus koraiensis* and *Pinus* spp. plantations, *Korea Journal of Environmental Biology*, 38(4), p.733-743.
- Kim, H.K. and Kim, J.S., 2018. Effect of cover crop *Aruncus dioicus* var. *kamtschaticus* on reducing soil erosion, *Journal of Korean Forest Society*, 107(1), p.50-58.

- Kim, N.C., Lee, S.J., Jung, J.J., Kim, J.H., and Nam, S.J., 2004. Study on the sod forming effects of the native plants for the erosion control in slopes, *Journal of Korean Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology*, 7(1), p.77-84.
- Kim, S.W., Kang, J.T., Jeong, S.H., Lee, S.J., Park, H., and Son, Y.M., 2014. Stand growth analysis and carbon stocks/removals assessment on forest growth monitoring plots in Korea, *Korean Journal of Agriculture & Life Science*, 48, p.11-19.
- Kim, T.H., Jung, J.H., Lee, C.H., Gu, K.S., Lee, W.K., Kang, I.A., and Kim, S.I., 1991. Growth of major species according to soil types, *KFRI Research Report*, 42, p.91-106.
- Kjeldahl, C., 1983. A new method for the determination of nitrogen in organic matter, *Zeitschrift für Analytische Chemie*, 22, p.366-382.
- Korean Standards & Certifications, 2021.11.15, <https://e-ks.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchView.do?menuId=919&topMenuId=502&upperMenuId=503&ksNo=KSE1001&tmprKsNo=KSE1001&reformNo=01>
- KSC (Korean Standards & Certifications), 2021.11.15., <https://e-ks.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchView.do?menuId=919&topMenuId=502&upperMenuId=503&ksNo=KSE1001&tmprKsNo=KSE1001&reformNo=01>.
- Kwon, S.D., Seo, J.H., Son, Y.M., and Park, Y.K., 2005. Biomass carbon emissions according to conversion of forest land in Korea. *Journal of Korea Forest Energy*, 24, p.10-15.
- Lee, J.Y., Han, S.H., Kim, S.J., Lee, S.H., Son, Y.M., and Son, Y.H. 2015a. A meta-analysis on the effect of forest thinning on diameter growth and carbon stocks in Korea, *Journal of Korean Forest Society*, 104(4), p.527-535
- Lee, K.J., 2001. *Tree Physiology*(2nd Ed.), Seoul University, Seoul, Korea, 514p.
- Lee, N.Y., 2011. Estimation of carbon storage in three cool-temperate broad-leaved deciduous forests at Bukhansan National Park, Korea, *Korean Journal of National Park Research*, 2, p.53-57.
- Lee, S.J., Y, J.S., Son, Y.M., and Kim, R.H. 2015b. Estimation of the Carbon Stock and Greenhouse Gas Removals by Tree Species and Forest Types in Gangwon Province, *Journal of Climate Change Research*, 6, p.303-310.
- Lee, S.K., Son, Y.H., Noh, N.J., Heo, J.J., Yoon, T.K., Lee, A.R., Sarah, A.R., and Lee, W.K., 2009. Carbon storage of natural pine and oak pure and mixed forests in Hoengseong, Kangwon, *Journal of Korean Society of Forest Science*, 98(6), p.772-779.
- Ministry of Environment, 2021.11.17., <https://www.law.go.kr/LSW/lsBylInfoPLinkR.do?lsiSeq=201372&lsNm=%ED%8F%90%EA%B8%B0%EB%AC%BC%EA%B4%80%EB%A6%AC%EB%B2%95+%EC%8B%9C%ED%96%89%EA%B7%9C%EC%B9%99&bylNo=0004&bylBrNo=03&bylCls=BE&bylEfYd=20180118&bylEfYdYn=Y>
- MIRECO (Mine Reclamation Corp.), 2020. *Annual Report OF MIRECO STATISTICS (2019)*. Wonju, Korea, 253p.
- Miro, M., Estela, J.M., and Cerda, V., 2004. Application of flowing stream techniques to water analysis Part III. Metal ions: Alkaline and alkaline-earth metals, elemental and harmful transition metals, and multielemental analysis, *Talanta*, 63, p.201-223.
- Oh, S.J., Cho, M.H., Park, C.O., Jung, M.H., and Lee, J.Y. 2012. A Study on the Development of Soil Neutraillizing-agent using Waste Materials (Waste-lime, Oyster, Bottom-ash), *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17(6), p.92-101.
- Park, J.H., Panneerselvam, P., Lamb, D., Choppala, G., and Bolan, N.S., 2011. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils, *Journal of Hazardous Materials*, 185, p.549-574.
- Shrestha, R.K. and Lal, R., 2010. Carbon and nitrogen pools in reclaimed land under forest and pasture ecosystem in Ohio, USA, *Geoderma*, 157, p.196-205.
- Singh, A.N., Raghubanshi, A.S., and Singh, J.S., 2004. Impact of native tree plantations on mine spoil in a dry tropical environment, *Forest Ecology and Management*, 187, p.49-60.
- The Republic of Korea. 2011. *Korea's third national communication under the united nations framework convention on climate change*, The Republic of Korea, Seoul.
- Troug, E., 1947. Soil reaction influence on availability of plant nutrients, *Soil Science Society of America Proceedings*, 11, p.305-308.
- Woo, B.M. and Kim, K.H., 1997. Studies on the Selection of Standard Revegetation Measures on the Highway Cut-slopes, *Journal of Korean Society of Forest Science*, 86(4), 476-488.
- Yim, J.H., Sung, N.C., and Lee, S.H., 1998. A study on the effect of oyster shell to improve the acid soil and to treat the stimulated acid rain, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 21(12), p.2427-2434.



**정 문 호**

2003년 서울대학교 농업생명과학대학 산  
림자원학과 농학학사  
2005년 서울대학교 농업생명과학대학 산  
림자원학과 농학석사

현재 호서대학교 에너지후융합기술학과 박사과정  
한국광해광업공단 기술연구원 과장 재직  
(E-mail; jungmh2@komir.or.kr)

---



**지 원 현**

2007년 고려대학교 공학박사(환경공학)  
2014년 호서대학교 경영학박사  
2021년 한국광해관리공단 수질토양기술  
팀장

현재 호서대학교 창의교양학부 교수  
호서대학교 부설 환경에너지연구소 소장  
(E-mail; greenidea@hoseo.edu)

---