

## 산청군 고령토(백토) 노천 광산 채굴지와 인접 소나무 임분의 토양 물리·화학적 성질

김경태<sup>1,2</sup> · 백경원<sup>2</sup> · 최병길<sup>2</sup> · 하지석<sup>2</sup> · 김춘식<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경상남도 산림환경연구원, <sup>2</sup>경남과학기술대학교 산림자원학과

## Soil Physical and Chemical Properties of Kaolinite Opencast Mines and Adjacent Red Pine Forests in Sancheong-gun

Kyung Tae Kim<sup>1,2</sup>, Gyeongwon Baek<sup>2</sup>, Byeonggil Choi<sup>2</sup>,  
Jiseok Ha<sup>2</sup> and Choonsig Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Gyeongsangnam-do Forest Environmental Research Institute, Jinju 52615, Korea

<sup>2</sup>Department of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology,  
Jinju 52725, Korea

**요약:** 노천 광산 채굴지의 토양 물리·화학적 성질은 광산지 식생 복원의 가장 중요한 요인이다. 본 연구는 경상남도 산청군 고령토 광산의 고령토 폐석지와 식생 복원지 및 인접한 소나무 임분의 토양 성질을 비교하기 위하여 수행하였다. 고령토 채굴이 진행되고 있는 6개 지역을 선정하고 고령토 폐석지, 식생 복원지, 소나무 임분의 토양 10 cm 깊이에 물리·화학적 성질을 조사하였다. 토양 용적밀도는 고령토 폐석지가 1.51 g·cm<sup>-3</sup>로 식생 복원지 1.19 g·cm<sup>-3</sup>나 소나무 임분 0.93 g·cm<sup>-3</sup>에 비해 유의적으로( $P < 0.05$ ) 높게 나타났으며, 기상은 고령토 폐석지가 14.2%로 소나무 임분 32.6%에 비해 유의적으로 낮았다. 점토함량은 소나무 임분이 33.6%로서 고령토 폐석지 14.8%나 식생 복원지 18.7%에 비해 유의적으로 높았다. 토양구조 안정지수는 고령토 폐석지가 0.87%, 식생 복원지가 1.61%로 소나무 임분 7.75%에 비해 유의적으로 낮았다. 토양 pH는 고령토 폐석지 pH 6.68, 식생 복원지 pH 6.27로 소나무 임분 pH 5.31에 비해 유의적으로 높았다. 그러나 토양 유기탄소 농도는 고령토 폐석지 2.12 mg·g<sup>-1</sup>, 식생 복원지 5.00 mg·g<sup>-1</sup>, 소나무 임분 36.03 mg·g<sup>-1</sup>, 전질소 농도는 고령토 폐석지 0.07 mg·g<sup>-1</sup>, 식생 복원지 0.31 mg·g<sup>-1</sup>, 소나무 임분 2.08 mg·g<sup>-1</sup>로 고령토 폐석지와 식생 복원지는 소나무 임분에 비해 유의적으로 낮은 값을 보였다. 토양 내 유효 인 농도는 고령토 폐석지, 식생 복원지, 소나무 임분 사이에 유의적인 차이가 없었다. 토양 포타슘 농도는 고령토 폐석지 0.08 cmol<sub>c</sub>·kg<sup>-1</sup>과 식생 복원지 0.21 cmol<sub>c</sub>·kg<sup>-1</sup>로 소나무 임분 0.30 cmol<sub>c</sub>·kg<sup>-1</sup>에 비해 유의적으로 낮았다. 본 연구 결과에 따르면 고령토 노천 채굴지의 고령토 폐석지나 식생 복원지는 토양 용적밀도가 높고, 토양 유기탄소, 전질소, 유효 인, 교환성 포타슘 농도가 낮았으며 식생 복원지의 경우 토양 비옥도로 향상할 수 있는 관리 방안이 필요한 것으로 나타났다.

**Abstract:** Soil properties in opencast mines are a key factor in reclamation (revegetation) of mining areas. In this study we determined the soil physical and chemical properties of kaolinite tailings, reclaimed areas, and adjacent natural red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) forests in kaolinite opencast mines in Sancheong-gun, Gyeongsangnam-do. Six sites were chosen for collection of soil samples to determine soil physical and chemical properties at a soil depth of 10 cm. Soil bulk density was significantly higher ( $P < 0.05$ ) in the kaolinite tailings (1.51 g·cm<sup>-3</sup>) than in the reclaimed areas (1.19 g·cm<sup>-3</sup>) and red pine forests (0.93 g·cm<sup>-3</sup>), whereas air phase in the kaolinite tailings (14.2%) was significantly lower than in the red pine forests (32.6%). Clay content in the kaolinite tailings (14.8%) was significantly higher than in the reclaimed areas (18.7%) or kaolinite tailings (14.8%), whereas soil structural stability index was significantly lower in the reclaimed areas (1.61%) and kaolinite tailings (0.87%) than in the red pine forests (7.75%). Soil pH was significantly higher in the kaolinite tailings (pH 6.68) and reclaimed areas (pH 6.27) than in the red pine forests (pH 5.31). Soil organic carbon and total nitrogen were significantly higher in the red pine forests (C:

\* Corresponding author

E-mail: ckim@gntech.ac.kr

ORCID

Choonsig Kim  https://orcid.org/0000-0002-3263-1187

36.03 mg·g<sup>-1</sup>; N: 2.08 mg·g<sup>-1</sup>) than in the reclaimed areas (C: 5.00 mg·g<sup>-1</sup>; N: 0.31 mg·g<sup>-1</sup>) than in the kaolinite tailings (C: 2.12 mg·g<sup>-1</sup>; N: 0.07 mg·g<sup>-1</sup>). The amount of available phosphorus was not significantly different among the three treatments. The concentration of exchangeable potassium was significantly lower in the kaolinite tailings (0.08 cmol<sub>c</sub>·kg<sup>-1</sup>) than in the reclaimed areas (0.21 cmol<sub>c</sub>·kg<sup>-1</sup>) and red pine forests (0.30 cmol<sub>c</sub>·kg<sup>-1</sup>). These results indicate that, because of high soil bulk density and low soil organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and exchangeable potassium in kaolinite tailings and reclaimed mining areas, soil nutrient management is needed in order to reclaim the vegetation in these type of areas.

**Key words:** mine soils, kaolinite, reclaimed soils, kaoline, forest soils, surface mines

## 서론

산림지역을 대상으로 석탄과 고령토 등과 같은 여러 가지 광물 자원의 노천 채굴(opencast mining)은 산림생태계의 지형 및 경관의 변화뿐만 아니라, 토양의 물리·화학·생물적 성질이나 산림 수문학적 순환영역에 상당한 변화를 초래하는 것으로 알려져 있다(Cooke and Johnson, 2002; Shrestha and Lal, 2011; Feng et al., 2019). 광물 자원의 채굴 과정 동안 산림 식생 및 지하부 토양자원의 제거는 산림생태계에 다양한 영향을 끼치게 되며 특히 산림토양의 물리·화학적 성질 변형은 산림생태계의 건전한 복구에 부정적인 영향을 줄 수 있다(Shrestha and Lal, 2011; Zipper et al., 2013; Feng et al., 2019). 또한, 광물 자원의 채굴이 완료된 지역의 경우 침식, 비산 먼지, 미세 광물질 입자에 의한 수질 오염 등을 최소화하기 위하여 지표면의 신속한 식생 복원이 필수적이다. 이러한 중요성 때문에 국외에서는 노천 채굴 지역을 대상으로 토양 성질에 기반을 둔 식생 복원의 중요성을 강조하고 있으며(Zipper et al., 2013; Feng et al., 2019; Hogberg et al., 2020; Lane et al., 2020), 성공적인 식생 복원의 가장 중요한 요인으로 토양의 물리·화학적 성질 개선을 제시하고 있다(Shrestha and Lal, 2011; Buta et al., 2019).

국내 광물 중 노천 채굴의 대표적 자원인 고령토는 도자기 원료, 제지용 코팅제, 충전제, 타일, 내화물, 페인트, 화장품 등의 산업용 원자재로 이용되고 있다(Moon et al., 2016). 2019년에 조사된 결과에 따르면 국내 고령토 광산은 약 91개로 102개의 석회석 광산 다음으로 가장 많이 가행되고 있는 것으로 알려져 있다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2020). 그러나 국내 고령토 채굴지는 대부분 산림에 위치하여 채굴 과정 동안 지상부 임목과 지하부 뿌리 등의 산림 바이오매스가 제거되고 채취 및 운반 같은 작업과정 동안 원래 산림토양 고유의 성질은 크게 변형되게 된다. 한편, 고령토 채굴이 완료된 지역의 경우 고령토 폐석(kaolinite tailings)을 기반으로 산지관리법 시행규칙에 따라 60 cm 이상 객토 후 식생 복원이 이루어지고 있으나, 폐광지나 폐채석

장 복원(National Institute of Forest Science, 2015)과는 다른 양상을 보일 것으로 예측된다.

본 연구는 국내에서 고령토 매장량이 가장 많으며 현재 노천 채굴에 의한 생산이 활발한 경상남도 산청지역 고령토 채굴지를 중심으로 고령토 폐석지, 식생 복원지, 인접 천연림인 소나무 임분의 토양 물리·화학적 성질을 비교하여 식생 복원을 위한 기초자료 제공을 목적으로 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황

본 연구는 현재 고령토 채굴이 활발하게 이루어지는 경상남도 산청군 금서면을 대상으로 6개 지역을 조사지로 선정하고(Figure 1), 2019년 7월 현장 조사를 실시하였다. 선정된 조사지의 방위는 동향이 대부분이었고, 해발고의 경우 290~540 m의 산지에 분포하였다. 최근 30년간(1981~2010) 조사지의 연평균 기온은 12.8°C, 강수량은 1,556.6 mm yr<sup>-1</sup>이다(Korea Meteorological Administration, 2017). 이 지역 산림토양은 호상편마암(biotite gneiss)과 화강편마암(granite gneiss)을 모재로 생성된 갈색약건산림토양형(B<sub>2</sub>)이 주로 분포한다. 고령토 광상은 선캠브리아기에 생성된 지리산 편마암 복합체에 관입된 회장암(anorthosite)질 암으로 구성된 지역에 산재하며, 양호한 배수 조건과 온난 습윤한 기후조건에서 심한 용탈 작용으로 생성된 10~30 m의 고령토질 풍화대(kaolin weathering profile)가 발달하고 있는 것으로 알려져 있다(Jeong and Kim, 1994). 이 지역의 고령토 생산은 대부분 노천 채굴이 이루어지기 때문에 산림 식생 파괴가 매우 심한 편이며 채굴 과정 동안 토양생성과정에서 발달한 비옥한 표토가 제거되고 자원함량이 낮은 광물 폐기물(mine spoils)을 이용하여 평탄 작업을 실시하거나, 절·성토 비탈면에 객토하고 파종 공법이나 떼붙이기, 묘목 식재 공법 등에 의한 복원이 실시되었다(Figure 1). 조사구는 고령토 폐석을 대상으로 지면 평탄작업이 실시된 “고령토 폐석지”, 식생 복원 수종이나 초종이 최근에 식재된 “식생 복원

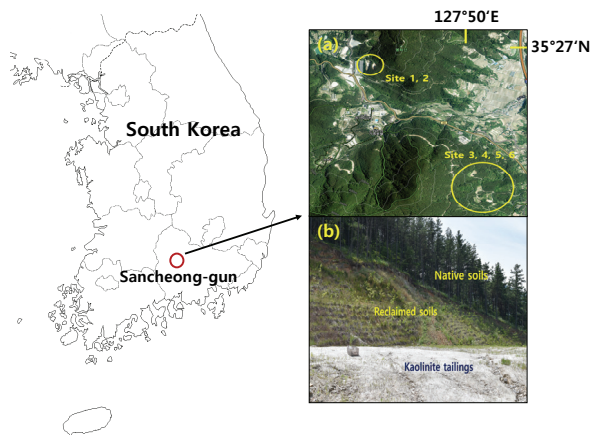


Figure 1. Location of the study sites (a), and kaolinite tailings, reclaimed soils, native (red pine forest) soils (b) of opencast kaolinite mines in Sancheong-gun.

지”, 고령토 폐석지와 식생 복원지에 인접한 “소나무 임분”을 대상으로 하였다(Figure 1). 고령토 채굴지에 인접한 소나무 임분의 평균 임령은 43년, 임분밀도는 1,050본  $ha^{-1}$ , 평균 흉고직경 25.9 cm, 평균 수고 16 m였다. 식생 복원지는 상수리나무(*Quercus acutissima* Carruth.) 1개소, 잣나무(*Pinus koraiensis* S. et. Z.) 1개소 외에는 목본 식생이 식재되지 않았으며, 파종된 초본 식생으로 큰김의털(*Festuca arundinacea* Schreb.) 5개소와 비수리(*Lespedeza cuneata* G. Don) 1개소였다. 한편, 일부 식생 복원지는 침입 식생으로 물오리나무(*Alnus incana* (L.) Medik.), 아까시나무(*Robinia pseudoacacia* L.), 싸리류(*Lespedeza* spp.) 등이 점상으로 분포하였다. 고령토 폐석지는 식생이 분포하지 않거나 드물게 초본 식생이 분포하였다.

## 2. 토양 성질 분석

고령토 폐석지, 식생 복원지, 인접 소나무 임분의 토양 성질은 400  $cm^3$  수집면적의 원통형 토양채취기를 이용하여 조사구별 임의로 선정된 3개소로부터 0~10 cm 깊이에서 토양 시료를 채취한 후(총 54점: 3처리 × 3반복 × 6조사구), 지퍼 백에 밀봉하고 실험실로 운반하였다. 채취한 시료 중 일부(총 18점: 3처리 × 6조사구)는 온풍 건조기에서 105°C로 48시간 이상 건조 후 토양 용적밀도와 고상, 액상, 기상을 계산하였으며, 나머지 시료(총 36점: 3처리 × 2반복 × 6조사구)는 2주일 이상 음건 후 2 mm체로 선별하여 석력 함량비를 계산하고 토양 물리·화학적 성질 분석용 시료로 조제하였다. 토양 입경 분포는 비중계법을 이용하여 온도에 따른 침강 속도와 측정시간을 보정하여 모래, 미사, 점토함량을 USDA 입경 분포 기준에 따라 결정하였다(Korea Forest Research Institute, 2014). 토양 pH는 이온전극(Model-735, ISTEK, Korea)을 이용하여 1:5

(토양:증류수) 혼합액으로부터 측정하였고, 전기전도도는 EC 측정기(Orion 3 Star-Conductivity, Singapore)를 이용하였다. 유기탄소 및 전질소 농도는 토양 건조량 시료를 0.420 mm체를 이용하여 시료를 조제한 후 대용량 원소 분석기(Vario Macro cube, Germany)를 이용하여 분석하였다. 인, 포타슘, 칼슘, 마그네슘 농도는 2.5 g의 건조 토양에 암모늄 아세테이트 용액 55 ml를 첨가하여 16시간 동안 진공 추출하고(Kalra and Maynard, 1991) 추출한 용액을 ICP(Perkin Elmer Optima 8000, USA)를 이용하여 분석하였다.

## 3. 토양구조 안정지수

고령토 폐석지, 식생 복원지, 소나무 임분을 대상으로 구조붕괴 위험성을 평가하기 위해 토양구조 안정지수(Structural Stability Index, SSI)를 아래 식 1에 의해 계산하였다(Pieri, 2012).

$$SSI = \frac{100 \times \text{토양 유기물 농도}(\%)}{(\text{점토함량} + \text{미사함량})} \quad (1)$$

토양 유기물 농도는 토양 유기탄소 농도에 1.724의 상수를 곱하여 환산하였다(Maiti, 2013). 토양구조 안정지수의 경우 > 9% 이상은 안정된 구조, 7% < SSI < 9%는 구조 붕괴 위험이 낮음, 5% < SSI < 7%는 구조 붕괴 위험이 높음, < 5%는 구조가 붕괴되는 것으로 알려져 있다(Pieri, 2012; Zhang et al., 2016).

## 4. 자료 분석

본 조사 과정에서 수집된 고령토 폐석지, 식생 복원지, 소나무 임분의 토양 성질 차이에 대한 자료는 SAS의 일반 선형모형(GLM)을 이용하여  $P < 0.05$  수준에서 검정하였다. 처리 간 유의성이 있는 경우 사후 비교는 Tukey 방법을 이용하였다(SAS Institute, 2003). 고령토 폐석지, 식생 복원지, 소나무 임분의 토양 성질 사이 상관성은 Canoco 5.1(Ter Braak and Šmilauer, 2018)을 이용하여 주성분 분석(Principle Component Analysis, PCA)을 실시하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 토양의 물리적 성질

#### 1) 토양 용적밀도

토양 용적밀도는 고령토 폐석지가 1.51  $g\ cm^{-3}$ 로 식생 복원지 1.19  $g\ cm^{-3}$ 나 소나무 임분 0.93  $g\ cm^{-3}$ 에 비해 유의적으로 높았다(Table 1). 토양 용적밀도는 토양의 훼손 정도를 평가하는 가장 중요한 토양 성질로 알려져 있으며

**Table 1. Soil physical properties in kaolinite tailings, reclaimed soils, and native (red pine forest) soils of opencast kaolinite mines in Sancheong-gun.**

Treatment	Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	Coarse fragment (g g <sup>-1</sup> )	Soil three phase (%)			Particle size distribution (%)		
			Solid	Liquid	Air	Sand	Silt	Clay
Kaolinite tailings	1.51 (0.04) <sup>a</sup>	0.29 (0.03) <sup>b</sup>	57.10 (1.38) <sup>a</sup>	28.67 (1.25) <sup>a</sup>	14.24 (1.52) <sup>c</sup>	59.00 (3.71) <sup>a</sup>	26.17 (1.92) <sup>b</sup>	14.83 (2.52) <sup>b</sup>
Reclaimed soils	1.19 (0.03) <sup>b</sup>	0.43 (0.04) <sup>a</sup>	45.04 (1.31) <sup>b</sup>	29.00 (1.30) <sup>a</sup>	25.96 (1.75) <sup>b</sup>	41.83 (7.51) <sup>a</sup>	39.50 (5.00) <sup>a</sup>	18.67 (2.86) <sup>b</sup>
Native soils	0.93 (0.03) <sup>c</sup>	0.35 (0.03) <sup>ab</sup>	34.95 (1.17) <sup>c</sup>	32.44 (1.11) <sup>a</sup>	32.61 (1.99) <sup>a</sup>	15.83 (5.36) <sup>b</sup>	50.50 (2.74) <sup>a</sup>	33.67 (3.96) <sup>a</sup>

Values in parenthesis are standard error. Different letters in each column indicate a significant difference among treatments at  $P < 0.05$ .

(Pouyat et al., 2007), 고령토 폐석지나 식생 복원지의 높은 토양 용적밀도는 1) 고령토 채굴 과정에서 사용되는 굴삭기 같은 장비에 의한 답압, 2) 채굴된 백토의 운송과정 동안 대형 트럭에 의한 지표면 교란, 3) 유기물 함량이 낮고 생물학적 활동이 빈약한 광물 폐석이나 복원 토양의 본질적 성질, 4) 복원 과정 동안 발생하는 인위적인 교란, 5) 모래 같은 조립질 입자의 높은 비율(Table 1) 등이 원인으로 사료 된다. 미국 오하이오주 노천 채굴 석탄 광산지의 식생 복원지는 인접한 미교란 자연림의 토양에 비해 토양 용적밀도가 6~54% 정도 증가하여 1.11~1.69 g cm<sup>-3</sup> 정도였으며(Shrestha and Lal, 2011), 이는 본 연구에서 조사된 값과 유사한 범위였다. 그러나 객토가 실시된 식생 복원지는 고령토 폐석지에 비해 토양 용적밀도가 유의적으로 낮았으며, 우리나라 산림토양 B층의 평균 토양 용적밀도인 1.04 g cm<sup>-3</sup>(Jeong et al., 2003)와 큰 차이는 없었다. 한편, 복원 식생의 식재 과정 동안 토양의 물리적 혼합, 식생 뿌리의 침투로 토양 공간 확보 및 토양구조 개선, 식물 뿌리의 신장에 따른 토양 내 공극 증가 등도 식생 복원지의 토양 용적밀도에 영향을 끼칠 수 있는 요인으로 사료된다(Zhang et al., 2016).

### 2) 석력 함량

토양 내 석력 함량은 고령토 폐석지 0.29 g g<sup>-1</sup>, 식생 복원지 0.43 g g<sup>-1</sup>, 소나무 임분 0.35 g g<sup>-1</sup>로 고령토 폐석지가 가장 낮았다(Table 1). 고령토 폐석지의 낮은 석력 함량은 고품위 고령토의 정선이 완료된 후 광물 폐기물이 주로 잔재되어 있기 때문으로 사료된다. 또한, 석력 함량은 식생 복원지와 소나무 임분과 유의적인 차이가 없었으며, 이는 객토 토양이 주로 인접한 산림토양으로부터 유입되어 공간적 변동이 크지 않았기 때문일 수 있다. 석력 함량은 뿌리 발달, 뿌리 생육 깊이, 수분 보유력, 양분 수송 능력 등에 영향을 끼치며 일반적으로 노천 광산 지

역의 식생 복구를 위한 석력 함량은 0.60 g g<sup>-1</sup> 이하가 적합한 것으로 알려져 있다(Zipper et al., 2013).

### 3) 토양 삼상

토양 삼상 중 고상은 모래 함량이 높아 토양 용적밀도가 크게 나타난 고령토 폐석지가 57.10%로 소나무 임분의 34.95%보다 유의적으로 높았다. 기상의 경우 고령토 폐석지는 14.24%로 높은 모래 함량과 토양 답압으로 인하여 소나무 임분의 32.61%에 비해 낮게 나타났다(Table 1). 소나무 임분의 높은 기상 값은 토양입단구조의 발달과 함께 토양 내 대공극뿐만 아니라 미소공극이 많이 분포하기 때문으로 사료된다. 액상의 경우 고령토 폐석지나 소나무 임분 간 유의적인 차이가 없었으며, 이는 고령토 폐석지의 낮은 기상 값에 따른 액상 비율의 상대적인 증가가 원인으로 사료된다. 한편, 고령토 폐석지의 낮은 기상 값은 토양공기와 토양수분 교환 능력에 영향을 끼칠 수 있으며, 일반적으로 기상이 10% 이하인 산림토양의 경우 식물 생육에 영향이 있는 것으로 알려져 있다(Lipiec and Hatano, 2003).

### 4) 토양 입경분포

모래함량은 소나무 임분이 15.8%로서 고령토 폐석지 59%나 식생 복원지 41.8%에 비해 유의적으로 낮았으나, 미사나 점토 같은 세립질 입자는 유의적으로 높은 값을 보였다(Table 1). 이는 소나무 임분의 경우 1) 고령토가 채굴되지 않아 점토 광물인 카올리나이트가 풍부하기 때문이거나, 2) 상층 식생 및 유기물층의 발달로 인하여 세립질 입자의 용탈이 최소화되었기 때문일 수 있다. 소나무 임분과는 대조적으로 고령토 폐석지와 식생 복원지의 높은 모래 함량은 점토 광물이 거의 잔존하지 않고 모래 성분이 풍부한 장석질 백토(feldspar rich white soil)가 분포하기 때문이다(Moon et al., 2016). 또한, 고령토 폐석지와

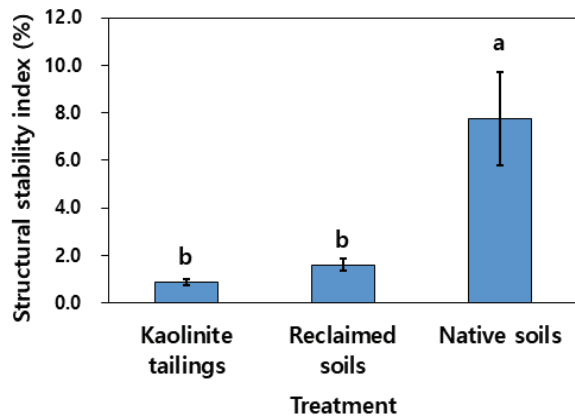


Figure 2. Structural stability index in kaolinite tailings, reclaimed soils, and native (red pine forest) soils in opencast kaolinite mines in Sancheong-gun. Vertical bars are standard error. Different letters on the bars indicate a significant difference at  $P < 0.05$ .

식생 복원지의 낮은 미사 및 점토함량은 지표면의 노출과 함께 강우나 바람으로 인하여 세립질 입자의 침식이나 용탈이 발생하였기 때문일 수 있다(Bradshaw, 1997). 한편 노천 광산지의 식생 복원을 위한 적합한 토성급은 사양토, 양토, 사질식양토로 알려져 있으며(Zipper et al., 2013; Feng et al., 2019), 본 연구에서 조사된 식생 복원지 토성급은 양토로써 복원에 적합한 토성급으로 나타났다.

5) 토양구조 안정지수

노천 채굴 고령토 광산의 토양구조 안정지수는 고령토 폐석지가 0.87%, 식생 복원지 1.61%, 소나무 임분 7.75%로, 고령토 폐석지와 식생 복원지 모두 토양구조가 안정화되지 않은 상태로 나타났다(Figure 2). 이는 식생 복원지의 경우 복구 초기단계로 식생의 피도가 낮아 지표면이 노출되고(Figure 1), 식생으로부터 토양에 환원되는 유기물 함량이 낮기 때문으로 사료된다. Zhang et al.(2016)은 중국의 노천 채굴 광산 식생 복원지의 토양구조 안정지수는

5% 이하로 보고하고 있으며, 고령토 폐석지나 식생 복원지 모두 중국에서 조사된 범위에 분포하였다.

2. 토양의 화학적 성질

1) 토양 pH 및 전기전도도

토양 pH는 고령토 폐석지 pH 6.68, 식생 복원지 pH 6.27, 소나무 임분 pH 5.31로 고령토 폐석지가 식생 복원지나 소나무 임분에 비해 유의적으로 높았다(Table 2). 고령토 폐석지나 식생 복원지의 토양 pH가 소나무 임분에 비해 높은 것은 1) 표토층 및 임상 제거에 따른 부식산 유입 감소, 2) 식생 제거에 따른 토양 양이온 흡수 및 수소이온 방출 감소, 3) 표토에 비해 염기성 양이온 함량이 높은 토양 모재 노출 등이 원인으로 사료된다(Weil and Brady, 2017; Binkley and Fisher, 2020). 일반적으로 노천 광산 채굴지의 경우 인접 산림지에 비해 토양 pH가 4~31% 정도 높게 나타나는 것으로 알려져 있으며(Shrestha and Lal, 2011), 본 연구 결과도 유사한 경향을 보였다. 식생 복원에 있어 적합한 토양 pH는 5.5~6.5 정도(Zipper et al., 2013)로, 본 조사구의 토양 pH는 식생 복원에 문제가 될 정도는 아니었다. 한편, 식생 복원지의 토양 pH가 고령토 폐석지에 비해 낮게 나타난 것은 1) 객토된 토양의 본질적인 성질, 2) 복구 식생의 양이온 흡수 동안 수소이온 방출, 3) 식생 뿌리로부터 방출되는 유기산 증가, 4) 복원 식생으로부터 유입된 유기물의 분해과정 동안 생성되는 부식산 등이 복합적으로 작용한 결과일 수 있다.

토양 전기전도도의 경우 고령토 폐석지가  $144 \mu\text{S cm}^{-1}$ 로 식생 복원지  $134 \mu\text{S cm}^{-1}$ 에 비해 높으나 유의적인 차이는 없었다(Table 2). 본 연구 결과는 일반적으로 광물 폐석지 같은 미풍화 모재는 식생 복원지 같은 풍화 모재에 비해 전기전도도가 높게 나타나는 경향과 유사하였다(Zipper et al., 2013). 토양 전기전도도는 식물 생산력과 밀접한 관련이 있는 토양의 물리·화학적 성질을 통합하는 지표로 알려져 있으며(Shrestha and Lal., 2011), 토양

Table 2. Soil chemical properties in kaolinite tailings, reclaimed soils, and native (red pine forest) soils of opencast kaolinite mines in Sancheong-gun.

Treatment	pH	EC ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	TN ( $\text{mg g}^{-1}$ )	OC ( $\text{mg g}^{-1}$ )	C/N	Avail. P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Exchangeable cation ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ )			
							K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
Kaolinite tailings	6.68 (0.09) <sup>a</sup>	144.9 (15.7) <sup>a</sup>	0.07 (0.03) <sup>b</sup>	2.12 (0.41) <sup>b</sup>	52.5 (14.3) <sup>a</sup>	1.87 (0.50) <sup>a</sup>	0.08 (0.02) <sup>b</sup>	8.13 (1.54) <sup>a</sup>	0.52 (0.13) <sup>b</sup>	0.15 (0.03) <sup>ab</sup>
Reclaimed soils	6.27 (0.08) <sup>b</sup>	133.8 (18.1) <sup>a</sup>	0.31 (0.04) <sup>b</sup>	5.00 (0.51) <sup>b</sup>	16.1 (0.6) <sup>b</sup>	2.25 (0.90) <sup>a</sup>	0.21 (0.03) <sup>a</sup>	9.23 (1.14) <sup>a</sup>	1.61 (0.38) <sup>a</sup>	0.18 (0.05) <sup>a</sup>
Native soils	5.31 (0.10) <sup>c</sup>	168.3 (22.4) <sup>a</sup>	2.08 (0.44) <sup>a</sup>	36.03 (7.71) <sup>a</sup>	17.3 (0.7) <sup>b</sup>	1.08 (0.88) <sup>a</sup>	0.30 (0.03) <sup>a</sup>	4.58 (1.50) <sup>a</sup>	0.91 (0.11) <sup>ab</sup>	0.04 (0.02) <sup>b</sup>

TN: total nitrogen; OC: organic carbon. Values in parenthesis are standard error. Different letters in each column indicate a significant difference among treatments at  $P < 0.05$ .



pH, 토성, 토심, 식생 복구 경과 시간, 풍화 정도 등 다양한 요인이 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(Feng et al., 2019). 그러나 고령토와 같이 규산염 광물을 많이 포함하는 광물 폐석지의 경우 이들 요인에 의해 뚜렷한 경향이 나타나지 않는 것으로 알려져 있다(Emerson et al., 2009). 본 조사구의 전기전도도는 식생복원에 영향을 줄 정도로 높지 않았으며, 타 연구에서 조사된 노천 광산 채굴지의 전기전도도는 119~349  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , 자연림은 43~154  $\mu\text{S cm}^{-1}$  정도로 알려져 있다(Shrestha and Lal, 2011).

## 2) 토양 양분 농도

토양 유기탄소 농도는 고령토 폐석지 2.12  $\text{mg g}^{-1}$ , 식생 복원지 5.00  $\text{mg g}^{-1}$ , 소나무 임분 36.03  $\text{mg g}^{-1}$ 로, 고령토 폐석지와 식생 복원지는 유의적인 차이가 없었으나, 소나무 임분에 비해 매우 낮은 값을 보였다(Table 2). 전질소 농도도 고령토 폐석지 0.07  $\text{mg g}^{-1}$ , 식생 복원지 0.31  $\text{mg g}^{-1}$ , 소나무 임분 2.08  $\text{mg g}^{-1}$ 로 유기탄소 농도에서 나타난 결과와 유사한 경향을 보였다. 유사한 결과로 미국 오하이오주 노천 석탄 채굴 광산지의 토양 내 전질소 농도는 유기탄소 농도와 유의적인 정의 상관( $r = 0.90$ )이 있었다(Shrestha and Lal, 2011). 한편, 고령토 폐석지의 유기탄소와 전질소 농도가 낮은 것은 식생이 거의 분포하지 않아 낙엽·낙지나 세균 등의 분해를 통한 유기물 유입이 발생하지 않았기 때문이며(Wang et al., 2016), 최근 조성된 식생 복원지의 경우도 생육이 불량하고 유기물층(organic horizon)이 미발달하여 유기물의 광물질 토양층에 환원이 활발하지 않았기 때문이다. 미국 오하이오주 노천 석탄 채굴 복원지 토양 0~15 cm 깊이의 유기탄소 농도는 4.8~12.7  $\text{mg g}^{-1}$ , 인접 미교란 산림지는 20.6~39.3  $\text{mg g}^{-1}$ 로서(Shrestha and Lal, 2011), 본 연구에서 조사된 국내 고령토 채굴지의 식생 복원지나 소나무 임분의 유기탄소 농도와 유사한 경향을 보였다.

C/N비의 경우 식생 복원지는 고령토 폐석지에 비해 유의적으로 낮았으며(Table 2), 소나무 임분과 유의적인 차이는 없었다. 이는 일부 식생 복원지의 경우 비수리가 파종되거나, 물오리나무, 아까시나무, 싸리류 등의 침입 식생에 의한 질소 농도의 증가로 C/N비가 낮게 나타난 것으로 사료된다. 본 연구 결과는 노천 채굴 광산지의 토양 C/N비는 식생 복원지가 미복원지에 비해 낮게 나타나는 결과와 일치한다(Feng et al., 2019).

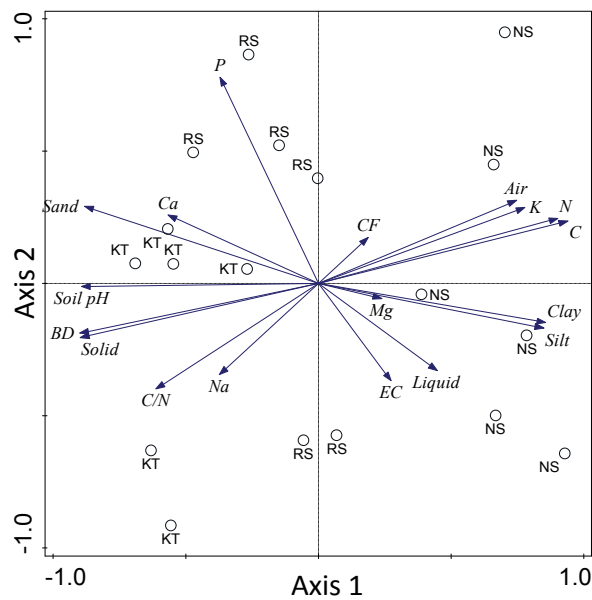
토양 내 유효 인 농도는 고령토 폐석지, 식생 복원지, 소나무 임분 사이에 유의적인 차이가 없었으며(Table 2), 타 연구에서 조사된 결과로 미국 애팔래치아 지역 노천 광산 미복원지의 토양 유효 인 농도 1.8~3.0  $\text{mg kg}^{-1}$ (Zipper et al., 2013)와 유사하였다. 유효 인의 경우 유기물의 분해과

정이나 토양 pH 변동에 따라 농도의 범위가 크며, 본 연구에서 소나무 임분에 비해 높은 pH에도 불구하고 유효 인 농도에 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 노천 광산 복원지나 채굴지에 풍부한 철 산화물(Fe oxides)이 유효 인을 고정하여 난용성 인으로 존재하기 때문이다(Zipper et al., 2013). 한편, 식생 복원지의 낮은 인 농도는 고령토 채굴지의 식생 복원 과정 동안 인산질 비료가 사용되지 않았음을 시사한다(Weil and Brady, 2017).

교환성 양이온 중 포타슘( $\text{K}^+$ ) 농도는 고령토 폐석지 0.08  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , 식생 복원지 0.21  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 로 소나무 임분 0.30  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 에 비해 유의적으로 낮았다(Table 2). 고령토 폐석지의 교환성  $\text{K}^+$  농도가 낮은 것은 수용성인  $\text{K}^+$  이온이 강우 시 표면으로부터 세탈이나 용탈이 발생하였기 때문으로 사료된다. 한편, 고령토 채굴지의 경우 식생 유입 25년 이후에도 인접 산림에 비해 교환성  $\text{K}^+$  농도는 약 25% 정도 낮은 것으로 알려져 있다(Lane et al., 2020). 노천 광산 채굴지 식생 복원에는 교환성  $\text{K}^+$  농도와 밀접한 관련이 있었으며, 미국 버지니아 지역 광산 토양(Showalter et al., 2005)이나 중국의 노천 광산(Wang et al., 2016) 식생 복원지의 경우도 임목 생육과 교환성  $\text{K}^+$  농도와는 정의 상관을 보였다. 칼슘( $\text{Ca}^{2+}$ ) 농도는 고령토 폐석지 8.13  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , 식생 복원지 9.23  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , 소나무 임분 4.58  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 로 고령토 폐석지가 소나무 임분에 비해 높은 값을 보였으나 유의적인 차이는 없었다. 토양 마그네슘( $\text{Mg}^{2+}$ ) 농도는 고령토 폐석지 0.52  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , 식생 복원지 1.61  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , 소나무 임분이 0.91  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 로 식생 복원지가 가장 높은 값을 보였다. 일반적으로 노천 광산 토양에서는 교환성  $\text{K}^+$ 가  $\text{Ca}^{2+}$ 나  $\text{Mg}^{2+}$  같은 양이온에 비해 낮은 농도를 보이는 것으로 알려져 있으며, 고령토 채굴지도 유사한 경향을 보였다. 광산 토양에서 교환성 양이온의 동태는 아직까지 잘 알려져 있지 않으며, 이는  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  같은 교환성 양이온 양분이 대부분 풍화된 모재로부터 유래하여 광산 복원지의 식생 생육에 충분하기 때문으로 알려져 있다(Zipper et al., 2013).

## 3. 고령토 폐석지, 식생 복원지, 소나무 임분의 토양 성질 사이의 상관성

고령토 폐석지, 식생 복원지, 소나무 임분의 토양 성질에 대한 주성분 분석 결과, 가로 축(Axis 1)은 토양 성질 분산에 대하여 61.41%, 세로 축(Axis 2)은 13.6%를 설명하였다. 고령토 폐석지는 칼슘, 모래, 토양 pH, 토양 용적 밀도, 고상, C/N비와 강한 상관관계가 있는 반면에 식생 복원지는 유효 인, 소나무 임분은 점토, 미사, 액상, 전기전도도와 상관성이 높았다. 한편, 토양 성질 중 모래와 점토 및 미사는 부의 상관, 유효 인과 전기전도도, 기상, 포타슘,



**Figure 3. Results of principal component analysis [NS: native (red pine forest) soils, KT: kaolinite tailings, RS: reclaimed soils] of soil physical and chemical properties in opencast kaolinite mines in Sancheong-gun.**

전질소 및 유기탄소 농도와 토양 pH, 토양 용적밀도, 고상 등도 강한 부의 상관성이 있었으며, 토양 용적밀도와 고상, 전질소와 유기탄소 농도 등은 강한 정의 상관성을 보였다 (Figure 3). 유사한 결과로 Shrestha and Lal(2011)은 미국 오키오주 노천 광산 식생 복원지는 토양 용적밀도와 토양 유기탄소 농도 사이에 부의 상관( $r = -0.30$ ), 유기탄소 농도와 전질소는 유의적인 정의 상관( $r = 0.90$ )을 보고한 바 있다.

## 결론

경상남도 산청지역 노천 채굴 고령토 광산의 고령토 폐석지나 식생 복원지는 인접한 소나무 임분에 비해 토양 용적밀도나 모래 함량이 높고 토양구조 안정지수가 낮아 토양 물리적 성질이 열악하였다. 토양의 화학적 성질 중 토양 pH나 전기전도도는 복원 식생의 생육에 영향을 줄 정도는 아니었으나, 토양 유기탄소, 전질소, 유효 인 같은 식물 생육 필수 양분은 인접 소나무 임분에 비해 매우 낮은 수준이었으며, 특히 식생 복원지의 토양 내 낮은 유효 인 수준은 시비 같은 토양 양분 관리가 전혀 실시되지 않고 있는 것으로 나타났다. 본 연구 결과에 따르면 고령토 광산의 식생 복원을 위해서는 토양 용적밀도를 낮추고, 토양 유기물 농도 증진과 질소 및 인 공급 등과 같은 토양 관리가 필수적임을 시사한다.

## 감사의 글

이 논문은 2020~2021년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## References

- Binkley, D. and Fisher, R.F. 2020. Ecology and Management of Forest Soils. 5th ed. John Wiley & Sons Ltd. UK. pp. 440.
- Bradshaw, A. 1997. Restoration of mined lands-using natural processes. *Ecological Engineering* 8(4): 255-269.
- Buta, M., Blaga, G., Paulette, L., Păcurar, I., Roșca, S., Borsai, O., Grecu, F., Sînziana, P.E. and Negrușier, C. 2019. Soil reclamation of abandoned mine lands by revegetation in Northwestern part of Transylvania: A 40-year retrospective study. *Sustainability* 11(12): 3393.
- Cooke, J.A. and Johnson, M.S. 2002. Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals: A review of theory and practice. *Environmental Reviews* 10(1): 41-71.
- Emerson, P., Skousen, J. and Ziemkiewicz, P. 2009. Survival and growth of hardwoods in brown versus gray sandstone on a surface mine in West Virginia. *Journal of Environmental Quality* 38: 1821-1829.
- Feng, Y., Wang, J., Bai, Z. and Reading, L. 2019. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. *Earth-Science Reviews* 191: 12-25.
- Hogberg, J.I., Pinno, B.D. and MacKenzie, M.D. 2020. Evaluating foliar nutrient concentration as an indicator of soil nutrients in reclaimed and natural forests in Alberta, Canada. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 34(2): 75-87.
- Jeong, G.Y. and Kim, S.J. 1994. Genesis of kaolin in the Sancheong district, Korea: Mineralogical and textural study. *Journal of the Geological Society of Korea* 30(3): 262-283.
- Jeong, J., Kim, C., Goo, K., Lee, C., Won, H. and Byun, J. 2003. Physico-chemical properties of Korean forest soils by parent rocks. *Journal of Korean Forestry Society* 92(3): 254-262.
- Kalra, Y.P. and Maynard, D.G. 1991. *Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis*. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-319E. pp. 116.
- Korea Forest Research Institute. 2014. *Methods Manual for Soil and Plant Analysis: Soil physical property*. Research Note 571. pp. 179.

- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. 2020. 2019 yearbook of minerals statistics. pp. 213.
- Korea Meteorological Administration. 2017. 2017 Annual Climatological Reports. pp. 323.
- Lane, M., Hanley, M.E., Lunt, P., Knight, M.E., Braungardt, C.B. and Ellis, J.S. 2020. Chronosequence of former kaolinite open cast mines suggests active intervention is required for the restoration of Atlantic heathland. *Restoration Ecology* 28(3): 661-667.
- Lipiec, J. and Hatano, R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116: 107-136.
- Maiti, S.K. 2013. *Ecorestoration of the Coalmine Degraded Lands*. Springer, London, England. pp. 379.
- Moon, D.H., Han, M.S., Cho, H.G., Kim, M.N. and Kim, J.H. 2016. Applicability as a Dancheong pigment raw materials of Korean low grade kaolin. *Journal of the Mineralogical Society of Korea* 29(4): 179-190.
- National Institute of Forest Science. 2015. Case Study of Vegetation Restoration in Abandoned Mines and Quarry. *Research Note* 614. pp. 92.
- Pieri, C.J.M.G. 2012. *Fertility of soils: A Future for Farming in West African Savanna*. Vol. 10. Springer, Berlin, Germany. pp. 348.
- Pouyat, R.V., Yesilonis, I.D., Russell-Anelli, J. and Neerchal, N.K. 2007. Soil chemical and physical properties that differentiate urban land-use and cover types. *Soil Science Society of America Journal* 71: 1010-1019.
- SAS Institute Inc. 2003. SAS/STAT Statistical software. version 9.1 SAS publishing Cary, NC.
- Showalter, J.M., Burger, J.A., Zipper, C.E. and Galbraith, J.M. 2005. Influence of physical, chemical, and biological mine soil properties on white oak seedling growth. *National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation*. June 19-23, 2005. pp. 1029-1041.
- Shrestha, R.K. and Lal, R. 2011. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. *Geoderma* 161(3-4): 168-176.
- Ter Braak, C.J.F. and Šmilauer, P. 2018. *Canoco Reference Manual and User's Guide: Software for Ordination (Version 5.10)*. Microcomputer Power, Ithaca, NY, USA, pp. 536.
- Wang, J., Wang, H., Cao, Y., Bai, Z. and Qin, Q. 2016. Effects of soil and topographic factors on vegetation restoration in opencast coal mine dumps located in a loess area. *Scientific Reports* 6: 22058.
- Weil, R.R. and Brady, N.C. 2017. *The Nature and properties of soils*. Pearson. Essex, England. pp. 1104.
- Zhang, O., Cui, Y., Zhang, Y., Jia, J., Wang, X. and Zhang, X. 2016. Changes in soil physical and chemical properties following surface mining and reclamation. *Soil Science Society of America Journal* 80(6): 1476-1485.
- Zipper, C.E., Burger, J.A., Barton, C.D. and Skousen, J.G. 2013. Rebuilding soils on mined land for native forests in Appalachia. *Soil Science Society of America Journal* 77(2): 337-349.

---

Manuscript Received : August 31, 2020

First Revision : September 21, 2020

Second Revision : October 12, 2020

Accepted : October 13, 2020