

산청군 고령토 광산 복원지와 인접 소나무 임분의 토양양분 저장량 및 잎 양분 농도 비교

김경태¹ · 김춘식^{2*}

¹경상남도산림환경연구원, ²경상국립대학교 환경산림과학부

Comparisons of Foliar Nutrient Concentrations and Soil Nutrient Stocks Between Restoration Areas and Adjacent Red Pine Stands in Opencast Kaolinite Mines in Sancheong-gun

Kyung Tae Kim¹ and Choonsig Kim^{2*}

¹Gyeongsangnam-do Forest Environmental Research Institute, Jinju 52615, Korea

²Division of Environmental and Forest Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

요 약: 본 연구는 고령토 광산 식생 복원지와 인접 소나무 임분을 대상으로 토양양분 저장량을 비교하고 복원지 식생의 잎 양분 농도와 토양 특성과의 관계를 조사하였다. 경상남도 산청군에 위치한 고령토 광산은 복원 식생으로 목본은 상수리 나무와 잣나무, 초본은 큰감의털과 비수리가 식재 또는 파종되었다. 한편, 일부 식생 복원지는 인접 산림으로부터 유입된 물오리나무, 아까시나무, 싸리류 등이 침입 식생으로 분포하였다. 토양 0~10 cm 깊이의 탄소 및 질소 저장량은 소나무 임분이 식생 복원지에 비해 유의적으로 높았으나($P < 0.05$), 인, 포타슘, 마그네슘 저장량은 유의적인 차이가 없었으며, 칼슘 저장량은 식생 복원지가 높게 나타났다. 식생 복원지에 조성된 비수리 잎 내 질소 농도는 20.28 mg N g⁻¹로 큰감의털 5.67 mg N g⁻¹에 비해 약 3배 정도 높았으나, 포타슘 농도는 비수리가 9.07 mg K g⁻¹로 큰감의털 18.8 mg K g⁻¹에 비해 약 2배 정도 낮았다. 침입 식생인 물오리나무, 싸리류, 아까시나무는 잣나무나 상수리나무 같은 식재 수종에 비해 잎 내 질소 농도가 2~4배 정도 높게 나타났다. 본 연구에 따르면 고령토 광산 식생 복원지의 열악한 토양 특성을 고려할 때 복원 수종으로 질소고정식물을 식재하거나 파종하고 토양 비옥도를 향상할 수 있는 산림 사업이 필요한 것으로 나타났다.

Abstract: We performed this study to determine the foliar nutrient concentration and the nutrient stocks of restoration areas and adjacent *Pinus densiflora* S. et. Z. (red pine) stands in opencast kaolinite mines in Sancheong-gun, Gyeongsangnam-do, southern Korea. We chose six sites to determine foliage nutrient concentrations and the nutrient stocks of soils (0-10 cm depth). The dominant vegetation planted in restoration areas comprised *Quercus acutissima* Carruth., *P. koraiensis* S. et. Z., *Festuca arundinacea* Schreb., and *Lespedeza cuneata* G. Don. Invading vegetation in the restoration areas comprised *Alnus incana* (L.) Medik., *Robinia pseudoacacia* L., and *Lespedeza* spp., among others. The carbon and nitrogen stocks at 10 cm soil depth were significantly higher in the red pine stands than those in the restoration areas, whereas those of phosphorus, potassium, and magnesium were not significantly different between the two areas. However, calcium stocks were significantly higher in the restoration areas than in the red pine stands. Nitrogen concentration in foliage was higher in *L. cuneata* (20.28 mg N g⁻¹) than that in *F. arundinacea* (5.67 mg N g⁻¹), whereas potassium concentration was twice as high in *F. arundinacea* (18.8 mg K g⁻¹) as that in *L. cuneata* (9.07 mg K g⁻¹). Foliar nitrogen concentrations in invasive vegetation such as *A. incana*, *R. pseudoacacia*, and *Lespedeza* spp. were twice or four times higher than those of *Q. acutissima* and *P. koraiensis*. Our results indicate the development of suitable vegetation and soil amendment treatments to improve poor soil environmental conditions in restoration areas are necessary following opencast kaolinite mining.

Key words: foliar nutrients, kaolinite, reclaimed soils, surface mines, vegetation restoration

* Corresponding author
E-mail: ckim@gnu.ac.kr

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

서론

노천 채굴(opencast mining)에 의한 광물 자원의 개발은 지형 및 경관, 토양 성질, 양분 및 수문 순환에 변화를 초래한다(Shrestha and Lal, 2011; Feng et al., 2019). 국내 노천 채굴의 대표적 광물 자원은 고령토로서(Moon et al., 2016), 가행되는 광산의 수가 석회석 광산 다음으로 많은 것으로 알려져 있다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2020). 국내 고령토 채굴지는 대부분 산림지역에 위치하며 노천 채굴로 인하여 식생 및 임상(forest floor)이 제거되고, 양호한 토양 성질을 가지는 표토가 손실되는 등 산림생태계 훼손이 발생하고 있다. 또한 채굴 및 운반 작업 동안 원래 산림토양 고유의 물리, 화학, 생물적 성질은 사라지고 크게 변형되어 건전한 식생 복원에 부정적인 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있다(Zipper et al., 2013; Kim et al., 2020). 한편, 노천 채굴이 완료된 지역은 지표면의 침식 및 토사유실, 비산 먼지, 미세 광물질 입자에 의한 수질 오염 등을 최소화하기 위하여 신속한 식생 복원이 필수적이다(Zipper et al., 2013; Feng et al., 2019).

광물자원의 채굴 후 광산 복원지에 식재된 식생의 양분 농도 분석은 결핍 양분의 진단뿐만 아니라, 복원 식생의 양분 관리, 양분 흡수 특성의 판정에 도움을 주며 식생의 건전한 생육을 위한 지표로 활용할 수 있다(Wilson-Kokes and Skousen, 2014; Hogberg et al., 2020). 예를 들면, 캐나다 앨버타 광산 복원지 북미사시나무(*Populus tremuloides* Michx.)의 잎 양분은 토양 양분의 지표로 사용된 바 있다(Hogberg et al., 2020). 한편, 국내 고령토 광산 복원지는 고령토 폐석(kaolinite tailings)을 기반으로 산지관리법 시

행규칙에 따라 60 cm 이상 객토 후 식생 복원이 이루어지기 때문에 광산 폐석(mine spoils)을 기반으로 식생이 복원되는 일반 폐광지(National Institute of Forest Science, 2015)와는 다른 특성을 보이는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2020).

노천 광산 채굴지의 성공적인 식생 복원을 위해서는 복원지 토양의 성질과 함께 식생의 양분 흡수 기작에 대한 정보가 필요하나 고령토 채굴지 복원 수준의 잎 양분 농도 같은 식생의 반응에 대한 연구는 아직까지 국내에서 미흡한 편이다. 본 연구는 현재도 노천 채굴에 의한 고령토 생산이 활발한 경상남도 산청지역(Kim et al., 2020) 고령토 광산의 식생 복원지와 인접 소나무 임분의 토양 양분 저장량을 비교하고, 복원지 내 수종 및 초종의 잎 양분 농도와 토양 특성과의 관계를 분석하여 수종 선정 및 관리를 위한 기초자료 제공을 목적으로 수행하였다.

재료 및 방법

1. 조사지의 일반현황

본 연구는 산청군 중 고령토 채굴이 활발하게 이루어지는 금서면 특리, 신아리, 평촌리 일원을 대상으로 하였다(Figure 1). 산청군의 최근 30년간(1981~2010) 연평균 기온은 12.8°C, 강수량은 1,556.6 mm yr⁻¹며(Korea Meteorological Administration, 2017), 조사지는 변성암을 모재로 생성된 갈색약건산림토양형(B₂)이 주로 분포하였다. 이 지역은 배수 조건이 양호하고 온난 습윤한 기후조건 아래 용탈(leaching) 작용으로 생성된 10~30 m의 고령토질 풍화대(kaolin weathering profile)가 발달하고 있는 것으로 알려

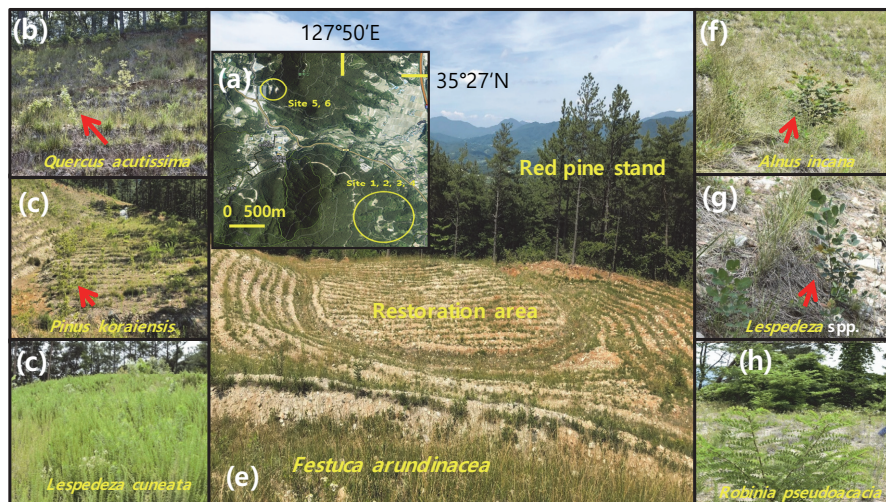


Figure 1. Location of study site (a) of restoration areas and adjacent red pine stands in opencast kaolinite mines in Sancheong-gun. *Quercus acurissima* (b), *Pinus koraiensis* (c), *Lespedeza cuneata* (d) and *Festuca arundinacea* (e) planted in restoration area. *Alnus incana* (f), *Lespedeza* spp. (g), and *Robinia pseudoacacia* (h) invaded in restoration area.

Table 1. General characteristics of the study sites.

Site	Treatment	Location	Elevation (m)	Aspect	Dominant vegetation	Stand age	Stand density (tree ha ⁻¹)	DBH (cm)	Height (m)	Basal area (m ² ha ⁻¹)
1	Red pine stand	35°25'35"N	310	E	<i>Pinus densiflora</i>	47	1,100	29.2	14.3	80.1
	Restoration area	127°50'31"E			<i>Festuca arundinacea</i>	-*	-	-	-	-
2	Red pine stand	35°25'39"N	280	E	<i>Pinus densiflora</i>	46	1,100	25.7	21.0	60.6
	Restoration area	127°50'36"E			<i>Lespedeza cuneata</i>	-	-	-	-	-
3	Red pine stand	35°25'44"N	310	E	<i>Pinus densiflora</i>	42	1,000	25.5	17.0	52.2
	Restoration area	127°50'46"E			<i>Festuca arundinacea</i>	-	-	-	-	-
4	Red pine stand	35°25'51"N	290	NE	<i>Pinus densiflora</i>	39	900	24.6	11.5	47.4
	Restoration area	127°50'37"E			<i>Lespedeza cuneata</i>	-	-	-	-	-
5	Red pine stand	35°26'54"N	470	W	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Pinus rigida</i>	42	1,000	26.4	17.1	55.7
	Restoration area	127°49'45"E			<i>Quercus acutissima</i> , <i>Festuca arundinacea</i>	-	-	-	-	-
6	Red pine stand	35°26'55"N	450	W	<i>Pinus densiflora</i>	42	1,200	23.9	16.1	58.3
	Restoration area	127°49'48"E			<i>Pinus koraiensis</i> , <i>Festuca arundinacea</i>	-	-	-	-	-
Mean Red pine stand						-	-	-	-	-
							(1.21)	(0.75)	(1.29)	(4.62)

*: not determined. Values in parenthesis are standard error.

져 있다(Jeong and Kim, 1994).

고령토 생산은 노천 채굴이 이루어지기 때문에 산림 식생 파괴가 매우 심한 편이며, 자원함량이 낮은 고령토 폐석을 이용하여 평탄 작업을 실시하거나, 절·성토 비탈면에 식생 복원이 실시되고 있다(Kim et al., 2020). 조사지는 고령토를 채굴 후 3년 이내 복원이 실시된 6개 지역을 대상으로(Figure 1) 2019년 7월에 현장 조사를 실시하였다. 조사지의 방위는 동향, 서향, 또는 북동향이었고, 해발고도의 경우 290~470 m의 산지에 위치하였다(Table 1). 조사구는 고령토 폐석을 기반으로 객토 후 복원 수종이나 초종이 식재된 “식생 복원지”와 식생복원지에 인접하며 교란을 받지 않은 “소나무 임분”을 대상으로 하였다(Figure 1). 고령토 채굴지에 인접한 산림은 대부분 소나무 천연림으로 성장추를 이용하여 추정된 임령은 39년에서 47년, 임분 밀도는 900 본 ha⁻¹에서 1,200 본 ha⁻¹으로 나타났다(Table 1). 평균 흉고직경과 수고는 25.9 cm, 16.2 m, 흉고단면적은 47.4 m² ha⁻¹에서 80.1 m² ha⁻¹로 범위가 넓었다. 고령토 채굴지의 복원 식생으로 초본의 경우 5개소는 큰김의털(*Festuca arundinacea* Schreb.), 1개소는 비수리(*Lespedeza cuneata* G. Don)가 파종되었다. 목본 식생은 산림청에서 지정고시한 산림 복원용 자생식물로(Korea Forest Service, 2020) 최근 1~2년 이내에 식재된 잣나무(*Pinus koraiensis* S. et. Z.) 1개소, 상수리나무(*Quercus acutissima* Carruth.)

1개소, 나머지 4개소에는 목본 식생이 식재되지 않았다. 그러나 일부 조사구의 경우 산림 복원용 자생식생은 아니지만 인접 산림으로부터 아까시나무(*Robinia pseudoacacia* L.), 물오리나무(*Alnus incana* (L.) Medik.)와, 산림 복원용 자생식물에 속하는 싸리류(*Lespedeza* spp.) 등이 침입 식생으로 출현하였다(Figure 1).

2. 토양 양분 저장량

토양 양분 저장량을 측정하기 위한 시료는 고령토 채굴지의 식생복원지와 인접 소나무 임분을 대상으로 10 × 10 m크기의 조사구를 구획한 후 임의로 선정된 3개소를 대상으로 400 cm³ 크기의 강철 토양 채취기로 0~10 cm 깊이의 토양 시료를 채취하고(총 36점: 2처리 × 3반복 × 6조사구) 지피백에 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 실험실로 운반된 토양은 건조 후 0.420 mm체를 이용하여 토양 탄소 및 질소 농도 분석 시료를 조제하여 대용량 원소분석기(Vario Macro cube, Germany)를 이용하여 측정하였다. 인, 포타슘, 칼슘, 마그네슘 등은 2.5 g의 건조 토양을 암모늄 아세테이트 용액 55 ml를 첨가하여 16시간 동안 진공 추출하고(Kalra and Maynard, 1991) 추출한 용액을 ICP(Perkin Elmer Optima 5300, USA)로 분석하였다. 토양 층의 양분 저장량은 양분 농도, 토양용적밀도, 시료 채취 깊이, 석력 함량의 용적비 등을 이용하여 계산하였으며,

토양 용적밀도와 석력 함량의 용적비는 동일 조사구의 발표된 자료를 이용하였다(Kim et al., 2020).

결 과

3. 복원지 식생의 잎 양분 농도

광산 복원지의 잎 양분 분석을 위한 시료는 파종되거나 식재된 수종과 침입 수종으로 구분하여 가지가 부착된 잎 부위를 채취하고 지퍼백에 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 운반된 잎 시료는 가지와 잎을 분리한 후 65°C 온풍건조기에 넣고 향량에 도달할 때까지 건조하였다. 건조된 잎 시료는 분쇄기로 곱게 분말을 만든 후 0.420 mm체를 이용하여 양분 분석 시료를 조제하였다. 잎 시료 내 탄소 및 질소 농도는 원소분석기(Thermo Scientific, Flash 2000, Italy), 인, 포타슘, 칼슘, 마그네슘 농도는 분쇄된 시료 0.5 g을 습식분해 후(Kala and Maynard, 1991) 추출된 용액을 대상으로 ICP (Perkin Elmer Optima 5300, USA)를 이용하여 분석하였다.

4. 자료분석

고령토 광산 식생 복원지와 소나무 임분의 토양 양분 저장량은 SAS의 T-test를 이용하여 $P < 0.05$ 수준에서 유의적인 차이를 검정하였다(SAS Institute Inc., 2003). 광산 복원지내 식생과 잎 양분 농도 사이의 관계는 Canoco 5.1 (Ter Braak and Šmilauer, 2018)로 주성분 분석(Principle Component Analysis; PCA)을 실시하였다.

1. 토양 양분 저장량

토양 0~10 cm 깊이의 탄소 및 질소 농도(Table 2)와 저장량(Table 3)은 소나무 임분이 복원지에 비해 유의적으로 높았으며, 인, 포타슘, 마그네슘 저장량은 식생 복원지와 소나무 임분 사이에 유의적인 차이가 없었다(Table 3). 탄소 및 질소 저장량과는 대조적으로 칼슘 저장량은 복원지가 소나무 임분에 비해 크게 나타났다.

2. 복원지 식생의 잎 양분 농도

복원지 식생 수종인 상수리나무 잎은 잣나무 잎에 비해 높은 질소나 칼슘 농도를 보였으나, 인, 포타슘, 마그네슘 농도는 두 수종 간 큰 차이가 없었다(Figure 2). 침입 식생인 물오리나무, 싸리류, 아까시나무 같은 질소고정식물의 잎은 산림복원용 자생식물인 잣나무나 상수리나무 잎에 비해 질소 농도가 2~4배 정도 높았다. 또한, 질소고정식물 잎의 인, 포타슘, 칼슘, 마그네슘 농도 등도 잣나무나 상수리나무 같은 자생식물 복원 수종에 비해 높은 농도를 보였다. 복원지에 조성된 식생 중 비수리[Figure 1(d)]는 큰김의털[Figure 1(e)]에 비해 지표면의 피복 뿐만 아니라 양호한 생육상태를 보이고 있으며, 잎의 질소 농도도 20.28 mg N g⁻¹로 큰김의털 5.67 mg N g⁻¹에 비해 높게 나타났다.

Table 2. Soil nutrient concentration of restoration area and adjacent red pine stands in opencast kaolinite mines in Sancheong-gun.

Treatment	Nutrient					
	Carbon	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Calcium	Magnesium
	(mg g ⁻¹)			(mg kg ⁻¹)		
Restoration area	5.0 (0.5)	0.31 (0.4)	2.25 (0.9)	83 (10)	1,846 (228)	196 (46)
Red pine stands	36.0 (7.7)	2.08 (0.4)	1.07 (0.9)	117 (10)	914 (299)	112 (14)
<i>P</i> -value	0.003	0.003	0.37	0.04	0.03	0.10

Values in parenthesis are standard error.

Table 3. Soil nutrient stocks of restoration area and adjacent red pine stands in opencast kaolinite mines in Sancheong-gun.

Treatment	Nutrient (kg ha ⁻¹)					
	Carbon	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Calcium	Magnesium
Restorationarea	3,370 (470)	204 (30)	1.67 (0.70)	55.65 (7.49)	1,333 (326)	128 (33)
Red pine stands	20,171 (3,193)	1,158 (154)	0.63 (0.52)	71.47 (10.6)	482 (90.6)	66 (10.4)
<i>P</i> -value	0.004	0.004	0.26	0.25	0.03	0.10

Values in parenthesis are standard error.

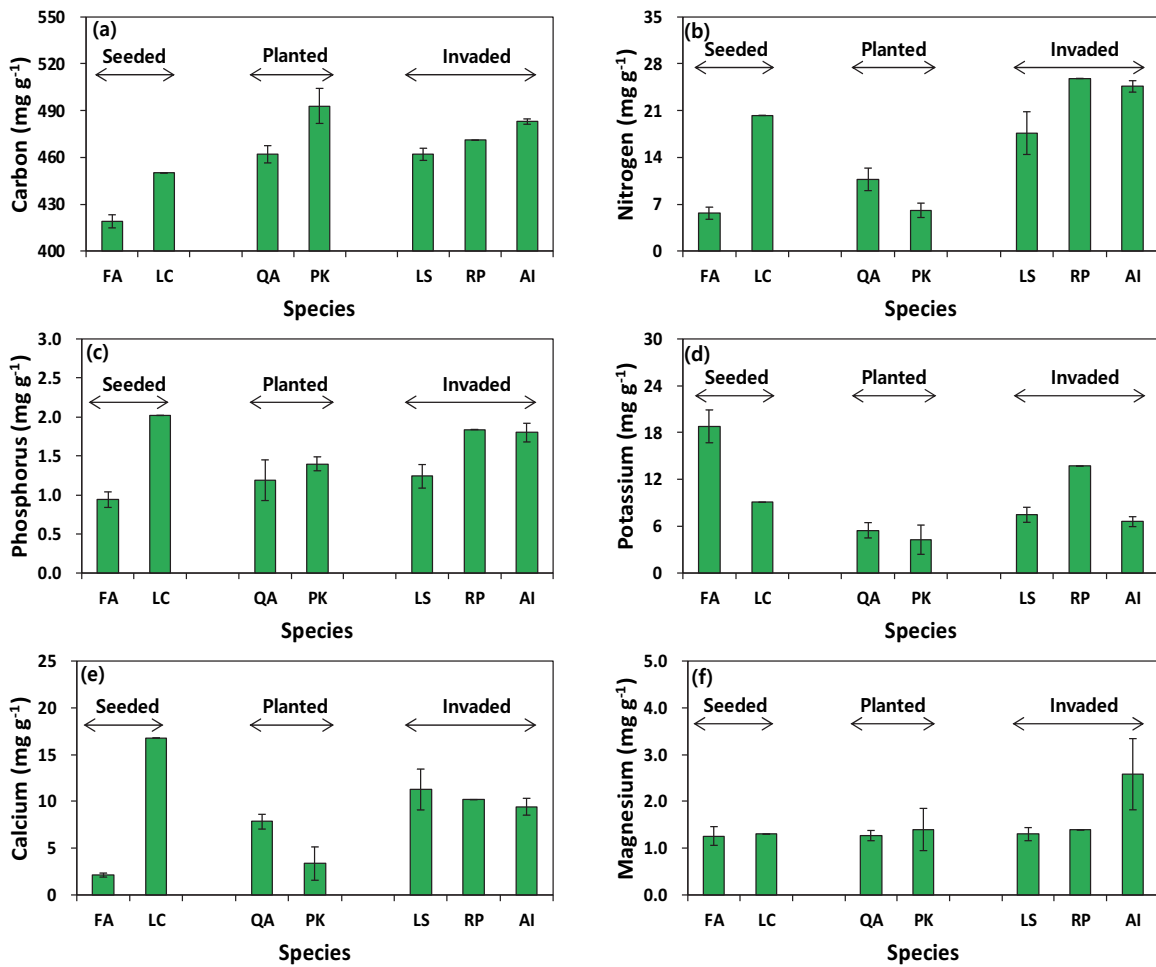


Figure 2. Foliage nutrient concentrations (a: carbon, b: nitrogen, c: phosphorus, d: potassium, e: calcium, f: magnesium) of the vegetation (AL: *Alnus incana*, FA: *Festuca arundinacea*, LC: *Lespedeza cuneata*, LS: *Lespedeza* spp., PK: *Pinus koraiensis*, QA: *Quercus acutissima*, RP: *Robinia pseudoacacia*) in restoration area of opencast kaolinite mines in Sancheong-gun. Vertical bars represent standard error.

탄소, 인, 칼슘 농도도 비수리의 잎이 큰김의털의 잎에 비해 높은 농도를 보였으나(Figure 2), 잎의 포타슘 농도는 큰 김의털이 18.8 mg K g⁻¹로 비수리 9.07 mg K g⁻¹에 비해 약 2배 정도 높았다.

3. 복원지 식생과 잎 양분 농도의 상관성

식생 복원지의 잎 양분 농도에 대한 주성분 분석 결과 가로축(Axis 1)은 잎 양분 농도 분산에 대하여 57.7%, 세로축(Axis 2)은 22.0%를 설명하였다. 식생 복원지의 큰김의털은 포타슘 농도와 강한 상관관계를 보였으며, 질소고정식물인 아까시나무나 싸리류의 경우 질소, 인, 칼슘, 마그네슘 농도와 밀접한 관계를 보였다. 잎 양분 농도의 경우 질소, 칼슘, 인 등은 강한 정의 상관관계, 탄소와 포타슘 농도는 부의 상관성이 있었다(Figure 3).

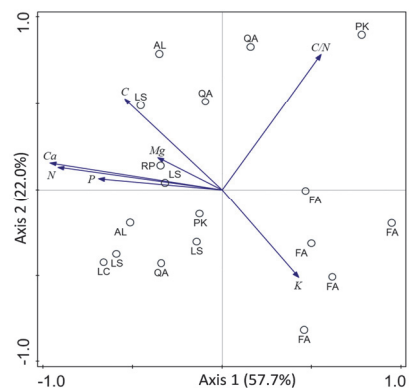


Figure 3. Results of principal component analysis (AL: *Alnus incana*, FA: *Festuca arundinacea*, LC: *Lespedeza cuneata*, LS: *Lespedeza* spp., PK: *Pinus koraiensis*, QA: *Quercus acutissima*, RP: *Robinia pseudoacacia*) of foliage nutrient concentration of the vegetation in restoration areas of opencast kaolinite mines in Sancheong-gun.

고 찰

훼손지 복원을 위한 초본식생으로 큰김의털, 비수리, 서양별노랑이(*Lotus corniculatus* L.), 서양전동싸리(*Melilotus officinalis* Pall), 왕포아풀(*Poa pratensis* L.) 등이 주로 파종된다(Bauman et al., 2015). 미국의 경우 광산 복원지는 큰김의털과 비수리(Bauman et al., 2015)가 가장 많이 파종되며, 본 연구에서 조사된 고령토 광산 복원지도 큰김의털이 주로 파종되었다. 광산 복원지에 조성되는 초본 식물은 세근이 풍부한 근계 시스템을 가지고 있어 토양 침식을 지연하거나 유기물 생산, 토양입단생성 증진 및 안정화, 토양구조 개선 및 답압 완화, 토양 수분 보전 등 다양한 효과를 발휘하는 것으로 알려져 있다(Buta et al., 2019). 그러나 복원지에 큰김의털이나 비수리의 종 풍부도 증가는 식물다양성에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 복원을 위해 식재되는 임목과 양분 및 수분 경쟁이 발생할 수 있다. 한편, 복원지에 분포하는 1~2년생 아까시나무, 물오리나무, 싸리 등은 큰김의털이나 비수리 조성지에 침입 식생으로 산재하였다(Figure 1). Showalter et al.(2005)는 아까시나무나 오리나무 같은 초기 천이종은 광산 복원지에서 잘 생육하고 생존율도 높으며, 하층 초본식생이 도달하지 못하는 곳까지 근계를 발달하여 양분 흡수, 토양 수분 침투율 증가, 토양 물리성 개선, 토양 생물 활동 개선 등의 효과가 있는 것으로 보고하고 있다.

고령토 광산의 식생 복원에 가장 문제가 되는 토양 양분은 질소이며 일반적으로 산림생산력이 낮은 지역에서 식생의 정상적인 생육을 위해서는 최소 800~1,000 kg N ha⁻¹ 정도가 필요한 것으로 알려져 있다(Kendle and Bradshaw, 1992). 고령토 채굴지에 인접한 소나무 임분의 0~10 cm 깊이 토양 내 질소량은 1,158 kg N ha⁻¹로서 식생의 정상적인 생육을 위한 질소량의 기준 값 범위에 분포하나, 식생 복원지의 경우 204 kg N ha⁻¹ 정도로 기준 값의 약 17.6% 정도에 불과하였다. 이러한 지역에 토양 질소량 증가는 질소고정식물인 비수리, 물오리나무, 아까시나무, 사방오리나무 등의 식재가 효과적일 수 있다. 예를 들면, 땅밀림 훼손 복구지에 큰낭아초 같은 질소 고정식물의 식재는 식재 전 토양 질소 농도가 0.3 mg N g⁻¹에서 파종 8년 후 1.4 mg N g⁻¹로 증가하였다(Kim et al., 2015a). 한편, 토양 유기물과 표토층의 생성은 오랜 기간이 소요되며, Larney and Angers(2012)는 캐나다 Saskatchewan주 광산 식생 복원지의 유기물 농도가 인접 미교란지의 수준으로 회복되기까지는 250~350년이 필요한 것으로 보고하고 있다. 유기물 농도의 회복에 장기간 소요되는 문제점 때문에 많은 연구 들은 훼손지 복원을 위해 토양 생물 군집의 다양성과 자생 식생 복원의 seed bank로 제공될 수

있는 표토(topsoils)를 보전하여 사용할 것을 강조하고 있다(Cooke and Johnson, 2002; Zipper et al., 2013; Lane et al., 2020). 토양 칼슘 저장량은 식생 복원지가 1,333 kg Ca ha⁻¹로 소나무 임분 482 kg Ca ha⁻¹보다 높게 나타났다. 이는 산청지역 고령토는 주성분 중 산화칼슘(CaO)이 12.04%로 이산화규소(SiO₂)나 산화알루미늄(Al₂O₃) 다음으로 풍부하기 때문이며(Jeong and Kim, 1994), 소나무 임분의 낮은 농도는 식생에 의한 칼슘 흡수나 용탈 등이 원인으로 사료된다.

잎 양분 농도는 토양의 양분 수준과 밀접한 관련이 있으며, 토양의 양분결핍을 진단할 수 있는 효과적인 도구로 알려져 있다(Binkley and Fisher, 2020). 식생 복원지의 임목 및 하층 식생의 잎 양분 농도는 수종이나 초종 간 차이가 있었다. 예를 들면, 비수리, 물오리나무, 아까시나무, 싸리류 등과 같은 질소고정식물의 질소 농도는 큰김의털이나 상수리나무 및 잣나무 등과 같이 복원을 위해 조성된 수종과 초본 식생에 비해 높은 농도를 보였다. 이와 같은 질소고정식물의 잎 내 높은 질소 농도는 타 연구에서도 관찰된 바 있다(Drysdale et al., 1980; Moon and Haruki, 1999; Kim et al., 2015a). 그러나 식생 복원지 질소고정식물의 잎 질소 농도는 싸리류 17.63 mg N g⁻¹, 물오리나무 24.63 mg N g⁻¹, 아까시나무 25.8 mg N g⁻¹ 정도로 일본에서 조사된 화산지역 일차침입종인 아까시나무 잎 내 질소 농도 42.4 mg N g⁻¹나 오리나무류 27.1 mg N g⁻¹(Moon and Haruki, 1999)에 비해 낮은 값을 보여 식생 복원지의 열악한 토양 환경을 반영하고 있다. 한편, 식재된 상수리나무의 양분 농도는 질소 10.72 mg N g⁻¹, 인 1.19 mg P g⁻¹, 포타슘 5.48 mg K g⁻¹, 칼슘 7.84 mg Ca g⁻¹, 마그네슘 1.27 mg Mg g⁻¹로 울산지역 산불 훼손지에 식생 복원을 위해 식재된 상수리나무의 질소 16.5 mg N g⁻¹, 인 0.7 mg P g⁻¹, 포타슘 6.0 mg K g⁻¹, 칼슘 4.9 mg Ca g⁻¹, 마그네슘 1.4 mg Mg g⁻¹(Kim et al., 2015b)과 비교할 때에 낮은 질소 농도를 제외하고 타 양분 농도는 큰 차이가 없었다. 잣나무 경우도 잎 질소 농도는 6.09 mg N g⁻¹로 산림지역에서 생육하는 잣나무의 잎 질소 농도 18.0 mg N g⁻¹(Yi, 1998)에 비해 매우 낮은 농도를 보이고 있다. 일반적으로 소나무류의 잎은 질소 농도가 10~12 mg N g⁻¹ 이하일 때 상당한 질소 결핍을 의미하는 것으로 알려져 있어(Binkley and Fisher, 2020), 식생 복원지에 식재된 잣나무의 질소 결핍이 심한 것으로 나타났다. 그러나 잣나무 잎 내 인 농도는 1.40 mg P g⁻¹, 포타슘 4.27 mg K g⁻¹, 칼슘 3.36 mg Ca g⁻¹, 마그네슘 1.40 mg Mg g⁻¹로 산림지역에서 생육한 잣나무 잎의 인 농도 2.1 mg P g⁻¹, 포타슘 3.8 mg K g⁻¹, 칼슘 5.9 mg Ca g⁻¹, 마그네슘 1.0 mg Mg g⁻¹과 비교할 때(Yi, 1998) 큰 차이는 없었다. 또한, 침엽수류 잎의 결핍 기준값인 인 1.0 mg

P g¹, 포타슘 3.5~6.0 mg K g¹, 칼슘 1.5 mg Ca g¹, 마그네슘 0.6~0.9 mg Mg g¹(Binkley and Fisher, 2020)와 비교할 때 결핍 기준치 농도 범위나 그 이상에 분포하였다. 이는 소나무 임분과 복원지 토양 사이에 이들 양분 저장량에 유의적인 차이가(Table 3) 나타나지 않거나 식생 복원지의 값이 높게 나타난 것과 유사한 경향을 보인다. 복원을 위해 식재된 임목과 유사하게 초종인 큰김의털의 잎 질소 농도는 5.67 mg N g¹로 벼과 식물의 잎 질소 농도 18.3 mg N g¹(Bae et al., 2018)와 비교할 때 낮은 값을 보였다. 한편, 큰김의털의 포타슘 농도는 18.8 mg K g¹로 타 수종이나 초종에 비해 높은 흡수 특성을 보이고 있으며, 이는 구소 흡수율이 높은 벼과 식물의 경우 포타슘 흡수 및 축적율이 높다는 결과와 일치한다(Bae et al., 2018).

결론

경상남도 산청군에 위치한 노천 채굴 고령토 광산 복원지와 인접한 소나무 임분의 토양 탄소 및 질소 저장량은 복원지가 소나무 임분에 비해 유의적으로 낮았으나 칼슘 저장량은 복원지가 높았으며, 인, 포타슘, 마그네슘 저장량은 유의적인 차이가 없어 양분에 따라 다른 경향을 보였다. 복원지 토양에 가장 문제가 되는 양분은 질소로서 산림 복원용 자생식물로 식재 수종인 상수리나무나 잣나무의 잎 질소 농도는 매우 낮았으나 침입 식생인 아까시나무, 물오리나무, 싸리류는 잎 양분 농도가 높고 생육상태도 비교적 양호하였다. 한편, 비수리는 식생 복원을 위해 가장 많이 파종되었던 큰김의털에 비해 질소, 인, 칼슘 등의 양분 농도가 높고 생육도 양호하여 고령토 광산지의 식생 복원을 위해 권장할 만한 산림 복원용 자생식물 초종이었다. 그러나 식재되거나 파종된 상수리나무, 잣나무, 큰김의털 등은 잎 질소 농도가 낮고 생육상태가 불량하여 이들 지역에는 질소질 성분을 포함하는 토양 개량제 처리 등이 필요할 것으로 나타났다. 본 연구 결과에 따르면, 고령토 광산의 식생 복원을 위해서는 산림 복원용 자생식물로 고시되지 않았지만 복원 초기 단계에 열악한 토양 특성을 개선할 수 있는 물오리나무나 아까시나무 같은 질소 고정식물을 복원용 식물로 고려할 필요가 있는 것으로 나타났다. 또한, 복원지의 토양 탄소 및 질소 저장량은 인접 소나무 임분의 약 17% 정도로 매우 낮게 나타나고 있어 광산 조성 전 토양을 보전하고 복원 시 활용하여 토양으로부터 이들 양분 손실을 최소화할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 경상남도산림환경연구원의 지원에 의해 수행

되었습니다. 시료채취와 분석에 도움을 주신 경상국립대학교 산림토양연구실 대학원 학우들과 논문의 논리적 구성에 도움을 주신 심사자님께 감사드립니다.

References

- Bauman, J.M., Cochran, C., Chapman, J. and Gilland, K. 2015. Plant community development following restoration treatments on a legacy reclaimed mine site. *Ecological Engineering* 83: 521-528.
- Bae, E.J., Kim, C.Y., Yonn, J.H., Lee, K.S. and Park, Y.B. 2018. Effect of silicate fertilizer application on *Zoysiagrass* (*Zoysia japonica* Steud.) field. *Weed & Turfgrass Science* 7(3): 247-257.
- Binkley, D. and Fisher, R.F. 2020. *Ecology and Management of Forest Soils*. 5th ed. John Wiley & Sons Ltd. UK. pp. 440.
- 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.
- Drysdale, R.A., Devlin, T.J., Lillie, L.E., Fletcher, W.K. and Clark, K.W. 1980. Nutrient concentrations in grass and legume forages of northwestern Manitoba. *Canadian Journal of Animal Science* 60(4): 991-1002.
- 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.
- 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.
- Kendle, A.D. and Bradshaw, A.D. 1992. The role of nitrogen in tree establishment and growth on derelict land.

- Arboricultural Journal 16(2): 103-122.
- Kim, C., Ju, N.G., Lee, H.Y. and Lee, K.S. 2013. Effects of fertilizer on growth, carbon and nitrogen responses of foliage in a red pine stand. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 46(1): 1-7.
- Kim, C., Park, J.H., Cho, H.S., Ma, H.S. and Lee, K.S. 2015a. Physicochemical properties of organic and soil horizons in restoration area following forest landslide by creeping soils. *Journal of Agriculture & Life Science* 49(6): 27-35.
- Kim, C., Jeong, J., Park, J.H. and Ma, H.S. 2015b. Growth and nutrient status of foliage as affected by tree species and fertilization in a fire-disturbed urban forest. *Forests* 6(6): 2199-2213.
- Kim, K.T., Baek, G., Choi, B., Ha, J. and Kim C. 2020. Soil physical and chemical properties of kaolinite opencast mines and adjacent red pine forests in Sancheong-gun. *Journal of Korean Society of Forest Science* 109(4): 382-389.
- Korea Forest Service. 2020. Notice of Korea Native Plant and Natural Material Provisions for Forest Restoration. No. 2020-55.
- 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.
- Larney, F.J. and Angers, D.A. 2012. The role of organic amendments in soil reclamation: A review. *Canadian Journal of Soil Science* 92(1): 19-38.
- Moon, D.H., Han, M.S., Cho, H.G., Kim, M.N. and Kim, J.S. 2016. Applicability as a Dancheong pigment raw materials of Korean low grade kaolin. *Journal of the Mineralogical Society of Korea* 29(4): 179-190.
- Moon, H.S. and Haruki, M. 1999. Nutrient distribution and content in plant tissue, forest floor, and litterfall in four pioneer stands on volcano Mt. Showa-Shinzan. *Japanese Journal of Forest Environment* 41(1): 7-11.
- National Institute of Forest Science. 2015. Case Study of Vegetation Restoration in Abandoned Mines and Quarry. Research Note 614. pp. 92.
- 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. *Proceedings America Society of Mining and Reclamation*. 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.
- Wilson-Kokes, L. and Skousen, J. 2014. Nutrient concentrations in tree leaves on brown and gray reclaimed mine soils in West Virginia. *Science of the Total Environment* 481: 418-424.
- Yi, M.J. 1998. Changes in aboveground biomass and nutrient accumulation of the Korean-pine (*Pinus koraiensis*) plantation by stand age at Kangwondo province. *Journal of Korean Forestry Society* 87(2): 276-285.
- 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 : March 10, 2022

First Revision : April 19, 2022

Second Revision : April 25, 2022

Third Revision : April 28, 2022

Accepted : April 29, 2022