

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.3.179>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

## Pine Forest Soil Characteristics and Major Soil Impact Factors for Natural Regeneration

Min-Suk Kim, Yong-Suk Kim<sup>1</sup>, Hyun-Gi Min<sup>2</sup>, Jeong-Gyu Kim<sup>2</sup>, and Namin Koo<sup>1\*</sup>

OJeong Eco Resilience Institute, Korea University, Seoul 02841, Korea

<sup>1</sup>Division of Forest Restoration, National Institute of Forest Sciences, Seoul 02455, Korea<sup>2</sup>Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea\*Corresponding author: [koosor@korea.kr](mailto:koosor@korea.kr)

### ABSTRACT

**Received:** March 27, 2017**Revised:** June 15, 2017**Accepted:** June 22, 2017

This study was conducted to identify characteristics of domestic pine forest soils and to elucidate major soil influencing factors for natural regeneration. We analyzed the physico-chemical characteristics of the soil samples collected from 23 pine forests and confirmed the similar results with the forest soil characteristics. Soil pH, organic matter content, total nitrogen, exchangeable Ca, silt content, and exchangeable Al were selected as the major soil factors among the exposed soils through 10 days of pine seedlings exposure and cultivation experiments and statistical analysis. Multiple regression analysis showed that soil pH had a positive effect on specific root length (SRL) of red pine seedlings and exchangeable Al was a significant factor affecting negative change in SRL. Taken together, the reduction of exchangeable Al by soil pH adjustment would be helpful for natural regeneration by restoring the forest and improving the fine root and root integrity of pine seedlings. Therefore, soil pH and exchangeable Al could be recommended as a major soil factor to be carefully considered in the monitoring and management of soil in pine forests that need to be renewed in the future.

**Keywords:** Exchangeable Al, Factor analysis, Multiple regression, Principal components analysis, Soil pH, Specific root length

Major soil factors (bold character) affecting specific root length of red pine resulted from principal components analysis.

Indicators	PC <sub>1</sub>	PC <sub>2</sub>	PC <sub>3</sub>	PC <sub>4</sub>
Sand	-0.674	-0.076	0.149	-0.041
Silt	0.100	-0.006	0.117	<b>0.896</b>
Clay	-0.140	-0.225	0.091	0.859
pH	0.198	0.010	<b>-0.829</b>	-0.083
Organic matter	<b>0.953</b>	-0.080	-0.047	-0.123
Total nitrogen	<b>0.942</b>	-0.131	-0.100	0.005
Available P	0.212	-0.445	0.589	0.072
CEC	0.835	-0.105	0.240	0.067
K	0.113	0.501	0.358	-0.340
Na	0.277	0.683	0.141	-0.177
Ca	-0.055	<b>0.724</b>	-0.035	0.064
Mg	-0.091	0.710	-0.046	-0.096
Al <sub>ex</sub>	0.076	0.051	<b>0.857</b>	0.081



## Introduction

소나무 (*Pinus densiflora* Sieb.)는 한반도, 일본, 중국 산둥반도, 백두산 동북부 지역에 분포하는 침엽수종으로, 우리나라 대부분 지역에 분포하며 단일 수종으로서는 최대 면적을 차지하는 대표적인 경제수종이다 (Choi et al., 2009; Lee, 2012; Yang, 2002). 1960년대 이후 집중적으로 조성된 산림은 최근에 수확작업을 통한 목재 생산에 이용되고 있으며, 소나무재선충과 같은 병해충 피해, 산불피해, 기후 온난화에 따른 경쟁수종의 번성 등으로 소나무림 면적이 점차 감소하고 있는 실정이다 (Lee et al., 2009). 감소하는 소나무림의 후계림 조성과 관련한 대안으로 인공조림 외에는 사실상 다른 갱신 방법을 찾아보기 힘들며, 수확 및 벌채기에 도달한 우리나라 소나무림은 대부분 중경급 이상으로 기존의 인력과 소형 장비를 이용한 수확 및 벌채 작업 또한 어려운 실정이다 (Kim and Oh, 2013). 또한 소나무림의 분포 지역이 넓어 소나무림 입지환경에 따라 임분의 유형과 밀도, 그리고 형질이 다양하기 때문에 그 관리에 다양한 방법들을 필요로 한다 (Lee et al., 2008). 이를 충족시킬 수 있는 방안으로 천연갱신 방법이 있으며 모수림작업, 개별작업 등이 그 예이다 (Ahn et al., 2015; Lee et al., 2008). 임분의 생산성과 안정성을 유지시킬 수 있는 다양한 천연갱신방법이 개발 및 적용되고 있으나 대부분의 연구들이 임분 내 유전적 다양성과 유전구조, 유전변이, 병해충 등을 중심으로 진행되고 있으며 (Ahn et al., 2015; Hong et al., 2004), 식물생장의 근간이 되는 토양의 특성에 대한 정보와 고찰에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 국내 소나무림의 토양 특성과 고유인자를 확인하고 소나무 유묘 생장에 유효하게 영향을 미치는 토양 인자를 평가함으로써 소나무림 천연 갱신을 위한 토양관리 방안을 도출하기 위해 수행되었다.

## Materials and Methods

**소나무림 토양의 선정과 분석** 본 연구에 사용된 토양은 국립산림과학원에서 구축한 전국 산림토양 모니터링 조사지 중 소나무림 23개소 (곡성, 광주, 군포, 김해, 남양주, 대전, 밀양, 보령, 여주, 영양, 옥천, 원주, 음성, 의성, 익산, 인제, 진주, 창녕, 춘천, 충주, 합천, 홍천, 횡성)에서 채취하였으며, 채취한 토양은 풍건 후 2 mm 체로 걸러서 분석과 소나무 유묘 노출 및 재배에 사용하였다. 모든 토양의 이화학적 특성은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법을 따랐다 (NIAST, 2000).

**소나무 유묘 토양 노출 실험** 소나무 유묘의 초기 생장에 미치는 토양 영향 인자를 확인하기 위해 채취한 토양을 대상으로 노출 실험을 진행하였다. 소나무 (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) 종자는 국립산림품종관리센터의 품질 관리기준 (순량율 93% 이상, 발아율 87% 이상)에 부합하고 2015년 채취된 종자를 제공받아 실험에 사용하였다. 준비된 소나무 종자를 증류수에 24시간 침지한 후 발아를 위해 저온배양기 (25°C, 암조건)에서 10일간 배양하였다. Petri-dish (50 × 10 mm)에 23개의 토양을 각각 25 g씩 넣고 발아한 소나무 유묘를 7개씩 일정한 간격으로 심은 후 배양실에서 10일간 재배하였다. 배양실에서의 소나무 유묘의 재배는  $140 \pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  광도와 주간 (16시간,  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ ), 야간 (8시간,  $18 \pm 2^\circ\text{C}$ )의 광주기 조건에서 실시되었다. 10일간의 재배가 완료된 소나무 유묘는 전량 수거한 후 증류수로 세척하여 뿌리신장을 스캐너 (Epson Perfection V700 Photo)를 이용하여 촬영한 후 이미지 분석 프로그램 (WinRhizo 5.0a, Regent, Canada)을 이용하여 분석하였다. 분석이 종료된 유묘는 60°C dry-oven에서 48시간 건조시킨 후 건중량을 측정하였다.

**데이터 분석** 소나무 유묘의 재배 및 모든 실험은 3반복으로 수행하였으며, 실험 결과는 3반복의 평균값으로 나타내었다. 실험 결과의 통계분석은 SAS 프로그램 (SAS 9.2, USA)를 이용하여 상관분석 (correlation analysis), 요인 분석 (factor analysis), 다중회귀분석 (multiple regression analysis)을 실시하였다.

## Results and Discussion

**소나무림 토양의 이화학적 특성** 국내 23개소 소나무림에서 채취한 토양의 이화학적 특성을 국가산림자원조사 (National Forest Inventory, NFI) 자료 결과와 비교하였다 (Table 1). 그 결과 본 실험에 사용한 23종류 토양의 평균 pH는 4.87, pH가 가장 높은 토양의 pH는 5.89로 모든 토양의 pH가 6 이하로 나타나 약산성을 띠는 것으로 나타났다. 국내 산림토양의 경우 대부분 산성모양을 바탕으로 하고 있으며 최근 도시화 및 산업화의 발달에 의한 산성강하물의 산림 내 유입으로 인하여 낮은 pH가 나타난 것으로 판단된다 (Lee and Park, 2001; Yoo et al., 1998). 실험에 사용한 토양의 모래함량은 평균 54.1%로 가장 높았고 미사, 점토 순으로 감소하는 경향을 나타내었다. 유기물과 총질소의 함량은 각각 3.49%와 0.16%로 전국 평균인 5.45%와 0.22% 보다 소폭 낮게 나타났다. 반면 가용성 인은 실험에 사용한 토양에서 전국 평균 대비 6배 가량 높게 측정되었다. 그 외에 양이온치환능력 (cation exchangeable capacity, CEC) 과 치환성양이온 (K, Na, Ca, Mg) 모두 전국 평균 값과 비슷한 수준으로 나타났다. 이를 종합해볼 때 23개소에 채취한 토양의 이화학적 특성이 전국 평균값 대비 크게 벗어나지 않아 실험에 사용하는 데에 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

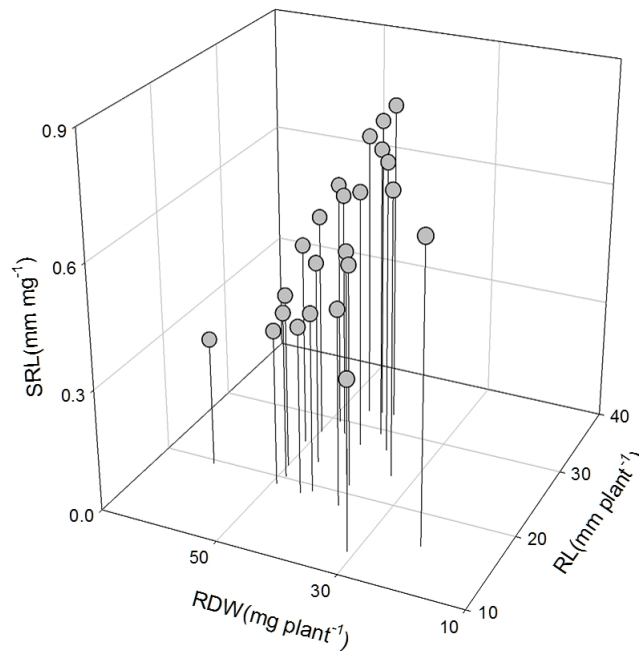
**Table 1.** Soil physico-chemical properties of studied soils (n = 23) and Korean forest soils (n = 898) in National Forest Inventory.

	Unit	Studied soils	NFI <sup>z</sup>
Sand	%	54.1 (20.8-89.5) <sup>†</sup>	42.7 (1.4-94.0)
Silt	%	25.7 (5.0-46.9)	42.5 (4.1-91.6)
Clay	%	20.1 (5.5-45.0)	14.8 (1.9-41.7)
pH		4.87 (4.06-5.89)	4.90 (3.33-7.93)
Organic matter	%	3.49 (0.96-7.40)	5.45 (0.11-28.03)
Total nitrogen	%	0.16 (0.05-0.30)	0.22 (0.01-1.13)
Available P	mg kg <sup>-1</sup>	59.3 (4.3-178.1)	10.7 (0.1-935.1)
CEC <sup>y</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	11.7 (5.2-19.1)	15.3 (3.5-61.7)
K <sup>x</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	0.30 (0.11-0.52)	0.25 (0.04-1.16)
Na <sup>x</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	0.14 (0.05-0.23)	0.09 (0.03-1.78)
Ca <sup>x</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	2.98 (0.40-9.58)	2.25 (0.02-37.90)
Mg <sup>x</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	2.38 (0.17-11.87)	0.81 (0.02-25.18)
Al <sub>ex</sub> <sup>x</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	16.8 (0.2-36.7)	n.d. <sup>w</sup>

<sup>†</sup> Values are expressed as mean, with ranges in parenthesis

<sup>z</sup>Data from National Forest Inventory in Korea, <sup>y</sup>Cation exchange capacity, <sup>x</sup>Exchangeable forms, <sup>w</sup>No data

**소나무 유묘 토양 노출 실험** 지하부 길이 대비 건중량 비 (specific root length, SRL)는 뿌리의 길이를 건중량으로 나누어 계산한 단위로 (mm mg<sup>-1</sup>), 뿌리의 양분흡수 효율과 새로운 뿌리의 형성 및 유지 비용을 표현하기 위한 지



**Fig. 1.** Root length (RL), root dry weight (RDW), and specific root length (SRL) of Korean red pine (*Pinus densiflora* S.) seedlings.

표로 개발되었으며 (Fitter, 1976; Fitter, 1985), SRL 지표의 유용성은 현재에도 많은 연구들을 통해 보고되고 있다 (Cudlin et al., 2007; Ostonen et al., 2007; Ryser, 2006). 본 연구에서 소나무 유묘에서 큰 SRL은 건중량 대비 뿌리의 길이 생장이 큰 것을 뜻하며, 이는 소나무림의 천연 갱신에 있어서 소나무 유묘의 생장 초기 뿌리 활착에 더 유리하게 작용한다는 것을 의미한다. 23개 종류의 토양에서 각각 10일간 재배한 소나무 유묘의 뿌리 신장과 건중량을 측정하였고 SRL을 계산하였다 (Fig. 1). 그 결과 23개 토양 중 황성에서 채취한 토양에 노출된 유묘의 SRL이 가장 낮게 나타났으며 ( $0.3198 \text{ mm mg}^{-1}$ ), 함천에서 가장 높은 SRL 값이 나타났다 ( $0.7915 \text{ mm mg}^{-1}$ ). 23개 토양에 노출된 소나무 유묘의 SRL이 다양하게 나타났으며 이에 영향을 주는 주요 토양 인자를 추출하기 위하여 요인 분석을 수행하였다.

**소나무림 토양 고유 인자 추출** 본 연구에서는 다양한 결과를 나타내는 소나무 유묘의 SRL 해석을 위한 유효한 토양 인자 추출을 위해 요인 분석 (factor analysis) 방법을 이용하였다 (Table 2). 주성분 분석을 이용한 고유인자 추출은 고유값 (eigen value)을 기준으로 1 이상을 나타내는 주성분을 선발하였으며, 각 주성분별로 요인벡터 (eigen vector)의 절대값이 0.5 이상인 토양 인자를 추출하였다 (Andrew et al., 2002b). 동일 주성분내에서 선발된 토양 인자 간 유의한 상관관계 (Pearson 상관계수 기준,  $p < 0.05$ )가 존재할 경우, 요인벡터의 절대값이 가장 큰 토양인자만을 추출하였으며, 요인벡터 값이 0.9 이상인 경우, 유효한 토양인자로 추출하였다. 요인 분석을 통해 산출된 주성분의 고유값 (eigen value)가 1 이상인 4개의 주성분을 선발하였으며 4개의 인자들이 전체에 대해 약 70%의 설명력을 가지는 것으로 나타났다. 그 중 24.2%를 설명하고 있는 주성분 1 (PC<sub>1</sub>)은 고유값 (eigen value)이 가장 높았으며, 주성분 2 (PC<sub>2</sub>) 19.6%, 주성분 3 (PC<sub>3</sub>) 14.1%, 그리고 주성분 4 (PC<sub>4</sub>) 10.8% 순으로 설명하였고 고유값은 각각 2.94, 2.12, 그리고 1.63으로 나타났다. PC<sub>1</sub>은 유기물, 총질소, CEC, 그리고 모래함량과 강한 관계를 나타내고 있었으며 이 요인들 간에는 모두 상관관계 (Pearson 상관계수  $> \pm 0.50$ )가 있는 것으로 나타나 0.9 이상의 요인벡터 (eigen vector)를 갖는

**Table 2.** Eigen vectors of the soil characteristics results from principal components analysis.

Indicators	PC <sub>1</sub>	PC <sub>2</sub>	PC <sub>3</sub>	PC <sub>4</sub>
Eigen value	3.63	2.94	2.12	1.63
Percent (%)	24.2	19.6	14.1	10.8
Cumulative (%)	24.2	43.8	57.9	68.7
Sand	-0.674	-0.076	0.149	-0.041
Silt	0.100	-0.006	0.117	0.896
Clay	-0.140	-0.225	0.091	0.859
pH	0.198	0.010	-0.829	-0.083
Organic matter	0.953	-0.080	-0.047	-0.123
Total nitrogen	0.942	-0.131	-0.100	0.005
Available P	0.212	-0.445	0.589	0.072
CEC <sup>z</sup>	0.835	-0.105	0.240	0.067
K <sup>y</sup>	0.113	0.501	0.358	-0.340
Na <sup>y</sup>	0.277	0.683	0.141	-0.177
Ca <sup>y</sup>	-0.055	0.724	-0.035	0.064
Mg <sup>y</sup>	-0.091	0.710	-0.046	-0.096
Al <sub>ex</sub> <sup>y</sup>	0.076	0.051	0.857	0.081

<sup>z</sup>Cation exchange capacity, <sup>y</sup>Exchangeable forms

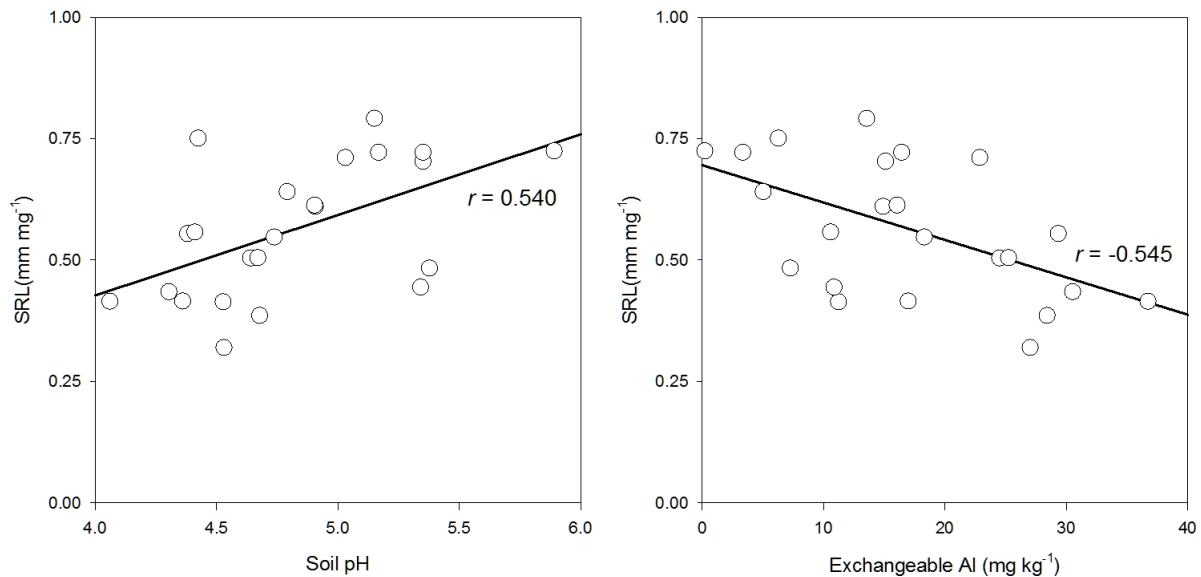
유기물과 총질소를 PC<sub>1</sub>을 설명하는 주요 인자로 선택하였다. PC<sub>2</sub>에서 요인벡터가 큰 토양 특성은 치환성 양이온 4종류(K, Na, Ca, Mg)로 나타났으며, 모두 유의한 상관관계( $r > \pm 0.48$ )를 갖는 것으로 분석되었다. 따라서 가장 높은 요인벡터를 갖는 Ca (0.724)를 PC<sub>2</sub>를 대표하는 주요 인자로 선택하였다. PC<sub>3</sub>에서 토양의 pH와 치환성 Al, 그리고 유효 인산만이 0.5 이상의 요인벡터를 가졌으며, 모두 유의한 상관관계를 나타내 가장 높은 요인벡터를 나타낸 치환성 Al을 PC<sub>3</sub>을 설명할 수 있는 주요 인자로 선택하였다. PC<sub>4</sub>는 미사와 점토가 높은 요인벡터를 나타냈으며 요인벡터가 높은 미사를 PC<sub>4</sub>에 대한 주요 인자로 선택하였다. 실험에 사용된 공시토양의 고유 특성 인자로 유기물, 총질소, 치환성 Ca, 치환성 Al 그리고 미사를 추출하였다. 주성분 분석에서는 고유 인자로 선택되지 않았지만 토양 pH의 경우, 토양 내에서 일어나는 화학반응의 기초 인자로 국내 산림 건강성 평가 지표 (NIFOS, 2016)로 활용되기 때문에 고유인자로 포함하여 분석을 진행하였다.

**토양인자와 소나무 유묘 뿌리생장의 관계** 요인 분석 등을 통해 선발된 토양 인자 (pH, 유기물함량, 총 질소, 치환성 Ca, 미사, 치환성 Al)을 대상으로 소나무 유묘의 SRL에 대한 단계적 다중회귀 (stepwise multiple regression) 분석을 실시하였다 (Table 3). 그 결과 치환성 Al과 토양 pH 인자만이 SRL 회귀식에 유의한 인자로 나타났으며 1단계에서 치환성 Al이 전체 식의 29.7%를 설명할 수 있는 것으로 나타났다 ( $F$ -value = 8.88,  $P$  = 0.007). 2단계에서는 치환성 Al과 함께 토양 pH가 유의한 인자로 확인되었으며 총 36%를 설명 가능한 것으로 나타났다 ( $F$ -value = 5.61,  $P$  = 0.014). 산출된 다중회귀식을 확인해 볼 때 치환성 Al은 소나무 유묘의 SRL에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났고 반면 토양의 pH는 증가할수록 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 다중회귀식에서 유의한 변수로 확인된 두 인자들에 대해 소나무 유묘의 SRL과의 개별적인 상관관계를 분석하였다 (Fig. 2). 유묘의 SRL은 토양 pH

**Table 3.** Stepwise multiple regression analysis of specific root length (SRL) and selected soil parameters (pH, organic matter, total nitrogen, exchangeable Ca, silt content, and exchangeable Al) from principal components analysis (PCA).

Dependent variable	Regression equation	$r^2$	F-value
<i>Stepwise regression</i>			
Specific root length (mm mg <sup>-1</sup> )	$= 0.695 + (-0.008 \times Al_{ex}^z)$	0.297	8.883 ( $P = 0.007$ )
	$= 0.165 + (-0.005 \times Al_{ex}) + (0.100 \times pH)$	0.359	14.493 ( $P = 0.012$ )
<i>Regression (No selection)</i>			
Specific root length (mm mg <sup>-1</sup> )	$= -0.0307 + (-0.0081 \times Al_{ex}) + (0.1203 \times pH) + (0.0006 \times silt)$ $+ (0.0455 \times organic\ matter) + (-0.4301 \times total\ nitrogen)$ $+ (0.0163 Ca_{ex}^y)$	0.487	2.531 ( $P = 0.064$ )

<sup>z</sup>Extractable Al in soil, <sup>y</sup>Exchangeable Ca in soil



**Fig. 2.** The relationship between soil pH, exchangeable Al ( $Al_{ex}$ ) and specific root length (SRL) of *Pinus densiflora* S.

와는 양의 상관관계를, 반대로 치환성 Al 함량과는 음의 상관관계에 있는 것으로 나타나 앞선 다중회귀 분석결과와 동일한 경향의 결과를 확인할 수 있었다. 또한 토양 pH와 치환성 Al간에도 고도의 상관관계 ( $r = -0.687$ )를 나타내었다. 이를 통해 공시토양 조건에서는 낮은 pH로 인한 직접적인 뿌리 정상성장 억제보다 토양 pH 감소로 인한 토양 내 치환성 Al의 증가가 더 유의하게 소나무 유묘 뿌리 생장에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 일반적으로 토양의 pH가 낮아지면 치환성 Al의 농도가 증가하고, 이는 식물 생육을 저해하는 중요한 요인으로 알려져 있다. 낮아진 토양 pH에서 토양 중 Al의 유효도가 증가하고, 증가한 치환성 Al은 식물 잔뿌리 또는 곁뿌리의 발육을 억제하여 전반적으로 식물 뿌리 신장을 저해하는 것으로 알려져 있으며 특히 종자 발아 단계보다는 발아 후 뿌리 초기 신장 단계에서 큰 영향을 미친다 (Hutchinson et al., 1986; Roy et al., 1988; Ulrich et al., 1980). 더하여 식물의 뿌리와 접하거나 뿌리 내로 흡수된 Al은 뿌리의 세포분열, 세포호흡, 효소활성을 저해하고 인산을 고정화하며 세포벽 내 다당류를 축적시켜 세포벽을 견고하게 함으로써 양분의 흡수와 이동을 저해하는 등 다양한 기작으로 식물 뿌리에 독성을 발현시킨다 (Rout et al., 2001). 이를 종합해보면 본 연구의 다양한 소나무림 토양 특성 중 토양의 pH, 유기물함량, 총 질소, 치환성 Ca, 미사, 그리고 치환성 Al이 고유 인자로 평가되었다. 소나무 유묘의 지하부 성장과 토양 인자간의 특성을 분석한 결과, 토

양 pH와 치환성 Al이 유의한 영향을 미치는 주요 영향 인자로 평가되었고 그 영향이 강하여 선행연구에서 확인된 인자들(유기물, 전질소, 치환성 인, Mn 등)은 확인할 수 없었다(Lee et al., 2002; Shin et al., 1999; Yang et al., 2013). 따라서 토양 pH 교정을 통한 Al의 유효도 저감은 치환성 Al을 감소시킴으로써 소나무 유묘의 초기 활착과 원활한 생육을 효과적으로 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## Conclusions

본 연구는 국내 소나무림 토양의 특성을 확인하고 천연갱신을 위한 주요 토양 영향인자를 도출하기 위해 수행되었다. 전국 23개소의 소나무림에서 채취한 토양 시료의 이화학성(토성, pH, 유기물, 총 질소, 유효인산, CEC, 치환성 양이온, 치환성 Al 등)을 측정하였다. 또한 23종류 토양에서 10일 간의 소나무 유묘 노출 및 재배 실험과 통계분석 등을 통해 eigen value가 1 이상인 4개의 주성분을 확인하였고, 13개의 토양 인자들 중 pH, 유기물함량, 총 질소, 치환성 Ca, 미사, 그리고 치환성 Al이 공시토양 중 주요한 토양인자로 선발되었다. 선발된 토양인자를 바탕으로 다중회귀분석을 수행한 결과 토양 pH는 SRL 변화에 양의 영향을 주었고 치환성 Al은 음의 영향을 주는 유의한 인자로 확인되었다. 위 결과를 종합해 볼 때 토양 pH 교정을 통한 치환성 Al의 저감은 임지회복과 소나무 유묘의 세근 및 뿌리 건전성을 증진시킴으로써 천연갱신에 도움이 될 것으로 판단된다. 따라서, 토양 pH와 치환성 Al을 향후 갱신이 필요한 소나무림의 토양 모니터링과 관리에 있어 주의 깊게 살펴보아야 할 주요 토양인자로 추천할 수 있으며 이를 기반으로 지역별 토양 특성과 외부 환경 등을 반영한 실증실험 등 추가적인 연구가 진행되면 현장 적용성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

## References

- Ahn, J.Y., J.W. Lee, S.W. Lee, S.H. Baek, H.I. Lim, and H.S. Kim. 2015. Comparison of genetic variation between pre-practice mature trees and post-practice one-year old seedlings in *Pinus densiflora* natural regeneration stands. *J. Korean For. Soc.* 104:543-548.
- Andrew, S.S., D.L. Karlen, and J.P. Mitchell. 2002a. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production system in Northern California. *Agric. Ecosyst. Environ.* 90:22-45.
- Andrew, S.S., J.P. Mitchell, R. Mancinelli, D.L. Karlen, T.K. Hartz, W.R. Horwath, G.S. Pettygrove, K.M. Cow, and D.S. Munk. 2002b. On-farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agron. J.* 94(1):12-23.
- Choi, J.W., J.I. Kwak, K.J. Lee, and W.K. Choi. 2009. A study for plant community structure and management plant of *Pinus densiflora* forest in Byeonsanbando national park. *Korean J. Environ. Ecol.* 23(5):447-459.
- Cudlin, P., B. Kieliszewska-Rokicka, M. Rudawska, T. Grebenc, O. Alberton, T. Lehto, M.R. Bakker, I. Borja, B. Konopka, T. Leski, H. Kraigher, and T.W. Kuyper. 2007. Fine roots and ectomycorrhizas as indicators of environmental change. *Plant Biosyst.* 141(3):406-425.
- Fitter, A.H. 1976. Effects of nutrient supply and competition from other species on root growth of *Lolium perenne* in soil. *Plant Soil* 45:177-189.
- Fitter, A.H. 1985. Functional significance of root morphology and root system in architecture, p. 87-106. In: A.H. Fitter, D. Atkinson, D.J. Read, and M.B. Usher (eds.) *Ecological interactions in soil*. Oxford, Blackwell.
- Hong, K.N., S.W. Lee, J.M. Chung, K.H. Chang, and B.Y. Kang. 2004. Spatial distribution of genetic variation at a small stand of *Pinus densiflora* regenerated after clearcut in Anmyon island, Korea. *J. Korean For. Soc.*

- 93(1):35-42.
- Hutchinson, T.C., L. Bozic, and G. Muonz-Vega. 1986. Response of five species of conifer seedlings to aluminium stress. *Water Air Soil Poll.* 31:283-294.
- Kim, H.S. and J.H. Oh. 2013. Natural regeneration of red pine and technological convergence for heavy hardwood harvesting. [http://www.sanrimji.com/site/websolution/menu/1368.do?p\\_2518\\_m\\_1\\_scene=article-detail&issueNo=1940&categoryNo=10&articleNo=22517](http://www.sanrimji.com/site/websolution/menu/1368.do?p_2518_m_1_scene=article-detail&issueNo=1940&categoryNo=10&articleNo=22517)
- Lee, S.W. and G.S. Park. 2001. Experimental assessment of forest soil sensitivity to acidification. *J. Korean For. Soc.* 90(1):133-138.
- Lee, K.J., S.W. Bae, J.H. Hwang, K.S. Lee, Y.S. Kim, S.K. Kim, Y.J. Kang, U.S. Baek, and H.S. Kim. 2008. Silvicultural practices of *Pinus densiflora* forest. Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea.
- Lee, K.S., J.H. Lee, S.K. Kim, S.W. Bae, and M.H. Jung. 2009. Consideration of silvicultural practice by taking community type of *Pinus densiflora* stand. *Korean J. Environ. Ecol.* 23(1):56-65.
- Lee, D.G. 2012. Statistical yearbook of forestry. Korea Forest Service, Daejeon, Korea.
- NIAST. 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon Korea.
- NIFOS. 2016. Annual report of forest health monitoring. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea.
- Ostonen, I., U. Puttsepp, C. Biel, O. Alberton, M.R. Bakker, K. Lohmus, H. Majdi, D. Metcalfe, A.F.M. Olsthoorn, A. Pronk, E. Vanguelova, M. Weih, and I. Brunner. 2007. Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosyst.* 141:426-442.
- Roy, A.K., A. Sharma, and G. Talukder. 1998. Some aspects of aluminium toxicity in plants. *Bot. Rev.* 54(2):145-178.
- Rout, G.R., S. Samantaray, and P. Das. 2001. Aluminium toxicity in plants: a review. *Agronomie* 21:3-21.
- Ryser, P. 2006. The mysterious root length. *Plant Soil* 286:1-6.
- Shin, J.A., Y.H. Son, S.G. Hong, and Y.K. Kim. 1999. Effect of N and P fertilization on nutrient use efficiency of *Pinus densiflora*, *Larix leptolepis*, and *Betula platyphylla* var. *japonica* seedlings. *Korean J. Environ. Agric.* 18(4):304-309.
- Ulrich, B., R. Mayer, and P.K. Khanna. 1980. Chemical changes due to acid precipitation in a loess-derived soil in central europe. *Soil Sci.* 130(4):193-199.
- Yang, H.S. 2002. Phytosociological studies of *Pinus densiflora* forest in Islets of southwestern coast, Korea. *Korean J. Ecol.* 25(2):127-134.
- Yang, A.R., J. Hwang, S.W. Song, and M. Cho. 2013. The comparison of soil properties and early growth of *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* seedlings in harvested *Larix kaempferi* and *Pinus rigida* stands, *J. Korean For. Soc.* 102(3):455-462.
- Yoo, J.H., J.K. Byun, C. Kim, C.H. Lee, Y.K. Kim, and W.K. Lee. 1998. Effects of lime, magnesium sulfate and compound fertilizers on soil chemical properties of acidified forest soils. *J. Korean For. Soc.* 87(3):341-346.