

상수리나무, 신갈나무, 졸참나무, 굴참나무 임분의 토양 물리·화학적 특성

이상태¹ · 정상훈¹ · 김춘식^{2*}

¹국립산림과학원 산림기술경영연구소, ²경상국립대학교 환경산림과학부

Physical and Chemical Properties of Soils in *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands

Sang Tae Lee¹, Sang Hoon Chung¹ and Choosig Kim^{2*}

¹Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science,
Pocheon, 11186, Korea

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

요약: 본 연구는 우리나라 대표적 낙엽활엽수종인 참나무류 중 상수리나무 임분 72개소, 신갈나무 임분 150개소, 졸참나무 임분 97개소, 굴참나무 임분 104개소 등 총 423개소를 대상으로 토양 물리·화학적 특성을 조사하였다. 토양 물리적 특성 중 모래 함량은 상수리나무 임분이 졸참나무, 굴참나무, 신갈나무 임분에 비해 유의적으로 높았으나, 점토 함량은 타 참나무류 임분에 비해 낮게 나타났다. 토양 pH는 임분 간 차이가 뚜렷하여 신갈나무나 졸참나무 임분이 상수리나무나 굴참나무 임분에 비해 토양 산성화가 심하였다. 토양 유기탄소 및 전질소 농도는 신갈나무 임분이 졸참나무, 굴참나무, 상수리나무 임분에 비해 유의적으로 높았다. 유효인산은 신갈나무와 졸참나무 임분이 굴참나무나 상수리나무 임분에 비해 유의적으로 높았으나, 교환성 포타슘, 칼슘, 마그네슘 농도는 낮게 나타났다. 양이온교환용량은 신갈나무, 졸참나무, 굴참나무, 상수리나무 임분 순이었다. 국내 참나무류 임분의 토양 물리·화학적 특성은 임분 간 차이가 있었으며, 신갈나무와 졸참나무 임분은 낮은 토양 pH와 교환성 양이온 농도를 개선할 수 있는 양분관리 방안을 모색할 필요가 있다.

Abstract: This study was conducted to compare the physical and chemical properties of soils in *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands. A total of 423 plots (*Q. acutissima* 72 plots, *Q. mongolica* 150 plots, *Q. serrata* 97 plots, and *Q. variabilis*: 104 plots) were examined to determine the soil properties of A and B horizons throughout the country. The physical and chemical properties of soils were significantly different among the four different *Quercus* spp. stands. The sand content in both horizons was significantly higher in *Q. acutissima* stands than in the other three oak stands, whereas the clay content was lowest among the four stands. The soils in *Q. mongolica* and *Q. serrata* stands were more acidified than those in *Q. acutissima* and *Q. variabilis* stands. The concentrations of organic carbon and total nitrogen in both soil depths were significantly higher in *Q. mongolica* stands than in *Q. serrata*, *Q. variabilis*, and *Q. acutissima* stands. The content of available phosphorus was significantly higher in *Q. mongolica* and *Q. serrata* stands than in *Q. acutissima* and *Q. variabilis* stands; whereas the contents of exchangeable potassium, calcium, and magnesium were lower in *Q. mongolica* and *Q. serrata* stands than in *Q. acutissima* and *Q. variabilis* stands. The cation exchange capacity was highest in *Q. mongolica* stands, followed by that in *Q. serrata*, *Q. variabilis*, and *Q. acutissima* stands. These data indicate the need to design a nutrient management plan to enhance the low soil pH and exchangeable cation in *Q. mongolica* and *Q. serrata* stands.

Key words: forest soils, oak forests, oak soils, soil nutrients, soil property

서론

* Corresponding author
E-mail: ckim@gnu.ac.kr
ORCID
Choosig Kim  <https://orcid.org/0000-0002-3263-1187>

산림토양의 발달은 토양생성작용에 관여하는 모재, 기후, 지형, 식생, 시간과 같은 요인의 복잡한 상호작용에 의해 영향을 받는다(Binkley and Fisher, 2020). 이들 요인

중 식생은 양분 흡수 및 순환, 근계의 깊이, 낙엽·낙지의 질적·양적 차이로 인하여 토양의 물리·화학적 특성에 상당한 영향을 끼칠 수 있다(Binkley, 1995; Levula et al., 2003; Ayres et al., 2009). 산림토양의 특성은 임목생장과 밀접한 관련이 있기 때문에(Aponte et al., 2011; Menéndez-Miguélez et al., 2015), 특정 수종이 점유하는 입지의 토양 물리·화학적 특성을 파악하는 것은 산림의 효율적 양분관리나 산림 생산성 향상 및 적지적수 등과 관련하여 매우 중요한 사항이다.

우리나라 참나무류는 다양한 입지에 분포하고 수종별 생장 특성이 상이한 것으로 알려져 있다(Kim and Kim, 2017; Park et al., 2020). 예를 들면 해발고(온도)는 참나무류 현존분포에 영향을 주는 일차적 요인으로 신갈나무는 냉온대 중부·산악지대, 졸참나무와 굴참나무는 냉온대 남부·저산지대, 상수리나무는 저해발 남향성 입지를 점유하는 것으로 알려져 있다(Kim and Kim, 2017). 이러한 입지 환경에 따른 수종별 분포 차이는 토양의 물리·화학적 특성에도 다양한 영향을 끼치고 있을 것으로 예측된다. 그러나 참나무류의 생장에 직접적으로 영향을 끼칠 수 있는 토양의 물리·화학적 특성에 대한 연구는 매우 미흡한 편이며, 일부 연구의 경우도 공간적으로 제한된 일부 산림지를 범위로 수행되거나(Choi et al., 2006), 굴참나무(Lee et al., 1996)와 상수리나무(Jung et al., 2017) 등과 같이 단일 수종의 산림생산력 판정을 위한 지위 추정모델을 위해 토양 특성이 설명 변수로 이용된 바 있다. 또한, 공간적으로 넓은 범위에서 수행된 참나무류의 산림토양 관련 연구로는 토양의 물리·화학적 특성보다는 1:25,000 산림입지도의 입지환경 및 토양단면의 속성 정보를 이용한 지위 추정 연구가 주종을 이루며, 상수리나무나 신갈나무(Lee et al., 2007, Kim et al., 2013, Lee et al., 2014) 등을 대상으로 임지생산력 평가나 적지 판정 연구 등이 수행된 바 있다. 한편, 많은 국외 연구들은 참나무류의 수종별 체계적인 관리 및 조성을 위해서는 토양의 물리·화학적 특성 조사의 필요성을 강조하고 있으나(Woolery et al., 2002; Bergès et al., 2005; Díaz-Maroto and Vila-Lameiro, 2008; Aponte et al., 2011; Paulo et al., 2015) 국내에 이들과 관련한 연구는 매우 미흡한 편이다. 국내에서 공간적으로 넓은 범위에서 수행된 참나무류 임분의 생장과 토양 특성 관련 연구의 결과로 굴참나무 임분의 토양 유기물 함량, 전질소, 양이온교환용량은 지위지수나 직경생장과 밀접한 상관을 보였으며(Lee et al., 1996), 상수리나무 임분도 전질소 및 유기물 함량, 토양 pH 등은 지위 추정 모델에 기여도가 높은 변수로 선발된 바 있다(Jung et al., 2017).

국내 참나무류의 분포 면적은 약 980천ha 정도이며(Park

et al., 2020), 이중 상수리나무 78천ha, 신갈나무 414천ha, 졸참나무 38천ha, 굴참나무 235천ha 등 총 767천ha가 분포하고 있다(Lee et al., 2018). 참나무류는 탄소 흡수 능력이 우수하고 용재적 가치뿐만 아니라 버섯재배용 자목 외에도 톱밥, 숯, 펄프용 칩 등 다양한 부분에 활용도가 높은 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2007, Park et al., 2020). 한편, 국내 참나무류는 지리적으로 광범위한 지역에 분포하기 때문에 공간적으로 넓은 범위에서 조사된 토양의 물리·화학적 특성 정보를 이용한 체계적인 임분 관리가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 전국에 분포하는 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무, 졸참나무를 대상으로 토양 물리·화학적 특성을 분석하여 수종별 적지선정이나 토양 양분관리를 위한 기초 자료 제공을 목적으로 수행하였다.

재료 및 방법

1. 임분 현황 조사

본 연구는 2016년에서 2021년 사이 전국 경제림 육성단지를 중심으로 기존 문헌 분석 및 입상도(1:5,000)를 이용하여 참나무류의 수종별 분포 현황을 파악하였고, 그 중 수관 점유비율 75% 이상인 임분을 조사구로 선정하였다. 조사한 표본 수는 상수리나무 72개소, 신갈나무 150개소, 졸참나무 97개소, 굴참나무 104개소 등 총 423개소였다(Figure 1).

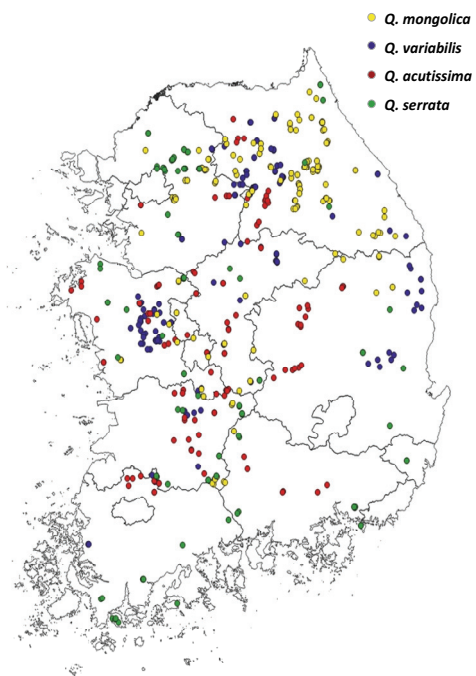


Figure 1. Location of the sampled sites in *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands.

Table 1. General stand characteristics in *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands.

Stand	No. of plot	Stand age	Elevation (m)	Stand density (tree ha ⁻¹)	Mean DBH (cm)	Mean height (m)	Site index	Basal area (m ² ha ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)
<i>Q. acutissima</i>	72	35±1.4c*	166±8c	753±40a	20.1±0.6b	13.8±0.3ab	14.9±0.5a	24.4±1.0b	176±8b
<i>Q. mongolica</i>	150	59±1.3a	667±21a	787±22a	21.8±0.4b	13.5±0.2b	15.3±0.2a	30.3±0.8a	213±6a
<i>Q. serrata</i>	97	43±1.0b	317±20b	527±22b	24.7±0.8a	14.4±0.2a	14.4±0.3a	26.2±1.1b	175±7b
<i>Q. variabilis</i>	104	43±1.1b	340±14b	806±38a	21.0±0.5b	13.5±0.2b	14.7±0.3a	27.3±0.9ab	211±11a

* Mean±standard error. Different letters among stands represent a significant difference at $P<0.05$.

조사구는 반경 11.3m의 원형 표본 조사구(400 m²)를 사면경사와 방위 등을 고려하여 설치하고, 지황(지형, 경사, 석력, 토양 등)과 임황(수종, 흉고직경, 수고) 등을 조사하였다. 임분 축적은 산림청과 국립산림과학원에서 개발한 임목수간재적표(Korea Forest Service and National Institute of Forest Science, 2021)로 환산하였으며, 지위지수는 국가산림자원조사자료를 바탕으로 개발된 참나무류의 지위지수(Park et al., 2020)를 이용하였다. 조사한 참나무 임분의 평균 흉고직경을 갖는 대표목을 대상으로 생장추를 이용하여 임령을 추정하고 결과 평균 임령은 신갈나무가 59년으로 가장 높았으며 굴참나무와 졸참나무는 43년, 상수리나무는 35년으로 가장 낮은 값을 보였다(Table 1). 임분 밀도는 굴참나무 임분 806본 ha⁻¹, 상수리나무 임분 753본 ha⁻¹, 신갈나무 임분 787본 ha⁻¹였으며, 졸참나무는 527본 ha⁻¹로 조사된 4개 참나무류 중 임분 밀도가 가장 낮았다. 흉고단면적은 신갈나무가 30.3 m² ha⁻¹로 가장 큰 값을 보였으며, 굴참나무 27.3 m² ha⁻¹, 졸참나무 26.2 m² ha⁻¹, 상수리나무 24.0 m² ha⁻¹순이었다. 임분 재적은 신갈나무 213 m³ ha⁻¹, 졸참나무 211 m³ ha⁻¹로 상수리나무 176 m³ ha⁻¹나 졸참나무 175 m³ ha⁻¹에 비해 크게 나타났다.

2. 토양 특성 분석

토양 특성 분석은 가로 80 cm, 세로 80 cm에 모재층 깊이까지 토양단면을 제작하고 A층과 B층을 구분한 후 토양 시료를 채취하였다. 채취된 토양 시료는 실내에서 2 주 이상 음건 후 2 mm 체로 선별하여 토양 분석용 시료를 조제하였다. 토양 유기물 분석은 Walkley-Black 방법(Kalra and Maynard, 1991), 유효인산은 Lancaster침출법, 교환성양이온(K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺)은 1N-NH₄OAc(pH 7.0) 침출 후 ICP를 이용하여 분석하였으며, 양이온교환용량(Cation Exchange Capacity)은 1N-NH₄OAc(pH 7.0) 침출 후 NH₄⁺-N 증류법, 토양 pH는 1:5 토양:증류수 현탁액을

pH 메터로 측정하였다. 전질소(Total nitrogen)는 Kjeldahl 황산분해증류법, 모래, 미사, 점토함량은 피펫법을 이용하였다(Kalra and Maynard, 1991).

3. 자료분석

수집된 자료는 SAS의 일반선형모형을 이용하여 임분 간 토양 특성에 대한 유의성을 검정하였으며, 유의적인 차이가 있을 경우 Tukey 방법으로 평균 간 차이를 조사하였다(SAS Institute Inc, 2003). 한편, 임분별 토양 특성의 상관성은 Canoco 5.1(Ter Braak and Šmilauer, 2018)을 이용하여 주성분 분석(Principle Component Analysis, PCA)을 실시하였다.

결 과

1. 토양 특성

토양 A층의 모래 함량은 상수리나무 임분이 57.3%로 졸참나무, 굴참나무, 신갈나무 임분에 비해 유의적으로 높았으며, 미사는 졸참나무 임분이 26.7%로 타 참나무류 임분에 비해 낮은 값을 보였다. 점토 함량은 졸참나무 임분이 22.8%로서 타 참나무류 임분에 비해 높았다. 토양 B층의 모래와 미사 함량은 A층과 유사한 경향을 보였으며, 점토 함량은 상수리나무 임분이 11.6%로 타 참나무류 임분에 비해 가장 낮았다.

토양 A층의 pH는 신갈나무 임분과 졸참나무 임분이 pH 4.22와 pH 4.26으로 굴참나무 임분 pH 4.84, 상수리나무 임분 pH 4.71에 비해 토양 산성화가 심하였다. B층도 A층과 유사한 경향을 보여 신갈나무나 졸참나무 임분은 굴참나무나 상수리나무 임분에 비해 유의적으로 낮은 토양 pH를 보였다. A층의 토양 유기탄소 농도는 신갈나무 임분이 43.4 mg g⁻¹로 졸참나무 임분 31.1 mg g⁻¹, 굴참나무 임분 26.4 mg g⁻¹, 상수리나무 임분 24.5 mg g⁻¹에 비해 유의적으로 높았으며, B층의 유기탄소 농도도 A층과 유사한 경향

을 보였다. A층의 전질소 농도는 토양 유기탄소 농도가 가장 높았던 신갈나무 임분이 3.3 mg g⁻¹으로 상수리나무 임분 2.5 mg g⁻¹, 졸참나무 임분 2.1 mg g⁻¹, 굴참나무 임분 2.1 mg g⁻¹에 비해 유의적으로 높았다. B층도 A층과 유사하게 신갈나무 임분이 2.4 mg g⁻¹로 타 참나무류 임분에 비해 가장 높은 값을 보였다. A층의 C/N율은 졸참나무가 16.0으로 타 참나무에 비해 유의적으로 높게 나타났다. 유효인산은 신갈나무 임분 66 mg kg⁻¹, 졸참나무 임분 54 mg kg⁻¹로 굴참나무 임분 24 mg kg⁻¹이나 상수리나무 임분 25 mg kg⁻¹에 비해 유의적으로 높았다. B층은 상수리나무 임분을 제외하고 신갈나무, 졸참나무, 굴참나무 임분 사이에 유의적인 차이가 없었다.

포타슘, 칼슘, 마그네슘 같은 교환성 양이온은 A층과 B층 모두 상수리나무나 굴참나무 임분이 신갈나무나 졸참나무 임분에 비해 높은 값을 보였다. 양이온교환용량은 신갈나무 임분의 A층이 21.1 cmol_ckg⁻¹, 졸참나무 임분 17.3 cmol_ckg⁻¹, 굴참나무 임분 13.5 cmol_ckg⁻¹, 상수리나무 임분은 11.3 cmol_ckg⁻¹ 순이었다. B층의 경우도 A층과 유사하게 신갈나무 임분이 15.8 cmol_ckg⁻¹으로 가장 높았으며, 상수리나무 임분이 9.8 cmol_ckg⁻¹으로 가장 낮았다.

2. 임분별 토양 특성의 관계

본 연구에서 수집된 자료는 임분 속성 8개와 토양 속성 13개 등 총 21개의 변수를 포함하고 있어 변수 사이 복잡한 상관관계를 간략하게 표현하기 위해 주성분분석을 실시한 결과 상수리나무 임분의 A층은 가로축(Axis 1)의 경우 임분 및 토양 특성 분산에 대하여 24%, 세로축(Axis 2)은 44%를 설명하였다. 토양 B층도 A층과 유사하게 가로축은 25%, 세로축은 41% 정도로 나타났다(Figure 2). 신갈나무는 A층의 가로축이 46%, B층 50%, 세로축은 A층 14%, B층 14%로 A층은 총 분산의 70%, B층은 64% 정도를 설명하고 있으나, 졸참나무나 굴참나무는 50% 내외로 주성분의 기여도가 낮게 나타났다.

임분 속성 간의 상관성은 조사한 4개 수종 모두 흉고직경, 지위지수, 수고, 임령, 흉고단면적, 임분축적은 각 화살표 사이에 각도가 작게 나타나 강한 정의 상관이 있었다(Figure 2). 토양 특성은 A층과 B층 모두 전질소 농도, 유기탄소 농도, C/N율은 정의 상관이 있었다. 조사한 토양 특성 중 상수리나무, 졸참나무, 굴참나무 임분의 모래 함량과 신갈나무 임분의 점토 함량은 흉고직경, 수고, 지위, 흉고단면적 등과 같은 임분 속성과 정의 상관을 보였다. 그러나 두 화살표의 각도가 정반대 방향을 보이는 모래와 미사 또는 점토 등은 강한 부의 상관을 보였다(Figure 2).

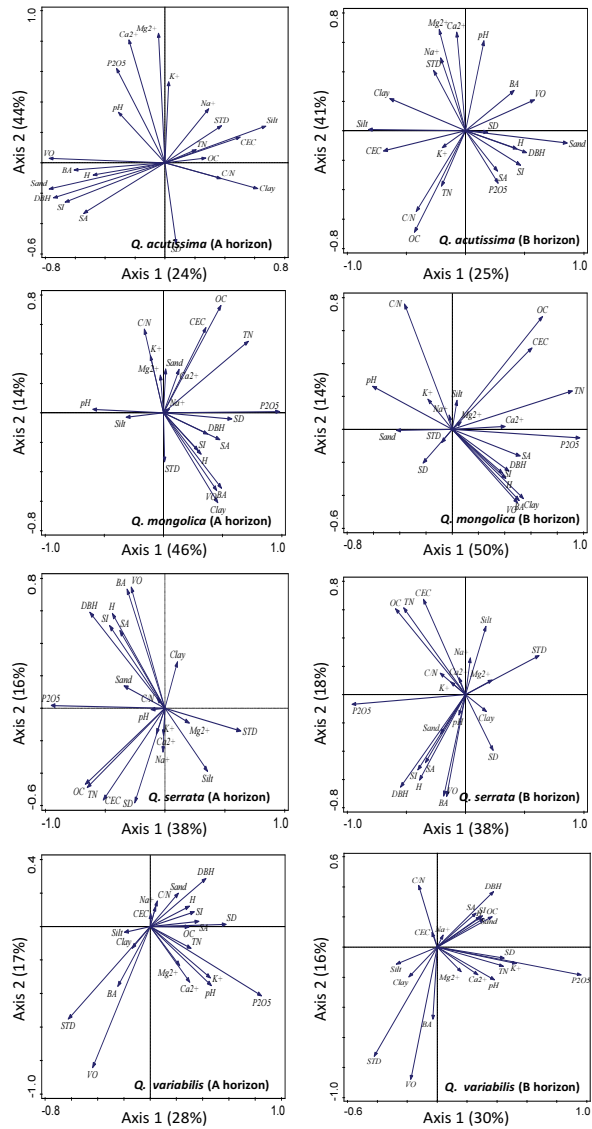


Figure 2. Results of principal component analysis (SI: Site index; SA: Stand age; OC: Organic carbon; SD: Soil depth; BA: Basal area; STD: Stand density; H: Height; VO: Stand volume) of stand characteristics and soil properties in *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands.

고찰

산림 내 식생은 낙엽유입량, 지상부와 지하부 바이오매스에 의한 양분 흡수 및 분배 특성, 뿌리의 깊이나 분포, 식생이 분포하는 지역의 기후적 특성 등에 따라 토양의 물리·화학적 특성에 상당한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(Russell et al., 2007; Ayres et al., 2009). 국내 분포하는 참나무류의 토양 물리·화학적 특성은 임분별 상당한 차이가 있었다. 토양 입경분포의 평균값으로부터 결정된 토성급 경우 상수리나무 임분은 사양토(sandy loam), 졸참

나무, 신갈나무, 굴참나무 임분은 양토(loam)로 나타났다. 본 연구 결과는 국외에서 수행된 타 연구의 참나무류 임분은 통기성이 양호한 양토 계열의 토성급에 주로 분포한다는 결과와 유사하였다(Serrasolses et al., 2009). 한편, 상수리나무 임분은 타 참나무류 임분에 비해 모래 함량이 높고 점토 함량이 낮게 나타났다. 이는 이 수종이 마을에 인접한 입지나 낮은 구릉성 산지에 주로 분포하여(Kim and Kim, 2017) 교란에 의한 답압 증가나 유기물층 훼손에 따른 광물질 토층으로부터 세립질 입자의 유실 등이 원인일 수 있다. 그러나 졸참나무 임분은 타 참나무류에 비해 점토 함량이 높은 경향을 보여 산록이나 점토 함량이 높아 토양 수분 조건이 양호한 지역을 중심으로 발달하는(Park et al., 2016) 졸참나무 임분의 특성을 보여 주고 있다. 본 연구에서 조사된 참나무류 임분은 49% 이상의 모래 함량을 보여 국내 산림토양의 A층과 B층 평균 모래 함량 37.3%와 37.8%(Jeong et al., 2002)에 비해 높아 이들 수종이 통기성이나 배수성이 양호한 지역에서 주로 생육하는 것으로 나타났다. 한편, 상수리나무와 굴참나무 임분의 모래 함량은 흉고직경(DBH)이나 지위지수(SI)와 정의 상관을 보이고 있다(Figure 2).

토양 A층과 B층의 pH는 신갈나무와 졸참나무 임분이 pH 4.22~pH 4.45로 상수리나무나 굴참나무 임분의 pH 4.71~pH 4.89에 비해 토양 산성화가 심하였다. 일반적으로 임분 간 토양 pH 차이는 유기물 분해과정 동안 부식산 및 염기성 양이온의 유입 정도, 수종 간 양분 흡수 특성에 따라 차이가 있는 것으로 알려져 있다(Binkley, 1995). 본 연구에서도 토양 pH가 낮게 나타난 신갈나무와 졸참나무 임분은 상수리나무나 굴참나무 임분에 비해 유기탄소 농도가 높았다(Table 2). 유사한 결과로 Díaz-Maroto and Vila-Lameiro(2008)는 스페인 *Quercus robur* 임분의 토양 pH와 유기탄소 농도 사이에 부의 상관($\rho=-0.44$)을 보고한 바 있다. 한편, 낮은 토양 pH를 보인 신갈나무와 졸참나무 임분은 토양 산성화에 따른 양분유효도 저하로 임목 생육이 저하되거나 토양생물 다양성이 감소할 수 있어, 토양 산성화 경감을 위한 임분 관리가 필요할 것으로 사료되었다.

토양 유기탄소 농도는 평균 해발고가 667 m로 타 참나무류 평균 해발고 166~340 m에 비해 높았던 신갈나무 임분이 가장 높은 값을 보였다. 이는 높은 해발고에 따른 낮은 토양온도로 인해 토양 유기물 분해가 타 참나무류 임분 보다 느리게 진행되었기 때문으로 사료된다(Lee et al., 2022). 국내에서 조사된 참나무류 임분의 유기탄소 저장량과 해발고는 정의 상관($r=0.52$, $P<0.001$)이 있는 것으로 보고된 바 있다(Lee et al., 2022). 한편, 신갈나무 임분

의 높은 C/N율은 유기탄소 농도는 높으나 낮은 토양온도와 낮은 토양 pH가 질소 무기화에 제한 요인으로 작용하였기 때문으로 사료된다. 신갈나무 임분과는 대조적으로 상수리나무 임분의 낮은 C/N율은 해발고가 낮은 지역에 분포하여 토양온도가 높고, 모래 함량이 높아 통기성과 유기물 분해에 관여하는 미생물의 활성화에 영향을 끼쳐 유기물의 분해나 탄소 무기화가 빠르게 진행되었기 때문으로 사료된다. 참나무류 4 수종의 토양 유기탄소와 전질소 농도는 국내에서 조사된 산림토양 A층의 평균 유기탄소 26 mg g⁻¹, 전질소 1.9 mg g⁻¹, B층 유기탄소 1.17 mg g⁻¹, 전질소 0.09 mg g⁻¹(Jeong et al., 2002)보다 높았다. 산림토양의 인산은 주로 유기물의 무기화 과정을 통해 토양에 공급되기 때문에(Gan et al., 2020) 높은 유기물 함량을 보인 신갈나무나 졸참나무 임분이 상수리나무나 굴참나무 임분에 비해 높았다.

교환성 양이온은 토양 pH가 높았던 상수리나무나 굴참나무 임분이 토양 pH가 낮았던 신갈나무나 졸참나무 임분에 비해 높은 값을 보였다. 임분 별 교환성 양이온의 차이는 임목의 양이온 흡수나 낙엽·낙지의 질적·양적 특성과 밀접한 관련이 있을 것으로 사료된다(Aponte et al., 2011). 예를 들면 신갈나무 임분은 임령이 높아 임목에 의한 양분 흡수 및 축적량이 증가하여 타 참나무류 임분에 비해 토양 내 낮은 교환성 양이온을 보일 수 있으며, 그 결과 신갈나무 A층의 교환성 양이온 농도나 임분축적(VO)과는 부의 상관을 보이고 있다(Figure 2). 또한 낙엽·낙지에 의한 양분순환 관점에서 칼슘과 마그네슘 농도의 경우 상수리나무 낙엽은 10.08 mg g⁻¹과 0.92 mg g⁻¹(Park et al., 2021)로 신갈나무의 4.2 mg g⁻¹나 1.3 mg g⁻¹(Mun et al., 2007)보다 크게 나타나 두 임분이 유사한 낙엽·낙지량을 보일 경우 상수리나무 임분의 낙엽에 의한 교환성 양이온의 토양환원이 높을 수 있다. 1980년대 국내에서 조사된 산림토양의 A층 포타슘은 0.23 cmol.kg⁻¹, 칼슘 2.44 cmol.kg⁻¹, 마그네슘 1.01 cmol.kg⁻¹, B층의 포타슘은 0.15 cmol.kg⁻¹, 칼슘 1.64 cmol.kg⁻¹, 마그네슘 1.03 cmol.kg⁻¹에 비해 국내 참나무류 임분의 교환성 양이온 농도는 낮게 나타났으며, 이는 임령 증가에 따른 양이온 흡수 및 축적량 증가 등이 원인이거나(Binkley and Fisher, 2020), 모래 함량이 높았던 이들 임분에서 교환성 양이온의 용탈 손실이 컸을 가능성이 있다. 양이온교환용량은 교환성 양이온의 흡착 능력이 높은 유기탄소 함량과 밀접한 관련이 있어 신갈나무나 졸참나무 임분이 상수리나무나 굴참나무 임분에 비해 높았으며, 참나무류 임분의 토양 유기탄소농도와 양이온교환용량과는 정의 상관(Figure 2)이 있었다.

Table 2. Soil physical and chemical properties in *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands.

Hori- zon	Stand	Soil depth (cm)	Sand	Silt	Clay	Soil pH	Organic C (mg g ⁻¹)	Total N (mg g ⁻¹)	C/N ratio	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exchangeable (cmolc kg ⁻¹)			CEC (cmolc kg ⁻¹)
											K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
A	<i>Q. acutissima</i>	7±0.5	57.3±1.9a*	31.9±1.5a	10.8±0.5d	4.71±0.04a	24.7±1.3b	2.5±0.1b	9.8±0.3b	24±5b	0.22±0.01a	1.63±0.19a	0.92±0.13a	11.3±0.36c
	<i>Q. mongolica</i>	17±0.7	49.6±1.3b	34.2±1.2a	16.2±0.7b	4.22±0.03b	43.4±2.0a	3.3±0.2a	14.2±0.6ab	66±6a	0.15±0.01b	0.91±0.12b	0.32±0.03bc	21.1±0.73a
	<i>Q. serrata</i>	20±0.9	50.5±1.3b	26.7±1.1b	22.8±0.8a	4.26±0.03b	31.1±1.7b	2.1±0.1b	16.0±1.3a	54±4a	0.11±0.01c	0.72±0.09b	0.28±0.04c	17.3±0.56b
	<i>Q. variabilis</i>	18±1.1	50.5±1.5b	35.8±1.2a	13.7±0.5c	4.84±0.04a	26.4±1.3b	2.1±0.1b	12.9±0.6b	24±3b	0.18±0.01ab	1.13±0.22ab	0.52±0.05b	13.5±0.43bc
B	<i>Q. acutissima</i>	45±1.7	57.9±1.9a	30.5±1.7b	11.6±0.8c	4.85±0.04a	11.4±1.1c	1.6±0.2ab	8.5±0.6b	17±2b	0.15±0.01ab	0.95±0.15a	0.77±0.15a	9.9±0.45c
	<i>Q. mongolica</i>	43±1.3	51.4±1.2b	33.1±1.0b	15.5±0.6b	4.45±0.03b	22.8±1.2a	2.4±0.3a	13.9±0.7a	35±4a	0.13±0.01b	0.51±0.10a	0.21±0.02b	15.8±0.54a
	<i>Q. serrata</i>	41±1.5	50.4±1.3b	26.8±1.0b	22.8±0.7a	4.36±0.03b	17.0±1.2b	1.3±0.1b	14.1±1.7a	31±3ab	0.09±0.01c	0.52±0.09a	0.23±0.31b	13.6±0.38b
	<i>Q. variabilis</i>	48±1.7	48.7±1.4b	37.4±1.2a	13.9±0.5bc	4.89±0.05a	19.8±1.0ab	2.1±0.3ab	13.4±0.8a	20±2b	0.18±0.01a	0.52±0.05a	0.94±0.52a	12.7±0.55b

* Mean±standard error. Different letters among stands at each soil horizon represent a significant difference at P<0.05.

결 론

지리적으로 광범위한 지역에 분포하는 상수리나무, 굴참나무, 신갈나무, 졸참나무 임분의 토양 물리·화학적 특성은 A층과 B층 모두 임분별 차이가 있었다. 조사한 참나무류 임분의 대부분은 토양 pH가 낮아 토양 산성화가 심하였으며, 신갈나무나 졸참나무 임분은 교환성 칼슘이나 마그네슘도 낮아 토양 산성화 개량을 위한 양분관리가 필요한 것으로 나타났다. 평균 모래 함량은 국내 산림토양의 평균 모래 함량에 비해 약 11%정도 높아 배수성이나 통기성이 양호한 지역에 참나무류가 주로 분포하고 있었다. 한편 토양 수분 환경과 밀접하게 관련되는 유기탄소 농도나 점토 함량이 높은 입지는 졸참나무나 신갈나무 임분, 유기탄소나 전질소 농도가 낮은 입지는 상수리나무 임분이 분포하였다. 본 연구 결과는 입지 및 토양 특성에 따른 참나무류 수종선정이나 임분 별 양분관리를 위한 기초 자료로 제공이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 산림기술경영연구소의 “활엽수림의 고부가가치 이용 및 유형별 관리기술 개발” 과제(SC0500-2018-10)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Aponte, C., García, L.V., Pérez-Ramos, I.M., Gutiérrez, E. and Marañón, T. 2011. Oak trees and soil interactions in Mediterranean forests: a positive feedback model. *Journal of Vegetation Science* 22(5): 856-867.
- Ayres, E., Steltzer, H., Berg, S., Wallenstein, M.D., Simmons, B.L. and Wall, D.H. 2009. Tree species traits influence soil physical, chemical, and biological properties in high elevation forests. *PLoS One* 4(6): e5964.
- Bergès, L., Chevalier, R., Dumas, Y., Franc, A. and Gilbert, J.M. 2005. Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Annals of Forest Science* 62(5): 391-402.
- Binkley, D. 1995. The influence of tree species on forest soils: processes and patterns. pp. 1-33. In : Mead, D.J. and Cornforth, I.S. (Eds.). *Proceedings of the Trees and Soil Workshop*. Agronomy Society of New Zealand Special Publication #10. Lincoln University Press. Canterbury, New Zealand.
- Binkley, D. and Fisher, R.F. 2020. *Ecology and Management of Forest Soils*. 5th edition John Wiley & Sons Ltd. Glasgow UK. pp. 440.
- Choi, H.J., Jeon, I.Y., Shin, C.H., and Mun, H.T. 2006. Soil properties of *Quercus variabilis* forest on Youngha valley in Mt. Worak National Park. *Journal of Ecology and Environment* 29(5): 439-443.
- Díaz-Maroto, I.J. and Vila-Lameiro, P. 2008. Chemical properties and macronutrients of oak soils in Northwest Spain. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 39(9-10): 1416-1435.
- Gan, H.Y., Schöning, I., Schall, P., Ammer, C. and Schrupp, M. 2020. Soil organic matter mineralization as driven by nutrient stoichiometry in soils under differently managed forest stands. *Frontiers in Forests and Global Change* 3: 99.
- Jeong, J.H., Koo, K.S., Lee, C.H. and Kim, C. 2002. Physico-chemical properties of Korean forest soils by regions. *Journal of Korean Society of Forest Science* 91(6): 694-700.
- Jung, S.Y., Lee, K.S., Lee, S.H., Park, Y.B. and An, K.W. 2017. The effects of physico-chemical soil properties on the site index of sawtooth oak (*Quercus acutissima* Carruth.) in the Korean peninsula - Including offshore islands and coastal areas -. *The Journal of Korean Island* 29(4): 301-322.
- 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.
- Kim, T.U., Sung, J.H., Kwon, T.S., Chun, J.H. and Shin, M.Y. 2013. Assessment of productive areas for *Quercus acutissima* by ecoprovince in Korea using environmental factors. *Journal of Korean Society of Forest Science* 102(3): 437-445.
- Kim, Y.H. and Kim, J.W. 2017. Distributional uniqueness of deciduous oaks (*Quercus* L.) in the Korean peninsula. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 20(2): 37-59.
- Korea Forest Service and National Institute of Forest Science. 2021. *Tree Volume, Biomass and Stand Yield Table*. Research Note of National Institute of Forest Science No. 979. pp. 373.
- Lee, S.W., Won, H.K., Shin, M.Y., Son, Y.M. and Lee, Y.Y. 2007. Estimation of forest productive area of *Quercus acutissima* and *Quercus mongolica* using site environmental variables. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 40(5): 429-434.
- Lee, S.J., Yim, J.S., Son, Y.M., Son, Y. and Kim, R. 2018.

- Estimation of forest carbon stocks for national greenhouse gas inventory reporting in South Korea. *Forests* 9(10): 625.
- Lee, S.T., Chung, S.H. and Kim, C. 2022. Carbon stocks in tree biomass and soils of *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands. *Journal of Korean Society of Forest Science* 222(3): 365-373.
- Lee, W.K., Kim, C., Koo, K.S., Kim, Y.K., Byun, J.K. and Seo, H.S. 1996. Effects of soil properties on site productivity in *Quercus variabilis* stands. *FRI Journal of Forest Science (Korea Republic)* 53: 142-149.
- Lee, Y.G., Sung, J.H., Chun, J.H. and Shin, M.Y. 2014. Effect of climate changes on the distribution of productive areas for *Quercus mongolica* in Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 103(4): 605-612.
- Levula, J., Ilvesniemi, H. and Westman, C.J. 2003. Relation between soil properties and tree species composition in a Scots pine-Norway spruce stand in southern Finland. *Silva Fennica* 37(2): 205-218.
- Menéndez-Miguélez, M., Álvarez-Álvarez, P., Majada, J. and Canga, E. 2015. Effects of soil nutrients and environmental factors on site productivity in *Castanea sativa* Mill. coppice stands in NW Spain. *New Forests* 46(2): 217-233.
- Mun, H.T., Kim, S.J. and Shin, C.H. 2007. Litter production and nutrient contents of litterfall in oak and pine forests at Mt. Worak National Park. *Journal of Ecology and Field Biology* 30(1): 63-68.
- Park, B.B., Han, S.H., Hernandez, J.O., An, J.Y., Youn, W.B., Choi, H.S. and Jung, S.C. 2021. Leaf litter decomposition of deciduous *Quercus acutissima* Carruth. and evergreen *Quercus glauca* Thunb. in an inter-site experiment in three contrasting temperate forest stands in South Korea. *Annals of Forest Science* 78: 34.
- Park, J.H., Chung, S.H., Kim, S.H. and Lee, S.T. 2020. Estimation of site index curve for 6 oak species in Korea. *Journal of Agriculture & Life Science* 54(3): 27-33.
- Park, J.H., Hwang, J.Y., Jung, S.Y., Yoo, B.O. and Kim H.H. 2016. Estimation of the occurrence probability for *Quercus mongolica* and *Quercus serrata* using Binary Logit Model. *Journal of Agriculture & Life Science* 50(6): 27-36.
- Paulo, J.A., Palma, J.H.N., Gomes, A.A., Faias, S.P., Tomé, J. and Tomé, M. 2015. Predicting site index from climate and soil variables for cork oak (*Quercus suber* L.) stands in Portugal. *New Forests* 46: 293-307.
- Russell, A.E., Raich, J.W., Valverde-Barrantes, O.J. and Fisher, R.F. 2007. Tree species effects on soil properties in experimental plantations in tropical moist forest. *Soil Science Society of America* 71: 1389-1397.
- SAS Institute Inc. 2003 Statistical Analysis System User's Guide: Statistical Version. 8th Edition, SAS Institute, Cary.
- Serrasolses, I., Pérez-evesa, M., Vilagrosa, A., Pausas, J.G., Sauras, T., Cortina, J. and Vallejo, R. 2009. Soil properties constraining cork oak distribution. pp. 89-91. In: Aronson, J., Pereira, J.S. and Pausas, J.G. (Eds.). *Cork Oak Woodlands on the Edge: Ecology, Adaptive Management, and Restoration*. Island Press. Detroit, MI, U.S.A.
- Ter Braak and Šmilauer. 2018. *Canoco Reference Manual and User's Guide: Software for Ordination (Version 5.10)*. Microcomputer Power, Ithaca, NY, U.S.A, pp. 536.
- Woolery, M.E., Olson, K.R., Dawson, J.O. and Bollero, G. 2002. Using soil properties to predict forest productivity in southern Illinois. *Journal of Soil and Water Conservation* 57(1): 37-45.

Manuscript Received : November 19, 2022

First Revision : December 10, 2022

Accepted : December 12, 2022