

1:5,000 산림입지토양도에 따른 우리나라 산림토양의 이화학적 특성

정진현^{1,2} · 이종명¹ · 지동훈³ · 김현준^{4*}

¹산림정보, ²국립산림과학원, ³한국임업진흥원 윤리감사실, ⁴전남대학교 산림자원학과

Physico-chemical Properties of Forest Soils in South Korea according to 1:5,000 Forest Soil Map

Jin-Heon Jeong^{1,2}, Jong Myoung Lee¹, Dong Hun Ji³ and Hyun-Jun Kim^{4*}

¹Forest Information, Namyangju 11901, Korea

²National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

³Ethics Audit Office, Korea Forestry Promotion Institute, Seoul 07569, Korea

⁴Department of Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

요약: 정밀임업과 지속가능한 산림 관리를 위해 고해상도 토양 정보는 필수적이다. 본 연구는 2009년부터 2021년까지 전국 592만 ha를 대상으로 제작된 1:5,000 대축척 산림입지토양도의 표준지 조사 자료(938개소)를 활용하여, 우리나라 산림토양의 이화학적 특성을 층위별(A, B층), 지역별, 모암별, 토양군별로 정량적으로 분석하고자 수행되었다. 또한, 과거 1:25,000 산림토양도 조사 자료와 비교하여 산림토양 환경의 시간적 변화를 구명하고자 하였다. 물리적 특성을 분석한 결과, B층의 점토 함량이 17.4%로 A층의 15.6%보다 일관되게 높아 점토 집적 작용이 확인되었다. 전국적으로 양토(L)와 사질양토(SL)가 주된 토성이었으며(A층 기준 66.8%), 갈색산림토양(Brown Forest Soil)이 80.1%로 가장 우세한 토양군이였다. 토양 특성은 모암과 토양군에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 화성암과 변성암 유래 토양은 조립질 특성이 강한 반면, 퇴적암 유래 토양은 B층의 점토 함량이 높았다. 특히 화산화산림토양(제주)은 미사질 토성(A층 SiL 50.0%)이 우세하였다. 화학적 특성 분석 결과, 특이점은 전국적인 토양 산성화 심화 현상이다. A층의 전국 평균 pH는 4.74로, 과거 1980-90년대 조사된 pH 5.48 대비 약 0.74 단위 감소하였다. A층(pH 4.74)은 B층(pH 4.96)보다 산성도가 높았으며, 경기도(A층 pH 4.50)에서 산성화가 가장 심한 것으로 나타났다. 모암별로는 퇴적암 유래 토양이 변성암 유래 토양보다 높은 완충능을 보였다. 토양군별로는 화산화산림토양과 암적색산림토양이 높은 비옥도와 완충능을 보인 반면, 적황색산림토양은 산성화에 가장 취약하였다. 결과적으로 1:5,000 산림입지토양도를 통해 우리나라 산림토양의 시간적 · 공간적 특성을 확인할 수 있었다. 특히, 지난 수십 년간 심각하게 진행된 산림토양의 산성화(A층 pH 4.74)는 산림의 건강성 유지를 위한 시급한 관리 대책이 필요함을 시사한다. 또한, 토양 특성이 모암과 토양군에 따라 명확히 구분됨에 따라, 향후 획일적인 관리가 아닌 모재와 토양 유형을 고려한 맞춤형 시비 및 토양 개량 전략 수립이 요구된다. 본 자료는 미래 디지털 토양 지도 및 토양 환경 모니터링을 위한 기초자료로 활용될 것이다.

Abstract: Based on the data of 938 plots on the 1:5,000 forest soil map of Korea, this study quantitatively analyzes the physicochemical properties of Korean forest soils by horizon, region, parent rock, and soil group. The clay content was consistently higher in the B-horizon (17.4%) than in the A-horizon (15.6%), evidencing clay illuviation. Loam and sandy loam (constituting 66.8% in the A-horizon) dominated the soil textures and brown forest soil was the most predominant soil group (80.1%). The soil properties significantly varied among the parent rocks and soil groups. Soils derived from igneous and metamorphic rocks were coarse-textured, whereas those derived from sedimentary rocks showed higher clay content in the B-horizon than in the A-horizon. Volcanic ash soils were notably dominated by silty textures. The most critical finding from the chemical analysis was severe and widespread soil acidification, revealing higher acidity in the A-horizon (pH 4.74) than in the B-horizon (pH 4.96) and the highest acidification vulnerability in the Gyeonggi region (A-horizon pH 4.50). Among the parent rocks, soils from sedimentary rock

* Corresponding author

E-mail: hjkim0837@jnu.ac.kr

ORCID

Hyun-Jun Kim  https://orcid.org/0000-0002-7373-1643

(A-horizon pH 4.95, Ca^{2+} 2.65 cmol_c/kg) exhibited higher buffering capacity than soils from metamorphic rock (A-horizon pH 4.65). Among the soil groups, volcanic ash soil (A-horizon SOM 13.35%, CEC 40.8 cmol_c/kg) and dark red soil (A-horizon pH 5.36, Ca^{2+} 4.12 cmol_c/kg) exhibited high fertility and buffering capacity, whereas red-yellow soil (A-horizon pH 4.28) was most vulnerable to acidification. Overall, the 1:5,000 Forest Site Soil Map is a critical baseline dataset for parcel-level precision management. The significant acidification of forest soils (A-horizon pH 4.74) over the past decades must be mitigated by management strategies to maintain forest health. Furthermore, future management must consider the differences in soil properties among parent rocks and soil groups, necessitating customized fertilization and amelioration plans rather than a uniform approach. This dataset will provide fundamental data for future digital soil mapping and soil environmental monitoring.

Key words: forest soils, forest soil map, physico-chemical properties, soil acidification

서론

산림토양은 산림 생태계의 지속가능성을 지탱하는 핵심 기반으로, 수목 생장에 필요한 수분과 양분을 공급할 뿐만 아니라 탄소 흡수, 수자원 함양 등 다양한 생태계 서비스를 제공한다(Lee et al., 2009). 최근 기후변화와 국지적인 토지 이용 변화가 가속화됨에 따라, 산림의 물리·화학적 특성을 정밀하게 파악하고 관리할 수 있는 고해상도 토양 정보의 중요성이 전 세계적으로 대두되고 있다(McBratney et al., 2003; Baskent et al., 2024).

과거 우리나라는 제1차, 제2차 치산녹화 사업과 연계하여 전국의 산림토양 조사를 수행하였다(NiFoS, 1970; NiFoS, 1976). 1995년부터 2004년까지는 1:25,000 축척의 산림입지 토양도를 제작하여 국가 산림 경영의 기틀을 마련하였다(Jeong et al., 2002). 그러나 소축척 지도(1:25,000)는 필지 단위의 정밀한 산림 관리가 요구되는 현대의 정밀임업(Precision Forestry)에 적용하기에는 공간적 해상도와 정보의 구체성 면에서 한계가 있었다(Kwon et al., 2021).

이에 산림청은 2009년부터 2021년까지 전국 산림(약 592만 ha)을 대상으로 현장 조사를 실시하여 세계적으로도 유례가 드문 대축척(1:5,000) 산림입지토양도를 구축 완료하였다. 이 과정에서 확보된 방대한 표준지 실측 자료는 우리나라 산림토양의 현주소를 가장 정확하게 대변하는 정량적 데이터이다. 하지만 구축된 지도의 공간 정보 활용에 관한 논의에 비해, 실제 현장에서 수집된 토양의 이화학적 특성이 과거 대비 어떻게 변화했는지, 그리고 모암이나 토양군과 같은 환경 인자에 따라 어떠한 특성 차이를 보이는지에 대한 종합적인 분석은 미흡한 실정이다(Kwon et al., 2021).

특히, 디지털 전환 시대에 발맞추어 추진 중인 디지털 토양 지도(Digital Soil Mapping, DSM)의 성공적인 구현을 위해서도, 모델의 학습과 검증에 사용될 현장 관측 데이터의 신뢰성을 확보하고 그 특성을 규명하는 과정은 필수적이다(Grunwald et al., 2011; KoFPI, 2017). 또한, 과거 대비 급격히 진행된 것으로 우려되는 토양 산성화와 같은 환경 변화를

정량적으로 진단하는 것은 지속가능한 산림 경영 전략 수립을 위해 시급히 요구되는 과제이다(Zou et al., 2018).

따라서 본 연구는 1:5,000 산림입지토양도 제작 사업을 통해 확보된 전국 938개 표준지의 정밀 조사 자료를 활용하여 다음의 목적을 수행하고자 한다. 첫째, 우리나라 산림토양의 최신 물리·화학적 특성을 층위별, 지역별, 모암별, 토양군별로 정량화하여 제시한다. 둘째, 과거 1:25,000 지도 자료와의 비교 분석을 통해 지난 수십 년간 진행된 산림토양의 이화학적 특성 변화 양상을 규명한다. 이를 통해 본 연구는 기후 스마트 임업 실현을 위한 과학적 기초 자료를 제공하고, 디지털 토양 지도 구축을 위한 핵심 입력 자료로서의 가치를 입증하고자 한다.

재료 및 방법

1. 공시재료

본 자료는 2009년부터 2021년까지 전국 산림을 대상으로 구축된 대축척(1:5,000) 산림입지토양도의 기본자료와 토양 시료 분석자료를 기반으로 수행하였다. 해당 대축척 산림입지 토양도는 일부 민통선 접경지역과 도서 지역을 제외한 총 592만ha의 산림 지역에 대한 자료가 구축되었다. 본 연구에서는 전체 조사 자료 중 표준지 938개소를 대상으로 토양의 물리·화학적 특성을 분석한 자료를 활용하였다. 토양 시료는 층위별로 A층과 B층에서 각각 채취하였다. 표준지 선정 기준 및 현장조사 방법에 대한 구체적인 절차는 ‘산림입지토양도(1:5,000)제작 매뉴얼(KoFPI, 2013)’에 상세히 제시되어 있다.

2. 토양 시료의 이화학적 특성 분석

토양 시료는 입자분포, 토성, 산도(pH), 유기물 함량(Soil Organic Matter; SOM), 총 질소 함량(Total Nitrogen; TN), 양이온치환용량(Cation Exchange Capacity; CEC), 치환성 양이온(Exchangeable Cation)을 분석하였다. 토양의 입자분포 및 토성 분석을 위해 토양 시료를 건조한 후 무게를 측정하고 기록하였다. 그 후, 토양을 증류수에 넣고 정해진 시간

간격으로 비중계를 사용하여 물의 밀도 변화를 측정하였다. 이러한 과정을 두 시간 동안 2회 측정하여 토양 내 모래, 미사, 점토의 함량을 측정하였으며, 토성은 비중계법을 통해 산출하였다. 산도는 1:5 증류수로 만든 토양 현탁액을 이용하여 pH meter를 이용하여 측정하였으며, SOM은 Tyurin 법을 사용하여 측정하였다. TN은 Dumas 방법을, CEC는 Brown 간이법을, 칼륨(K^+)과 나트륨(Na^+)의 함량은 염광분석법을, 칼슘(Ca^{2+})과 마그네슘(Mg^{2+})의 함량은 EDTA 적정법을 활용하여 정확히 분석하였다(NiFoS, 2014).

결과 및 고찰

1. 우리나라 산림토양의 물리적 특성

1) 산림토양의 지역·층위별 입자분포

토양 입경은 입자 사이의 공극의 크기와 양, 비표면적의 크기에 따라 토양의 무기물 및 유기 화합물을 흡착 보유하는 힘을 달리한다(Kim et al., 2006). 모래는 암석편과 조암광물로부터 구성되며, 토양의 통기성·투수성·경운 등에 영향을 미친다(Son et al., 2020). 점토는 화학적 풍화에 의한 2차

광물로 콜로이드 상태로 존재하며 외부 물질의 흡착, 팽윤, 응집작용을 함으로써 토양의 물리·화학적 기능에 중요한 역할을 한다(Kawada, 1989).

전국 산림토양의 A층은 평균 모래 42.9%, 미사 41.4%, 점토 15.6%로 양토(L)에 해당하는 토성 범위를 보였다(Table 1). B층의 전국 평균 토양 입자 분포 비율은 모래 43.5%, 미사 39.1%, 점토 17.4%로 토성은 양토로 나타났다. 전국 산림토양의 주된 토성이 양토로 나타난 것은 과거 1980년대에 수행된 조사 결과와 일치한다(Jeong et al., 2002). B층 점토 함량(17.4%)이 A층(15.6%) 대비 약 1.8%p 증가하여 표토에서 미세 입자가 용탈되어 심토에 집적되는 일반적인 토양 생성 작용이 제주를 제외한 내륙 전역에서 진행되고 있음이 확인되었다(Kwon et al., 2021). 또한, 전국적으로 A·B층 모두 점토의 함량이 각각 15.6%와 17.4%로 과거(A층 17.9%, B층 20.3%)에 비해 각각 2.3%와 2.9%p씩 감소한 반면에, A층에서는 미사 함량이 B층에서는 모래 함량이 상대적으로 증가하여 광물의 물리적 풍화작용이 활발하게 일어나고 있는 것으로 보인다(Jeong et al., 2002).

전국 산림토양의 토양 입자 분포 비율(B층 기준)을 국토지리정보원에서 보고한 우리나라 토양의 평균적인 토양 구성

Table 1. The soil particle distribution of Korea forest soils by regions.

Soil horizon	Region	No. of sample	Soil particle distribution		
			Sand (%)	Silt(%)	Clay(%)
A	Gangwon	79	47.7 ± 11.3	38.7 ± 8.9	13.6 ± 4.2
	Gyeonggi	95	46.6 ± 13.5	38.1 ± 9.4	15.3 ± 7.0
	Gyeongnam	109	32.4 ± 17.0	47.9 ± 14.1	18.8 ± 6.9
	Gyeongbuk	72	48.9 ± 13.6	38.7 ± 10.6	12.4 ± 4.8
	Jeonnam	92	39.9 ± 15.6	42.2 ± 12.5	17.9 ± 5.5
	Jeonbuk	120	42.0 ± 18.5	41.5 ± 15.8	16.5 ± 5.5
	Chungnam	195	47.8 ± 16.9	38.4 ± 13.7	13.8 ± 6.2
	Chungbuk	97	48.0 ± 18.2	39.9 ± 15.2	12.1 ± 5.6
	Jeju	54	22.5 ± 12.3	53.5 ± 11.6	24.0 ± 7.6
	Mean		42.9 ± 17.5	41.4 ± 13.7	15.6 ± 6.7
B	Gangwon	77	46.6 ± 13.6	37.7 ± 10.7	15.7 ± 5.4
	Gyeonggi	94	48.8 ± 14.5	34.3 ± 9.9	16.9 ± 7.1
	Gyeongnam	142	35.1 ± 18.8	42.8 ± 13.8	22.1 ± 8.4
	Gyeongbuk	73	16.2 ± 15.3	39.7 ± 12.1	14.0 ± 5.3
	Jeonnam	91	40.8 ± 14.7	39.3 ± 11.1	19.9 ± 5.9
	Jeonbuk	121	44.4 ± 18.9	37.5 ± 15.2	18.1 ± 6.4
	Chungnam	191	47.4 ± 17.3	36.7 ± 12.9	15.9 ± 7.4
	Chungbuk	96	48.6 ± 19.3	38.0 ± 14.7	13.4 ± 7.1
	Jeju	53	28.5 ± 18.3	51.8 ± 15.2	19.6 ± 8.4
	Mean		43.5 ± 18.1	39.1 ± 13.6	17.4 ± 7.5

(모래 41.7%, 미사 41.5%, 점토 16.8%)과 비교해 보면, 모래 함량은 1.8%p 높은 반면, 미사 함량 2.4%p, 점토 함량은 0.6%p 낮게 나타났다(NGII, 2020). 특히, 모래 함량이 높게 나타나는 것은 한반도의 2/3 이상이 풍화 후 조립질 토성을 갖는 화강암과 변성암을 모재로 생성된 토양에서 기인된 것으로 판단된다(NGII, 2020). 이러한 결과는 논이나 밭과 같은 인위적 경작지를 제외한 산림지역만의 조사치에서 기인된 것이며, 경작지는 경작 및 강우 등에 의한 표층토와 토사의 유실량이 산림토양에 비해 많기 때문이다(Son et al., 2020). 또한, B층의 모래 함량(43.5%)은 과거 Hur et al.(1984)이 보고한 우리나라 산림토양 B층의 모래 함량(42.8%)과 매우 유사한 것으로 나타났다.

지역별 모래 함량을 보면, 경기도(A층 46.6%, B층 48.8%)와 충청북도(A층 48.0%, B층 48.6%)가 높게 나타났다. 이는 이들 지역이 조립질 모재인 화성암과 변성암이 주로 분포하는 지형적 특성의 영향을 받은 것으로 판단된다(Park et al., 2010). 한편, 제주지역은 A층(22.5%)과 B층(28.5%) 모래 함량이 전국에서 가장 낮고, 화산회토를 모재로 하는 특성상 미사 함량(A층 53.5%, B층 51.8%)이 가장 높게 나타나 화산회 토양의 지역적 특수성을 명확히 보여주었다.

2) 산림토양의 지역·층위별 토성분포

전국 단위에서 평균적으로 A층 토성은 양토(L)가 36.8%로 가장 우세하였으며, 사양토(SL)가 30.0%로 뒤를 이었다(Table 2). 양질사토(LS) 2.2%를 포함하여 산림 표토의 약 69.0%가 조립질 토양으로 확인되었다. B층 역시 양토가 36.1%, 사양토가 30.7%로 가장 높은 비율을 차지했다. 그러나 A층 대비 양토와 미사질양토(SiL)의 비율은 감소하고, 사질식양토(SCL), 식양토(CL), 미사질식양토(SiCL)의 세립질 토성 비율이 B층에서 증가하는 경향을 보였다. 이러한 층위별 토성 변화는 토양 생성 작용의 결과로 해석된다. B층에서 세립질 토성이 증가하는 것은 A층으로부터 점토와 미사가 용탈되어 B층에 집적되는 전국적인 현상이 토성 분류 결과에 반영된 것이다(Kwon et al., 2021). 이는 B층이 A층보다 수분 및 양분 보유 능력이 높거나, 통기성과 투수성이 상대적으로 낮아질 수 있음을 의미한다(Jeong et al., 2002; Lee et al., 2009). 따라서 산림 수목의 뿌리 생장 및 수분 스트레스 연구에서는 A층과 B층의 토성 차이를 명확히 고려하여 물과 양분의 이동 경로를 모델링해야 한다(McBratney et al., 2003).

지역적 분포 측면에서 조립질 풍화 모재에서 기인되는 토성인 사양질(LS, SL, L)은 A층 69.0%, B층 69.8%인 반면에,

Table 2. The ratio of soil texture for Korea forest soils by regions. (unit: %)

Soil horizon	Region	LS	SL	L	SiL	SCL	CL	SiCL
A	Gangwon	0.0	39.2	45.6	13.9	0.0	1.3	0.0
	Gyeonggi	2.1	32.6	51.6	6.3	0.0	4.2	3.2
	Gyeongnam	0.9	15.6	30.3	42.2	0.9	1.8	8.3
	Gyeongbuk	0.0	45.8	41.7	11.1	0.0	1.4	0.0
	Jeonnam	0.0	25.0	43.5	23.9	0.0	5.4	2.2
	Jeonbuk	1.7	29.2	31.7	30.8	3.3	1.7	1.7
	Chungnam	4.1	35.9	35.9	20.0	1.0	1.5	1.5
	Chungbuk	7.2	33.0	33.0	23.7	2.1	1.0	0.0
	Jeju	0.0	3.7	14.8	50.0	0.0	13.0	18.5
	Total	2.2	30.0	36.8	24.0	1.0	2.8	3.2
B	Gangwon	1.3	37.7	42.9	14.3	1.3	2.6	0.0
	Gyeonggi	4.3	35.1	46.8	3.2	1.1	6.4	3.2
	Gyeongnam	1.4	20.4	31.0	21.8	1.4	9.2	14.8
	Gyeongbuk	1.4	39.7	34.2	20.5	0.0	1.4	2.7
	Jeonnam	0.0	26.4	46.2	13.2	0.0	8.8	5.5
	Jeonbuk	1.7	29.8	38.0	18.2	5.0	3.3	4.1
	Chungnam	4.2	36.1	35.6	13.6	1.0	5.2	4.2
	Chungbuk	10.4	33.3	31.3	19.8	1.0	1.0	3.1
	Jeju	0.0	13.2	13.2	54.7	1.9	1.9	15.1
	Total	3.0	30.7	36.1	17.9	1.5	4.9	5.9

* LS: Loamy Sand, SL: Sandy Loam, L: Loam, SiL: Silty Loam, SCL: Sandy Clay Loam, CL: Clay Loam, SiCL: Silty Clay Loam.

미세립질 풍화 모재에서 기인되는 미사식양질(SiL, CL, SiCL)은 A층 30.0%, B층 28.7%로 나타났다(Table 2). 사양질 토성이 가장 높은 지역은 충청남도, 주로 화강암 및 화강편마암이 분포하는 지역이므로 굵은 조립질 성분이 높은 모재의 영향을 받았기 때문으로 판단된다(Park et al., 2010). 미사식양질 토성이 가장 높은 지역은 강원도와 경상남도로, 주로 셰일, 역암, 사암 등 퇴적암 모암이 다양하게 분포되어 있어 풍화 후 세사 및 미사 성분이 주를 이루기 때문으로 판단된다(Jeong et al., 2002). 한편, 현무암을 모재로 생성된 화산회토가 주로 분포하는 제주지역은 미사질양토가 A층에서 50.0%, B층에서 54.7%로 가장 널리 분포하였는데, 이는 화산회토가 가진 미세입자의 우세라는 지역적 특수성을 재확인시켜 준 결과이다.

국토지리정보원은 우리나라 토양의 토성 비율은 모래 함량이 높은 사양질 토양이 전체 토양의 78.6%에 해당되며, 이러한 토성은 토양 내 공극률이 높고, 토양 배수가 양호한 특징을 보이는 반면, 유기물과 무기염류의 함량이 낮아 토양의 비옥도가 낮아질 가능성이 높다고 하였다(NGII, 2020). 따라서 본 연구에서 나타난 양토 및 사질양토의 우세는 산림 지역이 공극률과 배수성은 양호하나, 유기물 및 양분 관리 측면에서는 취약성이 내재되어 있다.

3) 산림토양의 모암·층위별 토성분포

전국 산림토양의 모재(Parent rocks)는 화성암(Igneous rocks)이 A층에서 42.4%와 B층에서 42.2%로 가장 넓게 분포하고 있었다(Table 3). 변성암(Metamorphic rocks)은 A층에서는 40.9%, B층에서는 39.9%로 화성암과 유사한 비율로 분포하였다. 퇴적암(Sedimentary rocks)은 A층에서 16.8%와 B층에서 17.9%의 분포 비율을 보였다. 층위별 모재 특성을 분석하면, 모든 모재에서 B층의 점토 함량이 A층 대비 증가하는 경향이 일관되게 확인되었다. 구체적으로 양질 토양

(LS, SL, L, SiL)의 A층 대비 B층에서 비율이 5.3% 감소하였으며, 식양질 토양(SCL, CL, SiCL)은 A층 대비 B층에서 비율이 5.3% 증가하였다. 화성암 유래 토양은 A층 식양질 토양 비율이 10.4%에서 B층 13.2%로, 변성암은 A층 4.0%에서 B층 8.0%로, 퇴적암은 A층 5.9%에서 B층 19.7%로 점토 함량이 증가하였다.

모재별 토성의 분포는 한반도의 복잡한 지질 구조를 반영하며, 모재의 종류가 토양의 물리적 조성에 직접적인 영향을 미친다(Park et al., 2010). 모든 모재에서 B층으로의 점토 집적이 확인된 것은 모재와 관계없이 침투하는 강우 등에 의해 점토 이동 현상이 보편적으로 발생하는 토양 형성 과정임을 입증한 것이다(Kwon et al., 2021). 모재별 토성 조성의 차이는 산림 관리 전략의 차별화 필요성을 시사한다. 화성암 유래 토양은 모래 함량이 가장 높아 사질 토성이 우세한 반면(A층 모래 50.4%), 퇴적암은 B층에서 점토 함량이 높아 점토 집적 현상이 가장 강하게 나타났다. 이는 모암의 광물 조성 및 풍화에 대한 저항성 차이가 토양 구조에 반영되었으며, 퇴적암 유래 토양은 점토가 많아 배수 취약성을 가질 수 있고, 화성암 유래 토양은 사질이 많아 양분 및 수분 보유 능력이 낮을 수 있음을 의미한다(Lee et al., 2009). 따라서 모재 특성에 따른 층위별 이화학적 특성 차이를 고려하여 맞춤형 산림 경영 계획을 수립해야 한다.

4) 산림토양의 토양군·층위별 토성분포

1:5,000 산림입지토양도 분류 체계에 따라 주요 토양군(soil groups)의 전국 분포 현황과 토양 층위별 토성 분포를 분석한 결과에 따르면, 전국 산림 면적의 A층은 약 80.1%, B층은 약 80.5%가 갈색산림토양(Brown)으로 확인되어 우리나라 산림의 가장 대표적인 토양 유형임을 재확인하였다(Table 4). 다음으로 적황색산림토양(Red & Yellow)이 A층에서 6.5%, B층에서 6.1%로 나타났다. 암적색산림토양

Table 3. The ratio of soil texture by soil horizon and parent rocks. (unit: %)

Soil horizon	Parent rocks	National distribution	LS	SL	L	SiL	SCL	CL	SiCL
A	Igneous	42.4	3.9	23.0	29.7	24.0	2.1	3.6	4.7
	Metamorphic	40.9	1.3	31.4	45.0	18.2	0.3	2.1	1.6
	Sedimentary	16.8	0.0	21.6	34.6	37.9	0.0	2.6	3.3
	Total	100.0	2.2	30.0	36.8	24.0	1.0	2.8	3.2
B	Igneous	42.2	4.5	31.3	30.8	20.2	2.8	5.1	5.3
	Metamorphic	39.9	2.1	34.2	43.0	12.6	0.5	4.3	3.2
	Sedimentary	17.9	1.2	21.4	33.3	24.4	0.6	6.0	13.1
	Total	100.0	3.0	30.7	36.1	17.9	1.5	4.9	5.9

* LS: Loamy Sand, SL: Sandy Loam, L: Loam, SiL: Silty Loam, SCL: Sandy Clay Loam, CL: Clay Loam, SiCL: Silty Clay Loam.

(Dark Red)은 A층에서 6.1%, B층에서 6.2% 분포하였으며, 화산회산립토양(Volcanic ash)은 A층과 B층에서 각각 5.9%와 5.7%의 분포를 보였다. 회갈색산립토양(Gray Brown)은 토양분류군 중 A층(1.4%)과 B층(1.6%) 모두에서 분포 비율이 가장 낮았다. 한편, 모든 토양분류군은 A층과 B층에서 유사한 비율로 분포하는 것으로 나타났다.

갈색산립토양의 압도적인 우세는 우리나라의 온대 및 냉온대 기후 환경하에서 활엽수림 또는 혼효림 식생의 영향으로 유기물 집적과 철분의 용탈 및 재집적이 활발히 일어나는 갈색화 작용이 가장 보편적인 토양 형성 과정을 반영한다(Lee et al., 2009). 이는 1:25,000 산림입지도 제작 시 확인된 갈색산립토양 우세 경향과 일치하며, 본 1:5,000 대축척 조사를 통해 그 분포 비율(A층 80.1%, B층 80.5%)을 더욱 정밀하게 파악할 수 있었다(Kwon et al., 2021; Jeong et al., 2002).

갈색산립토양의 층위별 토성을 보면, A층(38.6%)과 B층(37.9%) 모두에서 양토의 비율이 가장 높았으며, 사양토가 A층 33.1%, B층 33.9%로 그 뒤를 이었다. 층위별 변화에서 주목할 점은 A층(21.6%)에 비해 B층(14.3%)에서 미사질양토의 비율이 감소하고, 대신 사질식양토(A층 0.8% → B층 1.3%), 식양토(A층 1.5% → B층 4.2%), 미사질식양토(A층 1.9% → B층 4.8%) 등 세립질 토성의 비율이 뚜렷하게 증가하였다. 이는 갈색산립토양의 전형적인 발달 특성으로서 우리나라 대부분의 토양에서 A층의 유기물 혼합, 미사 용탈, B층으로의 점토 집적 등이 발생하고 있음을 알 수 있다(Lee et al., 2009).

특수 토양군의 분포는 토양 형성 인자 중 모재 및 지형의 영향이 토양 유형의 분화에 결정적인 역할을 함을 명확히 보여준다(McBratney et al., 2003; Park et al., 2010). 암적색산

립토양은 A층에서 양토(41.1%)와 사양토(35.7%)가 우세했으며, B층에서는 미사질양토(31.0%)의 비율이 A층(21.4%)보다 증가하는 특징을 보였다. 이 토양군은 주로 석회암 모재가 넓게 분포하는 강원도와 충청북도 지역, 그리고 퇴적암 모재가 우세한 경상북도 지역에서 높은 비율로 나타난다(Kwon et al., 2021). 이는 모재로부터 용탈된 탄산칼슘 등의 영향으로 토양 반응이 중성 또는 약알칼리성을 띠며 특징적인 암적색 B층이 발달하는 토양 특성을 반영한다(Jeong et al., 2003).

회갈색산립토양은 A층(61.5%)과 B층(60.0%) 모두에서 미사질양토가 압도적으로 우세했다. 적황색산립토양은 B층에서 식양토(A층 10.2% → B층 17.5%)와 미사질식양토(A층 8.5% → B층 15.8%)의 비율이 크게 증가하였다. 이처럼 층위별 미사와 점토의 집적 현상이 매우 활발함을 알 수 있었다. 이러한 세립질 B층의 발달은 수분 보유에는 유리할 수 있으나, 점토 함량의 증가로 인한 배수 불량을 유발하여 수목의 뿌리 발달에 제한 요인이 될 수 있다(Lee et al., 2009). 화산회산립토양은 A층과 B층 모두에서 미사질양토가 각각 50.0%와 54.7%로 절반 이상을 차지했으며, 미사질식양토의 비율은 A층에서 18.5%로 타 토양군 대비 매우 높게 나타났다. 이는 제주도에 집중 분포하는 화산회토의 지질학적 특수성 때문이다(Kwon et al., 2021). 현무암 모재로부터 유래된 화산회 물질은 미사 함량이 높은 미사질 토성을 우세하게 만들고 높은 유기물 함량을 갖게 하는 핵심 요인으로 작용하였다(Jeong et al., 2002).

종합적으로 1:5,000 산림입지도토양도를 통해 정밀하게 파악된 토양군과 토성의 층위별 분포 정보는 각 토양군의 고유한 물리·화학적 특성을 고려한 적지적수 조립 및 맞춤형 산

Table 4. The ratio of soil texture by soil horizon and soil groups. (unit: %)

Soil horizon	Soil group	National distribution	LS	SL	L	SiL	SCL	CL	SiCL
A	Brown	80.1	2.5	33.1	38.6	21.6	0.8	1.5	1.9
	Red & Yellow	6.5	3.4	16.9	32.2	23.7	5.1	10.2	8.5
	Dark Red	6.1	0.0	35.7	41.1	21.4	0.0	1.8	0.0
	Gray Brown	1.4	0.0	0.0	30.8	61.5	0.0	7.7	0.0
	Volcanic ash	5.9	0.0	3.7	14.8	50.0	0.0	13.0	18.5
	Total	100.0	2.2	30.0	36.8	24.0	1.0	2.8	3.2
B	Brown	80.5	3.6	33.9	37.9	14.3	1.3	4.2	4.8
	Red · Yellow	6.1	1.8	12.3	40.4	7.0	5.3	17.5	15.8
	Dark Red	6.2	0.0	29.3	34.5	31.0	0.0	5.2	0.0
	Gray Brown	1.6	0.0	6.7	20.0	60.0	0.0	0.0	13.3
	Volcanic ash	5.7	0.0	13.2	13.2	54.7	1.9	1.9	15.1
	Total	100.0	3.0	30.7	36.1	17.9	1.5	4.9	5.9

림 사업 계획 수립의 핵심 기반을 제공한다(Lee et al., 2009; Baskent et al., 2024). 또한, 토양 유형별 물리적 특성은 산사태 발생 가능성이나 토양 침식 위험도와도 연관된다(Seo et al., 2015). 따라서, 본 자료는 산림 재해 위험 평가 및 관리의 공간적 정확도를 높이는 데 기여할 것이다(Kwon et al., 2021).

2. 우리나라 산림토양의 화학적 특성

1) 산림토양의 지역·층위별 화학적 특성

토양의 화학적 성질에 영향을 미치는 주요 인자인 토양산도는 A층 pH 4.74, B층 pH 4.96으로 매우 낮은 값을 보였다(Table 5). A층의 값이 B층보다 낮은 것은 표층에서 강우

Table 5. The chemical properties of Korea forest soils by regions.

Soil horizon	Region	pH (1:5)	SOM (%)	TN (%)	CEC	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
					(cmol _c /kg)				
A	Gangwon	5.28 ± 0.79	6.10 ± 2.65	0.27 ± 0.12	20.5 ± 9.8	0.21 ± 0.15	0.07 ± 0.04	3.41 ± 5.41	0.63 ± 0.92
	Gyeonggi	4.50 ± 0.46	4.74 ± 2.29	0.18 ± 0.10	16.9 ± 7.1	0.17 ± 0.11	0.05 ± 0.02	1.05 ± 1.80	0.29 ± 0.32
	Gyeongnam	4.58 ± 0.40	3.17 ± 4.54	0.22 ± 0.17	16.1 ± 10.2	0.21 ± 0.15	0.07 ± 0.03	1.44 ± 1.59	0.67 ± 0.70
	Gyeongbuk	5.01 ± 0.72	6.04 ± 3.89	0.30 ± 0.21	17.1 ± 8.3	0.17 ± 0.14	0.08 ± 0.05	2.42 ± 3.37	1.18 ± 1.53
	Jeonnam	4.62 ± 0.33	5.69 ± 2.56	0.21 ± 0.09	16.1 ± 6.4	0.21 ± 0.11	0.11 ± 0.06	0.88 ± 1.02	0.39 ± 0.34
	Jeonbuk	4.56 ± 0.47	4.89 ± 2.14	0.16 ± 0.09	19.1 ± 9.2	0.16 ± 0.13	0.13 ± 0.16	1.42 ± 2.07	0.48 ± 0.47
	Chungnam	4.82 ± 0.36	4.24 ± 2.23	0.16 ± 0.10	13.6 ± 6.9	0.15 ± 0.09	0.05 ± 0.02	0.95 ± 1.76	0.41 ± 0.55
	Chungbuk	4.82 ± 0.45	3.99 ± 2.09	0.16 ± 0.10	16.7 ± 6.9	0.14 ± 0.10	0.13 ± 0.19	1.79 ± 3.23	0.65 ± 1.10
	Jeju	5.66 ± 0.70	13.35 ± 3.83	0.67 ± 0.23	40.8 ± 21.1	0.29 ± 0.17	0.23 ± 0.13	1.25 ± 1.01	0.88 ± 0.66
	Mean	4.74 ± 0.60	5.21 ± 3.66	0.23 ± 0.18	17.6 ± 9.7	0.19 ± 0.14	0.09 ± 0.08	1.86 ± 3.18	0.69 ± 0.99
B	Gangwon	5.39 ± 0.83	3.98 ± 2.63	0.18 ± 0.11	18.5 ± 8.7	0.14 ± 0.10	0.07 ± 0.09	2.31 ± 4.13	0.45 ± 0.62
	Gyeonggi	4.74 ± 0.37	1.78 ± 1.38	0.07 ± 0.06	15.1 ± 6.7	0.14 ± 0.09	0.06 ± 0.04	0.90 ± 1.68	0.26 ± 0.29
	Gyeongnam	4.88 ± 0.40	1.30 ± 2.56	0.05 ± 0.10	11.0 ± 5.2	0.15 ± 0.07	0.10 ± 0.04	0.73 ± 0.73	0.47 ± 0.43
	Gyeongbuk	5.19 ± 0.71	3.42 ± 2.88	0.23 ± 0.26	15.2 ± 6.9	0.13 ± 0.11	0.09 ± 0.09	1.99 ± 2.86	1.16 ± 1.42
	Jeonnam	4.81 ± 0.27	2.37 ± 1.66	0.10 ± 0.06	13.7 ± 5.8	0.16 ± 0.08	0.11 ± 0.06	0.60 ± 0.74	0.37 ± 0.47
	Jeonbuk	4.84 ± 0.44	2.08 ± 1.52	0.06 ± 0.05	16.2 ± 7.6	0.12 ± 0.09	0.14 ± 0.18	0.82 ± 1.08	0.38 ± 0.40
	Chungnam	4.79 ± 0.35	1.89 ± 1.15	0.06 ± 0.04	11.9 ± 5.2	0.12 ± 0.06	0.05 ± 0.03	0.60 ± 0.88	0.34 ± 0.47
	Chungbuk	5.03 ± 0.46	1.87 ± 1.43	0.07 ± 0.07	14.4 ± 6.2	0.11 ± 0.08	0.13 ± 0.18	1.60 ± 3.44	0.60 ± 1.09
	Jeju	5.70 ± 0.68	11.82 ± 4.70	0.57 ± 0.28	37.3 ± 20.7	0.15 ± 0.07	0.22 ± 0.12	0.47 ± 0.47	0.37 ± 0.30
	Mean	4.96 ± 0.55	2.71 ± 3.20	0.12 ± 0.17	14.5 ± 8.0	0.14 ± 0.09	0.10 ± 0.09	1.30 ± 2.42	0.57 ± 0.86

등에 의한 염기 용탈로 산성화가 진행되기 때문이다(Kim et al., 2006). 과거 1:25,000 산림토양도의 평균치(A층 pH 5.48, B층 pH 5.52)와 비교해 보면 우리나라의 산지가 매우 빠른 속도로 산성화되어 가고 있음을 보여주고 있다(Jeong et al., 2002). 특히, A층이 산도가 B층보다 낮은 pH를 보이는 것은 산성 강하물의 영향이 표층에 집중되고, A층에 집적된 SOM의 분해 과정에서 생성되는 유기산의 영향이 더해졌기 때문으로 판단된다(Lee et al., 2009). 이러한 토양 산성화는 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 등 필수 염기성 양이온의 용탈을 가속화하고 토양의 완충능을 약화시켜 산림 생태계의 건강성 및 임지 생산성을 저해하는 주요 요인이 될 수 있다(Seo et al., 2015). 또한, 수목의 생육 범위가 pH 4.8~6.5임을 감안할 때 수목의 정상적 생장에 지장을 주게 될 뿐만 아니라, 토양 산도가 pH 4.0이하로 내려 갈 경우에는 식물체에 독성이 되고 양분의 유효도를 감소시킴으로써 토양의 척박화 및 식물군집의 변화 등 산림 생태계에 미치는 부정적 영향은 매우 클 것으로 판단된다(Son et al., 2020).

A층의 SOM 함량(5.21%)과 TN 함량(0.23%)은 B층(SOM 2.71%, TN 0.12%) 대비 약 2배 정도 높게 나타났다. 이는 낙엽 등 유기물 공급이 표층에 집중되는 산림생태계의 전형적인 양분 순환 특성을 반영한다(Lee et al., 2009). Table 1에서 확인된 B층의 점토 함량 증가(A층 15.6% → B층 17.4%)에도 불구하고 A층의 CEC는 17.6 cmol/kg으로 B층(14.5 cmol/kg)보다 높게 나타났는데, 이는 CEC에 대한 기여도는 점토보다 유기물이 더 크다는 것을 의미한다(Lee et al., 2009). 따라서, 산림토양의 비옥도 유지를 위해서는 A층 유기물의 보전이 매우 중요하다.

지역별 편차에서는 제주도의 특수성이 두드러졌다. 제주도 A층은 pH 5.66, SOM 13.35%, CEC 40.8 cmol/kg로 전국 평균(pH 4.74, SOM 5.21%, CEC 17.6 cmol/kg) 대비 월등하게 높게 나타났다. 이는 Table 4에서 확인된 화산화산림토

양의 분포와 일치하며, 화산회토의 비결정질 점토(allophane)가 유기물과 강하게 결합하여 SOM의 집적률을 높이고 CEC를 극대화하는 지역적 특수성을 반영한 것으로 판단된다(Kwon et al., 2021). 이러한 제주도의 특성은 과거 1:25,000 산림토양도 조사에서도 높은 SOM(A층 10.4%)과 높은 pH(A층 5.8)로 보고된 바 있다(Jeong et al., 2002). 이처럼 본 1:5,000 대축척 조사에서 과거와 일관된 경향성이 확인되었다.

한편, 경기도는 A층 pH가 4.50으로 전국에서 가장 낮아 산성화에 가장 취약한 지역으로 나타났다. 이는 수도권의 높은 산성 강하물 부하와 관련되었을 가능성이 높다(Jeong et al., 2002). 강원도는 A층의 치환성 Ca^{2+} 함량이 3.41 cmol/kg로 전국 평균(1.86 cmol/kg)보다 매우 높았다. 이는 Table 4에서 확인된 암적색산림토양의 분포, 즉, 석회암 모재의 영향이 강하게 반영된 결과로 해석된다(Jeong et al., 2002; Kwon et al., 2021).

SOM은 A층을 기준으로 지역별로 살펴보면, 제주도가 13.35%로 가장 높고, 산악지역인 강원 지역(6.10%)과 경북 지역(6.04%) 순으로 나타났다. 반면에, 경남 지역과 충북 지역은 각각 3.17%와 3.99%로 낮게 나타났다. 토양 표면 위에 다양한 형태로 존재하는 지상부 잎과 가지 및 지하부 뿌리 등이 공급원이 되어 SOM이 증가하게 된다. 즉, 우리나라 산림의 발달로 유기물의 원활한 공급이 SOM 증가의 주요 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 그리고 SOM은 분해과정을 통해 토양으로 많은 염기를 공급함으로써 토양 pH를 증가시켰다. 이는 토양 pH와 SOM의 높은 양(+)의 상관관계를 통해 알 수 있었다(Figure 1).

과거 1:25,000 산림토양도와 비교하면, SOM은 A층에서 0.72%p, B층에서 0.68%p 증가하였으며, TN은 A층에서 0.04%p, B층에서 0.03%p 증가하였고, CEC는 A층에서 5.1 cmol/kg, B층에서 3.8 cmol/kg 증가하였다(Jeong et al.,

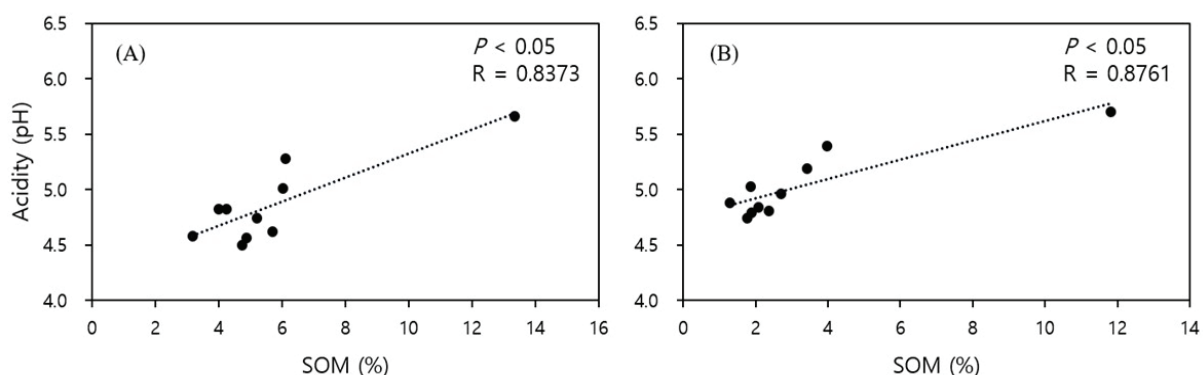


Figure 1. Region-scaled correlation analysis between soil organic matter (SOM) and soil acidity at (A) the A layer and (B) the B layer of forest soil.

2002). 반면에 치환성 염기인 칼륨, 나트륨, 칼슘, 마그네슘은 각각 A층에서 0.04 cmol/kg, 0.13 cmol/kg, 0.58 cmol/kg, 0.32 cmol/kg, B층에서 0.01 cmol/kg, 0.11 cmol/kg, 0.34 cmol/kg, 0.46 cmol/kg 감소하는 경향을 보였다. 일반적으로 치환성 염기는 다른 양분들에 비해 상대적으로 쉽게 용탈되는 경향이 있다(Jin et al., 1994). 우리나라 산림토양은 대규모 조림사업에 성공함으로써 전국 산림의 생장이 양호하여 다량의 SOM이 공급되고 이로 인해 토양 내 TN과 CEC가 증가한 것으로 판단된다. 그러나 한편으로는 토양 중의 치환성 염기가 다량으로 용탈되고 산림토양은 산성화되고 있어 산림토양의 지위가 점차 감소하고 있다(Jeong et al., 2002). 따라서, 우리나라 산림토양을 보다 건강하게 유지 관리하기 위해서는 토양의 급격한 산성화 방지를 위한 대안 마련이 시급한 실정이다.

2) 산림토양의 모암·층위별 화학적 특성

전국 산림토양의 화학적 특성은 A층의 평균 pH가 변성암 유래의 토양에서 4.65로 가장 낮아 높은 산성도를 보였으며, 화성암이 4.74, 퇴적암이 4.95 순으로 높은 pH를 보였다(Table 6). B층 역시 변성암(pH 4.88)에서 가장 낮고 퇴적암(pH 5.16)에서 가장 높은 것으로 나타나 모암의 종류가 토양의 pH에 직접적인 영향을 미친 것이 확인되었다. 모암은 토양의 무기적 구성과 화학적 특성을 결정하는 근원적인 토양 형성 인자이다(Park et al., 2010). 모든 모암 유형에서 A층의 pH가 B층보다 낮게 나타났는데, 이는 A층에 집적된 유기물의 분해 과정에서 발생하는 유기산의 영향과 산성 강하물의

직접적인 영향이 표층에 집중되었기 때문이다(Lee et al., 2009).

치환성 양이온 함량은 모암별 산도 특성을 명확하게 뒷받침한다. 퇴적암 유래의 토양은 A층의 치환성 Ca^{2+} (2.65 cmol/kg) 및 Mg^{2+} (0.92 cmol/kg) 함량이 화성암(Ca^{2+} 1.75 cmol/kg, Mg^{2+} 0.68 cmol/kg)이나 변성암(Ca^{2+} 1.35 cmol/kg, Mg^{2+} 0.50 cmol/kg) 유래의 토양 대비 현저히 높았다. 이 경향은 B층에서도 동일하게 나타났다. 이는 퇴적암, 특히 석회암이나 석회질 셰일 등이 모암인 경우, 풍화 과정에서 염기성 양이온을 토양에 지속적으로 공급하여 산성화를 완충하는 능력이 다른 모암에 비해 우수함을 의미한다(Jeong et al., 2002). 반면, 화강암이나 편마암이 주를 이루는 화성암 및 변성암 유래의 토양은 염기 함량이 낮아 외부의 산성 부하에 대한 저항력이 낮으며, 이는 변성암에서 가장 낮은 pH 값(A층 4.65)으로 확인되었다(Park et al., 2010).

SOM과 TN은 A층이 B층보다 높았으며, A층 기준으로는 화성암(SOM 5.85%, TN 0.25%)에서 가장 높고 변성암(SOM 4.68%, TN 0.19%)에서 가장 낮았다. CEC는 A층에서 화성암(18.2 cmol/kg)과 변성암(17.8 cmol/kg)이 퇴적암(16.6 cmol/kg)보다 높게 나타났다. 화성암과 변성암 유래 토양은 pH가 낮고 염기 함량이 낮음에도 불구하고 A층의 CEC가 높게 유지되는 것은 높은 SOM(화성암 5.85%, 변성암 4.68%)이 토양의 전하를 유지하는 데 결정적인 역할을 하고 있음을 시사한다(Lee et al., 2009). 결론적으로 본 1:5,000 산림입지토양도 자료는 우리나라 산림토양이 모암의 종류에 따라 산성화에 대한 토양의 완충능이 명확히 구분됨

Table 6. The chemical properties by soil horizon and parent rocks.

Soil horizon	Parent rocks	pH (1:5)	SOM (%)	TN (%)	CEC	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
					(cmol/kg)				
A	Igneous	4.74 ± 0.61	5.85 ± 4.32	0.25 ± 0.22	18.2 ± 11.0	0.19 ± 0.14	0.10 ± 0.09	1.75 ± 2.91	0.68 ± 1.04
	Metamorphic	4.65 ± 0.50	4.68 ± 2.53	0.19 ± 0.11	17.8 ± 9.1	0.18 ± 0.13	0.08 ± 0.08	1.35 ± 2.20	0.50 ± 0.88
	Sedimentary	4.95 ± 0.75	4.89 ± 3.95	0.25 ± 0.18	16.6 ± 8.4	0.21 ± 0.14	0.08 ± 0.06	2.65 ± 4.24	0.92 ± 1.00
	Mean	4.74 ± 0.60	5.21 ± 3.66	0.23 ± 0.18	17.6 ± 9.7	0.19 ± 0.14	0.09 ± 0.08	1.86 ± 3.18	0.69 ± 0.99
B	Igneous	4.96 ± 0.54	3.34 ± 4.07	0.14 ± 0.21	15.4 ± 9.5	0.13 ± 0.08	0.11 ± 0.12	1.14 ± 2.00	0.55 ± 0.83
	Metamorphic	4.88 ± 0.47	2.10 ± 1.76	0.08 ± 0.11	15.0 ± 6.8	0.14 ± 0.09	0.09 ± 0.08	0.98 ± 1.81	0.44 ± 0.88
	Sedimentary	5.16 ± 0.70	2.57 ± 3.06	0.13 ± 0.17	13.1 ± 7.0	0.15 ± 0.09	0.10 ± 0.06	1.67 ± 3.21	0.73 ± 0.83
	Mean	4.96 ± 0.55	2.71 ± 3.20	0.12 ± 0.17	14.5 ± 8.0	0.14 ± 0.09	0.10 ± 0.09	1.26 ± 2.42	0.57 ± 0.86

을 보여주었다(Kwon et al., 2021). 특히, 변성암과 화성암이 넓게 분포하는 지역은 산림토양 산성화 관리에 있어 우선적인 고려 대상이 되어야 하며, 이는 제6차 국가산림계획에서 강조하는 지속가능한 산림 관리 및 토양 보전 목표 달성을 위해 필수적인 정밀 정보로 이용될 것이다(KFS, 2025).

3) 산림토양의 토양군 · 층위별 화학적 특성

토양군별 화학적 편차는 매우 뚜렷하게 나타났다(Table 7). A층을 기준으로 적황색산림토양의 pH가 4.28로 가장 낮은 산성화를 보였으며, 가장 우세한 토양군인 갈색산림토양 역시 pH 4.66으로 전국 A층 평균(pH 4.74)보다 낮은 산성도를 나타냈다. 반면, 암적색산림토양은 pH 5.36, 화산화산림토양은 pH 5.66으로 측정되었으며, 이 두 토양군은 산성화의 영향이 상대적으로 적거나 높은 완충능을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 이처럼 토양군은 모암, 지형, 기후, 식생 등 토양 형성 인자의 복합적인 작용을 반영하므로 토양군별 화학적 특성의 차이를 규명하는 것은 토양의 기능적 특성을 이해하는 데 필수적이다(Park et al., 2010). 이러한 토양군별 산도 차이는 토양의 완충능을 결정하는 치환성 양이온 함량과 직접적으로 연관된다. pH가 가장 높았던 암적색산림토양

은 A층의 치환성 Ca^{2+} 함량이 4.12 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$ 로, 전국 A층 평균(1.86 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$)은 물론 갈색산림토양(1.57 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$)에 비해서도 월등히 높았다. 이는 Table 4와 6의 분석과 일치하는 결과로, 석회암 또는 염기성 퇴적암을 모암으로 하는 암적색산림토양의 특성이 토양의 화학성에 그대로 반영된 것으로 판단된다(Jeong et al., 2002).

화산화산림토양은 모든 화학적 특성에서 타 토양군과 구별되는 뚜렷한 지역적 특수성을 보였다. A층의 SOM은 13.35%, TN은 0.67%, CEC는 40.8 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$ 로 전국에서 가장 우세한 갈색산림토양(SOM 4.65%, TN 0.20%, CEC 17.3 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$) 대비 매우 높은 값을 나타냈다. 이는 제주도에 분포하는 화산회토의 비결정질 점토(Allophane)가 유기물과 매우 강한 결합을 형성하여 유기물의 분해를 억제하고 토양 내에 안정적으로 집적시키기 때문이다(Jeong et al., 2002; Kwon et al., 2021). 비록 B층에서도 SOM(11.82%)과 CEC(37.3 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$)가 높게 유지되었으나, Ca^{2+} 함량은 A층(1.25 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$) 대비 B층(0.47 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$)에서 급격히 감소하는 특징을 보였다. 한편, 적황색산림토양은 A층 pH가 4.28로 가장 낮았을 뿐만 아니라, CEC(11.8 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$), Ca^{2+} (0.68 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$), Mg^{2+} (0.23 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$) 함량 역시 조사된 토양군 중

Table 7. The chemical properties by soil horizon and groups.

Soil horizon	Soil groups	pH (1:5)	SOM (%)	TN (%)	CEC	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
					(cmol _c /kg)				
A	Brown	4.66 ± 0.47	4.65 ± 2.96	0.20 ± 0.13	17.3 ± 8.8	0.19 ± 0.14	0.09 ± 0.08	1.57 ± 2.52	0.60 ± 0.95
	Red · Yellow	4.28 ± 0.36	4.27 ± 2.12	0.15 ± 0.09	11.8 ± 2.9	0.27 ± 0.04	0.09 ± 0.04	0.68 ± 0.43	0.23 ± 0.13
	Dark Red	5.36 ± 0.94	5.87 ± 3.73	0.28 ± 0.14	17.0 ± 9.8	0.19 ± 0.11	0.07 ± 0.04	4.12 ± 6.02	1.02 ± 1.18
	Gray Brown	4.73 ± 0.26	4.19 ± 2.66	0.17 ± 0.10	16.7 ± 6.5	0.20 ± 0.16	0.10 ± 0.05	2.08 ± 2.70	1.12 ± 1.01
	Volcanic ash	5.66 ± 0.70	13.35 ± 3.83	0.67 ± 0.23	40.8 ± 21.1	0.29 ± 0.17	0.23 ± 0.13	1.25 ± 1.01	0.88 ± 0.66
	Mean	4.74 ± 0.60	5.21 ± 3.66	0.23 ± 0.18	17.6 ± 9.7	0.19 ± 0.14	0.09 ± 0.08	1.86 ± 3.18	0.69 ± 0.99
B	Brown	4.89 ± 0.44	2.11 ± 1.95	0.09 ± 0.12	14.4 ± 6.9	0.14 ± 0.09	0.10 ± 0.10	1.06 ± 1.83	0.51 ± 0.84
	Red · Yellow	4.63 ± 0.37	1.32 ± 0.72	0.05 ± 0.03	9.6 ± 1.9	0.20 ± 0.07	0.12 ± 0.04	0.52 ± 0.35	0.45 ± 0.33
	Dark Red	5.53 ± 0.89	3.72 ± 3.29	0.18 ± 0.13	15.4 ± 9.2	0.15 ± 0.08	0.07 ± 0.04	3.27 ± 5.35	0.74 ± 0.97
	Gray Brown	4.96 ± 0.47	2.08 ± 1.35	0.09 ± 0.05	12.0 ± 5.4	0.15 ± 0.11	0.11 ± 0.05	1.26 ± 1.73	0.95 ± 0.85
	Volcanic ash	5.70 ± 0.68	11.82 ± 4.70	0.57 ± 0.28	37.3 ± 20.7	0.15 ± 0.07	0.22 ± 0.12	0.47 ± 0.47	0.37 ± 0.30
	Mean	4.96 ± 0.55	2.71 ± 3.20	0.12 ± 0.17	14.5 ± 8.0	0.14 ± 0.09	0.10 ± 0.09	1.26 ± 2.42	0.57 ± 0.86

가장 낮았다. 이는 해당 토양군이 강한 용탈 작용을 받아 염기성 양이온이 심각하게 결핍되었으며, 산성 강하물에 대한 완충 능력이 매우 취약한 상태임을 의미한다(Lee et al., 2009).

종합적으로 본 1:5,000 산림입지토양도 데이터는 토양군에 따라 산도, 유기물 함량, 양분 보유 능력이 뚜렷하게 다르다는 것을 정량적으로 입증하였다. 이러한 결과는 제6차 국가산림계획에서 강조하는 지속가능한 산림 관리 및 토양 보전 목표 달성을 위해서는 획일적인 시업 방식이 아닌 토양군별 특성을 고려한 정밀입업이 필수적임을 강력히 시사한다(Baskent et al., 2024; KFS, 2025). 또한, 본 연구에서 구축된 토양군별 화학적 특성 데이터는 향후 디지털 토양 지도 기술을 활용하여 토양의 화학적 속성을 3차원적으로 예측하고 모델링하는 데 핵심적인 기초 자료로 활용될 수 있다(McBratney et al., 2003; Grunwald et al., 2011).

결론

본 연구는 1:5,000 산림입지토양도 기반의 대규모 현장 조사 자료를 활용하여 우리나라 산림토양의 최신 이화학적 특성을 층위별(A층 및 B층) 및 공간적으로 정량화하고, 지속가능한 산림 관리를 위한 과학적 기반을 제시하는 것을 목적으로 수행되었다. 연구 결과, 우리나라 산림토양 단면에서 토양 생성 작용이 뚜렷하게 확인되었는데, B층은 A층 대비 일관되게 높은 점토 함량을 보여주어 점토의 하향 이동 및 집적이 모든 모재와 지역에서 진행되었음이 입증되었다. 이러한 층위별 특성 발현은 토양의 물리적 안정성과 수분 보유 능력 평가에 있어 단면 전체의 3차원적 이해가 필수적임을 의미한다. 가장 중요한 화학적 발견은 전국 산림토양의 심각한 산성화 추세이다. A층의 전국 평균 pH는 4.74로, 이는 과거 자료와 비교할 때 지난 수십 년간 산성화가 가속화되었음을 보여주는 명확한 시간적 증거이다. 특히, A층은 SOM과 TN 등 양분이 가장 풍부하게 축적되어 있음에도 불구하고, 산성 강하물의 직접적인 영향을 받아 B층(pH4.96)보다 낮은 pH를 보였다. 이러한 특성으로 인해 A층은 산림생태계의 성장을 저해하는 요인으로 작용하거나, 치환성 양이온의 용탈원으로 작용할 가능성이 높다. 공간적으로는 모재의 영향이 A층과 B층 모두의 화학적 특성을 규정하는 데 결정적인 역할을 하였다. 퇴적암 모재가 상대적으로 높은 pH와 치환성 양이온 함량을 제공하는 천연 완충제 역할을 수행한 반면, 변성암 및 화성암 지대는 산성화에 가장 취약한 지역으로 판명되었다. 지역적으로는 경기도와 충청도의 A층이 전국 최저 수준의 pH를 보였으며, 이 지역들이 산림 건강성 유지를 위한 산림 개량 정책의 우선순위 대상지가 되어야 한다.

본 연구를 통해 1:5,000 산림입지토양도와 같은 고해상도 토양 정보가 시간적·공간적 산림토양의 특성 변이를 확인할 수 있는 핵심 기반 정보로서 높은 활용 가치가 있음을 확인하였다. 이러한 자료는 향후 산림 탄소 흡수원 관리, 산림 재해(산사태 등) 예측, 기후변화에 따른 토양 환경 변화의 시·공간적 모니터링 체계 구축 등 다양한 산림 정책 및 과학적 의사결정 과정에 기초자료로 활용될 수 있다. 후속 연구에서는 본 자료를 활용하여 디지털 토양 지도를 통한 토양 속성의 3차원 공간 분포 예측 모델을 개발하고, 토양 특성과 수목 성장 간의 정량적 관계를 규명하는 심층적인 연구가 필요하다.

References

- Baskent, E.Z., Borges, J.G. and Kašpar, J. 2024. An updated review of spatial forest planning: approaches, techniques, challenges, and future directions. *Current Forestry Reports* 10: 299-321.
- Grunwald, S., Thompson, J.A. and Boettinger, J.L. 2011. Digital soil mapping and modeling at continental scales: Finding Solutions for Global Issues. *Soil Science Society of America* 75(4): 1201-1213.
- Hur, B.K., Jo, I.S., Min, K.B. and Um, K.T. 1984. Representative physical and chemical properties of Korean soils by the results from detailed soil survey. *Journal of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 17(4): 330-336.
- Jeong, J.H., Kim, C.S., Koo, K.S., Lee, C.H., Won, H.G. and Byun, J.G. 2003. Physico-chemical properties of Korean forest soils by parent rocks. *Journal Korean Forestry Society* 92(3): 254-262.
- 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): 694-700.
- Jin, H.O., Lee, M.J., Sin, Y.O., Kim, J.J. and Chun, S.K. 1994. *Forest soil science*. Hyangmunsa. p. 325.
- Kawada, H. 1989. *Forest soil science general*. Hayasicoosaicai. p. 399.
- KFS (Korea Forest Service). 2025. The 6th national forest plan. Korea Forest Service. p. 146. (in Korean)
- Kim, K.H. et al. 2006. *Soil science*. Hyangmunsa. p. 471.
- KoFPI (Korea Forestry Promotion Institute). 2013. *Manual of forest soil map(1:5,000)*. KoFPI. Seoul. p150(in Korean)
- KoFPI (Korea Forestry Promotion Institute). 2017. *2017 Forest soil digital mapping (1:5,000) Manual*. KoFPI. Seoul. (in Korean)

- Kwon, M.Y., Kim, G.E., Jeong, J.H., Choi, C.E., Park, G.S., Kim, C.S. and Son, Y.H. 2021. The 1:5,000 Forest Soil Map: Current status and future directions. *Journal of Korean Society of Forest Science* 110(4): 479-495.
- Lee, C.Y., Jeong, J.H., Son, Y.H., Byun, J.K. and Koo, C.D. 2009. Forest soils. *Korea Journal of Soil Science and Fertilizer* 42(Special Issue): 1-13.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L. and Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117(1-2): 3-52.
- NGII (National Geographic Information Institute). 2020. The national atlas of Korea II 2020. NGII. Gyeonggi-do. p. 247.
- NiFoS (National Institute of Forest Science). 1970. Forest soil survey for suitable tree on a site 17. Korea Forest Research Institute. pp. 77-109. (in Korean)
- NiFoS (National Institute of Forest Science). 1976. Reports of reconnaissance forest soil survey. Korea Forest Research Institute. pp. 77. (in Korean)
- NiFoS (National Institute of Forest Science). 2014. Methods manual for forest soil and plant analysis. Korea Forest Research Institute. p. 292. (in Korean)
- Park, S.J., Son, Y.K., Hong, S.Y., Park, C.W. and Zhang, Y. S. 2010. Spatial distribution of major soil types in Korea and an assessment of soil predictability using soil forming factors. *Journal of the Korean Geographical Society* 45(1): 95-118.
- Seo, H.Y., Ma, H.S., Jung, S.Y. and Kim, C.S. 2015. Soil physicochemical properties in restored forests following landslide areas in Umyeonsan Mountain. *Journal of Agriculture & Life Science* 49(5): 145-156.
- Son, Y.H., Kim, C.S., Park, K.S., Yoon, T.Y. and Lee, K.H., 2020. Forest soil science. Hyangmunsa. p. 302,
- Zou, W., Jing, W., Chen, G., Lu, Y. and Song, H. 2018. A survey of big data analytics for smart forestry. *IEEE Access* 7: 17822-17834.

Manuscript Received : November 3, 2025

First Revision : January 3, 2026

Second Revision : January 16, 2026

Accepted : January 19, 2026