



이학석사 학위논문

지리산 아고산지대 구상나무 고사 지역의 토양 특성

Soil properties of Korean fir dieback areas in subalpine zone in Mt. Jiri

2023년 2월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 환경관리학전공

한 예 나

지리산 아고산지대 구상나무 고사 지역의 토양 특성

지도교수 오 능 환

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함 2023년 2월

> 서울대학교 대학원 환경계획학과 환경관리학 전공 한 예 나

한예나의 석사 학위논문을 인준함 2023년 2월

위육	원장	안 진 호	(인)
부위	원장	이 동 수	(인)
위	원	오 능 환	(인)

국문 초록

구상나무(Abies koreana, Korean fir)는 국내 아고산지대에 자생하는 침엽수로, 1990년대부터 고사 현상이 보고되었다. 국내 국립공원 중 구상나무 개체수가 가장 많은 지리산의 고사목 발생률은 2018년 기준 23%에 달하며, 아고산지대는 기후변화에 더욱 취약할 것으로 예상된다. 이 연구에서는 지리산 내 구상나무 집단 고사 지역 토양의 물리적, 화학적 특성을 측정함으로써 토양 환경과 구상나무 고사의 연관성을 파악하고자 하였다. 지리산 노고단 ~ 반야봉 능선부를 대상으로 400m²의 정방형 조사구를 총 9곳에 설치하고, 구상나무의 고사율에 따라 '상', '중', '하'로 구분하였다. '상' 조사구는 해발 1,500~1,600m의 남사면 및 서사면에, '중' 및 '하' 조사구는 해발 1,300~1,400m의 북사면에 위치하였다. 토양 시료는 30cm 깊이까지 채취하였으며. 토심이 30cm보다 낮은 경우 모재층 위까지 채취하였다. 토양 시료는 풍건 및 전처리 후 용적밀도, 석력 함량, 토성, 유효양이온치확용량, 염기포화도, 토양 pH, 토양 유기탄소 및 전질소 농도, δ¹³C, Δ¹⁴C, δ¹⁵N 등을 측정하였다. 측정을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 고사율에 따라 상, 중, 하로 분류한 집단 간 토양 특성의 차이를 확인하기 위하여 일원배치 분산분석을 수행하였고, 각 조사구별 고사율과 토양 특성 사이의 상관관계를 확인하기 위하여 피어슨 상관분석과 단순선형회귀분석을 이용하였다. 구상나무의 고사율이 높게 조사된 조사구는 상대적으로 토양 발달이 덜하였으며, 모래 비율이 높고 미사 비율이 낮은 토성을 가진 것으로 나타나 토양 수분 함량에도 차이가 날 것으로 예상된다. 또한, 고사율이 높을수록 토양 pH는 낮고, 탄질비는 높았으며, 토양 유기물의 δ¹⁵N 값이 낮고, 탄소연대는 더 높은(즉, 오래된) 경향을 보였다. 연구 결과를 종합하면, 고사율이 높은 조사구의 토양 환경은, 고사율이 낮은 조사구에 비교하여 식생 및 미생물 서식과 생장에 적합하지 않을 수 있음을 시사하며, 토양의 물리적, 화학적 특성이 구상나무 고사와 연관되었을 가능성을 보여준다.

주요어 : 아고산지대, 구상나무 고사, 토양 특성, 토양 유기탄소, 탄소순환, 기후변화

학 번 : 2021-21476

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 기존 연구 고찰	3

제	2 장 연구 방법	13
	2.1 조사지 선정	13
	2.2 시료 채취	15
	2.3 토양 특성 분석	17
	2.4 통계 처리	21

제 3 장 연구 결과2	23
3.1 상, 중, 하 세 집단 간 토양 특성의 차이	23
3.2 고사율 및 토양 특성 간 상관관계	41
3.3 고사율에 영향을 미치는 토양 특성	43

제	4	장	토의	 Ĺ
제	5	장	결론	 1
참.	고된	문헌		 3
Ab	stı	act	ţ	 3

표목차

[丑]	1]	 14
[丑]	2]	 15
[丑 3	3]	 22
[丑 4	4]	 23
[표]	5]	 28
[丑(6]	 33
[丑]	7]	 42

그림목차

[그림	1]	 14
[그림	2]	 16
[그림	3]	 17
[그림	4]	 25
[그림	5]	 27
[그림	6]	 29
[그림	7]	 30
[그림	8]	 31
[그림	9]	 32

[그림	10]	 34
[그림	11]	 36
[그림	12]	 36
[그림	13]	 37
[그림	14]	 37
[그림	15]	 38
[그림	16]	 39
[그림	17]	 39
[그림	18]	 40
[그림	19]	 44
[그림	20]	 45
[그림	21]	 45
[그림	22]	 46
[그림	23]	 47
[그림	24]	 47
[그림	25]	 48
[그림	26]	 48
[그림	27]	 49
[그림	28]	 50
[그림	29]	 50

제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

구상나무(Abies koreana)는 한라산, 지리산, 덕유산, 속리산, 가야산 등 국내 여러 아고산(subalpine)지대에서만 자생하는 한국 고유종으로, 주로 해발 1,000m 이상에 서식하는 소나무과 전나무속의 침엽수이다(국립생물자원관, 2010), 20세기 후반부터 아시아, 유럽, 북미 등 전 세계적으로 침엽수의 고사가 증가하는 경향을 보였으며(Crawford, 1989; Allen et al., 2010), 국내에서는 침엽수 중에서도 특히 구상나무의 고사 현상이 1990년대부터 보고되고 있다(김갑태 외, 1991; 김은식, 1994; 김갑태 외, 1997). 김남신 외(2013)는 한라산 및 지리산에서 구상나무의 서식지 분포가 감소하면서 신갈나무 등의 이종으로 대체되거나 초지 및 나대지가 증가하였다고 보고하였다. 2017~2018년 기준 한라산과 지리산의 고사목 발생률은 각각 28%, 23%에 달하였다(국립산림과학원, 2019). 환경부는 구상나무 서식지의 축소 및 소멸을 우려하여 2010년도에 구상나무를 기후변화생물지표종 (Climate-sensitive Biological Indicator Species: CBIS)으로 지정하였고, 세계자연보전연맹은 2013년부터 구상나무를 적색목록(Red List) 위기종으로 등재하여 경각심을 높였다. 국내 구상나무 고사의 근본적인 해결 방안을 마련하기 위하여 고사 원인을 파악하려는 연구가 진행되고 있다. 강풍, 홍수, 가뭄과 같은 극한의 기상 조건이 구상나무의 쇠퇴 및 고사의 주요 원인이 될 수 있으며(김은식, 1994; 김진원 외, 2021), 연구 대상지 내에서도 태풍과 바닷바람의 영향 여부에 따라

구상나무의 고사율 및 생육 상태가 다르게 나타났다(박홍철 외, 2014). 이상진 외(2018)는 토양 특성 중 낮은 토양 산도(pH) 또는 치환성 양이온 부족 문제가 구상나무 생육을 저해할 수 있음을 지적하였다. 구상나무 자생지 하부 식생인 조릿대 군락의 부식질에서 추출한 수용성 페놀화합물이 구상나무 종자 발아를 저해한다는 연구 결과도 있었으나(김군보 외, 1998), 조릿대류의 피도와 구상나무 생육과의 특정한 상관관계가 없었다고 보고된 바 있다(김갑태 외, 2000). 토양 수분을 고사 원인으로 파악한 연구가 다수 이루어졌는데, 봄철 수분수지가 구상나무 생장에 중요한 역할을 하며(박원규 외, 1999), 한라산 구상나무는 겨울철 기온 상승으로 광합성에 필요한 수분공급이 부족해져 고사한 것으로 보았다(구경아 외, 2001). 반면, 한라산 구상나무 고사의 원인이 토양수분 과다라는 상반된 결과도 보고되었다(안응산 외, 2019).

위 선행연구에서 볼 수 있듯이 토양 환경에 대한 연구는 토양 수분에 대한 연구가 가장 많이 이루어졌다. 고사의 원인과 결과를 파악하기 위해서는 토양의 물질 및 탄소의 순환에 대한 이해가 바탕이 되어야 하지만, 이에 대해 실측을 바탕으로 한 연구는 아직 미흡하여 토양 환경의 변화가 고사의 원인인지, 결과인지 명확히 밝혀진 바가 없다. 이 연구는 지리산 구상나무의 집단 고사 지역을 대상으로 물리적, 화학적 토양 특성을 분석하여 고사율별, 토양 깊이별 경향 및 차이를 비교 분석하고, 탄소 및 질소 동위원소(¹³C, ¹⁴C, ¹⁵N) 분석을 통해 탄소 및 질소 순환 연구에 대한 기초 자료를 마련하고자 한다. 이는 향후 구상나무 멸종 방지를 위한 고사 원인 분석 및 종복원 연구에 활용될 수 있을 것이다.

1.2 기존 연구 고찰

1.2.1 지리산 구상나무 현황

1.2.1.1 분포 및 고사현황

국립산림과학원(2019)에 따르면, 지리산(위도 35°20'15"N, 고도 1.915m)의 침엽수 면적은 6.448ha로 전체 면적(15.867ha)의 40.6%를 차지하였고, 7개 연구대상 침엽수종의 면적은 이 중 80.6%인 5.198ha로 나타나 한라산 등 연구 대상지들 중 가장 높은 면적이었다. 해당 연구에서 구상나무 등 3개 주요 고산수종이 분포하는 지역을 대상으로 조사한 결과, 구상나무 분포지역의 평균 고도는 1,367m(±177m)였으며 53.3%가 북쪽 사면에 위치하였다. 또한, 지리산 대상지 중 수관밀도 5% 이상인 지역의 구상나무 면적은 5.015ha, 수관밀도 10% 이상인 지역의 경우에는 2.804ha인 것으로 나타났다(국립산림과학원, 2019). 1990년대 중반 Landsat-5 영상과 2010년대 중반 Landsat-8 영상 활용을 활용하여 분석한 결과, 전체 54개 고산지대 분석대상지에서 침엽수림의 면적은 20년 동안 9,327 ha에서 6,990ha로 약 25% 감소하였다(국립산림과학원, 2019). 지리산 대상지(13,891ha)의 경우 침엽수림 면적이 1990년대 2010년대 1.913ha로 2.239ha에서 326ha로 약 14.6%감소하였다(국립산림과학원, 2019), 고산지대의 침엽수림 감소율이 이와 같이 유지된다면 2,100년대 고산 침엽수종 밀집지역은 현재 대비 약 2%만 남아있을 것으로 추정하였고, 고산 침엽수종 밀집지역은 대부분 사라지게 되고 저밀도로 산재된 형태로 잔존할 것으로 예상하였다(국립산림과학원, 2019), 따라서 보전·복원 활동을 통한 고산 침엽수림 면적의 감소율 완화가 중요하다고 강조하였다(국립산림과학원. 2019). 2009년부터 10년 이상

구상나무와 분비나무 군락의 고사실태를 분석한 결과, 지리산국립공원 구상나무 조사구는 1개소를 제외한 모든 조사구에서 매년 구상나무 고사목이 발생하였다(김진원 외, 2021). 지리산국립공원 서측 능선에 분포하고 있는 지역의 조사구들은 매년 고사목이 발생하였다. 반야봉 조사구는 고사목이 상대적으로 많이 발생하였으며, 특히 2014년과 2015년에 많이 발생하였다. 동측 능선에 분포하고 있는 조사구는 서측 조사구보다 낮은 고사율을 나타냈지만, 이 곳에서도 2014년과 2015년에 상대적으로 많은 수의 고사목이 발생하였다. 이와 같이 특정 연도에 고사율이 상대적으로 높게 나타난 것은 태풍, 가뭄, 홍수 등과 같은 기상 이벤트가 영향을 미친 것으로 판단하였다.

1.2.1.2 생육 및 쇠퇴 현황

지리산 조사 대상지 내 구상나무의 수관활력도 조사 결과, 개체목 중 29%는 병약, 매우 병악 및 고사 상태인 것으로 나타났다(국립산립과학원, 2019). 또한, 정상적으로 선 채로 생육하고 있는 개체목의 비율을 나타내는 수간건전도는 약 96%에 달해 비교적 높은 것으로 나타난 반면, 전체 개체목 대비 고사목 발생 비율은 22.9%로 나타났으며 조사 시 수목 대부분이 고사하여 생육 지역에서 제외한 경우는 고려하지 않았으므로 실제로 고사목 발생률은 더 높을 수 있다. 고사 원인을 유추할 수 있는 고사목의 수간 유형을 조사한 결과, 선 채 고사한 비율은 75%였으며 쓰러지거나 기대거나 부러진 채 고사한 비율은 25%로 나타났다. 생존목과 고사목의 본수, 수관활력도, 수간 유형을 이용한 개체목별 쇠퇴도(D) 및 대상지별 평균 쇠퇴도를 평가한 결과, 전국 평균

구상나무 쇠퇴도는 약 0.33으로 나타났으며 지리산 대상지의 구상나무 쇠퇴도는 약 0.31로 나타났다(국립산림과학원, 2019). 수목이 빛을 잘 받는지를 통해 평가한 수관빛노출도를 평가한 결과, 구상나무는 다른 수종에 비해 수관경쟁이 매우 심하였고, 지리산 대상지의 경우 약 57%의 개체목이 경쟁이 진행되거나 피압 위험에 놓인 것으로 나타났다. 생존 가능성이 높은 묘고 50cm 이상의 어린나무 출현 현황을 조사한 결과, 지리산 대상지 내 성목이 있는 표본점의 79%에서 어린나무가 출현한 것으로 나타났다(국립산림과학원, 2019).

1.2.2 지리산 구상나무 고사 원인

1.2.2.1 기후 및 지형의 영향

아고산지대는 일반적으로 저온, 강풍과 큰 일교차로 동결융해가 자주 일어나며, 강수가 잦고 강수량이 많아 침식 작용이 활발해지면 나지가 빠른 속도로 확대된다(김태호, 2006). 고산 및 아고산지대에 서식하는 한대성 식물들은 열악한 기후와 척박한 환경에 적응하여 산 정상부에 분포하고 있지만, 기온이 상승하면 이동할 통로나 피난처를 찾지 못하고 멸종할 우려가 있다(공우석, 1998). 고산 침엽수 분포 지역의 평균기온은 1980년대 6.4℃에서 2010년대 7.2℃로 0.8℃ 상승하였고 매 10년 마다의 상승 경향이 0.26℃로, 우리나라 전체 평균 기온 상승 경향인 0.18℃보다 높았다. IPCC의 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 기반으로 제작된 산지기후도 자료를 이용하여 1980년대부터 2100년까지의 1, 4, 7, 10월의 기온 상승률을 예측한 결과, 지리산 대상지에서는 각각 0.71℃ yr⁻¹, 0.49℃

것으로 예측하였다(국립산림과학원, 2019). 위계적 회귀분석을 사용한 Park et al.(2018)의 연구에서는 온도의 상승, 가뭄 및 다른 종과의 경쟁이 구상나무의 생존을 방해하는 요인으로 나타났다. 기온 상승은 수목의 생장에 영향을 줄 수 있는데, 임종환 외(2006)는 한라산 조사지의 구상나무를 대상으로 한 연구에서 광합성 능력은 기온이 15℃일 때가 20℃, 25℃일 때보다 높았으며, 쇠약 개체가 건전 개체에 비해 기공전도도는 낮은 반면 수분이용효율은 높았다고 보고하였다. 이는 봄철에 지상부에서는 광합성이 이루어지지만 토양으로부터 적당한 수분이 공급되지 않아 수목이 수분 스트레스를 받게 되고, 증산량이 감소하여 수분이용효율이 일시적으로 높아지기 때문에 나타난 현상으로 해석하였다. 식물 성장 및 발달에 손상을 일으킬 수 있을 정도로 온도가 상승하는 것을 열 스트레스라고 하며(Wahid et al., 2007). 수목이 열 스트레스를 완화하거나 적응할 때 발현되는 유전자에 대한 연구가 이루어지고 있다(Bigras, 2000; Weston & Bauerle, 2007). 구상나무의 내열성 메커니즘을 이해하기 위하여 열 스트레스 하에서 발현되는 구상나무 유전자를 종합적으로 분석하는 연구가 이루어졌으나(Hwang et al., 2018), 고온에서의 유전자의 조절 및 기능에 대해서는 추가 연구가 필요한 상황이다. 대표적인 지형적 특성인 경사향은 증발산에 영향을 주는데, 산림의 남사면의 증발산량이 가장 높고, 북사면의 증발산량이 가장 적은 것으로 보고된 바 있다(Isard et al., 1986). 오구균 외(2000)은 지리산 내 구상나무 개체군의 크기가 경사면과 해발고에 따라 차이가 나며, 이는 온도 인자 및 바람 강도와 상관관계가 있는 것으로 추정하였다. 노일 외(2018)의 연구에서는, 상대적으로 구상나무 실생묘가 치수가

발생하는 지리산 세석 지역의 경우 남사면보다 북사면의 고사율이 정도 높았으며, 토양 수분은 일반적 경향과는 반대로 2배 남사면(29.9%)이 북사면(21.7%)보다 유의하게 높았는데, 이는 계곡 등의 영향에 의한 것으로 추정하였다. 또한, 사면 및 층위에 따른 식생 조사 결과, 관목층 및 초본층에서 조릿대 피도가 낮을 경우 구상나무 실생묘 및 치수 발생에 긍정적으로 작용할 수 있을 것으로 추정하였다. 교목층, 아교목층 및 관목층에서의 균재도는 남사면이 북사면보다 다소 낮아 구상나무의 군집이 불안정한 반면. 북사면에서는 다른 종의 확산이 어렵기 어렵다고 추측하였다. 구경아(2016)는 한라산의 아고산대에서 구상나무의 분포는 미지형에 의해 형성되는 미기후와 연관되었고 수분조건에 매우 민감하였으며. 강수량의 증가와 미기후 공간들이 구상나무 서식지에 대한 온난화의 영향을 완화시킬 수 있다고 주장하였다. 박병주 외(2021)는 지리산 지역의 지형위치지수(Topographic Position Index: TPI) 및 지형습윤지수(Topographic Wetness Index: TWI)를 분석한 결과, 지형지수가 낮고 수분지수가 높을수록 분포가 넓게 나타나 수분지수가 높은 곳에서의 구상나무의 분포가 많은 것으로 보고하였다. 안웅산 외(2019)는 한라산을 대상으로 한 연구에서 지형경사가 낮은 곳은 토양 수분이 상대적으로 많고, 수계망 발달이 미약한 곳은 토양수의 배수가 잘되지 않으며, 일사량이 상대적으로 적어 토양 수분 증발도 적고, 토양 수분 함량이 높은 곳에서 구상나무 고사율이 높은 것으로 해석하여 고사 원인을 수분 과다로 추정하였으며 기온 상승에 따른 강우량 증가 및 토양 수분 과다가 구상나무 고사에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성을 주장하였다. 정운종 외(2020)는 구상나무 4년생 용기묘는 배수가 잘 되어 수분

함량이 상대적으로 낮은 배양토에서 생장이 양호하였다고 보고하였다. 또한, 고산생태계에서 지형적 특성은 미생물의 활동에도 영향을 미칠 수 있다(Nemergut et al., 2005; Zinger et al., 2009).

1.2.2.2 토양 환경의 영향

토양의 물리적 특성의 기본이 되는 토성(soil texture)은 토양의 입자 크기를 기준으로 하는데 USDA의 분류 기준에 의하면 0.05~2mm인 모래(sand), 0.002~0.05mm인 미사(silt), 0.002mm 이하인 점토(clav)의 비율로 나타낸다(Owens. 2005). 토성은 공극의 양과 크기, 양분이나 물을 보유하는 능력, 배수성, 통기성이 달라지게 되며 식물 및 미생물의 생육에 영향을 준다. 즉, 미세한 입자의 비율이 높을수록 토양의 비표면적이 증가하여 양이온치환용량(CEC)은 높아지며(Hatten et al., 2019), 점토 비율이 높은 토양의 경우 더 많은 양의 탄소를 저장할 수 있다(Sulman et al., 2014). 공극의 양은 증가하는 반면 공극의 크기는 감소하여 배수를 불량하게 하며, 세립질 토양에서 미생물의 호흡이 더 높을 수 있다(Jana et al., 2010), 반대로 모래 비율이 증가하면 투수성과 통기성은 좋아지지만, 가뭄의 영향을 쉽게 받으며 양분이 결핍될 수 있다. 용적밀도는 공기와 수분을 포함한 자연 상태의 토양 부피에 대한 건조 토양의 무게로, 일반적으로 용적밀도가 작을수록 투수성이 좋고 식물의 뿌리가 잘 자라게 된다. 입경이 2mm 이상인 것은 석력(자갈)으로 구분되는데, 석력의 함량은 풍화 정도를 판단할 수 있는 근거가 된다(국립산림과학원, 2019), 지리산 구상나무 자생지의 물리적 특성을 조사한 선행연구에서 석력 함량은 약 20~28%, 용적밀도는 약 0.4~0.95g cm⁻³로 나타났다. 토성의 경우 모래는 약

35%~41%, 미사는 약 49~51%, 점토는 약 8~14%인 것으로 나타났다(국립산림과학원, 2019; 박병주 외, 2021; 장래하 외, 2014). 토양 산도(pH)는 부식층, 모암, 질소산화물이나 황산화물의 영향을 받는다(정진현 외, 2002). 대기 중의 질소, 황 등 대기오염물질이 산성비로 토양이나 수목의 엽내에 유입되면 Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺와 같은 양이온 형태의 영양분과 결합하여 식물에 필요한 영양분을 용탈시킨다(이경재 외, 1994; 정진현 외, 2002), 특히, 산림에 질소가 식생이나 미생물이 이용하는 양 이상으로 과도하게 퇴적되는 현상이 지속되면 산림의 생산성이 감소되다는 문제가 제기된 이래로(Aber et al., 1989), 질소산화물의 퇴적이 산림이나 수목의 생장에 미치는 영향이 연구되어 왔다(Okochi et al., 2001; Magill et al, 2004; Huang et al., 2015), 인공산성우를 통한 김감태 외(1993)의 연구에서는 산성우의 산도가 높을수록 침엽수종의 생장이 저해되었으며 이는 토양의 pH 완충력 이상으로 산이 집적되었기 때문으로 분석하였다. 토양 산성화는 식물에 독성으로 작용하는 유해금속인 치환성 Al³⁺을 용출시킬 수 있으며 '(Ca+Mg+K)/Al'의 몰비는 산성물질로 인한 산림 피해 예측을 위한 지표로 활용될 수 있다(Ulrich et al., 1980; 이충화 외, 2005; 이아림 외, 2020). 국내에서도 공단이나 대도시 주변의 지역에서 pH 5.0 이하의 산성 토양 분포 비율이 증가하는 것으로 나타났으며, 수도권 지역 산림의 초기 쇠퇴현상이 보고되었다(국립산림과학원, 2011). 지리산 구상나무 자생지의 화학적 특성을 조사한 선행연구에서 지리산 대상지의 토양 산도(pH)는 약 4.0~4.2으로 나타나 전북 지역 산림토양 A층의 평균 pH인 5.16(정진현 외, 2002)보다 낮았으며 일반적으로 구상나무의 최적 토양 pH가 5.5~6.0임을 고려할 때 낮은 수치였다. 하지만 해당

연구에서는 수종별로 최적 생육 범위가 다르기 때문에 이를 고사의 원인으로 인식하지 않았다. 선행연구에서 지리산 대상지 내의 양이온치환용량(CEC)은 약 40 ~ 44cmol。 kg⁻¹으로 나타났으며 치환성 Al³⁺의 농도는 약 400~480mg kg⁻¹인 것으로 나타났다(국립산림과학원, 2019; 박병주 외, 2021). 산림토양에서는 식생으로부터 유래한 잎, 가지 등의 유기물질이 분해되어 부식의 형태로 축적되는데, 유기물은 양분 공급, 수분 보유, 토양 입단화에 순기능을 하여 토양의 생산력에 영향을 미치게 된다(국토부, 2016). 유기물은 유기탄소, 유기질소 등으로 구성되어 있으며, 일반적으로 유기물의 양이 많아지면 토양의 색이 검은색을 띄며, 함수량과 양이온치환능력(CEC)이 높아진다(국토부, 2016). 이 때 유기탄소, 질소 등으로 구성되는 유기물은 토양의 양이온치환용량의 30~70%를 제공한다(Miller & Donahue, 1990), 선행연구에서 지리산의 유기물 함량은 약 7%~14.5%(국립산립과학원, 2019), 해발 1.324m 구상나무림의 유기탄소량은 3.11tonC ha⁻¹ yr⁻¹(Lee et al., 2007)으로 보고되었다. 장래하 외(2014)는 한라산 구상나무림의 5년 평균 토양 유기탄소 축적량은 49.53tonC ha⁻¹로 보고하였는데, 지리산이 한라산보다 토양유기탄소량이 낮은 이유는 수목 밀도가 3배 이상 낮았기 때문으로 파악하였다. 하라산에 비해 국립산림과학원(2019)은 유기물 함량, 칼슘 농도, 치환성알루미늄 농도 및 미사의 비율을 지표로 활용한 토양 질 지수(Soil Qualty Index: SQI) 산정식을 통해 지리산 대상지의 SQI를 분석하였는데, 일반산림의 평균 비해 상대적으로 높은 수준인 것으로 나타났으며 이는 유기물함량이 비교적 높았기 때문으로 분석하였다. 탄질비는 일반적으로 토양의 비옥도를 분해가 잘 되어 있는 산림 토양의 표토층 탄질비는 12~13 정도이며, 유기물 분해가 지속되어 탄질비가 10이 되면 식물이 이용 가능한 형태의 질소가 생성되는 것으로 알려져 있는데(산림청), 토양 유기물(SOM)의 분해의 질적 변화를 나타내는 지표로 사용되기도 하며(Ostrowska et al., 2015) 토성이나 용적밀도, 토양 pH 등 다른 특성과 연관성이 발견되었다(Homann et al., 2007; Santruckova et al., 2010; Yang et al., 2012).

1.2.3 δ¹³C, Δ¹⁴C, δ¹⁵N의 활용

토양 δ¹³C 측정을 통해 C3 식물과 C4 식물 중 어떤 식생으로 이루어져 있는지 알 수 있으며, 깊이에 따른 분석으로 과거의 식생을 추정할 수 있다(Boutton, 1996; Desjardins et al., 2013). 주로 목본류인 C3 식물로 이루어진 지역은 ¹³C에 대한 분별 작용이 활발해 토양의 &¹³C값이 낮아지게 되며, C3 식물보다 분별작용이 덜한 C4 식물이 많은 초지는 상대적으로 토양의 *&*¹³C값이 높기 때문이다. 토양으로 유입된 새로운 유기물은 미생물에 의해 분해되고 작아진 탄소는 수분에 의해 더 깊이 내려가게 되면서 오래된 탄소는 아래에, 새로운 탄소는 위에 존재하게 된다(Nadelhoffer et al. 1988). 배수가 잘 되는 산림 토양은 깊이가 깊어질수록 토양유기탄소 농도(SOC concentration)는 감소하고, δ¹³C는 증가하는 경향은 다수의 연구에서 보고되었다(Ehleringer et al., 2000; Nadelhofer et al, 1988; Acton et al, 2013). 이러한 경향은 미생물이 유기물을 산화시킬 때 ¹³C보다 가벼운 ¹²C를 선호하기 때문으로 설명된다(Acton et al, 2013). 결과적으로 토양에는 ¹³C가 남게 되고, 이 과정이 진행됨에 따라 SOC 입자는 더 작은 크기로 분해되고 물리적인 힘에 의해 아래로

이동되어 토양이 깊어질수록 δ¹³C는 증가하게 된다. 이러한 SOC와 δ¹³C의 관계성을 바탕으로 한 선형 회귀계수(β)는 토양 유기물의 회전율(turnover)을 예측하는 지표이다. 또한, Volk et al.(2018)에서 용적밀도(bulk density)가 높을수록 MAOM(Mineral Associated Organic Matter)이 많아 SOC의 농도는 작고, δ¹³C 값이 더 높게 나타나며, 밀도가 낮을수록 POM(Particle Organic Matter)이 많아 SOC의 농도가 높고 δ¹³C 값이 더 낮게 된다는 결과를 보고하였다.

¹⁴C는 5,730년의 반감기를 가지는 방사성 원소로, 방사성탄소가 함유된 CO₂는 대기 중에 균일하게 퍼지고 식물에 흡수된다. 식물이 죽으면 방사성탄소는 일정한 속도로 붕괴하여 ¹⁴C의 농도가 감소하게 되는데 이를 통해 토양 내 유기물의 탄소 연대를 측정하거나 탄소의 회전율(turnover)를 예측하여 탄소순환을 연구하는 데에 활용된다(Lobo & Flexor, 1974; Gaudinski et al., 2000; Phillips et al., 2013). 측정방법으로는 액체섬광계수기(LSC), 비례계수기(GPC) 등과 같은 방사능계측기를 사용하는 방법과 가속기질량분석법(accelerator mass spectrometry: AMS)을 사용하는 방법이 있다(김낙배 외, 1990; Trumbore et al., 2016). 산림토양에서는 Δ¹⁴C는 δ¹³C과 다르게 깊이가 깊어질수록 값이 감소하는 경향을 보인다(Becker-Heidmann & Scharpenseel, 1986; O'Donnell et al, 2014). 따라서 Δ¹⁴C의 깊이별 측정을 통해 고사 지역의 유기물 분해 특성을 이해할 수 있다.

¹⁵N은 질소의 안정동위원소로, ¹⁴N과 ¹⁵N의 비를 나타내는 δ¹⁵N 값을 통해 오염물질이 생태계에 미치는 영향을 파악하거나(Nakanishi et al., 1995; Ammann et al., 1999) 식물의 잎과 뿌리, 토양의 δ¹⁵N 비교를 통해 질소 고정을 포함하여 생태계 내 질소 순환을 파악하는 연구에 활용되어 왔다(Durka et al., 1994; Austin et al., 1998; Michelsen et al., 1999; Kuzyakov et al., 2006; Ometto et al., 2006).

제 2 장 연구 방법

2.1 조사지 선정

조사지는 지리산 국립공원 일대에 위치한 서울대학교 남부학술림으로 선정하였다. 지리산에 자생하는 구상나무는 2017~2018년 기준 1,607천본으로 추정되며, 한라산(977천본)과 덕유산(67천본) 보다 많은 개체가 서식하는 것으로 추정되고 있다(국립산림과학원, 2019). 지리산 반야봉 인근은 지리산 국립공원 내에서도 구상나무 고사율이 높은 수준인 것으로 보고되었다(김진원 외, 2021). 또한, 2012 ~ 2018년 기준 반야봉의 봄 평균 기온 증가량은 인근 저지대의 3배에 달하며(표 1), 반야봉의 겨울 최고기온은 2018년에 11.0℃를 기록하여 2014년(4.1℃)보다 약 6.9 ℃ 상승하였다(국립공원관리공단, 2019).

따라서 이 연구에서는 반야봉 인근의 구상나무 군락지를 연구 대상지로 정하였다. 노고단 ~ 반야봉 능선을 대상으로 가로 20m, 세로 20m 크기의 정방형 조사구를 총 9개 설치하였다. 구상나무 고사율이 60% 이상 80% 미만인 곳을 상, 40% 이상 60% 미만인 곳을 중, 20% 이상 40% 미만인 곳을 하로 분류하였다. 각 조사구의 위치는 그림 1에 나타낸 바와 같으며, 고사율에 따라 분류한 집단(상, 중, 하)은 서로 다른 색으로 표기하였다. 조사구별 고사율, 고도 등 개요는 표 2에 나타냈다. 조사구의 평균 경사도와 방위는 국립지리정보원의 수치지도(축적 1:5000)를 사용하여 GIS 프로그램(QGIS ver. 3.26.3)에서 고도 값을 산출한 후, 각 방형구의 평균 경사 및 경사방향은 래스터 분석을 실시한 후 구역 통계 분석을

표 1. 지리산 반야봉과 인근 저고도 지역의 봄 평균 기온(국립공원관리공단, 2019). 기온 변화는 2012년도의 봄 평균 기온과 2018년도의 봄 평균 기온의 차이를 나타낸 것으로, 양의 값은 2012년에 비하여 기온이 상승한 것을 의미함. 측정 지점의 괄호 내 숫자는 기상청 관측 지점번호임.

초고 기거	= E()	기관 ㅋ도() 기온(℃)						기온 변화	
특성 시점	고도(m)	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
반야봉	1,650	4.2	4.6	4.9	5.1	6.5	6.6	8.4	+ 4.2
남원(247)	133	12.0	11.1	12.7	12.1	13.3	12.3	13.4	+ 1.4



그림 1. 조사구 위치. 좌측 상단 지도 내 파란색 원은 연구 대상지의 대략적인 위치를 나타냄. 지도의 사각형은 구상나무 군락지에 설치한 방형구를 의미하며, 숫자는 조사구의 번호를 의미함. 고사율 상 집단(1~3번 조사구)은 빨간색, 중 집단(4~6번 조사구)은 노란색, 하 집단(7~9번)은 초록색으로 표기함.

통해 산출하였다. 조사구의 암상은 한국지질자원연구원의 지오빅데이터 플랫폼에서 얻은 지질도를 통해 그림 2와 같이 분석하였으며, 대표암상은 혼성 페그마타이마질 편마암(gnpe) 또는 미그마타이트질편마암(gnm)으로 9개 조사구의 암상은 모두 편마암에 속하는 것으로 나타났다.

표 2. 조사구 개요. 고사율(%)은 고사 개체수를 총 개체수(생존 개체수 + 고사 개체수)로 나누어 산출하였으며, 고도는 방형구의 중앙 지점의 고도로 나타냄. 평균 경사도 및 방위는 GIS 프로그램으로 산출함.

조사구	$\neg \lambda$	구상나무 개체수(본)			고사율	고도	평균	버 . 이 (0)
번호	고 사 팔(%)	생존	고사	합계	분류	(m)	경사도(°)	방귀()
1	80	19	78	97	_	1,590	33.8	서(270)
2	75	12	36	48	상	1,610	23.0	남서(241)
3	65	9	17	26		1,530	36.2	남서(251)
4	56	16	20	36		1,330	26.6	북(360)
5	54	25	29	54	중	1,330	26.6	북(360)
6	56	29	37	66		1,355	28.6	북(326)
7	25	45	15	60		1,355	20.5	북(360)
8	26	45	16	61	하	1,350	26.6	북(360)
9	33	35	17	52	-	1,345	26.6	북(360)

2.2 시료 채취

토양 시료는 물리적 및 화학적 특성을 분석하기 위한 용도와 이러한 특성들의 입력값으로써 필요한 토양 용적밀도를 측정하기 위한 용도로 나누어 채취하였으며(그림 3), 모든 시료의 채취는 2021년 9월 ~ 2022년 9월 내에 시행하였다.



그림 2. 연구 지역 지질도. 지도내 사각형은 구상나무 군락지에 설치한 방형구를 의미하며, 화살표는 방형구의 위치를 나타냄. 숫자는 조사구의 번호를 의미함. 고사율 상 집단(1~3번 조사구)은 빨간색, 중 집단(4~6번 조사구)은 노란색, 하 집단(7~9번)은 초록색으로 표기함.

토양 시료는 낙엽층 및 유기물층(forest floor, O horizon)을 제거한 후 직경 3.5cm의 채토기 및 5cm의 코어 샘플러(core sampler)를 사용하여 채취하였다. 토양의 이질성(soil heterogeneity)으로 인한 영향을 낮추기 위하여 각 방형구 내 25개 지점에서 토양을 0~5 cm, 5~10 cm 10~15 cm, 15~30 cm 깊이로 채취한 후 깊이별로 혼합하였다. 단, 1~3번 조사구의 경우, 토심이 얕아 15cm 이상에서는 모재층이 나타나 15~30 cm 토양시료를 채취할 수 없었다. 토양의 용적밀도를 측정하기 위한 토양 시료는 방형구 내 임의의 3개 지점에서 0~5 cm 및 5~10 cm 깊이는 직경 5cm의 코어 샘플러를 사용하여 채취하였으며, 10cm 이하 깊이의

토양은 석력이 많아 코어 샘플러 활용이 어려워 직경 3.5cm의 채토기를 사용하여 채취하였다. 15~30 cm 채취 시 석력으로 인해 깊이의 오차가 발생하여 해당 깊이의 토양은 용적밀도를 분석하지 않았다. 토양 수분 함량을 측정하기 위한 시료는 0~10cm, 10~15 cm, 15~30 cm의 3개 구간으로 나누어 채취하였으며, 강우가 없는 날을 선정하여 모든 조사구에서 동일 날짜에 채취하였다. 채취한 토양 시료는 저밀도 폴리에틸렌(LDPE)백에 밀봉한 채로 실험실로 운반한 후, 상온에서 무게 변화가 없을 때까지 풍건하였다.



그림 3. 토양의 시료 채취 지점. 토양의 물리화학적 특성을 측정하기 위한 시료 채취 지점(25개)은 노란색으로, 용적밀도 및 수분 함량을 측정하기 위해 임의로 선정한 시료 채취 지점(3개)은 검은색으로 나타냄.

2.3 토양 특성 분석

토양의 물리적 특성으로는 식물의 생육에 영향을 줄 수 있는 토성(soil texture), 석력 함량(Coarseness), 광물 조성(Mineral identification), 토양 수분 함량(Water Content)을 분석하였다. 화학적 특성으로는 식물의 생육 환경 및 물질 순환과 관련이 있는 토양 pH, 유효양이온치환용량(effective cation exchange capacity: eCEC) 및 염기포화도(Base saturation: BS), 토양 유기탄소(Soil organic carbon: SOC) 및 전질소(Total nitrogen: TN)의 농도 및 양, 탄질비(C/N ratio), 탄소 및 질소의 안정동위원소비(δ¹³C, δ¹⁵N) 및 방사성탄소동위원소비(Δ¹⁴C)를 분석하였다. 이러한 특성들을 산출하기 위한 인자로써, 용적밀도(bulk density)와 AD/OD Ratio(Airdried/Oven-dried Ratio)를 함께 분석하였다.

모든 토양 시료는 체 분석기(Ro-tap sieve-shaker)를 사용하여 5분 동안 2mm 체에 통과시키고, 뿌리 및 식물 조직을 제거한 뒤 분석 항목별로 적절한 전처리를 시행하였다. 용적밀도는 풍건한 시료를 건조기에서 105℃로 항량이 될 때까지 20시간 이상 건조하여, 토양의 건조 중량(g)을 코어 샘플러 또는 채토기의 부피(cm³)로 나누어 산출하였다. AD/OD Ratio는 풍건한 토양 시료의 무게와 건조기에서 105℃로 건조한 토양 시료의 무게 비율로 산출하였다.

토성(soil texture)은 Pipette Method(Jackson, 1979)을 사용하여 모래(sand), 미사(silt), 점토(clay)의 비율(%)을 측정하였으며, 각 항목은 USDA textural class로 나타냈다. 석력 함량은 2mm 체에 걸러진 석력(자갈)의 무게를 전체 토양의 무게로 나누어 산출하였다. 토양의 광물 조성을 분석하기 위해 X-선 회절분석(X-Ray diffraction: XRD)을 실시하였다. 풍건한 2mm 이하의 토양 시료를 볼밀(ball mill) 분쇄기로 미세하게 분쇄 후 서울대학교 농생명과학공동기기원에 XRD 분석을 의뢰하였다. X-선 회절분석기(D8 ADVANCE with DAVINCI diffractometer)를 이용하였으며, 분석 시 X-선은 Cu Ka(λ=1.5418Å)을 사용하고, 2 theta 방식으로 5~90도 범위에서 0.5sec step⁻¹의 속도로 스캔하여 시료를 측정하였다.

토양 수분 함량은 각 조사구에서 같은 날에 0~10cm, 10~15 cm, 15~30 cm 깊이로 채취한 토양을 대상으로 밀봉한 상태와 오븐(drying oven)에서 105℃로 건조한 상태로 무게를 측정하여 계산하였다(식 1).

Soil	water content (%)		
_	(weight of moist soil (g) – weight of oven dried soil (g)) \times 100		
_	$($ weight of moist soil (g) $) \times 100$	(식	1)

산도(pH)는 2.5g의 풍건 토양을 5ml 증류수와 혼합한 후 교반하여 pH meter(Research Grade Meters, HANNA instruments)를 사용하여 토양 pHw를 측정하였으며, 1 M CaCl₂를 0.05ml 첨가한 후 토양 pHs를 측정하였다.

유효양이온치환용량은 치환성 양이온(Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺)과 H⁺, Al³⁺를 측정하는 두 단계로 나누어 산출하였다. 우선 치환성 양이온을 추출하기 위하여 Ammonium acetate method(pH 7)을 사용하였다. 2g의 풍건 토양에 1*M* NH₄OAc 용액(pH 7.0) 40ml을 섞은 혼합물을 진탕기에서 120rpm으로 30분 동안 반응시켜 토양을 NH₄⁺로 포화시킨 후, 필터(Whatman, 42)로 여과하였다. 이 용액의 치환성 양이온(Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) 농도 분석은 서울대학교 농생명과학공동기기원에 의뢰하였으며, 유도 결합 플라즈마 발광광도기(ICP (Inductively Coupled Plasma) Atomic Emission Spectrometer, ICP-730ES)를 사용하였다. H⁺, Al³⁺는 Exchangeable Acidity를 측정하여 정량하였다. 0.8g의 풍건 토양을 20ml 1*M* KCI과 상온에서 30분 반응시킨 후, 필터(Whatman, 42)로 여과하였다. 이 용액의 pH가 8.2에 도달할 때까지 첨가한 0.02*M* NaOH의 양을 meqOH⁻ kg⁻¹로 변환하였다. 치환성 양이온 및 Exchangeable Acidity 값은 cmol_c kg⁻¹로 값을 변환하여 유효양이온치환용량 및 염기포화도를 산출하였다(식 2, 3).

$$eCEC(cmol_{c}kg^{-1}) = \Sigma(Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, H^{+}, Al^{3+})(cmol_{c}kg^{-1}) \quad (A 2)$$

$$BS(\%) = \frac{\Sigma(Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+})(cmol_{c}kg^{-1})}{eCEC(cmol_{c}kg^{-1})} \times 100 \quad (A 3)$$

토양 유기탄소 및 전질소의 농도(%)는 1N HCI로 산처리하여 무기탄소를 제거한 시료(Komada et al., 2008)를 원소분석기(PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O Analyzer)를 사용하여 측정하였으며, 검출된 양에 AD/OD ratio를 곱하여 농도를 산출하였으며(식 4, 5), 이를 바탕으로 탄질비를 산출하였다(식 6). 용적밀도를 활용하여 단위면적당 양으로 변환하였다(식 7, 8).

$$SOC(\%) = \frac{SOC \, weight(g)}{Air - dried \, soil \, weight(g)} \times AD/OD \, ratio \tag{(A) 4}$$

$$TN(\%) = \frac{TNweight(g)}{Air-dried\ soil\ weight(g)} \times AD/OD\ ratio$$
(4) 5)

$$C/Nratio = \frac{SOC(\%)}{TN(\%)} \quad (4 6)$$

$$SOC(kgm^{-2}) = SOC(\%) \times bulk \, density(kgm^{-3}) \times soil \, depth(m) \quad (\cancel{4} 7)$$

 $TN(kgm^{-2}) = TN(\%) \times bulk \, density(kgm^{-3}) \times soil \, depth(m) \quad (A 8)$

탄소안정동위원소비(δ¹³C)와 질소안정동위원소비(δ¹⁵N) 측정을 위하여 풍건 토양을 볼밀 분쇄기로 미세하게 분쇄 후 산처리하여 무기탄소를 제거한 시료를 국립환경과학원(NIER)에 분석 의뢰하여 IRMS(isotope ratio mass spectrometer, IsoPrime Ltd., UK)을 이용하여 δ¹³C 및 δ¹⁵N 값을 측정하였다. 토양의 방사성탄소동위원소비(Δ¹⁴C)를 측정하기 위해, 토양 깊이별로, 조사구 번호 1~3번, 4~6번, 7~9번 토양 시료(표 2)를 혼합하여(composited) 분쇄한 뒤, 1*M* HCI로 토양 내 무기탄소를 제거하고, 40℃ 오븐(drying oven) 안에 NaOH pellet을 이용하여 토양 시료를 중화시켰다. 이렇게 준비된 토양 시료를 미국 National Ocean Sciences Accelerator Mass Spectrometry (NOSAMS) 에 보내 토양 유기물의 Δ¹⁴C 값 및 탄소연대를 분석하였다.

2.4 통계 처리

분석된 결과의 통계처리에는 SPSS 프로그램을 사용하였다(SPSS version.26, SPSS Inc., Chicago). 각 분석 목적에 따라 적절한 분석 방법을 활용하였다(표 3). 첫째로, 고사율에 따라 상, 중, 하로 분류한 집단 간 토양 특성의 차이를 확인하기 위하여 데이터를 깊이별로 분류한 후 일원배치 분산분석을 수행하였다. 둘째로, 각 조사구별 고사율과 토양 특성 사이의 상관관계를 확인하기 위하여 피어슨 상관분석을 수행하였다. 마지막으로 단순선형회귀분석을 통하여 고사율에 영향을 미치는 토양 특성이 무엇인지 분석하였다.

분석 목적	통계분석 방법
상, 중, 하 세 집단 간 토양 특성의 차이	깊이별 데이터를 대상으로 일원배치 분산분석(One-way ANOVA) 수행 사후검정 : Bonferroni, p<0.05수준에서 평균차이 검정
고사율 및 토양 특성 간	피어슨 상관분석 수행
상관관계 분석	(Pearson correlation analysis)
고사율에 영향을 미치는 토양	단순선형회귀분석 수행
특성 분석	(simple linear regression)

제 3 장 연구 결과

3.1 상, 중, 하 세 집단 간 토양 특성의 차이

고사율에 따라 상, 중, 하로 분류한 세 집단 간 토양 특성의 차이가 있는지에 대하여 One-way ANOVA를 통해 토양 깊이별로 분석한 결과, 대체로 중 집단과 하 집단의 토양 특성은 유사하고, 상 집단은 중 및 하 집단과 토양 특성에 차이가 있는 것으로 나타났다(표 4). 탄질비와 δ^{15} N는 모든 구간(O~30cm)의 깊이에서 집단 간 차이가 유의하게 나타났으며, 모래 및 미사의 비율(%), δ^{13} C는 3개 구간의 깊이에서 집단 간 차이가 유의하게 나타났다. O~15cm 깊이에서 모래 비율은 상 집단이 중, 하 집단보다 유의하게 높았으며, 미사 비율은 상 집단이 중, 하 집단보다

토양깊이(cm)	항목	F	Р
0-5	모래(%)	16.888	< 0.01
	미사(%)	15.299	< 0.01
	탄질비	10.906	< 0.05
	$\delta^{15}N$	36.660	< 0.01
5-10	모래(%)	24.098	< 0.01
	미사(%)	16.702	< 0.01
	탄질비	9.070	< 0.05
	$\delta^{15}N$	12.264	< 0.01
	$\delta^{13}C$	14.759	< 0.01
	모래(%)	304.103	< 0.01
	미사(%)	55.686	< 0.01
	점토(%)	11.570	< 0.01
	석력 함량	12.361	< 0.01
10-15	수분 함량	27.161	< 0.01
	유기탄소 농도	5.761	< 0.05
	전질소 농도	11.942	< 0.01
	탄질비	13.135	< 0.01
	$\delta^{15}N$	21.791	< 0.01
	$\delta^{13}C$	7.850	< 0.05
15-30	탄질비	20.614	< 0.05
	$\delta^{15}N$	10.507	< 0.05
	$\delta^{13}C$	20.084	< 0.05

표 4. 토양 깊이별 One-way ANOVA 분석 결과

유의하게 낮았다. 탄질비는 0~15cm 깊이에서 상 집단이 중, 하 집단보다 유의하게 낮은 반면 15~30 cm 깊이에서는 중 집단이 하 집단보다 유의하게 낮았다. δ¹³C은 중 집단이 상, 하 집단보다 높은 것으로 나타났다. 이 외에 10~15 cm 구간에서는 점토 비율, 석력 함량, 수분 함량, 유기탄소 농도, 전질소 농도에서 집단 간 차이가 유의한 것으로 나타났다.

3.1.1 토성

상 집단의 경우, 0~5, 5~10, 10~15 cm 깊이에서 평균 모래 비율이 각 51%, 50%, 57%에 달하여 중 집단의 평균 모래 비율(32%, 32%. 31%. 36%) 및 하 집단의 평균 모래 비율(33%. 34%. 29%. 38%)보다 유의하게 높은 것으로 나타났다(그림 4.a). 상 집단의 0~5.5~10.10~15 cm 깊이에서의 평균 미사 비율은 각 35%.35%. 32%로 중 집단의 평균 미사 비율(50%, 51%, 51%, 46%) 및 하 집단의 평균 미사 비율(51%, 50%, 53%, 44%)보다 유의하게 낮았다(그림 4.b). 반면, 점토 비율의 경우 상 집단에서 10~15%, 중 집단에서는 17~19%, 하 집에서는 16~18%로 나타나 5~10 cm 깊이에서만 중, 하 집단이 상 집단 보다 유의하게 높은 것으로 나타났다. 깊이에 따른 경향을 살펴보면, 상 집단은 5~10 cm 구간에서 10~15 cm으로 갈수록 모래 비율이 증가하였으며, 중 및 하 집단은 10~15 cm 구간에서 15~30 cm 구간으로 갈수록 모래 비율이 증가하는 경향을 보였다. 이는 토양의 깊이가 깊을수록 풍화작용 및 토양 발달이 덜하고 모재층과 가깝기 때문으로 판단된다.



그림 4. 상, 중, 하 집단의 깊이별 모래 비율(a), 미사 비율(b), 점토 비율(c).



* 각 그래프는 모래(a), 미사(b), 점토(c) 비율의 평균값을 나타냄. * 오차 막대는 ±1 표준 편차를 의미함(n=3). one-way ANOVA 분석 결과 p<0.05에서 유의한 차이를 보인 경우 다른 소문자로 표기함. 이하 그림 5~18에 동일하게 적용함.

3.1.2 석력 함량

석력 함량은 0~5 cm 깊이에서 13~19%, 5~10 cm 깊이에서 16~23%, 10~15 cm 깊이에서 8~32%, 15~30 cm 깊이에서 21~23%로 나타났으며, 대체로 깊이가 깊어질수록 증가하는 경향을 보였다(그림 5). 10~15 cm 구간을 제외하고 집단 간 차이가 유의하지 않았으나, 평균 석력 함량은 상 집단이 25%, 중 16%, 하 17%로 나타났다.



그림 5. 상, 중, 하 집단의 깊이별 석력 함량.

3.1.3 광물 조성

XRD 분석 결과, 토양 광물은 대부분 Quartz, Muscovite, Albite로 구성된 것으로 나타났다(표 5). 그 중에서도 Quartz는 모든 깊이에서 약 30~80%의 값을 나타내어 광물 조성에서 가장 높은 비율을 차지하였다. 깊이에 따른 광물 조성의 특정 경향은 나타나지 않았다. 다만, 상 집단에서 6종의 광물이 검출된 데 반해, 중 집단에서 13종, 하 집단에서 9종의 광물이 검출되어 중, 하 집단에서 상 집단보다 상대적으로 다양한 종류의 광물이 발견되었다. 또한, 풍화가 많이 일어난 지역에서 발견되는 Kaolinite의 경우 중, 하 조사구에서만 발견되었다. 15~30 cm 깊이에서 모재층이 나타나 토양 채취가 어려웠으며, 상 집단이 모래 비율이 유의하게 높았던 점과 석력 함량이 비교적 높았던 점을 함께 고려할 때, 상 집단의 조사구들은 토양 발달이 상대적으로 덜 이루어졌음을 유추할 수 있다.

고사율 집단	깊이(cm)	광물 조성(%)		
상	0~5	Quartz(73.3), Muscovite(17.9), Albite(8.3), Zirconium Hydride(0.5)		
	5~10	Muscovite(54.5), Quartz(27.1), Albite(18.4),		
	10~15	Quartz(65.2), Albite(16.0), Muscovite(9.4), Aluminum Scandium(5.9), Mica(3.6)		
No	0~5	Quartz(39.5),Albite(20.7),Muscovite(16.9),Orthoclase(14.7),Clay(4.4),Calcium Peroxide(3.8)		
	5~10	Quartz(67.9), Muscovite(16.2), Albite(6.9), Microcline(3.2), Beidellite(2.1), Hydrobiotite(2.2), Sodalite(1.5),		
	10~15	Quartz(81.1), Muscovite(9.2), Albite(6.7), Calcium Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide(1.9),		
	15~30	Gibbsite(1.1) Quartz(69.1), Muscovite(22.3), Albite(4.3), Microcline(2.6), Kaolinite(1.7)		
ठो	0~5	Quartz(48.2), Muscovite(19.5), Microcline(24.5), Albite(5.2), Richterite(2.7),		
	5~10	Glauconite(35.9), Quartz(35.8), Muscovite(19.1), Kaolinite(4.7), Albite(4.4)		
	10~15	Muscovite(60.7), Quartz(32.8), Clinochlore(3.6), Albite(2.9)		
	15~30	Quartz(69.3), Muscovite(23.7), Albite(3.5), Clinochlore(3.0), Zircon(0.5)		

표 5. 각 조사율 집단의 깊이별 광물 조성

3.1.4 토양 수분 함량

토양 내 수분 함량(%)은 10~15 cm 깊이에서만 상 집단이 중 및 하 집단보다 유의하게 낮았으며 모든 깊이에서 중 및 하 집단 사이에는 수분 함량에 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다(그림 6). 평균 값을 살펴보면, 상 집단이 평균 33%, 중 및 하 집단이 41%로 나타나 상 집단의 조사구들이 수분 함량이 비교적 낮은 것으로 나타났다. 0~10cm 깊이에서의 평균 수분 함량은 상 집단 33%, 중 집단 40%, 하 집단 43%로 나타났으며, 10~15 cm 깊이에서는 상 29%, 중 42%, 하 42%로 나타났다. 15~30 cm 깊이에서는 중 40%,
하 38%로 나타나 상 집단의 0~15cm 깊이의 수분 함량은 중 및 하 집단에서의 더 깊은 깊이(15~30 cm)에서보다 수분 함량이 낮을 수 있음을 보여준다.



그림 6. 상, 중, 하 집단의 깊이별 수분 함량. 토양 수분 함량 측정을 위한 시료는 2022년 9월 17일에 채취하였으며, 밀봉한 상태에서의 시료 무게와 105℃로 건조한 시료의 무게 차이를 통해 계산함(식 1).

3.1.5 용적밀도

용적밀도는 토양 깊이에 따라 평균 0.35~0.76 g cm⁻³로 나타났으며(그림 7), 대체로 전라남도 지역의 산림토양 A층 평균 용적밀도(0.88 g cm⁻³) 및 전라북도 지역의 평균 용적밀도(0.85 g cm⁻³)보다 낮은 값을 보였으나 지리산 대상 선행연구(이상진 외, 2018)에서 조사된 0~10cm 깊이에서의 평균 용적밀도(0.62 g cm⁻³) 가는 유사한 경향을 보였다. 모든 깊이 구간에서 상, 중, 하 집단 간 유의한 차이가 없었으며, 대체로 깊이가 깊어질수록 용적밀도가 증가하였다. 0~5 cm에서의 평균 용적밀도는 상 집단이 0.35 g cm⁻³, 중 집단이 0.41 g cm⁻³, 하 집단이 0.41 g cm⁻³로 매우 낮은 경향을 보였다. 5~10 cm에서의 평균 용적밀도는 상 집단이 0.78 g cm⁻³, 중 집단이 0.65 g cm⁻³, 하 집단이 0.69 g cm⁻³로 전남, 전북 지역의 산림토양 A층 평균 용적밀도(정진현 외, 2002)보다 낮은 값을 나타냈다.



그림 7. 상, 중, 하 집단의 깊이별 용적밀도. 시료 채취 시 석력으로 인한 깊이 오차 발생으로 15~30 cm 항목은 분석하지 않았음.

3.1.6 토양 pH

증류수를 사용하여 측정한 토양 pH(pHw)는 모든 깊이 구간에서 집단 간 차이가 유의하지 않았다(그림 8.a). 평균 값을 살펴보면 0~5 cm 구간은 상 집단이 3.82, 중 집단이 4.02, 하 집단이 4.19였으며, 5~10 cm 깊이에서 각 3.98, 4.11, 4.22, 10~15 cm 깊이에서 각 4.19, 4.34, 4.28로 나타났으며, 15~30 cm 깊이에서는 중 집단이 4.42, 하 집단이 4.49로 나타났다. 제1차 산림의 건강·활력도 조사결과(김선희 외, 2016)의 전국 산림토양의 평균 pH(4.9±0.5) 및 지리산 대상 선행연구(이상진 외, 2016)에서의 평균 pH(4.69)보다 낮은 값을 보였다. CaCl2를 사용하여 측정한 토양 pH (pHs)또한 모든 깊이 구간에서 집단 간 차이가 유의하지 않았다(그림 8.b). CaCl2로 토양 pH를 측정하면 일반적으로 증류수로 측정한 토양 pH보다 낮은 값을 가지는데, 측정 결과 평균 3.44~4.15로 모든 값이 증류수로 측정한 pH보다 낮은 것으로 나타났다. 모든 집단에서 토양 pH는 깊이가 깊어질수록 값이 증가하는 경향을 보였다.



그림 8. 상, 중, 하 집단의 깊이별 토양 pH. (a)는 토양에 증류수를 첨가하여 측정한 pH값을 의미하며, (b)는 이에 CaCl₂를 첨가하여 측정한 pH값을 의미함.

3.1.7 유효양이온치환용량 및 염기포화도

유효양이온치환용량(eCEC)은 모든 깊이 구간에서 집단 간 차이가 유의하지 않았으며(그림 9), 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 보였다. 0~5 cm 구간에서의 평균 값은 상(7.04 cmole kg⁻¹), 중(8.42 cmole kg⁻¹), 하(8.76 cmole kg⁻¹)으로 나타나 지리산을 대상으로 한 선행연구(산림청, 2019)에서 조사한 약 38 cmole kg⁻¹ 보다 매우 낮은 값을 나타냈으며, 제1차 산림의 건강·활력도 조사(김선희 외, 2016)에서 발표한 전남 지역의 평균(13 cmole kg⁻¹) 보다 낮았으며 지리산을 대상으로 한 선행연구(이상진 외, 2018)에서 조사한 19.69 cmole kg⁻¹보다 낮은 값을 보였다. 하지만, 유효양이온치환용량과 양이온치환용량의 측정 방법은 다르기 때문에 정확한 비교가 어렵다는 한계가 있다.



그림 9. 상, 중, 하 집단의 깊이별 유효양이온치환용량. 유효양이온치환용량은 Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, H⁺, Al³⁺함량의 합계로 계산하였음(식 2).

치환성 양이온 중 Ca²⁺은 전체 깊이 기준 평균 0.62 cmol_c kg⁻¹ ¹로 Na⁺(0.03 cmol_c kg⁻¹), Mg²⁺(0.25 cmol_c kg⁻¹), K⁺(0.21 cmol_c kg⁻¹) ¹)보다 높은 것으로 나타났고, 특히 상 사이트의 Na⁺은 전체 깊이에서 0.01 cmol_c kg⁻¹ 이하로 매우 낮게 나타났다(표 6).

고사율 집단	값이(cm) -	치환성 양이온(cmolc kg ⁻¹)							
		Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K+				
상	0~5	0.85	0.00	0.32	0.21				
	5~10	0.33	0.01	0.18	0.14				
	10~15	0.18	0.00	0.10	0.08				
중	0~5	1.62	0.06	0.51	0.45				
	5~10	0.53	0.02	0.24	0.23				
	10~15	0.26	0.03	0.14	0.15				
	15~30	0.20	0.04	0.09	0.13				
하	0~5	1.45	0.07	0.51	0.36				
	5~10	0.77	0.02	0.33	0.25				
	10~15	0.40	0.04	0.20	0.19				
	15~30	0.21	0.03	0.12	0.13				

표 6. 각 조사율 집단의 깊이별 치환성 양이온 함량

염기포화도(BS) 또한 모든 깊이 구간에서 집단 간 차이가 유의하지 않았으며(그림 10), 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 보였다. 전체 집단의 평균 염기포화도는 16.03%로, 제1차 산림의 건강·활력도 조사결과(김선희 외, 2016)에서 발표한 염기포화도의 전국 평균(24%) 및 전남 평균(19%) 보다 낮은 값을 나타냈다. 하지만, 깊이에 따라 선행 연구의 범위보다 훨씬 더 높은 값을 보이기도 했다. 0~5 cm 깊이에서의 평균 염기 포화도는 상(19.8%), 중(31.1%), 하(28.0%)로 나타나 중 집단이 하 집단보다 염기 포화도가 비교적 높은 경향을 보였다. 5~10 cm 깊이에서는 상(9.66%), 중(13.85), 하(19.76%), 10~15 cm 깊이에서는 상(7.20%), 중(9.77%), 하 (14.3%)로 나타나 하, 중, 상 순서로 높은 경향을 보였다.



그림 10. 상, 중, 하 집단의 깊이별 염기포화도. 염기포화도는 ∑(Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺)/eCEC x 100 으로 계산하였음(식 3).

3.1.8 토양 유기탄소 및 전질소

토양 유기탄소(SOC) 농도는 10~15 cm 깊이에서 하 집단이 상 집단보다 유의하게 높았으며, 이 외 깊이에서는 집단 간 차이가 유의하지 않았다(그림 11). 평균 유기탄소 농도는 0~5 cm 깊이에서 9.7%, 5~10 cm 깊이에서 6.73%, 10~15 cm 깊이에서 5.11%, 15~30 cm 깊이에서 3.70%로 나타났다. 제1차 산림의 건강·활력도 조사(김선희 외, 2016)의 전남 평균 유기물 함량(5.4%)과 이상진 외(2018) 연구의 지리산 평균 유기물 함량(12.68%)을 고려할 때, 토양 유기탄소 농도는 선행 연구의 범위 내에 있는 것으로 보인다.

토양 유기탄소량은 모든 깊이에서 집단 간 차이가 유의하지 않았다(그림 12). 평균 토양 유기탄소량은 0~5 cm 깊이에서 1.88 kg m⁻², 5~10 cm 깊이에서 2.35 kg m⁻², 10~15 cm 깊이에서 1.10 kg m⁻²로 나타났다.

토양 전질소(TN) 농도는 10~15 cm 깊이에서 하 집단이 상 집단보다 유의하게 높았으며, 이 외 깊이에서는 집단 간 차이가 유의하지 않았다(그림 13). 평균 전질소 농도는 0~5 cm 깊이에서 0.71%, 5~10 cm 깊이에서 0.50%, 10~15 cm 깊이에서 0.39%, 15~30 cm 깊이에서 0.29%로 깊이가 깊어질수록 감소하는 것으로 나타났다. 제1차 산림의 건강·활력도 조사(김선희 외, 2016)의 전남 평균 전질소 함량(0.22%)과 이상진 외(2018) 연구의 지리산 평균 전질소 함량(0.59%)을 고려할 때, 토양 전질소 농도는 선행 연구보다 높은 경향을 보였다. 토양 전질소량(kg m⁻²)은 0~15cm 깊이에서 집단 간 차이가 유의하지 않았다(그림 14). 평균 토양 유기탄소량은 0~5 cm 깊이에서 0.14 kg m⁻², 5~10 cm 깊이에서 0.17 kg m⁻², 10~15 cm 깊이에서 0.08 kg m⁻²로 나타났다.

토양 탄질비는 모든 깊이 구간에서 집단 간 차이가 유의하게 나타났다(그림 15). 0~15cm 깊이에서 상 집단은 중 및 하 집단보다 탄질비가 유의하게 높았으며, 15~30 cm 깊이에서 하 집단은 중 집단보다 탄질비가 높은 것으로 나타났다. 평균 탄질비는 0~5 cm 깊이에서 13.7, 5~10 cm 깊이에서 13.7, 10~15 cm 깊이에서 13.4, 15~30 cm 깊이에서 12.7로 나타났다.



그림 11. 상, 중, 하 집단의 깊이별 토양 유기탄소 농도(g-SOC g-Soil⁻¹).



그림 12. 상, 중, 하 집단의 깊이별 토양 유기탄소량.



그림 13. 상, 중, 하 집단의 깊이별 토양 전질소 농도(g-TN g-Soil⁻¹).



그림 14. 상, 중, 하 집단의 깊이별 토양 전질소량.



그림 15. 상, 중, 하 집단의 깊이별 탄질비.

3.1.9 탄소 동위원소비(δ¹³C, Δ¹⁴C)

토양의 탄소 안정동위원소비(δ¹³C)는 5~30 cm 깊이에서 집단 간 차이가 유의한 것으로 나타났다(그림 16). 5~10 cm 와 10~15 cm 깊이에서 중 집단이 상, 하 집단보다 높았으며, 15~30 cm 깊이에서도 중 집단이 하 집단보다 높은 값을 나타냈다. 모든 집단에서 대부분 -25 ~ -26‰로, 일반적으로 알려진 C3 식물의 δ¹³C 범위(-33 ~ -24‰) 내에 포함된다. 평균 δ¹³C 값은 0~5 cm 깊이에서 -26.28‰, 5~10 cm 깊이에서 -25.60‰, 10~15 cm 깊이에서 -25.12‰, 15~30 cm 깊이에서 -25.05‰로 나타났다.

토양의 방사성탄소동위원소비(Δ¹⁴C)는 상, 중, 하 집단 내 시료를 깊이별로 혼합하여 측정하였기 때문에 집단 간 차이 비교 등의 통계 분석이 불가하였다. 토양 유기탄소의 Δ¹⁴C 값이 음수이면 작을수록, 양수이면 클수록 오래된 탄소임을 의미하는데(Hua & Barbetti, 2004), Δ¹⁴C를 활용한 탄소 연대 분석 결과 중 집단은 10~15 cm 깊이에서 약 100 yBP (years Before Present: "Present" = 1950년), 15~30 cm 깊이에서 780 yBP, 하 집단은 15~30 cm 깊이에서 545 yBP로 나타났으며, 이외에는 모두 1950년 이후(modern)에 생성된 탄소로 분석되었다. Δ¹⁴C의 경우, 0~10cm 깊이에서 고사율에 따라 분류된 상, 중, 하 집단 모두 탄소의 연대가 modern인 것으로 나타났다(그림 17).



그림 16. 상, 중, 하 집단의 깊이별 토양 탄소안정동위원소비.



그림 17. 상, 중, 하 집단의 깊이별 토양 방사성탄소동위원소비 및 탄소 연대.

3.1.10 질소동위원소비(δ¹⁵N)

토양의 질소동위원소비(δ¹⁵N)는 모든 깊이에서 집단 간 차이가 유의한 것으로 나타났다(그림 18). 0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm 깊이에서 상 집단이 중, 하 집단보다 낮았으며, 15~30 cm 깊이에서는 중 집단이 하 집단보다 높은 값을 나타냈다. 전체 깊이에 대한 평균 δ¹⁵N값은 상 집단에서 1.63‰으로 중(4.03‰) 및 하(3.80‰)보다 낮았다. 깊이별 평균 값은 0~5 cm에서 1.27‰, 5~10 cm에서 2.68‰, 10~15 cm에서 4.55‰, 15~30 cm에서 5.36‰로 나타나 깊이가 깊어질수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 미생물의 질소 분별(fractionation) 작용이 지속되어 깊이가 깊어질수록 ¹⁵N이 ¹⁴N보다 토양에 많이 남아있게 되어 δ¹⁵N 값이 증가하게 되는 것으로 추정된다.



그림 18. 상, 중, 하 집단의 깊이별 토양 질소동위원소비.

3.2 고사율 및 토양 특성 간 상관관계

고사율 및 각 토양 특성 간 상관관계를 분석한 결과(표 7), 고사율과 양의 상관관계를 나타낸 것은 모래 비율(p<0.01), 전질소량(p<0.05)과 탄질비(p<0.01)였고, 음의 상관관계를 나타낸 것은 미사 비율(p<0.01), 점토 비율(p<0.01), 수분 함량(p<0.01), 토양 pHw(p<0.01), δ¹⁵N(p<0.05)으로 나타났다.

수분 함량은 모래 비율과 양의 상관관계(p<0.01), 미사와 점토 비율과는 음의 상관관계(p<0.01)를 나타내 토성과 수분 함량이 연관 있음을 보여준다. 토양 pH는 점토 비율과 양의 상관관계(p<0.05)를 나타냈으며, 유효양이온치환용량과는 음의 상관관계(p<0.01)를 나타냈다. 염기포화도의 경우 CaCl2로 측정한 토양 pH와 음의 상관관계(p<0.05)를 나타냈다. 토양 유기탄소농도는 석력 함량과는 음의 상관관계(p<0.05), 토양 pH와는 음의 상관관계(p<0.01), 반면, 토양 유기탄소량은 점토 비율과 양의 상관관계(+)를 나타내, 점토 비율이 높을수록 토양 내 유기탄소의 저장에 유리할 수 있음을 시사한다. 전질소 농도는 미사 비율과 양의 상관관계(p<0.05)를 나타냈으며, 석력 함량과는 음의 상관관계(p<0.05), 수분 함량과는 양의 상관관계(p<0.05), 토양 pH와는 음의 상관관계(p<0.01)를 보였다. 또한, 유효 양이온교치환용량 및 염기포화도, 토양 유기탄소농도와는 양의 상관관계를(p<0.01)를 나타냈다. 반면, 토양 전질소량은 토양 유기탄소농도, 토양 전질소농도, 토양 유기탄소량과는 양의 상관관계(p<0.01)를 나타냈다. 탄질비는 모래 비율과 양의 상관관계(p<0.01), 미사와 점토 비율과는 음의 상관관계(p<0.01)를 나타냈다. δ¹³C는 유기탄소 농도(p<0.01), 전질소 농도(p<0.01) 및 유기탄소량(p<0.05)와는 음의 상관관계를 보였다.

표 7. 고사율 및 토양 특성 간 상관관계 분석 결과. 피어슨 상관분석을 사용하였으며(n=33), ++, --는 각각 양, 음의 상관관계가 0.01 수준(양측)에서 유의하며, +, -는 각각 양, 음의 상관관계가 0.05 수준(양측)에서 유의함을 의미함.

	고사율모래미사점토 석력수분 함량함량 용적밀도	рНw	pH₅	유효 양이온치환용량	염기포화도	. 유기탄소농도	유기탄소력	량 전질소농 도	. 전질소령	铐 탄질비	δ ¹³ C	Δ ¹⁴ C	$\delta^{15} N$
고사율	++									+ +			-
모래	++									+ +			-
미사	++ ++							+					+
점토	- ++	+	+								+	-	+
석력 함량						-		-					
수분 함량					+			+	+				
용적밀도							+ +		+ +				
pHw			+ +								+ +		+ +
pHs					-		-			-	+ +		+ +
유효양이온치환용량					+ +	+ +	+ +	+ +	+ +			+ +	
염기포화도						+ +	+	+ +	+			+ +	
유기탄소농도							+ +	+ +	+ +			+ +	
유기탄소량								+ +	+ +		-	+ +	-
전질소농도									+ +			+ +	
전질소량												+ +	
탄질비											-	+ +	
δ ¹³ C													+ +
$\Delta^{14}C$													
δ^{15} N													

Δ¹⁴C는 토양 유기탄소 농도 및 전질소 농도와는 양의 상관관계(p<0.01), 유기탄소량 및 전질소량과는 음의 상관관계(p<0.01)를 나타냈다. δ¹⁵N는 수분 함량, 석력 함량, 용적밀도를 제외한 모든 항목과 상관관계를 나타냈는데, 이는 토양 깊이에 따른 경향성을 가지는 항목들이 서로 상관관계를 나타냈기 때문인 것으로 판단되므로 해석에 유의할 필요가 있다.

3.3 고사율과 연관성 높은 토양 특성

각 조사구(1~9번)의 고사율과 토양 특성에 대하여 회귀분석한 결과, 토양 특성 중 모래 및 미사의 비율, 수분 함량, 토양의 pHw, 치환성 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺), 염기포화도, 유기탄소 및 전질소 농도, 탄질비, δ¹⁵N이 일부 토양 깊이에서 고사율과의 연관성이 높았다.

3.3.1 물리적 특성

첫째로, 물리적 특성 중 토성이 고사율과의 연관성이 높았다(그림 19,20). 0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm 깊이에서 모래의 비율이 높아질수록, 미사의 비율이 낮아질수록 고사율이 높아지는 경향을 보였다(그림 19, 20). 특히 고사율이 60% 이상인 조사구(1~3번)에서 50% 이상의 높은 모래 비율을 보였다. 반면, 점토 비율은 10~15 cm 깊이에서만 고사율을 잘 설명하였으며(R² = 0.508), 이 때 점토 비율이 높아질수록 고사율은 감소하는 경향을 보였다.

둘째로, 물리적 특성 중 토양 내 수분의 무게 비율이 고사율에 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다(그림 21). 0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm 깊이에서 수분이 비율이 낮아질수록 고사율이 높아지는 경향을 보였다. 반면, 15~30 cm 깊이에서는 수분 함량이 높을수록 고사율이 높게 나타나는 경향을 보였는데, 이는 고사율이 20~60%인 조사구(4~9번)의 수분 함량이 비슷한 경향을 보이며 고사율이 60% 이상으로 높은 조사구(1~3번)는 15~30 cm 깊이에 대한 측정값이 부재하기 때문인 것으로 판단된다.



그림 19. 모래 비율과 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과. 붉은 색의 참조선은 평균값에 대한 95% 신뢰구간을 의미함. 이하 그림 20~29에 동일하게 적용함.



그림 20. 미사 비율과 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과.



그림 21. 토양 수분 함량(wt%, 식 1)과 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과.

3.3.2 화학적 특성

고사율과 연관성 높은 첫 번째 화학적 특성은 토양 산도(pH)이다. 0~5 cm, 5~10 cm 깊이에서 토양의 pHw 값이 낮아질수록 고사율이 높아지는 경향을 보였고, 깊이가 깊어질수록 pHw가 증가하는 경향이 나타났다(그림 22). 둘째로, 0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm 깊이에서 치환성 양이온 중 낮은 Ca²⁺과 Mg²⁺ 농도가 높은 고사율과 상관 관계를 보였다(그림 23, 24). 두 치환성 양이온의 회귀분석 결과 서로 비슷한 경향이 나타났다. 또한, 염기포화도(%)는 5~10 cm, 10~15 cm에서 값이 감소할수록 고사율이 증가하는 경향을 보였다(그림 25). 셋째로, 탄질비가 높을수록 고사율이 높아지는 경향을 보였다(그림 26).



그림 22. 토양 pHw와 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과.



그림 23. Exch. Ca²⁺과 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과.



그림 24. Exch. Mg²⁺과 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과.



그림 25. 염기포화도와 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과.



그림 26. 토양 탄질비와 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과.

넷째로, 5~10 cm, 10~15 cm 깊이에서 낮은 유기탄소 및 전질소 농도가 높은 고사율과 상관 관계를 보였다 (그림 27, 28). 마지막으로, 0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm 깊이에서 δ^{15} N 값이 낮아질수록 고사율이 높은 경향을 보였다(그림 29). 이러한 토양의 화학적 특성들은 고사의 원인일 수도 있으나, 고사의 결과로 나타난 특성일 수 있으므로 결과 해석에 유의할 필요가 있다.



그림 27. 토양 유기탄소농도(g-SOC g-Soil⁻¹와) 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과.



그림 28. 토양 전질소농도(g-TN g-Soil⁻¹)와 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과.



그림 29. 토양 질소동위원소비와 고사율에 대한 깊이별 회귀분석 결과.

제 4 장 토의

우리나라 구상나무 고사 원인으로 지리산 토양의 수분 부족 문제가 주로 제기되었다(박원규 외, 1999; 구경아 외, 2011). 지리산의 구상나무 분포(1981~2007년)를 분석한 결과, 경사도가 30°인 지역에서 분포 감소율이 높았으며, 볼록한 사면에 구상나무가 주로 분포하는데 토양수 배출이 잘 되는 지역에서 분포 변화가 큰 것으로 나타났다(김남신 외, 2013). 하지만, 국립공원연구원(2019)에서 측정한 지리산 반야봉 연평균 토양 수분함량은 2012년 22.9%, 2015년 27.5%, 2018년 26.1%로 토양 수분의 뚜렷한 감소가 관찰되지는 않았다. 따라서 이 연구에서는 지형과 고사율이 상이한 조사구를 대상으로 토양의 물리화학적 특징을 실측하여 구상나무 고사와의 연관성을 파악하고자 하였다.

고사율 60% 이상인 조사구는 남사면에 위치하였고 경사도가 높았으며, 60% 이하인 조사구는 북사면에 위치하였고 경사도가 비교적 낮았다(그림 1). 토성의 경우 고사율이 높을수록 모래 비율이 높고, 미사 비율이 낮았다(그림 4. a, b). 이 연구에서는 수분 함량을 가을(9월)에 1회만 측정하였으며, 낙엽이 지면서 오히려 수목의 수분 상태는 감소하고 토양 수분은 증가할 수 있기 때문에(Balducci et al, 2020) 토양 수분 함량 결과를 해석하는 데에 한계점이 있다. 그럼에도 고사율이 높은 조사구의 토양 수분 함량이 낮은 경향을 보이는 것(그림 21)은 지형 및 토양의 물리적 특성으로 인한 수분 보유 능력에 차이가 있을 가능성을 보여준다. 즉, 지리산 국립공원 내에서도 토양 발달이 덜 되어 토심이 낮고 모래와 석력 함량이

높은 지역의 경우 수분 부족 현상에 더 취약할 수 있음을 시사한다. 물리적 환경 자체가 일사량, 증발산량 및 토양 수분 함량에 영향을 주어 고사의 원인이 될 수 있으므로(안웅산 외, 2019), 기온, 토양 온도 및 토양 수분의 변화를 다양한 지점에서 지속적으로 모니터링하고 비교하는 등의 추가적인 연구가 필요하다.

고사율이 높을수록 일부 깊이에서의 토양 pH, 치환성 양이온(Exch. Ca²⁺, exch. Mg²⁺), 염기포화도가 더 낮은 경향을 보였다(그림 22, 23, 24, 25). 국내 산림 토양의 평균 pH는 2010년 5.14에서 2019년 4.3으로 감소하였고(국립산림과학원, 2021), 국내 산림 토양의 81%의 산성화 정도가 '주의' 또는 '심각'에 해당하여(이아림 외, 2020) 토양 산성화로 인한 피해를 최소화하기 위한 노력이 지속되고 있다.산림의 pH가 감소하는 이유 중 하나는 한랭습윤한 기후로 유기산 함량이 높을 수 있기 때문이며(김진원 외. 2022). 조민기 외(2015)는 이러한 이유로 지리산 세석지역의 구상나무림의 토양 pH가 낮아진 것으로 보았다. 토양이 산성화되면, 치환성 양이온이 용탈되어 양분 유효도가 감소하므로(Driscoll et al., 2003; Ohno & Erich, 1990) 수목 생장에 영향을 미칠 수 있다. 다만, 이 연구 결과로는 토양 pH, 치환성 양이온 및 염기포화도의 고사율에 따른 경향이 고사의 원인인지 아니면 결과인지는 명확히 파악하기 어렵다. 하지만, 일부 치환성 양이온이 고사율이 높은 조사구에서 낮게 나타난 것은(그림 23, 24) 모래 비율이 높기 때문일 수 있으며, 고사율이 높은 조사구는 모래 비율이 높기 때문에(그림 4) 토양 산도가 지속적으로 낮아질 경우 영양분 용탈에 더 취약할 가능성을 보여준다.

토양 δ¹³C 값이 조사구 간 차이가 적게 나타난 것(그림 16)은

구상나무 고사율이 높은 상 집단에서도 초본류의 영향이 크지 않았음을 의미한다. 주로 초본류에 해당하는 C4 식물의 경우 δ¹³C값이 약 -12 ~ -16‰이므로 토양의 유기물의 δ¹³C 값은 약 -10‰이 되며, 주로 목본류가 많이 해당되는 C3 식물의 경우 δ¹³C 값이 약 -20 ~ -37‰로 훨씬 낮아 토양의 유기물의 δ¹³C값은 약 -23‰이 되기 때문이다(O'Leary, 1988). 즉, 구상나무의 고사로 관목, 교목 등 식생의 종류에는 변화가 있을 수 있지만, C4 식물에 속하는 초본류가 해당 조사구에서는 탄소 순환에 지배적인 영향을 미치지 않고 있음을 시사한다.

0~10cm 깊이의 토양의 Δ¹⁴C을 통해 분석한 결과, 고사율 상 집단이 중, 하 집단보다 탄소연대가 더 오래된 것으로 나타났다(그림 17). 이는 구상나무가 집단 고사하여 새로운 유기물의 유입이 감소하고, 미생물의 활동이 저하되어 있어 유기탄소를 분해하는 속도가 느릴 것으로 유추해 볼 수 있으나, 토양 배양 실험 등의 추가적인 연구가 이루어져야 유기물 분해 속도를 확인할 수 있다. 고사율이 높을수록 5~15cm 깊이의 유기탄소 및 전질소 농도는 감소하는 경향을 보였다(그림 27, 28). 즉, 0~5 cm 깊이에서의 유기탄소 및 전질소 농도는 고사율에 따른 차이를 보이지 않다고 하더라도, 구상나무의 고사가 5~15cm 깊이에서의 유기탄소 및 전질소 농도와는 연관될 수 있음을 시사한다. 반면 15~30 cm 깊이에서는 유기탄소 및 전질소 농도가 고사율에 상관없이 모두 낮은 값을 나타내어 이 깊이에서는 고사 현상이 유기탄소 및 전질소 농도에 미치는 영향이 적거나 반대로 고사에 미치는 영향이 미미할 것으로 보인다. 고사율이 높을수록 토양의 탄질비는 높게 나타났으며, 고사율이 높은 1번과 3번 조사구의 탄질비는 17

이상으로 분석되어(그림 26), 구상나무 고사율이 높은 곳에서 미생물에 의한 유기물 분해가 다른 곳에 비해 느릴 것으로 유추된다. 이처럼 유기탄소 및 전질소 농도, δ¹⁵N, Δ¹⁴C, 탄질비 등 토양의 화학적 특성은, 고사율이 높은 곳에서 미생물에 의한 유기물 분해가 느리고 따라서 수목 생장에 더 불리한 조건임을 일관되게 보여준다.

제 5 장 결론

지리산 내 구상나무 서식지의 토양 특성과 고사율의 연관성을 확인하였다. 고사율이 높은 지역은 토양 발달이 덜하였으며, 모래 비율이 높고 미사 비율이 낮은 토성을 가졌으며, 이러한 특성은 수분 및 양분 보유 능력에 영향을 주는 것으로 나타났다. 즉, 구상나무림이 위치한 사면, 토성, 석력, 유효토심 등 물리적 토양 환경은 배수 특성이나 영양분 보유 능력에 영향을 줄 수 있기 때문에 구상나무 고사의 원인으로 작용하거나 고사를 가속화할 가능성이 있다. 또한, 고사율이 높을수록 토양 pH는 낮고, 탄질비는 높았으며, δ¹⁵N 값이 낮고 더 오래된 탄소인 점으로부터 구상나무 고사율 상 조사구 지역이 중, 또는 하 조사구 지역에 비해 미생물에 의한 유기물 분해가 느리고 식생의 생장에 덜 적합한 환경으로 추정된다.

이 연구에서는 지리산 반야봉 인근의 구상나무 고사율, 지형적 요소가 다른 조사구들을 대상으로 토양의 물리화학적 특성을 실측한 자료를 바탕으로 분석하였으며, 토양의 특성과 구상나무 고사 간 연관성을 조사하였다는 점에서 의의가 있다. 연구 결과, 토성과 같은 물리적인 특성이 영양분과 수분 보유에 영향을 미쳐 고사로 이어질 수 있다는 가능성을 제시하였고, 이는 지리산의 구상나무 고사 원인 및 종복원 연구에 기초자료로써 활용될 수 있을 것이다. 또한, 덕유산, 백운산, 한라산 등 다른 구상나무 자생지의 고사 원인을 파악하는 데에도 토양의 물리화학적 특성과 고사율의 연관성을 확인해야 할 필요성을 보여준다. 후속 연구로 고도 1,300~1,400m 지역의 조사구를 대상으로 비슷한 고도, 유사한 물리적 환경임에도 고사율의 차이가 발생하는 원인을 조사할 필요가 있다. 특히, 기온, 토양 수분, 토양 온도에 대한 장기 모니터링을 포함하여 유효인산 및 치환성 Al³⁺ 등 추가적인 항목에 대한 조사가 이루어져야 할 것이다. 또한, 배양실험을 통해 유기물 분해 특성에 대한 연구를 함께 진행한다면, 아고산지대 구상나무 관리 방안을 도출하고, 기후변화 하에서 산림토양의 유기탄소 저장 능력을 예측하는데 도움이 되리라 생각한다.

참고문 헌

공우석 (1998). 한라산 고산식물의 분포 특성. 대한지리학회지, 33(2), 191-208.

구경아 (2016). 지형조건과 미기후조건을 이용한 한라산 구상나무의

서식지 적합도 예측. 한국응용곤충학회 학술대회논문집, 155-155. 구경아, 박원규, 공우석 (2001). 한라산 구상나무(Abies koreana W.)의

연륜연대학적 연구 -기후변화에 따른 생장변동 분석-. 한국생태학회지, 24(5), 281-288.

- 국립공원연구원 (2019). 국립공원 기후변화 생태계 모니터링(NPRI-27). 국립공원연구원, 원주, 대한민국.
- 국립산림과학원 (2011). 대기오염과 산림생태계 변화. 국립산림과학원 연구자료 제11-23호. 국립산림과학원, 서울, 대한민국.
- 국립산림과학원 (2019). 전국 멸종위기 고산 침엽수림 현황과 보전 방안. 국립산림과학원 연구자료 제801호. 국립산림과학원, 서울, 대하민국.
- 국립산림과학원 (2021). 2020 전국 산림토양 산성화 현황. 연구 보고 21-14, 국립산림과학원, 서울, 대한민국.
- 국립생물자원관 (2010). 한반도의 생물다양성. https://species.nibr.go. kr/home/mainHome.do?cont_link=009&subMenu=009002&cont

Cd=009002&ktsn=120000059947 (accessed 5 September 2022) 국토부 (2016). 대한민국 국가지도집 제2권. http://nationalatlas.ngii.go.

kr/pages/page_122.php (accessed 5 September 2022) 김갑태, 김준선, 추갑철 (1991), 반야봉지역 삼림군집구조에 관한 연구

- 구상나무림-. 응용생태연구, 5(1), 25-31.

김갑태, 추갑철 (2000). 지역별 구상나무 생육현황 비교. 56 한국환경생태학회지, 14(1), 80-87.

김갑태, 추갑철, 엄태원 (1997). 지리산 천왕봉-덕평봉 지역의 삼림군집구조에 관한 연구 -구상나무림-. Journal of Korean Forest Society, 86(2), 146-157.

김군보, 이경준, 현정오 (1998). 지리산 구상나무림에서 타감작용이 지수형성에 미치는 영향. 한국산림과학회지, 87(2), 230-238.

김낙배, 우형주, 홍완 (1990). [해설] 방사성탄소 연대측정법. 분석과학, 3(2), 281-298.

김남신, 이희천 (2013). 아고산 지역의 구상나무 분포 변화에 관한 연구. 한국환경복원기술학회지, 16(5), 49-57.

김선희, 성주한, 구남인, 김용석, 제선미, 김경하 (2016). 제1차 산림의 건강 활력도 진단 평가 보고서. 국립산림과학원 연구자료 제698호. 국립산림과학원, 서울, 대한민국.

김은식 (1994). 환경변화와 고산지대 수목생장 쇠퇴현상과의 상관성 해석. 한국과학재단 연구보고서 KOSEF 921-1400-018-2, 89-89.

김진원, 박홍철, 박관수, 전자영, 박준희, 장진, 심규원 (2022). 분비나무군락의 토양환경 특성. 국립공원연구지, 13(1), 73-81.

김진원, 전자영, 박홍철 (2021). 국립공원 주요 아고산대

상록침엽수(구상나무, 분비나무) 고사현황 조사: 설악, 덕유,

지리산국립공원을 대상으로. 국립공원연구지, 12(2). 79-84. 김태호 (2006). 한라산 아고산 초지대 나지의 확대속도와 침식작용.

대한지리학회지 41(6),657-669.

노일, 정재민, 김태운, 타미랏 솔로몬, 문현식 (2018). 지리산 세석 구상나무림의 사면별 생태적 특성, 한국기후변화학회지, 9(3), 293302.

박병주, 김지동, 이준우, 조승완, 허태임, 이동혁, 변준기 (2021).

구상나무림의 종조성과 환경인자간 상관관계, 한국자원식물학회지, 34(2), 144-155.

박원규, 서정욱 (1999). 지리산 천왕봉지역 구상나무의 연륜기후학적 해석. 제4기학회지, 13(1), 25-33.

박홍철, 이호영, 오충현 (2014). 한라산 주요 사면별 구상나무 생육 및 쇠퇴 현황. 산림과학 공동학술발표논문집, 2014(0), 140-140.

- 산림청. 산림정책-병해충-예찰진단-환경 및 생리적 관리. 산림청 누리집. https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=N KFS_02_02_02_03_04&cmsId=FC_000832 (accessed 5 September 2022)
- 안응산, 김대신, 윤영석, 고석형, 김권수, 조인숙 (2019). 한라산 구상나무 공간적 고사패턴 분석을 통한 고사원인 추정 -기후변화에 따른 토양수분 과다 가능성 제안 -. 한국농림기상학회지, 21(1), 1-28.
- 오구균, 지용기, 박석곤 (2000). 지리산국립공원 구상나무 개체군 동태 - 지리산국립공원 동부지역을 중심으로-. 한국환경생태학회지, 13(4). 330-339.
- 이경재, 송근준, 김선희, 이윤원 (1994). 산성비 및 대기오염물질이 침엽수 잎에 미치는 피해의 조기판단에 관한 연구. 응용생태연구, 7(2). 252-269.
- 이나연(2012). 지리산국립공원 낙엽활엽수림 세 군락의 탄소저장량 평가. 한국환경생물학회지, 30 (2), 121-127.

이상진, 박관수, 김현숙, 안효진, 전현준, 김기정, 김용식, 박홍철 (2018).

한국의 주요 국립공원 내 구상나무군락의 토양 환경 특성 -지리산, 덕유산, 소백산 국립공원을 대상으로-. 한국환경생태학회 학술대회논문집. 28(2), 87-87.

- 이아림, 구남인 (2020). 우리나라 산림토양의 산성화 민감도평가와 그에 따른 토양 이화학적 특성 비교분석. 산림과학회지, 109(2), 157-168.
- 이총규, 황진형, 김종갑 (2004). 산성 강우에 의한 수목의 쇠퇴현상 -음이온을 중심으로 -. 한국생태학회지, 27(6), 347-353.
- 이충화, 이승우, 김은영, 김영걸, 변재경, 원형규, 진현오 (2005). 인위적인 토양 산성화가 소나무 묘목의 생장에 미치는 영향. 한국생태학회지, 28(6), 389-393.
- 임종환, 우수영, 권미정, 천정화, 신준환 (2006). 한라산 구상나무 건전개체와 쇠약개체의 온도변화에 따른 광합성능력과

수분이용효율. 한국임학회지, 95(6), 705-710. 장래하, 조규태, 유영한 (2014). 한라산 아고산대 구상나무림에서

- 연간물질 생산과 유기탄소량 변화. 한국환경생태학회지, 28(6), 627-633.
- 정진현, 구교상, 이충화, 김춘식 (2002). 우리나라 산림토양의 지역별 이화학적 특성. 한국산림과학회지(구 한국임학회지), 91(6), 694-700.
- 조민기, 정재민, 김태운, 김충열, 노일, 문현식 (2015). 지리산 세석지역 구상나무 임분의 생태적 특성. 한국기후변화학회지, 6(4), 379-388.
- Aber, J. D., Nadelhoffer, K. J., Steudler, P. & Melillo. J. M. (1989). Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. BioScience, 39(6), 378-386.

- Acton, P., Fox, J., Campbell, E., Rowe, H. & Wilkinson. M. (2013). Carbon isotopes for estimating soil decomposition and physical mixing in well-drained forest soils, Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 118(4), 1532-1545.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A. & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. Forest Ecology and Management, 259(4), 660-684.
- Ammann, M., Siegwolf, R., Pichlmayer, F., Suter, M., Saurer M. & Brunold, C. (1999). Estimating the uptake of traffic-derived NO₂ from ¹⁵N abundance in Norway spruce needles. Oecologia, 118, 124-131.
- Austin, A. & Vitousek, P. (1998). Nutrient dynamics on a precipitation gradient in Hawai'i. Oecologia, 113, 519–529.
- Balducci, L., Fierravanti A., Rossi S., Delzon, S., Grandpré, L. D., Kneeshaw, D. D. & Deslauriers, A. (2020). The paradox of defoliation: Declining tree water status with increasing soil water content, Agricultural and Forest Meteorology, 290, article 108025
- Becker-Heidmann, P. & Scharpenseel, H. (1986). Thin layer δ¹³C and d¹⁴C monitoring of "Lessive" soil profiles, Radiocarbon, 28(2A), 383-390.

- Bigras, F. J. (2000). Selection of white spruce families in the context of climate change: heat tolerance. Tree Physiology, 20(18), 1227-1234.
- Boutton, T. W. (1996). Stable carbon isotope ratios of soil organic matter and their use as indicators of vegetation and climate change. Mass Spectrometry of Soils, 47-82.
- Crawford, R.M.M. (1989). Studies in plant survival : ecological case stories of plant adaptation to adversity. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 253-254.
- Desjardins, T., Turcq, B., Nguetnkam, J. -P., Achoundong, G., Mandeng-Yogo, M., Cetin, F. & Lézine, A. -M. (2013). δ¹³C variation of soil organic matter as an indicator of vegetation change during the Holocene in central Cameroon, Comptes Rendus Geoscience, 345(7-8), 266-271.
- Driscoll, C. T., Driscoll, K. M., Mitchell, M. J. & Raynal, D. J. (2003). Effects of acidic deposition on forest and aquatic ecosystems in New York State. Environmental Pollution, 123(3), 327-336.
- Durka, W., Schulze, E. D., Gebauer, G. & Voerkeliust, S. (1994). Effects of forest decline on uptake and leaching of deposited nitrate determined from ¹⁵N and ¹⁸O measurements. Nature, 372, 765-767.
- Ehleringer, J. R., Buchmann, N. & Flanagan, L. B. (2000). Carbon isotope ratios in belowground carbon cycle processes. Ecological Applications, 10, 412-422.
- Gaudinski, J. B., Trumbore, S. E., Davidson, E. A. & Zheng, S. (2000).

Soil carbon cycling in a temperate forest: radiocarbon-based estimates of residence times, sequestration rates and partitioning of fluxes. Biogeochemistry, 51(1), 33–69.

- Hatten, J. & Liles, G. (2019). A 'healthy' balance The role of physical and chemical properties in maintaining forest soil function in a changing world. Global Change and Forest Soils, 36. Chapter 15, 373-396.
- Homann, P. S., Kapchinske, J. S., Boyce, A. (2007). Relations of mineral-soil C and N to climate and texture: regional differences within the conterminous USA. Biogeochemistry, 85, 303-316.
- Hua, Q. & Barbetti, M. (2004). Review of tropospheric bomb 14C data for carbon cycle modeling and age calibration purposes. Radiocarbon, 46(3), 1273-1298.
- Huang, Y., Kang, R., Mulder, J., Zhang, T., & Duan, L. (2015). Nitrogen saturation, soil acidification, and ecological effects in a subtropical pine forest on acid soil in southwest China. Journal of Geophysical Research: Biogeoscience, 120, 2457-2472.
- Hwang, J. E., Kim, Y. J., Shin, M. H., Hyun, H. J., Bohnert J. H. & Park,H. C. (2018). A comprehensive analysis of the Korean fir(Abies koreana) genes expressed under heat stress usingtranscriptome analysis. Scientific Reports, 8, article 10233.
- Isard, S. A. (1986). Factors influencing soil moisture and plant community distribution on Niwot Ridge, Front Range, Colorado, USA. Arctic and Alpine Research, 18(1), 83-96.

Jackson, M.L. (1979). Soil Chemical Analysis Advanced Course. 2nd

Edition.

- Jana, B.K., Biswas, S., Sonkar, S., Majumder, M., Roy, P. & Mazumdar, A. (2010). Estimation of soil carbon stock and soil respiration rate of recreational and natural forests in India. Impact of Climate Change on Natural Resource Management. Springer, Dordrecht, 329–343.
- Komada, T., Anderson, M. R. & Dorfmeier, C. L. (2008). Carbonate removal from coastal sediments for the determination of organic carbon and its isotopic signatures, δ¹³C and Δ¹⁴C: comparison of fumigation and direct acidification by hydrochloric acid. Limnology and Oceanography: Methods, 6(6), 254-262.
- Kuzyakov, Y., Mitusov, A. & Schneckenberger, K. (2006). Effect of C3– C4 vegetation change on δ¹³C and δ¹⁵N values of soil organic matter fractions separated by thermal stability. Plant Soil, 283, 229–238.
- Lee, D.H., Yoon, J.H. & Woo, K.S. (2007). Studies on biomass for young Abies koreana Wilson. Journal of Korean Forest Society, 96(2), 138-144.
- Lobo, P.F.S. & Flexor, L.M. (1974). Essai de détermination du temps de résidence des fractions humiques de deux sols ferrallitiques ár l'utilisation de radiocarbone naturel at thermonucléaire. Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, 12(1), 115-123.
- Magill, A. H., Aber, J. D., Currie, W. S., Nadelhoffer, K. J., Martin, M.E., McDowell, W. H., Melillo, J. M. & Steudler, P. (2004).Ecosystem response to 15 years of chronic nitrogen additions at

the Harvard Forest LTER, Massachusetts, USA. Forest Ecology and Management, 196(1), 7-28.

- Michelsen, A., Quarmby, C., Sleep, D. & Jonasson, S. (1998). Vascular plant 15N natural abundance in heath and forest tundra ecosystems is closely correlated with presence and type of mycorrhizal fungi in roots. Oecologia, 115, 406-418.
- Nadelhoffer, K. F. & Fry, B. (1988). Controls on natural ¹⁵N and ¹³C abundances in forest soil organic matter. Soil Science Society of America Journal, 52, 1633-1640.
- Nakanishi, Y., Yamamoto, Y., Park, K. L., Kato, S. & Kumazawa, K. (1995). Estimation and verification of origins of groundwater nitrate by using delta 15N values. Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 66(5), 544-551.
- Nemergut, D. R., Costello, E. K., Meyer, A. F., Pescador, M. Y., Weintraub, M. N. & Schmidt, S. K. (2005). Structure and function of alpine and arctic soil microbial communities. Research in Microbiology, 156(7), 775-784.
- O'Donnell, J., Aiken, G., Walvoord, M., Raymond, P., Butler, K., Dornblaser, M. & Heckman, K. (2014). Using dissolved organic matter age and composition to detect permafrost thaw in boreal watersheds of interior Alaska, Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 119(11), 2155-2170.
- O'Leary, M. H. (1988). Carbon isotopes in photosynthesis. BioScience, 38(5), 328–336.
- Ohno, T. & Erich, M. S. (1990). Effect of wood ash application on soil
pH and soil test nutrient levels. Agriculture. Ecosystems and Environment, 32(3-4), 223-239.

- Okochi, H. & Igawa, M. (2001). Elevational patterns of acid deposition into a forest and nitrogen saturation on Mt. Oyama, Japan. Water, Air, and Soil Pollution, 130, 1091–1096.
- Ometto, J. P. H. B., Ehleringer, J. R., Domingues, T. F., Berry, J. A., Ishida, F. Y., Mazzi, E., Higuchi, N., Flanagan, L. B., Nardoto G.
 B. & Martinelli, L. A. (2006). The stable carbon and nitrogen isotopic composition of vegetation in tropical forests of the Amazon Basin, Brazil. Biogeochemistry, 79, 251-274.
- Ostrowska, A., Porębska, G. (2015). Assessment of the C/N ratio as an indicator of the decomposability of organic matter in forest soils. Ecological Indicators, 49, 104–109.
- Owens, P. R. & Rutledge, E. M. (2005). Morphology. Encyclopedia of Soils in the Environment. Elsevier, 511-520.
- Park, J. S., Shin, H. S., Choi, C.-h., Lee, J. & Kim, J. (2018). Hierarchical environmental factors affecting the distribution of Abies koreana on the Korean Peninsula. Forests, 9(12), 777.
- Phillips, C. L., McFarlane, K. J., Risk, D. & Desai, A. R. (2013). Biological and physical influences on soil 14CO2 seasonal dynamics in a temperate hardwood forest, Biogeosciences, 10, 8211-8012.
- Santruckova, H., Kastovska, E., Kozlov, D., Kurbatova, J., Liveckova,M., Shibistova, O., Tatarinov, F., Lloyd, J. (2010). Vertical andhorizontal variation of carbon pools and fluxes in soil profile of

wet southern taiga in European Russia. Boreal Environment Research, 15, 357-369.

- Sulman, B., Phillips, R., Oishi, A., Shevliakova, E. & Pacala, S. W. (2014). Microbe-driven turnover offsets mineral-mediated storage of soil carbon under elevated CO₂. Nature Climate Change, 4, 1099-1102.
- Trumbore, S., Vogel, J. & Southon, J. (1989). AMS ¹⁴C measurements of fractionated soil organic matter: an approach to deciphering the soil carbon cycle. Radiocarbon, 31(3), 644-654.
- Ulrich, B., Mayer, R. & Khanna, P. K. (1980). Chemical changes due to acid precipitation in a Loess-derived soil in central Europe. Soil Science, 130, 193-199.
- Volk M., Bassin S., Lehmann M. F., Johnson M. G. & Andersen C. P. (2018). ¹³C isotopic signature and C concentration of soil density fractions illustrate reduced C allocation to subalpine grassland soil under high atmospheric N deposition, Soil Biol Biochem, 125, 178-184.
- Wahid, A., Gelani S., Ashraf M. & Foolad, M.R., (2007). Heat tolerance in plants: An overview. Environmental and Experimental Botany, 61(3), 199-223.
- Weston, D. J. & William L. (2007). Bauerle, Inhibition and acclimation of C3 photosynthesis to moderate heat: a perspective from thermally contrasting genotypes of Acer rubrum (red maple). Tree Physiology, 27(8), 1083–1092.

Yang, X. M., Xie, H. T., Drury, C. F., Reynolds, W. D., Yang, J. Y., Zhang,

X.D. (2012). Determination of organic carbon and nitrogen in particulate organic matter and particle size fractions of Brookston clay loam soil using infrared spectroscopy. European Journal of Soil Science, 63, 177-188.

Zinger, L., Shahnavaz, B., Baptist, F. & Geremia, R. A. (2009). Microbial diversity in alpine tundra soils correlates with snow cover dynamics. The ISME Journal, 3, 850-859.

Abstract

Soil properties of Korean fir dieback areas in subalpine zone in Mt. Jiri

Yeana Han

Environmental Management, Dept. of Environmental Planning Graduate School of Environmental Studies Seoul National University

Korean fir (*Abies koreana*) which grows in the subalpine zone of Korea, has been declining since the 1990s. The mortality of Korean fir in Mt. Jiri reached 23% as of 2018, which was the highest mortality of Korean fir among national parks in Korea. Subalpine zone is expected to be more vulnerable to climate change. The objective of this study was to understand the relationship between the Korean fir dieback in Mt. Jiri and physicochemical properties of the forest soils. A total of 9 plots were selected, which were categorized as three 'high', three 'medium', and three 'low' plots by the mortality of Korean fir in the plots. Soil samples were collected to a depth of 30 cm and analyzed for a variety of physicochemical properties including soil texture, mineralogy, pH, exchangeable cations, concentrations of soil organic carbon and total nitrogen, and isotope ratios (δ^{13} C, Δ^{14} C, δ^{15} N). Plots with high mortality had higher sand proportion (%) than those with medium or low mortality plots. Soil depth was also the shallowest at the high mortality plots, suggesting that the soils with high mortality plots could be prone to drought stress. Not only physical properties of soils but also chemical properties of soils contrasted between the high mortality plots and the others. In general, lower soil pH, higher C/N ratio, lower δ^{15} N, and older soil organic carbon were correlated with higher mortality of Korean fir, suggesting that decomposition of soil organic matter at the high mortality plots could have been slowed compared to those at the other plots. These results demonstrated a strong relationship between the physicochemical properties of the soils and dieback of Korean fir at Mt. Jiri, although further studies are still needed to clarify causation between the two.

Keywords : Subalpine Zone, Korean fir, Soil Properties, Soil Organic Carbon, Carbon Cycle, Climate Change *Student Number* : 2021–21476