

# 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지의 토양 및 광물학적 특성(I)

고석형\*, 안응산, 한태완, 박정훈  
제주특별자치도 세계유산·한라산연구원

## 서 론

예로부터 십장생의 하나로 장수를 상징하는 소나무는 전국 각지에 분포하고 있으며 여느 수목처럼 산림의 공익적 기능과 함께 정서적인 측면을 갖고 있다. 그러나 기후변화에 따른 이상기후 및 환경변화 등으로 최근 산림생태계가 위협을 받고 있으며 소나무재선충병, 솔잎혹파리, 솔껍질깍지벌레, 솔나방 등의 피해가 발생되고 있다.

학계 및 전문가들은 논문 및 보고서 등을 통해 학술적인 연구결과를 발표하고 있으며, 국립산림과학원은 2004년부터 2008년까지의 연구결과를 바탕으로 '소나무재선충병의 기초 생태특성 연구' 보고서를 발간하였고 이를 바탕으로 소나무재선충병 종합방제시스템을 구축하여 정보를 제공하고 있다.

제주도인 경우 한라산국립공원지역에는 적송이 주로 분포하고 있으며 그 이하 지역에서는 곰솔이 분포하고 있다. 최근 제주도내 전역으로 소나무재선충병이 확산되고 아름드리 소나무가 고사하면서 방제에 총력을 기울이고 있으며 해결방안을 찾기 위한 노력을 기울이고 있다. 학술적으로는 제주지역 특성에 맞는 맞춤형 소나무재선충병 조사연구 및 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구 등을 실시하고 있다.

본 연구는 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구의 토양지질분야로

---

\* 교신저자 ; 전화: 064-710-7578, e-mail: ksh5251@korea.kr

선정된 조사구 및 대조구에서 입지환경, 토양 및 광물학적 특성을 알아보고자 실시하였다. 따라서 소나무재선충병 피해지역의 생태계 복원과 지속가능한 숲의 보전전략을 모색하기 위한 기초 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

## 연구내용 및 방법

### 1. 조사지 개황

소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지는 제주특별자치도 제주시에 위치해 있으며 국유지 및 도유지에 4개소를 선정하였다(그림 1). 조사지는 방제가 이뤄진 피해지역을 조사구로, 방제가 이뤄지지 않은 미피해지역을 대조구로 구분하였다. 조사구와 대조구는 서로 인접지역으로 선정하였으나 와흘리는 곰솔 90%가 벌채되어 조사구와 대조구가 직선거리로 900m 정도가 떨어진 곳을 선정하였다. 곰솔 완전방제가 이뤄진 조사구는 우수암리, 도두1동 및 와흘리이며, 곰솔 부분방제가 이뤄진 곳은 광령리였다. 소나무재선충병 피해지 조사연구지에 온습도 및 지온을 모니터링하기 위하여 장비를 설치하였다(그림 2).

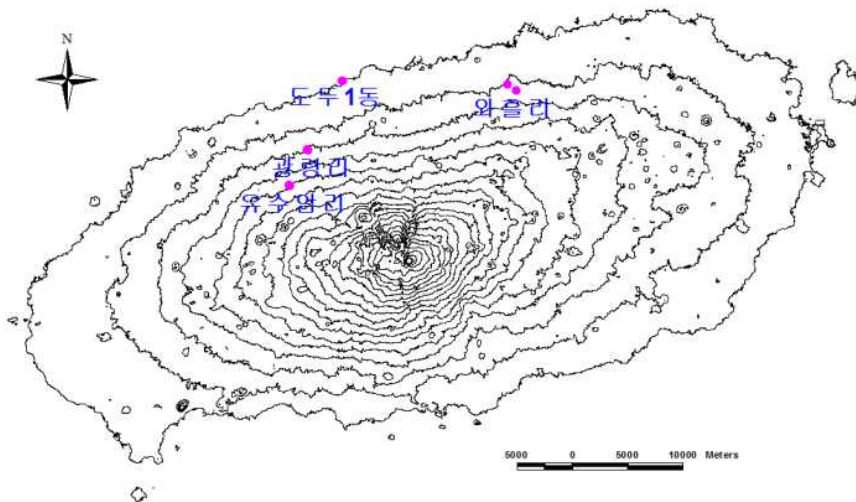


그림 1. 소나무재선충병 피해지 조사연구지의 입지환경 및 토양시료 채취지점.



그림 2. 소나무재선충병 피해지 조사연구지의 온습도 및 지온 관찰지점 전경  
 A: 유수암리, B: 광령리, C: 도두1동, D: 와홀1리.

조사연구지의 주요 식생은 유수암리 조사구에서 쥐똥나무, 팽나무 등이 우점하였으며, 대조구에서는 곰의말채, 털팽나무 등이 우점하였다. 광령리 조사구에서 쥐똥나무, 꾸지뽕나무 등이 우점하였으며, 대조구에서는 쥐똥나무, 후박나무 등이 우점하였다. 도두1동 조사구에서 예덕나무, 팽나무 등이 우점하였으며, 대조구에서는 예덕나무, 꾸지뽕나무 등이 우점하였다. 와홀리 조사구에서 예덕나무, 개망초 등이 우점하였으며, 대조구에서는 까마귀쪽나무, 후박나무 등이 우점하였다. 조사지에 대한 식물상 및 식생분포는 식물생태분야에서 조사하였으며, 곰솔의 흉고직경, 근원직경, 수령, 수관폭 등도 조사하였다. 향후 식생천이 및 대체조립 수종의 적응성 시험을 위한 기초 자료를 제공할 수 있을 것이다.

## 2. 시료채취

토양시료는 조사구와 대조구로 구분하여 총 8개 지점에서 식생조사가 이뤄진 방형구 주변에서 토양시료를 채취하였다. 시료채취시 먼셀 토색첩에 의해서 토색을 판정하였으며 토심, 석력함량, 건습도 등의 토양조사를 실시하였다. 표 1에 토양시료 채취지점의 해발고도, 면적 및 좌표를 나타내었다.

표 1. 시료채취 지점의 좌표

시료채취 지점	해발고도	면적 (m <sup>2</sup> )	TM 좌표	
	(m)		X 좌표	Y 좌표
유수암리 조사구	409	11,818	145680	41883
유수암리 대조구	404		145624	41919
광령리 조사구	214	9,855	147317	45113
광령리 대조구	209		147301	45159
도두1동 조사구	45	69,400	150454	51353
도두1동 대조구	33		150395	51376
와홀리 조사구	142	6,297	166176	50462
와홀리 대조구	118		165327	51069

물리성을 측정하기 위한 토양시료는 100cm<sup>3</sup> 스테인레스 원통을 이용하여 표토를 core sampler로 채취하였으며 수분이 날아가지 않도록 밀봉을 한 후 실내에서 분석하였다. 화학성을 측정하기 위한 토양시료는 낙엽층을 제거한 후에 층위를 고려하면서 표토와 심토로 나누어 물리성 시료를 채취한 동일지점에서 채취하였으며, 이 토양시료는 X-선 회절분석 및 형광분석에도 사용되었다.

## 3. 분석방법

조사지의 입지환경 조사를 위한 온습도는 조사구 4개소에 각각 미니로거 Pro v2 U23-001(Onset Computer Corporation, USA)을 설치하여 측정하였으며, 데이터로거의 온도 측정범위는 -40~70℃이며, 습도는 0~100%였다. 온습도

측정기간은 2015년 4월 1일에서 2015년 11월 30일까지이며 매 5분마다 데이터를 측정하였다. 지온은 Nautilus 85 data logger(ACR System Inc., Canada)를 설치하여 측정하였으며, 온도 측정범위는 -40~85℃였다. 지온 측정기간은 2015년 9월 1일에서 2015년 10월 31일까지이며 매 10초마다 데이터를 측정하였다.

토양의 이화학적 성질은 농촌진흥청 토양분석법(NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다. 토양의 물리적 성질 분석은 용적밀도는 core법, 입자밀도는 pycnometer method 원리를 응용하여 100mL vol. flask를 이용하여 측정하였다. 공극률은 용적밀도와 입자밀도를 이용하여 구하였으며, 투수계수는 정수위법으로 측정하였다. 입도분석은 풍건토양 10g을 정량하여 500ml Tall beaker에 담은 후 증류수를 300ml씩 가하고 30% 과산화수소를 25ml씩 가한 뒤 90℃로 가열된 전열판 위에서 유기물을 분해하였다. 과산화수소 분해가 끝나면 원심분리병에 분산제 5% sodium hexametaphosphate 10ml를 가한 후 약 18시간 정도를 진탕시키면서 완전히 분산시켰다. 이후 Pipette법과 체분석을 이용하여 측정하였다.

토양의 화학적 성질 분석은 채취한 시료를 풍건시킨 후 2mm 체에 통과된 토양시료를 사용하였다. 토양 pH는 토양과 증류수의 비를 1 : 5로 하여 pH meter로 측정하였고, 전기전도도는 pH를 측정하고 남은 여액을 EC meter를 이용하여 측정하였다. 유기물함량은 Walkley and Black법, 유효인산은 Lancaster법, 총 질소함량은 Kjeldahl법으로 측정하였다. 교환성양이온 K, Ca, Mg 및 Na는 1N ammonium acetate(pH 7.0)용액 50mL를 가하여 30분간 진탕한 다음 여과하여 얻어진 여액을 원자흡광분광광도계(AAS)를 이용하여 측정하였다. 양이온교환용량은 1N-NH<sub>4</sub>OAc(pH 7.0)로 포화하고 80% ethyl alcohol로 세척한 후 토양을 Kjeldahl 증류장치에 의해 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 함량을 정량하여 산출하였다.

X-선 회절분석(X-Ray Diffractometer, XRD)은 토양시료를 체분석과 침강법을 이용하여 2 $\mu$ m 이하의 점토를 분리시킨 후 실시하였다. Rigaku사의 CuK $\alpha$  선과 Ni-filter에 의한 X-선을 사용하는 Geigerflex 2013의 X-선분말회절장치를 사용하였다. 전압 30KV, 15mA, Scan speed 2 $^{\circ}$ 2 $\theta$ /min, 시정수 1 sec, slit slit 1 $^{\circ}$ ~ 0.3mm ~ 1 $^{\circ}$ 의 측정 조건으로 분석하였다. 전체(Bulk)시료를 부정위 시편

을 제작하여 정량분석 하였다. XRD 정량분석은 리트벨트 구조검증법(Rietveld refinement method)에 의거한 정량분석 프로그램(SIEROQUANT TM, version 3.0)을 이용하여 해석하였다. 또한 X-선 형광분석(X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF)은 Shimadzu사의 XRF-1700을 사용하였으며, 분석항목은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, CaO, TiO<sub>2</sub>, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO 및 LOI로 총 11개 성분이다.

## 결과 및 고찰

### 1. 조사지의 입지 특성 및 토양의 이화학적 성질

#### 1) 입지환경 및 입지토양 특성

표 2에 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지의 온습도를 나타내었다. 온습도 측정기간은 2015년 4월 1일에서 2015년 11월 30일까지이며, 지온 측정기간은 3개월 정도로 기간이 짧아 이번 보고서에는 제외시켰다. 조사구별 여름철(6~8월) 평균온도는 유수암리 18.7℃, 광령리 23.1℃, 도두1동 22.0℃ 및 와흘리 23.0℃였다. 유수암리는 해발 409m에 위치해 여름철 평균온도가 가장 낮았으나 나머지 조사구는 큰 온도차이가 없었다. 상대적으로 도두1동의 해발 고도가 가장 낮아 여름철 평균온도가 높을 것으로 예상했으나 바닷가에 인접한 분석구(오름)여서 다른 조사구보다 온도가 낮은 편이었다. 조사구별 가을철(9~11월) 평균온도는 유수암리 15.6℃, 광령리 17.2℃, 도두1동 15.6℃ 및 와흘리 16.9℃였다. 유수암리는 여름철과 마찬가지로 가을철 평균온도도 가장 낮았으며 바닷가에 위치한 도두1동도 가을철 평균온도가 낮았다.

조사구별 여름철 평균습도는 유수암리 86.2%, 광령리 84.8%, 도두1동 86.2% 및 와흘리 88.8%였으며, 가을철 평균습도는 유수암리 82.8%, 광령리 79.5%, 도두1동 82.8% 및 와흘리 86.7%였다. 여름철과 가을철 평균온도가 가장 높았던 광령리에서 평균습도가 가장 낮았으며 와흘리에서 여름철과 가을철 평균습도가 가장 높았다. 제주시는 크게 동부와 서부지역으로 구분할 수 있으며 대체적으로 서부지역보다 동부지역의 강우량이 많은 편이다. 따라서 동부

지역에 위치한 와흘리가 상대적으로 다른 조사구보다 평균습도가 높은 것으로 판단된다.

표 2. 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지의 온도(°C) 및 습도(%)

조사연구지		4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	평균
유수암리	온도	12.8	16.9	19.5	23.2	13.4	19.5	15.5	11.8	16.6
	습도	73.6	66.5	85.0	87.1	86.6	85.1	73.9	89.4	80.9
광령리	온도	13.6	17.8	20.5	24.1	24.8	21.0	17.3	13.2	19.0
	습도	71.9	66.4	83.6	86.3	84.4	81.6	71.1	85.8	78.9
도두1동	온도	14.0	16.9	19.5	23.2	23.4	19.5	15.6	11.8	18.0
	습도	73.6	66.5	85.0	87.1	86.6	85.1	73.9	89.4	80.9
와흘리	온도	13.2	17.6	20.4	23.9	24.6	20.8	16.6	13.3	18.8
	습도	77.7	70.1	87.2	89.5	89.7	89.4	80.8	89.9	84.3

제주도 정밀토양도(농업기술연구소, 1976)에 따른 토양분류에 의하면 유수암리 조사지는 구좌통, 광령리 조사지는 중문통, 도두1동 조사지는 금악통, 와흘리 조사지는 하원통에 속하였다. 따라서 유수암리, 광령리 및 도두1동 조사지는 속칭 뜯땅으로 알려진 화산회토이며, 와흘리는 육지부와 유사한 토양성질을 갖고 있는 비화산회토였다.

유수암리 조사구는 도유지로서 토심이 36cm로 얇고, 유기물층은 약 2cm 정도였다. 석력함량은 5~15%였으며, 시료채취시 지렁이 6마리가 발견됐다. 먼셀 토색척에 의한 토색판정 결과 토색은 표토 10YR 2/1, 심토 10YR 2/2였으며, 건습도는 약습에 해당됐다. 유수암리 대조구는 도유지로서 토심이 22cm로 매우 얇고, 유기물층은 약 9cm 정도로 조사구보다 유기물층이 깊었다. 석력함량은 15~30%로 많아 시료채취가 힘들었으며, 시료채취시 지렁이 5마리가 발견됐다. 토색은 표토와 심토에서 10YR 2/1였으며, 건습도는 약습에 해당됐다.

광령리 조사구는 도유지로서 토심이 55cm 내외였으며, 유기물층은 15cm 정도로 매우 깊었다. 석력함량은 5%이하로 적었으며, 시료채취시 지렁이 3마리가 발견됐다. 토색은 표토 10YR 2/2, 심토 10YR 3/4였으며, 건습도는 적윤에 해당됐다. 광령리 대조구는 도유지로서 토심이 45cm 내외였으며, 유기물층은 조사구와 마찬가지로 15cm 정도였다. 석력함량은 5~15%였으며 30cm 이하에서

는 자갈이 다수 출현하였고 시료채취시 지렁이는 발견되지 않았다. 토색은 조사구와 동일했으며, 건습도는 적윤에 해당됐다.

도두1동 조사구는 국유지로서 주변에 동백나무가 식재되었고 토심이 55cm 내외였으며, 유기물층은 5cm 정도였다. 석력함량은 15~30%로 많았으며, 시료채취시 지렁이는 발견되지 않았다. 토색은 표토 5YR 4/4, 심토 5YR 3/3였으며, 건습도는 적윤에 해당됐다. 도두1동 대조구는 국유지로서 토심이 50cm 내외로 30cm 깊이에서 스코리아(송이)와 큰 자갈이 출현하였으며, 유기물층은 조사구와 마찬가지로 5cm 정도였다. 석력함량은 5~15%였으며 시료채취시 지렁이 2마리가 발견됐다. 토색은 표토 10YR 3/4, 심토 10YR 2/2였으며, 건습도는 적윤에 해당됐다.

와홀리 조사구는 도유지로서 토심이 34cm로 얇았으며, 유기물층은 거의 없었다. 석력함량은 15~30%로 많았으며, 시료채취시 지렁이는 발견되지 않았다. 토색은 표토와 심토에서 10YR 2/2였으며, 건습도는 약습에 해당됐다. 와홀리 대조구는 도유지로서 토심이 30cm로 얇았으며, 유기물층은 3cm 정도였다. 석력함량은 5%이하로 적었으며, 시료채취시 지렁이 1마리가 발견됐다. 토색은 표토 10YR 3/4, 심토 10YR 4/4였으며, 건습도는 적윤에 해당됐다.

## 2) 조사지 토양의 물리적 성질

소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지 토양의 물리적 성질은 표 3과 같다. 조사지의 입도분석 결과 미국농무성(USDA)의 분류법에 의한 토성명은 우수암리는 조사구와 대조구가 모두 미사질양토였으며, 광령리는 조사구는 미사질양토, 대조구는 양토였다. 도두1동 조사구의 표토가 식양토, 심토가 양토였으며, 대조구의 표토가 미사질양토, 심토가 양토였다. 와홀리는 조사구의 표토가 미사질식양토, 심토가 식양토였으며, 대조구의 표토가 미사질양토, 심토가 미사질식양토였다. 정진현 등(2002)은 제주도를 제외한 우리나라 산림토양 대부분이 양토이며 제주도 토양은 미사질양토로 분류되었다고 보고한 바 있다. 본 결과에서도 미사질양토가 주를 이루었으며 전체적으로 미사함량이 높아 제주도 화산회토의 특성을 잘 나타낸다고 할 수 있겠다.

입경구분에 따른 평균 분포함량은 소나무재선충병 피해지인 경우 표토에서



모래 19.9%, 미사 54.4%, 점토 25.8%였으며, 심토에서 모래 24.3%, 미사 53.5%, 점토 22.1%였다. 미피해지인 경우 표토에서 모래 18.2%, 미사 58.5%, 점토 20.8%였으며, 심토에서 모래 21.3%, 미사 54.0%, 점토 24.8%였다. 피해지와 미피해지 사이에 유의적인 차이( $P>0.05$ )가 없었으며 공통적으로 미사의 함량이 50% 이상으로 높았다. 평균 토양삼상분포는 피해지인 경우 표토에서 고상 43.9%, 액상 43.0%, 기상 13.2%였으며, 심토에서 고상 44.6%, 액상 41.0%, 기상 14.4%였다. 미피해지인 경우 표토에서 고상 38.0%, 액상 34.4%, 기상 27.6%였으며, 심토에서 고상 42.3%, 액상 39.3%, 기상 18.4%였다. 고상과 액상의 경우 피해지와 미피해지 사이에 유의적인 차이가 없었으나 기상에서 유의적인 차이( $P<0.05$ )를 보였다. 기상과 액상은 공극의 크기, 구조 및 토양의 견습과 밀접한 관계가 있으며, 기상은 액상에 따라 상대비율이 달라진다(류순호, 2000). 본 연구결과에서 미피해지보다 피해지에서 기상률이 낮아 액상률에 영향을 미쳤으며 재선충 방제 실시로 인하여 무거운 기계의 이동 및 답압 등에 의하여 공극, 토양구조 등에 영향을 미친 것으로 생각된다.

조사지의 용적밀도는 피해지인 경우 표토 0.49~1.24g/cm<sup>3</sup>, 심토 0.68~1.35g/cm<sup>3</sup> 범위였으며, 미피해지인 경우 표토 0.50~1.01g/cm<sup>3</sup>, 심토 0.58~1.08g/cm<sup>3</sup> 범위였다. 용적밀도는 일정한 부피 안에 있는 고상의 건조중량을 말하는데, 용적밀도가 크면 다져져 있거나 무거운 입자로 구성되어 치밀한 정도를 나타낸다. 도두1동 조사지는 분석구(오름) 토양으로 모래함량, 고상률이 높았고 스코리아(송이)가 풍화된 비교적 큰 입자로 구성되어 용적밀도가 높은 것으로 생각된다. 정진현 등(2002)은 제주지역 산림토양의 평균 용적밀도를 표토 0.56 g/cm<sup>3</sup>, 심토 0.73 g/cm<sup>3</sup>로 보고한 바 있는데 이보다는 조금 높은 수치를 보였다. 입자밀도는 피해지인 경우 표토 1.34~2.25g/cm<sup>3</sup>, 심토 1.77~2.26g/cm<sup>3</sup> 범위였으며, 미피해지인 경우 표토 1.59~2.05g/cm<sup>3</sup>, 심토 1.70~2.20g/cm<sup>3</sup> 범위였다. 정진현 등(2002)은 제주지역 산림토양의 평균 입자밀도를 표토 2.42g/cm<sup>3</sup>, 심토 2.50g/cm<sup>3</sup>로 보고한 바 있는데 본 연구결과 피해지와 미피해지 모두 낮은 수치를 보였다. 토양내의 공간을 의미하는 공극률은 피해지인 경우 표토 45~63%, 심토 40~65% 범위였으며, 미피해지인 경우 표토 51~69%, 심토 51~66% 범위였다. 평균적으로도 공극률은 피해지가 미피해지보다 낮았으며 용적밀도가 컸던 도

두1동 조사지에서 가장 낮은 공극률을 보였다.

투수계수는 시간당 물의 이동 거리를 나타낸 것으로 1시간 동안 투수되는 거리(cm/h)로 나타내었다. 투수계수는 피해지인 경우 표토 0.16~193.77cm/h, 심토 0.16~275.16cm/h 범위였으며, 미피해지인 경우 표토 12.07~29.71cm/h, 심토 2.34~241.37cm/h 범위였다. 피해지인 경우 토층에 관계없이 와홀리에서 투수계수가 가장 높았으며, 미피해지인 경우 우수암리와 와홀리 대조구 심토에서 투수계수가 가장 높았다.

표 3. 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지 토양의 물리적 성질

구분	시료채취 지점	토성명	모래	미사	점토				입자 밀도		공극률 (%)	투수 계수 (cm/h)
					고상	액상	기상	용적 밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	입자 밀도 (g/cm <sup>3</sup> )			
피 해 지	우수암리 조사구(표)	미사질양토	14.7	62.5	22.8	36.6	45.2	18.2	0.49	1.34	63	0.16
	우수암리 조사구(심)	미사질양토	19.3	63.4	17.3	40.3	45.8	13.9	0.72	1.77	60	0.16
	광령리 조사구(표)	미사질양토	16.8	62.4	20.8	38.2	37.6	24.2	0.67	1.75	62	31.92
	광령리 조사구(심)	미사질양토	23.3	62.3	14.3	34.8	40.5	24.7	0.68	1.94	65	29.09
	도두1동 조사구(표)	식양토	32.9	39.4	27.7	55.2	39.6	5.2	1.24	2.25	45	17.55
	도두1동 조사구(심)	양토	32.3	43.5	24.2	59.6	37.8	2.6	1.35	2.26	40	4.17
	와홀리 조사구(표)	미사질식양토	15.0	53.2	31.8	45.4	49.4	5.2	0.94	2.06	55	193.77
	와홀리 조사구(심)	식양토	22.3	44.9	32.7	43.8	39.9	16.3	0.91	2.08	56	275.16
미 피 해 지	우수암리 대조구(표)	미사질양토	20.6	61.6	17.7	31.2	34.6	34.3	0.50	1.59	69	29.71
	우수암리 대조구(심)	미사질양토	19.4	60.5	20.2	34.1	42.1	23.9	0.58	1.70	66	101.16
	광령리 대조구(표)	양토	26.1	48.0	16.0	36.4	32.9	30.7	0.68	1.86	64	28.43
	광령리 대조구(심)	양토	34.8	45.9	19.3	45.8	34.7	19.5	0.85	1.85	54	2.34
	도두1동 대조구(표)	미사질양토	24.1	51.5	24.4	49.1	24.9	26.0	1.01	2.05	51	15.81
	도두1동 대조구(심)	양토	29.4	44.0	26.6	49.2	30.1	20.7	1.08	2.20	51	74.37
	와홀리 대조구(표)	미사질양토	2.1	72.7	25.2	35.4	45.2	19.3	0.67	1.90	65	12.07
	와홀리 대조구(심)	미사질식양토	1.7	65.4	32.9	40.1	50.3	9.6	0.80	1.99	60	241.37
평균의 표준오차			2.42	2.48	1.40	2.01	1.74	2.30	0.06	0.06	2.01	540.46
유의확률			0.65	0.67	0.98	0.33	0.45	0.04	0.43	0.77	0.33	0.90

### 3) 조사지 토양의 화학적 성질

소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지 토양의 화학적 성질은 표 4와 같다. 전체적으로 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지 토양의 화학적 성질은 피해지와 미피해지 사이에 유의적인 차이( $P>0.05$ )가 없었다.

평균 토양 pH는 소나무재선충병 피해지인 경우 표토 5.50, 심토 5.72였으며, 미피해지인 경우 표토 5.23, 심토 5.43이었다. 피해지와 미피해지에 관계없이 토양 pH가 산성을 나타냈으며 미피해지보다 피해지에서 토양 pH가 다소 높았다. 본 연구결과 피해지인 경우 정진현 등(2002)이 보고한 제주지역 산림 토양의 평균 토양 pH 표토 5.48과 심토 5.52에 비해서 표토는 유사하고 심토는 조금 높은 수치를 보였다. 토양 pH는 피해지와 미피해지 모두 도두1동에서 가장 높았으며 칼슘과 마그네슘 비료 시용이 없었던 미경작지인 임야에서 토양 pH가 높은 것은 바닷가에 위치하여 해풍 등에 의한 영향이라고 생각되며 이는 상대적으로 용탈이 잘 되는 교환성 Na가 도두1동 대조구에서 함량이 높은 것과 일치하는 경향을 보였다.

전기전도도가 높은 토양은 토양 수분에 염류이온의 농도가 높아 식물생육에 영향을 미친다. 평균 전기전도도는 소나무재선충병 피해지인 경우 표토 0.78dS/m, 심토 0.55dS/m였으며, 미피해지인 경우 표토 0.80dS/m, 심토 0.67dS/m였다. 조사지간에 다소 차이는 있었으나 대체적으로 표토가 심토보다 전기전도도가 높았으며, 이와 같은 농도는 식물생육에 대한 염류집적의 영향은 거의 무시할 수 있다고 판단된다.

제주도 토양은 화산폭발시 분출된 화산재와 동식물의 유체로부터 유래된 유기물이 결합하여 육지부 토양의 유기물함량 3% 이하에 비하여 매우 높다(류순호와 송관철, 1984). 평균 유기물함량은 소나무재선충병 피해지인 경우 표토 15.47%, 심토 8.02%로 표토가 심토에 비해 약 2배 정도 높았으나, 미피해지인 경우 표토 10.44%, 심토 9.82%로 차이가 없었다. 일반적으로 유기물함량은 심토보다 표토에서 높는데 피해지인 경우 표토가 심토보다 유기물함량이 높았으나, 미피해지인 경우 우수암리와 도두1동에서 높은 특이한 경향을 보였다. 본 연구결과는 정진현 등(2002)이 보고한 제주지역 산림토양의 평균 유기물함량 표토 10.40%, 심토 6.39%와 오차범위에서 유사한 경향을 보였다.

일반적으로 유기물함량이 높아지면 총 질소함량이 높아지는데 본 연구결과 총 질소함량도 유기물함량과 유사한 경향을 보였다. 평균 총 질소함량은 소나무재선충병 피해지인 경우 표토 0.42%, 심토 0.30%였으며, 미피해지인 경우 표토 0.45%, 심토 0.43%로 피해지와 미피해지 사이에 차이가 없었다. 이는 정진현 등(2002)이 보고한 제주지역 산림토양의 평균 총 질소함량 표토 0.43%, 심토 0.25%와 피해지인 경우는 유사하였으나 미피해지인 경우 본 연구결과와 심토에서 높은 경향을 보였다.

제주도 화산회토양은 활성화 인산을 흡착 및 고정시키는 능력이 매우 커서 유효인산이 결핍되어 토양비옥도가 낮은 원인으로 알려져 있다(류순호와 송관철, 1984). 평균 유효인산함량은 소나무재선충병 피해지인 경우 표토 4.59mg/kg, 심토 1.99mg/kg였으며, 미피해지인 경우 표토 6.18mg/kg, 심토 4.49mg/kg로 피해지가 미피해지보다 낮았다. 정진현 등(2002)은 제주지역 산림토양의 평균 유효인산함량을 표토 25.6mg/kg, 심토 11.9mg/kg로 보고한 바 있는데 본 연구결과에 비해 약 3~4배 정도 높은 함량을 보였다. 본 연구대상지의 유효인산함량이 너무 낮아 식생생육에 있어서 제한요인으로 작용될 수 있으므로 지속적인 모니터링이 필요하다고 생각된다.

소나무재선충병 피해지인 경우 표토에서의 교환성양이온 평균 함량은 K 0.45cmol<sub>c</sub>/kg, Ca 3.47cmol<sub>c</sub>/kg, Mg 1.93cmol<sub>c</sub>/kg 및 Na 0.49cmol<sub>c</sub>/kg 이었으며, 심토에서는 K 0.20cmol<sub>c</sub>/kg, Ca 2.32cmol<sub>c</sub>/kg, Mg 1.78cmol<sub>c</sub>/kg 및 Na 0.40cmol<sub>c</sub>/kg 이었다. 소나무재선충병 미피해지인 경우 표토에서의 교환성양이온 평균 함량은 K 0.27 cmol<sub>c</sub>/kg, Ca 2.72 cmol<sub>c</sub>/kg, Mg 1.85 cmol<sub>c</sub>/kg 및 Na 0.54 cmol<sub>c</sub>/kg 이었으며, 심토에서는 K 0.16 cmol<sub>c</sub>/kg, Ca 1.32 cmol<sub>c</sub>/kg, Mg 1.51 cmol<sub>c</sub>/kg 및 Na 0.51 cmol<sub>c</sub>/kg 이었다. 교환성 Na를 제외하면 미피해지보다 피해지에서 교환성 양이온함량이 높았으며 이는 국립산림과학원(2009)이 보고한 교환성 Ca는 피해지보다 미피해지에서 함량이 높다는 결과와 반대의 경향을 보였다. 피해지와 미피해지 사이에 교환성양이온함량은 유의적인 차이가 없었으며 평균의 표준오차는 교환성 K와 Na가 유사하였으며, 교환성 Ca와 Mg가 유사하였다.

양이온교환용량은 일정 토양이 갖고 있는 교환성양이온의 총량을 나타내며 토양비옥도를 나타내는 하나의 지표이다(류순호, 2000). 평균 양이온교환용량

은 소나무재선충병 피해지인 경우 표토 23.88  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ , 심토 22.20  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ 이었으며, 미피해지인 경우 표토 26.73  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ , 심토 22.30  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ 이었다. 피해지와 미피해지 사이에 심토는 유사한 수치를 나타냈으나 표토는 미피해지가 피해지보다 다소 높았다. 본 연구결과 정진현 등(2002)이 보고한 제주지역 산림 토양의 양이온교환용량보다 다소 높은 값을 나타냈다.

표 4. 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지 토양의 화학적 성질

구분	시료채취 지점	토양	전기	유기물	총	유효	교환성	교환성	교환성	교환성	양이온	
		pH (1:5)	전도도 (dS/m)	함량 (%)	질소 (%)	인산 (mg/kg)	칼륨 ( $\text{cmol}^+/\text{kg}$ )	칼슘 ( $\text{cmol}^+/\text{kg}$ )	마그네슘 ( $\text{cmol}^+/\text{kg}$ )	나트륨 ( $\text{cmol}^+/\text{kg}$ )	교환용량	
피 해 지	유수암리 조사구(표)	5.22	0.74	20.89	0.65	5.77	0.19	1.85	0.81	0.28	32.50	
	유수암리 조사구(심)	4.93	0.66	16.66	0.62	2.92	0.29	0.42	0.32	0.27	29.00	
	광령리 조사구(표)	5.73	0.72	13.60	0.53	5.00	0.28	3.54	1.79	0.42	28.10	
	광령리 조사구(심)	5.31	0.81	7.83	0.33	1.27	0.11	0.80	0.80	0.70	23.70	
	도두1동 조사구(표)	5.63	0.86	20.55	0.23	3.19	0.15	4.17	2.90	0.29	14.00	
	도두1동 조사구(심)	6.44	0.43	4.13	0.13	1.79	0.05	3.57	3.01	0.36	12.70	
	와흘리 조사구(표)	5.42	0.78	6.82	0.27	4.38	1.18	4.32	2.21	0.97	20.90	
	와흘리 조사구(심)	6.18	0.29	3.46	0.11	1.96	0.35	4.49	2.99	2.85	23.40	
	미 피 해 지	유수암리 대조구(표)	5.24	0.60	16.59	0.59	11.11	0.19	1.75	1.02	0.35	37.10
		유수암리 대조구(심)	4.96	0.72	20.65	0.63	9.36	0.13	0.62	0.47	0.29	27.40
광령리 대조구(표)		5.43	0.67	10.68	0.58	4.92	0.23	4.97	2.23	0.50	27.70	
광령리 대조구(심)		5.37	0.97	6.88	0.61	1.88	0.06	1.04	0.81	0.60	23.10	
도두1동 대조구(표)		5.37	1.42	5.10	0.24	3.17	0.48	2.82	3.24	1.04	17.40	
도두1동 대조구(심)		6.48	0.42	5.44	0.22	1.37	0.38	3.34	4.48	0.91	19.10	
와흘리 대조구(표)		4.88	0.51	9.37	0.37	5.52	0.16	1.34	0.92	0.27	24.70	
와흘리 대조구(심)		4.92	0.57	6.31	0.24	5.35	0.08	0.28	0.29	0.24	19.60	
평균의 표준오차		0.13	0.07	1.57	0.05	0.70	0.07	0.40	0.32	0.07	1.63	
유의확률		0.30	0.59	0.62	0.46	0.15	0.43	0.30	0.80	0.59	0.67	

## 2. 조사지 토양의 광물학적 특성

### 1) 조사지 토양의 구성광물 및 함량

소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지 토양의 표토를 대상으로 구성광물을 파악하기 위하여 X-선 회절분석을 실시하였고(그림 3), 이를 정량분석하여 함량비를 표 4에 나타내었다. 우수암리 조사구에서 휘석, 와홀리 대조구에서 적철석이 미검출된 것을 제외하면 조사지는 석영(Quartz), 장석류(Plagioclase, K-Feldspars), 운모류, 각섬석(Hornblende), 휘석(Pyroxene), 감람석(Olivine), 캐올리나이트(Kaolinite), 녹니석(Chlorite) 또는 질석(Vermiculite), 적철석(Hematite) 및 자철석(Magnetite)이 공통적인 구성광물이었다. 운모류는 운모(Micas) 또는 일라이트(Illite)로 추정되며 향후 정밀한 분석이 요구되었다. 이 중에서 캐올리나이트, 녹니석 또는 질석의 검출은 점토광물로서 풍화가 오래되었음을 시사하지만 조암광물에 비해 함량이 낮았다. 또한 특이하게도 와홀리 조사구에서는 아주 소량인 깃사이트가 유일하게 검출되었다.

우수암리는 석영, 사장석, 정장석, 휘석, 적철석이 주성분 광물이었으며, 감람석, 자철석 및 점토광물이 확인되었다. 다른 조사지에 비해 장석류 함량이 44~45%로 높으며 점토광물은 3%로 함량이 낮았다. 광령리는 석영, 사장석, 정장석, 휘석, 적철석, 자철석이 주성분 광물이었으며, 감람석 및 점토광물이 확인되었다. 다른 조사지에 비해 각섬석 함량이 12%로 높으며 점토광물은 5~7%로 함량이 높았다. 도두1동은 석영, 사장석, 정장석, 휘석, 적철석, 자철석이 주성분 광물이었으며, 감람석 및 점토광물이 확인되었다. 다른 조사지에 비해 적철석 함량이 22%로 매우 높아 특이한 경향을 보였으며 점토광물은 4~5%의 함량을 보였다. 와홀리 조사구는 석영, 사장석, 정장석, 휘석, 적철석, 자철석이 주성분 광물이었으며, 감람석 및 점토광물이 확인되었다. 다른 조사지에 비해 운모류 함량이 22%로 매우 높은 것이 특징이었으며 점토광물은 8%의 함량을 보였다. 와홀리 대조구는 석영, 사장석, 각섬석, 휘석이 주성분 광물이었으며, 정장석, 감람석, 자철석 및 점토광물이 확인되었다. 다른 조사지에 비해 석영의 함량이 47%로 매우 많았는데 이는 풍화작용과 토양생성작용에 의해 화산암의 유리질 성분이 탈유리화되어 생성된 것으로 생각된다. 또한 정장석의 함량은 3%로 상대적으로 적었고 점토광물은 9%로 다소 함량이 많았다.

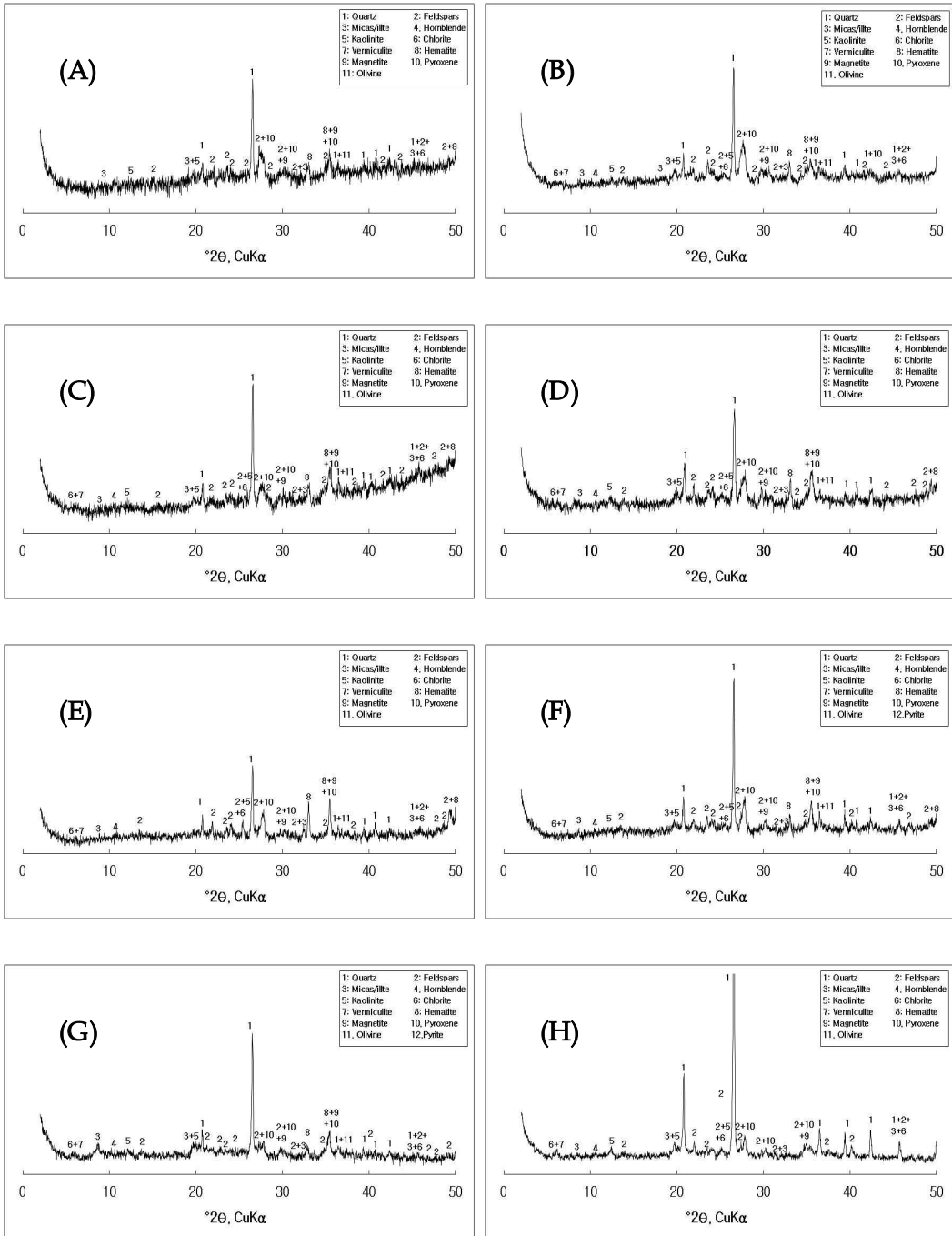


그림 3. 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지 토양의 X-선 회절도 (A: 유수암리조사구, B: 유수암리대조사구, C: 광령리조사구, D: 광령리대조사구, E: 도두1동조사구, F: 도두1동대조사구, G: 와흘리조사구, H: 와흘리대조사구).

표 4. 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지 토양의 구성광물 및 함량비(wt.%)

구성광물	유수암리 조사구	유수암리 대조구	광령리 조사구	광령리 대조구	도두1동 조사구	도두1동 대조구	와홀리 조사구	와홀리 대조구
Quartz	19.3	18.0	19.4	14.9	12.4	23.0	21.6	47.3
Plagioclase	21.0	24.4	12.7	20.0	21.9	23.2	9.5	16.5
K-Feldspars	23.2	20.6	9.1	14.2	10.5	6.7	10.2	3.0
Micas/Illite	5.2	4.9	6.6	8.8	7.2	9.4	19.6	7.0
Hornblende	-	4.0	12.3	4.3	6.4	4.8	2.8	8.2
Pyroxene	11.0	12.5	14.7	9.8	6.0	10.4	10.0	6.1
Olivine	3.5	1.4	2.0	2.9	3.9	3.7	3.1	1.1
Kaolinite	1.6	1.0	2.0	3.9	0.8	1.5	4.1	2.7
Chlorite/Vermiculite	1.0	2.3	3.0	3.3	3.7	2.6	2.3	6.0
Gibbsite	-	-	-	-	-	-	2.3	-
Hematite	9.1	7.7	9.9	12.1	21.8	10.2	5.9	-
Magnetite	4.9	3.2	8.5	5.9	5.4	4.5	8.5	2.2
합계	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	100.1

이와 같이 조사연구지의 구성광물은 조사구와 대조구가 인접하지 않은 와홀리를 제외하고는 일부 함량의 차이가 있었으나 주성분 광물이 유사한 경향을 보였다.

소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지 토양의 표토를 대상으로 화학성분 함량을 파악하기 위하여 주성분원소에 대한 X-선 형광분석을 실시하였다(표 5). 소나무재선충병 조사구(피해지)의 주성분원소는 SiO<sub>2</sub> 30.6~42.3%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 12.9~18.1%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10.2~20.0%, TiO<sub>2</sub> 1.8~5.0%, MnO 0.1~0.2, MgO 1.3~2.3%, CaO 1.0~2.2, Na<sub>2</sub>O 0.5~1.2, K<sub>2</sub>O 0.8~1.2%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.2~0.6 및 LOI 12.5~36.0% 범위였다. 소나무재선충병 대조구(미피해지)의 주성분원소는 SiO<sub>2</sub> 30.6~53.3%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 13.6~15.6%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 7.8~15.4%, TiO<sub>2</sub> 1.5~3.8%, MnO 0.1~0.2, MgO 1.1~1.8%, CaO 0.4~1.5, Na<sub>2</sub>O 0.6~1.1, K<sub>2</sub>O 0.8~1.4%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.1~0.6 및 LOI 14.9~36.0% 범위였다. 조사구에서는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 MgO 함량이, 대조구에서는 SiO<sub>2</sub> 함량이 다소 높았으나 유의적인 차이( $P>0.05$ )는 없었다. 고석형(2012)이 보고한 제주도 꽃자왈 토양을 대상으로 한 주성분원소와 비교하면 꽃자왈의 생성연대가 오래지 않아 꽃자왈에서 주성분원소 함량이 높을 것으로 생각되었으나 CaO와 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 제외하면 본 연구결과에서 함량이 다소 높게 나



타났다. 이는 LOI(작열감량)에 의한 수분 및 유기물 등에 의한 영향으로 생각되는데 추후 정확한 해석이 요구되어 진다. 주성분원소인 SiO<sub>2</sub> 함량으로 보았을 때 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지는 염기성 용암의 특징을 보인다고 할 수 있겠다.

표 5. 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지 토양의 화학성분 조성 (wt, %)

토양 층위	시료채취 지점	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI*	Total
	유수암리조사구	30.59	16.25	10.20	1.81	0.12	1.25	0.99	0.91	1.19	0.55	35.96	99.81
	유수암리대조구	33.16	15.62	10.07	1.77	0.10	1.26	1.13	1.09	1.28	0.57	33.80	99.83
	광령리조사구	30.78	14.90	11.22	2.26	0.14	1.80	1.27	0.57	0.83	0.36	35.73	99.86
	광령리대조구	30.62	15.01	10.85	2.20	0.14	1.77	1.51	0.61	0.76	0.41	35.97	99.85
표토	도두1동조사구	42.34	12.88	19.96	4.96	0.23	2.25	2.24	1.19	1.15	0.16	12.46	99.81
	도두1동대조구	45.71	14.25	15.41	3.76	0.18	1.58	1.54	1.10	1.26	0.22	14.91	99.89
	와흘리조사구	37.93	18.06	14.88	3.15	0.18	2.14	0.65	0.53	1.12	0.23	21.07	99.94
	와흘리대조구	53.27	13.64	7.80	1.54	0.12	1.13	0.44	0.58	1.36	0.14	19.86	99.89

\* LOI: 작열감량(Loss of ignition).

이와 같은 결과를 종합하면 소나무재선충병 피해지 산림생태계 조사연구지에서 피해지와 미피해지간에 토양특성의 차이는 토양삼상분포 중 기상이 중요한 인자로 파악되었으며 기상은 액상에 따라 상대비율이 달라지므로 수분함량과도 관계가 밀접한 것으로 생각된다. 본 연구는 2015년도 신규 연구사업으로서 토양지질분야만으로는 종합적인 해석이 불가능하였다. 향후 식생 등에 관한 전반적인 자료 및 기상 등 환경요소에 관한 데이터를 가지고 다양하게 해석하고 분석하면 종합적인 고찰이 가능할 것으로 생각된다.

## 인용문헌

- 고석형, 김종식, 이영돈, 신창훈. 2015. 교래와 산양 꽃자왈의 계절별 토양특성과 미생물의 다양성. 제주특별자치도 세계유산·한라산연구원 조사연구보고서 제14호:201-226.
- 농업기술연구소. 1976. 제주도 정밀토양도. 농업기술원. 농촌진흥청.
- 류순호, 송관철. 1984. 입지토양의 특성. 서울대 아열대농업연구. p.73-104.
- 류순호. 2000. 토양사전. 서울대학교출판부. pp.470.
- 정진현, 구교상, 이충화, 김춘식. 2002. 우리나라 산림토양의 지역별 이화학적 특성. 한국임학회지. 91(6):694-700.
- 국립산림과학원. 2009. 소나무재선충병 생태특성 연구. 국립산림과학원 연구보고 09-21. p.167-199.
- NIAST. 2000. Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea. p.35-131.