



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

조경학석사 학위논문

선태식물에 의한 토양복원 효과 연구

- 제주도 도너리오름을 대상으로 -

Soil restoration by using moss

- a case study of Donary Oreum in Jeju Island -

2023년 8월

서울대학교 환경대학원

환경설계학과

박재홍

# 선태식물에 의한 토양복원 효과 연구

- 제주도 도너리오름을 대상으로 -

지도교수 송 영 근

이 논문을 조경학석사 학위논문으로 제출함

2023년 4월

서울대학교 환경대학원

환경설계학과

박 재 홍

박재홍의 석사 학위论문을 인준함

2023년 6월

위 원 장 \_\_\_\_\_ (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

# 선태식물에 의한 토양복원 효과 연구

- 제주도 도너리오름을 대상으로 -

서울대학교 환경대학원 환경설계학과  
박재홍

위 논문은 서울대학교 및 환경대학원 환경조경학과 학위논문  
관련 규정에 의거하여 심사위원 및 초빙심사위원의 지도과정을  
충실히 이수하였음을 확인합니다.

2023년 8월

위원장 \_\_\_\_\_ (서울대학교 환경대학원 교수)

부위원장 \_\_\_\_\_ (서울대학교 환경대학원 교수)

위원 \_\_\_\_\_ (서울대학교 환경대학원 교수)

초빙심사위원 \_\_\_\_\_ (경희대학교 환경학 및 환경공학과 연구박사)



## 국문초록

제주도의 오름은 다른 지역에서 쉽게 볼 수 없는 지형적 특성을 지니고 있을 뿐만 아니라 자연의 수려함과 다양한 식물상, 역사, 인문, 교육적 가치가 매우 높은 생태 교육 및 관광 자원적 측면의 고가치를 지니고 있다(제주연구원, 2019). 그러나 이와 같은 뛰어난 자연 경관에 대한 관광객들의 인지도 증가와 방문으로 인하여 오름 훼손 및 생태계의 파편화가 진행되고 있다.

선태식물(이끼)를 활용한 복원은 건조한 토양의 복원에 이상적인데, 이끼는 잎을 통해 물과 영양소를 흡수하고 오랜 기간의 건조를 견딜 수 있기 때문이다(Vanderpoorten & Goffinet 2009). 또한 이끼류는 시아노박테리아 및 지의류 번식을 용이하게 하여 복원 대상 지역에서 생물 공동체와 생물 지각을 더욱 향상시킬 수 있기에(Antoninka et al. 2016) 복원 과정 초기에 이끼를 조성하는 것은 보다 완전한 생물 군집을 재건하는 데 귀중한 첫걸음이 될 수 있다.

본 연구의 목적은 제주도 도너리오름을 대상지역으로 하여 토양 환경을 중심으로 연구 대상지 토양의 물리 화학적 특성을 고려하여 이끼를 활용한 복원 연구를 진행하는 것이다. 도너리오름의 지리적 위치는 33° 19 '32.51 "N, 126° 19' 18.70" E이다. 해발고도는 439 m이며 총 면적은 약 300,000 m<sup>2</sup> 로, 발굽형 분화구, 원형 분화구가 각각 존재하고 탐방객에 의해 송이층이 파헤쳐지고 소와 말의 방목에 의한 훼손이 상당히 진행되었다. 때문에 도너리오름은 현재 자연의 생태계 보존을 위해 2008년부터 현재까지 15년간 자연휴식년제 상태였으며, 지역의 출입이 금지되어 있기에 연구에 앞서 허가를 받아 연구를 진행하였다.

토양시료는 2022년 8월에서 10월까지의 4차례 답사와 2023년 3월에서 4월까지의 2차례 답사에 걸쳐 10 cm 깊이의 표토를 1회 1 kg씩 총 26점을 채취한 뒤, 각 500 g을 실험실로 운반하여 분석 시료로 사용하고, 훼손지대의 시료를 비교군과 대조군으로 나누어 비교군에 이끼를 생육시켰다. 이끼는 연구 대상지에서 자생하고 있는 서리이끼(*Rhacomitrium canescens*)와 털깃털이끼(*Hypnum plumaeforme* Wilson), 지붕빨간이끼(*Ceratodon purpureus*)를 채취하여 사용하였으며, 각 종마다 동일한 환경과 조건, 반복을 통해 실험을 진행하였다. 시료 채취 시 오염을 최소화하기 위해 장비들은 매 채취시 새로운 장비들로 교체하며, 토양 분석은 질소분석기(OPSS), 분광광도계(Analyticyena) 등을 활용한 분석을 통해 진행하였다.

그 결과, 도너리 오름에 자생하는 이끼가 몇 가지 주요 토양 특성에 상당한 개선을 초래했다는 것을 확인하였다. 토양의 pH, 양이온 교환 용량(CEC), 칼슘(Ca), 유기 탄소, 칼륨(K), 마그네슘(Mg), 유기물, 유효인산 모두 이끼 적용 후 눈에 띄는 증가를 보였다. pH의 조정

효과는 중성적이거나 알칼리성 토양 환경에 적용할 경우 식물 생장에 적합한 약산성 토양으로의 전환을 야기할 것이며, 이는 최적의 식물 성장과 영양 공급을 가능케 한다. 또한 CEC의 상승은 토양이 필수 영양소를 유지하고 교환할 수 있는 능력을 향상할 수 있으며, 이를 통해 식물 생산성 향상을 유도할 수 있다. 이외에도 칼슘, 칼륨, 마그네슘의 증가는 식물의 다양한 생리적 과정을 촉진할 뿐만 아니라 토양의 구조적 안정성에 결정적이다. 마지막으로 유기 탄소 함량이 크게 증가한 것을 확인하였으며, 이는 토양 비옥도와 미생물 활동이 개선되었음을 나타낸다. 유기 탄소는 영양의 저장고 역할을 하며, 수분 보유를 촉진하고 토양 구조를 강화하여 건강한 뿌리 개발을 촉진하기에 최근 이슈가 되고 있는 탄소 격리 효과와 더불어 본 연구의 핵심 결과물이 될 것이다. 이러한 요소들은 향후 미소생태계 구성, 양분 흡수, 그리고 전반적인 식물 대사 및 생태계 다양성에서 중요한 역할을 할 것이다.

본 연구에서는 자연휴식년제가 오랜 기간 유지되어 복원이 진행 중인 제주도 도너리오름에 대하여 자연적으로 복원이 되지 못하고 있는 지역을, 대상지 생태계의 구성 요소인 이끼를 활용하여 복원할 수 있는 방안을 도출해내는데 큰 연구의의를 둔다. 본 연구 결과를 통해 훼손된 생태계 내의 토양 환경에 이끼를 처리할 경우 생태계 복원에 필요한 여러 토양 지표들에 긍정적인 영향을 끼칠 수 있을 것으로 판단되는 바, 추후 생태 복원에 있어 높은 안정성을 가질 수 있는 생태복원방안이 될 수 있을 것이라 기대한다.

■ 주요어: 이끼, 제주도, 오름, 토양 복원, 토양 영양, 식물 정화

■ 학 번: 2021-20311

# 목 차

제1장 서론 .....	1
1절. 연구의 배경 .....	1
2절. 연구의 목적 및 의의 .....	4
3절. 연구의 흐름 .....	6
제2장 이론 및 선행연구 .....	8
1절. 연구 대상에 대한 이론 .....	8
2절. 선행 연구 .....	11
3절. 선행 연구와의 차별성 .....	24
4절. 연구 질문과 가설 설정 .....	25
제3장 연구자료 및 방법 .....	26
1절. 연구의 범위 .....	26
2절. 연구 대상지 .....	28
3절. 연구 대상 중 .....	33
4절. 분석 대상 선정 및 시료 취득 .....	36

5절. 시료 데이터 취득 및 실험 처리 .....	39
제4장 결과.....	42
1절. 토양 입도분석 결과 .....	42
2절. 토양 비옥도 분석 결과 .....	44
제5장 결론 및 고찰.....	55
1절. 결론 및 고찰 .....	55
2절. 연구의 한계점 .....	57
참고문헌 .....	59

## 표 목차

표 1. 연구로 측정 가능한 속성을 가진 토양의 특성 .....	20
표 2. 각 토양 시료의 입도분포표 .....	42
표 3. 토양 시료의 유기탄소 분석 결과 .....	44
표 4. 토양 시료의 pH 분석 결과 .....	45
표 5. 토양 시료의 유효인산 분석 결과 .....	46
표 6. 토양 시료의 유기물 분석 결과 .....	47
표 7. 토양 시료의 양이온 치환능력 분석 결과 .....	48
표 8. 토양 시료의 전질소량 분석 결과 .....	49
표 9. 토양 시료의 치환성 칼륨 분석 결과 .....	50
표 10. 토양 시료의 치환성 칼슘 분석 결과 .....	50
표 11. 토양 시료의 치환성 마그네슘 분석 결과 .....	51

## 그림 목차

그림 1. 토양 황폐화의 유형과 종류 .....	8
그림 2. 토양 황폐화의 원인 및 과정 .....	9
그림 3. 토양 복원의 기본 전략 .....	10
그림 4. 오름 토양 Scoria .....	12
그림 5. 도너리오름 촬영 사진 .....	26
그림 6. 연구 대상지 및 제주도 내 오름 현황 지도 .....	28
그림 7. 도너리오름 초입 .....	30
그림 8. 도너리오름 중턱 .....	31
그림 9. 도너리오름 정상 분화구 지대 .....	32
그림 10. 연구 대상 이끼 종 전국 군락지 분포도 .....	33
그림 11. <i>Ceratodon purpureus</i> 와 적갈색 삭의 모습 .....	34
그림 12. <i>Racomitrium canescens</i> 와(좌) 피침형 잎의 모습(우) .....	35
그림 13. <i>Hypnum plumaeforme</i> 와(좌) 및 피침형 잎의 모습(우) .....	35
그림 14. 도너리오름 전체 NDVI 추출 결과 .....	37
그림 15. 도너리오름 훼손 중심지 내 토양 시료 채취지점 위치도 .....	38
그림 16. 입도 분포 곡선 .....	43
그림 17. 유기탄소 Normalization 결과 .....	44
그림 18. pH Normalization 결과 .....	45

그림 19. 유효인산 Normalization 결과 .....	46
그림 20. 유기물 Normalization 결과 .....	48
그림 21. CEC Normalization 결과 .....	49
그림 22. 치환성 칼륨 Normalization 결과 .....	51
그림 23. 치환성 칼슘 Normalization 결과 .....	52
그림 24. 치환성 마그네슘 Normalization 결과 .....	52
그림 25. PCA plot 결과 .....	53
그림 26. Heat-map 결과 .....	54

# 제1장: 서론

## 1절. 연구의 배경

최근, 인류 사회의 지속적인 발전으로 인해 사람들의 삶의 질 또한 크게 향상되었다. 그러나 삶의 속도가 가속화되고 라이프 스타일의 변화가 급격해짐에 따라 신체적, 정신적 건강에 부정적인 영향을 미치는 경우가 발생하게 되었고, 이와 동시에 산업화와 도시화가 야기하는 심각한 환경 문제는 인간의 건강과 복지를 위협하게 되었다(Farhud, 2015). 따라서 사람들은 자연과의 밀접한 접촉이 가능한 여가 및 관광 활동을 통해 이를 해결하고자 하였고, 이는 곧 자연 중심의 관광이 전 세계적으로 성장하게 되는 계기가 되었다.

그러나 이러한 여가 및 관광 활동의 성장은 자연 생태계에 많은 교란을 일으키고 있다(Pickering and Hill, 2007; Memoli et al., 2019). 대표적인 예로 공기, 물, 토양의 오염(Zeng et al., 2021; Xiong et al., 2022), 생물 다양성의 손실 (Habibullah et al., 2016), 그리고 생태계 기능 및 서비스의 저하 (Pueyo-Ros, 2018). 특히 대규모 방문객 및 관광 활동은 본 연구의 주제 대상 지인 제주도가 보유하고 있는 다채로운 풍경, 고유한 다양성, 대체 불가능한 사회적 및 문화적 가치에 큰 위협이 되고 있다.

최근 몇 년 동안 인위적 활동이 생태계에 미치는 영향을 측정하는 것이 점점 주목을 받고 있으며, 저항성과 회복력의 측정을 사용하여 식물의 취약성에 초점을 맞춘 환경에서 수많은 연구가 이루어지고 있다(Pickering and Hill, 2007; Prescott and Steward, 2022). 토양 품질 평가는 일반적으로 토양 기능 변화에 가장 민감한 토양의 생물학적, 화학적, 물리적 특성과 프로세스를 직접 측정하여 이루어진다(Andrews et al., 2004). 토양 평가 지표는 생태계 프로세스와 잘 연계되어야 하며, 토양 특성과 프로세스를 통합해야 하는 동시에 많은 사용자가 접근할 수 있어야 하고 관리 및 기후에 민감해야 한다. 또한 가



능하면 기존 데이터베이스의 구성요소가 유지되어야 한다(Doran, J.W. 1996). 토양 기능을 측정하는 데 사용되는 최소 데이터 지표 그룹은 복잡한 시스템의 화학적, 생물학적, 물리적 특성과 프로세스를 나타낼 수 있을 정도로 충분히 다양해야만 하는데, 연구자들은 이를 위해 토양 생태계 기능의 장기적인 변화에 대한 핵심 지표 역할을 할 수 있는 토양에 주의를 기울였다(Weil, R.R. 2004).

생태계 기본요소 중의 하나인 토양의 생태계 기능을 지원하는 대표적인 생육조건은 토양 내의 유기물 탄소(SOC), 유기물(SOM), 질소(Nasholm et al., 2009)등과 밀접하게 연관되어 있으며 상호작용을 통해 토양 생태계의 지속가능성을 구성한다. 그러나 토양 오염시 생육조건이 불균형으로 토양 내의 유기물 탄소 및 유기물은 양이온 및 음이온 교환 용량, 양분 안정성과 흙의 물리, 화학, 생물학적 성질에 영향을 주며, pH, 수분, 입자밀도 및 미생물(Lopes et al., 2021)등 부가적인 요소 또한 영향을 받게 된다. 따라서 식물생장에 필요한 복합적인 토양성분을 유지하는 것은 토양을 복원하기 위한 필수적인 조건으로 요구된다.

그러나 인위적 활동으로 발생한 화산 지형 토양 황폐화 영향 및 복원의 지표와 그 연구에 대해서는 잘 알려져 있지 않은데, 특히 기능적 특성 관점에서 화산 토양과 자생 식물종인 이끼의 영향에 대한 연구를 실시한 사례는 매우 희소하다.

이끼는 산림청 국립수목원, 인천수목원 등 다양한 기관에서 이끼의 장점을 바탕으로 생태공원 조성에 이용되고 있다. 해당 연구에서는 식물계의 선대식물(*Bryophyte*)에 속하는 이끼를 통해 수행하고자 하였다. 이끼는 척박한 환경에서도 생존 가능한 매우 작은 잎과 줄기의 엽록체를 통해 광합성이 이루어지는 최초의 육상식물(Wu et al., 2018)이며 종류 또한 우산이끼(*Marchantia polymorpha* L.), 털깃털이끼(*Hypnum plumaeforme* Wilson), 서리이끼(*Rhacomitrium canescens*) 등 전 세계적으로 약 15,000종 이상이 존재하는 것

으로 알려져 있다. 이끼는 척박한 토양에 정착하여 추후 다른 식물의 초기 활착에 영향을 주며 생태계를 구성하기 위해 필수적인 존재로 인식(Decker & Reski, 2020)된다. 이외에도 이끼는 환경오염에 대한 연구로 중금속정화(Maresca et al., 2022)에 대한 연구가 수행되는 등 환경 분야에 다양한 방법으로 적용되고 있다.

본 연구는 제주도의 대표적인 화산 지형인 오름에 대한 이끼의 영향을 토양 비옥도 기능 특성을 통해 평가한다. 또한, 일반적인 오름 생태계 내 토양의 경우 외부 환경 요인에 의한 변수가 발생할 수 있으므로, 황폐화가 진행된 지역의 토양을 대상으로 연구를 진행한다. 이를 통해 본 연구로 이끼가 황폐화된 오름 토양에 미치는 영향에 대한 평가를 제공하며, 이는 저항성과 회복성 지표를 통해 교란에 대한 오름의 반응을 연구하거나, 종 풍부도 변화만을 확인하는 이전의 연구를 보완할 수 있다.

이러한 연구 결과를 통해 제주도 오름의 관리와 보전에 대한 실질적인 근거를 제공할 수 있으며, 제주도 오름 토양에 대한 이끼의 영향을 평가하고 비옥도와 관계 연구함으로써 오름 토양의 기능적 특성 변화를 통해 이끼의 활동이 제주도 오름에 미치는 영향을 더 잘 이해할 수 있다. 이는 관계자들에게 제주도 오름의 보전과 관리에 대한 적절한 조치를 취할 수 있는 근거를 제공하며 또한 기능적 다양성을 사용하여 현재 오름 생태계 보호 방식인 ‘격리를 통한 보호’를 폭넓게 보완할 수 있도록 도울 수 있을 것이다.

## 2절. 연구의 목적 및 의의

### 1. 연구의 목적

본 연구는 심각한 지피식생의 훼손 및 스코리아 토양층의 쓸림으로 인해 자연휴식년제가 실시된 제주시 도너리오름의 토양 영양도를 정량적으로 측정하고 이끼를 활용하여 Biocrust를 유도, 토양 비옥도를 복원하는 실험을 통해 (1) 자연휴식년제가 목표로 하는 ‘외부 요인과의 격리와 방치를 통한 자연 복원’이 가지는 복원 한계점을 극복하며, (2) 격리된 생태계 내의 구성 생물종인 이끼를 활용하여 기반인 토양의 비옥도를 복원할 수 있음을 증명함과 동시에 복원능을 정량적으로 검증하고자 한다.

### 2. 연구의 의의

국내에서 토양 비옥도 개선을 위해 이끼 등 Biocrust 구성 요소를 활용한 연구는 미흡하기에 이들의 토양 비옥도 복원 능력을 정량적으로 측정하여 분석한다는 점에서 의의가 있다. 다양한 국내 이끼 품종 중 최적의 비옥도 복원 능력을 가진 이끼를 규명하고, 2 cm/pixel의 GSD로 NDVI값을 도출하여 식생의 생산성이 낮은, 토양 비옥도의 개선이 필요한 대상지를 규명하였다. 또한 대부분 기존의 연구는 이끼의 보수력 및 토양 흡착력에 초점을 맞추고 있기 때문에 결과에 향후 식생 복원 연계에 필수적인 토양 비옥도 수치가 빠지는 경우가 다수 있었으나, 본 연구는 식생의 생육에 영향을 미치는 토양인자인 유기물 함량, pH, 질산태질소, 암모니아태질소, 질소전량, 총인, 입도분포, 중금속, 수분 함유량, 양이온 치환능력, 치환성 K, Ca, Mg, Na를 측정하여 비옥도 복원능을 정량적으로 분석 가능하게 하였다. 또한 대상지의 토양을 샘플링하여 실험실 내의 Plant Incubator에서 광, 온도, 수분 등을 인공적으로 제어하여 외부 환경 변수를 차단하였다는 점에서 의의가 있다.

또한 이끼를 통해 산림을 복원시키는 본 연구는 황폐해진 토양을 건강한 상

태로 회복시키고 식물이 성장하는 데 필요한 토양의 성분과 기능을 강화해 식물의 성공적인 활착을 목표로 한다. 도너리오름의 훼손지를 복원하기 위해서는 토양을 구성하는 스코리아에 대한 이해와 그에 대한 근본적인 원인이 해결될 수 있는 적합한 방법이 필요하다. 식물 생육이 어려운 토양을 복원하기 위해서는 토양의 건강성과 그 기능을 강화해야 하며, 오름의 자연환경 및 기후와 스코리아의 특성에 적응하여 식물 성장 및 뿌리 활착 속도를 높일 수 있는 복원을 진행해야 한다. 도너리 오름 자생이끼를 활용하여 토양의 SOC(Soil Organic Carbon), 유기물 함량, 질소전량, 유효인산, 양이온치환용량 및 치환성 염기 측정값을 상승시켜 식물 성장에 적합한 수치로 개선한다. 식물 성장에 열악한 스코리아를 이끼를 통해서 토양의 건강과 기능을 회복시킴과 동시에 건강한 토양과 이끼에서 이어진 자생식물의 성장과 뿌리의 활착으로 토양의 안정성 및 건강성을 증가시켜 오름 생태계의 선순환을 기대할 수 있다.

### 3절. 연구의 흐름

본 연구는 토양 황폐화와 복원의 중요성 및 이끼의 역할에 초점을 맞춘 연구 배경을 설정하는 것으로 시작되었다. 이를 통해 서론 부분에서 토양 황폐화와 제주도의 오염에 미치는 영향에 대한 연구를 포함하는 연구 목표를 정의하였으며, 이후 문헌 검토, 현장 조사, 원격 감지, 통계 분석 및 시각화 분석으로 구성된 연구 방법론을 설계하였다.

뒤이어 토양 황폐화와 오염의 개념을 이해하기 위해 선행 연구 및 이론 검토가 수행되었다. 해당 분야와 관련된 선행 연구를 분석하여 부족한 부분을 파악하고 연구 질문을 공식화하였으며, 이후 수집된 인사이트를 바탕으로 가설을 수립하였다.

연구 재료 및 방법 확립을 통해 연구 매개변수를 설계하고 데이터 수집 전략의 윤곽을 잡는 등 연구 설정이 이루어졌다. 연구 질문 및 가설과의 관련성을 위해 다양한 종을 선정하여 연구를 진행하였다. 샘플 수집은 현장의 자생 생태계를 파괴하지 않는 체계적인 방식으로 수행되었으며, 결과의 타당성과 신뢰성을 보장하기 위해 적절한 실험 처리를 적용하였다.

결과에서는 종합적인 토양 입자 크기 분석으로 시작하여 토양 비옥도 분석 결과를 확인하였다. 이러한 분석은 현장 조사와 토양 샘플 연구에서 얻은 데이터를 사용하여 수행되었다. 결과는 통계 분석을 통해 처리되었으며 해석과 이해가 쉽도록 시각화하였다.

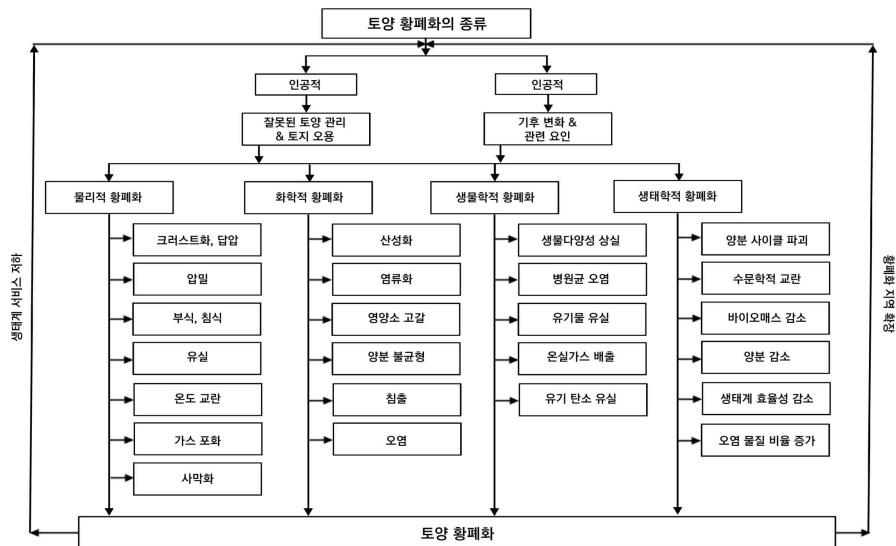
마지막으로 연구 질문과 가설을 재검토하고 그 맥락에서 연구 결과를 논의하는 것으로 연구를 마무리하였다. 연구의 의의를 되짚어보고 연구 결과의 잠재적 함의를 논의하였으며, 연구 과정에서 직면한 한계도 인정하여 포괄적인 결론과 향후 추가 연구의 가능성을 확인하였다.

연구 과정	연구 내용	연구 방법
제1장 서론	<div data-bbox="549 461 1054 524">연구의 배경 및 목적 수립</div> <div data-bbox="549 524 1054 618">연구의 목적, 방법 설정</div>	/
제2장 이론 및 선행연구	<div data-bbox="549 680 1054 743">토양 황폐화, 복원에 대한 이해</div> <div data-bbox="549 743 1054 826">선행 연구 조사</div> <div data-bbox="549 826 1054 913">연구 질문 및 가설 수립</div>	문헌조사
제3장 연구재료 및 방법	<div data-bbox="549 976 1054 1039">연구의 설정과 데이터의 수집</div> <div data-bbox="549 1039 1054 1122">연구 대상 중 선정</div> <div data-bbox="549 1122 1054 1209">시료 취득 및 실험 처리</div>	문헌조사 현장조사 원격탐사
제4장 결과	<div data-bbox="549 1272 1054 1335">토양 입도분석</div> <div data-bbox="549 1335 1054 1429">토양 비옥도 분석</div>	통계 분석 시각화 분석
제5장 결론 및 고찰	<div data-bbox="549 1491 1054 1554">결론 및 고찰</div> <div data-bbox="549 1554 1054 1657">연구 의의와 한계점</div>	/

## 제2장: 이론 및 선행연구

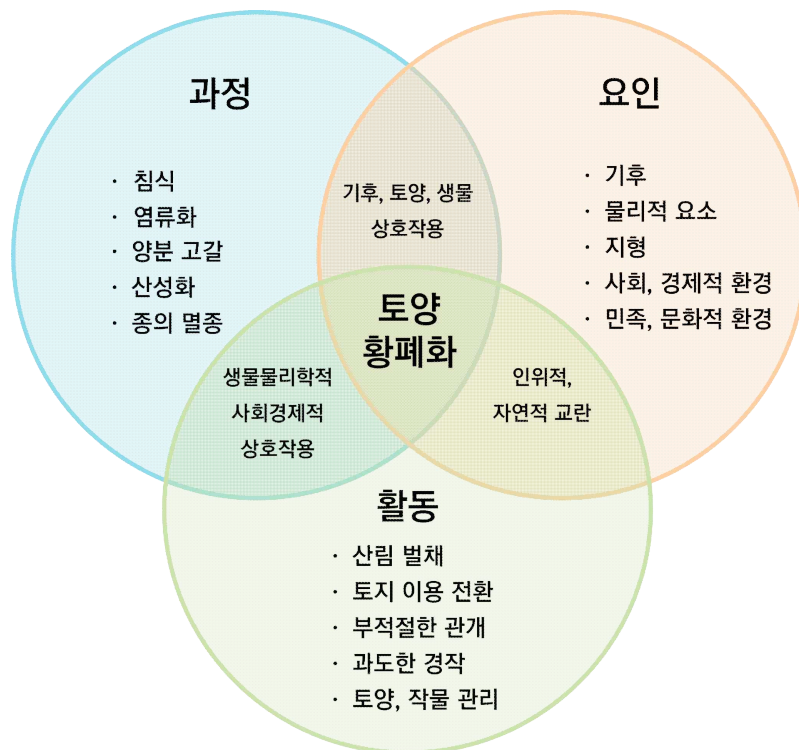
### 1절. 연구 대상에 대한 이론

토양의 황폐화는 생태계 기능과 생태계 서비스의 감소와 함께 토양의 질적 저하를 야기한다(Lal, R. 2009). 토양 황폐화에는 크게 (1) 물리적, (2) 화학적, (3) 생물학적, (4) 생태학적 네 가지 유형이 있다(그림 1). 토양의 물리적 황폐화는 일반적으로 답압으로 인한 크러스트화, 압밀, 수분 침투 감소, 표면 유출 증가, 바람 및 물 침식, 토양 온도 변동 증가, 사막화 등이 있으며, 화학적 분해는 산성화, 염류화, 영양소 고갈, 양이온 교환 능력(CEC) 감소, Al 또는 Mn 독성 증가, Ca 또는 Mg 결핍 등에 의한 오염 등이 있다. 생물학적 황폐화는 토양 유기 탄소(SOC) 풀의 고갈, 토양 생물 다양성의 손실, 토양 C 싱크 용량 감소 및 토양에서 대기 중으로 배출되는 온실 가스(GHG) 증가 등이 있다. 생태학적 저하는 다른 세 가지의 조합에 의해 발생하며, 원소 순환, 물 침투 및 정화, 수분 순환의 교란 및 생산성 저하와 같은 생태계 기능의 중단을 초래한다.



[그림 1] 토양 황폐화의 유형과 종류

이러한 토양 황폐화의 유형들은 해당 요소들의 요인 및 원인, 과정 간의 상호작용[그림 2]에 의해 크게 악화된다. 요인은 기후, 물리적 요소, 사회 경제적 또는 민족, 문화적 매개변수와 같은 자연적 또는 인위적 동인과 관련된 저하 매개변수로 구성된다. 토양 황폐화를 야기하는 활동에는 과정과 요인의 악영향을 악화시키는 특정 활동들이 다수 포함된다. 구체적인 원인의 예로는 산림 벌채, 토지 이용 전환, 부적절한 관개, 과도한 경작 및 과도한 토양, 작물 관리 등이 있다. 과정-요인-활동 벤 다이어그램은 각 사이트별 조건에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 토양의 품질을 회복하고 황폐화를 완화하기 위해서는 벤 다이어그램 내에서 부여있는 연결성을 이해하는 것이 중요하다.

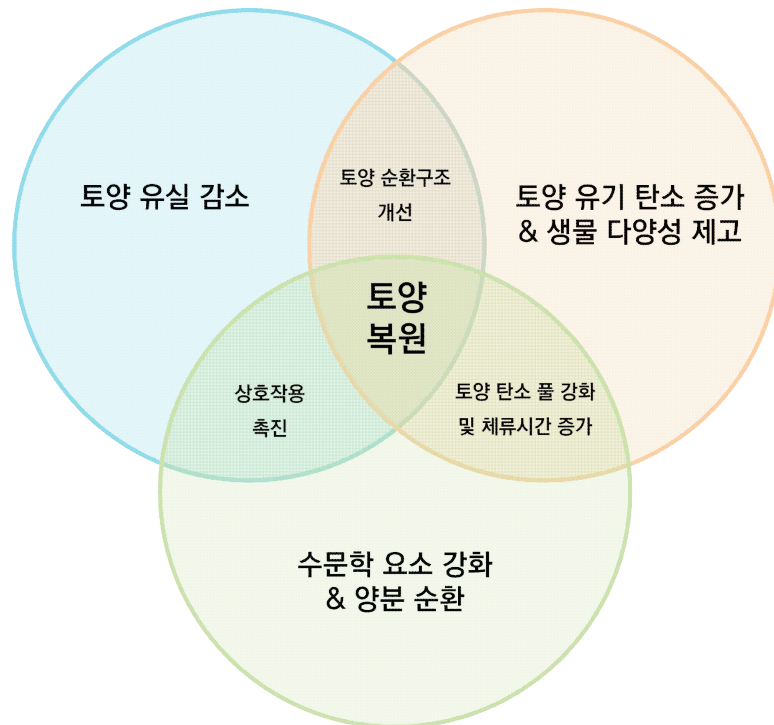


[그림 2] 토양 황폐화의 원인 및 과정



다만 토양 황폐화를 야기하는 연결을 이해한다 하더라도 토양 내 자원이 부족하여 황폐화된 토양의 품질을 복원하는 것은 어려운 작업이다. 여러 기능에 필수적인 SOC 풀의 복원을 위해서는 바이오매스와 N, P, S 등 토양 양분 필수 요소의 정기적인 투입이 필요하며, 동시에 토양의 품질을 회복하는 세 가지 기본 전략들이 병행되어야 한다.

토양의 질을 회복하는 세 가지 기본 전략은 (1) 토양 유실 및 손실 최소화, (2) 토양 유기 탄소를 증가시키며 동시에 생물 다양성을 제고하는 것, (3) 수문학 및 양분 순환 요소를 강화하는 것이다[그림 3]. 이렇게 토양 복원의 기본 전략을 지키며 현장 요인(생물학적, 물리적, 사회적, 경제적, 문화적)을 적절히 고려하고 적용할 경우, 지속적 가능하고 안정적인 토양 복원 유도를 기대할 수 있게 된다.



[그림 3] 토양 복원의 기본 전략

## 2절. 선행연구

### 1. 오름

제주 오름의 토양은 화산활동과 지질 특성에 영향을 받아 독특한 특성을 가지고 있다. 제주도는 신생대 제3기(Pliocene)에서 제4기(Pleistocene) 동안 대륙붕 위에서 이루어진 대륙 지각 내 화산활동에 의해 만들어진 화산섬으로 백만년간 지속된 용암 분출에 의해 한라산을 중심으로 하는 대규모 화산체의 분출과 소규모 단성 화산체에 의해 형성되었다. 오름은 작은 기생 화산체의 형성 과정에서 생성된 화산재로 이루어진 지형으로 제주도에만 존재하는 고유한 지형이다. 일반적으로 가파른 경사를 가지고 있으며 다양한 크기와 형태를 가진다. 제주에는 368개의 오름이 있으며 소형 오름은 몇 십 미터 정도의 높이에 불과하나 대형 오름은 수 백 미터에 이르기도 한다(제주연구원, 2019). 또한 원추형, 원형, 말굽형의 형태를 가지며 각 형태가 조합된 복합형 화산체로 구분되기도 한다. 이러한 오름은 특유의 지형과 풍화에 의한 토양 특성을 가져 지형 및 지질적으로 중요한 가치를 지니며 초지, 자연림, 인공림, 습지 등이 분포하여 다양한 생태적 가치와 학술적으로 팔목할 만한 생물적 다양성을 유지하고 있다(제주특별자치도 오름종합계획, 2016).

제주 오름의 토양 구성은 일반적으로 화산분출물의 일종인 스크리아(Scoria, 송이)를 모재로 하는 토양으로 구성되어 있다(그림 4). Scoria는 화성암으로 USDA 토양 분류학에 따라 화산회토(Andisol)로 분류된다. 최원준 외 1인(2008)은 제주 북부 지역의 열안지 오름, 노루손이 오름, 연동 민오름, 도두봉과 서부 해안지역의 어도 오름, 수월이못, 녹남오름, 송악산, 군산오름의 Scoria 시료를 채취하여 X-선 형광 분석을 통해  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  함량을 분석한 결과, 전형적인 현무암의 성분과 유사함을 밝혔다. 또한  $\text{SiO}_2$  함량에 따른 분류에 의하면, 염기성암으로 속하며  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량에 따른 화성암의 분류에 의하면, 고알루미나질로 형성됨을 파악할 수 있었다. 추가적으로 IUGS(International



[그림 4] 오름 토양 Scoria

Union of Geological Sciences)의 화산암에 대한 화학적 분류에 의하면, 전형적인 현무암에 속한다. 따라서 제주 오름을 형성하는 scoria는 현무암질 용암에 의해 형성되었다는 것을 알 수 있다. 또한 scoria는 암석 표면과 내부에 많은 구멍이 뚫린 다공성(vesicular) 구조를 가진다. 마그마가 표면으로 점차 상승함에 따라 마그마에 가해지는 압력이 감소하는데, 이때 마그마에 용해되어 있는 휘발성 기체가 용리되어 내부에서는 가스 거품이 형성된다. 마그마가 표면에 도달하여 냉각될 때, 가스 거품이 내부에 갇힌 채로 굳어져 암석에는 ‘vesicles’ 이라 불리는 가스로 채워진 구멍이 보존된 채로 형성된다. 또한 스킨리아는 다른 화산암들에 비해 점성이 낮은 현무암질 마그마로부터 형성되어 큰 기공과 두꺼운 기공벽을 갖는데, 이 때문에 맨눈으로 구분하기 어려운 작은 광물 알갱이로 이루어진 비현정질 구조(Aphanitic texture)를 띤다. 해당 구조는 주로 유리질로 주성분은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 SiO<sub>2</sub> 함량은 52 % 이하로 낮은 편이다. 조성에 따라 어두운 색을 띠는 특성을 가지며 주로 어두운 갈색, 검은색, 자줏빛 빨간색을 띠는 것이 특징이다. 제주도에 존재하는 scoria는 주성분 조성 성분 분석 결과 SiO<sub>2</sub>(약40~50 %) > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(약14~17 %) > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(약13 %) > CaO, MgO 순으로 함량을 차지한다. 때문에 Scoria는 대체로 강도

가 약하고 크기가 일정하지 않은데, 이를 모재로 하는 제주의 토양은 일반 토양에 비해 토양의 총용적 밀도가 낮아 공극률이 높고 풍식에 대한 저항력이 작다. 또한 유효 수분 보유력은 높으나 투수성이 높아 물의 하방 침투가 매우 빠른 특징을 가지며 SiO<sub>2</sub> 함량이 일반토양에 비해 낮은 편으로 염기성이나 초염기성을 띠어 수소 이온 농도가 높다. 강수량이 많은 제주도의 기후적 특성과 투수성이 높은 토양의 특성상 염기의 용탈이 심해 미경작지 토양의 경우 염기 포화도가 20 % 이하로 낮게 나타난다. 그러므로 치환성 염기 함량이 낮으며 식물 생육과 작물 재배에 불리하다고 판단된다.

이러한 화산회토의 이화학적 특성은 제주도의 토양을 한반도의 토양과는 다른 고유의 성질을 띠게 하는 동시에 높은 수준의 생태계 서비스를 제공하며 생태적, 지형적, 경관적, 환경자연적 가치를 가지지만 인적 활동에 의해 심각한 훼손이 진행되어 왔다. 체계적인 보전 및 관리가 이루어지지 못하였으며 탐방객이나 우마의 방목지로 활용하며 지형 및 녹지의 변형이 일어났다. 영세 목적의 목축지 개발이나 소규모 주택개발 또는 관광을 위한 인위적인 등산로 등의 개발로 오름 사면이 절개되면서 토지 피복도가 증가하였으며 식생이 감소하며 경계층의 마찰력이 저하되고 토양의 교란 및 유실이 증가하였다. 이는 사면을 계속적으로 침식시켜 오름의 원형을 훼손하고 생태적 기능을 상실시키는 주요 원인이라 할 수 있다. 특히, 사람이나 가축에 의한 답압으로 훼손의 면적이 증가하고 있으므로 제주 측은 1985년을 기점으로 관광객의 출입을 제한하는 자연휴식년제를 시행하고 있다. 하지만 각 오름의 상태를 면밀하게 고려한 인위적 복원조치를 취하고 있지 않아 오름의 토양 및 생태계에 대한 훼손을 방지하지 못하고 있는 실정이다.

이를 복원하기 위해서 토양을 복원하고 사면을 안정화하는 것이 우선인데, 일반적으로 지표면에 식생을 조성하여 토양 내부에 뿌리를 활착시켜 토양을 고정하는 방식이 주로 사용된다. 대체적으로 녹화네트, 야자매트 등을 설치하여 비탈면에서 토사 유실을 방지한다. 침식이 심한 경우에는 토양 보강을 위

해 토양 입자의 이동을 제한하는 지질망(geotextile)과 토양 피복을 강화하여 침식을 예방하는 그릿(gravel)을 설치한다. 또한 철망으로 이루어진 소성 매트(gabion)을 활용하여 침식을 방지하고 안정성을 증가시키기도 한다. 뿐만 아니라 지지벽, 단차벽 등의 토목 구조물을 설치하거나 토양의 피복을 보장하는 방식을 사용한다. 예를 들어, 한라산은 일부 등산로의 침식을 막기 위해 경로 조성 및 안내 설치가 이루어져 있다. 또한 경사면을 따라 단차벽이나 지지벽을 설치하여 토양의 안정성을 향상했으며 지질망과 그릿, 식물의 식재를 통해 토양 침식을 예방하였다. 그리고 강우에 의한 침식을 방지하기 위해 강우를 효과적으로 받아내고 과잉 강우를 토출하는 강우 관리 시설을 설치하였다. 이는 성산일출봉에서도 동일하게 활용된 방안이다. 위 방법은 일시적으로 토양 유실을 방지할 수 있고 대규모 훼손이 진행되는 오름에 적합한 방안이지만 소규모 훼손이 확대되고 있는 경우에는 적합하지는 않다. 즉, 경사가 가파르고 고도가 높은 오름 정상부의 훼손에서는 부적합하며 답압과 지표류로 인해 훼손이 반복될 수 있다는 한계점이 존재한다. 뿐만 아니라 scoria로 이루어진 토양은 우수로 인해 식물이 성장하는데 필요한 성분이 휩쓸릴 확률이 높으므로 식물을 통해 토양 피복도를 높이고 유기물에 의한 토양 구조를 안정화할 필요가 있다. 하지만 scoria 자체가 식물의 생육이 어려운 토양이므로 오름의 자연 환경 및 기후와 토양 특성에 적응하여 식물 성장 및 뿌리 활착 속도, 유기물 유입 속도를 높일 수 있는 복원을 진행해야 한다.

## 2. 이끼

이끼는 세계에서 가장 널리 분포한 식물 중 하나로(Lou YX, 2013), 특별한 잎 표면 구조와 세포 특성으로 인해 고온과 가뭄을 견딜 수 있고(Lou HX, 2012) 강력한 물 저장 능력과 수분 보유 능력을 제공하며 이를 통해 토양을 안정화시킨다(Li ZK et al., 2018). 또한 이끼는 암석 표면의 토양 침식을 방지하고 제어하는 데 중요한 역할을 하는데(Xh HH et al., 2020), 이끼 호흡과 분

비물에 의해 형성된  $H_2CO_3$ 는 암석을 용해시키고 원시 토양을 형성 할 수 있다(Jackson TA, 2015). 이때 이끼에 의해 분비되는 유기물은 미네랄 이온과 복합체를 형성하고 불용성 물질을 형성하는데(Ria LM et al., 2021) 불용성 물질은 이끼 잔류물에 달라붙어 토양 침착을 증가시킬 뿐만 아니라 유기물 축적을 촉진하고 토양 영양소 함량을 증가시킨다(Liu TL et al., 2017). 이외에도 맨땅에 비해 이끼 생물 껍질은 모든 토양 영양소에 긍정적인 영향을 미치고 황폐화 등 부정적인 영향을 완충하여 토양 미생물 풍부도를 크게 증가시키는 것으로 밝혀졌다(Cheng C et al., 2020). 또한 번식 시 포자체를 바람을 통해 날려 보내며 번식하는 방식으로 인해 적극적인 관리가 없이도 생육에 용이(Weber et al. 2016)하다는 등의 장점이 있는데, 이러한 이유들 때문에 최근 토양 복원의 핵심 요소로 주목받고 있다.

Henry S. Grover et al.(2019)는 산불에 의한 산림 회복과 경사면 안정화를 위해 교란 적응이끼 3종(*Ceratodon purpureus*, *Funaria hygrometrica*, *Bryum argenteum*)을 도입한 결과, 2개월만에 높은 이끼 매트를 형성하여 침식을 완화할 수 있음을 보였다. 이끼의 원활한 성장을 위하여 지속적인 수분 첨가와 보호 그늘 덮개를 활용한 결과, *Funaria hygrometrica*, *Bryum argenteum*은 배양 기질에 따라 73~263 % 이상의 피복률을 보였으며 모래질 토양, coconut coir mix에 비해 표토 기반의 유기 기질에서 가장 잘 성장하였다. 하지만 산불에 의해 형성된 회분이나 재를 혼합할 시, 피복율이 저하됐으며 두 종을 혼합하여 재배할 시에도 성장이 억제되었다. 이는 연소된 토양은 알칼리성이라 성장이 억제되었을 것이라 추측한다. J. C. Shen, Z. H. Zhang et al.(2019)는 극한 환경에 대한 종의 적응성과 토양에 물리적으로 미치는 영향도를 고려하였을 때, 이끼 *Homomallium plagiangium*, *Cyrto-hypnum pygmaeum*, *Brachythecium perminusculum*와 식물 *Veronica arvensis*, *Youngia japonica*, *Prunus salicina*의 조합은 토양 침식 지역의 복원에 사용하기 좋은 식물 종으로 권장하였다.

이외에도 토양에 이끼를 첨가하여 자연적 덮개를 조성할 경우, 토양의 비옥도가 증가한다는 연구결과가 존재한다. David J. Eldridge et al.(2023)는 식생이 없는 토양보다 이끼 아래 토양에서 토양 생물다양성 보존, 탄소 격리, 양분 순환, 유기물 분해, 식물 병원균 제어, 미생물 서식지 및 바이오매스 등 생태계 서비스 지원 능력이 더 크다는 결론을 도출했다. 또한 더 많은 질소, 인, 마그네슘을 보유하게 하는 동시에 토양 효소 활성을 높이고 식물 병원균의 비율은 낮춰 생산성이 낮은 토양일수록 이끼로 인한 상승효과를 가지고 있음을 확인하였다.

해당 선행연구에서 언급된 ‘자연적 덮개’는 생물학적 토양 지각(Biological soil crusts, BSC)으로, 표토 입자, 조류, 지의류, 이끼 등 다양한 생물체의 복합체로 토양 표면을 덮고 점착력을 가지며 토양 입자와 굳어진 구조를 의미한다. BSC는 세계 건조 지역 지표면의 최대 70%를 덮고 있으며 대기에서 약 2.6 Pg C/yr을 고정할 수 있다. 이는 전 세계 연간 탄소 흡수량의 7%에 해당한다.

Ting Xie et al.(2023)는 중국 Tengger 사막 지역에서 이끼로 이루어진 BSC와 이동식 모래언덕(Mobile sand dune, MSD)토양의 SOC를 조사한 결과 BSC 내에서 우세한 균집이 조류에서 이끼로 전환된 후, SOC 광물화 비율이  $0.03 \text{ g/kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ 에서  $0.04 \text{ g/kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ 로 증가함을 확인하였다. 또한 토양 수분 함량과 온도는 SOC 광물화를 제어하는 중요한 요소로 기질의 가용성을 통해 SOC 광물화를 가속화할 수 있다고 밝혔다. BSC 연령에 따른 두께는 크게 차이 났으며 구체적으로 8년의 성숙도를 가진 BSC는 0.11 cm이며 63년의 성숙도를 가진 BSC는 1.96 cm이었다. BSC의 SOC 광물화에 영향을 미치는 주요 요인은 C:N 비율, pH, 이끼의 피복도, 토양의 미사 및 점토 함량 등이었다. 특히 SOC의 경우, 8년 뒤 약  $5.4 \text{ g/kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ 로 증가함을 알 수 있다. 또한 증가된 C:N은 SOC 축적을 촉진했으며 미생물의 질소 요구량을 충족하기 위해 C:N 비율이 25:1 이상인 기질이 필요하다는 것을 규명하였다. 이후 다양한 토

양수분 및 온도 처리에 걸쳐 평균적으로 배양 147일 동안 광물화된 SOC의 양은 2.17-4.20 g/kg<sup>-1</sup> 및 0.28-0.59 g/kg<sup>-1</sup>으로 각각 SOC 함량의 18.13~37.87 % 및 26.34~57.14 %에 달하는 결과를 얻었다. 또한 Laura Concostrina-Zubiri et al.(2022)는 Biocrust를 형성하는 지의류와 이끼류의 분해는 토양의 C, N, P의 영양분 순환에 기여함을 보였다. 실험에서 사용한 이끼는 *Syntrichia caninervis*로 62일 후에 92 %의 질량 손실로 분해되어 SOC, DON, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 및 인산효소의 활성을 증가시키고 1년 후에 pH를 감소시켰다. Peilei Hu et al.(2019)는 바이오 크러스트를 고려하지 않은 복원에 비해서, 바이오 크러스트를 유도한 복원 방식을 사용하였을 때 가장 높은 복원도를 보였고, 식물이 이용 가능한 토양 질소 및 토양 품질의 개선을 유도할 수 있다는 것을 증명하였으며, 이후 Rosentreter, R.(2020)의 추가 연구를 통해 바이오 크러스트 확장 속도를 기준으로 북미의 일반적인 환경의 복원에 적합한 이끼 종, 가혹하고 건조한 지역의 복원에 적합한 이끼 종, 반 건조 지역에 적합한 이끼 종을 규명하였다. 해당 연구들은 이후 Anita Antoninka et al.(2020)의 연구에 영향을 미쳐 *Syntrichia caninervis*와 *S. ruralis*를 대상으로 시아노박테리아를 포함하는 바이오크러스트 유기체를 온실 환경에서 배양. 두 종 모두 4개월만에 6배의 바이오매스 증가 효과를 가져왔으며, 바이오크러스트를 인공적으로 환경 복원에 적용하는 사례가 될 수 있었다.

이외에도 이끼로 구성된 Biocrust가 토양의 수문학적 과정에 영향을 미친다는 것을 규명한 연구 또한 존재하였다. Eldridge et al.(2020)은 2020년 이전 출판된 109개의 출판물의 관측자료를 합성하여 표층 Biocrust의 피복도 증가에 따른 토양의 수문학적 과정을 분석했는데, 이를 통해 Biocrust의 증가가 토양의 침투력이 감소하고 물의 축적과 유출시간이 단축되며 상부 토양층에서 물 저장량이 늘어나게 한다는 것을 밝혀냈다. 또한 Biocrust가 표면의 기공을 차단하여 수증기의 확산을 줄이고, 물이 토양 속으로 깊이 침투하는 것을 제한하여 토양 표층에 물을 유지함을 규명하였다. 이는 이끼의 특수한 잎 구조



(cuculate leaves, leaf hair points)와 해당 잎을 매개로 한 구조(lamellae, papillae)에서 물을 흡수하고 유지하기에 가능하다고(Tao & Zhang, 2012) 설명할 수 있다. 이끼가 물을 저장하는 이 층은 토양의 생산성, 영양소 농도, 미생물 활동이 가장 활발한 영역과 일치하며 이끼, Biocrust가 토양의 수분함량에 영향을 미쳐 생태계 서비스에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 또한 건조지의 경우, 토양의 수분함량이 제한 요소로 작용되어 토양의 기능적 특성과 토양이 제공하는 생태계 서비스에 큰 영향력을 갖으므로 이끼를 통해 토양 표층의 수분함량을 증가시키고 토양 생태계 복원에 긍정적인 영향을 미칠 것을 기대할 수 있다. 또한 Chamizo, S., et al.(2017)은 퇴적물과 영양물질의 손실을 피하고 반건조 지역의 토양 비옥도를 유지하는 데 있어 Biocrust의 보존이 중요하다고 제안하였으며, Biocrust의 손실은 퇴적물과 SOC의 손실을 증가시키고 토양의 수분 보유 능력과 토양 미생물 및 식생 유지 능력을 저하시킴을 확인하였다. Kasimir, Å., et al.(2021)은 이끼의 광합성을 통한 일차생산량(유기물)은 낮은 분해성과 함께 토양에 축적되며 시간이 지남에 따라 SOC pool이 형성되는 것을 규명하였으며 이끼 식생이 지배적인 곳에서 토양에서 대기로 CO<sub>2</sub>가 방출되는 흐름이 다른 조건에 비해 상대적으로 적었음을 확인하였다.

Chiquoine, L. P., et al.(2016)은 Biocrust를 2년 동안 건조한 상태로 보관한 뒤, 표토에 접종하고 다년생 관목을 심고 18개월 기다린 결과, Biocrust 내 지의류와 이끼가 증가하였으며 시아노박테리아 집락의 밀도는 43 % 회복되었고, 교란 이전의 토양과 유사한 엽록소 함량을 지니고 토양 비옥도 및 안정성이 회복됨. Biocrust를 접종할 시, 3년 이내에 교란되지 않은 자연 천이 환경과 비슷한 토양으로 복원할 수 있음을 규명하였으며, Rosentreter, R. (2020)는 이끼 종에 따라 환경에 빠르게 적응하고 번식 및 서식할 수 있는지, 이끼가 적응할 수 있는 환경의 다양성 등 그 특성을 정리하고 건조한 서식지에서 복원 프로젝트를 수행하기에 적합한 이끼 종을 선정하였다. 해당 연구에서는 지붕빨간 이끼를 다뤘는데, 지붕빨간이끼는 무성생식으로 번식하며 대다수 포자법

(spores)으로 생식하며 일부 분절증식(fragmentation)으로 생식하여 번식률이 빠른 축에 속한다. 이러한 지붕빨간이끼의 특성은 환경에 빠르게 적응하고, 스트레스에 강하며 생태계 복원이 필요한 환경, 특히 교란이나 황폐화된 지역의 복원에 사용하기에 적합함을 알 수 있어 본 연구에도 사용되었다.

### 3. 토양 비옥도

토양 비옥도는 식생의 성장을 위해 적절한 양과 균형으로 영양분을 공급하는 토양의 품질로 정의된다(CitationSoil Science Society of America, 1997). 일반적으로 토양 비옥도는 특정 기간 동안 특정 토양에 존재하는 추출 가능하거나 이용 가능한 영양소의 양의 척도로 정의 되는데(CitationFageria and Baligar, 2005), 이들은 탄소 (C), 수소 (H), 산소 (O), 질소 (N), 인 (P), 칼륨 (K), 칼슘 (Ca), 마그네슘 (Mg), 황 (S), 구리 (Cu), 철 (Fe), 아연 (Zn), 망간 (Mn), 붕소 (B), 몰리브덴 (Mo) 및 염소 (Cl). 니켈 (Ni), 실리콘 (Si) 및 코발트 (Co)로, 작물의 성장에 필수적인 것으로 간주된다. C, H 및 O는 함께 식물 무게의 약 95 %를 형성하며 공기와 물을 통해 식물에 공급되며, N, P, K, Ca, Mg 및 S는 식물의 성장에 많은 양을 필요로 하며 다량 영양소로 알려져 있다. Cu, Fe, Zn, Mn, B 및 Mo는 식물의 성장에 소량으로 필요하며 미량 영양소로 알려져 있다. 이외에 Cl은 식물체 내 농도가 다량 영양소의 농도와 동일하지만, 미량 영양소로 간주되고 있다(CitationFageria et al., 2002).

토양 내에 충분한 양의 필수 영양소가 있다고 해서 이를 모두 식물이 가용할 수 있는 것은 아니다. 식물 성장은 토양 수분, 토양 온도, pH 또는 독성 원소 및 염분의 존재와 같은 요인으로 인해 제한 될 수 있는데(CitationFageria and Baligar, 2005), 이를 근거로 아무리 비옥한 토양이라 할지라도 다른 생산 요소의 수준에 따라 생산적이지 않을 수 있다. 따라서 생산적인 토양은 식물 성장을 위한 최적의 환경 조건을 갖는 토양이며, 실제 조건 하에서 모든 식물 성장 요소를 최적의 수준으로 유지하는 것은 매우 어렵다(CitationFageria et

al., 2002). 따라서 Adriana Allek et al.(2022)은 측정 가능한 토양 비옥도 특성 [표 1]을 규명하여 이들을 유지하고자 하였다.

[표 1] 연구로 측정 가능한 속성을 가진 토양의 특성(Adriana Allek et al., 2022)

토양의 지표	토양의 특성
Physical	Texture
	Bulk density
	Porosity
	Soil water characteristics (water potential, water content, water storage, soil moisture, water holding capacity, hydraulic conductivity, and infiltrability)
	Other (soil temperature and soil mass)
Chemical	Macronutrients (P, K, Mg, Ca, C, N, S, H, O)
	Micronutrients (Al, Na, Cu, B, Mn, Zn, Ni, Fe, Co)
	pH
	Cation exchange capacity
	Soil organic matter
Biological	Other (SO <sub>4</sub> ,C:P,Ca+Mg,N:P,NH <sub>4</sub> -N,NO <sub>3</sub> -N,S-SO <sub>4</sub> ,sumofbases)
	Soil respiration
	Enzymes activity (beta-glucosidase, phosphatase, FDA hydrolysis, protease, invertase, CM-cellulase, phenol oxidase, urease, dehydrogenase)
	Microbial diversity
	Microbial biomass

#### 4. 토양 유기탄소

토양이 건강하고 기능적인 상태에 있는지를 나타내는 토양의 품질과 토양 유기탄소(Soil Organic Carbon, SOC)는 밀접한 관계를 지닌다. 토양 품질은 토양의 구조, 유기물 함량, 토양의 조성, 미생물 활동 등 다양한 생물학적, 화학적 및 물리적 특성에 속하는 요소에 의해 결정된다(CitationFageria and Baligar, 2005). 토양의 품질이 향상되면 식물의 건강과 생산성이 향상되고 토양의 수분 보존 능력이 향상되며 영양소의 이용 가능성이 증대된다. SOC는 토양에 존재하는 유기성 물질의 총량을 나타내며 주로 식물 및 동물의 잔해, 미생물 생체, 뿌리 등으로 구성되는데(Rattan Lal, 2016), 이러한 유기물은 토양의 구조와 입자의 안정성을 증가시키고 토양의 생물 다양성과 생태계 기능에 중요한 영향을 미치는 동시에 토양 품질을 결정하는 핵심적인 요소이다(Gerke,J. 2022). 따라서 토양의 품질과 SOC는 밀접하게 연관되어 있으며 품질을 향상시키기 위해서는 SOC의 유지 및 증가가 중요하다.

식물은 SOC와 상호작용하며 토양의 비옥도에 영향을 끼치는 주요 요인이다. 식물은 광합성을 통해 태양 에너지를 흡수하고 유기물을 생산한다. 이러한 유기물은 식물의 뿌리, 줄기, 잎 등에서 발생하는 생체 폐기물이나 식물의 부분적인 분해를 통해 토양에 공급된다. 이를 통해 토양에 유기물이 축적되고 SOC의 양이 증가할 수 있다. 또한 식물의 뿌리는 유기성 물질을 분비하여 토양과의 상호작용을 촉진한다. 특히 토양 미생물의 활동을 촉진하고 미생물이 유기물을 분해하고 토양에 장기적으로 저장될 수 있다. 뿐만 아니라 식물의 뿌리는 토양 내부로 침투하여 SOC의 물리적 보호 및 축적을 촉진한다. 뿌리는 토양 구조를 형성하는 데 기여하며 토양 입자를 안정화 및 고정시켜 SOC의 분해를 방지하는 역할을 한다. Laurent J. Lamarque et al.(2023)은 토양에 식물을 투입할 경우, 토양 유기 탄소(SOC) 축적량을 증가시키며 plant-enhanced mineralization(positive priming)는 SOM에서 탄소(C)와 질소(N)의 장기 격리를 유발한다는 결과를 보였다. 또한 식물의 N 수요가 토양의 N 공급보다 낮은

경우, 토양 미생물은 미생물 고정화를 통해 SOM에서 N을 격리한다는 결론을 도출했다.

앞서 다른 또 다른 연구 주제인 이끼를 활용할 경우에도 토양 SOC를 증진시킬 수 있다는 선행 연구 결과가 있었다. Hengkang Xu et al.(2022)는 이끼의 SOC 함량 증가에 대한 가설을 그의 연구를 통해 검증하였는데, 연구 결과 BSC는 BSC가 없는 토양에 비해 SOC를 70.9 % 증가시켰다. 또한 Biocrust의 SOC 증가율은 초원(32.7 %)보다 사막(120.3 %)에서 더 높게 나타났다. 무엇보다 이끼(67.5 %)와 지의류(82.8 %)는 조류(58.2 %)에 비해SOC에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 규명되었다. 특히 이끼로 구성된 crust의 경우, 사막(991 %), 초원(38.9 %)를 증가시켰다.

이외에도 Rattan Lal.(2016), Gerke,J.(2022)는 SOC가 토양 내 영양분의 생물학적 가용성을 향상할 뿐만 아니라 다양한 메커니즘에 의해 토양 비옥도에 영향을 미쳐 토양과 상호작용하는 식물과 다른 생물의 성장 및 발달에 도움이 되는 토양 환경을 만든다는 것을 증명하였는데, 비슷한 연구로 SOC가 토양 내 유기물 (SOM)의 약 45~60 %를 구성하며(Rattan Lal. 2016), N과 S와 같은 Mineral Plant Nutrients의 순환에 영향을 미쳐 토양과 식물 뿌리의 영양분 흡수(가용성)에 있어 중심적인 역할을 한다는 것을 규명한 연구(Gerke,J. 2022) 등이 있다.

결과적으로 위와 같은 연구들에 의해 SOC와 SOM은 토양 상태를 측정하는 지표로 가장 널리 사용되고 있다. 근권토양에서 SOC의 임계값은 1.5~2.0 %로 (Rattan Lal. 2016), 1 % 미만일 때는 SOC의 감소가 식생의 성장에 있어 부정적인 영향을 끼친다(S.H Schoenholtz. 2000). 토양의 SOC를 임계값 이상의 수준으로 유지할 때, 토양의 구조적 안정성과 수분 보유 능력을 향상한다. 토양의 pH 완충 능력을 향상하고 CEC 또는 칼슘, 마그네슘, 칼륨과 같은 필수 영양소를 지속적으로 유지하고 공급시키며 토양 미네랄의 분해를 가속하여 식물의 흡수를 돕는 등 토양 건강성과 식물 성장에 있어서 중요하다. SOC는 토양

생산 능력의 중요한 구조적, 기능적 요소로서 그 중요성이 산림 토양에서도 널리 인정받고 있으며 토양의 건강성을 평가하는 데 있어서 핵심적인 지표로 사용된다(S.H Schoenholtz. 2000).

### 3절. 선행연구와의 차별성

기존의 많은 선행연구에서 토양 황폐화와 토양 유기탄소, 이끼에 대한 연구들은 이끼 단일 개체보다는 Biocrust라는 복합체를 중심으로 진행되고 있으며, 국내 환경을 배경으로 토양 비옥도 개선 연구를 진행한 경우는 전무하다.

본 연구에서는 먼저 제주도와 스코리아 토양이라는 특수한 토양 환경 상황을 고려하였다. 스코리아 토양은 그 물리적, 화학적 조성에 의해 토양 비옥도의 요소들이 빠르게 감소하는 경향을 보였으며, 이는 황폐화를 가속시키는 요인이 된다. 따라서 토양 복원 측면에서 취약성을 측정하고 해당 지역 토양 내 자생하는 이끼를 처리하였을 때 토양 비옥도 요소의 증감을 측정하였다. 처리는 기타 환경 변수 요소를 모두 통제하여 실시하였기에 토양 내 요소 변화는 이끼의 처리에 의해 발생한 것임을 의미한다.

다음으로 황폐화 대상지의 선정을 고려하였다. 대상지 선정 단계에서 NDVI(Normalised Difference Vegetation Index) 영상을 활용하여 황폐화가 심각하게 진행되고 있는 곳을 도출, 본 황폐화 토양 복원 연구의 대상지로 선정하였으며, 복원 대상지와 그렇지 않은 곳의 토양 영양도가 다르므로 구분하여 이해할 필요가 있다.

마지막으로 이끼의 품종에 따라 세부적인 토양 비옥도 요소의 증감 차이를 구분하여 분석하였다. 이끼 품종은 총 3가지를 사용하였으며, 황폐화된 연구 대상지 내에서 채취하여 본 연구에서 측정할 모든 토양 내 요소를 각각 동일하게 측정하였으므로 이끼별로 토양 복원에 최적화되어있는 품종이 어떤 품종인지 도출이 가능해지게 된다.

이를 종합하면, 제주도와 스코리아 토양이라는 특수한 토양 환경 상황을 고려했다는 점, 황폐화 대상지의 선정에 영상 자료를 활용하여 선정하였다는 점, 이끼의 품종에 따라 다른 복원도를 도출하고 향후 복원 시 최적의 품종을 선정할 수 있다는 점에서 본 연구는 차별성을 지닌다.

#### 4절. 연구 질문과 가설 설정

본 연구 질문과 가설은 다음과 같다.

· 이끼를 활용해 제주도 오름 황폐화 지역 토양을 복원할 수 있을 것인가?

**H1:** 선행 연구의 이끼 복원 효과를 검토하였을 때, 복원을 위한 처리 시 유의미한 차이가 있을 것이다.

· 모든 이끼 품종이 동일한 복원 효과를 나타낼 것인가?

**H2:** 이끼 품종별 자생 환경, 감광성, 번식법 및 스트레스 저항성이 다르기에 복원 정도 및 속도에서 차이를 보일 것이다.

· 심층 토양의 어느 부분까지 영향을 미칠 수 있을 것인가?

**H3:** 선행 연구에서 규명된 이끼의 피복도와 침투 깊이, 번식 속도, 강도를 기준으로 표토에서 10 cm까지의 심토에 영향을 미칠 수 있을 것이다.



## 제3장: 연구재료 및 방법

### 1절. 연구의 범위

#### 1. 공간적, 시간적 범위

연구 대상지는 제주시 한림읍 금악리와 서귀포시 안덕면 동광리에 걸쳐 위치한(33° 19' 32.51" N, 126° 19' 18.70" E) 도너리 오름으로, 표고는 439.6(110)m, 면적은 306,369m<sup>2</sup>이다. 연구의 시간적 범위는 2022년 8월 10일 해당 날짜에 촬영한 드론 다분광 데이터셋을 사용하였다[그림 5]. 토양 비옥도 조사에 사용된 토양 샘플은 2022년 8월 24일에 채취하였으며, 현장조사 자료는 2022년 6월에 걸쳐 2022년 11월까지 현장에서 조사한 식생 자료를 사용하였다.



[그림 5] 도너리오름 촬영 사진

## 2. 내용적 범위

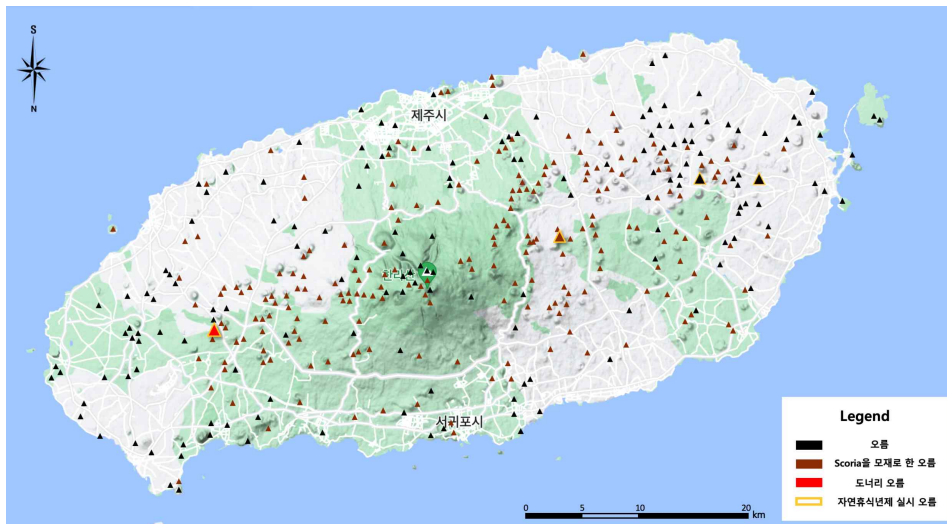
연구 대상종은 이끼류이다. 서리이끼(*Rhacomitrium canescens*)와 털깃털이끼(*Hypnum plumaeforme Wilson*), 지붕빨간이끼(*Ceratodon purpureus*)이다. 본 연구는 NDVI데이터와 토양 비옥도 데이터를 통해 영양 및 식생이 결핍되어있는 연구 대상지를 선정하고, 해당 지역의 토양을 샘플링하여 광, 온도, 수분이 제어되는 인큐베이터 환경 내에서 인위적으로 이끼를 착상시켜 토양 비옥도 데이터의 변화를 분석하는 연구를 진행하였다.

## 2절. 연구 대상지

### 1. 연구 대상지 개요

본 연구의 대상지 선정은 다음 2가지 조건을 최우선으로 삼았다. (1) Scoria 토양을 모재로 한 오름일 것, (2) 자연휴식년제가 실시되어 10년 이상 지속되었을 것, (3) 식생의 풍부도에서 오는 토지 피복도의 차이가 가능한 극명할 것.

해당 조건들을 설정하여 연구 대상지를 선정할 경우 Scoria 토양의 황폐화에 취약한 성질을 극복하여 복원할 수 있기에 이끼의 복원 한계 강도 규명에 많은 의의를 가질 수 있으며, 자연휴식년제로 인해 외부 교란의 요소가 10년 이상 차단되었을 것이기에 복원의 기준이 되기에 최적의 조건이었고, 식생 풍부도에서 많은 차이가 있을 경우 비교군, 대조군의 설정이 용이하여 조건으로 설정하였다. 그 결과 제주도 서쪽의 도너리오름[그림 6]을 최종 연구 대상지로 선정하였다.



[그림 6] 연구 대상지 및 제주도 내 오름 현황 지도

제주시 한림읍 금악리와 서귀포시 안덕면 동광리에 걸쳐 위치한 (33.3269 N, 126.3242 E) 도너리오름은 두 개의 화구를 가진 복합형 화산(표고 439.6m, 면적 306,369m<sup>2</sup>)이다. 정상 북서쪽으로 깊고 넓게 벌어진 말굽형 화구가 있으며 동쪽에는 급경사로 패어진 깔대기 모양의 원형화구가 위치하고, 화구둘레는 약 400m와 길이 40m로 초본으로 이루어져 생물권 보전지역으로 지정되어 있다. 우마와 관광객에 의한 원형 화구의 사면 송이 쓸림 현상이 심각해 2008년 12월부터 자연휴식년제(출입제한)를 실시한 후, 2023년까지 연장 실시 중이다. 자연휴식년제 실시로 원형화구의 송이층이 다소 회복되었으나 여전히 소나 말의 출입이 있고, 송이층의 지질 특성상 지반이 약해 복원속도가 느려 여전히 송이 쓸림 현상이 심각한 것으로 보인다. 특히 원형화구의 경사면은 경사가 매우 가파르고 집중호우에 의한 쓸림현상, 강한 햇빛에 의한 식생확대의 어려움 등 2차 훼손이 나타나고 있어 자원복원에 의해 정상 상태로 복원되기까지는 많은 시간이 필요할 것으로 관측된다.

## 2. 연구 대상지 특성

연구 대상지가 속하는 제주도는 신생대 제4기 동안 대륙붕 위에서 이루어진 대륙지각 내 화산활동에 의해 만들어진 화산섬이다. 제주도는 백만 년간 지속된 용암 분출의 역사가 있으며, 토양은 스킨리아(Scoria, 송이)를 모재로 하는 토양이 주로 존재하며 USDA 토양 분류학에 따르면 화산회토(Andisol)로 분류된다. 본 연구 대상지인 도너리오름 및 주변 토양 송악통에 해당하는 토양 또한 화산회토(Andisol)로 토색은 적갈색이며 심토 토성은 식양질(Clay Loam)이며 표토는 미사질양토(Silt Loam)로 스킨리아(화산 송이)로 덮여있다.

### 3. 연구 대상지 현존식생 분포특성

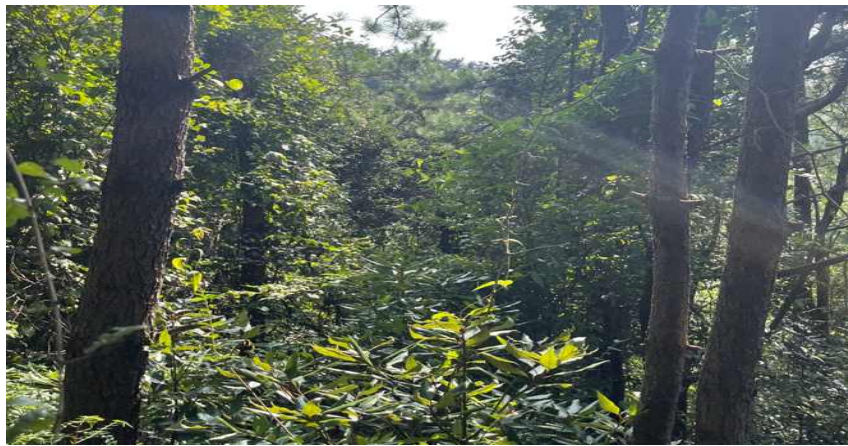
도너리 오름의 초입은 차의 출입이 있는 곳으로 도로 양 옆으로 백리향과 여러 교목들이 섞여 풍부하며 말들이 자유롭게 방목되고 있었다[그림 7]. 말에 의해 초지가 훼손되어 식생피복도가 낮았으며 흙쓸림 현상이 유발되어 곳곳에 임목파쇄칩, 피씨앗, 흙 등을 표면에 고루 덮어두었다. 초입부의 현존식생은 명아주(*Chenopodium album*), 우묵사스레피나무(*Eurya emarginata*), 개여뀌(*Persicaria longisetata*), 쥐꼬리망초(*Justicia procumbens*) 등의 잡초와 외래종이 뒤섞여 분포하고 있었다.



[그림 7] 도너리오름 초입

탐방로는 자연휴식년제를 실시한지 오랜 시간이 지나 소나무군락을 비롯한 관목림과 짙레를 포함한 덩굴 및 가시덤불이 우거져 있었으며 요등(*Paederia scandens*), 고사리(*Pteridium aquilinum*), 송장풀(*Leonurus macranthus*), 곰솔나무(*Pinus thunbergii*) 등이 우점하고 있었다. 특히 고사리의 경우, 눈썹고사리(*Asplenium wrightii*), 반쪽고사리 (*Pteris semipinnata*), 가는쇠고사리(*Arachniodes aristata*), 루모라고사리(*Rumohra adiantiformis*) 등 다양한 고사리들이 자생하고 있었다[그림 8]. 또한 자연휴식년제 이전에 설치한 것으로 추정

되는 야자매트로 인해 말 또는 사람의 답압으로 인한 영향을 최소화하고 있었으나 식생의 출현을 방지하여 식생피복도를 저하시켰다. 오름의 중앙부 능선까지 소나무를 비롯한 관목림이 이어지며 토양의 조성은 화산회토를 모재로 한 Andisols로 미사질양토였으며 약 5 cm의 L 층(Litter layer, 낙엽층), 약 2~3 cm의 F 층(Fermentation layer, 분해층), 약 10~15 cm의 H 층(Humus layer, 부식층)으로 이루어졌다.



[그림 8] 도너리오름 중턱

정상 부근은 삼나무 군락을 기반으로 높은 식생피복도를 가지고 있었으며 동쪽으로는 원형분화구, 서쪽으로는 말굽형 분화구가 존재한다. 말굽형 분화구는 큰 크기의 교목과 관목이 다간목 형태로 많았고 원형분화구는 그에 비해 비교적 관목이 적고 초본이 많았다. 구체적으로 원형 분화구 둘레이자 각 분화구 경계면에는 갈대 군락이 넓게 분포하고 있었다. 분화구 내부 가장자리의 경우, 초본이 우점하거나 송이층 쏄림 현상에 의해 식생이 출현하지 않았으나 중심으로 갈수록 덩굴식물이 번성하였고 일부는 다층 구조림이 형성되었다. 정상의 토양은 오름 중턱 부근의 비옥한 토양과 달리 전반적으로 표토가 극소하고 수분감이 전혀 느껴지지 않는 적갈색의 화산송이(scoria)가 표면에 다량 존재하였다[그림 9]. 송이 입자 간 점착력이 약하여 외부 자극에 쉽게 부서졌으며 토양이 전혀 지지되지 않아 경사면을 따라 쏄림 현상이 나타났다. L, F,



H 층이 전혀 없었으나 토양을 약 2~3 cm 가량 파헤칠 시, 표면의 송이보다 작은 입도의 흙갈색 토양을 발견할 수 있었다. 분화구의 경사도는 40~50도로 매우 높은 수준이었으며 훼손지대의 경우, 식물의 잎이 메마를 정도로 건조한 상태였다. 현존식생은 췌기풀과인 좀깨잎나무 (*Boehmeria spicata*), 벼과초본 (*Poaceae*), 부처손(*Selaginella tamariscina*), 씌마귀 (*Ixeridium dentatum*), 해송나무(*Pinus thunbergii*), 자운영(*Astragalus sinicus*) 등이 분포되었다.

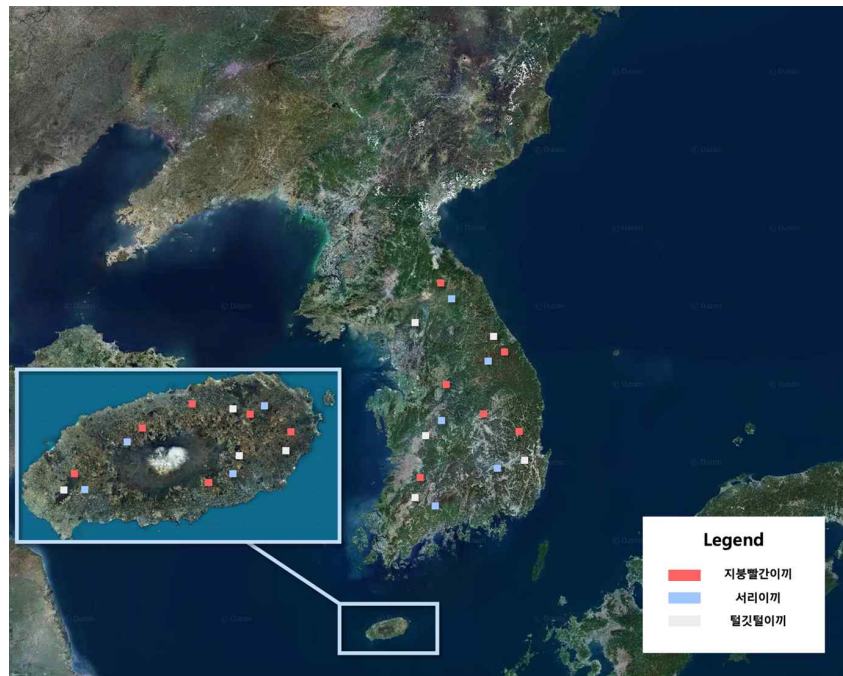


[그림 9] 도너리오름 정상 분화구 지대

따라서 도너리 오름의 현존식생 분포특성을 종합하면, 저지대 방향으로부터 정상까지 초본식생지 → 관목식생지 → 교목식생지의 스펙트럼 형태로 분포하고 있으며 대체적으로 초입과 정상의 원형분화구를 제외하고 식생활착 상태가 양호하였다. 다만, 정상의 원형 분화구는 말굽형 분화구가 큰 크기의 교목과 관목으로 이루어진 혼합림으로 이루어진 것에 비해 식생천이가 더더 초본식생지로 형성되어 있었으며 송이층 쓸림 현상으로 인해 훼손되어 있었다.

### 3절. 연구 대상 종

제주도는 근해의 해류, 지형 등이 기후인자로 복잡하게 작용하여 여름철에는 북태평양 기단에 의해 강우 및 폭우량이 크며 오호츠크해 기단이 강화될 시, 가뭄의 정도가 커진다. 겨울철에는 북서계절풍의 영향으로 온도의 차이가 극심해진다. 일반적으로 바람이 강하다는 특성을 가지고 있다. 따라서 본 도너리 오름을 복원하기 위한 이끼는 (1) 건조하고 추운 극한의 환경에서 생존이 가능하며 (2) 반음지 및 양지의 사질토 또는 바위 위에서 생존할 수 있고 (3) 도너리 오름 내에 자생하여야 한다는 선정 조건을 설정하였다. 그 결과, 훼손이 진행된 송이층을 포함하여 전국에서 원활히 자생하고 있는 식물종인 이끼 3종(서리이끼, 털깃털이끼, 지붕빨간이끼)을 확인하였으며[그림 10] 각 이끼 종에 대한 정보는 다음과 같다.



[그림 10] 연구 대상 이끼 종 전국 군락지 분포도



## 1. 지붕빨간이끼(*Ceratodon purpureus*)

지붕빨간이끼는 적갈색의 긴 삭을 지닌 이끼로 세계 각지뿐만 아니라 제주를 비롯한 대한민국 전국에 널리 분포하고 있다. ‘Redshank’로 불리며 교란 적응 이끼의 일종이다. 세포 내에 인지질 LPC, LPE가 풍부하게 발견되는데, 이는 식물 방어 시스템에 관여하고 건조되더라도 식물체를 보호하는 역할을 하며 건기 동안, 장쇄의 포화 지방산을 축적하는 경향이 있다(Wilton R.S et al., 2022). 음지 및 반음지보다 햇볕이 잘 드는 사질토 위 또는 초가집이나 판자집의 지붕에 모여 자란다. 800lux의 광조건에서 8~10시간의 일조시간을 가지며 70 % 이상의 습도에서 생육할 경우, 가장 활발히 성장하는 것으로 나타난다. 대부분의 토양 유형에서 잘 자란다. 특히, 촉촉하고 배수가 잘되며 pH 5~6.5의 약산성 토양을 선호한다는 특성이 있다. 10~15° C의 온도에서 가장 잘 자라지만 남극 및 빙하 퇴적물이 있는 -20° C의 극지 지역과 열대 지역의 35° C라는 극한 환경에서도 우수한 생존력을 지닌다. 가뭄, 대기오염, 중금속 함유 및 결핍 토양 등의 혹독한 환경에서도 서식한다. 일반적인 환경에서는 1 cm 이하의 줄기를 중심으로 주위에 뻗뻗하게 잎이 배열되지만, 건조한 환경에서는 상대적으로 수축된 형태를 띤다[그림 11]. 포자를 생산하기 위해서는 지속적인 암흑과 0° C 등의 극한조건이 형성되어야 한다.



[그림 11] *Ceratodon purpureus*와(좌) 적갈색 삭의 모습(우)

## 2. 서리이끼(*Racomitrium canescens*)

서리이끼는 난형, 피침형의 잎[그림 12]을 가진 이끼로 18~25° C의 기후조건을 가진 북반구에 넓게 분포하고 있다. 특히, 제주를 비롯한 대한민국 전국에서 흔히 볼 수 있는 이끼종 중 하나이다. 산지의 양지바른 바위 위, 사질 토양의 암석 및 길가, 바닷가 사구 등에 모여 자란다. 광량이 충분한 50~70 %의 습도 환경에서 생존하며 강한 습윤성과 내한성을 가져 생명력이 강하다. 산의 석회질 모래질 토양에서 60° C 이하의 조건이 형성될 경우, 포자를 생산한다.



[그림 12] *Racomitrium canescens*와(좌) 및 피침형 잎의 모습(우)

## 3. 털깃털이끼(*Hypnum plumaforme Wilson*)

털깃털이끼는 줄기가 깃모양으로 가지가 많이 갈라지는 두툼한 이끼[그림 13]로 북반구에 넓게 분포하며 제주를 비롯한 대한민국 전역에서 서식하고 있다. 반음지 또는 양지바른 산지 골짜기 또는 습지의 축축한 바위 위나 땅 위에 매트 모양으로 모여 자란다. 일반적으로 20° C에서 우수한 생장률을 띤다.

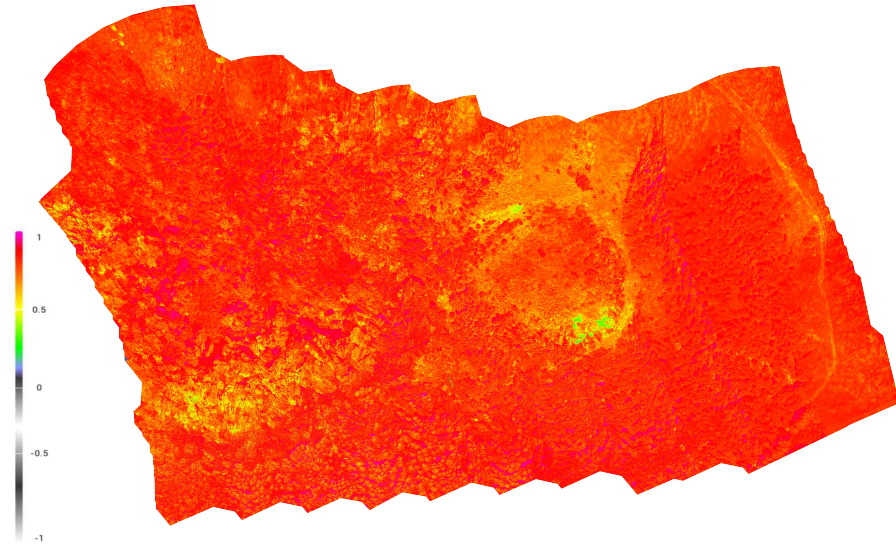


[그림 13] *Hypnum plumaforme Wilson*과(좌) 및 선형 잎의 모습(우)

## 4절. 분석 대상 선정 및 시료 취득

### 1. 분석 대상 지역 설정 및 샘플 수집 대상지 선정

시료 취득 및 전처리에 앞서 채취 지점 선정을 위하여 6가지 종류의 특수 렌즈를 부착한 multispectral 렌즈를 DJI Phantom4 RTK multispectral 무인기에 설치하여 구역별 저고도 LiDAR 촬영을 진행하였다. 총 6가지 렌즈의 종류는 적외선(RE), 근적외선(NIR), 녹색(G), 적색(R), 청색(B), 가시광선(RGB)으로 한 컷을 촬영할 때마다 6가지 렌즈가 동시에 촬영되어 이를 조합하여 다양한 값을 산출하였다. 촬영은 오름 최고 고도인 약 440m보다 80m 더 높이 위치시켜 상하, 좌우 90도 각도로 왕복하여 2회 진행되었다. 카메라의 각도는 수평선으로부터 45도 각도로 촬영되었고, 해상도는 1600x1300 (4:3.25)이다. 이후 삼각측량을 진행한 뒤, 식생지수를 계산하기 위해 Red, Green, Blue, 근적외선(Nir) 밴드의 정사영상을 구축하는 2D Multi Spectral Mapping을 진행하여 NDVI, GNDVI 두가지 식생지수 분포도를 추출하였고 식생의 활력도를 파악하기 더 용이한 NDVI를 지표로 활용하였다. NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)는 식생을 정량적으로 표현할 때 사용하는 지표이며, 식생의 활력도를 나타낸다(Rouse et al., 1973). 적색(Red)파장과 근적외선(NIR)파장을 이용하며 식생이 밀집되어 있고 건강하고 활력이 높을 경우 근적외선의 반사율이 높게 나타나 식생분포와 생육특성을 평가하는 대표적인 지표로 사용된다. -1에서 1 값을 갖으며 1 에 가까울수록 식생의 활력도가 높음을 나타낸다[그림 14].



[그림 14] 도너리오름 전체 NDVI 추출 결과

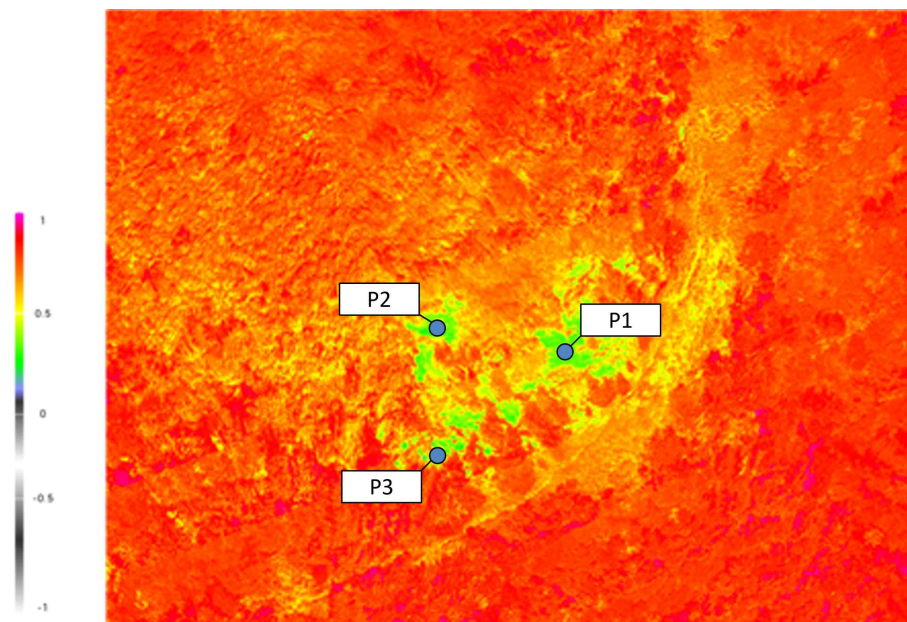
추출한 NDVI에서 도너리 오름의 산의 중턱부터 정상까지 1에 가까운 값으로 식생 피복도가 높은 반면 송이 쓸림현상이 일어나는 원형화구 내부는 식생이 풍부한 주변에 비해 낮은 0.3 정도의 NDVI 값을 갖는다[그림 15].

NDVI 분포도를 통해서 원형 분화구 내부 송이층 쓸림 현상이 발견되는 구역과 토양 유실과 건강성 저하로 인한 식물생육상태 저하로 인해 식생활력도가 낮은 구역을 훼손 지역으로 정의하고 본 연구의 대상지로 선정, 6m 격자를 생성하고 P1, P2, P3로 각각 지정하여 토양 시료를 채취하였다.

## 2. 토양 시료 채취

토양시료는 2022년 8월에서 10월까지의 4차례 답사와 2023년 3월에서 4월까지의 2차례 답사에 걸쳐 10cm 깊이의 표토를 1회 1 kg씩 총 26점을 채취하였다. 표토 시료는 10cm Hand auger (Sing Edelman auger, Eljkelkamp Soil & Water, Netherlands)를 이용하여 대상 오름의 경사 지점과 대칭방향으로 대각

선 선상의 3~4개 지점의 토양시료를 채취하여 각각 혼합하였다. 채취한 토양 시료는 풍건하여 2mm 토양체에 통과시킨 후 국립산림과학원의 토양 및 식물체 분석법(National Institute of Forest Science, 2014a)과 II (National Institute of Forest Science, 2014b), 토양오염공정시험기준의 방법에 준하여 분석에 사용하였다.



[그림 15] 도너리오름 훼손 중심지 내 토양 시료 채취지점 위치도



## 5절. 시료 데이터 취득 및 실험 처리

### 1. 토양 유기탄소(SOC)

SOC 함량은 각 4개의 토양층(Biocrust 표면 토양층 0-2 cm, 2-5 cm 토양층, 5-10 cm 토양층)에서 토양 시료를 채취한 후 혼합하여 복합 시료 획득하였으며, 국제표준화기구(ISO)와 미국농업학회(ASA) 등에서 표준화된 방법으로 토양 유기물에 탄소가 포함되어 있고 탄소가 중크롬산칼륨과 같은 강한 산화제에 의해 이산화탄소로 산화될 수 있다는 원리에 기초하여 중크롬산칼륨과 진한 황산 용액을 사용하여 토양 시료의 유기물을 산화시킨 다음, 황산제1철암모늄 표준용액으로 용액을 적정 하는 방법인 Walkey and Black's dichromate oxidation method로 측정하였다.

이후 500° C로 2시간 처리 후의 강열 감량(LOI)을 측정하여 SOM 함량을 결정하였다. LOI는 방정식(%OM = [% LOI × 0.7] - 0.23)을 사용하여 SOM으로 변환하였으며 이를 van Bemmelen factor 1.724(Cambardella et al., 2001)를 사용하여 SOM을 SOC로 변환하였다.

### 2. 토양 산도(pH)와 전기전도도(EC)

토양과 증류수의 비율을 1:5로 하여 마이크로웨이브(CEM)를 통해 진탕(5회, 30분)한 뒤, pH Meter(Thermo Fisher Scientific)와 Conductivity meter로 측정하였다.

### 3. 유기물(SOM)함량

「토양환경검사기준」(2019. 7. 31. 고시)에 따라 중크롬산칼륨(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)과 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)으로 유기물을 산화한 후, 자외선 가시광선 분광광도계(Analyticyena)를 통해 광도를 측정하는 습식산화법(Tyurin법)으로 정량하였다.

#### 4. 유효인산(P2O5)

Lancaster법에 따라 인산침출액 20mL에 토양 5g를 주입한 뒤, 마이크로웨이브(CEM)로 진탕(1회, 10분)하여 여과지로 시료액을 추출하였다. 추출한 용액 3mL와 조작액 6mL, 1-amino-2-naphtol-4-sulfonic acid 0.4mL를 혼합하여 항온(30° C, 30분)처리한 뒤, 분광광도계(Analyticyena) 720nm에서 표준용액의 검량선을 제조하여 측정하였다.

#### 5. 질산태질소, 암모니아태질소, 질소전량을 비롯한 질소 함량

습식산화법인 Kjeldahl 분석을 기반으로 질소 분석기(OPSIS)를 통해 분석하였다. 질소전량의 경우, 토양 0.25~2.0 g에 2mL의 증류수를 투입하고 교반한 뒤, 1mL의 과망간산칼륨을 넣어 교반을 반복했다. 이후, 물과 1:1로 혼합한 황산 2mL를 넣고 5분 방치하여 유기성 질소를 분해한 후, N-Octyl alcohol 한 방울을 투입하였다 환원된 Fe 0.5 g을 첨가하고 가열(100° C, 1시간)하여 알칼리성으로 증류하고 적정하여 질소량을 산출하였다. 질산태질소는 NaOH를 이용하여 추출용액을 알칼리성으로 제조한 뒤, de vada's alloy를 투입하여 NO<sub>3</sub>-N을 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N로 전환시켰다. 이후 생성된 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N을 2 % 붕산용액 50mL에 포집하여 0.01N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액으로 적정하였다. 암모니아태질소는 토양 10 g에 2M KCl 50mL를 넣어 30분간 진탕한 뒤, Whatman No.2 여과지에 여과하였다. 이후 여과액을 알칼리성으로 제조하기 위해 MgO를 투입하고 증류하였으며 질산태질소 분석기법과 동일하게 생성된 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N을 2 % 붕산용액 50mL에 포집하여 0.01N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액으로 적정하였다.

#### 6. 입도분포

sieve analysis에 따라 6개(53 μm, 105 μm, 250 μm, 500 μm, 1mm, 2mm)의 체로 sieving하여 조립토와 세립토로 분류 및 입도분포를 분석하였다. 분석은 ASTM D6913 표준에 따라 수행하였으며, 토양 샘플은 수분 함량을 제거하기

위해 먼저 105° C에서 24시간 동안 오븐에서 건조하여 전처리하였다. 이후 건조된 샘플을 53  $\mu$ m, 105  $\mu$ m, 250  $\mu$ m, 500  $\mu$ m, 1mm 및 2mm의 사이즈를 가진 6개의 체 스택에 통과하였다. 체는 토양 입자들을 완전히 분리하기 위해 기계식 진탕기를 사용하여 10분 동안 진탕하였으며, 각 체에 남은 질량을 기록하고 각 토양 분율의 백분율을 계산하였다.

## 7. 이끼 처리 및 격리 환경 내 실험

도너리옴 내 실험 대상구역의 토양 샘플을 실험실로 옮긴 다음 서리이끼 (*Rhacomitrium canescens*)와 털깃털이끼(*Hypnum plumaeforme Wilson*), 지붕빨간이끼(*Ceratodon purpureus*)를 자연광에서 7일간 건조한 뒤 분쇄하여 토양 샘플에 처리되었으며, 모든 샘플은 외부 환경과의 접촉이 차단되어 온도 25°C, 습도47 %, 빛 2218 Lux(10h)의 조건에서 4주간 처리되었다.

## 8. 통계분석

통계분석은 GraphPad Prism 5 (Version 5.01. GraphPad Software, INC. 2007)을 사용하여 unpaired t test를 수행하였다( $p < 0.0001$ ). 모든 분석은 하나의 시료를 최소 5번 반복하였다.



## 제4장: 결과

### 1절. 토양 입도분석 결과

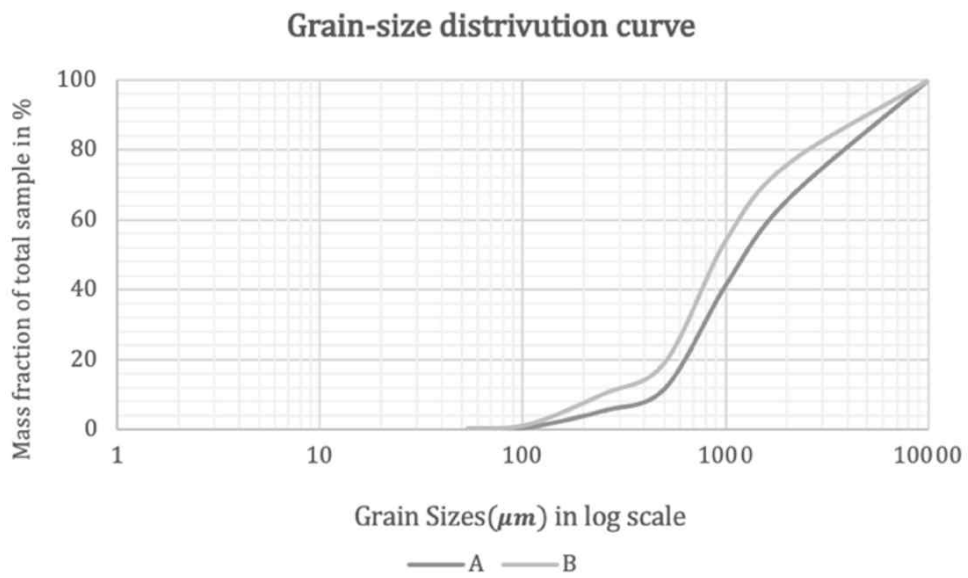
본 연구 대상지인 도너리오름 및 주변 토양에 해당하는 화산회토(Andisol)로 토색은 적갈색이며 심토 토성은 식양질(Clay Loam)이며 표토는 미사질양토(Silt Loam)로 스코리아(화산 송이)로 덮여있다. 본 프로젝트의 복원 목표 대상 구역에서 채취한 토양시료의 토성 분석 결과는 [표 2]과 같다.

[표 2] 각 토양 시료의 입도분포표

Sample	$d \leq 53 \mu m$	$53 \mu m < d \leq 105 \mu m$	$105 \mu m < d \leq 250 \mu m$	$250 \mu m < d \leq 500 \mu m$
우수 지대(A)	0.09	0.48	4.79	6.37
훼손 지대(B)	0.23	1.12	8.83	8.99
	용적 밀도	$500 \mu m < d \leq 1.00mm$	$1.00mm < d \leq 2.00mm$	$2.00mm < d$
우수 지대(A)	0.96	29.59	24.2	34.48
훼손 지대(B)	0.86	34.95	21.63	24.25

우수 지대의 토양(Sample A)과 훼손 지대의 토양(Sample B)의 입경을 분석한 결과, [표 2]와 같이 도출되었다. 훼손 지대의 함량비는 자갈 24.25 %, 모래 56.85 %, 미사 18.94 %, 점토 0.23 %로 삼각도표법에 따르면 사질양토(Sandy Loam)에 해당한다. 이를 입도분포곡선으로 표현할 경우, [그림 16]과 같다. 대조군과 훼손지대 토양 모두 기울기가 완만한 구배를 띄지만 실트와 같은 세립자의 함량이 적고 조립자의 함량이 높다고 파악할 수 있다. 특히, 유효입경

(effective size)을 비교하였을 때, 대조군에 비해 훼손지대의 토양의 세립자 함량이 더 높은 것을 알 수 있다. 또한 균등계수(coefficient of uniformity)의 경우, 훼손지대의 토양이 1.0 정도 더 높게 산출되므로 보다 균일한 직경을 가지고 있다고 판단할 수 있다. 뿐만 아니라 대조군의 용적밀도가 0.1 정도 더 높으므로 훼손지대의 토양은 보다 높은 공극량을 가지고 있으나 향후 복원을 통해 토양환경이 안정될 경우, 개선될 수 있을 것으로 판단한다.



[그림 16] 입도 분포 곡선

## 2절. 토양 비옥도 분석 결과

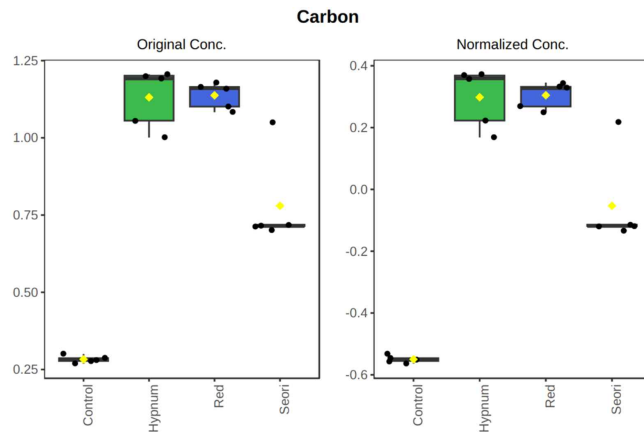
### 1. 토양 유기탄소 변화

[표 3] 토양 시료의 유기탄소 분석 결과

(단위: %)

반복 샘플	1	2	3	4	5
무처리	0.29	0.27	0.28	0.27	0.28
털깃털 이끼	0.60	0.54	0.61	0.68	0.64
지붕빨간 이끼	0.62	0.56	0.64	0.61	0.59
서리이끼	0.59	0.58	0.65	0.56	0.62

분석 결과[표 3] 이끼를 처리한 그룹에서 유기탄소가 약 0.3~0.41 % 증가하였으며, 서리이끼의 경우 가장 낮은 탄소 축적폭을 보였으며 털깃털이끼와 지붕빨간이끼의 경우 0.41 %까지 증가하며 매우 높은 축적폭을 확인하였다. 대조군(Control)로부터 ANOVA 분석을 통해 유의한 차이를 검정한 결과 0.0001 이하로 유의미한 차이가 발생한 것을 확인하였으며, 추가로 t-test 검정과 정규화를 통해 추가로 결과를 확인하였다[그림 17].



[그림 17] 유기탄소 Normalization 결과

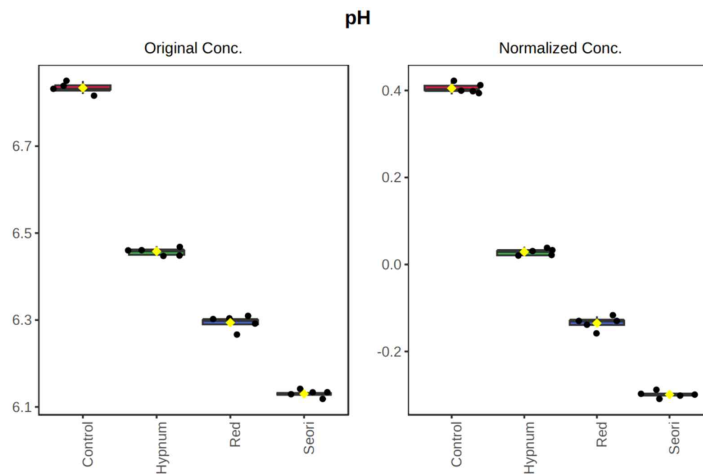
## 2. pH 변화

[표 4] 토양 시료의 pH 분석 결과

(단위: pH)

반복 샘플	1	2	3	4	5
무처리	6.83	6.82	6.83	6.84	6.85
털깃털 이끼	6.52	6.54	6.58	6.51	6.53
지붕빨간 이끼	6.41	6.39	6.43	6.42	6.41
서리이끼	6.48	6.45	6.46	6.49	6.48

분석 결과[표 3] 이끼를 처리한 그룹에서 pH가 약 0.4~0.5 감소하였으며 이는 식물이 자라기에 적절한 약산성(pH 6.0~6.5)의 범위(R. Dwain Horrocks, John F. Vallentine, 1999)를 나타낸다. 서리이끼의 경우 가장 높은 pH 감소를 보였으며 털깃털이끼의 경우 가장 적은 감소를 보였으나 처리한 이끼 모두 식물 생육에 적절한 pH 감소 효과가 있었다. 대조군(Control)로부터 ANOVA 분석을 통해 유의한 차이를 검정한 결과 0.0001 이하로 유의미한 차이가 발생한 것을 확인하였다[그림 18].



[그림 18] pH Normalization 결과

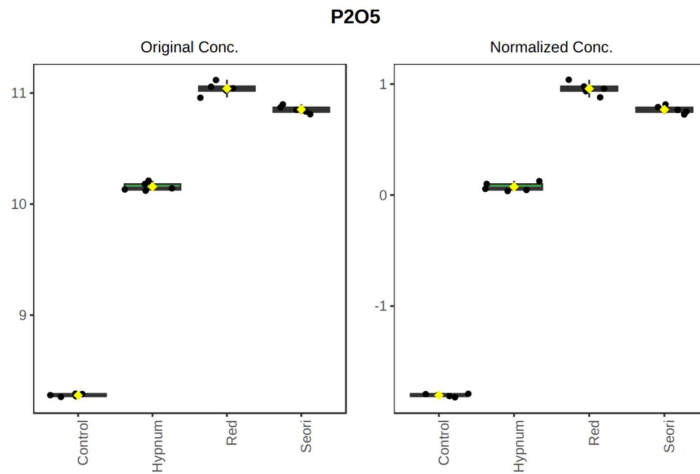
### 3. 유효인산 변화

[표 5] 토양 시료의 유효인산 분석 결과

(단위: mg/kg)

반복 샘플	1	2	3	4	5
무처리	8.29	8.27	8.28	8.29	8.26
털깃털 이끼	14.31	15.27	15.43	14.73	14.55
지붕빨간 이끼	21.47	19.46	19.87	23.11	22.08
서리이끼	28.63	25.43	23.88	29.41	26.5

유효인산(Available phosphate)의 경우 대조군에 비해 세 가지 이끼 모두 20% 이상 증가된 결과를 보였으며[표 5] 이끼 처리로 인해 토양의 인산이 증가하여 이는 이끼의 특정 성분으로 인해 토양의 부족한 인산이 보완된 것으로 확인된다. 털깃털이끼에 비해 지붕빨간이끼, 서리이끼에서 상승된 유효인산 증가가 나타났으며 이끼의 종류에 따라 토양 유효인산 증가 정도가 상이한 것을 확인하였다. 대조군(Control)로부터 ANOVA 분석을 통해 유의한 차이를 검정한 결과 0.0001 이하로 유의미한 차이가 발생한 것을 확인하였다[그림 19].



[그림 19] 유효인산 Normalization 결과

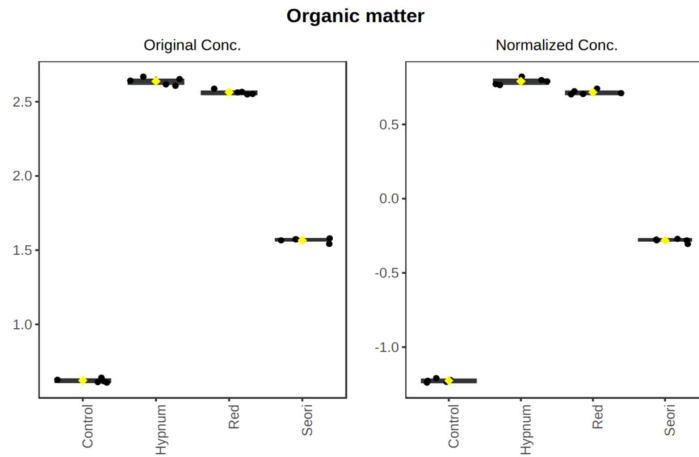
#### 4. 유기물 변화

[표 6] 토양 시료의 유기물 분석 결과

(단위: %)

반복 샘플	1	2	3	4	5
무처리	0.64	0.61	0.63	0.61	0.62
털깃털 이끼	1.34	1.2	1.36	1.51	1.42
지붕빨간 이끼	1.38	1.25	1.42	1.35	1.3
서리이끼	1.31	1.28	1.45	1.25	1.37

유기물(Organic matter)은 토양 내 중요한 성분으로 유기물 함량에 따라 식물생육이 좌우된다고 할 수 있다(A Nagase, 2011). 우리나라 기준 유기물 함량은 약 2~3 % 내외로(최효선, 2018) 적은 편이며 대조군(Control) 토양의 경우 낮은 유기물 함량으로 식물 생육에 적절하지 않은 유기물 함량을 나타낸다. 실험에 보유한 이끼를 처리한 경우 약 1.4 %로 기존 0.6 %정도의 유기물 함량에 비해 크게 증가된 결과가 측정되었다[표 6]. 이는 이끼 처리로 인해 이끼가 보유하고 있던 미생물, 특정 성분 등으로 인해 유기물이 증가된 것으로 확인된다. 특히 털깃털, 지붕빨간이끼의 경우 대조군에 비해 약 2배 증가된 유기물 함량이 측정되어 토양복원과 식물생육에 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 대조군(Control)로부터 ANOVA 분석을 통해 유의한 차이를 검정한 결과 0.0001 이하로 유의미한 차이가 발생한 것을 확인하였다[그림 20].



[그림 20] 유기물 Normalization 결과

## 5. 양이온 치환능력, 전질소량 변화

[표 7] 토양 시료의 양이온 치환능력 분석 결과

(단위: cmol/kg)

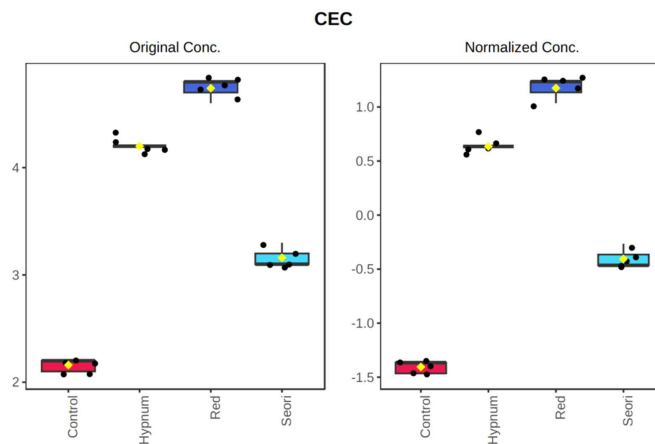
반복 샘플	1	2	3	4	5
무처리	2.1	2.2	2.1	2.2	2.2
털깃털 이끼	4.2	4.3	4.1	4.2	4.2
지붕빨간 이끼	4.8	4.8	4.7	4.6	4.8
서리이끼	3.1	3.1	3.3	3.1	3.2

[표 8] 토양 시료의 전질소량 분석 결과

(단위: %)

반복 샘플	1	2	3	4	5
무처리	0.028	0.029	0.028	0.026	0.026
털깃털 이끼	0.079	0.077	0.081	0.078	0.079
지붕빨간 이끼	0.071	0.074	0.07	0.072	0.071
서리이끼	0.061	0.061	0.062	0.059	0.063

양이온 치환능력(CEC)[표 7]과 전질소량(N)[표 8]의 경우 대조군(Control)에 비해 털깃털이끼, 지붕빨간이끼에서 2배이상 증가하였다. 양이온 치환능력(CEC)는 유기물과 밀접하게 관련이 있으며 유기물과 동일한 경향성을 보인다. 따라서 털깃털, 지붕빨간이끼에서의 유기물증가는 양이온치환능력 증가와 연관이 존재한다고 볼 수 있다. 3가지 이끼를 처리하였을 때 양이온 치환능력이 증가하여 토양의 산성화를 방지하고 황폐화된 토양 회복을 통해 식물생육이 가능하게 하는데 큰 기여를 한다고 확인할 수 있다. 대조군(Control)로부터 ANOVA 분석을 통해 유의한 차이를 검정한 결과 0.0001이하로 유의미한 차이가 발생한 것을 확인하였다[그림 21].



[그림 21] CEC Normalization 결과



## 6. 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘 이온 변화

[표 9] 토양 시료의 치환성 칼륨 분석 결과

(단위: cmol/ cm)

반복 샘플	1	2	3	4	5
무처리	0.068	0.066	0.062	0.064	0.067
털깃털 이끼	0.19	0.21	0.17	0.19	0.18
지붕빨간 이끼	0.097	0.095	0.092	0.096	0.097
서리이끼	0.28	0.18	0.20	0.23	0.24

[표 10] 토양 시료의 치환성 칼슘 분석 결과

(단위: cmol/kg)

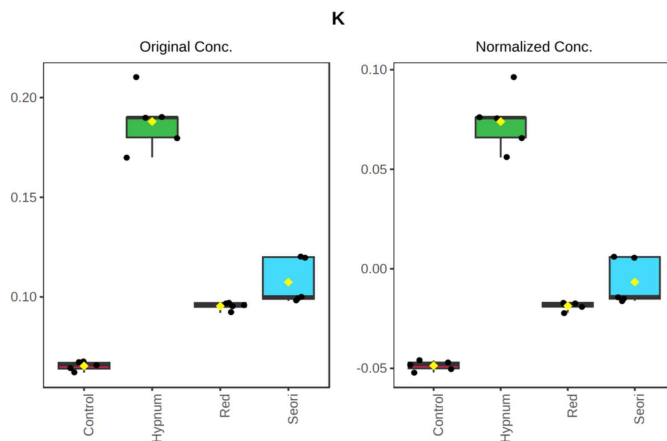
반복 샘플	1	2	3	4	5
무처리	0.41	0.39	0.43	0.42	0.43
털깃털 이끼	1.22	1.23	1.22	1.24	1.2
지붕빨간 이끼	1.4	1.43	1.41	1.4	1.45
서리이끼	0.74	0.76	0.74	0.75	0.72

[표 11] 토양 시료의 치환성 마그네슘 분석 결과

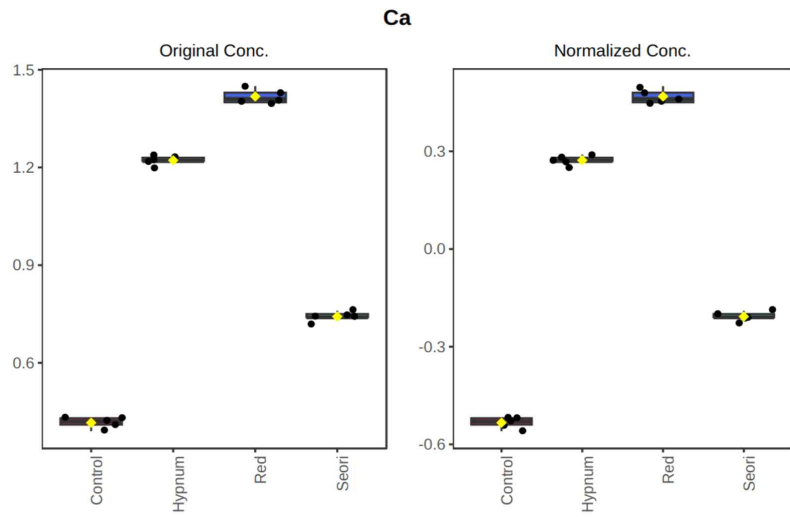
(단위: cmol/kg)

반복 샘플	1	2	3	4	5
무처리	0.29	0.27	0.29	0.28	0.27
털깃털 이끼	0.66	0.64	0.65	0.66	0.68
지붕빨간 이끼	0.57	0.57	0.56	0.54	0.55
서리이끼	0.39	0.37	0.4	0.38	0.37

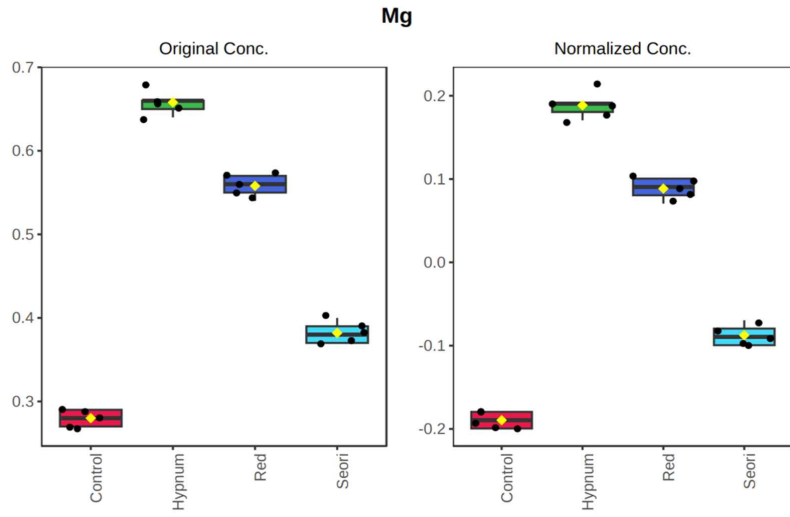
치환성 칼륨(K)[표 9], 칼슘(Ca)[표 10], 마그네슘(Mg)[표 11] 이온은 양이온 치환능력과 관련되어 있으며 치환성 칼륨의 경우 털깃털이끼에서 가장 높은 수치가 측정되었으며 치환성 칼슘의 경우 털깃털, 지붕빨간이끼에서, 그리고 치환성마그네슘의 경우 털깃털, 지붕빨간이끼에서 높은 수치가 측정되었다. 측정된 치환성 이온들은 대체적으로 유기물, 양이온치환능력과 비슷한 증감 경향을 보였으며 밀접한 연관이 있는 것을 확인하였다. 최종적으로 황폐화된 토양 복원에 이끼 처리를 통해 회복된 수치를 토양 성분측정을 통해 확인하였다. 대조군(Control)로부터 ANOVA 분석을 통해 유의한 차이를 검정한 결과 0.0001이하로 유의미한 차이가 발생한 것을 확인하였다[그림 22, 23, 24].



[그림 22] 치환성 칼륨 Normalization 결과

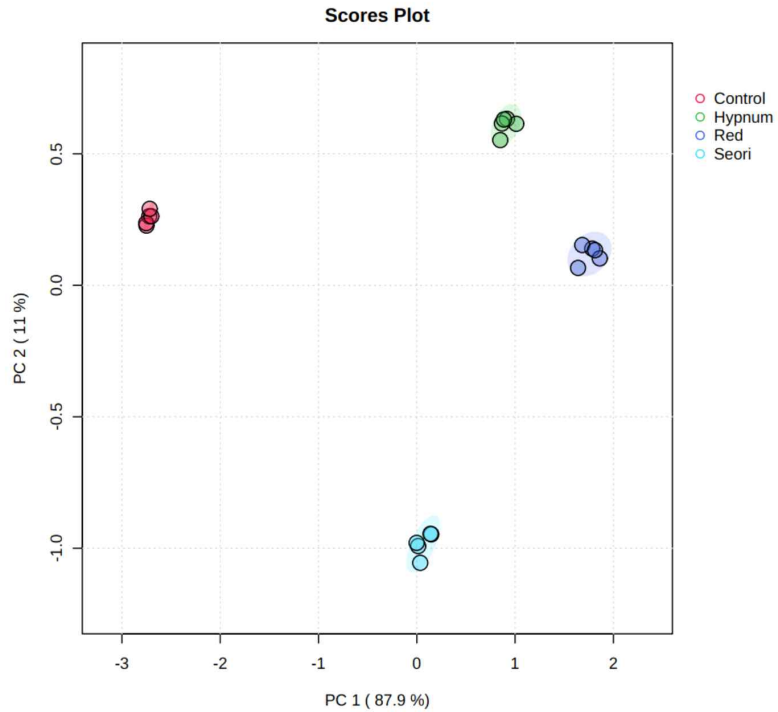


[그림 23] 치환성 칼슘 Normalization 결과



[그림 24] 치환성 마그네슘 Normalization 결과

## 7. PCA plot 결과



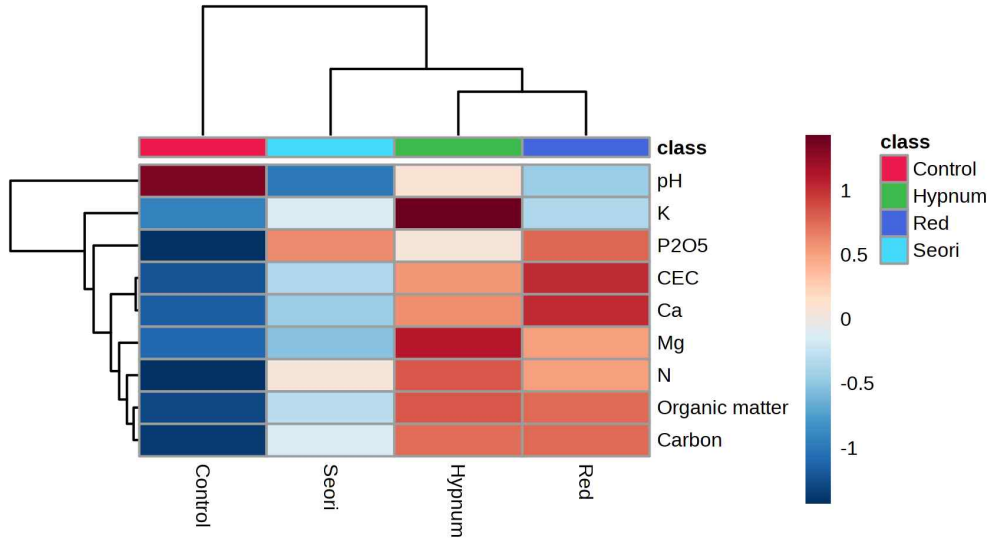
[그림 25] PCA plot 결과 데이터

각 데이터 간 변동성 데이터를 통해 PCA plot을 실시하였다[그림 25].

Z-score 정규화를 통해 각 변수의 평균을 0으로, 표준편차를 1로 만들어 데이터를 표준화한 뒤 데이터 변동성을 설명과 변수 간 상관관계 측정을 위해 공분산 행렬을 계산하였다. 이후 공분산 행렬로부터 고유값과 고유벡터를 계산한 뒤, 고유값을 통해 데이터 변동성에 기여하는 정도를 확인하고 고유벡터를 통해 주성분의 방향을 도출하여 새로운 축을 정의한다. 마지막으로 도출된 고유값을 기반으로 크기가 큰 순서대로 주성분을 선택하여 2차원 데이터로 시각화하였다.

결과값의 데이터 간 거리가 먼 것을 확인하여 토양 성분들을 기준으로 유의미한 차이가 나는 것을 확인하였다.

## 8. Heat-map 결과



[그림 26] Heat-map 분석 결과

이끼 종류에 따라 처리한 토양 성분분석 후 Normalized한 결과값을 확인하기 위해 Heat-map 분석을 실시하였다[그림 26]. 이후 토양 데이터 특성들을 선택하여 데이터 포인트로 설정한 뒤, 포인트 간의 유사도를 계산하여 토양 복원 결정 요소들 간의 관계를 평가하였다. Heat-map 생성 후 데이터 포인트의 값에 따라 높은 값의 데이터는 짙은 색, 낮은 값의 데이터는 옅은 색으로 표시하였다.

이를 통해 확인한 결과 대조군(Control)에 비해 털깃털이끼(Hypnum), 지붕빨간이끼(Red)에서 pH의 감소, 유기물, CEC, 탄소함량 등의 주요성분들이 증가함을 확인하였다[그림 27]. 각 block은 5반복의 평균을 나타내었다.

## 제5장: 결론 및 고찰

### 1절. 결론 및 고찰

본 연구에서는 도너리 오름에 자생하는 이끼가 황폐화 토양을 효과적으로 복원할 수 있으며, 몇 가지 주요 토양 특성에 상당한 개선을 초래했다는 것을 확인하였다. 토양의 pH, 양이온 교환 용량(CEC), 칼슘(Ca), 유기 탄소, 칼륨(K), 마그네슘(Mg), 유기물, 유효인산 모두 이끼 적용 후 눈에 띄는 증가를 보였다.

pH의 조정 효과는 중성적이거나 알칼리성 토양 환경에 적용할 경우 식물 성장에 적합한 약산성 토양으로의 전환을 야기할 수 있을 것이며, 이는 최적의 식물 성장과 영양 공급을 가능케 할 것이다. 또한 CEC의 상승은 토양이 필수 영양소를 유지하고 교환할 수 있는 능력을 향상할 수 있을 것이며, 이를 통해 식물 생산성 향상을 유도할 것이다. 이외에도 칼슘, 칼륨, 마그네슘의 증가는 식물의 다양한 생리적 과정을 촉진할 뿐만 아니라 토양의 구조적 안정성에 결정적이다. 이러한 요소들은 향후 미소생태계 구성, 양분 흡수, 그리고 전반적인 식물 대사 및 생태계 다양성에서 중요한 역할을 할 것이다.

유기 탄소 함량이 크게 증가한 것은 토양 비옥도와 미생물 활동이 개선되었음을 나타낸다. 유기 탄소는 영양의 저장고 역할을 하며, 수분 보유를 촉진하고 토양 구조를 강화하여 건강한 뿌리 개발을 촉진하기에 최근 이슈가 되고 있는 탄소 격리 효과와 더불어 본 연구의 핵심 결과물이 될 것이다.

유기물의 증가는 토양 유기 물질에 대한 이끼 처리의 긍정적인 영향을 강조하여 토양 구조, 수분 유지 및 영양 순환을 개선한 결과이다. 이를 통해 토양 건강과 생산성 회복에 도움을 주기 때문에 향후 퇴화되거나 황폐화된 토양에 본 연구 방식을 적용할 경우 긍정적인 효과를 기대할 수 있을 것이다.

또한 인산의 가용성이 향상되었다는 것은 식물로 하여금 보다 효율적으로 인 흡수를 가능케 할 수 있음을 증명한다. 인은 식물의 성장과 발달에 필수적

인 영양소이고, 황폐화된 토양에서는 공급이 제한되기에 인산의 가용성 증가는 영양 생물학적 가용성의 향상을 의미하며 식물과 생태계의 복원을 가능케 할 것이다.

위의 연구 결과에 근거하여 본 연구에서 선정된 이끼 3종을 USDA 토양 분류학에 따라 화산회토(Andisol)로 분류되는 scoria 토양의 건강성 회복을 위해 활용할 시, 시공 후 1년 만에 전후의 SOC는 70 % 이상 증가할 것으로 예측한다. 특히, 이끼 첨가 후 100일 동안의 변화가 급격할 것으로 추측한다. 이와 관련하여 Kyle D. Doherty et al.(2020)는 이끼 *Syntrichia ruralis*를 분쇄한 후, 삼베 조직에 생육한 결과, 이끼의 바이오매스가 30일 동안 1.5 %, 30~60일 사이에 7 %, 60~90일 사이에 12 % 증가하다가 일정 수준에서 평형을 유지한 결론을 도출했다. 따라서 본 복원 사업에서도 이끼의 탄소 저장량은 90~100일 동안 12 % 정도로 빠르게 증가하다가 평형을 유지할 것임으로 추측한다. 또한 이끼로 인한 더 나아가 오름의 이끼 활착을 통해 ACD(Aboveground Carbon Density, 지상 탄소 밀도)가 향상될 것으로 예측한다. Christopher D. Philipson et al.(2020)은 자연적으로 복원된 열대림과 인위적으로 복원된 열대림의 10년 ACD 회수율을 비교한 결과, 2.9 Mg/ha에서 4.4 Mg/ha로 50 % 이상 향상되었다. 특히 본 연구의 대상지인 도너리 오름은 2008년 이후부터 자연휴식년제를 실시하였으나 토양의 침식이 회복되지 않고 더 극심해지고 있으므로 이끼를 통한 복원 시공을 진행할 시 착수 10년 뒤 ACD가 50 % 이상 향상될 것으로 기대한다.

## 2절. 연구의 한계점 및 향후 연구과제

본 연구에서 이끼의 성장을 증대하거나 유지시키기 위해 극복해야 할 한계점이 분명히 존재한다. 첫째, 염기성 토양에서 이끼의 성장력을 증대시키기 위해 양액을 투입하거나 추가적인 활착조건을 조성하는 등의 정량적 연구가 필요하다. SiO<sub>2</sub>함량에 따른 분류에 의하면, 제주 오름은 염기성암을 모재로 한 토양으로 분류된다(최원준 외 1인, 2008). 또한 Henry S. Grover et al.(2019)은 화산재를 첨가하여 Biocrust를 생육한 결과, 알칼리성 토양에서 *Furaria hygrometrica*, *Bryum argenteum*의 성장이 억제될 수 있다는 가설을 제시하였다. 따라서 염기성 토양에서 이끼의 성장 속도가 저하되는지, 저하된다면 pH 조절, 수분, 영양상태 등의 요소를 고려하여 어떠한 조치를 취할 수 있는지에 대한 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다. 뿐만 아니라 이끼의 성장 속도를 증대시키기 위해 시행할 수 있는 방안에 대한 고찰이 필요하다. 둘째, scoria 토양층 상단에 이끼를 식재하더라도 scoria 자체의 입자간 점착력이 떨어지므로 강우 및 풍랑에 의한 침식을 방지하기 위해 이를 보완할 시공이 필요하다. 영구성과 지속가능성을 고려하였을 때, 이끼의 활착을 유지하고 토양의 침식을 방지하기 위해서 geotextile로 토양을 덮은 뒤, 이끼를 식재하는 방법을 도입할 수 있다. 뿐만 아니라 토양을 고정시킬 수 있는 뿌리체계를 갖춘 부처손 등의 초본이나 관목을 식재하는 방법을 도입할 수 있다. 이외에도 토양의 경사를 완화하기 위해 지평을 형성하는 구조물을 설치하는 방안이 필요할 경우, 도입을 고려할 수 있다. 셋째, 지속 가능성을 검증하기 위한 장기적인 관찰과 연구가 필요하다. 이끼를 4주간 토양에 처리한 결과들을 바탕으로 본 연구를 진행하였지만, 장기적인 관점에서의 토양 변화 또는 생태계에 미치는 영향은 관찰되지 못하였기에 반기 혹은 1년 이상의 장기 연구가 반드시 필요하다.

향후 이러한 연구를 연구를 지속하고 발전시켜 나가기 위해서는 보다 포괄적인 연구가 추가로 수행되어야 한다. 이끼 성장에 대한 pH의 영향뿐만 아니



라 기본 토양에 내재된 광물 조성, 미생물 활동 및 기타 생화학적 특성이 미치는 영향을 포함하여 이끼의 활착이 지역 동식물과 생태계에 의도하지 않은 결과를 초래하지는 않는지, 이끼의 적용에 사용되는 재료와 방법은 지속 가능한지 등의 여부 또한 연구되어야 한다. 결과적으로 이를 통해 주제에 대한 보다 포괄적인 관점을 향유할 수 있을 뿐만 아니라 이끼 재배 및 탄소 격리, 지속 가능한 생태 복원 분야로의 발전을 통해 선태식물에 의한 토양복원 효과 연구는 더 넓은 의미를 확립할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

### 국내문헌 및 서적

김준호, & 이현정. (2012). 이끼를 이용한 벽면녹화시스템의 열환경 평가 연구. 한국건축친환경설비학회 학술발표대회 논문집, 187-190.

안도현. (2019). 이끼를 활용한 공기정화 검증 시스템 제작. 한국산학기술학회논문지, 20(6), 587-591.

오은영, 오주아, 이세희, & 이소민. (2011). 이끼를 이용한 온습도 조절 효과 및 식생방음벽에 관한 연구. 한국환경교육학회 학술대회 자료집, 122-125.

오선중, 박민용, 김완두, & 임현의. (2016). 이끼필터를 이용한 안개 포집/제거 시스템. 대한기계학회 논문집 B 권, 40(7), 449-455.

김태호 (2003). “한라산과 다랑쉬오름 등산로의 답압에 의한 토양 압밀현상.” 한국지역지리학회지 9(2): 169-179.

문수형, et al. (2015). “1P-752: 제주도 스키리아의 물리화학적 특성에 관한 연구.” 한국공업화학회 연구논문 초록집 2015: 262-262.

임재영 (2022). “한라산국립공원지역 탐방로별 경관자원에 관한 연구.” 제주도연구 57: 179-207.

## 해외문헌 및 서적

America, S. S. S. o. (1997). Glossary of soil science terms, Soil Science Society of America.

Antoninka, A., et al. (2016). "Production of greenhouse-grown biocrust mosses and associated cyanobacteria to rehabilitate dryland soil function." *Restoration Ecology* 24(3): 324-335.

Barger, N. N., et al. (2006). "Impacts of biological soil crust disturbance and composition on C and N loss from water erosion." *Biogeochemistry* 77: 247-263.

Barger, N. N., et al. (2016). "Patterns and controls on nitrogen cycling of biological soil crusts." *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands*: 257-285.

Belnap, J., et al. (2011). "Aeolian and fluvial processes in dryland regions: the need for integrated studies." *Ecohydrology* 4(5): 615-622.

Belnap, J., et al. (2016). *Biological soil crusts as an organizing principle in drylands*, Springer.

Bowker, M. A., et al. (2008). "Revisiting classic water erosion models in drylands: the strong impact of biological soil crusts." *Soil Biology and Biochemistry* 40(9): 2309-2316.

Bowker, M. A., et al. (2013). "Hydrology in a patterned landscape is co-engineered by soil-disturbing animals and biological crusts." *Soil Biology and Biochemistry* 61: 14-22.

Bünemann, E. K., et al. (2018). "Soil quality-A critical review." *Soil Biology and Biochemistry* 120: 105-125.

Cambardella, C., et al. (2001). "Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on-ignition." *Assessment methods for soil carbon*: 349-359.

Castilla, Y. C., et al. (2021). "La restauración de biocostras: una herramienta clave para recuperar la funcionalidad de los ecosistemas áridos degradados." *Ecosistemas* 30(3): 2236-2236.

Chamizo, S., et al. (2017). "Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall." *Catena* 148: 117-125.

Chaudhary, V. B., et al. (2009). "Untangling the biological contributions to soil stability in semiarid shrublands." *Ecological Applications* 19(1): 110-122.

Cheng, C., et al. (2020). "Moss biocrusts buffer the negative effects of karst rocky desertification on soil properties and soil microbial richness." *Plant and Soil*: 1-16.

Chiquoine, L. P., et al. (2016). "Rapidly restoring biological soil crusts and ecosystem functions in a severely disturbed desert ecosystem." *Ecological Applications* 26(4): 1260-1272.

Doherty, K. D. (2019). *Producing and Deploying Biocrust Moss Materials for Ecological Restoration*, Northern Arizona University.

Elbert, W., et al. (2012). "Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen." *Nature Geoscience* 5(7): 459-462.

Eldridge, D. J. and J. F. Leys (2003). "Exploring some relationships between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion." *Journal of arid environments* 53(4): 457-466.

Eldridge, D. J., et al. (2020). "The pervasive and multifaceted influence of biocrusts on water in the world's drylands." *Global Change Biology* 26(10): 6003-6014.

Fageria, N. (2005). "Soil fertility and plant nutrition research under controlled conditions: Basic principles and methodology." *Journal of plant nutrition* 28(11): 1975-1999.

Fageria, N., et al. (2002). *Micronutrients in Crop Production* Adv Agron 77: 185-268.

Faist, A. M., et al. (2017). "Biological soil crust and disturbance controls on

surface hydrology in a semi-arid ecosystem." *Ecosphere* 8(3): e01691.

Ferrenberg, S., et al. (2018). "Biocrusts enhance soil fertility and *Bromus tectorum* growth, and interact with warming to influence germination." *Plant and Soil* 429: 77-90.

Gerke, J. (2022). "The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage." *Soil Systems* 6(2): 33.

Havrilla, C. A., et al. (2019). "Towards a predictive framework for biocrust mediation of plant performance: A meta-analysis." *Journal of Ecology* 107(6): 2789-2807.

Ives, C. M. (2016). Fire moss as a tool for post-wildfire ecosystem restoration, Northern Arizona University.

Jackson, T. A. (2015). "Weathering, secondary mineral genesis, and soil formation caused by lichens and mosses growing on granitic gneiss in a boreal forest environment." *Geoderma* 251: 78-91.

Kasimir, Å., et al. (2021). "Mosses are Important for Soil Carbon Sequestration in Forested Peatlands." *Frontiers in Environmental Science*: 383.

Kasimir, Å., et al. (2021). "Mosses are Important for Soil Carbon Sequestration in Forested Peatlands." *Frontiers in Environmental Science*: 383.

Kidron, G. J. and B. Büdel (2014). "Contrasting hydrological response of coastal and desert biocrusts." *Hydrological Processes* 28(2): 361-371.

Lal, R. (2016). "Soil health and carbon management." *Food and Energy Security* 5(4): 212-222.

Lange, O. and T. Green (2004). "Photosynthetic performance of the squamulose soil-crust lichen *Squammarina lentigera*: laboratory measurements and long-term monitoring of CO<sub>2</sub> exchange in the field." *Bibliotheca Lichenologica* 88: 363-392.

Lee, S.-B., et al. (2017). "Analysis of soil total nitrogen and inorganic nitrogen content for evaluating nitrogen dynamics." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 50(2): 100-105.

Li, Z., et al. (2018). "Diversity and ecological characteristics of bryophytes from peak cluster under the background of karst urban." *Bulletin of Botanical Research* 38(3): 433-443.

LIU, T., et al. (2017). "Carbonic anhydrase activity of six epilithic mosses and their underlying soil in the Puding karst area, Guizhou Province." *Carsologica Sinica*(2): 187-192.

Maharjan, B., et al. (2020). "Soil Health Gap: A concept to establish a benchmark for soil health management." *Global Ecology and Conservation* 23: e01116.

Mitchell, R. L., et al. (2021). "Cryptogamic ground covers as analogues for early terrestrial biospheres: Initiation and evolution of biologically mediated proto-soils." *Geobiology* 19(3): 292-306.

Nunes, M. R., et al. (2021). "The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon." *Soil Science Society of America Journal* 85(4): 1196-1213.

Oishi, Y. (2021). "Potential use of Sr isotope ratio to evaluate trace metal uptake in moss." *Ecological Indicators* 121: 107063.

Page, K. L., et al. (2020). "The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield." *Frontiers in sustainable food systems* 4: 31.

Rosentreter, R. (2020). "Biocrust lichen and moss species most suitable for restoration projects." *Restoration Ecology* 28: S67-S74.

Sancho, L. G., et al. (2016). "Carbon budgets of biological soil crusts at micro-, meso-, and global scales." *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands*: 287-304.

Schoenholtz, S. H., et al. (2000). "A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities."



Forest ecology and management 138(1-3): 335-356.

Shen, J., et al. (2018). "Ecological restoration of eroded karst utilizing pioneer moss and vascular plant species with selection based on vegetation diversity and underlying soil chemistry." *International journal of phytoremediation* 20(14): 1369-1379.

Su, Y.-g., et al. (2012). "Characteristics of carbon flux in two biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China." *Catena* 96: 41-48.

Valentine, G. A., et al. (2005). "Scoria cone construction mechanisms, Lathrop Wells volcano, southern Nevada, USA." *Geology* 33(8): 629-632.

Varela, Z., et al. (2021). "Optimising artificial moss growth for environmental studies in the Mediterranean area." *Plants* 10(11): 2523.

Veluci, R. M., et al. (2006). "Nitrogen fixation and leaching of biological soil crust communities in mesic temperate soils." *Microbial Ecology* 51: 189-196.

Wang, W., et al. (2023). "Moss-dominated biocrust-based biodiversity enhances carbon sequestration via water interception and plant-soil-microbe interactions." *Iscience* 26(1): 105773.

Weber, B., et al. (2022). "What is a biocrust? A refined, contemporary

definition for a broadening research community.“ *Biological Reviews* 97(5): 1768-1785.

Wiesmeier, M., et al. (2019). “Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales.“ *Geoderma* 333: 149-162.

Yang, X., et al. (2019). “Moss-dominated biological soil crusts improve stability of soil organic carbon on the Loess Plateau, China.“ *Plant, Soil and Environment* 65(2): 104-109.

Zhang, J., et al. (2009). “The influence of biological soil crusts on dew deposition in Gurbantunggut Desert, Northwestern China.“ *Journal of Hydrology* 379(3-4): 220-228.

Zhang, X., et al. (2021). “Effects of land use on slope runoff and soil loss in the Loess Plateau of China: A meta-analysis.“ *Science of The Total Environment* 755: 142418.

Zhang, X., et al. (2017). “Responses of antioxidant defense system of epilithic mosses to drought stress in karst rock desertified areas.“ *Acta Geochimica* 36: 205-212.

Zhang, Y., et al. (2016). “Interactions of biological soil crusts with vascular plants.“ *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands*: 385-406.

Zhang, Y., et al. (2006). “The microstructure of microbiotic crust and its influence on wind erosion for a sandy soil surface in the Gurbantunggut Desert of Northwestern China.” *Geoderma* 132(3-4): 441-449.

Christopher D. Philipson, Mark E. J. Cutler, Philip G. Brodrick, Gregory P. Asner, Doreen S. Boyd, Pedro Moura Costa, Joel Fiddes, Giles M. Foody, Geertje M. F. van der Heijden, Alicia Ledo, Philippa R. Lincoln, James A. Margrove, Roberta E. Martin, Sol Milne, Michelle A. Pinard, Glen Reynolds, Martijn Snoep, Hamzah Tangki, Yap Sau Wai, Charlotte E. Wheeler, David F. R. P. Burslem(2020). “Active restoration accelerates the carbon recovery of human modified tropical forests” , *Science*, 369(6505): 838-841.

Elisabeth M. Biersma, Peter Convey, Rhys Wyber, Sharon A. Robinson, Mark Downton, Bart van de Vijver, Katrin Linse, Howard Griffiths, Jennifer A. Jackson(2020). “Latitudinal Biogeographic Structuring in the Globally Distributed Moss *Ceratodon purpureus*” , *Frontiers in plant science*.

Hengkang Xu, Yingjun Zhang, Xinqing Shao, Nan Liu(2022). “Soil nitrogen and climate drive the positive effect of biological soil crusts on soil organic carbon sequestration in drylands: A Meta-analysis” , *Science of the Total Environment*.

Henry S. Grover, Matthew A. Bowker, Peter Z. Fulé(2019). “Improved, scalable techniques to cultivate fire mosses for rehabilitation” , *Restoration Ecology*, 28(52): S17-S14.

Kyle D. Doherty, Henry S. Grover, Matthew A. Bowker, Rebecca A. Durham, Anita J. Antoninka, Philip W. Ramsey(2020). “Producing moss-colonized burlap fabric in a fog chamber for restoration of biocrust” , Ecological Engineering, 158.

O. L. Lange(2003). “Photosynthesis of Soil-Crust Biota as Dependent on Environmental Factors” ,Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management, pp. 217-240.

Wilton R. Sala-Carvalho, Francisco P. Montessi-Amaral, Marisia P. Esposito, Richard Campestrini, Magdalena Rossi, Denilson F. Peralta & Claudia M. Furlan(2022). “Metabolome of *Ceratodon purpureus*(Hedw.) Brid., a cosmopolitan moss: the influence of seasonality” , Planta, 255(77).

Xiao-Meng Yao, Matthew A. Bowker, Bo Xiao(2020). “Estimation of annual CO<sub>2</sub>effluxofmossbiocrustthroughmeasuringandsimulatingitsrespirationrateinasemiaridclimate” ,Geoderma,376.

Xiao-Meng Yao, Bo Xiao, Guo-Peng Wang, Xin-Xin Zhang, Sheng-Long Li(2020). “Distribution characteristics of exogenous carbon in different carbon fractions in biocrusts-covered soil” , The journal of applied ecology, 31(11): 3737-3748.

## ABSTRACT

### Soil restoration by using moss

- a case study of Donary Oreum in Jeju Island -

**Park, Jae-Hong**

Department of Landscape Architecture  
Graduate School of Environment Studies  
Seoul National University

Jeju Island's oreums not only possess topographical features that are not easily found elsewhere, but also have high ecological education and tourism resource value due to their natural beauty, diverse flora, history, humanities, and educational value (Jeju Research Institute, 2019). However, due to the increasing awareness and visitation of tourists to these outstanding natural landscapes, the hill is being damaged and the ecosystem is being fragmented.

Restoration utilizing bryophytes (lichens) is ideal for restoring dry soils because they absorb water and nutrients through their leaves and can withstand long periods of dryness (Vanderpoorten & Goffinet 2009). Furthermore, lichens can facilitate the reproduction of cyanobacteria and geophytes, further enhancing biological communities and biota in restored areas (Antoninka et al. 2016), so establishing lichens early in the restoration process can be a valuable first step in reestablishing more complete biological communities.

The purpose of this study is to conduct a restoration study using mosses by considering the physicochemical characteristics of the soil in the study site, focusing on the soil environment in Donneri oreum, Jeju Island. The

geographical location of Donneri oreum is 33° 19'32.51"N, 126° 19'18.70"E. The altitude is 439 meters above sea level, and the total area is about 300,000 m<sup>2</sup> . There are hoof craters and circular craters, respectively, and the moss layer has been dug up by tourists and damaged by cattle and horse grazing. Therefore, Donneri oreum has been in a natural rest year for 15 years from 2008 to the present to preserve the natural ecosystem, and access to the area is prohibited, so we obtained permission before conducting the research.

Soil samples were collected from the topsoil at a depth of 10 cm for a total of 26 points over four trips from August to October 2022 and two trips from March to April 2023, and then 500 g of each was transported to the laboratory to be used as an analysis sample, and the samples from the damaged area were divided into a comparison group and a control group to grow moss in the comparison group. The mosses used were frost moss (*Rhacomitrium canescens*), woolly moss (*Hypnum plumaeforme* Wilson), and roof red moss (*Ceratodon purpureus*), which are native to the study site, and the same environment, conditions, and replicates were used for each species. To minimize contamination during sampling, equipment was replaced with new equipment after each sampling, and soil analysis was performed using nitrogen analyzers (OPIS) and spectrophotometers (Analyticyena).

The results showed that the mosses on Donnery Crag had caused significant improvements in several key soil properties. Soil pH, cation exchange capacity (CEC), calcium (Ca), organic carbon, potassium (K), magnesium (Mg), organic matter, and free phosphorus all showed significant increases after moss application. The pH adjustment effect will cause a shift to a slightly acidic soil suitable for plant growth when applied to a neutral or

alkaline soil environment, which will allow for optimal plant growth and nutrient supply. Elevated CEC can also improve the soil's ability to retain and exchange essential nutrients, which can lead to increased plant productivity. In addition, increases in calcium, potassium, and magnesium are crucial for the structural stability of the soil, as well as facilitating various physiological processes in plants. Finally, we found a significant increase in organic carbon content, which indicates improved soil fertility and microbial activity. Organic carbon acts as a reservoir of nutrients and promotes healthy root development by promoting water retention and strengthening the soil structure, making it a key outcome of this study, along with carbon sequestration, which has become an increasingly important issue. These factors will play an important role in future microecosystem composition, nutrient uptake, and overall plant metabolism and ecosystem diversity.

The main significance of this study is to identify ways to restore areas that cannot be restored naturally by utilizing mosses, which are a component of the target ecosystem, in the Donor Forest on Jeju Island, where restoration is underway due to a long period of natural rest year. Through the results of this study, it is judged that the treatment of moss in the soil environment within the damaged ecosystem can have a positive effect on various soil indicators necessary for ecosystem restoration, and it is expected that it can be an ecological restoration method with high stability in future ecological restoration.

■ Keyword: Moss, Volcanic Cone, Soil Restoration, Soil Nutrition, Phytoremediation, Jeju Island

■ Student Number: 2021-20311