

산불이 지질과 토심의 차이에 따른 산림토양 미생물 군집 활성도에 미치는 영향에 대한 연구

김지슬¹ · 김준호² · 정형철³ · 이은영^{4*}

¹수원대학교 환경공학과 박사과정, ²수원대학교 환경공학과 석사과정, ³수원대학교 데이터과학부 교수, ⁴수원대학교 환경에너지공학과 교수

Effect of Forest Fire on the Microbial Community Activity of Forest Soil according to the Difference between Geology and Soil Depth

Ji Seul Kim¹ · Jun Ho Kim² · Hyeong Chul Jeong³ · Eun Young Lee^{4*}

¹Doctoral Program, Department of Environmental Engineering, The University of Suwon

²Master's Degree Program, Department of Environmental Engineering, The University of Suwon

³Professor, Division of Data Science, The University of Suwon

⁴Professor, Department of Environmental and Energy Engineering, The University of Suwon

Abstract

The effects of forest fires on the activity of microbial communities in topsoil and subsoil were investigated. Samples were collected from Korean forest soils comprising mainly igneous and sedimentary rocks. Analysis of beta-glucosidase, found higher microbial activity in sedimentary rocks than in igneous rocks. Enzyme activity was not observed immediately after fire, but was restored over time. The enzyme activity of subsoil was inhibited by 33~46% compared with that in the topsoil, regardless of soil damage. The effect of fire on the availability of microbial substrate was investigated using Eco-Plate. The percentages of average well color development values of damaged and normal topsoil were 52.7~56.8% and 62.3~83.6%, respectively. Forest fires appear to affect the diversity and substrate availability of the subsoil microbial community by accelerating the decomposition of soil organic matter. The Shannon index, representing microbial biodiversity, was high in the topsoil of all samples; it was higher for soil microorganisms in sedimentary rocks than in igneous rocks, and higher in topsoil than in subsoil.

Keywords: topsoil, subsoil, forest fire, soil microbial community activity, normal soil, damaged soil

초 록

화성암과 퇴적암으로 이루어진 국내 산림토양 중 표토와 심토에서 채취된 시료의 미생물군집 활성도에 미치는 산불의 영향을 알아보았다. 베타글루코시다아제의 분석결과, 화성암보다 퇴적암의 미생물군집에서 높게 나타났다. 산불 발생 초기에 효소 활성이 관찰되지 않았으나, 시간이 경과됨에 따라 활성이 회복되었다. 또한, 토양의 훼손여부와 상관없이 심토는 표토에 비해 활성이 33~46% 저해되었다. EcoPlate를 이용하여 산불이 미생물 기질이용성에 미친 영향을 알아보았다. 정상토와 훼손토의 평균반응구발색도 값 백분율은 표토에서 각각 52.7~56.8% 및 62.3~83.6%로 나타났다. 산불 발생은 토양 유기물의 분해를 촉진함으로써 심토미생물군집의 다양성 및 기질이용성에 영향을 준 것으로 보여진다. 미생물군집의

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Eun Young Lee
E-mail: ley@suwon.ac.kr

Received: 23 November, 2022

Revised: 14 December, 2022

Accepted: 19 December, 2022

© 2023 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

종다양성지수인 샤논 인덱스(Shanon index, H)는 모든 시료의 표토에서 높게 나타났다. 샤논 풍부도는 퇴적암 토양미생물이 화성암에 비하여 높게 나타났으며, 표토가 심토보다 높게 나타났다.

주요어: 표토, 심토, 산불, 토양미생물군집 활성도, 정상토, 훼손토

서론

토양은 인간 삶의 질을 결정하는 기본 인자이며, 농작물 생산성에 중요한 역할을 한다. 토양이 오염될 경우 인간의 거주 및 농작물의 생산에 악영향을 미치고, 토양의 유실로 인하여 토양의 품질 및 생산성 저하도 발생할 수 있다.

토양에는 많은 토양 미생물들이 분포하며, 이들은 동식물을 이롭게 한다. 토양 내 영양물질의 순환을 촉매하여 식물의 생장을 촉진하는 토양 효소의 대부분은 식물, 동물, 미생물에 의하여 생산된다(Almeida et al., 2015). 따라서, 토양의 생태 기능 상태가 높을수록 효소활성도가 높게 나타나는 것으로 알려져 있다. 토양 효소활성도는 탈수소효소, 베타 글루코시다아제, 포스파타아제 등을 주로 이용하며, 그 중 베타 글루코시다아제는 토양 내 섬유소 분해 활성에 관여하는 효소이다(Benjamin et al., 2002). Eivazi and Tabatabai(1988)와 Debosz et al.(1999)의 연구에 따르면 토양에서 섬유소 분해에 관여하는 효소 중에는, 베타 글루코시다아제가 쉽게 검출되고 가장 풍부하다고 하였다. 글리코시다아제는 글리코사이드의 가수분해를 촉진하는 효소이며, 알파-와 베타-글루코시다아제가 토양에 널리 분포되어 있다. 알파-글루코시다아제는 알파-D-글루코피라노사이드(α -D-glucopyranosides)를 가수분해하고, 베타 글루코시다아제(β -glucosidase, cellobiase)는 셀로비오스를 가수분해(Martinez and Tabatabai, 1997; Utobo and Tewari, 2015)하여 최종 산물로 포도당을 생성한다(Almeida et al., 2015; Merino et al., 2016). 토양 효소 중 베타 글루코시다아제가 가장 일반적이고, 종속영양생물인 토양 미생물의 성장에 중요한 탄소순환을 통한 에너지원의 제공에 역할을 하기 때문에 토양 품질의 지표로 활용된다(Martinez and Tabatabai, 1997; Merino et al., 2016). 베타 글루코시다아제 활성에 영향을 미치는 인자는 pH, 토양 수분 함량, 토양 깊이, 중금속 등이 있다.

다양한 서식지 즉, 퇴적토에서 해수까지, 그리고 빈영양 지하수에서 토양 및 비료로 오염된 다양한 환경에 서식하는 종속 영양 미생물을 스크리닝하는 방법 중 하나가 군집수준의 생리학적 프로파일링(community-level physiological profiling, CLPP)이다. 생리학적 프로파일링은 군집의 기능적 다양성, 기능적 잠재력 및 기질을 이용하는 프로파일링을 통한 대사활동의 특성화를 비교하는 기법이다. 유일 탄소원으로 31개의 기질과 산화환원 염료를 포함한 BIOLOG EcoPlate™ (Biolog Inc., Hayward, USA)에 환경시료를 접종하여 배양한 후 발색반응을 통해 분석된다. 다양한 토양 시료로부터 미생물군집의 대사활동을 분석함으로써 토양의 잠재적 기능을 알아볼 수 있다.

일반적으로 토양은 크게 화강암, 퇴적암, 변성암으로 구분된다. 우리나라는 전국적으로는 비교적 유사한 기후와 식생 분포를 보이나, 지질 및 지형이 복잡하여 분포 역시 다양하게 되어있다. 특히, 지표환경의 변화가 심한 인셉티솔(inceptisol)이 전체 면적의 64.8%에 달하는 침식과 유실이 심각한 상황이다. 이는 우리나라의 기후환경이 여름철 고온 다습하고 집중 강우가 내리는 특성에서 기인하며 이를 통해 토양층의 유기물 축적이 어려워 토양형성 작용을 약화시키고 겨울철 결빙도 이를 촉진시켜준다. 모래함량은 논토양, 밭토양, 산림토양 순으로 증가하고 미사와 점토 함량은 반대로 감소한다. 토양의 깊이가 증가할수록 모래함량도 증가하며, 점토함량은 해안지역과, 석회암토양, 퇴적암이 발달한 토양에서 상대적으로 높게 나타난다. 토심은 토양의 수직적 깊이를 말하는데, 유효토심은 식물이 뿌리를 내려 땅속에서 호흡, 물과 양분을 흡수할 수 있는 깊이를 말하므로 깊을수록 식물의 성장에 유리하다. 국내 산림토양의 토심은 기후, 생물, 지형, 모암, 인위적 간섭 등으로 만들어졌으며, 평균 51 cm로 다소 얇은 편이다.

우리나라의 지질을 살펴보면 2/3가 화강암과 변성암으로 구성되어있다. 산림토양의 89% 이상을 차지하는 갈색 산림토양은 주로 화강암 또는 화강편마암을 모암으로 하여 발달한 토양이며, 특징으로는 최상단부에 유기물이 분해된 부식물이 표토 가까이 집적되어 짙은 검은색으로 나타나며, 심토층으로 갈수록 광물질 입자도 굵어지면서 토양의 색깔이 밝아진다(The National Atlas of Korea II, 2020). 화강암은 퇴적암이나 변성암에 비하여 유기물 함량이 다소 낮아 식물의 성장 측면에서는 다소 불리하다.

본 연구에서는 국내의 화성암 및 퇴적암이 주로 분포된 산림에서 토양을 채취하여 토양의 종류 및 토심에 따른 각 토양의 미생물군집 활성도 및 그에 따른 식물생장촉진 영향을 알아보고자 수행되었다. 또한, 산불과 같은 자연재해로 인하여 훼손된 토양과 훼손되지 않은 정상토 내의 미생물을 비교함으로써 환경 변화인자가 토양미생물군집의 기질이용성과 효소(베타글루코시다아제) 활성에 미친 영향을 알아보고자 하였다.

실험 방법

토양의 시료 채취

실험에 사용한 토양은 국내 산림 토양으로 화성암으로 이뤄진 2곳과 퇴적암 2곳이며, 토양별로는 각 지점은 정상토 1곳과 산불로 훼손된 토양 1곳이 포함되도록 구성하여 실험하였다. 산불 화재가 발생하여 소실된 산림 토양 2개 지점은 2020년 4월과 12월에 각각 100 ha 정도 피해를 받은 경상북도 안동시(101)와 500 ha 이상의 피해를 받은 울산광역시 울주군(42)이다. 그리고 산불로 피해가 없는 산림 토양 2개 지점은 경기도 양평시(34)와 경상북도 영덕군(68)이며, 각 토양을 채취한 위치는 Table 1에 표시하였다. 4개 지점의 토양은 표토(0~30 cm)와 심토(40~60 cm)으로 구분하여 채취하였고, 모든 시료는 4°C에서 보관되었다. 시료의 번호는 임의로 지정되었다.

Table 1. Soil sample characteristics and location and coordinates collected

Sample number	Type of rock	Location	Coordinate
34	Igneous rock	4-1, Jayeon-ri, Gaegun-myeon, Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do, Republic of Korea	37.535068, 127.624576
42	Igneous rock	100, Samjeong-ri, Cheongnyang-eup, Ulju-gun, Ulsan, Republic of Korea	35.490210, 129.235989
68	Sedimentary rock	95-1, Hwasu-ri, Yeongdeok-eup, Yeongdeok-gun, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea	36.437774, 129.384878
101	Sedimentary rock	109, Ingeum-ri, Pungcheon-myeon, Andong-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea	36.527987, 128.548379

베타글루코시다아제 효소 활성 검사

베타글루코시다아제는 QuantiChrom™ β -glucosidase Assay Kit(BioAssay systems, USA)를 이용하였다. 분석 버퍼용액 200 μ L와 베타 엔피지(β -NPG substrate) 기질 8 μ L (final 1.0 mM)을 혼합하여 작업용액을 제조하였다. 각 4개 지점의 표토와 심토 각각 0.5 g 씩에 50 mmols/L의 인산 완충용액(pH7.0) 0.5 mL를 넣고 혼합한 후 상등액을 취하여 작업용액과 적절히 혼합하여 96 반응구 평판(well plate)에 분취하였다. 반응액을 포함하는 평판을 Multiskan sky(Thermo scientific,

USA)를 이용하여 405 nm에서 흡광도를 측정하고, 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} & \text{효소활성도}(\mu\text{mole PNP/g dry soil} \cdot \text{hr}) = \\ & \frac{OD_{20} - OD_0}{OD_{cal} - OD_{H2O}} \times \frac{0.25U}{\text{mL}} \times \frac{\mu\text{mol PNP}}{1U \cdot \text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{\text{상등액의 부피 (mL)}}{\text{시료건조중량 (g)}} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, OD₀ : OD 405 nm에서 측정한 0분 때의 시료 값

OD₂₀ : OD 405 nm에서 측정한 20분 때의 시료 값

ODcalibrator : OD 405 nm에서 측정한 20분 때의 값

OD_{H2O} : OD 405 nm에서 측정한 D.W 220 μL를 넣은 셀의 20분 때의 값

토양 미생물의 기질 이용도

미생물의 기질 이용성을 알아보기 위해 BIOLOG EcoPlate™ (Biolog Inc., Hayward, CA)를 사용하였다. EcoPlate는 96 반응구로 구성된 마이크로평판(microplate) 내에 31종의 다양한 각기 다른 탄소화합물의 기질과 기질이 포함되지 않은 대조군이 3반복으로 되어있으며, 기질이 포함된 반응구에는 얇게 코팅된 상태로 건조되어있다. 31개의 기질은 탄수화물(n=10)계열, 아미노산(n=6)계열, 카르복실산(n=7)계열, 폴리머(n=4)계열, 페놀계화합물(n=2)계열과 아민(n=2)계열인 6개 그룹으로 되어있다(Sala et al., 2010).

이들 탄소원에 환경 시료 현탁액을 접종하고 배양하면서 시료 내의 미생물군집이 기질을 유일 탄소원으로 이용하여 세균성 호흡이 일어나면 반응구에 함유되어 있던 테트라졸리움 염색약(tetrazolium dye)이 보라색으로 발색되도록 고안되어있다.

모두 4개 지점에서 채취한 표토(0~30 cm)와 심토(40~60 cm) 시료가 이용되었다. 토양 시료와 멸균수를 1:10(w/w)의 비율로 희석한 후 200 rpm으로 30분간 교반한 후 정치시켜 0.45 μm 주사기필터로 거른 상등액을 EcoPlate(Biolog, USA)의 각각의 반응구에 150 μL씩 접종하였다. 이후, 접종된 EcoPlate를 상온에서 120시간 동안 배양하면서 24시간마다 각 반응구에 배양된 시료의 색을 측정하였다. 색 변화는 Multiskan sky(thermo scientific, USA)을 이용하여 595 nm 파장에서 측정하였고 이 값을 이용하여 평균반응구발색도(average well color development, AWCD)를 계산하였다. 계산식은 다음과 같다(Garland and Mills, 1991). 평균반응구발색도는 미생물 군집의 일반적인 대사활성도의 잠재성을 알려주며, EcoPlate™의 총 생물활성도를 의미하게 된다(Kenarova et al., 2014).

$$AWCD = [\sum(C - R)] / n \quad (2)$$

여기서, C : 각 기질이 함유된 반응구의 590 nm에서의 흡광도 값

R : 대조구의 590 nm에서의 흡광도 값

n : 기질의 수, 31

기질 풍부도(substrate richness, SR)는 산화된 기질의 수이며, 이는 120시간 배양 후 수정된 OD값이 적어도 0.25 이상인 총합을 의미한다(Farkas et al., 2020).

의미생태학에서 종다양성을 나타내는 지수인 샤논 인덱스 값은 다음과 같은 식으로 계산하였다(Ian and Peter, 2003).

$$H = -\sum P_i \cdot \ln P_i \quad (3)$$

여기서, H : 샤논 인덱스(Shanon index)

Pi : 590 nm에서의 전체 반응구의 발색 값에서 각 반응구에서의 발색 값의 비

샤논 균등도(Shanon eveness, E) 값은 샤논 인덱스(Shanon index, H)로부터 유도되는데, Jałowiecki et al.(2016)에 의해서 기질 풍부도(substrate richness)에 근거하여 계산된 값이다.

$$E = H / \ln SR \quad (4)$$

여기서, E : 샤논 균등도(Shanon eveness)

H : 샤논 인덱스(Shannon index)

SR : 기질 풍부도(substrate richness)

샤논 풍부도(Shanon richness)는 점유된 지역에서 이용되는 기질의 총 개수를 의미한다.

또한, 배양 5일의 각 well의 OD값을 아래의 식을 이용하여 기능적 다양성% (% Functional Diversity), 표본 내 결과의 변동성% (% Variation of Results within Sample), 유사도% (% Similarity, SSM)를 계산하였다. 계산식은 아래와 같다.

$$\% \text{ Variation of Results within Sample} = 100 * i/31 \quad (5)$$

여기서, i : 시료의 3반복수의 결과 값이 모두 양성이거나 모두 음성이 아닌 탄소 공급원의 수

즉, 시료의 3반복수의 결과 값이 모두 양성이거나 모두 음성이 아닌 시료의 비율은 실험결과의 일관성이 낮을수록 크게 나오게 된다.

$$\% \text{ Similarity (SSM)} = 100 * (a+d) / (a+b+c+d) \quad (6)$$

여기서, a : 시료 A와 시료 B에 모두 사용된 탄소 공급원의 수

b : 시료 A와 시료 B에 모두 사용되지 않은 탄소 공급원의 수

c : 시료 A에는 사용되었으나 시료 B에 사용되지 않은 탄소 공급원의 수

d : 시료 A에는 사용되지 않았으나 시료 B에 사용된 탄소 공급원의 수

실험 결과

지질 및 토심의 차이에 따른 토양미생물의 베타글루코시다제의 활성 비교

산림토양의 지질 및 토양의 깊이의 차이에 따른 토양미생물의 베타글루코시다아제 활성을 측정한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 4개의 지점 중 정상토로 이루어진 34지점과 훼손토로 이루어진 42지점은 화성암이 주종인 지역이었다. 이 중 산불로 인한 훼손토 42지점은 베타글루코시다아제의 활성이 없는 것으로 나타났다. 42지점은 산불로 500 ha 이상의 면적에서 임목이 소실된 심각한 훼손이 있던 지역으로 토양시료는 산불 발생 후 7개월이 경과된 시기에 채취되었다. 시료 채취 지역은 화재 과정에서 낙엽을 모두 태워버리고 불모화된 토양이었으며, 미생물 탄소원으로서의 섬유소가 거의 없어진 환경에서 서식하게 된 미생물 군집이 섬유소 분해효소의 기능이 불필요해진 결과로 해석될 수도 있다.

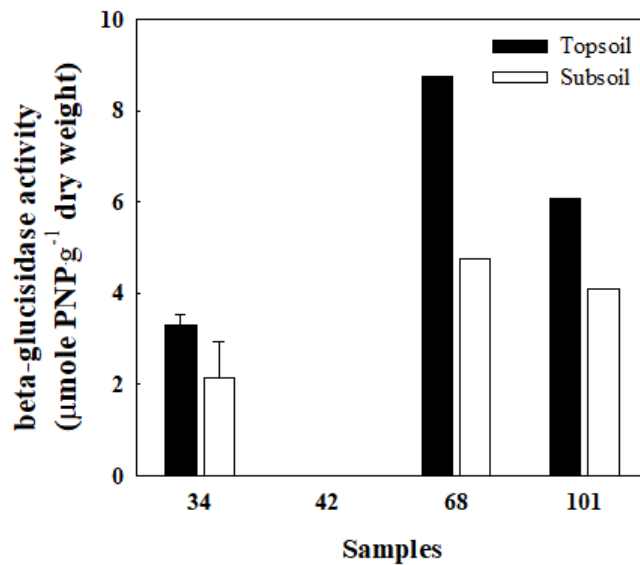


Fig. 1. The β -glucosidase activity of soil microorganisms according to the rock type and soil depth.

정상토로 이루어진 68지점과 산불로 인한 훼손토로 이루어진 101지점은 모두 퇴적암이 주종으로 되어있다. 42지점과는 다르게 101지점에서는 효소활성이 표토에서 6.08 $\mu\text{mole PNP/g dry weight}$ 이고, 심토에서는 4.08 $\mu\text{mole PNP/g dry weight}$ 로 분석되었다. 101지점은 화재 후 15개월이 경과되며 토양의 훼손이 회복되고 있음을 볼 수 있다. 지질의 종류와 상관없이 정상 토양일 경우 34지점(화성암) 및 68지점(퇴적암)에서 표토보다 심토에서의 베타글루코시다아제 활성이 각각 34.9% 및 45.8%가 감소하였다. 또한, 화성암 지역보다 퇴적암지역의 표토의 토양미생물 군집의 생물학적 활성이 심토에 비하여 더욱 활발하여, 토양의 훼손여부와 상관없이 심토의 효소활성도는 표토의 45.8% (68번, 정상토) 및 32% (101번, 훼손토)로 저하되고 있음을 보여주었다. 즉, 표토의 미생물 활성도는 지질종류의 차이와 무관하며, 훼손된 후 시간이 경과된 토양에서 심토에 비하여 높게 나타났다.

Table 2의 각 시료 채취 지점의 물리화학적 특성을 살펴본 결과, 기공율은 화성암보다 퇴적암이, 심토보다 표토에서 큰 값으로 나타났다. 식물의 생육은 토양질에 기상과 액상의 비율이 클수록, 즉 기공율이 클수록 유리하기 때문에 화성암의 토양에 비하여 퇴적암이 식물생육에 유리하고, 토양 내 미생물 생육에도 적합함을 알 수 있다. 채취된 토양의 토성은 식물의 생육에 적합한 양토(loam)질을 기본으로 하고 있다. 토양의 수분함량은 시료 채취 후 경과시간이 다소 차이가 있어

정확한 판단을 내리기는 어려웠다. 토양의 EC값은 pH에 저항하는 완충력과 양분을 보유하는 보비력을 의미하므로, 그 값이 커질수록 비옥도 값이 높아지므로 작물을 안정적으로 재배하기에 적합하다. 본 연구에서 퇴적암의 표토(68번 표토)에서 매우 큰 EC값을 보였으며, 이는 아래 Figs. 1~3의 모든 결과에서 68지점 시료가 다른 화강암 및 휘손된 시료보다 큰 효율성도, 평균반응구발색 값 및 종다양성지수 값을 나타내는 경향성을 EC값에서 원인을 찾을 수 있다.

Table 2. Collection site and physicochemical properties of soil samples

Sample number	34		42		68		101	
Type of rock	Igneous rock		Igneous rock		Sedimentary rock		Sedimentary rock	
Soil classification	loam		Sandy loam		Sandy loam		Silt loam	
Sample location	Topsoil	Subsoil	Topsoil	Subsoil	Topsoil	Subsoil	Topsoil	Subsoil
Effective porosity	5.5	5.5	17.5	25	23	23	19	16
Mineral composition and clay content (%)			Quartz 22.1%	Quartz 22.1%			Quartz 18.2%	Quartz 34.1%
	Quartz 42.2%	Quartz 42.1%	Microcline 18.6	Microcline 18.6		Quartz 35.8%	Microcline 16.4	Clays 46.7
	Microcline 31.5	Microcline 19.3	Clays 22.9	Clays 22.9	Quartz 20.4%	Clays 11.5	Clays 50.6	Albite 19.3
	Kaolin 26.2	Kaolin 24.5	Albite 36.3	Albite 36.3	Albite 79.6	Albite 52.7	Albite 14.9	Illite 31.7
	Clays 26.2	Clays 24.5	Illite 17.3	Illite 17.3		Illite 11.5	Illite 38.4	Chlorite 15
		Albite 14.2	Vermiculite 5.6	Vermiculite 22.9			Chlorite 12.2	
Water content (%)	48.07	46.74	41.53	43.97	46.97	45.85	45.93	43.60
pH	3.73	3.87	4.77	4.95	4.36	4.69	4.83	4.66
EC (μs)	53	32	18	14	143	28	31	15
Temperature (°C)	18.7	19.1	19.7	19.8	19.2	19.4	19.8	19.3
Unit weight (kg/m ³)	848.30	977.61	1,100.05	1,229.06	1,386.82	1,729.89	1,393.86	1,404.20

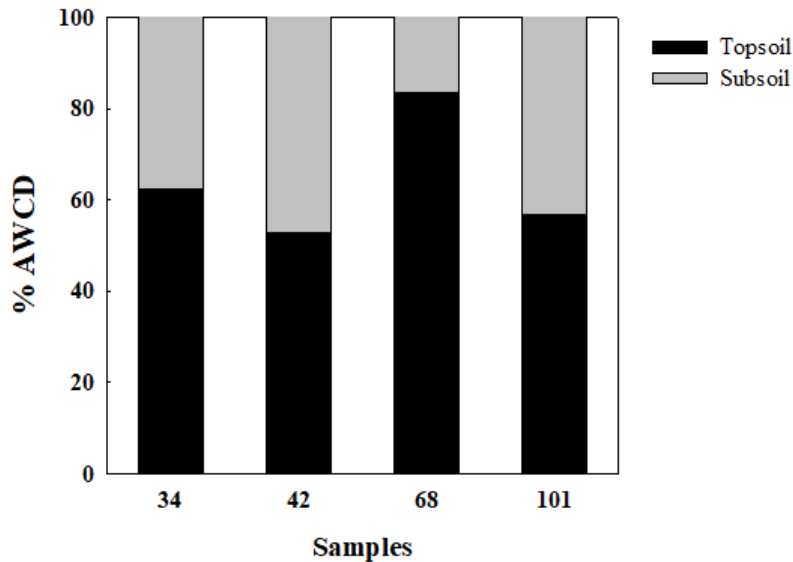


Fig. 2. Relative percentage of AWCD by soil rock type, soil depth, and soil degradation status.

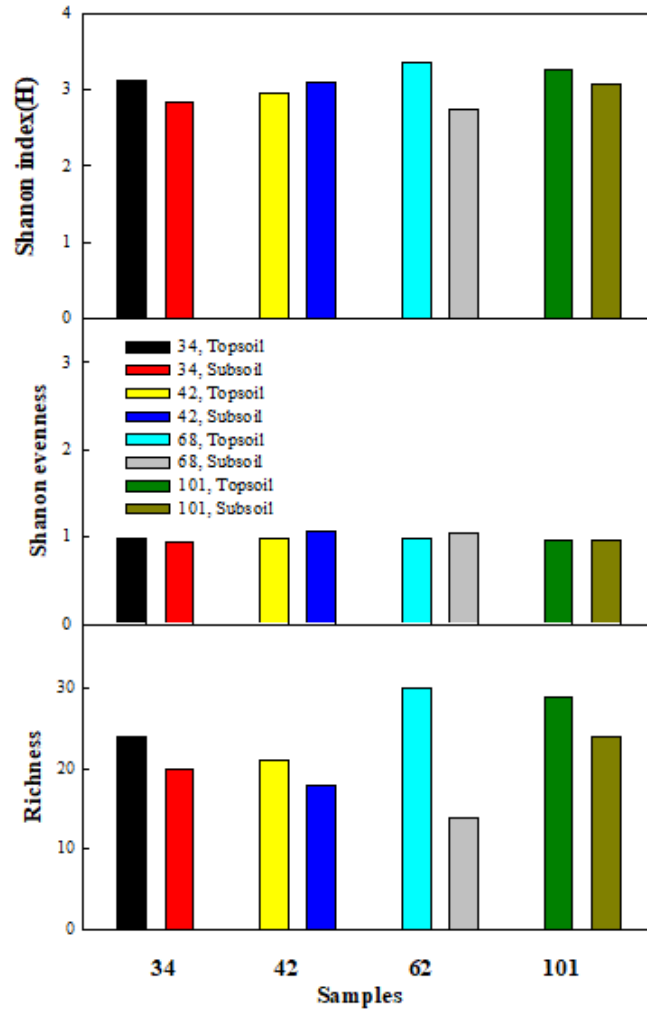


Fig. 3. Shanon index, Shanon evenness, and richness of soil samples.

지질 및 토심의 차이에 따른 토양미생물의 기질 이용성 비교

토양의 암석성분 및 토양의 깊이에 따른 차이, 그리고 산불로 인한 훼손여부가 토양미생물의 군집수준의 생리학적 프로파일링에 미치는 영향을 알아보았다. 각 토양 시료의 혼탁액을 EcoPlate에 접종하여 120시간동안 배양하며 얻은 결과를 통해 평균반응구발색도를 계산하였다. 각각의 반응구의 평균반응구발색도를 100%으로 환산해서 비교 분석한 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 산불로 훼손된 42지점과 101지점에서 100%로 환산한 평균반응구발색도 값은 표토의 값이 각각 52.7%, 56.8%으로 나타났다. 이는 지표화재의 결과 유기물의 분해가 이루어지며 미생물이 서식하기 어려운 심토 환경에 유기물이 공급되면서 미생물이 서식할 수 있는 환경으로의 변화가 이루어지면서 심토의 기질이용성이 증가한 것으로 사료 된다. 반면, 정상토의 경우 표토의 평균반응구발색도 백분율은 62.3~83.6%로 암석의 종류와 관계없이 더 높은 기질이용성을 보였다. 또한, 정상토의 경우에는 암석의 종류와 상관없이 표토 미생물의 기질이용도 활성이 더 높게 나타났다. 이는 표토 미생물의 효소활성도가 심토보다 높은 Fig. 1의 결과와도 유사하다. 또한, 기질이용성의 차이는 암석의 종류에 따라 차이가 있어, 퇴적암에서의 기질이용도 활성이 화성암에서 보다 뚜렷하게 나타나 표토의 평균반응구발색도 값이 심토의 값의 5.1배에 이른다. 따라서, 퇴적암의 표토는 토양미생물군집의 기질 이용성이 가장 높아서 화강암을 주종으로 하는 토

양보다 퇴적암을 주종으로 하는 표토에서 미생물의 생장이 활발하고 식물의 생장에 더 도움을 줄 수 있음을 의미한다.

EcoPlate를 이용한 기질이용성의 결과로부터 계산한 종다양성지수인 샤논 인덱스(H) 값을 Fig. 3에 도시하였다. 정상토 지점인 34번과 68번 시료에서는 표토에서 심토로 갈수록 종다양성지수가 감소됨을 볼 수 있다. 정상토의 경우 심토의 종다양성지수인 샤논 인덱스 값은 표토 값에서 각각 8.68~18.0% 저하되었다. 일반적으로 표토는 유기물이 많고, 생물이 서식하기 적합한 환경이라서 미생물의 활동도를 나타내는 평균반응구발색도와 샤논 인덱스(H)가 높게 나오게 된다. 심토는 유기물 함량이 낮으며, 용존산소도 적으므로 토양미생물이 서식하는데 어려움이 있다. 인위적이거나 자연적인 훼손이 없는 정상토인 경우 표토에서 상대적으로 심토보다 다양한 기질을 이용하는 다양한 미생물 군집이 서식하기 때문으로 보여진다. 산불로 인해 훼손된 토양의 경우는 조금 다양한 양상을 보였다. 42지점의 심토의 종다양성 지수는 표토와 비교시 4.72%가 증가하였으나, 101지점의 경우는 정상토에서와 유사하게 심토의 종다양성지수 값이 표토 값에 비하여 5.54% 감소하였다. 같은 훼손토이지만 이와 같은 심토에서 보여지는 종다양성의 차이는 앞선 Fig. 1의 베타 글루코시다아제의 활성 차이와 마찬가지로, 화재 경과시간에 따른 차이로 사료된다. 42지점의 경우 화재로 표토의 유기물의 분해가 이루어지고 표토층과 일부 심토가 혼합되고 토양층이 교란되면서 영양분이 제공된 심토층에 다양한 미생물군집이 서식할 수 있게 되면서 나타난 결과로 보여진다. 반면, 101지점은 화재 후 자연천이가 진행되면서 다시 표토층과 심토층의 단면이 안정화되어 표토층에만 유기물이 공급되고 생물의 생육에 유리한 환경이 이루어지면서 기존 정상토에서와 유사한 경향을 보이는 것으로 보여진다.

특정한 지점 내에서 이용되는 기질에 대한 대사활성의 균일성을 측정하는 샤논 균등도(E)는 토양 종류나 깊이에 상관 없이 비슷하게 나타났다. 샤논 풍부도는 34, 42, 68, 101지점의 표토와 심토에서 각각 24, 20, 21, 18, 30, 14, 29, 24로 나타났다. 샤논 풍부도는 토성에 따른 차이 및 깊이에 따른 차이도 알 수 있었는데, 화성암이 변성암보다 낮게, 심토가 표토보다 낮게 나타났다. 위의 결과를 통해 퇴적암 및 표토에서 서식하는 미생물의 기질 이용이 더욱 활발함을 알 수 있었다.

EcoPlate 분석 결과의 신뢰성을 알아볼 수 있는 표본 내 결과의 다양성% (식 (5))을 알아보았다. 이는 동일 기질의 3번 복 결과 값 중 모두 양성 혹은 모두 음성으로 나오지 않은 결과 값이 전체에서 차지하는 비율로서 34, 42, 68, 101지점의 표토와 심토에서 각각 22.6, 25.8, 32.3, 19.4, 0, 22.6, 16.1, 22.6%로 나타났다. 동일 지점의 표토와 심토시료의 기질 이용에 따른 유사성을 나타내는 유사도 값% (SSM)(식 (6))은 화성암인 34번 지점과 42번 지점의 유사도%는 각각 87.1%와 90.32%였다. 퇴적암으로 이루어진 지점 68과 지점101의 유사도%는 48.39%와 77.42%였다. 앞서 언급했듯이 훼손되지 않은 퇴적암의 표토는 생물의 생육에 유리한 것으로 보여지며, 표토의 미생물이 활성화되어있는데 반하여, 심토의 미생물의 활성이 상대적으로 낮아 낮은 유사도 값을 보여주고 있다. 특히 68지점의 경우 전체 31개의 기질 중 16개의 기질이 표토에서만 이용되고 심토에서 이용되지 않는 결과를 얻었는데 특히, 10개의 탄수화물 중 7개의 기질을 이용하지 않았다 (data not shown).

위의 결과들을 통해 산불로 훼손된 토양은 산불 초기에는 토심이 교란되어 심토에서도 다양한 생물의 서식이 가능하다가 시간이 경과됨에 따라 기존 토양화되는 것으로 보여진다. Fig. 3에서 보듯이 42번 지점의 산불로 훼손된 토양의 표토와 심토의 샤논 지수 및 샤논 균등도는 표토에 비해 심토가 증가하는 경향으로 나타났다. 앞선 Fig. 2에서도 42번 지점의 경우 다른 지점과는 달리 심토의 평균반응구발색도가 타 지점에 비하여 큰 차이가 나지 않고 비교적 다양한 기질을 이용하면서 심토의 종다양성 지수가 높게 나타났다. 반면에, 정상토인 68점 지점의 경우 Fig. 2의 심토의 평균반응구발색도가 표토의 1/5에 불과하며, 심토의 종다양성 지수가 표토에 비하여 18% 낮게 나왔다. 이는 대부분의 토양에서 평균반응구발색도와 종다양성지수가 표토에서 높은 값을 보이는 경향과 같다.

Fig. 4는 각 지점의 표토와 심토의 기질이용성을 비교한 그래프이다. 각 탄수화물 그룹, 및 복합 탄소원의 기질 이용도

백분율 값을 생화학적 그룹으로 나누어 표시하였다. 산불로 훼손된 42지점의 경우, 표토와 심토의 평균반응구발색도가 유사하게 나타났던 Fig. 2의 결과에서 보듯이 모든 카테고리의 탄소원을 골고루 이용하였다. 퇴적암으로 된 시료의 경우 표토에서만 이용되는 그룹의 탄소원이 많아서 표토와 심토의 기질이용백분율의 분포에 차이가 보였다.

화성암으로 구성된 34 및 42지점은 표토와 심토에서 모두, 아미노산 그룹의 글리실-엘-글루타민산(glycyl-L-glutamic acid), 탄수화물 그룹의 디-자일로스(D-Xylose), 아이-에리트리톨(i-Erythritol), 알파-디-락토오스(α -D-Lactose), 카르복실산 그룹의 이타코닉산(itaconic acid), 알파 케토부티르산(α -Ketobutyric acid)과, 페놀계화합물 그룹의 이-히드록시 벤조익산(2-Hydroxy benzoic acid)을 이용하지 못하였다. 또한, 표토에서 이용되나 심토에서 이용되지 않은 아민그룹의 페닐에틸아민(phenylethylamine), 탄수화물그룹의 베타-메틸-디-글루코사이드(β -methyl-D-glucoside), 및 폴리머그룹의 알파-씨클로덱스트린(α -Cyclodextrin), 글리코젠(glycogene) 등이 있으며, 그 외의 기질 이용성은 표토와 심토에서 유사하게 나타났다. 반면, 퇴적암으로 구성된 68, 101지점은 대다수의 기질을 이용하는 것으로 나타났다. 68번 지점의 표토와 심토에서 모두 페놀계화합물그룹의 이-히드록시 벤조익산을 이용하지 못하였다. 101지점은 폴리머그룹의 알파-씨클로덱스트린을 이용하지 못하고, 페놀계화합물 그룹의 이-히드록시 벤조익산은 심토에서만 이용되는 등 대부분의 기질을 이용하였다.

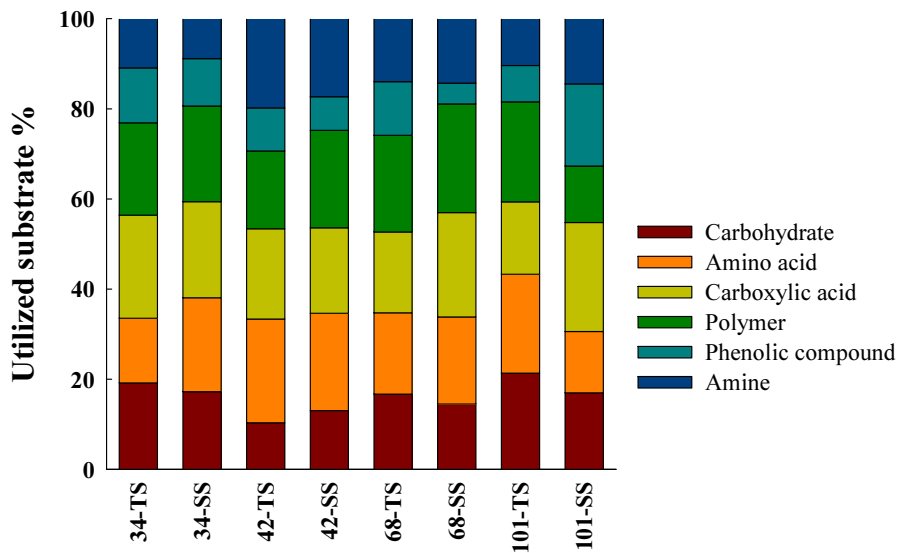


Fig. 4. Utilized substrate percentage in different carbon sources according to soil samples.

결론

국내 산림토양 중 산불로 훼손된 지역(훼손토)과 훼손되지 않은 지역(정상토)의 토양을 깊이별로 채취한 후 토양미생물 군집의 생리학적 프로파일링 기법과 효소활성도를 측정하였다. 생리학적 프로파일링은 미생물군집의 기능적 다양성, 기능적 잠재력 및 기질을 이용하는 프로파일링을 통한 대사활동의 특성화를 비교하는 기법으로 분석 결과를 통하여 산불과 같은 환경변화에 따른 미생물 활동도에 미치는 영향을 알아보았으며, 토성과 깊이에 따른 토양의 특성을 알아보았다. 시험에 이용한 토양 중 퇴적암이 화성암에 비하여, 표토는 심토에 비하여 평균반응구발색도 및 베타글루코시다아제 효소의 활성 값이 높게 나타났다. 그러나, 산불이 발생된 지 시간이 많이 경과되지 않은 지역에서 화재로 섬유소가 모두 소실되어

섬유소분해효소인 베타글루코시다아제 활성이 없었으며, 오히려 표토의 유기물 분해가 촉진되어 심토의 미생물이 다양한 기질을 이용할 수 있는 환경이 조성됨에 따라 종다양성지수 및 종균등도가 증가되는 결과를 보여주었다. 반면에, 산불이 발생된 후 시간이 경과됨에 따라 표토의 특성을 회복하게되어 정상토와 같은 표토와 심토 미생물 활성도 및 기질이용도를 보여주었다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 표토 보전 관리 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (과제번호: 2020002840001).

References

- Almeida, R.F.D., Naves, E.R., Mota, R.P.D., 2015, Soil quality: Enzymatic activity of soil β -glucosidase, *Global Journal of Agricultural Research and Reviews*, 3(2), 146-150.
- Benjamin, L.T., David, W.H., Philip, M.H., Nick, O., 2002, β -glucosidase activity in pasture soils, *Applied Soil Ecology*, 20(2), 157-162.
- Debosz, K., Rasmussen, P.H., Pedersen, A.R., 1999, Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: Effects of organic matter input, *Applied Soil Ecology*, 13(3), 209-218.
- Eivazi, F., Tabatabai, M.A., 1988, Glucosidases and galactosidases in soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 20(5), 601-606.
- Farkas, É., Feigl, V., Gruiz, K., Vaszita, E., Fekete-Kertész, I., Tolner, M., Kerekes, I., Pusztai, É., Kari, A., Uzinger, N., Rékási, M., Kirchkeszner, C., Molnár, M., 2020, Long-term effects of grain husk and paper fibre sludge biochar on acidic and calcareous sandy soils—A scale-up field experiment applying a complex monitoring toolkit, *Science of the Total Environment*, 731, 138988.
- Garland, J.L., Mills, A.L., 1991, Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization, *Applied and Environmental Microbiology*, 57(8), 2351-2359.
- Ian, F.S., Peter, J.F., 2003, A tribute to Claude Shannon (1916-2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the ‘Shannon-Wiener’ Index, *Global Ecology & Biogeography*, 12, 177-179.
- Jałowiecki, Ł., Chojniak, J.M., Dorgeloh, E., Hegedusova, B., Ejhed, H., Magnér, J., Płaza, G.A., 2016, Microbial community profiles in wastewaters from onsite wastewater treatment systems technology, *PLoS ONE*, 11(1), 0147725.
- Kenarova, A., Radeva, G., Traykov, I., Boteva, S., 2014, Community level physiological profiles of bacterial communities inhabiting uranium mining impacted sites, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 100, 226-232.
- Martinez, C.E., Tabatabai, M.A., 1997, Decomposition of biotechnology by-products in soils, *Journal of Environmental Quality*, 26(3), 625-632.
- Merino, C., Godoy, R., Matus, F., 2016, Soil enzymes and biological activity at different levels of organic matter stability, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(1), 14-30.
- Sala, M.M., Arrieta, J.M., Boras, J.A., Duarte, C.M., Vaqué, D., 2010, The impact of ice melting on bacterioplankton in the Arctic Ocean, *Polar Biology*, 33, 1683-1694.
- The National Atlas of Korea II, 2020, Retrieved from <http://nationalatlas.ngii.go.kr/us/index.php>.
- Utobo, E.B., Tewari, L., 2015, Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status, *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(1), 147-169.