Difference in Soil Biogeochemical Properties of Agricultural Highland by Topographical Characteristic and Soil Management

Jung-Hwan Yoon¹, Kye-Hoon Kim², and Jae E. Yang^{3*}

¹Researcher, Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

²Professor, Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul 02504, Korea

³Professor, Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

*Corresponding author: yangjay@kangwon.ac.kr

ABSTRACT

Received: November 9, 2021

Revised: November 25, 2021

Accepted: November 30, 2021

Edited by

Yeon-Kyu Sonn,
National Institute of Agricultural
Sciences, RDA, Korea

ORCID

Jung-Hwan Yoon
<https://orcid.org/0000-0001-8009-7807>

Kye-Hoon Kim
<https://orcid.org/0000-0002-4891-3322>

Jae E. Yang
<https://orcid.org/0000-0001-8641-6442>

In agricultural highland, soil properties change over time due to soil management methods, soil erosion, and cultivation. The objective of this study was to investigate the differences in soil properties according to land management in agricultural highland. As a result of the soil analysis, Anbandegi, Maebongsan, Yeongwol, and Jeongseon, located near the top of the mountain, had low bulk densities, and organic matter, CEC, exchangeable cation, water stable aggregation rate, and dehydrogenase activity, were relatively higher than those of Daegwallyeong and Punch bowl. In the Daegwallyeong and Punch bowl, saprolite soil was periodically piled to replace eroded top-soil, and as a result, soil characteristics differed significantly from those located near the top of the mountain. In the principal component analysis result, organic matter showed the largest eigenvalue in PC1, and pH was selected as PC2. The distribution of soil clusters by sampling point was PC1, and Daegwallyeong and Punch bowl were classified differently from highland areas near the top of the mountain, and coastal basins and Daegwallyeong were classified by PC2. In conclusion, highland soil showed different soil properties for each region, which was the result of differences according to the soil management methods. And considering the relationship between soil characteristics, it was confirmed that organic matter was the most important factor in the soil management methods.

Keywords: Biogeochemical properties, Highland, Microbial activity, Organic matter, Soil management

Coefficients of each variable for PC1 and PC2 through the PCA of agricultural highland soils.

Introduction

국내 고랭지 밭 총 면적의 84%인 약 32,000 ha가 이 지역의 고랭지 채소 생산을 위해 이용되고 있으며, 특히 해발 600 m 이상의 완전 고랭지는 대부분 강원도 지역 (99%)에 분포한다 (Joo et al., 2002; MoE, 2004). 강원도 고랭지 밭의 절반 (48%)은 경사도 15% 이상의 가파른 경사면에 형성되어 있어 (MoE, 2004), 침식에 의한 영향으로 자갈 함량이 약 40%로 일반 농경지보다 많고 안반데기를 비롯한 산 정상에 위치한 고랭지 지역은 42 - 76%가 자갈로 덮여 있다 (Yoon et al., 2021). Park et al. (2004)의 보고에 따르면, 많은 고랭지 밭에 자갈함량이 많고 점토 및 양이온교환용량이 낮은 석비레를 성토함으로써 토사 및 양분 유실 가능성이 더 커지고 있다. 이처럼 높은 경사와 함께 침식에 취약한 석비레 성토에 따른 토양의 물리적 특성 변화로 고랭지 밭토양은 토양침식 위험성이 높아 표토 유실 및 비점오염 발생 등의 문제가 대두되어 왔으며, 환경적 문제를 야기해 왔다 (Joo et al., 2004; Joo and Kim, 2007; Park et al., 2011; Jung et al., 2015). 그럼에도 불구하고, 고랭지 채소의 경제적 가치 때문에 대다수 농가에서는 다량의 화학비료 및 유기질비료 (퇴비)를 처리함으로써 고랭지 밭의 생산성을 극대화하고 있다 (Park et al., 1994; NIAST, 2001; Lee et al., 2002; RDA, 2005). 이처럼 고랭지 농업 및 성토 등의 인위적인 행위와 강우에 의한 지속적인 토양 침식은 토양 특성 변화에 영향을 주었고, 여러 연구에서 토양 침식, 성토, 비료 사용 등이 시간이 변함에 따라 농경지 화학성에 크게 영향을 미친다는 보고가 있었다 (Liebig and Doran, 1999; Jagadamma et al., 2008; Guo et al., 2010; Ayoubi et al., 2011).

따라서 본 연구에서는 대표적인 강원도 고랭지채소 재배 지역의 토양을 분석하고 지역별 및 성토와 같은 토양 관리에 따른 토양의 생지화학적 특성 차이를 알아보고자 하였다.

Materials and Methods

강원도 고랭지 농경지의 지형적 특성을 고려하여 총 6지역을 선정하여 총 57개 지점의 토양 시료를 채취하였다 (Table 1). 선정된 6지역은 경사가 가파른 산 정상 부근을 1960년대부터 개간하여 작물재배지로 이용 중인 4개 지역 (안반데기, 매봉산, 영월, 정선), 고위평탄면 지형인 대관령 1개 지역, 그리고 해발고도 400 - 600 m에 형성된 해안분지 (punch bowl) 1개 지역이다. 토양시료 채취는 각 지점별로 auger를 이용해 표토 (0 - 20 cm)를 채취하였고 입자밀도

Table 1. Descriptions of sampling sites in this study.

Sampling site	Location	Coordinate	Altitude	Number of sampling points
Anbandegi	Daegi-ri, Wangsan-myeon, Gangneung-si, Gangwon-do	37°37'20.18"N, 128°44'13.11"E	1,000 - 1,150	14
Jeongseon	Jodong-ri, Sindong-eup, Jeongseon-gun, Gangwon-do	37°11'54.73"N, 128°41'40.27"E	950 - 1,100	9
Mt. Maebong	Changjuk-dong, Taebaek-si, Gangwon-do	37°13'1.36"N, 128°57'58.81"E	1,050 - 1,250	10
Yeongwol	Deokgu-ri, Sangdong-eup, Yeongwol-gun, Gangwon-do	37°4'41.31"N, 128°48'22.63"E	700 - 900	5
Daegwallyeong	Daegwallyeong-myeon, Pyeongchang-gun, Gangwon-do	37°40'16.59"N, 128°42'28.01"E	800 - 900	8
Punch bowl	Haean-myeon, Yanggu-gun, Gangwon-do	38°17'11.77"N, 128°8'18.48"E	400 - 600	11

Fig. 1. Sampling sites for this study (A: Daegwalleong; B: Anbandegi; C: Yeongwol; D: Mt. Maebong; E: Jeongseon; F: Punch bowl).

분석을 위해 core 샘플링도 실시하였다. 지점별로 시료는 1개씩 채취하였으며, 상세한 시료채취 지점은 Fig. 1과 같다.

채취한 고령지 밭 토양은 풍건 후 2 mm 체에 걸러 토양 분석에 사용하였다.

물리적 특성은 용적밀도와 토양 입경분석, 내수성 입단화율을 분석하였다. 용적밀도 분석은 샘플링한 core를 농촌진흥청 표준분석법 (NIAST, 2000)에 따라 무게를 측정 후 105°C 오븐에서 건조한 후 무게를 측정해 계산하였다. 토양 입경분석은 micro pipette법 (Miller and Miller, 1987)에 따라, 내수성 입단화율은 Kemper and Rosenau (1986)의 분석방법에 따라 wet sieving 기기 (08.13 Wet sieving apparatus, Eijkelkamp, Netherlands)를 이용하여 측정하였다.

화학적 특성은 pH와 EC (electrical conductivity), 유효인산, 유기물 함량, 교환성 양이온, 양이온교환용량 (cation exchange capacity, CEC), 총 질소 (T-N)를 측정하였다. 토양 pH와 EC는 풍건된 토양 시료 5 g을 증류수 25 mL에 가하여 진탕 후 1시간 뒤에 각각 pH meter (MP 220, Mettler, Zurich, Switzerland)와 EC meter (MC 226, Mettler, Zurich, Switzerland)로 측정하였다. 토양 중 유효인산 함량은 Bray No.1법 (Bray and Kurtz, 1945)에 따라 UV-spectrophotometer (UV-160A, Shimadzu, Kyoto, Japan)를 이용해 측정하였다. 유기물 함량은 Walkley-Black법 (Nelson and Sommers, 1996)으로 분석하였다. 교환성 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+})과 양이온교환용량은 1 N 초산 암모니아법 (Sumner and Miller, 1996)을 이용하였다. 교환성 양이온은 ICP-OES (8300DV, Perkin Elmer, USA)를 이용하였고,

CEC는 질소증류장치 (Kjeltec 2300, Foss, Hillerød, Denmark)로 측정하였다. 총 질소 분석은 0.5 mm 체에 거른 토양 시료 0.5 g을 digestion tube에 Kjeltabs Se/3,5[®] (3.5 g K₂SO₄ + 3.5 mg Se)과 진한 황산 10 mL와 함께 추가해 hot plate 에서 200°C와 400°C에서 각각 30분과 1시간 30분 동안 분해한 후, 질소증류장치를 이용하여 측정하였다 (Bremner, 1996).

생물학적 토양 특성은 탈수소효소 활성도 (dehydrogenase activity, DHA)를 측정하여 정량화 하였다 (Tabatabai, 1994). 분석방법은 토양 20 g에 CaCO₃ 0.2 g을 첨가하여 잘 혼합 후, 6 g씩 3개의 유리관에 나누어 담고 3% 2,3,5-Triphenyltetrazolium chloride (TTC) 용액 1 mL와 증류수 2.5 mL를 가하고 밀봉하였다. 이 유리관을 항온배양기 (37°C)에서 24시간 동안 배양한 후, 각 유리관에 methanol 10 mL를 넣어 1분간 진탕 한 뒤 Whatman No.6 여과지로 100 mL 부피플라스크에 여과하고 methanol을 이용해 눈금까지 채웠다. 침출용액은 UV spectrophotometer (UV-1700, Shimadzu, Kyoto, Japan)를 이용해 485 nm 파장에서의 흡광도를 측정하여 탈수소효소 활성도를 정량하였다.

통계처리 본 연구에 포함된 강원도 고랭지 6지역 간의 토양 생지화학적 특성의 통계적 차이 및 상관관계를 분석 하기 위해 Minitab 16 (Minitab Inc., State College, Pennsylvania, USA)로 통계분석을 실시하였다. 고랭지 간의 토양 특성 차이를 알아보기 위해 One-way ANOVA Fisher's LSD (least-significant-difference) 분석을, 토양 특성 간의 상관관계를 알아보기 위해 Pearson correlation analysis를 수행하였다. 주성분 분석 (principal component analysis, PCA)을 통해 고랭지 토양의 주요 이화학적 특성에 대한 군집분석을 실시하였다.

Results and Discussion

고랭지 농업지역의 물리적 토양 특성을 분석한 결과 지역에 따라 용적밀도와 입경분포, sand 함량, 내수성 입단화 율에서 지역별로 유의적 차이가 있는 것으로 나타났다 (Table 2). 용적밀도는 산 정상에 위치한 안반데기, 영월, 매봉 산, 정선이 1.03 - 1.10 g cm⁻³로 대관령 (1.26 g cm⁻³)과 해안분지 (1.33 g cm⁻³)보다 유의적으로 낮았다. 산 정상에 위치한 지역에서는 장기간 강우에 의한 침식으로 표토가 많이 유실되어 크기가 큰 자갈이 지표면에 많이 노출되었고, 대관령과 해안분지 지역은 유실된 표토를 복구하기 위해 sand 함량이 높은 토양을 성토 및 객토하였기 때문에 판단 된다. Poesen and Lavee (1994)의 연구결과에 따르면 자갈함량이 40 - 50% 이상인 토양에서는 큰 자갈을 제외한 용 적밀도가 자갈함량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 보고되었다. 토성은 silt loam (37%)과 loam (37%)이 가장 많 았고 다음으로 sandy loam (21%)과 loamy sand (5%)였다. 지역별 토성분포는 안반데기가 silt loam (71%)과 loam (29%)이었고, 정선도 silt loam (78%)이 대부분이고 나머지는 loam (22%)이었다. 매봉산은 loam이 60%로 silt loam (40%) 보다 많았으며, 영월은 loam이 80%였고 sandy loam이 20%였다. 대관령은 sandy loam이 50%로 가장 많았으 며, loamy sand (38%), loam (13%) 순이었다. 해안분지는 sandy loam (64%)과 loam (36%)으로 분류되었다. 산 정상 에 위치한 지역들은 대관령이나 해안분지보다 sand 함량이 낮고, silt 함량이 높았다. Clay 함량은 매봉산과 정선이 15.5%와 16.8%로 가장 높았으며, 경사도가 낮고 성토가 많이 이뤄졌던 대관령의 clay 함량이 9.1%로 가장 낮았다. 이는 sand 함량이 높은 토양을 성토하였기 때문에 판단되며, Park et al. (2004)와 Zhang et al. (2015)에 따르면 평균 2년마다 대관령 지역에서 주기적으로 sand 함량이 높은 석비레 성토 및 객토를 한다고 한다. 석비레는 양이온교환용 량이 낮은 입자로 주로 구성되어 있으며, sand 함량이 매우 높으며 clay 함량이 낮아 응집력과 양분을 보유할 수 있는 능력이 매우 떨어지며 입단 형성이 어려운 토양이다 (Park et al., 2004). 이에 입단의 안정성을 판단하는 내수성 입단

화율 역시 지역에 따른 차이가 나타났다. 석비레를 주로 성토하여 sand 함량이 높고 clay 함량이 낮았던 대관령의 내수성 입단화율이 33.0%로 가장 낮았으며, 지리적인 특성상 대규모 토목 작업이 어려워 인위적인 성토가 이뤄지지 않은 산 정상 부근의 지점들의 내수성 입단화율은 58 - 70%로 대관령과 해안분지보다 높았다. 내수성 입단화율로 분석한 입단 안정성은 토양 침식과 음의 상관관계가 있다는 다수의 연구결과가 보고되었기 때문에 내수성 입단화율이 높은 산 정상 부근의 고랭지 재배지역이 해안분지나 대관령보다 침식에 대한 저항성이 큰 것으로 판단할 수 있다 (Reichert and Norton, 1994; Le Bissonnais and Arrouays, 1997; Barthes and Roose, 2002).

Table 2. Physical properties of the soil samples at six sampling sites.

Sampling site	Bulk density (g cm ⁻³)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture	Water stable aggregate (%)
Anbandegi (n = 14)	1.04 b [†]	32.9 c	55.2 a	11.8 bcd	Silt loam, Loam, Sandy loam	71.2 a
Jeongseon (n = 9)	1.03 b	27.2 c	56.0 a	16.8 a	Silt loam, Loam	58.7 ab
Mt. Maebong (n = 10)	1.10 b	36.7 c	47.8 b	15.5 ab	Loam, Silt loam	69.3 a
Yeongwol (n = 5)	1.04 b	51.5 b	37.5 c	11.0 cd	Loam, Sandy loam	70.3 a
Daegwallyeong (n = 8)	1.26 a	68.2 a	22.7 d	9.1 d	Sandy loam, Loamy sand, Loam	33.0 c
Punch bowl (n = 11)	1.33 a	54.4 b	32.0 c	13.6 abc	Sandy loam, Loam	46.7 bc
Average	1.14	43.4	43.4	13.2		58.7

[†] Same letters indicate no difference between sampling sites within each column ($p < 0.05$, LSD).

토양 화학성 분석결과에서도 지역에 따라 전기전도도를 제외한 모든 화학적 특성이 유의적인 차이가 있었다 (Table 3). 모든 토양의 평균 pH는 6.5로 2013년 전국 밭토양 수준인 6.2와 비슷하거나 조금 높았다 (Kong et al., 2015). 지역별 토양 pH 분포는 해안분지가 중산성인 5.1로 가장 낮았으며, 매봉산과 정선, 영월이 각각 중성인 7.3, 7.3, 7.1로 높았다. 산간 지역을 개간한 매봉산이나 정선, 영월, 안반데기의 pH는 Jeong et al. (2002)이 보고한 우리나라 산림토양의 평균 pH인 5.5보다 높은 수준이며, 이는 토양 중 Ca 농도가 높게 나타난 것을 고려하였을 때 산림개간 및 경작활동이 이뤄지면서 석회질 비료를 사용하였기 때문으로 보인다. EC는 모든 지점에서 2.0 dS m⁻¹ 이하인 평균 0.16 dS m⁻¹이었다. 유기물은 평균 34.1 g kg⁻¹로 고랭지채소 (배추) 재배 토양 적정범위인 20 - 30 g kg⁻¹ 보다 높았다 (NAAS, 2010). 다만 지역별로 유기물 함량 간 유의적인 차이가 있었는데 안반데기 (43.5 g kg⁻¹)와 매봉산 (44.9 g kg⁻¹), 정선 (47.6 g kg⁻¹)이 다른 지역들보다 높았으며, 해안분지와 대관령이 각각 17.9 g kg⁻¹와 14.8 g kg⁻¹로 적정기 준보다도 낮은 유기물 함량을 나타냈다. 유기물과 관련성이 높은 T-N 역시 이와 비슷하게 해안분지와 대관령이 0.12%로 가장 낮은 수치를 보였다. 대관령과 해안분지의 유기물이 낮은 것은 유실된 표토를 대체하기 위해 sand 함량이 많고 유기물이 매우 낮은 모재토(c horizons)인 석비레를 성토하였기 때문이며, 석비레를 성토한 토양의 유기물 함량은 일반 농경지보다 낮다는 선행 연구결과와 유사한 결과를 보였다 (Park et al., 2004; Zhang et al., 2015). 이와 반대로 산 정상 부근에 위치한 나머지 재배 지역들은 지리적 특성상 대규모 토목 작업이 어려워 자갈이 많이 존재하는 상태 그대로 재배가 이뤄지고 있으며, 급경사로 인한 침식 피해 예방 및 토양 질 향상을 위해 퇴비와 같은 유기질 비료를 지속적으로 다량 공급하였고, 그로 인해 유기물이 상대적으로 높았다. 유효인산은 전체 평균이 250.5 mg kg⁻¹로 적정범위인 300 - 500 mg kg⁻¹ 보다 적었다. 지역별로는 정선이 406.6 mg kg⁻¹로 가장 높았으나 해안분지를 제외하고는

유의적인 차이를 보이지는 않았고, 해안분지만 71.7 mg kg^{-1} 로 가장 낮았다. 고랭지 재배 지역들은 인산을 과다 시비하는 것으로 보고되었고 (Lee et al., 2002), 고랭지 밭토양을 조사한 Yang et al. (2001)의 연구결과에서도 유효인산이 배추재배 적정수준을 초과하는 것으로 나타났다. 이와 반대로 본 연구결과에서 대부분 적정범위 이내이거나 적정범위 이하로 측정된 것은 경사가 심하며, 침식에 취약한 재배 지역들을 중심으로 시료를 채취했기 때문에 실시하여 다량으로 투입된 인산질 비료가 강우에 의한 침식으로 유실되었을 것으로 보인다. 치환성 양이온 분석결과 Ca^{2+} 과 Mg^{2+} , K^{+} 모두 배추재배 적정 범위를 초과한 것으로 나타났다. Ca^{2+} 은 평균 $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 로 NAAS (2010)의 추천수준 ($6.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)보다 1.6배 높았고, Mg^{2+} 은 평균 $2.3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 로 추천수준인 1.5 - 2.0보다 약간 높게 조사되었다. K^{+} 은 $1.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 NAAS (2010)의 기준 ($0.5 - 0.6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)보다 약 2배 높았다. 전국 밭토양의 검정자료 분석 결과 (Ca^{2+} : $6.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; Mg^{2+} : $1.9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; K^{+} : $0.72 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)와 비교하였을 때 모든 양이온이 상대적으로 더 높게 나타났다 (Kong et al., 2015). 이는 고랭지 지역은 산림을 개간한 것이기에 다량의 석회질 비료를 시비했을 가능성이 높으며, 토양 유실로 비료 시비 기준보다 과다하게 시비한 것에 따른 것으로 보인다 (Park et al., 1994; NIAST, 2001; Lee et al., 2002; RDA, 2005). 지역별로 치환성 양이온을 비교해보면 해안분지가 Ca^{2+} 과 Mg^{2+} , K^{+} 모두 다른 지역보다 가장 낮았고, 영월과 매봉산, 정선은 Ca^{2+} 이 $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이상으로 매우 높았다. Ca^{2+} 이 높았던 영월과 매봉산, 정선은 pH가 7 이상의 중성으로 토양 산도 조절 및 고랭지 채소 재배를 위한 석회질 비료를 다량으로 사용하면서 Ca^{2+} 이 증가하면서 pH도 증가한 것으로 판단된다. 양이온 교환용량은 전체 평균이 우리나라 일반적인 양이온교환용량인 $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 보다 높은 $16.1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 로 조사되었다. 지역별 차이도 다른 토양 특성과 동일하게 해안분지와 대관령이 각각 $12.7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 과 $11.3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 가장 낮았고, 정선이 가장 높은 $19.1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이었다. 그 다음으로 안반데기 ($18.8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), 매봉산 ($17.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), 영월 ($15.1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) 순이었다. 고랭지 지역의 양이온 교환용량이 높은 것은 유기물이 높았기 때문으로 판단된다. 총 질소 (T-N) 분석결과도 마찬가지로 해안분지와 대관령이 0.12%로 가장 낮았으며, 안반데기가 0.27%로 가장 높았다.

Table 3. Soil chemical properties of six highland sites in Gangwon province.

Sampling site	pH (1:5W)	EC (dS m^{-1})	OM (g kg^{-1})	Avail-P (mg kg^{-1})	Ca ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Mg ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	K ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	CEC ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	T-N (%)
Anbandegi (n = 14)	6.3 c [†]	0.17 a	43.5 a	330.0 a	9.5 b	2.1 b	1.2 a	18.8 a	0.27 a
Jeongseon (n = 9)	7.3 a	0.16 a	47.6 a	406.6 a	14.6 a	2.8 ab	1.5 a	19.1 a	0.24 a
Mt. Maebong (n = 10)	7.3 a	0.13 a	44.9 a	228.2 ab	13.7 a	3.2 a	1.3 a	17.5 a	0.24 a
Yeongwol (n = 5)	7.1 ab	0.15 a	27.9 b	171.9 ab	10.8 ab	2.9 ab	1.2 a	15.1 ab	0.15 b
Daegwallyeong (n = 8)	6.5 bc	0.19 a	14.8 b	258.9 ab	9.1 b	2.4 ab	0.5 b	11.3 b	0.12 b
Punch bowl (n = 11)	5.1 d	0.15 a	17.9 b	71.7 b	3.7 c	1.1 c	0.4 b	12.7 b	0.12 b
Average	6.5	0.16	34.1	250.5	10.0	2.3	1.0	16.1	0.20
Optimal range	6.0 - 6.5	-	20 - 30	300 - 500	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0	0.5 - 0.6	10 - 15	

[†] Same letters indicate no difference between sampling sites within each column ($p < 0.05$, LSD).

생물학적 특성인 탈수소효소 활성도 분석결과 Fig. 2와 같이 지역별 탈수소효소 활성도가 유의적인 차이가 있었다. 산 정상 부근보다는 평탄한 지역으로 분류되는 해안분지와 대관령이 가장 낮은 활성도를 나타냈고, 정선지역이 가장 높은 활성도를 보여 화학적 특성과 유사한 경향을 보였다.

Fig. 2. Soil dehydrogenase activity (DHA) of six highland sites, Anbandegi (n = 14), Yeongwol (n = 9), Mt. Maebong (n = 10), Jeongseon (n = 5), Punch bowl (n = 11), and Daegwallyeong (n = 8). Same characters indicate no significant difference among the sites ($p < 0.05$).

토양 특성 간 상관관계 분석을 실시한 결과인 Table 4를 살펴보면 pH는 치환성 양이온인 Ca와 고도로 유의한 상관관계에 있는 것으로 분석되었다. 이는 앞서 언급한 것처럼 석회처리에 따라 Ca이 증가하였고, 토양 중 pH가 증가하였기 때문에 상관성이 높았다. 유기물은 pH를 제외한 모든 토양 특성과 상관성이 있는 것으로 나타났다. 특히, T-N과 CEC 간의 상관성(r)이 각각 0.938와 0.920으로 매우 높아 유기물에 의한 영향이 큰 것임을 확인할 수 있었다. 유효인산은 T-N, K와 상관성($p < 0.01$)이 있는 것으로 나타났는데 이는 대부분의 농가에서 NPK-복합비료 및 퇴비와 같은 유기질 비료를 처리한 것에 따른 것으로 보인다(Zhang et al., 2007; Park et al., 2016). 입단 안정성을 판단하는 내수성 입단화율은 유기물, T-N, CEC, silt와 고도로 유의한 양의 상관관계($p < 0.001$)를 나타냈고, 용적밀도, sand와는 고도로 유의한 음의 상관관계($p < 0.001$)를 보였다. 유기물과 내수성 입단화율간의 상관성이 높은 것은 유기물의 입단형성 효과 때문이며, 이에 따라 유기물과 상관성이 높았던 T-N, CEC 역시 내수성 입단화율과 고도로 유의한 상관관계에 있는 것으로 분석되었다. 그리고 물리적 특성인 용적밀도가 내수성 입단화율과 높은 음의 상관관계에 있는 것은 입단형성에 따라 공극률이 증가하면서 용적밀도가 감소하기 때문이다. 또한, clay를 제외한 sand, silt 함량이 내수성 입단화율과 상관성이 높은 것으로 분석된 것은 내수성 입단형성에 필요한 유기물과 높은 상관관계에 있기 때문이며, clay 함량이 상관성이 적은 것은 지역별 차이가 적었고 유기물과의 상관성이 적었기 때문이다. 탈수소효소 활성도는 유기물과 고도로 유의한 양의 상관관계($p < 0.001$)를 보였고, 유기물 함량이 높아 유기물에서 수소를 떼어내는 탈수소효소 활성도가 높아진 것으로 판단된다. 또한, 토양 효소 활성은 Das et al. (2011)의 연구결과와 같이 온도가 상승함에 따라 활성도가 높아지는 것으로 알려져 있고, Zhang et al. (2012)도 해발고도가 상승할수록 온도와 수분의 영향에 따라 표토층의 유기물 분해가 느려 진다는 결과를 보고하였다. 본 실험 대상지도 해안분지의 해발고도가 400 - 600 m이며, 대관령은 800 - 900 m, 안반데기는 1,000 - 1,150 m로 큰 차이가 있어 이에 따른 영향을 받았을 가능성이 높지만 지역별 유기물 함량과 같은 토양 특성이 크게 다른 점과 석비레 성토 여부 등이 토양 효소 활성에 미치는 영향이 더 컸기 때문에 해발고도가 높아 평균 기온이 낮은 산 정상 부근에 위치한 지역의 토양 효소 활성이 더 높은 것으로 판단된다. 토양의 다양한 이용 형태별로 화학적 특성과 생물학적 특성을 비교한 Hong et al. (2021)의 연구결과에

서도 유기물은 생물학적 특성과 상관관계가 가장 높았으며, 이에 유기물에 대한 관리가 토양의 효소 활성 뿐만 아니라 건강성 향상에 가장 중요하다고 하였다. 따라서 산 정상 부근 고랭지 재배단지의 토양이 해안분지나 대관령보다 생물학적 토양 건강성이 좋은 것으로 볼 수 있고, 성토 여부에 따른 토양특성 변화가 관련이 있다고 판단된다.

Table 4. Pearson correlation coefficients of the physicochemical properties for whole soil samples.

	pH	EC	OM	Avail-P	T-N	Ca	Mg	K	CEC	Bd	Clay	Sand	Silt	WSA
EC	-0.349**													
OM	0.346**	0.118												
Avail-P	0.157	0.070	0.345**											
T-N	0.246	0.278*	0.938***	0.393**										
Ca	0.823***	-0.089	0.600***	0.208	0.532***									
Mg	0.669***	0.055	0.444**	0.175	0.415**	0.726***								
K	0.396**	0.312*	0.734***	0.384**	0.710***	0.614***	0.507***							
CEC	0.205	0.162	0.920***	0.220	0.885***	0.492***	0.412**	0.646***						
Bd	-0.365**	-0.176	-0.711***	-0.162	-0.697***	-0.497***	-0.463***	-0.697***	-0.667***					
Clay	-0.017	0.236	0.285*	-0.059	0.226	0.126	0.096	0.373**	0.375**	-0.190				
Sand	-0.188	-0.168	-0.753***	-0.115	-0.687***	-0.381**	-0.262*	-0.661***	-0.791***	0.619***	-0.668***			
Silt	0.227	0.125	0.801***	0.155	0.741***	0.411**	0.280*	0.664***	0.817***	-0.672***	0.475***	-0.972***		
WSA	0.217	0.027	0.740***	0.068	0.680***	0.356**	0.340*	0.591***	0.701***	-0.703***	0.102	-0.599***	0.676***	
DHA	0.548***	-0.141	0.746***	0.364**	0.702***	0.675***	0.480***	0.619	0.651***	-0.600***	0.186	-0.525***	0.563***	0.464***

*, ** and *** indicate significance at the 0.05, 0.01 and < 0.001 levels, respectively.

토양특성에 따른 토양 군집 분석 수행을 위해 주성분 분석을 수행하였다. 주성분 분석결과 고유통계량 (eigenvalue) 이 1 이상이고 축적지수 (cumulative)가 81.6%인 4개의 주성분 축을 구할 수 있었다 (Table 5). PC1은 절반이 넘는 52%를 차지하며, 유기물 (0.337)과 T-N (0.321), CEC (0.319)가 가장 큰 고유벡터값을 보였다. 유기물이 PC1에서 가장 높은 값을 보인 것은 토양특성 간 상관관계 분석결과에서 pH를 제외한 모든 토양특성과 유의한 상관성을 가졌기 때문이며, T-N과 CEC는 유기물과 아주 높은 상관성이 있어 PC1에서 높은 고유벡터값을 나타냈다. 14.5%를 차지하는 PC2에서는 pH (-0.528)가 가장 관련성이 높았으며, PC3은 8%를 차지하며 유효인산 (-0.657)이 가장 높은 고유벡터값을 보였고, PC4는 EC (-0.532)가 가장 높은 고유벡터값을 나타냈다. 이 결과를 종합하면 경사지 토양 특성을 평가하는데 있어 52%를 차지하는 PC1의 유기물과 T-N, CEC가 토양특성 평가의 주요 인자라고 볼 수 있고, 그 다음으로 pH, 유효인산, EC 순으로 토양 특성을 평가하는데 중요한 인자로 분류되었다.

Table 5. Results of principal component analysis (PCA) of soil properties from six sampling sites.

Principal component	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
Eigenvalue	7.796	2.168	1.200	1.083
Percent	0.52	0.145	0.08	0.072
Cumulative percent	0.52	0.664	0.744	0.816
Eigenvectors				
pH	0.172	-0.528	0.204	-0.143
EC	0.051	0.370	-0.400	-0.532
OM	0.337	0.048	-0.088	0.164

Table 5. Results of principal component analysis (PCA) of soil properties from six sampling sites. (Continued)

Principal component	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
Avail-P	0.116	-0.110	-0.657	-0.026
T-N	0.321	0.093	-0.240	0.118
Ca	0.252	-0.388	0.088	-0.220
Mg	0.210	-0.348	0.010	-0.349
K	0.303	0.015	-0.146	-0.237
CEC	0.319	0.148	0.004	0.143
Bulk density	-0.290	-0.014	0.024	-0.086
Clay	0.137	0.318	0.405	-0.474
Sand	-0.296	-0.268	-0.266	0.034
Silt	0.307	0.216	0.187	0.109
Wet stable aggregation	0.267	0.083	0.040	0.388
DHA	0.283	-0.203	-0.030	0.108

주성분 분석결과로 선별한 주성분 중 PC1과 PC2를 이용해 지역별 토양을 구분하였다(Fig. 3). 지역별 분포경향을 살펴보면 해안분지와 대관령은 다른 지역과 달리 PC1 값이 주로 음의 값에 치우친 것을 확인할 수 있고, 산 정상부근인 안반데기와 정선, 매봉산, 영월은 주로 PC1이 양의 값에서 넓게 분포하고 있는 것으로 나타난다. 이는 PC1에서 가장 큰 고유벡터값을 가지는 유기물과 T-N, CEC가 두 지역이 낮으며, 음의 상관값을 갖는 sand와 bulk density가 대관령과 해안분지에서 높아 이런 차이가 나타난 것으로 판단된다. 또한, PC2로 해안분지와 대관령이 다른 분포를 하는 것으로 나타났는데 이는 PC2에서 가장 높았던 pH가 해안분지는 5.1이고 대관령은 6.5로 큰 차이가 있어 분포양상이 다르게 나타났다. PC2에서 산 정상 부근의 재배단지들은 대체로 분포양상이 비슷하게 나타났다.

Fig. 3. Coefficients of each variable for PC1 and PC2 through the PCA.

Conclusions

대표적인 강원도 고랭지 채소재배 지역의 토양 이용에 따른 토양특성 변화를 파악하기 위해 생지화학적 특성 분석을 실시하여 비교, 평가하였다. 토양 분석결과 산 정상 부근에 위치한 안반데기와 매봉산, 영월, 정선은 용적밀도 및 sand 함량이 대관령과 해안분지보다 낮았으며, 유기물 함량을 비롯한 CEC, 치환성 양이온, 내수성입단화율, 탈수소 효소 활성도 등은 높았다. 이처럼 토양 특성이 지역별, 지형별로 큰 차이를 보였으며, 이는 토양관리 방법 중 석비레 성토에 따른 차이가 가장 큰 영향을 주었다고 볼 수 있다. 대관령과 해안분지에서는 토목작업이 용이하기 때문에 강우 때문에 유실된 표토를 대체하기 위한 석비레 등을 주기적으로 성토하였고, 그 결과 토양 특성이 산 정상 부근에 위치한 지역들과 유의한 차이를 보였다. PCA 분석을 통한 고랭지 토양의 군집 분석결과에서는 유기물이 PC1에서 가장 큰 고유벡터값을 보였고, PC2로는 pH의 고유벡터값이 가장 컸다. PC1으로 대관령과 해안분지가 안반데기를 비롯한 산 정상부근 고랭지 지역과 분류되는 것을 확인할 수 있었고, PC2로 해안분지와 대관령이 분류되었고, 산 정상 부근 지점들은 대체로 비슷한 분포를 보였다. 이처럼 토양 특성으로 고랭지 지역별 토양이 다름을 확인할 수 있었으며, 유기물 함량이 주요 인자임을 알 수 있었다. 본 연구결과는 향후 고랭지 토양 관리에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was supported financially by a grant from the research project (PJ014141) of National Institute of Agricultural Sciences, Republic of Korea.

References

- Ayoubi, S., F. Khormali, K.L. Sahrawat, and A.C. Rodrigues de Lima. 2011. Assessing impacts of land use change on soil quality indicators in a loessial soil in Golestan province, Iran. *J. Agric. Sci. Technol.* 13:727-742.
- Barthes, B. and E. Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena* 47(2):133-149.
- Bray, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59(1):39-46.
- Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-total. p. 1085-1121. In D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, and M.E. Sumner (eds.) *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods*, 2nd edition. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Das, S., P. Bhattacharyya, and T.K. Adhya. 2011. Interaction effects of elevated CO₂ and temperature on microbial biomass and enzyme activities in tropical rice soils. *Environ. Monit. Assess.* 182(1):555-569.
- Guo, J.H., X.J. Liu, Y. Zhang, J.L. Shen, W.X. Han, W.F. Zhang, P. Christie, K.W.T. Goulding, P.M. Vitousek, and F.S. Zhang. 2010. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science* 327:1008-1010.
- Hong, Y.K., J.W. Kim, H.S. Kim, Y.H. Park, and S.C. Kim. 2021. Comparing soil chemical and biological properties in varied land use. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(1):20-32.
- Jagadamma, S., R. Lal, R.G. Hoefl, E.D. Nafziger, and E.A. Adee. 2008. Nitrogen fertilization and cropping system impacts on soil properties and their relationship to crop yield in the central Corn Belt, USA. *Soil Tillage Res.*

98:120-129.

- Jeong, J.H., K.S. Koo, C.H. Lee, and C.S. Kim. 2002. Physico-chemical properties of Korean forest soils by regions. *J. Korean Soc. For. Sci.* 91(6):694-700.
- Joo, J.H., and S.J. Kim. 2007. Evaluation of soil management practices using wild edible greens for reduction of soil erosion in highland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(6):488-494.
- Joo, J.H., C. Park, Y.S. Jung, J.E. Yang, J.D. Choi, W.J. Lee, and S.I. Kim. 2004. Evaluation of the dressed soil applied in mountainous agricultural land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37:245-250.
- Joo, J.H., Y.S. Jung, J.J. Kim, C.S. Park, and J.E. Yang. 2002. Characteristics of the dressed soil in farm land in Nae-rinchun upper stream and management practices to reduce soil erosion. *J. Agric., Life Environ. Sci.* 13:108-115.
- Jung, Y.H., D.H. Kum, J.H. Han, C.H. Jang, J.E. Yang, K.J. Lim, and K.S. Kim. 2015. Study on topsoil erosion indices for efficient topsoil management. *J. Korean Soc. Water Environ.* 31(5):543-555.
- Kemper, W.D., and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. p. 425-442. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods*, Agronomy Monograph No. 9. Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Kong, M.S., S.S. Kang, M.J. Chae, H.I. Jung, Y.G. Sonn, D.B. Lee, and Y.H. Kim. 2015. Changes of chemical properties in upland soils in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48:588-592.
- Le Bissonnais, Y. and D. Arrouays. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil Sci.* 48(1):39-48.
- Lee, C.S., G.J. Lee, K.Y. Shin, J.H. Ahn, and H.J. Cho. 2002. Status of fertilizer application in farmers' field for summer Chinese cabbage in highland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 35:306-313.
- Liebig, M.A., and J.W. Doran. 1999. Impact of organic production practices on soil quality indicators. *J. Environ. Qual.* 28:1601-1609.
- Miller, W.P., and D.M. Miller. 1987. A micro-pipette method for soil mechanical analysis. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 18(1):1-15.
- MoE. 2004. Comprehensive plan for reducing non-point pollution in highland areas. Ministry of Environment, Korea.
- NAAS. 2010. Fertilizer application recommendation for crops. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 961-1010. In D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, and M.E. Sumner (eds.) *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods*. Soil Science Society of America, Inc., and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- NIAS. 2000. Methods of soil and plant analysis. p. 29-134. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA.
- NIAS. 2001. Evaluation study on environmental affects by fertilizer use in cultivation lands. p. 3-46. The 3rd Year Completed Cooperation Report, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA.
- Park, B.G., T.H. Jeon, Y.H. Kim, and Q.S. Ho. 1994. Status of farmers' application rates of chemical fertilizer and farm manure for major crops. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 27:238-246.
- Park, C.S., Y.S. Jung, J.H. Joo, and J.E. Yang. 2004. Soil characteristics of the saprolite piled upland fields at highland in Gangwon province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37(2):66-73.
- Park, S., C. Oh, S. Jeon, H. Jung, and C. Choi. 2011. Soil erosion risk in Korean watersheds, assessed using the revised universal soil loss equation. *J. Hydrol.* 399(3):263-273.
- Park, S.J., J.H. Park, B.S. Kim, Y.H. Chung, D.J. Lee, O.H. Kwon, S.D. Park, and S.H. Lee. 2016. Assessing soil fertility status of edible wild plants fields in Ulleung island. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(4):368-374.

- Poesen, J. and H. Lavee. 1994. Rock fragments in top soils: Significance and processes. *Catena* 23(1):1-28.
- RDA. 2005. Status of fertilizer application and soil management in farmers' fields for major vegetable crops in alpine area. The 2nd Year Completed Cooperation Report, Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Reichert, J.M., and L.D. Norton. 1994. Aggregate stability and rain-impacted sheet erosion of air-dried and prewetted clayey surface soils under intense rain. *Soil Sci.* 158(3):159-169.
- Sumner, M.E. and W.P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. p. 1201-1230. In D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, and M.E. Sumner (eds.) *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical method*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Tabatabai, M.A. 1994. Soil enzymes. p. 775-833. In R.W. Weaver, S. Angle, P. Bottomley, D. Bezdicsek, S. Smith, A. Tabatabai, and A. Wollum (eds.) *Methods of soil analysis, Part 2: Microbiological and biochemical properties*. Soil Science Society of America, Inc., and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Yang, J.E., B.O. Cho, Y.O. Shin, and J.J. Kim. 2001. Fertility status in Northeastern alpine soils of South Korea with cultivation of vegetable crops. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 34:1-7.
- Yoon, J.H., Y.N. Kim, and K.H. Kim. 2021. Comparison of soil erodibility factors using gravel contents determined by different methods in highland of South Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(1):113-125.
- Zhang, Y.S., G.J. Lee, J.H. Joo, J.T. Lee, J.H. Ahn, and C.S. Park. 2007. Effect of winter rye cultivation to improve soil fertility and crop production in alpine upland in Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 26(4):300-305.
- Zhang, Y.S., K.H. Han, H.R. Cho, and S.W. Yoon. 2012. The influence of land elevation on organic matter distribution of surface soil. p. 91. In *Proceedings of the Spring Conference of the Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer*, Jeju, Korea.
- Zhang, Y.S., Y.H., Moon, Y.K. Sonn, K.H. Jung, H.R. Cho, and K.H. Han. 2015. Effect of deep ploughing with a spading machine and an excavator on improvement of physical properties in the highland applied saprolite. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48(5):564-569.