

Evaluation on Soil Characterization in Paddy Treated with Different Green Manure Crops and Tillage Method by Ordination Technique

Kwang Seop Kim, Ki Do Park, Suk-Jin Kim, Jong-Seo Choi, Yong Bok Lee¹, and Min-Tae Kim*

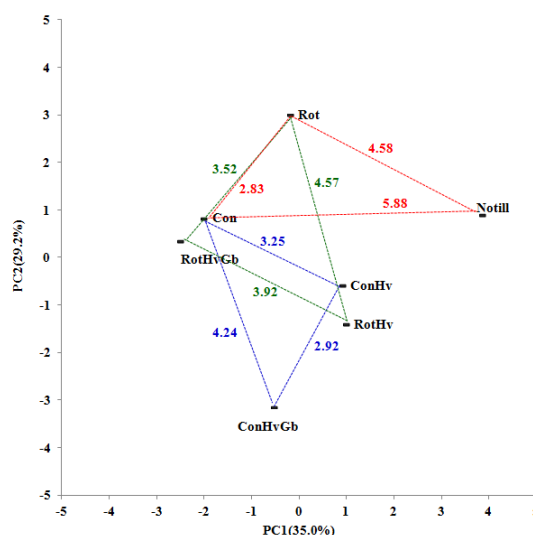
Crop Environment Division, NICS, RDA, Suwon, 441-853, Republic of Korea

¹*Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701 Republic of Korea*

(Received: June 22 2015, Revised: August 17 2015, Accepted: August 17 2015)

Ordination has been recognized useful method to analyze the effects of multiple environmental factors on dozens of species in vegetation ecology because of summarizing community data by producing a low-dimensional graphics. Main objective of this study was the application of ordination method, especially principal components analysis (PCA), to analyze the soil characterization on paddy treated by different green manure crops and tillage methods. Treatments included the three tillage treatments and two green manure crops as the following; (i) moldrotary + rotary tillage without green manure crop (Con), with (ii) hairy vetch (ConHv), and (iii) hairy vetch + green barely (ConHvGb), (iv) rotary tillage without green manure crop (Rot), with (v) hairy vetch (RotHv), and (vi) hairy vetch + green barley (RotHvGb), and (vii) no-tillage (Notill). Vectorial distance result from PCA of soil properties including physical, chemical, and microbial properties showed the two main difference. Firstly, soil properties among plots without green manure were strongly affected by tillage strength [Vectorial distance: Con-Notill (5.88) > Rot-Notill (4.58)] at PC1 (35.0%) axis. But it was difficult to find the fixed trend among plots when green manure crop was added in plot. Nevertheless, two groups were separated by adding green manure crop at PC2 (29.2%) axis. These results show that PCA ordination methods could be used the research for change of soil characterization.

Key words: Ordination, Principal components analysis, Green manure crop, Tillage, Paddy



Moldrotary+rotary tillage without green manure crop (Con), with hairy vetch (ConHv), and hairy vetch+green barely (ConHvGb), rotary tillage without green manure crop (Rot), with hairy vetch (RotHv), hairy vetch+green barely (RotHvGb), and no tillage (Notill).

Vectorial distance and PCA plot on paddy treated with different green manure crops and tillages.

*Corresponding author : Phone: +82316954006, Fax: +823169504011, E-mail: kmt6108@korea.kr

§Acknowledgement : This study was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ008690)”, Rural Development Administration, Republic of Korea and was supported by 2015 Postdoctoral Fellowship of National Institute of Crop Science, Rural Development Administration.

Introduction

풋거름작물 [녹비작물]의 논 토양환원 효과에 대한 연구는 주작물의 양분 공급 측면과 유기물 공급에 의한 토양 질 향상이라는 두 가지 큰 방향으로 다양하게 진행되어 왔다 (Ali, 1999; Becker et al., 1995; Jat et al., 2009). 국내에서는 논토양 중 풋거름작물 특히 헤어리베치의 토양환원 효과에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다 (Jeon, et al., 2008; Jeon, et al., 2010; Kim et al., 2002; Seo, et al., 2000; Yang et al., 2009). 국내의 논토양에서 풋거름작물 환원 연구의 특징은 주작물의 양분 공급적 측면과 풋거름작물의 재배 방법적 측면에 대한 연구가 많이 이루어 졌다. 논 토양특성과 관련되어서는 각각의 개별 토양특성에 미치는 영향에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 최근에 논토양에서 풋거름작물의 환원이 토양 질에 미치는 영향에 대한 종합적인 접근방법의 하나로 생산지속성 지수를 적용한 연구가 진행되었다 (Kim et al., 2014). 하지만 여전히 토양의 물리, 화학 및 미생물의 특성을 종합적으로 검토하는 연구는 미흡한 실정이다. 더욱이 풋거름작물의 환원 외에 경운방법이라는 인자가 더 해질 경우 이들에 대한 해석은 더욱 힘들어진다. 따라서 여러 가지 외부요인들을 동시에 고려한 풋거름작물 토양환원에 대한 해석이 필요하다.

배열법 (ordination method)은 다변량의 데이터 세트에서 일정한 경향을 찾고자 하는 데이터 분석의 한 방법으로 생태학에서 식생 및 생물군집분석을 위해 주로 사용되고 있다 (Austin, 1985). 이러한 배열법의 가장 큰 특징은 조사구간이 상이성을 바탕으로 저차원에 조사구를 배치함으로써 이들의 상관관계 혹은 변화 특성을 규명할 수 있는 장점을 가지고 있다 (Pielou, 1984). 토양분야에서는 미생물군집 특성에 미치는 외부요인의 영향에 대한 연구가 대표적인 예이다 (Bossio, and Scow, 1995). 대표적인 배열법의 종류로는 Nonmetric multidimensional scaling (NMDS), Principal components analysis (PCA), Correspondence analysis (CA), Detrended correspondence analysis (DCA), Redundancy analysis (RDA), Canonical correspondence analysis (CCA) 등이 있다. PCA (주성분분석)는 배열법 중에서 오래되고 비교적 간단한 방법의 하나로 널리 사용되고 있다 (Abdi and Williams, 2010; Zhang et al., 2008). 특히 요인분석에서 서로 다른 단위를 가진 변수들을 공분산행렬을 이용하여 서로 간의 상관관계를 나타낼 수 있으며, 서로 다른 성격을 가진 그룹들을 동일한 성격 (통합)으로 묶을 수 있는 장점을 가진다 (Abdi and Williams, 2010). 따라서 PCA는 토양의 물리, 화학, 및 미생물 특성변화 전체를 고려하여 토양 특성변화의 주요인을 파악할 수 있는 특징을 가지며, PCA를 이용한 배열법은 복잡한 인자들이 얽혀 있는 토양특성변화 해석에 유용한 방법의 하나가 될 수 있을 것이다.

본 연구는 풋거름작물이 환원된 논토양에서 경운방법에 따른 논토양의 특성변화를 PCA를 이용한 배열법을 통해 물리적, 화학적 및 미생물적 특성변화를 2차원에 단순화시켜 표현하고자 하였다. 이를 통해 풋거름작물 환원과 경운방법에 따른 논토양의 변화양상 (상이성 정도)과 초기 토양특성 변화 미치는 인자에 대해 살펴보고자 하였다. 또한 각각의 특성-물리적, 화학적 및 미생물적 특성-을 대표하는 주 인자를 선별하여 물리적, 화학적, 미생물적 특성 전체를 반영하는 배열과 처리구간의 벡터거리 (vectorial distance, VD)를 통해 풋거름 작물과 경운방법에 따른 토양특성 변화를 가시적으로 살펴보았다.

Materials and Methods

시험포장 및 재배방법 본 연구는 풋거름작물과 경운방법에 따른 논토양의 특성변화를 조사를 위해 2011년 국립식량과학원 (경기도 수원) 장내에 조성된 포장을 이용하였다. 각 처리구의 면적은 120 m² (6×20 m)으로 단구제로 하였으며, 토양조사를 위한 시료채취는 3개의 부표본점 (subplot)에서 3반복으로 실시하였다. 본 연구의 이화학 및 미생물군집 분석을 위한 토양 채취는 2014년 벼 수확 직후 (3년차)에 시행하였다. 시험 전 포장의 토양은 강서토 (양토)으로 pH (1:5), TN, Av.P₂O₅, Ex.K, Ex.Ca 및 Ex.Mg는 각각 6.0±0.21, 1.3±0.02 g kg⁻¹, 84±16.1 mg kg⁻¹, 0.15±0.04 cmol_c kg⁻¹, 5.0±0.23 cmol_c kg⁻¹ 및 1.0±0.09 cmol_c kg⁻¹이었다. 한편 표토와 심토의 용적밀도는 각각 1.3±0.12 및 1.5±0.06 Mg m⁻³였다. 공시 풋거름작물로는 헤어리베치와 풋거름보리를 이용하였으며, 풋거름작물을 환원은 주작물인 벼 재배 포장에 전년도 10월 초순에 파종, 재배하여 이듬해 벼 이앙 2주 전 (5월말) 토양에 환원하였다. 처리구는 경운방법에 따라 로터리+쟁기와 로터리 경운으로 구성했으며, 각 경운방법에 따른 처리구는 풋거름 작물을 환원하지 않는 처리구와 국내에서 논토양의 질소 양분공급을 위해 주로 이용되고 있는 헤어리베치를 환원한 처리구를 나누었다. 본 연구에서는 양분적인 측면 뿐만 아니라 토양물리성 향상을 위해 주로 이용되는 풋거름보리를 헤어리베치와 혼용한 처리구도 포함하여 이들의 토양 특성변화를 구명하고자 하였다. 한편 경운방법의 대조구로 무경운 처리를 포함하였으며, 무경운 처리구는 풋거름작물을 환원하지 않았다: 처리내용은 ①로터리+쟁기 처리구 (Con), ②헤어리베치만을 환원한 로터리+쟁기 처리구 (ConHv), ③헤어리베치+풋거름보리를 환원한 로터리+쟁기 처리구 (ConHvGb), ④로터리 처리구 (Rot), ⑤헤어리베치만을 환원한 로터리 처리구 (RotHv), ⑥헤어리베치+풋거름보리를 환원한 로터리 처리구 (RotHvGb) 및 ⑦무경운 (Notill) 등 7처리를 두었다.

재배기간 중 시비량은 벼 관행시비량 [N-P₂O₅-K₂O =

9.0–4.5–5.7 (kg/10 a)]에 준하여 시비하였으며, 풋거름작물 처리구는 2,000 kg/10 a에 해당되는 양을 무기질 질소비료 대체하여 시비하였다. 풋거름작물의 양이 충분하지 못한 경우 부족분을 외부포장에서 재배한 풋거름작물로 보충하였으며, 풋거름작물을 환원하지 않은 처리구는 질소원으로 요소를 처리하였다. 인산과 칼리 비료는 용과린과 염화칼리를 이용하였다. 공시재배 벼 품종 (남평)을 기계이앙 하였으며, 무경운은 자체 개발한 기계를 사용하였다. 기타 재배관리는 농촌진흥청 벼 표준 재배법에 준하여 실시하였다 (RDA, 2015).

토양 물리성 분석 본 연구의 풋거름작물 환원 및 경운 방법에 따른 토양특성 변화를 조사하기 위한 분석 시료채취는 2014년 10월 초 (벼 수확 직후)에 작토층 (0–15 cm)에서 채취하였다. 분석항목으로는 용적밀도, 공극율, 내수성입단화도, 토양경도 등 5개 항목을 실시하였다. 토양물리성은 경운정도에 따라 변화양상이 클 것으로 판단되어, 작토층을 로터리경운 (경운깊이 약 10 cm)과 관행경운 (경운깊이 약 20 cm)이 행해지는 깊이에 따라 0–5 cm와 10–15 cm로 나누어 시료를 채취하여 이들의 물리성 변화를 조사하였다. 용적밀도는 100 cm³의 코어 (core)를 이용하였으며, 공극률과 용적밀도는 농토양 물리성 측정법에 준하여 분석하였다 (IRRI, 1987). 내수성입단화도는 토양의 내수성입단화율은 wet sieving 기기 (Eijkelkamp 08. 13, Netherlands)를 이용하여 분석하였다 (Jeon et al., 2010). 토양경도는 야마나카 경도계 (Fujiwara Scientific Company, Japan)를 이용하여 5 cm와 15 cm 깊이에서 측정하였으며, 원추관입저항력 (Penetrolgger, Royal Eijkelkamp Company, Netherlands)은 60 cm까지 측정 후 5 cm와 15 cm의 값을 주성분분석을 이용한 토양 물리적 특성변화의 인자로 이용하였다.

토양 화학성 분석 벼 수확 직후 작토층 (0–15 cm)에서 채취한 토양시료는 풍건한 다음 2 mm 체에 통과시킨 후 분석시료로 이용하였다. pH, EC, 전탄소 (TC), 전질소 (TN), 유효인산, 유효구산 및 양이온치환가능 K, Ca, Mg 등 9개 항목에 대하여 농촌진흥청 토양화학 분석법에 준하여 실시하였다 (NIAST, 2000). 토양 pH (1:5)는 초자전극법, TC와 TN은 원소분석기 (Leco CNS-2000, USA), 유효인산은 Lancaster 법, 유효구산은 1N NaOAc (pH 4.0)로 침출하여 흡광광도계 (Cintra 404, GBC Scientific Equipment Ltd.)로 분석했으며, 치환성 양이온은 1N NH₄OAc (pH 7.0)로 침출하여 유도결합플라즈마분광광도계 (ICP-OES, GBC SDS-270)로 분석하였다.

토양 미생물 군집 분석 본 연구의 토양미생물 군집 분석을 위한 시료는 물리성과 화학성 분석 시료채취 시 동

시에 실시하였다. 미생물 군집의 변화는 토양의 외부조건에 많은 영향을 받는다. 특히 농토양에서는 재배기간 중 산화와 환원 과정의 반복으로 연내에 그 변화가 큰 것으로 알려져 있다. 그렇지만 본 연구에서는 동일한 경운방법과 풋거름작물 환원이 진행되었을 때 토양특성 변화를 조사에 그 목적을 두고 있기 때문에 연구 3년차에 벼 수확 직후 미생물 분석시료를 채취하였다 (Zhang et al., 2007). 각 처리구별 3지점에서 0–15 cm 깊이 (작토층)의 토양을 채취하였으며, 채취 지점별로 3지점의 시료를 혼합하여 분석시료로 이용하였다. 토양 미생물의 인지질지방산 (PLFA, phospholipid fatty acid)의 분석은 Frostegard et al. (1991)의 분석방법에 따랐으며, 냉동건조한 토양시료 2 g에 citrate buffer (1.5 mL, pH 4), chloroform (1.9 mL), methanol (3.8 mL), Bligh and Dyer 시약 (2 mL)를 혼합하여 지질을 추출한 후 silica column (SUPELCO, Pennsylvania, USA)으로 neutral-, glyco- 및 phospho-lipid로 분리하였다 (Daquiao et al., 2013). 지방산의 정성과 정량은 MIDI software (Microbial ID, Inc., Newark, DE, USA)을 이용하였으며, 이 때 각 지방산의 값은 표준으로 넣은 19:0 지방산을 이용하여 그 양을 환산하였다. GC-MIDI에서 검출된 피크 중에서 탄소수가 10개에서 20개인 인지질 지방산 값을 총 PLFAs의 퍼센트 비율로 표시했으며, 5개 이상의 시료에서 동시에 검출된 지방산의 종류는 모두 48개였다. 본 연구에서 이용한 인지질 지방산의 지표 (biomarker)는 다음과 같다: ①불포화 지방산: 15:1 ω 6c, 16:1 ω 9c, 16:1 ω 5c, 17:1 ω 8c, 18:1 ω 9c, 18:1 ω 7c, 20:1 ω 9c, 20:1 ω 7c, ②포화지방산: 12:0, 13:0, 15:0, 16:0, 17:0, 18:0, 20:0, ③그람음성균: 14:0, 16:0, 18:0, 16:1 2OH, 17:1 ω 8c, 17:0 CYCLO, ANTEISO 17:1 ω 9c, 18:1 ω 7c, 20:1 ω 9c, 20:4 ω 6,9,12,15c, ④그람양성균: 14:0 ISO, 15:0, 15:0 ISO, 15:0 ANTEISO, 16:0 ISO, 17:0, 17:0 ISO, 17:0 ANTEISO, ⑤곰팡이: 18:0 ANTE/18: 2 ω 6,9c, 18:1 ω 9c, 18:3 ω 6c(6,9,12), 20:0, ⑥방선균: 16:0 10 methyl, 17:0 10 methyl, ⑦균근균: 16:1 ω 5c, ⑧황환원균: 16:0 10 methyl, 17:0 CYCLO (Bossio and Scow, 1998; Daquiao et al., 2013; Eo et al., 2015; Frostegard and Baath, 1996; Kaur et al., 2005; Li et al., 2006; Park and Kim, 2010; Zelles, 1999)

토양특성 변화 인자 선택 및 배열법 풋거름작물 환원과 경운방법에 따른 물리적, 화학적 및 미생물적 특성 전체를 고려한 농토양의 특성변화를 살펴보기 위해, 본 연구에서는 두 단계의 과정을 거쳤다. 즉 각각의 특성에 가장 큰 영향을 주는 인자를 주성분 분석을 통해 선정한 후, 이들 인자들에 대해 주성분 분석을 이용하여 처리구간 상이성을 2차원 평면에 표현하였다. 첫 번째 단계, 즉 주요 인자선발의 목적은 가중치와 중복성을 피하기 위해서였다 (Kim et al.

2014). 2차 평면상에 배열을 위해 주성분 분석에서 두 개의 주요성분 PC1과 PC2를 선택하였으며, 처리구별 벡터거리 (vectorial distance : VD)는 Eq. 1을 이용하였다 (García-Ruiz et al. 2008).

$$VD = \sqrt{(PC1X_i - PC1X_j)^2 + (PC2Y_i - PC2Y_j)^2} \text{ (Eq. 1)}$$

여기서, PC1과 PC2는 각각 공간배치에서 가로축과 세로 축이다. 또한 X_i, Y_i 는 i 처리구의 PC1축 및 PC2축에서 점수를 나타낸 반면, X_j, Y_j 는 j 처리구 즉 i 처리구와 평면상에서의 벡터거리를 알아보고자 하는 처리구의 PC1 및 PC2에서의 값을 의미한다.

통계처리 주성분 분석의 값은 R 프로그램 3.0.2 버전 (2013)을 사용하여 공분산 매트릭스를 활용한 분산분석 (ANOVA, analysis of variance)으로 분석하였다. 토양의 물리, 화학 및 미생물 군집 분석 값은 R 프로그램 3.0.2 버전 (2013)을 이용하여 ANOVA 분석 후 최소유의차검정 (LSD, Least Significant Difference)으로 평균간 유의성 ($P < 0.05$)을 검정하였다.

Results and Discussion

토양의 물리적 특성 경운방법과 풋거름작물의 환원은 논토양의 물리성에 영향을 주는 것으로 잘 알려져 있으며, 풋거름작물 환원과 경운강도가 약할수록 물리성에 긍정적인 영향을 주는 것으로 잘 알려져 있다 (Astier et al., 2006; Jat et al., 2009; Jeon et al., 2008; Ray and Gupta 2001). 본 연구에서는 무경운 처리를 제외하고는 처리구간의 물리적 특성에서 뚜렷한 유의성을 보이지 않았다 (Table 1). 토양 깊이 0-5 cm에서 밀도는 Con (1.24 Mg m^{-3}),

RotHvGb (1.20 Mg m^{-3})과 Notill (1.21 Mg m^{-3})의 처리에서 Rot (1.10 Mg m^{-3}) 처리에서 유의성을 보였고, 10-15 cm에서는 Rot (1.60 Mg m^{-3})와 Notill (1.54 Mg m^{-3}) 사이에 뚜렷한 차이를 보였다. 공극률에서 Rot (1.60 Mg m^{-3}) 처리로 ConHv (1.59 Mg m^{-3}) 처리를 제외한 모든 처리구와 유의성을 보였으며, 가장 높은 값을 보였다. 풋거름작물이 포함되지 않은 처리구 (Con, Rot, Notill)간의 용적밀도와 공극률은 경운깊이에 의해 영향을 받는 것으로 나타났지만 풋거름작물이 환원되었을 때는 매우 복잡한 양상을 보였다. 이는 토양의 물리성은 경운에 의해 큰 영향을 받지만 풋거름작물에 의해서도 영향을 받음을 의미한다 (Jeon et al., 2010). 한편 무경운 처리구는 표토의 공극률 (1.21%)과 심토의 공극률 (1.54%) 사이에 차이가 가장 작았으며, 내수성 입단화도는 RotHvGb (87.5%)에서 가장 높았으며, Rot (79.4%)와 Notill (77.1%)에서 낮은 값을 가졌다. 아마나카 경도계를 이용한 토양의 경도에서는 5 cm 부근에서 Notill 처리구 (17.0 mm)에서 타 처리구와 뚜렷한 차이를 보인 반면, 원추관입저항력에서는 15 cm 부근 (1.63 Mpa)에서 타 처리구에 비해 월등히 높은 값으로 유의성을 가졌다. 비록 토양물리성에서 처리간에 유의성을 보이는 처리구가 존재하고 있었지만, 이들 사이에 경운방법과 풋거름처리 환원에 따른 뚜렷한 경향을 찾아보기는 힘들었다. 이는 경운방법과 풋거름작물 환원 방법에 따른 복합적인 작용은 물론 본 연구의 비교적 짧은 기간 (3년)에 의한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 각각의 결과들이 복합적으로 작용하여 나타난 처리별 토양 특성의 상이성 조사를 실시하고자 하였다.

이에 본 연구에서는 다양한 물리적 토양 특성의 결과를 보다 쉽게 판단하기 위한 방법으로 주성분 분석을 시행하여 이를 2차원 평면에 배치하였다 (Table 2, Fig. 1). 처리구별 차이를 45.8% 설명할 수 있는 PC1의 주요 인자는 토양밀도와 공극율이었고, 26.4% (PC2)의 처리별 차이를 나타내는

Table 1. Effect of different management practices on physical properties of paddy soil.

Plots	Bulk density		Porosity		WSA	Soil hardness (SHY) [*]		CPR	
	Mg m ⁻³		%			mm		Mpa	
	0-5 cm	10-15 cm	0-5 cm	10-15 cm	%	5 cm	15 cm	5 cm	15 cm
Con	1.24 ^a	1.55 ^{bc}	54.9 ^{ab}	41.4 ^{ab}	82.5 ^{abc}	14.3 ^{bc}	20.7 ^{bc}	0.33 ^d	0.37 ^c
ConHv	1.18 ^{ab}	1.59 ^{ab}	56.7 ^{ab}	40.3 ^b	82.0 ^{abc}	15.7 ^{ab}	20.7 ^{bc}	0.77 ^a	0.77 ^b
ConHvGb	1.14 ^{ab}	1.54 ^c	57.3 ^{ab}	43.5 ^a	84.8 ^{ab}	14.3 ^{bc}	20.0 ^c	0.77 ^a	0.77 ^b
Rot	1.23 ^{ab}	1.60 ^a	53.7 ^b	40.3 ^b	79.4 ^{bc}	16.5 ^{ab}	24.0 ^a	0.50 ^c	0.53 ^{bc}
RotHv	1.10 ^b	1.54 ^c	58.8 ^a	43.0 ^a	78.2 ^c	12.5 ^{bc}	20.7 ^{bc}	0.63 ^b	0.83 ^b
RotHvGb	1.20 ^a	1.56 ^{bc}	58.0 ^{ab}	41.0 ^b	87.5 ^a	14.3 ^{bc}	22.3 ^{ab}	0.60 ^{bc}	0.50 ^{bc}
Notill	1.21 ^a	1.54 ^c	54.3 ^b	42.0 ^{ab}	77.1 ^c	17.0 ^a	21.3 ^{bc}	0.77 ^a	1.63 ^a

Notes. WSA, water stable aggregates; CPR, cone penetrometric resistance. Values are expressed as means followed the different regular letters in a column are significantly different ($P < 0.05$) by the least significant different (LSD) test.

^{*} Soil hardness was measured by Yamanaka System Hardness Sensors (Fujiwara Scientific Company, Japan).

Table 2. Results of principal component analysis (PCAs) of physical properties on paddy soil used in this study.

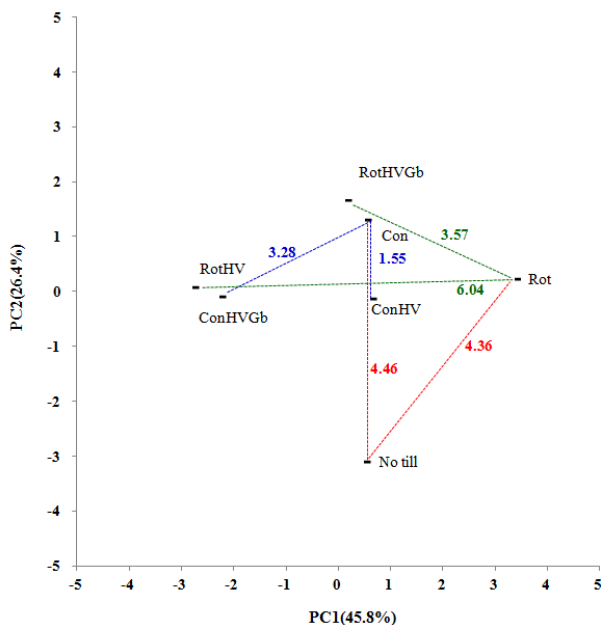
PCs	PC1	PC2	PC3	PC4
Eigenvalue	4.12	2.37	1.13	0.78
Percentage	45.8	26.4	12.5	8.7
Cumulative percent	45.8	72.2	84.7	93.4
Eigenvectors				
Bulk density (0-5 cm)	0.430	0.018	0.260	0.436
Bulk density ()	0.379	0.119	-0.471	-0.289
Porosity (topsoil)	-0.393	0.261	-0.350	-0.135
Porosity (subsoil)	-0.429	-0.119	0.284	0.024
WSA	-0.056	0.461	-0.291	0.674
Soil hardness (SHY-5)	0.359	-0.394	-0.157	0.285
Soil hardness (SHY-15)	0.384	0.057	-0.110	-0.371
CPR5	-0.211	-0.387	-0.621	0.164
CPR15	-0.101	-0.618	-0.024	0.079

Notes. WSA, water stable aggregates; CPR5, cone penetrometric resistance at 5 cm of soil layer; CPR15, cone penetrometric resistance at 15 cm of soil layer.

* Boldface eigenvalues correspond to the PCs examined for the index.

** Boldface factor loading are considered highly weighted.

*** Bold-italic factor loading correspond to the indicators included in the nutrient, microbiological, and yield index.



※ Moldrotary+rotary tillage without green manure crop (Con), with hairy vetch (ConHv), and hairy vetch+green barely (Con-HvGb), rotary tillage without green manure crop (Rot), with hairy vetch (RotHv), hairy vetch+green barley (Rot-HvGb), and no tillage (Notill).

Fig. 1. Vectorial distances between treatments with PC values on physical properties.

주요 인자는 15 cm 부근의 원추관입저항력과 내수성입단화도였다 (Table 1). 처리구별 벡터거리 분석한 결과, 관행경운 (Con)에서 헤어리베치 (ConHv)와 헤어리베치+풋거름보리 (ConHvGb) 처리에 따른 벡터거리는 각각 1.55와 3.28인데 비해, 로터리경운 (Rot)에서는 이보다 큰 값을 보였다 (Rot-RotHv: 6.04, Rot-RotHvGb: 3.57). 이는 토양의 물리성 변화의 차이에 경운방법과 풋거름작물이 동시에 관여하고 있음을 나타내는 것은 물론 토양 물리성에 미치는 영향은 경운강도가 풋거름작물 보다는 크다는 것을 의미한다. 무경운 처리구와 관행 및 로터리 경운의 벡터거리 비교에서도 확인할 수 있었다 (Notill-Con: 4.46, Notill-Rot: 4.36).

토양의 화학적 특성 경운방법과 풋거름작물 환원이 논토양의 화학적 특성변화에 미치는 영향에 대한 인자로 본 연구에서는 9가지 인자를 조사하였다 (Table 3). $Av.P_2O_5$ 에서는 헤어리베치를 처리한 구에서 높은 값을 가졌는데 (ConHv: 123.0 mg kg^{-1} , RotHv: 126.0 mg kg^{-1}), 이는 풋거름작물 특히 두과작물에 대한 여러 연구자들의 결과와 유사하였다 (Astier et al., 2006; Hargrove, 1986). RotHv와 RotHvGb 처리구에서 pH가 6.4로 타 처리구에 비해 유의적으로 높았다. 풋거름작물이 환원된 처리구 Con, Rot와 Notill에의 EC는 각각 0.74, 0.72 및 0.80 (ds m^{-1})을 보인 반면 풋거름작물이 환원되지 않은 처리구 ConHv, ConHvGb, RotHv와 RotHvGb에서는 0.67, 0.64, 0.67 및 0.62 (ds m^{-1})로 낮은 값을 가졌다. TC와 TN은 비록 일부 처리구별 유의성을 가졌지만, 큰 차이를 보이지 않았다. $Av.SiO_2$ 는 RotHvGb에서 가장 높은 값 (42.8 mg kg^{-1})을 가졌고, Notill에서 가장 낮은 값 (35.6 mg kg^{-1})을 보였다. 한편 치환성 양이온의 함량에서는 비록 처리구별 차이에 유의성을 가지는 결과들이 존재했지만, 그 차이는 크지 않았다.

토양 화학성 결과에 대한 주성분 분석을 수행했을 때, 처리구별 차이를 46.5% 설명할 수 있는 PC1의 주요 인자는 pH, EC, TC 및 $Av.SiO_2$ 였으며, 29.1% (PC2)의 처리구별 차이를 나타내는 주요 인자는 TN과 치환성 양이온(K, Ca, Mg)였다 (Table 4). 주성분 분석 결과를 바탕으로 이들을 2차원 평면에 배열했을 때의 결과는 Fig. 2와 같았다. 토양 화학성 변화는 로터리 경운 (Rot)에서는 헤어리베치 (RotHv)와 헤어리베치+풋거름보리 (RotHvGb)를 환원했을 때 벡터거리는 각각 2.43과 3.91인 반면, 관행경운 (Con)에서는 헤어리베치 (ConHv)와 헤어리베치+풋거름보리 (ConHvGb)를 환원했을 때 4.11과 4.09의 벡터거리를 보였다. 이 결과는 토양 물리성 변화와는 상반된 결과였다. 한편 일반적인 예상과는 달리 로터리경운 (Rot)과 무경운 처리구 (Notill)간의 거리 (DV: 4.11)가 관행경운 처리구 (Con)와 무경운 처리구간의 거리 (DV: 2.60)보다 더 길었다. 이는 경운방법에 따른 논토양 화학성 변화 역시 단순히 경운강도에 의해 변화

Table 3. Effect of different management practices on chemical properties of paddy soil.

Plots	pH	EC	TC	TN	Av.P ₂ O ₅	Av.SiO ₂	Exchangeable cations		
							K	Ca	Mg
	1:5	ds m ⁻¹	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹		
Con	6.3 ^{ab}	0.74 ^b	21.5 ^{ab}	2.35 ^b	92.9 ^c	41.0 ^{bc}	0.48 ^a	6.5 ^{bc}	1.7 ^a
ConHv	6.2 ^{bc}	0.67 ^c	21.8 ^a	2.55 ^a	123.0 ^a	36.3 ^{cd}	0.33 ^b	6.3 ^{cd}	1.2 ^b
ConHvGb	6.1 ^{bc}	0.64 ^c	21.0 ^{ab}	2.45 ^{ab}	93.0 ^c	36.7 ^{bcd}	0.29 ^c	6.1 ^d	1.1 ^d
Rot	6.2 ^{abc}	0.72 ^b	21.2 ^a	2.45 ^{ab}	110.5 ^b	39.2 ^b	0.29 ^c	6.1 ^d	1.1 ^{cd}
RotHv	6.4 ^a	0.67 ^c	20.1 ^b	2.41 ^b	126.0 ^a	42.8 ^b	0.34 ^b	6.7 ^{ab}	1.2 ^{bc}
RotHvGb	6.4 ^a	0.62 ^c	20.0 ^b	2.35 ^b	93.4 ^c	48.2 ^a	0.28 ^c	6.6 ^{bc}	1.1 ^{cd}
Notill	6.0 ^c	0.80 ^a	21.3 ^a	2.50 ^{ab}	113.8 ^b	35.6 ^d	0.45 ^a	6.9 ^a	1.7 ^a

Notes. EC, electrical conductivity; TC, total carbon; TN, total nitrogen. Values are expressed as means followed the different regular letters in a column are significantly different (P < 0.05) by the least significant different (LSD) test.

Table 4. Results of principal component analysis (PCAs) of chemical properties on paddy soil used in this study.

PCs	PC1	PC2	PC3	PC4
Eigenvalue	4.18	2.62	1.35	0.52
Percentage	46.5	29.1	15.1	5.8
Cumulative percent	46.5	75.6	90.7	96.5
Eigenvectors				
pH	-0.386	0.219	0.163	-0.640
EC	0.415	0.231	0.027	0.010
TC	0.392	-0.185	-0.272	-0.506
TN	0.302	-0.414	0.311	0.094
Av.P ₂ O ₅	0.137	-0.152	0.764	-0.334
Av.SiO ₂	-0.413	0.302	0.046	-0.078
Ex.K	0.338	0.421	-0.075	-0.239
Ex.Ca	0.089	0.474	0.447	0.385
Ex.Mg	0.350	0.422	-0.100	-0.060

Notes. EC, electrical conductivity; TC, total carbon; TN, total nitrogen; Av, available; Ex, exchangeable.

되는 것이 아니라 복합적인 영향을 받고 있는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 이러한 변화의 방향이 일시적인 것인지 아니면 지속적인지에 대한 장기적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

토양 미생물 군집 특성 논토양의 생물학적 특성변화 조사를 위해 본 연구에서는 미생물 군집 분석 방법의 하나로 사용되고 있는 인지질지방산 분석을 이용하였다. 인지질 지방산을 이용하여 미생물 군락을 세균, 곰팡이, 방선균, 근균, 황화원균으로 나누어 풋거름작물 환원과 경운방법에 따른 토양 미생물 군집의 차이를 분석한 결과는 Table 5와 같았다. 본 연구에서 미생물 군집의 특성은 전체 미생물 수에 의해 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 특히 무경운에서는

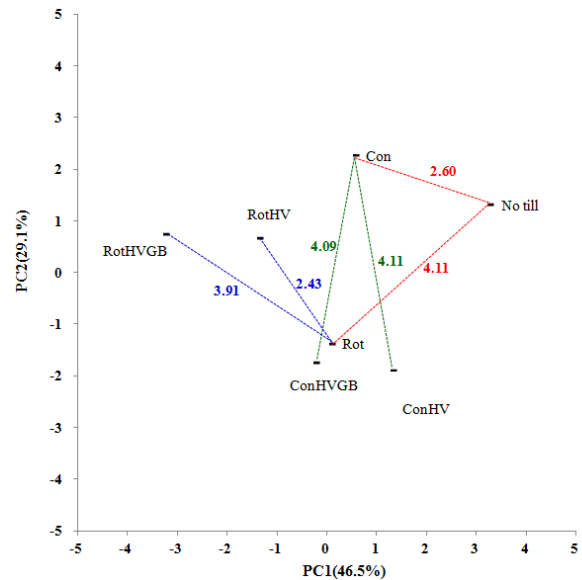


Fig. 2. Vectorial distances between treatments with PC values on chemical properties. For abbreviations, see Fig. 1.

타 처리와 비교했을 때 큰 차이를 보였다. 이는 Lee et al. (2011)의 연구결과와 유사하였으며, 이러한 원인은 무경운 토양에서는 경운에 의한 토양교란이 적어 유기물 분해가 적기 때문인 것으로 판단된다 (Beare et al, 1994). 한편, 로터리 경운 (Rot)이 전체 미생물 수에서 타 처리구와 유의성을 보였지만, 그 외의 처리구간 혹은 성분 간의 결과에서는 큰 차이를 보이지 않았다. Kim and Lee (2011)는 풋거름작물이 환원된 논토양에서 초기생육에서는 내성균군의 증가, 그람음성균의 증가, 불포화지방산의 증가 등이 나타난다는 보고를 하였는데, 본 연구에서는 동일한 결과를 보이지는 않았다. 이는 본 연구에서는 미생물 분석을 위한 토양시료 채취 기간의 차이에 의한 것으로 판단된다. 미생물은 산화, 환원조건과 유기물 투입시기 및 종류에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

Table 5. Effect of different management practices on microbial communities of paddy soil.

Plots	Tot	Bac	Act	Fun	AMF	SRB	G ⁻ /G ⁺	Fun/Bac	Uns/Sat
				PLFAs - nmol g ⁻¹			Ratio		
Con	478.8 ^c	255.3 ^b	19.8 ^c	89.7 ^c	4.7 ^c	25.3 ^a	2.56 ^{ab}	0.35 ^b	0.98 ^b
ConHV	472.7 ^c	260.2 ^b	22.5 ^c	88.8 ^c	5.1 ^c	19.5 ^b	2.41 ^{ab}	0.34 ^b	0.99 ^b
ConHVGB	453.7 ^c	244.8 ^b	20.6 ^c	82.3 ^c	5.1 ^c	21.6 ^{ab}	2.89 ^a	0.34 ^b	0.99 ^b
Rot	570.7 ^b	274.0 ^b	27.3 ^b	138.1 ^b	8.7 ^b	22.5 ^{ab}	2.02 ^b	0.52 ^a	1.95 ^a
RotHV	502.4 ^c	274.6 ^b	22.2 ^{bc}	92.6 ^c	5.4 ^c	21.4 ^{ab}	2.43 ^{ab}	0.34 ^b	1.00 ^b
RotHVGB	463.1 ^c	243.9 ^b	21.1 ^c	84.5 ^c	5.7 ^c	23.0 ^{ab}	2.23 ^{ab}	0.35 ^b	1.03 ^b
Notill	710.8 ^a	362.0 ^a	33.9 ^a	161.4 ^a	15.1 ^a	19.7 ^b	2.37 ^{ab}	0.45 ^{ab}	1.20 ^{ab}

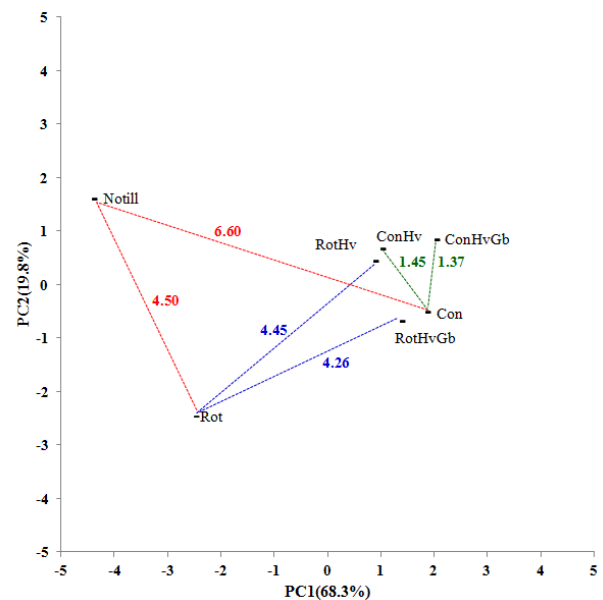
Notes. Tot, total; Bac, bacterial; Act, Actinomycetes; Fun, fungal; AMF, Arbuscularmycorrhizal fungi; SRB, Sulphate reducing bacteria, G⁻, Gram-negative bacteria; G⁺, Gram-positive bacteria; Uns, monounsaturated; Sat, saturated. Values are expressed as means followed the different regular letters in a column are significantly different ($P < 0.05$) by the least significant different (LSD) test.

Table 6. Results of principal component analysis (PCAs) of microbial communities on paddy soil used in this study.

PCs	PC1	PC2	PC3	PC4
Eigenvalue	6.15	1.79	0.65	0.38
Percentage	68.3	19.8	7.2	4.2
Cumulative percent	68.3	88.1	95.3	99.5
Eigenvectors				
Tot	-0.389	0.147	0.201	-0.093
Bac	-0.355	0.313	0.181	-0.199
Act	-0.400	0.133	-0.013	-0.003
Fun	-0.400	-0.015	0.136	0.720
AMF	-0.383	0.180	0.173	-0.060
SRB	0.169	-0.467	0.835	-0.218
G ⁻ /G ⁺	0.217	0.467	0.396	0.758
Fun/Bac	-0.344	-0.357	0.025	0.329
Uns/Sat	-0.253	-0.533	-0.155	0.460

Notes. Tot, total; Bac, bacterial; Act, Actinomycetes; Fun, fungal; AMF, Arbuscularmycorrhizal fungi; SRB, Sulphate reducing bacteria, G⁻, Gram-negative bacteria; G⁺, Gram-positive bacteria; Uns, monounsaturated; Sat, saturated.

미생물 군집에 대한 주성분 분석에서 처리구간의 차이를 68.3% 대변할 수 있는 PC1의 주요한 요인으로 전미생물체량, 방선균, 곰팡이, 근균 등이었으며, PC2 (19.8%)는 포화 지방산과 불포화지방산비, 그람 양성균과 그람 음성균의 비, 황환원균이 주요한 요인인 것으로 나타났다 (Table 6). 2차원 평면상에서 이들의 처리간의 차이성을 살펴본 결과, 관행경운에서는 쪼갯겨름 작물이 환원되었을 때 벡터거리의 차이가 작은 반면 (Con-ConHv: 1.45, Con-ConHvGb: 1.37), 로터리경운에서는 헤어리베치를 환원한 처리구에서는 4.45, 헤어리베치+쪼갯겨름 보리구에서는 4.26의 벡터거리로 관행경운에 비해 큰 차이를 보였다 (Fig. 3). 본 결과는 물리적 특성과 비슷한 결과, 즉 미생물 특성의 변화는 쪼갯겨름작물

**Fig. 3. Vectorial distances between treatments with PC values on microbial properties. For abbreviations, see Fig. 1.**

환원보다는 경운방법에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 무경운과 관행경운 및 로터리경운 사이의 벡터 거리를 비교했을 때도 유사한 결과를 보였다 [(DV: Notill-Con (6.60) > Notill-Rot (4.50)].

전체 토양 특성 변화 쪼갯겨름작물 환원과 경운방법에 따른 물리적, 화학적 및 미생물적 특성 전체를 고려한 논토양의 특성변화를 살펴보기 위해, 본 연구에서는 두 단계의 과정을 거쳤다. 즉 각각의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자들을 주성분 분석으로 선별하였다 (Kim et al. 2014). 이 과정을 거쳐 선별된 요인은 물리성에서는 표토의 용적밀도를 포함한 6개 인자, 화학성은 전기전도도를 포함한 4개 인자 그리고 미생물상에서는 토양 중 곰팡이 생체량을 비롯한 3개의 인자를 구할 수 있었다 (Table 2, 4 & 6 참조). 이들

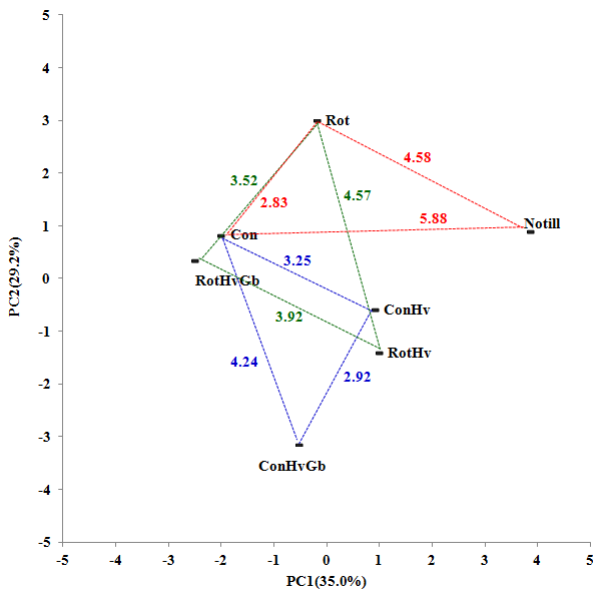


Fig. 4. Vectorial distances between treatments on PC values selected from physical, chemical and microbial properties. For abbreviations, see Fig. 1.

을 2차 평면상에 배열한 결과는 Fig. 4와 같았다. 2차원 평면에서 처리구별 차이를 35% 설명 가능한 PC1에서는 경운강도에 의한 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다. 즉 경운강도가 가장 강한 Con은 좌측에 Rot는 중간, Notill은 우측에 위치했다. 이들 차이는 15 cm 깊이에서 원추관입저항력, 내수성입단화도, 유효규산 및 황환원균이 차이의 주요한 인자로 작용하는 것으로 나타났다 (Table 7). 풋거름작물이 환원되었을 때, 풋거름작물과 경운강도의 복합적인 작용으로 풋거름작물이 환원된 처리구의 특성을 규정하기에는 매우 복잡하였다. 이는 본 연구가 토양의 특성변화에 비교적 장기적인 기간을 필요로 하는 논토양의 특성에 기인한 것으로 판단되며 향후 이러한 차이의 진행과정에 대한 장기적인 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

그럼에도 본 연구의 결과에서 몇 가지 주목할만한 점은 토양의 특성 차이를 29.2%로 설명이 가능한 PC2 축에서 풋거름작물을 환원했을 때와 하지 않았을 때 확연히 두 그룹으로 나뉜다는 점이다. 즉 풋거름작물을 환원한 처리구는 평면배열의 아래에 위치했으며, 이들 차이의 주요한 요인으로는 주로 용적밀도, 공극율, 토양경도 등에 의한 물리성에 의한 영향으로 나타났다. 화학성은 전기전도도가 미생물특성에서는 G^-/G^+ 가 주요인으로 작용하는 것으로 나타났다. 경운방법별 풋거름작물 종류의 차이에 따른 토양특성 변화는 관행경운에서는 헤어리베치와 풋거름보리를 동시에 환원했을 때가 헤어리베치를 단독으로 환원했을 때보다 더 큰 벡터거리를 보였다 [(VD: Con-ConHvGb (3.25) > Con-ConHv (4.24)]. 반면 로터리경운에서는 반대의 결과를 가졌다. 따라서 본 연구에서는 경운강도는 풋거름작물의 환원효

Table 7. Results of principal component analysis (PCAs) on selected factors from physical, chemical and microbial properties on paddy soil used in this study.

PCs	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Eigenvalue	4.56	3.80	1.72	1.42	0.92
Percentage	35.0	29.2	13.2	10.9	7.0
Cumulative percent	35.0	64.2	77.4	88.3	95.3
Eigenvectors					
BDt	-0.092	0.412	-0.249	-0.259	0.281
PORs	0.084	-0.387	-0.291	0.201	-0.090
WSA	-0.377	-0.156	0.086	-0.117	0.490
Soil hardness (SHY-15)	-0.063	0.429	0.278	-0.017	0.081
CPR5	0.286	-0.276	0.292	-0.154	0.412
CPR15	0.433	-0.050	-0.111	0.074	0.339
EC	0.280	0.281	-0.436	-0.043	-0.088
Av.P ₂ O ₅	0.325	0.023	0.380	0.163	-0.449
Av.SiO ₂	-0.312	0.059	0.153	0.579	0.160
Ex.Ca	0.195	0.044	-0.208	0.656	0.291
Fun	0.326	0.319	-0.120	-0.054	0.146
SRB	-0.378	0.134	-0.352	0.128	-0.196
G ⁻ /G ⁺	-0.023	-0.434	-0.363	-0.189	-0.038

Notes. Tot, total; Bac, bacterial; Act, Actinomycetes; Fun, fungal; AMF, Arbuscularmycorrhizal fungi; SRB, Sulphate reducing bacteria, G⁻, Gram-negative bacteria; G⁺, Gram-positive bacteria; Uns, monounsaturated; Sat, saturated.

과에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 이에 대한 장기적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Conclusion

여러 가지 외부 요인들이 복합적으로 얽혀있을 때, 토양 특성 변화를 이해하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 풋거름작물 환원과 경운조건이 다른 논토양에서 물리, 화학, 및 미생물 특성이 반영된 토양특성변화를 PCA를 활용한 배열법으로 살펴보았다. 토양의 물리적 특성과 미생물 군집은 풋거름작물 환원보다는 경운방법에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 화학적 특성은 이와는 다른 양상 즉 풋거름작물에 의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 물리, 화학 및 미생물 특성 모두를 고려한 배열법 분석에서 토양특성변화는 풋거름작물을 환원여부에 따라 PC2 (29.2%) 축에서 두 그룹으로 나뉘었다. 본 연구에서는 이에 관여하는 인자로 그램음성균과 그램양성균의 비율과 심토공극률이 크게 작용하는 것으로 나타났다. 본 연구는 복합적인 외부요인이 작용하는 재배환경에서 처리별 상대적 토양특성 변화에 대한 가시적 접근방법의 하나로 PCA 배열법의 적용가능성에

대해 살펴본 것으로 보다 정확한 결과를 위해서는 더 많은 인자에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서 사용된 PCA 배열법은 토양특성변화를 종합적으로 관찰할 수 있는 유용한 수단이 될 수 있을 것으로 생각한다.

References

- Abdi, H. and L.J. Willams. 2010. Principal component analysis. *WIREs Computational Statistics* 2:433-459.
- Ali, M. 1999. Evaluation of green manure technology in tropical lowland rice systems. *Field Crops Res.* 61:61-78.
- Astier, M., J.M. Maass, J.D. Etchevers-Barra, J.J. Peña, F. de León González. 2006. Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol. *Soil Till. Res.* 88: 153-159.
- Austin, M.P. 1985. Continuum concept, ordination methods, and niche theory. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 16: 39-61.
- Beare, M.H., P.F. Hendrix, and D.C. Coleman. 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-till soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:777-786.
- Becker, M., J.K. Ladha, and M. Ali. 1995. Green manure technology: potential, usage, and limitation. A case study for lowland rice. *Plant Soil* 174:181-194.
- Bossio, D., and K.M. Scow, 1995. Impact of carbon and flooding on the metabolic diversity of microbial communities in soils. *Appl. Environ. Microb.* 61: 4043-4050.
- Bossio, D., and K.M. Scow, 1998. Impact of carbon and flooding on soil microbial communities: Phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns. *Microb. Ecol.* 35: 265-278.
- Daquiado, A.R., T.Y. Kim, and Y.B. Lee. 2013. Microbial community structure of paddy soil under long-term fertilizer treatment using phospholipid fatty acid (PLFA) analysis. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46: 474-481.
- Eo, Jinu, J.-M. Park, and Kee-Choon Park. 2015. Effects of cover crops on soil chemical properties and biota in a pear orchard. *Koran J. Soil Sci. Fert.* 48: 15-21.
- Frostegard, A., and E. Baath. 1996. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil. *Biol. Fert. Soils* 22: 59-65.
- Frostegard, A., A. Tunlid, and E. Baath. 1991. Microbial biomass measured as a total lipid phosphate in soils of different organic content. *J. Microbiol. Meth.* 14: 151-163.
- García-Ruiz, R., V. Ochoa, M.B. Hinojosa, and J.A. Carreira. 2008. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2137-2145.
- Hargrove, W.L. 1986. Winter legumes as a nitrogen source for non-till grain shorgum. *Agron. J.* 78:70-74.
- International Rice Research Institute (IRRI). 1987. *Physical Measurements in Flooded Rice Soils.* pp. 65.
- Jat, M.L., M.K. Gathala, J.K. Ladha, Y.S. Saharawat, A.S. Jat, Vipin Kumar, S.K. Sharma, V. Kumar, and Raj Gupta. 2009. *Soil Till. Res.* 105:112-121.
- Jeon, W.-T., K.-Y. Seong, M.-T. Kim, G.-J. Oh, I.-S. Oh, and U.-G. Kang. 2010. Changes of soil physical properties by glomalin concentration and rice yield using different green manure crops in paddy. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43: 119-123.
- Jeon, W.-T. M.-T. Kim, K.-Y. Seong, J.-K. Lee, I.-S. Oh, and S.T. Park. 2008. Changes of soil properties and temperature by green manure under rice-based cropping system. *Korean J. Crop Sci.* 53:413-416.
- Kaur, A.A. Chaudhary, A. Kaur, R. Choudhary, and R. Kaushik. 2005. Phospholipid fatty acid - A bioindicator of environment monitoring and assessment in soil ecosystem. *Curr. Sci. India* 89; 1103-1112.
- Kim, C.-G., J.-H. Seo, H.-S. Cho, S.-H. Choi, and S.-J. Kim. 2002. Effect of hairy vetch as green manure on rice cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 35:169-174.
- Kim, E.-S., and Y.-H. Lee. Response of soil microbial communities to applications of green manures in paddy at an early rice-growing stage. 2011. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 2:221-227.
- Kim, S.K., S.-J. Kim, K.D. Park, C.-W. Lee, J.-H. Ryu, J.-S. Choi, W.-T. Jeon, H.-W. Kang, and M.-T. Kim. 2014. Assessment of sustainable production on paddy field treated with green manure crops using sustainability index. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47: 165-171.
- Lee, Y.-H., B.-K. Ahn, and Y.-S. Kwak. 2011. Impacts of organic farmin system on the soil microbial ecology in no-till paddy. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44: 814-818.
- Li, W.H., C.B. Zhang, H.B. Jiang, G.R. Xin, and Z.Y. Yang. 2006. Changes in soil microbial community associated with invasion of the exotic weed, *Mikania micrantha* HBK. *Plant Soil* 281:309-324.
- National Institute of Agricultural Science and Technology. 2000. *Analysis method of soil and plant.* p. 202. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
- Park, K.-C., and S.-J. Kim. 2010. Changes of soil microbial phospholipid fatty acid as affected by red pepper cultivation and compost amendment *Koran J. Soil Sci. Fert.* 43: 194-199.
- Pielou, E.C. 1984. *The interpretation of ecological data: A primer on classification and ordination.* Wiley, New York
- Ray, S.S. and R.P. Gupta. 2001. Effect of green manuring and tillage practices in physical properties of puddled loam soil under rice-wheat cropping system. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 49: 670-678.
- RDA. 2015. *Nongsaro: Agricultural Technology Information.* <http://www.nongsaro.go.kr>.
- Seo, J.H., H.J. Lee, and S.J. Kim. 2000. Changes of green manure and nitrogen yield of hairy vetch according to

- seeding date in autumn. *Korean J. Crop Sci.* 45:400-404.
- Yang, C.-H. J.-H. Ryu, T.-K. Kim, S.-B. Lee, J.-D. Kim, N.-H. Daek, S. Kim, W.-Y. Choi, and S.-J. Kim. 2009. Effect of green manure crops incorporation with rice cultivation on soil fertility improvement in paddy field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42:371-378.
- Zelles, L. 1999. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: a review. *Biol. Fertil. Soils* 29: 111-129.
- Zhang, J.-T., Y. Dong, and Y. Xi. 2008. A comparison of SOFM ordination with DCA and PCA in gradient analysis of plant communities in the midst of Taihang Mountains, China. *Ecol. Inform.* 3: 367-374.
- Zhang Q.-C., G.-H. Wang, and H.-Y. Yao. 2007. Phospholipid fatty acid patterns of microbial communities in paddy soil under different fertilizer treatments. *J. Environ. Sci.* 19: 55-59.