

Assessment of Sustainable Production on Paddy Field Treated with Green Manure Crops Using Sustainability Index

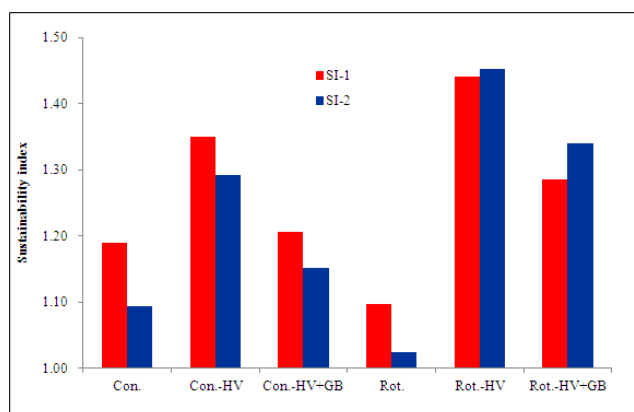
Kwang Seop Kim, Sook-Jin Kim, Ki Do Park, Choon-Woo Lee, Jin-Hee Ryu, Jong-Seo Choi,
Weon-Tai Jeon, Hang-Won Kang, and Min-Tae Kim*

Crop Environment Research Division, NICS, RDA, Suwon, 441-857, Republic of Korea

(Received: March 19 2014, Accepted: May 29 2014)

Assessment of sustainable production on a cropland can help to determine the most proper management practices. In this study, we evaluated the sustainable production on paddy field treated with green manure crops using sustainability index which based on nutrient index, microbiological index, and crop index related to nutrient-supplying capacity. Especially choosing appropriate indicators from a minimum data set (MDS) were used the principal components analysis (SI-2) as well as expert opinion (SI-1) usually used in sustainability index. Six treatments including the two tillage treatments and two green manure crops were investigated as follows; (i) moldrotary + rotary tillage without green manure crop (Con), with (ii) hairy vetch (Con-HV), and (iii) hairy vetch + green barely (Con-HV+GB), (iv) rotary tillage without green manure crop (Rot), with (ii) hairy vetch (Rot-HV), and (iii) hairy vetch + green barley (Rot-HV+GB). Con-HV and Rot-HV in SI-1 were maintained sustainability while Rot-HV and Rot-HV+GB in SI-2. Especially, treatments (Con and Rot) without green manure crops were more unsustainable than with green manure crops because of the low value of microbiological and crop index than with green manure crops. Meanwhile, sustainability indices and grain yield had the high correlation values ($R^2=0.756$ and 0.928 in SI-1 and SI-2, respectively). These results meant that application of green manure crops such as hairy vetch could improve both yield and soil quality in paddy.

Key words: Sustainability index, Green manure crop, Soil quality, Paddy, Tillage



note) Moldrotary + rotary tillage without green manure crop (Con), with (ii) hairy vetch (Con-HV), and (iii) hairy vetch + green barely (Con-HV+GB), (iv) rotary tillage without green manure crop (Rot), with (ii) hairy vetch (Rot-HV), and (iii) hairy vetch + green barley (Rot-HV+GB).

Sustainability indices on paddy soil with different treatments of green manure crops and tillages.

*Corresponding author : Phone: +82312906783, Fax: +82312906773, 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 2014 Postdoctoral Fellowship of National Institute of Crop Science, Rural Development Administration.

Introduction

농경지가 갖추어야 할 가장 중요한 조건 중의 하나가 작물의 지속적 생산이다. 작물성장은 토양으로부터 공급되는 영양분에 의해 지배를 받으며, 부족해지기 쉬운 주 영양분은 주로 화학비료에 의해 보충된다. 그러나 이러한 화학비료의 장기적인 투입은 토양의 질을 떨어뜨리는 원인되고, 과잉사용은 환경오염이라는 결과를 초래하였다. 최근 농경지에서 녹비작물의 이용은 토양 비옥도 향상을 위한 환경친화적 영농방법으로 국내에서도 이와 관련된 연구가 헤어리베치를 중심으로 꾸준히 진행되었다. 국내에서 진행된 녹비이용에 관한 연구는 녹비 생산량 증대, 관개량에 미치는 영향, 녹비작물 파종시기, 방법, 및 적정 사용량, 질소방출 패턴, 토양 물리성 개량 효과 및 쌀 생산에 미치는 영향 등 다양한 분야에서 진행되었다 (Jeon et al., 2010; Jeon et al., 2011; Kim et al., 2002; Kim et al., 2011; Lee et al., 2012; Ryu et al., 2013, Seo et al., 1998; Song et al., 2010; Yang et al., 2009). 그러나 녹비작물 환원에 따른 작물의 지속적 생산 능력에 대한 종합적인 검토는 미흡한 실정이다.

토양의 생산력 (soil productivity)은 특정 경영 조건하에서 작물 혹은 어떤 식물을 생산할 수 있는 토양의 능력으로 알려져 있다 (Schaetzl et al., 2012). 이러한 토양의 생산능력을 몇 가지 지표로써 예측하고자 하는 노력은 토양 및 농업분야에서 오랫동안 연구되어 왔다 (Hussain et al., 1999). 토양의 생산능력은 토양의 질 (soil quality)과 불가분의 관계를 맺고 있다. 따라서 그 토양을 대표하는 몇 가지 인자의 추출을 통한 토양의 질 평가로 작물의 생산능력을 추측하는 방법이 널리 사용되고 있다. 토양 질 평가를 위한 과정은 일반적으로 세 단계를 거친다 (Andrews et al., 2002). 첫째가 최소 데이터 세트 (minimum data set, MDS) 구축을 위한 지표의 선택 (indicator selection)이다. 이 때 지표는 토양의 특성을 최대한 반영할 수 있는 최소 갯수만을 선택하게 되는데, 대표적인 방법이 전문가 의견과 주성분 분석에 의한 것이다 (Andrews et al., 2002). 그 다음이 지표의 점수화 (transforming indicator scores)이며, 마지막으로 지표화된 점수 (score)를 지수 (index) 속에 통합시키는 작업이다. 즉 토양의 물리적, 화학적 및 미생물적 특성을 하나의 모델 (식)에 통합하는 것으로 많은 연구자들에 의해 다양하게 진행되었다 (Andrews and Carroll, 2001; Andrews et al., 2002, 2003, 2004; Fu et al., 2004; Mastro et al., 2008; Tiwari et al., 2006; Xu et al., 2006). 그러나 토양의 질은 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 부분이 상호 유기적으로 작용하고 있기 때문에 몇 가지 인자로 평가하는 것이 쉽지 않다. 따라서 토양의 질을 평가하기 위한 지표의 추출 및 점수화 등과 같은 과정은 매우 중요하다. 최근에 Kang et al. (2005)은 토양의 질을 평가함에 있어 토양의 양분, 미생물 특성 및 작물 수확량에 근거하여 생산지

속성을 평가한 새로운 방법을 제시하였다. 기존의 토양 질 평가 방법에서는 인자들이 처음부터 하나의 모델 속에 포함된 반면, 이들의 평가방법은 토양의 화학적 특성을 고려한 양분지수 (nutrient index), 미생물 특성을 반영한 미생물지수 (microbiological index), 수확량을 고려한 작물지수 (crop index)의 세 개의 백터를 독립적으로 산정 후 이들을 다시 통합하는 방식 (삼각형 면적)을 사용하였다. 이 모델은 특정 농경지의 지속성이 인정되지 않을 경우 어떤 부분이 부족한 지 쉽게 알 수 있는 특징을 가지며, 나아가 지속성을 유지하기 위한 농업경영 방법을 제공할 수 있는 장점을 가진다. 국내에서는 Lee et al. (2013)이 화학비료 장기연용 논토양에서 벼 생산량 지속성을 평가하기 위하여 이 지속성 지수를 사용하였다.

본 연구는 최근에 Kang et al. (2005)에 의해 제시된 지속성 지수를 사용하여, 경운방법에 따른 녹비작물 환원 논토양의 벼 생산성 지속성을 평가하였다. 또한 지표를 추출하는 방법에 있어 이들이 제시한 방법과는 별도로 주성분 분석을 통한 지표의 추출을 통해서 기존의 방법과의 차이를 살펴보았다. 마지막으로 쌀 생산량과 지속성 지수의 상관관계를 살펴보았다.

Materials and Methods

시험포장 및 재배방법 녹비작물이 환원된 논토양의 지속생산성을 평가하기 위한 본 연구는 장기적인 과정에서 2011년부터 시작되었다. 포장은 경기도 수원시에 소재한 국립식량과학원 장내에 위치하고 있으며, 시험포장의 토양은 강서동 (세시양토)이었다. 공시 녹비작물은 헤어리베치 (청풍보라)와 녹비보리 (영양보리)를 이용하였으며, 시험재배 전년도 10월 초순에 녹비작물을 파종하여, 이듬해 벼 이앙 2주 전 토양으로 환원하였다. 처리구는 녹비작물의 환원여부 및 환원 시 경운방법에 따라 6처리구—① 녹비작물을 환원하지 않은 로터리+쟁기 처리구 (Con), ② 로터리 처리구 (Rot), 그리고 녹비작물로 ③ 헤어리베치만을 이용한 로터리+쟁기 처리구 (Con-HV), ④ 로터리 처리구 (Rot-HV), 마지막으로 녹비작물로 ⑤ 헤어리베치와 녹비보리를 혼파재배하여 환원한 로터리+쟁기 처리구 (Con-HV+GB), ⑥ 로터리 처리구 (Rot-HV+GB)로 나누어 진행하였다. 녹비작물 환원 처리구에서 녹비작물은 벼 관행시비량 $[N-P_2O_5-K_2O = 9.0-4.5-5.7$ (kg/10a)] 중 질소량을 기준으로 하여 그에 상응하는 양을 환원하였다. 녹비작물의 양이 충분하지 않은 경우 부족분을 외부 포장에서 재배한 동일 녹비작물로 보충하였다. 녹비작물을 환원하지 않은 토양은 질소원으로 요소를 전량 기비 처리하였다. 한편 인산은 녹비작물의 환원여부와 관계없이 용과린을 전량 기비 처리하였으며, 칼리는 염화칼리로 기비 70%, 수비 30%로 2회 분시하여 처리하였다. 공시재배 벼 품종은

남평벼로 기계이앙을 하였다. 기타 재배기간의 관리는 농촌진흥청 벼 표준 재배법에 준하였다.

토양 및 식물체 분석 본 연구의 생산 지속성 지수 중 양분지수와 미생물지수를 구하기 위한 토양은 2013년 10월 초 (벼 수확 직후)에 작토층 (0-15 cm)에서 채취하였다. 양분 지수와 관련된 토양 화학적 특성 분석을 위한 시료는 채취한 토양을 그늘에서 풍건한 다음 2 mm 체에 통과시킨 후 사용하였다. 전탄소 (TC)와 전질소 (TN) 함량은 원소분석기 (LECO CNS-2000), 유효인산은 Lancaster 법, 치환성 양이온은 1N NH₄OAc (pH 7.0)로 침출하여 유도결합플라즈마분광광도계 (ICP-OES, GBC SDS-270)로 분석하였다. 미생물 특성분석을 위한 토양은 최대용수량의 약 40%까지 수분함량을 낮춘 후 2 mm 체에 통과시킨 후 밀봉하여 분석 시까지 냉장보관 하였다. 미생물생체량 N (microbial biomass N) 함량은 클로로포름 혼중을 이용한 혼중추출법 (chloroform fumigation)을 이용하였다 (Jenkinson, 1998). Potential mineralizable nitrogen (PMN)은 혐기성 조건에서 배양 후 배양 전후의 NH₄⁺-N의 차이로 산정하였다 (Keeney, 1982). 세균수는 표준한천배지를 이용한 호기적 조건의 토양 세균수 측정방법 (희석평판법)을 이용하였다 (Black, 1996). 작물지수에 사용된 벼는 수확기에 3.3 m²에서 3반복으로 수확하여 수량을 조사하였고, 식물체 중 양분분석을 위한 시료는 70°C에서 건조 후 분쇄하여 사용하였다. 식물체중 질소는 C/N 분석기를 이용하여 분석하였다. 식물체 시료는 H₂O₂-H₂SO₄ 혼합용액으로 습식 분해하여 P는 Vanadate법으로 비색정량하였으며, K는 유도결합플라즈마분광광도계 (ICP-OES)로 분석하였다.

지속성 지수 본 연구에서는 작물의 생육에 중요한 영향을 미치는 주요 양분의 공급에 중점을 둔 지속성 지수를 사용하였다 (Kang et al., 2005). 이 방법에서 지속성 지수는 양분지수, 미생물지수 및 작물지수로 구성되는데, 우선 각 지수를 구하기 위한 지표 (indicator)를 선택하여 분석하고, 분석된 항목을 지수로 변화하여 점수화하고 각각의 지수를 통합하는 과정의 세 단계를 거친다. 일반적으로 토양의 질 혹은 생산성 평가를 위한 지표의 선택은 목적과 지역적 특성을 반영하는 최소의 인자를 구하는 최소 자료구축 (minimum data set)을 기본으로 한다 (Andrews et al., 2002; Andrews et al., 2004; Tiwari et al., 2006). 최소 자료구축을 위한 지표의 선발은 크게 전문가의 의견을 반영하거나, 주성분분석 (principal components analysis)에 따라 이루어진다 (Andrews et al., 2002). 본 연구에서는 양분지수로 Total C, Total N, Av. P₂O₅, 및 Ex. K의 4개 항목, 미생물지수로 MBN, PMN 및 세균량의 3개 항목, 그리고 작물지수로 생체량 및 식물체 중 N, P, K 함량의 4개 항목으로 구성하였다.

본 연구에서 지표의 특성과 선발방법-전문가 의견 (expert

opinion)-을 고려하여 최소 자료구축 지표를 선발하였다. 그 다음 각각의 지수를 구성하는 분석항목을 지수로 변환하였다.

$$I_{ij} = \frac{A_{ij}}{Th_j}$$

I_{ij} 는 실험에서 j 번째 항목에 상응하는 i 번째 처리에 대한 지수 값을 의미하며, A_{ij} 는 j 번째 항목에 상응하는 i 번째 처리의 실험값이며, Th_j 는 j 번째 항목의 임계값이다. 본 연구에서 임계값을 각 분석항목의 평균값으로 사용하였다. 각각의 지수값은 각 지수를 구성하는 분석항목의 지수 평균에 각 분석항목의 개수로 나눈 값을 이용하였다. 한편 작물지수의 지수값은 아래와 같다.

$$CI_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 I_{ij}$$

즉, CI_j 는 i 번째 처리에 대한 작물지수 값이며, j 는 작물지수를 구하기 위한 이용된 분석항목의 수다. 다음으로 각각의 점수화된 지수를 통합하는 과정 즉 지속성 지수의 산정은 Kang et al. (2005)에 의해 제안된 삼각형 면적으로부터 지수성 지수 (sustainability index, SI)를 구하는 방법을 이용하였다 (Fig. 1).

$$Sustainability\ index\ (SI) = \frac{\sqrt{3}}{4}(ab + bc + ca)$$

a는 양분지수, b는 미생물지수, c는 작물지수이며, 지속성을 의미하는 최소 SI 값은 1.30으로 계산된다 (Kang et al., 2005). 본 연구에서는 최소 자료구축에서 전문가 의견으로 선발된 양분지수, 미생물지수 및 작물지수의 지표를 주성분분석과 다중상관관계 분석을 통해 가중치와 중복성을 고려하

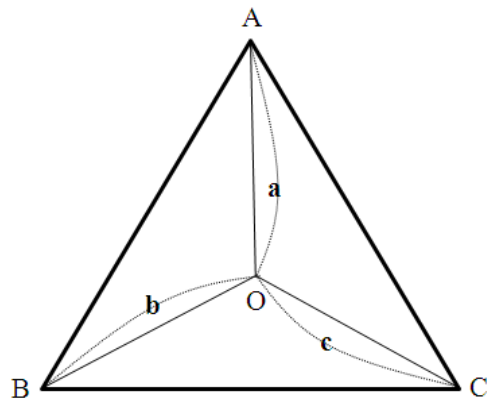


Fig. 1. Measurement of sustainability from system using the triangle area (suggested by Kang et al., 2005).

여 선발하는 작업을 수행하였다. 기존의 지속성 지수(SI-1)와 변형된 지속성 지수(modified sustainability index, SI-2)를 녹비작물 종류 및 경운방법에 따른 논토양에서 쌀 수확량과의 상관관계를 살펴보았다.

통계처리 다변량 주성분 분석 및 통계분석은 R 프로그램 3.0.2 버전(2013)을 사용하였다. 연도별 토양 화학성분은 5% 수준에서 LSD 및 Duncan 검정을 하였다.

Results and Discussion

토양의 양분-미생물적 특성 및 작물생육 생산지속성 지수를 산정하기 위한 논토양의 화학적, 미생물적 특성 및 작물 수확량은 녹비작물 환원 및 경운방법에 의해 영향을 받았다(Table 1). 양분지수의 산정에 이용되는 화학적 특성에서 전질소와 전탄소는 처리별 유의성을 보이지 않았다. 녹비작물이 환원된 토양에서 유기물 및 탄소의 함량이 증가한다는 보고(Yang et al., 2009; Yasue, 1991)와는 달리 본 연구에서는 이들의 증가를 확인할 수 없었다. 이는 녹비작물 환원의 기간이 2년으로 비교적 짧은 것에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 유효인산은 쟁기+로터리 경운, 로터리 경운 공히 헤어리베치가 처리된 처리구에서 다른 처리구에 비해 낮은 함량 [Con-HV 72.2, Rot-HV 73.2 (mg kg⁻¹)]을 보였으며, 녹비작물을 환원하지 않은 토양에서 대체적으로 높은 함량 [Con 93.0, Rot 84.0 (mg kg⁻¹)]을 보였다. 로터리 경운에서 녹비보리와 헤어리베치를 동시에 환원한 논토양에서 유효인산의 함량 또한 높은 값 (89.5 mg kg⁻¹)을 보였다. 치환성 칼리 또한 경운방법과 상관없이 녹비를 환원하지 않은 토양에서 타 처리구에 비해 높은 값을 보였다. 처리별 유효인산과 치환성 칼리의 함량의 차이는 식물체의 흡수량과 밀접한

관계가 있는 것으로 판단된다 (Table 1 yield parameter 참조). 그럼에도 이들의 토양 중 함량은 많은 요인들에 의해 좌우되기 때문에 장기적인 연구 수행 후 해석이 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

미생물적 특성 중 토양으로 투입된 질소양분의 분해와 관련된 MBN과 PMN은 2년차 시험에서는 뚜렷한 차이를 보이지 않았지만, 헤어리베치가 환원된 토양에서 타 처리구에 비해 높은 값을 나타내었다. PMN의 경우, 헤어리베치와 녹비보리를 동시에 환원한 쟁기+로터리 처리구 (Con-HV+GB)에서 가장 낮은 값 (27.36 mg kg⁻¹)을 보였고 로터리처리구에서도 타 처리구에 비해 다소 낮은 값을 보였다. 이는 녹비보리+헤어리베치 처리에서는 C/N율이 높은 화분과 식물인 보리 및 경운방법에 의한 영향이 상호작용했을 것으로 판단된다. 그럼에도 이를 확인하기 위해서는 장기적인 고찰이 필요할 것으로 판단된다. MBN 및 PMN과 달리 세균수에서는 녹비작물의 환원에 따른 뚜렷한 차이를 보였다. Kang et al. (2005) 연구에서 녹비작물 및 퇴비를 환원한 토양에서 이와 유사한 결과를 제시하였고, Kim and Lee (2011)은 녹비작물의 환원 기간이 짧은 (1년) 논토양에서 총 세균의 함량이 비록 관행구와 유의적 차이는 보이지 않았지만 경향은 증가 추세임을 제시하였다. 따라서 이의 결과로부터 녹비작물과 같은 유기물의 공급은 비록 2년차 재배에서 세균의 증식에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

벼 식물체 건물중은 녹비작물을 환원한 처리구에서 녹비작물을 환원하지 않은 토양에 비해 증가하는 경향을 보였다 (Table 1). 한편 건물중이 18.4 metric ton ha⁻¹인 Rot-HV+GB 처리구는 녹비작물을 처리하지 않은 Con (15.7 metric ton ha⁻¹) 및 Rot 처리구 (15.9 metric ton ha⁻¹)와 비교했을 때 높은 값을 가졌다. 수확한 벼 식물체 중의 질소함량은 Con-HV (817 mg hill⁻¹)와 Rot-HV (813 mg hill⁻¹)가 가장 높은 함량을 보였으며, 그 다음으로 Con-HV+GB (747 mg

Table 1. Average value of chemical and microbiological of soil and yield parameters.

Treatment	Chemical parameters				Microbiological parameters			Yield parameters			
	TC	TN	AP	EK	MBN	PMN	BC	DM	PN	PP	PK
Con.	1.07 ^{ms}	1.07 ^b	93.0 ^a	0.37 ^a	62.60 ^{ab}	32.17 ^{ab}	6.82 ^c	15.7 ^b	633 ^c	41.1 ^b	77.9 ^b
Con.-HV	1.12	1.03 ^{ab}	72.2 ^c	0.32 ^b	74.90 ^a	35.44 ^a	7.25 ^a	16.7 ^{ab}	817 ^a	56.8 ^{ab}	84.9 ^{ab}
Con.-HV+GB	1.19	0.93 ^a	79.3 ^{bc}	0.29 ^c	65.70 ^a	27.36 ^c	7.18 ^b	16.9 ^{ab}	747 ^{ab}	56.9 ^{ab}	82.8 ^{ab}
Rot.	1.12	1.10 ^{ab}	84.0 ^{ab}	0.35 ^a	56.10 ^{ab}	30.98 ^{abc}	6.80 ^c	15.9 ^b	614 ^c	35.6 ^b	75.3 ^b
Rot.-HV	1.18	1.12 ^a	73.2 ^c	0.32 ^b	68.40 ^a	34.88 ^a	7.15 ^b	18.4 ^a	813 ^a	72.2 ^{ab}	92.2 ^a
Rot.-HV+GB	1.17	1.15 ^a	89.5 ^a	0.31 ^{bc}	40.80 ^b	30.19 ^{bc}	7.20 ^{ab}	16.7 ^{ab}	730 ^b	87.0 ^a	80.9 ^b
F-value	3.12	1.14	7.4	13.92	2.90	4.28	97.20	2.3	9.74	3.7	3.6
CV(%)	3.4	10.8	6.3	4.14	16.7	7.97	6.3	6.5	6.6	25.3	6.6

TC total carbon (%), TN total nitrogen (g kg⁻¹), AP available P₂O₅ (mg kg⁻¹), EK exchangeable potassium (cmol_c kg⁻¹), MBN microbial biomass carbon (mg kg⁻¹), PMN potentially mineralizable N (mg kg⁻¹), BC bacteria count (log number), DM dry matter (metric ton ha⁻¹), PN plant nitrogen (mg hill⁻¹), PP plant phosphorus (mg hill⁻¹), PK plant potassium (mg hill⁻¹)

* Means with the same letter in column are not significantly difference at p<0.05 level by LSD.

hill⁻¹), Rot-HV+GB (730 mg hill⁻¹) > Con (633 mg hill⁻¹), Rot (614 mg hill⁻¹)의 순으로 낮아졌다. 벼 식물체 중 칼리의 함량 또한 질소와 유사한 경향을 보였다. 이 결과로부터 벼 식물체중 질소와 칼리의 함량은 경운방법보다는 녹비환원 방법에 크게 영향을 받는 것으로 판단되었다. 녹비작물 환원에 가장 크게 영향을 받는 벼 식물체 영양성분은 P로 녹비작물이 환원된 처리구는 녹비작물이 환원되지 않은 처리구에 비해 더 많은 함량을 보였다 (Table 1). 그러나 녹비작물의 처리방법 사이에는 유의성을 보이지 않았다.

양분·미생물 및 작물지수 본 연구에서는 고유값 (eigenvalue)이 0.9 이상, 누적율 (cumulative percent)이 80% 이상에 속하는 주성분을 지표에 포함시켰으며, 고유벡터 값이 0.500 이상인 것을 각 지수의 구성 지표로 선발하였다 (Table 2). 또한 각각의 지수들 사이에 다중상관관계 양의 값이 0.7 이상인 것은 지표에서 제외하였다. 이와 같은 절차를 거쳐 양분지수의 지표로 TC, TN 및 EK가 선발되었으며, 작물지수는 DM과 PP를 선발하였다. 미생물지수는 제외되는 지표 없이

SI-1과 동일하게 MBN, PMN 및 BC를 선발되었다.

생산 지속성 지수 녹비작물 환원에 따른 생산성 지속 지수 중 양분지수 (nutrient index)는 SI-1과 SI-2에서 비슷한 경향을 보였다. Con, Rot-HV+GB, Rot, Rot-HV 처리구가 Con-HV, Con-HV+GB 처리구에 비해 높은 값을 가졌다. 그러나 SI-2에서는 Con-HV+GB를 제외하고는 그 값의 차이가 매우 낮았다. 유효인산 함량이 낮게 나온 헤어리베치 처리구를 제외함으로써 그 차이가 줄어든 것으로 판단되며, 이미 언급된 바와 같이 헤어리베치 환원에 따른 토양 중 유효인산의 함량의 변화는 지속적으로 관찰되어야 할 것으로 판단된다. 미생물지수에서 Rot-HV+GB 처리구는 가장 낮은 값을 보였는데, 이는 MBN의 값이 타 처리구에 비해 상대적으로 매우 낮았기 때문이었다.

가장 높은 값을 보인 Con-HV 처리구는 모든 지표에서 가장 높은 값을 보였다. Rot-HV 또한 높은 미생물 지수 값을 보인 것으로부터 미생물의 활성에 헤어리베치의 역할이 큰 작용을 하고 있는 것으로 판단되었다. 작물지수에서는 녹비

Table 2. Results of principal component analysis (PCA) of selected chemical, microbiological, and yield parameters for nutrient index from different treatments of green manure and tillage.

Chemical parameters				Microbiological parameters				Yield parameters			
PCs	PC1	PC2	PC3	PCs	PC1	PC2	PC3	PCs	PC1	PC2	PC3
Eigenvalue*	2.41	0.91	0.61	Eigenvalue*	1.56	0.94	0.50	Eigenvalue*	3.28	0.50	0.20
Percent	60.37	22.79	15.28	Percent	52.11	31.27	16.62	Percent	81.93	12.61	4.90
Cumulative percent	60.37	83.16	92.85	Cumulative percent	52.11	83.38	100	Cumulative percent	81.93	94.54	99.45
Eigenvectors**, ***				Eigenvectors**, ***				Eigenvectors**, ***			
TC	<i>0.561</i>	0.440	-0.243	MBN	<i>-0.677</i>	0.172	0.715	DM	<i>0.524</i>	0.212	-0.605
TN	-0.316	<i>0.877</i>	0.296	PMN	<i>-0.662</i>	0.282	-0.694	PN	<i>0.514</i>	0.150	0.786
AP	-0.461	0.126	-0.878	BC	-0.321	<i>-0.944</i>	-0.077	PP	<i>0.426</i>	-0.894	-0.059
EK	<i>-0.610</i>	-0.146	-0.287					PK	<i>0.529</i>	0.365	-0.116

* 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.

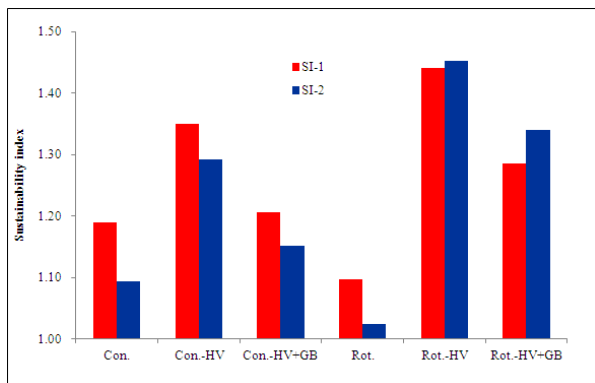


Fig. 2. Sustainability indices on paddy soil with different treatments of green manure crops and tillages.

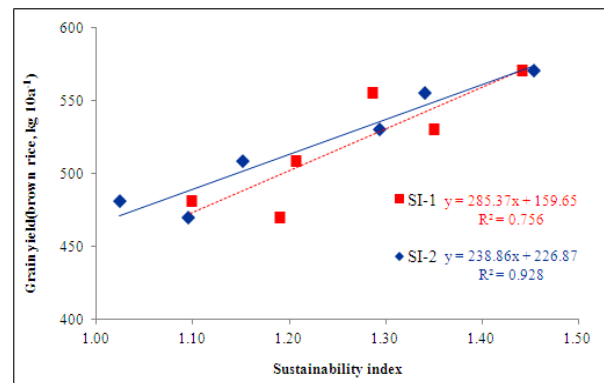


Fig. 3. Correlation between grain yields and sustainability indices with different treatments of green manure and tillage.

Table 3. Sustainability index selected in this study.

Treatments	Nutrient index					
	TC	TN	AP	EK	SI-1	SI-2
Con	0.94 ^{ns}	1.00 ^b	1.14 ^a	1.13 ^a	1.05	1.02
Con-HV	0.98	0.97 ^{ab}	0.88 ^c	0.97 ^b	0.95	0.98
Con-HV+GB	1.04	0.87 ^a	0.97 ^{bc}	0.89 ^c	0.94	0.93
Rot	0.98	1.03 ^{ab}	1.03 ^{ab}	1.08 ^a	1.03	1.03
Rot-HV	1.03	1.05 ^a	0.89 ^c	0.98 ^b	0.99	1.02
Rot-HV+GB	1.02	1.08 ^a	1.09 ^a	0.96 ^{bc}	1.04	1.02

Treatments	Microbiological index					
	MBN	PMN	BC	SI-1	SI-2	
Con	1.02 ^{ab}	1.01 ^{ab}	0.97 ^c	1.00	1.00	
Con-HV	1.22 ^a	1.11 ^a	1.03 ^a	1.12	1.12	
Con-HV+GB	1.07 ^a	0.86 ^c	1.02 ^b	0.98	0.98	
Rot	0.91 ^{ab}	0.97 ^{abc}	0.96 ^c	0.95	0.95	
Rot-HV	1.11 ^a	1.10 ^a	1.01 ^b	1.07	1.07	
Rot-HV+GB	0.66 ^b	0.95 ^{bc}	1.02 ^{ab}	0.88	0.88	

Treatments	Crop Index					
	DM	PN	PP	PK	SI-1	SI-2
Con	0.78 ^b	0.87 ^c	0.70 ^b	0.95 ^b	0.83	0.74
Con-HV	0.83 ^{ab}	1.13 ^a	0.98 ^{ab}	1.03 ^{ab}	0.99	0.90
Con-HV+GB	0.84 ^{ab}	1.03 ^{ab}	0.98 ^{ab}	1.01 ^{ab}	0.96	0.91
Rot	0.79 ^b	0.85 ^c	0.61 ^b	0.91 ^b	0.79	0.70
Rot-HV	0.92 ^a	1.12 ^a	1.24 ^{ab}	1.12 ^a	1.10	1.08
Rot-HV+GB	0.83 ^{ab}	1.01 ^b	1.49 ^a	0.98 ^b	1.08	1.16

작물을 환원한 처리구에서 경운방법에 관계없이 환원되지 않은 처리구에 비해 높은 작물지수값을 보였다. SI-1과 SI-2의 가장 큰 차이는 녹비작물이 처리되지 않은 처리구의 작물지수 값이 더 낮은 값을 보였으며, SI-1에서는 헤어리베치 단독 환원구가 헤어리베치+녹비보리 환원구에 비해 작물지수가 높은 반면, SI-2에서는 반대의 경향을 보였다. 벼 건물중량과 상관관계가 높은 식물체 중 질소와 칼리가 작물지수 산정에서 이중으로 계산된 것에 기인한 것으로 판단된다.

양분지수, 미생물지수 및 작물지수로부터 구한 생산 지속성 지수를 처리구별로 살펴보면 (Fig. 2), SI-1와 SI-2는 유사한 경향을 보였다. 즉 녹비작물이 환원된 처리구에서 생산 지속성 지수가 높으며, 경운방법은 로터리 처리가 로터리+쟁기 처리보다 더 높은 생산지속성 지수 값을 보였다. SI-1에서는 헤어리베치가 환원된 처리구 (Con-HV와 Rot-HV)에서 생산 지속성이 인정되는 1.30을 넘는 반면, SI-2에서는 Rot-HV에서만 유효한 지속성 지수 값을 가졌다. 또한 Rot-HV와 Rot-HV+GB는 SI-2에 의해 생산지속성 지수 값이 높아진 반면, 타 처리구는 그 값이 줄어들었다. 이는 작물지수에 기인한 것으로 Kang et al. (2005)에 의해 제시된 생산지

속성 지수는 양의 상관관계가 높을 경우, 이중으로 산정될 수 있는 특징을 내포하고 있음을 의미한다.

생산 지속성 지수와 현미 생산량 상관관계 녹비작물 환원에 따른 생산 지속성 지수와 현미 생산량의 관계를 살펴 본 결과, 두 변수 사이의 회귀식은 SI-1과 SI-2에서 각각 $y = 285x + 159.65$, $y = 238.86x + 226.87$ 이었으며, 결정계수 (R^2)는 0.756과 0.928이었다. 위의 결과로부터 논토양에서 생산지속성을 살펴볼 때는 지표의 선택이 매우 중요하며, 지표 선택 시 주성분 분석을 활용하는 것은 현미 생산량을 예측하기에 좋은 방법의 하나로 판단된다. 한편 본 연구에서는 생산지속성 지수와 현미 수량 간에는 직선의 상관관계를 보였다. Lee et al. (2013)은 화학비료가 장기연용된 논토양에서 논토양 지수가 2.00 이상일 때 최대 정조수량 (약 6.8 Mg ha⁻¹) 을 나타내는 이차 곡선으로 표현하였다. 본 연구에서는 가장 높은 생산지속성 지수 값을 보인 Rot-HV 처리구 (SI 값은 1.44)의 최대수량은 5.71 Mg ha⁻¹이기 때문에 직선의 상관관계를 나타낸 것으로 생각된다. 그럼에도 녹비작물이 환원된 논토양에서 최대 쌀 수량과 생산지속성 상관관계는 장기적 관점에서 계속 연구되어야 할 것으로 판단된다.

Conclusion

본 연구는 논토양에서 녹비작물 환원과 경운방법이 논토양과 쌀 생산성에 미치는 영향을 생산 지속성 지수를 이용하여 평가하였다. 기존의 방법에 따른 생산 지속성 지수 (SI-1)에서는 헤어리베치를 단독으로 처리한 구에서 경운방법에 상관없이 지속성이 인정되었으며 (Con-HV, Rot-HV), 지표 산정에 주성분 분석을 이용한 생산 지속성 지수 (SI-2)에서는 녹비작물을 환원한 로터리 경운에서만 (Rot-HV, Rot-HV+GB) 지속성이 인정되었다. 본 연구는 녹비작물 환원 2년차로 장기적 관점에서 지속적 연구가 필요하지만 헤어리베치 환원이 논토양의 생산 지속성에 효과가 있는 것으로 판단된다. 더욱이 본 연구에서 사용된 생산 지속성지수와 현미 생산량은 높은 상관관계 (R^2)를 보였다 (SI-1: 0.756, SI-2:0.928). 그러나 본 연구에서 사용한 생산지속성은 작물의 생육에 필요한 양분학적 관점에서 접근한 것으로 실제 토양의 질은 물리적인 특성이 큰 부분을 차지하고 있기 때문에 한계를 가질 수밖에 없다. 따라서 토양의 물리적 특성을 보강할 수 있는 새로운 모델의 개발을 통한 보다 정밀한 생산지속성의 평가가 필요한 것으로 판단된다.

References

- Andrews, S.S. and C.R. Carroll. 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management.

- Ecol. Appl. 11:1573-1585.
- Andrews, S.S., D.L. Karlen, and J.P. Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agric. Ecosyst. Environ.* 90: 25-45.
- Andrews, S.S., C.B. Flora, J.P. Mitchell, and D.L. Karlen. 2003. Growers' perceptions and acceptance of soil quality indices. *Geoderma* 114:187-213.
- Andrews, S.S., D.L. Karlen, and C.A. Cambardella. 2004. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1945-1962.
- Black, J.G. 1996. *Microbiology. Principles and applications.* Third edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. pp. 140-144.
- Fu, B.-J., S.-L. Liu, L.-D. Chen, Y.-H. Lü and J. Qiu. 2004. Soil quality regime in relation to land cover and slope position across a highly modified slope landscape. *Ecol. Res.* 19:111-118.
- Hussain, I., K.R. Olson, M.M. Wander, and D.L. Karlen. 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil Till. Res.* 50:237-249.
- Jenkinson D.S. 1988. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil. In: Wilson JR (ed) *Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems.* CAB International, Wallingford, pp 368-386.
- 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. Crop Sci.* 43:119-123.
- Jeon, W.-., S.-O. Hur, K.-Y. Seong, I.-S. Oh, M.-T. Kim, and U.-G. Kang. 2011. Effect of green manure hairy vetch on rice growth and saving of irrigation water. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:181-186.
- Kang, G.S., V. Beri, B.S. Sidhu, and O.P. Rupela. 2005. A new index to assess soil quality and sustainability of wheat-based cropping systems. *Biol Fertil Soils* 41:389-398.
- Keeney D.R. 1982. Nitrogen-availability indices. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR (eds) *Methods in soil analysis-part 2, chemical and microbial properties*, 2nd edn. Soil Science Society of America Inc, Publisher, Madison, WI, USA, pp 711-733.
- 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, S., Y. Seo, Y. Choi, M. Ahn, and A. Kang. 2011. Effect of mixed sowing of hairy vetch and rye on green manure yield in mountainous highland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:442-447.
- Kim, E.-S. and Y.-H. Lee. 2011. Response of soil microbial communities to applications of green manures in paddy at an early rice-growing stage. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:221-227.
- Lee, S.-G., D.-C. Seo, S.-W. Kang, Y.-J. Seo, I.-W. Choi, W.-T. Jeon, U.-G. Kang, H.-W. Kang, J.-S. Heo, and J.-S. Cho. 2012. Effects of application of liquid pig manure on yield of green manure in single and companion cropping. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:805-809.
- Lee, C.H., C.Y. Park, K.Y. Jung, and S.S. Kang. 2013. Long-term effects of inorganic fertilizer and compost application on rice sustainability in paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46:223-229.
- Masto, R.E., P.K. Chhonkar, D. Singh, and A.K. Patra. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environ Monit Assess* 136:419-435.
- Ryu, J.-H., W.-T. Jeon, M.-T. Kim, J.-S. Choi, S.-J. Kim, K.-S. Kim, K.-D. Park and H.-W. Kang. 2013. Effects of partial tillage seeding of hairy vetch on green manure biomass and rice yield in rice-based cropping system. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46:606-609.
- Schaetzl, R.J., F.J. Krist, Jr, and B.A. Miller. 2012. A taxonomically based ordinal estimate of soil productivity for landscape-scale analyses. *Soil Sci.* 177:288-299.
- Seo, J.-H., H.-J. Lee, S.-J. Kim and I.-B. Hur. 1998. Nitrogen release from hairy vetch (*Vicia villosa* Roth) Residue in relation to different tillages and plant growth stage. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 32:137-142.
- Song, B.-H., K.-A. Lee, W.-T. Jeon, M.-T. Kim, H.-S. Cho, I.-S. Oh, C.-G. Kim, and U.-G. Kang. 2010. Effect of green manure corps of legume and gramineae on growth responses and yields in rice cultivation with respect to environment friendly agriculture. *Korean J. Crop Sci.* 55:144-150.
- Tiwari, K.R., B.K. Sitaula, T. Borrensen, and R.M. Bajracharya. 2006. An assessment of soil quality in Pokhara Khola watershed of the Middle Mountains in Nepal. *J. Food Agric. Environ.* 4:276-283.
- Xu, M., Y. Zhao, G. Liu, and G.V. Wilson. 2006. Identification of soil quality factors and indicators for the loess plateau of China. *Soil Sci.* 171:400-413.
- Yang, C.-H., J.-H. Ryu, T.-K. Kim, S.-B. Lee, J.-D. Kim, N.-H. Baek, 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. Crop Sci.* 42: 371-378.
- Yasue Tasuke. 1991. The change of cultivation and utilization of chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and the effect of fertilizer and soil fertility on paddy field as a green manure. *Jpn. J. Crop Sci.* 60:583-592.