

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.3.150>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

## Assessing Changes in Selected Soil Chemical Properties of Rice Paddy Fields in Gyeongbuk Province

Sang-Jo Park\*, Jun-Hong Park, Jong-Gun Won, Dong-Hwan Seo, and Suk-Hee Lee  
Gyeongbuk Agricultural Research & Extension Services, Daegu 41404, Korea

\*Corresponding author: [szo@korea.kr](mailto:szo@korea.kr)

### ABSTRACT

**Received:** February 2, 2017

**Revised:** April 26, 2017

**Accepted:** May 26, 2017

This study was conducted with the data of monitoring on soil chemical properties of rice paddy soils in Gyeongbuk Province. The selected soil chemical properties were analyzed every 4 year from 1999 to 2015. The soil pH measured in 2015 was higher than pH 6.0, which was 0.3-0.4 pH unit higher than data until 2007 survey year. The mean content of organic matter was greater than  $24 \text{ g kg}^{-1}$  since 2003, but 35% of soil samples remained below the recommended level ( $20\text{-}30 \text{ g kg}^{-1}$ ) in 2015. The mean concentration of available phosphate was maintained at  $40 \text{ mg kg}^{-1}$  higher than the upper recommendation level ( $80\text{-}120 \text{ mg kg}^{-1}$ ), and more than 40% of paddy soils tested were found to have less than the recommendation level during the survey period. The exchangeable K concentration ranged from 0.25 to  $0.39 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Exchangeable Ca showed an average at the optimum range ( $5.0\text{-}6.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) during the monitoring period. Exchangeable Mg decreased linearly ( $0.02 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) from  $1.55 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  as of 1999 to below the lower level of the recommendation range ( $1.5\text{-}2.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ). The amount of available  $\text{SiO}_2$  was increased significantly from 2011 to over the recommendation level ( $\geq 157 \text{ mg kg}^{-1}$ ). It was revealed that the soil chemical properties of rice paddy fields was influenced by topology, soil texture, type and region as result of principal component analysis or cluster analysis. Therefore, an assessment on chemical properties of rice paddy soils should be performed to consider various soil physical conditions and agronomic practices such as fertilization, cropping system, and so on. Because of the high variability of nutrient levels across Gyeongbuk Province, nutrient management based on soil fertility test is required by respective farm land unit.

**Keywords:** Soil chemical properties, Rice paddy soils

### Changes in soil chemical properties of rice paddy soils in Gyeongbuk Province.

Survey year	pH <sub>(1:5)</sub>	OM $\text{g kg}^{-1}$	Avail. $\text{P}_2\text{O}_5$ $\text{mg kg}^{-1}$	Exch. K ----- $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	Exch. Ca ----- $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	Exch. Mg ----- $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	Avail. $\text{SiO}_2$ $\text{mg kg}^{-1}$
1999 (n = 494)	$5.7 \pm 0.5 \text{ c}^\dagger$	$18 \pm 9 \text{ c}$	$173 \pm 186 \text{ a}$	$0.31 \pm 0.3 \text{ bc}$	$5.0 \pm 2.0 \text{ c}$	$1.55 \pm 0.9 \text{ a}$	$92 \pm 64 \text{ c}$
2003 (n = 250)	$5.6 \pm 0.5 \text{ c}$	$24 \pm 10 \text{ b}$	$176 \pm 207 \text{ a}$	$0.26 \pm 0.2 \text{ c}$	$5.5 \pm 2.3 \text{ b}$	$1.39 \pm 0.8 \text{ ab}$	$102 \pm 80 \text{ bc}$
2007 (n = 247)	$5.7 \pm 0.4 \text{ c}$	$29 \pm 12 \text{ a}$	$168 \pm 196 \text{ a}$	$0.25 \pm 0.2 \text{ c}$	$5.2 \pm 2.0 \text{ bc}$	$1.36 \pm 0.9 \text{ b}$	$99 \pm 82 \text{ bc}$
2011 (n = 247)	$6.2 \pm 0.6 \text{ a}$	$26 \pm 10 \text{ b}$	$160 \pm 208 \text{ a}$	$0.39 \pm 0.3 \text{ a}$	$5.3 \pm 2.4 \text{ bc}$	$1.29 \pm 0.7 \text{ b}$	$120 \pm 89 \text{ b}$
2015 (n = 245)	$6.0 \pm 0.6 \text{ b}$	$26 \pm 13 \text{ b}$	$167 \pm 199 \text{ a}$	$0.35 \pm 0.2 \text{ ab}$	$5.9 \pm 2.3 \text{ a}$	$1.24 \pm 0.7 \text{ b}$	$193 \pm 132 \text{ a}$
Recommendation level	5.5 - 6.5	20 - 30	80 - 120	0.2 - 0.3	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0	$\geq 157$

<sup>†</sup>Mean and standard deviation of soil chemical properties are shown. Different letters in a same column indicate a significant difference (Tukey,  $p < 0.05$ ) between survey years.



## Introduction

토양환경정보시스템 (<http://soil.rda.go.kr/soil>)에 등록되어 있는 자료에 의하면, 경북지역 논(등록 면적은 262,725 ha이나, 2015년 이용면적은 127,000 ha이었음)은 형태적으로는 반숙토(Inceptisols) 41%, 완숙토(Alfisols) 40%, 과숙토(Ultisols) 13%, 미숙토(Entisols) 6%, 그리고 암연토(Mollisols) 0.02%로, 토양유형으로는 보통답 39%, 사질답 28%, 미숙답 26%, 그리고 습답 7%로, 분포지형으로는 선상곡간지 63%, 내륙평탄 17%, 하천변 9%, 홍적대지 7%, 표토의 토성으로는 양토 46%, 미사질양토 27%, 사양토 19%, 미사질식양토 4%, 세사양토 3%로 구성되어 있다. 벼논의 이용은 벼 단작이 주를 이루며, 벼 수확 후 보리, 마늘 또는 양파 등의 밭 작물과 윤작하거나 비닐하우스를 이용하는 수박, 참외 또는 딸기 같은 작물과 일정 주기로 순환재배하는 형태를 보이고 있으며 지역이나 영농조건에 따라 이용형태가 다양하게 나타나고 있다. 이와 같이 논 토양을 구성하고 있는 물리적인 조건(Ahn et al., 2016; Peukert et al., 2012; Son et al., 2016)과 이용형태(Park et al., 2016; Ye and Wright, 2010) 그리고 인위적으로 토양에 가해지는 관리방법(Kim et al., 2015)의 영향을 받아서 토양 화학적 특성이 다양하게 표현되는 원인으로 작용하는 것으로 알려져 있다.

토양 특성은 작물 생산성과 유의하게 상관되어 있으며(Yamagishi et al., 2003), 담수 논에 재배하는 벼 수량에는 토양 화학적 특성이 중요한 역할을 하는 것으로 보고되었다(Yanai et al., 2001). 토양 화학성이 떨어지면 토양 비옥도와 양분 수준이 감소하고 작물 생산성의 하락으로 이어지기 때문에, 토양 양분을 포함하는 토양 화학성의 분석은 농경지의 지속 가능한 이용에 있어서 매우 중요하다. 그리고 토양화학적 특성에 관한 정보는 비료와 퇴비의 투입 효과와 토양에 내재해 있는 양분의 이용 효율성 및 작물의 생산성 향상에 있어서 필수 요소이다. 논은 우리나라의 식량 자급에 중요한 역할을 담당하였으며, 1960년대부터 논 토양 검정이 주기적으로 실시되어(Jung et al., 1995; Kang et al., 2012; Kim et al., 2010) 벼의 경제적인 생산성 확보를 위해 노력하는 농민에게 지속적으로 개선된 양분관리 정보가 공급되어 왔다(NAS, 2010a). 식량 자급이 중요하였던 시기에는 다수확 중심으로 논 토양관리가 강조되어 왔으나, 쌀의 소비 경향이 변하면서 비료의 사용 방법도 수량보다는 쌀의 품질 향상에 초점을 두고 개발되고 있다(Lee et al., 2010). 또한, 농업의 장기 지속성에 대한 관심이 커지면서, 작물의 안전한 생산성과 토양의 화학적 물리적 생물적인 건전성을 유지하면서 환경에 부하되는 부정적인 영향을 최소화하는 농경지 관리체계가 강조되고 있다. 따라서 이 연구에서는 친환경적인 논 토양의 비옥도 관리에 필요한 자료를 얻기 위하여 1999년부터 조사한 경북지역의 논 토양 화학성에 대하여 장기간의 변동과 논 토양의 분포지형, 토성 및 유형에 따른 차이를 분석하였으며, 군집분석으로 시·군 단위 지역의 특성을 비교하였다.

## Materials and Methods

경북에서 벼를 재배하는 논을 선정하여, 1999년에 500지점 그리고 2003년부터는 250지점의 토양을 4년 주기로 화학적 특성을 검정하였으며, 이번 연구에서는 조사지점이 3개 미만인 지역, 지형 그리고 토성은 제외하고 분석하였다. 토양시료는 4~5월에 경운하지 않은 논에서 표토(0-20 cm)를 채취하여 실내에서 풍건한 다음 2 mm 체로 쳐서 화학적 특성검정에 사용하였다.

토양 화학적 특성은 국립농업과학원의 토양화학분석법에 따라 검정하였다(NAS, 2010b). 토양 pH는 토양에 증류수를 1:5로 넣고 30분간 진탕한 후에 pH 전극(Orion Versa Star, Thermo Scientific, USA)으로 측정하였고, 유효

인산은 Lancaster법으로 하여 760 nm (Optizen 3220UV, Mecasys Co., Korea)에서 흡광도를 측정하여 구하였다. 치환성 양이온 ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ )은 1 M  $NH_4OAc$  (pH 7.0)로 침출한 여과액을 원자흡광광도계 (Analyst 400, PerkinElmer, USA) 또는 ICP (PerkinElmer, USA)로, 유기물은 1999년부터 2011년까지의 시료는 Tyurin법으로, 2015년 시료는 원소분석기 (Vario MAX, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany)로 탄소를 측정하여 다음 환산하여 구하였다. 유효규산은 1 M  $NaOAc$  가용규산 측정법으로 정량하였다.

측정값은 SAS 9.2를 이용하여 통계분석하였다 (SAS, 2010). 기술통계는 MEAN으로, 조사시기, 지형, 토성 및 토양유형에 따른 토양화학성의 차이는 5% 유의수준에서 GLM에 의한 분산분석으로 비교하였다. 다섯 시기의 측정값을 이용하여 PRINCOM에 의한 주성분 분석과 CLUSTER에 의한 지역간의 유사 정도를 분석하였다.

## Results and Discussion

**화학성의 기술통계, 상관관계 및 주성분 분석** 경북지역 논 토양의 화학적 특성을 평가하기 위하여 1999년부터 2015년까지 4년 주기로 조사한 표토의 일반적인 토양화학성 7종을 분석한 결과는 Table 1과 같으며, 토양화학성의 적정범위 (NAS, 2010a)를 기준으로 구분한 부족, 적정 그리고 과다한 논 토양의 분포비율은 Fig. 1에 나타내었다. 토양 pH, OM (2015년 제외)과 치환성 Ca은 -1과 1사이에서 왜도 범위를 보여 정규 분포하였으나 (Asparouhov and Muthén, 2015), 그 밖의 화학성은 분포의 우측 꼬리가 좌측보다 길게 늘어지는, 측정값들이 평균의 왼쪽에 모여 있는 분포를 나타내었다. pH는 낮은 변이성 (CV 8-10%)을, OM, 치환성 Ca 그리고 Mg은 보통 변이성 (CV 27-66%)을 보였으나, 치환성 K과 유효규산은 조사주기에 따라 75% 이상의 높은 변이성을 보이기도 하였으며, 유효인산은 화학성 중에서 가장 높은 107% 이상의 변이성을 보였다. 논에 나타난 pH, OM 그리고 치환성 양이온 (K, Ca, Mg)의 변이 정도는 밭, 과수원 그리고 시설재배지와 유사하였으나, 유효인산은 논에서 상대적으로 더 높은 변이 정도를 보였다 (Park et al., 2016).

1999년부터 5 주기에 걸쳐 분석한 8개 화학성의 상관계수 (Pearson's correlation coefficient,  $r$ ) 계산에 의한 논 토양 화학성 간의 상관정도는 Table 2와 같다. pH는 6개 화학성과 유의한 상관을 나타내었으며, 치환성 Ca의 농도와 비교적 높은 상관 ( $r = 0.538$ )을 보였다 (Table 2). OM은 고도의 유의상관을 보인 4개 화학성 중에서 유효인산과 가장 높은 상관 정도 ( $r = 0.484$ )를 보였으며, 유효인산은 치환성 K과 가장 높은  $r = 0.527$ 의 고도로 유의한 상관 정도를 보였다. 이와 같은 화학성 간의 상관관계는 밭, 시설재배지와 과수원 토양에서도 확인된 바 있었으며 (Park et al., 2016), OM과 유효인산과 치환성 K간의 상관정도가 높은 것은 논과 밭 조건에서 공통적으로 나타나는 현상으로, N-P-K 중심의 시비와 퇴비의 사용과 연관이 있는 것으로 판단되었다 (Whalen and Chang, 2001; Sharpley et al., 2004; Park et al., 2016).

논 토양 화학성을 특성하는 주요 성분으로 전체 분산의 73.5%를 설명하는 고유값 0.96 이상의 주성분 3개를 추출하였다 (Table 3). 주성분 1에는 치환성 Ca이, 주성분 2에는 유효인산과 OM이, 주성분 3에는 유효규산과 치환성 Mg이 비교적 높은 상관을 나타내었다. 주성분 1과 2 변량의 벡터값을 산포도 (scatter plot)로 표시한 결과 (Fig. 5), 건토 조건인 밭, 과수원 그리고 시설재배지와 일정기간 담수상태로 이용되는 논 토양에서 화학성 변수간의 관계와 벡터 방향은 비슷하게 나타났는데 (Park et al., 2016), 이는 화학성 성분의 농도차이는 있으나 각 유형의 농경지에 가해지는 양분관리 자재와 양식은 유사하기 때문인 것으로 분석되었다.

**논 토양 화학성의 변동** 토양 pH는 조사기간에 평균 5.6-6.2 범위에서 측정되어 벼 재배에 적합한 수준인 pH 5.5-6.5 (NAS, 2010a)에서 변동하고 있었다 (Table 1). 2011년 이후부터는 이전보다 0.3-0.4 pH 단위 상승한 pH 6.0 이상을 보여 통계적으로 유의한 차이를 보였는데 ( $F 61.86, p < 0.0001$ ), 이는 적정범위 이하인 논외의 분포비율이 2003년 45%에서 2015년 23%로 감소한 반면 상대적으로 적정범위를 초과한 논외의 분포비율이 2003년 5.8%에서 2015년 18%로 증가한 것 (Fig. 1)과 상관분석 (Table 2)에서 보여진 것처럼 Ca과 같은 염기성 성분의 영향이 반영되어 나타나는 것으로 판단되었다. 논 표토의 유기물은 1999년 평균  $18 \text{ g kg}^{-1}$ 에서 2007년  $29 \text{ g kg}^{-1}$ 까지 점차 증가한 이후 조금 감소하여 2015년에는  $26 \text{ g kg}^{-1}$ 으로 검정되었다 (Table 1). 토양유기물은 2003년부터 적정범위 ( $20\text{-}30 \text{ g kg}^{-1}$ )의 하위

**Table 1.** Descriptive statistics of soil chemicals for the top soil of rice paddy fields in Gyeongbuk Province.

Variables	Survey year	Mean	SD	Range	CV (%)	Skewness
pH <sub>(1:5)</sub>	1999 <sup>†</sup>	5.7 c <sup>‡</sup>	0.50	4.4 - 7.4	9	0.6
	2003	5.6 c	0.53	4.5 - 7.4	10	0.5
	2007	5.7 c	0.43	4.8 - 6.9	8	0.6
	2011	6.2 a	0.59	5.0 - 8.1	10	0.3
	2015	6.0 b	0.56	4.7 - 7.4	9	0.1
OM ( $\text{g kg}^{-1}$ )	1999	18.3 c	9.1	0.5 - 56.3	50	1.0
	2003	24.5 b	10.5	6.1 - 69.8	43	1.1
	2007	28.9 a	12.0	7.1 - 69.9	41	0.9
	2011	26.4 b	10.5	7.6 - 60.7	40	0.7
	2015	26.4 b	12.6	2.5 - 98.5	48	1.9
Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	1999	173	186	2 - 1016	107	2.1
	2003	176	207	5 - 1123	118	2.2
	2007	168	196	4 - 1450	116	2.7
	2011	160	208	5 - 1338	130	2.9
	2015	167	199	7 - 1319	119	3.0
Exch. K ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	1999	0.31 bc	0.30	0.04 - 2.47	98	3.7
	2003	0.26 cd	0.18	0.04 - 1.68	70	2.8
	2007	0.25 d	0.17	0.10 - 1.30	69	3.0
	2011	0.39 a	0.26	0.10 - 2.09	67	3.3
	2015	0.35 ab	0.20	0.05 - 1.21	58	0.8
Exch. Ca ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	1999	5.0 c	2.0	1.4 - 12.9	40	1.0
	2003	5.5 ab	2.3	1.1 - 14.5	41	1.0
	2007	5.2 bc	2.0	1.0 - 12.7	39	0.9
	2011	5.3 bc	2.1	0.4 - 13.0	40	0.9
	2015	5.9 a	2.3	0.7 - 13.1	39	0.7
Exch. Mg ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	1999	1.55 a	0.95	0.19 - 6.99	61	1.6
	2003	1.39 b	0.79	0.25 - 5.34	57	1.5
	2007	1.36 b	0.90	0.10 - 5.60	66	1.9
	2011	1.29 b	0.70	0.10 - 3.85	55	1.1
	2015	1.24 b	0.67	0.25 - 4.73	54	1.3
Avail. SiO ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	1999	92 c	64	19 - 458	70	2.3
	2003	102 bc	80	10 - 595	78	2.3
	2007	99 bc	82	6 - 577	82	2.2
	2011	120 b	89	21 - 561	74	1.8
	2015	193 a	132	39 - 922	68	1.9

<sup>†</sup> Soil samples used for 1999, 2003, 2007, 2011, and 2015 were 494, 250, 247, 247, and 245, respectively.

<sup>‡</sup> Means within each variable followed by different letters are significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's HSD).

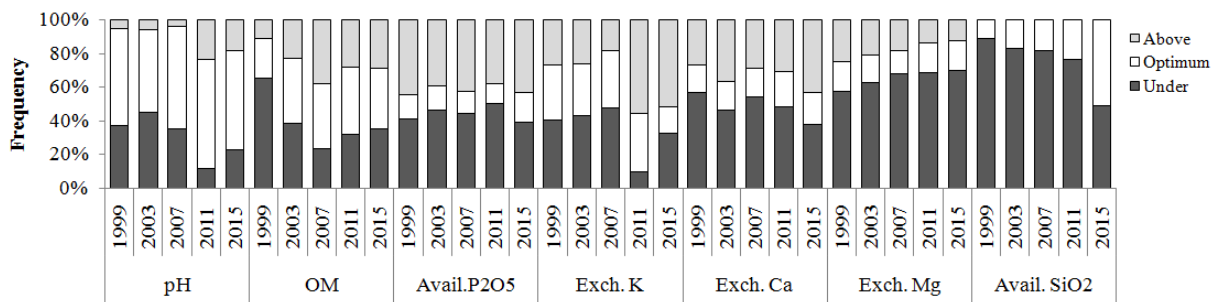
수준보다 높은 평균을 보여 양호한 수준으로 보이나, 유기물 함량의 추천 수준으로 보면 조사대상의 24-38%는 유기물의 추가공급이 필요한 것으로 조사되었다 (Fig. 1). 유효인산 함량은 조사주기마다 39% 이상의 논이 적정범위 (80-120 mg kg<sup>-1</sup>)에 미치지 못하였고 (Fig. 1) 중앙값은 80-106 mg kg<sup>-1</sup> 수준이었으나, 조사한 논의 18-21%에서는 240 mg kg<sup>-1</sup> 이상으로 높게 함유하고 있어서 유효인산의 평균함량이 적정범위의 상위수준보다 40 mg kg<sup>-1</sup> 이상으로 높게 유지하고 있는 것으로 분석되었다 (Table 1). 치환성 양이온의 농도 변화는 Fig. 1의 적정 농도범위를 기준으로 구분한 논의 분포비율 변동과 유사하게 움직였다. 치환성 K은 1999년 0.31 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>에서 2007년 0.25 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>까지 감소하였다가 2011년에 다시 증가하였다. 치환성 Ca은 적정범위 (5.0-6.0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) 수준에서 평균을 보여주고 있었으며 2015년 조사에서는 5.9 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>을 보여 2011년 이전보다 유의하게 증가하였다 ( $F 8.68, p < 0.0001$ ). 치환성 Mg은 1999년 1.55 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>에서 조금씩 감소하여 2003년부터 적정범위 (1.5-2.0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)의 하위수준보다 낮은 평균을 나타내었다. 유효규산의 함량은 2011년 이후부터 적정범위 ( $\geq 157$  mg kg<sup>-1</sup>) 이상으로 크게 증가하여 2015년에는 1999년보다 2배 높은 평균 (193 mg kg<sup>-1</sup>)을 나타내었다 (Table 1).

경북지역 논 토양에서 보면, 토양 pH와 치환성 Ca과 유효규산 간에 유의한 상관 (Table 2)이 있었고, 이 세가지 화학성이 상승하는 추세 (Table 1)를 보이고 있기 때문에 규산질비료의 사용에 있어서 유의하여야 할 사항으로 판단되었다. 전국 논 토양화학성과 비교하여 보면, 경북의 유효인산과 치환성 Ca 함량은 전국 평균보다 높은 수준이었고, 다른 화학성은 전국 평균수준에서 유지되고 있었다 (Jung et al., 1998; NAS, 2012). 치환성 Mg 농도의 변동은 경기 (Roh et al., 2015), 경남 (Son et al., 2016), 강원 (Yoon et al., 2016), 전북 (Ahn et al., 2016) 그리고 전남 (Kim et al., 2015) 지역과는 다르게 경북지역에서는 1999년 조사 이후부터 0.02 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> 수준으로 감소 추세를 보였다.

**Table 2.** Pearson’s correlation coefficient (*r*) between the tested soil chemical properties for surface soil of rice paddy fields.

Variable	pH	OM	Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Exch. K	Exch. Ca	Exch. Mg
OM	0.070**					
Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.129***	0.484***				
Exch. K	0.197***	0.298***	0.527***			
Exch. Ca	0.538***	0.185***	0.122***	0.256***		
Exch. Mg	0.276***	-0.034	0.007	0.259***	0.713***	
Avail. SiO <sub>2</sub>	0.391***	0.169***	0.005	0.182***	0.363***	0.168***

\*\* and \*\*\* indicate significance at the  $p < 0.01$  and  $p < 0.001$  levels, respectively.



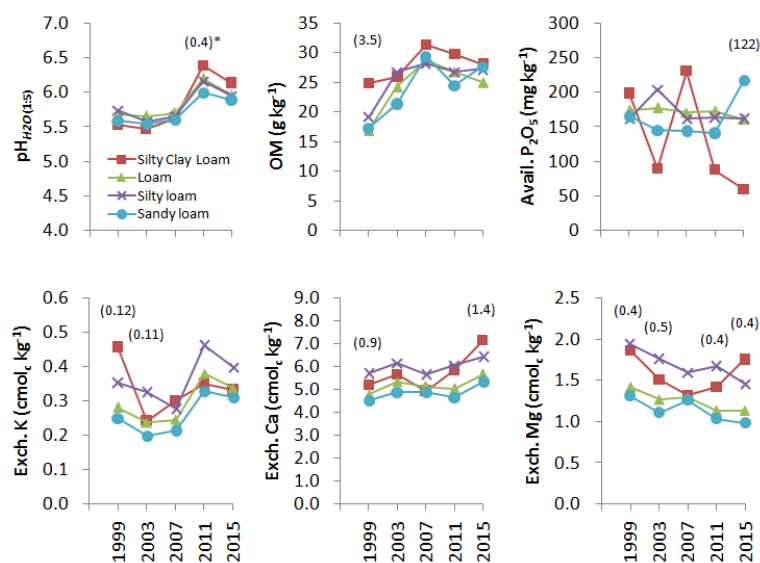
**Fig. 1.** Frequency distribution of rice paddy soils based on the Rural Development Administration’s recommendation level of each soil chemicals in Gyeongbuk Province.



전국 단위에서 치환성 Mg 농도의 변동은 1960년대 후반  $1.8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 에서 1995년  $1.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 까지 점차 감소하는 추세를 보였으나 1999년 이후부터는  $1.4\text{--}1.3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  수준에서 유지되고 있었다 (Jung et al., 1998; NAS, 2012).

**토성, 분포지형 및 유형간의 화학성 비교** 시료 토양을 흙토람 (<http://soil.rda.go.kr>)에 등록되어 있는 토성, 지형 그리고 유형자료를 기초로 분류하여 논 토양의 화학적 특성 변화를 비교하였다. 농업환경자원변동조사에 포함된 양토 (L), 미사질양토 (SiL), 사양토 (SL), 미사질식양토 (SiCL), 사토 (S) 그리고 식양토 (CL) 중에서, 5회 연속하여 조사한 네 토성의 화학성 변동은 Fig. 2와 같았다. 토양 pH는 네 토성에서 모두 2007년 이후 상승하는 비슷한 변동을 보였다. 유기물의 평균 함량은 미사질식양토에서 높게 유지되고 있었으나 1999년 ( $F 8.39, p < 0.0001$ ) 이외에는 통계적인 유의성 없이 유사한 변동을 보였다. 유효인산은 미사질식양토에서 조사시기에 따라 변동폭이 컸으며 2015년에는 다른 토성보다 유의하게 낮은 평균을 보였다. 치환성 양이온은 미사질양토와 미사질식양토보다 양토와 사양토에서 조금 낮게 유지되고 있었다 (Fig. 2). Ca은 네 토성 모두에서 증가하는 경향이였다. 미사질양토의 치환성 Mg은 2007년 최저 평균을 보인 후 증가 추세를 보였으나, 나머지 세 토성에서는 감소 추세가 이어졌다. 주성분 1과 2의 변량과 토성의 평균 벡터값을 산포도로 표시한 결과, 치환성 Ca와 Mg의 농도 수준에 의해서 미사질양토와 사질양토는 유의하게 구분되어 나타났다 (Table 3, Fig. 5A).

분포지형에 따른 논 토양의 pH와 양분 수준의 변동은 Fig. 3과 같다. 토양 pH는 1999년과 2007년에만 분포지형 간 차이가 있었고 변동양상은 다섯 지형에서 유사하게 나타났다. 유기물은 1999년 하해혼성평탄지에서 유의하게 높았으나 이후에는 유의한 차이없이 비슷한 변동양상을 보였다. 유효인산의 농도가 하성평탄지에서는 증가하는 추세를 보인 반면, 선상곡간지, 홍적대지 그리고 하해혼성평탄지에서는 감소하는 추세였으며, 홍적대지와 하해혼성평탄지의 유효인산은 다른 지형보다 낮은 평균수준으로 유지되고 있었으나 통계적인 유의성은 보이지 않았다. 홍적대지에서 치환성 K은 점차 증가추세를 보이거나 다른 지형에서는 조사시기에 따라 오르내림이 있었다. 하해혼성평탄지에서는 치환성 Mg의 평균이 다른 지형보다 유의하게 높았고, 1999년 이후 감소 정도가 가장 크게 나타났다. 주성분 1과 2

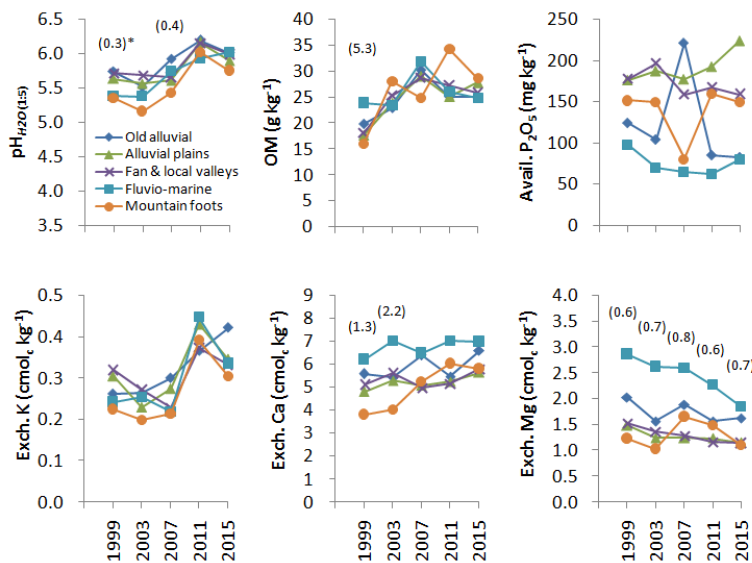


**Fig. 2.** Comparison of the changes in soil chemical properties between soil textures of rice paddy soils in Gyeongbuk Province. \*Minimum significant difference for Tukey's test between soil textures ( $p < 0.05$ ).

**Table 3.** Results of principal component analyses (PCA).

Variable	PC1	PC2	PC3
Eigenvalues	2.58	1.61	0.96
% Variance	36.8	23.0	13.7
<i>Eigenvectors</i>			
pH	0.4101	-0.2232	0.3213
OM	0.2656	0.4962	0.2295
Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2854	0.5860	-0.1307
Exch. K	0.3838	0.3540	-0.2436
Exch. Ca	0.5120	-0.2892	-0.1555
Exch. Mg	0.3972	-0.3531	-0.5301
Avail. SiO <sub>2</sub>	0.3356	-0.1639	0.6801
<i>Scores by texture</i>			
Silty clay loam	0.3057 ab <sup>†</sup>	0.0626	-0.1063 ab
Loam	-0.0854 bc	0.0222	0.1453 a
Silt loam	0.4672 a	-0.1485	-0.1975 b
Sandy loam	-0.4775 c	0.0801	0.0326 ab
<i>Scores by topology</i>			
Old alluvial terraces	0.3773 ab	-0.4178 bc	-0.0350 a
Fan & local valleys	-0.0338 b	0.0425 ab	0.0165 a
Alluvial plains	-0.0744 bc	0.1479 a	0.0327 a
Fluvio-marine plains	0.7702 a	-0.8026 c	-0.5138 b
Mountain foots	-0.7004 c	0.0447 ab	-0.0242 a
<i>Scores by type</i>			
High yield	0.3348 a	-0.0991 b	0.0211 ab
Sandy	-0.2914 bc	0.3057 a	0.1076 a
Unmatured	-0.0647 b	0.0252 b	-0.1180 b
Wet	-0.5600 c	-0.3959 c	-0.0038 ab

<sup>†</sup>Means within a column followed by different letters are significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's HSD).

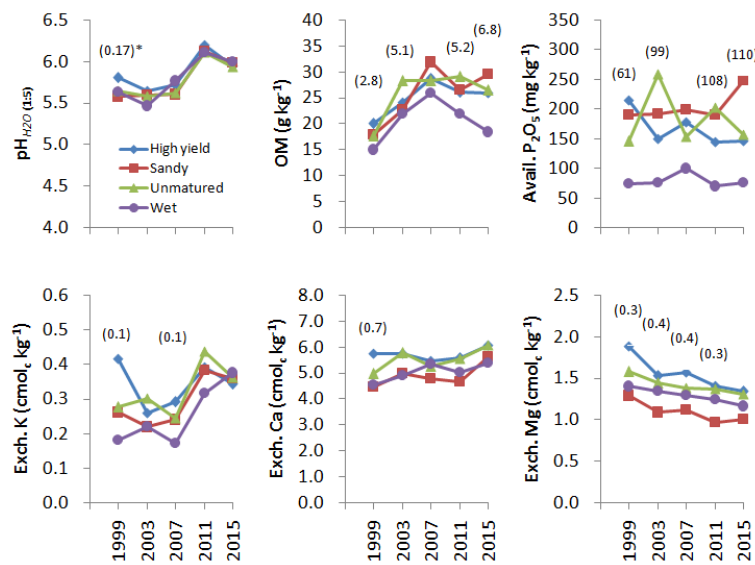


**Fig. 3.** Comparison of the changes in soil chemical properties between topologies of rice paddy soils in Gyeongbuk Province. \*Minimum significant difference for Tukey's test between topologies ( $p < 0.05$ ).

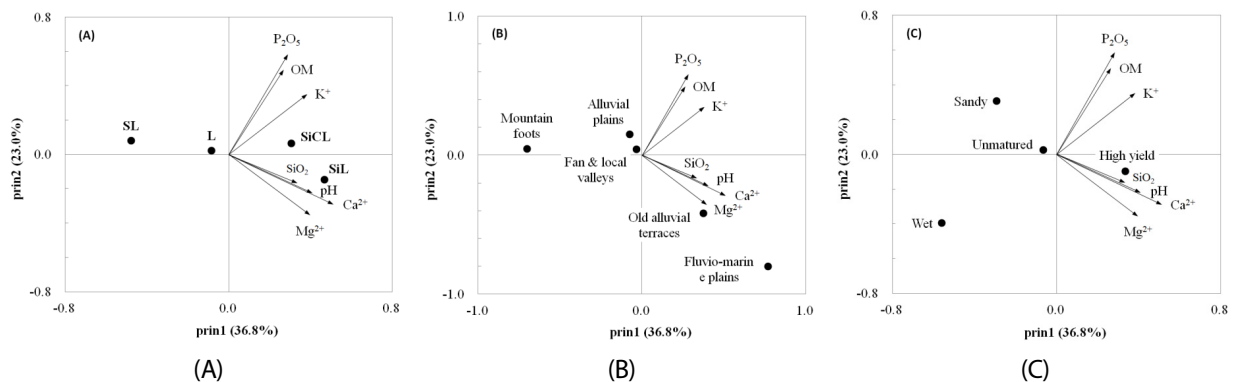
를 기준으로 비교한 결과, 하성평탄지와 선상곡간지가 밀접하게 연관되어 있었고, 치환성 Ca과 Mg은 높고 유효인산이 상대적으로 낮았던 하해혼성평탄지가 산록경사지와 뚜렷하게 구분되었다 (Table 3, Fig. 5B).

논의 유형에 따른 화학성의 변동을 Fig. 4에 나타내었다. 토양유기물은 2007년부터 보통답, 사질답 그리고 미숙답에서  $26 \text{ g kg}^{-1}$  이상으로 유지되고 있었으나, 습답에서는 약  $8 \text{ g kg}^{-1}$  감소하여 적정범위보다 낮은 수준으로 2015년에 검정되었다. 보통답에서는 유효인산이 점차 감소하는 경향을 보였고, 습답에서는 유효인산이 2007년 이외에는 나머지 세 유형보다 유의하게 낮은 적정범위 ( $80\text{-}120 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 이하의 수준에서 유지되고 있었다. 치환성 양이온은 조사시기마다 논 유형간에 유의한 차이가 있었으나 변동양상은 유사하였다. 습답은 다른 세 유형의 논과 유의하게 구분되는 것을 주성분 1과 2의 변량과 유형별 평균 벡터값의 산포도로 확인하였다 (Table 3, Fig. 5C).

자연적인 지형, 기후, 생물적 활성 그리고 토양수분 같은 자연조건과 경운과 비료 등의 인위적인 농경지 관리작업의 영향으로 들이나 농경지 내의 양분분포가 시·공간적으로 변이가 발생하고 (Zhang et al., 2011), 작은 규모로 구획



**Fig. 4.** Comparison of the changes in soil chemical properties between types of rice paddy soils in Gyeongbuk Province. \*Minimum significant difference for Tukey's test between paddy types ( $p < 0.05$ ).



**Fig. 5.** Scatter plot showing positive and negative correlations of 7 soil variables to the first and second principle variates derived from a principal component analysis procedure to differentiate rice soils by texture (A), topology (B) and type (C) in Gyeongbuk Province. L, loam; SL, Sandy loam; SiL, Silt loam; SiCL, Silty clay loam.



되고 지면을 평탄하게 하여 담수재배하는 논에서도 시비, 농기계 이동, 경운, 미세한 경사, 수분상태 등의 불균형으로 인한 화학성의 공간적 변이가 일어난다(Yanai et al., 2001)는 것은 알려진 현상이며, 이 연구에서 조사한 논에서도 토양 화학성은 생성된 지형, 토성, 양분상태나 수분 조건의 영향을 받으며 시간적인 변이성도 있음을 확인하였다(Figs. 2~4). 치환성 Mg은 토성과 지형에 따라 농도와 감소 기울기의 차이를 보였는데(Figs. 2~4), 이는 Mg이 K과 Ca보다 흙 입자와의 결합력이 작고 토양 내에서 이동성이 크기(Gransee and Führs, 2013) 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 그러므로 Mg은 논 물리적인 조건을 고려하여 관리되어야 하며, 엽록체의 구성 성분이면서 환경스트레스에 대한 저항성(Gransee and Führs, 2013)을 키워주는 기능을 하지만 벼의 비료사용기준에서는 제외되어 있어서 Mg 비료의 사용과 관리방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

**시·군 지역간 토양 화학성 비교** 조사시기마다 4지점 이상이 검정된 시·군 지역간의 토양 화학성을 비교하기 위하여 지역별 5주기 검정성적의 평균을 이용하여 군집분석(Average Linkage Cluster Analysis)을 실시하였다. 군집간의 거리 0.4를 기준으로 유사한 지역을 묶은 결과, Fig. 6과 같이 4개의 그룹과 2개의 개별지역으로 나누어졌다. 그룹 I 은 pH, 유기물 및 양분의 수준이 대부분 적정 범위에 속하거나 근접하는 7지역으로 구성되었다. 그룹 II 에는 유효인산(70-106 mg kg<sup>-1</sup>)이 두 번째로 낮고, 치환성 양이온은 적정범위의 하위수준 이하이고, 유효규산은 84-96 mg kg<sup>-1</sup> 수준으로 영양상태가 저조한 3지역이 포함 되었다. 그룹 III에는 2개 지역이 포함되었으며 유효규산이 가장 낮고, 치환성 Ca과 Mg는 적정범위에 미치지 못하였다. 그룹 IV에는 유효인산이 251-292 mg kg<sup>-1</sup>으로 적정범위 상위수준의 2배 이상이며, pH는 5.9-6.2, 치환성 K은 적정범위의 2배인 0.4-0.5 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> 수준이나 Ca과 Mg은 적정범위 수준인 4지역으로 구성되었다. 그룹 V 은 pH 5.8-6, 유기물 24-31 g kg<sup>-1</sup>, 유효인산 196-228 mg kg<sup>-1</sup> 및 유효규산 130-143 mg kg<sup>-1</sup> 수준의 2지역으로 구성되었다. 개별 1 지역에서는 토양 pH와 유효인산이 5회의 조사주기마다 다른 지역보다 현저히 낮은 수준에서 검정되었다. 개별 2 지역에는 벼논의 적정범위보다 유효인산은 3배, 치환성 K은 2배 그리고 Ca은 1.2배 높은, 경북 조사지역 중에서 가장 높은 수준으로 검정되었다(Fig. 6). 화학성별 수준이 시간적 변동이 작으면

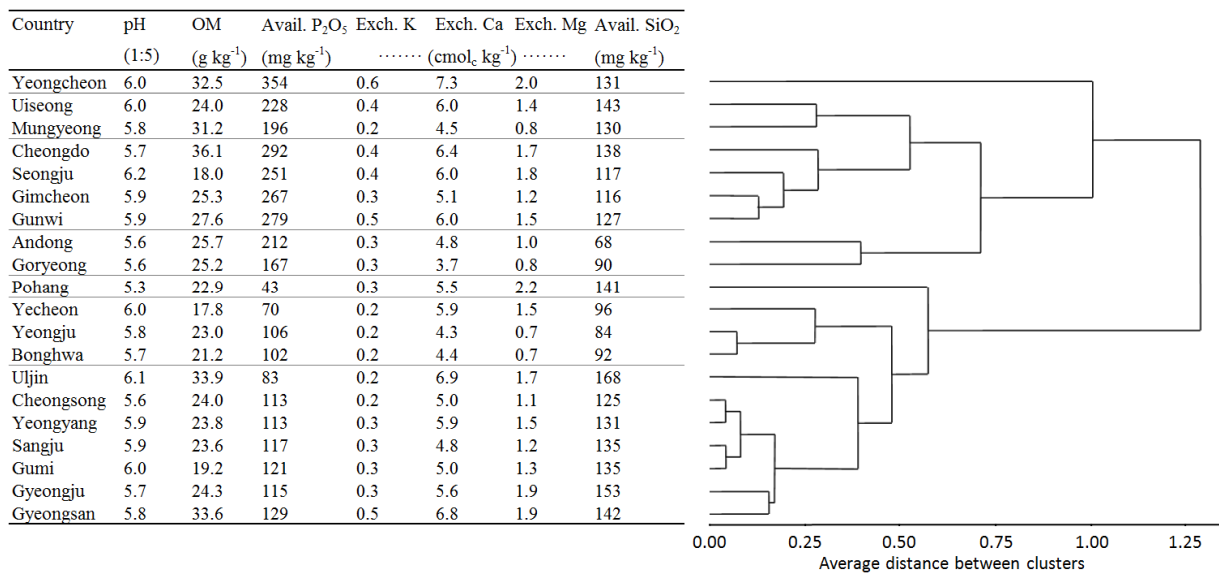


Fig. 6. Means of soil chemicals by country and dendrogram from average cluster method applied to soil chemical variables of rice paddy.

서 일정한 수준을 유지하는 지역이 있는 반면, 급격하게 변하는 지역에 의해서 군집구성이 조사주기에 따라 다양하게 나타나기도 하였다.

앞서 설명한 토양 물리적 특성뿐만 아니라, 분석에서 고려하지 않은 퇴비나 비료의 사용량과 사용시기, 작부체계 등이 토양의 화학적 특성 발현에 영향을 미치는데 (Liebig et al., 2004; Liu et al., 2010; Wang et al., 2014), 이러한 토양 관리방법의 다양성이 시·군 지역별 토양 화학성과 연계되어 Fig. 6과 같은 군집이 형성되었으며, 합리적인 시비방법과 비료의 사용효율을 향상시키기 위해서는 여러 요인을 함께 고려하여 평가하여야 할 것으로 판단된다.

## Conclusions

토양 pH는 2011년 이후부터는 이전보다 0.3-0.4 pH 단위 상승한 pH 6.0 이상을 보였다. 유기물은 2003년부터  $24 \text{ g kg}^{-1}$  이상의 평균을 보였으나 2015년에 조사한 논 35%는 추천하위수준인  $20 \text{ g kg}^{-1}$  이하에 머물렀다. 유효인산의 함량이 적정범위 ( $80\text{-}120 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 보다 부족한 논이 40% 이상 분포하였으며, 평균함량은 상위수준보다  $40 \text{ mg kg}^{-1}$  더 높은 수준을 조사기간 중에 유지하고 있는 것으로 분석되었다. 치환성 K은  $0.25\text{-}0.39 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  범위에서 변동하였다. 치환성 Ca은 적정범위 ( $5.0\text{-}6.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) 수준에서 평균을 보여주고 있었으며 2015년에는 2011년 이전보다 유의하게 증가하여  $5.9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 검정되었다. 치환성 Mg은 1999년  $1.55 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 에서 직선적으로 감소 ( $0.02 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) 하여 2003년부터는 적정범위 ( $1.5\text{-}2.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )의 하위수준보다 낮은 평균을 나타내었다. 유효규산의 함량은 2011년 이후부터 적정범위 ( $\geq 157 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 이상으로 크게 증가하였다. 논 토양 화학성은 생성된 지형, 토성 그리고 수분 조건의 영향을 받으며 시·군 지역에 따른 변이성이 있어서 토양의 물리적인 조건뿐만 아니라 퇴비나 비료의 사용방법, 논 이용방법 등 여러 요인을 함께 고려하여 평가되어야 할 것으로 판단되었다. 양분수준의 변이성이 크기 때문에 농가의 필지 단위에서 토양검정에 의한 양분관리가 필요한 것으로 나타났다.

## Acknowledgement

This work was supported by the Rural Development Administration, Republic of Korea, project no.: PJ00919 8232015, Monitoring Project on Agri-Environmental Quality in Korea.

## References

- Ahn, B.K., D.Y. Ko, C.K. Lee, J.H. Kim, Y.J. Song, and J.H. Lee. 2016. Long-term investigation of soil chemical properties in paddy fields located in different topographic areas of Jeonbuk Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:275-281.
- Asparouhov, T. and B. Muthén. 2016. Structural equation models and mixture models with continuous nonnormal skewed distributions. *Struct. Equation Model: A Multidiscip. J.* 23:1-19.
- Gransee, A. and H. Führs. 2013. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant Soil* 368:5-21.
- Jung, B.G., G.H. Jo, E.S. Yoon, J.H. Yoon, and Y.H. Kim. 1998. Monitoring on chemical properties of bench marked paddy soils in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31:246-252.
- Kang, S.S., A.S. Roh, S.C. Choi, Y.S. Kim, H.J. Kim, M.T. Choi, B.K. Ahn, H.W. Kim, H.K. Kim, J.H. Park, Y.H.

- Lee, S.H. Yang, J.S. Ryu, Y.S. Jang, M.S. Kim, Y.K. Sonn, C.H. Lee, S.G. Ha, D.B. Lee, and Y.H. Kim. 2012. Status and change in chemical properties of paddy soil in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:968-972.
- Kim, M.S., W.I. Kim, J.S. Lee, G.J. Lee, G.L. Jo, M.S. Ahn, S.C. Choi, H.J. Kim, Y.S. Kim, M.T. Choi, Y.H. Moon, B.K. Ahn, H.W. Kim, Y.J. Seo, Y.H. Lee, J.J. Hwang, Y.H. Kim, and S.K. Ha. 2010. Long-term monitoring study of soil chemical contents and quality in paddy fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:930-936.
- Kim, S.K., H.J. Kim, B.H. Kim, H.K. Kim, H.W. Kim, and S.S. Kang. 2015. Chemical properties of paddy soils and factors affecting their change in Jeonnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48:492-498.
- Lee, C.K., J.H. Kim, M.K. Choi, K.S. Kwak, and J.C. Shin. 2010. Nitrogen application method for high quality and labor saving in rice production under amended standard N application level. *Korean J. Crop Sci.* 55:70-75.
- Liebig, M.A., D.L. Tanaka, and B.J. Wienhold. 2004. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains. *Soil Till. Res.* 78:131-141.
- Liu, E., C. Yan, X. Mei, W. He, S.H. Bing, L. Ding, Q. Liu, S. Liu, and T. Fan. 2010. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma* 158:173-180.
- NAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2010a. Fertilizer recommendation standards for crops, Sangnok-sa, 16-23.
- NAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2010b. Method of soil chemical analysis. Rural Development Administration. Korea.
- NAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2012. Annual report of the monitoring project on agro-environmental quality in 2011. NAS, Suwon, Korea.
- Park, S.J., J.H. Park, C.Y. Kim, Y.J. Seo, O.H. Kwon, J.G. Won, and S.H. Lee. 2016. Comparison of the surface chemical properties of plastic film house, upland, and orchard soils in Gyeongbuk Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:115-124.
- Peukert, S., R. Bol, W. Roberts, C.J.A. Macleod, P.J. Murray, E.R. Dixon, R.E. Brazier. 2012. Understanding spatial variability of soil properties: a key step in establishing field to farm-scale agro-ecosystem experiments. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 26:2413-2421.
- Roh, A.S., J.S. Park, Y.H. Kim, and S.S. Kang. 2015. Status and changes in chemical properties of paddy soil in Gyeonggi Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48:436-441.
- SAS. 2010. SAS/STAT 9.2 user's guide. SAS Inst., Cary, NC.
- Sharpley, A.N., R.W. McDowell, and P.J.A. Kleinman. 2004. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:2048-2057.
- Son, D., Y.K. Sonn, S.S. Kang, J.Y. Heo, D.H. Kim, Y.J. Choi, S.D. Lee, Y.S. Ok, and Y.H. Lee. 2016. Long-term assessment of chemical properties from paddy soils in Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:132-137.
- Wang, X., Y. Tong, Y. Gao, P. Gao, F. Liu, Z. Zhao, and Y. Pang. 2014. Spatial and temporal variations of crop fertilization and soil fertility in the Loess Plateau in China from the 1970s to the 2000s. *PLoS one* 9(11):e112273.
- Whalen, J.K. and C. Chang. 2001. Phosphorus accumulation in cultivated soils from long-term annual applications of cattle feedlot manure. *J. Environ. Qual.* 30:229-237.
- Yamagishi, J., T. Nakamoto, and W. Richner. 2003. Stability of spatial variability of wheat and maize biomass in a small field managed under two contrasting tillage. *Field Crop Res.* 81: 95-108.
- Yanai, J., C.K. Lee, T. Kaho, M. Iida, T. Matsui, M. Umeda, and T. Kosaki. 2001. Geostatistical analysis of soil chemical properties and rice yield in a paddy field and application to the analysis of yield-determining factors. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47:291-301.
- Ye, R. and A.L. Wright. 2010. Multivariate analysis of chemical and microbial properties in histosols as influenced by

land-use types. *Soil Till. Res.* 110:94-100.

Yoon, B.S., S.C. Choi, S.J. Lim, S.J. Heo, I.J. Kim, and S.S. Kang. 2016. Status and changes in chemical properties of paddy soil in Gangwon Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:293-299.

Zhang, S., X. Zhang, T. Huffman, X. Liu, and J. Yang. 2011. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China. *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 89:427-438.