

경남지역 논토양 지형과 화학성의 관계

이영한[†] · 손연규^{1†} · 이성태 · 허재영 · 김민근 · 김은석 · 송원두 · 장용선¹ · 전원태² · 옥용식^{3*}

경상남도농업기술원, ¹국립농업과학원, ²국립식량과학원, ³강원대학교

Topographical Chemical Properties of Paddy Soils in Gyeongnam Province

Young-Han Lee[†], Yeon Kyu Sonn^{1†}, Seong-Tae Lee, Jae-Young Heo, Min-Keun Kim, Eon-Seok Kim, Won-Doo Song, Yong-Sun Zhang¹, Weon-Tai Jeon², and Yong Sik Ok^{3*}

Gyeongsangnam-do Agricultural Research and Extension Services, Jinju 660-3703, Korea

¹National Academy of Agricultural Science, RDA, Suin-ro 150, Gwonseon-gu, Suwon 441-707, Republic of Korea

²National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea

³Biochar Research Center, Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

Sustainable agriculture requires reliable information on the spatial distribution of the soil chemical properties for effective management of paddy fields. In order to provide adequate soil nutritional information for environmental-friendly agriculture, we investigated the soil chemical properties for 260 paddy soils sampled in Gyeongnam Province from 1999 to 2011 by four years of interval. Soil chemical properties of pH, organic matter, available phosphate and silicate, exchangeable potassium, calcium, and magnesium contents were analyzed. The pH value, organic matter, available phosphate and silicate, and exchangeable calcium and magnesium in paddy soils were significantly elevated in 2011 compared to 1999. The excessive levels of organic matter and available phosphate in paddy soils were detected in 2011. The soil available phosphate was highest in mountain foot-slope ($p<0.05$) and the soil organic matter was highest in diluvial terrace ($p<0.05$). It revealed that the soil available phosphate was the responsible factor for the differentiation of soil chemical properties by the topography in paddy soils.

Key words: Paddy soil, Chemical property, Soil topography, Available phosphate

서 언

친환경농업의 지속적인 발전을 위해서는 토양검정을 통한 효율적인 양분관리가 기초가 되어야 하며 이러한 정보를 지속적으로 구축할 수 있도록 일반농경지 모니터링 사업이 확대되어야 한다 (Lee et al., 2010). 농업은 작물이 탄소를 고정하여 인류에게 먹을 거리를 제공함으로써 환경과 가장 조화된 산업이며 삶의 질을 향상시키고 동시에 홍수조절, 지하수 보전과 침식방지 등 국토와 환경을 보전하는 사회공익적 기능을 가지고 있다 (Eom et al., 1993; Pollock et al., 2008; Pretty, 2008; Zhao et al., 2008). 우리나라 일반농경지 양분관리에 대해서 예전에는 토양 비옥도를 증진시켜 작물의 생산성을 높이는데 중점을 두었지만 (Hur et al., 1997; Kim et al., 1963) 최근에는 양분불균형 해소와

집적된 양분의 관리 및 2차 오염을 예방하는 것이 중요하게 되었다 (Cho et al., 2002; Tang et al., 2008). 우리나라는 2007년도에 논토양 2,070지점의 평균 화학성은 pH 5.8, 유기물 24 g kg⁻¹, 유효인산 132 mg kg⁻¹, 치환성 칼륨 0.32 cmol_c kg⁻¹, 치환성 칼슘 4.7 cmol_c kg⁻¹, 치환성 마그네슘 1.3 cmol_c kg⁻¹이었으며 유효규산의 변화량이 가장 높았다 (Kim et al., 2010). 경남지역의 논토양 유효인산 함량은 1999년부터 이미 적정범위 보다 높은 반면 유효규산 함량은 많이 부족한 상태였으며 치환성 양이온은 칼슘과 마그네슘에 비해 칼륨이 상대적으로 높은 편이었다 (Lee et al., 2010). 논토양의 화학성분을 주기적으로 분석한 결과는 다양한 농업환경 변동을 이해하고 지속적인 농업을 발전시키는 데 기여할 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 본 연구는 경남지역 논토양 260개소를 대상으로 1999년부터 2011년까지 4년 주기로 토양 화학성분 변동조사를 수행하였으며 주 성분분석에 의한 지형별 화학성분의 특성과 주요 변동요인을 해석하였다.

접수 : 2012. 2. 15 수리 : 2012. 3. 9

[†]공동제1저자

*연락처 : Phone: +82332506443

E-mail: soilok@kangwon.ac.kr

재료 및 방법

결과 및 고찰

논토양 지점 선정 및 시료채취 방법 경남지역 논토양의 화학성분 변동을 주기적으로 파악하기 위하여 1999년에 지역별로 토양 유형, 지형 및 토성과 분포면적 비율을 기준으로 260개 지점을 선정하였고 2011년까지 4년 주기로 동일한 지점을 조사하였다 (RDA, 1983). 토양은 비료를 사용하지 전인 3월부터 4월 사이에 표토를 0-15 cm 깊이에서 500 g 정도를 토양시료채취기를 이용하여 3반복으로 채취하였다.

토양 시료조제 및 화학성분 분석방법 채취한 토양은 실험실에서 7일간 풍건하여 2 mm 체를 통과된 것을 화학성분 분석에 사용하였다. 화학성분 분석은 농촌진흥청 국립농업과학원 토양화학분석법 (NAAS, 2010)을 적용하여 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 초자전극법 (Orion 520A pH meter, Orion Research Inc., Boston, USA)으로 측정하였고, 유기물 함량은 Tyurin법으로 분석하였으며, 유효인산은 Lancaster법과 유효규산은 1M NaOAc (pH 4.0)의 가용성 규산으로 비색계 (UV-1650PC, Shimadzu Co., Kyoto, Japan)를 사용하였다. 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등의 양이온은 1M NH₄OAc로 추출하여 원자흡광분광광도계 (AAnalyst 300, Perkin-Elmer, Norwalk, USA)로 분석하였다.

다변량 주성분 분석 및 통계분석 통계분석은 SAS 프로그램 9.1.3 버전 (2006)을 사용하였다. 연도별 토양 화학성분은 5% 수준에서 Duncan's multiple range test를 하였고 지형별 토양 화학성분은 5% 수준에서 Tukey's studentized range test를 하였다. 또한, 토양 화학성분의 주성분 분석을 통하여 연도 및 지형에 따른 차이를 비교 검토하였다.

연도별 논토양 화학성분 변동 경남지역 논토양의 화학성분 평균 함량 변동은 Table 1과 같다. 논토양의 pH는 1999년과 2003년의 5.7 보다 2007년에 5.6으로 유의적인 감소를 보였으나 2011년에 6.1의 수준으로 유의적인 증가를 보였다. 토양의 유기물 함량은 2011년에 31 g kg⁻¹으로 1999년 29 g kg⁻¹, 2003년 27 g kg⁻¹에 비해 유의적인 증가를 보였으나 2007년 30 g kg⁻¹과 차이가 없었다. 그러나 유효인산 평균 함량은 2011년에 235 mg kg⁻¹으로 1999년 196 mg kg⁻¹과 2007년 194 mg kg⁻¹에 비해 유의적으로 증가하였다. 토양의 치환성 칼륨, 칼슘 및 마그네슘 함량은 1999년에 0.23, 4.8 및 0.9 cmol_c kg⁻¹에서 2003년 0.30, 5.1 및 1.2 cmol_c kg⁻¹, 2007년 0.41, 6.4 및 1.5 cmol_c kg⁻¹, 2011년 0.37, 6.2 및 1.4 cmol_c kg⁻¹으로 2007년 이후로 유의적인 증가추세를 나타냈다. 유효규산 함량은 1999년 73 mg kg⁻¹에 비해 2003년 124 mg kg⁻¹, 2007년 113 mg kg⁻¹, 그리고 2011년에 193 mg kg⁻¹으로 유의적인 증가를 보였다. 이러한 결과는 조사 연도별 토양 화학성분 변동을 분석한 농업과학기술원 (NIAS, 2008)의 보고와 일치하는 경향이였다.

논토양의 pH 부족비율은 1999년 33.8%, 2003년 41.9%, 2007년 49.2% 및 2011년 13.1%으로 2011년에 크게 개선되는 경향이였다. 유효규산 함량도 부족한 비율이 1999년 95.4%, 2003년 69.6% 및 2007년 83.8%, 2011년 56.2%로 크게 개선되는 경향이였으나 부족한 비율이 매우 높아 벼 수량을 증대시키기 위해서는 규산질비료 공급 확대가 시급한 것으로 나타났다 (Kim and Choi, 2002; Park and Kim, 1971; Song et al., 2007). 논토양의 실제적인 적정수준에서 pH의 경우 1999년 56.5%, 2003년 48.1%, 2007년 43.5%, 2011년 63.8%였으며 유기물 함량은 1999년 18.1%, 2003년 10.8%, 2007년

Table 1. Chemical properties of paddy soils in Gyeongnam Province.

Year	pH	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation			Avail. SiO ₂	Number of sample
				K	Ca	Mg		
	(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----	mg kg ⁻¹	
1999	5.7b [†]	29bc	196b	0.23d	4.8b	0.9c	73c	260
(Range)	(4.8-7.5)	(1-75)	(2-1,218)	(0.04-1.80)	(0.4-33.1)	(0.2-3.1)	(21-556)	
2003	5.7b	27c	216ab	0.30c	5.1b	1.2b	124b	260
	(4.7-7.6)	(2-86)	(10-935)	(0.07-1.11)	(1.1-20.2)	(0.3-4.0)	(24-444)	
2007	5.6c	30ab	194b	0.41a	6.4a	1.5a	113b	260
	(4.3-7.4)	(8-55)	(14-1,193)	(0.07-1.09)	(2.0-13.6)	(0.3-6.0)	(21-742)	
2011	6.1a	31a	235a	0.37b	6.2a	1.4a	193a	260
	(5.2-8.0)	(6-77)	(13-1,284)	(0.07-2.47)	(2.0-23.6)	(0.3-5.0)	(21-990)	
Optimum range	5.5-6.5	25-30	80-120	0.25-0.30	5.0-6.0	1.5-2.0	157-180	

[†]Means within a column followed by the same letter are not significantly different at α = 0.05, 95% confidence level according to Duncan's multiple range test.

20.4%, 2011년 20.0% 였고 유효인산 함량은 1999년 10.8%, 2003년 13.8%, 2007년 17.3%, 2011년 14.6% 였으며 유효규산 함량은 1999년 1.9%, 2003년 8.5%, 2007년 3.5%, 2011년 6.9% 이었다 (Fig. 1). 그리고 유기물 함량의 초과비율은 1999년 40.0%, 2003년 30.4%로 감소하였다가 2007년 48.5%, 2011년 50.8%로 급격히 증가하였다. 이러한 결과는 친환경 농업이 확산되면서 퇴비를 많이 줄수록 작물이 잘 자라고 토양도 좋아진다는 농민들의 잘못된 인식이 영향을 미친 것으로 판단되었다 (NIAST, 2006). 또한, 유효인산 함량의 초과비율은 1999년 55.0%, 2003년 57.7%, 2007년 52.7%, 2011년 63.5%로 토양에 과잉 집적되는 경향이였다. 전반적으로 유효인산 함량은 1999년 이후로 적정수준 보다 2배 이상 높아 담수상태에서 조류에 대한 피해와 유출수로 인하여 하천으로 유입될 경우 하천의 부영양화 등 2차 오염이 우려되었다 (Cho et al., 2002; Tang et al., 2008). 따라서 토양의 유기물 함량과 유효인산 함량을 적정수준으로 유지하기 위해서는 과잉의 가축분 퇴비 시용에 대해 주의하고 토양 분석을 통한 적정 시용량을 준수하는 것이 중요할 것으로 판단되었다.

논토양 지형별 화학성 비교 및 상관관계 경남지역 논토양 지형에 따른 토양 화학성은 Table 2와 같다. 산록 경사지는 유효인산 함량이 296 mg kg⁻¹으로 다른 지형에 비해 유의적으로 많았으며 치환성 칼륨 함량은 0.42 cmol_c kg⁻¹으로 곡간 및 선상지 0.31 및 홍적대지 0.30에 비해 유의적으로 높았다. 특히 토양 유효인산 함량은 모든 지형에서 적정수준 보다 높게 나타나 인산질 함량을 줄일 수 있는 시비관리 방법이 시급한 것으로 판단되었다 (Lee et al., 2010). 토양 pH는 하해혼성평탄지와 해안평탄지가 6.0으로 곡간 및 선상지 5.7에 비해 유의적으로 높았다. 이러한 경향은 바닷물의 영향을 받는 해안주변의 논토양은 염분으로 인하여 토양의 pH가 상승된 것으로 판단되었다 (Hur et al., 1997; Lee et al., 2010). 유기물 함량은 홍적대지에서 39 g kg⁻¹으로 다른 지형에 비하여 유의적으로 많았으며 하해혼성평탄지와 해안평탄지는 각각 22, 23으로 매우 낮았다. 치환성 마그네슘 함량은 해안평탄지가 1.8 cmol_c kg⁻¹으로 산록경사지 1.6을 제외한 홍적대지 1.4, 곡간 및 선상지, 하성평탄지, 하해혼성평탄지의 1.2에 비해 유의적으로 많았다. 그러나 치환성 칼슘 함량과 유효규산 함량은 지형에 따른 큰 영

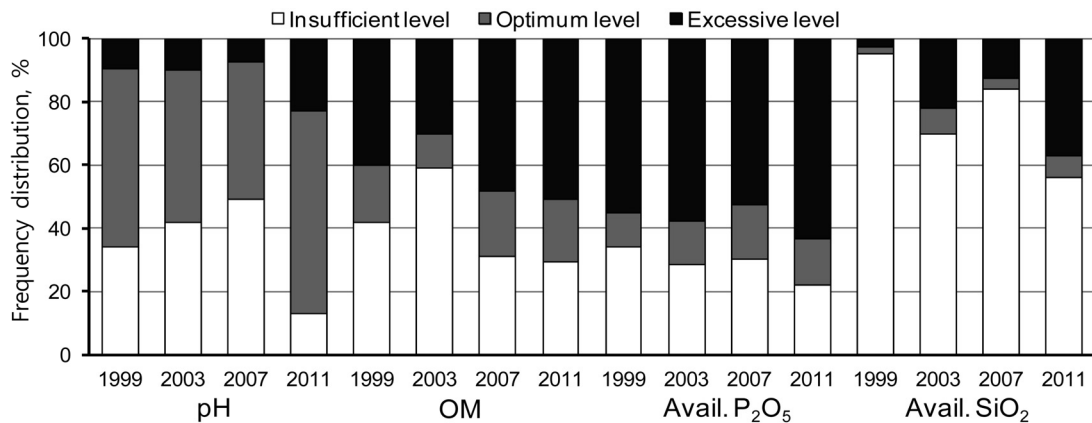


Fig. 1. Frequency distribution of chemical properties from sampling year in paddy soils (n = 260).

Table 2. Chemical properties of paddy soils in Gyeongnam Province.

Topographies	pH	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation			Avail. SiO ₂	Number of sample
				K	Ca	Mg		
	(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----	mg kg ⁻¹	
Fan & valley	5.7b	30b	204b	0.31b	5.5a	1.2c	129a	528
Mountain foot-slope	5.9ab	32b	296a	0.42a	6.5a	1.6ab	155a	36
Alluvial plains	5.9ab	27bc	215b	0.35ab	5.7a	1.2c	120a	352
Fluvio-marine plains	6.0a	22c	173b	0.32ab	5.8a	1.2c	113a	16
Marine plains	6.0a	23c	201b	0.37ab	6.1a	1.8a	115a	56
Diluvialterrace	5.9ab	39a	210b	0.30b	5.5a	1.4bc	124a	52
Optimum range	5.5-6.5	25-30	80-120	0.25-0.30	5.0-6.0	1.5-2.0	157-180	

†Values within a column followed by the same letter are not significantly different at α = 0.05 by Tukey's studentized range test.

향이 없는 것으로 나타났다.

토양 화학성분 상호간의 상관관계는 Table 3과 같다. 토양 pH는 치환성 칼슘 함량, 유효규산 함량, 치환성 마그네슘 함량, 치환성 칼륨 함량 및 유효인산 함량의 순으로 정의 상관을 보였다. 토양 유기물 함량은 유효인산 함량, 치환성 칼륨 함량, 치환성 칼슘 함량 및 유효규산 함량 순으로 정의 상관을 나타냈다. 또한, 유효규산 함량은 치환성 칼슘 함량, 치환성 마그네슘 함량 및 치환성 칼륨 함량 등의 양이온과도 유의적인 정의 상관을 보였다.

논토양 화학성 주성분 분석 작물생산과 관련하여 Rust et al. (1972)는 질소의 사용에 따른 환경 영향을 비교하여 토양의 질에 대한 지표 개발이 가능하다고 하였고 Warkentin and Fletcher (1977)는 토양의 질에 대하여 한가

지 요인으로 평가할 수 없으며 다양한 관점에서 고려해야 한다고 하였다. 최근에는 여러 가지 요인을 몇 가지의 성분으로 추출하여 설명하고 예측할 수 있는 주성분 분석방법을 이용하고 있다 (Cho et al., 2005; Lee et al., 2010; Lee et al., 2011). 토양 화학성분의 주성분 분석결과는 고유값이 1.0 이상인 주성분은 2개였고 제 1주성분 (PC1)에 속하는 토양 화학성은 기여도가 높은 순으로 치환성 칼슘, 치환성 마그네슘, pH, 유효규산 및 치환성 칼륨 등 5개였으며 제 2주성분 (PC2)에 속하는 토양 화학성은 유효인산 및 유기물 함량 등 2개로서 Lee et al. (2010)이 보고한 결과와 동일하였다. 토양 화학성분의 특성은 제 1주성분이 39.4%, 제 2주성분이 21.2%로서 전체 60.6%의 자료를 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 조사연도별 토양 화학성분은 Fig. 2와 같이 논 토양의 치환성 칼슘, 치환성 마그네슘, pH, 유효규산 및 치

Table 3. Correlation coefficients between chemical properties from paddy soils in Gyeongnam Province (n = 1,040).

Chemical property	OM	Avail. P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Avail. SiO ₂
pH	-0.013	0.096 ^{**†}	0.182 ^{***}	0.575 ^{***}	0.428 ^{***}	0.502 ^{***}
OM		0.344 ^{***}	0.159 ^{***}	0.104 ^{***}	0.008	0.093 ^{**}
Avail. P ₂ O ₅			0.454 ^{***}	0.140 ^{***}	0.055	-0.044
K				0.370 ^{***}	0.446 ^{***}	0.200 ^{***}
Ca					0.645 ^{***}	0.417 ^{***}
Mg						0.354 ^{***}

[†], **, and ***, significant at $\alpha = 0.05$, 0.01, and 0.001, respectively.

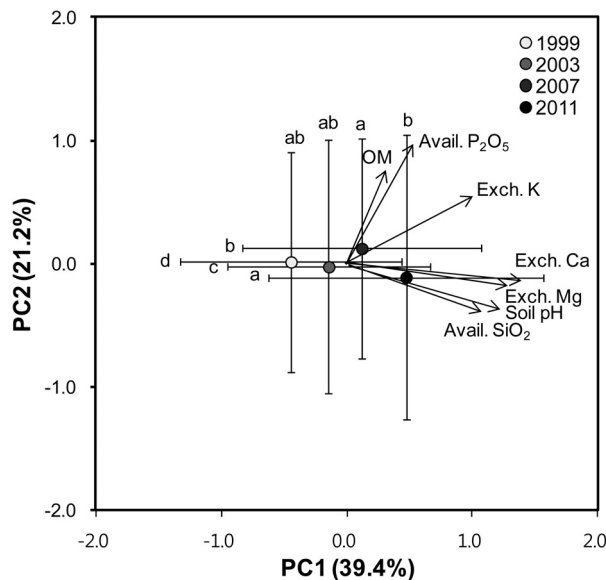


Fig. 2. Principal components analyses of chemical properties from sampling years in paddy soils. The variance explained by the each principal component (PC) axis is shown in parentheses. Bars present standard error (n = 1,040). Values within a column followed by the same letter are not significantly different at $\alpha = 0.05$ by Tukey's studentized range test.

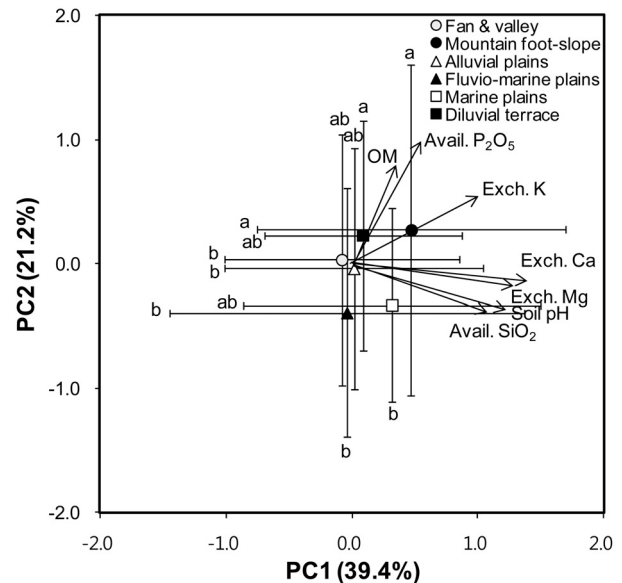


Fig. 3. Principal components analyses of chemical properties from soil topographies in paddy soils. The variance explained by the each principal component (PC) axis is shown in parentheses. Bars present standard error (n = 1,040). Values within a column followed by the same letter are not significantly different at $\alpha = 0.05$ by Tukey's studentized range test.

환성 칼륨 함량은 1999년도 이후 점차로 증가되는 경향이었으며 향후 지속적인 증가로 인한 과잉의 문제가 발생될 수 있을 것으로 예측되었다. 지형에 따른 주성분 분석결과는 Fig. 3과 같이 PC1은 산록경사지와 해안 평탄지에서 높았으며 PC2는 산록경사지에서 높았다. 이와 같이 주성분 분석을 이용하여 논토양 화학성분의 연도별 변화와 지형별 특성을 비교할 수 있었으며 향후 논토양의 미량성분 모니터링과 토양 미생물의 변화를 예측하는 연구에도 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

요 약

경남지역 논토양의 양분관리를 위한 기초자료를 제공하기 위해 260 지점의 화학성분 변동을 1999년부터 2011년까지 4년 주기로 분석하였다. 논토양 pH, 유기물 함량, 유효인산 함량, 유효규산 함량, 치환성 칼슘 및 마그네슘 함량은 1999년에 비해 2011년에 유의적으로 증가하였다. 유기물 함량의 초과비율은 1999년 40.0%, 2003년 30.4%, 2007년 48.5%, 2011년 50.8%로 증가하였다. 유효인산 함량의 초과비율은 1999년 55.0%, 2003년 57.7%, 2007년 52.7%, 2011년 63.5%로 2배 이상 과잉 집적되었다. 유기물 함량은 홍적대지에서 가장 높았고 유효인산 함량은 산록경사지에서 가장 높았다. 논토양의 통계분석과 주성분 분석을 통하여 경남지역 논토양의 유효인산 함량은 지형별 화학특성을 구별할 수 있는 중요인자로 판단되었다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ006906202012)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인 용 문 헌

Cho, I.H., Y.S. Kim, and K.D. Zoh. 2005. A case study on the comparison and assessment between environmental impact assessment and post-environmental investigation using principal component analysis. *Kor. J. Env. Hlth.* 31(2):134-146.

Cho, J.Y., K.W. Han, J.K. Choi, Y.J. Kim, and K.S. Yoon. 2002. N and P losses from a paddy field plot in central Korea. *Soil Sci. Plant Nutr.* 48:301-206.

Eom, K.C., S.H. Yun, S.W. Hwang, S.G. Yun, and D.S. Kim. 1993. Public benefit from paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 26(4):314-333.

Hur, B.K., S.K. Rim, Y.H. Kim, and K.Y. Lee. 1997. Physico-chemical properties on the management groups of

paddy soils in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30(1):62-66.

Kim, C.B. and J. Choi. 2002. Changes in rice yield, nutrients use efficiency and soil chemical properties as affected by annual application of slag silicate fertilizer. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 35(5):280-289.

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(6):930-936.

Kim, Y.S., S.C. Seo, and K.H. Han. 1963. Study on soil analysis. Annual research report of Institute of Plant Environment. RDA, Suwon, Korea.

Lee, Y.H. and S.K. Ha. 2011. Impacts of chemical properties on microbial population from upland soils in Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(2):242-247.

Lee, Y.H. S.T. Lee, J.Y. Heo, M.G. Kim, K.P. Hong, W.D. Song, C.W. Rho, J.H. Lee, W.T. Jeon, B.G. Ko, K.A. Roh, and S.K. Ha. 2010. Monitoring of chemical properties from paddy soil in Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(2):140-146.

NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. Analytical methods of soil and plant. NAAS, Suwon, Korea.

NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2006. Annual report of the monitoring project on agro-environmental quality in 2005. NIAST, RDA, Suwon, Korea.

NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2008. Annual report of the monitoring project on agro-environmental quality in 2007. NIAST, RDA, Suwon, Korea.

Park, Y.D. and Y.S. Kim. 1971. Increased yielding effect of silica on rice grown on Akiuchi soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 4(1):1-11.

Pollock, C., J. Pretty, I. Crute, C. Leaver, and H. Dalton. 2008. Introduction sustainable agriculture. *Philos Trans R. Soc. B.* 363:445-446.

Pretty, J. 2008. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philos Trans R. Soc. B.* 363:447-465.

RDA (Rural development administration). 1983. Soil in Korea. RDA, Suwon, Korea.

Rust, R.H., R.S. Adams, and W.P. Martin. 1972. Developing a soil quality index. *Indic. J. Environ. Qual.* 1:243-247.

SAS Institute. 2006. SAS Version 9.1.3. SAS Inst., Cary, NC.

Song, Y.S., H.J. Jun, B.G. Jung, W.K. Park, K.S. Lee, H.K. Kwak, J.H. Yoon, C.S. Lee, B.Y. Yeon, P.J. Kim, and Y.S. Yoon. 2007. Determination of optimum rate and interval of silicate fertilizer application for rice cultivation in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(5):354-363.

Tang, J., B. Zhang, C. Gao, and H. Zepp. 2008. Hydrological pathway and source area of nutrient losses identified by a

- multi-scale monitoring in an agricultural catchment. *Catena* 72:374-385.
- Warkentin, B.P. and H.F. Fletcher. 1977. Soil quality for intensive agriculture. p. 594-598. In Proceedings of international seminar on soil environment and fertilizer management in intensive agriculture. Soc. Sci. Soil and Manure and Natl. Inst. Of Agric. Sci., Tokyo, Japan.
- Zhao, J., Q. Luo, H. Deng, and Y. Yan. 2008. Opportunities and challenges of sustainable agricultural development in China. *Philos Trans R. Soc. B.* 363:893-904.