

## Changes of Chemical Characteristics of Soil Solution In Paddy Field from Fifty-Eight Years Fertilization Experiments

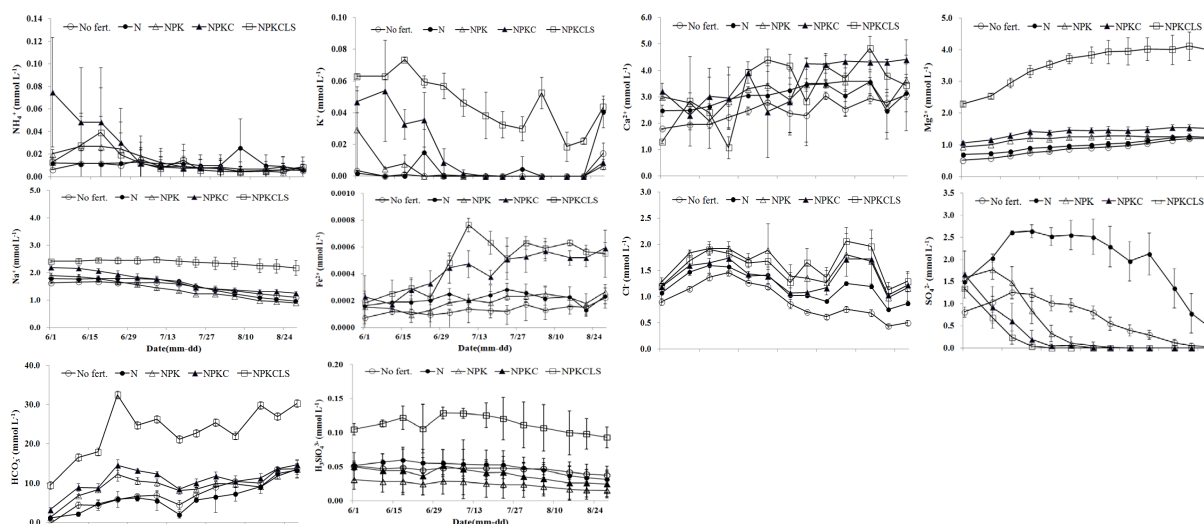
Myung Sook Kim\*, Yoo Hak Kim, Seong Jin Park, Chang Hoon Lee, Sun Gang Yun, and Yeon Kyu Sonn

Soil & Fertilizer Management Division, National Academy of Agricultural Science, Wanju 565-851, Korea

(Received: November 3 2014, Revised: February 19 2015, Accepted: February 24 2015)

The objectives of this study were to monitor the changes in soil solution nutrients and to evaluate their effect on rice uptake and yield. The changes of chemical characteristics of paddy soil solution were examined from the 58th fertilization experiment in which the continuous rice cropping experiment started in 1954 at the National Academy of Agricultural Science. The treatments were no fertilization (No fert.), inorganic fertilization (NPK), inorganic fertilizer plus rice straw compost (NPKC) and inorganic fertilizer plus silicate and lime fertilizer as a soil amendment (NPKCLS). The fertilizers were added at rates of standard fertilizer application rate in which nitrogen (N), phosphate ( $P_2O_5$ ), potassium ( $K_2O$ ), and silicate ( $SiO_2$ ) were applied at rates of 75~150 kg ha<sup>-1</sup>, 70~86 kg ha<sup>-1</sup>, 75~86 kg ha<sup>-1</sup>, and 7.5 Mg ha<sup>-1</sup> respectively and lime was applied to neutralize soil acidity until 6.5. Average Electrical Conductivity (EC) of soil solution in NPKCLS and NPKC ranged from 1.16 to 2.00 dS m<sup>-1</sup>. The  $NH_4^+$  and  $K^+$  levels in NPKCLS and NPKC were higher than that of the other treatments, due to high supply power of rice straw compost. The content of  $H_3SiO_4^-$  was higher in NPKCLS because of silicate application. The dominant ions in soil solution were  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  and  $Na^+$  among cations and  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , and  $Cl^-$  among anions in all treatments. The continuous application of inorganic fertilizers plus rice straw compost (NPKC) and silicate fertilizer (NPKCLS) led to the changes of various chemical composition in soil solutions. Also, they had a significant impact on the improvement of rice inorganic uptake and grain yield. Especially, inorganic uptake by rice in NPKC and NPKCLS significantly increased than those in NPK plot; 14~46% for T-N, 32~36% for P, 43~57% for K, and 45~77% for Si. Therefore, the combined application of inorganic fertilizers with organic compost as a soil amendment is considered as the best fertilization practice in the continuous rice cropping for the improvement of crop productivity and soil fertility.

**Key words:** Long-term experiment, Paddy soil, Soil solution, Chemical properties



Changes of cation ( $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ , and  $Fe^{2+}$ ) and anion ( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ , and  $H_3SiO_4^-$ ) in the top soil solution during rice cropping after the continuous fertilization for 58 years.

\*Corresponding author : Phone: +82632382454, Fax: +82632383822, E-mail: msk74@korea.kr

§Acknowledgement: This study was conducted by support of NAAS research and development project (project number: PJ009348022014).

## Introduction

토양 용액 중 화학적 성분의 조성은 작물의 양분 공급력을 좌우하는 큰 인자로 이들의 변화 특성을 알아보는 것은 작물의 생산성 및 토양비옥도 향상의 측면에서 매우 중요하다. 논토양에서 식물에 유효한 양분은 담수에 따른 토양 환원의 정도에 따라 크게 달라진다. 양이온 치환 복합체 (cation exchange complex)에 흡착되어 있던 양이온은 환원형태의 철이 이들 위치에 흡착함에 따라 토양 용액으로 방출되고 (Brinkman, 1970; Ponnampereuma, 1965; Genon et al., 1994), 인은  $Fe_2(PO_4)_3$  형태로 해리되어 방출된다 (Husin et al., 1987). 토양유기물에서 미생물의 작용으로 분해된  $NH_4^+$ 는 토양 입자의 양이온 치환 복합체에 고정된다(Ernstsen, 1996; Schneiders and Sherer, 1998). Khaled and Stucki (1991)는 smectite를 가진 환원철에 potassium의 고정이 이루어진다고 하였다 (Matsuo et al., 1995).

담수된 토양의 화학적 조성 및 반응 그리고 작물 흡수에 관한 연구는 실험실의 통제된 조건하에서 주로 이루어졌다. 간단한 실험을 통해 제한된 인자만을 가지고 model식을 이용하여 토양용액의 화학적 반응에 대해서 예측하였고, Ponnampereuma (1972)는 토양 용액에서 일어나는 반응에 주로 초점을 두었으며, 다른 연구자들은 실내 실험 조건에서 작물 양분의 측면에서 토양 용액에 대하여 연구하였다 (Oh, 1976; Husin et al., 1987; Narteh and Sahrawat, 1999). 그리고 Kim et al. (2008)은 밭토양을 담수한 후 일어나는 토양 용액의 화학성과 광물학적 특성을 연구하였다. 이러한 연구는 실내의 통제된 조건에서 토양 용액 중 일어나는 화학적 조

성 및 반응에 대해 주로 이루어진 것이며, 포장 조건 하에서의 토양 용액 중 화학적 조성의 변화에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 이러한 이유는 포장 조건에서 토양 용액에 영향을 주는 인자는 매우 다양하고 복잡하기 때문에 해석의 어려움이 많기 때문이다.

따라서, 본 연구의 목적은 동일한 무기질비료와 토양개량제를 지속적으로 투입하면서 벼를 재배하는 장기시험 포장에서 실험이 시작된 지 58년째 되는 해의 토양의 처리구간 화학적 특성을 비교하였고, 토양 용액에서 일어나는 화학적 조성 변화와 작물의 양분 흡수량 및 수량에 미치는 영향에 대해서 검토하고자 수행하였다.

## Materials and Methods

**시험포장 토양특성** 본 연구에 사용된 시험포장 논토양은 1954년도에 경기도 수원시 권선구 서둔동 소재 국립작물과학원 (현 국립식량과학원) 포장 내에 조성되었고, 지형적으로 하성평탄지에 위치한다. 논토양의 특성으로 유효토심은 보통이고 투수성은 빠르며 배수등급은 약간 양호이며, 토성은 사양질로 강서토 (Coarse loamy, Fluvaquentic Eutrudepts)의 특성을 가진다. 1954년 당시의 토양 화학성은 pH 5.2, 유기물 (OM) 함량은  $16 \text{ g kg}^{-1}$ , 유효인산 (Avail.  $P_2O_5$ ) 함량은  $120 \text{ mg kg}^{-1}$ , 치환성 칼륨 (Exch. K) 함량이  $0.08 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 로 유효인산 함량을 제외한 성분은 벼 생육을 위한 논토양 적정 비옥도에 기준 (NIAST, 2010)에 미치지 못하였다. 벼의 품종과 비료와 개량제를 사용한 내력은 Fig. 1과 같다.

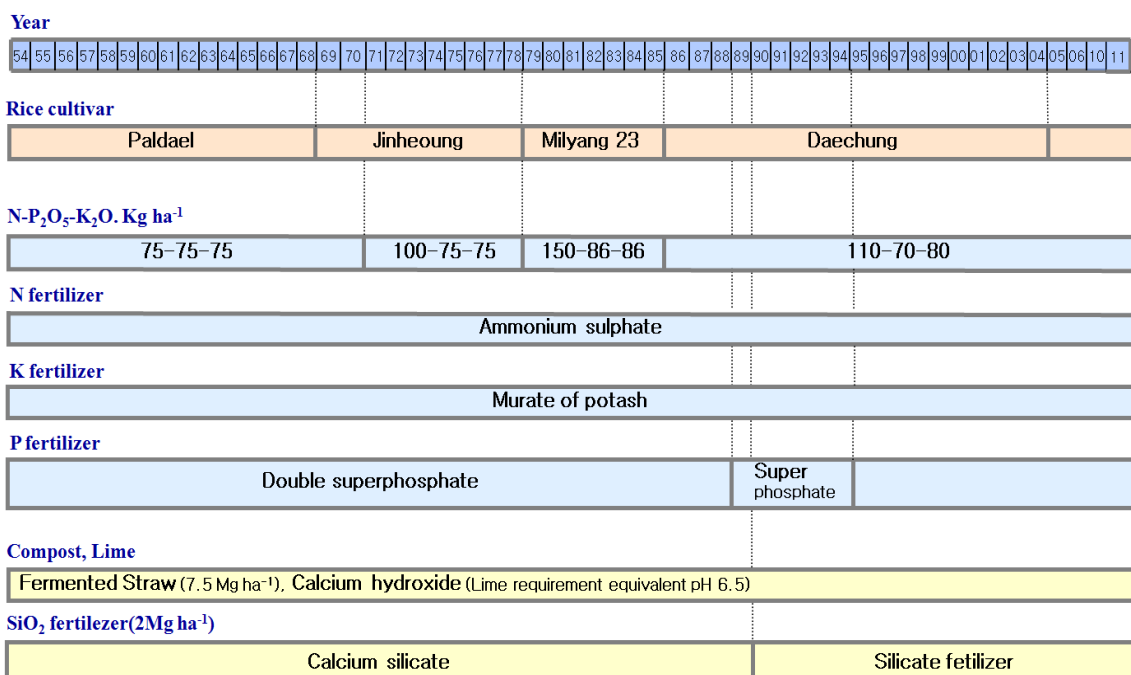


Fig. 1. Rice cultivar and chronological application of chemical fertilizers, rice straw compost, and soil amendments.

**공시품종** 벼의 품종은 1954년부터 1968년까지는 팔달, 1969년부터 1978년까지는 진흥, 1979년부터 1985년까지는 밀양 23호, 1986년부터 2003년도까지는 대청, 2004년부터 2011년까지는 삼광을 재배하였다.

**처리구** 처리구는 완전 임의 배치법으로 배치되었고 모두 32개의 처리구로 구성되어 있으나, 본 연구에서는 무비구 (No fert.), 유안구 (N), NPK구 (NPK=질소-인산-가리), 퇴비구 (NPKC), 종합개량구 (NPKCLS)만을 분석에 이용하였다.

**시비량 및 재배관리** 시비량은 시기별로 표준시비량 (NAAS, 2010)이 달라짐에 따라서 달라졌으며, 질소는  $75\sim 150\text{ kg ha}^{-1}$ , 인산은  $70\sim 86\text{ kg ha}^{-1}$ , 가리는  $75\sim 86\text{ kg ha}^{-1}$ , 퇴비는  $7.5\text{ kg ha}^{-1}$ , 규산질비료는  $2\text{ Mg ha}^{-1}$ 를, 석회는 pH 6.5까지 상승시키는 양을 사용하였고, 기비-분얼비-수비-실비의 분시비율은 질소는 50-20-20-10%, 가리는 70-0-30-0%로 2회, 인산, 퇴비, 석회, 그리고 규산은 전량 기비로 사용하였다. 벧짚퇴비의 제조는 벼 수확기에 시험연구 포장으로부터 벧짚을 3 ton 정도 수거하여 절단하고 물을 뿌렸으며 비닐을 덮어 후숙하였고 요소비료를 4~6 kg의 양을 첨가하여 부숙 한 후 사용하였다. 토양개량제인 규산질 비료와 소석회 그리고 벧짚퇴비는 토양과 충분히 반응하도록 4월 중순에 미리 각각의 처리구에 살포하고 경운하였으며, 무기질 비료는 5월 하순에 담수하면서 사용하고 벼를 이앙하였다. 전년도에 수확 후 남아있는 벼의 그루터기와 뿌리는 경운 시 썩어질 할 때 토양에 전량 환원하였다.

**토양 및 토양 용액 채취** 토양의 화학성을 분석하기 위한 시료는 4월 초에서 중순 사이에 처리구당 0~15 cm 깊이로 7군데를 채취한 후 혼합하여 사용하였고, 토양용액을 분석하기 위한 시료는 6월 1일부터 8월 28일까지 13회에 걸쳐 polyethylene porous cup (pore size  $35\sim 75\text{ }\mu\text{m}$ )을 설치하고 10 kPa의 일정한 압력을 유지하면서 토양용액 시료의 양이 100 mL가 되도록 채취하였다.

**토양 및 토양 용액 분석** 토양의 pH와 전기전도도 (EC, Electrical conductivity)는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 측정하였고, 토양유기물은 Tyurin법, 유효 인산은 Lancaster법으로 추출하여 720 nm에서, 유효규산은 1 M NaOAc (pH 4.0)용액으로 추출하여 700 nm에서 비색계 (U-3000, Hitachi)로, 치환성 양이온은 1M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 유도결합 플라즈마 발광광도계 (ICP-OES, GBC)로 측정하였다 (NIAST, 2000). 토양용액 중 pH와 EC는 pH와 EC meter를 이용하여 분석하였고, 양이온인  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ 과 음이온인 Si는 유도결합 플라즈마 분광광도계로, 음이온 중  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 이온크로마토그래피로,  $\text{NH}_4^+$ 는 원소자동분석기로,  $\text{HCO}_3^-$ 는 calcimeter를 이용하여 Jung and Kim (2006)이 제안한 방법을 변형하여 토양용액 2 mL를 넣고 분석하였다.

**식물체 무기성분 분석** 식물체의 무기성분 함량은 건조 후 40 mesh로 분쇄하였고 시료를 0.5 g 칭량하고 진한 황산을 10 mL와 50%의  $\text{HClO}_4$  10 mL를 가하여 분해한 후 여과지에 남아있는 분해 잔사물을  $600^\circ\text{C}$ 의 전기로에서 6시간 동안 회화시키는 중량법으로 조규산 함량을 정량하였다 (NIAST, 2000). Cl 성분은 공시액에 석회유를 첨가하여 염소의 휘산을 억제시키고 인산 등의 방해물과 결합하여 공시액중에 이동하는 것을 방지하고 Ion Chromatography로 Cl의 양을 정량하였고, S 성분은 황분석기 (S632, LECO)를 이용하여 분석하였다.

**정조 수량** 정조수량은 해마다 10월에 처리구 당 70주씩 3반복으로 채취하여 탈곡한 후에 자연 상태에서 건조하고 무게를 조사하였다.

## Results and Discussion

**비료 및 토양개량제 58년 투입한 후 토양의 화학적 특성** 장기시험 포장의 토양의 화학적 특성은 Table 1과 같다. 처리구별 토양의 pH는 No fert., N, NPK, NPKC, NPKCLS구는 각각 6.6, 6.3, 5.8, 5.9, 7.5로 NPKCLS구가

**Table 1. Mean pH, OM, available phosphate, exchangeable cation, and available silicate after the continuous fertilization for 58 years.**

Treatments	pH (1:5)	EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )	OM ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Available $\text{P}_2\text{O}_5$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Available $\text{SiO}_2$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Exch. cation ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ )		
						Ca	Mg	K
No fert.	6.6±0.1	0.40±0.04	17±1	20±3	69±3	6.1±0.3	0.9±0.0	0.05±0.01
N	6.3±0.3	0.64±0.08	16±1	11±1	61±2	7.6±1.2	0.9±0.0	0.08±0.01
NPK	5.8±0.1	0.63±0.03	19±0	136±11	35±1	6.4±0.1	0.9±0.0	0.07±0.00
NPKC	5.9±0.1	0.78±0.03	26±2	167±13	53±5	7.1±0.3	1.0±0.0	0.09±0.02
NPKCLS	7.5±0.1	0.99±0.15	30±1	169±6	261±46	11.7±0.8	1.7±0.1	0.15±0.02

가장 높았고, 그 다음에는 No fert. 구였으며, NPK구가 가장 낮았다. NPKCLS구는 pH를 높일 수 있는 소석회와 규산질 비료를 투입하였기 때문에 다른 처리구들보다 0.9~1.7 정도 높았고, No fert. 구는 벼의 생육량의 저조로 인해 토양 중에 양이온이 많이 남아 있었으며, N, NPK, NPKC 처리구는 무기질 비료 (유안)와 퇴비의 유기산 방출, 벼의 생육 증가로 토양용액 중 양이온의 감소를 가져와 No fert. 구보다는 더욱 낮은 pH를 나타냈다. 토양의 EC는 No fert. (0.40 dSm<sup>-1</sup>) > NPK (0.63 dSm<sup>-1</sup>) ≈ N (0.64 dSm<sup>-1</sup>) > NPKC (0.78 dSm<sup>-1</sup>) > NPKCLS (0.99 dSm<sup>-1</sup>)의 순으로 투입한 비료의 종류가 많아질수록 증가하는 경향이었고, No fert. 구는 우리나라 논토양의 평균 EC (0.51 dS m<sup>-1</sup>)보다 (RDA, 2011) 낮았으나 다른 처리구들은 높은 값을 나타냈다.

유기물 함량은 유기물질의 투입 여부, 벼의 그루터기와 뿌리로 투입되는 양에 따라 차이를 나타냈다. 유기물질이 투입된 NPKC구와 NPKCLS구는 각각 26, 30 g kg<sup>-1</sup>이었고, 유기물질이 투입되지 않은 처리구인 No fert. N, NPK구에서는 각각 17, 16, 19 g kg<sup>-1</sup>이었으며, 유기물질이 투입된 구가 그렇지 않은 구에 비해 1.4~1.8배 함량이 많아졌다. 그리고 유기물질이 투입되지 않은 처리구들 중에서 NPK구가 No fert. 구와 N구보다 2~3 g kg<sup>-1</sup>이 높은 이유는 벼의 그루터기+뿌리로 투입되는 양이 NPK구 (2,469 kg ha<sup>-1</sup>)가 No fert. 구 (801 kg ha<sup>-1</sup>)와 N구 (1,409 kg ha<sup>-1</sup>)보다 더 많았기 때문이다.

유효인산은 인산질 비료와 볏짚퇴비가 투입된 구에서 가장 높았고, 이들이 투입되지 않은 N구와 No fert. 구는 상대적으로 낮았다. 인산성분이 공급된 처리구인 NPK, NPKC, NPKCLS 구는 각각 136, 167, 169 mg kg<sup>-1</sup>으로 볏짚퇴비 (14 kg ha<sup>-1</sup>)와 인산질 비료 (70~86 kg ha<sup>-1</sup>)가 같이 투입된 처리구에서 더욱 높았다. 인산 성분이 투입되지 않은 처리구 중 No fert. 구와 N구는 각각 20, 11 g kg<sup>-1</sup>이었고, 담수로 인해 토양이 환원됨에 따라 인산은 FePO<sub>4</sub>에서 용해하기 쉬운 Fe<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 형태로 되어 토양용액으로 빠져 나온다 (Ponnamperuma, 1972). 특히 유안이 처리된 구는 유효인산 함량이 다른 처리구보다 더욱 낮아졌는데, 이것은 유안에 포함된 황산이온의 영향으로 인산이온이 토양용액으로 많이 용출되었기 때문이라고 하였다 (Yeon et al., 2007).

유효 규산은 규산질 비료가 투입된 NPKCLS구가 261 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 규산질 비료가 투입되지 않은 처리구 중 NPKC 구는 53 mg kg<sup>-1</sup>, NPK구는 35 mg kg<sup>-1</sup>, No fert. 구는 69 mg kg<sup>-1</sup>, N구는 61 mg kg<sup>-1</sup>으로 규산질 비료가 투입된 구에 비해 상대적으로 많이 낮았다. 벼가 가장 많이 흡수하는 양분은 규산 성분으로 토양에서 그 요구도가 높은 성분이다. NPKC와 NPK구는 No fert. 구 및 N구보다 유효규산 성분 함량이 더욱 낮았는데, 벼가 토양에서 흡수하는 규산의 양이 No fert. 구 (264 kg ha<sup>-1</sup>)와 N구 (378 kg ha<sup>-1</sup>)보다 NPKC구

(600 kg ha<sup>-1</sup>)와 NPK구 (413 kg ha<sup>-1</sup>)에서 더 많았기 때문이다.

치환성 칼슘은 토양개량제 (소석회)를 투입한 구인 NPKCLS 구에서 11.7 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>으로 가장 높았고, 그렇지 않은 처리구는 6.1~7.6 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>로 낮았다. 그리고 치환성 마그네슘 함량도 토양개량제를 투입한 구인 NPKCLS구에서 1.7 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>으로 가장 높았고, 그렇지 않은 처리구는 0.9~1.0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>로 낮았다. 토양개량제를 처리하면 그렇지 않은 구보다 1.7~1.8배 높았고, 토양개량제를 처리하지 않은 구에서 치환성 칼슘과 마그네슘의 함량은 처리구간에 큰 차이가 없었다.

치환성 칼륨은 무기질비료와 볏짚퇴비가 동시 투입된 처리구 (NPKC, NPKCLS)에서는 높았고, 칼륨 성분이 투입되지 않은 처리구 (No fert., N, NPK)에서는 0.05~0.08 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>로 낮았다. 이러한 이유는 무기질비료 (75~86 kg ha<sup>-1</sup>)와 볏짚퇴비 (47 kg ha<sup>-1</sup>)에서 공급되는 칼륨의 양이 다른 처리구보다 많았기 때문이다.

Figure 2는 벼를 재배하는 기간에 토양 용액 중의 pH와 EC의 변화를 나타낸 것이다. pH는 담수 초기에 일시적으로 감소하였는데 6.7~8.0의 범위에 있었고 생육 후기로 갈수록 7.2~7.5의 범위로 수렴하는 값을 나타내었다. Ponnamperuma (1962)에 따르면, pH는 담수 후 1~2일 내에 일시적으로 감소하였다가 2~3주 안에 6.5~7.5로 일정한 값으로 유지된다는 보고와 유사하였다. 담수 초기 pH의 감소는 CO<sub>2</sub>의 집적되는 것이 원인이라고 하였고 (Ponnamperuma, 1962), Motomura (1962)는 유기산의 생성이 원인이라고 하였다.

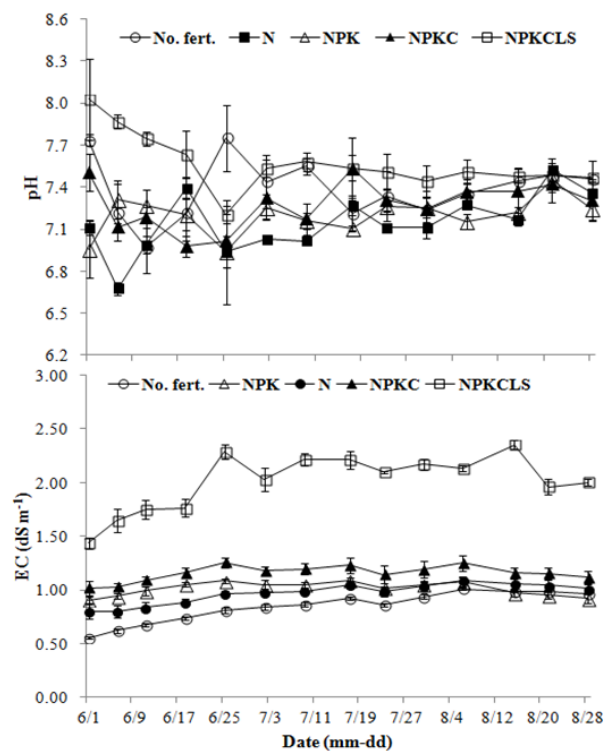


Fig. 2. pH and EC in soil solution during rice cropping after the continuous fertilization for 58 years.

EC는 NPKCLS구에서 담수 초기에 1.44 dS m<sup>-1</sup>에서 2.22 dS m<sup>-1</sup>까지 증가하였다가 생육 후기에는 2.00 dS m<sup>-1</sup>로 감소하였다. 그리고 다른 처리구 (N, NPK, NPKC, No fert.) 도 이와 유사한 경향을 보였고 담수 초기에는 0.56~1.02 dS m<sup>-1</sup>에서 생육 후기에는 0.92~1.12 dS m<sup>-1</sup>의 범위에서 변화하였으며 처리구간에 큰 차이는 없었다. 토양 환원이 진행됨에 따라 모든 처리구의 EC는 증가하는 경향이였다 (Ponnamperuma, 1962). 처리구간 EC 값은 생육 초기에 투입된 비료의 양과 비례하여 차이를 나타내었고, 생육 후기에 토양 용액으로부터 비의 양분 흡수로 인해 처리구간에 차이가 줄어들었으며, NPKCLS구에서만 다른 처리구보다 2배 높은 값을 유지하였다. Ponnamperma (1962)에 따르면 EC가 증가하는 이유는 양이온치환 반응으로 Ca<sup>2+</sup>과 Mg<sup>2+</sup>이 치환되기 때문이라고 보고한 바 있다.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 무기질 비료와 볏짚퇴비가 투입된 구 (NPK, NPKC, NPKCLS)가 다른 처리구 (No fert., N)보다 높았고, 담수 후 1달까지 급격하게 감소하는 경향이였다 (Fig. 3). NPKC와 NPKCLS구의 토양 용액 중 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도는 평균 0.021, 0.013 mmol L<sup>-1</sup>로 NPKC가 NPKCLS보다 1.6배 많았고 no fert. 구

는 0.085 mmol L<sup>-1</sup>, N과 NPK구는 0.012~0.013 mmol L<sup>-1</sup>로 유사하였다. 토양 용액 중 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 함량은 무기질비료, 유기질 비료, 비의 잔재물, 관개수, 환원 등에 의해 달라지는데, NPKCLS와 NPKC는 볏짚퇴비에서 공급되는 유기태 N의 공급으로 높아졌고, NPK는 무기 질비료와 비 잔재물 (그루티기 및 뿌리), N과 No fert.는 비의 잔재물의 영향으로 토양 용액 중 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 농도가 결정되었다. 그리고 이 성분은 비가 흡수함에 따라 생육후기로 갈수록 0.007~0.009 mmol L<sup>-1</sup>로 처리구간에 차이가 줄어들었다. 토양 용액 중 암모니아의 함량은 작물에게 질소 공급을 하기 때문에 비의 생산성에 가장 중요한 요소로 볏짚퇴비가 투입된 토양에서는 토양 용액 중의 질소 공급력이 높았다. Litaor et al. (2005)의 실험에서 35~75 μm크기의 porous cup의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 추출에 문제가 없다고 하였는데, 본 실험에서는 측정한계 농도 이하로 작은 값을 보였기 때문에 급후에 보다 세부적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

K<sup>+</sup>함량은 NPKCLS > NPKC > NPK > N ≈ No fert.의 순서로 높았으며, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>와 유사하게 담수 후 1달까지 급격하게 감소하는 경향을 나타냈다. NPKCLS와 NPKC는 볏짚퇴비의

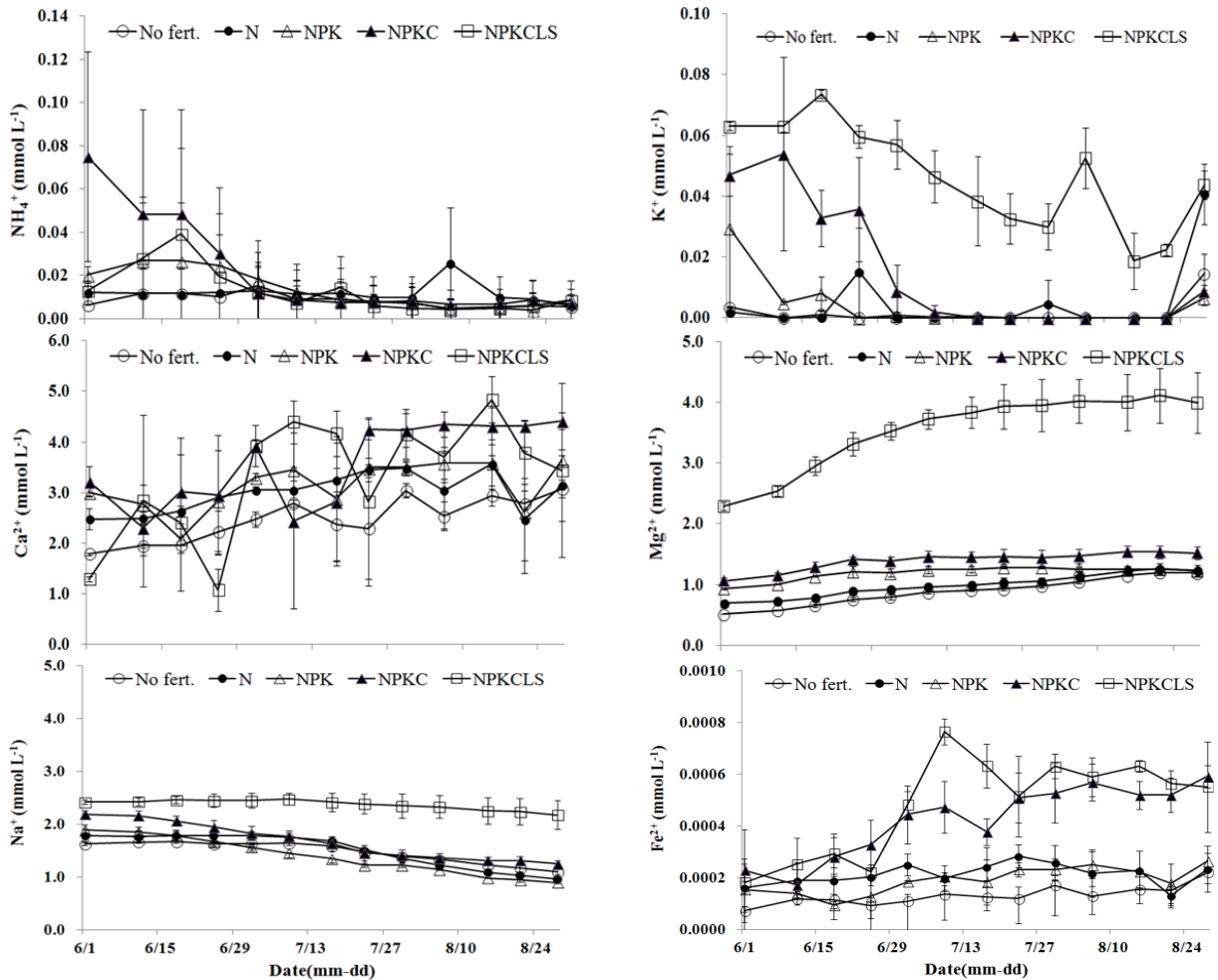


Fig. 3. Changes of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, and Fe<sup>2+</sup> in the top soil solution during rice cropping after the continuous fertilization for 58 years.

K 공급으로 그 함량이 높았고, NPK는 무기질비료와 비 잔재물 (그루터기 및 뿌리), N와 No fert. 구는 비의 잔재물의 의한 영향을 받았다.  $Ca^{2+}$ 와  $Mg^{2+}$  함량은 비의 생육기간 내내 증가하였으며, 특히  $Mg^{2+}$  함량은 APKCLS구가 다른 처리구에 비해 5배 정도 높았다. 토양 입자 표면에서의  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ 은 치환 반응에 의해 토양 용액으로 용해되어 나오고, 비의 흡수와 토양 용탈에 의해 토양용액에서 감소된다고 하였다 (Ponnamperuma, 1962). 본 실험에서는 NPKCLS구의 EC는 양이온 중  $Mg^{2+}$ 과 변화 양상이 비슷하여  $Mg^{2+}$ 의 영향이 가장 컸다 (Boivin et al., 2002).  $Na^+$ 는 NPKCLS구는 비의 생육기간 내내 일정하였고, 다른 처리구 (No fert., N, NPK, NPKC)에서 감소하는 추세를 나타냈다. 그리고  $Fe^{2+}$  함량은 증가하는 경향이었고, 밭짓퇴비가 투입된 구에서 함량이 높게 나타났는데, 유기물질은 토양으로부터  $Fe^{2+}$ 이온의 해리를 조장한다고 보고된 바 있다 (Ponnamperuma 1962).  $Cl^-$ 은 모든 처리구에서 변화 양상은 유사하였고, NPKCLS

구 및 NPK구에서  $Cl^-$ 함량이 다른 처리구보다 많았다 (Fig. 4).  $SO_4^{2-}$ 은 무기질 비료만 투입된 구 (N, NPK)에서 답수 후 한 달까지 감소하였고, 유안만을 투입한 N구는 다른 처리구에 비해 평균 5배까지  $SO_4^{2-}$ 가 높게 유지되었다.  $H_3SiO_4^-$ 함량은 NPKCLS > N > No. fert. > NPKC > NPK 순으로 규산질비료가 투입된 구인 NPKCLS구에서 가장 높았고, 규산질비료의 투입이 없고 비의 생육이 왕성한 구인 NPKC와 NPK 구에서는 낮았다.

토양 용액 중에서 양이온으로  $Ca^{2+}$ 와  $Mg^{2+}$ , 음이온으로  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ 이 많았고 이들은 비가 많이 흡수하지 않은 성분들로 토양 용액에 많이 잔류하였다.

비가 흡수하는 다량원소의 양은 처리구 간에 통계적으로 유의한 차이가 인정되었다 (Table 2). T-N 함량은 NPK는  $95 \text{ kg ha}^{-1}$ , NPKCLS와 NPK는 각각  $95, 83 \text{ kg ha}^{-1}$ , N구는  $55 \text{ kg ha}^{-1}$ , no fert. 구는  $31 \text{ kg ha}^{-1}$ 였다. 이를 NPK구 기준으로 상대지수를 계산한 결과 NPKC구는 146%, 퇴비와 규

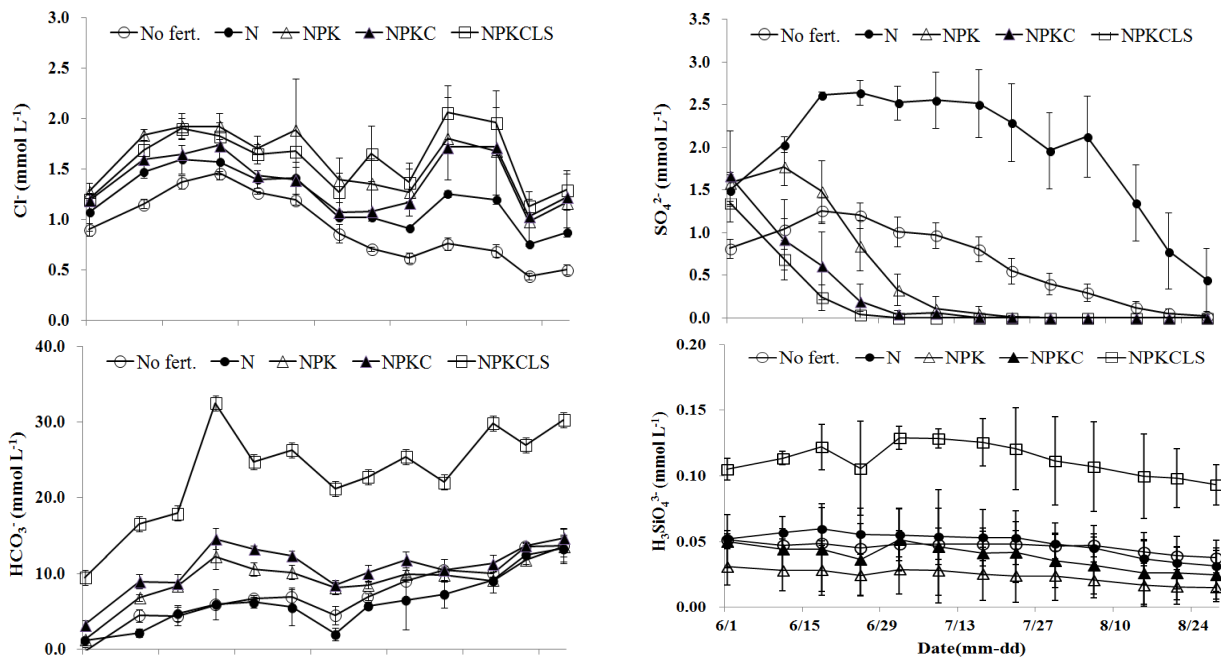


Fig. 4. Changes of  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ , and  $H_3SiO_4^-$  in the top soil solution rice cropping after the continuous fertilization for 58 years.

Table 2. Macro-element uptake in above-ground rice from the 58th long-term experiment fields.

Treatments	T-N	P	K	Ca	Mg	Na	Si
kg ha <sup>-1</sup>							
No fert.	31(37) <sup>d†</sup>	20(33) <sup>c</sup>	42(39) <sup>c</sup>	20(39) <sup>d</sup>	4(29) <sup>d</sup>	13(38) <sup>c</sup>	264(64) <sup>b</sup>
N	55(66) <sup>c</sup>	30(50) <sup>c</sup>	61(61) <sup>bc</sup>	31(61) <sup>c</sup>	9(63) <sup>c</sup>	21(60) <sup>c</sup>	378(91) <sup>b</sup>
NPK	83(100) <sup>b</sup>	60(100) <sup>b</sup>	101(100) <sup>b</sup>	50(100) <sup>b</sup>	15(100) <sup>b</sup>	35(100) <sup>ab</sup>	413(100) <sup>b</sup>
NPKC	121(146) <sup>a</sup>	82(136) <sup>a</sup>	144(143) <sup>a</sup>	60(119) <sup>ab</sup>	21(140) <sup>a</sup>	42(122) <sup>a</sup>	600(145) <sup>a</sup>
NPKCLS	95(114) <sup>b</sup>	80(132) <sup>a</sup>	158(157) <sup>a</sup>	69(138) <sup>a</sup>	19(131) <sup>a</sup>	31(90) <sup>b</sup>	730(177) <sup>a</sup>

( ) : relative index.

† Means with the same letter are not significantly different at 5% level of LSD.

**Table 3. Micro-element uptake in rice shoot from the 58th long-term experiment fields.**

Treatments	Cl	S	Fe	Mn	Cu	Zn
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----					
No fert.	7(35)c	5(55)d	1(27)c	1(33)c	0.02(9)a	0.16(42)b
N	14(75)b	7(76)d	1(60)bc	2(67)ab	0.03(15)_a	0.22(57)b
NPK	19(100)b	9(100)c	2(100)ab	3(100)a	0.24(100)a	0.39(100)a
NPKC	28(147)a	14(167)a	4(158)ab	2(67)ab	0.10(42)a	0.27(70)ab
NPKCLS	28(147)a	11(126)b	3(145)a	2(67)ab	0.04(15)a	0.32(82)ab

( ): relative index.

†Means with the same letter are not significantly different at 5% level of LSD.

**Table 4. Average grain yield of rice by treatments after the continuous fertilization for 58 years.**

Treatments	No fert.	N	NPK	NPKC	NPKCLS
	----- Mg ha <sup>-1</sup> -----				
Grain yield	2.45(41)d <sup>†</sup>	4.15(70)c	5.94(100)b	7.76(131)a	7.21(121)a

( ): relative index

†Means with the same letter are not significantly different at 5% level of LSD.

산 비료가 동시에 투입된 처리구 (NPK+CLS)는 114%로 동일하게 벧짚퇴비가 투입되더라도 규산질 비료의 투입으로 인하여 질소의 흡수량이 억제되었다. 이것은 앞에서 토양 용액 중 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도가 NPKC구가 NPKCLS구보다 높은 것과 일치하는 경향을 나타낸다.

P 흡수량도 3요소만 투입된 구 (NPK)보다 벧짚퇴비가 투입된 구 (NPKC, NPKCLS)에서는 32~36%가 더 흡수되었고, 질소만 처리된 구 (N)와 무비구 (No fert.)는 각각 50, 67% 적게 흡수되었다. 벧의 K 흡수량도 P와 비슷한 경향이였다. 벧의 Ca 흡수량은 벧짚퇴비가 투입된 구 (NPKC, NPKCLS)에서 19~38% 증가하였고, 질소 (N)와 무비구 (No fert.)구에서는 39~61% 적었다. 벧의 Mg 흡수량은 벧짚퇴비가 투입된 구 (NPKC, NPKCLS)에서 31~40% 많았고, 질소 (N)와 무비구 (No fert.)구에서는 37~71% 적었다. 벧의 Na 흡수량은 NPKC에서만 증가하였고, NPKCLS에서는 10%, N 및 No fert. 구에서는 79~87% 감소되었다. 벧의 Si 흡수량은 NPKC구는 45%, NPKCLS구는 77% 증가되었고, N구에서는 9%, No fert. 구에서는 36% 감소되었다. 벧의 S 함량은 규산질 비료 처리로 인해 감소하였고, 특히 NPK구와 N 처리구는 토양 용액 중 황의 함량이 각각 0.004~1.77, 0.4~2.6 mmol L<sup>-1</sup>로 평균 2배 많았지만 벧의 흡수량은 NPK 처리구보다 N 처리구는 24% 적었다.

벧가 흡수하는 미량원소의 양은 처리구간에 통계적으로 유의한 차이가 있었다 (Table 3). 벧의 Cl 함량은 NPKCLS와 NPKC구는 28 kg ha<sup>-1</sup>, NPK구는 19 kg ha<sup>-1</sup>, N구는 14 kg ha<sup>-1</sup>, No fert.구는 7 kg ha<sup>-1</sup>였다. 이를 NPK구를 기준으로 상대지수를 계산한 결과 NPK구와 NPKCLS구에서 NPKC구보다 47% 정도 많이 증가 하였고, 이를 통해 벧짚퇴비에

서의 Cl 공급력이 컸으며 규산질 비료가 Cl 공급력에 미치는 영향은 없었다. Fe의 함량은 벧짚 퇴비의 영향이 통계적으로 인정되지 않았고, Cu는 처리간에 차이가 없었다. Zn은 NPK구와 N 및 No fert. 구와의 차이가 인정되었으나, 다른 처리구 (NPKC, NPKCLS)와는 차이가 없는 것으로 나타났다.

N, P, K, Ca, Mg, Cl, S, Fe 등은 벧짚퇴비를 사용한 구에서 높았고, 벧짚퇴비 자체 내에 포함된 성분과 토양 내 이들 성분의 방출을 조장하기 때문에 벧의 양분 흡수량이 증가하였다고 판단된다.

토양 용액 중 존재하는 양분의 벧 흡수량 증가는 수량의 증가로 이어졌다 (Table 4). NPK구의 수량을 100으로 기준하여 처리구별로 수량의 상대지수를 평가한 결과 No fert. 구는 41%, N구는 70%, NPKC구는 131%, NPKCLS구는 121%로 나타났으며, 수량의 증가 정도는 NPK구보다 NPKC (31%)와 NPKCLS (21%)구에서 가장 높았으나, 수량은 N구 (30%)와 No fert. (59%)구에서는 낮았다. 규산질 비료와 벧짚퇴비가 동시에 투입된 처리구인 NPKCLS구와 벧짚퇴비 투입구인 NPKC구는 수량 간에 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 여기에 구체적인 자료는 제시하지 않았지만, 시험포장 조성 (1954)부터 55년차인 2007년까지는 NPKCLS구의 수량이 NPKC보다 높았으나 그 이후부터는 반대로 NPKC구의 수량이 NPKCLS구보다 높은 경향을 나타내고 있다. 앞에서 언급된 토양용액 중 용해된 질소 성분이 NPKCLS구가 NPKC구보다 적었는데, 이것은 토양용액 중 pH가 8.0으로 상승하면서 질소 성분인 암모늄 이온의 휘산이 촉진된 것으로 판단된다. 그리고 무기질 비료와 벧짚퇴비가 동시에 투입된 구(NPKC, NPKCLS)와 그렇지 않은 구 (No fert., N, NPK) 간에는 통계적으로 유의한 차이가 있었으며, 이로부터 무기질비료와 벧짚퇴비를 장

기적으로 투입하는 것은 벼의 수량 증대에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

## Conclusion

동일한 비료와 토양개량제를 장기적으로 투입하면서 벼를 재배하는 장기 시험 포장에서 시험 시작한 지 58년째 되는 해의 토양 용액 중의 변화는 비료 및 토양개량제 처리에 따라 크게 달라졌으며, 벼의 양분 흡수량 및 수량에도 큰 영향을 미쳤다. 질소비료인 유안만을 토양에 처리한 경우  $\text{SO}_4^-$  이 크게 증가하였고, 토양개량제인 규산질비료와 소석회를 투입한 경우 EC,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ 의 함량이 크게 증가하였다. 벼짚퇴비를 투입은  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ 의 토양 용액 중 양분 함량이 높아졌고, 이를 벼가 흡수하여 무기성분 (N, P, K, Ca, Mg, Na, Si, Cl, S, Fe)의 함량이 증대하였으며, 수량도 무기질 비료만 처리할 때보다 21~31% 정도 향상되었다. 무기질 비료 및 토양개량제의 장기적인 투입은 벼의 안정적인 생산과 논토양의 비옥도 향상에 있어서 가장 중요한 시비방법인 것으로 판단된다.

## References

Brinkman, R., 1970. Ferrollysis: a hydromorphic soil forming process. *Geoderma* 10:199-206.

Ernstsen, V. 1996. Reduction of nitrate by  $\text{Fe}^{2+}$  in clay minerals. *Clays Clay Mineral* 44:599-608.

Genon, J., N. deHepcee, B. Delvaux, J. Defey, and P. Hennerbert. 1994. Redox conditions and iron chemistry in highland swamps of Burundi. *Plant Soil* 166:165-171

Husin, A., A. Caldwell, B. Mengel, and F. Peterson. 1987. Effects of natural and artificially induced reduction on soil solution phosphorus in rice soils. *Plant Soil* 102:171-175.

Jung, W.K. and Y.H. Kim. 2006. Soil organic carbon determination for calcareous soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(6):396-402.

Khaled, E., and J. Stucki. 1991. Iron oxidation state effect on cation fixation in smectites. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:554-560.

Kim, J.G., C.M. Chon, and J.S. Lee. 2008. Changes of chemical properties and nutrient dynamic in pore water of upland soil during flooding. *Econ. Environ. Geol.* 41(3):327-334.

Kim, M.S., Y.H. Kim, S.S. Kang, H.B. Yun, and B.K. Hyun. 2012. Long-term application effects of fertilizers and amendments on changes of soil organic carbon in paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):1108-1113.

Lindsay, W.L. 1979. *Chemical equilibrium in soils*. John Wiley & Sons, New York.

Litaor, M.I., O. Reichmann, A. Haim, K. Auerswald, and M. Shenker. 2005. Sorption characteristics of phosphorus in peat soils of a semiarid altered wetland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1658-1665.

Matsuo, T., K. Kumazawa, R. Ishii, K. Hirata. 1995. *Science of the rice plant. Physiology*, vol II. Food and Agriculture Policy Research Center, Tokyo.

Motomura, S. 1962. The effect of organic matters on the formation of ferrous iron in soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 8(1):20-29.

NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. *Fertilizer Recommendation for crops (revision)*. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.

Narteh, L. and K. Sahrawat. 1999. Influence of flooding on electrochemical and chemical properties of West African soils. *Geoderma* 87:179-207.

NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2000. *Methods of soil and plant analysis*. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.

NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2011. *Annual report of the monitoring project on agro-environmental quality*. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.

Oh, W. K. 1976. *Management of paddy soils*. Potassium Research. Suwon, Korea.

Ponnamperuma, F. 1965. Dynamic aspects of flooded soils and the nutrition of the rice plant. In: IRRI(Ed), *The Mineral Nutrition of the Rice Plant*. Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, pp.395-328.

Ponnamperuma, F. 1972. The chemistry of submerged soils. *Advan. Agro.* 24:29-96.

Schneiders, M., and H.W. Sherer. 1998. Fixation and release of ammonium in flooded rice soils as affected by redox potential. *European J. Agro.* 8:181-189.

Yeon, B.Y., H.K. Kwak, Y.S. Song, H.J. Jun, and C.H. Kim, 2007. Changes in rice yield and soil properties under continued application of chemical fertilizer for 50 years in paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(6):482-487.