

## Dynamics of Exchangeable Magnesium of Soil in Long-term Fertilization Experiment

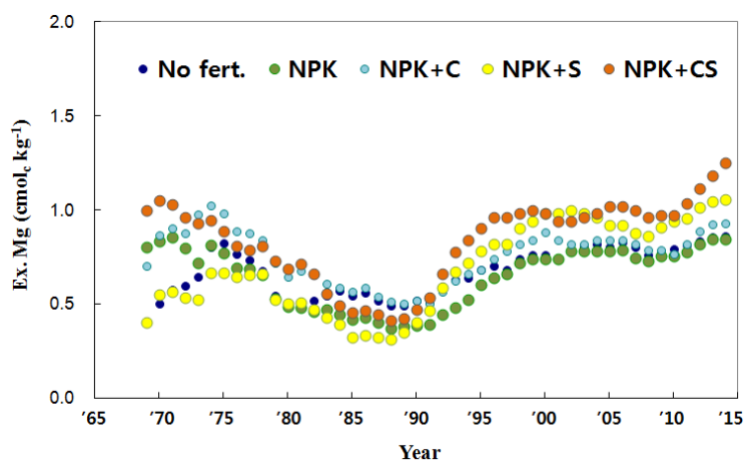
Myung-Sook Kim\*, Seong-Jin Park, Chang-Hoon Lee, Sun-Gang Yun, and Byong-Gu Ko

Soil & Fertilizer Management Division, National Academy of Agricultural Science, Wanju 55365, Rep. of Korea

(Received: September 23 2015, Revised: November 12 2015, Accepted: November 12 2015)

Monitoring of soil fertility by long-term application of fertilizers is necessary to improve the fertility of soil and the productivity of crop. The objective of this study was conducted to investigate the changes of exchangeable Mg by continuous application of fertilizers from 1969 to 2014. The treatments were no fertilization (No fert.) and fertilization (NPK, NPK+C, NPK+S, and NPK+CS). The concentration of exchangeable Mg in No fert., NPK+C, and NPK+S treatments tended to increase from 1965 to 1975, but decrease gradually from 1976 to 1987, and increase again after 1988. Based on these, the changes of exchangeable Mg were divided into period I ('69 ~'75), period II ('76~'87), and period III ('88~'14). Especially, exchangeable Mg decreased in the period II. This was presumed that a significant amount of Mg from topsoil were leached into subsoil by break of plow pan and some of subsoil was incorporated into topsoil according to change of plowing depth by replacement of tillage machinery. It could be possible that exchangeable Mg in NPK, NPK+S, and NPK+CS was accumulated in the depth of 15~20 cm. For the period III, exchangeable Mg in No fert., NPK, NPK+C, NPK+S, and NPK+CS treatments increased at rates of 0.013, 0.018, 0.015, 0.023, and 0.024  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  respectively. Exchangeable Mg level in NPK+S was lower than the other treatments in the period I and period II, but higher than in the period III. This result was attributed to replacement of silicate fertilizer type from wollastonite (Mg 0.3%) to silicate fertilizer (Mg 3%). Also, exchangeable Mg level of No fert. treatment increased, which showed that Mg concentration of irrigated water had the greatest impact on Mg accumulation of soil. Recently, Mg level of irrigated water tended to increase, indicating that Mg concentration of water will affect greatly the concentration of exchangeable Mg of soil in the future. Like these, the changes of exchangeable Mg were greatly influenced by agricultural environment such as plowing depth, plow pan, content of fertilizer, and quality of irrigated water. Considering these agricultural environment, the proper management of soil is needed for the improvement of soil fertility and crop productivity.

**Key words:** Exchangeable magnesium, Dynamics, Long-term experiment, Impact factors, Paddy soil



Changes of exchangeable magnesium by fertilizers treatment from 1969 to 2014. No fert., N, P, K, C, and S mean no fertilization, nitrogen, phosphate, potassium, rice straw compost, and silicate fertilizer, respectively.

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

§Acknowledgement: This study was conducted by support of NAS research and development project (project number: PJ0101202015).

### Introduction

우리나라 논토양의 치환성 마그네슘의 함량은 '95년에 1.2 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>에서 '03년 1.3 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, '11년에 1.2 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>으로 일정하게 유지되고 있으며 (NAAS, 2012), 벼의 생육을 위한 적정 범위 (1.5~2.0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)에 미치지 못하고 있는 실정이다. 이것은 논토양에서 비료의 부성분으로 마그네슘 성분이 소량으로 투입되기 때문이다.

토양에서 마그네슘은 Mg<sup>2+</sup> 형태로 작물에 흡수되고, 흡수된 Mg의 총량은 Ca과 K에 비해 낮지만, 작물에 있어서 광합성에 관여하는 엽록소의 분자 구성원소로 매우 중요한 성분이다. 토양의 마그네슘은 수용성, 교환성 및 비교환성의 세가지 형태로 분류되며, 대부분의 마그네슘은 비교환성의 광물형태로 존재하며, 수용성 및 교환성 마그네슘을 작물이 직접 쉽게 이용될 수 있는 형태이다 (Tisdale and Nelson, 1975; Lindsay, 1979). 마그네슘은 토양에 많을 경우 작물의 K<sup>+</sup> 흡수를 억제하며, 반대로 토양 용액 중 경쟁이온 (Ca<sup>2+</sup>와 K<sup>+</sup>)의 농도가 높으면 마그네슘의 작물 흡수는 억제된다 (Jeong et al., 1987).

토양에서 마그네슘 연구는 토양 담수 시 용액 중 Mg<sup>2+</sup>의 변화 양상 (Boivin et al., 2002; Kim et al., 2015)과 유기물 분해 시 생성된 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 영향에 따른 유기물 종류 (청초분, 전분, 볏짚퇴비, 볏짚 등)별 Mg<sup>2+</sup> 농도의 변화에 대해 보고되었고 (Kim and Kim, 1983; Oh, 1985), 중국에서 농가 포장으로부터 채취한 논토양을 벼 재배연수 (0~5년, 6~15년, 16~30년, 31~50년, 51~100년)별로 토양화학성 변동을 조사한 시험에서 소식회의 시용은 토양의 치환성 마그네슘 (Ex. Mg) 함량을 증가시킨다고 발표하였다 (Zhang and He, 2004).

마그네슘은 다량원소인 K의 흡수저해와 광합성에 깊이

관여하는 중요한 성분이지만, 마그네슘의 논토양의 변화양상에 대한 기초적인 연구가 부족하고, 지속농업을 위한 토양비옥도 관리측면의 자료를 제공하기 위해 무기질비료와 토양개량제인 퇴비와 규산질 비료를 장기 투입한 논토양을 대상으로 본 연구를 수행하였다.

### Materials and Methods

**시험포장 토양특성** 본 연구에 사용된 시험포장 논토양은 '54년도에 경기도 수원시 권선구 서둔동 소재 국립식량과학원 포장 내에 조성되었고, 토양 특성으로 유효토심은 보통이고 투수성은 빠르며 배수등급은 약간양호이며, 토양통은 강서통 (Coarse loamy, mixed, mesic family of Anthraquic Eutrudepts)으로, 표토가 회갈색의 세사양토이며 심토는 잡색을 띠며 갈색 내지 암갈색, 황색 및 회갈색의 세사양토인 심토층을 갖는다. 기층은 회갈색 반문이 있는 갈색 내지 암갈색으로 혼층을 이룬 양질세사토로서, 이들 토양은 사양질 층적물에 기인되며 하성평탄지에 분포한다.

장기시험 포장 시작 당시의 토양 화학성은 pH 5.2, 토양 유기물 (SOM) 함량은 16 g kg<sup>-1</sup>, 유효인산 (Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 함량은 120 mg kg<sup>-1</sup>, 치환성 칼륨 (Ex. K) 함량이 0.08 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>으로 유효인산 함량을 제외한 성분은 벼 생육을 위한 논토양 적정 비옥도의 기준 (NAAS, 2010a)에 미달되었다.

**공시 품종 및 처리구** 벼의 품종은 '54년부터 '68년까지는 팔달, '69년부터 '78년까지는 진흥, '79년부터 '85년까지는 밀양 23호, '86년부터 '03년까지는 대청, '04년부터 '14년까지는 삼광을 재배하였다 (Fig. 1). 처리구는 완전임의배치법으로 배치되었고 모두 32개의 처리구로 구성

Year	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	10	11	12	13	14
<b>Rice cultivar</b>																																																										
	Paldael								Jinheoung								Milyang 23								Daechung								Samkwang																									
<b>N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O Kg ha<sup>-1</sup></b>																																																										
	75-75-75								100-75-75								150-86-86								110-70-80																																	
<b>Type of N fertilizer</b>	Ammonium sulphate																																																									
<b>Type of P fertilizer</b>																																																										
	Double superphosphate																Super phosphate								Fused phosphate																																	
<b>Type of K fertilizer</b>	Murate of potash																																																									
<b>Compost, Lime</b>	Fermented Straw (7.5Mg ha <sup>-1</sup> ), Calcium hydroxide (Lime requirement equivalent pH 6.5)																																																									
<b>Lime</b>	Calcium hydroxide (Lime requirement equivalent pH 6.5)																																																									
<b>Type of Si fertilizer(2Mg ha<sup>-1</sup>)</b>																																																										
	Calcium silicate																Silicate fertilizer																																									

Fig. 1. Chronological application of fertilizers and rice cultivated.

되어 있으나, 처리구는 무비구인 No fert., 3요소구인 NPK (질소-인산-가리), 3요소에 벚짚퇴비를 병행 처리한 NPK+C, 3요소에 규산질비료를 병행 처리한 NPK+S, 3요소에 벚짚퇴비와 규산질 비료를 병행 처리한 NPK+CS 처리구를 분석하였다.

**비료 사용량 및 재배 관리** 시기별로 표준비료 사용량 (NAAS, 2010a)이 달라짐에 따라 질소는  $75 \sim 150 \text{ kg ha}^{-1}$ , 인산은  $70 \sim 86 \text{ kg ha}^{-1}$ , 칼리는  $75 \sim 86 \text{ kg ha}^{-1}$ , 퇴비는  $7.5 \text{ kg ha}^{-1}$ , 규산질 비료로 규회석 (69~89)과 규산질 비료 (90~14)는  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$ 를, 석회는 pH 6.5까지 상승시키는 양을 사용하였고, 기비-분얼비-수비-실비의 분비 비율은 질소는 50-20-20-10%, 가리는 70-0-30-0%로 2회, 인산, 퇴비, 석회, 그리고 규산은 전량 기비로 사용하였다 (Fig. 1). 벚짚퇴비의 제조는 벼 수확기에 시험연구 포장으로부터 벚짚 3 ton을 수거하여 절단하고 물을 뿌리고 비닐을 덮어 부피를 줄인 후 요소비료 4~6 kg을 첨가하여 부숙한 후 사용하였다. 토양개량제인 규산질비료, 소석회와 퇴비는 토양과 충분하게 반응하도록 4월 중순에 미리 각각의 처리구에 살포한 후 경운하였으며, 무기질비료는 5월 하순에 담수하면서 사용하고 벼를 이앙하였다. 전년도에 수확 후 남아있는 벼의 그루터기와 뿌리는 경운 시 쪼개질 할 때 토양에 전량 환원하였다.

**토양 채취 및 분석** 토양 중 치환성 마그네슘의 변동을 모니터링하기 위한 분석용 시료는 해마다 (69~14) 4월 초에서 중순 사이에 처리구당 0~15 cm 깊이로 3~7군데를 채취하고 혼합하여 사용하였다. 토양의 깊이별 치환성 마그네슘 함량을 조사하기 위한 시료는 12년 4월 초에서 중순 사이에 표면에서 지하 30 cm까지 5 cm 간격으로 깊이별로 채취하여 사용하였다. 그리고 토양 시료는 2 mm체를 통과한 입자를 분석에 이용하였고, 토양의 pH와 전기전도도 (EC, Electrical conductivity)는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 측정하였고, 토양유기물은 Tyurin법, 유효인산은 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)으로 측정하였다. 그리고 양이온교환용량은 1M  $\text{NH}_4\text{OAc}$ 법으로 포화시킨 후 alcohol로 세척하여 얻은  $\text{NH}_4^+$  포화액을 Kjeldahl 증류장치로 정량하여 분석하였다 (NAAS, 2010b)

**관개수의 수질** 관개수의 수질은 1960년대에 Lee et al. (1960)의 자료를, 1980년대에 NIAST (2003)의 자료를 이용하였고, 2009년과 2013년에 관개수는 수질오염공정시

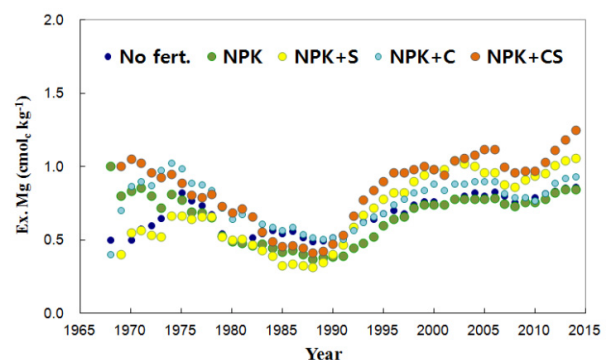
행기준 (Ministry of Environment, 2008)에 준하여 분석하였다.

**통계 분석** 모든 데이터는 SAS 프로그램 (v. 9.2)으로 통계분석을 하였다. 논토양에 무기질비료와 토양개량제의 사용에 따른 치환성 마그네슘의 변동을 검정하고자 ANOVA 분석을 실시하였고, 처리구간 치환성 마그네슘 함량을 비교하기 위해 DMRT 검정을 통해 분석하였다.

## Results and Discussion

**치환성 마그네슘 변동** 무기질 비료 (질소, 인산, 가리)와 토양개량제 (벚짚퇴비, 규산질비료)의 장기 투입에 따른 토양 중 치환성 마그네슘 (Ex. Mg)의 변동 특성은 Fig. 2와 같다. No fert., NPK+C, NPK+S 처리구의 치환성 마그네슘 함량은 '69년부터 서서히 증가하다가 '75년을 기점으로 '87년까지 감소하였고, '88년부터 '14까지 다시 지속적으로 증가하는 경향이였다. NPK와 NPK+CS 처리구의 치환성 마그네슘 함량은 '69년부터 약간 등락이 있으면서 변동하다가 '75년을 기점으로 '87년까지 감소하였고, '88년부터 '14년까지 다시 지속적으로 증가하는 경향이였다. 이러한 치환성 마그네슘의 변화 양상을 토대로 '69년~'75년을 시기 I, '76년~'87년을 시기 II, '88년~'14년을 시기 III으로 구분할 수 있었다.

시기 I의 토양 중 치환성 마그네슘 함량은 서서히 증가하다가 시기 II에서 갑자기 급격하게 감소하였다. 표토가 회갈색의 세사양토이며 심토도 세사양토인 토양 특성 때문에 심경 (우경에서 경운기로 변경됨)을 할 경우 경운 깊이가 깊어지고, 경반층이 파쇄됨으로써 마그네슘이 심토 (10~20 m)로 많이 용탈되고, 심토의 일부 (마그네슘 함량 적음)가 표토에 혼입되었기 때문으로 추정되며, 이것은 추후 연구가 더욱 필요한 부분이라 생각된다. 시기 III에 치환성 마그네



**Fig. 2.** Changes of exchangeable magnesium by fertilizers treatment from 1969 to 2014. No fert., N, P, K, C, and S mean no fertilization, nitrogen, phosphate, potassium, rice straw compost, and silicate fertilizer, respectively.

습 함량이 다시 증가한 것은 심토 (15~20 cm)에 형성된 경반층의 안정화로 마그네슘의 용탈량이 감소하였고, 표토에 마그네슘이 축적되었기 때문이라고 생각된다. 이로부터 파쇄된 경반층이 다시 안정화된 경반층으로 재형성되기까지 12년 정도 소요되는 것으로 나타났다. 익산 소재의 장기시험 논토양에서 치환성 마그네슘 함량은 시험을 시작하는 초기에 감소하다가 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었는데 (NIAST, 2003), 본 시험포장과 치환성 마그네슘의 변동 특성과 달랐으며, 그 이유는 관리 방법 (경운 깊이의 변화)에 기인한다고 생각된다. 만약 본 시험포장이 62년 동안 일정한 깊이로 경운되었다면 치환성 마그네슘 함량은 지속적으로 완만하게 증가하여 평형상태에 도달하였을 것이라 예상된다.

No fert., NPK, NPK+S 처리구의 깊이별 치환성 마그네슘 함량은 표면 (0~5 cm)에서 심토 (15~20 cm)로 깊어질수록 증가하였고, 20 cm부터 30 cm까지는 감소하였다 (Fig. 3). 이러한 분포 양상은 시기 II에 치환성 마그네슘 함량이 낮아진 근거가 될 수 있다고 판단된다. NPK+C 처리구에서는 심토 (25~30 cm)까지 치환성 마그네슘 함량이 지속적으로 증가하는 양상을 나타냈는데, 다른 처리구의 용적밀도 ( $1.20 \sim 1.39 \text{ Mg m}^{-3}$ )보다 NPK+C 처리구의 용적밀도 ( $1.19 \text{ Mg m}^{-3}$ )가 낮아 (NIAST, 2003) 빠른 투수성으로 인해 치환

성 마그네슘이 심토 30 cm까지 축적된 것으로 판단된다.

시기 I ('69~'75)에 NPK+CS ( $0.97 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )와 NPK+C 처리구 ( $0.90 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )의 치환성 마그네슘의 함량은 NPK ( $0.73 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), No fert. ( $0.62 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), NPK+S 처리구 ( $0.59 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )보다  $0.18 \sim 0.38 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  정도 높게 나타났으며 (Fig. 4), 이러한 차이는 벧짚퇴비의 투입 때문이라고 생각된다. 그리고 NPK+S 처리구의 치환성 마그네슘 함량이 낮은 것은 '68년부터 규회석을 토양에 투입하기 시작하여 투입기간이 짧았고, 규회석에 포함된 마그네슘 성분이 0.3% 정도로 적었기 때문이라 여겨진다.

시기 II ('76~'87)에 처리구별 치환성 마그네슘 함량은 NPK+C ( $0.70 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), NPK+CS ( $0.65 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), No fert. ( $0.60 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), NPK ( $0.53 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), NPK+S ( $0.49 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) 처리구의 순서로 나타났다 (Fig. 4). NPK+C 처리구가 NPK+CS 처리구보다 치환성 마그네슘 함량이 약간 높은 경향으로 나타났는데, 이는 심토로 용탈되는 마그네슘의 양과 관련이 있으리라 추정되며, 더욱 정확한 원인을 파악하기 위해 추후 연구가 필요하다. 그리고 No fert. 처리구가 NPK 처리구보다 토양 중 치환성 마그네슘 함량이 약간 높은 경향이었는데, No fert.와 NPK 처리구에서 비료로 투입된 마그네슘의 양은 각각  $0, 2.6 \text{ kg ha}^{-1}$ 이었고, 식물체의 흡수량은 각각  $10.8, 15.9 \text{ kg ha}^{-1}$ 로서, NPK

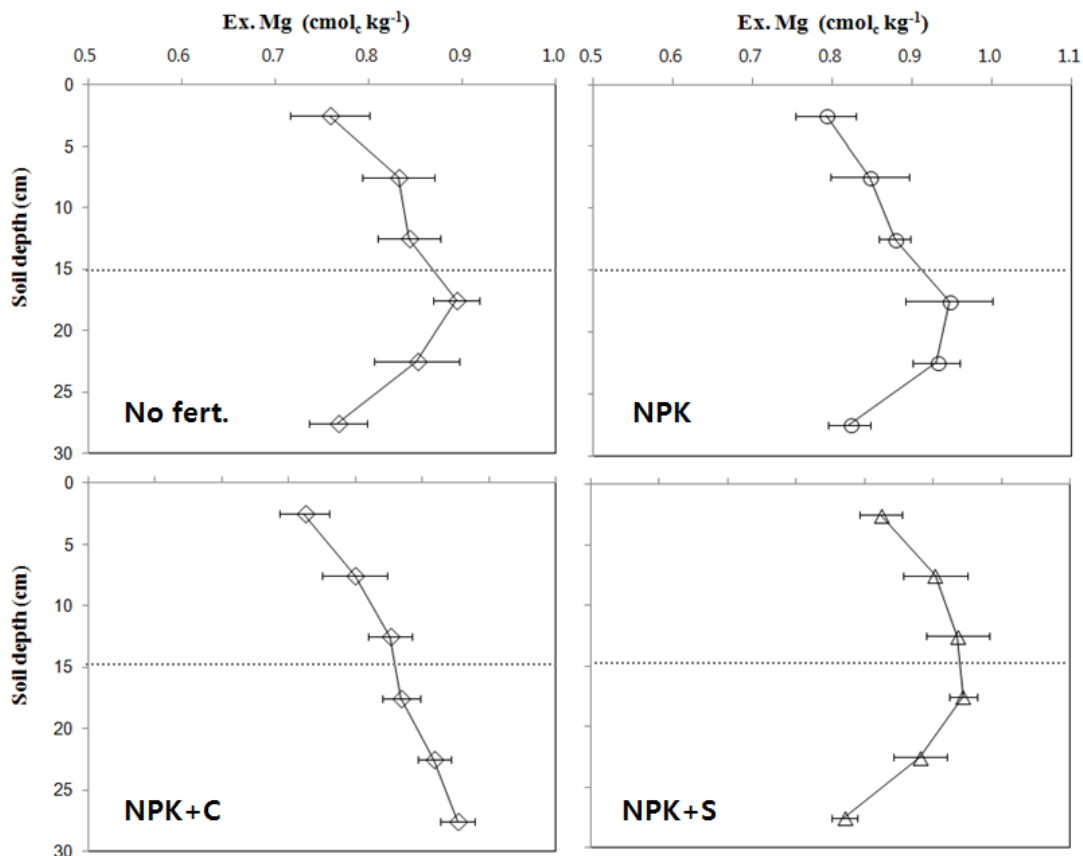
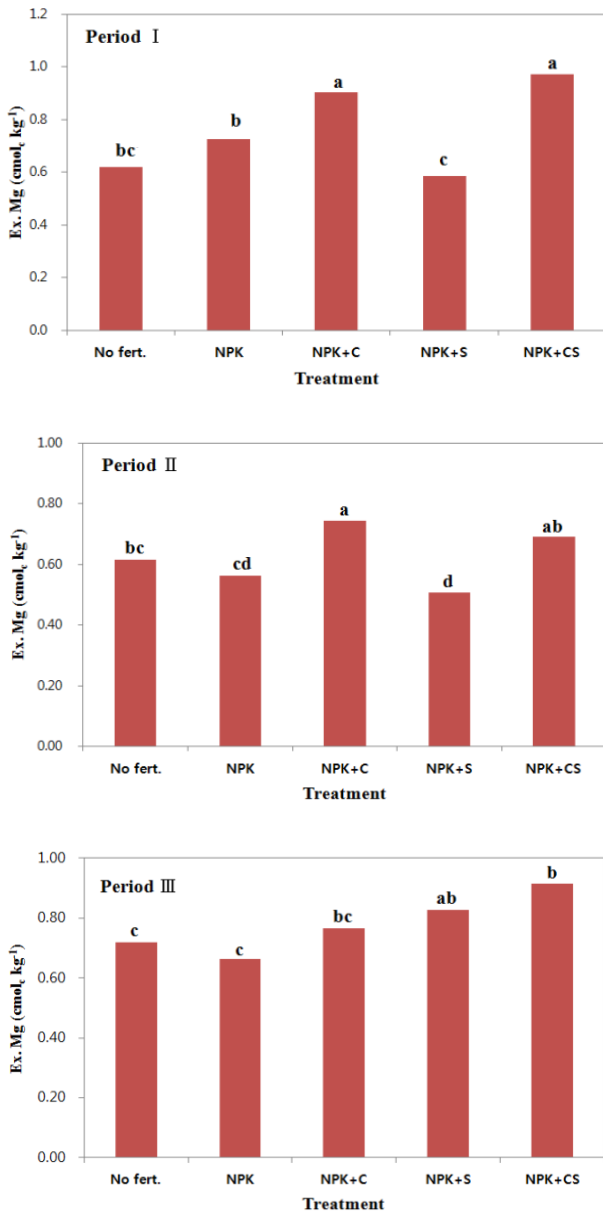


Fig. 3. Distribution of exchangeable magnesium by soil depth in 2011.





**Fig. 4.** Comparison of Average content of exchangeable magnesium for period I ('69~'75), period II ('76~'87), and period III ('88~'14). No fert., N, P, K, C, and S mean no fertilization, nitrogen, phosphate, potassium, rice straw compost, and silicate fertilizer, respectively. Different letters represent significant differences ( $P < 0.05$ ) between treatments by Duncan's multiple range test.

처리구의 마그네슘이 No fert. 처리구보다 매년 2.5 kg ha<sup>-1</sup> 정도 더 수탈되었기 때문으로 생각된다. 또한, 마그네슘 비료를 투입하지 않은 No fert. 처리구에서조차도 치환성 마그네슘 함량이 0.62 cmolc kg<sup>-1</sup>로 높게 나타났고, 이것은 관개수로 마그네슘이 공급되었기 때문이며, 관개 논에서 마그네슘 함량은 관개수질에 영향을 받을 수 있다고 판단된다.

시기 III ('88~'14)에 토양 중 치환성 마그네슘 함량은 NPK+CS (0.90 cmolc kg<sup>-1</sup>), NPK+S (0.82 cmolc kg<sup>-1</sup>), NPK+C (0.75 cmolc kg<sup>-1</sup>), No fert. (0.72 cmolc kg<sup>-1</sup>), NPK

**Table 1.** Changes exchangeable magnesium of No fert., NPK, NPK+C, NPK+S, and NPK+CS treatments from 1969 to 2014.

Year	Treatment	Regression equation	R <sup>2</sup>
Period I ('69~'75)	No fert. <sup>†</sup>	y = -0.022x + 43.44	0.574
	NPK	y = -0.030x + 59.18	0.868
	NPK+C	y = -0.035x + 70.39	0.895
	NPK+S	y = -0.033x + 65.40	0.948
	NPK+CS	y = -0.039x + 77.30	0.949
Period II ('76~'87)	No fert.	y = 0.013x - 25.75	0.835
	NPK	y = 0.018x - 34.97	0.808
	NPK+C	y = 0.015x - 28.67	0.679
	NPK+S	y = 0.023x - 45.62	0.686
	NPK+CS	y = 0.024x - 47.54	0.715

<sup>†</sup>No fert., N, P, K, C, and S mean no fertilization, nitrogen, phosphate, potassium, rice straw compost, and silicate fertilizer, respectively.

(0.66 cmolc kg<sup>-1</sup>) 처리구의 순서로 나타났다. NPK+CS와 NPK+S 처리구가 다른 처리구보다 0.13 cmolc kg<sup>-1</sup>정도 높게 나타났는데 (Fig. 4), 규산질 비료 처리구 (NPK+CS, NPK+S)의 마그네슘 투입량 (24 kg a<sup>-1</sup>)이 다른 처리구 (0~4.3 kg ha<sup>-1</sup>)보다 많았기 때문이다. 그리고, NPK+S 처리구의 치환성 마그네슘 함량은 시기 I 과 II에서 다른 처리구보다 낮았다가 시기 III에서는 높아졌다. 이것은 규산질 비료의 부성분으로 투입되는 마그네슘의 농도가 시기 I 과 II에서는 0.3% (규회석), 시기 III에서는 3% (규산질비료)로 높은데 기인한다.

관개수 중의 마그네슘 농도도 토양의 치환성 마그네슘 변동에 크게 영향을 주었다. '54년부터 '86년까지 경기 수원 시 서호수를, '87년부터 '14년까지 관정수를 사용하였다. 관개수 중 마그네슘 농도는 '60년에 5.2 mg L<sup>-1</sup> (Lee et al., 1960), '87년 이후의 관정수는 6.0 mg L<sup>-1</sup>로 약간 증가하였으며, '09년에 7.4 mg L<sup>-1</sup>에서 2013년에 9.2 mg L<sup>-1</sup>로 나타났다, 최고의 수질은 '60년보다 1.8배 증가하여 관개원의 마그네슘 농도가 점점 증가하고 있었다. 관개수량을 '12년 측정치의 평균인 11,792 ton ha<sup>-1</sup>로 가정하고, 관개수로 투입되는 마그네슘 양을 계산한 결과 '60년에 61 kg ha<sup>-1</sup>, '13년에 109 kg ha<sup>-1</sup>로 상당한 양의 마그네슘이 토양에 공급되었으며, 앞으로 관개수의 마그네슘 농도의 증가는 토양 중 치환성 마그네슘 함량의 증가에 매우 큰 영향을 줄 것이라 예상된다.

시기 II 와 III로 구분하여 1년 단위당 치환성 마그네슘의 변화량은 Table 1과 같다. 시기 II에서 No fert., NPK, NPK+C, NPK+S, NPK+CS 처리구의 1년당 치환성 마그네슘의 변화량은 각각 -0.022, -0.030, -0.035, -0.033, -0.039 cmolc kg<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>로 NPK+CS, NPK+S, NPK+C 처리구에서

**Table 2. Comparison of cation exchange capacity, exchangeable Mg, and Mg saturation according to treatments (Average of values measured in '05, '06, '11, and '12 year).**

Treatment	Cation exchangeable Mg		Mg saturation (%)
	exchangeable capacity	exchangeable Mg	
	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----		
No fert. <sup>†</sup>	10.8	0.9	8.3
NPK	11.1	0.9	8.1
NPK+C	12.2	1.1	9.0
NPK+S	11.7	1.1	9.4
NPK+CS	12.8	1.3	10.2

<sup>†</sup>No fert., N, P, K, C, and S mean no fertilization, nitrogen, phosphate, potassium, rice straw compost, and silicate fertilizer, respectively.

켰고, NPK와 No fert. 처리구는 변화량이 적었다 (Table 1). 이것은 NPK+CS와 NPK+S, NPK+C 처리구의 토양은 투입된 개량제의 토양 입단화 촉진으로 마그네슘의 심토 용탈량이 많았기 때문으로 추정된다. 그리고 시기 III의 1년당 치환성 마그네슘의 변화량은 No fert., NPK, NPK+C, NPK+S, NPK+CS 처리구에서 각각 0.013, 0.018, 0.015, 0.023, 0.024 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>로 NPK+CS와 NPK+S 처리구에서 가장 증가량이 컸으며, 이는 규회석 (Mg 0.3%)에서 규산질 비료 (Mg 3%)로 비종과 마그네슘 함량이 변경되었기 때문이다.

치환성 마그네슘 함량은 모든 처리구에서 '69년부터 '14년까지 농촌진흥청 국립농업과학원 (NAAS, 2010a)에서 추천하는 벼의 생육 적정 범위 (1.5~2.0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)보다 낮게 유지되었는데 (0.3~1.2 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>), 시험토양이 사양토로서 양분 보유력이 낮고 심토로 용탈이 용이하기 때문으로 판단된다. 처리구별로 치환성 마그네슘 포화도는 No fert.와 NPK 처리구에서 8.1~8.5%, NPK+C 처리구에서 9.0%, NPK+S구에서 9.4%, NPK+CS구에서 10.2%로 나타났고 (Table 2), 벧짚퇴비와 규산질비료 처리구의 치환성 마그네슘 포화도는 Albrecht (1975)가 제시한 이상적인 토양의 마그네슘 포화도 (10%)에 가까운 값을 나타내어 사양토에서 보유할 수 있는 마그네슘의 양으로 최대한 포화되었다고 여겨진다. 또한 토양개량제 처리구 (NPK+C, NPK+S, NPK+CS)에서는 다른 처리구 (No fert., NPK)보다 마그네슘의 보유력은 높은 것으로 나타났다. 이로부터 사양토인 논토양의 치환성 마그네슘 함량을 적정범위까지 높이기 위해서 점토함량이 높은 토양으로 객토하는 방법이 있고, 만약 객토할 수 없다면 유기물과 같은 토양개량제를 지속적으로 투입해 토양의 양이온교환용량 (Cation exchange capacity)을 증가시켜주는 방법이 있다. 그리고, 심경으로 토양의 경운 깊이가 달라져서 경반층이 파쇄될 경우 비료량을 늘려서 투입해야만 토양의 비옥도를 적절하게 관리할 수 있을 것으로

판단된다.

## Conclusion

장기시험 논토양에서 마그네슘이 부성분으로 포함된 인산질 비료와 벧짚퇴비, 규산질 비료를 장기적으로 투입함으로써 나타나는 치환성 마그네슘의 변동특성을 조사하였다. '69년부터 '75년까지 No fert.와 NPK+C, NPK+S 처리구의 치환성 마그네슘 점점 증가하였고, '76년부터 '87년까지 모든 처리구의 치환성 마그네슘 함량은 감소하다가 '88년부터 '14년까지 다시 증가하는 경향이었으며, 이것을 시기 I ('69~'75), II ('76~'87), III ('88~'14)으로 구분할 수 있었다. 시기 II에 농기계의 변경으로 경운 깊이가 깊어지고 경반층이 파쇄되어 표토의 마그네슘이 심토로 용탈되었고 표토가 심토 (15~20 cm)의 일부와 혼합되면서 희석되어 표토의 치환성 마그네슘 함량이 감소하였다. 시기 III에 재생성된 경반층의 안정화로 모든 처리구에서 치환성 마그네슘 함량은 다시 증가하였고, 특히 규산질 비료 처리구는 고농도의 마그네슘이 포함된 비종으로 변경되어 다른 처리구보다 높게 (0.13 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>정도) 증가하였다. No fert. 처리구에서 서조차도 관개수의 영향으로 치환성 마그네슘 함량이 증가하였고, 최근에 관개수원의 마그네슘 농도증가는 앞으로의 토양 중 치환성 마그네슘에 큰 영향을 줄 것이라 예상된다. 이처럼 경운 깊이와 경반층의 유무, 비료의 마그네슘 함량, 관개수질의 변화는 장기시험 포장에서 치환성 마그네슘 함량 변동에 가장 크게 영향을 주는 인자로 나타났다. 그리고, 치환성 마그네슘 함량은 사양토인 토양 특성으로 모든 처리구에서 벼의 생육 적정 범위보다 낮게 유지되었는데, 이를 개선하기 위해서 객토나 유기물과 같은 토양개량제의 공급이 필요하다. 이처럼 토양도 농업 여건에 따라 다양하게 영향을 받을 수 있기 때문에 지속적으로 작물을 생산하기 위해서는 토양 비옥도를 증진하고 적절하게 관리할 필요가 있다.

## References

- Albrecht, W.A. 1975. The Albrecht papers. Vol. 1: Foundation concepts. Acres USA, Kansas City.
- Boivin, P., F. Favre, C. Hammecker, J.L. Maeght, J. Delariviere, J.C. Poussin, and M.C.S. Wopereis. 2002. Processes driving soil solution chemistry in a flooded rice-cropped vertisol: analysis of long-term monitoring data. *Geoderma*, 110(1-2): 87-107.
- Jeong, Y.G. J.W. Hong, and H.S. Ha. 1987. Study on the influence of Ca and Mg saturation ratio of soil on the uptake of Ca, Mg, and K by rice plant. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 20(2):115-121.

- Kim, I.H., Y.P. No, and Y.T. Jung. 1987. Effects of long-term application of compost on physical properties of paddy soils. *Res. Rept. RDA (P.M&U)*, 29(1):54-59.
- Kim, M.S., S.J. Park, C.H. Lee, S.G. Yun, and Y.K. Sonn. 2015. Changes of chemical characteristics of soil solution in paddy field from fifty-eight years fertilization experiments. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 48(1):22-29.
- Lee. D.S., M.H. Lee, and K. Jeon. 1960. Monitoring of irrigated water quality. *J. Korean Agricultural Chem. Soc.* (first issue), pp:21-25.
- Lindsay, W. L. 1979. *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010a. *Fertilizer Recommendation for crops (revision)*. Rural Development Administration (RDA), Suwon, Korea.
- NAAS. 2010b. *Method of soil chemical analysis*. RDA, Suwon, Korea.
- NAAS. 2012. *Annual report of the monitoring project on agro-environmental quality*. RDA, Suwon, Korea.
- NIAS. 2003. *Management practices of soil fertility for environment-friendly agriculture. 50th anniversary symposium of Long-term experiments*. RDA, Suwon, Korea.
- Ministry of Environment. 2008. *Korean standard methods for water quality*. Gwacheon, Korea.
- Oh, W.K. 1985. Studies on the effect of the application of organic matters on some of the physical and chemical characteristics of paddy soils. *Res. Rept. RDA*, 9(1):175-208.
- Tisdale, S.L. and W.L. Nelson. 1975. *Soil fertility and fertilizers*. Macmillan Publ. Co., Inc., New York, NY.
- Zhang, M. and Z. He. 2004. Long-term changes in organic carbon and nutrients of an Ultisol under rice cropping in southeast China. *Geoderma*, 118:167-179.