

Short communication

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2018.51.3.239>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Changes of Exchangeable K in Paddy Soil Applied Potassium Fertilizer for 62 Years

Myung-Sook Kim*, Suk-Chul Kim, Seong-Jin Park, and Chang-Hoon Lee

Soil & Fertilizer Management Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: msk74@korea.kr

ABSTRACT

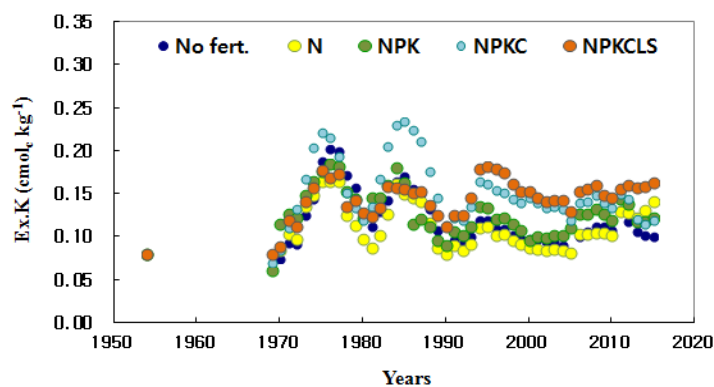
Received: June 21, 2018

Revised: July 2, 2018

Accepted: August 31, 2018

Potassium (K) is a main macronutrient for rice but deficit of potassium can have an effect on the productivity of rice and sustainability of paddy soil fertility. In an experiment conducted at the long-term research field of the National Institute of Agricultural Science, we investigated the effects of mineral fertilizer and rice straw compost on dynamic and balance of potassium under a rice single system. The treatments were no fertilization (No fert.), inorganic fertilization (N, NPK), and inorganic fertilizer plus rice straw compost (NPKC). The concentrations of exchangeable K in all treatments were ranged from 0.08 to 0.23 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ with fluctuation by a 10-year cycle. Especially, exchangeable potassium in NPKC treatment was higher 0.05~0.19 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ than that of No fert. treatment. K balance in all treatments resulted in the negative level that ranged from -3.4 to $-36.4 \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$. These were attributed to supply from K minerals of soil that were identified muscovite, biotite, microcline, and anorthoclase.

Keywords: Exchangeable K, K balance, Mineral, Long-term fertilization experiment, Paddy soil



Changes of Exchangeable K by applying of potassium fertilizer and rice straw compost from 1968 to 2015. No fert., N, P, K, C, L, and S mean no fertilization, nitrogen, phosphate, potassium, rice straw compost, lime, and silicate fertilizer, respectively.



Introduction

우리나라 논토양에서 치환성 칼륨의 적정범위는 $0.25\sim 0.30\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$ (NAAS, 2010)이고, 이 범위에 속하는 비율은 1999년에 13.7%에서 2011년 15.4%로 증가되었으며 적정보다 부족한 비율은 1999년에 46.0%에서 2011년 51.1%로 증가하였다 (Kang et al., 2012). 또한, 치환성 칼륨의 평균값은 1999년에 $0.32\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$ 에서 2011년 $0.30\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$ 으로 감소하는 경향이였다.

칼륨은 작물의 다량 필수영양소로서 매우 중요한 성분이며, 작물은 비료, 관개수, 잔재물, 토양광물로부터 칼륨성분을 공급받는다. 자연상태의 조건에서 토양 중 칼륨함량은 모재에 따라 크게 달라지는데, 그 범위는 0.2~3.3%에 포함한다. 칼륨성분을 함유한 광물은 장석, 운모, 백류석 (leucite), illite, vermiculite, 해록석 (glauconite)과 같은 규산염의 광물형태로 존재한다. 토양용액 중 칼륨을 작물이 흡수하면, 토양입자에 결합된 치환성 칼륨이 용액 중으로 방출되고, 토양입자 속에 비치환성 형태로 고정된 칼륨은 치환성 칼륨으로 변형되는 과정을 거치게 된다. 이처럼 토양용액-교환성-비교환성의 칼륨 사이에 동적인 평형관계를 유지하는 특성이 있고 (Sparks and Huang, 1985), 이들간의 반응 속도는 토양용액 중 칼륨과 치환성 칼륨간의 평형반응은 빠르게 일어나는 반면 치환성 칼륨과 비치환성 칼륨간의 평형은 느리게 진행된다 (Sparks and Huang, 1985).

농업적으로 토양환경 보전 및 식량안보 측면에서 논토양의 치환성 칼륨 함량은 벼 생육에 적합한 수준으로 유지해야 한다. 토양에서 치환성 칼륨의 변화는 장기적으로 조사해야 하며, 장기시험포장을 운영하고 관찰하고 있다. 아시아지역의 벼 재배지에서 치환성 칼륨의 장기적인 변동을 조사하고, 칼륨 수지와 점토광물을 연계하여 해석하거나 모델화하여 칼륨의 행동특성을 파악하려는 연구가 보고된 바 있다 (Cope, 1981; Singh and Goulding, 1997; Skinner and Todd, 1998; Blake et al., 1999; Anderson et al., 2007; Andrist-Rangel et al., 2007). 50년 동안 칼리질 비료를 넣지 않은 처리구에서 치환성 칼륨 함량은 14 ppm까지 감소하였고, 18~28 kg/ha의 칼리질 비료를 넣은 처리구에서는 치환성 칼륨 함량이 일정한 수준을 유지하고 작물의 최고 수량을 생산하였으며, Peck et al. (1976)은 사양토에서 9년간 140 kg/ha를 넣었을 때 치환성 칼륨함량은 증가하였고, 이보다 낮은 35 kg/ha를 넣었을 때에는 치환성 칼륨 함량이 감소하지 않으며 일정한 농도를 유지하였다고 발표하였다. 또한, Banks et al. (1976)은 양토인 토양에 47년 동안 칼리질 비료를 33.6 kg/ha를 사용할 경우에 치환성 칼륨은 증가하였다고 발표하였다.

칼륨 수지는 투입하는 비료량과 작물의 흡수로 제거한 양에 따라 다양한 연구결과를 보고하였다. 아시아의 벼 재배지에서 칼륨수지는 음의 값으로 나타났고, 이러한 원인은 칼리질 비료를 충분하게 토양에 공급하지 못했기 때문이라고 하였다 (Dobermann et al., 1999). 그리고 관개수를 공급한 지역은 관개수를 공급하지 않은 지역보다 칼륨 수지가 더 높지만 2지역 모두 음의 값이었고 (Singh et al., 2002), 논-밭으로 쌀-밀을 윤작재배하는 곳에서도 무기질비료와 유기자원(퇴비와 녹비)의 병행하여 넣었을 때 칼륨 수지는 음의 값이었다고 발표하였다 (Dobermann et al., 1996a, b). 이와 다른 연구결과로서 작물 잔재물을 토양에 환원할 경우, 칼륨 수지는 양의 값이었다고 발표한 연구도 일부 있었다 (Poss et al., 1997; Wihardjaka et al., 1999). 토양 중에서 칼륨 수지는 대부분 음의 값으로 나타난 연구가 많았고, 칼륨 수지가 음의 값이면 토양에서 치환성 칼륨 함량이 지속적으로 감소해야 하지만, 일정한 수준이하로 감소하지 않았다고 하였다. 그 이유는 토양의 점토광물에 포함된 비치환성 칼륨이 치환성 형태로 방출되었기 때문이라고 발표하였고, 대표적인 점토광물은 장석과 운모가 있으며, 운모가 장석보다 칼륨의 공급력이 높다고 하였다 (Goulding and Loveland, 1986).

따라서, 이 연구의 목적은 무기질인 칼리질 비료를 62년간 지속적으로 투입하면서 벼를 재배할 때 토양 중 치환성

칼륨 함량의 변동을 조사하고, 칼륨수지 및 점토광물의 영향력을 분석하고자 하였다.

Materials and Methods

시험포장 토양특성 본 연구에 사용된 시험포장 논토양은 '54년도에 경기도 수원시 권선구 서둔동 소재 국립식량과학원 포장 내에 조성되었고, 지형은 하성평탄지에 위치한다. 토양의 유효토심은 보통이고 투수성은 빠르며 배수등급은 약간양호하며 사양질의 토성인 강서토 (Coarse loamy, mixed, mesic family of Anthraquic Eutrudepts)에 해당한다. 장기시험 포장 시작 당시의 토양 화학성은 pH 5.2, 토양유기물 (SOM) 함량은 16 g kg^{-1} , 유효인산 (Av. P_2O_5) 함량은 120 mg kg^{-1} , 치환성 칼륨 (Ex. K) 함량이 $0.08 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 로 유효인산 함량을 제외한 성분은 벼 생육을 위한 논토양의 적정한 화학성 기준 범위 (NAAS, 2010)보다 부족하였다. 벼의 품종과 비료와 개량제를 사용한 내력은 Fig. 1과 같다.

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	15	16
Rice cultivar																																																											
Paldael					Jinheoung					Milyang 23					Daechung					Samkwang																																							
N-P ₂ O ₅ -K ₂ O, Kg ha ⁻¹																																																											
75-75-75					100-75-75					150-86-86					110-70-80																																												
Type of N fertilizer																																																											
Ammonium sulphate																																																											
Type of P fertilizer																																																											
Double superphosphate					Super phosphate					Fused phosphate																																																	
Type of K fertilizer																																																											
Murate of potash																																																											
Compost																																																											
Rice straw compost (7.5~30.0ton ha ⁻¹)																																																											
Lime																																																											
Calcium hydroxide (Lime requirement equivalent pH 6.5)																																																											
Type of Si fertilizer(2Mg ha ⁻¹)																																																											
Calcium silicate					Silicate fertilizer																																																						

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

공시 품종 및 처리구 벼의 품종은 '54년부터 '68년까지는 팔달, '69년부터 '78년까지는 진흥, '79년부터 '85년까지는 밀양 23호, '86년부터 '03년까지는 대청, '04년부터 '14년까지는 삼광을 재배하였다. 처리구는 완전임의배치법으로 배치되었고 모두 32개의 처리구로 구성되어 있고, 이 중에서 무비구 (No fert.), 유인 비료를 투입한 질소단용구 (N), 무기질비료 (질소, 인산, 칼리질 비료)를 사용한 3요소구 (NPK), 무기질비료와 볏짚퇴비를 처리한 퇴비구 (NPKC), 무기질비료와 볏짚퇴비, 소석회, 규산질비료를 투입한 종합개량구 (NPKCLS)를 대상으로 분석하였다.

비료 사용량 및 재배 관리 시기별로 표준비료 사용량 (National Institute of Agricultural Science, 2010)이 달라짐에 따라서 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 kg ha^{-1} , 규산질 비료

로 규회석 ('69~'89)과 규산질비료 ('90~'14)를 매년 2 Mg ha⁻¹를, 석회는 pH 6.5까지 상승시키는 양을 사용하였고, 기비-분얼비-수비-실비의 분시비율에 있어서 질소는 50-20-20-10%, 가리는 70-0-30-0%로 2회, 인산, 퇴비, 석회, 그리고 규산은 전량 기비로 사용하였다. 벧짚퇴비의 제조는 벧 수확기에 시험연구 포장으로부터 벧짚 3 ton을 수거하여 절단하고 물을 뿌리고 비닐을 덮어 부피를 줄인 후 요소비료 4~6 kg을 첨가하여 부숙한 후 사용하였다. 토양개량제인 규산질비료, 소석회와 퇴비는 토양과 충분히 반응하도록 4월 중순에 미리 각각의 처리구에 살포한 후 경운하였으며, 무기질비료는 5월 하순에 담수하면서 사용하고 벧를 이양하였다. 전년도에 수확 후 남아있는 벧의 그루터기와 뿌리는 경운 시 썩레질 할 때 토양에 전량 환원하였다.

토양 채취 및 분석 토양 화학성의 변동을 모니터링하기 위한 분석용 시료는 해마다('69~'14) 4월 초부터 중순 사이에 처리구당 0~15 cm 깊이로 3~7군데를 채취하고 혼합하여 사용하였다. 토양 시료는 2 mm체를 통과한 입자를 분석에 이용하였고, 치환성 칼륨은 1M NH₄OAc (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 유도결합 플라즈마 발광광도계 (ICP-OES, GBC)으로 측정하였다 (NIAST, 2000). 식물체의 무기성분 함량은 건조 후 분쇄한 시료를 0.5 g 칭량하고 conc. H₂SO₄ 10 mL와 50% HClO₄ 10 mL를 가하여 분해한 후 여과하여 K은 ICP-OES로 측정한 후 농도를 계산하였다 (NIAST, 2000).

칼륨(K) 수지 투입량은 무기질비료 (칼리질 비료)와 유기질비료 (벧짚퇴비) 그리고 관개수로 넣은 양으로 계산하였고, 배출량은 작물의 지상부가 흡수한 양으로 계산하였다 (Table 1). 무비구 (No fert.), 질소단용구 (N), 3요소구 (NPK), 벧짚퇴비구 (NPKC), 종합개량구 (NPKCLS)는 '69에서 '15년도까지 자료를 분석하였다. 관개수량은 '12년도 측정치들의 평균으로, 관개수질 중 서호수로 관개한 시기 ('69~'86)와 관정수 ('87~'15)의 수질은 NIAST (2003)의 자료를, 식물체 흡수량은 '87년도~'15년도의 자료를 이용하였고, 지하치투량은 감수심을 측정하는 장치를 토양에 30 cm 깊이로 박고, 수위계 센서를 설치하여 그 변화량을 계산하였으며 polyethylene porous cup (pore size 35~75 μm)를 논토양에 설치한 후 침투수를 채취하여 ICP로 분석하였다.

Table 1. Field balance of potassium in the continuous fertilization experiments for paddy soils. No fert., N, P, K, C, L, and S mean no fertilization, nitrogen, phosphate, potassium, rice straw compost, lime, and silicate fertilizer, respectively.

Treatment	Input (A)			Output (B)			Net balance (A-B)
	Fertilizer	Irrigation	Input	Rice uptake	Infiltration	Output	
	----- kg/ha -----			----- kg/ha -----			
No fert.	0	38.9	31.2	62.7	3.1	65.8	-12.9
N	0	38.9	31.2	64.5	3.3	67.8	-36.4
NPK	66.4	31.4	97.5	99.9	1.2	101.1	-3.4
NPKC	98.4	31.4	129.8	134.4	2.6	137.3	-7.5
NPKCLS	98.4	31.35	129.8	136.1	2.4	138.5	-6.4

K 내포한 점토광물 동정 토양을 2 mm체를 통과한 시료를 XRD (X-ray diffraction, D8 ADVANCE, BRUKER)를 이용하여 칼륨을 포함하는 점토광물을 동정하였다.

Results and Discussion

치환성 칼륨의 장기변화 무기질 비료(질소, 인산, 가리)와 토양개량제(볏짚퇴비)의 장기적인 투입에 따른 토양 중 치환성 칼륨(Ex. K)의 변동 특성은 Fig. 2와 같다. No fert., N, NPK, NPKC, NPKCLS 처리구의 치환성 칼륨 함량은 '69년부터 '15년까지 등락을 나타내면서 변화하였고, 그 특성은 치환성 칼륨이 10년 간격으로 등락이 반복하는 경향이었으며, 시기 I ('69~'81), 시기 II ('82~'92), 시기 III ('93~'02), 시기 IV ('03~'14)로 구분할 수 있었다.

치환성 칼륨 함량은 No fert. 처리구에서 시기 I ('69~'81), 시기 II ('82~'92), 시기 III ('93~'02), 시기 IV ('03~'14)의 변동폭은 각각 $0.12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $0.09 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $0.03 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $0.04 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 변화하였고, 장기시험포장을 시작한지 40년 후('93년)인 시기 III ('93~'02)부터 등락폭이 감소하기 시작하였다. 다른 처리구들(N, NPK, NPKC, NPKCLS)에서도 No fert. 처리구와 유사한 경향으로 나타났다. 이것은 담수된 논토양에서 풍화로 고정된 비치환성 칼륨과 치환성 칼륨 사이에 화학평형반응 작용이 발생한 것이라 추정하며, 정확한 해석은 추후 연구가 더 필요하다고 판단된다. 62년 동안에 No fert., N, NPK, NPKC, NPKCLS 처리구의 치환성 칼륨의 평균함량은 각각 0.10, 0.11, 0.12, 0.13, 0.15 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 NPKC와 NPKCLS 처리구에서 가장 높았으며 볏짚에 포함된 칼륨이 치환성 칼륨으로 공급되었기 때문에 볏짚처리구에서 치환성 칼륨의 평균 함량이 높았다고 생각된다(Kim et al., 2015).

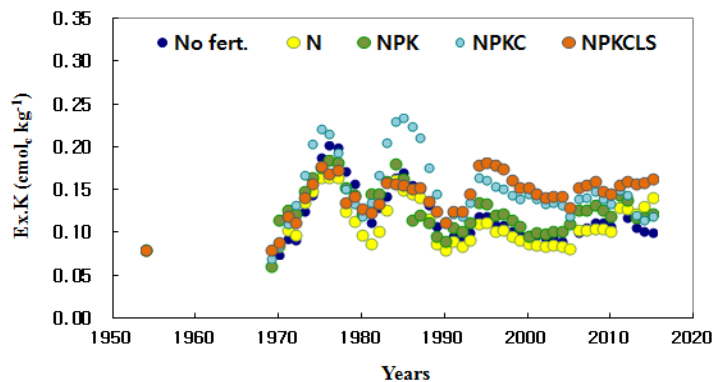


Fig. 2. Changes of Ex. K by applying of potassium fertilizer and rice straw compost from 1968 to 2015. No fert., N, P, K, C, L, and S mean no fertilization, nitrogen, phosphate, potassium, rice straw compost, lime, and silicate fertilizer, respectively.

칼륨 수지 토양에 매년 $75\sim 86 \text{ kg ha}^{-1}$ 의 칼리질 비료를 넣고 62년 동안 벼를 재배했을 때, 모든 처리구의 칼륨수지는 음의 값($-3.4 \sim -36.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)이었다. 동남아지역의 8개 장기시험 논포장에서 칼리질비료를 $25\sim 41 \text{ kg ha}^{-1}$ 을 투입했을 때 NPK 처리구의 칼륨수지는 $-76\sim -36 \text{ kg ha}^{-1}$ 로 음의 값이었고, 칼리질비료를 $62\sim 100 \text{ kg ha}^{-1}$ 을 사용했을 때 NPK 처리구의 칼륨수지는 5 kg ha^{-1} 로 양의 값(Dovermann et al., 1996b)으로 칼리질비료의 투입량에 따라 칼륨수지의 값이 달라졌다. 칼륨 수지가 음의 값이면 치환성 칼륨 함량이 매년 지속적으로 감소해야 하지만, 모든 처리구의 치환성 칼륨 함량은 $0.08 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 미만으로 감소하지 않았다. 이것은 토양광물에 내포된 칼륨이 치환성 칼륨으로 변형(Goulding and Loveland, 1986) 되었기 때문이라고 생각한다.

K 내포한 점토광물 동정 본 시험토양에 칼륨을 함유한 광물을 동정한 결과 muscovite, biotite, microcline,

anorthoclase 등이 동정되었다 (Fig. 3). 칼륨을 방출하는 대표적인 점토광물은 장석과 운모가 있으며, 운모가 장석보다 칼륨의 공급력이 높다고 보고 하였다 (Goulding and Loveland, 1986). Andrist-Rangel et al. (2006)에 따르면, 토양으로부터 칼륨을 방출하는 과정을 풍화라고 하였고, 운모의 풍화에 영향을 주는 인자는 광물종류, 구조, 입자크기, 미생물학적 작용, 유기산, 무기 양이온 등이며 (Mortland, 1958; Bassett, 1959), 풍화로 방출된 칼륨이 토양 용액 또는 치환성 칼륨으로 공급된다. 이 과정에서 치환성 칼륨의 pool은 2~7년 단위로 장소와 관리방법에 따라 등락을 반복하면서 평형농도에 도달하려는 특성이 있고 영향인자 중에 한 개의 요소가 변동이 생기면 새로운 평형농도로 변화하려는 특성이 있다고 발표하였다 (Goulding and Loveland, 1986). 그래서 본 연구에서도 매년 칼리질비료 75~86 kg ha⁻¹을 사용하는 논토양의 치환성 칼륨이 감소하지 않고 일정한 수준을 유지하게 이유는 muscovite, biotite와 같은 운모가 치환성 칼륨으로 지속적으로 변환할 수 있는 중요한 공급원이라 추정한다.

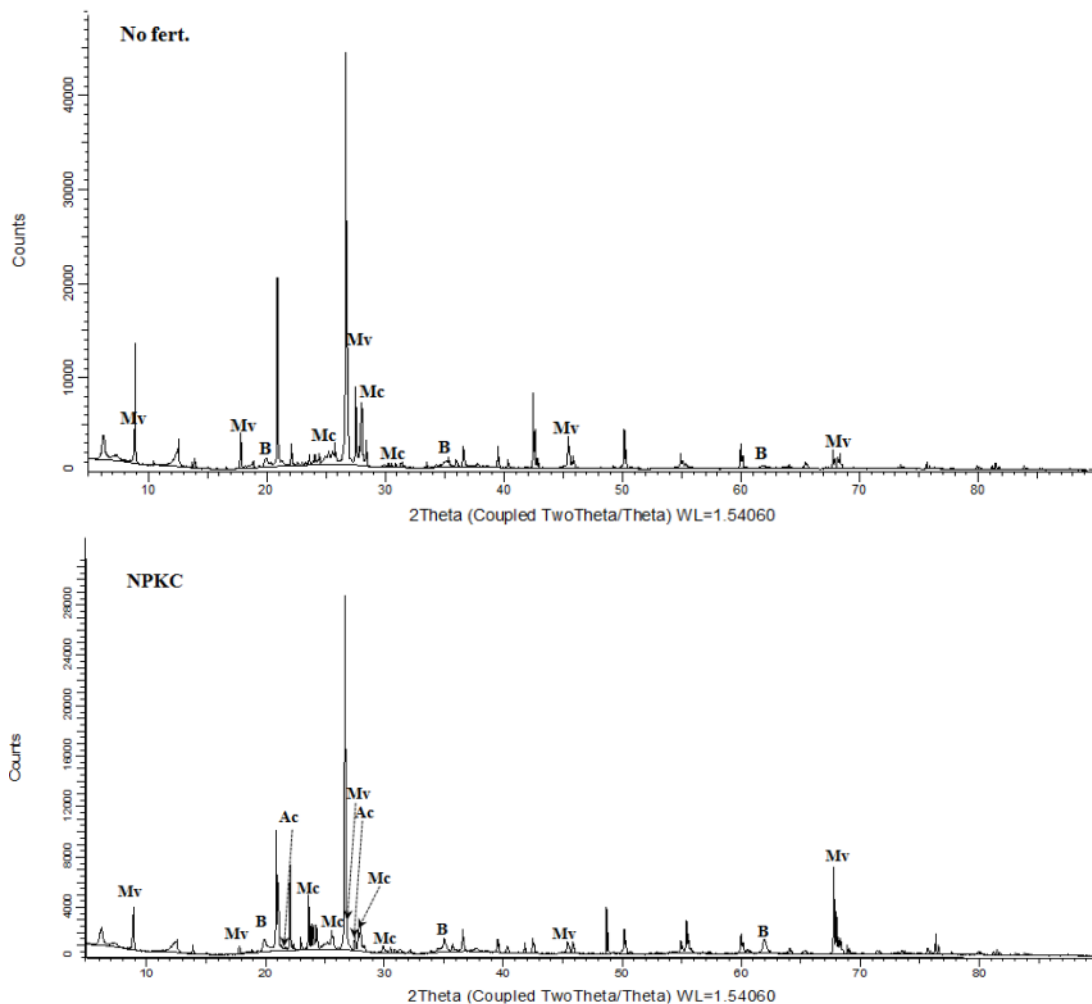


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of K-bearing minerals in No fert. and NPKC treatments. Key: Muscovite-2M1 (Mv), B (Biotite), Ac (Anorthoclase, syn), Mc(Nicrocline, intermediate).

Conclusion

논토양의 치환성 칼륨 함량은 0.08~0.23 cmol_c kg⁻¹의 범위로 변동하였고, 10년 단위를 주기로 등락을 반복하면서 변화하였다. 특히, 치환성 칼륨 함량은 무비구보다 무기질 비료 (N=75~150 kg ha⁻¹, P₂O₅=70~86 kg ha⁻¹, K₂O=75~86 kg ha⁻¹)와 벼짚퇴비 (7.5 ton ha⁻¹)를 병행하여 투입하였을 때 0.05~0.19 cmol_c kg⁻¹ 정도 더 증가하였다. 칼륨 수지는 모든 처리구에서 음의 값 (-3.4 ~ -36.4 kg ha⁻¹ yr⁻¹)이었고, 이에 상응하여 토양중에 치환성칼륨 함량은 감소해야 하지만 0.08 cmol_c kg⁻¹이하로 감소하지 않았다. 그 이유는 muscovite, biotite, microcline, anorthoclase 등의 칼륨이 포함된 토양광물이 동정되었고, 이러한 토양광물 중의 칼륨이 풍화과정을 통해 치환성 칼륨으로 공급되었기 때문으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was conducted by support of NAS research and development project (project number: PJ0135222018).

References

- Andersson, S., M. Simonsson, L. Mattsson, A.C. Edwards, and I. Öborn. 2007. Response of soil exchangeable and crop potassium concentrations to variable fertilizer and cropping regimes in long-term field experiments on different soil types. *Soil use and management*, 23(1):10-19.
- Andrist-Rangel, Y., M. Simonsson, S. Andersson, I. Öborn, and S. Hillier. 2006. Mineralogical budgeting of potassium in soil: a basis for understanding standard measures of reserve potassium. *Journal of plant nutrition and soil science*, 169(5): 605-615.
- Andrist-Rangel, Y., A.C. Edwards, S. Hillier, and I. Öborn, 2007. Long-term K dynamics in organic and conventional mixed cropping systems as related to management and soil properties. *Agriculture, ecosystems and environment*, 122(4):413-426.
- Banks, P.A., P.W. Santelmann, and B.B. Tucker. 1976. Influence of long-term soil fertility treatments on weed species in winter wheat. *Agronomy Journal*, 68(5):825-827.
- Bassett, W.A. 1959. The origin of the vermiculite deposit at Libby, Montana. *American Mineralogist*, 44(3-4):282-299.
- Blake, L., S. Mercik, M. Koerschens, K.W.T. Goulding, S. Stempen, A. Weigel, P.R. Poulton, and D.S. Powlson, 1999. Potassium content in soil, uptake in plants and the potassium balance in three European long-term field experiments. *Plant and Soil*, 216(1-2):1-14.
- Cate, R.B., and L.A. Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35(4): 658-660.
- Cope, J.T. 1981. Effects of 50 years of fertilization with phosphorus and potassium on soil test levels and yields at six locations. *Soil Science Society of America Journal*, 45(2):342-347.
- Dobermann, A., K.G. Cassman, P.S. Cruz, M.A. Adviento, and M.F. Pampolino. 1996a. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient-supplying power in intensive, irrigated rice systems. II: Effective soil K-supplying capacity. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46(1):11-21.
- Dobermann, A., P.S. Cruz, and K.G. Cassman. 1996b. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient-supplying power in intensive, irrigated rice systems. I. Potassium uptake and K balance. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46(1):1-10.

- Dobermann, A., K.G. Cassman, C.P. Mamaril, and J.E. Sheehy. 1998. Management of phosphorus, potassium, and sulfur in intensive, irrigated lowland rice. *Field Crops Research*, 56(1-2):113-138.
- Fanning, D.S., V.Z. Keramidis, and H.A. EL-Desoky. 1989. Mica 'Mineral in soil environments'. (Eds JB Dixon, SB Weed) pp. 551 – 534. Soil Science Society of America: Madison, WI.
- Goulding, K.W.T. and P.J. Loveland. 1986. The classification and mapping of potassium reserves in soils of England and Wales. *European Journal of Soil Science*, 37(4):555-565.
- 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 changes in chemical properties of paddy soil in Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45(6):968-972.
- Kim, M.S., S.J. Park, C.H. Lee, B.G. Ko, and S.G. Yun. 2016. Effects of rice straw compost application on exchangeable potassium in long-term fertilization experiments of paddy soils. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 49(2), 194-199.
- Kim, M.S., Y.H. Kim, 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 Journal of Soil Science and Fertilizer*, 48(1):22-29.
- Mortland, M.M. 1958. Kinetics of potassium release from biotite. *Soil Science Society of America Journal*, 22(6):503-508.
- NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. Fertilizer Recommendation for crops (revision). RDA, Suwon, Korea.
- 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). 2003. Soil fertility management for environment-friendly agriculture, RDA, Suwon, Korea.
- Norrish, K. 1973. Factors in the weathering of mica to vermiculite. In: Proceedings of the International Clay Conference 1972, Madrid (ed. Serratosa J. M.), pp. 417-432. Division de Ciencias C.S.I.C., Madrid.
- Peck, N.H., G.E. MacDonald, M.T. Vittum, and D.J. Lathwell. 1976. Effects of concentrated superphosphate and potassium chloride on residual available P, K, and Cl in three depths of soil derived from calcareous glacial till. *Agronomy Journal*, 68(3): 504-506.
- Poss, R., J.C. Fardeau, and H. Saragoni, 1996. Sustainable agriculture in the tropics: the case of potassium under maize cropping in Togo. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46(3):205-213.
- Singh, B. and K.W.T. Goulding. 1997. Changes with time in the potassium content and phyllosilicates in the soil of the Broadbalk continuous wheat experiment at Rothamsted. *European Journal of Soil Science*, 48(4):651-659.
- Singh, M., V.P. Singh, and D.D. Reddy. 2002. Potassium balance and release kinetics under continuous rice – wheat cropping system in Vertisol. *Field Crops Research*, 77(2):81-91.
- Skinner, R.J. and A.D. Todd. 1998. Twenty-five years of monitoring pH and nutrient status of soils in England and Wales. *Soil Use and Management*, 14(3):162-169.
- Sparks, D.L. and P.M. Huang. 1985. Physical chemistry of soil potassium (Munson, R. D.), pp. 201-276. Potassium in Agriculture, Madinson, USA.
- Wihardjaka, A.G.J.D., G.J.D. Kirk, S. Abdulrachman, and C.P. Mamaril, 1999. Potassium balances in rainfed lowland rice on a light-textured soil. *Field Crops Research*, 64(3):237-247.