Korean Journal of Environmental Agriculture

Korean J Environ Agric. 2017;36(3):141-146. Korean
Published online 2017 September 30. https://doi.org/10.5338/KJEA.2017.36.3.27

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Research Article

Open Access

인산질비료 장기연용 논토양에서 유효인산 변동

김명숙*, 김석철, 윤순강, 박성진, 이창훈

농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 토양비료과

Change in Available Phosphate by Application of Phosphate Fertilizer in Long-term Fertilization Experiment for Paddy Soil

Myung-Sook Kim*, Seok-Cheol Kim, Sun-Gang Yun, 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)

Received: 24 August 2017/ Revised: 23 September 2017/ Accepted: 25 September 2017

ORCID

Myung-Sook Kim

http://orcid.org/0000-0002-4382-0194

Abstract

BACKGROUND: Phosphorus(P) is a vital factor for rice but excess input of phosphorus fertilizer can cause environmental risk and waste of fertilizer resources. We studied to assess the change of available phosphate, P balance, critical concentration of available phosphate under a rice single system.

METHODS AND RESULTS: The changes of available phosphate of paddy soil were examined from long-term fertilization experiment which was started in 1954 at the National Academy of Agricultural Science. The treatments were no phosphate fertilization(No fert., and N), phosphate fertilization(NPK, NPKC, and NPKCLS). The available phosphorus concentrations in treatments without phosphate fertilizer (No fert. and N) were decreased continuously. But, after 47 years, available phosphate content in phosphate fertilizer treatment (NPK, NPKC, and NPKCLS) reached at the highest (245~331 mg kg^{-1}), showing a tendency to decrease afterward. The mean annual P field balance in these treatments (NPK, NPKC, and NPKCLS) had positive values that varied from 16.6 to 17.5 kg ha^{-1} $year^{-1}$, and ratio of residual P were increased. These showed that phosphate fertilizer in soil were converted into the form of residual phosphorus which was not easily extracted by available phosphate extractant. Also, It was estimated that the critical value of available phosphate for rice cultivation was 120 mg kg^{-1} using Cate-Nelson equation.

CONCLUSION: We concluded that no more phosphate fertilizer should be applied in rice single system if soil available phosphate is higher than the critical P value.

Key words: Available phosphate, Dynamics, Long-term experiment, Paddy soil

서 론

최근(2011년)에 우리나라 논토양의 유효인산 평균 함량은 131 mg kg^{-1}으로 벼 생육에 적정한 범위인 80~120 mg kg^{-1}보다 높은 것으로 나타났다(National Institute of Agricultural Sciences, 2012). 논토양에 과다하게 시용되는 인산질비료는 관개수를 따라 수계로 유출될 경우 부영양화를 초래할 수 있고, 비료자원의 불필요한 낭비를 가져올 수 있다(Sharpley, 1995). 더군다나, 가까운 미래에 인광석(인산질비료의 원료)이 고갈될 위기에 처해 있기 때문에(Cordell *et al.*, 2009) 비료자원을 절약하고, 수계환경의 보전하며 건전하게 농경지를 관리하기 위해서는 지금까지 농경지에 지속적으로 시용된 인산질 비료의 적정성을 검토하기 위하여 유효인산 함량의 변동을 평가할 필요가 있다.

무기질 인산비료와 퇴비를 12년간 논토양에 투입하는 경

*Corresponding author: Myung-Sook Kim
Phone: +82-63-238-2454; Fax: +82-63-238-3824;
E-mail: msk74@korea.kr

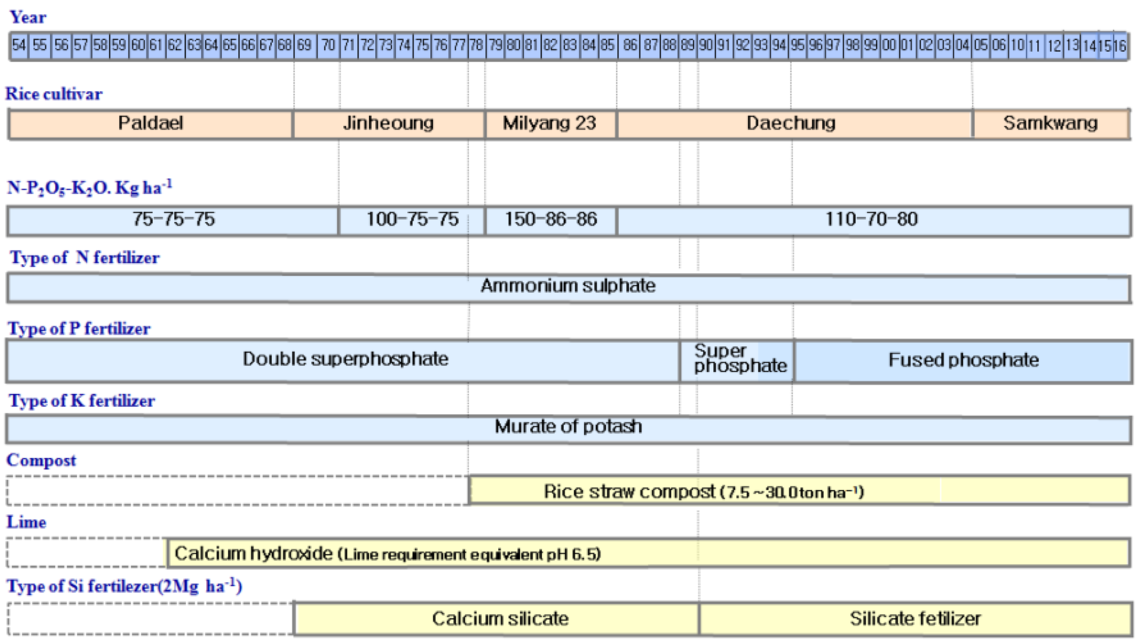

Fig. 1. Chronological application of fertilizers and rice cultivated.

우와 무시용하는 경우 인 수지는 -7.2~4.3 kg ha^{-1} year^{-1}범위이었다. 그리고 벼-호밀 윤작재배지에서도 총인의 수지 값은 -12.9~52.1 kg ha^{-1} year^{-1}이라고 하였다(Lin *et al.*, 2006; Yan *et al.*, 2013). 또한, 인산질 비료를 14~18 kg ha^{-1}을 투입한 경우보다 27~30 kg으로 다량 투입할 때가 토양의 유효인산 함량의 증가량이 급격하게 변화하므로 인산의 증가 또는 감소 정도는 시용량과 더불어 작물재배 방식에 따라 다양하게 나타났다(Cope, 1981).

토양에서 인산은 무기태와 유기태로 존재하는데 60~80%의 대부분이 무기태 형태이며, 분획에 따라 Ca-P, Al-P, Fe-P, occluded-P, residual-P로 구분하기도 한다. 이러한 형태는 토양의 pH, 반응 시간, 수분 함량(Meek *et al.*, 1979), 농경지의 이용형태와 비종에 따라 달라진다(Chang and Jackson, 1957), 논의 숙답화가 진행될수록 환원성 철 형태(Reductant Fe-P)의 분포 비율이 높아(Yoon *et al.*, 1982)지면, 환원된 논토양에서 인산은 sterngite($FePO_4 \cdot 2H_2O$)에서 vivianite ($Fe(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$)로 변환되며, vivianite의 용해도에 따라 인산의 유효도가 달라진다고 하였다(Yoon *et al.*, 1982). 그리고 토양의 총 인 함량 중에 50%의 비율이 잔류성 인(residual-P)의 형태로 존재(Kim *et al.*, 2000)하는데, 토양에서 인산은 특이흡착반응으로 결합한 후 고정화과정(aging process)을 거쳐 불용화된다. 작물이 이용할 수 없는 잔류성 인은 장기간 불용화된 인산이므로 인산의 결합형태에 대한 연구는 동일장소에서 장기간 비료시용이 이루어진 토양을 대상으로 평가하는 것이 합당하지만 이를 충족한 연구사례는 부족하였다.

따라서, 본 연구에서 비료 자원을 효율적으로 이용하고, 생태환경을 건전하게 보전하며, 농업적으로 안정적인 토지의 생산성을 유지하기 위한 토양의 질 지표를 설정하고자 1954년 이후 63년간 인산질비료를 연용한 논토양에서 유효인산 함량의 변동, 인의 수지 및 결합형태의 변화를 살펴보았다.

재료 및 방법

시험포장 토양특성

논토양으로 '54년에 경기도 수원시 권선구 서둔동 소재 국립식량과학원 포장 내에 조성되었고, 지형은 하성평탄지에 위치한다. 토양 특성으로 유효토심은 100 cm로 보통이고 투수성은 빠르며 배수등급은 약간양호이다. 토성은 사양질로 토양통은 강서통(Coarse loamy, mixed, mesic family of Anthraquic Eutrudepts)에 해당한다. 장기시험 포장 조성 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 cmol$_c$ kg^{-1}으로 유효인산 함량을 제외한 성분은 벼 생육에 추천하는 논토양의 화학성의 기준(NAAS, 2010)에 미달하였다. 벼의 품종, 비료, 개량제를 시용한 내력은 Fig. 1과 같다.

공시 품종 및 처리구

벼의 품종은 '54년부터 '68년까지는 팔달, '69년부터 '78년까지는 진흥, '79년부터 '85년까지는 밀양 23호, '86년부터 '03년까지는 대청, '04년부터 '16년까지는 삼광을 재배하였다. 처리구는 완전임의배치법으로 배치되었고 모두 32개의 처리구로 구성되어 있으나, 처리구는 무비구(No fert.), 유안 비료를 투입한 질소단용구 (N), 유안과 용성인비, 칼리질 비료 시용한 3요소구(NPK), 무기질비료와 볏짚퇴비 7.5 ton ha^{-1}를 처리한 퇴비구(NPKC), 무기질비료, 볏짚퇴비, 소석회, 규산질비료를 시용한 처리구(NPKCLS)를 대상으로. 유효인산 함량을 분석하였다.

비료 사용량 및 재배 관리

시기별로 표준비료 사용량 (NAAS, 2010)이 달라짐에 따라서 질소는 75~150 kg ha^{-1}, 인산은 70~86 kg ha^{-1}, 칼리는 75~86 kg ha^{-1}, 퇴비는 7.5 kg ha^{-1}, 규산질 비료로 규회석('69~'89)과 규산질비료('90~'14)는 2 Mg ha^{-1}를, 석회는 pH 6.5까지 상승시키는 양을 시용하였고, 기비-분얼비-수비-실비의 분시비율은 질소는 50-20-20-10%, 가리는 70-0-30-0 %로 2회이고 인산, 퇴비, 석회, 그리고 규산은 전량 기비로 시용하였다. 볏짚퇴비의 제조는 벼 수확기에 시험연구 포장으로부터 볏짚 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 시용하고 벼를 이앙하였다. 전년도에 수확 후 남아있는 벼의 그루터기와 뿌리는 경운 시 써레질 할 때 토양에 전량 환원하였다.

토양 채취 및 분석

토양 유효인산의 변동을 모니터링하기 위한 분석용 시료는 해마다('69~'16) 4월 초에서 중순사이에 처리구당 0~15 cm 깊이로 3~7군데를 채취하고 혼합한 후 음건하여 2 mm체를 통과한 입자를 분석에 이용하였다. 이 중에서 인분획용 시료는 '95년과 '15년의 시료를 사용하였다. 토양의 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 측정하였으며, 토양유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 추출하여 720 nm에서, 치환성 칼륨은 1M NH_4OAc (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 유도결합 플라즈마 발광광도계 (ICP-OES, GBC)으로 측정하였다 (National Institute of Agricultural Science and Technology, 2000). 인 분획실험에서 T-P는 $HClO_4$법, 유기태 P는 Ignition법, Inorganic P는 Modified Chang & Jackson method으로 분석하였다(Kuo, 1996).

정조수량 조사 및 식물체 분석

정조수량은 해마다 10월에 처리구당 70주씩 3반복으로 채취하여 탈곡한 후에 자연상태에서 건조하고 무게를 조사하였다. 식물체의 인 함량은 건조 후 40 mesh로 분쇄하였고 시료를 0.5 g 칭량하고 진한 황산을 10 mL와 50%의 $HClO_4$ 10 mL를 가하여 분해하여 한 후 여과지로 여과후에 유도결합 플라즈마 발광광도계 (ICP-OES, GBC)으로 측정하였다(National Institute of Agricultural Science and Technology, 2000).

인(P) 수지

수지는 투입량에서 배출량을 뺀 값을 수지로 계산하였고, 투입량은 무기질비료(인산질 비료), 유기질비료(볏짚퇴비), 관개수, 뿌리와 그루터기를 넣은 양으로 계산하였고, 배출량은 작물지상부가 흡수한 양으로 계산하였다(식 1). No fert., N, NPK, NPKC, NPKCLS는 '69에서 '16년도까지 자료를 분석하였다. 관개수량은 '12년도 측정치들으로, 관개수의 인의 함량은 서호수('69~'86)와 관정수('87~'14)로 관개한 시기의 값 (National Institute of Agricultural Science and Technology, 2003)을, 뿌리와 그루터기는 '12년도에 측정한 값으로, 식물체 흡수량은 '87년도~'14년도의 자료를 이용하였다.

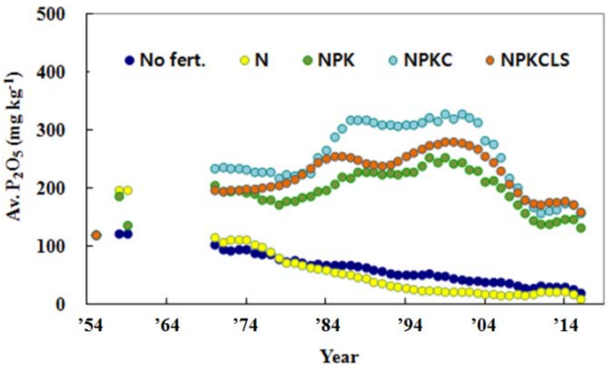

Fig 2. Change of available phosphate by continuous application of inorganic fertilizer, silicate fertilizer, lime, and rice straw compost. No fert.: No fertilization, N: Nitrogen fertilizer, NPK: nitrogen, phosphate, and potassium fertilizer, NPKC: NPK plus rice straw compost; NPKCLS: NPKC plus lime and silicate fertilizer.

Table 1. Regression equation of available phosphate according to phosphate fertilizer. No fert.: No fertilization, N: Nitrogen fertilizer, NPK: nitrogen, phosphate, and potassium fertilizer, NPKC: NPK plus rice straw compost; NPKCLS: NPKC plus lime and silicate fertilizer

Treatment	Period	Regression equation	R^2
No fert.	Ⅰ~Ⅱ('69~'16)	y=-1.66x+97.99	0.958
N	Ⅰ~Ⅱ('69~'16)	y=-3.35x+114.69	0.951
NPK	Ⅰ ('69~'00)	y= 2.27x+174.2	0.745
	Ⅱ ('01~'16)	y=-6.34x+501.43	0.809
NPKC	Ⅰ ('69~'00)	y= 4.04x+210.57	0.798
	Ⅱ ('01~'16)	y=-9.14x+685.15	0.724
NPKCLS	Ⅰ ('69~'00)	y= 2.94x+188.79	0.895
	Ⅱ ('01~'16)	y=-6.46x+556.88	0.779

Table 2. Annual P field balance in long-term fertilization experiments. No fert.: No fertilization, N: Nitrogen fertilizer, NPK: nitrogen, phosphate, and potassium fertilizer, NPKC: NPK plus rice straw compost; NPKCLS: NPKC plus lime and silicate fertilizer.

Treatment	Input (A)				Output (B)		Net balance (A-B)
	Fertilizer	Irrigation	Root and stubble	Input	rice uptake	Output	
	----------- kg ha^{-1} year^{-1} ------------				----------- kg ha^{-1} year^{-1} ------------		
No fert.	-	4.0	0.9	5.0	14.5	14.5	-9.5
N	-	2.0	1.2	3.0	18.2	18.2	-15.2
NPK	35.0	2.0	3.7	40.7	24.1	24.1	16.6
NPKC	38.5	2.0	5.0	45.5	28.6	28.6	16.9
NPKCLS	38.5	2.0	4.5	44.4	27.5	27.5	17.5

인(P) 수지(kg ha^{-1} year^{-1})=
(무기질과 유기질 비료의 P공급량+관개수, 뿌리, 그루터기의 P 공급량)- 벼의 지상부로 제거한 P량 ··· (식 1)

유효인산 함량과 벼 수량과의 관계

토양의 논토양의 유효인산 적정 함량을 살펴보기 위해서 유효인산 함량과 벼의 상대수량과의 관계를 Cate-Nelson split(Cate and Nelson, 1971)식으로 분석하였다.

통계 분석

논토양에 인산 결합형태별 연도간의 비교는 SAS 프로그램(v. 9.2)의 t-test 검정을 통해 분석하였다.

결과 및 고찰

유효인산의 장기 변동

시험포장 조성 당시인 1954년 토양의 유효인산 함량이 120 mg kg^{-1}인 No fert.와 N 처리구에서 1년당 각각 1.7 mg kg^{-1} year^{-1}, 3.3 mg kg^{-1} year^{-1}으로 감소하여 63년 후인 2016년에는 19, 10 mg kg^{-1}에 도달하였고(Fig. 2), 이들의 회귀식은 각각 y=-1.66x+97.99, y=- 3.35x+114.69 으로 나타낼 수 있었다(Table 1). N 처리구가 No fert.처리구보다 유효인산 감소량이 더욱 빠르게 나타났는데, N 처리구에 투입된 유안중의 황산성분이 불용성인 토양 인산화합물의 용해도를 높이고, N처리구의 작물생육량이 많아(33%) 토양으로부터 인산 제거량이 많았기 때문으로 판단된다.

또한, 인산질비료를 공급하는 않은 처리구(N, No fert.)에서 작물 수량이 급격하게 감소(NPK 처리구 대비 59%)하였고, 이 시기의 유효인산 함량은 50 mg kg^{-1}으로 이 농도에 도달하기까지는 시험포장 조성 당시에 유효인산 함량이 120 mg kg^{-1}에서 매년 1.66 mg kg^{-1}이 감소하여 43년이 소요되었다.

이에 비해 인산질 비료 처리구(NPK, NPKC, NPKCLS)는 유효인산 함량의 변화하는 양상은 다르게 나타났다. 유효인산 함량의 증가기('54~'00)와 감소기('00~'16)가 있었으며, 이것을 시기Ⅰ, Ⅱ로 구분할 수 있었다. 시기Ⅰ에서 NPK, NPKC, NPKCLS 처리구의 유효인산 함량은 1년당 각각 4.04 mg kg^{-1}, 2.94 mg kg^{-1}, 2.27 mg kg^{-1}으로 증가하여 47년 후에는 각각 245, 331, 280 mg kg^{-1}까지 도달하였으며 이들의 회귀식은 각각 y=2.27x+174.2y=- 4.04x+210.57, y =2.94x+188.79로 나타낼 수 있었다. 이것은 논토양에 인산질비료를 지속적으로 투입하여도 유효인산 함량은 일정한 농도 이상으로 증가하지 않기 때문에 시험포장의 토양에서 보유할 수 있는 유효인산의 최대 한계농도라고 판단되지만, 이에 대한 다각적인 연구적 접근이 더 필요하리라 생각된다.

시기Ⅱ에서 NPK, NPKC, NPKCLS 처리구의 유효인산 함량은 1년당 각각 9.14 mg kg^{-1}, 6.46 mg kg^{-1}, 6.34 mg kg^{-1}으로 감소하였고, '16년에는 133, 159, 160 mg kg^{-1}에 도달하였으며, 이들의 회귀식은 각각 y=-1.66x+97.99, y= -3.35x+114.69로 나타낼 수 있었다(Table 1).

특히, 시기Ⅰ에서 '80년부터 '87년까지 유효인산 함량이 약간 등락을 보였는데, 관개수의 부영영화로 인산농도(서호수 0.3 ppm)가 다른 시기(관정수 0.01 ppm)보다 높아서(National Institute of Agricultural Science and Technology, 2003) 토양의 유효인산 함량이 일시적으로 증가하였다고 판단되며, 논토양에서 관개수량과 수질이 큰 영향을 준다는 것으로 생각된다.

인 수지

NPK, NPKC, NPKCLS 처리구에서 시험포장으로의 인의 투입량이 작물의 흡수로 제거된 양보다 많아서 인의 수지는 양의 값으로 나타났고, No fert.와 N 처리구에서 인산질 비료를 투입하지 않음으로 인해 음의 값(-9.5~ -15.2 kg ha^{-1} year^{-1})으로 나타났다(Table 2). 인산질 비료 처리구의 인 수지는 양의 값(16.6~17.5 kg ha^{-1} year^{-1})이므로 유효인산 함량은 지속적으로 증가해야 하지만 시험포장 조성 47년차 이후에는 감소하는 경향을 나타냈다. 그 이유는 비료로 투입된 인산이 Fe, Ca, Al과 결합하여 불용화되었기 때문에 유효인산의 양이 감소한 것으로 판단된다.

중국의 논토양 장기시험포장('80년 시작)에서 인산질 비료

Table 3. P fraction in long-term fertilization experiments. No fert.: No fertilization, N: Nitrogen fertilizer, NPK: nitrogen, phosphate, and potassium fertilizer, NPKC: NPK plus rice straw compost; NPKCLS: NPKC plus lime and silicate fertilizer

Treatment	Year	T-P	Organic-P	Residual-P	Fe-P	Reductant-P	Soluble P	Al-P	Ca-P
		-----	-----	-----	-----	mg kg^{-1}	-----	-----	-----
No fert.	'95	205	9	119	30	10	1.8	27	8
	'15	139	8	72	37	14	1.7	22	4
t-test		**	ns	***	ns	*	ns	*	***
N	'95	224	7	170	32	13	1.2	4	2
	'15	203	7	98	53	30	1.2	8	11
t-test		**	ns	***	**	*	ns	*	***
NPK	'95	490	14	334	70	29	1.7	29	12
	'15	523	11	356	72	44	1.0	22	11
t-test		***	ns	***	ns	ns	ns	*	ns
NPKCLS	'95	470	69	275	61	5	1.2	34	25
	'15	573	47	361	67	7	2.1	24	27
t-test		***	*	***	ns	ns	*	*	ns

를 지속적으로 투입할 경우에 인 수지는 양의 값(54.54 kg ha^{-1} $year^{-1}$)이었고, 인산질비료를 투입하지 않을 경우에 인 수지는 음의 값(-28.76, -33.78 kg ha^{-1} $year^{-1}$)을 나타내었다 (Shin *et al.*, 2014). 또한, 8년 동안 벼-호밀 윤작지에서 무비구의 인 수지는 음의 값(-12.9 kg ha^{-1} $year^{-1}$)이었지만, 인산질 비료 투입(볏짚, 돈분 7,500~15,000 kg ha^{-1})한 경우에 인 수지는 양의 값(3.2~52.1 kg ha^{-1} $year^{-1}$)으로 변하였다. 장기시험포장을 운영 시 인산질 비료는 작물의 인산 흡수량 이상의 양으로 투입하기 때문에 토양의 인 수지 값은 인산질 비료를 시용하면 양의 값으로 나타내고, 그렇지 않은 경우에는 음의 값을 나타내었다고 생각된다.

총인(T-P)와 잔류성 P(Residual P)는 인산질비료가 투입되지 않은 No fert.. N 처리구에서 '95년도보다 '15년도에 감소하였고, 인산질 비료가 투입된 NPK, NPKCLS 처리구에서는 현저히 증가하였다(Table 3). 논토양에 투입된 인산은 시간이 경과함에 토양에 고정되는 잔류성 형태로 바뀌기 때문에 유효인산 추출액(Lancaster method)으로 추출될 수 있는 유효인산의 양이 감소하였다고 생각된다. 유기태 P는 No. fert., N, NPK 처리구에서 '95년도와 '15년도 사이에 큰 차이는 없었지만, NPKCLS 처리구는 '95년도보다 '15년도에 감소하였는데, 이와 동시에 유기물 함량도 '95년도보다 '15년도에 감소하므로 유효인산 함량의 감소는 이들과 결합한 유기물의 함량의 감소와도 영향이 있을 것이라 생각된다.

N처리구 제외한 다른 처리구에서 Fe-P는 '95년도보다 '15년도에 증가하는 경향이었지만 처리간에 유의한 차이는 없었다. 비료로 주는 인산은 인산칼슘($Ca(H_2PO_4)$)으로 물에 잘 녹고 식물에게 이용되고 남은 인산은 논토양에 철이 많기 때문에 ($Fe(PO_4)_2$로 바뀌므로 Fe-P는 증가하리라 생각된다. 환원성 P(reductant P)는 모든 처리구에서 '95년도보다 '15년도에 증가하는 경향이었다. 이러한 형태는 Fe oxide로 코팅되어 그 속에 결합되기 때문에 물에 잘 녹지 않는 형태로 (Change and Jackson, 1957), Fe oxide 코팅을 제거해야만 인을 추출할 수 있다.

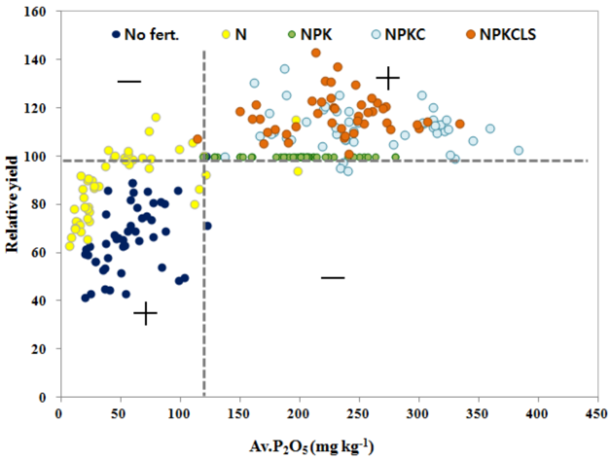

Fig. 3. Relationship relative grain yield and the content of available P_2O_5 in long-term experiments No fert.: No fertilization, N: Nitrogen fertilizer, NPK: nitrogen, phosphate, and potassium fertilizer, NPKC: NPK plus rice straw compost; NPKCLS: NPKC plus lime and silicate fertilizer.

Al-P는 모든 처리구에서 '95년도보다 '15년도에 처리간에 유의한 차이는 없었지만 감소하는 경향이었다. 논토양은 Al 형태보다는 Fe형태가 많기 때문에 Al과 결합형태는 감소하리라 생각된다. Ca-P는 '95년도보다 '15년도에 처리간에 유의한 차이는 없었지만 NPKCLS 처리구가 다른 처리구보다

높았는데, 소석회를 처리하였기 때문에 다른 처리구보다 높게 나타났다고 생각된다.

토양의 유효인산의 한계농도

벼의 수량을 안정적으로 생산하기 위해 논토양의 유효인산 적정한 함량은 120 mg kg^{-1}로 나타났다(Fig. 3). 이 함량은 현재 유효인산 적정범위(80∼120 mg kg^{-1})로 추천하는 값의 상한치에 해당한다(National Institute of Agricultural Sciences, 2010). 이보다 높을 함량에서는 인산질 비료를 논토양에 사용해도 벼의 수량의 증대효과는 크지 않으며, 현재의 유효인산 함량의 적정범위를 기준으로 논토양의 비료 사용량을 추천하는 것이 타당하다고 판단된다.

결 론

장기시험 포장으로부터 인산질 비료와 볏짚퇴비를 63년간 투입하였을 때 토양 중 유효인산 함량은 시험 초기에 120 mg kg^{-1}에서 시험시작한 지 47년차에 245~331 mg kg^{-1}까지 증가하였고, 48년차 이후에 유효인산 함량은 133~160 mg kg^{-1}에까지 감소하였다. 인산질비료 처리구에서 인 수지는 16.6~17.5 kg ha^{-1} $year^{-1}$으로 양의 값으로 토양 중 유효인산 함량은 지속적으로 증가해야 한다. 그러나 유효인산 함량은 증가하지 않고 감소하는 경향이었다. 이것은 비료로 투입된 인산질비료가 토양에 잔류성 인의 고정된 형태로 불용화 되었다고 생각한다. 그리고 Cate-Nelson 식에서 벼 수량은 토양 중 유효인산 함량 120 mg kg^{-1} 이상에서 크게 증가하지 않았기 때문에, 현재 벼 생산에 추천하는 논토양의 유효인산 함량 범위(80~120 mg kg^{-1})가 적당하다고 판단된다.

Notes

The author declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was supported financially by a grant from the research project (PJ012535022017) of National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

Cate, R. B., J. R., & Nelson, L. A. (1971). A simple statistical procedure for partioning soil test correlation data into two classes. Soil Science Society of America Proceedings, 35(4), 658-659.

Chang, S. C., & Jackson, M. L. (1957). Fractionation of soil phosphorus. Soil Science, 84(2), 133-144.

Cope Jr., 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.

Cordell, D., Drangert, K. O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global Environmental Change, 19(2), 137-316.

Lin, D. X., Hu, Feng., Fan, X. H., & Yang, L. Z. (2006). Effect of long-term fertilization on phosphorus transformation in paddy soil in the Taihu Lake region. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 12(4), 453-456.

Kim, P. J., Lee, S. M., Yoon, H. B., Park, Y. H., & Kim, S. C. (2000). Characteristic of phosphorus accumulation in organic farming fields. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 33(4), 234-241.

Kuo, S. (1996). Carbonate and gypsum. Sparks, D. L. (ed.). pp. 437-474. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical methods. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.

Meek, B. D., Graham L. E., Donovan, T. J., & Mayberry, K. S. (1979). Phosphorus availability in a calcareous soil after high loading rates of animal manure. Soil Science Society of America Journal, 43(4), 714-744.

Sharpley, A. N. (1995). Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. Journal of Environmental Quality, 24(5), 920-926.

Shin, L. L., Shen, M. X., Lu, C. Y., Wang, H. H., Zhou, X. W., Jin, M. J., & Wu, T. D. (2014). Soil phosphorus dynamic, balance and critical P values in long-term fertilization experiment in Taihu Lake region, China. Journal of Integrative Agriculture, 14(12), 2446-2455.

Yan, X., Wang, D., Zhang, H. L., Zhang, G., & Wei, Z. Q. (2013). Organic amendments affect phosphorus sorption characteristics in a paddy soil. Agriculture, Ecosystems & Environment, 175, 47-53.

Yoon, J. H., Hong, C. W., & Huh, B. L. (1982). Interrelationships among pH, pe, Fe^{2+} and water soluble phosphate in reduced soil-water suspension. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 15(3), 162-165.