

화학비료 50년 연용에 따른 벼수량과 논토양 특성 변화

연병열* · 곽한강¹ · 송요성¹ · 전희중¹ · 김창호²

작물과학원 인삼약초연구원, ¹농업과학기술원, ²공주대학교

Changes in Rice Yield and Soil Properties under Continued Application of Chemical Fertilizer for 50 Years in Paddy Soil

Byeong-Yeol Yeon,* Han-Kang Kwak¹, Yo-Seong Song¹, Hee-Joong Jun¹, and Chong-Ho Kim²

*Ginseng & Medicinal Plants Research Institute, Eumseong 369-873, Korea.
¹National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, 441-707, Korea
²Kongju National University, Kongju, 340-800, Korea*

This study was conducted to investigate the effect of long-term continuous application of fertilizers for rice cultivation. Changes of physical and chemical properties of paddy soil and the rice yield by continuous application of NPK fertilizers, ammonium sulphate, and urea over fifty years, from 1954 to 2003, were investigated. The rice yield index of each treatment were 100 of NPK plots, 84 of ammonium sulphate plots, 81 of urea plots, and 62 of no fertilizer plots. The variance of yield was large according to the quality of irrigation water. Nutrient uptakes by rice plants in ammonium sulphate and urea plots were significantly smaller than those in NPK plots; 86 and 75% in T-N, 79 and 82% in P₂O₅, 64 and 58% in K₂O, and 94 and 90% in SiO₂, respectively. Bulk density of soil in NPK plots significantly decreased compared to those in no fertilizer, ammonium sulphate, and urea plots, whereas CEC in NPK plots increased compared to other plots. Soil pHs of all plots were higher than that before experiment which was 5.2; 6.0 in no fertilizer, 5.9 in urea and NPK, and 5.4 in ammonium sulphate plots. The available phosphate in soil increased by 2.5 mg kg⁻¹ yr⁻¹ when 70 kg ha⁻¹ of P fertilizer applied for rice cultivation, and decreased by 1.8 mg kg⁻¹ yr⁻¹ when no P fertilizer applied.

Key words : Paddy soil, Chemical fertilizer, Soil property, Rice

서 언

최근 환경문제와 웰빙이 주요 관심사가 되면서 농업 분야에서도 환경에 대한 부담을 적게 주면서 생산성 향상과 더불어 고품질 농산물의 안정생산을 동시에 추구하는 농업형태로 전환되고 있으며, 토양의 질(soil quality)을 개선시키기 위해 많은 노력을 하고 있다(Yoon et al, 2002; OECD, 2001).

과거 논토양 비옥도관리는 생산성과 효율성 위주로 관리되었지만, 근래에는 토양의 생산성과 환경의 조화 뿐만 아니라 고품질 쌀 생산을 위한 보다 정밀한 관리가 요구되고 있다(Kim et al, 2002).

이와 같이 환경친화적으로 논토양을 관리하기 위해서는 토양의 물리화학적 특성과 생물상의 적절한 균형 유지와 더불어 생산을 위해 투입되는 영농자재의 양이 벼의 생육이나 토양이 감내해 낼 수 있어야 하며, 이

러한 조절 능력 이상의 영농 자재의 사용은 제한되어야 하기 때문에 토양특성과 생산 환경조건에 맞는 기술의 적용이 필요하다. 특히, 담수상태에서 벼를 재배하는 논토양은 수자원 함양, 홍수조절, 지하수 보전 및 환경오염 정화 기능과 같은 공익적 가치가 높이 평가(Seo et al, 2004)되고 있기 때문에 장기적인 관점에서 토양비옥도의 변화와 농업의 지속성(Sustainability)에 미치는 영향에 대한 평가가 필요하다.

외국의 경우 장기 연용시험은 주로 발작물을 대상으로 초기에는 단순히 질소, 인산, 칼륨 및 마그네슘 등에 대한 필요성을 밝히기 위해 주로 작물의 양분흡수 패턴 구명을 위한 시험을 실시하였으나(Jenkinson, 1991), 최근에는 토양의 질과 생태계에 미치는 영향까지 고려하여 지속적으로 농업의 생산성을 유지할 수 있는 토양관리 기술 개발에 초점을 맞추어 연구를 수행하고 있다(Granstedt and Kjellenberg, 1997).

이러한 시험은 제어된 조건에서 수행할 수 없기 때

접수 : 2007. 10. 25 수리 : 2007. 11. 15
*연락처 : Phone: +82438715553,
E-mail: byyeon@rda.go.kr

문에 단기간에 재현성 있는 결과를 얻기가 어렵고, 장기간에 걸쳐 이어져야 할 면을 갖고 있다.

본 연구는 1954년부터 2003년까지 50년간 질소, 인산, 가리의 화학비료를 장기간 연용 할 때, 토양의 이화학적 특성 변화와 벼의 생산력에 미치는 영향을 검토하였다.

재료 및 방법

본 시험은 1954년도에 경기도 수원시 권선구 서둔동에 위치하고 있는 작물과학원 포장시험 단지내에 조성된 국내 최장기 연구용 시험포장을 이용하였다.

공시토양 하성충적층을 모재로 한 하성평탄지에 분포하고 있으며 유효토심은 보통으로 투수성이 빠르며 배수가 약간 양호한 사양질인 강서토으로 시험전 토양의 화학성(1954년도) 중 토양산도는 5.2, 유기물 함량은 16 g kg⁻¹, 유효인산은 120 mg kg⁻¹, 치환성 칼륨 함량이 0.08 cmolc kg⁻¹인 일반적으로 논토양으로는 비옥도가 낮은 토양이었다(Table 1).

공시품종 1954년부터 1968년까지는 자포니카 품종인 팔달벼, 1969년부터 1978년까지는 자포니카 품종인 진흥벼, 1979년부터 1985년까지는 통일계 품종인 밀양 23호, 1986년부터 2003년도까지는 자포니카 품종인 대청벼를 재배하였다.

경종개요 실험설계는 1954년도에 조성된 3요소구(NPK), 유안단용구(A P0K0), 요소단용구(U P0K0)와 무비구(N0P0K0) 등 4처리가 있다. 인산질 비료는 국내 비료의 생산 비중이 달라짐에 따라 1954년부터 1988년까지 중과린산석회, 1989년부터 1993년까지 과린산석회, 1994년부터 2003년까지는 용과린을 사용하였으며, 가리질비료는 계속하여 염화가리를 사용하였다.

시비량은 품종 또는 표준시비량이 달라짐에 따라서 Table 2와 같이 질소는 75~150 kg ha⁻¹, 인산은 70~86 kg ha⁻¹, 가리는 75~86 kg ha⁻¹ 사용하였고, 기비-분얼비-수비-실비의 분시비율은 질소는 50-20-20-10%로 4회, 가리는 70-0-30-0%로 2회, 인산은 전량 기비로 사용하였다.

Table 2. Chronological application rates of chemical fertilizers.

Year	Nitrogen	Phosphate	Potassium
1954~1970	75	75	75
1971~1978	100	75	75
1979~1985	150	86	86
1986~2003	110	70	80

분석 및 조사 토성분석은 미농무성법에 의한 hydrometer법, 용적밀도 및 3상 분석은 3 inch core로 채취하여 분석하였고, 토양의 경도는 Yamanaka 경도계로 측정하였다.

토양유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성 양이온은 1N-NH₄OAc (pH 7.0) 완충용액으로 침출하여 유도결합플라즈마 발광광도계(ICP, GBC)로 측정하였다. 유효규산은 1N-NaOAc(pH 4.0)용액으로 침출하여 700nm 에서 비색 측정하였다.

식물체의 무기성분함량은 건조 후 40 mesh로 분쇄한 식물체 시료 0.5 g에 conc. H₂SO₄ 1 ml와 50%의 HClO₄ 10 ml를 가하여 분해한 후 여과하여 T-N, P₂O₅, K₂O, CaO, MgO, SiO₂ 등을 정량하였다.

전 질소함량은 Indophenol-blue법, 인산은 Vanadate법, K₂O, CaO, MgO는 ICP로 측정하였고, SiO₂는 분해잔사물을 600°C의 전기로에서 6시간 동안 태워 중량법으로 조규산함량을 정량하였다(RDA, 2000).

결과 및 고찰

벼 수량의 연차별 변화 1954년부터 2003년까지 50년간 생산된 정조 수량을 5개년씩 이동 평균한 성적은 Fig. 1과 같다.

이들 시험구의 년차간 정조수량의 변화를 품종별로 비교해 보면, 3요소구의 경우 1954년~1968년까지 15년간은 팔달벼를 공시하여 3.95 Mg ha⁻¹, 1969년~1978년까지 10년간은 진흥벼를 공시하여 5.36 Mg ha⁻¹, 1979년~1985년까지 7년간은 밀양 23호로 6.84 Mg ha⁻¹, 1986년~2003년까지 18년간은 대청벼로 공시하여 5.92 Mg ha⁻¹을 나타냈다.

통일계 품종인 밀양 23호를 재배한 년도에서 수량이 가장 많았고, 진흥벼와 밀양 23호의 경우에도 재배

Table 1. Chemical properties of soil used in the experiment in 1954.

pH	OM	Av. P ₂ O ₅	Exch. cation			Av. SiO ₂
			K	Ca	Mg	
1:5, H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- cmolc kg ⁻¹ -----			mg kg ⁻¹
5.2	16	120	0.08	3.4	-	-

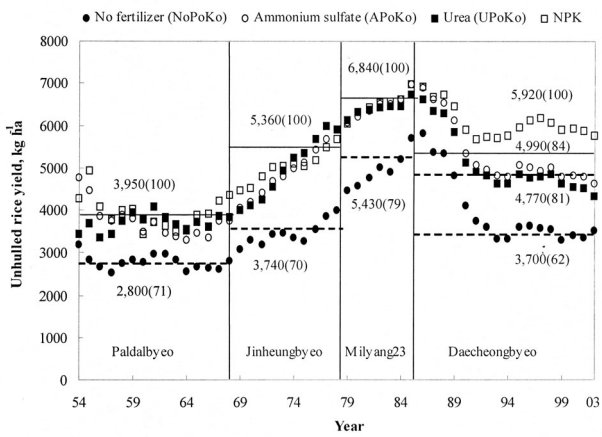


Fig. 1. Changes of unhulled rice yield with long-term continuous application of fertilizers. Numbers in parentheses are indices of rice yield to the NPK treatment plot.

년수가 증가됨에 따라 수량도 크게 증가하였다. 또한 무비구의 생산력을 3요소구와 대비해 보면 3요소구 수량지수 100에 대하여 팔달 벼는 71, 진흥벼는 70, 밀양23호는 79, 대청벼는 62로 무비구의 수량은 밀양 23호를 재배할 때 가장 많았던 반면 대청벼를 재배할 때에 가장 적었다.

논토양에서 토성별 무비구의 수량은 3요소구에 비하여 62~76%로 알려져 있는데(Song et al., 2001), 본 시험에서는 3요소구에 비해 무비구는 62~79%의 생산력을 보였다. 또한 년차간 무비구의 생산력을 보면 1986년까지는 점차 증가하다가 그 이후부터는 급격히 감소하는 결과를 보이고 있다.

이와 같이 1986년도까지 무비구의 수량지수가 높은 것은 관개수질에 의한 것으로 보이며 1954년~1986년

까지는 관개수로 서호의 물을 사용했으나 점차 수질이 나빠짐에 따라 1987년도부터는 관정지하수를 이용하여 벼를 재배하였다.

당시 사용했던 서호의 물과 관정지하수의 수질을 비교해 보면(Table 3), 서호수의 경우에는 NH₄-N는 3.0 mg L⁻¹으로 이는 연간 관개수량을 15,000 Mg ha⁻¹로 볼때 ha당 45 kg의 질소비료의 시용량에 해당되고, 칼륨은 9.0 mg L⁻¹으로 가리비료로 135 kg ha⁻¹에 해당되는 양이다.

무기태 인산의 경우에도 0.3 mg L⁻¹으로 이는 인산 질 비료 4.5 kg ha⁻¹ yr⁻¹에 해당되는 양이 관개수에 의해 공급되었다고 볼 수 있고, 관정지하수의 경우에는 NH₄-N 0.1, K 2.2, PO₄-P 0.01 mg L⁻¹로 서호수에 비해 양분의 천연 공급량이 매우 적은 것으로 조사되었다. 따라서 관정수를 사용한 1987년부터 1993년까지 7년간은 무비구의 수량이 급격히 저하되었으나 그 이후부터는 안정되고 있는 결과를 보이고 있다.

또한, 관개수원에 따른 3요소구와 유안과 요소단용구의 수량도 관개수의 수질에 영향을 크게 받은 것으로 조사되었다. 서호수를 관개수로 사용한 1954~1986년까지는 3요소구 수량 100에 대하여 유안과 요소단용구는 99로 수량 차이가 1%에 불과하나, 관정수를 사용한 1987년~2003년까지는 3요소구 수량 100에 대하여 유안단용구는 84, 요소단용구는 81의 수량 밖에 얻을 수 없었다. 따라서 이와 같은 결과로 볼 때 관개수질의 특성에 따라 논토양의 시비관리가 달라져야 된다고 생각된다

양분흡수량 1984~2003년도까지 20년간 조사된 벼

Table 3. Chemical prosperities of irrigation water.

Treatments	pH	EC	PO ₄ -P	NH ₄ -N	K	Ca	Mg	Na	SiO ₂	
	1:5	dS m ⁻¹	-----				mg L ⁻¹ -----			
Seoho reservoir	7.2	1.00	0.30	3.0	9.0	22	6.0	48	5.6	
Groundwater	7.8	0.32	0.01	0.1	2.2	14	6.0	24	6.0	

Table 4. Amount of nutrient uptake by above ground part of rice with continuous application of chemical fertilizers from 1984 to 2003.

Treatments	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	SiO ₂
	----- kg ha ⁻¹ -----					
NoPoKo	45.5(49) [†] a	33.3(60)a	75.5(63)a	22.3(59)a	11.7(51)a	402(90)a
A PoKo	79.2(86)b	43.5(79)b	77.7(64)a	32.1(85)b	18.6(81)b	420(94)a
U PoKo	69.1(75)c	45.6(82)b	70.3(58)a	31.0(82)b	18.4(81)b	406(90)a
N P K	92.5(100)d	55.3(100)c	120.5(100)b	37.6(100)c	23.0(100)c	449(100)a

[†] Index of the amount of nutrient uptake to the NPK plot.

[‡] Means with the same letter within a column are not significantly different at 5% level of DMRT.

수확기 경엽과 종실의 주요 무기성분 흡수량을 평균한 성적은 Table 4와 같다. 화학비료 처리구별 무기성분 흡수량 지수는 3요소구 흡수량 100에 대하여 무비구에서 T-N은 49, P₂O₅는 60, K₂O는 63, CaO는 59, MgO는 51로 유의성 있게 감소되었으나 SiO₂는 차이가 없었다. 유안단용구와 요소단용구에서 T-N은 86~75, P₂O₅는 79~82, K₂O는 64~58, SiO₂은 94~90으로 흡수량이 적었다. 이 중에서 K₂O의 흡수량이 가장 적은 반면 SiO₂의 흡수량이 가장 많았다.

토양물리성 변화 2003년도에 조사한 결과는 Table 5와 같다. 토양의 용적밀도는 무비구 1.43, 유안과 요소단용구에서 각각 1.46 g cm⁻³에 비하여 3요소구에서 1.34 g cm⁻³로 유의성 있게 감소하는 결과를 보였다. CEC의 경우에도 3요소구 9.0cmol⁺ kg⁻¹에 비하여 유안단용구 8.0, 요소단용구 8.1, 무비구 7.8로 3요소구에서 증가하는 경향을 보이고 있다. 고상과 액상은 무비구나 단용구보다 3요소구에서 감소하나 기상과 경도는 처리 간에 별 차이가 없었다.

이와 같은 결과로 볼때 적절한 비료사용은 지상부의 생육량을 증대시킬 뿐만 아니라 뿌리의 생육량도 함께 증가시키기 때문에 용적밀도의 감소와 CEC 증가에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 토양의 용적밀도는 비 생육량과 밀접한 관계가 있어 비의 생육량이 증가할수록 용적밀도는 감소되는 결과와 이로 인해 비의 뿌리 및 지상부 생육이 좋게 나타났다는 결과와 같은 경향을 보이고 있다(Mika and Rice, 2004;

Tisdall and Odades., 1982).

이상과 같은 결과를 종합해 보면 적절한 시비관리는 비료를 사용하지 않은 경우보다 용적밀도를 낮추어 토양을 부드럽게 할 뿐만 아니라 CEC를 증가시킴으로써 양분의 보유능을 크게 하는 결과를 보이고 있다.

토양화학성 50년경과 후 토양화학성의 차이를 알아보고자 2003년도 토양을 분석한 결과는 Table 6과 같다. pH는 포장조성(1954) 당시 5.2이었으나 2003년도에는 무비구를 포함하여 전 처리구에서 5.4~6.0까지 높아 졌다. 토양산도는 토양의 물리적, 화학적 및 생물학적 특성에 영향을 미치는 가장 중요한 인자이나 일부에서는 비료나 농약을 주고 작물을 재배하는 등의 농업활동이 토양을 산성화 시킨다는 생각이 거의 상식수준으로 알려져 있는 것이 현실이다. 그러나 Table 6의 연구결과에 따르면 비료에 의한 영농활동이 결코 농경지를 산성화 시키고 있지 않음을 보여 주고 있다. 이를 자세히 보면 50년전 시험포장의 pH 5.2에 비하여 무비구는 6.00, 요소단용구 5.93, 3요소구 5.93, 유안단용구 5.40으로 나타나 이를 반증해 주고 있다.

토양중 유기물 함량의 변화를 보면 1954년도 시험전 16 g kg⁻¹보다 각 처리구에서 증가되었으며, 처리별로 보면 3요소구 21 g kg⁻¹, 유안단용구 20 g kg⁻¹, 요소단용구와 무비구는 각각 21 g kg⁻¹이었다. 이와 같이 퇴비를 사용하지 않았음에도 불구하고 유기물 함량이 감소되지 않고 일정한 수준을 유지하는 결과는 전술

Table 5. Changes of soil physical properties with 50 years of long-term continuous application of chemical fertilizers in 2003.

Treatments	Bulk density Mg m ⁻³	Phase distribution			CEC cmolc kg ⁻¹	Hardness mm
		Solid	Liquid	Gaseous		
		----- % -----				
NoPoKo	1.43 b [†]	53.8 b	36.8 c	9.4 b	7.8	13.8 a
A PoKo	1.46 b	55.0 b	32.4 b	12.6 a	8.0	14.1 b
U PoKo	1.46 b	55.2 b	33.0 b	11.8 ab	8.1	14.2 b
N P K	1.34 a	50.4 a	39.5 a	10.1 ab	9.0	14.0 ab

[†] Means with the same letter within a column are not significantly different at 5% level of DMRT.

Table 6. Changes of soil chemical properties with 50 years of long-term continuous application of chemical fertilizers in 2003.

Treatments	pH	OM g kg ⁻¹	Av. P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	Exch. cation			Av. SiO ₂ mg kg ⁻¹
				K	Ca	Mg	
	1:5, H ₂ O			----- cmolc kg ⁻¹ -----			
NoPoKo	6.00 a [†]	18 b	40 b	0.10 b	5.0 b	0.9 a	89 a
A PoKo	5.40 c	20 a	14 c	0.07 b	4.4 a	0.8 b	69 a
U PoKo	5.93 a	18 b	24 bc	0.08 b	5.2 b	0.9 a	76 a
N P K	5.63 b	21 a	194 a	0.12 a	4.7 a	0.9 a	44 b

[†] Means with the same letter within a column are not significantly different at 5% level of DMRT.

한 벼 뿌리에 의한 영향으로 보이며 이에 대해서는 향후 세밀한 평가가 필요하다고 생각된다.

토양의 유효인산함량은 포장조성 당시 120 mg kg^{-1} 이었으나 2003년도에는 인산비료가 계속 투입된 3요소구는 194 mg kg^{-1} 까지 증가된 반면 인산비료가 투입되지 않은 무비구에서는 40 mg kg^{-1} , 유안단용구는 14 mg kg^{-1} , 요소단용구는 24 mg kg^{-1} 으로 큰 폭으로 감소하였다.

이러한 유효인산함량의 년차별 변화를 나타낸 결과는 Fig. 2와 같다. 50년간 매년 $70\sim 86 \text{ kg ha}^{-1}$ 의 인산질 비료를 시용한 3요소구의 경우에는 토양의 유효인산함량이 연간 2.49 mg kg^{-1} 씩 증가한 반면, 무비구의 경우에는 1.77 mg kg^{-1} 씩 감소되는 결과를 보였다. 또한 인산비료를 시비하지 않은 유안단용구는 이보다 감소 폭이 더 컸다. 이러한 원인은 인산의 유효도에 대한 질소비료의 영향으로 보이며 년차가 진행됨에 따라 무비구보다도 감소하는 경향이 심하였다. 또한, 초기에 무비구 보다 요소단용구에서 인산의 유효도가 높았던 것은 인산을 포함하는 광물은 산성에서 잘 녹아 나오므로(Lindsay, 1979), 유안과 요소에 있는 황산과 탄산 또는 질산화작용에 의하여 질산이 생성된 결과로 판단되었다.

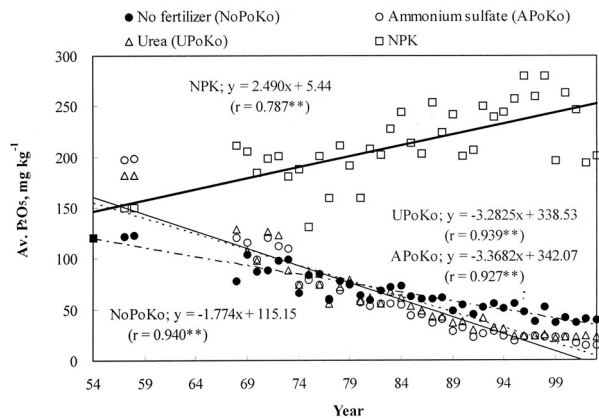


Fig. 2. Changes of available phosphate content in soil with long-term continuous application of chemical fertilizers.

특히, 유안과 요소단용구의 경우에는 재배 년수가 경과됨에 따라 유효인산함량이 지속적으로 감소하여 25년 후부터는 무비구보다도 더 낮아졌고, 50년차에는 각각 $14, 24 \text{ mg kg}^{-1}$ 까지 감소되었다. 이와 같은 원인은 Table 4에서 보는 바와 같이 인산 흡수량이 무비구 29.3 kg ha^{-1} 보다 유안단용구 30.1 kg ha^{-1} , 요소단용구 39.5 kg ha^{-1} 로 많았기 때문으로 생각된다. 또한 1990년도부터 요소와 유안단용구의 정조 수량이 3요소구보다 크게 낮아졌는데(Fig. 1), 이 시기의 토양의 유효인산함량은 50 mg kg^{-1} 이하로 존재하고 있기 때

문에 이것이 수량을 저하시키는 요인으로 작용한 것으로 볼 수 있으며, 토양 중 유효인산 함량이 50 mg kg^{-1} 이상은 유지되어야 정상적인 생육이 가능하다고 생각되었다.

질소 비종별로 보면 요소단용구 보다 유안단용구에서 수량이 높은 것은 유안의 황산근이 요소의 탄산근보다 불용성인 인산화합물을 더 잘 녹이기 때문에(Mehlich, 1978) 이로 인해 유안단용구에서 인산의 유효도가 증가되어 수량에 영향을 미친 것으로 판단되었다.

토양의 치환성 양이온 함량에서 칼륨은 시용한 구와 시용하지 않은 구의 유의성 있는 차이를 보이고 있으며, 가리비료 시용으로 칼륨함량이 증가하는 경향이였다.

가리비료가 시용되지 않은 유안단용구와 요소단용구에서는 $0.07\sim 0.08 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 로 포장조성 당시의 칼륨 함량과 같았다. 또한, 매년 가리비료를 시용한 3요소구에서도 $0.12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 로 논토양에서 적정 함량으로 제시된 $0.25\sim 0.30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 에(RDA, 2006) 미치지 못하고 있다. 이와 같이 가리질 비료를 장기간 시용하여도 치환성 칼륨이 증가되지 않은 원인은 시험 전 토양의 칼륨 함량이 적고, 칼륨의 투입량이 $70\sim 86 \text{ kg ha}^{-1}$ 으로 Table 4에서 보는바와 같이 흡수량 $59.8\sim 116 \text{ kg ha}^{-1}$ 보다 적었기 때문으로 생각된다. 따라서 현재 토양에 관계없이 $0.25\sim 0.30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 로 정해져 있는 토양의 적정 치환성 칼륨 함량에 대해서도 새로운 검토가 필요하다고 판단되었다.

토양 중 유효규산 함량은 무비구 89 mg kg^{-1} , 요소단용구 76 mg kg^{-1} , 유안단용구 69 mg kg^{-1} 에 비하여 3요소구(44 mg kg^{-1})에서 유의성 있게 감소되었다. 이와 같은 원인은 벼의 수량이 3요소구가 무비구, 유안단용구, 요소단용구에 비해 $16\sim 38\%$ 정도가 증가되었기 때문에 매년 벼에 의한 탈취량이 많아진 결과로 보이며 우리나라 논토양 적정 유효규산함량인 $130\sim 180 \text{ mg kg}^{-1}$ (RDA, 2006)보다는 크게 낮아 규산질 비료의 시용이 요구되었다.

적 요

농업과학기술원에서 보유하고 있는 국내 최장기 연구용 논토양에서 1954년부터 2003년까지 50년간 3요소 화학비료와 유안 및 요소비료를 장기간 연용 했을 때 벼의 생산력과 토양의 이화학적 특성에 미치는 영향을 조사한 결과는 다음과 같다

정조수량을 3요소구의 수량지수 100에 대하여 유안단용구 84, 요소단용구 81, 무비구 62이었으며 관개수질에 따라 벼의 생산량 차이가 컸다.

벼의 양분흡수량은 3요소구에 비하여 유안과 요소단

용구에서 T-N은 86~75, P₂O₅는 79~82, K₂O는 64~58, SiO₂은 94~90%로 흡수량이 유의성 있게 적었다.

토양의 용적밀도는 무비구, 유안단용구, 요소단용구보다 3요소구에서 유의하게 낮아지는 반면, CEC는 증가되었다.

토양의 pH는 시험전(1954) 5.2에 비하여 전 처리구에서 높았으며 무비구는 6.00, 요소단용구 5.93, 3요소구 5.93, 유안단용구 5.40순으로 저하되었다.

토양의 유효인산함량은 인산비료를 매년 70 kg ha⁻¹를 사용하고 비를 재배할 경우 유효인산의 증가량은 2.5 mg kg⁻¹ yr⁻¹이었고, 인산비료를 사용하지 않으면 1.8 mg kg⁻¹ yr⁻¹씩 감소되었다.

인 용 문 헌

- Granstedt, A., and L. Kjellenberg. 1997. Long-term field experiment in Sweden: Effects of organic and inorganic fertilizers on soil fertility and crop quality. In Proceedings of an International Conference in Boston, University, Agricultural Production and Nutrition, Massachusetts March 19-21, 1997.
- Jenkinson, D.S. 1991. The rothamsted long-term experiments : Are they still in use, *Journal of Agronomy*, 83(1):2-10.
- Kim, C.B., D.H. Lee, J. Choi. 2002. Effects of soil improvement on the dependence of rice nutrient contents and grain quality. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 35:296-305.
- Linsay, W. L. 1979. Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, NY., USA.
- Mehlich, A. 1978. Influence of fluoride, sulfate, and acidity of extractable phosphorus, calcium, magnesium, and potassium. *commun. Soil Sci. Plant Anal.* 9:455-476.
- Mika, M.M and C.W. Rice. 2004. Tillage and manure effects on soil and gregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:809-816.
- OECD. 2001. Environmental indicators for agriculture. Methods and results, Paris, France. Volume 3. 171-193.
- RDA. 2000. Methods of the soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- RDA. 2006. Standard of fertilizer description by crops. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Seo, M.C., H.B. Yun, S.G. Kim. 2004. Assessment of environmental conservation function at paddy farming according to productional environmental conditions, Research Report of Dept. of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea. 719-784.
- Song, Y.S., H.K. Kwak, B.K. Hyun, B.Y. Yeon, P.J. Kim. 2001. Effects of composted pig manure on rice cultivation in paddy soils of different texture. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 34:265-271.
- Tisdall, J.M., and J.M. Odades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33:141-163.
- Yoon J.H., I.Y. Kim, P.K. Jung, J.S. Suh, H.J. Jun. 2002. Development of soil quality indicator. Research Report of Dept. of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea. 240-258.