

동일비료 장기시용이 벼 수량과 토양의 화학성분에 미치는 영향

손지영^{1,†} · 김준환² · 강신구³ · 신성휴³ · 심강보³ · 양운호³ · 허성기³

Effects of Long-Term Fertilization on Rice Yield and Soil Chemical Properties in the Mid-Plain of Korea

Jiyoung Shon^{1,†}, Junhwan Kim², Shingu Kang³, Seonghyu Shin³, Kangbo Shim³, Woonho Yang³, and Sunggi Heu³

ABSTRACT A long-term field experiment under different fertilization treatments had been conducted to explore the effects of rice yield and soil chemical properties from 1978 to 2008 in Suwon, Korea. The paddy was applied eight fertilization treatments which were F0 (no fertilizer), PK (phosphorous and potassium), NK (nitrogen and potassium), NP (nitrogen and phosphorous), NPK (nitrogen, phosphorus and potassium), NPKC (NPK with compost), NPKS (NPK with straw) and NPKL (NPK with lime). Results of 31 years experiment showed that yield index (the ratio of yield in each treatment to NPK) was the lowest in F0 (0.52) and the highest in NPKC (1.18). Yield index was gradually increased in NPKC but decreased in F0 and NK. The yield index of PK, NP, NPKS and NPKL were not changed long-term treatment. Soil acidity of NPKL showed the highest with pH 7.9, and that of other treatments ranged from pH 6.3 to 6.8. Available phosphorous content of soil was increased in all plots by long-term fertilization, was the highest in PK and NPKC. Soil organic matter was higher in NPKC (1.8%) and NPKS (1.8%) than other treatments (1.3~1.4%) in the early experiment, but that was remarkably increased in only NPKC (2.5%) according to annual long-term application. Thus we suggest that annual compost application with optimum NPK could make stable and sustainable rice production.

Keywords : Long-term experiment, Rice, Soil chemical property, Yield index, Yield

작물의 생산성은 기상조건, 품종, 재배관리, 토양비옥도에 크게 좌우된다. 우리나라의 벼 재배면적은 2000년 107만ha에서 매년 감소하여 2014년에는 81만ha로 감소하였다. 그러나 단위면적당 생산성은 증가하는 추세인데 이는 고품질 다수확 품종의 보급, 벼 재배기술의 발달 및 토양비옥도 향상이 기여한 바로 보인다(Kang *et al.*, 2012). 쌀 수량성은 기상조건과 품종요인을 제외하면 시비, 물, 이앙시기 조절 등 재배관리와 토양 비옥도에 의한 영향이 매우 크다. 그러나 작물의 재배시험은 환경 변화에 의한 영향이 크고, 비료 시험의 경우 잔효 효과가 있어 재현성있는 결과를 얻기 힘든 경우가 많아 반드시 연차 간 반복시험을 필요로 한다(NIAST, 2004). 특히 양분과 토양이 작물의 생산성에 미치는 영향은 매우 장기적인 관찰을 필요로 한다. 우리나라에

서 가장 오래된 장기연용시험은 국립농업과학원에서 1954년부터 이어져 오고 있으며, 국립식량과학원 호남농업연구소에서는 1979년부터, 국립식량과학원 영남농업연구소에서는 1967년부터 시작되었으며 경상북도 농업기술원에서도 1975년부터 수행되어오고 있다(NIAST, 2004). 장기시험 중 가장 오래된 시험은 최초의 합성비료공장을 설립한 Lawes에 의해 설립된 영국의 Rothamsted long-term experiment로 1843년에 시작되어 170년이 지난 현재도 진행 중이다(Jenkinson, 1989). 미국에서도 1876년부터 시작된 장기시험포장을 포함해 1990년대까지 60년 넘게 지속된 포장 12지점이며 40년 이상 유지된 포장은 25지점에 달한다고 한다(Mitchell *et al.*, 1991). 초기의 장기시험들은 주로 각 양분요소들의 요구량을 밝히기 위한 목적으로 시작되었으며, 점차 안정적

¹농촌진흥청 54875 전라북도 완산구 농생명로 300 (Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea)

²국립식량과학원, 전북 완주군 이서면 혁신로 181 (National Institute of Crop Science, RDA, Jeonbuk 565-851, Korea)

³국립식량과학원, 441-857, 경기도 수원시 권선구 수인로 125 (National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea)

[†]Corresponding author: Jiyoung Shon; (Phone) +82-31-695-4132; (E-mail) olive1001@korea.kr

<Received 30 August, 2015; Revised 21 December, 2015; Accepted 3 February, 2016>

인 생산성유지와 작물재배에 의한 지력 변화연구를 목적으로 연구되어왔다. 최근에는 지속농업에 관심이 커져 토양의 물리성개선과 유기물함량을 높이기 위해 화학비료와 함께 퇴비, 녹비, 작부체계 등을 조합한 실험이 이루어지고 있다(Mitchell *et al.*, 1991).

장기연용시험으로 밝혀진 질소, 인산, 칼리와 같은 화학비료의 적절한 조합은 밀, 옥수수, 콩, 벼 등 작물의 수량을 평균 30~50% 증가시켰다고 한다(Stewart *et al.*, 2005). 외국의 장기시험 보고는 장기간 작물의 수량과 토양성분변화를 모니터링한 보고가 있으나(Dobermann *et al.*, 2000; Dong *et al.*, 2012; Miao *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2010), 국내의 장기시험보고는 대부분 장기시험포장에서의 특정년도에 시험한 보고이며(Han *et al.*, 1991; Kim and Choi, 2002), 장기시험에 대한 보고(NIAST, 2004)와 분석(Lee *et al.*, 2006)은 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 국립식량과학원 수원에서 1978년부터 2008년까지 수행된 31년간의 동일비료 장기 연용시험의 결과를 모니터링하고 비료처리가 쌀 수량과 토양의 화학성분의 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

재료 및 방법

비료 처리 방법

본 시험은 수원의 국립식량과학원에서 1978년부터 2008년까지의 31년간 벼 동일비료 시험포장에서 수행되었다. 시험포장은 사질양토로 배수가 매우 잘되는 토양이었다. 비료처리는 모두 8가지로 무비(F0), 무질소(PK), 무인산(NK),

무칼리(NP), 질소-인산-칼리 3요소(NPK), 3요소와 퇴비(NPKC), 3요소와 생고(NPKS), 3요소와 석회(NPKL)가 매년 동일하게 처리되었다. 비료처리량은 1978년부터 1990년까지 질소, 인산, 칼리를 각 각 10, 6, 9 kg/10a를 사용하였으나, 1991년부터 질소, 인산, 칼리가 각 각 11, 7, 8 kg/10a으로 사용되었다. 이후 2006년부터는 인산, 칼리가 각 각 4.5, 5.7 kg/10a으로 변경되었다(Table 1). 퇴비와 생고 및 석회는 각 각 1000, 750, 360 kg/10a를 처리하였다(Table 1). 질소, 인산, 칼리는 각 각 요소, 용성인비, 염화칼리 형태로 사용하였다. 시비방법은 질소는 기비, 분얼비, 수비를 5:2:3의 비율로 분시하였고, 인산은 전량 기비로, 칼리는 기비와 수비를 7:3의 비율로 분시하였다. 퇴비와 생고(볏짚), 석회는 매년 봄 경운하기 한 달 전에 처리하였다.

시험품종 및 재배방법

시험품종은 1978~1990년에는 진흥벼가, 1991~2008년까지는 일품벼가 재배되었다. 이앙시기는 1978~1990년까지는 6월 5일이었으며, 1991~2008년에는 5월 25일이었다. 재식거리는 30×15 cm였으며, 주당본수는 1968~1990년까지는 주당 5본씩, 1991년부터는 주당 3본씩으로 손이양하였다.

쌀 수량조사는 농촌진흥청 시험연구조사기준법에 준하여 실시하였으며 모든 처리구의 수량은 3반복구로 조사하였다. 다만 시험기간 중 1989년부터 1995년까지 7년간의 수량데이터가 누락되었는데 이 기간동안 공식적인 연구과제에 포함되지 않아 수량보고기록이 없었기 때문이다. 그러나 이 기간동안 각 처리구의 비료처리 및 시험 품종은 동일하게 유지되었다.

Table 1. Fertilizer treatments in the paddy from 1978 to 2008.

Treatments (Year)	Amounts of fertilizer (kg/10a)										
	N		P ₂ O ₅			K ₂ O			Compost	Straw	Lime
	1978~ 1990	1991~ 2008	1978~ 1990	1991~ 2005	2006~ 2008	1978~ 1990	1991~ 2005	2006~ 2008	1978~ 2008	1978~ 2008	1978~ 2008
F0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PK	-	-	6	7	4.5	9	8	5.7	-	-	-
NK	10	11	-	-	-	9	8	5.7	-	-	-
NP	10	11	6	7	4.5	-	-	-	-	-	-
NPK	10	11	6	7	4.5	9	8	5.7	-	-	-
NPKC	10	11	6	7	4.5	9	8	5.7	1,000	-	-
NPKS	10	11	6	7	4.5	9	8	5.7	-	750	-
NPKL	10	11	6	7	4.5	9	8	5.7	-	-	360

- : Fertilizer was not treated in each treatment plot.

토양 화학성분분석

토양의 화학성 분석은 당해연도 시험처리 전 표토에서 약 10 cm 깊이의 토양을 auger로 채취하여 그늘에서 건조시킨 후 분쇄하여 분석에 사용하였다. 분석항목은 토양 pH, 유기물(OM), 인산, 치환성 양이온인 K, Mg, Ca으로 농촌진흥청 토양화학분석법(NAAS, 2010)에 따라 수행하였다. 토양 성분 분석은 1981년부터 시작되었으나 모든 항목을 조사한 시기는 1981~1984년과 2006~2008년이었으므로 두 시기의 평균값을 비교하여 토양의 변화를 살펴보았다.

통계분석

처리간 평균 차이는 Duncan다중검정(DMRT)으로, 처리

별 수량과 연차간 변이의 상관계수로 추세를 분석하였고 통계프로그램은 SPSS 19.0을 사용하여 분석하였다.

결 과

비료연용에 따른 쌀 수량 및 수량지수 변화

1978년부터 2008년까지 31년간 8가지의 비료처리(F0, PK, NK, NP, NPK, NPKC, NPKS, NPKL)를 해마다 동일한 포장에 사용하였을 때, 각 처리에 따른 쌀 수량 변화는 Table 2와 같았다. 처리별 평균수량은 F0 (무비)의 수량이 가장 낮았으며 PK (무질소), NK (무인산), NP (무칼리), NPK (3요소), NPKS (3요소와 생고), NPKC (3요소, 퇴비) 처리구

Table 2. Average rice yield and yield index from 1978 to 2008 in the long-term fertilizer experiment at Suwon, Korea.

Year	Yield (kg/10a)								Yield Index [†]							
	F0	PK	NK	NP	NPK	NPKC	NPKS	NPKL	F0	PK	NK	NP	NPK	NPKC	NPKS	NPKL
1978	255	329	397	450	451	492	493	477	0.57	0.73	0.88	1.00	1.00	1.09	1.09	1.06
1979	189	186	294	281	370	455	491	399	0.51	0.50	0.80	0.76	1.00	1.23	1.33	1.08
1980	230	231	224	275	266	379	417	290	0.87	0.87	0.84	1.03	1.00	1.43	1.57	1.09
1981	239	238	450	458	497	472	524	479	0.48	0.48	0.91	0.92	1.00	0.95	1.06	0.96
1982	257	253	408	457	460	513	471	459	0.56	0.55	0.89	0.99	1.00	1.12	1.02	1.00
1983	327	352	426	459	474	504	533	504	0.69	0.74	0.90	0.97	1.00	1.06	1.12	1.06
1984	289	336	466	482	497	523	533	504	0.58	0.68	0.94	0.97	1.00	1.05	1.07	1.01
1985	213	285	347	489	499	517	525	446	0.43	0.57	0.70	0.98	1.00	1.04	1.05	0.89
1986	191	228	413	468	470	489	520	443	0.41	0.49	0.88	1.00	1.00	1.04	1.11	0.94
1987	214	246	413	455	460	493	494	420	0.47	0.53	0.90	0.99	1.00	1.07	1.07	0.91
1988	237	304	443	508	523	590	575	506	0.45	0.58	0.85	0.97	1.00	1.13	1.10	0.97
1996	281	234	372	405	427	472	484	439	0.66	0.55	0.87	0.95	1.00	1.11	1.13	1.03
1997	314	355	436	480	492	599	544	507	0.64	0.72	0.89	0.98	1.00	1.22	1.11	1.03
1998	239	291	447	497	511	623	573	543	0.47	0.57	0.87	0.97	1.00	1.22	1.12	1.06
1999	216	317	317	452	500	620	513	467	0.43	0.63	0.63	0.90	1.00	1.24	1.03	0.93
2000	229	356	348	456	363	471	429	418	0.63	0.77	0.96	1.26	1.00	1.30	1.18	1.15
2001	234	353	479	501	504	585	501	488	0.46	0.70	0.95	0.99	1.00	1.16	0.99	0.97
2002	169	225	363	419	422	465	390	375	0.40	0.53	0.86	0.99	1.00	1.10	0.92	0.89
2003	135	264	360	408	418	554	466	494	0.32	0.63	0.86	0.98	1.00	1.33	1.11	1.18
2004	250	266	468	455	549	659	570	499	0.46	0.48	0.85	0.83	1.00	1.20	1.04	0.91
2005	229	289	432	490	476	618	574	518	0.48	0.61	0.91	1.03	1.00	1.30	1.21	1.09
2006	215	209	416	539	526	591	531	623	0.41	0.40	0.79	1.02	1.00	1.12	1.01	1.18
2007	270	354	368	430	461	589	514	454	0.59	0.77	0.80	0.93	1.00	1.28	1.11	0.98
2008	115	282	326	396	354	558	445	385	0.47	0.73	0.89	1.06	1.00	1.54	1.06	0.91
Mean	231a	283b	392c	446d	457d	535e	505e	464d	0.52a	0.61b	0.86c	0.98d	1.0d	1.18f	1.11e	1.01d

Different letters in a mean column indicate a significant difference in means at $\alpha=0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

[†]Yield index represent the ratio of yield in each treatment to NPK.

Yield data from 1989 to 1995 are not recorded in official report, but all treatments were maintained in the same way.

순으로 수량이 높았다. NP와 NPKL (3요소와 석회)는 NPK와 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Table 2).

NPK (3요소) 대비 처리별 평균 수량지수를 보면, 무비(F0)처리는 NPK에 비해 0.52로 가장 낮았고 PK와 NK, NP는 각각 0.61, 0.86, 0.98이었다. NPKL의 수량지수는 NPK와 차이가 없었고, NPKS와 NPKC의 수량지수는 각각 1.11, 1.18로 퇴비구가 생고처리구보다 높았다(Table 2).

처리에 따른 쌀수량의 변화를 보면(Fig. 1), 상대적으로 수량이 낮은 무비구와 무질소구의 연차간 변이가 다른 처리에 비해 크게 나타났다. 동일한 비료처리가 장기간 지속

될 경우 쌀 수량에 미치는 영향은 F0는 영향이 없었고, PK, NK, NP, NPK, NPKL, NPKS는 모두 기간이 경과할수록 수량이 증가하는 양상으로 보이나 연차간 변이가 크고 영향이 미미해 통계적으로 유의성이 없었다. 다만 NPKC만이 처리기간이 경과할수록 수량이 증가하는 양상을 보였다(Fig. 1). 연차간 수량 변이는 기상 영향이 크므로 기상 영향에 의한 영향을 배제하고 처리에 의한 효과를 보기위해 3요소(NPK)처리구를 기준으로 수량지수를 비교해 보았다(Fig. 2). 수량지수의 변화는 쌀 수량에 비해 변이가 크게 줄어들어 처리별 수량차이가 좀 더 분명해졌다. 퇴비구는 수량지

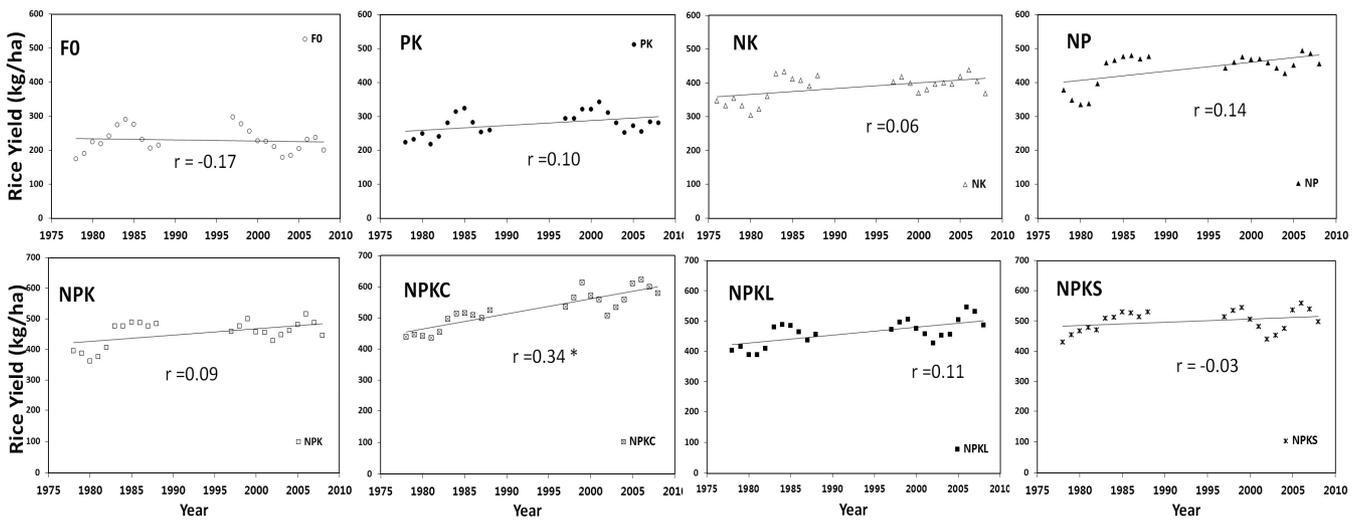


Fig. 1. Changes in rice yield from 1978 to 2008 treated with F0 (no fertilizer), PK, NK, NP, NPKC, NPKS and NPKL.

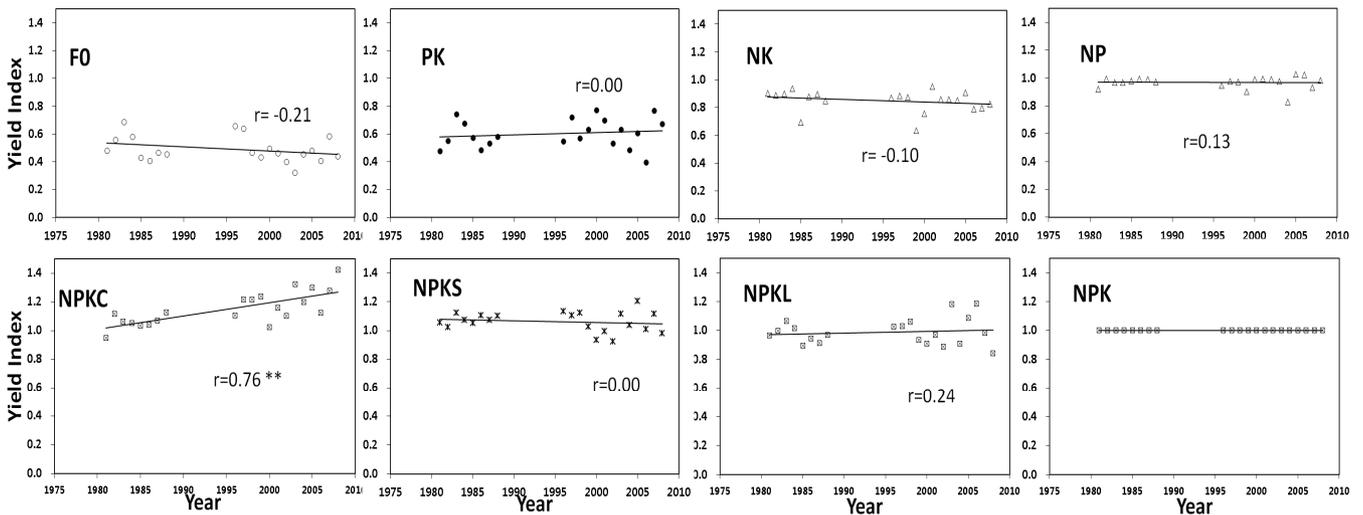


Fig. 2. Changes in rice yield index of each treatment to NPK by long-term fertilizer experiments from 1978 to 2008. F0: no fertilizer, PK: PK without N, NK: NK without P, NP: NP without K, NPKC: NPK with compost, NPKS : NPK with straw, NPKL : NPK with lime.

수가 유의하게 증가하는 양상을 보였고, 무비구와 무인산구는 감소하는 경향이었으나 유의성이 없었으며, 나머지 처리구는 수량지수가 거의 일정하게 나타나 장기처리효과는 없는 것으로 나타났다.

비료연용에 따른 토양 화학성 변화

장기시험 포장의 토양분석은 1981~1984년과 2006~2008년간 두 시점의 3개년 평균 값으로 30여년간의 비료 처리에 따른 토양 성분의 변화를 비교하였다(Fig. 3). 토양의 pH는 초기에는 NPKL를 제외한 모든 처리구의 pH가 5.2~5.7

로 약산성을 나타내었으나, 후기에는 모든 처리구의 pH가 증가하여 pH 6.3~6.8의 분포를 나타냈다. NPK가 pH 5.9로 다른 처리에 비해 약간 낮았으며 NPKL는 pH7.9까지 증가하여 약알칼리성을 띄었다.

토양 유기물함량은 초기에는 NPKC와 NPKS가 모두 1.8%로 다른 처리들의 1.3~1.4%에 비해 약간 높았으나, 후기에는 NPKC만 2.5%까지 증가하였고 다른 처리는 모두 초기와 비교해 유의한 차이가 없었다.

토양의 유효인산농도는 모든 처리구에서 초기보다 후기에 증가하였으며, PK와 NPKC의 인산농도는 초기(46, 49

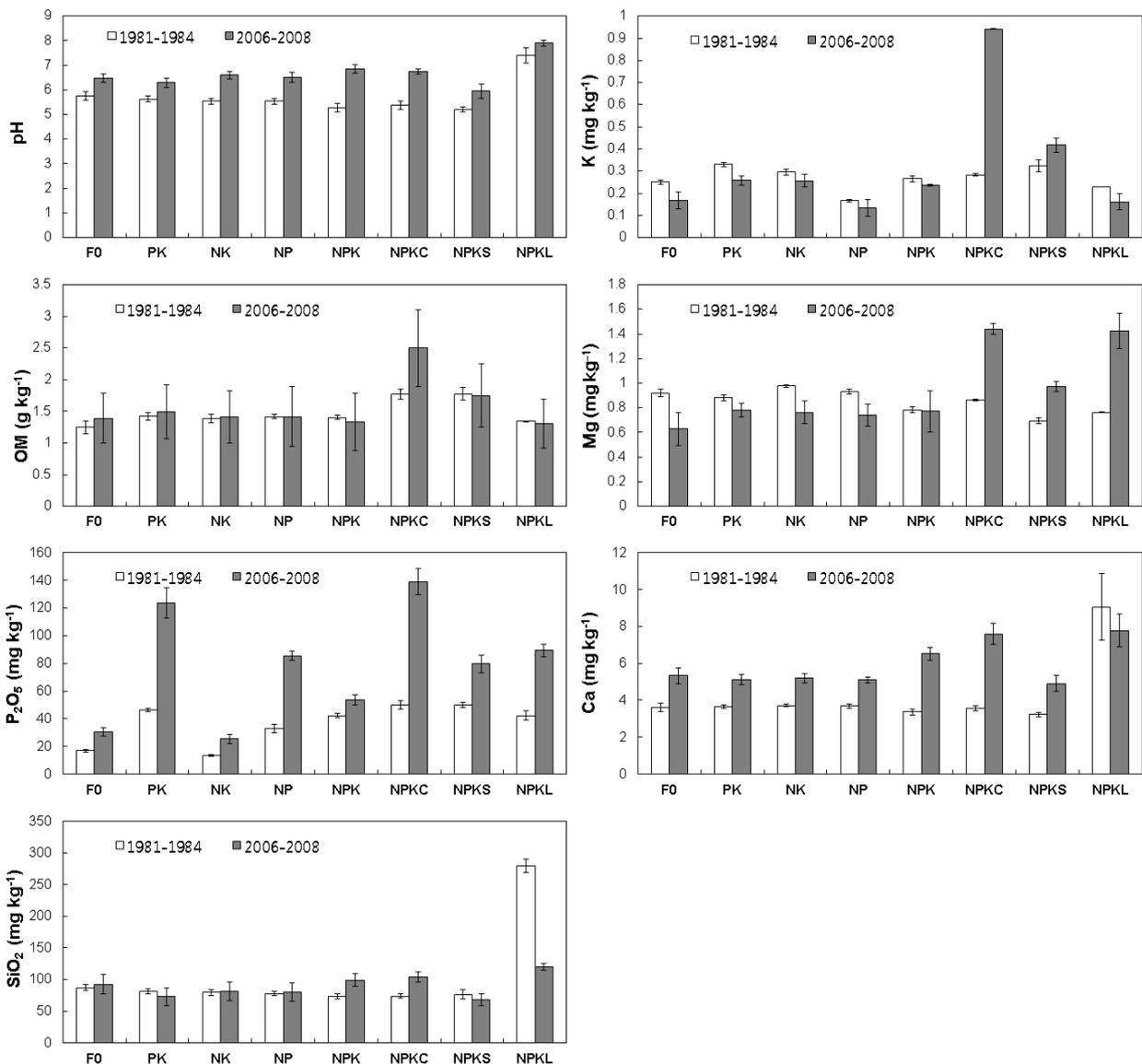


Fig. 3. Changes in soil chemical properties between the average earliest 3 years ('81~'84) and the average latest 3 years ('06~'08) under long-term fertilizer treatment. Errors bars are ± S.E.. F0: no fertilizer, PK: PK without N, NK: NK without P, NP: NP without K, NPKC: NPK with compost, NPKS : NPK with straw, NPKL : NPK with lime.

mg·kg⁻¹)보다 세 배 가까이(123, 139 mg·kg⁻¹) 증가하였으며, NP와 NPKL에서도 두 배 정도 증가한 85, 89 mg·kg⁻¹으로 나타났다. 인산을 처리하지 않은 F0와 NK처리구는 초기 17, 13.5 mg·kg⁻¹에서 30, 35 mg·kg⁻¹으로 증가해 다른 처리구에 비해 농도는 매우 낮았지만 유의하게 증가하였다.

토양 중 유효규산함량은 73~87 mg·kg⁻¹ 내외로 처리 간 차이가 거의 없었으나, NPKL의 규산함량이 다른 처리에 비해 비교적 높았다. 장기연용에 따른 유효규산함량의 변화는 3요소구(NPK)와 퇴비구(NPKC)에서 약간 증가하였으나 다른 처리에서는 차이가 없었다.

치환성양이온인 칼륨과 마그네슘 함량은 초기보다 후기에 약간 감소한 경향이었으며, 칼륨은 NPKC와 NPKS에서 크게 증가하였고 마그네슘은 NPKC와 NPKS, NPKL에서 증가하였다. 치환성 칼슘함량은 NPKL가 9 cmol.kg⁻¹로 다른 처리구의 3.2~3.6 cmol.kg⁻¹보다 2배 이상 높았으며, 후기에는 모든 처리에서 증가하였는데, 특히 3요소와 퇴비구의 증가폭이 컸다.

고 찰

논에 장기간 동일한 비료를 연용 처리하면서 수량변화를 보면 연차간 변이는 크지만, 각 처리별 증감양상은 비슷하였다. 연차간 변이는 기상이나 환경에 의한 영향이 크므로, 이에 대한 변이를 줄이기 위해 기준 처리대비 수량지수를 보면 비료처리에 의한 효과로 볼 수 있다. NPK대비 처리별 수량지수의 변화는 30년간 거의 일정하거나 변화의 기울기가 낮아, 비료 처리에 따른 효과가 매우 뚜렷함을 알 수 있었다. 비료를 전혀 처리하지 않을 경우 NPK에 비해 수량지수가 0.52로 NPK처리가 무비에 비해 두 배 정도 수량을 증가시키는 효과가 있음을 알 수 있었다. 3요소 중 N, P, K의 개별 성분이 결핍된 처리구에서는 질소 결핍이 수량에 미치는 영향이 가장 크고, 칼리의 효과가 가장 낮았다(Table 2). Stewart *et al.* (2005)는 미국과 영국의 여러 장기연용시험 결과를 분석한 결과, 화학비료(질소-인산-칼리)를 적절한 조합으로 처리할 경우 밀, 옥수수, 콩, 벼 등 작물의 수량을 평균 30~50% 증가시킨다고 하였는데 벼에서의 3요소 비료효과가 타작물보다 높은 것으로 판단된다.

F0와 NK는 미미하였지만 장기연용에 의해 수량이 감소하는 경향이었는데, 하성충적지 토양인 영남농업연구소의 장기시험에서도 무비구와 무인산구의 수량이 감소하였고 보고되었으며(NIAST, 2004), 미사질양토인 남양간척지의 장기연용시험에서도 무인산구의 수량지수는 감소하는

경향이라고 하였다(Lee *et al.*, 2006). 따라서 장기적으로 인산이 결핍될 경우 벼 수량을 감소시키는 요인으로 작용하는 것으로 생각된다. 그러나 NPK 및 PK, NP, NPKL은 모두 장기연용 할 경우 수량지수의 차이가 거의 없는 것으로 보아 인산을 제외한 화학비료와 석회는 장기 연용해도 누적 효과가 발생하지 않는 것으로 생각된다.

본 시험에서 장기적으로 수량지수가 유의하게 증가한 처리구는 NPKC 뿐이었다(Fig. 2). 영남농업연구소의 장기시험에서도 퇴비단용 또는 퇴비와 3요소 처리의 수량지수만 유의하게 증가한 것으로 보고되었다(NIAST, 2004). 생고 처리는 3요소에 비해 수량은 높았지만 장기연용에 따른 효과는 없는 것으로 나타났다.

장기연용에 의한 토양화학성의 변화를 보면, 본 시험에서 동일 비료를 30년간 장기연용할 경우 pH는 다소 증가하였지만 6.3~6.8의 분포를 보여 논 토양의 적정산도인 pH 5.5~6.5범위(NAAS, 2010; Kang *et al.*, 2012) 내에서 완충 작용을 하는 것으로 생각된다. 그러나 석회를 장기연용할 경우 토양산도는 pH 7.9까지 증가하여 적정 산도보다 오히려 높아 벼 생육에 부정적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각되었다. 앞에서도 기술하였듯이, 석회는 장기연용하더라도 수량지수에 영향을 주지 않았는데, 본 시험이 수행된 포장과 동일한 사질논토양의 장기연용시험구(농과원)에서도 장기간의 석회시용이 수량에 미치는 효과는 없다고 하였다(NIAST, 2004). 이는 석회 처리가 적정범위보다 낮은 산도의 토양을 단기간에 개선시키고자 할 경우 유효하나 장기간 처리가 토양 화학성 개선과 수량에 미치는 효과가 없는 것으로 생각된다.

논 토양의 적정 유기물 함량은 2.5~3%인데(NAAS, 2010), 퇴비구를 제외한 나머지 처리 모두 1.3~1.4%로 시험초기와 유의한 차이가 없었으며 적정 유기물 농도보다 50% 정도 부족한 것으로 나타났다. 논 토양의 유기물 함량을 증가시키기 위한 방법으로 볏짚시용의 효과도 큰 것으로 알려져 있지만, 본 결과에서 볏짚은 퇴비보다 유기물 증가효과가 낮은 것으로 나타났다. 유기물을 25년간 장기처리한 시험에서(영남농업연구소 장기연용시험), 부숙시킨 볏짚과 퇴비를 함께 시용한 처리구의 유기물함량 및 쌀수량이 가장 높았고 전년도 11월에 볏짚을 시용한 경우는 이보다 유기물함량과 쌀수량이 낮았다고 하였다(NIAST, 2004). 또 Lee *et al.* (2006)도 남양간척지 장기시험의 생고처리구의 수량지수가 일정하다고 하였다. Dong *et al.* (2012)의 보고에서도 볏짚과 녹비, 유기물퇴비를 10년간 처리한 경우, 유기물함량은 퇴비처리에서 0.7%증가하였으나 볏짚과 녹비처리 는 3요소처리보다 낮았다. 따라서 볏짚은 퇴비에 비해 유기

물 증가효과가 낮으며, 부숙정도에 따라 유기물 효과가 다르므로, 토양 개량 효과를 높이려면 부숙을 잘 시켜 사용해 토양개량 효과를 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

인산의 장기연용은 토양의 유효인산농도를 크게 증가시키는 것으로 나타났다. 토양의 유효인산 함량은 초기에는 적정농도보다 절반 이하였지만 30여년간 동일 비료를 장기 연용한 모든 처리구에서 유효인산농도가 증가하였고, 무칼리구와 생고, 석회처리구는 약 2배인 79~89 mg·kg⁻¹로 증가하였고 무질소구와 퇴비구는 120~140 mg·kg⁻¹까지 증가하였다(Fig. 3). 논 토양의 적정 유효인산농도는 80~120 mg·kg⁻¹로 제시되었는데(NAAS, 2010), 인산은 부족할 경우 무인산구에서와 같이 수량이 감소하지만, 과다할 경우에도 질소와 철분 흡수를 방해해서 생장이 저해되므로 화학비료를 장기간 연용하거나 인산이 포함된 퇴비를 장기간 연용할 경우 토양검정을 통해 시비량을 조절해야 할 것으로 생각된다.

토양의 치환성 칼륨 함량은 퇴비구와 생고구를 제외하고 모두 처리 초기보다 감소하였는데, 이는 칼리 시비량이 9 kg/10a (1968~1990)에서 4.5 kg/10a (2006~2008)로 낮아진 결과로 인산과 달리 토양흡착성이 없어 처리수준에 따른 조절이 즉각적으로 나타난 것으로 생각된다. 치환성 칼륨의 적정범위는 0.25~0.30 cmolc kg⁻¹이지만(NAAS, 2010), 퇴비구와 생고처리구의 치환성 칼륨함량은 각각 0.9, 0.4 cmolc kg⁻¹로 다른 처리구의 함량(0.16~0.25 cmolc kg⁻¹)에 비해 2~3배 이상 높은 수치를 보였다. NIAST (2004)의 보고에서도 퇴비처리구의 칼륨함량이 높다고 보고되어 본 시험과 동일한 결과였는데 이는 퇴비에 포함된 칼륨함량이 높기 때문으로 생각된다. 무칼리구의 치환성 칼륨 함량은 0.13 cmolc kg⁻¹으로 적정농도에 비해 50%정도 낮았지만, 3요소 대비 수량지수가 96%인 것으로 보아, 칼리 결핍에 의한 수량 저하 효과는 매우 낮은 것으로 나타났다.

토양의 치환성 칼슘함량은 장기시험의 모든 처리구에서 초기보다 증가하였다. 석회처리구는 초기에 9 molc kg⁻¹로 다른 처리에 비해 3배 정도 높았으나, 장기 연용 후에도 유의한 차이가 없어 일정 수준에서 더 이상 증가하지 않았음을 알 수 있었다. 논 토양의 치환성칼슘의 적정범위는 5.0~6.0molc kg⁻¹로 보고되었는데(NAAS, 2010), 석회를 별도로 처리하지 않더라도 논에 벼 재배를 장기간 유지할 경우 칼슘 함량은 적정범위로 증가하였음을 알 수 있었다. 오히려 석회를 장기간 처리할 경우에는 토양산도가 지나치게 증가하고 칼슘농도도 적정범위보다 지나치게 높아져 석회의 장기연용은 토양화학성을 나쁘게 하는 것으로 생각된다.

비료 장기연용에 따른 토양의 유효규산 함량이 유의하게

증가한 처리구는 3요소와 퇴비처리구였으며 다른 처리는 유의한 차이가 없었다. 규산은 따로 사용하지 않았기 때문에 생육이 왕성했던 3요소와 퇴비구에서 벼 그루터기와 뿌리 등의 잔여식물체의 규산성분이 축적된 것으로 생각된다. 적정 유효규산 농도는 157~180 mg kg⁻¹이지만 처리별 농도는 67~119 mg kg⁻¹으로 적정범위보다 낮았다.

종합하면 화학비료인 질소-인산-칼리 3요소를 사용할 경우에도 안정적인 수량확보가 가능하였지만 토양 유기물 함량은 거의 증가하지 않아 토양 성분 개선 효과는 미미하였다. Han *et al.* (1991), Kim and Choi (2002), Dong *et al.* (2012) 등도 화학비료는 토양의 물리성과 유기물함량을 증가시키지 못한다고 하였다. 퇴비를 장기처리할 경우 유기물함량이 증가되며 수량지수를 점진적으로 증가시켜 지속농업이 가능한 것으로 생각된다. Miao *et al.* (2011)는 화학비료를 과용할 경우 영양불균형이 심해지고 환경오염을 유발하지만 적정량의 화학비료와 퇴비를 사용할 경우 환경오염을 줄이고 지속농업이 가능하다고 하였다. 다만 유기물 사용시 퇴비나 생고, 석회를 장기간 연용할 경우 유효인산이나 칼륨농도가 지나치게 과다해질 수 있으므로 적절한 시비 처방을 통해 조절해야 할 것으로 생각된다. 우리나라는 사양토가 많고 유기물이 부족한 편으로 유기물 투입을 위한 동절기 녹비작물 재배확대 및 벧짚시용을 장려한 결과 최근 유기물함량이 증가하고 토양 화학성이 개선되고 있는 것으로 보고되고 있으나 인산농도는 지나치게 높은 곳이 많은 것으로 보고되었다(Kang *et al.*, 2012). 따라서 벼에서는 수량 뿐 아니라 미질향상을 위해서도 화학비료와 유기물의 적절한 시비가 중요하므로 벼 최적생산에 알맞은 시비처방과 토양관리가 필요하다고 생각된다.

적 요

1978년부터 2008년까지 31년간 국립식량과학원 수원소재 답작시험포장에서 동일 비료 장기연용의 의한 벼의 수량과 토양의 화학성에 미치는 영향을 시험한 결과 다음과 같았다.

1. 비료 연용처리에 따른 쌀 수량은 무비<무질소(PK)<무인산(NK)<무칼리(NP) ≤ 3요소(NPK) ≤ 석회(NPKL) <생고(NPKS) ≤ 퇴비(NPKC) 순으로 높았다.
2. 3요소(NPK)대비 수량지수는 무비구가 0.52로 가장 낮았으며, NPKS와 NPKC가 각각 1.11, 1.18로 NPK보다 높았다. PK, NK, NP는 각각 0.61, 0.86, 0.98로 3요소 중 질소가 수량에 미치는 영향이 가장 컸으며 칼

리의 영향이 가장 낮았다. NPKL은 NPK와 수량지수의 차이가 없었다.

- 3. NPKC는 기간이 경과할수록 수량과 수량지수가 모두 증가하였으며, NK와 F0의 수량지수는 감소하는 경향이었으나 유의성은 없었다. 그 외 PK, NK, NP, NPK, NPKS, NPKL의 수량지수는 모두 기간에 따른 변동이 없었다.
- 4. 토양의 유기물 함량은 NPKC는 적정유기물함량 수준인 2.5%까지 증가하였으나, NPKS는 1.8%에서 이들을 제외한 다른 처리는 1.3~1.4%로 초기와 차이가 없었다.
- 5. 토양의 유효인산 함량은 모든 인산 처리구에서 증가하였으며 특히 무질소구와 퇴비구에서 가장 높았다.
- 6. 석회처리구를 장기연용할 경우 토양 pH가 7.9까지 증가하여 논토양의 적정 산도보다 높아졌다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 작물시험연구사업(ATIS 과제번호: PJ00920302)의 지원에 의해 수행되었다.

인용문헌(REFERENCES)

Dobermann, A., D. D. Reimund, P. Roetter, and K. G. Cassman. 2000. Reversal of rice yield in a long-term continuous cropping experiment. *Agron. J.* 92 : 633-643.

Dong, W., X. Zhang, H. Wang, X. Dai, X. Sun, W. Qiu, and F. Yang. 2012. Effect of different fertilizer application on the soil fertility of paddy soils in red soil region of southern China. *PLOS One*, 7(9) : 1-9.

Han, H. S., M. H. Lee, and J. S. Shim. 1991. Effects of long term fertilizations on growth, yield and grain development of rice. *Korean J. Crop Sci.* 36(1) : 41-51.

Jenkinson, D. S. 1989. The Rothamsted long-term experiments: Are they still of use?. *Americal Soc. Agronomy* 83(1) : 2-10.

Kang, S., A. Roh, S. Choi, Y. Kim, H. Kim, and M. Choi et al. 2012. Status and changes in chemical properties of paddy soil in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6) : 968-972.

Kim, C. and J. Choi. 2002. Changes in rice yield, nutrients use efficiency and soil chemical properties as affected by annual application of slag silicate fertilizer. *Korean J. Soil Sci. Fertilizer* 35(5) : 280-289.

Lee, C.-K., S.-B. Lee, K.-J. Choi, T.-S. Park, and J.-C. Shin. 2006. Effect of long-term fertilizing on change of rice yield and soil chemical properties at reclaimed saline paddy filed. *Treat. of Crop Sci.* Vol. 7 : 373-382.

Miao, Y., B. A. Stewart, and F. Zhang. 2011. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A riview. *Agron. Sustain. Dev.* 31 : 397-414.

Mitchell, C. C., R. L. Westerman, J. R. Brown, and T. R. Peck. 1991. Overview of long-term agronomic research. *Agron. J.* 83 : 24-29.

NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. Fertilization standard of crop. Rural Development Administration. Korea.

NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2004. Digest of studies on the long-term fertilization experiments of Korea. p. 105.

Stewart, W. M., D. W. Dibb, A. E. Johnston, and T. J. Smyth. 2005. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy J.* 97(1) : 1-6.

Wang, D., C. Wang, and G. Zhang. 2010. Long-term fertilization effects on grain yield and soil fertility in the paddy soil of Yangtse Delta in China. 19th World Congress of Soil Science, 1-6 August 2010. Published in DVD. pp. 23-25.