

비료와 토양개량제가 장기 연용된 논토양에서의 유효규산 변동과 벼 수량

김명숙* · 김유학 · 현병근 · 양재의¹ · 장용선 · 윤홍배 · 손연규 · 이예진 · 하상건

국립농업과학원, ¹강원대학교 바이오자원생물학과

Rice Yield and Changes of Available Silicate in Paddy Soils from Long-term Application of Chemical Fertilizers and Soil Amendments

Myung-Sook Kim*, Yoo-Hak Kim, Byung-Keun Hyun, Jae-E Yang¹, Yong-Seon Zhang, Hong-Bae Yun, Yeon-Kyu Sonn, Ye-Jin Lee, and Sang-Keun Ha

National Academy of Agricultural Science, Suwon 441-707, Korea

¹Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chunchon, Korea

The changes of available silicate (Avail. SiO₂) contents in paddy soils (sandy loam) were assessed from data of the 41 years fertilization plots in which the continuous rice cropping experiment started in 1954 at the National Academy of Agricultural Science. The treatments were no fertilization (O), inorganic fertilization (NPK), inorganic fertilizer plus rice straw compost (NPK+C), inorganic fertilizer plus silicate fertilizer as a soil amendment (NPK+S), inorganic fertilizer plus rice straw compost and silicate fertilizer (NPK+CS) and inorganic fertilizer plus rice straw compost, silicate fertilizer and lime (NPK+CSL). Available silicate contents in NPK+S, NPK+CS and NPK in surface soil reached at the highest content (255~330 mg kg⁻¹) after 41 years and then levelled off. Available silicate contents in subsurface soil (25~30 cm) were higher in NPK+C and NPK+S treatments than those in other treatments. Continuous application of silicate fertilizer affected significantly on the levels of available silicate in surface and subsurface soils. Silicate uptake of top rice was more increased by 98% in NPK+CS and NPK+CSL over NPK. Grain yield also increased by 37~47% in NPK+CS and NPK+CSL as compared to NPK. The combined applications of inorganic fertilizers with silicate as a soil amendment are recommended as the best fertilization practice for fertilizer use efficiency, enhancement of soil fertility status in the continuous rice cropping system in Korea.

Key words: Long-term application, Available silicate, Paddy soil, Rice yield, Silicate fertilizer

서 언

논 토양에서 유효규산 함량은 토양의 비옥도 및 건전성을 나타내는 토양의 질 (quality)에 중요한 지표이다 (Yoon et al., 2004). 규산은 silicic acid를 생성하는 벼, 사탕수수 와 같은 화본과 작물에겐 많이 필요한 물질로 작물의 수량을 크게 증대시키며 (Epstein, 1994), 특히 벼에 있어서는 도열병 저항성을 향상시킨다고 알려져 있다 (Gang, 2001; Jian et al., 2002; Lee and Park, 2010; Rodrigues, 2001; Seo et al., 2002).

규소는 지각에서 두 번째로 많은 원소로 토양의 50% 이상을 구성하고 있으며, 이러한 이유로 처음에는 관개수와 토양, 그리고 벼짚으로 공급하는 규산의 양만으로 벼가 필

요로 하는 규산을 충분히 흡수한다고 여겨졌다 (Jian and Eiichi, 2002). 그러나, 논에 벼짚퇴비의 투입량이 감소하고 쌀의 생산량을 더욱 증대시키기 위해 토양 중 규산의 함량이 높아져야 했고, 이로 말미암아 철강산업의 부산물인 광재 (slag)를 규산질비료로 투입하게 되었다. 이때부터 논 토양에서 규산질비료의 장기연용 효과에 관한 연구가 시작하게 되었다 (Jian and Eiichi, 2002). 일본에서는 20세기 초기에 (Jian and Eiichi, 2002), 우리나라에서는 20세기 중반부터 (NIAST, 2003) 장기연용 포장을 운영하였다.

규산질비료의 원료물질과 형태가 변경됨에 따라 규산의 공급력, 양분수지 등과 (Lee and Park, 2003; Seo et al., 2002; Song et al., 2007), 규산질비료의 장기연용 효과에 관한 연구가 (Kim et al., 1986; Kim et al., 1994; Park et al., 2000) 많이 이루어졌다. 이러한 연구를 통해 규산질비료의 효과가 입증되면서 정부에서는 1996년부터 규산질비료를 무상으로 공급하여 논토양에 규산질 비료의 사용량이

접수 : 2011. 11. 15 수리 : 2011. 12. 15

*연락처 : Phone: +82312900329

E-mail: msk74@korea.kr

증가하였고, 농토양의 유효규산 함량은 2007년에는 126 g kg⁻¹으로 1995년에 72 mg kg⁻¹보다 1.8배로 크게 증가하게 되었다 (RDA, 2003; Kim et al., 2010).

본 연구는 농토양의 건전한 질을 유지하면서 지속적인 작물생산성을 유지하기 위해 비료와 토양개량제를 장기적으로 사용한 농토양에서의 유효규산 함량의 변동과 벼 수량의 영향을 평가하고자 수행하였다.

재료 및 방법

시험포장 처리구의 특성 본 연구에 사용된 농토양은 1954년도에 경기도 수원시 권선구 서둔동 소재 국립작물과 학원 (현 국립식량과학원) 포장 내에 조성된 것으로, 하성평 탄지에 위치하며 유효토심은 보통으로 투수성이 빠르며 배수가 약간 양호하고, 토성은 사양질인 강서토이다. 1954년 당시의 토양 화학성은 pH 5.2, OM은 16 g kg⁻¹, Avail. P₂O₅ 함량은 120 mg kg⁻¹, Ex. K 함량이 0.08 cmol_c kg⁻¹으로 (Yeon, 2007), Avail. P₂O₅ 함량을 제외한 성분은 벼 생육을 위한 농토양 적정 비옥도에 기준 (NIAST, 2006)에 미치지 못하였다. 처리구는 완전 임의 배치법으로 모두 32개의 처리구로 구성되어 있고 (Yeon, 2007), 이 중에서 본 연구에서는 6개의 처리구를 분석에 이용하였다.

시험구별 비료처리와 벼의 품종 시험구별 비료처리는 Fig. 1에 나타내었다. 비료를 사용하지 않은 무비구 (No fert.), 표준 3요소구 (NPK, 3요소구)는 질소질 비료는 유안으로, 인산질 비료는 중과린산석회 (1954~1988), 과린산석회 (1989~

1993), 용과린 (1994~2009)을 각각 사용하였으며, 칼리질 비료는 염화가리를 사용하였다. 개량제 처리구는 표준 3요소+벧짚퇴비(NPK+C, 벧짚퇴비구), 표준 3요소+벧짚퇴비+규산 (NPK+CS, 규산+퇴비구), 특히 규산질비료는 1954~1989년도에는 규회석을 1990~2009년에는 규산질비료를 각각 사용하였다. 그리고 표준 3요소+벧짚퇴비+규산+소석회 (NPK+CSL, 종합개량구)를 처리하였다. 시비량은 벼 재배품종과 그에 따른 표준시비량이 달라짐에 따라서 질소는 75~170 kg ha⁻¹, 인산은 70~86 kg ha⁻¹, 가리는 75~86 kg ha⁻¹, 벧짚퇴비는 7.5 Mg ha⁻¹을 각각 사용하였다. 그리고 기비-분얼비-수비-실비의 분시비율은 질소는 50-20-20-10%, 가리는 70-0-30-0%로 2회, 인산, 퇴비, 석회, 그리고 규산은 전량 기비로 사용하였다 (Fig. 1). 토양개량제인 규산질 비료와 소석회 그리고 퇴비는 토양과 충분히 반응하도록 4월 중순에 미리 각각의 처리구에 살포하고 경운하였으며, 화학비료는 5월 하순에 담수하면서 사용하고 벼를 이앙하였다. 전년도에 수확 후 남아있는 벼의 그루터기와 뿌리는 경운 시 썩레질 할 때 토양에 그대로 환원되었다.

벼 품종은 팔달벼 (1954~1968), 진흥벼 (1969~1978), 밀양 23호 (1979~1985), 대청벼 (1986~2003), 삼광벼 (2004~2009)를 재배하였다 (Fig. 1).

토양채취 및 분석 토양 화학성의 장기적인 변동을 모니터링하기 위한 분석용 시료는 해마다 4월 초에서 중순 사이에 처리구당 0~15 cm 깊이로 3~7군데를 채취하고 혼합하여 분석하였다. 그리고 토양 깊이별 양분함량의 분포를 조사하기 위한 시료는 2009년 5월부터 8월까지 3회에 걸쳐

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	07	08	09
Rice cultivar	Paldael					Jinheoung					Milyang 23					Daechung					Samkwang																																			
N-P₂O₅-K₂O kg ha⁻¹	75-75-75					100-75-75					150-86-86					110-70-80																																								
N fertilizer	Ammonium sulphate																																																							
K fertilizer	Murate of potash																																																							
P fertilizer	Double superphosphate															Super phosphate					Fused and superphosphate																																			
Compost	Rice straw compost (7.5 Mg ha ⁻¹)																																																							
SiO₂ fertilizer											Calcium silicate (2 Mg ha ⁻¹),										Silicate fertilizer (2 Mg ha ⁻¹)																																			
Lime	Calcium hydroxide (Lime requirement equivalent pH 6.5)																																																							

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

Core sampler로 0~30 cm 깊이까지 5 cm 간격으로 채토하여 각각 분석하였다.

토양 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 측정하였고, 토양유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 720 nm에서, 유효규산은 1 M NaOAc (pH 4.0)용액으로 추출하여 700 nm에서 비색계 (U-3000, Hitachi)로 측정하였다. 치환성 양이온은 1 M NH₄OAc (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 유도결합 플라즈마 발광광도계 (ICP-OES, GBC)으로 측정하였다. Table 1에서 pH, OM, Avail. P₂O₅, Ex. K, Ex. Ca, Ex. Mg는 1954년부터 2009년까지 12년 간격으로 평균한 값으로 표시하였고, Figure 2에서 유효규산 함량은 1968년부터 2009년까지 5년간 이동평균한 값으로 나타내었다. 토양 깊이별 양분함량은 2009년 조사한 성적을 평균하여 표시하였다 (Fig. 3).

볏짚 및 정조의 조규산 함량은 건조 후 40 mesh로 분쇄하였고 시료를 0.5 g 칭량하고 conc. H₂SO₄을 10 mL와 50%의 HClO₄ 10 mL를 가하여 분해한 후 여과지에 남아있는 분

해 잔사물을 600°C의 전기로에서 6시간 동안 회화시키는 중량법으로 정량하였고 (NIAST, 20000), Figure 4에서 식물체 흡수량은 1987년부터 2009년까지의 흡수량을 평균한 값으로 표시하였다. 정조수량은 해마다 10월에 처리구 당 70 주씩 3반복으로 채취하여 탈곡한 후에 자연상태에서 건조한 후 수분함량 15% 전후일때를 기준하여 무게를 달아 조사하였고, Table 2에서의 수량은 1954년부터 2009년까지의 수량을 평균한 값으로 나타내었다.

결과 및 고찰

토양의 특성 처리구의 시기별 pH, 유기물, 유효인산, 치환성양이온 함량은 Table 1과 같다. pH와 치환성 칼슘 함량은 모든 처리구에서 증가하는 경향이였다. 25~36 년차에 일시적으로 pH가 감소하였는데, 이는 24년차 이전까지 사용해주었던 포장 근처의 서호수 (K+Ca+Mg+Na, 3.1 cmol_c kg⁻¹)에서 양이온 함량이 낮은 관정수 (K+Ca+Mg+Na, 1.7 cmol_c

Table 1. Mean pH, available phosphate and exchangeable cations in different periods.

Treatments	Periods	pH	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation		
					K	Ca	Mg
		(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹		
No fert.	I (1-12 years)	5.1d [†]	17a	123a	0.09a	2.7c	-
	II (13-24 years)	5.6bc	20b	85b	0.14a	3.3bc	0.7b
	III (25-36 years)	5.4c	21b	65c	0.13a	3.3bc	0.5c
	IV (37-48 years)	5.7b	21b	47d	0.11a	3.9ab	0.7ab
	V (49-56 years)	6.3a	19ab	32e	0.10a	4.5a	0.8a
NPK	I (1-12 years)	5.0c	-	150c	0.10a	2.9bc	-
	II (13-24 years)	5.4b	20a	186bc	0.15a	3.1bc	0.7a
	III (25-36 years)	5.1c	21ab	215ab	0.12a	2.7c	0.4b
	IV (37-48 years)	5.4b	22a	237a	0.11a	3.5ab	0.7a
	V (49-56 years)	5.8a	20bc	164c	0.12a	4.2a	0.8a
NPK+C	I (1-12 years)	5.1c	21a	162c	0.11a	4.0b	-
	II (13-24 years)	5.5b	25b	225b	0.16a	4.0b	0.9a
	III (25-36 years)	5.3bc	29c	291a	0.17a	3.7b	0.6b
	IV (37-48 years)	5.4b	33d	320a	0.15a	3.3ab	0.8a
	V (49-56 years)	5.9a	29c	195bc	0.13a	5.0a	0.9a
NPK+S	I (1-12 years)	-	-	-	-	-	-
	II (13-24 years)	6.1b	20ab	201a	0.13a	4.7b	0.6b
	III (25-36 years)	5.8b	22a	214a	0.13a	5.4b	0.4c
	IV (37-48 years)	6.1b	23a	220a	0.12a	5.6ab	0.9a
	V (49-56 years)	6.6a	21ab	154b	0.12a	6.6a	0.9a
NPK+CS	I (1-12 years)	-	-	-	-	-	-
	II (13-24 years)	6.0b	24a	217c	0.16a	6.0a	0.9b
	III (25-36 years)	6.0b	30b	266b	0.17a	6.7a	0.5c
	IV (37-48 years)	6.2b	31b	302a	0.14a	6.1a	0.9ab
	V (49-56 years)	6.5a	30b	212c	0.13a	7.1a	1.1a
NPK+CSL	I (1-12 years)	-	-	-	-	-	-
	II (13-24 years)	6.3b	25a	202c	0.14a	7.6a	1.1ab
	III (25-36 years)	6.3b	31b	246b	0.14a	8.4a	0.6c
	IV (37-48 years)	6.4b	34c	271a	0.16a	7.4a	1.0b
	V (49-56 years)	6.9a	31b	195c	0.14a	8.6a	1.3a

[†]Means in a column followed by the same letter were not significantly different at 5% level of DMRT.

kg⁻¹)로 변경하였기 때문이라 생각되며, 추후 검토가 더 필요하다. 유효인산은 인산비료가 투입되지 않은 무비구에서는 지속적으로 감소하였고, 무비구를 제외한 모든 처리구에서는 시험 시작 48년차까지 지속적으로 증가하다가 그 이후에는 점차적으로 감소하는 경향이였다. 그리고 치환성 마그네슘 함량은 규산질비료와 소석회를 사용한 구인 규산구, 규산+퇴비구, 종합개량구에서 증가하는 경향을 나타냈고, 이것은 규산질비료와 소석회에 부성분으로 포함되어 논에 투입되었기 때문으로 추정된다.

유효규산 함량의 변화 논토양에 규산질 비료를 장기적으로 사용하였을 때 표토 (0~15 cm)에서 유효규산 함량은 점차적으로 증가하였다 (Fig. 2). 규산질 비료를 투입한 구 (규산구, 규산+볏짚퇴비구, 종합개량구)에서 1989년 (21년차)까지의 유효규산 함량은 64~105 mg kg⁻¹에 범위에 있었지만, 그 이후부터는 급속하게 증가하여 42년차되는 2009년에는 유효규산함량이 최대 255~333 mg kg⁻¹까지 높아졌다. 이것은 유효규산 함량을 최초로 사용하고 분석한 1969년의 규산비료 처리구 (규산구, 규산+볏짚퇴비구, 종합개량구)의 유효규산함량에 비해 무려 3.3~4.2배 상승한 양이었다. 이렇게 토양의 규산함량이 현저하게 증가하는 이유는 1968년부터 1989년까지 규산함량이 10%인 규회석을 사용하였으나, 1990년 이후에는 25%인 규산질 비료로 대체되었기 때문이다. 종합개량구의 유효규산 함량은 규산+퇴비구와 규산구에서의 유효규산 함량보다 무려 1.5배 더 높았으며, 이것은 규산질비료 이외에 더 투입되는 유기물과 소석회에 규산성분이 각각 4.5%, 0.7%로 더 함유되어 있기 때문으로 판단된다. 그리고 이러한 수치는 국립농업과학원 (NIAST, 2006) 작물별 시비처방기준에 제시된 유효규산의 적정범위 (157~180 mg kg⁻¹) 보다 1.5배~2.0배 많은 함량에 해당된다. 1984년과 1989년 사이에 토양 중 유효규산 함량은 급격하게 감소하였다가 다시 증가하였는데, 이것에 대한 원인은 추후 검토가 더 필요하다.

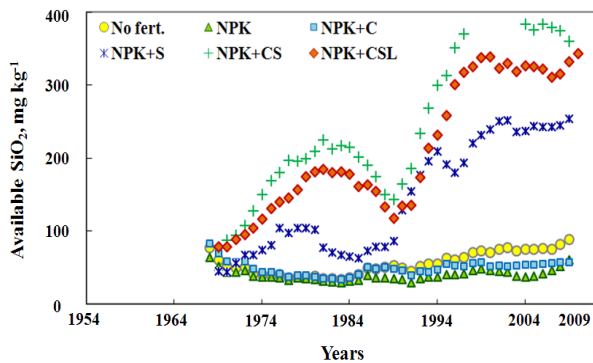


Fig. 2. Changes of available silicate with continuous applications of five different fertilizer treatments from 1968 to 2009.

규산 비료를 사용하지 않은 다른 구 (무비구, 3요소구, 볏짚퇴비구)에서는 2009년 (42년차)의 유효규산 함량은 통계적으로 유의한 차이가 없었으며 평균값은 58~89 mg kg⁻¹의 범위에 있었다. 이 값은 유효규산 함량을 최초로 분석한 1968년 당시 유효규산 함량보다 무비구에서는 1.1배 상승한 양이었고, 3요소구에서는 차이가 없었으며, 볏짚퇴비구는 오히려 0.8배 감소한 양이었다. Yang et al. (2010)은 전북 통에서 볏짚퇴비 10 Mg ha⁻¹를 30년 장기간 사용했을 때 3요소구에 비해 볏짚퇴비구에서 유효규산 함량이 81 mg kg⁻¹에서 116 mg kg⁻¹으로 유의하게 많아졌다고 보고한바, 본 연구결과와는 상이하였다. 이와 같은 차이는 본 연구에 이용된 포장의 토양은 강서통 (사양토로 배수는 약간 양호하고 투수성은 약간 빠름)으로 전북통 (미사질 식양토로 배수가 약간 불량하고 투수성이 약간 느림)에 비해 심토로 규산성분이 더욱 잘 용탈되는 토양특성 때문으로 추정된다.

토양 층위별 유효규산의 분포 화학비료와 볏짚퇴비를 42년간 논토양에 사용한 결과 토양 층위별 유효규산 함량은 상이한 분포를 나타내었다 (Fig. 3).

규산질 비료를 투입한 구 (규산구와 종합개량구)와 규산 비료를 투입하지 않은 구 (무비구, 3요소구, 볏짚퇴비구)에서 유효규산 함량은 토양깊이가 0~20 cm까지 깊어질수록 증가하는 경향이였다. 규산구와 종합개량구의 표토 (0~20 cm)에서 유효규산 함량은 각각 309, 314 mg kg⁻¹으로 가장 높았고, 그 다음으로 무비구 (108 mg kg⁻¹)였으며 3요소구와 볏짚퇴비구에서 60, 59 mg kg⁻¹으로 가장 낮았다. 3요소구와 볏짚퇴비구가 무비구보다 낮은 이유는 이들 두 처리구가 매년 벼 생육량이 무비구에 비해 컸으며, 그와 동시에 토양 중 유효규산을 많이 흡수하였기 때문이라 여겨진다. 규산질 비료를 투입한 구 (규산구와 종합개량구)에서 심토 (> 20 cm) 중 유효규산 함량은 표토 (172~198 mg kg⁻¹)보다 낮았다. 3요소구와 볏짚퇴비구보다 약 2.1배 높았고, 무비구보다는 1.6배 높았다. 이러한 결과는 벼 재배를 위해 일정기간

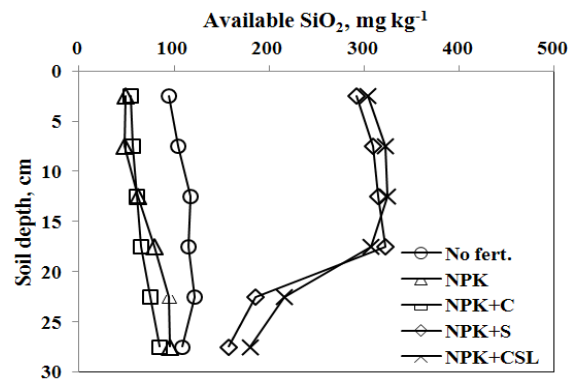


Fig. 3. Distribution of available silicate in the soil profile after forty-two years of the continuous fertilization experiments.

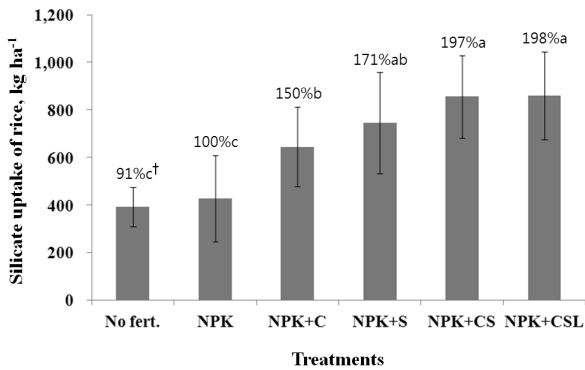


Fig. 4. Average uptake of silicate by above-aerial part of rice under continuous application of chemical fertilizer and compost from 1987 to 2009.

†Relative uptake of NPK treatment and Means in a column followed by the same letter were not significantly different at 5% level of DMRT.

담수상태를 유지함으로써 침투수와 동시에 수용성 규산성 분도 함께 용탈되었기 때문으로 생각된다. Jian and Eiichi (2002)도 논토양에서 규산은 심토로 용탈이 일어나며, 논이 담수된 상태일수록, 온도가 높은 여름철일수록 용탈하는 양이 증가한다고 보고하였다.

처리구별 유효규산 흡수량과 수량 벼가 흡수하는 규산의 양은 처리구간에 통계적으로 유의한 차이가 인정되었다 (Fig. 4). 3요소구에 비해 볏짚퇴비구는 50%, 규산구는 71%, 퇴비·규산구와 종합개량구는 97~98%를 더 흡수하는 것으로 나타났다.

볶짚퇴비구의 토양 중 유효규산 함량은 50 mg kg⁻¹으로 무비구 (56 mg kg⁻¹)보다 낮았음에도 불구하고, 벼가 흡수하는 규산의 양은 상당히 많았다. 이것은 볏짚퇴비로 투입되는 규산의 양은 1년당 약 1.2 ton ha⁻¹으로 이들 중에 약 50%를 흡수한 것으로 나타났다. 그리고 Matsuo et al (1976)은 일본의 Shiga 도립 농업시험장에서 수행한 장기연용 (1933~1973) 포장 시험에서 벼가 40년 동안 흡수한 규산의 양은 투입한 퇴비의 70%를 흡수하며 퇴비의 이용효율이 매우 높다고 보고하였다.

벼가 흡수하는 규산의 흡수량은 수량에 커다란 영향을 미친다. Table 2에서과 같이 3요소구의 수량을 100으로 기준하여 처리구별로 상대지수를 평가한 결과 무비구는 76, 볏짚퇴비구는 125, 규산구는 137, 규산+퇴비구는 145, 종합개량구는 147로 나타났으며, 수량의 증가정도는 종합개량구와 규산+퇴비구에서 가장 높았고, 그 다음으로는 규산구, 볏짚퇴비구, 3요소구, 무비구 순이었다. 논토양에 규산비료를 사용할 경우 재배조건에 따라 차이는 있지만 3요소구에 비해 평균적으로 7~12% 정도의 수량이 증가한다고 보고하

Table 2. Average grain yield by rice under continuous application of chemical fertilizer and compost from 1954 to 2009.

Treatments	Grain yield	Relative index [‡]
	Mg ha ⁻¹	%
No fert.	3.68 ± 0.77e [†]	76
NPK	5.49 ± 0.60d	100
NPK+C	6.04 ± 0.74c	125
NPK+S	6.62 ± 0.69b	137
NPK+CS	7.02 ± 0.71ab	145
NPK+CSL	7.08 ± 0.65a	147

[†]Means in a column followed by the same letter were not significantly different at 5% level of DMRT.

[‡]Relative yield of NPK treatment.

였으나 (Lee and Park, 2010), 규산비료의 장기사용 처리구에서의 수량은 37~45%로 훨씬 높은 수준이었다.

요 약

비료 및 토양개량제를 장기간 사용한 벼 재배포장에서 토양 중 유효규산 함량 분포 특성과 벼 생육량 차이를 구명하고자 수행하였다. 42년 동안의 실험에서 규산질 비료의 사용은 토양의 유효규산 함량을 최대 333 mg kg⁻¹까지 증가시켰고, 표토뿐만 아니라 심토에까지 영향을 주어 규산이 축적되었다. 또한, 벼의 규산 흡수량은 3요소구에 비해 볏짚퇴비를 사용한 구에서는 64%, 볏짚퇴비와 규산질비료를 병용하여 사용한 구에서는 98%를 더 흡수하였다. 벼의 수량도 규산질비료를 사용한 구에서는 37~47% 정도 크게 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구결과를 통해서 볼 때 무기질 비료와 더불어 유기질비료 및 규산질비료를 혼용하는 것은 토양비옥도를 향상시키고, 비료의 이용 효율을 향상시키는 방법 중에 하나로 생각되었다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ006428)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인 용 문 헌

- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 91:11-17.
Gang, Y.S. 2001. Effects of silicon on plant. p. 23-35. In

- Progress current using situation of silicate fertilizers. Korean Society of Soil Science, Suwon, Korea.
- Jian, F.M. and T. Eiichi. 2002. Soil, fertilizer, and plant silicon reserach in Japan. ELSEVIER, Amstedrdam-Bonston-London.
- Katoh, M., J. Murase, A. Sugimoto, and M. Kimura. 2005. Effect of rice straw amendment on dissolved organic and inorganic carbon and cationic nutrients in percolating water from a flooded paddy soil: A microcosm experiment using C-13-enriched rice. *Org. Geochem.* 36:803-811.
- Kim, C.B., N.K. Park, S.D. Park, D.U. Choi, S.G. Son, and J. Choi. 1986. Changes in rice yield and soil physicochemical properties as affected by annual application of silicate fertilizer. *Korean J. Soc. Soil Fert.* 192(2):123-131.
- Kim, C.B., N.K. Park, S.H. Lee, S.D. Park, and B.S. Choi. 1994. Changes in Barley yield and some physico-chemical properties of Upland soil by long-term application of silicate fertilizer and compost. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 27(3):195-200.
- Kim, M.S., W.I. Kim, J.S. Lee, G.J. Lee, G.L. Jo, M.S. Ahn, S. C. Choi, H.J. Kim, Y.S. Kim, M.T. Choi, Y.H. Moon, B.K. Ahn, H.W. Kim, Y.J. Seo, Y.H. Lee, J.J. Hwang, Y.H. Kim, and S.K. Ha. 2010. Long-term monitoring study of soil chemical contents and quality in paddy fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.*43(6):930-936.
- Lee, C.S. and Y.H. Park. Korean society of Soil Science and Fertilizer. 2010. Effects and recommendations of silicate fertilizers. Korean society of Soil Science and Fertilizer., Suwon, Korea.
- Lee, K.S. 2003. Study on production of high rice quality with application rate of silicate fertilzer. Completed report. Korean Society of Soil Science and Fertilizer. 11-29.
- Lugato, L., K. Paustian, and L. Giardini. 2007. Modelling soil organic carbon dynamics in two long-term experiments of north-eastern Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 120:423-432.
- Matsuo, H., T. Hayase, H. Yokoi, and Y. Onikura. 1976. Results of long-term fertilizer experiments on paddy rice in Japan. *Ann. Agron.* 27(5-6):957-968.
- NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- NIAST. 2003. Management practices of soil fertility for environment-friendly agriculture. 50th anniversary symposium of Long-term experiments. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- NIAST. 2006. Fertilizer Recommendation for crops (revisoin). National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Park, C.Y., J. Choi, K.D. Park, W.T. Jeon, H.Y. Kwon, and U.G. Kang. 2000. Changes of physical properties on long-term fertilization of compost and silicate in paddy soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 33(3):175-181.
- Rodrigues, F.A., L.E. Datnoff, G.H. Korndorfer, K.W. Seebold, and M.C. Rush. 2001. Effect of silicon and host resistance on sheath blight development in rice. *Plant Disease.* 85(8):827-832.
- RDA (Rural development administration). 2003. Monitoring project on agri-environment quality in Korea. one cycle project workshop. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Seo, Y.J., J.S. Kim, C.B. Kim, M. Park, D.H. Lee, C.L. Choi, and J. Choi. 2002. Evaluation of input and output amount of silica in sandy paddy soil during growing periods of rice plant. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 35(3): 162-168.
- Song, Y.S., H.J. Jun, B.G. Jung, W.K. Park, K.S. Lee, H.K. Kwak, J.H. Yoon, C.S. Lee, B.Y. Yeon, P.J. Kim, and Y.S. Yoon. Determination of optimum rate and internal of silicate fertilizer application for rice cultivation in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(5):354-363.
- Yeon, B.Y., H.K. Kwak, Y.S. Song, H.J. Jun, H.J. Cho, and C.H. Kim. 2007. Changes in rice yield and soil organic matter content under continued application of rice straw compost for 50 years in paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(6):454-459.
- Yoon, J.H. 2004. Review and Discussion on Development of Soil Quality Indicators. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37: 192-198.