

논 토양의 유기탄소 변동에 관한 비료와 개량제의 장기연용 효과

김명숙* · 김유학 · 강성수 · 윤홍배 · 현병근

국립농업과학원

Long-term Application Effects of Fertilizers and Amendments on Changes of Soil Organic Carbon in Paddy Soil

Myung-Sook Kim*, Yoo-Hak Kim, Seong-Soo Kang, Hong-Bae Yun, and Byung-Keun Hyun

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

The changes of soil organic carbon (SOC) content in paddy soils (sandy loam) were assessed from data of the 59 years fertilization plots in which the continuous rice cropping experiment started in 1954. The treatments were no fertilization(no fert.), NPK fertilization (N, NPK), NPK plus rice straw compost (NPK+C), and NPK plus rice straw compost, silicate fertilizer and lime (NPK+CLS). After 41 years, SOC content in NPK+C and NPK+CLS treatment in surface soils (0~15 cm) reached at the highest, followed by maintaining a plateau level for 8 years. After 51 years, they showed a tendency to decrease. Peak concentrations of soil organic carbon were 20.1 g kg⁻¹ in NPK+CLS, 19.1 g kg⁻¹ in NPK+C, 13.3 g kg⁻¹ in NPK, 11.9 g kg⁻¹ in N, and 11.6 g kg⁻¹ in control. Dissolved organic carbon(DOC) contents in surface soil solution were about 2.3 times higher in NPK+C than that in NPK+CLS. Therefore, SOC in subsurface soil(15~30 cm) was greater in NPK+C than the other treatments. These results indicate that continuous application of rice straw compost and silicate fertilizer affected significantly on the level of SOC in surface soils, subsurface soils, and soil solutions. Thus, the combined applications of NPK fertilizers with organic compost and silicate as a soil amendment are recommended as the best fertilization practice for soil carbon accumulation, environment conservation, and enhancement of soil fertility status in the continuous rice cropping system.

Key words: Long-term application, Soil organic carbon, Dissolved carbon, Rice straw compost, Silicate fertilizer

서 언

토양의 유기물은 비옥도 및 건전성을 나타내는 토양 질(quality)의 중요한 인자로 (Carter, 2002; Christensen and Johnston, 1997; Yoon, 2004), 질소와 인 등 양분을 작물에게 공급하여 양분을 순환시키고 토양의 입단안정화도와 수분보유력 등의 물리성을 향상시켜 작물의 생산성과 품질을 증대시킨다 (Lugato et al, 2007). 우리나라 토양유기물 함량은 1995년에 25 g kg⁻¹에서 1999년과 2003년에 23 g kg⁻¹, 2007에는 24 g kg⁻¹으로 더 이상 증가하지 않고 일정한 수준을 유지하였고 이러한 원인은 가축의 사료로 공급하기 위해 볏짚을 논토양으로부터 수탈하기 때문이라고 보고 되었으며 (Kim et al., 2010), 토양유기물로 인한 논토양의 비옥도의 질이 크게 향상되지 못하고 있는 이유이다. 토양 유기물로부터 생성된 수용성 유기탄소는 환경으로 유출될 경우 수계 내에서 퇴적물과 양분, 유기물질의 이동성 등에

영향을 주고, 특히 살충제와 중금속과 같은 오염물질의 흡착과 이동성을 높여 수질을 더욱 악화시킨다(Veum et al., 2009). 그리고 수용성유기탄소는 미생물적 분해자의 행동, 환경화학 등 많은 과정에 관련되어 있으며 (Wang et al., 2010), 경운, 유기물질의 시용, 시비 등 토양관리 방법에 따라 달라질 수 있다(Gonet and Debska, 2006). 이처럼 작물생산성을 향상하고 환경을 보전하기 위해서 토양 내에 유기물을 축적하기 위한 시비의 영향평가가 요구되고 있으며, 이러한 평가는 장기연용 포장에을 통해서 이루어지고 있다. 왜냐하면 토양 중의 유기물의 변동은 점진적이어서 장기연용 시험 포장으로부터 얻어져야 하기 때문이다 (Powlson and Oik, 2000). 장기연용 포장은 일반적으로 20년 이상 동안 운영해 온 시험포장을 말하며, 토양의 유기물함량 변화를 측정할 수 있는 장기포장 운영기간은 기후조건마다 달라질 수 있다. 예로 열대기후는 5년이 필요하고, 온대기후에서는 10~20년 이상이 요구된다고 하였다 (Powlson and Oik, 2000). 또한 장기시험포장 연구로부터 생성된 자료는 토양탄소 변동 모델을 검증하는데도 이용되고 있다 (Falloon and Smieth, 2002, 2003; Skjemstad et al., 2004; Cai and Qin., 2006).

접수 : 2012. 11. 26 수리 : 2012. 12. 3

*연락처 : Phone: +82312900329

E-mail: msk74@korea.kr

이처럼 장기연용 포장에서 토양유기물의 관한 시비영향 평가는 매우 중요하며 토양유기물의 중요한 인자로 토양유기탄소와 수용성탄소가 있다. 따라서, 본 연구는 논토양에 유기물 보전에 대한 합리적인 시비관리 방안을 모색하고자 장기시험포장에서 시비에 따른 유기탄소의 변동과 수용성탄소의 특성을 평가하고자 수행하였다.

재료 및 방법

시험포장 토양특성 및 재배관리 본 연구에 사용된 논토양은 1954년도에 경기도 수원시 권선구 서둔동 소재 국립작물과학원(현 국립식량과학원) 포장 내에 조성된 것으로, 하성평탄지에 위치하며 유효토심은 보통으로 투수성이 빠르며 배수가 약간 약간양호이며, 토성은 사양질인 강서토(Coarse loamy, Fluvaquentic Eutrudepts)이다. 1954년 당시의 토양 화학성은 pH 5.2, 유기물(OM) 함량은 16 g kg^{-1} , 유효인산 (Avail. P_2O_5) 함량은 120 mg kg^{-1} , 치환성 칼륨 (Exch. K) 함량이 $0.08 \text{ cmolc kg}^{-1}$ 으로 유효인산 함량을 제외한 성분은 벼 생육을 위한 논토양 적정 비옥도에 기준 (NIAST, 2006)에 미치지 못하였다. 처리구는 완전 임의 배치법으로 배치되었고 모두 32개의 처리구로 구성되어 있으나, 본 연구에서는 무비구 (contol), 유안구 (N), 3요소구 (NPK), 퇴비구 (NPK+C), 종합개량구 (NPK+CLS)를 분석에 이용하였다. 벼의 품종과 비료와 개량제를 사용한 내력은 Fig. 1과 같다. 벧짚퇴비는 벼 수확기에 시험연구포장에서부터 벧짚을 3 ton 정도 수거하여 절단하고 물을 뿌렸으며 비닐을 덮어 후숙하였고 요소비료를 4~6 kg 더 첨가하여 부숙 후 사용하였다. 비료는 기비-분얼비-수비-실비의 분시비율은 질소는 50-20-20-10%, 가리는 70-0-30-0%로 2회, 인산, 퇴비, 석회, 그리고 규산은 전량 기비로 사용하였

다. 토양개량제인 규산질비료와 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 쪼레질 할 때 토양에 그대로 환원하였다.

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 사용하였다. 그리고 토양 깊이별 양분함량의 분포를 조사하기 위한 시료는 2009년 5월부터 8월까지 3회에 걸쳐 core sampler로 0~30 cm 깊이별 토양을 채취하여 5 cm 간격으로 끊어서 각각 분석하였다. 벧짚의 그루터기는 2011년 벼를 수확 후 처리구당 5포기씩 채취한 후 건조하여 무게를 조사하였고, 특히 뿌리는 직경과 깊이가 15 cm인 원통형의 core를 박아 채취하였다. 토양용액의 수용성탄소함량을 분석하기 위해 시료는 2012년 5월 30일부터 8월 4일까지 10회에 걸쳐 polyethylene porous cup (pore size 35~75 μm)로 10 kPa의 일정한 압력을 가하여 100 mL의 양이 되도록 채취하였다. 토양의 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 측정하였고, 토양유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster 법으로 추출하여 720 nm에서, 유효규산은 1 M NaOAc (pH 4.0)용액으로 추출하여 700 nm에서 비색계 (U-3000, Hitachi)로, 치환성 양이온은 1M NH_4OAc (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 유도결합 플라즈마 발광광도계 (ICP-OES, GBC)으로 측정하였다 (NIAST, 2000). 수용성유기탄소는 유기탄소 분석기 (Sievers 5310C, GE)로, 수용성 무기탄소는 Jung and Kim (2006)이 제안한 방법을 변형하여 토양용액을 2 mL를 넣어서 분석하였다.

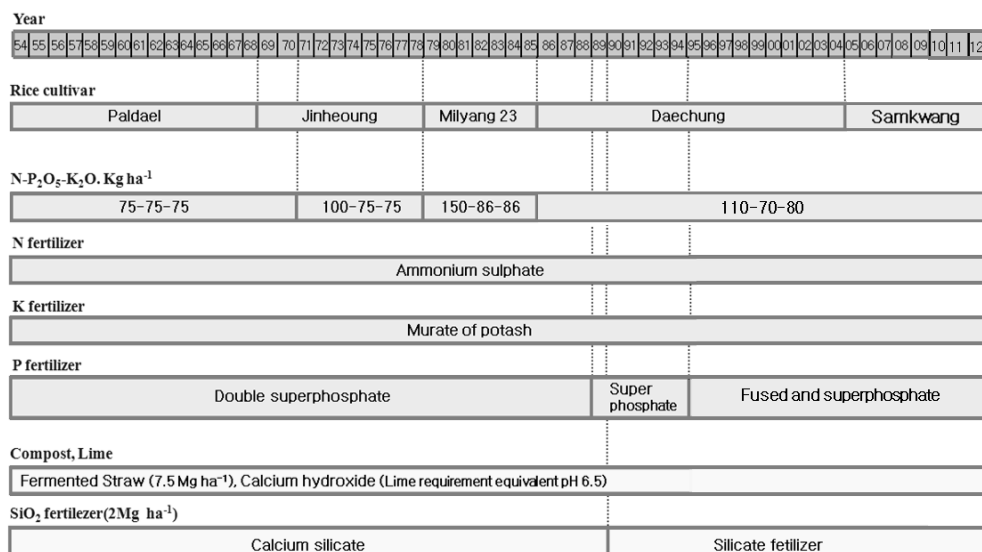


Fig. 1. Rice cultivar and chronological application of chemical fertilizers, rice straw compost, and soil amendments.

결과 및 고찰

토양유기탄소의 변화 논토양에 유기물질을 장기적으로 투입하고 벼를 재배할 경우 표토 (0~15 cm)의 유기탄소 함량은 40년이 (1993)이 될 때까지 벧짚퇴비가 투입된 구인 퇴비구와 종합개량구에서 현저하게 증가하였고 40년 이후에는 각각 18.9 g kg⁻¹, 19.6 g kg⁻¹으로 안정화되면서 평형을 유지하였다. 이때의 유기탄소함량은 1954년 장기포장 시험 이전의 함량 (9 g kg⁻¹)보다 약 2배 정도 증가한 양이었다. Zhang and He (2004)은 토양의 유기 탄소 함량은 벼를 재배 (2기작/년, 벧짚 토양환원) 후 30년까지 점차적으로 증가하였고 그 이후부터는 비교적 안정화되어 평형농도인 20.0 g kg⁻¹에 도달하였으며, 이처럼 토양의 유기탄소가 안정화되는 이유는 토양에 유기탄소가 축적된 상태에서 새롭게 투입되는 유기물질의 무기화율은 증가되고, 또 한편으로 유기물질 중 수용성 형태로 존재하는 탄소가 관개수를 따라 심토로 용탈하면서 근권에서 유기탄소 함량의 투입과 배출 사이에 일정한 균형관계가 형성하기 때문이라고 하였다. Johnston et al. (2009)은 필리핀에 있는 국제미작연구소 (IRRI; International Rice Research Institute)의 장기 시험 포장 (1978년~1991년)에서 유기탄소 함량은 질소비료를 투입하지 않은 구와 질소비료를 투입한 구에서 각각 22, 20 g kg⁻¹이었으며, 1년에 3회 벼를 재배하고, 담수되는 기간이 10개월 정도로 긴 것이 그 원인이라고 하였다. 기후와 토양 특성, 담수의 지속기간, 경작횟수 등은 유기탄소 축적에 영향을 미치고 토양유기탄소의 평형농도도 달라지며, 이러한 요인이 달라지면 새로운 평형농도로 이동하게 된다고 보고 하였다 (Johnston et al., 2009).

최근에 본 연구 포장에서 토양유기탄소 함량은 모든 처리구에서 약간 감소하기 시작하였다. 장기시험 포장 시작한 지 50년 후로 2003년에 해당하며 이때에 관개수가 담긴 보

의 크기를 변경하면서 수질의 달라졌기 때문으로 생각된다. 1987년에도 관개수를 서호수에서 관정수로 변경한 후에 일시적으로 유기탄소 함량이 감소하였으며, 관개수의 수질은 미생물 생체량에 중요한 영향을 미치고 미생물 생체량은 토양유기탄소 함량 (Reichardt et al., 2000)에 영향을 주었기 때문으로 추정된다.

벧짚퇴비가 투입되지 않은 구인 무비구와 유안구, 3요소구는 11.6~12.2 g kg⁻¹으로 벧짚퇴비가 투입된 구인 퇴비구와 종합개량구에 비해 유기탄소 함량이 크게 증가하지는 않았지만, 크게 감소하지 않고 일정한 수준을 유지하였다. 이것은 벼의 뿌리와 그루터기로 투입된 유기물질의 영향으로 논토양에 처리구별 벼의 그루터기와 뿌리로 투입되는 유기물질의 양을 살펴보았다. 벼의 뿌리와 그루터기의 양은 무비구와 유안구, 3요소구는 각각 801 kg ha⁻¹, 1,409 kg ha⁻¹, 2,469 kg ha⁻¹, 퇴비구와 종합개량구는 각각 2,530 kg ha⁻¹, 2,056 kg ha⁻¹로 유안구와 무비구는 3요소구의 32~57%정도에 해당하는 양이 토양에 환원되었고, 이것은 논토양의 유기탄소 함량을 일정하게 유지하는데 기여하였다고 판단된다 (Johnston, 1986). Bronson et al. (1997)은 토양에 환원되는 뿌리의 양은 질소질 비료를 사용하지 않을 경우와 사용할 경우 지상부 생육량의 각각 14, 19%라고 보고하였고, 본 연구에서는 자료를 구체적으로 제시하지 않았지만, 토양에 환원되는 뿌리의 양은 지상부 생육량의 7~8%의 양으로 산정되어 다소 차이가 있었다.

토양 층위별 토양유기탄소의 분포 화학비료와 벧짚퇴비, 개량제를 56년간 장기적으로 논토양에 사용하고 벼를 경작했을 때의 토양 층위별 토양유기탄소 함량의 분포는 Fig. 3과 같다. 토양유기탄소 함량은 모든 처리구에서 표토 5 cm에서 가장 높았고 심토 (25~30 cm)에서 가장 낮았으며, 처리구 간에 토양유기탄소 함량의 차이는 0~15 cm 깊

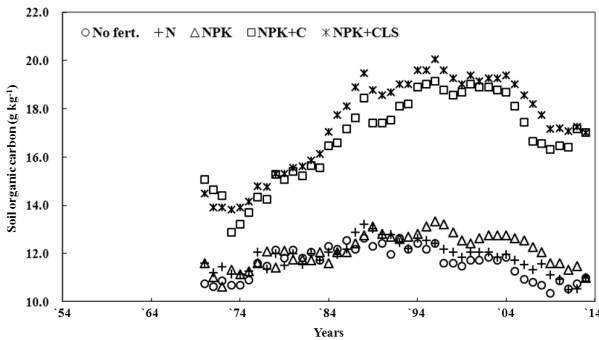


Fig. 2. Changes of soil organic carbon with continuous applications of five different fertilizer treatments for 59 years. No fert., no fertilization; N, nitrogen fertilizer; NPK, nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer; NPK+C, NPK fertilizers plus rice straw compost; NPK+CLS, NPK plus rice straw compost, silicate fertilizer and lime.

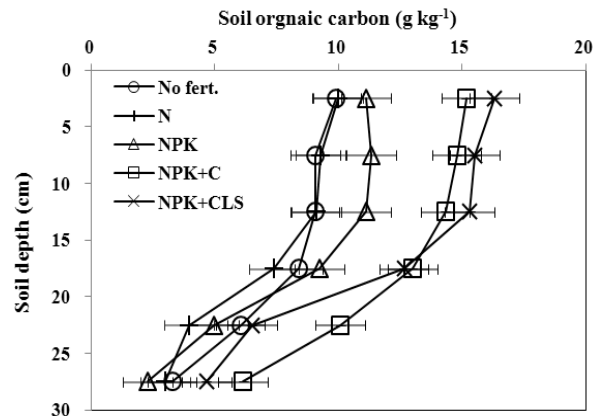


Fig. 3. Distribution of soil organic carbon(SOC) in the soil profile after fifty-six years of the continuous fertilization experiments (2009).

Table 2. Comparison of averaged dissolved carbon concentration in soil solution for rice paddy (2012).

Treatments	DOC	DIC	DTC	DOC/DTC
----- mmol L ⁻¹ -----				
No fert.	0.5±0.2c [†]	0.8±0.5b	1.3±0.6c	0.4±0.2b
N	0.6±0.2c	0.6±0.4b	1.2±0.6c	0.6±0.2a
NPK	1.8±0.7b	1.0±0.5b	2.8±1.1b	0.7±0.2a
NPK+C	3.7±1.5a	1.2±0.6b	4.9±2.1a	0.8±0.1a
NPK+CLS	1.6±0.8b	2.9±1.2a	4.5±1.5a	0.4±0.2b

[†]DOC, dissolved organic; DIC, dissolved inorganic carbon, DTC, dissolved total carbon.

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

이에서 가장 컸다. 이 깊이는 벼의 뿌리가 주로 분포하고 경운 시 벗겨져 토양에 혼입되는 깊이이기 때문으로 생각된다. 근권 (0~15 cm)에서 유기탄소 함량은 종합개량구가 가장 높았고, 그 다음으로는 퇴비구, 3요소구, 유안구, 무비구 순이었으며 이러한 순서는 벼짚퇴비의 투입 여부와 앞에서 서술한 토양으로 환원되는 벼의 그루터기 및 뿌리의 양과 매우 유사한 양상을 나타냈다. 그리고 벼짚퇴비를 투입한 구가 벼짚퇴비를 투입하지 않은 구보다 유기탄소 함량이 표토에서는 1.4배 심토에서는 2배 가량 높았다. Katoh et al (2005)는 논토양에 벼짚 잔재물 등 유기물질의 환원은 침투수 중 수용성 탄소의 함량을 높여 심토로 용탈되기 때문에 심토의 유기탄소 함량을 높인다고 하였다. 또한, 심토의 유기탄소 함량은 표토에서와 달리 퇴비구가 종합개량구보다 높았다.

벼 생육기간 중 토양용액의 수용성탄소 변화 처리구별 수용성 유기탄소함량 변화를 살펴본 결과 퇴비구에서 수용성유기탄소 함량은 5월 30일부터 급격하게 증가하여 6월 30일에 최고 농도인 5.9 mmol L⁻¹에 도달하였고, 그 이후에는 감소하였다(Fig. 3). 3요소구도 퇴비구와 비슷한 경향이였으나, 평균농도는 퇴비구의 1/2 수준으로 낮았다. 종합개량구는 다른처리구의 변화양상과 달리 5월 30일부터 6월 17일까지 3요소구보다 높았으나, 6월 30일 이후부터는 3요소구보다 낮았으며 7월 22일경에는 무비구, 유안구와 비슷한 수준으로 감소하였다. 표토용액 중 수용성 유기탄소 함량은 퇴비구, 3요소구, 종합개량구, 유안구, 무비구 순으로 퇴비구가 가장 높았고, 무비구가 가장 낮았다. 퇴비구에서는 표토용액과 심토의 유기탄소 함량이 모두 높았는데, 이것은 표토의 수용성 유기탄소가 하부로 용탈되어 심토의 유기탄소 함량에 영향을 주었기 때문이다. 그리고 표토용액 중 수용성 유기탄소 함량이 종합개량구보다 평균적으로 2.3배 가량 높았는데, 종합개량구와 퇴비구의 처리간 차이는 퇴비구보다 '94년 이전에는 소석회와 규산질비료, '94년 이후에는 규산질비료가 더 투입되었으며, 이로 인해 토양의 pH가 상승되고 토양미생물의 유기물질 분해작용에 영향을 주어 수용성탄소의 함량에 차이가 발생하였다고 추정된다.

수용성 무기탄소 함량은 수용성 유기탄소 함량과 달리 종합개량구, 퇴비구, 3요소구, 무비구, 유안구 순으로 종합개량구에서 가장 높았고 6월 9일부터 6월 30일에 급격하게 증가하여 4.9 mmol L⁻¹까지 가장 높아졌다가 그 이후에는 2.7 mmol L⁻¹까지 감소하였다. 퇴비구, 3요소구, 무비구, 유안구의 수용성 무기탄소 함량의 변화양상은 종합개량구와 비슷하였으나, 종합개량구의 30%정도 수준으로 그 농도가 낮았다. 수용성 무기탄소 함량은 관개수, 뿌리의 호흡, 석회물질의 투입 등에 영향을 받으며, 종합개량구에서 석회성분의 비료 투입에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다.

수용성 총탄소 중 수용성 유기탄소의 함량의 비율 (DOC/DTC)은 유안구, 3요소구, 퇴비구에서 0.6~0.7로 높았으나, 무비구와 종합개량구에서 0.4로 낮았다 (Table 2). Wang et al. (2010)은 습지에서 유출수의 DOC/DTC는 0.6이었다고 보고하였으며, 본 연구의 유안구, 3요소구, 퇴비구의 DOC/DTC와 비슷하였다. 퇴비구와 종합개량구의 총탄소함량은 4.9 mmol L⁻¹, 4.5 mmol L⁻¹로 비슷하였고, 3요소구는 2.8 mmol L⁻¹, 유안구와 무비구는 각각 1.2 mmol L⁻¹, 1.3 mmol L⁻¹로 유사하여 크게 3가지 유형으로 분류되었으며, 비료 및 개량제를 장기연용하는 것은 토양의 수용성탄소 함량에 커다란 영향을 주는 것으로 나타났다.

비료와 개량제 59년 장기연용한 후 토양의 특성 처리구별 pH, 유효인산, 치환성양이온, 유효규산 함량은 Table 3과 같다. 토양의 pH는 평균적으로 무비구에서 6.6, 유안구에서 6.3, 3요소구와 퇴비구에서 각각 5.8, 5.9, 종합개량구에서 7.5로 3요소구와 퇴비구에서 가장 낮았고, 종합개량구에서 가장 높았다. 그러나, 시험포장 조성 당시 ('54)의 토양의 pH (5.2)보다는 모든 처리구에서 높아지는 경향이였다. 유효인산 함량은 무비구에서 20 mg kg⁻¹, 유안구에서 11 mg kg⁻¹, 3요소구에서 136 mg kg⁻¹, 퇴비구에서 167 mg kg⁻¹, 종합개량구에서 169 mg kg⁻¹으로 유안구에서 가장 낮았고, 퇴비구와 종합개량구에서 적정비옥도 함량 (80~120 mg kg⁻¹)보다 1.7배 정도 높았으며, 3요소구는 적정비옥도 함량 (80~120 mg kg⁻¹)보다 1.4배 정도 높았다. 이

Table 3. Mean pH, available phosphate, exchangeable cation, and available silicate after 59 years (2012).

Treatments	pH	Avail. P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	Exch. cations			Avail. SiO ₂ mg kg ⁻¹
			K	Ca	Mg	
No fert.	6.6±0.1b [†]	20±3c	0.05±0.01c	6.1±0.3c	0.9±0.03c	69±3b
N	6.3±0.3c	11±1c	0.08±0.01bc	7.6±1.2b	0.9±0.04c	61±2b
NPK	5.8±0.1d	136±11b	0.07±0.00bc	6.4±0.1bc	0.9±0.04c	35±1b
NPK+C	5.9±0.1d	167±13a	0.09±0.02b	7.1±0.3bc	1.0±0.05b	53±5b
NPK+CLS	7.5±0.1a	169±6a	0.15±0.02a	11.7±0.8a	1.7±0.06a	261±46a

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

것은 인산질비료만을 투입할 때보다 인산질비료와 볏짚퇴비를 동시에 투입하는 것은 토양의 유효인산 함량을 더욱 증가시키는 것으로 나타났다. 치환성 칼륨은 종합개량구와 퇴비구에서 각각 0.15 cmolc kg⁻¹, 0.09 cmolc kg⁻¹로 높았으나, 무비구, 유안구, 3요소구에서는 0.05~0.08 cmolc kg⁻¹으로 낮았고, 볏짚퇴비의 투입은 유효인산 함량에서와 마찬가지로 토양에 치환성 칼륨 함량의 증대에도 기여하였다. 치환성 칼슘은 종합개량구에서 11.7 cmolc kg⁻¹, 유안구는 7.6 cmolc kg⁻¹, 퇴비구와 3요소구는 각각 6.4 cmolc kg⁻¹, 7.1 cmolc kg⁻¹으로 종합개량구가 다른 처리구에 2배 정도 높았고, 치환성 마그네슘은 종합개량구가 1.7 cmolc kg⁻¹, 퇴비구가 1.0 cmolc kg⁻¹, 3요소구, 유안구, 무비구는 0.9 cmolc kg⁻¹으로 치환성 칼슘함량과 비슷한 경향을 나타내었으며, 이것은 59년 동안 규산질비료와 소석회가 투입되었기 때문으로 판단된다. 유효규산 함량은 종합개량구를 제외한 구 (무비구, 유안구, 3요소구, 퇴비구)에서 35~69 mg kg⁻¹로 유사하였으나, 종합개량구는 261 mg kg⁻¹로 다른 처리구보다 4~7배 가량 많았다.

요 약

1954년부터 운영해온 장기 연용 포장은 벼를 경작하는 체계에서 토양의 비옥도를 향상하기 위한 방안을 모색하고자 수행되었다. 59년 동안의 시험에서 볏짚퇴비의 사용은 토양의 유기탄소 함량을 41년 이후에 최대 19~20 g kg⁻¹까지 도달하게 하였고, 볏짚퇴비를 사용하지 않은 것보다 표토에서는 1.4배, 심토에서는 2배까지 높아지게 하였다. 또한 처리구별로 토양용액중의 수용성유기탄소의 함량도 달라졌는데, 퇴비구에서 가장 높았고, 종합개량구에서는 퇴비구의 1/2 수준으로 환경으로 유출되는 수용성 유기탄소의 양이 감소하였다. 화학비료와 볏짚퇴비, 그리고 토양개량제인 규산질비료를 59년 동안 사용하였을 때, 토양의 pH, 유효인산, 치환성 양이온, 유효규산 함량 모두 증가하였다. 따라서, 무기질 비료와 유기질비료, 그리고 토양개량제인 규산질비료를 혼용하는 것은 토양의 탄소축적을 증대시키고,

환경으로 유출될 수 있는 수용성탄소의 함량을 감소시키며, 토양비옥도의 질을 향상시켜 작물을 안정적으로 생산할 수 있는 가장 적합한 방법이라 생각된다.

사 사

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

인 용 문 헌

Bronson, K.F., K.G. Gassman, R. Wassmann, D.C. Oik, M. van Noordwijk, and D.P. Garrity. 1977. Soil carbon dynamics in different cropping systems in principal ecoregions of Asia. p. 35-57. In R. La et al. (ed.) Management of carbon sequestration in soil. CRC Press, Boca Raton, FL.

Carter, M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functioning. *Agron. J.* 94:34-87.

Cai, Z.C. and S.W. Qin. 2006. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Geoderma*. 136:708-715.

Christensen, B. and A.E. Johnston. 1997. Soil organic matter and soil quality: Lessons learned from long-term experiments at Askov and Rothamsted. p. 399-430. In E.G. Gregorich and M.R. Carter (ed.) Soil quality for crop production and ecosystem health. *Dev. Soil Sci.* 25. Elsevier, Amsterdam.

Falloon, P. and P. Smith. 2002. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: model evaluation for a regional scale application. *Soil Use Manage.* 18:101-111.

Falloon, P. and P. Smith. 2003. Accounting for changes in soil carbon under the Kyoto Protocol: need for improved

- long-term data sets to reduce uncertainty in model projections. *Soil Use Manage.* 19(3):265-269.
- Gonet, S.S. and B. Debska. 2006. Dissolved organic carbon and dissolved nitrogen in soil under different fertilization treatments. *Plant Soil Environ.* 52:55-63.
- Jonsson, A., Algestern, G., Bergström, A.K., Gishop, K., Sobek, S., Tranvik, L.J., Jansson, M. 2007. Integrating aquatic carbon fluxes in a boreal catchment carbon budget. *J. Hydrol.* 334:141-150.
- Jung, W.K. and Y.H. Kim. 2006. Soil organic carbon determination for calcareous soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(6):396-401.
- 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, 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.
- Lugato, L., K. Paustian, and L. Giardini. 2007. Modelling soil organic carbon dynamics in two long-term experiments of north-eastern Italy. *Agric. Ecosyst. Environ.* 120:423-432.
- 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. 2006. Fertilizer Recommendation for crops (revision). National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Powlson, D.S. and D.C. Oik. 2000. Long-term soil organic matter dynamics. p. 49-64. In G.J.D. Kirk and D.C. Oik (ed.) 2000. Carbon and nitrogen dynamics in flooded soils. Los Banos, Philippines. 19-22 Arp. 1999. IRRI, Makati City, Philippines.
- Reichardt, W., K. Inubushi, and J. Tiedje. 2000. Microbial processes in C and N dynamics. p. 101-146. In G.J.D. Kirk and D.C. Oik (ed.) 2000. Carbon and nitrogen dynamics in flooded soils. IRRI, Makati city, Philippines.
- Skjemstad, J.O. L.R. Spouncer, B. Cowie, and R.S. Swift. 2004. Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model(RotC ver. 26.3), using measurable soil organic carbon pools. *Aust. J. Soil Res.* 42(1):79-88.
- Veum, K.S., K.W. Goyne, P.P. Motavalli, and R.P. Udawatta. 2009. Runoff and dissolved organic carbon loss from a paired-watershed study of three adjacent agricultural watersheds. *Agric. Ecosyst. Environ.* 130:115-122.
- Wang, L., C. Song, Y. Song, Y. Guo, X. Wang, and X. Sun. 2010. Effects of reclamation of natural wetlands to a rice paddy on dissolved carbon dynamics in the Sanjiang Plain, Northeastern China. *Ecol. Eng.* 36:1417-1423.
- Yoon, J.H. 2004. Review and Discussion on Development of Soil Quality Indicators. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37:192-198.
- Zhang, M.K. and Z.L. He. 2004. Long-term changes in organic carbon and nutrients of an Ultisol under rice cropping in southeast China. *Geoderma.* 118:167-179.