

목초재배지 및 벼논 관리 변화에 따른 토양 탄소 및 미생물 활성도

유가영* · 김현진 · 김예솔 · 정민웅¹

경희대학교 국제캠퍼스 공과대학 환경학 및 환경공학과

¹국립축산과학원 초지사료과

Soil Carbon and Microbial Activity Influenced by Pasture and Rice Paddy Management

Ga-Young Yoo*, Hyun-Jin Kim, Ye-Sol Kim, and Min-Hung Jung¹

Environmental Science & Engineering in Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, Korea

¹*Grassland & Forage Crops Division in National institute of animal science, Cheonan, Chungnam, Korea*

This study investigated soil carbon storage and microbial activities influenced by different management practices in rice paddies and pastures. Soils under a single-crop farming of rice (CON) and rice-Italian ryegrass rotation farming (IRG) were compared in Jangheung, Jeollanam-do, Seocheon and Cheonan, Chungcheongnam-do. Soils from pastures were analyzed to investigate the effect of duration period (P1, P2, P3) in Namwon, Jeollabuk-do and Seosan, Chungcheongnam-do. In rice paddy, total and particulate carbon (PC) concentrations in the IRG soils were significantly higher than those in the CON soils both in Jangheung and Seocheon where the IRG has been established for three years, whereas carbon concentrations were not significantly different in Cheonan where IRG planting history is only one year. In rice paddy soils, PC was suggested as an early indicator to monitor changes in soil carbon storage followed by adopting different management practices. In pasture, total and PC concentrations increased with duration period especially in the 0-5 cm soils. Contrary to the rice paddy soils, the magnitude of change in PC concentration is not as great as that in total carbon concentration, implying that there is a need to develop a new early indicator other than PC using different fractionation scheme. The soil carbon storage in pasture also increased with years since establishment and the increasing rate was significantly greater in the early stage (0-5 yrs) than the later one (> 5 yrs). Microbial activities measured from fluorescein diacetate (FDA) hydrolysis analysis were significantly lower in the IRG soils than CON soils, whereas no difference was observed in the pastures of different ages. This shows that FDA activity is not a sensitive indicator to differentiate soil qualities influenced by management practices if it is used by itself.

Key words: Soil carbon, Sequestration, Italian ryegrass, Management, Particulate organic carbon

서 언

우리나라의 온실가스 배출통계 작성 시스템은 주요 온실가스 배출원을 에너지, 산업공정, 농축산, Land use, land use change, and forestry (LULUCF) 및 폐기물로 구분하여 산출하고 있다. LULUCF 부문에서는 IPCC의 우수이행지침 (Good Practice Guidance)은 토지이용 범주를 6 가지 (산림지, 농경지, 초지, 습지, 주거지, 기타 토지)로 구분하고 있으나, 우리나라에서는 산림지의 줄기재적 순증가만을 이산

화탄소 흡수량으로 잡고 있는 실정이다 (IPCC, 1996; IPCC, 2000; Jeong et al., 2008; Son et al., 2010). 농축산 부문에서는 메탄 (CH₄)과 아산화질소 (N₂O)를 배출원으로 상정하며 경작면적과 비료시비량, 장내발효와 분뇨처리 부분으로 구분되어 있다. 농축산 분야는 온실가스 흡수원이라기 보다는 배출원으로 고려되고 있으나, 농경지 및 초지에서도 토양 내에서 저장될 수 있는 유기물의 양은 매우 크고 (FAO, 2010a; FAO, 2010b; Post and Kwon, 2000), 적절히 관리된다면 농축산 분야의 토양이 온실가스 흡수원으로 작용할 수 있는 가능성을 배제할 수 없다. 미국 농경토양은 매년 12 million metric tons (MMT)의 탄소를 흡수하는 순저장고 (net sink)라 보고되고 있다 (Pew center, 2009). Pew center에서 발간한 보고서는 농축산 부문에서 향후 10년에서 30

접수 : 2012. 5. 2 수리 : 2012. 6. 5

*연락처 : Phone: +821066989702

E-mail: gayoo@khu.ac.kr

년 사이에 매년 약 102에서 270 MMT에 이르는 탄소가 토양 내에 저장 증대 될 것이라고 추정하고 있는데, 이는 2004년 미국 전역의 온실가스 배출량의 약 5-14% 가량을 상쇄할 수 있는 양이다 (Pew center, 2009).

토양 탄소는 관리 방법이나 토지이용 변화에 대하여 민감하게 반응하는데, 토양탄소의 변화는 약 20년에서 30년 까지 지속되며 변화추세는 그 이후 안정화된다고 알려져 있다 (IPCC, 2000). IPCC (2006)의 가이드라인에 따르면, 토양 탄소는 토성, 기후, 토지이용 및 관리방법에 대하여 일정한 시간 이후에 안정화된다고 보았고, 대상 토양의 깊이를 0-30 cm로 제안하고 있다 (IPCC 2000). 이때 토양탄소 저장량은 채취할 토양의 깊이, 토양 샘플링 간격 등에 의존하는데, 현재 국내외 많은 토양 탄소저장량에 대한 연구는 표토의 탄소농도에 한정되어 있고 (Accoet et al., 2004; Roh, et al., 2010), 표토의 탄소 농도를 탄소저장량과 동일하게 다루는 경우가 많다 (Neill et al., 1997). 특히, 표토의 탄소 농도를 기준으로 토양탄소 저장량을 비교한다면, 유기물 유입에 의한 일차적 효과만을 과장하게 되는 단점이 있기 때문에 단위 면적당 저장되어 있는 탄소의 양 ($g C m^{-2}$)으로 바꾸어 탄소 저장량을 평가하는 것이 필요하다. 그러나 이의 문제점은 관리 방법이나 토지이용의 변화가 토양의 압착 (soil compaction)을 가져올 경우 토양질량이 변화하게 되어 압착된 토양에 저장된 탄소량이 과대평가 될 수 있다는 것이다. 탄소 저장량의 정확한 비교를 위해서는 단위 면적으로만 표현할 것이 아니라 토양마다 다른 용적밀도로 인해 달라지는 토양질량 (soil mass)을 고려한 등가 질량 기준법 (equivalent mass basis)이 제안되어 활용되고 있다 (Ellert and Bettany, 1995; Wander et al., 1998; Yoo and Wander, 2006).

이탈리안 라이그라스 (Italian ryegrass; IRG)는 단년생 목초로 사료작물로서의 가치가 높으며 기존 벼는 수확 후 유향 농경지에 이모작 형태로 재배할 수 있는 장점이 있다. 따라서 기존 벼 단작을 벼-이탈리안 라이그라스 이모작으로 변경할 경우 토양 내 탄소 저장이 증가될 것으로 예상할 수 있다 (Kuo et al., 1997). 농경지 이용 효율에 따른 토양 탄소 저장 및 온실가스 배출 변화는 이산화탄소 저감잠재력을 평가하는 데 있어 매우 중요한 기초연구가 된다. Pew center (2009)는 농경지를 초지로 전환할 경우 토양탄소는 약 $0.3-1 ton ha^{-1} yr^{-1}$ 만큼 축적이 증가될 수 있다고 보고 하였다 (Conant et al., 2001; Lal, 2004). 그러나 이 수치들은 주로 미국, 캐나다 등지의 자료에 기초한 것으로 국내에서 이를 활용하기 위해서는 이를 뒷받침할 만한 실측 자료가 필요하다.

토양 내 총 탄소의 양은 관리방법이나 토지이용의 변화에 대응하여 반응하지만 그 반응의 속도는 다른 토양의 지표들에 비해 그리 빠른 편이 아니다. 보통 1-2년 사이에 변

화는 쉽게 관찰되지 않고, 관찰된다 하여도 그 변화폭이 크지 않아 오차범위에 머무르는 경우도 있다. IPCC의 우수관리지침서 (2006)에서는 적절한 토양 탄소 저장량 추정을 위한 샘플링 간격을 5년 이상으로 보고 있는 것도 이 때문이다. 이에 토양의 총 탄소가 아닌 입자상 (particulate) 탄소를 분리하고 이를 관리에 민감한 지표로 활용하기도 한다 (Leidfeld and Kogel-Kanber, 2005; Six et al., 2000).

본 연구에서는 잠재적인 탄소 저장량에 대한 벼-IRG 이모작 효과를 평가하고 목초 재배지의 탄소 저장량과 비교하고자 하였다. 이를 위해 총탄소 및 질소, 그리고 입자내의 탄소 및 질소를 조사하였고, 토양탄소 저장을 쉽게 예측하기 위한 지표로 미생물활성도를 측정하였다.

재료 및 방법

포장 선정 및 관리 기존의 벼 단작과 벼-IRG 이모작의 탄소 저장량을 비교하기 위해 충남 천안, 서천 및 전남 장흥 세 지역의 논 포장을 선정하였다. 천안 성환읍 (국립축산과학원 내 시험지)의 포장은 기존의 벼 단작을 대조구 (RICE PADDY)로 유지하고 2010년 4월, IRG를 파종하여 처리구 (RICE+IRG)를 조성하였다. 서천과 장흥의 포장 역시 기존의 벼단작을 대조구로 하고 2008년 10월부터 RICE+IRG 처리를 시작하였다. 세 지역 모두 벼의 품종은 종재벼 전용 품종인 녹양 품종이고, IRG의 경우는 Kowinearly를 이용하였다. 천안지역의 토양통은 지산 (JISAN), 서천지역의 토양통은 전북 (JEONBUG), 그리고 장흥지역의 토양통은 포리 (PORI)이며, 모두 9월 초에 벼를 수확하고 10월 초에 IRG를 파종하였다. 또한 모든 지역에서 벼를 수확한 후와 IRG를 수확한 후 로타리 경운을 실시하였다.

초지 조성연도에 따른 토양탄소 축적양상을 파악하기 위해 충남 서산 (예산, YESAN)과 전북 남원 (운봉, UNBONG)의 초지를 선정하였다. 서산 지역의 초지 조성 기간은 3년, 5년 및 10년이었고, 남원 지역은 3년, 5년, 7년 및 10년이 있었다. 두지역의 초지 식생은 오차드그라스 $16 kg ha^{-1}$, 톨페스큐 $9 kg ha^{-1}$, 페레니얼라이그라스 $3 kg ha^{-1}$, 톨페스큐 $2 kg ha^{-1}$ 로 조성되었으며, 현재 식생구성은 톨페스큐 (*Lolium arundinaceum*), 오차드그라스 (*Dactylis Glommerata L.*), 켄터키 블루그라스 (*Poa Pratensis L.*)가 주종을 이루고 있었다. 또한 대상초지는 1년에 3회 예취하여 건초를 생산하는 채초지이며, 화학비료는 매년 $N-P_2O_5-K_2O$ 를 200-150-200 $kg ha^{-1}$ 를 사용해 오고 있다.

연구 대상지의 토성 및 탄소 함량은 Table 1과 같다. 충남 천안 토양의 토성은 사양토 (sandy loam), 충남 서천은 사양토 (sandy loam), 전남 장흥은 미사질식양토 (silty clay loam), 전북 남원은 사양토 (sandy loam), 그리고 충남 서산은 미사질식양토 (silty clay loam)이다. 토양탄소 함량은

Table 1. Physico-chemical characteristics of the soils from rice paddy and grassland.

Site		Sand	Clay	Silt	TC [†]	TN [‡]
		----- % -----			----- g kg ⁻¹ soil -----	
Rice paddy	Seocheon	65	15	20	29.09	2.32
"	Jangheung	20	30	50	12.22	1.19
"	Cheonan	55	3	42	6.83	0.58
Grassland	Namwon	55	15	30	30.32	3.21
"	Seosan	5	30	65	41.26	3.43

[†]TC: Total Carbon, [‡]TN: Total Nitrogen.

논의 경우 0.6–2.9%이며 초지의 경우는 3.5–4.4%로 초지의 탄소함량이 논에 비해 약 1.4–1.8 배가량 높음을 알 수 있다.

토양시료 채취 및 분석 모든 지역의 토양채취는 토양 core sampler (Forest supplier, i.d. 5 cm)를 이용하여 깊이 0–5 cm, 5–15 cm로 나누어 채취하였다. 처리구당 3개에서 5개의 core를 무작위 샘플링 방법으로 채취하여 이들을 혼합한 후 하나의 혼합시료를 만들었다.

충청남도 천안 지역 시료채취는 2010년 6월 수행하였고, 이를 처리구를 시행하기 전 기초선 (baseline)으로 보았다. 이 지역에서 1년 후 2011년 6월, 같은 방법으로 토양시료를 채취하였다. 다른 네 지역의 토양시료 채취는 2010년 10월에 수행하였다. 채취한 토양은 2 mm 체를 통과시켜 2주일 간 풍건하였다. Core sampler를 이용하여 채취한 토양의 총 무게를 샘플링 당시의 수분함량으로 보정하여 건조무게를 구하고, 이를 core의 부피로 나누어 줌으로써 토양의 용적 밀도를 구하였다.

토양 내 총탄소 및 질소는 풍건한 토양시료를 파쇄기 (disc mill)로 곱게 갈아 원소분석기 (Flash EA 1112, Italy)로 분석하였다. 입자상 유기물의 분리는 Wander et al. (1998)을 따랐다. 풍건 토양시료 10 g에 10% Na hexametaphosphate 용액 50 ml를 넣은 후 왕복진탕기 (reciprocal shaker)에 250 rpm의 속도로 흔들어 혼합액을 53 µm 입径의 폴리에스테르 체에 걸러 내어 80°C의 오븐에 24시간동안 건조시켜 입자상 유기물을 분리해 낸다. 분리된 입자상 유기물은 막자사발에 갈아 역시 원소분석기 (Flash EA 1112, Italy)로 입자상 유기물 내 탄소 및 질소 (이하 입자상 탄소, 질소)를 분석하였다.

탄소저장량 계산 탄소 및 질소 저장량은 등가 부피 (Equivalent volume) 기준과 등가질량 (Equivalent mass) 기준 두 경우로 표현하였다. 등가부피를 기준으로 탄소 및 질소의 토양내 저장량을 산정하는 방법은 토양의 탄소 및 질소 농도 (mg kg⁻¹ soil)에 해당 깊이의 용적밀도를 곱함으로써 단위 면적당 탄소 및 질소의 저장량으로 표현하는 것

이다. 등가질량을 기준으로 한 경우는 우선 해당 깊이에 용적밀도를 고려하여 그 깊이 내에 포함된 토양의 질량을 계산하게 된다. 이 경우 용적밀도가 처리구별로 모두 다르므로 동일 깊이라 하여도 깊이 내 포함된 토양질량은 모두 상이하다. 등가토양질량 기준법은 토양질량의 차이에 의해 생길 수 있는 탄소 및 질소저장량의 인위적 변화를 보정하기 위한 방법이다. 이에 동일한 질량의 토양을 비교하기 위하여 우선 처리구별 토양질량 중 가장 많은 것을 기준으로 두고, 각 처리구 별 토양을 기준토양질량과 동일하게 만들기 위하여 추가적으로 더 고려해야 할 토양깊이를 결정하고 이를 계산하는 방법이다. 자세한 방법론은 Ellert and Bettany (1985)를 참조할 수 있다.

FDA 분석 토양 미생물 활성도는 FDA 방법에 따라 분석하였다. 이는 fluorescein diacetate (3', 6'-diacetylfluorescein: FDA)가 토양 내의 보편적인 효소에 의해 가수분해 된다는 사실에 근거를 둔 방법으로, 균류 및 곰팡이류 등 일차 분해자들에게서 흔히 발견되는 protease, lipase, esterase 등이 가수분해에 관여한다. 토양 내에 FDA를 일정량 투입하면 미생물 효소에 의해 가수분해 되면서 밝은 연녹색 빛을 띠게 되는데 이의 형광정도를 흡광분석기 (Multiskan EX 200–240 V, Thermo scientific)의 490 nm 파장에서 분석하였다.

통계분석 통계분석은 SAS 9.0 (SAS institute, 2001)을 사용하여 PROC mixed로 분산분석을 시행하였고 처리간 평균비교방법은 least square mean 방법을 이용하였다 ($p < 0.05$). 상관분석은 PROC COR를 이용하여 총탄소 및 질소, 입자상 탄소 및 질소, 그리고 미생물활성도에 대하여 상관분석을 수행하였다.

결과 및 고찰

벼-IRG 재배지의 탄소저장효과 IRG 식재에 따른 대상 토양의 총탄소 농도 (0–15 cm 깊이까지의 가중평균치 사용)의 변화는 식재 후 1년이 경과한 천안에서는 유의한 증

가를 보이지 않았고 식재한지 3년이 경과한 서천과 장흥에서 유의하게 증가하였다 (Table 2, Fig. 1a). 반면, 토양의 입자상 탄소 농도 또한 서천과 장흥에서 증가한 반면 천안에서는 유의한 증가를 하지 않았는데, 천안에서 입자상 탄소농도의 증가폭은 26%이고 서천은 98%, 장흥은 84%로 총 탄소 농도의 변화폭인 천안 14%, 서천 50%, 장흥 43%에 비

하여 높았다 (Fig. 1b). 본 결과는 입자상 탄소농도는 관리 방법의 변화에 따라 빠르게 반응하는 조기 지시자가 될 수 있음을 시사한다. Leifeld and Kogel-Knabner (2005)와 Six et al. (1999)등의 연구에서도 입자상 탄소의 농도를 토지이용변화, 경운방식 변화 등에 따라 민감하게 반응하는 조기 지시자로 제안하였다.

Table 2. Variance analysis of TC concentration, PC concentration, equivalent volume SOC storage (0-15 cm), equivalent mass SOC storage (0-5 cm), and equivalent mass SOC storage (0-15 cm) of the soils from rice paddy and grassland. Trt means effects of Italian ryegrass planting in rice paddy and duration period in grassland.

	Concentration					
	Grassland			Rice paddy		
	TC	PC [†]		TC	PC	
	----- g C kg ⁻¹ soil -----					
Site	0.0336**	<.0001***		<.0001***	<.0001***	
Trt	<.0001***	0.3139		<.0001***	<.0001***	
Depth	<.0001***	<.0001***		0.1461	0.0022**	
Site*trt	0.0013**	0.0857		<.0001***	<.0001***	
Site*depth	0.0020**	0.0023**		0.6235	0.0079**	
Depth*trt	<.0001***	0.0233**		0.5627	0.1770	
Site*trt*depth	<.0001***	0.0780		0.0385**	0.0006***	
	SOC [‡] storage					
	Grassland			Rice paddy		
	Equivalent volume (0-15 cm)	Equivalent mass (0-5 cm)	Equivalent mass (0-15 cm)	Equivalent volume (0-15 cm)	Equivalent mass (0-5 cm)	Equivalent mass (0-15 cm)
	----- g C m ⁻² -----					
Site	0.0018**	0.6952	0.0035**	<.0001***	<.0001***	<.0001***
Trt	<.0001***	<.0001***	<.0001***	0.0003***	<.0001***	<.0001***
Site*trt	0.0032**	0.0015**	0.0209**	0.0310**	<.0001***	0.0037**

[†]PC, Particulate Carbon. [‡]SOC, Soil Organic Carbon.
 *, **, *** Significant at 0.05, 0.01, 0.001 probability level, respectively.

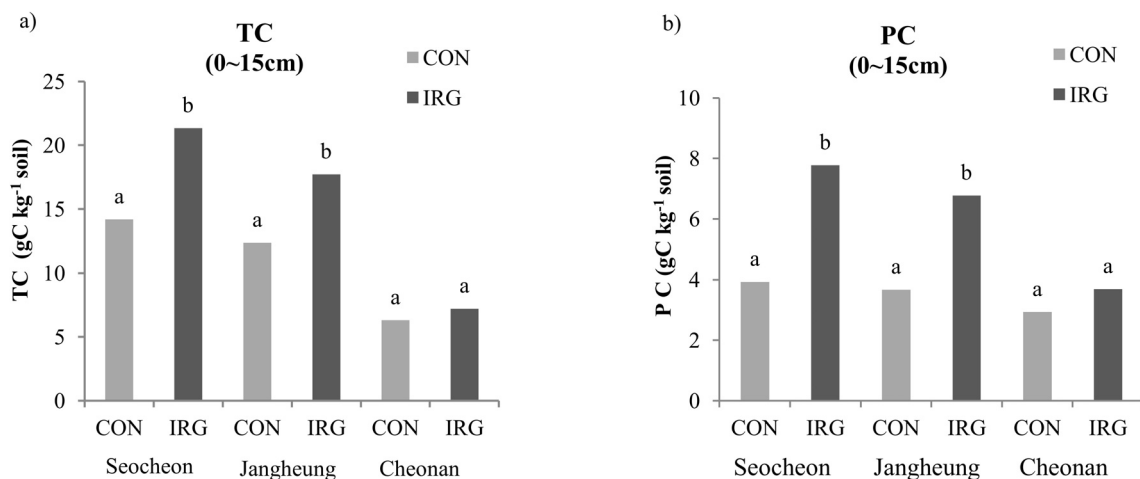


Fig. 1. Changes in total^{a)} and particulate^{b)} carbon concentrations in Seocheon, Jangheung, and Cheonan, Korea. Different letters with above data from each location mean significant difference at P<0.05.

IRG 식재에 따른 토양의 총탄소 저장량은 토심 0-15 cm 사이의 동일 토양부피 내에 저장된 탄소를 기준으로 한 경우와 토심 0-5 cm 사이 동일 토양질량 및 0-15 cm 사이 동일 토양질량 내 저장된 탄소를 기준으로 한 경우 모두 서천 및 장흥에서는 IRG 식재에 따라 유의하게 증가되었고 식재 한지 1년이 경과한 천안에서는 토양 탄소저장량의 유의한 증가는 토심 0-15 cm 사이의 동일토양질량을 기준으로 한 경우에 국한되었다 (Table 3).

토양 내 탄소저장량의 증가를 보인 서천 및 장흥지역에서는 IRG 식재 후 3년이 경과한 시점에서 IRG를 식재하지 않은 토양에 비하여 각각 52%, 및 43% 만큼의 탄소가 증가한 것으로 나타났다 (Fig. 1). 이 결과는 Ryegrass를 피복작물 (cover crops)로 5년간 재배한 경우 0-15 cm 토양에서 총탄소 농도의 증가를 관찰한 Kuo et al. (1997)의 결과와도 일치하며, 이런 탄소저장의 증가는 IRG로 인해 토양에 추가로 유입되는 유기물 때문으로 사료된다. IRG는 가을에 파종되어 봄에 지상부 유기물은 전량 수확되지만, 토양에 남아 있는 잔가지 및 뿌리가 토양에 골고루 혼합되어 토양유기물의 저장을 가져오는 것으로 파악된다. 동절기 동안 IRG를 심지 않은 나대지에서 발생하는 biomass와 토양의 순탄소동화량을 비교하면, 동절기 IRG 재배는 사료작물의 수입 대체

효과뿐만 아니라 농경지로부터 발생하는 이산화탄소의 저감에 합리적인 관리 방법으로 제안될 수 있다고 본다.

토양탄소 저장량을 계산하는 방법을 일정토양 부피기준 및 일정토양 질량기준으로 달리하여도 IRG 식재에 따른 영향은 변화하지 않았는데 (식재 후 1년 이내인 천안지점은 제외) (Table 3), 이는 IRG 식재에 따라 토양의 부피와 질량에 영향을 미치는 용적밀도가 유의하게 변화하지 않았기 때문으로 사료된다.

목초지의 탄소저장효과 토양의 총탄소 농도는 남원과 서산의 토심 0-5 cm에서 모두 초지 조성연도가 오래될수록 증가하였다 (Table 2, Fig. 2a). 토심 5-15 cm 깊이에서는 초지 조성연도에 따른 증가경향이 토심 0-5 cm에 비해 명확하지 않았는데 이는 초지를 구성하는 식물들의 뿌리가 주로 표토에 많이 분포하므로 오래된 초지일수록 뿌리로부터의 탄소유입이 많아지는 반면, 표토 이하의 토양에서는 경운 등의 토양혼합 작용이 없다면 탄소증가의 속도가 느려지거나 혹은 감소하는 경향까지도 보고된 바 있다 (Wander et al., 1998). 한편, 토양 내 입자상 탄소농도는 토심 0-5 cm의 표토에서 서산에서는 조성원년에 비해 5년 및 10년이 지난 시점에서 유의한 증가를 보였으나 남원에서는 조성한

Table 3. Changes in soil carbon storage calculated based on equivalent volume(0-15 cm), equivalent mass (0-5 cm), and equivalent mass (0-15 cm).

Site	Equivalent volume (0-15 cm)		Equivalent mass (0-5 cm)		Equivalent mass (0-15 cm)	
	CON [†]	IRG	CON	IRG	CON	IRG
Seocheon	2096.1 a*	2707.4 b	929.2 a	1698.5 b	2169.4 a	2695.9 b
Jangheung	1573.7 a	2094.6 b	966.9 a	1543.6 b	1575.6 a	2091.1 b
Cheonan	1043.2 a	1187.9 a	340.3 a	401.0 a	1028.6 a	1178.8 b

[†]CON, Single-crop farming of rice; IRG, Rice-Italian ryegrass rotation farming.

*Different letters with data mean significant difference at P<0.05.

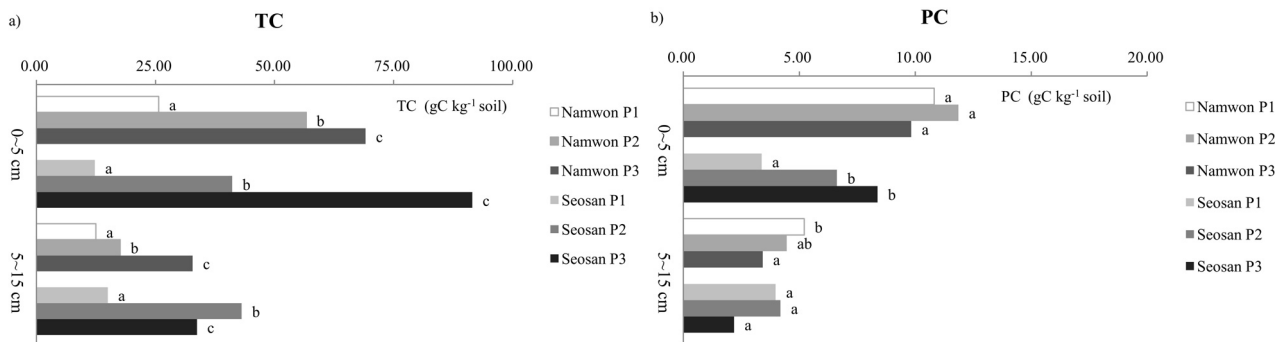


Fig. 2. Changes in total^{a)} and particulate^{b)} organic carbon concentrations in Namwon and Seosan influenced by years since establishment (P1, P2, P3). Different letters with above data from each location mean significant difference at P<0.05.

지 3년, 7년, 10년 후에 유의한 증가를 보이지 않았다 (Fig. 2b). 일반적으로 입자상 탄소 농도를 관리방법에 따른 변화의 초기 지시자로 제안한 경우, 주로 피복작물이나 경운 등의 농경지 관리에 따른 변화를 연구한 사례가 있다 (Jastrow, 1996; Wander et al., 1998). 반면 토양 탄소를 본 연구보다 세밀하게 분석한 Accoe et al. (2004)의 연구에서 초지 조성 연도에 따라 민감하게 증가하는 탄소 분획 (carbon fraction)은 습식 분리를 통해 걸러낸 15 μm -2 mm 사이의 입자 중 밀도가 1.37 g cm^{-3} 보다 높은 입단이라고 보고하였다. 즉, 초지의 경우 관리 변화에 가장 민감하게 반응하는 탄소는 입자상 탄소에 의존할 것이 아니라 밀도 및 크기 기준으로 세밀하게 분리하여 탄소저장에 대한 초기 지표를 찾아내는 노력이 필요하다고 할 수 있다.

토양의 총탄소 저장량은 조성연도에 따른 변화양상이 남원과 서산에서 각각 다르게 나타났다 (Table 2). 이는 남원의 경우 조성 후 3년, 7년, 10년의 자료로 구성되어 있고 서산의 경우는 조성 원년 및 5년, 10년의 자료로 구성되어 있기 때문이다. 총탄소 저장량의 시간에 따른 증가속도는 남원과 서산 두 지역의 자료를 종합하여 보았을 때 조성 초기의 증가속도가 조성 후기의 속도에 비해 매우 빠른 것을 알 수 있다. 이는 IPCC (2000)에서 관리방법 전환에 따른 토양 탄소의 축적속도가 0-20년 사이에 선형으로 가정된 것이 초기의 축적속도를 과소평가하고 후기의 축적속도를 과대평가할 수 있는 오류를 포함할 수 있음을 암시한다.

탄소저장량 계산방법에 따른 초지 탄소저장량 변화는 남원의 경우 계산방법을 달리함에 따른 유의성 차이가 발견되지 않았으나 서산의 경우 같은 깊이 기준 (토심 0-15 cm)에서 보았을 때 동일 부피로 비교한 경우와 동일 질량으로 비교한 경우에 조성연도별 유의성 차이가 달라졌다 (Table 4). 서산에서는 동일 부피의 토양으로 비교하였을 때 조성 후 5년과 10년 경과된 토양에서의 탄소저장이 유의하게 다르게 표현된 반면, 이를 동일 질량의 토양에서 비교하면 조성 후

5년 및 10년 경과된 토양의 탄소저장량이 유의하게 증가되지 않은 것으로 나타났다. 서산의 경우, 토양의 용적밀도는 조성원년의 토심 0-15 cm 사이의 가중 평균치가 1.14 g cm^{-3} 에서 조성 10년차에 1.21 g cm^{-3} 로 유의한 증가추세를 보였다. 초지가 오래됨에 따른 토양 용적밀도의 변화는 토성 및 수분조건에 따라 증가 및 감소 추세가 모두 보고되었는데, Neill et al. (1997)은 브라질의 3년에서 20년 이상 된 목초지에서 탄소저장을 연구한 논문에서 조성연도의 증가에 따른 용적밀도의 유의한 증가를 보고하였다. 연구대상지인 서산 및 남원 초지는 조성 후 시비 이외의 특별한 관리를 하지 않았을 뿐만 아니라, 경운작업도 실시하지 않은 곳이다. 따라서 표토의 총탄소와 입자상 탄소 농도는 조성연도에 따라 현저히 증가하지만 5-15 cm 깊이에서의 탄소 농도는 감소하는 경향을 볼 수 있다. 그 결과 0-15 cm 전체를 볼 경우 저장된 탄소의 양이 예상만큼 현저하게 증가되지는 않은 것을 알 수 있다. 즉, 초지가 논-IRG로 관리되는 농경지와 비교하였을 때에는 두 배 이상 높은 탄소를 보유하고 있지만 적절한 토양관리가 없을 경우 총탄소량의 증가를 기대하기 어려움을 시사한다고 할 수 있다.

토양 탄소 및 질소와 FDA 활성 간의 상관관계 토양 내 미생물 활성도는 토양시료 별로 전반적 유기물 분해 과정에 대한 상대적 비교를 할 수 있는 인자로 인용되고 있다 (Schnurer and Rosswall, 1982). 미생물 활성도는 IRG 식재에 따라 서천과 장흥에서 감소하였고, 미생물 활성 감소의 폭은 서천에서 더 컸다 (Fig. 3). 논-IRG와 초지 토양에서 각각 미생물활성도와 총 질소농도 및 입자상 질소농도는 음의 상관관계를 보였다 (Table 5).

초지에서 미생물활성도는 서산 및 남원 모두에서 조성연도에 따른 유의한 차이가 없었다. 이 지역에서 미생물활성도와 탄소 및 질소농도는 유의한 상관관계를 갖지 않았다. 본 연구에서 측정된 FDA는 특정 미생물과 관련되어 있다기

Table 4. Changes in soil carbon storage calculated based on equivalent volume (0-15 cm), equivalent mass (0-5 cm), and equivalent mass (0-15 cm) influenced by years since pasture establishment.

Site		Equivalent volume	Equivalent mass	Equivalent mass
		(0-15 cm)	(0-5cm)	(0-15 cm)
		g C m ⁻²		
Namwon	P1	2654.10 a*	2254.49 a	3847.40 a
"	P2	5523.30 b	3106.44 b	5831.34 b
"	P3	5679.85 b	3585.47 b	7652.32 b
Seosan	P1	2399.79 a	791.74 a	3172.76 a
"	P2	7803.13 b	2677.67 b	9419.38 b
"	P3	9626.29 c	4542.75 c	9567.77 b

* Different letters with data mean significant difference at $P < 0.05$.

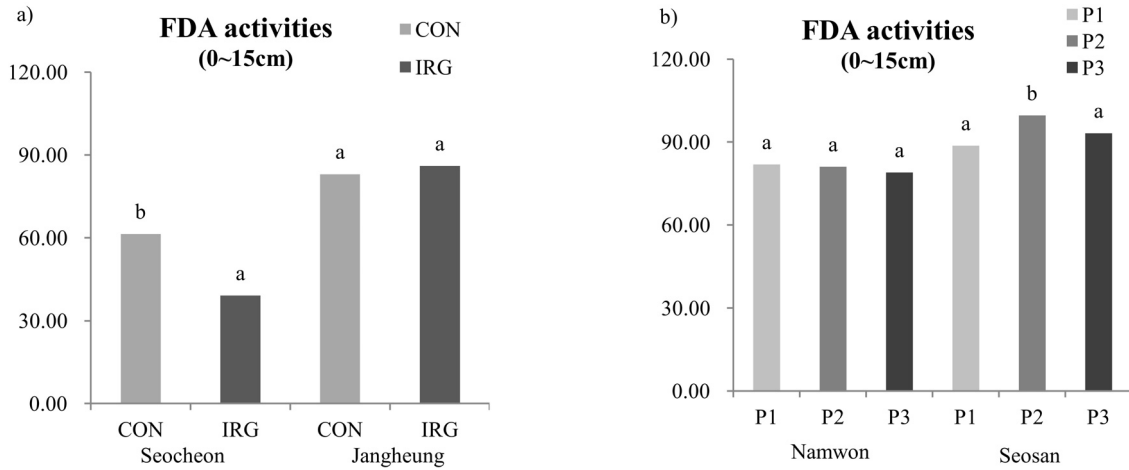


Fig. 3. Changes in FDA activities influenced by IRG plantation in rice paddy soils^{a)}, and by years since pasture establishment in grassland soils^{b)}. Different letters with above data from each location mean significant difference at $P < 0.05$.

Table 5. Pearson correlation coefficients among physico-chemical characteristics of the each treatment.

		FDA [†]	TC	TN	PC	PN
Rice paddy	FDA	1.000 (27)	-0.078 (27)	-0.363 (27)	-0.17 (27)	-0.367 (27)
	TC		1.000 (32)	0.853*** (32)	0.454** (32)	0.435* (32)
	TN			1.000 (32)	0.605*** (32)	0.504** (32)
	PC				1.000 (36)	0.887*** (36)
	PN					1.000 (36)
Grassland	FDA	1.000 (40)	0.07 (36)	0.202 (40)	-0.091 (40)	-0.064 (40)
	TC		1.000 (36)	1.000 (36)	0.411** (36)	0.381* (36)
	TN			0.397* (40)	0.897*** (40)	0.876*** (40)
	PC				1.000 (40)	0.993*** (40)
	PN					1.000 (40)

[†]FDA, Fluorescein Dehydrogenase Activity; PN, Particulate Nitrogen.

*, **, *** Significant at 0.05, 0.01, 0.001 probability level, respectively.

Numbers in parentheses are observation numbers used to calculate coefficients.

보다는 일반적 분해미생물에서 흔히 발견되는 esterase, protease, lipase 등을 측정하는 간접 지표로서 Son et al. (2006)의 연구에서 토양 FDA 활성도는 토지이용에 따라서

는 유의하게 달라졌으나, Lundquist et al. (1999)의 연구에서도 토양 FDA 활성도는 유기물을 첨가시키는 처리구에서 대조구와 유의한 차이를 보이지 않았다. 즉, FDA 활성도 자

체만으로는 토양탄소저장량을 판단하는 유용한 지표로 활용하기 힘들다고 판단되며 미생물 생체량 탄소 및 질소, 특정 토양효소 등과 함께 측정하여 토양별 차이의 설명에 도움을 주는 보조 자료로 활용되어야 한다고 생각한다.

요 약

본 연구는 논과 목초지에서 관리방법에 따른 토양탄소의 변화에 대해 알아보았다. 논에서는 총탄소 농도의 변화에 비하여 입자상 탄소농도의 변화가 IRG 처리에 따라 더 민감하게 반응하였으며, 이에 입자상 탄소농도는 관리방법 변화에 따른 조기지시자로 활용될 수 있음을 시사하였다. 반면, 초지에서는 입자상 탄소농도의 변화가 총탄소 농도 변화에 비해 오히려 더 민감하지 않게 반응하였는데, 이는 본 연구 방법에 따라 분류한 입자상 탄소가 초지와 같은 생태계에서는 의미 있는 탄소부분이 아닐 수 있음을 시사한다.

토양탄소저장을 살펴보았을 때 논은 겨울동안 IRG 목초작물을 재배하는 관리를 3년 이상 지속한 서천 및 장흥에서 유의한 증가가 있었다. 토양탄소의 유의한 증가는 농도뿐만 아니라 용적밀도를 고려하여 동일 부피 토양을 비교한 경우 및 동일 질량 토양을 비교한 경우 모두 유의하게 관찰되었는데, 이는 IRG 재배에 따른 토양탄소 저장의 증가가 단순히 표토에 축적된 식물체 유기물에 의한 일시적 농도의 증가가 아닌 토심 0-15 cm 깊이의 토양탄소의 증가였음을 시사한다.

목초지에서는 목초지 조성이후 3년, 5년, 7년, 10년이 지남에 따라 표토 (0-5 cm)에서의 탄소농도 증가가 현저하였다. 반면 5-15 cm 깊이의 토양에서는 이러한 증가경향이 뚜렷하지 않거나 오히려 감소하기도 하였다. 이 결과 토양 내 저장되어 있는 탄소량을 용적밀도를 고려하고 동일 질량을 비교한 경우에 시간에 따른 뚜렷한 증가경향이 흐릿해짐을 알 수 있었다. 이는 초지 조성시기가 오래됨에 따라 토양의 용적밀도가 높아짐으로 인해 용적밀도 증가에 따른 토양질량의 증가분을 보정하였을 때 나타나는 결과로써, 초지 조성연도가 오래될수록 저장된 탄소의 양이 선형적으로 증가할 것이라는 기존의 통념을 수정할 필요가 있음을 시사한다.

IPCC (2006)에서 제안한 지침에 따르면, 토양탄소는 20년 동안 직선적인 증가를 한다는 가정을 하였는데, 본 연구의 결과에서 특정 관리방법 착수시점에서 초기 5-7년 동안 토양탄소는 빠르게 증가하고, 증가속도는 그 이후에 느려지고 있음을 보여준다. 이는 지속적 토양탄소 저장 증가를 위해서는 적절한 토양관리 및 유기물 관리를 해야 한다는 점을 의미하기도 한다. 한편, 토양 내 FDA 활성도에 비추어 본 미생물 활성도는 논은 IRG 처리구에서 대조구에 비해 유의하게 낮게 나타났으며 초지의 경우는 조성연도별 유의한 차이가 없었다. 이는 FDA 활성도가 토양의 관리방

법별 차이에 따른 토양 질의 변화를 표현하기에는 민감하거나 변별력이 높은 지시자는 아님을 의미하며, 미생물 생체량이나 토양호흡량 등과 함께 측정하여 보조적인 자료로 활용하는 것이 좋다고 판단된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ0075622011)의 지원에 의해 이루어짐.

인 용 문 헌

- Accoe, F., P. Beocks, J. Busschaert, G. Hofman, and O. Van Cleemput. 2004. Gross N transformation rates and net N mineralization rates related to the C and N contents of soil organic matter fractions in grassland soils of different age. *Soil Biol. Biochem.* 36:2075-2087.
- Conant, R.T., K. Paustian, and E.T. Elliott. 2001. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecol. Appl.* 11:343-355.
- Ellert, B.H. and J.R. Bettany. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.* 75:529-538.
- FAO. 2010a. In Conant, R.T. (ed.) Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems: A technical report on grassland management and climate change mitigation. *Integrated crop management*. Vol. 9. FAO.
- FAO. 2010b. In Abberton, M. et al. (ed.) Grassland carbon sequestration: management, policy and economics. *Integrated Crop Management*. Vol. 11. FAO.
- IPCC. 1996. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC.
- IPCC. 2000. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. IPCC.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC.
- Jastrow, J.D. 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 28:665-676.
- Jeong, K.H., J.H. Jo, C.K. Kim, K.H. Lee, Y.C. Yoon, K.A. Roh, K.H. Park, K.I. Wang, and B.B. Jin. 2008. Research to apply for the new IPCC guidelines to national greenhouse gases corresponding UNFCCC (In Korean). Research Report 08-19. Korea Energy Economics Institute, Uiwang, Korea.
- Kuo, S., U.M. Sainju, and E.J. Jellum. 1997. Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:145-152.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma.* 123:1-22.

- Leidfeld, J. and I. Kogel-Knaber. 2005. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land use. *Geoderma*. 124:143-155.
- Lundquist, E.J., L.E. Jackson, K.M. Scow, and C. Hsu. 1999. Changes in microbial biomass and community composition, and soil carbon and nitrogen pools after incorporation of rye into three California agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.* 31:221-236.
- Neill, C., J.M. Melillo, P.A. Steudler, C.C. Cerri, J.F.L. De Moraes, C. Piccolo, and M. Brito. 1997. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon. *Ecol. Appl.* 7:1216-1225.
- Pew center. 2009. Climate Techbook: Agricultural sector overview. Pew Center
- Post, W.M. and K.C. Kwon. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biol.* 6:317-328.
- Roh, K.A., H.C. Jeong, G.Y. Kim, K.H. So, K.M. Shim, D.B. Lee, and Y.H. Kim. 2010. Estimation of carbon sequestration and methane emission with organic amendment application at agricultural soil in Korea. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, 2010 Spring Meeting Abstract. p. 156.
- Schnurer, J. and T. Rosswall. 1982. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Appl. Environ. Microbiol.* 43:1256-1261.
- Six, J., K. Paustian, E.T. Elliott, and C. Combrink. 2000. Soil structure and organic matter I: Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:681-689.
- Son, Y., K.Y. Seo, R.H. Kim, and J. Kim. 2006. Soil respiration and FDA hydrolysis following conversion of abandoned agricultural lands to natural vegetation in Central Korea. *J. Plant Biol.* 49(3):231-236.
- Son, Y.M., K.H. Lee, R.H. Kim, J.K. Pyo, I.H. Park, Y.H. Son, Y.J. Lee, and C.S. Kim. 2010. Carbon emission factor of the main species for forest greenhouse gas inventory(In Korean). Research Report 10-25. Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea.
- Wander, M.M., M.G. Bidart, and S. Aref. 1998. Tillage impacts on depth distribution of total and particulate organic matter in three Illinois soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1704-1711.
- Yoo, G. and M.M. Wander. 2006. Influence of tillage practices on soil structural controls over carbon mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:651-659.