

Evaluating Soil Carbon Changes in Paddy Field based on Different Fraction of Soil Organic Matter

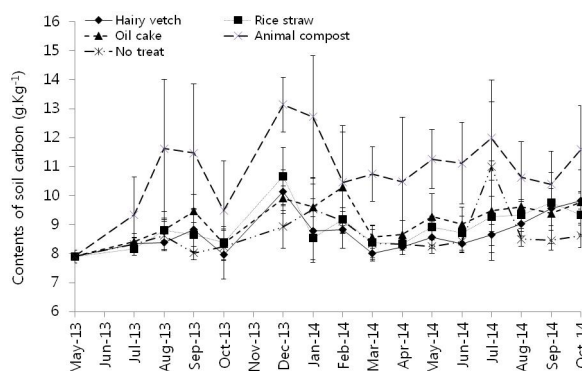
Myung-Chul Seo*, Hyeon-Suk Cho, Jun-Hwan Kim, Wan-Gyu Sang, Pyeong Shin, and Geon Hwi Lee

National Institute of Crop Science, Wanju-Gun, 55365, Korea

(Received: August 25 2015, Revised: October 30 2015, Accepted: December 25 2015)

Organic matter plays important roles in soil ecosystem in terms of carbon and nitrogen cycles. Due to recent concerns on climate change, carbon sequestration in agricultural land has become one of the most interesting and debating issues. It is necessary to understand behavior of soil carbon for evaluating decomposition or sequestration of organic matter and analyzing potential carbon decomposition pattern about the kinds of organic matter sources to cope with well. In order to evaluate decomposition of soil carbon according to organic material during cultivating rice in paddy field, we treated organic material such as hairy vetch, rice straw, oil cake fertilizer, and manure compost at $50 \times 50 \times 20$ cm blocks made of wood board, and analyzed carbon contents of fulvic acid and humic acid fraction, and total carbon periodically in 2013 and 2014. Soil sampling was conducted on monthly basis. Four Kinds of organic matter were mixed with soil in treatment plots on 2 weeks before transplanting of rice. The treatment of animal compost showed the highest changes of total carbon, which showed 7.9 g kg^{-1} in May 2013 to 11.6 g kg^{-1} in October 2014. Fulvic acid fraction which is considered to easily decompose ranged from 1 to 2 g kg^{-1} . Humic acid fraction was changed between 1 to 3 g kg^{-1} in all treatments until organic material had been applied in 2014. From May to August in the second year, the contents of humic acid fraction increased to about 4 g kg^{-1} . The average of humic fraction carbon at treatments of animal compost was recorded highest among treatments during two years, 2.1 g kg^{-1} . The treatment of animal compost has showed the lowest ratio of fulvic acid fraction, humic acid fraction compared with other treatments. The average ratio of fulvic fraction carbon in soil ranged from 16 to 20%, and humic fraction carbon ranged from 19 to 22%. In conclusion, animal compost including wood as bulking agent is superior in sequestering carbon at agricultural land to other kinds of raw plant residue.

Key words: Soil organic carbon, Decomposition, Carbon sequestration, Humic substance, Hairy vetch, Rice straw, Oil cake fertilizer, Animal compost



Periodical changes of total carbon contents with treatments in subjected soils.

The treatment of manure compost increased the highest among the treatments about the changes of total carbon showed 7.9 g kg^{-1} May in 2013 to 11.6 g kg^{-1} in October 2014. Other treatment of organic matter also showed trend to increase slightly in spite of lower than manure compost.

*Corresponding author: Phone: +82632385281, Fax: +82632385255, E-mail: mcseo@korea.kr

§Acknowledgement: This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ009332)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

농경지 토양에서 유기물은 토양의 물리적 특성을 결정하는데 주요한 인자일 뿐 아니라 작물 생산성에 기여하는 비옥도를 증진하거나 유지하는데 필수적인 요소이다. 또한 토양 미생물의 기질로 작용하여 분해되고 무기화되어 작물에 양분공급을 하는 등 토양 내 양분순환에 결정적인 역할을 한다 (Kim et al., 2004; Lee et al., 2006; Kim et al., 1997). 농업의 지속성을 고려한 생산성과 안정성 및 체계적인 토양관리 체계를 위한 평가수단인 토양의 질 (Soil Quality) 을 평가하는데 있어 국제적으로도 토양의 유기물은 물리적, 화학적, 생물학적으로 중요한 지표로서 자리매김 하고 있다 (Kim et al., 2014).

유기물의 물리성 개선 효과와 관련하여 김 등(2004)은 유기성 물질의 농경지 사용에 따라 용적밀도 감소, 통기성 증가, 대공극률 증가, 전단저항성 감소 등의 물리성 개선효과가 나타났으며 전통 유기물 자원별 토양 물리성 개선효과는 벚짚 퇴비가 높았고 헤어리베치, 가축분 등이 낮은 편이라고 보고하였다 (Kim, et al., 2004). 유기물의 양분공급능력도 높아 벚짚, 벚짚퇴비, 헤어리베치를 사용하여 벼를 재배한 결과 화학비료 3요소를 사용한 처리구에 비해 각각 72%, 77%, 103%의 쌀수량을 나타내었고 용적밀도는 감소하는 경향을 나타내었다고 보고하였다 (Lee et al., 2011). 토양에서 양분의 공급은 유기물의 분해로 이산화탄소가 발생하고 질소의 무기화 과정을 통해 이루어 지는데 유기물의 분해는 토양에 시비되는 유기물의 자원의 종류, 토양수분, 온도 등에 차이가 있어 양분 공급능력도 차이가 있으며 토양에서 존재하는 유기물의 다양한 형태적 특성에 따라 차이가 나타난다.

최근 기후변화에 대한 관심이 높아지면서 농경지 토양의 탄소 저장능력에 대한 시험과 고찰이 많이 이루어지고 있다. 2013년 지구 이산화탄소 수지에서 토양에서 이산화탄소를 발생할 수 있는 잔재의 탄소 저장량은 약 $2.5 \pm 0.9 \text{ GtC yr}^{-1}$ 로 평가되었으며 이 가운데 일부는 토양의 탄소 흡수원이 될 수 있다 (Le Quere et al., 2014). 우리나라 토지이용별 탄소 저장량을 보면 총 탄소 저장량은 413 GgC이며 이 가운데 논과 밭 등 농경지에는 157 GgC을 저장하고 있는 것으로 평가되었다 (Hong et al., 2010). 온실가스 발생 및 토양의 탄소축적을 위해서는 토양에서 유기물의 분해와 관련한 자료들과 시험들이 많이 수행되어 자료의 축적이 필요하다.

토양 유기물은 다양한 성분의 화합물로 구성되어 있다. 식물, 동물 등의 잔재로 이루어진 성분들과 생물학적 화학적 반응을 통해 변환된 물질 등으로 크기도 매우 다양한 성분으로 구성되어 있다. 토양 유기물의 특성을 구분하기 위해 산과 알칼리 용매에 대한 용해도의 차이를 이용하여 풀빅산 (fulvic acid), 부식산 (humic acid), 휴민 (humins)으로

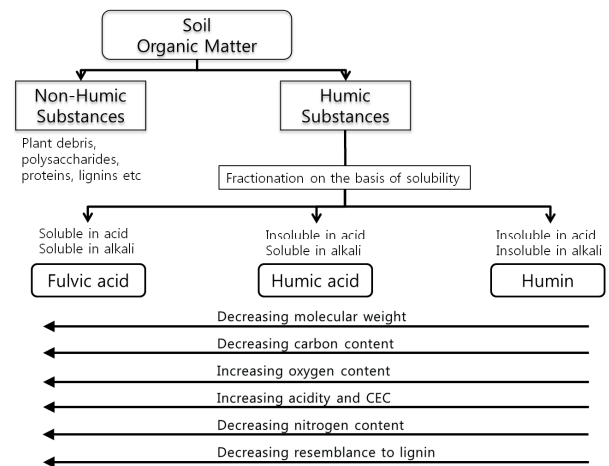


Fig. 1. Diagram of categorization of soil organic matter into humic and nonhumic substances (Roger S. Swift, 1996).

분획을 나누는데 주요한 과정 및 물리화학적 특성은 Fig. 1과 같다 (Roger, 1996). Fig. 1에서 보이는 바와 같이 분획별로 포함되어 있는 화합물을 정밀하게 분석하는 것은 많은 시간과 과정을 거쳐야 한다 (Christl et al., 2000; Michael and Hayes, 2006; Lee et al., 2004). Fig. 1에 나타난 바와 같이 휴민 분획으로 갈수록 난분해성인 리그닌 유사물질이 많아지기 때문에 유기물 분해도 상대적으로 어렵다는 것을 의미하고 있다. 분리된 분획내의 존재하는 탄소의 양을 정량화하여 이분해성 유기물과 난분해성 유기물의 동태를 평가하여 유기물의 분해 또는 축적양상을 평가하는 것이 유기물 종류, 토양의 상태에 따른 축적양상을 고찰하는데 중요할 것으로 판단된다.

농경지에서 지속적인 양분공급과 비옥도를 유지하기 위해서는 토양 내 유기물이 종류에 따라 얼마나 빠르게 분해되고 저장성을 갖는 지에 대한 동태가 중요하다. 이에 따라 유기물 분해와 관련한 모델개발, 변동양상 등에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다 (Stefano et al., 2012, Yasser et al., 2012). 유기물 분해 양태를 알기 위해서는 토양 내 존재하는 이분해성 유기물과 난분해성 유기물의 함량에 대한 동태를 파악하는 것이 필요하다. 토양 유기물 분획의 함량은 토양에서 투입된 유기물 자원이 얼마만큼 이분해성인 풀빅산과 난분해성인 휴민으로 변화되고 이에 따라 토양에서 분해되는 속도와 양분 공급능력에 대한 해석이 가능하다. 이러한 결과는 토양의 비옥도를 지속적으로 유지하기 위해 투입되는 유기물의 양과 종류를 적절하게 결정할 수 있는 수단을 제공할 수 있을 것으로 기대되며 이를 위한 유기물 분해 또는 축적 모형을 개발하는데 중요한 기초자료로서 활용될 수 있다.

본 연구는 유기물이 사용된 논에서 벼 재배시 토양내의 총 탄소함량과 유기물분획 내의 탄소함량의 변동 양상을 분석하여 토양에서 유기물 종류에 따라 분해 또는 축적되는 과정을 해석함으로써 안정적인 비옥도 및 양분공급능력을

유지하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

Materials and Methods

본 시험을 수행한 지점은 경기도 수원 국립식량과학원에 있는 포장이며 토양통은 강서통이었다. 벼 재배 시 유기물 자원에 따른 논 토양에서 토양탄소 및 유기물의 용해도에 따른 분획별 탄소함량을 평가하기 위하여 포장에서 50×50 cm (W×L) 크기의 무처 포트 3반복으로 조성하였다. 조성된 처리구에서 재배된 벼의 품종은 일미벼이며 2013년에는 5월 25일, 2014년에는 5월 28일에 포트 당 4주를 이앙을 하였고 2013년에는 10월 11일, 2014년 10월 10일 벼의 생육조사를 하였다. 본 시험은 유기물 분해양상을 경시적으로 평가하는 것이 주요한 목적이고 시용된 유기물의 양이 많기 때문에 무처리구를 포함한 모든 처리구에는 별도의 화학비료 시비는 하지 않았다. 본 시험에 처리는 헤어리베치, 벧짚, 유박, 가축분 퇴비 및 무시용 처리구를 조성하였으며 20 cm 깊이의 토양을 기준으로 2%에 해당되는 양을 유기자원 종류별로 혼합하고 다시 충전하여 시험을 수행하였다. 헤어리베치와 벧짚은 5 cm 내외로 절단하여 토양과 혼합하였으며 유박과 가축분퇴비는 판매되는 제품 상태로 혼합하였다. 유기물 시용은 2013년과 2014년 벼 이앙 2주 전에 투입하였으며 토양 유기물의 분해 양상을 분석하기 위하여 월 1회 토양 시료를 채취하여 시료를 건조하고 2 mm 체를 통과시켜 분석을 위한 토양시료를 조제하였다.

본 시험은 투입된 유기물 종류에 따른 토양탄소의 분해 및 각 분획에 포함되어 있는 탄소의 경시적 동태를 살피기 위해 일반적으로 경작시 토양에 시용되는 유기물의 양보다 많은 양을 투입하여 작물을 재배하였다. 처리된 유기물의 특성은 Table 1과 같으며 헤어리베치, 벧짚, 유박, 가축분퇴비의 전질소 함량은 각각 2.65, 0.8, 4.2, 1.8%로 유박이 가장 높았으며 다음으로 헤어리베치가 높았고 C/N율은 각각 15.0, 48.6, 9.5, 20.5로 전질소 함량과 반대로 유박, 헤어리베치 순으로 낮았으며 특히 벧짚은 다른 처리구에 비해 매우 높은 편이었다. 이러한 유기물의 특성을 보았을 때 토양의 2% 유기물 처리구에서 유박과 헤어리베치, 퇴비의 경우 작물 생육에 필요한 충분한 질소함량이 공급된 것으로 분석되지만 벧짚의 경우 질소기아가 발생할 우려가 매우 높

Table 1. Contents of total nitrogen and carbon, and C/N ratio in organic matter applied.

	Hairy vetch	Rice straw	Oil cake	Manure compost
T-N (%)	2.65	0.8	4.2	1.8
T-C (%)	39.8	38.9	39.9	36.9
C/N ratio	15.0	48.6	9.5	20.5

은 처리이다.

시험 전 토양의 화학성 분석을 위하여 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)을 적용하여 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 초자전극법 (Orion 520A pH meter, Orion Research Inc. USA)으로 측정하였고 유기물은 건식 연소법을 이용하는 원소분석기 (vario EL III, Elementar, Germany)를 이용하여 분석을 하였으며 토양유기물로 환산하기 위하여 분석된 탄소함량에 1.724 계수를 곱하여 계산하였고 양이온은 1M NH₄OAc로 추출하여 ICP (Integra-XP, GBC Scientific Equipment Ltd, Australia)로 분석을 하였다.

토양 내에서 변동되는 유기물 함량을 평가하기 위해 유기물 함량과 밀접한 상관관계를 가지고 있는 토양탄소의 함량을 주기적으로 분석하여 변동양상을 평가하였다. 먼저 시기별 채취된 토양시료에 대한 총 탄소함량을 분석하기 위하여 위에서 언급한 건식 연소법을 이용하여 분석하였다.

시기별 채취된 토양 내 분획별 탄소의 변동양상을 분석하기 위하여 조제된 토양 시료 4 g을 40 ml 0.1N NaOH 용액에 첨가하여 25°C, 200 rpm에서 12시간 진탕을 하였다. 3%에 해당하는 NaCl을 첨가하고 1,500 g에서 15분간 원심 분리한 후 상등액과 침전물을 분리하였다. 알칼리 용액에 용해된 풀빅산과 부식산 분획인 상등액을 10 ml 추출하여 총탄소 분석에 사용하고 (Solution A) 남은 30 ml의 상등액은 3N HCl를 첨가하여 pH를 1.0으로 조절하여 10간에서 16시간 상온에서 방치한 후 1,500 g에서 10분간 원심분리하여 상등액과 침전물을 분리하였다. 이 때 분리된 상등액을 다시 10 ml 추출하여 총탄소 분석을 하였다 (Solution B). 산에 용해되어 상등액에 포함된 탄소는 풀빅산 분획 탄소이며 침전물은 부식산 분획의 탄소로 정의하였다 (Roger, 1996).

분리된 분획에서 추출한 상등액인 Solution A와 Solution B는 증류수로 30배 희석 한 후 TOC analyzer (TOC-LCSH/CPH, Simazu, Japan)를 이용하여 탄소함량을 분석하였다.

분석된 Solution B의 탄소함량은 풀빅산 분획의 탄소함량으로, Solution A의 탄소함량에서 Solution B의 탄소함량을 뺀 탄소함량을 부식산 분획의 탄소함량으로, 마지막으로 토양 총 탄소함량에서 Solution A의 탄소함량을 뺀 값을 난분해성이라 할 수 있는 휴민의 함량으로 정의할 수 있다. 물에도 용해될 수 있는 당류 등의 이분해성 탄소화합물의 경우 양은 많지 않고 대부분이 알칼리와 산에 용해되는 풀빅산 분획에 포함될 것으로 추정되어 본 시험에서는 별도로 정량화하지는 않고 풀빅산에 포함되는 것으로 설정하고 본 시험을 수행하였다.

Results and Discussion

시험 전 토양의 화학성은 Table 2와 같다. 토양 pH는 8.4

Table 2. Chemical properties of initial soil in plot treated before experiment.

pH	EC	OM	T-N	P2O5	Exch. Catons		
					K ₂ O	CaO	MgO
(1:5)	dS.m ⁻¹	g kg ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	cmol.Kg ⁻¹		
8.4	89.7	13.6	0.09	89.8	0.48	13.8	3.76

Table 3. Rice yields and yield components at plots applied with hairy vetch, rice straw, oil cake fertilizer, animal compost and no treatment.

	Year	Culm length	Ear length	Ear number	1000 grain weight	Brown rice yields
		(cm)	(cm)		(g)	(g.4 plants ⁻¹)
Hairy vetch	2013	72.4	22.0	19.3	21.9	196.4
	2014	70.3	20.1	27.8	22.4	224.7
Rice straw	2013	69.5	20.4	12.9	17.0	99.4
	2014	67.3	20.4	13.3	22.3	113.7
Oil cake	2013	75.1	21.8	21.0	18.0	216.7
	2014	58.8	19.4	8.9	22.5	159.0
Manure compost	2013	73.4	18.3	12.8	17.3	136.7
	2014	72.1	19.1	29.7	22.2	240.0
No treat	2013	73.6	19.9	13.3	20.5	145.5
	2014	66.6	18.8	25.1	22.5	174.3

로 일반 농경지 토양보다 높은 편이었고 토양 유기물 함량은 13.6 g kg⁻¹로 일반 농경지 토양이 22-26 g kg⁻¹ 범주인 것에 비하면 토양 유기물 함량이 낮은 편이었다 (NIAS, 2013). 인산함량도 89.8 mg kg⁻¹로 높지 않았다. 반면 양이온의 함량은 보통수준을 나타내고 있었다.

각각의 유기물 처리에 따른 2013년, 2014년 벼의 수량 및 수량구성 요소는 Table 3과 같다. 볏짚 처리구의 경우 Table 3에 나타난 바와 같이 현미수량이 무처리구에 비해서도 낮게 나타나고 있는데 이는 볏짚의 C/N율이 높아 어느 정도 질소기가 현상이 나타난 것으로 추정되었다. 2013년과 2014년을 비교하였을 때 전체 처리구 및 처리구 간에서 수량차이가 크게 나타나고 있으며 유박 처리구의 경우 2013년 보다 2014년에 수량이 감소하였다. 무처리구의 경우 1년차 보다 2년차가 수량이 높았는데 1년차 벼 재배에 따른 뿌리 등의 유기물이 무기화 되면서 양분공급능이 커진 것으로 판단되었다. 옥수수 재배시 지상부에서 토양으로 옮겨지는 잔재보다 뿌리에서 변환되는 토양유기물의 양이 약 1.8배 많다고 보고한 바와 같이 벼 재배에서도 뿌리가 토양유기물로 되면서 일정 정도의 양분을 공급한 것으로 보이며 관개수에 포함된 양분 공급도 있어 무처리구의 수량이 크게 떨어지지 않았던 것으로 판단되었다 (Molina et al., 2001).

2013년, 2014년 2회에 걸쳐 유기물을 투입하고 벼를 재배하면서 월 1회 처리구별 토양을 채취하여 총 탄소 함량을 경시적으로 분석한 결과는 Fig. 2와 같았다. 처리구 사이에 정도의 차이가 있지만 유기물을 투입하고 작물을 재배하는

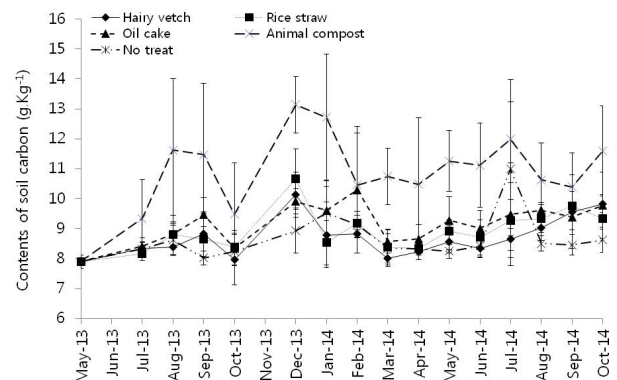


Fig. 2. Periodical changes of total carbon contents with treatments in subjected soils.

시기에 전체적으로 증가하는 양상을 보이다가 작물이 없는 겨울철에는 탄소함량이 감소하다가 이듬해 다시 유기물이 투입되었을 경우 다시 증가하는 경향을 보였다. 시기별 총 토양탄소 함량의 변동은 있지만 시험기간 내 총 질소의 함량은 모든 처리구에서 증가하는 추세를 나타냈다. 토양탄소의 증가는 가축분퇴비 처리구에서 가장 높았으며 무처리구에서 가장 낮은 경향을 나타내었다. 작은 입자가 많은 가축분퇴비의 경우 토양 탄소분석에 직접적으로 기여할 수 있기 때문에 다른 유기물 처리구보다 토양탄소의 함량이 높은 것으로 추정되었다. 계산적으로 많은 양의 탄소량이 토양에 투입되었음에도 불구하고 가축분퇴비를 제외하고는 토양탄소함량이 크게 증가하거나 감소하는 양상을 나타내지 않았다. 이러한 경향은 절단된 유기물이 토양에서 분해가 총

분히 되기까지 토양탄소 함량분석에 포함되지 않고 헤어리베치, 벧짚 등은 식물 잔재로서 바로 분해되기 때문에 토양탄소 함량 증가에 모든 탄소량이 직접적으로 기여하지 못하고 바로 분해되어 대기로 방출되는 것으로 판단되었다. 유박의 경우 탄소량은 다른 처리구에 많지 않고 펠렛으로 되어 있어 토양시료를 채취하였을 때 포함되는 탄소량은 헤어리베치나 벧짚과 같이 많지 않은 것으로 평가되었다.

헤어리베치는 토양에서 가축분퇴비보다 분해가 빠른 것으로 알려져 있는데 논 조건에서 헤어리베치 시용에 따른 이산화탄소와 메탄의 방출 특성을 평가한 결과 화학비료나 돈분퇴비 보다 메탄과 이산화탄소 플럭스를 증가시켰는데 이는 상대적으로 헤어리베치가 토양에서 이분해성 탄소가 많은 것 기인한 것으로 평가된 바 있다 (Lim et al., 2012).

전체 농경지에 대한 탄소수지를 산술적으로 평가하였을 경우 본 시험에서 토양탄소 함량에 반영이 안되고 식물 잔재로 바로 분해되는 양들이 포함되기 때문에 유기물이 시용되었을 때 토양탄소 함량은 유기물이 투입되는 시점에서 급격한 증가를 나타나게 되고 유기물 종류별 분해계수와 온도, 수분함량 등에 의해 분해속도가 결정된다. 그러나 본 연구에서 보는 바와 같이 실제 유기물의 시용은 유기물이 분해되면서 유기물의 포함되어 있는 질소 등의 양분이 무기화되어 토양에 잔재하고 무기화된 질소가 작물에 흡수되어 생육에 비료 역할을 하게 되는 질소의 순환을 가지게 되지만 탄소의 순환에서는 잔재의 형태로 탄소의 대부분이 분해되어 대기중으로 방출되고 풀빅산, 부식산, 휴민 등의 분획으로 변환되거나 미분해되어 미세한 크기로 토양에 잔존하면서 실질적인 토양탄소 함량의 변화에 기여하는 부분은 작은 것으로 판단되었다. 따라서 토양 유기물 종류에 따라 분해율이나 속도에 차이가 있지만 토양 유기물의 분해 또는 축적을 평가할 때에는 단기적인 측면도 필요하지만 장기적인 측면에서 고찰 하는 것이 필요하다.

토양을 산과 알칼리로 용해도의 차이에 따라 구분되는 풀빅산과 부식산, 휴민 가운데 풀빅산 분획에 있는 탄소 화합물이 가장 분해가 쉬운 이분해성 물질로 구성되어 있다고 할 수 있다. 처리된 유기물의 종류에 따른 토양 내 풀빅산 분획에 존재하는 탄소의 함량을 경시적으로 분석한 결과는 Fig. 3과 같았다. 토양 내 존재하는 풀빅산 분획의 탄소의 양은 모든 처리구에서 변동양상이 비슷하게 나타나고 있었으며 시기별로 함량의 변화가 있었으나 대략 1.5 g kg^{-1} 내외로 분포하고 있었다. 토양 총 탄소 함량에 비하면 약 5 내지 6 분의 1정도 해당하는 양이며 풀빅산 분획의 탄소화합물이 지속적으로 분해되면서 토양 내 미분해 유기물이 분해되어 풀빅산 분획의 탄소 화합물로 전환되고 있는 것으로 파악된다. 유기물의 분해는 대부분 미생물에 의해 이루어지며 일반적으로 온도와 습도가 주요 변수가 된다. 이분해성인 풀빅산 분획의 탄소화합물은 토양 총 탄소 함량이 유기

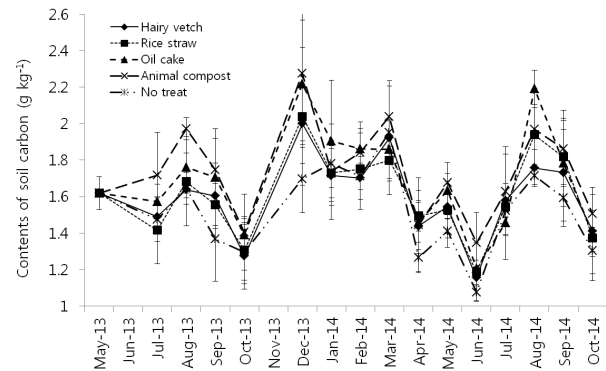


Fig. 3. Periodical changes of carbon contents with treatments in fulvic acid fraction.

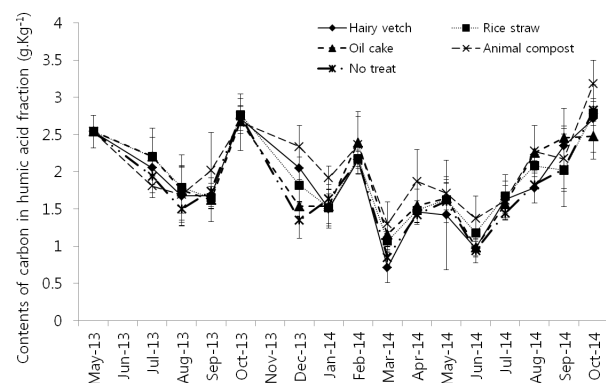


Fig. 4. Periodical changes of carbon contents with treatments in humic acid fraction.

물 투입에 따라 적은 양이지만 무처리구에 비해 전체적으로 증가하는 추세에 비하여 시기별 함량의 변동은 있으나 장기적인 추세는 나타나지 않았다. 무처리의 경우도 다른 유기물 처리구보다 풀빅산 분획의 탄소함량이 시기별로 다소 적게 나타나고 있으나 전체적인 변동양상은 큰 차이가 없었는데 이러한 양상은 무처리구에서도 벼의 생육과 미생물의 활동으로 어느 정도의 유기물 공급이 되면서 풀빅산 분획 탄소가 분해되고 새로운 풀빅산 분획 탄소화합물이 공급되기 때문인 것으로 판단되었다.

토양 풀빅산 분획 유기물보다 분해속도가 느린 것으로 알려진 부식산 분획을 각 처리구의 토양을 시기별로 채취하여 분획 내에 존재하는 탄소의 함량을 경시적으로 분석하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같았다. 부식산 분획의 탄소함량은 풀빅산 분획의 탄소함량과 유사한 범위를 가지고 있었으나 경시적 변동양상은 차이가 있었다. 1차년도 부식산 분획의 탄소함량은 시기별 변동성은 있으나 2차년도 작기 시작까지 감소하는 경향을 나타내었으나 2차년도 유기물 투입 후 벼를 재배하는 시기인 5월 이후로 지속적으로 증가하는 양상을 보였다. 처리별 총 탄소 함량에서 가축분퇴비 처리구가 전체적으로 함량이 높았던 것으로 고려하였을 때 풀빅산 분획과 부식산 분획의 탄소함량은 다른 유기물 처리구와

크게 차이가 나타나지 않았다. 투입 유기물이 지속적으로 분해되어 이산화탄소, 메탄 등 기체로 대기 중으로 방출되고 일부는 폴빅산과 부식산으로 전환되어 토양에 환원되고 토양 내 있는 폴빅산과 부식산 분획의 유기물은 분해되어 이산화탄소나 메탄 등으로 대기 방출되는 속도가 비슷하게 유지되고 있는 것으로 추정되었으나 더욱 정확한 근거를 생산하기 위해서는 더 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단되었다. 실제 유기물을 투입 후 이듬해 다시 유기물을 투입하기 전 토양에는 투입 유기물의 잔재가 거의 눈으로 구별하기 힘들 정도로 분해되어 있었다.

토양유기물을 이론적으로 또는 분석적으로 분류하는 데에는 학자들마다 다양한 의견이 있다. 최근 토양유기물 분류는 불안정한 토양유기물 (Labile soil organic matter)과 안정한 유기물 (Stable soil organic matter), 불활성 토양유기물 (Inert soil organic matter)로 구분하고 있다. 불안정 유기물은 냉수, 온수에서 추출되는 유기물과 정의되지 않은 유기물 분획을 말하는데 주로 미생물, 식물 등의 잔재나 쉽게 분해되는 비휴믹 물질들로 정의한다 (Eduard S., 2010). 본 시험에서 토양 조제시 일정 크기 이상의 불안정 토양유기물은 제거되었기 때문에 실제적으로 토양에 존재하는 불안정 유기물의 양은 적을 것으로 판단되었으며 일부는 폴빅산 분획에 포함되었을 것으로 추정된다. 따라서 투입된 유기물에 포함되어 있는 불안정 유기물 분획(labile fraction)은 유기물 종류에 따라 차이가 있지만 휴믹물질 분획으로 평가하는데 큰 영향은 없을 것으로 판단되었다. 농경지에서 토양탄소의 축적은 지속적인 유기물의 투입과 안정한 유기물과 불활성 토양 유기물의 축적이 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

난분해성 유기물이라 할 수 있는 토양의 휴민 분획의 탄소함량은 총 탄소 함량에서 폴빅산과 부식산 분획 탄소함량을 더한 값을 빼주어 산출하였고 시기 함량변화는 Fig. 5와 같았다. 부식산 분획의 탄소 화합물은 난분해성으로 분해속도가 가장 느리기 때문에 투입된 유기물이나 토양 내 유기물에서 휴민으로 전환된 탄소는 총 탄소의 시기별 양상과 비슷하게 증가하는 추세를 나타내고 있다. 가축분퇴비의 경

우 헤어리베치, 볏짚, 유박 처리구보다 지속적으로 높은 값을 유지하고 있는데 이러한 경향은 가축분퇴비의 원료의 특성에 기인한 부분이 많을 것으로 판단되었다. 가축분 퇴비는 제품을 제조하는 과정에서 가축분의 수분함량을 조절하기 위하여 톱밥 등의 부자재를 혼합하여 일정기간 부숙을 거치게 된다. 그 과정에서 이분해성인 탄소화합물은 많이 분해가 되어 기체형태로 대기중으로 방출되며 부자재인 톱밥은 난분해성인 리그닌 성분이 많은 재료로서 상당부분이 남게 된다. 따라서 가축분퇴비의 경우 난분해성인 리그닌이 함량이 많아 Fig. 5에서 보는 바와 같이 셀룰로오스 등 상대적으로 이분해성 탄소 화합물이 많은 헤어리베치나 볏짚보다 토양에 휴민 분획함량이 높은 것으로 판단된다. 한편 난분해성임에도 불구하고 시기별 휴민분획의 탄소 함량이 변동성을 나타내고 있는데 채취된 시료들간의 편차가 있거나 또는 난분해성임에도 불구하고 새로 형성되고 일부는 분해되는 것으로 추정되지만 정확한 근거를 확보하기 위해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

처리구별 토양에서 조사시기에 분석된 폴빅산, 부식산, 휴민 분획에서 탄소함량 비율에 대한 기초 통계량은 Table 4와 같았다. 헤어리베치, 볏짚, 유박 처리 토양의 경우 앞서 시기별 토양 탄소 분획의 함량이 차이가 있었으나 폴빅산, 부식산, 휴민 분획의 탄소함량의 평균 비율은 매우 유사하

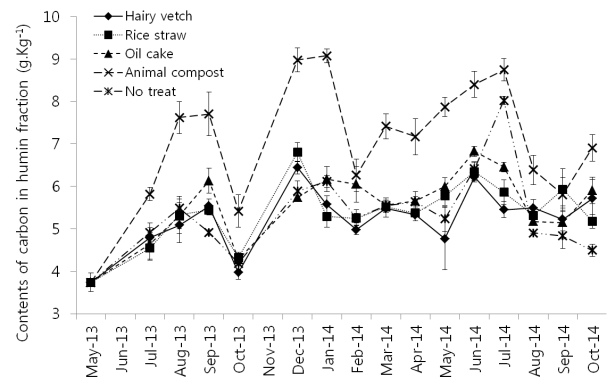


Fig. 5. Periodical changes of carbon contents with treatments in humin fraction.

Table 4. The statistics of ratio of carbon contents according to fulvic acid, humic acid and humin fractions in soils applied with hairy vetch, rice straw, oil cake fertilizer, animal compost and no treatment.

	Ratio of fulvic acid fraction carbon			Ratio of humic acid fraction carbon			Ratio of humin fraction carbon		
	Ave.	Max.	Min.	Ave.	Max.	Min.	Ave.	Max.	Min.
Hairy vetch	18.71	24.01	13.86	21.23	34.24	7.73	60.06	74.50	47.34
Rice straw	18.14	21.57	13.62	21.61	32.97	12.71	60.25	72.84	47.34
Oil cake fertilizer	18.52	22.80	13.41	21.17	32.25	10.91	60.31	75.69	47.34
Manure compost	16.21	20.51	12.12	19.62	32.15	12.01	64.17	75.64	47.34
No treat	17.41	23.43	12.75	21.21	33.42	10.17	61.38	76.12	47.34

게 나타났다. 무처리구 토양의 경우 풀빅산 분획의 탄소함량 비율이 앞서 언급한 세 처리구보다 1%가량 낮고 부식산 분획의 탄소함량 비율은 유사하였으며 휴민 분획의 탄소함량 비율이 1%가량 높았다. 반면 가축분퇴비 처리구 토양의 경우 풀빅산, 부식산 분획의 탄소함량의 평균 비율이 낮고 상대적으로 난분해성인 휴민 분획 탄소함량의 평균 비율이 앞서 언급한 세 처리구에 비해 4%가량 높은 것으로 분석되었다. 헤어리베치, 벧짚, 유박 등은 시간이 경과 하면서 대부분이 분해되고 적은 양의 유기물질이 점차적으로 토양에 축적되지만 토양 내에서의 풀빅산이나 부식산 형태의 유기물은 함량에서는 변동이 있으나 전체 토양탄소에서 차지하는 비율은 일정 범위에서 유지되고 있다.

이와 같은 결과들로 미루어 보았을 때 식물 잔재로 구성된 헤어리베치나 벧짚의 경우 토양탄소의 분석적인 측면에서 보면 사용되는 대부분의 유기화합물은 식물 잔재형태에서 분해되어 이산화탄소, 메탄 등 기체의 형태로 대기중으로 방출되고 매우 적은 양만이 안정한 유기물 및 불활성 유기물로 전환되어 토양탄소 축적에 기여하는 것으로 평가된다. 토양 유기물이 축적되어 비옥도를 유지하여 안정적인 작물생산의 기반을 마련하기 위해서는 유기물의 종류에 따라 축적되는 속도가 차이가 있지만 지속적인 유기물 사용을 하여야 토양탄소 축적이 이루어 질 수 있음을 확인하였다.

식량질 논토양에서 21년간 3요소 비료와 함께 벧짚퇴비를 매년 10 Mg ha⁻¹을 사용하였을 때 토양 유기물 함량이 5.6 g kg⁻¹이 증가하였고 이를 환산하면 매년 많은 양의 유기물이 사용되어도 실제 토양탄소의 축적은 약 0.3% 증가에 불과하였다 (Jeong et al., 2001). 사량질 논 토양에서 벧짚퇴비를 50년간 연용하였을 때 무비구나 3 요소 처리구에서 토양 유기물 함량이 20-23 g kg⁻¹인 반면 벧짚퇴비구에서는 33 g kg⁻¹로 안정화되고 유기물 증가량은 11 g kg⁻¹로 토양탄소 축적으로 보면 약 0.6%가 축적되었다고 보고된 바 있다 (Yeon et al., 2007). 이러한 결과는 본 시험에서 도출된 결과와 매우 유사한 결과이며 실제 토양유기물 축적과 관련한 시험은 장기적인 측면에서의 고찰이 필요하며 농경지 토양에서 유기물의 증가를 지속적으로 유지하기 위해서는 지속적인 유기물 사용이 매우 중요하다.

References

- Awad, Y.M., E.B. Lagodatskaya, Y.S. Ok, and Y. Kuzyakov 2012. Effects of polyacrylamide, biopolymer, and biochar on decomposition of soil organic matter and plant residues as determined by ¹⁴C and enzyme activities. *Eur. J. Soil Biol.* 48:1-10.
- Christl, I., H. Knicker, I. Kogel Knabner, and R. Kretschmar. 2000. Chemical heterogeneity of humic substances: characterization of size fractions obtained by hollow-fibre ultrafiltration. *Eur. J. Soil. Sci.* 51:617-625.
- Eduard Strosser. 2010. Methods of determination of labile soil organic matter: an overview. *J. Agrobiol.* 27(2):49-60.
- Hong, S.Y., T.S. Zang, M.S. Kim, E.Y. Che, and S.K. Ha. 2010. A study on estimation soil carbon in Asian countries and Korea. *Proceeding from autumn symposium Korean Korean Soc. Soil Sci. Fert.* p. 148-149.
- Jeong, J.H., B.W. Sin, and C.H. Yoo. 2001. Effect of the successive application of organic matters on soil properties and rice yields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 34(2):129-133.
- Kim, L.Y., H.J. Cho, and Han, K. H. 2004. Changes of Physical properties of soils by organic material application in farm land. *Korean. J. Soil Sci. Fert.* 37(5):304-314.
- Kim, S.C., Y.K. Hong, J.E. Yang. 2014. Soil management by using the evaluation method of soil quality. *Expert workshop at Korean Soc. Soil Sci. Fert.* p. 80-104. (presentation).
- Kim, P.J., D.Y. Chung, B.L. Lee, and K.Y. Kim. 1997. Hydraulic Conductivity in Multi-layered Soil amended with Cow Manure Compost. *J. KoSES* 2(3):59-67.
- Le Quere, C. et al. 2014. Global carbon budget 2014. *Earth Syst. Sci. Data Discuss* 7:521-610.
- Lee, C.H., H.S. Shin, and K.H. Kang. 2004. Chemical and spectroscopic characterization of peat moss and its different humic fractions (Humin, Humic acid and fulvic acid). *J. KoSSGE.* 9(4):42-51.
- Lee, Y.H., S.M. Lee, J.K. Sung, D.H. Choi, H.M. Kim, and G.H. Ryu 2006. Development of soil management technique in organic rice cultivation. *Korean J. Organic Agri.* 14(2):205-217.
- Lim, S.S., W.J. Choi, and H.Y. Kim. 2012. Fertilizer and organic inputs effects on CO₂ and CH₄ emission from a soil under changing Water Regimes. *Korean J. Environ. Agric.* 31(2):104-112.
- Manzoni, S., G. Piñeiro, R.B. Jackson, E.G. Jobbágy, J.H. Kim, and A. Porporato 2012. Analytical models of soil and litter decomposition: Solutions for mass loss and time-dependent decay rates. *Soil Biol. Biochem.* 50:66-76.
- Molina, J.A.E., E.E. Clapp, D.R. Linden, R.R. Allmaras, M.F. Layese, R.H. Dowdy, and H.H. Cheng. 2001. Modeling the incorporation of corn (*Zea mays* L.) carbon from roots and rhizodeposition into soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 33:83-92.
- Michael, H. and B. Hayes. 2006. Solvent system for the isolation of organic components from soils. *J. Soil Sci. Soc. Am.* 70:986-994.
- NIAS. 2013. Report of monitoring project on agro-environmental quality, p. 45. RDA, Suwon, Korea.
- NIAS. 2000. Methods of analysis of soil and plant. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea (in Korean).

Swift, R.S. 1996. Methods of soil analysis. Part3. Chemical methods-SSSA Book Series no. 5. p.1011-1069. USA.
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.