

The Changes of Soil Carbon as Affected by Several Kinds of Organic Material in Upland Soil

Hyeon-Suk Cho*, Myung-Chul Seo, Jun-Hwan Kim, Wan-gyu Sang, Pyeong Shin, and Jaekyeong Baek
National Institute of Crop Sciences, Wanju-Gun 55365, Korea

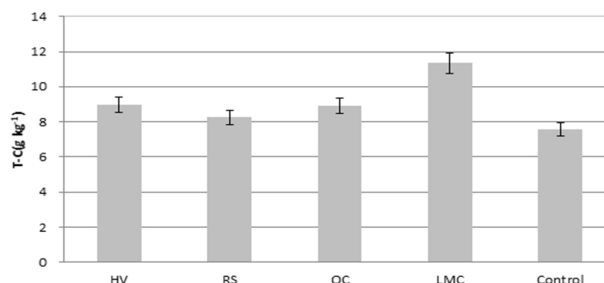
*Corresponding author: chohs@korea.kr

ABSTRACT

Received: October 15, 2018
Revised: November 19, 2018
Accepted: November 19, 2018

Organic matter is a substance that contains carbon. When applied to soil, it can improve the physical and chemical properties of soil and supply nutrients to plants. Also, it is decomposed in soil due to microbe activity, or absorbed and utilized by crops. The remaining differential to materials is accumulated in the soil and increases the level of organic matter in soil. Given that the humidity and temperature are appropriate, and there are energy sources favorable for microbe activity, the decomposition rate is higher, thus resulting in the increase of the nutrient availability of crops. Therefore, we analyzed the types of carbon content according to time while cultivating beans in soil with 4 different kinds of organic matter applied. Total carbon content (TC) was higher in organic matter application than in control (non-organic matter). Among the other organic matters, it was especially high in livestock manure compost (LMC) application with 11.1 g kg^{-1} . Hairy vetch (HV, 8.9 g kg^{-1}), oil cake (OC, 8.9 g kg^{-1}), and rice straw (RS, 8.2 g kg^{-1}) did similar. According to soil carbon form, Humin carbon(HnC) had the highest total carbon contrast of 62.0 %, Humic acid carbon(HaC) had 19.6%, and Fulvic acid carbon(FaC) had 18.1%. This pattern was the same in both control and organic matter application. Every type of carbon was the highest in LMC application. TC levels were temporarily high in June, which was after organic matter application, and decreased. It was higher than any other organic matter application in LMC. HaC increased in May and June which was when the organic matter was applied, slightly decreased in July, and were the highest in LMC with TC. FaC slowly increased after organic matter application until March and slowly decreased afterwards. It was highest in LMC, and similar in HV, OC, and RC, which shows that it had the smallest difference of content between kinds of organic matter. HnC inclined to decrease slowly as time passed after organic matter application, but rapidly increased in July and June. Also, it was the highest in LMC, and similar in HV, OC, and RC. Therefore, it was concluded that LMC, which had a high level of humin carbon that is difficult to decompose, was the best for accumulating carbon in soil.

Keywords: Carbon content, Upland soil, Organic matter, Carbon type



*HV : hairy vetch, RS : Rice straw, OC : oil cake, LMC : livestock manure compost.

Total carbon content(TC) as affected by the difference of organic matter in subjected soils.



Introduction

유기물은 농경지의 물리적 특성을 개량하고 토양 비옥도를 증진시켜 작물 생산에 중요한 역할을 수행하고 있으나 경작지에서는 유기물을 사용하지 않고 화학비료만 사용하여 작물을 생산하고 있다 (Kim et al., 2004; Lee et al., 2006). 그러나 일각에서는 경작지에 유기물을 사용하지 않고 화학비료만 사용하여 작물을 재배하면 토양 지력이 점차 감소되어 안정 식량생산이 어려울 수 있다는 우려의 목소리들이 나오고 있다. 토양에 환원된 유기물은 토양 미생물에 의하여 무기화 과정을 거쳐 작물에 양분을 공급하고 토양의 물리적인 특성을 개량하여 수분 및 양분보유력을 증가시킨다. 뿐만 아니라 토양 지온을 상승시키고, 배수 및 통기성을 높여주는 역할을 한다 (Choi et al., 2010). 이 때 유기물의 분해속도나 양분공급능력은 유기물의 종류, 토양수분, 온도 등에 따라 분해 속도나 공급능력이 다르게 나타나게 된다 (Ali et al., 2014; Kim et al., 2014; Yuan et al., 2014). Kim et al. (2004)은 농경지에 유기물을 환원하면 용적밀도는 감소하고 통기성과 대공극률은 증가하며 전단저항성이 감소되는 등 물리성이 개선되었으며, 또한 이런 물리적 특성의 개선효과는 벧짚퇴비는 높았고 헤어리베치, 가축분퇴비는 낮았다고 하였다. Jeong et al. (2001)은 농경지에 유기물을 사용하지 않고 21년 동안 벼를 재배하면 9년부터 양이온치환용량 (cation exchange capacity)이 월등히 감소하고 10년부터 쌀 수량이 급격하게 감소되어 벼 안전수량 확보가 어렵다고 하였으며, 쌀 안전수량을 얻기 위하여 농경지 지력 증진은 꼭 필요하다고 하였다. 이렇게 토양에서 유기물은 물리 화학성 특성을 개량하고 다음 작물에 양분을 공급하는 등 긍정적인 역할도 수행하지만 반대로 사용된 유기물이 분해과정에 발생하는 메탄, 아산화질소 등 온실가스로 인하여 지구온난화를 가속시키는 부정적인 효과도 동시에 갖고 있다. 실제로 농업부문에서 온실가스 총 배출량이 차지하는 비중은 국가총배출량의 3.2%로 적은 양인 반면 경중부문이 차지하는 비중이 61.4%로 매우 높은 편이다 (Jeong et al., 2012). 이 배출량 대부분은 농경지 내 물 관리, 유기물 사용, 화학비료 시비에 의하여 발생하고 있어 이를 잘 관리하면 농경지의 메탄발생량은 줄일 수 있을 것으로 판단되었다. 토양은 이산화탄소를 배출하는 배출원이면서 동시에 이산화탄소를 흡수하는 흡수원이기도 한다. Hong et al. (2010)은 우리나라 토지이용에 따른 총 탄소 저장량이 413 GgC으로 추정되며 이 가운데 약 38%가 논, 밭인 농경지에 저장하고 있는 것으로 평가하였다. 따라서 농경지는 관리방법에 따라 온실가스를 배출하기도 하지만 반대로 온실가스를 저장하는 저장소로 활용되기도 한다. 최근 온실가스 저감에 대한 부담이 증가하면서 많은 학자들이 농경지에서 이산화탄소 발생량을 줄이기 위한 유기물의 종류, 사용량, 물 관리 방법, 유기물 분해양상 및 동태 파악 등에 관한 연구들이 진행되고 있다 (Stefano et al., 2012; Yasser et al., 2012). 유기물은 매우 복잡한 성분의 화합물로 구성되어 있어 미생물의 작용을 받아 분해되면서 그 형태를 달리하는데 이 유기물의 결합 형태에 따라 토양에 축적되는 기간이 달라지게 된다. 유기물의 형태를 분별하는 방법은 산과 알칼리 용매에 대한 용해도의 차이를 이용하고 있으며 용해과정을 거쳐 풀빅산 (fulvic acid), 휴믹산 (humic acid), 휴민 (humine)으로 분획하여 나눈다 (Christl et al., 2000; Lee et al., 2004; Michael and Hayes, 2006). 분해과정을 거칠수록 난분해성물질이 많아져 유기물 분해에 오랜시간이 소요되어 토양에 잔류하는 기간이 길어지게 되어 토양 내 탄소 저장효과는 높아지게 된다.

본 연구는 농경지에 유기물을 사용할 때 토양 내에 존재하는 이분해성 유기물과 난분해성 유기물의 함량에 대한 동태를 파악하기 위하여 밭 토양에서 가장 많이 이용되고 있는 유기물 4종류를 선별하여 밭 토양에 투입하고 콩을 재배하면서 토양 탄소함량의 변동량을 평가하였다.

Materials and Methods

pot에 토양 충전 및 유기물 환원 밭 토양에서 환원된 유기물 종류에 따른 토양내 탄소 변동량을 평가하기 위하여 50×50 cm의 무저 pot를 토양에 설치하여 유기물을 환원하고 콩 (품종: 대원콩)을 재배하였다. 본 시험에 사용된 유기물은 헤어리베치녹비 (HV), 벧짚퇴비 (RS), 유박 (OC), 가축분발효퇴비 (LMC)의 4종류를 사용하였으며 대조구로 유기물 무사용구를 두었다. 유기물 환원을 위해 무저 pot 내 15 cm 깊이의 토양을 채취하고 여기에 토양무게 대비 2% 해당량의 유기물원을 혼합하여 pot에 다시 충전하였다. 유기물 환원시기는 2013, 2014년 모두 5월 중순에 실시하였다. 유기물원 중 HV와 RS는 식물체를 5 cm 내외로 절단하여 식물체가 토양과 골고루 혼합되도록 유도하였으며, 입자 사이즈가 적은 OC와 LMC는 시제품을 구매하여 전처리 과정없이 바로 사용하였다. 콩은 육묘하여 토양+유기물원을 충전한 pot에 각각 4주씩 이식하였다. 콩 재배 기간 동안 대조구는 유기물과 화학비료를 모두 시비하지 않았다.

토양시료채취 및 화학특성 분석 토양시료는 2013년 7월부터 2014년 콩 수확기 (10월)까지 월 1회 채취하여 그늘에서 건조한 다음 2 mm 체를 통과시켜 조제하였다. 시험 전 토양의 화학적 특성 분석은 pot에 충전하기 전의 시료를 일부 채취하여 사용하였다. 토양의 화학적 특성 분석은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (NIAS, 2000)을 적용하여 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 초자전극법 (Orion 520A pH meter, Orion ReseaRSh Inc. USA)으로 측정하였고 전탄소 (T-C) 함량은 건식 연소법을 이용하는 원소분석기 (Vario EL III, Elementar, Germany)를 이용하여 분석을 하였다. 양이온함량은 1M-NH₄OAc로 추출하여 ICP (Integra-XP, GBC Scientific Equipment Ltd, Australia)로 분석 하였다. 시험에 사용된 재료인 가축분발효퇴비, 유박, 벧짚, 헤어리베치는 각각 종류별로 100 g을 채취하여 50°C에서 건조하여 마쇄한 다음 2 mm 체를 통과시켜 사용하였다.

토양 내 형태별 탄소함량 분석 유기물의 탄소변동량을 분석하기 위하여 월 1회 채취한 토양 시료의 T-C는 시험 전 토양의 분석과 같은 방법으로 분석하였다. 토양 내 형태별 탄소인 휴믹산 (humic acid carbon, HaC), 풀빅산 (Fulvic acid carbon, FaC), 휴민 (humic carbon, HnC) 분획은 Fig. 1과 같이 산과 염기용액을 이용한 용해도 차이에 따라 분획하였다 (Christl et al., 2000; Michael and Hayes, 2006). 토양시료 4 g을 40 ml 0.5 N NaOH 용액에 첨가하여 상온에서 12시간 진탕하여 침출한 다음 7,000 rpm에서 15분간 원심분리한 후 상등액과 침전물을 분리하였다 (Solution A). 이때 상등액에 함유된 유기물질은 풀빅산과 휴믹산 탄소로 분류하였고 염기에 용해되지 않고 남은 토양에 포함된 유기 침전물은 난분해성인 휴민 탄소함량으로 분류하였다. solution A에 3N HCl를 첨가하여 pH를 1.0으로 조절 후 약 16시간 상온에서 방치한 다음 7,000 rpm에서 15분간 원심분리하여 상등액과 침전물을 분리하여 상등액을 추출하여 탄소함량을 분석하였다 (Solution B). 산에 용해되어 상등액에 포함된 탄소는 풀빅산 탄소로 침전물은 휴믹산 탄소로 정의하였다. 산, 염기로 분획된 용액의 탄소함량은 TOC analyzer (TOC-LMSH/CPH, Simazu, Japan)를 이용하여 분석하였다. 풀빅산 탄소함량은 Solution B의 탄소함량으로, 휴믹산 탄소함량은 Solution A 빼기 Solution B의 탄소함량으로 그리고 휴민 탄소함량은 T-C함량 빼기 Solution A의 탄소함량으로 정의하였다. 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 가정하고 시험을 수행하였다.

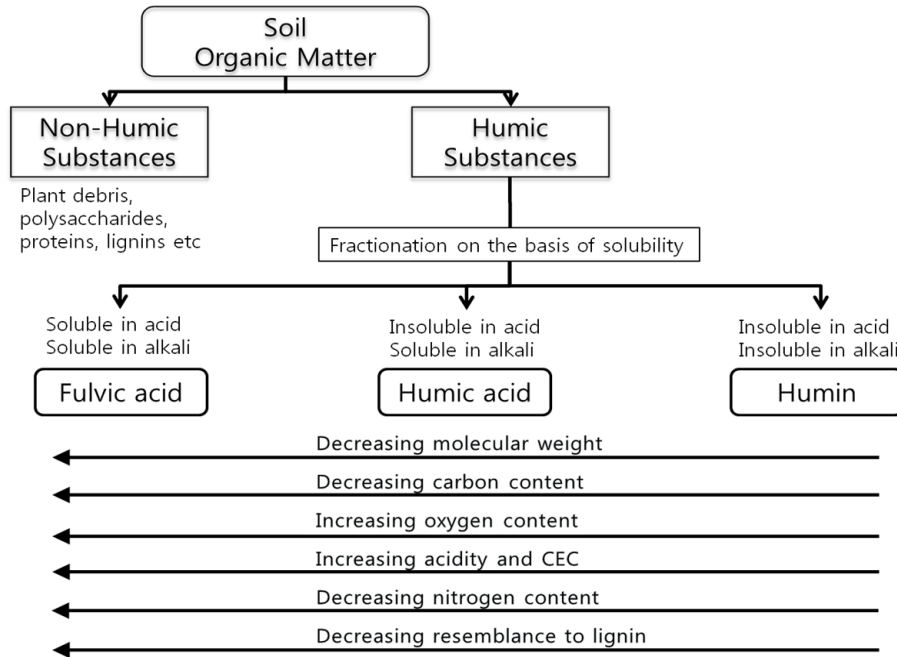


Fig. 1. Diagram of categorization of soil organic matter into humic and nonhumic substances (Roger S. Swift, 1996).

Results and Discussion

시험토양 및 유기물의 화학적 특성 시험 전 토양의 화학성은 Table 1과 같이 pH는 8.4이었고, 토양유기물 함량은 13.6 g kg^{-1} , 유효인산 함량은 89.8 mg kg^{-1} 이었다. 일반 농경지와 비교하면 토양산도는 약간 높았고 유기물 함량은 농경지 기준 함량인 $23\text{-}26 \text{ g kg}^{-1}$ 보다 낮았다. 인산함량은 89.8 mg kg^{-1} 으로 기준함량 (130 mg kg^{-1})미만으로 낮았으며 양이온함량은 보통 수준인 밭 토양이었다.

시험에 사용된 유기물의 탄소함량 (T-C)은 Table 2와 같이 헤어리베치녹비 (HV)구에서 438.7 g kg^{-1} 으로 가장 높았고, 벚지퇴비 (RS)구와 유박 (OC)은 각각 389.0 g kg^{-1} , 397.0 g kg^{-1} 로 같았으며, 가축분발효퇴비 (LMC)구는 366.8 g kg^{-1} 으로 약간 낮았으나 4 종류 유기물의 T-C함량은 비슷하였다. 유기물의 전질소 (T-N) 함량은 RS구에서 가장 낮은 7.1 g kg^{-1} 이었으며, LMC구는 18.0 g kg^{-1} 으로 RS구보다 약 2배정도 높았으나 OC구, HV구보다 2배 이상 낮은 양이었다. RS구 대비 OC (46.4 g kg^{-1})구는 약 6.6배, HV구 (40.8 g kg^{-1})는 약 5.7배로 질소함량이 높았다. 유기물 종류별 탄소함량은 차이가 적었던 반면 질소함량은 유기물 종류 간에 약 6배까지 차이를 보였다. 질소는 유기물 분해시 미생물의 에너지원으로 사용되기 때문에 질소함량의 차이는 유기물 분해속도에 영향을 미칠 것으로 판단되었다 (Choi

Table 1. Chemical properties of initial soil in plot treated before experiment.

pH	OM	P ₂ O ₅	Exch. Cations		
			K	Ca	Mg
(1:5)	g kg^{-1}	mg kg^{-1}		(cmol. kg^{-1})	
8.4	13.6	89.8	0.48	13.8	3.76

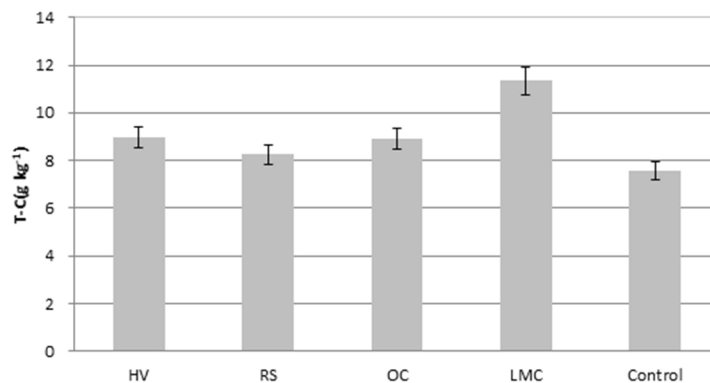
Table 2. Contents of Total carbon (TC), Total nitrogen (T-N), and C/N ratio of different type of organic matter used in the experiment.

Organic matter	Hairy vetch	Rice straw	Oil cake	Livestock compost
TC (g kg ⁻¹)	438.7	389.0	397.0	366.8
T-N (g kg ⁻¹)	40.8	7.1	46.4	18.0
C/N ratio	10.8	54.8	8.6	20.4

et al., 2010; Cho et al., 2015). 유기물 종류별 C/N율은 8.6-54.8까지 차이가 컸으며 OC > HV > LMC > RS 순이었다. T-N함량이 높았던 OC구와 HV의 C/N율은 낮은 반면 LMC구는 20.4, RS구는 54.8로 다른 유기물원보다 약 2.7-6.4 배로 매우 높았다. Yang et al. (2009)에 의하면 유기물의 C/N이 25미만이면 토양 환원시 분해 속도가 빠르게 이루어진다고 한 결과를 볼 때 HV구, OC구, LMC구는 토양환원시 분해가 빠를 것으로 예상되었으며 RS구는 다른 유기물 환원구보다 분해가 가장 늦게 이루어질 것으로 추정되었다.

유기물 종류에 따른 토양 전탄소 함량 변화 유기물 환원 후 토양 내 T-C함량은 Fig. 2와 같이 대조구보다 유기물 시용구에서 1.1-1.5배까지 높았다. 유기물 종류별로는 LMC구에서 11.1 g kg⁻¹로 가장 높았고, 그 다음은 OC구 > HV구 > RS 구 순이었다. 토양 내 T-C함량은 질소함량이 높고, C/N율이 낮았던 HV구, OC구에서 낮았으며, LMC구에서 가장 높았다. 다른 유기물에 비하여 RS구에서 상대적으로 토양 내 T-C함량이 낮았는데 RS구는 유기물의 질소함량이 낮고 C/N율이 54.8로 높아 토양 환원시 분해가 늦게 이루어져 토양 탄소함량을 증가시킬 것으로 예상되었으나 조사결과 이와 상이한 결과를 보였다. Han et al. (2017)은 밭 토양에서 벧짚퇴비의 분해속도가 돈분발효퇴비보다 빨라 콩 생육 및 수량이 증가되었다고 하였다. 따라서 호기적인 조건인 밭 토양에서 벧짚분해에 대한 추가적인 평가가 필요한 것으로 판단되었다.

시험기간 동안 토양 내 T-C 함량의 경시적인 변화는 Fig. 3과 같이 모든 유기물 시용구에서 대조구보다 높았다. Seo et al. (2015)는 농경지에 유기물을 사용하면 토양 T-C함량은 유기물이 투입되는 시점에서 급격한 증가하고 그 이후 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하는 패턴을 그린다고 하였다. 본 시험에서는 2013년, 2014년 모두 유기물 환원 후



*HV : hairy vetch, RS : Rice straw, OC : oil cake, LMC : livestock manure compost.

Fig. 2. Total carbon content(TC) as affected by the difference of organic matter in subjected soils.

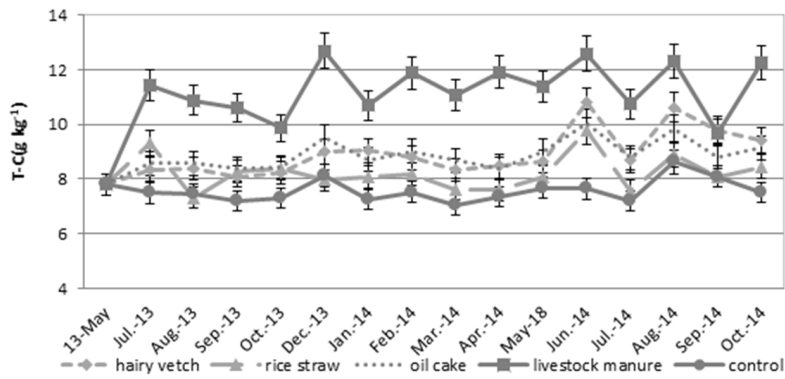
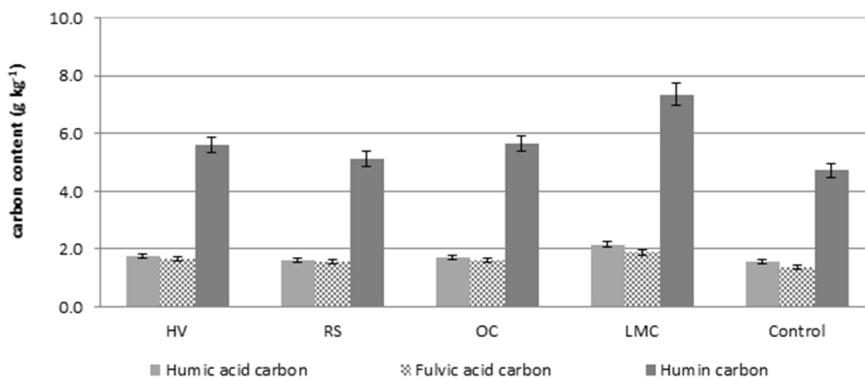


Fig. 3. The changes in TC as affected by the difference of organic matter in subjected soils.

인 6월 이후 토양 내 TC는 증가한 다음 서서히 감소되어 Seo et al. (2015)의 연구결과와 같은 경향이었으나 본 시험에서는 10월 이후 다시 증가한 다음 감소하는 패턴을 보였다. 이는 본 시험이 밭 토양이었고 재배한 작물이 콩으로 10월은 콩 수확시기에 해당되기 때문에 탈립된 콩잎, 뿌리 등이 토양 TC함량에 영향을 미쳤기 때문으로 판단되었다. 유기물 종류별 TC함량은 LMC구에서 퇴비사용 후 급격히 증가하였으며 시험기간 동안 TC함량은 꾸준히 높은 함량을 보였으며 그 다음 HV구, OC구에서 높았고 RS구는 다른 유기물에 비하여 약간 낮았다. 시기별로는 모든 유기물 환원구에서 시험 전인 2013년 5월보다 2014년 10월에 TC함량이 증가하였으며 가장 많이 증가한 유기물은 LMC사용구였다. 이는 가축분발효퇴비 조제시 수분함량을 조절하기 위해 부산물로 첨가된 톱밥 때문으로 판단되었다. LMC구에 비하여 HV구, RS구에서 TC함량이 낮았던 것은 이 유기물들이 식물 잔재로서 바로 분해되기 때문에 토양탄소 함량 증가에 모든 탄소량이 직접적으로 기여하지 못하고 바로 분해되어 대기로 방출되는 것으로 판단되었다.

유기물 종류에 따른 형태별 탄소함량의 변화 유기물은 다양한 성분의 화합물로 구성되어 있으며 토양에 환원되면 토양미생물의 작용을 받아 분해과정을 거쳐 풀빅산 (fulvic acid), 휴믹산 (humic acid), 휴민 (humine)탄소 같은 이분해성과 난분해성으로 나뉘어진다. Fig. 4는 산과 알칼리로 분획한 토양 내 형태별 탄소함량으로 2013-2014년 2년 동안 분석한 성적의 평균값을 나타내었다. 토양 내 형태별 탄소함량은 TC함량과 같이 대조구보다 유기물 사용구에서 휴민 탄소, 휴믹산 탄소, 풀빅산 탄소함량이 모두 높았으며 탄소 형태별로는 난분해성인 휴민 탄소함량이 가장



*HV : hairy vetch, RS : Rice straw, OC : oil cake, LMC : livestock manure compost.

Fig. 4. The type of carbon content according to the difference of organic matter in subjected soils.

높았고, 이분해성인 휴믹산 탄소함량과 풀빅산 탄소함량은 토양 내 함량이 비슷한 수준으로 존재하였으며 이는 모든 처리구에서 같은 경향이였다. 휴민 탄소함량은 TC와 같이 LMC구에서 7.4 g kg^{-1} 으로 다른 유기물 종류에 비하여 현저히 높았으며, HV구와 OC구는 비슷하였고, RS구는 5.1 g kg^{-1} 로 다른 유기물원보다 약간 낮았다. LMC구의 토양 내 휴민 탄소함량은 대조구보다 1.6배가 높았고 다른 유기물처리구보다는 1.30-1.4배 높았다. 휴믹산 탄소함량과 풀빅산 탄소함량도 대조구보다는 1.4배 높았으며 다른 유기물 종류보다 약 1.1-1.2배가 높아 휴민 탄소함량과는 달리 유기물 종류에 따른 차이가 적었다.

유기물의 형태별 탄소함량은 산과 알칼리의 용해도 차이에 따라 분획되고 있으며 이 중 분해가 쉬운 이분해성 물질인 풀빅산 탄소 함량의 토양 내 경시적인 변화는 Fig. 5와 같았다. 토양 내 존재하는 풀빅산 탄소함량은 시험 전과 시험 후에 차이가 없었으며 유기물 종류에 따른 차이도 가장 적었다. 시험기간 동안 풀빅산 탄소함량은 유기물 환원 후 2014년 2월까지 서서히 증가하였으며 이는 대조구를 포함한 모든 유기물 환원구에서 같은 경향이였다. Seo et al. (2015)는 농경지에 유기물이 시용되면 토양 탄소함량은 유기물이 투입되는 시점에서 급격한 증가한 다음 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하는 패턴을 그린다 고 하였는데 풀빅산 탄소함량은 이와 달리 유기물 환원 후 2014년 2월까지 서서히 증가된 다음 감소되는 패턴을 보였다. 풀빅산 탄소함량은 조사시기에 따른 차이는 있으나 분포 범위는 대략 $0.8-2.2 \text{ g kg}^{-1}$ 내외였으며 토양 TC함량에 비하여 1/5-1/6를 차지하여 토양 탄소량에 미치는 영향은 다른 형태의 탄소 함량보다 적었다. 이런 패턴은 유기물을 사용하지 않은 대조구도 유기물처리구와 탄소함량의 차이는 있었으나 패턴은 비슷하게 7월부터 서서히 증가하였는데 Molina et al. (2001)에 의하면 옥수수 재배시 지상부의 잔재보다 뿌리를 통하여 공급된 유기물 양이 약 1.8배 많았고 본 시험에서도 작물재배 후 미분해된 유기물, 식물체의 뿌리, 잎 등이 미생물 활동 등에 의하여 지속적으로 분해되었기 때문으로 사료되었다.

토양 내 휴믹산 탄소함량은 염기용액에 의해 침출된 값에서 풀빅산 탄소함량을 뺀 값으로 산출하며 시험기간 동안 토양 내 경시적인 변화는 Fig. 6과 같이 시험 전 (2013년 5월)보다 2014년 2월까지 서서히 감소되었다가 그 이후 서서히 증가하는 패턴을 보여 풀빅산 탄소함량과 정반대의 패턴 변이를 보였다. 토양유기물은 온도, 수분, 토양미생물의 영향을 받아 분해되는데 농경지에 환원되면 풀빅산 형태의 탄소가 가장 먼저 분해되고 다음은 휴믹산 탄소를 진행하고 있음을 알 수 있었다. 시험 전인 2013년 5월보다 시험 후 (2014년 10월)에 토양 T-C함량이 약간 떨어졌으나 시험기간 내에는 전반적으로 탄소함량은 큰 차이없이 비슷한 경향이였다. 토양 내 휴믹산 탄소함량은 $1.1-2.9 \text{ g kg}^{-1}$ 범위

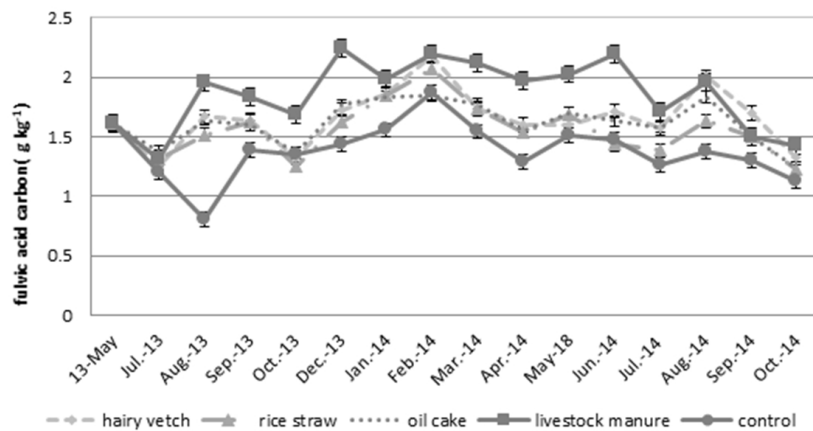


Fig. 5. Periodical changes of carbon contents with treatments in fulvic acid fraction.

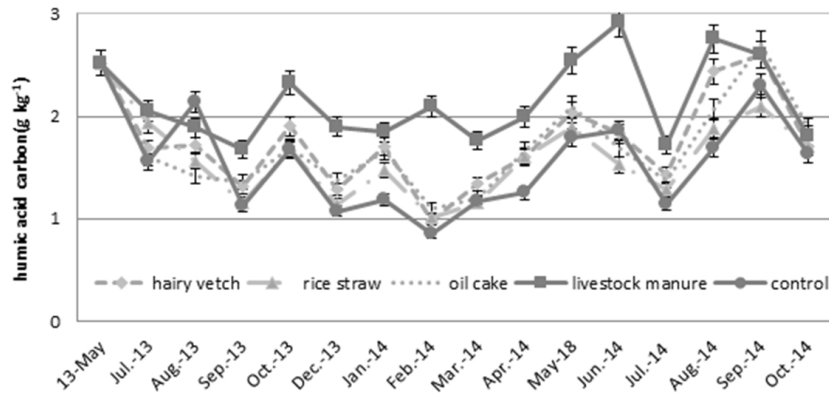


Fig. 6. Periodical changes of carbon contents with treatments in humic acid.

로 풀빅산 탄소함량보다 약 1.0-1.4배가 많았다. 유기물 종류별 휴믹산 탄소함량은 LMC구에서 월등히 많았으며 유기물 시용구에서 대조구보다 T-함량이 높아 유기물종류별 차이가 적었던 풀빅산 탄소함량과는 다른 패턴이었다. 최근 학자들 사이에서 토양유기물을 불안정한 토양유기물 (Labile soil organic matter), 안정한 유기물 (Stable soil organic matter), 불활성 토양유기물 (Inert soil organic matter)로 구분하고 있으며 불안정 유기물은 냉수, 온수에서 추출되는 유기물과 주로 미생물, 식물 등의 잔재나 쉽게 분해되는 비휴믹 물질들로 나누고 있다 (Eduard S. 2010; Seo et al., 2015). 본 시험에서 토양 조제시 일정 크기 이상의 불안정 토양유기물은 제거되었기 때문에 실제적으로 토양에 존재하는 불안정 유기물의 양은 적을 것으로 판단되었으며 일부는 풀빅산 탄소에 포함되었을 것으로 추정되었다.

난분해성 유기물인 휴민 탄소함량은 TC함량에서 풀빅산 탄소함량과 휴믹산 탄소함량을 더한 값을 빼주어 산출하였다. 시험기간 동안 휴민 탄소함량의 경시적인 변화는 Fig. 7과 같이 대조구보다 유기물 시용구에서 더 높았으며, 유기물 종류별로는 LMC구에서 현저히 높았고 다른 유기물인 RS, OC, HV구의 토양 내 휴민 탄소함량은 비슷하였다. 시기별로는 시험 전보다 시험 후에 토양내 휴민 탄소함량이 증가하였으며 특히, LMC구는 대조구보다 약 1.57배, 다른 유기물구보다 1.31-1.44배 많았다. 이런 경향은 가축분발효비료를 조제시 첨가된 할 때 난분해성 물질인 톱밥 때문인 것으로 판단되었다. 톱밥은 질소함량이 낮고 리그닌 등 난분해성 성분을 함유하고 있어 토양 환원시 분해속도가 느리기 때문에 셀룰로오스 등 상대적으로 이분해성 탄소 화합물이 많은 헤어리베치보다 토양 내에 휴민 탄소함량을 증가시켰으며 이는 토양 T-C함량을 증가시키는데 직접적인 영향을 미쳤던 것으로 사료되었다.

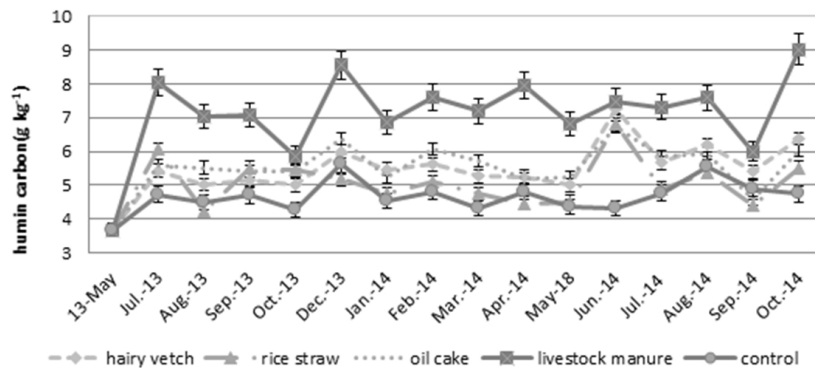


Fig. 7. Periodical changes of carbon contents with treatments in humin fraction

토양 내 형태별 탄소 함량의 분포 토양에 환원된 유기물은 지속적인 분해과정을 거쳐 이산화탄소, 메탄 등 분해가 빠른 성분은 기체형태로 대기 중으로 방출되고 일부는 이분해성인 풀빅산과 휴믹산 탄소화합물로 전환되고 나머지는 난분해성인 휴민 탄소화합물이 되어 토양에 저장된다. 이들 화합물은 지속적인 분해를 거쳐 형태를 바꾸면서 토양에 저장되는데 그 대표적인 형태인 풀빅산 탄소, 휴믹산 탄소, 휴민 탄소함량의 각각에 대한 비율은 Table 3과 같았다. TC 함량에 대한 형태별 탄소함량의 분포는 풀빅산 탄소는 약 16.5-19.0%, 휴믹산 탄소는 19.1-20.6%, 휴민 탄소는 61.2-64.5%로 토양 내 비율은 휴민탄소가 가장 높고 휴믹산탄소, 풀빅산탄소 순이었다. 토양 내 잔류하는 형태별 토양 탄소는 TC함량 대비 휴민탄소가 약 62%, 휴믹산탄소는 19.6%, 풀빅산 탄소는 18.1%가 분포되어 이분해성인 휴믹산 탄소와 풀빅산 탄소보다 난분해성인 휴민탄소가 약 1.6배 많이 차지하였다. 토양 내 탄소함량이 가장 높았던 LMC구의 탄소 비중은 풀빅산 탄소는 16.5%, 휴민산 탄소는 19.1%로 분포되어 다른 유기물원보다 0.6-1.6% 낮게 분포된 반면 휴민 탄소는 2.2% 더 많았다. 토양 내 탄소함량이 낮았던 RS구는 풀빅산 탄소함량과 휴민산 탄소함량의 비율은 다른 유기물보다 높았고 난분해성인 휴민 탄소의 비율은 HV구와는 유사하며 LMC구, OC구보다 상대적으로 낮았다. 이와 같은 결과로 볼 때 식물 잔재로 구성된 HV구나 RS구는 토양 내 탄소로 축적되는 부분보다는 식물체에 무기화된 양분을 공급하는 부분이 더 많은 것으로 추정될 수 있었다 (Seo et al., 2015). 또한 토양 탄소함량에 영향이 큰 탄소 형태는 휴민탄소였으며, 휴민탄소 함량이 높으면 이분해성인 풀빅산탄소, 휴믹산 탄소함량이 낮아 토양 내 탄소의 잔류 기간을 길게 유지하기 위해서는 이분해성 탄소가 높은 HV구나 RS구보다 난분해성 탄소가 많은 LMC를 사용하는 것이 더 유리할 것으로 판단되었다.

Table 3. The ratio of carbon contents according to fulvic acid, humic acid and humin fractions in soils applied with hairy vetch, rice straw, oil cake compost, livestock manure compost and control.

Organic sources	Carbon ratio by the TC*			Carbon ratio by HmC	
	FuC/TC	HaC/TC	HmC/TC	FuC/HmC	HaC/HmC
Hairy vetch	18.6	19.7	61.7	30.2	32.0
Rice straw	19.0	19.5	61.5	30.9	31.7
Oil cake	18.2	19.3	62.4	29.2	30.9
Livestock manure	16.5	19.1	64.5	25.6	29.6
Control	18.2	20.6	61.2	29.8	33.7

* fulvic acid carbon(FuC), humic acid carbon(HaC), humin carbon(HmC), Total carbon(TC).

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ0135662018)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Ali, M.A., M.A. Sattar, M.N. Islam, and K. Inubushi. 2014. Integrated effects of organic inorganic and biological amendments on methane emission, soil quality and rice productivity in irrigated paddy ecosystem of Bangladesh: field study of two consecutive rice growing seasons. *Plant Soil*. 378:239-252.
- Awad, Y.M., E. Blagodatskaya, 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 Bio.* 48:1-10.
- Cho, H.S., M.C. Seo, T.S. Park, and H.W. Kang. 2015. Effects of tillage depths on methane emission and rice yield in paddy soil during rice cultivation. *J. Crop Sci.* 60:167-173.
- Choi, B.S., J.A. Jung, M.K. Oh, S.H. Jeon, H.G. Goh, Y.S. Ok, and J.K. Sung. 2010. Effects of green manure crops on improvement of chemical and biological properties in soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5):650-658.
- Christl, I., H. Knicker, I. Kogel Knabner, and R. Kretzschmar. 2000. Chemical heterogeneity of humic substances: characterization of size fractions obtained by hollow-fibre ultrafiltration. *Eur. J. Soil Sci.* 51: 617-625.
- Han, K.H., K.H. Jung, H.R. Cho, H.S. Lee, J.H. Ok, Y.S. Zhang, G.S. Kim, and Y.H. Seo. 2017. Effect of crop yield and soil physical properties to application of organic resources in upland, *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc.* 25(4):15-22.
- 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 *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.*, 148-149.
- Jeong, H.C., G.Y. Kim, S.B. Lee, J.S. Lee, J.H. Lee, K.H. So. 2012. Evaluation of greenhouse gas emissions in cropland sector on local government levels based on 2006 IPCC guideline, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(5):842-847.
- Jeong, J.H., B.W. Sin, and C.H. Yoo. 2001. Effects of the successive application of organic matters on soil properties and rice yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 34:129-133.
- Kim, G.Y., J. Gutierrez, H.C. Jeong, J.S. Lee, M.D. M. Haque, and P.J. Kim. 2014. Effect of intermittent drainage on methane and nitrous oxide emissions under different fertilization in a temperate paddy soil during rice cultivation, *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 57(2):229-236.
- Kim, L.Y., H.J. Cho, and K.H. Han. 2004. Changes of Physical properties of soils by organic material application in farm land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37(5):304-314.
- 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. Kor. Soc. Soil Ground. Environ.*, 9(4):42-51.
- Lee, Y.H., S.M. Lee, J.K. Sung, D.H. Choi, H.M. Kim, G.H. Ryu. 2006. Development of soil management technique in organic rice cultivation. *Korean J. Org. Agric.* 14(2):205-217.
- 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.
- Michael, H., and B. Hayes. 2006. Solvent system for the isolation of organic components from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:986-994.
- NIAST. 2000. Methods of analysis of soil and plant. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
- Seo, M.C., H.S. Cho, J.H. Kim, W.G. Sang, P. Shin, and G.H. Lee. 2015. Evaluating soil carbon changes in paddy field based on different fraction of soil organic matter. *Kor. J. Soil Sci. Fert.* 48(6):736-743.
- Yang, C.H., J.H. Ryu, T.K. Kim, S.B. Lee, J.D. Lee, N.H. Beak, W.Y. Choi, and S.J. Kim. 2009. Effect of green manure crops Incorporation with rice cultivation on soil fertility improvement in paddy field, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(5):371-378.