

ORIGINAL ARTICLE

## 논토양에서 퇴비시용 및 경운이 토양탄소 축적과 안정화에 미치는 영향

홍창오 · 강점순<sup>1)</sup> · 신현무<sup>2)</sup> · 조재환<sup>3)</sup> · 서정민<sup>4)</sup>

부산대학교 생명환경화학학과, <sup>1)</sup>부산대학교 원예생명과학과, <sup>2)</sup>경성대학교 환경공학과, <sup>3)</sup>부산대학교 농업경제학과,

<sup>4)</sup>부산대학교 바이오환경에너지학과

### Effect of Compost and Tillage on Soil Carbon Sequestration and Stability in Paddy Soil

Chang-Oh Hong, Jum-Soon Kang<sup>1)</sup>, Hyun-Moo Shin<sup>2)</sup>, Jae-Hwan Cho<sup>3)</sup>, Jeong-Min Suh<sup>4)</sup>

*Department of Life Science and Environmental Biochemistry, Pusan National University, Miryang, 627-706, Korea*

<sup>1)</sup>*Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea*

<sup>2)</sup>*Department of Environmental Engineer, Kyungsoong University, Busan, 608-736, Korea*

<sup>3)</sup>*Department of Agricultural Economics, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea*

<sup>4)</sup>*Department of Bio-Environmental Energy, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea*

#### Abstract

So far, most studies associated with soil carbon sequestration have been focused on long term aspect. However, information regarding soil carbon sequestration in short term aspect is limited.

This study was conducted to determine changes of soil organic carbon content and stability of carbon in response to compost application rate and tillage management during rice growing season(150 days) in short term aspect. Under pot experiment condition, compost was mixed with an arable soil at rates corresponding to 0, 6, 12, and 24 Mg/ha. To determine effect of tillage on soil carbon sequestration, till and no-till treatments were set up in soils amended with application rate of 12 Mg/ha. Compost application and tillage management did not significantly affect soil organic carbon(SOC) content in soil at harvest time. Bulk density of soil was not changed significantly with compost application and tillage management. These might result from short duration of experiment. While hot water extractable organic carbon(HWEOC) content decreased with compost application, humic substances(HS) increased. Below ground biomass of rice increased with application of compost and till operation.

From the above results, continuous application of compost and reduce tillage might improve increase in soil organic carbon content and stability of carbon in long term aspect.

**Key words** : Compost, Rice, Tillage, Soil carbon sequestration

Received 15 October, 2013; Revised 25 October, 2013;

Accepted 25 November, 2013

\*Corresponding author : Jeong-Min Suh, Department of Bio-Environmental Energy, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea  
Phone : +82-55-350-5436  
E-mail : suhjm@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

산업혁명 이후 화석연료의 사용에 의존하였던 산업구조의 결과 대기의 이산화탄소의 농도는 급격히 증가해 왔으며, 지금과 같은 속도로 증가할 경우 21세기 안에는 지금의 두 배(720 ppm)가 되고, 이에 따라 대기의 평균 온도는 5°C 상승될 것으로 예측되고 있다(IPCC, 2007). 최근 들어 지구촌 곳곳에서 발생되고 있는 기상이변은 대기의 이산화탄소 농도 증가와 평균 온도의 상승으로 인한 지구온난화현상에 의해 기인되어진 것으로 판단된다.

토양은 대기의 이산화탄소를 제거하는 지구상에서 가장 방대한 저장고의 역할을 할 수 있다. 토양의 탄소량은 2,500 Gt으로 대기의 총 탄소량(760 Gt)의 3.3배, 생물체(560 Gt)의 4.5배로, 토양 탄소 저장량을 일부만 증가시켜도 대기 온실가스 농도 저감효과가 큰 것으로 보고되고 있다(Lal 등, 1997; Lal, 2000; Schlesinger, 2000). 토양의 탄소 축적(Soil carbon sequestration)은 바이오매스가 토양 내에서 부식화되는 과정을 통해 대기 중의 이산화탄소가 토양 유기탄소로 전환되는 과정으로 일컬어진다(Lal, 2007). 이러한 토양의 탄소 격리능을 향상시키는 전략은 토양 내 탄소의 투입량을 유출량보다 높게 유지하여 탄소의 수지를 높이는 것이다. 토양의 탄소 격리능을 향상시키기 위해서는 토양유기탄소의 분해, 침식, 용탈 등의 토양으로 부터의 탄소의 유실을 최소화하고 작물의 잔재를 토양으로 환원시키거나 무경운, 피복작물의 재배, 혹은 유기물 제재의 투입을 통해 토양의 탄소 투입량을 증가시켜야 한다(Nieder와 Benbi, 2008).

현재까지 연구되어진 몇몇 연구결과에 따르면 토양에 유기물 제재를 사용하면 토양의 입단화를 향상시켜 토양유기탄소의 함량이 증가되어진다고 보고하고 있다(Rasool 등, 2008; Six 등). 다른 연구결과에 따르면 유기물제재의 사용은 토양유기탄소의 분해율을 저감시킴에 따라 토양 내 유기탄소의 함량을 증가시킨다고 보고하고 있다(Mukherjee, 2008). 국내에서 연구되어진 결과에 따르면 40년간 실시된 처리구에서 화학비료와 퇴비를 혼용하였을 때 토양유기탄소의 함량이 지속적으로 증가한다고 보고하였다(Lee 등, 2013).

무경운은 토양을 덜 호기적인 조건으로 만들고(Doran,

1980) 토양의 입단파괴를 최소화하여 유기물의 분해를 지연시켜(West와 Post, 2002) 토양 내 유기탄소의 함량을 증대시킬 수 있다고 보고되고 있다. 그러나 일부연구 결과에서는 이러한 결론에 대해 반대되는 결과를 보고하고 있다(Angers와 Eriksen-Hamel, 2008; Baker 등, 2007; Blanco-Canqui와 Lal, 2008; Luo 등, 2010; Powlson와 Jenkinson, 1981).

현재까지 국내에서 퇴비의 사용과 경운에 따른 토양의 탄소격리와 탄소의 안정화 정도와 관련하여 수행되어진 연구는 부족한 실정이며 해외에서 연구되어진 연구결과들은 대부분 5년 이상의 장기간에 이루어진 연구결과들이었다. 따라서 본 연구는 단기간의 비재배시험 동안 축분퇴비의 사용량과 경운 유무에 따른 토양 유기탄소의 함량 변화와 토양 탄소의 안정화 정도를 조사하기 위해 실시하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시토양 및 퇴비 특성

본 연구를 수행하기 위해 경남 밀양시 부북면 오례리의 부산대학교 부속농장(128°72'11"N 35°50'23"E) 내 논토양을 공시토양으로 선정하였다. 대상지역의 토양은 우곡통에 속하는 토양이었으며 점토 7.2%, 미사 37%, 모래 55.8%를 포함하는 사질양토(sandy loam)이었다. 시험에 사용된 공시토양과 축분퇴비의 이화학적 특성은 Table 1에 나타내었다.

**Table 1.** Chemical properties of the studied soil and compost

Items	Soil	Compost
pH (1:5 with H <sub>2</sub> O)	6.50	6.24
Electrical conductivity (dS/m)	1.14	4.12
Total nitrogen (g kg <sup>-1</sup> )	2.9	21.5
Organic carbon (g/kg)	15.4	391
Humic substances (g/kg)	3.07	313
Hot water extractable organic carbon (g/kg)	0.47	19.9

### 2.2. 포트시험

논토양에서 축분퇴비의 사용량과 경운이 토양유기탄소의 축적에 미치는 효과를 검증하기 위해 부산대학교 부속농장 내 논토양의 표토(0~15 cm)를 채취하

여 풍건세토 후 2 mm 체에 통과시켰다. 1/2000a 와그너 포트에 건조된 토양 15 kg을 충전한 후 가비중이 1.25 g/cm<sup>3</sup>이 되도록 다졌다. 퇴비의 사용량에 따른 효과를 검증하기 위해 축분퇴비를 0, 6, 12(추천량), 24 Mg/ha로 처리하였다. 멀칭조건에 따른 효과를 검증하기 위해 축분퇴비를 추천량인 12 Mg/ha로 처리하고 토양과 축분퇴비를 완전히 혼합한 처리구를 경운 처리구로 설정하고 표토에 축분퇴비를 처리하고 토양과 혼합하지 않은 처리구를 무경운 처리구로 설정하였다. 모든 처리구에 질소(N 110 kg/ha)와 인산(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 30 kg/ha)과 가리(K<sub>2</sub>O 30 kg/ha)를 동일한 양으로 처리하였다. 벼 모종을 2012년 11월 8일에 이앙하여 2013년 4월 16일에 수확하여 총 150일간 온실에서 재배하였다. 재배기간 동안 논토양 조건을 유지하기 위해 수면이 토양으로부터 5 cm가 되게 물을 지속적으로 첨가하였다.

### 2.3. 이화학적 특성 조사

공시토양의 pH와 전기전도도는 풍건된 시료를 토양/증류수 비 1:5(w/w)로 하여 유리막대로 잘 저은 후 pH meter와 EC meter를 이용하여 pH와 EC 값의 변동이 없을 때 값을 읽었으며, 측정값의 일관성을 유지하기 위하여 동일한 측정시간을 적용하였다. 총질소 함량은 킬달증류법(Bremner, 1965; Kjeldahl method)으로 측정하였으며 수확 후 토양의 용적밀도는 core 법(Blake와 Hartge, 1986)으로 실시하였다.

### 2.4. 토양유기탄소 함량 및 안정화도 조사

토양유기탄소(soil organic carbon, SOC), 부식질(humic substances, HS) 및 열수 추출 가능한 탄소(hot water extractable organic carbon, HWEOC)에 대한 탄소의 함량은 Aurora1030 TOC(O.I. Analytical, USA)분석기기를 사용하여 분석하였다.

토양유기탄소 함량측정을 위해 토양시료에 5%의 HCl을 TOC 측정컵이 다 찼도록 충분히 채워주고 실험실 내 오븐에 넣어 시료를 가열시켜 무기탄소 성분을 제거 후 TOC 분석기로 분석하였다. 이 때 가열을 위한 일반적인 온도와 시간은 시료의 유기물 함량에 따라 달라지나, 75~250°C에서 5분~2시간 이내를 적용하며 본 실험에서는 100°C에서 1시간 동안 가열하

였다.

열수 추출 가능한 탄소는 이동성이 큰 토양유기탄소 안정성의 화학적 평가지표로 사용할 수 있으며 (Plante 등, 2011), 이를 위해 Sparling 등(1998)이 사용한 추출방법을 개량하여 사용하였다. 추출을 위하여 풍건된 시료 2 g을 플라스틱 튜브에 넣고 10 ml의 증류수를 가하여 토양/물의 비를 1:5(w/w)로 한 다음 30분간 교반하여 혼합 및 분산이 잘되게 하였다. 교반된 튜브는 70°C의 열수에 담귀 18시간 동안 추출 반응시킨 후 손으로 흔들거나 볼텍스 교반기를 사용하여 3초간 토양을 재부유한 후 5C 여과지로 여과하여 TOC를 분석하였다.

부식질은 Janos(2003)이 사용한 방법으로 추출하였다. 먼저 추출효율의 증대를 위하여 0.1M HCl로 세척을 하여 양이온, 철, 수산화알루미늄을 제거하였다. 세척이 끝난 시료는 질소가스 조건하에서 0.5 M NaOH로 추출하여, 5C 여과지로 분리하고 여액은 TOC 분석을 하였다. NaOH와 같은 강 알칼리 추출용액을 사용한 추출은 토양 및 퇴적물로부터 부식질을 분리하는데 널리 사용되어 왔다.

침출액 내 탄소의 함량을 측정하기 위해 10% sodiumpersulfate(Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)와 5% phosphoric acid(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)를 유기탄소 농도에 따라 조정하여 가함으로써 시료 내 무기탄소를 제거한 다음 TOC 분석기로 분석 하였다.

### 2.5. 바이오매스 조사

수확 후 벼를 지상부와 지하부로 분리시키고 흐르는 물에 세척하여 이물질을 제거한 후 드라이 오븐에서 70°C에서 72시간 동안 건조 후 건물 중을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 퇴비사용 효과

퇴비 사용량의 증가에 따라 토양유기탄소의 함량은 Table 2와 같이 다소 증가하는 경향을 나타냈으나 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다. 또한 시험 전 토양과 퇴비사용 후의 토양 내 유기탄소함량 차이를 조사해본 결과, 퇴비의 사용량을 증가시키기에 따라 Table 3과 같이 유기탄소의 변화량이 다소 증가하는 경향을 나타냈으나 통계적으로 유의한 차이는 나

**Table 2.** Changes in soil organic carbon(SOC), humic substances(HS), and hot water extractable organic carbon(HWEOC) content in response to compost application rate at harvest time

Compost (Mg/ha)	Soil depth (cm)				Soil depth (cm)				Soil depth (cm)			
	0-10	10-20	20-30	LSD <sub>0.05</sub> <sup>Y</sup>	0-10	10-20	20-30	LSD <sub>0.05</sub> <sup>Y</sup>	0-10	10-20	20-30	LSD <sub>0.05</sub> <sup>Y</sup>
	SOC (g/kg)				HS (g/kg)				HWEOC (g/kg)			
0	15.4	15.5	15.2	NS	3.07	2.87	3.05	NS	0.47	0.46	0.46	NS
6	15.3	15.3	15.4	NS	3.15	3.35	3.10	NS	0.37	0.36	0.38	0.02
12	15.6	15.7	15.6	NS	3.28	3.46	3.21	NS	0.36	0.36	0.34	NS
24	16.2	16.3	15.9	NS	3.41	3.39	3.25	NS	0.32	0.33	0.33	NS
LSD <sub>0.05</sub> <sup>Z</sup>	NS	NS	NS		NS	NS	NS		0.04	0.04	0.05	
	ΔSOC (g/kg)				ΔHS (g/kg)				ΔHWEOC (g/kg)			
0	-0.19	-0.16	-0.45	NS	0.58	0.39	0.57	NS	-0.92	-0.93	-0.92	NS
6	-0.33	-0.30	-0.18	NS	0.67	0.86	0.62	NS	-1.01	-1.03	-1.01	0.02
12	-0.07	0.03	-0.03	NS	0.80	0.97	0.73	NS	-1.03	-1.03	-1.05	NS
24	-0.59	0.72	0.27	NS	0.93	0.91	0.77	NS	-1.07	-1.06	-1.06	NS
LSD <sub>0.05</sub> <sup>Z</sup>	NS	NS	NS		NS	NS	NS		0.04	0.04	0.05	

<sup>Z</sup> least significant difference (p<0.05) among the application rates of compost.

<sup>Y</sup> least significant difference (p<0.05) among the soil depths.

<sup>X</sup> not significant at p<0.05 level.

타내지 않았다. 본 연구에서 퇴비의 시용에 따라 토양 유기탄소 함량이 유의적으로 증가하지 않은 것은 토양 유기탄소함량 변화의 조사가 단기간에 이루어진 것과 관련이 있는 것으로 판단된다. 많은 연구에서 퇴비의 시용에 따라 토양의 유기탄소함량이 증가한다고 보고하고 있으나 이러한 연구들은 대부분이 5년 이상의 장기간의 연구이었다(Lee 등, 2013; Mukherjee, 2008; Rasool 등, 2008; Six 등, 1999). Richter 등(2007)은 토양탄소의 양과 성질은 상당히 늦은 속도로 변화되기 때문에 이러한 변화를 관찰하기 위해서는 장기간의 연구가 필요하다고 보고하였다.

일부 연구에서는 토양 내 퇴비를 사용하게 되면 미생물의 활성을 개선시켜 토양 내 대입단(macroaggregates)

의 형성을 증가시키게 된다고 보고하고 있다(Jastrow, 1996; Six 등, 1999). Dorodnikov 등(2009)은 토양이 대기 중 탄소를 축적하는 데는 대입단의 형성이 중요하다 보고하였다. 일반적으로 대입단(>0.25 mm)은 소입단(microaggregates, <0.25 mm) 보다 훨씬 많은 탄소를 함유하고 있다(Cambardella와 Elliott, 1993a; Cambardella와 Elliott, 1993b; Elliott, 1986; Puget 등, 1995; Six 등, 2000). 이러한 대입단의 형성을 위해서는 장기간의 시간이 요구되어 질것으로 판단된다. 본 연구의 연구기간인 150일 동안 퇴비의 시용에 의해 토양 내 대입단의 형성이 유의적으로 증가되지 않은 것으로 판단된다. 이러한 판단에 대한 근거는 수확기에 측정된 토양의 용적밀도를 조사한 결과에 의해 입

**Table 3.** Changes in bulk density of soil in response to application rate of compost and tillage at harvest time

Soil depth (cm)	Compost application rate (Mg/ha)					Tillage		
	0	6	12	24	LSD <sub>0.05</sub> <sup>Y</sup>	No-till	Till	LSD <sub>0.05</sub> <sup>Y</sup>
	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )							
0-10	1.26	1.26	1.24	1.24	NS	1.23	1.24	NS
10-20	1.27	1.27	1.25	1.25	NS	1.25	1.24	NS
20-30	1.25	1.24	1.26	1.26	NS	1.26	1.25	NS
LSD <sub>0.05</sub> <sup>Z</sup>	NS	NS	NS	NS		NS	NS	

<sup>Z</sup> least significant difference (p<0.05) among the application rates of compost.

<sup>Y</sup> least significant difference (p<0.05) among the soil depths.

<sup>X</sup> not significant at p<0.05 level.

증되었다. 퇴비의 사용량 증가에 따른 용적밀도의 유의한 감소는 Table 3에서 보듯이 발견되지 않았다.

본 연구에서 수확기 토양 내 유기탄소의 함량과 유기탄소의 함량변화는 Table 2와 같이 토양의 깊이에 따라 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. Lee 등 (2007)은 스위치그래스를 재배토양에 퇴비를 사용하였을 때 표토(0~5 cm)에서 토양유기탄소의 함량이 유의적으로 증가하였으나 심토(30~90 cm)에서는 유의한 변화를 관찰하지 못하였다고 보고하였다. 이 연구는 현장조건에서 실시되어 퇴비를 4년간 지속적으로 표토에 사용하였을 때 관찰된 결과이었다. 반면에 본 연구는 포트시험 조건에서 150일간 실시되었으며 퇴비와 토양을 완전히 혼합한 후 포트에 충전 하였으므로 토양깊이별 유기탄소의 함량차이는 발견할 수 없었던 것으로 판단된다.

퇴비사용에 따른 토양의 유기탄소함량의 변화와는 달리 토양 내 열수추출 가능한 탄소의 함량은 퇴비의 사용에 따라 처리구간의 차이를 나타내었다. 퇴비를 사용함에 따라 열수추출 가능한 탄소의 함량은 모든 토양깊이에서 유의하게 감소하는 결과를 나타내었다. 토양 내 부식질의 함량은 퇴비의 사용량을 증가시킴에 따라 증가하는 경향을 나타내었으나 통계적 유의한 차이는 발견되지 않았다. 퇴비사용 전후의 토양 내 열수추출 가능한 탄소의 변화량을 조사한 결과에서도 유사한 결과를 나타내었다.

토양유기탄소의 안정화정도는 탄소가 토양 내에서

쉽게 분해되는가의 정도로 정의될 수 있다. 열수추출 가능한 탄소의 함량은 미생물에 의해 쉽게 분해가 가능한 토양탄소인 반면에 부식질은 쉽게 분해되지 않는 토양탄소의 형태로 간주되고 있다(Spaccini 등, 2000a; Spaccini 등, 2000b). 엄밀히 말하자면 미생물에 의해 쉽게 분해되지 않는 부식질 탄소의 함량이 증대되었을 때 토양의 탄소 축적이 증대되었다고 말할 수 있다. 사실상, 부식질 탄소는 토양 내에서 수백 년간 분해되지 않고 존재한다고 조사되었다(Piccolo, 1996). 토양 내 부식질은 주로 alkyl기와 같은 지용성의 물질로 구성되어 있다. 이러한 지용성의 물질들은 미생물이 탄소화합물을 분해하는 것을 보호하는 역할을 한다(Piccolo, 1999). 일반적으로 퇴비는 퇴비화과정을 겪는 동안 미생물에 의해 쉽게 분해 가능한 형태의 탄소는 제거되어 지고 주로 부식질의 탄소가 존재하게 된다. 본 연구에 사용된 퇴비의 부식질 탄소의 함량과 열수추출 가능한 탄소의 함량은 총 탄소함량의 각각 80.1%와 5.1%로 이러한 사실을 Table 1에서 증명한다. 본 연구에서 퇴비의 사용에 따라 토양 내 부식질의 함량이 Table 2와 같이 증가되는 반면 열수추출 가능한 탄소의 함량이 감소되는 것은 시험에 사용된 퇴비의 높은 부식질 함량에 기인된 것으로 판단된다.

### 3.2. 경운 효과

무경운(無耕耘)처리구와 경운 처리구의 토양 유기탄소 함량과 처리 전후 유기탄소의 함량변화를 비교한 결과 Table 4와 같이 표토(0~10 cm)에서 무경운 처

**Table 4.** Changes of soil organic carbon(SOC), humic substances(HS), and hot water extractable organic carbon(HWEOC) content in response to tillage at harvest time

Tillage	Soil depth (cm)				Soil depth (cm)				Soil depth (cm)			
	0-10	10-20	20-30	LSD <sub>0.05</sub> <sup>Y</sup>	0-10	10-20	20-30	LSD <sub>0.05</sub> <sup>Y</sup>	0-10	10-20	20-30	LSD <sub>0.05</sub> <sup>Y</sup>
	SOC (g/kg)				HS (g/kg)				HWEOC (g/kg)			
No-till	15.9	15.7	15.6	NS	3.28	3.28	2.94	NS	1.37	0.71	0.67	0.06
Till	15.6	15.7	15.6	NS	3.28	3.19	3.17	NS	0.36	0.58	0.34	NS
LSD <sub>0.05</sub> <sup>Z</sup>	NS	NS	NS		NS	NS	NS		0.13	NS	0.04	
	ΔSOC (g/kg)				ΔHS (g/kg)				ΔHWEOC (g/kg)			
No-till	0.27	0.03	-0.03	NS	0.80	0.80	0.45	NS	-0.01	-0.67	-0.72	0.06
Till	-0.07	0.03	-0.03	NS	0.80	0.71	0.69	NS	-1.03	-0.80	-1.05	NS
LSD <sub>0.05</sub> <sup>Z</sup>	NS	NS	NS		NS	NS	NS		0.11	NS	0.03	

<sup>Z</sup> least significant difference (p<0.05) among the application rates of compost.

<sup>Y</sup> least significant difference (p<0.05) among the soil depths.

<sup>X</sup> not significant at p<0.05 level.

리구가 다소 높은 것으로 나타났으나 통계적 유의한 차이는 없었다. 다른 토양 깊이(10~20 cm와 20~30 cm)에서는 무경운과 경운 처리 간에 유기탄소 함량차이를 발견할 수 없었다. 비록 통계적 유의한 차이는 없었지만 무경운 처리구에서 표토 내 유기탄소의 함량이 경운처리구보다 높았다. 이러한 결과는 기존에 이루어진 여러 연구들과 일치하는 결과이다. 무경운으로 관리된 토양에서는 표토 내 토양유기탄소의 함량이 가장 높으며 토양의 깊이가 깊어질수록 유기탄소의 함량은 감소된다. 반면에 경운으로 관리된 토양에서는 토양깊이와 상관없이 비슷한 함량을 보여준다(Machado 등, 2003). 무경운을 하게 되면 토양의 입단화가 촉진되어 결과적으로 토양 유기탄소의 함량은 증가하게 된다(Paustian 등, 2000; Six 등, 2000). 또한 경운을 하게 되면 토양의 대입단은 물리적으로 파괴되어 더 작은 소입단이 되어 무기화되기 쉬운 구조를 형성하여 토양 내 유기탄소의 함량은 감소하게 된다(Cambardella와 Elliott, 1993b; Six 등, 1998).

무경운 처리구의 표토 내 열수추출가능한 탄소의 함량은 Table 4와 같이 경운처리구에 비해 유의하게 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 토양 내 유기탄소는 호기적인 조건이나 입단이 파괴되면 보다 쉽게 분해된다(Balesdent 등, 2000; Beare 등, 1994; Doran, 1980). 경운처리구의 표토 내 열수추출 가능한 탄소의 함량이 무경운 처리구에 비해 낮았던 이유는 경운에 의한 입단파괴와 호기적 조건에 의한 것으로 판단된다. 앞에서 언급한 바와 같이 열수추출 가능한 탄소의 함량은 미생물에 의해 쉽게 분해가 가능한 토양탄소인 반면에 부식질은 쉽게 분해되지 않는 토양탄소의 형태로 간주된다(Spaccini 등, 2000a; Spaccini 등, 2000b). 엄밀히 말하자면 미생물에 의해 쉽게 분해되지 않는 부식질 탄소의 함량이 증대되었을 때 토양의 탄소 축적이 증대되었다고 말할 수 있다. 본 연구에서 경운 유무에 따른 토양 내 부식질 함량의 차이는 Table 4에서 보듯이 발견되지 않았다. 토양 탄소의 안정화 정도의 측면에서 본다면 무경운에 의해 표토 내 유기탄소의 함량이 증가하더라도 열수추출가능한 탄소의 함량이 높아 미생물에 의해 쉽게 분해되어 제거될 가능성이 높다. 그러나 본 연구는 150일 간의 짧은 기간 동안 수행되어 보다 장기적인 측면에서의 해석을 위해서는

연구가 더욱 필요할 것으로 판단된다.

### 3.3. 바이오매스 특성

경운 유무에 따라 비의 지상부의 바이오매스는 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 그러나 Fig. 1에서 경운 처리구에서 지하부의 바이오매스량은 무경운에 비해 유의적으로 높은 것으로 나타났다. 과도한 경운은 토양의 입단을 파괴하고 토양 내 유기물의 함량을 감소시켜 작물의 수량을 감소시킬 수 있으나 적당한 경운은 토양 내 양분의 무기화 및 물리성을 개량하여 작물의 수량을 증대시킨다(Ahmad 등, 1996; Keshavarzpour와 Rashidi, 2008; Ogban 등, 2008). 본 연구에서 무경운에 비해 경운처리에 의해 지하부의 바이오매스량이 더 많은 이유는 적당한 경운에 의해 토양 물리성 및 통기성이 개량되어 지하부의 생육이 보다 좋아진 것으로 판단된다. 토양의 용적밀도는 Table 3과 같이 무경운 처리구의 표토(0~10 cm)에서 경운처리보다 다소 높은 것으로 나타났으나 다른 토양깊이(10~20 cm와 20~30 cm)에서는 경운처리구에서 높은 것으로 나타났다.

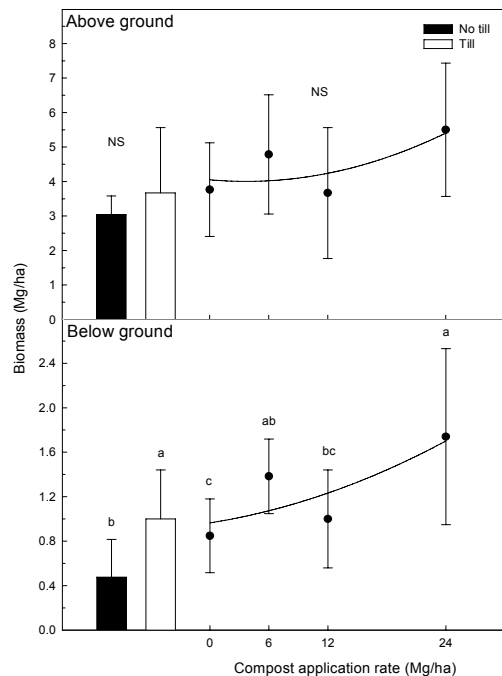


Fig. 1. Above and below ground biomass in response to compost application rate and tillage at harvest time.

퇴비의 사용량을 증가시킴에 따라 Fig. 1과 같이 비의 지상부 바이오매스량은 유의한 차이는 없었으나 지하부 바이오매스량은 유의하게 증가되었다. 작물의 지상부에서 고사된 잎이나 잔재물들은 토양의 유기탄소로 환원될 수 있는 바이오매스이다. 그러나 지상부 바이오매스의 대부분은 수확기에 토양으로부터 제거되어 진다. 반면에 지하부의 바이오매스는 수확 후에도 토양 내에서 남아 토양 유기탄소의 중요한 공급원이 된다. 따라서 장기간 동안 지속적으로 축분퇴비를 사용한다면 토양 유기탄소의 중요한 공급원이 되는 지하부의 바이오매스 양을 증대시켜 결론적으로 토양탄소의 격리능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 벼재배시험 기간 동안 축분퇴비의 사용량과 경운 유무에 따른 토양 유기탄소의 함량 변화와 토양 탄소의 안정화 정도를 조사하기 위해 실시되었다. 벼 기간 동안 퇴비의 사용과 경운 유무에 따라 토양 내 유기탄소 함량의 유의한 증가는 발견되지 않았다. 또한 퇴비사용과 경운에 의한 토양의 물리적 특성 변화는 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 본 연구의 짧은 조사기간과 관련이 있는 것으로 판단된다. 그러나 퇴비의 사용에 의해 쉽게 분해 가능한 형태인 열수추출 가능한 탄소의 함량은 감소하는 결과를 나타내었으며 쉽게 분해되기 어려운 형태인 부식질 탄소의 함량은 증가하였다. 경운을 하였을 때와 유기물을 사용하였을 때 비의 지하부 바이오매스의 함량이 증가되어지는 결과를 나타내었다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 장기적으로 축분퇴비를 지속적으로 사용하고 적당한 경운을 실시한다면 토양 유기탄소의 함량 증대와 안정화 정도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호 : PJ008316)의 지원에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- Ahmad, N., Rashid, M., Vaes, A.G., 1996, Fertilizer and their Use in Pakistan, No. 4/96, 2nd ed. NFDC Pub., Islamabad, 274.
- Angers, D. A., Eriksen-Hamel, N. S., 2008, Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: a meta-analysis, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 72, 1370-1374.
- Baker, J. M., Ochsner, T. E., Venterea, R. T., Griffis, T. J., 2007, Tillage and soil carbon sequestration-what do we really know?, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 118, 1-5.
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M., 2000, Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage, *Soil Till. Res.*, 53, 215-230.
- Beare, M. H., Caberera, M. L., Hendrix, P. F., Coleman, D. C., 1994, Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 58, 787-795.
- Blake, G. R., Hartge, K. H., 1986, Bulk density, *Methods of soil analysis, Part 1, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, USA*, 363-376.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2008, No-tillage and soil-profile carbon sequestration: an on-farm assessment. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 72, 693-701.
- Bremner, J. M., 1965, Inorganic forms of nitrogen, in: Black, C. A., et al. (Eds), *Methods of soil analysis, Part 2, Agron. Monogr. 9. ASA., Madison, WI, USA*, 1179-1237.
- Cambardella, C. A., Elliott, E. T., 1993a, Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions, *Geoderma*, 56, 449-457.
- Cambardella, C. A., Elliott, E. T., 1993b, Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1071-1076.
- Doran, J. W., 1980, Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 44, 765-771.
- Dorodnikov, M., Blagodatskaya, E., Blagodatsky, S., Marhan, S., Fangmeier, A., Kuzyakov, Y., 2009, Stimulation of microbial extracellular enzyme activities by elevated CO<sub>2</sub> depends on aggregate size, *Global Change Biology*, 15, 1603-1614.

- Elliott, E. T., 1986, Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 50, 627-633.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, Fourth Assessment Report (AR4), Geneva, Switzerland.
- Janos, P., 2003, Separation methods in the chemistry of humic substances, *J. Chromatogr. A*, 983, 1-18.
- Jastrow, J. D., 1996, Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter, *Soil Biol. Biochem.*, 28, 656-676.
- Keshavarzpour, F., Rashidi, M., 2008, Effect of different tillage methods on soil physical properties and crop yield of watermelon (*Citrullus vulgaris*), *World Appl. Sci. J.*, 3, 359-364.
- Lal, R., Kimble, J. M., Follet, R., 1997, Land use and soil carbon pools in terrestrial ecosystems, in: Lal, R., Kimble, J. M., Follet, R. (Eds), *Management of Carbon Sequestration in Soils*, CRC Press, New York, USA.
- Lal, R., 2000, Erosion effects on agronomic productivity, in: Lafren, J. M., Tian, J., Huang, C. H. (Eds), *Soil Erosion and Dryland Farming*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 229-246.
- Lal, R., 2007, Carbon management in agricultural soils, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, 303-322.
- Lee, C. H., Jung, K. Y., Kang, S. S., Kim, M. S., Kim, Y. H., Kim, P. J., 2013, Effect of long-term fertilization on soil carbon and nitrogen pools in paddy soil, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 46, 216-222.
- Lee, D. K., Owens, V. N., Doolittle, J. J., 2007, Switchgrass and soil carbon sequestration response to ammonium nitrate, manure, and harvest frequency on conservation reserve program land, *Agronomy. J.*, 99, 462-468.
- Luo, Z. K., Wang, E. L., Sun, O. J., 2010, Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 139, 224-231.
- Machado, P., Sohi, S.P., Gaunt, J.L., 2003, Effect of no-tillage on turnover of organic matter in a Rhodic Ferralsol, *Soil Use and Management*, 19, 250-256.
- Mukherjee M., 2008, Compost can turn agricultural soils into a carbon sink, thus protecting against climate change, Special issue of *Waste Management and Research*, [http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2008-02/spu-cct022208.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2008-02/spu-cct022208.php).
- Nieder, R., Benbi, D. K., 2008, *Carbon and Nitrogen in the Terrestrial Environment*, Springer, USA, 430.
- Ogban, P. I., Ogunewe, W. N., Dike, R. I., Ajaelo, A.C., Ikeata, N. I., Achumba, U. E., Nyong, E. E., 2008, Effect of tillage and mulching practices on soil properties and growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata* (L), WALP) in Southeastern Nigeria, *J. Tropical Agric., Food, Environment and Extension*, 7(2), 118-128.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T., Hunt, H. W., 2000, Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils, *Biogeochemistry*, 48, 147-163.
- Piccolo, A., 1996, Humus and soil conservation, in: Piccolo, A. (Eds), *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 225-264.
- Piccolo, A., Spaccini, R., Haberhauer, G., Gerzabek, M. H., 1999, Increased sequestration of organic carbon in soil by hydrophobic protection, *Naturwissenschaften*, 86, 496-499.
- Plante, A. F., Fernández, J. M., Haddix, M. L., Steinweg, J. M., Conant R. T., 2011, Biological, chemical and thermal indices of soil organic matter stability in four grassland soils, *Soil Biol. Biochem.*, 43, 1051-1058.
- Powlson, D. S., Jenkinson, D. S., 1981, A comparison of the organic matter, biomass, adenosine-triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils, *J. Agric. Sci.*, 97, 713-721.
- Puget, P., Chenu, C., Balesdent, J., 1995, Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils, *Eur. J. Soil Sci.*, 46, 449-459.
- Rasool, R., Kukal, S. S., Hira, G. S., 2008, Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system, *Soil and Tillage Research*, 101, 31-36.
- Richter, D. D., Callahan, M. A., Powlson, D. S., Smith, P., 2007, Long-term soil experiments: keys to managing earth's rapidly changing ecosystems, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 266-279.
- Schlesinger, W. H., 2000, Carbon sequestration in soils: Some cautions amidst optimism, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 82, 121-127.



- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K., 1998. Aggregate and SOM dynamics under conventional and no-tillage systems, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1350-1358.
- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K., 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1350-1358.
- Six, J., Paustian, K., Elliott, E. T., Combrink, C., 2000. Soil structure and organic matter. I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 681-689.
- Spaccini, R., Piccolo, A., Haberhauer, G., Gerzabek, M. H., 2000a, Transformation of organic matter from maize residues into labile and humic fractions of three European soils as revealed by  $^{13}\text{C}$  distribution and CPMAS-NMR spectra, *Eur. J. Soil Sci.* 51, 583-594.
- Spaccini, R., Conte, P., Zena, A., Piccolo, A., 2000b, Carbohydrates distribution in size-aggregates of three European soils under different climate, *Fresen. Environ. Bull.*, 9, 468-476.
- Sparling, G., Vojvodic-Vukovic, M., Schipper, L. A., 1998. Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C, *Soil Biol. Bioche.*, 30, 1469-1472.
- West, T. O., Post, W. M., 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 1930-1946.