

Effect of Soil Respiration on Light Fraction-C and N Availability in Soil Applied with Organic Matter

Byong-Gu Ko, Chang-Hoon Lee*, Myung-Sook Kim, Gun-Yeob Kim¹, Seong-Jin Park, and Sun-Gang Yun

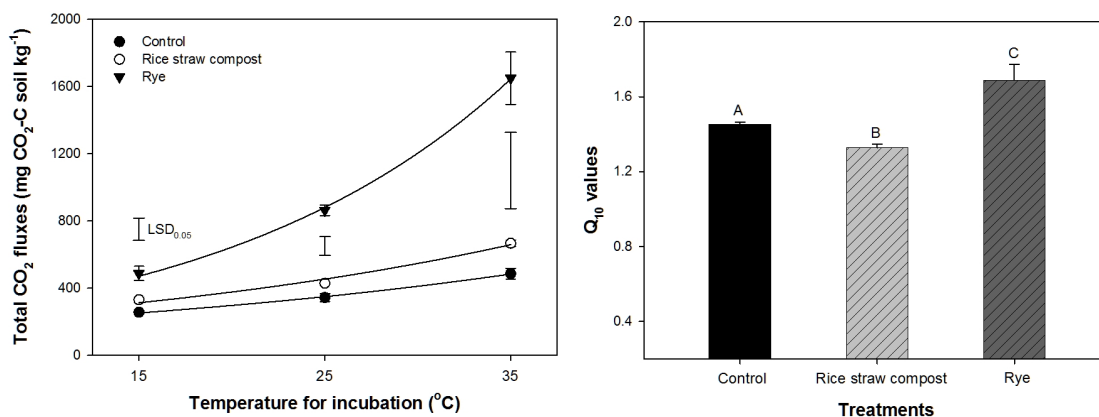
Soil and Fertilizer Division, NAS, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

¹Climate Change and Agroecology Division, NAS, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

(Received: June 28 2016, Revised: September 9 2016, Accepted: October 27 2016)

Soil respiration has been recognized as a key factor of the change of organic matter and fertility due to the carbon and nitrogen mineralization. In this study, we evaluated the effect of soil respiration on the light fraction-C and inorganic N content depending on temperature in soil applied with organic matter. Soil respiration was calculated by using total CO₂ flux released from soil applied with 2 Mg ha⁻¹ of rice straw compost and rye for 8 weeks incubation at 15, 25, 35°C under incubation test. After incubation test, light fraction and inorganic N content were investigated. Rye application dramatically increased soil respiration with increasing temperature. Q₁₀ value of rye application was 1.69, which was higher 27% than that of rice straw compost application. Light-C and NO₃-N contents were negatively correlated to soil respiration. Light-C in rye application more decreased than that in rice straw compost with temperature levels. These results indicate that temperature sensitivity of soil respiration could affect soil organic matter content and N availability in soil due to carbon availability. Also, light fraction would be useful indicator to evaluate decomposition rate of organic matter in soil under a short-term test.

Key words: Soil organic matter, Soil respiration, Light C fraction



Changes of total CO₂ fluxes and Q₁₀ values in soil applied with rice straw compost and rye under closed chamber condition.

*Corresponding author: Phone: +82632382453, Fax: +82632383822, E-mail: chlee915@korea.kr

§Acknowledgement: This study was supported by research project of National Institute of Agricultural Science (PJ009348042016), Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

최근 지속적으로 토양생산성과 환경보전에 관심이 높아짐에 따라 농경지의 토양유기물 관리가 주목받고 있다. 토양유기물은 토양생산의 지속성을 도모하고 (Lee et al., 2009; Lee et al., 2013), 대기 CO₂의 탄소저장에 효과를 가지고 있다. 농경지에서 토양유기물은 주로 작물잔사, 가축분 퇴비 사용 등에 의해 달라지는데, 토양특성에 따라 사용된 유기물은 미생물에 의하여 무기화 과정을 거치며 (Grayston et al., 1997; Hogberg et al., 2001; Kuzyakov and Cheng, 2001; Bowling et al., 2002; Tang et al., 2005), 작물생육에 필요한 양분으로 공급된다 (Nicholson et al., 1996). 이와 같이 토양유기물 분해는 탄소저장 및 양분순환이 달라질 수 있으므로 농경지에 토양유기물 관리를 위해 사용되는 유기물의 분해특성을 고려할 필요가 있다.

토양호흡은 유기물과 부식물질을 분해할 수 있는 종속영양미생물의 탄소기질의 이용성과 근권에서 CO₂를 생산하는 독립영양미생물에 의해 이루어진다 (Hanson et al., 2000; Wang et al., 2006). 토양호흡은 수분, 토양온도, 그리고 미생물 체내의 대사과정에 필요한 탄소기질에 영향을 받기 때문에 (Lloyd and Taylor, 1994; Buchmann, 2000; Li et al., 2008), 토양에 공급되는 유기물의 이·난분해성 함량이 토양호흡을 결정하는 중요한 인자가 된다 (Teklay et al., 2007). 특히, 적정 범위 내에서 온도 증가에 의한 미생물 개체수 증가로 유기물에 포함된 탄소와 질소기질의 무기화가 촉진되어진다 (Kirschbaum, 1995; Trumbore et al., 1996; Katterer et al., 1998; Liski et al., 1999; Giardina and Ryan, 2000; Fierer et al., 2005; Fang et al., 2005). 그러나 이·난분해성 함량과 C/N비 등의 유기물 특성은 미생물 활성, 탄소와 질소의 무기화, 양분유효도의 차이를 발생시킬 수 있다 (Kramer et al., 2002; Ko et al., 2015; Kim et al., 2015). 이와 같이 유기물 양과 화학적 조성에 차이에 따른 토양호흡량의 변화에 대한 연구를 수행해 왔다. 그러나 토양호흡량은 온도에 민감하지만 (Jansson, 1996; Wang et al., 2001), 유기물 사용에 따른 토양호흡의 온도반응성을 평가한 연구는 미미한 실정이다.

토양유기물을 구분하는 방법 중 크기, 밀도, 추출법을 주로 사용하고 있다. 이 중 밀도를 이용하는 방법은 비중 1.8 g cm⁻³ 용액에 뜨는 토양입자와 유기물을 light fraction (LF), 침전된 것을 heavy fraction으로 구분한다 (Sohi et al., 2001). 미생물이 이용하는 탄소 및 질소기질은 대부분 LF에 포함되어 있으며, 토양유기물 중 LF의 양과 C/N비는 토양호흡량과 높은 상관관계를 나타낸다 (Janzen et al., 1992; Wander et al., 1994; Gregorich and Janzen, 1996). 이와 같이 밀도를 이용한 물리적 토양유기물 분획 중 LF은 토양에 사용된 유기물 변화를 평가하는데 활용이 가능할 수 있다. 따라서 본 연구는

단기간에 토양에서 유기물 분해특성을 평가하고자, 유기물 분해 특성이 상이한 벧짚퇴비와 호밀을 이용하여 토양호흡량의 온도반응성에 따른 light fraction과 가용성 질소함량을 비교·분석하였다.

Materials and Methods

시료조제 및 처리구 유기물의 분해에 따른 토양호흡량을 평가하고자 미사질 양토를 채취하여 풍건 및 파쇄한 후에, 2 mm 체를 이용하여 토양시료를 조제하였다. 이때, 토양의 pH, 전탄소 (TC) 및 전질소 (TN) 함량은 각각 5.9, 4.78, 0.58 g kg⁻¹이었다. 토양에 사용할 유기물은 분해의 특성이 상이한 벧짚퇴비와 호밀을 대상으로 하였다. 벧짚퇴비는 2014년 수확한 벧짚을 이용하여 6개월 동안 퇴비화를 시킨 퇴비를 사용하였고, 호밀은 2015년 5월에 수확한 시료를 이용하였다. 벧짚퇴비와 호밀을 건조 및 파쇄하여 1 mm 체를 통과한 시료를 시험에 이용하였다. Table 1과 같이, 호밀은 TC와 TN 함량이 각각 398과 21.6 g kg⁻¹으로 벧짚퇴비에 비해 약 42와 54% 높았고, 그리고 C/N비는 18.9로 벧짚퇴비의 C/N비 (20.0)와의 차이는 미미하였다.

벧짚퇴비와 호밀의 수분함량을 50%로 가정하여 토양시료 250 g에 벧짚퇴비와 호밀을 건조물 1% (20 Mg ha⁻¹) 혼합하여 밀폐형 용기 (Ø 9.0 cm, H: 12.5 cm)에 충진 (H: 3.2 cm) 하였고, 대조구로 유기물을 사용하지 않은 무처리를 두었다. 그리고 토양의 수분함량은 중량수분 30%로 조절하여 실온에 2일간 방치하였다. 그리고 토양의 수분함량은 중량수분 30%로 조절하여 실온에 2일간 방치하였다. 이후, 밀폐형 용기는 15, 25, 35°C 항온기에 난괴법 3반복으로 배치하여 8주간 정치하며 가스를 채취하였고, 가스채취가 끝난 8 주차에 토양시료를 채취하였다. 토양시료 일부를 풍건 및 분쇄하여 2 mm 체에 통과한 시료를 분석에 이용하였다.

Table 1. Characteristics of organic matter used for the closed chamber test.

Contents	Organic matter types	
	Rice straw compost (RSC)	Rye
C	281.3 ± 2.6	399.0 ± 0.3
N	14.1 ± 0.1	21.2 ± 0.3
P	2.2 ± 0.2	3.5 ± 0.2
K	22.5 ± 0.3	32.2 ± 0.4
Ca	11.4 ± 0.3	3.8 ± 0.1
Mg	4.4 ± 0.2	1.5 ± 0.1
Na	2.8 ± 0.1	1.0 ± 0.1
C/N ratio	20.0 ± 0.2	18.9 ± 0.3

Note) The values were written as means with standard deviation (n=3). Unit is g kg⁻¹.

토양호흡량 측정 온도조건에 따라 밀폐형 용기로부터 발생하는 CO₂를 gas chromatography로 측정하여 토양호흡량을 평가하였다. 밀폐형 용기에서 발생된 가스시료는 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56일에 60 mL 주사기로 채취하였다. 토양호흡량 평가를 위해서 가스시료 중 CO₂ 농도는 밀폐형 용기의 뚜껑을 막기 전과 1시간 동안 뚜껑을 막은 후의 CO₂ 농도차로 구하였다. 이때 매일 밀폐형 용기 무게를 측정하여 증류수로 토양수분을 보정하였다. 가스시료 중 CO₂ 농도는 가스크로마토그래피 (Aligent, 7890A)로 분석하였다. 사용한 컬럼은 Porapack Q와 Porapack N 컬럼 (80/100 mesh, 0.3 cm, 2 m)이었고, CO₂ 측정을 위한 검출기는 불꽃 이온화 검출기 (flame ionization detector, FID)이었고, 검출온도는 250°C이었다. 항온조건에 따른 토양호흡량은 아래의 식을 이용하였다 (Curiel yuste et al., 2007).

$$SR = \frac{PV}{RT} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{AW}{soil} \times 10^{-3}$$

여기서, SR (soil respiration):CO₂ 함량 ($\mu\text{g soil g}^{-1} \text{ day}^{-1}$), P: 1기압 (atm), V: chamber 부피 (0.795 L), R: 0.08205 (L atm/mol K), T: 273+항온 온도 (°C), $\Delta C/\Delta t$: 단위시간당 CO₂ 농도 (ppm), AW: C의 원자량, Soil: 토양시료 (g)을 의미한다. 총 SR은 $\Sigma (SR \times D)$ 을 이용하여 구하였다 (Singh et al., 1999). 이때 SR은 CO₂ 함량 ($\mu\text{g g}^{-1} \text{ day}^{-1}$)이며, D는 시료채취 간격 일을 의미한다.

유기물 시용에 따른 토양호흡량에 대한 온도반응성을 평가하기 위해서 Q₁₀ 값을 아래와 같이 산정하였다 (Chen et al., 2010).

$$R = ae^{bT}$$

여기서, R은 토양호흡량 (mg CO₂-C soil kg⁻¹), a는 경험식 parameter, T는 온도 (°C), b는 온도에 의존하는 토양호흡 parameter로 정의된다. 이와 같이 경험식을 이용하여 10°C 씩 온도가 상승하는 조건에서 토양호흡량 변화를 나타내는 Q₁₀ 값을 구하였다.

Density fractionation 유기물의 분해에 따른 미생물의 기질이용성 차이를 평가하는 간접지표로 8주차 토양의 light fraction (LF)을 density fractionation 방법으로 조사하였다 (Sohi et al., 2001). 토양 20 g에 1.85 g cm⁻³의 NaI 용액 250 mL을 넣고, 1시간 동안 180 rpm에서 교반한 다음, 7000 rpm 속도로 10분간 원심분리하였다. 이후 0.45 μm nylon embrane filter로 원심분리된 상등액을 여과하였고, 0.01M CaCl₂ 용액으로 세척된 Membrane filter는 105°C에서 24시간 건조하여 light fraction 무게를 구하였다, 건조된 LF은 분쇄하여 원소

분석기로 전탄소 (TC)와 질소 (TN) 함량을 측정하였다.

토양분석 8주차에 건조하여 조제되는 토양시료를 분석에 이용하였다. 토양 pH는 토양과 증류수를 1:5비로 하여 30분간 진탕한 다음에 pH meter로 측정하였다. 막자사발로 곱게 갈린 토양시료를 이용하여 전탄소 (TC)와 전질소 (TN) 함량은 원소분석기 (Vario Max CNS, Elementar)로 분석하였다. 토양 10g을 2M KCl로 침출 및 여과하여 질소자동분석기 (Auto analyzer 3, BRAN+LUBBE)로 NH₄-N과 NO₃-N 함량을 측정하였다.

통계분석 모든 데이터는 난괴법 분산분석을 실시하였고, 처리평균간 비교는 유의수준 5%로 최소유의차 (Least significant difference, LSD)검정을 실시하였다. 데이터의 통계분석에 SAS 9.2 통계패키지를 사용하였다.

Results and Discussion

토양호흡 토양에 벼짚퇴비와 호밀 시용에 따른 8주 동안에 밀폐형 용기에서 발생한 총 CO₂ fluxes 측정하여 온도별 토양호흡량 변화를 비교하였다 (Fig. 1). 온도가 높아짐에 따라 토양호흡량은 증가하였고 ($P < 0.05$), 토양에 호밀을 투입함에 따라 상당히 토양호흡량이 높아졌다 ($p < 0.05$). 그리고 온도와 유기물 종류는 토양호흡량에 교호작용이 인정되었다. 항온온도가 15, 25, 그리고 35°C 일 때, 호밀 시용에 따른 총 토양호흡량은 각각 486.8, 863.2, 1649.5 mg CO₂-C kg⁻¹이었고, 이는 벼짚퇴비의 토양호흡량에 비해 각각 1.5, 2.0, 2.4배 높은 결과를 나타내었다. 그러나 벼짚퇴비 처리와 유기물 처리가 없는 무처리 간에 총 토양호흡량을 비교하였는데, 무처리의 총 토양호흡량은 각각 256.1, 343.6, 485.7 mg kg⁻¹이었고, 벼짚퇴비처리는 330.8, 428.9, 667.2 mg kg⁻¹이었다. 온도 15, 25, 35°C에서 대조구, 즉 무처리구에 비해 벼짚퇴비 처리의 총 토양호흡량은 약 29, 25, 37% 높았다. 그러나 벼짚퇴비와 대조구의 총 토양호흡량은 유의수준 5%에서 통계적인 유의차는 없었다.

토양호흡의 온도에 대한 반응성을 나타내는 Q₁₀은 온도 10°C 올라갈 때마다 토양으로부터 방출되는 Q₁₀의 변화비율을 의미한다. 시험 기간 중에 총 CO₂ 발생량 경험 모델로 산정한 벼짚퇴비와 호밀 시용에 따른 Q₁₀값을 비교하였다 (Fig. 1), 호밀을 시용함에 따른 Q₁₀값은 1.69를 나타내었고, 이는 벼짚퇴비의 Q₁₀값인 1.33에 비해 약 27% 높았다. 그리고 대조구의 Q₁₀값은 1.45로 벼짚퇴비의 Q₁₀값에 비해 약 9.4% 높았다. 토양호흡의 온도반응성에 대한 지수로서 사용되는 Q₁₀ 값이 다르면, 유기물 시용에 따른 토양 탄소순환 및 저장 또한 달라진다 (Shoji, 2005). 토양에 벼짚퇴비의 시용은 타영양미생물에 의한 토양호흡의 반응성이 호밀에 비해 낮아서 토양

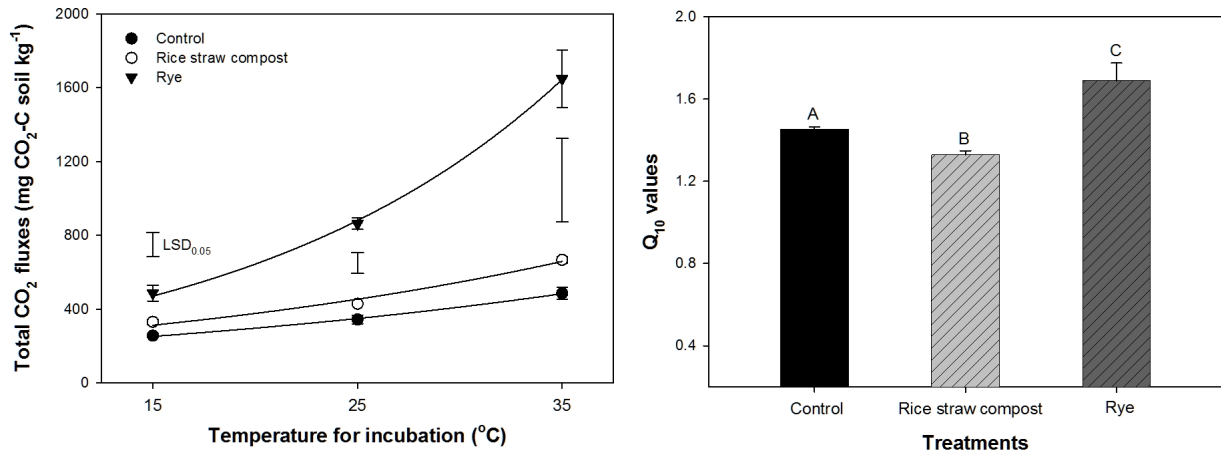


Fig. 1. Total CO₂ fluxes and Q₁₀ values in soil applied with organic matter as rice straw compost and rye under closed chamber condition at different temperatures.

유기물 증진에 더욱 효과적으로 평가되었다. 이러한 토양 호흡의 온도반응성 (Q₁₀값)은 토양에 투입되는 유기물 양과 C/N비, 쉽게 이용되는 탄소와 질소의 함량, 토양환경요인에 의해 달라진다 (Conant et al., 2011; Haddix et al., 2011; Fissore et al., 2013; Frey et al., 2013). Table 1에서 호밀의 탄소와 질소함량은 각각 399와 21.2 g kg⁻¹으로 벧짚퇴비에 비해 42.0와 50.4%가 높았다. 그럼에도 불구하고 벧짚퇴비와 호밀의 C/N 비는 각각 20.0과 18.9으로 두 유기물 간에 비슷한 수준이었다. 수확 시기에 따른 호밀은 셀룰로오스와 같은 이분해성 유기물 함량이 35~40%이며, 리그닌과 같은 난분해성 함량은 16~28%로 이분해성이 난분해성보다 많다 (Kim et al., 2015). 퇴비화 과정에서 쉽게 분해되는 이분해성 유기물 함량은 감소시키고, lignin과 복합체를 형성하는 안정한 난분해성 함량을 증가시키는 것으로 알려져 있다 (Bernal et al., 1998; Sellami et al., 2008). 이러한 과정이 벧짚퇴비에 포함된 난분해성 함량을 이분해성 함량보다 더 높게 할 수 있다. 따라서 온도 변화에 따른 토양호흡과 Q₁₀값의 차이는 벧짚퇴비와 호밀에 포함된 이·난분해성 함량에 기인한 결과로 해석할 수 있겠다.

Light fraction Light fraction (LF)은 토양호흡에 필요한 기질특성의 변화를 평가할 수 있다 (Janzen et al., 1992; Wander et al., 1994; Gregorich and Janzen, 1996). 벧짚퇴비와 호밀사용에 따른 8주 동안 토양호흡을 측정할 이후, 토양에 잔존하는 LF 함량을 평가하였다 (Fig. 2). 온도가 높아짐에 따라 토양의 LF 함량은 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 온도가 높아지더라도 벧짚퇴비의 사용에 따른 토양의 LF 함량의 감소는 가장 미미하였다. 그러나 온도가 15, 25, 35°C로 높아질 때, 호밀사용에 따른 토양 중 LF 함량은 각각 0.75, 0.70, 0.61%로 급격히 감소되었다 ($p < 0.05$).

Density fractionation으로 구분되는 Light fraction (LF)와 heavy fraction (HF) 특성을 조사한 결과는 Table 2에 나타내

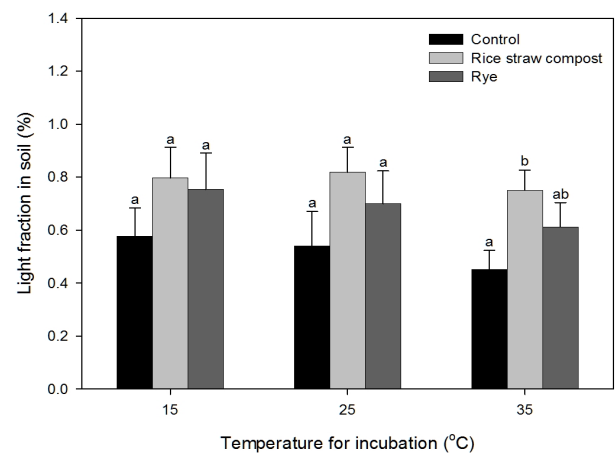


Fig. 2. Light fraction (LF) content in soil after soil respiration for 8 weeks incubation under closed chamber at different temperatures.

었다. 온도와 유기물 특성 차이로 LF에 포함된 탄소와 질소, 그리고 C/N비가 상당한 영향을 받았다 ($p < 0.001$). 온도가 증가함에 따라 LF에 포함된 C (Light-C) 함량은 감소되는 경향을 보였다. 특히 호밀을 사용함에 따라 토양 중 LF-C 함량이 각각 214, 190, 181 g kg⁻¹으로 뚜렷한 감소가 있었고, ($p < 0.05$), 벧짚퇴비를 사용한 토양 중 LF-C 함량보다 더 높은 감소비율을 보였다. 그러나 벧짚퇴비 사용에 따른 토양 중 LF에 포함된 N (Light-N)함량은 증가되는 경향을 나타내었고, 이는 온도가 높아짐에 따라 LF의 C/N비를 더 낮추게 하였다 (Table 2). 토양 중 LF-C와 달리, 벧짚퇴비와 호밀을 사용하더라도 heavy fraction에 포함된 C, N 함량은 온도가 높아짐에 따른 뚜렷하게 변화된 경향을 찾을 수 없었다.

토양특성 토양호흡은 탄소와 질소무기화로 토양의 pH 및 질소유효도 등의 토양특성에 영향을 미친다 (Cleve and Moore, 1978; Lee and Jose, 2005). Table 3과 같이, 온도가 높아짐에 따라 토양 pH는 무처리, 벧짚퇴비와 호밀 사용처리

Table 2. Characteristics of light and heavy fraction in soil after soil respiration for 8 weeks incubation under closed chamber at different temperatures.

Temperature (°C)	Treatments	Light fraction (LF)			Heavy fraction (HF)		
		TC	TN	C/N	TC	TN	C/N
		(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)		(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	
15	Control	147.1	7.0	21.6	4.03	0.42	9.6
	RSC	268.9	16.3	16.4	4.17	0.37	11.4
	Rye	214.0	12.4	17.5	5.20	0.54	9.6
	LSD _{0.05}	56.1	2.44	6.54	1.91	0.19	0.84
25	Control	150.4	8.0	19.2	4.06	0.40	10.1
	RSC	262.7	17.7	14.8	3.29	0.32	10.1
	Rye	190.3	11.1	17.2	4.36	0.46	9.6
	LSD _{0.05}	22.7	2.00	5.48	1.79	0.17	1.33
35	Control	141.7	7.5	19.7	3.95	0.41	9.8
	RSC	224.4	16.4	13.8	4.32	0.44	10.3
	Rye	181.0	11.2	16.2	4.07	0.42	9.7
	LSD _{0.05}	39.4	4.43	6.03	1.485	0.25	2.25
Temp. (A)		*	ns	ns	ns	ns	ns
Treatments (B)		***	***	**	ns	ns	*
A×B		ns	ns	ns	ns	ns	ns

Note) *, **, and *** denotes significance at 5.0%, 1.0%, and 0.1%, respectively. ns means not significant.

Table 3. Chemical properties in soil after soil respiration for 8 weeks incubation under closed chamber at different temperatures.

Temperature(°C)	Treatments	pH	TC	TN	C/N ratio	Extractable N	
						NH ₄ -N	NO ₃ -N
		(1:5)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)
15	Control	5.44	4.50	0.42	10.84	5.04	23.68
	RSC	5.68	5.22	0.54	9.75	4.19	26.01
	Rye	5.77	5.18	0.51	10.25	4.04	13.86
	LSD _{0.05}	0.2	0.14	0.08	1.34	1.53	5.62
25	Control	5.32	4.16	0.47	8.90	5.73	42.59
	RSC	5.42	5.03	0.52	9.73	4.66	48.29
	Rye	5.41	5.05	0.53	9.46	5.03	38.65
	LSD _{0.05}	0.08	0.59	0.09	1.09	0.92	10.2
35	Control	5.10	4.09	0.47	8.68	4.57	60.79
	RSC	5.17	5.19	0.58	8.94	4.36	60.11
	Rye	5.01	4.79	0.55	8.67	4.39	87.07
	LSD _{0.05}	0.14	0.08	0.04	0.57	0.68	11.1
Temp.(A)		***	*	ns	***	*	***
Treatments(B)		**	***	***	**	*	***
A×B		*	ns	ns	ns	ns	**

note) *, **, and *** denotes significance at 5.0%, 1.0%, and 0.1%, respectively. ns means not significant.

모두 낮아졌다. 무처리에서는 완만하게 pH가 낮아졌으나, 호밀처리에서는 낮아지는 정도의 폭이 더욱 커졌다. 토양 pH가 낮아지는 벧짚퇴비와 호밀처리 간에는 통계적인 유의차는 없었다 ($p < 0.05$). 토양 pH와 마찬가지로, 온도 및 유기물 사용이 토양 중 전탄소 (TN) 함량에 영향을 미쳤고, 이 두 요인 간에 상호작용은 통계적으로 인정되지 않았다. 그러나 전

질소 (TN) 함량의 변화는 벧짚퇴비와 호밀사용에 의해 달라졌다. 호밀이 사용된 토양은 온도가 높아짐에 따라 토양 중 전질소 (TN) 함량은 다소 감소되는 경향을 나타내었고, 벧짚퇴비 사용은 온도가 높아질수록 전질소 (TN) 함량은 미미하게 증가하는 경향을 보였다. Table 3와 같이, 벧짚퇴비와 호밀 사용에 따른 전질소 (TN) 함량이 토양 C/N비를 더 낮추었다.

토양호흡 과정에서 일어나는 질소무기화는 토양 중 질소 유효도에 영향을 미칠 수 있다 (Hargrove, 1986; Smith et al., 1987; Ranells and Waggar, 1996). 벧짚퇴비와 호밀과 같은 유기물 시용에 따른 온도별 토양호흡의 변화가 토양 중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 함량을 크게 높였다 ($p < 0.05$). Table 3에서 벧짚퇴비가 시용된 토양과 비교할 때, 토양에 호밀시용은 온도가 높아질수록 토양 중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 함량을 더 증가되었다. 이는 호기 조건의 토양에서 질소무기화로 발생된 $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 질산화작용을 거쳐 신속하게 $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 전환된다 (Ko et al., 2015). Table 3에서 보듯이, 온도가 높아질수록 토양 중 $\text{NH}_4\text{-N}$ 함량은 벧짚퇴비와 호밀 간에 뚜렷한 경향을 나타내지 않았지만, $\text{NO}_3\text{-N}$ 함량은 증가되는 경향을 나타내었다. 특히 Fig. 1에서, 호밀을 시용한 토양은 온도가 높아짐에 따라 토양호흡량이 크게 증가되었다. 이러한 경향과 유사하게 호밀을 시용한 토양의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 함량이 크게 증가되었다. 호밀은 쉽게 분해될 수 있는 이분해성 유기물 함량이 높고 C/N율이 낮기 때문에 질소무기화가 진행될수록 토양에 무기질소 함량을 높일 수 있다. 그러나 25°C 에서 호밀이 시용된 토양의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 함량은 38.7 mg kg^{-1} 으로 벧짚퇴비의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 함량인 48.3 mg kg^{-1} 에 비해 낮았다. 비록 토양호흡량은 온도에 영향을 받지만, 토양 미생물체량을 높게 한다. 25°C 에서 호밀의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 함량이 벧짚퇴비에 비해 낮은 것은 미생물체 증식에 의한 질소부동화에 의한 결과로 해석할 수 있겠다. 이상의 결과에서 토양에 시용된 유기물의 분해특성은 토양호흡과 질소무기화에 영향을 미칠 수 있음을 보여주고 있다. 특히 호밀과 같은 유기물은 단기적으로 질소유효도가 향상되지만, 토양호흡량의 증가로 CO_2 발생량의 증가를 초래하였다. 유기물의 분해특성은 토양유기물과 질소 유효도에 중요한 역할을 하고 있었다.

Conclusion

토양에서 유기물 분해특성이 상이한 벧짚퇴비와 호밀을 이용하여 온도변화에 따른 토양호흡과 light fraction 유기물 함량 변화를 평가하였다. 온도가 높아질수록 토양호흡량은 호밀이 벧짚보다 높았고, 토양호흡량의 온도반응성 (Q_{10} 값)은 호밀이 1.69로 벧짚퇴비의 1.33에 비해 약 27% 높았다. 온도가 높아짐에 따라 light fraction에 포함된 탄소함량이 낮아졌고, 이는 토양호흡량과 부의 상관관계를 나타내었다. 시험 후에 토양 중 전탄소 (TC)함량은 호밀시용이 벧짚퇴비 시용에 비해 낮았고, 가용성 질소함량은 더 높았다. 이상의 결과는 유기물시용에 따른 토양호흡의 온도반응성은 토양탄소 함량과 비옥도에 영향을 미칠 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 농경지의 토양유기물을 효율적으로 관리하기 위해서는 유기물의 분해특성을 고려한 합리적인 시용이 필요할 것으로 사료된다.

References

- Bernal, M.P., C. Paredes., M.A. Sanchez-Monedero, and J. Cegarra. 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresour. Technol.* 63:91-99.
- Bowling, D.R., N.G. McDowell, B.J. Bond., B.E. Law, and J.R. Ehleringer. 2002. ^{13}C content of ecosystem respiration is linked to precipitation and vapor pressure deficit. *Oecologia*. 131:11324.
- Buchmann, N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration in *Picea abies* stands. *Soil Biol. Biochem.* 32:1625-1635.
- Chen, X., J. Tang, L. Jiang, B. Li, J. Chen, and C. Fang. 2010. Evaluating the impacts of incubation procedures on estimated Q_{10} values of soil respiration. *Soil. Bio. Biochem.* 42:2282-2288.
- Cleve, K.V. and T.A. Moore. 1978. Cumulative Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer additions on soil Respiration, pH, and organic Matter content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42(1): 121-124.
- Conant, R.T., M.G. Ryan, G.I. Ågren, H.E. Birge, E.A. Davidson, P.E. Eliasson, S.E. Evans, S.D. Frey, C.P. Giardina, F.M. Hopkins, R. Hyvönen, M.U.F. Kirschbaum, J.M. Lavellee, J.Leifeld, W.J. Parton, J.M. Steinweg, M.D. Wallenstein, J. A. M. Wetterstedt, and M.A. Bradford. 2011. Temperature and soil organic matter decomposition rates—synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biol.* 17:3392-3404.
- Curiel yuste, J., D.D. Baldocchi, A. Gershenson, A. Goldstein, L. Misson, and S. Wong. 2007. Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture. *Global Change Biol.* 13(9):2018-2035.
- Fang, C.M., P. Smith, J.B. Moncrieff, and J.U. Smith. 2005. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature*. 436:881-81.
- Fierer, N., J.M. Craine, K. McLauchlan, and J.P. Schimel. 2005. Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition. *Ecology*. 86:320-26.
- Fissore, C., C.P. Giardina, and R.K. Kolka, 2013. Reduced substrate supply limits the temperature response of soil organic carbon decomposition. *Soil Bio. Biochem.* 67:306-311.
- Frey, S.D., J. Lee, J.M. Mellilo, and J.Six. 2013. The temperature response of soil microbial efficiency and its feedback to climate. *Nature Climate Change*. 3:395-398.
- Giardina, C.P. and M.G. Ryan. 2000. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*. 404:858-61.
- Grayston, S.J., D. Vaughan, and D. Jones. 1997. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. *Appl. Soil Ecol.* 5:29-6.
- Gregorich, E.G., and H.H. Janzen. 1996. Storage of soil carbon in the light fraction and macrogranic matter. In: Carter, M.R.,

- Stewart, B.A. (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. CRC-Lewis, Boca Raton, FL, pp:167-190.
- Haddix, M.L., A.F. Planteb, R.T. Conanta, J. Six, J.M. Steinwegd, M.B. Kim, R.A. Drijberf, S.J. Morris, E.A. Paul. 2011. The Role of soil characteristics on temperature sensitivity of soil organic matter *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:56-68.
- Hanson, P.J., N.T. Edwards, C.T. Garten, and J.A. Andrews. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*. 48:115-146.
- Hargrove, W.L. 1986. Winter legume as a nitrogen source for no till again sorghum. *J. Agron.* 78:70-74.
- Hogberg, P., A. Nordgren, and N. Buchmann. 2001. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*. 411:789-92.
- Janzen, H.H., C.A. Campbell, S.A. Brandt, G.P. Lafond, and L. Townley-Smith. 1992. Light-Fraction Organic Matter in Soils from Long-Term Crop Rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 16: 1799-1806.
- Katterer, T.M. Reichstein, O. Andren, and A. Lomander. 1998. Temperature dependence of organic matter decomposition, a critical review using literature data analyzed with different models. *Biol. Fert. Soils*. 27:258-62.
- Kim, S.Y., C.K. Park, H.S. Gwon, M.I. Khan, and P.J. Kim. 2015. Optimizing the harvesting stage of rye as a green manure to maximize nutrient production and to minimize methane production in mono-rice paddies. *Sci. Total Environ.* 537:441446.
- Kirschbaum, M.U.F. 1995. The temperature-dependence of soil organic-matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic-C storage. *Soil. Bio. Biochem.* 27:753-60.
- Ko, B.G., M.S. Kim, S.J. Park, S.G. Yun, T.K. Oh, and C.H. Lee. 2015. Effect of Decomposition on nitrogen dynamics in soil applied with compost and rye. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 648-657.
- Kramer, A.W., T.A. Doane, W.R. Horwath, and C. van Kessel. 2002. Combining fertilizer and organic inputs to synchronize N supply in alternative cropping systems in California. *Agr. Ecosys. Environ.* 34:43-50.
- Kuzyakov, Y. and W. Cheng. 2001. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. *Soil. Bio. Biochem.* 33:1915-925.
- Lee, C.H., C.Y. Park., K.Y. Jung, and S.S. Kang. 2013. Long-term effects of inorganic fertilizer and compost application on rice sustainability in paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46(3):223-229.
- Lee, K.H. and S. Jose. 2005. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient. *For. Ecol. Manage.* 185(3):263-273.
- Lee, S.B., C.H. Lee, K.Y. Jung, K.D. Park, D.K. Lee, and P.J. Kim. 2009. Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy. *Soil Till. Res.* 104:227-232.
- Li, H.J., J.X. Yan, X.F. Yue, and M.B. Wang. 2008. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area. *Agric. For. Meteorol.* 148:490-503.
- Liski, J., H. Ilvesniemi, A. Makela, and C.J. Westman. 1999. CO₂ emissions from soil in response to climatic warming are overestimated the decomposition of old soil organic matter is tolerant of temperature. *Ambio*. 28:171-74.
- Lloyd, J. and J.A. Taylor. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct. Ecol.* 8:315-323.
- Nicholson, F.A., B.J. Chambers, and K.A. Smith. 1996. Nutrient composition of poultry manures in England and Wales. *Bioresour. Technol.* 58:279-84.
- Ranells, N.N., and M.G. Wagger. 1996. Nitrogen release from grass and legume cover crop monocultures and bicultures. *J. Agron.* 88:777-782.
- Sellami, F., R. Jarboui., S. Hachicha., K. Medhioub., and E. Ammar. 2008. Co-composting of oil exhausted olive-cake, poultry manure and industrial residues of agro-food activity for soil amendment. *Bioresour. Technol.* 99:1177-1188.
- Singh, J., J.S. Singh, and A.K. Kashyap. 1999. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. *Soil. Bio. Biochem.* 31:1219-1228.
- Smith, M.S., B.L. Kish, and C.B. Crawford. 1987. Inheritance of wealth as human kin investment. *Evol. Hum. Behav.* 8:171-182.
- Sohi, P.S., M. Nathalic, J.R.M. Arah, D.D. Powlson, B. Madari, J.L. Gaunt. 2001. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1121-1128.
- Tang, J.W., D.D. Baldocchi, and L. Xu. 2005. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Change Biol.* 11:1298-304.
- Teklay, T., A. Nordgren, G. Nyberg, and A. Malmer. 2007. Carbon mineralization of leaves from four Ethiopian agroforestry species under laboratory and field conditions. *Appl. Soil Ecol.* 35:193-202.
- Trumbore, S.E., O.A. Chadwick, and R. Amundson. 1996. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric, carbon dioxide driven by temperature change. *Science*. 272:393-96.
- Wander, M.M., S.J. Traina, B.R. Stinner, and S.E. Peters. 1994. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1130-1139.
- Wang, W., J.X. Guo, J. Feng, and T. Olikawa. 2006. Contribution of root respiration to total soil respiration in a *Leymus chinensis* grassland of Northeast China. *J. Int. Plant Biol.* 48: 409-414.
- Wang, W.J., P.M. Chalk, D. Chen, and C.J. Smith, 2001. Nitrogen mineralization, immobilization and loss, and their role in determining differences in net nitrogen production during waterlogged and aerobic incubation of soils. *Soil. Bio. Biochem.* 33:1305-1315.