

Changes of Soil Organic Carbon in Forest and Arable Soil Under Different Altitude Levels

Chang Hoon Lee, Seok-Cheol Kim, Myung-Sook Kim, Seong-Jin Park, Sun-Gang Yun, Yu-Hak Kim, and Taek-Keun Oh^{1*}
Soil and Fertilizer Management Division, NAAS, RDA, Wanju 55365, Korea
¹Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

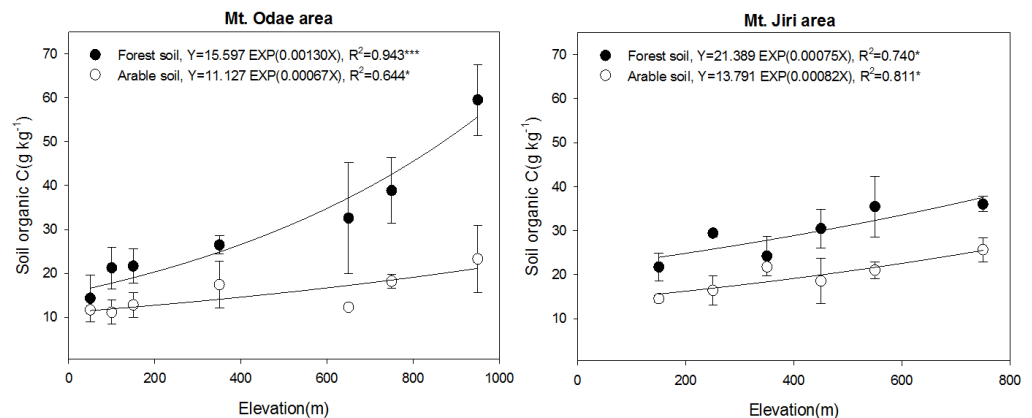
*Corresponding author: ok5382@cnu.ac.kr

ABSTRACT

Received: May 8, 2018
Revised: July 31, 2018
Accepted: August 31, 2018

Soil organic carbon(SOC) is one of the most important constituents of soils due to its capacity in affecting plant growth indirectly and directly. The change of SOC content is associated with organic input with various sources in soil. This study was conducted as follows; the evaluation of the effects of altitude above sea levels on SOC concentration in forest and arable soil under climatic zone, investigation of relationship between SOC contents and temperature in soil with elevation. Under the different climatic zone, the SOC concentration in forest and arable soil was affected by increasing the altitude levels. The SOC concentration of forest soil was higher than that of arable soil regardless of climatic zone. Also, the SOC was dramatically related to the soil temperature with altitude, which was induced the increase of SOC contents in forest and arable soils. These results indicated that the soil temperature with altitude could be differed carbon storage in forest and arable soil between climatic zone.

Keywords: Land-use, Altitude, Temperature, Soil organic carbon



Effect of elevation gradient on soil organic carbon(SOC) in forest and arable soils under different climatic zone.



Introduction

토양탄소는 지구의 총 탄소함량의 약 70%를 차지하고 있으며 (Stockman et al., 2013), 대기 CO₂ 및 CH₄ 농도에 관여하여 지구의 기후변화를 조절하는 중요한 역할을 한다 (Davidson and Janssens, 2006). 특히, 토양탄소의 대부분을 차지하는 유기탄소 (organic carbon)는 CO₂ 및 CH₄으로 배출되어 대기온도의 상승에 영향을 주는데 (Batjes, 2014), 대기 중 CO₂ 농도가 600 ppm에 도달할 경우, 우리나라 연평균 기온은 2.0-2.5°C 높아질 것으로 전망된다 (Ahn et al., 2008).

토양탄소 변동은 토양온도, 토양구조, 토양수분, 미생물 활성 및 기질특성의 영향을 받으며 (Bekku et al., 2004; Côté et al., 2000; Craine et al., 2010), 대기온도 상승은 토양탄소의 변동을 야기하는 중요한 요인이 될 수 있기 때문에, 배양시험을 통한 토양유기탄소 (soil organic carbon; SOC)의 온도반응성에 대한 폭넓은 연구가 이루어져 왔다 (Giardina and Ryan, 2000; Fierer et al., 2005). SOC 분해의 온도 반응성은 저온 (0-10°C)에서 낮았고, 중온 (10-20°C)은 높아지며, 오히려 고온 (20-30°C)에서 감소되었다. 그러나 SOC 분해는 온도 반응성 이외에도 토양탄소의 이·난분해성 함량에 의해 좌우된다 (Teklay et al., 2007). 예를 들어, Ko et al. (2015)의 연구결과에 따르면, 호밀과 벧짚퇴비를 사용한 토양의 탄소분해는 이분해성 함량이 높은 호밀이 온도가 증가함에 따라 크게 증가되었다. 이와 같이, 토양탄소의 변동은 온도 이외에도 토양에 공급되는 탄소원의 화학적 조성에 의해 달라질 수도 있다.

토지이용은 온도에 따른 SOC 분해에 영향을 줄 수 있다. 그러나 토지이용은 탄소공급원의 양과 질을 제어하기도 하고, 토양탄소의 분해의 온도 반응성에 관한 토양환경 특성을 변화시킬 수 있다 (Post and Kwon, 2000; Jones et al., 2005; Davidson and Janssens, 2006). 예를 들어, 산림토양에서 SOC는 낙엽 및 가지와 같은 litter 형태로 공급받는다 (Prescott, 2010). 이해 반해 농경지의 SOC는 가축분 및 퇴비, 그리고 작물 잔재물 등의 인위적인 투입을 통해서 공급을 받고 있다 (Palm et al., 1997; Lee et al., 2009). 또한 농경지는 경운 및 비료 사용으로 SOC 변동에 영향을 미치기도 한다 (Janzen et al., 1998; Six et al., 2000). 대기온도 등 기후변화가 SOC 변동에 영향을 주는지를 이해하기 위해서는 토지이용과 기후변화 효과간의 상호작용에 대한 연구가 필요하다.

산림지역의 고도는 토양탄소와 온도 관계를 구명할 수 있는 기회를 제공하기도 한다. Wang et al. (2013)은 SOC 무기화와 온도 반응성 관계를 평가하였는데, 특히 고도에 따라 산림지역의 SOC 무기화에 대한 온도상승 효과 구명이 가능하다고 하였다. 하지만, 대기온도의 상승으로 인한 토양온도는 토양탄소 변동을 초래할 수 있으나, 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 대기온도의 상승 조건에 따른 토지이용형태별 SOC 변동 경향을 예측하고자 고도에 따른 산림 및 농경지의 SOC 함량 변화를 조사하였고, 이를 통하여 온난화가 진행되고 있는 현 조건에서 토양탄소관리를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

Materials and Methods

조사지역 기후대는 온대북부 (37°50'33.56"N, 128°40'6.50"E)와 온대남부 (35°18'51.46"N, 127°35'1.33"E)로 나누었다. Fig. 1과 같이, 온대북부 (오대산), 온대남부 (지리산)의 연평균 기온은 각각 8.74, 14.1°C이었고, 연강수량은 557, 1614 mm으로 온대남부의 연평균 기온과 강수량이 온대북부보다 높았다. 오대산 지역은 강원도 진부면, 대관령면, 연곡면을 포함하였고, 지리산 지역은 경남 화개면, 금서면, 산내면, 산동면 일대이었다 (기상청, 2014).

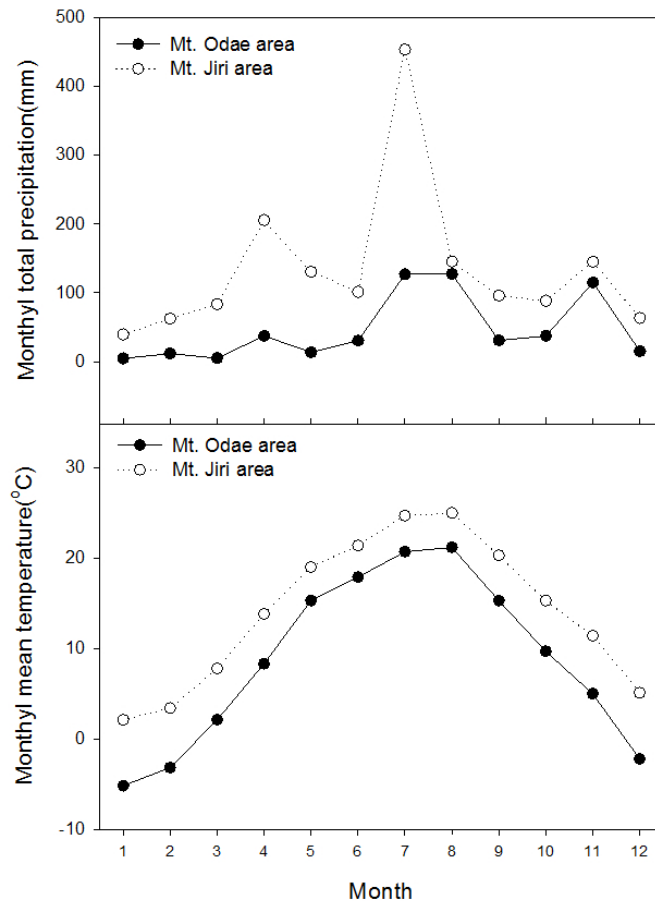


Fig. 1. Monthly average precipitation and temperature under different climatic area.

시료채취 및 분석 2014년 6월에 오대산과 지리산 지역의 산림과 농경지의 각각 30 지점을 임의 선정하였고, 오대산의 표고는 50-950 m, 지리산은 100-750 m 사이에 있었다. 토양시료채취는 유기물 층을 제거한 다음, 토양 깊이 0-15 cm와 15-30 cm에서 채취하였다. 토양온도는 0-15 cm의 토양 깊이에서 임의반복 (3회) 측정하였다. 토양시료는 풍건 및 분쇄하여 2 mm체에 통과된 시료를 분석에 사용하였다. 토양 pH는 10g의 토양에 증류수 50 mL을 넣고 2시간 동안 180 rpm에서 교반하였고, 30분간 정치하여 pH 미터기 (Orion star A121)로 측정하였다. 토양유기탄소 (SOC)는 시료 10 g을 막대사발로 곱게 갈은 후, 0.1 M HCl 용액 5 mL를 넣고 80°C에서 건조하여 원소분석기 (Vario Max, Elementar)로 측정하였다. 토양의 가용성 유기탄소 (TOC)와 총질소 (TN)는 Hot water extraction법을 이용하였다 (Ghani et al., 2003). 토양 10g에 증류수 50 mL을 넣은 다음 80°C에서 2시간 동안 진탕한 후에 No. 2 여과지에 여과한 여액을 TOC 분석기 (TOC-V 5050A, Shimadzu)분석기로 측정하였다.

통계분석 지역, 토지이용, 고도에 따른 분산분석과 각 요인 간에 교호작용에 대한 통계분석은 SAS (version. 9.2)의 GLM (general liner model)으로 수행하였다. 기후대별 토지이용에 따른 토양특성의 평균비교는 유의수준 5%로 Duncan 다중비교 (Duncan multiple range test; DMRT)로 수행하였다. 회귀분석으로 고도에 따른 SOC 변동을 예측하였고, 토양온도와 SOC 함량 간에 상관관계를 분석하였다.

Results and Discussion

토지이용에 따른 SOC 분포특성 기후대와 토지이용 형태 및 고도가 토양유기탄소 (SOC) 분포특성에 미치는 영향을 평가하였다 (Table 1). 기후대, 토지이용 형태, 고도는 토양온도에 영향을 주었고, 특히 SOC 함량은 토지이용 형태와 고도에 영향을 받았다. 미생물 활성과 관련이 있는 토양 pH는 토지이용에 영향을 받았다. 토양온도는 토양탄소의 변동에 주는 요인으로 작용하는데, 기후대와 토지이용 형태 및 고도에 의해 영향을 받았다. Table 1과 같이, 토양온도와 pH는 미생물활성 증대시켜 토양탄소의 변동을 초래하였다. 양분 및 토양개량제의 공급은 토양특성을 달라지게 한다. 산림의 경우는 잎 또는 가지가 주 공급원인 반면에, 작물생산을 하는 농경지는 비료, 퇴비 및 석회 등의 토양개량제를 사용한다. 이것은 토양온도와 SOC 함량이외에 토양 pH가 토지이용에 영향을 받은 이유로 판단된다.

Table 1. Multi-variation analysis of climatic zone, Land-use, and elevation on soil properties in surface soil.

Contents	Soil temperature	pH	SOC	HWC-TOC	HWC-TN
Climatic zone (A)	<0.0001	0.4548	0.8676	<0.0001	0.0025
Land-use(B)	<0.0001	0.0039	<0.0001	<0.0001	0.0160
Elevation(C)	0.0006	0.2149	<0.0001	<0.0001	0.0002
A×B	<0.0001	0.1109	0.1180	0.2643	0.2435
B×C	0.9790	0.2349	0.2822	0.0026	0.0184
A×C	0.0016	0.0048	0.1885	0.7063	0.3236
A×B×C	0.8942	0.6459	0.9567	0.7924	0.6939

온대북부와 온대남부의 두 기후대에서 산림과 농경지의 SOC 함량을 비교하였다 (Table 2). 토양유기탄소 (SOC) 함량은 산림이 농경지보다 더 높았다 ($p < 0.001$). 온대북부인 오대산 지역에서 산림과 농경지의 평균 SOC 함량을 비교한 결과, 산림은 33.4 g kg^{-1} 으로 농경지에 비해 약 2.2배 높았고, 온대남부 기후대인 지리산 인근에서 산림의 평균 SOC 함량은 30.2 g kg^{-1} 으로 농경지에 비해 약 1.5 배 높았다. Table 1과 2에 심토 (15-30 cm)를 나타내지는 않았으나, 표토 (0-15 cm)의 SOC 함량이 심토 (15-30 cm)보다 높았다 ($p < 0.05$). 오대산과 지리산 지역은 산림 심토의 평균 SOC 함량이 각각 15.3 과 17.9 g kg^{-1} 으로 농경지 심토에 비해 각각 1.2, 1.5배 높은 결과를 보였다. 토양유기탄소 (SOC)는 토양 깊이에 영향을 받지만, 토지이용 형태가 SOC 함량에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

Table 2. Average values of forest and arable soil under different climatic zone.

Climatic zone	Land-use	Soil tem.	pH	SOC	HWC(g kg ⁻¹)	
		(°C)	(1:5)	(g/kg)	TOC	TN
Odae area	Forest	13.8±1.2b	5.1±0.4b	33.4±17.3a	5.5±3.4a	2.4±1.5a
	arable	18.2±2.0a	5.4±0.6a	16.7±6.7b	3.3±1.4b	2.1±1.4a
Jiri area	Forest	23.8±2.2a	5.1±0.4a	30.2±7.0a	3.7±1.4a	1.9±0.8a
	arable	24.0±2.1a	5.2±0.8a	20.1±4.9b	2.3±0.9b	1.4±0.7b

Note) Soil tem., soil temperature; HWC, hot water extracts.

토양유기탄소(SOC) 함량은 토양에 공급되는 유기물의 양과 탄질비(CN)에 좌우되지만(Teklay et al., 2007; Li et al., 2008), 미생물 활성과 기질이용성에 영향을 받기도 한다(Anderson and Nilsson, 2001). 특히 토양온도와 pH는 미생물 활성과 밀접한 관계를 가지며(Lee et al., 2008), 특히 미생물 활성에 의해 탄소와 질소의 기질이용성을 높이는 것으로 알려져 있다(Ko et al., 2015). Table 2에서, 농경지의 평균 토양온도와 pH는 삼림보다 높았고, 가용성 탄소와 질소 함량은 낮은 결과를 보였다. 또한 산림지역의 가용성 총유기탄소(TOC)와 전질소(TN)함량이 각각 5.51과 3.7 g kg⁻¹으로 농경지에 비해 1.68과 1.5배 높았다. 이러한 결과는 삼림과 농경지의 토양온도와 pH 차이로 인한 미생물의 기질이용성에 영향을 미칠 수 있다. 이는 고도가 토지이용형태별 SOC의 변동시킬 수 있음을 시사한다.

고도에 따른 SOC 변화 고도가 100 m 높아짐에 따라 대기온도가 약 0.6°C씩 감소되기 때문에(Kong, 1999), 고도는 SOC 함량 변동의 한 요인이 될 수 있다. 두 기후대(오대산 및 지리산)에서 고도에 따른 산림과 농경지의 SOC 함량을 회귀식으로 예측하였다(Fig. 1). 오대산 지역에서 고도가 50 m에서 950 m로 높아질수록 산림의 표토에서 SOC 함량은 14.3 g kg⁻¹에서 59.5 g kg⁻¹으로, 농경지는 11.7 g kg⁻¹에서 23.3 g kg⁻¹으로 증가되었다. 또한 지리산 지역 또한 고도가 150 m에서 750 m로 높아질수록 산림의 표토 SOC 함량은 21.8 g kg⁻¹에서 36.0 g kg⁻¹으로, 농경지는 14.6 g kg⁻¹에서 25.7 g kg⁻¹으로 증가되었다.

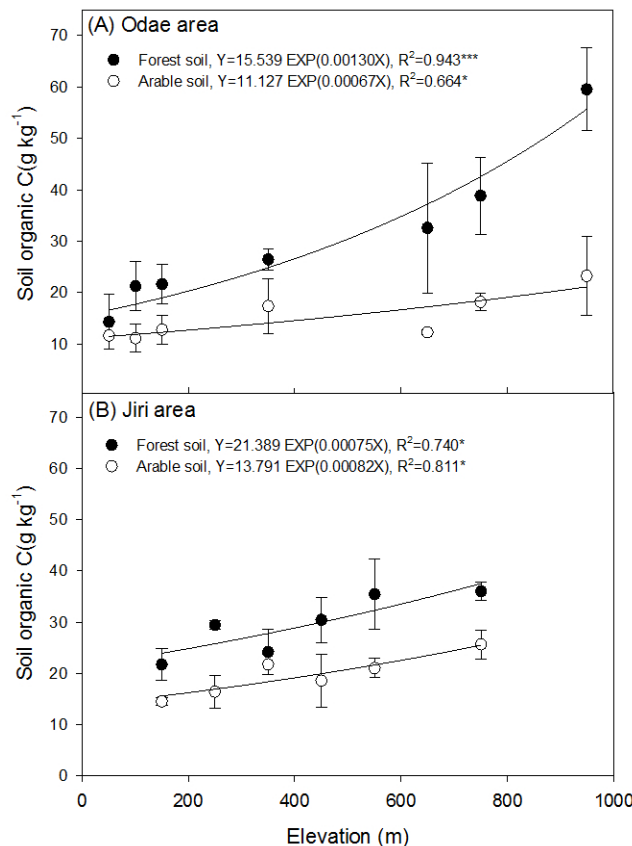


Fig. 2. Changes of soil organic carbon(SOC) in forest and arable soil under different altitude levels(* and *** denote significance at 1 and 5% levels, respectively).

기후대별 고도에 따른 산림과 농경지의 SOC 함량 차이는 여러 가지 원인으로 해석될 수 있다. 우선 식생피복과 사면이 대기 및 토양온도에 영향을 미칠 수 있다(Kong, 1999). 또한 토양에 공급되는 유기물의 리그닌 함량과 탄질비가 영향을 미치기도 한다(Teklay et al., 2007; Li et al., 2008). 산림에서 발생하는 litter의 분해율은 리그닌 함량과 탄질율이 높은 반면에, 농경지에서 퇴비 및 잔사의 상대적으로 낮아서 탄소의 분해율이 높아질 수 있다(Fierer et al., 2005). 토양 pH 및 양분과 같은 토양상태가 미생물 활성에 영향을 주기도 한다(Lee et al., 2008). Table 2에서 보듯이, 농경지 pH는 상대적으로 산림보다 높기 때문에 탄소미생물에 의한 탄소분해율이 높아질 수 있다(Augusto et al., 2015). 이 외에도 비료투입 및 경운 등이 SOC 분해를 촉진하기도 한다. 토양에 질소와 인 공급은 미생물 개체수와 활성을 증가시켜 SOC 분해를 가속화 시킨다(Liski et al., 1999; Fang et al., 2005). 그리고 경운도 입단의 SOC 분해를 촉진시키는 원인이 되기도 한다(Bernal et al., 1998; Sellami et al., 2008). 그러므로 고도에 따른 산림과 농경지의 SOC 차이는 지형에 기반한 토양상태와 유기물 종류, 비료 및 경운 등의 토양관리가 영향을 미친 것으로 판단된다.

고도에 따른 대기온도는 토양 온도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Merrill et al., 2008; Ashton et al., 2009). 오대산 지역에서 산림의 토양 온도는 평균 13.8°C으로 고도가 50에서 950 m로 높아질수록 토양온도는 14.6°C에서 12.1°C로 낮아졌고, 농경지는 토양온도가 평균 18.1°C로 고도가 높아짐에 따라 토양온도가 18.2°C에서 16.9°C로 낮아졌다. 또한 지리산 지역에서 산림의 토양 온도는 평균 24.1°C으로 고도가 150 m에서 750 m로 높아질수록 토양온도는 26.1°C에서 23.7°C로 낮아졌고, 농경지는 토양온도가 평균 24.1°C로 고도가 높아짐에 따라 토양온도가 24.4°C에서 22.4°C로 약간 낮아지는 경향을 보였다.

Fig. 3에서 토양온도 변화에 따른 산림과 농경지의 SOC 함량 변화를 보면, 오대산의 SOC 함량은 지온 15°C 부근에서 급격한 변화가 있었다. 즉 토양온도가 15°C 이하로 떨어질 때는 SOC 함량은 35 g kg⁻¹에서 68 g kg⁻¹으로 급격하게 증가되는 경향을 보였다. 이에 반해 15°C 이상으로 토양온도가 높아질 때는 SOC 함량이 35 g kg⁻¹에서 25 g kg⁻¹으로 완만한 감소경향을 보였다. 그러나 지리산 지역의 산림과 농경지의 최저 토양온도는 각각 22.4°C 부근으로 SOC 함량이 급격하게 변화는 토양온도를 찾을 수 없었고, 토양온도가 높아짐에 따라 산림과 농경지의 SOC 함량이 완만하게 감소되는 경향을 나타내었다. 토양에서 유기물 분해과정은 C/N비와 유기물에 포함된 이·분해성 함량 등의 유기물 특성에 영향을 받으며(Heal et al., 1997; Sainju et al., 1999), 이러한 과정은 온도변화에 따라 달라진다(Lloyd and

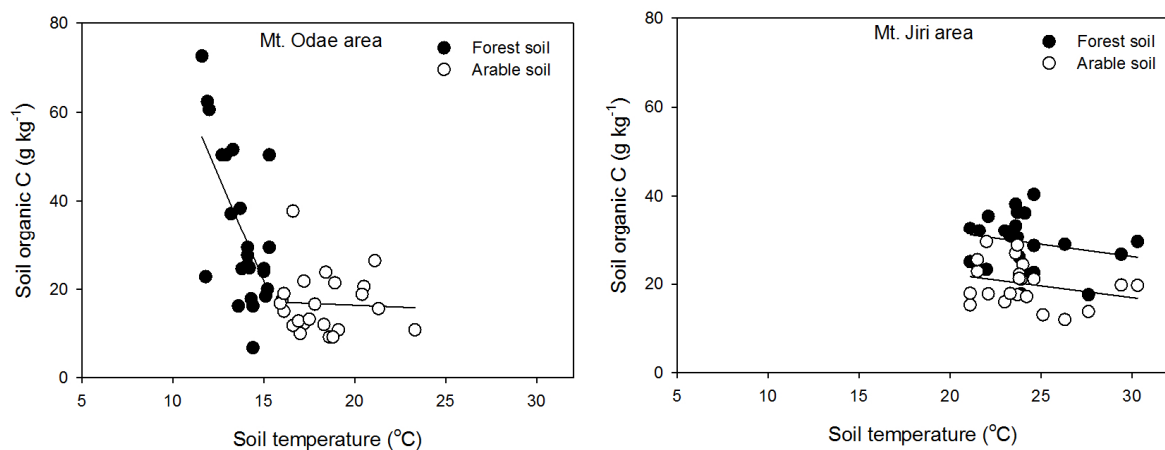


Fig. 3. Correlation between soil temperature and soil organic carbon(SOC) in forest and arable soil under different altitude levels.

Taylor, 1994; Li et al., 2008). Fig. 3과 같이, 고도에 따른 토양온도와 SOC 함량의 관계를 보면, 토양온도가 15°C 이하에서 SOC 함량은 급격하게 증가되었으나, 토양 온도가 15°C 이상에서는 SOC 함량이 완만하게 감소되었다. 이는 고도에 따른 산림과 농경지의 토양환경 차이와 더불어 토양온도의 변화가 미생물의 개체수 및 활성에 영향을 준 것으로 해석된다. 따라서 대기온도의 상승에 따른 토양온도의 변동은 미생물의 분해 작용으로 인한 토양탄소가 변동될 수 있음을 의미하고 있다.

Conclusion

대기온도의 상승 조건에 따른 SOC 변동 경향을 예측하기 위해서 온대북부와 온대남부의 기후대에서 고도에 따른 산림과 농경지의 SOC 함량 변화를 비교하였다. 토지이용형태 및 고도는 SOC 변동에 영향을 미쳤고, 이러한 경향은 산림이 농경지에 비해 높았다. 산림과 농경지는 고도가 높아짐에 따라 SOC 함량이 증가되었다. 특히 고도와 토양온도 간에는 높은 부의상관관계를 나타내었고, 고도에 따른 토양온도 변화는 SOC 변동에 기여하였다. 본 연구결과에서 온도 상승에 의한 토양온도는 토양유기탄소(SOC)의 변동에 영향을 미칠 수 있음을 시사하고 있다. 그러므로 온난화 대응한 합리적인 토양탄소관리대책이 요구된다.

Acknowledgement

This study was supported by research project of National Institute of Agricultural Science (PJ010925), Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Ahn, J.H., C.H. Park, J.S. Ryu, and Y.I. Jin. 2008. Distribution mapping for optimal of highland agricultural zone in current and global warming future in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 17:82-86.
- Anderson, S., and S. I. Nilsson. 2001. Influence of pH and temperature on microbial activity, substrate availability of soil-solution bacteria and leaching of dissolved organic carbon in a mor humus. *Soil Bio. Biochem.* 33(9): 1181-1191.
- Ashton, S., D. Gutierrez, and R.J. Wilson. 2009. Effects of temperature and elevation on habitat use by a rare mountain butterfly: implications for species responses to climate change. *Ecological Entomology*. 34:437-446.
- Augusto, L., A. De Sehrijver, L. Vesterdal, A. Smolander, C. Prescott and J. Ranger. 2015. Influences of evergreen gymnosperm and deciduous angiosperm tree species on the functioning of temperate and boreal forests. *Biol. Rev.* 90:444-66.
- Batjes, N.H. 2014. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 5:10-25.
- Bekku, Y.S., T. Nakatsubo, A. Kume, and H. Koizumi. 2004. Soil microbial biomass, respiration rate, and temperature dependence on a successional glacier foreland in Nylesund, Svalbard. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 36(4):395-399.
- 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.
- Côté, L., S. Brown, D. Paré., J. Fyles, and J. Bauhus. 2000. Dynamics of carbon and nitrogen mineralization in relation

- to stand type, stand age and soil texture in the boreal mixed wood. *Soil Bio. Biochem.* 32:1079-1090.
- Craine, J.M., and T.M. Gelderman. 2010. Soil moisture controls on temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition for a mesic grassland. *Soil Bio. Biochem.* 43:455-457.
- Davidson, E.A., and Janssens, I.A. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440:165-173.
- 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.
- Ghani, A., M. Dexter, and K.W. Perrott. 2003. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 35:1231-1243.
- Giardina, C.P., and M.G. Ryan. 2000 Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature* 404:858-861.
- Heal, O. W. , J. M. Anderson , and M. J. Swift. 1997. Plant litter quality and decomposition: An historical overview. Pages 3-30 in G. Cadisch, K. E. Giller, editors. *Driven by nature: plant litter quality and decomposition*. CAB International, Wallingford, UK.
- Janzena, H.H., C.A Campbellb, R.C Izaurraldec, B.H Ellerta, N Jumac, W.B McGillc, and R.P Zentnerb. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil Tillage Res.* 47:181-195.
- Jones, C., C.McConnell, K.Coleman, P. Cox, P. Falloon, and D. Jenkinson. 2005. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Glob. Change Biol.* 11(1):154-66.
- 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.
- Kong, W.S. 1999. The vertical distribution of air temperature and thermal amplitude of Alpine plants on Mt. Halla, Cheju Island, Korea. *J. Korean Geographical Soc.* 34(4):385-393.
- Lee, C.H., D. K. Lee, M. A. Ali, and P.J. Kim. 2008. Effects of oyster shell on soil chemical and biological properties and cabbage productivity as a liming materials. *Waste Manage.* 28:2702-2708.
- 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 Tillage 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.
- Merrill, R.M., D. Gutiérrez. O.T. Lewis, J. Gutiérrez, S.B. Díez, and R.J. Wilson. 2008. Combined effects of climate and biotic interactions on the elevational range of a phytophagous insect . *J. Anim. Ecol.* 77:145-155.
- Palm, C.A., R.J.K. Myers, and S.M. Nandwa, 1997. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment. In: Buresh R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F.E. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. SSSA Special Publication, vol. 51. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 193-218.
- Post, W.M., Kwon, K.C. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Glob Change Biol.* 6(3):317-27
- Prescott, C.E. 2010. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest

- soils? *Biogeochem.* 101:133-149.
- Sainju, U.M., B.P. Singh, S. Rahman, and V.R. Reddy. 1999. Soil nitrate-nitrogen under tomato following tillage, cover cropping, and nitrogen fertilization. *J. Environ. Qual.* 28:1837-1844.
- 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.
- Six, J., E.T. Elliott, and K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil. Bio. Biochem.* 32:2099-2103.
- Stockmann, U., M.A. Adams, J.W. Crawford, D.J. Field, N. Henakaarchchi, M. Jenkins, B. Minasny, A.B. McBratney, V.D.R.D. Courcelles, K. Singh, I. Wheeler, L. Abbott, D.A. Angers, J. Baldock, M. Bird, P.C. Brookes, C. Chenu, J.D. Jastrow, R. Lal, J. Lehmann, A.G. O'Donnell, W.J. Parton, D. Whitehead, and M. Zimmermann. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agric. Ecosyst. Environ.* 164:80-99.
- 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.
- Wang, G., Y. Zhou, X. Xu, H. Ruan, and J. Wang. 2013. Temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization along an elevation gradient in the Wuyi mountains, China. *PLOS ONE.* 8(1):1-7.