Characteristics of Distribution and Decomposition of Organic Matter in Soils Cultivated with Various Fruits and Vegetables in Plastic Film House Fields

Yeomyeong Lee¹, Seongwoo Choi¹, Juhee Lee¹, Hyerin An², Chang Hoon Lee³, Pyoung Ho Yi⁴, Seung Tak Jeong⁵, and Sang Yoon Kim^{1,2,6*}

¹Graduate Student, Department of Agricultural Chemistry, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

²Undergraduate Student, Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

³Professor, Fruit Science, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

⁴Researcher, Horticultural & Herbal Crop Environment Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, RDA, Wanju 55365, Korea

⁵Postdoctoral Fellow, Horticultural & Herbal Crop Environment Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, RDA, Wanju 55365, Korea

⁶Professor, Department of Agricultural Life Science, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

*Corresponding author: sykim@scnu.ac.kr

ABSTRACT

Received: August 23, 2021

Revised: November 16, 2021

Accepted: November 17, 2021

ORCID

Sang Yoon Kim

<https://orcid.org/0000-0003-4914-3080>

Enhancing soil carbon sequestration potential is one of the most important strategies to contribute to climate change mitigation. However, basic characteristics of soil organic matter (SOM) distribution and its decomposition rate in soils where fruits and vegetables are cultivated have rarely been investigated though this information is necessary for a better understanding of carbon sequestration. In this study, soil samples were collected from plastic film house fields cultivated for various fruits and vegetables including cucumber, Korean melon, pepper, and pumpkin. Soil chemical properties including characteristics of SOM distribution by chemical oxidizable organic fractions, and their decomposition rates by estimating soil respiration rate (Q_{10} value) via soil incubation were evaluated. Total carbon content in pepper soil showed highest (28.7 g kg^{-1}) and followed by pumpkin (23.9 g kg^{-1}), cucumber (17.6 g kg^{-1}), and Korean melon (11.8 g kg^{-1}). Highest Q_{10} value was observed in pepper cultivated soils (1.65) that could be comparatively sensitive for SOM degradation, and then followed by cucumber (1.42), pumpkin (1.36), and Korean melon (0.82). Labile carbon as easily available form was highest in pepper cultivated soils (20.7 g kg^{-1}), and followed by pumpkin (18.0 g kg^{-1}), cucumber (14.6 g kg^{-1}), and Korean melon (9.9 g kg^{-1}), showing significantly positive correlations with soil total and labile carbons. Our results provided useful information on SOM distribution and decomposition, which is necessary to manage and thus to further enhance carbon sequestration in soils.

Keywords: Decomposition rate, Q_{10} , Soil fraction, Soil organic matter, Soil respiration rate

Potential respiration rates and Q_{10} values were evaluated for a better understanding of soil carbon dynamics in soils cultivated with different fruits and vegetables, providing essential information on soil organic matter distribution and its decomposition.

Introduction

농업에서 토양유기물은 작물생산성 증진과 더불어 토양질 (soil quality) 향상에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 특히 입단형성 축진을 통해 토양의 물리적인 구조 개선과 수분보유력을 향상시킬 수 있으며, 유기물이 지닌 높은 양이온 치환용량으로 인해 토양 내 양분보유력과 완충능력 등을 높일 수 있다 (Thangarajan et al., 2013). 또한 토양 내 미생물의 에너지원을 공급함으로써 생물량과 생물 다양성을 증대시키고, 토양생태계의 건전성을 개선할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Bastida et al., 2021). 따라서 토양유기물은 지속가능한 농업생산을 위한 필수 인자로 인지되고 있다.

토양에서 유기물 함량을 증진시키기 위해서는 기본적으로 유기물 투입량을 극대화하면서 동시에 분해에 의한 제거량을 최소화해야만 한다. 양질의 유기물을 공급하기 위해서는 농업생산과정에서 나오는 부산물의 투입량을 증대 및 휴경기 피복작물 재배 등을 통해 토양 내 바이오매스 환원량을 극대화시키는 토양 관리 방안이 필요하다. 동시에 투입되는 유기물을 퇴비화 (Kim et al., 2014, 2018; Jeong et al., 2019), 바이오차 (Zhang et al., 2010; Park et al., 2021), 사전부숙 (Lee et al., 2020a; Song et al., 2021) 등 안정화 기술을 적용함으로써 토양으로 투입된 이후의 분해량을 최소화시킴으로서 농경지에서 토양유기물 함량을 지속적으로 증진시켜 나갈 수 있다.

국내에서 토양유기물 증진을 위한 다양한 시도가 이루어지고는 있으나, 대부분 유기물 축적량이 상대적으로 많은 벼 논을 중심으로 연구가 수행되어 왔다. 토양유기물 함량을 증진하기 위해 토양 내 유기물 투입을 증가시키기 위한 녹비작물 활용 기술 (Lee et al., 2010; Kim et al., 2012, 2013, 2015; Hwang et al., 2015), 투입된 유기물이 토양에서 분해되면서 손실되는 양을 최소화시킬 수 있는 유기물 활용 기술 (Jeong et al., 2018; Lee et al., 2020b; Park et al., 2021) 개발과 관련한 연구가 주로 수행되어 왔다. 또한 경운 혹은 비닐 멀칭과 같은 재배 관리방법에 따른 농경지 내 유기물 변동과 축적량을 현장에서 비교하는 연구 (Kim et al., 2016; Lee et al., 2019) 등도 수행된 바 있으나, 과채류 재배지에 대한 연구는 여전히 미미한 실정이다.

국내 과채류 재배면적은 2019년 기준 49,758 ha로 전체 과채류 재배면적 중 7대 과채류 (딸기, 수박, 토마토, 풋고추, 오이, 호박, 참외)의 비중이 전체 재배면적의 약 94% (46,680 ha)를 차지하고 있다 (Korean Statistics Information Service, 2019). 2019년 전국 과채류 전체 재배면적의 약 78% (38,676 ha)가 시설재배지로 전국 과채류 생산량의 약 86% (1,935천 톤)를 차지하고 있다. 실제 대부분의 과채류가 노지에 비해 상대적으로 고온 조건인 시설재배지에서 주로 재배되고 있는 점을 감안하면, 토양유기물의 분해가 더 빠르게 일어날 수 있고, 전체 변동 또한 클 것으로 판단되나 이에 대한 연구는 활발하게 이루어지지 않고 있는 실정이다. 또한 토양유기물 증진을 위해 과채류 재배지 토양의 기본

적인 유기물 분포 특성과 호흡량에 대한 기초자료 확보가 필수적이지만, 주요 원예작물 (과수 및 과채류)에 관한 연구는 상대적으로 드물게 수행되고 있는 실정이다.

토양유기물의 분해 (decomposition)는 토양호흡량 (soil respiration rate)에 의해 결정되며, 토양 내 다양한 요인 특히 토양수분함량, 토양온도, 미생물 대사에 필요한 탄소기질 종류 및 이 · 난분해성 함량 등에 의해 영향을 받는다 (Lloyd and Taylor, 1994; Buchmann, 2000; Li et al., 2008; Ko et al., 2016). 일반적으로 온도는 미생물 체내 화학반응을 조절할 수 있는 대표 인자로써, 유기물의 분해에도 직접적인 영향 줄 수 있다 (Conant et al., 2011). 이분해성 기질은 난분해성 기질에 비해 온도증가에 있어 더욱 민감하게 반응하며, 토양호흡량 증가와도 밀접한 관계를 지닌다. 일반적으로 온도민감성 (Q_{10}) 지수란 온도가 10°C 증가할 때마다 토양에서 방출되는 호흡산물의 변화비를 의미하며, Q_{10} 값이 높을수록 온도 증가에 따른 토양유기물 분해가 촉진될 수 있음을 의미한다 (Kirschbaum, 1995). 과채류 재배지 별로 유기물 관리방법이 다르고, 이로 인해 토양유기물의 분포 특성 및 유기물의 분해특성도 다를 것으로 판단되나 이에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 과채류 재배지 별로 시비방법 및 토양관리 방식이 달라 기본적인 토양화학성 및 토양유기물의 분포 특성 등의 차이가 발생될 수 있고 이로 인해 토양호흡량과 유기물 분해에 대한 Q_{10} 값이 토양 간 차이를 보일 수 있을 것이라는 가설을 세우고, 이를 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 본 연구의 목적은 대표 과채류 (고추, 호박, 오이, 참외) 재배지의 1) 토양 유기물 분포 특성, 2) 유기물 분획 특성, 3) 토양 호흡량 조사 및 Q_{10} 지수 평가를 통해 과채류 재배 토양의 전반적인 유기물 분포 특성과 분해에 관한 잠재성을 평가하여 기초데이터로 활용하고자 하였다.

Materials and Methods

과채류 재배 토양시료 채취 대표 과채류 재배지의 유기물 분포 특성과 토양호흡량을 평가하기 위해 총 40개의 지점을 선정하여, 2020년 6월부터 7월까지 토양시료를 채취하였다 (Fig. 1). 작목별로 경남 진주 대곡면 소재 고추 및 호박 시설재배지에서 각 10점씩, 20개 토양시료를 채취하였다. 경남 창녕군 길곡면 소재 오이재배지에서 10점, 대구광역시 달성군 하빈면 소재 참외재배지에서 10점의 시료를 각각 채취하였다. 현장에서 오우거 시료채취기를 이용하여 표층토 (0 - 15 cm)를 채취하였으며, 그늘에서 말린 후 2 mm체 통과 후 분석용 시료로 사용하였다.

토양화학성 및 유기물 분획 특성 토양시료 5 g에 증류수 25 mL를 첨가한 후 30분간 진탕 후 pH meter (Orion star A211, Thermo Scientific, Indonesia)로 토양산도 (pH)와 전기전도도 (Orion star A212, Thermo Scientific, Indonesia)를 측정하였다. 토양 총유기탄소 및 질소함량은 원소분석기 (Elemental A2400II, PERKIN ELMER, USA)를 이용하여 측정하였다. 용존유기탄소 (dissolved organic carbon, DOC)는 습토 3 g에 3차 증류수 30 mL를 넣어 1 시간 동안 진탕한 이후, 여과 (0.45 μm , acrodisc syringe filter) 한 다음 침출액을 총유기탄소분석기 (TOC-VCN, Shimadzu, Japan)로 측정하였다.

토양의 유기물 분획 특성은 Walkley-black 분석법을 약간 변형하여 사용하였다. 0.5 mm 미만으로 분쇄한 토양시료 0.5 g을 삼각플라스크로 옮긴 후 0.167 M 중크롬산칼륨 ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 10 mL를 첨가하였다. 이후 삼각플라스크의 황산 농도를 12 N, 18 N, 24 N로 각각 조절하여 반응시킨 다음 3반복으로 관련 조건에서 산화될 수 있는 유기물의 양을 비교하였다. 총유기탄소 분석결과와 12 N, 18 N, 24 N 황산을 사용하여 산화된 유기물의 양을 총 4개의 분획 (fraction)으로 분리하였다 (Chan et al., 2001).

Fig. 1. Description of soil sampling sites where different fruits and vegetables were cultivated in plastic film house fields.

토양호흡량 및 Q_{10} 지수 평가 과채류 재배지 토양에서 토양호흡량을 평가하기 위해 125 mL serum vial에 토양시료 15 g을 넣고, 전체공극의 약 60% (wt wt⁻¹)에 해당하는 수분을 추가하고 1주일 간 전배양 (pre-incubation)을 실시하였다. 이때 공극률은 용적밀도 (1.2 g cm⁻³)와 입자밀도 (2.65 g cm⁻³)를 이용하여 계산하였다. 이후 vial을 15°C, 25°C, 35°C 항온기에 난괴법 3반복으로 각각 배치한 다음 배양을 실시하였다. 매일 vial 무게를 측정하여 증류수로 토양수분을 증발로 인해 부족해진 만큼 보충하였다. Vial의 뚜껑을 막기 전과 30분 동안 뚜껑을 막은 후 각각 5 mL의 가스시료를 채취하였으며, 이때 발생된 이산화탄소 (CO₂)와 메탄 (CH₄)을 가스크로마토그래피 (GC-2014, Shimadzu, Japan)로 측정하여 토양호흡량을 평가하였다 (Ko et al., 2016). 시료채취는 주 1회 실시하였으며, 가스농도가 초기농도에 비해 더 이상 유의미하게 증가하지 않는 시점에서 시료채취를 종료하였다. 토양호흡량은 아래 Eq. 1을 이용하여 계산하였다 (Curiel Yuste et al., 2007; Ko et al., 2016).

$$\text{Soil respiration (SR)} = \frac{PV}{RT} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{AW}{\text{Soil}} \times 10^{-3} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, 토양호흡량 (soil respiration, SR)은 이산화탄소 및 메탄 배출량 (μg soil g⁻¹ day⁻¹)을 의미하며, P 는 1기압 (atm), V 는 용기 부피 (L), R 은 0.08205 (L · atm mol⁻¹ K⁻¹), T 는 273+항온온도 (°C), $\Delta c/\Delta t$ 는 단위시간당 가스농도차 (ppm), AW 는 탄소 원자량, Soil 은 토양시료의 무게 (g)를 의미한다. 전체 배양기간 중 총토양호흡량은 아래 Eq. 2를 이용하여 도출하였다 (Choi et al., 2020; Lee et al., 2020b).

$$\text{Total respiration (total CO}_2 \text{ and CH}_4 \text{ flux)} = \sum_i^n (F_i \times D_i) \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서, F_i 는 i 번째 시료채취 기간 내 토양호흡량, D_i 는 i 번째 기간 내 시료채취 간격 일수, n 은 시료채취 간격을 의미한다.

과채류 재배지 토양호흡량에 대한 온도민감성을 평가하기 위해 Q_{10} 값을 아래의 Eq. 3을 이용하여 산정하였다 (Chen et al., 2010; Ko et al., 2016).

$$R = ac^{bT} \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서, R 은 토양호흡량 ($\text{mg CO}_2\text{-C and CH}_4\text{-C soil kg}^{-1}$), a 는 경험식인자 (fitting parameter), T 는 온도 ($^{\circ}\text{C}$), b 는 온도에 의존하는 토양호흡인자로 정의된다. 이와 같은 경험식을 이용하여 10°C 씩 온도가 증가하는 조건에서 토양호흡량 변화를 나타내는 Q_{10} 값을 산정하였다.

통계 처리 통계분석은 SAS package (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 ANOVA 분석을 수행하였다. 처리 간 통계적인 유의성이 인정될 경우, Tukey test를 이용하여 5% ($p \leq 0.05$) 확률의 유의수준에서 사후 분석을 실시하여 각 처리간 효과를 비교하였다. 토양화학적 및 분획특성과 토양호흡량간 상관관계는 Pearson's correlation 분석을 이용하여 해석하였다.

Results and Discussion

과채류 재배지 토양 유기물 분포 특성 및 화학성 과채류 재배지 토양 유기물 분포 특성을 평가한 결과 (Table 1), 토양 평균 총유기탄소 (total C) 함량의 경우 고추재배토양에서 가장 높은 28.7 g kg^{-1} 으로 조사되었으며, 호박 (23.9 g kg^{-1}) > 오이 (17.6 g kg^{-1}) > 참외 (11.8 g kg^{-1}) 순으로 높았다. 토양 내 총질소 (total N) 함량은 토양유기탄소 변동과 거의 동일한 경향을 보였으며, 고추 (3.52 g kg^{-1}) > 호박 (2.80 g kg^{-1}) > 오이 (2.01 g kg^{-1}) > 참외 (1.43 g kg^{-1}) 순으로 나타났다. 농촌진흥청 작물별 비료사용처방에 따르면 (Table 2), 질소 추천시비량은 고추 (225 kg N ha^{-1}) > 호박 (200 kg N ha^{-1}) > 오이 (197 kg N ha^{-1}) > 참외 (187 kg N ha^{-1}) 순으로 나타났으며, 과채류 재배 토양 내 질소함량과도 밀접한 관련성이 있을 것으로 판단된다. 다른 과채류 재배지에 비해 고추의 경우 수확 후 전체 바이오매스 전량을 토양으로 환원하여 부속시키는 경우가 많고, 호박, 오이, 참외 등에 비해 분해가 어려운 형태의 리그닌과 같은 목질부위 (줄기 부분)를 포함하고 있어 (Kim et al., 2004), 토양유기탄소 증가에 영향을 준 것으로 판단된다. 평균 탄질비 (CN ratio)의 경우 대부분 8 정도의 범위로 토양별로 유의한 차이를 나타내지는 않았으나, 오이 (8.67) > 호박 (8.45) > 참외 (8.18), 고추 (8.11) 재배지 순으로 약간의 차이가 있는 것으로 조사되었다.

토양산도 (pH)는 고추재배지 토양에서 6.48 로 가장 낮았으며, 호박 (6.79) 및 오이재배지 (6.77)의 경우 중성범위에 가깝게 나타났다. 참외재배지 (7.58)의 경우 다른 과채류 재배지와는 다르게 다소 높게 조사되었다 (Table 1). 일반적으로 토양산도의 경우 미생물의 활성에 큰 영향을 줄 수 있으며 (Paustian et al., 1997), 산성토양의 경우 미생물 활성이 일반적으로 낮아 호흡량이 낮고, 토양유기물의 분해 속도를 느리게 할 수 있다 (Mueller et al., 2012). 본 연구에서는 고추재배지의 상대적으로 낮았던 토양산도로 인해 유기물 축적이 다른 과채류 재배지에 비해 다소 높아진 것으로 판단되며 (Table 3), 이로 인해 전반적인 유기물 함량이 높게 나타난 것으로 해석된다.

전기전도도 (electrical conductivity, EC)의 경우 일반적인 토양에 비해 다소 높은 것으로 조사되었으며, 시설재배지의 특성상 높게 나타난 것으로 보인다. Kong et al. (2018)의 조사에 따르면, 국내 시설재배지 ($n = 23,581$)의 일반적인 전기전도도는 2015년 2.99 dS m^{-1} 로 2006년 (2.52 dS m^{-1}) 이후 전반적인 증가하는 추세에 있으며, 시설재배지 전기전도도 기준 범위인 2.0 dS m^{-1} 을 초과하고 있는 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 고추와 오이재배지에서 평균 $2.8 - 2.9 \text{ dS m}^{-1}$ 로 국내 시설재배지의 평균 수준인 것으로 나타났으며, 호박 (1.4 dS m^{-1})과 참외재배지 (1.5 dS m^{-1})의 경우는 전반적으로 낮은 것으로 조사되었다.

과채류 재배지 내 용존유기탄소 함량은 오이 (109.2 mg kg^{-1}) > 참외 (98.4 mg kg^{-1}) > 고추 (33.2 mg kg^{-1}), 호박 (17.2 mg kg^{-1}) 재배지 순으로 높은 것으로 조사되었다 (Table 1). 특히 참외 재배지의 경우 용존유기탄소 함량의 변이의 폭이 다른 과채 재배토양에 비해 높게 나타났다 ($47.3 - 357.3 \text{ mg kg}^{-1}$). 용존유기탄소는 일반적으로 수용성 및 약산 등에 용출되는 형태로 토양 내 미생물 등이 사용하기 쉬운 탄소원인 탄수화물, 당류 등을 포함한다 (Ghani et al., 2003). 따라서 토양 내 용존유기탄소의 증가는 토양호흡량 증가와도 매우 밀접한 관계를 지닌다 (Chow et al., 2006; Yang et al., 2018). 토양에서 총토양탄소 함량 대비 용존유기탄소의 상대적인 비율 (relative ratio)은 토양에서 상대적으로 쉽게 이용될 수 있는 탄소원 (labile C)을 비율을 파악할 수 있는 지표로 활용될 수 있다 (Cao et al., 2013). 본 연구에서는 참외 (0.867) > 오이 (0.619) > 고추 (0.133) > 호박 (0.065) 재배지 순으로 높은 것으로 나타났으나, 호흡량과의 유의한 상관관계는 없는 것으로 나타났다 (Table 3). 이는 아마도 용존유기탄소 존재 비율 보다는 용존유기탄소의 전반적인 양이 토양호흡에 영향을 주는 주요 인자인 것으로 판단된다.

Table 1. Chemical properties of soils cultivated with different fruits and vegetables in plastic film house fields ($n = 10$).

Sites	Range	pH (1:5)	EC (dS m^{-1})	Total C (g kg^{-1})	Total N (g kg^{-1})	C/N ratio	Labile organic matter	
							DOC (mg kg^{-1})	Relative ratio [†] (%)
Red pepper	Min.	5.89	1.02	12.5	1.66	6.65	2.2	0.017
	Mid.	6.53	2.05	32.2	4.27	8.29	37.3	0.112
	Max.	6.98	9.24	42.8	5.14	8.93	56.0	0.310
	Mean	6.48 b	2.84 a	28.7 a	3.52 a	8.11 a	33.2 b	0.133 b
Pumpkin	Min.	6.34	0.83	14.9	1.97	7.45	1.2	0.006
	Mid.	6.82	1.44	23.0	2.77	8.45	14.9	0.060
	Max.	7.12	1.93	37.8	4.12	9.55	52.0	0.148
	Mean	6.79 b	1.44 b	23.9 ab	2.80 a	8.45 a	17.2 b	0.065 b
Cucumber	Min.	5.86	2.03	12.3	1.59	7.73	38.6	0.273
	Mid.	6.88	2.64	18.4	2.08	8.51	107.1	0.646
	Max.	7.26	5.08	22.7	2.44	10.0	159.9	0.872
	Mean	6.77 b	2.91 a	17.6 bc	2.01 b	8.67 a	109.2 a	0.619 a
Korean water melon	Min.	7.23	0.95	9.6	1.22	7.63	47.3	0.393
	Mid.	7.60	1.18	11.6	1.42	8.06	75.6	0.602
	Max.	7.86	2.50	14.0	1.70	8.76	357.3	3.373
	Mean	7.58 a	1.46 b	11.8 c	1.43 b	8.18 a	98.4 a	0.867 a

[†]EC, electrical conductivity; DOC, dissolved organic carbon; Relative ratio (%) was calculated by using the equation as $\text{DOC} (\text{g kg}^{-1}) / \text{total C} (\text{g kg}^{-1}) \times 100$.

Table 2. Standard fertilization rates recommended by RDA under the greenhouse condition (NIAST, 2019).

Sites	N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	K ₂ O (kg ha ⁻¹)	CaO (kg ha ⁻¹)
Red pepper	225	64	101	2,000
Pumpkin	200	84	99	2,000
Cucumber	197	103	122	2,000
Korean water melon	187	63	109	2,000

Table 3. Correlation between soil chemical properties and mean soil respiration rates and soil organic C (n = 40).

Categories	Parameters	Correlation coefficient (r)
Soil chemical properties	pH	-0.401*
	EC	-0.043
	Total C	0.647***
	Total N	0.556***
	CN ratio	0.463**
	DOC	-0.203
	Relative ratio (DOC in total C)	-0.308
	Fraction 1	0.600***
	Fraction 2	0.677***
	Fraction 3	-0.104
Soil organic fractionations	Fraction 4	0.652***
	Percentage of labile C	-0.184
	Percentage of resistant C	0.184
Soil respiration rates	pH	-0.333*
	EC	0.260
	Total N	0.975***
	CN ratio	0.328*
	DOC	-0.282
	Relative ratio (DOC in total C)	-0.418*
	Fraction 1	0.953***
	Fraction 2	0.938***
	Fraction 3	0.319*
	Fraction 4	0.817***
Soil organic C	Percentage of labile C	-0.362*
	Percentage of resistant C	0.362*

[†]*, **, and *** indicates significance at the 5 ($P \leq 0.05$), 1 ($P \leq 0.01$), and 0.1 ($P \leq 0.001$) % levels, respectively.

토양호흡량 및 Q₁₀지수 비교 고추재배지에서 Q₁₀ 지수가 1.65로 가장 높았으며, 오이 (1.42) > 호박 (1.36) > 참외 (0.82) 순으로 조사되었다 (Fig. 2). 토양호흡량은 배양온도 증가에 따라 고추, 호박, 오이 재배지에서는 증가하는 경향을 보였으나, 참외재배지의 경우 예외적으로 온도증가에 따라 오히려 토양호흡량이 감소하는 경향을 보였다. 일반적으로 Q₁₀ 지수는 온도가 10°C 올라갈 때마다 토양에서 방출되는 호흡산물의 변화비를 의미하며, 그 수치가

높을수록 온도 증가에 따른 토양유기물 분해가 촉진될 수 있음을 시사한다(Kirschbaum, 1995). 일반적으로 Q_{10} 지수는 토양온도가 높아질수록 증가하는 경향을 보이며, 토양 특성과 지역 등에 따라 차이는 있지만 대략 1.56 - 2.70 범위에서 변동하는 것으로 조사된 바 있다(Chen et al., 2010). 경작지의 경우 대략 1.89 - 2.53 정도의 범위이며(Chen et al., 2010), 볏짚 퇴비 및 호밀 등을 사용한 국내 농경지에서는 1.33 - 1.69 범위를 보이는 것으로 조사되었다(Ko et al., 2016). 본 연구에서 과채류 재배지의 온도증가에 따른 토양호흡량 증가율을 조사한 결과, 0.82 - 1.65 범위로 참외재배지(0.82)를 제외하고는 일반 농경지의 범위에 포함되는 값으로 조사되었다. 참외재배지의 경우 용존유기탄소 함량이 오이재배지 다음으로 높았으나(Table 1), 토양호흡량이 가장 낮게 조사되었다(Fig. 2). 용존유기탄소 함량은 토양 내 미생물의 생체량과 밀접한 관계가 있으며, 미생물의 사멸로 인한 세포의 용해는 중요한 탄소원이 되는 것으로 보고된 바 있다(Ye et al., 2011). 본 연구에서 시료 채취 당시의 직접적인 토양 혼중 및 소독 등 여부를 확인할 수는 없었다. 하지만, 총 탄소함량에 비해 높은 용존유기탄소 비율(0.87%)과 함량이 최대 357 mg kg^{-1} 로 평균치의 5배 가량 높게 조사된 점을 감안하면, 당시 토양미생물의 사멸이 이루어졌을 가능성이 높은 것으로 추정된다. 이로 인해 Q_{10} 지수가 타과채류 재배지에 비해 매우 낮고, 변화 추이 또한 정반대의 상이한 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 2. Soil respiration at three different temperatures and temperature sensitivity (Q_{10}) in soils cultivated with different fruits and vegetables in plastic film house fields.

과채류 재배지의 유기물 분획특성 유기물은 토양의 질과 생산성을 결정하는 주요 인자이지만, 특정 분획(fraction)이 더 중요한 부분을 차지하기도 한다. 특히 토양관리에 따라 관련 분획은 크게 변동할 수 있기 때문에 더 민감한 지표로 여겨지며, 다양한 연구에서도 활용되고 있다(Chan et al., 2001; Ghani et al., 2003; Kim et al., 2014; Ko et al., 2016). 본 연구에서도 대표 과채류 재배지의 토양유기물 분획 특성을 화학적 분획방법을 이용하여 평가하였다(Table 4). 분획1은 고추토양에서 평균 13.0 g kg^{-1} 으로 가장 높았으며, 호박(11.4 g kg^{-1}) > 오이(7.9 g kg^{-1}) > 참외(7.5 g kg^{-1}) 순으로 감소하였다. 분획2는 분획1과 동일한 경향을 보였으나, 전반적으로 낮은 수치를 보였으며, 고추(7.7 g kg^{-1}) > 호박(6.6 g kg^{-1}) > 오이(4.7 g kg^{-1}) > 참외(2.4 g kg^{-1}) 순으로 낮아졌다. 분획1과 분획2에 해당하는 탄소는 주로 신선한 유기물이거나, 균사체, 다당류 또는 기타 미생물의 산물이라고 알려져 있다(Janzen, 1987). 상대적으로 분해되기 쉬운 형태인 분획1과 분획2를 합친 가용성탄소(labile C)의 경우 고추(20.7 g kg^{-1}) > 호박(18.0 g kg^{-1}) > 오이(12.6 g kg^{-1}) > 참외(9.9 g kg^{-1}) 순으로 조사되었으나, 전체 유기탄소함량에 대한 비율은 다른 과채류 재배 토양(72 - 75%)에 비해 참외토양(85%)에서만 유의하게 높은 것으로 나타났다.

반면에 상대적으로 분해가 어려운 안정된 형태의 분획3과 분획4의 경우 가용성탄소에 비해 전반적으로 낮은 것으로 조사되었다. 분획3은 고추 (3.7 g kg^{-1}) > 참외 (2.0 g kg^{-1}) > 오이 (1.8 g kg^{-1}) > 호박 (1.4 g kg^{-1}) 순으로 조사되었으며, 분획4의 경우 호박 (4.5 g kg^{-1}) > 고추 (4.3 g kg^{-1}) > 오이 (3.2 g kg^{-1}) > 참외 (1.2 g kg^{-1}) 순으로 나타났다. 전체 유기탄소함량에 대한 비율은 참외 (15%)에서 유의한 수준으로 낮게 나타났으며, 고추, 호박, 오이의 경우 약 25 - 28% 범위인 것으로 조사되었다. 기존 연구에서 보고된 비율인 33 - 37% 수준에 비해 다소 낮은 것으로 나타났다. Chan et al. (2001)의 연구에 따르면 초지, 휴경지 등에서 토양에 따라 어느정도 차이는 있으나, 분획1과 분획2의 합은 주로 63 - 67% 범위이며, 분획3과 분획4의 합은 33 - 37% 범위의 수준인 것으로 보고된 바 있다. 본 연구에서 조사된 과채류 재배지에서는 가용성탄소가 기존 연구에 비해 다소 높은 것으로 조사되었으며, 안정탄소의 경우 낮게 나타났다. 이러한 차이는 과채류 재배지가 주로 시설에서 재배되는 특성상 높은 토양온도로 인해 토양미생물 활성이 높아지고, 상대적으로 안정된 유기물 분해가 더욱 촉진될 수 있었기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4. Characteristics of soil organic matter fractionation by chemical extraction method (n = 10).

Sites	Range	Labile C (LC) (g kg^{-1})		Recalcitrant C (RC) (g kg^{-1})		LC (%)	RC (%)
		Fraction 1	Fraction 2	Fraction 3	Fraction 4		
Red pepper	Min.	6.0	2.4	1.4	Trace	67.6	19.7
	Mid.	13.9	8.8	3.0	2.6	72.3	27.7
	Max.	19.0	13.2	8.4	11.3	80.3	32.4
	Mean	13.0 a	7.7 a	3.7 a	4.3 a	72.9 b	27.1 a
Pumpkin	Min.	6.6	4.0	0.3	2.5	69.0	20.0
	Mid.	10.6	6.1	1.4	4.7	75.3	24.7
	Max.	19.5	9.9	2.9	6.5	80.0	31.0
	Mean	11.4 a	6.6 ab	1.4 b	4.5 a	75.4 b	24.6 a
Cucumber	Min.	5.4	2.9	0.2	1.0	60.4	22.0
	Mid.	7.2	4.4	1.4	3.1	72.3	27.7
	Max.	10.6	7.4	3.4	6.2	78.0	39.6
	Mean	7.9 b	4.7 b	1.8 b	3.2 ab	71.6 b	28.4 a
Korean water melon	Min.	5.7	1.3	0.7	Trace	62.9	3.4
	Mid.	7.5	2.1	1.6	Trace	87.0	13.2
	Max.	9.6	4.5	3.8	1.3	96.6	37.1
	Mean	7.5 b	2.4 c	2.0 b	1.2 b	84.8 a	15.2 b

상관관계 과채류 재배지의 토양화학적 및 유기물분획 특성과 토양호흡량 간 상관관계를 조사한 결과 (Table 3), 토양호흡량은 주로 총유기탄소, 분획1과 분획2 등과 고도로 유의한 정의 상관관계를 보였으나, 가용성탄소의 비율과는 상관관계를 확인할 수 없었다. 토양 내 가용성탄소의 비율보다는 토양 내 존재하는 총가용성탄소의 양에 의존하여 호흡량이 결정될 수 있었던 것으로 보인다. Yang et al. (2018)의 연구에서는 습지 토양에서 용존유기탄소 (DOC)과 토양호흡량 간 매우 높은 정의 상관관계가 있다고 보고하였다. 하지만 본 연구에서는 토양호흡량과 DOC간 유의한 상관관계를 확인할 수 없었다. 이러한 결과는 토양호흡량 평가시 용존유기탄소 이외에 토양호흡에 미치는 다양한 인자 (유기물의 양과 질, 온도, 습도, 염도, 산도, 통기성)들이 상대적으로 더 제한될 수 있기 때문인 것으로 해석된다 (Han et al., 2007).

Conclusions

본 연구에서는 토양유기물 분포 특성 및 토양호흡량을 조사하여 대표 과채류 재배지의 토양유기물의 분해 특성을 평가하고자 하였다. 토양유기탄소 함량은 고추재배토양 (29 g kg^{-1}) 에서 가장 높은 것으로 조사되었으며, 호박 (23.9 g kg^{-1}) > 오이 (17.6 g kg^{-1}) > 참외 (11.8 g kg^{-1}) 순으로 높게 나타났다. 고추재배지에서 온도증가에 따른 가장 높은 Q_{10} 지수인 1.65을 보였으며, 오이 (1.42), 호박 (1.36), 참외 (0.82) 순으로 낮은 온도 민감성을 보였다. 과채류 재배지 평균적인 토양호흡량은 토양화학적 특성 중에서도 특히 토양총탄소 및 가용성탄소 분획과 고도의 정의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 아마도 토양 내 가용성탄소의 비율보다는 토양 내 존재하는 총가용성탄소의 양이 토양호흡량을 결정할 수 있는 주요 인자였던 것으로 해석된다. 따라서 고추재배지는 유기물 분해가 촉진될 수 있는 가능성이 상대적으로 높은 것으로 판단된다. 과채재배지 중 유기물 분해에 대한 온도민감성 또한 높아, 고추재배지를 대상으로 탄소격리량을 증진시킬 수 있는 합리적인 유기물 관리 기술의 개발이 필요하다. 추후 과채류 재배지 토양의 유기물 분포 특성 및 호흡량 평가를 위해 전국 지역별로 더 많은 토양시료를 채취하여, 추가적인 조사가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ015136012021)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Bastida, F., D.J. Eldridge, C. Garcia, G. Kenny Png, R.D. Bardgett, and M. Delgado-Baquerizo. 2021. Soil microbial diversity-biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes. *ISME J.* 15:2081-2091.
- Buchmann, N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biol. Biochem.* 32:1625-1635.
- Cao, J., X. Wang, X. Sun, L. Zhang, and Y. Tian. 2013. Effects of grazing intensity on soil labile organic carbon fractions in a desert steppe area in Inner Mongolia. *SpringerPlus* 2(1):S1.
- Chan, K., A. Bowman, and A. Oates. 2001. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxic paleustalf under different pasture leys. *Soil Sci.* 166:61-67.
- 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 Biol. Biochem.* 42:2282-2288.
- Choi, S., J. Lee, Y. Lee, P.J. Kim, J.-S. Cho, Y.H. Cheong, Y.-S. Rim, and S.Y. Kim. 2020. The effects of ethephon application on suppressing methane emission and stimulating rice productivity in a rice paddy soil: A pot experiment. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53:489-501.
- Chow, A.T., K.K. Tanji, S. Gao, and R.A. Dahlgren. 2006. Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils. *Soil Biol. Biochem.* 38:477-488.
- 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, and F.M. Hopkins. 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.* 13:2018-2035.
- 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.
- Han, G., G. Zhou, Z. Xu, Y. Yang, J. Liu, and K. Shi. 2007. Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. *Soil Biol. Biochem.* 39:418-425.
- Hwang, H.Y., G.W. Kim, Y.B. Lee, P.J. Kim, and S.Y. Kim. 2015. Improvement of the value of green manure via mixed hairy vetch and barley cultivation in temperate paddy soil. *Field Crop. Res.* 183:138-146.
- Janzen, H. 1987. Soil organic matter characteristics after long-term cropping to various spring wheat rotations. *Can. J. Soil Sci.* 67:845-856.
- Jeong, S.T., G.W. Kim, H.Y. Hwang, P.J. Kim, and S.Y. Kim. 2018. Beneficial effect of compost utilization on reducing greenhouse gas emissions in a rice cultivation system through the overall management chain. *Sci. Total Environ.* 613-614:115-122.
- Jeong, S.T., S.R. Cho, J.G. Lee, P.J. Kim, and G.W. Kim. 2019. Composting and compost application: Trade-off between greenhouse gas emission and soil carbon sequestration in whole rice cropping system. *J. Clean Prod.* 212:1132-1142.
- Kim, C.H., Y.Y. Kim, S.B. Park, and T.J. Eom. 2004. Chemical composition and alkaline pulping of a stem of red pepper (*Capsium annuum* L.). *J. Korean Wood Sci. Technol.* 32:26-32.
- Kim, S.Y., C.H. Lee, J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2013. Contribution of winter cover crop amendments on global warming potential in rice paddy soil during cultivation. *Plant Soil* 366:273-286.
- 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.* 537:441-446.
- Kim, S.Y., J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2012. Considering winter cover crop selection as green manure to control methane emission during rice cultivation in paddy soil. *Agric., Ecosyst. Environ.* 161:130-136.
- Kim, S.Y., J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2016. Unexpected stimulation of CH₄ emissions under continuous no-tillage system in mono-rice paddy soils during cultivation. *Geoderma* 267:34-40.
- Kim, S.Y., P. Pramanik, J. Gutierrez, H.Y. Hwang, and P.J. Kim. 2014. Comparison of methane emission characteristics in air-dried and composted cattle manure amended paddy soil during rice cultivation. *Agric., Ecosyst. Environ.* 197:60-67.
- Kim, S.Y., S.T. Jeong, A. Ho, C.O. Hong, C.H. Lee, and P.J. Kim. 2018. Cattle manure composting: Shifts in the methanogenic community structure, chemical composition, and consequences on methane production potential in a rice paddy. *Appl. Soil Ecol.* 124:344-350.
- 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 Biol. Biochem.* 27:753-760.
- Ko, B.G., C.H. Lee, M.S. Kim, G.Y. Kim, S.J. Park, and S.G. Yun. 2016. Effect of soil respiration on light fraction-C and N availability in soil applied with organic matter. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:510-516.
- Kong, M.-S., Y.-H. Kim, D.-J. Kim, S.-S. Kang, E.-J. Lee, G.-B. Jung, and H.-I. Jung. 2018. Agricultural soil management practices by assessing the soil chemical properties of plastic film houses in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51:576-585.
- Korean Statistics Information Service. 2019. <https://kosis.kr/index/index.do>.
- Lee, C.H., K. Do Park, K.Y. Jung, M.A. Ali, D. Lee, J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2010. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil. *Agric., Ecosyst. Environ.* 138:343-347.
- Lee, J.G., S.R. Cho, S.T. Jeong, H.Y. Hwang, and P.J. Kim. 2019. Different response of plastic film mulching on

- greenhouse gas intensity (GHGI) between chemical and organic fertilization in maize upland soil. *Sci. Total Environ.* 696:133827.
- Lee, J.H., M.H. Park, H.J. Song, and P.J. Kim. 2020a. Unexpected high reduction of methane emission via short-term aerobic pre-digestion of green manured soils before flooding in rice paddy. *Sci. Total Environ.* 711:134641.
- Lee, Y., S. Lee, J. Lee, S. Choi, and S.Y. Kim. 2020b. Impacts of different nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and lettuce productivity in upland soils during cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53:600-613.
- 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.
- Lloyd, J. and J.A. Taylor. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct. Ecol.* 8:315-323.
- Mueller, K.E., D.M. Eissenstat, S.E. Hobbie, J. Oleksyn, A.M. Jagodzinski, P.B. Reich, O.A. Chadwick, and J. Chorover. 2012. Tree species effects on coupled cycles of carbon, nitrogen, and acidity in mineral soils at a common garden experiment. *Biogeochemistry* 111:601-614.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2019. Fertilization standard of crop plants. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Park, J.H., S.W. Kang, J.J. Yun, S.G. Lee, S.H. Kim, J.S. Beak, and J.S. Cho. 2021. Effects of co-application of biochars and composts on lettuce growth. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54:151-160.
- Paustian, K., O. Andrn, H.H. Janzen, R. Lal, P. Smith, G. Tian, H. Tiessen, M. Van Noordwijk, and P.L. Woomer. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use Manage.* 13:230-244.
- Song, H.J., J.H. Lee, R.C. Canatoy, J.G. Lee, and P.J. Kim. 2021. Strong mitigation of greenhouse gas emission impact via aerobic short pre-digestion of green manure amended soils during rice cropping. *Sci. Total Environ.* 761:143193.
- Thangarajan, R., N.S. Bolan, G. Tian, R. Naidu, and A. Kunhikrishnan. 2013. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil. *Sci. Total Environ.* 465:72-96.
- Yang, J., C. Zhan, Y. Li, D. Zhou, Y. Yu, and J. Yu. 2018. Effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaohe River estuary, Northeast China. *Sci. Total Environ.* 642:946-953.
- Ye, L., X. Shi, X. Wu, M. Zhang, Y. Yu, D. Li, and F. Kong. 2011. Dynamics of dissolved organic carbon after a cyanobacterial bloom in hypereutrophic Lake Taihu (China). *Limnologia* 41(4):382-388.
- Zhang, A., L. Cui, G. Pan, L. Li, Q. Hussain, X. Zhang, J. Zheng, and D. Crowley. 2010. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agric., Ecosyst. Environ.* 139:469-475.