

농경지 생태계 유형별 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량 비교 및 토양환경요인과의 관계

이응필 · 정현모 · 강성룡 · 장인영**

국립생태원

Comparison of Soil Carbon Storage and Soil Respiration Among Agricultural Ecosystems Types and Their Relationship with Soil Environmental Factors

EungPill Lee · HeonMo Jeong · SungRyong Kang · Inyoung Jang**

*National Institute of Ecology, Seoecheon, Korea

(Received : 25 July 2024, Revised : 18 August 2024, Accepted : 24 August 2024)

요약

본 연구에서는 육상생태계 가운데 하나인 농경지 생태계의 주요 탄소저장고인 토양의 환경요인이 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 농경지 생태계 유형별 선행연구의 결과를 분석하였다. 그 결과 선행연구는 논과 시설재배지에서 가장 많은 연구가 진행되었다. 그리고 논과 과수원의 토양의 탄소 저장량과 토양의 화학적 특성 요인인 토양 pH, 전기전도도, 토양 유기물 함량, 전질소 함량은 밭, 시설재배지, 기타재배지보다 높았고, 토양호흡량은 논이 다른 농경지 생태계 유형보다 높았다. 또한, 토양의 탄소 저장량은 토양 유기물 함량($R^2=0.7237$, $p=0.0000$), 전질소 함량($R^2=0.8419$, $p=0.0000$), 유효인산($R^2=0.3123$, $p=0.0024$)과 토양호흡량은 토양 유기물 함량($R^2=0.5644$, $p=0.0000$)과 유의한 관계가 있었다. 본 연구에서 농경지 생태계는 각각의 생태계 유형(과수원, 논, 시설재배지)의 토양에서 $49.1 \pm 8.9 \text{ ton C ha}^{-1}$, $31.8 \pm 6.9 \text{ ton C ha}^{-1}$, $25.3 \pm 28.0 \text{ ton C ha}^{-1}$ 만큼 탄소 저장량이 확인되었기 때문에 탄소저장고로서 역할을 한다고 볼 수 있다. 따라서 농경지 생태계는 토양의 양분관리를 통해 토양의 탄소 저장 및 탄소 배출 관리를 해야 한다.

핵심용어 : 육상생태계, 탄소저장고, 선행연구, 환경요인, 양분관리

Abstract

In this study, we analyzed the results of previous studies on different types of agricultural ecosystems to understand how environmental factors in soils, which serve as significant carbon reservoirs within agricultural ecosystems, a type of terrestrial ecosystem, affect soil carbon storage and soil respiration. As a result, most previous studies have been conducted on paddy field and facility cultivation area. And, the carbon storage in the soil and the soil's chemical properties, such as soil pH, electrical conductivity, soil organic matter content, and total nitrogen content, were higher in paddy field and orchard compared to field, facility cultivation area, and other cultivation area. The soil respiration in paddy field was also higher than in other types of agricultural ecosystems. Furthermore, soil carbon storage showed a significant correlation with soil organic matter ($R^2=0.7237$, $p=0.0000$), total nitrogen ($R^2=0.8419$, $p=0.0000$), and available phosphorus ($R^2=0.3123$, $p=0.0024$), while soil respiration had a significant relationship with soil organic matter ($R^2=0.5644$, $p=0.0000$). In this study, agricultural ecosystems were found to act as carbon sinks, with soil carbon storage measured at $49.1 \pm 8.9 \text{ tons C ha}^{-1}$ in orchard, $31.8 \pm 6.9 \text{ tons C ha}^{-1}$ in paddy field, and $25.3 \pm 28.0 \text{ tons C ha}^{-1}$ in facility cultivation area. Therefore, agricultural ecosystems need to manage soil carbon storage and carbon emissions through proper soil nutrient management.

Key words : Terrestrial Ecosystem, Carbon Reservoir, Previous Studies, Environmental Factors, Nutrient Management

*To whom correspondence should be addressed.

National Institute of Ecology, Seoecheon, Korea

E-mail : iyjang@nie.re.kr

- EungPill Lee National Institute of Ecology / Associate Researcher (ecomman21@nie.re.kr)
- HeonMo Jeong National Institute of Ecology / Researcher (eimple01@nie.re.kr)
- SungRyong Kang National Institute of Ecology / Team Leader (srkang@nie.re.kr)
- Inyoung Jang National Institute of Ecology / Senior Researcher (iyjang@nie.re.kr)

1. 서론

인간의 활동으로 인한 인위적으로 배출된 CO₂ 농도는 2000년부터 10년에 20ppm씩 증가하면서 2021년 기준 전 세계의 대기 중 약 410ppm 수준으로 나타났고, 2022년에는 일부 지역에서 최대 430ppm 수준까지 나타나면서 지속적으로 증가하고 있는 추세이다(IPCC, 2022; IPCC, 2023). 그리고 지구의 온도는 최근 10년(2011~2020)이 산업화 이전(1850~1990)보다 1.09°C 상승하였고, 2100년에는 온도가 2.2°C에서 최대 3.5°C까지 상승될 것이라 전망하였다(IPCC, 2022; IPCC, 2023).

이에 따라 전 세계는 기후변화를 막기 위해 지구의 온도 상승을 산업화보다 2°C 아래로 억제하여 더 나아가 1.5°C를 달성하도록 촉구하는 파리협정을 체결하였고, UNFCCC(유엔기후변화협약)의 글래스고 기후합의와 우리나라의 「2050 장기저탄소발전전략」은 탄소중립 달성을 위해 자연생태계의 역할을 강조하였다(Jang *et al.*, 2023). 특히 농업, 산림 및 기타 토지 이용(Agriculture, Forestry, and Other Land Use, AFOLU)은 탄소중립을 위한 방안으로 활용되며, 이러한 주요 방안 중의 하나는 지속 가능한 농업과 산림, 생태계 보호를 통한 탄소저장고의 확대이다(IPCC, 2014).

기후변화에 관한 정부 간 협의체 보고서(IPCC)의 산정대상인 산림, 초지, 습지, 농경지는 육상생태계에 속하며, 이러한 육상생태계를 대상으로 탄소의 저장량과 호흡량을 정량화하는 연구가 전 세계적으로 이루어지고 있다(Baldocchi *et al.*, 2001; Baldocchi, 2008).

육상생태계 중 산림생태계는 가장 큰 탄소저장고이며, 특히 국내의 경우에는 산림생태계가 많은 면적을 차지하는 만큼 대부분의 연구가 산림생태계를 대상으로 탄소의 저장과 호흡을 산정하는 연구들이 진행되었으며, 최근에는 다양한 생태계에서의 탄소 순환이 강조됨에 따라 탄소수지 연구가 활발히 진행되고 있다(McCarl and Schneider, 2001; Jang *et al.*, 2023).

우리나라는 국토면적은 좁지만, 여러 작물을 재배할 수 있는 재배환경을 가지고 있고, 국제적인 수요에 따라 농작물 재배가 지속적으로 이루어지고 있기 때문에 농경지 생태계는 주요 탄소저장고 중에 하나로 주목받고 있다(Choi *et al.*, 2014). 하지만 농경지 생태계는 산림생태계와는 달리 탄소흡수원으로서 인정을 받지 못하고 있는데 이는 인간의 필요 활동으로 농작물을 소비 및 소각함으로써 농작물의 흡수된 CO₂가 농경지 생태계에 머무르지 못하고, 대기 중으로 방출되기 때문이다(Shim *et al.*, 2015; Suh *et al.*, 2015).

토양권은 식생의 약 3배, 대기의 약 2배에 달하는 탄소를 축적하고 있지만, 연간 75Pg의 탄소가 식물의 뿌리 호흡과 미생물의 호흡으로 인해 토양호흡의 형태로 대기 중으로 배출되기 때문에 전 지구적 탄소 순환에서 매우 중요한 역할을 하고 있다(Waring and Running, 1998; Bond-lamberty *et al.*, 2004; Lee, 2012).

토양은 이산화탄소의 주요 저장고이고, 토양의 이산화탄

소 플럭스는 토양의 종류와 구조 및 이화학적 특성에 따라 변하기 때문에 이러한 토양환경의 차이에 따른 토양의 저장 및 호흡에 대한 연구가 필요하다(Ok *et al.*, 2002; Bhattacharyya *et al.*, 2012). 특히 다른 생태계의 토양과 달리 농경지 생태계의 토양은 작물의 안정적인 생산과 토양비옥도를 위해 토양에 비료를 투입하기 때문에 양분의 시비량에 따른 토양 내 탄소 저장량 및 방출량의 변화를 규명하는 것이 중요하다(Cambell *et al.*, 2005; Gregorich *et al.*, 2005; Bhattacharyya *et al.*, 2012).

농경지의 장기간 비료 처리는 토양의 탄소량을 증가시키지만, 비료의 종류에 따라 토양의 탄소량은 달라지기도 하며, 벼짚과 퇴비와 같은 유기물원의 사용은 농경지 토양의 이화학적 특성을 개선하여 토양의 탄소량을 증가시킨다(Kim *et al.*, 2004; Hwang *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2013; Kwon *et al.*, 2022). 하지만, 토양의 탄소량을 증가시키기 위한 이러한 토양개량제의 과다 사용은 염류 집적의 가속화로 인해 토양의 특성을 악화시킬 수 있다(Chang *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2013). 이처럼 현재까지는 농작물의 생산성을 위해 토양의 탄소량을 개선하기 위한 연구는 많이 진행되었지만, 비료 처리에 따른 토양의 호흡량에 대한 연구는 체계적으로 진행되지 못하고 있다(Kim *et al.*, 2008; Ro *et al.*, 2015).

따라서 본 연구에서는 육상생태계의 탄소흡수원 가운데 하나인 농경지 생태계를 대상으로 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량을 산정한 선행연구를 목록화하고, 관련 연구 결과를 정리하여 국내 농경지 생태계 유형별 토양의 탄소 저장량 및 토양호흡량 현황을 파악하였다. 그리고 농경지 생태계 유형별 토양의 탄소 저장량 및 토양호흡량의 차이를 확인하고, 토양환경요인 간의 관계를 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 선행연구 수집

국내 농경지 생태계 유형별 토양의 탄소 저장량 및 배출량을 평가하기 위해 우선적으로 환경부 토지 피복 유형별 분류 체계(중분류)에 따른 국내 농경지 생태계의 세부 유형(논, 밭, 시설재배지, 과수원, 기타재배지)을 대상으로 한 관련 연구들을 수집하여 목록화 하였다.

선행연구 검색은 학술연구정보서비스(www.riss.kr), 구글 스칼라(scholar.google.com) 등 검색 엔진을 통해 수행하였으며, 검색어는 농경지 생태계의 세부 유형(논, 밭, 시설재배지, 과수원, 기타재배지), 토양, 탄소 등을 활용하였다.

그리고 검색된 결과 중 신뢰성 있는 결과의 획득을 위해 동료 평가가 완료되어 발간된 논문과 국가 연구소에서 발간된 보고서를 분석에 활용하였다.

2.2 선행연구 정리

수집된 선행연구는 크게 저장량 산정 연구와 배출량 산정 연구로 구분하였고, 농경지 생태계 유형별 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량의 비교 및 토양환경요인 간의 관계를 분석

하기 위해 토양의 탄소 저장량의 결과 값과 토양호흡량의 결과 값 및 토양 화학적 특성(토양 pH, 전기전도도, 토양 유기물 함량, 전질소 함량, 유효인산, 칼륨, 칼슘, 마그네슘)의 결과 값을 정리하였다(Table 1).

수집된 연구들을 대상으로 일정한 결과 값들을 산출하기 위해서는 통일된 단위가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 저장량 산정에는 ton C ha^{-1} 의 단위로 통일하였으며, 배출량을 대상으로 한 연구의 경우에는 시간을 고려하여 $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 의 단위 값을 사용하였다.

또한, 위의 단위 값 통일을 위해서 선행연구 중 토양의 탄소 저장량 및 토양호흡량이 면적 단위로 제시된 연구들만 활용하였고, 토양의 탄소 저장량의 경우 토양 g 당 탄소 저장량을 산정한 연구들이 있었으나, 이를 면적으로 환산하기 위해서는 토양 가밀도(bulk density)나 토양 채취 깊이 등 추가 데이터들이 필요하므로 이와 같은 연구는 대뿔값 산정에서 제외하고 진행하였다.

2.3 선행연구 분석

농경지 생태계 유형별 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량 및 토양의 화학적 특성의 경향성을 밝히기 위하여 측정된 자료의 정규분포 여부를 확인하기 위해 Kolmogorov-smirnov test를 실시하였고, 정규분포를 따르지 않아($p < 0.05$) 비모수 통계분석(nonparametric analysis)을 사용하였다. 각 환경 구별 차이 유의성은 KruskalWallis test의 사후검정(post-hoc)을 실시하여 확인하였다(No and Jeong, 2002).

농경지 토양의 화학적인 성질은 작물의 생산성과 밀접한 관련이 있고, 특히 토양의 탄소 저장 및 토양호흡에도 영향을 주기 때문에(Ok *et al.*, 2002; Bhattacharyya *et al.*, 2012) 이에 따라 농경지 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량 및 토양환경요인 간의 상관관계를 알아보기 위해 단순회귀분석을 시행하였다.

그리고 변수에 따라 서로 간에 영향을 주거나 받는 정도가 다를 수 있기 때문에 데이터의 표준화를 통해 변수에 따라 달라지는 영향의 크기를 최소화하였다(No and Jeong, 2002). 데이터의 표준화는 각 데이터로부터 평균을 빼고 표준편차로 나누어 평균은 0, 표준편차는 1이 되는 방법으로 시행하였다(No and Jeong, 2002). 또한, 통계분석의 유의확

률은 0.05로 설정하였고(No and Jeong, 2002), 선행회귀식은 엑셀프로그램(Microsoft office, 2016)에서 구하였다.

이상의 통계학적 분석은 Statistica 8 통계패키지(Statsoft Co. 2007)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 농경지 생태계 유형별 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량 및 환경특성 선행연구 현황

검색엔진을 통해 수집된 국내 농경지 생태계의 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량 및 토양환경 특성의 선행연구는 총 11건이었다(Table 2). 이 중, 8건은 논문이고 나머지 3건은 국가 기관에서 발간한 보고서였다(Table 2). 그리고 농경지 생태계 세부 유형별로는 논과 시설재배지에서 각각 4건(33.3%)으로 가장 많은 연구가 진행되었고, 과수원(3건, 25.0%), 밭(1건, 8.3%), 기타재배지(0건, 0.0%) 순으로 연구가 진행되었다(Table 2).

수집된 선행연구 결과 값의 데이터 수는 총 292 개 이었다(Table 3). 농경지 생태계 세부 유형별로는 시설재배지(133 개, 45.5%)가 가장 많았고, 논(116 개, 39.7%), 과수원(36 개, 12.3%), 밭(7 개, 2.4%), 기타재배지(0 개, 0.0%) 순으로 많았다(Table 3). 그리고 수집된 선행연구 중 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량의 결과 값의 데이터 수는 모두 시설재배지가 각각 15 개(48.4%), 20 개(74.1%)로 가장 많았고, 논(저장량: 13 개(41.9%), 호흡량: 4 개(14.8%)), 과수원(저장량: 3 개(9.7%), 호흡량: 3 개(11.1%)), 밭과 기타재배지(저장량: 0 개(0%), 호흡량: 0 개(0%)) 순으로 많았다(Table 3). 또한, 토양의 화학적 특성 결과 값의 수집된 데이터 수는 논(99 개, 42.3%)이 가장 많았고, 시설재배지(98 개, 41.9%), 과수원(30 개, 12.8%), 밭(7 개, 3.0%), 기타재배지(0 개, 0.0%) 순으로 많았다(Table 3).

국내에서 생태계 유형별 탄소 연구는 산림, 습지, 초지, 정주지에서 각각 82 건, 10 건, 6 건, 6 건으로 산림에서 가장 많은 연구가 진행되었고(Jang *et al.*, 2023), 농경지는 총 11 건으로 습지, 초지, 정주지보다는 많았지만, 산림생태계가 다른 생태계를 모두 합친 연구보다 많은 것으로 보아 이는 산림생태계가 아닌 다른 생태계에 대한 탄소 연구의 수행이 필요하

Table 1. Categories of carbon storage and carbon emission results from previous studies

Category		Carbon Storage	Carbon Emission
Environmental Factor	Soil Chemical Properties	Soil pH	
		Electrical Conductance (EC)	
		Soil Organic Matter (SOM)	
		Total Nitrogen (T-N)	
		Available Phosphorus (Ava. P ₂ O ₅)	
		Exchangeable	Potassium (K)
	Calcium (Ca)		
	Magnesium (Mg)		
Result	Soil	Soil Organic Carbon	Soil Respiration

다는 것을 의미하고 있다. 특히 농경지 생태계는 국내의 주요 작물을 재배하고 있는 생태계 유형 외에 추가적으로 기타재배지(목장, 양식장 등)의 탄소수지 연구가 진행되어야 한다.

선행연구에서 토양의 화학적 특성 결과 값의 수집된 데이터 수는 234 개로 토양의 탄소 저장량 및 토양호흡량의 결과 값의 수집된 데이터 수(58 개)보다 많았다(Table 3). 이는 농경지 생태계는 다른 생태계와는 달리 작물의 생산성을 위해 토양 내 토양개량제를 사용하고 있어 이로 인해 토양 내 화학적인 특성이 변화하게 된다(Kim *et al.*, 2004; Hwang *et al.*, 2013; Kwon *et al.*, 2022). 따라서 토양개량제로 인한 토양의 화학적 특성의 변화는 토양의 탄소 저장량 및 토양호흡량에 영향을 줄 수 있기 때문에 국내 여러 연구에서 농경지 생태계의 탄소 저장량 및 배출량을 정확히 산정하기 위해 토양의 화학적 특성을 함께 분석하였기 때문으로 판단된다.

3.2 농경지 생태계 유형별 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량 및 토양의 화학적 특성

농경지 생태계 유형별 토양의 탄소 저장량은 과수원(49.1±8.9 ton C ha⁻¹), 논(31.8±6.9 ton C ha⁻¹), 시설재배지(25.3±28.0 ton C ha⁻¹)에서 가장 높았다(Fig. 1(a)). 그리고 토양호흡량은 논(9.9±3.8 ton C ha⁻¹ yr⁻¹)에서 가장 높게 나타났고, 과수원(3.5±3.9 ton C ha⁻¹ yr⁻¹), 시설재배지(2.4±2.6 ton C ha⁻¹ yr⁻¹) 순이었다(Fig. 1(b)).

또한, 농경지 생태계 유형별 토양의 화학적 특성에서 토양 pH는 과수원(6.2±1.3), 시설재배지(6.2±0.4), 논(6.0±0.4)이 밭(5.2±0.1)보다 높았고, 전기전도도는 과수원(0.72±0.01 ds/m), 논(0.53±0.23 ds/m), 시설재배지(0.44±0.15 ds/m)에서 가장 높았다(Fig. 2(a), (b)). 토양 유기물 함량은 과수원(43.5±11.4 g/kg)과 논(27.9±5.6 g/kg)이 시설재배지(18.0±8.0 g/kg)와 밭(13.5±0.1 g/kg)보다 높았고, 전질소 함량은 과수원(2.02±0.34 g/kg)과 논(1.36±0.41 g/kg)이 가장 높았으며, 밭(0.99±0.01 g/kg), 시설재배지(0.07±0.34 g/kg) 순이었다(Fig. 2(c), (d)). 유효인산은 밭(268.0±0.9 mg/kg)이 가장 높았고, 시설재배지(131.3±33.0 mg/kg), 논(86.3±18.7 mg/kg) 순이었다(Fig. 2(e)). 칼륨은 과수원(1.07±0.55 cmol+/kg)이 가장 높았고, 시설재배지(0.47±0.17 cmol+/kg), 밭(0.30±0.01 cmol+/kg), 논(0.25±0.14 cmol+/kg) 순이었다(Fig. 2(f)). 칼슘은 밭(7.56±0.01 cmol+/kg)이 가장 높았고, 과수원(7.37±5.78 cmol+/kg)과 논(6.00±2.35 cmol+/kg), 시설재배지(5.50±0.67 cmol+/kg) 순이었다(Fig. 2(g)). 마그네슘은 농경지 생태계 유형별(밭: 1.93±0.01 cmol+/kg, 시설재배지: 1.64±1.06 cmol+/kg, 과수원: 1.48±0.47 cmol+/kg, 논: 1.38±0.79 cmol+/kg)로 차이가 없었다(Fig. 2(h)).

본 연구의 결과를 종합적으로 보았을 때 논과 과수원은 밭, 시설재배지, 기타재배지보다 토양의 탄소 저장량과 토양

Table 2. List of previous studies by detailed types of agricultural ecosystems used in analysis

Ecosystem Types	Previous Studies	
	Report	Research Paper
Paddy Field	Ministry of Education, Science and Technology, 2013	Shim <i>et al.</i> , 2015; Shim <i>et al.</i> , 2016; Han <i>et al.</i> , 2020
Field	National Institute of Agricultural Science, 2013	-
Facility Cultivation Area	Rural Development Administration, 2017	Kim <i>et al.</i> , 2008; Kim <i>et al.</i> , 2017; Byeon <i>et al.</i> , 2023
Orchard	Rural Development Administration, 2017	Jo <i>et al.</i> , 2014; Lee <i>et al.</i> , 2016
Other Cultivation Area	-	-

Table 3. Number of data from previous studies on soil carbon storage, soil respiration, and soil environmental factors by detailed types of agricultural ecosystems used in the analysis (SOC: Soil Organic Carbon, SR: Soil Respiration, pH: Soil pH, EC: Electrical Conductivity, SOM: Soil Organic Matter, TN: Total Nitrogen, AP: Available Phosphorus, K: Exchangeable Potassium, Ca: Exchangeable Calcium, Mg: Exchangeable Magnesium)

Ecosystem Types	Previous Studies												Total
	Result			Environmental Factor									
	SOC	SR	Total	pH	EC	SOM	TN	AP	K	Ca	Mg	Total	
Paddy Field	13	4	17	13	12	14	12	12	12	12	12	99	116
Field	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	7	7
Facility Cultivation Area	15	20	35	14	8	14	7	14	14	14	13	98	133
Orchard	3	3	6	5	3	3	3	5	5	5	5	30	36
Other Cultivation Area	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	31	27	58	33	23	32	23	32	32	32	31	234	292

의 화학적인 특성 요인인 토양 pH, 전기전도도, 토양 유기물 함량, 전질소 함량이 높았고, 특히 토양호흡량은 논이 다른 농경지 생태계 유형보다 높았다.

토양 pH의 적정범위는 5.4~6.4 정도로 토양 동물 및 토양 미생물에 최적인 범위로 알려져 있다(Pennisi and Thomas, 2015). 그리고 전기전도도, 토양 유기물 함량과 전질소 함량은 토양 미생물의 활성을 나타내는 중요한 인자이며, 일반적으로 토양 내 유기물 함량과 전질소 함량이 높은 경우 미생물의 활성이 활발하다고 알려져 있다(Yoo *et al.*, 2012; Natural Resources Conservation Service, 2013). 본 연구에서 논과 과수원은 토양 유기물 함량이 높은 것으로 보아 유기탄소는 유기물의 형태로 존재하기 때문에 다른 농경지 생태계 유형보다 토양의 탄소 저장량이 높은 것으로 판단된다(Hu and Wang, 2008; Dixon *et al.*, 1994). 특히 논은 다른 농경지 생태계 유형보다 토양호흡량이 높았는데(Fig. 1(b)), 이는 논 토양 미생물의 활동이 다른 농경지 생태계 유형보다 높은 것을 의미한다.

그리고 논 토양의 유효인산(Fig. 2(e))과 치환성양이온 칼륨(Fig. 2(f)), 칼슘(Fig. 2(g)), 마그네슘(Fig. 2(h))은 다른 농경지 생태계 유형보다 낮게 나타났는데, 이러한 이유는 토양 미생물이 토양 내 유기물을 분해하는 과정에서 활동을 위해 유효인산과 양이온을 미생물 체내에 흡수하였기 때문이다(Kirkby *et al.*, 2014; Kuzyakov *et al.*, 2000).

3.3 농경지 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량 및 토양환경 요인 간의 관계

농경지 토양의 탄소 저장량과 통계적으로 유의한 관계를 보인 것은 토양 유기물 함량($R^2=0.7237$, $p=0.0000$), 전질소 함량($R^2=0.8419$, $p=0.0000$), 유효인산($R^2=0.3123$, $p=0.0024$) 이었고($p<0.05$) (Fig. 3(c), 3(d), 3(e)), 토양호흡량과 통계적으로 유의한 관계를 보인 것은 토양 유기물 함량($R^2=0.5644$, $p=0.0000$)이었다($p<0.05$) (Fig. 4(c)). 이는 토양의 탄소 저장량은 토양 유기물 함량과 전질소 함량이 증가할수록 증가한다는 것을 의미하고, 유효인산이 증가할수록 감소한다는

것을 의미한다. 그리고 토양호흡량은 토양 유기물 함량이 증가할수록 증가한다는 것을 의미한다.

이러한 결과로 보아 농경지 생태계는 유기물과 질소의 공급과 축적으로 인해 토양의 탄소 저장량이 증가하게 된다. 특히 유기물의 증가는 토양 미생물의 활동을 증가시키기 때문에 이로 인해 토양 미생물의 호흡이 증가하여 토양호흡량도 증가하게 된다(Dixon *et al.*, 1994; Hu and Wang, 2008; Yoo *et al.*, 2012; Natural Resources Conservation Service, 2013). 또한, 토양 내 유효인산은 토양 미생물의 활동에 영양분으로서 유효인산이 증가하게 되면 토양 미생물의 활동 증가로 토양 내 유기물을 분해하기 때문에 토양의 탄소 저장량이 감소하게 된다(Liu *et al.*, 2013; Kirkby *et al.*, 2014; Kuzyakov *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2023).

따라서 농경지 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량은 토양의 영양소 증감에 따라 달라지기 때문에 각 농경지 생태계 유형에 맞는 토양의 관리가 필요하다. 특히 다른 농경지 생태계와는 다르게 논 생태계는 다양한 영농활동이 일어나고 있어 영농활동에 따른 탄소수지를 정량할 필요가 있는데 최근 여러 연구에서는 작부체계(단작지와 이모작지)와 시비 활동 및 친환경 농업 활동에 따른 토양 탄소의 저장 및 배출을 평가하여 토양 관리의 필요성을 강조하고 있다(Bhattacharyya *et al.*, 2012; Shim *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017; Han *et al.*, 2020).

이처럼 농경지 생태계에서 탄소 고정량은 토양의 관리에 의해서 달라지며, 동시에 토양의 호흡을 통해 상당량의 탄소를 배출하고 있다(Cambell *et al.*, 2005; Gregorich *et al.*, 2005; Schlesinger, 2000). 그리고 농경지의 토양 유기탄소는 토양비옥도의 유지와 작물의 안정적인 생산에 매우 중요하며, 특히 최근에는 기후변화 문제로 인해 농경지의 토양 내 유기탄소 저장에 대한 중요성이 커지고 있다(Su *et al.*, 2006; Kundu *et al.*, 2007; Hong *et al.*, 2015).

현재 농경지 대부분이 유기농법이 아닌 관행농법으로 관리되고 있으며, 관행농법에서 비료의 사용은 토양이 산성화 되어 토양의 화학성이 악화되고 있다(Kim *et al.*, 2006;

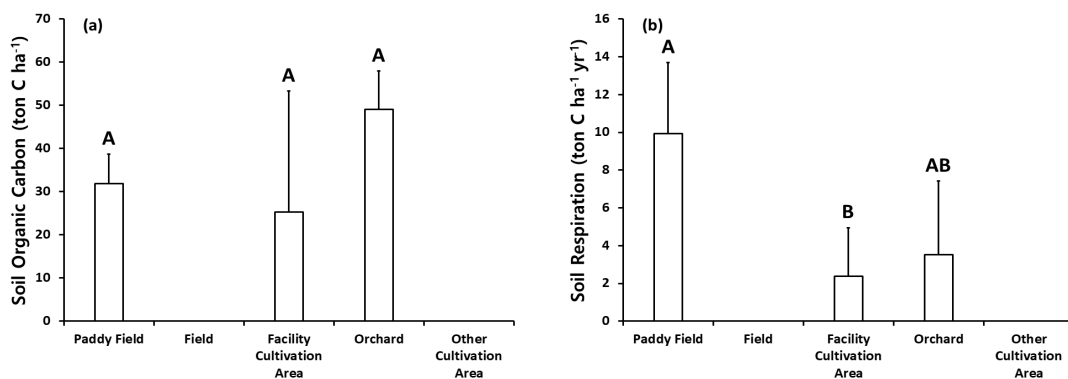


Fig. 1. Soil Organic Carbon (ton C ha⁻¹) (a) and Soil Respiration (ton C ha⁻¹ yr⁻¹) (b) measured under agricultural ecosystem types. Alphabets on the bars mean significant difference among agricultural ecosystem types ($p<0.05$). Above bars on the graph mean standard deviation.

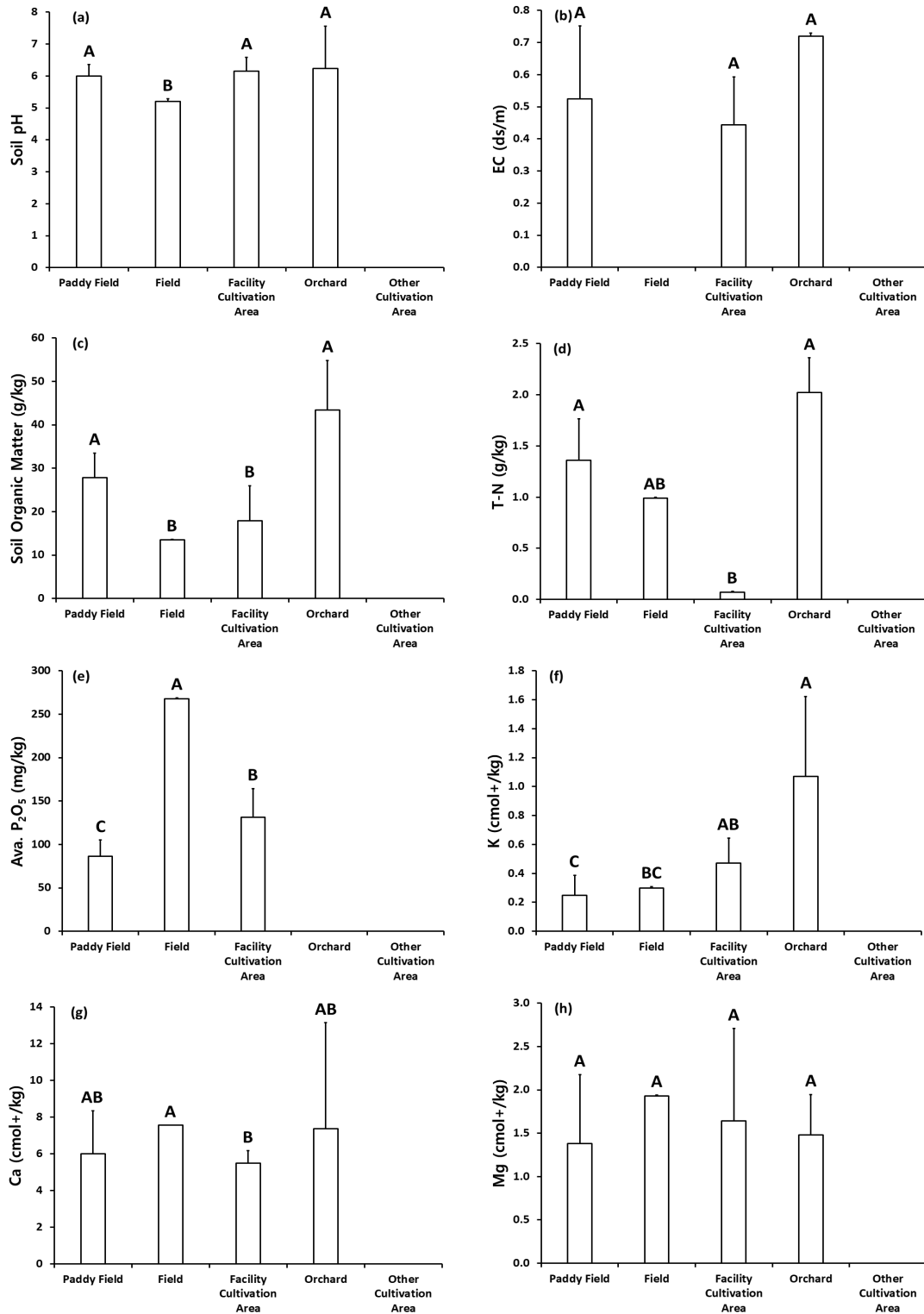


Fig. 2. Soil pH (a), EC (ds/m) (b), Soil Organic Matter (g/kg) (c), T-N (g/kg) (d), Ava. P₂O₅ (mg/kg) (e), K (cmol+/kg) (f), Ca (cmol+/kg) (g), Mg (cmol+/kg) (h) measured under agricultural ecosystem types. Alphabets on the bars mean significant difference among agricultural ecosystem types ($p < 0.05$). Above bars on the graph mean standard deviation.

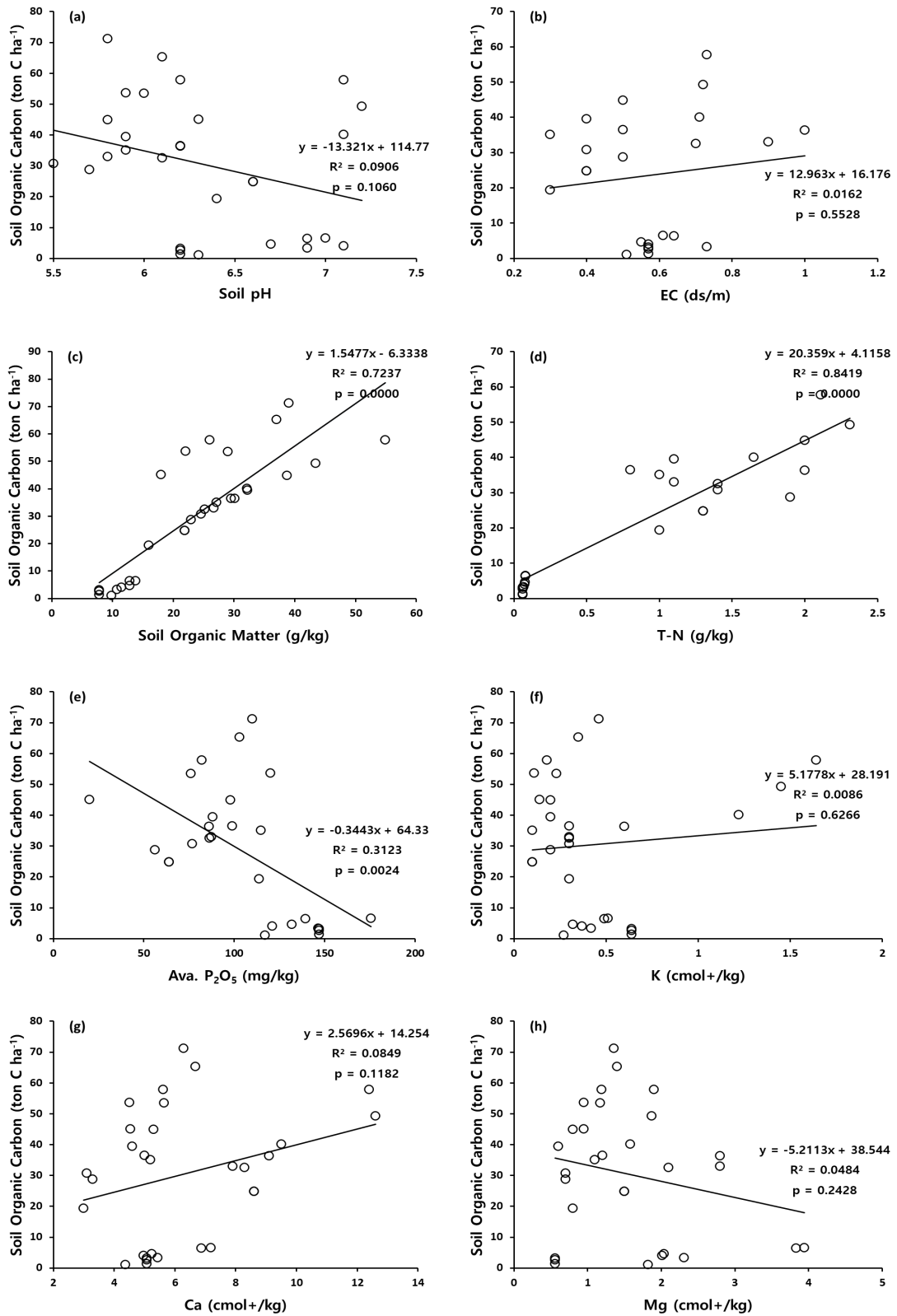


Fig. 3. The relationship among soil organic carbon (ton C ha⁻¹) of cropland and soil chemical properties (Soil pH (a), EC (ds/m) (b), Soil Organic Matter (g/kg) (c), T-N (g/kg) (d), Ava. P₂O₅ (mg/kg) (e), K (cmol+/kg) (f), Ca (cmol+/kg) (g), Mg (cmol+/kg) (h)).

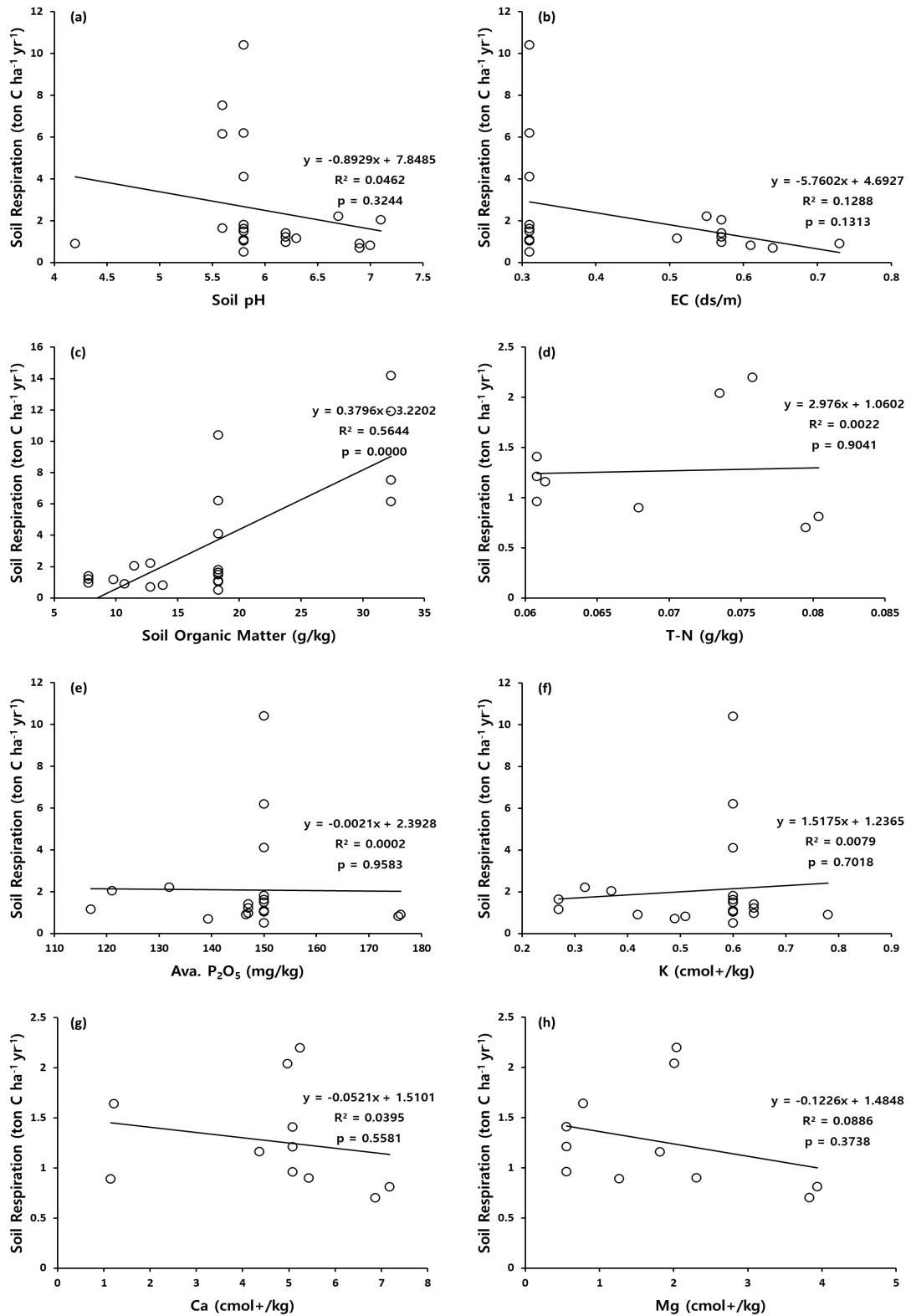


Fig. 4. The relationship among soil respiration (ton C ha⁻¹ yr⁻¹) of cropland and soil chemical properties (Soil pH (a), EC (ds/m) (b), Soil Organic Matter (g/kg) (c), T-N (g/kg) (d), Ava. P₂O₅ (mg/kg) (e), K (cmol+/kg) (f), Ca (cmol+/kg) (g), Mg (cmol+/kg) (h)).

Chung and Lee, 2008; Han *et al.*, 2020). 따라서 농경지에 서는 이러한 점을 고려하여 벧짚과 퇴비와 같은 유기물원과 탄화물을 이용함으로써 토양개량과 함께 탄소저장 효과를 높이기 위해 노력하고 있다(Kim *et al.*, 2004; Laird *et al.*, 2010; Hwang *et al.*, 2013; Kwon *et al.*, 2022).

대기 중 온실가스의 농도를 결정하는 탄소의 흡수와 방출에서 육상생태계는 탄소흡수원의 역할을 수행하고 있고, 다른 자연생태계와 달리 인위적으로 관리되는 농경지 생태계는 작물의 소비 및 소각으로 작물이 가지고 있는 탄소가 방출되기 때문에 탄소흡수원으로서 인정을 받지 못하고 있는 실정이다(Shim *et al.*, 2015; Jang *et al.*, 2023). 하지만 본 연구에서 농경지 생태계는 각각의 생태계 유형(과수원, 논, 시설재배지)의 토양에서 $49.1 \pm 8.9 \text{ ton C ha}^{-1}$, $31.8 \pm 6.9 \text{ ton C ha}^{-1}$, $25.3 \pm 28.0 \text{ ton C ha}^{-1}$ 만큼 탄소 저장량이 확인이 되었기 때문에 탄소저장고로서 역할을 한다고 볼 수 있다. 또한, 농경지 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량은 유기물 함량, 전질소 함량, 유효인산과 관련이 있기 때문에 농경지 생태계는 토양의 양분관리를 통해 토양의 탄소 저장 및 배출 관리를 해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 육상생태계 가운데 하나인 농경지 생태계의 주요 탄소저장고인 토양의 환경요인이 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 농경지 생태계 유형별 선행연구의 결과를 분석하였다.

그 결과 선행연구는 논과 시설재배지에서 가장 많은 연구가 진행되었지만, 농경지 생태계는 국내의 주요 작물을 재배하고 있는 생태계 유형 외에 기타재배지(목장, 양식장 등)의 탄소수지 연구가 진행되어야 한다. 그리고 논과 과수원의 토양의 탄소 저장량과 토양의 화학적 특성 요인인 토양 pH, 전기전도도, 토양 유기물 함량, 전질소 함량은 밭, 시설재배지, 기타재배지보다 높았다. 특히 논과 과수원의 토양 pH는 토양 미생물이 서식하기에 적정범위이고, 논과 과수원은 토양 내 유기물 함량과 전질소 함량이 높은 것으로 보아 유기탄소는 유기물의 형태로 존재하기 때문에 다른 농경지 생태계 유형보다 토양 내 탄소 저장량이 높은 것으로 판단된다. 또한, 토양호흡량은 논이 다른 농경지 생태계 유형보다 높았고, 이는 논 토양 미생물의 활동이 다른 농경지 생태계 유형보다 높은 것을 의미한다. 그리고 농경지 생태계의 토양의 탄소 저장량은 토양 유기물 함량, 전질소 함량, 유효인산과 토양호흡량은 토양 유기물 함량과 유의한 관계가 있었다. 이처럼 농경지 생태계 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량은 토양의 영양소 증감에 따라 달라지기 때문에 각 농경지 생태계 유형에 맞는 토양의 관리가 필요하다.

본 연구에서 농경지 생태계는 각각의 생태계 유형(과수원, 논, 시설재배지)의 토양에서 $49.1 \pm 8.9 \text{ ton C ha}^{-1}$, $31.8 \pm 6.9 \text{ ton C ha}^{-1}$, $25.3 \pm 28.0 \text{ ton C ha}^{-1}$ 만큼 탄소 저장량이 확인이 되었기 때문에 탄소저장고로서 역할을 한다고 볼 수

있다. 또한, 농경지 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량은 유기물 함량, 전질소 함량, 유효인산과 관련이 있기 때문에 농경지 생태계는 토양의 양분관리를 통해 토양의 탄소 저장 및 탄소 배출 관리를 해야 한다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2024-16).

References

- Baldocchi, D. (2008). Breathing of the Terrestrial Biosphere: Lessons Learned from a Global Network of Carbon Dioxide Flux Measurement Systems. *Australian Journal of Botany*, Vol. 56, pp. 1–26
DOI: <https://doi.org/10.1071/BT07151>
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, Ch., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, U. K. T., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K. and Wofsy, S. (2001). FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem – Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 82(11), pp. 2415–2434.
DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2)
- Bhattacharyya, P., Neogi, S., Roy, K. S. and Rao, K. S. (2012). Gross Primary Production, Ecosystem Respiration and Net Ecosystem Exchange in Asian Rice Paddy: an Eddy Covariance-based Approach. *Current Science*, Vol. 104(1), pp. 67–75.
- Bond-Lamberty, B., Wang, C. and Gower, S. T. (2004). Contribution of Root Respiration to Soil Surface CO₂ Flux in a Boreal Black Spruce Chronosequence. *Tree Physiology*, Vol. 24, pp. 1387–1395, DOI : <https://doi.org/10.1093/treephys/24.12.1387>
- Byeon, J. E., Kim, S. H., Shim, J. H., Jeon, S. H. Lee, Y. H. and Kwon, S. I. (2023). Effects of Rice Straw Compost Application on Soil Chemical Properties and Soil Organic Carbon Stock in Paddy Fields. *Korean Journal of Crop Science*, Vol. 68(2), pp. 90–96,
DOI: <https://doi.org/10.7740/kjcs.2023.68.2.090> [Korean Literature]
- Cambell, C. A., Janzen, H. H., Paustian, K., Gregorich, E. G., Sherrod, L., Liang, B. C. and Zentner, R. P. (2005). Carbon Storage in Soils of the North American Great Plains: Effect of Cropping Frequency. *Agronomy Journal*, Vol. 97, pp.

- 349–363,
DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0349>
- Chang, K. W., Cho, S. H. and Kwak, J. H. (1999). Changes of Soil Physico-chemical Properties by Repeated Application of Chicken and Pig Manure Compost. *Journal of the Korea Organic Waste Recycling Council*, Vol. 7(1), pp. 23–30. [Korean Literature]
- Choi, E. J., Suh, S. U., Jeong, H. C., Lee, J. S., Kim, G. Y. and So, K. H. (2014). A Review on the Carbon Exchange Estimation in Fruit Orchard. *Journal of Climate Change Research*, Vol. 5(4), pp. 339–348.
DOI: <http://dx.doi.org/10.15531/KSCCR.2014.5.4.339> [Korean Literature]
- Chung, D. Y. and Lee, K. S. (2008). Role of Chemical Fertilizer and Change of Agriculture in Korea. *Korean Journal of Agricultural Science*, Vol. 35(1), pp. 69–83. [Korean Literature]
- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trxler, M. C. and Wisniewski, J. (1994). Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, Vol. 263, pp. 185–190.
- Gregorich, E. G., Rochette, P., VandenBygaart, A. J. and Angers, D. A. (2005). Greenhouse Gas Contributions of Agricultural Soils and Potential Mitigation Practices in Eastern Canada. *Soil and Tillage Research*, Vol. 83, pp. 53–72.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.009>
- Han, Y. S., Nam, H. S., Park, K. L., Lee, Y. M., Lee, B. M. and Park, K. C. (2020). Evaluation of Soil Carbon Storages in the Organic Farming Paddy Fields. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, Vol. 28(1), pp. 73–82.
DOI: <https://doi.org/10.17137/korrae.2020.28.1.73> [Korean Literature]
- Hong, S. G., Sin, J. D., Park, K. L., Lee, S. B., Kim, S. H., Kim, S. C., Shiedung, H. and Amelung, W. (2015). Feasibility of Analyzing Soil Organic Carbon Fractions using Mid-Infrared Spectroscopy. *Journal of the Korea Organic Resource Recycling Association*, Vol. 23(3), pp. 85–92,
DOI : 10.17137/korrae.2015.23.3.085 [Korean Literature]
- Hu, H. and Wang, G. G. (2008). Changes in Forest Biomass Carbon Storage in the South Carolina Piedmont between 1936 and 2005. *Forest Ecology and Management*, Vol. 255(5–6), pp. 1400–1408.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.064>
- Hwang, S. A., Bae, H. S., Lee, S. H., Kang, J. G., Kim, H. K. and Lee, K. B. (2013). Changes of Soil Properties and Rice Quality by Long-Term Application of Rice Straw and Rice Straw Compost in Paddy Field. *Journal of Agriculture & Life Sciences*, Vol. 44(2), pp. 65–70. [Korean Literature]
- IPCC. (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Pachauri, R. K. and Meyer, L. A. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. pp. 151.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Al Khouradajie, A., van Diemen, R., McCollum, D., Pathak, M., Some, S., Vyas, P., Fradera, R., Belkacemi, M., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S. and Malley, J. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. pp. 1–34.
- Jang, I. Y., Jeong, H. M., Han, S. H., Ahn, N. H., Kim, D. Y. and Kang, S. R. (2023). Estimation of Carbon Storages and Fluxes by Ecosystem Type in Korea. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 25(4), pp. 417–425.
DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2023.25.4.417> [Korean Literature]
- Jo, H. K., Park, S. M., Kim, J. Y. and Park, H. M. (2014). Carbon Uptake and Emissions of Apple Orchards as a Production-type Greenspace. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, Vol. 42(5), pp. 64–72.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9715/KILA.2014.42.5.064> [Korean Literature]
- Kim, G. Y., Lee, J. S., Lee, S. I., Jeong, H. C., Choi, E. J. and Na, U. S. (2017). Evaluation of Carbon Balance for Carbon Sink/Emission with Different Treatments in Paddy Field. *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 35(4), pp. 715–725.
DOI: <https://doi.org/10.11626/KJEB.2017.35.4.715> [Korean Literature]
- Kim, G. Y., Suh, S. U., Ko, B. G., Jeong, H. C., Roh, K. A. and Shim, K. M. (2008). Evaluation of CO₂ Balance in the Barley-Red Pepper and Barley-Soybean Cropping System. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 41(6), pp. 408–414. [Korean Literature]
- Kim, J. D., Kim, S. G. and Kwon, C. H. (2006). Effect of Tillage System and Fertilizer Type on the Forage Yield, Quality, and Production Cost of Winter Rye. *Journal of Animal Science and Technology*, Vol. 48(1), pp. 115–122. [Korean Literature]
- Kim, L. Y., Cho, H. J. and Han, K. H. (2004). Changes of Physical Properties of Soils by Organic Material Application in Farm Land. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 37(5), pp. 304–314. [Korean Literature]

- Kirkby, C. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Conyers, M. and Kirkegaard, J. A. (2014). Carbon–Nutrient Stoichiometry to Increase Soil Carbon Sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 68, pp. 57–69.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.011>
- Kundu, S., Ranjan, B., Ved, P., Ghosh, H. B. and Gupta, H. S. (2007). Carbon Sequestration and Relationship between Carbon Addition and Storage under Rainfed Soybean–Wheat Rotation in a Sandy Loam Soil of the Indian Himalay. *Soil and Tillage Research*, Vol. 92, pp. 87–95, DOI : 10.1016/j.still.2006.01.009
- Kuzyakov, Y., Friedel, J. K. and Stahr, K. (2000). Review of Mechanisms and Quantification of Priming Effects. *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 32(11–12), pp. 1485–1498. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00084-5)
- Kwon, S. I., Lee, Y. H., Hwang, H. Y. and Kim, S. H. (2022). Long–Term Application Effects of Soil Amendments on Yield and Soil Properties in Paddy. *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association*, Vol. 30(1), pp. 5–11. [Korean Literature]
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R. and Karlen, D. (2010). Biochar Impact on Nutrient Leaching from a Midwestern Agricultural Soil. *Geoderma*, Vol. 158(3), pp. 436–442.
DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.05.012
- Lee, C. H., Jung, K. Y., Kang, S. S., Kim, M. S., Kim, Y. H. and Kim, P. J. (2013). Effect of Long Term Fertilization on Soil Carbon and Nitrogen Pools in Paddy Soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 46(3), pp. 216–222, DOI: <http://dx.doi.org/10.7745/KJSSF.2013.46.3.216> [Korean Literature]
- Lee, K. S., Yoon, K. S., Choi, D. H., Jung, J. W., Choi, W. J. and Lim, S. S. (2013). Agricultural Soil Carbon Management Considering Water Environment. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 22(1), pp. 1–17. [Korean Literature]
- Lee, N. Y. (2012). Estimation of Carbon Storage in Three Cool–Temperate Broad–Leaved Deciduous Forests at Jirisan National Park, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 30(2), 121–127. [Korean Literature]
- Lee, S. I., Lee, J. S., Kim, G. Y., Choi, E. J., Suh, S. U. and Na, U. S. (2016). Effect of Carbonized Biomass Derived from Pruning on Soil Carbon Pools in Pear Orchard. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, Vol. 35(3), pp. 159–165.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2016.35.3.26> [Korean Literature]
- Liu, L., Zhang, T., Gilliam, F. S., Gundersen, P., Zhang, W., Chen, H. and Mo, J. (2013). Interactive Effects of Nitrogen and Phosphorus on Soil Microbial Communities in a Tropical Forest. *PLOS ONE*, Vol. 8(4), e61188.
DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061188>
- McCarl, B. A. and Schneider, U. A. (2001). Greenhouse Gas Mitigation in U.S. Agriculture and Forestry. *Science*, Vol. 294, pp. 2481–2482.
DOI: 10.1126/science.1064193
- Ministry of Education, Science and Technology. (2013). Estimation of Carbon Storage in Cropland Using Remote Sensing. Ministry of Education, Science and Technology. Seoul.
- National Institute of Agricultural Science. (2013). Assessment of Organic Carbon Cycling in Agricultural Land within the Green Village. National Institute of Agricultural Science. WanJu.
- Natural Resources Conservation Service. (2013). Soil Electrical Conductivity. Soil health for Educators. USDA Natural Resources Conservation Service.
- No, H. J. and Jeong, H. Y. (2002). Well–Defined Statistical Analysis according to Statistica. Hyeonseol Publisher, Seoul.
- Ok, Y. S., Lim, S. and Kim, J. G. (2002). Electrochemical Properties of Soils: Principles and Applications. *Life Science and Natural Resources Research*, Vol. 10, pp. 69–84. [Korean Literature]
- Pennisi, B. V. and Thomas, P. A. (2015). Essential pH Management in Greenhouse Crops: pH and Plant Nutrition. Extension Floriculture Specialists, The University of Georgia.
- Ro, H. M., Choi, J. H., Lee, S. Y., Lee, T. K., Kim, J. S., Park, J. S., Choi, J. J. and Lee, M. J. (2015). Annual Increase in Carbon and Nitrogen Stocks of Trees and Soils in a ‘Nittaka’ Pear Orchard Following Standard Fertilization Recommendations. *Horticultural Science & Technology*, Vol. 33(4), pp. 591–597. [Korean Literature]
- Rural Development Administration. (2017). Study of Carbon Balance for the Evaluation of Agricultural GHGs Emissions. Rural Development Administration. Jeonju.
- Schlesinger, W. H. (2000). Carbon Sequestration in Soils: Some Caution Amidst Optimism. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 82, pp. 121–127.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00221-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00221-8)
- Shim, K. M., Min, S. H., Kim, Y. S., Jung, M. P. and Choi, I. T. (2015). Estimation of Net Biome Production in a Barley–Rice Double Cropping Paddy Field of Gimje, Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 17(2), pp. 173–181.
DOI: 10.5532/KJAFM.2015.17.2.173 [Korean Literature]
- Shim, K. M., Min, S. H., Kim, Y. S., Jung, M. P., Choi, I. T. and Kang, K. K. (2016). Comparison of Carbon Budget between Rice–barley Double Cropping and Rice Mono Cropping Field in Gimje, South Korea. *Korean Journal of Agricultural*

- and Forest Meteorology*, Vol. 18(4), pp. 337–347.
DOI: 10.5532/KJAFM.2016.18.4.337 [Korean Literature]
- Su, Y. Z., Wang, F., Suo, D. R., Zhang, Z. H. and Du, M. W. (2006). Long-Term Effect of Fertilizer and Manure Application on Soil-Carbon Sequestration and Soil Fertility under the Wheat-Wheat-Maize Cropping System in Northwest China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Vol. 75, pp. 285–295.
- Suh, S. U., Choi, E. J., Jeong, H. C., Lee, J. S., Kim, G. Y., Lee, J. S. and Sho, K. H. (2015). The Study on Carbon Budget Assessment in Pear Orchard. *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 33(3), pp. 345–351.
DOI: <https://doi.org/10.11626/KJEB.2015.33.3.345> [Korean Literature]
- Wang, C., Mori, T., Mao, Q., Zhou, K., Wang, Z., Zhang, Y., Mo, H., Lu, X. and Mo, J. (2020). Long-Term Phosphorus Addition Downregulates Microbial Investments on Enzyme Productions in a Mature Tropical Forest. *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 20, pp. 921–930.
- Waring, R. H. and Running, S. W. (1998). *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales*. Academic Press, Cambridge.
- Yoo, G. Y., Kim, H. J., Kim, Y. S. and Jung, M. H. (2012). Soil Carbon and Microbial Activity Influenced by Pasture and Rice Paddy Management. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 45(3), pp. 435–443.
DOI: 10.7745/KJSSF.2012.45.3.435 [Korean Literature]
- Zhao, F., Yu, H., Wang, B., Jiao, F. and Huang, J. (2023). Response of Plant-Bacteria-Soil System to Phosphorus addition under Simulated Nitrogen Deposition: Evidence from a Dryland Ecosystem. *Plant and Soil*, Vol. 489, 593–611.
DOI: 10.1007/s11104-023-06043-1

Appendix

Appendix 1. Results of previous studies on soil carbon storage and soil respiration, and soil environmental factors by detailed types of agricultural ecosystems used in analysis (SOC: Soil Organic Carbon (ton C ha⁻¹), SR: Soil Respiration (ton C ha⁻¹ yr⁻¹), pH: Soil pH, EC: Electrical Conductivity (ds/m), SOM: Soil Organic Matter (g/kg), TN: Total Nitrogen (g/kg), AP: Available Phosphorus (mg/kg), K: Exchangeable Potassium (cmol+/kg), Ca: Exchangeable Calcium (cmol+/kg), Mg: Exchangeable Magnesium (cmol+/kg))

Ecosystem Types	Result		Environmental Factor								Reference
	SOC	SR	pH	EC	SOM	TN	AP	K	Ca	Mg	
Paddy Field	27.3 (n=1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Ministry of Education, Science and Technology, 2013
	-	5.6~6.8 (n=2)	5.6 (n=1)	-	32.3 (n=1)	-	-	-	-	-	Shim <i>et al.</i> , 2015
	-	10.6~12.7 (n=2)	-	-	32.3 (n=1)	-	-	-	-	-	Shim <i>et al.</i> , 2016
	19.4~44.9 (n=12)	-	5.5~6.6 (n=12)	0.3~1.0 (n=12)	16.0~38.7 (n=12)	0.8~2.0 (n=12)	56~115 (n=12)	0.1~0.6 (n=12)	3.0~9.1 (n=12)	0.6~2.8 (n=12)	Han <i>et al.</i> , 2020
Field	-	-	5.2 (n=1)	-	13.5 (n=1)	1.0 (n=1)	268 (n=1)	0.3 (n=1)	7.6 (n=1)	1.9 (n=1)	National Institute of Agricultural Science, 2013
Facility Cultivation Area	-	6.9 (n=1)	-	-	-	-	-	-	-	-	Rural Development Administration, 2017
	-	1.0~10.4 (n=10)	5.8 (n=1)	0.3 (n=1)	18.3 (n=1)	-	150 (n=1)	0.6 (n=1)	5.5 (n=1)	-	Kim <i>et al.</i> , 2008
Facility Cultivation Area	1.1~6.5 (n=9)	0.7~2.2 (n=9)	6.2~7.1 (n=7)	0.5~0.7 (n=7)	7.8~13.8 (n=7)	0.06~0.08 (n=7)	117~176 (n=7)	0.3~0.6 (n=7)	4.4~7.2 (n=7)	0.6~3.9 (n=7)	Kim <i>et al.</i> , 2017
	45.1~71.2 (n=6)	-	5.8~6.3 (n=6)	-	18.0~39.0 (n=6)	-	20~120 (n=6)	0.1~0.5 (n=6)	4.5~6.7 (n=6)	1.0~1.4 (n=6)	Byeon <i>et al.</i> , 2023
Orchard	-	8.0 (n=1)	-	-	-	-	-	-	-	-	Rural Development Administration, 2017
	-	0.9~1.6 (n=2)	4.2~5.6 (n=2)	-	-	-	176 (n=1)	0.3~0.8 (n=2)	1.15~1.22 (n=2)	0.8~1.3 (n=2)	Jo <i>et al.</i> , 2014
	40.1~57.8 (n=3)	-	7.1~7.2 (n=3)	0.7 (n=3)	32.1~54.9 (n=3)	1.7~2.3 (n=3)	-	1.2~1.6 (n=3)	9.5~12.6 (n=3)	1.6~1.9 (n=3)	Lee <i>et al.</i> , 2016