

옥수수 재배지의 유기자원 처리와 무경운이 온실가스 배출 및 토양 유기탄소에 미치는 영향

이영돈^{1#}, 주진호^{2#}, 노수빈², 박병준², 정석순¹, 이상민³, 김혁수^{2*}

Effects of Organic Amendments with No-Tillage on Greenhouse Gas Emissions and Soil Organic Carbon in Maize (*Zea mays*) Fields

Young-Don Lee ^{1#}, Jin-Ho Joo ^{2#}, Su-Bin Noh ², Byung-Jun Park ², Seok-Soon Jeong ¹, Sang-Min Lee ³ and Hyuck-Soo Kim ^{2*}

¹강원대학교 농업생명과학연구원, ²강원대학교 농업생명과학대학 환경융합학부, ³농촌진흥청 국립농업과학원 재생유기농업과

¹Agriculture and Life Science Research Institute, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea,

²Department of Biological Environment, College of Agriculture and Life Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea, ³Senior Researcher, Regenerative Organic Agriculture Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

* Correspondence: kimhs25@kangwon.ac.kr

These authors contributed equally to this work.

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.42>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 443-452

Received: October 1, 2025

Revised: November 12, 2025

Accepted: November 24, 2025

Published: December 8, 2025

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2025



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

Abstract: This study analyzed the effects of tillage management and organic amendments on soil properties, greenhouse gas (GHG) emissions, soil organic carbon (SOC) and maize growth in an organic farming system. The results showed that tillage increased carbon dioxide (CO₂) emissions, whereas organic amendments initially increased nitrous oxide (N₂O) emissions but gradually decreased over time. Methane (CH₄) emissions remained low regardless of tillage conditions. Organic amendments application had a positive effect on SOC accumulation, with compost treatment showing the highest SOC and mineral-associated organic matter (MAOM) content, demonstrating its potential for stable carbon storage. The net ecosystem carbon budget (NECB) analysis revealed that no-tillage with organic amendments application led to a net carbon sequestration effect, with compost treatment recording the highest NECB value. These findings confirm that compost can effectively reduce GHG emissions while enhancing soil carbon storage. Furthermore, organic amendments such as compost can serve as a sustainable alternative to chemical fertilizers, contributing to the reduction of GHG emissions and improving carbon sequestration in soil. Proper combinations of tillage practices and organic amendments can maintain crop productivity while promoting sustainable agriculture.

Keywords: Greenhouse gases, Mineral associated organic matter, Net ecosystem carbon budget, Organic Fertilizer, Soil organic carbon

서 론

현재 우리나라 온실가스 총 배출량은 2022년도 기준 약 724.3백만 톤으로 전년도 대비 2.3% 감소한 수치이지만 여전히 많은 양의 온실가스가 배출되고 있다. 이 중 농업 분야는 전체 배출량의 3.21% 차지하며, 2022년 기준 23백만 톤을 배출하였다. 비록 농업 분야가 전체 3%로 전체 온실가스 배출량에서 차지하는 비율은 낮지만, 농업 분야가 기후변화에 민감하다는 점을 고려할 때 온실가스 배출 감축 및 대응을 위한 지속 가능한 농업 정책의 필요성이 그 어느 때보다 분명해졌다[1].

전 세계적으로 온실가스 배출로 인한 이상기후는 가뭄, 홍수, 폭염 등과 같은 자연재해를 초래하며, 막대한 인명피해와 경제적 피해를 일으키고 있다. 이를 해결하고자 국제 사회는 탄소배출 감축 목표를 상향 조정하였고, 각국은 정책적 지원과 혁신 기술 개발에 대한 투자를 확대하며, Net-Zero 달성을 위한 실질적인 대책 마련에 주력하고 있다. IPCC는 이러한 기후위기 대응의 일환으로, 2010년 대비 2030년까지 온실가스 배출량을 최소 45% 감축하고, 2050년까지 탄소중립을 달성해야 한다는 글로벌 로드맵을 제시하였다[2].

유기농업은 화학 합성 농약, 무기질비료, 성장 촉진제 등을 사용하지 않으며, 자연 생태계의 순환과 균형을 유지하며 농작물을 재배하거나 가축을 기르는 농업 방식을 의미한다[3]. 유기농업은 관행농업에 비해 에너지 소비(연료, 화학 합성 농약 및 비료 등)가 적고, 농업 활동 중 발생하는 온실가스 배출을 줄이는 데 기여한다[4]. 더불어 유기농업은 토양 내 탄소 저장, 침식방지, 생물의 다양성 증진, 생태환경 개선 등 생태계 전반에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[5,6]. 특히 유기농업에서 활용되는 유기탄소 저장량은 1 ha당 약 37.4톤으로 이는 관행농업에 비해 약 11톤 더 높은 수치로 보고되었다[7]. 이러한 특징은 유기농업 방식이 토양의 물리·화학적 특성을 개선하고 토양 내 유기탄소의 축적을 통해 온실가스 감축에 기여하며, 생물다양성을 유지하고 보전하는 지속 가능한 농업의 형태로 자리 잡고 있음을 보여준다[8]. 작물 재배 전 토양을 물리적으로 교반하는 것을 일반적으로 경운이라고 하며, 반대로 토양 교란을 최소화하거나 생략하는 방식을 무경운으로 정의한다. 무경운 재배는 경운으로 인한 양분 손실을 최대한 줄일 수 있고 농경지로부터 온실가스 배출을 저감하는 효과가 있어 최근 온실가스 감축을 위한 농업기술로 주목받고 있다[9].

따라서 본 연구의 목적은 경운 유무와 유기자원 처리가 유기농업 옥수수 재배지에서의 온실가스 배출량 그리고 토양 유기탄소에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

결과 및 고찰

작물 수확 전후 토양화학성 변화

옥수수 재배지의 수확 전 토양화학성을 분석한 결과(Table 1), pH는 평균 6.3으로 나타났으며, EC 역시 평균 0.08 ds/m 수준이었고 두 항목 모두 경운 유무와 유기자원 처리에 따라 통계적으로 유의적인 차이를 보였다. 특히 토양 유기물 함량(O.M)과 유효인산(Avail. P_2O_5) 농도에서는 처리 간 뚜렷한 차이를 나타냈으며, 통계적 유의성 검정에서도 무처리구 < NPK < 유박 < 퇴비 처리구 순으로 증가하는 경향이 확인되었다. 교환성 양이온 중에서는 Ca 함량이 퇴비 처리 시 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Lee 등[21]의 연구에서 가축분 퇴비 시용이 유효인산과 교환성 양이온 함량을 증가시키는 것으로 보고된 바 있으며, 특히 무기질 비료(NPK) 처리 대비 유효인산이 증가한다고 제시한 결과와 일치한다. 본 연구에서도 수확 전 경운 지역의 퇴비처리구의 유효인산 함량이 무기질 비료 처리에 비해 현저히 증가하는 경향을 보였으며, 이는 선행 연구에서 제시된 경향과 유사한 결과이다. 수확 후 토양에서도 수확 전과 비슷한 경향을 나타냈으나, 전반적으로 유효인산과 Ca 이온의 함량이 감소한 것으로 나타났다(Table 1). 이는 재배 기간 동안 작물의 흡수와 강수로 인한 용탈에 의한 것으로 사료된다[22].

옥수수 재배기간 중 온실가스 배출 특성

유기자원 처리 및 경운 유무에 따른 옥수수 재배지에서 메탄(CH_4) 배출량을 평가한 결과는 Fig. 1과 같다. 메탄의 경우 밭 토양은 논 토양에 비해 호기적 조건이며, 메탄 생성에 필요한 혐기성 환경이 조성되지 않기에 경운, 무경운 지역에서 모두 배출량에 큰 변화 없이 낮은 CH_4 발생량을 나타냈다[23].

Table 1. Chemical properties of soil used in this study

Treatments		pH	EC	O.M	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Ca	Exch. K	Exch. Mg	Exch. Na
		1:5	dS/m	g/kg	mg/kg	cmol/kg			
Before harvest	Tillage	Control	6.3cde*	0.06e	17.06f	259.68e	7.65c	0.22e	3.07a
		NPK	6.4bc	0.06e	21.12e	344.78c	7.35c	0.26d	2.88bc
		Oil-cake	5.9e	0.08c	22.44de	441.33b	7.16cd	0.27d	2.84c
		Compost	6.8ab	0.10b	28.35b	440.05b	10.38b	0.30c	3.03ab
	No-Tillage	Control	6.4bcd	0.07d	22.64d	309.97d	7.30c	0.32c	2.83c
		NPK	6.1cde	0.06e	21.97de	353.39c	6.42e	0.35b	2.55d
		Oil-cake	5.9de	0.08c	24.78c	431.99b	6.70de	0.30c	2.78c
		Compost	6.9a	0.13a	32.86a	742.88a	12.51a	0.66a	2.91abc
Post harvest	Tillage	Control	6.1ef	0.16g	18.92cd	226.44e	5.78e	0.14f	2.37e
		NPK	6.5b	0.21de	19.80cd	277.04d	6.60c	0.18d	2.73b
		Oil-cake	6.1f	0.19f	16.43d	312.84c	6.85b	0.17e	2.79a
		Compost	7.1a	0.36b	26.33ab	461.89b	8.79a	0.20c	2.67bc
	No-Tillage	Control	7.1a	0.22a	22.99bc	272.74d	6.06d	0.20c	2.53d
		NPK	6.4c	0.20d	19.77cd	290.07d	5.84e	0.22b	2.47d
		Oil-cake	6.1e	0.24ef	20.24cd	328.29c	6.17d	0.18e	2.61c
		Compost	6.3d	0.35c	28.55a	596.55a	8.79a	0.30a	2.49d

* The different letters indicate significance according to the organic material treatments in Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

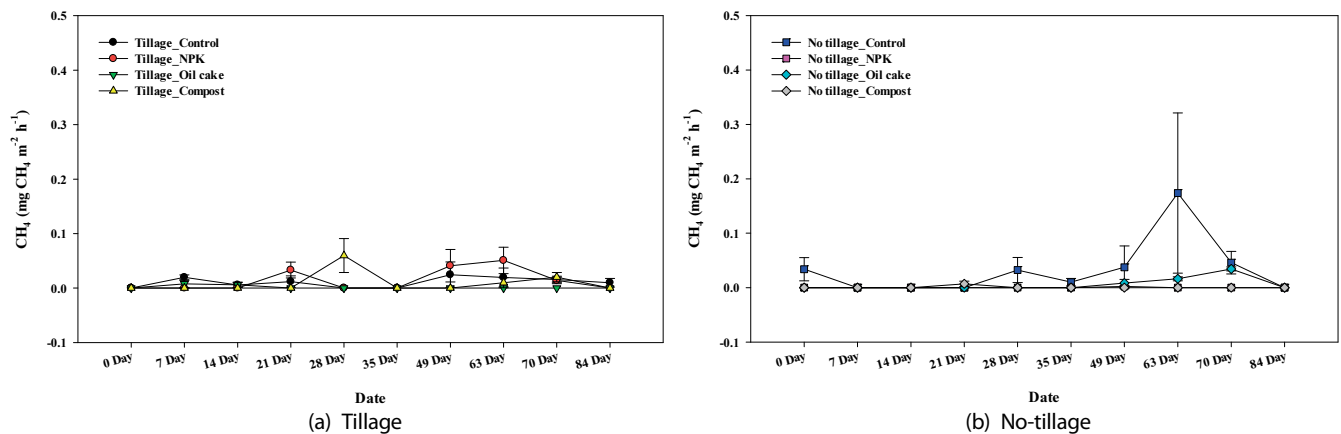


Fig. 1. CH₄ fluxes during the organic maize cultivation period. Error bars represent standard deviations (n=3).

반면 이산화탄소(CO₂)의 경우 경운 지역의 퇴비 처리구가 옥수수 정식 49일(2417.48 mg CO₂/m²/h)과 70일(2315.12 mg CO₂/m²/h)차에 다른 처리구 대비 가장 높은 이산화탄소 배출량을 나타냈다(Fig. 2(a)). 이는 경운 과정 중 토양 입단(aggregate)을 분해하여 내부에 있던 CO₂가 방출되어 나타난 결과로 판단된다[24].

아산화질소(N₂O) 배출량은 정식 1주차 경운, 무경운 지역 모두 유박처리구가 가장 높은 값을 나타냈으며, 2주차가 지나고 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). Lee 등[25]의 연구에서는 질소질 비료원인 유박 투입 후 2일째부터 N₂O 배출량이 급격히 증가하여 투입 8일째 최대치를 기록하였으며, 본 연구에서도 투입 7일차에 최고 배출량이 나타내며 유박 처리 시 단기간 내 N₂O 배출이 집중되는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 초기 투입된 유박이 토양 내 질소의 가용성을 높여 호기성 질산화 미생물이 증가되고 이로 인해 N₂O 배출량을 증가시킨 결과로 판단된다.

옥수수 재배 중 온실가스 누적 배출량을 분석한 결과는 Fig. 4와 같다. CH₄의 경우 무경운 지역에서 무처리구가 가장 높은 배출량을 나타냈으며(Fig. 4(a)), CO₂는 경운과 무경운 모두에서 처리구간 통계적으로 유의적인 차이를 보이지 않았으나 특히

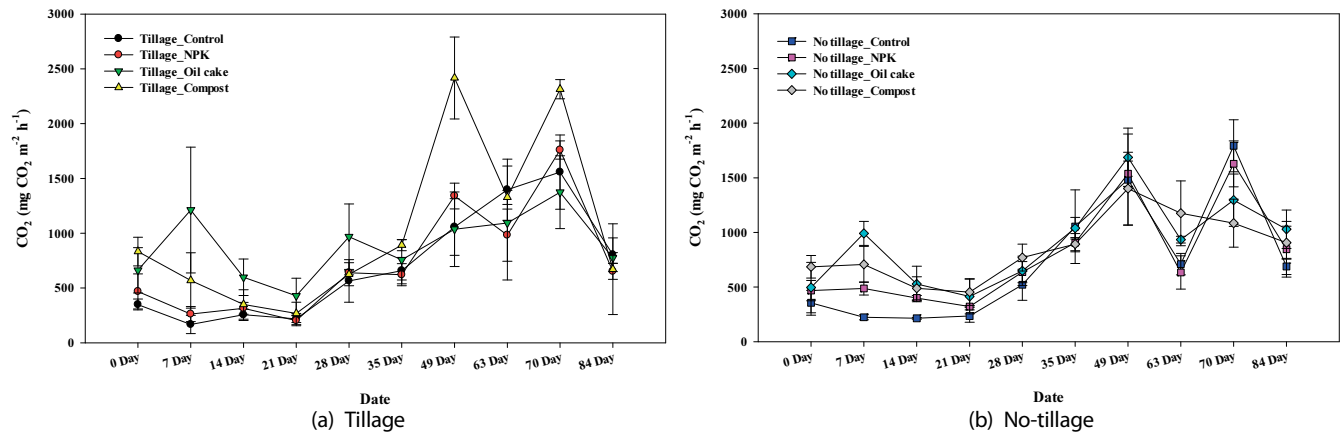


Fig. 2. CO₂ fluxes during the organic maize cultivation period. Error bars represent standard deviations (n=3).

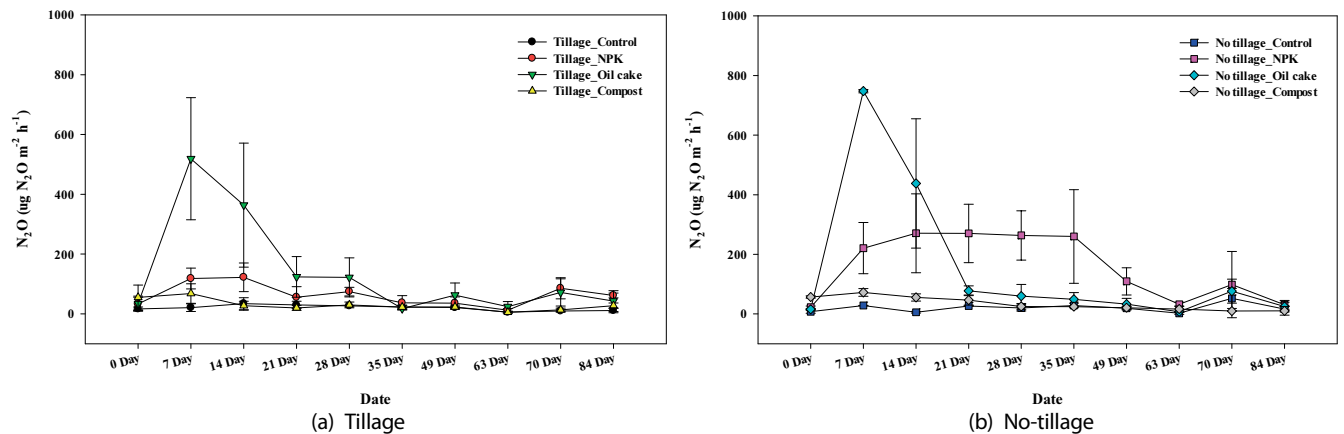


Fig. 3. N₂O fluxes during the organic maize cultivation period. Error bars represent standard deviations (n=3).

경운 퇴비 처리 시 상대적으로 높은 누적 배출량을 확인하였고 이는 일 배출량 결과와 유사한 결과를 보였다(Figs. 4(a), 4(b)). 반면 N₂O의 경우 경운 NPK 처리가 유박처리와 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았지만 높은 N₂O 누적 배출량을 보였는데(Fig. 4(c)), 이는 초기 투입된 NPK의 무기태질소(NO₃⁻)가 미생물에 의해 탈질화 반응이 활발해지고 이로 인해 N₂O 배출을 촉진시켜 나온 결과로 사료된다. 또한 N₂O는 질산화 및 nitrifier-denitrification 등 다양한 경로를 통해 생성될 수 있으며, 경운과 무경운 지역에 따른 토양 통기성 및 수분 조건의 차이가 이러한 반응 경로의 상대적 기여에 영향을 미친 것으로 판단된다[26].

옥수수 재배지의 안정화된 토양 탄소 변화

옥수수 수확 후 토양의 SOC는 유박 및 퇴비 처리구에서 모두 통계적으로 유의하게 증가했으며(Fig. 5), MAOM 함량 역시 SOC 함량과 유사한 경향으로 증가하였다(Fig. 6). 반면 경운 지역에서는 무경운에 비해 다소 낮은 MAOM 함량을 보였는데 이는 단순 유기물 처리에 따른 증가가 아니라, 점토 및 철(Fe), 알루미늄(Al) 산화물과 같은 무기 입자와 미생물에 의해 분해된 유기물(necromass)의 상호 작용을 통해 무경운 지역에서 MAOM이 더 많이 형성되어 나온 결과로 판단된다[27]. 선행 연구에 따르면, 무경운 및 최소 경운 시 0~30 cm 깊이에서 토양 SOC 함량이 관행 경운 대비 약 21% 높고, macroaggregate 형성이 촉진되어 토양 안정성을 향상시키지만 규칙적인 경운은 무기입자 및 유기물 간의 결합을 억제하여 MAOM 함량을 낮추는 경향이 있다[28].

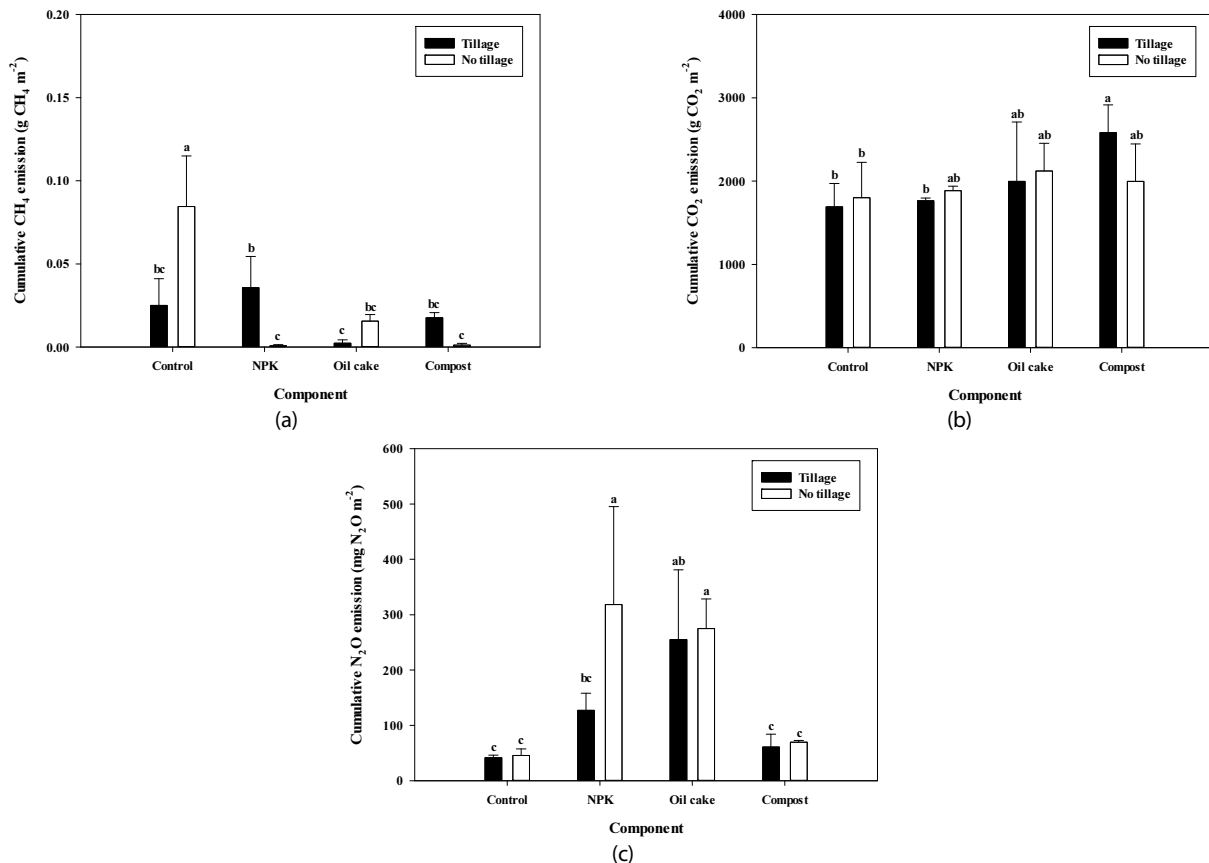


Fig. 4. Cumulative greenhouse gas emissions in maize field. The different letters indicate significance according to the organic material treatments in Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

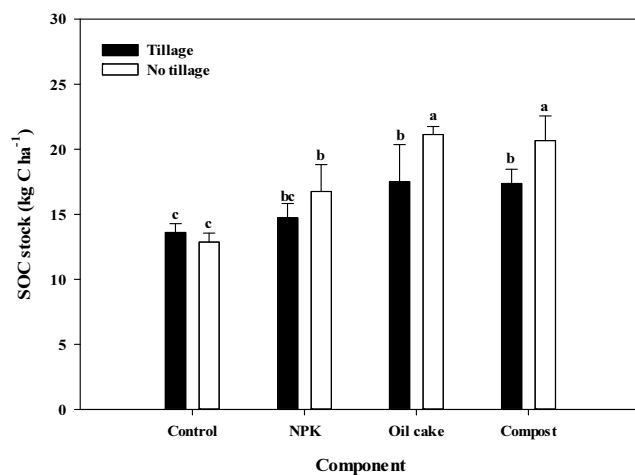


Fig. 5. SOC stock content of organic maize cultivation fields. The different letters indicate significance according to the organic material treatments in Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

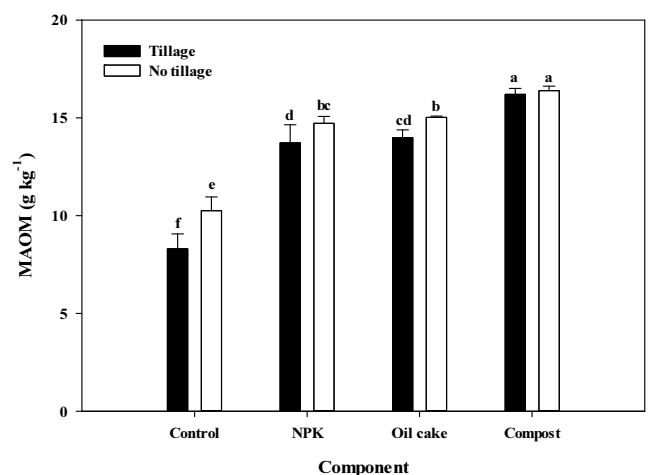


Fig. 6. Mineral associated organic carbon content of organic maize fields. The different letters indicate significance according to the organic material treatments in Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

경운 유무와 유기자원 처리에 따른 옥수수 수확량 변화

경운 유무와 유기자원 처리에 따른 옥수수 생육과 수량은 무경운 지역보다 경운 지역에서 전반적으로 높게 나타났다(Table 2). 이는 경운을 통해 토양 물리성이 개선되고, 경운 과정에서 비료와 유기물이 토양 내 균일하게 혼합됨으로써 양분 가용성이

Table 2. Results of maize growth and yield

Treatments		Ear length	Ear width	Hundred kernel weight	Yield
		cm		FW/g	kg/10a
Tillage	Control	20.50±1.50ab*	11.00±2.58b	33.20±3.21c	482.27±137.83b
	NPK	19.30±1.65ab	15.23±0.65a	39.30±0.80a	901.60±75.03a
	Oil-Cake	21.00±0.53a	15.25±1.17a	37.07±0.51ab	1045.20±153.15a
	Compost	18.83±0.74ab	14.57±0.72a	34.00±1.11c	848.27±8.81a
No-Tillage	Control	17.13±3.16b	13.21±0.56a	33.17±1.15c	559.47±83.14b
	NPK	19.97±2.57ab	14.65±0.83a	38.20±2.07ab	886.53±193.83a
	Oil-Cake	19.47±0.93ab	14.34±0.35a	35.83±1.04bc	773.87±104.18a
	Compost	21.43±1.44b	14.26±0.46a	29.93±1.68d	868.00±37.20a

* The different letters indicate significance according to the organic material treatments in Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

Table 3. Seasonal organic carbon input and output during the maize growing period

Treatments		Carbon input (kg C/10a)				Carbon output (kg C/10a)				NECB (kg C/10a)
		Above ground	Below ground	Organic amendments	Sum [A]	CH ₄	CO ₂	Harvest removal	Sum [B]	[A-B]
Tillage	Control	489.2	153.8	0.0	643.0	0.0	461.5	195.7	657.2	-14.2
	NPK	908.8	285.6	0.0	1194.4	0.0	481.1	363.5	844.6	349.8
	Oil-cake	1113.7	350.0	66.1	1529.9	0.0	544.7	445.5	990.2	539.7
	Compost	857.6	269.5	183.8	1310.9	0.0	704.3	343.0	1047.3	263.6
No-tillage	Control	567.6	178.4	0.0	745.9	0.1	491.0	227.0	718.1	27.8
	NPK	893.6	280.9	0.0	1174.5	0.0	514.0	357.5	871.5	303.0
	Oil-cake	824.6	259.2	66.1	1149.9	0.0	578.7	329.8	908.6	241.3
	Compost	877.5	275.8	183.8	1337.1	0.0	544.6	351.0	895.7	441.5

향상된 결과로 판단되었다[29]. 이삭장을 살펴보면, 경운 지역에서 유박 처리가 21.00 cm로 가장 높은 값을 나타냈으며, 통계적으로도 유의적인 차이를 보였다. 반면 무경운 지역에서는 퇴비 처리구가 21.43 cm로 가장 높은 값을 나타냈으나, NPK 및 유박 처리구와의 유의적인 차이는 확인되지 않았다. 수확량 또한 경운과 무경운 지역 모두에서 무처리구 대비 유기자원 처리구의 생산성이 유의하게 증가하였다. 이러한 증가 폭은 NPK 처리와 근사한 수치였다.

탄소수지(NECB) 분석을 통한 토양 탄소 저장량 평가

옥수수 재배기간 중 추가적인 탄소 투입원은 없었고, 그 결과(Table 3) 경운 지역에서 전체 처리구 중 NECB는 유박(539.7 kg C/10a)이 가장 높았으며, 이를 통해 유박이 토양 탄소 저장에 가장 효율적인 것으로 확인하였다. NPK 처리와 가축분 퇴비 처리는 비록 옥수수 수확량에서 유사한 수준을 보였으나, 퇴비 처리구에서 CO₂ 배출이 상대적으로 높아 NECB 결과에서 NPK 처리가 더 높은 값을 보여주었다. 반면 무경운 지역에서는 경운과는 다르게 모든 처리구가 양의 값을 나타냈으며, 가축분 퇴비 처리구가 441.5 kg C/10a로 가장 높은 NECB 값을 나타냈다. 이를 통해 유기자원(유박, 퇴비) 투입이 NECB 개선과 탄소 저장량 증가에 효과적임을 확인하였다[30].

결론

본 연구에서는 경운 유무와 유기자원 처리가 유기농업 환경에서 토양의 화학적 특성 변화, 온실가스 배출, SOC 및 탄소

저장량, 그리고 옥수수 생육과 수확량에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 온실가스 배출량에서는 유기자원(유박, 퇴비)을 투입할 경우 CO₂ 배출량이 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 경운 조건의 퇴비 처리구에서 통계적으로 유의적인 차이를 내며 높은 배출량을 확인하였다. 유박을 투입할 경우 초기 N₂O 배출을 높였으나 점차 감소하는 경향을 보여주었다. NECB 측면에서는 경운 지역에서는 유박 처리가 무경운 지역에서는 가축분 퇴비 처리가 가장 높은 NECB 값을 보이면서 유기자원 투입이 탄소 저감 및 저장에 효과적임을 확인하였다. 따라서, 경운 유무와 유기자원 처리를 적절히 조합할 경우 작물 생산성을 유지하면서 지속 가능한 농업을 실현할 수 있을 것으로 판단된다.

재료 및 방법

시험포장 및 처리구 설정

본 연구에서 사용된 공시 작물은 옥수수(*Zea mays*, 품종: 미백2호)를 사용하였으며, 시험 포장은 강원특별자치도 춘천시 신북읍 천전리 소재에 위치한 강원대학교 부속 농장 밭 토양에서 조성하였다. 처리구는 무처리구, 무기질 비료 표준시비(NPK), 퇴비, 유박 총 3개의 비료를 경운 유무에 따라 무경운, 경운(0~15 cm)으로 각각 구분하여 총 8개의 처리구를 조성하였다(각 처리구 면적: 9 m²). 모든 처리는 국립농업과학원 작물별 비료 사용 처방 중 보통 옥수수 표준 시비량에 따라 처방하였다[10]. 관행처리(무기질 비료) 시비량은 N-P₂O₅-K₂O 기준으로 18.6-3.5-7.4 kg/10a로 처리하였으며, 유박은 질소 투여량 기준으로 206 kg/10a, 퇴비는 우분, 계분, 돈분이 혼합된 가축분 퇴비를 760 kg/10a 각각 처리하였다.

경운 유무와 유기자원 처리에 따른 토양 화학적 특성분석

토양시료는 옥수수 재배 전과 옥수수 수확 후에 유기물층 제거 후 hand auger를 사용하여 토양깊이 0~15 cm에서 채취하였다. 수집한 토양 시료는 풍건하여 2 mm 체로 체거름한 뒤 본 연구 분석에 사용하였다. 분석 항목은 pH, 전기전도도(EC), 교환성 양이온, 유효인산, 유기물 등으로 분석은 토양 화학 분석법[11] 및 토양 및 식물체 분석법[12]에 준하여 수행하였다.

양분관리 기술별 온실가스 배출량 평가

옥수수 재배 기간 동안 밭 토양에서 발생하는 온실가스는 간이폐쇄정태법(챔버, Φ × H: 25 cm × 46 cm)을 활용하여 총 84일간 채취하였다. 샘플링 시기는 주 1회(오전 10시 30분~11시) 수행하였으며, 분석항목은 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 이산화탄소(CO₂)로 분석장비 GC(Agilent-8890_G3540A, Agilent, USA)를 사용하여 분석하였다. 온실가스 배출량 계산식은 다음의 식(Eq. 1)에 따라 계산하였다[13]. Eq. 1의 식을 바탕으로 계산된 온실가스 배출량을 통해 처리구별 온실가스 누적 발생량을 산정하였다(Eq. 2).

$$F = \rho \times \left(\frac{V}{A} \right) \times \left(\frac{\Delta C}{\Delta t} \right) \times \left(\frac{273}{T} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

F = 가스 발생량(g/kg/h), ρ = 가스 밀도(kg/m³), V = 챔버 내 공기체적(m³), A = 면적(m²),
 $\Delta C/\Delta t$ = 챔버 내 가스 농도의 평균 증가속도(농도변화/정치시간), T = 챔버 내 평균 기온(K)

$$\sum_{i=1}^n (R_i \times D_i) \quad \text{Eq. 2}$$

R_i = i 일의 온실가스 배출량, D_i = i 일의 시료 간격

토양 유기탄소 축적량(Soil organic carbon stock, SOC stock)

옥수수 재배과정 중 각 처리구 토양의 유기탄소 축적량은 토양 용적밀도, 유기탄소 함량을 통해 산출하였다. 토양 용적밀도는 옥수수 수확 후 코어 샘플링(Φ × H: 5 cm × 5 cm)을 통해 채취한 토양 시료를 105°C에서 건조한 뒤 측정하였다. 토양 유기탄소

(Soil organic carbon, SOC)는 유기물 함량에 환산 계수를 적용하여 계산하였으며, 토양 유기탄소 축적량은 Eq. 3을 이용하여 산출하였다[14].

$$\text{Soil organic carbon stock (kg C/ha)} = \text{Soil organic carbon (g/kg)} \times \text{Bulk density (kg/m}^3\text{)} \times \text{Depth (m)} \times (1 - \text{rock fragments fraction}) \quad \text{Eq. 3}$$

안정화된 토양 유기탄소(Mineral associated organic matter, MAOM)

Mineral associated organic matter (MAOM)은 토양 내 점토광물과 산화물 표면에 흡착되거나 기공 내에 포함된 유기물질을 의미하며, 안정적인 유기 혹은 무기 복합체를 형성함으로써 장기적으로 토양 유기탄소 저장에 기여하는 것으로 알려져 있다[15, 16]. 토양 내 MAOM 분석은 Christensen[17]의 방법을 기반으로 물리적 분획 과정을 통해 수행되었다. 2 mm 체거름한 토양 5 g에 증류수 100 mL를 첨가한 뒤 항온교반기(IST-3075 Jeio-tech, Korea)를 사용해 180 rpm으로 18시간 이상 교반하여 시료를 균질화하였다. 이후 입자 크기 분리를 위해 소니케이션(NXPC-B5020S, Kodo, Korea)을 활용하여 30분간 초음파를 가하였다. 초음파 처리된 토양 용액을 50 µm 체를 통해 입자 크기에 따라 모래와 미사, 점토를 분리하여 Dry oven을 사용해 80°C로 건조하였다. 건조된 시료는 Walkely black법을 통하여 MAOM의 유기물 함량을 분석하는 데 사용되었다.

옥수수 생육 조건 및 수확량 분석

2024년 5월 20일 각 처리구 조성 이후 5월 31일 옥수수 모종을 정식하였으며, 재식거리는 60 cm × 25 cm로 설정하였다. 최종 수확(8월 13일) 후 옥수수 생육 조사는 농업과학기술연구소의 분석 기준 중 보통 옥수수 수량 조사 방법[18]에 따라 실시하였다. 조사 항목은 종실중, 이삭장, 이삭폭, 개체당 생중량, 건중량, 백립중으로 구성되었으며, 이를 토대로 옥수수의 생육 변화와 수확량을 조사하였다.

순생태계탄소수지(Net ecosystem carbon budget, NECB) 산정

유기자원 처리와 경운 유무가 토양 탄소수지에 미치는 영향을 평가하기 위해 본 연구에서는 순생태계 탄소수지(Net Ecosystem Carbon Balance, NECB)를 Eq. 4에 따라 산정하였다. C input의 경우 탄소 유입량으로 비료와 같은 유기자원 식물의 잔재 등과 같은 기타 유기물의 총탄소를 말하며, C output은 탄소배출량으로서 CO₂, CH₄ 배출량, 수확 등과 같은 손실로 인한 총 탄소 배출량을 말한다. 처리된 유기자원과 무기질비료 그리고 옥수수의 지상부 및 지하부의 탄소 함량 분석은 원소분석기(Thermo, Flashsmart CHN/O, USA)를 활용하여 수행하였으며, 분석 결과를 단위 면적당 탄소 투입량으로 환산하여 작물생산 탄소량(Net Primary Production, NPP)를 산정하였다[19,20].

$$\text{NECB (kg C/10a/year)} = \Sigma \text{C input} - \Sigma \text{C output} \\ = (\text{NPP} + \text{Fertilizer} + \text{organic amendments}) - (\text{Respired C loss} + \text{Harvest removal}) \quad \text{Eq. 4}$$

통계분석

본 연구에서 진행된 모든 실험은 3회 반복으로 수행되었으며, 실험 결과로부터 도출된 평균값과 표준편차를 바탕으로 통계 분석을 진행하였다. 데이터 분석은 SAS 9.4 프로그램을 활용하였으며, 유의성 검정은 Duncan 다중 범위 검정(Duncan's Multiple Range Test)을 통해 $p < 0.05$ 수준에서 확인하였다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: Y.-D.L. and J.-H.J. writing-original draft preparation; S.-B.N. Data curation; B.-J.P. and S.-S.J. methodology; S.-M.L. collected the data; H.-S.K. supervision

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2022-RD010378)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.42>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Hyuck-Soo Kim.

Peer review information Agricultural and Environmental Sciences thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

1. Ministry of Environment (2025) 2024 National Greenhouse Gas Inventory (1990–2022) Publication (2006, 1996 IPCC guidelines).
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018) Special Report on Global Warming of 1.5°C. Incheon, Korea.
3. Lee YH, Lee SG, Kim SH, Shin JH, Choi DH, Lee YJ, Kim HM (2006) Investigation of the utilization of organic materials and the chemical properties of soil in the organic farms in Korea. *Korean Journal of Organic Agriculture*, 14(1), 55-67.
4. Kim BM, Lee CH, Yoon DH (2024) Growing spinach (*Spinacia oleracea* L.) organically in greenhouses can reduce greenhouse gas emissions. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 57(3), 141-153. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2024.57.3.141>.
5. Krauss M, Wiesmeier M, Don A, Cuperus F, Gattinger A, Gruber S, Haagsma WK, Peigné J, Chiodelli Palazzoli M, et al. (2022) Reduced tillage in organic farming affects soil organic carbon stocks in temperate Europe. *Soil and Tillage Research*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105262>.
6. Olivia MS, Abigail LC, John PR, David WC (2020) Landscape context affects the sustainability of organic farming systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(6), 2870-2878. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906909117>.
7. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2011) A report of the Round Table on Organic Agriculture and Climate Change. Rome, Italy.
8. Lee CR, Hong SG, Lee SB, Park CB, Kim MG, Kim JH, Park KL (2015) Physico-chemical properties of organically cultivated upland soils. *Korean Journal of Organic Agriculture*, 23(4), 875-886. <https://doi.org/10.11625/KJOA.2015.23.4.875>.
9. Burney JA, Davis SJ, Lobell DB (2010) Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(26), 12052–12057. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914216107>.
10. National Institute of Agricultural Sciences (2022) Fertilizer Application Recommendations for Crops, pp. 125-127, 5th ed, RDA, Wanju, Korea.
11. Rural Development Administration (RDA) (2010) Soil Chemical Analysis, National Institute of Agricultural Sciences, Korea.
12. Rural Development Administration (RDA) (2000) Soil and Plant Analysis, National Institute of Agricultural Sciences, Korea.
13. Rolston DE (1986) Gas flux. *Methods of Soil Analysis, Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 1103-1119.
14. Poeplau C, Vos C, Don A (2017) Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *Soil*, 3, 61-66. <https://doi.org/10.5194/soil-3-61-2017>.
15. Christensen BT (1996) Carbon in primary and secondary organomineral complexes, In: Carter MR, Stewart BA, *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. pp. 97-165, CRC Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.
16. Christensen BT (2001) Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 52(3), 345-353. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00417>.
17. Christensen BT (1992) Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Science*, 20, 1-90. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1.
18. Rural Development Administration (RDA) (2012) Standards for Research and Analysis in Agricultural Science and Technology, National Institute of Agricultural Sciences, Korea.
19. Liu Y, Tang H, Smith P, Zhong C, Huang G (2021) Comparison of carbon footprint and net ecosystem carbon budget under organic material retention combined with reduced mineral fertilizer. *Carbon Balance and Management*, 16, 7. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00170-x>.
20. Park DG, Jeong HC, Jang EB, Lee JM, Lee HS, Park HR, Lee SI, Oh TK (2024) Effect of rice hull biochar treatment on net ecosystem carbon budget and greenhouse gas emissions in Chinese cabbage cultivation on infertile soil. *Applied Biological Chemistry*, 67, 44.

<https://doi.org/10.1186/s13765-024-00903-9>.

21. Lee YH, Park SJ, Shim JH, Kwon SI, Kim SH (2021) Effect of livestock manure composts application on yield, soil chemical properties and carbon sequestration of maize cropping for five years. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 54(4), 636-642. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2021.54.4.636>.
22. Lee Y, Choi HS, Lee SM, Jung JA, Kuk YI (2012) Effects of organic materials on changes in soil nutrient concentrations and nutrient uptake efficiency in sorghum-sudangrass hybrid (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Journal of Bio-Environment Control*, 21(2), 108-113.
23. Kim SJ, Cho HS, Choi JS, Park KD, Jang JS, Kang SG, Park JH, Kim MT, Kang IJ, et al. (2016) Changes in methane emissions from paddy under different tillage and cultivation methods. *Korean Journal of Crop Science*, 61(4), 251-256. <https://doi.org/10.7740/kjcs.2016.61.4.251>.
24. Reicosky DC, Archer DW (2007) Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. *Soil and Tillage Research*, 94(1), 109-121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.004>.
25. Lee SI, Kim GY, Gwon HS, Lee JS, Choi EJ, Shin JD (2020) Effects of different nitrogen fertilizer and biochar applications on CO₂ and N₂O emissions from upland soil in the closed chamber. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 53(4), 431-445. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.4.431>.
26. Hassan MU, Chattha MU, Ullah A, Khan I, Aamer M, Khan TA, Ali Q, Shakeel A, Chattha MBS, et al. (2022) Management strategies to mitigate N₂O emissions in agriculture. *Life*, 12(3), 439. <https://doi.org/10.3390/life12030439>.
27. Argyris S, Christopoulos A, Patila N, Nikolaidis NP, Banwart S, Panagos P, Karyotis T, Kalogeropoulos K, Dalias P (2024) Stabilization mechanisms of mineral-associated organic matter (MAOM) in clay-rich agricultural soils. *Biogeosciences*, 21(6), 4077-4094. <https://doi.org/10.5194/bg-21-4077-2024>.
28. Mikha MM, Vigil MF, Benjamin JG (2012) Long-term tillage impacts on soil aggregation and carbon dynamics under wheat-fallow in the central great plains. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2), 594-605. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0125>.
29. Pikul JS, Jr. Huggins DR, Lamb JA (2003) Conservation tillage and crop rotation effects on soil physical properties and crop yields. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5), 1413-1421. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.0001>.
30. Gwon HS, Kim GY, Choi EJ, Lee SI, Lee JS. (2021) Greenhouse gas emissions characteristics in fallow paddy fields with water management during the cropping season: Net global warming potential (net GWP) estimation. *Journal of Climate Change Research*, 12(1), 1-13. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2021.12.1.001>.