

생태농업 실천농가의 온실가스배출 및 생물다양성 실태조사

유병덕* / 이시도르 지속가능연구소 소장

편제훈 / 이시도르 지속가능연구소 연구원

김유진 / 이시도르 지속가능연구소 팀장

윤지용 / 이시도르 지속가능연구소 팀장

이보은 / 농부시장마르쉐@ 대표이사

1. 연구 필요성

2022 국가 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면 2020년도 온실가스의 국가 총배출량 656.2백만 톤 CO₂eq. 중 농업 분야의 배출량은 약 21.1백만 톤 CO₂eq.으로 약 3.2%를 차지한다. 농업 분야의 배출 비중이 에너지 분야 86.8%, 산업공정 분야 7.4% 등 다른 분야보다 상대적으로 낮게 계산되어 온실가스를 적게 배출하는 분야라고 인식할 수 있지만, 농업 분야도 기후변화에 면제의 대상이 아니라 책임의 대상이다(이승헌, 2023).

국가온실가스인벤토리는 에너지 분야, 산업공정 분야, 농업 분야, LULUCF(Land Use, Land Use Change and Forestry) 분야, 폐기물 분야의 다섯 분야로 크게 분류하는데, 농업 분야는 직접적 농업생산 과정에 관계된 축산 장내발효, 가축 분뇨

* 유병덕(isidor@isidor.kr): 2013년 이시도르지속가능연구소를 설립하고 농업생태학의 가치를 확산하기 위한 연구를 10년 동안 지속해 오고 있다.

처리, 벼 재배, 농경지토양, 작물 잔사 소각의 다섯 부문에 국한하여 온실가스 배출량을 계산한다. 농업생산 과정의 비료 생산, 토지 전용, 냉·난방, 기계·설비, 운송, 식품가공, 조리 및 소매, 식품 폐기 등 간접적 농업 유관 활동들은 농업 분야 외 다른 분야들에 분산되어 계산이 이루어지고 있다.

세계 농식품 산업의 간접적 유관 활동 전부를 계산하면 지구상의 인간활동에 의한 온실가스 총 배출량(2022년 기준 406억 t)의 21-37%를 차지한다(IPCC, 2020). 이는 직접적 농업생산 과정만이 아니라 비료, 토지 등 투입하는 자원을 시작으로 음식을 섭취한 후 폐기하기까지 모든 과정을 계산한 결과이다. 이렇게 투입자원에서 상품의 사용 후 폐기에 이르는 모든 과정의 온실가스 배출량 및 제거량을 계산하는 모델을 전과정평가(LCA, life cycle assessment)라고 한다.

IPCC는 2019년도 농업·산림·기타 토지이용(AFOLU, Agriculture, Forestry and Other Land Use) 분야에서 배출하는 온실가스가 지구상의 인간활동에 의한 총배출량의 22%를 차지하는 것으로 보고하였다(IPCC, 2023). 산림은 대체로 온실가스의 흡수원(sink)이 되므로 AFOLU 중에는 농업 분야가 가장 많은 배출을 한다고 볼 수 있다. 즉, 전 세계에서 농업 분야가 배출하는 온실가스는 우리나라의 경우인 3.2%를 크게 웃돌 것으로 추정이 가능하다. 사실 농업 분야는 기후변화에 매우 큰 영향을 주고 있다.

우리나라에서 농식품 관련 전과정평가를 수행한 예를 찾기 어려운데, IPCC가 계산한 수준(21-37%)과 크게 차이가 나지 않을 것으로 추정할 수는 있을 것이다. 그렇다면, 우리나라도 농식품 산업 관련 총배출량이 적어도 20%가 될 것으로 보는 것이 타당하다. 우리나라도 농식품 산업에서 온실가스 배출을 감축하는 전략과 정책은 중차대한 국가 과제로 보아야 한다.

농업 분야가 기후변화에 대응하는 방법으로 다음과 같은 예가 있다. 품종 개량, 용수의 관리 및 저장, 토양 수분의 보존, 관개, 농림 혼작(agroforestry), 지역사회 기반 조성, 경관 다양성, 지속가능한 토지 관리, 농업생태학적 원칙과 방법의 사용, 그리고 자연과 협업을 꾀하는 시도들이다(IPCC, 2023). 이러한 방법들을 농업에 적용할 때 온실가스 배출을 경감하는 동시에 토양에 탄소를 축적할 수 있다. 중요한 점은 농업 분야가 성취해야 하는 기후변화 대응 전략이 대기로부터 배출(GHG emission)하는 온실가스를 경감하는 일에만 있는 것이 아니라 대기로부터 온실가스

를 제거(CO₂ removal)하는 일에도 있다는 것이다.

다른 분야와 마찬가지로 농업 분야의 온실가스 배출량 계산은 IPCC의 가이드라인(2006)과 IPCC GPG(GPG, Good Practice Guidance) LULUCF(2003)를 따른다. IPCC의 두 지침서는 농업을 통한 온실가스의 배출과 함께 토양유기탄소(SOC, soil organic carbon)의 축적을 계산하도록 하고 있다. AFOLU 분야에서의 온실가스 흐름은 두 가지 방법으로 산정될 수 있다. 1) 시간의 흐름에 따른 탄소 축적량의 순수한 변화를 활용하는 방법 2) 직접적으로 대기로부터 그리고 대기로부터 발생하는 기체 흐름의 비율을 활용하는 방법이다(IPCC, 2006). 농업은 AFOLU의 주요 분야로서 온실가스 배출과 제거를 함께 계산한다.

육지에서 온실가스를 제거하는 흐름은 세 가지 카테고리의 다섯 가지 탄소 저장고(pool)가 적용된다. 바이오매스, 고사 유기물, 토양으로서 세 개의 카테고리로 나누고, 다시 세부적으로 지상부 바이오매스, 지하부 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양유기물로서 탄소 저장고를 정의하였다(IPCC, 2003). 이 가운데 토양유기물은 농업 관리 방법에 따라 증감하는 토양 평가의 주요 지표로서 경작 방법과 연관된다. 농업 분야에서 온실가스를 제거하는 활동은 토양유기물을 비롯한 탄소 저장고의 양을 증가시키는 방법에서 찾아야 한다.

2050 농식품 탄소중립 추진전략(농식품부, 2021)에서는 ‘토양의 탄소 저장능력 향상’을 핵심 과제로 언급하면서도 그 방법이 바이오차를 토양 내 매립하는 것 외에는 나타나지 않는다. ‘탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획’(관계부처 합동, 2023)에서도 농업생산 과정에 대한 직접적인 전략으로 스마트팜, 논물관리, 질소비료 저감 등 온실가스 배출 저감 중심의 전략과 탄소 저장에 대해서는 바이오차 투입 방식에 머물러 있다. 현 정부의 계획에서 산림과 해양 외 농경지를 탄소흡수원으로 조성하려는 계획을 찾아볼 수 없는 상황이다.

이번 연구에서 기후변화에 대응하는 농업의 양식으로서 생태농업이 효과적인지 검토하고자 하였다. 생태농업은 관행농업보다 외래 자원의 투입이 적고 생물다양성에 생산의 기반을 둔다. 또한 농가로부터 지역사회와 국가의 식량 주권의 기반을 마련할 수 있다. 나아가 여성농민과 청년농민에게 공정한 권리와 기회를 제공하는 생산 양식이다. 생태계의 보전과 사회적 공존을 기반으로 하는 생태농업이 기후변화 대응에도 효과적인지 분석하고자 한다.

생태농업은 관행농업보다 온실가스를 적게 배출할 뿐만 아니라 토양 탄소 축적의 효과도 더 높을 것으로 추정할 수 있다. 토양 탄소의 축적 효과가 더 높다면 토양 유기물(SOM, soil organic matter)의 함량이 더 높을 것이다. 생태농업은 이름에서 나타나듯 농업생태계를 보전하는 농업이므로 생물다양성이 더 높을 것이다. 이번 연구에서는 이상의 세 가지 추정을 검증하려 하였다. 즉, 온실가스 배출량, 토양유기물 함량, 농업생태계의 생물다양성을 추산, 분석, 실사함으로써 생태농업과 관행농업을 비교하려 한다.

II. 연구방법

1. 농가선정

농부시장 마르쉐@¹⁾에 소속된 지구농부²⁾ 중 생태환경 조사와 온실가스 배출량 추산이 가능하다고 판단되는 10개의 농가(밭 농가 5호, 논 농가 5호)를 선정하였다. 농가 선정은 농부시장 마르쉐측의 협조를 받아 3년 이상 생태농업을 지속해온 농가 중 연구 참여 의사가 있는 농가를 최종 선정하였다. 이들 중 논·밭 각각 2호씩(총 4호) 인근에 대조군으로 관행농가를 선정하였다.

생물다양성 조사는 마르쉐 소속 10개 농가(밭 5호, 논 5호)와 4개의 관행농가(밭 2호, 논 2호)를 선정하여 실시하였다. 또한 비교 대상의 유의성을 높이기 위해 농림축산식품부의 농업환경보전프로그램(농프) 참여 마을 중 이시도르연구소가 직접 생물다양성 조사로 얻은 생태환경조사 데이터(17개 마을)를 추가하여 생태농가와 비교하였다.

1) 마르쉐@은 '장터, 시장'이라는 뜻의 프랑스어 마르쉐(marché)에 장소 앞에 붙는 전치사 at(@)을 더해 지은 이름으로, 어디에서든 열릴 수 있는 시장이라는 의미이다. <http://www.marcheat.net>

2) 농부시장 마르쉐@에 참여하는 농부들을 '지구농부'라고 부르며, 땅을 건강하게 되돌리고 자연에 조화로운 방식으로 농사를 짓는다.

〈표 2-1〉 조사 대상 농가 현황

구분	논/밭	품목수	생태농업 연차	소재지
풀풀	논	1	10년	충남 홍성군 홍동면
풀풀 대조*	논	1	0년	"
다랑	논	1	3년	경남 밀양시 단장면
다랑 대조*	논	1	0년	"
더불어	논	1	45년	충남 논산시 상월면
너멍굴	논	1	8년	전북 완주시 고산면
주나미	논	1	12년	경남 창원시 동읍
현강자연애	밭	약 20종	15년	경기 이천시 대월면
현강자연애 대조*	밭	고추 1종	0년	"
찬우물	밭	약 50종	12년	경기 고양시 대장동
찬우물 대조*	밭	4종	0년	"
자란다팜	밭	약 50종	6년	경기 양평군 옥천면
봉금의뜰	밭	약 40종	9년	경기 양평군 양서면
종합재미	밭	약 10종	7년	경기 양평군 개군면

주: 별표(*)는 관행 농가

〈그림 2-1〉 생태환경 조사 방법론 교육
(현강자연애)



농업환경보전프로그램은 토양·용수 등 농업환경과 생태계의 보전, 농촌경관을 개선하기 위한 지역주민들의 활동을 지원하는 사업이다. 이시도르 지속가능연구소는 2020년부터 현재까지 농업환경보전 프로그램 현장지원조직 업무를 수행하고 있다. 연구소 내에 생태환경조사를 전담하는 농업생태팀을 구성하여 2023년 사업 대상지 17개소의 생태환경조사를 직

접 수행하였다. 농업환경보전프로그램은 1개 사업지구에서 5년간 지속되는 사업이며, 본 연구에서는 2023년 실시한 17개 마을의 생태환경조사 결과 평균치를 산출하였다. 모든 사업지구의 생태환경조사는 농림축산식품부의 농업환경보전프로그램

생태환경조사 매뉴얼 방법론을 적용하고 필지별로 3회씩 조사하였다.

마르쉐 소속 10개 농가와 4개의 관행농가에도 농업환경보전프로그램 생태환경조사 매뉴얼을 동일하게 적용하였고, 필지별로 3회씩 조사를 하였다. 1차 조사는 본 연구진이 직접 농장에서 실시하고, 이때 해당 농장주에게 생태환경조사 방법론을 교육하였다. 밭에서는 필지 내에 서식하는 식물 종수, 벌, 무당벌레, 꽃등에, 거미류의 개체수를 조사하였다. 논에서는 필지 내에 서식하는 식물 종수, 어류, 양서류, 파충류, 수서 무척추류, 논 수서 곤충류를 조사하였다. 2차·3차 조사는 농장주로 하여금 직접 조사를 실시하도록 하였다. 농장주들은 1차 조사에서 조사 방법을 학습하여 자기 농장의 생물들을 직접 관찰하고 기록하였다. 육안 조사를 기본으로 하면서 밭은 황색 점착 트랩을 활용하여 곤충을, 논은 통발을 설치하여 어류를 조사하였다.

〈표 2-2〉 밭 생물다양성 조사 개요

구분	조사 기간	조사 방법	조사 대상 생물종
1차	4.27. ~ 5.18.	육안 조사	식물 및 곤충류
2차	7. 3. ~ 7.28.	1차와 동일	1차와 동일
3차	8. 2. ~ 8.29.	트랩 조사	곤충류 조사

〈표 2-3〉 논 생물다양성 조사 개요

구분	조사 기간	조사 방법	조사 대상 생물종
1차	5. 3. ~ 6.28.	육안 및 도구 (뜰채) 조사	식물, 양서류, 파충류, 어류, 수서 무척추류, 논 수서 곤충류
2차	7.15. ~ 8. 5.	1차와 동일	1차와 동일
3차	8.24. ~ 8.28.	통발 조사	논 수서 곤충류

2. 온실가스 배출량 산출

2.1. IPCC 가이드라인

온실가스 배출량 계산은 IPCC 가이드라인(2006)과 저탄소 농축산물 인증의 계산법을 적용하였다.³⁾ 논의 경우 IPCC 가이드라인 계산법과 저탄소 농축산물 인증제 계산법을 모두 적용하였으며, 밭은 저탄소 농축산물 인증제 계산법만 적용하였다.

IPCC 가이드라인에서는 경작 면적을 변수로 입력하지만, 이번 연구의 목적은 생태농업과 관행농업의 온실가스 배출 기여도를 비교하는 것이므로, 농가별 재배 면적을 입력하지 않고 단위 면적당 배출량을 계산하였다.

온실가스의 배출에 대해서는 논의 경우 IV. AFOLU 섹션의 제5장 농경지의 5.5. 벼 재배에 의한 메탄 배출의 추산 모형을 적용하였다.

논에서 배출되는 온실가스(CH₄)의 양은 (식 1)의 모형을 적용하여 계산한다. 메탄 배출량은 논농업의 일 배출계수에 경작 기간과 재배 면적을 곱하여 계산한다(IPCC, 2006).

$$CH_{4RICE} = \sum_{i,j,k} (EF_{i,j,k} \cdot t_{i,j,k} \cdot A_{i,j,k} \cdot 10^6) \dots\dots\dots (식 1)$$

- CH_{4RICE} = 논에서 연간 메탄 배출, Gg $CH_4 yr^{-1}$
- $EF_{i,j,k}$ = i, j, k 조건에서 일 배출계수, kg $CH_4 ha^{-1} day^{-1}$
- $t_{i,j,k}$ = i, j, k 조건에서 벼 경작기간, day
- $A_{i,j,k}$ = i, j, k 조건에서 벼의 연간 수확 면적, ha yr^{-1}
- i, j, k = 다른 생태계, 수문 체계, 유기 개량제의 양과 종류

논으로부터 메탄 배출의 영향을 주는 조건들은 다음과 같다.

벼 경작 방식에는 지역적인 차이, 다중 작물, 수문 체계(생태계 종류, 범람 패턴), 토양의 유기 개량, 기타 조건들이 있다.⁴⁾ 지역적인 차이란 국가 단위의 논농업 방식의 다양성을 말한다. 다중 작물이란 벼 외의 작물을 재배하는 경우를 말하고 각 계절별로 추산하여야 한다. 수문 체계의 생태계 종류란 관개논, 천수답, 깊은 물의

3) 저탄소 농축산물 인증은 친환경 또는 농산물 우수관리(GAP)인증을 받은 농산물 중 저탄소 농업기술을 적용하여 생산과정에서 '온실가스를 줄인 농산물'임을 인증하는 농식품 국가 인증이다(농식품부, 2021).

4) 변수를 칭하는 용어는 IPCC GL의 한글번역판(환경부, 2008)의 것을 이 자료에 그대로 사용하였다.

물관리 유형을 말한다. 범람 패턴이란 담수 방식을 말하는데 관개시설에 의한 수시 담수, 계절에 따라 비로 담수, 가뭄에 걸리기 쉬운 논, 깊게 담수하는 논으로 나뉜다. 토양의 유기 개량은 볏짚, 퇴비, 복합비료, 농장 비료 등 논에 투입하는 양분을 말한다. 기타 조건에는 벼 품종과 황의 투입 여부가 메탄 배출에 영향을 주는 조건이 된다.

IPCC는 논에서 메탄 배출의 조건들을 종합하여 ‘조절된 일 배출계수’를 (식 2)와 같이 제안하고 있다. 우리나라 국가온실가스인벤토리 작성 시에도 (식 2)가 적용된다(IPCC, 2006).

$$EF_i = EF_c \cdot SF_w \cdot SF_p \cdot SF_o \cdot SF_{s,r} \dots\dots\dots (식 2)$$

- EF_i = 단위면적당 보정한 일배출계수
- EF_c = 유기물질 투입 없고 상시 담수하는 논의 기본배출계수
- SF_w = 중간물떼기 기간
- SF_p = 경작기 이전의 물관리 계수
- SF_o = 볏짚환원 계수
- $SF_{s,r}$ = 토양형, 벼품종에 대한 계수

위의 계수들 중 EF_c 를 CH_4 기본 배출계수로서 산출의 시작점으로 사용하는데, 상시담수 및 유기물 무시용의 조건에 배출되는 CH_4 배출계수를 말한다. 우리나라는 2014년 국가고유 배출계수로 승인한 $2.32 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 을 적용한다.⁵⁾ 그밖에 조건에 해당하는 ‘중간물떼기’, ‘볏짚 환원’에 해당하는 SF_w , SF_o 는 농가별 조사 결과를 입력한다.

휴경기 물관리 계수(SF_p)와 토양형 및 벼품종에 대한 계수($SF_{s,r}$)는 국가온실가스 인벤토리에서 적용하지 아니하였고, 이번 연구에서도 적용하지 아니한다. 이는 국가고유 배출계수의 정밀한 개발이 이루어진 이후에 적용할 수 있다.

2.2. 저탄소 농축산물 인증

농림축산식품부의 ‘저탄소 농축산물 인증제’는 저탄소 농산물과 축산물의 소비를 장려하고 확대함으로써 시장주도로 온실가스를 줄이고자 하는 취지의 제도이다(한국

5) IPCC GL(IPCC, 2006)에서는 Tier 1 수준에서 EF_c 에 대한 기본 값이 $1.30 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ (오차범위 0.8-2.2)이다

농업기술진흥원, 2023). “저탄소 농축산물”이란 저탄소 농업기술 등을 활용하여 생산 전과정에서 발생하는 온실가스 배출량이 해당 품목의 평균 온실가스 배출량보다 적은 농축산물을 말한다(농식품부, 2017).

저탄소 농축산물의 정의에 따라 본 연구에서는 실험군(생태농가)의 평균 온실가스 배출량과 농림축산식품부에서 고시한 품목별 기준 배출량을 비교하여 생태농업의 온실가스 배출량 수준을 진단하였다. 논외의 경우 생태는 5개의 평균 배출량과 관행논 2개의 평균 배출량을 산출하였다. 그리고 나서, 계산된 평균 배출량과 농림축산식품부에서 고시한 벼의 온실가스 기준 배출량을 비교하였다.

생태밭의 경우 한 필지 안에서 다양한, 많게는 수십 종의 작물을 재배하므로 하나의 재배 품목에 대해 평가를 하기 어렵다. 이번 연구에서는 이와 같이 매우 많은 종류의 작물을 한 필지에 심는 작물유형을 ‘다양성작’으로 이름을 붙였다. 다양성작에서는 저탄소 농축산물 인증에서 제시한 품목별 배출 기준값을 비교 대상으로 할 수 없다. ‘다양성작’의 온실가스 배출량과 저탄소 농축산물 인증에서의 기준 배출량을 비교하기 위해서 모든 품목의 기준 배출량에 대한 평균값을 구하였다. 저탄소 농축산물 인증(한국농업기술진흥원, 2023)에서 제시하는 135개 품목의 기준값 중 수도작, 과수, 임산물을 제외한 65개 밭작물의 기준값 평균(3,537.6kg CO₂/10a)을 다양성작의 비교치로 설정하였다(표 2-4).

〈표 2-4〉 저탄소 농축산물 인증에서 65개 밭작물의 온실가스 기준 배출량

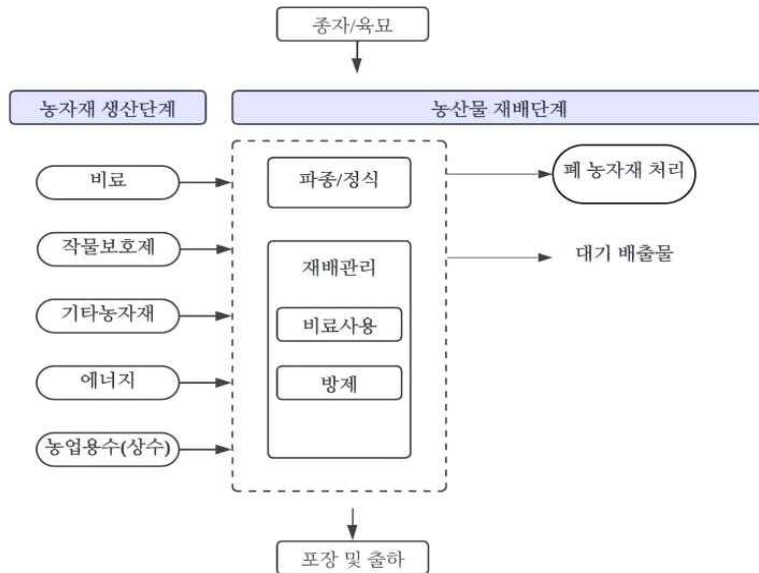
감자 (노지, 봄)	580	멜론 (시설, 억제)	1,617	양배추 (시설)	750
감자 (노지, 가을)	554	무(시설)	625	양배추 (노지)	750
고구마 (노지)	282	무(노지, 봄무)	533	양파 (시설)	705
밀 (노지)	236	무(노지, 가을무)	498	양파 (노지)	705
보리 (노지, 맥주보리)	302	무(노지, 고랭지무)	584	연근 (시설)	839
보리 (노지, 겉보리)	277	미나리 (시설)	2,022	연근 (노지)	839
보리 (노지, 쌀보리)	249	방울토마토 (시설)	13,674	오이 (시설, 촉성)	20,935
옥수수 (노지, 풋옥수수)	601	배추 (시설)	1,025	오이 (시설, 반촉성)	8,104
콩 (노지, 두류)	97	배추 (노지, 봄배추)	747	오이 (시설, 억제)	3,143

가지 (시설, 축성)	15,597	배추 (노지, 가을배추)	633	오이 (노지)	1,073
가지 (시설, 반축성)	15,597	배추 (노지, 고랭지)	688	착색 단고추 (시설, 파프리카)	35,004
고추 (시설)	14,307	부추 (시설)	2,513	참외 (시설)	1,676
고추 (노지)	794	부추 (노지)	1,467	토마토 (시설, 축성)	11,813
단고추 (시설, 축성, 피망)	12,317	브로콜리 (시설)	746	토마토 (시설, 반축성)	5,555
당근 (시설)	495	브로콜리 (노지)	746	파 (시설, 대파)	869
당근 (노지)	495	상추 (시설, 쌈채류)	2,171	파 (노지, 대파)	869
들깻잎 (시설, 축성)	8,130	생강 (시설)	841	파 (시설, 쪽파)	1,328
딸기 (시설, 축성)	3,599	생강 (노지)	841	파 (노지, 쪽파)	1,328
딸기 (시설, 반축성)	2,815	수박 (시설, 반축성)	1,055	호박 (시설, 축성)	5,336
마늘 (시설)	731	수박 (노지)	575	호박 (시설, 반축성)	5,336
마늘 (노지)	731	시금치 (시설)	627	호박 (시설, 억제)	5,336
멜론 (시설, 축성)	9,845	시금치 (노지)	853	평균	3537.6

저탄소 농축산물 인증제는 1품목 1기작 기준 단위면적(1,000m²) 당 배출량을 산출한다. 배출 과정은 농자재 생산(파종 전)과 농산물 재배(파종 후) 두 단계로 구분한다.

농자재 생산단계에는 파종 전 실시하는 작업(로터리 작업, 멀칭 등)과 투입 자재(바이오차, 토양개량제 등) 사용으로 인한 배출량을 계산한다. 농산물 재배단계는 파종 이후 작업(제초, 관수 등)과 투입 자재(비료, 살충제 등) 사용에 따른 배출량을 계산한다. 투입 자재는 비료, 작물보호제, 에너지, 기타 농자재 4개의 항목으로 구분한다. 계산은 각 투입 자재의 단위면적(1,000m²) 당 투입량과 해당 자재의 배출계수를 곱하여 1기작 기준 단위면적(1,000m²) 당 이산화탄소 배출량(kgCO₂)을 산출한다(한국농업기술진흥원, 2023). 저탄소 농축산물 인증제에서 사용하는 품목별 배출계수는 농촌진흥청, 환경부, 산업통상자원부, Ecoinvent(데이터 수집 비영리기관) 등에서 개발한 계수를 적용한다(한국농업기술진흥원, 2023).

〈그림 2-2〉 저탄소농축산물 인증에서 탄소배출 시스템 경계도



자료: 한국농업기술진흥원 「농산물 온실가스 배출량 산정을 위한 공통지침」

저탄소 농축산물 인증에서는 기본 배출량을 위한 두 가지 과정 외에 질소비료 시용에 따른 아산화질소 배출량과 논 답수에 따른 메탄 배출량을 추가로 계산한다. 논 메탄 배출량은 벼 재배 일수와 유기물 시용 여부, 물관리 보정계수를 반영한다(식 5)(한국농업기술진흥원, 2023). 질소비료를 투입하는 밭에는 비료 제품별 질소 함유량과 건조중량률을 반영하여 아산화질소 배출량을 산출한다(식 4)(한국농업기술진흥원, 2023). 배출량으로 계산한 메탄과 아산화질소는 이산화탄소 양으로 환산한다.

저탄소 농축산물 인증제는 재배 과정에서 발생하는 온실가스 배출뿐 아니라 바이오차 투입을 통한 탄소 고정량도 계산한다.⁶⁾ 탄소 고정량은 바이오차 제조 시 가열 온도(표 2-6)와 원료의 종류에 따라 100년 후 잔여 탄소 비율(표 2-7)이 차별화된다(식 6)(한국농업기술진흥원, 2023).

6) 탄소의 '고정량'은 '축적량'으로 표현하기도 한다.

$$\text{기본배출량} = (1,000\text{m}^2 \text{ 당 1기작당 자재투입량}) \times (\text{배출계수}) \dots\dots\dots (\text{식 3})$$

$$\text{질소비료 사용으로 인한 } N_2O\text{배출량} = (1,000\text{m}^2 \text{ 당 1기작당 질소비료 투입량}) \times (\text{해당 제품의 질소함유율}) \times (\text{해당 제품의 건조중량율}) \times (\text{해당 제품 배출계수}) \times GWP^a \dots (\text{식 4})$$

$$\text{논 물대기로 인한 } CH_4\text{배출량} = (\text{면적단위환산계수}(1,000\text{m}^2/\text{ha})^b \times (\text{물관리 보정계수})^c \times (\text{유기물 사용 보정계수})^d \times (\text{벼재배 일수}) \times (\text{매탄배출 계수})^e \times GWP^a \dots\dots\dots (\text{식 5})$$

$$\text{바이오차 사용에 따른 온실가스 고정량} = (\text{바이오차 사용량}(\text{kg}/\text{년})) \times (\text{유기탄소 함량}) \times (\text{100년 후 잔여 탄소비율}) \times (\text{CO}_2\text{분자량}/\text{C분자량}) \dots\dots\dots (\text{식 6})$$

- a: 지구온난화지수(메탄: 25, 아산화질소: 298)
- b: 0.1
- c: 기본값: 0.66, 2주 이상: 0.49
- d: 기본값: 1.7, 무시용: 1.0
- e: 마른 논: 1.32, 담수시: 2.32

이와 같은 방법으로 생태농가와 관행농가의 온실가스 배출량을 계산하였다. 밭의 경우 기본 배출량과 질소비료 사용에 따른 온실가스 배출량을 산정하였다. 그리고 바이오차 투입에 의한 토양 탄소 축적을 계산하였으며, 계산식에 들어가는 잔여 탄소 비율<표 2-6>과 유기탄소 함량<표 2-7>은 아래의 공통지침을 반영하였다.

논 온실가스 배출량 계산은 기본 배출과 논 물대기에 의한 배출량을 산정하였다. 마찬가지로 논 물대기로 인한 온실가스 배출식의 계수도 아래의 공통지침을 반영하였다.

<표 2-5> 비료 품목 중 맞춤형 비료의 배출계수

명칭	배출계수(CO ₂ /kg)
맞춤형 16호	8.00E-01
맞춤형 17호	6.36E-01
맞춤형 18호	7.20E-01
맞춤형 19호	6.37E-01
맞춤형 20호	7.40E-01
맞춤형 29호	7.80E-01
맞춤형 30호	5.90E-01

자료: 한국농업기술진흥원, 2023

〈표 2-6〉 바이오차 생산유형별 100년 후 잔여 탄소 비율

바이오차 생산온도		적용값(Fperm) ^a
고온	600℃	89%
중온	450℃ 초과 600℃이하	80%
저온	350℃ 이상 450℃이하	65%

a: 생산 유형별 처리된 바이오차의 100년 후 잔여 유기탄소 비율의 단위
 자료: 한국농업기술진흥원, 2023

〈표 2-7〉 바이오차 유기탄소 함량(건조 중량기준)

원료명	생산공정	적용값(FC) ^a
가축분	열분해	38%
	가스화	9%
목재	열분해	77%
	가스화	52%
초분류왕겨 및 목재	열분해	65%
	가스화	28%
왕겨 및 볏짚	열분해	49%
	가스화	13%
건과류	열분해	74%
	가스화	40%
슬러지	열분해	35%
	가스화	7%

a: 생산 유형별 바이오차의 유기탄소 함량의 단위
 자료: 한국농업기술진흥원, 2023

〈표 2-8〉 저탄소 인증 방식의 배출량 계산 예시(현강자연애)

항목	투입재	연간 투입량	1,000m ² 당 투입량	단위	배출계수	배출량 (kgCO ₂ /1,000m ²)
비료	흙살림 균배양체	1,400	159.89	kg	3.36E-02	5.37
작물보호제	키토산	10	1.14	kg	1.31E+00	1.50
에너지	경유	100	11.42	L	4.92E-01	5.65
에너지	휘발유	20	2.28	L	6.82E-02	0.16
합계						12.68

자료: 한국농업기술진흥원, 2023

3.3. 토양탄소축적량 산출

농경지에 저장되는 탄소의 양에 대해서는 IPCC(2003)의 GPG for LULUCF의 Tier 1 방법을 참조하였다. ‘농경지로 유지된 농경지’의 탄소축적 변화량은 (식 7)에 따라 추산한다.

$$\Delta C_{CC\ soils} = \Delta C_{CC\ mineral} - \Delta C_{CC\ organic} - \Delta C_{CC\ lime} \dots\dots\dots (식\ 7)$$

$\Delta C_{CC\ soils}$ = 연간 토양탄소축적 변화, t C yr⁻¹
 $\Delta C_{CC\ mineral}$ = 무기질 토양의 연간 토양탄소축적 변화, t C yr⁻¹
 $\Delta C_{CC\ organic}$ = 유기 토양의 연간 토양탄소축적 변화, t C yr⁻¹
 $\Delta C_{CC\ lime}$ = 농업용 석회시용으로 인한 탄소 배출, t C yr⁻¹

우리나라에는 유기 토양이 희박하여 국가온실가스인벤토리에서 유기 토양에 대한 계산은 배제하고 있으므로, 이번 연구에서도 제외한다. 따라서, 농경지 탄소 축적의 변화량 산출에서는 무기질 토양의 토양탄소축적 변화가 핵심이 된다.

무기질 토양의 토양탄소축적 변화는 (식 8)에 따라 구한다(IPCC, 2023).

$$\Delta C_{CC\ mineral} = [(SOC_0 - SOC_{(0-T)}) \cdot A] / T \dots\dots\dots (식\ 8)$$

SOC_0 = 대상 연도의 토양 유기탄소 양, t C ha⁻¹
 $SOC_{(0-T)}$ = 대상 기간 전의 토양 유기탄소 양, t C ha⁻¹
 T = 대상 기간 (기본값은 20년)
 A = 경지 면적, ha

이번 연구에서는 대상 기간 전의 토양 유기탄소 양을 추산하기 어려우므로 $SOC_{(0-T)}$ 에 대한 계산은 생략하는 대신 SOC_0 값에 대상 기간의 기본값인 20년으로 나누도록 한다. SOC 의 값은 (식 9)에 따라 구한다(IPCC, 2023).

$$SOC = SOC_{REF} \cdot F_{LU} \cdot F_{MG} \cdot F_I \dots\dots\dots (식\ 9)$$

SOC_{REF} = 기본 토양유기탄소 축적 계수, t C ha⁻¹
 F_{LU} = 토지 이용 형태에 따른 축적 변화 계수
 F_{MG} = 관리 체계에 따른 축적 변화 계수
 F_I = 유기물 시용에 따른 축적 변화 계수

기본 토양 유기탄소 축적 계수(SOC_{REF})는 IPCC GPG LULUCF에 제시된 기본값을 사용한다. 우리나라 토양형은 크게 고탄성점토(HAC), 저탄성점토(LAC), 사질토(sandy), 화산회토(volcanic)의 네 가지로 구분하는데, HAC가 전국 논외 89.55%, 밭외 89.41%로 대부분을 차지한다(국가온실가스인벤토리, 2022). 이번에 조사한 농지는 모두 HAC로 간주하여(IPCC, 2023), 우리나라 HAC 토양형에 대한 국가고유 배출계수(2021년 승인) 39t C /ha를 적용한다. 이번 연구의 목적은 생태농업과 관행농업의 토양탄소축적을 양적으로 비교하는 것이므로, 토양형의 특성을 적용하지 않아야 두 농업 양식 사이의 순수한 차이를 비교할 수 있기 때문이다.

토양유기탄소의 축적 변화 계수 세 가지(F_{LU} , F_{MG} , F_I)는 IPCC GPG LULUCF에 제시된 기본값을 사용한다. 이는 국가온실가스인벤토리에서 적용한 값을 이번 연구에도 그대로 적용하는 것이다(표 2-9).

온실가스 배출량 및 토양탄소축적량의 추산에 요구되는 입력 변수의 값은 연구진이 농가를 방문하여 인터뷰를 통하여 확보하였다.

〈표 2-9〉 농경지 관리활동 종류별 축적변화계수

구분	Level	Temperature Regime	Moisture Regime	GPG default
Land Use (F_{LU})	Long-term cultivated	Temperate	Wet	0.71
	Paddy rice	Temperate and Tropical	Dry and Wet	1.10
Tillage (F_{MG})	Full	Temperate	Dry and Wet	1.00
	Reduced	Temperate	Dry and Wet	1.09
	No-till	Temperate	Dry and Wet	1.16
Input (F_I)	Low ^a	Temperate	Wet	0.91
	Medium ^b	Temperate	Dry and Wet	1.00
	High without manure ^c	Temperate and Tropical	Wet	1.11
	High with manure ^d	Temperate and Tropical	Wet	1.38

- a: 작물 잔사를 환원하지 않고 경작지에서 제거하는 경우, 작물 잔사가 매우 적게 나오는 작물.
- b: 대부분의 곡류에 해당. 수확물 외에 작물 잔사를 모두 경작지에 환원. 또는, 작물 잔사를 모두 제거하지만 유기물질(축분 등)을 보충.
- c: 많은 잔사가 발생하는 작물이거나, 피복작물·녹비작물·다량의 식물을 발생시키는 휴경 등을 활용하여 작물 자체의 잔사보다 현저히 많은 유기물질을 투입. 축분은 무사용.
- d: 위의 경우에 축분까지 사용하는 경우.

자료: IPCC GPG LULUCF (2003) Table 3.3.4

2.4. 토양유기물 분석

토양 탄소 축적량과 토양 유기물 수치의 상관관계를 분석하기 위해 14개 농가(생태농가 10호, 관행농가 4호)의 토양을 채취하여 해당 지역 농업기술센터에 시료 분석을 의뢰하였다. 토양 시료는 농가당 1개 필지의 10개 내외의 지점에서 고르게 채취하였다. 채취한 시료는 10개 내외의 지점의 것을 하나의 용기에 모아 혼합하였다. 혼합한 시료는 토양 검사용 비닐 용기에 1kg 이상 담아 밀봉 및 라벨링 하였다. 분석기관은 해당 생산자가 소속한 시·군 농업기술센터로 정하였고, 생산자가 직접 분석을 의뢰하였다. 분석 의뢰 후의 분석결과는 시·군 농업기술센터가 해당 생산자에게 토양 비료사용 처방서로 통보하였다.

〈그림 2-3〉 토양 시료 채취



논(다랑)



밭(종합재미)

Ⅲ. 연구 결과

1. 생물다양성

생태농업을 실천하는 농가들은 논과 밭 모두 전반적으로 관행농업 및 농업환경보전프로그램 생태환경조사 결과보다 높은 생물다양성과 개체수를 나타내었다.

밭에서는 꽃등애를 제외한 식물종, 벌, 무당벌레, 거미 등의 종수와 개체수가 관행농업 농장들보다 높게 나타났다. 꽃등애는 관행농업에서 관찰된 개체수(1.6)가 생태

농업(1.1)보다 더 많았다. 그밖에 생물종은 생태농업에서의 개체수가 높는데, 특히 무당벌레(14.7배)와 거미(9.0배)의 개체수는 관행농업보다 크게 높게 나타났다. 마찬가지로 농업환경보전프로그램 조사 결과와 비교 했을 때 꽃등애를 제외한 식물종, 벌, 무당벌레, 거미 종수와 개체수 모두 생태농업에서 높게 나타났다. 관찰된 꽃등애에 개체수(2.0)는 생태농업, 관행농업보다 많았다. 그 외 식물 종수(2.4)는 관행(6.3)보다 낮게 나왔다. 무당벌레와 거미 종수 및 개체수는 모두 관행농업보다 높고 생태농업보다 낮은 수준으로 나타났다. 천적의 포식에 의한 해충의 자연적인 방제를 중요시하는 농업생태학에 부합하는 결과라 할 수 있다.

논에서는 식물, 양서류, 파충류, 어류, 수서무척추류, 거미류 모두 종수와 개체수가 관행농업 농장들보다 높게 나타났다. 특히 생태농업에서 수서무척추류는 관행농업보다 32.4배 높은 빈도로 관찰되었다. 관행농업에서 파충류는 관찰되지 않았다. 농업환경보전프로그램 조사 결과에서는 수서무척추류 개체수(42.8)를 제외한 모든 종수와 개체수가 생태농업보다 낮게 나타났다. 어류 종수(0.3)는 생태농업(1.2)보다 3배, 식물 종수(1.5)는 생태농업(3.5)보다 2.3배 적게 나타났다.

〈표 3-1〉 밭 생물다양성 조사 결과

구분	식물 종수	벌 종수	벌 개체수	무당벌레 개체수	꽃등애 개체수	거미 종수	거미 개체수
생태	7.1 (2.02)	1.0 (0.48)	11.5 (21.17)	4.4 (12.86)	1.1 (2.23)	0.5 (0.51)	29.8 (62.39)
관행	6.3 (2.51)	0.0	0.0	0.3 (0.57)	1.6 (2.88)	0.3 (0.57)	3.3 (7.07)
농프	2.4 (1.41)	0.5 (0.30)	9.1 (7.81)	3.7 (2.60)	2.0 (1.57)	0.4 (0.28)	8.0 (13.16)
Δ_s	0.8	1.0	11.5	4.1	-0.5	0.2	26.5
Δ_p	4.7	0.5	2.4	0.7	-0.9	0.1	21.8

주: ()는 표준편차, Δ_s =(생태)-(관행), Δ_p =(생태)-(농프)

7) 조사대상 생물은 농업환경보전프로그램의 생태조사 매뉴얼에 준하여 선정하였다.

〈표 3-2〉 논 생물다양성 조사 결과

구분	식물 종수	양서류 종수	양서류 개체수	파충류 개체수	어류 종수	어류 개체수	수서 무척추 종수	수서 무척추 개체수
생태	3.5 (1.67)	0.7 (0.48)	8.6 (13.75)	0.5 (1.80)	1.2 (1.13)	10.4 (19.72)	2.3 (2.05)	40.5 (34.73)
관행	1.6 (0.70)	0.5 (0.57)	4.2 (5.13)	0.0	0.5 (0.57)	2.2 (2.64)	0.5 (1.15)	1.2 (2.50)
농프	1.5 (0.42)	0.4 (0.24)	5.9 (5.62)	-	0.4 (0.21)	7.5 (5.28)	1.7 (0.93)	42.8 (51.83)
Δ_s	1.9	0.2	4.4	-	0.7	8.2	1.8	39.3
Δ_p	2	0.3	4.2	-	0.5	2.2	0.6	-2.3

주: ()는 표준편차, Δ_s =(생태)-(관행), Δ_p =(생태)-(농프)

2. 온실가스 배출

2.1. 논 온실가스 배출량 추산

IPCC 계산법을 적용하여 단위 면적당 보정한 일 배출량을 계산한 결과 생태논 평균은 $2.55 \text{ kgCH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다. 2개의 관행논은 각각 1.39, 1.40 $\text{kgCH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 로 생태논 배출량보다 낮은 수준을 보인다. 생태논의 메탄 배출이 관행논보다 높은 이유는 생태논의 경우 벧짚을 그 논에 환원하였으므로 담수 시 유기물의 혐기 분해로 인한 메탄 발생량이 관행논의 경우보다 높기 때문으로 추정할 수 있다. 관행논은 벧짚을 그 논으로 환원하지 않고 유출하여 유기물의 투입이 적고, 대신 화학비료로 양분을 보충함으로써 메탄의 발생은 생태논보다 적다.⁸⁾

저탄소 농축산물 인증제 계산법을 적용하였을 때에는, 생태논가 5호의 평균 온실가스 배출량은 $464.4 \text{ kgCO}_2/1,000\text{m}^2$ 으로 관행논가 2호의 배출량 평균인 $888.5 \text{ kgCO}_2/1,000\text{m}^2$ 의 절반 수준이다. 또한 생태논가의 온실가스 배출량은 저탄소 농축산물 인증에서 벼에 대한 온실가스 기준 배출량인 $1,253.0 \text{ kgCO}_2/1,000\text{m}^2$ 의 37.0%

8) 벧짚 환원 대신 화학비료를 사용하면 메탄의 발생은 작을 수 있지만, 아산화질소의 배출이 높아질 수 있다.

수준이다. 논 생태농가 온실가스 배출량이 관행논 및 저탄소 농축산물 기준 배출량보다 현저히 낮은 것으로 나타난다. IPCC 계산법과 대조적으로 저탄소 농축산물 인증제 계산법을 적용하였을 때 생태논의 배출이 크게 낮은 이유는 유기물의 혐기 분해로 인한 메탄 외에도 에너지, 물, 화학비료, 농약 등 농업생산과정에 투입되는 모든 자원을 포함하여 계산하였기 때문이다.

〈표 3-3〉 저탄소 인증 방식의 농자재 사용에 따른 배출량 계산 예시(풀풀농장)

항목	투입재	연간 투입량	1,000㎡당 투입량	단위	배출계수	배출량 (kgCO ₂ /1,000㎡)
에너지	전기	188	63.30	kWh	4.92E-01	31.33
에너지	경유	60	20.20	L	6.82E-02	1.38
합계						12.68

자료: 한국농업기술진흥원, 2023

〈표 3-4〉 저탄소 인증 방식의 논 물대기에 따른 배출량 계산 예시(풀풀농장)

면적단위 환산계수	물관리 보정계수	유기물 사용 보정계수	벼재배 일수	메탄배출 계수	GWP	배출량 (kgCO ₂ /1,000㎡)
0.1	0.66	1.0	105	2.32	25	401.94
합계						401.94

주: (식 5) 참조

자료: 한국농업기술진흥원, 2023」

〈표 3-5〉 논 메탄 배출량

구분	생태논 평균	관행논 평균	저탄소 농축산물 수도작 기준
IPCC 계산법 적용 (kgCH ₄ ha ⁻¹ day ⁻¹)	2.55	1.39	-
저탄소 농축산물 인증 계산법 적용 (kgCO ₂ /1,000㎡)	464.4	888.5	1,253.0

2.2. 밭 온실가스 배출량 추산

저탄소 농축산물 인증제의 온실가스 배출 계산법을 적용하여 생태밭의 온실가스 배출량을 추산하였다. 본 연구에서 조사대상 생태밭은 한 필지에 많게는 수십 종의 품목을 동시에 재배하는 극단적 혼작(다양성작)이다. 이에 품목별로 적용하는 저탄소 농축산물 인증제의 기준값과 비교하기 위해 벼와 과수, 임산물을 제외한 밭작물 65종의 배출량 평균을 구하였다. 65종의 평균값과 다양성작의 온실가스 배출량을 비교하였다.

먼저 생태밭 5호의 개별 배출량을 계산하였다. 적게는 43.08kgCO₂/1,000m²에서 많게는 455.42kgCO₂/1,000m²로 그 편차가 있으나, 저탄소 농축산물 인증제 기준값 대비 배출량이 현저히 낮게 나타났다.

〈표 3-6〉 온실가스 배출량

단위: kgCO₂/1,000m²

구분	현강자연애	봉금의뜰	찬우물	종합재미	자란다팜
생태밭	43.08	86.01	455.42	619.08	7.92
관행밭	727.71	-	2,166.87	-	-

관행밭 2호의 평균 배출량은 1,446.9 kgCO₂/1,000m²로 생태밭 5호의 평균 배출량인 242.2 kgCO₂/1,000m²의 약 6배 수준으로 나타났다. 저탄소 농축산물 인증에서 밭작물 65종의 기준 배출량 평균은 3,537.62 kgCO₂/1,000m²으로 생태밭 온실가스 배출량보다 약 14배 수준으로 나타났다.

〈표 3-7〉 밭 온실가스 평균 배출량

단위: kgCO₂/1,000m²

구분	생태밭 평균	관행밭 평균	저탄소 농축산물 밭작물 기준
배출량	242.2	1,446.9	3,537.6

2.3. 토양탄소축적

생태농업의 토양탄소축적량이 관행농업보다 높게 나타났다. 논·밭의 경우 관행농업에서 연간 2.15t/ha가 축적되는데, 생태농업에서 ha당 0.38t 더 많은 연간 2.53t/ha의 탄소가 토양에 축적된다. 생태농업이 관행농업보다 탄소축적량이 약 18% 더 높다.

밭의 경우 관행농업에서 연간 1.5t/ha가 축적되는데, 생태농업에서는 0.49t 더 많은 1.99t/ha의 탄소가 축적된다. 생태농업이 관행농업보다 무려 33% 더 많은 탄소를 토양에 축적한다.

생태농업이 지향하는 농업생태계는 지상부뿐만 아니라 지하부의 생물학적 건강이다. 근권의 균근을 비롯한 땅속 생태계는 식물 뿌리의 발달을 촉진하여 지하부의 바이오매스를 증가시킨다. 이에 더하여 퇴비·축분 등의 유기물질을 투입하면 유기물을 통한 탄소축적은 증가할 수 있다. 고사유기물(dead organic matter)과 투입한 유기물질이 산화·분해되어 이산화탄소·아산화질소로 대기에 배출되기도 하지만, 나머지 양은 토양에 축적이 가능하다. 이때 토양을 경운(tillage) 한다면 탄소로 축적되는 양은 영에 가까워진다.

생태농업은 무경운 또는 부분경운을 도입하는 경우가 많기 때문에 논·밭을 완전히 경운하여 작물을 재배하는 관행농업보다 탄소의 축적이 높다. 다만, 생태농업을 이른바 ‘무투입’으로 이해하는 경우가 있어, 퇴비·축분 등의 유기물의 투입을 고려하지 않는 농민이 있다. 생태농업을 이행할 때 유기물 투입을 적극적으로 고려한다면 더욱 높은 탄소축적의 결과를 만들 수 있을 것이다.

〈표 3-8〉 토양탄소축적량 추산 결과

(단위: tCha⁻¹yr⁻¹)

논		밭	
생태농업	관행농업	생태농업	관행농업
2.53 (0.10)	2.15 (0.00)	1.99 (0.25)	1.50 (0.16)
Δ = 0.38		Δ = 0.49	

주: () = 표준편차, Δ = (생태농업)-(관행농업)

〈표 3-9〉 토양탄소 축적량

Site	LU	SOC_{REF} (tCha ⁻¹)	F_{LU}	F_{MG}	F_I	SOCL	T(yr) ^a	$\Delta C_{CCmineral}$ (tCha ⁻¹ yr ⁻¹)
풀밭	논	39	1.10	1.00	1.11	47.61	20	2.38
풀밭 대조*	논	39	1.10	1.00	1.00	42.90	20	2.15
다랑	논	39	1.10	1.09	1.11	51.90	20	2.60
다랑 대조*	논	39	1.10	1.00	1.00	42.90	20	2.15
더불어	논	39	1.10	1.09	1.11	51.90	20	2.60
너멍굴	논	39	1.10	1.16	1.00	49.76	20	2.49
주나미	논	39	1.10	1.09	1.11	51.90	20	2.60
현강자연애	밭	39	0.71	1.11	1.11	33.50	20	1.68
현강자연애 대조*	밭	39	0.71	1.00	1.00	32.12	20	1.61
찬우물	밭	39	0.71	1.38	1.38	41.65	20	2.08
찬우 물대조*	밭	39	0.71	1.00	1.00	27.69	20	1.38
자란다팜	밭	39	0.71	1.38	1.38	44.32	20	2.22
봉금의뜰	밭	39	0.71	1.38	1.38	44.32	20	2.22
종합재미	밭	39	0.71	1.11	1.11	35.65	20	1.78

주: 별표(*)는 관행농업

a: IPCC GL(2006)의 default 값 적용.

2.4. 토양유기물 함량

생태농업 실천 농장의 토양유기물은 논과 밭 모두 관행농업보다 높은 함량을 나타내었다. 논인 경우 생태농업(2.18%)이 관행농업(2.05%)보다 0.13% 더 높았고, 밭의 경우 생태농업(2.30%)이 관행농업(1.50%)보다 0.8% 더 높았다. 논에서 생태농업과 관행농업의 격차는 유의한 격차라고 할 수 없지만, 밭에서는 유의한 격차를 보였다.

관행농업 논인 경우 유기물 함량이 높게 나온 것은 (1)친환경 벼재배 기술의 발달로 친환경농산물 인증을 받지 않은 관행 농가까지 친환경적 재배기술이 보급되었다는 점, (2)생태농업 실천 농가들 중에는 이른바 ‘무투입’을 최선으로 여겨 유기물 투입을 최소화하는 경우가 있기 때문이다. 관행농가인 다량대조 농장의 경우가 (1)에 해당한다. (2)의 경우에는 생태농업 농경지의 유기물 함량이 퇴비·축분 등 유기물질을 풍부하게 투입하는 관행농업 농경지보다 낮을 수 있다.

토양유기물은 토양탄소축적의 결과물로서 생태농업이 온실가스 배출 저감의 효과가 관행농업보다 더 높다고 할 수 있다. 다만, 생태농업이 ‘무투입’을 강조하는 농업이 아니며, 퇴비 등 유기물질을 충분히 투입하여 토양탄소축적량을 더욱 높일 필요가 있다. 특히, 논에서는 휴경기에 피복작물·녹비작물·심근작물 등을 정기적으로 파종하여 토양유기물을 증가시킬 필요가 있다.

또한 생태농업 연차와 토양 유기물의 상관관계가 높지 않은 것은 농업 형태와 관계 없이 각 농가별 토양 관리 방법의 영향으로 판단된다. 농업 연차와 관계없이 중간에 토양을 보충하거나 유기물이 적은 토양을 추가하는 등 재배 외적인 요인이 토양 유기물을 결정한다.

〈표 3-10〉 토양유기물(SOM) 함량 조사 결과

(단위: %)

논		밭	
생태농업	관행농업	생태농업	관행농업
2.18	2.05	2.30%	1.50%
(8.34)	(10.61)	(3.67)	(7.07)
Δ = 0.13		Δ = 0.80	

주: () = 표준편차, Δ = (생태농업)-(관행농업)

〈표 3-11〉 토양 유기물 함량 조사 결과: 농장별

농장명	논/밭	생태농업 연차	유기물 함량(%)
풀풀	논	10년	2.1
풀풀 대조*	논	0년	1.3
다랑	논	3년	3.6
다랑 대조*	논	0년	2.8
더불어	논	45년	1.4
너멍골	논	8년	1.9
주나미	논	12년	1.9
현강자연애	밭	15년	2.0
현강자연애 대조*	밭	0년	1.0
찬우물	밭	12년	2.5
찬우물 대조*	밭	0년	2.0
자란다팜	밭	6년	2.8
봉금의뜰	밭	9년	1.9
종합재미	밭	7년	2.3

주: 별표(*)는 관행농업

IV. 결론

농업으로 인하여 온실가스가 배출되는 것이 사실이지만 생산 양식에 따라 배출량이 달라지므로 기후변화에 대응을 위해 농업 생산 양식의 선택이 중요하다. 본래 농업은 농민이 자연과의 협업으로 생산하는 산업으로 자연생태계를 보전함과 동시에 농업생태계를 가꾸어 지속가능한 생산 능력을 갖추는 일이 필수적이다. 그러한 일을 목적의식적으로 수행하는 농업 양식을 생태농업이라 할 수 있다. 현대의 농업은 일시적 생산성을 높이는 효과는 있겠지만 온실가스 배출량이 많아지고 장기적 생산성이 낮아진다는 문제가 있다. 본 연구에서 실시한 온실가스 배출량 조사에 따르면 생태농가의 온실가스 배출량은 관행농가 및 저탄소 농축산물 인증제 기준 배출량 대비 현저히 낮은 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 토양 유기탄소 축적도 생태

농가가 월등히 높으므로 생태농업 혹은 그와 비슷한 방법의 농업 형태를 통해 순배출 제로(0)를 달성할 수도 있다.

농업생태학은 생물다양성과 토양 비옥화를 생산의 기반이자 목적으로 여긴다. 혼작, 윤작, 무경운 등 생태농업의 방식은 단작, 연작, 기계화, 에너지와 외래 자원의 투입을 생산성 증대의 원리로 보는 관행농업의 것과 대조된다. 나아가, 농업생태학은 생산방법뿐만 아니라 생산자들의 연대와 협력, 유통 체계의 공정과 인간미를 중시하는데, 이번 조사에 참여한 농민들은 모두 이러한 모델을 기반으로 농업을 이행하고 있다. 추후 생태농업에 관한 추가적인 연구가 진행된다면 이러한 형태를 반영하여 생태농업을 정의할 필요가 있다.

이번 조사에 참여한 열 곳의 생태농가들은 화학비료와 화학농약을 사용하지 않는 친환경적 농업을 실천할 뿐만 아니라, 볏짚 등 작물 잔사를 환원하고, 경운을 최소화하며, 필지 내 다양한 작물을 심어 종다양성을 최대화하면서, 흔히 잡초라 일컫는 비작물 식물군마저 보존하는 등 생태적 방법을 적극적으로 도입한 경우에 해당한다. 이들은 '지구농부'라 불리는 생산자 단체에 소속하여 각자의 생태적 생산방법을 공유하며 집단지성을 발휘하여 비슷한 양식의 생산기술을 심화시킨다. 또한 '마르쉐' 농부시장을 통하여 소비자를 직접 만나 거래하며 생태적 생산물로서의 특징을 생산의 다음 단계인 유통 과정과 거래 방식에도 이어간다.

생태농업은 생물다양성이 관행농업보다 높을 것이라는 추정은 이번에 현장을 답사하여 조사함으로써 확인할 수 있었다. 생태밭에서 식물의 종수, 벌의 종수 및 개체수, 무당벌레의 개체수, 거미의 종수 및 개체수가 관행밭과 농업환경보전프로그램 이행 밭보다 높게 나타났다. 생태논에서도 식물의 종수, 양서류의 종수 및 개체수, 파충류의 개체수, 어류의 종수 및 개체수, 수서무척추류의 종수가 관행논과 농업환경보전프로그램 이행 논보다 높게 나타났다. 생태밭에서 꽃등에 개체수가 관행밭과 농업환경보전프로그램 이행 밭보다 적게 관찰된 점과, 생태논에서 수서무척추류의 개체수가 농업환경보전프로그램 이행 논보다 적게 관찰된 점이 예외적이다. 즉, 생태농업 필지가 관행농업 필지보다 생물의 다양성(biodiversity)이 더 높고 서식하는 생물의 종수도 더 많다고 할 수 있다.

생태농업은 온실가스 배출량이 관행농업보다 낮을 것이라는 추정도 배출량 추산을 통하여 확인할 수 있었다. 생태논에서 메탄의 배출이 관행논보다 높게 계산되었

지만, 이는 벧짚을 논에 환원하지 않는 관행농업보다 벧짚을 환원하는 생태농업의 약점으로 보인다. 하지만 화학비료 등 외래 자원의 투입이 높은 관행논이 외래 자원에 대한 의존성이 낮은 생태논보다 아산화질소와 이산화탄소의 배출이 높다는 점을 간과할 수 없다. 이처럼 모든 온실가스와 모든 생산과정을 계산에 포함하는 저탄소 농축산물 인증의 방식으로 계산하면 생태논의 배출량이 관행논의 것보다 낮음을 확인할 수 있었다. 밭은 저탄소 농축산물 인증의 방식으로만 계산하였고, 생태밭의 온실가스 배출량이 관행밭의 온실가스 배출량보다 낮음을 알 수 있었다. 즉, 생태농업이 관행농업보다 온실가스 배출량이 더 적다고 할 수 있다.

생태농업이 관행농업보다 토양탄소축적량이 더 많을 것이라는 추정도 축적량의 추산을 통하여 확인할 수 있었다. 논과 밭 모두 생태농업이 관행농업보다 토양탄소 축적 능력이 더 높다. 이는 축적량의 추산을 통해서도 알 수 있었지만, 현장에서 채취한 토양의 검정을 통해서도 확인할 수 있었다. 논과 밭 모두 생태농업의 토양에서 유기물 함량이 관행농업의 것보다 더 높게 나타났다.

이상과 같이 생태농업이 생물다양성 증진, 온실가스 배출량 감축, 토양 탄소 축적의 면에서 관행농업보다 뛰어난 농업 양식임을 확인하였다. 이 결과는 추정하기 어렵지 않으나 직접 조사와 분석을 통하여 확인하였다는 점이 이번 연구의 의의라고 할 수 있다.

하지만 조사 표본의 수가 적다는 점이 이번 연구의 한계로 여겨진다. 생태농업 열 농가도 표본의 수가 적거니와 비교 대상으로 선정한 관행농업 네 농가는 더욱 적다. 생물다양성을 비교할 때에는 표본의 수가 적다는 점을 보완하고자 농업환경보전프로그램의 이행 농가에서 조사한 결과와도 비교하였다. 이 보완 또한 일반적인 관행농가가 아니라 환경보전 활동을 하는 곳으로부터 데이터를 얻은 것이므로 완벽한 대조군으로 볼 수 없다. 이번 연구를 보완하기 위하여 조사기간의 연장 및 지속, 표본의 수를 통계적 유의미한 수준으로 확보하여 조사하는 일이 이루어질 필요가 있다.

이번 연구는 생태농업이 기후변화 대응 및 생물다양성 보전의 효과가 높음을 상기시키고, 이슈에 대한 화두를 제공하였다는 의미를 부여할 수 있다. 기후변화에 대응하는 전략을 수립할 때 생태농업적 방식을 적극 고려할 필요가 있다. 농업의 양식 변화를 통하여 생물다양성을 높이면서 온실가스 배출을 줄이는 전략은 지금까지

크게 고려되지 않았다. 생태농업을 실천하는 농민이야말로 가장 지혜롭게 농업의 위기를 극복하고 있는 가치 있는 사람임을 알아야 한다. 생태농업을 더욱 확산할 방안이 농업계의 다양한 곳에서 제기되기를 기대한다.

참고문헌

- 관계부처합동. (2023). *탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획*.
- 농림축산식품부. (2017). *농림축산식품부고시 제2017-76호*. 2017.8.28
- 농림축산식품부. (2021). *2050 농식품 탄소중립 추진 전략*.
- 온실가스종합정보센터. (2022). *2022 국가 온실가스 인벤토리 보고서*.
- 이승헌. (2023). “탄소중립시대, 농업분야의 이행 과제”. *한국농공학회지* 65(2), 2-9
- 한국농업기술진흥원. (2023). *농산물 온실가스 배출량 산정을 위한 공통지침*.
- 환경부·환경관리공단. (2008). *국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인 제4권*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). 「Status of the World's Soil Resources」
- Fred Magdoff. (2007). *Ecological agriculture: Principles, practices, and constraints*.
- _____. (2019). *Tool for Agroecology Performance Evaluation*
- Greenpeace International. (2015). *Ecological Farming: The Seven Principles of a Food System that has People at its Heart*
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*
- _____. (2006). 「2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories」 Vol 4. 'Agriculture, Forestry and Other Land Use'
- _____. (2020). *Climate Change and Land*.
- _____. (2023). *Climate Change 2023 Synthesis Report-Summary for Policy Makers*.
- 국제연합 기후변화협약 온실가스 인벤토리. https://di.unfccc.int/time_series