

발간등록번호

11-1543000-003332-01

농업환경보전프로그램 성과관리체계 개선방안 연구

2020. 11



농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 「농업환경보전프로그램 성과관리체계 개선방안 연구」의 최종보고서로 제출합니다.

2020년 11월

경희대학교 산학협력단 단장 김 우 식

책임연구원

연구원

연구보조원

유 가 영 교 수

이 환 휘 연구원

현 준 기 연구원

요 약 문

1. 연구 배경 및 목적

- 농업환경보전프로그램은 농업환경개선이 필요한 지역에 개선계획을 수립하고 토양, 용수, 생태 등 농업환경 보전활동을 시행하는 사업임.
- 동 사업을 통해 농업환경보전, 온실가스 감축, 생물다양성 증진 등 다양한 성과가 있으나 이에 대한 성과관리체계 및 방법이 부재함
- 특히, 국내에서는 농업부문의 탄소저장 관련한 자료가 매우 불충분하여 농업환경보전프로그램에서 토양탄소 저장과 관련된 활동 효과를 평가하는데 과학적 근거가 부족함
- 따라서 본 연구에서는 환경보전형 영농활동(식물잔사 투입, 녹비, 퇴비, 바이오차)이 농경지에서 발생하는 온실가스 감축(토양탄소 저장)에 미치는 영향을 규명하고 체계적인 평가방법과 계산 산정식을 마련하고자 함

2. 주요연구내용

- 국내·외 탄소저장량 산정관련 사례 문헌조사 및 분석
- 국내 환경보전형 영농활동 중 토양탄소 저장증대 농업활동 분석·선정
- 탄소저장량 방법론 개발을 위한 영농활동별 체계화
- 영농활동별 토양탄소 저장량 산정을 위한 적용 계수 조사·분석
- 영농활동별 토양탄소 저장량 계산기 스프레드시트 구축
- 현행 농업환경보전프로그램 사업대상지 적용 및 효과정량화

3. 연구결과

가. 국내·외 탄소저장량 산정관련 사례 문헌조사 및 분석

- (일본) Roth-C(Rothamasted Carbon Model)을 기반으로 하여 일본 각지의 논·밭에서 장기간 시험데이터를 사용하여 검·보정한 자료를 이용하여 토양탄소저장량 및 온실가스 감축량을 계산하고 있음
- (캐나다) 사스카추완주 농경지를 중심으로 작물과 농업활동에 따른 토양내 유기탄소 변화량을 20년간 비교하여 조사하였음
 - Prairie Soil Carbon Balance Project (PSCB project)로 농경지 토양보전을 위해 136개의 상업용 농경지에서 토양유기탄소를 조사한 결과 변화량은 1996년부터 2018년까지 5% 증가
- (미국) 토지 이용에 따른 토양내 유기탄소 저장량을 조사하여 기후변화에 따른 미래 토양탄소 저장량을 예측하여 Cubist regression tree algorithm을 기반으로 하는 모델을 개발·운영하고 있음
- (중국) 지역별로 토양유기탄소 저장량을 조사하고, 지난 20년 동안의 토양유기탄소 변화량을 지정학적 차이에 따라 연구하였음
 - 토지 이용에 따라, 산림(forest), 초지(grassland), 습지(wetland), 작물(cropland) 토양에서의 2004~2014년의 SOC 저장량은 각각 34.08 ± 5.43 , 25.69 ± 4.71 , 3.62 ± 0.80 , 15.17 ± 2.20 Pg C 이었음
- (국내) 밭 토양에서 경운 및 무경운 활동에서의 왕겨숯을 각각 투입하였을 때, 왕겨 숯 투입량이 많을수록 총 탄소함량이 증가하였음(국립농업과학원, 2016).
 - 고도가 토양지온에 영향을 미쳐 탄소저장량이 변화됨을 연구하였고(국립농업과학원, 2016) 시비 및 토양개량제 투입에 따른 논토양의 탄소저장량은 화학비료>헤어리베치>돈분퇴비의 순서였고, 탄소격리량은 돈분퇴비>헤어리베치>화학비료 순으로 증가하였음(서울대학교, 2013)

나. 국내 환경보전형 영농활동 중 토양탄소 저장증대 농업활동 분석·선정

- 환경보전형 영농활동 중 온실가스 감축 및 토양탄소 저장증대 농업활동을 분석하고 다음과 같이 선정하였음
 - 경운농법으로 관행 기술인 경운기술로부터 무경운농업 기술 도입
 - 비료작물농법 기술에서 녹비작물 기술 도입
 - 토양개량제 기술에서 작물잔사 환원
 - 퇴비 투입
 - 바이오차 투입
 - 완효성 비료 투입은 기존 화학비료 대체 효과가 있어 온실가스 감축에 기여는 크지만 토양탄소 저장증대 효과는 직접적이지 않음

다. 탄소저장량 방법론 개발을 위한 영농활동별 체계화

- 토양탄소 저장증대에 영향을 주는 영농활동으로는 경운, 작부체계, 녹비, 퇴비, 그리고 바이오차가 선정되었음
 - 영농활동은 현장에서 단독으로만 수행되는 것이 아니라 두 개 이상이 결합되므로 이에 따른 위계를 체계적으로 고려할 필요가 있음
- 2019 개정된 IPCC 가이드라인의 Tier 1 방법론 및 계수는 아래 표와 같음
 - 무기토양에서 연간 토양탄소 축적량의 변화

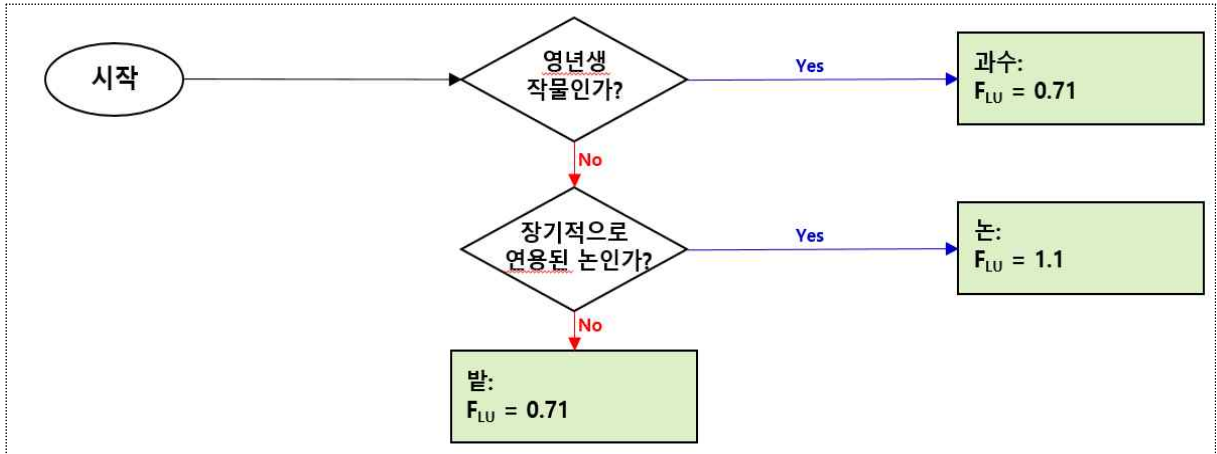
$$\Delta C_{Mineral} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC = \sum (SOC_{REF} \cdot F_{LU} \cdot F_{MG} \cdot F_I \cdot A)$$

(주: T가 ≥20년이면, 이 식에서 D를 대신하여 T를 사용한다.)

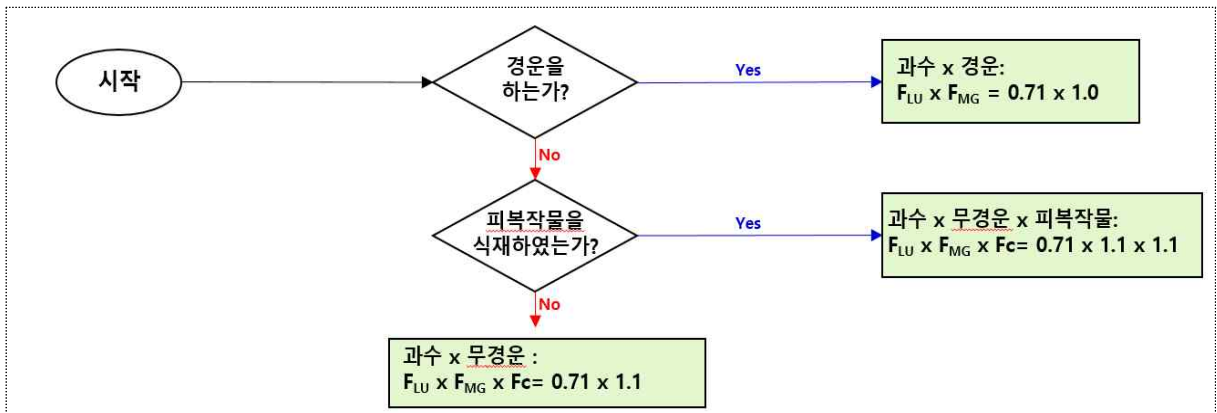
$\Delta C_{Mineral}$ = 무기토양에서 연간 탄소(C) 축적량의 변화 (ton C/yr)
 SOC_0 = 인벤토리 기간 중 마지막 해의 토양 유기탄소(C) 축적량 (ton C)
 $SOC_{(0-T)}$ = 인벤토리 기간 중 첫 해의 토양 유기탄소(C) 축적량 (ton C)
 T = 단일 인벤토리기간의 연수 (yr)
 D = 평형 SOC 값 사이의 전환에 관한 기본값 기간인 저장변화계수의 시간 의존도 (yr)
 SOC_{REF} = 탄소(C) 축적량 인용값 (ton C/ha)
 F_{LU} : 토지이용에 따른 토양탄소 축적변화계수
 F_{MG} = 경운 정도에 따른 토양탄소 축적변화계수
 F_I = 유기물 투입에 따른 탄소 축적변화계수
 A = 산정된 층의 토지 면적 층 (ha)

- 농업에서의 토지이용 고려는 영년생 작물 여부에 따라 과수 및 논, 밭으로 구분하여 아래와 같은 순서도를 작성하였음



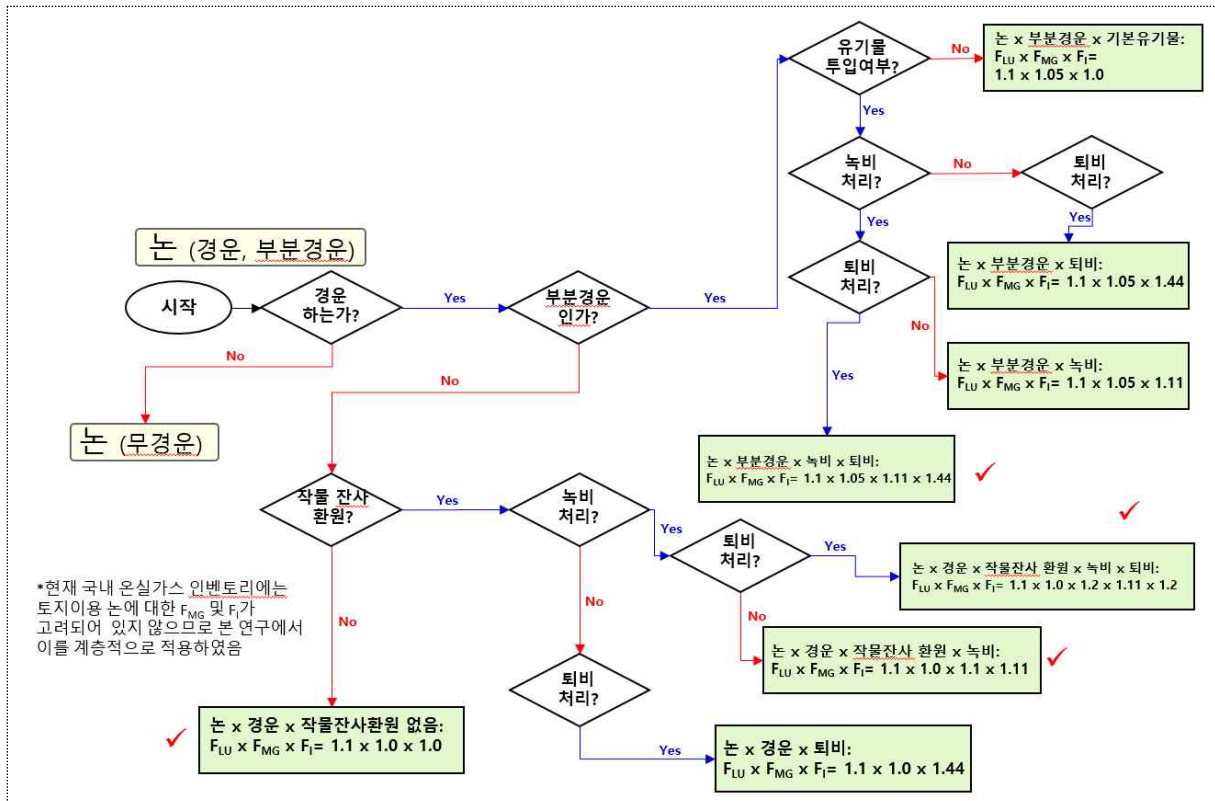
<토지이용에 따른 영농활동 체계화>

- 과수원에 적용되는 영농활동은 무경운과 피복작물 두 개를 고려하여 아래와 같은 순서도를 작성하였음



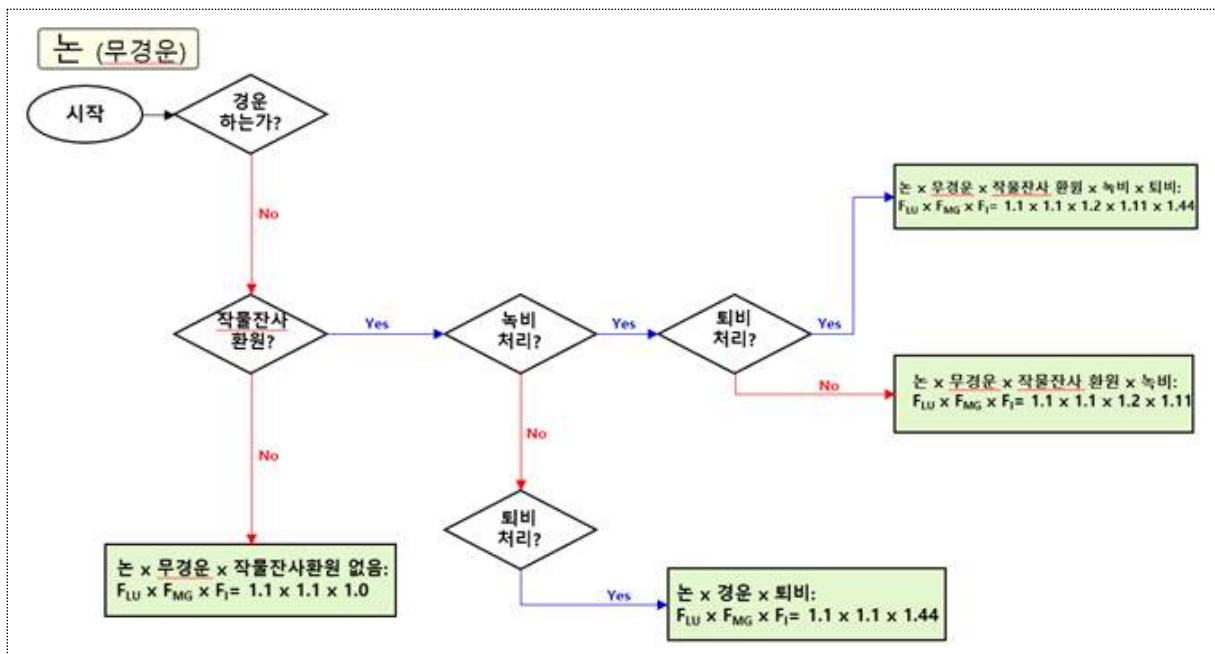
<과수원에서의 영농활동 체계화>

- 논에 적용되는 영농활동은 무경운, 작물잔사 환원, 녹비, 퇴비, 바이오차를 고려하여 아래와 같은 순서도를 작성하였음
- 논 면적이 농경지의 과반을 차지하는 국내 실정에 맞지 않으므로 본 연구에서는 이를 개정하여 아래와 같이 나누어 고려하였음
- 논에서 경운 또는 부분 경운을 하는 경우의 토양탄소 저장량 변화

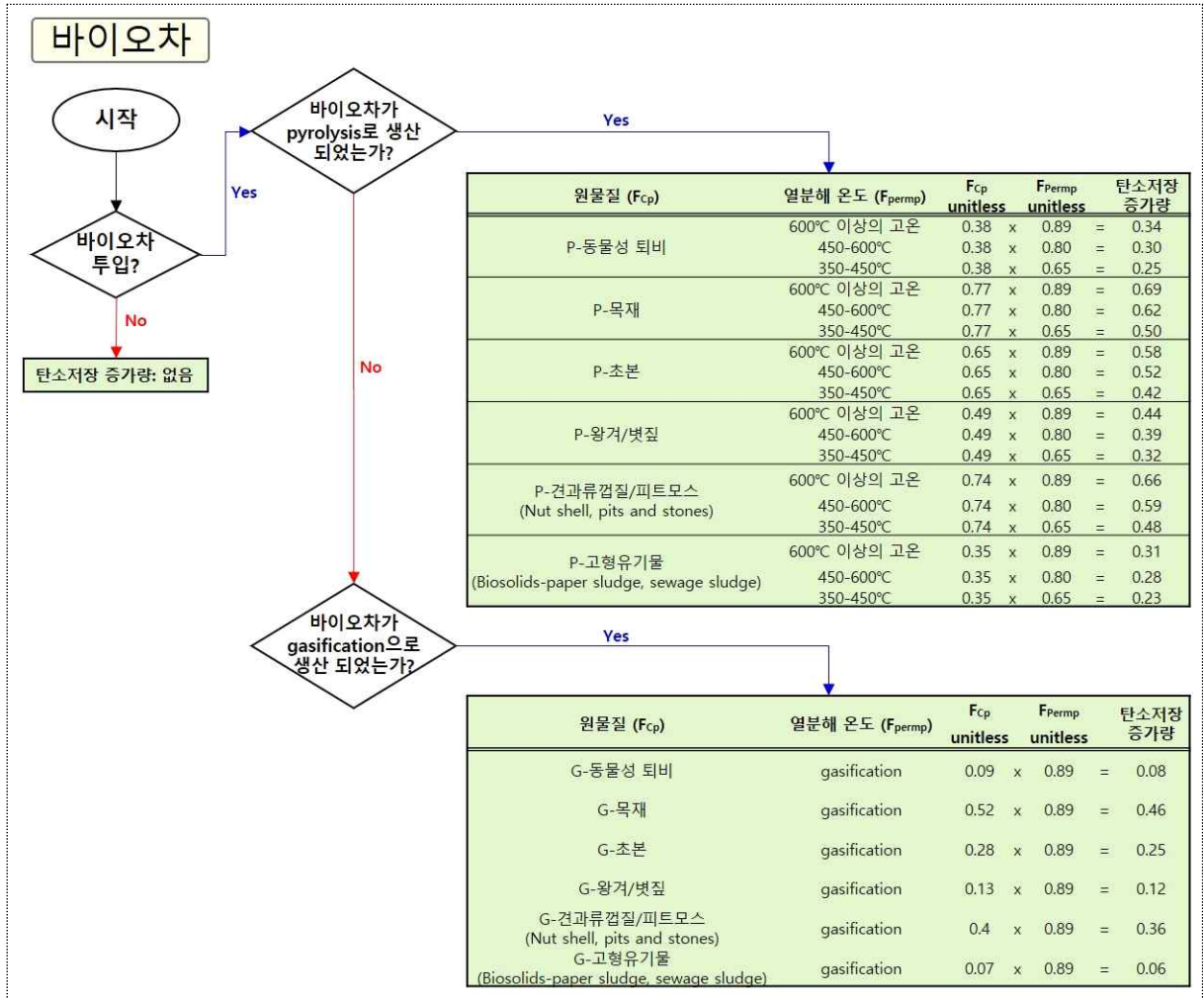


<경운 및 부분경운 시 논에서의 영농활동 체계화>

- 논에서 무경운을 하는 경우의 토양탄소 저장량 변화



< 무경운 시 논에서의 영농활동 체계화>



<바이오차 투입 시 탄소저장량 산정 체계화>

라. 영농활동별 토양탄소 저장량 산정을 위한 적용 계수 조사·분석

- (경운) 관행농업으로 상정했을 때 부분경운과 무경운에 대한 계수는 각각 1.05와 1.10으로 적용하였으며 논, 밭, 과수에 동일한 계수 적용
- (녹비) 녹비의 종류가 콩과와 벼과인 경우로 나누어 생각해 볼 수는 있으나 국내 자료의 부족으로 두 경우 모두 IPCC의 기본 값인 1.11을 적용
- (유기물 투입) 유기물 투입 영농활동은 작물잔사 환원과 퇴비사용으로 나누어 고려하였으며, 작물잔사를 토양으로 환원하는 경우에는 계수값을 1.11을 적용하였고, 퇴비는 작물잔사 환원 수준과 무관하게 모두 IPCC의 기본값인 1.30의 계수를 적용
- (바이오차) 바이오차 투입에 따른 토양탄소저장 증가량은 바이오차 생산 시의 열분해 방법, 원재료, 열분해 온도에 따른 계수를 곱하여 산정됨(식 1)

$$\Delta BC_{Mineral} = \sum_{p=1}^n (BC_{투입량_p} \times F_{탄소함량_p} \times F_{잔존율_p}) \dots \dots \dots \text{식 1}$$

$\Delta BC_{Mineral}$: 바이오차 투입에 따른 총 토양 탄소 저장 증가량, ton sequestered C
 $BC_{투입량_p}$: 바이오차 생산 타입 p의 토양 투입량, ton biochar dry matter
 $F_{탄소함량_p}$: 바이오차 생산 타입 p의 유기탄소 함량, ton C ton⁻¹ biochar dry matter
 $F_{잔존율_p}$: 바이오차 생산 타입 p의 토양 투입 100년 후 분해되지 않고 잔존하는 비율(표), ton sequestered C ton C⁻¹

<표> 원물질 및 열분해 방법별 바이오차의 유기탄소 함량 (IPCC, 2019)

열분해 방법	원물질	$F_{탄소함량_p}$	95% 신뢰구간
		ton C ton ⁻¹ biochar dry matter	% of the mean
Pyrolysis	동물성 퇴비	0.38	49
	목재	0.77	42
	초본	0.65	45
	왕겨/벗짚	0.49	41
	견과류껍질/피트모스	0.74	39
	고형유기물	0.35	40
Gasification	동물성 퇴비	0.09	53
	목재	0.52	52
	초본	0.28	50
	왕겨/벗짚	0.13	50
	견과류껍질/피트모스	0.40	52
	고형유기물	0.07	50

- (완효성 비료) 토양탄소 저장증대를 위한 영농활동으로 분류되지는 않았으나 농업환경보존프로그램에서 많이 제안되는 기술이므로 이와 관련된 온실가스 감축 효과에 대해 정리하였음
 - 밭에서 고추 재배시 완효성비료인 LCU(Latex Coated Urea) 시용에 따른 아산화질소 배출량은 화학비료 시용 대비 50.0% 감축효과를 보임(국립농업과학원, 2012; 김건엽 외, 2018)
 - 아산화질소 감축효과: 화학비료 대비 50%
 - 비료이용 효율: 화학비료 대비 완효성 비료 시용 17.0% 증대
 - 홍고추 수량: 화학비료 대비 완효성 비료 시용으로 7.3% 증수
 - 작물의 비료효율 증대와 더불어 밭작물 재배지의 온실가스 배출 감축 기대

마. 영농활동별 토양탄소 저장량 계산기 스프레드시트 구축

- 영농활동의 변경에 따른 농경지 토양 탄소 저장량 변화를 산정하기 위한 계산 파일을 만들었으며, 그 사용법은 box. 1과 같음. 원본 파일은 부록으로 첨부하였음(탄소 저장량 계산기.xlsx).

Box 1. 탄소 저장량 계산기 스프레드시트 사용 방법

1. 기본 화면

농경지 토양 유기탄소 저장량 계산기					
1. 토성, 농경지 종류, 경운 수준, 유기물 투입 수준을 선택 (기존 활동/변경할 활동) 후 농경지 면적을 입력					
2. 토양 유기탄소 저장량을 알고있는 농경지의 경우 값을 직접 입력					
3. 기존 농업활동을 유지했을 때의 총 탄소 저장량과 농업환경을 변경했을 때 20년 후의 총 탄소 저장량을 산정 후 최종적으로 연간 탄소 저장 증가량을 산정					
4. 바이오차 투입 농경지의 경우 바이오차 투입량을 입력하고 바이오차의 원물질, 열분해 방법 (P=pyrolysis, G=gasification), 열분해 온도를 선택하여 바이오차 투입에 따른 토양 탄소 저장 증가량을 산정할 수 있음					
토성(기본 토양유기탄소축적계수) --t C ha ⁻¹ , 토양 깊이 0-30cm--	농경지 면적 -ha--	연간 탄소 저장 증가량 --ton C yr ⁻¹ --	바이오차 탄소 저장량 --ton C--		
LAC	55	10	2.27	50.05	
<기존영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계	녹비**	퇴비***	경운수준(F _{MG})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	과과	퇴입	경운	453.88
	0.69	0.92	1	1.3	1
<신규영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계	녹비**	퇴비***	경운수준(F _{MG})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	과과	퇴입	무경운	499.27
	0.69	0.92	1	1.3	1.1
* Low, Medium, High는 작부체계(작물별 작물전사 환경량)를 의미하며 그 분류는 아래와 같음 Low: 작물전사를 수거 또는 소각하여 토양에 유입되는 양이 적은 농경지, 재소-담배-면 등 작물전사의 양이 적은 작물 재배지, 무기질비료를 주지 않거나 질소고정 작물이 아닌 경우 Medium: 작물전사를 모두 토양에 환원시키는 곡물 재배지, 작물전사를 수거해가는 경우 퇴비 등의 추가 유기물이 투입되는 농경지, 무기질 비료를 주거나 질소고정 식물을 윤작하는 농경지 High: 곡물류보다 유의하게 작물전사량이 많은 작물 재배지, 녹비, 피복작물, 휴경, 관개, 다년생 조분류 등의 탄소 저장 용대 활동이 이루어지는 농경지 ** : 녹비의 토양탄소축적변화계수는 국가 고유 값임 *** : Low, Medium, High는 작부체계(작물전사 환경량)를 의미함. Low, Medium 농경지에서의 퇴비 사용에 따른 토양탄소 저장 증가량은 계수가 없기 때문에 1로 대체함					
<바이오차 투입>					
바이오차 투입량 --kg--	바이오차 원물질 및 열분해 방법	바이오차 열분해 온도	탄소저장 증가량 --kg C--		
100	P-류개	350-450도	50.05		
		0.77	0.65		
※ 본 산정방법은 20년 이상 농경지로 유지된 농경지만을 대상으로 함					

2. 토성 선택 및 농경지 면적 입력

- 4가지 토성 (HAC, LAC, 사질토, 화산회토) 중 하나를 선택하면 기본 토양 유기탄소 축적계수가 입력된다.
- 농경지의 면적을 ha 단위로 입력한다.

토성(기본 토양유기탄소축적계수) --t C ha ⁻¹ , 토양 깊이 0-30cm--	농경지 면적 -ha--
LAC	10
HAC	
LAC	
사질토	
화산회토	

3. 기존영농활동 선택

- 농업환경보전프로그램에 참여하기 전 수행 중이었던 영농활동을 선택한다. 활동을 선택하면 활동 별 탄소축적변화계수가 자동으로 입력된다.
 - 농경지 종류 : 논, 밭/과수원, 다년생 목본류 중 하나를 선택한다.
 - 농경지 종류 : 표 아래의 주의사항을 참고하여 유기물 투입수준 - 작부체계를 선택한다.
 - 녹비 : 녹비 작물을 재배하는 경우 작물의 종에 따라 콩과 또는 버과를 선택한다.
 - 퇴비 : 퇴비를 투입여부를 선택한다.
 - 경운 : 관행에 따라 경운을 할 경우 경운, 2-3년 간격으로 경운을 하거나 작물을 심는 일부분만 경운을 할 경우 부분경운을, 경운을 하지 않을 경우 무경운을 선택한다.
- 농업활동의 선택을 마치면 현재 농경지 전체의 토양 탄소 저장량이 산정된다(30cm 깊이 기준).

<기존영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계	녹비**	퇴비***	경운수준(F _{MG})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	과과	퇴입	경운	453.88
	0.69	0.92	1	1.3	1

Box 1. 탄소 저장량 계산기 스프레드시트 사용 방법 (계속)

4. 신규영농활동 선택

- 농업환경보전프로그램에 참여하며 변경하고자 하는 영농활동을 선택한다(ex 경운 → 무경운). 기존과 동일한 농업활동은 <기존영농활동>과 동일한 선택지로 유지한다.
- 농업활동의 선택을 마치면 변경 20년 후의 농경지 전체 토양 탄소 저장량이 산정된다 (30cm 깊이 기준).

<신규영농활동>					
농경지종류(F ₁₀)	유기물 투입 수준(F ₂) - 작부체계	녹비**	퇴비***	경운수준(F _{10a})	총 탄소 저장량
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	unitless-----		무경운	499.27
	0.69	0.92	1	1.3	1.1

5. 바이오차 관련 정보 선택

- 바이오차를 사용하는 농경지의 경우 바이오차 관련 정보를 입력하여 토양 탄소 저장 증가량을 산정할 수 있다.
 - 바이오차 투입량 : 해당 농경지에 사용된 바이오차의 총 중량을 기입한다.
 - 바이오차 원물질 및 열분해 방법 : 열분해로 제조된 바이오차의 경우 P, 가스화(gasification)을 통해 제조된 바이오차의 경우 G가 붙어있는 원물질 종류를 선택한다.
 - 바이오차의 열분해 온도를 선택한다.
 - 바이오차 1회 투입으로 증가하는 탄소의 양이 산정된다.

<바이오차 투입>			
바이오차 투입량	바이오차 원물질 및 열분해 방법	바이오차 열분해 온도	탄소저장 증가량
100	P-목재	350-450도	50.05
		0.77	0.65

6. 연간 탄소 저장 증가량과 바이오차 탄소 저장량 바이오차 관련 정보 선택

- 1-5번 단계를 모두 수행하면 영농활동의 변경에 따른 연간 탄소 저장 증가량이 산정된다. 이 값은 영농활동 변경 시 20년간 탄소 저장량이 선형으로 증가한다는 가정 하에 산정된 값이며 21년부터의 탄소 저장 증가량은 0이다.
- 바이오차 탄소 저장량은 바이오차 투입한 뒤 (1회 당) 100년 후에도 분해되지 않고 남아있을 바이오차 탄소의 양을 산정한 것이다.

연간 탄소 저장 증가량	바이오차 탄소 저장량
--ton C yr ⁻¹ --	--ton C--
2.27	50.05

바. 현행 농업환경보전프로그램 사업대상지 적용 및 효과정량화

- 3개 지역(상주, 문경, 보령) 농업환경보전프로그램 참여농가의 영농활동별 탄소저장증가량을 산정한 결과 232tC가 증가한 것으로 나타남

지역	농경지 종류	면적 ha	변경된 영농활동	토양탄소저장량 (변경 전)	토양탄소저장량 (변경 20년 후)	탄소저장 증대량
				---ton C---		
상주	논	29.89	경운횟수 줄이기(부분경운)	2,885	3,029	144
	밭	12.14	경운횟수 줄이기(부분경운)	551	579	28
문경	논	10.76	경운 최소화(부분경운)	1,039	1,091	52
	밭	3.37	경운 최소화(부분경운)	153	161	9

목 차

제 1장 연구 개요

- 1. 연구 배경 및 목적 2
- 2. 연구 내용 및 방법 4

제 2장 농업의 탄소 저장량 산정체계 현황

- 1. 국외 사례 10
- 2. 국내 사례 14

제 3장 탄소저장량 증대 영농활동 분석

- 1. 국내 탄소저장 증대 영농활동 사례조사 22
- 2. 농업부문 토양탄소 저장증대 영농활동 선정 26

제 4장 탄소저장량 정량화 방법론 개발

- 1. 영농활동별 체계화 28
- 2. 영농활동별 토양탄소 축적계수 산정 39
- 3. 탄소저장량 계산기 스프레드시트 구축 48

제 5장 현행 친환경 농업환경 보전 프로그램 영농활동 효과 정량화

- 1. 현행 친환경 농업환경 보전 프로그램 영농활동 정리 52
- 2. 탄소 저장량 증가 효과 정량화 53

- 참고 문헌 57

- 표 목차 -

표 1. 농업환경 보전 프로그램 분야별 활동취지 및 세부활동 분야	2
표 2. 본 연구 관련 자문단 구성	8
표 3. 논 토양탄소격리 기능 평가	17
표 4. 유기와 관행 논 토양에서 토양탄소저장량에 따른 경제적 가치 평가	18
표 5. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론	22
표 6. 저탄소 농축산물 인증 가능한 품목	23
표 7. 저탄소 농축산물 인증 취득을 위한 저탄소 농업기술 목록	24
표 8. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론	25
표 9. 무경운 또는 부분경운에 따른 연평균 SOC 변화량(국내 연구 결과)	40
표 10. 무경운 또는 부분경운에 따른 연평균 SOC 변화량(해외 연구 결과)	40
표 11. 녹비 작물 재배에 따른 연평균 SOC 변화량(국내 연구 결과)	41
표 12. 원물질 및 열분해 방법별 바이오차의 유기탄소 함량(IPCC, 2019)	43
표 13. 열분해 온도별 잔존하는 바이오차 탄소비율(IPCC, 2019)	43
표 14. 고추 재배 시 질소공급원별 비료 이용 효율 및 아산화질소 배출 평가	44
표 15. 고추 재배 시 비료 투입 및 수량 평가	45
표 16. 콩 재배 시 질소공급원별 비료 이용 효율 및 아산화질소 배출 평가	46
표 17. 콩 재배 시 비료 투입 및 수량 평가	46
표 18. 처리구별 온실가스 배출량에 대한 온난화지수(GWP)	47
표 19. 세 지역에서의 농업환경 보존 프로그램 실시 현황 표	52
표 20. 상주 및 문경 지역의 부분경운 도입에 따른 토양탄소저장 변화량 산정	56

- 그림 목차 -

그림 1. 농업의 토양유기탄소 축적 개념도	3
그림 2. 연구내용 및 추진계획	6
그림 3. 연구팀 구성 체계	7
그림 4. 일본의 토양 특성과 기상자료 선택에 의한 토양 탄소 저장량 조사 ...	11
그림 5. 캐나다 토지이용관리에 따른 토양유기탄소 변화량 조사	11
그림 6. 미국 위스콘신주 토양유기탄소 저장량 맵핑 및 예측	12
그림 7. 중국 지리적 차이에 따른 토양 내 유기탄소 저장량 조사	13
그림 8. 토양 탄소저장 축적량에 따른 잠재능	14
그림 9. 경운 및 무경운(22년) 논포장에 ^{13}C -표지 벧짚 처리	16
그림 10. 우리나라 논 0~15 cm의 토양탄소 저장량 분포도(kg m^{-2})	17
그림 11. 대한민국의 토양 탄소 저장량에 대한 공간적 변이	19
그림 12. 토양 특성에 따른 진도 지역의 토양유기탄소 저장량 추정	19
그림 13. 저탄소 농축산물 인증 마크	23
그림 14. 토지이용에 따른 영농활동 체계화	32
그림 15. 과수원에서의 영농활동 체계화	32
그림 16. 경운 및 부분경운 시 논에서의 영농활동 체계화	33
그림 17. 무경운 시 논에서의 영농활동 체계화	34
그림 18. 경운 시 밭에서의 영농활동 체계화	35
그림 19. 부분경운 시 밭에서의 영농활동 체계화	36
그림 20. 무경운 시 밭에서의 영농활동 체계화	37
그림 21. 바이오차 투입 시 탄소 저장량 산정 체계화	38
그림 22. 고추 재배기간 아산화질소 총 배출량	45
그림 23. 벼 논에서 양수분 복합관리에 따른 아산화질소 및 메탄 배출특성 ...	47

제 1장 연구개요

제 1장 연구 개요

1. 연구 배경 및 목적

가. 연구배경 및 필요성

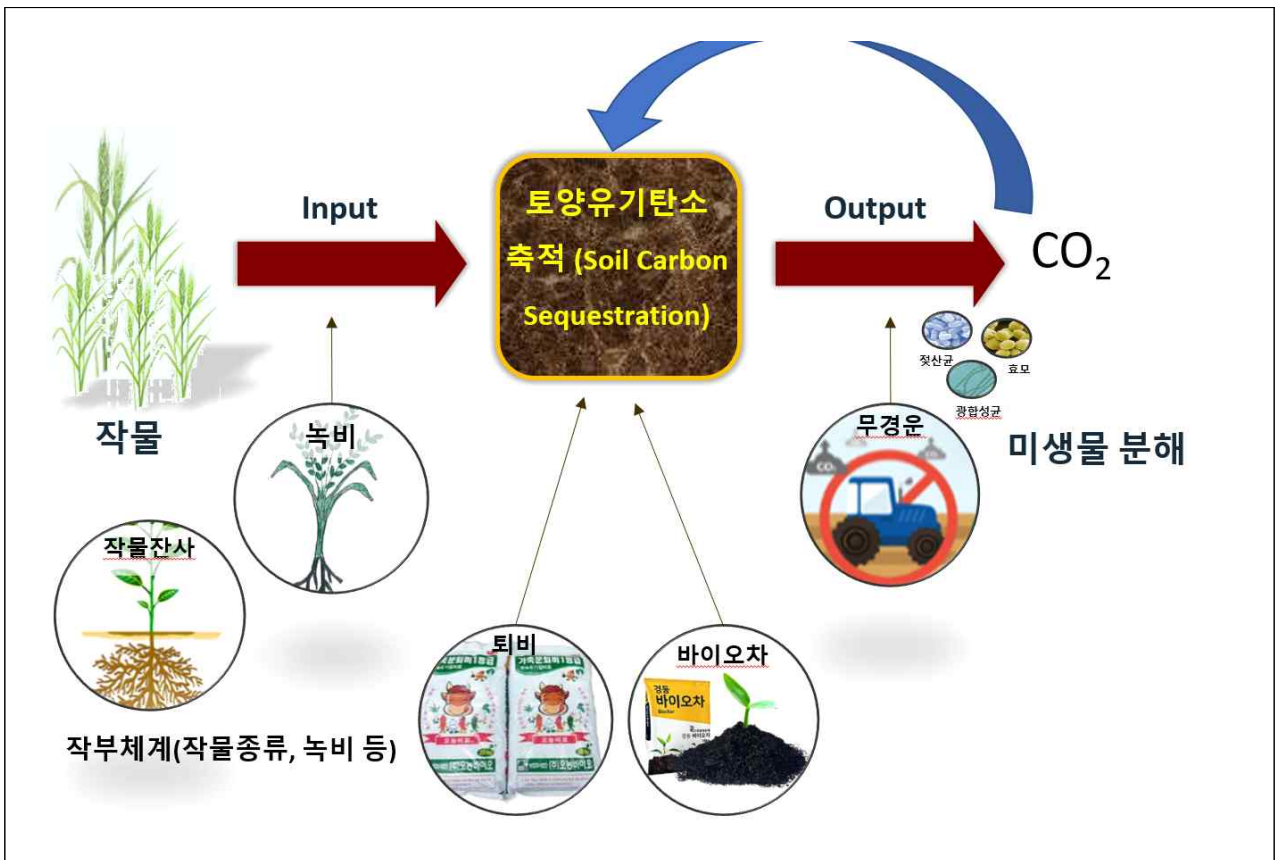
- 농림축산식품부는 농업에 대한 국민의 인식이 과거 식량 공급 기능에서 생태계 환경서비스 기능으로 확장됨에 따라 제4차 친환경농업육성 5개년 계획(2016-2020)에서 농업환경 보전 프로그램 시행체계를 마련하였음
- 농업환경 보전 프로그램은 농업의 공익적 가치 제고를 위하여 농촌 공동체 활성화, 농업환경보전 의식 개선 및 관련 활동 실천지원을 통해 농업인들의 농업환경을 개선하고자 하는 목적으로 시작되었음
- 농업환경 보전 프로그램 활동 분야는 토양, 용수, 대기, 경관/생활, 유산/생태의 분야이며 이와 관련된 활동 취지 및 세부 활동 분야는 아래 <표 1>과 같음

<표 1> 농업환경 보전 프로그램 분야별 활동취지 및 세부활동 분야

분야	활동취지	세부활동분야
토양	양분관리, 농약저감 등 저투입농법 유도, 비점오염원 관리 등	양분관리, 침식방지, 농약저감, 활동 등
용수	수질개선 및 비점오염원 관리 등	오염된 하천 및 저수지 청소, 사용량 절감 활동 등
대기	온실가스 감축 및 축산악취 저감	온실가스 감축을 위한 경운 최소화, 축산악취 저감활동 등
경관/생활	농촌경관 및 정주여건 개선, 어메니티증진 등	농촌경관 개선 활동, 생활환경 개선 활동 등
유산/생태	농경문화 보전, 생물다양성 제고 등 생태계 보전	전통 농경문화 보전 및 둠벙조성 등 생태계기반 조성 활동

- 온실가스 감축 부문에 있어서 농업은 비록 총배출량이 많지는 않으나 비이산화탄소 부분의 기여도가 높은 편임

- 하지만 농업 부문에서의 감축활동은 활동에 따른 비용이 상대적으로 낮고 공편익이 타부문에 비해 매우 높은 편으로 국가 온실가스 관리에 있어 간과되어서는 안되는 중요한 분야임
- 농업 부문의 토양 탄소 저장은 농업 부문의 대표적 감축활동임. 토양탄소 저장량은 토양으로 들어오는 유기물의 유입과 미생물에 의한 유기물의 분해 사이의 균형을 통해 결정되는데, 토양 탄소저장의 증대를 위해서는 유입의 증가와 유출의 감소를 가져와야 함
- 유기물 유입은 주로 작물의 잔사 투입, 녹비, 퇴비, 바이오차 등을 통해 토양에 저장되고 미생물의 유기물 분해는 경운과 같은 활동에 의해 토양의 물리적 환경을 바꿈으로써 변화시킬 수 원리를 가지고 있음(그림 1)



<그림 1> 농업의 토양유기탄소 축적 개념도

- 하지만 국내에는 농업부문의 탄소저장 관련한 자료가 매우 불충분하여 농업환경 보전 프로그램에서 토양탄소 저장과 관련된 활동 효과를 평가하는 데에 과학적 근거가 부족함

나. 연구 목적

- 본 연구에서는 환경보전형 영농활동(식물잔사 투입, 녹비, 퇴비, 바이오차)이 농경지에서 발생하는 온실가스 감축(토양탄소 저장)에 미치는 영향을 규명하고 체계적인 평가방법, 산정식을 마련하고자 함
 - 농업부문에서 토양탄소 저장을 증대시키는 영농활동(식물잔사 투입, 녹비, 퇴비, 바이오차)에 대한 토양탄소 저장 효과를 정량화하는 방법론 개발
 - 현행 농업환경보전 프로그램 사업 중 토양탄소 저장 사업에 대한 온실가스 감축효과가 있는 활동을 발굴하고 정량화하는 방법론 마련

2. 연구 내용 및 방법

가. 연구 내용

□ 농업환경에 적용 가능한 온실가스 감축 사례 분석

- 농업활동별 국내·외 온실가스 감축 및 탄소저장량 산정관련 문헌조사
 - 국내 사례
 - 농업활동별 온실감축 사례 분석
 - 농업활동별 탄소저장량 산정자료 조사
 - 국외 사례
 - 농업활동별 온실감축 사례 분석
 - 농업활동별 탄소저장량 산정자료 조사
- 현행 농업환경보전 프로그램 및 추가 가능한 농업활동 조사
 - 기존 농업활동 유형화

- (예시) 완효성비료 사용, 퇴비·액비사용, 농업부산물 논·밭 환원, 휴경기
녹비작물 재배 및 토양환원, 경운최소화
- 추가 가능한 농업활동 제시
 - 기존 활동 이외에 추가 가능한 활동 파악
 - 인건비와 연료비 절감과 같은 비용효과적인 측면 및 환경개선 측면에서의
활동 파악

□ 농업부문 활동별 온실가스 감축량 산정 방법론 개발

○ 자료 수집

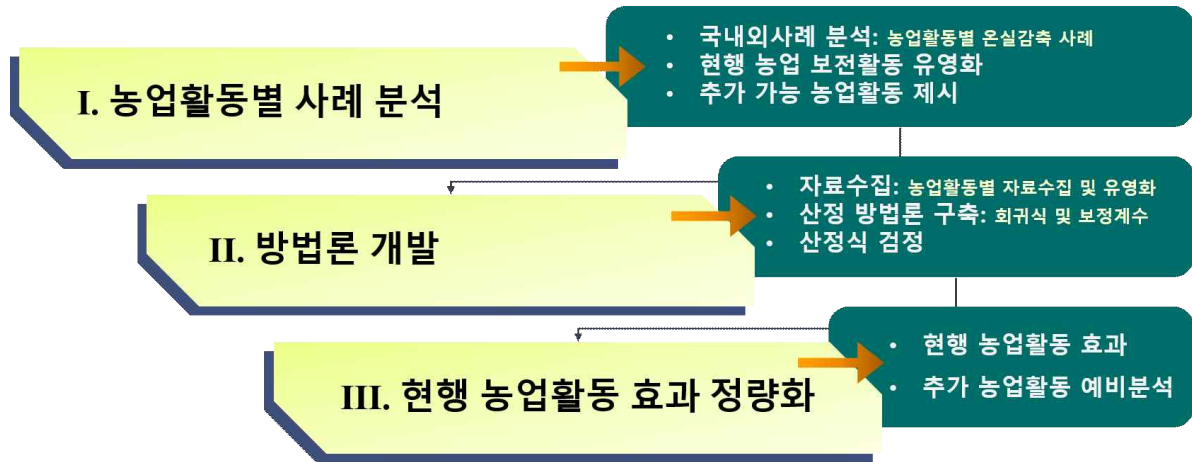
- 농업 활동별 온실가스 감축 및 탄소저장량 변화 자료 수집
 - 국내 보고서 및 영농활용자료, 국내외 논문을 통한 자료 수집
 - 수집된 자료의 표준화(GWP: Global warming potential로 통일)
- 수집된 자료에 대한 지역(기후), 작물, 토성별 효과 유형화
 - (대상지) 북부, 중부, 남부 등
 - (농작물 및 과수작물) 작물별 유의한 차이가 없다면 벼, 밭작물, 과수
작물로 구분
 - (녹비작물) 귀리, 헤어리베치, 메밀, 자운영, 보리, 호밀, 레드클로버 등

○ 산정 방법론 구축 및 검증

- 산정식 마련
 - 표준화된 자료를 이용 각 농업활동별 회귀식 마련
 - 농업활동 별 회귀식에 기후, 작물, 토성 등의 효과를 고려한 보정계수 도출
- 산정식 검증
 - 국내·외 문헌과 비교한 산정식 교차 검증

□ 산정방법론의 적용

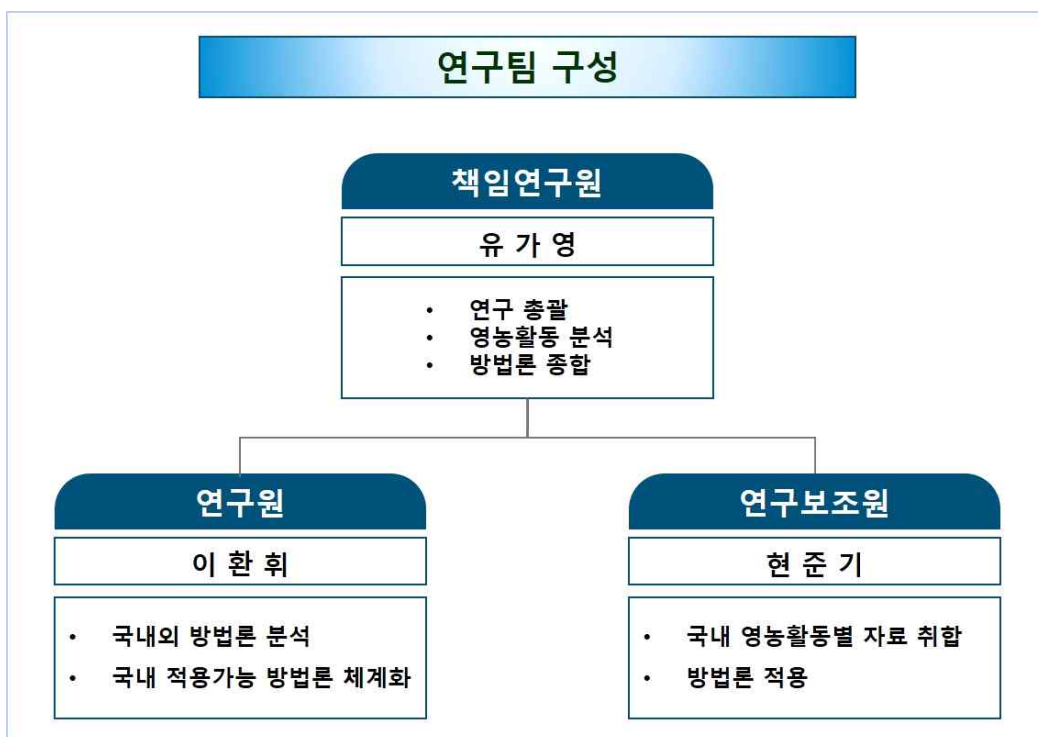
- 현행 농업환경보전 프로그램 활동에 대한 온실가스 감축효과 정량화
- 추가 농업활동에 따른 온실가스 감축효과 예비분석



<그림 2> 연구내용 및 추진계획

나. 연구 방법

- 본 연구진은 2011년부터 농업부문 온실가스 인벤토리 관련 배출계수 연구를 꾸준히 진행하였고, 토양탄소 저장증대를 위한 영농활동 중 하나인 바이오차르 토양투입과 관련된 연구활동을 지속하고 있음
- 이에 농업부문 기후변화 대응 동향에 대한 폭넓은 전문지식을 가진 연구진을 아래와 같이 구성하였음



<그림 3> 연구팀 구성 체계

- 국내·외 문헌 조사
 - 선행 연구자료, 사업추진실적 및 평가자료, 국내·외 연구사례 등 문헌 조사
 - 농업부문 온실가스 감축과 연계된 영농활동 검토를 위해 아래의 자료 검토

* 2030 온실가스 감축 로드맵(수정안, 2019년 9월)

** 제2차 국가 기후변화 적응대책

*** 농업기술 실용화 재단 농업·농촌 자발적 온실가스 감축 사업

○ 관련부서 전문가 인터뷰

- 국내 농업분야의 온실가스 감축 관련분야 전문가 자문 조사
- 국내 기후변화 저탄소정책 관련 전문가 자문 조사

<표 2> 본 연구 관련 자문단 구성

성 명	기관/분과	직위
박 성 진	국립농업과학원 기후변화 생태과	연구사
홍 창 오	부산대학교	연구관
임 영 아	한국농촌경제연구원	부연구위원
송 영 일	KETI 국가기후변화적응센터	선임연구위원

○ 농업환경 보전활동별 토양탄소저장량 산정식 전문가 의견 수렴

- 농업환경보전프로그램 관련 토양탄소저장 전문가 위촉
- 토양탄소저장량 관련 전문가 검토 및 보완 의견 수렴
- 농업환경 활동별 탄소저장량 산정식 방법론 보충 및 구축

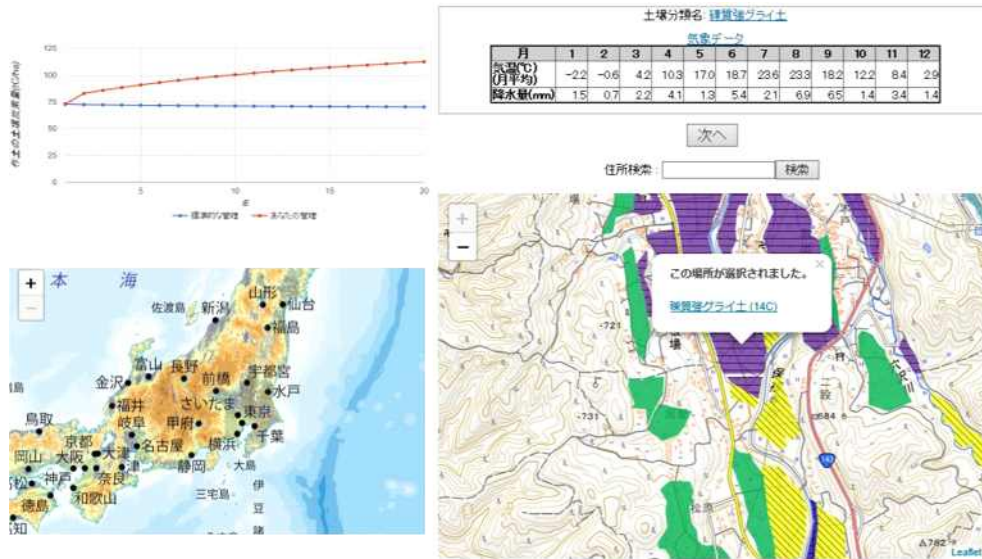
제 2장 농업 토양의 탄소저장량 산정체계 현황

제 2장 농업의 탄소저장량 산정체계 현황

1. 국외 사례

가. 일본

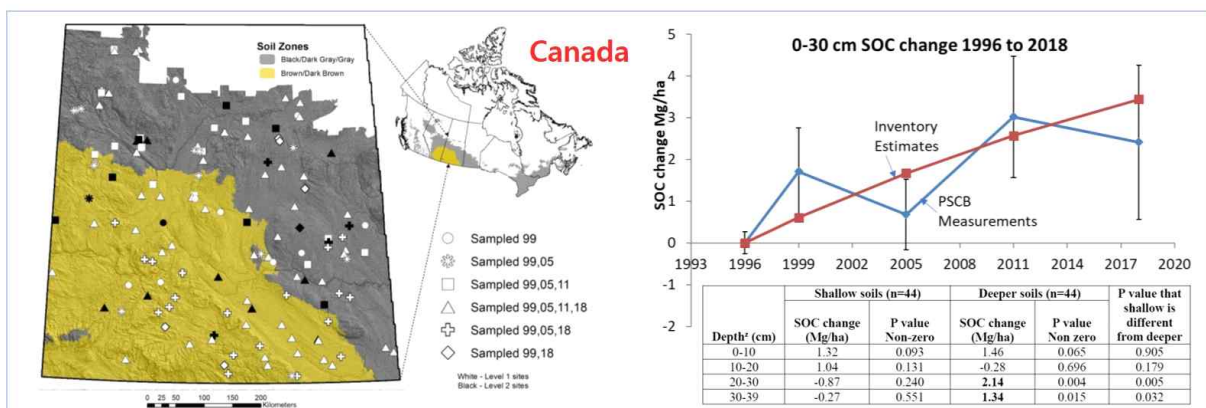
- 일본 Roth-C(Rothamsted Carbon Model)을 기반으로 하여 일본 각지의 논·밭에서 장기간 시험데이터를 사용하여 검·보정한 자료를 이용하여 시행하고 있음
- 토양탄소 분해 및 저장량과 관련하여 토양특성과 기상자료를 선택적으로 확인할 수 있으며 사용자가 사이트 지도에서 활동 장소를 선택하고, 재배 작물 종류 및 재배·관리방법을 선택하면 그 장소와 관리에 따른 토양탄소저장량 및 CO₂ 감소량 계산이 가능함
- 일본의 토양에서는 화산재 토양 이외의 밭에서는 모델 검정 없이 바로 사용해도 문제가 없었으며, 화산재 토양의 경우 활성 알루미늄에 의한 안정적인 부식 생육을 고려하여 모델을 개량하였음. 논 토양에서는 논에 물을 채워둠으로 유기물 분해 기작이 달라지는 것을 고려하여 모델을 개량하였음
- 기상자료의 경우 월별 평균기온, 강수량, 수면증발량에 대해 선택한 장소의 위치 정보로부터 1 km x 1 km 기상 값을 기본으로 계산할 수 있음
- 토양의 탄소 투입량은 작물 잔사와 퇴비 등 유기물 재료를 구분하여 RothC 모델에 입력하였음. 벧짚과 같이 반출 가능한 잔사의 환원량은 작물의 수량에서 짚 부위의 양을 우선적으로 계산한 후 작물잔사를 논에 반출하는 비율(% , 반출률) 및 토양에 환원(투입)양을 곱하여 추정하였음
- 퇴비 입력의 경우 투입한 퇴비의 생중량, 수분함량(%) 및 탄소농도로부터 투입량을 계산하였으며, 표준값을 사용하거나 직접 측정한 값은 직접 입력하여 수치를 변환하기도 하였음



<그림 4> 일본의 토양 특성과 기상자료 선택에 의한 토양 탄소 저장량 조사

나. 캐나다

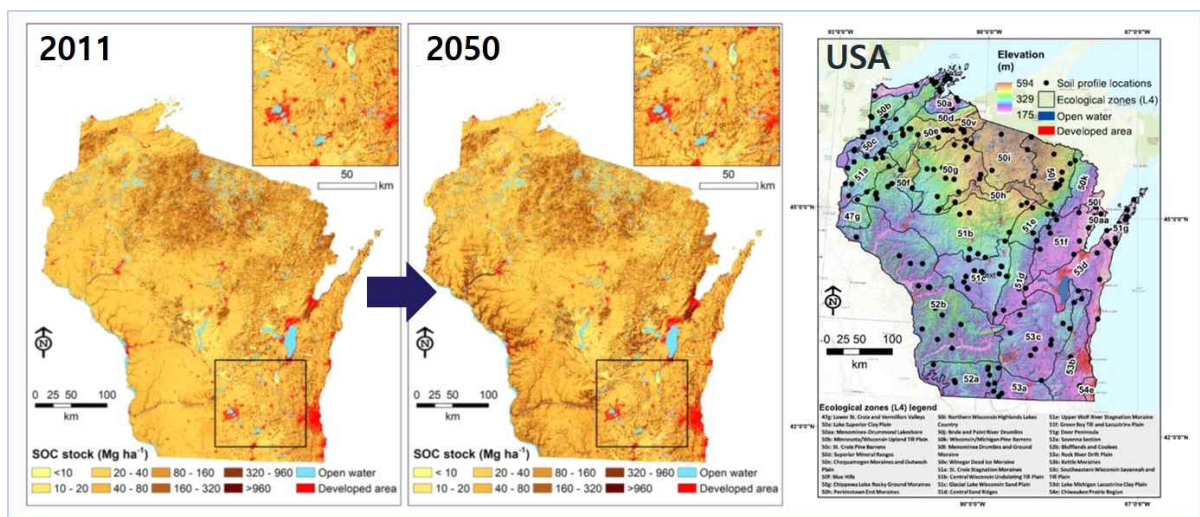
- 캐나다의 사스카추완주 농경지를 중심으로 작물과 농업활동에 따른 토양 내 유기탄소 변화량을 20년간 비교하여 조사하였음
- Prairie Soil Carbon Balance Project (PSCB project)로 농경지 토양보전을 위해 136개의 상업용 농경지에서 토양유기탄소를 조사하였음
- SOC 변화량은 1996년부터 2018년까지 5% 증가하였음
- SOC 변화량은 2011년부터 2018년까지 1.07 tC/acre 증가하였음



<그림 5> 캐나다 토지이용관리에 따른 토양유기탄소 변화량 조사(PSCB Report, 2019)

다. 미국

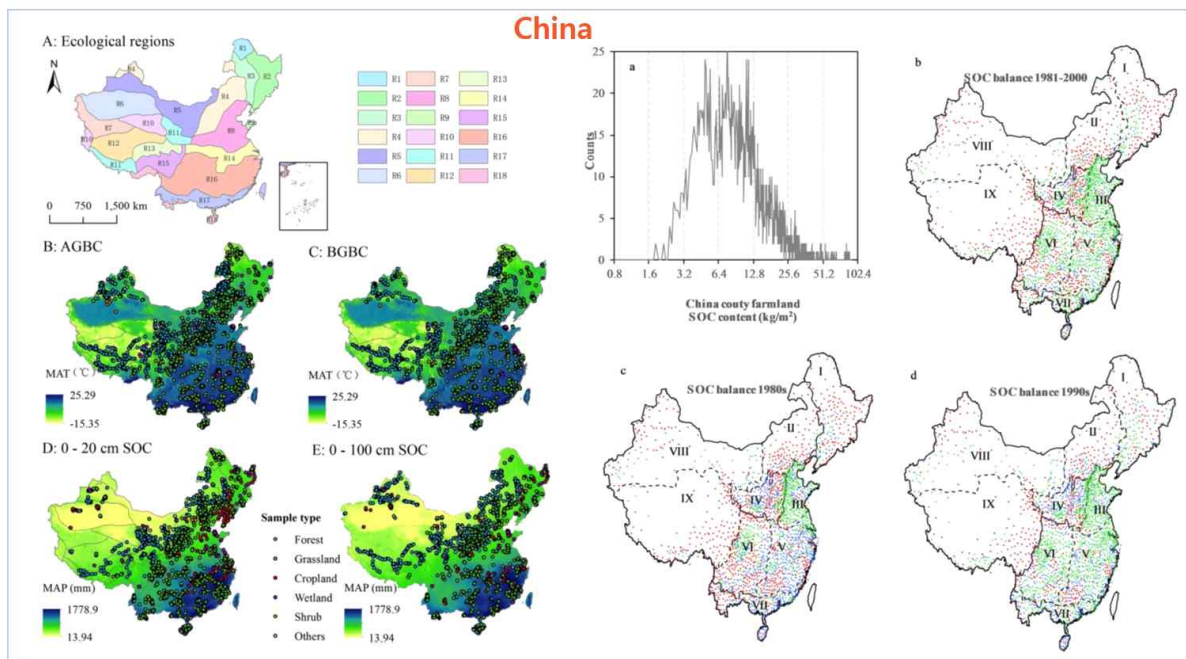
- 미국의 토지 이용에 따른 토양내 유기탄소 저장량을 조사하여 기후변화에 따른 미래 토양탄소 저장량을 예측하여 제시하였음
- SOC 관측자료 및 17개 환경요인을 입력자료로 하여 Cubist regression tree algorithm을 기반으로 하는 모델을 개발하였음
- 위스콘신 주 토양의 2050년까지의 SOC 변화량 예측한 결과, 몰리졸(molisol)의 경우 62 Mg ha⁻¹, 엔티졸(entisol)의 경우 45 Mg ha⁻¹의 토양탄소저장량이 있을 것으로 추정됨. 알피졸(alfisol)의 경우 25 Mg ha⁻¹의 SOC가 증가할 것으로 예측되었음. 히스토졸(histosol)의 경우 앞으로 30여년간 4~19 Mg ha⁻¹의 SOC가 감소할 것으로 예측되었으며, 울티졸(ultisol)의 경우 2050년까지 SOC 변화량이 없을 것으로 조사되었음



<그림 6> 미국 위스콘신주 토양유기탄소 저장량 맵핑 및 예측(Adhikari et al., 2019)

라. 중국

- 지역별로 토양유기탄소 저장량을 조사하고, 지난 20년 동안의 토양유기탄소 변화량을 지정학적 차이에 따라 연구하였음
- 토지 이용에 따라, 산림(forest), 초지(grassland), 습지(wetland), 작물(cropland) 토양에서의 2004~2014년의 SOC 저장량은 각각 34.08 ± 5.43 , 25.69 ± 4.71 , 3.62 ± 0.80 , 15.17 ± 2.20 Pg C 이었음



<그림 7> 중국 지리적 차이에 따른 토양 내 유기탄소 저장량 조사 (Xu et al., 2018; Zhang et al., 2017)

2. 국내 사례

- 밭 토양에서 경운 및 무경운 활동에서의 왕겨숯을 각각 투입하였을 때, 왕겨 숯 투입량이 많을수록 총 탄소함량을 증가하였음
 - 무경운과 비교할 때, 1 ha당 5 ton 처리구에서는 2.04 kg의 토양 탄소가 축적되었음. 이에 따른 토양 탄소저장 축적량을 다음과 같이 제시하였음 (국립농업과학원, 2016)

$$PEp_{TC} = (TC_{CN} + TC_{CI})$$

PEp_{TC} : 농경지 탄화물 투입으로 인한 토양 탄소저장 잠재능 (t C/ha)
 TC_{CN} : 탄화물 무투입 시 토양 탄소량 (t C/ha)
 TC_{CI} : 탄화물 투입 시 토양 탄소 축적량 (t C/ha)

TC_{CI} (무경운)는 $y = 0.5021 x + 0.2308$
 TC_{CI} (경 운)는 $y = 0.4626 x + 0.5477$
 적용 [x : 탄화물 투입량 (ton/ha)]




<그림 8> 토양 탄소저장 축적량에 따른 잠재능(출처: 국립농업과학원, 2016)

- 바이오매스 탄화물 투입에 따른 농경지 토양의 탄소저장 효과에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있음
- 2030 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵을 분석하여, 농축산 분야에서 부문별 온실가스 감축 수단 분석을 실시하였음(한국환경정책·평가연구원, 2018)
 - 완효성 비료 사용으로 온실가스 감축에 기여하였기에, 완효성 비료사용 확대 및 화학비료 사용 감축 방안을 제시하였음
 - 저메탄 사료 공급이 증가함에 따라 온실가스 감축효과를 분석하였음
- 탄화물 사용량 증가에 따라 작물 재배 후 토양 내 유기 탄소 함량이 통계적으로 증가하여, 1428 kg/10 a의 탄화물을 투입한 처리구에서 49 g/g 탄소 저장 효과를 나타내었음(국립농업과학원, 2014)

- 고도에 따른 농업생태계 내 토양유기탄소가 변화함에 따라 고도가 토양지온에 영향을 미쳐 탄소저장량이 변화됨을 연구하였음(국립농업과학원, 2016)
- 농경지 토양자원의 가치산정 및 농업의 다원적 기능을 발굴함으로써 농경지 토양자원에 대한 산정체계를 구축하였음
- 시비 및 토양개량제 투입에 따른 논토양의 탄소저장량 증대기술 개발 결과로 벼의 수량은 화학비료>헤어리베치>돈분퇴비의 순서였고, 제올라이트 처리에 의해 수량이 증가하였지만, 비산재 처리에 의해서는 감소하였음. 탄소격리량은 돈분퇴비>헤어리베치>화학비료 순이었으며, 제올라이트 보다는 비산재 처리에 의해 더 큰 폭으로 증가하였음(서울대학교, 2013)
 - 벼 수량과 탄소저장량 증대 양자를 위해 헤어리베치+돈분퇴비를 시비하고, 제올라이트를 처리하는 것이 가장 유리할 것으로 기대됨. 탄소저장량 증대를 우선할 경우 비산재를 추가적으로 처리할 수 있을 것으로 판단됨
 - 논 토양의 탄소 저장량은 비료 처리와 수준에 따른 토양 탄소농도 증감, 뿌리에 의한 탄소 격리 및 환원 가능한 벧짚의 탄소 함량에 영향을 받음
 - 뿌리에 의한 탄소저장량을 포함할 경우 증가 폭은 6.6~56.3%로 증가하며, 벧짚을 환원할 경우 15.6~65.0%로 토양 탄소 저장량이 증가하였음
 - 부식 함량이 높은 퇴비를 투입하면 논 토양의 탄소격리량을 증대시킬 수 있고, 벧짚을 환원할 경우 탄소 저장 효과가 증대될 것으로 기대됨
- 무경운에 따른 토양 탄소저장량 증가와 효과를 검증한 결과로 작기 후 벧짚을 투여한 결과 22년 무경운 토양의 유기물층은 5 cm정도였으며, 작토층에서의 유효인산과 양이온 함량은 경운논에 비해 무경운 논에서 높은 경향성을 보였음(서울대학교, 2013)
 - 토양 중의 탄소저장량은 무경운 논이 8,303/10a 으로 경운 논 5,767/10a에 비해 44% 많았음. 이는 경운 대비 무경운 토양탄소저장량이 1.44로 추정되었음

- 논토양에서는 무경운 재배를 통해 더 많은 양의 유기탄소를 토양에 저장할 것으로 판단됨



(a) Conventional tilled (CT) paddy field



(b) No tilled (NT) paddy field for 22-yr



(c) Treatment of ^{13}C labelled plant residue into the CT paddy field



(d) Treatment of ^{13}C labelled plant residue into the NT paddy field

<그림 9> 경운 및 무경운(22년) 논포장에 ^{13}C -표지 벼짚 처리

- 고랭지밭에서 친환경 개량제를 통한 토양질 개선 및 탄소격리 평가 결과로 참나무 재료의 바이오차를 토양에 투입한 경우 토양 유기물의 분해가 촉진되었으며, 토양 미생물 및 효소의 활성을 증진시켜 토양의 비옥도를 향상시켰음(서울대학교, 2013)
- 밭토양에서는 퇴비, 바이오차 개량제와 같은 유기물 투입 등의 관리로 인해 더 많은 양의 유기탄소 저장 및 농경지에 식물체 성장을 유도하여 안정한 토양탄소로의 유입을 촉진시킬 수 있을 것으로 판단됨
- 토양과 관련된 생태계서비스 4가지(공급, 조절, 지지, 문화) 중 조절 서비스에서 탄소격리 및 저장 항목을 두고 있으며, 농업환경 보전 기능 중 탄소격리기능으로는 67억원의 연간가치가 있음을 보고 하였음(국립농업과학원, 2018)

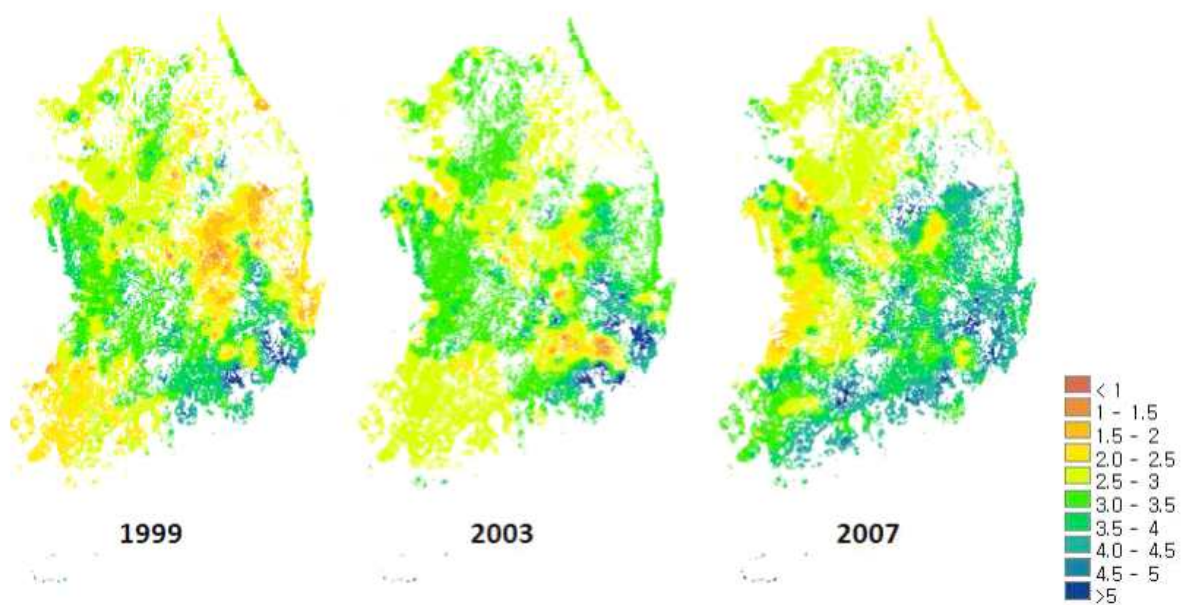
- 탄소격리기능의 의미는 작물잔사에 의한 토양 내 탄소 격리 추정량을 말함
- 모형식은 [작물잔사량(그루터기 + 뿌리) x 탄소함량(%) x 연간분해율(%)]을 사용하였음

<표 3> 논외 토양탄소격리 기능 평가

구분	면적(ha)	평균잔사량(ton ha ⁻¹)	탄소함량(%)	탄소거래가(원 ton ⁻¹)
논	895,739	1.94	37.6	20,659

○ 원격탐사를 이용한 농경지 탄소 저장량 추정 연구 결과로 분광학을 이용한 토양 유기물 함량 추정모형을 구축하여 우리나라 평균 토양탄소저장량을 추정하였고, 층위별 토양 유기탄소 저장량 추정과 지도를 작성하였음(국립농업과학원, 2013)

- 토양탄소저장량(1 m) 추정: 우리나라 평균 5 kg m⁻²
- 층위별 토양 유기탄소 저장량 추정과 지도를 작성하였음(0-5 cm 12.7 g kg⁻¹, 5-15 cm 11.7 g kg⁻¹, 15-30 cm 8.3 g kg⁻¹, 30-60 cm 4.57 g kg⁻¹, 60-100 cm 3.2 g kg⁻¹)



<그림 10> 우리나라 논 0~15 cm의 토양탄소 저장량 분포도(kg m⁻², 국립농업과학원, 2013)

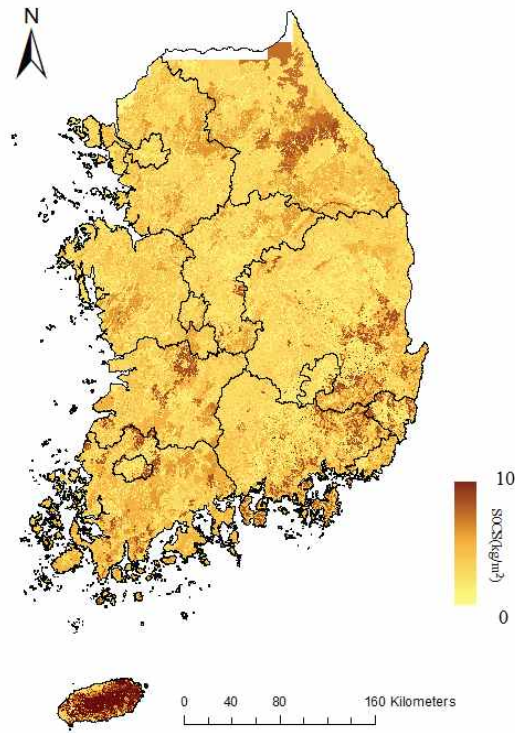
- 농경지 토양의 탄소저장 능력과 관련하여 전국 6개 지역에서 107개의 유기 및 관행 벼 재배토양의 탄소함량을 비교 분석하였음(한양수 외, 2020)
 - 지역별로는 부여-I 지역을 제외한 5개지역(부여-II, 김해, 산청-I, II, 순천)의 유기토양 탄소함량이 관행토양 탄소함량보다 높게 나타났음
 - 유기농 실천에 따른 유기토양(36.1 MgC ha^{-1})이 관행토양(29.4 MgC ha^{-1})보다 약 23% 높은 토양탄소 저장량을 나타내었음
 - 단위면적당 토양탄소 저장량에 대한 경제적 가치는 유기토양 758,100원 ha^{-1} 과 관행토양 617,400원 ha^{-1} 로 나타났음
 - 우리나라 전체 논토양의 탄소저장량 가치는 5,281억 원으로 추정되며, 이중 친환경토양의 가치는 367억 원, 관행논토양의 가치는 4,914억 원으로 추정되며 전체 논토양의 5.7%를 차지하는 친환경논토양의 면적을 확대함으로써 전체 논토양의 탄소저장량 가치를 향상시킬 수 있을 것이라 사료됨

<표 4> 유기와 관행 논 토양에서의 토양탄소저장량에 따른 경제적 가치 평가
(국립농업과학원, 2019)

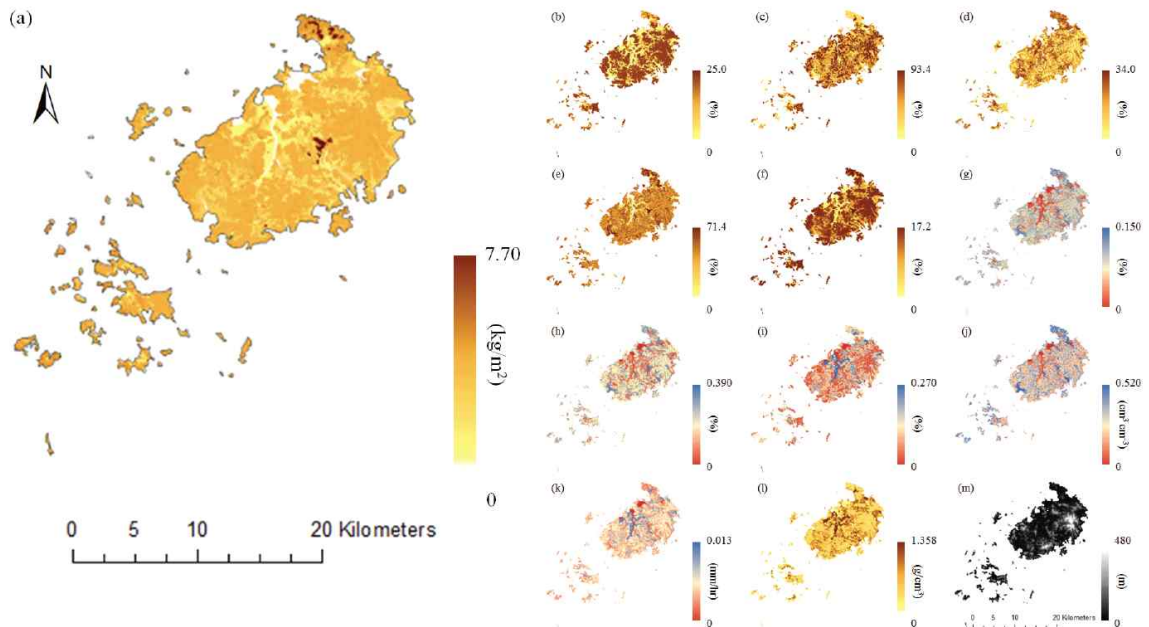
재배 구분	탄소저장량(Mg ha^{-1})	가치환산 (KRW ha^{-1})	가치 차이(KRW ha^{-1})
유기 벼 재배	36.1	758,100	140,700
관행 벼 재배	29.4	617,400	

- 토양 특성에 따른 토양유기탄소저장량 산정모형을 개발한 연구결과로 진도 지역에서의 토양유기탄소저장량과 토양의 수리학적 매개변수 및 물리·화학적 특성과의 상관성 결과를 나타내었음(이태화 외, 2019)
 - 상관성 분석에 사용된 매개변수로는 자갈, 모래, 점토, 유기물의 함량, 포장용수량 (FC-Field Capacity), 위조점 (WP-Wilting point), 유효수분함량 (AWC-Available Water Content), 포화 상태의 토양 수분, 포화 상태의 수리전도도, 용적밀도 및 DEM((Digital Elevation Model, $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$))을 사용하였음
 - 상관성이 가장 높게 나타난 것은 용적밀도, 모래, 미사, 포화 상태의 토

양수분, 유기물함량 순으로 나타났으며, 용적밀도와 모래는 역상관성으로 나타났음



<그림 11> 대한민국의 토양 탄소 저장량에 대한 공간적 변이(이태화 외, 2019)



<그림 12> 토양 특성에 따른 진도 지역의 토양유기탄소 저장량 추정, (a) 자갈, (b) 모래, (c) 미사, (d) 점토, (e) 유기물 함량, (f) 위조점, (g) 포장용수 함량, (i) 유효수분함량, (j) 포화 상태의 토양 수분, (k) 포화 상태의 (l) 용적밀도, (m) digital elevation model (이태화 외, 2019)

제 3장 탄소저장량 증대 영농활동 분석

제 3장 탄소저장량 증대 영농활동 분석

1. 국내 탄소저장 증대 영농활동 사례조사

가. 농업환경보전프로그램

○ 사업개요

- 담당기관 : 농림축산식품부

- 농촌 공동체 활성화, 농업환경보전 의식 개선 및 관련활동 실천 지원을 통해 농업인의 농업환경 개선·보전 활동 참여를 유도하여 농업 분야의 공익적 가치를 제고하고자 본 사업이 시행됨(농림축산식품부, 2020)

- 농업환경 개선이 필요한 지역을 대상으로 토양·용수·대기·경관·생활·유산·생태 분야 별로 농업환경 보전활동을 시행하는 농가에 5년간 자금을 지원 하는 사업이며, 이 중 일부 활동들이 농업 부문의 온실가스 배출량을 감축하고 토양 탄소 저장량을 증대시키는 기능을 하고 있음

○ 농업환경보전프로그램의 세부 활동 중 토양 탄소 저장량을 증대시키고 온실가스 배출량을 저감하는 영농활동은 아래와 같음(표 5)

<표 5> 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론(농림축산식품부, 2020)

분야	단위과제	세부활동
토양	1. 적정 양분 투입	비료 살포시 토양검정을 받고 비료사용처방서 준수
		완효성 비료 사용하기
		퇴비(가축분뇨 유래) 사용기준 준수
		액비(가축분뇨 유래) 사용기준 준수
	2. 외부 양분 투입 감축	농사 후 남은 농업부산물 잘라 논·밭에 환원
		휴경기 녹비작물 재배 및 토양 환원
3. 토양침식 및 양분유출 방지	벗짚 등 농업부산물로 경사진 밭 덮기	
대기	1. 온실가스 감축	경운 최소화

나. 저탄소농축산물인증제

○ 사업개요

- 담당기관 : 농업기술실용화재단
- 사업대상 : 친환경 인증, GAP (Good agricultural practices) 등 농식품 국가인증을 획득하고, 저탄소 농업기술을 도입한 농업인 및 농업법인
- 저탄소 농업기술을 적용하여 농축산물 생산 전과정에서 필요한 에너지 및 농자재 투입량을 줄이고, 온실가스 배출을 감축한 농축산물을 대상으로 '저탄소 농축산물 인증 (그림 13)'을 표시하는 제도
- 인증기준 : 생산 농산물의 온실가스 배출량이 품목별 평균 온실가스 배출량 기준 대비 적어야 하며 인증 가능한 품목은 표 6과 같음



<그림 13> 저탄소 농축산물 인증 마크

<표 6> 저탄소 농축산물 인증 가능한 품목(농업기술실용화재단, 2019)

분류	작물명
식량작물 (6개 품목)	벼, 보리, 옥수수, 고구마, 감자, 콩
채소 (24개 품목)	수박, 무, 배추, 파, 양배추, 생강, 당근, 부추, 시금치, 참외, 딸기, 오이, 토마토, 방울토마토, 상추, 고추, 호박, 가지, 착색단고추(파프리카), 마늘, 양파, 들깻잎, 단고추(피망), 멜론
과수 (12개 품목)	사과, 배, 복숭아, 단감, 포도, 감귤, 참다래, 유자, 만감(한라봉, 세토까 (천혜향) 등), 자두, 복분자, 매실
특용작물 (9개 품목)	인삼, 참깨, 느라티버섯, 오미자, 녹차, 더덕, 양송이버섯, 새송이버섯, 땅콩

- 저탄소 농축산물 인증 취득을 위한 저탄소 농업기술의 종류
 - 저탄소 농축산물 인증 취득을 위해서는 표 7의 저탄소 농업기술 도입을 통해 생산 농산물의 온실가스 배출량을 감축해야 함

<표 7> 저탄소 농축산물 인증 취득을 위한 저탄소 농업기술 목록
(농업기술실용화재단, 2019)

분류	기술명
비료 및 작물 보호제 절감 기술	최적비료사용
	경축순환농법
	자가제조 농자재 사용 농법
	풋거름 작물재배
	순환식 수경재배(폐양액 재활용 시스템)
	생물적 자원을 이용한 제초 이용
농기계 에너지 절감기술	직파재배
	무경운 및 부분경운
난방에너지 절감기술	다겹보온커튼 및 보온터널 자동개폐장치
	축열물주머니 이용 보온장치
	수막재배 시스템
	농업용 열 회수형 환기장치
	온풍난방기 배기열 회수장치
	목재펠릿 난방 장치
	지열 히트펌프 시스템
	폐열 재이용 난방시스템
	일사량 감응 전자동 변온관리 시스템
농업용수 관리 기술	빗물 재활용기술
	논의 물관리 기술

다. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업

- 사업개요
 - 담당기관 : 농업기술실용화재단
 - 농업인이 기존 영농활동으로 인해 발생하는 온실가스를 저탄소 농업기술 도입을 통해 감축하면, 줄어든 온실가스 감축량만큼을 정부가 구매하거나 탄소시장에서 거래하여 농업인이 추가소득을 획득하고 에너지 비용 등의 영농비용을 절감할 수 있도록 보조하는 사업

- 감축사업의 종류에 따라서 감축실적을 농림축산식품부에서 구매하거나 (사회공헌형, 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업의 운영규정을 만족하는 사업), 배출권거래 시장에서 거래함(온실가스 배출권거래제 외부사업의 외부사업 타당성평가 및 감축량 인증에 관한 지침을 만족하는 사업)

○ 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업의 저탄소 농업기술

- 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업에서는 표 8의 15개 기술을 저탄소 농업기술로 인정하고 있음(농업기술실용화재단, 2019)

<표 8> 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론(농업기술실용화재단, 2019)

번호	방법론명	번호	방법론명
1	미활용 에너지를 이용한 농업시설의 온실가스 감축 방법론	9	목질바이오매스를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론
2	순환식 수확재배를 이용한 화석연료 사용량 절감 방법론	10	바이오가스 플랜트를 통한 온실가스 감축 방법론
3	LED 조명기기 설치를 통한 농업시설의 전기 사용량 절감 방법론	11	왕겨를 이용한 RPC 곡물건조 열원대체 방법론
4	고효율 보온자재를 이용한 농업시설의 난방용 에너지 사용량 감축 방법론	12	보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론
5	지열에너지를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	13	논벼 재배 시 물관리를 통한 온실가스 감축 방법론
6	재생에너지(태양광, 태양열, 수력, 풍력) 방법론	14	부산물 비료를 이용한 질소질비료 사용 저감 방법론
7	녹비작물을 이용한 질소질비료 사용저감 방법론	15	토지의 이용방법 전환을 통한 메탄감축 방법론
8	완효성 비료를 이용한 질소질 비료 사용저감 방법론		

라. 공익형직접지불제

○ 사업개요

- 담당기관 : 농림축산식품부
- 농업활동을 통해 환경보전, 농촌 공동체 유지, 먹거리 안전 등의 공익 기능을 증진시킬 수 있도록 농업인에게 보조금을 지원하는 제도
- 공익직불제를 통해 기본직불금을 수령하고자 하는 농업인은 환경보호, 생태계보전, 먹거리안전, 마을공동체 활성화, 영농활동 준수 등 5개 분야 17개 의무를 지켜야 하며, 일부 활동들이 농업 부문의 온실가스 배출량을 감축하고 토양 탄소 저장량을 증대시키는 기능을 하고 있음

○ 공익직불제 수령을 위한 의무 중 토양 탄소 저장량을 증대시키고 온실가스 배출량을 저감하는 영농활동은 아래와 같음

- 화학비료 사용기준 준수 및 비료 적정 보관·관리
- 가축분뇨 퇴비·액비화 및 살포기준 준수

2. 농업부문 토양탄소 저장증대 영농활동 선정

○ 앞서 1절에서 검토한 농업에서의 온실가스 감축 영농활동 중 토양탄소 저장증대 영농활동을 추출하기 위하여 전문가 자문회의를 개최하였음

○ 자문회의 결과 도출된 영농활동은 아래와 같음

- 경운농법 기술에서의 기존 관행기술인 경운기술로부터 무경운농업 기술 도입
- 비료작물농법 기술에서 녹비작물 기술 도입
- 토양개량제 기술에서 작물잔사 환원
- 퇴비 투입
- 바이오차 투입
- 완효성 비료 투입은 기존 화학비료 대체 효과가 있어 온실가스 감축에 기여는 크지만 토양탄소 저장증대 효과는 직접적이지 않음

제 4장 토양탄소저장량 정량화 방법론 개발

제 4장 토양탄소 저장량 정량화 방법론 개발

1. 영농활동별 체계화

가. 영농활동의 위계

- 토양탄소 저장량에 영향을 주는 농업활동들을 체계적으로 고려
 - 앞서 3장에서 추출한 토양탄소 저장증대에 영향을 주는 영농활동으로는 경운, 작부체계, 녹비, 퇴비, 그리고 바이오차가 선정되었음
 - 이와 같은 영농활동은 현장에서 단독으로만 수행되는 것이 아니라 두 개 이상이 결합되어 시행될 수 있으므로 이에 따른 위계를 체계적으로 고려할 필요가 있음
- 2019 개정된 IPCC 가이드라인의 Tier 1 방법론 및 계수는 아래 표와 같음
 - 무기토양에서 연간 토양탄소 축적량의 변화

$$\Delta C_{Mineral} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC = \sum (SOC_{REF} \cdot F_{LU} \cdot F_{MG} \cdot F_I \cdot A)$$

(주: T가 ≥20년이면, 이 식에서 D를 대신하여 T를 사용한다.)

$\Delta C_{Mineral}$ = 무기토양에서 연간 탄소(C) 축적량의 변화 (ton C/yr)

SOC_0 = 인벤토리 기간 중 마지막 해의 토양 유기탄소(C) 축적량 (ton C)

$SOC_{(0-T)}$ = 인벤토리 기간 중 첫 해의 토양 유기탄소(C) 축적량 (ton C)

T = 단일 인벤토리기간의 연수 (yr)

D = 평형 SOC 값 사이의 전환에 관한 기본값 기간인 저장변화계수의 시간 의존도 (yr)

SOC_{REF} = 탄소(C) 축적량 인용값 (ton C/ha)

F_{LU} : 토지이용에 따른 토양탄소 축적변화계수

F_{MG} = 경운 정도에 따른 토양탄소 축적변화계수

F_I = 유기물 투입에 따른 탄소 축적변화계수

A = 산정된 층의 토지 면적 총 (ha)

- F_{LU} 는 토지이용으로 논, 밭, 과수원으로 나눔
- F_{MG} 는 경운 정도로 무경운, 부분경운, 경운으로 나눔
- F_I 는 유기물 투입인데 이를 작물잔사와 퇴비로 나누어 고려하기로 함
- 각각의 계수에 대한 표는 아래와 같음
- 작물잔사 및 퇴비 투입의 경우는 유기물이 토양으로 유입되는 활동이므로 단기적 토양탄소 저장 증대를 가져오기는 하지만 이 경우 이산화탄소의 발생이 증가되거나 아산화질소나 메탄같은 비이산화탄소 온실가스가 더 많이 발생될 우려도 있으므로 유기물 투입의 장기적 토양탄소 저장 증대효과에 대해서는 신중한 접근이 필요함

TABLE 5.5 (UPDATED)
RELATIVE CARBON STOCK CHANGE FACTORS (F_{LU} , F_{MG} , AND F_I) (OVER 20 YEARS) FOR MANAGEMENT ACTIVITIES ON CROPLAND

Factor value type	Level	Temperature regime	Moisture regime ¹	IPCC defaults	Error ^{2,3}	Description
Land use ⁵ (F_{LU})	Long-term cultivated	Cool Temperate/Boreal	Dry	0.77	±14%	Represents area that has been converted from native conditions and continuously managed for predominantly annual crops over 50 yrs. Land-use factor has been estimated under a baseline condition of full tillage and nominal ("medium") carbon input levels. Input and tillage factors are also applied to estimate carbon stock changes, which includes changes from full tillage and medium input.
			Moist	0.70	±12%	
		Warm Temperate	Dry	0.76	±12%	
			Moist	0.69	±16%	
		Tropical	Dry	0.92	±13%	
			Moist/Wet	0.83	±11%	
Land use ⁶ (F_{LU})	Paddy rice	All	Dry and Moist/Wet	1.35	±4%	Long-term (> 20 year) annual cropping of wetlands (paddy rice). Can include double-cropping with non-flooded crops. For paddy rice, tillage and input factors are not used.
Land use ⁵ (F_{LU})	Perennial/Tree Crop	Temperate/Boreal	Dry and Moist	0.72	±22%	Long-term perennial tree crops such as fruit and nut trees, coffee and cacao.
		Tropical	Dry and Moist/Wet	1.01	±25%	
Land use (F_{LU})	Set aside (< 20 yrs)	Temperate/Boreal and Tropical	Dry	0.93	±11%	Represents temporary set aside of annually cropland (e.g., conservation reserves) or other idle cropland that has been revegetated with perennial grasses.
			Moist/Wet	0.82	±17%	
		Tropical montane ⁴⁴	n/a	0.88	±50%	
Tillage (F_{MG})	Full	All	Dry and Moist/Wet	1.00	n/a	Substantial soil disturbance with full inversion and/or frequent (within year) tillage operations. At planting time, little (e.g., <30%) of the surface is covered by residues.
Tillage ⁷ (F_{MG})	Re-duced	Cool Temperate/Boreal	Dry	0.98	±5%	Primary and/or secondary tillage but with reduced soil disturbance (usually shallow and without full soil inversion). Normally leaves surface with >30% coverage by residues at planting.
			Moist	1.04	±4%	
		Warm Temperate	Dry	0.99	±3%	
			Moist	1.05	±4%	
		Tropical	Dry	0.99	±7%	
			Moist/Wet	1.04	±7%	
Tillage ⁷ (F_{MG})	No-till	Cool Temperate/Boreal	Dry	1.03	±4%	Direct seeding without primary tillage, with only minimal soil disturbance in the seeding zone. Herbicides are typically used for weed control.
			Moist	1.09	±4%	
		Warm Temperate	Dry	1.04	±3%	
			Moist	1.10	±4%	
		Tropical	Dry	1.04	±7%	
			Moist/Wet	1.10	±5%	

TABLE 5.5 (UPDATED) (CONTINUED)
RELATIVE CARBON STOCK CHANGE FACTORS (FLU, FMG, AND FI) (OVER 20 YEARS) FOR MANAGEMENT ACTIVITIES ON CROPLAND

Factor value type	Level	Temperature regime	Moisture regime ¹	IPCC defaults	Error ^{2,3}	Description
Input (Fi)	Low	Temperate/Boreal	Dry	0.95	±13%	Low residue return occurs when there is removal of residues (via collection or burning), frequent bare-fallowing, production of crops yielding low residues (e.g., vegetables, tobacco, cotton), no mineral fertilization or N-fixing crops.
			Moist	0.92	±14%	
		Tropical	Dry	0.95	±13%	
			Moist/ Wet	0.92	±14%	
Tropical montane ⁴	n/a	0.94	±50%			
Input (Fi)	Medium	All	Dry and Moist/ Wet	1.00	n/a	Representative for annual cropping with cereals where all crop residues are returned to the field. If residues are removed then supplemental organic matter (e.g., manure) is added. Also requires mineral fertilization or N-fixing crop in rotation.
Input (Fi)	High without manure	Temperate/Boreal and Tropical	Dry	1.04	±13%	Represents significantly greater crop residue inputs over medium C input cropping systems due to additional practices, such as production of high residue yielding crops, use of green manures, cover crops, improved vegetated fallows, irrigation, frequent use of perennial grasses in annual crop rotations, but without manure applied (see row below).
			Moist/ Wet	1.11	±10%	
		Tropical montane ⁴	n/a	1.08	±50%	
Input (Fi)	High – with manure	Temperate/Boreal and Tropical	Dry	1.37	±12%	Represents significantly higher C input over medium C input cropping systems due to an additional practice of regular addition of animal manure.
			Moist/ Wet	1.44	±13%	
		Tropical montane ⁴	n/a	1.41	±50%	

Notes: Long-term cultivation, perennial crops paddy rice and tillage management factors were derived using methods provided in Annex 5A1.

¹Where data were sufficient, separate values were determined for temperate and tropical temperature regimes; and dry, moist, and wet moisture regimes. Temperate and tropical zones correspond to those defined in Chapter 3; wet moisture regime corresponds to the combined moist and wet zones in the tropics and moist zone in temperate regions.

²± two standard deviations, expressed as a percent of the mean; where sufficient studies were not available for a statistical analysis to derive a default, uncertainty was assumed to be ± 50% based on expert opinion. NA denotes 'Not Applicable', where factor values constitute defined reference values, and the uncertainties are reflected in the reference C stocks and stock change factors for land use.

³ This error range does not include potential systematic error due to small sample sizes that may not be representative of the true impact for all regions of the world.

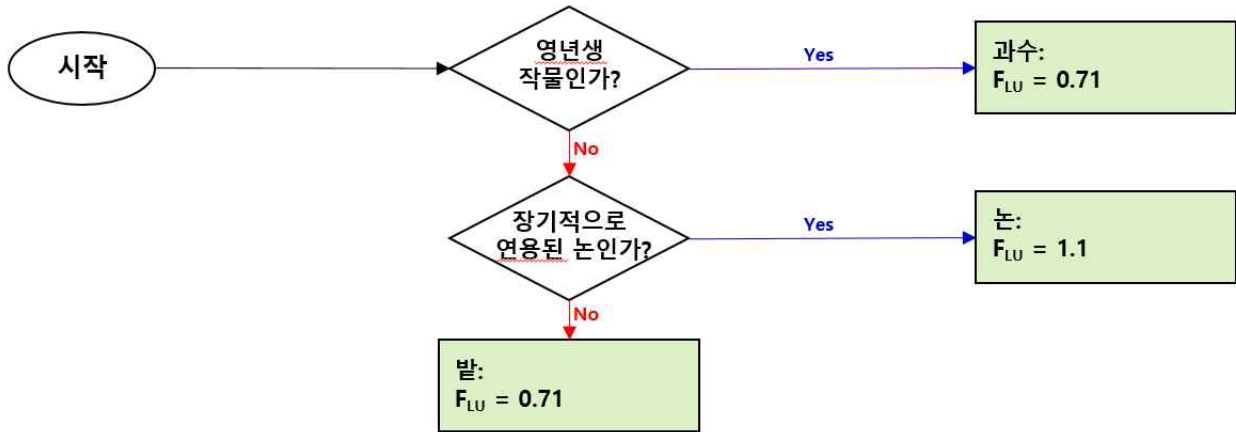
⁴There were not enough studies to estimate some of the stock change factors for mineral soils in the tropical montane climate region. As an approximation, the average stock change between the temperate and tropical regions was used to approximate the stock change for the tropical montane climate.

Sources:

⁵ The following references used for land-use factors (other than paddy rice): Aborisade and Aweto, 1990; Adachi *et al.*, 2006; Agbenin and Goladi, 1997; Aina, 1979; Alcantara *et al.*, 2004; Allen, 1985; An *et al.*, 2003; Ashagrie *et al.*, 2005; Assad *et al.*, 2013; Aweto, 1981; Aweto and Ayuba, 1988; Aweto and Ayuba, 1993; Aweto and Ishola, 1994; Ayanaba *et al.*, 1976; Banaticla and Lasco, 2006; Bashkin and Binkley, 1998; Baille-Bayer *et al.*, 2010; Bautista-Cruz and del Castillo, 2005; Berhongaray *et al.*, 2013; Bernardi *et al.*, 2007; Bernhardreversat, 1988; Berthrong *et al.*, 2012; Bertol and Santos, 1995; Beyer, 1994; Binkley *et al.*, 2004; Binkley and Resh, 1999; Bonde *et al.*, 1992; Bowman and Anderson, 2002; Brand and Pfund, 1998; Brown and Lugo, 1990; Bruun *et al.*, 2006; Burke *et al.*, 1995; Burke *et al.*, 1995; Buschbacher *et al.*, 1988; Buschiazzo *et al.*, 1998; Buyanovksy *et al.*, 1987; Cadisch *et al.*, 1996; Cai *et al.*, 2008; Cambardella and Elliott, 1994; Cambardella and Elliott, 1992; Campos *et al.*, 2007; Cao *et al.*, 2004; Carvalho *et al.*, 2009; Carvalho *et al.*, 2009; Cerri *et al.*, 1991; Cerri *et al.*, 2003; Cerri *et al.*, 2007; Chan, 1997; Chandran *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2007; Chen, 2006; Chia *et al.*, 2017; Chidumayo and Kwibisa, 2003; Chiti *et al.*, 2014; Chone *et al.*, 1991; Cleveland *et al.*, 2003; Collins *et al.*, 1999; Conant *et al.*, 2001; Conti *et al.*, 2014; Cook *et al.*, 2014; Corazza *et al.*, 1999; D'Annunzio *et al.*, 2008; da Silva-Junior *et al.*, 2009; Dai *et al.*, 2008; Dai *et al.*, 2008; Dalal *et al.*, 2005; Dalal and Mayer, 1986; Dawoe *et al.*, 2014; de Blecourt *et al.*, 2013; de Camargo *et al.*, 1999; de Freitas *et al.*, 2000; de Koning *et al.*, 2003; de Moraes *et al.*, 2002; de Moraes *et al.*, 1996; de Neergaard *et al.*, 2008; Dechert *et al.*, 2004; Delelegn *et al.*, 2017; Deneff *et al.*, 2007; Desjardins *et al.*, 1994; Desjardins *et al.*, 2004; Detwiler, 1986; Eaton and Lawrence, 2009; Eclesia *et al.*, 2012; Eden *et al.*, 1990; Ekanade, 1991; Elliott *et al.*, 1991; Elmore and Asner, 2006; England *et al.*, 2016; Epron *et al.*, 2009; Erickson *et al.*, 2001; Fabrizzi *et al.*, 2009; Farley *et al.*, 2004; Feldpausch *et al.*, 2004; Feller *et al.*, 2001; Fernandes *et al.*, 2002; Fernandez *et al.*, 2012; Fisher *et al.*, 1994; Follett *et al.*, 1997; Freibauer, 1996; Freixo *et al.*, 2002; Fu *et al.*, 2000; Fu *et al.*, 2001;

나. 토지이용

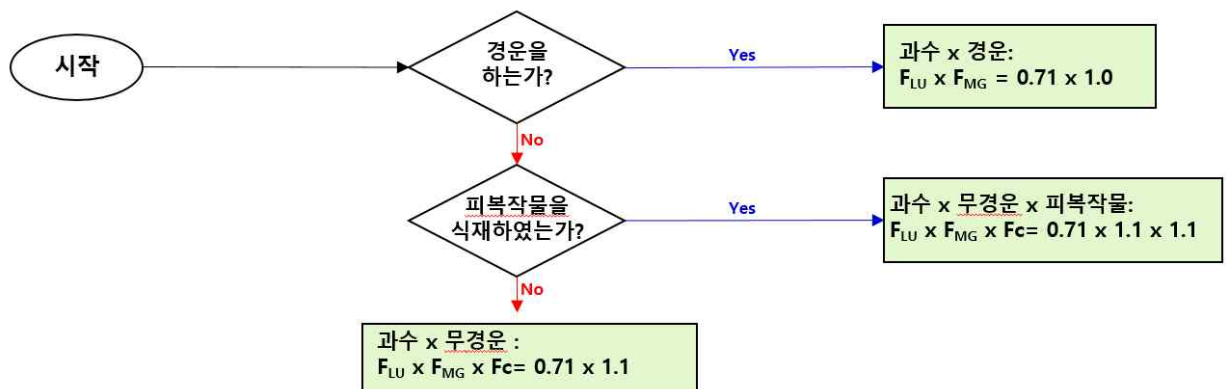
- 농업에서의 토지이용 고려는 영년생 작물 여부에 따라 과수 및 논, 밭으로 구분하여 아래와 같은 순서도를 작성하였음



<그림 14> 토지이용에 따른 영농활동 체계화

다. 과수원

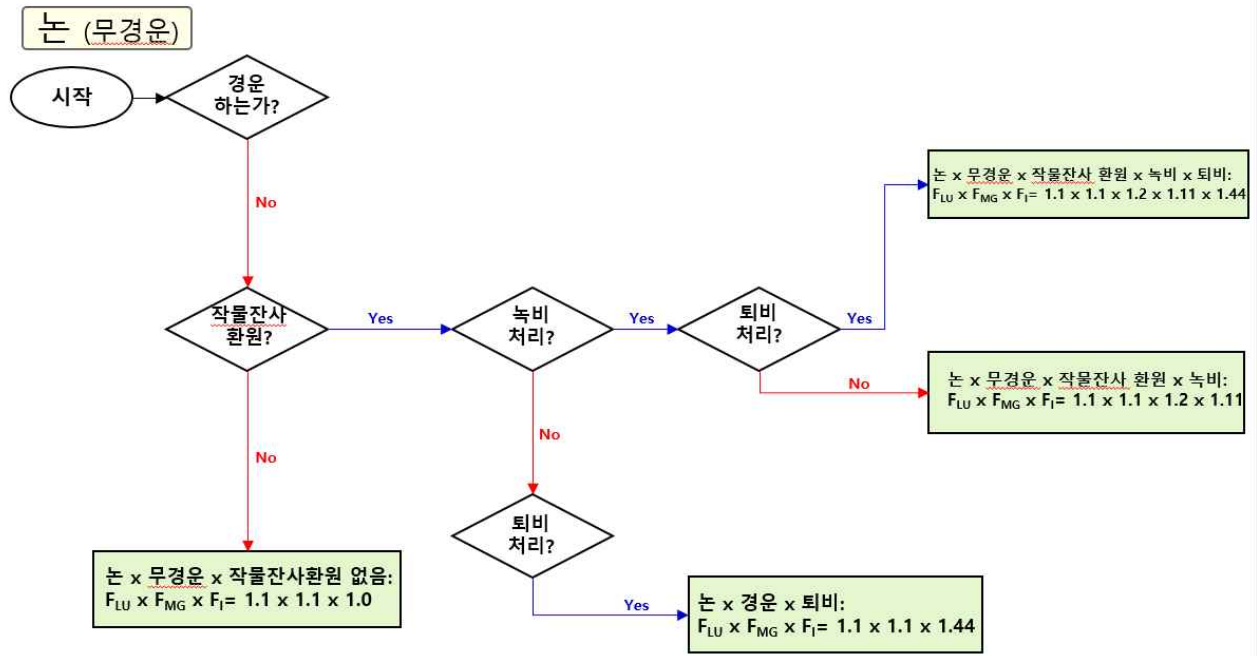
- 과수원에 적용되는 영농활동은 무경운과 피복작물 두 개를 고려하여 아래와 같은 순서도를 작성하였음



<그림 15> 과수원에서의 영농활동 체계화

- 현재 과수원에서는 경운만 고려되고 작물잔사 환원 또는 녹비는 고려되고 있지 않은아 추후 수정이 필요함

- 논에서 무경운을 하는 경우의 토양탄소 저장량 변화

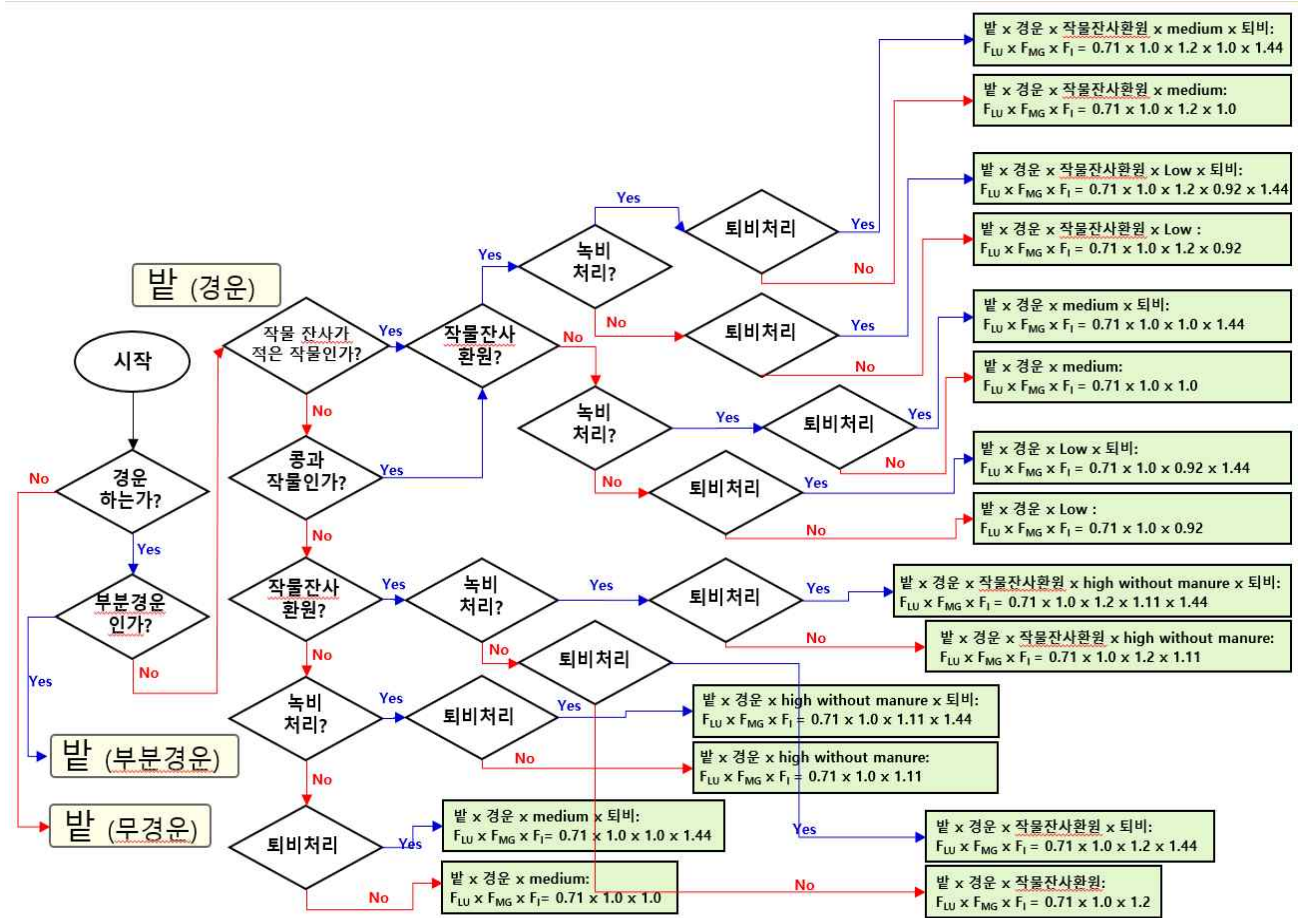


<그림 17> 무경운 시 논에서의 영농활동 체계화

마. 밭

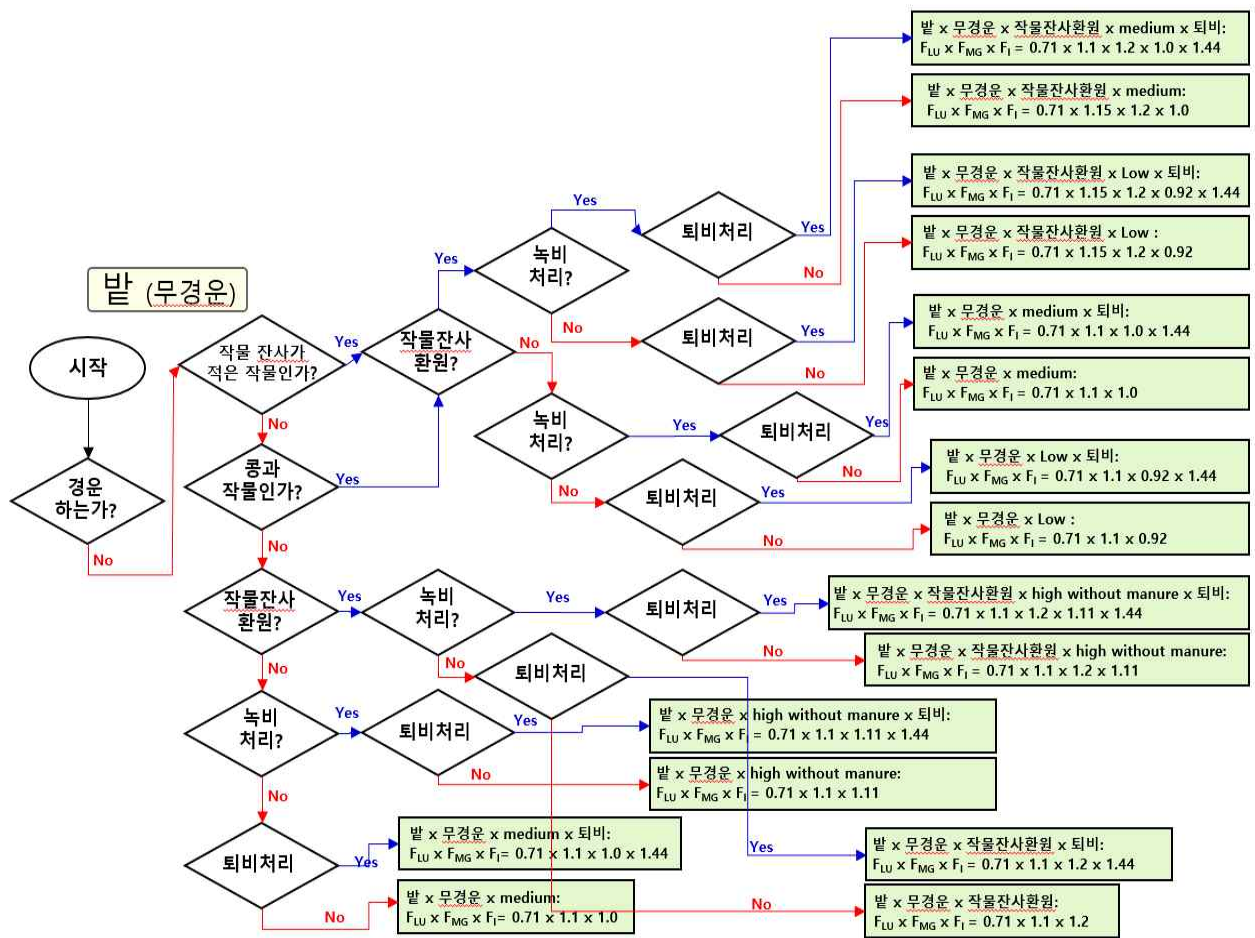
○ 밭에 적용되는 영농활동은 경운, 작물의 종류, 녹비, 퇴비를 고려하여 아래와 같은 순서도를 작성하였음

- 밭에서 경운을 하는 경우



<그림 18> 경운 시 밭에서의 영농활동 체계화

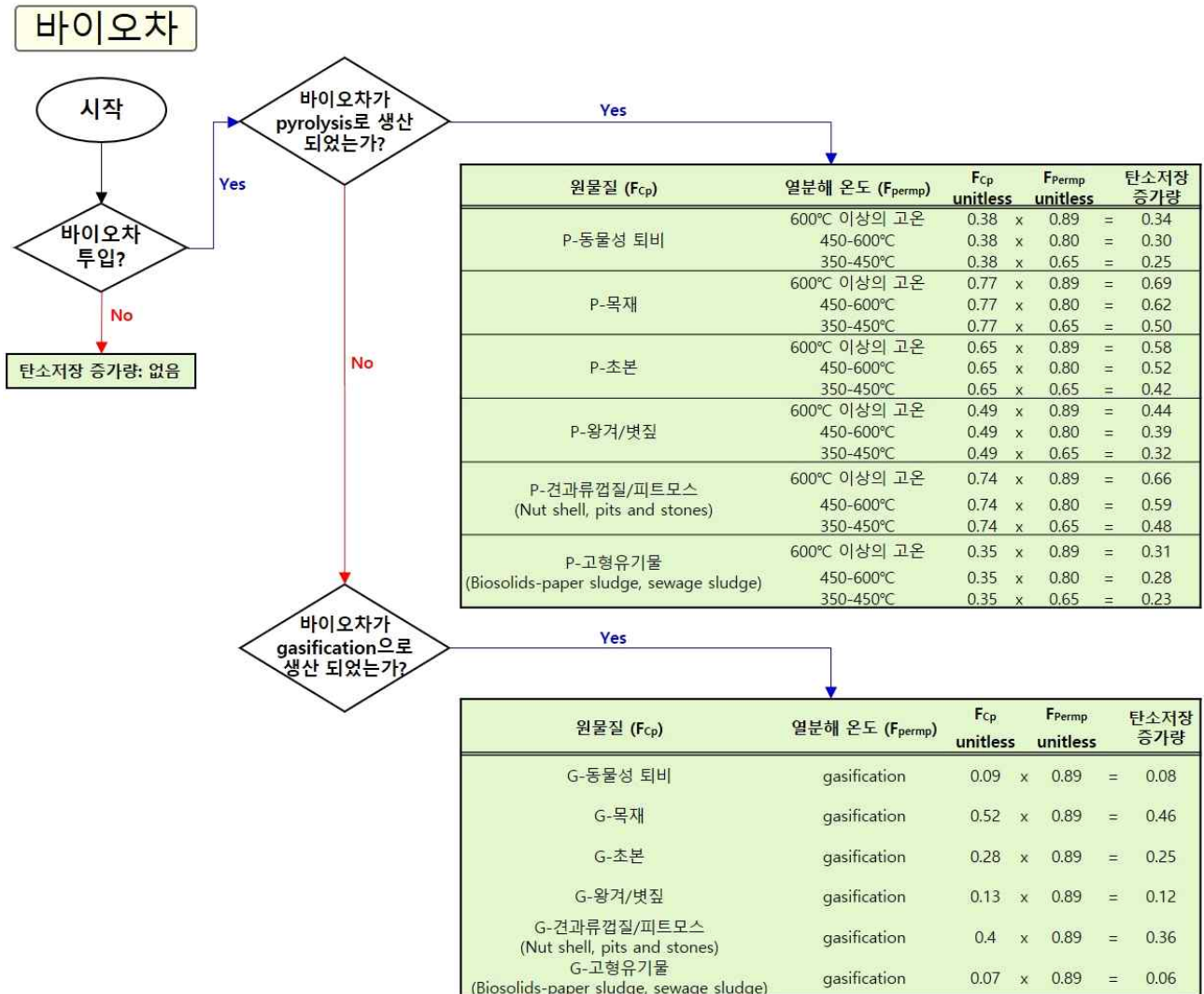
- 밭에서 무경운의 경우



<그림 20> 무경운 시 밭에서의 영농활동 체계화

바. 바이오차

- 바이오차를 투입한 경우 바이오차 생산과정의 원물질 및 열분해 방법에 따라 토양 탄소 저장량을 별도로 산정할 수 있음
 - 밭에서 바이오차를 투입하는 경우



<그림 21> 바이오차 투입 시 탄소저장량 산정 체계화

2. 영농활동별 토양탄소 축적계수 산정

가. 토지이용

- IPCC 가이드라인에서 고려한 토지이용은 과수원, 논, 밭이고 이에 따른 기본 탄소축적 변화계수가 달라짐
- 특히, 논은 가이드라인에서 토지이용 단계에서만 계수를 0.71로 적용하고 이후 추가적 영농활동에 대한 고려를 하고 있지 않으므로 논 농사가 많은 국내 실정을 고려하여 Tier 1 수준을 수정할 필요가 있음
- 이에 본 연구에서는 논에 대해서도 밭과 동일하게 경운, 녹비, 작물잔사, 퇴비를 고려하기로 함

나. 경운

- 경운을 관행농업으로 상정했을 때 부분경운과 무경운에 대한 계수는 각각 1.05와 1.10으로 논, 밭, 과수에 동일하게 적용하였으나 아래에 국내 고유 계수 개발을 위한 보충자료에 대한 내용을 정리하였음
- 국내 고유의 계수 적용을 위해 국내에서 수행된 연구 중 아래의 두 가지 조건을 만족하는 결과를 정리하였음
 - 무경운, 경운 또는 부분 경운의 비교 처리구가 존재하는지 여부
 - 단위면적당 탄소저장량(ton C/ha) 또는 토양 깊이별 탄소 농도(gC/kg soil)와 용적밀도 (g/cm³) 자료가 있어서 탄소저장량 산정이 가능한 경우
- 국내 연구 중 토양 유기탄소 저장량이 증가한 3건의 실험 모두 경운 처리구 대비 1.3배 (20년 기준, 4년 실험의 경우 20년 30cm깊이를 기준으로 외삽하였음) 가량 증가하였고, IPCC Tier 1의 난온대 습윤 F_{MG} 계수와 비교했을 때 무경운은 18%, 부분경운은 24% 높은 수치를 보임

<표 9> 무경운 또는 부분경운에 따른 연평균 SOC 변화량 (국내 연구 결과)

영농활동	재배작물	토양 깊이	실험 기간	연평균 SOC stock 변화량 (경운 처리구 대비)	F _{MG}	참고문헌
		--cm--	--yr--	---ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹ ---	unitless	
무경운	벼(논)	15	4	1.07	1.30	국립식량과학원, 2018
부분경운	벼(논)	15	4	1.04	1.29	
무경운	옥수수/녹비	30	1	-10.25	-	국립농업과학원, 2014
무경운	벼(논)	30	20	0.895	1.31	서울대학교, 2013
무경운	벼(논)	15	3	-0.705	0.84	국립식량과학원, 2016

<표 10> 무경운 또는 부분경운에 따른 연평균 SOC 변화량 (해외 연구 결과)

영농활동	토양 깊이	실험 기간	연평균 SOC stock 변화량 (경운 처리구 대비)	F _{MG}	국가	참고문헌
	--cm--	--yr--	---ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹ ---	unitless		
무경운	30	20	0.2±0.13	1.08	프랑스	Arrouays et al. (2002)
무경운	15	23	0.31±0.2	1.08	영국	Powlson et al. (2012)
무경운	30	34	0.4±0.61	1.15	미국	Johnson et al. (2005)
부분경운	30	20	0.05-0.16	1.03	캐나다	VandenBygaart et al. (2008)
부분경운	15	42	0.34±0.06	1.32	호주	Sanderman et al. (2010)
부분경운	60	20	0	1.00	벨기에	D'Haene et al 2009
부분경운	10	40	0.15±0.028	1.16	호주	Lam et al. (2013)
부분경운	25	28	0.1	1.04	프랑스	Metay et al. (2009)

- 해외 연구사례를 종합해본 결과, 평균 F_{MG}는 무경운 1.10, 부분경운 1.11로 무경운은 IPCC 계수와 같았으나, 부분경운은 IPCC 계수 대비 5.7%가량 높은 수치를 나타냄. 0-15cm 깊이 토양 측정 결과에 기반한 2건의 사례로 인해 부분경운의 효과가 다소 과대평가 되었을 것으로 판단됨.
- 또한 국내 연구 결과인 1.30과 비교했을 때 무경운은 15%, 부분경운은 14.6% 낮은 수치를 보였는데, 15cm 깊이의 토양 분석 결과만 있는 단기간의 국내 연구사례로 인해 무경운과 부분경운의 효과가 다소 과대평가된 것으로 사료됨

다. 녹비

- 녹비를 재배하지 않는 연용 논/밭 대비 탄소 축적변화계수를 1 이상으로 적용하였는데, 녹비의 종류가 콩과와 벼과인 경우로 나누어 생각해 볼 수는 있으나 국내 자료의 부족으로 두 경우 모두 동일한 계수인 1.11을 적용하였음
- 아래 표에서 보듯 논에서 녹비로 헤어리베치와 보리를 처리한 경우 토양 탄소 저장량의 증대는 과대평가되거나(헤어리베치) 오히려 음수를 보였기(보리) 때문에 국내 연구사례로 신뢰도 높은 계수를 개발하기 어려웠음. 이는 국내 실험이 1년의 단기간이며 토양의 깊이도 표토로 제한되어 있었으므로 신뢰도가 낮은 결과로 사료됨

<표 11> 녹비 작물 재배에 따른 연평균 SOC 변화량 (국내 연구 결과)

영농활동	작물	녹비 작물	연평균 SOC stock 변화량 (무처리구 대비)	참고문헌
			---ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹ ---	
녹비	벼	헤어리베치	1.45	조현숙 외, 2012
	벼	보리	-0.73	조현숙 외, 2012
	벼	헤어리베치	1.25	김건엽 외, 2017
	벼	헤어리베치	0.63	조현숙 외, 2012
	벼	헤어리베치	1.83	김건엽 외, 2014
	벼	헤어리베치	3.53	김건엽 외, 2014
	벼	헤어리베치	3.19	김건엽 외, 2014
	옥수수	보리	0.30	이경숙, 2014
	콩	보리	0.70	김건엽 외, 2018
	옥수수	보리	0.50	김건엽 외, 2018

- 이에 IPCC의 기본 값인 1.11을 제시하는 것이 바람직하다고 판단되어 이 수치를 사용함

다. 유기물 투입

- 유기물 투입 영농활동은 작물잔사 환원과 퇴비시용으로 나누어 고려하였음
- 작물 잔사 환원은 녹비와는 별도로 주 작물에서 남겨진 작물을 다시 농경지에 환원하는 것으로써 이의 수준을 작물의 종류에 따라 담배, 배추 등 잔사 잔류량이 적은 경우와 대부분의 식량작물처럼 잔사 일부(뿌리 및 밑동부분)가 투입되는 경우로 나누어 고려하였음. 여기에 작물잔사를 추가로 환원하는 농가는 계수 1.11을 적용하였음
- 퇴비의 경우 토양탄소 축적계수 적용을 IPCC 방법론을 기반으로 변형하여 사용하였는데, IPCC의 Fi 계수 중 작물잔사가 많이 환원되는 경우에만 적용된 퇴비 시용 계수를 작물잔사 환원 수준과 무관하게 모두 적용하여 1.30이라는 계수를 적용하였음
- 퇴비 시용은 토양탄소 저장량 증대를 가져오는 영농활동이지만 적정량 이상 투입하였을 경우 추가적 온실가스 및 암모니아 배출의 위험이 있고 단기적으로는 오히려 이산화탄소 배출량이 증가되므로 토양탄소 저장이 아닌 온실가스 감축 측면으로 확장해서 본다면 다른 결과가 도출될 수 있음

라. 바이오차

- 바이오차에서 유래한 탄소의 경우 기존의 토양 유기탄소와는 상이한 분해 속도와 분해 메커니즘을 갖기 때문에 기존 토양 탄소 저장량 산정방법과는 다른 체계를 통해 별도로 산정하고자 함
- IPCC 2019 개정판에서는 Tier 1 수준의 바이오차 투입에 따른 토양탄소 저장 증가량 산정 방법론을 제시하고 있음
- 바이오차 투입에 따른 총 토양 탄소 저장 증가량은 바이오차 생산 시의 열분해 방법, 원재료(표 12), 열분해 온도에 따른 계수를(표 13) 곱하여 100년 뒤에도 분해되지 않고 잔존하는 바이오차 탄소의 양으로 산정됨(식 1)

$$\Delta BC_{Mineral} = \sum_{p=1}^n (BC_{투입량_p} \times F_{탄소함량_p} \times F_{잔존율_p}) \dots \dots \dots \text{식 1}$$

$\Delta BC_{Mineral}$: 바이오차 투입에 따른 총 토양 탄소 저장 증가량, ton sequestered C

$BC_{투입량_p}$: 바이오차 생산 타입 p의 토양 투입량, ton biochar dry matter

$F_{탄소함량_p}$: 바이오차 생산 타입 p의 유기탄소 함량 (표 12), ton C ton⁻¹ biochar dry matter

$F_{잔존율_p}$: 바이오차 생산 타입 p의 토양 투입 100년 후 분해되지 않고 잔존하는 비율 (표 13), ton sequestered C ton C⁻¹

<표 12> 원물질 및 열분해 방법별 바이오차의 유기탄소 함량 (IPCC, 2019)

열분해 방법	원물질	$F_{탄소함량_p}$ ton C ton ⁻¹ biochar dry matter	95% 신뢰구간 % of the mean
Pyrolysis	동물성 퇴비	0.38	49
	목재	0.77	42
	초본	0.65	45
	왕겨/벼짚	0.49	41
	견과류껍질/피트모스	0.74	39
	고형유기물	0.35	40
Gasification	동물성 퇴비	0.09	53
	목재	0.52	52
	초본	0.28	50
	왕겨/벼짚	0.13	50
	견과류껍질/피트모스	0.40	52
	고형유기물	0.07	50

<표 13> 열분해 온도별 100년 후에도 분해되지 않고 잔존하는 바이오차 탄소 비율(IPCC, 2019)

열분해 온도	$F_{잔존율_p}$ ton sequestered C ton ⁻¹ C	95% 신뢰구간 % of the mean
600도 이상의 고온 또는 gasification	0.89	13
450-600도	0.80	11
350-450도	0.65	15

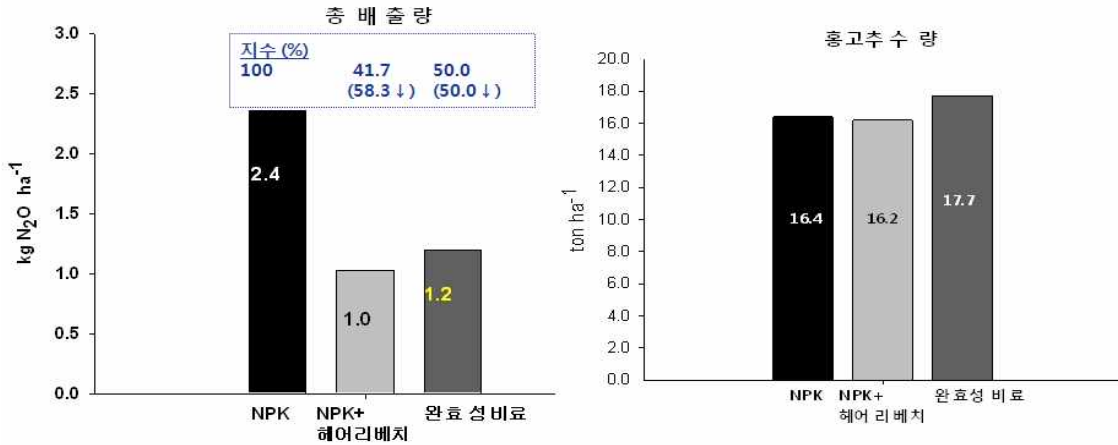
마. 완효성 비료

- 완효성 비료는 앞서 토양탄소 저장증대를 위한 영농활동으로 분류되지는 않았으나 농업환경 보존 프로그램에서 많이 제안되는 기술이므로 이와 관련된 온실가스 감축 효과에 대해 정리하였음
- 밭에서 고추 재배시 완효성비료인 LCU(Latex Coated Urea) 사용에 따른 아산화질소 배출량은 화학비료 사용 대비 50.0% 감축효과를 나타내었음. 또한 고추의 수량 증가로 영농현장지도 자료로 활용되었음(국립농업과학원, 2012; 김건엽 외, 2018)
 - 아산화질소 감축효과: 화학비료 대비 50%
 - 비료이용 효율: 화학비료 대비 완효성 비료 사용 17.0% 증대
 - 홍고추 수량: 화학비료 대비 완효성 비료 사용으로 7.3% 증수
 - 작물의 비료효율 증대와 더불어 밭작물 재배지의 온실가스 배출 감축 기대

<표 14> 고추 재배 시 질소공급원별 비료 이용 효율 및 아산화질소 배출 평가

처리	N 사용량 (kg ha ⁻¹)	수량 (ton ha ⁻¹)	비료이용 효율	아산화질소 총 배출량 (kg N ₂ O ha ⁻¹)
질소 무사용	0	9.81		
NPK	190	16.38	34.6	2.4
NPK+헤어리베치	190	16.20	33.6	1.0
완효성비료	190	17.73	41.7	1.2

※비료 이용 효율(Fertilizer use efficiency, FUE): (수량-질소 무사용 수량)/N 사용량



<그림 22> 고추 재배기간 아산화질소 총 배출량

<표 15> 고추 재배 시 비료 투입 및 수량 평가

화학비료 처리(A)	완효성비료(B)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 처리별 건고추 수량 (수분량 73%) <ul style="list-style-type: none"> - 4.43톤/ha ○ 손실비용 (비료가격) <ul style="list-style-type: none"> - 단비 : 913,400원/ha^㉔ ○ 이익 되는 비용 (건고추 가격 : 2011년) <ul style="list-style-type: none"> - 4.43톤x68,000원/kg=301,240천원/ha^㉕ 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 처리별 건고추 수량 (수분량 73%) <ul style="list-style-type: none"> - 4.78톤/ha ○ 손실비용 (비료가격) <ul style="list-style-type: none"> - LCU완효성(조비) : 1,365,000원/ha^㉖ ○ 이익 되는 비용 (건고추 가격 : 2011년) <ul style="list-style-type: none"> - 4.78톤x68,000원/kg=325,040천원/ha^㉗ - 탄소가격 : 4166.4원/ha^㉘
㉔-㉕ = 300,327천원/ha	㉗+㉘-㉖ = 323,679천원/ha
○ 추정수익액(B-A) = 323,679천원-300,327천원 = 23,352천원/ha	

- 밭에서 콩 재배시 완효성비료인 LCU(Latex Coated Urea) 시용에 따른 아산화질소 배출량은 화학비료 시용 대비 37.8% 감축효과를 나타내었음. 콩의 수량 증가로 영농현장지도 자료로 활용되었음(국립농업과학원, 2012)
 - 아산화질소 감축효과: 화학비료 대비 37.8%
 - 비료이용 효율: 화학비료 대비 완효성 비료 시용 40.0% 증대
 - 콩 수량: 화학비료 대비 완효성 비료 시용으로 27.2% 증수
 - 고추 재배시 온실가스 배출 저감을 위한 완효성 비료시용 효과에 따른 영농활용기술과 연계(2012, 영농활용; 김건엽 외, 2018)

<표 16> 콩 재배 시 질소공급원별 비료 이용 효율 및 아산화질소 배출 평가

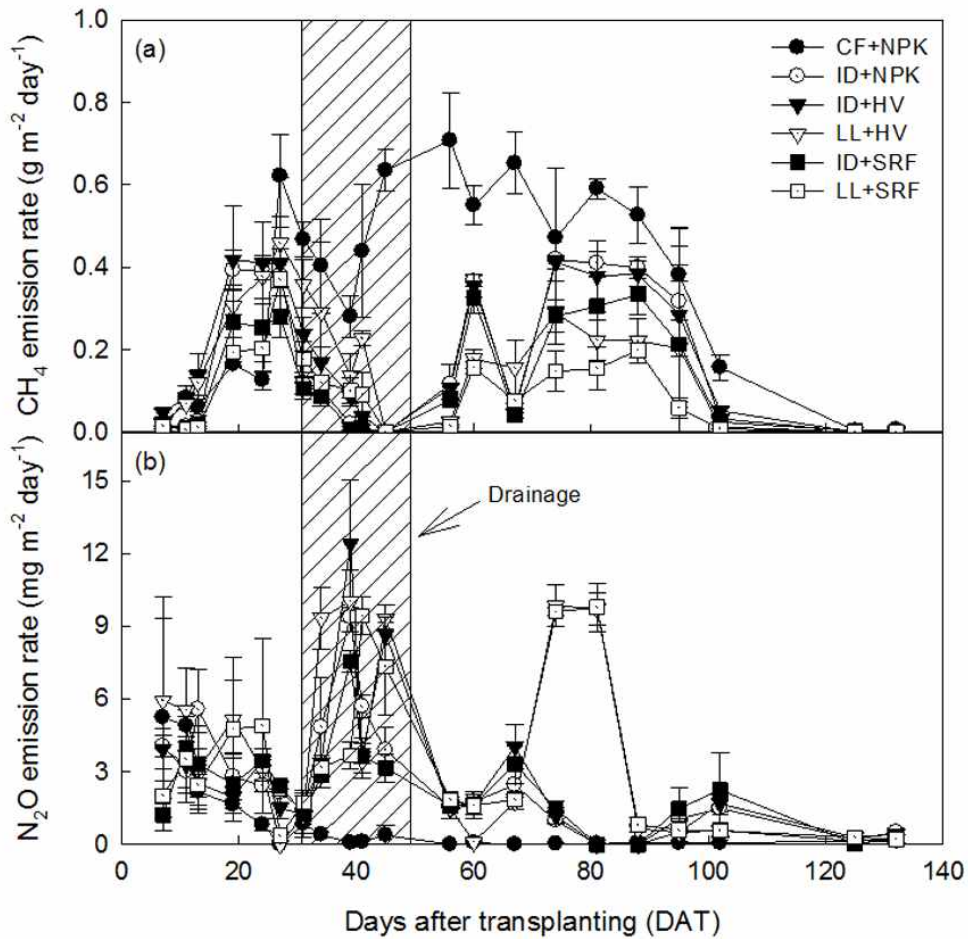
처리	N 시용량 (kg ha ⁻¹)	수량 (ton ha ⁻¹)	비료이용 효율	아산화질소 총 배출량 (kg N ₂ O ha ⁻¹)
질소 무시용	0	1.12		0.35
NPK	32	2.32	37.5	0.98
NPK+헤어리베치	32	2.25	35.3	0.54
완효성비료	32	2.95	52.5	0.61

※비료 이용 효율(Fertilizer use efficiency, FUE): (수량-질소 무시용 수량)/N 시용량

<표 17> 콩 재배 시 비료 투입 및 수량 평가

화학비료 처리(A)	완효성비료(B)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 처리별 콩 수량 (수분량 14%) - 2.32톤/ha ○ 손실비용 (비료가격) - 단비 : 913,400원/ha^㉑ ○ 이익 되는 비용 (콩 가격 : 2012년) - 수량x가격= 2.32톤x8,000원/kg=18,560천 원/ha^㉒ ○ CO₂ 배출 감축 효과=3,645.6원/ha^㉓ 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 콩 수량 (수분량 14%) - 2.95톤/ha ○ 손실비용 (비료가격) - LCU완효성(조비) : 1,365,000원/ha^㉔ ○ 이익 되는 비용 (콩 가격 : 2012년) - 수량x가격=2.95톤x8,000원/kg=23,600천 원/ha^㉕ ○ CO₂ 배출 감축 효과= 2,269.2원/ha^㉖
^㉑ -(^㉒ + ^㉓) = 17,643천원/ha	^㉕ -(^㉔ + ^㉖)= 22,233천원/ha
○ 추정수익액(B-A) = 22,233천원 - 17,643천원 = 4,590천원/ha	

- 물관리 기술 3가지인 상시담수(CF), 간단관개(ID), 논물얕게대기(LL)와 양분관리 3가지 처리기법인 화학비료(NPK), 헤어리베치(HV), 완효성 비료(SRF)를 처리구로 하여 아산화질소 배출 특성을 살펴본 결과, 간단관개와 완효성비료를 함께 적용하는 복합기술의 적용 시 아산화질소 배출이 2.45 kg ha⁻¹로 배출됨에 따라 다른 다른 비료처리 대비 효과적인 결과라 할 수 있음(권효숙 외, 2019)



<그림 23> 벼 논에서 양수분 복합관리에 따른 아산화질소 및 메탄 배출특성

<표 18> 처리구별 온실가스 배출량에 대한 온난화지수(GWP)

처리	Seasonal flux (kg ha ⁻¹)		GWP (kg CO ₂ -eqv. ha ⁻¹)
	CH ₄	N ₂ O	
CF+NPK	435	0.78	11115
ID+NPK	208	2.71	5997
ID+HV	225	3.01	6531
LL+HV	182	4.40	5861
ID+SRF	154	2.45	4580
LL+SRF	106	3.88	3801

3. 탄소저장량 계산기 스프레드시트 구축

가. 탄소 저장량 계산기 스프레드시트 사용방법

- 영농활동의 변경에 따른 농경지 토양 탄소 저장량 변화를 산정하기 위한 계산 파일을 만들었으며, 그 사용법은 box. 1과 같음. 원본 파일은 부록으로 첨부하였음(탄소 저장량 계산기.xlsx).

Box 1. 탄소 저장량 계산기 스프레드시트 사용 방법

1. 기본 화면

농경지 토양 유기탄소 저장량 계산기					
1. 토성, 농경지 종류, 경운 수준, 유기물 투입 수준을 선택 (기존 활동/변경할 활동) 후 농경지 면적을 입력					
2. 토양 유기탄소 저장량을 알고있는 농경지의 경우 값을 직접 입력					
3. 기존 농업활동을 유지했을 때의 총 탄소 저장량과 농업환경을 변경했을 때 20년 후의 총 탄소 저장량을 산정 후 최종적으로 연간 탄소 저장 증가량을 산정					
4. 바이오차 투입 농경지의 경우 바이오차 투입량을 입력하고 바이오차의 원물질, 열분해 방법 (P=pyrolysis, G=gasification), 열분해 온도를 선택하여 바이오차 투입에 따른 토양 탄소 저장 증가량을 산정할 수 있음					
토성(기본 토양유기탄소축적계수) --t C ha ⁻¹ , 토양 깊이 0-30cm--	농경지 면적 -ha--	연간 탄소 저장 증가량 --ton C yr ⁻¹ --	바이오차 탄소 저장량 --ton C--		
LAC	10	2.27	50.05		
<기존영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F _i) - 작부체계	녹비**	퇴비***	경운수준(F _{MG})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	종과	투입	경운	453.88
	0.69	0.92	1	1.3	1
<신규영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F _i) - 작부체계	녹비**	퇴비***	경운수준(F _{MG})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	종과	투입	경운	499.27
	0.69	0.92	1	1.3	1.1
*: Low, Medium, High는 작부체계(작물별 작물잔사 함유량)를 의미하며 그 분류는 아래와 같음 Low: 작물잔사를 수거 또는 소각하여 토양에 유입되는 양이 적은 농경지, 채소-담배-면 등 작물잔사의 양이 적은 작물 재배지, 무기질비료를 주지 않거나 질소고정 작물이 아닌 경우 Medium: 작물잔사를 모두 토양에 환원시키는 곡물 재배지, 작물잔사를 수거해가는 경우 퇴비 등의 추가 유기물이 투입되는 농경지, 무기질 비료를 주거나 질소고정 식물을 윤작하는 농경지 High: 곡물류보다 유의하게 작물잔사량이 많은 작물 재배지, 녹비, 피복작물, 휴경, 관개, 다년생 조분류 등의 탄소 저장 증대 활동이 이루어지는 농경지 **: 녹비의 토양탄소축적변화계수는 국가 고유 값임 ***: Low, Medium, High는 작부체계(작물잔사 함유량)를 의미함. Low, Medium 농경지에서의 퇴비 사용에 따른 토양탄소 저장 증가량은 계수가 없기 때문에 1로 대체함					
<바이오차 투입>					
바이오차 투입량 --kg--	바이오차 원물질 및 열분해 방법	바이오차 열분해 온도	탄소저장 증가량 --kg C--		
100	P-육재	350-450도	50.05		
	0.77	0.65			
※ 본 산정방법은 20년 이상 농경지로 유지된 농경지만을 대상으로 함					

2. 토성 선택 및 농경지 면적 입력

- 4가지 토성 (HAC, LAC, 사질토, 화산회토) 중 하나를 선택하면 기본 토양 유기탄소 축적계수가 입력된다.
- 농경지의 면적을 ha 단위로 입력한다.

토성(기본 토양유기탄소축적계수) --t C ha ⁻¹ , 토양 깊이 0-30cm--	농경지 면적 -ha--
LAC	10
HAC	
LAC	
사질토	
화산회토	

3. 기존영농활동 선택

- 농업환경보전프로그램에 참여하기 전 수행 중이었던 영농활동을 선택한다. 활동을 선택하면 활동별 탄소축적변화계수가 자동으로 입력된다.
 - 농경지 종류 : 논, 밭/과수원, 다년생 목분류 중 하나를 선택한다.
 - 농경지 종류 : 표 아래의 주의사항을 참고하여 유기물 투입수준 - 작부체계를 선택한다.
 - 녹비 : 녹비 작물을 재배하는 경우 작물의 종에 따라 콩과 또는 벼과를 선택한다.
 - 퇴비 : 퇴비를 투입여부를 선택한다.
 - 경운 : 관행에 따라 경운을 할 경우 경운, 2-3년 간격으로 경운을 하거나 작물을 심는 일부분만 경운을 할 경우 부분경운을, 경운을 하지 않을 경우 무경운을 선택한다.
- 농업활동의 선택을 마치면 현재 농경지 전체의 토양 탄소 저장량이 산정된다(30cm 깊이 기준).

<기존영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F _i) - 작부체계	녹비**	퇴비***	경운수준(F _{MG})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	종과	투입	경운	453.88
	0.69	0.92	1	1.3	1

Box 1. 탄소 저장량 계산기 스프레드시트 사용 방법 (계속)

4. 신규영농활동 선택

- 농업환경보전프로그램에 참여하며 변경하고자 하는 영농활동을 선택한다(ex 경운 → 무경운). 기존과 동일한 농업활동은 <기존영농활동>과 동일한 선택지로 유지한다.
- 농업활동의 선택을 마치면 변경 20년 후의 농경지 전체 토양 탄소 저장량이 산정된다 (30cm 깊이 기준).

<신규영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계*	녹비**	퇴비***	경운수준(F _{WC})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	농작	투입	무경운	499.27
	0.69	0.92	1	1.3	1.1

5. 바이오차 관련 정보 선택

- 바이오차를 사용하는 농경지의 경우 바이오차 관련 정보를 입력하여 토양 탄소 저장 증가량을 산정할 수 있다.
 - 바이오차 투입량 : 해당 농경지에 사용된 바이오차의 총 중량을 기입한다.
 - 바이오차 원물질 및 열분해 방법 : 열분해로 제조된 바이오차의 경우 P, 가스화(gasification)을 통해 제조된 바이오차의 경우 G가 붙어있는 원물질 종류를 선택한다.
 - 바이오차의 열분해 온도를 선택한다.
 - 바이오차 1회 투입으로 증가하는 탄소의 양이 산정된다.

<바이오차 투입>			
바이오차 투입량 --kg--	바이오차 원물질 및 열분해 방법	바이오차 열분해 온도	탄소저장 증가량 --kg C--
100	P-육재	350-450도	50.05
	0.77	0.65	

6. 연간 탄소 저장 증가량과 바이오차 탄소 저장량 바이오차 관련 정보 선택

- 1-5번 단계를 모두 수행하면 영농활동의 변경에 따른 연간 탄소 저장 증가량이 산정된다. 이 값은 영농활동 변경 시 20년간 탄소 저장량이 선형으로 증가한다는 가정 하에 산정된 값이며 21년부터의 탄소 저장 증가량은 0이다.
- 바이오차 탄소 저장량은 바이오차 투입한 뒤 (1회 당) 100년 후에도 분해되지 않고 남아있을 바이오차 탄소의 양을 산정한 것이다.

연간 탄소 저장 증가량 --ton C yr ⁻¹ --	바이오차 탄소 저장량 --ton C--
2.27	50.05

**제 5장 현행 친환경 농업환경 보전
프로그램 영농활동 효과 정량화**

제5장 농업환경 보전 프로그램 영농활동 효과 정량화

1. 현행 친환경 농업환경 보전 프로그램 영농활동 정리

- 3개 지역(상주, 문경, 보령) 농업환경 보전 프로그램 참여 농가의 영농활동 검토
 - 농업환경 보전 프로그램에 참여하고 있는 농가에서 시행 중인 영농활동을 검토하여 토양 탄소 저장 증대 효과가 있는 활동이 적용된 농경지의 면적을 산정하였음
 - 상주, 문경, 보령의 농업환경 보전 프로그램 실시 현황 표

<표 19> 세 지역(상주, 문경, 보령)에서의 농업환경 보전 프로그램 실시 현황 표

상주	%	논	밭	과수
	완효성 비료	38	5	0
	작물잔사 환원	4	57	46
	녹비재배	0	6	0
	경운 최소화	58	37	54
	총면적	100 (51ha)	100 (32 ha)	100 (7 ha)
문경	%	논	밭	논/밭 혼합
	작물잔사 환원	32	35	52
	녹비재배	34	24	11
	경운 최소화	34	52	37
	총면적	100 (32 ha)	100 (7 ha)	100 (24 ha)
보령	%	논	밭	과수
	완효성 비료	50	48	100
	작물잔사 환원	45	47	
	퇴비/액비	2	0	
	녹비재배	3	4	
	총면적	100 (112 ha)	100 (6 ha)	100 (0.21 ha)

2. 탄소 저장량 증가 효과 정량화

- 3개 지역(상주, 문경, 보령) 농업환경 보전 프로그램 참여 농가의 영농활동별 탄소 저장 증가량 산정

- 위 3개 지역에서 경운횟수 줄이기(상주), 경운 최소화(문경)가 도입된 농경지에서의 총 탄소 저장 증가량을 토양 탄소 계산기를 활용하여 box. 2와 같이 계산함

Box 2. 경운 최소화에 따른 농경지의 탄소저장 변화량 산정 결과

1. 문경 지역 경운 최소화 도입 농경지(논)의 탄소 저장 변화량 산정 결과

농경지 토양 유기탄소 저장량 계산기					
1. 토성, 농경지 종류, 경운 수준, 유기물 투입 수준을 선택 (기존 활동/변경할 활동) 후 농경지 면적을 입력					
2. 토양 유기탄소 저장량을 알고있는 농경지의 경우 값을 직접 입력					
3. 기존 농업활동을 유지했을 때의 총 탄소 저장량과 농업환경을 변경했을 때 20년 후의 총 탄소 저장량을 산정 후 최종적으로 연간 탄소 저장 증가량을 산정					
4. 바이오차 투입 농경지의 경우 바이오차 투입량을 입력하고 바이오차의 원물질, 열분해 방법 (P=pyrolysis, G=gasification), 열분해 온도를 선택하여 바이오차 투입에 따른 토양 탄소 저장 증가량을 산정할 수 있음					
토성(기본 토양유기탄소축적계수) --t C ha ⁻¹ , 토양 깊이 0-30cm--	농경지 면적 -ha--	연간 탄소 저장 증가량 --ton C yr ⁻¹ --	바이오차 탄소 저장량 --ton C--		
LAC 55	10.76	2.60	0.00		
<기존영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계*	낙비***	퇴비***	경운수준(F _{WC})	총 탄소 저장량 --ton C--
논	Medium	1	투입	경운	1,038.61
1.35	1	1	1	1.3	1
<신규영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계*	낙비***	퇴비***	경운수준(F _{WC})	총 탄소 저장량 --ton C--
논	Medium	1	투입	부분경운	1,090.54
1.35	1	1	1	1.3	1.05
* : Low, Medium, High는 작부체계(작물별 작물잔사 함유량)를 의미하며 그 분류는 아래와 같음 Low : 작물잔사를 수거 또는 소각하여 토양에 유입되는 양이 적은 농경지, 채소-담배-면 등 작물잔사의 양이 적은 작물 재배지, 무기질비료를 주지 않거나 질소고정 작물이 아닌 경우 Medium : 작물잔사를 모두 토양에 환원시키는 곡물 재배지, 작물잔사를 수거해가는 경우 퇴비 등의 추가 유기물이 투입되는 농경지, 무기질 비료를 주거나 질소고정 식물을 윤작하는 농경지 High : 곡물류보다 유의하게 작물잔사량이 많은 작물 재배지, 낙비, 피복작물, 휴경, 관개, 다년생 초본류 등의 탄소 저장 증대 활동이 이루어지는 농경지 ** : 낙비의 토양탄소축적변화계수는 국가 고유 값임 *** : Low, Medium, High는 작부체계(작물잔사 함유량)를 의미함. Low, Medium 농경지에서 퇴비 사용에 따른 토양탄소 저장 증가량은 계수가 없기 때문에 1로 대체함					
<바이오차 투입>					
바이오차 투입량 --kg--	바이오차 원물질 및 열분해 방법	바이오차 열분해 온도	탄소저장 증가량 --kg C--		
0	P-목재	350-450도	0		
0	0.77	0.65			
※ 본 산정방법은 20년 이상 농경지로 유지된 농경지만을 대상으로 함					

2. 문경 지역 경운 최소화 도입 농경지(밭)의 탄소 저장 변화량 산정 결과

농경지 토양 유기탄소 저장량 계산기					
1. 토성, 농경지 종류, 경운 수준, 유기물 투입 수준을 선택 (기존 활동/변경할 활동) 후 농경지 면적을 입력					
2. 토양 유기탄소 저장량을 알고있는 농경지의 경우 값을 직접 입력					
3. 기존 농업활동을 유지했을 때의 총 탄소 저장량과 농업환경을 변경했을 때 20년 후의 총 탄소 저장량을 산정 후 최종적으로 연간 탄소 저장 증가량을 산정					
4. 바이오차 투입 농경지의 경우 바이오차 투입량을 입력하고 바이오차의 원물질, 열분해 방법 (P=pyrolysis, G=gasification), 열분해 온도를 선택하여 바이오차 투입에 따른 토양 탄소 저장 증가량을 산정할 수 있음					
토성(기본 토양유기탄소축적계수) --t C ha ⁻¹ , 토양 깊이 0-30cm--	농경지 면적 -ha--	연간 탄소 저장 증가량 --ton C yr ⁻¹ --	바이오차 탄소 저장량 --ton C--		
LAC 55	3.37	0.38	0.00		
<기존영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계*	낙비***	퇴비***	경운수준(F _{WC})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	1	투입	경운	152.96
0.69	0.92	1	1	1.3	1
<신규영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계*	낙비***	퇴비***	경운수준(F _{WC})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	1	투입	부분경운	160.61
0.69	0.92	1	1	1.3	1.05
* : Low, Medium, High는 작부체계(작물별 작물잔사 함유량)를 의미하며 그 분류는 아래와 같음 Low : 작물잔사를 수거 또는 소각하여 토양에 유입되는 양이 적은 농경지, 채소-담배-면 등 작물잔사의 양이 적은 작물 재배지, 무기질비료를 주지 않거나 질소고정 작물이 아닌 경우 Medium : 작물잔사를 모두 토양에 환원시키는 곡물 재배지, 작물잔사를 수거해가는 경우 퇴비 등의 추가 유기물이 투입되는 농경지, 무기질 비료를 주거나 질소고정 식물을 윤작하는 농경지 High : 곡물류보다 유의하게 작물잔사량이 많은 작물 재배지, 낙비, 피복작물, 휴경, 관개, 다년생 초본류 등의 탄소 저장 증대 활동이 이루어지는 농경지 ** : 낙비의 토양탄소축적변화계수는 국가 고유 값임 *** : Low, Medium, High는 작부체계(작물잔사 함유량)를 의미함. Low, Medium 농경지에서 퇴비 사용에 따른 토양탄소 저장 증가량은 계수가 없기 때문에 1로 대체함					
<바이오차 투입>					
바이오차 투입량 --kg--	바이오차 원물질 및 열분해 방법	바이오차 열분해 온도	탄소저장 증가량 --kg C--		
0	P-목재	350-450도	0		
0	0.77	0.65			
※ 본 산정방법은 20년 이상 농경지로 유지된 농경지만을 대상으로 함					

Box 2. 경운 최소화에 따른 농경지의 탄소저장 변화량 산정 결과(계속)

3. 상주 지역 경운 최소화 도입 농경지(논)의 탄소 저장 변화량 산정 결과

농경지 토양 유기탄소 저장량 계산기					
1. 토성, 농경지 종류, 경운 수준, 유기물 투입 수준을 선택 (기존 활동/변경할 활동) 후 농경지 면적을 입력					
2. 토양 유기탄소 저장량을 알고있는 농경지의 경우 값을 직접 입력					
3. 기존 농업활동을 유지했을 때의 총 탄소 저장량과 농업환경을 변경했을 때 20년 후의 총 탄소 저장량을 산정 후 최종적으로 연간 탄소 저장 증가량을 산정					
4. 바이오차 투입 농경지의 경우 바이오차 투입량을 입력하고 바이오차의 원물질, 열분해 방법 (P=pyrolysis, G=gasification), 열분해 온도를 선택하여 바이오차 투입에 따른 토양 탄소 저장 증가량을 산정할 수 있음					
토성(기본 토양유기탄소축적계수) --t C ha ⁻¹ , 토양 깊이 0-30cm--	농경지 면적 -ha--	연간 탄소 저장 증가량 --ton C yr ⁻¹ --	바이오차 탄소 저장량 --ton C--		
LAC	55	29.89	7.21	0.00	
<기존영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계*	농비***	퇴비***	경운수준(F _{MC})	총 탄소 저장량 --ton C--
논	Medium	1	1	경운	2,885.13
<신규영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계*	농비***	퇴비***	경운수준(F _{MC})	총 탄소 저장량 --ton C--
논	Medium	1	1	부분경운	3,029.39
* : Low, Medium, High는 작부체계(작물별 작물잔사 환원량)를 의미하며 그 분류는 아래와 같음 Low : 작물잔사를 수거 또는 소각하여 토양에 투입되는 양이 적은 농경지, 재소·담배·면 등 작물잔사의 양이 적은 작물 재배지, 무기질비료를 주지 않거나 질소고정 작물이 아닌 경우 Medium : 작물잔사를 모두 토양에 환원시키는 곡물 재배지, 작물잔사를 수거해가는 경우 퇴비 등의 추가 유기물이 투입되는 농경지, 무기질 비료를 주거나 질소고정 식물을 윤작하는 농경지 High : 곡물류보다 유의하게 작물잔사량이 많은 작물 재배지, 녹비, 피복작물, 휴경, 관개, 다년생 초분류 등의 탄소 저장 증대 활동이 이루어지는 농경지 ** : 농비의 토양탄소축적변화계수는 국가 고유 값임 *** : Low, Medium, High는 작부체계(작물잔사 환원량)를 의미함. Low, Medium 농경지에서 퇴비 사용에 따른 토양탄소 저장 증가량은 계수가 없기 때문에 1로 대체함					
<바이오차 투입>					
바이오차 투입량 --kg--	바이오차 원물질 및 열분해 방법	바이오차 열분해 온도	탄소저장 증가량 --kg C--		
0	P-육재	350-450도	0.65	0	
※ 본 산정방법은 20년 이상 농경지로 유지된 농경지만을 대상으로 함					

4. 상주 지역 경운 최소화 도입 농경지(밭)의 탄소 저장 변화량 산정 결과

농경지 토양 유기탄소 저장량 계산기					
1. 토성, 농경지 종류, 경운 수준, 유기물 투입 수준을 선택 (기존 활동/변경할 활동) 후 농경지 면적을 입력					
2. 토양 유기탄소 저장량을 알고있는 농경지의 경우 값을 직접 입력					
3. 기존 농업활동을 유지했을 때의 총 탄소 저장량과 농업환경을 변경했을 때 20년 후의 총 탄소 저장량을 산정 후 최종적으로 연간 탄소 저장 증가량을 산정					
4. 바이오차 투입 농경지의 경우 바이오차 투입량을 입력하고 바이오차의 원물질, 열분해 방법 (P=pyrolysis, G=gasification), 열분해 온도를 선택하여 바이오차 투입에 따른 토양 탄소 저장 증가량을 산정할 수 있음					
토성(기본 토양유기탄소축적계수) --t C ha ⁻¹ , 토양 깊이 0-30cm--	농경지 면적 -ha--	연간 탄소 저장 증가량 --ton C yr ⁻¹ --	바이오차 탄소 저장량 --ton C--		
LAC	55	12.14	1.38	0.00	
<기존영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계*	농비***	퇴비***	경운수준(F _{MC})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	0.92	1	경운	551.01
<신규영농활동>					
농경지종류(F _{LU})	유기물 투입 수준(F) - 작부체계*	농비***	퇴비***	경운수준(F _{MC})	총 탄소 저장량 --ton C--
밭/과수원 (Long term cultivated)	Low	0.92	1	부분경운	578.56
* : Low, Medium, High는 작부체계(작물별 작물잔사 환원량)를 의미하며 그 분류는 아래와 같음 Low : 작물잔사를 수거 또는 소각하여 토양에 투입되는 양이 적은 농경지, 재소·담배·면 등 작물잔사의 양이 적은 작물 재배지, 무기질비료를 주지 않거나 질소고정 작물이 아닌 경우 Medium : 작물잔사를 모두 토양에 환원시키는 곡물 재배지, 작물잔사를 수거해가는 경우 퇴비 등의 추가 유기물이 투입되는 농경지, 무기질 비료를 주거나 질소고정 식물을 윤작하는 농경지 High : 곡물류보다 유의하게 작물잔사량이 많은 작물 재배지, 녹비, 피복작물, 휴경, 관개, 다년생 초분류 등의 탄소 저장 증대 활동이 이루어지는 농경지 ** : 농비의 토양탄소축적변화계수는 국가 고유 값임 *** : Low, Medium, High는 작부체계(작물잔사 환원량)를 의미함. Low, Medium 농경지에서 퇴비 사용에 따른 토양탄소 저장 증가량은 계수가 없기 때문에 1로 대체함					
<바이오차 투입>					
바이오차 투입량 --kg--	바이오차 원물질 및 열분해 방법	바이오차 열분해 온도	탄소저장 증가량 --kg C--		
0	P-육재	350-450도	0.65	0	
※ 본 산정방법은 20년 이상 농경지로 유지된 농경지만을 대상으로 함					

- 상주와 문경 지역 논·밭에 부분경운(경운횟수 줄이기 또는 경운 최소화) 도입에 따른 토양 탄소 저장 변화량은 표 20와 같음.

<표 20> 상주 및 문경 지역 논·밭의 부분경운 도입에 따른 토양 탄소 저장 변화량 산정 결과

지역	농경지 종류	면적	변경된 영농활동	토양탄소저장량 (변경 전)	토양탄소저장량 (변경 20년 후)	탄소저장 증대량
		---ha---		---ton C---		
상주	논	29.89	경운횟수 줄이기(부분경운)	2,885	3,029	144
	밭	12.14	경운횟수 줄이기(부분경운)	551	579	28
문경	논	10.76	경운 최소화(부분경운)	1,039	1,091	52
	밭	3.37	경운 최소화(부분경운)	153	161	9

참고 문헌

- 국립농업과학원, 2012. 고추 재배시 완효성 비료사용으로 온실가스 배출 저감 효과. 영농활용. 온실가스 발생저감을 위한 작물의 재배관리 기술 개발
- 국립농업과학원, 2012. 콩 재배시 완효성 비료사용으로 온실가스 배출 저감 효과. 영농활용. 온실가스 발생저감을 위한 작물의 재배관리 기술 개발
- 국립농업과학원, 2013. 원격탐사를 이용한 농경지 탄소저장량 추정 연구. 농촌진흥청. pp. 1-65
- 국립농업과학원, 2016. 온난화 및 토지이용변화에 따른 토양유기탄소의 변동 평가. 농촌진흥청. pp. 1-100
- 국립농업과학원, 2016. 농촌 바이오매스 활용 농경지 토양탄소 격리기술 개발. 농촌진흥청. pp. 1-104
- 국립농업과학원, 2018. 농업의 다원적 기능 및 토양자원 가치 설정 연구. 농촌진흥청. pp. 1-64
- 국립농업과학원, 2019. 유기농 실천유형별 환경생태 특성조사 및 평가지표 개발. 농촌진흥청. pp. 1-118
- 권효숙, 김건엽, 최은정, 이선일, 이종식, 2019. 벼 논에서 양수분 복합관리에 따른 온실가스 (CH_4 , N_2O) 배출 특성 및 수량 변동에 미치는 영향. *Journal of Climate Change Research* 10(4), 351-359
- 김건엽, 이선일, 이종식, 정현철, 최은정, 2018. 콩과 고추재배지에서 양분 공급원별 N_2O 배출량 평가. *Korean J. Environ. Biol.* 36(4), 680-686
- 서울대학교. 2013. 토지이용형태별 토양탄소 안정화 및 저장용량 증진기술 개발. 농촌진흥청. pp. 1-187
- 이선일, 이창규, 김건엽, 권효숙, 이종식, 최은정, 신중두, 2019. Analysis of Research Trends in Nitrous Oxide Emissions from Upland in Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 52(4), 307-317

- 이태화, 김상우, 신용철, 정영훈, 임경재, 양재의, 장원석. 2019. 토양 특성을 이용한 토양유기탄소저장량 산정 모형 개발. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(6), 1-8
- 조현숙, 서명철, 김준환, 신평, 백재경. 2018. The changes of soil carbons as affected by several kinds of organic material in upland soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 51(4), 586-595
- 조현숙, 성기영, 박태선, 서명철, 전원태, 양운호, 강항원, 이혜진. 2012. 녹비작물 종류에 의한 토양 및 비 탄소량의 변화. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45(6), 1058-1064
- 한국환경정책·평가연구원, 2018. 기후변화 적응정책과 온실가스 감축정책의 연계·평가 기술개발. pp. 1-541
- 한양수, 남홍식, 박광래, 이영미, 이병모, 박기춘. 2020. 유기 농토양의 토양탄소 저장 효과 평가. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association* 28(1), 73-82
- Adhikari, K., Owens, P.R., Libohova, Z., Miller, D.M., Wills, S.A., Nemecek, J., 2019. Assessing soil organic carbon stock of Wisconsin, USA and its fate under future land use and climate change. *Science of the Total Environment* 667, 833-845
- Brian McConkey, 2019. Prairie Soil Carbon Balance Project: Monitoring SOC Change Across Saskatchewan Farms from 1996 to 2018. Saskatchewan Soil Conservation Association. pp. 1-25.
- Martín, J.A.R., Álvaro-Fuentes, J., Gonzalo, J., Gil, C., Ramos-Miras, J.J., Corbí, J.M.G., Boluda, R., 2016. Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma* 264, 117-125
- Xu, L., Yu, G., He, N., Wang, Q., Gao, Y., Wen, D., Li, S., Niu, S., Ge, J., 2018. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: A synthesis. *Scientific Reports* 8:2806
- Zhang, F., Wang, Z., Glidden, S., Wu, Y.P., Tang, L., Liu, Q.Y., Li, C.S., Frohling, S., 2017. *Scientific Reports* 7:7144