



제1장 농경지 부문 탄소 축적량 산정 개선방안 연구

이동근

제1절 서론

1. 연구 배경

2010년에 저탄소 녹색성장 기본법 및 온실가스총괄관리규정(환경부 훈령 935호)이 제정됨과 함께, 통계청 소속 통계개발원은 국가 온실가스 배출통계 작성과정에서 MRV 지침서 개정, 국가 온실가스 인벤토리보고서(NIR: National Inventory Report) 및 공통보고서식(CRF: Common Report Format) 검증, 온실가스 배출통계 관련 활동자료 수집, 기타 온실가스 통계 작성과 관련한 필요 사항 등에 걸쳐 법정 협의기관으로 참여하고 있다. 이들 협의업무 중, NIR 및 CRF 검증작업은 2010년부터 2013년까지 4차례에 걸쳐, 온실가스종합정보센터와 통계개발원이 공동으로 실시한 바 있는데, 작업과정에서 발견된 오류사항들은 통계공표 이전에 많은 부분들이 수정·보완되고 있으나, 산정기관 상황에서 단기에 해결하지 못하는 부분들은 중장기적인 개선과제로써 유보하는 사례들도 종종 발견되어 왔다.

LULUCF 농경지 부문도 상황은 비슷하여, 2013년 검증 작업과정에서 14건의 보완사항이 발견되었으며, 그 중 12건은 검증작업(7~11월) 이후 공표(12월) 단계까지 수정·보완되었으나, 다년생 목질 바이오매스에 대한 배출량 산정·과수원 등에 적용한 기후대 적용·전체 시계열 자료에 대한 단일 축적변화량계수 적용 등은 관련되는 국가 통계자료 등의 부족을 이유로 중장기 개선과제로 분류하고, 당해 연도 적용에서 보류된 바 있다.

한편, 현행 국가 온실가스 배출통계 작성을 위한 지침서 및 NIR은 IPCC 1996 GL, GPG 2000, GPG 2003에 기초하고 있으나, 이들 지침서에 대한 제대로 된 번역자료가 준비되지 않고 있어, 관계 기관 및 일반 이용자들에게 많은 혼선과 어려움을 주고 있는 것이 사실이다.¹⁾ 이런 상황에서, 국가 온실가스 배출통계 작성과정에 참여하고 있는 관계 기관(총괄기관, 관장기관, 산정기관, 협의기관 등) 담당자들은 기관 상황에 따라, 갖은 교체가 이루어지고 있는데, 업무 인수인계 과정에 활용할 수 있는 적절한 교육·훈련용 교재도 필요한 상황이다.

2014년 상반기에 수행한 농경지 부문 탄소 축적량 산정 개선방안 연구는 이와 같은 중장기 개선과제에 대한 적용방안 연구를 중심으로 진행하였으며, 한편으로는 현재 적용 중인 GPG 2003에 대한 체계적인 번역 및 해설자료 제공, 관계기관 업무 담당자를 위한 교육·훈련 자료 제공 등을 목적으로 수행하였다.

2. 연구 범위

2014년 상반기(3~8월)에 걸친 짧은 연구기간을 고려하여, 연구범위는 LULUCF 대분류 부문 중, 농경지(5B) 중분류 부문을 중심으로 진행하였다. 세부적으로는 현행 MRV 및 NIR에서 산정 중인 ‘농경지로 유지된 농경지(5B1)’를 대상으로 검토하였으며, 그 외 농경지 탄소(C) 축적량에 포함·산정하는 농업용 석회시비로 인한 CO₂(5IVB) 부분은 포함하고, 농경지로 전용에 따르는 N₂O 배출량 산정 부분은 제외하였다.

〈표 1-1〉 농경지 부문 탄소 축적량 산정 개선방안 연구 범위

분류	배출원·흡수원		온실가스 종류	현행 산정 여부
5B1	농경지	농경지로 유지된 농경지	CO ₂	E
5B2		다른 토지에서 전용된 농경지		IE(5.B.1.)
5III B		농경지로 전용에 따른 N ₂ O 배출	N ₂ O	NE
5IV B		농업용 석회시비로 인한 CO ₂ 배출	CO ₂	E

3. 연구 방법

2013년 합동 검증작업 결과에서 도출된 농경지 부문 중장기 개선과제를 중심으로 진행하였으므로, 이와 관련한 관계기관 검토자료 등에 대한 이해를 우선하였고, 국내외

1) IPCC 2006 GL이 발표되었으나, 아직까지 적용 여부는 확정되지 않은 상태이며, 번역자료가 온실가스종합정보센터 등을 통해 제공되고는 있으나, 번역과정의 전문성 부족으로 활용에는 많은 어려움이 있다.



관련되는 선행 연구자료·각종 국가 통계자료 등에 대한 문헌연구를 추진하였다. 다음으로, GPG 2003에 대한 체계적인 학습을 위해, 전체 부문을 대상으로 번역작업을 추진하였으며, 작업 과정은 단순 번역 작업을 넘어 주해서(註解書) 수준에 가능한 근접할 수 있도록 해설작업을 보완하였다. 작업 진행 중 문헌연구 과정은 현행 2014년 MRV 지침서 및 최신 NIR(2013년)에 대한 검토작업도 병행하여 진행하였다.

또한, IPCC 홈페이지에 게시된 주요 Annex 1 국가군 중에 국내와 산정체계가 유사한 (GPG 2003 적용) 일본, 호주, 캐나다의 NIR 작성사례들을 검토하여, 국내 관련 사례와의 비교 및 시사점을 얻고자 하였다.²⁾

제2절 GPG 2003 작성 지침

1. 농경지(Cropland) 일반

농경지 부문은³⁾ ‘농경지로 유지된 농경지’(CC: cropland remaining cropland)와 ‘농경지로 전환된 토지’(LC: land converted to cropland)로 구분하여 산정·보고하도록 규정하고 있다. 농경지는 모든 단년생 작물(annual crop)과 다년생 작물(perennial crop) 재배지 및 일정기간 휴경한 토지(휴경지, fallow land) 등으로 구분한다. 단년생 작물은 곡류(cereal), 유지(oil seeds), 채소, 뿌리작물(root crops), 사료작물(forages) 등을 포함하며, 다년생 작물은 교목(tree, 喬木, 큰키나무), 관목(shrub, 灌木),⁴⁾ 각종 초본 작물(혼농임업 등)⁵⁾ 등을 포함한다.

- 2) 미국, EU 국가 사례들도 수집하여 번역작업을 진행하였으나, IPCC 2006 GL에 기초한 사례들이 많아 본문에는 수록하지 않았다.
- 3) GPG-LULUCF는 Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry(토지 이용·이용 변화 및 임업에 관한 우수 수행 지침, 이하 GPG 2003)의 약자로서, 2003년에 IPCC NGGIP(National Greenhouse Gas Inventories Programme) 전문가 약 150명이 참여하여 작성·발간하였다. GPG 2003은 1996년에 발간된 Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory(국가 온실가스 인벤토리를 위한 개정 1996 IPCC 지침서, 이하 1996 IPCC GL)에서 LULUCF(토지 이용·이용 변화 및 임업) 부문을 보완하는 내용 중심으로 구성되어 있으며, GPG 2000(Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 국가 온실가스 인벤토리 우수 수행 지침 및 불확도 관리)에 이은 IPCC 우수 수행 지침으로 기능하고 있다. GPG 2003 발간 이후 IPCC는 1996 IPCC GL과 GPG들을 통합·보완하고, 환경변화를 반영한 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory(국가 온실가스 인벤토리를 위한 2006 IPCC 지침서, 이하 2006 IPCC GL)를 발간·보급하였으며, 제17차 당사국총회(2011년, 남아프리카 공화국 더반)는 2015년부터 Annex 1 국가들의 온실가스 인벤토리 작성에 개정 지침을 적용하도록 결정한다. 한편, non-Annex 1 국가로 분류된 국내에서는 2006 IPCC GL 적용방안에 대해 최근에는 본격적인 논의가 진행되고 있으므로, 당분간은 1996 IPCC GL과 GPG 2000·2003이 계속 적용될 것으로 예상된다.
- 4) 일반적으로, 관목은 2~3m 이하로 성장하는 떨기나무 종류를 말하며, 교목은 8~10m 이상 성장하는 나무를 말한다(디지털농업용어사전). 수고가 2~8m인 나무는 관목과 교목 이행단계로 분류한다(생명과학대사전, 2008.2.). 교목은 땅속에서 줄기가 1개로 성장하는데 반해, 관목은 줄기가 밑둥이나 땅속 부분에서 갈라져 나오는 특징이 있다(디지털농업용어사전 등).

한편, 다년생 작물 재배지는 과수원, 포도원과 코코아·커피·차·기름야자(oil palm)·코코넛·고무·바나나 등을 재배하는 플랜테이션(plantation)⁶⁾으로 구분한다. 토지이용(농경지, 산림지, 초지 등)과 관련하여, IPCC는 국제적으로 적용 가능한 통일된 정의를 제시하지는 않고 있으며, 개별 국가가 토지이용 구분을 자체 정의하여 사용하되, 국가 온실가스 인벤토리⁷⁾ 작성 기간에 걸친 일관성은 유지할 것을 강조하고 있다. 농경지는 보통 단년생 작물 재배지로 이용되지만, 작물-목초 윤작을 위해 일시적으로 사료작물을 재배하거나 목초지로 이용하는 경우도 포함한다.

농경지에서 배출되거나 흡수되는 탄소량은 식재되는 작물 종류, 경지 관리방법, 재배지 토양 및 기후 등에 영향을 받는다. 즉, 단년생 작물은 매년 수확되므로 바이오매스(biomass)에⁸⁾ 대한 장기 탄소 저장현상은 발생하지 않는 반면, 과수원, 포도원, 혼농임업 지역에서 재배하는 다년생 목본식물은 상당한 탄소를 저장할 수 있다. 다년생 작물 재배지에서 탄소 저장 수준은 식재하는 작물 종류 및 성장률, (식재간격 등에 의해 영향 받는) 조밀도(density), 수확 및 전지(剪枝, 가지치기) 방법 등에 영향을 받는다. 농경지 토양탄소 축적량도 중요한데, 축적량 변화는 대부분 작물 종류, 윤작(rotation, 돌려짓기)·경운(tillage, 耕耘, 흙 갈이)·관개(drainage, 灌溉)·잔사(residue, 殘渣, 남은 찌꺼기)처리·유기 토양개량제 사용 여부 등을 포함한 재배지 관리방법의 영향을 받는다.

다른 용도의 토지가 농경지로 전환되는 경우에는 여러 가지 방법으로 탄소 축적량과 온실가스에 영향을 미칠 수 있다. 산림지, 초지, 습지가 농경지로 전환된 경우에는 바이오매스 및 토양을 통해 대기 중으로 탄소 순손실을 발생시킨다. 이에 반해, 성긴 식생을 가지거나 광산 등과 같이 고도로 교란된 토지에서 전환된 경우에는 바이오매스 및 토양 중에 탄소 순이익(획득)을 야기시킨다. 토지이용 전환은 이용형태(농경지, 산림지 등) 상호간에 발생한 경우에만 해당되며, 다년생 작물 재배지가 유사 혹은 다른 작물로 전환

-
- 5) 혼농임업(agroforestry)은 농업과 임업을 겸하면서 축산까지 도입하여 식량, 과일, 사료, 땀감, 목재 등을 생산하고 토양보전을 실천하여 지속농업을 가능케 하는 복합농업 형태를 말하며, EU 각국에서 폭 넓게 실용화 되고 있다(디지털농업용어사전).
 - 6) plantation에 대해 IPCC GL은 명확한 정의를 내리지 않고 있으나, 토지이용 부문 중 산림지와 농경지 부문 모두에서 사용하고 있다. 이와 관련하여, FAO(United Nations Food and Agriculture Organization, 국제연합식량농업기구)는 산림지를 대상으로 production plantation과 protection plantation을 구분·사용하며, 농경지에 대해서는 compact plantation으로 사용하고 있다.
 - 7) 인벤토리(소관목록, 관장목록)는 기록학에서 사용되는 용어로써, 책자 형태 검색도구의 기능을 가지며, 기록 집합체를 상세히 기술하는 구조를 나타낸다. 일반적인 형식은 서문, 생산기관 연혁, 생산시기, 매체, 배열, 기록 부문별 기술, 기록질 목록, 색인 등으로 구성된다(기록학용어사전, 한국기록학회, 2008.10.).
 - 8) 바이오매스는 생물량(生物量), 생물자원(生物資源), 생물체량(生物體量), 생체량(生體量) 등으로 번역·사용되며, 일반적으로 탄소 혹은 질소 중량으로 환산하여 표현한다. 바이오매스 정의에 대해서는, 지식경제용어사전(산업통상자원부, 2010.11.)에서 태양에너지를 받는 식물과 미생물, 광합성으로 생성되는 식물체, 균체와 이를 먹고 살아가는 동물체를 포함하는 생물 유기체를 말하며, 이를 이용하여 고체(목질계), 액체(바이오디젤, 에탄올), 기체(바이오 가스) 에너지원으로 활용 가능한 것으로 설명하고 있다.



재배된 경우에는 계속하여 농경지로 유지된 토지로 분류되며, 탄소 축적량 변화도 같은 부문에서 산정된다.

농경지로 유지된 농경지에서, 농업 관리과정 중 발생하는 CH₄, N₂O 배출량은 GPG 2000에서 설명하며, GPG 2003에서는 농경지로 전환된 토지에서 토양 산화를 통해 발생하는 N₂O 배출량과 관련한 산정·보고 지침을 제공한다. 산정방법론은 계층적 단계 구조를 따르며, Tier 1 방법은 활동자료로써 제한된 면적자료(세분화 수준이 낮은)와 함께, 배출계수 등은 지침서에서 제공하는 기본 값을 사용한다. Tier 2 방법은 국가 고유계수 및 한층 세분된 면적자료를 사용하며, 결과적으로 배출량·흡수량 산정에서 불확도 수준을 감소시킬 수 있다. Tier 3 방법은 과정모형(process model)⁹⁾과 상세한 인벤토리 측정자료 등을 포함한 국가 고유방법론을 적용한다. 한편, IPCC GL에서 제공하는 관련 기본 값(흡수·배출 계수 등)들은 가능한 갱신하거나 최신 연구결과에 기초하여 새로운 기본 값으로 적용하는 것이 바람직하다.

2. 농경지로 유지된 농경지(CC: Cropland Remaining Cropland)

농경지로 유지된 농경지에서 연간 탄소 축적 변화량(CO₂ 배출량 및 흡수량)은 2개 하위 범주인 생물 바이오매스 및 토양 부문에 대해, 각각의 연간 탄소축적 변화량을 산정하여 구할 수 있다.¹⁰⁾ 탄소 축적 변화량 산정 값(단위: C ton)은 이산화탄소 천톤(CO₂ Gg) 단위로 환산한 값을 최종적으로 적용한다.

<식 1-1> 농경지로 유지된 농경지에서 연간 탄소 축적 변화량

$$\Delta C_{CC} = \Delta C_{CC_{LB}} + \Delta C_{CC_{Soils}}$$

- ΔC_{CC} : 연간 탄소축적 변화량(tonnes C/year)
- $\Delta C_{CC_{LB}}$: 생물 바이오매스 연간 탄소축적 변화량(tonnes C/year)
- $\Delta C_{CC_{Soils}}$: 토양 연간 탄소축적 변화량(tonnes C/year)

* 탄소 톤 단위로 산정한 축적 변화량은 공통보고서식(CRF: Common Report Format)에서 요구하는 단위(Gg CO₂)로 전환[44/12(C 원자량 ⇒ CO₂분자량), 1/1000(톤 ⇒ 천톤(Gg))을 산정된 축적 변화량에 차례로 곱하여 최종 산정]

9) 물질 및 에너지 흐름, 상태 등과 관련하여, 과정모형은 물질수지(收支), 에너지 수지 등을 변수로 구성된 연립방정식 형태로 나타내는 것을 말한다. 이와 같은 과정모형은 해석적·통계적 설명과 함께 인과관계 및 상태변화에 대한 기술 및 수식적 표현을 가능하게 한다(컴퓨터인터넷IT용어대사전, 전산용어사전편찬위원회, 2011.1.).

10) 농경지로 유지된 농경지의 CH₄와 N₂O 배출량은 IPCC GL과 GPG 2000 중 농업 부문에서 설명된다.

한편, 하위 범주인 생물 바이오매스 및 토양 부문에 대한 작성수준을 보여 주는 산정등급 (Tier 1 ~ 3)별 주요 특성을 설명하면 다음과 같다. 먼저, 다년생 목본작물에 대한 생물 바이오매스 부문에서, Tier 1은 IPCC GL이 제시하는 탄소 축적·손실률 기본계수를 적용하고, 기후대별 면적 자료를 사용한다. Tier 2는 탄소 축적·손실률 계수에 대해 국가 고유 값을 일부라도 적용하고, 이에 상응할 수 있는 면적 자료를 연간 혹은 주기적인 조사를 통해 확보하여 사용하며, 가능하다면, 지하부 바이오매스에 대한 고려도 필요하다. 접근방법은 고유 탄소 축적변화율을 개발하는 대신, 2개 시점 탄소 축적량에 대한 측정 혹은 추정방법을 선택적으로 적용할 수 있다. Tier 3은 커피, 과수원, 간작영농¹¹⁾ 등 재배방법별 상세 세분 면적 및 국가 고유 탄소 축적·손실률 값을 사용하며, 접근방법은 상세 세분 면적에 대한 모형 혹은 측정 등의 방법을 통한 국가 고유 탄소 축적량 접근법을 사용한다.

다음으로, 토양 부문에서, Tier 1은 무기토양 및 유기토양 모두 기본계수와 기후대별 면적 자료를 사용하되, 무기토양은 토양형태별로 한층 세분된 면적 자료를 사용하며, 석회 배출량은 기본계수를 사용한다. Tier 2는 모든 토양에 걸쳐 기본계수와 국가 고유계수를 혼합한 계수 값과 보다 세분된 면적 자료, 석회종류별 세분된 배출계수를 사용한다. Tier 3은 모형·측정 등을 통한 국가 고유 접근법을 적용한다.

〈표 1-2〉 농경지로 유지된 농경지 하위 부문별 Tier 설명

구분	Tier 1	Tier 2	Tier 3
생물 바이오매스 (다년생 목본작물)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 탄소 축적·손실률 기본 계수 사용 ■ 기후대별 면적 사용 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 탄소 축적·손실률 국가 고유 값 (부분적) 사용 ■ 토지면적 상세 조사 ■ 지하부 바이오매스 고려 ■ 측정·추정 등을 통한 축적량 차이법 선택 적용 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 하위 부문별 상세 세분 면적 사용(커피, 과수원, 간작영농 등) ■ 영농방법별 국가 고유 탄소 축적·손실률 값 사용 ■ 국가 고유 탄소 축적량 접근법 사용(모형, 측정 등)
토양	<ul style="list-style-type: none"> ■ 무기토양 토양탄소 변화량 기본계수 및 기후대별 토양형태별 면적 사용 ■ 유기토양 토양탄소 변화량 기본계수 및 기후대별 면적 사용 ■ 석회배출량 기본계수 사용 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 유기·무기 토양 모두, 기본계수 및 국가 고유 계수 혼합사용, 세분된 면적 사용 ■ 석회종류별 세분된 배출 계수 사용 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 국가 고유 접근법 사용 (모형, 측정 등)

11) 간작(間作, inter-cropping)은 사이짓기를 말하며, 어떤 작물의 이랑이나 포기 사이에 한정된 기간 동안 다른 작물을 심는 것을 말한다. 관련하여, 윤작(輪作)은 돌려짓기를 뜻하며, 작물을 일정한 순서에 따라서 주기적으로 교대하여 재배하는 방법을 말한다.



가. 생물 바이오매스 탄소 축적량 변화(Change in Carbon Stocks in Living Biomass)

농경지에서 탄소는 다년생 목본작물과 같은 생물 바이오매스를 통해 저장될 수 있다. 이들 생물 바이오매스를 재배하는 농경지에는 커피·기름야자·코코넛·고무 등을 재배하는 플랜테이션, 과수 및 견과류(fruit and nut) 등을 재배하는 과수원 등과 같이 단일 경작(monoculture)¹²⁾ 재배지에 한정하지 않고, 혼농임업과 같이 복합경작(polyculture) 재배지도 또한 포함된다.¹³⁾

1) 방법론상 주안점

바이오매스 변화량은 다년생 목본작물에 대해서만 산정한다. 일년생 작물은 단일 연도에 증가한 바이오매스 축적량이 동일 연도 중 발생한 수확·고사 등 사멸에 의한 바이오매스 손실량과 상쇄되어, 바이오매스 탄소 순축적량(net accumulation)은 없는 것으로 가정한다.

농경지로 유지된 농경지에서 생물 바이오매스 탄소 축적 변화량($\Delta C_{CC_{LB}}$) 기본식은 산림지로 유지된 산림지에서 제시된 방식과 동일하다. 다만, 이용할 수 있는 자료 한계를 고려하여, 지상부 바이오매스에 대해서만 산정하고, 지하부 바이오매스(뿌리)는 포함하지 않는다.

〈식 1-2〉 연간 생물 바이오매스 탄소 축적 변화량(기본방법, 획득 손실법)

$$\Delta C_{CC_{LB}} = \Delta C_{CC_G} + \Delta C_{CC_L}$$

- $\Delta C_{CC_{LB}}$: 생물 **지상부** 바이오매스 연간 탄소축적 변화량(tonnes C/year)
- ΔC_{CC_G} : 연간 지상부 바이오매스 성장에 기인한 **탄소축적 증가량**(tonnes C/year)
- ΔC_{CC_L} : 연간 지상부 바이오매스 손실에 기인한 **탄소축적 감소량**(tonnes C/year)

생물 지상부 바이오매스에 관한 기본적인 축적률·손실률 관련 자료는 온대·열대 기후대별로 구분하여 제시하고 있다.¹⁴⁾ 연간 바이오매스 축적률은 수확기 또는 성목(成木, adult tree)기 작물의 바이오매스 축적량을 성목 주기(식목단계부터 수확 혹은 성숙단계

12) 같은 장소·시기에, 한 가지 작물만을 재배하는 것을 단일경작(單作, single crop, 단작), 두 가지 이상 작물을 재배하는 것을 복합경작(復作, 복작)으로 분류한다.

13) 목본 바이오매스 변화량 추정에 관한 기본적인 방법론은 1996 IPCC GL의 산림지 및 기타 목본 바이오매스 축적량 변화(5.2.2)와 GPG 2003의 산림지로 유지된 산림지(3.2.1) 부분 중 생물 바이오매스 탄소 축적량 변화(3.2.1.1)에서 다루고 있다.

14) 4개 기후대별 바이오매스 탄소 축적량·손실량 값은 Schroeder가 1994년에 혼농임업(agroforestry)시스템에 관한 탄소 축적량 연구 보고서에 근거한 자료이다.

까지 기간)로 나눈 값을 나타내며, 연간 바이오매스 손실량은 수확기에 전체 바이오매스가 제거되는 것으로 가정하여, 수확기 바이오매스 축적량과 동일한 값을 적용한다. 농경지로 유지된 농경지에서 고사 유기물(dead organic matter)의 탄소 축적 변화량 추정을 위한 기본 매개변수(parameter) 값과 산정방법은 정보 부족으로 제공되지 않는다.

〈표 1-3〉 다년생 작물의 지상부 목질 바이오매스 기본계수 및 수확 주기

구분	수확기 지상부 바이오매스 탄소 축적량(tonnage C/ha)	수확 및 성목 주기 (year)	바이오매스 축적률(G) (tonnage C/ha/year)	바이오매스 손실률(L) (tonnage C/ha)	오차 범위(%) ¹⁵⁾
온대	63	30	2.1	63	±75%
열대	건조	9	5	1.8	
	습윤	21	8	2.6	
	강우	50	5	10.0	

2) 방법론 선정

농경지 바이오매스 탄소 변화량 산정을 위해, 두 가지 선택적 접근방법을 제공하고 있다. 첫째로는 앞서 살펴본, 획득-손실법에 의한 연간 성장 및 손실률을 산정하는 것이고, 둘째로는 축적량차이법에 의해 두 시점에서의 탄소 저장량을 산정하는 것이다. 획득-손실법은 기본형인 Tier 1 방법을 위해 개발된 접근법이지만, 더욱 정교한 형태로 구성하면 Tier 2, Tier 3 방법까지 적용 가능하다. 축적량차이법은 Tier 2 또는 Tier 3 방법으로써 개발되었다.

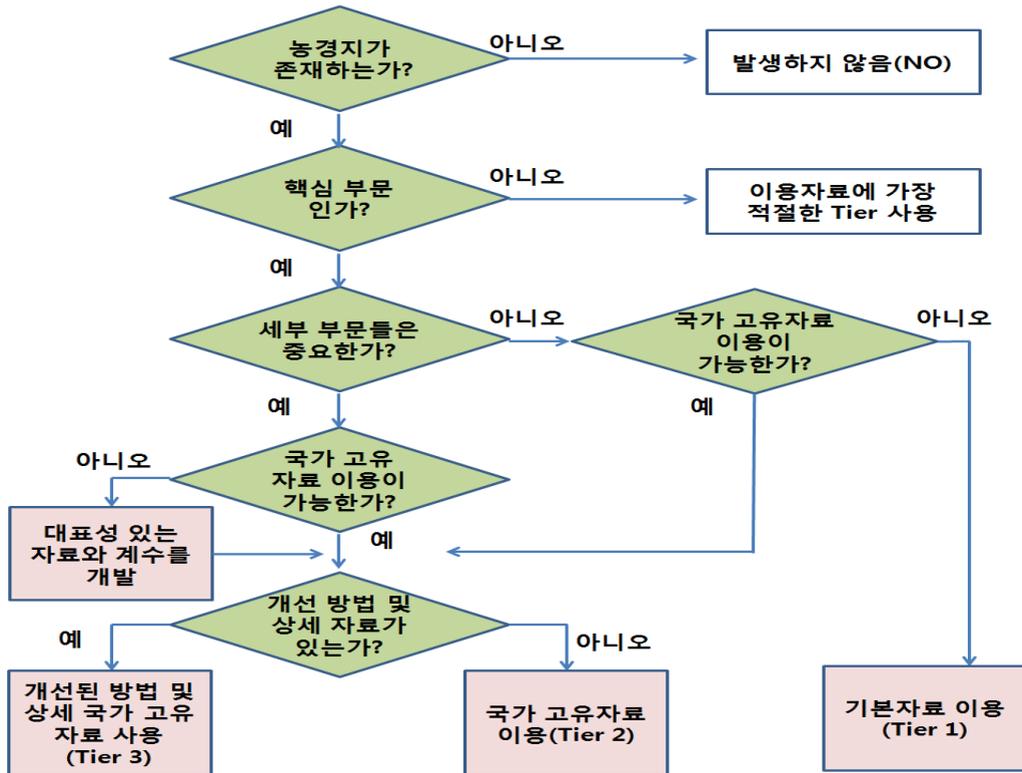
Tier 1 방법은 기본 탄소 축적·손실률을 적용하면서 일반적인 다년생 목본작물에 대해 고도로 통합된 면적 추정량을 기초로 산정한다. 이에 반해, Tier 2 방법은 국가 고유 탄소 축적·손실률, 또는 축적량차이법에 의한 국가 고유 추정량을 사용하면서, 기후대별 주요 목본작물에 대한 면적 추정량을 개발하여 적용한다. Tier 3 방법은 고도로 세분된 Tier 2 방법을 적용하거나 과정모형화·상세 측정 등을 포함한 국가 고유 방법론을 사용하게 된다. 모든 국가들은 주어진 환경이 허용하는 범위에서 가장 높은 Tier를 바탕으로 인벤토리를 보고할 수 있도록 노력하여야 한다. 만일, 농경지로 유지된 농경지에서 탄소 흡수·배출원이 국가 인벤토리 작성과정에 있어, 핵심 부문(key category)으로 분류되고, 생물 바이오매스 하위 부문(subcategory)의 중요성이 인정되는 경우(cross-cutting issues)¹⁶⁾에는

15) 오차에 대한 명목 추정값을 나타내며, 상대표준오차 2배에 해당한다.

16) GPG 2003은 개별 국가들이 국가 온실가스 인벤토리 흡수·배출원을 준비하는 과정에서 고려해야 될 일반적인 주요 사안(cross-cutting issues)으로써 불확도 확인 및 계량화(identifying and quantifying uncertainties), 표본설계(sampling), 방법론 선정 및 핵심 부문 확인(methodological choice, identification of key categories),



Tier 2 혹은 Tier 3 방법을 사용하는 것을 우수 수행(good practice)으로 분류하고 있다. 또한, 개별 국가들은 적절한 접근방법 선정을 위해 IPCC GL에서 제공하는 의사결정나무(decision tree) 방법을 이용할 것을 권고하고 있다.



[그림 1-1] 농경지로 유지된 농경지에서 국가별 적정 Tier 선정을 위한 의사결정나무

* GPG 2003은 농경지로 유지된 농경지는 과거 20년간 계속하여 농업용으로 사용한 토지로 설명하고 있으나, 개별 국가 환경에 맞춰 기간은 조정할 수 있도록 규정
 * **중요 하위 부문**은 소속 상위 부문 전체 흡수·배출원의 약 25~30%를 설명할 수 있는 경우에 분류

품질보증 및 품질관리(quality assurance and quality control), 시계열 일관성 및 재계산(time series consistency and recalculation), 검증(verification)을 예시하고 있다.

가) Tier 1 방법

기본적인 방법은 다년생 목본작물 재배면적에 바이오매스 성장에 따르는 축적 순 추정량을 곱하고 수확 또는 기타 제거에 따르는 손실을 공제하여 산정한다. 손실은 다년생 목본작물 수확 혹은 제거 면적에 탄소 축적 값을 곱하여 산정한다.

기본적인 Tier 1 방법은 다음과 같은 가정을 전제하고 산정한다. 첫째, 다년생 목본 바이오매스에 포함된 모든 탄소는 바이오매스가 제거(제거 이후 다른 작물로 식재한 경우 등)된 연도에 모두 배출되며, 둘째, 표준적인 수확·성숙 주기에 상당한 기간 동안 탄소를 축적한다. 둘째 가정은 다년생 목본작물이 제한된 기간 동안만 바이오매스를 축적한다는 것을 의미하는데, 수확을 통해 작물이 제거되거나 탄소 순축적(net accumulation)이 발생하지 않는 안정상태에 도달하는 기간 동안만 바이오매스량은 증가하게 된다. 안정상태에서는 작물 성장률이 느려지고 성장에 따르는 증가분이 발생하지만, 자연적인 사멸, 가지치기, 기타 손실 등이 발생하여 상쇄되기 때문이다.

IPCC GL에서 제시하는 기본계수를 국가적으로 도출된 토지면적 추정량에 적용한다.

<식 1-3> 연간 바이오매스 증가에 따르는 탄소 축적량 증가

$$\Delta C_{ccG} = \sum(A_{ij} \times G_{totalij}) \times CF$$

- ΔC_{ccG} : 연간 지상부 바이오매스 성장에 기인한 탄소축적 증가량(tonnes C/year)
- A_{ij} : 영농형태별(i), 기후대별(j) 농경지 면적(ha)
- $G_{totalij}$: 영농형태별(i) 기후대별(j) 연평균 전체 바이오매스 증가량(tonnes d.m./ha/year)
- CF : 건물질 탄소 분율(기본 값=0.5, tonnes d.m.)

< 작성 사례 >

열대 습윤 지역에서 다년생 목본작물 9만 ha를 경작하고, 1만 ha를 수확으로 제거한 경우, GPG 2003 기본 계수 및 획득-손실법을 사용한 연간 탄소 순축적 변화량 계산

- ① (적용 축적계수) 연간 ha당 2.6 tonnes C(열대 습윤지역 미성숙 다년생 목본작물)
- ② (적용 손실량) 연간 ha당 21 tonnes C(수확 지역은 당해 연도에, 모든 바이오매스 축적에 따르는 탄소를 상실하는 것으로 가정)
- ③ (연간 탄소 축적 변화량) 2.6 tonnes C × 90,000 ha - 21 tonnes C × 10,000 ha = 24,000 탄소 톤



나) Tier 2 방법

두 가지 접근법을 선택적으로 적용할 수 있으나, 원칙적으로 각각의 접근법은 동일한 결과를 가져와야 한다. 첫째 방법은 Tier 1 방법을 확장한 형태로서, 보다 세분된 면적 추정량(국가 고유 다년생 목본작물 형태 및 세부 기후대별 면적 등)을 사용하며, 부분적 이나마 국가 고유 탄소 축적 및 수확 자료를 적용한다. 개별 국가들은 자국 내에서 가장 일반적인 다년생 목본작물이나 토지 단위당 다년생 목본 바이오매스 수준(탄소 축적량)이 상대적으로 높은 영농형태를 중심으로 국가 고유 매개변수를 개발하는데 주력해야 한다. 둘째 방법은 축적량차이법으로써, 정기적인 시간 간격을 가지고 다년생 목본 작물 전체 탄소 축적량을 추정하는 것이다.

<식 1-4> 연간 생물 바이오매스 탄소 축적 변화량(축적량차이법)

$$\Delta C_{ccLB} = (C_{t2} - C_{t1}) / (t_2 - t_1)$$

$$C = [V \times D \times BEF] \times (1 + R) \times CF$$

- ΔC_{ccLB} : 생물 바이오매스 연간 탄소축적 변화량(tonnes C/year)
 - C_{t2} : t_2 시점에서 산정한 바이오매스 전체 탄소량(tonnes C)
 - C_{t1} : t_1 시점에서 산정한 바이오매스 전체 탄소량(tonnes C)
 - V : 상업적 재적(m^3/ha)¹⁷⁾
 - D : 기본 목재 밀도(tonnes d.m./ m^3)¹⁸⁾
 - BEF : 바이오매스 확장계수¹⁹⁾
 - R : 지상부에 대한 지하부 바이오매스 비율
 - CF : 건물질 탄소 분율(tonnes C/tonne d.m.)
- * 획득·손실법에서 가정한 바와 같이, 지상부 바이오 매스만 산정한다면, 지상부에 대한 지하부 바이오매스 비율(R)은 제외 가능

- 17) 재적(材積, volume)은 나무 부피를 나타내며, 특정 산림에서 자라고 있는 모든 나무 부피를 뜻하는 축적(蓄積, growing stock)과 구분된다. 상업적 재적은 나무에서 비상업적 바이오매스 구성 부분인 그루터기(stump), 큰 가지(branch), 작은 가지(twig), 잎(foliage) 등을 제외한 재적을 말하는데, 경우에 따라 아주 작은 나무 자체를 상업적 재적에서 제외하기도 한다.
- 18) 기본 목재 밀도를 나타내는 단위인 tonnes d.m.은 건조기·가마 등에서 70℃ 정도로 건조한 상태의 톤 단위 무게를 뜻한다.
- 19) 다년생 작물의 전체 생물 바이오매스는 지상부·지하부 바이오매스로 구성되며, 지상부 바이오매스 건물질 기준 중량은 상업적 재적 × 기본 목재 밀도 × 바이오매스 확장계수(BEF)를 곱하여 산정한다. BEF는 상업적 재적에 기초하여 산정한 바이오매스를 비상업적 바이오매스 부분까지 확장하는 기능을 수행하며, R은 지상부 바이오매스 건물질 기준 중량($V \times D \times BEF$)을 지하부(뿌리) 바이오매스까지 확장하기 위한 비율 값을 말한다.

다) Tier 3 방법

국가 고유 탄소 축적 저장량 및 변화량 값을 가진 고도로 세분된 Tier 2 방법을 사용하거나, 세분된 인벤토리 작성이 가능하도록 국가 고유 모형화 혹은 반복된 축적량 측정 방법을 적용한다. 예를 들면, 충분히 검증된 작물 고유 성장 모형과 수확·가지치기 등 영농방법에 관한 상세한 자료는 연간 성장률을 추정하는데 사용될 수 있으며, 획득·손실법과 유사하다. 이런 방법은 특정 지역에서 기후, 토양 및 기타 작물 성장 제한조건에 관한 자료와 함께 작물별, 연령 등급별 목본 바이오매스 작물면적에 관한 정보를 필요로 한다. 대안으로는, 축적량차이법과 같은 주기적인 표본조사에 기반한 축적 변화량 추정방법을 적용할 수 있다.

3) 배출·흡수 계수 선정

인벤토리 산정을 위한 배출·흡수 계수는 바이오매스 탄소 축적률(G) 및 손실률(L) 값과 관련된 내용이다. 앞서, ‘다년생 작물의 지상부 목질 바이오매스 기본계수 및 수확 주기’ 자료에서 IPCC GL이 제시한 계수 값들을 설명하였으나, 이들은 광대한 기후대를 배경으로, 일반 다년생 목질 바이오매스 작물에 기초한 값이므로, 개별 국가들이 기본 값을 적용하는 것은 불확실성을 높일 수 있다. 목본 작물은 용도, 성장률 및 수확률, 비목본 작물과의 혼재 정도 등이 대단히 다양하므로, 산정과정에 단순한 기본 계수를 적용한 결과는 정확성이 다소 낮은 대략적인 탄소 변화량 산정이 될 것이다.

Tier 2 방법을 적용할 때, 바이오매스 축적량, 수확 주기 및 탄소 축적률은 개별 국가 전문가들에 의해 수행된 다년생 목본 작물시스템에 관한 국가 혹은 지역 고유 연구결과를 통해 추정될 수 있다. 목본작물은 녹비(green manure)²⁰⁾ 또는 연료목(fuel wood)으로 사용하기 위해 매년 수확되는 작물부터 과수원 수목과 같이 오랜 기간 생존할 것으로 예상되는 목본작물까지 대단히 다양하다.

바이오매스 축적률 추정 값을 유도하는데 있어서, 바이오매스 축적 순증가는 목본 작물 식목 혹은 재생 이후 초기 몇 년간에 주로 발생한다는 것을 인식하는 것이 중요하다. 오래 생존하는 과수원 수목들은 정기적인 제거(벌목 등) 및 이식(replanting) 주기에 영향을 받지 않는 반면, 가지치기 및 수종갱신에 따르는 바이오매스 손실은 새로운 바이오매스 성장 부분으로 대부분 상쇄될 것이므로, 성목 기준으로 탄소 축적 순증가량은 거의 ‘0’에 가까울 것이다. 따라서, 국가 수준에서 바이오매스 탄소 축적 순증가량은 보다 낮은 탄소 축적을 가진 다른 토지에 비해 목본작물 재배면적이 상대적으로 증가하거나, 제거에 영향을 받는 토지 비율이 표준적인 수확 주기로 사용되는 토지(어리고, 최근에 식재된

20) 비료성분이 풍부하여 유기질비료로 사용되는 작물을 말하며, 풋거름으로도 호칭한다. 자운영, 클로버, 알파파 등 콩과 식물과 호밀 및 귀리 등 화본과 식물, 야생 활엽수의 어린 경엽 등이 주종을 이룬다(토양비료 용어 사전, 2011.12, 농촌진흥청).



목본작물이 우점하고 있는 토지 면적 등) 비율보다 작은 경우에 주로 발생할 것이다. 반대로, 국가 수준에서 바이오매스 손실은 목본작물이 다른 일년생 작물로 대체되거나 목본작물 수확 횟수가 증가할 때 발생할 것이다.

다년생 목본작물 바이오매스에 대한 탄소 축적량 추정을 보다 개선하기 위해, 국가들은 탄소 축적 변화량 혹은 축적률을 측정하기 위해 현장조사를 수행할 수 있다. 연구 조사는 건전한 과학적 원칙에 기반해야 하고, 다른 유사한 연구에서 설계된 일반적인 접근법에 따라야 한다(Dixon et al., 1993; Schroeder, 1994; Schroth et al., 2002; and Masera et al., 2003). 현장조사에서 나타난 결과자료는 선행 연구에서 보고된 범위 안에 있음을 증명하기 위해, 다른 자료원에서 보고한 탄소 축적률 추정 값과 비교해야 한다. 보고된 탄소 축적률은 추가 자료와 전문가 의견, 명백한 이론적 설명 등에 기반하여 수정될 수 있으며, 관련 문서들은 인벤토리 보고서에 포함되어야 한다.

4) 활동자료 선정

활동자료는 다년생 목본작물에서 증가한 축적과 수확된 토지에 대한 면적 추정값(A_G , A_L)에 관련된다. 다년생 목본작물에 대해, 개별 국가들은 이용 가능한 배출·흡수 계수 및 기타 매개변수에 일치할 수 있도록 세분된 형태의 면적 추정 값을 확보할 필요가 있다.

가) Tier 1 방법

다년생 작물에 대한 연평균 식재된 면적과 수확·제거된 면적을 추정하기 위해 관련 접근방법과 함께 연간 또는 주기적인 조사가 이용된다. 면적 추정 값은 기본 G (연간 바이오매스 축적량)· L (연간 바이오매스 손실량) 값과 연결하기 위해 일반 기후대별로 세분되어야 한다. Tier 1에서는 FAO 데이터베이스와 같은 국제통계, IPCC GL 및 기타 자료원들을 다년생 목본작물에 관한 토지면적 추정에 사용할 수 있다.

나) Tier 2 방법

Tier 2 방법에서는 다년생 목본작물 종류별로 보다 세분된 연간 또는 주기적인 조사가 실시되어야 한다. 면적자료는 다년생 목본작물 종류별, 기후대별로 구성할 수 있는 모든 형태에 대해 면적 추정 값을 대표할 수 있도록 관련 부문으로 세분되어야 한다. 또한, 이들 면적 추정 값은 Tier 2 방법 적용을 위해 개발된 국가 고유 탄소 축적·손실 값과 연결되어야 한다. 국가 고유 식별 자료를 부분적으로만 이용 가능한 경우에, 개별 국가들은 외삽법(extrapolate)을²¹⁾ 통해 다년생 목본작물 전체 토지에 대한 기초자료로 적용할 것이 권장되며, 방법 적용과정은 최고의 이용 지식에서 나오는 건전한 가정을 기초로 실시되어야 한다.

21) 체계산 등에 따르는 시계열자료 간격(data gaps)이 발생한 경우에, IPCC 2006 GL은 접합기법(splicing technique)으로써, 중첩(overlap)법, 대체자료(surrogate data)법, 보간법(내삽법, interpolation), 추세 외삽법(trend extrapolation) 등을 제시하고 있다. 이들 중 추세 외삽법(外挿法)은 과거 배출량 추세가 그대로 지속된다는 가정 아래, 과거 추세를 연장해서 배출량을 산정하는 방법을 말한다.

다) Tier 3 방법

Tier 3 방법에서는 국가 하부 지역까지 정교한 격자 수준으로 세분된 활동자료를 필요로 한다. Tier 2 방법과 유사하게, 토지면적은 주요 기후, 토양 및 기타 잠재적으로 중요한 지역 변수(농업경영 형태 등)들을 고려하여 목본작물 종류별로 세분되어야 한다. 가능하다면, 다년생 목본작물 재배지에 대한 포괄범위 완전성을 나타내고, 과대·과소 산정이 발생하지 않도록, 공간적으로 분명한(공간 명시적) 면적 추정 값이 적용되어야 한다. 나아가, 공간 명시적 면적 추정 값은 지역별 탄소 축적·제거율, 재축적 및 영농방법 영향, 추정 값 정확성 개선 등과도 관련될 수 있다.

5) 불확도 평가

Tier 방법별 관련 불확도 평가를 위한 지침을 살펴보면 다음과 같다.

가) Tier 1 방법

Tier 1 방법을 사용하는 경우, 불확도는 토지면적 추정 값, 기본 탄소 축적률·손실률을 적용하는 과정에 대한 정확성 수준에서 발생한다. 앞서, 배출·흡수 계수 값에 대한 기본 자료를 유도하기 위해 사용된 연구 논문(Schroeder, 1994)은 다양한 연구 결과자료들을 기반으로 작성한 결과이지만, 그들에 대한 결합된 불확도 범위를 밝히지 않고 있다. 따라서, 매개 변수 값에 대한 기본 불확도 75% 수준은 전문가 판단에 근거한 것으로 볼 수 있다. 이상의 매개변수 불확도 자료를 면적 추정량에 대한 불확도 측정결과와 함께 평가하게 되면, 농경지 바이오매스 탄소 배출·흡수량 추정 값의 불확도를 산정할 수 있다. 불확도 분석을 위한 Tier 1 방법에서는 단순오차증식법(simple propagation of error)을²²⁾ 사용한다.

22) GPG 2003은 불확도 합성방법으로 Tier 1 방법인 단순오차증식법과 Tier 2 방법인 몬테카를로분석법(Monte Carlo analysis)을 제시하고 있다. 단순오차증식법은 합성 대상이 되는 세부 부문별 불확도(a, b, c, ...)를 계산한 뒤 이들에 대한 제곱합의 제곱근($\sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + \dots}$)을 사용하여 합성 불확도를 산정한다. 몬테카를로분석법은 확률론적 분석기법에 기반한 것으로써, 세부 부문을 모형화하고, 난수를 적용한 모의실험(simulation)을 거쳐 불확도를 산정하는데, 아직까지 국내 인벤토리 작성과정에서는 일반화되지 않고 있다.



나) Tier 2 방법

Tier 2 방법은 영농형태별 탄소 축적·손실 추정 값과 기후대별 토지자료 적용과정에서 국가 고유 자료를 이용하므로 전체적인 불확도가 감소된다.²³⁾ 기본 불확도 평가과정에 국가 고유 탄소 축적률에 대한 오차 추정 값(표준편차, 표준오차, 오차범위 등)을 계산·적용하고, 국가 고유 계수에 대한 오차 범위를 평가하여 GPG 2003의 기본 탄소 축적률 계수와 비교·평가하는 것을 우수 수행으로 분류한다. 기본 계수 값과 비교하여 국가 고유 비율 값이 같거나 더욱 큰 것으로 나타나면, 보다 많은 현장 측정과정을 거쳐 고유 비율 값을 정교화하는 한편, 당장의 인벤토리 산정방법은 Tier 1 방법을 우선 적용하는 것이 바람직하다.

다) Tier 3 방법

Tier 3 방법은 Tier 1, Tier 2 방법과 비교하여, 최고 수준의 확실성을 제공하는데, 국가 고유 바이오매스 축적률·손실률 모두에 대해 표준편차, 표준오차, 오차범위 등을 계산·적용하는 것을 우수 수행으로 평가한다. 또한, 개개 토지 부문별 면적 추정과정에서 측정오차를 평가하는 것도 우수 수행으로 분류한다. 개별 국가들은 Tier 2 불확도 평가방법인 몬테카를로 모의 실험(simulation) 적용을 위해 확률밀도함수²⁴⁾를 개발하는 것이 바람직하다.

나. 토양 탄소 축적량 변화(Change in Carbon Stocks in Soils)

1) 방법론상 주안점

IPCC GL은 모든 토지 이용 부문에 적용할 수 있는 토지 이용 및 관리방법별 토양 CO₂ 배출량·흡수량 산정방법론을 제공하고 있다. 방법론에서는 무기토양 유기탄소 축적량 변화(CO₂ 배출량 및 흡수량), 유기토양(이탄토양²⁵⁾ 등) CO₂ 배출량, 농업용 석회 시비에 따르는 CO₂ 배출량에 대한 방법론을 설명한다.

토양 탄소 축적량은 기본적으로 30cm 깊이까지 측정하며, 토양 표면 잔재물(고사 유기물²⁶⁾)이나 무기탄소(탄산염 광물²⁷⁾) 변화에 따르는 탄소량은 제외한다. 대부분의

23) 예를 들면, GPG 2003에서 제시하는 기본 계수 값을 적용하는 대신, 커피 플랜테이션 고유 재배면적과 계수 값을 적용한다.

24) 연속확률변수가 주어진 어떤 구간 내에 포함될 확률을 확률밀도라고 하며, 이를 함수형태로 나타낸 것이 확률밀도함수(pdf: probability density functions)이다(교육평가용어사전, 2004.5.).

25) 이탄이 집적된 유기질 토양으로써, 습지에서 고사한 습생 식물잔재가 과습한 조건에서 분해가 억제되어 퇴적된 것 중에서 식물조직이 명료하게 잔존하는 토양을 말한다(토양비료 용어사전, 2012.12., 농촌진흥청). 이탄을 모체로 하는 유기질 토양으로써, 자연제방이나 해안사구의 배후습지, 산지의 저습지 등에서 볼 수 있다. 수심이 얇은 소택지나 호소에서는 지하 수위가 높은 부영양의 조건하에서 먼저 갈대, 오리나무 등이 생육하고 이들 식물유체로 이루어진 저위(low) 이탄토가 생성된다. 저위 이탄토 표면이 수면 위로 올라가면서 지하수위의 양분 함량이 저하되기 때문에 식생이 변화하면서 중간(transitional) 이탄토가 이루어진다. 계속해서 밀밭과 흙과 거리가 증대하여 빈영양 조건이 되면 빗물만으로 번식할 수 있는 물이끼 등의 유체로 이루어진 고위(high) 이탄토가 생성된다(자연지리학사전, 2006.5., 한국지리정보연구회).

26) 고사 유기물은 고사목(직경 10cm 이상)과 낙엽층(직경 10cm 미만, 2mm 이상)으로 구성된다. 고사목은 지

농경지 토양에서, 표면 잔재물은 경운(tillage) 등에 따라 없거나 소수의 축적량을 나타낸다. 기준 토양 깊이는 보다 높은 수준에서 산정할 수도 있으나 모든 경우, 전체 시계열에 걸쳐 일관성은 유지해야 한다.

토양 유기탄소 변화량 추정을 위한 산정식은 다음과 같다.

〈식 1-5〉 연간 토양 탄소 축적 변화량

$$\Delta C_{ccSoils} = \Delta C_{ccMineral} - \Delta C_{ccOrganic} - \Delta C_{ccLime}$$

- $\Delta C_{ccSoils}$: 연간 토양 탄소 축적 변화량(tonnes C/year)
- $\Delta C_{ccMineral}$: 연간 무기토양 탄소 축적 변화량(tonnes C/year)
- $\Delta C_{ccOrganic}$: 연간 유기토양 탄소 축적 변화량(tonnes C/year)
- * 유기토양 경작에 따라 유출되는 탄소 유량(flux)을 평가
- ΔC_{ccLime} : 연간 농업용 석회시비에 의한 탄소 배출량(tonnes C/year)

Tier 1, Tier 2 방법에서 고사 유기물 및 무기탄소 변화량은 ‘0’으로 가정한다. Tier 3 방법에서 고사 유기물 변화량을 산정하는 경우에도, 당해 연도 수확과정에서 발생한 잔재물은 일시적 유기물 저장고(pool)로 분류하여 고사 유기물에서 제외되므로, 연간 고사 유기물 수준이 가장 적었던 변화량으로 산정해야 한다. 최적의 Tier 방법을 선정하기 위해서는 다음과 같은 사항들을 고려해야 한다.

- 장기 시계열에 걸친 영농방법 및 방법 변화에 관한 활동자료 종류와 상세 수준
- 기준 토양 유기탄소 축적량과 축적 변화, 배출 계수와 관련한 자료 이용 가능성
- 토양탄소 축적량 평가를 위해 설계된 국가 인벤토리시스템 이용 가능성

주어진 국가 환경에서, 모든 국가들은 가능한 최고의 Tier 방법으로 인벤토리를 작성·보고할 수 있도록 노력해야 한다. 또한, 농경지로 유지된 농경지에서 탄소 흡수·배출원이 국가 인벤토리 작성과정에 있어, 핵심 부문으로 분류되고, 토양 유기물 하위 부문의 중요성이 인정되는 경우에는 Tier 2 혹은 Tier 3 방법을 사용하는 것을 우수 수행으로 분류하고 있다. 또한, 개별 국가들은 적절한 접근방법 선정을 위해 IPCC GL에서 제공하는 의사결정나무 방법을 이용할 것을 권고하고 있다.

표면 위에 쓰러져 있는 나무, 고사된 뿌리, 그루터기 등을 모두 포함한다. 낙엽층은 다양한 부패 단계를 진행하면서, 땅 속에 묻혀있는 모든 살아있지 않은 바이오매스를 포함한다. 직경 2mm 미만인 고사물은 토양 유기물로 분류한다(IPCC 2006 GL).

- 27) 탄산염은 이산화탄소와 금속 산화물 또는 수산화물로 구성되는 화합물로서, 공통적으로 탄산이온(CO₃)을 포함하고 있으며, 산화반응 과정에서 CO₂를 발생시켜 대표적인 온실가스 배출원으로 분류한다. 대표적인 탄산염으로는 탄산칼슘(CaCO₃, 석회석 광물), 탄산마그네슘(MgCO₃, 능고토석 광물), 탄산칼슘마그네슘(CaMg(CO₃)₂, 백운석 광물) 등이 있다(2006 IPCC 가이드라인 이행방안 연구, 2013.8. 이동근).



2) 방법론 선정

무기토양 탄소 축적 변화량을 산정하는 방법은 유기토양 경우와는 차이가 있다. 또한, 이들 하위 부문의 세부 구성 부분들에 대해 자료원의 이용 가능성을 고려하여 각각 다른 Tier 방법을 적용하는 것도 가능하다. 이를 반영하여, IPCC GL은 무기토양, 유기토양, 석회 시비로 분리하여 배출량 산정방법을 설명하고 있다.

가) 무기토양(Mineral Soils)

무기토양 탄소 축적량은 일정 기간 동안, 각종 관리방법 변화로 발생하는 토양 탄소 변화량에 기초하여 산정한다. 즉, 농경지 부문 인벤토리 전체 산정 기간(T)을 대상으로, 인벤토리 보고 연도 탄소 축적량(SOC₀)과 산정 기간 초기 연도 탄소축적량(SOC_{0-T})을 기준 토양 유기탄소 축적량 및 축적량 변화 계수들을 시점별로 각각 적용하여 산정한다. 산정식에서 사용한 작물시스템은 특정 기후, 토양 및 영농방법 등이 유기적으로 결합된 상태를 말하며, 연간 탄소 배출·흡수율은 보고 연도와 초기 연도 축적량 차이를 인벤토리 전체 산정 기간(IPCC GL에서 제시하는 기본 값은 20년)으로 나눠서 산정한다.

〈식 1-6〉 단일 작물 재배시스템에서 연간 무기토양 탄소 축적 변화량

$$\Delta C_{\text{Mineral}} = [(SOC_0 - SOC_{0-T}) \times A] / T$$

$$SOC = SOC_{\text{REF}} \times F_{\text{LU}} \times F_{\text{MG}} \times F_{\text{I}}$$

- $\Delta C_{\text{Mineral}}$: 연간 무기토양 탄소 축적 변화량(tonnes C/year)
- SOC₀ : 인벤토리 산정 기간 중 보고 연도의 토양 유기탄소 축적량(tonnes C/ha)
- SOC_{0-T} : 인벤토리 산정 기간 중 시작 연도의 토양 유기탄소 축적량(tonnes C/ha)
- T : 인벤토리 산정기간(year, 기본 값 : 20년)
- A : 부문별 토지 면적(ha)
- SOC_{REF} : 기준 토양 유기탄소 축적량(tonnes C/ha)
- F_{LU} : 토지 이용 형태별 축적량변화계수
- F_{MG} : 경운방법별 축적량변화계수
- F_I : 유기물 투입형태별 축적량변화계수

토지 이용 및 경운방법²⁸⁾ 등에 관해 제공되는 계수들은 대단히 넓은 포괄범위로 정의

28) 일반적으로 경운방법은 천경(淺耕, shallow plowing, 얇이갈이), 관행 경운(慣行耕耘, conventional tillage), 심경(深耕, deep tillage, 깊이갈이), 무경운 파종(無耕耘播種, non-tillage seeding), 최소 경운(minimum tillage, 最小耕耘), 표토 경운(表土耕耘, surface tillage), 심토 경운(深土耕耘, subsoil tillage) 등으로 구분한다(토양비료용어사전, 2012.12.). 천경은 일반적으로 평균 깊이 이하로 얇게 경운하는 것을 말하며, 관행 경운은 5~9cm, 심경은 20~40cm 깊이로 경운하는 것을 말한다. 무경운 파종은 별도의 경운작업을 하지 않고, 파종 구멍만 파고 씨 뿌리는 농법이며, 최소 경운은 전면 경운을 하지 않고, 작물이 자랄 장소만을 경운하거나 필요한 기계적 에너지와 소요 노동력을 감소시키는 경운법을 말한다. 평균 경심(9~12cm)에

되고 있으며, 토지이용계수(F_{LU} , 토지이용 형태 관련 탄소 축적 변화량), 경운방법계수 (F_{MG} , 경운방법 관련 탄소 축적 변화량), 유기물투입계수(F_I , 유기비료 등 탄소 투입 관련 탄소 축적 변화량)로 구성된다.

농경지에서, 토지이용계수는 경작하지 않은 천연상태의 토양 탄소 축적량에 대한 장기 경작지, 논벼 경작지, 일시 휴경지 등에 대한 기준 토양 유기탄소 축적량을 나타낸다. 인벤토리 작성 시작 연도에 다른 토지용도(산림지, 초지 등)였던 면적은 농경지로 전환 된 토지 부문에서 제공하는 지침에 따라 산정되어야 한다.

토지 단위 면적(ha)당 SOC_0 , SOC_{0-T} , $\Delta C_{CCMineral}$ 산정을 위한 단계는 다음과 같다.

- 1단계 : 기후대 및 토양 종류를 기준으로, 개별 토지 면적별 기준 토양 유기탄소 축적량(SOC_{REF})을 선정
- 2단계 : 인벤토리 시작 연도(기본은 20년 이전)의 농경지 이용형태(F_{LU}), 경운방법 (F_{MG}), 유기물 투입 수준(F_I)을 선정하고, 1단계에서 확인된 SOC_{REF} 와 곱하여 시작 연도 토양탄소 축적량(SOC_{0-T})을 산정
- 3단계 : 2단계와 동일한 방법으로 보고 연도의 토양탄소 축적량(SOC_0)을 산정. SOC_{REF} 는 2단계와 동일 값을 적용하되, F_{LU} , F_{MG} , F_I 값은 보고 연도 기준으로 재선정하여 사용
- 4단계 : SOC_0 와 SOC_{0-T} 의 차이 값에 인벤토리 산정기간으로 나눠 기간 중 연간 평균 토양탄소 축적 변화량($\Delta C_{CCMineral}$)을 최종 계산

< 작성 사례 >

난온대(warm temperate) 습윤 지역, 몰리졸(Mollisol) 토양²⁹⁾에서, SOC_{REF} , F_{LU} , F_{MG} , F_I 값 변화에 따르는 **인벤토리 시작·보고 연도 축적량 및 $\Delta C_{CCMineral}$ 산정**

- ① 기준탄소축적량 = 88 tonnes C/year(난온대 습윤지역, 고풍성 점토질 토양)
- ② 토지이용·경운방법·유기물투입 계수(F_{LU} , F_{MG} , F_I)
 - (시작 연도) F_{LU} (0.71, 장기 경작), F_{MG} (1, 전면 경운), F_I (0.91, 낮은 탄소 투입)
 - (보고 연도) F_{LU} (0.71, 장기 경작), F_{MG} (1.16, 무경운), F_I (1, 중간 탄소 투입)
- ③ 인벤토리 산정기간 = 20년(IPCC GL 기본 기간)
- ④ 연간 평균 무기토양 탄소 축적 변화량
 - $[SOC_0(88 \times 0.71 \times 1.16 \times 1 = 72.5) - SOC_{0-T}(88 \times 0.71 \times 1 \times 0.91 = 56.9)] / 20$
= 0.78 tonnes C/ha/year

대해, 표토 경운은 9cm 이하로 경운하는 것을 말하며, 심토 경운은 표토 밑을 날로 갈지만 뒤집지는 않고 토양을 느슨하게 만들고 잔재물을 토양에 혼합해 주는 최소 경운의 일종이다.

〈표 1-4〉 1 ha당 기준 토양 유기탄소 축적량(SOC_{REF}) 기본 값

(단위 : tonnes C)

기후대	고활성 점토 토양 ^{30),31)}	저활성 점토 토양 ³²⁾	사질토양 ³³⁾	스포딕 토양 ³⁴⁾	화산토양 ³⁵⁾	습지토양 ³⁶⁾
이한대	68	NA	10 [#]	117	20 [#]	146
냉온대/건조	50	33	34	NA	20 [#]	87
냉온대/습윤	95	85	71	115	130	
난온대/건조	38	24	19	NA	70 [#]	88
난온대/습윤	88	63	34	NA	80	
열대/건조	38	35	31	NA	50 [#]	86
열대/습윤	65	47	39	NA	70 [#]	
열대/다습	44	60	66	NA	130 [#]	

주 : 1) Jobbagy & Jackson(2000), Bernoux et al.(2002)에 의해 작성된 토양 데이터베이스를 인용한 자료로써, 평균 축적량을 나타낸다, 기본 오차범위는 상대표준오차 2배로 계산하여 ±95%로 가정하였다.

2) '#'은 자료 이용이 가능하지 않으므로, IPCC 1996 GL 기본 값을 계속 적용하였다.

3) 토양 깊이는 30cm가 기준이며, 'NA'는 'Not Applicable: 적용하지 않음'을 나타낸다.

- 29) 고탄성 점토질(HAC: high activity clay) 토양의 일종으로 아습윤기후(亞濕潤氣候) 지역의 초생지(草生地)에서 나타나는 토양이다(IPCC GL 및 자연지리학 사전 등).
- 30) 토양분류(soil classification)는 미국 농무성이 1975년에 발표한 계통적 분류체계(soil taxonomy)가 세계적으로 널리 이용되고 있는데, 토양 생성발달 정도와 종류에 따라 목(目), 아목(亞目), 대군(大群) 등의 체계로 구분하고 있다. 한편, FAO는 국제토양학회(ISSS), 국제토양자원정보센터(ISRIC)와 공동으로 세계토양자원분류기준(WRB: World References Base for Soil Resources)을 1998년에 발표하였는데, 상대적으로 간단한 체계로 구성되어 있어, 점차적으로 이용도가 높아지고 있다(토양비료용어사전 등)
- 31) 점토광물은 층상구조를 가지는데, 실리카(Si-O, 산화규소) 사면체층과 알루미늄(Al-O, 산화알루미늄) 팔면체층이 결합하는 형태에 따라 1:1형, 2:1형 등으로 구분한다. 고탄성 점토토양(HAC: high activity clay)은 2:1형 실리카 점토광물이 다수 분포하는 중간 정도 풍화된 토양을 말하며, WRB 토양에서는 Leptosols, Vertisols, Kastanozemes, Chernozems, Phaeozemes, Luvisols, Alisols, Albeluvisols, Solonetz, Calcisols, Cypsisols, Umbrisols, Cambisols, Rogosols 등이 해당되고, 미국 농무부(USDA: United States Department of Agriculture) 토양분류체계에서는 Mollisols, Vertisols, high-base(고염기성) status Alfisols, Aridisols, Inceptisols 등이 해당된다.
- 32) 저활성 점토토양(LAC: low activity clay)은 1:1형 점토광물, 비결정질(amorphous) 철, 산화 알루미늄 등이 다수 분포하는 고도로 풍화된 토양을 말하며, WRB 토양에서는 Acrisols, Lixisols, Nitisols, Ferralsols, Durisols를 포함하고, USDA 토양분류에서는 Ultisols, Oxisols, acidic(산성) Alfisols 등이 포함된다.
- 33) 사질토양(sandy soils)은 표준 토성분석(standard textural analyses)에 따라, 모래가 70%를 초과하고, 점토가 8% 미만인 모든 토양을 나타낸다. WRB 분류에서는 Arenosols이 해당하고, USDA 분류에서는 Psamments가 포함된다.
- 34) 스포딕토양(spodic soils)은 회백토화(podzolization)가 많이 진행된 토양으로, WRB 분류에서는 Podzols이 해당하고, USDA 분류에서는 Spodosols이 포함된다.
- 35) 화산토양(volcanic soils)은 화산재에서 파생된 토양으로써, 규산·철·알루미늄·철·물 등으로 구성된 비결정질 점토광물(allophane)이 다수 분포한다. WRB 분류에서는 Andosols이 해당하고, USDA 분류에서는 Andisols이 포함된다.

〈표 1-5〉 농경지 영농방법별 축적변화계수 기본 값

계수 종류	영농 방법	기후대	건조/ 습윤	1996 GL	GPG 2003	오차 범위	비고
F _{LU}	장기 경작	온대	건조	0.7(0.6)	0.82	±10%	20년 넘게 지속적으로 경작되고, 일년생 작물이 주로 재배되는 경지. F _{LU} 값은 F _{MG} 전면 경운, F _I 중간 투입 수준에서 평가
			습윤		0.71	±12%	
		열대	건조	0.6(0.5)	0.69	±38%	
			습윤		0.58	±42%	
	논벼	온대, 열대	건조, 습윤	1.1	1.1	±90%	20년 넘게 논벼를 경작한 경지. 물을 대지 않는 작물을 이모작하는 경지도 포함. F _{MG} 및 F _I 는 적용하지 않음
	휴경 (<20년)	온대, 열대	건조, 습윤	0.8	0.93 0.82	±10% ±18%	일년생 작물을 일시적으로 재배하지 않거나, 다년생 풀로 재생 중인 묵힌 경지
F _{MG}	전면 경운	온대	건조, 습윤	1.0	1.0	NA	연중 잦은 경운과 깊은 경운(잔사 토양환원, 제거 등 ³⁷⁾)으로 실질적인 토양 교란을 발생. 식재시기에 경지 표면은 작물 잔사 등이 30% 미만 존재
		열대		0.9(0.8)	1.0	NA	
	감소 경운	온대	건조	1.05	1.03	±6%	연중 1-2차례 얕고, 전면적 토양 전환이 없는 경운 실시. 식재시기에 경지 표면은 작물 잔사 등이 30% 넘게 존재
			습윤		1.09	±6%	
		열대	건조	1.0	1.10	±10%	
			습윤		1.16	±8%	
	무경운	온대	건조	1.1	1.10	±6%	1차 경운 없이 직파(직접 씨를 뿌림) 하여, 파종 구역에만 최소한의 토양 교란을 발생. 잡초제거는 제초제를 활용
			습윤		1.16	±4%	
열대		건조	1.1	1.17	±8%		
		습윤		1.23	±8%		
F _I	낮음	온대	건조	0.9	0.92	±4%	작물잔사 제거(수집 혹은 소각 등)로 낮은 잔사 환원. 잦은 노출 휴한지, 잔사 발생율이 낮은 작물(채소, 담배, 면화 등) 생산
			습윤		0.91	±8%	
		열대	건조	0.8	0.92	±4%	
			습윤		0.91	±4%	
	중간	온대	건조, 습윤	1.0	1.0	NA	곡물류 등 일년생 작물을 생산. 모든 잔사는 토양 환원. 잔사 제거 경우에는 보충 유기물(거름 등) 투입
		열대	0.9	1.0	NA		
	높음 (無분뇨)	온대, 열대	건조	1.1	1.07	±10%	잔사 발생을 높은 작물 생산으로 잔사 투입 높음. 녹비·피복 작물, ³⁸⁾ 식생있는 휴한지, 윤작용 다년생 풀 재배, 동물 분뇨 사용하지 않음
			습윤		1.11	±10%	

36) 습지토양(wetland soils)은 주기적인 침수와 혐기상태로 배수가 제한된 토양을 말하며, WRB 분류에서는 Gleysols이 해당하고, USDA 분류에서는 Aquic 아목(suborder)이 해당된다.

	높음 (有분뇨)	온대, 열대	건조	1.2	1.34	±12%	높은 작물잔사 투입 및 정기적인 동물 분뇨 투입
			습윤		1.38		

- 주 : 1) 이용 자료가 충분한 경우에는 기후대별 건조·습윤 지역을 구분하여 적용하였다. 열대 습윤 지역은 열대 강우·습윤 지역을 통합하여 설명한다.
- 2) 사용된 오차범위는 표본 수 부족으로, 계통오차를 설명하지 못하며, 세계 모든 지역에 대해 대표성 있는 진정한 영향력을 설명하지도 못한다. 오차범위는 상대표준오차로 나타내었으며, 표준편차 2배에 해당한다. 충분한 자료가 확보되지 않은 경우(NA)에는 전문가 판단에 근거하여 ±50%를 적용한다.
- 3) IPCC 1996 GL에서 ‘()’안의 값은 습지토양(aquic soil)에 적용되며, 다른 토양에서는 중요한 차이점이 없다.

① Tier 1 방법

Tier 1 방법에서, 개별 국가는 기본 기준탄소축적량 및 축적량변화계수를 기본 기후대 및 토양종류별 주요 영농형태(crop system)에 따라 사용한다. 통합·제공되는 경지면적 자료를 이용하여 축적 변화량을 산정하기 위해서는, 개별 경지 구역들에 대해 영농방법 변경 여부를 확인하여, 축적 변화량을 산정(B형)하는 방법, 영농형태별 개괄적인 면적 자료를 사용하여 인벤토리 산정기간 중의 작성·보고 연도 전체 토양탄소 축적량을 계산(A형)하는 방법을 적용할 수 있다. 두 가지 접근법은 통합된 농경지 면적자료를 동일하게 사용하지만, B형에서는 개별 경지면적별 영농방법 변화를 파악하기 위한 활동자료를 사용하여, 고유 영농방법별 기여 수준을 평가할 수 있는 차이점이 있다.

<식 1-7> 연간 무기토양 탄소 축적 변화량

$$A \text{형} : \Delta C_{\text{CCMineral}} = \sum_c \sum_s \sum_i [(SOC_0 - SOC_{0-T}) \times A_{c,s,i}] / T$$

$$B \text{형} : \Delta C_{\text{CCMineral}} = [\sum_c \sum_s \sum_i (SOC_0 \times A)_{c,s,i} - \sum_c \sum_s \sum_i (SOC_{0-T} \times A)_{c,s,i}] / T$$

* ‘c’는 기후대, ‘s’는 토양 종류, ‘i’는 영농형태

- 37) 경운 시기에 경작지의 작물 잔여물을 갈아 토양과 혼합(토양 환원)하거나, 그루터기·뿌리 등을 뽑아 제거하는 작업과정을 말한다.
- 38) 녹비작물(綠肥作物, green manure crop)은 농경지에서 작물을 일정기간 성장시킨 후, 갈아엎어 유기비료로 사용하는 작물을 말하며, 대표적으로 자운영, 클로버 종류, 자주개자리(알팔파) 등 두과 식물과 호맥, 연맥, 옥수수, 메밀 등의 비두과 식물이 있다. 한편, 피복작물(被覆作物, cover crop)은 토양 침식, 양분 유실 방지 등을 목적으로 지표면을 보호하기 위해 재배하는 작물로서, 예초(풀베기) 이후 토양에 투입하면 녹비작업로 사용한다(토양비료용어사전, 2012.12.).

< 작성 사례 >

통합된 농경지 면적자료를 대상으로 **B형 토양탄소 축적변화량**을 산정. 해당 농경지는 난온대 습윤 지역, Mollisol 토양, 일년생 작물 계속 재배지로서 전체면적은 1백만 ha. **인벤토리 시작 연도**에는 장기 경작·전면 경운·낮은 탄소 투입 40만 ha, 장기 경작·전면 경운·중간 탄소 투입 60만 ha, **인벤토리 보고 연도**에는 장기 경작·전면 경운·낮은 탄소 투입 20만 ha, 장기 경작·감소 경운·중간 탄소 투입 70만 ha, 장기 경작·무 경운·중간 탄소 투입 10만 ha

- ① **기준탄소축적량** = 88 tonnes C/year(난온대 습윤지역, 고풍성 점토질 토양)
- ② **인벤토리 산정기간** = 20년(IPCC GL 기본 기간)
- ③ **시작 연도 축적량** = $400,000 \times 88 \times 0.71 \times 1 \times 0.91 + 600,000 \times 88 \times 0.71 \times 1 \times 1 = 60.231$ million tonnes C
- ④ **보고 연도 축적량** = $200,000 \times 88 \times 0.71 \times 1 \times 0.91 + 700,000 \times 88 \times 0.71 \times 1 \times 1 + 100,000 \times 88 \times 0.71 \times 1.16 \times 1 = 66.291$ million tonnes C
- ⑤ **연간 평균 축적변화(증가)량** = $(66.291 - 60.231) / 20 = 6.060$ million tonnes C

② Tier 2 방법

Tier 2 방법은 기본적으로 Tier 1 방법과 동일한 산정식을 적용하지만, 기준탄소축적량과 축적변화계수에 국가 고유 값을 적용한다. 또한, 관련 자료가 충분히 제공된다면, 영농방법별로 보다 상세한 구분 자료를 사용하는 것을 권고한다.

③ Tier 3 방법

Tier 3 방법은 단순한 형태의 축적 변화·배출 계수를 그대로 적용하지 않고, 상세한 토양탄소 배출·축적 변화량 측정자료를 역학 모형에 결합한 방법을 사용한다. 모형에 기초한 접근방법에서, 배출량 추정 값은 모형 내부의 토양탄소 축적 순변화량을 추정하기 위한 다수 방정식 간 상호작용 과정에서 유도된다. 토양탄소 역학을 모의실험하기 위해 설계된 다양한 모형(McGill et al., 1996; Smith et al., 1997 등)들이 소개되고 있다

모형 선정을 위한 핵심 기준은, 사용한 주요 투입자료(input, driving variables)가 국가 고유 값에 기초하여야 하고, 결과적으로 국내 모든 영농방법을 대표할 수 있는지가 될 것이며, 이런 요건을 갖춘 경우에만 모형 선정의 적정성이 인정될 것이다. 모형은 개별 국가에서 다양한 기후, 토양, 영농방법을 대표할 수 있어야 하는데, 이를 위해 국가·지방 단위에서 현장조사를 거친 독립 관측치를 사용하는 경우에 모형의 유효성을 인정받을 수 있다. 검증용 거친 적정 모형에 대한 예시로써, 장기 반복적인 현지실험 사례(Somnet, 1996; Paul et al., 1997), 에디공분산시스템(eddy covariance system)³⁹⁾을 이용하여 영농방법에



대한 장기적인 생태계 탄소 흐름을 측정할 사례(Baldocchi et al., 2001) 등이 있다. 이상적으로는, 통계자료(국가 주요 기후대, 토양 종류, 영농방법 및 변화 등) 대표성을 확보할 수 있도록 토양탄소 축적량을 반복 측정할 수 있는 곳(농장 등)에 고정 표본점을 설치하는 것이 바람직하다. 대부분의 경우, 권고되는 반복측정 주기는 최소 3~5년 이상이어 하며(IPCC, 2000b), 가능한 토양탄소 축적량 측정법은 같은 크기에 기초하여 구성되어야 한다(e.g. Ellert et al., 2001). 시계열에 걸친 반복 표본과 함께 측정절차는 공간 다양성에 대한 영향력을 최소화할 수 있도록 수행되어야 한다(e.g. Conant and Paustian 2002). 최종적인 측정 값은 모형에 기초한 산정방법으로 통합되어야 한다.

나) 유기토양(Organic Soils)

유기토양(이탄에서 유래한 토양 등) 탄소 축적 변화량 산정을 위한 기본 방법은 배수(drainage), 농업생산을 위한 경운 등의 기타 교란요인에서 비롯된 탄소 연간 손실률을 계산하는 것이다. 배수와 경운은 과거에 높은 무산소 상태 환경에서 생성된 유기물질의 산화를 촉발시킨다. 경작된 유기토양의 CO₂ 배출량은 기후대별 유기토양 경지면적에 연간 탄소 배출량 추정을 위한 배출계수를 곱하여 산정한다.

〈식 1-8〉 경작된 유기토양의 CO₂ 배출량

$$\Delta C_{cc\text{Organic}} = \sum(A \times EF)_c$$

- $\Delta C_{cc\text{Organic}}$: 경작된 유기토양 CO₂ 배출량(tonnes C/year)
- A : 기후대(c)별 유기토양 토지면적(ha)
- EF : 기후대(c)별 배출계수(tonnes C/ha/year)

Tier 1 방법은 기본 배출계수와 국가별 기후대별 경작된 유기토양 추정 면적을 함께 사용한다.

Tier 2 방법은 Tier 1 방법과 동일하지만, 국가 고유 자료를 통해 추정된 배출계수 값을 적용한다.

Tier 3 방법은 무기토양 작성방법에서와 같이 역학 모형과 측정 조직(network)이 결합된 보다 상세한 시스템을 적용한다.

39) 에디공분산시스템은 기상학 분야에서 주로 사용하는데, 매우 빠른 속도로 움직이는 여러 방향의 유체량(풍속, 수증기, 이산화탄소 등)을 감지하여 측정할 수 있는 시스템을 말한다(위키피디아 백과사전).

〈표 1-6〉 경작된 유기토양에서 연간 배출계수

기후대	기본 값(tonnes C/ha/year)	오차 범위
냉온대	1.0	±90%
난온대	10.0	±90%
열대	20.0	±90%

주 : 오차범위는 오차에 대한 명목 추정값을 나타내며, 상대표준오차 2배에 해당한다.

다) 석회 시비(Liming)

IPCC GL은 농경지 부문 CO₂ 배출원으로, 석회를 함유한 탄산염 광물⁴⁰⁾의 비료 사용을 포함하고 있다. 배출과정에 대한 간단한 설명을 덧붙이면, 석회 함유 탄산염이 토양에서 용해되는 과정에서, 탄산염에 포함된 염기 양이온(Ca⁺⁺, Mg⁺⁺)이 토양 중에 있는 수소 이온(H⁺)과 교환반응을 거치면서 중탄산염 (2HCO₃)을 형성한다. 중탄산염은 보다 쉽게 반응하여 최종적으로 CO₂와 물(H₂O)을 배출하게 된다. 이와 같은 석회시비 효과는 몇 년에 걸쳐 지속되는 것으로 알려져 있으나, IPCC GL은 시비 연도에 투입된 모든 탄산염 중 탄소가 CO₂로 배출되는 것으로 설명하고 있다. 결과적으로, CO₂ 배출량은 농업용으로 투입된 석회 시비량에 배출계수를 곱하여 단순 계산하는 산정식이 제공된다(배출계수는 추가된 석회 종류에 따라 약간의 변경은 발생한다).

Tier 1 방법은 농경지에 투입된 석회 함유 탄산염 총량에 통합 배출계수 값으로써 0.12를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하며, 석회 함유 탄산염 구성상의 차이는 없는 것으로 가정한다. 주의할 것은 석회 함유 탄산염을 산화물 혹은 수산화물⁴¹⁾로 가공한 것을 주로 시비한 경우에는 무기탄소를 함유하지 않으므로 석회시비 배출량 산정에서는 제외하여야 한다(산화물 혹은 수산화물 제조과정에서 CO₂가 배출되지만, 이후 단계인 토양 시비과정에서는 CO₂가 발생하지 않는다).⁴²⁾

Tier 2 방법은 다른 탄산염으로 구성된 석회(석회석, 이회암⁴³⁾ 및 조개류 퇴적물 등)는 탄소 함유량과 전체적인 순도에 차이가 있다는 가정 아래, 석회 유형별 특성에 대한 고려가

40) 석회석 광물에서 주요 탄산염은 탄산칼슘(CaCO₃), 백운석 광물에서 주요 탄산염은 탄산칼슘마그네슘(CaMg(CO₃)₂)이며, 석회석 광물을 소성(Firing, 燒成, 조합된 연료를 가마 등에서 가열하여 경화성 물질을 만듦)하여 생석회(CaO, lime, 칼슘석회), 백운석 광물을 소성하여 고토석회(CaOMgO)를 제조한다.

41) 석회를 함유한 탄산염을 산화하여 산화칼슘(생석회, CaO), 산화칼슘마그네슘(CaOMgO)을 만들며, 이들을 물과 반응시켜 Ca(OH)₂(수산화칼슘, 소석회)와 Ca(OH)₂Mg(OH)₂(수산화칼슘마그네슘)를 제조한다.

42) 결국, 농업용 석회시비에서 생석회(CaO), 소석회(Ca(OH)₂)를 사용하는 경우는 CO₂ 배출량 산정에서 제외하여야 한다.

43) 이회암(泥灰巖, marl)은 퇴적암의 일종으로 석회분이 풍부한 이암(泥巖)을 말하며, 탄산염을 35~65% 함유한다. 지층을 이루어 넓게 분포하는 경우와 사암(砂巖)이나 이암 내에서 결핵상(結核狀)으로 산출되는 경우가 있으며, 석회 공급재 및 벽돌 제조 등에 사용된다(광물자원용어사전, 2010.12, 한국광물자원공사).



요청되며, 자료 이용이 가능하다면, 고유 배출계수도 필요로 한다.

Tier 3 방법은 석회시비 과정에서 초래된 CO₂ 배출량에 대해, Tier 1 및 Tier 2 방법보다 더욱 상세한 설명자료를 필요로 한다. 기후와 토양 조건에 영향을 받아, 석회시비 과정에서 유도된 중탄산염은 토양과 수중에 CO₂ 전부를 배출하지는 않을 것이며, 일부는 토양단면(soil profile)⁴⁴⁾에서 더 깊이 침출·침전되거나, 깊은 지하수, 호수, 해양 등으로 운반되어 사라질 수도 있다. 만일, 특정 기후·토양 조건에 대한 충분한 자료와 무기탄소 전환과정에 대한 이해가 있다면, 고유 배출계수를 유도하여 사용할 수 있다. 그러나, 이와 같은 분석과정은 토양 및 영농과정에 투입되는 다양한 탄산염 형태별 탄소흐름(carbon fluxes)에 대한 자료가 포함되어야 할 것이다.

〈식 1-9〉 농업용 석회 시비에 따르는 연간 탄소 배출량

$$\Delta C_{CC_{Lime}} = M_{Limestone} \times EF_{Limestone} + M_{Dolomite} \times EF_{Dolomite}$$

- $\Delta C_{CC_{Lime}}$: 농업용 석회 시비에 따르는 C 배출량(tonnes C/year)
 - M : 연간 석회석(CaCO₃) 또는 백운석(CaMg(CO₃)₂) 시비량(tonnes C/year)
 - EF : 배출계수(tonnes C/석회석 또는 백운석 톤)
- * 배출계수 값은 탄산염별 탄소 함유량과 동일하므로, CaCO₃는 12%, CaMg(CO₃)₂는 13.02%⁴⁵⁾

3) 배출흡수 계수 선정

가) 무기토양

Tier 1 또는 Tier 2 방법을 사용하는 경우, 무기토양에 대해 다음과 같은 배출·흡수 계수가 요청된다. 즉, 기준탄소축적량(SOC_{REF}), 토지 이용 형태별 축적량변화계수(F_{LU}), 경운방법별 축적량변화계수(F_{MG}), 유기물 투입형태별 축적량변화계수(F_I)

44) 토양을 관찰하기 위해 수직으로 절단한 경우의 절단면을 말한다. 특정 지역의 토양 성질은 지표에서 기반암에 이르기까지의 수직적인 물리적·화학적 성질의 추이로 파악할 수 있다(자연지리학사전, 2006.5.).

45) GPG 2003은 CaMg(CO₃)₂에 대해 12.2%를 명시하고 있으나, 원소 주기율표에서 각각의 원자량(Ca 40.078, Mg 24.3050, C 12.011, O 15.9994)으로 계산한 최종적인 배출계수 값은 13.02% $[24.022(12.011 \times 2) / 184.4014(40.078 + 24.3050 + 12.011 \times 2 + 15.9994 \times 6) = 13.02]$ 를 적용하는 것이 옳다. 이와 관련해서 IPCC GL이 산업공정 부문에서 제시하고 있는 CaCO₃ 배출계수는 0.43971 $[(12.0\% / 100 \times (44.0098/12.011))]$, CaMg(CO₃)₂ 배출계수는 0.47732 $[(13.02\% / 100 \times (44.0098/12.011))]$ 을 적용하고 있는 것에서 동일한 내용을 확인할 수 있다.

① 기준탄소축적량(SOC_{REF})

중요한 토지이용 및 영농방법의 영향을 받지 않고, 원래 식생이 유지되는 토양이 토양 탄소 변화에 대한 기준선으로 사용된다.

Tier 1 방법에서는 기본 기준탄소축적량(SOC_{REF})을 적용하는 것이 우수수행이다. 기본 SOC_{REF}는 IPCC GL에서 갱신된 자료로써 다음과 같은 개선점을 가지고 있다. 즉, 추정 값들은 원래 식생이 유지되는 토양단면을 대상으로, 최근 수집자료에서 통계적으로 유도된 결과를 제공하며, 토양종류에 있어서는 스포딕 토양(WRB 분류에서는 podzols, USDA 분류에서는 Spodosols)과 아한대 지역 토양들이 새롭게 포함되었다.

Tier 2 방법에서 기준탄소축적량(SOC_{REF}) 값은 국가 토양 조사 및 지도 작성작업 등에서 사용하는 토양 측정 방법을 통해 결정될 수 있는데, 이와 같은 값은 개별 국가에게 보다 대표성 있는 자료로 산정하고, 공식 불확도 분석과정에서 보다 좋은 확률분포함수(probability distribution functions) 추정을 가능하게 한다. 고유 축적량 값을 개발하는 과정에서, 표본설계, 토양 유기탄소·부피밀도⁴⁶⁾ 분석작업 등은 승인된 표준적인 방법이 적용되어야 하고, 보고·검증을 위한 서류화 작업도 수행되어야 한다.

② 축적량변화계수(F_{LU}, F_{MG}, F_I)

Tier 1 방법에서는 기본 축적량변화계수(F_{LU}, F_{MG}, F_I) 값을 적용하는 것이 우수 수행이고, 이들 값들은 IPCC GL에서 갱신되었으며, 관련 선행연구들에 대한 통계적 분석에 기초하고 있다.

Tier 2 방법에서 축적량변화계수 값은 특정 국가 혹은 지역을 위해 실시한 장기적인 실험자료(Smith et al., 1996; Paul et al., 1997 등), 기타 현지 측정자료(현지 연대층서(年代層序, chronosequences⁴⁷⁾) 측정 등)를 통해 추정되었다. 즉, 축적량변화계수를 추정하기 위해, 유기탄소 축적량에 대해 설명하고 있는 선행연구 및 다른 자료원들(즉, 특정 토양 깊이에서 면적 단위당 축적량 관련 자료)을 수집하거나 부피밀도(bulk density)에서 유기탄소 구성비 등 토양 유기탄소 축적량 계산에 필요한 관련 자료들을 활용하였다. 유기물질 구성비가 파악된 경우에는 탄소 함유량에 대해 전환계수로써 0.58을 적용하였다. 추가적으로, 측정 깊이, 토양 관리방법 차이를 나타낼 수 있는 시간간격(time frame) 등에 관한 정보가 활용되었다. 토양 측정 깊이에 대해, 고유 방법이 없는 경우에는 최소 30cm(Tier 1 산정량 기준) 깊이에서의 축적량변화계수를 비교하는 것이 우수수행이다.

46) 분립체, 섬유체 등을 어떤 용기에 충전하였을 때, 입자 간에 생기는 공극(빈틈)을 포함한 체적을 기준으로 측정된 밀도를 말한다(화학용어사전, 2011.1.).

47) 연대층서는 토양 생성 중 시간의 차이에 의해 토양의 특성이 달라진 토양군을 말한다(자연지리학사전, 2006.5.). 연대층서 측정은 시간 순서에 따르는 토지이용 및 관리방법을 대표하기 위해 유사하지만 분리되는 장소들의 측정 값으로 구성되며, 같은 장소에 대한 중단적인 반복 측정·실험을 대체하기 위해 실시된다(GPG 2003).



보다 깊은 토양 깊이에 대해, 충분한 관련 연구자료 이용이 가능하고, 토지 관리방법에 따라 통계적으로 중대한 축적량 차이가 나타나는 경우에는 보다 깊은 토양 깊이에 대한 축적 변화량을 이용하는 것이 바람직하다. 한편, 기준탄소축적량(SOC_{REF}) 및 축적변화량 계수 값들은 동일한 깊이 수준에서 산정되는 것이 중요하며, 계수 값들은 주요 기후대, 토양 종류에 대해 최소한 Tier 1 방법에서 사용한 상세 수준 이상으로 수집되어야 한다.

나) 유기토양

유기토양 배출량 산정을 위한 배출계수는 유기토양이 배수과정을 거쳐 경지로 사용되는 지역별 기후대별 값들이 요청된다.

Tier 1 방법에서는 IPCC GL에서 제공하는 기본 배출계수가 사용되는데, 이들 계수들은 기후대별로 구분되고 있으며, 경지로 사용되기 이전에 토양은 배수가 완료된 것으로 가정하고 있다. 유기토양은 논벼와 침수상태에서 자라는 부작물(소택지에서 자라는 덩굴월귤, 야생 쌀 등)⁴⁸⁾을 재배하는 토지는 제외한다.

Tier 2 방법은 유기토양의 탄소손실에 관한 문헌연구 자료를 통해 배출계수를 유도하여 사용할 수 있다. 경작된 유기토양의 탄소 손실량 추정은 일반적으로 CO₂ 흐름(fluxes)을 직접 측정한 몇몇 연구자료(Klemedtsson et al., 1997; Ogle et al., 2003)와 함께 물 빠짐에 대한 측정자료에 기초하고 있다. 배수(물 빠짐)과정은 침식, 다지기, 소각, 분해 등의 단계로 구분할 수 있으며, 배출계수 추정에는 분해에 의한 손실만이 포함된다. 침수 관련 자료를 사용할 수 있으면, 산화(oxidation)에 기여한 침수 비율을 결정하기 위해 적절한 지역 전환계수를 사용해야 하며, 전환계수는 침수와 CO₂ 흐름 모두를 측정한 연구에 기반해야 한다. 산화 대 침수 비율에 대한 관련 자료가 없는 경우에는 Armentano & Menges(1986) 연구자료에서 기반한 기본 비율 값 0.5(그램 당 그램에 상당)가 권고된다. 유기토양 배출량 추정을 위한 관련 자료 이용이 가능한 경우에는 탄소 흐름에 관한 직접 측정 값 사용이 최선의 방법으로써 권고된다.

4) 활동자료 선정

가) 무기토양

다른 영농방법을 사용하는 경지 면적에 대한 각각의 무기토양 배출량·흡수량 추정이 요청된다. 경작 중인 농경지에 대해, 활동자료는 토양탄소 저장량에 영향을 미치는 작물 종류, 윤작 및 경운 방법, 관개, 비료시비, 잔사 처리 등과 같은 영농방법에 대한 추세 또는 변화 상태를 나타내야 한다. 활동자료 관리방법은 크게 두 가지 형태로 구분된다. 첫째

48) 부작물(副作物, 미소작물(微小作物), minor crop)은 논이나 밭에 재배되는 주작물이 아닌 것을 나타내며, 소택지는 늪과 못 등으로 둘러싸인 습한 토지를 말한다. 또한, 덩굴월귤(cranberry)은 철쭉과 덩굴월귤속 작물로써 소스나 젤리 등을 만드는데 사용된다.

형태는 국가 또는 국가 내 행정구역별(도·군 등)로 취합된 통합형 통계자료로 구성하며, 둘째 형태는 국가별 토지면적에 대해, 통계학에 기초한 표본점을 구성하여 토지이용 및 관리방법에 관한 활동자료를 구성한다. 어떤 형태의 활동자료라도 그들에 대한 공간적·시간적 분석방법에 따라, 3가지 Tier 방법 모두에 적용이 가능하다. Tier 1, Tier 2 방법에서, 기준 탄소축적량은 주요 기후대 및 토양 종류에 따라 대단히 가변적인 모습을 나타내므로, 활동자료도 기후대 및 토양 종류에 따라 구분되어야 한다. Tier 1 방법은 대단히 넓은 범위로 정의한 토양 분류를 사용하므로, 국가 또는 세계 토양지도 수준에서도 농경지 면적의 세부 토양분류를 설명하는데 사용될 수 있다. Tier 3 방법은 역학적 모형과 직접 측정에 기반한 활동자료를 사용하기 때문에, 기본적으로는 Tier 1 방법과 유사하거나 보다 상세한 기후, 토양, 지리학⁴⁹⁾ 및 관리방법 등에 관한 상세 자료가 요청되지만, 산정과정에 사용된 모형에 따라 정확한 필요자료가 추가로 요청될 수 있다. FAO 데이터베이스(<http://apps.fao.org>) 등 세계적으로 이용 가능한 토지이용 및 영농방법과 관련한 통계자료들은 주요 토지이용 형태별 전체 토지면적에 대한 연간 취합자료들을 제공하고 있다. 이들 자료는 세부적으로 몇몇 영농방법 종류(관개된 농경지, 관개되지 않은 농경지 등), 다년생 작물면적⁵⁰⁾(포도원, 과수원 등), 주요 작물별(밀, 쌀, 옥수수, 수수 등) 경지 면적 및 생산량 등에 관한 자료들도 제공한다. 이와 같이, FAO 또는 유사한 국가 전체 자료가 사용되는 경우에는 기후 및 토양 종류별 구분 면적에 대한 국가 내부 자료가 추가적으로 필요하다. 국가 내부에서 추가적인 자료 수집이 어려운

49) 지리학(地誌學, topography)은 어느 특정 지역 내의 지리학적 현상을 자연, 인문 양쪽 모두 견지에서 연구하는 학문이다. 지리학의 연구대상은 해당 지역의 정치, 경제, 산업, 법, 제도, 사회, 문화, 민속, 지형, 수문, 기후 등 광범위한 분야에 이른다.

50) GPG 2003은 영구작물(永久作物, 永年生作物, permanent crop)로 표기하면서, 별도의 설명자료 제시가 없으므로, 혼선방지를 위해 다년생 작물로 표현하고 관련되는 보완자료를 다음과 같이 덧붙였다. IPCC GL은 작물을 다년생 작물(perennial crop)과 일년생 작물(annual crop)로 크게 구분하고 있으나, FAO는 영구 작물(permanent crop)과 일시작물(一時作物, temporary crop)로 구분하고 있다. FAO가 2005년에 발간한 2010 농업총조사를 위한 세계 프로그램(World Programme for the Census of Agriculture 2010)에서 영구 작물 재배지는 수년 동안 재식재가 필요 없는 장기 작물을 재배하는 토지로써, 화초작물(장미, 자스민 등)을 생산하는 교목 및 관목 재배지, 농업용 육묘 재배지를 포함하되, 임업용 육묘 재배지, 향구 목초지 및 방목장은 제외하는 것으로 정의하고 있다(land cultivated with long-term crops which do not have to be replanted for several years; land under trees and shrubs producing flowers, such as roses and jasmine; and nurseries(except those for forest trees, which should be classified under "forest or other wooded land"). Permanent meadows and pastures are excluded from land under permanent crops). 한편, 일시 작물 재배지는 1년보다 짧은 성장주기를 가진 작물 재배지로서, 수확 이후 추가적인 생산을 위해서는 새롭게 파종 및 식재를 해야 하는 재배지로 정의하고 있다. 다만, 아스파라거스, 스트로베리, 파인애플, 바나나, 사탕수수 같은 작물을 1년생 작물처럼 재배하는 경우에는 일시 작물에 포함할 수 있으며, 국가별 관행에 따라 영구 작물 또는 일시 작물로도 분류 가능한 것으로 정의하고 있다(all land used for crops with a less than one year growing cycle; that is, they must be newly sown or planted for further production after the harvest. Some crops that remain in the field for more than one year may also be considered as temporary crops. Asparagus, strawberries, pineapples, bananas and sugar cane, for example, are grown as annual crops in some areas. Such crops should be classified as temporary or permanent according to the custom in the country).



경우에는, 이용 가능한 토지 피복·토지 이용 지도들(국가 고유 정보 또는 IGBP-DIS⁵¹⁾ 등과 같은 세계적 정보를 이용)에 국가 고유 토양 지도 또는 FAO 세계 토양 지도 등을 중첩(overlay)하는 방법으로 작성되어야 할 것이다. 가능하다면, 작물별 경지면적 자료를 단순 적용하기보다는 영농방법(운작 및 경운 방법 등)별 경지면적 자료가 확보되고 적절한 계수 값들로 연결되는 것이 바람직하다(FAO가 분류하는 다년생 작물 등 특정 작물 종류별 면적 기초 추정량에도 이들 방법론이 적용되므로, 농경지 바이오매스 부문에서도 동일한 내용이 적용된다). ‘국가 토지이용 및 자원 목록(National land-use and resource inventories)’은 영구 표본점(정기적으로 자료가 수집되는 지점)에서 수집한 자료들로 구성되는데, 통합형으로 수집된 농업 및 토지이용 통계에 대해 많은 장점들을 가지고 있다. 즉, 표본점들은 특정 영농방법들과 쉽게 연결이 가능하며, 특정 지점의 토양 종류는 표본조사 혹은 관련 토양 지도들을 참조하는 방법으로 손쉽게 판단할 수 있다. 적절히 통계적 방법으로 설계되어 선정된 표본점들은 활동자료와 관련하여 다양한 추정 값을 제공하며, 이를 통해 불확도 분석을 위한 공식자료로도 사용할 수 있다. 농경지를 포함한 대표적인 국가 토지이용 및 자원 목록 사례로는 미국에서 실시하는 National Resource Inventory in the U.S.(Nusser and Goebel, 1997)를 참고할 수 있다.

나) 유기토양

유기토양 배출량 추정을 위해서는 기후대별로 경작된 유기토양 면적을 필요로 하며, 무기토양에서 설명한 것과 유사한 데이터베이스 자료 및 접근방법이 면적 추정량을 유도하는데 사용된다. 유기토양(히스토졸⁵²⁾ 등의 공간적 분포를 보여주는 토양 지도와 경지면적을 나타내는 토지이용 지도를 중첩하게 되면, 농업용으로 사용한 유기토양 면적에 관한 기초 자료를 확보할 수 있다. 추가적으로 검토할 부분은, 유기토양을 농업용으로 사용하기 위해서는 보통 광범위한 인공 배수시설이 필요하므로, 토양 지도와 연결되는 국가 고유의 배수사업에 관한 자료와 표본조사들은 관련 면적의 보다 정교한 추정 값을 얻는데 사용될 수 있다.

51) IGBP-DIS은 국제과학연맹이사회(International Council of Scientific Union)가 주관하는 지구 변화와 관련한 연구사업(International Geosphere-Biosphere Program, 국제 지권생물권연구) 결과 자료를 제공하는 시스템(Data and Information System)을 말한다(해양과학용어사전, 2005.10. 등).

52) Histosol(이탄토, 泥炭土)은 USDA 토양분류법에 의한 토양분류 중 하나이며, 습지토양에 해당하고, 유기질 토양으로 분류된다. 히스토졸은 토양층 상위 80cm 이내에 50% 이상의 유기질을 함유하며, 세계 토양의 약 0.8% 정도가 이에 해당된다.

5) 불확도 평가

공식적인 불확도 평가는 활동자료(토지이용 및 영농방법 변화와 관련된 토지 면적 등) 불확도 및 단위 면적당 배출·흡수율에 관한 불확도와 이들 자료를 합성한 불확도 산정을 필요로 한다. 국가 고유방법의 불확도 평가가 어려운 경우에는 IPCC GL에서 제공하는 기본 불확도 추정 값을 다양한 활동자료에 적용하여 사용할 수 있다. 다만, 인벤토리 책임기관은 이와 같이 단순한 세계 기본 값을 특정 국가 사례에 적용하였을 경우에는 상대적으로 높은 불확도 수준을 가진다는 점을 인식해야 한다. 또한, 세계 기본 값 유도에 사용된 현장 연구자료들이 모든 기후대, 토양종류, 영농방법 등에 걸쳐 고르게 분포되지 않았으므로, 일부 지역(특히, 열대 지역)에서는 불확도 수준이 과소 평가되고 있다. Tier 2 방법에서는 지역 혹은 국가 고유 자료를 산정하는 과정의 일부로써, 축적량변화계수, 유기탄소배출계수, 기준탄소축적량에 대한 확률밀도함수(즉, 평균 및 분산 추정 값을 이용)가 유도될 수 있다. 예를 들면, Ogle et al.(2003)는 미국 농경지 토양의 고유 계수 값 및 기준탄소축적량을 위한 확률밀도함수를 유도하기 위해 선형혼합효과 모형(linear mixed-effect models⁵³)을 적용한 바 있다. 토지이용 및 영농방법에 대해, 통계적으로 유도된 경지면적 등 관련 활동자료는 불확도 추정 값을 산정하기 위한 기초 자료로써 이용된다. 전체 인벤토리 불확도에 대한 평균 및 신뢰구간을 추정하기 위해, 배출계수와 활동자료, 합성 불확도를 결합하는 것은 몬테카를로 절차를 사용할 수 있다 (Ogle et al., 2003; Smith and Heath, 2001).

53) 선형혼합효과모형(線型混合效果模型)은 실험계획법에서 출발하여 개발된 것으로서, 의학, 공학, 심리학, 경제학, 경영학 등 여러 학문 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 기본적인 모형식은 종속변수와 독립변수들인 고정효과변수 및 확률효과변수로 구성되며, 변수형태는 수준 선택이 기술적으로 정해져 있는 경우에는 고정효과변수로 설정하고, 확률적으로 정해지는 경우에는 확률효과변수로 설정하여 변수 간의 상관관계 또는 인과관계 등을 설명한다.



제3절 농경지 부문 국가 인벤토리 산정 현황

1. 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침

온실가스종합정보센터는 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위해 국가 온실가스 통계⁵⁴⁾ 산정·보고·검증(Measurement, Reporting, Verification, 이하 MRV 지침서) 지침서를 매년 작성·보급하고 있다. MRV 지침서는 1차적으로 산정지침, 보고지침, 검증지침으로 구분되어 있으며, 산정지침은 다시 IPCC GL이 제시한 부문 분류에 따라 5개 장(章)으로 구성되어 있다. 농경지 부문은 제4장 토지이용, 토지이용 변화 및 임업 분야 산정지침에서 세분된 6개 토지이용 범주 중 일부로써 설명되고 있다.

가. LULUCF 부문 공통 산정지침

MRV 지침서는 LULUCF 부문에 공통적으로 적용되는 개념, 범주 구분, 탄소 저장고 및 온실가스 종류, 산정범위 등에 관한 산정지침을 다음과 같이 설명하고 있다.

- ① (개념) 국토 육상 생태계에서 이루어지는 인위적인 토지이용 및 전용, 토지이용 관리 활동을 통해 야기되는 온실가스 배출량 및 흡수량을 산정
- ② (범주) 6개 토지이용 범주(산림지, 농경지, 초지, 습지, 주거지, 기타 토지)로 구분하고, 각각의 토지이용 범주별로 유지되는 토지와 전용된 토지로 재구분
- ③ (탄소저장고) 지상부 바이오매스, 지하부 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양 등 5개 탄소저장고에서의 온실가스 흡수량 및 배출량을 산정
- ④ (온실가스 종류) 온실가스 인벤토리는 CO₂, CH₄, N₂O 흡수량 및 배출량을 산정
- ⑤ (산정범위) 2014년 인벤토리는 활동자료 부재, 배출·흡수 계수 미비 등으로 인해 산림지로 유지된 산림지(5.A.1), 농경지로 유지된 농경지(5.B.1), 초지로 유지된 초지(5.C.1), 습지로 유지된 습지(5.D.1) 및 농업용 석회시용으로 인한 CO₂ 배출(5.IV) 만을 산정 대상에 포함

54) 통계작성 명칭과 관련하여, MRV 지침서는 ‘국가 온실가스 통계’로 호칭하고 있으나, 관련 보고서는 ‘국가 온실가스 인벤토리 보고서’란 명칭으로 발간되고 있으며, 통계법에 따라 승인된 통계 명칭은 ‘온실가스 배출통계’ 등을 사용하고 있으므로, 통계 이용자에게 혼선을 가져오고 있다. 공식 승인 통계 명칭을 따르는 것이 가장 적절하겠으며, 최소한 용어 통일성은 갖추는 것이 바람직할 것이다.

〈표 1-7〉 LULUCF 부문 배출원, 흡수원 및 작성 대상 온실가스 종류

분류	배출원·흡수원		온실가스 종류	산정여부
5A1	산림지	산림지로 유지된 산림지	CO ₂	E
5A2		타토지에서 전용된 산림지		IE(5.A.1.) ⁵⁵⁾
5IA		질소시비로 인한 N ₂ O 배출	N ₂ O	NE
5IIA		배수로 인한 Non-CO ₂ 배출	CH ₄ , N ₂ O	NE
5VA		바이오매스 소각에 의한 배출	CH ₄ , N ₂ O	NE
5B1	농경지	농경지로 유지된 농경지	CO ₂	E
5B2		다른 토지에서 전용된 농경지		IE(5.B.1.)
5III B		농경지로 전용에 따른 N ₂ O 배출	N ₂ O	NE
5IVB		농업용 석회시비로 인한 CO ₂ 배출	CO ₂	E
5C1	초지	초지로 유지된 초지	CO ₂	E
5C2		다른 토지에서 전용된 초지		IE(5.C.1.)
5IVC		석회시비로 인한 CO ₂ 배출	CO ₂	NE
5VC		바이오매스 소각에 의한 배출	CH ₄ , N ₂ O	NE
5D1	습지	습지로 유지된 습지	CO ₂	E
5D2		다른 토지에서 전용된 습지		IE(5.D.1.)
5IID		배수로 인한 Non-CO ₂ 배출	CH ₄ , N ₂ O	NE
5VD		바이오매스 소각에 의한 배출	CH ₄ , N ₂ O	NE
5E1	정주지	정주지로 유지된 정주지	CO ₂	NE
5E2		다른 토지에서 전용된 정주지		IE(5.E.1.)
5VE		바이오매스 소각에 의한 배출	CH ₄ , N ₂ O	NE
5F1	기타 토지	기타 토지로 유지된 기타 토지	CO ₂	NE
5F2		다른 토지에서 전용된 기타 토지		IE(5.F.1.)
5IIF		질소시비로 인한 N ₂ O 배출	N ₂ O	NE
5IIF		배수로 인한 Non-CO ₂ 배출	CH ₄ , N ₂ O	NE
5IVF		석회시비로 인한 CO ₂ 배출	CO ₂	NE
5VVF		바이오매스 소각에 의한 배출	CH ₄ , N ₂ O	NE

주 : 1) 분류는 IPCC GL에서 제공하는 공통보고서식(CRF: Common Reporting Format) 기준
 2) 산정 여부에서 E는 Estimated(산정), NE는 Not Estimated(미산정), IE는 Included Elsewhere(다른 부문에 포함 산정)을 나타내며, IE의 괄호 안 분류는 포함 산정한 부문을 나타냄

55) IE는 6개 토지이용 범주별로 전용된 토지에서 발생하는데, 개별 토지들의 과거 토지이용 이력자료 구축이 부족한데 원인이 있다. IPCC GL이 개별 연도의 토지전용에 대해 과거 20년 자료를 요구하며, 산정기간 시작연도가 1990년이므로, 최소 1970년부터의 토지이용 이력자료가 마련되어야 한다.



나. 토지이용 구분 방법

LULUCF 부문의 토지이용 구분방법에 대해, MRV 지침서는 모든 국내 토지를 관리되는 토지로 가정하고 있으며, 이를 전제로 관련 기초 통계자료를 이용한 6개 토지이용 범주별 작성 및 접근방법, 전용된 토지 처리 등에 대해 다음과 같이 제시하고 있다.

- ① **(기본가정)** 국내 국토에는 법적 혹은 행정적으로 관리되지 않는 토지는 없는 것으로 가정
- ② **(작성방법)** 현재 작성되고 있는 국가 토지이용 관련 통계자료에서 6개 토지이용 범주별 구분에 부합되는 항목(지목)들을 재분류하여 적용
- ③ **(접근방법)** GPG 2003이 토지이용 면적 파악을 위해 제시한 방법론 중 접근법 (Approach1)⁵⁶⁾을 기준으로 활동자료 적용
- ④ **(전용된 토지)** 6개 범주별로 타토지에서 전용된 토지에 대한 배출량 및 흡수량은 기존 토지로 유지되는 토지에 포함하여 산정하고 IE로 보고

한편, 6개 토지이용 범주별로 실제 인벤토리 작성에 적용되는 관련 통계 자료원은 지적통계, 임업통계연보,⁵⁷⁾ 농업면적조사의 해당 항목들을 제시하고 있다.⁵⁸⁾

- 56) GPG 2003은 토지면적 파악을 위한 방법론으로 세 가지 접근법을 제시하고 있다. 접근법 1은 산림·임업 통계 등과 같이 다른 목적을 위해 작성된 기존 자료를 사용하므로, ‘유지된 토지’ 중심으로 작성되며 ‘전용된 토지’와 관련된 정보에는 취약하다. 접근법 2는 기성 통계자료와 함께, 표본설계를 통한 현지조사를 결합하여 적용하며, 유지된 토지와 전용된 토지를 포함한 행렬표(matrix) 자료를 제공한다. 접근법 3은 유지된 토지와 전용된 토지에 대해 공간적으로 표현이 가능한 자료를 제공하는데, 관측을 위한 표본점(혹은 단위 지역)은 지리정보시스템(GIS: Geographic Information System)이나 관련 지도를 기초로 통계적으로 추출되며, 관측자료는 현지조사, 위성을 이용한 원격탐사(RS: Remote Sensing), 면적조사, 조사표 등의 방법으로 수집된다.
- 57) 임업통계연보는 산림청이 작성하는 각종 승인 통계자료(산림기본통계, 목재이용실태조사 등 10종), 미승인 행정 통계자료, 외국 통계자료 등을 수록한 종합통계간행물 성격의 보고서로써 산림청 정보통계담당관, 국립산림과학원, 한국임업진흥원 관계자들의 합동작업으로 2013년(제43호)까지 발간되었다. LULUCF 부문 통계자료원으로는 이용항목의 통계명칭인 산림기본통계를 사용하는 것이 균형에 맞고, 적절하다.
- 58) 지적통계, 산림기본통계, 농업면적조사에 대한 조사 개요를 살펴보면, 다음과 같다.

구분	지적통계	산림기본통계	농업면적조사
작성 기관	국토교통부	산림청	통계청
승인 번호	11005	13601	11433
승인 연도	1982.11.	1975.3.	1999.5.
통계 종류	일반승인, 보고통계	지정승인, 보고통계	지정승인, 조사통계
주요 항목	28개 지목별 지적공부 등록현황 등	산림면적 및 추적, 조림 및 벌채, 전용 현황 등	작물 재배면적, 경지면적 등

- 59) 측량·수로조사 및 지적에 관한 법률 시행령 제58조(지목의 구분)는 지목별 구분 기준을 다음과 같이 제시하고 있다.

〈표 1-8〉 토지이용 부문 및 관련 통계 자료원 현황

부문	하위 부문	통계 자료원	이용 항목
전체 국토		지적통계	전체 국토 면적
산림지	침엽수림	임업통계연보	침엽수림 면적
	활엽수림		활엽수림 면적
	혼효림		혼효림 면적
	죽림		죽림 면적
농경지	논	농업면적조사	논 면적
	밭		밭 면적(과수원·뽕밭·기타 수원지((樹園地) 면적 제외)
	과수원		과수원·뽕밭·기타 수원지 면적
초지		지적통계	목장용지 면적 ⁵⁹⁾
습지	자연침수지		하천 면적
	인공침수지		구거·유지·양어장 면적
정주지			광천지·염전·대(垓)·공장용지·학교용지·주차장·주유소용지·창고용지·도로 및 철도용지·계방·수도용지·공원·체육용지·유원지·종교용지·사적지·묘지 등 면적 합산
기타 토지		전체 국토 면적에서 산림지·농경지·초지·습지·정주지 면적을 제외한 나머지 토지 면적	

지목	구분 기준
전	물을 상시적으로 이용하지 않고 곡물·원예작물(과수류는 제외한다)·약초·뽕나무·닥나무·묘목·관상수 등의 식물을 주로 재배하는 토지와 식용(食用)으로 죽순을 재배하는 토지
답	물을 상시적으로 직접 이용하여 벼·연(蓮)·미나리·왕골 등의 식물을 주로 재배하는 토지
과수원	사과·배·밤·호두·곶나무 등 과수류를 집단적으로 재배하는 토지와 이에 접속된 저장고 등 부속시설물의 부지
목장용지	축산업 및 낙농업을 위해 초지를 조성한 토지, 축산법 제2조 제1호에 따른 가축을 사육하는 축사 등의 부지, 이상의 토지와 접속된 부속 시설물의 부지
임야	산림 및 원야(原野)를 이루고 있는 수림지(樹林地)·죽림지·암석지·자갈땅·모래땅·습지·황무지 등의 토지
하천	자연의 유수(流水)가 있거나 있을 것으로 예상되는 토지
구거	용수(用水) 또는 배수(排水)를 위하여 일정한 형태를 갖춘 인공적인 수로·둑 및 그 부속시설물의 부지와 자연의 유수(流水)가 있거나 있을 것으로 예상되는 소규모 수로부지
유지(溜池)	물이 고이거나 상시적으로 물을 저장하고 있는 댐·저수지·소류지(沼溜地)·호수·연못 등의 토지와 연·왕골 등이 자생하는 배수가 잘 되지 아니하는 토지
양어장	육상에 인공으로 조성된 수산생물의 번식 또는 양식을 위한 시설을 갖춘 부지와 이에 접속된 부속시설물의 부지



다. 농경지 부문 산정지침

LULUCF 부문의 공통 산정지침에서 설명한 바와 같이, 농경지 부문은 농경지로 유지된 농경지(5B1)에서 작성 대상 연도의 모든 농경지를 통합하여 산정하므로, 다른 토지에서 농경지로 전환된 토지를 별도로 구분하지 않는다. 농경지로 유지되는 농경지에서는 다년생 목질 바이오매스 축적 변화 및 토양 탄소의 축적 변화에 대한 CO₂ 흡수량을 산정하고, 농경지의 고사목 및 낙엽층은 활동자료 및 배출·흡수계수 부재로 산정에서 제외한다. 흡수원 및 배출원에 의한 흡수량과 배출량은 각각 분리하여 산정한다.⁶⁰⁾

〈표 1-9〉 농경지 부문 배출원·흡수원별 CO₂ 산정 여부

산정 부문	배출원·흡수원		탄소 저장고	산정 여부
	전용 이전	전용 이후		
5B1	농경지로 유지된 농경지		다년생 목질 바이오매스	NE
	(논)	(논)		
	(밭)	(밭)	다년생 목질 바이오매스	NE
	(과수원)	(과수원)		
		토양탄소	E	
5B2	타토지에서 전용된 농경지			IE

1) 농경지로 유지된 농경지(5B1)

가) 배출원, 흡수원

농경지 부문 논, 밭, 과수원을 대상으로, 무기토양에 대한 유기탄소 축적변화에 따르는 흡수량과 농업용 석회시비로 인한 CO₂ 배출량을 산정한다. 농업용 석회시비로 인한 CO₂ 배출량 산정을 위한 방법론은 기타(5IV)에서 별도로 제시하며, 국내 농경지에는 유기토양에서의 농업 활동은 없는 것으로 간주한다(NA: Not Applicable).

60) 이 부분은 농경지 부문 일반에 대한 내용으로 해석되지만, MRV 지침서 내용에서 표와 관련 지문이 서로 어울리지 않는 부분이 있다. 즉, 지문에서는 다년생 목질 바이오매스는 산정하고, 고사목 및 낙엽층은 산정에서 제외하는 것으로 표현하고 있으나, 표에서는 두 가지 모두를 산정에서 제외하고 있다. 또한, 다른 토지에서 전용된 농경지를 IE로 분류한 상황에서, 표에 전용 이전과 전용 이후를 구분하는 것은 의미가 없다. 한편, 토양탄소는 과수원에만 해당되지 않고, 전체 농경지가 대상이므로 표 구조의 포괄범위에 오류가 발견되며, 흡수원만으로 구성된 표에서 표두에 배출원, 흡수원을 별도로 구분하는 것도 의미가 없는 것으로 판단된다.

나) 산정방법, 배출·흡수계수, 활동자료(CO₂)⁶¹⁾

① 배출·흡수량 산정식

GPG 2003이 제시한 무기토양에서 탄소 축적 변화량 산정을 위한 Tier 1 방법론의 산정식을 적용한다. 세부적으로는 농경지로 유지된 농경지의 토양 탄소 축적 변화량 산정식, 단일 농경지 체계에서의 무기토양 탄소 축적 변화량 산정식, 농경지로 유지된 농경지의 무기토양 탄소 축적 변화량 등에 대한 산정식을 사용한다.⁶²⁾

<식 1-10> 농경지로 유지된 농경지의 토양 탄소 축적 변화량 산정식

$$\Delta C_{ccSoils} = \Delta C_{ccMineral} - \Delta C_{ccLime}$$

- $\Delta C_{ccSoils}$: 농경지에서 유지된 농경지에서의 연간 토양 탄소 축적 변화(tonnes C/year)
- $\Delta C_{ccMineral}$: 무기토양에서의 연간 탄소 축적 변화(tonnes C/year)
- ΔC_{ccLime} : 농업용 석회사용으로 인한 연간 탄소 배출(tonnes C/year)

61) 산정방법, 배출·흡수계수, 활동자료(CO₂)란 표현은 다소 부정확한 의미해석을 가져온다. 앞서, 농경지 부문에서 작성 대상인 온실가스를 CO₂로 한정하였으므로, CO₂는 삭제해도 무방하며, 그렇지 않으면, CO₂를 앞으로 이동하는 것이 적절할 것이다.

62) 농경지로 유지된 농경지의 토양 탄소 축적 변화량 산정식은 GPG 2003 기본형에서 유기토양 부분을 제외한 간략한 구조를 사용한다. 단일 농경지 체계에서의 무기토양 탄소 축적 변화량 산정식과 농경지로 유지된 농경지의 무기토양 탄소 축적 변화량 산정식의 관계는 명칭으로는 구분이 어려운데, 전자가 기후, 토양, 영농체계가 동일한 단위 농경지를 가정한 산정식이며, 후자는 국가 수준에서 기후·토양·영농체계의 다양성을 고려하여 여러 단위 농경지들을 취합한 형태의 산정식을 나타내므로, 전자는 단위 농경지에 대한 산정식, 후자는 전체 농경지에 대한 산정식으로 표기하는 것이 보다 적절할 것으로 판단된다. 또한, 농경지로 유지된 농경지의 무기토양 탄소 축적 변화량 산정식은 GPG 2003에서 제시한 A형, B형 산정식을 각각 나타내고 있으나, 이용자 혼선을 가져올 수 있으므로, 실제 적용하는 산정식 1종으로 수정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. MRV 지침서가 당해 연도 온실가스 산정을 위해 매년 개정되는 것과 2013년까지 국내 작성 현황을 고려하면, A형 산정식($\sum_s \sum_i [(SOC_0 - SOC_{0-T}) \times A_{c,s,i}] / T$)만 유지하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 한편, 산정식에서 SOC_{0,T}는 인벤토리 대상 기간의 토양 유기탄소 축적으로 설명하고 있으나, 실질적으로는 대상 기간 중 첫 해를 나타내므로 부정확한 표현이며, 시작 연도 등으로 변경하는 것이 바람직하다.



〈식 1-11〉 단일 농경지 체계의 무기토양의 탄소 축적 변화량 산정식

$$\Delta C_{cc_{\text{Mineral}}} = [(SOC_0 - SOC_{0-T}) \times A] / T$$

$$SOC = SOC_{\text{REF}} \times F_{\text{LU}} \times F_{\text{MG}} \times F_{\text{I}}$$

- $\Delta C_{cc_{\text{Mineral}}}$: 무기토양에서의 연간 탄소 축적 변화(tonnes C/year)
- SOC_0 : 인벤토리 대상 연도의 토양 유기탄소 축적(tonnes C/ha)
- SOC_{0-T} : 인벤토리 대상 기간의 토양 유기탄소 축적(tonnes C/ha)
- T : 인벤토리 대상 기간 20년(year)
- A : 구획별 토지 면적(ha)
- SOC_{REF} : 기본 탄소축적량(tonnes C/ha)
- F_{LU} : 토지이용 또는 토지이용 변화 형태에 따른 축적변화계수
- F_{MG} : 관리 체계에 따른 축적변화계수
- F_{I} : 유기물 시용에 따른 축적변화계수

〈식 1-12〉 농경지로 유지된 농경지의 무기토양의 탄소 축적 변화량 산정식

$$\Delta C_{cc_{\text{Mineral}}} = \sum_c \sum_s \sum_i [(SOC_0 - SOC_{0-T}) \times A_{c,s,i}] / T$$

$$\Delta C_{cc_{\text{Mineral}}} = [\sum_c \sum_s \sum_i (SOC_0 \times A)_{c,s,i} - \sum_c \sum_s \sum_i (SOC_{0-T} \times A)_{c,s,i}] / T$$

* 'c'는 기후대, 's'는 토양 종류, 'i'는 주요 농경지 체계

② 배출·흡수계수

기본 탄소축적량(SOC_{REF})은 GPG 2003의 기본 배출계수 중 국내 농경지 토양 환경을 적절히 대표할 수 있도록, 다음과 같은 값을 선정하여 적용한다.^{63), 64)}

63) GPG 2003은 기후대 및 건조·습윤 지역 구분 기준을 제시하고 있는데, 냉온대(cold temperate)는 평균 연간 기온(MAT: mean annual temperature)이 0~10℃, 난온대(warm temperate)는 MAT가 10~20℃인 경우로 규정하고 있다. 건조·습윤 지역을 구분하는 기준은 평균 연간 강수량(MAP: mean annual precipitation)와 잠재 증발산량(PET: potential evapotranspiration) 비율(MAP/PET)이 1보다 큰 경우가 습윤 지역, 작은 경우를 건조 지역으로 구분한다. 잠재 증발산량이란 식물이 성장하는 지표면에서 토양 표면이 충분히 수분을 포함하고 있을 때, 주어진 기상 상태 아래에서 토양 수분이 최대 증발산 되는 양을 말한다(지구과학사전, 2009.8.).

64) MRV 지침서는 국내 기후 및 습도 지역 구분과 관련하여, 뚜렷한 설명자료를 제시하지 않고서, 겨울은 난온대 건조 지역으로, 나머지 계절은 난온대 습윤 지역으로 구분하고 있다. 토양 종류별로 습도 구분에 따라, 약 1.1 ~ 3배까지 차이가 나는 것을 고려하면, 보다 신중한 접근(MAP/PET 비율 등)이 요청된다.

〈표 1-10〉 탄소축적량(SOC_{REF}) 기본계수

(단위 : t C /ha, 토양 깊이 0~30cm)

지역	LAC 토양	사질 토양	화산회토
난온대 건조(겨울)	24	19	70
난온대 습윤(봄, 여름, 가을)	63	34	80

주: 국가 고유계수 개발 및 고시 현황에 따라 적용계수 및 하위범주 구분 변경 가능

축적변화계수(F_{LU}, F_{MG}, F_I)도 GPG 2003의 기본 배출계수 중, 국내 농경지 토양 환경을 적절히 대표할 수 있도록 다음과 같은 값을 선정하여 적용한다.⁶⁵⁾

〈표 1-11〉 농경지 관리활동 종류별 축적변화계수

종류	수준	기후형	습도형	기본계수
토지이용(F _{LU})	장기 경작(밭, 과수)	온대	습윤	0.71
	논벼 경작(논)	온/열대	건/습윤	1.1
경운(F _{MG})	Full	온대	건/습윤	1.0
유기물 시용(F _I)	Medium	온대	건/습윤	1.0

주: 국가 고유계수 개발 및 고시 현황에 따라 적용계수 및 하위범주 구분 변경 가능

③ 활동자료

토지이용 현황은 토지이용 구분 및 면적 결정방법에서 설명한 관련 국내 통계자료를 적용한다.

65) 앞서, 탄소축적량 기본계수는 계절별로 구분한 습도형을 사용하여 조정하고 있으나, 축적변화계수에서는 구분없이 단일 습도형을 사용하고 있다. GPG 2003에서 논벼 경작, 경운(Full), 유기물시용(Medium)은 습도형에 상관없이 단일 계수 값을 적용하고 있으나, 장기 경작 경우에는 건조(0.82), 습윤(0.71) 지역을 구분하고 있으므로, 탄소축적량 기본계수 사례와 동일한 적용도 가능할 것이다. 또한, GPG 2003은 토지 이용에서 휴경, 경운방법 및 유기물시용에서 여러가지 계수 형태를 제시하고 있으나, MRV 지침에서는 단일 경운방법 및 유기물 시용방법으로 단순화하여 적용하고 있으며, 국가 인벤토리 보고서에서는 1990년 이후 전체 산정기간에 대해서도 단일 축적변화계수를 계속 적용하고 있어, 현실과는 많이 동떨어진 것으로 판단된다.



2) 농업용 석회사용으로 인한 CO₂ 배출(5IV)

가) 배출원, 흡수원

농업용 석회(Ca(CO₃)) 사용으로 인한 CO₂ 배출량을 산정하며, 산정된 배출량은 농경지 (5.B) 부문에서 포함하여 보고한다(IE).⁶⁶⁾

나) 산정방법, 배출·흡수계수, 활동자료(CO₂)

① 배출·흡수량 산정식

농업용 석회 사용으로 인한 탄소 배출량은 석회비료 사용량에 탄소 함유율을 적용하여 산정한다.⁶⁷⁾

<식 1-13> 농업용 석회 사용으로 인한 탄소 배출량 산정식

$$\Delta C_{\text{Fertilizer}} = F_{\text{Lime}} \times CF_{\text{Lime}}$$

- $\Delta C_{\text{Fertilizer}}$: 석회비료 사용에 따른 C 배출량 변화(tonnes C/year)
- F_{Lime} : 석회비료 사용량(tonnes C/year)
- CF_{Lime} : 석회비료의 탄소 함유율(tonnes C/tonnes d.m.)

② 배출·흡수계수

석회비료 탄소 함유율은 GPG 2003에 제시된 기본계수 값인 12%(CaCO₃)를 적용한다.

③ 활동자료

활동자료는 국내 비료연감 등에서 발표하는 석회 사용량을 사용한다.

2. 국가 온실가스 인벤토리 작성 현황

국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR: National Inventory Report, 이하 NIR)는 온실가스 종합정보센터가 부문별 산정기관 및 관장기관에서 제출한 보고서를 합본한 형태로 발간하고 있으며, 농경지 부문 국가 온실가스 인벤토리는 국립농업과학원이 산정기관으로, 국립축산식품부가 관장기관으로 참여하여 매년 작성하고 있다.⁶⁸⁾

66) 석회비료는 백운석(CaMg(CO₃)₂) 광물을 통해서도 생산되므로, 부적절한 표현으로 판단된다.

67) GPG 2003이 제시한 산정식(석회석 및 백운석 시비량 × 석회석 및 백운석 배출계수)과 다소 차이가 있는데, 석회비료의 탄소 함유율을 배출계수로 사용하더라도, 산정식은 배출계수(EF)를 포함하고, 설명자료를 붙이는 형식이 보다 적절한 것으로 판단된다. 또한, 탄소함유율은 원자량 및 분자량 비율을 % 단위로 나타낸 것이므로 산정식 단위에서 tonnes C(탄소 톤)/tonnes d.m(건조 톤)은 오류이다.

68) 저탄소녹색성장기본법에 의해, 국가 온실가스 인벤토리는 산정기관에서 1차적으로 부문별 인벤토리를

앞서, MRV 지침에서 설명한 바와 같이, 농경지 부문은 농경지로 유지된 농경지(5.B) 부문에서 통합·산정하며, 다른 토지이용 부문에서 전용된 농경지 부문은 산정하지 않고 있다. 또한, 생물 바이오매스 탄소 축적량도 활동자료 부족 등을 이유로 산정하지 않고, 토양탄소 중 유기토양은 국내에서 해당 종류의 토양이 없는 것으로 가정하므로 산정에서 제외하고 있다. 결국, 1990년 이후부터 농경지 부문 국가 온실가스 인벤토리는 토양탄소 축적량 중 흡수원에 해당하는 무기토양 탄소 축적량과 배출원에 해당하는 석회시비에 의한 CO₂ 배출량만을 대상으로 산정하고 있다.

아래에서는 2013년에 발행한 국가 온실가스 인벤토리 보고서의 농경지 부문 중 무기 토양 탄소 축적량과 석회시비에 의한 CO₂ 배출량 작성 현황을 간략히 소개한다.

가. 무기토양 탄소 축적량

1) 흡수원 개요

흡수원은 논, 밭, 과수원으로 구분·산정하며, MRV 지침에 따라 토양탄소는 탄소 축적의 변화는 없으나 농경지의 관리 방법에 따라 탄소 축적이 발생할 수 있으므로 토양탄소의 배출량 산정이 필요하다.⁶⁹⁾

2) 산정방법론

GPG 2003이 제시한 Tier 1 방법론의 산정식을 적용한다.⁷⁰⁾

〈식 1-14〉 농경지로 유지된 농경지의 토양탄소 축적의 변화

$$\Delta C_{ccSoils} = \Delta C_{ccMineral} - \Delta C_{ccOrganic} - \Delta C_{ccLime}$$

- $\Delta C_{ccSoils}$: 농경지에서 유지된 농경지에서의 연간 토양 탄소 축적 변화(tonnes C/year)
- $\Delta C_{ccMineral}$: 무기토양에서의 연간 탄소 축적 변화(tonnes C/year)
- $\Delta C_{ccOrganic}$: 경작지 유기토양에서의 연간 탄소 배출(tonnes C/year)
- ΔC_{ccLime} : 농업용 석회시용으로 인한 연간 탄소 배출(tonnes C/year)

작성하고, 관장기관을 거쳐 온실가스종합정보센터에 취합되면, 통계청과 합동 검증작업을 실시하고, 최종적으로는 국가 온실가스 관리위원회 의결을 거쳐 공표하고 있다.

69) MRV 지침에서 Tier 1 방법을 적용하고 있으므로, 기준탄소축적량(SOC_{REF})의 변화가 없다는 가정을 말하고 있으나, 상위 Tier로 전환하면, 고유 값으로 변경이 가능하다. 또한, 탄소 축적 변화 요인으로써 농경지 관리방법만 언급하고 있으나, 토지 이용방법 및 토양에 대한 유기물 투입도 설명하는 것이 적절하다.

70) MRV 지침에서 제외한 연간 유기토양 탄소축적 변화량($\Delta C_{ccOrganic}$)을 산정식에 포함하고 있다.



3) 배출계수

토양탄소 축적변화량 파악을 위해, 기본 탄소축적 계수인 SOC_{REF} 산정이 필요하며, 이를 위해 토양 기후형, 토양형태 및 경작 운영 비율, 토지용도 및 토양형태별 면적비율 등을 파악해야 한다.⁷¹⁾ 한편, 국내 기후형은 기본적으로 온대 습윤지역으로 분류하며, 겨울철은 온대 건조지역으로 분류한다. 국내 농경지 토양종류는 제주도 지역을 화산회토로 분류하고, 나머지 지역은 1:1형 점토광물이므로 LAC 토양 및 사질토양으로 분류한다.⁷²⁾ 토지용도와 토양형태별 면적비율은 사질토양이 논 4.3%, 밭 5.8%, 과수원 4.3%를 차지하며 화산회토는 밭 7.0%, 과수원 8.8%가 해당한다. 토양 종류별 자료를 계절별 토양 면적비율에 적용하여 SOC_{REF} 값을 선정한다.⁷³⁾ SOC_{REF} 값에 IPCC 기본 축적변화계수 값을 곱하여 토양 유기탄소 축적량(SOC)을 산정한다.

산정과정에서 적용한 IPCC 축적변화계수 기본 값은 다음과 같다. 토지이용 또는 토지이용 변화 형태에 따른 축적변화계수인 F_{LU} 는 온대 습윤 기후형에서 논벼 경작 1.1과 장기경작 0.71을 적용하였다. 농경지 관리체계에 따른 축적변화계수인 F_{MG} 는 대부분 기계영농을 하고 있기 때문에 경운 Full 1.0을 적용하였다.⁷⁴⁾ 유기물 시용에 따른 축적변화계수인 F_i 는 유기물 시용이 증가하는 현 상황을 고려하여 Medium 1.0을 적용하였다.

4) 활동자료

활동자료로 사용한 농경지 면적은 MRV 지침의 토지이용 구분에 따른 면적결정 방법에 따라 경작운영에 따른 토양형태 및 면적을 구분하였다. 전체 국토 토질특성과 다른 제주지역의 토양특성은 화산회토 지역으로 별도 표기하였다.

-
- 71) GPG 2003은 SOC_{REF} 값 선정과 관련하여 토지이용 및 영농방법의 영향을 받지 않고 원래, 식생이 유지되는 토양을 기준선으로 설명하고 있으므로, 지문에서 밝히고 있는 토양형태 및 경작 운영 비율, 토지용도 및 토양형태별 면적비율 등을 제외되어야 할 것으로 판단된다.
- 72) 1:1형 점토광물은 층상구조인 LAC 토양에만 적용되므로, 1:1형 점토광물인 LAC 토양과 사질토양으로 분류한다고 수정하는 것이 적절하다.
- 73) ‘토양 종류별 자료를 계절별 토양 면적비율에 적용하여 SOC_{REF} 값을 선정한다.’는 설명은 SOC_{REF} 값 선정에 대한 내용이고, ‘토지용도와 토양형태별 면적비율은 사질토양이 논 4.3%, 밭 5.8%, 과수원 4.3%를 차지하며 화산회토는 밭 7.0%, 과수원 8.8%가 해당한다.’는 F_{LU} , F_{MG} , F_i 값과 관련되므로, 전후 문장이 서로 바뀌어야 적절하다.
- 74) ‘대부분 기계영농을 하고 있기 때문에 경운 Full 1.0을 적용하였다’는 1990년 이후부터 경지형태(논, 밭, 과수원), 영농형태(논벼, 식량작물, 채소, 과수 등) 차이 등을 무시하고 선정되었으며, 근거자료 제시가 전혀되지 않고 있다. 이와 같은 단순화는 유기물 시용에 따른 축적변화계수인 F_i 에서도 동일하게 나타나고 있어 적절하지 않은 것으로 판단된다.
- 75) 단일 농경지는 앞서, MRV 지침 산정식에서 비롯된 것으로 판단되지만, 표에서 논, 밭, 과수원은 다양한 ‘c(기후대), s(토양종류), i(영농형태)’를 통합한 분류이므로 ‘단일’ 표현은 삭제하는 것이 옳다.

〈표 1-12〉 우리나라 논, 밭 및 과수원 면적

(단위 : 천 ha)

구분	단일 농경지 ⁵⁾	1990년	1995년	2000년	2005년	2009년	2010년	2011년
전체	논	1,345	1206	1149	1105	1010	984	960
	밭	609	579	545	537	526	523	528
	과수원	155	200	195	182	201	208	210
제주	논	0.9	0.2	0.2	0.2	0.06	0.03	0.03
	밭	42	37	36	44	42	45	34
	과수원	26	29	29	23	23	23	20

나. 석회사용으로 인한 CO₂ 배출량

1) 배출계수

농업용 석회사용으로 인한 연간 탄소배출은 IPCC 기본값인 백운암 0.122tC, 석회석 0.12t C를 적용하여 산정하였다.⁷⁶⁾

2) 활동자료

농업용 석회비료는 MRV 지침에 따라 백운석 또는 석회석 사용 활동자료를 사용한다. 현재 토양개량제로 공급되는 석회고토가 백운암(CaMg(CO₃)₂)에 해당하며 패회석은 석회석(CaCO₃)에 해당하여 각각 IPCC 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하였다. 석회 사용량 자료는 2012년에 사용한 비료연감보다 활동자료 통계 정확성이 높은 농림축산식품부 내부 자료를 활용하였다.⁷⁷⁾

〈표 1-13〉 우리나라 석회비료 사용량

(단위 : 천톤)

연도	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
사용량	162	152	137	180	190	170	171	202	231	222	218
연도	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
사용량	258	314	286	256	271	243	209	187	204	155	294

76) 배출계수 값은 석회석 등 탄산염 광물에 포함된 탄산염(CaCO₃ 등) 단위 당 비율 값 자료이므로 IPCC 2006 GL은 화학량 비율로 계산된 값에 기본 함유율을 곱한 값으로 적용할 것을 권고하고 있다.

77) 농협중앙회에서 무상으로 제공하고 있는 석회고토 비료와 패회석 비료 물량을 활동자료로 사용하고 있으나, 석회질 비료에는 그 외 생석회(CaO), 소석회(Ca(OH)₂), 부산소석회(Ca(OH)₂), 석회석 분말(CaCO₃), 부산석회(CaCO₃) 등도 사용하고 있으므로 상세한 확인작업이 필요할 것으로 판단된다. 무기탄소를 포함하지 않은 생석회, 소석회, 부산소석회 등은 탄소 배출이 없으므로 활동자료에서 제외되어야 할 것이다.



3) 불확도 및 시계열 일관성 등

배출계수는 IPCC 기본 값을 사용하여 불확도 평가에서 제외하였고, 활동자료 불확도 평가는 수행하지 못하였다. 활동자료 및 배출계수 적용의 시계열 일관성은 유지하였으며, 무기토양 축적변화에 따른 흡수량 산정 및 석회 시용량 자료가 갱신되어 재계산하였다. 현재 국가 고유 배출·흡수계수 개발을 위한 연구과제(2013~2016)를 수행하고 있으며, 검증 절차를 거쳐 인벤토리 산정에 활용할 계획이다.

제4절 농경지 부문 주요 국가 인벤토리 산정 현황

해외 주요 국가들의 농경지 부문 인벤토리 산정 현황은 일본, 호주, 캐나다가 2013년에 UNFCCC 홈페이지에 등록한 국가 NIR 보고서를 기초로 검토하였다. 아래에서는 각 국의 농경지 부문 작성 개요와 함께 국내 온실가스 산정과정에 참고할 수 있는 시사점 있는 부분을 중심으로 살펴보았다.

1. 일본

LULUCF 부문은 GPG 2003에 근거하여 작성하고 있으며, 국토를 6개 범주인 산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타 토지로 분류하고, 토지 전환 여부에 따라, 2개 하위 범주(유지된 토지, 전용된 토지)로 세분하고 있다. 토지이용 전환기간은 GPG 2003 기본 값인 20년을 사용한다. 온실가스 인벤토리 중 탄소 축적량 산정은 5가지 탄소 저장고(지상부 바이오매스, 지하부 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양)를 대상으로 탄소축적 변화량, 농업용 석회 사용으로 인한 CO₂ 배출량을 보고하고 있다.

가. 토지이용 범주 구분

6개 토지 범주는 기존 통계자료 및 기타 관련 자료(행정 보고자료, 항공 위성자료 등)를 적용하여 분류하며, 토지이용 범주별로 ‘유지된 토지(land remaining land)’와 ‘전환된 토지(land converted to land)’를 구분한 토지이용 전환 행렬표를 작성한다. 행렬표는 가능한 기존 통계자료를 이용하여 산정하지만, 전환된 토지 등의 산정과정에서 관련 통계자료 부족으로 직접 산정할 수 없는 경우에는 적정 비율 값을 이용하여 토지 전환 면적을 할당하거나 내삽법, 추세 외삽법 등을 통해 산정한다.⁷⁸⁾

78) 일본 NIR에 따르면, 산림지로 전환된 밭(upland field), 산림지로 전환된 과수원, 산림지로 전환된 목초지

참고로, 2011년 일본 LULUCF 부문 토지이용 전환 행렬자료를 살펴보면, 다른 부문으로 전환된 토지 면적은 농경지에서 기타 토지로 전환된 면적(23 천ha)이 대부분을 차지하며, 농경지에서 정주지로 전환된 면적(6.3 천ha), 산림지에서 정주지로 전환된 면적(3.9 천ha) 등이 뒤를 잇는 것으로 나타났다.⁷⁹⁾

〈표 1-14〉 2011년 일본 토지이용 전환 행렬

(단위 : 천 ha)

구분	전환 이전 토지이용 범주							
	산림지	농경지	초지	습지	정주지	기타 토지	합계	
전환 이후	산림지	24,967.7	0.2	0.0	0.0	0.1	0.04	24,968.1
	농경지	0.8	3,944.4	0.001	0	IE	0.6	3,945.8
	초지	0.1	0.6	990.5	0	IE	0.4	991.6
토지 이용	습지	0.2	0.01	0.005	1,328.3	0.001	0.0	1,328.5
	정주지	3.9	6.3	1.2	IE	3,766.7	IE	3,778.0
범주	기타 토지	0.1	23.0	2.5	IE	IE	2,752.3	2,778.0
	합계	24,972.8	3,974.5	994.2	1,328.3	3,766.8	2,753.4	37,790.0

나. 바이오매스 탄소축적 변화량 계수

과수원에 대한 생물 바이오매스 축적량 계수 값은 관련 논문(Ito et al.)에서 평균 수령(樹齡)과 성장률로 계산한 값을 적용하며, 논·밭은 GPG 2003에 따라 '0' 값을 적용하고 인벤토리 산정에서 제외한다. 연간 바이오매스 축적률은 논·밭·과수원 모두 '0' 값을 적용하는데, 논·밭 축적률 값은 GPG 2003의 기본 값과 동일하고, 과수원 축적률 값은 생산성 향상을 위한 일본 특유의 과수재배 방법(저수고 밀식재배, 低樹高 密植栽培, high

면적은 기존 통계자료에서 통합되어 보고되는데, 이런 경우에는 산림지로 전환된 통합 면적에 대해 연도의 밭·과수원·목초지 면적 비율을 적용하여 할당하는 방식으로 산정한다. 또한, 산림지 면적은 2004년 이전에는 5년 간격으로 조사되었으므로, 조사하지 않은 연도 산림 면적에 대해서는 조사 연도 면적에 기초한 일차 방정식(linear expressions)을 구성하여 내삽 또는 외삽을 통해 추정하였다.

79) 모든 국토면적을 관리되는 토지로 분류하고, 기타 토지를 산정하지 않는 국내 현실과는 대조적으로, 일본은 전체 국토면적에서 기타 토지가 차지하는 비중을 7.3%로 산정하고 있어, 농경지 10.4%, 정주지 10.0% 등 과도 크게 차이나지 않는 수준을 나타낸다. 일본은 MLITT(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 국토기반시설교통관광부)에서 실시하는 토지이용실태조사(Land Use Status Survey)에서 전체 국토 면적 합계자료로부터 산림지, 농경지 등 5개 토지이용 범주별 면적자료를 공개하여 기타 토지면적을 산정한다. 기타 토지이용 부문으로 분류되는 경우는 방위시설 부지(defense facility sites), 경작을 포기한 토지(cultivation abandonment areas), 해안, 북방 영토를 예시하고 있다.



density planting)을 반영한 결과이다.⁸⁰⁾ 고사목과 낙엽층에 대한 바이오매스 축적량도 GPG 2003에 따라 '0' 값을 적용한다.

다. 토양탄소 축적량 계수

농경지 무기토양 탄소 축적 변화량은 GPG 2003에서 제시한 Tier 1 산정 방법 A형을 적용하여 산정한다. 작성과정은 농경지 단위 면적당 기후대·토양 종류·영농방법에 대한 연구자료(Takada et al., 2009)를 기초로, 연도별·유형별 경지 면적자료를 곱하여 토양탄소 축적량을 산정한다. 기후대 및 습도형은 GPG 2003에서 제시한 연평균 기온과 강수량 자료를 적용하여 구분하며,⁸¹⁾ 무기토양 기준탄소축적량 값은 GPG 2003의 기본 값을 적용한다. 영농형태별 토양탄소 축적률은 일본 국립농업환경과학협회(NIAES: National Institute for Agro-Environmental Science)에서 제공한 논·밭·과수원(농경지 평균 값 포함)별 구분 값을 적용한다. 축적량변화계수는 GPG 2003에서 제시한 기본 값을 논·밭에 적용하며, 과수원은 IPCC 2006 GL에서 제시한 기본 값을 적용한다.⁸²⁾

라. 농업용 석회시비 배출량

농업용 석회시비 배출량은 GPG 2003의 Tier 1 방법을 사용하여 산정하며, 2011년 기준 농업용 석회시비로 인한 배출량은 1990년과 비교하여 55.2%가 감소하였다. 주요 감소 원인은 지속적인 토양개량으로 토양의 화학적 특성이 개선되어 석회시비에 대한 수요가 감소한 영향이다. 석회시비 종류로는 석회석이 99.5%를 차지한다. 배출계수는 모두 IPCC 2006 GL 기본 값을 적용하며, 석회석은 0.120(tonnes C/tonnes 석회석), 백운석은 0.13(tonnes C/tonnes 백운석)을 적용한다.⁸³⁾ 활동자료는 석회 생산량과 수입량을 합산하여 사용하며, 전문가 판단에 따라, 탄산칼슘 비료는 100%, 패회석(Fossil seashell fertilizer) 비료 및 분쇄 석회석은 각각 70%를 석회석(CaCO_3)으로 분류하고, 탄산 마그네슘 비료 100%,

80) 저수고 밀식재배는 수고(樹高)를 낮게 유지하고, 수형(樹形) 향상을 위한 전지(剪枝) 등으로 나무 성장을 제한하는 재배방법을 말하며, 일본 NIR은 이를 이유로 탄소 축적률을 계산하지 않고 있다.

81) 일본 NIR은 지역별 기후대 분류를 밝히고 있다. 즉, 홋카이도는 냉온대(연평균 기온이 섭씨 0~10도), 홋카이도 이외 대부분 지역은 난온대(연평균 기온 섭씨 10~20도)로 설명하고 있다. 습도형은 연간 강수량이 대부분의 지역에서 1,000mm 이상으로 나타나, 홋카이도는 냉온다습, 홋카이도 이외 지역은 난온다습으로 분류하고 있다.

82) GPG 2003은 다년생 작물 재배지에 대한 F_{LU} 값을 제시하지 않고 있으나, IPCC 2006 GL은 영구작물(나무 재배 포함)에 대한 F_{LU} 값을 모든 기후대 및 습도형에 걸친 단일 값으로 제시하고 있다.

83) 일본 NIR은 농업용 석회시비와 관련하여 재계산한 상황을 다음과 같이 설명하고 있다. 즉, 2010년 기준까지는 백운석 사용에 따르는 CO_2 배출계수는 GPG 2003에서 제시한 0.122(12.2%)를 적용하였으나, 화학량론에 따른 CO_2 배출계수인 0.13(13%)을 적용하는 것이 타당하므로, 배출계수를 2006 IPCC 지침에서 제시한 기본 값인 0.13으로 바꾸고, 재계산을 실시하였다.

혼합 마그네슘 비료 74%는 백운석($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)으로 분류한다.⁸⁴⁾

〈표 1-15〉 일본 농업용 석회시비로 인한 CO_2 배출량

(단위 : CO_2 천톤)

구분	1990년	1995년	2000년	2005년	2008년	2009년	2010년	2011년
합계	550.2	303.5	332.9	231.3	305.7	270.2	242.9	246.8
석회석	549.9	303.0	332.4	230.7	304.1	269.6	241.9	245.6
백운석	0.3	0.5	0.5	0.6	1.7	0.6	1.0	1.1

2. 호주

광대한 국토면적(769억 ha)을 보유하여, 다양한 식생 및 생물 자원을 보유하고 있다. 강우량은 매우 가변적이며, 홍수와 가뭄이 자주 발생하는 건조 대륙이다. 북부지방은 여름철에 강우량이 많은 열대·아열대 기후, 남부지방은 지중해성 기후, 중부지방은 건조 혹은 반건조 기후, 해안 변두리와 동부 산맥 지방은 강우량이 높은 기후를 나타낸다.

1998년 국가온실가스사무국(AGO: Australian Greenhouse Office) 설립과 함께, 토지와 관련 부문의 배출량과 흡수량을 산정하기 위한 통합시스템을 개발한 바 있으며, 이 시스템은 모든 탄소 저장고, 온실가스, 토지 및 토지 이용 활동과 관련한 인벤토리 관련 자료들을 제공하고 있다. 통합시스템은 탄소 축적량 변화 및 온실가스 배출량을 산정하기 위해, 공간정보에 기초한 자료(spatially referenced data)와 물질 수지, 탄소 순환 생태계 모형(FullCAM: Full Carbon Accounting Model)⁸⁵⁾을 통합한 형태로 운영된다. 현재 이 시스템은 농경지·초지·산림지 부문의 전용된 토지, 경지·초지로 유지된 토지의 농업시스템 구성 요소들에 대해 Tier 3, 접근법(Approach) 3에 해당하는 배출량 및 흡수량 계산의 공간정보 기초자료들을 지원한다. 토지이용 전환기간은 강우량이 적은 국가 고유 기후 특성이 탄소 역학에 미치는 영향을 반영하여 IPCC GL이 권고한 기본 기간(20년)보다 긴 50년을 적용하고 있다.⁸⁶⁾

84) 폐화석비료, 분쇄 석회석, 혼합 마그네슘 등에 70%~74%를 적용한 것은 이들의 품위가 100% CaCO_3 및 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 에 미치지 못하는 것을 반영한 것으로 판단된다.

85) FullCAM 모형은 세 개의 하위 모형으로 구성되어 있다. 즉, CAMFor 모형은 산림지 탄소계정모형이며, 산림지 수목 및 낙엽층 사이의 탄소수지 및 이동형태를 모형화 하고 있다. CAMAg 모형은 작물 및 초지 시스템에 대한 탄소계정모형이며, 탄소축적량에 대한 관리방법의 영향력을 반영하고, 다양한 식생, 낙엽층 및 토양 저장고 간의 물질수지 할당형태를 모형화 하고 있다. Roth-C model(Rothamsted Soil Carbon Model)은 고사 유기물 투입과 토양탄소 분해율에 기초한 변화량과 관련되는 모형으로, CAMFor 및 CAMAg과 함께 사용한다.



가. 토지이용 범주 구분

LULUCF 부문은 6개 범주인 산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타 토지로 분류하며, 토지 전환 여부에 따라, 2개 하위 범주(유지된 토지, 전용된 토지)로 세분하고 있다. 다만, 유지된 습지 및 정주지는 의무적 보고사항이 아니므로 산정에서 제외하고(NE), 전용된 습지 및 정주지는 초지로 전용된 산림지 부문에서 포괄하여(IE) 산정한다. 기타 토지는 관리되지 않는 토지로 분류하며(NA), 의무적 보고사항이 아니므로 제외한다. 관리되지 않는 토지는 중부 사막지대 등이 주로 포함된다. 세부 부문별 작성방법론 및 배출계수는 주로 국가 고유 계수와 모형을 적용하는 Tier 3 방법론을 따르고 있다.

〈표 1-16〉 호주 LULUCF 부문별 CO₂ 산정 방법론 및 사용 배출계수(EF)

흡수원/배출원			CO ₂	
			방법론	배출 계수
산림지	유지된 산림지	수확된 천연림 ⁸⁷⁾	T2	모형
		기타 천연림	T2	고유 계수
		플랜테이션 ⁸⁸⁾	T3	모형
		연료목 소비	T2	고유 계수
		전환된 산림지	T3	모형
농경지		유지된 농경지	T3	모형
		전환된 농경지	T3	모형
초지		유지된 초지	T2, T3	고유 계수, 모형
		전환된 초지	T3	모형
습지		유지된 습지	NE	NE
		전환된 습지	IE	IE
정주지		유지된 정주지	NE	NE
		전환된 정주지	IE	IE
기타 토지		유지된 기타 토지	NA	NA
		전환된 기타 토지		

86) 50년간 전환기간이 계속된 토지를 유지된 토지(land remaining)로 분류하지만, 변환기간이 장기임을 고려하여, 0~20년과 21~50년 구간을 별도로 구분하여 관리하고 있다.

87) 천연림 중 어느 시점에 수확(벌목 등)이 있었거나, 인벤토리 작성 시작 연도인 1990년에 수확에 이용될 것으로 간주된 산림지 면적을 나타낸다.

88) 1990년 이전에 상업적 목적으로 조성된 플랜테이션을 나타낸다.

2011년 LULUCF 부문 토지이용 전환 행렬자료를 살펴보면, 다른 부문으로 전환된 토지 면적은 산림지에서 초지로 전환된 면적(0.28 백만ha)이 대부분을 차지하며, 초지에서 산림지로 전환된 면적(0.09 백만ha), 농경지에서 산림지로 전환된 면적(0.03 백만ha) 등으로 나타났다. 전환된 면적 산정 사례를 살펴보면, 인간에 의한 산림지 손실이 확인된 경우에는 초지로 전용된 산림지 또는 농경지로 전용된 산림지로 분류하여 보고한다. 초지 혹은 농경지로 할당하는 방법은 토지 관리방법의 상대적인 빈도와 해당 토지 토양 종류에 따라 설정한다. 1990년 이후 산림 피복에 인간에 의한 변화가 일어난 경우에는 산림지로 전용된 토지로 분류하여 보고한다. 1990년도 이전의 플랜테이션은 산림지로 유지된 산림지로 보고한다.⁸⁹⁾

<표 1-17> 2011년 호주 토지이용 전환 행렬

(단위 : 백만 ha)

구분	전환 이전 토지이용 범주							
	산림지	농경지	초지	습지	정주지	기타 토지	합계	
전환 이후	산림지	107.92	0.03	0.09	IE	IE	NA	108.04
	농경지	0	26.18	0	IE	IE	NA	446.75
	초지	0.28		446.47	IE	IE	NA	26.18
토지 이용	습지	IE	IE	IE	13.49	IE	IE	13.49
	정주지	IE	IE	IE	IE	1.60	IE	1.60
범주	기타 토지	NA	NA	NA	NA	NA	172.94	172.94
	합계	108.20	26.21	446.55	13.49	1.60	172.94	769.00

나. 토양탄소 및 목질 원예작물(woody horticulture) 흡수량 산정

농경지로 유지된 농경지의 토양 CO₂ 흡수량은 FullCAM을 사용하여 산정한다. 목질 원예작물 면적 변화와 관련된 CO₂ 흡수량은 Tier 1 접근법으로 산정한다. 구체적인 산정 과정을 살펴보면, 먼저, 토양 CO₂ 흡수량은 Tier 3 방법, Approach 3 방법으로 볼 수 있는 FullCAM을 사용하여 산정하는데, 농경지로 전용된 산림지 산정방법에서 적용한 기후대, 장소, 관리형태 등에 관한 자료들을 동일하게 사용한다. FullCAM은 생물 바이오매스, 고사유기물, 토양 등 모든 현장 탄소 저장고(on-site carbon pools) 배출량을 산정하지만, 농경지로 유지된 농경지는 토양 탄소 변화량만을 보고한다. 일년생 작물 및 고사유기물

89) 산림지로 전용된 토지 또는 산림지로 유지된 토지의 하위범주별로 정확하게 할당하기 위한 연결된 공간 자료 및 발생 시점에 관한 데이터가 부족한 이유인데, 관련 자료 수집방법이 현재 연구되고 있다.



탄소 축적 변화량은 GPG 2003에 따라 없는 것('0')으로 보고한다. 영농방법에 관해서는 전체 농경지를 포괄하면서, 시계열 및 공간정보를 제공할 수 있는 관련 자료가 없으므로, 탄소 축적변화량은 기후 및 품종 개량에 영향을 받는 작물 생산량을 중심으로 산정한다.

목질 원예작물 면적 변화로 인한 CO₂ 흡수량은 IPCC Tier 1 접근법 및 GPG 2003의 온대 지역 지상부 목질 바이오매스(above ground woody biomass) 기본 계수를 사용하여 산정하며, 원예작물 재배면적은 호주통계청 농산물 통계(ABS agricultural commodity statistics)에서 제공한다. 즉, 목질 원예작물 재배면적에 바이오매스 성장으로 인한 연간 축적률 기본계수 값(2.1 tonnes C/ha/year)을 곱하고, 수확 또는 기타 제거와 관련된 손실량을 공제하는 방식을 적용한다. 손실량은 제거된 목질 원예작물 재배면적에 바이오매스 탄소 축적량 기본계수 값(63 tonnes C/ha/year)을 곱하여 산정한다.

다. 농업용 석회시비로 인한 CO₂ 배출량 산정

GPG 2003에서 제시한 산정식과는 다소 차이가 있으나, CO₂ 배출량을 산정하는 것이 목적이므로, 배출 탄소량을 CO₂ 배출량으로 전환하여 산정한다. 배출계수가 순도 100%를 가정한 값이므로, 석회석 및 백운석은 품위를 고려한 수정 값을 적용하여 계산한다.

〈식 1-15〉 호주의 농업용 석회 시비에 따르는 연간 CO₂ 배출량

$$\Delta C_{\text{CC Lime}} = [(M_{\text{Limestone}} \times \text{Frac}_{\text{Lime1}} \times P_1 \times \text{EF}_{\text{Limestone}}) + (M_{\text{Dolomite}} \times (1 - \text{Frac}_{\text{Lime2}}) \times P_2 \times \text{EF}_{\text{Dolomite}})] \times 44/12$$

- $\Delta C_{\text{CC Lime}}$: 농업용 석회 시비에 따르는 CO₂ 배출량(tonnes CO₂/year)
 - M : 연간 석회석(CaCO₃) 또는 백운석(CaMg(CO₃)₂) 시비량(tonnes C/year)
 - $\text{Frac}_{\text{Lime}}$: 백운석 및 석회석 시비 비율
 - P : 석회석 및 백운석 순도(P₁ = 0.9, P₂ = 0.95)
 - EF : 배출계수(tonnes C/석회석 또는 백운석 톤)
- * 배출계수 값은 탄산염별 탄소 함유량과 동일하므로, CaCO₃는 12%, CaMg(CO₃)₂는 13%

3. 캐나다

넓은 국토 면적을 고려하여, LULUCF 부문은 공간정보로 연결된 18개의 보고지역(reporting zones)⁹⁰⁾으로 구분하며, 직접적인 인간 활동에 영향을 받지 않는 것으로 가정된 최북단 극지산악지역(Arctic Cordillera)을 제외한 17개 지역을 대상으로 인벤토리를 보고한다. 인벤토리 산정은 MARS(Monitoring, Accounting and Reporting System, 관측·산정·보고 시스템)라고 불리는 시스템을 이용하며, 산림지 부문은 NFC-MARS(National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System), 농경지 부문은 Can Ag-MARS(Canadian Agricultural Monitoring, Accounting and Reporting System)를 적용한다. 토지이용 전환기간은 습지로 전환된 토지는 10년으로 평가하고, 나머지 토지는 IPCC GL이 권고한 기본 기간인 20년을 적용한다.

가. 토지이용 범주 구분

토지에 기반하는 모든 산정치를 조화하기 위해, 산정과정에 참여한 모든 기관은 공통된 정의 체계에 맞춰 작업하였다. 정의 체계는 토지 관리방법, 지배적인 환경 조건 및 자료 수집 가능성 등을 고려하면서 GPG 2003이 제시한 토지 범주 구분과 일치하도록 구성하였다.

산림지 중 관리되는 산림지는 목재 자원 및 비목재 자원(공원 등)을 위해 관리하거나 화재방지 대상이 되는 산림을 포함한다. 농경지는 경지와 농업용 초지로 구성되며, 농업용 초지는 가축방목을 위해 사용되는 미개량(unimproved) 목초지 또는 방목지가 대상이 되며, 토지가 버려질 경우 자연적인 산림지 재성장이 없을 것으로 판단되는 지역을 포함한다. 산림지와 농경지 정의에 해당되지 않는 식생 지역은 일반적으로 초지로 분류되며, 북부의 광대한 툰드라 영역은 관리되지 않는(un-managed) 초지로 간주한다. 습지는 영구적 또는 반복적으로 포화 상태를 형성하고, 그에 맞는 전형적인 식생이 확립되거나 토양 개발이 허용하는 토지를 포함하며, 관리되는 습지는 인간의 개입으로 지하수면이 변경된 지역(이탄 추출을 위해 배수한 이탄 지대 또는 침수지 등)이 해당된다.⁹¹⁾

90) 극지산악지역, 북부극지지역, 남부극지지역, 동부타이가(냉대 침엽수 산림지대)보호지역, 동부아한대보호지역, 대서양연안지역, 혼합림평야지역, 허드슨평야지역, 서부아한대보호지역, 아한대평야지역, 습윤대초원지역, 반건조대초원지역, 타이가평원지역, 산지산악지역, 태평양연안지역, 아한대산악지역, 타이가산악지역, 타이가서부보호지역으로 구분한다.

91) 정주지는 건물 또는 도로가 들어선 모든 토지를 포함하지만, 인벤토리는 독자적으로 산정하지 않는다. 다만, 다른 토지이용 부문에서 정주지로 전환된 토지는 온실가스 인벤토리에서 평가한다.



〈표 1-18〉 2011년 캐나다 토지이용 전환 행렬

(단위 : 천 ha)

구분		전환 이전 토지이용 범주					
		산림지	농경지	초지	습지	정주지	기타 토지
전환 이후	산림지	229,266	80	NO	NO	NO	NO
	농경지	430	47,081	3	NE	NE	NO
토지 이용	초지	NO	NO	NE	NO	NO	NO
	습지	74	NE	NE	413	NO	54
	정주지	503	NE	1	NE	NE	NE
범주	기타 토지	NO	NO	NE	NE	NO	NE

나. 무기토양 탄소 축적량 산정

토지 관리방법 변화(LMC: Land Management Change)는 작물 구성(다년생 작물, 일년생 작물), 경운방법(감소 경운, 무경운, 기타), 여름 휴경지로 세분하여 배출량 및 흡수량을 산정한다. 산정과정은 관리 변화를 겪은 농경지 면적에 국가 고유 배출·흡수계수를 적용하여 산정한다. 유형별 농경지 면적자료는 농업총조사(Census of Agriculture) 자료를 중심으로 사용하며, 관련 탄소 계수는 CENTURY 모델(Version 4.0)⁹²⁾을 사용하여 해당 관리 변화가 ‘있는 경우(with)’와 ‘없는 경우(without)’에 대한 시나리오 결과를 비교하여 도출하며, 특수한 경우에는 CENTURY 실행 결과를 보완하기 위해 경험적 자료(empirical data)도 병행 사용한다.

다. 석회시비에 따르는 CO₂ 배출량 산정

농업용 석회시비와 관련한 배출량은 연간 사용한 석회석 및 백운석 사용량과 각각의 물질수지에서 탄소가 차지하는 비중을 적용하여 계산하는 GPG 2003의 Tier 1 방법을 따르고 있다.⁹³⁾

92) CENTURY 모형은 미국 NSF(National Science Foundation, 국가과학재단)의 생태계 관련 연구과제로 개발되었으며, 식물 토양의 영양성분 주기(cycling)에 대한 일반 모형을 제공한다. 모형은 토양 유기물 및 분해, 수자원 수지(water budget), 초지 및 작물, 산림생산 등의 하위 모형으로 구성되며, 초지, 농경지, 산림지, 사바나 등을 포함한 다양한 생태환경에 따르는 탄소 및 영양성분 주기의 모의실험을 가능하게 한다.

93) 배출계수를 별도로 제시하지 않고, 석회석과 백운석 조성 물질의 분자량 및 원자량 비율 값을 산정식에 포함하는 특색을 보인다.

〈식 1-16〉 캐나다의 농업용 석회 시비에 따르는 연간 CO₂ 배출량

$$\Delta C_{ccLime} = [(M_{Limestone} \times 12/100) + (M_{Dolomite} \times 24/184.3)]$$

- ΔC_{ccLime} : 농업용 석회 시비에 따르는 C 배출량(tonnes C/year)
- M : 연간 석회석(CaCO₃) 또는 백운석(CaMg(CO₃)₂) 시비량(tonnes C/year)
- 12/100, 24/184.3 : CaCO₃ 분자량 및 CaMg(CO₃)₂ 분자량 중 C 원자량 비율

라. 목질 바이오매스의 탄소 축적량 산정

다년생 목질 바이오매스는 포도원, 과수원, 크리스마스트리 재배지를 대상으로 산정한다. 이들 재배지는 지속적인 수확량 확보를 위해 집중적인 관리가 실시되며(특히, 포도원과 과수원은 매년마다 정지작업을 실시한다), 수령이 오래된 수목은 질병 예방, 축적량 개선, 신품종 도입 등을 위해 계획적으로 대체하여 재식재하는 경우가 많다. 이와 같이, 이들 재배지는 매년 지속적인 수확량을 목표로 수목들을 관리하므로, 생산 수목별 연령 분포는 일정한 수준일 것으로 가정한다. 결국, 이들 가정을 따른다면, 농경지의 목질 바이오매스 탄소 축적량은 순증가도 순감소도 없게 되며, 수확 또는 수목 교체에 따르는 탄소 손실분은 새로 성장한 수목 증가분과 상쇄되어 균형을 이루게 되고, 최종적인 탄소 축적량 산정은 재배면적 변화량만으로 산정하게 된다.

목질 바이오매스 축적량 산정은 관련 연구자료에 기초하여 계산하는데, 포도원 및 과수원과 관련한 연구자료는 국내 자료가 없어, 외국자료를 참조하여 계산한다.⁹⁴⁾

94) 관련 연구자료(Mailvaganam(2002), Nendel and Kersebaum(2004), McConkey et al.(2007), Bartelink(1998))에 기초한 인벤토리 작성 내용을 살펴보면, 포도원의 재식재 기간은 28년, 평균 수령은 14년으로 나타났으며, 지속적인 전지작업 영향으로 싹과 잎의 바이오매스 축적량은 고정 값으로 4 Mg(tonnage)/ha, 지상부 및 지하부 바이오매스 축적량은 연간 0.4 Mg/ha, 0.3 4Mg/ha, 바이오매스 탄소 함유량은 50%로 산정한다. 포도원 면적이 감소한 경우, 손실분은 6.9 Mg/ha로 가정(14년생 포도나무 평균)한다. 사과 및 복숭아 과수원은 단위 면적당 순광합성량을 최대화하기 위해 수형(tree shapes)과 수관(tree canopy)을 관리하므로, 바이오매스 축적량은 수목 크기 및 식재밀도와 관계없이 36 Mg/ha, 40 Mg/ha로 산정한다. 연간 탄소 축적률은 12년 동안 매년 1.6 Mg/ha로 산정한다. 같은 비율 값이 지하부 바이오매스(지상부-지하부 비율 0.4 적용)에도 적용된다. 연간 탄소 손실률은 면적에 대해 계산하며, 수목은 10년(플랜테이션 평균 수령) 동안 균일한 비율로 바이오매스를 축적한다. 과수원 재배면적 감소에 따르는 탄소 손실률은 10년생 수목 전체 바이오매스의 50%(22.4 Mg/ha)와 동일하다. 크리스마스트리는 10년생 정도에 시장으로 출하된다. 목재는 크리스마스트리 바이오매스의 70%(벌목 당시 수분 함량 60~80%) 정도에 해당되며, 지상부 바이오매스 밀도는 17.1 Mg/ha로 산정한다. 시장에 출하된 뿌리-지상부 비율이 0.3인 크리스마스트리의 전체 바이오매스는 11.1 Mg/ha, 새로 식재한 크리스마스트리 연간 탄소 축적량은 지상부 및 지하부 바이오매스에 각각 0.85 and 0.26 Mg C/ha를 적용하며, 플랜테이션 감소 면적당 5.6 Mg C/ha의 손실량을 산정한다.



제5절 농경지 부문 탄소 축적량 산정 개선방안

앞서, LULUCF 부문의 IPCC 기본 지침서인 GPG 2003에 대한 수록 내용들을 정밀하게 살펴보았으며, 다음으로 이에 근거하여 작성 중인 2014년 국가 온실가스 배출통계 MRV 지침서, 2013년 국가 온실가스 인벤토리 보고서와 함께, 주요 Annex 1 국가 중 일본, 호주, 캐나다 작성 사례들도 비교·검토한 바 있다. 이상의 검토과정을 거쳐, 현행 온실가스 배출통계 작성과정의 주요 문제점들이 확인되었으며, 국내 적용이 가능한 몇 가지 보완 사항들도 파악할 수 있었다. 다음에서는 이를 바탕으로 농경지 부문 탄소 축적량 산정을 위한 개선방안들을 세부적으로 살펴보았으며, 최종적으로는 2015년 MRV 지침서 개정 작업 등에 도움을 줄 수 있는 실무적인 권고안도 마련하고자 하였다.

1. 습도(humidity, 濕度)형 구분 및 SOC_{REF} 적용

가. 대상 부문

MRV 지침서 및 NIR 보고서에서 사용한 무기토양 탄소축적변화량 기본계수(SOC_{REF})는 GPG 2003에서 제시한 기본 값 중 난온대 기후형과 계절별 구분 습도형(겨울은 건조형, 나머지 계절은 습윤형)을 가중평균한 값을 사용하고 있다. 이런 결과로, 겨울철(12~2월)에 적용되는 탄소축적량 기본 값은 봄·여름·가을(3~11월)에 비해 LAC 토양은 38.1%, 사질 토양은 55.9%, 화산회토는 87.5% 수준에 불과하여 전체 무기토양 탄소축적량 수준을 크게 낮추고 있다. 한편, GPG 2003은 연간 평균 강수량(MAP)과 잠재 증발산량(PET) 비율(MAP/PET)로 습도형을 구분하고 있으며, 관련 외국 사례에서도 계절별 구분 습도형을 적용한 사례는 발견되지 않았다. 이와 관련하여, LULUCF 습지 부문 중 인공적으로 담수된 토지(flooded land remaining flooded land)에 적용하는 비결빙기 확산 배출계수⁹⁵⁾ GPG 2003에서 난온대 습윤형과 건조형으로 구분하고 있으나, 2013년 국가 인벤토리 보고서는 습윤형 단일 값인 13.2kg CO₂/ha/day를 계절에 구분 없이 동일하게 적용하고 있어, 통일성이 떨어지고 있다.

95) 인공적인 담수 이후, 토양탄소 분해에 따르는 확산에 의한 CO₂ 배출량은 GPG 2003의 Tier 1방법론에 따라, 연중 비결빙기 일수에 평균 일일 확산 배출량 및 담수된 지역의 표면적을 곱하여 산정한다(2013년 국가 인벤토리 보고서, 온실가스종합정보센터).

〈표 1-19〉 GPG 2003의 인공 담수지 기본 배출계수

기후형	습도형	비결빙기(ice-free period) 확산 배출계수(kg/ha/day)		
		CH ₄	CO ₂	N ₂ O
아한대	습윤형	0.11	15.5	0.008
냉온대	습윤형	0.2	9.3	측정되지 않음
난온대	건조형	0.063	-3.1	
	습윤형	0.096	13.2	

나. MAP(연평균 강수량)/PET(연평균 잠재증발산량) 관측자료 평가

GPG 2003이 습도형을 구분하는 기준으로 제시한 PET는 동일한 조건인 경우에 기온의 영향을 많이 받게 되므로, 강수량이 같은 지역이라도 기온에 따라 습윤형과 건조형이 나누어질 수가 있다.⁹⁶⁾ PET 관련 관측자료는 기상청이 2012년에 발간한 15개 시도별 기후변화전망보고서를 참고할 수 있다.⁹⁷⁾

관측자료는 권역별 기후변화전망보고서의 2001년부터 2010년까지 현재 기후 값을 대상으로 월별 MAP(연평균 강수량) 대비 PET(연평균 잠재증발산량) 자료를 정리하고, 계절별로 재분류하여 건조형 및 습윤형 발생 개월 수와 습도형별 농경지 면적 구성비를 계산하여 검토하였다. 이상의 평가과정을 거쳐, 국내 농경지에 적용할 수 있는 습도형을 살펴보면, 여름은 습윤형, 봄·가을은 건조형인 것을 확인할 수 있으며, 겨울은 발생 개월 수 기준은 건조형에 가까우나, 관련 농경지 면적 구성비 기준은 습윤형으로 나타나고 있어, 오히려 중립적인 성격으로 분류되었다.

96) 건조기후는 환경에 수분이 부족하기 때문에 나타나는 기후형이다. 강수량의 절대적인 양보다는 이용 가능한 수분은 강수량과 증발산량의 차이로 나타나므로, 건조기후는 강수량만으로 결정되지 않는다. 건조기후는 강수량과 기온에 의해 결정되는데 열대, 아열대, 온대에는 건조기후가 나타나지만, 한대는 한랭한 기후로 건조기후가 나타나지 않는다. 우리나라는 대륙 동안의 편서풍지대에 있기 때문에 몬순기후의 영향으로 강수량이 많은 여름 장마기를 제외하고는 건조한 기후가 많은 편이다. 특히 태백산맥을 넘는 바람이 산맥 동쪽으로 많은 비를 내리기 때문에 산맥 동쪽인 강원도 동쪽 지역에는 건조기후가 잘 나타난다. 습윤기후는 건조기후와 대응하는 용어로, 수목의 성장에 충분한 강수량을 갖는 기후를 말한다. 나무의 생장에 필요한 수분은 상대적인 것으로 상대습도와 관계되기 때문에 강수의 절대량뿐만 아니라 기온도 포함하여 고려하여야 한다. 한국이나 서유럽의 여러 나라는 모두 습윤기후에 속한다. 열대, 온대, 냉대에 따라 습윤기후는 나타나지만 한대는 한랭한 기후 때문에 수목의 생육현상이 나타나지 않으므로 습윤기후에서 제외한다(산림청 산림용어사전, <http://www.forest.go.kr/>).

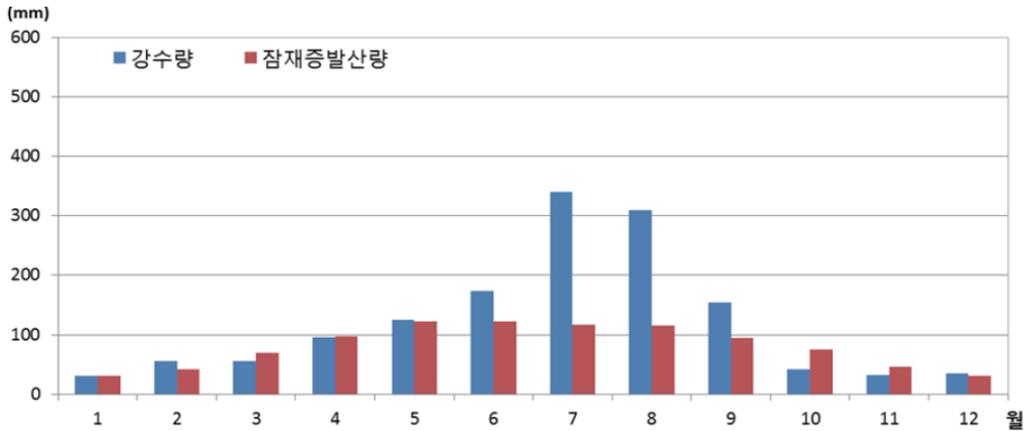
97) 기상청이 발간한 기후변화전망보고서는 전국을 9개 권역으로 구분·작성되었으며, 권별 자료 중 기후정보 응용 및 활용 부문 아래의 수자원 세부 분야에서 잠재 증발산량 및 강수량 관련 정보를 제공한다. 관련 정보는 2001년부터 2010년까지 권역별 현재 기후 값과 함께, 21세 후반기 기후 전망자료를 수록하고 있다. 한편, 제주지역은 단독 보고서로 편성되었으나, 수자원 세부 분야는 다루지 않고 있다.



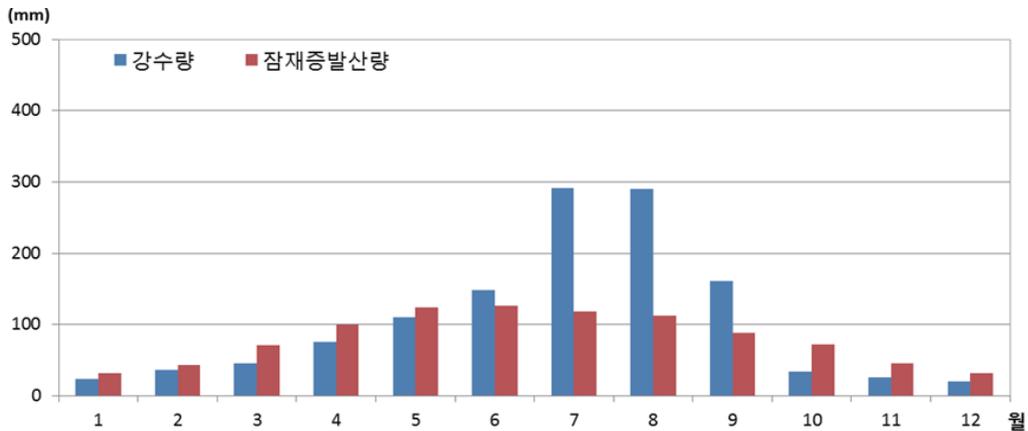
<표 1-20> 기후변화전망보고서의 계절별, 권역별 건조형 및 습윤형 기후 분포

계절		봄(3~5월)	여름(6~8월)	가을(9~11월)	겨울(12~2월)
건조형	개월	21	1	15	13
	경지 구성비	86.8%	4.2%	64.3%	47.4%
습윤형	개월	3	23	9	11
	경지 구성비	13.2%	95.8%	35.7%	52.6%

주 : 1) 경지 구성비는 기후변화전망보고서의 권역별 습도형에 맞춰, 2010 농림어업총조사에서 조사된 해당 지역의 경지면적 자료를 계산



[그림 1-2] 기후변화전망보고서의 광주, 전남 지역 강수량 및 잠재 증발산량(2001~2010년)



[그림 1-3] 대구, 경북 지역 강수량 및 잠재 증발산량(2001~2010년)

〈표 1-21〉 기후변화전망보고서의 시도별 MAP(연평균 강수량)/PET(연간 잠재증발산량) 비교

지역	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
서울, 경기, 인천	P	P	P	P	P	P	M	M	M	P	P	P
광주, 전남	M	M	P	P	M	M	M	M	M	P	P	M
충북	M	P	P	P	P	M	M	M	M	P	P	P
전북	M	M	P	P	P	M	M	M	M	P	P	M
강원	P	P	P	P	P	M	M	M	M	P	M	P
부산, 울산, 경남	P	M	P	M	M	M	M	M	M	P	P	P
대구, 경북	P	P	P	P	P	M	M	M	M	P	P	P
충청, 대전	M	M	P	P	P	M	M	M	M	P	P	M

주 : 1) GPG 2003의 주요 기후대 정의에 따라, P=건조형(MAP<PET), M=습윤형(MAP>PET)
 2) 제주 지역은 기후변화전망보고서에서 수자원 부문이 제외되어, 잠재증발산량 자료 없음

〈표 1-22〉 2010 농림어업총조사 농경지 면적 조사 현황

(단위 : 천 ha)

구분	경지 합계	논					밭 ⁹⁸⁾			
		소계	일모작	이모작	휴경	경지 정리	소계	일반밭	과수원	휴경
소계	1,396	840	760	75	5	637	570	399	157	14
서울,경기,인천	174	110	110	0	0	76	65	54	10	1
광주,전남	255	166	138	26	1	141	91	69	20	2
충북	94	45	44	0	0	32	50	34	15	1
전북	177	128	107	20	0	105	50	39	10	1
강원	98	39	38	0	0	25	61	56	3	2
부산,울산,경남	148	87	68	18	1	66	63	33	28	2
대구,경북	229	118	109	7	1	80	114	61	50	3
충청,대전	221	147	145	2	1	112	74	51	22	1
제주	54	0	0	0	0	0	55	32	22	1

주: 1) 합계는 제주지역 제외, 경지정리 논은 일모작 및 이모작 논 중에서 경지정리한 논 면적
 2) 경지합계 = 논 소계(경지정리 논 제외) + 밭 소계

98) 2010 농림어업총조사는 논과 밭으로 농경지를 구분하고, 과수원은 밭 면적에 포함하는 형식으로 조사하고 있으나, 표에서는 밭 면적에서 과수원 면적을 공제하여 일반 밭으로 구분하였다. 현행 국가 NIR의 활동 자료인 경지면적은 농업면적조사 자료를 적용하고 있으며, 농림어업총조사 경지면적과는 절대 규모에서 차이가 있다(2010 농림어업총조사는 개인 농가, 임가, 어가만을 대상으로 조사한다).



다. 개선 방안

GPG 2003에서 제시한 습도형 선정 기준, 주요 외국 사례, 국내 기후대의 연평균 MAP/PET 비율(전국 평균 1.476) 등에 비취 볼 때, 국가 인벤토리 산정과정에 적용할 습도형은 온대 습윤형 단일 값을 적용하는 것이 바람직하며, 이를 통해 인공 담수지 온실가스 배출량 등 다른 산정 부문과의 일관성 유지도 가능할 것으로 판단된다. 또한, 현행 MRV 지침서 및 NIR에서 적용 중인 계절별 구분 적용방법은 겨울철의 낮은 강수량 수준에만 초점을 맞춘 것으로써, 관련 근거가 빈약할뿐더러 실제 관측자료와 많은 차이가 있으므로 향후 인벤토리 산정과정에서는 변경되어야 할 것으로 판단된다. 장기적으로는 세분된 활동자료 확보, 고유 흡수계수 개발, 고유 산정모형(모형·계정체계 등) 개발 등에 맞춰, 고유 습도형 모형도 병행하여 적용하는 것이 보다 바람직할 것으로 판단된다.

〈표 1-23〉 기후변화전망보고서의 현재 기후 기준 시도별 MAP/PET 값

지역	전국 ⁹⁹⁾	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산
MAP(A)	1,388.0	1,387.0	1,532.1	1,224.8	1199.2	1,415.5	1,286.7	1,447.8
PET(B)	940.2	933.6	1,092.4	1,069.1	977.1	963.8	895.2	968.5
A/B	1.476	1.486	1.403	1.146	1.227	1.469	1.437	1.495
지역	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남
MAP(A)	1,437.3	1,491.5	1,351.4	1,264.2	1,417.4	1,476.0	1,291.6	1,596.8
PET(B)	864.2	878.7	887.2	891.1	901.4	965.4	854.3	960.4
A/B	1.663	1.697	1.523	1.419	1.572	1.529	1.512	1.663

〈표 1-24〉 탄소축적량(SOCREF) 기본계수 적용방법 개선 방안

(단위 : t C/ha)

현행 적용 값				개선 적용 값			
기후형	LAC 토양	사질 토양	화산 회토	기후형	LAC 토양	사질 토양	화산 회토
난온대 건조(겨울)	24	19	70	난온대 습윤	63	34	80
난온대 습윤 (봄, 여름, 가을)	63	34	80				

99) 기후변화전망보고서에 게재된 15개 시도 현재 기후 값 자료를 단순평균한 자료이다.

2. 농업용 석회시비로 인한 CO₂ 배출량 산정

가. 석회시비 현황

농지법 제21조에 근거하여 무상으로 공급하는 석회질 비료는 농림축산식품부가 시행하는 토양개량사업의 일부로써 제공되고 있으며,¹⁰⁰⁾ 1997년부터 전액보조 방식이 적용되고 있다.¹⁰¹⁾ 2007년 이전까지는 전국 모든 농경지를 대상으로 4년 주기로 석회질 비료를 일괄 공급하였으나, 2008년 이후에는 신청제로 전환하여 3년 주기로 공급하고 있다.

비료 공급자에 대한 품질검사와 관련하여, 공급되는 석회질 비료는 비료관리법에 근거한 ‘비료공정규격 설정 및 지정(농촌진흥청 고시-2013.36호, 이하 비료공정규격)’을 따르도록 규정하고 있다. 비료공정규격은 석회고토, 패화석 등 10종의 석회질 비료를 선정하고 있는데, 주요 성분으로 분류하면, 탄산칼슘(CaCO₃) 계열이 3종, 산화칼슘(CaO) 계열이 4종, 수산화칼슘(Ca(OH)₂) 계열이 2종, 탄산칼슘마그네슘(CaMg(CO₃)₂)이 1종으로 구성된다. 이들 석회질 비료 중 시비과정에서 온실가스 배출량을 발생시키는 종류는 탄산염(CO₃)을 가지고 있는 CaCO₃ 및 CaMg(CO₃)₂ 계열 비료이며, 정부에서 토양개량사업으로 공급 중인 종류는 CaCO₃ 계열 중 패화석(貝化石)¹⁰²⁾ 비료와 CaMg(CO₃)₂ 계열의 석회고토¹⁰³⁾ 비료가 대상이 된다. 2011년 기준으로 석회고토 비료 243천톤과 패화석 비료 51천톤이 공급된 것으로 보고되었다.

한편, 석회고토 비료 공급형태는 2003년까지 가루 분말형태인 분상형으로 공급되었으나, 2004년에 시범사업으로 6천톤의 입상형¹⁰⁴⁾ 보급한 뒤, 2009년 이후에는 전체 물량을 입상형으로 대체하여 공급하고 있다.

-
- 100) 농림축산식품부의 2014년 지원사업시행지침을 살펴보면, 토지개량사업은 규산질 및 석회질 비료에 대해 연간 약 100억원(국고보조 70%, 지방자치단체 부담금 30%) 규모를 매년 지원한다. 사업 추진단계는 신청(농업인), 선정·사업 시행(농협중앙회 지역조합), 공급(한국석회석가공업협동조합 등), 이행 점검(시도, 시군구), 품질 검사(농촌진흥청, 시군구) 등으로 진행되며, 규산질 비료는 논벼, 석회질 비료는 밭 작물이 재배되는 경지를 대상으로 지원한다.
- 101) 농지법 제21조는 국가와 지방자치단체가 농업인이나 농업법인이 환경보전적인 농업경영을 지속적으로 할 수 있도록 토양의 개량 및 보전에 관한 사업을 시행하고, 관련 시험·연구·조사 등에 관한 시책을 마련하도록 규정하고 있다. 연도별 예산지원 비율(국비 대비 지방비)은 1990~1992년 20:20, 1993~1996년 25:25, 1997~2007년 80:20, 2011년 이후 70:30 등으로 변경되어 왔다. 일반적으로 지방비 비율 중 50%는 시도에서 부담한다.
- 102) 패화석은 조개나 굴 등의 조개껍질을 말하며, 조개류가 분비한 칼슘 성분이 바닷물에 포함된 이산화탄소와 결합하여 탄산칼슘 결정체를 형성한 것을 말하지만, 석회석의 탄산칼슘과는 성분이나 결정 모양에서 차이가 있다(농업용어사전, 농촌진흥청, 한국석회석가공업협동조합 석회질비료 설명자료 등)
- 103) 석회석에 마그네슘이 일정하게 포함되어 있는 백운석을 분쇄하여 분말로 만든 것을 석회고토비료로 분류한다. 석회 성분(CaO) 이외에 고토 성분(MgO)이 함유되어 있어 고토의 시용 효과도 기대할 수 있으며, 가격이 저렴하고 토양에서의 분해 및 유실이 적어 지속성이 있다. 국내 농업용 토양개량제 공급량의 대부분을 차지하고 있다(한국석회석가공업협동조합 석회질비료 설명자료).
- 104) 분상형 석회고토 비료는 운반이 불편하고, 기계작업이 불가능하여 투입과정에 많은 노동력이 필요하며, 보관에도 어려움이 많다(한국농민신문, 2005.1.17. 등). 또한, 살포과정에 흠날림으로 인한 경제적 손실도 8% 정도로 파악된 바 있다(산업광물은행, kmb.or.kr).



〈표 1-25〉 비료공정규격의 석회질 비료 주요 성분 최소량 비율

구분 ¹⁰⁵⁾	소석회	석회석	석회고토	부산소석회	부산석회	폐화석	생석회
주요 성분	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	CaMg(CO ₃) ₂	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	CaCO ₃	CaO
알카리분 ¹⁰⁶⁾	60%	45%	53%	60%	45%	40%	80%
가용성고토	-	-	15%	-	-	-	-

주 : 1) 석회고토는 분말가루 형태인 분상(粉狀) 기준이며, 알갱이 형태인 입상(粒狀, 구슬형) 기준은 알카리분 51%, 가용성고토 14%

2) 기타 석회질 비료는 액상석회(수용성 석회 17%), 수용성분상석회(수용성 석회 18%, 구연산칼슘 15.0% 이상), 부산석고(가용성 석회 23%) 등으로 구분된다.

〈표 1-26〉 석회고토 비료 형태별 공급량

(단위 : 천톤)

	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년 ²⁾	2009년	2010년	2011년
합계	256	271	243	209	187	204	155	294
분상형	250	231	183	108	47	0	0	0
입상형	6	40	60	101	140	204	155	294

주 : 1) 입상형 자료는 농림축산식품부 ‘친환경농업육성정책 보고자료(2007.5.)’, ‘농어가 경영안정을 위한 지원예산 대폭 늘려, 보도자료(2008.9.)’ 등 참조

2) 2008년 자료는 지방자치단체 사업시행지침 등을 참조한 잠정자료(평균 75% 적용)

105) 부산석회, 부산소석회, 부산석고에서 부산은 다른 산업의 부산물(副産物)로 생산된 석회물질을 말하며 주요 발생 종류는 화학공업의 부산석회, 제당의 부산석회, 피혁공업의 부산석회 등이 있다(한국석회석 가공업협동조합, 석회질비료 설명자료). 한편, 생석회(lime)는 석회석을 고온의 킬른(kiln, 가마, 爐)에서 소성하여 CO₂를 제거하여 생산하며, 소석회(수산화칼슘)는 생석회에 물을 첨가하여 발열반응시킨 백색 분말로써 표백제, 소독제 등으로 사용된다. 폐화석 등 석회질 비료 생산과정에서도 가열과정이 있으나, 대부분 700℃ 미만 수준에서 공정처리 되므로 탄산염이 제거되지는 않는다. 석회고토는 원재료인 CaCO₃MgCO₃[CaMg(CO₃)₂] 중에 포함된 MgCO₃가 750~800℃에서 1차 분해되고, 다음으로 CaCO₃가 900~1,000℃에서 2차 분해되어 생산된다.

106) 알카리분 성분 비율은 산화칼슘(CaO) 구성비를 나타내며, 산화마그네슘(MgO)이 포함된 경우에는 CaO(분자량 56.0774)에 대한 MgO(분자량 40.3044) 비율 값인 1.3914를 곱하여 환산한 값을 적용한다. 즉, 비료 공정규격의 석회고토 알카리분 53%는 CaO 32%, MgO 15% × 1.3914를 합산한 값을 나타낸다.

나. 개선 방안

1) 기본 배출계수 수정

농업용 석회질 비료 사용과 관련하여, IPCC GL의 기본 배출계수는 석회석 및 백운석 조성 원자들의 화학량을 적용하여 이론적으로 계산한 값에 근거하고 있다. 즉, 순수한 CaCO_3 는 Ca 1개, C 1개, O 3개 원자로 구성되므로, 전체 분자량 값은 100.087, 이들 중 탄소 구성비는 0.120(12%)이다. 동일한 방법을 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 에 적용하면, 전체 분자량 값은 184.401, 탄소 구성비는 0.1302로 계산된다(13.02%).¹⁰⁷⁾

<표 1-27> 농업용 석회 배출계수 계산과정

구분	석회석	백운석
분자식	CaCO_3	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
분자량 값	$\text{Ca}(40.078) + \text{C}(12.011) + \text{O}(15.999) \times 3 = 100.087$	$\text{Ca}(40.078) + \text{Mg}(24.305) + [\text{C}(12.011) + \text{O}(15.999) \times 3] \times 2 = 184.401$
탄소 비율 (배출계수)	$\text{C}(12.011) \div \text{CaCO}_3(100.087) = 0.120$	$\text{C}(12.011) \times 2 \div \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(184.40) = 0.1302$

석회석 및 백운석 배출계수의 국내외 적용 사례들을 살펴보면, 석회석 배출계수는 IPCC GL 및 주요 국가 사례에서 공통적으로 0.12를 적용하고 있으나, 백운석 배출계수는 0.122(GPG 2003, 한국 NIR, 일본 NIR(2012년 이전))와 0.13(2006 GL, 호주, 캐나다, 일본 NIR(2013년))을 사용하는 사례들로 나뉘고 있다. 백운석 배출계수 혼선이 발생한 이유는 1996 GL 및 2006 GL이 0.13을 제시한 반면,¹⁰⁸⁾ 주요 국가들의 LULUCF 부문을 직접 규정하는 GPG 2003이 기본 값으로써 0.122을 제시하고 있는 영향이다. 하지만, 상기와 같은 분명한 계산 착오가 확인되며, 일본이 2013년 NIR 작성과정에서 이전까지의 착오 산정을 인정하고 2006 GL에 따라 0.13 값을 적용하여 전면 재계산한 사례 등을 참고하면, 국내에서도 백운석 배출계수 값은 0.13으로 변경하고 시계열 자료도 전면 재계산되어야 할 것이다(개선 적용 값 1안).

한편, 농업용 석회시비 CO_2 배출량 부문은 흡수원이 아닌 배출원을 산정하는 부문임을 고려하면, 배출계수에 사용하는 단위를 기존의 탄소 톤에서 이산화탄소 톤으로 변경하여

107) 원자량은 상대적인 값을 나타내므로, 단위를 가지지 않지만, 실제 화학반응에서 화합물의 질량을 계산하는 경우 등 단위가 필요한 경우에는 그램원자량(gram atomic mass)을 사용한다(두산백과사전).

108) 1996 GL이 농경지 부문에 대해 직접적으로 백운석 배출계수를 규정하지는 않지만, 산업공정 하위 부문 중 백운석 소비에 대한 배출계수를 0.477 CO_2 톤으로 적용하고 있으며, 이 값은 탄소비율 0.13에 이산화탄소 전환비율(44/12)를 곱한 결과이다.



적용하는 것이 보다 바람직할 것으로 판단된다(개선 적용 값 2안). 즉, 전환비율(44/12)을 적용하여, 석회석은 0.440(tonnes CO₂/tonnes 석회석), 백운석은 0.477(tonnes CO₂/tonnes 백운석)을 적용하는 것이 MRV 지침의 통일성을 확보하고 관리과정의 편의성과 정확성을 가져올 수 있으며, 이용자 혼선도 예방할 수 있을 것으로 판단된다. 석회석 및 백운석에 대한 소비 부문별 국가 고유 배출계수 값이 개발되지 않은 현실(IPCC GL의 기본 배출계수 값을 적용하는 Tier 1 방법)을 고려한다면, 석회석 및 백운석을 소비하는 모든 부문(농업용 석회시비(5IVB), 석회석 및 백운석 소비(2A3), 시멘트 생산(2A1)¹⁰⁹)에서 CO₂ 배출량을 산정하는 방법론과 배출계수는 동일하다는 인식이 필요할 것으로 판단된다.

〈표 1-28〉 IPCC GL 및 국가별 배출계수 적용 값 비교

(단위 : tonnes C/tonnes 석회석 및 백운석)

구분	IPCC GL		한국		일본	호주	캐나다
	2003 GPG	2006 GL	MRV 지침서	NIR			
석회석	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
백운석	0.122	0.13	-	0.122	0.13	0.13	0.13

주 : 1) 일본은 백운석 배출계수를 2010년까지 0.122을 적용했으나, 2011년부터 수정하고 재계산
2) 캐나다는 배출계수 값을 분자량 비율로 표기(석회석 12/100, 백운석 24/184.3)

〈표 1-29〉 농업용 석회시비 배출계수 개선 방안

(단위 : tonnes C/tonnes 석회석 및 백운석)

현행 적용 값 (tonnes C/tonnes 탄산염)		개선 적용 값(1안) (tonnes C/tonnes 탄산염)		개선 적용 값(2안) (tonnes CO ₂ /tonnes 탄산염)	
석회석 (CaCO ₃)	백운석 (CaMg(CO ₃) ₂)	석회석 (CaCO ₃)	백운석 (CaMg(CO ₃) ₂)	석회석 (CaCO ₃)	백운석 (CaMg(CO ₃) ₂)
0.12	0.122	0.12	0.13	0.440	0.477

109) 시멘트 생산 부문의 배출계수는 클링커(clinker, 석회석을 분쇄·소성하여 만든 시멘트 중간 투입물) 1톤당 CaO 함유량, CaCO₃ 중 CaO 구성비(56.03% 고정 값), 석회석 배출계수 값(0.4397)을 곱하여 계산한다.

〈표 1-30〉 IPCC 2006 GL 산업공정 부문 탄산염 배출계수

탄산염 종류	광물 명칭	탄산염 분자질량	배출계수(톤 CO ₂ /톤 탄산염)
CaCO ₃	석회석	100.0869	0.43971
CaMg(CO ₃) ₂	백운석	184.4008	0.47732

2) 탄산염(carbonate) 순도(purity) 적용

현행 MRV 지침서 및 NIR은 농업용 석회시비로 인한 CO₂ 배출량 산정방법에 대해, Tier 1 방법에 근거하고 있으므로, 국내에서 시비되는 석회질 비료는 석회 함유량 구성에서 차이가 없는 것으로 가정하고 있다. 즉, 석회고토 비료는 100% 순수한 탄산칼슘 마그네슘(CaMg(CO₃)₂)으로 구성되고, 패화석은 100% 순수한 탄산칼슘(CaCO₃)으로 구성된 것으로 가정한다. 한편, GPG 2003은 Tier 2 방법을 적용하기 위해서는 ‘다른 탄산염으로 구성된 석회는 탄소 함유량과 전체적인 순도에 차이가 있다는 가정 아래, 석회 유형별 특성에 대한 고려가 요청된다’고 설명하고 있다. 이와 관련하여 외국 사례 중 일본은 전문가 판단에 따라 석회질 비료를 탄산칼슘 및 탄산마그네슘 비료는 100%, 패화석 및 분쇄 석회석 비료는 70%, 혼합 마그네슘 비료는 74%로 순도를 조정하여 산정하고 있으며, 호주는 배출량 산정식 자체에 순도 인자(P)를 포함하고 있으며, 석회석 비료 90%, 백운석 비료 95%로 순도를 조정하여 산정하고 있다.^{110), 111)}

한편, 국내에서 농업인(농가 및 농업법인)에게 무상으로 공급되는 석회질 비료는 석회고토 및 패화석 비료인 것으로 파악되었으며, 이들 2종의 비료는 비료관리법에 따라 비료공정규격의 엄격한 적용을 받는 것도 확인된 바 있다. 즉, 비료공정규격은 알카리분 최소 기준으로 석회고토 비료의 분상형은 53%(MgO 15%, CaO 32%), 입상형은 51% (MgO 14%, CaO 31.5%), 패화석 비료는 40%(CaO 40%)를 규정하고 있다. 이들 비료와 순수 CaCO₃, CaMg(CO₃)₂의 CaO 및 MgO 함유량 합계를 비교하면, 석회고토 비료 분상형은 89.9%, 입상형은 87%, 패화석 비료는 71.3%로 순도를 평가할 수 있다.

이상의 자료에서 확인한 바와 같이, 국내 농업용 석회시비로 인한 CO₂ 배출량 산정은 연도별 석회고토 비료 형태별 공급량, 패화석 비료 공급량 자료와 탄산염별 수정된 배출계수 및 순도 인자를 결합하여 적용하는 방식이 보다 타당성 높은 배출량 자료를 제공할 것으로 판단된다.

110) 국내 석회석 광산 현황을 살펴보면, 전체 179개 광산은 저품위(26.7~54.8%) 광산 86개, 고품위(49.5~55.3%) 광산 93개로 구성되며, 전체 부존량 75억톤 중 CaO 52% 이상의 고품위 광산의 부존량은 12%에 불과하다(광물자원 매장량 현황, 대한광업진흥공사, 2007).

111) GPG 2000, IPCC 2006에서 생석회 및 고토석회 배출계수 기본 값은 각각의 화학량 값에 국가군별(선진국, 개발도상국) 기술수준을 순도 인자로 적용하여 조정하고 있다.



〈표 1-31〉 석회질 비료 탄산염 순도 산정

(단위 : %)

구분	CaMg(CO ₃) ₂ (순도 100%)	석회고토 비료		CaCO ₃ (순도 100%)	패화석 비료
		분상형	입상형		
알카리분	60.8	53	51	56.1	40
가용성 고토(MgO)	21.9	15	14	-	-
산화칼슘(CaO)	30.4	32	31.5	56.1	40
탄산염 순도 [MgO+CaO 비율]	100.0	89.9	87.0	100.0	71.3

3) 배출량 산정식 등 MRV 지침 변경

농업용 석회시비 배출량 산정과 관련한 2014년 MRV 지침을 살펴보면, 배출원과 배출계수 적용 대상으로, 관련되는 탄산염 중에 석회석(패화석 비료, CaCO₃)만 포함하고 있으며, 백운석(석회고토 비료, CaMg(CO₃)₂)에 대한 설명은 제외하고 있다. 또한, 제시된 산정식은 석회비료 사용량에 탄소 함유율(CF)을 곱하는 방식으로 표현하고 있어, 대단히 단순한 구조를 나타내고 있다. 앞서, 석회질 비료 국내 공급량 현황에서 살펴본 바와 같이, 백운석을 원료로 제조한 석회고토 비료가 공급량의 대부분(2011년 기준 82.7%)을 차지하는 현실을 감안하면, 차기 MRV 지침 개정에서는 백운석을 포함한 산정지침이 반드시 제시되어야 할 것이다. 배출량 산정식은 백운석을 포함하는 이외에도 추가적인 고려사항이 필요한 것으로 판단된다. 곧, 주요 국가별 배출량 산정식에서 특징적인 부분이었던, 이산화탄소 전환비율(44/12)을 포함한 사례(일본, 호주), 순도 인자(P)를 포함한 사례(호주), 석회석 및 백운석 화학량 비율을 포함한 사례(캐나다) 등에 대한 국내 적용 여부를 검토해 볼 필요가 있다.

먼저, 산정식에 이산화탄소 전환비율을 포함하는 것은 산정 부문 명칭과 산정식이 요구하는 온실가스(CO₂) 종류가 통일성 있게 표현되어, 의미전달이 분명해지므로 타당한 것으로 판단된다. 다음으로, 순도 인자를 살펴보면, 현행 지침의 CaCO₃ 및 CaMg(CO₃)₂에 대한 순도 100% 가정은, 국내에서 실제 공급되는 석회질 비료 구성과 큰 차이가 있어, 결과적으로 CO₂ 배출량 과다 산정을 가져오며, 비료공정규격 등을 통해 순도 산정도 가능하므로 산정식에 포함하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 끝으로, 배출계수 대신에 화학량 비율을 직접 적용하는 것은 다른 부문 산정식 틀과 상이한 구조이며, 숫자로만 나타내게 되어 직관적인 이해도를 떨어뜨리고, 소숫점 처리문제 등도 발생하여 지양하는 것이 옳을 것으로 판단된다.

〈표 1-32〉 농업용 석회시비 산정식 비교

구분	산정식
GPG 2003	$\Delta C_{CC\text{Lime}} = M_{\text{Limestone}} \times EF_{\text{Limestone}} + M_{\text{Dolomite}} \times EF_{\text{Dolomite}}$
한국	$\Delta C_{\text{Fertilizer}} = F_{\text{Lime}} \times CF_{\text{Lime}}$
일본	$\Delta C_{CC\text{Lime}} = M_{\text{Limestone}} \times EF_{\text{Limestone}} + M_{\text{Dolomite}} \times EF_{\text{Dolomite}} \times 44/12$
호주	$\Delta C_{CC\text{Lime}} = [(M_{\text{Limestone}} \times \text{Frac}_{\text{Lime}1} \times P_1 \times EF_{\text{Limestone}}) + (M_{\text{Dolomite}} \times (1 - \text{Frac}_{\text{Lime}2}) \times P_2 \times EF_{\text{Dolomite}})] \times 44/12$
캐나다	$\Delta C_{CC\text{Lime}} = A_{\text{Limestone}} \times 12/100 + A_{\text{Dolomite}} \times 24/184.3$

한편, MRV 지침에서 활동자료는 석회 사용량을 적용하는 것으로 단순하게 표현하고 있으나, 국내 비료공정규격은 10종의 석회질 비료로 다양하게 규정하고 있으며, 비료 제조 형태(입상형, 분상형)별로 순도 인자 값도 차이가 있으므로, 석회질 비료 중 탄산기(CO₃)를 가진 비료만 산정대상에 포함(생석회, 소석회, 부산소석회, 부산석고 등은 제외)하고, 비료 제조형태별로 구분된 활동자료를 수집하는 것이 바람직하다.

〈표 1-33〉 농업용 석회시비 CO₂ 배출량 산정지침 개선 방안

구분	변경 이전	변경 이후
배출원	CaCO ₃	CaCO ₃ , CaMg(CO ₃) ₂
배출계수	CaCO ₃ 12%	CaCO ₃ 12%, CaMg(CO ₃) ₂ 13%
산정식	$\Delta C_{\text{Fertilizer}} = F_{\text{Lime}} \times CF_{\text{Lime}}$	$C_{CC\text{Lime}} = [(M_{\text{Limestone}} \times P_1 \times EF_{\text{Limestone}}) + (M_{\text{Dolomite}} \times P_2 \times EF_{\text{Dolomite}})] \times 44/12$
활동자료	석회 사용량	탄산기(CO ₃)를 가진 <u>석회질 비료</u> 사용량을 입상형과 분상형으로 구분

3. 무기토양 축적변화계수(F_{LU}, F_{MG}, F_I) 적용

가. 산정 현황

무기토양 축적변화계수는 F_{LU}(토지이용), F_{MG}(경운방법), F_I(유기물 투입)로 구성되며, 토양 종류별 SOC_{REF}(기준탄소축적량)와 연결하여 무기토양 탄소 축적량 산정에 사용된다. GPG 2003에서 축적변화계수는 영농방법에 따라 F_{LU} 3종, F_{MG} 3종, F_I 4종 등으로 세분하고



있으며, 습도형에 맞춰 건조형·습윤형으로 다시 구분하고 있다. 국내 NIR은 F_{LU} 를 장기 경작형(밭·과수원 면적) 및 논벼형(논 면적)으로 구분하고, F_{MG} 는 전면 경운형, F_I 는 중간형으로 각각 통합하여 적용하고 있다. 한편, GPG 2003은 F_{LU} 를 일년생 작물을 재배하는 장기 경작형, 논벼형, 휴경형으로만 구분하고 있어, 과수원 등 다년생 작물 재배지에 대한 유형 구분을 제시하지 않고 있는 반면, IPCC 2006 GL은 기후대에 관계없이 다년생 작물 재배지 통합형 F_{LU} 값으로써 1.0을 제시하고 있다.

〈표 1-34〉 무기토양 축적변화계수 기본 값 및 적용 현황

구분	GPG 2003			2013년 NIR	
	영농방법	기후대	계수값		
F_{LU}	장기 경작 (일년생 작물)	온대	건조	0.82	온대 습윤형 계수 값을 밭 및 과수원 면적에 적용
			습윤	0.71	
	논벼	온대	1.1		온대 통합 계수 값을 논 면적에 적용
	휴경(<20년)	온대	건조	0.93	미적용
습윤			0.82		
F_{MG}	전면 경운	온대	1.0		온대 통합 계수 값을 전체 경지에 적용
	감소 경운	온대	건조	1.03	미적용
			습윤	1.09	
	무경운	온대	건조	1.10	미적용
습윤			1.16		
F_I	낮음	온대	건조	0.92	미적용
			습윤	0.91	
	중간	온대	1.0		온대 통합 계수 값을 전체 경지에 적용
	높음(無분뇨)	온대	건조	1.07	미적용
			습윤	1.11	
	높음(有분뇨)	온대	1.34		미적용

이상에서, 무기토양 축적변화계수와 관련한 국내 적용 현황을 살펴보았는데, 전체적으로 국내 농경지 관리방법을 지나치게 단순한 유형으로 구분하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, F_{LU} 는 일년생 작물 재배지를 대상으로 하는 장기경작형에 일반 밭과 과수원을 함께 포함하며, 휴경 농경지에 대한 구분도 제외하고 있다. 또한, F_{MG} 와 F_I 역시 일년생 작물 재배지에 해당하는 전면 경운형과 유기물 중간 투입형 단일체계에 전체 농경지를 각각 통합하여 산정하고 있다.

나. 개선 방안

1) F_{LU}(토지이용 축적변화계수)

F_{LU} 적용과정에서 우선적인 검토가 필요한 부분은 GPG 2003에서 계수 유형을 제시하지 않고 있는 다년생 작물 재배지에 대한 유형 분류를 결정하는 것이다. 이와 관련하여 IPCC 2006 GL에서 해당 사항을 독립된 유형으로 제시하고 계수 값을 다르게 적용하고 있는 것을 확인한 바 있으며, GPG 2003을 기초로 작성하는 일본 사례에서도 다년생 작물 재배지는 IPCC 2006 GL을 따르고 있음도 확인한 바 있다. IPCC GL 적용과 관련한 대내외 적용 수준을 간단히 살펴보면, 선진(Annex 1) 국가군들은 2014년까지는 IPCC 1996 GL을 기본지침서, GPG 2000과 GPG 2003을 보완지침서로 적용하며, 국가 상황에 맞춰, IPCC 2006 GL을 선택적(임의적)으로 적용하도록 규정하고 있다. 한편, 개발도상국(Non-Annex 1)은 NIR 제출 자체가 비의무적 사항이므로 IPCC GL 적용은 ‘권장 사용’ 혹은 ‘선택 사용’이 탄력적으로 적용되고 있다. 우리나라는 비록 Non-Annex 1 국가군으로 분류되고는 있으나 Annex 1 국가군 수준의 배출량 산정을 준비·진행하고 있어, 이들 국가군의 지침서 적용 기준을 따르고 있다.

〈표 1-35〉 국가군별 IPCC Guideline 적용 수준

구분	지침서 성격	Annex 1 국가군		Non-Annex 1 국가군	
		'90년~'14년	2015년~	'90년~'14년	2015년~
1996 GL	기본 지침서				
2000 GPG	보완서 (에너지, 산업공정, 농업, 폐기물 부문)	의무 사용	-	권장 사용	권장 사용
2003 GPG	보완서(LULUCF 부문)				
2006 GL	기본 지침서	선택 사용	의무 사용	선택 사용	

이와 관련하여 국내 2014년 MRV 지침서 내용을 살펴보면, 총괄원칙에서 적용 지침서는 기본적으로 IPCC 1996 GL, GPG 2000, GPG 2003에 기초하여 적용하는 것으로 선언하고 있으나, 관련 계수 값이 누락되거나, 세분되지 않고 통합된 경우 등에는 아래 표와 같이 IPCC 2006 GL 값을 탄력적으로 적용하고 있음을 확인할 수 있다. 이상의 상황들을 참고하면, 과수원 등 다년생 작물 재배지에 대한 GPG 2003의 계수 유형 누락은 IPCC 2006 GL 규정에 맞춰 1.0 값을 대체 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.



〈표 1-36〉 2014년 MRV 지침서의 IPCC 2006 GL 적용 사례

부문	배출계수 적용 사례
에너지산업(1A1)	정제가스(C), 정제가스 및 LPG(CH ₄ , N ₂ O)
제조업 및 건설업(1A2)	정제가스·LPG·납사·윤활유·석유코크(CH ₄ , N ₂ O)
수송(1A3)	LPG(CH ₄ , N ₂ O)
마그네슘 주조(2C4)	마그네슘 주조(SP ₆)
기타 할로카본 소비(2F6)	반도체 제조(HFC _s , PFC _s , SF ₆), 액정표시장치(HFC _s , PFC _s , SF ₆)
벼 재배(4C)	벼 재배 기간 중 물 관리방법별 보정계수
농경지 토양(4D)	토양 직접배출 및 간접배출(N ₂ O)

F_{LU} 적용과 관련한 다음 사항으로, 휴경 농경지 유형 구분에 대한 고려가 요청된다. 즉, 2010 농림어업총조사 결과자료에서 휴경 농경지는¹¹²⁾ 논 5 천ha, 밭 15 천ha가 조사되었으며, 전체 논·밭 면적에 대한 비율 값으로는 각각 0.6%, 2.4%로 파악된 바 있다. 물론, 농림어업총조사와 농업면적조사는 조사방법(전수·표본), 조사대상(개인 농가·전체 농경지) 등에 차이가 있으며,¹¹³⁾ MRV 지침서 및 NIR에서 농경지 면적은 농업면적조사를 기준으로 산정하고 있으나, 경지면적 자료는 농업면적조사 자료를 사용하더라도 휴경 논·밭 면적 비율은 농림어업총조사 자료를 적용하여 F_{LU} 유형 중에 휴경형으로 구분 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

〈표 1-37〉 2010 농림어업총조사 농경지 면적 조사 현황

(단위 : 천 ha)

경지 합계	논					밭			
	소계	일모작	이모작	휴경	경지정리	소계	일반밭	과수원	휴경
1,450	840	760	75	5	637	625	431	179	15

112) 농림어업총조사는 지목과 관계없이 작물생산에 직접 투입된 토지를 모두 농경지로 조사하며, 휴경 기간이 3년 이상인 경우에는 황무지로 분류하여 논·밭에서 제외한다(2010 농림어업총조사 조사지침서).

113) 농림어업총조사는 조사기준일 현재 경지 1천m² 이상을 직접 경작하는 개인 농가를 대상(농업법인, 기타 법인 등은 제외)으로 전수조사를 실시한다. 2010년에 실시한 총조사에서 농경지와 관련한 항목은 논 면적(경지정리 논, 경지미정리 논, 일모작 논, 이모작 논, 경작하지 않은 논), 밭 면적(경작한 밭, 경작하지 않은 밭), 주요 작물별 재배(수확)면적, 과수(성과수 및 미성과수 구분) 재배면적 및 수확면적 등을 조사하였다. 한편, 농업면적조사는 전국 농경지를 2ha 단위로 묶은 모집단 틀(1,015천 개)에서 약 26천 개 표본 조사구를 선정하여 표본조사를 실시한다.

2) F_{MG}(관리방법 축적변화계수)

F_{MG}로 제시된 경운 유형은 작물 종류, 경운 깊이 등에 대해 GPH 2003에서 제공하는 설명자료가 부족하며, 관련되는 통계자료 등도 빈약하여 활동자료 확보에 어려움이 많다. 따라서, F_{MG} 유형 분류는 일년생 작물을 재배하는 경우에는 전면 경운형(농기계 사용) 및 감소 경운형(농기계 미사용)으로 구분하고, 다년생 작물은 농기계 사용 여부에 상관 없이 무경운형으로 분류하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

〈표 1-38〉 GPG 2003의 농경지 관리방법 축적변화계수 유형별 특징

전면 경운	감소 경운	무경운
연중 잦고 깊은 경운	연중 1~2차례 얇은 경운	경운 없이 직접 파종
실질적인 토양 교란	표층 토양만 교란	파종 구역만 토양 교란
식재기 표면 작물 잔사 30% 미만 존재	식재기 표면 작물 잔사 30% 이상 존재	잡초제거에 제초제 사용

한편, 국내 농기계 보유 현황 및 농업 기계화율은 농림축산식품부의 농기계보유현황 조사를 통해 1990년부터 최근 연도까지 관련 자료 확보가 가능하다. 다만, 농업 기계화율은 논벼·밭작물 작업 단계별 연면적에 대한 농기계를 이용한 작업 연면적 비율로 나타내는데, 작업 단계별 기계화율 자료는 시계열 단절 연도가 존재한다. 즉, 온실가스 배출통계 대상 기간에서, 경운·정지 기계화율을 살펴보면, 논벼는 농림축산식품부 주요통계 등에서 1990년, 1995년, 2000~2002년, 2004년 및 2006년 이후 연간 자료가 제공되며, 밭작물은 공식 통계보고서는 제공되지 않고, 농촌진흥청, 농림축산식품부 업무자료 등에서 1998~2002년, 2006년, 2009년에 대한 기계화율 자료가 수집 가능하다.¹¹⁴⁾

114) 1998년 농기계 이용수지 및 농업기계화율 조사결과(1999.2., 농림축산식품부)는 1997~1998년 농업 작업 단계별 기계화율 자료를 제공하는데, 밭작물 경운·정지 기계화율은 1997년 92.5%, 1998년 96.3%로 보고하고 있다.



〈표 1-39〉 연도별 농업 기계화율 및 농기계 보유대수

(단위 : 천대, %)

구분	1990년	1995년	1996년	2000년	2005년	2010년	2011년	2012년	2013년
벼농사 기계화율	68.3	82.9	84.3	87.2	89.9	91.5	91.5	94.7	94.1
(경운·정지)	83.9	95.4	N.A.	98.5	N.A.	99.9	99.9	99.9	N.A.
밭농사 기계화율	-	-	40.6	45.9	47.2	50.1	50.1	55.7	55.7
보유대수	974	1,290	1,369	1,560	1,467	1,320	1,268	1,250	1,233
트랙터	41	100	113	192	228	265	268	273	278
콤바인	44	72	74	87	87	81	79	79	79
이앙기	138	248	271	342	332	276	254	245	236
경운기	751	869	910	939	820	698	667	653	640

주 : 1) 농림축산식품부 농기계 보유 현황 연도별 자료
 2) 기계화율은 농업 작업단계별(경운·정지, 이앙, 수확, 건조) 농경지 연면적에 대한 농기계 작업 연면적 비율¹¹⁵⁾

〈표 1-40〉 연도별 밭농사 경운·정지 기계화율

(단위 : %)

구분	1998년	1999년	2000년	2001년	2002년	2006년	2009년
밭농사 경운·정지 기계화율	94.0	96.3	94.4	95.2	95.3	97.4	99.7

주 : 1) 제303회 국회(정기회) 농림수산식품위원회 농촌진흥청 국정감사 자료(2011년 9월)

이상의 자료를 참고하면, 농경지 관리방법 축적변화계수 유형은 다음과 같은 단계를 이용하여 적용하는 것이 차선적인 접근방법으로 판단된다. 즉, i) 농업면적조사에서 나타난 논·밭 면적 자료를 농림어업총조사 자료 등을 이용하여 논·일반 밭·과수원으로 세분하고, ii) 논 및 일반 밭은 해당 면적자료에 벼농사 및 밭농사 경운·정지 기계화율을 적용하여 연도별 경운유형 비율을 산정하며, iii) 과수원 면적은 무경운형으로 구분한다. 다만, 논벼 및 일반 밭작물에 대한 기계화율 자료 중 시계열 단절 구간은 추세 외삽법 혹은 전체 벼농사 및 밭농사 기계화율 등 관련 자료를 이용한 대체자료법 등의 자료간격 접합기법¹¹⁶⁾ 적용이 필요하다.

115) 논벼 농업작업 단계 중 경운·정지, 이앙, 수확, 건조 농경지 면적이 동일하다면, 전체 기계화율은 단계별 기계화율을 단계 수(4)로 나눈 값과 같다. 즉, 1ha 논에 경운·정지, 이앙, 수확 단계는 기계로 작업한 뒤, 건조 기계를 사용하지 않고 자연 건조한 경우에는 전체 기계화율은 $75\%[(100 + 100 + 100 + 0) / 4]$ 로 조사된다. 한편, 1998년 농기계 이용수지 및 농업기계화율 조사는 밭농사 기계화율 단계를 경운·정지, 이앙, 방제, 수확·탈곡, 건조로 구분한 바 있다.

<표 1-41> 농경지 관리방법 축적변화계수 개선 방안

구분	변경 이전	변경 이후
논	1990년부터 2011년까지 전체 농경지 면적에 대해 기계영농 100% 를 적용(전면 경운형)	전면 경운형 × 벼농사 경운·정지 기계화율 × 논 면적 + 감소 경운형 × (1 - 벼농사 경운·정지 기계화율) × 논 면적
일반 밭		전면 경운형 × 밭농사 경운·정지 기계화율 × 일반 밭 면적 + 감소 경운형 × (1 - 밭농사 경운·정지 기계화율) × 일반 밭 면적
과수원		과수원 면적에 무경운형 적용(과수원 면적은 밭 면적에서 총조사 등 비율 자료를 이용)

3) F₁(유기물 투입 축적변화계수)

F₁로 제시된 유기물 투입 유형도 작물 종류, 잔사 환원·제거 등에 대해 GPG 2003에서 제공하는 설명자료의 구체성이 부족하며, 관련되는 통계자료도 빈약하여 활동자료 확보에 어려움이 많다. 결국, GPG 2003에서 제시하는 유기물 투입 축적변화계수에 대한 유형별 특징은 작물 종류를 중심으로 관련 활동자료를 분류하는 방법이 가장 적절할 것으로 판단된다.

<표 1-42> GPG 2003의 농경지 유기물 투입 축적변화계수 유형별 특징

구분	낮음	중간	높음(분뇨 미사용)	높음(분뇨 사용)
특성	작물 잔사 제거, 짚은 노출 휴한지, 잔사 발생률 낮은 작물	모든 잔사 토양 환 원, 보충 유기물(거 름 등) 투입	잔사 발생률 높은 작물, 동물분뇨 미 사용	높은 작물 잔사 투 입, 정기적인 동물 분뇨 사용
대상 작물	채소, 면화, 담배	식량작물 중 곡물류	녹비·피복 작물 및 다년생 사료작물, 휴경지	-

116) IPCC GL은 재계산 등으로 자료간격(Data Gaps)이 발생한 경우, 자료 접합기법((Splicing Technique)으로 중첩(Overlap)법, 대체자료(Surrogate Data)법, 보간법(내삽법, Interpolation), 추세외삽법(Trend extrapolation) 등을 제시하고 있다. 중첩법은 신·구 자료 사이에 일관적인 관계가 존재한다는 가정을 전제하고 있으며, 신규 자료를 직접 이용할 수 없는 연도의 배출량은 신·구 자료의 중첩기간 동안 관찰된 관계를 이용하여, 과거 자료들을 비례적으로 수정하는 방법을 말한다. 대체자료법은 재계산이 필요한 자료의 시간적인 변화를 설명할 수 있는 관련 통계자료를 이용하여 대체 입력변수를 개발하고 그 비율 값을 적용하는 방법을 말한다. 입력변수는 회귀분석(Regression Analysis) 등을 이용하여 하나 이상을 선택하여 적용한다.



한편, 국내에서 과거부터 곡물류를 제외하면 잔사를 환원하는 작물이 거의 없으며, 작물 재배를 위해 동물 분뇨를 투입하는 사례에 대한 관련 자료도 없으므로, F₁ 유형 분류 중 높음(분뇨 사용)형은 국내 적용이 없는 것으로 가정하고, 통계청 농업면적조사에서 사용하는 작물 종류별 분류 체계를 활용하여 다음과 같이 F₁ 유형분류를 시도하였다. 즉, F₁ 유형분류에서 중간형은 곡물류인 미곡·맥류, 높음형(분뇨 미사용)은 사료작물·기타 작물·휴경지, 낮음형은 기타 식량작물(두류, 잡곡, 서류)·채소·특용작물·약용작물·과수·기타 수원지·화훼 작물 등 나머지 작물들을 포함하여 분류할 수 있겠다.

〈표 1-43〉 농경지 관리방법별 축적변화계수 개선 방안

변경 이전	변경 이후
1990년부터 2011년까지 전체 농경지 면적에 대해 곡물류 100%를 적용(중간형)	미곡(11000, 논벼·밭벼), 맥류(12000, 걸보리·맥주보리·쌀보리·밀)는 중간형 적용
	사료작물(72109), 기타작물(79900, 녹비 등), 휴경지(93211)는 높음형(분뇨 미사용) 적용
	기타 식량작물(두류, 잡곡, 서류), 채소, 특용작물, 약용작물, 과수, 기타 수원지, 화훼 등 나머지 작물은 낮음형 적용

〈표 1-44〉 농업면적조사 작물별 경지 이용 면적

(단위 : 천 ha)

연도	식 량 작 물						특용·약용	채소	과수	뽕밭	기타
	소계	미곡	맥류	두류	서류	잡곡					
1990	1,669	1,244	160	188	40	37	130	277	132	8	195
1995	1,346	1,056	90	132	40	28	122	322	172	2	233
2000	1,316	1,072	68	107	44	25	92	296	169	1	224
2005	1,232	980	61	118	48	26	77	240	150	1	222
2006	1,178	955	58	101	39	25	76	234	147	1	224
2007	1,161	950	56	88	40	27	80	222	148	-	244
2008	1,143	936	56	87	38	26	76	223	149	-	243
2009	1,125	924	54	82	41	24	86	216	151	-	296
2010	1,093	892	51	83	42	25	86	206	156	-	279
2011	1,054	854	42	88	43	27	79	227	154	-	282
2012	1,092	883	32	97	48	32	80	226	159	-	283

주 : 1) 통계청 농업면적조사(2013 농림축산식품 주요 통계 인용)

2) 기타는 시설작물, 수원지(樹園地) 및 기타 작물

〈표 1-45〉 농업면적조사 작물부호표

작물 명칭	부호	작물 명칭	부호	작물 명칭	부호	작물 명칭	부호
작물 총 합계	00000	근채류	23000	감귤	45000	시설면적	hhhhh
식량작물	10000	무	23100	성과수	45101	시설 재배면적	h0000
미곡	11000	일반	23116	미과수	45209	식량작물	h1000
논벼	11126	고랭지	23124	감	46000	서류	h1500
밭벼	11207	김장	23132	떨은감	46100	감자	h1521
맥류	12000	총각무	23141	성과수	46116	채소류	h2000
겉보리	12106	당근	23205	미과수	46124	엽채류	h2100
맥주보리	12203	조미채소	24000	단감	46200	배추	h2111
쌀보리	12301	고추	24121	성과수	46213	시금치	h2130
밀	12408	마늘	24200	미과수	46221	상추	h2140
두류	13000	한지형	24236	자두	47000	과채류	h2200
콩	13129	난지형	24244	성과수	47104	수박	h2210
팥	13226	양과	24300	미과수	47201	참외	h2220
녹두	13323	조생종	24333	매실	4a000	오이	h2230
기타 두류	13927	중만생종	24341	성과수	4a100	호박	h2241
잡곡	14000	과	24400	미과수	4a200	토마토	h2250
옥수수	14371	대과	24410	유자	4b000	일반	h2251
메밀	14427	쪽과	24420	성과수	4b100	방울	h2252
기타 잡곡	14907	생강	24503	미과수	4b200	딸기	h2260
서류	15000	기타 채소	25003	기타 과수	49000	근채류	h2300
고구마	15105	엽채류	26000	성과수	49107	무	h2310
감자	15200	특·약용작물	30000	미과수	49204	일반	h2311
봄감자	15211	유지작물	31000	기타 수원지	61000	총각	h2314
고랭지감자	15229	참깨	31330	기타 작물	70000	조미채소	h2400
가을감자	15237	들깨	31429	사료작물	72109	풋고추	h2414
채소류	20000	땅콩	31500	인삼	73113	과	h2440
엽채류	21000	약용작물	32107	담배	73121	대과	h2441
배추	21100	특용작물	33990	화훼	75000	쪽과	h2442
일반	21113	과수	40000	기타	79990	기타 채소	h2500
고랭지	21121	사과	41000	미재배면적	90000	과수	h4000
김장	21130	성과수	41106	휴경	93211	포도	h4400
겨울	21140	미과수	41203			성과수	h4410
양배추	21202	배	42000			미과수	h4420
시금치	21300	성과수	42102			감귤	h4500
상추	21407	미과수	42200			성과수	h4510
과채류	22000	복숭아	43000			미과수	h4520
수박	22101	성과수	43109			기타 과수	h4900
참외	22209	미과수	43206			성과수	h4910
오이	22306	포도	44000			미과수	h4920
호박	22411	성과수	44105			화훼	h7500
딸기	22608	미과수	44202			기타 작물	h7999



4. 다년생 목질 바이오매스 탄소 축적량 산정

가. 국내외 산정 현황

농경지 부문 다년생 목질 바이오매스는 주요 국가 사례에서 대부분 과수, 관상수(크리스마스트리 등) 등을 대상으로 산정하고 있으며,¹¹⁷⁾ 성목 수령 도달 이후에는 GPG 2003에서 가정한 연간 바이오매스 축적률 ‘0’을 적용하여 산정하는 경우가 많은 것으로 나타났다. 즉, 성목 수령 도달 이전까지 다년생 목질 바이오매스 축적량이 일정 비율로 증가하는 것으로 산정하며, 성장률 값은 관련 연구자료를 적용하거나 GPG 2003에서 제시한 기본 값을 적용하고 있다.

〈표 1-46〉 GPG 2003 및 주요 국가별 농경지 다년생 목질 바이오매스 산정 사례

구분	적용 방법
GPG 2003	<ul style="list-style-type: none"> ■ 온대지역 성목 수령 30년, 연간 바이오매스 축적률 2.1 tonnage/ha, 전체 바이오매스 축적량(손실량) 63 tonnage/ha 등 관련 기본계수 값 제시 ■ 자료 부족 등을 이유로 지상부 바이오매스만 산정 ■ 성목 수령 도달 이후에는 연간 바이오매스 축적률은 ‘0’으로 가정(Tier1)
일본	<ul style="list-style-type: none"> ■ 바이오매스 축적량은 평균 수령에 연구논문을 통해 계산된 축적률 값을 곱하여 산정 ■ 저수고 밀식재배 방식 일반화를 반영하여, 성목 수령 시작 연도 이후에는 연간 바이오매스 축적률로 ‘0’ 값을 적용
호주	<ul style="list-style-type: none"> ■ GPG 2003에서 제시한 온대 기후 기본계수 값인 2.1 tonnage/ha(연간 축적률), 63 tonnage/ha(손실률)를 적용
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> ■ 지속적 수확량 확보를 위한 집중관리(정기적인 정지작업, 대체 식재 등)를 반영하여 일정 수령 분포를 가정하므로 연간 축적량은 ‘0’ 값을 적용하므로, 바이오매스 전체 축적량은 재배면적 변화량만으로 산정 ■ 바이오매스 전체 축적량은 해외 관련 연구자료를 활용한 연간 축적률 값과 평균 수령 및 성목 수령을 반영하여 산정 ■ 지하부 바이오매스 비율 값을 적용하여 산정

한편, 국내 MRV 및 NIR은 과수원 대상으로 다년생 목질 바이오매스 축적량을 산정하는 것으로 분류하고 있으나, 아직까지는 미산정(NE) 상태를 보고하고 있다.

117) 캐나다는 크리스마스트리 바이오매스 축적량을 별도로 산정하고 있으며, 2006년 및 2011년에 실시한 농업 총조사(Census of Agriculture) 조사항목으로 크리스마스 트리 재배면적을 포함하여 전수 조사하였다.

나. 개선 방안

GPG 2003은 다년생 목질 바이오매스 전체를 대상으로 산정할 것을 규정하므로, 과수원 이외 관상수 등에 대한 바이오매스 축적량도 산정하는 것이 필요하겠으나, 중요 수종을 대상으로 산정 중인 주요 국가 사례를 고려하고, 국내 관련 활동자료 확보 수준 및 부문별 포괄범위 중복성 등을 고려하면, 중요 과수만을 대상으로 바이오매스 축적량을 산정하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 즉, 통계청에서 조사하는 농업면적조사 조사대상 작물 중 기타 수원지 분류에서 관상수 등이 조사되고는 있으나, 포괄범위가 산림지 부문 목질 바이오매스와 많은 부분이 중복되며,¹¹⁸⁾ 세분 자료도 확보되지 않는 상황이므로, 사과·배·포도·복숭아·감귤·감(단감, 뽕은감) 등 7대 주요 과수에¹¹⁹⁾ 대한 산정방안을 중심으로 검토하는 것이 보다 적절한 것으로 판단된다.

〈표 1-47〉 농업면적조사 기타 수원지 조사 범위

구분		대상 작물
기타 수원지 (나무밭)	묘포	관상수·수원지·조림용 수목 묘포
	관상수	단풍나무, 은행나무, 주목, 향나무, 후박 등(판매목적으로 임시로 심은 나무)
	기타	밤나무, 산딸기, 엄나무, 옷나무, 탕자(묘목용은 묘포), 호두나무 등

한편, 주요 과수별 바이오매스 축적량 산정을 위한 활동자료는 농업면적조사에서 파악된 연도별 과수 재배면적 활용이 가능한 것으로 파악되었으며, 수종별 평균 수령, 성목도달 수령 등 주요 매개변수 관련 값들은 과수실태조사(2007년), 임가경제조사 자원 평가방법 개발(2001년, 한국임정연구회 산림청 위탁연구) 연구자료 등을 활용하여 계산이 가능한 것으로 나타났다. 먼저, 활동자료 측면을 살펴보면, 농업면적조사에서 연도별 주요 과수별 재배면적이 조사되고 있으며, 통계청 KOSIS(국가통계포털, Korean Statistical Information Service) 시스템을 통해 1990년 이전부터 최근 연도까지 조사자료가 제공되고

118) 1999년 및 2005년에 실시한 제1~2차 임업총조사와 2010 농림어업총조사는 조림용 묘목, 밤·호두·대추·잣·은행 등 5대 유실수는 재배하는 토지 유형(논·밭·산림)에 관계 없이 임산물로 조사하였다.

119) 7대 주요 과수는 농림축산식품부 산하 국립농산물품질관리원이 8차례(1971년, 1976년, 1982년, 1987년, 1992년, 1997년, 2002년, 2007년) 조사한 과수실태조사에서 과수 품종별로 조사한 주요 과수 수종을 말한다. 2007년에 실시한 과수실태조사는 전국 과수 농가 및 준농가(법인 등) 약 20만 개를 대상으로 전수 조사하였다(모집단으로 사용한 2005년 농업총조사 과수 농가는 약 23만 가구). 과수실태조사를 흡수하여 2010년에 실시한 농림어업총조사도 7대 주요 과수를 품종별로 구분하여 조사한 바 있다. 2010 농림어업총조사에서 사과는 감홍 등 13개 품종, 배는 신고 등 13개 품종, 복숭아는 백도 등 21개 품종, 단감은 부유 등 4개 품종, 포도는 거봉 등 9개 품종, 감귤은 감평 등 17개 품종, 뽕은감은 고종시 등 6개 품종을 구분하여 조사하였다.



있다.¹²⁰⁾ 농업면적조사 주요 과수별 재배면적은 과종별 재배면적 합계와 성과수 재배면적이 공표되고 있으나, 성과수 개념은 성목수령에 도달한 수목을 뜻하지는 않으므로, 온실가스 배출통계 측면에서는 목질 바이오매스 축적량이 계속 증가하는 성장기에 있는 수목으로 파악해야 한다. 따라서, 농업면적조사를 통한 활동자료는 과종별 전체 재배면적 합계 및 연도별 재배면적 증감 자료 파악에 활용 가능할 것으로 판단된다.

〈표 1-48〉 2014년 농업면적조사 주요 과수별 재배면적

(단위 : 천 ha)

구분	사과		배		복숭아		포도		감귤		뽕은감		단감	
	계	AFT	계	AFT	계	AFT	계	AFT	계	AFT	계	AFT	계	AFT
합계	31	21	13	12	16	10	14	11	17	16	16	10	12	11
논	2	1	0.2	0.1	1	0.3	1	0.4	-	-	0.4	0.1	0.3	0.1
밭	29	21	13	12	15	9	13	11	17	16	15	10	12	11

주 : 1) AFT(Adult Fruit Tree, 성과수) 재배면적

다음으로, 과수 수종별 평균 수령, 수령별 재배면적 비율 자료는 2007년에 실시한 과수 실태조사를 통해 파악할 수 있다. 평균 수령은 과수실태조사 수령 구간 중앙값에 구간별 재배면적을 가중치로 적용하여 계산하였다.

< 평균 수령 산식 및 사례 >

- (산식) 평균 수령 = 과수 수령 구간별 중앙값 × 재배면적 ÷ 과수별 재배면적
- (사례) 왜성사과¹²¹⁾ 수령 = (1.5세 × 54.7ha + 3.5세 × 92.0ha …… 37세 × 183.3ha + 40세 × 65.6ha) ÷ 26,721.8ha = 11.1세

120) 농업면적조사는 주요 과수에 대해 성과수와 미과수로 구분하여 조사하며, KOSIS 수록 자료는 수종별 재배면적과 성과수 재배면적을 제공하고 있다. 한편, 농업면적조사에서 성과수는 상품 가치 있는 과실을 수확·판매할 수 있는 상태를 말하며, 묘목 식재 후 일반사과 7년, 왜성사과 4년, 배 4년, 복숭아 3년, 포도 3년, 감 4년, 감귤 4년 등이 경과한 과수를 말한다. 다만, 이들 기간들은 결과수령(結果樹齡, 상품성 있는 과실이 처음으로 열리는 연령)을 말하므로 성목수령(成木樹齡, 완전히 자라서 과실 생산이 최고조에 달하는 연령)과는 차이가 있다.

121) 왜성사과와 일반사과는 접목한 대목(접붙이기 이전 밑 부분)에 따라 구분하며, 일반사과는 사과실생, 삼엽해당, 환엽해당 등의 대목에 원하는 품종을 접붙인 것으로 나무의 키가 크고 결실 수령이 늦으며 재래 품종이 많은 반면, 왜성사과는 왜성대목에 원하는 품종을 접붙인 것으로 나무 키가 2.5m 이내이고 재식 밀도가 높은 특징을 보인다. 오늘날은 저수고 밀실재배 영향으로 대부분 왜성사과 중심으로 재식재하고 있다.

또한, 과종별 성목수령 기간은 임가경제조사 자원평가방법 개발 연구자료에서 성목 연령 도달 원년 수령과 내용년수 도달 수령을 성목수령 시작·끝 연령으로 각각 적용하였다. 성목수령 도달 재배면적 비율은 과종별 전체 재배면적에 대한 성목수령 미달수령 구간 재배면적들을 제외한 재배면적 비율로써 계산하였으며, 성목수령 경계 구간에 걸쳐 분리되지 않은 경우에는 50% 비율로 적용하였다.¹²²⁾ 과종별 전체 평균 수령과 함께, 동일한 방법을 적용하여 과종별 성목수령 미달(성장기) 수목들에 대한 평균 수령도 별도로 계산하였다.

〈표 1-49〉 2007년 과수실태조사 과수 연령별 재배면적

(단위 : ha)

수령	일반사과	왜성사과	배	복숭아	포도	단감	뽕은감	감귤
전체	5,271	26,722	22,120	12,911	17,660	16,290	8,564	19,055
1~2	55	2,139	133	739	872	57	573	89
3~4	92	3,314	308	1,277	1,568	98	758	347
5~6	112	3,525	530	1,852	2,133	213	666	564
7~8	109	3,098	1,392	2,430	2,910	416	772	514
9~10	195	2,602	2,949	2,769	3,489	1,165	1,093	739
11~12	116	1,391	2,960	1,038	2,160	985	446	320
13~14	111	1,263	2,315	628	1,845	1,137	360	339
15~16	515	2,739	2,858	921	1,450	2,423	906	1,529
17~18	329	1,904	1,208	238	369	1,576	370	908
19~20	1,210	2,645	1,813	477	436	2,703	878	2,879
21~22	276	516	282	85	95	621	70	539
23~24	289	374	288	75	66	550	86	938
25~29	978	835	1,458	241	174	2,285	471	4,064
30~34	623	280	1,479	92	53	1,290	616	3,966
35~39	183	45	1,034	15	14	504	193	1,003
40이상	66	28	1,069	14	9	225	286	299

122) 과수실태조사 조사표는 과종별 수령을 6개월 단위로 반올림하여 기재토록 하고 있으나, 최종 보고서는 수령 구간별로 발표하고 있다. 따라서, 감귤 경우에는 성목수령 시작 연령이 19~20세 수령 구간 끝 연령(20세)에 해당되므로 불가피하게 해당 구간 면적의 50%를 반영하였다.

123) 임가경제조사 자원 평가방법 개발자료는 성목연령 도달 연도와 내용년수를 규정하며, 내용년수는 식물이 완전히 자라 성목이 되었을 때부터 경제적 가치가 소멸할 때까지 기간으로 설명한다. 이를 반영하여, 성목연령 도달 연도는 성목수령 시작 연도, 내용년수 도달 연도는 성목수령 끝 연도로 설정하였다.



〈표 1-50〉 2007년 과수실태조사 수종별 평균 수령, 성과 수령 도달 비율

과종	평균 수령	결과 수령	성목 수령		성목수령 도달비율(%)	성목수령 미달 비율(%)	평균수령
			시작	끝			
일반사과	21.3	7	15	25	85.0	15.0	8.3
왜성사과	11.1	3	7	23	66.4	33.6	3.8
배	17.6	4	15	25	52.1	47.9	10.2
복숭아	9.5	3	7	13	70.0	30.0	4.1
포도	9.7	3	7	18	74.1	25.9	4.1
단감	19.5	3	15	25	75.0	25.0	10.4
뽕은감	14.7	3	15	25	45.5	54.5	7.1
감귤	23.0	4	20	30	64.4	35.6	13.4

주 : 1) 임가경제조사 자원 평가방법 개발 연구자료 참조¹²³⁾

2) 성목수령 도달 비율은 전체 재배면적 대비 성목수령에 도달한 수목 재배면적 비율

한편, 과종별 목질 바이오매스 산정을 위해서는 성장기 수목(성목수령 도달 이전 수목)에 대한 연간 축적량 값이 필요한데, 관련 국내 자료가 없으므로, GPG 2003에서 제시한 온대기후 기본계수 값인 2.1(tonnage C/ha/year)을 공통적으로 적용할 수밖에 없다.

이상 자료들을 기초로 국내 과종별 목질 바이오매스 산정을 위한 관련 계수 값들을 정리하면, 다음 표와 같이 정리할 수 있다.

〈표 1-51〉 과수 수종별 목질 바이오매스 산정 매개변수 값

수종	성목기 축적량 (tonnage C/ha)	성목 도달 수령(year)	축적량(tonnage C/ha/year)	손실량 (tonnage C/ha)	평균 수령(year)	
					전체	성장기
일반사과	31.5	15	2.1	31.5	21.3	8.3
왜성사과	14.7	7		14.7	11.1	3.8
배	31.5	15		31.5	17.6	10.2
복숭아	14.7	7		14.7	9.5	4.1
포도	14.7	7		14.7	9.7	4.1
단감	31.5	15		31.5	19.5	10.4
뽕은감	31.5	15		31.5	14.7	7.1
감귤	42.0	20		42.0	23.0	13.4

최종적으로 농경지 부문 다년생 목질 바이오매스 축적량은 과종별 성목기간(성목수령 도달 이후 수목) 바이오매스 축적량과 성장기간(성목수령에 미치지 못하는 수목) 바이오매스 축적량을 각각 계산하고 합산하여 산정 가능한 것으로 파악되었다.

이상의 산정과정을 거쳐, 2007년에 실시한 과수실태조사 7대 주요 과수에 대한 목질 바이오매스 탄소 축적량을 시험적으로 산정해 보면, 전체 과수 탄소 축적량은 약 2,848 천톤(C)으로 나타났으며, 수종별 탄소 축적량은 감귤 706 천톤(C), 배 590 천톤(C), 단감 474 천톤(C) 순인 것으로 파악되었다.

< 다년생 목질 바이오매스(B.M.) 산정 사례 >

- 산정식 = 과종별 성목기간 B.M. + 성장기간 B.M.
- * 성목기간 B.M. = 성목기 축적량 × 재배면적 × 성목수령 도달 비율
- * 성장기간 B.M. = 성장기 평균 수령 × 연간 축적량 × 재배면적 × 성목수령 미달 비율
- 왜성사과 산정 사례
- * 전체 B.M. = 260,840 + 71,641 = 332,481(tonnage C)
- * 성목기간 B.M. = 14.7(tonnage C/ha) × 26,722(ha) × 0.664 = 260,840(tonnage C)
- * 성장기간 B.M. = 3.8(세) × 2.1(tonnage C/ha/year) × 26,722(ha) × 0.336 = 71,641(tonnage C)

<표 1-52> 2007년 과수실태조사 기준 과수 수종별 목질 바이오매스 축적량

(단위 : tonnage C)

수종	B.M. 축적량 소계	성목기간 B.M. 축적량	성장기간 B.M. 축적량
전체 과수	2,847,792	2,113,391	734,401
일반사과	154,911	141,148	13,763
왜성사과	332,481	260,840	71,641
배	590,038	363,245	226,793
복숭아	166,227	132,923	33,304
포도	231,758	192,385	39,373
단감	473,805	384,864	88,941
뽕은감	192,330	122,730	69,600
감귤	706,242	515,256	190,986

한편, 1990년부터 과종별 바이오매스 축적량 시계열 자료는 연도별 농업면적조사 결과자료에 2007년 과수실태조사를 이용하여 시험적으로 계산한 방법을 동일하게 적용하여 산정 가능하다. 다만, 농업면적조사는 일반사과와 왜성사과 재배면적을 통합하여



제공하므로, 사과와 관련된 매개변수 값들은 2007년 과수실태조사에서 파악된 일반사과 및 왜성사과 재배면적 비율을 가중치로 사용하여 수정한 자료를 적용할 수밖에 없다.¹²⁴⁾ 또한, 뽕은감과 단감은 2003년 이전자료가 제공되지 않으므로 외삽법 등 간접 추계방식에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

〈표 1-53〉 농업면적조사 연도별 노지 과수 재배면적

(단위 : ha)

연도	사과	배	복숭아	포도	감귤	뽕은감	단감
1990	48,833	9,058	12,333	14,962	19,287	-	-
1991	50,595	9,495	11,529	14,802	20,221	-	-
1992	52,985	10,339	10,635	14,957	21,482	-	-
1993	52,297	11,009	10,548	16,991	22,247	-	-
1994	52,098	12,649	10,166	19,773	22,233	-	-
1995	50,103	15,752	10,241	25,630	23,622	-	-
1996	43,857	18,243	10,002	26,593	24,729	-	-
1997	39,995	21,983	10,892	27,558	24,730	-	-
1998	34,692	24,612	12,012	29,044	24,667	-	-
1999	31,079	25,677	12,942	29,462	24,959	-	-
2000	29,063	26,142	13,876	28,085	25,198	-	-
2001	26,328	25,459	14,412	25,578	24,919	-	-
2002	26,163	25,317	15,598	24,569	24,330	-	-
2003	26,398	24,025	15,880	23,160	22,473	-	-
2004	26,676	22,906	15,566	21,128	19,792	8,626	18,533
2005	26,907	21,735	15,014	20,106	19,145	9,632	17,199
2006	28,312	20,656	13,383	17,406	18,662	11,132	17,304
2007	29,358	19,888	13,188	17,003	18,622	12,530	16,309
2008	30,006	18,277	12,638	16,231	18,216	14,410	16,259
2009	30,451	17,090	12,967	15,757	18,353	15,562	14,785
2010	30,992	16,239	13,908	15,330	18,041	16,564	15,244
2011	31,167	15,081	13,795	14,978	18,034	17,040	14,299
2012	30,734	14,353	14,335	14,590	17,771	16,874	13,390
2013	30,449	13,740	14,633	14,129	17,533	16,248	12,905
2014	30,702	13,127	15,539	13,538	17,007	15,537	12,451

124) 사과에 대해 가중치를 적용하여 계산하면, 성목수령 도달 비율 0.6947, 성목수령 미달 비율 0.3053, 성목기 축적량 17.5(tonnage C/ha), 성장기간 평균 수령 4.5세를 각각 적용할 수 있다.

농업면적조사 자료를 활용한 연도별 과종별 바이오매스 축적량을 살펴보면, 2014년 기준으로, 전체 바이오매스 축적량은 2,532 천탄소톤으로 나타났다.¹²⁵⁾ 과종별 축적량은 감귤(631 천탄소톤), 사과(462 천탄소톤), 단감(362 천탄소톤) 순으로 많은 것으로 파악되었다. 이와 같은 결과는 연간 바이오매스 축적량을 과종에 관계없이 동일 값(2.1 탄소톤)을 적용하고, 과종별 성목 도달 연령 차이가 컸던 영향인 것으로 판단된다.

〈표 1-54〉 연도별 과종별 바이오매스 축적량

(단위 : 천탄소톤)

연도	전체			사과	배	복숭아	포도	단감	뽕은감	감귤
	합계	성목기	성장기							
1990	2,046	1,554	492	735	242	159	196	-	-	715
1991	2,107	1,598	509	761	253	148	194	-	-	750
1992	2,202	1,667	535	797	276	137	196	-	-	797
1993	2,264	1,712	552	787	294	136	223	-	-	825
1994	2,335	1,762	573	784	337	131	259	-	-	825
1995	2,517	1,891	626	754	420	132	336	-	-	876
1996	2,540	1,894	646	660	487	129	348	-	-	917
1997	2,606	1,928	678	602	586	140	361	-	-	917
1998	2,628	1,933	695	522	656	154	380	-	-	915
1999	2,630	1,929	702	468	685	166	386	-	-	926
2000	2,615	1,913	703	437	697	178	368	-	-	935
2001	2,520	1,839	681	396	679	185	335	-	-	924
2002	2,494	1,820	674	394	675	201	322	-	-	903
2003	2,379	1,739	640	397	641	204	303	-	-	834
2004	2,957	2,188	769	401	611	200	277	539	194	734
2005	2,868	2,120	749	405	580	193	263	501	217	710
2006	2,823	2,084	739	426	551	172	228	504	251	692
2007	2,812	2,073	739	442	530	170	223	475	282	691
2008	2,787	2,055	732	451	487	163	213	473	324	676
2009	2,748	2,025	724	458	456	167	206	430	350	681
2010	2,765	2,039	726	466	433	179	201	444	373	669
2011	2,713	2,001	712	469	402	177	196	416	383	669
2012	2,649	1,955	695	462	383	184	191	390	380	659
2013	2,589	1,912	677	458	366	188	185	376	366	650
2014	2,532	1,873	659	462	350	200	177	362	350	631

125) 앞서 2007년 과수실태조사(B)를 이용하여 시험적으로 살펴본 자료와 비교하면, 농업면적조사(A)를 활용한 자료는 미세한 차이가 발생한다. 즉, 농업면적조사 자료를 활용한 경우를 100.0으로 가정한 경우, 전체 B.M. 101.3(2,848/2,812 천탄소톤), 성목기간 B.M. 101.9(2,113/2,073 천탄소톤), 성장기간 B.M. 99.3(734/739 천탄소톤) 수준으로 파악된다.



참고로, 일본, 캐나다 등에서 적용하고 있는 과수 저수고·집약 관리 재배형태에 대한 국내 현황을 살펴보면, 2010 농림어업총조사 과종별 재배시설 형태별 조사자료에서 개략적인 재배형태 현황을 파악할 수 있다.¹²⁶⁾ 즉, 총조사에서 전체 과수재배 농가는 186천가구로 나타났으며, 지주시설·온실재배 등 재배시설을 갖춘 농가는 72천가구로 파악되어 약 38.5% 수준인 것으로 확인되었다. 과종별로는 사과, 배, 포도 재배 농가 등은 60% 수준 이상이 재배시설을 갖춘 상태에서 집약관리 되고 있는 것으로 파악되었으며, 단감·뽕은감·감귤 등은 상대적으로 재배시설 보유율이 낮은 것으로 나타났다.

〈표 1-55〉 2010 농림어업총조사 과수 재배시설 보유 현황

(단위 : 가구, %)

과종	농가 수	재배시설 보유농가 수	재배시설 형태					
			비중	온실 재배	조류 퇴치망	빗물방지 시설	지주 시설	관개 시설
전체	185,588	71,503	38.5	9,916	13,152	22,484	62,124	44,114
사과	38,765	24,205	62.4	20	3,530	1,027	20,355	13,878
배	22,589	14,041	62.2	37	3,144	943	12,234	5,848
복숭아	26,385	9,166	34.7	87	743	466	6,681	4,117
포도	35,765	32,993	92.2	4,542	5,850	19,889	24,797	17,826
감귤	27,041	6,430	23.8	5,223	99	110	68	4,718
단감	28,443	2,452	8.7	21	354	238	1,426	1,078
뽕은감	42,634	2,059	4.8	10	212	155	1,146	1,014

주 : 1) 1개 과수재배 농가에서 2가지 이상 재배시설을 갖춘 수 있으므로 시설 형태 소계가 재배시설 보유 농가 수와 일치하지 않음

126) 과수 재배시설에서 저수고 재배형태와 직접 관련되는 시설은 지주시설 및 온실재배로 볼 수 있으나, 조류 퇴치망·빗물방지시설 등도 수고를 제한하면서 집약관리를 실시하고 있다. 재배시설 형태 중 온실재배는 비닐하우스 등 온실에서 재배하는 경우를 말하며, 조류퇴치망은 조류 피해방지를 위해 철사 또는 그물 등을 설치한 시설을 나타낸다. 또한, 빗물방지시설은 비를 가릴 수 있도록 천장에 비닐 등을 설치한 시설을 말하며, 지주시설은 밀식재배를 위해 파이프·콘크리트 등의 지주를 설치하고 철선으로 연결한 재배시설을 말한다. 관개시설은 과수재배를 위한 스프링클러·물방울 관개시설(과수원 땅속 또는 땅위에 관을 설치하여 과수 아래 지표에 물을 주는 시설)·양수기 시설 등을 뜻한다(2010 농림어업총조사 조사 지침서, 통계청).

제6절 결론

1. 연구결과 요약

LULUCF 6개 세부 부문 중 농경지 부문은 산림지 부문과 함께 주요 흡수원·배출원으로 분류되고 있으며, 주요 국가 현황에서도 다른 4개 세부 부문에 비해 수준 높은 산정체계를 갖추고 있다. 이에 반해, 국내 농경지 부문 국가 온실가스 인벤토리는 토양 탄소 축적량 중 흡수원에 해당하는 무기토양 탄소 축적량과 배출원에 해당하는 석회시비에 의한 CO₂ 배출량만을 대상으로 산정하고 있어, IPCC가 제시한 인벤토리 산정 5대 원칙¹²⁷⁾ 중 국제 비교가능성(Comparability)과 완전성(Completeness)에서 많은 문제점을 내포하고 있다. 또한, 산정 중인 무기토양 탄소 축적량은 탄소축적변화량 기본계수(SOC_{REF}) 적용과정에서 습도형 구분에 오류가 있으며, 축적 변화계수(F_{LU}, F_{MG}, F_I)는 다년생 작물재배지와 휴경지에 대한 산정을 하지 않는 등 지나치게 단순화된 모형을 적용하고 있고, 석회시비에 의한 CO₂ 배출량은 배출계수 적용 오류와 함께, 석회비료 종류별 탄산염 순도에 대한 고려의 필요 등 정확성(Accuracy)과 투명성(Transparency) 차원에서 개선이 요청되는 부분이 다수 발견되었다.

농경지 부문 국가 인벤토리에 대한 이와 같은 상황 인식 아래 진행된 이번 연구과제는, 현행 산정과정에 적용 중인 IPCC GPG 2003에 대한 전면적인 재번역 및 주해작업을 우선적으로 실시하였고, 일본·호주·캐나다 등 주요 국가들의 산정 현황과 관련 국내 통계조사 및 연구자료들에 대한 수집·비교·검토과정을 거쳤으며, 최종적으로 실무 적용이 가능한 수준에서 부문별 최종 개선방안을 제시하고자 하였다.

결론적으로 연구과제 수행과정에서 도출된 농경지 부문에 대한 주요 개선사항들을 정리하면, 무기토양 탄소축적변화량 기본계수(SOC_{REF})에 적용 중인 기존 기후형에 대한 오류 수정, 농업용 석회시비 과정에서 발생하는 CO₂ 배출량에 적용되는 백운석 기본 배출계수 수정·석회고토 비료 분상형 및 입상형 구분·석회비료 종류별 탄산염 순도 적용·배출원 및 배출량 산정식 등에 대한 MRV 관련 지침 수정, 무기토양 축적 변화계수인 F_{LU}(토지이용 축적변화계수)·F_{MG}(관리방법 축적변화계수)·F_I(유기물 투입 축적변화계수) 값들에 대한 세분 산정 등을 제안하였으며, 농경지 세부 부문 중에 그 동안 인벤토리 산정에서 제외하고 있던 과수 등 다년생 목질 바이오매스 탄소축적량 산정방안 등도 제시하였다.

127) IPCC는 국가 인벤토리 산정과정에서 준수해야 할 5대 원칙(TACCC)으로 투명성(Transparency), 정확성(Accuracy), 완전성(Completeness) 일관성(Consistency), 비교 가능성(Comparability)을 제시하고 있다.



〈표 1-56〉 농경지 부문 온실가스 인벤토리 주요 개선방안

구분	개선 방안							
습도형 구분 및 SOC _{REF} 적용	■ GPG 2003 습도형 선정 기준, 주요 외국 사례, 국내 기후대 연평균 MAP/PET 관측 자료 비율(전국 평균 1.476) 등을 고려하여, SOC _{REF} 값은 온대 습윤형 단일 값 적용							
	현행 적용 값				개선 적용 값			
	기후형	LAC 토양	사질 토양	화산 회토	기후형	LAC 토양	사질 토양	화산 회토
	난온대 건조(겨울)	24	19	70	난온대 습윤	63	34	80
난온대 습윤(봄, 여름, 가을)	63	34	80					
농업용 석회시비 CO ₂ 배출량 산정	■ 백운석 기본 배출계수 수정 - GPG 2003에서 기본 배출계수 산정식(분자량 이용) 오류를 수정 적용(1안) - 1안 백운석 수정 값을 산업공정 백운석 소비부문과 통일 적용(2안)							
	현행 적용 값 (톤 C/톤 탄산염)		개선 적용 값(1안) (톤 C/톤 탄산염)		개선 적용 값(2안) (톤 CO ₂ /톤 탄산염)			
	석회석	백운석	석회석	백운석	석회석	백운석		
	0.12	0.122	0.12	0.13	0.440	0.477		
	■ 탄산염 순도 적용 - 석회고토 비료 분상형/입상형 구분 적용, 석회고토 및 패화석 비료 순도 적용							
	구분	CaMg(CO ₃) ₂ (순도 100%)	석회고토 비료		CaCO ₃ (순도 100%)	패화석 비료		
			분상형	입상형				
	알카리분	60.8	53	51	56.1	40		
	가용성 고토(MgO)	21.9	15	14	-	-		
	산화칼슘(CaO)	30.4	32	31.5	56.1	40		
순도[MgO+CaO 비율]	100.0	89.9	87.0	100.0	71.3			
■ 배출량 산정식 등 MRV 지침 변경								
구분	변경 이전			변경 이후				
배출원	CaCO ₃			CaCO ₃ , CaMg(CO ₃) ₂				
배출계수	CaCO ₃ 12%			CaCO ₃ 12%, CaMg(CO ₃) ₂ 13%				
산정식	$\Delta C_{\text{Fertilizer}} = F_{\text{Lime}} \times CF_{\text{Lime}}$			$C_{\text{ccLime}} = [(M_{\text{Limestone}} \times P_1 \times EF_{\text{Limestone}}) + (M_{\text{Dolomite}} \times P_2 \times EF_{\text{Dolomite}})] \times 44/12$				
활동자료	석회 시용량			탄산기(CO ₃)를 가진 석회질 비료 시용량을 입상형과 분상형으로 구분				

〈표 1-56〉 농경지 부문 온실가스 인벤토리 주요 개선방안(계속)

구분	개선 방안		
	■ F _{LU} (토지이용 축적변화계수) - 과수원 등 다년생 작물 재배지에 대한 GPG 2003의 계수 유형 누락은 IPCC 2006 GL 규정에 맞춰 1.0 값을 대체 적용 - 휴경 농경지 구분 적용, 휴경 비율은 논 0.6%, 밭 2.4% 적용		
	구분	변경 이전	변경 이후
	다년생 작물 재배지	일년생 밭작물 재배지 계수 값 적용	2006 GL 다년생 작물 재배지 계수 값 적용
	휴경 농경지	미적용	구분 적용
무기토양 축적 변화계수 적용	■ F _{MG} (관리방법 축적변화계수) - 논벼 및 밭농사 경운·정지 기계화율을 구분 적용, 과수원은 무경운형 적용		
	구분	변경 이전	변경 이후
	논	1990년부터 2011년 까지 전체 농경지 면적에 대해 기계 영농 100%를 적용 (전면 경운형)	전면 경운형 × 벼농사 경운·정지 기계화율 × 논 면적 + 감소 경운형 × (1 - 벼농사 경운·정지 기계화율) × 논 면적
	일반밭		전면 경운형 × 밭농사 경운·정지 기계화율 × 일반 밭 면적 + 감소 경운형 × (1 - 밭농사 경운·정지 기계화율) × 일반 밭 면적
과수원	과수원 면적에 무경운형 적용(과수원 면적은 밭 면적에서 총조사 등 비율 자료를 이용)		
	■ F _I (유기물 투입 축적변화계수) - 농작물 종류별 중간형, 높음형(분뇨 미사용), 낮음형을 구분 적용		
	변경 이전	변경 이후	
	1990년부터 2011년 까지 전체 농경지 면적에 대해 곡물류 100%를 적용 (중간형)	미곡(11000, 논벼·밭벼), 맥류(12000, 겉보리·맥주보리·쌀보리·밀)는 중간형 적용	사료작물(72109), 기타작물(79900, 녹비 등), 휴경지(93211)는 높음형 (분뇨 미사용) 적용
다년생 목질 바이오매스 탄소축적량 산정	■ 과종별 국가 고유 평균 수령(2007 과수실태조사), 성목 도달 수령(임가경제조사 자원 평가방법 개발 연구자료) 자료와 IPCC 연간 축적량 기본 값(2.1 톤 C/ha/year) 자료를 적용하여 산정 - 과종별 성목기간 바이오매스와 성장기간 바이오매스를 구분 계산한 뒤 합산하여 산정		



2. 결어

농경지 부문 탄소 축적량 산정 개선방안 연구과제는 2013년에 실시한 국가 온실가스 인벤토리 검증과정에서 농경지 부문 증장기 개선과제로 도출된 사항들에 대한 해결책을 강구하는 방편으로 추진하였다. 물론, 과제 수행기간이 2014년 상반기(3~8월)에 걸친 단기 연구과제 성격으로 진행되어, 보다 많은 부분들을 포괄하지 못한 한계는 있으나, 국내외 관련 기초자료들을 가능한 충실하게 수집·검토하여 개선방안을 도출하고자 하였으며, 이를 통해 향후 주관기관을 중심으로 진행될 증장기 개선과제 추진 과정에서 시사점과 방향성을 제시하고, 실무적용을 위한 단초 역할을 수행할 것을 기대한다.

끝으로, 기초연구 진행과정에서 살펴본 외국 사례를 참고하여 덧붙이면, 농경지 세부 부문을 포함한 LULUCF 부문은 인벤토리 산정을 위한 완전성 차원보다는 효율성 차원에서 접근하는 경향이 짙다는 것이다. 즉, 토지 이·전용 행렬 작성과 관련하여, 주요 배출원·흡수원 이외 부문인 초지, 습지, 정주지, 기타 토지 등은 산정에서 제외하거나(NE, NO, NA), 다른 부문과 포괄 산정(IE)하는 사례들이 많았으며, 다년생 목질 바이오매스 축적량 및 손실량 산정과 관련하여, 연간 축적 증가량을 '0'으로 산정한 사례(일본, 캐나다), GPG 2003이 제공한 기본 축적량·손실량을 적용한 사례(호주), 연간 축적량 산정과정에 관련 외국자료를 사용한 사례(캐나다) 등도 동일선상에서 접근한 것으로 판단된다. 주요 국가들의 이와 같은 작성 사례는 국가 전체 인벤토리에서 차지하는 부문별 기여 수준을 고려하여 산정방법을 차별화한 것으로 볼 수 있으며, 국내에서도 관련 부문 개선·개발 작업 등에 있어, 시사하는 바가 큰 것으로 판단된다. 즉, 전체 온실가스 배출량·흡수량에 대한 농경지 부문의 낮은 기여 수준을 고려하여,¹²⁸⁾ 향후 추진이 예상되는 농경지 인벤토리 부문 활동자료 및 배출계수·각종 매개변수 개발작업 중 핵심 부문에 대한 개선·개발 작업은 신규 조사·관측·측정 등을 기초로 추진하되, 기여도가 낮은 부문은 IPCC GL이 권고한 기본계수·매개변수 값 적용, 대내외 연구자료 등에 기초한 모형화기법(modeling) 적용 등으로 대처하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 또한, 활동자료 등 개선·개발 작업과정에 신규 통계조사 등이 필요한 경우에도, 조사부담 및 응답부담까지 고려하여, 가능한 전수조사(농림어업총조사 등)와 대표본조사(농림어업조사 등)는 피하고, 소표본조사 또는 각종 행정자료를 중심으로 접근하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

128) 2013년에 환경부가 발표한 국가 온실가스 배출통계에서, 전체 배출량 697.7백만톤 CO₂ 중 농업 부문은 22.0백만톤 CO₂(3.2%)로 나타났으며, 흡수원 평가에서 LULUCF 전체 흡수량 43.0백만톤 CO₂ 중 농업 부문은 4.0백만톤 CO₂(9.7%)로 나타나, 농업 부문 흡수원은 전체 배출량과 비교하여 0.6% 수준에 불과한 것을 확인할 수 있다. 즉, 국가 전체 배출량과 비교하면, 통합 산정한 농업 부문은 배출량 기준 3.2%, 흡수량 기준 0.6% 수준에서 기여하고 있는 것으로 파악되었다.

<참고 문헌>

- 통계청 농림어업총조사 홈페이지(<http://www.lib.rda.go.kr/newlib/dicN/dictSearch.asp>).
- 농촌진흥청 디지털농업용어사전 3.1 홈페이지(<http://www.lib.rda.go.kr/newlib/dicN/dictSearch.asp>).
- 산림청 산림용어사전(<http://www.forest.go.kr/>)
- FAO(2003), 「Definitions Related to Planted Forests」. Forest Resources Assessment Programme Working Paper 79
- 산림청, 한국임정연구회(2001), 「임가경제조사 자원평가방법 개발」.
- 이동근(2013), “2006 IPCC 가이드라인 이행방안 연구(IPPU 중 광물산업)”, 연구보고서
- FAO(2005), 「World Programme for the Census of Agriculture 2010」
- Future Agricultures Consortium(2013), 「Plantation, Contract Farming and Commercial Farming in Africa」. Working Paper 55
- 기상청 기후변화전망센터(2012), 「시도별 기후변화 전망보고서」.
- 농림축산식품부(1999), “1998 농기계 이용수지 및 농업 기계화율 조사결과”.
- 농촌경제연구원(2011), 「농업기계 관리제도 도입을 통한 효율적 운영 방안」.
- 농림축산식품부(2005), 「농림업 주요 통계」.
- 농림축산식품부(2008, 2013), 「농림수산물 주요 통계」.
- 온실가스종합정보센터(2014), 「2014년도 국가 온실가스 통계 산정·검증·보고 지침」.
- 온실가스종합정보센터(2014), 「2013년 국가 온실가스 인벤토리 보고서」.
- Ministry of the Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan(2005), 「Japanese Agricultural Standard of Organic Agricultural Products」.
- IPCC(1996), 「The Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories」.
- IPCC(2001), 「Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories」.
- IPCC(2003), 「Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry」.
- IPCC(2007), 「2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories」.
- Ministry of the Environment, Japan(2010), 「National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan」.
- Environment Canada(2013), 「National Inventory Report Greenhouse Gas sources and Sinks in Canada 1990-2011」.
- Environment Canada(2013), 「Australian National Greenhouse Accounts, National Inventory Report 2011」.