

## 2019 개선된 IPCC 가이드라인에 따른 농업분야 재배(경종)부문의 배출량 산정방법 개선연구

최은정\*† · 김건엽\* · 이선일\* · 이종식\*\* · 윤지혜\*\*\* · 권효숙\*\*\*\*

\*국립농업과학원 기후변화평가과 농업연구사, \*\*국립농업과학원 기후변화평가과 농업연구관,  
\*\*\*국립농업과학원 기후변화평가과 연구원, \*\*\*\*국립농업과학원 기후변화평가과 박사후연구원

### Estimation of Greenhouse Gases Emission from the Crop Cultivation Session of Agricultural Sector according to 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines

Choi, Eunjung\*† · Kim, Gunyeob\* · Lee, Sun-il\* · Lee, Jongsik\*\* · Yoon, Ji-hye\*\*\* and Gwon, HyoSuk\*\*\*\*

\*Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea  
\*\*Senior Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea  
\*\*\*Assistant, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea  
\*\*\*\*Post Doctor, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

#### ABSTRACT

Accurate estimation of national greenhouse gas (GHG) emissions is very important for mitigation action of climate change. The IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) guidelines have been used for calculating emissions from the energy, industrial processes, agriculture, and LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry), and waste sectors in national country. Assessment of national GHG emissions from the agriculture sector has been conducted using the 2000 Good Practice Guidance and 2006 IPCC Guidelines. In 2019, refined guidelines, such as the 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines were published. We conducted to this study to investigate application of the new guidelines which including calculation equation, emission factor, fractions and so on to compare of the old one.

Some emission factors and fractions were changed to disaggregated ones considering climate zone and fertilizer type. Also, the default cultivation period of rice was provided for the first time in the guideline and that was 112 days in the East Asia region. The nitrous oxide emission factor for flooded rice fields was changed from 0.003 to 0.005 kg N<sub>2</sub>O-N (kg N)<sup>-1</sup> when applied to single and multiple drainage of rice paddies. In addition to fraction of N loss through leaching and runoff, fraction of synthetic fertilizer N and organic N fertilizer that volatilize as NH<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> were changed. When the changed parameters including emission factors, were applied to estimation of national GHG inventory of the agricultural sector, total emissions were reduced by 1,132 Gg CO<sub>2</sub>-eq.

**Key words:** 2019 Refinement Guidelines, IPCC Guidelines, Agricultural Sector, Emission Factor

†Corresponding author : [choiej1@korea.kr](mailto:choiej1@korea.kr) (55365, 166 Nongsangmyeong-ro, Wanju, Jeollabuk-do, Republic of Korea. Tel. +82-63-238-2486) ORCID 최은정 0000-0001-9535-612X 이종식 0000-0002-9101-6811  
김건엽 0000-0001-8346-895X 윤지혜 0000-0003-2499-6917  
이선일 0000-0002-0519-3150 권효숙 0000-0003-4030-1134

## 1. 서론

파리협정 이후 온실가스 감축을 위해 전 세계가 동참하는 가운데, 온실가스 인벤토리(inventory) 통계에 대한 중요성이 높아지고 있다. 우리나라는 2010년부터 ‘저탄소 녹색성장 기본법’을 시행하며, 국가 온실가스 인벤토리의 체계적 작성과 투명성 및 정확도 향상을 위해 지속적으로 노력하고 있다(온실가스종합정보센터, 2019). 그 일환으로 2019년에는 제 4차 국가보고서(NC; National Communication)와 제 3차 격년갱신보고서(BUR; Biennial Update Report)를 국제사회에 제출함으로써 기후변화 완화를 위한 우리의 노력과 성과를 보여주기도 하였다.

유엔기후변화협약 제 24차 당사국총회(COP24)를 통해 개도국을 포함한 모든 국가가 2년마다 격년투명성보고서(BTR; Biennial Transparency Report)와 국가인벤토리보고서(NIR; National Inventory Report)의 제출을 의무화하고 온실가스 배출량 산정 방법 기준을 2006 IPCC 가이드라인으로 하는 것에 합의하였다(UNFCCC, 2018). 그러므로 배출량 산정 근거가 되는 가이드라인을 정확하게 파악하는 것은 배출량 산정에 있어서 매우 중요한 의미를 갖는다.

IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change; 기후변화에 관한 정부 간 협의체)는 기후변화에 관한 과학적 근거, 영향 및 위험 등에 대한 종합적인 평가보고서와 특별보고서, 온실가스 산정에 관한 방법론 보고서 등을 발간한다. 온실가스 산정 방법론 보고서는 1996, 2006년에 발간되었으며 최근에는 2019년에 「개선된 2006 IPCC 가이드라인(2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 이하 2019 GL)」을 발간하였다. 2006 가이드라인(이하 2006 GL)은 십년 간 축적된 수많은 온실가스 연구 결과들이 반영되어 배출 분야 카테고리, 산정식, 산정계수 등 많은 부분에서 1996 가이드라인과 구별되지만, 2019 GL은 제목에서도 알 수 있듯 2006 GL을 근간으로 일부 개선된 사항만 반영되었으므로 큰 범위에서는 2006 GL이라 볼 수도 있다. 미국, 일본, EU, 뉴질랜드 등 선진국이 포함된 부속서 I 국가들 대부분은 2006 GL이 적용된 국가 보고서를 국제사회에 제출하고 있으며, 배출량 산정을 시작한 일부 개발도상국들도 2006 GL을 적용하여 산정하고 있다(UNFCCC, 2020). 따라서 2006과 2019 가이드라인의 비교를 통해 배출량 산정에서 개선된 부분을 확인하고 산정에 필요한 활동자료 등을 준비할 필요가 있다.

2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서(온실가스종합정보센터, 2019)에 따르면 농업분야는 국가 온실가스 배출량의 약 3%를 차지하지만, 메탄(CH<sub>4</sub>) 총 배출량의 43.9%, 아산화질

소(N<sub>2</sub>O) 총 배출량의 62.3%로 비중이 가장 크다. 따라서 비(非)이산화탄소 감축에 있어 농업분야의 역할이 매우 중요하며, 이에 따라 정확한 배출량 산정이 선행되어야 할 것이다. 본 연구는 2019 GL 중 농업분야 재배(경종)부문의 배출원별 배출계수, 매개변수, 산정식뿐만 아니라 2006 GL과 비교하여 추가되거나 삭제된 배출·흡수원, 산정방법 부연 설명 등을 분석하고, 변경된 내용 적용 시 국내 농업분야 온실가스 배출량에 어떠한 영향을 미치는지 알아보고자 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 2006 및 2019 IPCC 가이드라인 비교

개선사항을 명확하게 설명하기 위해 2006 GL의 배출원 분류에 따라 Tier 1 수준의 배출량 계산식과 계수를 비교하였다. 2019 GL의 Mapping tables 자료를 기반으로 추가되거나 개선된 내용을 확인하고, 해당 내용을 2006 GL과 직접 비교하는 방식으로 연구를 수행하였다(IPCC, 2006; IPCC, 2019). 2006 GL에서 신규 추가되거나 삭제된 배출원은 2019 GL을 기준으로 설명하였고, 우리나라에서 발생되지 않거나 발생되더라도 배출량이 매우 적어 산정에서 포함되지 않은 배출원에 대해서는 제외하였다.

개선된 산정식과 배출계수 적용에 따른 배출량 비교에서는 국가고유계수가 개발·등록된 배출원은 Tier 1 수준의 배출계수 기본값(default)이 변경됐다 하더라도 Tier 2 수준으로 산정하기 때문에 배출량 비교에서 제외하였다. 그 밖의 매개변수나 작물 재배일수 등이 변경된 배출원은 현재 산정 수준에서 변경된 내용을 적용하여 배출량을 비교하였다.

### 2.2 온실가스 배출량 산정

개선된 가이드라인 적용에 따른 온실가스 배출량 비교를 위해 활동자료는 「2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서(2019)」와 동일한 자료를 사용하였다. 벼 재배 부분 배출량 산정을 위해 작물별 재배면적, 작물 생산량 등은 농림축산식품부의 2018 농림축산식품통계연보를 참고하였고, 유기물 시용 및 작기 중 물관리 면적 산출하기 위해 2010 농림어업총조사와 2011~2017 농림어업조사 자료를 참고하였다. 2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서에 포함되지 않은 작기 전 물관리 면적 활동자료는 작기 중 면적과 동일한 출처인 2010 농림어업총조사와 2011~2017 농림어업조사 자료를 참고하였다. 농경지토양에 투입되는 작물별 화학비

료 사용량은 통계청 국가통계포털(<https://kosis.kr>)사이트의 농산물생산비조사와 한국 비료공업협회의 비료연감(2018), 농촌진흥청 국립농업과학원의 작물별 비료사용처방(2019)을 활용하였다. 농경지에 투입되는 가축분뇨 질소량 산정을 위해 통계청의 가축동향조사, 축산물이력제, 2018 농림축산식품통계연보를 활용하였다. 그리고 요소 및 석회 시용에 따른 이산화탄소 배출량을 산정하기 위해 석회비료 사용량은 농협중앙회의 비료사용 통계요람(2018)을 활용하였고, 요소비료 사용량은 2018 농림축산식품통계연보의 요소 비료 사용량을 활용하였다.

### 3. 결과

#### 3.1 2006 및 2019 IPCC 가이드라인 비교

##### 3.1.1 벼 재배

벼 재배 부분 배출량 산정을 위해서는 상시답수 유기물 무시용 조건의 메탄 기본 배출계수에 유기물 사용량 및 종류에 따른 보정계수, 작기전·작기중 물관리 보정계수, 토성 및 벼 품종에 따른 보정계수가 필요하다. 개선된 가이드라인에서는 각 국의 다양한 재배환경을 배출량 산정에 반영하기 위해 일일 메탄 배출계수의 산정 수준을 구분하고, 일일 메탄 배출계수 산출을 위한 물관리 보정계수가 세분화되고 수치가 변경되었다. 또한, 기존 2006 GL에서의 일일 메탄 배출계수는 토성과 벼 품종에 관한 보정계수 적용이 선택 사항이었으나, 2019 GL의 Tier 2 수준에서는 토성과 벼 품종에 관한 보정계수의 적용을 권고하고 있다(Table 1).

또한, Tier 1 수준의 메탄 기본 배출계수와 벼 재배일수를 국가 또는 지역단위로 구분하여 default 값을 적용하는 국가들의 배출량도 재배 환경이나 기후를 반영할 수 있도록 세분화 및 추가하였다.

##### ① 메탄 기본 배출계수

2006 GL에서 제시된 메탄 기본 배출계수 default값이 1.30 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> 인데 반해, 2019에서 제시하고 있는 통합 국가 단위 계수는 1.19 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> 이므로 2019 GL 적용 시 Tier 1 수준으로 산정하는 국가들의 배출량이 감소될 것으로 판단된다(IPCC, 2006; IPCC, 2019). 지역별로 세분화했을 때 동아시아 지역의 메탄 기본 배출계수 default값이 0.85 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, 북아메리카 지역이 0.65 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> 로 다른 지역보다 상대적으로 낮으므로 국가계수는 부재하나 활동자료가 있는 이 지역의 국가들은 Tier 1 수준으로 산정했을 때 벼 재배에 따른 메탄 배출량이 상당히 감소될 것으로 예측된다(Table 2).

현재, 우리나라는 메탄 기본배출계수, 작기 전·작기 중 물관리 보정계수, 유기물 사용 보정계수가 국가고유계수로 등록된 상태로 일일 메탄 배출계수를 Tier 2 수준으로 산출하고 있으나, 2019 GL 적용을 위해서는 토성과 품종에 관한 국가 보정계수가 필요할 것이다.

##### ② 작기 전 물관리 보정계수

2006 GL에서의 작기 전 물관리 보정계수는 3가지로 구분된다. 1) 이앙 전 180일 미만 비답수(SF<sub>p</sub>=1.00), 2) 이앙 전 180일 이상 비답수(SF<sub>p</sub>=0.89), 3) 이앙 전 30일 이상 답수(SF<sub>p</sub>=2.41)의 보정계수 default값을 각각 제시하고 있으

Table 1. Comparison of equation 5.2 which adjusted daily emission factor from 2006 and 2019 IPCC guideline

Equation 5.2	
2006 IPCC Guideline	2019 IPCC Guideline
$EF_i = EF_c \cdot SF_w \cdot SF_p \cdot SF_o \cdot SF_{s,r}$	$EF_i = EF_c \cdot SF_w \cdot SF_p \cdot SF_o \text{ (Tier 1)}$
	$EF_i = EF_c \cdot SF_w \cdot SF_p \cdot SF_o \cdot SF_s \cdot SF_r \text{ (Tier 2)}$
EF <sub>i</sub> : Adjusted daily emission factor for a particular harvested area (kg CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) EF <sub>c</sub> : Baseline emission factor for continuously flooded fields without organic amendments SF <sub>w</sub> : Scaling factor to account for the differences in water regime during the cultivation period SF <sub>p</sub> : Scaling factor to account for the differences in water regime in the pre-season before the cultivation period SF <sub>o</sub> : Scaling factor should vary for both type and amount of organic amendment applied SF <sub>s,r</sub> : Scaling factor for soil type, rice cultivar, etc., if available	SF <sub>s</sub> : Scaling factor for soil type SF <sub>r</sub> : Scaling factor for rice cultivar

(Source: 2006 IPCC guideline Equation 5.2, 2019 IPCC guideline Equation 5.2, 5.2A)

Table 2. Default CH<sub>4</sub> baseline emission factor assuming no flooding for less than 180 days prior to rice cultivation, and continuously flooded during rice cultivation without organic amendments

World		Regional		
Emission factor (kg CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	Error range (kg CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	Region	Emission factor (kg CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	Error range (kg CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
1.19	0.80-1.76	Africa	1.19	0.80-1.76
		East Asia	1.32	0.89-1.96
		Southeast Asia	1.22	0.83-1.81
		South Asia	0.85	0.58-1.26
		Europe	1.56	1.06-2.31
		North America	0.65	0.44-0.96
		South America	1.27	0.86-1.88

(Source: 2019 IPCC guideline Table 5.11(Updated))

며, 이양 전 30일 미만 답수는 보정계수에 고려하지 않는다(IPCC, 2006). 그러나 2019 GL은 작기 전 물관리 보정계수를 4가지로 구분하고 있는데, 1~3번은 기존과 동일하나 이양 전 365일 이상 비답수(SFp=0.59) 항목이 추가되었다(IPCC, 2019). 연작에 따른 병해충 발생 등의 문제로 윤작을 시행하거나 논에서 발작물을 재배하는 방식을 고려하여 물관리 방법이 추가된 것으로 판단된다. 지금까지는 당해 연도의 논과 밭면적으로 통계가 공표되거나 앞으로 전년도 작물 재배에 대한 농경지 활용 이력까지 조사된다면, 보다 정확한 배출량이 산정될 수 있을 것이다.

### ③ 벼 재배일수 및 유기물 사용 보정계수

벼 재배 부문 국가 배출량 산정에 사용 되는 재배일수는 138일이며, 이는 우리나라에서 재배되는 벼 품종별 재배일수를 재배면적으로 가중 평균하여 산출된 값이다(Choi et al., 2013). 2019 GL에 제시된 벼 재배기간은 113일로 그 동안의 가이드라인에서는 볼 수 없었던 새로 추가된 내용이다. 우리가 적용하는 재배일수보다 25일 적고, 국가별로 세분화된 재배일수를 비교했을 때 우리나라가 속한 동아시아 국가는 112일로 26일 적었다.

유기물 사용 보정계수(SF<sub>o</sub>)는 유기물 종류 및 투입 방법에 따른 전환계수를 먼저 선택한 뒤 유기물 투입량을 곱하여 산출된다(식 1). 이 중 볏짚 사용 시기에 따른 전환계수 기본값 일부가 2006 GL과 비교하여 변경되었는데, 「벼 이양 30일 이상 전 볏짚 사용」 전환계수 기본값이 0.29에서 0.19로 감소되어, 볏짚 투입량 6 ton ha<sup>-1</sup>을 기준으로 볏짚 사용 유기물 보정계수가 1.81에서 1.57로 변경되었다.

$$SF_o = (1 + \sum_i ROA_i \times CFOA_i)^{0.59} \quad (1)$$

SF<sub>o</sub> : 유기물 종류 및 투입량에 따른 보정계수

ROA<sub>i</sub> : 유기물 투입량, 볏짚은 건중량, 그 밖의 유기물은 생중량, ton ha<sup>-1</sup>

CFOA<sub>i</sub> : 유기물 전환계수(볶짚 사용 시기별 2종, 퇴비, 축분)

그러나 「벼 이양 30일 이상 전 볏짚 사용」 전환계수와 동일한 내용의 「볶짚 가을사용 및 가을 경운」 전환계수가 국가 고유계수로 2019년에 등록되어, 우리나라는 2019 GL의 변경 내용에 영향 없이 국가 온실가스를 산정할 것으로 판단된다.

### 3.1.2 농경지토양

농경지토양은 직접 배출과 간접 배출로 나누어 산정된다. 직접 배출량 산정을 위해서는 각각 논과 밭의 질소원(화학비료, 유기물 등)별 아산화질소 배출계수와 방목 가축의 분뇨 투입에 의한 배출계수가 필요하고, 간접 배출량 산정에는 대기 휘산 및 수계 유출에 의한 아산화질소 배출계수가 필요하다. 2019 GL에서는 직·간접 배출 산정식의 큰 변화 없이 적용 계수들이 2006 GL과 비교하여 세분화되었다. 관리된 토양에서의 아산화질소는 투입되는 질소 종류 및 특성 뿐만 아니라 환경 인자(기후, 토양 내 유기 탄소 함량, 토성, 토양 pH, 토양 투수성 등)에 의해서도 배출되는 정도가 다르다. 2019 GL에서는 크게 기후대와 비료의 특성에 따라 기본 아산화질소 배출계수를 구분하였다. 기후대는 습윤기후와 건조기후로 나뉘는데, 이는 강수량이 토양 수분함량과 밀접하게 관련되어 아산화질소 배출량에 영향을 주기 때문이다.

우리나라는 가이드라인에서 제시한 습윤기후(wet climates, 북쪽 온대지역에서 발생하며 연간 강수량 대 절대 증발산의 비율이 1 이상인 기후)와 가깝기 때문에, default 값을 적용하는 계수들 일부가 변경되어 배출량 산정에 영향을 받을 것이다.

① 직접 배출

관리된 토양에서의 직접 아산화질소 배출량 Tier 1 산정식은 2006 GL과 동일하나, 2019 GL에서는 Tier 2 수준의 산정 시 환경 인자와 재배 관리 관련 인자들을 고려한 구체적 계수 적용을 제안하고 있다. 위에서 언급한 환경 인자뿐만 아니라 재배 관리와 관련된 비료 특성별 질소 투입량, 유기 비료 형태(고형 또는 액상), 물 관리 등 다양한 상황별 배출계수 적용을 제안하고 있어 이에 대한 준비가 필요할 것으로 생각된다.

화학비료, 유기물, 작물 잔사 등의 질소 투입에 따른 배출계수(EF<sub>1</sub>)는 통합 계수 적용 시 0.010 kg N<sub>2</sub>O-N(kg N)<sup>-1</sup>으로 2006 GL과 동일하다. 그러나 기후대별로 세분화하였을 때, 습윤기후에서 화학비료 투입에 따른 배출 계수는 0.016, 습윤기후에서 그 외 질소 투입에 따른 배출계수는 0.006, 건조기후에서 모든 질소 투입에 따른 배출계수는 0.005 kg N<sub>2</sub>O-N(kg N)<sup>-1</sup>로 구분하고 있다(Table 3). 또한, 벼 재배를 위한 담수된 논에서의 통합 기본계수는 0.003에서 0.004 kg N<sub>2</sub>O-N(kg N)<sup>-1</sup>로 증가하였으며, 이를 물 관리별로 세분화하여 상시담수는 0.003, 중간낙수 1회 이상 논은 0.005 kg N<sub>2</sub>O-N(kg N)<sup>-1</sup>로 제시하고 있다.

마지막으로 농경지 아산화질소 배출량 산정과 관련된 질소 투입원 중 작물 잔사 환원에 따른 연간 질소 투입량 (F<sub>CR</sub>) 산정식과 매개변수가 개선되었다. 질소 투입량(F<sub>CR</sub>)은 작물잔사에 의해 토양으로 투입되는 질소량으로 지상부와 지하부를 모두 포함하는데, 기존 가이드라인에서 Tier 1 수준으로 F<sub>CR</sub>을 산정하기 위해서는 지상부 잔사 건물비율(R<sub>AG(T)</sub>)이 필요하다. 2006 GL에서는 R<sub>AG(T)</sub>이 없는 국가나 지역을 고려하여 대안으로 사용할 수 있는 대체식을 제시해준 반면, 2019 GL에서는 기본 R<sub>AG(T)</sub> 값이 제공되어 산정식을 단순화시켰다. 또한 FCR 산정을 위해 필요한 작물별 매개변수 중 특성이 비슷한 작물들을 하나로 통합하여 매개변수 목록을 개선하였다. 그러나 질소 투입량 산정식은 변경되었으나, 계산에 필요한 계수나 매개변수의 default값이 수정된 것은 아니기 때문에 아산화질소 배출량에 큰 영향을 미치지 않았다.

② 간접 배출

간접 배출량은 대기 휘산에 의한 배출과 수계유출에 의한 배출로 나뉘는데, 이들 배출량 산정에 필요한 배출계수 및 매개변수 default 값이 변경되고 세분화되었다. 먼저 대기 휘산에 의한 간접 배출량을 산정하기 위해서는 화학비료 투입에 의한 질소 휘산 비율(Frac<sub>GAS(F)</sub>)과 유기물 투입에 의한 질소 휘산 비율(Frac<sub>GAS(M)</sub>), 대기 휘산에 의한 아산화질소 배출계수(EF<sub>4</sub>)가 필요하다(식 2).

Table 3. Default emission factors to estimate direct N<sub>2</sub>O emissions from managed soils

Emission factor	Aggregated		Disaggregated		
	Default value	Uncertainty range	Disaggregation	Default value	Uncertainty range
EF <sub>1</sub> for N additions from synthetic fertilisers, organic amendments and crop residues, and N mineralised from mineral soil as a result of loss of soil carbon [kg N <sub>2</sub> O-N(kg N) <sup>-1</sup> ]	0.010	0.001-0.018	Synthetic fertiliser inputs in wet climates	0.016	0.013-0.019
			Other N inputs in wet climates	0.006	0.001-0.011
			All N inputs in dry climates	0.005	0.000-0.011
EF <sub>1FR</sub> for flooded rice fields [kg N <sub>2</sub> O-N(kg N) <sup>-1</sup> ]	0.004	0.000-0.029	Continuous flooding	0.003	0.000-0.010
			Single and multiple drainage	0.005	0.000-0.016
EF <sub>3PRP, CPP</sub> for cattle(dairy, non-dairy and buffalo), poultry and pigs [kg N <sub>2</sub> O-N(kg N) <sup>-1</sup> ]	0.004	0.000-0.014	Wet climates	0.006	0.000-0.026
			Dry climates	0.002	0.000-0.006
EF <sub>3PRP, SO</sub> for sheep and 'other animals' [kg N <sub>2</sub> O-N(kg N) <sup>-1</sup> ]	0.003	0.000-0.010	-	-	-

(Source: 2019 IPCC guideline Table 11.1(Updated))

$$N_2O_{(ATD)} - N = [(F_{SN} \times Frac_{GASF}) + ((F_{ON} + F_{PRP}) \times Frac_{GASM})] \times EF_4 \quad (2)$$

$N_2O_{(ATD)}-N$  : 대기 휘산에 의한 연간 배출량, kg  $N_2O-N$  yr<sup>-1</sup>  
 $F_{SN}$  : 연간 화학비료 농경지 투입량, kg N yr<sup>-1</sup>  
 $Frac_{GASF}$  : 화학비료 내 질소 중 농경지 사용 시 대기로 휘산되는  $NH_3$ ,  $NO_x$  비율, kg N 휘산량(kg N 사용량)<sup>-1</sup>  
 $F_{ON}$  : 연간 방목 가축에 의해 투입되는 질소를 제외하고 농경지토양에 투입되는 유기질 비료량, kg N yr<sup>-1</sup>  
 $F_{PRP}$  : 연간 방목 가축의 분뇨로 목초지, 방목지, 들판에 투입되는 질소량, kg N yr<sup>-1</sup>  
 $Frac_{GASM}$  : 농경지토양에 투입되는 유기질 비료 질소량 ( $F_{ON}$ )과 방목 가축의 분뇨 질소량( $F_{PRP}$ ) 중 농경지 사용 시 대기로 휘산되는  $NH_3$ ,  $NO_x$  비율, kg N 휘산량(kg N 사용량 혹은 방치량)<sup>-1</sup>  
 $EF_4$  : 토양 및 수계면에서 대기 휘산에 의한 배출계수, kg  $N-N_2O$ (kg  $NH_3-N+NO_x-N$  휘산량)<sup>-1</sup>

2019 GL은  $EF_4$ 의 default 값을 습윤기후와 건조기후로

세분화하였는데, 습윤기후의 배출계수는 0.014, 건조기후에서는 0.005 kg  $N-N_2O$ (kg  $NH_3-N+NO_x-N$  휘산량)<sup>-1</sup> 로 2006 GL default 값인 0.010 kg  $N-N_2O$ (kg  $NH_3-N+NO_x-N$  휘산량)<sup>-1</sup>과 다소 차이가 있다. 그리고 화학비료에 의해 대기로 휘산되는 비율( $Frac_{GASF}$ )을 0.10에서 0.11(통합)로, 유기질 비료에 의해 대기로 휘산되는 비율( $Frac_{GASM}$ )을 0.20에서 0.21로 변경하였다. 뿐만 아니라  $Frac_{GASF}$ 의 default 값을 사용하는 화학비료 성분에 따라 구분하여, 화학비료 사용에 따른 대기 휘산량의 산정 정확도를 향상시켰다 (Table 4).

수계 유출에 의한 아산화질소 배출량 산정식은 식 (3)과 같으며, 수계 유출에 의한 아산화질소 배출계수( $EF_5$ )가 0.075에서 0.011 kg  $N-N_2O$ (kg 수계유출량)<sup>-1</sup>로 변경되었다. 또한, 질소 투입에 따른 수계 유출 비율( $Frac_{LEACH-(H)}$ )은 0.30에서 0.24로 변경되면서 적용 범위가 습윤 기후대로 한정되었다. 대기 휘산에 의한 아산화질소 배출량은 강수량 및 증발산량에 영향을 받으므로 기후대별로 배출계수가 구분되었지만(Albanito et al., 2017; Rochette et al., 2018), 수계 유출에 의한 아산화질소 배출량은 기후대

Table 4. Comparison of default emission, volatilization and leaching factors for indirect soil  $N_2O$  emissions from 2006 and 2019 IPCC guideline

Emission factor	2006 GL		2019 GL				
	Default value	Uncertainty range	Aggregated		Disaggregated		
			Default value	Uncertainty range	Disaggregation	Default value	Uncertainty range
$EF_4$ [N volatilization and re-deposition], kg $NH_3-N+NO_x-N$ volatilized) <sup>-1</sup>	0.010	0.002-0.05	0.010	0.002-0.018	Wet climates	0.014	0.011-0.017
					Dry climates	0.005	0.000-0.011
$EF_5$ [N leaching / runoff], kg $N_2O-N$ leaching / runoff) <sup>-1</sup>	0.0075	0.0005-0.025	0.011	0.000-0.020	-	-	-
$Frac_{GASF}$ [Volatilization from synthetic fertilizer], (kg $NH_3-N+NO_x-N$ ) (kg N applied) <sup>-1</sup>	0.10	0.03-0.3	0.11	0.02-0.33	Urea	0.015	0.03-0.43
					Ammonium-based	0.08	0.02-0.30
					Nitrate-based	0.01	0.00-0.02
					Ammonium-nitrate-based	0.05	0.00-0.20
$Frac_{GASM}$ [Volatilization from all organic N fertilizers applied, and dung and urine deposited by grazing animals], (kg $NH_3-N+NO_x-N$ ) (kg N applied or deposited) <sup>-1</sup>	0.20	0.05-0.5	0.21	0.00-0.31	-	-	-
$Frac_{LEACH-(H)}$ [N losses by leaching / runoff in wet climates], kg N (kg N additions or deposition by grazing animals) <sup>-1</sup>	0.30	0.1-0.8	0.24	0.01-0.73	-	-	-

(Source: 2006 IPCC guideline Table 11.3, 2019 IPCC guideline Table 11.3)

와의 연관성 근거자료가 없어 단일 통합 계수만 제시되었다. 그러나  $Frac_{LEACH-(H)}$ 은 오직 습윤기후에만 적용되며, 건조기후의  $Frac_{LEACH-(H)}$ 은 0으로 간주한다.

$$N_2O_{(L)} - N = (F_{SN} + F_{ON} + F_{PRP} + F_{CR} + F_{SOM}) \times Frac_{LEACH-(H)} \times EF_5 \quad (3)$$

$N_2O_{(L)}-N$  : 수계 유출에 의한 연간 배출량, kg  $N_2O-N$  yr<sup>-1</sup>

$F_{SN}$  : 연간 화학비료 농경지 투입량, kg N yr<sup>-1</sup>

$F_{ON}$  : 방목 가축에 의해 투입되는 질소를 제외하고, 농경지토양에 투입되는 관리되는 가축 퇴비, 하수 슬러지 및 기타 유기질 비료량, kg N yr<sup>-1</sup>

$F_{PRP}$  : 연간 방목 가축의 분뇨로 투입되는 질소량, kg N yr<sup>-1</sup>

$F_{SOM}$  : 농경지 토양 토지이용 및 관리 변화에 따른 토양 탄소 손실로 인해 광물화된 질소량, kg N yr<sup>-1</sup>

$Frac_{LEACH-(H)}$  : 관개수 지하침투나 지표수 유출이 발생하는 지역의 질소 투입 총량 중 수계로 유출되는 질소량, kg N(kg N 투입량)<sup>-1</sup>

$EF_5$  : 수계유출에 의한  $N_2O$  배출계수, kg N- $N_2O$ (kg 수계유출량)<sup>-1</sup>

### 3.1.3 작물잔사소각

농경지토양의 질소 배출원 중 하나인 작물잔사 환원량과 작물잔사 소각량은 밀접하게 연관되어 있어 있는데, 작물을 수확하고 난 후 작물잔사 바이오매스의 활용 방법에 따라 연료용, 사료용, 비료용 등으로 나뉘지기 때문이다. 예를 들어, 작물잔사 총량에서 연료용 사용이 많으면 나머지 사료용과 비료용 비율이 낮아지게 되고, 사료용으로의 사용량이 많으면 상대적으로 다른 방법들의 비율이 낮아지게 된다. 이를 계산하기 위해 2019 GL에서는 연간 지상부 작물잔사 총량( $AGR_{(T)}$ )과 지하부 작물잔사 총량( $BGR_{(T)}$ )의 개념이 도입된다. 2006 GL에서는 작물 T에 대한 각 지상부와 지하부의 비율( $R_{AG(T)}$ ,  $R_{BG(T)}$ )만 제시했던 반면, 2019에서는 총량과 비율의 개념을 모두 제시함으로써 산정의 투명성을 향상시켰다.

작물잔사소각의 배출량 산식은 2006 GL과 변동이 없으나, 배출량 산정에 필요한 매개변수 중 하나인 농경지에서 소각된 잔사 중량( $M_B$ )의 default값이 2006 GL에서는 작물별 수치로 제시된 반면 2019 GL에선 수식으로 변경되어 개선되었다(식 4).

$$M_B = AGR_{(T)} \times Frac_{Burnt(T)} \quad (4)$$

$M_B$  : 연소 가능한 잔사 소각량, ton ha<sup>-1</sup>(작물 바이오매스, 낙엽, 고사목 포함)

$AGR_{(T)}$  : 작물 T에 대한 연간 지상부 잔사 총량, kg d.m. yr<sup>-1</sup>

$Frac_{Burnt(T)}$  : 작물 T 소각에 대한 연간 수확 면적 비율

### 3.1.4 무기질 토양에 바이오차(biochar)를 이용한 탄소 축적

2019 GL에서는 지금까지 발간되었던 가이드라인 중 처음으로 바이오차의 탄소 저장 평가에 관해 언급하고 있다. 바이오차란 목재나 왕겨 등의 바이오매스 소재를 산소가 제한된 조건에서 350°C 이상의 온도로 가열했을 때 생성되는 고체 물질로 정의된다(IPCC, 2019). 바이오차 생성 원료별로 열분해 생성과정 및 열분해 온도로 구분하여, 초지나 농경지 토양에 바이오차를 투입했을 때의 토양 탄소 저장량을 산정할 수 있다(식 5).

$$\Delta BC_{Mineral} = \sum_{p=1}^n (BC_{TOTp} \times F_{Cp} \times F_{perm_p}) \quad (5)$$

$\Delta BC_{Mineral}$  : 바이오차 투입에 따른 무기질 토양 내 총 탄소 저장 변화, ton C 격리량 yr<sup>-1</sup>

$BC_{TOTp}$  : 인벤토리 기간 동안 무기질 토양에 혼합된 종류 p별 바이오차의 량, ton 바이오차 건중량 yr<sup>-1</sup>

$F_{Cp}$  : 각 바이오차 종류 p별 유기 탄소 함량, ton C ton 바이오차 건중량<sup>-1</sup>

$F_{perm_p}$  : 각 바이오차 종류 p별 100년 후에 무기화되지 않은 탄소 비율, ton C 격리량 ton 바이오차 C<sup>-1</sup>

$n$  : 각기 다른 바이오차 종류의 수

바이오차 투입에 따른 토양 탄소 저장량은 바이오차를 만드는 소재와 생성 온도, 바이오차 종류별 유기 탄소 함량만을 산정식에 포함하고 있어, 토양 조건 또는 토지 이용에 따른 바이오차 내 탄소의 영향이 고려되지 않았다(IPCC, 2019). 따라서 앞으로 실질적으로 산정식에 적용하기 위해서는 우리나라 농업 환경 조건에 맞는 계수 개발 및 관련 활동자료 구축이 필요할 것으로 생각된다.

### 3.1.5 그 밖에 변경된 내용

2019 GL은 배출량 산정식 및 계수 세분화에 대한 개선뿐만 아니라, Tier 3 수준의 산정방법을 2장 일반적 방법을 통해 자세히 설명하고 있다. Tier 3 산정 방법은 직접 측정, 모

텔에 의한 측정으로 구분하여 각 방법에 대한 상세 설명을 추가하였다. 직접 측정 방법은 표본의 범위 및 사이트 선정, 초기 데이터 수집부터 보고자료 생성까지의 내용을 설명하였고, 모델을 이용한 측정 방법은 모델 선정, 모델 보정부터 모델 구동을 위한 입력값 수집, 불확도 평가까지의 내용을 담고 있다. 특히, 각 나라별로 모델을 이용해 온실가스 배출량을 산정하고 불확도를 평가했던 구체적인 사례를 추가하여 산정하는 이들의 이해도를 높이기도 하였다.

또한 5장 5절 벼재배 논에서의 메탄 배출을 통해 챔버를 이용해 메탄 배출량을 측정하는 내용을 새롭게 추가하고 국가 고유 배출계수 개발 국가가 참고할 수 있게 하였다.

### 3.2 온실가스 배출량 산정

#### 3.2.1 벼 재배

2019 GL을 반영한 벼 재배부분 배출량은 재배일수만 변경하였다. 재배일수는 벼 재배부분의 메탄 배출량에 직접적 영향을 주는 매개 변수이기 때문에, 현재 배출 산정식에 재배일수를 138일에서 113일로 변경했을 때 온실가스 배출량은 2017년 기준 6,250에서 5,073 천톤CO<sub>2</sub>-eq.으로 1,178 CO<sub>2</sub>-eq.만큼 감소하는 결과를 나타냈다(Fig. 1).

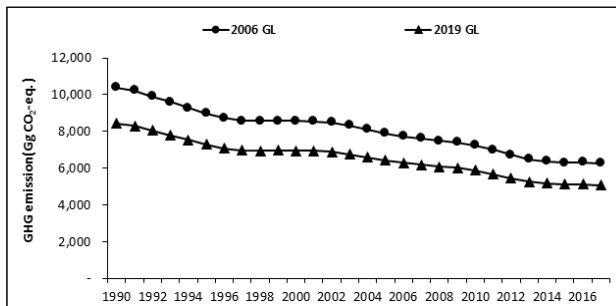


Fig. 1. Comparison of national greenhouse gas emissions from rice cultivation which calculated by each cultivation periods of 2006 guideline and 2019 guideline

#### 3.2.2 농경지토양

2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면 담수된 논에서의 아산화질소 배출계수는 default값인 0.003를 적용하고 있다. 우리나라는 벼 재배 논의 약 87%가 중간낙수를 시행하고 있어 이를 고려하여 변경된 계수를 적용하

면, 화학비료 사용에 따른 아산화질소 직접 배출량은 578 천톤CO<sub>2</sub>-eq로 2006 GL 대비 2%로 증가될 것이다(Fig. 2).

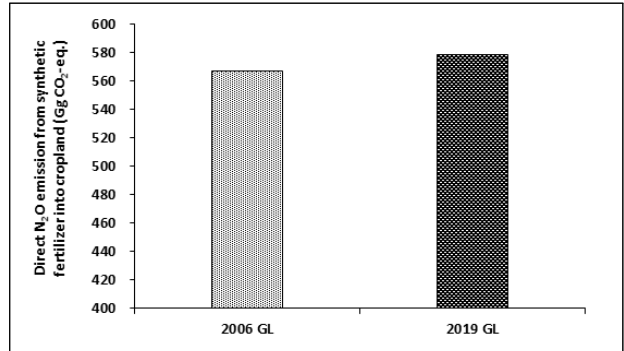


Fig. 2. Comparison of direct N<sub>2</sub>O emissions from synthetic fertilizer incorporated managed soil in 2017 following applied each emission factors of 2006 guideline and 2019 guideline

2019 GL을 적용하여 휘산에 의한 간접배출량 산정 시 습윤기후대의 기본 배출계수 0.014를 적용하고, 요소 사용에 따른 대기 휘산 비율 0.15를 적용하면 대기 휘산에 의한 간접 배출량은 2017년 기준 299 천톤CO<sub>2</sub>-eq.에서 498 천톤CO<sub>2</sub>-eq.으로 약 200 천톤CO<sub>2</sub>-eq. 증가한다.

수계 유출 아산화질소 배출계수(EF<sub>5</sub>)는 국가계수로 등록되어 있어, 2019 GL의 변경된 수계 유출 비율 (Frac<sub>LEACH-(H)</sub>)을 적용하면 2006 GL 대비 20%의 아산화질소 배출량이 감소된다(Fig. 3).

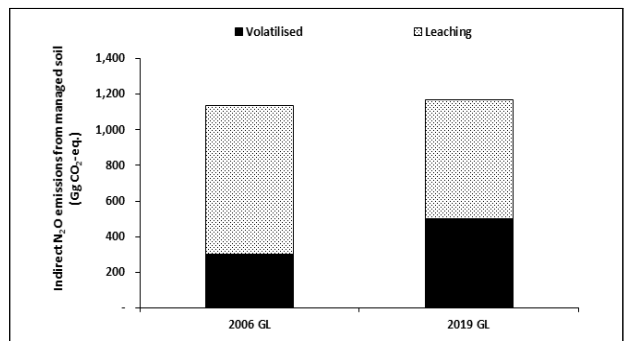


Fig. 3. Comparison of indirect N<sub>2</sub>O emissions from managed soil in 2017 following applied each calculation parameters of 2006 guideline and 2019 guideline



Table 5. List of changed parameters (including emission factor and fraction, etc.) which be applied calculation of national GHG emission in 2006 and 2019 IPCC guideline

Parameter	2006 GL		2019 GL	
	Default value	Uncertainty range	Aggregated default value	Uncertainty range
EF <sub>1</sub> for N additions from synthetic fertilisers, organic amendments and crop residues, and N mineralised from mineral soil as a result of loss of soil carbon [kg N <sub>2</sub> O-N(kg N) <sup>-1</sup> ]	0.010	0.001-0.018	0.016 <sup>1)</sup>	0.013-0.019
EF <sub>4</sub> [N volatilization and re-deposition], kg NH <sub>3</sub> -N+NO <sub>x</sub> -N volatilized) <sup>-1</sup>	0.010	0.002-0.05	0.014 <sup>2)</sup>	0.011-0.017
EF <sub>5</sub> [N leaching / runoff], kg N <sub>2</sub> O-N leaching / runoff) <sup>-1</sup>	0.0075	0.0005-0.025	0.011	0.000-0.020
Frac <sub>GASF</sub> [Volatilization from synthetic fertilizer], (kg NH <sub>3</sub> -N+NO <sub>x</sub> -N) (kg N applied) <sup>-1</sup>	0.10	0.03-0.3	0.11	0.02-0.33
Frac <sub>GASM</sub> [Volatilization from all organic N fertilizers applied, and dung and urine deposited by grazing animals], (kg NH <sub>3</sub> -N+NO <sub>x</sub> -N) (kg N applied or deposited) <sup>-1</sup>	0.20	0.05-0.5	0.21	0.00-0.31
Frac <sub>LEACH(H)</sub> [N losses by leaching / runoff in wet climates], kg N (kg N additions or deposition by grazing animals) <sup>-1</sup>	0.30	0.1-0.8	0.24	0.01-0.73

1) Disaggregated emission factor for Synthetic fertiliser inputs in wet climates 2) Disaggregated emission factor for wet climates

#### 4. 결론

2019 GL의 농업분야 재배부문 배출원별 산정식은 예전 가이드라인과 크게 변동이 없으나, 각 산정에 필요한 배출 계수 등을 기후 및 지역에 맞게 세분화하여 산정의 정확도를 향상시켰다(Table 5). 뿐만 아니라 바이오차라는 물질의 탄소 저장 연구 결과를 반영한 신규 카테고리가 추가되어 농업분야 흡수원에 대한 적용 가능성을 확대시켰다.

또한, 2019 GL의 큰 변화 중 하나는 온실가스 측정 및 산정 방법에 대한 자세한 정보를 제공하고 있다는 것인데, 이렇게 개선된 내용들은 향후 배출량 산정 고도화 연구에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

변경된 내용을 반영하여 가이드라인별 농업분야 재배부문의 온실가스 총 배출량을 비교하면 2017년 기준 2006 GL 적용 배출량은 10,100 천톤CO<sub>2-eq</sub>이고, 2019 GL 적용 배출량은 8,968 천톤CO<sub>2-eq</sub>으로 2006 GL 대비 약 11.2% 적게 산정된 것을 알 수 있었다(Fig. 4). 국가고유계수를 적용하는 일부 배출원을 제외하면, 벼 재배일수 및 수계유출 비율의 영향으로 배출량이 감소된 것으로 생각된다. 우리나라의 벼 재배일수는 2012년까지의 자료를 바탕으로 산출된 결과이므로, 향후 현재의 품종과 기후를 고려한 벼 재배일수의 개선이 필요할 것이다.

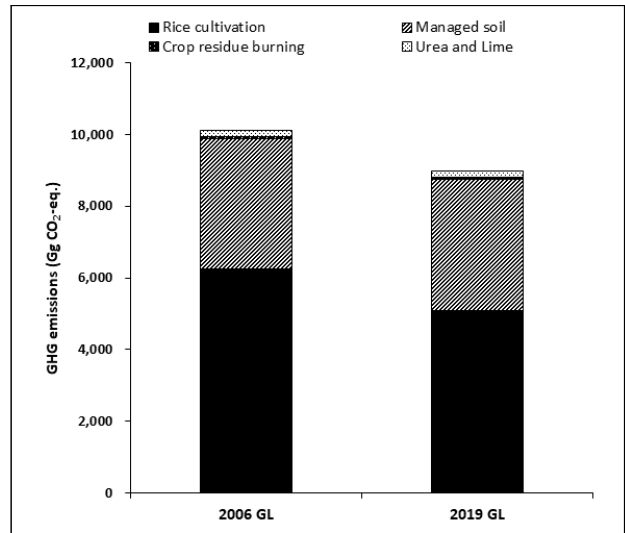


Fig. 4. Total emissions of agricultural sector in 2017 following applied each calculation methodologies of 2006 guideline and 2019 guideline

그리고 배출계수 및 매개변수가 세분화된 것을 고려하여 보다 구체적인 활동자료 확보 또한 필요하다. 특히, 배출량 산정에는 국가 공인된 통계자료를 우선 적용하기 때문에 관련 부처들과의 협업을 통해 온실가스 배출량 산정

에 필요한 통계자료를 구축해나가야 할 것이다.

## 사사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(PJ01381403)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## References

- Albanito F, Lebender U, Cornulier T, Sapkota TB, Brentrup F, Stirling C, and Hillier J. 2017. Direct nitrous oxide emissions from tropical and sub-tropical agricultural systems-A review and modelling of emission factors. *Scientific reports* 7: 44235.
- Choi EJ, Lee JS, J HC, Kim GY, So KH. 2013. Assessment of methane emissions from rice paddy and crop residues burning in 2011 with the IPCC guideline methodology. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 46(6):575-578. [in Korean]
- GIR (Greenhouse gas Inventory and Research center). 2019. 2019 National Greenhouse gas inventory report of Korea (NIR). pp. 3-250. Seoul, Korea. [in Korean]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(Volume 4).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. IPCC 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(Volume 4).
- Korea Fertilizer Association. 2019. Fertilizer yearbook. [in Korean]
- Ministry of Agriculture, Food and Rural affairs. 2018. Agriculture, Food and Rural affairs statistics yearbook. Sejong-si, Korea. [in Korean]
- National Institute of Agricultural Sciences(NIAS). 2019. Fertilizer recommendation for Each Crop in Soil Testing. Wanju-gun Korea. [in Korean]
- Nonghyup. 2018. Book for statistics of synthetic fertilizers use. Seoul, Korea. [in Korean]
- Rochette P, Liang C, Pelster D, Bergeron O, Lemke R, Kroebel R, MacDonald D, Yan W, Flemming C. 2018. Soil nitrous oxide emissions from agricultural soils in Canada: Exploring relationships with soil, crop and climatic variables. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 254: 69-81.
- Statistics Korea. 2010. Census of agriculture, forestry and fisheries. <http://kosis.kr>
- Statistics Korea. 2011-2017. Agriculture, forestry and fishery survey. <http://kosis.kr>
- Statistics Korea. Statistical Information Service. <http://kosis.kr>
- The government of the Republic of Korea. 2019. Fourth national communication of the Republic of Korea.
- The government of the Republic of Korea. 2019. Third biennial update report of the Republic of Korea.
- UNFCCC. 2018. Decision 18/CMA.1. Annex. Modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement. pp.22-27.
- UNFCCC. 2020. United Nations Climate Change homepage. <https://unfccc.int>