

2006 기후변화에 관한 정부간 협의체 가이드라인에 따른 벼재배 및 농경지토양 온실가스 배출량 변화 분석

이형석^{*,****} · 정현철^{**} · 이선일^{*} · 박혜란^{*,****} · 이민지^{*} · 이종문^{***} · 박도균^{*****} · 장은빈^{****} · 오택근^{*****†}

^{*}국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과 농업연구사, ^{**}국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과 농업연구관, ^{***}국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과 박사연구원, ^{****}충남대학교 생물환경화학학과 석사과정생, ^{*****}충남대학교 생물환경화학학과 박사과정생, ^{*****}충남대학교 생물환경화학학과 교수

2006 IPCC guideline application: Analysis of greenhouse gas methodology and emissions in the rice cultivation and agricultural soil

Lee, Hyoung Seok^{*,****} · Jeong, Hyun Cheol^{**} · Lee, Sun Il^{*} · Park, Hye ran^{*,****} · Lee, Min Ji^{*} · Lee, Jong Mun^{***} · Park, Do Gyun^{*****} · Jang, Eun Bin^{****} and Oh, Taek Keun^{*****†}

^{*}Researcher, Division of Climate Change Assessment, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

^{**}Senior Researcher, Division of Climate Change Assessment, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

^{***}Postdoctoral Researcher, Division of Climate Change Assessment, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

^{****}Master's Student, Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam University, Daejeon, Korea

^{*****}Doctoral Student, Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam University, Daejeon, Korea

^{*****}Professor, Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam University, Daejeon, Korea

ABSTRACT

In 2023, South Korea estimated its greenhouse gas emissions based on the 2006 IPCC guidelines (GLs) in preparation for the 2024 UNFCCC National Inventory Report. This study compared greenhouse gas emissions in the agricultural sector, focusing on rice cultivation and agricultural soil emissions from 1990 to 2021, using both 1996 and 2006 GLs. The objective was to identify the factors causing differences in emissions between these two GLs. The total emissions for 1990 were 15,139 Gg CO₂-eq under the 1996 GL and 17,459 Gg CO₂-eq under the 2006 GL. By 2021, total emissions were 11,114 Gg CO₂-eq for the 1996 GL and 10,392 Gg CO₂-eq for the 2006 GL, with the 1996 GL showing a 6.5% higher figure. Methane emissions from rice cultivation in 1990 were 10,533 Gg CO₂-eq for the 1996 GL and 14,073 Gg CO₂-eq for the 2006 GL, marking a 33.6% increase under the 2006 GL due to a change in methane's global warming potential (GWP) from 21 to 28. Nitrous oxide emissions from agricultural soil were accounted for 4,656 Gg CO₂-eq in 1996 GL and 3,232 Gg CO₂-eq in 2006 GL in 1990, reflecting a 17.9% decrease under the 2006 GL, primarily due to the reduced GWP for nitrous oxide from 310 to 265. The study reveals significant shifts in greenhouse gas emissions in agriculture when moving using from the 1996 to 2006 GLs, driven by changes in GWP for methane and nitrous oxide and variations in nitrogen input methods. These findings highlight the importance of guideline updates in accurately accounting for greenhouse gas emissions in agriculture.

Key words: Agriculture, Greenhouse Gases, Methane, Nitrous Oxide, Cropland

†Corresponding author : ok5382@cnu.ac.kr (Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam University, Daejeon, 34134, Korea. Tel. +82-42-821-6735)

ORCID 이형석 0000-0002-7459-0643
정현철 0000-0003-2556-0808
이선일 0000-0002-0519-3150
박혜란 0000-0001-8249-2149
이민지 0009-0006-5928-1929

이종문 0000-0003-1269-8277
박도균 0000-0002-5471-1065
장은빈 0000-0001-5698-7367
오택근 0000-0003-0215-0427

Received: November 22, 2023 / Revised: January 15, 2024 / Accepted: February 16, 2024

1. 서론

산업혁명 이후 지속적으로 증가한 온실가스는 지구온난화의 주요 원인이다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental panel on climate change, IPCC)에서 발간한 제6차 평가보고서는 거의 모든 미래의 기후변화 시나리오에서 가까운 미래(2021~2040년)에 지구온난화로 인해 기온이 1.5°C 상승할 것으로 분석하였다(IPCC, 2023). 기후변화 대응을 위해 전 지구적으로 온실가스 순 배출량을 0으로 만드는 넷제로(Net zero)가 주목받고 있고, 국가별로 온실가스 배출원을 파악하고 정확히 산정하는 것이 중요해지고 있다. IPCC는 국가별로 배출량 산정을 위한 가이드라인(IPCC, 1996a, 2000, 2003, 2006)을 제시하였으며 각 국은 자국의 실정에 맞는 가이드라인을 적용하여 배출량을 산정하고 있다(Jeong et al., 2017). 우리나라는 2022년까지 온실가스 배출량 산정 시 1996 GL, 2000 GPG, 2003 GPG를 적용하였으며, 일부 방법론이나 계수에 2006 GL을 적용해왔다(Jeong et al., 2017). 2015년 유엔기후변화회의(United nations climate change conference)에서 채택된 파리협정에 따라 모든 당사국은 2024년에 2006 GL을 기반으로 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National inventory report, NIR)를 제출할 의무가 있으며, 우리나라 또한 2023년부터 2006 GL 방법론을 기반으로 온실가스 배출량 산정 계획을 수립하였다(Ministry of Environment, 2020).

본 연구는 농업에서 중요한 온실가스 배출원인 벼재배와 농경지토양을 중심으로, 2022~2023년 국가 온실가스 산정·보고·검증 지침(GIR, 2022a, 2023)을 적용하여 1996 GL과 2006 GL 기반의 온실가스 배출량을 산정하였다. 이전 선행 연구에서 Jeong et al. (2011)은 1996 GL과 2006 GL에서 제시된 기본계수(Tier 1)를 이용하여 배출량을 시범산정하였으며, 국가 고유 계수 개발의 필요성을 강조하였다. Jeong et al. (2017)과 Choi et al. (2020)는 IPCC 가이드라인의 개정에 따른 새로운 산정방법을 분석하고, 국가 인벤토리 적용을 위한 계수 개발과 활동자료 구축의 필요성을 제시하였다. 본 연구의 목적은 이러한 배경에 기초하여, 지침 변경에 따른 벼재배 메탄과 농경지토양 아산화질소 배출량의 연도별 변화를 비교하고 분석하는 것이다. 이를 통해 IPCC 가이드라인 변경이 온실가스 배출량에 미치는 영향을 파악하고, 보다 정확한 온실가스 배출량 산정을 위한 기초자료를 제공함으로써 기후변화 대응 정책 수립에 기여하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 온실가스 산정 범위

국가 온실가스 인벤토리(GIR, 2022b)에 따르면 우리나라 농업분야 재배부문의 배출원은 벼재배(rice cultivation), 농경지토양(agricultural soil), 작물잔사소각(field burning)으로 나뉘며 온실가스는 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)를 보고하였다. 배출원별로 온실가스를 보면 벼재배에서는 메탄, 농경지토양에서는 아산화질소를 산정하며, 작물잔사소각에서는 메탄과 아산화질소가 모두 배출된다. 배출원에 따른 배출량 비중을 보면 작물잔사소각 부문은 농업분야 전체 배출량의 0.1%를 차지하기 때문에 우리나라 재배 부문은 벼재배와 농경지토양이 주요 배출원이라 할 수 있다. 연도별(1990~2021) 온실가스 산정을 위한 활동자료(activity data, AD)는 공인된 국가 통계 수치를 이용하였으며, 배출량은 산정 지침에 따라 활동자료에 IPCC 기본계수(Tier 1) 또는 국가 고유 계수(Tier 2)를 곱하여 계산하였다.

2.2. 활동자료 수집

2.2.1. 벼재배 배출원 활동자료

‘벼재배 배출원’의 활동자료인 논벼 재배면적, 맥류 재배면적, 녹비사용 면적은 공인된 국가통계포털(Statistics Korea, 2023a)에서 농림 주제로 분류된 농업면적조사, 농림어업조사, 농림어업총조사, 농축산물생산비조사, 가축동향조사, 농작물생산조사를 통해 수집하였다. 그 외 논물관리 방법에 따른 재배 면적 비율, 유기물(볏짚, 녹비) 사용 비율, 보리·밀 유기물 환원율은 마이크로데이터(Statistics Korea, 2023b)를 이용하여 산출하였다. 벼재배 메탄 계산에 주 활동자료인 재배면적은 모두 3년 평균을 적용한다. 모든 연간 재배면적은 산정연도(n) 기준 n-2, n-1, n연도 조사 면적의 3년 평균값을 이용하였다. 논에서 물관리 방법에 대한 통계 조사는 2010년 농림어업총조사부터 실시되었다. 따라서 1990년부터 2009년까지 물관리 방법별 비율은 2010년 값을 모두 적용하였으며, 2011년 이후는 농림어업조사 자료 수치를 적용하였다. 2015년과 2020년은 통계자료의 일관성을 위해 전년도와 차년도 값을 내삽한 값을 적용하였다. 볏짚과 맥류 유기물 사용에 대한 통계는 2017년 이후는 농림어업조사 마이크로데이터의 잔사처리 방법 중 ‘경지비료로 활용’ 항목의 비율을

적용하였다. 과거 시계열은 전문가 판단에 근거하여 1990년 유기물 사용 면적 비율을 50%로 정하고 2017년 비율을 활용하여 1991~2016년까지 선형 내삽하였다(GIR, 2022a, 2022b, 2023). 녹비 면적에 대한 통계는 2010, 2015, 2020년 농림어업총조사에서 확인할 수 있다. 조사자료가 없는 과거 시계열은 최신연도 비율을 준용하였다. 벼 재배일수(t)는 1990년부터 2017년까지 138일을 적용하였다. 벼 출수기 생태별(조생, 중생, 중만생)로 재배면적 비율을 가중치로 적용하여 대표 재배일수 138일을 산출하였다(GIR, 2022a, 2022b, 2023). 2018년 이후는 137일을 적용하였는데 이는 일부 남부지역의 이앙 적기가 늦어지는 추세를 반영한 것이다(GIR, 2022a, 2022b, 2023).

2.2.2. 농경지토양 배출원 활동자료

‘농경지토양 배출원’의 활동자료는 화학비료, 가축분뇨, 작물잔사에 의한 질소 투입량으로 구분하여 수집하였다. 질소 투입량 계산에 필요한 모든 연간 활동자료는 벼재배 산정과 마찬가지로 3년 평균을 적용하였다. 화학비료 질소 투입량은 농림축산식품통계연보(MAFRA, 2022) 질소질비료 소비량을 이용하였으며, 농축산물생산비조사의 단위 면적당 비료 투입물량 통계를 이용하여 논과 밭으로 구분하였다. 밭 작물종별로 투입량은 작물별 시비처방 기준(RDA, 2022)에 따라 노지재배 작물 시비처방(N kg ha⁻¹)을 기준으로 작물별 재배면적을 곱하여 계산하였다. 가축분뇨에 의한 질소 투입량은 가축동향조사의 가축사육두수와 가축분뇨 처리시설 이용비율(Statistics Korea, 2023b)을 수집하여 계산하였다. 마지막으로 작물잔사에 의한 질소 투입량은 논벼, 보리, 밀, 고추, 마늘, 양파, 참깨, 두류(콩, 팥)를 대상으로 농작물생산조사에서 작물 생

산량과 작물별 토양 환원율(Statistics Korea, 2023b)을 계산하여 값을 산출하였다.

2.3. 벼재배 메탄 배출량 산정 방법

벼재배에서 메탄 배출량은 Table 1. 식 (1)에 따라 일일 배출계수(EF_i)와 재배일수(t), 재배면적(A)의 곱으로 계산된다. 일일 메탄 배출계수(EF_i)는 Table 1. 식 (2)에 따라 유기물 사용 여부와 작기 전·후 물관리 방법에 따라 다르게 결정된다. 상시답수, 유기물 무시용 조건의 메탄 기본 배출계수(EF_c)는 국가 고유 배출계수로 등록된 2.32 kg ha⁻¹ day⁻¹를 적용하였으며(Kim et al., 2013), 작기 중 물관리 보정계수(SF_w)는 중간물떼기 1주 미만 0.83, 1~2주 미만 0.66, 2주 이상 0.49를 적용하였다. 천수답(상습가뭄)은 국가 고유 계수가 없으므로 2022 MRV와 2023 MRV에서 제시한 0.4(IPCC, 1996a)와 0.25(IPCC, 2006)를 각각 적용하였다. 유기물 사용 보정계수(SF_o)는 우리나라 논에서 표준 볏짚 사용량(GIR, 2022a)과 녹비사용량(GIR, 2023)을 6 t ha⁻¹, 0.0685 t ha⁻¹로 설정하여 해당범위의 계수 2.5, 1.045를 각각 적용하였다.

계산된 메탄은 다른 온실가스와 비교를 위해 지구온난화 지수(global warming potential; GWP)를 곱하여 이산화탄소로 환산(CO₂-eq)하였다. 메탄의 GWP값은 IPCC 제2차 평가보고서(IPCC, 1996b) 기준 21, 제5차 평가보고서(IPCC, 2014) 기준으로 28로, 2022 MRV와 2023 MRV에 각각 21과 28을 적용하였다.

2.4. 농경지토양 아산화질소 산정 방법

농경지토양에서 아산화질소 배출량은 직접배출(N₂O

Table 1. Methodology for calculating methane emissions from rice cultivation based on IPCC GL

| Guideline | 2022 MRV(1996 GL) | 2023 MRV(2006 GL) |
|-----------|---|---|
| (1) | $CH_4 = \sum(EF_i \times t \times A \times 10^6)$ | |
| (2) | $EF_i = EF_c \times SF_w \times SF_o$ | $EF_i = EF_c \times SF_w \times SF_p \times SF_o$ |

CH₄ : Annual total methane emissions from rice cultivation [Gg CH₄ yr⁻¹]
 EF_i : Daily methane emission factor [kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹]
 EF_c : Baseline emission factor for continuous flooded without organic matter
 SF_w : Scaling factor by water management methods during cultivation period
 SF_p : Scaling factor by water management methods before cultivation period
 SF_o : Scaling factor when utilize organic matter
 t : Rice cultivation periods [day]
 A : Cultivation area [ha yr⁻¹]

* GIR (2022a, 2023)

Table 2. Methodology for calculating nitrous oxide emissions from agricultural soil based on IPCC GL

| Guideline | 2022 MRV(1996 GL) | 2023 MRV(2006 GL) |
|-----------|--|--|
| (3) | $N_2O_{DIRECT} = (F_{SN} + F_{AM} + F_{BN} + F_{CR}) \times EF_1 \times 44/28$ | $N_2O_{DIRECT} = (F_{SN} + F_{AM}^* + F_{CR}^*) \times EF_1 \times 44/28$ |
| (4) | $N_2O_{INDIRECT} = N_2O_{(G)} + N_2O_{(L)}$ | |
| | $N_2O_{(G)} = (F_{SN} \times \text{Frac}_{GASF} + F_{AM} \times \text{Frac}_{GASM}) \times EF_4 \times 44/28$ $N_2O_{(L)} = (F_{SN} + F_{AM} + F_{CR}) \times \text{Frac}_{LEACH} \times EF_5 \times 44/28$ | $N_2O_{(G)} = (F_{SN} \times \text{Frac}_{GASF} + F_{AM}^* \times \text{Frac}_{GASM}) \times EF_4 \times 44/28$ $N_2O_{(L)} = (F_{SN} + F_{AM}^* + F_{CR}^*) \times \text{Frac}_{LEACH} \times EF_5 \times 44/28$ |

F_{SN} : Annual amount of synthetic fertilizer nitrogen applied to soils (kg N yr⁻¹)
 F_{AM} : Annual total nitrogen from livestock manure applied to soils (kg N yr⁻¹)
 F_{AM}^* : Annual total nitrogen from livestock manure applied to soils after subtracting the nitrogen loss in the sewage treatment systems (kg N yr⁻¹)
 F_{BN} : N fixed by N-fixing crops in country (kg N yr⁻¹)
 F_{CR} : N in crop residues returned to soils in country (kg N yr⁻¹)
 F_{CR}^* : Annual nitrogen inputs from crop residues, including N-fixing crops (kg N yr⁻¹)
 EF_1 : Direct nitrous oxide emission factors by crop tye, synthetic fertilizer, crop residues and livestock manure (kg N₂O-N kg⁻¹ N input)
 44/28 : Conversion factor to convert N₂O-N into N₂O
 Frac_{GASF} : Fraction of synthetic fertilizer nitrogen applied to soils that volatilize as NH₃ and NO_x emissions
 Frac_{GASM} : Fraction of livestock nitrogen excretion that volatilises as NH₃ and NO_x emission
 Frac_{LEACH} : Fraction of nitrogen input to soils that is lost through leaching and runoff (kg N₂O-N kg⁻¹ N)
 EF_4 : Emission factor for atmospheric N deposition (kg N₂O-N kg⁻¹ N)
 EF_5 : Emission factor for leaching/runoff (kg N₂O-N kg⁻¹ N)

* GIR (2022a, 2023)

direct)과 간접배출(N₂O indirect)로 구분하여 산정하며, 배출량 산정식은 Table 2와 같다. 직접배출량은 Table 2. 식 (3)에 따라 화학비료, 가축분뇨, 질소고정작물 포함 작물 잔사의 토양 환원에 의한 질소 투입량으로 배출량이 결정된다. 아산화질소는 질소 투입원에 따라 각각 배출계수 (EF₁, EF₄, EF₅)를 곱하여 계산하고 GWP값을 곱하여 이산화탄소로 환산하였다. 아산화질소의 GWP값은 IPCC AR2 기준 310, AR5 기준으로 265를 각각 2022 MRV와 2023 MRV에 적용하였다.

Table 2에서 2023 MRV는 2022 MRV와 다르게 가축분뇨에 의한 질소 투입량 계산에 분뇨처리 과정에서의 질소 손실율(F_{AM}^{*})을 반영한다. 손실된 질소에 의한 배출량은 2022 MRV에서 농경지토양 배출원에서 산정한 반면, 2023 MRV는 축산분야에서 별도로 배출량을 산정하였다. 연간 가축종(T)별로 분뇨에서 발생한 질소 총 배출량 (N_{ex}(T) kg N head⁻¹ yr⁻¹)은 IPCC GL에 따라 다르다. Table 3과 같이 2023 MRV는 2019 GL을 선적용하여 축종별 평균 체중(typical animal mass, TAM)과 질소 배출율(N rate(T)) 수치로부터 질소 총 배출량(N_{ex}(T))를 계산하였다.

논에 투입되는 무기질 비료 및 유기물 사용에 대한 아산화질소 직접배출계수(EF₁)는 2006 GL 기본계수 0.003 kg N₂O-N kg⁻¹ N를 적용하고, 그 외 밭 작물은 국가 고유 계수를 적용하였다. 국가 고유 계수에 따라 고추, 콩, 감자, 봄배추, 가을배추, 그 외 밭작물을 각각 0.0086, 0.0119, 0.0049, 0.0056, 0.0058, 0.00596 kg N₂O-N kg⁻¹ N를 적용하였다. 가축분뇨비에 의한 아산화질소 직접배출계수(EF₁)는 2006 GL 기본계수 0.01 kg N₂O-N kg⁻¹ N를 적용하였다. 간접배출량은 Table 2. 식 (4)에 따라 가축분뇨와 화학비료 투입에 의한 대기휘산(N₂O_(G))과 가축분뇨, 화학비료, 작물잔사의 토양 환원에 의한 수계유출(N₂O_(L))로 구분하여 산정하였다. 대기휘산은 농경지로 사용되는 화학비료 내 질소 중 대기로 휘산되는 NH₃, NO_x 비율인 10%, 유기질 비료(가축분뇨)는 20%를 휘산량으로 적용하였다. 간접 배출계수(EF₄)는 0.01 kg N₂O-N kg⁻¹ NH₃-N+NO_x-N를 적용하였다. 수계유출은 농경지에 투입되는 화학비료, 가축분뇨, 작물잔사환원에 의한 총 질소의 30%를 수계 유출량으로 계산하였다. 간접 배출계수(EF₅)는 국가 고유 계수인 0.0135 kg N₂O-N kg⁻¹ N를 적용하였다.

Table 3. Annual total nitrogen emission by livestock manure based on IPCC GL

| Species | 2022 MRV (1996 GL) | 2023 MRV (2006 GL) |
|---------------------|--|-----------------------|
| | kg N head ⁻¹ yr ⁻¹ | |
| Dairy Cow | 100 | 142.35 |
| Korea Cow | 70 | 49.68 ^(cs) |
| Other Cow | 70 | 59.422 |
| Swine (<6 months) | 20 | 10.97 ^(cs) |
| Swine (≥6 months) | 20 | 26.353 |
| Poultry (<3 months) | 0.6 | 0.603345 |
| Poultry (≥3 months) | 0.6 | 0.49932 |
| Duck | 0.6 | 0.817965 |
| Sheep | 12 | 3.6208 |
| Goats | 40 | 2.9784 |
| Horses | 40 | 39.9602 |
| Other (Deer) | 40 | 29.346 |

* GIR (2022a, 2023), IPCC (2019)

2.5. IPCC GL에 따른 배출량 차이 원인 분석

비재배와 농경지토양 산정식을 통해 연도별 온실가스 배출량을 계산하고 IPCC GL에 따라 배출량 차이가 발생하는 원인을 분석하였다. “1996 GL”과 “2006 GL”의 차이는 온실가스 산정식 변경과 그로 인한 활동자료 세분화 그리고 기존 IPCC 기본계수(default) 값과 지구온난화 지수(GWP) 값이 변경된 점이라 할 수 있다. 2023 MRV에서 비재배는 작기 전 보정계수(SF_p)와 녹비시용 보정계수(SF_o)가 새로 추가되었고, 천수답(상습가뭄)에서 적용한 IPCC 기본계수(SF_w)가 0.4에서 0.25로 변경되었다(GIR, 2023; IPCC, 1996a, 2006). 계수(SF_p, SF_o, SF_w)가 추가 또는 변경되면서 2022 MRV 대비 증감한 배출량을 각각 계산하였다. 반면, 농경지토양의 아산화질소 배출량은 질소 투입량에 따라 결정되고, Table 3. 식 (3)에 따라 화학비료(F_{SN})는 “1996 GL”과 “2006 GL” 산정방법이 동일하므로 가축분뇨(F_{AM})와 작물잔사(F_{CR})에 의한 질소 투입량이 배출량 차이의 직접 영향을 준다. 국가 온실가스 인벤토리(GIR, 2022b)에 따라 작물잔사(F_{CR})에 의한 아산화질소 배출량은 농경지토양 총 배출량에 비해 3% 미만으로 미미하므로 본 연구는 가축분뇨(F_{AM}) 질소 투입량 차이를 일으키는 원인을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 연도별 비재배 및 농경지토양 총 배출량

“1996 GL”과 “2006 GL”에 따라 연도(1990~2021)별 비재배와 농경지토양 온실가스 배출량을 합산한 총 배출량은 Fig. 1과 같다. 두 가이드라인에 따른 총 배출량은 모두 경시적으로 감소하였다.

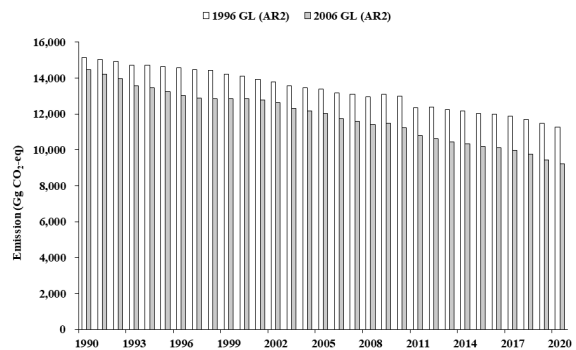


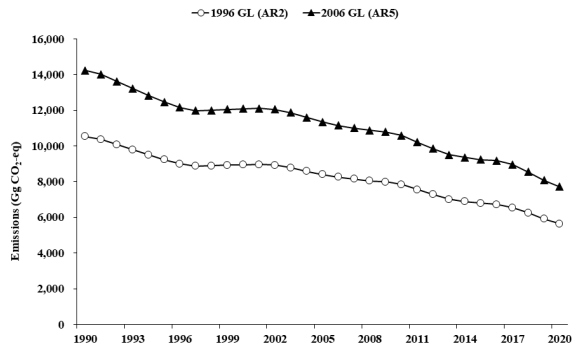
Fig. 1. Total GHG emissions in rice cultivation and agricultural soil based on IPCC GL

1990년 총 배출량은 “1996 GL” 기준으로 15,139 Gg CO₂-eq이며 “2006 GL” 기준 17,459 Gg CO₂-eq보다 15.3% 낮았다. 산정연도 2015년을 기점으로 1996 GL로 산정한 배출량이 2006 GL으로 산정한 배출량보다 높게 평가되었으며, 2021년 총 배출량은 “1996 GL” 기준 11,114 Gg CO₂-eq으로 “2006 GL” 기준 10,392 Gg CO₂-eq보다 6.5% 높은 수치를 보였다.

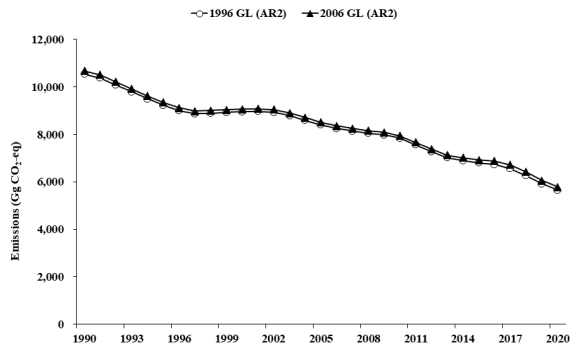
3.2. 비재배 메탄 배출량 산정 결과 및 분석

Fig. 2(a)를 보면 1990년 비재배 중 온실가스 배출량은 “1996 GL”과 “2006 GL” 기준 각각 10,533, 14,073 Gg CO₂-eq 배출되는 것으로 계산되었다. “1996 GL”보다 “2006 GL”에서 33.6% 증가한 3,540 Gg CO₂-eq 더 배출되었으며, 이는 “1996 GL”에는 GWP 값을 21을 적용하고, “2006 GL”에는 33.3% 큰 28을 적용한 결과를 반영한다. Fig. 2(b)를 보면 동일하게 GWP(AR2)를 적용했을 때 두 가이드라인 간 배출량 차이는 거의 없으며, “2006 GL” 산정값이 “1996 GL”보다 근소하게 높은 것을 확인할 수 있다. 연도별 배출량을 보면 1990년 이래로 메탄 배출량은 감소해서 2021년의 “1996 GL”은 5,432 Gg CO₂-eq,

“2006 GL”은 7,413 Gg CO₂-eq으로 계산되었다. 벼재배 배출원의 주요 활동자료인 논벼 재배면적을 보면 1990년 1,242 천ha부터 감소하였다. 2021년은 732 천ha로 1990년 대비 41% 재배면적이 줄었으며, 활동자료 영향으로 메탄 배출량 또한 감소한 것으로 분석하였다.



(a) Using global warming potential of AR5 in 2006 IPCC GL



(b) Using global warming potential of AR2 in 2006 IPCC GL

Fig. 2. Methane emissions from rice cultivation according to 1996, 2006 IPCC GL

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 IPCC 변경에 따라 벼재배 배출량이 차이가 나는 가장 큰 원인이 GWP 값이 21에서 28로 증가한 결과임을 보여준다. 2021년 기준으로 Fig. 2(a)의 배출량 차이는 2,008 Gg CO₂-eq로 “2006 GL”에서 높은 배출량을 보였으나, Fig. 2(b)에서 같은 GWP (AR2)를 적용했을 때 배출량 차이는 148 Gg CO₂-eq이다.

Fig. 3을 보면 1990년 기준 “2006 GL”의 배출량이 “1996 GL”보다 증가한 가장 큰 원인은 녹비사용 보정계수(SF₀)인 것을 알 수 있다. 녹비사용 보정계수가 “2006 GL”에 반영되면서 배출량은 119 Gg CO₂-eq 증가하였다. 이는 2022 MRV에서 전체 논벼 재배면적 중 녹비사용 면적에 대한 기존 배출량에서 보정계수 1.045가 곱해진 결과이다. 1990년 기준 작기 전 물관리 보정계수(SF_p)로 인

해 배출량은 19 Gg CO₂-eq 증가하였다. 작기 전 물관리 보정계수로 인한 배출량 증감량은 점차 증가하는 추세를 보이며, 이는 통계조사에서 작기 전 30일 이상 담수하는 면적 비율이 높아진 결과이다. 통계청 농림어업조사를 보면 작기 전 물관리 조사가 시작된 2011년 이전 시계열 값은 2011년 담수일 30일 이상 면적 비율인 9.41%를 적용하고 있다. 해당 비율은 증가하는 추세로 2021년에는 전체 논벼 면적 22.3%가 30일 이상 담수하는 것으로 조사되었다. 천수담 보정계수(SF_w)는 2022 MRV는 0.4를 적용하고, 2023 MRV에서는 0.25를 적용한다. 해당 계수 적용으로 인해 1990년 기준 오히려 배출량이 20 Gg CO₂-eq 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 우리나라는 관개시설 확장으로 인해 천수담을 하는 논벼 면적을 점차 줄어드는 추세이다. 2021년 전체 논벼 재배면적의 5.3%의 작기 중 물관리 방법이 천수담인 것으로 조사되었다. 이를 고려할 때 천수담에 의한 배출량 영향은 향후 온실가스 산정에서 미미할 것으로 판단된다.

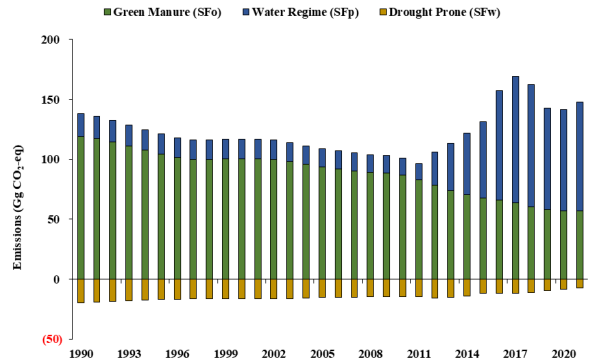
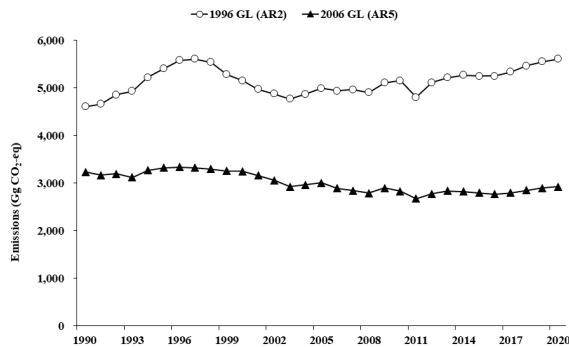


Fig. 3. Changes in methane emissions in rice cultivation sector based on scaling factors (SF)

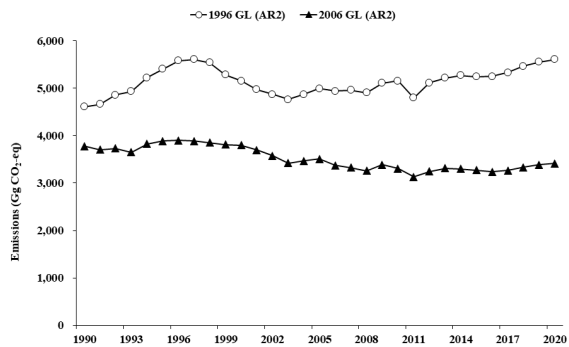
3.3. 농경지토양 아산화질소 배출량 산정 결과 및 분석

1990년 농경지토양에서는 “1996 GL” 기준 4,656 Gg CO₂-eq, “2006 GL” 기준 3,232 Gg CO₂-eq의 아산화질소가 배출된 것으로 계산되었다. “1996 GL”보다 “2006 GL”에서 17.9% 배출량이 감소하였으며 “1996 GL”은 GWP를 310, “2006 GL”은 265를 적용한 것을 우선 반영한다. 연도별 배출량을 보면 1990년 이후 아산화질소 배출량은 큰 변화없이 증감을 반복한다. 2021년 “1996 GL”은 5,682 Gg CO₂-eq, “2006 GL”은 2,953 Gg CO₂-eq으로

계산되었다. 아산화질소 배출의 주요 활동자료인 질소질 비료 소비량과 가축사육두수를 보면 질소질비료 소비량은 1990년 562 천톤부터 감소 추세로 2021년은 54% 감소한 260 천톤으로 조사되었다. 반면, 가축사육두수는 축종별로 차이가 있지만 “1996 GL”은 가축분뇨에 의한 총 질소 투입량이 299 천톤에서 2021년은 115% 증가한 644 천톤으로 조사되었다.



(a) Using global warming potential of the AR5 in 2006 IPCC GL



(b) Using global warming potential of the AR2 in 2006 IPCC GL

Fig. 4. Nitrous oxide emissions from agricultural soil according to 1996, 2006 IPCC GL

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)를 보면 GWP 변경 외 다른 원인으로 “2006 GL”에서 배출량이 줄어든 것 확인할 수 있다. 비재배와 마찬가지로 주요 활동자료인 화학비료 사용량, 가축사육두수, 작물생산량의 차이는 없었기 때문에 산정 방법의 변화로 질소 투입량이 적게 계산되었다. 질소 투입량이 줄어든 원인은 가축분뇨에 의한 질소 투입량인 것으로 분석되었다. 2023 MRV에 따라 가축분뇨에 의한 질소 투입량을 계산할 때는 분뇨처리 과정(퇴비화, 액비화, 퇴액비화, 정화처리, 위탁처리, 기타처리) 중 NH₃ 또는 NO_x로 휘발된 질소 비율(Frac_LossMS)을 적용하며, 휘발

된 질소 비율만큼 농경지에 투입되는 질소가 줄어든 것이다. 다른 원인은 Table 3과 같이 가축종별로 연간 질소 배출량(Nex(T)) 계수가 변경된 것으로 분석하였다.

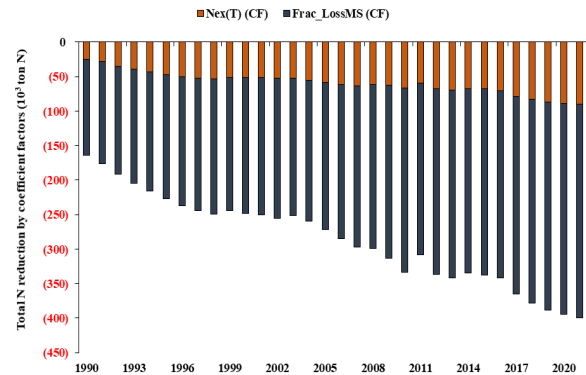


Fig. 5. The reduction in total nitrogen from livestock manure due to changes in coefficient factors(CF) according to the 2006 GL

Fig. 5를 보면 1990년 기준 “2006 GL”에서 농경지토양 질소 투입량이 “1996 GL”보다 줄어든 가장 큰 원인은 분뇨처리 과정 중 휘발된 질소 비율(Frac_LossMS)이다. 1990년 기준 Frac_LossMS가 “2006 GL”에 반영되면서 140 천톤의 질소가 감소했다. 가축종별 연간 질소 배출량(Nex(T))은 계수가 변화하면서(Table 3) 질소 투입량이 25 천톤 감소하는데 영향을 주었다. 연간 추이를 보면 “1996 GL”과 “2006 GL” 간 질소 투입량 격차는 Frac_LossMS와 Nex(T)로 인해 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 “1996 GL”에서 연간 가축분뇨에 의한 질소 투입량은 증가하는 만큼 2006 GL에서 분뇨처리 과정 중에 질소도 휘발되어 손실되기 때문이다. Nex(T) 계수 변경에 의한 영향도 증가하는 추세이다. Nex(T)는 축종별 가축사육두수 영향이 크기 때문에, Table 3에서 축종별로 과평가된 질소 배출량이 “2006 GL”에서 계수가 개선되면서 질소 투입량 계산은 반영된 결과이다.

4. 결론

본 연구는 재배부문에서 주요 배출원인 비재배와 농경지토양을 중심으로 2022 MRV와 2023 MRV 방법론을 적용하여 “1996 GL”과 “2006 GL” 기반의 온실가스 배출량

을 산정하였다. 또한 두 가이드라인의 산정 방법과 연도별 배출량 산정 결과를 토대로 배출량 차이가 나는 원인을 분석하였다. “1996 GL”과 “2006 GL” 간 배출량 차이 원인은 메탄 GWP가 21에서 28로 변경된 점이 주요인이다. 동일한 GWP를 적용했을 때 두 가이드라인의 배출량의 차이는 3% 미만으로 분석되었다. “2006 GL” 배출량이 “1996 GL”보다 근소하게 높은 원인은 “2006 GL” 산정에 새로 적용한 작기 전 물관리 보정계수(SF_p)와 녹비시용 보정계수(SF_o)가 반영된 결과이다. 천수답(SF_w)은 계수가 변경되면 “1996 GL”보다 배출량이 낮게 산정되었지만, 우리나라 천수답 비율이 5% 미만인 점을 고려하면 배출량 변화에 대한 영향력은 미미하다. 농경지토양은 아산화질소 GWP가 310에서 265로 하향조정된 점을 제외해도 기존 “1996 GL” 산정 결과보다 배출량이 줄어들었다. 배출량이 줄어든 원인은 농경지에 투입된 질소 투입량이 감소하였기 때문인데 가축분뇨에 의한 질소 투입량이 감소한 것으로 분석되었다. 질소 투입량이 감소한 이유는 2023 MRV에서 가축분뇨 처리에 의한 질소회발율($Frac_LossMS$)이 반영되고, 손실된 질소에 의한 아산화질소 배출량이 축산분야에서 산정되기 때문이다. 또한 가축종별로 연간 분뇨에 의한 질소배출량($Nex(T)$)이 개선되면서 높게 산정된 질소 투입량을 “2006 GL” 기준에서 재계산한 결과 “1996 GL”보다 질소 투입량이 적게 산출되었다.

IPCC 산정 지침이 개선됨에 따라 우리나라 재배부문은 산정 방법과 GWP의 변화로 인해 온실가스 배출량의 비중이 크게 변화하였다. 2021년 산정 기준으로 기존 2022 MRV를 적용했을 때 벼재배와 농경지토양은 49:51로 배출량이 거의 같았지만, 2023 MRV를 적용하면서 72:28로 벼재배 배출량이 농경지토양 배출량의 2.5배 이상 높아졌다. 정확한 온실가스 산정을 위해서는 산정 방법론과 계수 개발에 따른 온실가스 배출량 변화를 지속적으로 모니터링하고 분석할 필요가 있다. “2006 GL” 기반 온실가스 배출량과 기존 “1996 GL” 기반 온실가스 배출량을 비교·분석한 결과는 향후 “2006 GL” 기반의 신기후체제 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(PJ015592) 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Choi EJ, Kim GY, Lee SI, Lee, JS, Yoon JH, Gwon, HS. 2020. Estimation of greenhouse gases emission from the crop cultivation session of agricultural sector according to 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines (in Korean with English abstract). J Clim Chang Res 11(6-2): 703-712. doi: 10.15531/kscrr.2020.11.6.703
- GIR(Greenhouse gas Inventory and Research center). 2022a. National greenhouse gas emissions Measurement, Reporting, and Verification guidelines (MRV). Sejong, Korea: Ministry of Environment.
- GIR(Greenhouse gas Inventory and Research center). 2022b. National greenhouse gas Inventory Report of Korea (NIR). Sejong, Korea: Ministry of Environment.
- GIR(Greenhouse gas Inventory and Research center). 2023. National greenhouse gas emissions Measurement, Reporting, and Verification guidelines (MRV). Sejong, Korea: Ministry of Environment.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996a. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Geneva, Switzerland: Author.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996b. The second assesment report (AR2) of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: Author.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan: IGES(Institute for Global Environmental Strategies).
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Hayama, Japan: IGES(Institute for Global Environmental Strategies).
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Geneva, Switzerland: Author.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. The fifth assessment report(AR5) of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: Author.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Geneva, Switzerland: Author.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. AR6 synthesis report: climate change 2023. Geneva, Switzerland: Author.
- Jeong HC, Choi EJ, Lee JS, Kim GY, Lee SI. 2017. The analysis of differences by improving GHG emission estimation methodology for agricultural sector in recent 5 years (in Korean with English abstract). *J Clim Chang Res* 8(4): 347-355. doi: 10.15531/KSCCR.2017.8.4.347
- Jeong HC, Kim GY, Lee DB, Sim GM, Kang KK. 2011. Assessment of greenhouse gases emission of agronomic sector between 1996 and 2006 IPCC guidelines (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 44(6): 1214-1219. doi: 10.7745/KJSSF.2011.44.6.1214
- Kim GY, Jeong HC, Ju OJ, Kim HK, Park JH, Gwon HS, Kim PJ. 2013. Establishment of baseline emission factor of methane in Korean rice paddy soil (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Agric* 32(4): 359-365.
- MAFRA(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2022. Administration. agriculture, food and rural affairs statistics yearbook. Sejong, Korea: Author.
- Ministry of Environment. 2020. National greenhouse gas management plan. Sejong, Korea: Author.
- RDA(Rural Development Administration). 2022. The 5th revised edition of crop-specific fertilizer application guidelines. Jeonju, Korea: Author.
- Statistics Korea. 2023a. KOSIS(Korean Statistical Information On Service); [accessed 2023 July 31]. <https://www.kosis.kr>
- Statistics Korea. 2023b. MDIS(Microdata integrated service); [accessed 2023 April 3]. <https://mdis.kostat.go.kr>