

최근 5년간 농업부문 온실가스 산정방법 개선과 그에 따른 배출량 차이 분석

정현철[†] · 최은정 · 이종식 · 김건엽 · 이선일

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과

The Analysis of Differences by Improving GHG Emission Estimation Methodology for Agricultural Sector in Recent 5 Years

Jeong, Hyun Cheol[†], Choi, Eun Jung, Lee, Jong Sik, Kim, Gun Yeob, and Lee, Sun Il

Division of Climate Change & Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju-gun 55365, Korea

ABSTRACT

Methane and nitrous oxide are main greenhouse gases from agricultural system and their global warming potential are 25 and 258 times stronger than that of CO₂, respectively. In 2016, the emission was 21,290 Gg tone CO₂-eq. which was emitted from agriculture sector and about 3.1% of total GHG emission of Korea. Those guidelines that were published by IPCC have methodology for GHGs emission calculation as well as emission factor and so on. For recent 5 years, GHGs emissions in Korea have calculated by MRV which has been improved every year based on IPCC guidelines. Analysis as estimating method improvement showed that the methane emissions from rice cultivation were the lowest on 2012 methodology, and the highest on 2014 methodology. On the other hand, the emissions of agricultural soils were the lowest on 2015 methodology and the highest on 2012 methodology. Total emissions from agriculture sector were the lowest on 2015 methodology and the highest on 2012 methodology. Compared with 2016 methodology, the GHGs emitted as few as -1,865 Gg tone CO₂-eq and as many as 2,717 Gg tone CO₂-eq. GHGs emissions can vary greatly, depending on how to use the emission factor and activity data. Therefore, it need constantly a detailed analysis for methodology and GHGs emission in the future.

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

1. 서 론

기후변화의 주요 원인은 대기 중 온실가스 농도의 증가 때문이며, 대기 온실가스 중 메탄(CH₄)의 52%, 아산화질소(N₂O)의 84%가 농업활동을 통해 배출된다(IPCC 1996, Smith *et al.*, 2007). 2016년에 산정된 2014년 우리나라 농업부문 온실가스 배출량은 약 21.3 백만 톤 CO₂-eq.로 국가 총 배출량의 약 3.1%에 해당하는 양이다(GIR, 2016). 특히 농업부문에서 발생이 많은 메탄과 아산화질소의 지구온난화지수(Global Warming Potential; GWP)는 각각 25와 298로 기후변화에 미치는 영향이 이산화탄소(CO₂)보다 더 크다(IPCC, 2006). 농업 부문에서 배출되는 온실가스 중 메탄은 담수상태 논, 혐기 조건에서 유기물이 분해되면서 발생하고, 가축의 장내발효나

분뇨처리과정을 통해서도 발생한다(Hadi *et al.*, 2010). 아산화질소는 주로 농경지 토양에 질소 투입에 의해 배출되는데, 가축분뇨 처리과정에서도 배출된다(Mosier, 2001; Schy *et al.*, 2003; Eichner, 1990; Parkin and kaspar, 2006). 이처럼 농업부에서 발생하는 온실가스는 투입원(유기물, 질소 등)이나 토양, 기상조건 등에 따라 달라지기 때문에 국가 단위에서 정확한 온실가스 배출량 산정을 위해서는 자국의 환경에 맞는 온실가스 배출·보정계수 개발이 필요하며, 신뢰성 있는 통계자료 확보도 반드시 필요하다(Jeong *et al.*, 2011). 기후변화에 관한 정부간 협의체(International Panel on Climate Change; IPCC)는 각 국가의 온실가스 배출량 산정을 위해 배출량 산정방법에 관한 가이드라인(1996 IPCC guideline, 2000 Good Practice Guidance(GPG), 2003 GPG, 2006 IPCC guideline)을

[†] Corresponding author: taiji152@korea.kr

Received November 11, 2017 / Revised November 13, 2017 / Accepted November 24, 2017

발간했고, 각 국은 자국의 실정에 맞는 가이드라인을 적용하여 배출량을 산정하고 있다.

유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC) 상에서 ANNEX I 국가는 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Report; NIR) 작성 시 2006 IPCC 가이드라인을 적용해 배출량을 산정하고 있다. 반면, 우리나라는 온실가스 배출량 산정 시 1996 IPCC 가이드라인과 2000 GPG, 2003 GPG를 혼용하고 있으며, 일부 방법론이나 계수의 경우에는 2006 IPCC 가이드라인을 적용하고 있다. 우리나라도 산업부문별 2006 IPCC 가이드라인의 방법론을 적용해 온실가스 배출량을 시범산정 할 계획에 있다. 국가 온실가스를 총괄하고 있는 온실가스종합정보센터는 IPCC 가이드라인에 준해 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침을 매년 발간하고 있으며, 이에 준해 산업부문별로 온실가스 배출량이 산정되고 있다. 농업분야도 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침에 준해 1990년 배출량부터 배출량 산정 당해년도(t)를 기준으로 전전년도($t-2$)까지 매년 배출량을 산정하고 있다. 또한 매년 배출량 산정방법 개선을 통해 배출량에 대한 불확도를 줄이고 신뢰도를 높이기 위한 노력을 기울이고 있다.

이번 연구는 농업분야 온실가스 배출량 산정 방법론에 대해 최근 5년간(2012~2016)의 개선사항을 경종부문 중심으로 분석하고, 방법론 변화에 따른 배출원별, 연도별 온실가스 배출량 차이를 비교·분석하고자 수행되었다.

2. 재료 및 방법

농업부문 온실가스 배출량 산정은 1996 IPCC 가이드라인, 2000 GPG, 2003 GPG 및 2006 IPCC 가이드라인에 준해 매년 개정되는 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침(2012~2016)에 따라 수행되었다. 온실가스 계산은 벼재배 논에서의 메탄, 농경지 토양에서의 아산화질소로 구분하여 활동자료에 배출·보정계수를 곱해 산정하였다.

2.1 활동자료

배출량 산정을 위한 작물별 재배면적, 생산량, 화학비료 생산량 등은 농림축산식품통계연보(2011~2016)를 활용하였고, 당해년도 활동자료는 3년 평균(전전년도, 전년도, 당해년도) 값을 적용하였다. 벼 재배에 의한 메탄 배출량 산정 시 보정계수 적용을 위한 논물 관리 방법과 유기물 사용 면적 등은 농림어업총조사(2010) 자료와 농림어업조사(2011~2014) 자료를 활용하였다. 농경지 토양에서 배출되는 아산화질소 배출량 산정을 위한 질소 투입량은 농림축산식품통계연보를 활용하

였고, 작물종별 화학비료 사용량은 작물별 시비처방기준(농촌진흥청, 2010) 자료를 활용하였다. 농경지 질소 투입량 중 가축분뇨 투입량 계산을 위한 가축사육두수는 통계청의 가축동향조사(1990~2014) 자료와 농림수산물통계연보(2007~2014), 농림통계연보(1996~2006) 등을 활용하였다.

2.2 벼논 메탄 배출량 산정 방법론

벼재배 논에서의 메탄 배출량은 기본 배출계수(EF_C)에 논물 관리 방법에 따른 보정계수(SF_W)와 유기물 사용량(SF_O)에 따른 보정계수를 곱해 산정된다(식 1).

CH₄ Emission (1)

$$CH_4 = \sum(EF_i \times t \times A \times 10^{-6})$$

$$EF_i = EF_C \times SF_W \times SF_O \text{ (kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ day}^{-1}\text{)}$$

EF_i : A daily emission factor (kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹)

EF_C : Baseline emission factor for continuously flooded fields without organic amendments

SF_W : Scaling factor to account for the differences in water regime during the cultivation period

SF_O : Scaling factor should vary for both types and amount of organic amendment applied

A : Cultivation area (ha yr⁻¹)

t : Cultivation days

2.3 농경지 토양 아산화질소 배출량 산정 방법론

농경지토양에서의 아산화질소 배출량은 직접배출(Direct emission)과 간접배출(Indirect emission)로 구분하여 산정되고, 간접배출은 다시 대기취산(N₂O_(G))과 수계유출(N₂O_(L))에 의한 배출로 구분하여 산정된다(식 2). 직접배출량은 질소 투입원별로 각각의 배출계수를 곱하여 산정된다. 질소 투입원은 IPCC 가이드라인에 따라 화학비료 투입량(F_{SN}), 가축분뇨투입량(F_{AW}), 작물잔사 환원에 의한 투입량, 두과작물에 의한 질소 고정량으로 구분하였다. 간접배출량은 질소투입량 중 대기로 휘산되는 비율과 수계유출 비율을 곱한 후, 각각의 배출계수(EF_4 , EF_5)를 곱하여 산정된다.

N₂O Emission (2)

$$N_2O_{\text{DIRECT}} = (F_{SN} \times F_{AW} \times F_{BN} \times F_{CR}) \times EF_1 \times 44/28$$

F_{SN} : Annual amount of synthetic fertilizer nitrogen app-

lied to soils adjusted to account for the amount that volatilises as NH₃ and NO_x (kg N yr⁻¹)

F_{AW}: Manure nitrogen used as fertilizer in country, corrected for NH₃ and NO_x emission (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)

EF₁: Emission factor for emission from N inputs (kg N₂O-N kg⁻¹ N input)

28/44: Conversion factor to convert N₂O-N into N₂O

$$N_2O_{INDIRECT} = N_2O_{(G)} \times N_2O_{(L)}$$

$$N_2O_{(G)} = (N_{FERT} \times \text{Frac}_{GASF} + N_{EX} \times \text{Frac}_{GASM}) \times EF_4 \times 44/28$$

$$N_2O_{(L)} = [(N_{FERT} + N_{EX}) \times \text{Frac}_{LEACH}] \times EF_5 \times 44/28$$

N_{FERT}: Fertilizer nitrogen use in country (kg N yr⁻¹)

N_{EX}: Livestock nitrogen excretion in country (kg N yr⁻¹)

Frac_{GASF}: Fraction of synthetic fertilizer nitrogen applied to soils that volatilises as NH₃ and NO_x emission

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)

EF₄(N deposition): Emission factor for atmospheric deposition (kg N₂O-N kg⁻¹ N)

EF₅ (leaching/runoff): Emission factor for leaching/runoff (kg N₂O-N kg⁻¹ N)

3. 결과 및 고찰

3.1 연도별 벼 재배에 의한 메탄 배출량 산정 방법 분석

Table 1은 5년간(2012~2016) 연도별 메탄 배출량 산정 시 적용한 메탄 배출·보정계수 개선 및 변화를 분석한 표이다. 우리나라 벼논에서의 메탄 배출량 산정방법론은 2000 GPG와 2006 IPCC 가이드라인을 혼용하고 있다. 2012년에 적용한 메탄 기본 배출계수(상시담수, 유기물 무시용 조건)는 Park and Yun(2002)의 연구결과를 활용하여 2.37 kg ha⁻¹ day⁻¹를 적용하였고, 물 관리 방법에 따른 보정계수와 유기물 투입량에 따른 보정계수는 2006 IPCC 가이드라인 기본 값(Default)인 0.6과 2.0을 각각 적용하였다. 2013년 메탄 배출량 산정 방법론에서는 유기물 사용량을 5 ton ha⁻¹에서 6 ton ha⁻¹으로 수정하여 2.0 대신 2.5를 적용했다. 통계자료의 경우 1990년부터 2010년까지는 2012년 통계 값을 적용하고, 2011년 값은 통계 조사 값이 없어 2010년과 동일한 값을 적용하였다. 2014년 메탄 배출량 산정에서는 계수 적용에서 많은 개선이 있었던 것으로 분석됐다. 특히 국내에서 개발된 국가 고유 배출·

Table 1. Changes of emission factor and scaling factor used to calculate for methane emission in paddy fields

| Estimation year | | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | |
|--|--|----------------------|-----------|-----------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Estimation period | | 1990~2010 | 1990~2011 | 1990~2012 | 1990~2013 | 1990~2014 | |
| Emission factor (kg ha ⁻¹ day ⁻¹) | | 2.37 (CS) | 2.37 (CS) | 2.32 (CS) | 2.32 (CS) | 2.32 (CS) | |
| Methane emission by rice cultivation | Scaling factor by water management (SFw) | Continuously flooded | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | |
| | Intermittently flooded | | | | · (< 1 week) 0.83 (CS) | · (< 1 week) 0.83 (CS) | |
| | | | 0.6 (D) | 0.6 (D) | 0.66 (CS) | · (1 week < < 2 week) 0.66 (CS) | · (1 week < < 2 week) 0.66 (CS) |
| | | | | | | · (2 week <) 0.49 (CS) | · (2 week <) 0.49 (CS) |
| Scaling factor by organic amendments (SFo) | No application | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | |
| | Application | 2.0 (D) | 2.5 (D) | 2.5 (CS) | 2.5 (CS) | 2.5 (CS) | |

* D: Default factor, CS: Country specific factor.

보정계수를 적용하여 Tier 2 수준의 배출량 산정체계를 구축하였다. 적용된 국가 고유 배출·보정계수는 메탄 기본 배출계수 $2.32 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 과 물 관리 간단관계 보정계수 0.66, 유기물 사용 보정계수 2.5를 적용하였다. 2015년 메탄 배출량 산정에서는 물 관리 보정계수 중 중간낙수 보정계수를 1주 미만 낙수 0.83, 1주 이상 2주 미만 낙수 0.66, 2주 이상 낙수 0.49 및 천수답 0.4로 세분화 하였다. 2016년 메탄 배출량 산정에서는 2015년과 동일한 계수를 적용하였고, 통계 조사 값만 2010년 값을 2014년까지 동일하게 적용하였다.

물 관리 방법과 유기물 투입량에 따른 보정계수 적용을 위한 통계조사는 2010년부터 통계청에서 시작되었다. 따라서 통계 값이 존재하지 않는 1990년부터 2009년까지 값을 산출하기 위해 IPCC에서 제시하고 있는 전문가 판단(Expert judgement)을 활용하여 1990년의 상시답수와 간단관계 비율을 50대 50으로 하였다. 따라서 1991년부터 2009년까지의 통계자료는 1990년 50:50과 2010년 통계값인 14.4:85.6을 적용하여 선형내삽법으로 산출하였다. 유기물(벼짚 환원) 사용량 또한 전문가 판단을 활용해 1990년 유기물 사용과 무사용의 비율 50대 50, 2010년 통계 값인 45.5:54.5를 적용하여 선형내삽법으로 산출하였다. 2011년부터 2014년까지의 물 관리 방법 및 유기물 사용 보정계수는 2010년 값을 동일하게 적용하였다.

3.2 연도별 벼 재배에 의한 메탄 배출량 차이 분석

Fig. 1은 2012년부터 2016년 각 해당연도에 산정한 연도별 메탄 배출량 변화 및 비교를 나타낸다. 배출량 산정연도와 상관없이 1990년 이후 메탄 배출량은 벼 재배면적 감소에 따라 지속적으로 감소하였다. 각 연도별 산정방법론에 따른 배출량은 2012년 방법론을 적용했을 때 배출량이 가장 적었고, 2014년 방법론을 적용했을 때 배출량이 가장 많았다. 2012년보다 2014년 방법론을 적용했을 때 메탄 배출량이 높았던 이유는

유기물 사용에 따른 보정계수가 2012년 2.0에서 2014년 2.5로 개선됐기 때문이다. 2015년과 2016년 산정 방법론을 적용했을 때 배출량이 줄어든 이유는 물 관리 보정계수가 기존 계수보다 세분화되고 중간 물떼기를 했을 경우 많게는 50% 이상 배출량이 줄어드는 보정계수를 사용했기 때문인 것으로 분석된다. 2015년과 2016년에는 배출량 산정 방법에 대한 개선이 없었기 때문에 배출량 또한 차이가 없는 것으로 분석됐다.

Fig. 2는 2016년 산정방법을 기준으로 각 연도별 배출량 차이 변화를 나타낸다. 2016년 산정방법은 국내에서 개발된 국가 고유 배출·보정계수를 적용하고, 2006 IPCC 가이드라인을 반영하여 이전의 산정 방법론에 비해 가장 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 2016년 산정 방법론을 기준으로 이전 배출량 값을 비교했을 때 많게는 약 1,500 Gg CO₂-eq.까지도 배출량 차이가 나는 것으로 분석됐다. 특히 2012년 방법론으로 산정한 연차별 메탄 배출량은 2016년 방법론과 비교해 1990년 607 Gg CO₂-eq.에서 2010년 1,438 Gg CO₂-eq.으로 차이가 크게 증가했다. 2013년 방법론에 따른 메탄 배출량 차이는 1990년 1,242 Gg CO₂-eq.으로 가장 컸고, 2004년부터는 배출량이 적어지는 것으로 분석됐다. 2014년 방법론에 따른 메탄 배출량 차이는 1990년 1,467 Gg CO₂-eq.으로 가장 컸고, 2009년부터 음의 값을 나타냈다. 2015년 배출량은 2016년과 차이를 나타내지 않았다.

3.3 연도별 농경지 토양에서의 아산화질소 배출량 산정 방법 분석

Table 2는 5년간 연도별 아산화질소 배출량 산정 시 적용한 배출계수 개선 및 변화를 분석한 표이다. 2012년 방법론에서 질소 투입에 따른 아산화질소 직접배출계수를 논의 경우 2006 IPCC 가이드라인의 기본계수인 $0.003 \text{ kg N}_2\text{O-N N kg}^{-1}$ 을 적용하였고, 밭의 경우는 GPG 2000의 기본계수인 0.0125

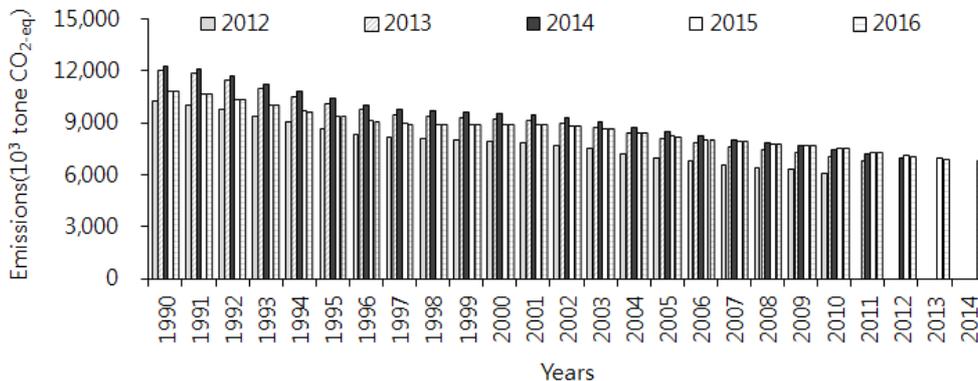


Fig. 1. Comparison of methane emissions as calculation methodology in rice cultivation.

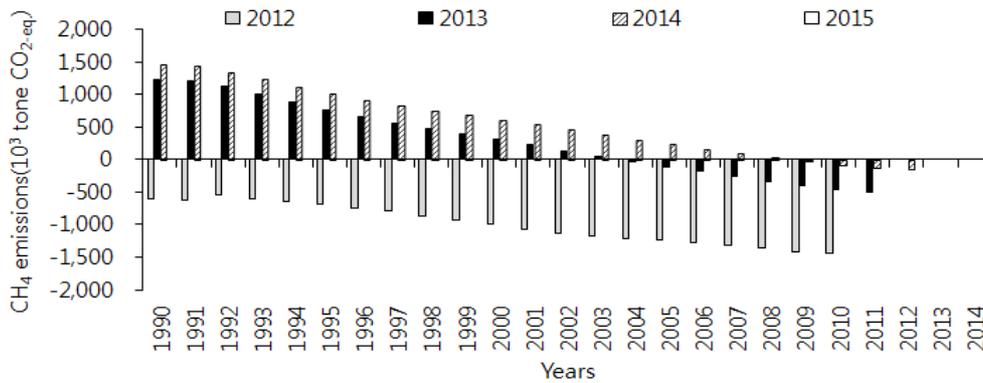


Fig. 2. Comparison of methane emissions differences changes based on 2016 as calculation methodology in rice cultivation.

Table 2. Changes of emission factor used to calculate for nitrous oxide emission in agricultural soils.

| Estimation year | | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|---|--|--|------------|--|--|--|
| Estimation period | | 1990~2010 | 1990~2011 | 1990~2012 | 1990~2013 | 1990~2014 |
| Unit | | ----- kg N ₂ O-N N kg ⁻¹ ----- | | | | |
| N ₂ O emission factor by direct emission | EF ₁ for N addition in agricultural soils | 0.0125 (D) | 0.0125 (D) | 0.00596 (CS) | 0.00596 (CS) | 0.00596 (CS) |
| | | | | · Integration factor for fertilizer application 0.00596 (CS) | · Integration factor 0.00596 (CS) · Red pepper 0.0086 (CS) · Soybean 0.0119 (CS) · Potato 0.0049 (CS) · Spring cabbage 0.0056 (CS) · Autumn cabbage 0.0058 (CS) | · Integration factor 0.00596 (CS) · Red pepper 0.0086 (CS) · Soybean 0.0119 (CS) · Potato 0.0049 (CS) · Spring cabbage 0.0056 (CS) · Autumn cabbage 0.0058 (CS) |
| | EF _{1FR} for flooded rice fields | 0.003 (D) | 0.003 (D) | 0.003 (D) | 0.003 (D) | 0.003 (D) |
| N ₂ O emission factor by indirect emission | EF ₄ for atmospheric decomposition | 0.01 (D) | 0.01 (D) | 0.01 (D) | 0.01 (D) | 0.01 (D) |
| | EF ₅ for N leaching and runoff | 0.025 (D) | 0.025 (D) | 0.025 (D) | 0.0135 (CS) | 0.0135 (CS) |

* D: Default factor, CS: Country specific factor.

kg N₂O-N N kg⁻¹를 적용하였다. 아산화질소 간접 배출계수의 경우 대기 침적에 의한 배출계수와 수계유출에 의한 배출계수는 1996 IPCC 가이드라인의 기본계수 0.01 kg N₂O-N N

kg⁻¹과 0.025 kg N₂O-N N kg⁻¹를 각각 적용하였다. 2013년 방법론에서는 2012년에 적용한 배출계수와는 차이가 없는 것으로 분석됐다. 다만 농경지 질소 투입량 중 가축분뇨 투입량

산정 방법을 4분기 평균 사육두수로 개선했고, 작물잔사 환원율을 국가 통계 조사 값으로 적용해 불확실성을 개선한 것으로 분석됐다. 2014년 방법론에서는 화학비료 투입에 따른 아산화질소 배출계수를 국가 고유배출계수 $0.00596 \text{ kg N}_2\text{O-N N kg}^{-1}$ 을 적용해 Tier 2 수준으로 개선했고, 질소고정작물에 의한 배출량 산정방법을 Tier 1a 방법에서 Tier 1b 방법으로 개선한 것으로 분석됐다. 2015년 방법론에서는 질소투입에 따른 아산화질소 배출계수를 통합계수와 작물별 국가고유 배출계수(고추 0.0086, 콩 0.0119, 감자 0.0049, 봄배추 0.0056, 가을배추 0.0058)로 세분화하여 산정방법을 Tier 2 수준으로 개선한 것으로 분석됐다. 또한 수계유출에 의한 간접배출계수를 국가 고유계수인 $0.0135 \text{ kg N}_2\text{O-N N kg}^{-1}$ 을 적용하였고, 일부 축종의 가축사육두수 환산방법을 4분기 평균값으로 적용하여 산정하였다. 2016년 배출량 산정에서는 2015년에 적용한 배출계수는 동일한 계수를 적용해 계수에서는 큰 차이가 없었다. 다만 2006 IPCC 가이드라인에 따라 질소투입량에 따른 대기 휘산량 10% 보정을 적용하지 않았고, 가축분뇨 처리과정 중 대기소실량 40%를 제외하지 않아 농경지 질소 투입량이 예전에 비해 상대적으로 많으므로 배출량 또한 더 많은 것으로 분석됐다.

3.4 연도별 농경지 토양에서의 아산화질소 배출량 차이 분석

Fig. 3은 2012년부터 2016년까지 각 해당년도에 산정한 연도별 아산화질소 배출량 변화 및 비교를 나타낸다. 농경지 토양에서의 아산화질소 배출량은 질소투입량과 투입원(화학비료, 가축분뇨, 작물잔사 환원 및 질소고정)에 따라 달라진다. 1990년 이후 농경지 면적 감소에 따라 화학비료 생산량은 감소하여 배출량 또한 지속적으로 감소한 반면, 가축사육두수는

1990년 이후 증감을 반복해 가축분뇨 투입량도 증감을 반복하였고, 그에 따른 배출량 또한 증감을 반복하였다. 2012년 방법론으로 산정한 1990년부터 2010년까지 아산화질소 배출량의 경우 1997년에는 최대 7,087 Gg CO₂-eq.까지 증가하였고, 이후 화학비료 시용량 감소와 가축사육두수 감소로 인해 지속적으로 감소하였다. 연도별 산정 방법론에 따른 배출량 변화의 패턴은 전체적으로 비슷했으나, 절대량에 있어서는 배출량 산정 방법에 따라 차이가 컸다. 특히 1990년 배출량의 경우 2012년 방법론으로 산정했을 때는 6,923 Gg CO₂-eq.이었고, 2015년 산정방법론을 적용했을 경우에는 3,785 Gg CO₂-eq.으로 약 2배까지 차이를 나타냈다. 배출량 차이의 직접적인 원인은 아산화질소 직접 배출계수가 2012년의 방법론에서는 기본계수(Default factor)인 $0.0125 \text{ kg N}_2\text{O-N N kg}^{-1}$ 를 적용한 반면, 2015년의 방법론에서는 통합계수 $0.00596 \text{ kg N}_2\text{O-N N kg}^{-1}$ 과 작물별 배출계수 5종(고추 $0.0086 \text{ kg N}_2\text{O-N N kg}^{-1}$, 콩 0.0119, 감자 0.0049, 봄배추 0.0056, 가을배추 0.0058)을 적용했기 때문인 것으로 분석됐다. 또한 수계 간접배출계수도 기본계수인 $0.025 \text{ kg N}_2\text{O-N N kg}^{-1}$ 에서 국가 고유계수 $0.0135 \text{ kg N}_2\text{O-N N kg}^{-1}$ 를 적용했기 때문에 배출량의 차이가 있던 것으로 분석됐다. 2015년과 2016년에는 아산화질소 배출계수의 차이는 없었으나, 질소투입량에 따른 대기 휘산량 10% 보정을 하지 않았고, 분뇨처리과정 중 대기소실량 40%를 제외하지 않고 아산화질소 배출량을 산정했기 때문에 2016년 배출량이 2015년보다 높았던 것으로 판단된다.

Fig. 4는 2016년 산정방법을 기준으로 각 연도별 배출량 차이 변화를 나타낸다. 배출량 차이는 2012년 산정방법에 의한 배출량과의 차이가 1990년 2,028 Gg CO₂-eq.으로 가장 컸고, 그 차이가 2008년까지 차이는 감소하다 2009년 이후 적어지는 것으로 나타났다. 2012년과의 배출량 차이가 컸던 원인은

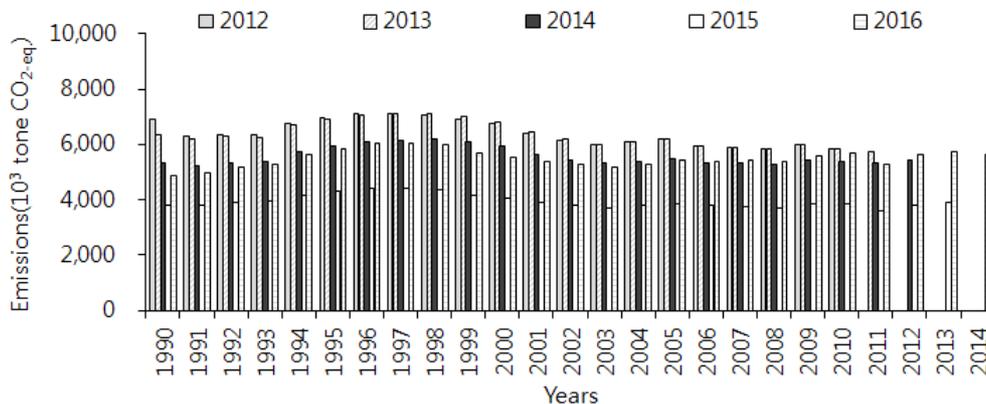


Fig. 3. Comparison of nitrous oxide emissions as calculation methodology in agricultural soils.

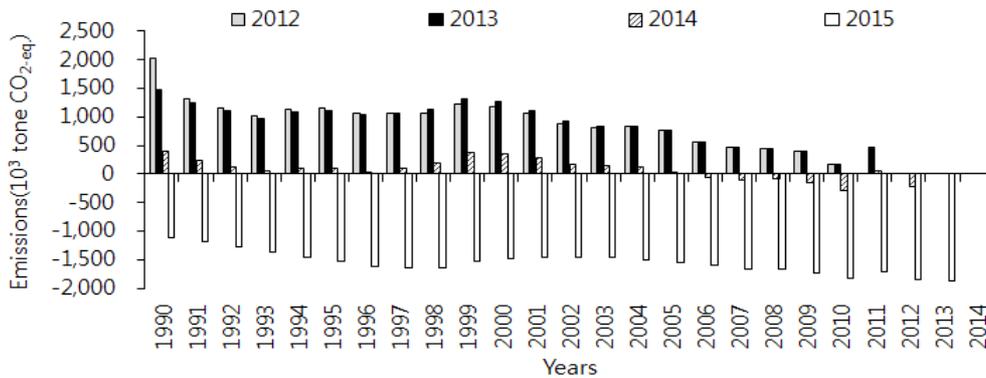


Fig. 4. Comparison of nitrous oxide emissions differences changes based on 2016 as calculation methodology in agricultural soils.

배출계수와 가축분뇨 대기소실량 중복산정을 제외했기 때문인 것으로 분석된다. 특히 2015년 산정방법과 배출량 차이(변동 폭)가 큰 폭으로 변했던 이유는 가축분뇨처리 과정에서의 대기소실량을 제외하지 않았기 때문인 것으로 분석된다.

3.5 연도별 농업부문 온실가스 배출량 차이 분석

Fig. 5는 벼재배 논에서의 메탄 배출량과 농경지 토양에서의 아산화질소 배출량을 합한 농업부문 총 배출량 변화 및 비교를 나타낸다. 산정방법별로 구분했을 때 농업부문 온실가스 총 배출량은 2013년 산정방법론을 적용했을 경우 배출량이 가장 높았고, 2015년 산정방법론을 적용했을 경우 온실가스 배출량이 가장 낮았다.

4. 결 론

농업부문 국가 온실가스 배출량 산정은 매년 배출량 산정방법 개선을 통해 신뢰성을 높이고, 불확도를 저감하는 방향으로

개선되고 있다. 또한 개선된 산정방법론을 적용하고 시계열 적용을 통해 1990년부터 산정년도를 기준으로 전년도($t-2$)까지의 배출량에 대해서 재계산하고 있다. 따라서 배출량은 산정년도에 따라 달라지며, 연도 간 배출량에도 차이가 있다. 기본적으로 온실가스 배출량 산정은 모든 국가가 기본적으로 IPCC 가이드라인 방법론을 적용하고 있으나, 선진국의 경우에는 2006 IPCC 가이드라인을, 개도국은 1996 IPCC 가이드라인을 적용하고 있다. 우리나라 농업분야는 두 방법론과 GPG를 혼용하고 있고, 빠른 시일 내에 전 분야에 2006 가이드라인 적용을 위한 시범산정을 할 계획이다. IPCC 가이드라인에서는 불확도 저감 방법으로 기본 배출계수(Default factor)가 아닌 자국의 농업환경 여건이 반영된 국가 고유계수(Country specific factor)를 개발·적용하도록 권고하고 있다. 우리나라는 지난 5년간 벼 재배에 의한 메탄 배출·보정계수 5종과 아산화질소 직접·간접 배출계수 7종 등 총 12종의 국가 고유 배출계수 개발 및 적용을 통해 Tier 2 수준에 준하는 배출량 산정을 해온 것으로 분석되었다.

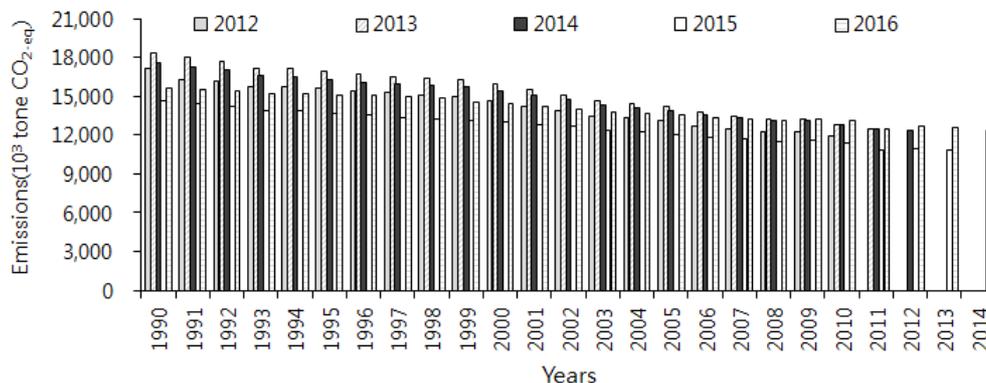


Fig. 5. Comparison of total greenhouse gases emission as calculation methodology in rice fields and agricultural soils.

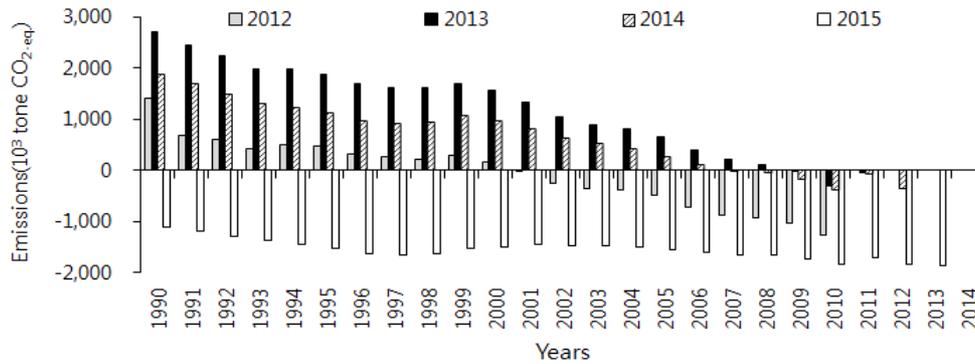


Fig. 6. Comparison of total greenhouse gases emission differences based on 2016 as calculation methodology in rice fields and agricultural soils.

온실가스 배출량은 산정방법에 따른 배출량 변화는 벼 재배 논에서 배출되는 메탄의 경우 2014년 방법론을 적용했을 때 배출량이 가장 많았고, 2012년 산정 방법을 적용했을 때 배출량이 가장 적었다. 농경지 토양에서 질소 투입에 따른 아산화질소 배출량은 2012년 방법론을 적용했을 때 배출량이 가장 많았고, 2015년 방법론을 적용했을 때 배출량이 가장 적었다. 반면, 농업부문 총 배출량에서는 2013년 방법론을 적용했을 때 배출량이 가장 많았고, 2015년 배출량을 적용했을 때 배출량이 가장 적었다.

농업부문 온실가스 배출량은 2016년 가장 개선된 산정방법론을 기준으로 산정방법에 따라 많게는 약 2,717 Gg CO₂-eq. 까지 높게 산정되거나 1,865 Gg CO₂-eq.까지 낮게 산정되기도 하였다. 2016년 농업부문 온실가스 총 배출량 21,290 Gg CO₂-eq.중 축산을 제외한 경종부문 배출량이 12,514 Gg CO₂-eq.임을 감안할 때 2,717 Gg CO₂-eq.의 배출량 차이는 상당히 크다고 할 수 있다. 따라서 향후 2006 IPCC 가이드라인의 완전한 적용과 추가로 개발 중인 국가 고유계수를 적용할 경우 배출량 차이는 더 클 것으로 예상된다.

매년 국가단위에서 산정하는 온실가스 배출량은 산정방법 개선의 측면에서 불확도 저감의 긍정적인 효과도 있지만, 개선 전 데이터에 대한 신뢰성 결여 등에 대한 부정적인 효과도 생각해 볼 필요가 있다. 또한 연차별 방법론 개선에 따른 배출량 차이의 원인 분석은 향후 신규 계수 개발 계획 수립 및 통계자료 확보, 신규 가이드라인 적용을 위한 방법론 구축뿐만 아니라, 국가 온실가스 감축목표 달성, 기후변화 협상 대응 등에 객관적인 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구

개발사업(PJ01003003) 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

Eichner MJ. 1990. Nitrous oxide emission from fertiliser source on denitrification and nitrous oxide emissions in a maize-field. *J of Environmental Quality* 19:272-280.

Greenhouse Gas Inventory and Research Center(GIR). 2012, 2013, 2014, 2015, 2016. National greenhouse gas inventory report of Korea. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. Ministry of Environment.

Hadi K, Inubushi K, Yagi K. 2010. Effect of water management on greenhouse gas emissions and microbial properties of paddy soils in Japan and Indonesia. *Paddy Water Environ* 8:319-324.

IPCC. 1996. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

IPCC. 2000. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. Penman J, Kruger D, Galbally I, Hiraishi T, Nyenzi B, Emmanuel S, Buendia L, Hoppaus R, Martinsen T, Meijer J, Miwa K, Tanabe K. (Eds). IPCC/OECD/IEA/IGES. Hayama, Japan.

IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Krug T, Kruger D, Pipatti R, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, Wagner F. (Eds). IPCC/IGES, Hayama, Japan.

IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Jeong HC, Kim GY, Lee DB, Shim KM, Lee SB, Kang KK.

2011. Assessment on nitrous oxide (N₂O) emissions in Korea agricultural soils in 2011. *Korean J Soil Sci Fert* 44(6):1207-1213.
- Mosier AR. 2001. Exchange of gaseous nitrogen compounds between agricultural systems and the atmosphere. *Plant and Soil* 228:17-27.
- Park ME, Yun SH. 2002. Scientific basis for establishing country CH₄ emission estimates for rice-based agriculture: A Korea (south) case study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 64:11-17.
- Parkin T, Kaspar T. 2006. Nitrous oxide emissions from corn-soybean systems in the midwest. *J Environ Qual* 35:1496-1506.
- Schy U, Ruser R, Munch J. 2003. Nitrous oxide fluxes from maize fields: Relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions. *Agric Ecosyst Environ* 99:97-111.
- Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, McAllister T, Pan G, Romanenkov V, Schneider U, Towprayoon S, Wattenbach M, Smith J. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture.