

농업분야 온실가스 배출량 산정의 불확도 추정 및 평가

배연정 · 배승종 · 서일환 · 서교* · 이정재* · 김건엽**

서울대학교 그린바이오과학기술연구원

*서울대학교 생태조경·지역시스템공학부, 서울대학교 농업생명과학연구원

**농촌진흥청 국립농업과학원

Estimation of Uncertainty on Greenhouse Gas Emission in the Agriculture Sector

Bae, Yeon-Joung · Bae, Seung-Jong · Seo, Il-Hwan · Seo, Kyo · Lee, Jeong-Jae* · Kim, Gun-Yeob**

Institute of Green Bio Science & Technology, Seoul National University

**Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering,
Research Institute for Architecture and Life Science, Seoul National University*

***National Academy of Agricultural Science(NAAS), RDA*

ABSTRACT : Analysis and evaluation of uncertainty is adopting the advanced methodology among the methods for greenhouse gas emission assessment that was defined in GPS2000 (Good practice guideline 2000) and GPG-LULUCF (GPG Land Use, Land-Use Change and Forestry). In 2006 IPCC guideline, two approaches are suggested to explain the uncertainty for each section with a national net emission and a prediction value on uncertainty as follows; 1) Spread sheet calculation based on the error propagation algorithm that was simplified with some assumptions, and 2) Monte carlo simulation that can be utilized in general purposes. There are few researches on the agricultural field including greenhouse gas emission that is generated from livestock and cultivation lands due to lack of information for statistic data, emission coefficient, and complicated emission formula. The main objective of this study is to suggest an evaluation method for the uncertainty of greenhouse gas emission in agricultural field by means of intercomparison of the prediction value on uncertainties which were estimated by spread sheet calculation and monte carlo simulation. A statistic analysis for probability density function for uncertainty of emission rate was carried out by targeting livestock intestinal fermentation, excrements treatment, and direct/indirect emission from agricultural lands and rice cultivation. It was suggested to minimize uncertainty by means of extraction of emission coefficient according to each targeting section.

Key words : AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use), Greenhouse Gas, Monte Carlo Simulation, Uncertainty

1. 서론

우리나라는 기후변화협약 당사국으로 온실가스의 배출현황 및 전망, 온실가스 억제정책을 포함하는 국가보고서를 제출해야 하며, 온실가스 의무감축 대상국으로의 편입을 대비하여 보다 정확하고 신뢰성 있는 온실가스

배출량 통계를 구축해야 한다(김철한 등, 2008). 온실가스 배출량 통계는 기후변화에 관련 정부간 패널(IPCC, intergovernmental Panel on Climate Change)이 권고하는 가이드라인에 맞추어 온실가스에 관한 국가목록을 작성하는 것으로, IPCC 가이드라인은 인간활동에 따른 온실가스 배출원에 의한 배출과 저감원에 의한 저감의 국가목록을 작성하기 위한 방법론을 제공하고 있다. 아직 우리나라는 배출량 통계작성에 있어 초기단계에 머무르고 있어 국제적인 수준의 통계 작성 및 관리 체계의 선진화

Corresponding Author : Bae, Seung-Jong

Tel : 033-339-5811

E-mail : bsj5120@hanmail.net

를 위한 개선 활동이 절실하다(김현성 등, 2008).

국가 온실가스 인벤토리 작성 시 신뢰성 확보를 위해서는 정확한 불확도(Uncertainty)의 산정이 필요하다. 불확도는 국가 온실가스 인벤토리에서 산정된 배출량 및 흡수량에 대한 신뢰성을 통계적 방법을 통해 계량화한 것으로, 이러한 불확도의 평가는 미래 온실가스 배출량 산정에 있어서 정확도를 높이는 국가적 노력에 우선순위를 부여하는 지침이 될 수 있으며, 온실가스 배출량 저감을 위한 방법론의 선택에 도움을 줄 수 있다. IPCC는 인벤토리 작성 시 투명성(Transparency), 정확성(Accuracy), 일관(Consistency), 비교가능성(Comparability), 완전성(Completeness) 원칙을 따르도록 권고하고 있는데, 불확도는 이 다섯 가지 원칙 모두에 영향을 미치는 중요한 요소가 된다(도승희, 2009; 김현선 등, 2008).

국제표준화기구(ISO)에서는 측정불확도를 참값이 존재하는 범위를 나타낸 추정값으로 정의하고 있으며, 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산 특성을 나타내는 값(표준편차, 신뢰구간의 반너비 등)으로 표현한다. 측정 불확도는 다시 A형 표준불확도와 B형 표준불확도로 구분하는데, A형 표준불확도는 통계적 자료에 의하여 추정할 수 있는 불확도이고, B형 표준불확도는 통계적 방법 이외의 방법(전문가의 판단 등)으로 추정되는 불확도를 나타낸다(박윤영 등, 2010; 한국표준과학연구원, 2008). 2006 IPCC 가이드라인에서는 불확도를 “가능한 값들의 범위와 가능성을 특징짓는 확률밀도함수(PDF, Probability Density Function)로서 기술될 수 있는, 변수의 진실한 값에 관한 지식의 결여이며, 기본 프로세스 및 추론기법에 관한 지식뿐만 아니라 적용 가능한 자료의 질과 양 즉, 분석자의 지식상태에 좌우된다.”라고 정의한다(박윤영 등, 2010). IPCC가 이처럼 불확도에 대해 모호한 정의를 내리고 있는 것은 아직까지 많은 부문에서 계량화하기 어려운 배출계수가 존재하기 때문인 것으로 판단되며, 이는 결국 A형 표준불확도와 B형 표준불확도 개념을 포함하는 정의로 받아들일 수 있다. 온실가스 배출량 산정의 또 다른 가이드라인인 GPG 2000(Good Practice Guide 2000)에서는 불확도 원인을 배출량의 지속적인 모니터링에 관한 불확도, 배출계수 결정에 관한 불확도, 공표된 레퍼런스의 배출계수에 관한 불확도, 그리고 활동자료에 관한 불확도로 구분하고 있다.

온실가스 인벤토리에서 불확도의 평가 방법은 온실가스 배출원 혹은 흡수원에 대한 각각의 변수(배출계수, 활동자료)에 대해 불확도를 결정하고 이들을 조합하여 총 불확도를 결정하는 체계를 따르고 있다. 2006 IPCC 가이드라인은 활동자료와 배출계수의 불확도를 평가하기 위한 방법으로 배출량 산정 모형의 불확도, 자료의 통계

분석 불확도, 전문가 판단의 불확도, 확률밀도함수 선택의 불확도 등에 대해 상세한 가이드라인을 제시하고 있으며, 불확도를 조합하는 방법으로 오차의 확산 및 몬테카를로 모의실험 방법을 제시하고 있다(환경부, 2010). 그러나 우리나라의 경우 배출계수 및 활동자료에 대한 불확도가 평가되지 않거나 IPCC가 제공하는 기본 불확도를 그대로 인용하고 있어 불확도에 대한 심층적인 연구가 절실하다.

현재까지 불확도 평가에 관한 국내 연구문헌은 양적인 측면에서 많지 않다. 김철한 등(2008)은 불확도 추정과 관련된 IPCC 가이드라인의 이론적 배경 및 계량화 방법을 소개하였으며, 박윤영 등(2010)과 김정미(2011)는 온실가스 배출통계의 불확도에 대한 개념적인 정의 및 산정에 관한 실무적인 지침을 제시한 바 있다. 김현선 등(2008)은 매립지 온실가스 배출량 산정에 있어서 불확도 평가 및 조합방법에 대해 실증적인 연구를 수행하였다. 그러나 농업분야 및 토지이용에 관한 불확도 평가는 에너지 및 산업공정 분야에 비해 통계자료의 구득, 배출계수 산정의 어려움 그리고 배출량 산정식의 복잡성으로 인해 거의 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 선진화된 온실가스 통계분석 체계를 구축하고 있는 핀란드와 일본에서도 농업부문에 대한 불확도가 다른 부문에 비해 매우 높은 편으로, 이는 농업부문의 배출량 산정이 타 부문에 비해 어려운 것을 방증한다. 핀란드의 경우 농업부문 최소 불확도는 14%로 폐기물 부문에 이어 두 번째로 크며, 일본의 경우에도 농업부문 배출계수의 최소 불확도는 50%인 반면에 에너지는 0.3% 산업공정의 경우 2.0%로 평가되고 있다.

2012년 국가온실가스 인벤토리 보고서에 따르면 2010년 농업 분야에서의 배출량은 21.3 백만 톤 CO₂ eq. (CO₂ equivalent, 이산화탄소 동가환산량) 으로 국가 전체 배출량의 약 3.2%만을 차지한다. 그러나 농업부문의 온실가스 배출량 대한 정확하고 신뢰성 있는 불확도 평가가 중요한 이유는 농업부문이 총 온실가스 변화 기여도에서 차지하는 비중이 높기 때문이다. 1990년을 기준으로 2010년의 배출량 및 흡수량 변화량에 대해 배출량 상위 95%까지의 주요 배출원 분석을 보면 농업 부문의 비재배(상시답수 논)에 대한 변화기여도가 9위, 농경지 간접배출의 변화기여도가 29위로 농업부문이 다른 부문에 비해 온실가스 저감 잠재력이 높은 것으로 분석된다. 따라서 농업부문 각각의 배출원에 적용된 방법론, 배출계수 및 활동자료의 적합성을 평가하여 온실가스 총 배출량의 불확도를 평가할 수 있는 배출통계체계가 요구된다.

본 연구에서는 우리나라 농업부문 온실가스 배출량의 산정에 대한 불확도를 평가하고 불확도에 큰 영향을 미

치는 배출계수 및 활동자료를 추출하여 온실가스 배출량 저감을 위한 방법론의 선택에 기준을 제시하고자 한다. 이를 위해 먼저 농업부문 온실가스 배출량 산정식을 고찰하고, 각각의 산정식에서 이용하는 배출계수 및 활동자료에 대한 개별적인 불확도를 검증한 후 이에 대한 조합 불확도를 산출하여 온실가스 배출량에 대한 신뢰도를 평가하고자 한다.

II. 연구방법

배출계수 및 활동자료의 불확도를 계량화 하는 방법으로 2006 IPCC 가이드라인은 ① 모형의 불확도, ② 실증적 자료의 통계적 분석, ③ 전문가 판단을 부호화 하는 방법, ④ 확률밀도함수(PDF)의 선택에 관한 상세한 가이드라인을 제시하고 있다. 또한 불확도를 조합하는 방법으로 두 가지 접근법을 제시하는데, 접근법 1은 오차의 확산을 통한 접근법으로 계산을 단순화하기 위한 일부 가정들에 기초한 단순한 스프레드시트 기반의 계산 절차이고, 접근법 2는 몬테카를로 모의실험(Monte Carlo Simulation)에 기반하며 보다 일반적인 적용이 가능한 방법이다(Ramirez 등, 2008; Hastings 등, 2010; Monni 등, 2004; Winiwarter 등, 2001).

1. 불확도 계량화 방법

불확도 평가 방법

불확도를 통계적 개념으로 정량화하는 방법은 표본데

이터를 신뢰구간에 대한 오차의 한계 개념으로 정량화하는 방법과 측정데이터의 분포를 통해 그 분산정도를 정량화하는 방법이 이용된다. 그러나 자료를 기록하고 추론하는 개념화, 모형의 개발, 측정기법의 적용, 그 외 시스템적으로 발생하는 오차는 계량화하기 어렵다. 이런 경우 IPCC에서도 우수실행지침(Good Practice Guideline)을 통해 잠재적 불확도 원인을 기술하고 불확도를 저감할 수 있는 노력을 주문할 뿐 불확도 계량화 방법에 대해 별도의 기준을 제시하고 있지 않다.

표본을 이용한 조사데이터나 측정데이터의 경우 불확도는 95% 신뢰구간의 오차의 한계를 추정값으로 나눈 값을 백분율로 나타낸다. 확률밀도함수(PDF)가 대칭인 경우 불확도는 신뢰구간을 ±신뢰구간 길이의 절반크기를 변수의 추정값으로 나눈 값을 이용하며, 비대칭인 경우 신뢰구간의 상한과 하한을 각각 지정하여 나타낸다. Figure 1은 확률밀도함수가 비대칭인 경우를 나타내는데, 불확도 평균이 1.0 단위이고 2.5번째 백분위수(Percentile)는 0.5 단위이며 97.5번째 백분위수는 2.0 단위이므로 불확도는 -50% ~ +100%로 표현된다(IPCC, 2006).

온실가스 배출량을 산정하기 위한 배출계수 및 활동자료의 선택은 측정자료, 출판된 관련 정보, 모형의 출력값 및 전문가 판단을 조합하게 되는데, 이때 측정자료나 통계자료를 활용할 경우 확률밀도함수(PDF)의 확인 및 선택이 필요하다. 특히 수집된 자료가 적거나 전문가의 판단을 이용한 경우에는 확률밀도함수의 선택이 전체 배출원의 불확도를 좌우한다. 정규분포는 불확실성의 범위가 작고 추정값에 대해 확률분포가 대칭일 때 가장 적절하고, 로그정규분포는 불확실성이 양의 왜도를 가지는

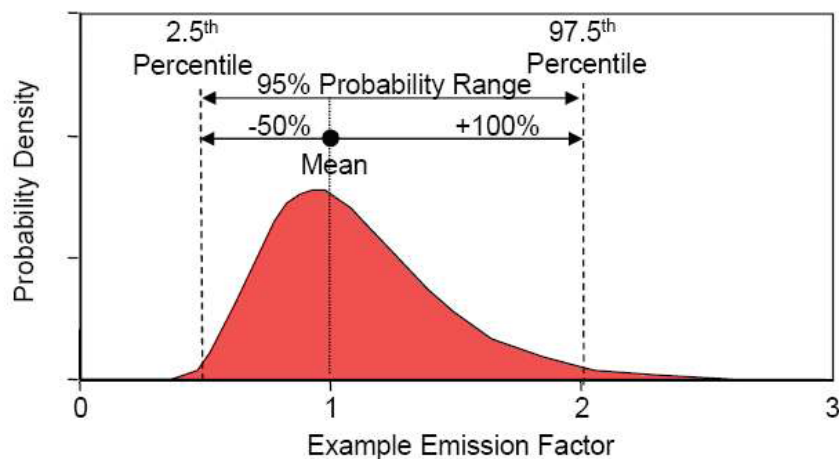


Figure 1 Uncertainty measurement in asymmetric probability distribution (IPCC guideline, 2006)

경우에 적절하다. 로그정규분포와 형태는 유사하지만 로그정규분포만큼 굽은 꼬리(Tail-heavy) 형태가 아닌 경우에는 Weibull 분포나 Gamma 분포를 이용하는 것이 적당하다. 균등분포는 조사 자료 수가 적고 전문가가 상한과 하한을 지정할 수 있는 경우에 적당하며, 삼각분포는 전문가가 상한, 하한과 함께 선호값을 제공하는 경우에 적당하다(박윤영 등, 2010).

불확도 조합 방법

불확도의 조합은 각 부문에 대한 활동자료와 배출계수의 불확도를 조합하여 부문에 대한 불확도를 산정하거나, 부문별 불확도를 조합하여 총 인벤토리 불확도를 산정할 때 필요하며, 두 가지 접근법이 제시되고 있다. 첫 번째 접근법은 오차의 확산에 기반한 스프레드시트를 이용한 방법으로 배출계수 및 활동자료에 대한 불확도 범위를 조합하는 방식으로 Eq. 1은 부문별 온실가스 배출량의 불확도를 조합하는 경우에 Eq. 2는 부문별 온실가스 배출량에 대한 불확도를 국가 온실가스 배출량의 불확도로 합산하는 경우에 각각 이용한다. 부문별 배출 온실가스가 상이한 경우 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential)를 이용해 CO₂ 등가로 변환한 후 불확도를 조합한다. 이러한 접근 방법은 입력자료 간 상관관계가 없는 경우를 가정하며, 변이계수(표준편차/평균값)가 0.3 미만일 경우 적용할 수 있다(박윤영 등, 2010).

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \tag{1}$$

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot x_1)^2 + (U_2 \cdot x_2)^2 + \dots + (U_n \cdot x_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|} \tag{2}$$

여기서, U_{total} 은 전체 불확도, U_n 은 부문별 불확도

이며, x_n 은 각 부문별 배출량을 나타낸다.

두 번째 접근법은 몬테카를로 모의실험에 의한 방식으로 확률밀도함수가 비정규적인 경우나 온실가스 배출량 산정식이 복잡한 경우, 혹은 배출계수 간 상관관계가 존재할 경우에 적합하다. 몬테카를로 모의실험 절차는 ① 온실가스 배출량 산정에 이용되는 배출계수 및 활동자료에 대한 확률밀도함수(PDF)를 결정하고, ② 각각의 입력자료(배출계수 및 활동자료)에 대한 확률밀도함수에서 무작위로 확률변수를 추출하고, ③ 배출량 산정식에 적용해 온실가스 배출량을 산정하며, ④ 정해진 횟수만큼 확률변수 추출 및 배출량 산정 프로세스를 반복하는 형태로 구성된다. 온실가스 배출량 산정 시 IPCC에서 제공하는 기본배출계수를 이용하는 Tier 1 방법을 이용할 경우 오차의 확산 기법에 의한 불확도 산정방법이 적당하며, 농업, 임업 및 기타 토지이용(AFOLU, Agriculture, Forestry and Other Land Use)과 같이 산정식이 복잡하고 배출계수 산정을 위해 Tier 2 방법이 이용될 경우에는 몬테카를로 모의실험에 기반 한 불확도 산정방법이 적합하다(Ramirez et. al., 2008).

2. 농업분야 온실가스 배출량의 불확도 산정

최근에 보고된 2012년 국가온실가스 인벤토리 보고서(1990년~2010년)는 1996 IPCC 가이드라인에 따라 온실가스 배출량 통계가 작성되었는데, 농업부문 배출원 구분은 장내발효(4A), 분뇨처리(4B), 비재배(4C), 농경지 토양(4D), 작물잔사 소각(4F)과 같은 5개 카테고리 구성되었으며, 발생 온실가스는 CH₄와 N₂O로 구성된다.

장내발효(4A) 부문에 대한 불확도 산정

장내발효 부문 배출원은 젖소, 한·육우, 돼지, 닭, 염소, 면양, 말, 사슴, 오리와 같은 가축이 섭취한 사료가 장 내에서 소화되는 과정에서 발생하는 CH₄ 배출량을

Table 1 Greenhouse gas emission by agricultural categories in 2010 (2012 NIR)

Emission Sources	Total	CH ₄	N ₂ O
	(Gg CO ₂ eq.)		
Agricultural Field	21,257.62	11,452.53	9,805.04
Enteric Fermentation (4A)	4,063.49	4,063.46	N/A
Manure Management (4B)	5,162.43	1,232.32	3,930.09
Rice Cultivation (4C)	6,098.39	6,098.39	N/A
Agricultural Soils (4D)	5,854.79	N/A	5,854.79
Field Burning of Agricultural Residues (4F)	78.52	58.36	20.16

산정한 것이다. 2012년 국가온실가스 인벤토리 보고서에서는 1996 IPCC 가이드라인의 Tier 1 방법을 적용하고 있으며 배출계수는 IPCC 기본 값을, 활동자료는 농림수산물통계연보를 이용하고 있다. 보고서에서는 IPCC를 인용하여 불확도를 $\pm 50\%$ 로 산정하고 있지만, 본 연구에서는 몬테카를로 모의실험을 통한 불확도 평가를 위해 배출계수 및 활동자료에 대한 확률밀도함수를 정의하였다. 배출계수에 대한 확률밀도함수 적용은 각각의 가축에 대한 IPCC 기본배출계수를 평균으로 하고 IPCC의 추정 불확도인 $\pm 20\%$ 의 정규분포로 가정하였다. 또한 활동자료에 대해서는 농림수산물통계연보의 목표오차가 3% 이므로 이를 적용하여 정규분포의 확률밀도함수를 적용하였다.

분뇨처리(4B) 부문에 대한 불확도 산정

가축분뇨 처리과정에서 발생하는 온실가스는 CH_4 와 N_2O 로 구분된다. CH_4 의 배출량 산정은 장내발효(4A)와 유사하며, 활동자료는 농림수산물통계연보에 따라 1990년부터 2010년까지의 가축두수를 이용하며 이에 대한 불확도는 $\pm 3\%$ 의 정규분포를 이용하였다. 배출계수는 IPCC 기본배출계수를 이용하며 이에 대한 불확도는 IPCC의 추정 불확도인 $\pm 20\%$ 의 정규분포로 가정하였다. N_2O 배출량은 Eq. 3과 같은 배출량 산정식을 이용하는 데, 분뇨처리 시설로는 혐기성 저장조(Anaerobic Lagoon), 액비화 시설(Liquid System), 일일 살포(Daily Spread), 퇴비화 시설(Solid Storage and Drylot), 목초지/방목지(Pasture Range and Paddock), 기타(Other System)로 구분된다. 분뇨처리시설 배출계수의 확률밀도함수는 IPCC의 각 분뇨처리시설 배출계수 범위를 상한과 하한으로 하고 국가인벤토리 보고서에서 채용한 배출계수 값을 최빈값(Mode)으로 하는 삼각분포를 적용하였다. 국가인벤토리 보고서는 분뇨처리 시설별 비율을 결정하는데 있어 2010년 농림어업총조사 자료를 기반으로 1990년~2010년 모든 활동자료에 적용한다. 그러나 액비화 시설이나 퇴비화 시설의 도입은 2000년을 기점으로 농가에 확산된 것

으로 2010년 조사자료를 기반으로 모든 년도에 적용하는 것은 심각한 오차를 발생시킬 수 있다. 본 연구에서는 이러한 오차를 보정하기 위해 2010년 통계조사 목표 오차 3%를 기준으로 정규분포인 확률밀도함수를 적용하고 1년마다 불확도가 $\pm 3\%$ 씩 증가하는 형태로 구성하였다. 따라서 2009년에는 $\pm 6\%$, 2008년 $\pm 9\%$ 를 적용하여 1990년에는 배출계수의 불확도가 $\pm 63\%$ 인 정규분포를 따르도록 하였다.

$$N_2O_D = \left[\sum_S \left[\sum_T (N_{(T)} N_{ex(T)} MS_{(T,S)}) EF_{3(S)} \right] \right] \frac{44}{28} \quad (3)$$

여기서, N_2O_D 는 가축분뇨처리시설의 직접적인 N_2O 배출량 ($kg N_2O/year$), $N_{(T)}$ 는 가축 종류와 분유에 따른 두수, $N_{ex}(T)$ 는 가축당 분뇨로 배출하는 연평균 질소량 ($kg N/가축/year$), $MS_{(T,S)}$ 는 가축분뇨처리시설 S의 이용비율, $EF_{3(S)}$ 는 가축분뇨처리시설 S의 직접적인 아산화질소 배출계수 ($kg N_2O - N/kg N$), S는 가축분뇨처리시설종류, T는 가축의 종류 또는 분류, 44/28은 $N_2O - N$ 을 N_2O 로 전환하는 것을 나타낸다.

벼 재배(4C) 부문에 대한 불확도 산정

우리나라 농경지에서 배출되는 CH_4 는 1996 IPCC 분류에 따라 물관리가 가능한 논(Irrigated)에 해당한다. 물관리가 가능한 논은 다시 항상 물을 담수하는 상시담수(Continuously flooded) 논과 벼 재배기간 동안 적어도 한번(3일 이상) 이상 건조를 하는 간판관개(Intermittently flooded) 논으로 나누어진다. 벼 재배 논에서 CH_4 배출량 산정 방법론은 Eq. 4와 같다. 기본배출계수는 농촌진흥청에서 5년(1993 ~ 1997)간 연구한 시험결과를 바탕으로 국가 고유 배출계수로 2.37을 적용하고 있다. 그러나 IPCC에서 제시하는 기본배출계수는 2.0이고, 2012년 농촌진흥청 시험연구보고서에서는 2.03(정현철 등, 2012)을 제안하고 있어 기본배출계수에 대한 확률밀도함수는 하한이 2.0이고 상한이 2.37이며 최빈도가 2.03인 삼각분포

Table 2 Emission factor($N_2O - N$) and utilization rate of manure management

Manure management	Emission Factor	Utilization rate of manure management systems					
		Cow	Cattle	Pig	Chicken	Duck	Others
Anaerobic Lagoon	0.001 (0-0.002)	0.1	0.3	16.2	0.3	0.6	-
Solid Storage and Drylot	0.02 (0.005-0.03)	86.2	92.0	15.6	68.8	67.8	100.0
Other systems	0.005	13.7	7.7	68.2	30.9	31.6	-

를 가정하였다. 또한 벼 재배일수는 품종별 재배일수와 재배면적의 가중평균을 통해 산정한 138일을 채용하고 있는데 지역별로 이양시기가 20~30일 가량 차이가 나는 점을 감안하여 확률밀도함수는 138일을 평균으로 하고 불확도가 ±15%인 정규분포로 가정하였다. 상시담수 논과 간단관계 논에 대한 재배면적을 산정하기 위한 통계 자료는 2010년 농림어업총조사를 통해 상시담수 논과 간단관계 논의 비율을 14.4:85.6으로 계산하고, 그 이전의 자료는 1990년을 기점으로 상시담수와 간단관계 비율이 50:50으로 가정하여 1차 선형 회귀식을 통해 산정하고 있다. 본 연구에서는 이러한 회귀식 적용에 따른 오차를 보정하기 위해 2010년 통계조사 목표오차 3%를 기준으로 정규분포인 확률밀도함수를 적용하고 1년마다 불확도가 ±2%씩 증가하는 형태로 구성하였다. 유기물 시용 비율에 대해서도 물 관리 방법 비율과 유사하게 조사되었는데 유기물 시용 논 비율이 1990년 전문가 판단에 따라 50%, 2010년 농림어업총조사 자료를 기반으로 45.5%를 적용한다. 본 연구에서는 이에 따른 불확도를 결정하기 위해 확률밀도함수를 불확도가 ±10%인 정규분포로 가정하였다.

$$CH_4 Rice = A \times t \times (EF_C \times SF_W \times SF_O \times SF_S) (Gg CH_4 yr^{-1}) \quad (4)$$

여기서, A 는 면적 ($ha/year$), t 는 재배일수 ($days$), EF_C 는 기본배출계수, SF_W 는 벼 재배기간 중 물관리 보정계수, SF_O 는 유기물사용 보정계수, SF_S 는 토양특성이나 벼품종 별 보정계수이다.

농경지(4D) 부문에 대한 불확도 산정

농경지에서의 N_2O 배출은 배출원에 따라 농경지 토양으로부터의 직접배출 및 간접배출로 구분된다. 직접배출은 화학비료(F_{SN})나 가축분뇨(F_{AW})에 의한 질소, 질소고정작물 재배에 의한 질소(F_{BN}), 작물 잔사 환원에 의한 질소(F_{CR}) 등으로 구분하고 있으며, 배출량 산정식은 Eq. 5와 같다. 화학비료 사용량에 따른 (F_{AW})에 의한 N_2O 직접 배출계수는 논외의 경우 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하는 $0.003 kg N_2O-N/Nkg$ 을 적용하는데 배출계수의 범위가 (0 ~ 0.006) 이므로 삼각분포로 가정하여 불확도에 대한 확률밀도함수로 이용하였다. 밭의 경우 GPG 2000의 기본배출계수인 $0.0125 kg N_2O-N/Nkg$ 을 인용하였는데 배출계수의 범위가 (0.0025 ~ 0.0225) 이므로 범위값을 상한과 하한으로 하고 최빈값을 기본배출계수 값으로 하는 삼각분포를 가정

하였다. 가축분뇨에 의한 농경지 배출량 산정식에서는 밭의 배출계수를 그대로 적용하였으며, 가축 종별 배설물의 질소함량은 2006 IPCC 기본값을, 불확도는 가이드라인에서 제시한 ±50%로 가정하였다. 작물 잔사 환원에 의한 N_2O 배출량 산정에서 각 작물별 건물율과 질소함량은 GPG 2000의 기본배출계수를 이용하는데, 이에 대한 불확도 평가를 위한 확률밀도함수는 가이드라인에서 제시하는 불확도 ±50%의 정규분포로 가정하였다. 활동자료에 대한 불확도는 대부분의 자료가 농림수산물통계연보를 활용하였기 때문에 통계자료의 목표오차인 3%를 적용하여 정규분포의 확률밀도함수를 가정하였다.

$$N_2O_{DIRECT} = [(F_{SN} + F_{AW} + F_{BN} + F_{CR}) \times EF_1] + F_{OS} \times EF_2 \times 44/28 \quad (5)$$

여기서, EF_1 은 N_2O 직접 배출계수, F_{SN} 은 화학비료로 농경지에 투입되는 총 질소량에서 대기휘산을 제외한 질소량, F_{AW} 는 가축분뇨로 농경지에 투입되는 총 질소량에서 대기휘산을 제외한 질소량, F_{BN} 은 질소고정작물에 의해 투입되는 질소량, F_{CR} 은 작물 잔사로서 농경지에 재투입되는 질소량, F_{OS} 는 연간 경작되는 유기질 토양면적, EF_2 는 유기질 토양경작에 의한 N_2O 배출계수이다.

농경지 토양으로부터 N_2O 간접배출은 대기 침적에 의한 N_2O 간접배출과 수계유출에 의한 간접배출로 구분된다. 대기 침적에 의한 간접배출은 다시 화학비료, 가축분뇨의 농경지 시용, 그리고 퇴비화 과정에서 발생하는 대기휘산량을 계산한다. 화학비료 사용에 따른 대기휘산의 경우 IPCC 가이드라인에 따라 화학비료 전체사용량의 10%를 가정하며 이에 대한 불확도 범위는 (0.03~0.3)과 같다. 가축분뇨의 농경지 시용에 따른 대기휘산량은 가축분뇨 전체사용량의 20%를 가정하며 불확도 범위는 (0.05~0.5)로 가정한다. 또한 퇴비화 과정에서 발생하는 대기휘산은 국가고유배출계수인 40%를 적용하는데, 퇴비 내부 교환 여부에 따라 (0.3~0.6)의 변화가 관측됨에 따라 이 범위를 불확도 범위로 가정한다. 배출계수는 1996 IPCC 가이드라인에 따라 0.01(0.002~0.02)를 적용한다. 수계유출에 의한 N_2O 간접배출량 산정에 있어서 활동자료는 IPCC 가이드라인에 따라 농경지에 시용된 전체 질소량의 30%가 수계유출을 통해 배출되는 것으로 가정하며, 이에 대한 불확도 범위는 (0.1~0.8)과 같다. 배출계수는 활동자료와 마찬가지로 IPCC 가이드라

인을 인용하여 0.025(0.002~0.12) 값을 적용한다.

작물잔사 소각(4F) 부문에 대한 불확도 산정

작물잔사 소각에 따른 온실가스 배출량은 N_2O 와 CH_4 를 대상으로 산정하며, 대상 작물은 벼, 맥류, 밀, 두류, 고추를 이용한다. 온실가스 배출량 산정 방법은 IPCC 가이드라인에 따라 작물잔사 비율, 건물물, 소각률, 산화율, 건물에 대한 탄소와 질소의 함량, 그리고 소각 시 발생하는 온실가스 배출률을 곱하여 계산한다. 온실가스 배출계수는 IPCC 가이드라인을 이용하였으며, N_2O 의 경우 0.007(0.005~0.009), CH_4 의 경우 0.005(0.003~0.007)의 값을 이용하였다. 활동자료는 벼의 경우 2010년 농림어업총조사 자료를 이용하였기 때문에 목포 오차인 3%를 적용하고, 맥류 및 밀의 경우 농어촌연구원의 실험결과를 바탕으로 하여 43.9%를 적용하는데 이에 대한 불확도 범위를 $\pm 20\%$ 로 가정하였다. 두류 및 고추의 경우 작물잔사 전체가 소각되는 것으로 가정하기 때문에 이에 대한 불확도는 계산하지 않았다.

불확도의 조합 및 민감도 분석

본 연구에서는 농업부문 온실가스 배출량 산정에 이용되는 다양한 배출계수 및 활동자료의 불확도를 조합하여 부문별 불확도를 추정하기 위해 몬테카를로 모의실험

방법을 적용하였다. 몬테카를로 모의실험은 크리스탈볼 프로그램(version 7.3, Oracle Inc., USA.)을 이용하였으며, 배출계수 및 활동자료가 온실가스 배출량에 미치는 영향을 분석하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 이때 산정된 민감도는 개별 배출계수 및 활동자료가 배출량에 미치는 영향을 단순히 분석하는 것이 아니라, 변수간의 상관관계를 반영한 배출량에 대한 영향력을 분석한 것으로 온실가스 배출량 산정에 있어서 불확도를 저감하기 위한 배출계수 선정 등에 이용할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

장내발효, 분뇨처리, 벼 재배, 농경지 토양, 작물잔사 소각에 따른 온실가스 배출량에 대한 불확도를 산정하기 위해 각각의 배출량 산정식에 이용된 배출계수 및 활동자료의 확률밀도함수를 적용하고 몬테카를로 모의실험을 수행하였다. Table 3과 Figure 2는 2010년 농경지 토양에 대한 직접배출과 간접배출에 대해 몬테카를로 모의실험을 통한 불확도 산정 결과를 보인 것으로, 온실가스의 배출량의 불확도는 - 50.3% ~ +90.5%로 분석되었다. 이와 같은 불확도 분석방법을 토대로 장내발효, 분뇨처리, 벼 재배, 농경지 토양, 작물잔사 소각에 따른 온실가스

Table 3 Uncertainty in agricultural soils category (unit: Gg CO₂ eq./yr)

Mean	Median	Std. dev.	Confidence Level		Uncertainty (%)	
			2.5%	97.5%	Lower	Upper
8,448	7,821	3,079	4,199	16,095	50.3%	90.5%

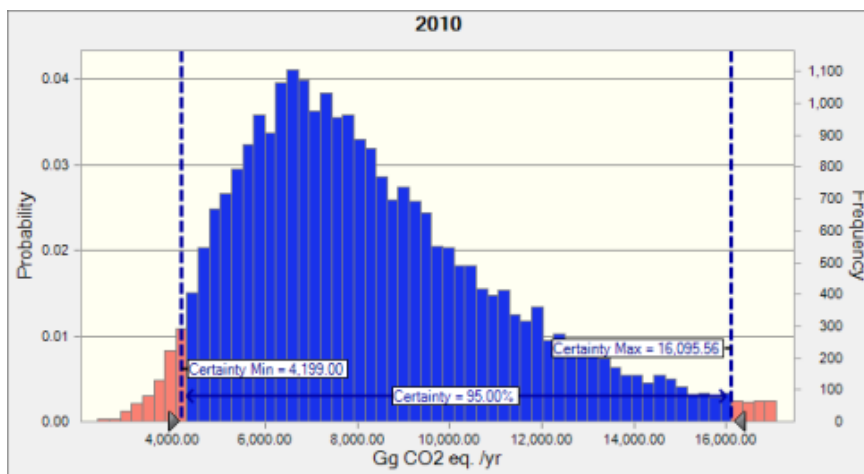


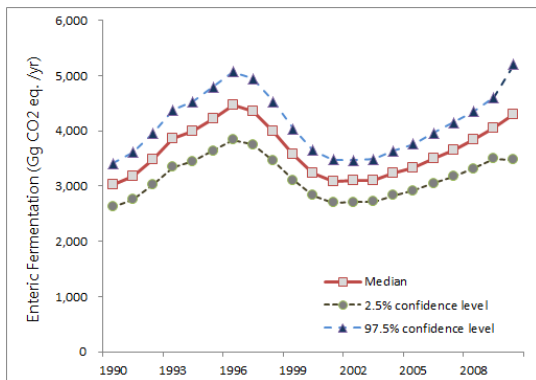
Figure 2 Uncertainty distribution simulated by Monte Carlo Simulation in agricultural soils

배출량의 불확도를 계산하면 Table 4와 같다.

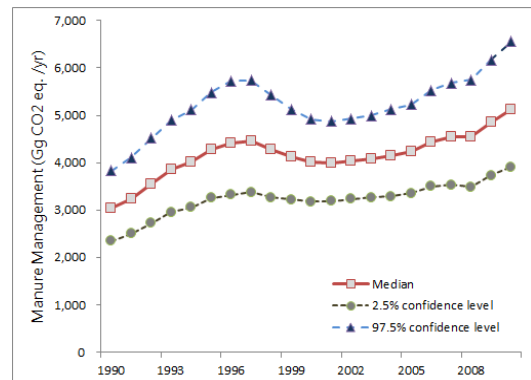
Figure 3은 농업분야의 온실가스 배출에 대한 불확도를 분석하기 위하여 1990년부터 2010년까지의 부문별 온실가스 배출량 변화를 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 분석한 결과이다. 장내발효 부문과 분뇨처리 부문의 온실가스 배출량 분포는 2001년 구제역 파동을 기점으로 감소하였다가 최근에 다시 증가하는 추세를 보이고 있다. 장내발효에 의한 온실가스 배출량은 가축의 축종별 사육두수에 의해 크게 좌우되기 때문에 2001년 큰 감소가 있는 후 2003년 이후 가파른 상승세는 보이며, 온실가스 산정식이 간단하기 때문에 년도 별 불확도의 범위는 크게 변하지 않는다. 반면에 분뇨처리에 따른 온실가스 배출량은 2001년 구제역에 따른 한·육우 가축두수의 감소에도 불구하고 감소폭이 장내발효에 크게 못 미친다. 이러한 이유는 2001년 구제역 파동 시 한·육우의 두수가 11% 감소한 반면에 돼지의 경우 6%의 순증가를 나타내고 있고, 돼지의 분뇨처리에 의한 질소배출량이 상대적으로 크며 분뇨처리 시설에 대한 계수, 처리

시설 별 온실가스 배출계수 등이 반영되기 때문에 한·육우의 가축 두수 감소에 민감하게 반응하지 않은 것으로 분석된다.

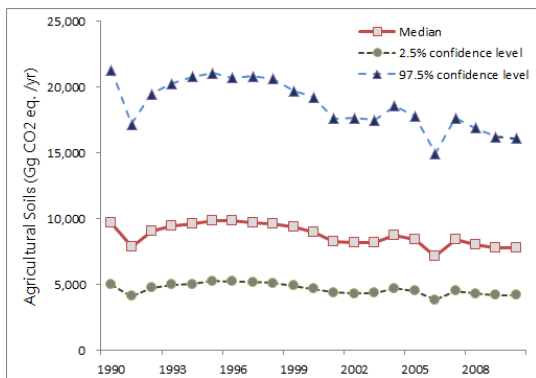
농경지 토양의 온실가스 배출량은 불확도의 상한과 하한의 범위가 매우 크게 나타나며, 특히 상한의 불확도는 그 범위가 91% ~ 101%로 나타난다. 이러한 이유는 직접배출 및 간접배출량 산정에 있어서 대기휘산, 수계유출 등의 불확도 범위가 큰 배출계수가 이용되고 있고, 배출량 산정식도 복잡하기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 2006년 농경지 온실가스 배출량이 급격히 감소하였다가 2008년 다시 회복하는 현상은 2005년 정부의 화학비료 보조금 제도를 폐지함에 따라 사전 구매로 인해 2006년 화학비료 판매량이 급격히 감소하였기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 현재 온실가스 인벤토리에서는 연간 화학비료 사용량을 추정하는데 있어서 화학비료 판매량 통계를 이용하기 때문에 실제 화학비료 사용량이 2005년 증가했다가 2006년 감소한 것이라기보다는 배출량 모델 구성의 오차로 보는 것이 타당하다.



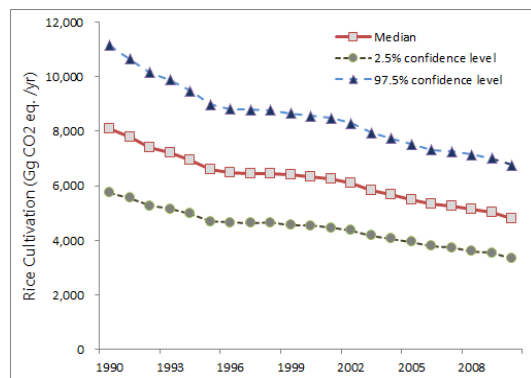
a) Enteric fermentation



b) Manure Management



c) Agricultural Soils



d) Rice cultivation

Figure 3 Annual greenhouse gas emission using Monte carlo simulation

농업분야 온실가스 배출량 산정의 불확도 추정 및 평가

벼 재배에 의한 온실가스 배출량은 우리나라 논 면적이 지속적으로 감소함에 따라 온실가스 배출량도 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 그에 대한 불확도도 감소하고 있다.

온실가스 배출량 결과에 영향을 미치는 배출계수 및 활동자료에 대한 민감도 분석을 수행한 결과를 Figure 4와 5에 나타내었다. 민감도 분석은 불확도가 크고 불확도 산정식에 이용되는 배출계수 및 활동자료가 많은 분

노처리 부문과 농경지 토양 부문에 대해 수행하였다. 분뇨처리의 경우 한·육우와 돼지에서 배출되는 분뇨에 대한 퇴비화시설의 질소 배출계수의 민감도가 각각 47.7%와 11.0%로 전체의 절반이상을 차지하였다. 이는 기존에 사용하는 질소 배출계수의 불확도가 총 온실가스 배출량에 대한 불확도에 많은 영향을 미치는 것으로 불확도를 감소시키기 위해서는 퇴비화시설에서의 질소 배출계수 변동범위를 축소시켜야 함을 의미한다. 농경지 토양에서

Table 4 Uncertainty of greenhouse gas emission in Agriculture (unit: Gg CO₂ eq./yr)

year	Enteric Fermentation				Manure Management				Rice Cultivation				Agricultural Soils				Incineration of Crop Residue			
	Avg.	Confidence interval in 95%		Uncertainty (%)	Avg.	Confidence interval in 95%		Uncertainty (%)	Avg.	Confidence interval in 95%		Uncertainty (%)	Avg.	Confidence interval in 95%		Uncertainty (%)	Avg.	Confidence interval in 95%		Uncertainty (%)
		Lower	Upper			Lower	Upper			Lower	Upper			Lower	Upper			Lower	Upper	
1990	3,022	2,625	3,415	13%	3,052	2,347	3,831	24%	8,178	5,739	11,154	33%	10,597	5,008	21,314	53%-101%	49	35	66	31%
1991	3,184	2,757	3,608	13%	3,266	2,509	4,112	25%	7,875	5,549	10,652	32%	8,615	4,136	17,162	52%-99%	45	32	61	32%
1992	3,486	3,021	3,950	13%	3,559	2,723	4,518	25%	7,482	5,260	10,146	33%	9,875	4,752	19,457	52%-97%	47	33	65	33%
1993	3,858	3,348	4,374	13%	3,875	2,954	4,891	25%	7,297	5,140	9,890	33%	10,330	4,982	20,280	52%-96%	48	34	67	34%
1994	3,991	3,444	4,531	14%	4,030	3,058	5,113	25%	7,012	4,973	9,488	32%	10,501	5,037	20,800	52%-98%	43	30	59	35%
1995	4,218	3,642	4,792	14%	4,303	3,260	5,484	26%	6,659	4,691	8,986	32%	10,767	5,264	21,055	51%-93%	63	42	91	39%
1996	4,462	3,834	5,070	14%	4,451	3,327	5,722	27%	6,559	4,654	8,817	32%	10,717	5,227	20,703	51%-97%	66	43	96	40%
1997	4,356	3,756	4,951	14%	4,483	3,382	5,742	26%	6,516	4,631	8,782	32%	10,589	5,178	20,837	51%-97%	58	38	86	42%
1998	3,998	3,462	4,529	13%	4,296	3,273	5,427	25%	6,519	4,643	8,767	32%	10,476	5,114	20,626	52%-93%	54	36	79	40%
1999	3,571	3,106	4,032	13%	4,133	3,222	5,132	23%	6,456	4,559	8,660	32%	10,201	4,928	19,717	52%-97%	74	47	111	43%
2000	3,242	2,831	3,648	13%	4,019	3,183	4,920	22%	6,378	4,532	8,564	32%	9,766	4,694	19,219	51%-95%	65	41	99	45%
2001	3,089	2,702	3,475	13%	3,998	3,194	4,872	21%	6,312	4,456	8,479	32%	9,046	4,388	17,619	52%-97%	72	46	108	43%
2002	3,092	2,709	3,470	12%	4,044	3,231	4,933	21%	6,144	4,359	8,293	32%	8,959	4,341	17,650	51%-95%	66	42	98	43%
2003	3,109	2,723	3,491	12%	4,092	3,267	4,998	21%	5,886	4,169	7,948	32%	8,954	4,381	17,497	51%-94%	59	37	89	44%
2004	3,233	2,829	3,635	12%	4,172	3,296	5,123	22%	5,731	4,061	7,732	32%	9,576	4,711	18,552	51%-94%	69	44	105	44%
2005	3,340	2,917	3,761	13%	4,254	3,361	5,229	22%	5,563	3,933	7,523	32%	9,189	4,508	17,814	51%-94%	70	45	104	42%
2006	3,508	3,055	3,961	13%	4,463	3,500	5,530	23%	5,384	3,785	7,323	33%	7,772	3,846	14,946	51%-92%	61	39	92	43%
2007	3,657	3,173	4,146	13%	4,559	3,529	5,679	24%	5,326	3,727	7,255	33%	9,202	4,529	17,638	51%-92%	67	42	103	46%
2008	3,834	3,314	4,345	13%	4,565	3,495	5,752	25%	5,203	3,600	7,148	34%	8,733	4,336	16,888	50%-93%	65	42	99	43%
2009	4,049	3,493	4,604	14%	4,887	3,738	6,170	25%	5,077	3,529	7,006	34%	8,469	4,204	16,224	50%-92%	59	37	90	45%
2010	4,303	3,475	5,206	20%	5,150	3,908	6,553	26%	4,852	3,325	6,748	35%	8,448	4,199	16,096	50%-91%	66	45	94	37%

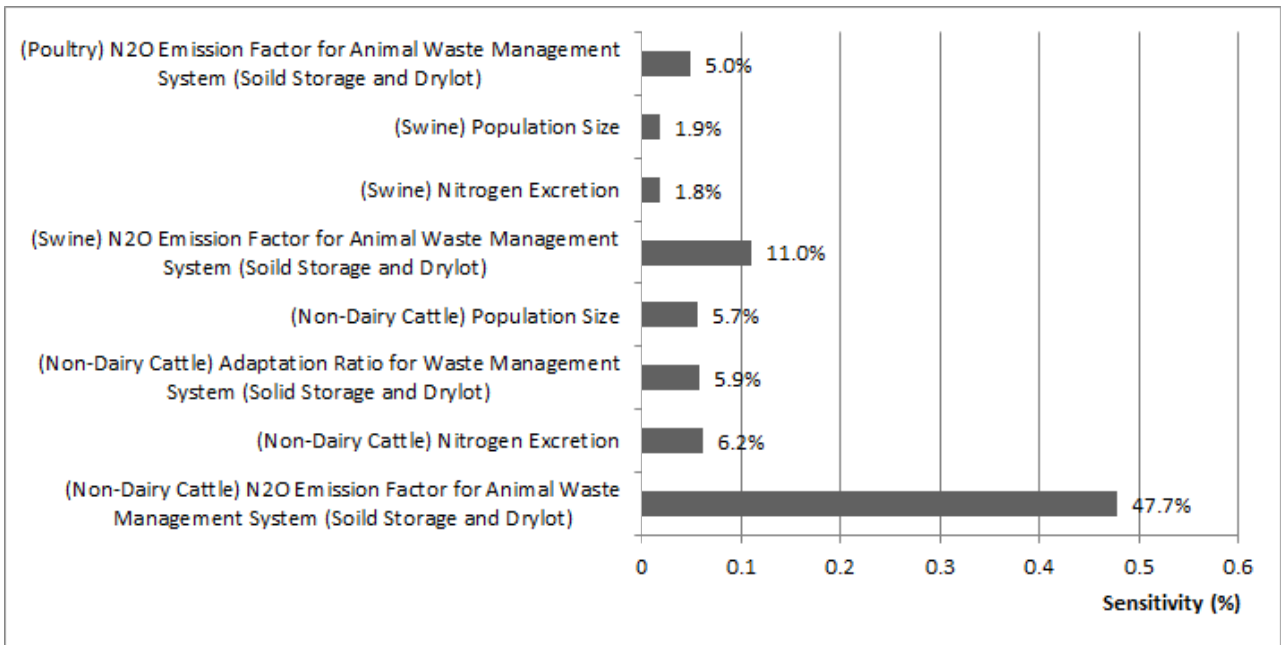


Figure 4 Sensitivity analysis on uncertainty of livestock manure management.

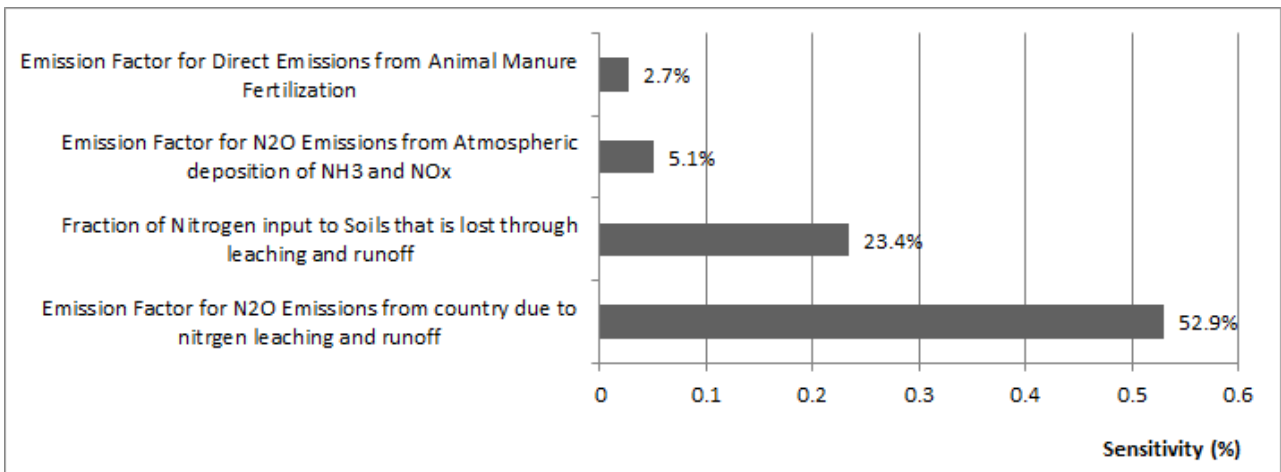


Figure 5 Sensitivity analysis on uncertainty of agricultural soils

발생하는 온실가스 배출량의 불확도에 대한 민감도 분석 결과 52.9 %가 간접배출 및 수계유출에 따른 질소 배출계수에서 발생하였다. 이는 비교적 측정이 용이한 농경지 토양에서의 직접배출량을 추정하기 위한 직접 배출계수와 대기회산에 의한 직접배출계수에 비해 수계유출에 대한 배출계수 산정부분에서 정확한 데이터를 가지고 있지 못하다는 결과를 나타낸다.

VI. 결 론

본 연구에서는 우리나라 농업부문 온실가스 배출량 산정에 대한 불확도를 평가하기 위하여 부문별 온실가스 배출량 산정식을 적용하여 개별적인 불확도 및 민감도 분석을 통하여 온실가스 배출량 산정값에 대한 신뢰도를 평가하고자 하였다. 1990년부터 2010년까지의 몬테카를로 시뮬레이션 통한 연간 농업부문별 불확도 평가 결과 농경지 토양이 평균 73%로 작물소각(40%), 비재배(33%), 분뇨처리(24%), 장내발효(13%)에 비하여 불확도가 높은 결과를 보였다. 이는 농경지 토양에서의 온실가스 배출에 대한 예측의 어려움을 나타내는 것으로, 관련된 요인

들에 대한 민감도를 평가한 결과 간접적 및 수계배출에 따른 N_2O 배출계수의 민감도가 52.9%로 나타나 불확도를 증가시키는 가장 중요한 요인으로 분석되었다. 이러한 결과는 향후 온실가스 배출량 산정의 신뢰성을 높이기 위하여 연구를 수행하여야 할 부분에 대한 방향성을 제시하고 있다. 특히 IPCC 기본배출계수를 사용하던 배출계수에 대해 국내 연구를 바탕으로 한 국가고유배출계수를 정의해 나감으로써 온실가스 배출량의 불확도를 낮춤과 동시에 온실가스 배출량 규제 및 관련정책에의 활용성을 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 “농림축산식품분야 온실가스 인벤토리 활용 정보화 전략계획 수립 및 파일럿시스템 개발” (과제번호: PJ009885)의 지원에 의해 이루어진 것임.

참고문헌

1. 김경미, 2011, 국가 온실가스 배출통계 활동자료 불확도 산정방안 연구: 개념 및 통계적 방법을 활용한 산정방법을 중심으로, 통계청.
2. 김철한, 김홍배, 차명수, 정기호, 김후곤, 2008, 국가 온실가스 통계목록 작성을 위한 IPCC 가이드라인에서의 불확실성 추정, 2008, 2008 대한산업공학회/한국경영과학회 춘계공동학술대회.
3. 김현선, 김동식, 김호, 이승목, 2008, 매립지 온실가스 배출량의 민감도 및 불확도 평가, 대한환경공학회지, 257-262.
4. 도승희, 2009, 제6차 아시아지역 온실가스 인벤토리 워크숍 국외출장 결과보고.
5. 박윤영, 김경미, 2010, 국가온실가스배출통계 불확도 산출 방법론 기초연구, 통계청.
6. 정현철, 서재순, 2012, 농경지 메탄 배출계수 개발 및 배출량 평가, Korean J. Soil Sci. Fert, 45(5), 842-847.
7. 한국표준과학연구원, 2008, 도전 측정불확도 기초에서 중급까지, KRISS 불확도위원회.
8. 환경부, 2010, 목표관리지침 사업체 분야 불확도 산정방법.
9. 환경부·환경관리공단, 2010, 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인.
10. Andrea Ramirez, Corry Keizer, 2008, Monte Carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990-2004, Atmospheric Environment, 42, 8263-8272.
11. Astley Hastings, Martin Wattenbach, 2010, Uncertainty propagation in soil greenhouse gas emission models: An experiment using the DNDC model and at the Oensingen cropland site, Agriculture, Ecosystems and Environment, 136, 97-110.
12. IPCC, 1997, Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
13. IPCC, 2000, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.
14. IPCC, 2003, Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.
15. IPCC, 2006, IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
16. Suvi Monni, Sanna Syri, 2004, Uncertainties in the Finnish greenhouse gas emission inventory, Environmental Science & Policy, 7, 87-98.
17. Wilfried Winiwarter, Kristin Rypdal, 2001, Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories: a case study for Austria, Atmospheric Environment, 35, 5425-5440.

접 수 일: (2013년 11월 23일)

수 정 일: (1차: 2013년 11월 27일)

게재확정일: (2013년 11월 27일)

■ 3인 익명 심사필