

에너지분야 온실가스 인벤토리의 불확도에 관한 연구: Tier 1 에러전파방법을 이용한 추정[†]

황인창* · 진상현**

요약 : IPCC는 국가별 온실가스 배출량이 얼마나 확실한 값인가를 보여줄 수 있는 불확도를 함께 보고하도록 규정하고 있다. 그렇지만 한국 정부는 IPCC 기본값을 그대로 적용하고 있는 수준에 불과하며, 그나마도 결측된 값들이 있어서 전체적인 불확도를 산정하지 못한 채 항목별 불확도만을 나열하고 있을 뿐이다. 이에 본 논문에서는 국가 온실가스 배출량의 85.3%를 차지하는 에너지분야를 대상으로 Tier 1 수준의 에러전파방법을 이용해서 온실가스 인벤토리의 불확도를 추정하고 있다. 분석결과 국내 에너지분야 온실가스 배출량의 불확도는 3.4%였으며, 이는 핀란드와 유사한 수치인 것으로 밝혀졌다. 그렇지만 온실가스별로는 이산화탄소의 불확도가 2.7%에 불과했지만, 메탄은 116%, 아산화질소는 473%에 달할 정도로 차이가 큰 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 한국 정부가 에너지분야의 불확도를 낮추려면 이산화탄소 보다는 메탄과 아산화질소를 대상으로 활동도뿐만 아니라 배출계수의 개선이 필요하다는 정책적 함의가 제시될 수 있었다. 결론적으로는 IPCC 기본값 대신에 신뢰도 높은 한국 고유의 배출계수를 개발하는 작업이 필요함을 제안하고 있다.

주제어 : 정확성, 정밀성, 에러전파, 민감도, IPCC 가이드라인

JEL 분류 : Q54

접수일(2014년 4월 5일), 수정일(2014년 6월 17일), 게재확정일(2014년 6월 18일)

[†] 본 논문은 「산업·에너지부문 온실가스 인벤토리 작성 및 품질 개선」의 일부를 학술논문 형태로 재구성한 글임을 밝힌다.

* 서울대학교 아시아에너지환경지속가능발전 연구소 객원연구원, 네덜란드 암스테르담 자유대학 박사과정 (제1저자) (e-mail: ichwang79@gmail.com)

** 경북대학교 행정학부 조교수 (교신저자)(e-mail: upperhm@knu.ac.kr)

An Analysis of Uncertainties in Energy Category: Estimation by using Tier 1 Method

In Chang Hwang* and Sang Hyeon Jin**

ABSTRACT : IPCC requires the national uncertainties which show how credible the emission of greenhouse gases is. But the Korean government did not submit the total uncertainties, only the detailed uncertainties by items. Also it uses the default values of IPCC including some missing values. This paper tries to estimate the total uncertainties of energy by categories, which accounts for 85.3% in national emission of greenhouse gases. Concretely, it uses Tier 1 method suggested by IPCC. As a result of the analysis, the uncertainties in energy category are 3.4% similar to Finland's. But there was a big difference among greenhouse gases; carbon dioxide 2.7%, methane 116% and nitrous oxide 473%. So this paper suggests Korean government need to improve not only the activity but also the emission factor of data in order to reduce the national uncertainties in energy category.

Keywords : accuracy, precision, error propagation, sensitivity, IPCC guideline

Received: April 5, 2014, Revised: June 17, 2014, Accepted: June 18, 2014.

* Asian Institute for Energy, Environment and Sustainability, Seoul National University, Institute for Environmental Studies (IVM), VU University Amsterdam(e-mail: ichwang79@gmail.com)

** School of Public Administration, Kyungpook National University(e-mail: upperhm@knu.ac.kr)

I. 서론

국내에서는 박근혜 정부의 출범 이후 온실가스 배출량 관련 논란이 있었다. 왜냐 하면 이전 정권인 이명박 정부가 향후 60년의 국가전략으로 제시했던 ‘저탄소 녹색성장’이 과연 얼마나 성공적으로 달성되었는가를 판단하는 가장 중요한 지표가 온실가스 배출량이기 때문이다.¹⁾ 이와 관련해서 유럽위원회의 공동연구센터는 한국의 2010년 온실가스 배출량이 5억9000만톤이라고 발표했다(JRC, 2011). 반면에 독일의 재생가능에너지산업연구소(IWR: Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien)는 한국의 온실가스 배출량이 7억1600만톤이라고 발표해 상당한 차이가 있었다.²⁾ 최종적으로 환경부 산하의 온실가스종합정보센터에서 발표한 온실가스 배출량은 6억6900만톤이었다.³⁾

이처럼 발표하는 기관마다 국가의 온실가스 배출량에 차이가 존재하는 이유로는 여러 가지가 있다(이현주, 2011; 이재영 외, 2012). 첫째, 배출량의 산정범위가 상이하기 때문일 수 있다. 예를 들면, 어떤 기관은 에너지분야만을 대상으로 하는 반면에, 다른 기관은 농업·토지이용·폐기물까지 포함하기 때문에 차이가 있을 수 있다. 둘째, 산정방식도 다르게 적용되었을 수 있다. IPCC는 1996년에 발표된 산정지침을 개정해서 2006년 지침까지 발간한 상태이기에, 기관마다 상이한 산정기준이 적용되었을 수도 있다. 그밖에도 여러 가지 이유로 인해 배출량의 산정값이 수행기관마다 달라지게 마련이다. 그럼에도 불구하고 한국 정부는 기후변화협약의 가입국으로서 UN의 기준을 준수해 산정한 뒤, 공식화된 온실가스 배출량을 발표해오고 있다.

그렇지만 세계 각국의 정부가 발표하는 온실가스 배출량과 관련해서는 그 값이 과연 참값인가에 대한 논란이 여전히 제기되고 있다. 예를 들면, 제3세계처럼 온실가스 관련 데이터베이스의 구축이 제대로 이뤄지지 못한 나라에서 발표한 배출량을

1) 실제로 「제2차 녹색성장 5개년 계획」에서는 1차 계획기간에 국가발전전략을 설정했을 뿐만 아니라 국내외적인 위상을 높이는 성과를 거두기는 했지만, 핵심지표인 온실가스 배출량을 실제로 줄이지는 못한 것으로 평가되고 있다(관계부처 합동, 「제2차 녹색성장 5개년 계획」, 2014.6.3).

2) “정부의 2010년 온실가스 배출량 통계 발표 왜 늦어지나”(세계일보 2013.2.6).

3) “폭염·한파, 철강생산 증가 등으로 2010년 국가 온실가스 배출량 9.8%(60백만톤) 증가”(환경부 보도자료 2013.2.28).

과연 신뢰할 수 있을 것인가라는 문제가 제기되고 있는 것이다. 마찬가지로 한국이 발표한 온실가스 배출 자료의 신뢰성과 관련해서도 똑같은 의문이 제기될 수 있다.

이와 관련해서 IPCC는 해당 국가의 진정한 온실가스 배출량, 즉 참값은 누구도 알 수 없다는 입장을 취하고 있다. 자료의 제한, 측정기의 물리적 한계, 통계관리의 인적 오류 등으로 인해 온실가스 배출량의 참값은 해당 정부뿐만 아니라 국제기구에서도 검토가 불가능할 수밖에 없다. 결국 IPCC는 국가별 온실가스 배출량이 참값에 얼마나 근접해있는지에 대해서는 판단할 수 없다고 선언한 상태이다. 대신에 IPCC는 공식적으로 발표되는 온실가스 배출량이 얼마나 확실한 값인가에 대해서는 함께 보고하도록 요구하고 있다. 즉, 국가별 온실가스 배출량이 어느 정도의 편차를 지니고 있는지에 대해서는 ‘불확도(uncertainty)’라는 개념으로 보고하도록 규정하고 있다.

이를 근거로 한국 정부는 매년 발표하는 「국가 온실가스 인벤토리 보고서」에서 불확도를 산정하고 있다. 그렇지만 IPCC에서 제공하는 기본값을 그대로 적용하고 있는 수준에 불과할 뿐이며, 그나마도 결측된 값들이 있어서 전체적인 불확도를 산정하지 못한 채 세부 항목별 불확도만을 나열하고 있는 실정이다. 이에 본 논문에서는 2010년을 기준으로 국가 온실가스 배출량의 85.3%를 차지하는 에너지분야를 대상으로 Tier 1 수준에서 온실가스 인벤토리의 불확도를 추정하고자 한다.

구체적으로 2장에서는 온실가스 관련 불확도의 개념뿐만 아니라 Tier 1 방법론에 대해 설명하고 있다. 다음으로 3장에서는 에너지분야의 불확도를 추정하기 위해 해외사례 및 선행연구에 대한 검토를 토대로 필요한 기초 자료를 구축하고 있다. 끝으로 4장에서는 에너지분야를 대상으로 전반적인 온실가스 인벤토리의 불확도를 산정해서 보여주고 있다. 5장에서는 국가 온실가스 통계 관련 자료의 품질관리 관련 함의를 결론으로 제시하고 있다.

II. 불확도의 개념 및 Tier 1 방법론 개요

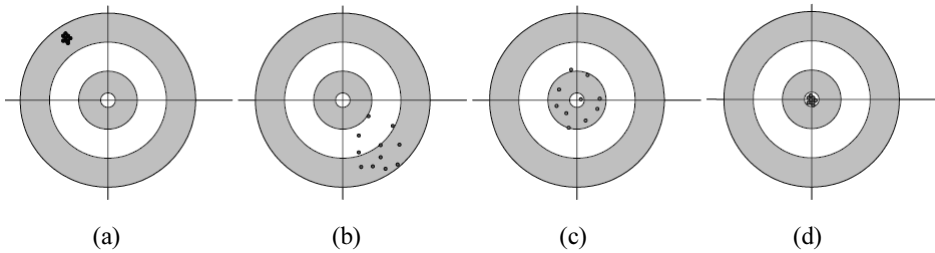
1. 온실가스 인벤토리 관련 불확도의 개념

국가별 온실가스 인벤토리의 불확도와 관해서는 ‘정확성(accuracy)’과 ‘정밀성(precision)’이라는 개념을 이해할 필요가 있다. 여기서 정확성은 산정값이 참값(true

value)과 일치하는 정도를 의미한다. <그림 1>에서 (c)와 (d)는 정확한 추정에 해당되는 반면에, (a)와 (b)는 부정확한 추정에 해당된다. 반면에 정밀성은 산정값이 중심값으로 부터 벗어난 정도를 나타내는 개념이다. <그림 1>에서 (a)와 (d)는 정밀한 추정인데 반해, (b)와 (c)는 정밀하지 않은 추정에 해당된다.

〈그림 1〉 정밀성과 정확성의 개념도

(a) inaccurate but precise; (b) inaccurate and imprecise; (c) accurate but imprecise; (d) precise and accurate;



주: 십자선의 중앙이 참 값(true value)이며, 점으로 표현된 값들은 추정 값(estimated value)임.
 자료: IPCC (2006: 3.8).

IPCC의 온실가스 인벤토리 불확도 분석은 정확성이 아닌 정밀성을 분석하기 위한 방법론이다(IPCC, 2006). 왜냐하면 IPCC에서는 정확성과 관련된 불확도를 산출하는 방법론이 존재하지 않을 뿐만 아니라 품질관리를 통해서 정확성을 어느 정도 제어할 수 있다고 보기 때문이다(EPA, 2002). 즉, IPCC는 국가별 온실가스 배출량의 참값은 알 수 없지만, 적어도 배출량 추정치의 분산은 불확도라는 개념으로 보고하도록 요구하는 것으로 정리될 수 있다. 따라서 이하에서 살펴볼 IPCC의 불확도 분석 방법론은 정확성과 관련한 불확도가 배제된, 정밀성 관련 불확도로 이해되어야 한다.

2. Tier 1 방법

1) 개요

IPCC(2006)는 온실가스 배출량의 불확도 산정과 관련해서 Tier 1과 Tier 2라는 두 가지 방법론을 제시하고 있다. Tier 1 방법은 변수들 사이의 상관관계가 적고, 개별 변수가 정규분포를 가지며, 불확도가 크지 않을 경우에 적용 가능한 방식이다.

이런 특징을 전제로 변수들 사이의 연산에 관련된 통계적 성질을 이용해서 불확도를 산출하기 때문에, Tier 1 방법은 에러전파(error propagation) 방식이라고도 불린다. 반면에 Tier 2 방법은 개별 변수의 확률분포로부터 무작위 추출을 통해 온실가스 배출량의 산정을 반복함으로써 불확도의 확률분포를 산출하는 방식이다. 이때 확률적 시뮬레이션을 위해 몬테카를로 기법이 주로 사용되기 때문에 Tier 2 방법은 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)이라고도 불린다(전봉걸 외, 2014).

국내에서는 Tier 1 수준의 불확도 추정까지도 아직 완료되지 않은 상태이다. 환경부의 산하 조직으로 국가 인벤토리 보고서 작성의 책임을 맡고 있는 온실가스종합정보센터(2013)는 Tier 1 수준에서의 인벤토리 불확도 평가를 채택하고 있지만 일부 항목에 대한 IPCC의 기본값이 누락되어져 있기 때문에 국가 전체의 불확도를 산정하지 못하고 있다. 반면에 Tier 2 수준의 불확도 분석은 국가 전체나 대분류 분야가 아닌 세부 부문을 대상으로 시범적인 연구가 몇 차례 진행된 바 있다(김현선 외, 2008; 노수진 외, 2012; 권진웅 외, 2012; 한근식, 2012; 전봉걸 외, 2014). 정리하자면 국내에서는 Tier 2 수준의 불확도 연구가 일부 특정 부문을 대상으로 진행된 바 있지만, 대분류 분야를 대상으로 한 Tier 1 수준의 연구는 아직까지 완료되지 않은 상태이다.⁴⁾ 이에 본 논문에서는 에너지분야를 대상으로 Tier 1 수준에서 온실가스 인벤토리의 불확도를 추정하고자 한다.⁵⁾

IPCC에서 제시하는 Tier 1 방법론에 대해 보다 구체적으로 살펴보면, 다음과 같다. 즉, Tier 1 방법은 아래에서 기술할 Rule A와 Rule B를 이용해 국가 온실가스 인벤토리의 불확도를 산출하는 방식이다. 구체적으로는 개별 배출원의 온실가스 배출량 관련 불확도를 산출할 경우에는 Rule B가 이용되고, 배출원별 배출량을 합산할 경우에는 Rule A가 사용된다. 또한 기준년도 대비 배출량의 변화와 관련된 불확도는 민감도 분석을 실시한 이후에 Rule A 방식으로 합산될 수 있다.

4) 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서 ‘분야’는 에너지·산업공정·농업·폐기물이라는 대분류이며, ‘부문’은 하위의 세분류 항목을 의미한다. 예를 들면, 에너지분야는 다시 에너지산업, 제조업 및 건설업, 수송, 기타부문으로 세분된다.

5) 본 논문에서 에너지분야를 대상으로 불확도를 산정하는 이유는, 에너지분야가 국가 전체 온실가스 배출량의 85.3%를 차지할 뿐만 아니라 비에너지분야의 불확도를 산정하기 위해서는 Tier 1 수준에서도 방대한 자료수집이 필요하기 때문이다. 즉, 비에너지분야로 확장해서 국가 전체 Tier 1 수준의 불확도 분석을 완료하기 위해서는 추가 재원이 확보되는 정부 지원 하의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2) Rule A: 확률변수의 합

불확실한 변수들을 합할 경우, 합산된 변수의 표준편차는 개별변수의 표준편차와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\sigma_{X+Y} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + 2\rho\sigma_X\sigma_Y} \quad (1)$$

식 (1)에서 X, Y는 확률변수, σ_X , σ_Y 는 각각의 표준편차, ρ 는 X와 Y의 상관계수를 나타낸다. 이때 Rule A는 두 변수의 상관관계가 작을 때 최종 변수의 표준편차가 개별 변수의 분산을 합한 값의 제곱근과 근사적으로 같다는 성질을 이용하는 방식이다. 이때 Rule A는 불확도를 %단위로 나타낸다. 구체적으로 n개의 확률변수를 합할 경우의 불확도는 다음과 같은 방식으로 산출될 수 있다. 예를 들면, 국가 온실가스 총 배출량에 관한 불확도는 수송부문, 발전부문, 산업부문, 가정부문 등의 부문별 불확도와 개별 온실가스 배출량을 식 (2)에 대입하여 산출된다.

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1x_1)^2 + (U_2x_2)^2 + \dots + (U_nx_n)^2}}{x_1 + x_2 + \dots + x_n} \quad (2)$$

식 (2)에서 x_i 는 확률변수(X_i)가 취하는 값, 예를 들면 수송부문의 온실가스 배출량을 나타내며, 개별변수의 불확도는 다음 식을 이용해서 산출된다.

$$U_i = \frac{(X_i \text{의 } 95\% \text{ 신뢰구간 길이})/2}{X_i \text{의 평균}} \times 100(\%) \quad (3)$$

3) Rule B: 확률변수의 곱

2개 이상의 확률변수를 곱할 경우 결과값의 표준편차는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{X \times Y} = \sqrt{\sigma_X^2 E(Y)^2 + \sigma_Y^2 E(X)^2 + 2\rho\sigma_X\sigma_Y E(X)E(Y)} \quad (4)$$

식 (4)에서 E(X)는 개별 확률변수의 기대값을 의미한다. 여기서 Rule B 방식은 두 확률변수의 상관관계가 작고 확률변수가 정규분포를 가질 때 이용되는 방식이다. 이때 퍼센트 불확도는 식 (4)를 변형해서 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \quad (5)$$

식 (5)에서 U_i 는 식 (3)을 통해 구해진 값을 사용한다. 예를 들어, 수송부문 배출량의 불확도는 활동도 관련 퍼센트 불확도(U_1)와 배출계수 관련 퍼센트 불확도(U_2)를 각각 식 (3)으로 구한 뒤, 그 값을 식 (5)에 대입하는 방식으로 산출된다.

4) 민감도 분석

배출량의 변화와 관련된 불확도를 분석하기 위해서는 배출원별, 온실가스별로 Type A와 Type B로 구분되는 민감도 분석을 실시해야 한다. Type A 민감도는 기준연도와 해당연도의 특정부문 온실가스 배출량을 동시에 1%씩 증가시켰을 때, 특정부문으로 인해 기준연도 대비 해당연도의 총 국가 온실가스 배출량이 변화된 상대적인 정도(%)를 나타낸다. 반면 Type B 민감도는 Type A와 유사하지만, 특정부문의 해당연도 배출량만 1% 증가시켰을 때, 기준연도 대비 해당연도의 국가 온실가스 배출량이 특정부문으로 인해 기준연도 대비 변화된 정도(%)를 나타낸다. 최종적으로는 부문별 민감도 값을 Rule A 방식으로 합산해서 배출량의 변화 관련 불확도를 산출한다.

III. 에너지분야의 불확도 관련 기초자료 구축

1. 한국의 에너지분야 불확도 산정 현황

국내에서는 활동도와 배출계수에 대한 기초 통계자료가 부족하기 때문에, IPCC의 기본값을 적용한 Tier 1 수준에서의 인벤토리 불확도 평가를 실시하고 있다(온실가스종합정보센터, 2013). 구체적으로 2010년 에너지분야 온실가스 인벤토리에 적용된 활동도와 배출계수의 불확도 값은 <표 1>과 같다. 여기서 합성 불확도는 온실가스정보센터의 2013년 보고서에 제시된 활동도 불확도와 배출계수 불확도 값을 바탕으로 식 (5)를 적용해 새롭게 산출된 수치이다.

<표 1> 에너지분야의 온실가스 인벤토리 불확도

배출원	온실가스	불확도(%)			
		활동도	배출계수	합성	
에너지연소	고정연소	CO ₂	3	5	5.8
		CH ₄	3	150	150
		N ₂ O	3	1,000	1,000
	제조업 및 건설업	CO ₂	3	5	5.8
		CH ₄	3	150	150
		N ₂ O	3	1,000	1,000
	항공수송	CO ₂	5	5	7
		CH ₄	<5	200	200
		N ₂ O	<5	10,000	10,000
	도로수송	CO ₂			5
		CH ₄			40
		N ₂ O			50
	철도수송	CO ₂	5		
		CH ₄	5		
		N ₂ O	5		
	해운수송	CO ₂		5	
		CH ₄		200	
		N ₂ O		1000	
	기타수송	CO ₂	5		
		CH ₄	5		
		N ₂ O	5		
기타부문	CO ₂	3	5	5.8	
	CH ₄	3	150	150	
	N ₂ O	3	1,000	1,000	
탈루성배출	석탄 지하채굴	CH ₄	14	200	200.5
	석탄 후처리	CH ₄	14	300	300.3
	석유(운송)	CH ₄	10	25	26.9
	석유(정제/저장)	CH ₄	3	150	150
	천연가스(프로세싱)	CH ₄	3	150	150
	기타누출	CH ₄	3	150	150

주: 음영은 IPCC에서 기본값을 제공하지 않아 산출되지 않은 값들임.

자료: 온실가스종합정보센터(2013).

<표 1>에서 볼 수 있듯이 온실가스정보센터는 IPCC의 불확도 값이 주어졌을 경우에 상한값과 하한값 범위 내의 특정값을 선택해서 사용하고 있다. 따라서 IPCC에서 기본값을 제공하지 않는 부문에 대해서는 불확도 평가를 실시할 수 없는 실정이다.

구체적으로는 본 논문의 연구대상인 에너지분야에서도 철도수송, 해운수송, 기타수송 부문에 대해 불확도를 산정하지 않고 있다.⁶⁾ 이로 인해 온실가스종합정보센터에서는 에너지분야에 한해서도 총 온실가스 배출량에 대한 불확도를 발표하지 못하고 있다.

따라서 에너지분야의 총 불확도를 산출하려면 먼저 개별 부문의 불확도 값부터 산정되어야 한다. 이에 본 논문에서는 IPCC 기본값이 누락된 철도수송, 해운수송, 기타수송 부문에 대한 불확도를 추정함으로써 에너지분야 전체의 온실가스배출 불확도를 산정하고자 한다. 물론 IPCC가 권고하는 것처럼 국가 고유의 불확도 값을 사용하는 것이 바람직하겠지만, 본 논문에서는 이에 대한 대안으로 해외 선진국의 보고서와 관련 선행연구를 참고하여 개별 부문에 대한 불확도를 추정하였다. 가장 먼저 살펴볼 문헌은 유럽연합(EEA, 2013)의 「대기 오염물질 배출량 인벤토리 가이드북(EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook)」이다. 왜냐하면 스웨덴을 포함한 일부 국가의 경우에도 고유 불확도를 산출하지 않은 일부 부문에 대해 유럽연합 가이드북에 제시된 값을 사용하기 때문이다(SEPA, 2013).

2. 유럽연합 가이드북의 에너지분야 불확도

유럽연합의 ‘대기 오염물질 배출량 인벤토리 가이드북’은 「장거리 이동성 대기오염 협약(Convention on Long-range Transboundary Air Pollution)」에 의거해 유럽연합환경청(EEA: European Environment Agency)의 책임 하에 1992년부터 작성되고 있다. 이후 EEA의 1999년 가이드북은 ‘IPCC 2000 우수실행지침(GPG)’의 불확도 분석 방법론의 기초가 되었다. 즉, IPCC 2000 GPG에서 제시하고 있는 부문별 활동도와 배출계수의 불확도 기본값은 EEA 가이드북에서 제시된 값이라고 볼 수 있다(IPCC, 2000). 아래에서는 EEA의 2013년 지침에 제시되어 있는 철도와 해운수송부문의 불확도 값을 살펴보고자 한다. 다만 기타수송부문의 경우에는 EEA 가이드북에서도 자료 부족을 이유로 불확도 값을 제시하지 않고 있기 때문에, 해외 선진국의 다른 선행연구 사례에 대한 검토가 필요한 실정이다.

6) 도로수송 부문에 대해서는 활동도와 배출계수의 불확도는 제시하지 않았으나 합성 불확도는 산정하고 있다. 이는 IPCC 우수실행지침 (IPCC, 2000)에서 합성 불확도만 제시하고 있기 때문이다.

1) 철도수송부문

유럽연합의 가이드북에는 온실가스뿐만 아니라 모든 대기오염물질의 배출계수와 불확도 값이 신뢰구간으로 제시되어져 있다. 철도수송부문의 대기오염물질별 배출계수 관련 불확도는 <표 2>에 제시된 바와 같다. 여기서 제시된 정보를 이용해 이산화탄소의 배출계수 불확도를 산출하면 0.64%였다. 이때 이산화탄소의 배출계수 불확도는 IPCC 2000 우수실행지침에서 제시된 바에 따라 식 (3)을 이용해서 계산되었다. 한편 <표 2>에는 포함되어져 있지 않지만, EEA 가이드북에서는 메탄 배출계수의 평균값과 95% 신뢰구간이 각각 182g/연료톤과 77~350g/연료톤이라고 보고되어져 있다(EEA, 2013: 1.A.3.c, 9). 이를 이용하여 산출한 메탄의 배출계수 불확도는 75%였다. 활동도의 불확도와 관련해서 EEA 가이드북은 활동도 통계가 하향식(top-down)으로 집계된 경우 5%, 상향식(bottom-up)으로 집계된 경우 10%로 제시하고 있다(EEA, 2013: 1.A.3.c, 9).

<표 2> 유럽연합 지침서의 철도수송부문 배출계수 불확도

오염원	배출계수	단위	95% 신뢰구간		출처
			하한값	상한값	
NO _x	52.4	kg/tonne fuel	25	93	Aggregated Tier 2 method
CO	10.7	kg/tonne fuel	6	19	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
NMVOG	4.65	kg/tonne fuel	2	8	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
NH ₃	0.007	kg/tonne fuel	0.004	0.012	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
TSP	1.52	kg/tonne fuel	3	23	Aggregated Tier 2 method
PM ₁₀	1.44	kg/tonne fuel	2	16	Aggregated Tier 2 method
PM _{2.5}	1.37	kg/tonne fuel	2	14	Aggregated Tier 2 method
Cd	0.01	g/tonne fuel	0.003	0.025	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
Cr	0.05	g/tonne fuel	0.02	0.2	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
Cu	1.7	g/tonne fuel	0.5	4.9	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
Ni	0.07	g/tonne fuel	0.02	0.2	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
Se	0.01	g/tonne fuel	0.003	0.025	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
Zn	1	g/tonne fuel	0.3	2.5	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
Benzo(a) pyrene	0.03	g/tonne fuel	0.01	0.1	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
Benzo(b) fluoranthene	0.05	g/tonne fuel	0.02	0.2	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
Benz(a) anthracene	0.08	g/tonne fuel	0.03	0.2	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006
Dibenzo(a,h) anthracene	0.01	g/tonne fuel	0.004	0.03	EMEP CORINAIR Gdbk 3.2/2006

자료: EEA(2013: 1.A.3.c, 8).

2) 해운수송부문

EEA 가이드북에서 제시하고 있는 해운수송부문의 배출계수 불확도는 <표 3>과 같다. <표 3>에서 제시된 불확도는 95% 신뢰구간에 해당하는 값으로 대표 값에서 떨어진 정도를 나타낸다. 예를 들어 대표 값이 100이라면, $\pm 10\%$ 가 의미하는 바는 대표 값의 신뢰구간이 90~110이라는 의미이다. 이 경우 식 (3)에 따라 계산된 %불확도는 10%이다. 이와 관련해서 EEA 가이드라인은 해운수송부문에 대해 Entec(2002)의 연구결과를 인용하고 있다. 결과적으로 EEA 가이드북은 해운수송부문의 배출계수 불확도를 해상, 항구, 운항중으로 구분해서 제시하고 있다. 해상을 기준으로 보면, 해운수송부문 이산화탄소의 배출계수 불확도 기본값은 10%이다. 활동도 불확도의 경우 EEA 가이드북에서는 활동도 통계가 전수 조사되었을 경우 5%, 표본조사되었거나 기타 방법으로 추정되었을 경우에는 10%로 제시하고 있다(EEA, 2013: 1.A.3.d, 33).

<표 3> 유럽연합 해운수송부문의 배출계수 불확도

	해상	운항중	항구
NO _x	$\pm 20\%$	$\pm 40\%$	$\pm 30\%$
SO ₂	$\pm 10\%$	$\pm 30\%$	$\pm 20\%$
CO ₂	$\pm 10\%$	$\pm 30\%$	$\pm 20\%$
HC	$\pm 25\%$	$\pm 50\%$	$\pm 40\%$
PM	$\pm 25\%$	$\pm 50\%$	$\pm 40\%$
sfc	$\pm 10\%$	$\pm 30\%$	$\pm 20\%$

자료: Entec (2002: 23).

3. 해외 선진국의 에너지분야 불확도 사례

1) 해외 사례 개요

2절에서도 언급했듯이 EEA 가이드북에서도 기타수송부문의 경우에는 자료 부족을 이유로 불확도 기본값을 제시하지 않고 있는 실정이다. 또한 해운수송부문의 경우에는 메탄과 아산화질소의 배출계수 불확도가 제시되지 않았으며, 철도수송부문의 경우에도 아산화질소 배출계수의 불확도가 제시되지 않고 있다. 이에 본 논문에서는 철도수송, 해운수송, 기타수송부문의 누락된 불확도 기본값을 추정하기 위해

해외 선진국의 사례를 검토하고자 한다. 본 논문에서 살펴볼 사례는 기후변화협약에 의거해 국가인벤토리보고서를 제출하고 있는 부속서1 국가 가운데 해당 부문의 불확도 기본값을 보고하고 있는 국가들이다.

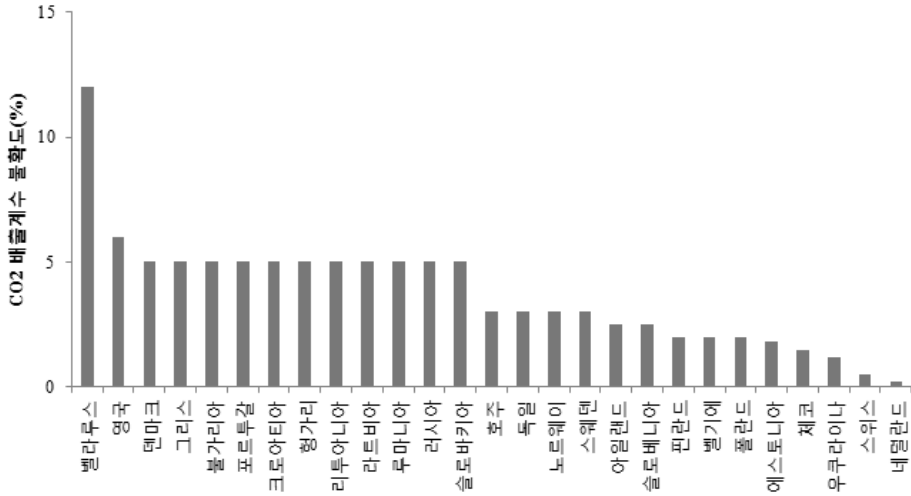
검토결과 대부분의 국가들은 대체로 전문가판단방법을 통해 개별요소의 불확도 값을 추정하고 있었다. 그렇지만 독일과 캐나다를 포함한 일부 국가에서는 직접 측정하거나 연구를 통해 추정하고 있었다. 한편 벨기에, 룩셈부르크, 리히텐슈타인, 크로아티아 등의 경우에는 본 논문과 마찬가지로 해외사례를 참고해서 일부 개별요소의 불확도를 추정하고 있었다.⁷⁾ 해외사례를 종합해서 철도수송, 해운수송, 기타수송이라는 부문별로 정리한 결과는 다음과 같다.

2) 철도수송부문의 배출계수 불확도

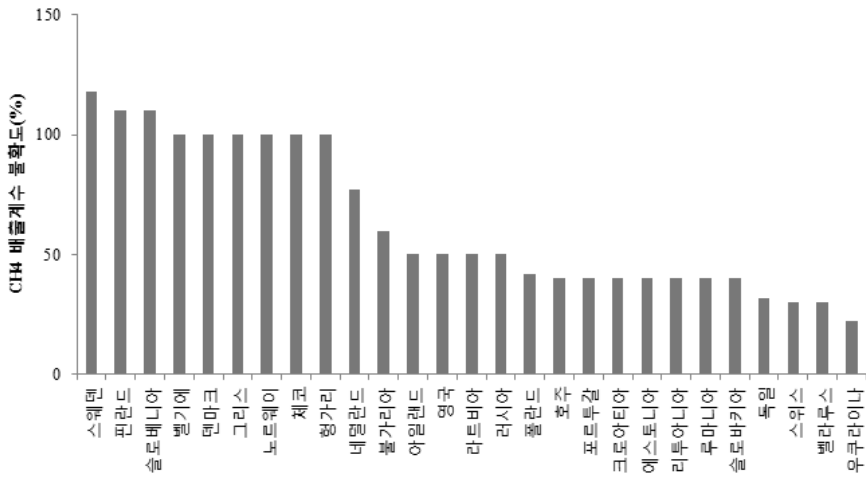
철도수송부문의 배출계수 불확도는 <그림 1~3>, <표 4>와 같다. 이때 국가별 활동도의 불확도가 연료별로 자세히 분류되어있을 경우에는 국내 실정을 고려해서 액체연료(경유)의 값이 적용되었다. <그림 1~3>에서 확인할 수 있듯이 국가별 불확도 값은 상당히 큰 편차를 보이고 있었다. 27개국에서 이산화탄소 활동도의 불확도 평균값이 3.7%였고, 중앙값과 최빈값은 각각 3%와 5%였으며, 최대값과 최소값은 각각 12%와 0.2%였다. 메탄과 아산화질소의 경우에는 개별 통계치들이 모두 크게 증가하는 경향을 보였다. 통계치들이 보여주고 있듯이 개별국가의 불확도 값은 비대칭분포를 갖고 있다. 이런 비대칭분포에서는 평균값이 자료를 대표하는 데 적절하지 않기 때문에, 본 논문에서는 평균, 중앙값, 최빈값이 모두 고려되었다. 최종적으로 철도수송부문의 온실가스별 배출계수 불확도 값의 범위는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소에 대해 각각 3~5%, 40~63%, 50~165%로 추정될 수 있었다.

7) 예외적으로 러시아 같은 동구권 국가들의 경우에는 세부 부문별로 구분하지 않고 수송부문 전체에 대해 동일한 불확도 값을 적용하고 있었다.

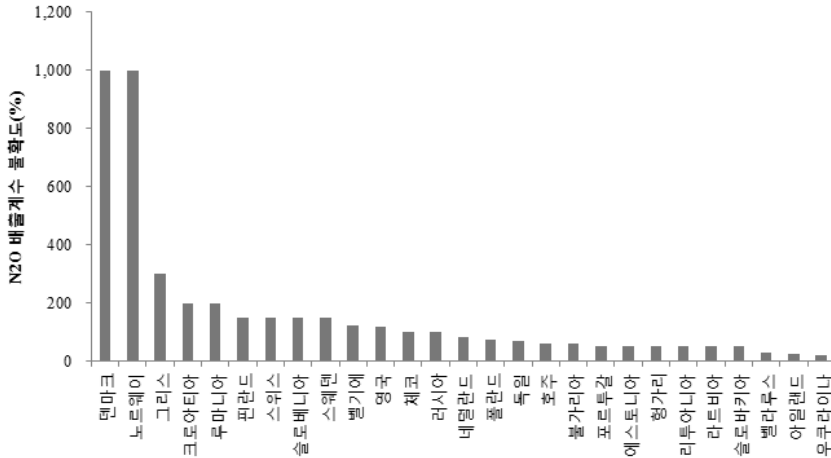
〈그림 2〉 철도수송부문의 배출계수 불확도(CO₂)



〈그림 3〉 철도수송부문의 배출계수 불확도(CH₄)



<그림 4> 철도수송부문의 배출계수 불확도(N₂O)



<표 4> 해외사례 철도수송부문의 배출계수 불확도

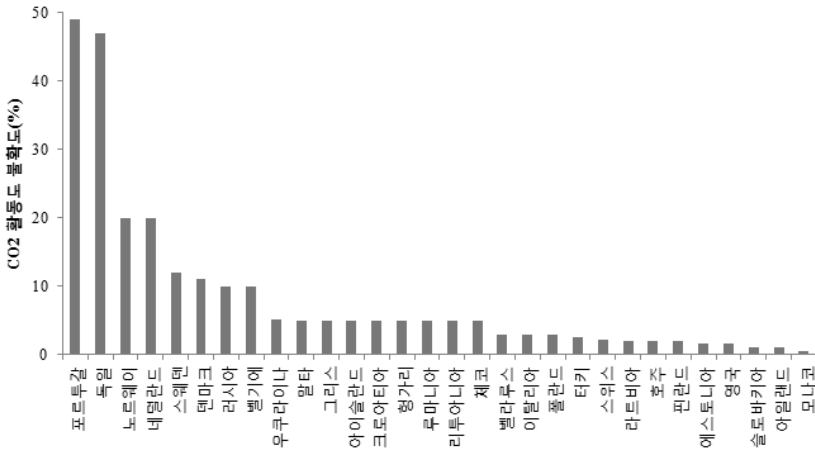
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
평균(%)	3.7	63.4	165.3
중앙값(%)	3.0	50.0	82.0
최빈값(%)	5.0	40.0	50.0
표준편차(%)	2.3	30.7	244.4
최대값(%)	12.0	118.0	1,000.0
최소값(%)	0.2	22.2	20.0
국가수	27	27	27

3) 해운수송부문의 활동도 불확도

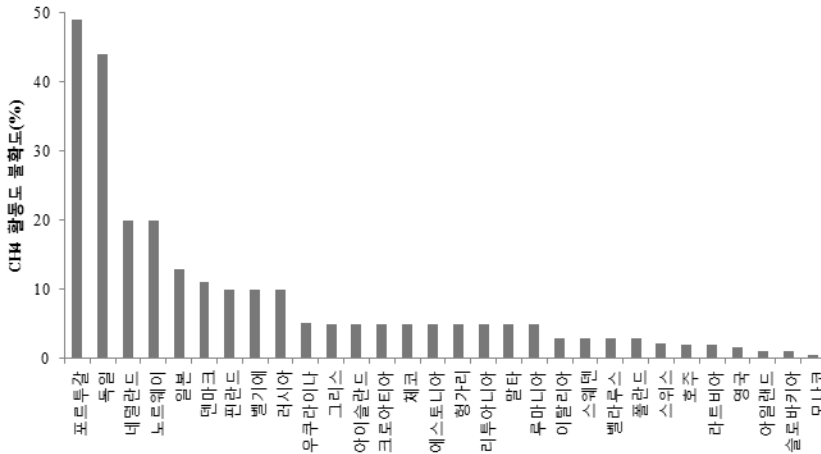
해운수송부문의 활동도 불확도는 온실가스별로 <그림 5~7>, <표 5>와 같다. 이때 국가별 활동도의 불확도가 연료별로 자세히 분류되어 있을 경우에는 국내 실정을 고려해서 액체연료(중유 또는 경유)의 값이 적용되었다. 해운수송부문의 경우에도 국가별 불확도 값에서 큰 편차가 존재하고 있었다. 온실가스별로는 이산화탄소의 경우 30개국에서 활동도의 불확도 평균값이 8.3%였고, 중앙값과 최빈값은 모두 5%였으며, 최대값과 최소값은 각각 49%와 0.5%였다. 메탄과 아산화질소의 경우에

도 비슷한 통계치를 보여주었다. 해운수송부문의 경우에도 비대칭분포를 갖고 있기 때문에 본 논문에서는 마찬가지로 평균, 중앙값, 최빈값이 모두 고려되었다. 최종적으로 해운수송부문의 온실가스 활동도 불확도 값의 범위는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소에 대해 각각 5~8%, 5~9%, 5~9%로 추정될 수 있었다.

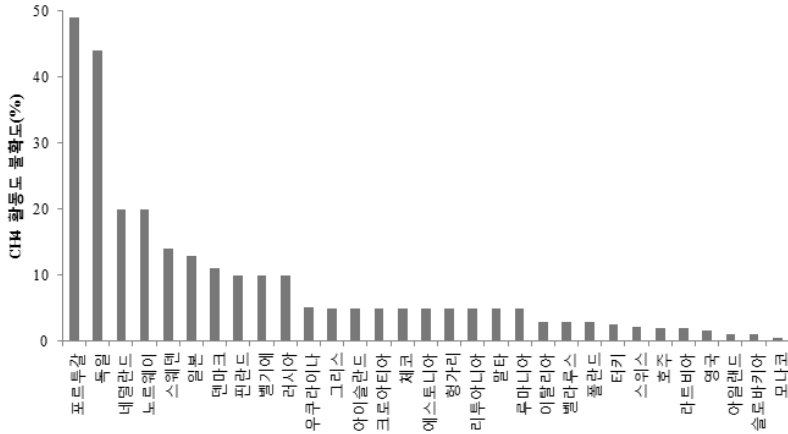
<그림 5> 해운수송부문의 활동도 불확도(CO₂)



<그림 6> 해운수송부문의 활동도 불확도(CH₄)



<그림 7> 해운수송부문의 활동도 불확도(N₂O)



<표 5> 해외사례 해운수송부문의 활동도의 불확도

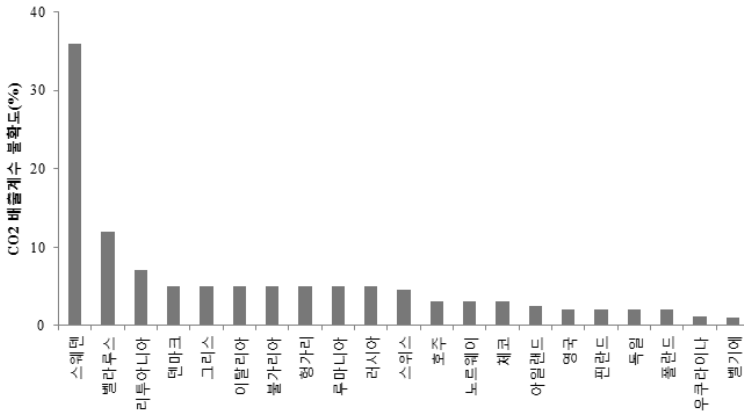
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
평균(%)	8.3	8.7	8.8
중앙값(%)	5.0	5.0	5.0
최빈값(%)	5.0	5.0	5.0
표준편차(%)	11.7	11.2	11.1
최대값(%)	49.0	49.0	49.0
최소값(%)	0.5	0.5	0.5
국가수	30	30	31

4) 기타수송부문의 배출계수 불확도

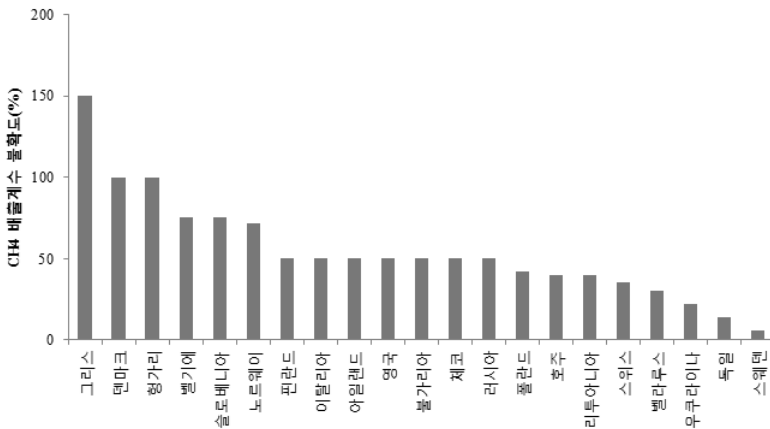
기타수송부문의 배출계수 불확도는 온실가스별로 <그림 7~9>, <표 6>과 같다. 이때 국가별 배출계수의 불확도가 연료별로 자세히 분류되었을 경우에는, 국내 실정을 고려해서 액체연료(경유·휘발유·항공유)에 해당하는 값이 적용되었다. 기타수송부문의 경우에도 국가별 불확도 값은 상당히 큰 편차를 보이고 있었다. 온실가스별로는 이산화탄소의 경우 21개국에서 배출계수의 불확도 평균이 5.5%였고, 중앙값과 최빈값은 각각 4.5%와 5.0%였으며, 최대값과 최소값은 각각 36%와 1%였다. 메탄과 아산화질소의 경우에는 개별 통계치들이 모두 크게 증가하는 경향을 보였다.

기타수송부문의 경우에도 비대칭분포를 보였기 때문에 본 논문에서는 평균, 중앙값, 최빈값을 모두 포함해서 해외사례가 검토되었다. 최종적으로 해운수송부문의 온실가스 활동도 불확도 값의 범위는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소에 대해 각각 4~5%, 50~55%, 50~190%로 추정될 수 있었다.

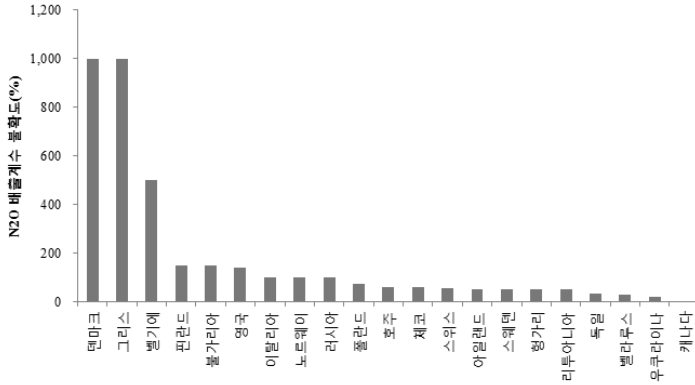
〈그림 8〉 기타수송부문의 배출계수 불확도(CO₂)



〈그림 9〉 기타수송부문의 배출계수 불확도(CH₄)



〈그림 10〉 기타수송부문의 배출계수 불확도(N₂O)



〈표 6〉 해외사례 기타수송부문의 배출계수 불확도

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
평균(%)	5.5	54.8	188.9
중앙값(%)	4.5	50.0	67.5
최빈값(%)	5.0	50.0	50.0
표준편차(%)	7.2	31.7	288.1
최대값(%)	36.0	150.0	1,000.0
최소값(%)	1.0	6.0	20.0
국가수	21	21	20

4. 불확도 관련 기초 자료의 종합

해외사례를 검토한 결과 불확도 값을 추정하는 방법은 다음의 네 가지로 크게 구분될 수 있었다. 첫 번째는 영국, 독일, 캐나다 등의 선진국들이 취하는 방법으로 국가 고유의 부문별 불확도를 추정하는 것이다. 이를 위해서는 실험측정방법, 통계추정방법, 전문가판단방법 등이 적용될 수 있다. 두 번째는 IPCC 유사부문의 불확도 기본값을 적용하는 방법으로 러시아를 포함한 동구권 국가들이 주로 사용하고 있었다.⁸⁾ 세 번째는 EEA 가이드북의 불확도 기본값을 적용하는 방법으로 「IPCC 2000 가이드라인」의 불확도 기본값이 EEA 가이드북을 참고하고 있다는 점에서 적합한 방법일 수 있다. 스웨덴을 포함한 일부 국가들은 국가 고유의 불확도를 추정하고 있

8) 이러한 방법은 예를 들어 해운수송 부문의 활동도 불확도 값을 정할 때 IPCC가 철도 수송부문에 대해 제시한 활동도 불확도 값을 그대로 적용하는 것을 의미한다.

으면서도 특정부문에 대해서는 세 번째 방식을 함께 적용하고 있었다. 네 번째는 해외사례를 비교해서 불확도 값을 추정하는 방법으로 벨기에, 룩셈부르크 등의 소규모 국가들이 취하는 방식이었다.⁹⁾ 물론 개별 국가의 상황에 따라 여러 가지 방식을 혼합해서 적용할 수도 있다.

한국의 경우에는 장기적으로 첫 번째 방식을 사용하는 것이 가장 적절할 수 있다. 실제로 에너지경제연구원에서는 최근 석탄, 철강 등 에너지 분야의 일부 부문에 대해 전문가판단방법을 사용해 불확도를 추정한 바 있다(전봉걸 외, 2014). 그렇지만 단기간에 모든 부문에 대해 첫 번째 방법을 사용해 부문별 불확도를 추정한다는 것은 비효율적일 수 있기 때문에, 현재 불확도가 추정되지 않고 있는 수송 부문을 시작으로 비에너지 분야에 이르기까지 대상을 점진적으로 확대해 나가야 할 것이다. 다만 과도기적으로는 본 논문에서 제시하는 바와 같이 두 번째에서 세 번째의 방식을 혼용해서 사용하는 것이 적합할 수 있다. 이때 현재와 같이 두 번째와 세 번째 방식으로 얻을 수 있는 정보의 양이 제한되어 있을 경우에는, 부족한 정보에 대해 네 번째 방식을 함께 적용해야 할 것이다.

본 논문에서는 정부가 직접 국가 고유값을 산정해야하기 때문에 현실적으로 불가능했던 첫 번째 방식을 제외한 나머지 세 가지 방법을 적용함으로써 철도수송, 해운수송, 기타수송부문의 불확도를 추정하고자 한다. 개별 산식을 이용해서 추정된 3개 부문의 요소별 불확도는 <표 7>과 같다. 그 중에서 어떤 값을 최종적으로 온실가스 불확도 산정에 사용할 지는 인벤토리를 산정하는 기관이 결정할 사항이지만, 본 논문에서는 EEA 가이드북에서 기본값이 제공될 경우 그 값이 우선적으로 적용되었으며, EEA 가이드북에서 기본값이 제공되지 않을 경우에는 해외사례에서 추정된 값이 적용되었다. 이때 해외사례의 경우에는 범위로 값이 주어지는데, 본 논문에서는 보수적인 기준을 채택해 가장 높은 불확도 값이 적용되었다.

9) 예를 들어 벨기에의 경우 배출원별 온실가스별 불확도 값으로 IPCC에서 제시한 기본 값을 적용하되, 정보가 부족할 경우 유럽연합 EEA 가이드북에서 제시한 값을 사용한다. EEA 가이드북에서도 값이 제시되지 않은 경우에는 IPCC 부속서 1국가들의 인벤토리 보고서를 비교하여 그 값을 적용한다. 결과적으로 벨기에에서는 철도수송부문의 경우 활동도 불확도는 6%, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등 온실가스별 배출계수 불확도는 각각 2%, 100%, 125%로 산정하였다. 해운수송부문의 경우 활동도 불확도는 10%, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등 배출계수 불확도는 각각 2%, 75%, 125%로 정하였다. 마지막으로 기타수송부문의 경우 활동도 불확도는 5%, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등 배출계수 불확도는 각각 1%, 75%, 500%로 정하였다 (Flemish Environment Agency et al., 2013).

<표 7> 수송부문의 온실가스 인벤토리 불확도(%)

배출원	온실가스	IPCC 유사부문			EEA 가이드북			해외사례 비교분석		
		활동도	배출계수	합성	활동도	배출계수	합성	활동도	배출계수	합성
철도수송	CO ₂	5	5	7	5	0.64	5	5	3~5	6~7
	CH ₄	5	200	200	5	75	75	5	40~63	40~63
	N ₂ O	5	1000	1000	5			5	50~165	50~165
해운수송	CO ₂	5	5	7	5	5	7	5~8	5	7~9
	CH ₄	5	200	200	5	200	200	5~9	200	200
	N ₂ O	5	1000	1000	5	1000	1000	5~9	1000	1000
기타수송	CO ₂	5	5	7	5			5	4~5	6.5~7
	CH ₄	5	200	200	5			5	50~55	50~55
	N ₂ O	5	1000	1000	5			5	50~190	50~190

주: 음영은 새로 추가된 값이며, EEA 가이드북에서 제시되지 않은 부분은 공란으로 표시됨. 국가별 구체적인 수치는 「산업에너지부문 온실가스 인벤토리 작성 및 품질 개선(에너지경제연구원, 2013)」을 참고할 수 있다.

첫 번째 선택의 기준은 앞서 언급했듯이 EEA 가이드북이었다. 두 번째는 EEA 가이드북에서도 최근의 연구결과를 반영하고 있기 때문에 해외사례의 범위 값이 채택되었다. 기술과 경험이 발전함에 따라 요소별 불확도 값이 변경될 수 있기 때문에 최근의 값을 적용하는 것도 의미가 있을 수 있다.¹⁰⁾ 이 같은 기준을 토대로 국내에서 적용되고 있는 결측값이 포함된 <표 1>을 완성시킨 불확도 테이블은 <표 8>과 같다. 이 테이블은 다음 장에서 살펴 볼 에너지분야의 부문별 배출량 불확도를 산정하는 작업에 기초 자료로 사용될 것이다. 물론 추정치를 비교할 때에는 한국과 유사한 정치사회적 환경 및 에너지 소비구조를 지닌 국가를 우선적으로 참고하는 것이 필요할 수 있다. 그렇지만 본 논문에서 이러한 원칙을 적용하기에는 현실적인 한계가 존재할 수밖에 없었다. 예를 들면 한국과 유사한 사례를 선정하기 위해서는 수송 수단별로 세부 에너지원별 소비량을 파악할 수 있어야 하는데 동구권 국가들을 포함해서 이처럼 세분화된 자료를 취득하는 데에는 현실적인 어려움이 있다. 이러한 한계에도 불구하고 본 논문에서 해외사례와의 비교를 통해 제시된 값들은 현재 배

10) 다만, 철도수송부문 이산화탄소 배출계수 불확도의 경우에는 EEA 가이드북의 기본값이 현재 국내에서 적용되는 다른 부문 이산화탄소 배출계수의 불확도에 비해 상당히 낮은 값이기 때문에, 본 논문에서는 이 부문에 대해 유럽연합의 기본값 대신 해외사례분석에서 살펴본 범위 내에서 가장 낮은 값이 사용되었다. 철도수송부문은 온실가스 배출과 관련하여 에너지분야에서 차지하는 비중이 크지 않기 때문에 이산화탄소 배출계수 불확도 값으로 해외사례에서 가장 높은 값인 5%를 사용한다고 하더라도 총 에너지분야 불확도에 미치는 영향은 작다.

출원별 온실가스 불확도를 유엔기후변화협약에 보고하고 있는 모든 국가들을 대상으로 하여 개별 국가들이 보고한 값의 분포를 산정하고, 이를 바탕으로 추출한 값이라는 점에서 의의가 있다. 또한 수송부문의 경우에는 대부분 액체연료를 사용하는 점에서 다른 부문에 비해 국가별로 연료구성의 차이가 크지 않을 것이기 때문에 본 논문이 채택한 방식이 갖는 한계는 줄어들 것으로 판단된다.

〈표 8〉 에너지분야의 온실가스 인벤토리 불확도

배출원	온실가스	불확도(%)			
		활동도	배출계수	합성	
에너지연소	고정연소	CO ₂	3	5	5.8
		CH ₄	3	150	150
		N ₂ O	3	1000	1,000
	제조업 및 건설업	CO ₂	3	5	5.8
		CH ₄	3	150	150
		N ₂ O	3	1000	1,000
	항공수송	CO ₂	5	5	7
		CH ₄	<5	200	200
		N ₂ O	<5	10000	10000
	도로수송	CO ₂			5
		CH ₄			40
		N ₂ O			50
	철도수송	CO ₂	5	3	5.8
		CH ₄	5	75	75
		N ₂ O	5	165	165
	해운수송	CO ₂	5	5	7
		CH ₄	5	200	200
		N ₂ O	5	1000	1000
	기타수송	CO ₂	5	5	7
		CH ₄	5	55	55
		N ₂ O	5	190	190
기타부문	CO ₂	3	5	5.8	
	CH ₄	3	150	150	
	N ₂ O	3	1000	1,000	
탈루성배출	석탄 지하채굴	CH ₄	14	200	200.5
	석탄 후처리	CH ₄	14	300	300.3
	석유(운송)	CH ₄	10	25	26.9
	석유(정제/저장)	CH ₄	3	150	150
	천연가스(프로세싱)	CH ₄	3	150	150
	기타누출	CH ₄	3	150	150

주: 음영은 본 논문에서 새로 추정된 값임.

IV. 에너지분야 온실가스 인벤토리의 불확도 산정

1. 에너지분야의 불확도

4장에서는 국내 에너지분야 온실가스 배출량의 불확도를 산정하기 위해, 온실가스 종합정보센터에서 미완의 상태로 남겨놓은 불확도 테이블을 최종적으로 완성시킨 <표 8>을 이용하고자 한다. 대신 온실가스 배출량의 산정방식은 온실가스정보센터의 방식을 그대로 따르고 있다. 참고로 에너지분야의 국가 온실가스 인벤토리는 Tier 1 방식과 Tier 2 방식을 혼용하고 있으며, 2011년 배출량부터는 국가 고유의 배출계수를 적용한 Tier 2방식이 대부분의 부문에 걸쳐서 적용될 계획이다. 본 논문에서는 이 방침을 따라 국가 고유의 배출계수를 적용해서 부문별 배출량을 산출하였다. 마찬가지로 활동도와 배출계수 자료는 온실가스정보센터가 제시하는 값이 그대로 사용되었다.

배출량의 불확도 산정은 2장에서 살펴본 IPCC 2000 우수실행지침 Tier 1 수준의 에러전파 방식이 그대로 적용되었다. 분석결과 에너지분야 온실가스 배출량의 불확도는 <표 9>와 같다. 각 열별로 제 3행에는 해당 불확도의 산출되는 방식이 기록되어져 있다. 이와 관련해서 보다 자세한 내용은 2장과 「IPCC 2000 우수실행지침」을 참고할 수 있다.

<표 9> Tier 1 방식에 의한 에너지분야의 불확도 (2011년)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
IPCC 목록	온실 가스	기준 년도 배출량	해당 년도 배출량	활동 도불 확도	배출 계수 불확도	종합 불확도	배출 원별 기여도	Type A 민감도	Type B 민감도	배출 계수에 따른 배출 추이 불확도	활동도에 따른 배출 추이 불확도	배출 추이 불확도
		입력	입력	입력	입력	$\sqrt{E^2 + F^2}$	$\frac{(C \cdot D)^2}{(\sum D)^2}$		$\left \frac{D}{\sum C} \right $	$I \cdot F$	$J \cdot E \cdot \sqrt{2}$	$K^2 + L^2$
	GHG	GgCO _{2e}	GgCO _{2e}	%	%	%		%	%	%	%	%
A.		233,904	618,550									
A.1.		47,782	267,115									
A.1.a.		36,048	251,086	3.0	6.3	7.0	7.8	0.7	1.0	4.1	4.5	36.7
A.1.b.		11,199	13,846	3.0	5.1	6.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2
A.1.c.		535	2,182	3.0	5.7	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

<표 9> Tier 1 방식에 의한 에너지분야의 불확도 (2011년) (계속)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
IPCC 목록	온실 가스	기준 년도 배출량	해당 년도 배출량	활동 도불 확도	배출 계수 불확도	중합 불확도	배출 원별 기여도	Type A 민감도	Type B 민감도	배출 계수에 따른 배출 추이 불확도	활동도에 따른 배출 추이 불확도	배출 추이 불확도
		입력	입력	입력	입력	$\sqrt{E^2+F^2}$	$\frac{(C \cdot D)^2}{(\sum D)^2}$		$\frac{D}{\sum C}$	$I \cdot F$	$J \cdot E \cdot \sqrt{2}$	K^2+L^2
	GHG	GgCO ₂ e	GgCO ₂ e	%	%	%		%	%	%	%	%
A.2.		70,283	202,927									
A.2.a.		24,924	96,159	3.0	6.8	7.4	1.3	0.1	0.4	0.9	1.7	3.7
A.2.b.		544	778	3.0	5.1	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A.2.c.		11,993	37,680	3.0	8.9	9.4	0.3	0.0	0.2	0.2	0.7	0.5
A.2.d.		2,785	1,503	3.0	5.2	6.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
A.2.e.		3,252	2,151	3.0	5.2	6.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
A.2.f.		26,786	64,656									
A.2.f.1		13,818	15,529	3.0	6.3	7.0	0.0	0.1	0.1	0.5	0.3	0.4
A.2.f.2		2,555	5,199	3.0	5.1	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
A.2.f.3		218	181	3.0	5.2	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A.2.f.4		1,581	2,964	3.0	5.4	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
A.2.f.5		5,113	2,421	3.0	5.3	6.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1
A.2.f.6		3,500	38,363	3.0	9.3	9.8	0.4	0.1	0.2	1.1	0.7	1.7
A.3.		35,779	86,555									
A.3.a		1,107	1,718	5.0	103.9	104.0	0.1	0.0	0.0	0.5	0.1	0.3
A.3.b		30,906	81,602	5.0		5.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
A.3.c		876	506	5.0	3.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A.3.d		2,440	2,262	5.0	5.6	7.5	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
A.3.e		449	467	5.0	5.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A.4.		80,060	62,479									
A.4.a		20,718	21,052	3.0	6.2	6.9	0.1	0.1	0.1	0.9	0.4	0.9
A.4.b		54,495	35,254	3.0	5.3	6.1	0.1	0.4	0.1	2.4	0.6	6.0
A.4.c		4,846	6,173	3.0	5.6	6.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0
B.		5,333	8,255									
B.1.		4,809	582									
B.1.a		4,230	512	14.0	200.0	200.5	0.0	0.0	0.0	8.8	0.0	78.1
B.1.b		578	70	14.0	300.0	300.3	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	3.3
B.2.		524	7,673									
B.2.a		0	0	10.0	25.0	26.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B.2.b		0	0	3.0	150.0	150.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B.2.c		524	7,673	3.0	150.0	150.0	3.4	0.0	0.0	3.9	0.0	15.6
B.2.d		0	0	3.0	150.0	150.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
총합		239,237	626,805				13.9					147.4
에너지분야의 총 불확도:							3.4	변화경향 불확도				12.1

주: A열은 IPCC의 배출원 목록구분 기호임.¹¹⁾

분석결과 2011년 에너지분야 온실가스 배출량의 총 불확도는 3.4%로 산출되었다. 이 같은 결과는 에너지분야 총 온실가스 배출량의 95% 신뢰구간에서 하한값이 603,423GgCO₂e¹²⁾이고, 상한값이 650,188GgCO₂e¹³⁾라는 것을 의미한다. 이렇게 도출된 국내 에너지분야의 배출량 불확도는 다른 국가와도 비교될 수 있다. <표 10>은 에너지분야를 포함한 국가별 총 인벤토리의 불확도를 비교한 것이며, 온실가스 배출량 불확도의 범위를 가늠하는 참고자료가 될 수 있다. 에너지분야에 국한해서 온실가스 배출량의 불확도를 비교하면, 독일의 경우에는 불확도 값의 95% 신뢰구간이 -2.67~2.71%였으며(UBA, 2010), 핀란드의 경우에는 불확도 값이 한국과 유사한 3.8% 수준이었다(Statistical Finland, 2007). 다만 독일과 핀란드의 경우 에너지구조가 한국과 다르고 Tier 2 수준에서 불확도를 분석한 값이라는 측면에서 직접적인 비교는 한계가 있을 수 있다.¹⁴⁾

11)

<에너지분야의 IPCC 배출원 목록>

A. Fuel Combustion Activities (Sectoral Approach)	3. Transport
1. Energy Industries	a. Civil Aviation
a. Public Electricity and Heat Production	b. Road Transportation
b. Petroleum Refining	c. Railways
c. Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	d. Navigation
2. Manufacturing Industries and Construction	e. Other Transportation
a. Iron and Steel	4. Other Sectors
b. Non-Ferrous Metals	a. Commercial/Institutional
c. Chemicals	b. Residential
d. Pulp, Paper and Print	c. Agriculture/Forestry/Fisheries
e. Food Processing, Beverages and Tobacco	B. Fugitive Emissions from Fuels
f. Other	1. Solid Fuels
1. Non-Metalic	a. Coal Mining
2. Fabricat. Metal	b. Coal Processing
3. Wood and Wood Products	2. Liquid and Gas Fuels
4. Construction	a. Crude Oil Transportation
5. Textile	b. Crude Oil Processing and Storage
6. Other Manufacture	c. Natural Gas Processing
	d. Others

주: A.2.f의 세부목록은 <표 9>와의 비교를 위해 추가된 것임.

12) 2011년 에너지분야 온실가스 배출량의 96.3%이다.

13) 2011년 에너지분야 온실가스 배출량의 103.7%이다.

14) 참고로 핀란드는 2001년부터 온실가스 인벤토리의 불확실성을 평가해왔으며, 2003년부터 2007년

〈표 10〉 국가별 온실가스 인벤토리의 불확도 평가 결과

	Tier1	
	총량(%)	변화율(%)
덴마크	4.1	2.4
오스트리아	4.0	2.1
독일	3.8	4.1
네덜란드	4.3	3.2
영국	16	2.3

자료: Fauser et al. (2011: 156).

국내에서 에너지분야 배출량 변화의 불확도는 12.1%였다. 이는 1990년부터 2011년 사이에 에너지분야 온실가스 배출량의 증가율(164.4%)이 95% 신뢰구간에서 하한값 152.3%, 상한값 176.5%라는 의미이다.¹⁵⁾ 국내 온실가스 배출량의 변화추이 불확도는 <표 10>에서 살펴본 다른 나라들에 비해 높았는데, 이는 한국의 배출량 변화율이 다른 나라보다 10배 내외로 높았기 때문이다.

2. 민감도 분석 결과

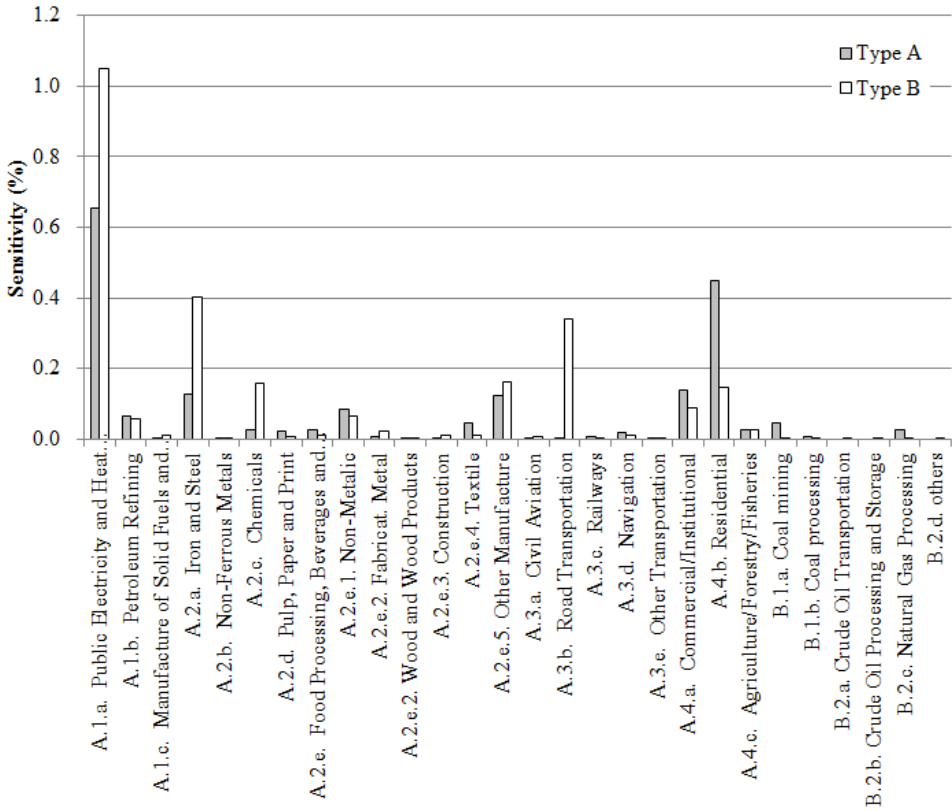
에너지분야의 온실가스 인벤토리에 대한 민감도 분석결과는 <그림 11>과 같다. 1990년과 2011년 사이 배출량 변화에 가장 민감한 영향을 미친 요소는 발전부문,

까지는 Tier 2 방법을, 2008년부터는 Tier 1 방법과 Tier 2 방법을 병행하고 있다. 좀 더 자세히 살펴보면, Tier 1 방법은 스크리닝(screening)을 위해 사용되었으며, 스크리닝을 통해 얻어진 정보들을 바탕으로 중요부문에 대해서는 Tier 2 방법으로 불확실성이 평가되었다. 불확실성 평가를 위해 필요한 개별 변수에 대한 확률분포는 전문가판단, 측정데이터, IPCC 기본값 등이 사용되었다. 전문가 판단방법을 사용할 때에는 부문별로 한 명의 전문가에게 개별 변수에 대한 불확실성을 문의하였으며, 2010년 국가인벤토리 보고서(NIR)에는 총 22명의 전문가가 불확실성 평가 설문조사에 참여했다. 이때 한 전문가가 여러 부문의 불확실성을 평가하기도 한다(Statistics Finland, 2010). 부문별-온실가스별로 Tier 2 방법을 사용하는 방식은 조금씩 차이가 있는데, 에너지부문 이산화탄소의 경우에는 연소기술이 불확실성에 미치는 영향이 작기 때문에 세부 부문별로 자세히 구분하지 않고, 연료별로 부문 전체의 불확실성을 평가하고 있다. 다만 도로수송 부문의 경우에는 활동도 자료가 가장 구체적으로 산출되기 때문에 세부 부문별로 불확실성이 평가된다. Tier 2 방식을 적용한 2007년 핀란드의 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면, 핀란드의 전체 온실가스 인벤토리 불확실성은 토지 이용 및 산림부문을 제외할 경우 95% 신뢰구간이 -4%~7%였으며, 배출변화량의 불확실성은 -14%~6%였다. 온실가스 별로는 아산화질소, 배출원 부문별로는 농업부문의 불확실성이 가장 높았으며, 이산화탄소와 에너지부문의 불확실성이 가장 낮았다. 한편 핀란드에서는 1차 에너지소비량 중에서 석유, 석탄, 천연가스, 원자력, 재생가능에너지, 목재 등이 차지하는 비중이 2008년 현재 각각 25%, 10%, 11%, 17%, 9%, 22%였다(Statistical Finland, 2009). 핀란드와 비교했을 때 한국은 석유, 석탄, 천연가스, 원자력, 재생가능에너지 등의 비중이 2011년 현재 각각 38%, 30%, 17%, 12%, 3%였다(에너지경제연구원, 2012).

15) 152.3%는 164.4%에서 12.1%를 뺀 값, 176.5%는 164.4%에서 12.1%를 더한 값이다.

가정부문, 철강부문, 도로수송부문이었다. 참고로 민감도 A와 B는 식 (6), (7)을 이용하여 산출되었다. 여기에서 C와 D는 각각 <표 9>의 열 번호를 나타낸다(IPCC, 2000).

<그림 11> 에너지분야의 부문별 민감도 분석결과



$$I_x = \text{percentage trend if category } x \text{ is increased by 1 percent in both years} - \text{percentage trend without increase}$$

$$= \frac{0.01 \cdot D_x + \sum D_i - (0.01 \cdot C_x + \sum C_i)}{(0.01 \cdot C_x + \sum C_i)} \cdot 100 - \frac{\sum D_i - \sum C_i}{\sum C_i} \cdot 100 \quad (7)$$

$$J_x = \text{percentage trend if category } x \text{ is increased by 1 percent in year } t - \text{percentage trend without increase}$$

$$= \frac{0.01 \cdot D_x + \sum D_i - \sum C_i}{\sum C_i} \cdot 100 - \frac{\sum D_i - \sum C_i}{\sum C_i} \cdot 100 \quad (8)$$

$$= \frac{D_x}{\sum C_i}$$

3. 온실가스별 불확도

온실가스별 불확도는 <표 11>과 같다. 구체적으로 에너지분야의 온실가스별 불확도는 이산화탄소가 2.7%, 메탄이 117%, 아산화질소가 473%였다. 이 같은 차이는 배출계수의 불확도 값이 이산화탄소에 비해 메탄과 아산화질소가 수십에서 수백 배까지 크기 때문에 나타난 결과이다. 배출량 변화의 불확도 역시 이산화탄소에 비해 메탄과 아산화질소의 불확도가 상당히 큰 것으로 나타났다. 배출량 불확도와 마찬가지로 국내에서는 1990년에 비해 온실가스 배출량이 크게 증가했기 때문에 배출량 변화경향의 불확도도 큰 값으로 산출되었다.

<표 11> 에너지분야의 온실가스별 인벤토리 불확도(2011년)

배출량의 불확도(%)				배출량 변화의 불확도(%)			
CO ₂	CH ₄	N ₂ O	전체	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	전체
2.7	116.6	473.0	3.4	5.9	181.1	1,345.6	12.1

대부분의 국가 인벤토리 보고서에서 온실가스별로는 불확도 값을 제시하지 않은 채, <표 9>와 같은 부문별 불확도 값만 제시하고 있었기 때문에 많은 해외사례와 직접 비교하기는 한계가 존재할 수 있다. 그렇지만 앞서 철도수송, 해운수송, 기타 수송부문의 요소별 불확도 산정사례에서 살펴본 것처럼 다른 국가의 온실가스별로는 이산화탄소에 비해 메탄과 아산화질소의 불확도가 수십~수백 배 더 큰 것으로 예상되었다. 예를 들면, Tier 1 방식으로 불확도를 산정한 네덜란드의 2004년 인벤토리 불확도의 경우에도 이산화탄소가 1.9%로 가장 낮았고, 메탄과 아산화질소의 불확도는 각각 18%와 45%로 큰 차이가 있었다(MHWS, 2013). 오스트리아의 경우에는 Tier 2 방식으로 평가하기는 했지만, 2011년 인벤토리의 이산화탄소 불확도가 1.6%, 메탄과 아산화질소의 불확도가 각각 14.7%와 92.1%일 정도로 상당한 격차가 존재했다(Environment Agency Austria, 2013).

V. 결론

본 논문은 한국 정부가 ‘저탄소 녹색성장’을 선언한 이후 온실가스 배출량을 발표하고 있으면서도 정작 온실가스 배출량의 불확도를 제대로 발표하지 못하고 있는 문제를 해소하기 위해 기획되었다. 구체적으로는 국가 온실가스 배출량의 85.3%를 차지하는 에너지분야를 대상으로 Tier 1 수준의 에러전파 방식을 이용해서 온실가스 인벤토리의 불확도를 추정했다. 연구결과 에너지분야 온실가스 배출량의 불확도는 3.4%였으며, 이는 핀란드를 포함한 다른 나라와 유사한 수치인 것으로 판단된다.

그렇지만 온실가스별로는 불확도에서 큰 차이가 있었다. 즉, 에너지분야에서 이산화탄소의 불확도는 2.7%에 불과했지만, 메탄은 116.6%, 아산화질소는 473.0%에 이를 정도로 불안정한 값들을 보여주었다. 물론 에너지분야에서 이산화탄소의 비중이 압도적으로 크기 때문에 메탄이나 아산화질소의 불확도를 무시할 수 있을 정도였지만, 궁극적으로는 이들 불안정한 온실가스의 불확도를 낮추는 방안이 마련되어야 할 것이다. 구체적으로는 3장의 <표 8>에서 볼 수 있듯이 활동도에 비해 배출계수의 불확도가 높은 것으로 나타났기 때문에, 한국 정부는 활동도 자료의 신뢰성을 높여려는 노력과 더불어서 국가 고유의 배출계수를 개발하는 작업을 병행할 필요가 있다. 특히 아산화질소 배출계수의 불확도가 1,000%에 달할 정도로 높기 때문에 특별히 집중적으로 관리해야 할 것이다.

다행히도 최근 들어서 온실가스 배출량의 불확도를 산정하려는 연구들이 늘어나고 있다. 예를 들면, 온실가스 비중이 큰 발전부문의 석탄을 대상으로 한 Tier 2 수준의 불확도 산정이 이뤄진 바 있다(전봉걸 외, 2014). 특히 에너지경제연구원의 경우에는 산업·에너지부문을 대상으로 온실가스 인벤토리의 품질을 개선하기 위한 장기 연구를 진행해오고 있다(심성희, 2012; 김성균, 2013). 따라서 후속 연구로는 본 논문에서 산정한 바와 같이 에너지분야 같은 대분류 항목에 대해서는 Tier 1 수준으로 불확도 산정을 완료한 뒤, 메탄이나 아산화질소처럼 불확도가 높은 항목에 대해서는 Tier 2 수준의 불확도 산정을 결합하는 하이브리드 방식의 조합이 필요할 것으로 판단된다.

한국 정부가 온실가스 배출량 관련 데이터베이스를 체계적으로 관리한 지는 4년

이 채 안되었다고 해도 과언이 아닐 것이다. 왜냐하면 전담기관인 온실가스종합정보센터가 공식적으로 출범한 시기가 2010년 6월에 불과할 뿐이며, 그 이전에는 에너지경제연구원이나 관련 기관들이 산발적으로 담당해왔었기 때문이다. 즉, 한국에서 온실가스 관련 데이터베이스는 ‘저탄소 녹색성장’을 선언했던 이명박 정부 이후부터 체계적으로 관리되었다고 할 수 있다. 박근혜 정부 들어서 녹색성장에 대한 관심이 줄어들기는 했지만, 기후변화에 대한 대응만큼은 창조경제와 맞물려서 적극적으로 추진하겠다고 선언한 상태이다. 따라서 저탄소 대한민국의 정책기조를 계승하려면, 박근혜 정부는 온실가스 데이터베이스에 대한 관리, 특히 배출량 자료의 신뢰도와 밀접하게 관련 있는 불확도부터 체계적으로 산정·구축해야 할 것이다.

[참고문헌]

1. 권진웅·김영진·허철행·김정·장영기, “DARS를 이용한 배출원별 휘발성 유기화합물(VOC) 불확도 평가”, 「한국대기환경학회 추계학술대회 논문집」, 2012, pp.120-120.
2. 김성균, 「산업·에너지부문 온실가스 인벤토리 작성 및 품질 개선」, 산업통상자원부·에너지경제연구원, 2013.
3. 김현선·김동식·김호·이승묵, “매립지 온실가스 배출량의 민감도 및 불확도 평가”, 「대한환경과학회지」, 제30권 제3호, 2008, pp.257-263.
4. 노수진·류성희·이정주·유종영, “회귀분석을 이용한 군급 매립지 온실가스 배출량의 불확도 추정”, 「한국대기환경학회 추계학술대회 논문집」, 2012, pp.169-169.
5. 심성희, 「산업·에너지부문 온실가스 인벤토리 작성 및 품질 관리」, 지식경제부·에너지경제연구원, 2012.
6. 온실가스종합정보센터, 「국가 온실가스 인벤토리 보고서」, 2013.
7. 에너지경제연구원, 「2012 에너지통계연보」, 2012.
8. 이재영·김용기·이철규·이영호, “IPCC 가이드라인을 이용한 국내 철도수송에 따른 온실가스 배출량 산정에 관한 연구”, 「한국철도학회논문집」, 제15권 제4호, 2012, pp.408-412.

9. 이현주, “수송부문 국가 온실가스 배출량 산정의 정확도 제고 방안”, 「교통 기술과 정책」, 제8권 제6호, 2011, pp.99-105.
10. 전봉걸·심성희·황인창·진상현. “발전부문 온실가스 배출량의 불확도 분석: 전문가 판단 조사방법을 이용한 몬테카를로 시뮬레이션”, 「환경정책」, 제22권 제1호, 2014, pp.1-29.
11. 한근식, “온실가스 인벤토리 불확도 계산을 위한 기초 통계”, 「온실가스정보센터 포럼 발표자료」, 2012.
12. Entec UK Limited, *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community*, 2002.
13. Environment Agency Austria, *Austria's National Inventory Report 2013. National Inventory Report to the UNFCCC*, 2013.
14. Environmental Protection Agency(EPA), *Quality assurance/quality control and uncertainty management plan for the U.S. greenhouse gas inventory: Procedures manual for quality assurance/quality control and uncertainty analysis*, 2002.
15. European Environment Agency(EEA), *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013: Technical guidance to prepare national emission inventories*, 2013.
16. Fauser, P, Srensen, P. B., Nielsen, M., Winther, M., Plejdrup, M. S., Hoffmann, L., Gyldenkrne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R. and Lyck, E., “Monte Carlo (Tier 2) uncertainty analysis of Danish Greenhouse gas emission inventory”, *Greenhouse Gas Measurement and Management*, vol.1 no.3-4, 2011, pp.145-160.
17. Flemish Environment Agency et al., *Belgium's Greenhouse Gas Inventory (1990-2011). National Inventory Report to the UNFCCC*, 2013.
18. IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2006.
19. IPCC, *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, 2000.
20. JRC(European Commission's Joint Research Centre), *Long-term Trend in Global CO2 Emissions 2011 Report*, 2011.
21. Ministry of Health, Welfare and Sport(MHWS), *Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990-2011: National Inventory Report 2013*, 2013.
22. Statistical Finland, *GHG Inventory and Energy Statistics Yearbook 2009*, 2009.
23. Statistics Finland, *Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990-2005. National*

- Inventory Report to the UNFCCC, 2007.*
24. Statistical Finland, *Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990-2008. National Inventory Report to the UNFCCC, 2010.*
 25. Swedish Environmental Protection Agency(SEPA), *National Inventory Report Sweden 2013. National Inventory Report to the UNFCCC, 2013.*
 26. UBA (Federal Environment Agency, Germany), *National Inventory Report 2013. National Inventory Report to the UNFCCC, 2010.*