

Tier 1과 2 수준을 복합한 에너지부문 온실가스 인벤토리의 불확도 평가*

전봉걸** · 이규환*** · 장호미**** · 김성균*****

요 약

2020년 신(新)기후변화협약 체제의 출범을 앞두고 한국은 온실가스 감축을 위하여 다양한 정책들을 펼쳐오고 있다. 이와 함께 온실가스 감축을 평가하기 위한 인벤토리의 구축과 분석이 매년 수행되고 있다. 그러나 온실가스 배출량의 변화를 엄밀하게 추정하기 위한 불확도 분석과 실험은 상대적으로 미미한 수준이며, 그나마 일부 부문에 한하여 수행되는 불확도 분석도 한국의 실정이 반영되지 않은 Tier 1 수준에 머물러 있다. 이에 본 논문은 Tier 1 방법과 Tier 2 방법을 복합할 수 있는 불확도 추정법을 제시하였고, 나아가 Tier 1 방법과 Tier 2 방법을 복합하여 발전, 철강산업, 비금속광물산업 부문의 불확도 분석을 실시하였다. 현재 Tier 2 방법은 일부 부문에 한정되어 있지만, 향후 한국의 실정을 반영한 Tier 2 방법을 확장하는 과정에서 Tier 2 방법으로 추정한 불확도와 Tier 1으로 추정한 불확도를 결합해야 할 필요가 발생할 것으로 전망된다.

* 이 논문은 2015년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의해 연구되었음. 본 논문은 에너지경제연구원 보고서 ‘산업·에너지부문 온실가스 인벤토리 작성 및 품질관리’의 한 챕터를 수정·보완하였음.

** 서울시립대 경제학부 부교수(교신저자). bgchun@uos.ac.kr

*** 서울시립대 석사 졸업, 한국과학기술기획평가원 위촉연구원(공동저자). kuhlee@kistep.re.kr

**** 서울시립대 박사과정, 자본시장연구원 연구원(공동저자). j-hm@nate.com

***** 에너지경제연구원 연구위원(공동저자). skkim@keei.re.kr

본 논문이 수행한 연구는 이러한 필요에 대응하여 Tier 1 방법과 Tier 2 방법을 복합한 불확도 추정 방법과 실제 추정 사례를 제공한 선행연구로서 의의를 가진다.

주요단어 : 온실가스 불확도, 국가 인벤토리 보고서, 전문가 판단
경제학문헌목록 주제분류 : Q50

I. 서 론

지난 1997년 교토의정서가 체결된 이후, 선진국들은 자국의 온실가스 배출량을 보다 엄밀하게 추정하고 나아가 온실가스 감축량을 보다 과학적으로 평가하기 위하여 온실가스 배출량의 불확도를 평가해왔다. 한국도 지난 2008년 저탄소 녹색성장 비전을 선포한 이후, 2020년 BAU 대비 30% 감축목표 설정(2009년)과 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵 수립(2014년)을 발표했고, 2015도에는 온실가스 배출권거래제가 시행되었다. 이러한 정책적 움직임에 동조하여 온실가스 배출량과 이것의 불확도를 과학적으로 분석해야 할 필요성과 시급성이 강화되어 지난 몇 년 동안 온실가스 배출량과 불확도를 한국의 실정에 맞게 추정하려는 연구가 이어져왔다. 그리고 이러한 노력의 결실로 정부는 지난 2011년부터 IPCC의 가이드라인에 따라 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR)를 발간하여 온실가스 배출량을 체계적으로 산정하고 있다.

그러나 이러한 노력에도 불구하고 NIR에서 수행된 온실가스 배출량의 불확도 분석은 선진국과 비교했을 때 미미하고 뒤떨어져 있는 수준이다. 그나마 이루지는 불확도 분석도 IPCC 가이드라인에서 제시하는 참고값을 바탕으로 한 Tier 1 방법에 치중되어 한국의 실정을 제대로 반영하지 못하고 있고, 일부 배출 부문에 국한되어 있는 상황이다.

본 논문은 위에서 언급한 바와 같이 한국의 불확도 분석이 수준이나 범위

면에서 진전시켜야 할 부분이 많다는 인식 하에서 발전, 철강산업, 비금속광물산업 부문의 이산화탄소 배출량에 대한 Tier 2 불확도 분석을 실시하여 불확도 분석의 저변을 넓히하고자 하였다. 그리고 Tier 2 방법으로 추정된 이산화탄소 배출량의 불확도를 Tier 1 방법으로 추정한 메탄, 아산화질소의 불확도와 복합할 수 있는 방법론을 탐구하고 실제로 그 방법론을 수행함으로써 향후 Tier 1과 Tier 2 방법의 불확도를 복합하여 추정할 수 있는 기반을 제시하였다.

논문의 구성은 불확도 분석방법의 개요를 설명한 2장, 전문가 판단 조사방법의 방법론을 요약한 3장, 그리고 Tier 1과 Tier 2를 복합한 분석 결과를 제시한 4장으로 구성되었고, 5장에서 본 논문의 기여와 한계를 언급하며 본 논문의 의의를 평가하였다. 여기서 3장은 전문가로부터 불확실성과 관련된 정보를 얻기 위한 방법론을 제시한 장으로서, ‘전문가 판단 조사방법’을 본 논문에 포함한 것은 Tier 2 방법으로 불확도를 추정하기 위해서는 활동자료 및 배출계수에 대한 확률분포 형태가 필요하고, 이러한 정보를 얻기 위해서는 전문가로부터 관련 의견을 도출해내야 하기 때문이다.

Ⅱ. 불확도 분석 개요

1. 불확도의 개념

온실가스는 다양한 배출원으로부터 발생한다. 화석연료를 연료로 사용하는 기계장치뿐만 아니라 화석연료가 원료로 사용되는 산업 분야, 가축의 분뇨, 폐기물의 소각 및 매립 등 다양한 부문으로부터 온실가스가 배출된다. 배출원이 다양한 만큼 온실가스 배출 과정에 영향을 미치는 요인들도 다양하다. 그러나 온실가스 배출량을 측정하는 방법은 다양한 부문의 다양한 특성들을 모

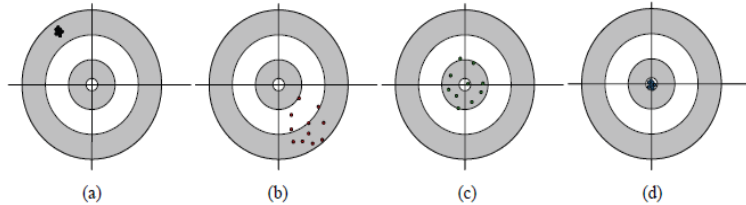
두 고려할 수 있을 정도로 세부적인 정교성을 가지고 있지 않다. 또한 세부적인 정교성을 확보한다 할지라도 배출량 추정에 필요한 자료 수집 과정에서 측정 오차가 발생할 수 있다. 불확도는 이러한 오차들로 인하여 생성되는 실제 참값과 추정값 사이의 차이 정도를 나타내는 개념으로서, IPCC(2006)는 불확도가 현실의 참값(true value)에 대한 정보의 부족으로부터 발생하며 지식의 정도 및 분석 방법에 의해 그 정도가 결정되는 것으로 설명한다.

보다 구체적으로 IPCC(2006)에서는 불확도 개념을 정확성(Accuracy), 정밀성(Precision)의 개념을 사용하여 설명하고 있다. 정확성은 실제의 참값과 관측 또는 추정된 값(이하 추정치) 사이의 일치 정도를 나타내는 용어이다. 따라서 정확성이 결여되어 실제의 참값과 추정치가 큰 차이를 나타내게 되면 체계적인 불확도가 높게 나타나는 것으로 해석될 수 있다.¹⁾ 반면, 정밀성은 관측 또는 측정된 통계값이 여러 번 반복되어 관측 또는 추정되었을 때 그 값들이 동일한 값을 가지게 되는 정도를 나타내는 용어이다. 따라서 정밀성이 결여되어 추정된 값들이 큰 차이를 보이게 되면 확률적인 불확도가 크게 나타나는 것으로 해석될 수 있다.²⁾ [그림 1]은 정확성과 정밀성의 개념을 사례로서 제시하고 있다. 여기서 중앙은 참값을 나타내고 검은 점들은 추정치를 나타낸다. 그리고 (a)와 (b)는 정확성이 결여된 상태를 나타내고, (b)와 (c)는 정밀성이 결여된 상태를 나타낸다.

-
- 1) 체계적인 불확도는 어떤 구체적인 원인으로부터 만들어지는 불확도를 의미하는 개념으로서, 모집단을 대표하는 표본을 사용하지 않거나 배출계수 또는 활동자료를 측정하는 장비나 도구에 결함이 있을 때 발생한다.
 - 2) 확률적인 불확도는 어떤 구체적인 원인으로부터 만들어지지 않는 불확도로서, 반복되는 실험 또는 측정으로부터 발생한다. 측정 시기가 다르거나 모집단 내 개체들이 어떤 특정한 값에 대하여 큰 차이를 보일 때 확률적인 불확도가 높아질 수 있다.

[그림 1] 정확성과 정밀성의 개념

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



출처: IPCC (2006)

IPCC의 온실가스 배출량의 불확도를 분석하는 방법은 기본적으로 정밀성과 관련된 불확도, 즉 확률적인 불확도를 분석하기 위한 방법론이다(IPCC, 2006). 이는 정확성과 관련된 불확도를 산정하는 분석 방법이 아직 일반화된 형태로 정립되지 않았기 때문이며(EPA, 2002), 다른 한 편으로는 품질관리(QA/QC)를 통해 체계적인 불확도를 일정 부분 감소시킬 수 있다고 보기 때문이다(에너지경제연구원, 2013).

2. 불확도 분석방법

정성적(Qualitative) 또는 정량적(Quantitative) 불확도를 추정하는 방법과 관련하여 미국의 환경청인 EPA는 <표 1>과 같은 방법들을 제시하고 있다. 이 중 IPCC가 권고하는 방법론은 에러 전파 방법과 직접 시뮬레이션 방법 중 몬테카를로 시뮬레이션 방법이다. IPCC는 에러 전파 방법과 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 각각 Approach 1과 Approach 2로 명명하고 있지만, 대부분의 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서는 에러 전파 방법과 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 Tier 1과 Tier2로 부르고 있다. 따라서 본 논문에서도 에러 전파 방법과 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 Tier 1과 Tier 2로 명명한다.

에러 전파 방법, 즉 Tier 1 방법은 상위 부문의 불확도와 하위 부문의 불확

도를 일련의 방정식으로 나타내어 하위 부문의 불확도를 방정식에 대입하여 상위 부문의 불확도를 산출하는 방법론이다. 이 Tier 1 방법은 하위 부문의 불확도만 알고 있으면 Tier 2 방법보다 비교적 쉽고 빠르게 분석을 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 Tier 1 방법을 적용하기 위해서는 몇 가지 전제가 충족되어야 하는데, 불확도를 나타내는 확률변수가 정규분포의 형태를 가져야하고, 변동계수(표준편차/평균)가 0.3보다 작아야 하고, 그리고 확률변수 간에 상관관계가 존재하지 않아야 한다.

〈표 1〉 불확도 추정 방법

방법	설명	난이도
정성적 논의	· 불확도의 발생원인이 논의되고 목록화됨. · 식별된 편이의 방향과 부정확성의 상대적 정도를 제공함.	낮음
자료품질의 주관적 평가	· 전문가 평가에 의해 각각의 배출계수 또는 다른 변수에 대하여 불확도에 관한 순위를 매김.	낮음
자료속성 평가 시스템 (DARS)	· 객관적 방법을 통해 상대적 불확도를 정량화된 수치로 나타냄.	중간
전문가 추정 방법	· 전문가가 평균, 표준편차, 확률분포의 정보를 제공함. · 가정된 자료로부터 신뢰구간의 상한과 하한을 추정함. · 델파이 방법에서는 전문가 판단이 불확도를 추정하는데 직접적으로 사용됨.	중간
에러 전파 방법	· 전문가 판단, 추정, 또는 다른 방법으로 매개변수의 평균과 표준편차를 추정함. · 테일러전개에 기반한 에러 전파의 통계적 분석 기법이 결합 불확도를 추정하기 위해 사용됨.	중간
직접적인 시뮬레이션 방법	· 몬테카를로, 라틴 하이퍼큐브, 부트스트랩, 그리고 다른 기법들이 중앙값과 신뢰구간을 추정하기 위해 사용됨. · 몬테카를로 시뮬레이션 수행에 앞서 전문가 판단으로 매개변수의 확률분포를 추정함. · 다른 기법들에서 반드시 전문가 판단으로 매개변수의 확률분포를 추정할 필요는 없음.	높음
직접 또는 간접측정(정당)	· 현장에서 직접적 또는 간접적으로 배출량의 불확도를 측정함.	높음

Tier 1과 2 수준을 포함한 에너지부문 온실가스 인벤토리의 불확도 평가

방법	설명	난이도
기법	· 직접 측정으로서 스택 샘플링(Stack sampling)과 간접 측정으로서 트레이서 연구(Tracer studies)가 포함됨. · 배출량 산정식 및 추정치를 정당화하는 자료를 제공함.	

출처: Karins et al.(2010)

Tier 1 방법에서 활동자료와 배출계수의 불확도는 식(1)과 식(2)와 같은 방정식을 통해 추정되고, 불확도를 나타내는 U 는 식(3)과 같은 형태로 표현된다.

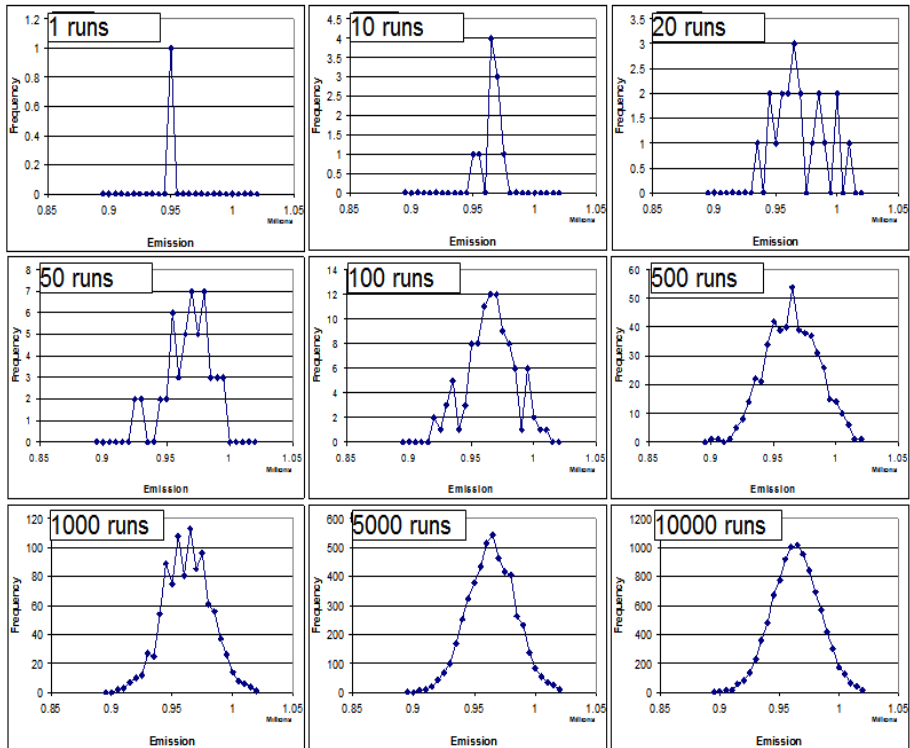
$$U_{\text{배출계수}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \quad (1)$$

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

$$U = \frac{\sqrt{95\% \text{ 신뢰구간의 절반}}}{\text{평균}} = \frac{1.96 \times \text{표준편차}}{\text{평균}} \quad (3)$$

몬테카를로 시뮬레이션 방법, Tier 2 방법은 어떤 확률변수의 값을 반복적으로 측정하여 그 측정된 값들로부터 평균, 확률분포, 평균의 표준편차 등과 같은 결과를 얻고자 할 때 사용되는 프로그램 기법이다. 예를 들어 [그림 2]와 같이 확률분포가 알려지지 않은 어떤 확률변수의 값을 수만 번 이상 반복 측정하여 그 확률변수의 확률분포를 식별할 때 사용될 수 있다.

〈그림 2〉 몬테 카를로 시뮬레이션의 예시



참고: UNFCCC(2012)의 CGE Training Materials National Greenhouse Gas Inventories에서 재구성

Tier 2 방법은 활동자료와 배출계수의 확률밀도함수로부터 임의의 값을 추출하여 온실가스 배출량을 산출하는 과정을 반복한다. 이러한 반복 과정이 수만 번 반복하게 되면 [그림 2]처럼 배출량의 확률분포가 구체적인 형태를 갖추게 되는데, 확률분포가 [그림 2]의 마지막 그림과 같이 구체적인 형태를 갖추게 되면 이 확률분포로부터 95% 신뢰구간, 즉 상한 $\Delta\%$ 및 하한 $\Delta\%$ 로 표현되는 불확도를 산출할 수 있다.

몬테카를로 시뮬레이션, 즉 Tier 2 방법은 Tier 1 방법이 요구하는 전제들이 충족되지 않아도 사용될 수 있기 때문에 사용된 자료가 비정규 분포를 띄

고 상관관계를 가져도 적용될 수 있다. 특히, 불확도가 크게 나타날 경우 Tier 1 방법보다 상대적으로 더 적합한 분석 방법으로 여겨진다(IPCC, 2006). 대신에 Tier 2 방법을 적용하기 위해서는 배출계수 및 활동자료의 확률분포가 구체적으로 제시되어 있어야 하고, 시뮬레이션을 반복 수행할 수 있는 @RISK 또는 Crystal Ball과 같은 소프트웨어 패키지가 필요하다. 또한 이러한 소프트웨어 패키지로 각각의 자료마다 약 수만 번 이상의 시뮬레이션을 수행해야 하기 때문에 Tier 1보다 시간과 비용 측면에서 더 많은 자원이 투입된다.

2. Tier 1과 Tier 2를 혼용하는 방법

어떤 상위 부문의 배출원에 대하여 이것의 하위 몇몇 부문은 Tier 1 방법을 적용하는 것이 충족되지만 다른 몇몇 하위 부문의 배출계수와 활동자료는 불확도가 높게 나타나거나 비정규분포를 띄거나 또는 상관관계를 가져 Tier 1 방법을 적용하기 어려울 수 있다. 만약 모든 하위 부문에 Tier 2를 적용하기 어려운 상황이라면, 이 경우 일부 하위 부문에 대해서는 Tier 1 방법으로 불확도를 추정해야 하며, Tier 1을 적용하기 어려운 다른 하위 부문에 대해서는 가능하다면 Tier 2 방법으로 불확도를 추정해야 한다. 그런데 하위 부문별로 서로 다른 불확도 분석을 적용하게 되면 상위 부문의 불확도를 분석할 수 없게 된다. Tier 1 방법과 Tier 2 방법은 상위 부문의 배출량 불확도를 산출하는 방법이 서로 다르기 때문이다. 대신에 Tier 2의 불확도 분석 결과를 Tier 1 분석 양식에 적용할 수 있게 바뀌주면 Tier 1 방법으로 상위 부문의 불확도를 추정할 수 있다(IPCC, 2006). 이때 Tier 2 방법에 사용된 하위 부문들(a subset of categories)의 자료가 상관관계를 가지고 있다면 그 하위 부문들을 개별 하위부문으로 나누지 말고, 하나의 하위부문으로 취급하여 불확도를 기입해야 한다. Tier 1 불확도 분석 보고양식에 기입되는 Tier 2 분석 결

과는 기준연도 배출량, 당해연도 배출량, 결합 불확도, 그리고 배출추이 불확도이며, 이는 각각 Tier 1 불확도 분석 보고양식의 C, D, G, M열에 해당된다. [그림 3]은 Tier 2 보고양식 중 어떤 항목이 Tier 1 보고양식에 기입되어야 하는지를 나타내는 그림으로서, Tier 2 보고양식의 C, D, G, J 열은 각각 Tier 1의 C, D, G, M 열에 기입되어야 한다.

[그림 3] Tier 2 불확도 추정치의 Tier 1 불확도 기입 방법

Tier 1 불확도 보고 양식												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
배출원	온실 가스	기준 연도 배출 / 음 수량	당해 연도 배출 / 음 수량	활동 자료 불확 도	배출 계수 / 기 타 불 확도	종합 불확도	배출원별 기여도	Type A 민감도	Type B 민감도	배출 계수 에 따른 배출 추이 불확 도	활동도에 따른 배출 추이 불확 도	배출추 이 불확 도

Tier 2 불확도 보고 양식										
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
배출원	온실 가스	기준연 도 배출 / 음수량 Cg C ₀ eq	당해연 도 배출 / 음수량 Cg C ₀ eq	활동 자 료 불 확 도	배출 계 수 / 기타 불확도	종합 불확도	배출 원별 기여도	기준연도에서 해당연도로 배출량 증가량 (기준연도 대비 %)	배출량 증가량의 불확도	방 법 및 비 고
				(-)% (+)%	(-)% (+)%	(-)% (+)%	fraction		(-)% (+)%	

위의 경우에서와는 반대로, Tier 1 방법의 불확도를 Tier 2 방법에 포함하여 상위 부문의 불확도를 추정하는 방법도 가능하다. 국가 전체 배출량 또는 상위 부문의 불확도를 몬테카를로 시뮬레이션으로 추정할 때, Tier 1 방법의 불확도 추정치로부터 확률분포를 식별하고 이 확률분포와 95% 신뢰구간을 몬테카를로 시뮬레이션에 입력해주면 된다. 여기서 Tier 1 방법으로 추정된 불확도가 크게 나타나면 로그정규분포를 사용하고, 불확도가 충분히 작으면 정규분포를 사용하는 것이 권고되고 있는데, 배출량의 변동계수가 0.3 이하이

면 불확도가 작다고 판단할 수 있고 그 반대이면 불확도가 크다고 판단할 수 있다(IPCC, 2006).

Ⅲ. 전문가 판단 조사방법

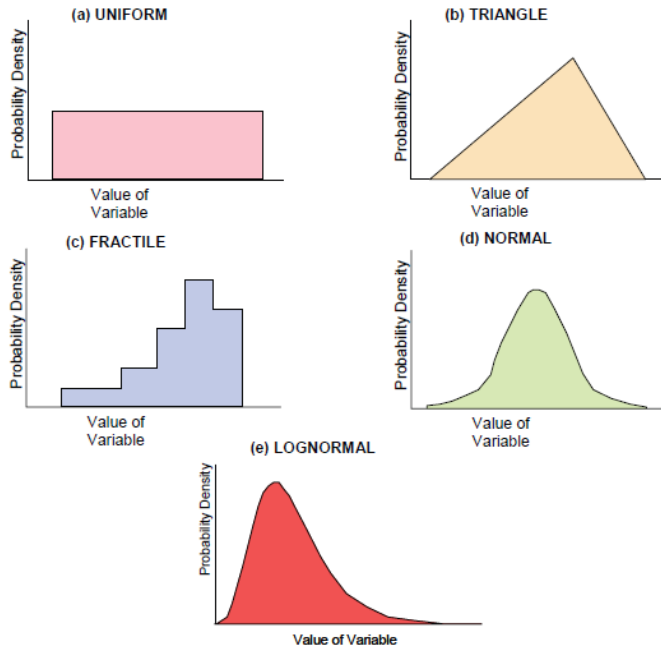
1. 전문가 판단 조사방법의 개요

불확도 산출에 필요한 경험적인 자료(추정 또는 관측된 자료)가 부족하고 관련된 불확도가 모두 고려되지 못했다고 여겨질 경우, 관련 분야 전문가의 판단으로부터 불확도에 관한 자료를 얻어야 한다. 전문가 판단 조사방법(expert elicitation)은 전문가로부터 불확도에 관한 자료를 얻는 일련의 과정을 일컫는 용어로서, 관련 전문가에게 불확도(uncertainty)와 관련된 과학적 질문, 예를 들어 불확실한 수량(uncertain quantity)과 서로 다른 사건(events), 관계, 변수의 발생확률과 관련된 질문을 던져 그들로부터 정량화된 수치로 그 질문에 대한 답을 얻고자 할 때 사용된다(EPA, 2011).

온실가스 배출량의 불확도 분석과 관련하여 전문가 판단 조사방법의 목적은 전문가들에게 과학적 방법으로 구성된 질문들을 던져 활동자료 및 배출계수의 확률분포 형태, 중앙 값, 95% 신뢰구간의 상한치 및 하한치의 정보를 정량적으로 구체화하는 것이다(IPCC, 2006).

전문가가 주어진 질문으로부터 확률분포의 형태를 제시할 때는 [그림 4]에 서와 같이 균일(Uniform) 분포, 삼각(Triangle) 분포, 계단(Fractile) 분포, 정규(Normal) 분포, 로그정규(Lognormal) 분포의 다섯 가지 확률분포 형태가 고려된다(IPCC, 2006).

[그림 4] 확률분포의 형태



출처: IPCC(2006 : 3.23)

우선, 정규분포는 불확도(예를 들어, 95% 신뢰구간의 길이)가 작고 확률분포의 형태가 평균을 중심으로 대칭을 이룰 때 사용될 수 있으며, 여기에 더해 배출계수 또는 활동자료의 불확도를 구성하는 개별 불확도 중 어느 하나도 그것의 불확도에 큰 영향을 끼치지 않아야 한다. 이 정규분포는 불확도가 작으면 대체로 잘 적용되는 것으로 알려져 있으며, 특히 화석연료의 배출계수와 활동자료에 적합한 것으로 여겨진다. 로그정규분포는 왼쪽이 볼록한 형태를 갖고 오른쪽으로 긴 꼬리를 갖는 분포로서, 토양에 뿌려진 비료로부터 발생하는 아산화질소의 배출계수에 적합한 분포로 여겨진다. 균일분포는 확률분포안의 모든 값의 발생 확률이 동일할 경우를 나타내는 분포형태로서, 불확도에 대한 사전지식이 없고 전문가가 배출계수 및 활동자료의 하한과 상한을 제시

할 수 있을 때 사용될 수 있는 분포이다. 삼각분포는 전문가가 하한치, 상한치, 그리고 최빈값만을 제공할 수밖에 없을 때 적용될 수 있는 분포형태로서, 대칭적 형태를 가질 수도 있고 비대칭적 형태를 가질 수도 있다. 마지막으로 언급할 계단분포는 배출계수 및 활동자료가 취할 수 있는 값의 구간을 몇 개의 구간으로 나누어 이 구간의 상대적 발생확률을 비교할 때 적합한 분포형태이다.

그런데 2명 이상의 전문가로부터 동일한 질문에 대하여 불확도에 대한 확률분포를 얻는다면 이 확률분포들을 합산하여 하나의 확률분포로 제시할 수 있어야 한다. 확률분포가 여러 개라면 그것들 중 어떤 확률분포를 사용해야 되는지에 대한 문제가 발생할 수 있기 때문이다.

확률분포를 합산하는 방법은 크게 두 가지 방법으로 구분된다. 하나는 수학적 방법을 사용하여 전문가들로부터 도출된 확률분포를 하나의 확률분포로 합산하는 것이고, 다른 하나는 전문가끼리 토론, 평가, 합의 과정을 거쳐서 하나의 확률분포를 도출해내는 것이다(Clemen and Winkler, 1999 ; EPA, 2011). 전문적인 용어로 전자를 Mathematical aggregation(or combination)이라 부르고, 후자를 Behavioral aggregation(or combination)이라 부르는데, 본 보고서에서는 전자를 수학적 합산이라 부르고, 후자를 전문가 합의라고 부르기로 한다.

2. 수학적 합산 방법

수학적 합산 방법은 전문가 판단 조사방법으로 얻어진 개개의 확률분포를 방정식을 통해 하나의 확률분포로 산출하는 방법이다. 이 수학적 합산 방법은 기초적인 방정식 형태를 사용하는 의견 통합(Opinion pooling)과 베이저안 정리(Bayes' Theorem)에 기반한 베이저안 모형(Bayesian Models)으로 구분될 수 있다.

의견 통합은 전문가들이 제시한 확률분포에 가중치를 부여하여 합산하는

방식으로서, 기본적으로 선형 의견 통합(Linear opinion pool)과 로그 의견 통합(Logarithmic opinion pool)으로 나타낼 수 있다. 선형 의견 통합과 로그 의견 통합은 각각 가중 산술 평균을 나타내는 식(4)와 가중 조화 평균을 나타내는 식(5)로 나타낼 수 있다.³⁾ 아래의 두 식에서 n 은 전문가의 수를 나타내며, w_i 는 각 전문가에게 할당되는 가중치를 나타낸다. $P_i(\theta)$ 는 알려지지 않은 파라미터 θ 에 대한 각 전문가의 확률분포를 가리키고, $P(\theta)$ 는 전문가들의 확률분포를 합산한 확률분포를 가리킨다. 그리고 식(5)에서 쓰인 k 는 정규화상수(Normalizing constant)를 의미한다. 이때 식(5)에서 $w_i = \frac{1}{n}$ 으로 정해진다면 로그 의견 통합은 조화평균과 비례 관계를 갖게 된다. 그리고 선형 의견 통합은 각 전문가들의 확률분포 $P_i(\theta)$ 가 동일한 값을 가지면 가중치를 어떻게 설정해주느냐에 상관없이 합산된 확률분포 $P(\theta)$ 는 전문가들의 확률분포와 동일한 값을 가지게 되며(Clemen and Winkler, 1999), 각 전문가들에게 부여되는 w_i 가 동일하면 식(4)는 단순 산술 평균, 즉 $P(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i(\theta)$ 이 된다.

$$P(\theta) = \sum_{i=1}^n w_i P_i(\theta) \text{ where } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (4)$$

$$P(\theta) = k \prod_{i=1}^n P_i(\theta)^{w_i} \text{ where } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (5)$$

의견 통합은 간단한 모형을 통해 전문가 의견을 합산하기 때문에 다른 수학적 합산 방법보다 비교적 사용하는 데 용이하다. 그러나 의견 통합으로 전문가 의견을 합산할 때는 각 전문가에게 w_i 를 부여해줘야 한다. 따라서 의사결정자는 w_i 를 어떻게 부여할 것인가를 결정해야 한다. 그러나 아직까지 w_i 를 부여하는 방법과 관련하여 일반적으로 합의된 방법은 존재하지 않는다.⁴⁾

3) 식(4)는 가중 산술 평균을 나타내고, 식(5)는 가중 기하 평균을 나타낸다.

베이지안(Bayesian) 모형을 사용하여 전문가 의견을 합산하는 방법은 전문가가 의견을 합산하는 가장 강건한(Robust) 방법으로 알려져 있다. 이 방법 하에서 전문가가 제시한 확률분포(또는 확률)는 베이지안 정리에 따라 새로운 증거로 사용되며, 의사 결정자(Decision Maker)는 그의 사전적 확률분포에 새로운 증거를 추가하여 그 사건의 확률분포를 다시 구할 수 있다(Ouchi, 2004).

베이지안 정리를 이용하여 전문가의 의견을 합산하는 방법과 관련된 초기의 연구들 중 Morris의 연구는 베이지안 정리에 입각하여 전문가 의견을 합산하는 기초를 제공한 것으로 알려져 있다(Clemen and Winkler, 1999). Morris의 연구는 쉽게 이해될 수 있다. 만약 n 명의 전문가가 어떤 사건의 확률분포 $(g_1, \dots, g_n)$ 를 의사 결정자에게 제공한다고 할 때, 의사 결정자는 식(6)을 이용하여 자신의 사전적 확률분포 $P(\theta)$ 를 사후적 확률분포 $P(\theta|g_1, \dots, g_n)$ 로 갱신할 수 있다.

$$P(\theta|g_1, \dots, g_n) \propto \frac{P(\theta)L(g_1, \dots, g_n|\theta)}{P(g_1, \dots, g_n)} \quad (6)$$

위의 식에서 전문가들이 제시한 확률분포가 독립적으로 결정되며 그들의 확률분포는 정규분포를 가진다고 하면, 우도함수(Likelihood function) $L(g_1, \dots, g_n|\theta)$ 는 식(7)과 같은 형태로 표현될 수 있다. 즉, 우도함수 $L(g_1, \dots, g_n|\theta)$ 는 각 전문가의 확률분포를 곱한 것으로 나타낼 수 있게 된다.

$$L(g_1, \dots, g_n|\theta) = \prod_{i=1}^n P(g_i|\theta) \quad (7)$$

4) 몇몇 학자들에 의해 w_i 를 부여하는 방법이 연구되고 제시되어 왔다. Winkler(1968)는 각 전문가에게 부여되는 w_i 를 설정하는 방법과 관련하여 4가지 방법을 제시하였다.

3. 전문가 합의 방법

전문가 합의 방법(Behavioral combination)은 전문가들 사이의 직접적 또는 간접적 상호행위(interaction) 과정을 거쳐서 그들로부터 하나의 확률분포를 도출해내는 방법이다. 전문가 합의 방법은 가중치를 부여하는 문제로부터 상대적으로 자유로우며 복잡한 수리 모형을 필요로 하지 않지만, 이 방법을 수행하기 위해서는 전문가 사이에서 이루어지는 평가 및 합의 과정을 촉진할 수 있는 진행자 겸 기록자가 필요하다. 그러나 전문가 합의 방법은 관련된 쟁점을 보다 정량적으로 표현하고, 과대평가되거나 특정 집단의 이익이 포함된 의견을 제거함으로써 전문가들이 문제에 대한 인식을 개선(Refine)하고 그들 사이의 의견차이를 좁히는 데 도움을 줄 수 있다(EPA, 2011).

전문가 합의 방법의 가장 간단한 방법은 전문가들을 한 자리에 모아놓고 그들에게 토론 및 평가 과정을 거쳐서 하나의 확률분포를 도출하도록 지시하는 것이다. Clemen and Winkler(1999)는 전문가 합의 방법과 관련하여 델파이 방법(Delphi method), Nominal Group Technique, Kaplan's approach를 소개하였다.

전문가 합의 방법 중 델파이 방법(Delphi method)은 전문가가 자신의 의견 수정 과정을 되풀이하여 합의에 도달하는 방법으로서, 의견을 수정하는 과정은 다음과 같이 진행된다. 우선, 전문가들은 자신의 의견을 제출한다. 이 제출된 의견은 무기명으로 다른 전문가들에 의해 평가되어 다시 자신에게로 되돌아간다. 그리고 전문가는 다른 전문가의 평가에 비추어 자신의 의견을 수정한다. 이 과정은 모든 전문가들의 의견이 동의될 때까지 여러 번 반복될 수 있다.

Nominal Group Technique는 전문가들이 다수가 존재하며, 이들의 모든 의견이 반영되면서 하나의 결론을 빠르게 도출하기를 원할 때 사용될 수 있는 방법이다. 우선, 전문가들은 자신의 의견을 다른 전문가 앞에서 발표하고 다른 전문가들은 발표된 의견에 대하여 평가를 내린다. 이때 전문가가 자신의

의견을 발표할 때는 간략하게 이루어지고, 전문가들 사이의 토론을 촉진하는 사회자가 서로의 평가를 공유하는 데 도움을 준다. 그리고 평가 과정을 통해 중복되는 전문가 의견은 삭제되고 전문가 의견이 서열화된다. 이러한 토론을 거치면서 전문가는 자신의 의견을 수정할 수 있으며, 전문가들이 하나의 결론에 도달할 때까지 토론과정은 계속된다.

Kaplan's approach에서 전문가들은 서로의 의견에 대하여 평가를 수행하되, 전문가들로부터 합의를 도출하는 것은 분석가(analyst or facilitator)라는 진행자에 의해 이루어진다. 분석가는 전문가들과의 토론을 통해 그들 사이에서 합의를 이끌어낼 수 있는 어떤 결론(확률분포 또는 확률)을 도출하는데, 결론이 도출되었다고 판단되면 분석가는 그 결론을 제시한다. 이러한 결론을 제시하기에 앞서 분석가는 전문가들과의 토론에서 확률분포가 올바르게 도출되었다는 확신을 전문가들로부터 얻어야 한다.

IV. Tier 1과 Tier2를 복합한 불확도 평가

1. 복합 불확도 평가 개요

본 논문은 에너지집약적인 배출원 부문으로서 발전, 철강산업, 비금속광물 산업을 선정하고, Tier 1 방법과 Tier 2 방법을 복합한 불확도 추정 방법을 사용하여 세 부문의 온실가스 배출량의 불확도를 추정하였다. 온실가스는 메탄(CH_4)과 아산화질소(N_2O), 그리고 이산화탄소(CO_2)의 세 가지 가스로 구분된다. 본 논문은 이산화탄소의 배출량은 Tier 2 방법으로 추정하고 메탄과 아산화질소의 배출량은 Tier 1 방법으로 추정하여 Tier 2 방법의 불확도를 Tier 1 방법의 불확도 표에 기입하는 방식으로 온실가스 배출량의 불확도를 추정하였다.

발전, 철강산업, 비금속광물산업의 이산화탄소 배출량의 불확도는 다음에서 설명하는 자료를 사용하여 추정되었다.⁵⁾ 우선, 발전부문의 불확도 추정은 2013년 3월 에너지경제연구원의 최종보고서 「에너지부문 불확도 평가를 위한 국내 현황 분석 및 방법론 연구」의 기본 정보를 바탕으로 진행하였다. 철강산업 부문에 대한 추정은 2013년 12월 에너지경제연구원의 최종보고서 「에너지 부문 온실가스 인벤토리 불확도 평가 고도화 연구」의 기본 정보를 바탕으로 진행하였다. 또한 비금속광물산업부문의 불확도는 2014년도에 실시된 전문가 설문조사를 통해 수집된 자료를 바탕으로 추정되었다.⁶⁾ 이때 전문가들로부터 도출된 확률분포 등의 의견을 하나의 의견으로 나타내는 것이 필요하다. 앞서 전술한 바와 같이 2명 이상의 전문가로부터 도출된 의견을 하나의 의견으로 통합하는 데는 수학적 합산과 전문가 합의방법이 사용되는데, 본 논문은 전문가의 의견을 통합하는 방법으로서 전문가 합의방법을 고려하였다. 하지만 전문가를 한 자리 소집하거나 재차 회의를 개최하는 것은 시간과 비용, 그리고 인적 측면에서 상당한 자원을 필요로 하기 때문에 전문가 의견 중 다수의 의견이나 가장 신뢰할만한 의견을 고려하여 에너지원의 수요량(활동자료) 분포를 선택하였다.

5) IPCC 카테고리 상으로는 각각 1-a, 2-a, 2-b에 해당한다.

6) 에너지경제연구원은 지난 2012년부터 매년 특정 부문을 선정하여 온실가스 배출량의 불확도를 몬테카를로시뮬레이션으로 추정하고 있다. 2014년에는 비금속광물 부문에 대하여 불확도가 추정되었다. 비금속광물산업부문 온실가스 배출량 인벤토리 불확도 평가를 위한 전문가판단 조사는 IPCC 지침서에서 추천하고 있는 Stanford/SRI 프로토콜을 기초로 설계하였다. 구체적인 설문 문항은 IPCC 지침이 반영된 미국의 불확도 보고서(EPA, 2002)와 해외 개별 국가에서 제시하고 있는 질문 양식 등을 참고해 종합하여 작성하였다. 다만 에너지원 소비량 설문조사의 경우 전문가와의 사전 접촉 등을 통해 설문 내용을 이전 연도에 시행하였던 것보다 대폭 간소화하여 설문 문항을 줄였다. 설문지는 조사 관련 기본정보를 전문가에게 제공하는 부문과 개별 변수에 관하여 질문에 대한 답을 전문가에게 요구하는 부문으로 구성되었다.

2. Tier 2 불확도 분석

<표 2>는 각 배출부문에 적용된 에너지원 소비량(활동자료)의 분포에 대한 가정을 정리해 놓은 도표이다. 2012년 발전부문에서 에너지원의 소비량(활동자료)에 대한 전문가들의 의견을 보면 유연탄과 무연탄은 대체로 정규분포와 균일분포로 형태를 띠었다. 이 중에서 설문 응답자의 신뢰성, 응답의 유사성 등을 고려하여 유연탄은 정규분포의 평균, 무연탄은 정규분포로 가정하여 분석을 실시하였다. 2013년 철강산업부문 설문조사에서는 에너지원 소비량에 대한 시나리오가 무연탄은 균등분포 및 삼각분포, 유연탄은 균등분포 및 삼각분포, 도시가스는 균등분포 및 로그정규분포 등으로 각각 구성되었다. 본 논문에서는 무연탄, 유연탄, 도시가스 모두에서 균등분포를 가정하였다. 2014년도에 실시한 비금속광물산업부문에 대한 설문조사 결과는 유연탄, 석유(B-C유), 페트코크의 소비량에 대한 전문가의 의견이 균등분포 및 삼각분포로 나뉘었다. 본 논문에서는 각 에너지원에 대하여 삼각분포를 가정하였다.

〈표 2〉 Tier 2 분석 부문

연도	배출부문	전문가 의견을 반영한 에너지원 수요에 대한 분포 가정
2012	발전 이산화탄소	유연탄 정규분포 평균, 무연탄 정규분포
2013	철강산업 이산화탄소	유연탄 균등분포, 무연탄 균등분포, 도시가스 균등분포
2014	비금속광물산업 이산화탄소	유연탄 삼각분포, 석유(B-C유) 삼각분포, 페트코크 삼각분포

각 부문별 이산화탄소 불확도의 분석 결과는 <표 3>과 같다. 각 부문별 에너지원은 무연탄, 유연탄, 휘발유, 등유, 경유, 석유(B-C유), 프로판, LNG, 도

시가스, 신탄, 기타유 등으로 구성된다. 그런데 본 논문에서 수집된 에너지원의 수용량은 몇몇 에너지원에 한정되어 있기 때문에 발전부문 활동자료의 불확도 분석에는 유연탄과 무연탄이, 철강산업부문 활동자료에서는 유연탄과 무연탄 그리고 도시가스가, 비금속광물산업부문에서는 유연탄, 석유, 페트코크가 사용되었고, 이들 에너지원만 불확도를 가진다고 가정하였다. 즉, 유연탄, 무연탄, 도시가스, 페트코크를 제외한 다른 에너지원의 활동자료는 불확도가 없는 상수로 취급되었다. 배출계수 불확도는 모든 에너지원에 대하여 소비량을 1로 대체하고 배출계수 및 다른 변수들의 계수 값을 2010년 기준 고시값으로 산정하여 배출계수에 대한 불확도 시뮬레이션을 수행하였다.

〈표 3〉 각 부문별 불확도 분석

(단위: ton, %)

배출 부문	불확도 구분	추정치의 불확도				평균	표준편차
		하한	상한	하한 불확도	상한 불확도		
발전	활동자료	10,947	11,132	-0.83	0.83	11,040	47
	배출계수	33.37	34.12	-1.10	1.13	33.74	0.19
	배출량	221,641	251,430	-6.30	6.30	236,536	7,578
철강 산업	활동자료	4,163	4,177	-0.16	0.16	4170	4
	배출계수	37.72	38.41	-0.89	0.92	38.06	0.17
	배출량	87,741	103,600	-8.16	8.44	95,532	4,030
비금속 광물 산업	활동자료	603	640	-2.97	2.99	622	10
	배출계수	33.99	35.27	-1.82	1.88	34.62	0.33
	배출량	11,342	14,973	-13.53	14.15	13,117	924

발전부문의 에너지원 중 유연탄 및 무연탄 활동자료의 불확도에 대하여 정규분포를 가정하였을 때, 이산화탄소 배출량의 상한 불확도와 하한 불확도는 각각 -0.83%, 0.83%로 분석되었으며, 분석된 정보를 기초로 이산화탄소 배출량의 불확도를 산출하면 0.83%로 나타났다.⁷⁾ 발전부문 배출계수의 불확도는 위에 적시한 방법으로 시뮬레이션을 수행하여 1.12%로 분석되었다. 그리고 주어진 활동자료의 불확도와 배출계수의 불확도로부터 발전부문 이산화탄소 배출량의 불확도를 추정하면 6.30%의 불확도 값을 구할 수 있다.

철강산업부문의 에너지원은 무연탄(수입탄), 유연탄(원료탄), 등유, 경유, 석유(B-A유), 석유(B-B유), 석유(B-C유), 프로판, LNG, 도시가스 등으로 구성된다. 이 중 유연탄, 무연탄, 도시가스 등을 제외한 모든 에너지원에 대하여 소비량은 그대로 두고 석탄소비량 측정기(로드셀)의 정밀도가 $\pm 0.2\%$ 이내라는 점을 감안하였다. 이를 토대로 균등분포를 따르는 에너지원의 소비량에 대한 하한 불확도와 상한 불확도를 추정하면 각각 -0.16%, 0.16%로 산출되었고, 활동자료의 불확도와 배출계수의 불확도는 각각 0.16%, 0.91%로 추정되어 철강산업부문의 이산화탄소 배출량의 불확도는 8.30%로 분석되었다.

비금속광물산업부문의 에너지원은 유연탄(연료탄), 등유, 경유, 석유(B-A유), 석유(B-B유), 석유(B-C유), 프로판, 펄코크, 도시가스, 기타유 등으로 구성된다. 에너지원 중 유연탄(연료탄) 및 석유(B-C유) 그리고 펄코크 소비량에 대하여 삼각분포의 불확도 분포를 가정하면 활동자료의 불확도는 2.98%로 분석되며, 배출계수의 불확도는 1.85%로 분석되었다. 그리고 주어진 활동자료와 배출계수의 불확도에 따라 비금속광물산업부문의 이산화탄소 배출량의 불확도는 13.84%로 추정되었다.

7) 95%의 신뢰구간에서 이산화탄소의 활동도 불확도는 Lower Bound Uncertainty과 Upper Bound Uncertainty의 절대값 평균으로 계산된다.

3. Tier 1과 Tier 2를 복합한 불확도 추정

개별방식으로 추정된 발전부문, 철강산업부문, 비금속광물부문의 요소별 불확도는 다음 <표 4>와 같다. 앞서 분석하였던 내용을 바탕으로 기존에 온실가스종합정보센터가 적용하고 있는 불확도 테이블에 이번 연구에서 산출한 Tier2 불확도 값을 추가하여 테이블을 새롭게 구성하였다. 온실가스종합정보센터에서 제시한 기존의 요소별 불확도를 살펴보면, 배출된 온실가스 중 메탄과 아산화질소의 활동자료 불확도는 이산화탄소의 활동자료 불확도와 같음을 알 수 있다. 메탄과 아산화질소는 이산화탄소 배출량 산정에서 사용하는 것과 동일한 활동자료를 사용하기 때문이다. 이번 연구에서도 Tier 2 수준으로 추정한 이산화탄소의 활동자료 불확도를 그대로 메탄과 아산화질소에 적용하였다. 배출계수 불확도는 값이 서로 달라 이산화탄소의 불확도를 적용할 수 없으므로 온실가스종합정보센터에서 제시한 불확도 값을 이용하였다. 메탄과 이산화질소의 합성불확도는 활동도 및 배출계수 불확도를 이용하여 Tier 2 기준으로 산정하였다.

표에서 볼 수 있듯이 Tier 2 기준으로 계산한 합성 불확도의 값은 Tier 1 기준에서와는 다르게 활동자료의 불확도와 배출계수의 불확도의 값 사이에서 나타나지 않고 있다. 이는 온실가스 배출량 산식에서 활동도 및 배출계수 등의 불확도를 산정할 때에는 한 변수만이 확률분포를 갖지만 합성 불확도를 산정할 때에는 곱으로 이루어진 두 변수 이상이 확률분포를 갖는 데 기인한다.⁸⁾

8) 합성 불확도만을 이용하여 계산하는 배출량 불확도와 활동도 및 배출계수 등의 불확도를 사용하여 계산하는 배출추이 불확도의 경우 Tier 1 수준에서 분석한 불확도와는 차이의 정도가 다를 수 있다.

〈표 4〉 에너지부문 온실가스 인벤토리 불확도

	온실가스	추정치의 불확도(%)		
		활동도	배출계수	합성
발전부문	CO_2	0.8	1.1	6.3
	CH_4	0.8	150	150
	N_2O	0.8	1000	1000
철강산업부문	CO_2	0.2	0.9	8.3
	CH_4	0.2	150	150
	N_2O	0.2	1000	1000
비금속광물부문	CO_2	3.0	1.9	13.8
	CH_4	3.0	150	150
	N_2O	3.0	1000	1000

Tier 1 방법과 Tier 2 방법을 복합하여 계산한 온실가스별 불확도 값은 다음의 <표 5>와 같다. 산정방식은 Tier 1 수준에서 실시하는 온실가스종합정보센터의 방식을 따랐다. 에너지부문 온실가스별 불확도는 이산화탄소가 3.1%, 메탄이 113.4%, 아산화질소가 540.3%였다. 이는 배출계수 불확도 값이 이산화탄소에 비해 메탄과 아산화질소가 상대적으로 적게는 수십에서 많게는 수백 배까지 크기 때문이다. 배출량 변화 경향의 불확도 역시 이산화탄소에 비해 메탄과 아산화질소의 불확도가 상당히 크게 분석되었다. 에너지부문 총 배출량 변화 추이의 불확도는 9.7%였는데, 이것이 의미하는 바는 에너지부문 총 온실가스 배출량 증가율의 95% 신뢰구간은 하한 값과 상한값이 증가율의 $\pm 9.7\%$ 라는 것이다.

〈표 5〉 에너지부문 온실가스별 인벤토리 불확도

배출량 불확도(%)				배출추이 불확도(%)			
CO_2	CH_4	N_2O	전체	CO_2	CH_4	N_2O	전체
3.1	113.4	540.3	4.5	2.8	180.1	1,917.4	9.7

V. 결론

한국은 그동안 온실가스 배출량을 감축하기 위하여 다방면에 걸쳐 정책적 노력을 기울여왔다. 그리고 이러한 정책적 효과는 온실가스 배출량의 변화로 나타난다. 온실가스 배출량의 불확도를 추정하는 것은 온실가스 배출 과정에 내재된 다양한 요인들의 불확실성을 고려하여 온실가스 배출량을 보다 과학적으로 엄밀하게 추정하고, 이로부터 온실가스 배출량의 변화가 불확실성을 고려했을 때에도 발생하였는가를 정확하게 평가하기 위해서이다. 따라서 한국의 온실가스 배출량의 변화를 보다 정확하게 평가하기 위해서는 다양한 요인들의 불확실성을 고려한 불확도 분석이 수행되어야 한다.

본 논문의 기여는 Tier 1과 Tier 2를 복합하여 불확도를 추정할 수 있는 방법론을 제시하고 나아가 이 방법론에 의거하여 다배출 업종인 발전, 철강산업, 비금속광물산업 부문의 온실가스 배출량의 불확도를 추정하였다는 점에 있다. 한국의 실정을 반영한 Tier 2 방법이 향후 불확도 분석에서 주요한 위치를 차지하게 될 것이지만, Tier 2 방법은 시간과 비용 측면에서 Tier 1 방법보다 많은 자원을 소요한다는 점을 감안할 때 Tier 2 방법은 모든 부문에 일시에 적용되는 것이 아니라 점진적으로 다른 부문으로 확장되어 적용될 것이다. 따라서 Tier 1과 Tier 2를 복합한 불확도 추정 방법은 향후 Tier 1에서 Tier 2로 불확도 분석이 옮겨가는 과정에서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

그러나 본 논문은 Tier 1과 Tier 2의 복합 불확도를 추정함에 있어서 발전, 철강산업, 비금속광물산업에 대하여 복합 불확도를 추정하였는데, 이들 세 부문은 IPCC 카테고리 상에서 하나의 범주에 묶이지 않는다. 즉, 발전은 에너지 산업(Energy Industries) 범주에 속하고 철강산업과 비금속광물산업은 제조·건설업(Manufacturing Industries and Construction) 범주에 속한다. 또한 수

집할 수 있는 자료의 한계 상 일부 에너지원에 대해서만 불확도 분석을 실시하였다. 따라서 향후 Tier 1과 Tier 2를 복합한 불확도를 추정하는 연구에서는 IPCC 카테고리 상에서 하나의 범주로 묶이는 하위 부문들에 대하여 분석을 수행하고, 가용할 수 있는 자료의 범위를 넓혀 최대한 많은 에너지원에 대하여 불확도 분석을 실시할 필요가 있을 것이다. 한편, 전문가 의견을 합치함에 있어서 한정된 시간과 비용의 문제로 제대로 된 전문가 합의 방법을 적용하지 못했다. 향후 연구에서는 수학적 합산 방법으로 전문가 의견을 합산하거나 적법한 절차와 구성에 따른 전문가 합의 방법으로 전문가 의견을 일치시키는 것을 시도할 수 있을 것이다.

접수일(2015년 10월 12일), 게재확정일(2016년 3월 7일)

◎ 참 고 문 헌 ◎

- 에너지경제연구원, 2013, 「에너지부문 불확실성 평가를 위한 국내 현황 분석 및 방법론 연구」, 울산; 에너지경제연구원.
- 에너지경제연구원, 2013, 「에너지부문 온실가스 인벤토리 불확도 평가 고도화 연구」, 울산; 에너지경제연구원.
- Clemen and Winkler, 1999, “Combining Probability Distribution From Experts in Risk Analysis”, Risk Analysis 19(2), pp. 187~203.
- EPA, 2002, 「Procedures Manual for Quality Assurance / Quality Control and Uncertainty Analysis」, EPA.
- EPA, 2011, 「Expert Elicitation Task Force White Paper」, EPA.
- IPCC, 2000, 「Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories」, IPCC.
- IPCC, 2006, 「2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories」, IPCC.
- Ritter, K., Lev-On, M. and Shires, T., 2010, “Understanding Uncertainty in Greenhouse Gas Emission Estimates : Technical Considerations and Statistical Calculation Methods”.
- Ouchi, F., 2004, “A Literatur Review on the Use of Expert Opinion in Probabilistic Risk Analysis”, World Bank Policy Research working Paper 3201.
- Winkler L. R., 1968, “The Consensus of subjective probability distributions”, Management Science 15(2), pp.61-75.

ABSTRACT

Estimating Uncertainty of Greenhouse Gas Emissions in Energy Sectors using the combined Tier Method

Bong Geul Chun*, Kyu-Hwan Lee**, Hyo-mi Jang***
and Sung-Kyoon Kim****

Before the establishment of Post-2020 Climate Change Mitigation Commitments, the government have been executing a variety of policies to mitigate greenhouse gas emissions. With these policies, the estimation and analysis of greenhouse gas inventory have been carrying out for the assessment of how much the emissions was mitigated every year. However, the analyses of uncertainty on the emissions are nearly restricted to Tier 1 approach in that way the real state of our country is hardly reflected. For the accuracy and reliability of uncertainty estimation there will be the need to apply Tier 2 approach to the estimation of uncertainty in greenhouse gas emissions. And There will be also the need to combine Tier 1 and Tier 2 approaches in the process of expanding and applying Tier 2 approach to estimating the uncertainty of emissions. In this paper, we proposed a method of uncertainty estimation which is able to combine Tier 2 approach with Tier 1 and estimated the uncertainty of emissions in energy-intensive sectors using the combined method.

Key Words : Uncertainty of green-hous gases, Inventory report, Expert elicitation

JEL Code: Q50

* Associate Professor, University of Seoul, Department of Economics(lead author), bgchun@uos.ac.kr

** Research Assistant, Korea Institute of Science and Technology Evaluation and Planning(co-author), kuhlee@kistep.re.kr

*** Research Assistant, Korea Capital Market Institute(co-author), j-hm@nate.com

**** Research Fellow, Korea Energy Economics Institute(co-author), skkim@keei.re.kr