

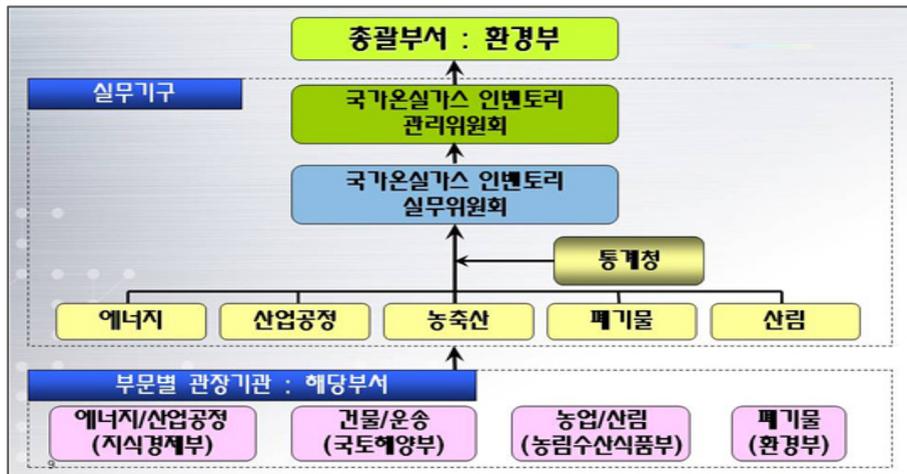
제8장 국가온실가스배출통계 불확도 산출 방법론 기초연구

박운영 김경미

제1절 서론

1. 연구배경

동 보고서의 일차적인 배경은 기후변화에 대한 범정부적 대응에 참가함이다. 이러한 대응 전략 수립의 일원인 국가온실가스 인벤토리 작성이 저탄소녹색성장기본법 시행령에 반영(2010년 4월)됨에 따라 동 시행령의 취지에 맞추어 통계작성의 공정성과 신뢰성을 높여야 하는 의무가 생기가 되었다. 특히, 동 법령에서 제시하고 있는 온실가스통계 작성의 대표기관, 관장기관, 협의기관의 한 축으로써 통계청이 협의권을 가지고 참석하게 되었음은 주지할 만한 사실이다.

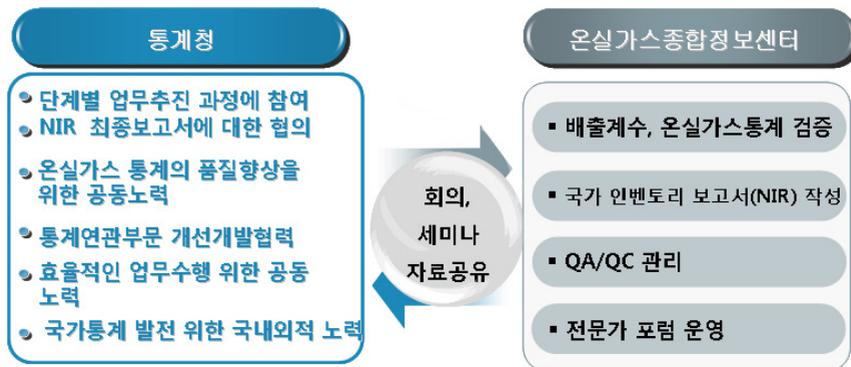


자료 : 온실가스종합정보센터

[그림 8-1] 온실가스인벤토리 업무분장 상 통계청의 위치

현 분산작성 시스템하에서는 온실가스 통계를 관장기관에서 취합 작성 후 국가대표 기관인 온실가스종합정보센터에서 통계청과 검증을 협의하게 되어 있는바 “협의업무”의 구체적인 명시를 위해 온실가스종합정보센터와 통계청에서는 6개 항목으로 요약된 협의사항을 [그림 8-2]와 같이 도출한 바가 있다. 또한 이는 법령의 형태로 제정될 예정이다. 추가적으로 활동자료(activity data), 불확도(uncertainty) 등 통계적인 전문영역에 대해서는 통계청에서 수년간 축적해온 지식에 기반하여 주도적으로 진행할 수 있는 인프라가 마련되었다고 할 수 있겠다.

또 다른 연구배경은, 금융위기를 거치면서 경제사회 전반적인 분야에서 불확도 혹은 불확실성이라는 용어가 대중매체를 통해 부쩍 많이 늘어나고 있고 이는 온실가스배출통계에서도 반드시 활용 및 도입해야 하기 때문이다. 특히, 금융시장의 경우 개별 금융상품의 시장가 분석 및 판단 시 다양한 금융변수, 가령 환율, 경영상태, 경기, 물가, 기후변화 등 다양한 인자들을 고려하고 추가적으로 불확도 혹은 불확실성을 제공하는 사례들을 볼 수 있다. 이러한 사례는 금융시장 진입을 앞두고 있는 “온실가스배출량·탄소배출권”에 대해서도 예외는 아니다. 또한 배출량의 신뢰성 및 정확도를 높이기 위하여 의무감축국 국가보고서에는 의무적으로 불확도를 제출하게 되어 있다. 요약하자면, 동 연구는 온실가스배출통계 및 불확도 산출 관련 제도적인 틀이 마련되어 가고 있는 시점에서 숙련된 통계지식을 보유하고 있는 전문통계기관의 역할증대와 궤를 같이한다고 할 수 있다. 또한 전 세계적으로 온실가스배출량의 중요성이 높아지고 동 통계가 금융시장의 상품으로까지 선진시장에서 거래됨에 따라, 동 자료의 신뢰성과 공정성을 담보해줄 지표로서 불확도 통계의 중요성이 높아지는 시대흐름에 맞추어 시대부응 맞춤형인프라 서비스 기반을 구축코자 하는 것이다.



[그림 8-2] 통계청 및 온실가스종합정보센터와의 업무분담안

2. 개념정의

일반적으로 불확도(uncertainty)는 대부분 측정데이터에서의 측정불확도의 의미로 쓰여진다. 이때의 불확도는 측정결과의 불확실성 정도를 의미한다. 즉, 동일한 사람이 동일한 측정법과 환경에서 동일한 계측기로 측정해도 각 측정값들 사이엔 항상 약간의 차이가 발생하는데, 이 차이의 정도를 말한다. 측정불확도는 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산 특성을 나타내는 값(표준편차, 신뢰구간의 반너비 등)이며 반복측정에 의해 얻어진 측정값들의 분산의 개념으로 통계적으로 접근되어왔다. 측정결과가 통제된 환경에서 얼마나 정확히 측정이 되었느냐를 말해주는 지표로서 측정결과의 신뢰성을 대표하는 값으로 이용되고 있다.

반면 온실가스통계에서 정의되는 불확도는 일반적인 측정불확도와는 그 개념이 다소 차이가 있다. 2006 IPCC¹⁾ 가이드라인에 따르면 불확도는 가능한 값들의 범위와 가능성을 특징짓는 확률밀도함수로서 기술될 수 있는, 변수의 진실한 값에 관한 지식의 결여라고 정의되어 있으며 불확도는 기본 프로세스 및 추론기법에 관한 지식뿐만 아니라 적용 가능한 자료의 질과 양에 좌우되며 분석자의 지식상태에 좌우된다고 설명되었다(환경부·환경관리공단 2006 IPCC 가이드라인 번역본).²⁾ 이와 같이 국제 가이드라인의 정의로 볼 때 온실가스통계에서의 불확도는 값의 정확성에 대한 정량적 수치로 정의하고 있으나 그 내용이 광범위하고 모호하게 설명되어 있다. 또 다른 국제 가이드라인인 GPG(Good Practice Guidance) 2000에서는 불확도에 대해 배출량의 지속적 모니터링에 관한 불확도(uncertainties associated with continuous monitoring of emissions), 배출계수 결정에 관한 불확도(uncertainties associated with determination of emission factors), 공표된 레퍼런스의 배출계수에 관한 불확도(uncertainties associated with emission factors from published reference), 활동자료에 관한 불확도(uncertainties associated with activity data)로 나누어 구분하고 있다. 국제 가이드라인을 바탕으로 한 보다 상세한 내용은 다음 절에서 논의하기로 한다.

이와 별도로 불확도에 대한 일반적인 이해의 폭을 넓히기 위해 앞서 설명한 일반적인 측정불확도에 관해 국제표준화기구(ISO)의 정의를 살펴보자. 1993년 ISO는 여러 국제기구와 합동으로 모든 측정현장에서 통일적으로 적용할 수 있는 측정불확도 표현지침(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)을 발간하였다. 이 표현지침에 따

1) Intergovernmental Panel on Climate Change : 기후변화에 관한 정부 간 패널

2) 원문내용 : Lack of knowledge of the true value of a variable that can be described as a probability density function(PDF) characterising the range and likelihood of possible values. Uncertainty depends on the analysts state of knowledge, which in turn depends on the quality and quantity of applicable data as well as knowledge of underlying processes and inference method



르면 측정불확도는 참값이 존재하는 범위를 나타낸 추정값으로 정의하였으며, 이를 A형 표준 불확도와 B형 표준 불확도로 구분하였다. A형 표준 불확도는 통계적 자료에 의하여 추정할 수 있는 불확도, B형 표준 불확도는 통계적 방법 이외의 다른 방법으로 추정하는 불확도라고 정의한다. 또한 합성 표준 불확도와 확장 불확도의 개념도 정의하였는데 합성 표준 불확도는 측정 결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때 A형/B형으로 구한 개개의 불확도를 각 입력량의 변화가 측정 결과에 미치는 영향에 따라 가중된 분산과 공분산의 양의 제곱근으로 계산한다. 확장 불확도는 측정량이 확실하게 존재할 것으로 기대되는 범위를 산정하기 위하여 합성 표준 불확도에 범위 인자를 곱하여 구한다.

또한 측정불확도는 오차(error)와는 개념의 차이가 있다. 일반적으로 오차는(error) 측정결과와 측정량의 참값의 차이를 말하며 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{오차(error)} &= \text{측정결과}(\hat{\theta}) - \text{참값}(\theta_t) \\ &= \{ \text{측정결과}(\hat{\theta}) - \text{반복측정의 모평균}(\overline{\theta_n}) \} \\ &\quad + \{ \text{반복측정의 모평균}(\overline{\theta_n}) - \text{참값}(\theta_t) \} \\ &= \text{우연오차(random error)} + \text{계통오차(systematic error)} \end{aligned}$$

간단한 예로 불확도와 신뢰수준을 살펴보면 줄자로 막대의 길이를 잰더니 1,234mm 이고, 불확도가 $\pm 1\text{mm}$ (95% 신뢰 수준)이라고 한다면, 자가 아무리 부정확하고 사람이 아무리 잘못 재었다고 해도 막대 길이의 참값은 $1,234 \pm 1\text{mm}$, 즉 1,233~1,235mm 사이에 있음을 의미한다고 하겠다. 신뢰수준과 관련하여 $\pm 1\text{mm}$ 안에 참값이 있다는 것을 95% 믿을 수 있다는 의미로서 길이를 100번 재었을 때 최소 95번은 $\pm 1\text{mm}$ 내에 참값이 있음을 확신한다는 의미이다. 불확도의 범위가 넓으면 신뢰수준은 높아진다고 하겠다. 이와 같은 예는 측정자료일 때의 불확도와 오차의 개념이다. 자료는 크게 측정자료와 조사자료로 나누어 볼 수 있는데 이에 따라 오차의 표현방법이 다르다. 위와 같이 측정자료의 경우 오차는 계통오차(systematic error, determinate error)와 우연오차(random error, indeterminate error)로 나누어진다. 계통오차는 실험과정이나 실험기기의 결함으로부터 유발되는 오차로 같은 방법으로 실험 시 재발생한다. 발견(detection)과 보정(correction)이 가능한 오차이며, 항상 양의 값이거나 음의 값이 있으며 방향성이 존재한다(계기오차, 환경오차, 개인오차). 이에 반해 우연오차는 측정 시 제어하지 않은 혹은 제어할 수 없는 변수에 의해 발생하는 오차이다. 측정 시 언제나 발생하지만 보정할 수는 없으며 방향성은 없다. 이와 달리 조사자료의 오차는 표본오차(sampling error) 비표본오차(non-sampling error)로 나눌 수 있다. 표본오차는 모집단의 일부분인 표본에서 얻어진 결과를 일반화하는 과정에서 발생하는 오차를 말하며 표본을 뽑기 때문에 발생하는 필연적 오차이다. 표본오차의 크기는 조절할 수 있으며, 정교한 확률 구조에 따라 표본을 추출하면 이를 줄일 수

있다. 비표본오차는 무응답, 적절치 않은 추출틀의 사용, 조사원의 미숙, 응답자의 거짓 말 등으로 인한 오차, 자료의 입력 및 처리 과정에서 발생하는 오차 등을 의미한다.

국가 온실가스 배출통계에 대한 불확도 산정에 있어 이에 관한 명확한 개념정의가 있어야 한다. 국제가이드라인의 개념이 광범위하고 모호하므로 국제가이드라인의 개념과 일반화된 측정불확도의 개념, 자료의 특성에 따른 오차의 개념을 아우르는 국가온실가스통계 불확도의 개념 정의가 필요하며 이를 위해서는 각 분야 전문가의 자문은 물론 개념 및 정의에 관한 심도 깊은 연구가 필요하다고 판단된다.

3. 연구범위 및 필요성

연구범위를 선정하기 위해 아래의 그림에서 제시하고 있는 온실가스 배출량 현황을 우선 살펴보기로 하자. [그림 8-3]과 같이 2007년 기준 국가온실가스배출현황을 부문별로 살펴보면 에너지 84.7%, 산업공정 9.8%, 농업·폐기물 5.4%로 순으로 나타나고 있다. 또한 에너지부문의 온실가스 배출원을 살펴보면 전환(36.8%), 산업(32.4%), 수송(19.4%), 가정·상업(10.6%), 공공·기타(0.9%) 순이다. 이러한 배출량에 대한 일반인들의 시각은 통계수치로만 인식할 뿐 얼마나 신뢰할 수 있는지에 대한 부가적인 의문을 제시하는 사람은 많지 않으리라고 본다. 하지만 이 후자에 대한 의문은 온실가스 의무감축국으로 지정되는 시점부터 중요해진다. 얼마 정도의 배출량이 신뢰할만한지 혹은 불확실한지에 대해 계량화하는 방법이 필수적이다. 본 보고서는 이와 같은 불확도 계량화 방법론에 관한 연구이며 이는 단시간에 해결 할 수 없는 사안인 만큼 이 연구를 바탕으로 지속적인 연구가 필요하다고 보여진다.



자료 : 에너지관리공단

[그림 8-3] 온실가스 시계열/부문별 배출량

국가 온실가스 배출 불확도 통계 산출과 관련하여 연구의 편의상 과정별로 연구를 3 단계 즉 기초방법연구, 심화연구, 고도화연구로 범주를 나누고 이에 따라 연구범위를 구분해 보기로 한다. <표 8-1>에 나와 있는 연구과제는 가장 현안이라고 판단되는 내용을 정리하였지만, 과제의 누락 및 연계성 등에 대해서는 다소 부족한 점이 있다는 점을 미리 밝혀둔다. 우선 기초방법론은 온실가스 배출통계를 작성하고 있지만 불확도 비의 무감축국이 대상이 되는 연구주체들로, 선행연구, 국제가이드라인, 계량화기법, 통계방법론 매칭, 국내외 산출현황 등이 있다. 기초방법론에 관한 다양하고 창의적인 내용들이 학계, 정부, 민간에서 나와 이로부터 심화단계의 연구로 진행될 수 있으리라고 본다.

심화단계에서는 국별 NIR(National Inventory Report)에서 제시하고 있는 다양한 불확도 유형과약 및 계량화 대상 선정, 온실가스 배출 부문/불확도 대상별 표준화 및 시산, 조합 불확도 산출기법, 불확도 관리에 대한 거버넌스(governance)³⁾ 논의가 진행되어야 한다. 심화 부문 연구는 현재 비의무감축국 중 선도국과 의무감축국(NIR제출) 중 중후진국의 기술력을 지니고 있는 국가에서 진행이 되고 있는 것으로 판단된다.

고도화단계에서는 온실가스배출부문별 및 불확도 유형별 산출, 매뉴얼 작성 보급, 불확도 조합도 방법론 표준화 및 산출, 사업장 단위 불확도 매뉴얼 확산, 불확도 거버넌스 제도(법제)화 등이 연구과제로 선정될 수 있겠다.

<표 8-1> 불확도 과정별 연구단계

단계	주요과제	시기	국별수준
기초방법론	<ul style="list-style-type: none"> · 선행연구 · 국제가이드라인분석 · 계량화기법 · 통계방법론 매칭 · 국내산출현황 · 해외산출현황 · 기타 	'10년 하반기	개도국, Non-Annex 그룹
심화	<ul style="list-style-type: none"> · 계량화유형별 불확도통계 선정 · 온실가스배출부문/불확도 유형별 국내표준화 및 시산 · 조합불확도 심층연구 · 불확도관리 적합 Governance · 기타 	'11년 하반기	Non-Annex국 중 선도국 및 Annex국 중 중후진국

3) 국가의 여러 업무를 관리하기 위해 정치·경제 및 행정적 권한을 행사하는 방식. 국정관리체계, 공치, 협치라고도 함

단계	주요과제	시기	국별수준
고도화	<ul style="list-style-type: none"> · 온실가스배출부문별/불확도 유형별 산출 · 매뉴얼 제작 및 보급 · 조합도 방법론 표준화 및 산출 · 사업장 단위 불확도 매뉴얼 제작 및 보급 · 불확도 Governance 제도(법제)화 · 기타 	'12년 하반기 ~ 의무감축국 이전	Annex국 중 선진국 그룹

금번 연구범위는 기초방법론에 주안을 두고 과제별로 수집 및 분석 가능한 자료에 기반하여 연구를 진행하고자 한다. 기초방법론에 대한 보다 구체적인 내용을 살펴보면 선행연구의 경우 불확도 관련 연구문헌을 중심으로, 국제가이드라인의 경우 2006 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) G/L(Guide Line) 및 2000 GPG(Good Practice Guidance) 상의 불확도에 대한 총괄적인 내용을, 계량화기법 관련하여 산출 및 실용가능한 방안을 중심으로, 통계매칭에 대해서는 일반통계론 및 불확도 적용 시 논의될 수 있는 개념정리를 중심으로, 국내외 산출현황은 입수가능한 정보원을 중심으로 연구범위를 지정하고자 한다.

제2절 불확도 산출 문헌 연구

1. 국제가이드라인 분석

국제 가이드라인 분석은 2006년 Intergovernmental Panel on Climate Change Guide Line (이하 2006 IPCC G/L)을 중심으로 하였다. 또한 본 내용은 환경부·환경관리공단에서 2006 IPCC G/L을 번역한 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인의 내용을 토대로 하였음을 밝혀둔다.

가. 불확도 산출 개요

2006 IPCC G/L에서는 불확도 산출에 대해 온실가스 배출 및 흡수통계 작성의 본질적인 부문이라고 밝히고 있다. 지침서에 따르면 불확도 산출은 배출계수, 활동자료, 각 부문을 위한 기타 산정모수와 같은 구성요소를 위해서 뿐만 아니라, 국가적 수준 및 추세 산정을 위해서도 도입되어야 한다고 명시하고 있다. 불확도에 대한 구조적인 접근법으로 인벤토리(예를들어 특정한 부문의 배출 산정치, 배출계수, 활동자료)에 이용되는 개별

변수의 불확도 결정, 요소 불확도(component uncertainties) 인벤토리 통합, 추세 불확도 결정, 자료 수집과 인벤토리를 개선하기 위한 노력 등을 기록하고 있다.

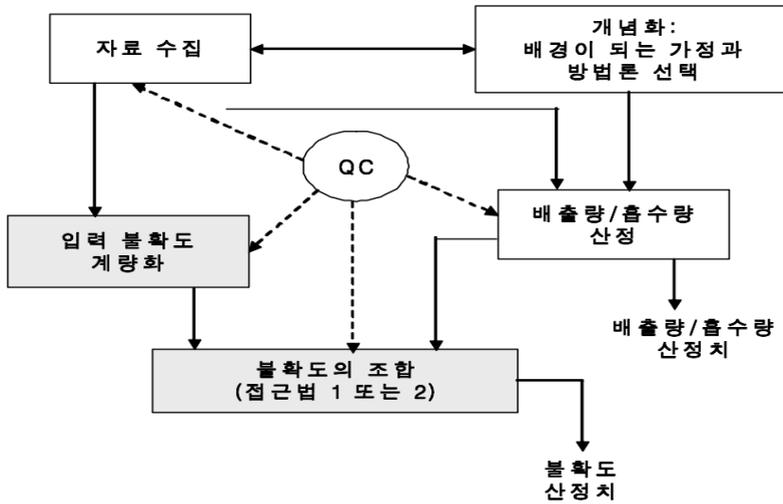
불확도 분석을 위해 2006 IPCC G/L에서는 무엇보다 향후 인벤토리 불확도를 감소시키기 위한 국가별 순위 부여가 유용하다고 설명한다. 또한 불확도 산출 방법론 선택은 배출원에 의한 배출 및 흡수의 다양한 부문, 기법, 국가적 상황에 적용이 가능하도록 실용적이고 과학적으로 강건해야 하며 인벤토리 사용자가 이해할 수 있는 방식으로 제시할 것을 주문하고 있다.

나. 불확도 분석의 전체적인 구조

2006 IPCC G/L에서는 다음의 [그림 8-4]에서와 같이 불확도 분석의 전체적인 구조를 간략한 방식으로 소개하고 있다. 그림에서도 살펴볼 수 있듯이 온실가스의 배출량과 흡수량 산정은 기본적으로 3가지 요인에 의해서 결정된다. 보다 구체적으로 배출/흡수 산정은 (1) 개념화, (2) 모형, (3) 입력자료와 가정(예를 들어 배출계수와 활동자료)에 기초한다고 밝히고 있다. 이들 세 가지는 각각 불확도의 원천이 될 수 있다.

(1) 개념화(conceptualization)는 가이드라인에서 불확도 분석의 시작이라고 밝히고 있다. 이는 인벤토리의 구조 또는 부문(sector)의 구조에 관한 일단의 가정들이다. 이러한 가정들은 전형적으로 지역의 범위, 평균을 구하는 기간(temporal averaging time), 부문, 배출 내지 흡수 프로세스, 포함되는 가스를 포함한다. 가정 및 방법론 선택은 자료 및 정보를 위한 요구를 결정한다. 자료 및 가정과 방법론 선택 간에는 어떤 상호작용이 존재할 수 있으며, 이는 그림에서 양방향 화살표로 표시된다. 예를 들어, 보다 높은 tier 수준의 방법론을 위해 필요한 부문을 분해하는(disaggregate) 능력은 자료의 이용가능성에 좌우될 수 있다. 실증적이거나 또는 전문가판단에 의존하거나 간에 자료는 적절한 자료 수집 및 QC 절차를 거칠 것을 요구한다. (2) 모형은 각 부문에 대한 활동과 배출계수의 산술적 곱셈과 모든 부문에 걸친 이후의 덧셈처럼 단순할 수도 있지만, 특정 부문에 고유하고 복잡한 프로세스 모형을 또한 포함할 것이다. (3) 입력자료와 정보는 자료수집 과정에서 얻는 것으로서 불확도를 위한 자료 및 판단의 보다 고유한 지식기반(knowledge base)에 입력(input)이 되어야 한다고 가이드라인은 밝히고 있다.

보다 체계적인 접근을 위해서는 가이드라인을 상세히 살펴보는 것이 매우 유익하리라고 판단된다. 개념화, 모형, 자료에서의 불확도의 고유한 원인들과 계량화 부문은 2006 IPCC 가이드라인의 3.2.1절 및 3.2.2절에서 언급되어 있다. 또한, 3.1.4절은 배출인벤토리 불확도 분석에 대한 입력(input)을 위해 백분율 불확도 산정치와 확률밀도함수(PDF)가 포함되어 있고, 3.2.3절은 부문들 및 전체적인 인벤토리 결과를 위한 불확도 산정치에 도달하기 위해 입력 불확도를 조합하기 위한 기법들을 논의하고 있다.



자료 : 환경부·환경관리공단, 2006 IPCC 가이드라인

[그림 8-4] 일반적인 불확도 분석의 전체적인 구조

불확도 조합과 관련해서는 2가지 접근법이 제시된다. 접근법1은 계산을 단순화하기 위해 일부의 가정들에 기초한 상대적으로 단순한 스프레드시트 기반의(sheet-based) 계산절차이다. 접근법 2는 몬테카를로 모의실험(Monte Carlo simulation)에 기초를 두며 보다 일반적으로 적용될 수 있다. 각각의 접근법은 전체 온실가스 인벤토리에 관련된 전체적인 불확도의 산정치를 제공한다.

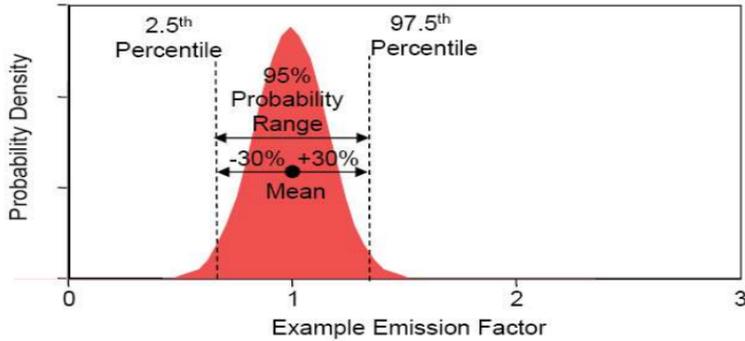
다. 불확도 분석의 기초

불확도 분석의 기초는 계량화가 가능한 불확도의 측면에 초점을 두고 있지만 전형적으로 계량화되지 않는 불확도 또한 존재한다. 계량적 불확도 분석은 시스템과 이용 가능한 자료의 유한 표본크기에 기초한 무작위 오차, 측정오차의 무작위 요소, 전문가 판단으로부터 구한 불확도의 무작위 요소에 관한 추론을 주로 다루는 경향이 있다.

반면 자료를 기록하고 추론하는 개념화, 모형, 측정기법, 기타 시스템의 불완전성 때문에 발생하는 체계적 오차는 계량화하기에 보다 더 어려울 것이다. 특히 개념화, 모형, 자료 측면에서 계량화되지 않은 불확도의 잠재적 원인을 기술하고 미래에 이들을 계량화하기 위해 모든 노력을 기울이는 것은 우수실행(good practice)이라고 가이드라인은 밝히고 있다. 이를 보다 명확히 하기 위해서 가이드라인에서 제시하고 있는 다양한 불확도의 사례를 살펴보자. [그림 8-4]는 평균에 대한 ±20%의 대칭적 배출계수 불확도의 예이며, [그림 8-5]에서는 평균에 대한 -50%에서 +100% 또는 2의 배출계수의 비대칭적 불확

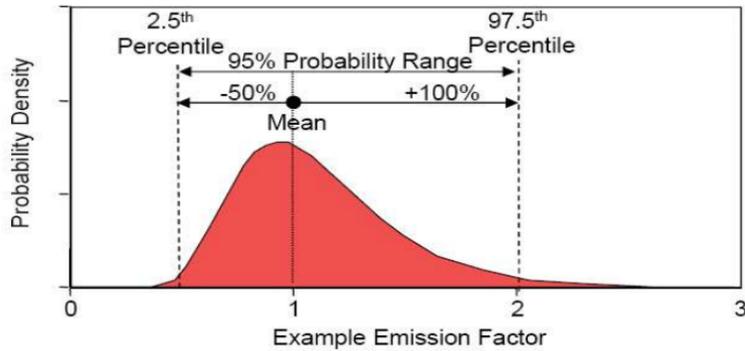


도 사례를 확률밀도함수 및 신뢰구간을 이용하여 작성한 것을 보여주고 있다.



자료 : 환경부·환경관리공단, 2006 IPCC 가이드라인

[그림 8-5] 평균에 대한 $\pm 20\%$ 의 대칭적 불확도의 예



자료 : 환경부·환경관리공단, 2006 IPCC 가이드라인

[그림 8-6] 평균에 대한 -50% 에서 $+100\%$ 또는 2의 계수의 비대칭적 불확도의 예

라. 불확도 원인 및 관리전략

앞서 살펴본 불확도 분석의 전체적인 구조를 보면 온실가스의 배출량과 흡수량 산정은 기본적으로 3가지 요인(개념화, 모형, 입력 자료와 가정)에 의해서 결정된다. 이들 세 가지가 각각 불확도의 원인이 될 수 있다. 여기에서는 보다 구체적으로 불확도가 발생할 수 있는 9개 원인 즉, 완전성 결여, 모형(편향 및 무작위 오차), 자료의 결여, 자료의 대표성의 결여, 통계적 무작위 표본추출 오차, 측정오차(무작위요소), 측정오차(편향), 잘못된 보고 내지 잘못된 분류, 누락된 자료로 가이드라인을 기준으로 세부화시켜 보기로 한다. 이들 9개의 원인들을 다루는 3가지 불확도 관리전략 즉 개념화 및 모형 정식화 평가,

실증적 통계적, 전문가판단을 간략히 살펴보는 것은 불확도 계량화 및 관리에 유익하리라고 기대된다. 9개 원인 및 세부 관리전략을 표로 정리하여 보면 아래와 같다.

〈표 8-2〉 불확도의 여러 다른 원인을 다루기 위한 전형적인 전략들

불확도의 원인	전략			기타의 설명
	개념화 및 모형 정식화 평가	실증적 통계적	전문가 판단	
완전성의 결여	✓			시스템의 주요요소가 누락되었는가? 그렇다면, 체계적 오차에 대한 계량화 내지 비계량화되는 영향은 얼마인가? 적절한 QA/QC가 이를 피하는데 도움이 될 것이다.
모형 (편향 및 무작위 오차)	✓	✓	✓	모형 정식화는 완전하고 정확한가? 모형의 타당성 검증에 기초한 모형 예측치의 불확도는 얼마인가? 통계적 타당성 검증 자료가 이용 가능하지 않다면 전문가 판단에 기초한 모형 정확도 및 정밀도의 산정치는 얼마인가?
자료의 결여			✓	자료가 부족하다면, 유사한(대용의, 대리) 자료 내지 이론적 고려사항에 기초하여 추론을 하기 위해 전문가판단이 이용될 수 있는가? 이는 완전성의 결여와 모형 불확도와 관련될 것이다.
자료의 대표성의 결여	✓	✓	✓	
통계적 무작위 표본추출 오차		✓		예, 자료에서의 변동과 표본크기에 기초한 신뢰구간을 산정하기 위한 통계적 이론
측정오차: 무작위 요소		✓	✓	
측정오차: 체계적 요소(편향)	✓		✓	QA/QC 및 검증은 통찰력을 제공할 것이다.
잘못된 보고 내지 잘못된 분류		✓	✓	적절한 QA/QC는 이를 피하는데 도움이 될 것이다.
누락된 자료		✓	✓	검출되지 않는 측정치 내지 기타 유형의 누락된 자료 때문에 불확도를 산정하는 통계적 판단에 기초한 접근법

자료 : 2006 IPCC 가이드라인

2. 주요 선행 연구 검토

불확도 추정에 관한 국내 연구문헌은 양적인 측면에서 볼 때 많지 않다. 김철한 등(2008)은 국가 “온실가스 통계목록 작성을 위한 IPCC 가이드라인에서의 불확실성 추정”이라는 논문을 2008년 대한산업공학회 및 한국경영과학회 춘계공동학술대회에서 발표하였다. 주요내용을 살펴보면 이론적 배경으로 IPCC 가이드라인의 개요, 적용되는 가스의 종류, 방법론적 접근법, 불확실성 분석의 개요, 불확실성 분석의 구조, 불확실성 분석의 기초, 불확실성 원인과 감소방법, 불확실성 계량화 방법, 모형에서의 불확실성, 실증적 자료의 통계적 분석, 확률밀도함수의 확인 및 선택, 전문가 판단의 부호화, 불확도 조합과 관련한 오차확산 접근법 및 몬테카를로 모의실험법 등을 소개하고 있다. 보다 상세한 사례연구는 김현선(2008) 등이 대한환경공학회지에 발표한 “매립지 온실가스 배출량의 민간도 및 불확도”에서 살펴볼 수 있다. 동 논문에서는 기후변화의 민감함과 연구방법에 대한 개요로서의 2006년 G/L 상에서의 산정방법, 크리스탈볼에 기반한 민감도 및 불확도 분석, 배출량 산정에 적용되는 변수로써 W(폐기물처리실적), MCF(메탄가스로 전환되는 비율), DOC(생화학적 분해가능 유기탄소), DOCF(분해가능 유기탄소함량의 실제 분해비율), F(메탄가스비율), K(메탄발생속도상수), R(메탄가스회수량), OX(산화율)이 적용됨을 보여주고 있다. 동 연구결과에서 주목할 점은 확률분포를 가정하고 2006 G/L 메탄 배출량 산정식을 적용하여 10,000회의 몬테카를로 시뮬레이션 결과에 기반한 매립지 메탄 배출량 산정과 동시에 불확도를 제시하고 있는 점이다. 이 논문에서는 변이계수를 불확도로 사용하고 있다.

불확도의 실무적인 접근법과 관련하여 도승희(2008)는 “6차 아시아지역 온실가스 인벤토리 워크숍 국외출장 결과보고”에서 불확실성 평가와 관련한 세션의 내용을 정리하고 있다. 여기에서 보고된 사항으로는 Non-Annex국들의 불확도 분석 노력 미흡, 불확도 원인(자료부족, 대표성 부족, 무작위표본오차, 측정오차, 오류보고 등), 불확도 결합방법(스프레드시트, 몬테카를로), 일본 불확도 평가사례(NIR Annex 7 참조, GPG 2000) 등이다. 특히, 에너지 부문 불확도와 관련하여 배출계수 불확도는 연료별 발열량 표본활동자료의 표준편차를, 활동자료 불확도로는 에너지통계연부(General Energy Statistics)의 고체, 액체, 기체 연료 통계오차를 활용하고 있음을 제시한다. 산업공정 부문 중 화학산업(기타)에서는 배출계수의 경우 표본수가 5개 이상인 카본블랙, 스틸렌, 코크스의 경우 측정치 자료의 95% 신뢰구간을 활용하고, 표본수가 5개 이하인 에틸렌, 디클로로에틸렌의 경우 전문가판단에 기반하여 추정된 95% 신뢰구간이 활용되고 있다고 전하며, 활동자료의 경우 온실가스추정방법위원회에서 정한 5% 표준값이 활용되고 있음을 보고하고 있다. 상기 문헌 중 학계에서 선행된 2가지 연구를 간략히 정리하면 다음과 같다.

가. 국가온실가스 통계목록 작성을 위한 IPCC 가이드라인에서의 불확실성 추정 (김철한 등, 2008)

이는 기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)이 권고하는 가이드라인인 2006 IPCC 가이드라인 1권 3장의 “불확실성(uncertainties)”의 주요내용을 정리한 논문이다.

불확실성을 “가능한 값들의 범위와 가능성(likelihood)을 나타내는 확률밀도함수(PDF)로 기술될 수 있는, 변수의 참값에 관한 지식의 부족”으로 정의하고 배출 혹은 저감을 추정함에 있어 (1) 개념화, (2) 모형, (3) 입력 자료와 가정에서 나타날 수 있는 불확실성을 불확실성 분석의 구조라 정의하였다. 이에 기초하여 불확실성을 계량화하는 주요 방법으로 (1) 모형에서의 불확실성, (2) 실증적 자료의 통계적 분석, (3) 확률밀도함수(PDF)의 확인 및 선택, (4) 불확실성에 관한 전문가 판단의 부호화 등을 권고한다. 또한 각각의 불확실성을 조합하는 조합 불확실성을 결정하는 방법으로는 (1) 오차의 확산을 통한 접근법, (2) 몬테카를로 모의실험을 권고하였는데 (1)의 방법은 스프레드시트에 기초한 방법으로 확산방정식을 이용하는 방법이며 (2)의 방법은 모든 입력자료에 대해 PDF를 정의하여 몬테카를로 모의실험을 통해 불확실성을 측정하는 방법이다. 이는 2006년 IPCC 가이드라인의 권고사항을 정리한 것으로 보다 다양한 방식으로 불확실성을 추정할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다고 명시하였다.

나. 매립지 온실가스 배출량의 민감도 및 불확도 평가(김현선 등, 2008)

이 논문은 매립지 온실가스 배출량에 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 평가를 실제적으로 적용한 사례이다. 2006 Guide Line의 Tier 2 방법에 따른 매립지 온실가스 배출량의 산정식을 살펴보면 이는 매립된 폐기물의 양과 메탄보정계수, 분해 가능한 유기탄소 비율, 유기탄소 중 미생물에 의해 동화될 수 있는 비율 등의 곱으로 이루어져 있다. 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 산정을 위해 이 산정식을 중심으로 그에 포함되는 각 변수에 대해 분포를 정의하는데 이때 분포의 결정은 분야 전문가의 다소 주관적 결정을 통한 것으로 보인다. 결정된 각 변수의 분포들과 산정식에 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하여 95% 신뢰구간을 통해 불확도를 산정하였다. 결과는 평균 25%의 불확도를 가졌으며, 이를 줄이기 위해서는 가정한 분포의 범위가 넓은 변수에 대해 정확한 자료수집 혹은 측정이 필요함을 제시하였다.



제3절 계량화 방법론

1. 불확도 계량화 기법

불확도를 계량화하기 위한 방법론에 대하여 2006 IPCC 가이드라인은 1권 3장 “불확

도”에서 기본적인 내용을 설명하고 있다. 동 장에서는 배출 및 저감의 연간 추정치 및 시간에 따른 추세에 관련된 불확도를 추정 및 보고하는 지침을 제공한다. 또한 부문 불확도를 국가의 순배출 총계 및 추세에 대한 불확도 추정치로 조합하기 위한 두 가지 접근법(스프레드시트 계산법, 몬테카를로 모의실험법)을 제시하고 있다. 더불어 배출량 산정을 위해 활용되는 개별적인 변수(즉, 배출계수, 활동자료, 추정치 등)의 요소별 불확도를 통합한 불확도 계산을 통해 우선순위 부여 등에 대한 내용도 언급하고 있다.

불확도 계량화를 위해서 인벤토리 담당자는 추정에 관련된 불확도의 원인을 확인 후에 95% 신뢰구간에서 국가 및 부문별 고유한 불확도 추정치 개발용 정보를 수집해야 한다. 또한 실용적 접근법으로는 최선의 이용 가능한 추정치 이용, 측정자료, 출판된 정보, 모형의 출력값, 전문가판단을 조합할 필요성이 있다. 불확도 계량화 기법으로는 크게 4 가지 방법(모형 불확도, 실증자료 통계분석, 확률밀도함수 확인 및 선택, 불확도 전문가 판단 부호화)이 권고되고 있다.

첫 번째, 모형 불확도에서는 검증용 독립자료를 가지는 모형 결과 비교, 대안 모형 예측치 비교, 모형 불확도 크기에 관한 전문가판단 이용, 이들에 대한 조합을 이용할 수 있다. 두 번째로 실증자료 통계분석은 배출계수·활동자료 및 기타 추정모수에 대한 DB의 수집 및 평가, 개별 활동자료·배출계수에 대한 실증적 분포함수를 개발 및 자료 도식화, 활동자료 및 배출계수 자료 변동에 대한 대안적 확률밀도함수 모형들의 적합화·평가·선택, 변동에 대한 분포의 불확도 특징부여, 총 배출 불확도 추정용 입력, 총 불확도 기여도 결정 및 핵심 불확도 추정치 개발용 민감도 분석의 6단계 절차를 활용할 수 있다. 세 번째로는 확률밀도함수의 확인 및 선택은 함수영역, 함수범위, 모양 및 자료를 생성한 과정에 의해 좌우된다. 특히, 정규분포는 불확도 범위가 작고 평균에 대해 대칭적일 경우, 로그정규분포는 불확도가 비음인 변수에 대해 크고 양의 왜도를 가질 경우, 균등분포는 물리적으로 제한된 양을 표현하거나 전문가가 상한과 하한을 지정할 수 있는 경우, 삼각분포는 전문가가 상한 및 하한과 선호값을 제공하는 경우, 프렉털 분포는 실증적 분포로 불확도에 대한 전문가 판단을 표현할 경우 유용하다. 네 번째 계량화 방법으로는 전문가 판단의 부호화로 불확도에 관한 전문가의 판단을 계량적 확률밀도함수로 변환하는 과정으로 이를 위해 고정값, 고정확률, 구간기법 및 도표화 등의 방법이 이용된다.

불확도의 조합은 부문에 대한 활동자료, 배출계수, 배출량 불확도가 추정되면 총 인벤토리(총배출통계량) 추정치와 시간에 따른 전체 목록의 추세 불확도를 위해 이를 조합하는 것이 필요하며 두 가지 접근법이 존재한다. 첫 번째 접근법은 스프레드시트에 기초한 표를 이용하는 방식을 이용한다. GPG(Good Practice Guidance: 우수실행지침)에서는 활동자료 및 배출계수에 대한 불확도 범위를 이용하여 부문 수준에서 이루어지며, 이를 위해 서로 다른 가스들이 CO₂ 등가로 입력되어야 한다. 동 접근은 등식에서 입력자료

간 상관관계가 없는 경우를 가정하며, 상관관계가 존재할 경우 명시적으로 포함하거나 덜 중요한 수준으로 자료를 통합할 수 있다. 또한, 접근법 1은 이론적으로 변이계수가 0.3(표준편차/평균값) 미만임을 요구한다. 또한 동 접근법은 배출 및 활동계수에서의 불확도의 상대적인 범위가 기준연도와 연도 t에서 동일하다고 가정한다.

또 다른 접근법은 몬테카를로 모의실험에 의한 방식으로 불확도가 상세한 부문별 평가에 적합하고, 불확도가 높고, 비정규적 분포, 알고리즘이 복잡, 활동자료와 배출계수 간 상관관계의 존재 시 적합하다. 또한 몬테카를로 기법은 추세 불확도 추정 시에도 이용될 수 있고, 여기서 추세는 기준 연도와 관심 있는 연도 간의 백분율 차이로 정의된다.

양 방법의 선택은 결국 동일한 결과를 가져올 것이지만, 접근법 1은 Tier 1 방법이 적용될 때 가능하고, 농업, 임업 및 기타 토지이용(AFOLU; Agriculture, Forestry and Land Use) 부문에서처럼 복잡한 시스템의 배출/저감 추정치의 불확도를 계량화하기 위해서는 Tier 2와 3 방법이 이용되는 경우에는 접근법 2를 적용할 가능성이 보다 크다.

2. 몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로는 모나코의 유명한 도박도시에서 유래된 명칭으로써, 프로세스 변동의 효과를 측정하기 위해 확률변수를 이용하는 방법이다. 이 방법은 무작위표본을 이용하는 모의실험이며 난수표를 이용한다(박영근, 2010).

불확도는 여러 가지 분야에서 다루어지고 있다. 금융, 공학, 의학 등 과학적인 이론제시에 매우 유용한 결과를 제공하고 있기 때문이다. 전통적으로 불확도를 다루는 기법으로는 단일 점추정, 시나리오 분석, What If 분석 등을 열거할 수 있다. 단일 점추정의 경우 결과를 이끌어 내기 위해 평균과 같은 가장 그럴듯한 하나의 결과값을 도출하는 일반적인 방법으로 빠르고 쉬운 방법이지만 잘못된 결과를 얻기 쉬우며 평균의 오류를 범할 수 있다. 시나리오 분석의 경우 가장 그럴듯한, 최적 및 최악의 시나리오를 구성할 수 있고 가능한 결과도 도출해 낼 수 있다. What If의 경우 변수값을 정해진 크기만큼 규칙적으로 증가시키며 가능한 결과 범위를 나타내는 많은 자료를 얻을 수 있으나 그 결과의 발생 확률을 얻을 수는 없다.

이에 반해 현대적인 확률론적 분석기법(Stochastic Analysis)에 기반한 불확도 추정은 어떠한 현상이나 사건을 모형화하여 가상으로 실행시켜 봄으로써 실제 상황에서의 결과를 예측하는 모의실험으로 불확도를 다룰 수 있다. 이는 문제에 대해 어떤 가정(확률분포)하에서 수리모형을 설정하고 여러 상황에서 가장 효과적인 시스템 또는 방식을 모색하는 것으로써 비용과 시간을 절감할 수 있는 장점이 있다. 또한 시스템 설계를 통해 문



제를 정의하고 모델을 구축함으로써 프로세스 본질에 대한 통찰력도 제공한다. 보다 구체적으로 몬테카를로 시뮬레이션은 확률분포를 누적확률분포로 변환한 후 표본값을 변환 모델에 입력함과 동시에 생성된 난수값을 활용한 표본값 전환기법을 통해 모델을 계산하고 시뮬레이션 결과값을 기록하는 형태로 시행된다. 이러한 시뮬레이션의 장점은 실행에 앞서 의사결정을 평가하는데 경제적이고, 시스템에서 중요한 구성요소를 제시하며, 변화를 필요로 상황에서 훌륭한 도구이며, 하드웨어 및 소프트웨어의 발전으로 간편하게 구동될 수 있다는 점이다. 하지만 결과가 입력값의 정확성에 대해 민감하고(GIGO: Garbage In Garbage Out), 시뮬레이션만으로는 문제를 해결할 수 없고, 결과적으로 시뮬레이션이 복잡한 문제에 대한 쉬운 해결책을 제시하는 것은 아니다.

3. 크리스탈볼을 이용한 시뮬레이션의 적용

몬테카를로 시뮬레이션을 구동해 볼 수 있는 프로그램은 다양하다. 동 보고서에서는 크리스탈볼을 중심으로 그 실행방법을 설명하고자 한다. 크리스탈볼에서 모델 구축을 위해 먼저 시행하여야 하는 작업은 3가지 기본용어인 가정(Assumption), 결정변수(Decision Variable), 예측(Forecast)의 정의에서부터 시작된다. “가정”은 입력값, X , 독립변수, 확률변수, 확률분포로 이해할 수 있다. “결정변수”는 통제변수와 동일한 개념으로 풀이되며, 마지막으로 “예측”은 결과값, Y , $f(X)$, 종속변수와 유사한 개념으로 정리할 수 있다. 우선 가정에서 제일 먼저 실시하여야 할 사항으로는 가정정의단계인 바 여기에서는 과거 데이터와 가장 일치하는 확률분포 적합 방법들(정규, 삼각형, 이산형, 기울기형 등) 중 선택하거나 아니면 다른 분포로 설명될 수 없고 자료 수가 제한적일 때 활용할 수 있는 사용자 정의 분포를 통한 가정방법(단일값, 비 연속적인 범위, 연속적인 범위, 조합 등)을 활용할 수 있다. 예를들면 연속형 사용자 정의 분포의 활용 시 최소값, 최대값, 각 범위의 확률을 지정하여야 하고, 기울기가 있는 범위의 경우 최소값, 최대값, 끝 값의 높이를 지정하고 일정간격으로 모수를 이산형으로 변경하는 방법이 있다. 가정단계에서 또한 고려하여야 하는 사항으로는 확률분포 가정 간의 상관관계를 고려하는 것이다. 상관계수는 두 변수 간의 연관성을 측정하는 것이며, 양의 상관계수는 변수들이 함께 증가하거나 감소하는 것을 나타내지만 반드시 연관성이 인과관계와 동일한 것은 아니다. 일반적으로 모델에 상관계수를 추가하면 결과의 표준편차가 증가하는 경향을 보인다. 가정과 통제변수에 대한 정의가 끝나면 마지막으로 “예측값”의 정의단계에서는 적절한 셀을 선택하고, 예측값에 대한 도수 분포 및 정확도 분석을 시행하면 된다. 이 단계에서 옵션으로는 Split View/Full screen, 통계량, 백분위수 등을 표출시킬 수 있으며 통계량상의 변이계수를 활용하여 불확도를 점검해 볼 수 있다.

제4절 국외 불확도 산출 사례 연구

1. 불확도 산출 결과 분석(핀란드, 일본)

2008년 핀란드 NIR 보고서 부속명세서 6에 수록되어 있는 불확도 산출 통계표를 요약해보면 아래의 <표 8-3>과 같다. 현재 핀란드의 경우 9개 분야 144개 총 1,296여 개의 불확도를 국가보고서에 산출하고 있다. 산출되는 불확도의 유형을 살펴보면 활동도(1), 배출계수(2), 조합(3), 2008년 총 국가 배출 분야로써 조합 불확도(4), 민감도 A(5), 민감도 B(6), 배출계수 불확도 시계열 불확도(7), 활동도자료 불확도 시계열 불확도(8), 총 국가배출량 시계열 불확도(9)로 구분할 수 있다. 부문별로 살펴보면 에너지의 경우 67개의 카테고리별로 9개 유형에 대해서 불확도 통계가 산출되고 있다. 활동자료 불확도의 경우 90%(최대)에서 1%(최소)치가 있고, 배출계수의 경우보다 범위가 넓어져 378%(최대치)에서 0%(최소치)의 결과도 보여주고 있다. 조합결과 378%(최대치), 1%(최소치)는 배출계수 산출결과에 많은 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 다만 동 자료가 어떻게 산출되는지에 대한 세부적인 내용은 현재 자료 확보가 용이치 않아 추가적인 연구과제로 남기기로 한다.

<표 8-3> 핀란드 불확도 부문별 최대값/최소값 현황

구분		활동 자료 UC ⁴⁾	배출 계수 UC	조합 UC	08년총국가배출 조합불확도 배출량UC	A 민감도	B 민감도	배출계수 시계열UC	활동도 시계열UC	시계열 조합UC	계
에너지	67	max 90%	378%	378%	3.55%	0.1182	0.4453	0.53%	1.26%	1.28%	
		min 1%	0%	1%	0.00%	-0.0006	0.0000	-0.03%	0.00%	0.00%	
산업 공정	18	max 88%	100%	100%	4.50%	0.0237	0.0464	0.24%	0.62%	0.95%	
		min 0%	0%	4%	0.00%	-0.0008	0.0000	-0.01%	0.00%	0.00%	
기타 공정	2	max 30%	20%	36%	0.04%	-0.0001	0.0006	0.00%	0.03%	0.03%	
		min 5%	10%	11%	0.02%	-0.0004	0.0010	0.00%	0.01%	0.01%	
농업	7	max 15%	248%	248%	6.09%	0.0166	0.0550	1.18%	0.00%	1.18%	
		min 0%	14%	16%	0.00%	0.0000	0.0000	0.00%	0.00%	0.00%	
산림	40	max 30%	380%	380%	14.19%	0.0361	0.1094	3.25%	2.78%	12.85%	
		min 0%	11%	11%	-35.45%	-0.3893	-0.3893	-12.85%	0.00%	0.00%	



폐기물	10	max	30%	380%	380%	2.29%	0.0008	0.0341	0.05%	0.05%	0.37%	
		min	0%	32%	35%	0.03%	-0.0086	0.0001	-0.37%	0.00%	0.00%	
계	144		144	144	144	144	144	144	144	144	144	1296

자료 : 2006 Finland NIR

다음으로 일본의 경우, 핀란드 분석결과와는 달리 4개 분야 즉 배출계수(1), 활동자료(2), 조합(3), 2008년 총국가배출 분야로서 조합불확도(4)로 구분하여 다소 간결하게 제시하고 있다. 일본의 불확도 산출결과를 살펴보면 아래의 <표 8-4>와 같다.

<표 8-4> 일본의 불확도 부문별 최대값/최소값 현황

구분		배출계수 UC	활동도 UC	조합 UC	08년 총국가배출 부문 조합불확도 배출량UC	계
에너지	93	-	13	13		
		max	10000.0%	104.4%	10000%	0.86%
		min	0.03%	0.3%	0%	0.00%
산업공정	51	-	12	1		
		max	163.0%	50.0%	163%	0.44%
		min	2.0%	2.0%	5%	0.00%
솔벤트 및 기타	1	-	1			
				5.0%	5%	0.00%
농업	63	-	29	20		
		max	481.0%	100.0%	712%	0.15%
		min	50.0%	0.3%	15%	0.00%
산림	25	-	22	22	13	13
		max	75.6%	85.3%	114%	0.42%
		min	-50.0%	9.0%	6%	0.00%
폐기물	35	-	10	10		
		max	300.0%	104.4%	304%	0.32%
		min	4.3%	10.0%	17%	0.00%
계	268		268	268	268	1072

자료 : 2008 Japan NIR

4) Uncertainty : 불확도

눈에 띄는 수치로는 에너지부문의 배출계수 불확도 최대값이 10,000%를 넘는 점이다. 활동자료 불확도 최대값에 있어서도 에너지, 농업, 폐기물 분야에서의 불확도가 100% 이상이 나오고 있는 점도 눈여겨 볼 만하다. 최소값으로 배출계수의 불확도를 살펴보면 에너지의 경우 0.03%로 나타나는 반면 농업의 경우 50%까지 나타나고 있다. 활동자료 불확도의 경우에도 에너지의 경우 0.3%로 나타나는 반면 폐기물의 경우 10%로 나타나고 있다.

2. 일본 불확도 산정 방법 검토

일본 불확도 산정방법 검토는 일본의 국가보고서 National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN의 Annex 7.을 번역하여 정리하였다. 일본의 불확도 산정의 배경 및 목적은 UN기후변화 협약 하에 의무감축 당사국들이 온실가스 배출 및 저감에 대한 배출통계를 사무국에 제출하게 되어있음에 있다. 2000년 5월에 채택된 GPG2000(Good Practice Guidance 2000, 이하 GPG2000)은 배출통계에 대하여 불확도의 계량적인 측정 및 보고를 추가하여 요구하고 있다. 불확도 평가는 배출통계의 정확성을 지속적으로 개선하고자 하는 의도이며, 불확도의 높고 낮음이 배출통계의 정도에 영향을 끼치는 것도 아니며 당사국 배출통계 간의 정확성 비교를 이끌어내고자 하는 것도 아니다. 일본의 경우 2001년과 2006년도에 온실가스배출 추계위원회에서 불확도를 고민하였다. 일본은 그 이후 위원회의 결과에 기초하여 불확도 평가수행을 연 단위로 진행해오고 있다. 동 보고서는 일본 배출통계 불확도 평가를 수행하는 가이드라인으로 활용될 것이다.

불확도 평가에 대한 전망을 설명하면서 일본국가보고서에서 불확도란 용어는 진실과 비교하여 다양한 자료 간의 불일치 정도를 언급한다. 측정의 대표적인 신뢰성을 포함한 확실성을 결합하고 있는 다수의 특성치로부터 도출되는 불확도는 정확도의 개념보다는 폭넓은 개념으로 해석된다. 특정 자료원으로부터 배출량 불확도는 배출계수와 활동자료 불확도와 관련된 불확도를 적용 및 계산함으로써 산출된다. GPG2000은 아래의 표를 활용하여 자료원으로부터의 배출 불확도 산출을 요구한다.

$$U = \sqrt{U_{EF}^2 + U_A^2}$$

U : Uncertainty of the emissions of the source (%)

U_{EF} : Uncertainty of the emission factor (%)

U_A : Uncertainty of the activity data (%)

배출계수 및 활동자료원 확인법으로는 배출계수의 관측치에 대한 표준편차는 확률밀도함수를 지정하는데 활용되고, 불확도는 95% 신뢰구간을 구함으로써 평가된다. 또한, 총 국가 배출 불확도 산정법은 모든 자료원들로부터의 배출량 불확도를 조합함으로써, 일본 총 배출의 불확도를 측정하게 된다. 다중 불확도 간 상관관계가 없을 경우, 그리고 정규분포가 될 경우에는 GPG2000은 불확도의 조합방식(가법 및 승법)과 관련된 2가지 실행법을 제시하고 있다.

$$U_{Total} = \frac{\sqrt{(U_1 \times E_1)^2 + (U_2 \times E_2)^2 + \dots + (U_n \times E_n)^2}}{E_1 + E_2 + \dots + E_n}$$

U_{Total} : Uncertainties of National Total Emissions (%)

U_i : Uncertainties of the Emissions from source "i" (%)

E_i : the Emissions from source "i" (%)

불확도 평가 목표와 관련하여 GPG2000은 모든 불확도가 배출량을 추계할 시 고려되어야 한다고 제시한다. 배출계수 및 활동자료를 통한 구체적인 불확도 사례를 정리해보면 다음과 같다. 첫째로 배출의 지속적인 모니터링과 관련된 불확도는 측정연 단위로 이루어지는 예처럼, 측정시점에 조건상의 차이로부터 벌어지는 불확도를 의미한다. 둘째로 배출계수 수립과 관련된 불확도는 기계운영상 시동 및 일시가동 등이 활동자료와 관련하여 다른 배출비율을 제시할 수 있다. 이러한 경우에는 자료가 세분화되어야 하고, 분리된 배출계수와 확률밀도함수가 정지, 가동, 가동중지 상태로 도출되어야 한다. 배출계수는 운영로드에 달려져 있을 수 있다. 이러한 경우에는 총배출량의 추정과 불확도 분석은 총가동 비율로 표현될 수 있는 업무량을 고려하여 증화될 필요가 있다. 이러한 사항은 회귀분석 혹은 배출비의 산포도에 의해 수행될 수 있다. 타 목적을 고려하여 측정된 결과의 채택은 대표적이지 못하다. 예로 안전 목적으로 발생한 메탄추정치는 총 배출량을 대표치 못한다. 측정자료와 총배출량 간 비율은 불확도 분석을 위해 추정되어야 한다. 셋째로 제한된 측정자료로부터 도출된 배출계수 불확도는 그 분포가 정규분포와는 종종 상이할 수 있다. 분포가 알려졌을 경우, 전문가 판단에 의거 추정하는게 적절하나 부가적으로 이론적인 배경을 제공하는 서류를 첨부하면 된다.

다음으로 활동자료 불확도 사례를 살펴보면 다음과 같다. 첫째로 통계오차해석에서 나타날 수 있다. 에너지수지 내에서 통계적 오차는 1차 원료량과 최종소비 및 전이량

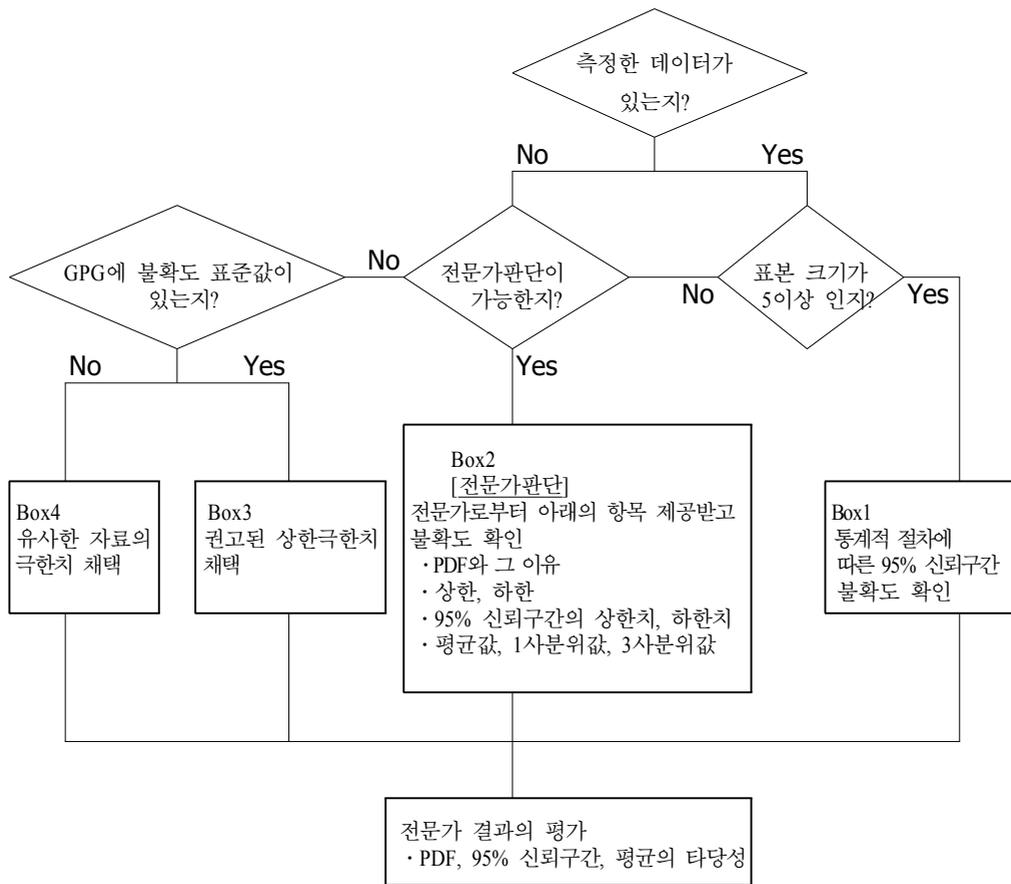
사이의 카테고리에 포함된 연료량 사이의 차이를 대표한다. 이들은 자료의 불확도 크기를 제시할 수 있는데, 특히 장기시계열이 고려되어야 한다. 둘째로, 에너지수지 해석에서 발생할 수 있다. 생산, 활용, 수입 및 지출 자료는 일치되어야 한다. 만약 그렇지 않다면 불확도를 제시할 수 있어야 한다. 셋째로 연관체크에서 발생할 수 있다. 불확도 범위를 제시하기 위해 동일자료원에 적용된 2가지의 활동자료원을 비교할 수 있다. 예로, 차량연료소비의 합계는 모든 유형의 차량의 연료소비효율에 차량주행거리(km)를 곱함으로써 계산될 수 있다. 넷째로, 차량수 및 유형에서도 발생할 수 있다. 어떤 나라는 세부적인 차량 등록 DB 즉 차량유형, 연식, 연료형태, 배출통제기술 등을 보유하고 있다. 이러한 것은 메탄 및 아산화질소 산출을 세부 상향식(Bottom up) 방법으로 시행하는데 매우 유용하다. 이런 세부정보가 없을 경우 불확도가 증가될 경향이 높다. 다섯째로 경계를 벗어난 연료 도입에서도 발생할 수 있다. 수립연료와 부분별 연료소비의 합산은 교차체크로 비교될 수 있다. 여섯째로 생체(바이오메스)연료에서 발생할 수 있다. 바이오메스연료 시장이 존재치 않을 경우, 추정소비는 일반소비보다 정확성이 떨어질 수 있다. 일곱째로 가축 수 자료에서도 발생할 수 있다. 정확도는 센서스나 표본조사의 신뢰도에 달려있고, 총 기간 동안 생존하고 있지 않은 동물에 대한 수치상 차이도 일어날 수 있다.

불확도 평가 방법과 관련하여 GPG2000은 불확도가 전문가판단을 통할 수도 있고 활동자료는 위에 제시한 불확도 자료원을 고려하여 제시될 수도 있다고 보고서에 명기해 놓기도 하였다.

보다 구체적으로 일본 인벤토리 불확도 평가기법을 살펴보기로 한다. 일본의 불확도 평가원리는 집합식과 GPG2000에서 제시된 방법상 편의를 고려하여 활용되어야 하며 이는 카테고리 간 표준평가로부터의 편차가 없다는 가능성을 최대한 유지하는 형태를 고려한다고 밝히고 있다. 특히, 배출계수와 활동자료의 불확도는 분리될 것을 강조한다. 개별 자료원들로부터의 추정계수 방정식은 <배출량 = 배출계수 × 활동자료>로 표기할 수 있다. 그러나 배출량이 2~3개 모수를 구성하고 있는 확률방정식으로부터 도출된 경우에는 배출량의 자료원이 다수일 경우가 있다. 그리고 모수의 조합은 배출계수와 활동자료로써 이루어져야 하는 것이 불 명확화될 수도 있다. 이와 같은 경우에는, 배출계수와 활동자료는 기본적으로 1999년 3월에 지구온난화에 대응하기 위해 측정을 진작시키기 위한 법령강화안에 기반한 배출계수 개념에 따라 기본적으로 정의하기로 한다. 또 다른 사례로 2~3개 모수를 구성하고 있는 확률방정식(음식물찌꺼기 소각지로부터의 메탄 배출량)을 살펴보면 배출량 = 음식물 처리 시 포함된 이산화탄소 × 음식물 처리 시 가스 전환 비율 × 양산 가스 내 메탄 비율 × 16/12 × 톤으로 표출된 계산 기본기간 동안 세분화된 음식물처리 / 배출량 = (배출계수 : 음식물처리 시 내포된 이산화탄소 × 음식물처

리 시 가스 전환 비율 × 가스 생산 시 메탄비율 × 16/12) × (활동자료 : 톤으로 표출된, 기본산정기간간 분할될 음식물 처리)의 형태로 표현할 수 있다.

본격적으로 부문별 불확도 평가를 살펴보기로 하자. 우선 배출계수 불확도 평가부문과 관련된 의사결정도를 살펴보면 아래의 표와 같다.



[그림 8-7] 배출계수의 불확도 산정 흐름도

만약 적절한 평가가 상기에 제시된 의사결정도에 의해서도 없을 경우, 적절하다고 사료되는 방법을 활용하여도 된다. 그러할 경우에는 왜 적절한 평가가 의사결정도를 통해 활용될 수 없는지 명확하게 설명되어야 한다. 5개 이상의 측정치가 있을 경우에는 실제 측정치가 있고, 5개 이상의 표본치가 존재할 경우, 불확도는 다음의 불확도평가지침에 맞추어 계량화 측정이 가능하다.

배출계수 관련 불확도 평가 지침	
지침 1	실측치 확보 및 표본이 5개 이상일 경우, 정규분포정리를 따른다는 가정하에, 모든 평균은 표준편차를 따른다는 정규분포정리에 입각하여 배출계수만 수립하기 위해 측정되어야 한다.
지침 2	불확도 산정 시, 개별자료항목에 내제된 체계오차가 분포상에 계수라고 가정하기로 한다. 그러므로 개별자료항목에 내제된 체계도차는 탐지될 필요가 없다.
지침 3	불확도에 관여할 수 있는 항목이지만 계량화 평가가 될 수 없는 것은 향후 연구로 보고되어야 한다. 만약 전문가판단을 통해, 불확도 추정이 가능하다면, 불확도는 전문가 판단을 따라 이루어져야 한다.

배출계수 계산 시 활용된 분포자료로부터 도출된 통계기법을 사용하기가 어려울 경우에는 첫 번째로 배출계수 표본자료의 단순평균을 계산할 수 있다. 배출계수가 단순평균을 활용하여 계산될 경우, 배출계수를 계산하는데 활용된 자료는 정규분포를 따른다고 가정한다. 그러므로 표본의 표준편차는 배출계수의 표준편차를 추정하는 표본수의 제곱근에 의해 나누어지고, 불확도는 수식(1.1)에 따라 신뢰수준 95%에 맞추어서 계산된다.

$\text{배출계수 불확도(\%)} = \frac{1.96 \times \sigma_{EF}}{ EF } \dots (1.1)$ <p>σ_{EF} : 평균의 표준편차 EF : 배출계수</p>

두 번째로 배출계수 표본자료의 가중평균을 활용하여 계산할 수 있다. 배출계수가 표본자료의 가중평균을 활용하여 도출될 경우, 배출계수를 계산하는데 활용되는 자료는 정규분포를 따른다고 가정한다. 그러므로 표준오차는 아래의 수식을 따른다. 불확도는 수식 (1.1)에 맞추어서 평균의 95% 신뢰구간을 찾아 계산함으로써 산출된다.

<p>가중평균에 적용된 가중치, $w_i (\sum w_i = 1)$ 표본평균 : $EF = \sum (w_i \times EF_i)$ 표본평균의 불변분산 : $\sigma_{EF}^2 = \sum \{w_i \times (EF_i - \overline{EF})^2\} / (1 - \sum W_i^2) \times \sum w_i^2$</p>

배출계수를 계산함에 있어 자료 분포를 이용한 통계기법을 활용할 수 있다. 이를 활용함으로써 배출계수를 계산하는데 활용된 자료의 분포를 도출할 때, 자료는 정규분포를 따른다. 자료의 각 부문별 불확도는 그 다음에 결정되고, 배출계수의 표준편차는 불확도를 확보하기 위해 계산된다. 만약 국가온실가스배출추계기법을 위한 인벤토리 실무협의회 전문가의 전문가는 표본이 5개 이상일 경우에도 통계분석이 부적절할 경우, 불확도는 전문가판단에 의해 평가되어야 된다고 한다. 전환하여, 표본수가 5개 이하일 경우에도 통계분석을 수행하는 것이 가능하다고 볼 경우에 불확도는 통계적으로 평가되어야 할 것이다.

가중평균이 배출계수를 확보할 경우에, 배출계수 EF는 각 하부목목의 배출계수가 EF_i 이거나, 가중변수가 A_i 이거나, 가중변수의 총합이 A 인 경우, 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$EF = \frac{\sum_i EF_i \times A_i}{\sum_i A_i} = \frac{\sum_i EF_i \times A_i}{A}$$

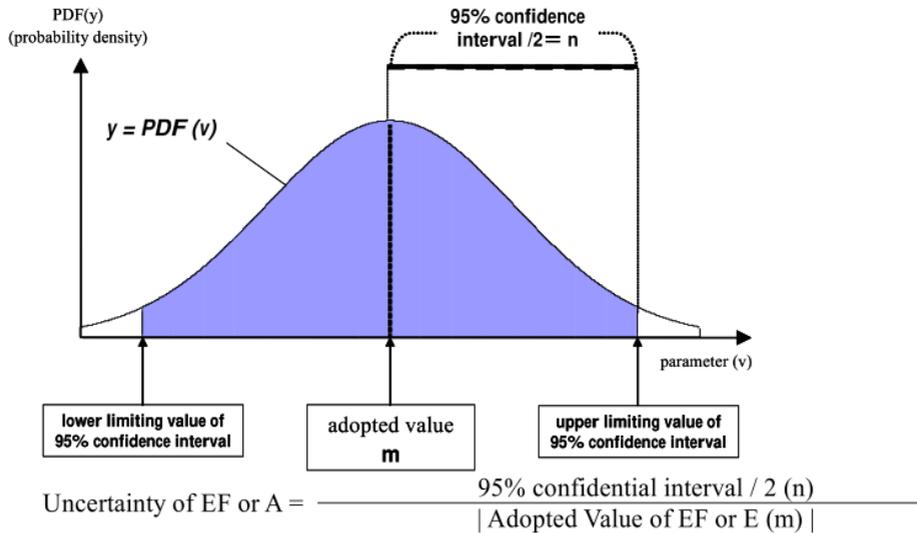
배출계수 EF의 분포를 대체할 경우, σ_{EF}^2 , 그리고 개별 배출계수 EF_i 의 분포와 개별가중변수 A_i , $\sigma_{EF_i}^2$, $\sigma_{A_i}^2$ 그런 다음 σ_{EF}^2 은 오차추정방식이라고 알려진 방정식을 활용하여 아래와 같이 산출된다.

$$\sigma_{EF}^2 = \sum_i \left\{ \left(\frac{\delta EF}{\delta EF_i} \right)^2 \sigma_{EF_i}^2 + \left(\frac{\delta EF}{\delta A_i} \right)^2 \sigma_{A_i}^2 \right\} = \sum_i \left\{ \frac{A_i^2}{A_i} \sigma_{EF_i}^2 + \frac{(EF_i - EF)^2}{A^2} \sigma_{A_i}^2 \right\}$$

이와 같이, 배출계수 불확도 U 는 아래의 방정식을 통하여 만들어진다.

$$U = \frac{1.96 \times \sigma_{EF}}{|EF|}$$

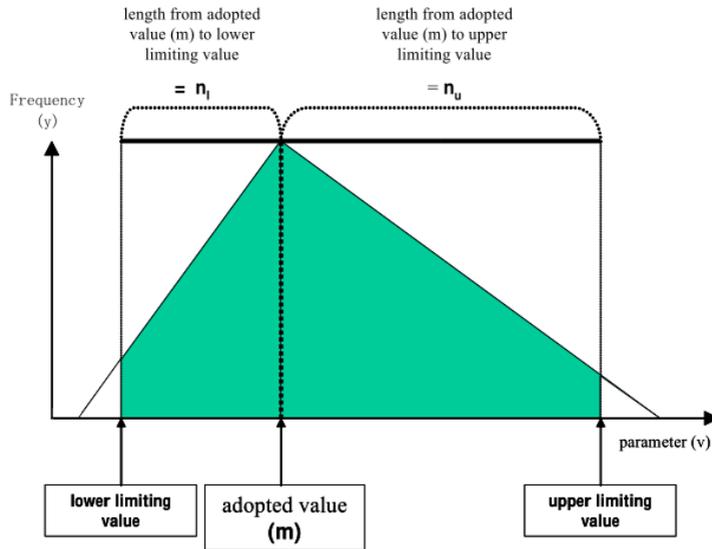
실질 측정치가 없거나, 표본규모가 5개 미만일 경우에는 실제 측정치가 부재하거나, 표본수가 5개 미만일 경우 불확도는 전문가 판단에 의하여 평가된다. 전문가판단이 가능할 경우(box 2)이면서 1) 배출계수의 확률밀도함수 분포가 전문가판단을 통해 활용될 경우에는 불확도는 전문가판단을 통하여 이루어진다. 전문가판단을 제공하는 전문가, 그들의 결정에 대한 기초, 고려로부터 배제된 불확도에 기여하는 계수들은 문서화되어야 하고, 문서는 보존되어야 한다. 이때 분포 및 증거, 상한값, 하한값, 95% 신뢰구간의 상한치, 하한치, 평균, 1사분위수, 3사분위수가 포함되어져야 한다.



[그림 8-8] 배출계수의 분포를 이용한 불확도의 계산(정규분포)

2) 배출계수의 확률밀도함수 분포가 전문가판단을 통해 활용될 수 없을 경우에는 배출계수에 적합한 상한값, 하한값에 대해 전문가에게 문의하고, 국가배출계수를 꼭지점을 가진 삼각형 분포로 그려서, 아래의 그래프와 같이 국내 배출계수의 상한값, 하한값에 적절한 95% 신뢰구간의 상한 및 하한치를 도출한다. 만약 배출계수가 상한값보다 크면, 배출계수는 상한값처럼 활용되어야 한다. 만약 활용된 배출계수가 하한값보다 작다면, 배출계수는 하한값처럼 활용되어야 한다. 전문가판단을 제공하는 전문가, 그들의 의사결정의 근거, 고려사항으로부터 제외된 불확도에 기여하는 계수들은 문서화되어야 하고, 문서는 보관되어야 한다. 동 내용하의 불확도는 하한값 불확도 $UL(\%) = -(\text{한계값}(nl) / \text{평균}(m) \text{를 낮추는 거리 값})$ - 상한값 불확도 $Uu(\%) = +(\text{상극값}(n u) / \text{평균}(m) \text{까지의 거리값})$ 의 형태의 방정식을 활용하여 계산되어야 한다. 불확도는 -0%에서 +0%까지의 형태로 나타나지만, 총괄적인 불확도를 평가할 때는 최대 절대값이 활용되어야 한다.

전문가판단이 가능치 않을 경우이면서 1) 불확도 기준값이 GPG2000에 제공되어 있을 경우, 즉 GPG2000이 특별한 배출원에 대한 불확도 평균값을 제공할 경우, 불확도 추정은 GPG2000에 주어진 표준 불확도의 상한값이 활용되어야 한다. 2) 불확도 기준값이 GPG에 제공되지 않을 경우에는 즉 GPG2000이 특별한 배출원에 대한 표준 불확도를 제시하지 않을 경우, 유사한 배출원에 대하여 GPG2000에서 제시하고 있는 표준 불확도가 상한값으로 활용되어야 한다.



[그림 8-9] 배출계수의 분포를 이용한 불확도의 계산(삼각형 분포)

<표 8-5> 배출계수 불확도 참조값(GPG2000)

카테고리		배출계수 불확도
1. 에너지		
	1. A. CO2	5%
	1. A. CH4, N2O	3%~10%
	1.A.3.운송(CH4, N2O)	5%
2. 산업공정		
	Excluding HFCs, PFCs, SF6	1%~100%
	HFCs, PFCs, SF6	5%~50%
3. 솔벤트 및 기타 생산품 활용		
4. 농업		
5. 토지용도 변경 및 산림		
6. 폐기물		

* category3: 유기물 솔벤트 및 기타 그와 같은 생산품 활용은 GPG(2000)에서는 다루지 않음

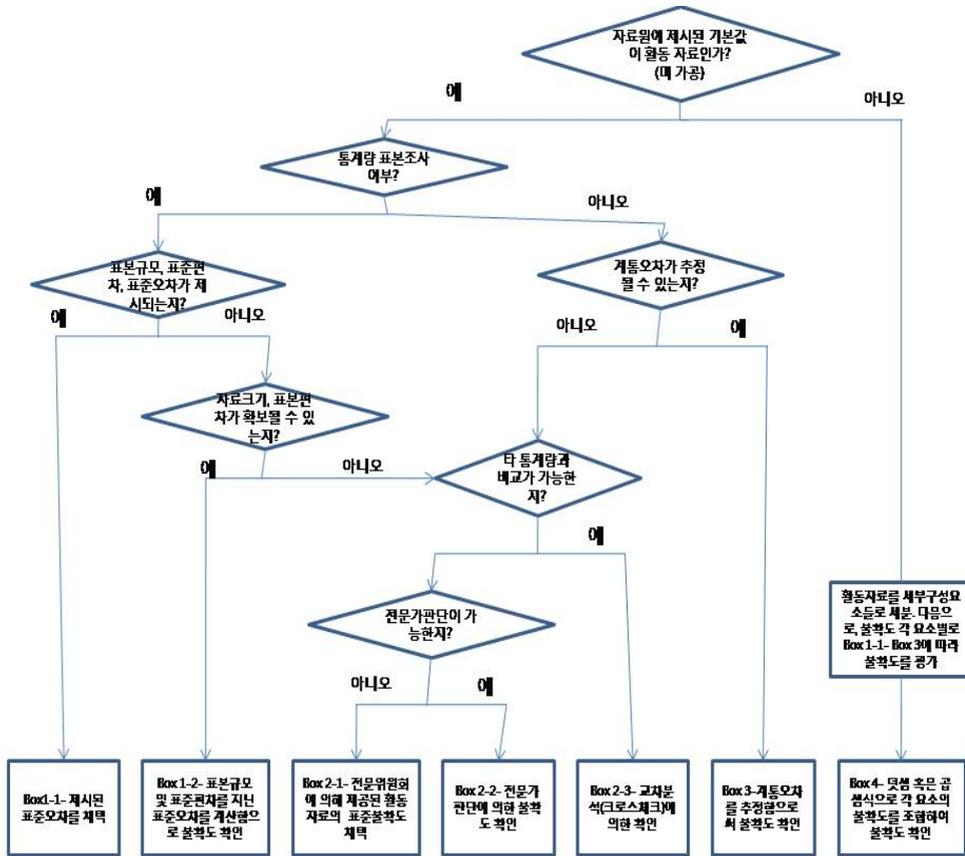
** category5: 토지활용변화 및 산림은 GPG(2000)에서는 다루지 않음

배출계수 불확도 조합기법은 GPG2000의 Tier 1이다. 요소들 간 상관관계가 강할 경우, 불확도는 몬테카를로 기법을 활용하여 조합될 수 있다(Tier 2 GPG2000). 다중 모수 조합으로 파생된 하나의 배출계수에 대한 불확도는 다음의 방정식 - Page Annex 7.5상의 예시에서 기술된 유형들의 상황에서 보여진 것처럼- 을 활용한 다중 모수들의 불확도들로부터 얻어질 수 있다.

$$U_{EF} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

U_{EF} : 배출계수의 불확도 (%)
 U_i : 모수 i 의 불확도(%)

다음으로 활동자료 불확도 평가를 위한 의사결정모형을 살펴보기로 한다.



[그림 8-10] 활동자료의 불확도 산정 흐름도

활동자료 통계값 활용 시 불확도는 다음의 지침에 따라 계량적으로 평가되어야 한다.

배출계수 관련 불확도 평가 지침
<p>지침 1 표본조사의 경우 표준오차만을 기준으로 불확도 산정</p> <p>지침 2 표본조사 이외의 경우, 계통오차가 추정치를 기준으로 불확도 산정</p> <p>지침 3 표본조사 이외의 경우, 계통오차가 추정 불가능하면, 크로스체크 혹은 전문가판단을 기준으로 불확도 산정</p> <p>지침 4 계량평가가 어려운 경우, 불확도에 관련된 요인들이 향후 탐색을 위해 기록되어야 함</p>

표본조사에 기반한 통계값을 활용할 경우 1) 작성자가 공개오차를 제공 시(Box 1-1)에는 통계자료 발행인이 표본조사상 표준오차를 공표할 경우에, 표본오차를 활동자료의 불확도로 활용한다. 2) 작성자가 공개오차를 미제공 시(Box 1-2)에는 통계자료 발행인에게 표본규모, 표본평균, 표준편차에 대한 정보를 요청한다. 표본의 분포가 모수분포를 따른다는 가정하에, 통계치로부터 불확도를 산정한다.

<p>불확도 $U = (1.96 \times s / \sqrt{n}) / X_{ad}$</p> <p>$X_{ad}$: 표본평균</p> <p>s : 표준편차</p> <p>n : 자료 수</p> <p>하지만, 분포가 비대칭일 경우, 불확도 U는 표본평균으로부터 95% 신뢰구간의 극한점의 값과 표본평균에 의한 평균값 사이의 차이를 나눔(분할합)으로써 산정</p>
--

표본조사로부터 도출된 값으로부터의 추정법 확정과 추정법과 관련된 불확도 추정 또한 같이 수행되어야 한다. 3) 자료량과 표준오차가 미 제공되고, 상호검사(크로스체크)가 가능할 경우(Box 2-3)에는 표본조사에 의한 통계량의 경우, 자료와 표본표준편차 및 자료량이 없지만, 다수종의 타 통계치와 적절한 비교가 가능 시 불확도는 section A 1.2.3, page A 1.7(GPG2000)에 기술된 두 번째 방법을 활용하여 평가한다.

$$\text{불확도 } U = (1.96 \times s) / X_{ad}$$

X_{ad} : 활동자료 값

s : 표준편차(상호검토용 자료)

만약 분포가 비대칭일 경우, 불확도 U는 활동자료 값 평균치와 활동자료 값 95% 신뢰구간 극한값 사이의 차이를 분할함으로 계산됨

또한, 단일 통계치만 존재 시, 평가는 2)에서 기술된 동일식을 활용하여야 한다. 배출계수의 확률밀도함수 분포가 확보되지 못할 경우에는 Section 7.1.3.3.b.상의 전문가판단을 활용한다. 4) 자료량과 표준오차가 미 제공되고, 전문가판단이 가능할 경우(Box 2-2)는 즉 자료와 표준편차가 없는 표본조사 통계량의 경우, 자국 내 전문가를 통해 활동자료에 대한 최대 및 최소값을 문의한다. 다음으로 꼭지점 같은 자국 활동자료를 지닌 삼각형 활동자료 분포도를 그린다. 동 꼭지점은 95% 신뢰구간 극한값이 활동자료에 적절한 극한값과 연계된다. 만약 활동자료 값이 극한 상한값보다 크면, 활동자료는 극한 상한값을 활용한다. 만약 활동자료가 극한 하한값보다 작으면, 배출계수는 극한 하한값을 취한다. 전문가판정을 제공하는 전문가, 의사결정 기준, 고려되지 않은 불확도에 기여한 요인들이 문서화되어야 하고 유지되어야 한다. 5) 자료량과 표준오차가 미 제공되고, 전문가판단이 가능하지 않을 경우(Box 2-3)는 온실가스 배출추계를 위한 위원회에서 결정된 아래의 기준값이 활용된다.

〈표 8-6-1〉 온실가스배출추계법 위원회에의 수립된 표본통계의 불확도

	기본통계량	기타통계량
표본조사	50%	100%

기본통계, 승인통계, 보고통계 값은 GPG2000 및 기타 참고자료를 기준으로 온실가스 배출추계법 위원회에 의해 정립되고 기본통계 이외의 통계는 기본통계의 2배로 감안한다.

통계값이 표본조사에 기반하지 않을 경우 1) 계통(체계)오차가 추정 시(Box 3) 그 추정치가 활용된다. 계통오차가 계산되어지는 기법은 문서화 및 유지되어야 한다. 2) 계통오차가 비추정 시, 상호검사(크로스체킹)이 가능할 경우(Box 2-3), 기타 통계치와 적절한 통계치를 비교해 볼 수 있으나, 불확도는 GPG A1.2.3의 Section 1.7에 기술된 Case 2에서 시현되고 있는 동일 기법으로 측정한다. 3) 계통오차가 미 추정, 상호검사가 불가능, 전문가판단이 가능할 경우(Box 2-2), 마찬가지로 자료와 표본편차가 없을 경우에는 전문가

판단(Box 2-2)을 활용한다. 4) 계통오차가 미 추정, 상호검사가 불가능, 전문가 판단이 불가능(Box 2-1)한 경우 온실가스배출추계기법 위원회에 의해 수립된 아래의 표준안이 활용되어야 한다.

〈표 8-6-2〉 위원회에 의해 수립된 표본통계량에 대한 불확도

	기본통계량	기타통계량
전수조사(no rounding)	5%	10%
전수조사(rounding)	20%	40%

활동자료가 가공된 통계값 활용 시에 활동자료와 평가 개별요소별로 분리하고 활동자료가 아래 표와 같이 세부적으로 분석되어야 한다.

- 배출원 : 화학 산업에서 나프타(납사) 산화로부터 발생하는 이산화 탄소
 - 확률방정식
- 적절한 방출원에 대한 활동자료
- = 나프타(납사)소비량 × 20%(잔여 80%는 생산품에 고정) - 암모니아 원재료

분해 후에 통계치 개별 요소들은 section 7.1.3.4.a.에 제시된 불확도 산정법을 통해 측정되어야 한다. 요소혼합은 합산법과 조합법으로 개별 요소들을 조합하고, 불확도를 평가한다. 합산법(Rule A) : 불확도가 합산에 의해 조합되는 경우 활동자료는 A1+A2로 표현된다.

$$U_{A-total} = \frac{\sqrt{(U_{A1} \times A_1)^2 + (U_{A2} \times A_2)^2}}{A_1 + A_2}$$

U_{A_n} : Uncertainty of element An(%)

배출계수와 활동자료 불확도가 완료되면 배출량 불확도를 평가하여야 한다. 배출량 불확도 평가는 우선 개별 배출자료원들로부터 배출원 측정 불확도를 확보하고 1) 배출계수 및 활동자료를 통한 배출을 추정한다. 이 때 GPG2000의 Tier 1에 주어진 품목조합 방정식을 활용하여야 한다. 본 방정식은 이전 세션의 배출계수 평가결과에 기반하여 마련된 것이다. 그리고 개별 방출원으로부터의 배출불확도를 평가한다.

$$U_{Ei} = \sqrt{U_{EFi}^2 + U_{Ai}^2}$$

U_{Ei} : Uncertainty of emissions from emission source i (%)

U_{EFi} : Uncertainty of element An(%)

U_{Ai} : Uncertainty of element An(%)

2) 배출에 대한 실질측정은 배출이 실측에 의해 도출 시, 배출불확도는 “7.1.3.3 배출계수불확도평가”에 따라서 직접 평가되어야 한다. 총 배출량 불확도 산정은 총 온실가스 배출원 불확도를 평가하기 위해 다중 배출원 배출불확도 평가 결과를 조합한다. 다중 배출원 불확도는 GPG2000 Tier 1 수준에 제공된 상품조합방정식을 활용하여 조합되어야 한다.

$$U_{Total} = \frac{\sqrt{(U_1 \times E_1)^2 + (U_2 \times E_2)^2 + \dots + (U_n \times E_n)^2}}{E_1 + E_2 + \dots + E_n}$$

U_{Total} : Uncertainty of total Japanese emissions(%)

U_i : Uncertainty of emission source i (%)

E_i : Emissions from emission source i (Gg)

다중 자료원 배출량 불확도 조합 시 단지 배출 불확도만이 지시되어야 하고, 배출계수와 활동자료 양자의 불확도 조합은 시행되지 말아야 한다. 불확도평가의 마지막 단계는 2006년도 온실가스배출추계기법 위원회에서 불확도평가결과로 수행된다. 2008년도, 일본 총 순배출은 약 대략 12억300만 톤이다. 총 순배출에 대한 불확도는 2%로 평가되고 총 순배출 추세에 도입된 불확도는 1%로 평가된다. 상세한 불확도 평가결과는 다음의 표와 같다.

〈표 8-6-3〉 일본 총 순 배출 불확도

IPCC 카테고리	온실가스	배출/감축		조합 불확도 (%)	순위	총국가배출량 조합 불확도 (%)	순위
		A	%	B		C	
1.A 연료연소 (이산화탄소)	이산화탄소	1,151,985.3	89.9	1	10	0.76	2
1.A 연료연소 (고정:메탄, 아산화질소)	메탄, 아산화질소	5,060.9	0.4	27	3	0.11	8
1.A 연료연소 (이동:메탄, 아산화질소)	메탄, 아산화질소	2,962.5	0.2	355	1	0.87	1
1.B 연료 탈루배출	이산화탄소, 메탄, 아산화질소	446.4	0.0	19	5	0.01	9
2. 산업공정 (이산화탄소, 메탄, 아산화질소)	이산화탄소, 메탄, 아산화질소	51,667.6	4.0	7	7	0.32	7
2. 산업공정 (수소불화, 과불화, 육불화황)	수소불화, 과불화, 육불화황	23,642.7	1.8	26	4	0.52	4
3. 솔벤트 및 기타상품사용	아산화질소	160.4	0.0	5	9	0.00	10
4. 농업	메탄, 아산화질소	25,844.9	2.0	18	6	0.38	6
5. LULUCF	이산화탄소, 메탄, 아산화질소	-78,807.9	-6.1	6	8	0.42	5
6. 폐기물	이산화탄소, 메탄, 아산화질소	20,058.0	1.6	32	2	0.53	3
총순배출량	(D) 1,203,020.6			(E) 2			

1) $C = A \times B / D$

2) $E = \sqrt{C_1^2 + C_2^2 + \dots}$

제5절 시사점 및 결론

동 연구를 수행하면서 통계전문기관으로써의 역할이 크게 두 가지(불확도, 활동자료 개선)를 중심으로 강화될 필요성에 암묵적인 동의가 있음을 인지할 수 있었다. 첫 번째로 불확도에 대한 체계적인 접근을 위해서는 불확도 계량화의 구체적인 국가시안 작성 마련이 필요하다는 점이다.

주요 현황 및 문제점을 살펴보면 불확도 9개 원인(완전성, 모형, 자료결여, 대표성결여, 표본추출오차, 측정오차, 편향, 잘못된 분류, 누락자료)별 파악이 필요하고, 이들은 3개 전략(개념화, 실증적, 전문가판단)을 통해서 계량화되어야 하나 실질적으로 구체화가 부족하다는 점이다. 또한, 온실가스 5개 분야 중 하나인 산업공정 부문 불확도 산정에서 크게 4가지 유형으로 불확도가 산정되고 있음을 알 수 있었고, 특히 반도체 및 디스플레이 공정의 경우 배출계수 불확도 50%를 활동자료에 접목하거나 10% 초과 예상 등으로 명기한 경우도 볼 수 있었다.

불확도 계량화에 대한 개선의견으로는 원인을 명확히 규명하기 위해 불확도 산정에 필요한 기초자료 즉 전수/표본, 표본크기, 사업체별 생산량(월/년), 오차값 제시 여부, 전문가 판단값 제공여부, 체계오차 산정여부, 비산정 시 기준값 등에 대한 사전정보 입수가 절실히 요구된다. 원인과 정보가 파악되면 계량화 문제가 생기는 바, 계량화 구조도(tree)를 만들고 사례별로 계량화(예를 들어 일본사례의 7 box)할 필요가 있다고 판단된다. 계량화의 우선순위는 1순위 제공된 표준오차, 2순위 계산된 표준오차, 3순위 전문가위원회 판단(일본사례), 4순위 GPG 디폴트(default) 상한값 등을 제시해 보는 것도 방안이 되리라고 사료된다. 다만, 전문가판단위원회에서 제시하는 불확도 값 등에 대하여는 향후 보다 심층적인 논의가 필요하리라고 사료된다. 효율적인 모델로, 핀란드식의 세부화된 불확도 산정기법과 일본식의 구체화된 불확도 산정지침을 벤치마킹해 볼 필요가 있다. 이를 통해 한국에 맞는 시산법 및 불확도 산정 매뉴얼에 대한 연구도 지속적으로 진행되어야 된다고 판단된다. 또한 불확도를 종합적으로 조정 관리할 수 있는 국가거버넌스 구축도 의무감축국 이전에 필요하다고 사료된다.

두 번째로 활동자료개선 또한 작성기관 및 총괄기관에서 요구하는 바가 높은 분야라고 판단된다. 특히 불확도 계량화를 실질적으로 가능하게 하는 것이 정확한 활동자료라는 점은 쉽게 공감할 수 있는 부문이다.

주요 현황 및 문제점 파악을 위해, 동 연구기간 중 물리적으로 짧은 기간이었지만 공동 참가하게 된 인벤토리 검증과정은 매우 유익하였다. 검증과정 중 검증 기준의 하나인 비교가능성(comparability)이라는 측면에서 통계청 DB와 인벤토리 자료 시계열 매칭이 되지 않는 점은 하나의 한계로 인식되었다. 보다 구체적으로 산업공정분야를 중심으로 언급하자면 현재 활동자료원이 협회, 개별사업체 협조요청, 통계청 광업·제조업조사

통해 확보되고 있음을 알 수 있었다. 이 중 협회를 통한 자료입수가 90% 이상을 차지하고 나머지 개별 사업장 직접조사, 통계청 자료 활용 순으로 나타났다. 이러한 과정에서 작성기관은 통계법상에 명시된 통계조정력 및 자료입수권이 부재한 이유로 자료 확보가 용이하지 않음을 알게 되었다. 또한, 국가 에너지/환경부문 통계 개선 계획(안) 수립을 위한 기획력 등을 발휘하는데 한계가 발생한다는 점도 드러났다. 예로 광공업제조업통계조사 품목별조사결과와 온실가스 배출 사업체 숫자가 매칭되지 않은 사례를 살펴볼 수 있었고, CRF(Common Report Format)작성 시 NE(Not Estimated)로 표현해야 함에도 NO(Not Occuring)로 작성된 표기(notatation)도 이러한 조정력의 부재로부터 발생하는 문제로 규명될 수 있다. 또한 AD 출처가 명확하지 않아 자료개선 및 검증 시 어려움이 많은 것도 문제점으로 지적될 수 있었다.

개선의견으로는 향후 가칭 “온실가스 검증 DB-산업분류체계와 IPCC분류체계를 연계 고려”를 구축하면 시계열상 이상치(Outlier)를 쉽게 발견할 수 있고 검증의 일반원칙인 일관성(consistency)이 높아질 수 있으리라는 점과, IPCC G/L에서 국가승인통계를 활동자료로 활용 시 가장 신뢰성 및 공정성을 높이 평가한다는 근거에서 볼 때 활동자료별 국가통계화의 노력이 필요하리라고 사료된다. 참고로, 현재 산업공정 분야의 자료제공 협회현황을 살펴보면 한국양회공업협회(크링크), 한국석회석가공업협동조합(석회석, 백운석), 석유화학공업협회(에틸렌, 에틸렌다이클로라이드, 스티렌), 정밀화학산업진흥회(HFC), 무역협회(할로카본 순수입량), 반도체산업협회(가스구입량 등), 디스플레이산업협회, 중전기기업체(SF6) 등이고 이중 통계청의 작성승인을 받은 협회는 철강협회와 무역협회뿐이었다. 특히, 사업체(암모니아, 질산, 아디프산)를 직접 조사하는 경우 품질관리(Q/C) 등의 절차를 거치기가 매우 어려운 실정이라는 점을 감안하면 “다배출 소수사업장 통계조사”를 개발하여 국가통계시스템으로 흡수하는 것도 대안이 될 수 있다고 사료된다. 또한 현재 연간단위로 조사되고 있는 광업·제조업 조사는 협회회원사와 조사대상이 겹치므로 부가조사를 개발하여 온실가스인벤토리 구축에 필요한 활동자료를 확보해보는 것도 아이디어로 제시해 볼 수 있겠다. 다만 이는 시계열유지를 강조하는 국제가이드라인을 반영하여 충분한 검토 후에 시행되어야 하리라고 판단된다. 특히, 협회자료를 계속 이용할 경우 활동자료의 정도와 체계적 관리를 위해서는 협회가 통계작성기관이 될 수 있도록 지원해주는 것을 생각해 볼 수 있다. 상기 문제점에서 주지한 AD 출처는 가능하면 상세하게 명기하도록 하는 것도 반드시 필요한 사항이다. 예를 들어 작성기관(기관명, 협회, 사업체, 작성자명)과 작성방법(전수/표본 여부, 승인여부, 가공, 추계, 보고, 실험, 인용여부 등), 출처(보고서, DB, 인터넷, 논문명 등)를 명기함이 요구되고 상세분석 및 활동자료 개선을 위해서는 NIR(National Inventory Report)에 대상업체 정보 및 업체별 세부자료 확보가 제도적으로 작성될 수 있도록 유도하여야 할 것이다.

마지막으로 동 연구가 국가온실가스배출통계 불확도 산출방법에 대한 기초연구라는 점을 강조하면서 보다 심화된 연구가 향후 이루어지기를 기대해본다.

참고문헌

- 김현선 등 (2008), 매립지 온실가스 배출량의 민감도 및 불확도 평가, 서울대 보건대학원
- 김철한 등 (2008), '국가온실가스 통계목록 작성을 위한 IPCC 가이드라인에서의 불확실성 추정',
2008 대한산업공학회/한국경영과학회 춘계공동학술대회
- 도승희(2009), 제6차 아시아지역 온실가스 인벤토리 워크숍 국외출장 결과보고
- 문상용, 측정불확도의 개념 및 추정방법
- 박영근(2010), 크리스탈볼 소개, 이레테크
- 환경부·환경관리공단, 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인
- KTL(한국사업기술연구원), 측정 불확도, 정밀측정교육자료
- IPCC(2005), Guidance Notes for Lead Authors of the IPCC Fourth Assessment Report On
Addressing Uncertainties
- 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- Good Practice Guidance 2000
- 측정불확도 표현지침서(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1993)