

제3장

국가 온실가스 배출통계 활동자료 불확도 산정방안 연구

- 개념 및 통계적 방법을 활용한 산정방법 중심으로 -

김경미

제1절 서론

1. 연구개요

국가 온실가스 인벤토리 작성은 기후변화에 대응하기 위한 정책수립의 기본 자료가 된다. 우리나라의 국가 온실가스 인벤토리는 부문별(에너지, 산업공정, 농축산, 폐기물, LULUCF¹⁾)로 각 관장기관(지식경제부, 국토해양부, 농림수산식품부, 환경부)들이 부문별 온실가스 인벤토리를 작성하여 환경부 온실가스종합정보센터에서 이를 취합·검증 후 최종 보고하는 절차를 가진다. 2010년 공표된 저탄소 녹색성장 기본법 제45조 및 동법 시행령 제36조은 이에 관한 내용을 명시하고 있다.

국가 온실가스 인벤토리 작성 시 신뢰성 확보를 위해서는 무엇보다 정확한 불확도(uncertainty)의 산정이 우선되어야 한다. 불확도는 국가 온실가스 인벤토리에서 산정된 배출량 및 흡수량이 얼마만큼의 불확실성을 가지는지 즉, 얼마나 신뢰할만한지 계량화하여 나타내는 방법이다. UNFCCC²⁾는 투명성(Transparency), 정확성(Accuracy), 일관성(Consistency), 비교가능성(Comparability), 완전성(completeness)의 원칙이 최대한 구현될 수 있도록 인벤토리를 작성할 것을 권고하고 있는데 정확한 불확도의 산정은 다섯 가지 원칙의 전반에 모두 영향을 미친다. 뿐만 아니라 불확도는 국가 온실가스 인벤토리 내의 부문별 비교도 가능하게 한다.

1) Land-Use, Land-Use Change and Forestry : 토지이용 및 토지이용으로 인한 산림의 변화
2) United Nations Framework Convention on Climate Change



지난해 1990-2008년 국가온실가스 인벤토리 보고서가 작성되었다. 그러나 온실가스 인벤토리 산정 시, 기본 자료원이 되는 활동자료(activity data)는 물론 배출계수(emission factor)에 대한 불확도가 파악되지 않아 대부분 제공하지 않거나 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change: 기후변화에 관한 정부 간 패널)의 기본값을 그대로 적용하는 수준이었다. 또한 온실가스 인벤토리의 불확도에 대한 명확한 개념조차 정립되어 있지 않은 실정이다. 이에 국가 온실가스 인벤토리의 불확도 산정에 관한 심도 깊은 연구가 필요하다.

2. 연구범위

본 연구는 국가 온실가스 인벤토리의 불확도에 대한 개념 정립을 위해 IPCC에서 정의하고 있는 온실가스 인벤토리 불확도의 개념, 일반적으로 널리 알려진 ISO에서 정의하는 측정불확도의 개념, 통계학의 오차의 개념, 목표관리지침의 사업체 분야에서 정의하는 불확도 개념 등을 살펴볼 것이다. 이를 통해 국가 온실가스 인벤토리 불확도의 개념정의 및 산정 방향을 수립하고자 한다.

또한 불확도를 산정하는 방법 중 통계적 방법을 활용한 산정에 관해 알아 볼 것이다. 통계학의 신뢰구간이 불확도에 활용되는 범위, 분포와 확률밀도함수(PDF: Probability Density Function)를 이용한 방법, 통계적 방법이 측정불확도의 산정에 활용되는 부분, 측정불확도와와의 비교 등을 중심으로 알아보하고자 한다.

국가 온실가스 인벤토리의 각 부문별 2006 IPCC³⁾ 가이드라인에 권고된 불확도의 산정방법 및 제시된 기본(default)값에 대해 살펴보고 시사점을 도출하고자 한다.

한편, 국가 온실가스 인벤토리는 온실가스 배출량과 흡수량에 대한 내용으로 구성되는데 이는 배출계수와 활동자료를 바탕으로 계산된다. 마찬가지로 국가 온실가스 인벤토리의 불확도는 배출계수의 불확도와 활동자료의 불확도의 조합으로 산정된다. 본 연구는 이 중 활동자료의 불확도를 중심으로 한다.

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

제2절 불확도의 개념

1. 2006 IPCC 가이드라인에서 정의하는 국가 온실가스 인벤토리의 불확도

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 온실가스 인벤토리 작성 전반의 기본이 되는 가이드라인을 작성하였다. 각 국가의 온실가스 배출량과 흡수량에 대한 신뢰할 수 있는 산정값을 산출할 수 있도록 이에 필요한 다양한 변수와 배출계수의 기본값 및 기본 방법론 제공한다. 뿐만 아니라 국가 간의 적합성, 비교가능성, 일관성을 유지하면서 구체적인 국가별 방법론을 사용할 수 있도록 큰 틀을 제시한다. 2006 IPCC 가이드라인은 1996 IPCC 가이드라인을 바탕으로 우수실행보고서(Good Practice Guidance)에 근거하여 더욱 개선된 방법으로 작성되었으며 새로운 배출원과 가스에 대해서도 추가적으로 다루고 있다. 2006 IPCC 가이드라인의 제1권 제3장에서는 불확도의 산정에 관한 가이드라인을 제시하고 있는데 그 정의는 아래와 같다.

<표 3-1> 2006 IPCC 가이드라인의 불확도 정의

가능한 값들의 범위와 가능성을 특징짓는 확률밀도함수(PDF)로서 기술될 수 있는, 변수의 진실한 값에 관한 지식의 결여. 불확도는 기본 프로세스 및 추론기법에 관한 지식뿐만 아니라 적용 가능한 자료의 질과 양에 좌우되는, 분석자의 지식상태에 좌우된다.

자료 : 환경부·환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인

(원문) 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.

자료 : IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

2006 IPCC 가이드라인의 제1장 제3절 ‘불확도’에서는 불확도 분석 전반에 관해 대략적 가이드라인을 제시하고 있다. 이에 따르면 국가 온실가스 인벤토리의 불확도 산정 시 각각의 인벤토리 불확도를 산정하고 이를 조합해 전체 인벤토리의 불확도를 산정할 것



을 권하고 있다. 즉 인벤토리(특정한 부문의 배출 산정치, 배출계수, 활동자료)에 이용되는 개별적인 변수의 불확도를 결정한 후 각각의 요소 불확도(component uncertainties)를 총 인벤토리로 통합하고 추계 불확도를 결정한다. 2006 IPCC 가이드라인은 각각의 불확도를 조합하는 방법에 대해서는 예시와 함께 그 방법론에 대해 비교적 자세히 설명되어 있는 반면 각각의 요소 불확도 즉 활동자료의 불확도, 배출계수의 불확도를 산정하는 방법론에 대한 구체적인 설명은 나와 있지 않다.

불확도를 발생시키는 원인에 대해서는 8가지 광범위한 원인들을 명시하고 이를 고려해 불확도를 산정해야 한다고 제시하고 있다. 가이드라인이 명시하는 8가지 원인은 ① 완전성의 결여 ②모형 ③자료의 결여 ④자료의 대표성 결여 ⑤통계적 무작위 표본추출 오차 ⑥측정 오차 ⑦잘못된 보고 내지 잘못된 분류 ⑧누락된 자료이다.

불확도를 계량화 하는 방법으로는 크게 4가지 기법들을 제안하는데 ①모형의 불확도 ②실증적 자료의 통계적 분석 ③전문가 판단을 부호화 하는 방법 ④확률밀도함수 선택 시 Good Practice Guidance를 참조하는 방법이다. 측정된 배출자료에서의 불확도 산정 시에는 자료의 대표성과 편위의 잠재성, 측정의 정밀도와 정확도, 표본 크기 및 측정에서의 개체 간 변동 등을 고려하도록 권고한다.

불확도를 조합하는 방법은 크게 2가지 접근법을 제시하는데 ①오차의 증식(가산, 감산, 승산) ②몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)이다. 각각의 방법에 대한 자세한 방법은 ‘2006 IPCC 가이드라인’이나 ‘국가온실가스배출통계 불확도 산출 방법론 기초연구’(2010, 박윤영 등)를 참조하기 바란다.

2. ISO⁴⁾에서 정의하는 측정 불확도

측정과 표준화에 관한 전반에 대한 가이드라인을 제시하는 국제표준화기구 ISO에서는 국제 측정학 용어집(ISO/IEC⁵⁾ Guide VIM: International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology)과 측정불확도 표현지침(GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)에서 측정에서의 불확도를 다음과 같이 정의하고 있다.

4) International Organization for Standardization : 국제 표준화 기구

5) International Electrotechnical Commission, 국제전기기술위원회

〈표 3-2〉 ISO의 측정불확도 정의

측정결과에 관련하여 **측정량을 합리적으로 추정된 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터**

자료 : 국제 측정학 용어집 · 측정불확도 표현지침

(원문) Parameter associated with the result of a measurement, that characterizes the **dispersion** of the values that could reasonably be attributed to the measurand.

자료 : ISO/IEC Guide VIM · GUM

정의에서 말하는 측정량을 합리적으로 추정된 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터는 표준편차 또는 명시된 신뢰구간의 반너비 등이 될 수 있다.

측정불확도는 일반적으로 여러 성분으로 구성되어 있으며 크게 두 가지 부류로 나눌 수 있다. 한 부류는 여러 번 측정된 결과의 **통계적인 분포로부터 값이 결정되는 것**으로 실험 표준편차로 나타낼 수 있고 다른 부류는 마찬가지로 표준편차로 나타낼 수 있지만, **경험이나 다른 정보에 근거하여 가정한 확률분포로부터 그 값이 결정되는 것**이다. 일반적으로 전자를 A형 불확도, 후자를 B형 불확도라 부른다.

〈표 3-3〉 측정불확도의 종류

▮ 불확도의 A형 평가(Type A evaluation of uncertainty)

- 일련의 관측값을 **통계적으로 분석하여 불확도를 구하는 방법**

▮ 불확도의 B형 평가(Type B evaluation of uncertainty)

- **알려진 정보나 전문가의 판단 등 통계적 분석이 아닌 방법으로 불확도를 구하는 방법**

통계적인 방법을 이용하는 A형 불확도는 그 산정방법에 따라 다시 합성표준불확도(combined standard uncertainty)와 확장불확도(expanded uncertainty)로 나눌 수 있다.



〈표 3-4〉 측정결과에 따른 측정불확도의 분류

▮ 합성표준불확도(combined standard uncertainty)

- 측정결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때 이 측정결과의 표준불확도를 말한다. 합성표준불확도는 각 입력량의 변화가 측정결과에 미치는 영향에 따라 가중된 분산과 공분산의 합의 양의 제곱근과 같다.

▮ 확장불확도(expanded uncertainty)

- 측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 **측정결과 주위의 어떤 구간을 정의하는 양**.
- 이 때 부분은 **포함확률 또는 구간의 신뢰수준**을 뜻한다.
- 특정한 신뢰수준을 확장불확도에 의해 정의되는 구간과 관련짓기 위해서는 측정결과와 그 합성표준불확도로 결정되는 확률분포에 관한 명백하거나 함축적인 가정이 요구된다. 구간에 부여할 수 있는 신뢰수준은 그 가정이 성립되는 범위에서만 알 수 있다.

한편, 측정결과는 측정량의 값에 대한 최선의 추정값이라 할 수 있으며 여러 가지 원인으로 부터 오는 다양한 불확도 성분이 모두 분산의 원인이 되는데, 사용된 표준기와 표준물질 보정 등에 관련된 성분처럼 계통효과에서 기인하는 성분도 포함된다.

3. 통계학의 오차

통계학에서는 오차(error)라는 개념을 쓰고 있는데 통계학의 오차는 자료의 **추정값(estimate) 또는 측정결과(result of measurement)와 참값(true value)의 차이**를 의미한다. 오차의 개념은 데이터의 종류에 따라 구분된다. 데이터가 조사 자료(survey data)인 경우와 측정 자료(measurement data)인 경우로 구분하여 설명할 수 있다. 조사 자료의 오차는 표본오차(sampling error)와 비표본오차(non-sampling error)로 구분되며 측정 자료의 오차는 계통오차(systematic error)와 우연오차(random error)로 구분된다.

〈표 3-5〉 조사 자료(survey data)의 오차

▮ 표본오차(sampling error)

- 모집단의 일부분인 표본에서 얻어진 결과를 일반화하는 과정에서 발생하는 오차이다. 표본조사에서는 필연적으로 생기는 오차이며 표본오차의 크기는 조절할 수 있으며, 정교한 확률 구조에 따라 표본을 추출하면 조사결과에 대한 신뢰도를 평가할 수 있다.

▮ 비표본오차(non-sampling error)

- 무응답, 적절치 않은 추출틀(sample frame)의 사용, 조사원의 미숙, 응답자의 거짓 말 등으로 인한 오차, 자료의 입력 및 처리 과정에서 발생하는 오차 등을 의미한다.

〈표 3-6〉 측정 자료(measurement data)의 오차

▮ 계통오차(systematic error, determinate error)

- 실험과정이나 실험기기의 결함으로부터 유발되는 오차로 같은 방법으로 실험 시 재 발생할 수밖에 없는 필연적 오차이다. 발견(detection)과 보정(correction)이 가능한 오차로 항상 양의 값이거나 음의 값이며 방향성이 존재한다. 계기오차, 환경오차, 개인오차가 이에 포함된다.

▮ 우연오차(random error, indeterminate error)

- 측정 시 제어하지 않은 혹은 제어할 수 없는 변수에 의해 발생하는 오차이다. 측정 시 언제나 발생하지만 보정할 수는 없으며 방향성이 없다.

조사 자료의 표본오차는 측정 자료의 계통오차와, 비표본오차는 우연오차와 같은 맥락을 가진다.

▮ 오차 vs 불확도

오차와 불확도의 개념을 비교해 살펴보면 다음과 같다.



❧ 오차, error

오차의 개념은 참값과 추정값의 차이값으로 그 의미는 명확하나, 현실적으로 참값(true value)을 알기 힘들다는 점에서 정확한 값을 산정하기에 어려움이 있다.

❧ 불확도, uncertainty

불확도는 참값의 초점을 둔 오차의 개념과는 달리 기준값의 개념을 바탕으로 측정된 값의 분산특성을 나타낸 값이다. 일반적으로 통계학적 분산개념이 영어로 variance 인 반면, 불확도는 dispersion의 개념이다.

오차와 불확도는 개념적으로는 그 차이를 가지나, 통계적으로 정량화하는 부분에서의 계산방법은 동일하다. 측정불확도는 A형 평가와 B형 평가로 나뉘는데, 특히 통계적인 계산방법을 이용하는 A형 평가의 경우 통계학의 오차의 한계를 계산하는 방법과 동일한 과정이다. 제 3장 「통계를 활용한 불확도」에서 이에 대해 구체적으로 비교하여 정리할 것이다.

4. 목표관리지침의 사업체 분야 불확도 개념 및 산정방법

국가 온실가스 배출통계의 불확도 개념을 정립하기 위해 국가 온실가스 배출통계의 작성과 더불어 온실가스 인벤토리의 한 축인 온실가스·에너지 목표관리제의 사업체 분야의 불확도 개념 및 산정방법을 살펴보았다. 「온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침 제정안」의 별표 16 불확도 산정 절차 및 방법(제46조 제2항 관련)에서 정의하는 불확도의 개념은 아래와 같다.

〈표 3-7〉 목표관리지침의 불확도 정의

측정값들의 범위와 상대적 분포가능성을 기술할 수 있는, 진실한 값에 대한 상대적인 측정오차를 의미하며 측정량을 합리적으로 추정된 분산특성을 나타내는 파라미터이다. 불확도의 산정은 완전한 온실가스 인벤토리 산정의 본질적인 요소이며 불확도 분석을 통하여 인5벤토리의 정확도를 향상시키기 위한 실질적인 품질관리 활동을 실시하는데 기여한다.

자료 : 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침 제정안

〈표 3-8〉 목표관리지침의 불확도 유형

<p>▮ 모형불확도(Model Uncertainty)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 배출량을 산정하기 위한 산정방법론(모형)의 복잡성이 큰 현실 시스템을 정확하게 반영하지 못하여 발생하는 오류
<p>▮ 매개변수불확도(Parameter Uncertainty)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 배출량을 산정하기 위한 활동자료, 배출계수 등 매개변수의 측정 및 정량화와 관련한 불확도

〈표 3-9〉 목표관리지침의 불확도 산정절차

1단계 (사전검토)	2단계 (표준불확도 추정)	3단계 (불확도조합-승산법)	4단계 (불확도조합-가감법)
<ul style="list-style-type: none"> • 매개변수 분류 및 검토 • 불확도 원인규명 (전문가 검토 등) 	<ul style="list-style-type: none"> • 측정횟수에 따른 확률분포값 결정 • 측정값에 대한 표준편차, 평균, 표준불확도 추정 	<ul style="list-style-type: none"> • 활동자료, 배출계수 등 표준불확도를 활용하여 배출량의 불확도를 계산 	<ul style="list-style-type: none"> • 개별시설 배출량의 불확도를 합산하여 사업장 총 배출량 불확도를 계산

목표관리지침의 불확도는 모형불확도와 매개변수불확도로 그 유형을 구분하고 있으며 불확도의 산정절차를 제시하고 있다. 사업체의 경우 데이터의 형태가 **측정데이터**인 경우가 대부분으로 **측정불확도의 개념 및 산정방법**을 그대로 가져온 것을 알 수 있다.

5. 국가 온실가스 인벤토리 불확도의 개념정의 및 산정방향

국가 온실가스 인벤토리 불확도의 정의에 있어서는 **측정불확도의 개념을 그대로 준용할 수 있을 것이라** 판단된다. ISO에서 정의하는 불확도의 개념인 ‘측정결과에 관련하여 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터’로 국가 온실가스 인벤토리의 불확도로 정의할 수 있을 것이다.

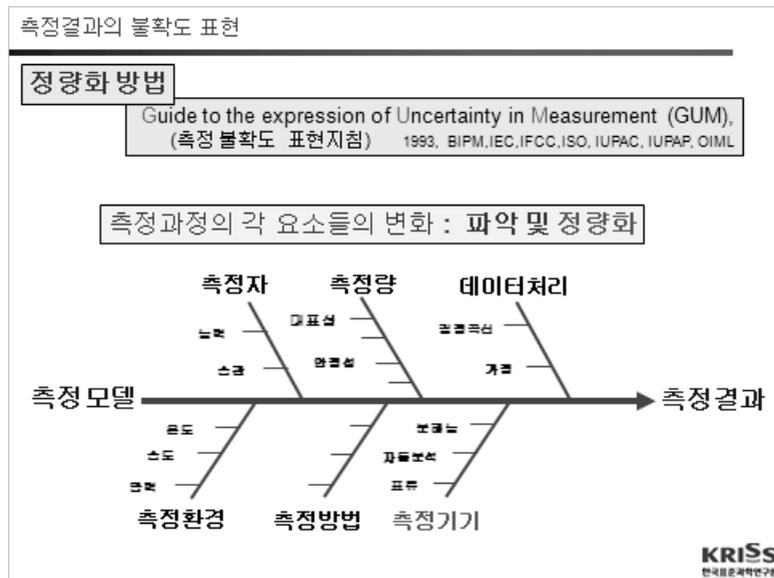
통계적 부분의 산정 방법은 제 3장 「통계를 활용한 불확도」와 같이 정리할 수 있을 것이다. 측정불확도의 A형 평가와 같은 개념으로 측정불확도가 **측정 자료(measurement data)에 한정하여 설명**하고 있는 데에 비해, 국가 온실가스 인벤토리 활동



자료(activity data)의 경우 조사 자료(survey data)가 다수 포함되어 있으므로 조사 자료까지 확장하여 통계적 불확도의 산정 부분을 정리하였다.

통계적 부분을 제외한 부분에 대한 산정방법의 개발이 필요하다. 국가 온실가스 인벤토리를 구성하는 활동자료를 자료형태에 따라 구분하고, 통계적으로 계산할 수 있는 자료 이외의 자료에 대한 산정방법의 개발이 필요하다. 활동자료 중 큰 비중을 차지하는 행정자료 및 협회자료 등에 대한 불확도의 산정방법이 우선되어야 할 것으로 보인다.

측정불확도에서 B형 평가로 설명되는 부분에 대해 국가 온실가스 인벤토리에 적합한 산정방법에 대한 가이드라인을 제시가 필요하다. 아래의 측정 자료에서 측정과정의 각 요소들에 관해 나열한 fish-bone diagram처럼 각각을 어떻게 정량화 할 것인가 하는 가이드라인이 필요하다.



[그림 3-1] 측정과정을 정량화 하는 fish-bone 다이어그램

〈표 3-10〉 측정불확도에서 일반적으로 고려하는 불확도의 원인

- (1) 측정량에 대한 불완전한 정의
- (2) 측정량의 정의에 대한 불완전한 실현
- (3) 대표성이 없는 표본추출
- (4) 측정환경의 효과에 대한 지식 부족 및 환경조건에 대한 불완전한 측정
- (5) 아날로그 기기에서의 개인적인 판독 차이
- (6) 기기의 분해능과 검출 한계
- (7) 측정표준과 표준물질의 부정확한 값
- (8) 외부자료에서 인용하여 데이터분석에 사용한 상수와 파라미터의 부정확한 값
- (9) 측정방법과 측정과정에서 사용되는 근사값과 여러 가지 가정
- (10) 외관상 같은 조건이지만 반복적인 측정에서 나타나는 변동

제3절 통계를 활용한 불확도

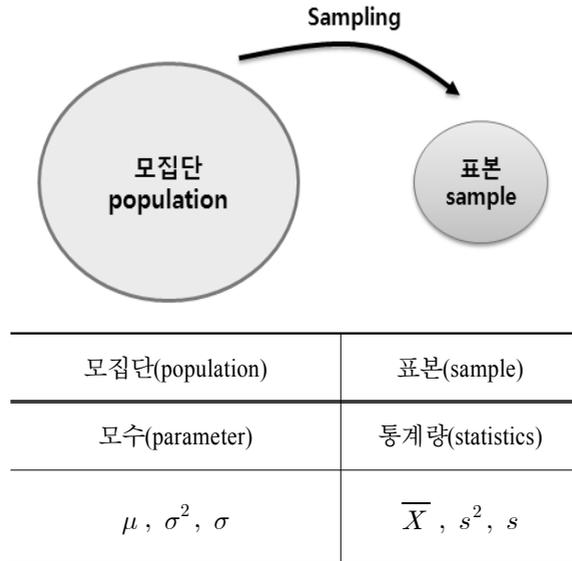
불확도를 통계적 개념으로 정량화할 수 있는 부분은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. **표본데이터를 신뢰구간의 오차의 한계 개념으로 정량화** 하는 부분과 **측정데이터를 분포를 통해 그 분산의 정도를 정량화** 하는 부분이다.

1. 표본자료(sampling data) - Simple Random Sampling 가정

국가온실가스배출통계를 구성하는 활동자료(activity data) 중 표본을 이용한 조사데이터와 측정데이터의 경우, 통계적인 불확도의 계산이 가능하다. 이때의 불확도는 통계적 의미의 **신뢰수준을 이용한 구간추정, 오차의 한계의 개념이 활용**된다. 이에 통계학적 정의 및 계산방법과 이를 이용한 불확도 산정에 관해 설명하고자 한다.

먼저 통계학에서 말하는 신뢰구간에 대해 평균의 신뢰구간을 중심으로 각각의 조건에 따라 이를 설명하고 그와 비교해 어떤 부분이 불확도에 활용되어 쓰이는지를 언급하겠다. 또한 일반적으로 통용되고 있는 불확도의 개념인 국제표준화기구(ISO: International Organization for Standardization)를 바탕으로 한 측정불확도 표현지침(GUM: Guide to the expression of Uncertainty in Measurement)에서 정의되는 측정불확도와 더불어 설명하고 이에 대해 비교하고 정리하고자 한다.

가. 통계학의 신뢰구간



[그림 3-2] 기본개념

- ⌘ 모집단(population) : 그 특성에 대해 연구, 조사하고자 하는 모든 원소를 말한다. 조사대상인 모집단을 목표모집단(target population)이라고 부른다.
- ⌘ 표본(sample) : 조사를 위해 모집단에서 취해진 일부를 표본이라고 한다.
- ⌘ 모수(parameter) : 모집단의 특성을 나타내는 값으로 대표적으로 모평균, 모분산, 모표준편차 등이 있다.

$$\cdot \text{모평균 } \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\cdot \text{모분산 } \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad \cdot \text{모표준편차 } \sigma = \sqrt{\sigma^2}$$



☞ 통계량(statistics) : 표본집단의 특성을 나타내는 값으로 대표적으로 표본평균, 표본분산, 표본표준편차 등이 있다.

· 표본평균 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

· 표본분산 $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ · 표본표준편차 $s = \sqrt{s^2}$

☞ 전수조사(census) : 모집단의 모든 원소를 포함하는 조사

☞ 표본조사(sample survey) : 모집단의 일부로부터 정보를 얻는 방법의 조사

표본조사의 주요한 목적은 표본으로부터 얻은 정보를 이용하여 관심 있는 **모수를 추정**하는데 있다.

☞ 추정량(estimator) : 표본으로 추출된 조사 단위들을 조사하여 얻은 관측 자료에 의하여 모수를 추정하는데 사용되는 공식

☞ 추정값(estimate) : 이 추정량에 관측값들을 대입하여 구한 값

모든 조사에서는 표본오차(sampling error)와 비표본오차(non-sampling error)가 발생한다. 표본오차는 표본에서 얻어진 결과를 모집단의 특성으로 일반화하는 과정에서 발생하는 오차, 표본조사에서는 필연적으로 생기는 오차이다. 비표본오차는 표본오차 이외의 오차로 무응답, 조사원의 미숙, 응답자의 거짓말, 자료의 입력 및 처리 과정에서 발생하는 오차 등을 말한다. 일반적으로 **표본오차**는 추정량의 표준편차인 **표준오차**로 설명된다.



※ 표준오차(standard error) : 추정량의 표준편차

$$\cdot s.e.(\bar{X}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\cdot \widehat{s.e.}(\bar{X}) = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

구간추정 시 이러한 표준오차를 이용하여 신뢰구간을 추정한다. 신뢰수준 95%의 의미는 반복적으로 μ 에 대한 구간추정을 행할 때, 이들 중 대략 95%에 해당하는 신뢰구간들이 참값 μ 를 포함한다는 뜻이다.

<표 3-11> 평균의 95% 신뢰구간(CI: Confidence Interval)

- (σ 를 아는 경우)

$$\left(\bar{X} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

- (σ 를 모르는 경우)

$$n > 30 \quad \left(\bar{X} - z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \right)$$

$$n < 30 \quad \left(\bar{X} - t_{(n-1)} \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{X} + t_{(n-1)} \frac{s}{\sqrt{n}} \right)$$

표준오차에 표준정규분포나 t분포의 임계값을 곱한 값, 신뢰구간에서 추정량 \bar{X} 에 더하고 빼지는 항을 오차의 한계라고 부른다.

나. 불확도

표본을 이용한 조사데이터나 측정데이터의 경우, 불확도는 95% 신뢰구간의 오차의 한계를 추정값으로 나누고 100을 곱한 값으로 나타낼 수 있다. 위와 같이 평균을 추정값으로 하는 경우 데이터의 불확도 $u(x)$ 는 아래와 같이 계산 될 수 있다.

〈표 3-12〉 평균의 불확도(uncertainty) $u(x)$

- (σ 를 아는 경우)

$$u(x) = \frac{z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}}{\bar{X}} \times 100 (\%)$$

- (σ 를 모르는 경우)

$$n > 30 \quad u(x) = \frac{z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}}{\bar{X}} \times 100 (\%)$$

$$n < 30 \quad u(x) = \frac{t_{(n-1)} \frac{s}{\sqrt{n}}}{\bar{X}} \times 100 (\%)$$

다. 측정불확도와의 비교

측정불확도에서는 표본데이터의 불확도를 산정함에 있어 표준불확도는 통계학의 표준오차의 개념을 이용하여, 확장불확도는 오차의 한계를 이용하여 정의하고 있다. 비교 가능한 값으로 환산하기 위해 추정값으로 나누어 100을 곱하여 백분율로 사용하고 있다.

✎ 표준불확도 : 표준오차를 추정값으로 나눈 값

✎ 확장불확도 : 오차의 한계를 추정값으로 나눈 값

표본조사의 경우 측정불확도에서 정의하는 표준불확도는 표준오차를 추정값으로 나누어 계산하고 있는데 이는 상대표준오차의 개념이다.



2. 측정데이터 중 분포를 아는 경우 확률밀도함수(PDF)를 이용한 산정

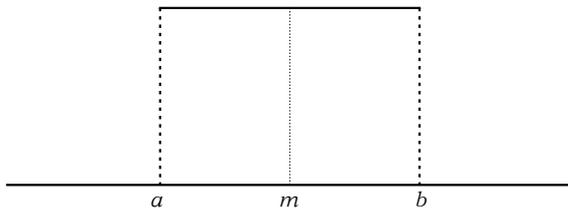
측정데이터의 경우 데이터의 분포를 알 때, 확률밀도함수(PDF: Probability Density Function)를 이용하여 불확도를 산정할 수 있다. 분포의 편차를 이용하여 표준불확도를 산정한다. 분포의 표준편차값을 불확도 $u(x)$ 로 산정하며, 이를 추정값으로 나누어 백분율로 계산한 값을 표준불확도라 한다. 이때의 표준불확도는 표준편차를 추정값으로 나누어 계산하는데 이는 통계학의 변동계수(coefficient of variation)의 개념이다.

Examples

다양한 분포에 따른

☞ 확률밀도함수(pdf), 분산(variance), 불확도 $u(x)$

□ 균등분포 or 일양분포(Uniform distribution)



$$\text{pdf } f(x) = \frac{1}{b-a} \text{ where } a < x < b$$

$$E(X) = \frac{a+b}{2} \quad \text{Var}(X) = \frac{(b-a)^2}{12}$$

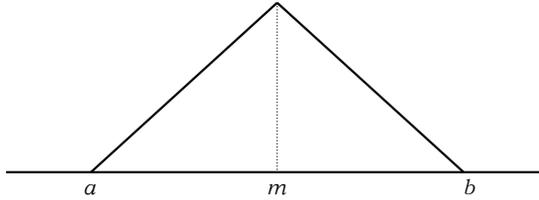
$$u(x) = \sqrt{\text{Var}(X)}$$

※ 만너비가 a일 때 불확도 $u(x)$

$$b = -a$$

$$u(x) = \sqrt{\frac{(b-a)^2}{12}} = \sqrt{\frac{(-2a)^2}{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

□ 삼각형분포(Triangular distribution)



$$\text{pdf } f(x) = \begin{cases} \frac{4}{(b-a)^2}(x-a) & , a \leq x < m \\ \frac{4}{(b-a)^2}(b-x) & , m \leq x < b \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases}$$

$$E(X) = \frac{a+b}{2} \quad \text{Var}(X) = \frac{(b-a)^2}{24}$$

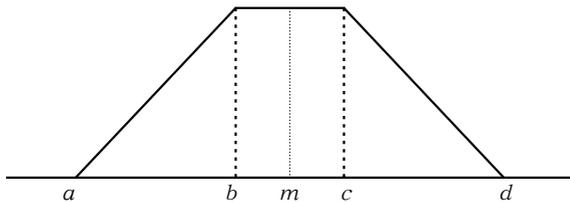
$$u(x) = \sqrt{\text{Var}(X)}$$

※ 반너비가 a 일 때 불확도 $u(x)$

$$b = -a$$

$$u(x) = \sqrt{\frac{(b-a)^2}{24}} = \sqrt{\frac{(-2a)^2}{24}} = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

□ 사다리꼴분포(Trapezoidal distribution)



$$\text{pdf } f(x) = \begin{cases} \frac{2}{(d-a)(b-a)k}(x-a) & , a \leq x < b \\ \frac{2}{(d-a)k} & , b \leq x < c \\ \frac{2}{(d-a)(d-c)k}(d-x) & , c \leq x < d \end{cases} \quad k = \frac{d+c-b-a}{d-a}$$

$$E(X) = \frac{(d^2 + c^2 - b^2 - a^2 + cd - ab)}{3(d+c-b-a)}$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(X) &= \frac{1}{18(d+c-b-a)} \\ &\times [3(d^3 + c^3 - b^3 - a^3 - a^2b - ab^2 + c^2d + cd^2) \\ &\quad - \frac{2[(d+c-b-a)(d+c+b+a) + ab - cd]^2}{(d+c-b-a)}] \end{aligned}$$

$$u(x) = \sqrt{\text{Var}(X)}$$

※ 최빈값 m 을 중심으로 좌우대칭이면,

$$E(X) = m \left(= \frac{a+d}{2} = \frac{b+c}{2} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(X) &= \frac{(d-a)^2}{24} (1+k^2) \\ &\left(= \frac{[d^3 + c^3 - 4m^3 + (6m^2 + cd)(d+c) - 4m(d^2 + c^2 + cd)]}{6(d+c-2m)} \right) \end{aligned}$$

※ 반너비가 a 일 때 불확도 $u(x)$

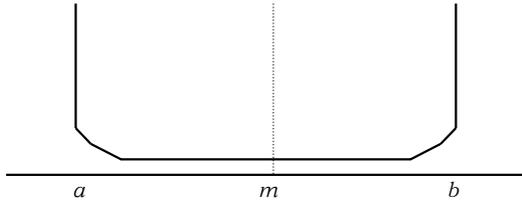
$$d = -a$$

$$u(x) = \sqrt{\frac{(d-a)^2}{24}(1+k^2)} = \sqrt{\frac{(-2a)^2}{24}(1+k^2)} = \frac{a}{\sqrt{6}} \sqrt{1+k^2}$$



□ Arcsine (U-shaped) distribution

($\alpha = \beta = 1/2$ 인 베타분포의 special case)



pdf $\frac{1}{\pi \sqrt{x(1-x)}}$

$E(X) = \frac{a+b}{2}$ $Var(X) = \frac{(b-a)^2}{8}$

$u(x) = \sqrt{Var(X)}$

※ 반너비가 a일 때 불확도 $u(x)$

$b = -a$, $u(x) = \sqrt{\frac{(b-a)^2}{8}} = \sqrt{\frac{(-2a)^2}{8}} = \frac{a}{\sqrt{2}}$

□ 정규분포(Normal distribution)

pdf $\frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$

$E(X) = \mu$ $Var(X) = \sigma^2$

$u(x) = \sqrt{Var(X)}$

□ t분포(t-distribution)

$$\text{pdf} \quad \frac{\Gamma(\frac{\nu+1}{2})}{\sqrt{\nu\pi} \Gamma(\frac{\nu}{2})} \left(1 + \frac{x^2}{\nu}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}}$$

$$E(X) = 0 \quad \text{Var}(X) = \begin{cases} \frac{\nu}{\nu-2} & , \nu > 2 \\ \infty & , 1 < \nu \leq 2 \end{cases}$$

$$u(x) = \sqrt{\text{Var}(X)}$$

□ 지수분포(Exponential distribution)

$$\text{pdf} \quad \lambda e^{-\lambda x}$$

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Var}(X) = \frac{1}{\lambda^2}$$

$$u(x) = \sqrt{\text{Var}(X)}$$

□ 감마분포(Gamma distribution)

$$\text{pdf} \quad x^{k-1} \frac{e^{-\frac{x}{\theta}}}{\Gamma(k)\theta^k}$$

$$E(X) = k\theta \quad \text{Var}(X) = k\theta^2$$

$$u(x) = \sqrt{\text{Var}(X)}$$



□ 베타분포(Beta distribution)

$$\text{pdf} = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}$$

$$E(X) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad \text{Var}(X) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}$$

$$u(x) = \sqrt{\text{Var}(X)}$$

3. 예제

✎ 계산 예제

<표 3-13> 표본데이터(표본추출방법 - simple random sampling)

582	613	485	510	521	564	554	581	513	542
564	598	572	564	529	486	458	475	498	492
495	48	465	473	472	456	485	496	475	496

• 평균의 불확도?

표본데이터이며 n=30인 경우,

$$u(x) = \frac{z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}}{\bar{X}} \times 100 (\%) \text{ 를 이용.}$$

sol) 95% 신뢰구간 $z_{\alpha/2} = 1.96$,

$$s = 45.39 \text{ ,}$$

$$n = 30 \text{ ,}$$

$$\bar{X} = 516.63$$

$$u(x) = \frac{1.96 \times \frac{45.39}{\sqrt{30}}}{516.63} \times 100 (\%) = 3.15\%$$

실무 예제

온실가스 인벤토리 축산부문에서 **장내발효 CH₄ 배출량**의 경우,
 활동자료 : **가축동향조사**의 젓소, 한·육우, 돼지, 닭의 사육두수를 이용

〈표 3-14〉 가축동향조사 표본추출방법 (2010년 조사 기준)

- 모집단 : 2005년 인구주택총조사 조사구 중 조사가축사육 가구가 있는 전국의 31,691조사구
 - 축종별로 조사구내 사육두수를 총 사육두수로 나눈 사육비율로 변환한 다음 축종별 최대값을 단일변수로 하고, 2002년 설계된 층의 개수를 최대한도로 하여 사육비율의 최대값을 일정비율로 나누어 층화
 - 네이만 할당법에 따라 목표 상대오차에 대해 축종별로 필요한 층별 표본수를 계산한 후 그 중 최대값을 해당 층의 표본수로 정함
 - 층의 개수는 위의 절차를 층의 개수를 달리한 모든 경우에 대해 모의실험을 한 후 필요표본수가 가장 작게 나오는 경우를 선정
(시지역은 6개, 도지역은 8개 이내)
 - 시도별로 층 내에서 난수를 발생하여 최종 표본 추출(3,608개 조사구)
- ※ 목표오차 : 전국 3%, 시도 5%

자료 : 통계청, 가축동향조사 메타 데이터

위의 경우 전국 3%, 시도 5%의 목표오차로 표본추출 하여 추정하므로 통계청에서 제시한 목표오차를 그대로 불확도로 사용할 수 있다.



제4절 2006 IPCC 부문별 불확도 가이드라인

본 절의 내용은 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)의 지구환경전략 연구기관(IGES: Institute for Global Environmental Strategies)에서 발행한 「2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories」를 우리나라 환경부·환경관리공단에서 번역한 「국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인」의 제2권 에너지, 제3권 산업공정 및 제품 사용, 제4권 농업, 산림 및 기타 토지 이용, 제5권 폐기물 중 활동자료 불확도와 관련된 내용을 요약하였음을 밝혀둔다.

1. 에너지

에너지 부문에서 배출 산정치를 위해 필요한 활동자료는 국가적 및 국제적 에너지 밸런스 및 에너지 통계로부터 주로 도출된다. 이러한 자료는 일반적으로 정확한 것으로 생각된다. 연료 연소 통계 내지 에너지 밸런스에 관한 불확도 정보는 책임 있는 국내 또는 국제기관으로부터 얻을 수 있을 것이다. 추가적인 자료가 이용가능하지 않다면 권고되는 기본적인 불확도 범위는 $\pm 5\%$ 인 것으로 가정한다.

에너지 밸런스에서 연료의 공급으로부터 파생되는 자료와 연료의 수요로부터 파생되는 자료간의 차이를 계산하여 통계적 차이(statistical difference)를 판단할 수 있다. 연료 연소 자료의 불확도는 통계적 차이에 의해 제안된 불확도보다 일반적으로 높을 것이라는 사고방식에 기초하여 기본 불확도 범위를 권고하고 있다. 화석연료에 비해 연료로서 바이오매스에 대한 자료는 데이터처리가 잘되어 있지 않기 때문에, 바이오매스 연료의 불확도 범위는 상당히 클 것이다. $\pm 50\%$ 의 값이 권고된다.

가. 고정 연소

직접적인 측정 혹은 의무적 보고로부터 얻어지는 대규모 배출원에서 연소된 연료의 통계치는 중심 산정치(central estimate)의 3% 이내일 것이다. 일부 에너지 집약적 산업에 대해 연소 자료는 보다 정확할 것이다. 불확도는 조사 설계(survey design)의 질 및 이용된 표본의 크기에 의존하기 때문에, 표본조사 설계자와 상의하여 주된 하위부문에 대한 연료 소비의 불확도를 산정하는 것은 우수실행(good practice)이다.

활동자료의 전반적인 불확도는 계통오차와 우연오차 모두의 조합이다. 대부분의 선진국들은 연료 공급 및 이송의 밸런스 표를 제공하며 이는 체계적 오차에 관한 검사를 제공한다. 이러한 상황에서 계통오차는 작을 것이며, 전문가들은 조합된 두 가지 오차로부터 발생하는 불확도는 대부분의 선진국들에 대해 $\pm 5\%$ 범위 내에 있을 것이라고 믿는



다. 덜 개발된 에너지 자료 시스템을 가진 국가들에 대해서는 대략 $\pm 10\%$ 일 것이다. 비공식적 활동(Informal activities)은 불확도를 일부 국가의 일부 부문에서 50% 정도까지 증가시킬 것이다.

인벤토리 작성자가 가능하다면 전문가 판단 및/혹은 통계적 분석을 이용하여 국가 고유의 불확도를 개발하는 것은 우수실행이다.

〈표 3-15〉 고정연소 활동자료와 관련된 불확도 등급

부문	잘 개발된 통계 시스템		덜 개발된 통계 시스템	
	조사	외삽법	조사	외삽법
주요 활동 전력 및 열 생산	1% 미만	3~5%	1~2%	5~10%
상업용, 공공, 가정 연소	3~5%	5~10%	10~15%	15~25%
산업용 연소 (에너지 집약적 산업)	2~3%	3~5%	2~3%	5~10%
산업용 연소 (기타)	3~5%	5~10%	10~15%	15~20%
소규모 배출원의 바이오매스	10~30%	20~40%	30~60%	60~100%

인벤토리 작성자는 어떤 유형의 통계 시스템이 국가적 상황을 가장 잘 기술하는지 판단해야 한다.

자료 : 환경부·환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인 제2권 에너지

나. 이동 연소

일반적으로 약 $\pm 5\%$ 의 불확도를 가지며 원인은 다음과 같다.

- 국가적 에너지 조사와 자료 회수에서의 불확도
- 기록되지 않은 국경 변경
- 연료 분류상의 실수
- 차량 대수 분류상의 실수
- 완전성의 부족
- 한 세트의 활동자료에서 다른 자료
(연료 소비 자료 \Rightarrow 인/톤·km 또는 그 반대)로의 변환에 따른 불확도

다. 탈루성 배출

1) 지하 탄광

석탄 생산량: 국가에 고유한 톤수는 1~2%로 알려질 것이지만, 석탄 자료가 가용하지 않다면, 판매 가능한 석탄 생산 자료로부터 전환될 때 불확도는 $\pm 5\%$ 정도로 증가할 것이다. 자료는 또한 일반적으로 5~10% 사이의 수준에서 나타나며 매우 정확히 결정되지는 않는 수분함유량에 의해 영향을 받는다.

측정의 불확도와 별도로, 여기에서 고려되지 않은 통계 데이터베이스의 성격에 의해 도입되는 추가적인 불확도가 존재할 수 있다. 통제된 광산과 비통제된 광산이 혼합되어 있는 국가에서 활동자료는 $\pm 10\%$ 의 불확도를 가질 것이다.

2) 석유 및 천연가스

불확도의 원인에는 다음이 포함된다.

- 측정 오차
- 외삽 오차
- 선택된 산정기법의 고유한 불확도
- 배출원 모집단 및 활동자료에 관한 누락 내지 불완전한 정보
- 배출원에서의 시간적 및 계절적 변화에 관한 나쁜 이해
- 카테고리 및 배출원 정의의 혼란 내지 비일관성으로 인한 과대 내지 과소 계산
- 활동자료 내지 배출계수의 잘못된 적용
- 보고된 활동자료에서의 오차
- 중간 이전 작업 및 재처리 활동의 계산 누락
- 통제 장치들의 유효성 차이, 시간에 따른 성과의 잠재적 악화 및 통제 수단에 관한 계산 누락 배출계수와 활동자료에서의 불확도 평가에 관한 지침이 아래의 하위 절에서 제시된다.

이 절에서 인용되는 백분율은 전문가 판단에 기초하며, 중심 산정치 주위로 95% 신뢰구간을 계산하는 것을 목적으로 한다. 가스 혼합물은 일반적으로 개별적인 구성요소에 대해 $\pm 5\%$ 이내까지 정확하다. 흐름율(Flow rates)은 전형적으로 판매량에 대해 $\pm 3\%$ 이하, 다른 양에 대해 $\pm 15\%$ 이상의 오차를 가진다. 생산 통계 내지 처분 분석(disposition



analysis)은 (예를 들어, 용어의 차이 및 이러한 자료를 합산할 때의 잠재적 오차로 인해) 이것이 동일한 원래의 측정결과에 기초할지라도 서로 다른 보고기관 간에 일치가 되지 않는다. 이러한 불일치는 자료에서의 불확도에 관한 지표로 이용된다. 원래의 측정결과에 고유한 편의(bias)가 존재한다면 추가적인 불확도가 존재할 것이다(예를 들어, 판매용 계량기는 종종 고객에 유리하도록 설계되며, 액체 취급 시스템은 증발성 손실로 인해 음의 편의를 가질 것이다). 무작위 계량과 계산 오차는 산업에 대해 통합될 때 사소한 것으로 가정될 수 있을 것이다.

주요 시설(예를 들어, 가스공장, 정유공장 및 이전용 압축 사업소)의 개수는 일반적으로 오차가 거의 없는 것으로 알려져 있을 것이다(예를 들어 5% 미만). 이 개수에 오차가 발생하는 경우에 이는 일반적으로 특정 기간 동안 건설되는 새로운 시설 및 중지되는 구식 시설의 수에 관한 일부 불확도 때문이다.

각 현장에서 장비의 유형 및 양 뿐만 아니라, 유정 시설, 소규모 유전 설비 및 가스 수집용 압축 사업소의 개수는 훨씬 덜 정확히 알려져 있을 것이다 (예를 들어, 적어도 $\pm 25\%$ 의 불확도 이상) 개별적인 통계조치로 인한 배출 저감의 산정치는 고려되는 하위 시스템 내지 배출원의 수에 따라 작은 퍼센트에서 $\pm 25\%$ 내에서 정확할 것이다.

2. 산업공정

가. 광물산업

1) 시멘트 생산

시멘트 생산의 불확도는 활동자료의 불확도가 크며 클링커에 대한 배출계수에 관련된 불확도는 작은 편이다. 시멘트 생산 부문 활동자료 불확도는 클링커 생산 자료가 시멘트 생산에서 산정되는 경우 대략 35%의 값을 가진다. Tier 2에서 클링커 생산 톤수에 대한 자료를 이용 가능할 경우 불확도는 약 1~2%이다. 국가 총계를 사용하는 대신에 개별적인 생산자로부터 자료를 수집하는 것은 불확도를 감소시킨다. CKD를 제외하고 Tier 3에 관련된 불확도의 가장 큰 원인은 탄산염 종류의 확인(1~5%)과 원료의 무게에 관련된 불확도이다. 배출은 탄산염보다 훨씬 작지만, Tier 2 산정치에서 CKD에서 발생하는 배출의 산정과 관련된 상당한 불확도가 존재할 것이고 공장에서 킬른으로 재활용되지 못하는 CKD 무게를 측정하지 못하거나 공장의 CKD 집진기가 부족하다면 Tier 3에서도 그렇다. 공장에 대해 CKD의 무게 및 구성이 알려져 있지 않은 경우에 불확도는 보다 높을 것이다.

여러 계수 및/내지 클링커와 시멘트의 제조 단계에 대한 근사적인 불확도를 산정하기 위한 시도가 이루어졌다. 아래 표에서 불확도의 기본값이 제시되며 이는 근사적인 요

소 불확실성이다. 즉 이는 클링커 제조에서 특정한 단계 내지 활동과 관련된 불확도이다. 이를 참조해 각 요소 불확도를 조합해 시멘트(클링커) 생산에 대한 불확도를 산정하기를 권고한다. 불확도 값에 대해 범위가 주어지는 경우에 국가에 고유한 또는 공장에 고유한 환경이 또 다른 값이 사용되어야 하는 경우가 아니면 중간범위(mid-range)가 사용되어야 한다.

〈표 3-16〉 시멘트 생산에 대한 기본 불확도 값

불확도*	설명	Tier
화학분석/성분		
2~7%	포틀랜드 시멘트에서 95% 클링커 계수를 가정	1
1~2%	CaO를 확인하기 위한 클링커의 화학분석	2
3~8%	클링커에서 65% CaO를 가정	2
1~3%	100% CaO가 CaCO ₃ 에서 발생한다고 가정 (회분 내지 슬래그 재료가 사용되지만 이를 고려하지 않는다면 불확도는 보다 커짐)	2
1%	클링커가 되는 탄산염의 100% 소성을 가정	2, 3
1~3%	케로켄 (내지 기타 비탄산염 탄소) 확인	3
1~3%	탄산염 함유량 (질량) 및 유형에 관련된 전반적인 화학분석	3
1~5%	탄산염 족이 100% CaCO ₃ 라는 가정	3
생산 자료		
1~2%	보고된 (공장 수준의) 시멘트 생산 자료	1
35%	국가 산출물이 100% 포틀랜드 시멘트라는 가정	1
10%	산정된 국가 (내지 통합된 공장) 생산 자료 (국가 통계)의 사용	1, 2
가변적	시멘트 내지 클링커의 보고된 반올림 무게 자료의 사용 (예를 들어, 큰 단위의 국가 수준의 보고); 불확도는 마지막 유효숫자의 일 단위이다	1, 2
1~2%	클링커 생산의 계량 내지 계산, 완전한 보고를 가정한다.	2
1~3%	원재료의 공장 수준의 계량에 관한 불확도	3
CKD		

25~35%	CKD에서 발생하는 배출은 클링커 생산에서 발생하는 공정 관련 배출의 2%라는 Default 가정. 불확도는 클링커의 33~50%가 재활용되지 않는다고 가정한다. 재활용이 되지 않거나 소성 비율이 50%를 크게 초과하면 불확도는 50% 이상이 될 수 있다.	
1%	CKD의 원래 성분이 미가공 혼합물과 동일하다는 가정	2, 3
1%	CKD의 (소성되거나 남아있는) 모든 탄산염이 CaCO ₃ 라는 가정	2, 3
10~35%	CKD의 % 소성의 산정	2, 3
20~80%	CKD의 100% 소성의 가정	2, 3
60%까지	CKD의 50% 소성의 가정	2, 3
5%	집진기에 의해 포집된 CKD를 계량함	2, 3
1~3%	킬른에 반환된 집진기에 포집된 CKD를 계량함	2, 3
5~10%	킬른에 재활용되지 않은 집진기에 포집된 CKD를 계량함(다른 처분)	2, 3
10~15%	킬른으로 자동적으로 수송된 CKD 무게의 산정	2, 3
20~30%	회수 내지 세척되지 않은 경우에 CKD 무게의 산정	2, 3
수입/수출		
10%	클링커에 대한 거래 자료 (관세 코드가 정확히 분리되고 시멘트가 포함되지 않음)	1
수입 톤수의 50%	소비를 위한 순 클링커 수입을 차감하지 않는 것에서 발생하는 과대 산정 (이는 CO ₂ 가 근사적으로 클링커 무게의 절반이기 때문이다)	1

*산정치는 전문가 판단에 기초함

자료 : 환경부 · 환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인 제3권 산업공정 및 제품 사용

2) 석회 생산

석회생산 부문에서도 배출계수의 불확도에 비해 활동자료의 불확도가 매우 크다. 비 판매용 석회 생산의 누락은 상당한 과소산정을 초래할 것이다. 수화석회에 대한 수정은 전형적으로 추가적인 불확도를 초래한다. CKD에 대해 위에서 기술한 것처럼, 생산된 LKD 질량 및 LKD의 소성 정도를 계량하는데 관련된 상당한 불확도가 존재한다. LKD의 산정에 관련된 불확도는 CKD와 관련된 불확도 이상일 것이다. 아래 표의 기본값 불확도에 대해 범위가 주어지는 경우 일반적으로 중간범위가 사용되어야 한다.



〈표 3-17〉 석회 생산에서 발생하는 CO₂ 배출 산정에 대한 기본 불확도 값

불확도	설명	Tier
4~8%	석회에서 평균적인 CaO를 가정할 때의 불확도	1, 2
2%	고칼슘석회의 배출계수	1, 2
2%	고토석회의 배출계수	1, 2
15%	수경성석회의 배출계수	1, 2
5%	수화석회에 대한 수정	1, 2
	비시장성 석회 생산이 산정되지 않은 경우의 가능한 대규모 오차	1, 2, 3
1~2%	공장 수준의 석회 생산 자료의 불확도, 공장은 일반적으로 이보다 나은 산출을 측정하지 않는다. 완전한 보고를 가정한다.	2
	LKD에 대한 수정	2, 3
1~3%	석회석으로부터 100% 탄산염 배출원을 가정할 때의 오차	3
1~3%	원료의 공장 수준의 계량에 관한 불확도	3

출처 : 전문가 판단에 기초

자료 : 환경부·환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인 제3권 산업공정 및 제품 사용

3) 유리 생산

시멘트와 석회 생산에서처럼, Tier 3 접근법에서 원료의 가중치 부여에 관련된 불확도는 대략 1~3%이다. 일본 탄산염을 포함하는 원료가 시설로 들어와서 먼지(즉, 결코 소성이 되지 않음)로 손실되는 것이 가능하지만 이 양은 사소한 것으로 가정된다.

Tier 1 및 Tier 2에 대해 유리생산 자료는 전형적으로 매우 정확히 측정된다($\pm 5\%$). 위에서 언급된 것처럼 인벤토리 작성자는 어디서 활동자료를 질량으로 이용할 수 없고 대신에 단위(ex. 병) 내지 영역(ex. m³)으로 이용 가능한지 주의를 기울여야 한다. 활동자료가 질량으로 전환되어야 한다면 이는 추가적인 불확도를 초래할 것이다.

4) 탄산염의 기타 공정 사용

탄산염 소비가 적절한 소비 부문/산업에 할당된다고 가정할 때 주어진 산업에 대한 탄산염의 가중치 부여에 관련된 불확도는 1~3%이다. 탄산염 함유량 및 확인에 관련된 전반적인 화학 분석의 불확도는 또한 1~3%이다. 석회석 대 백운석의 85%/15%의 기본값



분할의 가정을 포함한 Tier 2 및 Tier 1 방법의 사용과 관련된 불확도는 국가의 고유한 상황에 따라 달라진다.

다양한 최종 사용이 여러 산업에서 존재하고, 일부는 배출적이고 다른 것은 그렇지 않기 때문에, 석회석 및 백운석 사용에 대한 활동자료는 수집하기 어려울 것이다. 국가 통계는 ‘기타 미지정 사용’이라는 최종 사용 카테고리를 포함할 것이고, ‘기타 미지정 사용’을 적절한 소비 부문에 할당하는 것은 어려울 것이다. 모든 사용이 적절히 확인될 수 없는 경우 불확도는 증가할 것이다.

나. 화학 산업

1) 암모니아 생산

활동자료가 공장에서 획득될 때, 불확도 산정치는 생산자로부터 얻을 수 있다. 이러한 활동자료는 거의 $\pm 2\%$ 정도의 낮은 불확도를 가진다. 이것은 연료사용과 암모니아 생산, 재생된 CO_2 대한 불확도 산정치를 포함하고 있을 것이다. 통계청에서 획득한 자료에는 대개 불확도가 나와 있지 않다. 그래서 샘플오차에 대한 정보를 얻을 수 있는 지에 대해 통계청의 자문을 구하는 것도 좋다. 통계청이 암모니아 생산시설로 이루어진 모집단에서 자료를 수집할 경우, 국가적 통계치의 불확도는 공장수준의 협의에서 만들어진 불확도와 다를 것이라 예상되지 않는다. 불확도 값을 다른 출처에서 얻을 수 없으면 $\pm 5\%$ 정도의 기본값이 사용될 수도 있다.

2) 질산 생산

대개 암모니아 생산의 경우와 동일하게 판단할 수 있으며 불확도 값을 다른 출처에서 얻을 수 없으면 $\pm 2\%$ 정도의 기본값이 사용될 수도 있다. 불확도를 줄이기 위해 활동자료가 100% HNO_3 에 대한 것임을 확실히 하는 것도 우수실행(good practice)이 될 것이다.

3) 아디프산 생산

잠재적으로 생산되는 N_2O 배출은 다른 N_2O 의 배출원보다도 아디프산 생산 시 훨씬 많아진다. 적절히 관리되고 보정된 모니터링 시스템의 측정치는 $\pm 5\%$, 아디프산 공장의 수가 적다면 불확도는 공장 수준의 자료 즉, $\pm 2\%$ 와 같다.

4) 카프로락탐 생산

다른 화학 산업과 동일하게 판단되며 불확도 값을 다른 출처에서 얻을 수 없으면 $\pm 2\%$ 정도의 기본값이 사용될 수도 있다.

5) 카바이드 생산

다른 화학 산업과 동일하게 판단되며 $\pm 5\%$ 정도의 기본값이 사용될 수도 있다.

6) 이산화티타늄 생산

다른 화학 산업과 동일하게 판단되며 불확도 값을 다른 출처에서 얻을 수 없으면 $\pm 5\%$ 정도의 기본값이 사용될 수도 있다.

7) 소다회 생산

다른 화학 산업과 동일하게 판단되며 불확도 값을 다른 출처에서 얻을 수 없으면 $\pm 5\%$ 정도의 기본값이 사용될 수도 있다.

8) 석유화학제품과 기본블랙 생산

가) 에틸렌

에틸렌 생산에 관한 활동자료의 불확도는 증기 분해 공정 원료(에탄, 나프타 등)와 공정 산물(에틸렌, 프로필렌 등)의 유형과 양, 특성을 결정하는데 있는 어려움과 연관되어 있다. 원료 소비와 생산물의 제조는 에틸렌 생산에 대한 원료의 소비나 증기 분해 공정에서의 어떤 예외도 없이 단지 연간 단위로 국가 에너지 통계나 상품 통계로만 보고될 수도 있다. 에틸렌 생산에 대한 탄소 수지 계산을 수행하는 것은 고유원료의 소비와 증기 분해공정의 고유 산물 생산에 대한 활동자료의 유용성에 좌우된다. 만일 국가 연간 에틸렌 생산에 대한 활동자료만 있다면 국가지역에 대한 기본 원료를 이용, 기본배출계수가 적용될 것이다. 이 경우에 원료 분석은 기본 원료에 대한 수율 계수표를 적용시켜 이루어진다. 그러나 원료에 대한 배출계수와 수율 계수의 다양성을 고려하면 고유 원료 소비 자료의 부재가 배출 산정과 원료 분석에 불확도를 증가시킬 수 있는 것이다. 만일 고유 원료 소비에 대한 활동자료가 있다면 그래서 별도의 배출산정과 원료분석이 각 원료에 대해 수행된다면, 불확도는 감소한다. 그러나 이상적으로 고유 원료 소비와 소유산물 생산에 대해 활동자료가 존재한다면 더 높은 Tier 탄소수지 계산식이 이루어질 수 있



다. 불확도의 또 다른 원인은 석유화학 공장에서 (인접한) 석유 정제소로의 증기 분해 산물의 역행과 다른 부산물에 의한 에너지 회수와 연소의 흐름을 포함한 증기 분해 방식 에틸렌 공정 유형의 다른 세부 사항을 결정하는 어려움과 연관되어 있다. 정제소로의 역행에 대한 활동자료의 부재는 원료 분석의 불확도를 더할 것이다.

나) 이염화에틸렌과 염화비닐 모노머

이염화에틸렌에 대한 불확도의 원인은 생산에 적용된 고유 공정을 결정하고 원료 소비에 대한 활동자료를 결정하는 데 있어서의 어려움을 포함한다. 만일 이염화에틸렌 생산에 대한 활동자료만 이용가능하다면 배출 산정은 balanced process 산물 수율 계수와 공정에 대한 기본배출계수를 사용해 수행될 수 있다. 그러나 염화산소화 공정과 직 산화 공정, balanced process에 대한 배출계수와 수율계수의 다양성을 고려하면 공정에 의한 고유 에틸렌 원료소비 자료의 부재는 배출 산정에 중요한 불확도를 초래한다.

다) 에틸렌 옥사이드

에틸렌 옥사이드 생산에 있어서 불확도의 근원은, 에틸렌 옥사이드 생산에 대한 에틸렌 원료의 소비 활동자료를 결정하는데 있어서의 어려움이다. 만일 에틸렌 소비 활동자료가 없으면 배출계수 접근만이 가능하다. 만일 국가 연간 에틸렌 옥사이드 생산량에 대한 활동자료가 있다면 기본 산물 수율 계수가 가정되어 그의 배출계수가 적용될 것이다. 이런 경우에 원료 분석은 기본 산물 수율 계수를 적용하여 수행된다. 그러나 보고된 생산물의 수율 계수와 에틸렌 공정에 대한 배출계수의 다양성을 고려하면, 고유 에틸렌 원료소비 자료의 부재는 배출 산정에 중요한 불확도를 더할 것이다.

라) 아크릴로니트릴

아크릴로니트릴 생산에 있어서 불확도의 근원은 생산을 위한 고유 공정 유형을 결정하는데 있어서의 어려움과 공정에서 프로필렌 원료 소비에 대한 활동자료, 아크릴로니트릴과 아세토니트릴의 생산에 대한 활동자료를 결정하는데 있어서의 어려움을 말한다. 만일 아크릴로니트릴의 활동자료만 구할 수 있다면, 배출 산정은 기본 공정 구성(아세토니트릴 회수가 없다고 가정하는)과 그에 대한 배출계수를 사용하여 수행할 수 있다. 그러나 아세토니트릴이 공정에서 회수되지 않는다는 가정은 배출과 원료 계산에 의미 있는 불확도를 부여해 아크릴로니트릴 공정에서 배출의 과대산정과 원료 흐름의 과소산정을 초래할 수 있다. 아크릴로니트릴 생산 공정에서의 아크릴로니트릴과 아세토니트릴에 대한 국가 생산 활동자료는 회수된 아세토니트릴로부터 국가 아크릴로니트릴 생산의 배

율에 대한 공정 고유의 배출계수를 적용하도록 할 수 있다. 그러나 이상적인 것은 아크릴로니트릴 생산 공정에 의한 프로필렌 소비와 아크릴로니트릴, 아세토니트릴, 시안화수소의 생산에 대한 활동자료로 더 높은 Tier 방법을 적용시켜 불확도를 줄이는 것이다.

마) 카본 블랙

카본 블랙 생산의 활동자료에서 불확도는 카본 블랙 공정에서 일차와 이차 원료의 유형, 양, 특성을 결정하는 어려움과 카본 블랙 생산에 사용된 공정의 유형을 결정하는 어려움, 공정에서 카본 블랙 생산의 특성을 결정하는 어려움에서 나온다. 일차와 이차 원료 소비와 카본 블랙 생산은 연간 에너지 통계와 산업 통계상에 생산 공정상의 어떤 손실도 없는 것으로 가정되어 보고될 수도 있다. 대부분 세계적 카본 블랙의 생산은 노(furnace) 블랙 공정에 의한 것으로, 만일 원료 소비 활성 자료가 없다면 모든 카본 블랙 생산은 불확도를 야기하지 않고 노(furnace) 블랙 공정으로 가정될 수 있다.

또한 일차 카본 블랙 원료 소비에 대한 활동자료가 유용하지 않다면, 석유 정제소에서 생산된 석유 관련 원료인지 철 코크 생산에 의한 석탄 타르 원료인지에 대한 설명 없이 '카본 블랙 원료'라는 일반적 용어로 자료가 보고될 수도 있다. 다른 일차 카본 블랙 원료(아세틸렌 등)에 대한 활동자료가 유용하지 않을 수도 있다. 또한 고유 활동자료가 카본 블랙 생산에 사용된 다른 이차 원료(코크 오븐 가스 등)에 대해 적용가능하지 않을 수도 있다. 고유의 일차 및 이차 원료 카본 소비 자료의 부재는 원료 분석에 대한 불확도를 증가시킨다.

바) 불확도 범주

각 공정에 대한 Tier 1 배출계수와, Tier 2 활동자료, Tier 3 활동자료의 불확도 범주가 아래 표에 제공된다. 자료의 출처나 불확도를 산정하기 위해 사용된 전문 판단자료는, 각 계수와 활동도 자료마다 표에 규정되어 있어, 가능한 자료의 범위를 평가하는 데 인용되었다. 많은 경우에 공정 고유 자료가 몇 공장에 대해서만 유용하였고 비교적 불확도의 범주가 큰 것은 자료가 매우 적고 석유화학제품 및 카본 블랙 공장에서 예상되는 공정 유형과 원료 사용 효율성이 다양하기 때문이다.

〈표 3-18〉 배출계수 및 활동자료에 대한 불확도 범위

방법	계수	불확도 범위
Tier 3	모든 물질에 대한 가스 연소 샘플과 함께 원료소비를 직접 측정	±5%
Tier 1	메탄올 생산 배출 CO ₂ 계수들	±30%
Tier 1	메탄올 생산원료 소비계수들	±30%
Tier 1	메탄올 생산에 대한 메탄 배출계수들	-80% to +30%
Tier 1	에틸렌생산에 대한 CO ₂ 배출계수들	±30%
Tier 1	에틸렌생산에 대한 CO ₂ 배출의 지역조정 계수들	±10%
Tier 1	에틸렌 생산에 의한 CH ₄ 배출계수들	±10%
Tier 1	2염화에틸렌/염화비닐 생산 공정배출 CO ₂ 배출계수들	-20% to +10%
Tier 1	2염화에틸렌/염화비닐 생산에 의한 CO ₂ 배출계수들	-50% to +20%
Tier 1	2염화에틸렌/염화비닐 모노머공정 원료 소비계수들	±2%
Tier 1	2염화에틸렌/염화비닐 모노머공정 CH ₄ 배출계수들	±10%
Tier 1	에틸렌 옥사이드 생산원료 소비와 CO ₂ 배출계수들	±10%
Tier 1	에틸렌 옥사이드 생산에 의한 CH ₄ 배출계수들	±60%
Tier 1	아크릴로니트릴 생산에 의한 CO ₂ 배출계수들	±60%
Tier 1	아크릴로니트릴 생산에 의한 CH ₄ 배출계수들	±10%
Tier 1	카본 블랙 생산에 의한 CO ₂ 배출계수들	±15%
Tier 1	카본 블랙 생산에 의한 CH ₄ 배출계수들	±85%
Tier 2	에틸렌 증기 크래킹의 원료-생산 매트릭스	±10%
Tier 2	아크릴로니트릴 생산 공정을 위한 이차 생산물 생산계수	±20%

자료 : 환경부·환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인 제3권 산업공정 및 제품 사용



다. 금속 산업

1) 철, 강, 아급 코크스 생산

Tier 1에서 쓰인 코크스 생산과 제철 생산의 기본 배출계수들은 $\pm 25\%$ 의 불확도를 가지고 있다. Tier 2 재료 탄소 함량은 $\pm 10\%$ 의 불확도를 가지고 있다. 탄소 함량과 질량을 (mass rate) 자료가 있다면, Tier 3 배출계수는 $\pm 5\%$ 의 불확도를 가지고 있다. 아래 표는 배출계수, 탄소 함량 그리고 활동자료의 전체적인 내용을 제공한다.

〈표 3-19〉 불확도 범위

방법	자료출처	불확도 범위
Tier 1	기본 변수값	$\pm 25\%$
	국내 생산 자료	$\pm 10\%$
Tier 2	개별 원료의 탄소 함량	$\pm 10\%$
	국내 환원제 & 가공 원료 자료	$\pm 10\%$
Tier 3	회사로부터 수집(company-derived) = 가공 원료 자료	$\pm 5\%$
	회사에서 별도로 측정한 CO ₂ 와 CH ₄ 자료	$\pm 5\%$
	회사 배출계수	$\pm 5\%$

자료 : 환경부·환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인 제3권 산업공정 및 제품 사용

Tier 1에서, 활동 자료의 가장 중요한 종류는 각 방법을 사용하면서 생산된 강의 양이다. 국내 통계자료는 구할 수 있으면 그리고 $\pm 10\%$ 의 불확도를 가지고 있다. Tier 2에서 제철 생산에 쓰인 환원제와 가공 재료들의 전체량은 10%이내에 있다. Tier 3는 시설에서 쓰인 환원제와 가공 재료(약 5%의 불확도를 가진)의 정보를 필요로 한다. 또한 Tier 3의 실제 배출 자료는 5%의 불확도를 예상한다. Tier 3는 실제 받은 자료의 분석을 통해서 더 정확하게 구해질 수 있다.

2) 일차 알루미늄 제조

연간 알루미늄 생산 자료는 1% 미만의 매우 적은 불확도가 존재한다. 탄산 소모, 코크스와 페이스트(paste) 소모량을 기록하면서 생긴 불확도는 알루미늄 생산 불확도 보다 약간 더 높은 2% 미만이다. Tier 2 와 Tier 3을 사용한 개별 시설 배출량들의 다른 변수는 양극 효과 활동 자료이다. 예를 들면 양극 효과 미세값 per cell day 아니면 양극 효과

과전압, 이러한 매개변수들은 거의 모든 알루미늄 생산 시설들의 가동 부분으로서 공정 관리 시스템에 의해 기록 된다. 그리고 이 자료의 불확도는 낮다.

3) 마그네슘 생산

가) 1차 생산으로 인한 CO₂ 배출량

시설 수준에서는 생산된 마그네슘의 톤수뿐만 아니라 원료 물질의 유형/분석과 사용에 대한 내용은 잘 문서화 되어야 한다. 모든 가스에 대하여 Tier 2와 3 방법에서 요구되는 직접적으로 보고된 활동자료는 대체로 5% 미만의 범위 내에서 정확하다. 국가 인벤토리 수준에서 마그네슘 생산 활동도와 배출량 자료의 정확성은 다른 국가 생산 통계의 정확성(예: ±5%)에 필적한다. 추가적인 불확도는 직접적으로 보고되지 않은 생산량 값을 산정하는 것을 통해 알 수 있다.

나) 마그네슘 주조 과정(1차와 2차)

SF₆

Tier 1 접근법에서는 다른 2차 영역으로부터의 생산량을 총합하는 것과 배출계수 기본값을 사용하는 것을 통해 불확도를 알 수 있다. 예컨대 주조 작용으로 인한 국가 자료는 SF₆ 배출량이 다를 가능성이 있음에도 형관 주조와 중량 주조 부문으로 분리되지 않는다. 이러한 접근법은 실제 배출량의 매우 대략적인 산정치 기본값에 의한 것이다. 상이한 처리 작용과 주조 작용이 중요도 순위에 의해 달라지는 표면 가스에서의 SF₆의 농도를 사용한다면, Tier 1 방법을 사용할 때 생겨나는 불확도도 중요도의 순위에 따라 달라질 것이다.

Tier 1과 2 방법에서는, 사용된 SF₆의 100%가 배출된다는 가정과 연관된 불확도의 수준도 존재한다. 전형적인 주조 작용에서, 이러한 가정에서의 불확도는 30% 이내여야 한다(Bartos et al., 2003). Tier 2 방법에서는, SF₆의 사용이 입수된 자료로부터 쉽고 정확하게 측정되기 때문에, 시설 수준에서의 SF₆ 사용과 관련하여 불확도가 매우 낮다(보통 직접적으로 보고된 자료에는 5% 미만의 불확도 산정값이 적절하다).

Tier 3 방법에서의 불확도는 주로 장비의 눈금 측정이나 정확도를 검토하는 과정에서 일어난다. 푸리에 변환 인프라 적분 광학(Fourier Transformed Infra Red Spectroscopy, FTIR)과 같은 대표적인 가스 분석 방법은 대체로 ±10%로 산정된 정확도를 갖고 작용한다. FTIR과 유사한 분석적 기술에 추가하여, FTIR의 전체적인 불확도를 ±20%까지 가져



오는 대표적인 표집과 눈금 측정과 관련된 문제로 인해 보다 큰 불확도가 유발될 수도 있을 것이다.

HFC-134a, FK 5-1-12, 분해 생산물 - 예: PFCs

SF₆에 대한 Tier 3 방법과 관련하여, 주요 불확도는 HFC-134a나 FK 5-1-12의 표면 가스를 사용하는 과정에서 나타나는 점검 장비의 눈금 측정/정확성과 연관되어 있다. 불확도는 대략 ±10%이다.

운반 가스

가장 큰 불확도는 극소량의 표면 가스로 인한 CO₂ 배출량을 고려한 Tier 1 접근법과 연관되어 있다. 특히 이것은 시설에서 CO₂가 매우 많은 운반 가스 혼합물을 사용할 경우에 그러하다. 다른 tiers는 SF₆와 관련되어 있기 때문에 동일한 불확도 값을 갖는다.

4) 납 생산 / 아연 생산

활동자료 불확도는 국가 생산 통계량을 입수하여야 하며 ±10%의 불확도 값을 갖는다. Tier 2 방법에서는 납 생산에 사용된 환원제나 공정 물질의 총량에 대한 불확도는 10% 이내이다. Tier 3 방법을 활용하기 위해서는, 생산량 자료에 대한 시설별 정보(약 5%의 불확도)를 구해야 한다. 부가적으로, Tier 3 에서의 실제 배출량 자료는 ±5%의 불확도 값을 갖는다.

〈표 3-20〉 불확도 범위

방법	자료 출처	불확도 범위
Tier 1	국내 생산량 자료	±10%
	배출계수 기본값	±50%
	공정유형에 따른 배출계수	±20%
Tier 2	사용된 환원제의 양과 유형	±10%
	공정 물질 탄소 함량	±15%
Tier 3	시설 유도 = 공정 물질 자료	±5%
	시설별 측정된 CO ₂ 자료	±5%
	시설별 배출계수	±5%



라. 연료로부터 비에너지 제품 및 용매 사용

1) 윤활제의 사용

배출량 산정에서 나타나는 불확실성의 많은 부분은 개별 국가에서 사용되는 비에너지 제품의 양을 결정하기 어려운 것과 관련되어 있다. 에너지 통계의 정확성에 대한 전문가 판단에 따르면, 잘 개발된 에너지 통계를 가지고 있는 국가에서는 5%의 기본값이 기타 국가에서는 10~20%의 기본값이 사용되기 때문이다. 여기에서 사용된 총 소비량에서 그 값을 빼도록 되어 있는 2기통 엔진에서 이용된 윤활유의 양을 알지 못하기 때문에, 활동자료에서의 불확도는 더 높고 매우 높은 방향으로 편중될 것이다. 대부분의 윤활유가 2기통 엔진에서 이용되는 국가에서는 이 분야에서의 활동자료의 불확도 범위가 더 낮은 지점에서(at the lower end) 훨씬 높아질 것이고, 국가 소비 총량 내의 2기통 엔진 산정량을 통해 산정될 수 있다.

2) 아스팔트 생산과 사용

보다 정교한 방법을 사용한 결과가 가장 정확한 것으로 생각되지만, 도로 포장과 아스팔트 roofing으로 인한 NMVOC⁶⁾와 CO 배출량의 불확도의 $\pm 25\%$ 의 범위에 있고 세부적인 활동자료와 통제 기술 자료에 근거하지 않은 계산일 경우에는 이 값이 더욱 커진다(-100%부터 +25%까지).

HMA와 컷백 아스팔트에 대한 생산 자료는 아스팔트 생산이나 공사 산업에 의해 수집된 자료에 근거할 경우에 $\pm 10\%$ 만큼 정확할 것이다. 그러나 컷백 아스팔트에 근거한 활동자료가 외삽될 필요가 있을 때에는, 많은 국가에서 컷백 아스팔트의 양이 해마다 사실상 달라질 수 있기 때문에(2개나 3개의 계수가 드물기 때문에) 불확도가 매우 크다(EAPA, 2002; EAPA 2003; U.S.EPA, 2004). 컷백 아스팔트 유형이 혼합된 자료와 HMA 생산 시설 유형과 적용된 통제 기술이 혼합된 자료는 일반적으로 총 생산 자료에 비해 덜 정확하다. 아스팔트 roofing 물질의 생산 통계 상의 불확도는 계산이 틀리지 않았다면, $\pm 10\%$ 만큼 정확할 것이다. 그러한 경우가 아니라면, 범위의 맨 끝에서의 불확도는 100%만큼 높거나 그 이상일 것이다.

도로 포장용 아스팔트 생산과 사용으로 인한 NMVOC의 화석 탄소 함량 분율 기본값은 대부분의 경우 40%에서 50%까지에서 다양하게 나타나고, 아스팔트 roofing으로 인한 NMVOC의 화석 탄소 함량 분율 기본값은 약 80%이다(EMEP/CORINAIR 배출 인벤토리 가이드라인에 제공된 NMVOC의 각 종에 대해 계산됨).

6) 비메탄계탄화수소

3) 용매 사용

NMVOC 배출량의 불확도는 일반적으로 꽤 클 것이다. 즉, 이 배출원에 대한 세밀한 인벤토리 목록을 개발해 온, 불확도가 25% 정도일 수 있는 국가를 제외하고는, 약 $\pm 50\%$ 정도이다. NMVOC의 화석 탄소 함량 비율 기본값은 종 프로파일에 대해 한정 출판된 국가 분석에 따르면 질량 값으로(by mass) 60%이다. 화석 탄소 함량 비율 기본값은 질량으로 50~70% 범위의 탄소값이며, 약 $\pm 10\%$ 의 불확도를 가진다. 국가별 비율은 예컨대 $\pm 5\%$ 와 같이 더 낮은 불확도를 가져야 한다.

4) 전자 산업 배출

Tier 3 방법은 가장 덜 불확실한 인벤토리 양을 산출할 것이다. 공장의 수가 제한적이라는 점과 공장별 생산 공정이 긴밀히 모니터링 되고 있다는 점을 고려한다면 Tier 2 혹은 Tier 3 방법에 사용하기 위한 자료 수집은 기술적으로 가능해야 한다. 인벤토리 작성자는 개괄된 전문가의 판단을 얻기 위한 접근법을 이용하여 불확도에 대해 산업현장의 조언을 구해야 한다.

모든 방법 가운데 Tier 1이 가장 불확실하다. 다양한 반도체 제품으로부터의 FC 배출량을 설명하기 위해 계수 하나만을 이용하는 것은 명백한 단순화이다. 현재 최신 기술(그리고 FC 배출량 감축을 위한 방법을 사용하지 않는)을 이용하는 제품을 제조하고 있는 나라들에 대한 계수는 더 클 것이며 반면 오래된 기술을 사용하는 제품이나 단순장치를 제조하는 국가들은 같거나 훨씬 더 작은 계수를 사용할 것이다.

TFT-FPD 제조업의 Tier 1 배출계수는 자료입수가 가능한 면적에 대해 TFT-FPD 제조 중 소비된 기판유리의 면적당 산정된 총 PFC 배출량을 나타낸다.(Burton, 2004b) 일본에 대해 보고된 배출량 산정치는 반도체 제조업(Nishida 외, 2004)에서의 국가 온실가스 인벤토리에 대한 우수실행지침 및 불확도 관리(IPCC, 2000)로부터 반도체 제조업에 대한 Tier2b 계수를 이용하였다.(Leu 외, 2004) 그러나 Leu(2004)는 곧이어 Burton(2004b)에 의해 개발된 것과 비슷한 크기의 총 배출계수를 보고했다. TFT-FPD 제조에 대한 Tier 1 배출계수의 불확도는 크겠지만 지금으로선 정확히 알려져 있지 않다.

반도체와 TFT-FPD 제조업에 대해 Tier 3 방법을 사용할 때 결과로 얻은 배출량의 산정치는 Tier2a, 2b, 혹은 Tier1 방법보다 30% 가량(95% 신뢰구간) 더 정확할 것이다. 배출제어기술의 효과성에 있어서의 불확도는 이 불확도, 특히 배출제어장치 가동시간의 변화와 장치설계한도를 초과할 수도 있는 배출제어장치의 플로우 속도의 변화에 가장 영향을 미치는 것으로 보인다.

Tier 2 방법을 이용하여 열전도유체를 이용할 때 발생하는 배출량을 산정하는 것은 Tier1 방법보다 20% 가량 더욱 정확하다.(95% CI)

마. 기타 제품 제조 및 사용

1) 전기 설비로부터의 SF₆ 및 PFCs의 배출

Tier 3 방법을 이용할 때, 배출량 산정 결과는 ±10% 정도의 정확성을 가지게 될 것이며, Tier 2 또는 Tier 1 방법에 의해 개발된 산정량보다 더 정확할 확률이 높다. 만일 조사가 불완전하다면 연관된 불확도는 더 클 것이다. 불확도의 특정한 원인은 다음을 포함할 수 있다;

- 설비 생산자에 의해 수출된 SF₆
- 외국 설비 생산자에 의해 수입된 SF₆
- 외국 재활용 시설로 되돌아 온 SF₆
- 질량, 밀도, 및 압력의 측정값 (일반적으로 총 질량의 1, 2% 내로 정확하지만 만약 배출량이 낮다면 배출량의 상당한 %일 수도 있다)
- 배출계수
- 배출과 수리 사이의 시간 지연
- 설비의 수면
- 어떠한 외삽에 의한 접근법에 연관된 회귀 오차

Tier 1 방법에 대한 배출계수 기본값에서 산정된 불확도는 아래 표와 같이 전기 설비로부터의 SF₆ 배출량에 대한 배출계수 기본값에 대한 불확도에 나타나 있다. 이 값들은 유럽의 배출계수에서 관측된 변이에 근거한다.



〈표 3-21〉 기본 배출계수 및 수명에 대한 불확도

Phase 설비 유형	제조	사용(누수, 중요 결함/arc 결함 및 유지 손실)	처분	
			수명(years)	폐기 시 잔존하는 충전 비율
밀폐된 압력 ^a	±20%	±20%	-20%/+40%	d
폐쇄된 압력 ^b	±30%	±30%	-10%/+40%	d
가스 충전 변압기 ^c	±30%	±30%	-10%/+40%	d

a 'Reductions of SF6 Emissions from High and Medium Voltage Electrical Equipment in Europe, 'Ecofys, June, 2005로부터 산정됨; 일본에서는 어떠한 불확도도 이용가능하지 않다; USA에 대해서 적용가능하지 않다.

b 'Reductions of SF6 Emissions from High and Medium Voltage Electrical Equipment in Europe, 'Ecofys, June, 2005로부터 산정됨; US 배출계수는 제조에 대해 더 높은 불확도(70%) 및 사용에 대해서는 약간 더 낮은 불확도(15%)를 가진다(US Inventory of Greenhouse Gases and Sinks (US EPA, 2004)). 일본으로부터는 이용 가능한 불확도가 없다.

c 폐쇄된 압력 시스템과 유사한 방법으로 산정됨; 실제 불확도는 다소 높을 수 있다. 일본으로부터는 이용 가능한 불확도가 없다.

d 회수 시 잔존하는 충전(charge) 비율에 대해서는 이용 가능한 불확도가 없다.

2) 제품 사용으로부터 N₂O

N₂O 제품의 생산자 및 분배자로부터 얻은 용도 유형에 의한 N₂O의 공급량의 불확도는 국가 간에 매우 다양할 수 있다. 만약 생산자 및 분배자로부터 불확도 추정치를 얻을 수 있다면, 이를 이용해야 한다. 그렇지 않으면, 활동자료의 불확도는 전문가 판단에 의하여 추정되어야 한다.

3. 농업, 산림 및 기타 토지 이용(AFOLU)

가. 토지이용

면적 산정에서 불확도의 잠재적인 근원들의 개수는 접근법 1에서 접근법 3으로 가면서 증가하는 경향이 있을 것이다. 계속해서 평가에 더 많은 자료가 투입되기 때문이다. 하지만 이것은 불확도가 증가한다는 것을 의미하지는 않는다. 새로운 자료로 인하여 교차 검증이 증가하고, 오류 상호제거로 인해 불확도가 일반적으로 감소하기 때문이다. 접근법 1과 접근법 2, 3의 주요한 차이는 토지이용간의 변화에 대한 불확도의 비율이 접



근법 1에서 큰 경향이 있다는 것이다. 이것은 접근1의 토지이용 변화들이 전체 면적들의 차이에 의하여 유래하기 때문이다. 이러한 접근법 1의 불확도가 변화로 생긴 배출과 흡수에 미치는 영향은 국가에서 토지 변화가 전체 토지 면적의 한 부분으로서 상대적인 양에 의존할 것이다. 예를 들어, 접근법 3은 배출량 산정에 있어서 어떤 공간 모형 접근에 필요한, 자세한 공간적으로 표현 가능한 정도를 제공한다. 접근법 3은 공간적으로 상세한 정보를 제공하며, 이는 배출량 산정을 위한 공간적 모형 접근법들을 필요로 한다.

〈표 3-22〉 접근법 1~3의 불확도 개요

접근법	불확도의 근원	불확도를 줄이는 방법	검증에 따른 지시적 불확도
1	<p>불확도의 근원은 자료출처의 속성에 따라서 다음을 포함:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 인구조사오류의 재발 • 기간별 정의의 차이 • 표본조사 설계 • 표본조사 오류 • 표본들의 해석 • 알려진 지역에서의 순변화 <p>추가적으로, 카테고리들 간의 면적변화에 대한 교차 검증은 접근법1에서 수행될 수 없으며 이는 불확도를 증가시킨다.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 국가 면적과 일관성 있는 관계를 위한 검증 • 정의간의 차이 교정 • 불확도가 포함 되는 경향이 있는 통계 기관 참조 조사 • 국가자료와 비교 	<p>수% 수준에서 수십% 수준의 각 카테고리 내 총 토지면적</p> <p>연속적인 조사들로 추론된 면적 변화에 대한 비율보다 더 큰 불확도</p> <p>다른 목적을 위해 준비된 자료를 사용할 때 체계적인 오류가 중요할 수 있다</p>
2	<p>접근법 1과 같이, 하지만 알려진 면적에서의 총계는 교차 검증을 수행할 수 있는 능력과 함께 변화한다.</p>	<p>위와 같이, 더해서 행렬 안에서의 카테고리 간 변화 사이의 일관적인 검증</p>	<p>이들이 직접적으로 유도된 이래로 수% 수준에서 수십% 수준의 각 카테고리 내 총 토지면적과 면적의 보다 큰 변화</p>
3	<p>접근법 2와 같이, 사용된 원격 탐사 자료의 해석과 관련된 불확도를 더하고, 표본조사 불확도를 뺀다.</p>	<p>접근법 2와 같이, 이에 더해서 1권 2장에 정해진 원리들을 사용한 공식적인 불확도 분석</p>	<p>접근법 2와 같이, 하지만 지리적으로 확인 가능한 면적을 포함한다. 그러나 접근 3에 대해서, 불확도의 정도는 접근 2보다 보다 정교하게 예측이 가능하다. 오류들은 지도화 되어 있고, 독립적인 자료와 현장 검증을 통해 검증될 수 있기 때문이다.</p>

자료 : 환경부·환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인 제4권 농업, 산림 및 기타 토지 이용

나. 임지

1) 임지로 유지되는 임지

바이오 매스

산업화된 국가는 임지 산정의 약 3% 불확도가 산정되었다.(FAO, 2000)

토양탄소

토양 탄소(C) 인벤토리 내 존재하는 불확도의 세 가지 중요한 출처는 다음과 같다.

- (1) 토지이용, 관리행위, 환경 자료에 대한 불확도
- (2) Tier 1 또는 2 접근을 이용한 경우(무기토양에 한정),
탄소참조축적량에 대한 불확도
- (3) Tier 1 또는 2 접근에 대한 축적량 변화/배출계수,
접근법에 기초한 Tier 3 모델에 대한 모델구조/변수 오차,
인벤토리에 기초한 Tier 3 산정과 관련된 측정오차/샘플 다양성에 대한 불확도

토지이용과 관리 자료에 대한 불확도는 인벤토리 편집자에 의하여 설명되어야 하며, 단순오류확산식(the simple error propagation equations)과 같은 적절한 방법을 이용하여, 기본 계수와 탄소 축적량 인용값(무기 토양에만 해당)에 대한 불확도와 결합되어야 한다.

무기토양에 대한 탄소참조축적량, 기본값과 유기토양에 대한 배출계수는 어떤 국가에 적용할 경우, 기본적으로 높은 불확도를 가질 수 있고 부분적으로 치우칠 수 있다. 기본값은 토지이용과 관리영향 또는 지역-특성 값으로부터 다양해지는 탄소참조축적량의 전 지구적인 평균값을 의미한다. 치우침은 Tier 2 방법을 사용한 국가고유 계수를 유도하거나, Tier 3 국가특성 산정 체계를 개발함으로써 감소시킬 수 있다. 고차의 Tier 접근에 대한 기본 원리는 토양 탄소에 대한 토지이용과 관리의 영향을 설명하는 국가 또는 근접지역에 대하여 조사될 수 있다. 치우침은 축적량 변화 기록에 있어 더욱 문제가 되는 부분으로 간주 된다. 왜냐하면 이는 불확도 카테고리 내에서 포착되기 어렵기 때문이다.(즉, 만약 계수에 중대한 치우침이 있다면, 축적량 변화의 참값은 기록된 불확도 카테고리 밖이 될 수 있다.)

토지이용 활동자료 계층화의 불확도는 추가적인 표본 샘플 위치 그리고 추가적인 적용범위를 제공하기 위한 원격탐사와 함께 이용하는 지표에 기반을 둔 조사의 개발 또



는 확장과 같은 더 나은 국가 체계를 통하여 개선될 수 있다. 국가 스케일에서 불확도를 최소화하기 위한 충분한 표본 크기를 가지고 토지이용과 관리행위의 대부분을 포함하는 계층화를 계획하는 것은 바람직하다.

2) 임지로 전용된 토지

바이오 매스

임지로 전용된 토지의 탄소 축적량 변화를 산정하기 위해 요구되는 배출계수는 임지로 유지되는 임지의 탄소 축적량 변화를 산정하기 위해 요구되는 배출계수와 거의 동일하다. 그러나 인벤토리 해의 20년 범주 내에(전용의 기본 기간) 임지로 전용된 토지에 한정된다. 임지로 유지되는 임지의 불확도에 대한 논의는 여기에서도 또한 적용된다. 전용 전 후의 토지의 바이오매스 축적량의 산정을 포함하는 불확도 정도는 높다. 제거된 임목에 대한 불확도는 낮다. 그 이유는 때로 산림벌채로 인한 상업적 수확을 임지로 유지되는 임지에서부터 기인한 것과 구분하기 어렵다 하더라도, 국가 통계가 상업적 수확에 대하여 수행되기 때문이다. 그러나 제거된 연료재와 연료재 수집, 교란에 의한 바이오매스 손실에 대해서는 불확도가 높아진다. 상업적인 그리고 전통적인 방법을 포함하는 불확도는 각기 다른 사회생태지역과 기후지역에 따른 표본 조사를 수행함으로써 감소시켜야 한다.

탄소 축적량 산정에 요구되는 중요한 활동자료는 초기 전화와 그 후의 기간 동안 전용된 토지 면적과 바이오매스의 손실률을 포함한다. 집약적, 조방적 조림지 면적에 대한 불확도 수준은 낮아질 수 있다. 대부분의 국가들이 조림, 그리고 재 조림된 면적에 대한 정보를 가지고 있기 때문이다. 불확도는 임지로 원격탐사와 다른 모니터링기술에 기반을 둔 전용된 토지의 각 카테고리에 대한 임지로 유지되는 임지의 토지이용변화 매트릭스를 개발함으로써 감소시켜야 한다. 원격탐사와 지역조사의 조합은 불확도를 10~15% 범위로 낮게 유지할 수 있다.

다. 농경지

1) 농경지로 유지되는 농경지

고사 유기물(DOM)

불확도 산정은 Tier 1에서는 필요로 하지 않는다. DOM 축적량은 안정하다고 가정하기 때문이다. Tier 2와 3에 대해서 면적 자료와 불확도 산정은 3장 방법을 사용하여 얻어져야 한다. 탄소 축적과 손실계수는 지역적으로 평가되어야 한다.

토양탄소

토양탄소(C) 조사 목록에서 세 가지 넓은 불확도의 원인이 있다.

- 1) 토양 이용과 관리 이용에서 불확도
- 2) 만일 Tier 1 또는 2 접근을 사용할 때, 준거 토양 탄소 축적량의 불확도
(무기 토양만)
- 3) Tier 1 또는 2 접근을 위한 축적량 변화, 배출계수, Tier 3의 모형 기본 한 접근에서 모형 구조/변수 오차, 측정 오차/3단계 측정-기반을 둔 목록과 연관된 표본 조사 변이에서의 불확도

일반적으로 세 가지 넓은 카테고리에 대한 값을 산정하기 위하여 보다 많은 표본 조사를 할수록 조사 목록의 자세함은 증가하고 신뢰 구간은 작아진다. 하지만 국가특이적인 정보를 활용하는 보다 높은 단계 조사의 개발을 통하여 편중 제거(예, 정확성을 개선)가 일어날 수 있다.

무기 토양에 대한 기본 준거 탄소 축적량과 축적량 변화계수, 유기 토양의 배출계수는 특정 국가에 적용할 때 본질적으로 높은 불확도, 부분적인 편중을 가질 수 있다. 기본값은 전 지구적 토지 이용, 관리 영향에 대한 평균적인 값을 나타내고 준거 탄소 축적량은 지역 특이적 값에 따라서 변할 수 있다. Tier 2 방법을 사용하여 국가 특이적인 계수를 유도하거나 단계 국가 특이적 산정 체계를 개발함으로써 편중을 줄일 수 있다. 보다 높은 단계 접근에 대한 기본 토대는 토양 이용과 관리가 토양 탄소에 미치는 영향을 다루는 국가 또는 인접한 지역에서의 실험이 될 것이다. 추가적으로, 기후형과 토양형 사이의 변이와 같은 국가 내 상당한 차이에 대한 원인을 제시하여 편중을 최소화하는 것은 계수 산정에서 정확성이 감소될지라도 우수실행이다. 편중은 축적량 변화를 보고 하는데 보다 문제라고 생각될 수 있다. 그것은 불확도 범위에서 반드시 포착되지 않기 때문이다.(예, 축적량의 진짜 변화는 만일 계수에 상당한 편중이 있다면, 보고 된 불확도의 범위 밖에 있을 수 있다)

토지이용 통계에서의 불확도는 보다 더 좋은 국가적인 체계를 통하여 감소할 수 있다. 더 좋은 국가 체계란 추가적인 표본 지역과 추가적인 피복을 제공하기 위한 원격 탐사를 서론하여 지상 기준의 조사를 개발하거나 확장하는 것과 같은 것이다. 국가적인 수준에서 불확도를 최소화하기 위해 충분한 표본 수를 가지고 토지 이용과 관리 이용의 우점을 채택하는 분류 체계를 설계하는 것은 우수실행이다.

Tier 2 방법에 대하여 국가 특이적인 정보는 편중을 줄이기 위한 목적으로 목록 분석에 도움이 된다. 예를 들어 Ogle et al. (2003)은 농업토양에 대한 미국 특이적인 계수,



활동자료, 준거 탄소 축적량에 대한 확률 분포 함수를 만들기 위하여 국가 특이적인 자료를 활용하였다. 계수, 준거 탄소 축적량 또는 토지이용 관리 활동자료 사이 의존성을 평가하는 것은 우수실행이다. 특히, 토지 이용과 관리 활동자료에서 강한 의존성이 있는 것은 흔하다. 왜냐하면 관리 방식은 시공간으로 연관되는 경향이 있기 때문이다. 축적량 변화/배출계수, 준거 탄소 축적량과 활동자료에서의 불확도를 결합하는 것은 토양 탄소 축적량에서 변화를 위한 평균과 표준 편차를 측정하기 위하여 단순오차전개식(simple error propagation equation) 이나 몬테카를로방법과 같은 방법을 사용하여 행해질 수 있다.

Tier 3 모형은 보다 복잡하다. 단순오차전개식은 산정을 낳는데 연관된 불확도를 효과적으로 정량화하지 못할 수 있다. 몬테카를로 분석은 가능하다. 하지만 그 모형이 많은 변수(어떤 모형은 수백 개의 변수를 가질 수 있음)를 가지고 있다면 사용하기 어려울 수 있다. 결합확률분포함수(joint probability distribution functions)는 변수들 사이에서 공분산뿐만 아니라 분산을 정량화하면서 만들어져야 한다. 경험에 근거한 접근과 같은 다른 방법은 또한 가능하다. 이는 측정된 결과와 모형화된 결과 사이에서 관계를 통계적으로 평가하는 감시 네트워크에서 측정을 사용한다. 모형작업과 대조적으로 측정에 근거한 Tier 3 목록에서의 불확도는 표본 분산, 측정 오차, 그리고 다른 적절한 불확도의 배출 원으로부터 계산될 수 있다.

바이오매스 연소에서 non-CO₂ 온실가스 배출

잔류물이 일반적으로 연소되는 작물의 각 종류가 심겨진 면적의 산정은 매우 불확실하다. 작물 생산의 통계는, 심겨진 면적을 산정하는데 간접적인 방법이며, 매년 자료 갱신이 되지 않는다면, 매우 불확실하다. 현지에서 태워지는 농업적 잔류물의 비율은 아마도 가장 불확실한 변수이다. 국가특이적인 변수들에 바탕 하는 Tier 2 산정은 보다 자세하다. 국가특이적인 연소와 배출계수 그리고 연소된 면적을 위하여 오차 산정 (예: 표준편차, 표준오차, 범위들)을 제공하기 위하는 것은 우수실행이다.

라. 초지

1) 초지로 유지되는 초지

고사 유기물

본 절은 초지로 유지되는 초지에서의 DOM을 위한 산정과 관련된 배출원-특정 불확도를 다룬다. 탄소 인벤토리에 존재하는 불확도의 두 가지 배출원은 다음과 같다. 첫째,

토지이용과 관리행위와 환경데이터에 대한 불확도, 둘째, 탄소증가와 손실, Tier 2 접근에 대한 축적량 변화/배출계수에서의 탄소 축적량과 확장계수 항, Tier 3 모델에 기반한 접근에 대한 모델 구조/변수 오차 또는 Tier 3 측정에 기반을 둔 인벤토리와 관련된 측정 오차/샘플링 가변성에의 불확도이다. 일반적으로, 각 항목에 대한 값을 측정하기 위한 샘플링 강도가 커질수록 인벤토리의 정밀도는 커지고, 신뢰구간은 더 좁아진다. 한편, 편향을 줄이는 것은(즉, 정확도를 향상시키기 위하여) 국가특성 정보와 병행하는 고차수준의 Tier의 개발을 통하여 달성하기 더 용이하다. 오차산정(즉, 표준편차, 표준오차 또는 범위 등)은 기본 불확도 평가에 이용되는 국가별로 정의된 항의 각각에 대하여 계산되어야 한다.

만약 활동자료에 대하여 총합된 토지이용 면적통계(예, FAO자료)를 이용하는 경우, 인벤토리 기관은 토지이용산정에 대하여 불확도의 기본수준을 적용해야 한다.(±50%)

그러나 인벤토리 작성자가 기본 수준을 이용하는 대신 국가특성 활동자료로부터의 불확도를 유도하는 것이 우수실행이다. Tier 2와 3에 대하여, 더 높은 resolution activity data의 사용은(예, 국가별 경계내의 초지관리 시스템에 대한 기후지역별 면적산정) 모든 탄소 축적/손실 변수가 적절하게 분류 되었을 때, 불확도 level을 감소시킬 수 있다. 토지이용 활동자료 통계의 불확도는 진보된 국가시스템을 통하여 감소될 수 있다.(예, 추가적인 표본위치와 병행한 토지기반 조사의 개발 또는 확장, 부가적인 피복정보를 제공하기 위한 원격탐사와의 병행) 국가차원에서 불확도를 최소화하기 위한 충분한 표본크기를 가지고 토지이용의 대부분과 관리 활동자료를 얻기 위한 분류 시스템을 계획하는 것이 우수실행이다.

토양탄소

세 가지 주요한 불확도의 배출원은 다음과 같다.

- 1) 토지이용과 관리활동도와 환경데이터에 대한 불확도
- 2) Tier 1 또는 2 방법을 이용한 경우 탄소 축적량 인용값의 불확도
- 3) Tier 1 또는 2 방법을 사용한 경우 축적량 변화/배출계수에서의 불확도

Tier 3 모델에 근거한 접근에 대한 모델 구조/변수 오차에 대한 불확도 또는 Tier 3 측정에 근거한 인벤토리와 관련된 측정 오차/샘플링 강도가 커질수록 인벤토리의 정밀도는 커지고, 신뢰구간은 더 좁아진다. 한편, 편향을 줄이는 것은(즉, 정확도를 향상시키기 위하여) 국가특성 정보와 병행하는 고차수준의 Tier의 개발을 통하여 달성하기 더 용이하다.



토지이용과 관리데이터에 대한 불확도는 인벤토리 작성자에 의하여 설명되어야 하면, 단순오차확대공식과 같은 적절한 방법을 이용하여 기본계수와 탄소 축적량 인용값(무기토양에 한함)에 대한 불확도와 결합하여야 한다. 만약 활동자료에 대하여(예, FAO 자료) 총합된 토지이용통계를 이용한다면, 인벤토리 기관은 토지면적산정에 대하여 불확도의 기본수준을 적용하여야 할 것이다.(±50%)

탄소 축적량 인용값과 무기토양에 대한 축적량 변화계수, 유기토양에 대한 배출계수는 본래 높은 불확도를 가질 수 있다. 특히 특정국가에 적용할 경우 편향이 발생할 수 있다. 기본값은 토지이용과 관리영향에 대한 전 지구적 평균된 값을 나타내거나 지역특성값에 따라 다양해 질 방법을 이용하여 국가특성 계수를 유도함으로써, 혹은 Tier 3 국가특성 산정시스템을 개발함으로써 저감될 수 있다. 고차 Tier 접근에 대하여 근거가 되는 원칙은 토양 탄소에 대한 토지이용과 관리에의 영향을 나타내는 국가 또는 인접지역에 대하여 실험되어진다. 부가적으로, 계수산정에 대한 정확성이 다소 떨어지더라도 중대한 국가 내 토지이용과 관리영향에의 차이를(예를 들어, 기후 지역 그리고/또한 토양 타입들 간의 가변성) 고려함으로써 편향을 최소화 하는 것은 우수실행이다. 편향은 축적량 변화를 기록하는데 더 큰 문제로 간주된다. 왜냐하면, 불확도의 카테고리를 정하기 어렵기 때문이다.(즉, 계수에 대하여 중대한 편향이 작용하는 경우, 실제 축적량 변화는 보고된 불확도의 카테고리 바깥에서 존재한다.)

토지이용 활동자료 통계에의 불확도는 추가적인 표본 지역을 가지고 ground-based 조사를 확장하거나 개발하는 것과 같은 더 발전한 형태의 국가시스템을 통하여 그리고/또는 부가적인 피복 상태를 제공하기 위한 원격탐사와의 병행을 통하여 감소시킬 수 있다. 토지이용의 대부분을 이루는 구성요소와 국가차원의 불확도를 감소시키기 위한 충분한 표본크기를 가진 관리 활동자료를 포착하는 분류를 계획하는 것이 우수실행이다.

Tier 2 방법에 대하여, 국가특성 정보는 편향을 줄이기 위한 목적으로 인벤토리 분석과 함께 진행되어야 한다. 예를 들어, Ogle et al(2003)는 US 특정계수, 활동자료와 경작용 토양에 대한 탄소 축적량 인용값에 대하여 확률분포함수를 고안하기 위하여 국가특성데이터를 활용한다. 계수, 탄소 축적량 인용값 또는 토지이용과 관리 활동자료간의 의존성을 평가하는 것이 우수실행이다. 특히, 토지이용과 관리 활동자료간의 강한 의존성은 일반적이다. 관리행위는 시간과 공간에 관련이 있게 마련이기 때문이다. 축적량 변화/배출 계수, 탄소 축적량 인용값과 활동자료에 대한 불확도의 결합은 바이오매스 탄소 축적량 변화에 대한 평균 및 표준편차를 산정하기 위한 단순오차확대공식 또는 몬테카를로 프로시저와 같은 방법을 이용하여 수행 될 수 있다.

Tier 3 모델은 더 복잡하고, 단순오차확대공식은 산정의 결과에 대한 불확도와 관련한 정량화에 비효율적이며 몬테카를로 분석이 가능하다. 그러나 만약 모델이 많은 변수를 가지고 있을 경우는 그 적용이 어려울 수 있다.(어떤 모델은 수백 개의 변수들을 가질 수 있다.) 왜냐하면 둘 이상의 변수를 가지는 확률분포 함수는 변수 간 공분산 뿐 아니라 분산을 정량을 위해 고안되어야 하기 때문이다. 측정결과와 모델링 결과간의 관계를 통계적으로 산정하는 모니터링 네트워크로부터의 측정을 사용하는 경험에 기반을 둔 접근과 같은 다른 방법들 또한, 이용가능하다. 모델링과 대조적으로, 측정에 기반을 둔 Tier 3 인벤토리의 불확도는 측정오차와 불확도와 관련된 다른 배출원과 표본분산으로부터 직접적으로 산정할 수 있다.

바이오매스 연소로 인한 non-CO₂ 온실가스 배출

초지로 유지되는 초지에서의 바이오매스 연소로 인한 non-CO₂ 배출의 산정과 관련한 불확도에의 여러 개의 배출원이 있다. 화재 거동은 이들 사이에서 크게 변한다. 그러므로 식생에 대한 정보의 분해는 더 큰 정확도를 가질 수 있다. 바이오매스 연소가 진행되는 동안 실제로 연소된 연료의 분율(연소계수)은 생태계에서 뿐 아니라 화재별, 연도별 그리고 문화적 행위의 기능으로서 상당히 큰 폭으로 변한다.

미량 가스의 배출로의 바이오매스 연소의 기여분의 산정에 대한 불확도의 주 원인은, 특히 열대 생태계에서, 불탄 면적의 넓이, 화재의 강도, 번지는 속도가 된다. 정밀도 산정은 본질적으로 불탄 면적의 정확도, 이용 가능한 연료의 산화된 비율, 이용 가능한 바이오매스 연료에 의존하여 폭넓게 변한다. 불탄 면적의 산정에의 불확도는 적용된 방법론에 의존하여 큰 폭으로 다양하게 변할 수 있다. 예를 들어, global fire map의 이용이 2배 이상의 불확도를 야기하는데 반해, 고해상도 원격탐사가 이용되는 경우에는, 20% 정도의 불확도를 가진다. 화재로 인한 넓은 지역에서의 온실가스 배출의 산정 불확도는 적어도 50%가 된다.

2) 초지로 전용된 토지

바이오매스

초지로 전환된 토지에 대한 불확도 분석은 근본적으로 초지로 유지되는 초지와 동일하다. 탄소 인벤토리 내 존재하는 불확도의 두 개의 배출원은 다음과 같다.

1) 토지이용과 관리활동과 환경데이터에 대한 불확도

- 2) 탄소증가와 손실, Tier 2 방법에 대한 축적량 변화/배출계수에서의 탄소 축적량과 확장계수 항, Tier 3 모델에 기반을 둔 접근에 대한 모델 구조/변수 오차 또는 Tier 3 방법에 기반을 둔 인벤토리와 관련된 측정오차/샘플링 가변성에의 불확도

바이오매스 연소로 인한 non-CO₂ 온실가스 배출

(Tier 1)

본 방법에서의 불확도의 배출원은 여러 배출원으로부터 발생한다.

- 1) 전 지구적 또는 국가차원의 초지로 전환된 토지면적에 대한 전환율과 정확하지 않은 산정치의 이용
- 2) 관리행위의 일부로써 불탄 전환된 면적의 산정(농경지를 만들기 위한 처음 토지 이용에서의 바이오매스의 흡수)
- 3) 이용 가능한 연료의 질량
- 4) 연소 및 배출계수

배출과 연소계수와 관련된 불확도는 제공되어 있으며 항목 (i)과 (ii)와 관련된 것들은 그들의 산정에 이용된 방법에 따라 상당히 다양하게 변할 수 있다. 이들 불확도의 결과로서, 불탄 면적의 산정은 20%보다 더 높은 값을 가질 수 없으며, Tier 1 방법에서 이용한 계수 2 안에서 단위 면적당 배출값을 가진다.

(Tier 2)

더 신뢰할 수 있는 배출원(원격탐사데이터, 표본접근)으로부터 얻어진 면적산정의 이용은 Tier 1과 접근법 1과 관련된 정확도를 개선할 수 있다. 이들 배출원은 전환되고 불에 탄 면적에 대한 더 나은 산정을 제공한다. 수확된 임목 생산품 또는 멜감으로서 흡수된 것과 현지에 남겨져 부패된 바이오매스를 무시하는 것은 산정에서의 편향(과대산정)을 야기할 수 있다. 만약 오차범위(표준편차의 형태로서)와 병행한, 국가차원의 배출 또는 연소계수의 산정은 평가되어진 농경지로 전환된 토지와 관련된 불확도를 허용한다.

(Tier 3)

Tier 3 활동자료와 관련된 불확도는 Tier 1 또는 2에서의 불확도보다 작고, 이는 원격 탐사와 현장조사, 이용된 모델링 접근과 데이터입력에 의존한다.



마. 습지

1) 관리되는 이탄습지

이탄습지로 유지되는 이탄습지

관리되는 이탄습지에 대하여 모여진 이용 자료를 사용한 국가들은 유럽과 북미에서 50%의 불확도의 요소들을 요소화해야 한다. 하지만 나머지 국가들은 계수 2를 factor화해야 한다. 만일 관리되는 이탄습지 면적들이 전체(관리되거나 관리 되지 않는) 이탄습지 또는 생산량에 근거한다면 이탄 생산이 좋은 날씨 조건에 강하게 좌우되므로 불확도는 더 커질 수 있다. 단계 2와 3에서 적절하나 생태-기후 변수들과 관리 체계로 인한 이탄습지 면적의 공간적 분포, 이탄의 최종 사용에 대한 정보, 최근에 전환된 이탄습지와 생산이 진행 중인 습지, 그리고 복원 중인 것과의 구분이 보다 정확한 예측을 가능하게 할 것이다.

2) 침수지

침수지로 유지되는 침수지

큰 댐(>100km²)으로 가두어진 침수지에 대한 국가적인 통계정보가 있어야 하며, 10% 이내에 오차 범위로 정확할 것이다. 댐에 대한 국가적인 자료류음이 없을 때, 그리고 다른 정보가 사용될 때, 특히 넓은 침수지를 가진 국가들에게, 댐으로 가두어진 침수지 면적은 아마도 50% 이상의 불확도를 가질 것이다. 비록 통계적인 추론이 (자료가 있는 곳에서) 저수지의 크기 분포에 근거하여 가능할지라도 위치, 종류 그리고 작은 댐의 기능에 대한 자세한 정보는 얻기 힘들지도 모른다. 저수지들은 자료의 활용성에 영향을 주는 많은 이유들로 만들어진다. 그리고 결과적으로 표면적에 대한 불확도는 국가 특이적인 조건에 달려있다.

바. 주거지

1) 주거지로 유지되는 주거지

바이오매스

(Tier 1)

불확도의 평가는 요구되지 않는다. 그 이유는 살아있는 바이오매스의 변화를 0으로 두기 때문이다.



(Tier 2와 3)

살아있는 바이오매스 내의 탄소축적변화율의 어떠한 평가에 대한 전반적인 불확도는 그 자체의 구성기간의 개별적 불확도의 합이 될 것이다. 이것은 도시타입별 토지이용 범위 내 그리고 공공 및 사적인 공간 내에 서식하는 식생의 지위의 강도 및 빈도의 이질성에 영향을 받을 것이다. 불확도는 도시 및 전원지역의 주거지에서 탄소축적변화율을 측정함에 있어 한정된 경험으로부터 높아질 것이다. 몇몇 연구들은 방법과 견해를 달리하여 도시들의 탄소 흡수원을 측정했지만 전반적인 탄소축적변화율의 측정의 불확도가 평균치에 대해 30~50% 보다 덜 나올 일은 없을 것이다.

사. 기타 토지

1) 기타 토지로 유지되는 기타 토지

2) 기타 토지에서 전환된 토지

바이오매스

(Tier 1)

Tier 1에 따라 불확도의 근원은 전환 이전의 임지 또는 다른 지역 내의 바이오매스 탄소축적량의 세계 및 국가적 평균값의 이용을 들 수 있고, 다른 지역에서 전환된 지역의 대강의 평가로 기인된다. 지역은 3장에서 나온 방법을 이용하여 산정되어야 한다. 탄소 축적량은 지침서 내의 그들의 평가와 관련하여 불확도를 가질 것이다. 다른 평가들의 부재로 평가된 CO₂ 배출의 ±75% 수준의 고정된 불확도를 가정될 수 있다.

(Tier 2)

다른 토지에서 전환된 토지를 위한 실제지역의 평가는 더욱 명백한 계산과 지역의 중복계산을 피하기 위해 전문가의 의견을 따른다. Tier 2 방법은 최소 몇몇의 국가 고유값을 이용하며, 이것은 평가의 정확도를 향상시킬 것이다. 국가고유값이 개발될 때 인벤토리 편집자는 충분한 샘플링 자료와 최소한이 오차를 위한 기법을 이용해야 한다. 확률 밀도함수는 모든 국가변수에서 나올 수 있다. 이러한 자료는 몬테카를로 시뮬레이션과 같은 더 발전된 불확도 분석법으로 이용될 수 있다. Tier 2 접근법은 최소한 각 국가고유변수를 위한 오차범위를 제공해야 한다.

(Tier 3)

활동자료는 토지 전환에 관계된 지역의 불확도의 평가를 위한 기준을 제공한다. 배출/제거 인자들의 결합과 활동자료, 불확도와 관련된 것들은 몬테카를로방법을 이용하여 조정할 수 있다.

토양탄소

- (1) 전환 이전의 토지이용 및 관리활동에 대한 불확도
- (2) 무기토양만을 위한 Tier 1, 2 방법을 이용한 탄소 저장량의 기준값에 대한 불확도
- (3) Tier 1 또는 2 방법의 저장변화/배출계수들에 대한 불확도

아. 가축 및 분뇨관리로 인한 배출

가축 개체수와 사료 특성조사

자료를 수집하는 첫 번째 단계는 기존의 국가통계, 산업적인 출처, 연구자료, FAO 통계를 조사하는 것이어야 한다. 개체수와 관련된 불확도는 출처에 의존해서 다양하게 나타난다. 그러나 $\pm 20\%$ 내외여야 한다. 종종 국가적인 가축 개체 수 통계는 이미 불확도 산정을 이미 수행한 것이 있다. 이러한 경우 이 자료를 사용해야 한다. 이러한 출처로부터의 출간된 자료가 사용 가능하지 않다면 주요 산업계, 학계 전문가들과의 인터뷰가 수행되어야 한다. 소화가능성의 산정도 또한 총 에너지 섭취량의 Tier 2 산정에서 특히 중요하다. 소화가능성 산정을 위한 불확도 산정은 $\pm 20\%$ 만큼 높을 것이다.

분뇨 처리에 의한 메탄 배출량

분뇨 처리 시스템 사용 자료의 불확도는 각 국가의 가축 산업의 특성과 어떻게 분뇨 관리에 대한 정보를 수집했는지에 의존한다. 예를 들어, 목초지와 방목지와 같이 거의 오로지 한 가지 유형의 정보를 수집했는지에 의존한다. 예를 들어, 목초지와 방목지와 같이 거의 오로지 한 가지 유형의 관리시스템에 의존하는 국가의 경우, 관리시스템 사용 자료에 관한 불확도는 10% 또는 그 이하가 될 것이다. 그러나 지역마다 다른 운영 관행으로 인해 매우 다양한 관리시스템을 사용하는 국가들의 경우, 시스템 사용별로 동물 개체수를 구별 짓는 신뢰할 수 있고 대표적인 측정 자료의 활용가능성에 따라, 관리시스템 사용 자료의 불확도 범위가 25%에서 50%에 이를 것이다.



석회처리로부터 유출된 CO₂ 배출량

- (1) 토양에 유입되는 탄산염 석회의 양에서 불확도
- (2) CO₂로 배출하는 석회이용에서 발생하는 순탄산염-탄소량에서 불확도

활동자료의 불확도는 이용량통계, 판매량, 수입/수출 기록, 채굴기록, 이용 자료의 정확성에 달려 있다. 사용 자료는 판매량, 수입/수출량과 채굴기록이 이용에 관한 직접적 추론이 없어 추가적 불확도를 가지기 때문에 최소의 불확도를 가진다. 인벤토리 작성자는 보전적 접근법을 사용하거나 이용가능하거나 구입된 모든 석회가 토양으로 유입된다고 가정할 수 있다. 특정한 연도에 이용 가능한 또는 구입된 총석회량을 이용하지 않는다면, 이 접근법은 각 연도에서 배출량을 과대 또는 과소평가할 수도 있다. 그러나 오랜 기간 동안 이 선입견은 석회의 장기간 사재기가 없었다고 가정하는 것을 무시했었다. 태일적으로, 인벤토리 작성자는 이용 가능한 석회의 양과 특정한 인벤토리 연도에 이용한 양에서 불확도를 주지시킬 수 있다.

요소비료에서 CO₂ 배출량

- 1) 토양에 이용된 요소량에서 불확도
- 2) CO₂로서 배출되는 순요소-탄소량에서 불확도

이산화탄소로 배출하는 요소비료에서 토양으로 더해지는 순탄소량에서 불확도는 Tier에 의존적이다. Tier 1 방법을 이용한다면, 요소내의 모든 탄소는 대기로부터 온 CO₂로서 손실된다고 가정된다. 이것은 보전적 접근법이고, 고정배출계수들은 주어진 이 가정에서 확실하다고 생각된다. 그러나 실제적으로, 어느 정도의 요소 내의 탄소는 적어도 이용된 해에는 무기탄소로서 토양 내에 머물 것이고 이산화탄소로 배출되지 않는다. 결과적으로 기본 배출계수는 배출량 산정에서 체계적 치우침을 불러일으킬 수 있다.

그러므로 특별하게 요소-탄소가 주요원이라면, Tier 2 또는 3 방법들을 각각 가지는 국가-특이적 배출계수 또는 발전된 산정 접근법을 개발하는 것이 우수실행이다. 더 상위 Tier 접근법은 치우침을 제한하는 것으로 보이는 반면, 설명이 필요한 부가적 불확도가 있다. 이들 불확도는 무기탄소를 이산화탄소로 이동과 전환에 영향을 주는 장소 특성들, 수문학, 그리고 다른 환경변수들에 대한 부족한 자료에서 시작될 수 있다. 과정들과/또는 국가-특이적 배출계수 또는 요소-탄소의 운명을 대표하는 산정체계의 능력에 대한 부족한 지식으로 인한 불확도가 또한 있을 것이다.

4. 폐기물

가. 고형폐기물 매립

CH₄ 배출량 산정값의 품질은 이 산정값을 도출하는데 사용된 폐기물 발생, 조성, 관리 자료의 질과 이용가능성에 직접적으로 관련된다. 폐기물 영역의 활동자료는 고형 폐기물 매립지에 보내진 도시 고형 폐기물 총량, 산업 폐기물 총량, 폐기물 구성, 고형 폐기물의 비율을 포함한다.

폐기물 매립 자료의 불확도는 자료를 수집한 방법에 의존한다. SWDS(Solid Waste Disposal Sites)의 폐기물 질량이 측정되면 이 불확도는 감소될 수 있다. 산정값이 폐기물 운반 차량의 용량이나 눈에 보이는 평가에 근거한 것이라면 불확도는 더 높아질 것이다. 활동자료의 기본값(default)에 근거한 산정값은 가장 높은 불확도를 가지게 될 것이다.

SWDS에서 폐기물 제거(scavenging)가 일어난다면 폐기물 매립 자료와 함께 이를 고려하여야 하고, 한편 폐기물 매립 자료에서의 불확도는 증가할 것이다. 또한 제거는 SWDS에 매립된 폐기물 조성에 있어서의 불확도를 증가시키고, 따라서 폐기물 내의 DOC(dissolved organic carbon) 총량의 불확도도 증가시킬 것이다. 기본값 모델 계수에 대한 불확도 산정값은 아래 표에 제시되어 있다. 산정값은 전문가의 판단에 근거한다.

폐기물 발생은 인구수(혹은 도시 인구수)와 1인당 폐기물 발생률로부터 산정될 수 있다. 이때의 인구수가 폐기물이 수합된 인구의 수와 일치하지 않는다면, 불확도가 수반될 수 있다. 많은 국가에서 폐기물은 전형적으로 도시 인구 수에만 근거하여 수합된다. 그런데 도시 인구 수는 작업장이 이동됨에 따라 매일 혹은 계절적으로 변동될 수 있다.

〈표 3-23〉 SWDS로부터의 CH₄ 배출량에 대한 FOD(First Order Decay) 방법의 활용에 있어 활동자료의 기본값과 변수에 연관된 불확도 산정

활동자료와 배출계수	불확도 범위
총 도시 고형 폐기물(MSW _T)	국가 고유의 값: 30%는 주기적 조사에 근거하여 폐기물 발생 자료를 수합한 국가의 전형적인 값 ±10%는 질이 높은 자료를 가진 국가 (예컨대 모든 SWDS나 다른 처리 시설에 가중치는 두는) 질이 낮은 자료를 가진 국가: 두 배 이상

7) 제시된 불확도의 범위는 폐기물 총량에서 DOC 함량을 적용한 것이다. 표 2.4에 제시된 MSW 내 폐기물 구성요소에 대한 DOC 범위는 이들 구성 요소의 불확도를 산정하는데 사용될 수 있다.



SWDS에 보내진 MSW _T 의 비율(MSW _F)	±10%는 질이 높은 자료를 가진 국가 (예컨대 모든 SWDS에 가중치를 두는) ±30%는 SWDS의 매립량에 관한 자료를 수합한 국가 질이 낮은 자료를 가진 국가: 2개보다 많은 개수
폐기물 조성의 총 불확도	±10%는 질이 높은 자료를 가진 국가 (대표적인 SWDS에서의 정규적인 시료 채취) ±30%는 일정기간의 시료 채취를 포함하는 연구에 근거한 국가 고유의 자료를 가진 국가 질이 낮은 자료를 가진 국가: 2개보다 많은 개수
분해 가능한 유기 탄소(DOC) ⁷⁾	IPCC 기본값: ±20% 국가 고유값 대표적인 시료 채취와 분석에 기인한 경우: ±10%
변질된 분해 가능한 유기 탄소 분율(DOC _f)	IPCC 기본값: ±20% 국가 고유값: ±10%는 장기간에 걸친 실험 자료에 근거한 국가
메탄 보정 계수(MCF) = 1.0 = 0.8 = 0.5 = 0.4 = 0.6	IPCC 기본값: -10%, +0% ±20% ±20% ±30% -50%, +60%
발생된 매립지 가스 내 CH ₄ 의 분율(F) = 0.5	IPCC 기본값: ±5%
CH ₄ 회수(R)	불확도 범위는 회수되고 연소되거나 이용된 CH ₄ 의 양이 어떻게 산정되었는지에 따라 달라질 것이다. ±10%는 계량기가 있는 경우 ±50%는 계량기가 없는 경우
산화율(OX)	0이 아닌 값이 OX 자체로 사용된다면, 불확도 분석에 OX를 포함하 라. 이 경우 불확도에 관해 고려해야만 0이 아닌 값을 정당화할 수 있 다.
반감기(t1/2)	IPCC 기본값의 범위는 표 3.4에 제시된다. 국가고유값은 불확도를 고려한 값을 포함해야 한다.

출처 : 해당 장의 주 저자에 의한 전문가 판단

자료 : 환경부 · 환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인 제5권 폐기물

나. 고품 폐기물의 생물학적 처리

활동자료의 불확도는 자료가 어떻게 수집되었는가에 따라 달라질 것이다. 폐기물 발생량과 생물학적으로 처리된 폐기물의 분율에 대한 불확도 산정값은, SWDS에 매립된 MSW에 대한 방법과 동일하게 산정될 수 있다. 불확도는 해당 국가의 자료 수집의 질에 따라 달라진다.

다. 폐수처리 및 배출

1) 폐수로부터의 메탄 배출

가정 폐수

불확도의 주요 원인은 아래와 같다.

- 도시 고소득, 도시 저소득 그룹 및 지방 인구에 대해서 개발도상국에서 채택된 변소나 정화조에서 폐수가 처리되는 정도 혹은 하수에 의해 제거되는 정도 ($T_{i,j}$)
- 개발도상국의 개방형 하수도의 혐기성 정도와 CH_4 배출 예상값, '개방형' 하수도의 비율. 이것은 체류 시간과 온도, 그리고 가능성(facultative) 층의 존재와 혐기성 박테리아에 대한 유해 요소 등 (예, 특정 산업 폐수 배출)의 기타 요인에 따라 달라진다.
- 각 국가에 대한 개방형이나 폐쇄형 가정 하수도에 배출된 산업 TOW의 양은 정량화하기에 매우 어렵다.



〈표 3-24〉 가정 폐수의 불확도 범위의 기본값(default) - 활동자료

활동자료	불확도 범위
인구 수(P)	±5%
1인당 BOD	±30%
소득 그룹의 인구 비율(U)	도시화에 대한 좋은 자료가 이용 가능하다. 그러나 도시 고소득과 도시 저소득 사이의 뚜렷한 차이는 전문가 판단에 근거해야 할 수도 있다. ±15%
각 소득 그룹에 대한 처리/배출 경로 또는 시스템의 이용도(T _{ij})	좋은 기록 및 단지 하나 또는 두 개의 시스템을 가지고 있는 국가에 대해서는 3% 정도로 낮을 수 있다. 개별적인 방법/경로에 대해서 ±50%가 될 수 있다. 총 T _{ij} = 100%인 것을 검증하여야.
하수로 방류되는 추가적인 산업 BOD에 대한 보정계수	수합되지 않는 경우, 불확도는 0%이다. 수합되는 경우, 불확도는 ±20%이다.
출처: 전문가 그룹(이 절의 저자들에 의한 판단)	

자료 : 환경부·환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인 제5권 폐기물

〈표 3-25〉 산업 폐수에 대한 불확도의 기본 범위 - 활동자료

활동자료	불확도 범위
산업 생산량(P)	±25%. 더 정확한 불확도 범위를 할당하기 위하여 자료 공급원의 품질에 대해서 전문가 판단을 사용하라.
폐수/단위 생산량(W)	동일한 부문이라도 다른 국가와 다른 시설에서는 다른 폐수처리 공정을 사용할 수 있기 때문에, 이러한 자료는 매우 불확실할 수 있다. 변수들의 곱(W*COD)은 적은 불확도가 기대된다. 불확도 값은 직접적으로 kg COD/tonne-생산량으로 할당될 수 있다. -50%, +100%가 제시된다 (즉, 2배)
COD/단위 폐수(CD)	

출처 : 전문가 그룹(이 부문의 부의장, 편집자들 그리고 저자들에 의한 판단)

자료 : 환경부·환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인 제5권 폐기물

2) 폐수로부터의 아산화질소 배출

〈표 3-26〉 N₂O 방법론 기본값 자료 - 활동자료

활동자료	정의	기본값	범위
P	국가 내 인구 수	국가 고유값	±10%
단백질	연간 1인당 단백질 소비량	국가 고유값	±10%
F _{NPR}	단백질 내 질소 비율 (kg N/kg 단백질)	0.16	0.15 ~ 0.17
T _{시설}	대형 WWT 시설의 이용도	국가 고유값	±20%
F _{비소비(NON-CON)}	비 소비되는 단백질에 대해 조정하기 위한 변수	쓰레기 매립이 없는 국가 : 1.1 쓰레기 매립이 있는 국가 : 1.4	1.0 ~ 1.5
F _{산업-상업}	하수로 동시 방류되는 산업적 질소에 대해 허용하기 위한 변 수. 주요 생선 가공 설비를 지 닌 국가에 대해서, 이 변수는 더 높을 수 있다. 전문가 판단 이 권고된다.	1.25	1.0 ~ 1.5

자료 : 환경부·환경관리공단 번역본, 2006 IPCC 가이드라인 제5권 폐기물

5. summary

에너지 부문의 온실가스 배출통계는 각 국가의 에너지 밸런스 및 에너지 통계로부터 주로 도출된다. 이러한 자료의 불확도는 일반적으로 조사 설계(survey design)의 질 및 이용된 표본의 크기에 의존하므로 표본조사 설계자와 상의하도록 한다. 활동자료의 전반적 불확도는 계통오차, 우연오차 모두의 조합이라고 명시하고 있다. ‘고정연소’에 관해서는 활동자료와 관련된 불확도의 기본값(default)을 제시하고 있다. 하위 범주별로 불확도가 발생할 수 있는 원인에 관한 항목들을 제시하고 있다.

산업공정의 ‘광물산업’은 활동자료의 불확도가 배출계수에 비해서 매우 크다고 알려져 있다. 이 범주에서는 기본값이 비교적 자세히 제시되어 있으며 많은 경우의 수를 포함하고 있다. 반면 ‘화학산업’은 활동자료의 불확도는 낮은 편이며 배출계수의 불확도가 전체 불확도의 대부분을 차지한다. ‘연료로부터 비에너지 제품 및 용매사용’은 잘 개발된 에너지 통계를 가지고 있는 국가가 불확도가 낮다고 알려져 있다. ‘기타 제품 제조 및 사용’은 불확도가 발생할 수 있는 원인에 관한 항목들을 제시하고 있다.

농업, 산림 및 기타 토지 이용(AFOLU: Agriculture, Forestry & Other Land Use)부문은 토지이용(농지, 임지, 초지 등) 전반에 관련해 토양탄소 인벤토리 내 존재하는 불확도 출처를 3가지로 제시하고 있다.

- 1) 토지이용과 관리활동도와 환경데이터에 대한 불확도
- 2) Tier 1 또는 2 방법을 이용한 경우 탄소 축적량 인용값의 불확도
- 3) Tier 1 또는 2 방법을 사용한 경우 축적량 변화/배출계수에의 불확도, 접근법에 기초한 Tier 3 모델에 대한 모델구조/변수 오차, 인벤토리에 기초한 Tier 3 산정과 관련된 측정오차/샘플 다양성에 관한 불확도

폐기물 부문은 ‘고형폐기물’의 경우 자료의 질에 많이 의존하고 있다고 알려져 있으며 ‘폐수 처리 및 배출’은 불확도가 발생할 수 있는 주요원인을 제시하고 있다.



제5절 결론 및 제언

국가 온실가스 인벤토리 작성 시 신뢰성 확보를 위해서는 무엇보다 정확한 불확도의 산정이 필요하며 이에 따라 불확도에 관한 명확한 정의가 우선되어야 한다. 국가 온실가스 인벤토리 작성의 중요한 지침서인 2006 IPCC 가이드라인에서는 값의 정확성에 대한 정량적 수치에 대한 내용으로 불확도를 정의하고 있으나 그 내용이 광범위하고 모호하게 설명되어 있다. 그래서 일반적으로 통용되는 불확도인 측정불확도의 개념과 통계학의 오차의 개념, 목표관리지침의 사업체 분야의 불확도의 개념을 살펴보았다. 검토 결과, 국가 온실가스 인벤토리 불확도의 정의에 있어서는 측정 불확도의 개념을 그대로 준용할 수 있을 것이라 판단된다. 국제표준화기구(ISO)에서 정의하는 불확도의 개념인 ‘측정결과에 관련하여 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터’로 국가 온실가스 인벤토리의 불확도로 정의할 수 있을 것이다.

통계를 활용한 불확도의 산정 방법은 측정불확도의 A형 평가와 같은 개념이다. 측정불확도의 경우 측정 자료에 한정하여 설명하고 있는데 이를 조사 자료에 확장하여 통계적 기법을 활용한 불확도의 산정 부분을 정리하였다. 조사 자료 중 단순임의표집 (simple random sampling) 표본자료의 경우 불확도의 산정은 오차의 한계를 추정값으로 나누어 100을 곱한 값으로 계산될 수 있다. 이는 측정불확도에서 말하는 확장불확도의 개념이며, 측정불확도의 표준불확도는 표준오차를 추정값으로 나눈 상대표준오차의 개념이었다. 한편, 측정데이터의 경우 데이터의 분포를 알 때 확률밀도함수(PDF)를 이용하여 불확도를 산정할 수 있다. 분포의 편차를 이용하여 표준불확도를 산정하는데 이는 분포의 표준편차를 추정값으로 나눈 개념으로 통계학의 변동계수(CV)의 개념이다. 이러한 방법들을 활용하여 활동자료가 조사 자료 중 표본자료인 경우는 오차의 한계 개념을 사용해 불확도를 산정하고, 측정 자료인 경우 분포를 이용해 불확도를 산정하면 될 것이라 판단된다. 통계청 ‘가축동향조사’의 예처럼 표본추출방법과 목표오차를 제공하는 경우 통계청에서 제시한 목표오차를 불확도로 사용할 수 있다.

2006 IPCC 가이드라인에서는 부문별로 불확도 산정에 대한 가이드라인과 기본값 (default)을 제공하고 있으며 불확도가 발생할 수 있는 원인에 관한 항목들을 제시하고 있다. 그러나 제시하는 기본값이 어떻게 산정되었는가에 대한 구체적 근거는 제시하고 있지 않으며 전문가 판단으로 결정되었다고만 설명하고 있다. 에너지 부문은 특히 자료의 종류가 전수 성격의 행정자료가 많은데 전문가 판단을 통한 기본값, 불확도를 발생시킬 수 있는 원인에 대해 명시하고 있다. 산업공정 부문의 광물산업은 활동자료의 불확도가 배추계수에 비해서 매우 크다고 하며 기본값이 비교적 자세히 제시되어 있고 많은 경우의 수를 포함하고 있다. 이는 이 부분의 공정이 그만큼 복잡하다고도 생각되며 이러



한 부문에 대해서는 공정관련 전문가 프로세스 맵핑이 필요할 것이라 판단된다. 또한 이 부문은 IPCC 가이드라인에 제시된 다양한 기본값을 활용해 조합하는 것도 한 방법이 될 수 있다고 판단된다.

국가 온실가스 인벤토리를 구성하는 활동자료는 다양한 형태의 자료를 포함하고 있다. 국가승인 여부에 따라 승인통계와 비승인통계로 구분할 수도 있으며 자료 수집 방법에 따라 조사 자료, 측정 자료, 행정자료 등 다양하게 구분되며 자료의 종류에 따라 불확도 산정 방법도 다르다. 이에 따라 통계적인 방법을 활용하기 어려운 부분에 대한 산정방법의 개발 또한 필요하다. 활동자료 중 큰 비중을 차지하는 행정자료 및 협회자료 등에 대한 불확도의 산정방법이 우선되어야 할 것으로 보인다. 이러한 자료의 경우 대부분 전수자료의 성격이거나 확률적 표본추출방법을 통한 자료가 아니기 때문에 통계적 오차에 대해 실질적으로 계산하기 어려움이 있다.

이러한 부분에 대해서는 측정불확도에서 B형 평가로 설명되는 전문가 판단으로 산정해야 할 것이라 생각된다. 이 때 전문가 판단에 근거가 되는 가이드라인을 제시가 필요할 것이라 생각된다. 측정 자료에서 정확한 불확도 측정을 위해 측정과정의 각 요소들에 관해 나열한 fish-bone diagram([그림 3-1])을 작성하는데 이처럼 각각을 어떻게 정량화 할 것인가 하는 가이드라인이 필요하다. 국가 온실가스 인벤토리는 그 포괄범위가 매우 넓으며 각 부문별 하위 카테고리별 특성이 다르다.

그러므로 각 부문별, 필요에 따라서는 하위 카테고리별로 각각 자료생산자, 공정전문가, 통계전문가 등이 전문가 집단을 구성하여 그 부문에 대한 불확도의 원인을 체계화하여 불확도 산정 가이드라인을 제시하여야 할 것이다. 이 때 측정불확도에서 일반적으로 고려하는 불확도의 원인, IPCC 가이드라인에서 제공하는 부문별 하위 카테고리별 불확도의 원인 등을 고려할 수 있을 것이다. 향후 이러한 가이드라인의 작성에 대한 구체적인 연구가 수행되기를 바란다.

참고문헌

최종오, 남경희, 강주식, 오상협(2010), 「측정불확도 전문과정」, 한국표준과학연구원 KRISS.

한국표준과학연구원(2008), 「도전 측정불확도 기초에서 중급까지」, KRISS 불확도위원회
환경부·환경관리공단(2008), 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인
국제 측정학 용어집 - 기본 및 일반 개념과 관련 용어(VIM)

2006 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인

환경부(2010), 목표관리지침 사업체 분야 불확도 산정방법