



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위 청구논문
지도교수 전 의 찬

온실가스 배출계수 불확도 평가 연구
- 시멘트산업을 중심으로

세종대학교 대학원
지구환경과학과
황 수 립

석사학위 청구논문

오직 스벨체수 불도 평가 연구 | 시멘트 자형률 증진으로

2010.2

황수림

석사학위 청구논문
지도교수 전 의 찬

온실가스 배출계수 불확도 평가 연구 - 시멘트산업을 중심으로

Study of Uncertainty Evaluation of Greenhouse
Gas Emission Factors for Cement Industry

세종대학교 대학원

지구환경과학과

황 수 립

석사학위 청구논문
지도교수 전 의 찬

온실가스 배출계수 불확도 평가 연구
- 시멘트산업을 중심으로

Study on Uncertainty Evaluation of Greenhouse Gas
Emission Factors for Cement Industry

이 논문을 석사학위청구논문으로 제출합니다.

2010. 02

세종대학교 대학원
지구환경과학과
황 수 립

이 논문을 황수림의
석사학위 논문으로 인준함.

2010. 02.

심사위원장 김 기 현

심사위원 허 진

심사위원 전 의 찬

감사의 글

제 삶에서 2년간의 대학원 생활은 가장 뜻 깊고 알찬 시간이었습니다. 대학원 진학에 대한 많은 고민을 했었지만, 교수님들과 선배님들 그리고 후배님들이 이끌어 주시고 많은 도움을 주셨던 덕분에 값진 시간을 보낼 수 있었습니다. 가장 먼저 격려와 따끔한 질타로 부족한 저를 많이 성장할 수 있게 해주신 전의찬 교수님께 진심으로 감사드립니다. 지도교수님으로 모시게 된 점은 저에게 큰 행운이었으며 가장 큰 기회였습니다. 제가 학부생이었을 때부터 지도교수님으로서 저에게 많은 충고와 조언을 해주셨고, 대학원에 진학하여서도 따뜻한 격려와 관심으로 저를 이끌어 주셨습니다. 교수님을 통해서 학문적인 부분 외에도 삶을 살아가는 데에 필요한 많은 부분을 배울 수 있었습니다. 교수님을 진심으로 존경하며, 감사드립니다. 대학교 및 대학원 생활동안 저에게 해주신 많은 조언과 질책들을 잊지 않고 가슴속에 새기겠습니다.

세종대학교 지구환경과학과 교수님들께 감사드립니다. 격려와 애정으로 학문적으로 많은 도움을 주셨으며 심사위원장을 흔쾌히 수락해주신 김기현 교수님, 늘 따뜻한 관심으로 학문 뿐만 아니라 삶에 대한 조언을 많이 해주셨던 심사위원을 맡아 주신 허진 교수님, 애정으로 지식과 인생의 교훈을 알려주신 고의장 교수님, 언제나 도움을 요청할 때면 흔쾌히 도와주셨던 정명채 교수님, 마주칠 때마다 인자한 웃음으로 답해주신 배위섭 교수님, 정태웅 교수님께 진심으로 감사드립니다.

알찬 수업으로 학문의 즐거움을 알려주신 토목환경공학과 송지현 교수님, 보고서와 논문을 작성하는데 통계적인 부분에 대한 많은 도움을 주신 이승연 교수님, 연구과제를 진행할 때 부족한 저를 이끌어주셨던 이승은 박사님께 감사드립니다.

대학원 생활에 많은 도움을 주신 실험실 선배님들께 깊은 감사를 드립니다.

실험실의 큰 선배로서 언제나 도움을 주셨던 사재환 박사님, 항상 격려와 조언을 아끼지 않으셨던 박종호 선배님, 자주 뵙진 못했지만 대학원 생활의 지침을 알려주신 이성호 선배님 그리고 항상 밝은 모습으로 세심한 부분까지 늘 챙겨주셨던 정재학 선배님께 진심으로 감사드립니다. 실험실에 처음 들어왔을 때 잘 모르던 저를 항상 신경 써주시고 잘 이끌어주신 석경언니, 걱정거리가 생길 때면 깊이 들어주고 항상 같이 고민해주신 진수선배, 늘 따뜻한 격려로 이끌어주시고 힘들 때면 다독여 주며 큰 도움 많이 주신 시형선배에게 정말 감사드립니다. 동기로서 저를 많이 도와주었던 옥현오빠, 그리고 언제나 듬직하고 유쾌한 정우오빠에게 감사드리며 앞으로 실험실을 잘 이끌어 나갈 기교오빠와 향경이에게 격려의 말을 전하고 싶습니다. 환경을 아끼는 마음을 생활속에서 실천하도록 이끌어주신 이상훈 실장님, 하지원 의원님 그리고 학문에 대한 열정을 보여주신 홍기협 과장님, 이장훈 선배님, 타지에 홀로와서 고생이 많은 Thuc, 인생의 선배로서 따뜻한 미소로 늘 응원해주셨던 은숙언니께 감사드립니다. 그리고 기후변화협동과정에서 인연을 맺게 된 윤정호 과장님, 이창석 과장님, 신병철 팀장님, 김찬규 팀장님, 김상완 팀장님께 감사드립니다.

대기환경 실험실의 종종 같이 술잔을 기울였던 멋쟁이 원필오빠, 모르는 것이 있을 때 적극적으로 도와주셨던 지원언니 그리고 수질 실험실의 학부생부터 같이 해왔던 민혜언니, 항상 밝은 모습으로 인사했던 태환오빠, 보미, 가영이, 미희에게 감사드립니다. 토양오염 실험실의 모든 분들께 감사드리며 마주치면 항상 반갑게 인사하고 잠시나마 이야기를 나누었던 동기 경민씨, 철민씨, 남극씨 그리고 에너지 실험실의 태문오빠에게 감사드립니다. 토목환경공학과 송지현 교수님 실험실의 카리스마와 따뜻함을 지니신 신승규 선배님, 즐겁게 담소를 나누었던 동기 형규오빠와 정희오빠, 여자가 많이 없는 대학원에서 만나면 늘상 반갑고 즐거웠던 현정이와 해영이에게 감사드립니다. 그리고 만나면 항상 즐거웠던 지구환경과학과 귀여운 후배인 민선이에게 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 늘 즐겁고 유쾌한 말로 이끌어주셨던 시립대학교 이임학 선배님, 보고서와 논문을 작성하는데 통계적으로 많은 도

움을 주신 응용수학과 이제봉 조교님께 감사드립니다.

늘 안부를 전하고 저를 많이 챙겨주신 02학번 선배인 용진오빠, 영종오빠에게 감사드립니다. 대학교에서 만나서 벌써 6년간 같이 생활하며 즐거운 추억을 만들고 저를 많이 챙겨준 동기들인 누리오빠, 수경언니, 아영언니, 현곤오빠에게 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 그리고 학교에서 늘 함께 지내다가 졸업하고 자주 볼 수 없어서 늘 보고 싶은 승희, 보영 작가님, 동기이지만 한편으로는 오빠 같은 어려울 때 많이 도와준 상민이에게 정말 고맙다는 말을 전합니다. 고등학교에서 만나 같이 성장해온 사랑하는 소중한 친구들 소영이, 선미, 지현이, 지남이 그리고 멀리 떨어져 있어서 자주 못 보고 있지만 만나면 정말 즐거운 나홍이에게 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 그리고 항상 곁에서 많은 힘이 되었고 즐거움이자 큰 위로가 되었던 영환님에게 특별히 감사하다는 말씀 전하고 싶습니다.

마지막으로 세상에서 가장 사랑하는 가족들에게 정말 감사하다는 말 전하고 싶습니다. 늘 한결같이 천진난만한 모습으로 반겨주었던 막내 초롱이, 동생이지만 이제는 친구같은 그리고 언니를 항상 걱정해주고 챙겨주었던 수형이에게 정말 고맙다는 말을 전하고 싶고 부족한 딸을 많이 걱정하시고 격려해주셨던 세상에서 가장 소중한 부모님 글로는 표현할 수 없을 정도로 항상 감사하며 사랑한다고 전하고 싶습니다.

목 차

제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경 및 필요성	1
1.2 연구의 내용 및 구성	3
제 2 장 배출계수의 불확도 분석 방법	5
2.1 불확도의 개요	5
2.1.1 불확도의 정의	5
2.1.2 불확도의 원인	8
2.1.3 불확도 분석 방법	10
2.2 몬테카를로 시뮬레이션	12
2.2.1 몬테카를로 시뮬레이션의 개요	12
2.2.2 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 불확도 평가	14
제 3 장 불확도 평가를 위한 확률밀도함수 선정	17
3.1 확률밀도함수 종류별 특징	17
3.1.1 정규분포(Normal distribution)	19
3.1.2 로그정규분포(Lognormal distribution)	20
3.1.3 균일분포(Uniform distribution)	21
3.1.4 삼각분포(Triangular distribution)	22
3.1.5 지수분포(Exponential distribution)	23
3.1.6 감마분포(Gamma distribution)	24
3.1.7 베타분포(Beta distribution)	25
3.1.8 와이블분포(Weibull distribution)	26
3.2 확률밀도함수 선정 방법	28

3.2.1 변수 선택	28
3.2.2 확률밀도함수 선택	28
제 4 장 시멘트산업의 Non-CO₂ 배출계수 불확도 평가	32
4.1 시멘트산업의 Non-CO ₂ 배출계수 산정	32
4.1.1 현장조사 대상시설	32
4.1.2 대상 온실가스 선정	33
4.1.3 Non-CO ₂ 배출계수 산정	36
4.2 Non-CO ₂ 배출계수 불확도 평가	43
4.2.1 시멘트산업 Non-CO ₂ 배출계수의 확률분포	43
4.2.2 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 불확도 평가	44
제 5 장 결 론	50

List of Table

Table 1. Summary of uncertainty assessment of CO ₂ emission factors for stationary combustion sources of selected country(IPCC Guideline, 2006)	6
Table 2. Summary of uncertainty assessment of CH ₄ , N ₂ O emission factors for stationary combustion sources of selected country(IPCC Guideline, 2006)	7
Table 3. Characteristic of some commonly used density function(National Institute of Environmental Research, 2007; Lee, 2006)	18
Table 4. Present distribution of cement factory in Korea and target facilities of this study	32
Table 5. Classification of categories of emission from cement industry (IPCC Guideline, 2006)	35
Table 6. Calculation worksheet to get CH ₄ emission factor by exhaust gas analysis in this study	37
Table 7. Calculation worksheet to get N ₂ O emission factor by exhaust gas analysis in this study	38
Table 8. CH ₄ emission factor in the target stack	40
Table 9. N ₂ O emission factor in the target stack	41
Table 10. Comparison of non-CO ₂ (CH ₄ , N ₂ O) emission factor of cement industry	42
Table 11. P-value of non-CO ₂ emission factor by type of probability distribution function	43

List of Figure

Figure 1. Causes of uncertainty(IPCC Guideline, 2006)	8
Figure 2. Examples of symmetric uncertainties in an emission factor (IPCC Guideline, 2006)	11
Figure 3. Examples of asymmetric uncertainties in an emission factor (IPCC Guideline, 2006)	11
Figure 4. Overall structure of a generic uncertainty analysis	13
Figure 5. Process of uncertainty for GHG emission factor in this study	14
Figure 6. Outlier	15
Figure 7. Trimmed mean	15
Figure 8. Shape of normal distribution	20
Figure 9. Shape of lognormal distribution	21
Figure 10. Shape of uniform distribution	22
Figure 11. Shape of triangular distribution	23
Figure 12. Shape of exponential distribution	24
Figure 13. Shape of gamma distribution	25
Figure 14. Shape of beta distribution	26
Figure 15. Shape of weibull distribution	27
Figure 16. Non-CO ₂ emission factor developing process	28
Figure 17. Process of cement manufacture	33
Figure 18. Flow chart for the development plasticity(Hanil cement)	34
Figure 19. Result of Monte Carlo simulation of CH ₄ emission factor	46
Figure 20. Result of Monte Carlo simulation of N ₂ O emission factor	49

논문 요약

온실가스 배출계수 불확도 평가 연구 - 시멘트산업을 중심으로

산업혁명 이후 화석연료 사용 증가로 인하여 인위적으로 발생하는 온실가스의 배출량이 급증하고 있으며, 이러한 온실가스는 최근 심화되고 있는 지구온난화의 원인물질로 밝혀지고 있다. 이에 따라 온실가스 감축이 전지구적 당면과제로 나타나고 있는데, 온실가스 배출량을 효과적으로 감축하기 위해서는 정확한 배출량을 산정하여야 하며 이를 위해서는 국가 온실가스 인벤토리 시스템을 구축하여야 한다.

국가 온실가스 인벤토리의 개발에 있어서 불확도 평가는 우수실행(good practice)의 중요한 요소로 제시되고 있다(IPCC 가이드라인, 2006). 그러나 국내에서는 온실가스 배출계수 신뢰도 확보를 위한 불확도 평가와 관련된 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 IPCC 가이드라인의 불확도 평가 방법에 따라 시멘트산업에서 배출되는 Non-CO₂(CH₄, N₂O) 배출계수를 대상으로 불확도를 평가하였다. 이를 위해서 배출계수의 분포를 가장 잘 반영하는 확률밀도함수를 선택하여 최종적으로 불확도를 평가하였다.

불확도 평가를 위한 확률밀도함수인 정규분포, 로그정규분포, 감마분포, 균일분포, 지수분포를 대상으로 'R'을 이용하여 p-값을 이용한 적합도 검정을 실시하였다.

CH₄ 배출계수의 경우 p-값이 가장 크게 나타난 정규분포를 선택하여 불확도를 평가한 95% 신뢰구간에서 불확도는 6.175%로 나타났다. p-값의 크기가 두 번째인 로그정규분포와 세 번째인 감마분포의 경우 불확도는 각각 6.256%, 7.479%로 정규

분포와 큰 차이가 없었다. 반면, 지수분포의 경우에는 불확도가 61.8%로 나타나 가장 크게 평가되었다. 정규분포를 선택한 결과, CH₄ 배출계수는 2.65 kg/TJ이었으며, 불확도는 6.2% 였다.

N₂O 배출계수 경우는 p-값이 가장 크게 나타난 감마분포를 선택한 결과 95% 신뢰구간에서 불확도는 8.857%로 나타났다. p-값의 크기가 두 번째인 로그정규분포와 세 번째인 정규분포의 경우 불확도를 평가한 결과는 각각 7.374%, 7.552%로 나타나 감마분포와 큰 차이가 없었다. 지수분포의 경우 불확도가 75.4%로 나타나 불확도가 가장 크게 평가되었다. 감마분포를 선택한 결과 N₂O 배출계수는 1.14 kg/TJ이었으며, 불확도는 8.9%로 평가되었다.

주제어 : Climate change , Greenhouse gas , Emission factor ,
Uncertainty , Monte Carlo simulation

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 필요성

산업혁명 이후 화석연료 사용 증가로 인하여 인위적으로 발생하는 온실가스의 배출량이 급증하고 있는데, 이러한 온실가스는 최근 심화되고 있는 지구온난화의 원인물질로 밝혀지고 있다. 지구온난화 현상으로 지난 100년간 전세계 기온은 0.74℃ 상승하였고 해수면은 매년 1.8 mm씩 상승하고 있다(IPCC 제4차 보고서, 2007). 만약, 현재와 같이 화석연료를 지속해서 사용한다면 금세기 말에는 지구의 평균 기온이 최대 6.4℃ 상승하고 해수면이 59 cm 상승할 것으로 예측되고 있다(IPCC 제4차 보고서, 2007). 기후변화는 생태계 교란, 기상 재해, 보건 문제 증가 등의 환경적인 악영향을 미치며 지구를 위협하고 있다.

기후변화를 방지하기 위한 전지구적인 노력의 하나로 리우 유엔환경개발회의(1992. 06.)에서는 UN기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC)을 채택하였다. 또, 1997년 12월 개최된 UN기후변화협약의 제3차 당사국총회(COP 3)에서는 선진국들의 구속적인 온실가스 감축목표를 설정한 '교토의정서(Kyoto Protocol)'를 채택하였다. 교토의정서는 온실가스 배출량 감축에 대해 구속력을 갖는 최초의 국제적 규범이다. 2007년 12월 개최된 제13차 당사국총회(COP 13)에서는 '발리로드맵'을 채택하여 선진국과 함께 개발도상국도 온실가스 감축에 동참하도록 규정하였다. 1993년 12월에 UN기후변화협약에 가입한 우리나라는 세계 9위의 온실가스 배출 국가로서 제2차 의무이행기간(2013년 ~ 2017년)에 온실가스 감축 의무를 갖게 될 가능성이 높을 것으로 예상되고 있다.

국내에서는 국제적 위상에 부합하여 온실가스를 감축하고 기술개발을 통한 기후 변화 영향을 최소화하기 위하여 '기후변화협약 대응 제1차 ~ 제4차 종합대책'을

수립하였다(국무조정실, 2007). 또한, 2009년 11월 정부는 개발도상국으로는 처음으로 온실가스를 2020년까지 자발적으로 BAU(Business as usual: 배출전망치) 대비 30%를 줄이겠다는 중기 목표를 내놓았다.

온실가스 배출량을 효과적으로 감축하기 위해서는 우선적으로 배출량을 정확히 알아야 하며, 정확한 배출량을 산정하기 위해서는 국가 온실가스 인벤토리 시스템이 구축되어야 한다. 국가 온실가스 인벤토리 시스템 구축은 '기후변화협약 대응 제4차 종합대책'의 5가지 분야별 중점 추진 대책 중 인프라 구축에 해당되기도 한다. 이는 국제적 신뢰성 확보를 위해 통계 작성체계에 대한 제도적 절차 및 작성·관리 체계의 시스템화를 추진하고 국내 부문별 온실가스 배출원을 조사하고 분석하며 온실가스 배출량 관리를 체계화하는 것을 목적으로 하고 있다(국무조정실, 2007).

국가 온실가스 배출량을 산정할 때 IPCC에서는 IPCC 가이드라인의 기본배출계수(default emission factors)를 이용하는 Tier 1 수준의 배출량 산정보다 해당 국가의 특성을 반영한 국가배출계수(country-specific emission factor)를 이용하여 배출량을 산정하는 Tier 2 수준의 배출량 산정을 권고하고 있다(IPCC 가이드라인, 2006). 그러나 국내에서는 현재 대부분의 분야에서 Tier 1 방법을 이용하여 배출량을 산정하고 있다(통계청, 2008). 따라서 국내의 특성을 반영하는 국가 고유의 배출계수를 개발하고 불확도 평가 등을 통하여 신뢰도가 높은 배출계수를 개발하는 것이 중요하다.

국가 온실가스 인벤토리의 개발에 있어서 불확도 평가는 우수실행(good practice)의 중요한 요소로 제시되고 있다. 입력 변수들과 그 결과의 불확도에 대한 이해는 자료의 수집과 인벤토리 작성단계에 대한 적절성을 평가할 수 있게 한다. 또한 불확도 평가는 불확도의 주 원인이 되는 범주를 찾도록 도와주고 향후 인벤토리 개선의 우선순위를 정할 때 도움이 된다(IPCC 가이드라인, 2006).

현재 국내에서는 국가 온실가스 배출계수를 개발하기 위한 많은 연구를 수행하고 있으나 아직 검증단계에 있으며(에너지경제연구원, 2008), 배출계수 신뢰도 확보를

위한 불확도 평가에 관한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 IPCC 가이드라인의 불확도 평가 방법에 따라 시멘트산업에서 배출되는 Non-CO₂(CH₄, N₂O) 배출계수를 대상으로 불확도를 평가 하였다. 이를 위해서 배출계수의 분포도를 가장 잘 반영하는 확률밀도함수를 선택하여 최종적으로 불확도를 평가하였다.

1.2 연구의 내용 및 구성

본 연구의 대상시설인 시멘트산업에서 연료 연소에 의하여 배출되는 온실가스의 종류는 CO₂, CH₄, N₂O 등이 있다(IPCC 가이드라인, 2006). CO₂는 연료 분석을 통하여 배출계수를 산정하는데 상대적으로 불확도가 작아 본 연구에서는 제외하였다. 따라서 본 연구의 대상 온실가스는 Non-CO₂(CH₄, N₂O)로 선정하였다.

Non-CO₂ 배출계수는 배출원에서 시료를 채취하고 분석하여 산정하며, 배출계수의 불확도는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 이용하여 평가하였다. 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하기 위해서는 배출계수들의 분포 특성을 반영한 확률밀도함수를 선택해야 하는데, 본 연구에서는 'p-값'이 가장 큰 확률분포를 선택하고 95% 신뢰구간에서 불확도를 평가하였다.

본 연구의 방법 및 절차는 다음과 같다.

1. 온실가스 배출계수 불확도 평가에 대한 문헌조사를 실시하고, IPCC 가이드라인에서 불확도 평가 방법 중 하나로 제시하고 있는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 중심으로 온실가스 배출계수 불확도 평가 방법을 조사한다.

2. 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 온실가스 배출계수 불확도를 평가하기 위하여 확률밀도함수의 종류별 특성을 살펴보고 온실가스 배출계수의 분포를 반영하는 확률밀도함수를 선택하는 방법을 파악한다.
3. 고정연소 부문에 포함되는 산업 중 시멘트산업을 대상으로 온실가스 배출계수를 산정하는데 필요한 변수들을 파악하고 배출계수의 분포를 잘 나타내는 확률밀도함수를 선택한다.
4. 확률밀도함수 선택에 따른 불확도의 변화를 평가하고 가장 적합한 확률밀도함수를 선택하여 최종적으로 불확도를 평가한다.

제 2 장 배출계수의 불확도 분석 방법

2.1 불확도의 개요

2.1.1 불확도의 정의

불확도(Uncertainty)¹⁾는 결과물의 품질을 정량적으로 나타내며, 오차의 모든 근원을 포괄하는 넓은 범위의 뜻을 갖고 있다. 불확도의 가장 기초가 되는 변수는 측정 데이터이며 측정 데이터의 신뢰도를 나타내기 위해서는 불확도가 평가되어야 한다(S. Mommi et al, 2004).

온실가스 인벤토리에 대한 불확도 평가는 입력 데이터와 결과 데이터에 대한 통계적인 변화이며 이는 표준편차의 형식으로 표현한다(Morgan and Herion, 1990). 불확도 평가의 대상이 되는 입력변수에는 활동도 자료, 배출계수 혹은 배출량 측정값 등이 있는데, 불확도 결과는 입력 변수들간의 상관성 혹은 일치성에 영향을 받는다(Kristin Rypdal, 2001).

인벤토리에 대한 정확한 불확도 평가를 하기 위하여, 그리고 인벤토리를 보다 구체적으로 개선할 수 있도록 하기 위해 활동도 자료와 배출계수간의 불확도는 분리하는 것이 바람직하다(Kristin Rypdal, 2001).

불확도는 국가별로 입력 변수의 차이 뿐만 아니라 불확도 원인의 차이 등 국가적 상황에 따라 다른 양상을 나타낼 수 있다(Kristin Rypdal, 2001). 온실가스 인벤토리의 불확도를 평가한 연구 사례는 Table 1, 2와 같다.

1) Uncertainty에 대한 명명 방법은 'KS A 0002: 2004 측정학 용어'와 'KS A 3000 : 2005 측정결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침'에 따라 '불확도'로 칭함(환경부·환경관리공단, 2008).

Table 1. Summary of uncertainty assessment of CO₂ emission factors for stationary combustion sources of selected country(IPCC Guideline, 2006)

Country	95% confidence interval	Distribution	Reference
Oil			
Austria	± 0.5	Normal	Winiwarter and Rypdal, 2001
Norway	± 3	Normal	Rypdal, 1999
The Netherlands	± 2	-	Van Amstel et al., 2000
UK	± 2	Normal	Baggott et al., 2005
USA	± 2	-	EIA, 1999
Coal, coke, gas			
Austria	± 0.5	Normal	Winiwarter and Rypdal, 2001
Norway	± 7	Normal	Rypdal, 1999
The Netherlands	± 1~10	-	Van Amstel et al., 2000
UK	± 1~6	Normal	Baggott et al., 2005
USA	± 0~1	-	EIA, 1999
Other fuels(mainly peat)			
Finland	± 5	Normal	Monni et al., 2004

Table 2. Summary of uncertainty assessment of CH₄, N₂O emission factors for stationary combustion sources of selected country(IPCC Guideline, 2006)

Country	95% confidence interval	Distribution	Reference
CH₄			
Austria	± 50	Normal	Winiwarter and Rypdal, 2001
Finland	-75 ~ +10	Beta	Monni et al., 2004
Norway	-50 ~ +100	Lognormal	Rypdal, 1999
The Netherlands	± 25	-	Van Amstel et al., 2000
UK	± 50	Truncated normal	Baggott et al., 2005
USA	Order of magnitude	-	EIA, 1999
N₂O			
Austria	± 20	Normal	Winiwarter and Rypdal, 2001
Finland	- 75 ~ + 10	Beta	Monni et al., 2004
Norway	- 66 ~ + 200	Beta	Rypdal, 1999
The Netherlands	± 75	-	Van Amstel et al., 2000
UK	± 100 ~200	-	Baggott et al., 2005
USA	- 55 ~ + 200	-	EIA, 1999

2.1.2 불확도의 원인

온실가스 인벤토리의 불확도 원인은 다양하다. IPCC 가이드라인(2006)에서는 Figure 1과 같이 온실가스 배출량의 불확도 원인을 8가지로 제시하고 있다. 2006 IPCC 가이드라인에서 제시한 불확도 원인은 아래와 같다.

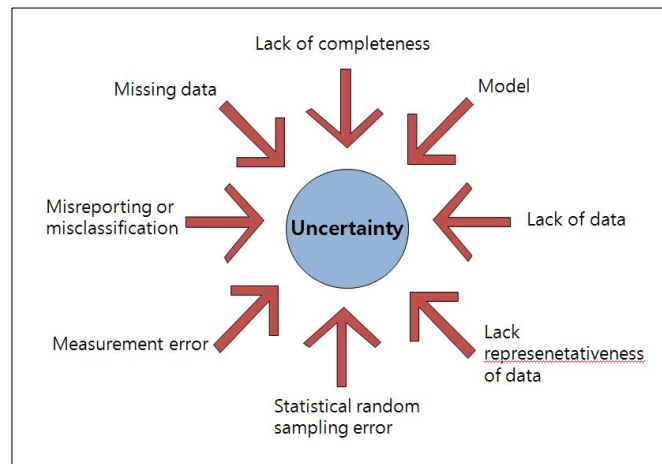


Figure 1. Causes of uncertainty(IPCC Guideline, 2006)

가. 완전성의 결여

공정에 대하여 충분히 이해되지 않았거나, 측정방법을 적용하기 어려운 경우에 측정하였거나, 또는 기타 자료가 누락된 경우이다. 편향(Bias)을 초래할 수 있으며 상황에 따라 무작위 오차의 원인이 된다.

나. 모델

온실가스 배출량 혹은 흡수량을 산정할 때 사용되는 모델에 의한 불확도 발생 원인은 다양하다. 첫 번째로 모델은 실제의 시스템을 단순화한 것이므로 대표성이 부족할 수 있으므로 필연적으로 불확도를 내포하고 있다. 두 번째로는 보간법

(Interpolation)²⁾과 외삽법(Extrapolation)³⁾으로 인하여 불확도가 발생할 수 있다. 또한 모델에 입력되는 자료 및 변수로 인하여 불확도가 발생할 수 있으며, 이는 모델로 인한 불확도 외에 추가적으로 불확도를 발생시킬 수 있다. 모델 역시 편향과 무작위 오차의 원인이 된다.

다. 자료의 부족

배출량과 흡수량을 산출하는데 이용가능한 자료가 부족할 경우이다. 이 경우에 일반적으로 유사한 부분의 자료를 대신 사용하거나 보간법 또는 외삽법을 이용한다.

라. 자료의 대표성 부족

이용가능한 데이터의 상태와 실제 배출량 또는 흡수량의 불일치로 발생한다. 자료의 대표성 부족은 전형적으로 편향을 초래한다.

마. 통계적 무작위 표본추출 오차

모집단에 대한 전수조사가 이루어지지 못하므로 발생하며 불확도는 표본의 수를 증가시킴으로써 감소될 수 있다.

바. 측정 오차

측정, 기록, 측정기준 및 참고 자료의 부정확한 값, 상수 및 기타 모수의 부정확한 값(예를 들어, IPCC 가이드라인에서 제시하는 기본배출계수(Default emission factor)), 측정기법 및 산정절차에 포함된 근사값 및 가정들 등으로 인하여 발생한다.

2) 보간법(interpolation): 모델 예측이 타당하다고 간주되는 범위 내에서 모델을 적용하는 방법

3) 외삽법(extrapolation): 모델 예측이 타당하다고 간주되는 범위 밖에서 모델을 적용하는 방법

사. 잘못된 보고 혹은 잘못된 분류

배출량과 흡수량에 대한 불완전하고 불명확한 정의로 인한 것으로 이러한 불확도의 원인은 전형적으로 편향을 초래한다.

아. 누락된 자료

측정을 실시했지만 데이터가 이용가능하지 않은 경우에 발생한다. 예를 들어 측정결과가 검출한계 이하일 경우이다. 이러한 원인은 편향과 무작위 오차를 모두 초래한다.

2.1.3 불확도 분석 방법

불확도 분석은 데이터의 불확실성이 결과에 미치는 영향을 정량화하고 규명하는 시스템적인 절차로, 투입 데이터의 확률밀도함수를 결정하고 신뢰구간을 설정하여 분석한다. 불확도 분석은 정량적인 분석결과를 제공하기 때문에 신뢰성이 높다. 그러나 모든 데이터를 확률밀도함수로 나타내는데 한계가 있으며 수행과정이 다소 복잡하다는 단점이 있다(IPCC 가이드라인, 2006).

IPCC 가이드라인에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 5000회 반복하여 95% 신뢰구간에서 lower, upper 범위를 구하도록 제시하고 있다. 신뢰구간은 중심 추정치에 대한 백분율로 표현하며 95% 신뢰구간은 확률밀도함수의 2.5 ~ 97.5% 범위 내의 구간을 일컫는다. 불확도는 Figure 2와 3에 제시한 바와 같이 평균값에 대해 대칭적인 범위로 표현할 수 있다. Figure 2는 불확도가 배출계수의 평균값인 1에 대하여 대칭일 경우이다. 불확도의 2.5% 값이 0.7이고 97.5% 값이 1.3일 경우 불확도 범위는 $1.0 \pm 30\%$ 로 나타낼 수 있다. Figure 3은 불확도가 배출계수의 평균값인 1에 대하여 비대칭일 경우이다. 불확도의 2.5% 값이 0.5이고 97.5% 값이 2일 경우 불확도 범위는 $-50 \sim +100\%$ 로 나타낼 수 있다(IPCC 가이드라인, 2006).

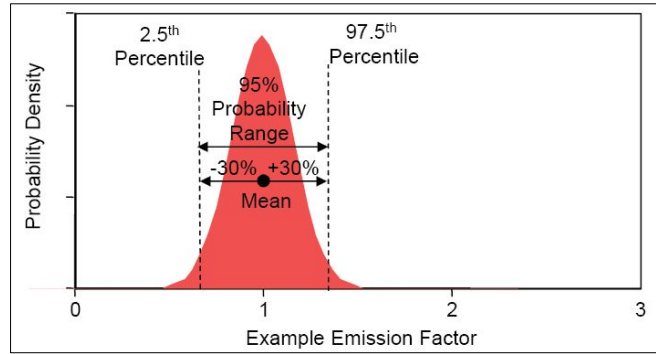


Figure 2. Examples of symmetric uncertainties in an emission factor(IPCC Guideline, 2006)

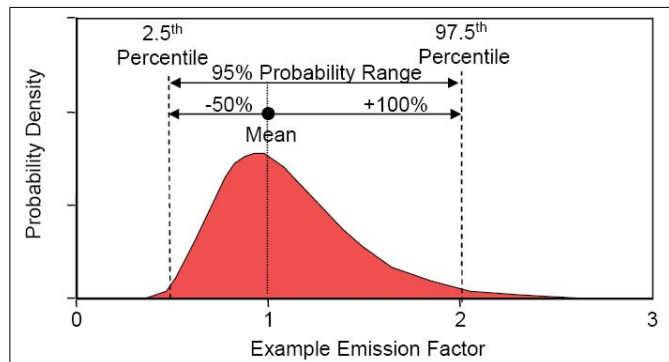


Figure 3. Examples of asymmetric uncertainties in an emission factor(IPCC Guideline, 2006)

2.2 몬테카를로 시뮬레이션

2.2.1 몬테카를로 시뮬레이션의 개요

시뮬레이션은 어떠한 분석법을 적용하기에 복잡하고 어려울 때 실제 상황을 모사하여 보다 쉽게 파악할 수 있는 분석법을 의미한다(이상구, 2006). 몬테카를로라는 명칭은 확률적 특성 때문에 도박의 도시로 유명한 모나코 북부에 위치한 '몬테카를로'에서 유래된 것으로(송시호, 2008), 몬테카를로는 고정된 변수에 대하여 고정된 값 대신 주어진 확률 곡선으로 값의 범위를 조합하는 것을 허용한다(Ramirez et al, 2006). 몬테카를로 방법(Monte Carlo method, Monte Carlo analysis)은 무작위 표본들을 사용하여 수리적인 함수의 통계적인 값을 구하는 것을 뜻한다(Ramirez et al, 2006).

몬테카를로 시뮬레이션은 측정 자료들이 주어졌을 경우 확률밀도함수를 지정하고 측정 자료들과 비슷한 난수⁴⁾를 희망하는 횟수만큼 반복적으로 여러번 생성한다(이상구, 2006). 난수는 가상적 난수생성기(PRNG)로 불리는 알고리즘에 의하여 생성되며 이러한 방법을 '가상적 무작위(pseudo-random)'로 부른다(IPCC 가이드라인, 2006). 가상적 난수를 통하여 가상 자료를 만들고 결과를 종합하여 분포를 이루게 하여 불확도를 확률적으로 파악한다. 결과의 분포는 평균값과 분산을 가지는 확률 분포를 형성한다(이상구, 2006). 즉, Figure 4에서 보는 바와 같이 각각의 변수의 확률분포를 통합해서 결과값의 확률분포를 알아낸다. 몬테카를로 시뮬레이션은 확률적 기법이므로 반복횟수가 증가됨에 따라 결과의 정밀도가 개선된다(Ramirez et al, 2006).

4) 난수: 무작위로 추출되는 확률변수의 실현값

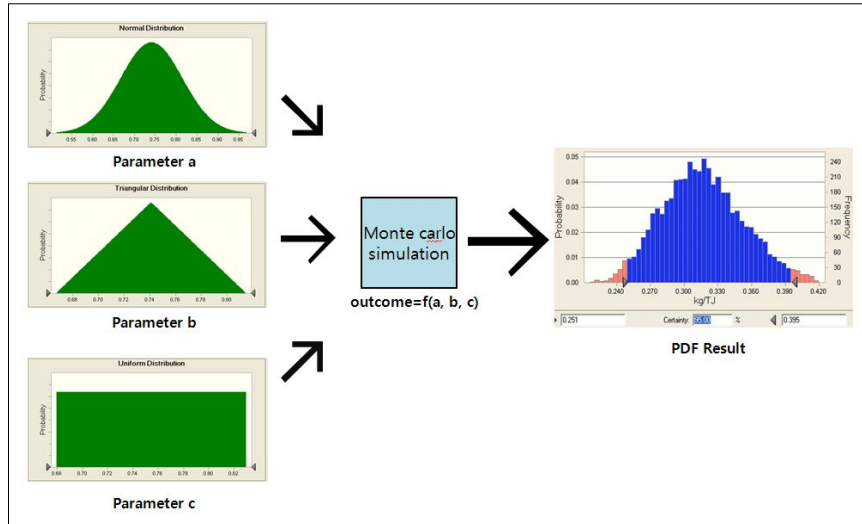


Figure 4. Overall structure of a generic uncertainty analysis

몬테카를로 시뮬레이션은 수학적 모형을 이용하여 불확도를 분석하기 어려운 상황 혹은 너무나 단순화된 수학적 모형을 사용할 수 밖에 없는 경우에 실제상황을 모방하여 불확도를 확률적으로 파악할 수 있다(이상구, 2006).

IPCC 가이드라인(2006)에는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 불확도 분석을 실시할 경우를 아래와 같이 5가지로 제시하고 있다.

- 불확도가 큰 경우
- 분포가 정규분포(Gaussian distribution)를 따르지 않을 경우
- 알고리즘이 복잡할 경우
- 활동도 자료 및 배출계수들 간에 상관관계가 존재하는 경우
- 인벤토리가 작성된 연도별로 불확도가 다를 경우

몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 불확도를 분석하기 위해서는 배출계수를

산정하는데 필요한 데이터들에 대한 적절한 확률밀도함수를 가정해야 하며, 이는 결과에 중요한 영향을 미친다. 따라서 확률밀도함수를 가정할 때는 데이터의 특징을 고려하여 결정하는 것이 중요하다(Ramirez et al, 2006).

2.2.2 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 불확도 평가

본 연구에서는 Crystal Ball 소프트웨어(Oracle's Crystal Ball Global Business Unit사, version 7)를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션으로 불확도를 평가하였다. Figure 5는 국립환경과학원(2007)에서 제시한 배출량 산정에 필요한 주요 인자의 불확도 평가 절차를 열거한 것이다.

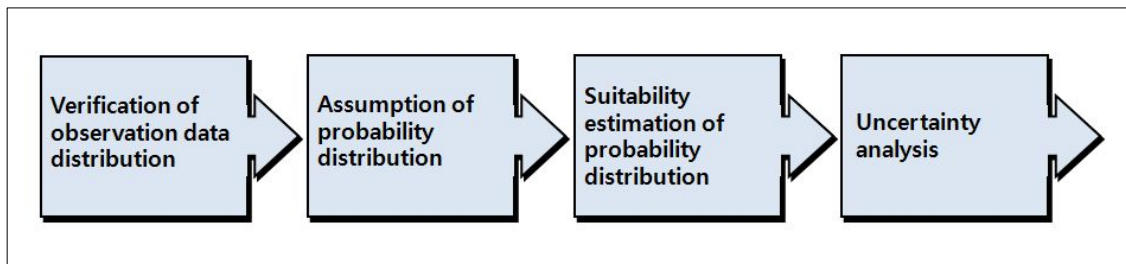


Figure 5. Process of uncertainty for GHG emission factor in this study

가. 측정자료의 분포 확인

측정된 온실가스 농도 데이터의 분포를 확인하고 Figure 6과 같이 일반적으로 다른 자료들과 분리되어 보이는 특이값(outlier)이 있을 경우 그 원인을 파악하여 제거 유무를 판단한다(김민정, 2009). 특이값을 제거할 때는 Figure 7에서 도표로 제시한 절사평균(trimmed mean) 등을 이용하여 농도 데이터의 정확성을 높일 수 있다. $\alpha\%$ 절사평균은 상·하위 $\alpha\%$ 의 자료를 제거한 후 산술평균한 것이다. 절사평균의 장점은 자료의 꼬리 값에 영향을 덜 받으며, 특이값 제거로 인하여 평균에 대한 특이값의 영향을 줄일 수 있다(전제운, 2006).

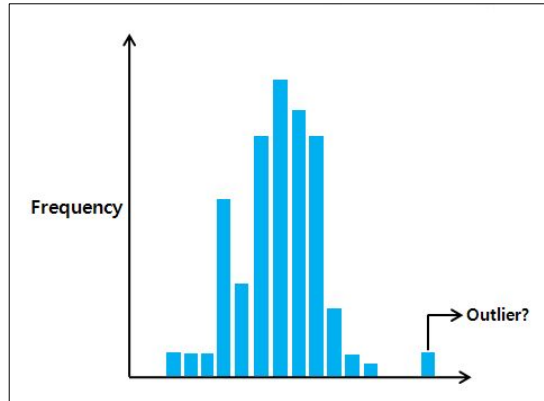


Figure 6. Outlier

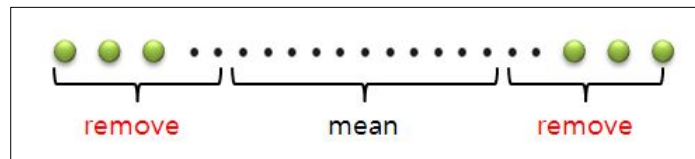


Figure 7. Trimmed mean

나. 확률밀도함수 가정

측정자료의 분포를 확인한 후 분포를 적절하게 나타낼 수 있는 확률밀도함수를 가정한다. 확률밀도함수를 통해서 직접 측정한 자료 외의 값을 예측하는 것이 가능하며 확률적 분석 결과들의 통합을 위해 중요하다(국립환경과학원, 2007). 확률밀도 함수에는 정규분포, 로그정규분포, 감마분포, 균일분포, 지수분포, 베타분포 등이 있다.

다. 확률밀도함수의 적합도 평가

모수의 확률밀도함수를 가정하였다면, 가정한 분포와 실제로 측정한 자료의 분포의 적합도를 평가한다. 적합도 평가는 자료들의 산점도(scatter plot)를 가정한 확률밀도함수와 비교하는 주관적 평가와 적합도에 대한 수치적 결과를 평가하는

통계적 검정 방법이 있다. 통계적 검정 방법은 Kolmogorov-Smirnov test, Anderson-Darling test 등이 있다(국립환경과학원, 2007).

라. 불확도 분석

배출계수를 산정하기 위해 필요한 측정 데이터의 분포를 잘 나타내는 확률밀도 함수를 가정하였다면 배출계수를 추정할 수 있으며, 배출계수 추정 결과는 확률 분포의 형태로 산출된다(국립환경과학원, 2007). 배출계수의 불확도 역시 확률분포의 형태로 결과가 산출되며 확률적 기법인 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 통하여 여러 번의 시뮬레이션을 실행하여 최종 추정 결과를 얻게 된다.

제 3 장 불확도 평가를 위한 확률밀도함수 선정

3.1 확률밀도함수 종류별 특징

확률밀도함수(probability density function: pdf)는 확률변수의 분포를 나타내는 함수로, 그 함수를 특정 구간에 대해 적분한 값이 구간에 포함될 확률값이 되는 함수이다(송요한, 1996). 즉, 수집된 자료집단의 밀집되어 있는 정도를 확률로 표현한 것으로 확률밀도함수는 확률변수 X 가 갖는 값의 범위에 따라 좁게 밀집되거나 넓게 흩어진 정도를 확률로 나타낸 함수이다. 확률분포는 x 축에 확률변수의 값을, y 축에 확률변수의 값이 나타날 확률을 표현한 곡선이다(송요한, 1996). 확률분포의 전체 면적은 1이다.

특정한 상황을 표현하는 많은 확률밀도함수가 존재하며 확률밀도함수의 선택은 함수의 영역, 함수의 범위, 모양 등에 좌우된다. 변수에 대한 충분한 실측값이 있을 경우에는 그 분포를 알 수 있으나, 충분한 실측값이 없을 경우에는 변수에 대한 특성을 고려하여 예측하는 변수에 대한 분포를 가정한다(국립환경과학원, 2007). Table 3에서는 대표적인 확률밀도함수의 특성을 제시하였다.

Table 3. Characteristic of some commonly used density function(National Institute of Environmental Research, 2007; Lee, 2006)

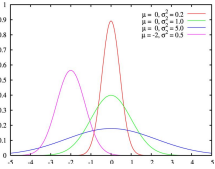
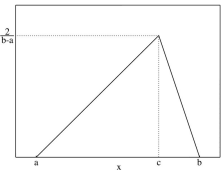
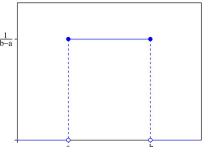
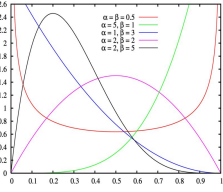
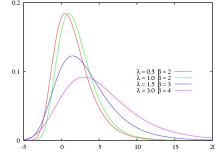
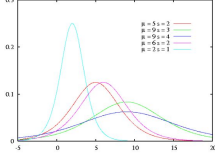
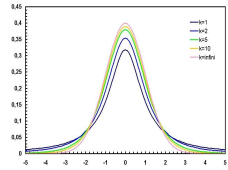
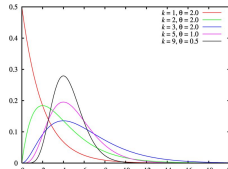
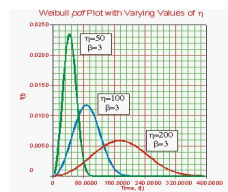
Distribution	Characteristic	Function	Shape	PDF
Normal	- Approaching in mean value, occurrence possibility is high	μ : mean σ^2 : deviation	Bilateral symmetry from mean value	
Triangular	- Min, max values are fixed - The highest occurrence possibility value between min and max value	min mode max	Variable shape as location of mode	
Uniform	- Min, max values are fixed - All values in range are equal to occurrence possibility	min max	Quadrangle shape	
Beta	- Min, max values are fixed - 0 < value < positive value	α : shape parameter β : shape parameter min, max	$0 < \alpha$ or (and) $\beta < 1$: bulged down α and $\beta > 1$: bulged up $\alpha > \beta$: right-sided $\alpha < \beta$: left-sided	
Extreme value	- Condition and parameter are complex	α : location parameter $\beta > 0$: scale parameter	Variable shape as β	
Logistic	- Condition and parameter are complex	μ : location parameter $s > 0$: scale parameter	Variable shape as s	

Table 3. Characteristic of some commonly used density function(continue)(National Institute of Environmental Research, 2007; Lee, 2006)

Distribution	Characteristic	Function	Shape	PDF
Student's t	- Possibility of values are higher than normal distribution in maximum point	v: degree of freedom m: location parameter s: scale parameter	Bilateral symmetry from center point	
Gamma	- Occurrence possibility has not limited into measurement unit - Independent occurent	α : location parameter β : scale parameter	Variable shape as α, β	
Weibull	- Related to a number of other probability distributions	α : scale parameter γ : shape parameter	Variable shape as α, γ	

3.1.1 정규분포(Normal distribution)

정규분포는 가우스분포(Gaussian distribution)로 부르기도 한다. 실험이나 관찰을 통하여 수집된 자료집단의 확률분포는 대부분 정규분포를 따르므로 자연과학 현상은 물론 사회과학 현상을 분석할 때 가장 빈번하게 활용된다(Andrea Ramirez, 2006). 정규분포는 데이터의 불확도 범위가 작고 평균값이 최빈값 및 중앙값과 일치하며 평균에 대해 대칭일 때 사용하며 변동계수(표준편차/평균)가 30% 미만일 때 사용한다(IPCC 가이드라인, 2006).

정규분포는 좌우가 대칭적인 종모양으로 여러가지 형태를 갖는데, Figure 8과 같이 위치는 평균에 의하여 결정되고 모양은 표준편차에 의하여 정해진다(Andrea Ramirez, 2006).

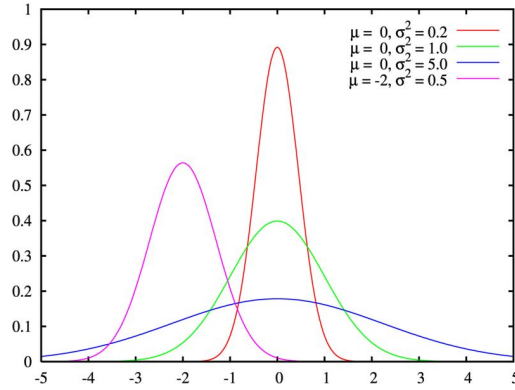


Figure 8. Shape of normal distribution

확률변수 X 가 평균이 μ 이고 분산이 σ^2 이며 정규분포 한다면, 확률밀도함수는 다음 식과 같이 나타낸다(강석복·우정수, 2008).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

3.1.2 로그정규분포(Lognormal distribution)

로그정규분포는 정규분포로부터 파생하였으므로 정규분포의 잔재가 남아있으며 정규분포와 마찬가지로 자연현상과 관련이 있다. 로그정규분포를 이루는 데이터에 자연로그를 취하면 정규분포가 나타나며 정규분포와 마찬가지로 평균과 표준편차에 의하여 모양이 결정된다(Andrea Ramirez, 2006).

불확도가 작을 경우에 사용하며 변수가 0보다 작은 값을 가질 수 없으며 왜도가 양으로 알려질 경우 그리고 변동계수가 30% 이상일 때에 사용한다. 많은 불확실한 변수들이 곱해지면 그 곱은 로그정규분포에 접근한다(Andrea Ramirez, 2006).

로그정규분포의 형태는 큰 값을 향하여 긴 꼬리를 나타내는 비대칭 구조로 Figure 9와 같다.

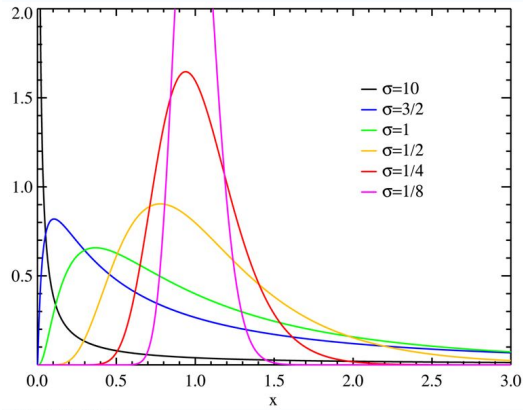


Figure 9. Shape of lognormal distribution

확률변수 X 가 평균이 μ 이고 분산이 σ^2 일 때, 확률밀도함수는 다음 식과 같이 나타낸다(문경애, 2000).

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad x > 0$$

3.1.3 균일분포(Uniform distribution)

가장 단순한 확률분포이며 어떤 구간에서 확률밀도가 일정한 상수값을 갖는 경우로 범위 내에서 어떤 값을 동일하게 구할 가능성을 나타낸다. 물리적으로 제한된 양을 표현하거나 전문가가 상한값(lower limit value)과 하한값(upper limit value)을 지정할 수 있을 때 전문가 판단을 표현하는데 유용하다(IPCC 가이드라인, 2006).

균등분포의 형태는 Figure 10과 같다.

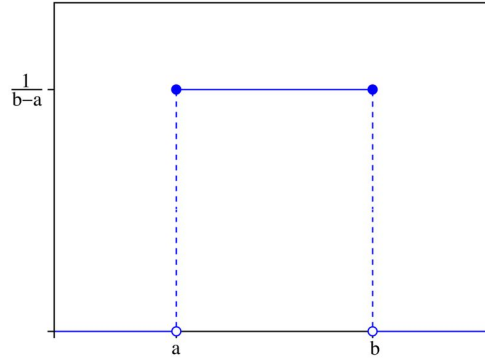


Figure 10. Shape of uniform distribution

확률변수 X 의 하한값이 a , 상한값이 b 일 경우, 확률밀도함수는 다음 식과 같다 (강석복·우정수, 2008).

$$f(x) = \frac{1}{b-a}, \quad a \leq x \leq b$$

3.1.4 삼각분포(Triangular distribution)

대부분의 값이 최빈값과 가까울 때 사용하며 범위의 상한값과 하한값에 대하여 확실성이 있으나 분포의 모양을 명확히 알 수 없을 때 사용한다. 상한값, 하한값, 최빈값이 서로 연결된 모양이 삼각형 구조를 형성하며 비대칭일 수 있다(IPCC 가이드라인, 2006). 삼각분포는 결과의 확대해석을 줄이는 데 도움을 줄 수 있다 (Morgan and Herion, 1990).

삼각분포의 형태는 Figure 11과 같다.

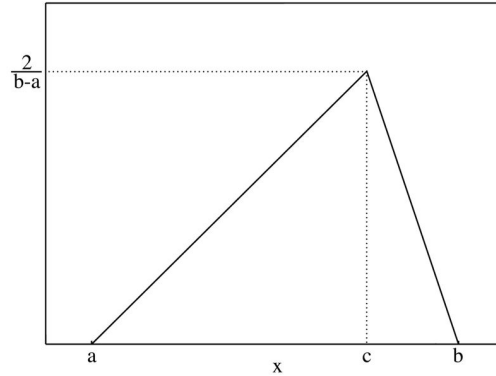


Figure 11. Shape of triangular distribution

확률변수 X 의 하한값이 a , 상한값이 b 일 경우 확률밀도함수는 다음과 같다(문성우, 2007).

$$f(x) = \frac{1}{b-a+1}, \quad a \leq x \leq b$$

3.1.5 지수분포(Exponential distribution)

지수분포에서 초점은 다음 사건이 발생할 때까지의 대기시간으로 유일하게 확률 분포의 평균만으로 결정되는 분포이다. 확률함수는 x 가 증가함에 따라 0에 가까워지며 왜도가 매우 크다(박범조, 2006).

지수분포의 형태는 Figure 12와 같다.

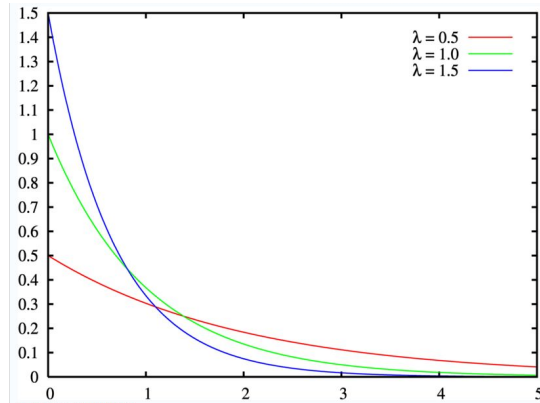


Figure 12. Shape of exponential distribution

확률변수 X 가 단위 시간 또는 공간에서 평균 도착 비율인 λ 를 모수로 가질 때 확률밀도함수는 다음과 같다(강석복·우정수, 2008).

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x > 0$$

3.1.6 감마분포(Gamma distribution)

특정 사건이 α 번 발생할 때까지 걸리는 시간과 관련한 확률을 계산하는데 사용하며 포아송(Poisson) 분포⁵⁾ 및 지수분포와 밀접한 관계가 있다. 신뢰성 이론 분야에서 중요하게 응용되는 분포이다(이동원, 2006). 감마분포의 형태는 오른쪽으로 치우친 특성을 가지고 있으며 Figure 13과 같다.

5) 포아송(Poisson) 분포: 어떤 특정 시간대에 걸쳐 알려진 어떤 사건의 발생률의 분포를 표현하기 위한 이산확률 분포이다. 포아송분포는 거리, 면적, 체적 등 다른 값의 특정 간격안에서 발생하는 사건들의 확률을 다루는 데도 쓰일 수 있다. 주로 시간, 거리, 또는 공간상에서 무작위로 드물게 발생하는 사건의 수를 묘사하는 데 사용하고 있다.

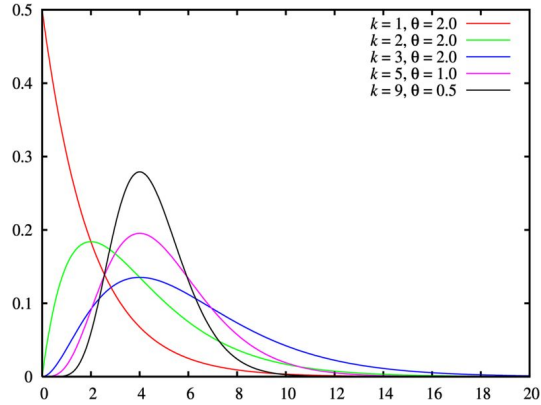


Figure 13. Shape of gamma distribution

확률변수 X 가 형태 모수인 α , 크기 모수인 β 가 있을 때 확률밀도함수는 다음 식과 같다(강석복·우정수, 2008).

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \quad 0 \leq x, \quad 0 < \alpha, \beta$$

3.1.7 베타분포(Beta distribution)

베르누이 시행에서 성공 비율을 의미한다. 주로 화학약품의 불순물, 기계의 가동률, 공정의 불량률 등에 사용하며 불확도가 클 경우 사용한다(Paul Johnson, 2006).

베타분포의 형태는 Figure 14와 같다.

-
- 6) Γ : 감마 함수(gamma function), 팩토리얼(차레곱)의 개념을 복소수까지 확장시킨 함수이다. 팩토리얼(차레곱)은 1부터 n 까지의 연속된 자연수를 차례로 곱한 값이다.
 - 7) 베르누이 시행: 임의의 결과가 '성공' 또는 '실패'의 두 가지 중 하나인 실험을 뜻한다. 즉 '예' 또는 '아니오' 중 하나의 결과를 낳는 실험을 말한다.

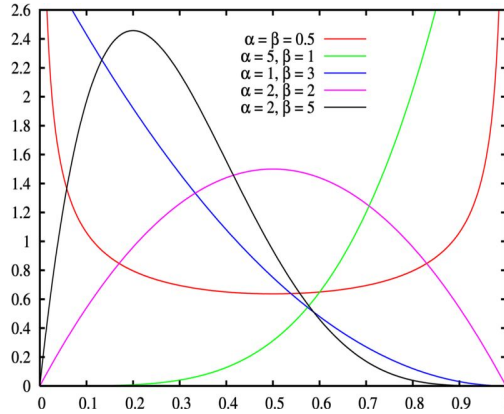


Figure 14. Shape of beta distribution

확률변수 X 가 모수 α, β 를 가질 때 확률밀도함수는 다음 식과 같다(우정수·강석복, 1997).

$$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, \quad 0 \leq x \leq 1, \quad 0 < \alpha, \beta$$

3.1.8 와이블분포(Weibull distribution)

수명과 관련된 데이터 분석에 자주 쓰이며 정규분포나 지수분포 같은 다른 분포를 나타낼 수도 있다. 주로 산업현장에서 부품의 수명을 추정하는 데 사용하며, 제품이 고장날 확률이 시간이 지나면서 높아지는 경우와 줄어드는 경우와 일정한 경우 모두 추정할 수 있다. 고장날 확률이 시간이 지남에 따라 일정한 경우는 지수분포와 같다(김광원, 2006).

와이블분포의 형태는 Figure 15와 같다.

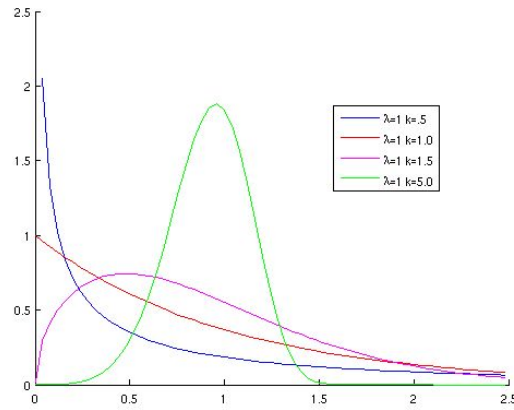


Figure 15. Shape of weibull distribution

확률변수 X 가 모수 α (형태 모수) >0 , β (크기 모수) >0 일 때 확률밀도함수는 다음 식과 같다(강석복·우정수, 2008).

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-(x/\beta)^\alpha}, \quad x > 0$$

3.2 확률밀도함수 선정 방법

3.2.1 변수 선택

본 연구에서는 배기가스의 시료채취를 통하여 Non-CO₂ 배출계수를 산정하였으며, Non-CO₂ 배출계수 산정 과정은 Figure 16과 같다. 먼저 실측한 온실가스의 농도를 구한 후 질량 농도로 환산한다. 그리고 질량농도에 측정 당시 해당 호기의 유량을 곱하여 Non-CO₂ 배출량을 산정한다. 그와 동시에 사업장에서 사용하는 연료 종류별 저위발열량과 측정 당시의 연료 종류별 연료소비량을 이용하여 활동도(activity data)로 사용할 열 생산량을 계산한다. 이렇게 산정한 Non-CO₂ 배출량을 활동도인 열 생산량으로 나누면 최종적으로 Non-CO₂ 배출계수가 산정된다.

이와 같이 모든 변수들이 수식을 통하여 최종적으로 Non-CO₂ 배출계수로 산정되므로, 본 연구에서는 Non-CO₂ 배출계수에 대한 확률밀도함수를 선택하였다.

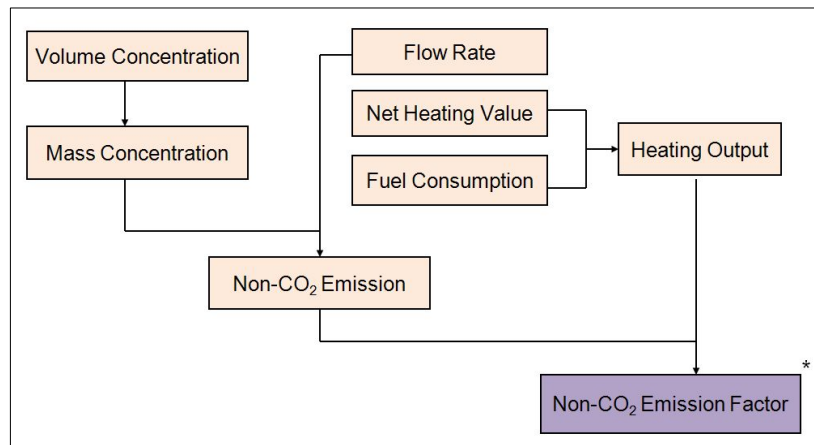


Figure 16. Non-CO₂ emission factor developing process

3.2.2 확률밀도함수 선택

배출계수 데이터의 분포를 살펴보고 분포를 반영할 수 있는 최적 확률밀도함수를

선택한다. 선택한 분포의 적합성 유무를 검정하는 방법은 충분한 자료가 존재하는 경우 왜도 및 첨도의 제곱을 이용할 수 있으며 함수는 최소제곱 적합도 검정을 이용할 수 있다(IPCC 가이드라인, 2006). 또한 몬테카를로 시뮬레이션으로 불확도를 평가할 수 있는 소프트웨어인 'Crystal ball'의 적합도 검정을 통하여 확률밀도함수를 선택할 수 있다.

본 연구의 경우 통계학적인 방법으로 확률밀도함수를 선택하고 적합도 검정을 실시하였다. 적합도 검정을 수행하기 위하여 모수 검정을 활용하기에는 자료의 수가 충분하지 않으므로 비모수 검정 방법인 '콜모고로프 적합도 검정(Kolmogorov goodness-of-fit test)'을 이용하여 변수의 분포에 적합한 확률밀도함수를 가정한 후, p-값을 이용하여 확률밀도함수 검정을 실시하였다.

가. 콜모고로프 적합도 검정(Kolmogorov goodness-of-fit test)

콜모고로프 적합도 검정은 모집단 데이터가 충분하지 않을 때 사용하는 비모수적 검정 방법의 한 종류이다. 하나의 모집단이 어떤 특정한 분포(이론적 분포)에 어느 정도 일치하는지 확인하기 위한 검정으로 '일표본 콜모고로프-스미르노프 검정(one sample Kolmogorov-Smirnov test)'이라고도 한다. 모집단의 분포함수 $F(x)$ 가 어떤 특정한 분포함수 $F_0(x)$ 와 동일한가를 검정하기 위하여 우선적으로 다음과 같은 가설⁸⁾을 설정한다(한국전자통신연구원, 2001).

$$H_0: \text{모든 } x \text{에 대해 } F(x) = F_0(x)$$

$$H_1: \text{적어도 한 점 } x \text{에 대해 } F(x) \neq F_0(x)$$

본 연구에서 사용한 가설에 대한 검정절차는 다음과 같다.

8) 본 연구에서는 양측검정을 위한 가설을 사용하였음.

$$D = \sup_x \{ |F_0(x) - F(x)| \}$$

$$= \max\{D^+, D^-\}$$

여기서,

$$D^+ = \sup_x \{F_0(x) - F(x)\}^9$$

$$D^- = \sup_x \{F_n(x) - F_0(x)\}^{10}$$

검정법은 유의수준 α 에서

$$D > d(\alpha/2, n) \text{이면 } H_0 \text{를 기각}^{11}$$

본 연구에서는 'R'¹²⁾을 이용하여 콜모고로프 적합도검정을 실시하였다.

나. p-값(p-value)

가설검정에서 귀무가설이 기각될 수 있는 최소 유의수준을 p-값이라고 한다. 이 방법은 확률개념을 이용하여 귀무가설에 반하는 정도를 표현하는 것으로 p-값이 작을수록 귀무가설을 기각할 가능성이 크다. 유의수준보다 p-값이 작을 경우 귀무가설이 기각되며 유의수준보다 크면 귀무가설을 채택한다(박범조, 2006).

즉,

$p\text{-값} \leq \alpha$: 유의수준 α 에서 귀무가설(H_0) 기각

$p\text{-값} > \alpha$: 유의수준 α 에서 귀무가설(H_0) 채택

9) 단측검정

10) 단측검정

11) α, n 은 콜모고로프 D-값 표에서 구할 수 있음.

12) 통계적 계산을 하는데 유용한 컴퓨터 언어

본 연구에서는 p-값을 입력 변수에 대해서 어떠한 확률밀도함수가 얼마만큼 적합한지를 알아보기 위해 사용하였다. R을 이용하여 p-값을 이용한 가설검정을 실시하였으며 $\alpha = 0.05$ 보다 p-값이 큰 확률밀도함수를 채택하였다.

제 4 장 시멘트산업의 Non-CO₂ 배출계수 불확도 평가

4.1 시멘트산업의 Non-CO₂ 배출계수 산정

4.1.1 현장조사 대상시설

시멘트산업의 온실가스 배출계수 산정에 사용한 데이터의 대상시설은 Table 4와 같다. 전체 시멘트 사업장 중 전체 클링커 생산량의 92%를 차지하는 상위 6개 업체를 선정하고 생산 능력이 큰 사업장의 시료를 채취하여 자료의 대표성을 확보하였다.

Table 4. Present distribution of cement factory in Korea and target facilities of this study

Region	The number of facilities	Kiln manufacture		Target facilities	
		1,000 ton	%	The number of facilities	%
Gangwon area	6	36,781	59.52	4	66.6
Chungbuk area	4	23,868	38.63	2	50.0
Gyeongbuk area	1	568	0.92	0	0
Jeonnam area	1	577	0.93	0	0

시료는 2008년 현장조사를 실시한 대상 사업장의 stack에서 한번에 3개의 테들러 백(Tedlar bag)에 시료를 20분 간격으로 4번 채취하여 총 12개의 시료를 채취한 것이다. 2009년에는 30분에 1개씩 8시간동안 시료를 채취하여 총 16개의 시료를 추가하였다. 따라서 6개 사업장, 16개의 Stack에서 채취한 총 시료수는 370개이다.

4.1.2 대상 온실가스 선정

가. 시멘트 제조 공정

시멘트 제조 공정은 Figure 17과 같이 채광공정, 원료 및 연료 분쇄공정, 소성공정, 제품화 공정으로 크게 4가지로 나눌 수 있다. 석회는 주로 강원도를 중심으로 산재하고 있으며 노천 채굴로 주로 계단식 채굴방법을 사용한다(세종대학교, 2008). 채굴된 석회석은 1, 2, 3차 분쇄과정을 거쳐 벨트 컨베이어 등에 의하여 예비 혼합 저장 시설로 운반된다(윤석경, 2006). 예비 혼합 저장시설에서는 석회석 및 부원료(규산질, 알루미나)를 정확히 혼합한 후 분쇄기로 분쇄한 후 원료 저장시설로 운반된다. 이 때 다음 단계인 소성공정에서 클링커의 소결이 잘 이루어지기 위해서는 혼합이 잘 이루어져야 한다(에너지관리공단, 2008). 소성공정에서는 Figure 18과 같이 원료가 예열기를 거쳐 약 800 ~ 860℃까지 예열된다. 예열기로부터 유입된 원료는 소성로에서 1,350 ~ 1,450℃까지 가열되어 시멘트의 반제품인 클링커가 형성된다. 소성로에는 원료를 소성하기 위하여 버너가 설치되어 있으며, 이 버너의 연료로 유연탄, 중유, 폐자원 연료 등을 사용한다(정재학, 2006). 생산된 클링커는 냉각기로 이동한 뒤 석고와 함께 미분쇄되어 시멘트가 탄생하고 제품으로 만들어진다(에너지관리공단, 2008).

본 연구에서는 시멘트 제조공정 중 가장 핵심 공정인 소성공정 과정에서 배출되는 온실기체를 대상물질로 선정하였다.

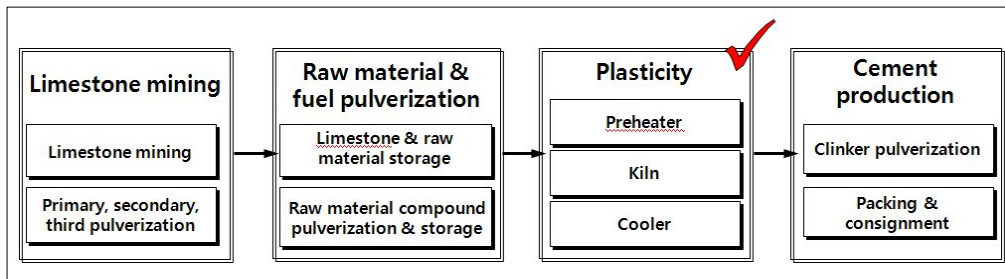


Figure 17. Process of cement manufacture

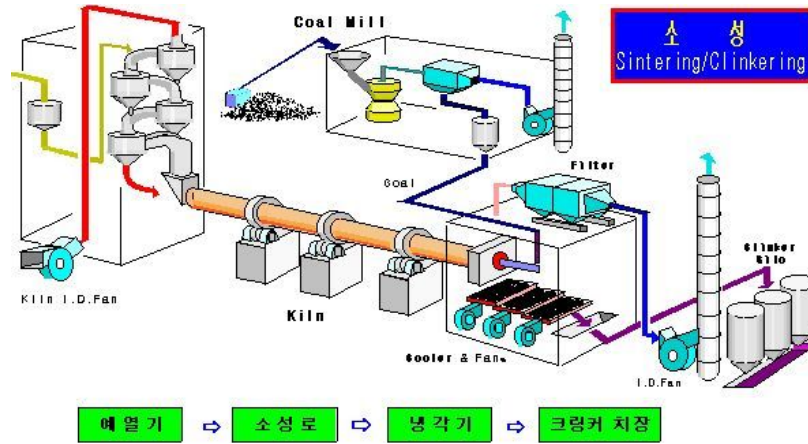


Figure 18. Flow chart for the development plasticity(Hanil cement)

나. 대상 온실가스

소성공정에서 배출되는 온실가스는 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories volume 1 General Guidance and Reporting에서 제시하고 있는 Table 5와 같이 에너지 카테고리에서 1A2 Manufacturing Industries and Construction으로 분류되며, 보다 세부적으로 1A2 f Non-Metallic Minerals로 분류된다. 또한 산업공정 및 제품생산 카테고리에서는 2A1 Cement production으로 분류된다. 시멘트산업에서는 연료 연소에 의해 CO₂, CH₄, N₂O등이 배출되며, 생산공정에서 CO₂가 배출된다. 생산공정에서 CH₄도 배출되긴 하지만 시멘트 생산시 소성로의 고온(1,500℃)으로 인해 배출량이 매우 적으므로 다루지 않는다(IPCC 가이드라인, 2006). 따라서 본 연구에서는 연료연소에 의하여 배출되는 CH₄, N₂O를 대상으로 배출 계수의 불확도를 평가하였다.

Table 5. Classification of categories of emission from cement industry(IPCC Guideline, 2006)

Category Code	Category Name	Greenhouse Gases
1. Energy		
1A	Fuel Combustion Activities	
1A2	Manufacturing Industries and Construction	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 a	Iron and Steel	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 b	Non-Ferrous Metals	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 c	Chemicals	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 d	Pulp, Paper and Print	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 e	Food Processing, Beverages and Tobacco	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 f	Non-Metallic Minerals (Includes products such as glass ceramic, cement, etc)	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 g	Transport Equipment	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 h	Machinery	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 i	Mining(excluding fuels) and Quarrying	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 j	Wood and Wood Products	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 k	Construction	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 l	Textile and Leather	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
1A2 m	Non-specified Industry	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
2. Industrial process and product use		
2A	Mineral Industry	
2A1	Cement Production	CO ₂

4.1.3 Non-CO₂ 배출계수 산정

가. 산정방법

Non-CO₂의 배출은 연료에 함유된 탄소 함량보다도 연소기술, 작동조건, 방지시설, 유지관리 등과 같은 요인에 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 stack에서 배출되는 배기가스 등의 Non-CO₂ 농도를 실측하여 배출계수를 산정하였다.

Non-CO₂ 배출계수를 산정하기 위한 worksheet는 Table 6, 7과 같이 총 4단계로 나누어져 있다. 1단계에서는 채취한 Non-CO₂ 농도와 유량을 입력하며, 2단계에서는 저위발열량, 연료소비량, 제품생산량 등을 입력한다. 3단계에서는 농도(mass concentration)에 유량을 곱하여 배출량을 산정하고, 4단계에서는 배출계수를 산정한다.

Table 6. Calculation worksheet to get CH₄ emission factor by exhaust gas analysis in this study

Step 1 (Methane concentration)				
Item	Volume concentration	Mass concentration	Flow rate	
Sub-Item	A	B	C	
Unit	ppm	kg/m ³	m ³ /hr	
Calculation		$A \times (16 \div 22.4) \times (273 \div 296)$		
Step 2 (Raw Data)				
Item	Lower heating value	Fuel consumption	Manufactures production	Heating output
Sub-Item	D	E	F	G
Unit	TJ/ton	ton/hr	ton/hr	TJ/hr
Calculation				C×D
Step 3 (Methane Emission)				
Item	CH ₄ emission			
Sub-Item	H			
Unit	kg CH ₄ /hr			
Calculation	B×C			
Step 4 (Methane Emission Factor)				
Item	CH ₄ emission factor			
Sub-Item	H - ①	H - ②		
Unit	t CH ₄ /TJ	t CH ₄ /ton clinker		
Calculation	$H \div C \div 10^3$	$H \div F \div 10^3$		

Table 7. Calculation worksheet to get N₂O emission factor by exhaust gas analysis in this study

Step 1 (Nitrous oxide concentration)			
Item	Volume concentration	Mass concentration	Flow rate
Sub-Item	A	B	C
Unit	%	kg/m ³	m ³ /hr
Calculation		$A \times (44 \div 22.4) \times (273 \div 296)$	
Step 2 (Raw Data)			
Item	Lower heating value	Fuel consumption	Electric power generation
Sub-Item	D	E	F
Unit	TJ/ton	ton/hr	MWh
Calculation			
Step 3 (Nitrous oxide Emission)			
Item	N ₂ O emission		
Sub-Item	G		
Unit	kg N ₂ O / hr		
Calculation	$B \times C$		
Step 4 (Nitrous oxide Emission Factor)			
Item	N ₂ O emission factor		
Sub-Item	H - ①	H - ②	
Unit	t N ₂ O/TJ	t N ₂ O/MWh	
Calculation	$G \div (D \times E) \div 10^3$	$G \div F \div 10^3$	

나. 산정결과

CH₄의 경우에는 구체적인 원인은 아직 밝혀지지 않았으나, 농도 변동이 상당히 큰 것으로 나타났다. 이러한 농도 변동은 연료로 유연탄 뿐만 아니라 폐자원 연료를 사용하기 때문에 나타나는 것으로 추정된다. CH₄의 배출계수를 유연탄을 대상으로 한 IPCC 및 다른 연구결과와 비교하기 위하여 폐자원 혼소(混燒) 시, 농도 값을 제외하였다. 그리고 범위를 벗어난 특이값을 제외하고 꼬리값(Figure 7 참조)의 영향을 줄이기 위하여 15% 절사평균 즉, 농도 분포 중 상·하위 15%를 제거한 후 산술평균 하였다. 15% 절사평균은 '국립환경과학원 대기오염물질 배출계수관리위원회'에서도 사용하고 있다. N₂O 농도는 CH₄ 농도에 비하여 특이값이 거의 없었으므로, 15% 절사평균만 적용하였다.

본 연구에서 산정한 시멘트산업의 Non-CO₂ 배출계수는 Table 8, 9와 같다. CH₄ 배출계수는 1.53 ~ 4.87 kg/TJ 범위로 평균은 2.65 kg/TJ이며, N₂O 배출계수는 0.34 ~ 2.53 kg/TJ 범위로 평균은 1.14 kg/TJ로 산정되었다. CH₄ 배출계수가 가장 크게 산정된 호기는 E 사업장의 7호기로 CH₄ 배출계수가 4.87 kg/TJ이었으며 가장 작게 산정된 호기는 E 사업장의 1호기로 CH₄ 배출계수가 1.53 kg/TJ이었다.

Table 8. CH₄ emission factor in the target stack

(Unit: kg/TJ)

Target stack	CH ₄ emission factor
A kiln 5	2.32
A kiln 6C	1.61
C kiln 3	3.82
C kiln 5	3.80
D kiln 6	2.45
D kiln 7	1.83
E kiln 1	1.53
E kiln 7	4.87
average	2.65

N₂O 배출계수가 가장 크게 나타난 호기는 E 사업장의 7호기로 N₂O 배출계수가 2.53 kg/TJ이었으며 가장 작게 산정된 호기는 A 사업장의 5호기로 N₂O 배출계수가 0.34 kg/TJ로 산정되었다.

Table 9. N₂O emission factor in the target stack

(Unit: kg/TJ)

Target stack	N ₂ O emission factor
A kiln 5	0.34
A kiln 6C	0.36
B kiln 2	1.12
C kiln 3	1.29
D kiln 6	1.68
D kiln 7	0.94
E kiln 1	0.70
E kiln 4	1.32
E kiln 7	2.53
average	1.14

IPCC 및 국외의 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National GHG Inventory Report: NIR)에서 제시하고 있는 배출계수와 본 연구에서 산정한 배출계수를 비교한 것은 Table 10과 같다. IPCC 배출계수는 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory에서 제시하고 있는 배출계수를 사용하였으며, 각 국가별 배출계수는 2005년 NIR에 제시된 1A2f Non-Metallic minerals에 해당되는 배출계수를 사용하였다. 본 연구의 대상 사업장에서는 유연탄을 주연료로 사용하므로, NIR에서 연료별로 배출계수를 제시할 경우 유연탄의 배출계수와 비교하였다.

IPCC 및 선진국의 CH₄ 배출계수의 경우 1.0 ~ 15 kg/TJ 범위이며 N₂O 배출계수의 경우 1.0 ~ 3 kg/TJ 범위이다. IPCC와 일본의 경우 CH₄ 배출계수는 제시하고 있으나, N₂O 배출계수는 제시하지 않고 있다. 본 연구에서 산정한 CH₄ 배출계수는

IPCC에서 제시한 값보다 약 2.6배 더 크며, 일본 NIR 보다는 약 1.8배 큰 것으로 나타났다. 호주 NIR의 CH₄ 배출계수가 1.0 kg/TJ, N₂O 배출계수가 0.8 kg/TJ로서 본 연구의 CH₄ 배출계수가 약 2.7배 크며, N₂O 배출계수의 경우는 본 연구결과가 약 2배 큰 것으로 나타났다. 덴마크 NIR의 CH₄ 배출계수는 15 kg/TJ, N₂O 배출계수는 3 kg/TJ로서 IPCC 및 국외 NIR에서 제시하고 있는 배출계수 중에서 가장 큰 값을 제시하고 있다. 본 연구에서 산정한 배출계수와 비교하면, CH₄ 배출계수의 경우 본 연구에서 산정한 배출계수가 약 5.7배 작은 것으로 나타났으며, N₂O 배출계수의 경우 본 연구에서 산정한 배출계수가 약 2.6배 작은 것으로 나타났다. 오스트리아 NIR에서 제시하고 있는 CH₄ 배출계수는 7.0 kg/TJ로 본 연구에서 산정한 배출계수가 약 2.6배 작은 것으로 나타났으며, N₂O 배출계수는 1.4 kg/TJ로 본 연구에서 산정한 배출계수와 비슷한 것으로 나타났다.

Table 10. Comparison of non-CO₂(CH₄, N₂O) emission factor of cement industry
(Unit: kg/TJ)

	Fuel type	CH ₄ emission factor	N ₂ O emission factor
IPCC	coal	1.0	-
Japan	solid fuel, liquid fuel, gaseous fuel	1.5	-
Australia	black coal	1.0	0.8
Denmark	coal	15	3
Austria	lignite and brown coal	7.0	1.4
This study	coal, waste tire, waste plastic, RDP ¹³⁾ , pet coke	2.65	1.14

13) RDF: 폐합성수지

4.2 Non-CO₂ 배출계수 불확도 평가

4.2.1 시멘트산업 Non-CO₂ 배출계수의 확률밀도함수

시멘트산업 온실가스 배출계수의 분포를 반영한 최적 확률밀도함수를 선택하기 위하여 대표적이며 자주 쓰이는 확률분포인 정규분포, 감마분포, 균일분포, 로그 정규분포, 지수분포를 대상으로 'R'을 이용하여 적합성검정에 대한 p-값을 구하였다. 이때, 유의수준은 0.05로 정하였다.

온실가스 배출계수의 확률분포 종류별 p-값은 Table 11과 같다. CH₄ 배출계수의 확률분포는 정규분포의 p-값이 0.79로 가장 큰 값을 가졌으며, N₂O 배출계수의 경우에는 감마분포의 p-값이 0.98로 가장 큰 값을 가진 것으로 나타났다. p-값이 가장 작게 나타난 분포는 CH₄ 배출계수의 경우 지수분포로 p-값이 0.08이며 N₂O 배출계수의 경우에는 균일분포로 p-값이 0.23이다. CH₄ 배출계수, N₂O 배출계수의 분포에 유의수준 0.05 기준에서 볼 때 적합하지 않은 확률밀도함수는 없었으나, CH₄ 배출계수의 경우 지수분포는 적합하지 않다고 볼 수 있다.

Table 11. P-value of non-CO₂ emission factor by type of probability distribution function

Type of probability distribution	P-value of CH ₄ emission factor	P-value of N ₂ O emission factor
Normal	0.79	0.91
Gamma	0.64	0.98
Uniform	0.54	0.23
Lognormal	0.65	0.95
Exponential	0.08	0.52

4.2.2 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 불확도 평가

각 확률분포별 p-값 분석 결과, p-값이 큰 순서대로 확률분포를 선택하여 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 불확도를 평가하였다.

불확도는 몬테카를로 시뮬레이션의 분석 결과를 이용하여, 다음과 같이 일본 NIR에서 제시한 불확도 산정 식을 이용하여 평가하였다. 다음 식은 데이터 수가 5개 이상일 때 사용가능 하며 표본 데이터에 대한 단순 평균 계산으로 배출계수를 산정하였을 때 사용할 수 있다(Japan NIR, 2008).

$$Uncertainty(\%) = \frac{1.96 \times \sigma_{EF}}{EF} \times 100$$

σ_{EF} : Standard Deviation of Average

EF: Emission Factor

가. CH₄ 배출계수 불확도 평가

CH₄ 배출계수 불확도 평가 결과는 Table 12와 Figure 19와 같다. p-값이 0.78로 가장 크게 나타난 정규분포를 선택하여 불확도를 평가하면 95% 신뢰구간에서 불확도는 6.175%로 나타났다. p-값이 0.65로 두 번째로 크게 나온 로그정규분포를 선택하여 불확도를 평가하면 95% 신뢰구간에서 불확도는 6.256%로 나타났다. p-값이 0.64로 세 번째로 크게 나타난 감마분포를 선택하여 불확도를 평가한 결과 95% 신뢰구간에서 불확도는 7.479%로 나타났다. 정규분포, 로그정규분포, 감마분포를 선택하여 평가한 불확도는 서로 비슷한 양상을 보이고 있다. p-값이 0.54로 네 번째로 크게 나온 균일분포를 선택하여 불확도를 평가하면 95% 신뢰구간에서 불확도는 3.607%로 나타났다. 이는 앞에서 분석한 불확도보다 작은 값이다. p-값이 가장 작은 0.08로 나타난 지수분포를 선택하여 불확도를 평가하면 95% 신뢰구간에서 불확도가 61.759%로, 불확도가 가장 큰 것으로 평가되었다.

p-값을 기준으로 볼 때, p-값이 가장 큰 경우의 확률분포가 데이터의 분포에 가장 적합하다고 볼 수 있으므로, 불확도 또한 비교적 작게 나올 것으로 판단된다. 따라서 균일분포를 제외하면 시멘트산업의 CH₄ 배출계수 불확도는 정규분포일 때, 6.175%로 얻어졌다. 또, Table 11과 12의 결과에서 보는 바와 같이 감마분포와 로그정규분포의 경우에도 p-값이 어느 정도 큰 값을 가지며 불확도가 작다. 불확도 기준에서 보면 균일분포가 가장 작은 값을 갖지만 p-값이 상대적으로 매우 작아서 데이터 분포를 잘 모사하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 시멘트산업의 CH₄ 배출계수에 대한 확률분포는 정규분포, 감마분포, 로그정규분포 중 어느 것으로 선정해도 큰 차이는 없지만, 본 연구에서는 p-값을 기준으로 하여 정규분포로 선정하였다.

Table 12. Result of Monte Carlo simulation by probability density distribution of CH₄ emission factor

(Unit: kg/T)

Distribution	Mean	Median	Standard Deviation	Variance	95% Minimum	95% Maximum	Uncertainty (%)
Normal	2.825	2.827	0.089	0.008	2.652	3.002	6.175
Lognormal	2.824	2.822	0.090	0.008	2.652	3.003	6.256
Gamma	3.276	3.263	0.125	0.016	3.068	3.561	7.479
Uniform	2.826	2.826	0.052	0.003	2.725	2.927	3.607
Exponential	2.815	2.698	0.887	0.787	1.430	1.847	61.759

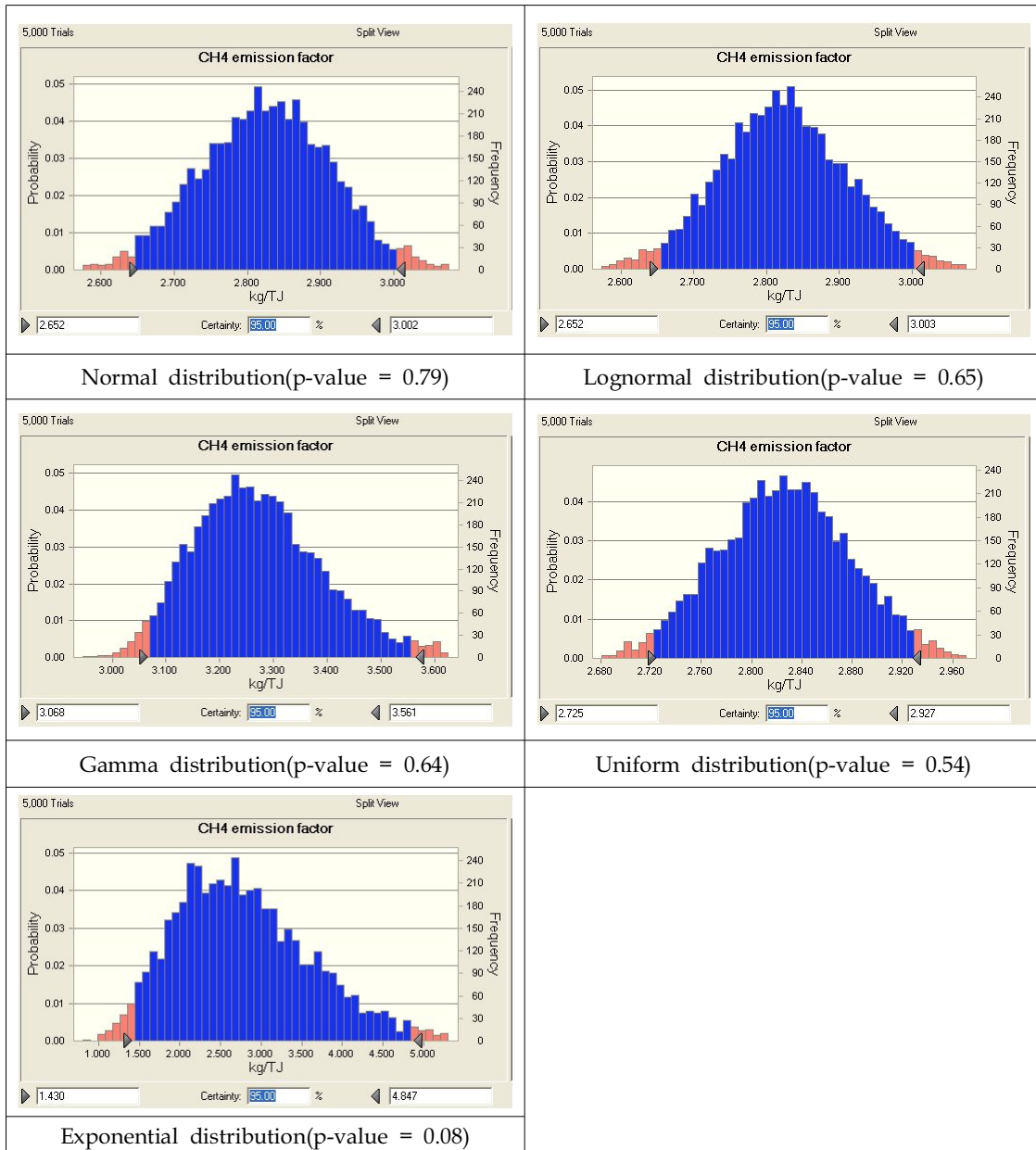


Figure 19. Result of Monte Carlo simulation of CH₄ emission factor

나. N₂O 배출계수 불확도 평가

N₂O 배출계수의 확률분포 선택에 따른 몬테카를로 시뮬레이션 결과는 Table 13과 Figure 20과 같다. N₂O 배출계수 불확도를 평가하기 위하여 우선적으로 p-값이 0.98로서 가장 크게 나타난 감마분포를 선택하여 불확도를 평가하였는데, 95% 신뢰구간에서 불확도는 8.857%로 나타났다. p-값이 0.95로 두 번째로 크게 나타난 로그정규분포를 선택하여 불확도를 평가하면 95% 신뢰구간에서 7.374%로 나타났다. p-값이 0.91로 세 번째로 크게 나타난 정규분포를 선택하여 불확도를 평가한 결과는 95% 신뢰구간에서 7.552%로 나타났다. 감마분포, 로그정규분포, 정규분포를 선택하여 불확도 범위를 분석한 결과는 비슷한 양상을 보이고 있다. p-값이 0.52로 네 번째로 크게 나온 지수분포를 선택하여 불확도를 평가하면 95% 신뢰구간에서 불확도는 75.437%로 나타나 불확도 범위가 월등히 크게 나타났다. p-값이 0.23으로 가장 작게 나타난 균일분포를 선택하여 95% 신뢰구간에서 불확도를 평가한 결과, 4.287%로 나타났으며 가장 작은 불확도를 보이고 있다.

N₂O 배출계수 역시 CH₄ 배출계수의 경우와 같은 원리로 p-값이 가장 큰 확률 밀도함수가 데이터의 분포를 가장 잘 나타내므로 불확도 또한 비교적 작게 나타날 것으로 판단된다. 위의 결과에서 p-값을 기준으로 보면 정규분포, 감마분포, 로그정규분포가 적합도 검정에서 적합한 것으로 평가되었으며, 불확도 값도 세 분포에 대해 매우 비슷한 값을 갖는다. 따라서 시멘트산업의 N₂O 배출계수에 대한 확률 분포는 감마분포, 정규분포, 로그정규분포 중 어느 것으로 선정해도 큰 차이는 없지만, 본 연구에서는 p-값을 기준으로 하여 감마분포로 선정하였다.

Table 13. Result of Monte Carlo simulation by probability density distribution of N₂O emission factor

(Unit: kg/TJ)

Distribution	Mean	Median	Standard Deviation	Variance	95% Minimum	95% Maximum	Uncertainty (%)
Gamma	1.372	1.366	0.062	0.004	1.270	1.512	8.857
Lognormal	1.143	1.142	0.043	0.002	1.060	1.231	7.374
Normal	1.142	1.142	0.044	0.002	1.054	1.226	7.552
Exponential	1.151	1.094	0.443	0.196	0.472	2.202	75.437
Uniform	1.143	1.143	0.025	0.001	1.094	1.191	4.287

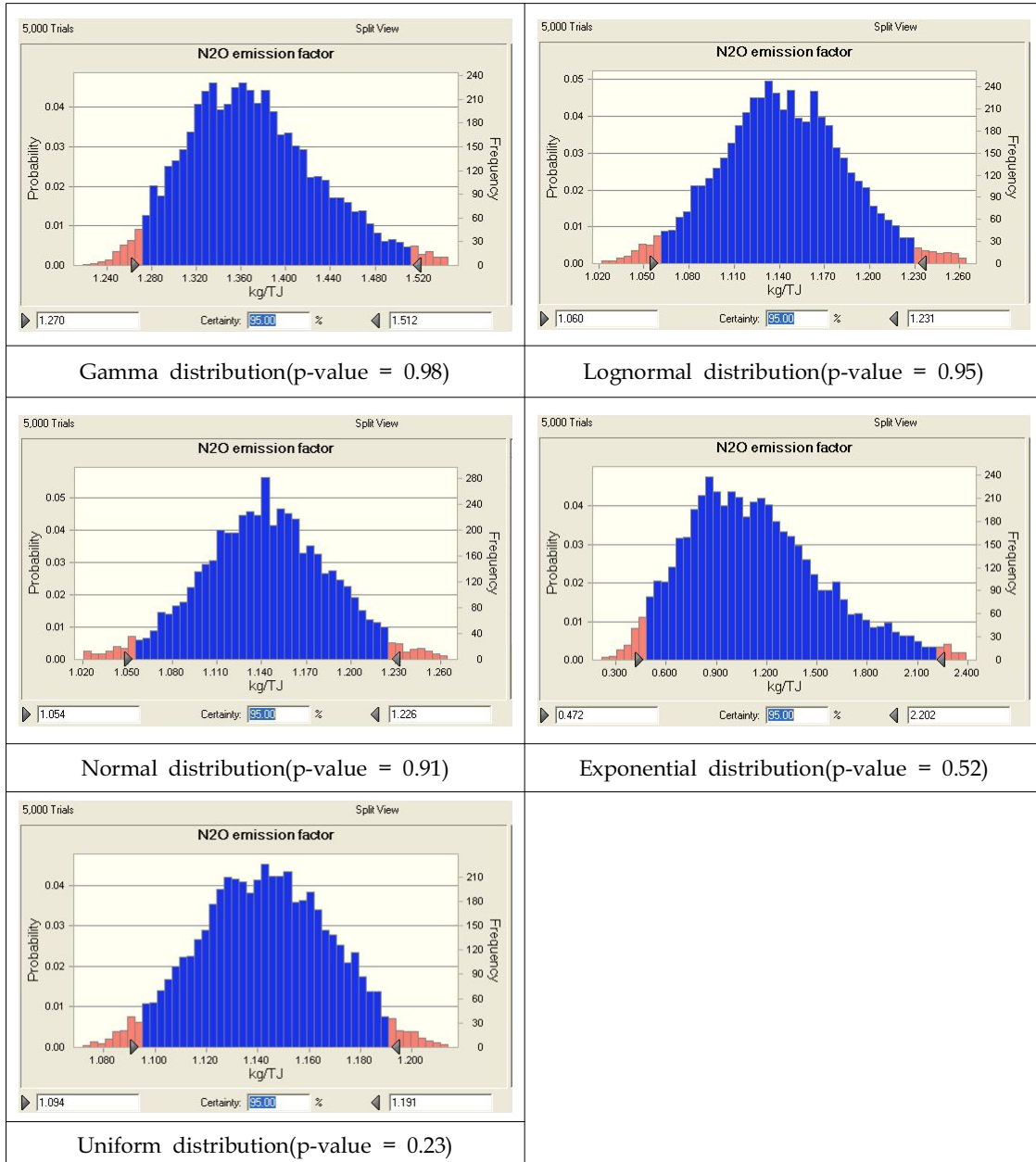


Figure 20. Result of Monte Carlo simulation of N₂O emission factor

제 5 장 결 론

IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 불확도 평가 방법에 따라 에너지 부문에서 배출되는 Non-CO₂(CH₄, N₂O) 배출계수의 불확도 평가 방법을 연구하고 시멘트산업(1A2 f Non-Metallic Minerals)을 대상시설로 선정하여 배출계수의 불확도를 평가하였다.

시멘트 제조 공정 중 가장 핵심 공정인 소성공정에서 배출되는 CH₄, N₂O를 대상물질로 선정하였다. CO₂의 경우에는 연료 분석을 통하여 배출계수를 산정하므로 불확도 크기에 대한 물리적인 제약이 있으므로 불확도가 상대적으로 작아 제외하였다. 본 연구에서 산정한 CH₄ 배출계수는 1.53 ~ 4.87 kg/TJ 범위로 평균은 2.65 kg/TJ 이며 N₂O 배출계수는 0.34 ~ 2.53 kg/TJ 범위로 평균은 1.14 kg/TJ 이다.

몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 이용하여 온실가스 배출계수 불확도를 평가하기 위하여 확률밀도함수의 종류별 특성을 살펴보고 온실가스 배출계수들의 분포를 반영하는 확률밀도함수를 선택하였다.

확률밀도함수를 선택하기 위하여 대표적이며 자주 쓰이는 확률분포인 정규분포, 감마분포, 균일분포, 로그정규분포, 지수분포를 대상으로 데이터 분포 유의 여부를 가리기 위하여 p-값을 구하였다. 유의 수준은 0.05로 정하였다.

CH₄ 배출계수 불확도를 평가하기 위하여 p-값이 0.78로 가장 크게 나타난 정규분포를 선택하여 불확도를 평가하면 95% 신뢰구간에서 불확도는 6.175%로 나타났다. p-값이 0.65로 두 번째로 크게 나온 로그정규분포와 p-값이 0.64로 세 번째로 크게 나타난 감마분포를 선택하여 95% 신뢰구간에서 불확도는 각각 6.256%, 7.479%로 나타나 정규분포와도 유사한 값을 보이고 있다. 정규분포, 로그정규분포, 감마분포를 선택하여 평가한 불확도는 서로 비슷한 양상을 보이고 있다. p-값이 0.54로 네 번째로 크게 나온 균일분포를 선택하여 95% 신뢰구간에서 불확도는 3.607%로 나타나 앞에서

분석한 불확도 보다 작게 평가되었다. p-값이 가장 작은 0.08로 나타난 지수분포를 선택하여 95% 신뢰구간 불확도를 평가하면 61.759%로 나타나 불확도가 가장 크게 평가되었다.

불확도 기준에서 보면 균일분포가 가장 작은 값을 갖지만 p-값이 정규분포와 로그정규분포에 비하여 매우 작다. 따라서 시멘트사업장의 CH₄ 배출계수에 대한 확률분포는 정규분포, 로그정규분포, 감마분포 중 어느 것으로 선정해도 큰 차이는 없지만 p-값을 기준으로 하여 정규분포로 선정하였다. 따라서 CH₄ 배출계수 불확도는 배출계수의 분포가 정규분포일 때인 6.175%로 선정하였다.

N₂O 배출계수 불확도를 평가하기 위하여 p-값이 0.98로 가장 크게 나타난 감마 분포를 선택하여 95% 신뢰구간에서 불확도를 평가하면 8.857%로 나타났다. p-값이 0.95로 두 번째로 크게 나타난 로그정규분포와 p-값이 0.91로 세 번째로 크게 나타난 정규분포를 선택하여 불확도를 평가한 결과는 각각 7.374%, 7.552%로 나타났다. 이는 감마분포를 선택하였을 때와 거의 비슷한 분포를 보였다. p-값이 0.45로 네 번째로 크게 나온 지수분포를 선택하여 95% 신뢰구간 불확도를 평가하면 범위는 75.437%로 나타나 불확도가 월등히 크게 나타났다. p-값이 0.23으로 가장 작게 나타난 균일분포를 선택하여 95% 신뢰구간에서 불확도를 평가한 결과, 4.287%로 가장 작게 나타났다.

N₂O 배출계수 불확도 역시 CH₄ 배출계수 불확도와 같은 원리로 p-값이 가장 큰 확률분포가 데이터의 분포를 가장 잘 적합하는 분포이므로 불확도 또한 상대적으로 작은 값을 가진다. 감마분포, 정규분포, 로그정규분포가 거의 차이가 없으므로 시멘트사업장의 N₂O 배출계수의 경우에는 p-값을 기준으로 감마분포를 선정하였다. 따라서 불확도는 N₂O 배출계수의 분포가 감마분포일 때인 8.857%로 선정하였다.

불확도에 대한 보다 정밀하고 풍부한 정보를 획득하기 위해서는 연속측정을 통하여 동일한 조건하에서 사업장, 호기, 연료별로 측정된 자료를 충분히 확보할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 배출계수의 불확도를 평가하였으므로, 다른 선진

국들과 마찬가지로 활동도에 대한 불확도를 평가하고 연도별로 지속적으로 온실 가스를 측정하여 최종적으로 인벤토리의 불확도를 평가할 수 있도록 보다 많은 연구가 필요한 것으로 판단된다.

배출권거래제도에 있어서 불확도를 포함하고 있으면 위험성이 높아지므로 향후 기후변화협약 등 온실가스 관련 국제협상에서 보다 우리나라가 우위를 점하기 위해서는 국가 고유 배출계수의 신뢰성을 확보해나가는 연구를 지속적으로 해야 한다.

참고 문헌

강석복·우정수, 2008, 통계적 확률분포이론

국립방재교육연구원 방재연구소, 2007, 기후변화에 따른 국내의 대응체계 분석 연구

국립환경과학원, 2007, 환경부문 온실가스 배출량 inventory 작성 및 배출계수 개발(II)

김광원, 2006, 신뢰도 평가에서 제한된 데이터를 이용한 와이블분포 모형화 기법

김민정, 2009, 탐색적 자료 분석 관점에서 본 대푯값으로서의 평균의 적절성 - 우리나라 7차 교과서에 나타난 예시 자료를 중심으로 -

김진수, 2009, B-C유 화력발전소의 CO₂ 및 Non-CO₂ 배출계수 개발

김찬규, 2007, 국가 온실가스 통계 신뢰성 향상 방안에 관한 연구

문경애, 2000, 로그정규분포의 상등에 관한 베이지안 검정

문성우, 2007, 삼각분포를 활용한 공정 별 공사기간 보정

박범조, 2006, excel을 이용한 현대통계학 이론과 활용

산업자원부, 2006, 온실가스 국가배출계수 마련을 위한 기반연구

송시호, 2008, 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용한 유기물질에서의 전자이동도 계산에 대한 연구

송요한, 1996, 통계학-확률밀도함수와 분포함수

안상전, 2005, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 전과정영향평가의 불확실성에 대한 확률통계적분석

에너지관리공단, 2008, 시멘트업종 온실가스 배출량 산정 Good Practice 가이드라인

우정수·강석복, 1997, 통계이론과 연습

윤석경, 2006, 시멘트산업 대체연료의 온실가스 배출계수 개발 및 저감량 평가 연구

이동원, 2006, 감마분포 공정을 위한 변동계수 관리도의 통계적 설계

이상구, 2006, Monte Carlo simulation 기법을 이용한 폐기물매립지 온실가스 배출량 불확도 분석에 관한 연구

이시형, 2009, 복합화력발전소의 국가 온실가스 배출계수 개발

전제윤, 2006, 절사평균을 사용한 Count Five 검정법 연구

정재학, 2006, 산업부문의 온실가스 배출계수 산정 방법에 대한 비교 연구 -시멘트산업을 중심으로-

통계청, 2008, 온실가스 배출통계 수준 및 개선방안에 대한 연구

한국전자통신연구원, 2001, 우편 물량 변동 추세 Knowledge Base 구축 기술에 관한 연구

환경관리공단, 2008, 국가 온실가스 배출계수 총괄관리방안 연구

환경관리공단, 2008, 기후변화 2007 영향, 적응 및 취약성

Andrea Ramírez, 2006, Monte Carlo Analysis of Uncertainties in the Netherlands greenhouse Gas Emission Inventory for 1990 - 2004

Andrea Ramirez, 2008, Monte Carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990 - 2004

Department of Environmental and Water Resources Australian Greenhouse Office, 2005, National Inventory Report 2003

IPCC, 1996, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

IPCC, 2001, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.

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

Kirstin Rypdal, 2001, Sensitivity analysis as a tool for systematic reductions in greenhouse gas inventory uncertainties

Kirstin Rypdal, 2001, Uncertainties in greenhouse gas emission inventories - evaluation, comparability and implications

Ministry of the Environment, Denmark, 2005, Denmark's National Inventory Report 2005

Ministry of the Environment, Japan, Greenhouse Gas Inventory Office of Japan (GIO),
CGER, NIES, 2007, National Inventory Report of Japan

Paul Johnson, 2006, Beta Distribution

Suvi Monni, 2004, Uncertainties in the Finnish greenhouse gas emission inventory

SCI(Cement Sustainability Initiative), 2005, CO₂ Accounting and Reporting Standard for
the Cement Industry

Statistics Finland, 2006, Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990-2003

Umweltbundesamt, 2005, Austria's National Inventory Report 2005

Wilfried Winiwarter, 2001, Assessing the uncertainty associated with national greenhouse
gas emission inventories: a case study for Austria

ABSTRACT

Study of Uncertainty Evaluation of Greenhouse Gas Emission Factors for Cement Industry

Hwang Soorim

Department of Earth & Environmental Sciences

Sejong University

Greenhouse gases have been increased dramatically because consumption of fossil fuel has been increased since the Industrial Revolution. Greenhouse gas has been identified major contributor to climate change. Thus reducing greenhouse gas emission accured as global issue. To reduce greenhouse gas efficiently, we have to calculate it exactly and build national greenhouse gas inventory system.

When we build national greenhouse gas inventory system, uncertainty assessment is suggested as major factor of good practice(IPCC Guideline, 2006). But it is short that the study about uncertainty assessment of greenhouse gas emission factor in Korea.

In this study, uncertainty was assessd about Non-CO₂(CH₄, N₂O) emission factor of cement industry according to IPCC Guideline. Probability distribution function was selected which was reflecting emission factor distribution to do this.

Probability distribution function to assess uncertainty, normal distribution,

lognormal distribution, gamma distribution, uniform distribution were chosen and carried out goodness-of-fit test by p-value.

In case of CH₄ emission factor, normal distribution was chosen because p-value was the highest. In 95% confidence interval, uncertainty was 6.175%. P-value of lognormal distribution was the secondary-highest, gamma distribution was the third-highest and each uncertainties were 6.256%, 7.479%. On the other hand, in case of exponential distribution, uncertainty was 61.8% as the highest. The result of choosing normal distribution, CH₄ emission factor was 2.65 kg/TJ and uncertainty was 6.2%.

In case of N₂O emission factor, gamma distribution was chosen because p-value was the biggest. In 95% confidence interval, uncertainty was 8.857%. P-value of lognormal distribution is the secondary-biggest, normal distribution was the third-biggest and each uncertainties were 7.374%, 7.552%. In case of exponential distribution, uncertainty was 75.4% as the biggest. The result of choosing gamma distribution, N₂O emission factor was 1.14 kg/TJ and uncertainty was 8.9%.