creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

보건학 석사 학위논문

폐기물 소각시설에서 발생하는 CO_2 배출량 산정방법에 관한 연구

A Study on Methodologies for the Estimation of Carbon Dioxide Emissions from Waste Incinerator

2012년 8월

서울대학교 보건대학원

환경보건학과 대기환경전공

이 혜 영

폐기물 소각시설에서 발생하는 CO_2 배출량 산정방법에 관한 연구

A Study on Methodologies for the Estimation of Carbon Dioxide Emissions from Waste Incinerator

지도교수 이 승 묵

이 논문을 보건학 석사학위논문으로 제출함

2012년 6월

서울대학교 대학원

환경보건학과 대기환경전공

이 혜 영

이혜영의 석사 학위논문을 인준함

2012년 7월

위 원 장 김 호 (인)

부위원장 조 경 덕 (인)

위 원 이 승 묵 (인)

초 록

우리나라는 좁은 면적으로 인해 다른 나라에 비해 폐기물 처리방법 중 소각이 높은 비중을 차지하고 있으며 2008년 국가 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면 폐기물부문 온실가스 배출량 중 소각은 약 50%를 차지하고 이중 CO_2가 97%, N_2O가 3%를 차지한다. 즉 소각부문에서 발생하는 CO_2 배출량에 대한 신뢰성 확보와 배출량 관리가 중요하다고 할 수 있다.

현재 우리나라는 폐기물부문 소각분야 CO_2 배출량 산정시 IPCC 가이드라인의 배출량 산정식을 사용하고 있으며 이 식은 성분분석을 통한 폐기물의 화석탄소함량에 기인한다. 하지만 사업장은 소각되는 모든 폐기물에 대한 성분분석의 법적 의무를 지지 않고 있으므로 실제 폐기물의 성분분석을 통한 실측값을 얻기 어려운 실정이며, 대형 생활폐기물 소각시설에서 주기적으로 이루어지는 성상분석 결과 또한 월별 값의 큰 차이를 보이는 등 높은 불확도를 가진다. 따라서 본 연구에서는 현재 사용하고 있는 CO_2 배출량 산정방법 뿐 아니라 그 밖의 방법들을 이용하여 CO_2 배출량을 산정하고 이를 비교 및 분석함으로써 우리나라 상황에 적용가능하며 정확성이 높은 방법을 도출하고자 한다.

연구대상은 생활폐기물 소각시설 6개, 사업장폐기물 소각시설 3개소로, 2008년 기준 폐기물 소각처리량, 방지시설 등을 고려하여 선정하였다.

본 연구에 사용된 CO_2 배출량 산정방법은 첫째, 굴뚝에서 배출되는 CO_2 농도의 현장 측정을 통한 배출량 산정, 둘째, 폐기물의 성상분석을 통한 화석탄소함량에 기인한 배출량 산정, 마지막은 F, F_C 및 O_2 농도값을 사용하여 추정한 CO_2 농도를 이용한 배출량 산정으로 각 방법을 사용하여 시설별 CO_2 배출량을 산정하였다. 각 방법별 CO_2 배출량의 정확성, 현재 구축되어 있는 기반시설과 연계한 적용가능성, 비용효율적인 면 등을 고려하였다.

그 결과, 실제 소각시설에서 발생되는 CO_2 배출량을 가장 잘 나타낼 수 있는 현장측정을 이용한 방법과 F, F_C 및 O_2를 이용한 배출량은 유사한 값, 분포를 보였으며 폐기물의 화석탄소함량에 기인한 CO_2 배출량은 다른 두 방법과 다소 큰 차이 및 상이한 분포를 나타내었다.

또한 현장측정을 통한 CO_2 배출량에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 불확도를 도출하였으며 이를 이용해 오차범위를 설정한 결과, F, F_C 및 O_2를 이용한 배출량은 모든 시설이 오차 이내의 값을 나타냈다. 하지만 폐기물 화석탄소함량에 기인한 배출량은 모든 시설, 많은 기간에서 오차를 초과하였으며 또한 소각시설의 운전이 안정하게 이루어지는 동안 동일 시설 내에서도 기간별 큰 차이를 나타냈다.

우리나라 소각시설에서 발생하는 CO_2 배출량 중 대부분을 차지하는 대형 소각시설에 굴뚝 TMS, 총량관리시스템에 따른 O_2 측정기가 설치되어 있는 것을 감안할 때 F, F_C 및 O_2를 이용한 CO_2 배출량 산정방법은 CO_2 측정기 또는 측정cell을 개별적으로 설치하지 않으면서도 소각시설의 운전상황을 잘 반영하고 CO_2 배출량을 정확히 측정할 수 있는 방법일 것으로 판단된다.

이번 연구를 통한 CO_2 배출량 산정에 대한 이와 같은 접근방법은 소각시설 뿐 아니라 사용되는 원료 및 연료가 소각시설에 비해 더 균일한 발전소, 보일러 등 연소시설에서 발생하는 CO_2 배출량 산정시에도 적용 가능할 것으로 예상되며 이를 토대로 우리나라 온실가스 배출량 산정에 대한 신뢰성 및 정확성을 높일 수 있을 것으로 보인다.

Keywords : 이산화탄소, 이산화탄소 배출량 산정방법, 온실가스, 폐기물 소각시설

학번: 2009-23620

목 차

초록 i

목차 iii

List of Tables v

List of Figures vi

1. 서 론 1

1.1 연구 배경 1

1.2 국내·외 연구 현황 2

1.3 연구 목적 5

2. 연구 방법 6

2.1 대상 소각시설 선정 6

2.2 CO_2 배출량 산정방법 7

2.2.1 현장측정을 통한 CO_2 배출량 산정 7

2.2.1.1 CO_2 농도 현장측정(On-site) 7

2.2.1.2 자료수집 및 정리 8

2.2.1.3 QA/QC 10

2.2.1.4 CO_2 배출량 산정 11

2.2.2 IPCC 가이드라인에 따른 배출량 산정방법 12

2.2.2.1 폐기물 소각에 따른 배출량 12

2.2.2.2 보조연료에 따른 배출량 14

2.2.2.3 화석탄소함량(FCF) 15

2.2.3 Fc, F 값 이용한 CO_2 배출량 산정 16

2.2.3.1 Fc, F 값 이용한 CO_2 농도 추정 16
2.2.3.2 CO_2 배출량 산정 18
2.2.3.3 CO_2와 O_2의 상관관계식 도출 18
2.3 불확도산정 18

3. 결과 및 고찰 20

3.1 현장측정을 통한 CO_2 농도 및 배출량 20
3.1.1 CO_2 및 O_2 농도분포 20
3.1.2 CO_2 배출량 분포 23
3.2 2006 IPCC GL 산정식에 따른 배출량 24
3.2.1 일별소각처리량 및 성상분석 24
3.2.2 CO_2 배출량 분포 24
3.3 소각시설별 F, F_C 이용한 배출량 26
3.3.1 소각시설별 F, F_C 도출 26
3.3.2 상관관계식 계수와 비교 27
3.3.3 CO_2 배출량 분포 31
3.4 불확도 산정 32
3.5 산정방법에 따른 CO_2 배출량 비교 34
3.5.1 시설별 화석탄소함량 34
3.5.2 CO_2 배출량 비교 35

4. 정책적함의 및 활용과제 41

5. 결론 44

6. 참고 문헌 46

Abstract 49

List of Tables

Table 1. Summary of measurement target 6

Table 2. Details for estimating CO_2 emissions 8

Table 3. Standard, reference for data sorting 9

Table 4. Correlation equation of flow and O_2 10

Table 5 Result of analyzer alignment test 10

Table 6. Specification of standard gas 11

Table 7. Heating value's conversion factors of fuel 14

Table 8. Emission factor of fuel 14

Table 9. CO_2 emission using measurement data on site 23

Table 10. Amount of incinerated waste 24

Table 11. CO_2 emission 2006 IPCC GL equation 25

Table 12. Fc, F of each facility's waste 26

Table 13. Fc, F of each fuel 27

Table 14. a, b value between two methods 28

Table 15. CO_2 emission using F, Fc and O_2 31

Table 16. Uncertainties using Tier1, Tier2 methods 33

Table 17. FCF per each facility..... 34

List of Figures

Fig. 1. Schematics of continuous measurement of greenhouse gas 8

Fig. 2. Fish bone diagram for uncertainty factors 18

Fig. 3. Distribution of CO_2 & O_2 concentration in MSW incinerator 20

Fig. 4. Distribution of CO_2 & O_2 concentration in IW incinerator .. 21

Fig. 5. CO_2 emission using measurement data on site 23

Fig. 6. CO_2 emission using 2006 IPCC GL equation 25

Fig. 7. Correlation of CO_2 & O_2 concentration in MSW 29

Fig. 8. Correlation of CO_2 & O_2 concentration in IW 30

Fig. 9. CO_2 emission using F, F and O_2 31

Fig. 10. Comparison CO_2 emission among three methods in MSW 35

Fig. 11. Comparison CO_2 emission among three methods in IW 35

Fig. 12. Comparison CO_2 emission among three methods in MSW 38,39

Fig. 13. Comparison CO_2 emission among three methods in IW 40

1. 서론

1.1 연구 배경

지구온난화에 따른 이상기후현상을 전 지구적 차원에서 대응하기 위해 1992년 브라질 리우환경회의에서 기후변화협약이 채택되었으며 "공통의 그러나 차별화된 책임원칙"에 따라 각국의 능력 및 사회·경제적 여건에 따라 모든 국가가 인위적 활동으로 인한 온실가스 배출량을 감소시키기 위해 노력하고 있다. 우리나라는 기후변화협약 당사국으로서 동 협약 제4조 및 제12조에 따라 국가 온실가스 배출량을 산정하고 국가보고서의 형태로 이를 보고하고 있다.

'국가 온실가스 인벤토리를 위한 2006 IPCC 가이드라인(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse gas inventories, 이하 2006 IPCC GL)'에 따라 폐기물 소각으로 인한 국가온실가스 배출량 산정의 대상 온실가스에는 CO_2, N_2O, CH_4가 있다. 2008년 국가 온실가스 배출량 자료에 따르면, 폐기물부문 중 소각은 50%를 차지하고 소각분야 온실가스 배출량 중 CO_2가 97%, N_2O가 3%를 차지하므로 폐기물부문 온실가스 배출량의 약 49%가 소각에서 배출되는 CO_2에 기인한다. 즉, 소각부문에서의 CO_2 배출량에 대한 신뢰성 확보와 배출량 관리가 중요하다고 할 수 있다.

또한 폐기물 처리 중 소각의 비중이 매립보다 높은 우리나라의 상황은 배가스 처리장치가 부착된 소각시설이 거의 없는 대부분의 개발도상국이나 넓은 국토면적으로 폐기물의 대부분을 매립 처리하는 선진국들과 달라서, 소각이 온실가스 배출원으로써 매우 중요한 위치에 있다고 할 수 있다. 기후변화협약 당사국으로서 각 국가에서 UN 기후변화협약 사무국에 제출한 개발도상국(비부속서 I 국가)의 국가보고서상의 1994년 혹은

2000년 온실가스 인벤토리 및 부속서 I 국가가 제출한 2009년 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면 폐기물 처리로 인한 소각부문의 온실가스 배출비율이 우리나라보다 높은 나라는 일본(71.6%)이 유일하며 그 외 높은 국가들로 프랑스(9.4%), 체코(8.8%), 벨기에(7.8%)가 있다(UNFCCC, 2011). 우리나라를 제외한 비부속서 I 국가 중 가장 높은 나라는 싱가폴(27.9%)이며 다른 국가는 1% 이하의 수준에 머물러 있다.

1.2 국내·외 연구 현황

국제적으로 통용되는 온실가스 배출량 산정지침인 IPCC 가이드라인에서는 온실가스 배출량 산정방법을 Tier 1, 2, 3수준으로 나누어 제시하고 있으며 더 높은 수준을 우수실행(good practice)으로 정의하고 있다(2006 IPCC GL). 또한 소각시설에서 발생하는 CO_2는 화석연료기원 탄소함량에 따른 CO_2 만을 산정하도록 정의하고 있으며 생물기원 탄소함량에 따른 CO_2는 자연 순환의 일부로 국가 배출량 산정시 이를 제외하도록 정의한다.

Tier 1, 2는 폐기물의 성상분석을 통한 화석탄소함량에 기인한 배출량 산정방법이며 Tier 3은 실측을 통한 배출량 산정방법이다. IPCC는 본 지침서에서 제시하고 있는 방법론 외에 국가고유 배출량 산정방법이 있다면 그 방법을 사용하는 것을, 그리고 배출량 산정요소의 국가 고유값이 있다면 그 값의 사용을 권장하고 있다.

과거 많은 연구에서는 배출량 산정에 사용되는 배출계수의 국가 고유값 개발에 대한 필요성을 강조하고 있다. Kim. et al.(2007)의 연구를 보면 발전시설을 대상으로 실측을 통해 CO_2 배출계수를 산정하였으며 이를 2006 IPCC GL 기본값을 이용하여 산정한 배출계수와 비교하였다. 두 배출계수는 작은 오차를 보이며 유사한 값을 나타냈다. 하지만 해당 연

구에서는 IPCC 가이드라인 기본값은 보편적인 활용성을 고려하여 개발된 값이므로 국가, 시설별 특성을 반영하지 못하고 있다고 제시하고 있으며 실측에 따른 배출계수 개발의 필요성을 언급하였다.

Kim et al.(2010)의 연구에서는 생활폐기물 소각장을 대상으로 실측을 통한 배출량을 이용하여 개발한 CO_2 배출계수와 가이드라인 기본값을 이용한 배출계수를 산정하여 비교하였다. 그 결과 폐기물 탄소함량에 기초한 CO_2 배출량에 대한 과대산정 가능성을 제시하였으며 따라서 국가 고유 배출계수 개발의 필요하다고 주장하였다.

CO_2 배출계수의 각 요인들에 관한 연구도 진행되고 있다. J. Mohn et al.(2008)은 소각시설에서 발생하는 CO_2 배출에서 생물기원, 화석연료기원에 따른 CO_2 배출량의 구분에 대한 어려움을 제시하였다. CO_2 배출량 안의 방사선동위원소(^{14}C)와 생물기원탄소함량의 상관관계를 제시함으로써 이 값을 이용해 생물기원, 화석연료기원 탄소에 따른 CO_2 배출량을 구분하고자 하였다.

배출량 산정방법에 관한 기존 연구는 대부분 실측을 통한 CO_2배출량 산정과 IPCC 가이드라인의 성상분석을 통한 화석연료기원탄소에 기인한 배출량의 비교·분석에 관한 연구가 많다.

환경관리공단(2007)의 연구보고서에서는 시멘트 소성시설, 발전소를 대상으로 굴뚝 TMS을 이용하여 CO_2 실측하였으며 이를 통해 산정한 CO_2 배출량과 가이드라인 기본값을 이용한 배출량을 비교하였다. 그 결과 두 배출량은 작은 오차를 나타낸다고 제시하고 있다.

또한 이와 유사한 연구로 GIR(2011)의 연구에서는 소각시설, 발전소, 시멘트 소성시설을 대상으로 현장측정과 가이드라인 방법을 이용한 배출량을 산정하여 비교하였다. 시설별 다양한 오차가 도출되었으며 그 중 발전소, 시멘트 소성시설 같은 성상 변화가 크지 않은 연료들이 연소되는 시설에서는 작은 오차가, 연소되는 물질의 변화가 다양한 소각시설에

서 상대적으로 큰 오차가 도출되었다. 위 두 연구 모두 두 방법을 이용한 배출량 분석을 통해 현장측정을 통한 CO_2 배출량 산정의 정확성을 제시하고자 하였다.

Kim et al.(2011)의 연구에서는 현장측정과는 다른 각도에서 CO_2 배출량을 산정하고자 하였다. 폐기물의 탄소함량에 근거한 IPCC 배출계수는 건조함량, 탄소함량, 화석탄소함량 등 변수를 결정해야 하며 따라서 변수가 많으므로 불확도가 높아진다고 제시하며, 발열량 산정식(Dulong식)의 탄소 값을 이용한 배출계수를 산정하였다. 이를 이용하여 배출량을 산정한 결과 2개 소각시설에서 작은 오차가 나타났음을 제시하였다.

과거 연구에서는 폐기물 탄소함량에 기초한 가이드라인 산정방법을 기준으로 시설 특성별 CO_2 배출량을 산정하여 분석하거나 배출계수의 국가 고유값 개발에 초점을 맞춘 연구들은 많이 진행되었으나 우리나라 상황에 맞는 CO_2 배출량 산정방법의 도출에 관한 연구는 미비한 상황이다. 또한 CO_2 배출량 산정에 관한 연구시 성상분석에 따른 배출량 산정방법, 실측을 통한 배출량 산정방법, 이 두 가지 방법을 이용하고 있는 연구가 대부분이다.

1.3 연구목적

우리나라는 폐기물 소각시설에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하기 위하여 IPCC 가이드라인을 사용하고 있으며 이중 CO_2 배출량 산정 방법으로 폐기물의 화석탄소함량에 기인한 물질수지법을 사용하며 이는 성상별 건조물질함량, 탄소함량, 화석탄소함량, 산화계수 값에 의해 결정된다.

하지만 우리나라는 계절 변화 등의 이유로 발생하는 계절별 폐기물의 성상비, 건조물질함량에서 차이를 나타내며, 또한 화석탄소함량, 산화계수의 경우 국가 고유값이 없으므로 가이드라인 기본값에 의존하여 배출량을 산정하고 있다. 현재 우리나라는 소각되는 모든 폐기물에 대해 성상분석 및 원소분석의 의무를 지우지 않으므로 CO_2 배출량 산정 시 해당 변수는 간헐적으로 측정된 값, 시설설계 당시의 값 또는 가이드라인 기본값을 사용하게 되므로 배출량 산정과정에서 큰 불확도를 지니게 된다. 따라서 우리나라 폐기물 처리방법 중 큰 비중을 차지하고 있는 소각분야의 CO_2 배출량 산정에 대해 우리나라 소각환경을 정확히 반영하고 불확도가 낮은 방법을 도출해야 한다.

본 연구에서는 현장에서 직접측정, 폐기물의 화석탄소함량을 이용한 방법 및 F, F_C, O_2를 이용하여 CO_2 농도를 추정하는 방법을 통해 CO_2 배출량을 산정하며 각 방법에 따른 배출량의 비교·분석함으로써 실제 소각상황을 잘 반영할 수 있고 불확도가 낮으며 우리나라의 기반시설을 고려했을 때 가장 적용 가능한 방법을 도출하고자 하였다.

2.연구방법

2.1 대상 소각시설 선정

본 연구는 생활폐기물 소각시설 6개소, 사업장폐기물 소각시설 3개소를 대상으로 선정하였으며 대상시설 개요는 Table 1과 같다.

우리나라 폐기물 통계인 '전국폐기물발생 및 처리현황(환경부)'에 따라 시설별 소각처리량을 기준으로 하였으며 그 외 시설용량, 소각로유형, 운영방식 등을 참고하여 대표성 있는 대상을 선정하였다.

또한 현장측정 시 유량, 산소 등 자료 수집의 안정성, 현장측정의 용이성을 위하여 굴뚝원격감시체계(굴뚝 Tele-Monitoring System, 이하 굴뚝 TMS)또는 대기오염물질 총량관리시스템(이하 총량관리시스템)이 구축되어 있는 사업장을 고려하였다.

Table 1. Summary of measurement target

Division	Type of waste	Capacity (t/d)	Type of incinerator and operating mode	Pollution control facilities
A	MSW	400	Stoker, Continuous	SCR, SDR, B/F
B		750	〃	SCR, SDR, B/F
C		300	〃	SNCR, SDR, B/F
D		300	〃	SNCR, SDR, B/F
E		600	〃	SCR, SDR, B/F
F		70	Fludized Bed, Continuous	SNCR, SDR, B/F
G	IW	230	Stoker, Continuous	SNCR, SDR, B/F
H		70	〃	SNCR, SDR, B/F
I		277	〃	SNCR, SDR, B/F

* MSW : Municipal Solid Waste, IW : Industrial Waste, SCR : Selective-Catalytic Reactor, SDR : Semi-Dry Reactor, B/F : Bag Filter

우리나라 폐기물은 통계상 생활폐기물, 사업장폐기물로 나뉘며 그 중 사업장폐기물은 사업장배출시설계폐기물, 건설폐기물, 지정폐기물로 구분된다. 생활폐기물은 '08년 기준 전체 소각처리량의 약 50%를 차지하며, 사업장배출시설계폐기물은 약 34%를 차지한다. 따라서 본 연구대상인 생활폐기물과 사업장배출시설계폐기물은 전체 소각처리량에서 큰 비중을 차지한다. 또한 '2008년 전국폐기물 발생 및 처리현황(환경부)'을 기준으로, 생활폐기물 소각시설 6개소의 소각처리량은 전체 생활폐기물 처리량에서 약 16.70 %를, 사업장폐기물 소각시설 3개소에서 처리되는 소각처리량은 사업장배출시설계폐기물 전체에서 3.49 %를 차지한다.

2.2 CO_2 배출량 산정방법

2.2.1 현장측정을 통한 CO_2 배출량 산정

2.2.1.1 CO_2 농도 현장측정(On-site)

본 연구에서는 각 소각시설에서 발생하는 CO_2의 농도를 측정하기 위하여 환경오염공정시험기준의 '굴뚝연속자동측정기 설치방법(ES 01802.1)'의 기준에 따른 연속자동측정시스템을 이용하였다. Fig. 1은 온실가스 연속측정시스템의 구성도로서 크게 전처리장치, 측정기, 자료수집장치(data logger, D/L)로 구성된다. 폐기물 소각의 결과물로 발생되는 배출가스는 굴뚝의 대표지점에서 채취되어 수분제거, 일정온도 유지를 위한 전처리장치를 거치고, 비분산적외선법(Non-dispersive infrared absorption, NDIR) 측정기에서 실시간으로 측정되며 이 CO_2 농도는 D/L에서 30분 또는 1시간 단위의 자료로 수집된다. 측정기는 Horiba의 VA-3001 장비를 사용하였으며, 시설별로 일정기간 동안 24시간 연속측정을 진행하였다.

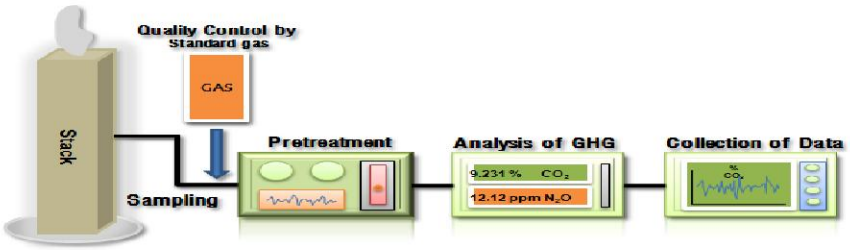


Fig. 1. Schematics of continuous measurement of greenhouse gas

2.2.1.2 자료수집 및 정리

현장측정을 통한 CO_2 배출량을 산정하기 위해 시설별 24 ~ 86일의 기간 동안 측정된 CO_2, O_2, 유량의 1시간 또는 30분 자료가 사용되었다. CO_2 농도는 현장에서 직접 측정하였고 굴뚝TMS. 총량관리시스템으로부터 실측된 O_2, 유량자료, 노내온도, 대기오염물질 농도, 사업장으로부터 가동중지, 측정기 및 시설보수기간 등 시설운영정보를 수집하였다.

Table 2. Details for estimating CO_2 emissions

Division	Item	Details
Continuous Measuring	CO_2	- Concentration of CO_2
Data Collecting	Flow, O_2 air pollutants	- Concentration of Flow, O_2 - air pollutants for comprehending operating change(NOx, temp. of incinerator and etc.)
	Operating condition	- Stop and Start time - Maintenance period, etc.

연속으로 측정된 CO_2 배출농도는 소각시설의 운영현황 및 측정기의 상태, 측정 자료의 시계열, 대기오염물질과의 비교 등을 기준으로 선별하였다. 측정기간 동안 수집된 온실가스 측정농도 및 유량 등의 자료는 각 시설별로 576 ~ 3,744개로 이를 선별하기 위하여 인용된 선별기준 및 출처는 아래 Table 3과 같다.

환경부고시 제2009-252호 '굴뚝원격감시체계관제센터의 기능 및 운영'에 따라 소각시설의 가동중지, 측정기 유지보수 기간 및 O_2, 노내 온도의 변화 추이 등을 파악 후 이상 기간에 대해 무효자료로 구분하였다.

대기오염측정망 설치·운영지침('10, 환경부)의 통계 기준에 따라 측정농도 24개(또는 48개)의 자료 중 75 %이상이 유효할 경우 유효측정일로 사용하였으며 이는 측정농도가 1시간(또는 30분) 자료를 기본으로 수집되는 반면, 소각처리량은 1일 기준으로 산정되므로 CO_2 배출량을 비교 가능한 최소단위인 일 배출량으로 산정하기 때문이다.

또한 EPA 40 CRF part 75의 기준을 적용하여 측정기 교정 중 자료 또는 수집 중 누락되었거나 대체할 필요성이 있는 자료(비정상측정 등)의 경우 대체자료를 생성하였으며, 해당 자료의 전후 정상 측정된 자료의 평균값으로 대체하였다.

Table 3. Standard, reference for data sorting

Division	Standard or Method	Reference
Invalid Data	Selecting data during stop, disorder of incinerator, analyzer and etc.	MOE's Notification (Title : 2009-252)
Valid Measurement Day	More than 75% valid data among 24 hourly data	Guideline for the national ambient air monitoring stations(MOE, '10)
Formation of Substituted Data	Applying the average of before and after valid data	EPA 40CFR part 75

* MOE : Ministry of Environment in Korea

측정농도의 극단적인 이상치를 제외하기 위해 통계기법인 box plot의 extreme outlier 공식(Interquartile Range의 3배 이상되는 값을 outlier로 선정)을 사용하여 해당 자료에 대해서는 대체자료를 생성하였다.

유량은 굴뚝TMS, 총량관리시스템으로부터 제공된 자료로써 이는 대

기오염물질의 공기 희석 배출을 판단하기 위해 대기오염물질과 마찬가지로 산소 보정된 값이므로 실제 배출량의 산정을 위해서는 역보정이 필요하다. 이때 환경오염공정시험기준 총칙 중 유량 산소 보정식을 이용하였다.

Table 4. Correlation equation of flow and O_2

Division	Correlation Equation	Source
Flow	$Qa = Q \times \frac{21 - O_s}{21 - O_a}$	Standard of Experiment Process in Environment Field

* Qa : measurement flow(Sm^3/day), Q : corrected flow(Sm^3/day), Os : oxygen conc. in standard condition(%), Oa : measurement oxygen conc.(%)

2.2.1.3 QA/QC

배출량 산정에 사용한 유량, O_2 자료는 굴뚝TMS, 총량관리시스템 자료로써, 해당 측정기는 형식승인 및 정기적 정도검사의 대상이지만 본 연구에 사용된 CO_2 측정기 VA-3001의 경우 형식승인 및 정도검사의 대상에 해당되지 않는다. 하지만 측정값의 신뢰성을 확보하기 위하여「환경측정기기의 형식승인 정도검사에 관한 고시(2009-61호)」의 대기배출가스 측정기기 및 그 부속기기의 성능시험방법 및 세부시험 기준에 근거하여 자체적으로 정도검사를 실시하였으며 그 결과는 Table5와 같다.

Table 5. Result of analyzer alignment test

Division	Result	
	Criteria	Analyzer
Zero Drift	1%	within criteria
Span Drift	2%	"
Reproducibility	2%	"
Correcting error	5%	"
Response Time	within 5min	"

또한 측정이 일정기간 동안 연속적으로 진행되므로 수분, 방해물질 등에 따른 측정기의 성능 저하를 방지하기 위해 주기적으로 대상시설을 방문하여 측정기 교정을 실시하였으며, 전처리기 및 온실가스 측정장비의 상태를 확인하였다. 측정기 교정시 사용된 표준가스(zero, span)의 규격은 Table 6과 같다.

Table 6. Specification of standard gas

Division	Specification
Zero Gas	- Purity : N_2, Min. 99.999% - Uncertainty : ±5%(Min. 99.999%)
Span Gas	- Gas Mixture : CH_4, N_2O, CO_2(N_2 Balance) - Expanded Uncertainty : ±2% (Confidence level about 95% k=2)

2.2.1.4 CO_2 배출량 산정

CO_2, 유량자료를 이용하여 CO_2 배출량을 산정하였으며 대기환경보전법 시행령 [별표 5]의 대기오염물질 배출량 산정식을 적용하였다. 소각시설의 운영현황, 측정자 료의 시계열 등을 고려하여 측정자료 선별 후 적용하였으며, 유량 자료의 경우 O_2 값을 역보정한 후 적용하였다.

$$\text{CO}_2\ \text{emission(ton/hr)} = \frac{CO_2(\%)}{100} \times \frac{44}{22.4} \times 10^{-3} \times Q(m^3/hr) \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

CO_2 (%): Concentration of carbon dioxide measured on site
Q(m^3/hr): Gas flow at the same time

2.2.2 IPCC 가이드라인에 따른 배출량 산정방법

2.2.2.1 폐기물 소각에 따른 배출량

폐기물 소각분야의 온실가스 배출량 산정방법은 '국가 온실가스 인벤토리를 위한 수정된 1996 IPCC 가이드라인'(Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) 에서는 배출량 산정의 기본개념을 제시한 수준에 불과하였으나, '국가 온실가스 인벤토리에서 우수실행지침과 불확도 관리(Good Practice Guidance & Uncertainty management in National Greenhouse Gas Inventories)'와 2006 IPCC GL을 통해 구체화되었다. 특히, 2006 IPCC GL에서는 CH_4 및 도시고형폐기물의 노천소각에 의한 CO_2 배출량 산정방법을 추가하여 이전 가이드라인을 더욱 보강하였다. 또한, 2006 IPCC GL에서는 고형폐기물과 액상폐기물의 소각에 의한 CO_2 배출량 산정 방법을 분류하였고, 도시고형폐기물의 경우에는 폐기물 성상별 자료를 이용한 배출량 산정식을 제시하였다.

아래 식은 고형폐기물 소각에서 배출되는 CO_2 배출량 산정식으로 CO_2 배출량은 소각처리되는 폐기물에 화석탄소함량(FCF, Fossil Carbon Fraction)에 기인한다. IPCC GPG 2000과 다른 점은 건조물질함량(dm, dry matter)을 식에 포함시킴으로써 탄소함량(CF, Carbon Fraction)이 건조 폐기물 중의 비율임을 나타내고 있다.

$$CO_2 \text{ emission(ton/yr)} = \sum (SW_i \cdot dm_i \cdot CF_i \cdot FCF_i \cdot OF_i) \cdot 44/12 \quad \cdots\cdots(2)$$

i: municipal solid waste, industrial waste, sewage sludge and etc.
SW: total amount of solid waste of type i
dm: dry matter content in the waste (wet weight) incinerated, fraction
CF: fraction of carbon in the dry matter
FCF: fraction of fossil carbon in the total carbon
OF: oxidation factor
44/12: conversion factor from C to CO_2

2006 IPCC 가이드라인은 아래 식과 같이 도시고형폐기물을 대상으로 폐기물 성상비를 이용하여 보다 정확하게 CO_2 배출량을 산정할 수 있는 방법론을 제시하였다. 이 식을 이용하여 도시고형폐기물에 대한 세분화된 통계를 보유하고 있는 국가가 보다 정확하게 배출량을 산출하도록 하였고, 만약 폐기물 성상별 자료가 없을 경우 앞서 제시된 CO_2 배출량 산정식을 이용하여 산출할 수 있다.

$$CO_2 \text{ emission(ton/yr)} = MSW \cdot \Sigma(WF_j \cdot dm_j \cdot CF_j \cdot FCF_j \cdot OF_j) \cdot 44/12 \quad \cdots\cdots(3)$$

j: rubber and leather, plastics, textiles, food waste, wood and etc.
MSW: total amount of municipal solid waste as wet basis
WF: fraction of waste type/material of components in the MSW
dm: dry matter content in the waste (wet weight) incinerated, fraction
CF: fraction of carbon in the dry matter
FCF: fraction of fossil carbon in the total carbon
OF: oxidation factor
44/12: conversion factor from C to CO_2

IPCC 가이드라인에서는 현장측정을 통한 배출량 산정식 또한 포함하고 있다. 하지만 본 연구에서는 방법별 구분을 위해 대부분의 나라에서 CO_2 배출량 산정시 보편적으로 사용하는 방법인 성상분석을 이용한 산정방법을 2006 IPCC GL으로 구분하여 명명하였다.

본 연구에서는 시설별 폐기물의 성상별 자료를 확보하여 CO_2 배출량을 산정하였다. 생활폐기물 소각시설의 일별 성상별 소각처리량은 사업장 고유값을, 건조물질함량, 탄소함량은 실제 측정한 사업장 고유값 또는 사업장 값이 없을 경우 '전국폐기물통계조사'의 전국 대푯값을, 화석탄소함량, 산화계수의 경우 IPCC 기본값을 사용하였다.

사업장폐기물의 경우 일별 소각처리량은 사업장 고유값을 사용하였지만 모든 소각시설에서 폐기물 성상비율이나 건조물질함량, 탄소함량의 실측값이 없으므로 시설 설계시 제시된 값 또는 폐기물 통계의 전국 대

폿값을 사용하였다. 화석탄소함량, 산화계수는 생활폐기물과 같이 IPCC 기본값을 사용하였다.

2.2.2.2 보조연료 사용에 따른 배출량

폐기물 소각시 법으로 규정된 폐기물 투입온도의 기준을 준수하고 폐기물의 완전소각을 위한 소각로 내 적정온도 유지를 위하여 보조연료를 사용하며 또한 SCR 등 방지지설의 적정효율을 유지하기 위해 보조연료를 사용한다. 따라서 소각시설에서 발생하는 CO_2 배출량 산정시 보조연료 사용에 따른 배출량이 감안되어야 하며 이를 계산하기 위하여 에너지법 시행규칙 [별표] 에너지열량 환산기준 및 2006 IPCC GL의 연료별 CO_2 배출계수 기본값을 사용하였다.

Table 7. Heating value's conversion factors of fuel

Fuel	Unit	Lower Heating Value	
		kcal	MJ
Diesel	ℓ	8,450	35.4
Liquefied natural gas	Nm^3	9,550	40

* These values are given by 'enforcement regulation of energy law'.

Table 8. Emission factors of fuel

(Unit : kg/TJ)

Fuel	CO_2		
	Default Emisson Factor	Lower Emisson Factor	Upper Emisson Factor
Gas/Diesel Oil	74,100	72,600	74,800
Natural Gas	56,100	54,300	58,300

* These values are given by 2006 IPCC G/L Chap. 2. Energy, 2. Stationary Combustion

2.2.2.3 화석탄소함량(FCF) 계산

폐기물의 소각시 발생하는 CO_2 배출량은 생물기원 탄소에 기인한 배출량을 제외한 화석연료기원 탄소에 대한 배출량만을 산정하도록 정의(IPCC, 2006)하고 있다. 하지만 현장 측정을 통한 배출량, F, Fc를 이용한 배출량의 경우 화석연료기원탄소, 생물기원탄소에 따른 CO_2 배출량 모두를 포함하고 있으므로 이 값들을 2006 IPCC GL을 통해 산정된 배출량과 직접 비교하기는 어렵다. 따라서 각 시설에 맞는 화석탄소함량을 산정하여야 하며 이를 위해서 폐기물 조성, 성상별 탄소함량, 화석탄소함량과 아래 식(GIR, 2011)을 이용하였다. 폐기물의 성상별 화석탄소함량은 국가 고유값이 없으므로 IPCC 가이드라인 기본값을 사용하였다.

$$E_{end} = E_{initial} * \frac{\sum_i (SWi \times dmi \times CFi \times FCFi)}{\sum_i (SWi \times dmi \times CFi)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

E_{end}: CO_2 emission originated from fossil carbon
$E_{initial}$: CO_2 emission originated from total carbon
i: municipal solid waste, industrial waste, sewage sludge and etc.
SW: total amount of solid waste of type i
dm: dry matter content in the waste (wet weight) incinerated, fraction
CF: fraction of carbon in the dry matter
FCF: fraction of fossil carbon in the total carbon

2.2.3 Fc, F 값 이용한 CO_2 배출량 산정

2.2.3.1 Fc, F 값 이용한 CO_2 농도 추정

EPA는 CFR Title 40 Appendix F to Part 75에서 연속 자동측정자료를 활용하여 다른 오염물질의 농도를 구하는 방법을 제시하고 있다. 그 중 CO_2 농도를 구하기 위하여 연속 측정되는 O_2농도를 이용한 추정식을 식(5)와 같이 제시하였다.

$$CO_{2d} = 100 \frac{F_c}{F} \frac{20.9 - O_{2d}}{20.9} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

O_{2d}: hourly O_2 concentration of each facility in dry basis
F, Fc: F-factor or carbon based Fc factor
20.9: O_2 concentration in the atmosphere

이중 F는 연료 소각시 발생되는 발열량에 대한 건조연소가스의 비율을, Fc는 동일 발열량에 대한 CO_2 가스의 발생량의 비율을 의미한다.

part75에서는 coal, petroleum coke 등의 화석연료에 대한 F, Fc 값을 제공하고 있지만 폐기물에 대한 값은 제시하고 있지 않다. 나라별, 특히 미국의 경우 소각 발생 비율이 매우 낮으며, 또한 우리나라 폐기물 성상과의 차이를 보일 것으로 추정됨에 따라 우리나라의 환경에 맞는 F, Fc의 값이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 F, Fc를 산정하기 위하여 part 75에서는 제시하고 있는 식을 사용하고 폐기물 성상별 원소(C, H, O 등)분석 값을 적용하여 F, Fc를 산출하였다.

$$F = \frac{3.64(\%H) + 1.53(\%C) + 0.57(\%S) + 0.14(\%N) - 0.46(\%O)}{GCV} \times 10^6 \quad \cdots\cdots(6)$$

$$Fc = \frac{321 \times 10^3 (\%C)}{GCV} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

%H, %C, %S, %N, %O : percentage of H, C, S, N, O
GCV : Gross Calorific Value

생활폐기물 소각시설의 경우 폐기물의 성상비는 사업장에서 직접 분석한 값 또는 '전국 생활폐기물 자원회수시설 운영현황('09, '10, 환경부)'의 각 시설별로 제시된 값을 이용하였으며 발열량 또한 같은 통계값으로부터 도출하였다. 원소분석값은 '제3차 전국폐기물통계조사 : 2006~2007'를 이용하여 전국에서 채취한 생활폐기물에 대한 원소분석 자료를 이용하였으며, 이 중 A, B시설 소각폐기물의 성상별 탄소함량은 해당기간 동안 직접 측정한 값을 사용하였다. 사업장폐기물 소각시설의 폐기물 성상비는 시설설계값을, 발열량은 3000kcal로 가정하여 적용하였으며 원소분석값은 생활폐기물과 동일한 값을 사용하였다.

40 CFR part 75에서는 F, Fc값을 도출을 위해 9개 이상의 성분 분석 자료가 필요하다고 제시하고 있다. 하지만 우리나라 특성상 발생하는 폐기물은 계절에 따른 차이가 크게 나타나므로(이건주, 2004) 9개 이상이라는 기준보다는 계절별 값을 적용하는 것이 옳다고 판단하였으므로 본 연구에서는 측정기간에 해당하는 월, 계절에서 분석된 삼성분분석, 원소분석 값을 적용하였다.

2.2.3.2 CO_2 배출량 산정

'2.2.1.4 CO_2 배출량 산정'과 같은 식을 이용하여 배출량을 산정한다.

2.2.3.3 CO_2와 O_2의 상관관계식 도출

F, Fc를 이용한 산정식에서도 알 수 있듯이 CO_2와 O_2는 서로 상관성을 나타낸다고 가정할 수 있다. 따라서 이를 뒷받침하기 위하여 현장측정을 통한 측정된 CO_2, O_2 농도를 이용하여 두 농도에 대한 상관성 분석을 실시하였으며, 이를 이용하여 시설별 CO_2, O_2의 상관관계식을 도출하였다. 상관석 분석 및 상관관계식 도출을 위하여 통계프로그램 'R'을 이용하였으며, p-value, R^2값을 도출하였다.

2.3 불확도 산정

폐기물 소각시설에서 발생하는 CO_2 배출량은 측정, 산정과정에서 여러 불확도 요인들을 포함하고 있으므로 시설별 배출량에 대한 신뢰성 확인을 위해서는 불확도 요인들을 파악하여 시설별 불확도를 산정해야 한다. 또한 불확도 평가는 국가 온실가스 인벤토리 개발에 있어 우수실행(Good Practice)의 중요한 요소이다(IPCC, 2006)

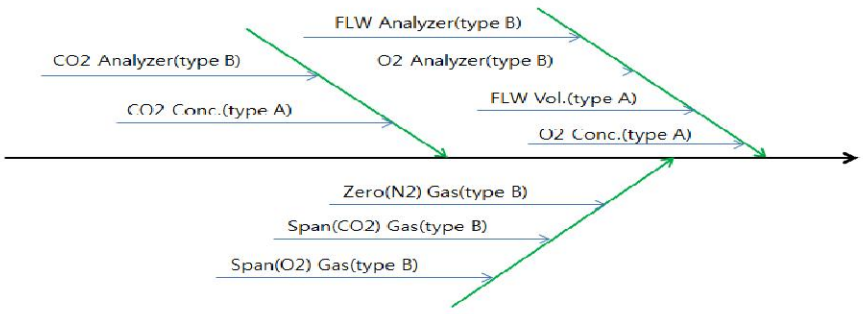


Fig. 2. Fish bone diagram for uncertainty factors

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 측정기 오차, 표준가스 오차 등 불확도 요인을 파악하여 이를 계량화하였으며 각 요인들을 조합하기 위하여 2006 IPCC GL에 제시된 Tier1, 2의 방법을 사용하였다.

Tier 1 방법은 오차증식법(simple error propagation equation)으로 각 불확도 요인의 평균 및 표준편차를 산정하여 이를 승산 및 가감과 감산법을 이용하여 조합하게 된다.

Tier 2 방법은 몬테카를로 모의실험(Monte Carlo Simulation)으로 각 불확도 요인의 확률밀도함수(Probability Density Function, 이하 PDF)를 이용하는 것으로 분포가 비정규적이고, 알고리즘이 복합한 함수이며 일부 변수들 간에 상관관계가 존재하는 경우 적합하다. 몬테카를로 모의실험을 실시하기 위하여 Crystal Ball을 이용하였으며 2006 IPCC GL에서 무작위 오차의 계량화를 위해 95% 신뢰구간을 요구하고 있으므로 이를 적용하였다.

Tier 1 : 오차의 증식(승산, 가감과 감산)

- 2006 IPCC G/L Vol. 1, chap3. EQUATION 3.1 COMBINING UNCERTAINTIES - -APPROACH 1 - -MULTIPLICATION and ADDITION AND SUBTRACTION

Tier 2 : 몬테카를로 모의실험(Monte Carlo Simulation)

3. 결과및고찰

3.1 현장측정을 통한 CO_2 농도 및 배출량

3.1.1 CO_2 및 O_2 농도분포

생활폐기물, 사업장폐기물 소각시설에서 일정기간 동안 현장측정을 실시한 결과, 시설별 CO_2, O_2의 농도분포는 아래 Fig. 3과 같다. 생활폐기물 소각시설인 A ~ F에서의 CO_2 농도는 8.56 ± 0.40, 9.84 ± 0.77, 10.23 ± 0.54, 9.72 ± 0.77, 9.34 ± 0.90, 5.40 ± 0.35의 분포를 나타냈으며 O_2 농도는 10.59 ± 0.43, 8.96 ± 0.88, 8.79 ± 0.57, 10.02 ± 0.69, 9.51 ± 0.60, 14.52 ± 0.36의 분포를 나타냈다.

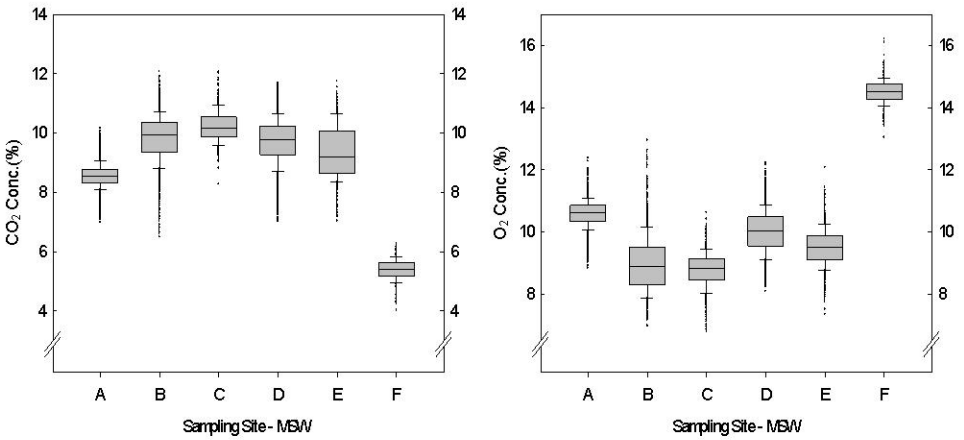


Fig. 3. Distribution of CO_2 & O_2 concentration in MSW incinerator

A ~ E시설은 평균 8 ~ 10% 정도의 유사한 CO_2, O_2농도를 나타내었다. 위 시설들은 대형 생활폐기물 소각시설로 고정상 소각로이며 NOx 저감시설인 SCR, SNCR 외에는 유사한 방지시설을 운영하고 있다. 반면 소

각용량이 상대적으로 작고 유동상 소각로인 F시설의 경우 다른 시설에 비해 상대적으로 낮은 약 5 %의 CO_2 농도, 상대적으로 높은 약 15 %의 O_2 농도를 나타냈다. 이는 유동상 소각로의 특성상 화격자 소각로에 비해 상대적으로 소각이 어려운 폐기물의 소각이 가능한 반면 운전이 어렵기 때문에 불안정한 소각이 이루어질 가능성이 크며 따라서 고정상 소각로인 다른 시설들에 비해 상이한 농도 분포를 나타낸 것으로 판단된다.

사업장폐기물 소각시설인 G ~ I시설에서의 CO_2 농도는 6.95 ± 0.69 8.68 ± 0.78, 8.29 ± 0.63의 분포를, O_2 농도는 12.68 ± 0.74, 10.80 ± 0.91, 11.35 ± 0.66의 분포를 나타낸다.

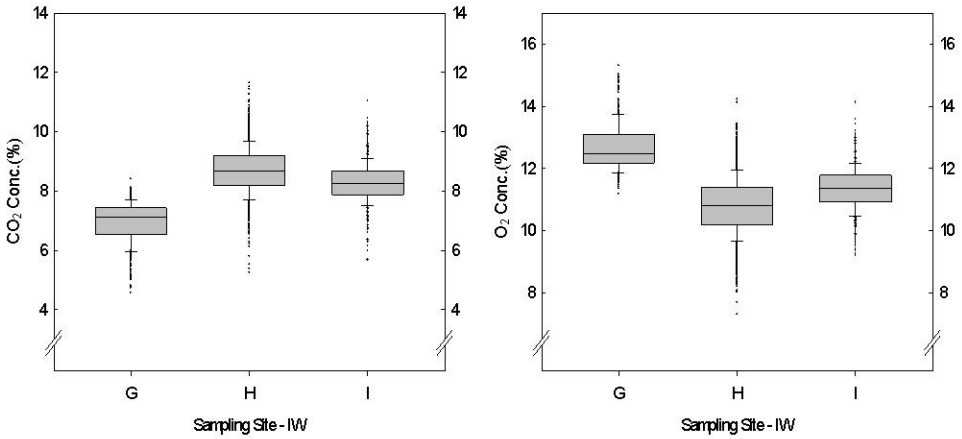


Fig. 4. Distribution of CO_2 & O_2 concentration in IW incinerator

사업장폐기물 소각시설의 경우 생활폐기물에 비해 소각처리 폐기물의 성상이 고르지 못하므로 불안정한 소각이 이루어질 가능성이 높으며 F를 제외한 생활폐기물 소각시설과 비교했을 때 상대적으로 낮은 CO_2 농도를 보인다.

사업장폐기물 소각시설 중 G시설의 경우 가장 낮은 CO_2 및 가장 높은 O_2 농도 분포를 보인다. I시설은 건설폐기물 소각시설로 상대적으로 소각

이 잘 되는 목재의 소각비중이 다른 시설보다 크며 또한 I시설의 운전기간이 4 ~ 5년인 것을 고려했을 때 10년 이상 운전된 G시설에 비해 상대적으로 최신 시설설비에 따른 안정적인 소각이 이루어졌을 것으로 판단된다. I시설과 유사한 농도분포를 보인 H시설 또한 운전기간이 I시설과 유사하다.

본 실험 결과에 따르면 CO_2, O_2 농도 분포는 폐기물 소각 상황을 반영하는 값으로, 폐기물의 소각이 안정하게 이루어지지 않을 경우 CO_2 농도는 상대적으로 낮은, O_2 농도는 상대적으로 높은 분포를 나타내는 것으로 보인다.

3.1.2 CO_2 배출량 분포

생활폐기물, 사업장폐기물 소각시설에서 직접 측정한 CO_2 농도, 유량을 이용하여 산정한 CO_2 배출량은 약 27 ~ 183 ton/day의 분포를 나타낸다.

사업장폐기물 소각시설인 G시설에서 가장 높은 배출량 및 편차를 나타내었다.

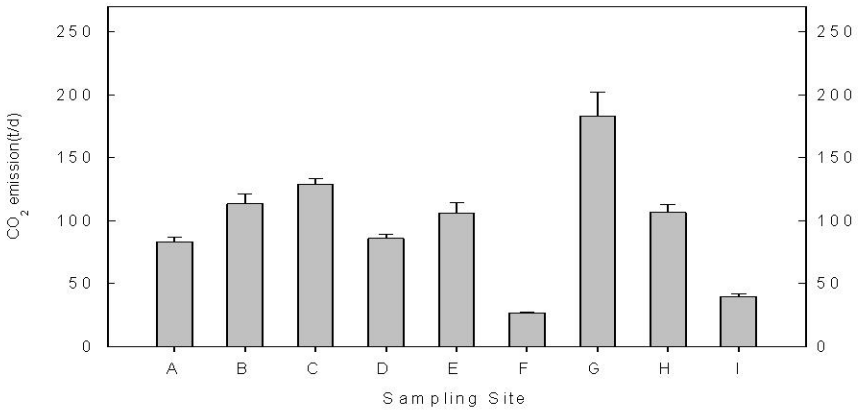


Fig. 5. CO_2 emission using measurement data on site

Table 9. CO_2 emission using measurement data on site

(Unit : ton/day)

Division	A	B	C	D	E	F	G	H	I
average	83.49	113.50	129.18	86.07	105.93	26.87	182.94	106.71	39.79
STD	3.21	8.10	4.62	3.49	8.91	0.85	19.07	6.08	2.01

* CO_2 emissions are corrected by FCF(Fossil carbon fraction).

3.2 2006 IPCC GL 산정식에 따른 배출량

3.2.1 일별소각처리량 및 성상분석

2006 IPCC GL에 따른 CO_2 배출량은 각 시설 성상별 폐기물의 화석연료기원탄소함량에 기인한다. CO_2 배출량은 일별 소각처리량, 성상비, 탄소함량, 화석연료기원 탄소함량을 이용하여 산정하며 본 연구에서 A, B 시설의 탄소함량을 제외한 그 외 시설의 탄소함량은 국가값을, 모든 시설의 화석연료기원 탄소함량은 가이드라인 기본값을 사용했다. 따라서 시설별 배출량의 편차 발생은 소각처리량, 성상비에서 기인한다고 볼 수 있다.

Table 10은 시설별 소각처리량의 분포를 나타내며 그 중 I시설에서 상대적으로 높은 편차를 나타낸다.

생활폐기물 소각시설인 A ~ F는 측정기간동안 성상분석을 2 ~ 5회를 실시하였으며 그 값을 적용하여 배출량을 산정하였다. 하지만 G ~ I시설의 경우 실측값이 없으며 시설설계값 1번만을 이용하여 산정하였다.

Table 10. Amount of incinerated waste

(Unit : ton/day)

Division	A	B	C	D	E	F	G	H	I
average	176	213	236	115	295	33	173	90	66
STD	7	11	10	6	6	3	10	0	12

3.2.2 CO_2 배출량 분포

2006 IPCC GL 산정방법에 따른 CO_2 배출량은 약 30 ~ 427 ton/day의 분포를 나타내었다.

G시설은 사업장폐기물 소각시설로 화석연료기원 탄소함량이 상대적으

로 높게 나타나며 측정을 통해 산정된 배출량과 마찬가지로 가장 높은 배출량을 나타냈다.

생활폐기물에 비해 성상변화가 클 것으로 예상한 사업장폐기물 소각시설인 G ~ I시설보다 C시설에서 더 큰 배출량의 편차가 나타났다. 이 산정방법은 일별소각처리량과 성상분석 값 변화에 따라 편차가 나타날 수 있는데 생활폐기물 소각시설 C에서는 해당 기간 동안 2번의 성상분석 값을 적용하였으며, 그 2번의 차이가 크게 발생했으므로 배출량 또한 그 값 차이를 반영해 큰 편차를 보였다. G ~ I시설의 경우 시설설계값 한번만을 적용한 결과 소각 처리량만이 편차발생에 영향을 주었으므로 소각처리량에서 큰 편차를 나타내는 I시설이 상대적으로 높은 편차를 나타내었다.

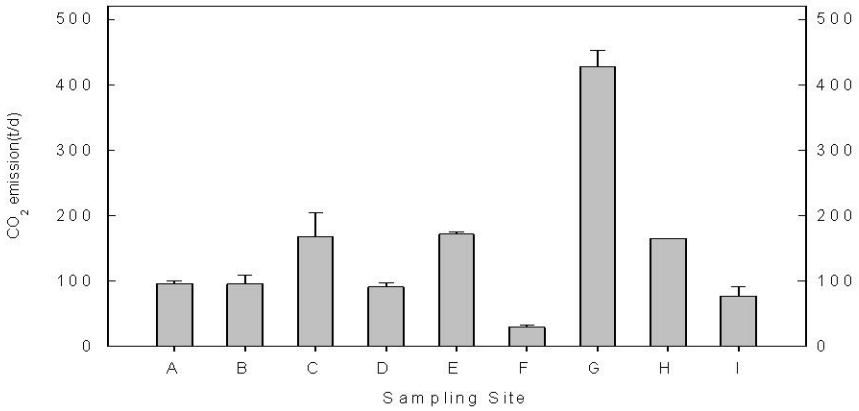


Fig. 6. CO_2 emission using 2006 IPCC GL equation

Table 11. CO_2 emission 2006 IPCC GL equation

(Unit : ton/day)

Division	A	B	C	D	E	F	G	H	I
average	95.87	95.29	168.14	90.99	171.29	29.49	427.11	164.71	77.04
STD	3.82	12.89	35.49	6.46	3.87	2.45	24.80	0.49	13.55

3.3 소각시설별 F, Fc 이용한 배출량

3.3.1 소각시설별 F, Fc 도출

O_2를 이용한 CO_2 농도 추정식을 이용하기 위하여 시설별 소각되는 폐기물에 대한 F, Fc값을 산정하였으며 그 결과는 Table 12와 같다. CO_2 농도를 측정하기 위해 실제 필요한 값은 Fc/F로 생활폐기물의 경우 0.1758 ~ 0.1805로 유사한 값을 나타냈으며 사업장폐기물의 경우 0.1621 ~ 0.1714로 생활폐기물에 비해 다소 낮은 값을 나타낸다.

Table 12. Fc, F of each facility's waste

Division	Fc	F	Fc/F
A	2,120	11,791	0.1798
B	1,844	10,215	0.1805
C	2,434	13,653	0.1783
D	2,450	13,933	0.1758
E	3,005	16,809	0.1788
F	3,317	19,058	0.1740
G	4,487	27,677	0.1621
H	3,748	21,864	0.1714
I	2,819	16,905	0.1667

* F : a factor representing a ration of the volume of dry flue gases generated to the caloric value of the fuel combusted(dscf/mmBtu), Fc :a factor representing a ration of the volume of CO_2 generated to the calorific value of the fuel combusted(scf CO_2/mmBtu)

Table 13은 EPA Method 40 CFR part 75에서 제시하는 화석연료의 F, Fc값으로 0.1194 ~ 0.2000의 분포를 나타내며 본 연구에서의 F, Fc값과 비교시 생활폐기물의 경우 Tire Derived Fuel과 유사한 값을 보인다.

Table 13. Fc, F of each fuel

Division	Fc	F	Fc/F
Coal(Anthracite)	1,970	10,100	0.1950
Coal(Bituminous)	1,800	9,780	0.1840
Coal(Subbituminous)	1,840	9,820	0.1874
Coal(Lignite)	1,910	9,860	0.1937
Petroleum Coke	1,850	9,830	0.1882
Tire Derived Fuel	1,800	10,260	0.1754
Oil	1,420	9,190	0.1545
Natual Gas	1,040	8,710	0.1194
Gas(Propane)	1,190	8,710	0.1366
Gas(Butane)	1,250	8,710	0.1435
Wood(Bark)	1,920	9,600	0.2000
Wood(Wood residue)	1,830	9,240	0.1981

* These examples are given by EPA Method 40CFR part 75 Appendix F

본 연구에서 도출된 F, Fc값과 Table 13에서 제시하고 있는 화석연료의 값 사이에는 차이를 보인다. 이 차이는 동일 발열량을 내기 위해 생활폐기물의 경우 Coal, Oil 등 화석연료에 비해 더 많은 양이 연소되어야 하며, 따라서 배출가스 및 CO_2가 더 많이 발생되는 것에 기인하는 것으로 보인다.

이중 사업장폐기물은 실측값이 아닌 시설 설계값 등을 사용하였으므로 F, Fc 값은 생활폐기물에 비해 상대적으로 높은 불확도를 가진다.

3.3.2 상관관계식 계수와 비교

40 CFR part75 식은 O_2를 이용해 CO_2를 추정하는 것으로 O_2 농도를 x, CO_2 농도를 y로 식(8)과 같이 일차식(y = ax+b)으로 표현할 수 있다.

$$a = 100 \times \frac{F_c}{F} \times \frac{-1}{20.9} \qquad b = 100 \times \frac{F_c}{F} \quad \cdots\cdots\cdots(8)$$

현장 측정한 CO_2, O_2 농도의 회귀분석 결과 또한 두 가스는 Fig. 7, 8과 같이 음의 상관관계 및 일차식의 형태를 나타낸다. 'R'을 이용한 상관성분석의 결과 모든 시설의 p-value가 0.001미만의 값으로 높은 상관성을 보였으며 R^2값은 시설별 0.219 ~ 0.853로 높은 값이 도출되었다.

Table 14. a, b value between two methods

Division	Equation of EPA Method		Measurement on Site		
	a	b	a	b	R^2
A	-0.860	17.984	-0.772	16.743	0.69
B	-0.864	18.051	-0.780	16.839	0.80
C	-0.853	17.830	-0.785	17.119	0.67
D	-0.841	17.584	-0.789	17.626	0.50
E	-0.855	17.876	-0.698	15.976	0.22
F	-0.833	17.402	-0.643	14.742	0.45
G	-0.776	16.214	-0.857	17.806	0.85
H	-0.820	17.145	-0.736	16.629	0.72
I	-0.798	16.674	-0.676	15.958	0.49

상관관계식을 통해 도출된 a, b값과 EPA method를 이용한 F, Fc를 이용해 계산된 a, b값을 비교한 결과, CO_2, O_2의 R^2 값은 Table 14와 같다.

R^2 값이 가장 낮게 도출된 E시설의 경우 O_2 측정기의 노후화로 인해 측정시점에서 약 1개월 후에 교체가 이루어졌으며 따라서 측정당시 O_2 값의 정확성이 다른 시설에 비해 낮을 수도 있었을 것이라 예상된다. 그 결과 상대적으로 낮은 상관관계가 나타난 것으로 판단된다.

R^2 값이 상대적으로 낮은 시설일수록 두 방법을 통해 도출된 a, b값 사이에서 차이를 보인다.

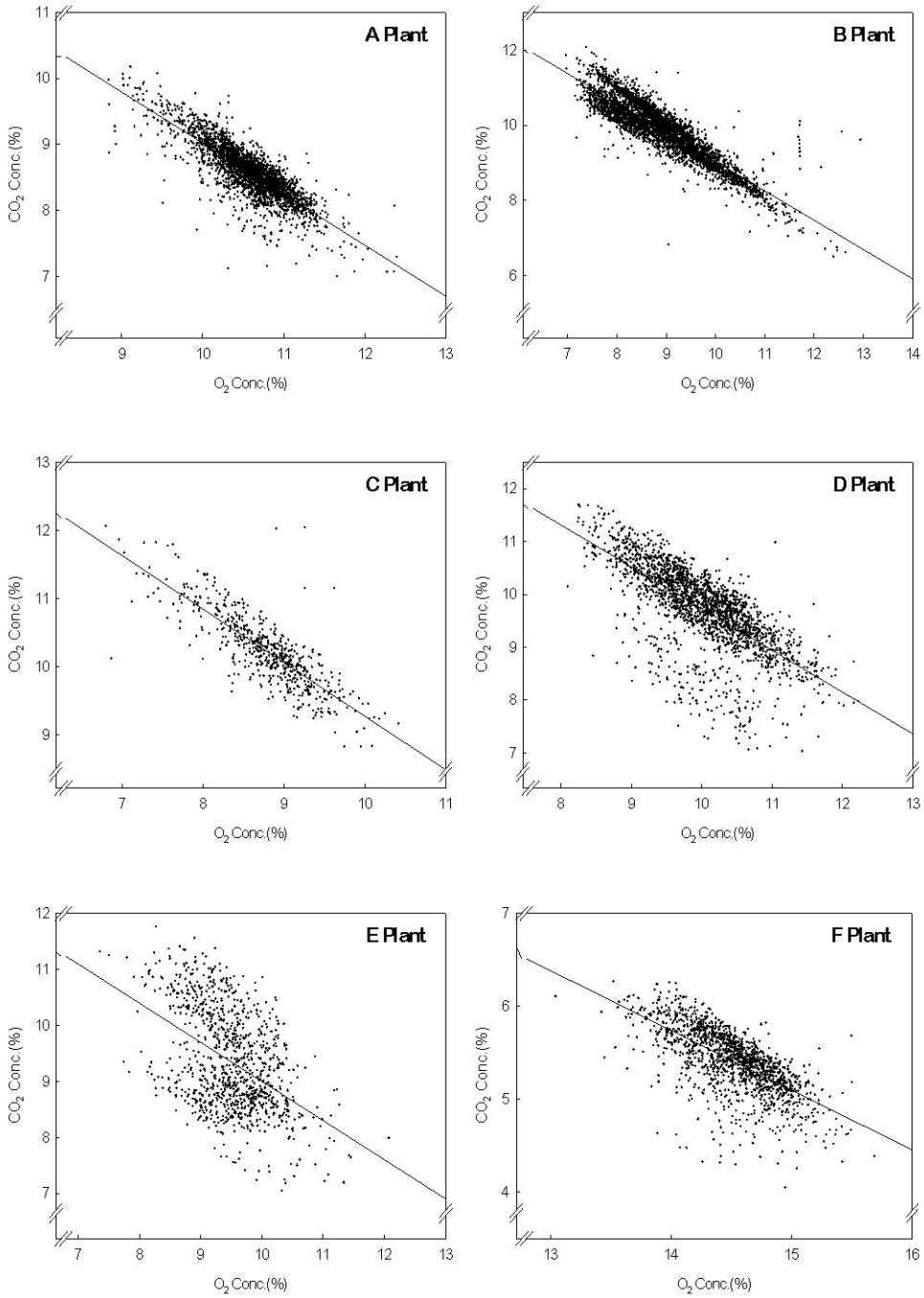


Fig. 7. Correlation of CO_2 & O_2 concentration in MSW in incinerator

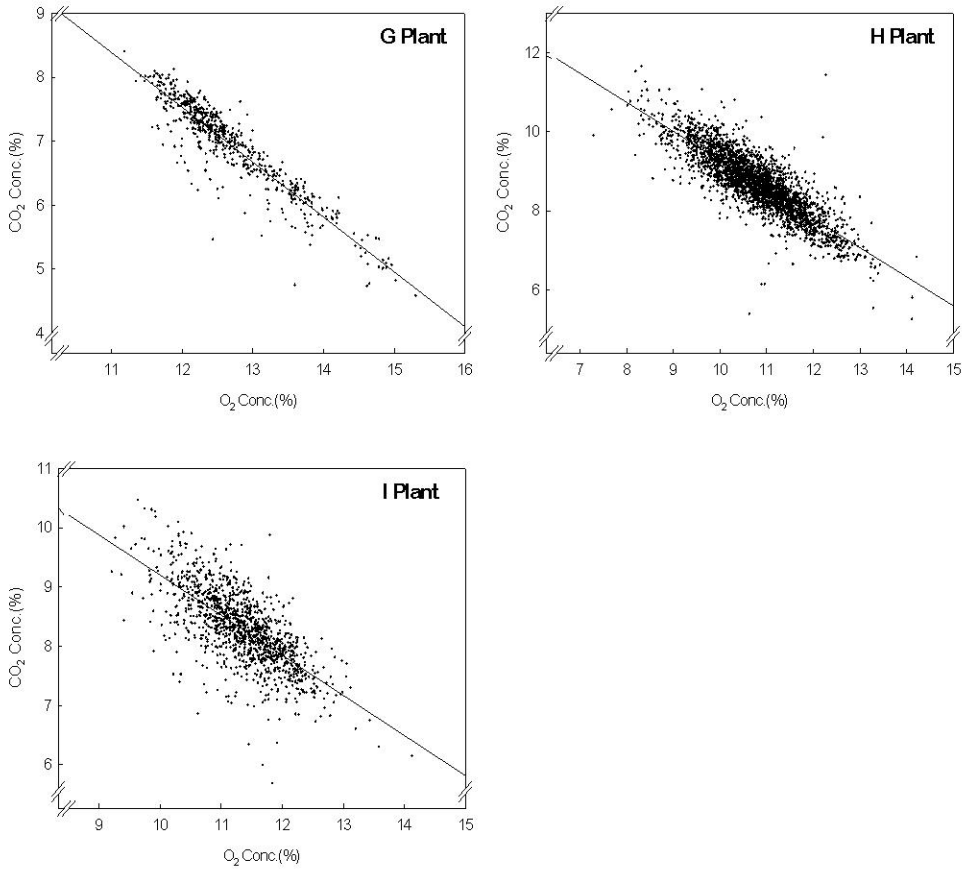


Fig. 8. Correlation of CO_2 & O_2 concentration in IW incinerator

3.3.3 CO_2 배출량 분포

F, Fc, O_2를 이용한 CO_2 배출량의 경우 현장측정을 통해 산정한 배출량과 유사한 형태를 보인다. CO_2 배출량은 약 26 ~ 168ton/day의 분포를 나타내며 현장측정에 따른 배출량과 마찬가지로 사업장폐기물 소각시설인 G에서 가장 높은 배출량 및 편차를 나타내었다.

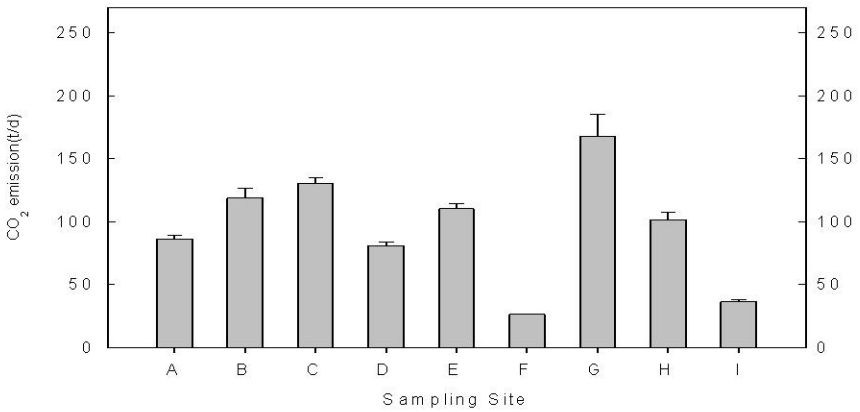


Fig. 9. CO_2 emission using F, Fc and O_2

Table 15. CO_2 emission using F, Fc and O_2

(Unit : ton/day)

Division	A	B	C	D	E	F	G	H	I
average	86.48	118.85	130.55	81.08	110.30	26.41	167.95	101.88	36.60
STD	3.13	7.65	4.23	2.90	4.07	0.63	17.16	5.39	1.85

* CO_2 emissions are corrected by FCF(Fossil carbon fraction).

3.4 불확도 산정

현장측정을 통한 CO_2 배출량과 2006 IPCC GL 및 O_2를 이용하여 산정한 CO_2 배출량에 대한 정확도를 비교·분석하기 위하여 현장측정에 따른 CO_2 배출량에 대한 불확도를 산정하였다. CO_2 농도, 유량 등 측정값의 오차, 측정기의 오차 등을 고려하였으며 2006 IPCC GL에서 제시하는 Tier 1 방법인 가감법, Tier 2 방법인 Monte Carlo Simulation을 이용하였다. 불확도 산정결과, Tier 1은 ±6 % ~ ±9 %로 시설별 큰 차이를 나타내지 않았으며 Tier 2는 -12 % ~ 29 %로 다양한 값이 도출되었다.

Tier 1 방법 적용 시 본 연구에서 사용된 시설별 자료가 모두 50개 이상으로 자료수가 많기 때문에 CO_2, O_2농도, 유량 측정값에 따른 A형 불확도가 매우 낮게 도출되었으며 따라서 측정값에 따른 불확도는 큰 의미를 나타내지 못하였다. 또한 시설별 유사한 장비와 동일한 불확도를 가지는 표준가스를 사용하였으므로 시설별 유사한 결과가 도출되었다.

Tier 2 방법인 Crystal Ball을 이용한 Monte Carlo Simulation의 결과는 아래 Table 16과 같으며, 이는 Tier 1 방법의 불확도 결과에 비해 다양하고 큰 값이 도출되었다.

Tier 2는 Tier 1과 동일한 불확도 요인을 포함하지만 시설별 CO_2, O_2, 유량 값에 대해 PDF(Probability Density Function)을 파악함으로써 측정값의 농도분포에 대한 불확도가 반영되었으며 따라 좀 더 정확하고 시설별 다양한 값이 도출되었을 것으로 판단된다.

현장측정을 통한 시설별 배출량 산정값과 불확도를 이용하여 오차 범위 설정하였으며 나머지 두 방법에 따른 배출량에 비교한 결과, 2006 IPCC GL에 따른 배출량은 모두 시설, 다수의 일별 배출량에서 오차범위 이상의 값을 나타냈으며, O_2를 이용한 배출량은 모든 시설, 모든 기간에서 오차범위 이내의 값인 걸로 확인되었다. 따라서 O_2를 이용한 CO_2 배출량은 현장상황을 잘 반영하는 것으로 판단된다.

Table 16. Uncertainties using Tier 1, Tier 2 methods

Division	Tier1 (Addition and Subtraction)	Tier2 (Monte Carlo Simulation)	
		Lower U	Upper U
A	± 6 %	- 13.08 %	13.33 %
B	± 6 %	- 18.65 %	16.09 %
C	± 7 %	- 12.03 %	13.08 %
D	± 7 %	- 17.12 %	15.84 %
E	± 7 %	- 18.36 %	29.16 %
F	± 7 %	- 19.74 %	18.15 %
G	± 7 %	- 25.94 %	19.30 %
H	± 9 %	- 26.46 %	29.36 %
I	± 7 %	- 20.82 %	21.01 %

* Tier 2's uncertainty are calculated at 95% confidence level.

3.5. 산정방법에 따른 CO_2 배출량 비교

3.5.1 시설별 화석탄소함량

현장측정을 통한 CO_2 배출량, F, Fc 및 O_2 값을 이용한 CO_2 배출량은 생물기원탄소, 화석연료기원탄소 모두를 포함하고 있으나, 2006 IPCC GL에 따른 CO_2 배출량은 화석연료기원 CO_2 배출량만을 포함한다.

따라서 가이드라인에서 정의하는 소각분야 CO_2 배출량에 대한 기준을 따르며, 동일한 조건에서의 비교를 위하여 화석연료기원탄소에 따른 CO_2 배출량을 구분 산정해야 한다. 이를 위하여 Table 17과 같이 폐기물 성상별 화석탄소함량을 이용하여 각 시설별 화석탄소함량을 계산하였다.

Table 17. FCF per each facility

	Division	FCF
MSW	A	0.406
	B	0.427
	C	0.467
	D	0.520
	E	0.452
	F	0.568
IW	G	0.894
	H	0.789
	I	0.676

화석탄소함량은 생활폐기물에 비해 플라스틱 등 화석연료기원폐기물 비율이 더 높은 사업장폐기물에서 다소 높은 값을 나타내었다. I시설은 건축폐기물 반입량이 높은 사업장으로 생물기원인 목재의 비율이 G, H 시설에 비해 상대적으로 높은 것으로 판단됨에 따라 다소 낮은 FCF값을 나타냈다. 하지만 사업장폐기물에 대한 FCF값은 대부분 시설설계값, 가이드라인 기본값에 의존하고 있으므로 높은 불확도를 가진다.

3.5.2 CO_2 배출량 비교

세 가지 방법에 따라 일별 CO_2 배출량을 산정했으며 그 결과는 Fig. 10, 11과 같다. 현장측정과 F, Fc값을 이용한 CO_2 배출량의 경우 유사한 값을 가지며, 2006 IPCC GL의 CO_2 배출량은 대부분의 시설에서 다른 두 가지 방법과 차이를 나타내었다. G시설에서 가장 큰 값 차이를 보이며 시설 내 값에서는 C시설에서 가장 큰 편차를 나타냈다.

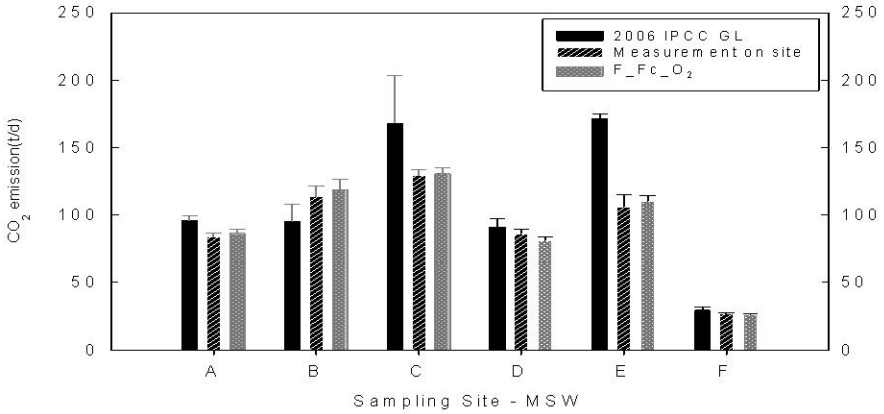


Fig. 10. Comparison of CO_2 emission between three methods in MSW

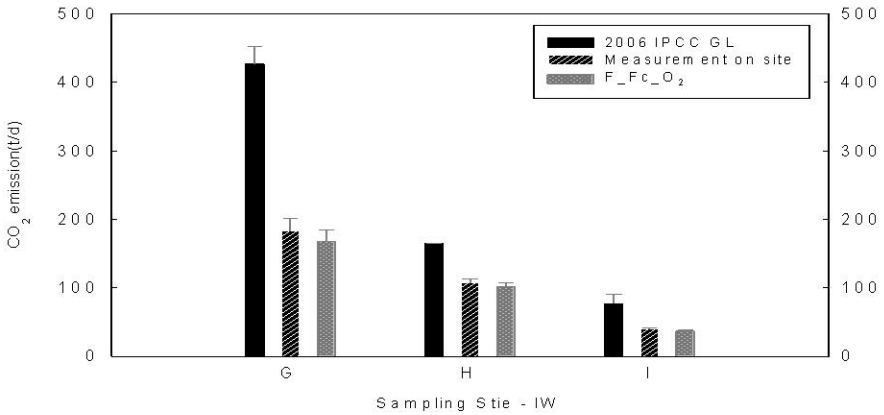


Fig. 11. Comparison of CO_2 emission between three methods in IW

Fig. 12, 13에서는 측정기간 동안 산정방법별 CO_2 배출량의 추이를 나타내고 있다. 측정기간 동안 일별 배출량의 추이 및 분포를 비교·분석함으로써 각 방법별 CO_2 배출량의 차이 및 원인을 분석하였다.

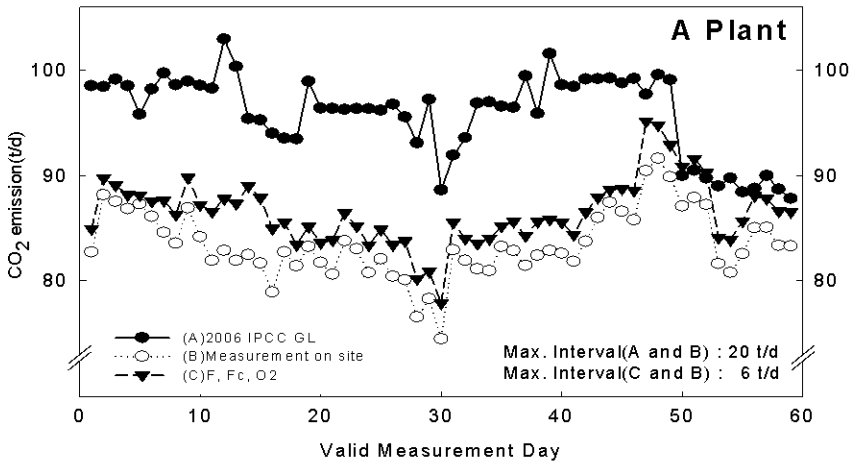
그 결과, 현장측정과 F, F_c 및 O_2를 이용한 CO_2 배출량의 경우 일별 유사한 분포를 보이며 각 시설 내 배출량에서도 측정기간 동안 큰 변화를 보이지 않는다. 하지만 2006 IPCC GL 산정식에 따른 배출량의 경우 B, C 등의 시설에서 일별 CO_2 배출량의 큰 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있으며 해당 시점은 성상분석이 이뤄진 시점과 동일한 것으로 확인된다.

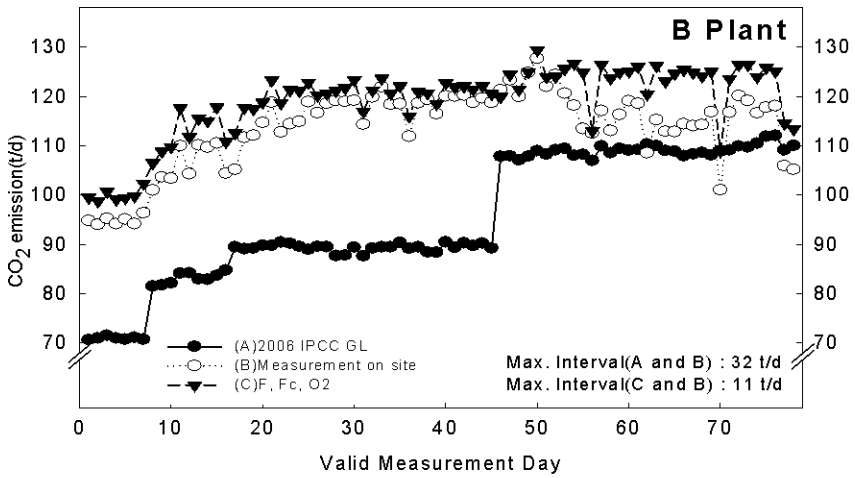
현재 우리나라는 소각되는 모든 폐기물에 대한 분석이 이루어지지 않고 있으며 계절별, 시기별 반입되는 폐기물의 성상 및 조성이 일정하지 않다. 또한 폐기물 수집, 분류과정 및 간헐적으로 이뤄지는 분석과정 등에서 발생할 수 있는 불확도가 높게 나타날 수 있으며 이에 따른 결과로 IPCC 가이드라인 방법에 따른 배출량 산정의 경우 일별 변화가 크게 발생할 수 있는 가능성을 지닌다.

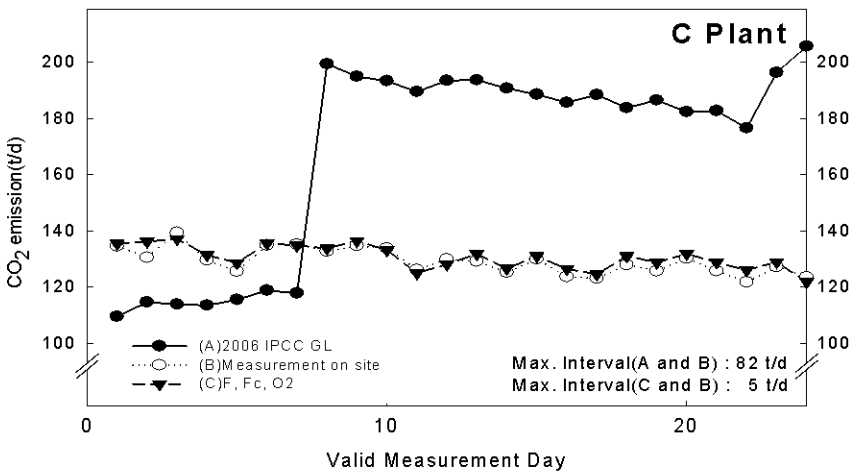
Fig. 12, 13의 그래프는 시설별 소각용량이 다양함에 따라 배출량의 차이가 크다. 따라서 모두 범위가 다르며 각 그래프의 정확한 해석을 위해 방법별 일별 편차 중 가장 큰 값을 함께 제시하였다. 생활폐기물의 경우 현장측정에 대한 배출량은 2006 IPCC GL의 배출량과 7 ~ 84 ton/day, F, Fc, O_2값을 이용한 배출량과는 2 ~ 18 ton/day의 차이를 나타내었다. 사업장폐기물의 경우 각각 72 ~ 310 ton/day, 5 ~ 20 ton/day의 차이를 보였다. 따라서 2006 IPCC GL 방법을 이용한 CO_2 배출량은 F, Fc, O_2를 이용한 배출량이 실제 측정값과 작은 차이를 나타내는 것에 비해 상대적으로 큰 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 차이 또한 2006 IPCC GL 방법이 소각시설 운영현황과 상이한 배출량을 제시할 수 있다는 가정을 뒷받침한다.

우리나라 폐기물관리법에서는 폐기물을 소각하기 위해서는 소각로 내 일정 온도를 유지해야 하며 적정공기비를 공급해야 하는 등 안정된 소각을 도모하기 위하여 항상 유사한 환경을 유지하도록 규제하고 있다. 또한 우리나라 폐기물 소각량의 대부분을 처리하는 1 ~ 3종 사업장에 대해 굴뚝TMS 및 총량관리시스템을 운영함으로써 소각시설의 안정된 운전을 실시간으로 확인하고 있다. 따라서 대부분의 시설에서 안정되고 유사한 소각환경을 유지하며 실제 배출되는 CO_2 배출량 또한 심한 변동을 보이지 않을 것으로 예상한다. 따라서 우리나라 상황을 기준으로 일부 시점에서 급격하게 배출량이 변하는 2006 IPCC GL 산정방법에 따른 CO_2 배출량은 실제로 배출되는 상황을 제대로 반영하지 못한 것이라 판단된다.

F, Fc, O_2를 이용한 배출량 산정방법에서도 F, Fc 값을 산정하기 위해 가이드라인과 마찬가지로 폐기물의 성상분석 값이 필요하다. 따라서 폐기물의 성상분석이 모든 폐기물에 대해 수행되지 않은 상태에서 간헐적으로 이뤄지는 성상분석값 또는 시설설계값을 이용하여 산정한 F, Fc값 또한 마찬가지로 큰 불확도를 가진다. 하지만 Fig. 12, 13에서 알 수 있듯이 이 값을 이용한 CO_2 배출량은 실측을 통한 배출량과 유사한 분포를 보이고 있다. 이는 불확도가 큰 F, Fc값을 포함하고 있지만 실측을 통해 실시간 수집된 O_2 농도가 현장상황을 즉각 반영하여 그 값을 보정해 줌으로써 직접측정과 유사한 배출량과 분포가 나타나는 것으로 보여진다.


A Plant
CO_2 emission(t/d)
100
90
80
0
10
20
30
40
50
60
Valid Measurement Day
(A)2006 IPCC GL
(B)Measurement on site
(C)F, Fc, O2
Max. Interval(A and B) : 20 t/d
Max. Interval(C and B) : 6 t/d


B Plant
CO_2 emission(t/d)
130
120
110
100
90
80
70
0
10
20
30
40
50
60
70
Valid Measurement Day
(A)2006 IPCC GL
(B)Measurement on site
(C)F, Fc, O2
Max. Interval(A and B) : 32 t/d
Max. Interval(C and B) : 11 t/d


C Plant
CO_2 emission(t/d)
200
180
160
140
120
100
0
10
20
Valid Measurement Day
(A)2006 IPCC GL
(B)Measurement on site
(C)F, Fc, O2
Max. Interval(A and B) : 82 t/d
Max. Interval(C and B) : 5 t/d

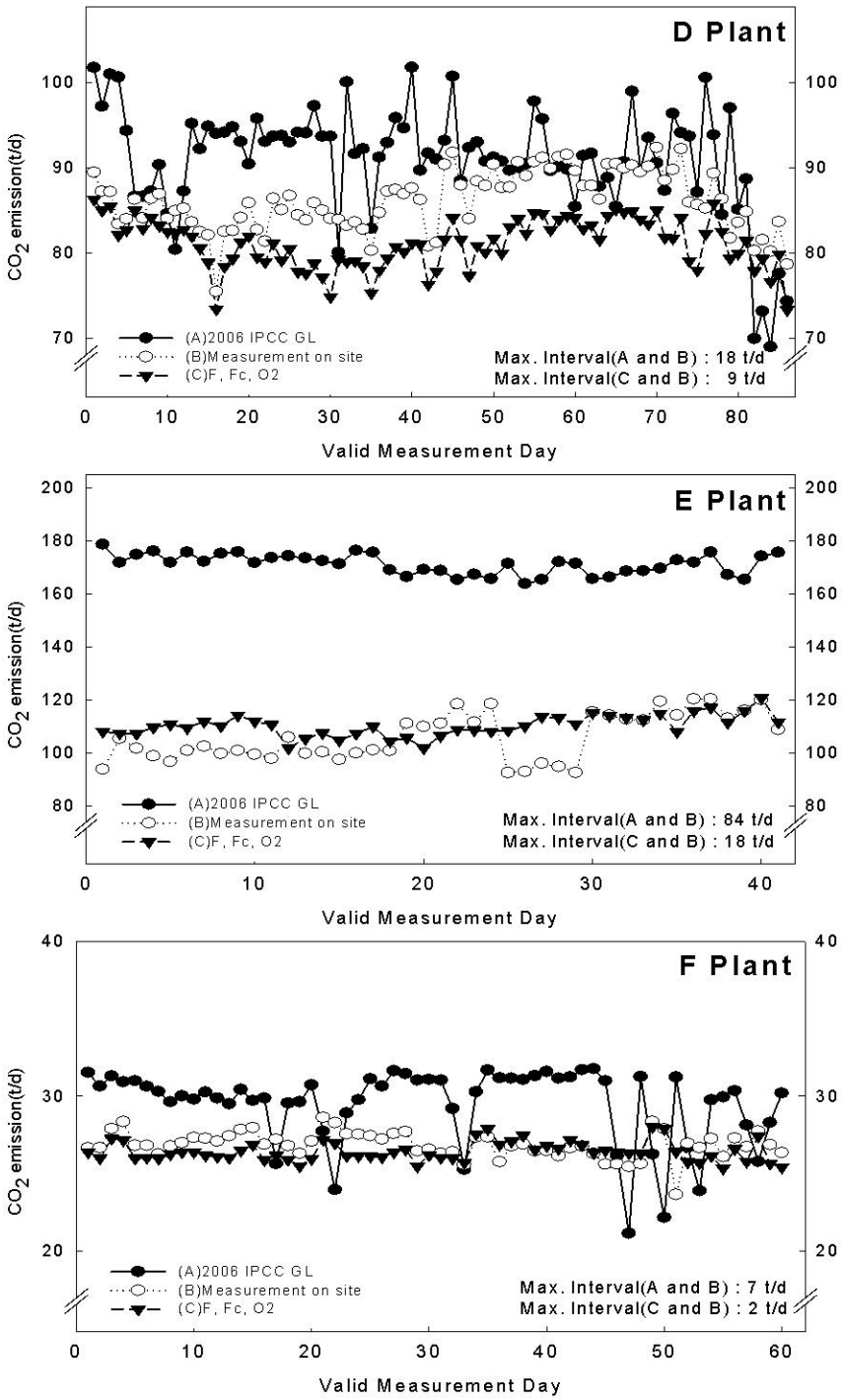


Fig. 12. Comparison CO_2 emission among three methods in MSW

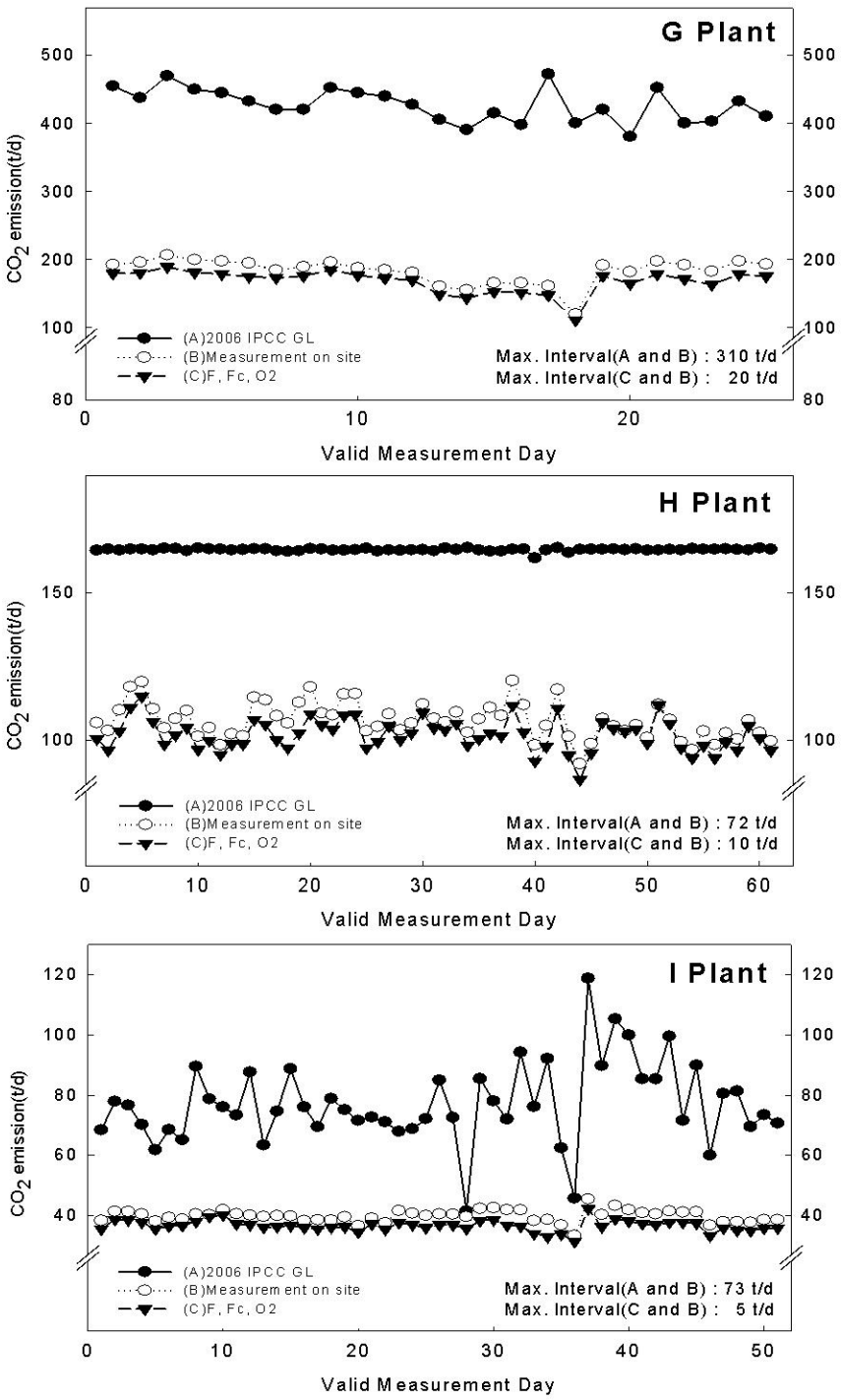


Fig. 13. Comparison CO_2 emission among three methods in IW

4. 정책적 함의 및 활용과제

우리나라는 현재 소각분야 온실가스 배출량을 산정하기 위하여 IPCC GPG 2000(IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories)의 Tier 2 방법을 이용하고 있으며, 이는 폐기물종류별 소각처리량과 배출계수를 곱하여 CO_2 배출량을 산정한다. 이때 배출계수는 건조물질함량, 탄소함량, 화석탄소함량, 소각효율을 곱한 값이다.

활동자료인 폐기물 소각처리량은 국가폐기물 통계에 의존하고 있으며 해당 통계는 bottom-up 접근방식으로 폐기물의 정보를 수집하여 폐기물의 발생량, 성상별 처리량을 제시한다. 하지만 폐기물 소각량을 산정하는 중에도 계근기의 오차 등 불확도 요인이 존재하며, 성상별 소각처리량을 구하기 위한 곱해주는 성상비 또한 직접 분석을 실시하여 그 성상비를 제시하고 있는 경우도 있지만 많은 시설에서는 과거 연구자료를 인용한 성상비를 적용하며 활동자료의 불확도를 높인다. 직접분석을 실시하는 경우에도 성상분석은 간헐적으로 이뤄지고 있다.

정확한 활동자료를 도출하기 위해서는 물론 소각되는 모든 폐기물에 대해 성상분석을 실시해야 한다. 하지만 이 방법은 그에 따르는 노동력, 분석비용 등 추가비용이 크게 발생할 수 있으며 시료채취, 분석과정 등에서 또한 불확도 요인이 존재한다. 비용편익적인 면 뿐 아니라 업무의 효율, 정확성을 살펴보았을 때에도 모든 폐기물에 대한 성상분석을 실시하는 것은 바람직하지 않다.

특히 사업장폐기물 소각시설의 경우 대부분에서 성분분석을 실시하지 않고 있으며 그중 자가처리시설은 소각폐기물의 성상이 유사한 편이지만 대규모 시설의 대부분인 중간처리시설의 경우 폐기물이 외부에서 반입되므로 폐기물 성상이 고르지 않으며 성상변화가 크게 나타날 가능성이 높다.

배출계수의 경우, 과거 연구결과에 따르면 가이드라인 기본값을 이용하여 배출량 산정했을 때 그 값이 우리나라 폐기물의 특성을 잘 반영하지 못하므로 국가 고유 배출계수 개발의 필요성을 언급하고 있다. 또한 계절적 변화가 뚜렷한 우리나라의 경우 배출계수를 산정하기 위한 요인들이 계절적 차이를 보일 것으로 판단되므로, 배출계수에 가이드라인 기본값을 일괄적으로 적용하여 CO_2 배출량을 산정할 경우 실제 우리나라 소각시설에서 발생하는 배출량과 상이한 값이 도출될 수 있다.

소각시설에서 발생하는 CO_2 배출량은 현장에서 CO_2, 유량 등의 직접 측정을 통해 가장 정확하게 산정할 수 있으며 이는 소각시설에서 발생하는 순간적인 불완전연소 및 가동중지 등 현황을 즉각적으로 반영한다. 하지만 이는 우리나라 시설기반을 기준했을 때 각 시설에 CO_2 측정기를 신규 설치하거나 기존 측정기에 측정 cell을 추가 장착했을 때 가능한 것으로 신규 장비 구입 및 장비의 유지보수 비용 등이 추가로 발생한다.

본 연구결과에 따르면 O_2 값을 이용하여 CO_2 농도 추정을 통한 CO_2 배출량 산정방법은 실측을 통한 배출량과 작은 오차 및 유사한 분포를 나타낸다. 우리나라는 현재 대기환경보전법에 따른 굴뚝 TMS, 수도권대기환경개선에관한특별법에 따른 총량관리시스템을 운영하고 있으며 이는 소각시설, 발전소, 보일러 등에서 발생하는 대기오염물질 배출을 실시간으로 감시하는 시스템으로 '10년 기준 굴뚝TMS는 전국 564개 시설, 1,454개 굴뚝에, 총량관리시스템은 151개 시설, 438개 굴뚝에 설치되어 있다. 시설 특성에 따라 TSP(Total Suspended Particulate) 등 오염물질과 O_2, 유량 등 비오염물질의 측정기가 설치되어 있으므로 해당 시스템을 통해 쉽게 시설별 O_2 값이 수집될 수 있다. 따라서 O_2를 이용한 방법을 CO_2 배출량 산정에 쉽게 적용시킬 수 있을 것으로 판단된다.

소각시설에서의 CO_2 배출량을 산정하기 위한 가장 정확한 방법은 CO_2 측정기 또는 측정 cell을 추가로 설치하여 CO_2 농도를 실측하는 방법일

것이다. 하지만 본 연구에서는 비용편익적인 면, 우리나라에 굴뚝 TMS, 총량관리시스템이 구축되어 있는 상황을 반영하고, 또한 O_2 값의 추정을 통한 CO_2 배출량이 실측을 통해 산정된 배출량과 큰 차이를 보이지 않으며 오차 범위 내의 값을 나타내는 상황 등을 고려하고 적은 추가 비용과 소각환경을 정확하게 반영할 수 있는 CO_2 배출량 산정방법을 제시하고자 하였다. 따라서 우리나라 소각분야 CO_2 배출량을 산정시 F, F_C 및 O_2 값을 이용한 CO_2 배출량 산정방법의 적용을 제안하고자 한다. 다만 이 방법은 O_2농도의 정확한 값을 필요로 하므로 O_2 측정기에 대한 지속적이며 정확한 관리가 수반되어야 한다.

뿐만 아니라 본 연구의 대상이 폐기물의 성상변화가 많고 운전이 어려운 소각시설이란 점을 고려했을 때, 상대적으로 일정한 연료 및 원료가 사용되는 보일러, 발전소 등 연소시설에서 배출량 산정시에도 O_2를 이용한 CO_2 배출량 산정방법은 적용 가능할 것으로 판단된다. CO_2 배출량 산정에 대한 이런 접근을 통해 우리나라 연소시설에서 발생하는 온실가스 배출량 산정에 대한 신뢰성 및 정확성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

다만 현장측정과 O_2를 이용하여 산정된 CO_2 배출량은 생물기원탄소함량에 따른 CO_2 배출량까지 포함하고 있으므로 시설별 정확한 화석탄소함량을 적용함으로써 화석연료기원 탄소함량에 따른 CO_2 배출량만을 구분 산정해야 한다. 본 연구에서는 가이드라인의 성상별 화석탄소함량 기본값을 이용해 시설별 화석탄소함량을 산정하였다. 하지만 소각분야 온실가스 배출계수 개발보고서(2009, 환경관리공단)에서 제시하는 섬유의 화석탄소함량만을 비교했을 때에도 우리나라 고유값은 국가 온실가스 배출량 산정시 사용 중인 가이드라인 기본값과 차이를 보인다. 따라서 정확한 CO_2 배출량을 산정하기 위해서는 향후 우리나라 고유의 시설별, 폐기물 성상별 화석탄소함량 산정방법에 대한 연구가 수행되어야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 우리나라 폐기물 소각시설에서 발생하는 온실가스 중 가장 큰 부분을 차지하는 CO_2 배출량을 산정하기 위하여 소각처리량, 소각로 형태 등을 기준으로 생활폐기물 소각시설 3개소, 사업장폐기물 소각시설 6개소, 총 9개 폐기물 소각시설을 선정하여 실제 소각시설에서 배출되는 CO_2를 시설별 일정기간(24 ~ 86일), 24시간 동안 실시간 현장측정을 실시하였다. 또한 폐기물의 삼성분, 원소분석값을 이용하여 2006 IPCC GL에서 제시는 폐기물의 화석탄소함량에 기인한 배출량 산정식으로 CO_2 배출량을 산정하였으며 마지막으로 F, Fc, O_2값을 이용한 CO_2 농도추정을 통해 CO_2 배출량을 산정하였다.

세 가지 방법을 이용한 시설별 CO_2 배출량 및 일별추이를 비교·분석함으로써 각 방법의 정확성, 적용가능성 및 비용효율적인 면을 고려하였으며 이를 통해 우리나라 소각분야 배출량 산정에 가장 적합하고 적용가능한 방법을 도출하고자 하였다.

현장측정을 통한 온실가스 배출량 산정은 소각시설 배출구에 부착되어 실시간으로 CO_2의 농도를 측정함으로써 소각환경, 즉 폐기물의 변화, 가동중지, 운전이상, 유지보수 등의 상황을 모두 반영해 줌으로써 소각시 발생되는 CO_2 배출량을 가장 정확하게 산출할 수 있는 방법으로 판단된다. 하지만 현장에 직접 측정기를 설치해야 하며 유지·관리에 따르는 추가비용이 소요된다.

현재 우리나라 폐기물부문 소각분야 배출량 산정시 사용 중인 폐기물의 화석탄소함량에 기인한 배출량 산정방법은 산정결과 CO_2 배출량이 폐기물의 성상분석이 이루어진 주기 등에 따라 큰 차이를 보이는 등 소각현황을 잘 반영하지 못하는 결과가 도출되었다. 또한 이 방법은 가동

중지 등 운전상황을 제대로 반영할 수 없다는 단점을 가지며 성분분석 과정에서 발생할 수 있는 불확도를 포함하고, 또한 성분분석을 위해 노동력, 분석비용 등 현장측정과 마찬가지로 추가비용이 발생한다.

마지막으로 F, Fc값, O_2 농도를 이용한 CO_2 배출량은 현장측정을 통한 배출량과 적은 오차 및 유사한 분포를 보였으며, 현장측정의 CO_2 배출량에 대해 Monte Carlo Simulation을 이용한 불확도 산정 결과, 9개 모든 시설의 배출량에서 오차범위 이내의 값을 나타내었다. 즉 이 방법 또한 현장측정과 마찬가지로 소각환경을 잘 반영하는 것으로 판단된다.

현재 우리나라 대규모 소각시설(국내 배출량의 큰 부분을 차지함)에 O_2 측정기가 설치되어 있는 상황을 고려해 봤을 때 추가로 측정기를 설치할 필요 없이 적용 가능한 방법으로 판단된다. 또한 F, F_C값에서 큰 불확도를 가지는 사업장폐기물 소각시설에서도 유사한 결과가 도출된 것으로 보아 O_2 실시간 측정 농도가 정확한 CO_2 배출량 산정에 큰 역할을 하는 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 소각되는 폐기물의 성상이 다양한 소각시설에서 F, F_C 및 O_2를 이용한 CO_2 배출량 산정방법의 적용가능성을 확인한 바, 나아가 상대적으로 일정한 연료 및 원료가 연소되는 보일러, 발전소 등의 시설에서의 배출량 산정 시에도 동 방법은 적용 가능할 것으로 판단된다. 이런 접근을 통해 향후 우리나라 온실가스 배출량 산정에 대한 신뢰성 및 정확성을 높일 수 있을 것이다.

6. 참고 문헌

온실가스종합정보센터(2011) 국가 온실가스인벤토리보고서

온실가스종합정보센터(2011) 연속측정방법에 따른 온실가스 배출량 산정

한국환경공단(2010) 국가 폐기물부문 온실가스인벤토리보고서

한국환경공단(2010, 2011) 폐기물부문 온실가스 배출계수 개발보고서

환경관리공단(2007) CleanSYS를 활용한 온실가스 배출계수 개발결과 보고서

환경관리공단(2009) 폐기물부문 온실가스 배출계수 개발보고서

환경부(2000) 환경기초시설에서 발생하는 온실가스 배출량 조사

환경부(2008) 환경부문 온실가스 배출량 Inventory 작성 및 배출계수 개발

환경부(2008, 2009) 전국폐기물발생 및 처리현황

환경부(2009, 2010) 대형 생활폐기물 소각시설 운영현황

환경부(2010) 대기오염측정망 설치 운영지침

환경부(2010) 대기환경보전법

환경부(2010) 환경오염공정시험기준

IGES(2006) 2006 IPCC Guidelines Vol.5

JIR(2009) National Inventory Report

J. Mohn, S.Szidat, J.Fellner, H.Rechberger, R.Quartier, B.Buchmann, L.Emmenegger(2008) Determination of biogenic and fossil CO_2 emitted by waste incineration based on $^{14}CO_2$ and mass balances

Kyupark Shim(2004) Monte Carlo Simulation Using Crystal Ball, Journal of the Korean Data Analysis Society, 6(6) 1745~1754

Kang, I.L., T.W. Han, Y.S. Cho(2009) A Comparative Cost Analysis between Alternative Methods for Monitoring CO_2 Emissions in the Emission Trading System,

Kim, B.S., S.D. Kim, C.H. Kim, T.J. Lee(2010) Property Analysis of Municipal Solid Waste and Estimation of CO_2 Emissions Waste Incinerators, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 26(6), p657~665

Kim, S.D., E.K. Kim, B.B. Jin(2011) Estimation Method for CO_2 Emission from Incineration Facility of Municipal Solid Wastes based on heating value

Kim, H.R., B.B. Jin, W.W. Yoon, Y.S. Kwon, M.Y.Lee, Y.B. Yoon, and W.G. Shin(2007) Estimation of emission and development of emission factor on greenhouse gas(CO_2) of the combustion facilities, Environment Management Corporation

Lee, G.J.(2004) The Physico chemical Characteristic of MSW and sludge in West area of Kangwondo, Department of Environmental Engineering, Sangji Univ. in Korea.

Lee, G.J.(2010) The study of combusting gas characteristic by incinerator operation condition, Department of Environmental Engineering, Sangji Univ. in Korea.

UNFCCC(2011) Greenhouse Gas Inventory Data - Detailed Data by Party, Available online at: http://unfccc.int/di/DetailedByParty.do.

Abstract

A Study on Methodologies for the Estimation of Carbon Dioxide Emissions from Waste Incinerator

Lee Hye young
Department of Environmental Health
Graduate School of Public Health,
Seoul National University

In Korea, incineration occupies a high proportion among waste treatment methods due to the limited land space compared to other countries. National greenhouse gas inventory in 2008 shows that incineration sector accounted for about 50% and among the gases from waste incineration, CO_2 accounted for 97%, N_2O does 3%. Therefore CO_2 emissions in incineration sector on the reliability and emissions management are very important

Currently we use IPCC Guidelines' equation for estimation of greenhouse gas emission in waste incineration sector and it is originated from fossil-fuel carbon content of waste by component, element analysis.

However, all the waste incineration facilities do not undertake any obligation for the component, element analysis by law, so actual value of waste's component, water content and etc. is difficult to obtain. Also the results of periodic analysis by large municipal waste incineration facilities have high uncertainty showing greater deviation between the monthly values. From this study, I suppose the most realistic, accurate and applicable method through comparison and analysis between three methodologies in estimating CO_2 emissions in waste incinerator.

The subjects of this study are six incinerators for municipal solid waste and three incinerators for industrial waste those are selected by considering the amount of incineration, prevention facilities and etc.

The three methods for estimating CO_2 emission used in this study, first, CO_2 emission from direct measuring for CO_2 concentration and gas flow in field, second, emission based on the composition of the waste through analysis of fossil-fuel carbon content and the last, emission using by F, Fc, O_2 concentration and gas flow.

In this study, CO_2 emissions per facilities by using each method are compared and analyzed in consideration of accuracy, applicability to infra-structure of Korea and cost-effective aspect.

As a result, emissions through field measurement that represent to actual emission from incineration shows similar values and distribution with emission using F, Fc, and O_2. And the emission using by component analysis shows different values and distributions, respectively.

In addition, the uncertainties of CO_2 emission from field measurement are derived from performing Monte Carlo Simulation and the error ranges are set from it. For all facilities's emission using F, Fc and O_2 are showing the result which are within the uncertainty but emissions by component analysis exceed the error range some in the period per facility. The emission by component analysis also shows the difference during stable operation of incineration for some facilities.

In consideration of that large incineration facilities which are occupied most CO_2 emission from incinerator are installed O_2 analyzer because of Stack TMS, the method of estimating using by F, Fc and O_2 can be good way to estimate similarly of real emission without installment of new CO_2 analyzer.

Through this study, this approach which are conducted for waste incinerator can be also applicable to combustion facilities like power plant, boilers and etc. which use more even fuel and source compared to waste. Moreover, it is expected to increase reliability and accuracy for the estimation of greenhouse gas emission in Korea.

Keywords : Carbon Dioxide, Estimation CO_2 emission, Greenhouse Gas, Waste Incinerator

Student Number: 2009-23620