Journal of Climate Change Research 2018, Vol. 9, No. 3, pp. 273~281
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.3.273

폐기물 소각시설의 이산화탄소 (CO_2) 연속측정 실효성에 관한 연구

오승환[*] · 강임석[**†] · 정동희[***]

[*]한국환경공단 배출권관리처 팀장, [**]부경대학교 환경공학과 교수, [***]한국환경공단 배출권관리처 처장

A Study on the Effectiveness of Continuous CO_2 Emission Monitoring in a Waste Incinerator

Oh, Seung Hwan[*], Kang, Lim Suk[†] and Jung, Dong Hee[***]**

[*]Team Manager, Dept. of Climate Change Action, Korea Environment Corporation, Incheon, Korea
[**]Professor, Environmental Engineering of Pukyung National University. Busan, Korea
[***]Director, Dept. of Climate Change Action, Korea Environment Corporation, Incheon, Korea

ABSTRACT

The purpose of this study is to consider the effectiveness of continuous CO_2 emission monitoring in waste incinerator. To prevent global warming, many countries are trying to reduce CO_2, the main greenhouse gas. Currently, Korea is implementing an emission trading scheme to reduce CO_2, and waste incinerators are included in this scheme as major CO_2 sources. However, when using waste incinerators, CO_2 is discharged during incineration of various types of wastes, therefore it is very difficult to calculate the amount of emissions according to IPCC guidelines. In addition, the estimation of CO_2 emissions by calculation is known to lack of accuracy comparing with actual emissions. Currently, Korea is operating CleanSYS, which enables continuous measurement of gases emitted into the atmosphere. Therefore, it is possible to estimate the CO_2 emissions of waste incineration facilities. The IPCC, which published CO_2 emission calculation guidelines, recognizes that direct measurement of emission is a more advanced method in cases of various CO_2 emission sources such as a waste incineration facility. Also, Korean emission trading scheme guidelines allow estimation of CO_2 emissions by continuous measurement at waste incineration facilities. Therefore, this study considers the effectiveness of a direct measurement method by comparing the results of CleanSYS with the calculation method suggested by the IPCC guidelines.

Key words: *Global Warming, CO_2 Estimation, Direct Measurement, Emission Trading Scheme, Waste Incineration, Tier 4*

1. 서 론

2014년 발간된 IPCC 기후변화 종합평가보고서에 따르면 산업혁명 이전인 1750년대부터 2011년까지 대기로 배출된 CO_2는 2040±310GtCO_2으로 평가되고 있으며, 산업혁명 이후 현재까지 대기로 배출된 총 온실가스의 50%가 지난 40년 동안에 배출된 것으로 평가하고 있다. 특히, 2000년대부터 전 지구적인 온실가스 감축대책 시행에도 불구하고 온실가스의 대기 배출은 심화되면서 부정적인 기후변화 영향은 가중되고 있다. 따라서 국제사회는 전 지구적인 온실가스 감축을 위하여 파리협정 (Paris Agreement, 2016)을 체결하고 교토의정서 (Kyoto Protocol, 1997)와 다르게 모든 당사국이 온실가스의 배출을 줄일 것을 합의하였다. 아울러, IPCC를 통하여 온실가스 배출량 산정 지침을 제공하고 있다. 각 국가는 동 지침에 따라 자국에서 배출되는 온실가스의 배출량을 산정하여 UN에 보고 (NIR, National Inventory Report)하고 있다.

한편, 동 지침에서는 배출량 산정과정에서 가장 우선적으로 고려할 원칙 (Principle)으로 배출량의 정확성 (Accuracy)과 적용된 자료의 투명성 (Transparency)을 강조하고 있다. 특히 폐기물 소각과 같이 다양한 성상 및 종류의 온실가스 배출원이 소각되는 공정에서는 IPCC 지침에 따른 계산방식 (Calculation)의 배출량 산정 보다는 직접측정 (Direct

† **Corresponding author:** Kang, kangls@pknu.ac.kr (45, Yongso-ro, Nam-Gu, Busan, 48513, Korea. T. 051-629-6527)
Received August 07, 2018 / Revised September 03, 2018 / Accepted September 17, 2018

Measurement)이 우수한 방법임을 명시하고 있다. 또한, 우리나라의 경우 2015년부터 온실가스 배출권거래제 (Emission Trading Scheme)를 시행하고 있으며 연간 25,000tCO_2 배출사업장은 매년 온실가스 배출량을 산정하여야 하며 국내 폐기물 소각시설이 여기에 포함된다.

현재, 국내 배출권거래제 운영지침에 따른 소각시설의 온실가스 배출량 산정 방법은 IPCC 지침에 따라 Tier1부터 Tier3까지의 방식과 함께 연속측정에 따른 Tier4 방식을 규정하고 있다. 특히 국내의 경우 대기오염 방지를 위하여 "CleanSYS"를 운영중이며 폐기물 소각시설을 포함한 대기오염물질 배출원의 배출구 (Stack)에 연속측정 기반 (TMS, Tele- Monitoring System)이 마련되어 있는 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 국내 소각시설을 대상으로 IPCC 지침에 따른 계산방식의 CO_2 배출량 산정과 함께 TMS를 활용한 CO_2 연속측정에 따른 배출량 산정결과를 비교 · 분석하여 폐기물 소각시설에서의 CO_2 연속측정에 대한 실효성을 평가하고자 하였다.

2. 국내외 CO_2 배출량 산정현황

2.1 IPCC 지침에 의한 CO_2 배출량 산정방법

온실가스 배출량 산정에 대한 국제적 지침인 "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories"에 따른 온실가스 배출량 산정식은 (1)과 같다.

$$\text{Emissions} = AD \bullet EF \quad (1)$$

즉, 온실가스 배출의 원인이 되는 활동자료 (AD, Activity Data)에 각 활동자료의 단위 온실가스 배출량 (EF, Emission Factor)을 반영하여 온실가스 배출량을 산정하는 것이다.

따라서, 각 인자에 적용되는 값의 정확도에 따라 배출 총량의 정확도가 결정된다고 할 수 있다. IPCC 지침에서는 각 인자를 Tier1부터 Tier3까지 구분하고 있으며, 적용 Tier가 높을수록 정확도가 높은 것으로 평가하고 있다. 예를들면 Tier1은 IEA 및 IPCC 등과 같은 국제기구에서 제공하는 값을 적용하고, 해당국가의 평균값을 적용하는 경우를 Tier2로 해당 사업장의 고유값을 적용하는 방식을 Tier3로 정하고 있다. 아울러, IPCC 지침에서는 데이터 수집 및 배출계수 산정과정에서의 품질관리 (QA/QC) 필요성 및 배출량 산정결과에 대한 불확도 (Uncertainty) 평가로 참값 (Real Emission)과의 차이를 분석하도록 하고 있다. 이러한 개념에 따라 IPCC 2006 지침에서 제시하고 있는 폐기물 소각시설 CO_2 배출량 산정식은 아래 (2)와 같다.

$$CO_2 \text{ 배출량} = MSW \cdot \sum (WF_j \cdot dm_j \cdot CF_j \cdot FCF_j \cdot OF_j) \cdot 44/12 \quad (2)$$

여기서,

CO_2 배출량 = 연간 CO_2 배출량, Gg/yr

MSW = 소각되는 고형폐기물 총량, Gg/yr

WF_j = MSW 내 구성 성분 j의 폐기물 유형/물질의 비율 ($\sum WF_j=1$)

dm_j = 소각되는 MSW의 구성 성분 j 중 건조 물질 함량, (비율)

CF_j = 구성 성분 j의 건조 물질 (예: 탄소 함량) 내 탄소 분율

FCF_j = 구성 성분 j의 탄소 총량 중 화석 탄소 분율

OF_j = 산화계수, (비율)

44/12 = 탄소에 대한 이산화탄소 변환 계수

위 식에서 보듯이 폐기물 소각시설의 경우 다양한 폐기물 성상 (*j*)들이 연소과정에서 CO_2가 배출되고 동 배출되는 CO_2의 양 중에서 화석탄소에 기인하는 CO_2를 분류하여야 한다. 따라서, 계산식의 경우 폐기물의 각 성상별 비율 (WF_j), 건조무게 (dm_j), 탄소함량 (CF_j) 그리고 화석탄소함량 분율 (FCF_j)과 같은 다양한 인자의 도출이 필요하다. 결과적으로 단일연료 및 원료에 대한 CO_2 배출량 산정과정과 비교 매우 복잡하고 높은 불확실성을 갖는다.

이러한 이유로 IPCC 2006 지침에서는 폐기물 소각시설의 경우 연속측정 (CEMS, Continuous Emission Monitoring System)을 통한 배출량 산정을 권고하고 있다. 특히, 온실가스 배출권 탄소시장과 연계되어 있는 배출권거래제의 경우 배출량이 화폐와 거래되므로 정확도를 높여야 하기 때문에 연속측정 적용의 필요성을 강조하고 있다. 다만 배출 가스량을 직접 측정하는 경우 대상가스의 농도와 유량으로 배출량이 산정되므로 배출가스의 배출속도 (flow rate), 압력, 온도, 수분량 (water vapour content) 등이 측정에 포함되어야 하고, 정기적인 정도검사를 위한 QA/QC가 필요하다고 IPCC 지침에서는 규정하고 있다.

2.2 국내 소각시설의 CO_2 배출량 산정현황

현재, 국내 폐기물 소각시설의 온실가스 배출량은 계산법에 의해 산정되고 있다. 이 경우 소각되는 폐기물의 성상분석, 성상별 건조무게, 성상별 탄소함량 등을 고려하여 CO_2 배출량을 산정하고 있다. 하지만 산정과정에서 적용되는 인자(Emission Factor)의 대부분은 IPCC에서 제공하는 기본값(Default Factor)을 이용하므로 정확도가 낮고 높은 불확도를 갖고 있다.

한편, 국내 온실가스 배출권거래제에 참여하고 있는 폐기물 소각시설의 경우 매년 폐기물 소각에 의한 배출량을 산정하여 제 3자의 검증을 거친후 관할 감독기구에 제출하도록 하고 있다. 산정지침으로는 국제적 기준인 IPCC 지침과 동일하게 바이오매스 폐기물 (음식물, 목재 등)의 소각으로 인한 CO_2 배출은 생물학적 배출량이므로 제외하도록 하고 있으며 화석연료에 기인한 폐기물 (플라스틱, 합성 섬유, 폐유 등)의 소각으로 인한 CO_2만 배출량에 포함하도록 규정하고 있다. 또한, Tier4 방식도 가능하며 국내 배출권거래제 지침에 구체적인 산정방법을 제시하고는 있으나 이를 적용하여 산정하는 업체는 전무한 실정이다. 아래 식 (3)은 국내 배출권거래제에서 폐기물 소각시설에서의 Tier4 산정식이고 CO_2 측정기기의 설치방법 및 성능 등과 같은 시험기준은 환경오염공정시험기준 TMS 기능에 따르도록 하고 있다.

$$E_{CO_2} = K \times C_{CO_2 d} \times Q_{sd} \quad (3)$$

여기서,

E_{CO2} : CO_2배출량 (g CO_2/30분)

C_{CO2d} : 30분 CO_2 평균농도 % (건 가스 (dry basis)기준, 부피농도)

Qsd : 30분 적산 유량 (Sm^3) (건 가스 기준)

K : 변환계수 (1.964 × 10, 표준상태에서 1kmol이 갖는 공기부피와 CO_2 분자량 사이의 변환계수)

또한, 국내 법률에 의거한 환경오염공정시험기준에 따른 TMS의 CO_2 측정기기의 교정오차는 5% 이하, 상대정확도는 10% 이하, 영점 및 교정편차 (2시간)은 0.4% 이하로 규정하고 있다.

2.3 CO_2 연속측정 국외사례

해외 경우에도 선진국을 중심으로 CO_2 연속측정에 대한 규정 및 프로그램을 마련하여 시행하고 있다. 특히 CO_2 배출권이나 대기오염물질을 거래하는 시장이 형성되어 있는 미국 및 유럽을 중심으로 폐기물 소각시설의 연속측정이 활발하게 이루어지고 있다

미국의 경우 “CFR Title 40 Part 98”의 온실가스 배출량 산정 부분에서 정하고 있으며, 사업장 중 250mmBtu/day 이상 또는 MSW 600tons/day 이상의 고체 화석연료 및 연간 1,000시간 이상 운영시 연속측정 허가 대상 사업장으로 정하고 있다. 방법론으로는 온실가스 보고 프로그램인 e-GGRT (Electronic Greenhouse Gas Reporting Tool)을 통해 보고하고 있다. 보고 내용은 각 시설별 규모 및 CO_2 배출량 산정결과와 배출된 CO_2 양을 바이오 및 비바이오 배출량으로 구분하여 보고토록 하고 있다. 또한, 유럽의 경우도 온실가스 연속측정 관련법은 배출권거래제와 연계하여 2003년 제정된 “Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003”에 근거하여 Commission Regulation (EU) No 601과 Commission Regulation (EU) No 600에 규정이 마련되어 있다. 유럽 온실가스 배출권거래제에 참여하는 배출시설 (Installation)의 CO_2 배출량 산정방법으로 계산방식 및 연속측정 방식 모두 인정하고 있으며, 연속측정 방식의 경우 CO_2 배출량은 시간평균 농도 및 시간평균 유량의 측정을 통해 단위 시간별로 산정된 후 보고년도의 모든 단위 시간별 배출량을 합산하여 연간 총배출량으로 산정하는 것으로 제시하고 있다. 아울러 해당시설에서 배출되는 CO_2 중 바이오매스 함량의 연속측정이 불가능하므로 측정하여 결정된 CO_2 총배출량으로부터 생물학적 기원 CO_2를 제외한 근사치로 계산한다고 규정하고 있다. 또한, 유럽의 연소측정 방식에서는 계산법과 유사한 수준의 불확도를 증명하여야 함을 명시하고 있다.

온실가스 배출량 산정방식의 국제적 지침인 IPCC 지침에서는 CO_2 배출량을 연속측정 하는 경우 측정기에 대한 성능 및 유지·관리 규정을 제도적으로 갖추고 시행하여야 함을 명시하고 있다. 따라서 이미 CO_2 연속측정을 도입·시행하고 있는 미국 및 유럽의 경우 이와 관련된 규정을 제도적으로 시행하고 있으며, 국내의 경우도 TMS 측정기의 성능 및 유지·관리를 위하여 관련법률 및 공정시험법 등의 고시를 통하여 제도적으로 관리하고 있는 상황이다. 아래 Table 1은 연속 측정기의 성능 및 유지·관리를 위한 항목과 각 항목별 국내, 미국 및 유럽의 관련규정을 비교한 것으로 국가별 측정기의 성능 및 품질관리를 위하여 규정하고 있는 제도가 상호 부합 하는지를 평가한 것이다. Table 1에서 알 수 있듯이 국내 및 해외사례의 경우 관련 법령에 근거하여 연속측정에 대한 측정기의 성능 및 설치 기준, 운영 기준 등이 마련되어 있고

Table 1. The comparison of CO_2 instrument regulation among the countries

Items	Korea	USA	EU	Comply
Act	환경분야 시험·검사 등에 관한 법률	40 CFR 75	MRR	OK
Standard of CEMS performance	환경측정기기의 형식 승인·정도검사 등에 관한 고시	40 CFR 60, 40 CFR 75	EN 15267	OK
Standard of CEMS installation	대기오염공정시험법 (ES 01802.1)	40 CFR 75	MRR	OK
Standard of CEMS maintenance & measurement	환경분야 시험·검사 등에 관한 법률, 대기오염공정시험법 (ES 01801.1) 환경측정기기의 형식 승인·정도검사 등에 관한 고시	40 CFR 75	EN 14181	OK
Analyzing methods of CO_2 emission	KS 10396	40 CFR 75	MRR	OK
Quality control of CEMS	측정기기 정도검사	40 CFR 75	EN 14181	OK

Table 2. Incinerator & Measurement Terms for this study

NO	Incinerator[1)]	Stack	Specification		Measurement Term
			Type	Methode	
1	M-B	#1	MSW	Stoker	1st year : Jun to Dec 2014, 2nd year : Jan to Jun 2015 3rd year : Aug 2016 to Feb 2017
2	I-B	#1	IW	Stoker	

매우 유사한 체계를 갖추고 있다. 특히 국내의 경우 대기오염물질과 관련하여 굴뚝 원격감시체제 시스템인 TMS로 기본부과금 부과자료와 배출허용기준 초과 여부를 판단하여 각종 행정처분 자료로 활용함에 따라 국내의 경우도 CO_2 연속측정을 위한 측정기기의 성능 및 유지 · 관리를 위한 제도적 체계는 이미 갖추어져 있다고 볼 수가 있다.

3. 연구방법

국내 운영중인 폐기물 소각시설의 연속측정을 통한 CO_2 배출량 산정 실효성 연구를 위하여 국내에 운영 중인 폐기물 소각시설을 선정하여 IPCC 지침에 따른 Tier1 산정방식과 연속측정 방식인 Tier4의 CO_2 배출량 산정결과를 비교 분석하였다. 아울러, 본 연구기간 동안 조사 · 분석된 값을 활용하여 해당시설의 고유값을 적용하는 Tier3 방식도 상호 비교하였다. 아래 Table 2와 같이 연구기간은 시계열을 고려하여 2014년부터 2016년까지 연차별로 실시되었으며 사업장은 폐기물 특성을 고려하여 생활 및 사업장폐기물 소각시설 각 1개소를 대상으로 실시하였다.

연구는 우선 1차 연도에는 CO_2 연속측정의 가능성을 평가하기 위하여 각 소각시설별 소각대상 폐기물의 성상, 건조무게, 탄소함량에 대한 조사와 함께 TMS를 통한 CO_2 연속측정이 시행되었다. 2차 연도에서는 배출량의 정확도를 제고시키기 위하여 폐기물 및 소각 배출가스의 화석탄소함량 측정도 함께 실시되었다. 그리고 3차 연도에는 소각시설의 CO_2 연속측정을 통한 배출량 산정의 현장 적용성 평가를 위하여 Tier1,3 및 4 방식의 배출량 산정과 함께 소각시설 배출가스의 화석탄소함량에 대한 계수 개발을 추진하였다. 아울러, 각 배출량 산정 방식별 적용된 매개변수 및 인자에 대한 불확도(Uncertainty)도 시행하였다.

Tier1 불확도 산정은 각 주요 변수에 대한 IPCC 불확도 기본값을 적용하였다. 다만 현재 국내 소각시설의 경우 폐기물의 성상분석 및 소각 폐기물의 양은 관련규정[2)]에 따라 매월 1회 이상 분석을 의무화하고 있고 측정 불확도를 7.5% 이내로 제한하고 있으므로 이를 반영하였다. Tier3의 경우 매월 측정된 매개변수 값의 불확도를 평가하여 적용하였다. 그리고 Tier4 경우는 연속측정기기의 측정 불확도에 기인할 것으로 매월 시행된 정도관리 과정에서 나타난 CO_2 측정기의 농

1) 연구대상 소각시설의 “M”은 생활폐기물 (Municipal Waste)을 “I”는 사업장폐기물 (Industrial Waste)을 표현하며 “-” 이후 알파벳은 대상 “소각시설 명의 약자”를 의미함

2) 온실가스 · 에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침 (2016.12, 환경부) 392페이지

도 및 유량측정기의 불확도를 합성하여 반영하였다. 다만 화석탄소함량 불확도 값은 의뢰된 전문기관[3]에서 제시한 불확도 값 (0.24%)을 반영하였다.

4. 주요 연구결과

4.1 IPCC 기본값과 측정값의 배출계수 비교

폐기물 소각시설의 CO_2 배출량은 소각되는 폐기물의 성상비중과 각 성상별 건조무게, 탄소함량 및 화석탄소함량 비율에 따라 결정된다. 따라서 본 연구기간 동안 선정된 폐기물 소각시설에서 측정된 주요 인자들을 IPCC 지침에서 제공하고 있는 기본값과 건조무게 및 탄소함량 값을 비교하였으며 생활폐기물 소각시설인 M-B의 결과는 아래 Table 3과 같다

측정된 건조무게의 값은 종이류 22.3%, 플라스틱류 17.5%, 기타류 12.4% 순으로 IPCC 기본값 보다 적은 값을 보였다. 이는 국내 생활폐기물의 경우 현재 IPCC 지침의 Tier1 방식을 적용하여 산정한 CO_2 배출량 값이 측정된 값보다 과다하게 산정될 가능성을 내포하고 있다. 탄소함량의 경우는 기타류 34.3%, 섬유류 6.2% 등으로 측정된 값이 IPCC 기본값 보다 큰 것으로 측정됨에 따라 배출 CO_2 배출량 결과가 축소 될 가능성이 내포되어 있었다.

사업장폐기물 소각시설인 I-B의 건조무게 및 탄소함량 측정결과 결과는 Table 4와 같다. CO_2 배출량의 기여도가 높은 석유제품류의 건조무게는 IPCC 기본값 보다 낮았지만 탄소함량은 높은 것으로 나타났고, 건설폐기물의 경우는 건조무게 및 탄소함량 모두 IPCC 기본값 보다는 낮은 것으로 평가되어 반입되는 폐기물 성상별 비중에 따라 CO_2 배출량 산정결과는 측정값과 IPCC 기본값 간의 차이 (Gap)가 발생할 가능성이 매우 높은 것으로 판단되었다.

폐기물 소각시설 CO_2 배출량 산정결과의 또 다른 주요 인

Table 3. The dm & cf 3 years average value of M-B (unit : %)

Waste	dm in M-B						cf in M-B					
	1st	2nd	3rd	Ave	IPCC	Gap	1st	2nd	3rd	Ave	IPCC	Gap
Paper	72.4	73.3	57.4	67.7	90.0	-22.3	40.1	38.6	39.7	39.5	46.0	-6.5
Textile	74.0	80.0	68.9	74.3	80.0	-5.7	59.5	57.0	52.1	56.2	50.0	6.2
Food	55.9	40.6	40.2	45.6	40.0	5.6	40.6	34.3	46.8	40.6	38.0	2.6
Wood	82.8	70.6	75.6	76.3	85.0	-8.7	45.9	44.0	43.7	44.5	50.0	-5.5
Garden	72.0	46.5	58.5	59.0	40.0	19.0	46.1	42.5	39.9	42.8	49.0	-6.2
Nappies	52.1	49.3	71.1	57.5	40.0	17.5	57.5	68.4	73.0	66.3	70.0	-3.7
Rubber	77.3	94.9	85.7	86.0	84.0	2.0	45.7	65.9	58.5	56.7	67.0	-10.3
Plastics	77.3	93.6	76.7	82.5	100.0	-17.5	72.4	72.0	73.4	72.6	75.0	-2.4
other	78.7	80.8	73.2	77.6	90.0	-12.4	44.0	20.9	53.2	39.3	5.0	34.3

Table 4. The dm & cf 3 years average value of I-B (unit : %)

Waste	dm in I-B						cf in I-B					
	1st	2nd	3rd	Ave	IPCC	Gap	1st	2nd	3rd	Ave	IPCC	Gap
Textile	94.6	97.6	88.7	93.6	80.0	13.6	54.7	58.9	52.6	55.4	46.0	9.4
wood	72.4	89.5	77.0	79.6	85.0	-5.4	45.4	45.1	55.3	48.6	50.0	-1.4
Paper	83.1	93.0	nd	88.0	90.0	-2.0	38.7	38.3	50.0	42.3	38.0	4.3
Petroleum	93.0	99.3	94.4	95.6	100.0	-4.4	76.9	58.1	65.9	67.0	50.0	17.0
Synthetic	98.4	98.4	95.3	97.4	84.0	13.4	62.8	54.6	61.1	59.5	49.0	10.5
Construction	84.1	86.7	97.2	89.3	100.0	-10.7	45.3	4.2	65.7	38.4	70.0	-31.6
Other	94.9	99.6	89.2	94.6	90.0	4.6	73.2	56.5	39.1	56.3	67.0	-10.7

3) 측정기관 : 한국지질자원연구원, 시험·분석기관 : ㈜카본에널리시스랩

자인 화석탄소함량 비율의 경우는 IPCC 지침에서는 각 성상별 기본 값을 제시하고 있으나 금번 연구는 Tier4의 실효성을 평가하기 위한 것으로 시설별 폐기물을 합성한 고형물 샘플과 소각후 배출가스 샘플을 월별로 채취하여 전문기관에 화석탄소함량 값의 분석을 의뢰하였으며 주요결과는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. 생활폐기물 고형물 샘플 화석탄소함량 값은 57.1%, 배출가스 샘플의 값은 41.6% 수준이었다.

사업장폐기물 소각시설의 경우에도 고형물 샘플 화석탄소함량 값이 95.4%, 가스형 샘플의 58.2% 보다 높게 나타났으며 이는 소각효율과 연계되어 발생된 차이 (Gap)라 볼 수 있다.

또한, 생활폐기물 소각시설에서는 가스형 샘플의 월별 측정값이 그리고 사업장폐기물 시설에서는 고형물 샘플 값이 월별로 안정적인 것으로 나타났다. 이는 생활폐기물의 성상이 사업장폐기물과 비교 다양하여 샘플링 과정에서 한계[4].가 있었던 것으로 판단되며, 사업장폐기물의 경우는 월별 화석탄소 함량이 높은 폐기물의 성상 비중 편차가 높았던 것으로 분석된다.

4.2 CO_2 배출 폐기물의 주요 성상

생활폐기물 M-B시설의 폐기물 성상별 건조무게 및 탄소함량 측정값의 경우 플라스틱류, 폐지류, 섬유류 등의 순으로 6개 폐기물 성상이 CO_2 배출량에서 차지하는 비중이 95%를 초과하는 것으로 평가되었고, Table 5 나타나듯이 IPCC 지침 적용시 폐기물 성상 순서는 같았지만 기타 폐기물류를 제외

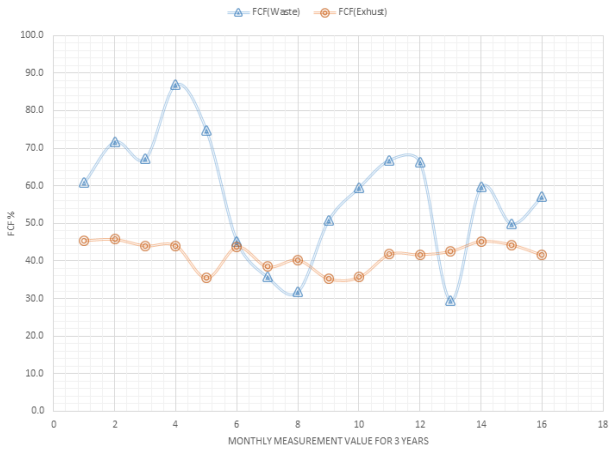

Fig. 1. The FCF 3 years average value of M-B. (unit : %)

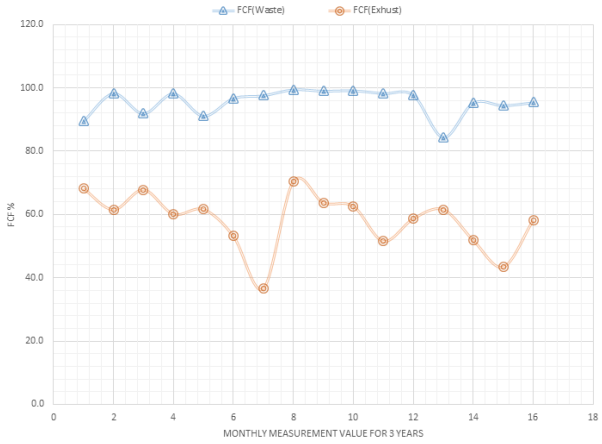

Fig. 2. The FCF 3 years average value of I-B. (unit : %)

Table 5. The waste type caused of 95% CO_2 emission in M-B incineration

Waste		Measurement				IPCC			
Type	%	dm	cf	%	Rank	dm	cf	%	Rank
paper	28.2	72.4	40.1	0.227	2	90.0	46.0	0.275	2
Textile	10.5	74.0	59.5	0.128	3	80.0	50.0	0.099	3
Wood	3.5	82.7	45.8	0.037	6	85.0	50.0	0.035	5
Nappies	13.2	52.1	57.4	0.110	4	40.0	70.0	0.087	4
Plastics	25.7	77.3	72.3	0.399	1	100.0	75.0	0.453	1
Other	4.6	78.6	43.9	0.044	5	90.0	5.0	0.005	-

4) IPCC 2006 지침에서는 폐기물 성상분석에 대한 불확실성 관련 정기적인 샘플링을 통하여 조사하는 경우에 ±10%의 불확실성이 있는 것으로 평가하고 있으며, 간헐적인 연구 및 특수 목적으로 샘플링을 통하여 성상을 분석하는 경우 ±30%의 불확실성을 내포하고 있는 것으로 평가하고 있다 (IPCC 2006 Volume 5 Chapter 3.7 Table 3.5)

한 5개의 폐기물 성상이 95% 수준에 도달하였다. 이는 금번 측정값과 IPCC 지침에서 제시하고 있는 기본값의 차이는 있으나 순서는 동일한 것으로 평가되었다.

사업장폐기물 I-B시설 측정값의 경우 Table 6과 같이 석유제품류, 기타사업장 폐기물류, 건설폐기물류 등의 순으로 4개의 폐기물 성상으로부터 배출되는 CO_2 배출량이 전체 배출량의 95%를 초과하는 것으로 평가되었다. 반면 IPCC 지침에 따른 폐기물 성상별 건조무게 및 탄소함량을 적용[5]하는 경우 CO_2 배출량에 기여하는 폐기물의 성상은 석유제품류, 폐수슬러지류, 건설폐기물류 순으로 측정값과 비교 순서가 바뀌었다. 이는 사업장폐기물의 경우 성상이 특정되지 않은 기타 폐기물의 탄소함량 값이 많은 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 산정방법에 따른 CO_2 배출량 비교

IPCC 기본값을 적용한 Tier1, 3년간 측정 평균값을 적용한 Tier3 (3 Years Average), 3차 연도 단년도 월별 평균을 적용한 Tier3 (Year Average)와 화석탄소함량 단년도 평균값을 적용한 Tier4 (Year Average)와 3년 평균값을 적용한 Tier4 (3 Years Average)로 구분하여 산정하였다. 이와 같이 방식별로 산정한 M-B 소각시설의 3차 연도 배출량 산정결과는 아래 Fig. 3과 같다.

Tier1과 Tier3 (3 Years Average)로 산정한 배출량이 매월 동일수준으로 가장 많았고 Tier3 (Years Average) 및 Tier4 방식 순으로 배출량이 적었다. 한편 Tier4 방식의 경우 3차연도 단년도 평균값 적용이나 3년간의 평균값 적용 때나 거의 동일한 수준인 것으로 나타났다. 이는 생활폐기물 소각시설의 경우 배출량 산정 방식별 값의 차이는 있었으나 일정비율이 유지되었고 연속측정의 경우 방법별로 거의 동일한 값이 나타남에 따라 신뢰성이 높은 것으로 평가되었다.

사업장폐기물 소각시설인 I-B 소각시설의 3차 연도 배출량 산정결과는 아래 Fig. 4와 같다. Tier3 (3 Years Average)가 가장 많았고 Tier3 (Years Average), Tier1 및 Tier4 순으로

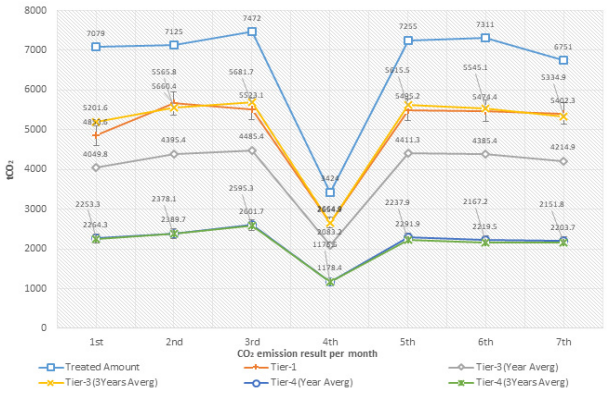

Fig. 3. The CO_2 Emission trends of M-B Incineration in 3rd year. (unit : tCO_2)

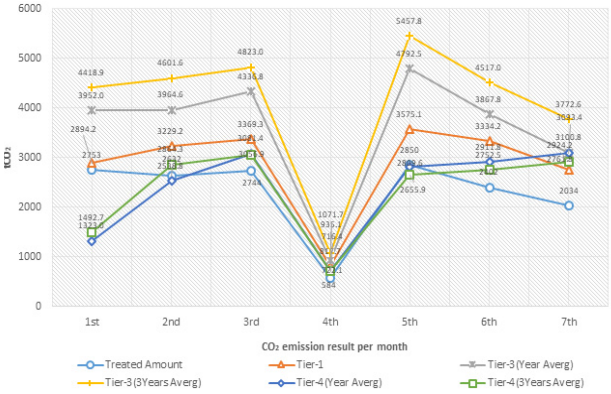

Fig. 4. The CO_2 Emission trends of I-B Incineration in 3rd year. (unit : tCO_2)

Table 6. The waste type caused of 95% CO_2 emission in I-B incineration

Waste		Measurement				IPCC			
Type	%	dm	cf	%	Rank	dm	cf	%	Rank
Petroleum	60.8	93.0	76.8	82.4	1	100.0	80.0	93.0	1
Construction	5.2	84.1	45.3	3.7	3	100.0	24.0	2.3	3
Other	7.2	94.9	73.2	9.5	2	90.0	4.0	0.5	4
Ind sludge	17.9	23.0	34.1	2.6	4	23.0	34.1	2.6	2

5) IPCC 지침에서 슬러지에 대한 건조무게와 탄소함량 값을 제시하고 있지 않음에 따라 배출량 산정의 일관성 확보를 위하여 금회 측정된 값을 IPCC의 값으로 적용하였다. 그 동안 육상에서 발생하는 슬러지는 해양투기가 일반적인 처리방법이었으나 2011년부터 슬러지 해양투기 금지로 국내의 경우 육상에서 처리되고 있으며, IPCC 지침 2006년 Version은 아직 이를 반영하고 있지 못한 것으로 판단됨

Table 7. The average CO_2 emission result of each Tier in 3rd year. (unit : tCO_2)

Incinerator		Tier1	Tier3 (Year)	Tier3 (3Years)	Tier4 (Year)	Tier4 (3Years)
Municipal	M-B	5,010 (100%)	4,003 (80%)	5,085 (101%)	2,164 (43%)	2,137 (42.6%)
Industrial	I-B	2,854 (100%)	3,564 (125%)	4,094 (143%)	2,354 (82%)	2,351 (82.3%)

배출량이 적었다. 한편 Tier4 방식의 경우 생활폐기물과 비교하여 3차연도 단년도 평균값 적용이나 3년간의 평균값 적용시의 월별 약간의 차이 (5% 이내)는 발생하였으나 월별 평균은 유사한 수준인 것으로 나타났다. 이는 사업장 폐기물 소각시설의 경우 생활폐기물 소각시설과 비교 특정 폐기물 (석유제품류)의 탄소함량 값이 높고 연차별 동류의 소각량의 변화에 따른 화석탄소함량의 차이로 평가되나, 타 방식과 비교 CO_2 배출량의 차이가 가장 작은 것으로 평가된다.

4.4 CO_2 배출량 산정 방식별 불확도

각 방식별 불확도의 경우 Tier1 상대불확도는 생활폐기물 시설인 M-B 시설에서는 21.11%에서 74.29%까지로 나타났으며, 사업장폐기물 시설인 I-B 시설에서는 78.05%에서 430.21%까지로 생활폐기물 결과보다 높게 나타났다. Tier3 방식에 따른 상대불확도는 생활폐기물 시설인 M-B 시설에서는 9.22%에서 38.48%까지로 나타났으며, 사업장폐기물 시설인 I-B 시설에서는 22.05%에서 76.72%까지 나타났다. Tier4의 경우에는 본 연구기간 정도검사 과정에서 수행된 생활폐기물 M-B 시설의 CO_2 농도 표준불확도는 평균 0.022405 수준이었고, 유량기의 표준불확도는 평균 0.034427 수준인 것으로 조사되었으며, 사업장폐기물 I-B 시설의 CO_2 농도 표준불확도는 0.027225 그리고 유량기의 표준불확도는 0.102041 수준인 것으로 조사되었다. 이에 화석탄소함량 측정기관이 제시한 오차범위 (pMC) 0.24%를 반영한 M-B 시설의 상대불확도는 4.118% 수준이었고, I-B 시설의 상대불확도는 10.564% 수준이었다.

5. 결 론

본 연구는 폐기물 소각시설에서의 CO_2 연속측정 실효성 평가에 그 목적이 있다. 우선, 폐기물 성상별 CO_2 배출량 결과의 기여도는 IPCC의 기본값과 비교하여 본 연구에서도 유사한 것으로 평가되나, 성상별 건조무게 및 탄소함량 값 (%)이 많은 차이 (Gap)가 발생하므로 CO_2량 산정의 정확도 제고를 위하여 성상별 계수값 측정은 불가피 할 것으로 판단된다.

Tier1부터 Tier4까지 다양한 방식으로 CO_2 배출량을 산정한 3차 연도의 평균값을 Table 7에 나타내었다. 현재 국내에서 적용되고 있는 Tier1 방식을 기준으로 Tier3의 경우 폐기물 성상별 측정된 인자들의 오차로 3년도 및 단년도 평균값 적용시 18%~19%의 오차를 보였다. 반면 Tier4의 경우 화석탄소함량의 값을 3년도 및 단년도 평균값 적용시 0.3%~0.4%의 오차만이 발생하였다. 이는 Tier1 방식의 경우 IPCC 지침에서 제시하고 있는 CO_2 배출계수가 국내 폐기물 배출계수와의 차이로 실제 배출량 산정에 높은 불확실성을 내포하고 있으며, Tier3의 경우에는 연차별 폐기물 샘플링에 대한 편차로 연차별 측정값 및 실제 배출량 결과에서 많은 편차가 발생한 것으로 나타났다. 결과적으로 측정기기가 제도적으로 관리되는 경우 Tier4 적용시 CO_2 배출량 산정결과에 대한 일관성이 유지됨에 따라 신뢰성이 가장 높은 것으로 평가되었으며, 또한, CO_2 배출량 산정결과에 대한 불확도 (Uncertainty) 측면에서도 연속측정인 Tier4가 불확도가 낮은 것으로 평가됨에 따라 현재 국내에 제도적으로 인프라가 구축된 TMS를 활용하여 CO_2 배출량을 산정하는 것이 IPCC 지침에서 제시하고 있는 CO_2 배출량 산정의 기본원칙인 정확도 및 신뢰도 측면에서 타 방식과 비교 우수한 것으로 평가되었다.

특히, CO_2 배출량이 화폐처럼 거래되는 탄소시장을 고려할 경우 제도적 측면에서 검증이 가능한 연속측정 방식의 Tier4 적용이 필요하고, 이 경우 금번 연구에서는 화석탄소함량의 값 (%)은 생활폐기물 시설의 경우 41.6%, 사업장폐기물 소각시설인 경우 58.2%가 제안된다.

REFERENCES

EUROPEAN COMMISSION, 2017, The Monitoring and Reporting Regulation – General guidance for installations, Updated Version of 27 November 2017, p.78-81.

IPCC. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories Volume 5 Chapter 3.7 Table 3.5

IPCC. 2014. Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers. p.4-6.

Korean MOE. 2016. Guideline for operation of GHG reduction target management system (MOE notice

2016-255). p.476-488.

Korean MOE. 2018. Work Manual of the of real time air pollution monitoring system (CleanSYS) in the Metropolitan Area (Publication registration number 11-1480000-001521-01). p.15-17, 106-109, 137-145.

US-EPA. 2016. Direct Emissions from Stationary Combustion Sources. p.8-17.

WRI, Ranping Song, Mary Sotos AND Lei Yin, 2015, Guide for Designing Mandatory greenhouse gas reporting programs, p.54-85.