

폐기물 소각시설의 CO₂ 배출량 산정방법 개선 및 연속측정법(Tier 4) 적용효과 분석

정승현* · 이봉재**†

*한국화학융합시험연구원 기후에너지센터 선임연구원, **한국화학융합시험연구원 기후에너지센터 센터장

Improvement of CO₂ emission estimation methods and impact analysis of continuous emission monitoring (Tier 4) in waste incinerator

Jung, Seung-Hyun* and Lee, Bongjae**†

*Senior Researcher, Climate Energy Center, Korea Testing & Research Institute, Gyeonggi-do, Korea

**Managing Director, Climate Energy Center, Korea Testing & Research Institute, Gyeonggi-do, Korea

ABSTRACT

This study compares CO₂ emissions from municipal (M-W) and industrial (I-W) waste incineration facilities in Korea using emission factor-based methods (Tier 1, 2, 3) and Continuous Emission Monitoring method (Tier 4). The objective of this study is to quantify the greenhouse gas (GHG) reduction effect associated with methodological improvements and to evaluate method-specific uncertainties, ultimately aiming to propose reliable emission reduction strategies. Results indicated significant reductions in fossil-derived CO₂ emissions using Tier 4. In the industrial facility (I-W), emissions were lowest with Tier 4 (304 ± 15 tons), a 30.1% decrease compared to Tier 1 (435 tons). Similarly, in the municipal facility (M-W), Tier 4 emissions (224 ± 9 tons) represented a 22.0% reduction from Tier 1 (287 tons). Uncertainty analysis revealed that Tier 4 provided substantially greater precision (uncertainty 4.02% ~ 4.91%) compared to Tier 1 (up to 348%), primarily due to uncertainties in emission factors and waste composition assessments. In the short term, it is necessary to reduce the high uncertainty associated with emission factor-based methods by developing Korea-specific fossil carbon fraction (FCF) emission factors based on appropriate biomass content analysis methods. In the long term, applying Continuous Emission Monitoring method (Tier 4) is recommended as the most effective approach for accurately and reliably managing and reporting GHG emissions from waste incineration facilities.

Key words : Tier 4, Biomass Content, FTIR, Uncertainty, Incineration of Waste

1. 서론

전 지구적 기후변화는 화석연료 사용 및 토지 이용 변화 등의 인간 활동으로 인한 온실가스 배출에 기인하며, 2011년부터 2020년까지의 평균 지표면 온도는 산업화 이전(1850 ~ 1900년) 대비 약 1.1°C 상승한 것으로 보고되었다(IPCC, 2023). 인구 증가 및 경제발전에 따라 폐기물 발생량과 처리 과정에서의 온실가스 배출량이 크게 증가하였으며, 우리나라는 2022년 기준 폐기물 부문에서 온실가

스 배출량은 약 1,820만 톤 CO₂eq으로 보고되었고, 이 중 25%(약 450만 톤 CO₂eq)가 폐기물 소각처리 과정에서의 배출량으로 보고되었다(GIR, 2025a).

우리나라는 온실가스 배출량 산정을 위해 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후변화에 관한 정부간 협의체)에서 공표하는 국제적 기준을 독자적인 배출량 산정 지침에 적용하고 있다. 2021년부터 국내 폐기물 부문의 온실가스 배출량 산정방식이 과거 IPCC GPG 2000 (IPCC Good Practice Guidance 2000)에서

†Corresponding author : jae8076@ktr.or.kr (98, Gyoyukwon-ro, Gwacheon-si, Gyeonggi-do, 13810, Korea. Tel. +82-2-2164-1445)

ORCID 정승현 0009-0000-7792-8286

이봉재 0000-0002-0292-8238

2006 IPCC GL (2006 IPCC GuideLine) 기준으로 전환되면서, 폐기물 부문 배출량은 기존 산정 방식 대비 최소 16%에서 최대 31% 감소한 것으로 나타났다(IPCC, 2000; IPCC, 2006, Kang et al., 2019). 이는 산정 방법의 개선이 배출량 감축효과를 가져올 수 있음을 시사한다.

본 연구에서는 온실가스 배출량 산정 방법은 크게 배출계수법과 연속측정법으로 구분하였다. 배출계수법은 활동자료(Activity Data)와 배출계수(Emission Factor)를 이용해 산정하는 방법이며, 적용되는 배출계수 수준에 따라 Tier 1 (글로벌 수준), Tier 2 (국가 수준), Tier 3 (사업장 수준)로 구분된다. 한편, 연속측정법(Tier 4)은 배출계수법과 달리 배출가스 내 온실가스 농도와 유량을 연속측정방법으로 측정하여 배출량을 산정하는 방법을 말한다. 우리나라는 폐기물 소각 분야 배출량 산정 방법의 개선을 지속적으로 추진하고 있다. 국내 온실가스종합정보센터(GIR, Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea)는 폐기물 부문의 국가 수준(Tier 2)의 배출계수, 즉, 국가 고유 배출계수를 개발하여 글로벌 수준(Tier 1)으로 적용되던 배출계수의 신뢰도를 향상시켰다(GIR, 2025b). 폐기물분야 배출량 산정은 원료의 성상이 복잡하므로 단일 성상의 원료보다 성분분석 결과의 불확실성이 크며, 일별로 반입되는 폐기물에 대해서 성분조사는 월별 1회 실시하기에 대표성이 떨어진다는 한계가 존재한다(Oh et al., 2018). 이러한 문제를 해결하고자 국립환경과학원에서는 주요 온실가스의 연속측정 관련 국가 표준 방법을 마련하여 연속측정법(Tier 4)으로 배출량 산정방법의 전환을 유도하고 있다(NIER, 2022).

기존 선행연구(Oh et al., 2018)에서는 국내 폐기물 소각시설을 대상으로 연속측정법(Tier 4)의 적용 가능성과 실효성을 검토하고, 배출계수법(Tier 1) 결과와 비교 분석하였다. 그러나 기존 연구 당시에는 Tier 2 배출계수의 부재 및 성상별 FCF (Fossil Carbon Factor, 화석탄소 질량분율) 배출계수 미개발로 인해 배출계수법의 정확성 보완에는 한계가 있었다. 이에 본 연구는 최신 개발된 Tier 2

배출계수와 성상별 FCF 배출계수를 반영하여 기존 연구의 한계점을 보완하기 위하여 실시되었다.

따라서, 본 연구는 기존 산정방법인 배출계수법을 Tier 1 방법에서 Tier 2 및 Tier 3까지 확장하고, 굴뚝 측정을 통한 연속측정법(Tier 4)까지 적용하여, 국내 폐기물 소각시설 2곳을 대상으로 각 산정방법별 CO₂ 배출량을 산정하여 비교하였다. 이를 통해 기존 산정방법의 개선으로 인한 온실가스 변화량을 정량화하고, 불확도 비교를 통해 산정방법 간 정밀성을 판단하여 국내 폐기물 부문 배출량 산정방법의 효과적인 개선 방향을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 대상 및 운영 조건

본 연구의 연구대상으로 국내 폐기물 소각시설 유형에 따라 생활폐기물 소각시설(M-W) 1개소와 사업장폐기물 소각시설(I-W) 1개소를 각각 선정하였다. 두 시설 모두 24시간 연속 가동하는 시설이며, 폐기물 처리량이 가장 많아 대표성 확보가 용이한 경기지역에 위치하고 있다. CO₂ 배출량 산정을 위해 M-W는 168시간(2024년 6~7월 중), I-W는 72시간(2023년 10월 중) 동안 측정을 진행하였으며, 각 소각시설의 평균 일일 소각량은 M-W가 65.81 ton/day, I-W가 116.44 ton/day로, 측정기간 중 반입트럭의 계근대 중량 실측데이터를 적용하였다. 두 시설은 모두 굴뚝원격감시체계(CleanSYS)를 통해 굴뚝 내 배출가스의 유량, 산소 농도, 수분 함량 등을 실시간 모니터링하는 업체로, 30분 단위 데이터를 사업장에서 제공받아 연구를 수행하였으며, 이 중 유량은 측정기간 동안 평균 일일 적산량 기준 M-W는 4.08×10^5 Sm³/day, I-W는 3.62×10^5 Sm³/day 수준으로 확인하였다(Table 1).

2.2. 배출계수법에 의한 배출량 산정(Tier 1 및 Tier 2)

배출계수법(Tier 1, Tier 2, Tier 3)은 폐기물 소각 분야

Table 1. Summary of target waste incineration facilities

Site ID	Type	Obs. Period (hr)	Avg. Waste Input (ton/day)	Avg. CO ₂ Conc. (vol%/30min)	Avg. Flow (Sm ³ /day)	Avg. Biomass content (mass %)
M-W	MSW	168	65.81	8.45	4.08×10^5	52.61 (n=6) ¹⁾²⁾
I-W	Industrial	72	116.44	7.19	3.62×10^6	42.57 (n=3) ¹⁾

Note: 1) *n* indicates the number of total analyses (one analysis per day).

2) One sample was missing due to the sample loss.

Table 2. Parameters for industrial waste incineration (I-W)

Waste		Korea ¹⁾		IPCC ²⁾			
Type	Ratio (%)	dm (%)	CF (%)	Type	dm (%)	CF (%)	FCF (%)
Other combustible	2.1	0.133	0.3643	Petroleum products, Solvent, plastics	1	0.8	0.8
oil	2.9	0.682	0.772				
Waste synthetic resin	44.0	0.9143	0.6657				
Waste synthetic resin (construction)	4.1	0.7884	0.4923	Construction and demolition	1	0.24	0.2
synthetic rubber	0.5	0.9916	0.802	synthetic rubber	0.84	0.56	0.17
Textiles	0.5	0.9986	0.6227	Textiles	0.8	0.4	0.16
Papers	0.0	0.9470	0.4027	Papers	0.9	0.41	0.01
Wastewater treatment sludge	0.2	0.388	0.262	Wastewater sludge	0.35	0.45	0
Food waste	13.6	0.4 ³⁾	0.15 ³⁾	Food waste	0.4	0.15	0
wood (construction)	1.1	0.93	0.4593	wood	0.85	0.43	0
Animal and plant residues	0.4	0.24	0.431	Medical waste ⁴⁾	0.65	0.4	0.25
Adsorbent ⁴⁾	0.0	0.9436	0.8417	Others	0.9	0.04	0.03
Others	30.6	0.9 ³⁾	0.04 ³⁾				

Note: 1) Korea-specific emission factor as of 2025 (GIR, 2025b).

2) Default emission factors from the IPCC 2006 Guidelines (IPCC, 2006).

3) As no officially published emission factor is available as of 2025, the IPCC default value was used.

4) The classification provided by the company does not align with the categories used for emission factors.

배출량 산정에서 주로 사용되고 있으며, 폐기물 소각량 (Activity Data)에 물질수지(Mass Balance) 기반의 배출계수(Emission Factor)들을 곱하여 산정하는 방식으로, 본 연구에서는 「2006 IPCC GL(IPCC, 2006)」 및 국내 온실가스 배출량 산정지침(ME, 2025)에서 제시하는 식 (1)을 따라 적용하였다.

$$Fossil\ CO_2\ emissions_{EF} = \quad (1)$$

$$SW \times \sum_i (WF_i \times dm_i \times CF_i \times FCF_i \times OF_i) \times 3.664$$

여기서,

$Fossil\ CO_2\ emissions_{EF}$ = 배출계수법에 따른 화석기원 CO₂ 배출량(tCO₂)

SW = 소각되는 폐기물의 총량(t-Waste)

WF_i = 폐기물 성상(i)별 질량 비율(0과 1 사이)

dm_i = 폐기물 성상(i)별 건조물질 질량 비율(0과 1 사이)

CF_i = 성상(i)별 폐기물 내 탄소 질량 비율(tC/t-Waste)

FCF_i = 성상(i)별 총 탄소 내 화석탄소 질량 비율(0과 1 사이)

OF_i = 성상(i)별 산화계수(0과 1 사이, 본 연구에서는 1.0으로 가정)

3.664 = 탄소에 대한 이산화탄소 변환 계수(44.010 tCO₂ / 12.011 tC)

글로벌 수준(Tier 1) 배출량과 국가 수준(Tier 2) 배출량 산정을 위해서는 배출계수법 산정식(식 (1))에 IPCC 기본값(Tier 1)과 국가 고유 배출계수(Tier 2)를 각각 적용해야 한다. 본 연구에서 적용한 기본값은 생활폐기물(M-W)과 사업장폐기물(I-W)로 구분하여 각 성상 분류 체계에 따라 Table 2와 Table 3에 정리하였고, 활동자료는 소각시설로부터 제공받은 실데이터를 적용하였으며, 측정기간 동안의 소각량(SW), 성상비율 조사결과(WF_i), 착화용 LNG 사용량 등을 포함한다. 한편, LNG 연료 사용에 따른 CO₂ 배출량도 고정연소 부문 산정지침에 따라 별도로 계산하여 최종 배출량에 포함하였다(ME, 2025a).

Table 3. Parameters for municipal solid waste incineration (M-W)

Waste		Korea ¹⁾		IPCC ²⁾		
Type	Composition Ratio (%)	dm (%)	CF (%)	dm (%)	CF (%)	FCF (%)
Paper	26.9	83.91	41.44	90	46	1
Textiles	19.9	77.63	51.76	80	50	20
Food waste	8.7	N/A ³⁾	N/A ³⁾	40	38	0
Wood	2.1	N/A ³⁾	N/A ³⁾	85	50	0
Garden & park waste	2.1	N/A ³⁾	N/A ³⁾	40	49	0
Diapers	2.1	N/A ³⁾	N/A ³⁾	40	70	10
Rubber	6.4 ⁵⁾	96.14	69.86	84	67	20
Leather		92.15	60.03			
Plastics	18.6	88.55	72.30	100	75	100
Metals	1.5	0 ⁴⁾	0 ⁴⁾	100	0 ⁴⁾	0 ⁴⁾
Glass	0.8	0 ⁴⁾	0 ⁴⁾	100	0 ⁴⁾	0 ⁴⁾
Others	10.9	67.70	48.59	90	3	10

Note: 1) Korea-specific emission factor as of 2025 (GIR, 2025b).

2) Default emission factors from the IPCC 2006 Guidelines (IPCC, 2006).

3) No officially published emission factor as of 2025.

4) Parameters are not defined due to non-combustible nature.

5) The composition ratio provided by the company does not distinguish between rubber and leather materials.

2.3. 배출계수 개발을 통한 배출량 산정(Tier 3)

본 연구는 실제 사업장 수준의 배출량 산정에 필요한 Tier 3 배출계수 개발을 위해 사업장폐기물 소각시설 (I-W)에서 성상조사에 따라 주요 성상 5종의 폐기물 원료 (Fig. 1)를 시료로 채취하였고, 해당 성상별 배출계수에 대해 실측 분석을 수행하였으며, 분석은 Table 4에 정리된 「고형연료제품 품질 시험·분석방법」(ME, 2024)에 따라 수행하였다. 주요 성상 5종을 제외하고, 실측데이터가 확보되지 않은 성상에 대해서는 Tier 2 배출계수를 적용하여 배출계수법 산정식(식 (1))에 따라 최종적으로 Tier 3 배출량을 산정하였다.

2.4. 연속측정법에 의한 배출량 산정(Tier 4)

2.4.1. 연속측정법 배출량 산정식 변형

복합 성상이 특징인 폐기물 부문에서 배출계수법보다 정확성이 높은 연속측정법(Tier 4)은 굴뚝 배출가스 중 CO₂ 농도와 배출가스 유량을 실시간 측정하여 온실가스 배출량을 산정하는 방식이다(IPCC, 2006). 우리나라는 온



Fig. 1. Sample - ① Wood, ② Rubber, ③ Plastic, ④ Textile, ⑤ Paper

실가스 배출량 산정지침(ME, 2025a) 내 연속측정방법의 배출량 산정 방법에 따라 Tier 4 배출량을 산정하고 있으나, 현재의 산정식은 바이오매스에 의한 소각 배출량 (Biogenic CO₂)까지 포함하여 산출한다는 점에서 폐기물 소각분야에 부적합하다. 이는 폐기물 소각분야에서 바이

Table 4. Analytical methods by parameter

Test item	Standards (method) ¹⁾	Parameters ²⁾
Sampling	BS EN 15442 (BSI, 2011a), KS I 5201 (KATS, 2023) (Cone fractionation method)	-
Moisture content	DD CEN/TS 15414-1 (BSI, 2010), KS E ISO 579 (KATS, 2022)	dm _i
Carbon content	BS EN 15407 (TCD, Thermal Conductivity Detector) (BSI, 2011b)	CF _i
Biomass content	BS EN 15440 (SDM, Selective Dissolution Method) (BSI, 2011c)	FCF _i

Note: 1) According to the 「Test and analysis methods for the quality of solid refuse fuel products」 (ME, 2024)

2) Parameters related to Equation (1)

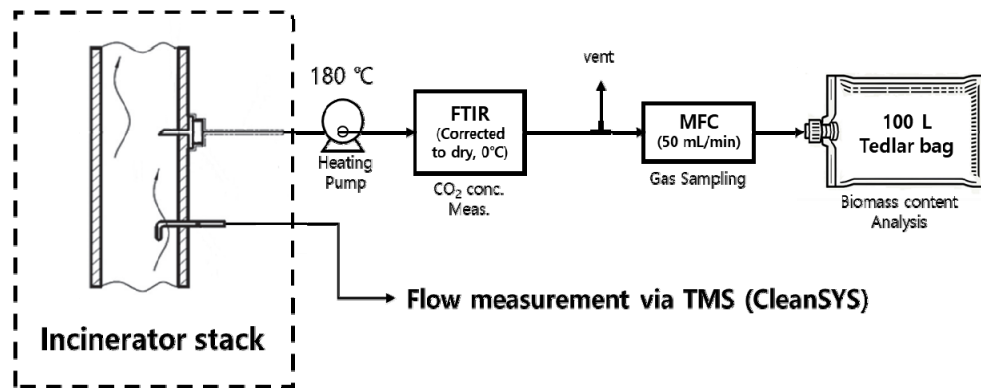


Fig. 2. Diagram of flue gas sampling and continuous measurement

오매스 소각에 의한 배출량(Biogenic CO₂)은 동 지침에 따라 생물학적 배출량으로 인식하여 총배출량(Total CO₂)에서 제외하며, 실제 온실가스 인벤토리 보고대상은 화석 기원 CO₂ (Fossil CO₂)로 제한하기 때문이다. 이에 따라, 본 연구에서는 바이오매스 함량 인자를 산정식에 추가하여 이를 보완하였다(식 (2)).

$$F_{\text{ossil CO}_2 \text{ emissions}_{\text{CEMS}}} = \quad (2)$$

$$\sum_k \left(\sum_j (K \times C_{\text{CO}_2, j} \times Q_{\text{sd}, j}) \times (1 - B_k) \right)$$

여기서,

$F_{\text{ossil CO}_2 \text{ emissions}_{\text{CEMS}}}$ = 연속측정법에 따른 화석기원 CO₂ 배출량(tCO₂)

K = 표준상태에서 1 kmol 부피 대비 CO₂ 분자량 (44.010 tCO₂) 변환계수(1.964×10^{-5} tCO₂/Sm³)

$C_{\text{CO}_2, j}$ = 30분 CO₂ 평균농도(건식 기준, 부피농도)(%)

$Q_{\text{sd}, j}$ = 30분 적산 유량(건식 기준)(Sm³)

B_k = 배출가스 내 바이오매스 질량 비율(0과 1 사이)

j = 30분 단위의 시간 간격

k = 바이오매스 시료 분석 간격

한편, 본 연구에 적용할 유량 데이터는 이미 굴뚝원격 감시체계(CleanSYS)를 통해 건조 기준·0°C 기준·표준 산소농도 기준으로 보정처리된 값을 제공받았으며, 이 중 온실가스 배출량 산정 목적에 부적합한 표준산소 보정항목은 「CleanSYS 업무편람(ME, 2025b)」의 보정식을 역환산하여 산소보정 이전 유량으로 활용하였다.

2.4.2. 배출가스 내 CO₂ 농도 측정(FTIR)

CO₂ 농도는 FTIR (Fourier Transform Infrared) 방식의 GasMet DX4000 장비를 사용하였으며, 굴뚝의 배출가스를 시료채취관을 통해 연속측정하였다(Fig. 2). FTIR 방식은 특정 파장의 적외선 흡수를 통해 CO₂를 정성 및 정량 분석하나, 수분(H₂O)과의 흡수 파장 중첩에 따른 간섭 가능성이 존재한다. 이에 따라 본 연구에서는 수분을 제거

하지 않은 습식 방식으로 측정하였고, 별도로 수분 농도를 측정해 건식 기준으로 환산하였다. 이러한 보정 방식은 수분 제거 시 수분에 용해된 CO₂의 소실로 인한 오차 발생 가능성을 지적한 기존 연구(Larjava et al., 1997)와, 건식측정 값 대비 습식측정 후 보정한 값의 비교 결과 오차가 0.5% 미만으로 미미하다고 보고한 연구(Park et al., 2023)를 바탕으로 채택하였다. 습식 측정을 위해서는 수분의 응결을 방지해야 하므로, 샘플링 라인과 분석장비의 셀은 모두 180℃로 가열하여 측정을 수행하였다(Fig. 2). 한편, 배출가스 내 바이오매스 함량(B_k) 산출을 위해 바이오매스 함량 분석 관련 국제표준(ISO 13833, ISO, 2013)에 따라 가스시료를 일정 유량(50 mL/min)으로 1일간 테들라백(Tedlar bag)에 채취하여 총 9개 시료(M-W 6건, I-W 3건)에 대해 분석하였다.

3. 결과

3.1. Tier 3 배출계수 개발 결과 및 배출계수별 비교

본 연구에서는 사업장폐기물(I-W)시설의 주요 폐기물 성상 5종에 대해 실측 분석을 통해 사업장 수준(Tier 3) 배출계수를 개발하였다. 주요 성상은 폐섬유류, 폐목재류, 폐합성수지류, 폐합성고무류, 폐지류 등으로 Tier 3 배출계수와 기존 배출계수 기본값(Tier 1 및 Tier 2)을 성상별로 비교하여 Table 5에 정리하였다. 비교 결과, 각 배출계수 항목의 성상별 편차를 나타내는 상대표준편차(RSD) 값은 건조물질 질량분율(RSD of dm_i)의 경우 2%~12%,

탄소 질량 분율(RSD of CF_i)의 경우 1%~32%로 나타났으며, 탄소 내 바이오매스 질량 분율은 기본 배출계수(Tier 1)와 배출계수 개발 값(Tier 3) 두 개의 값의 차이를 절대값으로 분석하였더니, 섬유류와 고무류에서 비교적 높은 값을 나타내었다.

3.2. 사업장폐기물 소각시설(I-W) 배출량 비교 (Tier 1 vs Tier 2 vs Tier 3 vs Tier 4)

사업장폐기물 소각시설(I-W)의 CO₂ 배출량에 대해 3종류의 배출계수법(Tier 1, Tier 2, Tier 3)과 연속측정법(Tier 4)으로 각각 산정하여 그 값을 비교하였다(Table 6 and Fig. 3(a)). I-W에서의 화석기원 CO₂ 배출량(Fossil CO₂)은 Tier 1에서 435 ton으로 가장 높았고, Tier 2 (326 ton), Tier 3 (336 ton), Tier 4 (304 ± 15 ton) 순으로 Tier 4 배출량이 가장 낮은 수치를 보였으며, 기존의 인벤토리 배출량(Tier 1) 기준으로 각 산정방법별 Tier 2는 25.1%, Tier 3은 22.8%, Tier 4는 30.1%씩 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 배출계수법(Tier 1, 2, 3)에서 연속측정법(Tier 4)으로 변경하였을 경우, 모든 경우에서 6.7%~30.1% 감소되는 것으로 나타났다. 총 CO₂ 배출량(Total CO₂)은 Tier 1에서 578 ton, Tier 2에서 453 ton, Tier 3에서 549 ton, Tier 4에서 530 ± 26 ton으로 산정되었으며, 이 중 화석기원 CO₂ 배출량(Fossil CO₂)이 차지하는 비율은 Tier 1에서 Tier 4까지 순서대로 75%, 72%, 61%, 57%로 배출되는 CO₂ 총량 중의 반 이상을 화석기원 CO₂가 차지하고 있었다.

Table 5. Comparison of default and measured values for each parameter

Waste	dm_i (%)				CF_i (%)				FCF_i (%)		
Type	IPCC ¹⁾	Korea ²⁾	Facility ³⁾	RSD (%)	IPCC ¹⁾	Korea ²⁾	Facility ⁴⁾	RSD (%)	IPCC ¹⁾	Facility ⁵⁾	Abs. Difference (%p)
Textile	80	99.86	97.3	12	40	62.27	59.7	23	16.0	51.4	35.4
Wood	85	93.00	81.6	7	43	45.93	48.8	6	0.0	1.9	1.9
Plastic	100	91.43	95.3	4	80	66.57	77.2	9	80.0	64.6	15.4
Rubber	84	99.16	98.2	9	56	80.20	42.8	32	17.0	49.5	32.5
Paper	90	94.70	90.4	3	41	40.27	40.2	1	1.0	8.1	7.1

Note: 1) Default emission factors from the IPCC 2006 Guidelines (IPCC, 2006).

2) Korea-specific emission factor as of 2025 (GIR, 2025b).

3) Facility-specific emission factor (dm_i) by BS EN 15407 (TCD, Thermal Conductivity Detector) (BSI, 2011b).

4) Facility-specific emission factor (CF_i) by DD CEN/TS 15414-1 (BSI, 2010), KS E ISO 579 (KATS, 2022).

5) Facility-specific emission factor (FCF_i) by BS EN 15440 (SDM, Selective Dissolution Method) (BSI, 2011c).

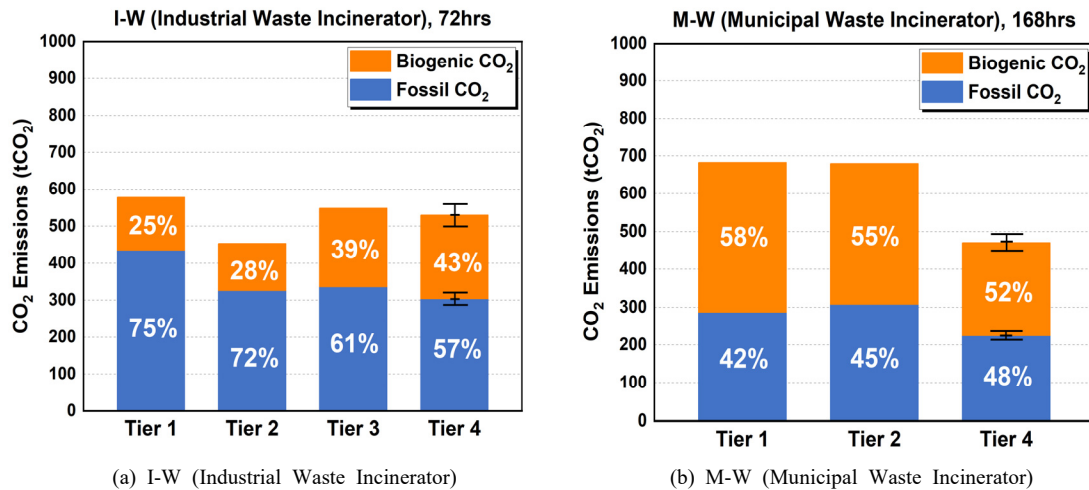
Fig. 3. Comparison of CO₂ emissions by estimation method in waste incineration facilities

Table 6. Comparative results of emissions from waste incineration facilities

Facility	Emission Type	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 4
I-W	Total CO ₂	578 ton	453 ton	549 ton	530 ± 26 ton
	Biogenic CO ₂	143 ton	127 ton	213 ton	226 ± 11 ton
	Fossil CO ₂	435 ton	326 ton	336 ton	304 ± 15 ton
M-W	Total CO ₂	683 ± 865 ton	680 ton	-	471 ± 19 ton
	Biogenic CO ₂	396 ± 1378 ton	372 ton	-	247 ± 10 ton
	Fossil CO ₂	287 ± 999 ton	308 ton	-	224 ± 9 ton

3.3. 생활폐기물 소각시설(M-W) 배출량 비교(Tier 1 vs Tier 2 vs Tier 4)

I-W시설에 이어, 생활폐기물 소각시설(M-W)의 CO₂ 배출량은 2종류의 배출계수법(Tier 1, Tier 2)과 연속측정법(Tier 4)으로 각각 산정하여 그 값을 비교하였다(Table 6 and Fig. 3 (b)). M-W에서의 화석기원 CO₂ 배출량은 Tier 2가 308 ton으로 가장 높았고, Tier 1 (287 ± 999 ton), Tier 4 (224 ± 9 ton) 순으로 M-W에서도 동일하게, Tier 4의 배출량이 가장 낮은 수치를 보였다. M-W에서는 기존의 인벤토리 배출량(Tier 1) 대비 Tier 2 배출량은 7.3% 증가한 반면, Tier 4 배출량은 22.0% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 배출계수법(Tier 1, 2, 3)에서 연속측정법(Tier 4)으로 변경하였을 경우, 모든 경우에서 22.0% ~ 27.3% 감소

되는 것으로 나타났다. 총 CO₂ 배출량은 Tier 1에서 683 ± 865 ton, Tier 2에서 680 ton, Tier 4에서 471 ± 19 ton으로 산정되었으며, 이 중 화석기원 CO₂ 배출량(Fossil CO₂)이 차지하는 비율은 42% (Tier 1), 45% (Tier 2), 48% (Tier 4)로 배출되는 CO₂ 총량 중의 화석기원 CO₂보다 생물기원 CO₂ 배출량이 다소 우세한 것으로 나타났다.

4. 결론 및 고찰

4.1. 연속측정법 사용에 따른 온실가스 감소효과

본 연구에서는 폐기물 소각시설에 대하여 산정방법별로 CO₂ 배출량을 비교함으로써, 기존 산정방법의 변경에 따른 온실가스 감소효과를 정량화하였다. I-W와 M-W 모

두에서 연속측정법(Tier 4)으로 산정한 배출량이 가장 낮은 수치를 보였으며, 배출계수법(Tier 1, 2, 3)에서 연속측정법(Tier 4)으로 변경할 경우, I-W에서는 6.7%~30.1%, M-W에서는 22.0%~27.3% 감소효과가 나타났다. 따라서, 폐기물 소각분야에서는 주로 사용되는 배출계수법 대신 연속측정법으로 배출량을 산정할 경우 온실가스 감축에 유리하다.

4.2. 산정방법 간 불확도 비교(Tier 1 및 Tier 4)

본 연구에서는 산정방법별 불확도 추정을 통해 Tier 1 배출량(M-W)과 Tier 4 배출량(I-W 및 M-W) 중 정밀한 산정방법이 무엇인지 확인하였다. 자세한 산정방법 및 인자별 불확도값은 S1 and S2에서 다루었다. 본 연구에서 M-W의 경우, Tier 1의 불확도가 Tier 4 보다 약 87배 높은 수준으로 나타났다. 또한, Table S1에 제시된 배출계수법의 경우, 불확도 요인 중 하나인 성장조사결과(WF_i)에 대한 불확도가 10%로 제시하고 있다. 이로부터, 배출계수 단일 불확도만으로도 연속측정법에 대한 배출량의 불확도(4.02%~4.91%)값보다 2배 이상 높게 제시하고 있음을 확인하였다(Table S1).

4.3. FCF 국가 고유 배출계수 개발 필요성 및 한계

본 연구에서의 배출계수 기본값(Tier 1 또는 Tier 2)과 개발값(Tier 3) 간 편차를 비교하였다. 화석탄소 질량분율(FCF)의 경우, 일부 성장에서 계수 간의 차이가 크게 나타났으며, 배출계수 항목별로 불확도 비교 결과에서도 FCF 항목이 대체로 높은 불확도를 보였다(Table S2(a)). 이는 다른 배출계수 항목과 달리, FCF 계수는 국가 고유 배출계수(Tier 2)의 부재로 국내 폐기물 특성을 반영하지 못하기 때문이다.

또 하나의 문제점은 FCF 계수를 실측하는 데 필수적인 바이오매스 함량 분석방법의 한계이다. 본 연구에서 사용된 용해선별법(SDM, Selective Dissolution Method)은 지금까지 폐기물 원료 분석에서 널리 사용되어 왔으며, 글로벌 수준의 IPCC 기본값 개발에도 일정 수준의 영향을 끼친 것으로 추정된다. 그러나 관련 국제 표준 BS EN 15440 (BSI, 2011c)에 따르면, SDM은 황산에 용해되기 쉬운 합성수지, 합성고무, 합성섬유 등 일부 물질에 대해 이 방법을 적용하는 것은 적합하지 않다고 지적하고 있다.

더불어 SDM과 또 다른 분석방법인 질량가속기법(AMS, Accelerator Mass Spectrometry) 간의 분석값의 차이를 확

인한 기술보고서(NIER, 2016)에 따르면, 두 방법 간의 폐기물 분석값의 편차가 9.9~26.6%p 발생하여 분석방법 간에도 큰 편차를 보였다고 보고되었다. 따라서, 향후에는 SDM vs AMS 등 분석방법 간의 비교 연구를 통해 배출계수 개발에 적합한 바이오매스 함량 분석방법의 도출이 필요하다.

4.4. 소각시설별 화석기원 CO₂ 비중 비교(I-W vs M-W)

소각시설별로 총배출량(Total CO₂) 중 화석기원 CO₂ 배출량(Fossil CO₂)의 비중은 I-W 시설에서는 57%~75%로 화석기원 배출량이 우세한 반면, M-W 시설에서는 42%~48%로 생물기원 배출량(Biogenic CO₂)이 우세하게 나타나 시설 유형에 따라 다른 양상을 보였다. 본 연구에서는 이러한 원인을 시설별로 주된 폐기물 성상의 FCF 값의 차이에서 기인한 것으로 판단하였으며, I-W에서는 화석기원탄소 함량(FCF)이 비교적 높은 플라스틱류의 비중이 44.0%로 가장 높았고, M-W에서는 화석기원탄소 함량(FCF)이 비교적 낮은 종이류의 비중이 26.9%로 가장 높았다.

4.5. 연구의 제약사항

본 연구는 폐기물 소각시설의 CO₂ 배출량 산정방법별 비교를 위해 주요 시설을 대상으로 수행되었으나, 다음과 같은 제약이 존재한다. 우선, 생활폐기물 소각시설(M-W)의 경우 성장별 시료 확보가 어려워 사업장 수준의 배출계수(Tier 3)를 적용하지 못하였으며, 이에 따라 배출계수법 간 비교는 사업장폐기물 소각시설(I-W)을 중심으로 이루어졌다. 아울러, 연구 대상이 두 개의 소각시설에 한정되어 있어 폐기물 성상의 지역적·계절적 특성을 충분히 반영하기에는 제한이 따른다.

4.6. 종합 결론

본 연구에서는 폐기물 소각시설의 CO₂ 배출량을 배출계수법과 연속측정법에 따라 비교한 결과, 연속측정법으로 변경할 경우 최대 27.3%~30.1%의 감소효과를 확인하였다. 불확도의 경우, 배출계수법은 연속측정법보다 87배 높은 수준으로 나타났다. 이에 따라, 장기적으로 폐기물 소각분야의 온실가스 산정방법은 연속측정법으로 변경하는 것이 정확성 및 배출량 감소효과 측면에서 비교적 유리하다.

그러나 현재 연속측정법의 산정식은 바이오매스 함량

인자를 정량적으로 반영하지 못하고 있으며, 바이오매스 함량 측정을 위한 국내 표준시험방법 또한 마련되지 않아 실제 적용에는 제도적 한계가 따른다. 따라서, 현 단계에서는 배출계수법의 높은 불확실성을 우선적으로 해소할 필요가 있다.

한편, 국내 폐기물 분야의 온실가스 감축정책의 일환으로 바이오플라스틱 전환이 추진되고 있으며, 바이오플라스틱 사용 촉진 및 해당 제품의 환경표지인증을 위한 바이오매스 함량 기준량을 지속적으로 확대 중이다. 이에 따라 국내 플라스틱 폐기물의 바이오매스 함량 특성 또한 변화할 것으로 예상되며, 기존의 글로벌 기준인 Tier 1 수준의 FCF 계수를 동일하게 적용할 경우 산정 결과의 불확실성은 더욱 증가할 수 있다. 이러한 이유로 연속측정법을 적용하기에 앞서 FCF 계수에 대한 국가 고유 배출계수(Tier 2)의 개발이 선행되어야 하며, 이를 위해서는 적합한 바이오매스 함량 분석방법을 통한 국가 기초자료 생산이 요구된다.

추가로 본 연구에서는 폐기물 소각시설의 배출량 특성이 폐기물 원료 구성에 따라 달라짐을 수치적으로 확인하였으며, 특히 화석탄소 질량분율(FCF)값이 높은 성상의 폐기물 비중(WF)이 높을수록 비교적 화석기원 CO₂ 배출량(Fossil CO₂)의 비중이 높게 나타나는 경향을 확인하였다. 다만, 제한된 수의 소각시설을 대상으로 하였기 때문에, 향후 보다 다양한 소각시설 데이터를 추가 확보하고, 이를 바탕으로 폐기물 성상 특성을 반영하여 보다 정밀한 배출량 산정체계를 마련할 필요가 있다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00232066).

Reference

- BSI (British Standards Institution). 2010. DD CEN/TS 15414-1:2010 - Solid recovered fuels - Determination of moisture content using the oven dry method - Part 1: Determination of total moisture by a reference method. London, UK: BSI.
- BSI (British Standards Institution). 2011a. BS EN 15442:2011 - Solid recovered fuels - Methods for sampling. London, UK: BSI.
- BSI (British Standards Institution). 2011b. BS EN 15407:2011 - Solid recovered fuels - Methods for the determination of carbon (C), hydrogen (H) and nitrogen (N) content. London, UK: BSI.
- BSI (British Standards Institution). 2011c. BS EN 15440:2011 - Solid recovered fuels - Method for the determination of biomass content. London, UK: BSI.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2025a. National Greenhouse Gas Inventory (1990-2022). Cheongju, Korea: GIR. <https://www.gir.go.kr/home/main.do>
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2025b. Approved National Greenhouse Gas Emission Factor and Electricity Emission Factor for 2024. Cheongju, Korea: GIR. <https://www.gir.go.kr/home/main.do>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. In: Penman J, Kruger D, Galbally I, Harnisch J, et al. (eds). Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In: Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds). Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Lee H, Romero J (eds)]. Geneva, Switzerland: IPCC.
- ISO (International Organization for Standardization). 2002. ISO 11222:2002 - Air quality: Determination of the uncertainty of the time average of air quality

- measurements. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO (International Organization for Standardization). 2007. ISO 20988:2007 - Air quality: Guidelines for estimating measurement uncertainty. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO (International Organization for Standardization). 2008. ISO/IEC Guide 98-3:2008 - Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO (International Organization for Standardization). 2013. ISO 13833:2013 - Stationary source emissions - Determination of the ratio of biomass and fossil-derived carbon dioxide - Radiocarbon sampling and determination. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO (International Organization for Standardization). 2014. ISO 6145-2:2014 - Gas analysis: Preparation of calibration gas mixtures using dynamic methods. Part 2: Piston pumps. Geneva, Switzerland: ISO.
- Kang SM, Roh JY, Cho CS, Lee HS, Jeon EC. 2019. Analysis of factors for emission change in the waste incineration sector caused by change of guidance in the greenhouse gas emissions estimate method. *J Clim Change Res* 10(1): 35-46. doi: 10.15531/KSCCR.2019.10.1.35
- Kang W, Trang ND, Lee S, Lee SH, Choi YM. 2020. Uncertainty analysis of stack gas flow measurements with an S-type Pitot tube for estimating greenhouse gas emissions using a continuous emission monitoring system. *Metrologia* 57(6): 065031. doi: 10.1088/1681-7575/ab9a9f
- KATS (Korean Agency for Technology and Standards). 2022. KS E ISO 579:2022 - Coke - Determination of total moisture. Eumseong, Korea: KATS
- KATS (Korean Agency for Technology and Standards). 2023. KS I 5201:2023 - Method for sampling of industrial wastes. Eumseong, Korea: KATS
- Larjava KT, Tormonen K, Jaakkola PT, Roos AA. 1997. Field measurements of flue gases from combustion of miscellaneous fuels using a low-resolution FTIR gas analyzer. *J Air Waste Manag Assoc* 47(12): 1284-1290. doi: 10.1080/10473289.1997.10464073
- ME (Ministry of Environment, Korea). 2024. Test and analysis methods for the quality of solid refuse fuel products. Sejong, Korea: ME. ME Notification No. 2024-174.
- ME (Ministry of Environment, Korea). 2025a. Guideline on reporting and verification of emissions under the Emissions Trading Scheme (ME Notification No. 2025-64). Sejong, Korea: ME. <https://www.law.go.kr>
- ME (Ministry of Environment, Korea). 2025b. The Stack Tele-monitoring System (TMS) Operation Handbook. Korea Environment Corporation. Sejong, Korea: ME. https://www.me.go.kr/home/web/public_info/list.do
- NIER (National Institute of Environmental Research, Korea). 2016. Improvement of the test method for the sampling and analysis of greenhouse gas. Incheon, Korea: NIER. Technical Report NIER-SP-2016-005.
- NIER (National Institute of Environmental Research, Korea). 2022 Nov 24. Greenhouse gas emissions to be estimated more accurately: Introduction of direct measurement via the newly established GHG Process Test Standards. Incheon, Korea: NIER. <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156538433>
- Oh SH, Kang LS, Jung DH. 2018. A study on the effectiveness of continuous CO₂ emission monitoring in a waste incinerator. *J Clim Change Res* 9(3): 273-281. doi: 10.15531/KSCCR.2018.9.3.273
- Park CR, Jeong SJ, Jeong SH, Lee JI, Kim IS, Lim CS. 2023. Assessment of atmospheric greenhouse gas concentration equipment performance. *Atmosphere* 33(5): 549-560. doi: 10.14191/Atmos.2023.33.5.549

APPENDIX

S1. 산정방법별 불확도 추정 방법

본 연구에서는 국제 기준인 GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)을 기반으로 불확도를 추정하였다(ISO, 2008). Tier 1과 Tier 4 각각의 산정 방식에 적합한 접근법을 적용하였으며, 매개변수별 상대불확도(U_i)는 문헌 및 측정 반복성, 시험성적서 등에서 도출하였다. Tier 1의 경우, 폐기물 총량(SW), 성상비(WF_i), 건조물질함량(dm_i), 탄소함량(CF_i), 화석탄소함량 계수(FCF_i) 등을 주요 변수로 고려하였으며, 각 매개변수에 대해 모두 2006 IPCC GL (IPCC, 2006)에서 제시된 정보를 기반으로 추정하였으며, Table S1에 산정 근거와 함께 정리하였다. 다만, CF_i 및 FCF_i 의 경우 가이드라인에 직접적인 불확도 값이 명시되어 있지 않아 생활폐기물에

한해 제시되어 있는 계수범위(Range)를 기반으로 상대불확도를 산정하였다. 그리고 국가 고유 배출계수에 대한 공식적인 불확도 정보가 부재하여, 본 연구에서는 생활폐기물 소각시설의 Tier 1 산정 결과에 한정하여 배출계수법의 불확도를 추정하였다.

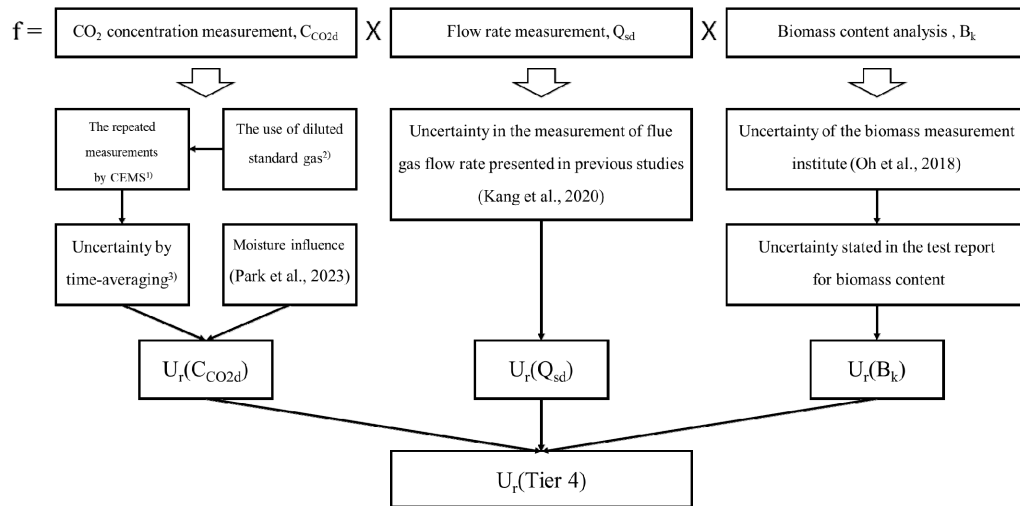
한편, Tier 4는 실측 기반 산정 방식으로, CO₂ 농도, 배출가스 유량, 바이오매스 함량 측정 등을 주요 요소로 설정하였다. CO₂ 농도는 반복 측정을 통해 A형 불확도 기반으로, 유량 및 바이오매스 값은 문헌과 시험성적서를 활용한 B형 불확도로 각각 적용하였다. Tier 4 배출량 산정의 불확도 산정 절차는 Fig. S1과 같이 정리하였다.

Table S1. Determination of uncertainties by parameter for emission factor-based estimation

Parameters	Reference source (Based on 2006 IPCC GL, Vol.5 (EN)) (IPCC, 2006)	Relative expand uncertainty, U_i
SW	‘...uncertainties on the amount of incinerated waste are estimated around ± 5 percent on a wet weight basis...’ (Ch.5 §5.7.2, p.5.24)	5%
WF_i	‘... $\pm 10\%$ for countries with high quality data (e.g., regular sampling at representative SWDS)...’ (Ch.3 Table 3.5, p.3.27)	10%
dm_i	‘...The uncertainty of the dry matter content may therefore range between ± 10 percent up to ± 50 percent and even more. ...’ (Ch.5 §5.7.2, p.5.24)	10% ¹⁾
CF_i	Refer to the default value ranges by MSW component. (Ch.2 Table 2.4, p.2.14)	Refer to Table 7
FCF_i	Refer to the default value ranges by MSW component. (Ch.2 Table 2.4, p.2.14)	Refer to Table 7
OF_i	‘...For waste incinerators it is assumed that the combustion efficiencies are close to 100 percent...’ (Ch.2 §5.4.1.3, p.5.20)	~2)

Note: 1) The value was estimated on the lower side, applying the minimum value.

2) Since the OF factor is assumed to be close to 100, its uncertainty is considered negligible.



Note: 1) ISO 20988:2007 - Air quality: Guidelines for estimating measurement uncertainty (ISO, 2007)

2) ISO 6145-2:2014 - Gas analysis: Preparation of calibration gas mixtures using dynamic methods.

Part 2: Piston pumps (ISO, 2014)

3) ISO 11222:2002 - Air quality: Determination of the uncertainty of the time average of air quality measurements (ISO, 2002)

Fig. S1. Procedure for estimating uncertainty in continuous emission monitoring methods

S2. 산정방법별 불확도 추정 결과(Tier 1 vs Tier 4)

생활폐기물 소각시설(M-W) 및 사업장폐기물 소각시설(I-W)에 대해 Tier 1 및 Tier 4 산정방법으로 추정된 화석기원 CO₂ 배출량의 상대불확도 결과를 Table S2(a)와 Table S2(b)에 각각 제시하였다. M-W에서는 Tier 1 배출량의 상대불확도는 348%로 나타났으며, Tier 4는 4.02%로 Tier 1의 불확도가 약 87배 높게 나타났고, I-W의 Tier

4 배출량의 상대불확도는 4.91%로 M-W보다 다소 높은 수치를 보였다. Tier 1 산정방법의 경우, 불확도 요인 중에서 FCF 항목의 종이와 섬유류에서 불확도가 289%와 144%로 매우 높았고, Tier 4 산정방법에서는 유량측정에 대한 불확도가 1.91%로 가장 컸다.

Table S2(a). Uncertainty by parameter in the 2006 IPCC GL (IPCC, 2006) and uncertainty of Tier 1 emissions

Relative expand uncertainty (%), U _r				CF _i (%)		FCF _i (%)		Combined (%)		
U _r (SW)	U _r (WF _i)	Waste type	U _r (dm _i)	X _{Min}	X _{Max}	U _r (CF _i)	X _{Min}	X _{Max}	U _r (FCF _i)	U _r (i)
5	10	Paper	10	42	50	10.0	0	5	288.7	289.2
		Textile	10	25	50	28.9	0	50	144.3	148.0
		Food waste	10	20	50	45.6	0	0	0.0	48.0
		Wood	10	46	54	9.2	0	0	0.0	17.6
		Garden and park waste	10	45	55	11.8	0	0	0.0	19.1
		Diapers	10	54	90	29.7	10	10	0.0	33.3
		Rubber & Leather	10	67	67	0.0	20	20	0.0	15.0
		Plastics	10	67	85	13.9	95	100	2.9	20.6
		Metal	10	-	-	-	-	-	-	15.0
		Glass	10	-	-	-	-	-	-	15.0
		Others	10	0	5	96.2	50	100	28.9	101.6
with 95% confidence level, k = 2										
Tier 1		Relative expand uncertainty(%), U _{r,M-W} = 347.9								

Table S2(b). Uncertainty by factor in continuous emission monitoring methods and uncertainty of Tier 4 emissions

Component	Unit	Factor	Type (A/B)	Relative standard uncertainty (%), U_r	Relative expand uncertainty (%), U_r
C_{M-W}	%	CO ₂ concentration measurement	A	0.43	1.04
		Moisture influence	B	0.29 ¹⁾	
C_{I-W}	%	CO ₂ concentration measurement	A	1.48	3.00
		Moisture influence	B	0.29 ¹⁾	
Q	m ³ /min	Flow rate measurement	B	1.91 ²⁾	3.81
B_{M-W}	%	Biomass test report	B	0.35	0.76
		Uncertainty by measurement institute	B	0.14 ³⁾	
B_{I-W}	%	Biomass test report	B	0.31	0.67
		Uncertainty by measurement institute	B	0.14 ³⁾	
K	-	-	-	-	-
				with 95% confidence level, $k =$	2
Tier 4				Relative expand uncertainty (%), $U_{r,M-W} =$	4.02
				Relative expand uncertainty (%), $U_{r,I-W} =$	4.91

Note: 1) Park et al. (2023)

2) Kang et al. (2020)

3) Oh et al. (2018)