

고로가스의 탄소배출계수와 이산화탄소 배출계수 개발 및 불확도 평가

박민성* · 조승현** · 전의찬***†

*세종대학교 일반대학원 기후에너지융합학과 석사과정, **세종대학교 기후환경융합센터 선임연구원,

***세종대학교 일반대학원 기후에너지융합학과 교수

Development and uncertainty assessment of carbon content and CO₂ emission factor for blast furnace gas

Park, Minsung* · Jo, Seunghyun** and Jeon, Eui-chan***†

*Master Student, Dept. of Climate and Energy Convergence, Sejong University Graduate School, Seoul, Korea

**Senior Researcher, Dept. of Climate and Environment Research Center, Sejong University, Seoul, Korea

***Professor, Dept. of Climate and Energy Convergence, Sejong University Graduate School, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study analyzed the composition of blast furnace gas (BFG) from a Korean steel company subject to the emissions trading scheme to develop greenhouse gas emission factors and assess their reliability using the 2006 IPCC uncertainty assessment methodology. Gas composition was measured with an industrial gas analyzer (MAX300-IG) and expressed as 366 daily averages from January 1 to December 31, 2024. After outliers were removed using the $1.5 \times \text{IQR}$ criterion, 295 daily averages remained, and monthly values were calculated using heat-output-weighted averaging. The carbon content of BFG was 73.2 tC/TJ, and the corresponding CO₂ emission factor was 267.1 tCO₂/TJ. The carbon content was 3.4% higher than the 2006 IPCC default value (70.8 tC/TJ), primarily because the annual mean CO concentration at the target facility (24.5%) exceeded the IPCC default composition (approximately 22%). It was only 0.4% lower than the country-specific factor (73.5 tC/TJ). Because the country-specific factor is derived from Tier 3 data from Korean integrated steel mills, this close agreement should not be interpreted as independent validation. Rather, the principal contribution of this study is the public documentation of facility-level measurements and their uncertainty. Uncertainty was quantified by Monte Carlo simulation (10,000 iterations) incorporating Pearson correlations among the input variables. The resulting uncertainty was $\pm 2.7\%$ at the 95% confidence level (71.28 ~ 75.30 tC/TJ), well below the IPCC Tier 1 default of $\pm 7\%$. These results are expected to improve the reliability of greenhouse gas inventories in the steel sector.

Key words : Blast Furnace Gas (BFG), Carbon content, CO₂ Emission Factor, Monte Carlo Simulation, Steel Industry

1. 서론

계속 심해지고 있는 기후위기에 적극 대응하기 위해 2015년 파리협정(Paris Agreement)이 채택된 이후, 유럽 연합, 미국, 일본 등 주요 선진국들은 2050 탄소중립을 목표로 온실가스 감축 정책을 강화하고 있는 추세이다

(UNFCCC, 2022). 또한, 유럽연합의 탄소국경조정제도 시행 등 국제 무역장벽이 현실화됨에 따라, 탄소배출집약도가 높은 제조업 중심의 국가들은 산업 부문의 배출량 관리가 국가 경쟁력을 결정짓는 핵심 요소로 대두되고 있다 (Koolen and Vidovic, 2022).

대한민국의 철강 산업은 2022년 기준 국가 총 온실가

†Corresponding author : ecjeon@sejong.ac.kr (209, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05006, Korea. Tel. +82-2-3408-4353)

ORCID 박민성 0009-0000-1802-3292
조승현 0000-0001-9004-9948

전의찬 0000-0003-2783-4550

스 배출량의 3.8%에 해당하는 2,771만 톤 CO₂eq.을 배출한다(GIR, 2024). 철강 공정에서는 코크스 제조와 제선, 제강 과정에서 코크스오븐가스(Coke Oven Gas, COG), 고로가스(Blast Furnace Gas, BFG), 전로가스(Linz-Donawitz Gas, LDG) 등 다양한 부생가스가 발생하며, 제철소 내 발전 및 가열 공정의 주요 에너지원으로 재사용된다. 최근 국가 에너지밸런스가 개정되어 기존에 석탄 제품으로 포괄적으로 관리되던 부생가스가 연료별로 세분화됨에 따라(KEEL, 2022), 해당 가스의 온실가스 배출량을 정확하게 산정하는 것이 중요해졌다.

국내 온실가스 배출량 산정에는 온실가스종합정보센터가 고시한 국가고유배출계수가 적용된다. 고로가스의 국가고유배출계수는 국내 일관제철소의 탄소배출계수(carbon content) 측정 결과를 집계하여 산출한 값으로 전체 평균 경향을 반영하지만, 고로가스의 탄소배출계수는 투입 코크스의 성상, 고로 조업 조건, 환원제 투입 비율에 따라 사업장별로 편차가 발생할 수 있으므로(Ge et al., 2016), 국가고유배출계수의 산정 기반이 되는 사업장 단위 실측값의 산정 절차와 불확도를 공개하는 자료가 요구된다. IPCC 가이드라인은 사업장 실측값에 기반한 Tier 3 탄소배출계수 개발을 권장하며, 탄소배출계수의 정밀도와 불확도를 정량적으로 제시할 수 있다.

배출권거래제 지침에 따라 시설별 연간 배출량이 50만 톤을 초과하는 업체는 Tier 3 방법론으로 탄소배출계수를 산정하여 명세서에 기재하여야 한다. 배출권거래제 지침은 Tier 3 탄소배출계수 산정방법과 불확도 평가 절차를 규정하고 있으나, 개별 사업장의 산정 결과는 명세서 체계에서 비공개로 관리된다. 따라서 사업장 기반 고로가스 탄소배출계수 및 불확도 산정 결과를 공개 학술문헌으로 제시하고, IPCC 기본값 및 국가고유 탄소배출계수와 정량적으로 비교한 사례는 문헌에서 찾기 어렵다. 국내에서는 Jo et al. (2021)이 코크스오븐가스를 대상으로 탄소배

출계수를 개발하고 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 불확도를 산정한 바 있으나, 고로가스에 대한 동일 수준의 연구는 아직 이루어지지 않았다.

본 연구는 국내 일관제철소 1곳을 대상으로 고로가스 성분을 분석하여 IPCC Tier 3 방법론에 기반한 탄소배출계수 및 이산화탄소 배출계수를 산정하고, 몬테카를로 시뮬레이션으로 95% 신뢰 수준의 불확도를 정량화하고자 한다. 산정된 탄소배출계수는 IPCC 기본값 및 국가고유 탄소배출계수와 비교하여 국가 인벤토리 체계와의 정합성을 확인하며, 산정 절차와 불확도를 학술적으로 공개하여 방법론 투명성을 확보한다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 대상시설

본 연구는 제철공정 중 발생하는 부생가스를 포집하여 연료로 재사용하는 국내 발전소 1곳을 대상시설로 선정하였으며, 측정자료는 해당 사업장으로부터 협조를 받아 확보하였다. 대상 시설은 온실가스 배출권거래제 할당대상 업체로, 시설별 연간 온실가스 배출량이 50만 톤을 초과하여 Tier 3 배출계수 개발 의무가 적용된다. 대상 발전시설의 설계용량과 연소기술 사용 연료에 대한 주요 사양은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Design specifications and fuel type of the target power generation facility

Capacity	Combustion Technology	Fuel type
100 MW	Gas Boiler	Coke Oven Gas, Blast Furnace Gas, Linz-Donawitz Gas

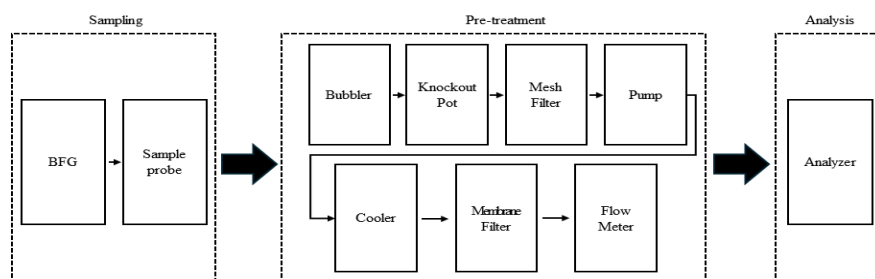


Fig. 1. Schematic diagram of the sampling and pretreatment process for BFG analysis

2.2. 시료채취 및 분석방법

고로가스는 공정 특성상 고온의 수분과 분진, 타르를 다량 함유하고 있다. 수분, 분진, 타르를 전처리 없이 직접 분석기에 주입할 경우 검출기의 감도 저하를 유발할 수 있으므로 Fig. 1과 같이 전처리 절차를 거쳐 산업용 가스분석기(MAX300-IG, USA)를 통해 가스 성분을 분석하였다.

시료는 고로 배관 내 샘플 프로브를 통해 추출되며, 이송 과정에서의 응축을 방지하기 위해 샘플 라인을 거쳐 전처리부로 유입된다. 유입된 가스는 Knockout Pot과 Bubbler를 통과하며 응축수와 타르 성분이 1차적으로 제거되고, 이어지는 Mesh Filter를 통해 조대 입자가 여과된다. 이후 펌프를 통해 이송된 시료는 Cooler를 거치며 수분이 제거되고, 최종적으로 Membrane Filter를 통해 미세 입자가 제거된 후 분석기에 주입된다. 유량계를 통해 일정 유속으로 제어된 시료는 산업용 가스분석기를 이용하여 ISO 6976 규격(ISO, 2016)에 따라 분석하였다.

2.3. 고로가스 분석자료 수집 및 탄소배출계수·이산화탄소 배출계수 산정

고로가스 분석자료는 2024년 1월 1일부터 2024년 12월 31일까지 총 1년간 수집된 일평균 대상시설의 측정자료를 활용하였다. 분석에 활용한 데이터는 대상 사업장의 배출권거래제 명세서 작성을 위해 가동 중인 MAX300-IG 산업용 가스분석기의 연속 측정값을 일평균으로 환산한 자료이며, 측정 자료의 이상치는 고로가스 조성 및 순발열량 항목에 대해 사분위범위(IQR) 1.5배 기준으로 식별하였으며, 어느 한 항목이라도 기준을 벗어난 날을 제외하여 총 365일 중 295일을 분석에 사용하였다. 해당 일평균 값은 배출권거래제 명세서 작성에 활용되는 공식 집계 단위이며, 측정주기 및 평균화 절차는 사업장 내부 운영 기준에 따라 관리된다.

월별 평균 조성 및 순발열량은 일별 유량을 가중치로 적용하여 산정하였으며, 표준편차도 동일한 가중치를 적용한 가중 표준편차로 산정하였다. 수집된 데이터를 바탕으로 IPCC 2006 가이드라인의 Tier 3 방법론에 따라 연료 내 성분을 분석하여 식 (1)과 같이 탄소배출계수를 산정하였으며, 이산화탄소 배출계수는 탄소배출계수에 산화율을 고려하여 식 (2)와 같이 산출하였다.

$$EF_i = \frac{MV_y \times VR_y}{V} \times \frac{1}{EC_i} \times 10^3 \quad (1)$$

EF_i : 연료 i 의 탄소배출계수(tC/TJ)

VR_y : 조성별 부피비(m^3/m^3 -연료)

MV_y : 성분별 탄소의 몰 질량(kg/kmol)

V : 표준상태에서 1 kmol이 갖는 부피(22.4 m^3)

EC_i : 연료 i 의 순발열량(MJ/Nm³-연료)

$$EF_{CO_2,i} = EF_i \times \frac{44}{12} \times OxF \quad (2)$$

$EF_{CO_2,i}$: 연료 i 의 이산화탄소 배출계수(tCO₂/TJ)

EF_i : 연료 i 의 탄소배출계수(tC/TJ)

44/12: 분자량 환산계수

OxF : 산화율

2.4. 불확도 산정 방법

2006 IPCC 가이드라인의 Tier 2 방법론은 몬테카를로 시뮬레이션을 배출계수의 불확도 평가 방법으로 제시하고 있다. 몬테카를로 시뮬레이션은 각 입력변수의 확률밀도함수로부터 난수를 무작위로 추출하여 결과값의 확률 분포를 도출하는 방식으로, 전문가의 판단과 데이터의 변동성을 동시에 고려할 수 있는 불확도 평가 방법이다. 본 연구는 고로가스 탄소배출계수의 불확도를 산정하기 위해 Oracle Crystal Ball (Ver. 11.1.2.4)을 사용해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

순발열량과 CO, CO₂를 입력변수로 선정하고 확률밀도 함수를 설정하였다. 변수 간의 상호 의존성을 무시하고 독립적으로 가정할 경우, 불확도가 과대 혹은 과소평가될 위험이 있기 때문에 2006 IPCC 가이드라인은 불확도 산정 시 입력변수 간의 상관관계가 명확할 경우 상관계수를 반영하는 것이 바람직하다고 명시하고 있다. 피어슨 상관계수는 두 변수 간 상관관계의 강도와 방향을 수치화한 지표로 -1과 1 사이의 값을 가지며 상관계수의 절댓값이 커질수록 상관관계가 강함을 의미한다. 설정한 확률밀도함수를 기반으로 10,000회의 반복 시뮬레이션을 수행하여 결과값의 확률 분포를 생성하였다. 반복 횟수는 입력자료의 정보량을 늘리거나 표본 수 부족을 보완하기 위한 것이 아닌, 출력분포의 평균과 95% 신뢰구간 분위수(2.5%, 97.5%) 추정값이 수치적으로 안정되도록 하기 위한 설정이다. 2006

IPCC 가이드라인은 반복 횟수를 결과가 수렴할 만큼 설정하도록 권고하며, 본 연구는 분위수 추정값의 수렴을 확인한 뒤 10,000회를 적용하였다. 반복 횟수의 증가는 탄소배출계수의 불확도 자체를 줄이는 것이 아니라 분위수 추정의 안정성을 높이며, 불확도의 크기는 입력자료의 변동성이 결정한다. 확률분포를 통해 95% 신뢰구간의 평균 탄소배출계수와 불확도를 산정하였다. 본 연구에서는 입력변수간의 피어슨 상관계수를 산정하고, 시뮬레이션 모델에 적용하여 불확도 평가의 신뢰성을 확보하였다.

3. 연구 결과

3.1. 고로가스의 조성

2024년 1월부터 12월까지 1년 동안 측정된 대상 사업

장의 월별 평균 조성 및 순발열량 분석 결과는 Table 2와 같다. 본 연구의 분석은 366개 일평균 자료 중 이상치를 제거한 295일을 기준으로 수행하였으며, Table 2의 월별 값은 일평균 유량을 가중치로 하여 월 단위로 집계한 것이다. 분석 결과, 고로가스의 주요 구성 성분은 N_2 , CO , CO_2 , H_2 로 나타났다.

고로가스 조성 중 가장 높은 비율을 차지하는 성분은 불연성 가스인 N_2 로, 연평균 47.5%(±0.5%)로 나타났다. 가연성 성분인 CO 는 연평균 24.5%(±0.5%)로 분석되었으며, 월별 23.9%에서 25.1%의 범위를 보였다. 온실가스인 CO_2 는 연평균 23.5%(±0.4%)로, H_2 는 연평균 3.9%(±0.3%)로 나타났다. 고로가스의 순발열량은 유량 기반 가중 평균 840 kcal/Nm³으로 산정되었으며, 가중 표준편차는 14.3 kcal/Nm³으로 산정되었다. 사분위수로 이상치를 제거 후 고로가스의 성분 및 발열량은 Table 3과 같다.

Table 2. Monthly average composition and net calorific value of BFG at the target facility in 2024

Month	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	O ₂	Net calorific value
	(vol%)	(vol%)	(vol%)	(vol%)	(vol%)	(kcal/Nm ³)
Jan	24.79	23.48	3.66	47.51	0.01	844
Feb	24.58	23.47	3.61	47.78	0.02	836
Mar	24.78	23.39	3.52	47.73	0.02	840
Apr	24.69	23.26	3.77	47.70	0.03	843
May	24.43	23.60	3.85	47.57	0.01	839
Jun	24.47	23.57	3.89	47.53	0.00	842
Jul	24.08	23.93	4.15	47.30	0.00	834
Aug	24.32	23.99	4.36	46.79	0.01	847
Sep	24.14	23.57	4.22	47.51	0.02	838
Oct	23.92	23.47	3.92	48.12	0.01	824
Nov	24.58	23.42	3.66	47.78	0.01	837
Dec	25.11	23.05	3.55	47.73	0.01	850
Weighted average	24.51	23.54	3.86	47.54	0.01	840
Weighted standard deviation	0.5	0.4	0.3	0.5	0.0	14.3

Table 3. Descriptive statistics of the daily-average data after outlier removal in 2024 (n = 295)

Statistic	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	O ₂	Net calorific value
	(vol%)	(vol%)	(vol%)	(vol%)	(vol%)	(kcal/Nm ³)
Mean	24.52	23.51	3.83	47.58	0.01	840
Geometric mean	24.51	23.51	3.82	47.58	0.01	840
Median	24.54	23.51	3.80	47.56	0.01	840
Minimum	23.09	22.27	3.11	46.22	0.00	801
Maximum	25.74	24.59	4.66	49.10	0.04	880

Table 4. Comparison of carbon content and CO₂ emission factor of BFG with IPCC default values and country-specific emission factor

Category	This study	1996 IPCC	2006 IPCC	Country-specific emission factor
Carbon Content (tC/TJ)	73.2	66.0	70.8	73.5
CO ₂ Emission Factor (tCO ₂ /TJ)	267.1	242.0	259.6	268.2
Difference (carbon Content)	-	+10.9%	+3.4%	-0.4%

Note: Carbon content values exclude the oxidation factor. CO₂ emission factors of this study and the country-specific factor apply an oxidation factor of 0.995 (Korean Tier 3 guideline), whereas IPCC default values assume complete oxidation.

3.2. 고로가스의 온실가스 배출계수 산정 결과

본 연구에서 2024년 1월부터 12월까지 1년간 수집된 실측 데이터를 바탕으로 산정한 고로가스의 탄소배출계수는 73.2 tC/TJ이다. 본 연구의 탄소배출계수와 1996 IPCC 가이드라인의 기본값(66.0 tC/TJ)의 차이는 +10.9%로 나타났으며, 2006 IPCC 가이드라인의 기본값(70.8 tC/TJ)과의 차이는 +3.4%로 나타났다. 다만 1996 IPCC 가이드라인은 현행 국가 배출량 산정의 기준이 아니므로 기본 탄소함량의 개정 흐름을 보여주는 참고자료로만 제시하였으며, 2019 Refinement는 고정연소 부문의 기본 배출계수를 갱신하지 않았으므로 현행 IPCC 비교 기준은 2006 가이드라인이다.

국내 배출계수 값과 비교하기 위해 2022년 1월 승인된 산업공정 부문 고로가스의 국가온실가스 배출계수(GIR, 2022)를 참조하였다. 국가고유배출계수인 0.6869 tCO₂/t과 본 연구에서 산정한 배출계수의 단위가 상이하여, 동일 기준 비교를 위해 환산하였다. 본 연구 기간 중 실측된 고로가스의 연평균 밀도(1.38 kg/Nm³)와 연평균 순발열량(840 kcal/Nm³)을 적용하였으며, 「배출활동별 온실가스 배출량 등의 세부산정방법 및 기준」의 배출계수 산정식(Ministry of Environment, 2025)을 이용하여 식 (3)과 같이 환산하였다.

환산 결과, 고로가스의 국가고유 탄소배출계수는 73.5 tC/TJ로 산정되었으며, 본 연구의 탄소배출계수와 -0.4%의 차이를 보였다. 본 연구의 탄소배출계수 73.2 tC/TJ에 산화율 0.995를 적용하여 이산화탄소 배출계수를 산출하였다. 산출된 이산화탄소 배출계수는 267.1 tCO₂/TJ이며, IPCC 기준 및 국내 기준과의 비교 결과는 Table 4와 같다. Table 4에서 탄소배출계수는 모두 산화율을 적용하지 않은 값이며, 국가고유 이산화탄소 배출계수와 본 연구의 이산화탄소 배출계수는 국내 Tier 3 산화율인 0.995를 적용한 값으로, IPCC 1996 및 2006 GL의 이산화탄소 배출계

수는 완전산화 조건인 산화율 1.0을 적용하여 제시하였다.

$$EF_{i,C} = EF_{i,CO_2} \times \frac{12}{44} \times \frac{D_i}{EC_i \times 4.1868 \times 10^{-6}} \quad (3)$$

$EF_{i,C}$: 연료 i 의 탄소배출계수(tC/TJ)

EF_{i,CO_2} : 산업공정 부문에 고시된 이산화탄소 배출계수(tCO₂/t)

D_i : 연료 i 의 평균밀도(kg/Nm³-연료)

EC_i : 연료 i 의 순발열량(kcal/Nm³-연료)

4.1868×10^{-6} : kcal에서 TJ로의 단위환산계수

3.3. 고로가스의 탄소배출계수 불확도 산정 결과

본 연구에서는 도출된 고로가스 탄소배출계수의 불확도를 산정하기 위해 Oracle Crystal Ball을 활용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 10,000회 수행하였다. 입력변수의 확률밀도함수는 이상치 제거 후 295일 일평균 자료로부터 추정하였다. 입력변수인 CO, CO₂, 순발열량에 대해 적합도 검정을 수행한 결과, 모든 입력변수가 정규분포를 따르는 것으로 확인되어 정규분포를 확률밀도함수로 설정하였다.

시뮬레이션의 입력변수 간의 상관관계를 분석하여 반영하였다. 상관계수는 이상치 제거 후 295일 일평균 자료를 기준으로 산정하였다. 분석 결과, CO와 순발열량 간에는 0.834의 강한 양의 상관관계가 확인되었으며, CO와 CO₂ 간에는 -0.510의 음의 상관관계, 순발열량과 CO₂ 간에는 -0.295의 음의 상관관계가 각각 나타났다. 이러한 상관 구조는 고로가스의 조성 특성을 반영한다. 주된 가연성 성분인 CO는 순발열량과 양의 상관관계를, 불연성 성분인 CO₂는 순발열량과 음의 상관관계를 보이며, 고로 조업 중 환원 정도에 따라 CO와 CO₂가 상호 전환되어 두 성분은 음

Table 5. Pearson correlation matrix among input variables used in Monte Carlo simulation (n = 295)

	NCV	CO	CO ₂
NCV	1.000	0.834	-0.295
CO	0.834	1.000	-0.510
CO ₂	-0.295	-0.510	1.000

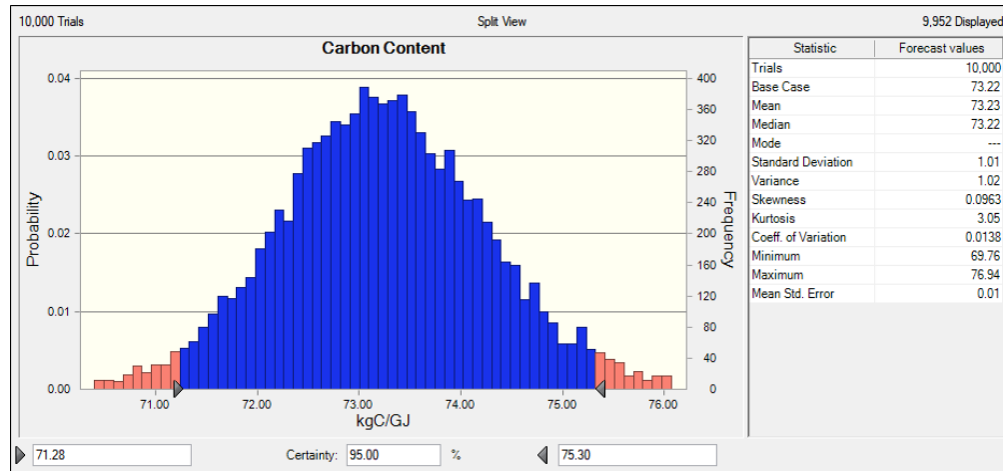


Fig. 2. Probability distribution of carbon content for BFG using Monte Carlo simulation

의 상관을 나타낸다. 입력변수 간의 상관계수는 Table 5와 같다.

시뮬레이션 결과 도출된 확률 분포는 Fig. 2와 같다. 분석 결과, 고로가스 탄소배출계수의 확률 분포는 정규분포 형태를 나타내었으며, 시뮬레이션을 통해 도출된 95% 신뢰 수준에서의 탄소배출계수 범위는 하한값 71.28 tC/TJ, 상한값 75.30 tC/TJ로 나타났다. 확장 불확도를 산정한 결과, 약 $\pm 2.7\%$ 수준의 낮은 불확도를 보였다. 본 연구에서 산정된 불확도 $\pm 2.7\%$ 는 IPCC Tier 1 기본 불확도 $\pm 7\%$ 보다 낮으며, 이는 법정 Tier 3 산정체계에서 확보되는 사업장 실측자료가 고로가스 탄소배출계수의 변동성을 비교적 정밀하게 반영하고 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구는 국내 A 제철소 부생가스 발전소의 고로가스를 대상으로 IPCC Tier 3 방법론에 기반한 탄소배출계수(Carbon content)와 이산화탄소 배출계수를 산정하고, 몬테카를로 시뮬레이션으로 불확도를 정량화하여 철강 부문 온실가스 인벤토리의 신뢰성 향상을 위한 기초 자료를 제시하였다. 2024년 1월 1일부터 12월 31일까지 MAX300-IG 연속식 가스분석기로 수집된 366개의 일평균 실측 데이터

중 이상치를 제외한 295일을 활용하였으며, 연간 CO 연평균 농도는 24.5%, CO₂는 23.5%로 연간 안정적인 조성 분포를 보였다.

대상 사업장의 고로가스 탄소배출계수는 연평균 73.2 tC/TJ로 산정되었으며, 2006 IPCC 기본값 70.8 tC/TJ 대비 +3.4% 높고 국가고유 탄소배출계수 73.5 tC/TJ와는 -0.4%의 차이를 보였다. 산출된 이산화탄소 배출계수는 267.1 tCO₂/TJ이다. IPCC 기본값과의 차이는 대상 사업장의 연평균 CO 농도 24.5%가 IPCC 기본 조성 약 22%보다 높은 조업 특성에서 비롯된다.

몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확도 평가 결과, 95% 신뢰 수준에서 약 $\pm 2.7\%$ 의 불확도를 나타냈으며, 신뢰 구간은 71.28 ~ 75.30 tC/TJ이었다. 본 연구에서 산정된 불확도 $\pm 2.7\%$ 는 IPCC Tier 1 불확도 기본 범위 $\pm 7\%$ 보다 낮은 수준으로 실측 기반 Tier 3 배출계수의 산정이 대상 사업장의 배출 특성을 보다 정밀하게 반영함을 나타낸다. 본 연구에서 산정한 탄소함량 73.2 tC/TJ 및 이산화탄소 배출계수 267.1 tCO₂/TJ는 고로가스 Tier 3 산정 결과의 공개 학술 사례이며, 본 연구의 의의는 국가고유배출계수가 비공개 또는 집계 수준으로 관리되는 사업장 단위 실측 자료와 불확도 산정 결과를 학술 문헌으로 제시하여 고로가스 인벤토리의 투명성과 추적성을 높이는 데 있다.

본 연구의 산정 절차와 불확도 평가 결과는 배출권거래제 명세서의 Tier 3 배출계수 적합성 평가와 국가 인벤토리 QA/QC 과정에서 사업장 실측값의 타당성을 교차 확인하는 참고자료로 활용될 수 있다. 또한 국내 고로가스 배출원이 소수 사업장에 집중된 여건을 고려할 때, 각 할당대 사업체가 본 연구와 같은 형식으로 Tier 3 배출계수의 산정 근거와 불확도를 공개한다면 국가고유배출계수의 검증 기반 강화와 고로가스 인벤토리의 신뢰성 제고에 기여할 수 있다. 후속 연구에서는 측정 대상을 국내 다른 제철소로 확대하여 공개 가능한 사업장 단위 비교자료를 축적할 필요가 있다. 또한 본 연구는 지침 산화율을 적용하였으므로, 배가스 중 CO 농도와 실제 산화율을 직접 실측하면 사업장별 CO₂ 배출계수 산정 정밀도를 더욱 높일 수 있다.

사사

본 연구는 기후에너지환경부 ‘기후변화특성화대학원사업’의 지원으로 수행되었습니다.

본 연구는 한국기후변화학회 2025 하반기학술대회에서 발표한 내용을 확장·보완하여 작성하였습니다(Park et al., 2025).

References

- Ge X, Chang LP, Yuan J, Ma J, Su X, Ji H. 2016. Greenhouse gas emissions by the Chinese coking industry. *Pol J Environ Stud* 25(2): 593-598. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61065>
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2022 Jan 10. 2021 nyeon seungin gukga onsilgaseu baechul·heupsu gyesu gonggo [2021 approved national greenhouse gas emission and removal factors] (in Korean). Cheongju, Korea: Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2024. national greenhouse gas inventory report of Korea. Seoul, Korea: Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea.
- IPCC. 1996. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Houghton JT, Meira Filho LG, Lim B, Tréanton K, Mamaty I, Bonduki Y, Griggs DJ, Callander BA (eds). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds). Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.
- ISO. 2016. Natural gas — Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition. Geneva: International Organization for Standardization. ISO 6976:2016.
- Jo S, Roh JY, Kang SM, Jeon EC. 2021. Development of the coke oven gas carbon emission factor and calculation of uncertainty (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 12(2): 137-142. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2021.12.2.137>
- KEEI (Korea Energy Economics Institute). 2022. Yearbook of energy statistics. Ulsan, Korea: Korea Energy Economics Institute.
- Koolen D, Vidovic D. 2022. Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners. Publications Office of the European Union. Luxembourg. 88 p. EUR 31112 EN (JRC129297). doi: 10.2760/170198.
- Ministry of Environment. 2025. Guidelines on greenhouse gas emissions reporting and certification under the emissions trading scheme [Annex 6: Detailed calculation methods and criteria for greenhouse gas emissions by activity] (in Korean). Sejong, Korea: Ministry of Environment. Notice No. 2025-64.
- Park MS, Jo SH, Jeon EC. 2025. Development and uncertainty assessment of carbon emission factor for blast furnace gas. Proceedings of 2025 KSCC Fall Conference; 2025 Dec 3~Dec 5; BEXCO 2nd Exhibition Center. Busan, Korea: The Korean Society of Climate Change Research. P-35.
- UNFCCC. 2022. Long-term low-emission development strategies: Synthesis report by the secretariat. Bonn, Germany: United Nations Framework Convention on Climate Change. Report No. FCCC/PA/CMA/2022/8.