

광음향 분광법을 이용한 부생가스 발전시설의 N₂O 배출계수 연구

김수빈* · 조승현** · 강성민*** · 전의찬****†

*스마트에코(주) 연구원, **세종대학교 기후에너지융합학과 박사과정학생, ***서울연구원 환경안전연구실 초빙부연구위원, ****세종대학교 기후에너지융합학과 교수

A Study on N₂O emission factor for by-product gas power plants using the PhotoAcoustic Spectroscopy (PAS) method

Kim, Subin* · Jo, Seunghyun** · Kang, Sungmin*** and Jeon, Eui-chan****†

*Researcher, Institute for Environmental Strategies, SMaRT ECO, Seoul, Korea

**Ph.D. student, Cooperate Course for Climate Change, Sejong University, Seoul, Korea

***Visiting Associate Research Fellow, Division of Environment and Safety, The Seoul Institute, Seoul, Korea

****Professor, Dept. of Climate and Environment, Sejong University, Seoul, Korea

ABSTRACT

By-products of steel production facilities include Coke Oven Gas, Blast Furnace Gas, and Linz-Donawitz converter Gas. And the CO₂ emission factor and calorific value were developed and announced in 2022 through related research in Korea, but study or research about Non-CO₂ emission is insufficient. The IPCC guidelines recommend developing a national emission factor (Tier 2) or emission factor per unit facility (Tier 3) when calculating greenhouse gas emissions. Research related to Non-CO₂ emitted from by-product gas is needed to increase the reliability of the greenhouse gas inventory. This study confirmed the emission characteristics of N₂O for the power plant using by-product gas and developed the N₂O emission factor of power plants using by-product gas. The PAS method, one of the real-time measurement method, was used to measure the N₂O concentration of by-product gas power plant. The facility to be studied was selected for one of the two domestic facilities that generate power using by-product gas. The final exhaust gas is emitted through the by-product gas after combustion, and the N₂O concentration was measured for a total of 6 days in this study. The average N₂O concentration of by-product gas power plant in this study was 0.34 ppm. The N₂O emission factor of this study was 0.69kgN₂O/TJ, with a maximum value of 0.98kgN₂O/TJ and a minimum value of 0.57kgN₂O/TJ. This study developed the N₂O emission factor of domestic by-product gas power plants for the first time, and it is believed that it can contribute to increasing the reliability of the national greenhouse gas inventory.

Key words: By-product Gas, By-product Gas Power Plant, N₂O Concentration, N₂O Emission Factor, Greenhouse Gas Inventory

1. 서론

국제사회는 전 지구적인 기후변화 문제에 대응하기 위해 2015년 12월에 파리협정을 채택하였다. 파리협정 당사국들은 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승을 2℃보다

아래로 유지하고 1.5℃ 이내로 제한하기 위해, 5년 단위로 당사국 스스로 결정한 온실가스 감축목표를 제출하여 자발적으로 이행하고 있다. 우리나라 정부는 2015년에 『2030 국가 온실가스 감축목표(NDC, Nationally Determined Contribution)』를 유엔기후변화협약 사무국에 제출하였다.

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

ORCID 김수빈 0000-0001-6227-7601
조승현 0000-0001-9004-9948

강성민 0000-0001-8628-8241
전의찬 0000-0003-2783-4550

2021년에는 온실가스 감축 목표를 2018년 온실가스 총배출량 대비 40%인 291 백만톤 CO₂eq.으로 상향하여, 『2030 국가 온실가스 감축목표 상향안』을 제출하였다(The Government of the Republic of Korea, 2021).

우리나라 에너지 분야의 2020년 온실가스 배출량은 569.9 백만톤으로 전체 온실가스 배출량 중 86.8%로 가장 큰 비중을 차지하고 있다(GIR, 2021). NDC 달성을 위한 우리나라의 온실가스 감축을 위해서는 에너지 분야의 신뢰성 있는 인벤토리 기반의 배출량 관리가 필수적이다. 에너지 분야 중 연료연소 부문에서는 다양한 연료를 사용하고 있으며, 그 중 부생가스는 철강산업의 제철공정에서 부산물로 발생되어 발전용 연료로 사용되고 있다(MOTIE, 2021).

철강생산시설에서 발생하는 부생가스로는 코크스가스, 고로가스, 전로가스가 있다. 코크스가스는 철을 제련하는 과정에서 유연탄을 코크스를 만드는 과정에서 휘발성 물질이 증발하여 코크스 가스가 생성되며, 고로가스는 코크스가 연소하는 과정에서 생성된다(Jo et al., 2021). 전로가스는 전로에서 선철을 강으로 전환하는 공정에서 생성되는 가스를 일컫는다. 일반적으로 세가지 가스를 부생가스로 정의하며, 부생가스의 CO₂ 배출계수와 발열량은 국가 고유 값이 개발되어 고시되었으나, Non-CO₂ 배출계수는 개발 및 관련 연구가 미흡한 실정이다. IPCC 가이드라인에서는 온실가스 배출량 산정 시 국가고유배출계수(Tier 2)를 개발하거나 사업장 단위의 배출계수(Tier 3)를 개발하여 적용하는 것을 권장하고 있다. 에너지 분야 인벤토리의 신뢰성을 높이기 위해서는 부생가스의 Non-CO₂ 배출계수와 관련된 연구가 필요하다.

본 연구는 부생가스를 이용하는 발전시설을 대상으로 N₂O의 배출 특성을 확인하고 N₂O 배출계수를 개발하였다. 부생가스 발전시설의 N₂O 농도 측정은 더 많은 데이터와 측정 농도 변화 추이를 확인하기 위해 실시간 측정 방법 중 하나인 광음향 분광법(PAS, Photo-Acoustic Spectroscopy)을 이용하였다(da Silva et al., 2006). PAS 방법으로 측정된 배기가스 중 N₂O 농도와 발열량 및 유량을 이용하여 N₂O 배출계수를 개발하였으며, IPCC와 EPA에서 제시하고 있는 부생가스의 N₂O 배출계수와 비교하였다.

2. 연구 방법

2.1. 대상시설 선정

국내의 부생가스 발전시설은 총 2곳으로 철강업체에서 운영하고 있으며, 본 연구에서는 그중 한 업체를 대상으로 N₂O 농도를 측정하였다. 대상시설은 100 MW 규모로 부생가스를 혼소하여 사용하고 있다. 대상 발전시설의 설계용량과 연소 기술, 사용 연료는 Table 1로 나타내었다.

Table 1. Capacity and fuel used of power plant

	Capacity	Combustion method	Fuel type
Power plant (A)	100 MW	Gas Boiler	By-product gas (Coke Oven Gas, Blast Furnace Gas, Linz-Donawitz converter Gas)

연구 대상시설은 고로가스를 가장 높은 비율로 사용하며, 코크스가스와 전로가스는 고로가스와 함께 혼합하여 사용하고 있다. 또한, 초기점화 및 승온용으로 천연가스를 함께 사용하고 있다.

제철공정에서 생산되는 코크스가스, 고로가스, 전로가스는 발전시설의 보일러로 혼합되어 공급되며, 보일러로 인해 과열된 증기는 고압터빈과 중저압터빈을 거쳐 발전기를 통해 전력이 생산된다. 연소 후의 배기가스는 질소산화물(NOx) 저감을 위한 SCR (Selective Catalyst Reduction, 선택적 촉매 환원법)과 공기에열기를 거쳐 연돌로 최종 배출된다. 부생가스 발전의 공정흐름도는 Fig. 1과 같다(JISF, 2023).

2.2. N₂O 농도 측정 방법

연소시설에서의 N₂O 배출은 연소 특성 및 조건, 기술적 요소 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. PAS는 24 시간 데이터를 확보할 수 있어 Lung Sampler를 이용하여 시료를 포집하고 농도를 측정하는 방법보다 더 많은 데이터를 확보할 수 있다(Kang, 2015; Kang et al., 2014). 본 연구에서는 6일 동안 배기가스의 시료를 채취하였다.

현장에 설치한 N₂O 연속자동측정기기의 모식도는 Fig. 2에서 나타내었다. 배출시설의 배기가스는 10 m/sec 이상의 속도와 100℃ 이상의 고온으로 배출되므로 시료채취관은

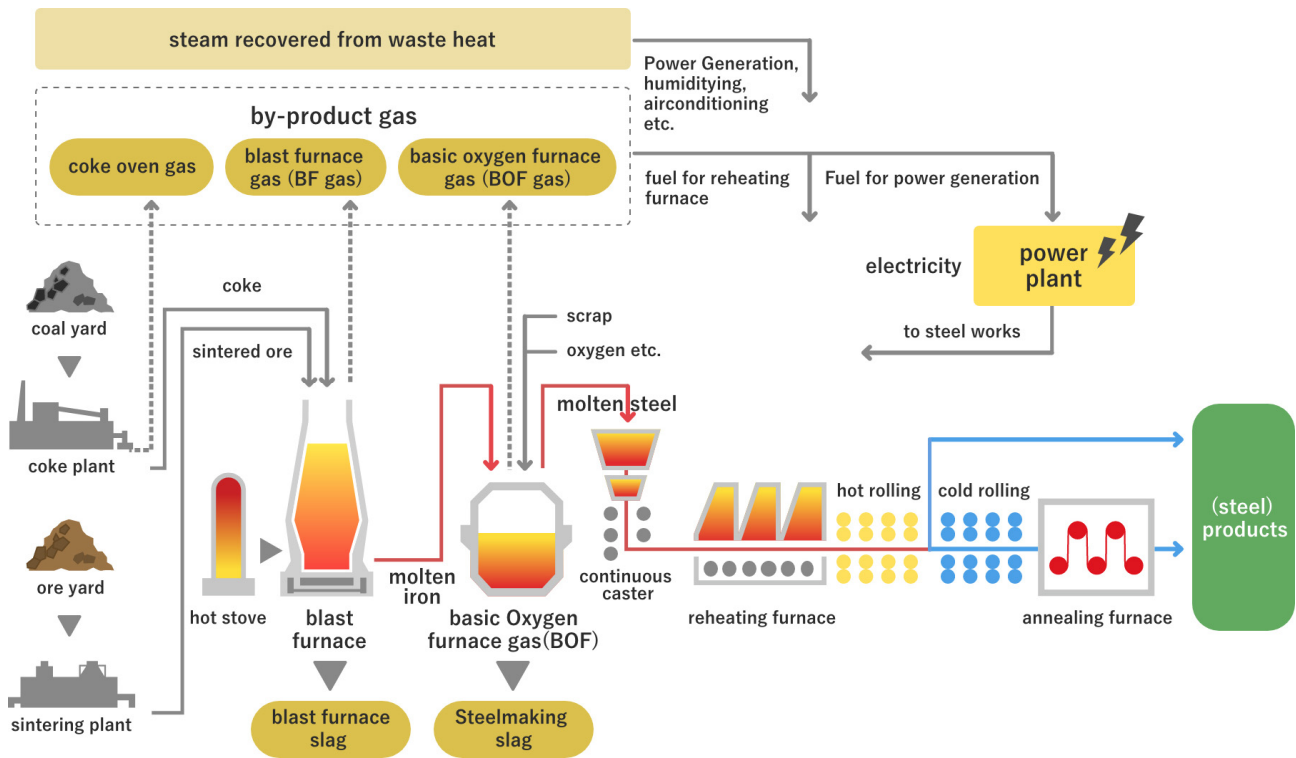


Fig. 1. Process flow diagram of by-product gas in power plants

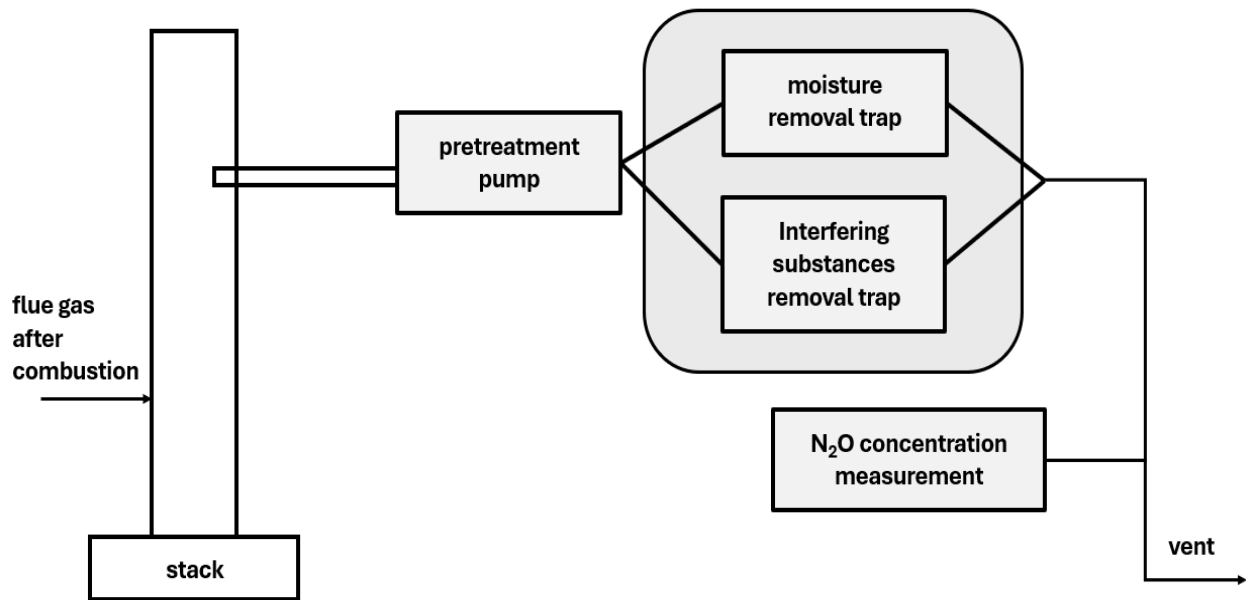


Fig. 2. N₂O continuous measurement equipment in power plants site

유속과 온도에 견딜 수 있는 스테인레스강 재질을 사용하였다. 시료채취관을 통해 채취된 시료는 전처리펌프를 통해 일정 온도로 냉각된 후 수분이 제거된 배기가스가 1 L/min의 유량으로 기기로 이동하도록 하였으며, 추가로 제거되지 못한 수분과 간섭물질을 제거를 위해 Trap을 설치하였다.

N₂O 측정기기(LSE-4405)의 가스 유입 유량은 80 mL/min이며 가스 시료의 온도는 5 ~ 25°C로 설정하였다. LSE는 수분과 CO₂, SO₂ 등의 간섭물질에 영향을 받기 때문에, 기기 전단에 간섭물질을 제거하는 Chemisorb S (BETE, Belgium)과 수분을 제거하는 Molecular Sieve (SIGMA ALDRICH, USA)로 이루어진 Trap을 설치하였다. PAS 기기 LSE-4405의 분석조건은 Table 2에 나타내었다.

2.3. N₂O 연속측정기기의 신뢰성 평가

측정기기의 신뢰성은 직선성(Linearity)과 반복성(Repeatability) 평가를 통해 확인할 수 있다. 직선성을 확인하기 위해 농도를 알고 있는 표준가스를 PAS 기기로 측정하였다. 발전시설의 N₂O 농도 범위를 고려하여 표준가스 0.25 ppm, 0.5 ppm, 1 ppm, 2 ppm, 5 ppm을 이용하였다. 이 중 0.25 ppm, 0.5 ppm, 2 ppm, 5 ppm은 1 ppm과 10 ppm(RIGAS, KOREA)으로부터 초고순도질소로 희석하여 사용하였다. 희석을 위해 1 ppm을 제외한 농도의 표준가스는 Syringe를 이용하여 5 L 용량의 Tadar bag (SKC, US)으로 옮겨 측정하였으며, Tadar bag은 고순도 질소(99.999%)를 사용하여 3회 이상 세척하여 사용하였다.

N₂O 농도는 각 시료 당 3회씩 측정하였으며, 농도의 평균을 계산하여 표준가스의 농도와의 직선성 그래프를 작성하였다. 이는 Fig. 3으로 나타내었고, 검정곡선의 적합한 정도를 결정계수(R², Coefficient of determination)는 0.99 이상인 것으로 확인하였다.

PAS로 측정한 N₂O 농도 값의 반복성을 확인하기 위해 동일한 농도인 N₂O 1 ppm 표준가스를 사용하여 10회 반복 측정하였다. PAS의 반복성은 Table 3으로 나타내었으며 측정 결과, PAS를 이용한 평균 N₂O 농도는 1.00 ppm으로 나타났고 표준편차는 0.02, 상대표준편차는 1.95%로 나타났다. 표준가스와 비교하여 약 0.1% 낮게 나타났으며, 차이는 0.001 ppm으로 나타났다. PAS의 N₂O 농도 결과는 선행연구(da Silva et al., 2006)의 반복성 결과인 1%보다 다소 높지만 유사하게 나타났으며, ISO 1564에서 제시한 재현성 3.0%보다 낮게 나타났기 때문에 반복성이 우수한 것으로 확인하였다.

Table 2. Analysis conditions of PAS, LSE-4405

N ₂ O LSE-4405 Analyser	
Systems	PAS
Sample Flow rate	80 mL/min
Sample Temperature	5 ~ 25°C
Pump Speed	42%
Tqcl Cycle scan	21 ~ 25°C
Current Through QCL	0.65 A
Temperature measurement cell	35°C
Scan Range	1,277.847 ~ 1,279.548 cm ⁻¹

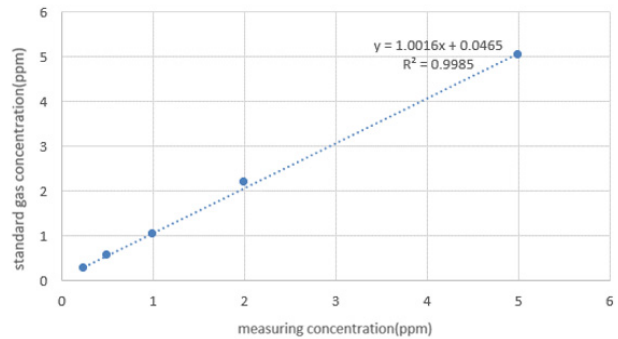


Fig. 3. N₂O concentration graph of PAS using standard gas

Table 3. Repeatability of PAS

(Unit: ppm)

Repeatability	PAS
	N ₂ O concentration
1st	0.97
2nd	1.00
3th	1.01
4th	1.01
5th	1.03
6th	1.02
7th	0.98
8th	0.98
9th	0.98
10th	1.01
mean	1.00
SD	0.02
CV(%)	1.95

2.4. N₂O 배출계수 산정 방법

본 연구에서는 「온실가스-에너지 목표관리제 지침」에서 제시하고 있는 굴뚝연속자동측정기에 의한 배출량 산정방법을 이용하여 부생가스 발전의 N₂O 배출계수를 개발하였다. 실시간으로 측정된 N₂O 농도를 이용하여 배출계수를 산정하기 위해서 굴뚝연속자동측정기에 의한 배출량 산정방법을 이용하였다. N₂O 농도는 PAS를 이용하여 연속적으로 측정하고 일평균 자료를 기준으로 계산하였다. 배출 유량과 연료 사용량, 발열량, 밀도는 업체로부터 제공 받아 사용하였다. N₂O 배출계수는 식 (1)을 이용하여 산정하였다.

$$EF_{N_2O} = [C_{N_2O} \times K \times Q_{day} \times 10^6] / (W_{day} \times N) \quad (1)$$

EF_{N₂O} : N₂O 배출계수(kgN₂O/TJ)

C_{N₂O} : 일평균 N₂O 농도(ppm, 건연소가스 기준)

K : 44/22.4(kg/m³)

Q_{day} : 배출 유량(kNm³/day)¹⁾

W_{day} : 연료 사용량(m³/day)

N : 부생가스의 일평균 발열량(순발열량)(kJ/m³)

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. PAS 방법을 이용한 부생가스 발전의 N₂O 농도

본 연구에서는 부생가스 발전시설의 N₂O 배출계수를 개발하기 위해 PAS LSE-4405 측정 장비를 이용하여 실시간으로 배기가스의 N₂O 농도를 측정하였다. 총 6차, 3일씩 두 번에 걸쳐 배기가스의 N₂O 농도를 측정하였으며, 부생가스를 이용한 발전시설의 N₂O 농도 연속측정 결과는 Table 4와 같다.

1차 ~ 3차 기간동안 측정된 평균 N₂O 농도는 0.32 ppm이며, 최댓값은 0.51 ppm, 최솟값은 0.11 ppm으로 나타났다. 1차 측정의 경우, 평균 0.39 ppm으로 최댓값이 0.51 ppm, 최솟값이 0.17 ppm으로 나타났으며, 표준편차는 0.16으로 나타났다. 2차 측정값의 경우, 평균 0.32 ppm으로 최댓값이 0.46 ppm, 최솟값이 0.18 ppm으로 나타났으며, 표준편차는 0.05으로 나타났다. 3차 측정값의 경우, 평

Table 4. Continuous measurement N₂O concentration of by-product gas power plant

(Unit: ppm)

Measurement	Max.	Min.	Mean	SD
1st	0.51	0.17	0.39	0.16
2nd	0.46	0.18	0.32	0.05
3th	0.36	0.11	0.25	0.05
1st ~ 3th mean	0.51	0.11	0.32	0.09
4th	0.53	0.26	0.34	0.03
5th	0.69	0.20	0.43	0.07
6th	0.65	0.12	0.30	0.11
4th ~ 6th mean	0.69	0.12	0.35	0.07
mean	0.69	0.11	0.34	0.08

균 0.25 ppm으로 최댓값이 0.36 ppm, 최솟값이 0.11 ppm으로 나타났으며, 표준편차는 0.05로 나타났다.

4차 ~ 6차 기간동안 측정된 평균 N₂O 농도는 0.35 ppm이며, 최댓값은 0.69 ppm, 최솟값은 0.12 ppm으로 나타났다. 4차 측정값의 경우, 평균 0.34 ppm으로 최댓값이 0.53 ppm, 최솟값이 0.26 ppm으로 나타났으며, 표준편차는 0.03로 나타났다. 5차 측정값의 경우, 평균 0.43 ppm으로 최댓값이 0.69 ppm, 최솟값이 0.20 ppm으로 나타났으며, 표준편차는 0.07으로 나타났다. 6차 측정값의 경우, 평균 0.30 ppm으로 최댓값이 0.65 ppm, 최솟값이 0.12 ppm으로 나타났으며, 표준편차는 0.11으로 나타났다.

부생가스 발전의 전체 연구기간 동안의 N₂O 평균값은 0.34 ppm으로 나타났으며, 최댓값은 0.69 ppm, 최소값은 0.11 ppm로 나타났다. 전체 표준편차는 0.08로 확인하였다. 본 연구의 부생가스는 철강 공정에서 부생으로 생성되기 때문에 연료 투입량 및 연료의 구성 성분이 일정하지 않기 때문에 농도의 레인지가 넓게 측정된 것으로 보이며, 표준편차 값도 일반적인 값보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

3.2. 부생가스 발전시설의 연료 특성 분석

대상 발전시설은 철강 생산에서 발생하는 부생가스를

1) Nm³: 0°C, 1atm 기준

이용하여 발전하고 있기 때문에, 부생가스 각각을 구분하지 않고 혼합하여 연료로 사용하고 있다. 제철공정에서 생성되는 부생가스는 혼합율이 일정하지 않기 때문에 N₂O 농도와 배출계수 산정에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 연구기간 동안의 부생가스의 혼소율을 확인하여 Table 5로 나타내었다. 부생가스 혼합 비율 확인 결과, 코크스가스는 부생가스의 평균 2.39%의 비중을 차지하고, 고로가스는 79.59%, 전로가스는 7.27%를 차지하는 것으로 나타났다.

Table 6에서는 대상 발전시설의 코크스가스 발열량과 2006 IPCC 가이드라인의 발열량 기본값을 비교하였다. 대상 발전시설의 코크스가스 평균 발열량은 8,514 kcal/kg으로 나타났으며, 최댓값은 8,646 kcal/kg, 최솟값은 8,317 kcal/kg, 표준편차는 116.70으로 나타났다. 본 연구의 코크스가스의 평균 발열량은 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하는 코크스가스의 발열량보다 7.89% 낮게 나타났으나, 95% 신뢰구간인 4,681 kcal/kg ~ 18,391 kcal/kg에 포함되는 것으로 확인하였다.

Table 7은 대상 발전시설의 고로가스의 발열량과 2006 IPCC 가이드라인(Gómez et al., 2006)에서 제시하는 고로가스의 발열량을 비교하였다. 대상 발전시설의 고로가스 평균 발열량은 625 kcal/kg으로 나타났으며, 최댓값은 638 kcal/kg, 최솟값은 611 kcal/kg, 표준편차는 9.42로 나타났다. 본 연구의 고로가스 발열량은 2006 IPCC 가이드라인의 발열량보다 5.94% 높게 나타났으나, 95% 신뢰구간인 287 kcal/kg ~ 1,194 kcal/kg에 포함되는 것으로 확인하였다.

Table 5. By-product gas co-firing rate

Measurement	Coke oven gas	Blast furnace gas	Linz-Donawitz converter gas
1st	3.06%	91.48%	5.46%
2nd	3.80%	91.52%	4.67%
3th	1.61%	89.99%	8.39%
4th	1.17%	68.79%	9.14%
5th	1.97%	69.22%	6.53%
6th	2.73%	66.51%	9.41%
mean	2.39%	79.59%	7.27%

Table 6. Comparison of coke oven gas calorific value between this study and IPCC

(Unit: kcal/kg)

Measurement	Coke oven gas calorific value	
	This study	IPCC
1st	8,641	9,243 (4,681 ~ 18,391)*
2nd	8,646	
3th	8,563	
4th	8,317	
5th	8,446	
6th	8,469	
mean	8,514	
max.	8,646	
min.	8,317	
SD	116.70	

* 95% of the calorific value suggested by the 2006 IPCC guidelines
Lower and upper bounds of the confidence interval

Table 7. Comparison of blast furnace gas calorific value between this study and IPCC

(Unit: kcal/kg)

Measurement	Blast furnace gas calorific value	
	This study	IPCC
1st	611	590 (287 ~ 1,194)*
2nd	616	
3th	621	
4th	633	
5th	631	
6th	638	
mean	625	
max.	638	
min.	611	
SD	9.42	

* 95% of the calorific value suggested by the 2006 IPCC guidelines
Lower and upper bounds of the confidence interval

Table 8. Comparison of Linz-Donawitz converter gas calorific value between this study and IPCC
(Unit: kcal/kg)

Measurement	Linz-Donawitz converter gas calorific value	
	This study	IPCC
1st	1,216	1,686 (909 ~ 3,582)*
2nd	1,232	
3th	1,252	
4th	1,087	
5th	1,132	
6th	1,101	
mean	1,170	
max.	1,252	
min.	1,087	
SD	65.52	

* 95% of the calorific value suggested by the 2006 IPCC guidelines
Lower and upper bounds of the confidence interval

Table 9. Calorific value of by-product gas considering co-firing rate
(Unit: kcal/kg)

Measurement	Coke oven gas	Blast furnace gas	Linz-Donawitz converter gas	Calorific value considering co-firing rate
1st	8,641	611	1,216	889.79
2nd	8,646	616	1,232	950.24
3th	8,563	621	1,252	802.17
4th	8,317	633	1,087	631.95
5th	8,446	631	1,132	677.22
6th	8,469	638	1,101	759.47
Weighted mean	8,514	625	1,170	786.11
SD	116.48	9.68	65.55	111.26

대상 발전시설의 전로가스의 발열량과 2006 IPCC 가이드라인에서 제시한 기본값을 비교하여 Table 8에 나타내었다. 대상 발전시설의 전로가스 평균 발열량은 1,170 kcal/kg으로 나타났으며, 최댓값은 1,252 kcal/kg, 최솟값은 1,087 kcal/kg, 표준편차는 65.52로 나타났다. 본 연구의 전로가스 발열량은 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하는 전로가스의 발열량인 1,686 kcal/kg보다 낮게 나타났지만, 최대 최솟값, 평균값 모두 95% 신뢰구간인 909 kcal/kg ~ 3,582 kcal/kg에 포함되는 것으로 확인하였다.

Table 9에서는 대상 발전시설의 측정 회차별로 코크스 가스, 고로가스, 전로가스의 발열량을 연료 사용량 기준으로 가중평균하여 평균 발열량과 표준편차를 나타내었다. 가중평균 결과, 전체 연구기간 동안의 부생가스의 평균 발열량은 786.11 kcal/kg, 표준편차는 111.26으로 나타났다.

3.3. N₂O 배출계수 산정 결과 및 비교

본 연구에서는 실측을 통해 N₂O 배출계수를 산정하였으며, 결과를 Table 10에 나타내었다. 배출계수 산정 결과, N₂O 배출계수 평균값은 0.69 kgN₂O/TJ, 최댓값은 0.98 kgN₂O/TJ, 최솟값은 0.57 kgN₂O/TJ으로 분석되었으며, 표준편차는 0.17로 확인하였다.

부생가스와 관련된 선행연구들의 N₂O 배출계수는 부생가스별로 제시되어 있다. 본 연구의 대상시설은 코크스 가스, 고로가스, 전로가스를 혼합하여 연소시켜 발전하기 때문에, 직접 비교의 어려움이 있다. 부생가스 혼소에 따른 배출계수와 관련하여 참고할 만한 관련 계수가 없기 때문에 IPCC와 EPA (US EPA, 2013)에서 제시하고 있는 부생가스별 배출계수와 비교하였다.

Table 10. Results of calculated N₂O emission factor
(Unit: kgN₂O/TJ)

Measurement	N ₂ O emission factor
1st	0.70
2nd	0.57
3th	0.46
4th	0.79
5th	0.98
6th	0.64
mean	0.69
SD	0.17

Table 11. Comparison of by-product gas N₂O emission factor among this study, IPCC and EPA

(Unit: kgN₂O/TJ)

N ₂ O emission factor			Lower ²⁾	Upper ²⁾
2006 IPCC Guideline	Coke oven gas	0.1	0.03	0.3
	Blast furnace gas	0.1	0.03	0.3
	Linz-Donawitz converter gas	0.1	0.03	0.3
2014 EPA National Emissions Inventory	Coke oven gas	0.09	-	-
	Blast furnace gas	0.09	-	-
This study	By-product gas	0.69	-	-

2006 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 코크스가스, 고로가스, 전로가스의 N₂O 배출계수는 0.1 kgN₂O/TJ이다. 2014년 EPA가 제출한 National Emissions Inventory는 코크스가스와 고로가스의 N₂O 배출계수는 0.09 kgN₂O/TJ를 제시하였다. 이는 Table 11로 나타내었다. 본 연구의 부생가스 N₂O 배출계수는 IPCC에서 제시하는 부생가스의 상한값인 0.3 kgN₂O/TJ보다 0.39 kgN₂O/TJ 높게 산정되었으며, EPA에서 제시하고 있는 N₂O 배출계수보다 0.6 kgN₂O/TJ 높게 산정되었다. 부생가스의 발전은 연료의 특성상 일정한 사용량 및 발열량 관리가 어렵기 때문에 IPCC의 값과 차이가 있게 산정된 것으로 추정된다. 또한, 철강 공정에서의 계절적 차이가 없다고 판단하여 본 연구에서는 총 6차에 걸쳐 N₂O 농도를 측정하여 연간 평균 농도라고 가정하여 배출계수를 산정하였다.

4. 결론

본 연구는 부생가스를 이용하여 전력을 생산하는 발전 시설을 대상으로 총 6차에 걸쳐 실시간으로 N₂O 농도를 측정하여 부생가스 혼소 사용에 따른 N₂O 배출계수를 개발하였다.

대상 발전시설은 코크스가스, 고로가스, 전로가스 혼소를 조사 결과, 코크스가스는 부생가스의 평균 2.39%의 비중을 차지하고, 고로가스는 79.59%, 전로가스는 7.27%를 차지하는 것으로 나타났다. 부생가스 발전의 평균 N₂O 농

도는 0.34 ppm로 나타났으며, N₂O 배출계수는 0.69 kgN₂O/TJ으로 산정되었다.

2006 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 코크스가스, 고로가스, 전로가스의 N₂O 배출계수는 0.1 kgN₂O/TJ이고 95% 신뢰구간은 0.03 ~ 0.3 kgN₂O/TJ이며, 2014년 EPA가 제출한 National Emissions Inventory는 코크스가스와 고로가스의 N₂O 배출계수는 0.09 kgN₂O/TJ이다. 본 연구의 부생가스 N₂O 배출계수는 IPCC에서 제시하는 부생가스의 상한값인 0.3 kgN₂O/TJ보다 0.39 kgN₂O/TJ 높게 산정되었으며, EPA에서 제시하고 있는 N₂O 배출계수보다 0.6 kgN₂O/TJ 높게 산정되었다.

IPCC에서 제공하는 Tier 1 기본 N₂O 배출계수는 국내의 연소 시설 및 기술 등을 반영하지 못하기 때문에 부생가스 발전의 국가고유 N₂O 배출계수가 개발되어야 한다고 판단된다. 본 연구는 우리나라의 온실가스 인벤토리 신뢰성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

실시간 측정 방법 중 하나인 광음향 분광법, PAS를 이용하여 실시간으로 N₂O 농도를 측정하였으며, N₂O 농도 상대적으로 농도 분포가 크기 때문에 신뢰성 있는 온실가스 배출량 관리를 위해서는 연속 측정을 통한 온실가스 배출량 산정 방법이 적용될 필요성이 있다.

국내의 부생가스를 이용한 발전시설은 국내의 두 철강 업체에서만 운영하고 있으며, 본 연구는 국내 두 업체 중 한 곳의 부생가스 발전시설을 대상으로 현장에서 N₂O 농도를 측정하여 N₂O 배출계수를 개발하였다. 국내의 두 발전시설을 대상으로 연구를 진행한다면 신뢰도 높은 부생가스 발전시설의 국가고유배출계수 개발로 국가 온실가스 인벤토리에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사사

환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었습니다.

References

- da Silva MG, Miklós A, Falkenroth A, Hess P. 2006. Photoacoustic measurement of N₂O concentrations in ambient air with a pulsed optical parametric oscillator. *Appl Phys B* 82: 329-336.

2) IPCC는 95% 신뢰구간에서 하한값과 상한값을 제시하고 있음.

- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center). 2021. National greenhouse gas inventory report of Korea. Seoul, Korea: GIR. National Report.
- Gómez DR, Watterson JD, Americano BB, Ha C, Marland G, Matsika E, Namayanga LN, Osman-Elasha B, Saka JDK, Treanton K. 2006. Stationary combustion. In: Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds). The 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2. Energy. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies. p. 2.1-2.47.
- JISF (The Japan Iron and Steel Federation). 2023. Technologies to support COURSE 50; [accessed 2023 May 30]. <https://www.course50.com/en/technology/technology03/>
- Jo SH, Roh JH, 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 Chang Res* 12(2): 137-142. doi: 10.15531/kscrcr.2021.12.2.137
- Kang SY, Kim SJ, Kang SM, Lee JW, Cho CS, Sa JH, Jeon EC. 2014. A study on N₂O measurement characteristics using Photoacoustic Spectroscopy (PAS). *Sensors* 14(8): 14399-14410. doi: 10.3390/s140814399
- Kang SY. 2015. Comparison of N₂O emissions by greenhouse gas emission estimation method [dissertation] (in Korean with English abstract). Sejong University.
- MOTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy), KEEI (Korea Energy Economics Institute). 2021. Yearbook of energy statistics. Ulsan, Korea: KEEI.
- The Government of the Republic of Korea. 2021. The Republic of Korea's enhanced update of its first nationally determined contribution.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency). 2013. Emission factors for greenhouse gas inventories. Washington, DC: US EPA.