



우드칩 유동층보일러의 Non-CO₂ 배출계수 개발

정재현* · 노준영** · 이화수*** · 전의찬****†

*서울시청 물재생센터 난지물재생센터, **세종대학교 기후변화협동과정 석사과정학생,
동의과학대학교 화학공업과 교수, *세종대학교 환경에너지융합학과

Development of Non-CO₂ Emission Factor of Wood Chip Fired Fluidized Bed Combustion

Jeong, Jae Hun*, Roh, Joon Young**, Lee, Hwa Su*** and Jeon, Eui Chan****†

*Researcher, Nanji Sewage Treatment Center, Seoul Metropolitan Government, Republic of Korea

**M.S. Student, Climate Change Research Center, Sejong Univ, Republic of Korea

***Professor, Department of Chmical industry, Dong-Eui Institute of Technology, Republic of Korea

****Professor, Dept. of Environment, Energy & Geoinformatics, Sejong Univ, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, the development of the non-CO₂ emission factors from a fluidized bed boiler were evaluated. In total, 0.22 kg CH₄/TJ and 7.04 kg N₂O/TJ were observed. CH₄ showed a maximum difference of 13.6 times that measured in overseas studies, while N₂O showed a maximum difference of 1.42times. The results of this study were compared with other studies conducted in Korea, with 6.4-fold CH₄ and 1.76-fold N₂O detection.

Key words: Non-CO₂, Emission Factor, Climate Change, Fluidized Bed Boiler

1. 서 론

신기후체제의 기반이 되는 파리협정 (Paris Agreement)은 2015년 파리에서 개최된 UNFCCC 당사국총회 (COP21)에서 채택되었다. 신기후체제에서는 개도국을 포함한 모든 당사국이 온실가스 감축에 동참하며, 각 국가가 제출한 자발적 감축 공약 (INDC)에 대한 국제 이행점검 (Global Stotaking)이 2023년부터 시행된다. 온실가스감축의 국제 이행점검을 대비해 온실가스 인벤토리의 정확성 및 신뢰성 확보에 대한 중요성이 커지고 있다.

본 연구의 대상시설인 순환유동층보일러는 저급 석탄 뿐 아니라 폐기물 에너지를 RPF, RDF, 바이오매스 (우드펠릿, 우드칩 등)와 같은 재생에너지를 혼합 연소할 수 있는 기술로서 상대적으로 연소효율이 좋은 시설이다 (조현구, 2015). RPS 제도 시행 의무를 이행해야 하는 발전소에서 주목하고 있는 기술이다 (이충호, 2015).

CH₄, N₂O 등 Non-CO₂ 온실가스는 CO₂와 비교하여 발생

량은 작지만, 지구온난화지수 (Global Warming Potential)가 매우 높으므로 중요하게 다루어야 할 온실가스이다. Non-CO₂ 온실가스의 배출 특성은 연료 특성, 연소 조건, 연소 기술 등 여러 인자들의 영향을 많이 받기 때문에 2006 IPCC 가이드라인에서는 Tier 1 수준보다 높은 수준인 Tier 2 혹은 Tier 3 수준의 배출계수를 이용하여 배출량을 산정할 것을 권고하고 있다.

우리나라의 경우, 화석연료 연소에 의한 CO₂ 배출계수와 Non-CO₂ 배출계수에 대한 연구는 비교적 많이 진행되었다. 탄소 배출계수는 에너지법 시행규칙 제 5조에 따라 5년마다 에너지열량 환산기준이 고시되고 있으며 Non-CO₂ 배출계수는 2017년 온실가스종합정보센터에서 연소유형별 배출계수를 고시하였다. 그러나 바이오매스연료 연소에 의한 Non-CO₂ 온실가스 배출계수에 대한 연구는 많이 진행되지 않은 상황다. 본 연구에서는 재생에너지로서 중요성이 커지고 있는 우드칩 유동층보일러를 대상으로 Non-CO₂ 온실가스 배출계수를 개발하여 우리나라 온실가스 인벤토리의 신뢰도

† Corresponding author: ecjeon@sejong.ac.kr (209, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05006, Republic of Korea, 82-2-3408-4353)
Received June 10, 2019 / Revised July 24, 2019 / Accepted August 28, 2019

를 향상시키고자 한다.

2. 연구방법

순환유동층보일러의 Non-CO₂ 배출계수를 산정하기 위해 연료와 배출가스 농도를 분석하였다. 본 연구의 순환유동층 보일러 설비용량은 400 MW이고 노내 연소온도는 850~950°C이다. 연료 특성은 발열량분석, 원소분석, 공업분석을 이용하여 총발열량과 탄소 (C) 및 수소 (H) 함량, 그리고 총수분 등을 분석하였다. 배출가스의 농도는 GC-FID와 GC-ECD를 이용하여 분석하였고, TMS의 유량 및 온도 자료를 이용하여 Non-CO₂ 배출계수를 개발하였다.

2.1 연료 분석

2.1.1 발열량분석

발열량은 IKA사의 자동열량분석기 (IKA-C2000, Germany)를 이용하여 분석하였다. 표준시료로는 'Benzoic Acid C 723'을 사용하였다.

2.1.2 원소분석

원소분석은 시료 중의 탄소 (Carbon), 수소 (Hydrogen), 질소 (Nitrogen), 황 (Sulfide), 그리고 산소 (Oxygen) 함량을 측정하는 분석방법이다. 본 연구에서는 자동원소분석기 (Thermo Finnigan-Flash EA 1112, USA)를 이용하였다.

2.1.3 공업분석

공업분석은 중량분석기 (TGA-701)을 이용하여 분석하였다. 표준시료로는 0.75% Sulfur in Coal PROX-X IARM No.HC-30075B, 3.00% Sulfur in Coal PROX-X IARM No.HC-30300B, 그리고 5.00% Sulfur in Coal PROX-X IARM No.HC-30500B를 사용하였다.

2.2 배출가스 시료 채취

순환유동층보일러에서 배출되는 CH₄ 및 N₂O를 채취하기 위하여 간헐적 포집방법 (EPA Method 18)을 적용하였다. 채취방법은 장치 내부의 압력을 감소시킨 뒤 내·외부의 압력차를 이용하여 시료를 채취하는 진공포집법 (lung sampler)을 사용하였다.

배출가스에 포함된 수분은 시료채취장치 전단에 공병과 실리카겔 (6 mesh ~ 16 mesh 크기의 변색 지시형)로 구성된

흡습병을 설치하여 제거하였으며, 시료포집용기는 10 L 용량의 Tedlar bag (SKC, US)을 이용하였다.

2.3 배출가스 농도 분석

2.3.1 CH₄ 농도 분석

순환유동층보일러 배출가스의 CH₄ 농도 분석은 기체크로마토그래피 (CP-3800, Varian)를 이용하였고, Detector로는 GC-FID를 이용하였다. Stainlesssteel 길이 1 m, 외경 3.175 mm의 PorapakQ 80/100mesh컬럼 (Restek)을 사용하였으며, 컬럼과 수소의 유량은 각각 30 ml/min, 공기는 300 ml/min로 설정하였다. Injector, FID, Oven의 온도는 각각 120°C, 250°C, 70°C로 설정하였으며, 운반 가스는 초고순도 질소 (N₂ 99.999%)를 이용하였다.

2.3.2 N₂O 농도 분석

N₂O 농도 분석은 기체크로마토그래피 (CP-3800, Varian)를 이용하였고, Detector로는 GC-ECD를 이용하였다. Stainlesssteel 길이 3 m, 외경 3.175 mm의 PorapakQ 80/100 mesh 컬럼을 사용하였으며, injector, ECD, Oven 온도는 각각 120°C, 320°C, 70°C로 설정하였다. 운반 가스는 초고순도질소 (N₂ 99.999%)를 이용하였다.

2.4 Non-CO₂ 배출계수 산정

연료 분석 결과와 순환유동층보일러 배출가스의 농도 측정 결과를 이용하여 다음과 같은 식으로 배출계수를 산정하였다.

$$EF_{CH_4} = C_{CH_4} \times G'_0 + (m-1) \times A_0 \times MW / V_m / NCV \quad (1)$$

여기에서,

EF_{CH_4} : CH₄ 배출계수 (kgCH₄/TJ)

C_{CH_4} : 배출가스 중의 CH₄ 농도 (ppm)

G'_0 : 이론 배출가스량 (건조) (Nm³/kg)

m : 공기비 (실제공기량/이론공기량)

A_0 : 이론공기량 (Nm³/kg)

MW : CH₄의 분자량 (정수) (=16g/mol)

V_m : 표준상태에서 이상기체 1몰의 체적 (=22.4L/mol)

NCV : 연료의 순발열량 (MJ/kg)

공기비 m 은 다음과 같은 식으로 산정하였다.

$$m = \frac{21}{21 - C_{O_2}} \quad (2)$$

C_{O_2} : 배출가스 중의 O₂ 농도 (%)

N₂O에 대한 배출계수 산정도 CH₄와 같은 방법으로 산정하였다.

$$EF_{N_2O} = C_{N_2O} \times G'_0 + (m - 1) \times A_0 \times MW / V_m / NCV \quad (3)$$

여기에서,

EF_{N_2O} : N₂O 배출계수 (kgN₂O/TJ)

C_{N_2O} : 배출가스 중의 N₂O 농도 (ppm)

G'_0 : 이론 배출가스량 (건조) (Nm³/kg)

m : 공기비 (실제공기량/이론공기량)

A_0 : 이론공기량 (Nm³/kg)

MW : N₂O의 분자량 (정수) (=44 g/mol)

V_m : 표준상태에서 이상기체 1몰의 체적 (=22.4 L/mol)

NCV : 연료의 발열량 (MJ/kg)

3. 연구결과 및 고찰

3.1 사용 연료의 분석결과

3.1.1 발열량 분석 결과

연료의 발열량 분석은 시료 3개를 각각 3회 반복 분석하였으며, 결과는 Table 1에 제시하였다. 연료의 발열량 (3회 평균)은 1차 4,342 kcal/kg, 2차 4,338 kcal/kg, 3차 4,285 kcal/kg으로 나타났다.

3.1.2 원소분석 결과

연료의 원소분석은 시료 3개를 각각 4회 실시하였으며, 결과는 Table 2에 제시하였다. 원소분석 결과 탄소 함량 (4회 평균값)의 경우 1차 46.55%, 2차 47.83%, 3차 50.10%로 나타났으며, 수소 함량 (4회 평균값)의 경우 1차 5.90%, 2차 5.92%, 3차 6.30%로 나타났다. 질소 함량 (4회 평균값)의 경우 1차 1.62%, 2차 1.85%, 3차 1.39%로 나타났으며, 황 함량 (4회 평균값)의 경우 1차 0.07%, 2차와 3차는 0%로 나타났다.

3.1.3 공업분석 결과

연료의 공업분석은 시료 4개를 각각 3회 분석하여 평균값을 산정하였다. 분석한 결과는 Table 3에 나타내었다.

분석결과 고유수분 (3회 평균값)은 1차 7.41%, 2차 7.11%, 3차 7.16%로 나타났으며, 휘발분 (3회 평균값)의 경우 1차 72.52%, 2차 72.87%, 3차 72.40%로 나타났다. 회분 (3회 평균값)의 경우 1차 1.14%, 2차 1.13%, 3차 1.36%로 나타났으며

Table 1. Gross calorific value of woodchip

(Unit : kcal/kg)

No.		Gross Calorific Value	Number of samples
1	mean	4,342	3
	SD	37.90	
2	mean	4,338	3
	SD	6.66	
3	mean	4,285	3
	SD	22.50	

Table 2. Elementary analysis of woodchip

(Unit : %)

No.		C	H	N	S	Number of samples
1	mean	46.55	5.90	1.62	0.07	4
	SD	0.26	0.07	1.01	0.14	
2	mean	47.83	5.92	1.85	0.00	4
	SD	1.56	0.15	0.81	0.00	
3	mean	50.10	6.30	1.39	0.00	4
	SD	0.29	0.13	0.34	0.00	

Table 3. Proximate analysis of woodchip

(Unit : %)

No.		Inherent Moisture	Volatile Matter	Ash	Fixed Carbon	Number of samples
1	mean	7.41	72.52	1.14	18.93	3
	SD	0.09	0.15	0.16	0.30	
2	mean	7.11	72.87	1.13	18.89	3
	SD	0.02	0.14	0.05	0.11	
3	mean	7.16	72.40	1.36	19.08	3
	SD	0.15	0.47	0.11	0.49	

Table 4. CH₄ concentration of samples

(Unit : ppm)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	mean	SD
1st	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.74	0.33	0.33	1.10	0.47	0.26
2nd	0.33	0.33	1.78	0.52	0.40	0.73	0.33	0.47	0.38	0.59	0.44
3th	1.97	0.32	0.94	0.33	1.15	0.35	0.31	1.43	0.35	0.79	0.58

Table 5. N₂O concentration of samples

(Unit : ppm)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	mean	SD
1st	11.15	8.70	11.03	9.67	11.34	10.35	13.39	13.76	8.38	10.86	1.75
2nd	11.41	12.16	2.63	11.10	11.16	8.58	10.48	8.79	11.99	9.81	2.81
3th	8.80	10.64	8.16	13.4	5.96	12.88	13.73	5.02	10.98	9.95	3.00

며, 고정탄소 (3회 평균값)의 경우 1차 18.93%, 2차 18.89%, 3차 19.08%로 나타났다.

3.2 순환유동층보일러 배출가스의 CH₄ 농도 분석

순환유동층보일러의 배출가스 시료는 3차에 걸쳐 총 27개를 포집하여 측정하였다. Table 4에서 보는 바와 같이 배출가스 내의 CH₄ 평균 농도는 1차 0.47 ppm, 2차 0.59 ppm, 3차 0.79 ppm으로 나타났다.

3.3 순환유동층보일러 배출가스의 N₂O 농도 분석

순환유동층보일러의 배출가스 시료는 3차에 걸쳐 총 27개를 포집하여 측정하였다. Table 5에서 보는 바와 같이 배출가스 내의 N₂O 평균 농도는 1차 10.86 ppm, 2차 9.81 ppm, 3차 9.95 ppm으로 나타났다.

3.4 순환유동층보일러의 Non-CO₂ 배출계수 산정

우드칩을 연료로 사용하는 순환유동층보일러의 Non-CO₂ 배출계수를 산정하였다. Non-CO₂ 배출계수 산정은 CH₄의 경우 식 (1), N₂O의 경우 식 (3)을 이용하여 산정하였으며 결과값은 Table 6에 제시하였다. CH₄ 배출계수는 1차 실험에서 0.13 kgCH₄/TJ, 2차 실험에서 0.16 kgCH₄/TJ, 3차 실험에서 0.20 kgCH₄/TJ로 평균 0.16 kgCH₄/TJ로 산정되었다. N₂O 배출계수는 1차 실험에서 8.16 kgN₂O/TJ, 2차 실험에서 7.46 kgN₂O/TJ, 3차 실험에서 7.31 kgN₂O/TJ로 평균 7.64 kgN₂O/TJ로 산정되었다.

선행연구 결과와의 비교는 Table 7에 나타내었다. 2006 IPCC Guideline의 배출계수 값과 비교한 결과, 본 연구의 CH₄ 배출계수는 18.8배 낮게 산정되었으며, N₂O 배출계수의 경우 0.92배 높게 산정되었다. Eemeli Tsupari의 연구와 비교하여 CH₄ 배출계수는 6.25배 작게 산정되었으며, N₂O 배출계수의 경우 1.31배 작게 산정되었다. Changsang Cho의 연구

(2012)와 비교한 결과, CH₄는 8.75배 낮게 산정되었으며, N₂O는 0.52배 높게 산정되었다. 이와 같은 차이가 나타나는 이유는 연료의 조성 차이 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 우드칩을 대상으로 배출계수를 산정하였고 Eemeli Tsupari (2007)의 연구에서는 Peat (갈탄) 전소시설을 대상으로, 조창상 (2012)의 연구에서는 우드칩과 폐고형연료 혼소시설을 대상으로 연구를 진행하였기 때문에 배출계수 값의 차이가 나타난 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 우드칩을 연료로 사용하는 순환유동층보일러의 Non-CO₂ 배출계수를 산정한 것이다. 연구 결과, CH₄의 배출계수는 0.16 kgCH₄/TJ로 나타났으며 N₂O의 배출계수는 7.64 kgN₂O/TJ로 나타났다.

CH₄ 배출계수의 경우, 2006 IPCC Guideline의 배출계수 값과 비교하여 18.8배 낮게 산정되었고, Eemeli Tsupari (2007)의 연구와 비교하여 6.25배 낮게, 조창상 (2012)의 연구와는 8.75배 낮게 산정되었다.

N₂O 배출계수의 경우, 2006 IPCC Guideline의 배출계수 값과 비교하여 0.92배 높게 산정되었으며, Eemeli Tsupari (2007)의 연구와 비교하여 1.31배 낮게, 조창상 (2012)의 연구와는 0.52배 높게 산정되었다.

선행연구와의 배출계수 값 차이는 연료의 성상과 연소시설의 운영조건이 다르기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 본 연구에서는 우드칩 전소시설을 대상으로 연구를 진행하였고, Eemeli Tsupari (2007)의 연구에서는 Peat (갈탄) 전소시설을 대상으로, 조창상 (2012)의 연구에서는 우드칩과 폐고형연료 혼소시설을 대상으로 연구를 진행하였기 때문에 배출계수 값의 차이가 나타난 것으로 판단된다.

본 연구에서는 배출가스 포집방식으로 간헐포집방식을 이용하였는데, 간헐포집방식은 포집시료 간 농도 편차가 있을 수 있기 때문에 다른 포집방식을 사용한 값과 다소 차이가 날 수 있을 것으로 판단된다. 이를 보완하기 위해 연속포집방식 혹은 배출가스가 발생하는 현장에서 농도 값을 측정할 수 있는 연속측정방식을 이용한 배출계수 개발 연구가 필요하다고 판단되며, 이를 통해 보다 신뢰성 높은 우드칩 연료를 사용하는 순환유동층보일러의 Non-CO₂ 배출계수 개발이 가능할 것으로 판단된다.

Table 6. CH₄ and N₂O Emission Factor

No.	CH ₄ emission factor (kgCH ₄ /TJ)	N ₂ O emission factor (kgN ₂ O/TJ)
1	0.13	8.16
2	0.16	7.46
3	0.20	7.31
mean	0.16	7.64
SD	0.03	0.37

사 사

본 연구는 환경부 “기후변화특성화대학원사업”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Lee CH, 2015, A study on the operational characteristics of

Table 7. Comparison of Non-CO₂ Emission Factors

Classification	Boiler type and Fuel	CH ₄ emission factor (kgCH ₄ /TJ)	N ₂ O emission factor (kgN ₂ O/TJ)
2006 IPCC Guideline	Fluidised Bed combustor, Peat	3	7
Eemeli Tsupari ¹⁾	CFB ²⁾ , Peat	<1	<10
Changsang Cho ³⁾	CFB, Wood Chip, RDF ⁴⁾	1.4	4.0
This Study	CFB, Wood Chip	0.16	7.64

- 1) Estimation of annual CH₄ and N₂O emissions from fluidised bed combustion: An advanced measurement-based method and its application to Finland, Eemeli Tsupari, 2007
- 2) Circulating Fluidised Bed combustor
- 3) Development of Methane and Nitrous Oxide Emission Factors for the Biomass Fired Circulating Fluidized Bed Combustion Power Plant, Changsang Cho, 2012
- 4) Refuse Derived Fuel (폐기물가공연료)

- the 500 MW super critical circulating fluidized bed boiler by changes in air ratio [dissertation], Yonsei University.
- Kang SY, 2015, Comparison of N₂O Emissions by Greenhouse Gas Emission Estimation Method [dissertation], Sejong University.
- Kim SJ, 2013, Development of Non-CO₂ emission factor of coal briquette [dissertation], Sejong University.
- Lee HJ, 2013, Analysis of Ionic Liquid Utilization and Catalytic Chemical Decomposition for Sugar Production from Woody Biomass [dissertation], Korea University.
- Hong YJ, 2016, Optimal sampling methodology for the analysis of greenhouse gases from combustion facilities [dissertation], Sejong University.
- Cho HK, 2015, A Study on the RPS Implementation with Wood Pellet Mixed Combustion for 340 MW Circulating Fluidized Bed Boiler [dissertation], Gyeongsang National University.
- Lee, SK, 2012, Development of CO₂ Emission Factor for Wood Chip Fuel and Reduction Effects, Climate Change Research Vol. 3, No. 3, 2012, p. 211~224.
- Jeong ED, 2010, Co-combustion characteristics of mixed coal with anthracite and bituminous in a circulating fluidized bed boiler [dissertation], Hanyang University.
- C. David Cooper, F.C. Alley, 2003, Air Pollution Control: A Design Approach p. 500~509.
- G. Tyler Miller, 2008, Jr., Environmental Science : Working With TheEarth p. 392 Calculation Tools for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Pulp ICFPA, 2005, and Paper Mills p. 29.
- US EPA, 2011, Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories, <https://www.epa.gov/>.