

가정용 연탄보일러의 Non-CO₂ 배출계수 개발

송가람* · 조창상** · 이대겸*** · 전의찬****

세종대학교 환경에너지융합학과*, 세종대학교 기후변화센터**, 세종대학교 기후변화협동과정***,
세종대학교 환경에너지공간융합학과****

Development of Non-CO₂ Emission Factor of the Coal Briquette Boiler

Song, Garam*, Cho, Changsang**, Lee, Deakyeom*** and Jeon, Eui Chan****†

*Dept. of Environment Energy, Sejong University

**Climate Change Research Center, Sejong University

***Cooperate Course for Climate Change, Sejong University

****Dept. of Environment Energy and Geoinformation, Sejong University

ABSTRACT

In this study, Non-CO₂ emission factors were estimated for the coal briquette boiler, which is the Korean heating system. As a result, the CH₄ and N₂O emission factors of the coal briquette boiler were estimated to be 11.76 kgCH₄/TJ and 7.44 kgN₂O/TJ, respectively. The results showed that CH₄ emission factor was 12 times and N₂O emission factor was 5 times higher than IPCC default value. Also the emission factors developed in this study were compared with a precedent study. The results indicated that were similar to open the air inlet of coal briquette stove because the combustion condition of this study was similar to that of coal briquette stove.

Key words: The Coal Briquette Boiler, Non-CO₂, Greenhouse Gas, Emission Factor, Climate Change

1. 서 론

우리나라의 2013년 온실가스 총배출량은 694.5백만톤 CO₂eq이며, 이 중 에너지 분야의 온실가스 배출량은 약 606.2백만톤 CO₂eq으로 전년 대비 약 1.5% 증가하였다. 이 중 연료연소에 의한 온실가스 배출량은 에너지 분야 온실가스 배출량의 99.2%를 차지하였다. 연료연소에서 배출되는 온실가스는 CO₂, CH₄, N₂O 등이며, 총배출량에서 차지하는 비율은 CO₂ 91.5%, CH₄ 3.7%, N₂O 2.0%로 조사되었다(National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea, 2015). 이 중 CH₄와 N₂O의 배출량은 CO₂ 배출량에 비하여 매우 작으나, CH₄와 N₂O의 지구온난화지수(Global Warming Potential; GWP)가 CO₂ 지구온난화지수의 21배, 310배에 달하므로(National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea, 2016), IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), WRI/WBCSD(World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development)

등 주요 기관에서는 CO₂와 더불어 CH₄와 N₂O에 대한 배출량 및 배출계수를 중요한 지표로 설정하고 있다(IPCC, 2006; WRI/WBCSD 2005). 연료 연소에서 주로 배출되는 CO₂는 연료의 탄소함량에 의해 결정되나, CH₄, N₂O와 같은 Non-CO₂ 배출계수는 연소 방법 및 연소 조건 등에 따라 달라지게 된다(IPCC, 2006). 연탄은 에너지총조사보고서에서 별도 항목으로 사용량을 조사하고 있지만(Korea Energy Economics Institute, 2014), 우리나라의 온실가스 인벤토리에서는 무연탄 사용에 따른 온실가스 배출량에 포함하여 산정하고 있다. 연탄 제조 시 사용되는 무연탄은 2014년 기준 약 188만톤이 소비됐으며, 이 중 가정상업부문에서 약 163만톤이 소비됐다(Korea Energy Economics Institute, 2015). 이는 전체 무연탄 사용량의 86%를 차지하고 있다. 그러나 연탄의 연소특성은 무연탄의 연소특성과 상이하며, 산화계수 또한 다르므로 연탄의 온실가스 배출량을 별도로 산정하는 것이 바람직하다(Lee, 2011). 따라서 본 연구에서는 우리나라의 고유 연소방식인 연탄보일러를 대상으

† Corresponding author: ecjeon@sejong.ac.kr

Received May 19, 2017 / Revised June 15, 2017 / Accepted June 23, 2017

로 Non-CO₂ 배출계수를 개발하였다. 개발된 배출계수는 IPCC에서 제시하고 있는 무연탄의 기본배출계수 및 선행연구의 결과와 비교 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 배기가스 시료 채취 및 농도 분석 방법

본 대상 연소시설은 주로 겨울에 사용되므로, 현장조사를 2015년 12월, 2016년 1월과 2월에 실시하였다. 분석용 시료는 하루 3회씩 3일간 포집하여 실험실에서 분석을 수행하였다. 현장조사 대상시설은 광진구에 있는 연탄보일러 사용 가구로 Fig 1과 같다.

연탄보일러에서 배출되는 배기가스는 Fig 2와 같은 방법(US EPA, 2000)으로 시료를 채취하였다. 10L Tedlar bag(SK, US)을 Lung sampler(ACEN, KOREA)에 연결하고, Lung sampler의 음압 펌프를 이용해 내부를 진공으로 만들어 시료를 포집하였다.

채취된 시료는 실험실에서 GC-FID와 GC-ECD를 이용하여 Non-CO₂ 농도를 분석하였다. CH₄ 분석에는 GC-FID를 사용하였으며, 외경 3.175 mm의 Porapak Q 80/100 mesh 컬럼, 1 m의 Stainless steel 컬럼을 사용하였다. 또한, N₂O 분석에는 GC-ECD를 사용하였으며, 컬럼은 Porapak Q 80/100 mesh를 충전한 1/8인치 직경의 1 m와 3 m의 Stainless Steel packed 컬럼을 사용하였다. GC-FID와 GC-ECD의 분석조건은 Table 1과 같다.

CH₄와 N₂O의 정량분석을 위해, CH₄는 총 6개의 다른 농도인 0.1 ppm, 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm의 표준시

료를 제조하여 검량선을 작성했다. CH₄의 검량선 작성 결과, Fig 3(a)에서 보는 바와 같이 검량선의 R² 값은 0.9979로 매우 우수한 직선성을 나타냈다.

또한, N₂O는 총 4개의 다른 농도인 0.1 ppm, 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm의 표준시료를 제조하여 검량선을 작성했다. Fig 3(b)에서 보는 바와 같이, N₂O 검량선의 R² 값은 0.9984로, 매우 우수한 직선성을 나타냈다.

배기가스 분석의 재현성을 확인하기 위해 각각 1 ppm의 CH₄와 N₂O 표준가스(KRISS, Korea)를 각각 7회씩 분석하였다. 그 결과, Table 2와 같이 CH₄와 N₂O의 상대표준편차(RSD)는 각각 2.92%, 3.00%로 우수한 재현성을 보였다.

2.2 연료 분석 방법

2.2.1 발열량 분석 방법

발열량은 IKA사의 자동열량 분석기(IKA-C2000, Germany)를 사용하여 “KS E 3707 석탄류 및 코크스류의 발열량 측정 방법”에 따라 분석하였다. 분석용 시료는 정밀전자저울(Mettler Toledo-AB204S, Switzerland)을 이용하여 0.0001 g까지 정확히 정량하였다. 냉각수로는 증류수를 사용하고, 수온은 25°C로 설정하여 Isoperibolic at 25°C mode로 분석하였다(ISO 1928, 2009; KS E 3707, 2001; ASTM D 2015-91, 1991). 발열량 분석기의 재현성은 발열량 분석의 표준시료인 Benzoic acid(IKA, 발열량 6,320.4 cal/g)를 분석하여 평가하였다. 그 결과, 평균 표준시료의 발열량은 6,358±9 cal/g이며, 상대표준편차(RSD)는 0.14%로 우수한 재현성을 나타냈다.



Fig. 1. Coal briquette boiler in the study site.

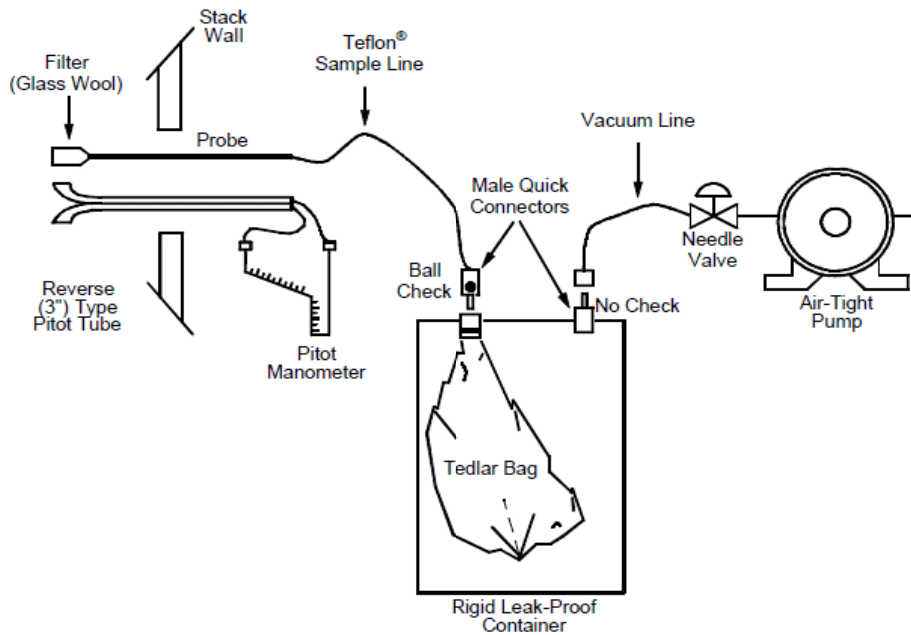


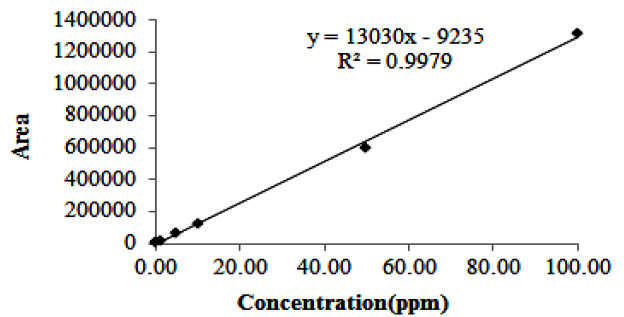
Fig. 2. Schematic diagram of intermittent sampling (US EPA).

Table 1. Analysis condition of GC for CH₄ and N₂O

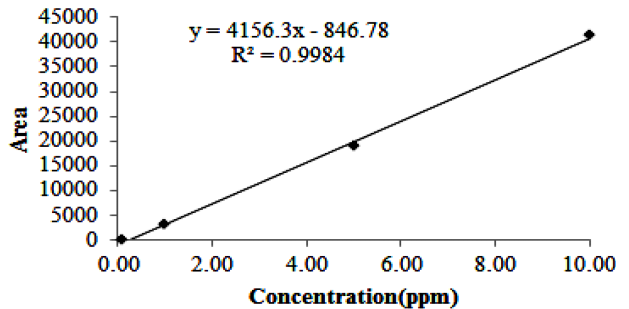
Item	GC-FID	GC-ECD	
Column	Porapack Q 80/100	Porapack Q 80/100	
Carrier gas	N ₂ (99.999%)	N ₂ (99.999%)	
Flow	30 mL/min	20 mL/min	
Oven	80°C	70°C	
Temperature	Injector	100°C	120°C
Detector	250°C	320°C	
Detector range	0	0	

2.2.2 원소 분석 방법

연탄의 탄소함량 및 수소함량은 자동원소분석기(Thermo Finnigan-Flash EA 1112, USA)를 이용하여 측정하였다. 노내 온도(Furnace temperature)는 950°C, TCD의 오븐 온도(Oven temperature)는 70°C로 설정하였고, 컬럼은 길이 2 m ParaQ-X를 사용하였다. 또한, 운반가스(He 99.999%, MS Gas Corporation), 산소(O₂ 99.99%, Dong Min Specialty Gases), reference 가스의 유량은 각각 140 mL/min, 240 mL/min, 100 mL/min으로 설정하였다(ASTM D 3176-89, 2002; ASTM D 3178-89, 2002). 원소 분석기의 재현성은 원소 분석의 표준시료인 BBOT



(a) CH₄



(b) N₂O

Fig. 3. Calibration curve with Non-CO₂ standard.

(2,5-bis(5-tert-butyl-benzoxazolyl) thiophene : C=72.59%, H=6.06%, N=6.54%, S=7.43%, O=7.42%)를 사용하여 평가하였

Table 2. Results of reproducibility test using standard gas

	CH ₄ concentration (ppm)	N ₂ O concentration (ppm)
1	0.37	0.56
2	0.36	0.56
3	0.36	0.57
4	0.36	0.58
5	0.35	0.53
6	0.34	0.56
7	0.34	0.52
Mean	0.36	0.56
Standard deviation (SD)	0.01	0.02
Relative standard deviation (RSD, %)	2.92	3.00

다. 표준시료 분석 결과, 탄소 함량은 원소 함량을 입력한 표준시료(standard)에서는 72.52%, 원소 함량을 입력하지 않고 분석한 시료(unknown)에서는 73.10%로 분석되었으며, 수소 함량은 각각 6.09%, 6.10%로 분석되었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이, 표준시료와 미지시료(unknown)의 차이는 탄소함량의 경우 0.57%, 수소함량의 경우 0.01%로 우수한 재현성을 나타냈다.

2.3 Non-CO₂ 배출계수 개발 방법

연료의 원소 분석 및 발열량 분석 결과와 가정용 연탄보일러 배기가스 중 CH₄와 N₂O의 농도 측정 결과를 이용하여 배

Table 3. Repetition test of calorific value analysis using standard sample

Sample	Mass of standard (g)	Gross calorific value (cal/g)
1	0.4652	6,368
2	0.4906	6,346
3	0.4881	6,360
Mean		6,358
Standard deviation (SD)		9.09
Relative standard deviation (RSD, %)		0.14

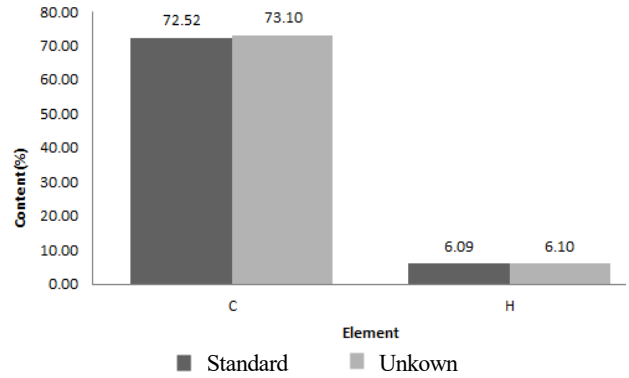


Fig. 4. Repetition test of elemental analysis for carbon and hydrogen.

출계수를 산정하였다. Non-CO₂ 배출계수 산정에 사용한 워크시트는 Table 4와 같다. 1단계에서는 원소분석기를 이용하여 수소(Hydrogen) 함량, 탄소(Carbon) 함량 등을 분석하였으며, 건조기를 이용하여 총수분 함량을 분석하였다. 그리고 수소 함량과 총수분 함량을 이용하여, 연탄의 총발열량을 순발열량으로 환산하였다. 2단계에서는 연탄보일러의 배기가스를 실험실에서 GC-FID와 GC-ECD를 이용하여 CH₄와 N₂O 농도를 분석하였다. 3단계에서는 배기가스 중의 산소 농도를 이용하여 이론산소요구량, 이론공기량, 과잉공기비 등을 산정하였다. 4단계에서는 3단계의 매개변수들을 이용하여 이론건조배기가스량을 산정하였으며, 5단계에서는 1~4단계에서 구한 값들을 이용하여 CH₄와 N₂O의 배출계수를 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Non-CO₂ 농도 분석 결과

연탄보일러의 Non-CO₂의 농도분석 결과를 Table 5에 나타내었다. CH₄ 배출농도는 평균 2.14 ppm으로 나타났으며, 표준오차와 상대표준편차는 각각 0.36 ppm, 16.85%로 분석되었다. N₂O 배출농도는 평균 0.49 ppm으로 나타났으며, 표준오차와 상대표준편차는 각각 0.06 ppm, 11.78%로 분석되었다. 연탄보일러의 CH₄ 배출농도는 N₂O 배출농도보다 더 크고, 변동도 약간 더 큰 것으로 분석되었다.

3.2 연료 분석 결과

본 연구에서는 2015년 12월부터 2016년 2월까지, 총 3회에 걸쳐 현장조사를 실시하였으며, 현장에서 채취한 연탄시료를 0.15 mm 이하로 분쇄하여 건식 총발열량을 발열량 분석기로

Table 4. The work-sheet for estimating the Non-CO₂ emission factors

Step 1 (Fuel data)	Item	Elementary analysis					Net calorific value
		Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Surfer	
	Sub-Item	A	B	C	D	E	F
	Unit	%(wt)	%(wt)	%(wt)	%(wt)	%(wt)	MJ/kg
Step 2 (Exhaust data)	Item	Concentration (CH ₄ , N ₂ O)			Exhaust oxygen concentration		
	Sub-Item	G			H		
	Unit	ppm			%(vol)		
Step 3 (Parameter)	Item	Theoretical oxygen (O ₀)		Theoretical air (A ₀)		Excess air ratio (m)	
	Sub-Item	I		J		K	
	Unit	m ³ /kg		m ³ /kg		-	
	Calculation	1.867×A+5.6×(B-C/8)+0.7×E		I/0.21		21/(21-H)	
Step 4 (Amount of theoretical dried combustion gas)	Item	Amount of theoretical dried combustion gas(G _{0d})					
	Sub-Item	L					
	Unit	m ³ /kg					
	Calculation	(1-0.21)×J+1.867×A+0.7×E+0.8×D					
Step 5 (Emission factor)	Item	Non-CO ₂ Emission factor					
	Sub-Item	M					
	Unit	kgNon-CO ₂ /TJ					
	Calculation	[L+(K-I)×J]×G×(16/22.4)÷F					

Table 5. Non-CO₂ concentration analysis of coal briquette

Fuels type	Combustion process	Date	CH ₄ (ppm)	N ₂ O (ppm)	Number of samples
Coal briquette	Boiler	Dec. 16 th , 2015	1.66	0.56	9
		Jan. 14 th , 2106	2.53	0.42	9
		Feb. 11 th , 2016	2.22	0.48	9
	Mean		2.14	0.49	-
	Standard deviation (SD)		0.36	0.06	-
	Relative standard deviation (RSD, %)		16.85	11.78	-

분석하였다. 시료를 분석한 결과는 Table 6에 제시하였다. 총 3개의 시료를 분석한 연탄의 평균 건식 총발열량은 3,097 kcal/kg으로 나타났다. 분석 결과, 연탄의 평균 탄소 함량은 53.72 %, 평균 수소 함량은 0.82%로 나타났다. 연탄의 총발열량을 순 발열량으로 산정하기 위해서는 연탄의 수소 함량과 총수분 함량이 필요하다. 총수분 함량의 경우 평균값의 편차가 크므로, 평균값 대신 중간값인 0.80%를 적용하여 배출계수를 산정하

였다. 질소 함량 또한, 실험값들의 편차가 크므로 평균값 대신 중간값인 0.08%를 적용하여, 분석한 결과와 함께 Table 6에 나타내었다.

3.3 연탄보일러의 Non-CO₂ 배출계수 개발

워크시트를 이용하여 연탄보일러의 Non-CO₂ 배출계수를 개발한 결과, CH₄의 배출계수는 11.77 kgCH₄/TJ로 분석되었

Table 6. Result of fuel analysis of coal briquette

Category	Gross calorific value, dry basis (kcal/kg)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Total moisture (%)
1 st	3,063	50.53	0.85	0.10	0.3	0.09	2.74
2 nd	3,131	55.31	0.81	0.10	0.08	0.11	0.98
3 rd	3,097	55.31	0.81	0.10	0.08	0.11	1.86
Mean	3,097	53.72	0.82	0.10	0.15	0.10	1.86
Median	3,097	55.31	0.81	0.10	0.08	0.11	0.80

고, N₂O의 배출계수는 7.43 kgN₂O/TJ로 분석되었다.

본 연구에서 산정된 연탄보일러의 Non-CO₂ 배출계수를 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 무연탄의 Non-CO₂ 기본배출계수 및 선행연구의 결과와 비교하여 Table 7에 제시하였다.

본 연구와 2006 IPCC 가이드라인의 무연탄 기본배출계수 및 선행연구(Kim, 2013)의 Non-CO₂ 배출계수를 비교한 결과, 개발된 연탄보일러의 Non-CO₂ 배출계수는 연탄난로의 공기주입구를 열었을 때와 매우 유사하게 나타났다. 이는 연탄보일러의 연소조건이 연탄난로의 공기주입구를 열었을 때의 조건과 유사하기 때문으로 판단된다. 본 연구결과의 Non-CO₂ 배출계수는 2006 IPCC 가이드라인에서 제시한 무연탄의 기본배출계수보다 크게 나타났다. 이는 일반적으로 연소 공기량이 부족하거나, 연소온도가 낮은 불완전 연소에 의해 생성되는 CH₄의 발생 특성(Korea Energy Agency, 2008)에 따른 결과라 판단된다. N₂O의 경우, 일반 연소시설과는 달리 주기적으로 연탄을 교체하는 연탄보일러의 연소특성이 반영된 결과라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 우리나라의 고유 난방방식인 연탄보일러를 대상으로 Non-CO₂ 배출계수를 산정하였다. 연탄보일러의 Non-CO₂ 배출계수를 산정하기 위하여, 가정에 설치된 연탄보일러

의 배기가스를 채취하여 Non-CO₂ 농도를 분석하고, 대상 연탄보일러의 연탄을 실험실에서 분쇄한 뒤 발열량, 원소 함량, 그리고 수분함량 등을 분석하였다.

분석 결과, 연탄의 건식 총발열량은 3,097 kcal/kg, 탄소 함량은 53.72%, 수소 함량은 0.82%, 총수분 함량은 1.86%로 분석되었다. 총수분 함량 및 수소 함량을 이용하여 건식 총발열량을 인수식 순발열량으로 환산하였다. 배기가스 중 Non-CO₂ 농도를 분석한 결과, 연탄보일러의 CH₄ 농도는 1.66~2.53 ppm의 범위로 나타났으며, N₂O 농도는 0.42~0.56 ppm의 범위로 나타났다.

연구 결과, 연탄보일러의 CH₄와 N₂O 배출계수는 각각 11.77 kgCH₄/TJ, 7.43 kgN₂O/TJ로 산정되었다. 이 값을 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 무연탄의 기본배출계수와 비교한 결과, IPCC 기본배출계수보다 CH₄의 경우 약 12배, N₂O의 경우 약 5배 정도 높은 것으로 나타났다. 이것은 연탄보일러의 경우, 일반 연소시설과는 달리 장시간 불완전 연소가 지속되며, 주기적으로 연탄을 교체해야 하는 연소 특성에 따른 결과라 판단된다. 또한, 본 연구에서 개발한 배출계수를 연탄난로를 대상으로 한 선행연구와 비교한 결과, 연탄난로의 공기주입구를 열었을 때와 유사하게 나타났다. 이것은 본 연구의 연소조건이 연탄난로의 공기주입구를 열었을 때의 조건과 유사하기 때문으로 판단된다.

우리나라의 온실가스 인벤토리 신뢰도를 높이기 위해서는, 연탄보일러뿐만 아니라, 연탄아궁이와 연탄난로 등과 같이, 다

Table 7. Comparison of emission factors in this study, IPCC and the other study

Category	This study	IPCC		
		Anthracite	Open the air inlet	The other study ¹⁾ Close the air inlet
CH ₄ Emission factor (kgCH ₄ /TJ)	11.77±1.72	1	11.28±0.70	18.14±1.67
N ₂ O Emission factor (kgN ₂ O/TJ)	7.43±1.15	1.5	6.25±0.57	2.98±0.35

¹⁾ Kim (2013).

양한 연소시설에서의 연탄 배출계수 개발과 관련된 연구가 수행되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- ASTM D 2015-91. 1991. Standard test method for gross calorific value of coal and coke by the adiabatic bomb calorimeter.
- ASTM D 3176-89. 2002. Standard practice for ultimate analysis of coal and coke.
- ASTM D 3178-89. 2002. Standard test method for carbon and hydrogen in the analysis sample of coal and coke.
- GIR. 2015. 2015 national greenhouse gas inventory report of Korea(in Korean).
- GIR. 2016. 2016 national greenhouse gas inventory report of Korea(in Korean).
- ISO 1928. 2009. Solid mineral fuel - determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value.
- IPCC. 2006. The 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Korea Energy Agency. 2008. Development of country specified greenhouse gas emission factor(I) (in Korean).
- KS E 3707. 2001. Determination of calorific value of coal and coke.
- Korea Energy Economics Institute. 2014. 2014 energy consumption survey(in Korean).
- Korea Energy Economics Institute. 2015. 2015 yearbook of energy statistics(in Korean).
- Kim SJ. 2013. Development of non-CO₂ emission factor of coal briquette. Sejong University.
- Lee JW. 2011. Development of greenhouse gas (CO₂) emission factor for coal briquette in Korea. Sejong University.
- US EPA. 2000. Air-sampling method 1, 2, 3.
- WRI/WBCSD. 2005. A corporate accounting and reporting standard. CSI.