

국내 아역청탄의 발열량 추이 분석과 탄소배출계수 개발

김민욱* · 조창상** · 전영재* · 양진혁*** · 신호철**** · 전의찬*****

*세종대학교 대학원 환경에너지융합학과, **세종대학교 기후변화센터, ***한국에너지공단 통계분석실,
****한국에너지공단 신재생에너지정책실, *****세종대학교 환경에너지공간융합학과

Sub-bituminous Coal's Calorific Value Trend Analysis and Carbon Emission Factor Development

Kim, Min wook*, Cho, Changsang**, Jeon, Youngjae*, Yang, Jinhyuk***,
Sin, Hochul**** and Jeon, Eui Chan*****†

*Dept. of Environment and Energy, Sejong Graduate School, **Sejong Climate Change Research Center,
Statistics Analysis Division of Korea Energy Agency, *New Renewable Energy Center of Korea Energy Agency,
*****Dept. of Environment and Energy, Sejong University., Seoul, Korea

ABSTRACT

Korea's energy consumption has been constantly increasing. Final energy consumption was increased by an annual average of 2.9% compared to 2010. The consumption of all energy sources except for its oil was increased during the same time. While electric demand has increased coal consumption increased rapidly. Therefore, calorific value and carbon emission factor development can improve the quality of Korea's greenhouse gas inventory. Calorific value is the amount of heat generated while burning coal. Caloric value is one of the most important factors in the development of carbon emission factors. Calorific value is used as the basis for the analysis of the various energy statistics. This study has calculated the sub-bituminous coal's calorific value by the data received from domestic coal-fired power plants. Calorific value's trend analysis period is the year of 2011~2015. Through analyzing the carbon content it was calculated the carbon emission factor. The sub-bituminous coal's uncertainty analysis was performed using a Monte Carlo simulation.

Key words: Sub-bituminous Coal, Calorific Value, Carbon Emission Factor, Uncertainty Analysis

1. 서 론

우리나라의 에너지 총 소비량은 지속적으로 증가하여 2013년 수요부문의 최종에너지 소비는 200,347천 TOE(Ton of oil equivalent)로, 2010년 대비 연평균 2.9% 증가하였다(산업통상자원부, 2015). 에너지원별로 석유를 제외한 모든 에너지원의 소비가 고르게 증가하였는데, 석탄은 2013년 26,189 천TOE로 2010년 19,353 천TOE 대비 6.3% 증가한 것으로 나타났다(온실가스종합정보센터, 2015).

아역청탄은 갈탄과 유연탄 사이의 중간 등급에 해당하는 적갈색 또는 흑색 석탄으로 유연탄보다 고정탄소의 양이 적고

휘발분이 많으며, 비점결성 또는 약점결성을 띤다. 또한 고유수분량이 매우 높고(15~30%), 유황 함량이 상대적으로 낮은 특징이 있다(국가기술표준원, 2013). 아역청탄은 주로 발전용으로 사용되고 있으며, 연료공급의 유연성 확보를 위해 연료용 유연탄과 혼소하여 사용되고 있다.

발열량은 연료가 완전히 연소될 때 단위질량당 발생하는 열량으로 탄소배출계수를 개발하는데 가장 중요한 인자 중 하나이다. 이러한 발열량은 각종 에너지 통계와 효율 분석의 기초 자료로 사용되기 때문에 주기적인 모니터링이 필요하다.

본 논문은 각각의 대상 석탄발전소의 5개년도(2011~2015년) 연료 분석자료를 이용하여 아역청탄의 발열량 기준을 제시하

† Corresponding author: ecjeon@sejong.ac.kr

Received April 26, 2017 / Revised June 1, 2017 / Accepted June 13, 2017

고, 수집된 탄소함량, 수소함량, 고유수분 등의 분석자료를 통해 탄소배출계수를 개발하였다. 또한 개발된 아역청탄의 탄소배출계수는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 불확도를 산정하였다.

2. 연구방법

2.1 연료 분석자료 수집

아역청탄의 연료 분석자료 수집은 한국전력의 5개 발전자회사 소속 8개 석탄화력발전소를 대상으로 실시하였다. 대상 시설에서 받은 연료 분석자료 항목은 5년간(2011~2015년) 사용된 아역청탄의 입하량, 발열량, 원소, 공업분석, 수분 등이다.

대상시설의 아역청탄 입하량은 Table 1에서 보는 바와 같다. 최소 입하량은 30,303,036 ton(2012년)이었으며, 최대 입하량은 39,956,858 ton(2011년)으로 나타났다. 아역청탄의 5개 년도(2011~2015년) 평균 입하량은 34,204,174 ton이었다.

Table 1. The amount of sub-bituminous coal (2011~2015)

Year	Sub-bituminous coal (ton)
2011	39,956,858
2012	30,303,036
2013	31,685,134
2014	37,769,697
2015	31,306,144
Average	34,204,174

Table 2. Object facility's analytical specifications

Object facility	Analytical specifications		
	Calorific analysis	Ultimate analysis	Proximate analysis
A coal-fired power plant	KS E 3707	ASTM D 5373	ASTM D 7582
B coal-fired power plant	ASTM D 5865	ASTM D 5373	ASTM D 7582
C coal-fired power plant	ASTM D 5865	ASTM D 5373	ASTM D 7582
D coal-fired power plant	ASTM D 5865	ASTM D 5373	ASTM D 5142
E coal-fired power plant	ASTM D 5865	ASTM D 5373	ASTM D 7582
F coal-fired power plant	ASTM D 5865	ASTM D 5373	ASTM D 7582
G coal-fired power plant	ASTM D 5865	ASTM D 5373	ASTM D 7582
H coal-fired power plant	KS E 3707	ASTM D 5373	ASTM D 7582

각 대상시설에서는 석탄의 발열량, 원소, 공업분석을 실시하고 있다. 분석규격은 Table 2에서 보는 바와 같다.

아역청탄 발열량 분석은 B, C, D, E, F, G 화력에서 ASTM D 5865(Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke)을, A, H 화력에서는 KS E 3707(석탄류 및 코크스류의 발열량 측정 방법) 규격을 적용하고 있다.

원소분석은 모든 화력발전소에서 ASTM D 5373(Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke)을 적용하고 있다. 공업분석은 모든 화력발전소에서 ASTM D 7582(Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis)를 적용하고 있으나, D 화력은 ASTM D 5142(Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures)를 적용하고 있다.

2.2 배출계수 산정 방법

아역청탄의 탄소배출계수는 온실가스·에너지 목표관리제에서 제시한 연료분석 방법을 적용하여 산정하였다. 석탄의 주요 성분은 탄소(C), 수소(H), 질소(N), 황(S), 수분(Moisture), 재(Ash) 등이며, 이 중 탄소와 수소함량 그리고 수분량은 배출계수를 산정하는데 매우 중요한 요인이다(전의찬, 2006).

대상시설의 연료 분석자료는 기건식 총발열량 기준으로 작성되어 있다. 식 (4)에 따라, 배출계수 산정을 위해 기건식 총발열량은 인수식 총발열량으로 환산해야 한다. 인수식 총발열량은 기건식 시료에서 얻은 고유수분(Mar, %)과 인수식 시료에서 얻은 총수분(Mar, %)을 통해 환산된다(환경부, 2016). 식 (1)은 기건식 총발열량을 인수식 총발열량으로 환산하는 방법이다.

$$\text{인수식 총발열량} = \text{기건식 총발열량} \times \frac{100 - Mar_i}{100 - Mad_i} \quad (1)$$

Mar_i : 아역청탄(i)의 총수분 백분율(%)
 Mad_i : 아역청탄(i)의 고유수분 백분율(%)

환산된 인수식 총발열량은 다시 인수식 순발열량으로 환산해야 한다. 인수식 순발열량은 ASTM 규격에 있는 인수식 순발열량 환산방법에 따라 환산하게 된다. 식 (2)는 인수식 총발열량을 인수식 순발열량으로 환산하는 방법이다.

$$\text{인수식 순발열량} = \text{인수식 총발열량} - 6[9H(\%) + W(\%)] \quad (2)$$

원소분석은 건식기준으로 분석되므로 인수식으로 환산해야 한다. 식 (3)은 탄소와 수소를 인수식으로 환산하는 방법이다.

$$\text{인수식 탄소 및 수소 함량} = \text{건식 } C \text{ 및 } H \times \frac{(100 - Mar_i)}{100} \quad (3)$$

발열량, 탄소 그리고 수소를 모두 인수식으로 환산시킨 후, 식 (4)를 적용하여 아역청탄의 탄소배출계수를 산정하게 된다.

$$EF_{i,c} = C_{ar,i} \times \frac{1}{EC_i} \times 10^3 \quad (4)$$

$EF_{i,c}$: 아역청탄(i)에 대한 탄소 배출계수(kgC/GJ-연료)

$C_{ar,i}$: 아역청탄(i) 중 탄소의 질량 분율(인수식, 0에서 1사이의 소수)

EC_i : 아역청탄(i)의 열량계수(연료 순발열량, MJ/kg-연료)

2.3 불확도 산정 방법

탄소배출계수의 불확도를 산정하는 절차는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 4단계로 구성된다(한국에너지공단, 2016). 첫 번째는 모델설정 단계로 탄소배출계수 산정 work-sheet를 구성한다. 두 번째는 탄소배출계수와 관련된 입력변수의 확률밀도함수를 가정한다. 이때, 입하량은 “온실가스·에너지 목표관리제 Tier 3의 활동도 불확도 범위인 2.5%를 적용한 정규분포를 가정하였다. 탄소 함량, 수소 함량, 수분 함량, 총발열량, 순발열량은 기본 정규분포를 가정하였다. 세 번째 단계는 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하는 단계로 “Crystall ball”을 이용해 무작위 샘플링 시뮬레이션을 수행한다. 네 번째 단계는 시뮬레이션된 결과를 통해 95% 신뢰구간의 불확도 범위를 산정한다.

3. 연구결과

3.1 원소분석

아역청탄의 5개년도(2011~2015년) 평균 탄소 함량은 69.00%이며, 표준편차는 0.5(고유단위, %), 상대표준편차는 0.7%로 분석되었다. 아역청탄의 최소 탄소함량은 68.50%(2015년)

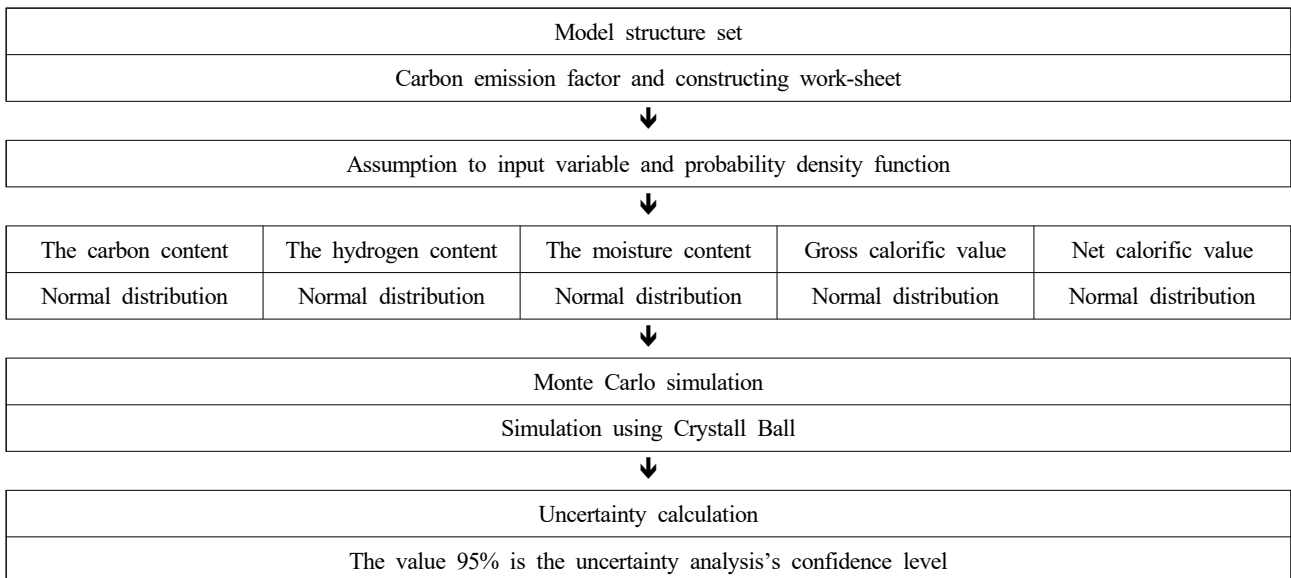


Fig. 1. Procedure for uncertainty analysis.

이었으며, 최대 탄소함량은 69.58%(2013년)로 약 1.57% 차이가 나타났다.

아역청탄의 5개년도(2011~2015년) 평균 수소 함량은 4.93%이며, 표준편차와 상대표준편차는 각각 0.03(고유단위, %), 0.6%로 분석되었다. 아역청탄의 최소 수소함량은 4.90%(2011년)이었으며, 최대 수소함량은 4.96%(2014년)로 약 1.22% 차이가 나타났다(Table 3).

3.2 공업분석

아역청탄은 다른 석탄에 비해 탄화도가 낮은 탄으로 고유수분량 및 휘발분이 매우 높고, 고정탄소가 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있다(국가기술표준원, 2013).

아역청탄의 5개년도(2011~2015년) 평균 총수분량 측정 및 공업분석 결과는 Table 4에서 보는 바와 같다. 5개년도 평균

Table 3. Sub-bituminous coal's ultimate analysts (2011 ~ 2015) (Unit : %)

Year	Carbon (Dry)	Hydrogen (Dry)
2011	68.80	4.90
2012	68.72	4.93
2013	69.58	4.91
2014	69.36	4.96
2015	68.50	4.95
Average	69.00	4.93
Standard deviation (SD)	0.50	0.03
Relative standard deviation (RSD, %)	0.70	0.60

Table 4. Sub-bituminous coal's proximate analysts (2011~2015)

Year	Total moisture	Inherent moisture	Fixed carbon	Volatile matter	Ash
2011	24.08	13.73	41.08	39.98	6.08
2012	23.59	14.43	39.30	40.30	5.96
2013	23.66	15.26	39.59	39.10	6.06
2014	23.24	14.69	40.50	38.91	5.93
2015	23.21	16.10	38.49	25.72	19.70
Average	23.57	14.78	38.89	37.03	8.52
Standard deviation (SD)	0.40	0.90	1.00	6.20	6.10
Relative standard deviation (RSD, %)	1.50	6.00	2.60	16.90	70.00

총수분량은 23.57%, 고유수분량은 14.78%, 고정탄소는 38.89%, 휘발분은 37.03%, 그리고 재는 8.52%로 산정되었다.

총수분량은 최소 23.21%(2015년), 최대 24.08%(2011년)이며, 고유수분량은 최소 13.73%(2011년), 최대 16.10%(2015년)로 나타났다. 고정탄소는 최소 38.49%(2015년), 최대 41.08%(2011년)이며, 휘발분은 최소 25.72%(2015년)에서 최대 40.30%(2012년)으로 나타났다. 재 함량은 최소 5.93%(2014년), 최대 19.70%(2015년)로 차이는 232.20%로 나타났다. 재 함량이 높아진 이유는 휘발분이 낮고 재 함량이 높은 저급탄의 수입이 증가되었기 때문으로 판단된다.

3.3 발열량 분석

아역청탄의 5개년도(2011~2015년) 발열량 데이터를 분석한 결과, 아역청탄의 인수식 총발열량은 평균 5,110 kcal/kg이며, 표준편차와 상대표준편차는 각각 25.0 kcal/kg, 0.5%로 나타났다. 인수식 순발열량은 평균 4,750 kcal/kg이며, 표준편차와 상대표준편차는 각각 24.7 kcal/kg, 0.5%로 분석되었다(Table 5).

기건식 총발열량은 최소 5,557 kcal/kg(2015년)에서 최대 5,770 kcal/kg(2011년)이며, 인수식 총발열량은 최소 5,080 kcal/kg(2011년)에서 최대 5,139 kcal/kg(2014년)으로 나타났다. 순발열량 인수식은 최소 4,730 kcal/kg(2015년)에서 최대 4,794 kcal/kg(2014년)으로 나타났다.

아역청탄 5개년 평균 인수식 총발열량은 5,110 kcal/kg으로 2011년 개정·고시된 에너지열량 환산기준 값인 5,420 kcal/kg보다 약 5.71%(310 kcal/kg) 낮게 나타났다. 인수식 순발열량은 5개년 평균 발열량 4,750 kcal/kg으로 2011년 개정·고시된 에너지열량 환산기준 값인 5,100 kcal/kg보다 약 6.86%(350 kcal/kg) 낮게 나타났다(Table 6).

아역청탄의 발열량을 산지별로 분석한 결과는 Fig. 2에서

Table 5. Analysis of sub-bituminous coal's calorific value (Unit: kcal/kg)

Year	Gross calorific value		Net calorific value (as received)
	As air dried	As received	
2011	5,770	5,080	4,737
2012	5,690	5,082	4,737
2013	5,667	5,106	4,762
2014	5,712	5,139	4,794
2015	5,557	5,086	4,730
Average	5,685	5,110	4,750
Standard deviation (SD)	78.2	25.0	24.7
Relative standard deviation (RSD, %)	1.4	0.5	0.5

보는 바와 같다. 인도네시아산의 5개년도(2011~2015년) 평균 발열량은 4,717 kcal/kg으로 아역청탄 주요 수입 6개국 중 가장 낮게 나타났다. 아역청탄의 전체 물량 비중 중에 인도네시아산의 비중은 86%(2011년), 87%(2012년), 84%(2013년), 85%(2014년), 81%(2015년)로 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 그 결과, 아역청탄의 발열량 변동 원인은 인도네시아산의 물량 비중에 따른 것으로 분석되었다.

2011년도 개정고시 값보다 5개년도(2011~2015년) 발열량이 감소한 이유는 2011년 이후 상대적으로 발열량이 높은 중국산 5,058 kcal/kg이 수입되지 않았으며, 원가절감으로 인해 발열량이 낮은 저급탄의 수입량 증가로 인해 평균 발열량에 영향을 준 것으로 판단된다.

3.4 CO₂ 배출계수 산정결과

아역청탄의 5개년도(2011~2015년) 탄소배출계수 결과는

Table 6. Sub-bituminous coal's calorific value comparisons (Unit: kcal/kg)

Sub-bituminous coal	Regulations in South Korea's energy law (2011)	This study (2011~2015)	Comparison result (%)
Gross calorific value (as received)	5,420	5,110	5.71
Net calorific value (as received)	5,100	4,750	6.86

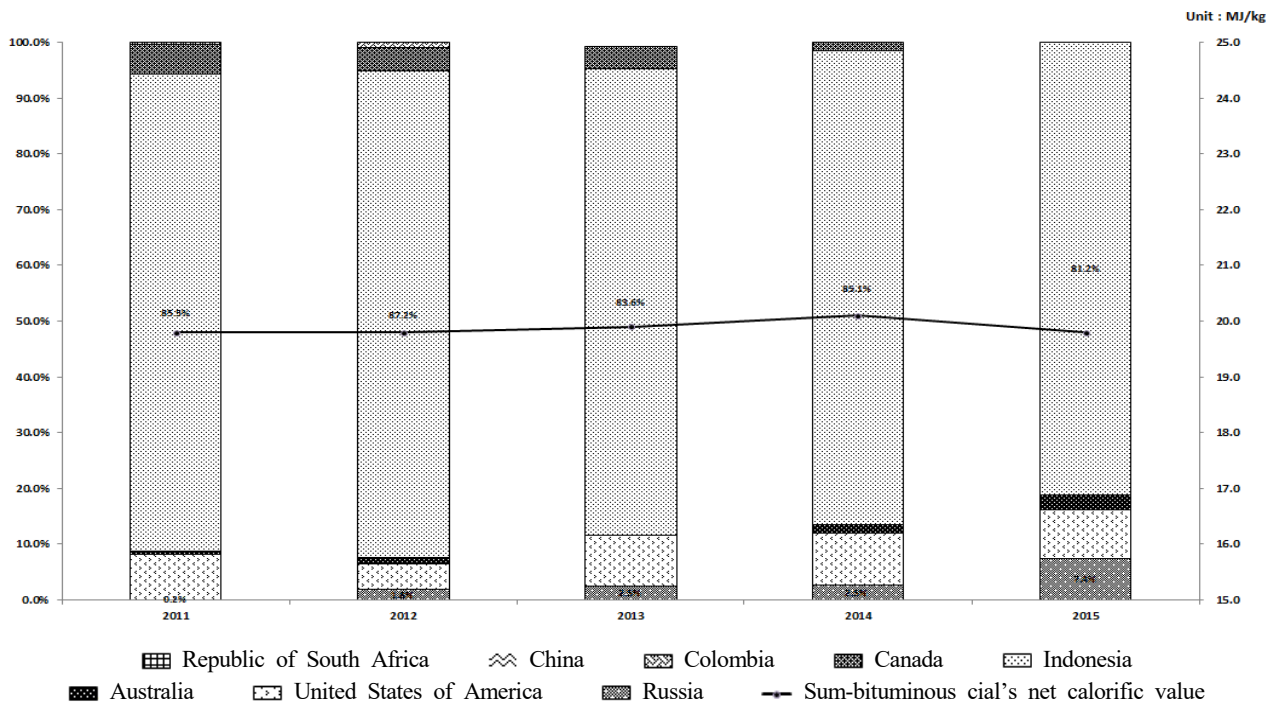


Fig. 2. Sub-bituminous coal (country of origin) (2011~2015).

Table 7에서 보는 바와 같다. 아역청탄의 5개년도 평균 탄소 배출계수는 26.5 ton C/TJ이며, 표준편차와 상대표준편차는 각각 0.1 ton C/TJ, 0.4 %로 분석되었다. 아역청탄의 최소 탄소배출계수는 26.4 ton C/TJ(2011년)에서 최대 26.7 ton C/TJ (2013년)로 차이는 1.13%로 나타났다.

본 논문에서 개발한 아역청탄의 탄소배출계수를 2006 IPCC 가이드라인과 비교한 결과, IPCC에 제시된 기본 값보다 1.1% (0.3 kg/GJ) 높게 산정되었다. 이는 상한값과 하한값의 범위에 포함되는 것으로 나타났다(Table 8).

3.5 불확도 분석

아역청탄을 대상으로 산정한 탄소배출계수의 불확도를 분석하였다(Fig. 3). 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 산출한 아역청탄의 불확도 분포는 Lognormal 분포이며, 평균 탄소배출계수는 26.84 ton C/TJ이며, 하위 2.5%의 탄소배출계수는 26.43 ton C/TJ 상위 97.5%의 탄소배출계수는 27.26 ton C/TJ로 산출되었다.

산출된 아역청탄의 불확도 범위는 95% 신뢰수준에서 -1.5%~+1.6%로 산정되었다. 본 논문을 통해 산출된 불확도 범위는 2006 IPCC 가이드라인에서 제시된 Energy 부문 배출계수의 불확도 범위인 7% 범위보다 낮게 나타났다.

Table 7. Sub-bituminous coal's carbon emission factor (2011~2015) (Unit : ton C/TJ)

Year	Carbon emission factor
2011	26.4
2012	26.5
2013	26.7
2014	26.5
2015	26.6
Average	26.5
Standard deviation (SD)	0.1
Relative standard deviation (RSD, %)	0.4

Table 8. Sub-bituminous coal's carbon emission factor comparisons (Unit : ton/TJ)

2006 IPCC G/L		This study's analysis result (2011~2015)		Comparison result (%)
Classification	Default value	Classification	Mean value	
Sub-bituminous coal	26.2 (25.3~27.3)	Sub-bituminous coal	26.5	1.1 % ↑

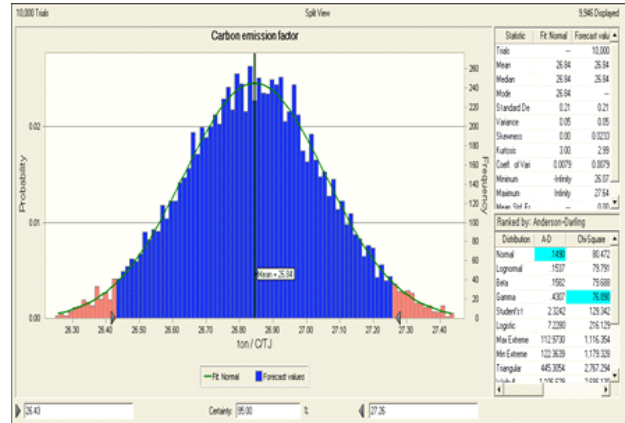


Fig. 3. Sub-bituminous coal's uncertainty analysis result (2011~2015).

Table 9. Sub-bituminous coal's uncertainty analysis comparisons

Classification	Uncertainty range (%)
This study Sub-bituminous coal	-1.5~+1.6
2006 IPCC G/L Energy	7

4. 결 론

아역청탄의 연료 분석자료 수집은 한국전력의 5개 발전자회사 소속 8개 석탄화력발전소를 대상으로 실시하였다.

에너지원별 발열량은 에너지법 시행규칙에 따라 5년을 주기로 개정하도록 되어 있다. 따라서 대상시설에서 사용하는 아역청탄의 발열량, 원소, 공업분석 결과 값을 포함하는 5개년도 연료 분석자료(2011~2015년)를 수집하여 발열량 추이분석과 탄소배출계수를 개발하였다.

아역청탄의 발열량분석 결과 값은 인수식 총발열량과 순발열량으로 산정하였다. 발열량 분석결과, 아역청탄 5개년 평균 인수식 총발열량은 5,110 kcal/kg으로, 2011년 개정·고시된 에너지열량 환산기준 5,420 kcal/kg보다 약 5.71%(310 kcal/kg) 낮게 나타났다. 인수식 순발열량의 5개년 평균 발열량은 4,750 kcal/kg으로 2011년 개정·고시된 에너지열량 환산기준 5,100

kcal/kg보다 약 6.86%(350 kcal/kg) 낮게 나타났다.

분석기간 내 아역청탄의 발열량 변동 폭은 주요 수입 산지의 발열량과 물량비중을 고려하여 분석하였다. 인도네시아산의 5개년도(2011~2015년) 평균 발열량은 4,717 kcal/kg으로 아역청탄 주요 수입 6개국 중 가장 낮게 나타났다. 아역청탄의 전체 물량 비중 중에 인도네시아산의 비중은 86%(2011년), 87%(2012년), 84%(2013년), 85%(2014년), 81%(2015년)로 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 따라서 아역청탄의 발열량 변동 원인은 인도네시아산의 물량 비중에 따른 것으로 분석되었다.

탄소배출계수는 아역청탄의 인수식 순발열량을 사용하여 산정하였다. 아역청탄의 탄소배출계수는 26.5 ton C/TJ로 산정되었다. 산정된 탄소배출계수를 IPCC 가이드라인에서 제시된 아역청탄의 기본 값과 비교결과, 기본 값보다 약 1.1% 높게 산정되었다. 하지만 상한값과 하한값의 범위에 포함되었다.

석탄은 다른 에너지원과 달리 수분에 의한 영향이 크고, 채광되는 산지에 따라 발열량의 변동이 크기 때문에, 인벤토리 통계 신뢰성과 품질향상을 위해 주기적인 모니터링이 필요하다. 본 논문은 국내 석탄발전소에서 사용되고 있는 탄중 연료용 유연탄 다음으로 가장 많이 사용되는 아역청탄을 대상으로 발열량 추이분석(2011~2015년)과 탄소배출계수를 개발하였다. 따라서 본 논문은 온실가스 인벤토리 품질향상을 위한 기초 자료로 기여될 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Korea Energy Agency. 2014. Handbook of energy and economic statistics in Korea.

- Korea Energy Economics Institute. 2012. Energy consumption survey.
- Korea Energy Economics Institute. 2014. Yearbook of energy statistics.
- Korea Ministry of Environment. 2016. GHG & energy target management system.
- Korea Energy Agency. 2016. Energy's calorific value trend analysis and carbon emission factor development.
- Jeon EC. 2006. Development of emission factors for greenhouse gas (CO₂) from bituminous coal fired power plants. Korean Society for Atmospheric Environment.
- Kim OH. 2010. Develop of greenhouse gas emission factor using coals in Korea. Korean Society for Atmospheric Environment.
- Kim SJ. 2013. Development of classification method for anthracite and CO₂ emission factor to improve the quality of national GHG inventory.
- Kim MW. 2016. Domestic bituminous coal's calorific value trend analysis (2010~2014) and carbon emission factor development.
- ASTM D 5865. 2012. Standard test method for gross calorific value of coal and coke.
- ASTM D 7582-10. 2010. Standard test methods for proximate analysis of coal and coke by macro thermogravimetric analysis.
- IPCC 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- KS E 3707. 2011. Determination of calorific value of coal and coke.
- KS E 3709. 2014. Coal and coke-general rules for sampling, analysis and testing.