

## 초초임계압 발전소 확대에 따른 CO<sub>2</sub> 감축잠재량 연구

노준영\* · 강성민\*\* · 이화수\*\*\* · 전의찬\*\*\*\*†

\*세종대학교 대학원 기후환경융합학과 박사과정생, \*\*세종대학교 기후환경융합센터 선임연구원,  
\*\*\*동의과학대학교 화학공학과 교수, \*\*\*\*세종대학교 대학원 기후환경융합학과

### CO<sub>2</sub> Reduction Potential due to Expansion of Ultra Super-Critical Power Plants

Roh, Joon Young\* · Kang, Sung Min\*\* · Lee, Hwa Su\*\*\* and Jeon, Eui-Chan\*\*\*\*†

\* Ph.D. Student, Department of Climate and Environment, Sejong University, Korea

\*\*Senior Researcher, Climate Change & Environment Research Center, Sejong University, Graduate School, Korea

\*\*\*Professor, Department of Chemical Industry, Dong-Eui Institute of Technology, Korea

\*\*\*\*Head Professor, Department of Climate and Environment, Sejong University, Graduate School, Korea

#### ABSTRACT

In this study, the CO<sub>2</sub> emission factors of supercritical and ultra-supercritical power plants considering the transmission stage efficiency were calculated. The CO<sub>2</sub> reduction potential was calculated for the ultra-supercritical power plant, which was introduced up to 40%. The CO<sub>2</sub> emission factor of the supercritical power plant was 1.017 kg CO<sub>2</sub>/kWh, while the emission factor of the ultra-supercritical power plant was 0.947 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Thus, the emission factor of the ultra-supercritical power plant was estimated to be about 7% lower. By calculating the CO<sub>2</sub> emissions according to the supercritical and ultra-supercritical power generation ratio, we found that when the power generation ratio of the ultra-supercritical power generation increased to 40%, the CO<sub>2</sub> emissions decreased by 1.74% (4,906,117 tons of CO<sub>2</sub>).

**Key words:** CO<sub>2</sub>, Emission Factor, Climate Change, Supercritical, Ultra-Supercritical Power Plants

#### 1. 서론

신기후체제 출범 이후 기후변화 전반에 대한 대응 체계 강화가 요구됨에 따라, 2019년 우리나라는 저탄소 녹색성장 기본법(제40조)을 근거로 한 『제 2차 기후변화대응 기본계획』을 발표하였다. 이 계획에서는 2030년 감축 목표를 2017년 온실가스 배출량 대비 24.4% 수준인 총 배출량 574.3백만톤으로 설정하였고, 그 중 에너지 부문 배출량은 505.3백만톤을 목표로 설정하였다.

『국가온실가스인벤토리보고서』에 따르면, 우리나라의

2017년 온실가스 총 배출량은 709.1백만톤이며, 그 중 에너지 부문의 온실가스 배출량은 615.8백만톤(약 87%)으로 가장 많은 배출량을 차지하는 것으로 나타났다. 에너지 부문에서 약 1억톤 이상의 온실가스 배출량을 줄이기 위하여 『제 2차 기후변화대응 기본계획』에서는 국내 석탄 화력발전소 중 초초임계압 발전소(Ultra-Super Critical)를 2030년까지 전체의 40%까지 확대 적용하겠다고 발표하였다.

국내 석탄 화력발전소 대부분을 차지하고 있는 초임계압 발전 방식은 주증기의 온도와 압력을 임계점보다 높은 조건에서 발전하는 방식이며, 주증기의 온도와 압력 조건

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

ORCID 노준영 0000-0002-3066-3230  
강성민 0000-0001-8628-8241

이화수 0000-0001-8042-031X  
전의찬 0000-0003-2783-4550

을 더 향상시킨 초초임계압 발전 방식은 효율이 상승함에 따라 연료절감과 온실가스 배출량을 감축할 수 있다.

2018년 기준, 한국전력의 5개 발전회사 석탄화력발전소는 12개 발전소, 59개호기이다. 그 중 초초임계압 발전 방식을 도입한 발전소는 3개 발전소 6개호로. 2016년부터 태안, 당진, 신보령 화력발전소에서 초초임계압 화력발전소가 운영되고 있다.

따라서 본 논문에서는 초초임계압과 초임계압 발전소의 송전단 기준 CO<sub>2</sub> 배출계수를 산정하여 비교하고, 초초임계압 발전소의 도입에 따른 CO<sub>2</sub> 감축잠재량을 산정하였다.

## 2. 연구방법

초임계압과 초초임계압 발전소의 송전단 기준 CO<sub>2</sub> 배출계수를 비교하기 위하여 자료조사와 연료를 분석하였다. 자료조사를 통해 발전소의 효율, 송전량 등을 반영하였고 원소분석, 공업분석을 통해 연료의 인수식 탄소 함량을 구하여 탄소배출계수를 산정하였다. 이 자료들을 주어진 식을 이용하여 초임계압과 초초임계압 발전소의 송전단 기준 CO<sub>2</sub> 배출계수를 비교하고, 초초임계압 발전소 확대에 따른 감축잠재량을 산정하였다.

### 2.1 연료 분석 및 CO<sub>2</sub> 배출계수 산정

#### 2.1.1 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.

#### 2.1.2 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.

#### 2.1.3 CO<sub>2</sub> 배출계수 산정

초임계압과 초초임계압 발전소의 CO<sub>2</sub>의 배출계수를 산정하기 위해 다음과 같은 식을 이용하였다. 현재 온실가스 인벤토리에서 적용되고 있는 CO<sub>2</sub> 배출계수는 ‘온실가스 에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침 [별표16]’에서 제시

한 식으로 산정하고 있다(식 (1), 식 (2) 참조). 본 연구에서는 식 (3)과 같이 송전단 전력량을 기준으로 한 초임계압과 초초임계압 발전소의 CO<sub>2</sub> 배출계수를 산정하였다. 초임계압과 초초임계압의 송전단 효율은 발전소의 실제 효율을 협조 받아 반영하였다.

$$EF_{TJ,CO_2} = EF_{i,C} \times 3.664 \times 10^3 \quad (1)$$

$$EF_{i,C} = C_{ar,i} \times \frac{1}{EC_i} \times 10^3 \quad (2)$$

$$EF_{kWh,CO_2} = EF_{TJ,CO_2} \times \frac{4.1868}{10^9} \times 860 \div E \quad (3)$$

여기서,  $EF_{kWh,CO_2}$ : 송전량(kWh) 기준 CO<sub>2</sub> 배출계수 (kgCO<sub>2</sub>/kWh)

$E$ : 송전단 열효율(초임계압: 37.65%, 초초임계압: 40.35%)

$EF_{TJ,CO_2}$ : 열량(TJ) 기준 CO<sub>2</sub> 배출계수 (kgCO<sub>2</sub>/TJ-연료)

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

3.664: CO<sub>2</sub>의 분자량(44.010)/C의 원자량(12.011)

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

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

### 2.2 감축 잠재량 산정 방법

2030년 석탄화력발전의 송전단 발전량을 예측하여 초임계압과 초초임계압발전소의 비율에 따른 CO<sub>2</sub> 감축잠재량을 산정하였다. 2030년의 송전단 발전량은 『제8차 전력수급기본계획』의 전력수요 전망과 발전량 비중 전망 자료를 이용하여 예측하였다. 2030년의 전력소비량에 송배전손실을(2018년)을 고려하여 2030년 모든 발전원의 송전단 발전량을 예측하였으며, 2030년 기준 시나리오의 석탄 발전량 비중 전망치인 40.5%를 고려하여 석탄화력발전의 예측 발전량(송전단 기준)을 산정하였다. 산정 결과, 2030년 화력발전의 예측 발전량(송전단 기준)은 280,350 GWh로 산정되었다.

Table 1. Value for estimating power generation

Classification	Value
Power consumption	666,955 GWh
Transmission/distribution loss rate (2018)	3.56%
Estimated power generation (based on power transmission stage)	692,221 GWh
Proportion of thermal power generation	40.5%
Estimated amount of thermal power generation (2030)	280,350 GWh

2019년 발표된 『제2차 기후변화대응 기본계획』에서 국내 석탄 화력발전소 중 초초임계압 발전소(Ultra-Super Critical)를 2030년까지 40%까지 확대 적용하겠다고 발표하였다. 이를 바탕으로, 초임계압과 초초임계압의 비율을 설정하고 본 연구에서 개발한 CO<sub>2</sub> 배출계수를 이용하여 저감잠재량을 산정하였다. 현재의 발전 비율은 전력통계시스템(EPIS)에 제시된 2018년 실제 발전 비율(A)을 반영하여 초임계압 발전 비율은 85%, 초초임계압 발전 비율은 15%로 설정하였으며, 2030년의 발전 비율(B)은 초임계압 발전 비율 60%, 초초임계압 발전 비율 40%로 설정하였다(Table 2 참조).

Table 2. Generation ratio of supercritical and ultra-supercritical power

Classification	A	B
Supercritical power generation rate	85	60
Ultra-Supercritical power generation rate	15	40*

\*Reflects the rate of introduction of ultra-supercritical power plants according to the 2nd Basic Plan for Climate Change Response (40%)

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 연료 분석 및 CO<sub>2</sub> 배출계수 산정 결과

##### 3.1.1 원소분석 결과

초임계압과 초초임계압 발전소에서 현장 측정 시 사용된 연료(유연탄) 3개를 각각 3회 반복 분석하여 각 평균값으로 Table 3에 나타내었다. 초임계압 발전소에서 사용된 연료의 원소분석 결과는 C(탄소) 71.68%, H(수소) 4.92%, O(산소) 12.79%, N(질소) 1.47%, S(황) 0.46% 로 나타났

다. 초초임계압 발전소에서 사용된 연료의 원소분석 결과는 C(탄소) 69.00%, H(수소) 4.78%, O(산소) 15.70%, N(질소) 1.35%, S(황) 0.31%로 나타났다.

Table 3. Result of elementary analysis

Type		C	H	O	N	S
Fuel of Supercritical power plant	mean	71.68	4.92	12.79	1.47	0.46
	SD	0.20	0.03	0.36	0.32	0.13
Fuel of Ultra-Supercritical power plant	mean	69.00	4.78	15.70	1.35	0.31
	SD	0.30	0.09	0.38	0.43	0.25

##### 3.1.2 공업분석 결과

초임계압과 초초임계압 발전소에서 현장 측정 시 사용된 연료(유연탄) 3개를 각각 3회 반복 분석하여 각 평균값으로 Table 4에 나타내었다. 초임계압 발전소에서 사용된 연료의 공업분석 결과는 고유수분(Inherent Moisture) 9.30%, 휘발분(Volatile Matter) 35.14%, 회분(Ash) 7.96%, 고정탄소(Fixed Carbon) 47.60%으로 나타났다. 초초임계압 발전소에서 사용된 연료의 공업분석 결과는 고유수분(IM) 11.72%, 휘발분(VM) 35.94%, 회분(Ash) 10.31%, 고정탄소(FC) 42.03%로 나타났다.

Table 4. Result of proximate analysis

Type		Inherent Moisture	Volatile Matter	Ash	Fixed Carbon
Fuel of Supercritical power plant	mean	9.30	35.14	7.96	47.60
	SD	0.10	0.25	0.13	0.30
Fuel of Ultra-Supercritical power plant	mean	11.72	35.94	10.31	42.03
	SD	0.39	0.30	0.17	0.10

##### 3.1.3 초임계압과 초초임계압 발전소의 CO<sub>2</sub> 배출계수 산정 및 비교

식 (3)을 이용하여 초임계압과 초초임계압 발전소의 송전량 기준(kWh) CO<sub>2</sub> 배출계수를 산정하고 비교하였다.

초임계압 발전소의 CO<sub>2</sub> 배출계수는 1.017 kgCO<sub>2</sub>/kWh으로 산정되었으며, 초초임계압 발전소의 배출계수는 0.947 kgCO<sub>2</sub>/kWh으로 초초임계압 발전소의 배출계수가 7% 낮게 산정되었다. 열량 기준 CO<sub>2</sub> 배출계수와 다르게 효율이 더 높은 초초임계압 발전소가 같은 전력량을 생산하는데 CO<sub>2</sub>가 더 적게 배출되는 것으로 나타났다(Table 5 참조).

Table 5. Comparison of CO<sub>2</sub> emission factors between supercritical power plant and ultra-supercritical power plants

	Ultra-Supercritical power plant (A)	Supercritical power plant (B)	Rate of Change (%) (A-B)/B
CO <sub>2</sub> Emission Factor	0.947 kgCO <sub>2</sub> /kWh	1.017 kgCO <sub>2</sub> /kWh	-7

### 3.2 CO<sub>2</sub> 감축 잠재량 산정

2030년 화력발전의 예측 발전량은 280,350 GWh로 산정되었다. 이를 기준으로 2018년 초임계압과 초초임계압 발전소의 비율(A)인 85%, 15%를 고려하면 초임계압 발전소의 송전량은 238,297 GWh, 초초임계압 발전소의 송전량은 42,052 GWh로 나타났다. 본 연구에서 가정한 2030년의 초임계압과 초초임계압 발전소 비율(B)인 60%, 40%을 적용한 결과, 초임계압 발전소의 송전량은 168,210 GWh, 초초임계압 발전소의 송전량은 112,140 GWh로 나타났다(Table 6 참조).

Table 6. Transmission amount considering the generation ratio of supercritical power plants and ultra-supercritical power plants

Classification		Generation ratio (%)	Transmission amount (GWh)
A	Supercritical power plant	85	238,297
	UltraSupercritical power plant	15	42,052
B	Supercritical power plant	60	168,210
	UltraSupercritical power plant	40	112,140

\*Reflects the rate of introduction of ultra-supercritical power plants according to the 2nd Basic Plan for Climate Change Response (40%)

초임계압과 초초임계압 발전 비율에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정한 결과, 초초임계압 발전의 발전 비율이 40 %까지 증가할 때, CO<sub>2</sub> 배출량이 1.74%(4,906,117 tonCO<sub>2</sub>) 감소하는 것으로 나타났다(Table 7).

Table 7. Comparison of CO<sub>2</sub> emissions considering the generation ratio of supercritical power plants and ultra-supercritical power plants (Unit: tonCO<sub>2</sub>)

	A	B	Rate of Change (%) (B-A)/A
CO <sub>2</sub> emissions	282,171,805	277,265,688	-1.74

\*Reflects the rate of introduction of ultra-supercritical power plants according to the 2nd Basic Plan for Climate Change Response (40%)

## 4. 결론

본 연구에서는 송전단 효율을 고려한 초임계압과 초초임계압 발전소의 CO<sub>2</sub> 배출계수를 산정하고, 산정한 CO<sub>2</sub> 배출계수를 이용하여 초초임계압 발전소가 40%까지 도입되었을 때의 CO<sub>2</sub> 저감 잠재량을 산정하였다.

초임계압과 초초임계압 발전소의 송전단 효율을 고려한 CO<sub>2</sub> 배출계수를 산정한 결과, 초임계압 발전소의 CO<sub>2</sub> 배출계수는 1.017 kgCO<sub>2</sub>/kWh, 초초임계압 발전소는 0.947 kgCO<sub>2</sub>/kWh으로, 초초임계압 발전소의 CO<sub>2</sub> 배출계수가 7%(0.047 kgCO<sub>2</sub>/kWh) 낮게 산정되었다.

산정한 배출계수를 이용하여 초초임계압 발전소를 2030년까지 40% 도입 시(제2차 기후변화대응 기본계획), 국내 5개 발전사의 2030년 예측 송전량을 기준으로 CO<sub>2</sub> 저감 잠재량을 산정하였다. 2030년 화력발전의 예측 발전량은 280,350 GWh로 산정되었으며. 이를 기준으로 초임계압과 초초임계압 발전 비율을 고려하여 CO<sub>2</sub> 저감 잠재량을 산정하였다.

2018년 초임계압과 초초임계압 발전 비율인 85%, 15%를 고려하면 초임계압 발전소의 송전량은 238,297 GWh, 초초임계압 발전소의 송전량은 42,052 GWh로 나타났으며, 2030년 초임계압과 초초임계압 발전소 비율을 60%, 40%으로 적용한 결과, 초임계압 발전소의 송전량은 168,210 GWh, 초초임계압 발전소의 송전량은 112,140 GWh로 나타났다

CO<sub>2</sub> 배출량을 산정한 결과, 2018년에는 282,171,805 tonCO<sub>2</sub>, 2030년에는 277,265,688 tonCO<sub>2</sub>로, 초초임계압 발전소가 40%까지 도입될 시 CO<sub>2</sub> 저감량이 1.74% (4,906,117 tonCO<sub>2</sub>) 감소하는 것으로 나타났다. 효율이 높은 초초임계압 발전소가 더 많이 도입될 시 CO<sub>2</sub> 저감량을 정량적으로 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 2018년 한국전력 5개 발전사회사의 송전량을 기준으로 CO<sub>2</sub> 저감 잠재량을 산정하였지만, 국내 모든 발전소의 부하율, 이용률, 발전 용량 등이 고려되지 않았기 때문에 보다 정확하고 신뢰성 있는 CO<sub>2</sub> 저감 잠재량을 산정하기 위해서는 국내 모든 발전소의 발전 용량, 부하율, 이용률 등이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 사사

본 연구는 환경부 “기후변화특성화대학원사업”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Cho CS. 2016. A study on Non-CO<sub>2</sub> forecasting models and the effect of air pollution prevention facility on Non-CO<sub>2</sub> emissions concentration. : In case of bituminous coal firing power plant. Sejong University
- Electric Power Statistics Information System(EPSIS). 2019. Power Plant Construction Project Progress 3Q 2019.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center. 2019. National Inventory Report. Bae SH. 2016 July 25. Eco-friendly power generation technology with high economic efficiency and power generation efficiency, supercritical pressure. Electric Power Journal.
- Hong YJ. 2016. Optimal sampling methodology for the analysis of greenhouse gases from combustion facilities. Sejong University
- Korea Power Exchange(KPX). 2019. Power Plant Status.
- Ministry of Environment. 2017. the Administrative Guideline for the Greenhouse gas Target Management System.
- Ministry of Environment. 2019. Second Climate Change Response Basic Plan IPCC, 2006. The 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Volume 2: Energy, Chapter 2: Stationary Combustion.