



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

초임계압과 초초임계압 발전소의
CO₂ 배출계수 비교 및 Non-CO₂ 배출특성 연구
Comparison of CO₂ Emission Factors and Non-CO₂
Emission Characteristics of Supercritical and
Ultra-Supercritical Power Plants

2020년 2월

세종대학교 대학원
기후변화협동과정
노준영

초임계압과 초초임계압 발전소의
CO₂ 배출계수 비교 및 Non-CO₂ 배출특성 연구
Comparison of CO₂ Emission Factors and Non-CO₂
Emission Characteristics of Supercritical and
Ultra-Supercritical Power Plants

지도교수 전 의 찬

이 논문을 공학 석사학위논문으로 제출함

2020년 2월

세종대학교 대학원
기후변화협동과정
노 준 영

노준영의 석사학위논문을 인준함

2020년 2월

심사위원장 강 성 민 (인)

심 사 위 원 김 하 나 (인)

심 사 위 원 전 의 찬 (인)

국문 초록

국가 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면, 우리나라의 2017년 온실가스 총 배출량 7억 9백만 톤 CO₂eq 중 에너지산업 공공전기 및 열 생산 부문의 온실가스 배출량은 2억 7천만 톤 CO₂eq(약 34%)으로 가장 많은 양을 차지하고 있다. 우리나라의 에너지원별 발전비율은 석탄 41.9 %, 가스 26.8 %, 원자력 23.4 %, 신재생 6.2 %으로 석탄의 발전비율이 가장 높다.

정부에서는 온실가스 배출량의 가장 많은 양을 차지하고 있는 공공전기 및 열 생산 부문의 온실가스 배출량을 줄이기 위해 기술적 노력과 환경 규제를 강화하고 있다. 초임계압 발전기술을 1990년대부터 도입하여 운전 중에 있으며, 2000년대 초부터 정부 주도로 초초임계압 기술 개발이 시작되었다. 2016년부터 1000MW급 초초임계압 발전소가 신보령, 태안, 당진 화력발전소에 도입되어 운영되고 있다.

본 연구에서는 발전 효율을 고려한 초임계압과 초초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수를 산정하고, 산정한 CO₂ 배출계수를 이용하여 초초임계압 발전소를 40%까지 도입하였을 때의 CO₂ 저감 잠재량을 산정하였다. 또한, Non-CO₂ 배출계수를 산정·비교하고 Non-CO₂ 농도와 TMS 자료와의 상관관계를 분석하였다.

초임계압과 초초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수 산정 결과, 초임계압 발전소는 1.017 kgCO₂/kWh로 산정되었고, 초초임계압 발전소는 0.947 kgCO₂/kWh로, 초초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수가 7 % 작게 산정되었다. 산정한 배출계수를 이용하여 초초임계압 발전소를 2030년까지 40% 도입 시 CO₂ 배출량을 국내 5개 발전사의 송전량을 기준으로 산정할 결과, 2018년(초임계압: 90%, 초초임계압: 10%)에는 212,996,000 tonCO₂, 2030년(초임계압: 60%, 초초임계압 40%)에는 208,579,000 tonCO₂로 초초임계압 발전소가 40 %까지 도입될 시 CO₂ 저감량이 2 %(4,417,000 tonCO₂) 감소하는 것으로 나타났다.

초임계압과 초초임계압 발전소의 Non-CO₂ 배출계수 산정 결과, 초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수는 0.351 kgCH₄/TJ, 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수는 0.091 kgCH₄/TJ로, 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수가 74% 낮게 산정되었다. 또한, 초임계압 발전소의 N₂O 배출계수는 0.872 kgN₂O/TJ, 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수는 0.553 kgN₂O/TJ로, 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수가 36% 낮게 산정되었다.

스피어만의 상관관계 분석 방법(Spearman's rank correlation coefficient)를 이용하여 Non-CO₂ 농도와 연료성분 및 배기가스 중 여러 성분과의 상관관계를 분석하였다. CH₄ 농도와 연료 중 탄소 함량의 상관관계 분석 결과, 상관계수 0.752으로 강한 양의 상관관계를 나타냈다. 연료 중 탄소 함량이 많은수록 배기가스의 CH₄ 농도가 높아지는 것으로 나타났다. N₂O 농도와 배기가스 중의 NO_x 농도와의 상관관계 분석 결과, 상관계수 -0.264로 낮은 음의 상관관계를 나타냈다. NO_x의 생성이 증가할수록 N₂O의 생성이 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 초초임계압 발전소의 도입 시 CO₂ 저감량을 정량적으로 확인할 수 있었고, CH₄과 N₂O도 초임계압 발전소보다 초초임계압 발전소에서 더 적게 배출되는 것을 알 수 있었다.

주요어: 온실가스, Non-CO₂, 초임계압 발전소, 초초임계압 발전소,
인벤토리, 배출계수, 온실가스 저감

목 차

제1장 서 론

제1절 연구의 배경 및 목적	1
제2절 연구의 내용 및 범위	3

제2장 이론적 고찰

제1절 초임계압과 초초임계압 화력발전소	5
제2절 석탄 화력발전소의 Non-CO ₂ 배출특성	8
제3절 선행연구 고찰	11

제3장 연구 방법

제1절 연료 분석	13
제2절 배기가스 포집 및 농도 분석	16
제3절 CO ₂ 배출계수 및 감축 잠재량 산정	23
제4절 Non-CO ₂ 의 배출특성 분석	25

제4장 초임계압과 초초임계압 발전소의 온실가스 배출특성 비교

제1절 연료 분석 결과	28
제2절 CO ₂ 배출계수 비교 및 감축 잠재량 산정	31
제3절 Non-CO ₂ 배출계수 산정 및 비교	34
제4절 Non-CO ₂ 배출과 영향 요소	41

제5장 결론

제1절 연구요약	45
제2절 연구의 시사점 및 한계	47
참고문헌	48
Abstract	50

표 목 차

<표 2-1> 임계압별 조건 및 발전 효율	6
<표 2-2> 국내 5개 발전사의 발전소 현황	7
<표 2-3> 초임계압과 초초임계압 발전소 온실가스 관련 국내·외 연구	12
<표 3-1> Gas Chromatography 분석 조건	17
<표 3-2> CH ₄ 농도분석의 반복성 평가	19
<표 3-3> Gas Chromatography 분석 조건	20
<표 3-4> N ₂ O 농도분석의 반복성 평가	22
<표 3-5> 초초임계압 발전소 도입에 따른 발전소 현황	24
<표 3-6> Non-CO ₂ 배출계수 산정을 위한 Worksheet	26
<표 3-7> 상관관계 계수에 따른 상관관계 강도	27
<표 4-1> 초임계압 발전소에서 사용된 연료의 발열량 분석결과	28
<표 4-2> 초임계압 발전소에서 사용된 연료의 원소분석 결과	29
<표 4-3> 초임계압 발전소에서 사용된 연료의 공업분석 결과	30
<표 4-4> 초초임계압과 초임계압 발전소의 열량 기준 CO ₂ 배출계수 비교	31
<표 4-5> 초초임계압과 초임계압 발전소의 송전량 기준 CO ₂ 배출계수 비교	32
<표 4-6> 초임계압과 초초임계압 발전 비율에 따른 송전량	32
<표 4-7> 초임계압과 초초임계압 발전 비율을 고려한 CO ₂ 배출량 산정	33
<표 4-8> 초임계압과 초초임계압 발전 비율을 고려한 CO ₂ 배출량 비교	33
<표 4-9> 초임계압 발전소 배기가스의 CH ₄ 농도	34
<표 4-10> 초임계압 발전소 배기가스의 CH ₄ 배출계수	35
<표 4-11> 초초임계압 발전소 배기가스의 CH ₄ 농도	35
<표 4-12> 초초임계압 발전소 배기가스의 CH ₄ 배출계수	36
<표 4-13> 초임계압과 초초임계압 발전소의 CH ₄ 배출계수 비교	37
<표 4-14> 초임계압 발전소 배기가스의 N ₂ O 농도	37
<표 4-15> 초임계압 발전소 배기가스의 N ₂ O 배출계수	38
<표 4-16> 초초임계압 발전소 배기가스의 N ₂ O 농도	39

<표 4-17> 초초임계압 발전소 배기가스의 N ₂ O 배출계수	39
<표 4-18> 초임계압과 초초임계압 발전소의 N ₂ O 배출계수 비교	40
<표 4-19> CH ₄ 배출농도와 연료 중 탄소 성분의 평균값	42
<표 4-20> CH ₄ 배출농도와 연료 중 탄소 함량의 정규성 검정 결과	43
<표 4-21> CH ₄ 배출농도와 연료 중 탄소 함량의 상관관계 분석	43
<표 4-22> N ₂ O 배출농도와 NO _x 배출농도의 평균 값	44
<표 4-23> N ₂ O 배출농도와 NO _x 배출농도의 정규성 검정 결과	44
<표 4-24> N ₂ O 배출농도와 NO _x 배출농도의 상관관계 분석	45

그림 목 차

<그림 1-1> 연구 흐름도	4
<그림 2-1> 연소온도에 따른 NO_x 와 N_2O 배출농도의 관계	9
<그림 2-2> N_2O 의 생성 및 분해반응 경로	10
<그림 3-1> 발열량 분석기 (IKA-C2000, Germany)	13
<그림 3-2> 자동원소분석기 (Thermo Finnigan-Flash EA 1112, USA)	14
<그림 3-3> 공업분석기 (ELTRA TGA-701)	15
<그림 3-4> Lung sampler를 이용한 간헐적 포집방법(US-EPA method 18)	16
<그림 3-5> 표준시료를 이용한 CH_4 검량선	18
<그림 3-6> 표준시료를 이용한 N_2O 검량선	21

제1장 서론

제1절 연구의 배경 및 목적

2019년 국가 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면, 우리나라의 2017년 온실가스 총 배출량은 7억 9백만 톤 CO₂eq으로 1990년 대비 142.7%, 전년대비 2.4% 증가하였다. 그 중 에너지산업의 공공전기 및 열 생산 부문의 온실가스 배출량은 2억 7천만 톤CO₂eq(약 34%)으로 가장 많은 배출량을 차지하고 있다. 우리나라의 에너지원별 발전비율은 석탄 41.9 %, 가스 26.8 %, 원자력 23.4 %, 신재생 6.2 %으로 석탄의 발전비율이 가장 높다(통계청, 2018).

국내 석탄 화력발전소는 주증기의 온도와 압력을 임계점보다 높은 조건에서 발전하는 초임계압 발전 방식으로 전기를 생산하고 있으며, 최근에는 주증기의 온도와 압력 조건을 향상시킨 초초임계압 발전 방식을 도입하여 연료절감과 온실가스 배출량을 감축하기 위한 노력을 하고 있다.

2018년 기준, 국내 5개 발전사의 석탄화력발전소는 12개 발전소, 59호기이며, 그 중 초초임계압 발전 방식을 도입한 발전소는 3개 발전소 6개 호기이다. 국내에서는 2016년부터 태안, 당진, 신보령 화력발전소에서 초초임계압 화력발전소를 도입하였다. 2019년 발표한 제2차 기후변화대응 기본계획에서 국내 석탄 화력발전소에 초초임계압 발전소(Ultra-Super Critical)를 2030년까지 전체의 40 %까지 확대 적용하겠다고 발표하였다.

초초임계압 화력발전소의 도입과 더불어 발전 효율과 CO₂ 배출량 저감량 비교에 대한 연구가 진행되고 있지만, 아직 연구가 많이 부족한 상황이다. Non-CO₂ 배출 특성에 관한 연구도 아직 많이 진행되고 있지 않다.

본 논문에서는 초임계압과 초초임계압 발전소의 효율을 고려한 송전단

기준 CO₂ 배출계수를 산정하고 비교하고자 한다. 또한, 본 연구에서 산정한 배출계수를 이용하여 초초임계압 발전소가 더 많이 도입됨에 따라 CO₂ 저감 잠재량을 산정하였다.

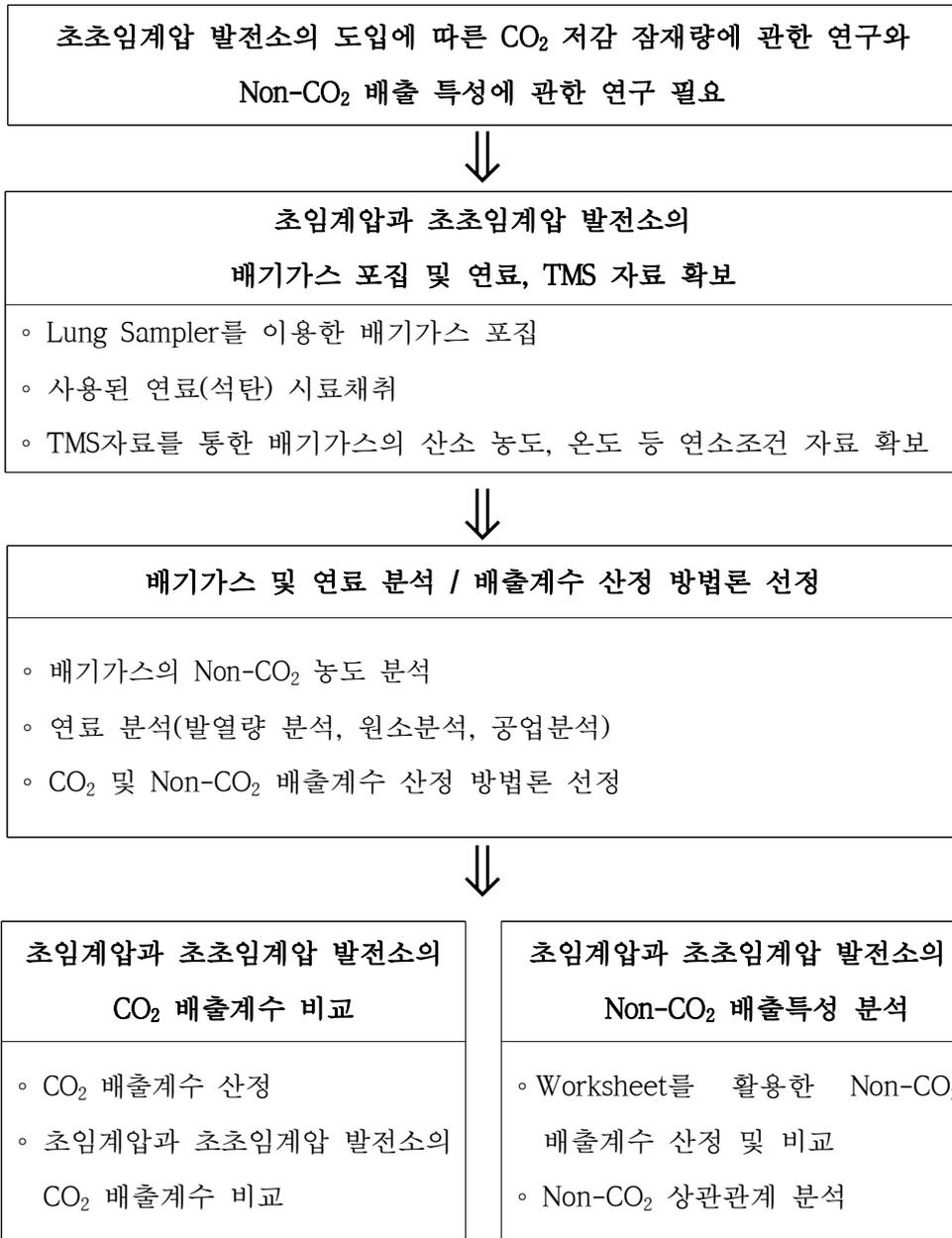
Non-CO₂ 배출 특성을 파악하기 위해 초임계압과 초초임계압 발전소의 Non-CO₂(CH₄, N₂O) 배출계수를 산정하여 비교하고, Non-CO₂ 농도와 TMS 자료와의 상관관계를 분석하고자 한다.

제2절 연구의 내용 및 범위

본 연구에서는 초임계압과 초초임계압 발전소의 효율을 반영한 송전량 기준 CO₂ 배출계수를 비교하고자 한다. 또한, Non-CO₂ 측면에서는 배출계수 산정하고 비교하고, Non-CO₂ 농도와 TMS 자료와의 상관관계를 분석하고자 한다.

본 연구의 방법 및 절차는 다음과 같다.

- ① 국내 초임계압과 초초임계압 발전소의 현황을 파악하고, 선행연구와 자료를 검토하여 초임계압과 초초임계압 발전소의 온실가스 배출 특성에 대해 고찰한다.
- ② CO₂ 배출계수와 Non-CO₂ 배출계수 산정 및 비교, Non-CO₂ 농도와 TMS 자료와의 상관관계 분석을 위한 방법을 선정한다.
- ③ 발열량 분석, 원소분석, 공업분석을 통해 연료의 조성을 파악한다. 분석값을 이용하여 인수식 탄소함량과 순발열량을 산정하고, 주어진 식을 이용하여 CO₂ 배출계수를 산정한다. Non-CO₂ 배출계수 산정을 위하여 발전소의 배기가스를 포집하여 농도를 분석하고, 연료 분석값과 TMS 자료를 이용하여 Non-CO₂ 배출계수를 개발한다.
- ④ 배기가스의 농도와 연료의 조성, 그리고 TMS 자료를 이용하여 초임계압과 초초임계압 발전소의 CO₂와 Non-CO₂ 배출계수를 산정·비교하고, Non-CO₂ 농도와 TMS 자료와의 상관관계를 분석한다.



<그림 1-1> 연구 흐름도

제2장 이론적 고찰

제1절 초임계압과 초초임계압 화력발전소

1. 초임계압과 초초임계압 화력발전소

석탄 화력발전소는 보일러에서 석탄을 연소시켜 만들어진 증기를 이용하여 터빈발전기를 돌림으로써 전기를 생산하는 시설이다. 일반적으로 물은 대기압 하 100 °C에서 끓지만 압력이 높아지면 끓는점이 높아지게 된다. 물이 증기로 변할 때 임계점(압력 225.6 kg/cm², 온도 374 °C)에 이르게 되면 증발 잠열 없이 증기로 변하게 되어 소요되는 에너지를 줄일 수 있다. 증기의 압력과 온도는 발전 효율 향상에 직접적인 영향을 미치고, 일반적으로 주증기 온도가 10 °C 상승할 때 효율은 0.5 % 증가하고, 증기 압력이 10 bar 상승할 때 0.2 %의 발전효율이 증가하는 것으로 알려져 있다(배상훈, 2016).

미국, 일본, 유럽 등에서는 화력발전소의 주증기 온도와 압력을 높게 하여 효율을 상승시키고 연료 절감과 온실가스 및 대기오염물질 배출을 줄이는 기술을 개발하여 도입해 오고 있다. 화력발전소는 주증기의 온도와 압력 조건에 따라 아임계압, 초임계압, 초초임계압으로 분류할 수 있다. 초임계압 발전소는 터빈을 돌리는 주증기의 압력 250bar, 온도 565 °C 이상의 발전소이며, 초초임계압 발전소는 주증기의 압력 250bar, 온도 593 °C의 발전소이다. 임계압별 조건과 발전 효율은 <표 2-1>에 나타내었다.

<표 2-1> 임계압별 조건 및 발전 효율

구 분	조 건	발전 효율(%)
아임계압	165bar / 565℃	35
초임계압	>250bar / 565℃ ~585℃	38
초초임계압	>250bar / 593℃ ~621℃	>42

출처: 신소재경제, 2018

2. 초임계압과 초초임계압 화력발전소 현황

석탄화력 발전시설이 점차 대형화·고효율화 되는 흐름과 함께 많은 선진국들은 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력과 환경 규제를 강화하고 있다. 이로 인해 1990년대부터 초임계압 발전기술이 실증화되어 상용화 되었고, 2000년대 초중반부터 독일, 일본 등에서 초초임계압 발전기술이 상용화되었다.

우리나라는 2002년부터 정부 주도로 초초임계압 기술개발이 시작되었고, 2016년부터 1000MW급 초초임계압 발전 방식을 도입하여 발전하고 있다. 국내 5개 발전사의 석탄화력 12개 발전소(59호기) 중, 신보령화력발전소 #1~2호기, 태안화력발전소 #9~10호기, 당진화력발전소 #9~10호기에서 초초임계압 발전방식으로 발전하고 있다(<표 2-2> 참조).

<표 2-2> 국내 5개 발전사의 발전소 현황

회사명	발전소명(#호기)	초초임계압 도입 호기
한국남동발전	영동 #1	
	여수 #1~2	
	삼천포 #1~6	
	영흥 #1~6	
한국남부발전	삼척그린파워 #1~2	
	하동 #1~8	
한국동서발전	동해 #1~2	
	당진 #1~10	당진 #9~10
	호남 #1~2	
한국서부발전	태안 #1~10	태안 #9~10
한국중부발전	보령 #1~8	
	신보령 #1~2	신보령 #1~2
합계	12개 발전소, 59호기	3개 발전소, 6호기

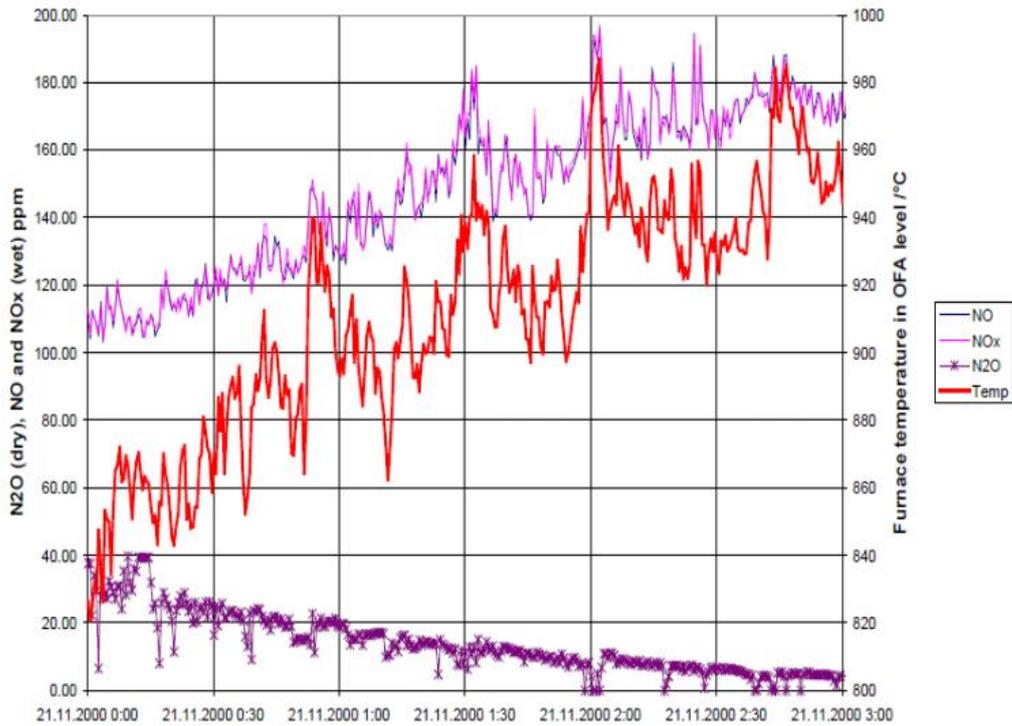
2018년 발표한 제2차 기후변화대응 기본계획에서는 국내 석탄 화력발전소에 초초임계압 발전소(Ultra-Super Critical)를 2030년까지 전체의 40%까지 확대 적용하겠다고 발표하였다(환경부, 2019). 더 높은 주증기의 온도와 압력을 견딜 수 있는 금속소재 기술 및 관련 기술의 발전이 수반됨에 따라 일부 선진국에서는 A-USC(Advanced USC) 기술을 개발 중이다.

제2절 석탄 화력발전소의 Non-CO₂ 배출특성

석탄화력발전소의 온실가스가 배출되는 과정은 연료저장 및 전처리, 연소시설, 대기오염물질 방지시설 등에서 배출되며, 대부분의 온실가스는 연소시설과 대기오염방지시설에서 배출된다.

연소시설에서 배출되는 CO₂는 연료 중 탄소 성분이 고온에서 산화되어 발생하며 가장 많은 배출량을 차지한다. 국가인벤토리보고서에 따르면, 2017년 국내에서 배출된 CO₂ 중 93.3 %가 연료연소에서 배출된 것으로 나타났다(온실가스종합정보센터, 2019). 연소 과정에서 연료 중 CO₂로 산화되지 않은 탄소는 일산화탄소(CO), 메탄(CH₄), 비메탄휘발성유기화합물(Non Methane Volatile Organic Compounds, NMVOCs)로 생성된다.

N₂O는 연료 중 질소의 불완전 연소에 의해 배출되는 것으로 알려져 있다. 휘발분 함량이 낮은 저급의 연료를 연소시키는 경우에 많이 발생하며, 특히 연소 온도의 영향을 많이 받아 700 °C 부근에서 가장 많이 생성되고 500 °C 이하와 900 °C 이상에서는 생성이 억제된다(조창상, 2016). 또한, S. Korhonen의 연구에 따르면 연소 온도에 따른 NO_x의 배출은 N₂O 배출 농도에 미치는 영향이 크다고 알려져 있다. <그림 2-1>에서 보는 바와 같이, 연소온도가 높아질수록 NO_x의 생성이 많아지고 N₂O의 생성이 억제되는 것을 알 수 있다.



<그림 2-1> 연소온도에 따른 NOx 와 N₂O 배출농도의 관계

출처: Methane and nitrous oxide emission in the Finish energy production

(S. Korhonen et al., 2001)

대기오염물질 방지시설(SCR, Selective Catalytic Reduction)에서도 온실 가스가 배출된다. SCR 공정에서 NO_x를 환원시키는 과정에서 중간 생성물로 N₂O가 발생되어 배출되는 것으로 알려져 있으며(이효상, 2014), 촉매의 종류, 반응 온도, 산소 농도 등에 따라 발생 정도가 다르다 (Parvulscu et al., 1998). 식 (1)~(5)와 <그림 2-2>는 N₂O의 생성 및 분해 반응을 보여주고 있다.

제3절 선행연구 고찰

초임계압과 초초임계압 발전소와 관련된 선행연구를 살펴본 결과, 연료 또는 연소방식(미분탄 연소방식, 순환유동층 연소방식)에 따른 온실가스 배출 비교에 관한 연구는 어느 정도 진행되었으나, 초임계압과 초초임계압 발전소에 따른 온실가스 배출의 차이에 대한 연구는 많이 진행되어 있지 않았다.

IPCC 2006 Guideline에는 연료 종류, 연소기술(미분탄 연소 보일러, 유동층 보일러)에 따른 온실가스 배출계수가 산정되어 있지만, 주중기의 온도와 압력조건(초임계압과 초초임계압 발전)에 따른 배출계수 비교는 되어 있지 않았다.

Non-CO₂ 배출에 영향을 주는 요인에 관한 연구에는 연소 조건, 대기 오염 방지시설에 따른 영향에 관한 연구들이 진행되었다. 조창상(2016)의 연구에 따르면 발전소의 CH₄ 농도는 부하율, 노내온도와는 약한 음의 상관관계가 있고, N₂O는 배기가스 중의 NO_x 농도와 음의 상관관계를 갖고 있는 것으로 나타났다.

V.A. Kondratenko(2008)의 연구에서는 SCR에서 사용되는 NH₃가 산화되어 N₂O를 생성하는 것과 이효상(2014)의 연구에서는 SCR에서 사용되는 촉매 중 Fe(O_x)-modified V₂O₅/TiO₂ 촉매가 N₂O의 생성 억제에 영향을 주는 것으로 나타났다. Shimizu(2016)의 연구에서는 순환유동층보일러에서 사용되는 CaO가 N₂O를 분해하는 것으로 나타났다(<표 2-3> 참조).

<표 2-3> 초임계압과 초초임계압 발전소 온실가스 관련 국내·외 연구

연구	연구 내용
이효상 (2014)	V ₂ O ₅ /TiO ₂ 촉매 사용에 따른 NH ₃ -SCR 탈질반응에서 N ₂ O 생성 억제에 관한 연구
조창상 (2016)	대기오염방지시설이 Non-CO ₂ 배출농도에 미치는 영향과 예측모형 개발
2006 IPCC Guideline	연료별, 연소기술(미분탄 연소 보일러, 유동층 보일러)에 따른 온실가스 배출계수 산정
V.A. Kondratenko (2008)	SCR에서 사용되는 NH ₃ 가 산화되어 N ₂ O가 생성되는 매커니즘에 관한 연구
Tadaaki Shimizu (2016)	CaO가 N ₂ O 감소에 미치는 영향에 관한 연구

제3장 연구 방법

제1절 연료 분석

1. 발열량 분석

발열량 분석은 대상 물질을 연소시킬 때 발생하는 열에 의해 수온이 변화하는데, 이를 이용하여 연소 전·후의 수온 차에 따라 열량을 측정하는 방법이다.

본 연구에서는 독일 IKA사의 자동열량분석기(IKA-C2000)를 이용하였다. 표준시료는 Benzoic Acid C723을 사용하였고, 정밀전자저울(Mettler Toledo-AB204S, Swizerland)을 이용하여 0.0001g 단위까지 정량하여 분석하였다.

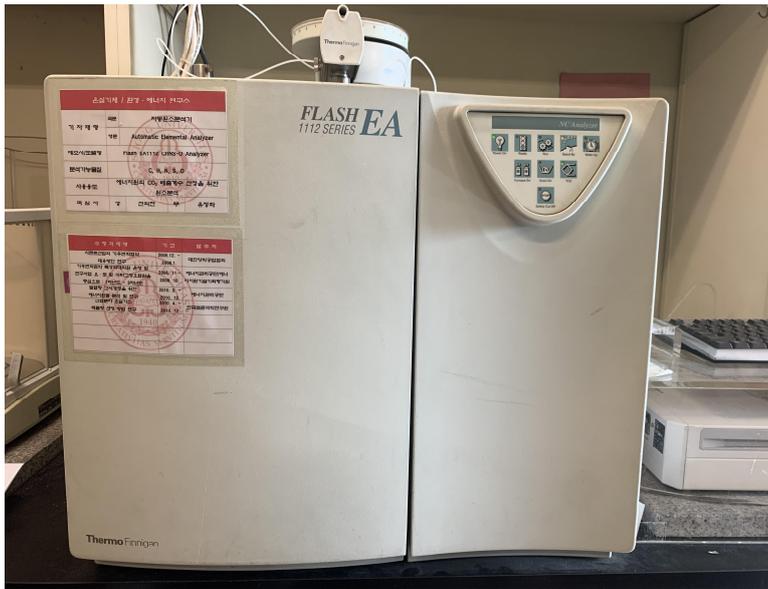


<그림 3-1> 발열량 분석기 (IKA-C2000, Germany)

2. 원소분석

원소분석은 시료의 C, H, N, S 함량을 정량 분석하는 방법으로, 본 연구에서는 자동원소분석기(Thermo Finnigan-Flash EA 1112, USA)를 이용하였다.

자동원소분석기는 시료 내의 원소들을 산화시킨 뒤 컬럼에서 분리능에 의해 분리하여 TCD detector로 각각의 원소를 정량 분석한다. 컬럼은 2 m 길이의 ParaQ-X column을 사용하였으며, 운반가스로는He(99.999%, MS Gas Corporation)를 사용하였다.



<그림 3-2> 자동원소분석기 (Thermo Finnigan-Flash EA 1112, USA)

3. 공업분석

공업분석은 기건식 상태의 시료의 휘발분(Volatile matter), 회분(Ash), 고정탄소(Fixed Carbon), 고유수분(Inherent moisture)을 분석하는 방법이다.

본 연구에서는 열중량분석기(TGA-701)를 사용하였으며, 표준시료로는 Calibration Standard Premium Coal 9255-3040(Lot: 781411)를 사용하였다.



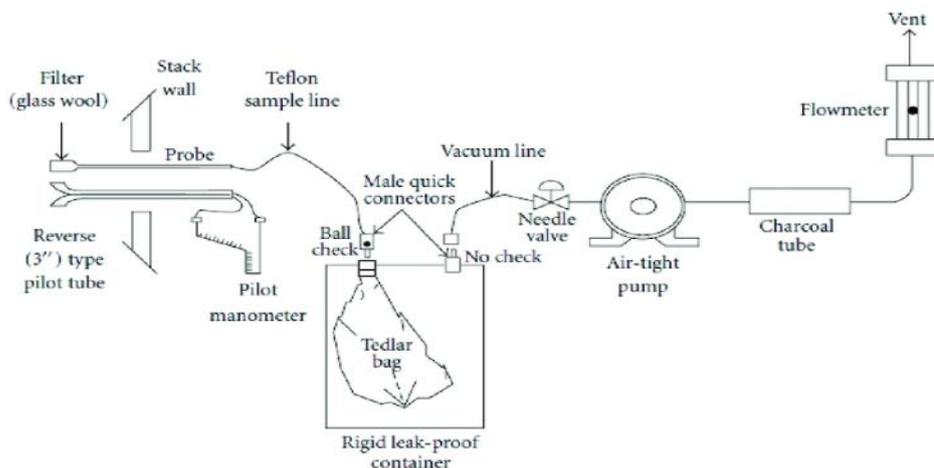
<그림 3-3> 공업분석기 (ELTRA TGA-701)

제2절 배기가스 포집 및 농도 분석

1. 배기가스 포집 방법

배기가스 포집 방법은 간헐적 포집으로 EPA Method 18(US EPA, 2001) 방법을 이용하였다. EPA Method 18은 주로 대기오염물질을 분석하기 위한 가스 시료 포집을 위한 방법으로, 연소시설의 배기가스 중 온실가스 분석을 위한 포집에도 사용된다(홍윤정, 2016).

본 연구에서는 Lung Sampler(ACEN, KOREA)를 이용하여 배기가스를 포집하였다. 펌프를 이용하여 Tedlar bag이 연결된 Lung Sampler를 진공으로 만들어 배기가스를 포집하였다(〈그림 3-4〉 참조). 배기가스에 포함된 수분은 시료채취장치 전단에 공병과 실리카겔(6 mesh ~ 16 mesh 크기의 변색 지시형)로 구성된 흡습병을 설치하여 제거하였다.



〈그림 3-4〉 Lung sampler를 이용한 간헐적 포집방법(US-EPA method 18)

출처: US EPA, 2010

2. 배기가스의 CH₄ 농도분석 방법

가) 가스크로마토그래피 분석 조건

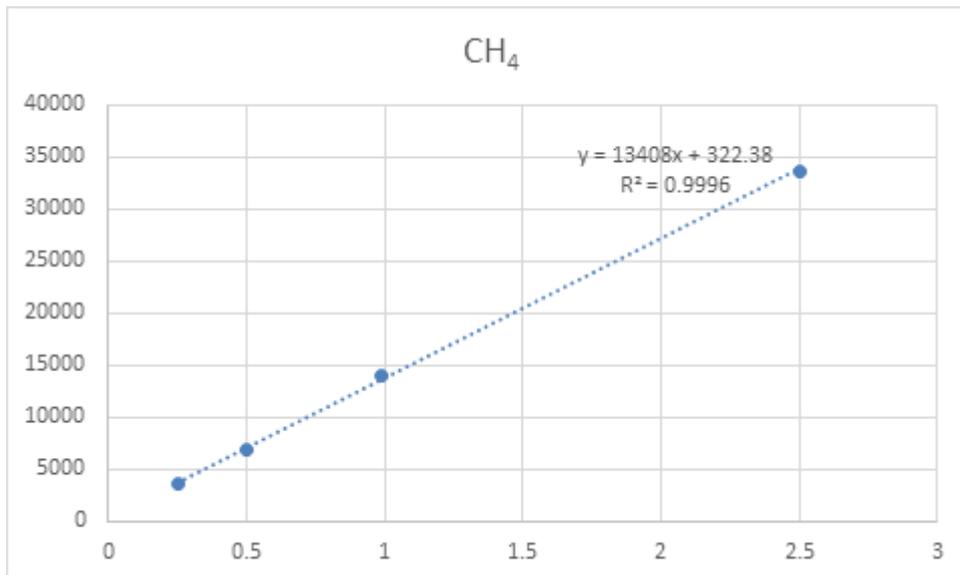
발전소의 배기가스 농도는 가스크로마토그래피법(Gas Chromatography, GC)으로 분석하였다. CH₄ 농도는 GC-FID(Gas Chromatography Flame Ionization Detector)를 이용하여 분석하였으며, 컬럼은 Porapak Q 80/100 1m을 사용하였다. 운반가스(N₂, 99.999%)와 Air, H₂의 유량은 각 25 ml/min, 300 ml/min, 300 ml/min 으로 설정하였다. Oven, Inlet, Detector의 온도는 120 °C, 70 °C, 250 °C로 설정하였다(<표 3-1> 참조).

<표 3-1> Gas Chromatography 분석 조건

Varian CP-3800		
Detector		FID
Colume		Porapak Q 80/100
Carrier gas		N ₂ (99.999 %)
가스 유속	N ₂	25 ml/min
	H ₂	30 ml/min
	Air	300 ml/min
온도	Oven	70 ° C
	Inlet	120 ° C
	Detector	250 ° C

나) 직선성 평가

배기가스의 CH₄ 농도를 분석하기 전에 직선성 평가와 반복성 평가를 통해 QA/QC를 진행하였다(〈그림 3-5〉 참조). 가스크로마토그래피의 CH₄ 농도 분석을 위한 검량선은 5가지 농도의 표준가스 CH₄ 0.25 ppm, 0.5 ppm, 1 ppm, 2.5 ppm, 5ppm(Rigas, Korea)를 이용하여 작성하였다. 5ppm의 표준가스를 희석하여 2차 표준가스 2.5 ppm을 제조하여 사용하였다. 또한 1 ppm 표준가스를 희석하여 0.25 ppm과 0.5 ppm 표준시료를 제조하였다. 검량선의 R² 값은 0.9996으로 나타났다.



〈그림 3-5〉 표준시료를 이용한 CH₄ 검량선

다) 반복성 평가

또한 가스크로마토그래피의 반복성은 표준가스를 7회 반복 분석하 <표 3-2>에 나타내었다. 평균에 대한 표준편차는 49, 상대표준편차는 0.36 %로 나타냈다.

<표 3-2> CH₄ 농도분석의 반복성 평가

반복 횟수	Peak area
1	13,601
2	13,598
3	13,607
4	13,615
5	13,595
6	13,602
7	13,618
평균값	13,605
표준편차	49
상대표준편차(%)	0.36

3. 배기가스의 N₂O 농도분석 방법

가) 가스크로마토그래피 분석 조건

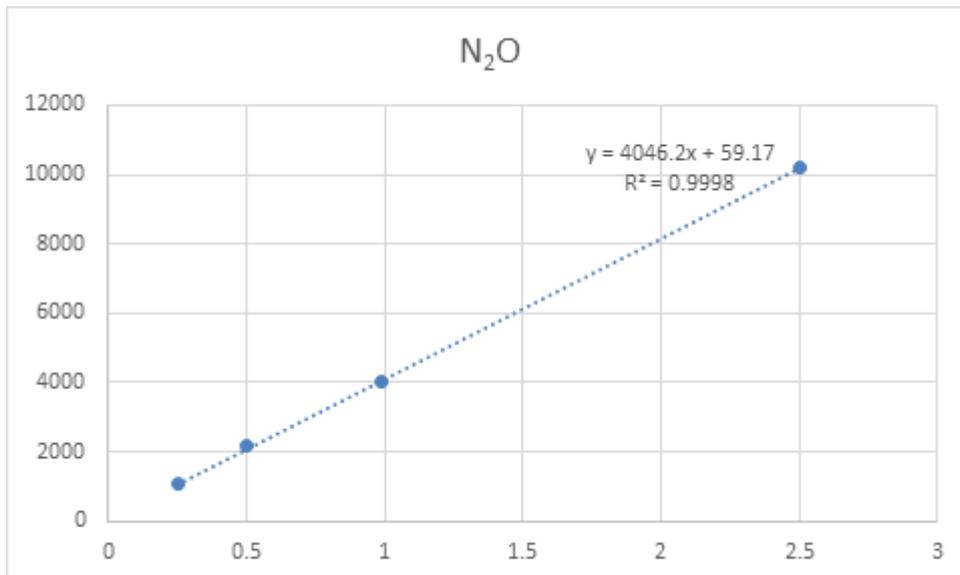
발전소의 배기가스 농도는 가스크로마토그래피법(Gas Chromatography, GC)으로 분석하였다. N₂O 농도는 GC-ECD(Gas Chromatography Electron Capture Detector)를 이용하여 분석하였으며, 컬럼은 Porapak Q 80/100 1m을 사용하였다. 운반가스(N₂, 99.999%)와 H₂, Air의 유량은 각 25 ml/min, 30 ml/min, 300 ml/min 으로 설정하였다. Oven과 Inlet, Detector의 온도는 각 70 °C, 100 °C, 350 °C로 설정하였다(<표 3-3> 참조).

<표 3-3> Gas Chromatography 분석 조건

Varian CP-3800		
Detector		ECD
Column		Porapak Q 80/100
Carrier gas		N ₂ (99.999 %)
가스 유속	N ₂	25 ml/min
	H ₂	30 ml/min
	Air	300 ml/min
온도	Oven	70 °C
	Inlet	100 °C
	Detector	350 °C

나) 직선성 평가

배기가스의 N₂O 농도를 분석하기 전에 직선성 평가와 반복성 평가를 통해 QA/QC를 진행하였다(〈그림 3-6〉 참조). 가스크로마토그래피의 N₂O 농도 분석을 위한 검량선은 5가지 농도의 표준가스 N₂O 0.25 ppm, 0.5 ppm, 1 ppm, 2.5 ppm, 5ppm(Rigas, Korea)를 이용하여 작성하였다. 5ppm의 표준가스를 희석하여 2차 표준가스 2.5 ppm을 제조하여 사용하였다. 또한 1ppm 표준가스를 희석하여 0.25 ppm과 0.5 ppm 표준시료를 제조하였다. 사용한 검량선의 R² 값은 0.9998으로 나타났다.



〈그림 3-6〉 표준시료를 이용한 N₂O 검량선

다) 반복성 평가

또한 가스크로마토그래피의 반복성은 표준가스를 7회 반복 분석하 <표 3-4>에 나타내었다. 평균에 대한 표준편차는 88.28, 상대표준편차는 1.5%로 나타냈다.

<표 3-4> N₂O 농도분석의 반복성 평가

반복 횟수	Peak area
1	6,412
2	6,532
3	6,610
4	6,555
5	6,500
6	6,423
7	6,680
평균값	6,530
표준편차	88.28
상대표준편차(%)	1.5

제3절 CO₂ 배출계수 및 감축 잠재량 산정

1. 초임계압과 초초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수 산정

초임계압과 초초임계압 발전소의 CO₂의 배출량 차이를 비교하기 위해 CO₂ 배출계수를 산정하였다. 현재 온실가스 인벤토리에서 적용되고 있는 CO₂ 배출계수는 ‘온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침 [별표16]’ 에서 제시한 식으로 산정하고 있다(식 (6), 식 (7) 참조).

본 연구에서는 식 (8)과 같이 송전단 전력량을 기준으로 한 초임계압과 초초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수를 산정하였다. 초임계압과 초초임계압의 송전단 효율은 발전소의 실제 효율을 협조 받아 반영하였다.

$$EF_{TJ,CO_2} = EF_{i,C} \times 3.664 \times 10^3 \quad (6)$$

$$EF_{i,C} = C_{ar,i} \times \frac{1}{EC_i} \times 10^3 \quad (7)$$

$$EF_{kWh,CO_2} = EF_{TJ,CO_2} \times \frac{4.1868}{10^9} \times 860 \div E \quad (8)$$

여기서, EF_{kWh,CO_2} : 송전량(kWh) 기준 CO₂ 배출계수(kgCO₂/kWh)

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

EF_{TJ,CO_2} : 열량(TJ) 기준 CO₂ 배출계수(kgCO₂/TJ-연료)

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

3.664 : CO₂의 분자량(44.010)/C의 원자량(12.011)

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

EC_i : 연료(i)의 열량계수(연료 순발열량, MJ/kg-연료)

2. 초초임계압 발전소 도입에 따른 CO₂ 감축 잠재량 산정

2018년 발표된 제2차 기후변화대응 기본계획에서 국내 석탄 화력발전소 중 초초임계압 발전소(Ultra-Super Critical)를 ‘30년까지 전체의 40%까지 확대 적용하겠다고 발표하였다. 이를 바탕으로, 본 연구에서 산정한 CO₂ 배출계수를 이용하여 2030년까지 초초임계압 발전소가 40%까지 도입될 시 CO₂ 감축 잠재량을 산정하였다.

전력거래소에서 발간한 2018년 발전소 현황과 2019년 3분기 발전소 건설사업 추진현황에 따르면, 2019년 국내 5개 발전사의 전체 발전소 호기 수는 59개이며, 이 중 초임계압 발전소는 53개, 초초임계압 발전소는 6개이다.

2030년 기준, 초임계압 발전소와 초초임계압 발전소 호기 수는 기후변화대응 기본계획에서 제시된 초초임계압 발전소 반영 비율 40 %를 고려하여 초임계압 32개, 초초임계압 22개 호기로 가정하였다(<표 3-5> 참조).

<표 3-5> 초초임계압 발전소 도입에 따른 발전소 현황

구분	2018년	2030년
전체 발전소 호기 수	59	54
초임계압 발전소 호기 수	53	32
초초임계압 발전소 호기 수	6	22*

*제2차 기후변화대응 기본계획에 따른 초초임계압 발전소 도입 비율 반영(40%)

전력통계정보시스템(EPSS)을 통해 확인한 2018년 국내 5개 발전사의 송전량을 기준으로, 2018년과 2030년의 초임계압과 초초임계압 발전소의 비율을 고려하여 CO₂ 감축 잠재량을 산정하였다.

제4절 Non-CO₂의 배출특성 분석

1. Non-CO₂ 배출계수 산정 방법

CO₂는 원소분석을 통하여 신뢰도 높은 배출계수를 산정할 수 있으나 CH₄과 N₂O와 같은 Non-CO₂ 배출계수는 연소 조건에 따라 가변적인 영향을 받을 수 있다(IPCC, 2006). 이에 따라 본 연구에서는 연료의 분석 결과와 실측을 통한 CH₄과 N₂O의 농도값, 그리고 TMS자료를 이용하여 배출계수를 산정하였다.

Non-CO₂ 배출계수 산정방법은 5단계의 Worksheet로 구성할 수 있다 (<표 3-6> 참조). 1단계는 발열량 분석, 원소분석, 공업분석을 통해 연료의 발열량 및 조성을 분석하는 단계이며, 2단계는 배기가스를 포집하고 실험실에서 GC-FID, GC-ECD를 이용하여 농도를 분석하는 단계이다. 3단계는 분석된 연료조성값과 TMS자료를 이용하여 이론공기량, 이론산소량, 과잉공기비, 순발열량을 산정하며, 4단계는 CH₄와 N₂O의 이론 배기가스량을 산정하는 단계이다. 마지막 5단계에서는 1~4단계를 통하여 산정한 값들을 이용하여 Non-CO₂ 배출계수를 산정한다.

<표 3-6> Non-CO₂ 배출계수 산정을 위한 Worksheet

Step 1 (Fuel data)							
Item	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Surfer	GCV	Moisture
Sub-Item	A	B	C	D	E	F	G
Unit	%	%	%	%	%	MJ/kg	%
Step 2 (Exhaust data)							
Item	Concentration of CH ₄		Concentration of N ₂ O		Exhaust oxygen concentration		
Sub-Item	H		I		J		
Unit	ppm		ppm		%		
Step 3 (Parameter)							
Item	Theoretical oxygen(O ₀)	Theoretical air(A ₀)	Excess air ratio(m)	NCV			
Sub-Item	K	L	M	N			
Unit	m ³ /kg	m ³ /kg	-	MJ/kg			
Calculation	$1.86 \times A + 5.6 \times (B - C/8) + 0.7 \times E$		K/0.21	21(21-J)		F-6(9B+G)	
Step 4 (Amount of theoretical dried combustion gas)							
Item	Amount of theoretical dried combustion gas(G _{od})						
Sub-Item	O						
Unit	m ³ /kg						
Calculation	$(1-0.21) \times L + 1.867 \times A + 0.7 \times E + 0.8 \times D$						
Step 5 (Emission Factor)							
Item	Non-CO ₂ emission factor						
Sub-Item	P						
Unit	kgNon-CO ₂ /TJ						
Calculation	$\{O + (M-1) \times L\} \times H(I) \times (16/44)/22.4/N$						

2. Non-CO₂ 배출농도와 TMS 자료와의 상관관계 분석

초임계압과 초초임계압 발전소를 대상으로 CH₄와 N₂O의 농도와 TMS 자료와의 상관관계를 분석하였다.

상관관계 분석은 한 변수의 변화에 따라 다른 변수의 변화 정도와 방향을 예측하는 분석방법이다(송지준, 2019). 두 변수의 상관관계는 등간 척도 이상의 두 변수 중에서 한 변수의 변화가 다른 변수의 변화에 따라 어떤 변화가 일어나는지를 보여주는 상관계수의 값으로 나타나며, -1.00에서 +1.00사이의 값으로 나타난다. 양의 상관관계 경우에는 (+) 값으로, 음의 상관관계의 경우에는 (-)값으로 나타난다. 상관계수의 절대값이 높을수록 두 변수간의 상관관계가 높다고 볼 수 있으며, 상관계수 값에 따른 상관관계 강도는 <표 3-7>과 같다.

본 연구에서는 SPSS 프로그램을 이용하여 상관관계를 분석하였다.

<표 3-7> 상관관계 계수에 따른 상관관계 강도

상관관계 계수	상관관계 강도	상관관계 계수	상관관계 강도
± 0.9 이상	매우 높은 상관관계	±0.2 ~ ± 0.4 미만	낮은 상관관계
±0.7 ~ ± 0.9 미만	높은 상관관계	±0.2 미만	상관관계 거의 없음
±0.4 ~ ± 0.7 미만	다소 높은 상관관계		

제4장 초임계압과 초초임계압 발전소의 Non-CO₂ 배출특성 비교

제1절 연료 분석 결과

1. 발열량 분석 결과

초임계압과 초초임계압 발전소에서 현장 측정 시 사용된 연료(유연탄) 3개를 각각 3회 반복 분석하였다. <표 4-1>에는 발열량 분석 결과의 전체 평균값으로 나타내었다. 초임계압 발전소에서 사용된 연료의 순발열량은 4,983 kcal/kg, 초초임계압 발전소에서 사용된 연료의 발열량은 4,732 kcal/kg으로 나타났다.

<표 4-1> 초임계압 발전소에서 사용된 연료의 발열량 분석결과
(단위 : kcal/kg)

구 분		순발열량
초임계압 발전소	평균	4,983
	표준편차	19
초초임계압 발전소	평균	4,732
	표준편차	20

2. 원소분석 결과

초임계압과 초초임계압 발전소에서 현장 측정 시 사용된 연료(유연탄) 3개를 각각 3회 반복 분석하였다. <표 4-2>에는 원소분석 결과의 전체 평균값으로 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) 0.13 %로 나타났다.

S(황) 0.46 % 로 나타났다. 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.

<표 4-2> 초임계압 발전소에서 사용된 연료의 원소분석 결과

(단위: %)

구 분		C(탄소)	H(수소)	O(산소)	N(질소)	S(황)
초임계압 발전소	평균	71.68	4.92	12.79	1.47	0.46
	표준편차	0.20	0.03	0.36	0.32	0.13
초초임계압 발전소	평균	69.00	4.78	15.70	1.35	0.31
	표준편차	0.30	0.09	0.38	0.43	0.25

3. 공업분석 결과

초임계압과 초초임계압 발전소에서 현장 측정 시 사용된 연료(유연탄) 3개를 각각 3회 반복 분석하였다. <표 4-3>에는 공업분석 결과의 전체 평균값으로 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.

<표 4-3> 초임계압 발전소에서 사용된 연료의 공업분석 결과

(단위: %)

구 분		고유수분(IM)	휘발분(VM)	회분(Ash)	고정탄소(FC)
초임계압 발전소	평균	9.30	35.14	7.96	47.60
	표준편차	0.10	0.25	0.13	0.30
초초임계압 발전소	평균	11.72	35.94	10.31	42.03
	표준편차	0.39	0.30	0.17	0.10

제2절 CO₂ 배출계수 비교 및 감축 잠재량 산정

1. 초임계압과 초초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수 산정 및 비교

식 (7)을 이용하여 초임계압과 초초임계압 발전소의 열량(TJ) 기준 CO₂ 배출계수를 산정하였다. 산정한 배출계수는 값은 <표 4-4>에 나타내었다. 초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수는 106,372 kgCO₂/TJ, 초초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수는 106,174 kgCO₂/TJ로 열량 기준 CO₂ 배출계수는 거의 차이가 없었다.

<표 4-4> 초초임계압과 초임계압 발전소의 열량 기준 CO₂ 배출계수 비교

구 분	초초임계압 발전소(A)	초임계압 발전소(B)	차이 (%) (A-B)/B
CO ₂ 배출계수	106,174 kgCO ₂ /TJ	106,372 kgCO ₂ /TJ	-0.2

식 (8)을 이용하여 초임계압과 초초임계압 발전소의 송전량 기준(kWh) CO₂ 배출계수를 산정하고 비교하였다(<표 4-5> 참조). 초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수는 1.017 kgCO₂/kWh으로 산정되었으며, 초초임계압 발전소의 배출계수는 0.947 kgCO₂/kWh으로 초초임계압 발전소의 배출계수가 7 % 낮게 산정되었다. 열량 기준 CO₂ 배출계수와 다르게 효율이 더 높은 초초임계압 발전소가 같은 전력량을 생산하는데 CO₂가 더 적게 배출되는 것으로 나타났다.

<표 4-5> 초초임계압과 초임계압 발전소의 송전량 기준 CO₂ 배출계수 비교

구 분	초초임계압 발전소(A)	초임계압 발전소(B)	차이 (%) (A-B)/B
CO ₂ 배출계수	0.947 kgCO ₂ /kWh	1.017 kgCO ₂ /kWh	-7

2. 초초임계압 발전소 도입에 따른 CO₂ 감축 잠재량 산정

전력통계정보시스템(EPSIS)를 통해 확인한 2018년 국내 5개 발전사의 송전량은 210,823,720 MWh 였다. 이를 기준으로 2018년 초임계압과 초초임계압 발전소의 비율인 90 %, 10 %를 고려하면 초임계압 발전소의 송전량은 189,741,348 MWh, 초초임계압 발전소의 송전량은 21,082,372 MWh로 나타났다. 본 연구에서 가정한 2030년의 초초임계압과 초초임계압 발전소 비율인 60 %, 40 %을 적용한 결과, 초임계압 발전소의 송전량은 126,494,232 MWh, 초초임계압 발전소의 송전량은 84,239,488 MWh로 나타났다(<표 4-6> 참조).

<표 4-6> 초임계압과 초초임계압 발전 비율에 따른 송전량

구 분	발전 비율 (%)	송전량(MWh)	
현재	초임계압 발전소	90	189,741,348
	초초임계압 발전소	10	21,082,372
제2차 기후변화대응	초임계압 발전소	60	126,494,232
기본계획*	초초임계압 발전소	40	84,239,488

*제2차 기후변화대응 기본계획에 따른 초초임계압 발전소 도입 비율 반영(40%)

위와 같이 산정한 송전량을 본 연구에서 개발한 CO₂ 배출계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다. 2018년의 CO₂ 배출량은 초임계압 발전소 193,021,000 tonCO₂, 초초임계압 발전소 19,974,000 tonCO₂으로 나타났다. 2030년의 CO₂ 배출량은 초임계압 발전소 128,681,000 tonCO₂, 초초임계압 발전소 79,898,000 tonCO₂으로 나타났다(<표 4-7> 참조).

<표 4-7> 초임계압과 초초임계압 발전 비율을 고려한 CO₂ 배출량 산정

(단위: tonCO₂)

구 분	현재		제2차 기후변화대응 기본계획*	
	초임계압 발전소	초초임계압 발전소	초임계압 발전소	초초임계압 발전소
CO ₂ 배출량	193,021,000	19,974,000	128,681,000	79,898,000

*제2차 기후변화대응 기본계획에 따른 초초임계압 발전소 도입 비율 반영(40%)

초초임계압 발전 비율에 따른 CO₂ 배출량을 산정한 결과, 제2차 기후변화대응 기본계획을 반영한 초초임계압 발전소의 비율이 40 %로 증가할 때, CO₂ 배출량이 2 %(4,417,000 tonCO₂) 감소하는 것으로 나타났다(<표 4-8> 참조).

<표 4-8> 초임계압과 초초임계압 발전 비율을 고려한 CO₂ 배출량 비교

구 분	현재(A)	제2차 기후변화대응 기본계획(B)*	차이% (B-A)/A
CO ₂ 배출량	212,996,000 tonCO ₂	208,579,000 tonCO ₂	-2

*제2차 기후변화대응 기본계획에 따른 초초임계압 발전소 도입 비율 반영(40%)

제3절 Non-CO₂ 배출계수 산정 및 비교

1. 초임계압과 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수 산정 및 비교

가) 초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수 산정

초임계압 발전소의 배기가스를 1일 10개, 3일에 걸쳐 총 30개 포집하여 측정하였다. 배기가스의 농도 측정은 GC-FID를 이용하여 측정하였으며, 측정한 CH₄ 농도 분석결과는 <표 4-9>에 나타내었다. 1차 실험의 CH₄ 평균 농도는 1.043 ppm, 2차 실험에서는 0.944 ppm, 3차 실험에서는 0.986 ppm으로 나타났으며 전체 평균 농도는 0.991 ppm으로 나타났다.

<표 4-9> 초임계압 발전소 배기가스의 CH₄ 농도

(단위: ppm)

구 분	CH ₄ 농도	표준편차	상대표준편차(%)
1차 실험	1.043	0.346	33
2차 실험	0.944	0.065	7
3차 실험	0.986	0.033	3
평균	0.991	0.200	21

<표 3-6>에서 제시한 Work-sheet를 따라 산정한 초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수는 다음과 같다(<표 4-10> 참조). 1차 실험에서의 배출계수 평균값은 0.378 kgCH₄/TJ, 2차 실험에서는 0.323 kgCH₄/TJ, 3차 실험에서는 0.351 kgCH₄/TJ으로 나타났으며 전체 배출계수 평균값은 0.351 kgCH₄/TJ으로 나타났다.

<표 4-10> 초임계압 발전소 배기가스의 CH₄ 배출계수

(단위: kgCH₄/TJ)

구 분	CH ₄ 배출계수	표준편차	상대표준편차(%)
1차 실험	0.378	0.122	32
2차 실험	0.323	0.021	7
3차 실험	0.351	0.013	4
평균	0.351	0.075	21

나) 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수 산정

초초임계압 발전소의 배기가스를 1일 10개, 3일에 걸쳐 총 30개 포집하여 측정하였다. 배기가스의 농도 측정은 GC-FID를 이용하여 측정하였으며, 측정한 CH₄ 농도 분석결과는 <표 4-11>에 나타내었다. 1차 실험의 CH₄ 평균 농도는 0.271 ppm, 2차 실험에서는 0.287 ppm, 3차 실험에서는 0.260 ppm 으로 나타났으며 전체 평균 농도는 0.273 ppm으로 나타났다.

<표 4-11> 초초임계압 발전소 배기가스의 CH₄ 농도

(단위: ppm)

구 분	CH ₄ 농도	표준편차	상대표준편차(%)
1차 실험	0.271	0.035	13
2차 실험	0.287	0.032	11
3차 실험	0.260	0.011	4
평균	0.273	0.030	11

<표 3-6>에서 제시한 Work-sheet를 따라 산정한 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수는 다음과 같다(<표 4-12> 참조). 1차 실험에서의 배출계수 평균값은 0.088 kgCH₄/TJ, 2차 실험에서는 0.092 kgCH₄/TJ, 3차 실험에서는 0.094 kgCH₄/TJ으로, 전체 배출계수 평균값은 0.091 kgCH₄/TJ으로 나타났다.

<표 4-12> 초초임계압 발전소 배기가스의 CH₄ 배출계수

(단위: kgCH₄/TJ)

구 분	CH ₄ 배출계수	표준편차	상대표준편차(%)
1차 실험	0.088	0.011	13
2차 실험	0.092	0.010	11
3차 실험	0.094	0.030	32
평균	0.091	0.020	22

다) 초임계압과 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수 비교

초임계압과 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수를 비교한 결과는 <표 4-13>에 나타내었다. 초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수는 평균 0.351 kgCH₄/TJ, 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수는 평균 0.091 kgCH₄/TJ으로 초초임계압 발전소의 평균 CH₄ 배출계수가 74 % 낮게 산정되었다. 2006 IPCC Guideline에서 제시한 CH₄ 배출계수보다 초임계압과 초초임계압 발전소 모두 낮게 산정되었다.

〈표 4-13〉 초임계압과 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수 비교

(단위: kgCH₄/TJ)

구 분	초임계압 발전소	초초임계압 발전소	2006 IPCC Guideline
CH ₄ 배출계수	0.351	0.091	0.7

2. 초임계압과 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수 산정 및 비교

가) 초임계압 발전소의 N₂O 배출계수 산정

초임계압 발전소의 배기가스를 1일 10개, 3일에 걸쳐 총 30개 포집하여 측정하였다. 배기가스의 농도 측정은 GC-ECD를 이용하여 측정하였으며, N₂O 농도 분석결과는 〈표 4-14〉에 나타내었다. 1차 실험의 N₂O 평균 농도는 0.627 ppm, 2차 실험에서는 1.084 ppm, 3차 실험에서는 0.936 ppm으로 나타났으며 전체 평균 농도는 0.882 ppm으로 나타났다.

〈표 4-14〉 초임계압 발전소 배기가스의 N₂O 농도

(단위: ppm)

구 분	N ₂ O 농도	표준편차	상대표준편차(%)
1차 실험	0.627	0.187	30
2차 실험	1.084	0.221	20
3차 실험	0.936	0.131	14
평균	0.882	0.265	30

〈표 3-6〉에서 제시한 Work-sheet를 따라 산정한 초임계압 발전소의 N₂O 배출계수는 다음과 같다(〈표 4-15〉 참조). 1차 실험에서의 배출계수

평균값은 0.627 kgN₂O/TJ, 2차 실험에서는 1.023 kgN₂O/TJ, 3차 실험에서는 0.917 kgN₂O/TJ으로 나타났으며 전체 배출계수 평균값은 0.872 kgN₂O/TJ으로 나타났다.

<표 4-15> 초임계압 발전소 배기가스의 N₂O 배출계수

(단위: kgN₂O/TJ)

구 분	N ₂ O 배출계수	표준편차	상대표준편차(%)
1차 실험	0.627	0.194	31
2차 실험	1.023	0.220	21
3차 실험	0.917	0.122	13
평균	0.872	0.244	28

나) 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수 산정

초초임계압 발전소의 배기가스를 1일 10개, 3일에 걸쳐 총 30개 포집하여 측정하였다. 배기가스의 N₂O 농도 측정은 GC-ECD를 이용하여 측정하였으며, N₂O 농도 분석결과는 <표 4-16>에 나타내었다. 1차 실험의 N₂O 평균 농도는 0.572 ppm, 2차 실험에서는 0.835 ppm, 3차 실험에서는 0.464 ppm으로 나타났으며 전체 평균 농도는 0.623 ppm으로 나타났다.

〈표 4-16〉 초초임계압 발전소 배기가스의 N₂O 농도

(단위: ppm)

구 분	N ₂ O 농도	표준편차	상대표준편차(%)
1차 실험	0.572	0.063	11
2차 실험	0.835	0.089	11
3차 실험	0.464	0.075	16
평균	0.623	0.173	28

〈표 3-6〉에서 제시한 Work-sheet를 따라 산정한 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수는 다음과 같다(〈표 4-17〉 참조). 1차 실험에서의 N₂O 배출계수 평균값은 0.511 kgN₂O/TJ, 2차 실험에서는 0.738 kgN₂O/TJ, 3차 실험에서는 0.412 kgN₂O/TJ으로, 전체 배출계수 평균값은 0.553 kgN₂O/TJ으로 나타났다.

〈표 4-17〉 초초임계압 발전소 배기가스의 N₂O 배출계수

(단위: kgN₂O/TJ)

구 분	N ₂ O 배출계수	표준편차	상대표준편차(%)
1차 실험	0.511	0.057	11
2차 실험	0.738	0.079	11
3차 실험	0.412	0.067	16
평균	0.553	0.153	28

다) 초임계압과 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수 비교

초임계압과 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수를 비교한 결과는 〈표 4-18〉에 나타내었다. 초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수는 평균 0.872 kgN₂O/TJ, 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수는 평균 0.553 kgN₂O/TJ으로 초초임계압 발전소

의 평균 N₂O 배출계수가 36 % 낮게 산정되었다. 2006 IPCC Guideline에서 제시한 N₂O 배출계수보다 초임계압과 초초임계압 발전소 모두 높게 산정되었다.

<표 4-18> 초임계압과 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수 비교

(단위: kgN₂O/TJ)

구 분	초임계압 발전소	초초임계압 발전소	2006 IPCC Guideline
N ₂ O 배출계수	0.872	0.553	0.5

제4절 Non-CO₂ 배출과 영향 요소

Non-CO₂ 배출과 영향 요소의 관계를 살펴보기 위하여 Non-CO₂ 배출에 영향을 줄 것으로 예상되는 연료 성분과 배기가스 성분의 상관관계를 분석하였다. CH₄ 배출농도는 연료 중 탄소 함량과 높은 양의 상관관계를 나타냈고, N₂O 배출농도는 NO_x 배출농도와 낮은 음의 상관관계를 나타냈다.

1. CH₄ 농도와 연료 중 탄소 함량의 상관관계

CH₄ 배출농도와 연료 중 탄소 성분의 상관관계를 분석하였다. 상관관계 분석을 위해 CH₄ 농도와 연료 중 탄소 함량 자료 120개를 수집하여 상관관계를 분석하였다. CH₄ 농도와 연료 중 탄소 함량의 평균값은 <표 4-19>에 나타내었다.

<표 4-19> CH₄ 배출농도와 연료 중 탄소 성분의 평균값

구분	평균 값	자료 수
CH ₄ 배출농도	0.540 ppm	120
연료 중 탄소 함량	68.94 %	120

상관관계를 분석하기 위해 정규성 검정을 진행하였다. 정규성 검정 결과, <표 4-20>에서 보는바와 같이 유의확률이 0.05미만으로 정규분포를 만족하지 않았기 때문에 비모수 상관관계 분석 방법인 스피어만의 상관관계 분석 방법(Spearman's rank correlation coefficient)을 이용하여 분석하였다.

<표 4-20> CH₄ 배출농도와 연료 중 탄소 함량의 정규성 검정 결과

구분	Shapiro-Wilk		
	통계량	자유도	유의확률
CH ₄ 배출농도	0.303	120	0.000
연료 중 탄소 성분	0.260	120	0.000

<표 4-21>에서 보는 바와 같이 상관계수 0.752로, CH₄ 농도와 연료 중 탄소 함량은 높은 양의 상관관계를 나타냈다. 연료 중 탄소 함량이 많을 수록 배기가스 중의 CH₄ 농도가 높아지는 것으로 나타났다.

<표 4-21> CH₄ 배출농도와 연료 중 탄소 함량의 상관관계 분석

Spearman의 상관관계 분석		연료 중 탄소 함량
CH ₄ 배출농도	상관계수	0.752**
	유의확률(양측)	0.000
	N	120

**상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의함.

2. N₂O 배출농도와 NO_x 배출농도의 상관관계

초임계압과 초초임계압 발전소를 대상으로 N₂O 배출농도와 배기가스 중의 NO_x 농도와의 상관관계를 분석하였다. 상관관계 분석을 위해 N₂O 농도와 배기가스 중의 NO_x 농도 자료 120개를 수집하여 상관관계를 분석하였다. N₂O와 배기가스 중의 NO_x 평균농도는 <표 4-22>에 나타내었다.

<표 4-22> N₂O 배출농도와 NO_x 배출농도의 평균 값

구분	평균 값	자료 수
N ₂ O 배출농도	0.604 ppm	120
NO _x 배출농도	23.30 ppm	120

상관관계를 분석하기 위해 정규성 검정을 진행하였다. 정규성 검정 결과, <표 4-23>에서 보는바와 같이 유의확률이 0.05미만으로 정규분포를 만족하지 않았기 때문에 비모수 상관관계 분석 방법인 스피어만의 상관관계 분석 방법(Spearman's rank correlation coefficient)을 이용하여 분석하였다.

<표 4-23> N₂O 배출농도와 NO_x 배출농도의 정규성 검정 결과

구분	Shapiro-Wilk		
	통계량	자유도	유의확률
N ₂ O 배출농도	0.137	120	0.000
NO _x 배출농도	0.221	120	0.000

<표 4-24>에서 보는 바와 같이 상관계수 -0.264 로, N₂O 배출농도와 NO_x 배출농도는 낮은 음의 상관관계를 나타냈다. NO_x의 생성이 증가할 수록 N₂O의 생성이 감소하는 것으로 나타났다.

<표 4-24> N₂O 배출농도와 NO_x 배출농도의 상관관계 분석

Spearman의 상관관계 분석		NO _x 배출농도
N ₂ O 배출농도	상관계수	-0.264**
	유의확률(양측)	0.004
	N	120

**상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의함.

제5장 결론

제1절 연구요약

본 연구에서는 송전단 효율을 고려한 초임계압과 초초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수를 산정하고, 산정한 CO₂ 배출계수를 이용하여 초초임계압 발전소가 40%까지 도입되었을 때의 CO₂ 저감 잠재량을 산정하였다. 또한, Non-CO₂ 배출계수를 산정·비교하고 Non-CO₂ 농도와 TMS 자료와의 상관관계를 분석하였다.

초임계압과 초초임계압 발전소의 송전단 효율을 고려한 CO₂ 배출계수를 산정한 결과, 초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수는 1.017 kgCO₂/kWh, 초초임계압 발전소는 0.947 kgCO₂/kWh으로, 초초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수가 7 % (0.047 kgCO₂/kWh) 낮게 산정되었다.

산정한 배출계수를 이용하여 초초임계압 발전소를 2030년까지 40% 도입 시(제2차 기후변화대응 기본계획), 국내 5개 발전사의 2018년 송전량을 기준으로 CO₂ 저감 잠재량을 산정하였다. 2018년 기준 국내 5개 발전사의 송전량은 전력통계정보시스템(EPSS)를 통해 확인하였고, 초임계압과 초초임계압 발전소의 송전단 효율은 발전소의 실제 효율을 협조 받아 반영하였다.

CO₂ 배출량을 산정한 결과, 2018년(초임계압: 90%, 초초임계압: 10%)에는 212,996,000 tonCO₂, 2030년(초임계압: 60%, 초초임계압: 40%)에는 208,579,000 tonCO₂로, 초초임계압 발전소가 40 %까지 도입될 시 CO₂ 저감량이 2 %(4,417,000 tonCO₂) 감소하는 것으로 나타났다.

초임계압과 초초임계압 발전소의 Non-CO₂ 배출계수를 산정하고 비교하였다. 발전소 굴뚝에서 배기가스를 포집하여 GC(Gas

Chromatography)로 CH₄과 N₂O의 농도를 분석하고, TMS 자료를 이용하여 Non-CO₂ 배출계수를 개발하였다. 초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수는 0.351 kgCH₄/TJ, 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수는 0.091 kgCH₄/TJ으로, 초초임계압 발전소의 CH₄ 배출계수가 74% 낮게 산정되었다. 2006 IPCC Guideline에서 제시한 CH₄ 배출계수보다 초임계압과 초초임계압 발전소 모두 낮게 산정되었다. 초임계압 발전소의 N₂O 배출계수는 0.872 kgN₂O/TJ, 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수는 0.553 kgN₂O/TJ로, 초초임계압 발전소의 N₂O 배출계수가 36% 낮게 산정되었다. 2006 IPCC Guideline에서 제시한 N₂O 배출계수보다 초임계압과 초초임계압 발전소 모두 높게 산정되었다. 2006 IPCC Guideline에서 제시한 CH₄ 배출계수보다 초임계압과 초초임계압 발전소의 배출계수가 모두 낮게 나타났고, N₂O 배출계수는 초임계압과 초초임계압 발전소의 배출계수가 모두 높게 나타났다.

Non-CO₂ 농도와 영향 요소의 상관관계 분석은 비모수 상관관계 분석 방법인 스피어만의 상관관계분석 방법(Spearman's rank correlation coefficient)으로 분석하였다. CH₄ 농도와 연료 중 탄소 함량의 상관관계 분석 결과, 상관계수 0.752로 강한 양의 상관관계를 나타냈다. 연료 중 탄소 함량이 많을수록 배기가스의 CH₄ 농도가 높아지는 것으로 나타났다. N₂O 농도와 배기가스 중의 NO_x 농도의 상관관계 분석 결과, 상관계수 -0.264로 낮은 음의 상관관계를 나타냈다. NO_x의 생성이 증가할수록 N₂O의 생성이 감소하는 것으로 나타났다.

제2절 연구의 시사점 및 한계

본 연구에서 송전단 효율을 반영한 CO₂ 배출계수를 개발한 결과, 초초임계압 발전소의 CO₂ 배출계수가 초임계압 발전소보다 7%(0.047 kgCO₂/kWh) 낮게 산정되었다. 같은 양의 전력을 생산하는데 효율이 높은 초초임계압 발전소가 CO₂를 적게 배출하는 것으로 나타났다.

개발한 CO₂ 배출계수를 이용하여 2030년 초초임계압 발전소가 전체 발전소의 40%까지 도입될 시, CO₂ 배출량이 2%(4,417,000 tonCO₂) 감소하는 것으로 나타났다. 효율이 높은 초초임계압 발전소가 더 많이 도입될 시 CO₂ 저감량을 정량적으로 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 2018년 국내 5개 발전사의 송전량을 기준으로 CO₂ 저감 잠재량을 산정하였고, 국내 모든 발전소의 부하율, 이용률, 발전 용량 등이 고려되지 않았기 때문에 신뢰성 있는 CO₂ 저감 잠재량을 산정하기 위해서는 국내 모든 발전소의 발전 용량, 부하율, 이용률 등이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

초임계압과 초초임계압 발전소의 Non-CO₂ 배출계수 개발 결과, 초초임계압 발전소의 CH₄, N₂O 배출계수 모두 초임계압 발전소보다 낮게 산정되었다. 본 연구를 통해 초초임계압 발전소의 비율이 높아질수록 온실가스가 저감되는 것으로 나타났다.

Non-CO₂의 배출특성은 로내온도, 대기오염방지시설 등과 같은 요인들에 의해 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로 더욱 신뢰성 있는 연구를 위해서 더 많은 연구 사례가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 배상훈, 2016, “경제성·발전 효율 높은 친환경 발전기술, 초초임계압,”
<http://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=10647>, [2019.10.13.]
- 송지준, 2019, 『논문 작성에 필요한 SPSS/AMOS 통계분석방법』, 경기도:
21세기사
- 신소재경제, 2018, “차세대 석탄화력 발전플랜트 소재기술(1)-제4장 에너지 효율화·경량화 소재기술-신소재경제신문·재료연구소 공동기획 소재기술백서 2016(33),” <http://www.amenews.kr/news/view.php?idx=36493>, [2019.10.14.]
- 온실가스종합정보센터, 2019, 『2019년 국가 온실가스 인벤토리(1990~2017) 공표』, 서울: 온실가스종합정보센터.
- 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침, 2017, 제87조 [별표16].
- 이효상, 2014, “NH₃-SCR 탈질반응에서 N₂O 생성 억제를 위한 Fe(OX)-modified V₂O₅, TiO 촉매,” 석사학위 논문, 대구대학교, 대구.
- 정재현, 2017, “우드칩 유동층보일러의 Non-CO₂ 배출계수 개발,” 석사학위 논문, 세종대학교, 서울.
- 조창상, 2016, “대기오염방지시설이 Non-CO₂ 배출농도에 미치는 영향 및 예측모형 연구,” 박사학위 논문, 세종대학교, 서울.

홍윤정, 2016, “연소시설의 온실가스 최적 시료채취 및 분석 설계 연구,”
박사학위 논문, 세종대학교, 서울.

한국전력거래소, 2019, 『발전 설비 현황』, 전라남도 나주: 한국전력거래소.

한국전력거래소, 2019, 『발전소 건설사업 추진현황 2019년 3분기』, 전라
남도 나주: 한국전력거래소.

환경부, 2019, 『제2차 기후변화대응 기본계획』, 세종시: 환경부.

IPCC, 2006. The 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas
Inventories. Volume 2: Energy, Chapter 2: Stationary Combustion.

S. Korhonen, M. Fabritius and H. Hoffren, 2001, METHANE AND NITROUS
OXIDE EMISSIONS IN THE FINNISH ENERGY PRODUCTION, Fortum
Power and Heat Oy, Technology.

Taddaki Shimizu, “Reaction Pathways of NO_x and N_2O over CaO in the
Presence of Char under Carbonator Conditions of Calcium-Looping CO_2
Capture Process,” Journal of the Japan Institute of Energy, 95, pp.
1115-1124.

V.A. Kondratenko, “Mechanistic aspects of N_2O and N_2 formation in NO
reduction by NH_3 over $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$: the effect of O_2 and H_2 ,”
Environmental, 84, pp.497-504.

Abstract

Comparison of CO₂ Emission Factors and Non-CO₂ Emission Characteristics of Supercritical and Ultra-Supercritical Power Plants

Joonyoung Roh

Cooperation Course for Climate Change

The Graduate School

Sejong University

In this study, the CO₂ emission factors of supercritical and ultra-supercritical power plants considering transmission stage efficiency were calculated, and the CO₂ reduction potential was calculated when the supersupercritical power plant was introduced up to 40% using the calculated CO₂ emission factor. In addition, non-CO₂ emission factors were calculated and compared, and the correlation between non-CO₂ concentration and TMS data was analyzed.

As a result of calculating the CO₂ emission coefficients of the supercritical and supercritical power plants, the supercritical power plant was estimated to be 1.017 kgCO₂/kWh, the supersupercritical power plant was 0.947 kgCO₂/kWh, and the CO₂ emission factor of the supersupercritical power plant was estimated. 7% lower. Using the calculated emission factors, 40% of ultra-supercritical power plants were introduced, and CO₂ emissions were calculated based on the transmission of five domestic power generation companies. 212,996,000 tonCO₂ for supercriticalpower

plants: 90%, ultra-supercritical power plants: 10%), 208,579,000 tonCO₂ for 2030 (supercritical power plants: 60%, ultra-supercritical power plants 40%) CO₂ reduction was found to decrease by 2% (4,417,000 tonCO₂).

As a result of calculating the non-CO₂ emission factor of supercritical and supercritical power plants, the CH₄ emission factor of the supercritical power plant is 0.351 kgCH₄/TJ, and the CH₄ emission factor of the ultra-supercritical power plant is 0.091 kgCH₄/TJ. The CH₄ emission factor of the pressure plant was estimated to be 74% lower. The N₂O emission factor of the supercritical power plant was 0.872 kgN₂O/TJ, and the N₂O emission factor of the ultra-supercritical power plant was 0.553 kgN₂O/TJ, which was estimated to be 36% lower.

The correlation between non-CO₂ concentration and TMS data was analyzed by Spearman's Spearman's rank correlation coefficient (rho) method. As a result of the correlation analysis between the concentration of CH₄ and the concentration of O₂ in the exhaust gas, the correlation coefficient of 0.812 showed a strong positive correlation. Incomplete combustion of the fuel increased the concentration of CH₄ and O₂ in the exhaust gas. As a result of correlation analysis between N₂O concentration and O₂ concentration in exhaust gas, the correlation coefficient was low negative with correlation coefficient -0.264. As NO_x production increased, it was confirmed that N₂O production decreased.

Keywords : Greenhouse gases, GHGs reduction, Non-CO₂, Inventory, Emission Factor, Ultra-supercritical power plant