

기술자료

충남 석탄화력발전소 주변 지역 대기오염 영향 분석

Air Pollution Impact in the Area Around Coal-fired Power Plant in ChungNam

김수향, 박세찬¹⁾, 황규철¹⁾, 최영남¹⁾, 이상신¹⁾, 박선환, 이가혜²⁾,
김정호³⁾, 노수진⁴⁾, 김종범¹⁾,*

(주)선일이앤씨, ¹⁾충남연구원 서해안기후환경연구소,

²⁾차세대융합기술연구원 산불감시실증지원센터, ³⁾(주)미세먼지연구소,

⁴⁾대림대학교 보건안전학과

Su-Hyang Kim, Sechan Park¹⁾, Kyuchool Hwang¹⁾, Young-Nam Choi¹⁾,
Sang Sin Lee¹⁾, Sunhwan Park, Gahye Lee²⁾, Jeongho Kim³⁾,
Sujin Noh⁴⁾, Jong Bum Kim¹⁾,*

Sunil Engineering & Consultant Co., Ltd, Uiwang, Republic of Korea

¹⁾Seohae Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong, Republic of Korea

²⁾Test-bed & Support Center for Wildfire Monitoring, Advanced Institute of Convergence Technology, Suwon, Republic of Korea

³⁾Fine Particle Lab CO., Ltd., Incheon, Republic of Korea

⁴⁾Department of Health & Safety, Daelim University, Anyang, Republic of Korea

접수일 2023년 11월 13일

수정일 2023년 12월 10일

채택일 2023년 12월 22일

Received 13 November 2023

Revised 10 December 2023

Accepted 22 December 2023

*Corresponding author

Tel : +82-(0)41-630-3924

E-mail : kjb0810@cni.re.kr

Abstract In this study, we analyzed the impact of air pollutants caused by a coal-fired power plants located in Chungnam. The Chungnam region is characterized by diverse large-scale emission facilities, particularly notable for coal-fired power plants emitting noteworthy quantities of air pollutants, including PM_{2.5}, SO₂, and NO₂. For the analysis, we conducted modeling using the WRF-SMOKE-CMAQ system, utilizing emission data from the Clean Air Policy Support System (CAPSS) in 2019 was used. The modeling focused on Boryeong, Dangjin, and Taeon, where coal-fired power plants are situated. To assess changes in concentration resulting from emission variations, the study used the Brute Force Method (BFM) and the Significant Impact Levels (SILs), developed by the United States Environmental Protection Agency (EPA). As a result of the emission analysis, it was found that air pollutant emissions in Chungnam were gradually decreasing, with significant reductions noted in Dangjin, Boryeong, and Taeon. Analyzing the influence of surrounding areas on the modeling target areas revealed that the impact in Dangjin and Taeon was relatively small, likely due to the wind trajectory being pushed from inland to the coast. Conversely, Boryeong had the most significant influence on its surrounding areas, with the most affected regions being Boryeong, Hongseong, and Yesan.

Key words: Coal-fired power plant, PM_{2.5}, NO₂, SO₂, Chungnam, SILs, BFM

1. 서 론

대기환경은 수환경이나 토양 등과 다르게 어느 한 곳에 국한되지 않고, 온도와 압력, 에너지의 차이에 따라 이동하며 상호 영향을 미친다. 이러한 특징은 대기 오염이 발생하였을 때 국지적인 영향과 더불어 오염

물질이 먼 곳까지 도달하여 광범위한 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다(Ohara, 2011). 환경부는 대기 오염으로부터 국민을 보호하고 대기질 개선을 위해 다양한 환경정책을 추진해 오고 있으며, 그 결과 가시적인 개선 효과가 나타나고 있다(Kim, 2019). 하지만 이러한 가시적인 효과에도 불구하고 미세먼지(par-

ticulate matter less than 10 μm , PM_{10})와 초미세먼지 (particulate matter less than 2.5 μm , $\text{PM}_{2.5}$)로 분류되는 입자상 오염물질의 고농도 발생사례는 증가하여 대기 오염에 대한 국민적 관심과 우려 또한 증가하고 있다 (Yeo and Kim, 2019). 환경부에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 에 대해 주의보와 경보 기준을 설정하였으며, 2015년 이후 2020년까지 매년 100~200회 발령되고 있다(NIER, 2021). 이처럼 전반적으로 개선되고 있는 대기질 대비 증가하는 고농도 미세먼지 발생에 대한 국민적 우려와 걱정을 해소하기 위해 2018년 환경부를 중심으로 “미세먼지 관리 종합계획 (2020~2024)”이 수립되었고, 이에 대한 법적 기반 마련을 위해 2019년과 2020년에 각각 “미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(이하 미세먼지특별법)”과 “대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법(이하 대기관리권역법)”을 제정하였다(MOE, 2020a, 2019). 이전에는 서울, 경기, 인천 지역을 수도권 권역으로 지정하여 관리하였으나, 해당 법을 통해 중부권, 남부권, 동남권이 추가로 설정되어 총 4개의 권역으로 관리되기 시작하였다(MOE, 2020b).

중부권에 포함된 충남은 한반도 중서부에 위치하여 중국 등으로부터 유입되는 장거리 이동 오염물질에 직접적인 영향을 받으며, 발전소, 석유화학단지 및 제철소와 같은 대형배출시설이 다수 위치해 이에 따른 대기질 영향이 큰 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2020a). 일반적으로 석탄화력발전소는 총부유분진(total suspended particle, TSP)과 이산화질소(nitrogen dioxide, NO_2), 이산화황(sulfur dioxide, SO_2)의 배출량이 많은 것으로 알려져 있으며(Zhang *et al.*, 2022a; Lin *et al.*, 2019), 2022년 기준 우리나라 석탄화력발전소 59기 가운데 29기가 충남에 위치하여 이로 인한 지역적 영향이 큰 것으로 보고되고 있다(Lee *et al.*, 2021). 산업통산자원부는 제8차 전력수급 기본계획을 통해 석탄화력발전소의 단계적 감축과 LNG로의 전환을 계획하였고(MOTIE, 2017), 환경부에서는 노후 석탄화력발전소의 봄철 가동중지 및 조기 폐쇄, 발전량 상한 제약 등을 추진 중에 있다(MOE, 2020b). 국가미

세먼지정보센터에서 매년 발간하는 대기정책지원시스템(clean air policy support system, CAPSS)에 따르면 충남은 2015년부터 2018년까지 전국 대기오염물질 전체 배출량에서 경기도에 이어 2위를 차지하였고, 2020년에는 4위를 차지하는 등 대기오염물질 배출량이 많은 지역으로 나타났다(NIER, 2022). 통합환경관리사업장 및 대형사업장에 부착되어 운영 중인 굴뚝원격감시체계(tele monitoring system, TMS) 자료에 의하면 2015년부터 2021년까지 전국 10대 배출사업장 중 5곳이 석탄화력발전소이고, 이 가운데 3개 사업장이 충남에 위치해 있다(KECO, 2022). 충남은 “충남 대기환경 개선 종합계획(2018~2022)”과 “충남 대기환경관리 시행계획” 등을 수립하여 대형배출원 중심 대기질 관리를 추진하고 있다(Lee *et al.*, 2021).

Son *et al.* (2020a)은 충남에서 운영 중인 도시대기 측정망(air quality monitoring station, AQMS) 자료와 모델링을 활용하여 대형배출시설 인근의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 수준 및 주변 지역에 대한 기여도를 분석하였고, Moon *et al.* (2021)은 전국 17개 지자체를 대상으로 오염원별, 물질별 배출량이 해당지역과 인접 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 에 미치는 기여도를 분석하였다. 이외에도 충남의 대형배출원에 대한 영향 분석 연구가 다수 보고된 바 있다(Bae and Kim, 2022; Kang *et al.*, 2021; Son *et al.*, 2020b; Ju *et al.*, 2018a; Kim *et al.*, 2017). 하지만 충남에 위치한 화력발전소가 지역 내 미치는 영향에 대한 연구와 정보는 아직 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 충남에 위치한 발전소를 중심으로 주요 오염물질인 $\text{PM}_{2.5}$ 와 SO_2 , NO_2 에 의한 지역 내 영향과 기여도를 분석하였다. 본 자료는 추후 충남의 대기질 개선정책 수립과 발전소 관리 대책 마련을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 대상 발전소 선정

대상 발전소는 충남 내 4곳의 석탄화력발전소(당



Fig. 1. Location of the coal-fired power plant operated in Chungnam.

Table 1. Emission of regional air pollutants from coal-fired power plants located in Chungnam.

Unit: ton/year	Coal-fired power plants					② Chungnam	①/② (%)
	New-Boryeong	Boryeong	Taeon	Dangjin	① Summary		
TSP	84	311	344	436	1,175	65,443	1.8
SOx	1,503	4,429	4,821	4,315	15,069	62,332	24.2
NOx	720	4,505	5,627	4,385	15,237	96,950	15.7
VOCs	152	290	422	413	1,277	74,724	1.7
NH ₃	776	1,349	2,107	2,112	6,344	53,469	11.9
CO	1,265	2,358	3,522	3,447	10,592	63,944	16.6
Total	4,500	13,242	16,843	15,108	49,694	416,862	11.9

진, 태안, 보령, 서천) 중 서천을 제외한 3개 지점으로 선정하였다. 서천의 경우 2016년 석탄화력발전소가 폐쇄된 이후 2021년 신서천발전이 개소하여 재가동하고 있다. 하지만 본 연구는 2019년 CAPSS 배출량 자료를 기반으로 설계되었고, 서천의 경우 당해연도 배출량 자료가 없어 본 연구에서 제외되었다. 그림 1은 충남 내 4개 시·군에 위치한 발전소를 나타낸 것이다.

표 1은 2019년 CAPSS 기준 충남과 충남 내 운영 중인 석탄화력발전소의 대기오염물질 배출량을 나타낸

것이다. 2019년 기준 충남의 전체 대기오염물질 배출량은 416,862톤으로 그중 석탄화력발전소가 차지하는 비율은 11.9% (49,694톤)로 나타났다. 지역별로는 태안이 16,843톤(4.0%)으로 가장 높은 비율을 차지하며, 그 뒤를 이어 당진 15,108톤(3.6%), 보령 13,242톤(3.2%), 신보령 4,500톤(1.1%)으로 확인되었다. 오염물질별로는 NOx가 23.3%로 가장 큰 비율을 차지하였고, VOCs 17.9%, TSP 15.7%, CO 15.3%, SOx 15.0%로 나타났다.

2.2 대기질 모델링 및 입력자료

충남에 위치한 석탄화력발전소의 지역 내 영향 분석을 위해 3차원 광화학모델인 community multiscale air quality (CMAQ)를 활용하였다. CMAQ은 배출량 정보를 활용하여 오존생성이나 대기오염물질의 확산, 산성 침착, 화학반응에 의한 생성 결과에 대해 정확한 정보를 제공해 줄 수 있어 다수의 연구에 활용되고 있다(Jonathan *et al.*, 2014). CMAQ은 v4.7.1.을 활용하였고, 모사 영역은 동아시아 27 km (124×131), 국내 9 km (70×80)의 수평해상도로 설정하였다. 상세 분석 지역인 중부권과 충남에 대해서는 각각 3 km (70×76)와 1 km (154×142)의 수평해상도 영역으로 구성하였다. 연직층은 16층이며, 동아시아 영역에 대한 초기/경계값은 CMAQ 모델에서 제공하는 대기오염물질 프로파일 자료(Stockwell *et al.*, 1990)를 사용하였고, 국내, 중부권, 충남은 각각 상위 도메인의 모사 결과를 이용하여 오염물질의 장거리 수송을 고려하였다. 예측기간은 2021년 1월 1일부터 12월 31일이며 스

핀업(spin-up) 기간은 2020년 12월 22일~31일(11일)로 설정하였다.

배출량 자료는 국가미세먼지정보센터에서 제공하는 CAPSS 2019년 자료를 기반으로 sparse matrix operator kernel emission (SMOKE, v3.6)을 사용하였다. 국외 인위적인 배출량은 동아시아 배출목록(inter-continental chemical transport experiment phase B, INTEX-B)을 기초로 한 배출목록을 적용하였으며(NIER, 2009), 자연적 배출량은 biogenic emission inventory system (BEIS)을 활용하였다(Woo *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2009). 기상 초기입력자료는 국립환경예측센터(the national center for environmental prediction, NCEP)에서 제공하는 FNL (Final Operational Global Analysis data)의 분석장 자료($0.25 \times 0.25^\circ$)를 활용하였다. 기상장은 WRF v3.9.1을 사용하였고, 수행 옵션은 WSM3 (9 km 격자해상도), WSM6 (3 km 격자해상도), ACM2 PBL scheme, RTG SST (real-time global sea surface temperature)를 적용하였다. 그림 2

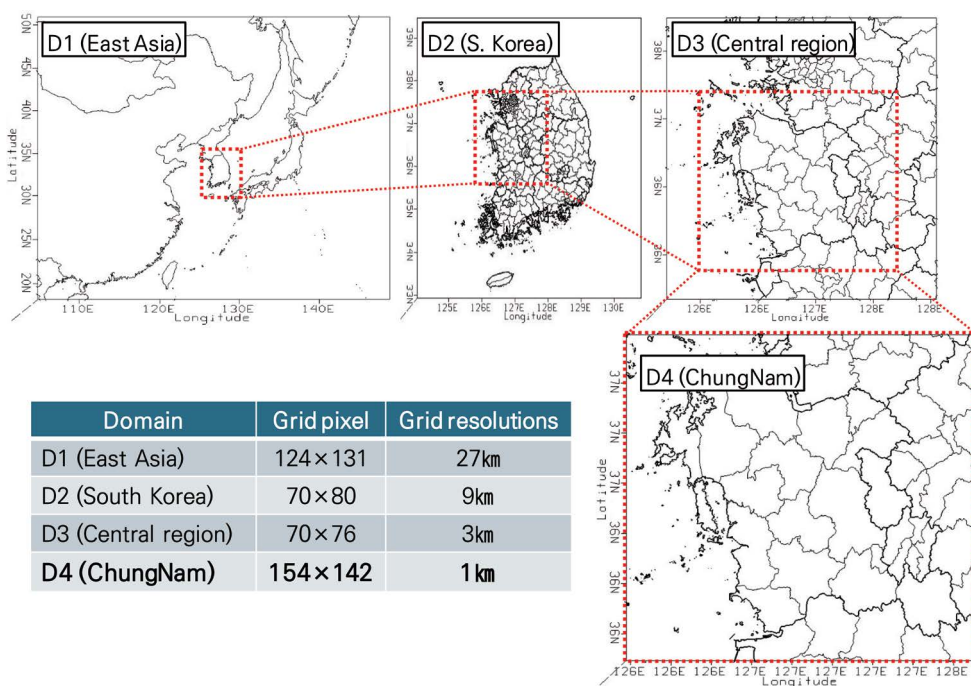


Fig. 2. CMAQ modeling domain and grid resolutions used in this study.

는 본 연구를 위해 사용된 격자와 세부 정보를 나타낸 것이다.

2.3 석탄화력발전소 영향 분석 방법

충남에서 운영 중인 석탄화력발전소에 의한 지역 내 영향파악을 위해 BFM (brute force method)을 이용하였다. BFM은 대기모델링 분야에서 배출량 변화에 따른 농도변화를 분석하는 데 주로 사용되는데, 모의된 농도와 배출량에 대해 정책이나 기술적용에 따른 증감 효과분석에 활발히 사용되고 있다(Bae *et al.*, 2020; Nam *et al.*, 2019). 식 1은 BFM에 사용된 평가방법이다.

$$S_i = \frac{C_i - C_x}{e_i} \quad (1)$$

S_i 는 발전소 I의 배출량 변화에 따른 농도변화이고, C_i 는 모든 배출원을 포함한 기본 모의 결과이고, C_x 는 발전소 I에 대한 삭감량을 반영한 모의 농도이다. 이때 e_i 는 발전소 I에 의한 삭감폭을 의미하며, 초기대비 변화된 값을 대상 배출원의 영향으로 분석한다. 본 연구에서는 e_i 를 100%로 설정하여 충남 내 석탄화력발전소가 위치한 보령, 당진, 태안의 발전소에 대한 각각의 영향을 분석하고, 최종적으로 3개 발전소에서 배출되는 오염물질에 대한 충남 지역 내 영향을 모사하였다(표 2). 영향조사 물질로는 $PM_{2.5}$ 와 그 전구물질로 알려진 NO_2 및 SO_2 를 대상으로 선정하였다.

2.4 석탄화력발전소 영향 범위 추정방법

석탄화력발전소의 영향 범위 산정에는 SILs (significant impact levels)을 활용하였다. SILs는 미국환경청 (United States environmental protection agency, U.S.

EPA)이 대기질 악화방지(PSD, prevention of significant deterioration)하의 허가 신청 시 특정 오염원에서 배출되는 오염물질이 국가대기질기준 (national ambient air quality standards, NAAQS) 또는 PSD 증가분을 초과하는 대기오염을 유발하지 않음을 입증하기 위해 자료를 제출하는데, 이때 대기질 모델링을 이용하여 영향예측 판단의 지표로 활용되고 있다(U.S. EPA, 2022, 2018). 표 3은 U.S. EPA에서 제공하고 있는 대기오염물질별 기준과 Class II, III의 SILs를 나타낸 것이다(NDEP, 2018). Class I은 국립공원과 같이 인간 활동이 거의 없는 자연환경 지역이며, Class II 지역은 Class I로 지정되지 않은 모든 지역으로 제한된 새로운 오염원 증가가 가능하다. Class III은 새로운 개발을 위해 지정할 수 있는 지역으로 허용가능한 증가량이 크지만 아직 지정된 지역은 없다. 국내에서는 아직 모델링 결과에 대한 영향 수준 파악을 위한 지표가 제시된 것이 없어 본 연구에서는 SILs 기준으로 영향권을 설정하였다. 국내 기준이 대기 중 오염물질의 부피분율(ppm)로 설정되어 있는 NO_2 와 SO_2 의 경우 표준상태(0°C, 1 atm)를 기준으로 무게농도로 환산된 농도($\mu g/m^3$)를 적용하였다.

2.5 공기흐름 분석방법

본 연구에서 공기의 이동 경로 및 흐름을 분석하기

Table 3. Ambient air quality standards and recommended significant impact levels (SILs).

Pollutants	Average period	NAAQS ($\mu g/m^3$)	SILs ($\mu g/m^3$)	SILs (ppb)
NO_2	1-Hour	188	7.5	
	Annual	100	1	0.487
SO_2	1-Hour	196	7.8	
	3-Hour	1,300	25	
	24-Hour	365	5	
	Annual	185	1	0.35
PM_{10}	24-Hour	150	5	
$PM_{2.5}$	24-Hour	35	1.2	
	Annual	12	0.2	

Table 2. Reduction scenario of coal-fired power plants used in this study.

Item	Domestic emissions
Scenario 1	Contribution from Dangjin (DJ) Plant
Scenario 2	Contribution from Taean (TA) Plant
Scenario 3	Contribution from Boryeong (BR) Plant
Scenario 4	Contribution from all coal-fired power plant in Chungnam

위해 사용한 모델은 미국 해양대기청(national oceanic atmospheric administration, NOAA)의 Hysplit 모델이며, 버전 5.2.1을 사용하였다. Hysplit 모델에서는 시작 위치에서 시작하여 시간이 지남에 따라 앞으로 이동하는 경로에 대한 추정치를 모사하는 forward trajectory와 공기가 시작 위치에 도착하기 전 경로의 추정치를 모사하는 backward trajectory 기능을 제공하는데, 본 연구에서는 충남 지역의 시간당 공기 이동 경로를 예측하기 위해 forward trajectory를 사용하였다.

대상 기간은 2021년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 6시간 간격으로 365일간 시행하였으며 분석시간은 공기괴의 이동경로를 분석하기 위해 72시간으로 설정하였다. 공기의 출발 지점은 발전소 위치로 당진(경도 126.508, 위도 37.055), 보령(경도 126.491, 위도 36.401), 태안(경도 126.231, 위도 36.904)으로 총 3지점으로 높이 500m에서 진행하였다. 해당 모델을 수행하기 위해 수평 및 수직 바람장, 온도, 해면기압, 고도 등의 기상 자료가 필요하며, NOAA에서 제공하는 GDAS one-degree archive의 기상 자료를 사용하였다. 시간별 모든 궤적의 위치를 QGIS를 이용하여 표시하고 3km 격자 내 포함하는 궤적의 개수를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 충남의 대기오염물질 배출량 추이

충남은 2020년 CAPSS 기준 전국 배출량 4위를 차

지하였으며, 2019년까지는 경기도, 경북에 이어 배출량 3위를 기록했다. 대형배출시설이 다수 위치해 있는 충남은 2018년부터 수립되어 추진된 “충청남도 대기환경 개선 종합계획(2018~2022)”에 따라 대형배출시설에 대한 개선대책을 진행 중에 있으며, 그 효과가 반영된 결과로 판단된다. 그림 3은 TMS 자료를 기준으로 2015년과 2021년의 배출량을 지역별로 나열한 것이다. CAPSS의 경우 국가차원에서 산정·배포하고 있는 주요 배출량 자료이나 최소 해상도가 시·군·구 정도로 발전소에 대한 직접적인 영향을 볼 수 있는 TMS 자료를 활용하였다. TMS에서는 TSP를 포함하여 총 7가지 물질을 산정하고 있으나 석탄화력발전소의 경우 TSP와 SOx 및 NOx만 배출량 정보를 제공하고 있어 본 연구에서는 해당 3개 물질을 대상으로 배출량 변화를 분석하였다. 2015년 전국의 총 TMS 배출량은 400,892톤으로 충남이 전체 배출량의 30.5%를 차지하여 가장 높은 기여도를 차지하였다. 전체 10위 배출기업 중에 4개 기업(서부발전 태안본부, 중부발전 보령본부, 동서발전 당진본부, 현대제철)이 충남에 포함되어 있었으며, 석탄화력발전소가 배출량 상위에 포진하고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 2021년에는 총 배출량이 189,029톤으로 2015년 대비 52.8% 감소한 것을 확인할 수 있고, 전체적인 순위 역시 1위에서 2위로 1단계 내려왔다. 충남의 전체적인 배출량 또한 2015년 122,243톤에서 2021년 33,091톤으로 72.3%로 큰 폭의 감소를 확인할 수 있다.

그림 4는 충남 내 위치하고 있는 발전3사(보령, 신

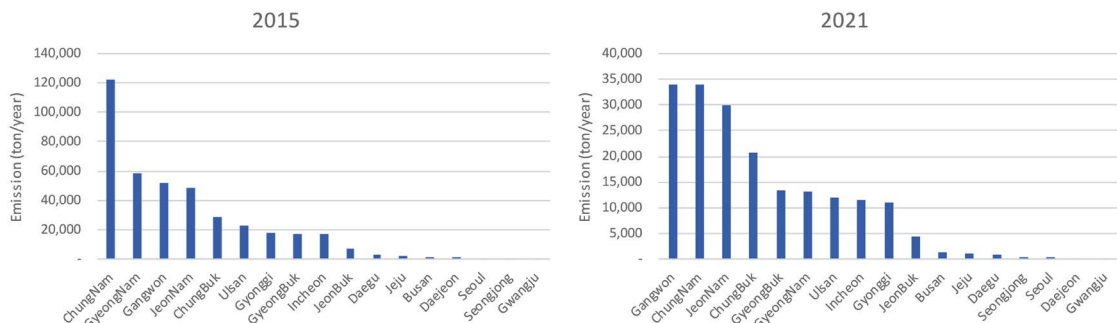


Fig. 3. Air pollution emissions of region calculated based on TMS.

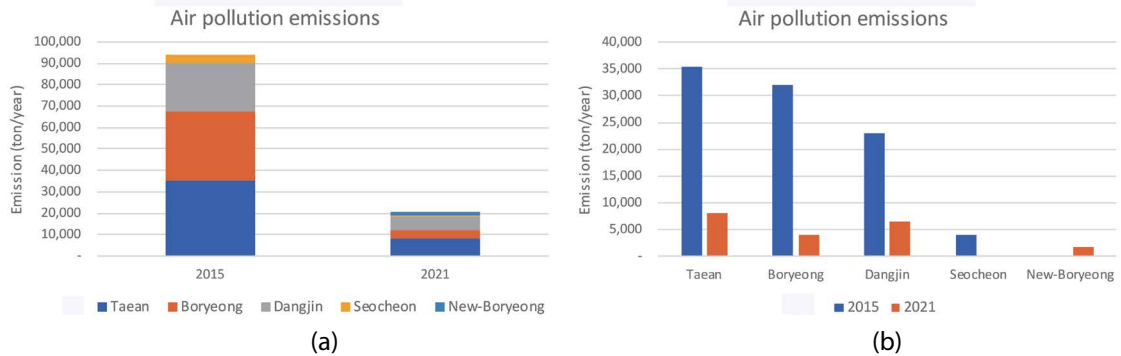


Fig. 4. Air pollution emissions of coal-fired power plants calculated based on TMS.

Table 4. Statistical validation for temperature, wind speed and wind direction with weather station in Chungnam.

Site	Temperature					Wind direction		Wind speed				
	r	Bias	GE	Model Ave. (K)	Obs Ave. (K)	Bias	GE	r	Bias	GE	Model Ave. (m/s)	Obs Ave. (m/s)
Criterion	≥ 0.8	$\leq \pm 0.5$ K	≤ 2 K	-	-	$\leq \pm 10$ deg	≤ 30 deg	≥ 0.6	$\leq \pm 0.5$ m/s	≤ 2 m/s	-	-
Seosan	0.98	0.04	1.73	286.4	286.3	1.02	34.7	0.71	0.67	1.10	2.6	1.9
Hongseong	0.98	-0.02	1.56	286.4	286.4	3.28	43.5	0.65	0.77	1.10	2.2	1.4
Cheonan	0.98	0.12	1.68	285.9	285.7	-0.06	42.4	0.65	0.48	0.91	1.7	1.2
Boryeong	0.98	-0.18	1.64	286.8	287.0	5.57	35.9	0.45	1.11	1.49	2.6	1.5
Buyeo	0.98	0.52	1.74	287.0	286.5	2.66	43.7	0.67	0.71	0.96	1.8	1.1
Gumsan	0.97	0.22	1.84	286.3	286.1	-12.26	50.0	0.73	0.62	0.90	1.7	1.1

보령, 서천, 태안, 당진)의 2015년과 2021년의 TMS 배출량을 나타낸 것으로 (a)는 총 배출량을, (b)는 지역별 배출량 차이를 나타낸 것이다. 석탄화력발전소의 배출량은 2015년 94,065톤에서 2021년 21,469톤으로 86.7% 감소하여 충남 전체의 TMS 감축량(72.3%)보다 더 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났다. 지역별로는 서천이 94.0%로 가장 큰 감축을 보였으나 서천의 경우 기존 석탄화력발전소가 폐쇄 후 신서천발전이 시범운전하는 과정에서 지속적으로 정상가동이 된 상황이 아니라 추후 재산정이 필요해 보인다. 서천을 제외할 경우 보령이 87.6%로 가장 큰 감축률을 보였고, 태안 77.1%, 당진 71.5% 순으로 나타났다.

3.2 모델링 검증

모델링 수행에 앞서 기상모델링과 대기질 예측 결

과에 대한 정합도에 대해 통계적 검증을 수행하였다. WRF의 기상모델 검증을 위해 충남 내 위치하고 있는 종관기상관측(automated synoptic observing system, ASOS) 자료를 활용하였다. 또한 CMAQ의 모델링 결과의 정합도 분석을 위해 충남 내 위치하고 있는 AQMS의 $PM_{2.5}$ 측정 결과와 비교 분석하였다. 기상인자 분석에는 상관계수(correlation coefficient, r)와 데이터 편향도(bias), 과대오차(gross error, GE)를, CMAQ 분석에는 r과 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE), Normalized Mean Bias (NMB), index of agreement, IOA)를 사용하였다(Kim *et al.*, 2020b; Choi *et al.*, 2018). 표 4는 충남 내 위치한 6개 ASOS의 측정데이터와 WRF 결과를 분석한 결과이며, 표 5는 CMAQ에 대한 분석 결과를 지역 내 주요 측정소와 비교한 결과이다. 실측값과 모델링과의 상관성

Table 5. Statistical validation for PM_{2.5} with air quality monitoring station in Chungnam.

AQMS	r	Model Ave. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Obs Ave. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IOA	NMB (%)	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Baekseok	0.750	20.3	23.1	0.85	-12.09	11.170
Tancheon	0.698	18.5	23.4	0.82	-21.23	11.168
Taeon	0.672	14.3	19.0	0.79	-24.47	11.591
Jeongsan	0.739	17.4	18.4	0.85	-5.55	17.388
Jugyo	0.754	15.7	19.4	0.84	-19.10	9.952
Buyeo	0.632	18.5	22.0	0.77	-16.11	11.521
Dongmun	0.702	16.1	20.0	0.82	-19.63	11.330
Mojong	0.702	21.8	24.0	0.82	-9.25	12.662
Seongyeon	0.676	16.1	20.0	0.80	-19.25	11.657
Seocheon	0.681	17.7	18.8	0.82	-5.93	10.465
Gongju	0.670	18.0	20.0	0.80	-10.19	11.104
Sinbang	0.737	20.7	22.8	0.85	-8.90	10.962
Yesan	0.726	19.1	22.4	0.83	-14.69	11.734
Umsa	0.740	16.8	16.9	0.85	-0.15	8.233
Hongseong	0.686	20.4	22.5	0.82	-9.20	12.035
Cityhall of Dangjin	0.635	23.0	22.3	0.79	3.11	15.200
Sumyeon	0.683	15.2	16.9	0.82	-9.71	9.826
Daecheon 2-dong	0.655	15.5	20.3	0.76	-23.61	12.870

은 기온의 경우 0.97~0.98로 매우 높은 수준을 보였으며, Bias와 GE 모두 검증 기준 이내로 확인되었다 (Emery and Tai, 2001). 하지만 풍속의 경우 0.4~0.73으로 상대적으로 낮은 상관성을 보였으며, bias는 천안을 제외하고 모든 지역에서 검증 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 풍속 과대모사는 모델링 시대기오염물질의 이류에 영향을 주어 농도의 과소 모사할 수 있다(Bae *et al.*, 2022). 다수의 연구에서 WRF 결과가 실제 풍속보다 과대평가하는 경향이 있다. 이는 수치모델의 한계로 지표면 거칠기가 대기의 흐름을 방해하여 지표면 풍속이 낮아지지만 모델에서는 이러한 영향의 반영이 부족하여 나타나는 것으로 보고되고 있다(Zhang *et al.*, 2013).

최종적으로 산출된 CMAQ의 결과와 AQMS에서 측정된 일평균 PM_{2.5}에 대한 통계분석 결과 대체적으로 예측값이 측정값보다 저평가되었지만, r 0.632~0.754, IOA 0.77~0.85, NMB -24.47~3.11%로 전체적인 모의 성능은 선행연구 결과에서 제시된 검증 기준 ($r > 0.4$, $\text{IOA} > 0.5$, $\text{NMB} \leq \pm 30\%$)에 만족하는 것으로 나타났다(Kang *et al.*, 2021; Moon *et al.*, 2021; You *et*

al., 2020; Ju *et al.*, 2018b; Willmott *et al.*, 1985).

3.3 충남의 연평균 PM_{2.5}, NO₂, SO₂의 공간분포

그림 5는 CAPSS의 2019년도 배출량과 2021년도 기상자료를 이용하여 CMAQ 모델로 예측한 충남 내 연간 PM_{2.5}와 NO₂, SO₂의 농도분포이다. 그림의 등농도선은 CMAQ 모델링 예측 결과이며, 원은 AQMS의 연평균 값이다. 3개 오염물질 모두 당진과 서산을 중심으로 고농도가 분포하는 것으로 나타났으며, AQMS에서 측정된 연평균 자료 대비 당진, 서산을 중심으로 모델링 예측값이 과대평가된 것으로 나타났지만 서산과 당진이 충남의 대기오염물질 배출량 1, 2위인 것을 감안한다면 모사 결과가 적절한 것으로 판단된다. Son *et al.* (2020a)도 국외 영향의 기여도가 높은 고농도 기간에서도 당진제철소의 해당 지역에 대한 기여도는 약 40%로 주변 대기질에 큰 영향을 미치는 것으로 분석하였다. 또한 You *et al.* (2022)은 당진에서의 모델예측 결과의 과대 모사는 CAPSS의 배출량 또는 배출형태의 불확도에서 기인한다고 보고하였다.

충남의 전체 배출량 대비 서산의 비율은 PM_{2.5}

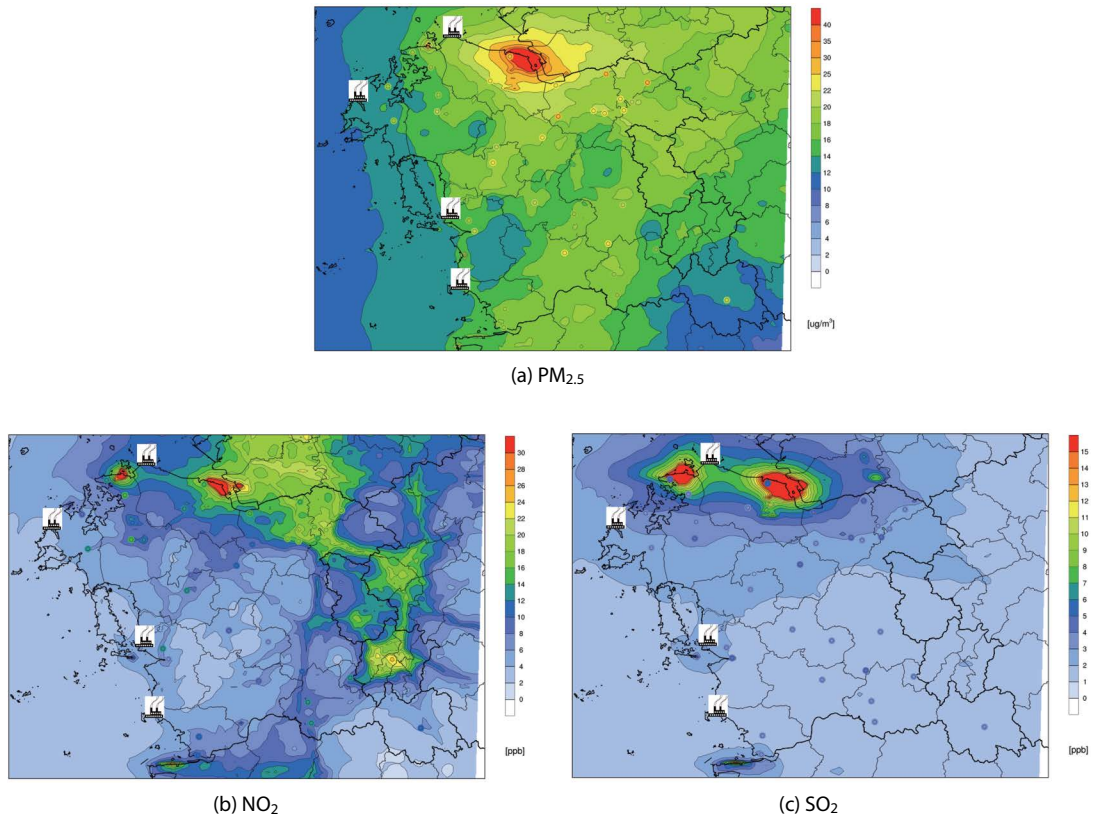


Fig. 5. Annual spatial distribution of major air pollutants ($PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2) in Chungnam. The circles represent the annual average concentration of AQMS.

3.1%, NO_x 15.1%, SO_x 27.5%로 NO_x 와 SO_x 의 비율이 높았다. 서산의 경우 대산석유화학단지에 배출되는 VOCs와 NO_x , SO_x 가 주요 배출물질로 상대적으로 낮은 $PM_{2.5}$ 농도를 보인다. 반면 당진의 경우 충남의 $PM_{2.5}$ 배출량 중 72.2%를 차지할 만큼 높은 배출 기여도를 보이고 있으며, 그 외 NO_x 35.3%, SO_x 52.0%로 이 역시 높은 수준을 보이는데, 이는 석탄화력발전소 외에 당진제철소와 같은 대형배출시설의 영향이 크게 작용하고 있다는 것을 의미한다.

3. 4 지역별 석탄화력발전소에 의한 충남 내 오염물질 영향 분석

표 6과 그림 6은 당진, 태안, 보령(신보령 포함) 3개 발전소를 대상으로 BFM을 활용하여 개별 영향 및 3

곳 모두의 배출량을 고려하였을때 지역 내 영향을 SILs을 적용하여 나타낸 것이다.

3. 4. 1 $PM_{2.5}$

대기 중 $PM_{2.5}$ 에 대한 보령화력의 충남 지역 내 영향은 $0.140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 영향을 보였고, 영향이 큰 순서대로 홍성 $0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 예산 $0.238 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 보령 $0.223 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 서산 $0.195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 배출원이 자리한 보령보다 내륙에 있는 홍성, 예산에 대한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 태안화력의 경우 $0.117 \sim 0.023 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에서 평균 영향은 $0.075 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 당진화력은 $0.019 \sim 0.092 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에서 평균 영향 수준은 $0.048 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 당진화력에 의해 높은 영향을 받는 지역은 당진 $0.092 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 예산 0.076

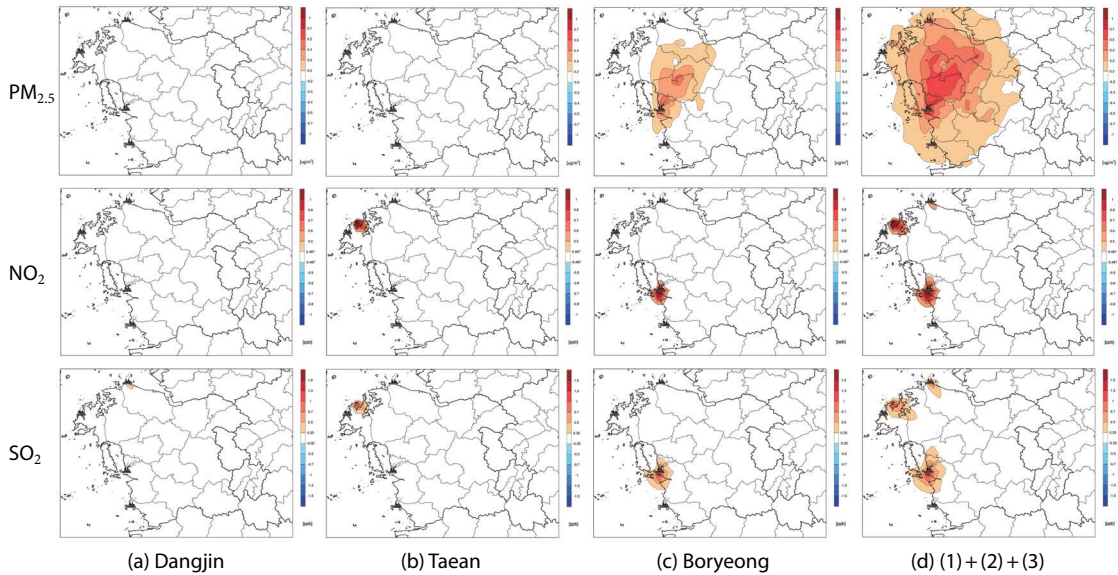


Fig. 6. Spatial distribution of pollution in Chungnam region by pollutants emitted from coal-fired power plants.

Table 6. Contribution of pollutants in the region by coal-fired power plants located in Chungnam.

Region	PM _{2.5} (μg/m ³)				NO ₂ (ppb)				SO ₂ (ppb)			
	(1) DJ	(2) TA	(3) BR	(1) + (2) + (3)	(1) DJ	(2) TA	(3) BR	(1) + (2) + (3)	(1) DJ	(2) TA	(3) BR	(1) + (2) + (3)
SILs	0.2				0.487				0.35			
Gyeryong	0.024	0.046	0.058	0.129	0.016	0.012	0.016	0.044	0.017	0.015	0.021	0.052
Gongju	0.049	0.070	0.091	0.212	0.031	0.021	0.026	0.078	0.029	0.023	0.037	0.088
Geumsan	0.019	0.023	0.028	0.071	0.011	0.006	0.008	0.026	0.012	0.008	0.013	0.033
Nonsan	0.030	0.051	0.056	0.138	0.017	0.011	0.018	0.046	0.017	0.014	0.024	0.054
Dangjin	0.092	0.098	0.192	0.390	0.143	0.075	0.060	0.281	0.133	0.067	0.072	0.276
Boryeong	0.042	0.069	0.223	0.340	0.025	0.042	0.310	0.377	0.026	0.037	0.302	0.366
Buyeo	0.043	0.067	0.115	0.230	0.020	0.025	0.076	0.121	0.021	0.025	0.088	0.134
Seosan	0.060	0.117	0.195	0.377	0.063	0.163	0.093	0.321	0.067	0.130	0.104	0.304
Seocheon	0.035	0.056	0.130	0.226	0.016	0.026	0.117	0.159	0.017	0.025	0.126	0.169
Asan	0.059	0.080	0.145	0.287	0.050	0.030	0.036	0.117	0.052	0.029	0.043	0.126
Yesan	0.076	0.102	0.238	0.418	0.061	0.049	0.085	0.196	0.056	0.045	0.094	0.196
Cheonan (Dongnam)	0.047	0.052	0.078	0.178	0.039	0.018	0.015	0.072	0.039	0.019	0.022	0.079
Cheonan (Seobuk)	0.037	0.046	0.091	0.175	0.035	0.016	0.018	0.069	0.049	0.021	0.026	0.096
Cheongyang	0.055	0.092	0.162	0.312	0.030	0.030	0.079	0.139	0.030	0.030	0.095	0.155
Taean	0.032	0.109	0.102	0.248	0.039	0.252	0.071	0.364	0.042	0.191	0.077	0.312
Hongseong	0.071	0.115	0.330	0.519	0.045	0.066	0.181	0.293	0.045	0.056	0.185	0.287

Gray block : SILs exceeded region

μg/m³ > 홍성 0.071 μg/m³ > 서산 0.06 μg/m³로 나타났다. 당진의 경우 발전소가 위치해 있는 당진에서의 영향이 가장 큰 것으로 나타났고, 그 뒤를 이어 예산,

홍성이 높은 영향을 받는 것으로 나타났다. 태안화력에 의한 영향이 가장 크게 나타난 지역은 0.117 μg/m³의 서산으로 나타났고, 그 뒤를 이어 홍성 0.115 μg/m³

$\text{m}^3 > \text{태안 } 0.109 \mu\text{g}/\text{m}^3 > \text{예산 } 0.102 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 확인되었다. 당진, 태안, 보령(신보령 포함)화력에 의한 각각의 영향을 검토하였을 때, 발전소의 영향이 있다고 판단할 수 있는 지역($0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과)은 홍성, 예산, 보령으로 나타났고, 3곳 모두 보령화력에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 충남 내 발전소 3곳의 영향을 모두 반영하였을 경우, 계룡, 금산, 논산, 천안을 제외한 11개 시군이 $\text{PM}_{2.5}$ 영향권으로 나타났다. 종합적인 영향을 고려했을 경우 홍성이 $0.519 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 영향을 받는 것으로 확인되었고, 그 뒤를 이어 예산 $0.418 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 당진 $0.390 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 서산 $0.377 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 보령 $0.340 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다.

3.4.2 NO_2

보령화력에 의한 충남지역 내 NO_2 평균 영향은 0.076 ppb 로, 최대 영향 지역은 발전소가 있는 보령(0.310 ppb)으로 확인되었다. 그 뒤를 이어 홍성 $0.181 \text{ ppb} > \text{서천 } 0.117 \text{ ppb} > \text{서산 } 0.093 \text{ ppb}$ 순이었다. 태안화력에 의한 영향은 평균적으로 0.053 ppb 로 보령화력 대비 낮은 영향 수준을 보였고, 지역별로는 태안 $0.252 \text{ ppb} > \text{서산 } 0.163 \text{ ppb} > \text{당진 } 0.075 \text{ ppb} > \text{홍성 } 0.066 \text{ ppb}$ 로 나타났다. 당진화력에 의한 영향은 0.040 ppb 로 3개 발전소 중 가장 낮은 비율을 보였고, $\text{PM}_{2.5}$ 와 같은 기여도 순서를 보였다. 가장 높은 영향을 받는 지역은 0.143 ppb 의 당진으로 확인되었고, 서산 $0.063 \text{ ppb} > \text{예산 } 0.061 \text{ ppb} > \text{아산 } 0.05 \text{ ppb}$ 였다. $\text{PM}_{2.5}$ 와 다르게 NO_2 는 해당 지역 발전소가 위치해 있는 시·군에 가장 높은 영향을 주고 있는 것으로 확인되었다. 발전소가 위치한 지역을 제외하고 보령화력은 홍성, 서천, 서산에, 태안화력은 서산, 당진, 홍성에, 당진화력은 서산, 예산, 아산에 높은 영향을 미치는 것으로 나타났고, 서산의 경우 3개 발전소 모두에서 기인한 NO_2 의 영향을 받고 있는 것으로 확인되었다. 발전소 3곳의 영향을 모두 고려할 경우 충남 전역에 대한 평균 영향은 0.16 ppb 로 나타났다. 보령이 0.377 ppb 로 가장 높은 지역으로 확인되었고, 그 뒤를 이어 태안 $0.364 \text{ ppb} > \text{서산 } 0.321 \text{ ppb} > \text{홍성 } 0.293 \text{ ppb} > \text{당진 } 0.281 \text{ ppb}$ 로 나타났다. 하지만 본 연구에서 영향 기준

으로 설정한 SILs (0.487 ppb)에 대해 초과하는 지역은 확인되지 않았다.

3.4.3 SO_2

보령화력에 의한 충남지역 내 평균 영향은 0.083 ppb 로 나타났고, 지역별로는 보령이 가장 높은 영향(0.302 ppb)을 받고 있는 것으로 나타났다. 그 뒤로는 홍성 $0.185 \text{ ppb} > \text{서천 } 0.126 \text{ ppb} > \text{서산 } 0.104 \text{ ppb}$ 였다. 태안화력에 의한 영향은 평균 0.046 ppb 로 보령화력의 절반 수준으로 확인되었고, 지역별로는 보령과 마찬가지로 발전소가 있는 태안이 0.191 ppb 로 가장 높은 영향을 받고 있었다. 그 뒤로는 당진 $0.067 \text{ ppb} > \text{홍성 } 0.056 \text{ ppb} > \text{예산 } 0.045 \text{ ppb}$ 로 확인되었다. 당진화력에 대한 영향 역시 앞서 보령, 태안과 마찬가지로 발전소가 위치해 있는 당진이 0.133 ppb 로 가장 높은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 가스상 오염물질인 NO_2 와 SO_2 모두 발전소가 위치한 지역에 대한 영향이 가장 큰 것으로 확인되었다. 당진, 보령, 태안 3개 발전소 모두의 영향을 고려했을 경우 SO_2 에 대한 가장 큰 피해지역은 NO_2 와 마찬가지로 보령(0.366 ppb)으로 확인되었으며, 이는 지역 내에서 유일하게 SILs 기준(0.35 ppb)을 초과하는 것으로 나타났다.

3.5 석탄화력발전소에 의한 충남 내 영향 분석

충남 내 위치한 석탄화력발전소를 대상으로 지역 내 배출과 영향 수준을 파악하였다. $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 보령화력의 영향이 가장 크게 나타났으며, 태안화력의 1.87배, 당진화력의 2.9배 수준이다. 영향 범위 추정치의 지표로 사용되는 SILs를 기준으로 당진, 태안의 경우 각각 기준 이하로 나타났으나 보령의 경우 보령, 예산, 홍성이 기준 이상의 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 영향 범위를 3개 발전소 모두로 설정 시 계룡, 금산, 논산, 천안을 제외한 11개 시군이 영향을 받고 있는 것으로 확인되었다. NO_2 와 SO_2 의 경우 발전소가 위치해 있는 보령, 당진, 태안에서 가장 높은 영향을 받고 있는 것으로 확인되었으나 대부분 기준 이하인 것으로 확인되었다. 다만 SO_2 에서 3개 발전소 모두의 영향을 고려했을 경우 보령에서 SILs 기준을 초과하는

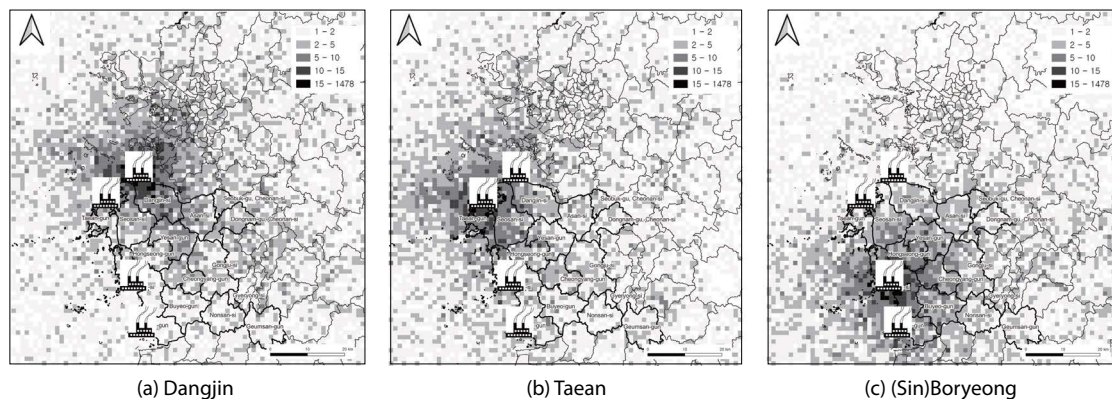


Fig. 7. Analysis results of trajectory measured in Dangjin, Taeon, and Boryeong.

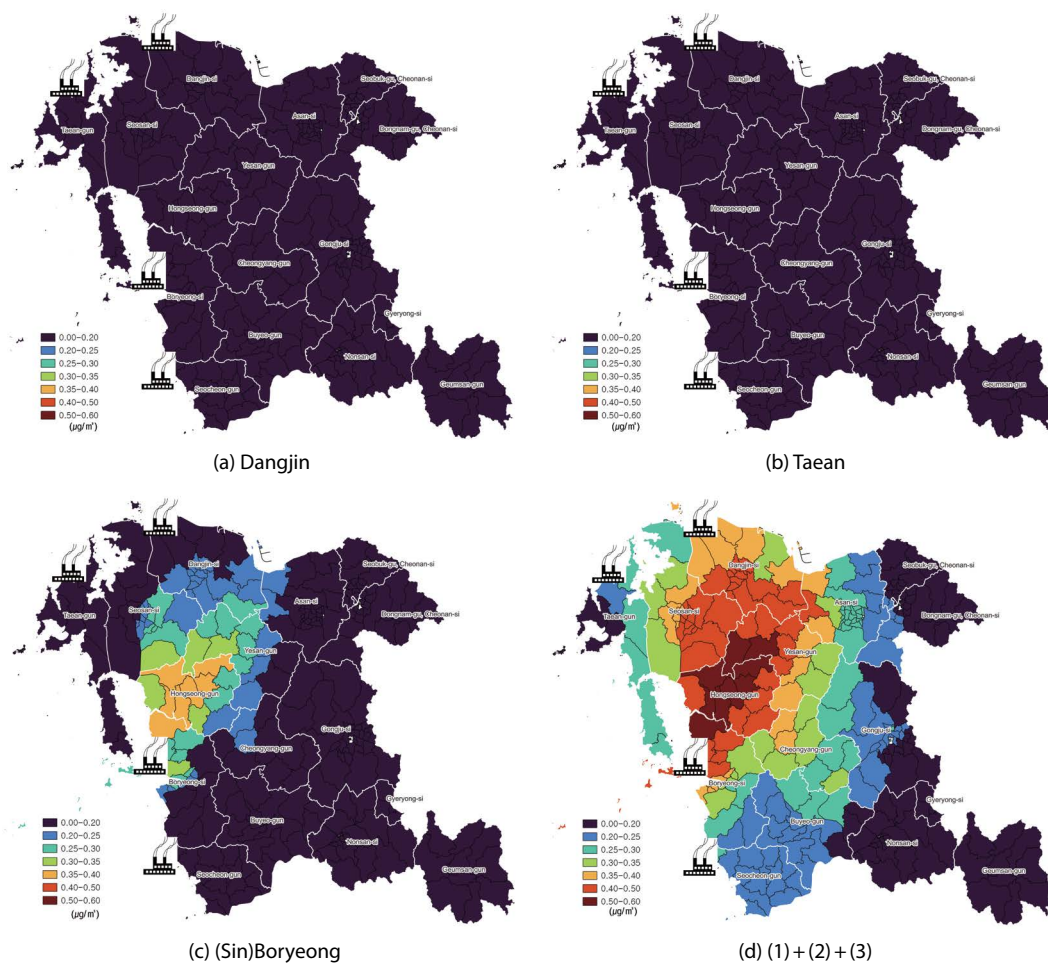


Fig. 8. Intra-regional impact according to Coal-fired power plants located in Chungnam.

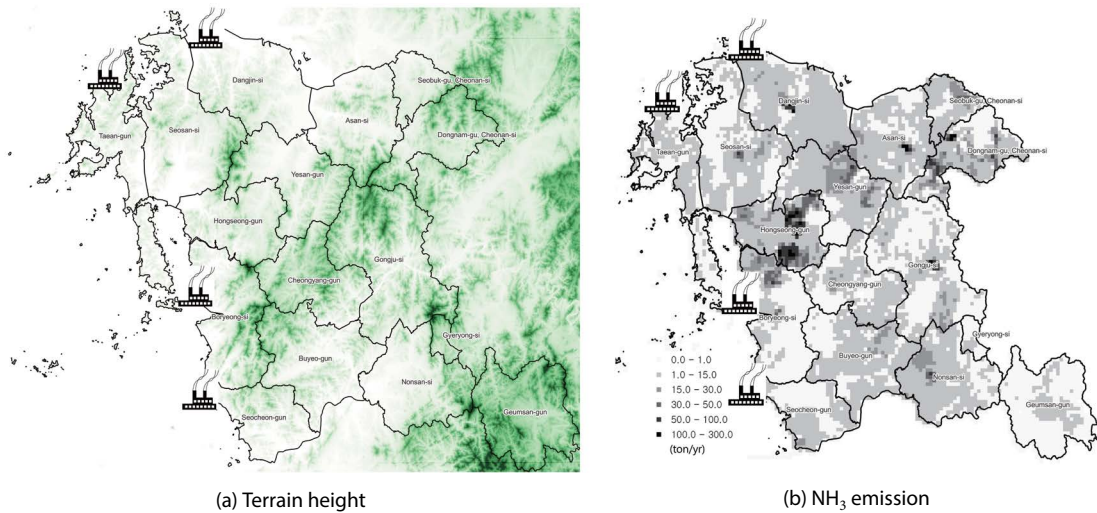


Fig. 9. Topography map (a) and NH₃ emission (b) of Chungnam.

것으로 확인되었다. 전반적으로 태안, 당진 대비 보령 발전소에 의한 지역 내 영향이 큰 것으로 확인되었는데 이는 보령발전소(신보령 포함)의 총 배출량이 17,742톤/년으로 태안, 당진에 비해 1.05~1.17배로 그 차이가 크진 않지만 지역별로 나타나는 공기흐름의 영향인 것으로 판단된다.

그림 7은 2021년도를 기준으로 당진, 보령, 태안발전소에서부터 Hysplit의 forward trajectory 분석 결과이다. 3km 격자를 설정하고 해당 격자에 분포하는 궤적의 개수를 분석하였다. 보령의 경우 발전소를 기준으로 바람의 궤적 빈도가 내륙에서 높은 것으로 나타나 주로 동쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 반면 태안과 당진의 경우 바람의 궤적 빈도가 내륙보다는 해안가 및 인근 내해에서 높은 특징을 보여 발전소의 풍하지역이 충남 내륙보다는 바닷가로 형성되면서 상대적으로 낮은 기여율을 보인 것으로 판단된다.

그림 8은 PM_{2.5}에 대한 영향을 읍 단위로 좀 더 세부적으로 나타난 것이다. 앞서 그림 6에 나타난 것처럼 개별적인 발전소의 영향 분석 시 보령발전소에 의한 보령, 예산, 홍성을 제외하고는 충남지역 내 영향은 기준 이하로 나타났다. 하지만 범위를 확대하여 3개 발

전소 모두를 대상으로 했을 경우는 반대로 4개 시·군을 제외하고는 모든 지역이 영향권으로 나타났는데 이는 2차 생성에 의한 영향인 것으로 판단된다. NO₂와 SO₂는 대기 중 NH₃와 반응하여 2차 반응에 의해 PM_{2.5}를 생성하는 것으로 알려져 있다(Chen *et al.*, 2018; Heo *et al.*, 2016; Henze *et al.*, 2009). 특히, NH₃는 2차 PM_{2.5}에 대한 민감도가 가장 큰 물질이다(Mon *et al.*, 2021).

발전소에서 배출된 가스상 오염물질은 일부 바닷가로 유출되기는 하나 충남지역 내 주풍인 북서풍 계열의 영향을 받아 내륙으로 이동하게 되는데, 이때 지리적으로 홍성과 예산을 가로지르는 차령산맥에 막혀 이동이 저지되게 된다.

충남지역은 전국 최대 축산·농업지역으로 알려져 있다(Choi, 2021). 그림 9는 충남지역에 대한 지형도(a)와 NH₃ 배출량 자료(b)를 나타낸 것이다. 발전소에서 배출된 오염물질이 기류를 타고 홍성과 예산으로 유입되고, 이때 산맥에 막혀 이동하지 못하고 정체된 상태에서 NH₃와 만나 반응을 통해 PM_{2.5}를 생성하여 홍성과 예산의 PM_{2.5} 농도를 높인 것으로 판단된다. 선행연구에서 분지형태의 경우 정체 현상으로 인해

고농도 미세먼지 발생이 자주 발생하는 것으로 보고 되었는데, 본 사례 역시 이와 동일한 원인에 의한 것으로 판단된다(Wierzbinska and Kozak, 2023; Zhang *et al.*, 2022b).

4. 결 론

충남은 전국에서 운영 중인 석탄화력발전소의 절반에 가까운 숫자가 위치하여 이에 대한 지역 내 영향이 문제가 되고 있다. 이에 본 연구에서는 모델링을 활용하여 서천화력을 제외한 3곳을 대상으로 발전소별 영향을 파악하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 국내 배출량 자료의 기반이 되는 CAPSS 기준 충남의 대기오염물질 배출량 추이를 분석한 결과 2015년 전국 배출량 2위에서 2020년에는 전국 4위로 배출량 순위가 하락하였다. 지역 내 배출 기여도도 그동안 부동의 1위를 차지하던 당진의 지속적인 감축 노력으로 2위로 내려오고, 그 사이 감축 폭이 낮은 서산이 1위로 올라왔다. 전반적으로 발전소가 위치한 당진, 보령, 태안의 배출량이 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났다.
2. 발전소의 영향 검토에 앞서 2019년 배출량과 2021년도 기상장을 기반으로 주요 오염물질인 PM_{2.5}와 NO₂, SO₂의 충남 내 분포를 검토하였다. 분석 결과 3개 오염물질 모두 당진과 서산을 중심으로 고농도가 분포하는 것으로 나타났으며, 이는 AQMS 측정값 대비 과대평가된 것으로 나타났으나 지역 내 배출 기여도를 봤을 때 현실을 반영한 분석 결과로 판단되었다.
3. BFM과 SILs를 이용하여 석탄화력발전소의 충남 지역 내 영향을 분석하였다. 당진과 태안보다 보령의 기여도가 높은 것으로 나타났으며, 이는 기류패턴 분석 결과 당진과 태안의 경우 기류 궤적이 내륙보다 바닷가쪽으로 밀려 나가는 반면, 보령의 경우 대부분의 기류가 해안에서 내륙으로 불어들어와 상대적으로 높은 기여도를 보이는 것으로 확인되

었다. SILs 기준 SO₂와 NO₂의 경우 대부분 영향 기준 이내로 나타났으나 SO₂에서 보령만 기준 이상으로 나타나 영향권으로 확인되었다.

4. PM_{2.5}의 경우 당진과 태안 발전소에 의한 영향이 기준 이내로 확인되었으나 보령의 경우 보령, 예산, 홍성에서 기준 이상으로 나와 발전소의 영향을 받는 것으로 확인되었다. 또한 발전소 3개 모두의 영향을 고려하였을 때, 계룡, 금산, 논산, 천안을 제외한 11개 시·군이 모두 영향권으로 나타났다. 특히 최대 피해지역이 홍성과 예산으로 확인되었는데 이는 보령 등으로부터 배출된 오염물질이 내륙지역으로 이동하다가 홍성, 예산 경계의 차령산맥을 만나 정체되면서, 지역 내 높은 배출을 보이는 NH₃와 반응, 2차 입자를 생성하여 결과적으로 높은 PM_{2.5} 농도를 보이는 것으로 판단된다.

그동안 발전소의 경우 “발전소 주변지역 지원에 관한 법률”을 근거로 지원사업이 수행되었으며, 대부분 발전소 기준 반경 5 km 이내로 한정되어 추진되었다. 하지만 본 연구 결과 발전소에 의한 영향을 발전소가 위치한 지역뿐만 아니라 지형 및 기상조건에 따라 수 km 이상 이격된 지역에 더 큰 피해를 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 석탄화력발전소에 의한 오염물질이 주변 지역에 더 큰 영향을 주고 있다는 것이 확인된 만큼 앞으로 배출물질에 대한 주변 지역 영향 분석과 더불어 2차 반응에 의한 피해 영향 또한 지속적인 추적관찰과 원인분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 충남의 지원으로 수행된 “화력발전소 주변지역 기후환경 영향연구(22SU051)”와 2023년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단-동북아-지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발 사업(2023M3G1A109065921)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Bae, M., Kim, S. (2022) Adjustment of Foreign Emission Impacts on Provincial PM_{2.5} Concentrations in South Korea based on Upwind Observations and Estimation of Domestic Emission Uncertainty, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 624-636, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.624>
- Bae, M., Kim, S., Kim, S. (2022) Quantitative Evaluation on the Drivers of PM_{2.5} Concentration Change in South Korea during the 1st - 3rd Seasonal PM_{2.5} Management Periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 610-623, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.610>
- Bae, M., Yoo, C., Kim, S. (2020) Estimating the Shutdown Effect of the Old Coal-fired Power Plants on PM_{2.5} and its Composition, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 48-63, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.048>
- Chen, Y., Zang, L., Du, W., Xu, D., Shen, G., Zhang, Q., Zou, Q., Chen, J., Zhao, M., Yao, D. (2018) Ambient air pollution of particles and gas pollutants, and the predicted health risks from long-term exposure to PM_{2.5} in Zhejiang province, China, *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 23833-23844. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2420-5>
- Choi, H.-J. (2021) Impact Analysis of PM_{2.5} Reduction Policy in Chungcheong Considering Agricultural Emissions of Ammonia, Konkuk University, Master thesis.
- Choi, K.-C., Lim, Y., Lee, J.-B., Nam, K., Lee, H., Lee, Y., Myoung, J., Kim, T., Jang, L., Kim, J.-S., Woo, J.-H., Kim, S., Choi, K.-H. (2018) Evaluation of the Simulated PM_{2.5} Concentrations using Air Quality Forecasting System according to Emission Inventories - Focused on China and South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 306-320, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.2.306>
- Emery, C., Tai, E. (2001) Enhanced Meteorological Modeling and Performance Evaluation for Two Texas Ozone Episodes, 7-31.
- Henze, D.-K., Seinfeld, H., Shindell, D.-T. (2009) Inverse modeling and mapping US air quality influences of inorganic PM_{2.5} precursor emissions using the adjoint of GEOS-Chem, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 5877-5903. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5877-2009>
- Heo, J., Adams, P., Gao, H.O. (2016) Reduced-form modeling of public health impacts of inorganic PM_{2.5} and precursor emissions, *Atmospheric Environment*, 137, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.026>
- Jonathan, J.-B., Xinyi, D., John, D.-S., Joshua, S.-F., Jonathan, I.-L. (2014) Using the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model to estimate public health impacts of PM_{2.5} from individual power plants, *Environment International*, 68, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.03.031>
- Ju, H.-J., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Yoo, C., Kim, S. (2018a) PM_{2.5} Source Apportionment Analysis to Investigate Contributions of the Major Source Areas in the Southeastern Region of South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 517-533, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.4.517>
- Ju, H.-J., Kim, H.-C., Kim, B.-U., Ghim, Y.-S., Shin, H.-J., Kim, S. (2018b) Long-term Trend Analysis of Key Criteria Air Pollutants over Air Quality Control Regions in South Korea using Observation Data and Air Quality Simulation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 101-119, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.101>
- Kang, Y.-H., Kim, E., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, S. (2021) Source Sectoral Impacts on Provincial PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016 using the CMAQ Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 17-44, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.017>
- Kim, C.-H., Lee, S.-H., Jangn, M., Chun, S., Kang, S., Ko, K.-K., Lee, J.-J., Lee, H.-J. (2020a) A Study on Statistical Parameters for the Evaluation of Regional Air Quality Modeling Results - Focused on Fine Dust Modeling -, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 29(4), 272-285, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14249/eia.2020.29.4.272>
- Kim, J.-B., Yoon, S.-H., Lee, S.-S., Kim, K.-H., Noh, S.-J., Bae, G.-N. (2020b) Spatial and Temporal Distributions of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations in Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 464-481, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.464>
- Kim, S., Kim, O., Kim, B., Kim, H.-C. (2017) Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area, *Journal of Korean Society for*

- Atmospheric Environment, 33(2), 159-173, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.159>
- Kim, Y.P. (2019) Research and Policy Directions against Ambient Fine Particles, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(3), 191-204, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.3.191>
- Korea Environment Corporation (KECO) (2022) Clean SYS (Available URL: <https://cleansys.or.kr/index.do>).
- Lee, S.-Y., Hong, H.-S., Kim, C.-H., Hwang, E.-Y., Yoon, S.-H., Lee, S.-S., Noh, S.-J., Kim, J.-B. (2021) Characteristic Analysis of Urban Air Pollution of Northwest Cities in Chungnam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(4), 561-577, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.4.561>
- Lin, C.-K., Lin, R.-T., Chen, T., Zigler, C., Wei, Y., Christiani, D.-C. (2019) A global perspective on coal-fired power plants and burden of lung cancer, *Environmental Health*, 18, 9. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0448-8>
- Ministry of Environment (MOE) (2019) Special act on the reduction and management of fine dust.
- Ministry of Environment (MOE) (2020a) Special act on the improvement of air control in air control zones.
- Ministry of Environment (MOE) (2020b) Basic Plan for Air Quality Management in Central Region.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2017) The 8th Basic plan for electricity supply and demand.
- Moon, N., Seo, J., Kim, S. (2021) Estimation of Contribution and Emission-to-PM_{2.5} Conversion Rate by Each Local Government for Policy Support, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(6), 891-906, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.891>
- Nam, K.-P., Lee, H.-S., Lee, J.-J., Park, H.-J., Choi, J.-Y., Lee, D.-G. (2019) A Study on the Method of Calculation of Domestic and Foreign Contribution on PM_{2.5} using Brute-Force Method, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 86-96. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.086>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2009) Estimation OF Source-Receptor relationship for total nitrate deposition (I).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2021) Annual report of air quality in Korea 2020.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022) National Air Pollutants Emission 2019.
- Nevada Division of Environmental Protection (NDEP) (2018) Policy for Significant Impact Levels (SILs) Analysis for Air Quality Impact Assessment.
- Ohara, T. (2011) Long-Range Transport and Deposition of Air Pollution, *Encyclopedia of Environmental Health*, 515-519. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00059-3>
- Son, K.-W., Kim, E., Bae, M., You, S., Kang, Y.-H., Kim, H.-C., Kim, B.-U., Kim, S. (2020b) Evaluations on PM_{2.5} Concentrations and the Population Exposure Levels for Local Authorities in South Korea during 2015-2017, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 806-819, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.806>
- Son, S.-C., Park, S., Bae, M., Kim, S. (2020a) A Study on Characteristics of High PM_{2.5} Pollution Observed around Large-scale Stationary Sources in Chungcheongnam-do Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(5), 669-687, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.669>
- Stockwell, W.-R., Middleton, P., Chang, J.-S., Tang, X. (1990) The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95, 16343-16367.
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2018) Guidance on significant impact levels for ozone and fine particles in the prevention of significant deterioration permitting program.
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2022) Guidance for Ozone and Fine Particulate Matter Permit Modeling, EPA-454/R-22-005.
- Wierzbinska, M., Kozak, J. (2023) PM₁₀ Concentration Levels in the Żywiec Basin vs. Variable Air Temperatures and Thermal Inversion, *Journal of Ecological Engineering*, 24(3), 47-54. <https://doi.org/10.12911/22998993/157520>
- Willmott, C., Ackleson, S.-G., Davis, R.-E., Feddema, J.-J., Klink, K.-M., Legates, D.-R., O'Donnell, J., Rowe, C.-M. (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models, *Journal of Geophysical Research*, 90(C5), 8995-9005. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>
- Woo, J.-H., Jeong, B.-J., Seo, J.-H., Choi, K.-C. (2010) Development of emission processing system for research support of climate change modeling, *Journal of Environmental Studies*, 49, 157-177.
- Yeo, M.-J., Kim, Y.-P. (2019) Trends of the PM₁₀ Concentrations and High PM₁₀ Concentration Cases in Korea, *Journal of*

- Korean Society for Atmospheric Environment, 35(2), 249-264, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.249>
- You, S., Bae, C., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2020) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(6), 785-805, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.785>
- You, S., Kang, Y.-H., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2022) The Importance of Plant Emission Type on PM_{2.5} Impact Estimation: A Case Study of Nonpublic Anthracite Burning Facilities, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 38(6), 802-822, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.6.802>
- Zhang, C.-H., Sears, L., Myers, J.-V., Brock, G.-N., Sears, C.-G., Zierold, K.-M. (2022b) Proximity to coal-fired power plants and neurobehavioral symptoms in children, Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 32, 124-134. <https://doi.org/10.1038/s41370-021-00369-7>
- Zhang, H., Pu, Z., Zhang, X. (2013) Examination of Errors in Near-Surface Temperature and Wind from WRF Numerical Simulations in Regions of Complex Terrain, Weather and Forecasting, 28(3), 893-914. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00109.1>
- Zhang, Q., Streets, D.-G., Carmichael, G.-R., He, K.-B., Huo, H., Klimont, A., Park, I.-S., Reddy, S., Fu, J.-S., Chen, D., Duan, L., Lei, Y., Wang, L.-T., Yao, Z.-L. (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, Atmospheric Chemistry and Physics, 9, 5131-5135. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5131-2009>
- Zhang, Y., Zhai, S., Huang, J., Li, X., Wang, W., Zhang, T., Yin, F., Ma, Y. (2022a) Estimating high-resolution PM_{2.5} concentration in the Sichuan Basin using a random forest model with data-driven spatial autocorrelation terms, Journal of Cleaner Production, 380(1), 134890. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134890>

Authors Information

- 김수향((주)선일이앤씨 부장) (shzwei@gmail.com)
 박세찬(충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원) (psc89@cni.re.kr)
 황규철(충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원) (kchwang@cni.re.kr)
 최영남(충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원) (cynam08@cni.re.kr)
 이상신(충남연구원 서해안기후환경연구소 연구위원) (emandi@naver.com)
 박선환((주)선일이앤씨 대표이사) (pjm64818@empas.com)
 이가혜(차세대융합기술연구원 산불감시실증지원센터 선임연구원) (gahya1129@snu.ac.kr)
 김정호((주)미세먼지연구소 소장) (jeonghoflux@naver.com)
 노수진(대림대 보건안전학과 교수) (sjnoh@daelim.ac.kr)
 김종범(충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원) (kjb0810@cni.re.kr)