

논문

충남 서북부지역 대형배출시설 배출량 저감에 따른 도시대기농도 영향 분석

Characteristic Analysis of Urban Air Pollution of Northwest Cities in ChungNam

이선엽, 홍현수¹⁾, 김창혁²⁾, 황은영, 윤수향, 이상신, 노수진³⁾, 김종범*

충남연구원 서해안기후환경연구소,

¹⁾충남대학교 컴퓨터융합학부 컴퓨터시스템 및 소프트웨어 전공,

²⁾국립환경과학원 기후환경연구과, ³⁾연세대학교 환경공해연구소

Seonyeop Lee, Hyun-su Hong¹⁾, Chang Hyeok Kim²⁾, Eun Young Hwang,
Soo Hyang Yoon, Sang Sin Lee, Sujin Noh³⁾, Jong Bum Kim*

Seahaean Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong, Republic of Korea

¹⁾Major of Computer Systems and Multimedia Division of Computer Convergence, ChungNam National University, Daejeon, Republic of Korea

²⁾Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

³⁾Institute for Environmental Research, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2021년 5월 27일
수정일 2021년 6월 11일
채택일 2021년 6월 16일

Received 27 May 2021
Revised 11 June 2021
Accepted 16 June 2021

*Corresponding author

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

E-mail: kjb0810@cni.re.kr

Abstract Owing to the increasing interests and concerns regarding air pollution in public, air quality management and policies at the central government level are being implemented. Chungcheongnam-do (ChungNam) has a number of large-scale facilities such as power plants, steel mills, and industrial complexes. ChungNam is the second largest region in Korea with the largest air pollutant emissions. In particular, the four cities located in the northwest of South ChungNam Province (Cheonan, Asan, Seosan, and Dangjin) have various emission sources, making them major targets for air quality management. In this study, the emission and concentration levels of air pollutants in the region were investigated, and the regional impact of power plant emission reduction was analyzed. Clean air policy support system (CAPSS) and Tele-monitoring system (TMS) data were used for the emission analysis, and the atmospheric environment annual report was used for the concentration levels in this study. In the results, emissions from CAPSS showed increasing tendency from 2013 to 2016, and decreased in 2017, but that from TMS has shown decreasing tendency since 2015. The concentration of air pollutants such as PM₁₀, NO₂, and O₃ in ChungNam slightly increased or showed similar level compared to the base year. The effect of emission reduction in the power plant to the atmosphere was insignificant at less than 1 μg/m³ in the whole of ChungNam. Hence, governmental reduction effort for the emissions in a specific area such as ChungNam should be made for various fields and in various ways including adjacent area from a mid- to long-term perspective rather than intensive emissions reduction to improve atmospheric environment.

Key words: ChungNam, Northwest cities, Air Pollutants, Clean air policy support system (CAPSS), Tele-monitoring system (TMS), Air quality monitoring station (AQMS)

1. 서론

미세먼지 (particulate matter less than 10 μm, PM₁₀)

를 포함한 대도시 대기오염문제가 대두되면서 정부 및 지자체 차원의 대책마련이 추진되고 있다. 2018년 “미세먼지 관리 종합계획 (2020~2024)”이 수립된 이

후 2019년과 2020년에 각각 “미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(이하 미세먼지법)”과 “대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법(이하 대기관리 권역법)”이 신설되어 전국적인 대책 마련이 진행되고 있다(ME, 2020a, 2019a, 2018). 충청남도는 대기관리 권역법에 의거 대전, 세종, 충북, 전북과 함께 중부권으로 분류되었고, 지역 특성에 맞는 대기관리 시행계획을 수립하여 대기질 개선을 위해 노력 중에 있다. 또한, 한반도 서쪽 끝에 위치하여 중국이나 타 지역으로부터 유입되는 장거리 이동오염물질에 직접적인 피해를 받고 있으며(Park, 2019; Yu *et al.*, 2015; Oh, 2007), 전국에 분포하고 있는 58개의 석탄화력발전소를 포함하여 현대제철, 대산석유화학단지 등 대형 배출시설이 다수 분포하고 있어 대기오염 문제가 지역 문제로 대두되고 있다(Lee and Park, 2019; Kim *et al.*, 2017). 환경부에서 매년 발간하고 있는 대기정책지원 시스템(clean air policy support system, CAPSS)에 따르면 충청남도는 2015년에서 2017년까지 경기도에 이어 2번째로 높은 대기오염물질 배출량을 나타내고 있으며(ME, 2020b), 2019년 조사된 굴뚝원격감시체계(tele-monitoring system, TMS)에서 지역 전국 배출량 중 가장 높은 21.2%를 차지하는 것으로 나타나 전국적으로 배출되고 있는 대기오염물질 중 상당량을 차지하는 것으로 보고되고 있다(MIS, 2021).

충청남도는 대기관리를 위해 북부권, 서부권, 동남권의 3개 권역으로 구분하여 관리하고 있으며, 특히 에너지발전 및 생산시설과 대도시가 위치하고 있는 북부권과 서부권의 배출기여도가 높다(Ju *et al.*, 2020). 2017년 CAPSS를 기준으로 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)에 대한 기여도는 서산, 천안, 당진, 아산의 4개 시가 충남 전체 배출량의 75.1%를 차지하며, PM₁₀ 기준 77.9%를 배출하는 등 대부분의 배출량을 차지하고 있다(ME, 2020b). 발전소가 다수 위치해 있는 보령, 서천, 태안 등의 경우 대부분의 시설이 바닷가에 위치해 있어 해양과 내륙의 비열차이에 의한 해륙풍 등의 영향으로 희석·확산 작용이 활발히 이루어지는 반면, 내륙과 연

결되어 있는 서산·당진·아산·천안지역의 경우 좁은 면적에 제철소, 산업단지, 발전소 및 도로오염원이 밀집되어 있고(Kim *et al.*, 2020), 아산시 뒤쪽으로 차령산맥이 가로막혀 있어 충남지역의 주풍인 서풍이나 북서풍이 유입될 때 오염물질이 풍하지역으로 희석·확산되지 못하고 국지적인 고농도를 발생시키는 것으로 보고되고 있다(Son *et al.*, 2020). 이처럼 대규모 사업장이 밀집된 충남지역의 대기질 개선을 위해 국가 및 충청남도는 2020년 12월을 기준으로 보령 석탄화력발전소 1, 2호 폐쇄, 미세먼지 계절관리제 도입에 따른 노후 석탄화력발전기 운행 중단, 발전량 상한 제약(80%), 최적 방지기술(best available technology, BAT) 적용, 대기오염 배출시설 배출허용기준 강화 등 다양한 정책을 추진 중에 있다(ME, 2020c). 하지만 현재 국가 정책의 근간이 되는 CAPSS의 경우 최신 자료가 2017년 자료이고, 각 사업체별로 등록하고 있는 대기배출원관리시스템(stack emission management system, SEMS)의 경우 제한적인 정보만을 제공하고 있어 실질적인 정책 추진에 따른 효과분석이 이루어지고 있지 못하고 있는 실정이다. 최근에는 대기오염관리 방안으로 과거 배출량을 규제하는 방법에서 농도관리로 전환되어 관리되고 있으며, 이에 대한 정책효과 분석을 위해 대기오염측정망(air quality monitoring system, AQMS)이 설치·운영되고 있다(NIER, 2019).

본 연구에서는 국내 배출원 중 대형 배출시설이 많아 주요 배출원으로 관리되고 있는 충청남도 지역 중 대부분의 배출량을 차지하고 있는 충남 서북부(천안·아산·서산·당진) 지역을 중심으로 대형배출시설의 배출량 저감에 따른 지역 농도변화 특성을 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 대상공간 설정 및 현황

배출량 저감에 따른 영향검토를 위해 충남지역 중

배출기여도가 높지만 좁은 지역과 주변 지형으로 인해 고농도 지역으로 구분되는 충남 서북부 4개시(천안, 아산, 당진, 서산)를 대상으로 하였다. 그림 1은 충청남도과 본 연구 대상인 4개시의 위치를 나타낸 것으로, 한반도의 정서쪽에 위치하고 있다. 전국 인구 51,829,023명 중 4.1%인 2,121,029명이 충청남도에 거주하고 있으며, 서북부 4개시에 전체 충남 인구 중 62.1%인 1,316,777명이 거주하고 있다. 토지는 전국 100,401 km² 중 31.9%인 8,229 km²을 차지하고 있고, 충남 내 4개 시군의 면적은 31.9%인 2,624 km²이다 (SK, 2021). 서산에 전국 3대 석유화학단지인 대산석유화학단지가, 당진에는 석탄화력발전소와 전국 3대 제철소 중 1개가 위치하고 있다. 천안과 아산의 경우 도시형 지역으로 도로이동오염원에 의한 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 도시대기질을 모니터링하는 AQMS가 아산 5개소, 천안·서산 4개소, 당진 2개소 등 총 15개소가 설치되어 운영되고 있다 (KECO, 2021a).

한편 충청남도는 2018년 “충청남도 대기환경 개선 종합계획 (2018~2022)”을 수립하여 대기질 개선을 위한 부문별 세부 시행계획을 수립하여 추진하고 있으며, 2015년 대비 2022년까지 대기오염물질 총 배출량을 35.3% 저감을 목표로 발전소, 제철소, 산업시설 등 대형배출시설(1~2종)에 대한 발전 상한계약, 계절관리제를 통한 가동 중지, 자발적 감축 목표 수립, 공정개선, 비산배출 저감 등을 진행하고 있다 (CNI, 2018).

2.2 충남지역 대기오염물질 배출자료 수집

지역적 일반현황정보는 충청남도 및 4개시에서 2020년도에 발간한 통계연보를 활용하였고, CAPSS는 2017년도, TMS는 2019년도 자료를 기준으로 최근 5~10년정보를 활용하였다. 통계연보는 충청남도 및 각 시청 홈페이지에서 다운로드 받았고, CAPSS 자료는 국가미세먼지정보센터에서 제공하는 엑셀시트를 가공하였다. TMS는 환경공단에서 제공하는 굴뚝자동측정기기 측정결과 사이트 정보를 가공하여 사용하였다. 데이터처리 및 통계처리는 SigmaPlot (v14.0,

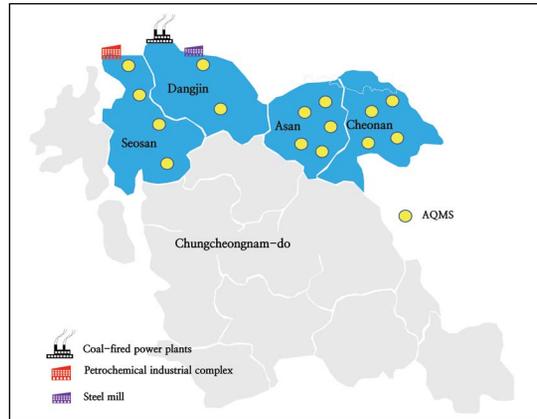


Fig. 1. Location of 4 province in ChungNam.

Systat software)을 활용하였다.

2.3 충남지역 대기오염측정소 현황

정부에서는 지역 대기질에 대한 장기적인 모니터링과 정책 추진에 따른 효과 분석 등을 위해 대기측정망을 운영 중에 있으며, 그 중 AQMS는 국지적인 지역의 대기질을 실시간 모니터링하기 위해 운영되고 있다. 표 1은 충청남도 및 4개시에 설치되어 있는 AQMS의 설치위치 및 연도, 누적 개소수를 나타낸 것이다. 충청남도의 AQMS는 1993년 천안 성황동에 처음 설치되어 2006년까지 천안, 서산, 아산 등지에 5기만이 운영되어 왔지만 2017년 이후 꾸준히 증가하여 2021년 기준 35개소가 자료를 생산 중에 있으며, 그 중 절반에 가까운 15개소가 충남 서북부 4개시에 위치하고 있다. 운영지침에 따르면 측정지점의 결정은 4가지 방법에 따라 선정하는데 (NIER, 2019) 그 중 첫 번째가 인구비례에 의해 측정대상지역 내의 인구 분포나 밀도를 고려하여 선정하는 방법으로 이에 따라 인구밀도가 높은 천안, 아산 지역을 중심으로 가장 많은 측정소가 위치하고 있다.

2.4 발전소 배출량 감소에 따른 충남지역 내 영향 분석

충남에 위치하고 있는 시설 중 현재 가장 큰 대형 시설은 당진에 있는 제철소와 서산의 석유화학산업

Table 1. Cumulative number of AQMS operated in ChungNam area.

Station	Built year	City	Cumulative number of AQMS	
			In ChungNam	In 4 cities
Seonghwang-dong	1993	Cheonan-si	1	1
Dokgot-ri	1994	Seosan-si	2	2
Dongmun-dong	1996	Seosan-si	3	3
Baekseok-dong	2001	Cheonan-si	4	4
Mojong-dong	2006	Asan-si	5	5
Baebang-eup	2017	Asan-si	8	6
Songsan-myeon	2017	Dangjin-si	10	7
Seonggeo-eup	2018	Cheonan-si	18	8
Dogo-myeon	2018	Asan-si	20	9
Dunpo-myeon	2018	Asan-si	21	10
Inju-myeon	2018	Asan-si	22	11
Daesan-ri	2018	Seosan-si	23	12
Dangjin city hall	2018	Dangjin-si	25	13
Sinbang-dong	2019	Cheonan-si	30	14
Seongyeon-myeon	2019	Seosan-si	31	15
Total AQMS number (2021)			35	15

Table 2. Summary of scenario assumed in this study.

Items	Unit	Case study
Emission	%	100, 80, 60, 40
Wind speed	m/s	0.5, 2.0, 4.0
Wind direction	°	NW (135), W (180), SW (225)

단지, 그리고 4개 시·군(당진, 태안, 보령, 서천)에 분포하고 있는 화력발전소이다. 제철소와 석유화학단지의 경우 사기업으로 운영관리 및 제재가 어렵지만 발전소의 경우 국가에너지 생산시설로 발전현황과 환경영향 등을 고려하여 제한운영이 가능하다. 이에 본 연구에서는 화력발전의 배출물 변화에 따른 영향을 수치해석을 통해 분석하였다. 대기질 모사에는 CALMET (v6.334)-CALPUFF (v6.42)를 사용하였고, 모델 운영에 사용된 지표기상자료는 충남 지역 종관 기상관측소 정보(서산, 홍성, 금산, 부여, 보령, 천안)를, 고공기상정보는 오산고공기상정보를 활용하였다. 풍향·풍속은 모든 지점에서 동일하다고 가정하여 시나리오를 구성하였다. 시나리오는 2016년 발표된 CAPSS의 자료를 기반으로 화력발전의 배출량(67.9 g/sec)을 100% 배출로 하여(ME, 2019b), 100%,

80%, 60%, 40% 감소할 경우와 풍속 0.5, 2.0, 4.0 m/s, 풍향은 발전소에서 배출된 오염물질이 충남 내륙지역에 영향을 미칠 것으로 판단되는 북서풍(NW), 서풍(W), 남서풍(SW)으로 가정하였다. 표 2는 본 연구에서 설정한 가정사항을 나열한 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 충남 서북부지역 연도별 대기오염 배출현황

CAPSS는 정부의 대기환경정책 수립의 근거자료 및 대기환경관리 시행계획 수립의 기초자료로 활용되고 있으며, 유럽의 CORINAIR 배출원 분류체계를 기초로 국내 배출원 체계를 고려하여 활용하고 있다(Choi *et al.*, 2020). 그림 2는 2012년부터 최근인 2017년까지의 자료를 대상으로 전국과 충청남도의 대기오염물질 배출량 변화를 나타낸 것이다. 입자상오염물질은 현 산정체계상 PM₁₀과 초미세먼지(particulate matter less than 2.5 μm, PM_{2.5})가 총부유먼지(total suspended particulate, TSP)에 포함되어 산정되고 있으므로 통계처리시 이를 제외하였고, 검댕

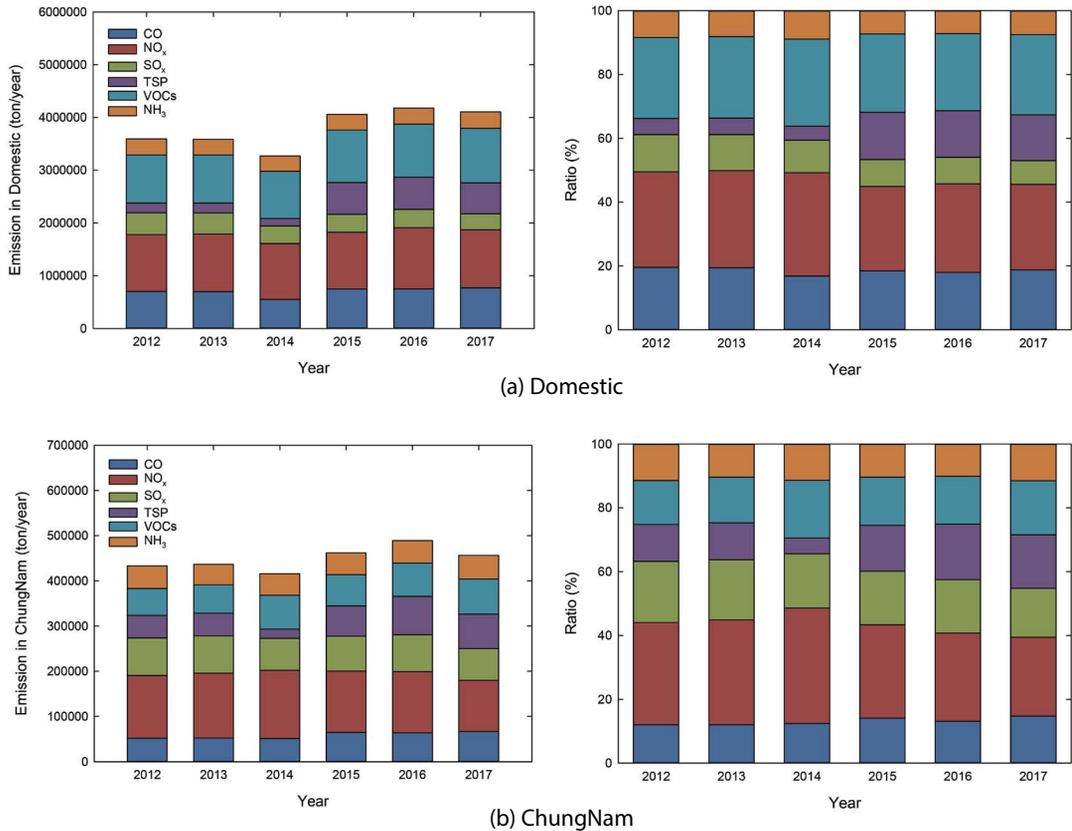


Fig. 2. Emission trend of air pollutants at ChungNam and domestic.

(black carbon, BC)은 과거 데이터와의 비교를 위해 제외하였다.

2012년 기준 전국에서 배출된 대기오염물질 총량은 3,593,967톤이었으나 2017년 4,104,164톤으로 14.2%가 증가한 것으로 나타났다. 충청남도 역시 2012년 433,197톤에서 2017년 456,463톤으로 전국에 비해 낮지만 5.4%가 증가한 것으로 나타났다. 2014년 대비 2015년 TSP의 비율이 대폭 증가한 것은 2015년부터 추가된 비산먼지와 생물성연소가 포함되면서 나타난 결과이다.

오염물질별로는 전국의 경우 2012년 NO_x 배출량이 전체 배출량의 29.9%로 가장 높은 비율을 차지하였고, VOCs 25.4%, CO 19.6%, SO_x 11.6% 순이었다. 2017년 역시 전체 배출량 중 NO_x의 비율이 가장 높

고 다른 물질의 구성비도 유사하게 나타났다.

TSP는 2012년 5.1%에서 2017년 14.4%로 대폭 상승하였으나 이는 앞에서 설명한 추가된 비산먼지와 생물성연소물질의 영향인 것으로 판단된다. 충청남도 또한 전국과 마찬가지로 2012년 기준 NO_x의 비율이 32.0%로 가장 높았고, SO_x가 19.2%로 2위를 차지하였으며, 그 외 항목들은 유사한 수준(VOCs 13.8%, CO 12.0%, TSP 및 NH₃, 11.5%)이었다. 하지만 2017년에는 가장 높은 농도를 보였던 NO_x와 SO_x의 비율이 각각 24.7%와 15.3%로 급격히 감소한 가운데 다른 물질들은 유사하거나 소폭 증가한 것으로 나타났다. 충남의 경우 석탄화력발전소와 같이 화석연료를 다량 사용하는 대형배출시설들이 다수 밀집되어 있는데, 대기환경문제가 이슈화되면서 발전소 방지시

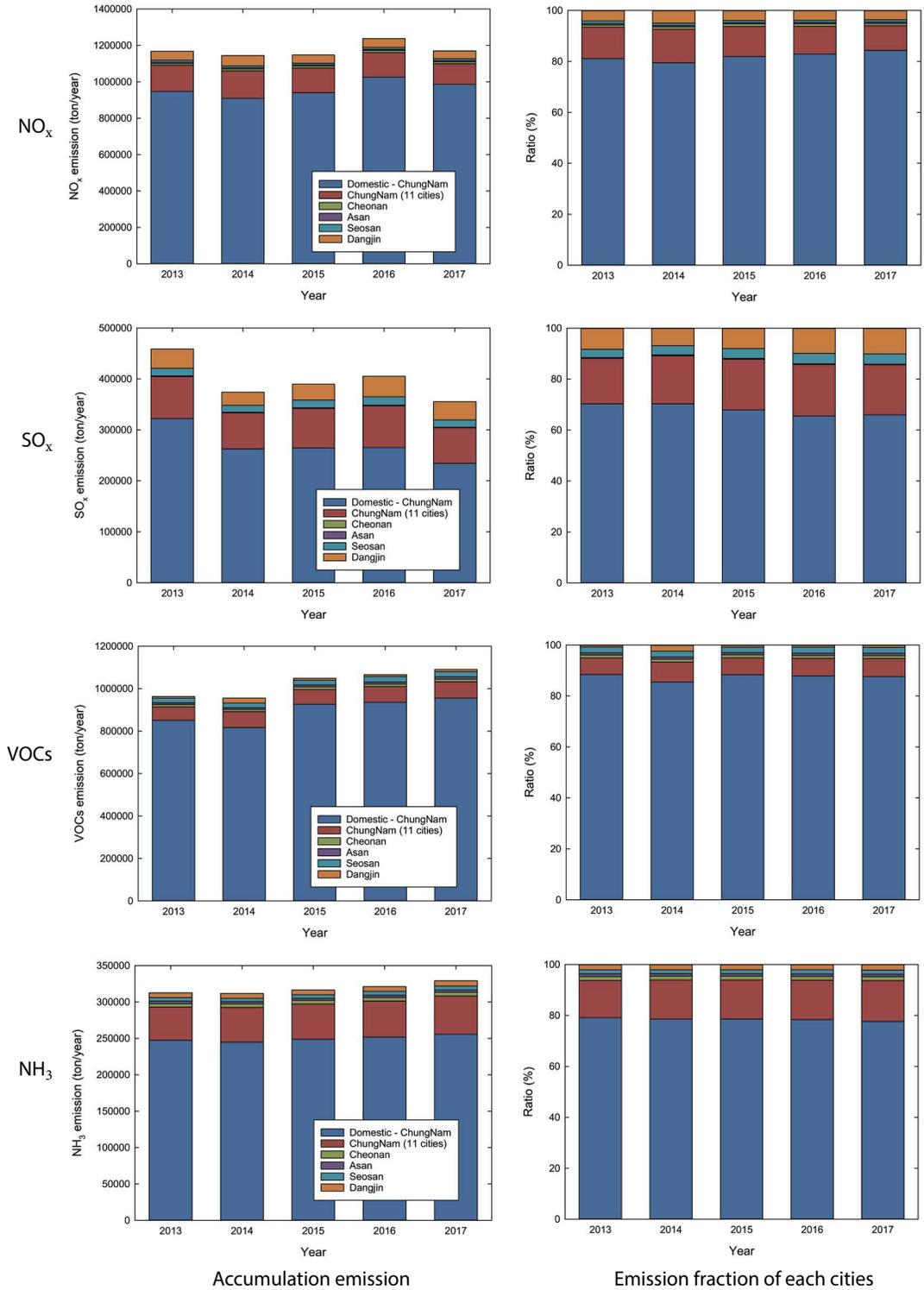


Fig. 3. Emission trend of each air pollutant since 2013.

설에 대한 자발적 감축 노력이 반영된 결과로 판단된다. 고농도 미세먼지 이슈가 발생하기 시작한 2016년을 기준으로 전국적인 대기오염 개선 노력이 추진되기 시작하였는데, CAPSS 데이터 역시 2016년까지 대기오염 배출량이 증가추세를 이루다가 2017년 소폭 감소한 것으로 나타나고 있다. 이후 지속적인 감축 노력이 이루어지고 있는 만큼 향후 제공될 CAPSS 2018과 2019 등에서는 지속적인 감소추세가 나타날 것으로 예상된다.

그림 3은 전국 대비 충청남도과 서북부에 위치한 4개시의 최근 5년간 대기오염물질 배출량 변화를 나타낸 것이다. 입자상오염물질의 경우 비산먼지와 생물성연소가 2015년부터 추가됨에 따라 추세분석이 무의미하여 본 분석에서 제외하였다.

NO_x의 경우 국가는 지속적으로 증가하다가 2017년 감소추세로 변화하였고, 충청남도의 경우 천안, 아산은 유사하거나 소폭 증가, 서산, 당진은 감소세를 보였다. 특히 당진의 경우 2013년 48,043톤에서 2017년 42,468톤으로 11.6%나 감소한 것으로 나타났다. 당진의 저감 노력에 의해 전국에서 충청남도의 배출 비율 또한 2013년 18.9%에서 2017년 15.7%로 3.2% 감소하였다.

SO_x의 경우 저황유 제품 사용과 탈황기술 개발 등으로 인해 전국적으로 급격한 감소추세를 보이고 있으며, 2013년 458,872톤에서 2017년 355,423톤으로 22.5%나 저감하였다. 하지만 이에 비해 충남은 11.3% 저감하는 것에 그쳤는데, 이는 당진과 서산에 위치해 있는 대형배출시설(석탄화력발전소, 제철소, 석유화학단지)의 경우 아무리 좋은 기술을 적용한다 해도 연간 사용되는 양이 지속적으로 증가하다 보니 배출량 또한 증가하고 있는 것으로 판단된다(CNI, 2020). 2013년 서산과 당진에서 배출되고 있는 SO_x가 충청남도에서 배출되는 전체 SO_x의 64.4%를 차지하였고, 2017년에는 71.8%로 증가하였는데, 이는 타 지역이 저 황함유 원료를 사용하면서 자동차 등 이동오염원부터 배출되는 SO_x를 철저히 관리한 반면, 서산이나 당진에서는 연소나 정제과정에 상대적으로 황함유가

높은 연료를 사용함으로써 나타난 결과로 풀이된다. SO_x 전체 배출에 대한 충남지역의 기여도는 2013년 29.7%에서 2017년 34.1%로 증가하였는데, 이는 충청남도가 전국의 높은 저감 효과 대비 상대적으로 낮은 감소를 보였기 때문에 전체적인 배출비율이 증가한 것으로 판단된다.

VOCs는 전국적으로 꾸준히 증가추세에 있다. 2013년 기준 962,356톤 배출에서 2017년 1,090,430톤으로 13.3% 증가한 가운데 충청남도는 21.5%로 이보다 더 높은 증가율을 보였다. 지역별로는 당진이 37.3%로 가장 크게 증가하였고, 아산 25.8%, 서산과 천안이 각각 13.5%와 13.1%의 증가율을 보였다. 전체적인 VOCs 배출량 대비 충청남도가 차지하는 비율은 2013년 11.6%에서 12.4%로 소폭 증가하였는데 이는 배출량이 가장 많은 경기도의 기여율이 매우 높아 상대적으로 낮은 증가율을 나타냈다.

NH₃는 대부분 농축산에서 배출되는 것으로 산정되고 있는데, 충청남도는 최대 도시인 천안, 아산에서도 농업이 이루어지고 있을 만큼 15개 시군 대부분에서 농업과 축산업이 이루어지고 있어 배출량이 높다. 2013년에도 전국 배출량의 20.8%로 높은 비율을 보였으며 2017년 역시 22.3%로 매우 높은 수준으로 확인되었다. 전국적으로 5년 사이 5.3%의 NH₃ 증가가 확인된 반면, 충청남도는 12.6%가 증가한 것으로 나타났다. 특히 당진이 11.3%로 가장 높은 증가율을 보였다. 최근 NH₃는 SO_x, NO_x 등과 반응하여 2차 무기입자(secondary inorganic compounds, SIA)를 생성하는 전구물질로 알려지면서 매우 높은 관심을 받고 있다(Knellopoulos *et al.*, 2020; Kroll and Seinfeld, 2008; Trebs *et al.*, 2004). 당진의 경우 CAPSS 기준 충청남도에서 배출되는 입자상 오염물질의 절반 이상을 배출하는 것으로 산정되고 있는데, 이들 전구물질과 반응에 의해 생성된 SIA를 감안한다면 훨씬 더 많은 무기입자가 영향을 미치고 있을 것으로 예상된다.

그림 4는 충청남도를 기준으로 2013년도와 2017년도에 배출된 대기오염물질을 부문별, 물질별로 구분하여 비교한 것이다. 2013년의 경우 NO_x가 전체

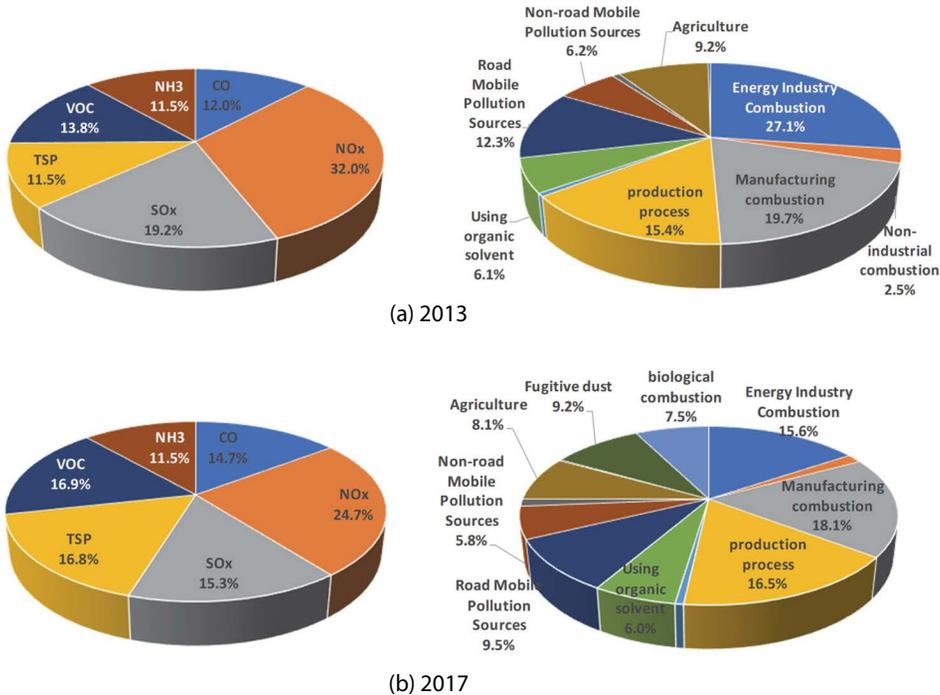


Fig. 4. Comparison of air pollutants by substance and sector.

염물질 중 가장 많은 32.0%를 차지하였고, SO_x 19.2%, VOCs 13.8% 순이었다. 하지만 2017년이 되면서 NO_x의 비율이 24.7%까지 감소하였고, VOCs와 TSP가 각각 16.9%와 16.8%로 증가한 반면, SO_x가 15.3%로 감소하였다. 부문별로는 에너지 산업연소가 27.1%로 가장 높았고, 제조업 연소 19.7%, 생산공정 15.4%, 도로이동오염원 12.3% 순이었다. 2017년 역시 에너지 산업연소가 11.5% 감소한 15.6%로 대폭 감소하였지만 제조업 연소 18.1%, 생산공정 16.5%, 도로이동오염원 9.5%로 비산먼지와 생물성연소가 추가되면서 전반적인 비율 변화는 있었지만 2013년과 유사한 수준을 보였다. 이는 아직까지 충청남도의 산업구조가 기존의 에너지 산업연소와 제품생산에 대한 의존도가 높은 후진국형 산업구조를 가지고 있다는 것을 의미한다.

정부에서는 일정규모 이상의 대형사업장 굴뚝을 대상으로 TMS를 운영하고 있으며, 환경에 대한 국민적 관심과 우려가 높아지면서 이를 실시간으로 공개

하고 있다(KECO, 2021b). TMS에서는 2019년 12월부터 대형사업장 111개소의 정보를 실시간으로 공개하기 시작하여 2020년 4월부터는 TMS 부착 모든 사업장을 대상으로 총 7개 항목에 대해 정보를 공개하고 있다. 그림 5는 2015년부터 가장 최근 공개정보인 2019년까지 총 5년간의 전국과 충청남도의 배출량 변화를 나타낸 것이다. CAPSS의 경우 사용된 원료나 활동자료에 배출계수를 적용하여 환산값을 사용하기 때문에 입력데이터에 대한 검증과 산출된 결과에 대한 검증이 필요하지만, TMS의 경우 굴뚝으로부터 배출되는 실시간 자료들을 활용하기 때문에 측정장비가 정확한 값을 제공해준다는 가정하에 실측정보를 실시간으로 획득할 수 있다는 장점이 있다. 한 예로 CAPSS의 경우 2021년 기준 4년전 정보인 2017년 배출량 자료가 최신자료이나 TMS는 비교적 최신인 2019년까지 자료를 확보하여 좀 더 최신의 정책반영 결과를 분석할 수 있다.

TMS 기준 전국 배출량은 2015년 403,537톤에서

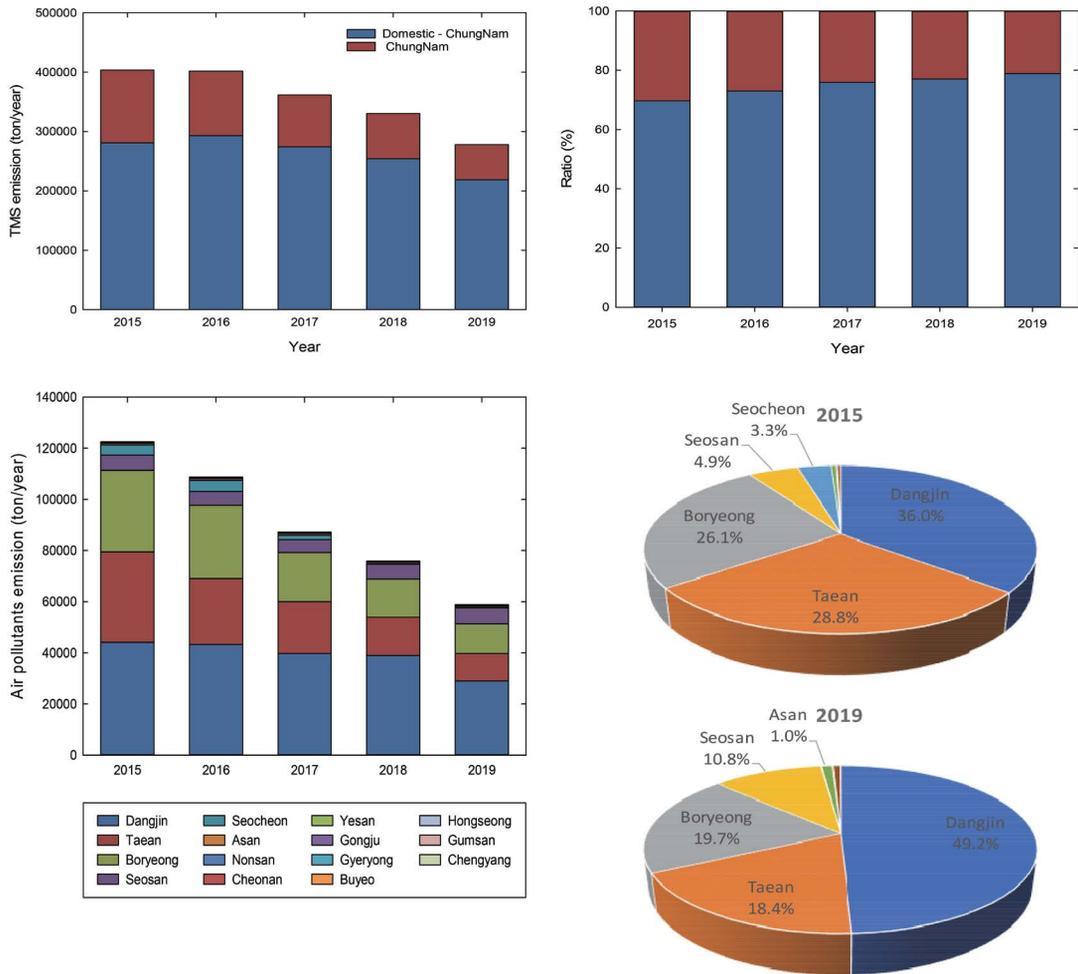


Fig. 5. Emission trend of air pollutants in ChungNam area using TMS data.

2019년 277,695톤으로 31.2% 감소하였고, 충청남도는 2015년 122,474톤에서 2019년 58,775톤으로 52.0%의 감소를 보였다. 비율면에서도 2015년에는 전국 TMS 배출량의 30.4%를 충남이 차지하였으나 2019년에는 21.2%로 9.2%의 감소를 보였다. 충청남도만을 기준으로 봤을 때 당진, 태안, 보령, 서산의 비율이 2015년에 95.8%, 2019년 98.0%로 대부분을 차지하는 것으로 나타났고, 그 중 당진 49.2%, 보령 19.7%, 태안 18.4%, 서산 10.8% (2019년 기준)이었다. TMS 배출량 1~3위의 지역은 석탄화력발전소가 위치하고 있는 지역이었고, 4위의 서산은 대형 산업단

지(대산석유화학단지)가 위치한 곳으로 확인되었다. TMS가 대부분 대형배출시설을 대상으로 설치된다는 것을 감안한다면 충청남도의 산업부문의 배출량 감소를 위해서는 당진, 태안, 보령, 서산의 배출량 감소가 필요하며, 최근 5년간 다각도의 노력에 의해 52%의 배출량이 감소된 것으로 확인되고 있다. 정부에서 2018년 “미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)”이 수립된 이후 2019년 미세먼지특별법, 2020년 대기관리권역법이 신설되면서 더욱 강력한 조치와 규제가 시행되고 있어 2020년 이후의 배출량은 더욱 감소될 것으로 예상된다.

3.2 충남 서북부지역의 대기질 변화 특성

그림 6은 충청남도에 AQMS가 설치되어 데이터를 송신하기 시작한 1995년 이후 국가와 충남, 서북부 4개시의 오염물질 농도변화를 나타낸 것이다. 충청남도는 2016년까지 단 5개소만이 운영되고 있었고, 이후 2017년부터 급격히 증가하였기 때문에 1개소의 측정소값이 그 지역을 대표한다고 볼 수는 없지만 통상적으로 측정소가 1개인 경우 그 지역 대표값으로 사용하기 때문에 본 연구에서도 이를 반영하여 활용하였고, 그 이후에는 늘어난 측정소들의 경우 지역 평균값을 반영하였다.

PM₁₀의 경우 전국의 측정값이 제시되기 시작한 1998년 기준 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 지속적으로 증감을 반복하다가 2006년을 기점으로 감소하기 시작해 가장 최근인 2019년에는 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 감소하였다. 충청남도는 1998년 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정 초기에는 전국 평균 농도보다 낮았으나 지속적인 증감을 거쳐 2019년에는 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전국보다 약간 높은 수치를 보였다. 1998년 이후 수도권 대기환경특별법이나 배출허용기준 강화 등 강력한 저감 노력으로 약 20년간 25.5%가 감소한 것에 반해 충청남도는 10.6% 수준으로 상대적으로 낮은 감소율을 보였다. 충남 서북부의 경우 2007년부터 4개시 모두에서 측정데이터가 생산되기 시작하였는데, 이때 전국 평균농도가 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 충청남도는 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 지역적으로는 아산이 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고, 천안 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 서산 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 당진 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순이었다. 2007년 기준 4개시의 2019년까지의 저감율은 서산이 27.8% (39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 가장 높게 나타났고, 천안이 16.1% (47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 아산이 13.3% (52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 당진의 경우 오히려 17.4% (54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 증가하여 충청남도 지역 내 최대 농도를 보였다. 당진의 경우 2017년 2번째 AQMS가 송산면에 설치되었는데, 위치상 충청남도 내 배출량이 가장 많은 제철단지 바로 앞에 위치하고 있어 충청남도 내 가장 높은 농도를 보이고 있다.

SO₂의 경우 대부분의 배출이 화석연료에 포함된 황 성분이 연소과정을 거쳐 배출되는 것으로 알려져

있다. 1970년대 이후 급격히 증가한 산성비의 피해 관리를 위해 탈황설비 보강, 원유 및 석탄에 포함된 황 성분 제거 등 다양한 처리설비를 구축하였다. 그 결과 전국 기준 1998년 9 ppb였던 농도는 2019년 4 ppb로 55.6%가 감소한 것으로 나타났고, 충청남도 역시 8 ppb에서 4 ppb로 유사한 수준(52.5%)으로 전반적으로 급격한 감소를 보이고 있다. SO₂ 역시 충남 서북부 4개 시군의 데이터가 확보되기 시작한 2007년을 기준으로 전국 33.3%, 충남 15.6%의 감축을 보인 반면 아산 20.0%, 서산 16.7%, 천안 0%, 당진 -100%로 아산, 서산은 감소한 반면, 천안과 당진은 각각 유지와 2배 증가를 보였다. 천안은 기존 2007년의 농도값이 현재 수준의 낮은 수준이다 보니 현 수준의 저감 대책으로는 배경농도 이하로 낮출 수 없다는 의미로 해석된다. 기존에 높았던 아산과 서산은 소폭 감소를 보인 반면 당진은 송산면 측정소의 데이터가 추가되면서 오히려 2배 증가한 것으로 나타나고 있다.

NO₂는 자동차 배기가스, 산업공정, 생활연소 등 다양한 분야에서 배출되기 때문에 어느 한 분야에 대한 저감으로는 그 효과를 보기가 쉽지 않다. 1998년 기준 전국과 충청남도의 NO₂ 농도는 20 ppb와 15 ppb에서 2019년 18 ppb와 13 ppb로 각각 10.0%와 8.5% 수준의 감소를 보였다. 전국의 농도는 1998년부터 2004년까지 증가하다가 2005년 이후 약 10년간 유지 후 2016년부터 감소세를 보이고 있으며, 충청남도는 1998년부터 2016년까지 증감을 반복하다가 2017년부터 감소세를 나타내고 있다. 전국과 충남이 전반적으로 감소추세를 보이는 반면 아산(23.8% 감소)을 제외한 천안, 서산, 당진은 측정 초기인 2007년과 2019년의 농도가 유사하거나 소폭 증가한 것으로 나타났다. 절대적인 농도만을 봤을 때 아산, 서산, 당진의 경우 전국 및 충남의 평균농도와 유사한 수준으로 이 역시 SO₂와 마찬가지로 지금 추진 중인 정책 수준으로는 현 배경농도 수준 이하로의 저감은 어렵다는 것을 의미하며, 천안의 경우 타 지역에 비해 높아진 차량 운행과 도시 밀집현상에 따른 도심

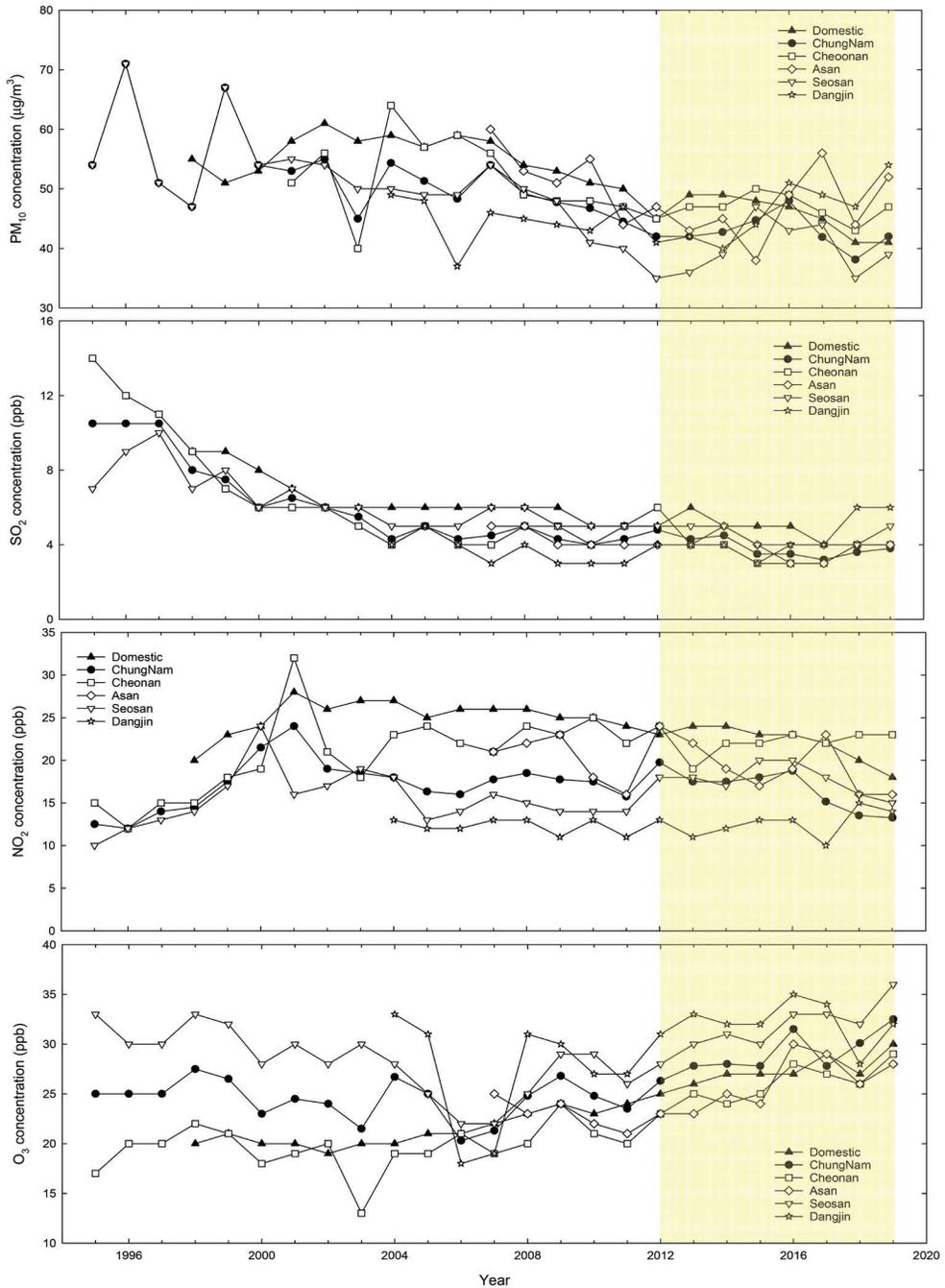


Fig. 6. Change trend of major air pollutants measured at ChungNam and 4 cities since 1995.

내 농축 현상으로 농도가 증가하고 있는 것으로 판단된다. 천안은 향후 이에 대한 추가적인 자료 분석

이나 상세측정이 수행되어 원인파악 및 개선대책 마련이 필요하다.

Table 3. Influence analysis of PM₁₀ in ChungNam by Change of emission reduction, wind speed, and wind direction.(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	NW (135°)			W (180°)			SW (225°)		
	0.5 m/s	2.0 m/s	4.0 m/s	0.5 m/s	2.0 m/s	4.0 m/s	0.5 m/s	2.0 m/s	4.0 m/s
100%	0.15	0.14	0.17	0.08	0.08	0.10	0.05	0.05	0.07
80%	0.11	0.12	0.14	0.06	0.06	0.08	0.04	0.04	0.06
60%	0.09	0.08	0.10	0.05	0.05	0.06	0.03	0.03	0.04
40%	0.06	0.06	0.06	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03

O₃은 대표적인 광화학 2차 오염물질로 강한 산화력을 가지며, 건물부식 및 피부관련 질환을 야기하는데 특별한 대책이 없어 이에 대한 관심이 증가하고 있다. 1998년 20 ppb였던 전국 농도는 2019년 30 ppb로 50% 증가하였고, 충청남도 역시 28 ppb에서 33 ppb로 18.2% 증가한 것으로 나타났다. 4개시 역시 기준연도인 2007년 대비 당진 68.4%, 서산 63.6%, 천안 52.6%, 아산 12.0% 증가한 것으로 나타났다. 주로 내륙에 위치한 천안, 아산보다 해안가에 위치한 당진, 서산의 증가율이 높은 것을 확인할 수 있는데 이는 주로 바닷가에 위치하고 있는 발전소, 산업단지에서 배출된 오염물질이 햇빛과 반응하여 생성된 2차 오염물질이 추가로 반영된 결과로 풀이된다. 전국과 충청남도 및 4개시 모두에서 지속적인 증가추세를 보이고 있으며, 강한 농도에 장기간 노출시 피부암 등 인체에 비가역적인 악영향을 줄 수 있기 때문에 이에 대한 대책 마련이 요구되며, 대책마련 전까지 피해 구간에 대한 노출 최소화를 위한 정책적 보완책 마련이 필요하다.

3.3 충남 서북부지역 배출량 저감에 따른 지역 농도변화 분석

충청남도에 위치해 있는 다양한 대형배출시설 중 화력발전소를 대상으로 배출량과 풍속, 풍향변화에 따른 지역 내 영향을 분석하였다. 2016년 CAPSS를 기준으로 배출량을 그대로 적용(100%)하였을 때, 북서풍이 4.0 m/s로 불 때 충청남도 전역에 대해 0.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 높이는 효과를 보였고, 0.5 m/s와 2.0 m/s일 때는 각각 0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 0.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 유사

한 수준을 보였다. 반대로 남서풍이 4.0 m/s로 불 경우에는 북서풍이 0.5 m/s일 경우의 1/2 수준의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 당진이나 태안쪽에 위치한 발전소의 경우 평야지대로 배출된 오염물질이 주변으로 확산되어 영향을 미치기 쉬운 지형을 가진 반면, 동쪽이나 남동쪽에 위치한 보령이나 서천의 경우 차령산맥(덕유산, 칠갑산)으로 막혀 있어 확산에 의한 영향이 적게 나타나기 때문인 것으로 분석된다. 동일한 풍향에서 배출량이 감소(100→40%)할 경우 PM₁₀에 대한 영향 수준은 35.3~42.9%까지 감소하였고, 그 중 남서풍일 경우에 가장 크게 나타났으며(40.0~42.9%), 반대로 서풍일 경우 가장 미미하게 나타났다(37.5~40.0%). 표 3은 배출량과 풍속, 풍향 변화에 따라 충청남도 내 PM₁₀의 영향 수준을 요약한 것이다.

그림 7은 인자의 변화에 따라 충청남도 내 PM₁₀의 영향 수준을 15개 시·군으로 구분하여 나타낸 것이다. 배출량을 그대로 유지하였을 경우 북서풍 유입시 홍성, 예산, 천안, 아산의 농도가 높게 나타났으며, 서풍일 경우 당진, 보령, 청양, 공주가, 남서풍일 경우 충남 전역의 농도가 상대적으로 고르게 높게 나타났다. 북서풍일 경우 당진과 태안화력으로부터 배출된 오염물질이 남동쪽으로 이동하다가 홍성, 예산에 걸쳐 솟아있는 차령산맥을 넘지 못하고 분지형태의 영향을 주어 상대적으로 높은 농도값을 보이고 있다. 서풍의 경우 발전소가 위치한 당진, 태안, 보령, 서천으로부터 좌에서 우로 일직선상의 농도값이 높은 것으로 확인할 수 있다.

배출량을 100%에서 80%로 감소시키자 평균적인

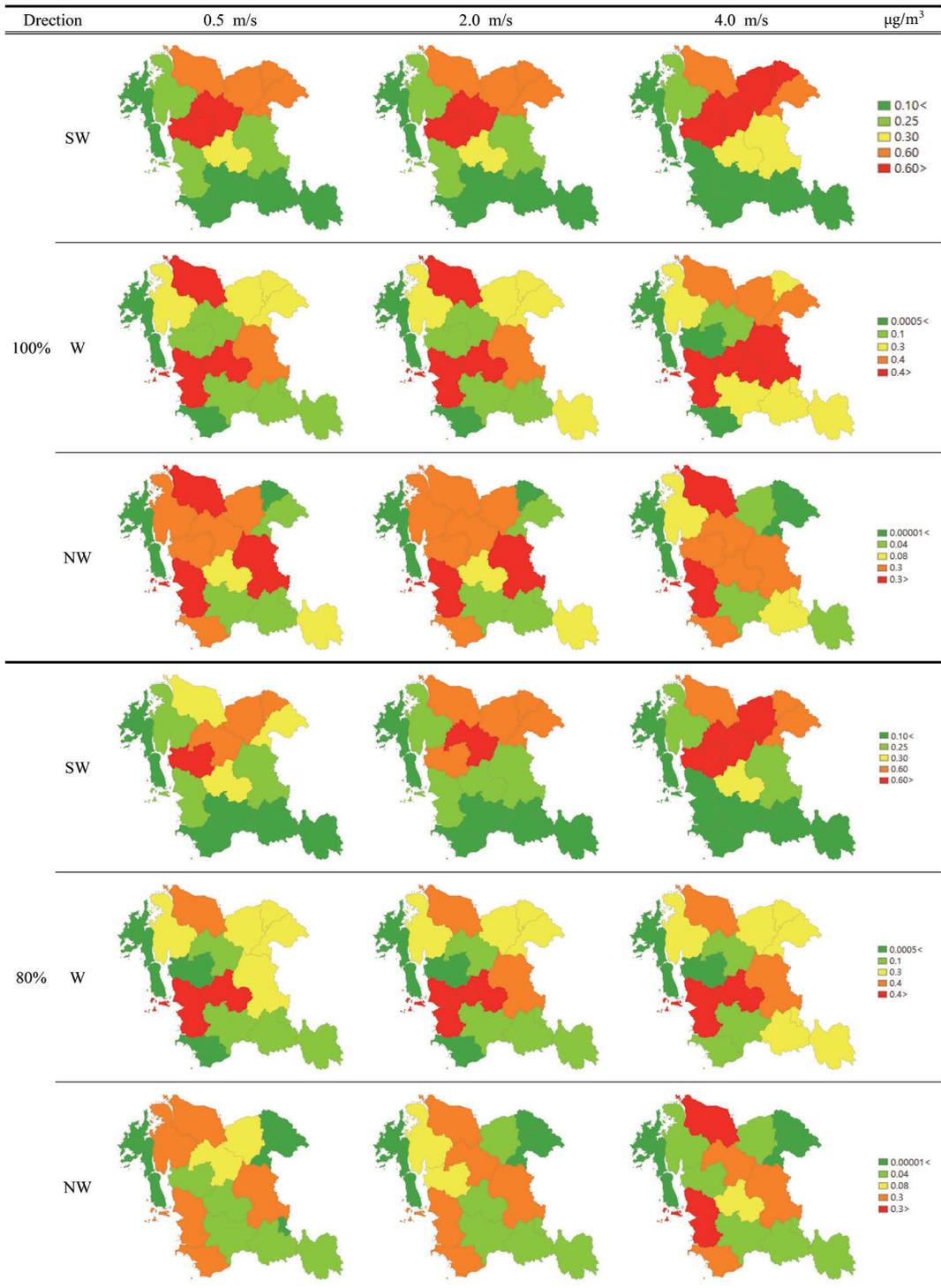


Fig. 7. Influence analysis of PM₁₀ by emission reduction of coal-fired power plant.

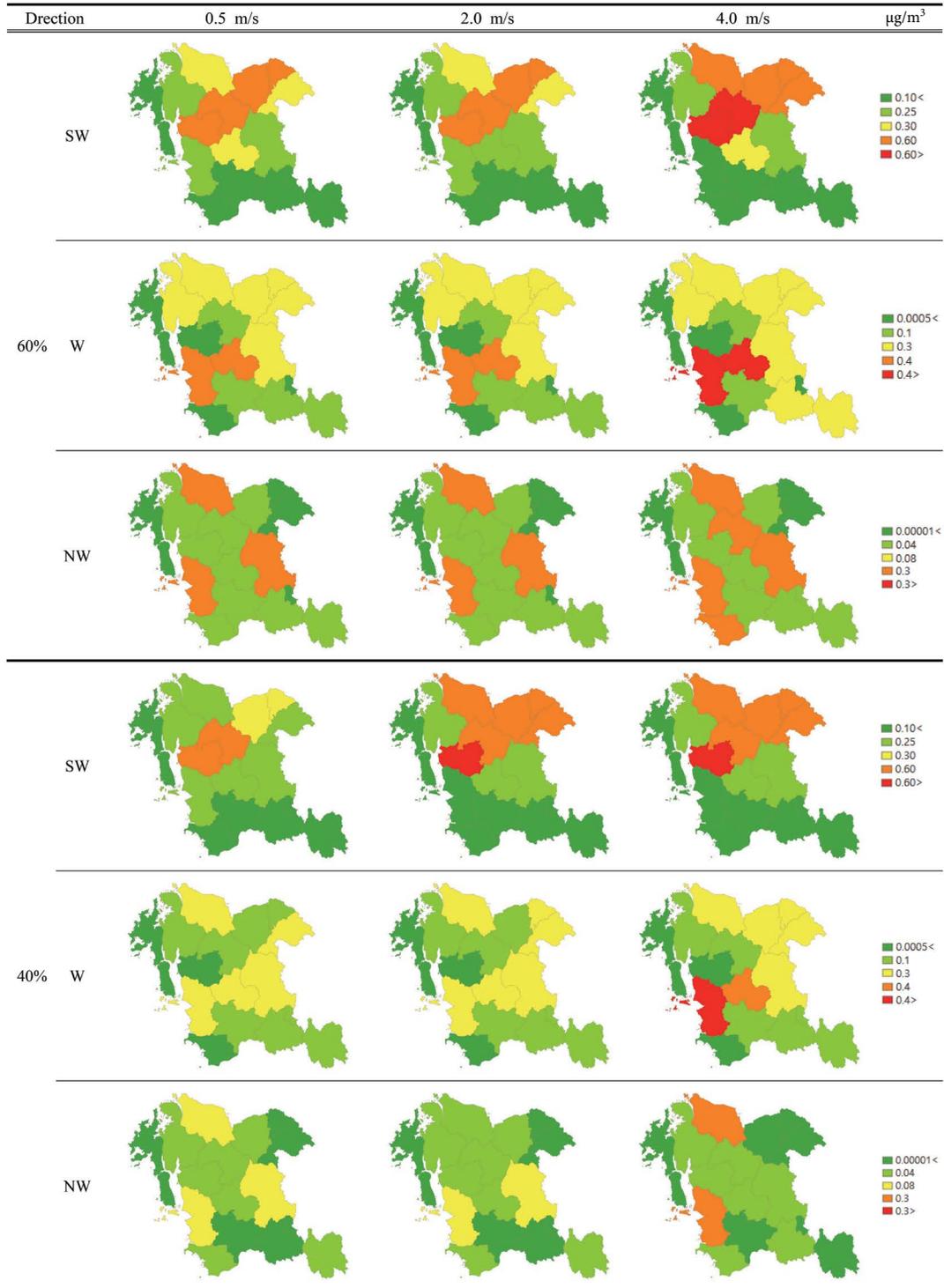


Fig. 7. Continued.

로 약 20% (14.3~26.7%)의 농도감소를 보였는데, 특히 풍속이 미풍인 0.5 m/s나 2.0 m/s보다 바람이 더 빠른 4 m/s에서 더 큰 폭의 감소세를 보였다. 이는 상대적으로 높은 유속일 경우 배출량이 감소하더라도 확산력이 커 주변으로의 영향이 큰 반면, 풍속이 낮아질 경우 주변으로의 확산력이 약해지면서 영향력이 줄어드는 것으로 확인되었다.

본 연구결과를 바탕으로 배출량을 감소시킨다 하더라도 주변지형의 영향과 풍속 차이에 따라 지역적으로 다른 영향을 받을 수 있다는 것을 확인하였고, 대기질 개선을 위해서는 배출량 저감과 동시에 배출된 오염물질을 확산·희석시킬 수 있는 정화능력의 향상과 주변 지형을 이용한 바람길 제어가 필요하다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

정부차원의 대기질 개선대책이 추진 중인 가운데 대형배출시설이 많이 밀집되어 있는 충청남도도 소형 배출시설이 많은 경기도와 함께 높은 대기오염물질 배출량을 보이고 있었으며, 서로 다른 관점에서 배출량 저감 대책이 요구되고 있다. 이러한 관점에서 충남 서북부에 위치한 천안·아산·당진·서산의 4개시는 제철단지·발전소·석유화학단지·대형도시 등 저마다의 다양한 특징을 가지고 있으며, 서로 상이한 특징을 감안한 저감방안 마련이 필요하다. 이에 본 연구에서는 기존 데이터들을 기반으로 특성 분석을 실시하였고, 발전소의 배출량 감소에 따른 지역 내 영향을 수치해석 하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. CAPSS 기준 최신 자료인 2017년을 기준으로 최근 5년간의 배출량을 검토한 결과 전국과 충청남도 모두 증가추세에 있으며, 2016년 배출량 대비 2017년 배출량이 소폭 감소한 것으로 나타났다. 물질별로는 2013년 대비 2017년 NO_x 와 SO_x 의 배출비율이 감소한 반면 VOCs와 CO의 비율이 증가하였고, TSP 역시 증가하였으나, 비산먼지와 생물성연소가

2015년부터 추가된 것을 감안한다면 이에 대한 분석은 추후 몇 년간의 데이터가 추가된 이후 가능할 것으로 보인다.

2. 대형배출시설을 위주로 관리되고 있는 TMS 자료 기반 최근 5년 자료 분석결과 전국과 충남 모두 5년간 지속적인 감소세를 보이고 있으며, 전반적인 배출량을 산정하는 CAPSS 대비 TMS의 감축량이 크다는 것은 최근 정책 반응을 통해 소형배출보다는 대형배출시설에 대한 저감 효과가 크게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다.
3. CAPSS와 TMS 자료를 기반으로 최근 전국과 충청남도 내 대기오염물질의 배출량은 감소되고 있는 가운데 충남 서북부 4개 시의 농도변화를 분석한 결과 급격한 감소세를 보이는 SO_2 를 제외한 다른 물질들은 소폭 감소하거나 오히려 증가하는 추세를 보이고 있다.
4. 대형배출시설에 대한 관리방안으로 발전소 상한제약을 추진하고 있는데 발전소 배출량 감축에 따른 시나리오를 적용하여 수치해석을 시행한 결과 충남지역 전체에 대한 저감효과는 미미한 수준($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)으로 나타났다.

현재 국가차원의 대기질 개선대책 마련을 위한 기초자료로 CAPSS 자료가 활용되고 있으나 최신 자료가 2017년도 자료이다 보니 최근 정부 시책 추진에 따른 저감효과를 전혀 반영하지 못하고 있으며, TMS와의 비교만으로도 간접적으로 감소추세를 따라가지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 대형배출시설에 대한 저감 대책으로 발전소 상한 제약이나 운행정지, 조기폐쇄 등이 진행되고 있으나 배출량 저감에 따른 영향 분석 결과 지역 전체에 대한 농도 저감효과는 미미한 것으로 나타났다. 대기오염물질은 수질이나 토양 등과 달리 어느 한 곳에 국한되어 영향을 미치는 것이 아니라 매개체인 바람이나 기류를 통해 전역으로 확산·분포되므로 어느 한 부분에 대한 중점적인 저감 정책보다는 배출원에 대한 정확한 원인파악과 다방면의 저감대책을 통해 저감을 이뤄낼 수 있는 만큼 단시일내의 저감대책보다는 중장기적인 차원의 대책

마련과 지속적인 노력이 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 충남녹색환경지원센터의 2020년도 수탁사업지원과제 “충남 서북부 기초 지자체의 미세먼지 대응 행정협의회 운영방안 연구” 및 “화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구(3차년도)”의 지원으로 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

References

- Choi, S.W., Kim, T., Lee, H.K., Kim, H.C., Han, J., Lee, K.B., Lim, E.H., Shin, S.H., Jin, H.A., Cho, E., Kim, Y.M., Yoo, C. (2020) Analysis of the national air pollutants emission inventory (CAPSS 2016) and the major cause of change in republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 14(4), 422-445. <https://doi.org/10.5572/ajae.2020.14.4.422>
- CungNam Institute (CNI) (2018) Set target amount for reducing air pollutants in Chungcheongnam-do.
- CungNam Institute (CNI) (2020) A study on climate and environmental impacts around coal-fired power plants.
- Ju, S., Yu, G.H., Park, S., Lee, J., Lee, S., Jee, J., Lee, K., Lee, M. (2020) Pollution characteristics of PM_{2.5} Measured during Fall at a season site in Chungcheong Prvovince, *Journal of Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 329-345, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.329>
- Kim, J.B., Yoon, S.H., Lee, S.S., Kim, K.H., Noh, S.J., Bae, G.N. (2020) Spatial and temporal distribution of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration in Chungcheongnam-do, *Journal of 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.U., 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>
- Korea Environment Corporation (KECO) (2021a) AirKorea. URL: <https://www.airkorea.or.kr/eng>
- Korea Environment Corporation (KECO) (2021b) CleanSYS. URL: <https://cleansys.or.kr/introBn.do>
- Kroll, J.H., Seinfeld, J.H. (2008) Chemistry of secondary organic aerosol: formation and evolution of low-volatility organics in the atmosphere, *Atmospheric Environment*, 42(16), 3593-3624. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.003>
- Lee, B.J., Park, S.S. (2019) Temporal and Spatial Variabilities of Concentrations of Criteria Air Pollutants during Early Summer in 2018 in South Chungcheong Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 265-281, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.265>
- Ministry of Environment (ME) (2018) Comprehensive Plan on Fine Dust (2020~2024).
- Ministry of Environment (ME) (2019a) Special act on the Reduction and Management of Fine Dust.
- Ministry of Environment (ME) (2019b) National Air Pollutants Emission 2016.
- Ministry of Environment (ME) (2020a) Special act on Improvement of Atmospheric Environment in Atmospheric Management Area.
- Ministry of Environment (ME) (2020b) National Air Pollutants Emission 2017.
- Ministry of Environment (ME) (2020c) Basic Plan for Air Quality Management in Central Region.
- Ministry of the Interior and Safety (MIS) (2021) Cleansys. URL: <http://apis.data.go.kr/B552584/cleansys>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) Air Pollution Measuring Network Installation and Operation Instruments.
- Oh, S. (2007) Concentration of atmospheric fine particles measured during 2005 in Chugnam, Korea, *Journal of Society for Atmospheric Environment*, 23(1), 132-140, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2007.23.1.132>
- Park, S. (2019) Change in Mass Size Distributions of Ambient Aerosol Particles during Asian Dust Storm Event in Late Fall at an Urban Site of Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 502-515, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.502>
- Son, S.C., Park, S., Bae, M., Kim, S. (2020) 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, 35(5), 669-687, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.669>

Statistics Korea (SK) (2021) Korean Statistical Information Service. URL: <https://kosis.kr/index/index.do>

Trebs, I., Meixner, F.X., Slanina, J., Otjes, R., Jongejan, P., Andreae, M.O. (2004) Real-time measurements of ammonia, acidic trace gases and water-soluble inorganic aerosol species at a rural site in the Amazon basin, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, 967-987. <https://doi.org/10.5194/acp-4-967-2004>.

Yu, G.H., Cho, S.Y., Bae, M.S., Lee, K.H., Park, S.S. (2015) Investigation of PM_{2.5} pollution episodes in Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 269-286, (in Korean with English

abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.3.269>

Authors Information

이선엽 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)

홍현수 ((주)나인에코 대표이사)

김창혁 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)

황은영 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)

윤수향 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)

이상신 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구위원)

노수진 (연세대 환경공해연구소 박사후연구원)

김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)