

논문

충남지역 대규모 점오염원 주변 PM_{2.5}의 고농도 사례 특성 연구

A Study on Characteristics of High PM_{2.5} Pollution Observed around Large-scale Stationary Sources in Chungcheongnam-do Province

손세창, 박승식*, 배민아¹⁾, 김순태¹⁾

전남대학교 환경에너지공학과, ¹⁾아주대학교 환경안전공학과

Se-Chang Son, Seungshik Park*, Minah Bae¹⁾, Soontae Kim¹⁾

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

접수일 2020년 9월 6일
수정일 2020년 10월 11일
채택일 2020년 10월 19일

Received 6 September 2020
Revised 11 October 2020
Accepted 19 October 2020

*Corresponding author
Tel : +82-(0)62-530-1863
E-mail : park8162@chonnam.ac.kr

Abstract In this study, pollution episodes of PM_{2.5} observed between May 07 and June 07, 2019 at air monitoring stations located around large-scale stationary sources in Chungcheongnam-do province were examined. Furthermore, local and regional contributions of PM_{2.5} measured during the pollution episodes were evaluated using Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model. During the study period, two and three episodes were identified at stations around coal-fired power plants and a petrochemical complex (episodes I and II), and at stations around a steelworks and its downwind locations (episodes I, II, and III), respectively. Episode I occurred between May 15 and 17 was dominated by local pollution with very stable air conditions, and similar to the episode I, episode III (June 02~06) was also associated with stagnant weather pattern over the Korean Peninsula with some inflow of air pollutants from outside. On the contrary, episode II occurred between May 23 and 25 at all stations was strongly associated with long-range transportation of air pollutants from northern regions of China (e.g., Shanghai area). Average local and regional contributions of PM_{2.5} over 9 stations estimated using CMAQ model were 60.6 and 39.4%, 25.7 and 74.3%, and 41.3 and 58.7% during episodes I, II, and III, respectively. However, respective local contribution of PM_{2.5} observed at the station around a steelworks increased to 67.6, 40.0, and 56.2%, suggesting setting up effective reduction strategies of air pollutants such as SO₂, NO_x, and primary PM_{2.5} from the steelworks.

Key words: Chungcheongnam-do, Large-scale stationary sources, PM_{2.5}, CMAQ model, Pollution episodes, Local and regional contributions

1. 서론

대기 에어로졸 입자는 자연적 또는 인위적 배출원에서 유래하며, 에어로졸 입자의 1차 발생은 바이오매스와 화석 연료의 불완전 연소 과정, 화산 폭발, 해양, 도로, 토양 등을 통해 이루어지며, 2차 생성은 오염원을 통해 배출된 기체상 전구물질들의 대기 중 화학반응과 기체-입자 변환 과정에 의하여 이루어진다. 이

와 같은 과정을 통해 생성된 대기 에어로졸 입자는 호흡기 및 심혈관 질환 등 건강에 악영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다(Lipfert *et al.*, 2018; Pope *et al.*, 2009; Miller *et al.*, 2007). 최근 국내에서 미세먼지에 대한 관심이 많아지고 있으며 미세먼지의 고농도 발생 원인으로 석탄화력발전소, 철강산업 등에서 배출되는 대기오염물질들을 지목하고 있다(Ju *et al.*, 2020; Lee and Park, 2019; Kim *et al.*, 2017). 2019년 국립환경

과학원에서 발간한 “2016년 국가 대기오염물질 배출량” 자료에 따르면, 17개 지방자치단체에서 배출한 대기오염물질(TSP, CO, NO_x, SO_x, VOCs, NH₃)의 총량은 4,134,191톤이며, 이 중에서 충청남도가 차지하는 비율은 약 12%로 경기도에 이어서 두 번째로 높았다(NIER, 2019). 또한, 시·도별 대형사업장의 대기오염물질(TSP, SO₂, NO_x, CO)의 총배출량은 충청남도 24%, 강원도 15%, 전라남도 14%, 경상남도 13% 등으로 충청남도의 배출량이 가장 높았다(Lee and Park, 2019). 이러한 원인은 충청남도 서쪽에 위치하고 있는 대규모 석탄화력발전소, 제철소 및 석유화학 산업단지에 의한 것이며, 충청남도에 위치한 당진화력발전소, 보령화력발전소 및 태안화력발전소에서 배출하는 대기오염물질은 충청남도 전체의 68%를 차지하고, 현대제철 당진제철소를 비롯한 제철제강업은 25%, 석유화학산업은 5.2%로 충청남도에서 배출되는 대기오염물질의 대부분을 차지하였다(Lee and Park, 2019).

Kim *et al.* (2017)은 충청남도 대형 점오염원에서 배출되는 대기오염물질이 충청남도 및 수도권에 미치는 기여도를 알아보기 위하여 3차원 광화학 모델인 CMAQ (Community Multiscale Air Quality)을 이용하여 분석하였다. 기여도 모사는 2010년과 2014년의 1월, 4월, 7월 및 10월을 대상으로 수행하였으며, 모사 대상 지역은 화력발전소를 포함한 대형 점오염원이 존재하는 충청남도과 인접해 있는 서울, 인천, 경기 등 수도권 지역이다. 모사 결과에 의하면 충청남도 대형 점오염원이 수도권 연평균 PM_{2.5}에 기여하는 평균 농도는 0.62~1.64 µg/m³이었으며, 충청남도 지역에는 1.01~1.86 µg/m³로 나타났다. 또한, 기상 및 배출조건에 따라 수도권이 충청남도보다 더 높은 기여도를 보인 경우도 발생하였다. 또한 Kim *et al.* (2019)은 서울, 인천 및 경기 지역인 수도권의 PM_{2.5} 농도에 영향을 주는 충청남도 배출부문별 기여도를 살펴보았다. 2015년 1월, 4월, 7월, 10월의 대기질 모사를 CMAQ을 이용하여 수행하였으며, 모사 결과 충청남도 7개 배출 부문이 수도권 PM_{2.5}에 영향을 미친 추정 기여도는 1월 2.9%, 4월 7.8%, 7월 17.1%, 10월 4.6%로 7월

에 높은 기여도를 보였다. 또한, 배출 부문 중 제조업 연소, 에너지산업 연소, 생산 공정 순으로 높은 기여도를 보였으며 각각의 기여도는 6.8, 2.7, 2.7%이었다. Lee and Park (2019)은 충청남도에 위치한 대형배출시설이 주변 지역의 PM_{2.5}에 미치는 영향을 연구하였다. 대형배출시설의 영향을 파악할 수 있는 10곳의 대기오염측정소에서 2018년 5~6월에 생산한 PM₁₀, PM_{2.5}, CO, O₃, SO₂의 농도 자료를 분석하였으며 대형배출시설에서 배출된 대기오염물질이 주변 지역에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히, 현대제철 당진제철소가 위치한 곳의 대기오염측정소에서 PM₁₀, PM_{2.5}, CO, O₃ 및 SO₂의 월평균 및 시간최고농도가 가장 높았으며 석유화학산업단지가 위치한 대기오염측정소에서는 O₃와 SO₂의 월평균 및 시간 최고농도는 충청남도 지역에서 거의 최고 수준으로 나타났다.

충청남도에서 배출되는 대기오염물질은 충청남도 지역뿐 아니라 인구밀도가 높은 인접지역인 수도권에 많은 영향을 주고 있으며 이러한 관점에서 충청남도의 대형사업장에서 배출되는 대기오염물질들에 대한 관리의 매우 중요하다. 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단에서는 2019년 5월초~6월초까지 충남지역 대형사업장 주변의 대기질 파악 및 대기오염물질의 국지적 및 국외 유입 영향을 조사하기 위하여 충남지역 해안을 따라 항공관측을 수행하였다. 본 연구에서는 충남보건환경연구원에서 관리하고 있는 29곳의 대기측정망 중 11곳의 대기오염측정소에서 생산한 대기오염물질(PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂ 및 O₃) 자료를 활용하여 대형사업장 주변의 대기질을 파악하였다. 또한, 대기질 측정 자료와 기상자료 등을 활용하여 대형배출시설 주변 지역 PM_{2.5}의 고농도 사례를 분석하였으며, CMAQ 모델을 이용하여 이들 고농도 사례 기간 중 PM_{2.5}의 국지 및 국외 영향을 평가하였다. PM_{2.5}의 기여도 모사 지점은 석탄화력발전소, 석유화학 산업단지, 현대 당진제철소와 같은 대형배출시설에 인접한 대기오염측정소 총 9개 지점이며, 모사 기간은 PM_{2.5}의 고농도 사례가 발생한 2019년 5월 12~17일, 5월

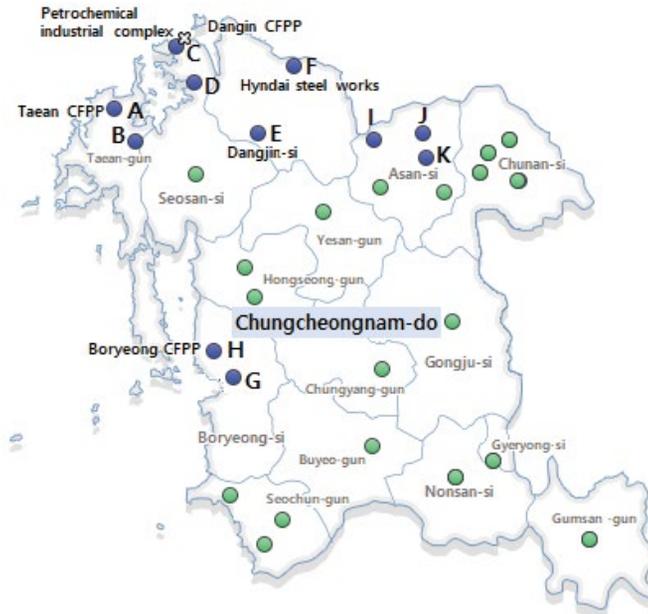


Fig. 1. Location of 11 air quality monitoring stations (blue circles) in Chungcheongnam-do province.

23~25일, 6월 2~6일로 총 세 기간이다.

2. 연구방법

2.1 연구 대상 지역의 공간적 범위

그림 1은 충남지역에 위치하는 대형배출시설 주변의 11곳 대기오염측정소(연구 대상 지점)의 위치를 나타낸다. 충남지역에 위치하는 석탄화력발전소, 석유화학산업단지, 철강산업단지 등과 같은 대형배출시설은 주로 충남의 서쪽에 위치하고 있다. 표 1에 연구 대상 지점의 위치와 위도/경도 좌표 값을 정리하였으며 충남지역을 기준으로 A~F 지점은 북서 방향, G와 H 지점은 남동 방향, I~K 지점은 북동 방향에 위치하고 있다. 연구 대상 지점인 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J 및 K는 주변에 대형배출시설이 존재하며 유사한 배출시설로 분류한 각 지점의 특성은 다음과 같다.

A와 B 지점은 태안화력발전소의 풍하 지역에 위치하여 태안화력발전소에서 배출되는 대기오염물질들

의 영향을 평가할 수 있는 지점에 해당한다. A 지점은 시골 지역에 위치하며, B 지점보다 태안화력발전소와 더 가까운 지점으로 발전소와의 거리는 약 11 km 떨어져 있으며 B 지점은 차량의 통행이 약간 존재하는 소규모 도심지로 발전소와의 거리는 약 24 km이다. G와 H 지점은 보령화력발전소의 풍하 지역으로 G 지점은 산업시설이 없는 중·소 도시 규모의 준-도심 지역으로 약간의 교통량이 존재하며 발전소에서 약 15 km 떨어진 남쪽 방향에 위치한다. H 지점은 인근에 주요 배출원이 거의 없는 시골 마을에 위치하고 있으며 발전소와의 거리는 약 9 km이고 G 지점과는 약 6 km 떨어져 있다.

C와 D 지점은 서산시 대산읍에 존재하는 석유화학산업단지가 인접해 있으며 C 지점과 석유화학산업단지는 매우 가깝고 D 지점은 C 지점에서 약 9 km 거리에 위치하여 출·퇴근 시간에 두 지점 사이에 교통량이 많이 발생하고 있다.

E와 F 지점은 현대제철 당진제철소에서 발생하는 대기오염물질의 영향을 평가할 수 있는 지점으로 E

Table 1. Information of 11 air pollution monitoring stations around large-scale stationary sources in Chungcheongnam-do province.

Station	Location addresss	Site latitude and longitude
A	14, Bunji-gil, Poji-ri, Iwon-myeon, Taeon-gun, Chungcheong-namdo	36°52'11.0"N 126°16'49.8"E
B	Guncheong 6-gil, Taeon-eup, Taeon-gun, Chungcheong-namdo (around taeon power plants)	36°44'46.1"N 126°18'08.9"E
C	123-20, Dokgot-ri, Daesan-eup, Seosan-si, Chungcheong-namdo (National Agricultural Cooperative Federation)	36°59'22.1"N 126°23'04.0"E
D	1942, Choongero, Daesan-eup, Seosan-si, Chungcheong-namdo	36°56'16.7"N 126°26'02.2"E
E	Cityhall-ro 1, Dangjin-si, Chungcheong-namdo	36°53'23.7"N 126°38'44.9"E
F	342-27, Yugok-ro, Songsan-myeon, Dangjin-si, Chungcheong-namdo (around Hyundai Steels Works)	36°58'36.1"N 126°42'59.1"E
G	142-16, Jungang-ro, Boryeong-si, Chungcheong-namdo	36°21'11.9"N 126°35'23.2"E
H	Ulkyeun-gil 396, Jukyemyun, Boryeong-si, Chungcheong-namdo (around Boryeong power plants)	36°23'27.2"N 126°34'10.0"E
I	23-28, Injusandan-ro, Inju-myeon, Asan-si, Chungcheong-namdo (around automotive parts industry)	36°52'21.6"N 126°52'42.5"E
J	1481, Seokgok-ri, Dunpo-myeon, Asan-si, Chungcheong-namdo	36°55'20.7"N 127°03'28.8"E
K	573-2, Mojong-dong, Asan-si, Chungcheong-namdo	36°46'57.8"N 127°00'52.6"E

지점(당진시 시청 옥상)은 전형적인 도심의 특성을 보이고 있고, F 지점은 당진제철소에서 약 300 m 떨어진 곳으로 제철소에서 발생하는 대기오염물질의 영향을 직접적으로 받는 위치에 해당한다.

I와 J 지점은 당진제철소와 평택항의 풍하 지역으로 I 지점은 당진제철소에서 약 26 km 떨어진 동남쪽에 위치하며 자동차 부품 등을 주로 생산하는 인주산업단지 내에 위치한다. J 지점은 당진제철소 동남쪽으로 약 44 km 거리에 위치하고 있으며 항공기 부품류가 주요 생산품인 기계산업단지가 존재한다. 또한, 두 지점 모두 출·퇴근 시간에 차량 통행량이 많으며 지점 북쪽 방면에 평택시와 평택 항이 존재하여 기상 조건에 따라 선박 활동에 의한 대기오염물질의 영향을 받는 장소이다.

2.2 CMAQ을 이용한 PM_{2.5}의 국지 및 국외 영향 기여도 분석

대상 지점의 대기질 모사를 위하여 Weather Rese-

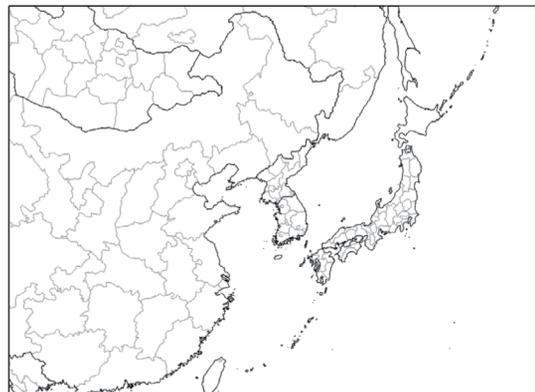


Fig. 2. CMAQ modeling domains at horizontal resolutions of 27 × 27 km and 174 × 128 grids.

arch and Forecasting (WRF; version 3.9.1) (Skamarock *et al.*, 2008)-Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKE; version 3.1)-Community Multiscale Air Quality (CMAQ; version 4.7.1) 모델링 시스템을 이용하였다. 기상 초기장은 NCEP-FNL (The Nation-

Table 2. WRF and CMAQ configurations used in this study.

WRF		CMAQ	
Micro Physics	WSM 6-class	Aerosol Module	AEROS
Cumulus Scheme	Kain-Fritsch	Chemical Mechanism	SAPRAC 99
Long-Wave Radiation	RRTM	Advection Scheme	YAMO
Short-Wave Radiation	Goddard	Horizontal Diffusion	Multiscale
PBL Scheme	YSU	Vertical Diffusion	Eddy
		Cloud Scheme	RADM
		Boundary condition / Initial condition	Profile

al Centers for Environmental Prediction-Final)을 이용하였으며, WRF 결과를 CMAQ 입력 자료로 변환하기 위하여 Meteorology-Chemistry Interface Processor (MCIP; version 3.6)로 처리하였다. 배출량 목록은 남한과 국외에 대하여 CAPSS 2016 (KOURS v.5)를 이용하였다. 모사 영역은 그림 2와 같이 동북아시아를 포함하는 지역에 대해 27 km × 27 km 수평 해상도로 설정하였다. 대상 기간은 본 연구에서 PM_{2.5}의 고농도 사례로 분류한 2019년 5월 12일~17일, 5월 23일~25일, 6월 2일~6일로 설정하였다. WRF와 CMAQ 모사에 대한 자세한 물리옵션은 표 2에 정리하였다.

본 연구에서는 국외 배출이 국내 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Brute Force Method (BFM)을 이용하였다. BFM은 분석 대상이 되는 배출량을 변화시켜 대기질 모사를 수행하고, 변화 전·후의 농도 변화를 분석하여 영향을 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 국외 배출량을 50% 삭감하는 조건으로 모사하였다. 국외 배출의 영향은 기본모사와 삭감 모사의 민감도로부터 Zero-Out Contribution (ZOC)을 계산하여 추정하며, 계산식은 식(1)과 같다.

$$ZOC = (C_B - C_{S,50}) \times \frac{100\%}{\Delta E} \quad (1)$$

식(1)에서 C_B는 기본모사 농도, C_{S,50}은 국외 배출량 50% 삭감 후 수행한 민감도 모사 농도를 의미한다. ΔE는 배출량 변화량을 의미하며, 본 연구에서는 50%이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 충남지역 대기환경기준물질의 농도 특성

표 3은 연구 대상 지점인 충남 지역에 위치한 11곳 대기오염측정소에서 2019년 5월 7일~6월 7일에 1시간 단위로 측정된 대기환경기준물질 (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, O₃ 및 SO₂)의 평균 농도를 정리한 것이며, 그림 3~7은 대형배출시설에서 배출되는 대기오염물질의 영향을 알아볼 수 있는 대기오염측정소인 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K 지점에서 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, O₃의 시간 농도 변화를 도식화 한 것이다.

PM₁₀의 평균 농도는 태안화력발전소 인근의 A 지점에서 가장 낮았으며 (38 ± 22 μg/m³), 현대제철 당진 제철소가 위치한 F 지점에서 가장 높았다 (75 ± 42 (9~284) μg/m³). 당진제철소의 풍하 방향에 위치한 I와 J 지점은 F 지점 다음으로 높은 PM₁₀ 평균 농도를 보였으며, 각각 64 ± 31 (12~246), 64 ± 35 (1~189) μg/m³으로 나타났다. F 지점에서 조사된 높은 PM₁₀의 평균 농도는 아마도 당진제철소의 생산 공정인 고로, 제강, 소성, 소결 등에서 발생한 낙광탄이 바람에 의하여 비산되어 주변 지역에 영향을 준 것으로 판단된다(Lee and Park, 2019). PM_{2.5}의 평균 농도가 가장 높은 지점은 당진제철소의 풍하 방향에 위치한 아산시 둔포면의 J 지점으로 41 ± 25 (2~130) μg/m³이었다. J 지점 다음으로 F, I, E 지점 순으로 높았으며 각각 39 ± 23 (3~125), 35 ± 24 (1~119), 29 ± 20 (1~115) μg/m³로 나타났다.

NO₂ 평균 농도는 K 지점에서 15 ± 9 (1~46) ppb로 가장 높았으며 그 다음으로 I, E, D 지점 순으로 높았

Table 3. A summary of criteria air pollutants concentrations during study period at 11 sites.

Station	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)
A	38 ± 22 (1~135)	20 ± 14 (1~96)	8 ± 4 (3~31)	4 ± 2 (3~19)	44 ± 15 (15~95)
B	43 ± 26 (1~167)	20 ± 14 (1~77)	9 ± 4 (2~32)	3 ± 1 (1~17)	46 ± 18 (10~102)
C	43 ± 25 (1~158)	21 ± 14 (1~77)	11 ± 9 (3~74)	6 ± 4 (3~41)	59 ± 20 (14~125)
D	39 ± 20 (7~121)	22 ± 14 (1~85)	13 ± 7 (3~57)	6 ± 2 (4~21)	60 ± 23 (10~135)
E	50 ± 28 (2~158)	29 ± 20 (1~115)	11 ± 6 (2~38)	6 ± 2 (4~18)	50 ± 23 (6~120)
F	75 ± 42 (9~284)	39 ± 23 (3~125)	14 ± 10 (2~50)	9 ± 7 (2~47)	57 ± 24 (14~138)
G	47 ± 27 (3~154)	26 ± 18 (1~110)	9 ± 4 (2~33)	4 ± 1 (3~9)	57 ± 22 (11~140)
H	38 ± 20 (1~126)	21 ± 13 (1~83)	9 ± 3 (3~26)	6 ± 1 (4~10)	56 ± 26 (6~146)
I	64 ± 31 (12~246)	35 ± 24 (1~119)	14 ± 9 (1~86)	5 ± 3 (2~35)	48 ± 21 (4~134)
J	64 ± 35 (1~189)	41 ± 25 (2~130)	13 ± 7 (2~43)	4 ± 2 (2~16)	49 ± 22 (4~121)
K	53 ± 30 (1~159)	27 ± 20 (1~109)	15 ± 9 (1~46)	5 ± 3 (2~30)	49 ± 22 (7~117)

고 각각 14 ± 9 (1~86), 14 ± 10 (2~50), 13 ± 7 (3~57) ppb이었다. SO₂ 평균 농도는 F 지점에서 9 ± 7 (2~47) ppb로 가장 높았으며 C와 D 지점에서 그 다음으로 높은 6 ± 4 (3~41), 6 ± 2 (4~21) ppb로 나타났다. NO₂와 SO₂의 농도 추이는 보령화력발전소와 인접한 G와 H 지점을 제외한 모든 지점에서 5월 10일~17일과 6월 2일~6일에 NO₂와 SO₂의 농도가 확연하게 증가하였으나, 5월 23일~25일에는 매우 낮은 농도를 보였다. 이러한 농도 추이에서 특이할만한 점은 F 지점의 SO₂ 시간별 농도 변화가 5월 22일~25일을 제외한 기간에는 PM₁₀의 시간별 농도 변화와 유사하며 이는 F 지점의 PM₁₀과 SO₂의 농도 변화는 당진제철소에서 배출된 대기오염물질의 특성과 밀접한 관련이 있음을 보여준다. 그리고 5월 10일~17일의 F 지점과 SO₂ 배

출원이 거의 없는 I와 J 지점의 SO₂ 농도 추이가 유사한 원인은 아마도 당진제철소에서 발생한 SO₂의 일부가 바람에 의하여 당진제철소 풍하 지역인 I와 J 지점에 영향을 준 것으로 판단된다. 반면에 보령화력발전소와 인접한 G와 H 지점은 다른 대형배출시설이 존재하는 지점과는 다르게 NO₂와 SO₂의 뚜렷한 농도 증가가 나타나지 않았는데 이에 대하여 Lee and Park (2019)은 인접해 있는 대형 배출시설로부터 배출되는 연기의 이동 방향이 측정소의 위치와 일치하지 않는 점과 연기의 배출 고도(150~200 m)와 연기상승고를 고려하면 배출원과 측정 지점과의 거리가 짧아 배출 연기의 영향이 적은 것을 원인으로 추정하였다.

O₃의 평균 농도는 석유화학산업단지가 위치한 C와 D 지점, 당진제철소 인근의 F 지점, 보령화력발전

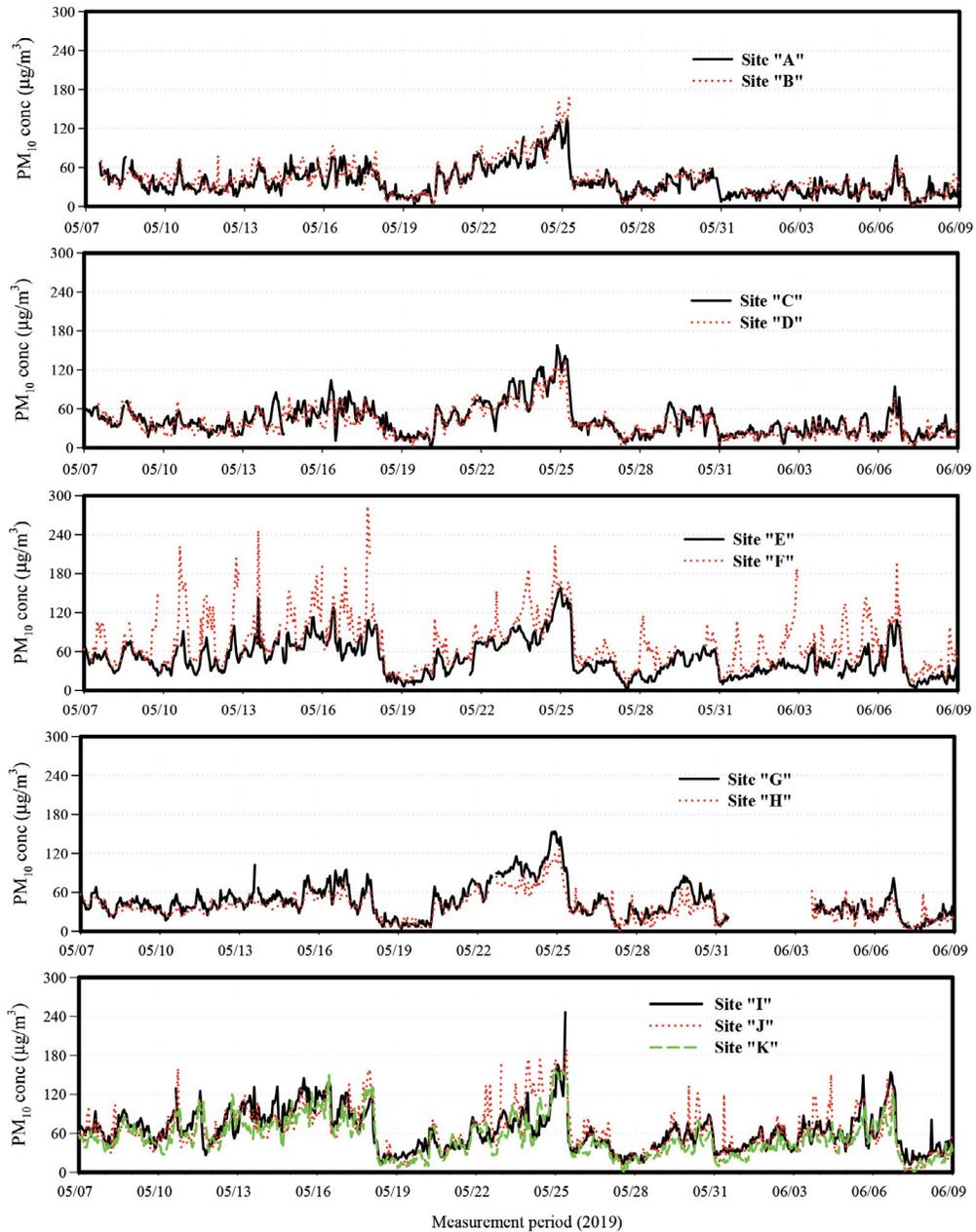


Fig. 3. Temporal variation of PM₁₀ concentration at monitoring sites around large point source.

소와 인접한 G와 H 지점에서 높게 측정되었고, C, D, E, G, H 지점의 O₃ 평균 농도는 각각 59 ± 20 (14~125), 60 ± 23 (10~135), 57 ± 24 (14~138), 57 ± 22 (11~140), 56 ± 26 (6~146) ppb이었다. 반면에 태안화력발전소

주변의 A와 B 지점과 당진제철소의 풍하 방향에 위치한 I와 J 지점의 O₃ 농도는 비교적 낮았으며, 각 지점의 O₃ 평균 농도는 44 ± 15 (15~95), 46 ± 18 (10~102), 48 ± 21 (4~134), 49 ± 22 (4~121) ppb로 나타났

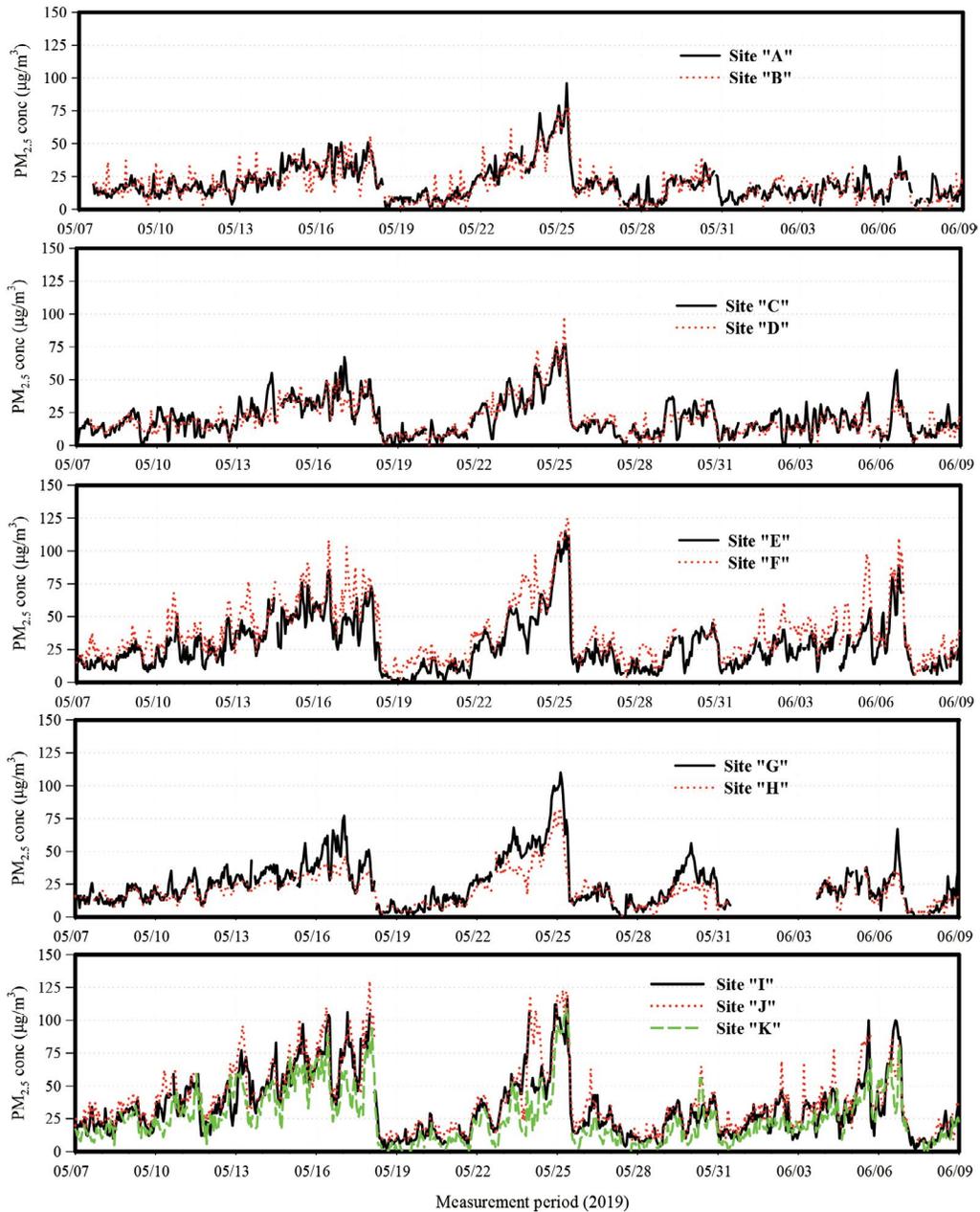


Fig. 4. Temporal variation of $PM_{2.5}$ concentration at monitoring sites around large point source.

다. 그림 3과 4를 보면 각 지점의 PM_{10} 농도 증가와 $PM_{2.5}$ 농도 증가는 매우 밀접한 관련이 있다. 또한, 각 지점들 사이에 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 및 O_3 의 농도 경향은 지점에 상관없이 상당히 균일하게 분포하였다.

3.2 충남지역 대형배출시설 주변 지점 $PM_{2.5}$ 고농도 사례에 대한 기상학적 특성

앞서 살펴본 것처럼 $PM_{2.5}$ 의 농도 증가는 PM_{10} 과 매우 밀접한 관련이 있으며 석탄화력발전소, 석유화

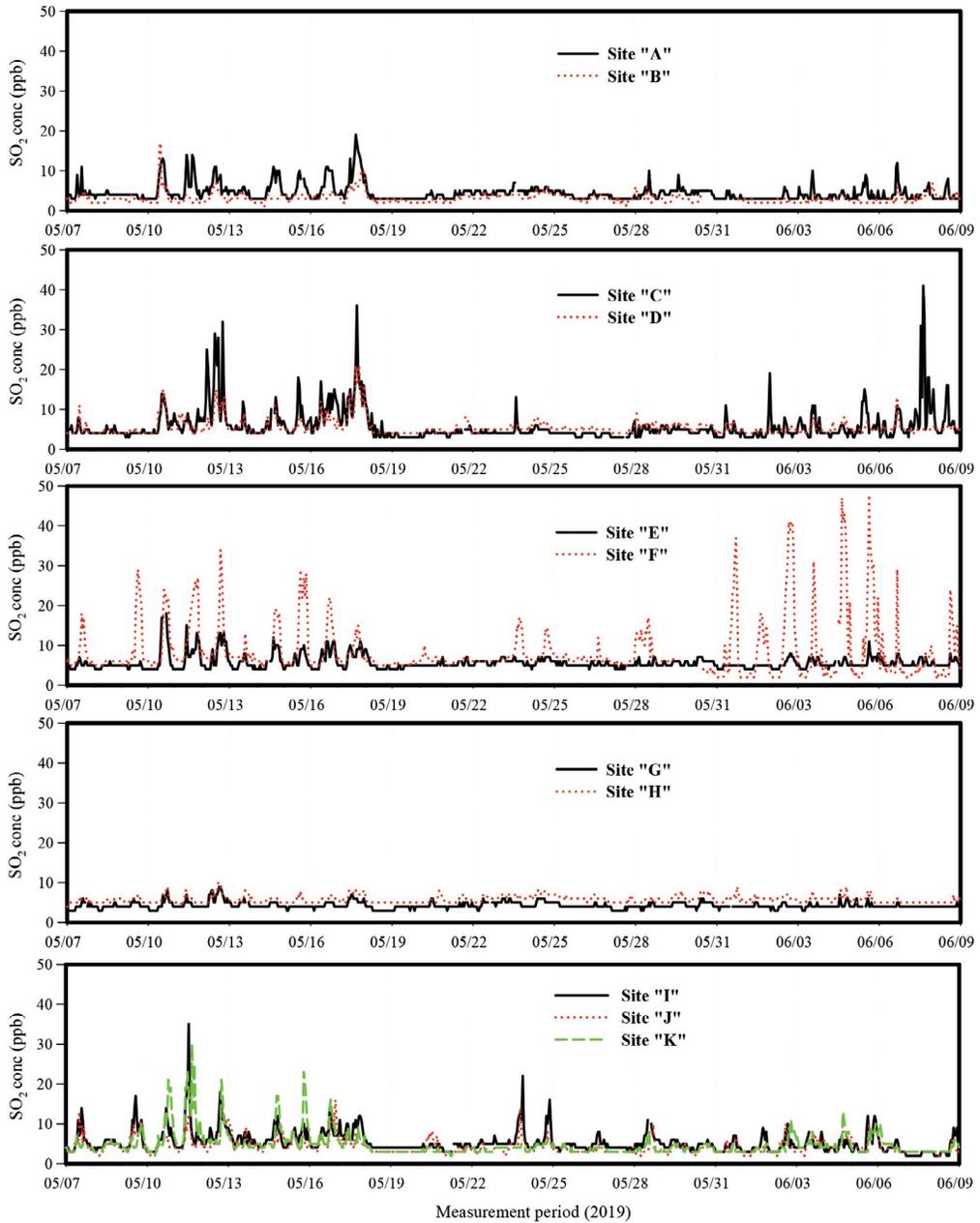


Fig. 5. Temporal variation of SO₂ concentration at monitoring sites around large point source.

학산업단지, 현대제철 당진제철소와 인접한 지점들 사이의 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도는 서로 연관성을 가지고 분포하는 것으로 보였다. 24시간 평균 PM_{2.5}의 환경기준치인 35 µg/m³를 초과하는 것을 기준으로 각

지점의 PM_{2.5} 고농도 사례를 분류하였다. 석탄화력발전소와 석유화학산업단지가 인접한 A, B, C, D, G, H 지점에서는 5월 15일~17일(사례 I)과 23일~25일(사례 II)에 두 차례의 고농도 사례가 확인되었다. 반면

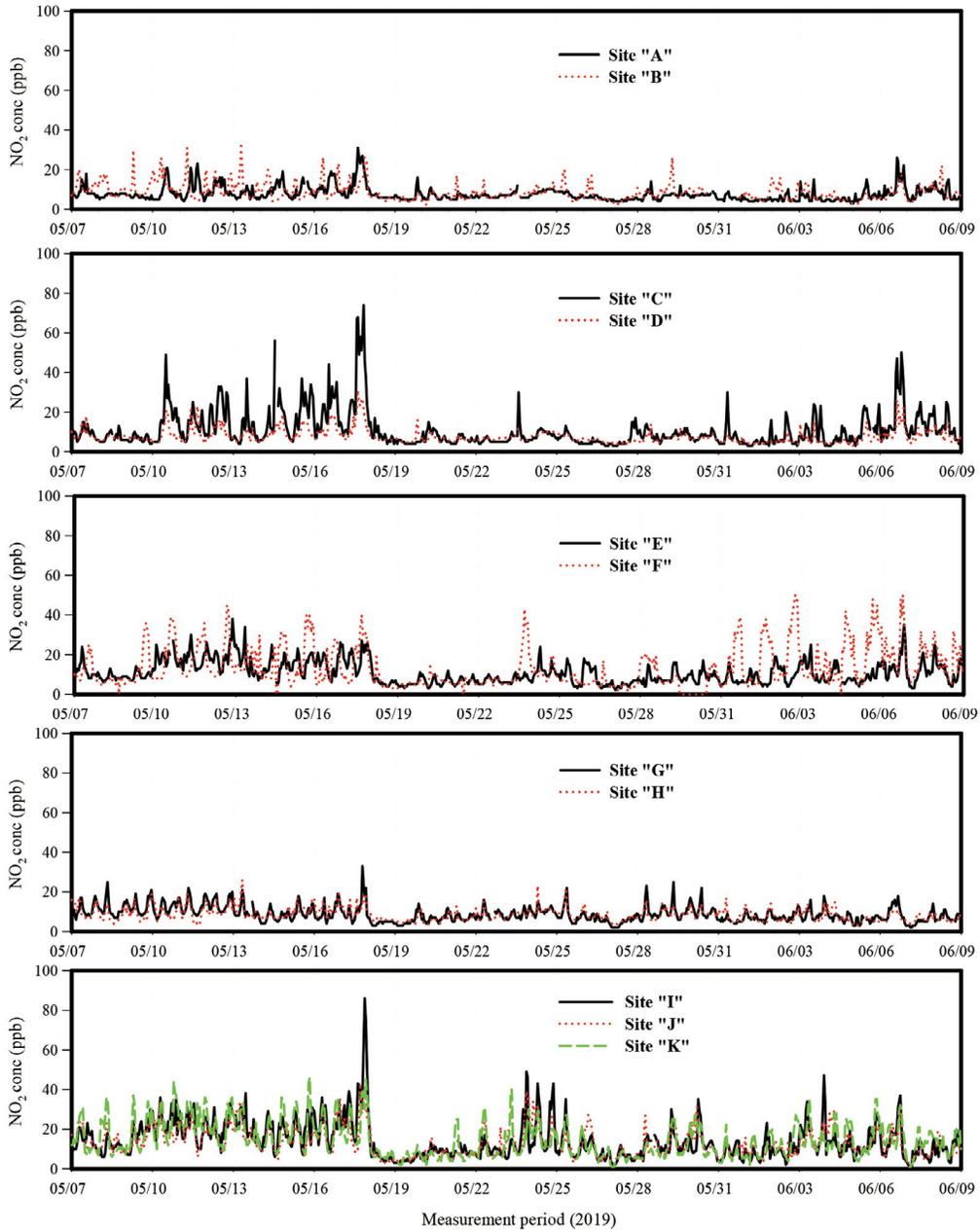


Fig. 6. Temporal variation of NO₂ concentration at monitoring sites around large point source.

에, 현대제철 당진제철소가 위치한 E와 F 지점, 제철소 풍하 방향의 I와 J 지점에서는 5월 10일~17일(사례 I), 23일~25일(사례 II), 그리고 6월 2일~6일(사례 III)에 세 번 관측되었다.

대형배출시설의 종류에 따라 PM_{2.5} 고농도 발생 시 PM_{2.5} 농도는 큰 차이를 보였다. 석탄화력발전소와 석유화학산업단지 주변 지점에서 측정된 5월 15일~17일, 23일~25일의 24시간 평균 PM_{2.5} 최고 농도는

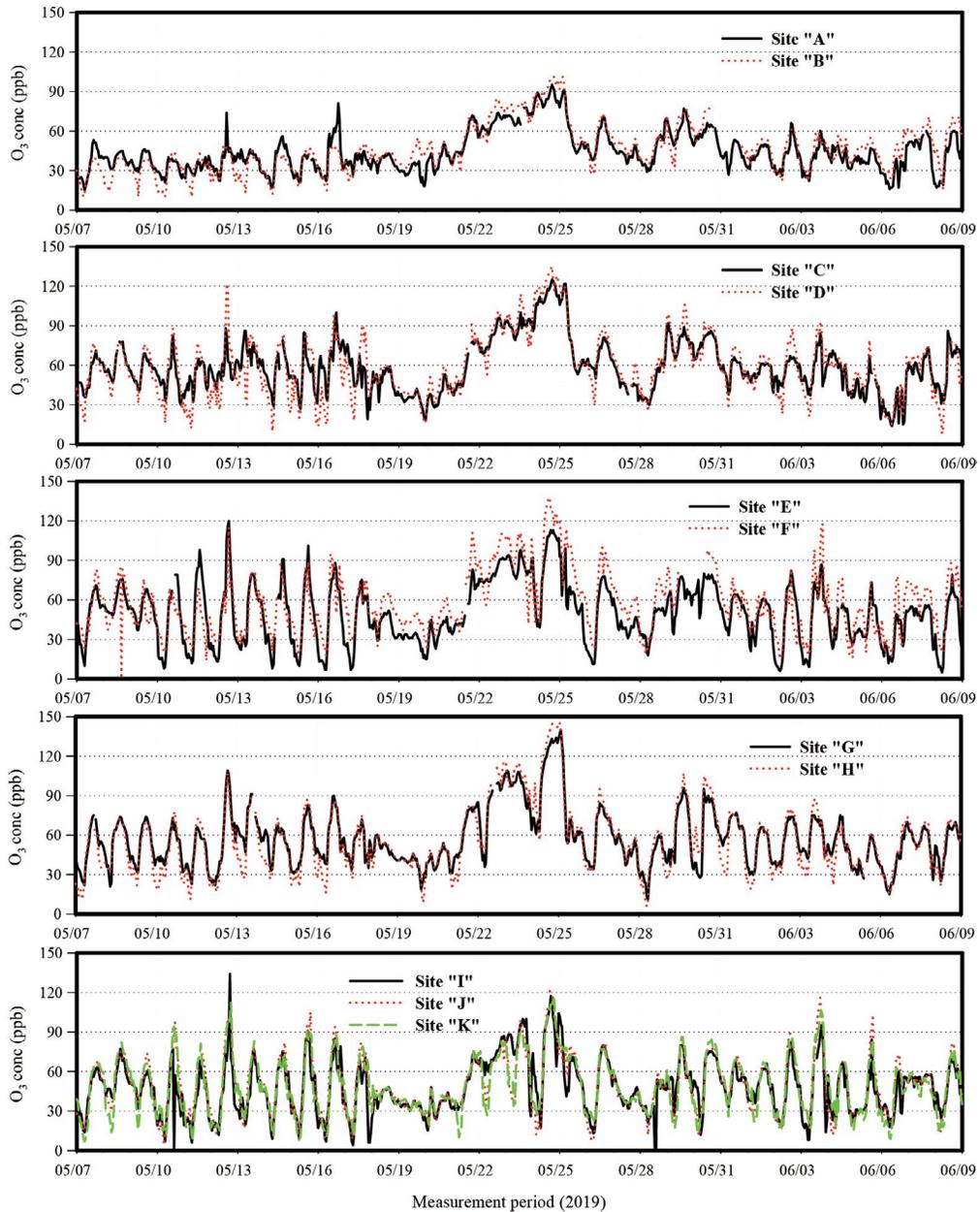


Fig. 7. Temporal variation of O₃ concentration at monitoring sites around large point source.

각각 36~25, 52~69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 각 사례에서 최고 농도는 5월 16과 24일에 관측되었다. 이 중 보령화력 발전소의 풍향 방향에 위치하며 준-도심 지역인 G 지점에서 가장 높았으며 5월 16일과 24일의 24시간 평

균 PM_{2.5} 농도는 각각 52, 69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 당진제철소 주변에서 관측된 24시간 평균 PM_{2.5}의 최고 농도는 5월 10일~17일에는 70 (F 지점)~81 (J 지점) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 23일~25일에는 64 (I 지점)~80 (J 지점) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 그

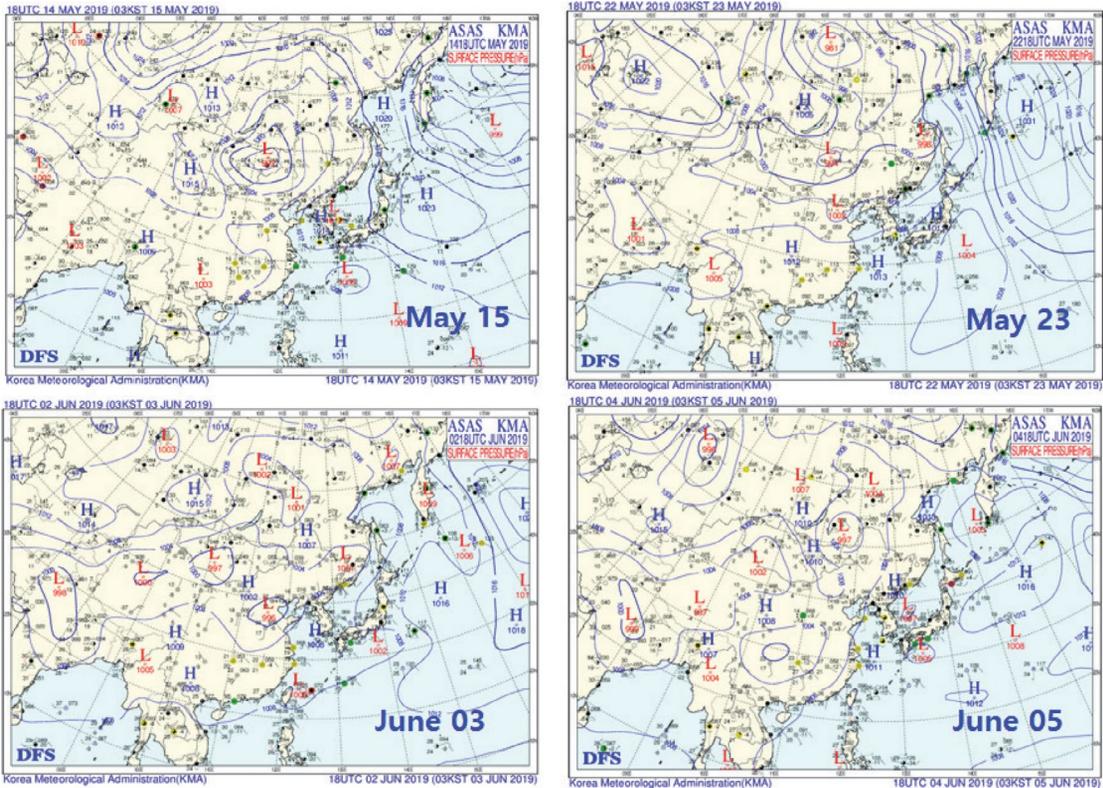


Fig. 8. Weather charts on May 15 (episode I), May 23 (episode II), June 3 and 5 (episode III).

리고 6월 2일~6일에는 60 (J 지점)~62 (F 지점) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 각 지점의 최고 농도는 5월 17일, 24일 및 6월 6일에 관측되었다.

연구 기간 동안 나타난 세 차례의 $\text{PM}_{2.5}$ 고농도 사례는 두 종류로 나눌 수 있으며, 미세먼지의 2차 생성을 유발하는 기체상 전구물질인 SO_2 와 NO_2 의 농도 수준에 따라 분류된다. 5월 10일~17일과 6월 2일~6일에는 SO_2 와 NO_2 의 농도가 비교적 높게 유지된 상태에서 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 증가가 나타난 반면에, 5월 23일~25일 사이에 관측된 $\text{PM}_{2.5}$ 의 고농도 현상은 SO_2 와 NO_2 의 농도는 상당히 낮았으나 O_3 의 농도는 매우 높았던 사례에 해당하였다(그림 5~7). 이는 아마도 국지적인 O_3 생성에 의한 영향보다는 외부 유입에 의한 결과로 판단된다.

연구 기간 중 분류된 $\text{PM}_{2.5}$ 의 고농도 사례의 특성

을 지상일기도, 기단의 이동경로, 그리고 대기질 예보 결과와 등의 기상학적 관점에서 조사하였다. 그림 8은 $\text{PM}_{2.5}$ 고농도 사례 시 지상일기도이며, 그림 9는 대형 배출시설과 인접한 11곳 지점으로 유입되는 기단의 역궤적 해석을 나타낸 것이다. 기단의 역궤적 해석은 미국 NOAA의 HYSPLIT 모델을 이용하였으며 3일 간격으로 300 및 500 m 고도에서 계산하였다(그림 9(a)~(e)). 그리고 그림 9(f)~(j)에 각 수용지점으로 유입된 기단이 풍하 방향으로 1일 동안 이동한 경로를 나타내었다. 그림 10은 세 고농도 사례 기간 중 한국 대기질 예보 시스템(Korean Air Quality Forecasting System, KAQFS, <http://kaqf.or.kr/>)을 이용해 예측한 $\text{PM}_{2.5}$ 의 대기질 예보 결과를 보여준다. 그림 8의 지상일기도를 살펴보면, 5월 15일~17일(또는 5월 12일~17일, 사례 I)은 한반도 전역에 고기압이 형성되

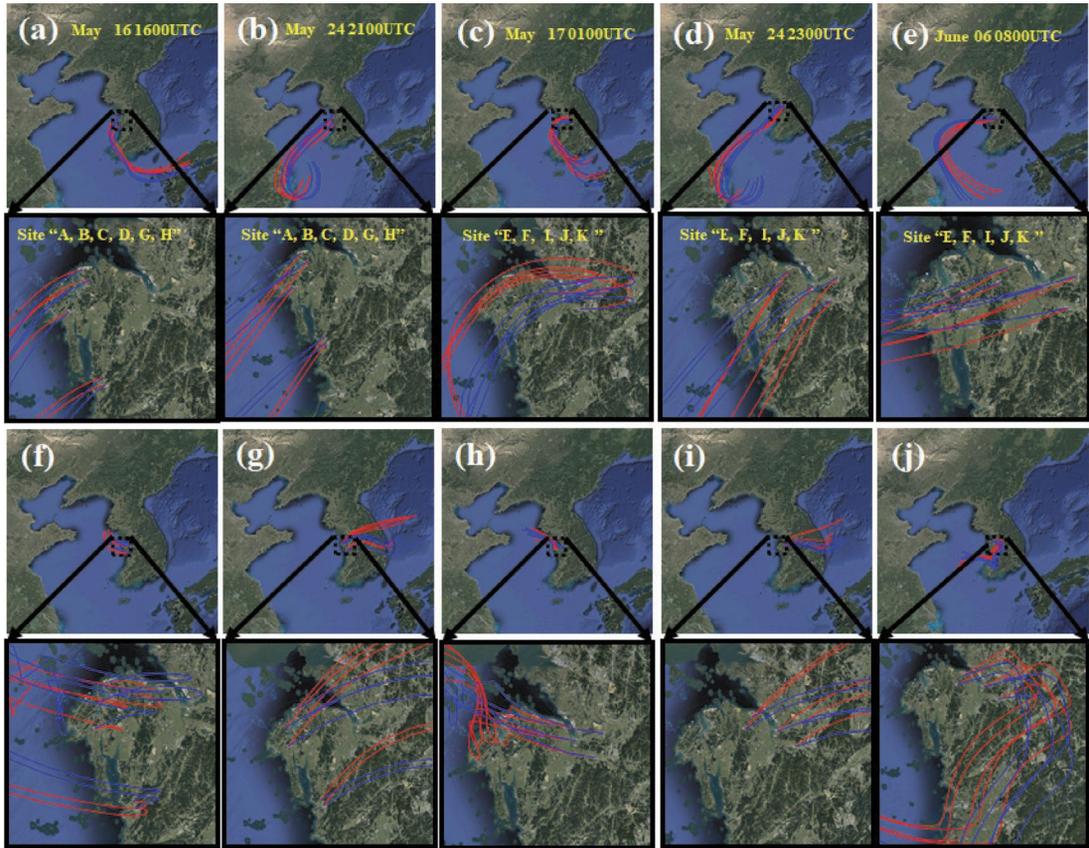


Fig. 9. Backward (a~e) and forward (f~j) trajectories of air masses for episodes I and II around coal-fired power plants and petrochemical industrial complexes (a~b), and for episodes I, II, and III around Dangjin steelworks and Asan city (c~e).

어 있으며 중국으로부터 오염물질의 유입이 거의 없는 국내 정체형 종관 기상에 해당하였다. 5월 23일~25일(사례 II)의 사례에서는 대기 정체(지상일기도 참조)로 인한 국지적 오염과 중국의 상하이 지역에서 지속적으로 대기오염물질이 유입(기단의 이동경로, 그림 9와 10)이 가중되는 종관 기상 패턴이다. 6월 2일~6일(사례 III)은 5월 15일~17일의 사례와 비슷하나, 한반도 전역이 약한 고기압의 영향권에 속하며 외부 유입 기류가 비교적 약한 국내 정체형 종관 기상 패턴을 나타낸다. 기단의 이동 경로를 보면 300 및 500 m 고도의 기단이 해양과 한반도 내륙을 거치면서 측정소로 유입되는 경로로 판단할 때 고농도 사례 I과 III은 국지적 영향이 국외로부터 오염물질의 장거

리 수송에 의한 유입의 영향보다 큰 것으로 보인다. 반면에 고농도 사례 II는 국외 오염물질들의 유입의 영향이 국지적 영향보다 훨씬 크게 나타난 경우로 판단된다(그림 9와 10 참조). 좀 더 상세하게 언급하면 A, B, C, D, G, H 지점(석탄화력발전소와 석유화학산업)으로 유입되는 기단은 사례 I(5월 15일~17일)의 경우에는 모두 해양기단이었으나(그림 9(a)), 사례 II(5월 23일~25일)에는 중국 상하이 지역에서 시작한 후 해양을 경유하여 해당 지점으로 유입되었다(그림 9(b)). E, F, I, J, K 지점(당진제철소와 아산시)으로 유입되는 기단은 사례 I에서는 해양성 기단이었으나(그림 9(c)), 사례 II(5월 23일~25일)에서는 중국 상하이 지역에서 시작한 후 석유화학산업단지를 경유

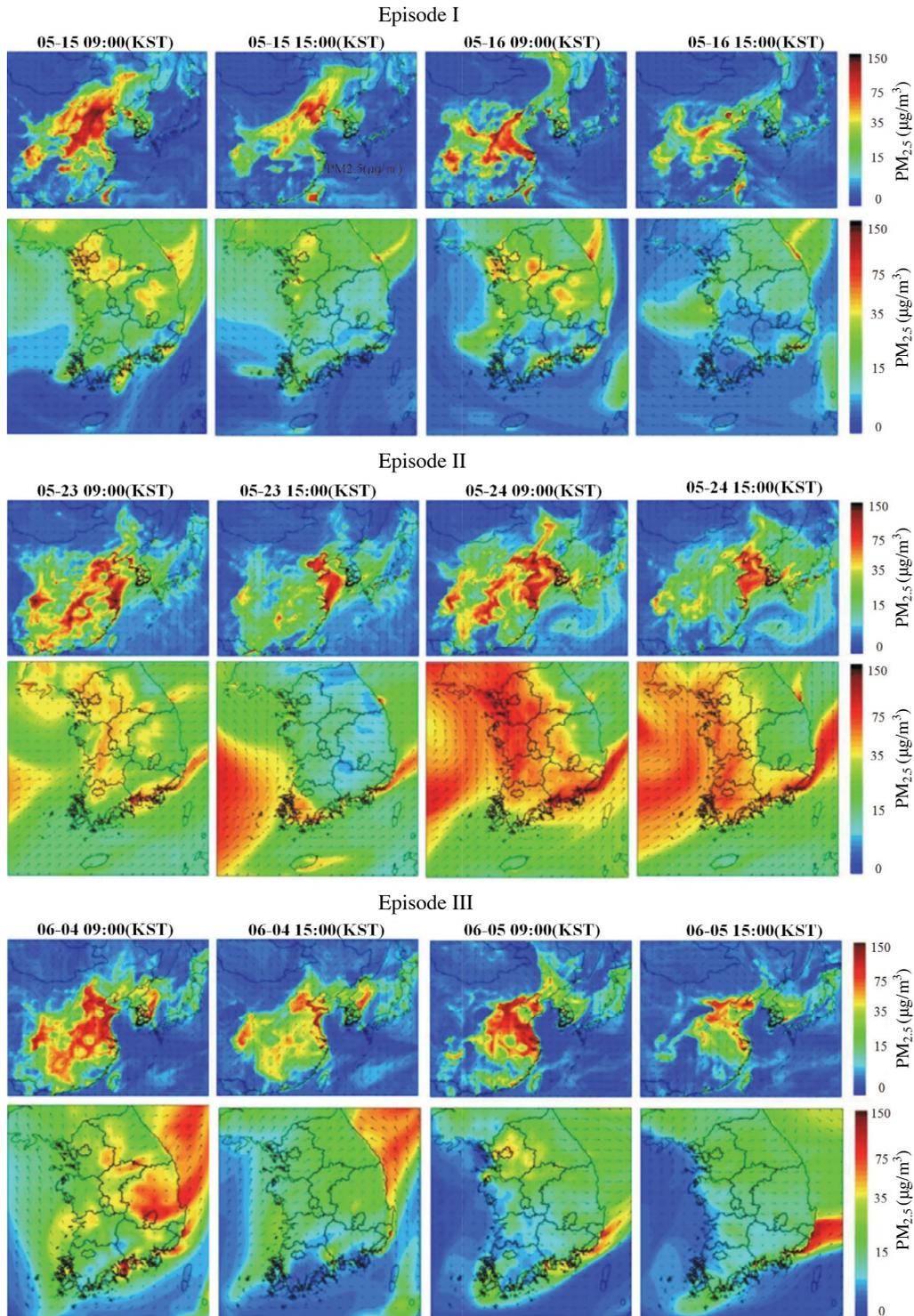


Fig. 10. Forecasting results of $PM_{2.5}$ for $PM_{2.5}$ episodes I, II, and III.

Table 4. Local and regional contributions of PM_{2.5} at 9 sites.

Site	Episode I		Episode II		Episode III	
	Local influence	China influence	Local influence	China influence	Local influence	China influence
A	55.5±16.3	44.5±16.3	8.2±8.5	91.8±8.5	34.6±27.2	65.4±27.2
B	49.3±17.9	50.7±17.9	6.3±8.8	93.7±8.8	29.3±21.6	70.7±21.6
C	60.1±17.1	39.9±17.1	19.5±14.7	80.5±14.7	41.4±24.4	58.6±24.4
D	60.1±17.1	39.9±17.1	19.5±14.7	80.5±14.7	41.4±24.4	58.6±24.4
F	67.6±13.8	32.4±13.8	40.0±19.3	60.0±19.3	56.2±17.1	43.8±17.0
G	43.6±18.8	56.4±18.8	11.8±10.4	88.2±10.4	26.7±18.6	73.3±18.6
H	43.6±18.8	56.4±18.8	11.8±10.4	88.2±10.4	26.7±18.6	73.3±18.6
I	67.6±13.8	32.4±13.8	40.0±19.3	60.0±19.3	56.2±17.1	43.8±17.0
J	57.9±13.6	42.1±13.6	23.3±20.4	76.7±20.4	45.3±18.4	54.7±18.4
All site	60.6±14.5	39.4±14.5	25.7±15.7	74.3±15.7	41.3±20.1	58.7±20.1

하여 당진과 아산으로 유입되었다(그림 9(d)). 그리고 사례 II와 III이 발생한 기간에 당진시와 서산시 지점으로 유입되는 기단은 태안 석탄화력발전소의 플룸 영향이 있었을 것으로 판단된다(그림 9(d) & (e)).

3. 3. CMAQ을 이용한 지점별 PM_{2.5}의 국지적 영향 및 국외 영향 기여도 분석

표 4는 PM_{2.5}의 고농도 사례가 발생한 5월 12일~17일(사례 I), 5월 23일~25일(사례 II), 그리고 6월 2일~6일(사례 III) 기간 중 대형배출시설이 인접한 9 지점(A, B, C, D, E, G, H, I, J)의 PM_{2.5}의 농도에 영향을 미친 국지적 및 국외 영향기여도를 추정한 결과이다. CMAQ 모사 결과에 의하면 PM_{2.5}의 국지 및 국외 영향은 사례에 따라 큰 차이를 보였다. 모사 대상 지점에서 사례 I은 국지적 영향이, 사례 II와 III은 국외 영향이 우세한 것으로 나타났으나, 동일한 고농도 사례라도 세부 지점에 따라 국지 영향과 국외 영향의 기여도가 다르게 나타났다.

PM_{2.5}의 고농도 사례 I 기간 중 충남 전 지역의 국지적 영향과 국외 영향의 기여도는 각각 60.6±14.5, 39.4±14.5%이며, 서해에서 가까운 B, G 및 H 지점에서 서만 국외 영향의 기여도가 높게 나타났다. 국지적 영향의 기여도가 가장 높은 지점은 철강 산업, 화학 산업 및 자동차 생산시설과 자동차 운행에 의한 1차 PM_{2.5}와 SO₂와 NO₂와 같은 가스상 전구물질들의 인

위적 배출량이 많은 F(현대제철)와 I(인주산업단지) 지점(Lee and Park, 2019)으로 67.6±13.8%였으며, G와 H 지점(보령화력발전소 주변)에서 가장 낮은 43.6±18.8%로 나타났다. 사례 II 기간은 3.2절에서 논의된 바와 같이 국지적으로 대기오염물질의 배출이 매우 적고 중국으로부터 장거리 수송에 의한 오염물질의 유입이 매우 커서 국외 영향의 기여도가 매우 강한 사례에 해당한다. 이때 충남 전 지역에서 나타난 국지적 영향 및 국외 영향의 기여도는 각각 25.7±15.7, 74.3±15.7%로 모든 지점에서 국외 영향의 기여도가 높게 나타났다. 다만, 국지적 영향의 기여도가 가장 높은 지점은 대기오염물질의 배출량이 많은 현대제철 당진제철소가 위치한 F와 제철소의 풍하 방향에 위치한 I 지점으로 40.0±19.3%이며, 국외 영향의 기여도가 가장 높은 지점은 B 지점으로 93.7±8.8%에 이르렀다. 사례 III 기간은 앞 3.2절에서 기상학적 관점에서 국외 영향보다는 국지적인 영향이 우세한 경우에 해당된다고 추정하였다. 그러나 CMAQ 모사 결과에 의하면, 국지적 영향보다 국외 영향이 더 높게 나타난 기간으로 충남 전 지역의 국지적 영향 및 국외 영향의 기여도는 각각 41.3±20.1, 58.7±20.1%로 나타났다. 3.2절의 PM_{2.5}의 고농도 현상에 대한 기상학적 특성과 CMAQ 모사 결과가 다른 이유는 아마도 국내 및 국외 영향에 대한 정량적 평가가 가능한 3차원 수치모델링 결과와 다르게 기상학적

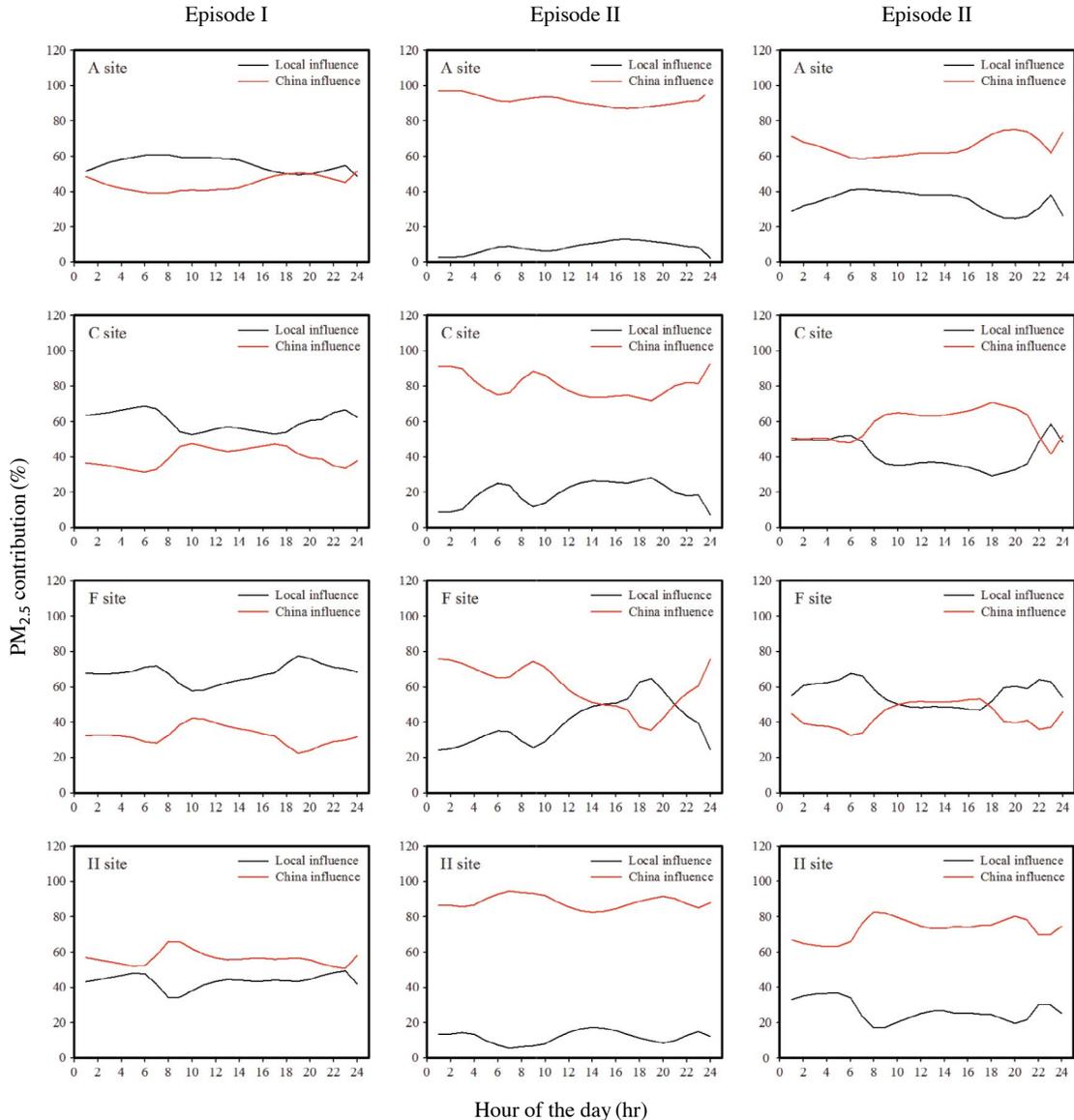


Fig. 11. Diurnal profiles of local and regional $PM_{2.5}$ contributions by episodes at A, C, F, and H sites.

관점의 해석은 단순히 정성적으로 추정하였기 때문이다. 국지적 영향의 기여도가 가장 높은 지점은 사례 I과 II 기간과 동일하게 F와 I 지점으로 $56.2 \pm 17.1\%$ 였으며, 국외 오염물질의 기여도가 가장 높은 지점은 G와 H 지점으로 $73.3 \pm 18.6\%$ 이었다. 결론적으로, 지점별 분석에서 현대제철 당진제철소 인근 F

지점과 풍하지역인 아산시 인주산업단지 I 지점은 세 종류의 고농도 사례에서 국지적 영향이 가장 높게 나타났는데 이는 현대제철 사업장에서 발생한 다양한 오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 등)이 제철소 주변 지역과 풍하지역에 영향을 미친 것으로 판단된다 (Lee and Park, 2019).

그림 11은 A, C, F 및 H 지점에 영향을 미치는 국지적 영향과 국외 영향의 시간별 변화를 보여준다. 국지적 영향의 기여도가 우세한 사례 I 기간에는 대규모 석유화학산업단지가 근접해 있는 C 지점과 당진 현대 제철소 근처의 F 지점에서 모든 시간에 국지적 영향의 기여도가 우세한 것으로 나타났다. 이는 아마도 다른 지점(A와 H, 석탄화력발전소)과 다르게 사업장의 생산 활동과 밀접하게 관련되어 나타난 결과로 보인다. 대산 석유화학산업단지가 위치한 C 지점은 6시에 국지적 영향의 기여도가 68.7%로 가장 높았으며, 10시에 가장 낮은 52.6%이었다. F 지점은 19시에 77.6%로 가장 높았고, 10시에 57.8%로 가장 낮았다. 두 지점에서 국지적 영향의 기여도가 가장 높은 시간은 다르게 나타났지만 오전 시간에 국지적 영향의 기여도가 낮아지고, 저녁부터 새벽 시간까지 국지적 영향의 기여도가 높아지는 공통적인 특성을 나타냈다. 하지만 오염물질 기여도의 거동 특성에 차이점 또한 보였으며 C 지점은 저녁 시간인 18시부터 다시 국지적 영향의 기여도가 높아지고 F 지점은 오전에 급격히 낮아진 후 20시까지 계속해서 높아졌다. C와 F 지점에서 시간에 따른 국지적 영향 기여도의 변화에 대한 원인을 명확하게 규명하기 위해서는 사업장 내 시간별 대기오염물질 배출량, 기상 자료(풍향, 풍속, 혼합고 등) 등에 대한 정보가 필수적이다. 그러나 본 연구에서는 제한된 자료만으로 이에 대한 원인 규명이 어려운 실정이다. 따라서 향후 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다. C와 F 지점과 달리 인접한 곳에 특정한 배출 오염원이 존재하지 않고 시골 마을에 위치한 H 지점(H 측정소와 보령화력발전소 사이의 거리: ~9 km) 모든 시간에 국외 영향의 기여도가 높았으며, 23시에 국지적 영향의 기여도가 49.3%로 가장 높았고 8시에 가장 낮은 34.1%이었다. H 지점의 국지적 및 국외 영향 기여도의 거동 특성은 C, F 지점과 다르게 나타났는데 저녁에서부터 새벽 시간까지 높아진 국지적 영향의 기여도가 6시부터 8시까지 급격히 낮아진 후 13시까지 다시 높아지지만 19시까지 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. 태안화력발전소에서

약 11 km 떨어진 A 지점은 1~18시와 21~24시 사이에 국지적 영향의 기여도가 국외 영향의 기여도보다 높았으며, 아침 7시에 60.9%로 가장 높은 국지적 영향의 기여도를 보였다.

고농도 사례 II와 III은 국외 영향의 기여도가 우세한 시간으로 국외 영향의 기여도는 사례 II가 사례 III보다 더 높았으며 이러한 차이는 시간별 기여도에도 차이를 나타내었다. 사례 II 기간에는 A, C 및 H 지점에서 모든 시간에 국외 영향의 기여도가 높았지만, 사례 III 기간에는 A와 H 지점에서만 모든 시간에 국외 영향의 기여도가 높았다. 또한, F 지점의 경우는 앞에서 설명한 대로 사례 II에서는 대부분의 시간에서 국외 영향이 국지적 영향보다 더 크게 모사되었다. C 지점에서도 앞에서 기술한 바와 같이 사례 II 기간에는 모든 시간에서 국외 영향의 기여도가 국지적 영향의 기여도보다 높았지만, 사례 III 기간에는 대부분의 시간에서 국외 영향의 기여도가 높았다. 정리하면, PM_{2.5}의 고농도 사례에 대한 시간에 따른 국지적 및 국외 영향의 기여도는 각 지점에 위치한 대규모 점오염원의 오염물질 배출특성, 고농도 사례의 기상학적 특성 및 오염물질의 외부 유입의 강도에 따라 다른 경향을 보여주었다. 특히 주목할 점은 국외 영향의 기여도가 높았던 사례 II 기간에 F 지점(현대제철 당진제철소)에서 9시~19시에 국지적 영향이 점차적으로 증가하는 현상이 나타났다. 이와 같은 증가는 당진제철소의 조업 시간과 밀접하게 관련이 되었을 것으로 추정한다(Lee and Park, 2019).

4. 요약 및 결론

연구에서는 충남의 대형 점오염원 주변 지역 11곳의 대기오염측정소에서 2019년 5월 7일~6월 7일에 측정된 대기오염 자료를 해석하였다. 또한, 24시간 기준 PM_{2.5}의 환경 기준치를 초과하는 고농도 사례를 지정한 후, CMAQ 3차원 모형을 이용하여 대형배출 시설 주변 지점에서 PM_{2.5}의 국지적 및 국외 영향을

파악하였다. PM_{2.5}의 고농도 사례는 석탄화력발전소와 석유화학산업단지 주변 지점에서는 5월 15일~17일(사례 I)과 5월 23일~25일(사례 II)에 두 번 관측되었으며, 당진제철소와 풍하지역(인주산업단지와 아산시 둔포면 기계산업단지)에서는 5월 12일~17일(사례 I), 5월 23일~25일(사례 II), 그리고 6월 2일~6일(사례 III)에 세 번 확인되었다.

PM_{2.5}의 고농도 사례 I과 III에서는 모든 지점에서 SO₂와 NO₂ 농도가 비교적 높게 유지되었고 PM_{2.5}의 농도 증가 역시 확인되었다. 하지만, 사례 II에서는 SO₂와 NO₂ 농도는 매우 낮았지만 O₃와 PM_{2.5}의 농도는 매우 높은 특성을 보였다. 기상학적 관점에서 PM_{2.5}의 고농도 사례 I과 III은 한반도 전역이 고기압의 영향권에 속하며 외부 오염물질의 유입이 적고 국지적 영향이 큰 국내 정체형 종관 기상 특성에 해당하였다. 반면에 사례 II는 중국 상하이 지역으로부터 대규모 오염물질들이 서해를 경유하여 충남 지역으로 유입된 후 수도권으로 이동하는 국외 유입형 종관 기상 특성을 보였으며, 국외 유입의 영향이 지배적인 사례에 해당하였다.

CMAQ 모사 결과에 의하면, PM_{2.5}의 고농도 사례 I에서는 PM_{2.5}의 농도에 미치는 국지적 및 국외 영향의 기여도는 각각 $67.6 \pm 14.5\%$, $39.4 \pm 14.5\%$ 로 국지적 영향의 기여도가 높았다. 반면에 사례 II와 III의 경우에는 국외 영향의 기여도가 더 높았으며, 평균적으로 $74.3 \pm 15.7\%$ 와 $58.7 \pm 20.1\%$ 를 차지하였다. 그러나 충남 전 지역에서 국외 영향의 기여도가 높은 사례 II 기간에도 현대제철 당진제철소가 위치한 송산면 측정소와 당진제철소의 풍하 방향에 위치한 아산시 인주면 측정소에서는 국지적 영향의 기여도가 $40.0 \pm 19.3\%$ 에 이르렀다.

본 연구를 통하여 충남 지역에 존재하는 대형배출 시설에서 배출되는 대기오염물질이 주변 지역에 미치는 영향에 관한 정성적인 평가를 조사하였으나, 앞으로 PM_{2.5}의 고농도 사례에 대한 정확한 원인 규명을 위해서는 관련 오염물질들의 측정과 성분 분석을 통한 정량적 자료 확보가 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-국가전략프로젝트사업의 지원을 받아 수행하였음(2017M3D8A1092015). 또한 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기후변화대응 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M1A2A2103953).

References

- Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE Emission Data Processor and SMOKE Tool Input Data Processor in Models-3, Presented at The Emission Inventory Conference, Denver, CO, May 1-4, 2001.
- Byun, D., Schere, K.L. (2006) Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, Applied Mechanics Reviews, 59(2), 51-77. <https://doi.org/10.1115/1.2128636>
- Ju, S.-R., Yu, G.-H., Park, S.-S., Lee, J.-Y., Lee, S.-I., Jee, J.-B., Lee, K.-Y., Lee, M.-D. (2020) Pollution Characteristics of PM_{2.5} Measured during Fall at a Seosan Site in Chungcheong Province, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(3), 329-345, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.329>
- Kim, E.-H., Kim, H.-C., Kim, B.-U., Kim, S.-T. (2019) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (VI) Estimating Influence of Sectoral Emissions from Chungcheongnam-do, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(2), 159-173, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.226>
- Kim, S.-T., Kim, O.-K., 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>

- org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.159
- 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>
- Lipfert, F.W. (2018) Long-term Associations of Morbidity with Air Pollution: A Catalog and Synthesis, Journal of the Air & Waste Management Association, 68, 12-28. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1349010>
- Miller, K.A., Siscovick, D.S., Sheppard, K., Sullivan, J.H., Anderson, G.L., Kaufman, J.D. (2007) Long-term Exposure to Constituents of Fine Particulate Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Events in Women, The New England Journal of Medicine, 356, 447-458. <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMoa054409>
- National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (2000) NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, Continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) National Air Pollutants Emission 2016.
- Otte, T.L., Pleim, J.E. (2010) The Meteorology-Chemistry Interface Processor (MCIP) for the CMAQ Modeling System: Updates through MCIPv3.4.1, Geoscientific Model Development, 3(1), 243-256. <https://doi.org/10.5194/gmd-3-243-2010>
- Pope, C.A., Ezzati, M., Dockery, D.W. (2009) Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States, The New England Journal of Medicine, 360, 376-386. <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMsa0805646>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, pp. 1-113. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>

Authors Information

손세창(전남대학교 환경에너지공학과 박사과정)
 박승식(전남대학교 환경에너지공학과 교수)
 배민아(아주대학교 환경안전공학과 박사과정)
 김순태(아주대학교 환경안전공학과 교수)