



기술자료

충청남도 지역 2018년 초여름 대기환경기준물질 농도의 시간적·공간적 변화 분석

Temporal and Spatial Variabilities of Concentrations of Criteria Air Pollutants during Early Summer in 2018 in South Chungcheong Province

이복진, 박승식*

전남대학교 환경에너지공학과

Bok-Jin Lee, Seung-Shik Park*

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University

접수일 2019년 3월 27일
수정일 2019년 4월 11일
채택일 2019년 4월 12일

Received 27 March 2019
Revised 11 April 2019
Accepted 12 April 2019

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

Abstract Stationary sources such as coal-fired power plants, steel works, and petrochemical plants emit significant amounts of air pollutants to the atmosphere. Generally, SO_2 and NO_x from the large-scale stationary sources convert to the SO_4^{2-} and NO_3^- particles through atmospheric chemical transformation processes, respectively, resulting in increase in ambient $\text{PM}_{2.5}$ concentration. It has been reported that large-scale coal-fired power plants and steel works in the west coast areas of Chungcheongnam-do could be important sources of $\text{PM}_{2.5}$ in the metropolitan area and other downwind regions. In the near future, the National Strategic Project-Fine Particle makes a project to conduct aircraft measurements in the west coast region to investigate transport pathways of air pollutants coming from polluted Chinese regions and to impact of air pollutants from the large-scale stationary sources in the region. In this study, as a part of this project, concentrations of criteria air pollutants (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO , O_3 , NO_2 , and SO_2) observed at 10 air quality monitoring networks during May~June, 2018 in Chungcheongnam-do were examined to understand the difference in the concentrations of the air pollutants among the monitoring sites and to find out the impact of large-scale stationary sources (coal-fired power-plants, steel works, and petrochemical facilities) on the air quality at downwind sites. Results from the study indicated that monthly average and hourly maximum concentrations of PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO , O_3 , and SO_2 were found to be the highest at the monitoring site around a large-scale steel works. In addition, the PM_{10} and SO_2 concentrations around the steel works showed similar diurnal patterns and rapid increases between 12:00 and 20:00. However, the PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, and SO_2 were low at monitoring sites around two coal-fired power plants. When considering emission inventory of PM, SO_2 , and NO_x from the coal-fired power plants in Chungcheong-namdo province, relatively low concentration levels of PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, and SO_2 around the two coal-fired power plants were likely attributed to meteorological conditions and short distance between the power plants and air quality monitoring sites.

Key words: Chungcheongnam-do, Coal-fired power plants, Air quality monitoring networks, PM, and SO_2

1. 서 론

대기 에어로졸 입자, 특히 공기 역학적 직경이 $2.5 \mu\text{m}$ 보다 작은 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)는 탄소성분, 이온성분, 원소성분 및 수분으로 구성된 복잡한 혼합물이다.

이들의 오염원은 인간의 활동과 매우 밀접하게 관련이 되어있으며 오염원을 통해 직접 배출되는 1차 오염물질과 자연적·인위적 오염원을 통해 배출된 기체상 전구물질들(SO_2 , NO_x , NH_3 , 휘발성 유기화합물 등)의 대기 화학반응을 통해 생성된 2차 오염물질로

이루어져있다. 2017년 정부의 미세먼지 관리 종합대책 자료에 의하면 2014년 기준 수도권 지역 $PM_{2.5}$ 의 배출량은 경유차(23%), 건설기계·선박(16%), 사업장(14%), 냉·난방(12%), 유기용제(10%), 발전소(9%) 등의 순이었다(MOE, 2017). 반면에 전국의 $PM_{2.5}$ 의 배출량은 사업장(38%), 건설기계·선박(16%), 발전소(15%), 경유차(11%), 냉·난방(5%), 비산먼지(5%) 등의 순이었다. 또한 2018년 7월 환경부(한국환경공단)가 굴뚝 자동측정기기가 부착된 635개 대형사업장을 대상으로 업종별로 조사한 대기오염물질(먼지, SO_2 , NO_x , HCl, HF, NH_3 및 CO)의 총 배출량은 발전 시설(47%), 시멘트 제조 시설(22%), 제철·제강 시설(16%), 석유화학 산업 시설(10%), 그리고 기타 업종(5%) 순으로 나타났다(MOE, 2018). 이와 같이 대형사업장을 위주로 조사한 대기오염물질의 총 배출량은 대규모 발전 시설을 통해서 가장 많은 양의 오염물질이 배출되고 있으나, 모든 배출 오염원을 대상으로 조사한 $PM_{2.5}$ 의 배출량 결과와는 상당히 달랐다. 표 1은 시·도별 대형사업장의 오염물질별 배출량을 정리한 것이다. 시·도별로는 충청남도가 8만 7,135톤(24%), 강원도가 5만 5,409톤(15%), 전라남도가 5만 411톤(14%), 경상남도가 4만 6,447톤(13%) 등의 순으로 대기오염물질을 많이 배출하는 것으로 나타났다(표 1 참조). 경기도(152개)는 충청남도(61개)에 비해 대형사업장 수가 2.5배 이상이었으나, 화력발전소 등 대기오염물질을 다량 배출하는 사업장 수가 적어 대기오염물질의 총 배출량의 약 5%를 차지하였다. 충청남도

에서 가장 많은 대기오염물질이 배출되는 이유는 대규모 석탄화력발전소(태안화력, 당진화력 및 보령화력), 현대제철 당진제철소 및 석유화학 산업단지가 분포하고 있기 때문이다. 충청남도에서 배출되는 먼지, SO_2 , 그리고 NO_x 의 양은 각 오염물질의 국내 총 배출량의 32.0%, 34.3%, 19.5%를 차지하였다. 또한 충청남도의 총 대기오염물질 배출량에서 석탄화력발전소는 68.3%, 제철·제강 시설은 25.1%, 석유화학산업은 5.2%를 차지할 정도로 세 종류의 오염원에서 대부분의 오염물질을 배출(98.6%)하고 있었다. 그리고 업종별로 구분한 먼지, SO_2 , 그리고 NO_x 의 배출량 구성비는 석탄화력발전소는 50.8%, 60.3% 및 40.6%, 제철·철강 시설은 18.3%, 24.1% 및 13.0%, 그리고 석유화학산업은 6.3%, 12.3% 및 9.0%이었다.

최근 방송, 언론 등에 의해 발표되는 기사에 의하면 고농도 미세먼지 발생 시 $PM_{2.5}$ 의 주요 원인으로 석탄화력발전소에서 배출되는 미세먼지와 SO_2 의 영향을 심각하게 우려하고 있으나, 2017년 환경부의 연구결과에 의하면 충청남도에서 멀리 떨어져 있지 않은 수도권 지역의 $PM_{2.5}$ 농도에 미치는 석탄화력발전소의 영향은 10% 이하였다(MOE, 2017). 요즘 미세먼지 문제에 대한 국민들의 공분과 석탄화력발전소에 대한 매우 부정적인 여론은 석탄화력발전소의 배출가스가 미세먼지에 미치는 영향을 과학적인 자료에 근거하여 정확하게 규명해야 하는 필요성을 요구하고 있는 상황이다. 정부에서는 고농도 미세먼지 발생 시 화력발전소 가동률을 일정 수준 이하로 제한(예를 들어 20%

Table 1. Emissions inventory of air pollutants by region for 635 TMS (Telemonitoring systems) attached facilities (ton/yr).

	Total	Dust	SO_2	NO_x	CO
Nation	361,458	6,533	109,339	242,441	2,631
Chungcheongnam-do	87,135	2,089	37,533	47,277	168
– Hyundai dangjin steel works	21,849	486	10,900	10,464	–
– Taean power plants	20,341	645	8,723	10,973	–
– Boryeong power plants	18,197	413	8,355	9,429	–
– Dangjin power plants	15,978	391	6,763	8,825	–
Gangwon-do	55,409	1,100	3,019	51,229	29
Jeollanam-do	50,411	700	21,831	27,157	708
Gyeongsangnam-do	46,447	909	21,331	24,025	145
Gyeonggi-do	16,910	149	2,806	13,405	466

축소)하는 강력한 조치 등을 통해 화력발전소로 인한 대기오염물질 배출량을 줄이려는 시도를 하고 있으나 큰 효과는 얻지 못하고 있다.

정부의 미세먼지 국가전략프로젝트 사업단에서는 최근 빈번하게 발생하고 있는 고농도 미세먼지에 대한 원인을 규명하기 위해 2019년 5~6월에 한반도의 서해상에서 항공 관측을 계획하고 있다. 항공 관측의 목적은 국외에서 서해상으로 유입되는 미세먼지의 이동 경로 추적과 유입량의 산정뿐만 아니라 충청남도에 위치한 석탄화력발전소, 제철소 및 석유화학산업단지와 같은 대형 점오염원의 배출 영향을 조사하기 위함이다. 대형 점오염원으로부터 배출되는 미세먼지, SO_2 , NO_x , 그리고 2차 생성 미세먼지 등이 주변 지역의 대기질에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 (Kim et al., 2017), 이들의 영향을 확실하게 밝히기 위해서는 점 오염원 배출 지역과 풍하 지역에서의 포괄적인 연구가 수반되어야 한다. 논문에서는 미세먼지 사업단의 대기질 항공 관측에 앞서 충청남도 지역에 설치된 대기오염측정소에서 생산한 2018년 5~6월의 대기환경기준물질 측정 자료를 면밀히 분석하여 해당 지역에 있는 대형배출시설의 주변지역 대기질에 미치는 영향을 조사하였다. 대기환경기준물질 측정자료 분석의 공간적인 범위는 태안화력발전소, 당진화력발전소, 보령화력발전소, 석유화학산업단지, 현대제철 당진제철소 등의 대형 배출오염원이 위치하고 있는 충청남도의 태안군, 서산시, 당진시, 홍성군, 예산군 및 보령시로 제한하였다. 대기오염측정망의 기본적인 대기환경기준물질의 분석 자료에 대한 정보는 항공기를 이용한 대기질 관측 시 비행경로를 추적하고 대기오염물질의 외부유입에 의한 영향과 대형 점오염원이 주변 및 수도권 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 에 미치는 영향을 규명하는데 필요한 기초 자료가 될 것이다.

2. 충청남도 지역 대기오염측정소 개요와 측정 항목 및 대형배출시설 소개

현재 충청남도 지역에 설치되어 운영 중인 대기오

염측정망은 총 28곳으로 본 논문에서는 석탄화력발전소, 석유화학산업단지, 그리고 제철산업단지가 위치한 10곳을 주요 지점으로 선정하여 2018년 5~6월에 측정한 대기환경기준물질에 대한 자료를 분석하였다. 각 측정소에서 생산한 대기환경기준물질인 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3 , NO_2 , SO_2 , 그리고 CO의 시간 평균농도자료를 사용하였다. PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 는 두 대의 베타게이지 (BAM-1020)를 이용해 각각 측정하였다. 기체상 오염물질인 O_3 , NO_2 , SO_2 , 그리고 CO의 농도는 각각 자외선 광도법 (pulsed ultraviolet photometric method, Thermo 49i), 화학발광법 (Thermo 42CTL), 자외선 형광법 (pulsed ultraviolet fluorescence method, Thermo 43i), 비분산적외선법 (non-dispersive infrared method, Thermo 48i)을 이용하여 측정하였다. 보령화력발전소에서 가장 가까운 곳에 위치한 보령시 주교면의 대기오염측정소에서는 해당 기간에 측정이 이루어지지 않아서 자료 분석에서 제외하였고 보령화력발전소의 오염물질 배출 영향 여부를 판단하기 위하여 보령시 중앙로 대천 2동에 위치한 대기오염측정소의 자료를 분석에 활용하였다. 그리고 당진화력발전소 주변에는 대기오염측정망이 없어서 당진화력발전소 배출 오염물질들이 주변 지역에 미치는 잠재적인 영향은 확인할 수 없었다. 논문에서 측정 자료를 이용한 10곳의 대기오염측정소 위치와 주소를 그림 1과 표 2에 나타내었다.

태안발전본부(충청남도 태안군 원북면 방갈리)는 500 MW의 발전용량을 가진 8기와 1050 MW의 발전용량을 가진 2기의 총 10기의 석탄화력발전소, 345 MW 규모의 석탄가스화 복합발전, 그리고 4.7 MW의 신재생에너지 발전 등으로 총 6480 MW의 전기를 생산하고 있는 발전소이다. 2018년 환경부의 대기오염배출량 자료에 의하면 태안발전본부는 먼지, SO_2 , 그리고 NO_x 를 각각 645.0, 8722.8, 10973.3 톤/년을 배출하고 있다(표 1). 당진화력발전소(충청남도 당진시 석문면 교로길 30)는 500 MW의 발전용량을 가진 8기와 1020 MW의 발전용량을 가진 2기의 석탄연소 보일러가 가동 중에 있으며 총 발전용량은 6060 MW

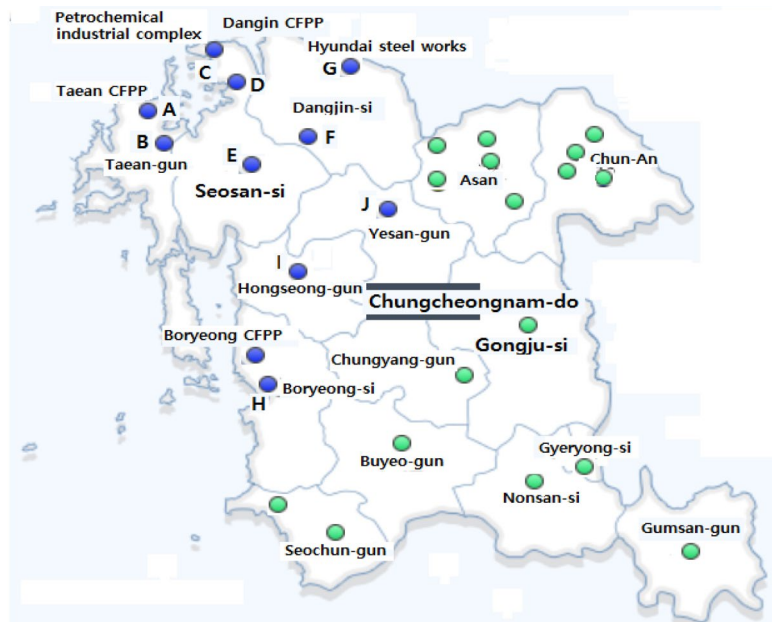


Fig. 1. Location of air quality monitoring stations (blue color) in Chungcheongnam-do province.

Table 2. Address of 10 air pollution monitoring stations in Chungcheongnam-do.

Location	Address of the monitoring stations
A	Guncheong 6-gil, Taeon-eup, Taeon-gun, Chungcheongnam-do (around taean power plants)
B	14, Bunji-gil, Poji-ri, Iwon-myeon, Taeon-gun, Chungcheongnam-do
C	123-20, Dokgot-ri, Daesan-eup, Seosan-si, Chungcheongnam-do (National Agricultural Cooperative Federation)
D	1942, Choongero, Daesan-eup, Seosan-si, Chungcheongnam-do
E	918-3, Dongmun-dong, Seosan-si, Chungcheongnam-do (Seosan elementary school)
F	Cityhall-ro 1, Dangjin-si, Chungcheongnam-do
G	342-27, Yugok-ro, Songsan-myeon, Dangjin-si, Chungcheongnam-do (around Hyundai Steels Works)
-	Ulkyeun-gil 396, Jukyemyun, Boryeong-si, Chungcheongnam-do (around Boryeong power plants)
H	142-16, Jungang-ro, Boryeong-si, Chungcheongnam-do
I	Naepo-ro 136, Ogwan-ri, Hongseong-eup, Hongseong-gun, Chungcheongnam-do
J	64, Jugyo-ro, Jugyo-ri, Yesan-eup, Yesan-gun, Chungcheongnam-do

이다. 발전 과정에서 대기 중으로 배출되는 먼지, SO_2 , 그리고 NO_x 의 양은 각각 390.7, 6762.5, 8825.1 톤/년이었다(표 1). 그리고 보령발전본부(충청남도 보령시 오천면 오포리)는 500 MW의 발전용량을 가진 8기의 석탄화력발전소(총 4000 MW), LNG 연료를 사용하는 150 MW의 발전용량을 가진 9기의 복합 화력발전(총 1350 MW), 그리고 약 8 MW의 신재생 에너지 발전으로 총 5358 MW의 발전용량을 보유하고

고 있다. 보령화력본부에서는 8기의 석탄화력보일러에서 먼지, SO_2 , 그리고 NO_x 가 각각 412.8, 8355.1, 9429.1 톤/년을 배출하고 있다(표 1). 현대제철 당진 제철소(충청남도 당진시 송악읍 북부산업로 1480)는 고로사업, 전기로사업, 특수강사업, 자동차 부품 사업 등에서 필요한 열연, 냉연, 후판, 철근, 특수강 등 매우 다양한 제품들을 생산하고 있으며 생산과정 중 먼지, SO_2 , 그리고 NO_x 가 각각 486.0, 10899.5,

Table 3. A summary of criteria air pollutants concentrations during May and June 2018 at 10 sites.

(A) May 2018						
Site	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	CO (ppm)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	SO ₂ (ppb)
A	42 ± 26 (4~143)	18 ± 9 (2~49)	0.38 ± 0.09 (0.20~0.90)	9 ± 5 (3~37)	38 ± 11 (9~87)	3 ± 2 (1~20)
B	39 ± 22 (2~116)	18 ± 9 (1~46)	0.35 ± 0.10 (0.10~0.70)	8 ± 5 (1~31)	40 ± 12 (6~84)	3 ± 3 (1~27)
C	40 ± 26 (2~123)	17 ± 14 (1~78)	0.36 ± 0.09 (0.10~0.80)	15 ± 13 (2~78)	48 ± 18 (3~136)	5 ± 5 (1~39)
D	38 ± 25 (2~110)	16 ± 8 (1~37)	0.49 ± 0.17 (0.20~1.50)	14 ± 7 (3~37)	46 ± 19 (2~125)	5 ± 3 (2~25)
E	39 ± 27 (2~193)	13 ± 8 (1~37)	0.35 ± 0.14 (0.10~1.30)	13 ± 6 (3~48)	43 ± 16 (9~106)	3 ± 2 (1~18)
F	38 ± 29 (2~198)	20 ± 17 (1~95)	0.23 ± 0.10 (0.10~0.80)	12 ± 6 (3~39)	39 ± 18 (4~111)	4 ± 2 (2~17)
G	65 ± 42 (2~233)	32 ± 25 (1~127)	0.59 ± 0.46 (0.20~5.70)	16 ± 9 (4~59)	33 ± 20 (2~105)	8 ± 9 (2~59)
H	38 ± 25 (2~120)	18 ± 10 (1~55)	0.30 ± 0.07 (0.20~0.60)	6 ± 4 (2~29)	49 ± 17 (3~120)	3 ± 1 (2~10)
I	42 ± 27 (4~129)	19 ± 11 (1~65)	0.28 ± 0.11 (0.20~0.70)	7 ± 5 (2~35)	42 ± 16 (3~107)	3 ± 1 (2~9)
J	43 ± 25 (3~166)	14 ± 10 (1~61)	0.34 ± 0.13 (0.10~0.80)	8 ± 5 (2~32)	46 ± 18 (6~110)	4 ± 1 (2~13)
(B) June 2018						
Site	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	CO (ppm)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	SO ₂ (ppb)
A	38 ± 15 (7~88)	22 ± 10 (3~52)	0.43 ± 0.08 (0.30~0.80)	12 ± 3 (4~28)	35 ± 12 (5~74)	4 ± 2 (1~19)
B	35 ± 14 (2~86)	21 ± 10 (1~59)	0.42 ± 0.11 (0.20~1.10)	7 ± 4 (2~25)	34 ± 12 (5~73)	4 ± 3 (2~20)
C	33 ± 17 (3~109)	19 ± 12 (1~63)	0.44 ± 0.14 (0.20~1.30)	14 ± 12 (1~99)	48 ± 18 (1~104)	6 ± 5 (2~35)
D	28 ± 12 (2~100)	20 ± 10 (1~54)	0.52 ± 0.14 (0.30~1.50)	11 ± 7 (1~56)	44 ± 19 (3~110)	5 ± 3 (2~28)
E	33 ± 14 (2~82)	21 ± 10 (1~49)	0.49 ± 0.13 (0.20~0.90)	7 ± 5 (2~33)	46 ± 16 (7~104)	3 ± 2 (1~21)
F	33 ± 19 (2~108)	22 ± 13 (1~67)	0.25 ± 0.09 (0.10~0.80)	9 ± 5 (2~30)	40 ± 20 (1~113)	4 ± 2 (2~16)
G	55 ± 33 (3~239)	33 ± 19 (1~131)	0.64 ± 0.42 (0.30~3.50)	13 ± 7 (3~54)	48 ± 20 (3~128)	10 ± 9 (3~49)
H	38 ± 17 (4~95)	24 ± 12 (3~64)	0.33 ± 0.09 (0.20~0.80)	6 ± 4 (2~23)	48 ± 17 (9~101)	3 ± 1 (2~13)
I	38 ± 18 (5~94)	22 ± 12 (1~65)	0.31 ± 0.09 (0.20~0.60)	6 ± 4 (2~21)	42 ± 16 (4~96)	4 ± 1 (2~9)
J	35 ± 16 (6~83)	22 ± 15 (1~68)	0.37 ± 0.10 (0.20~1.70)	8 ± 4 (2~33)	48 ± 19 (6~128)	4 ± 2 (2~42)

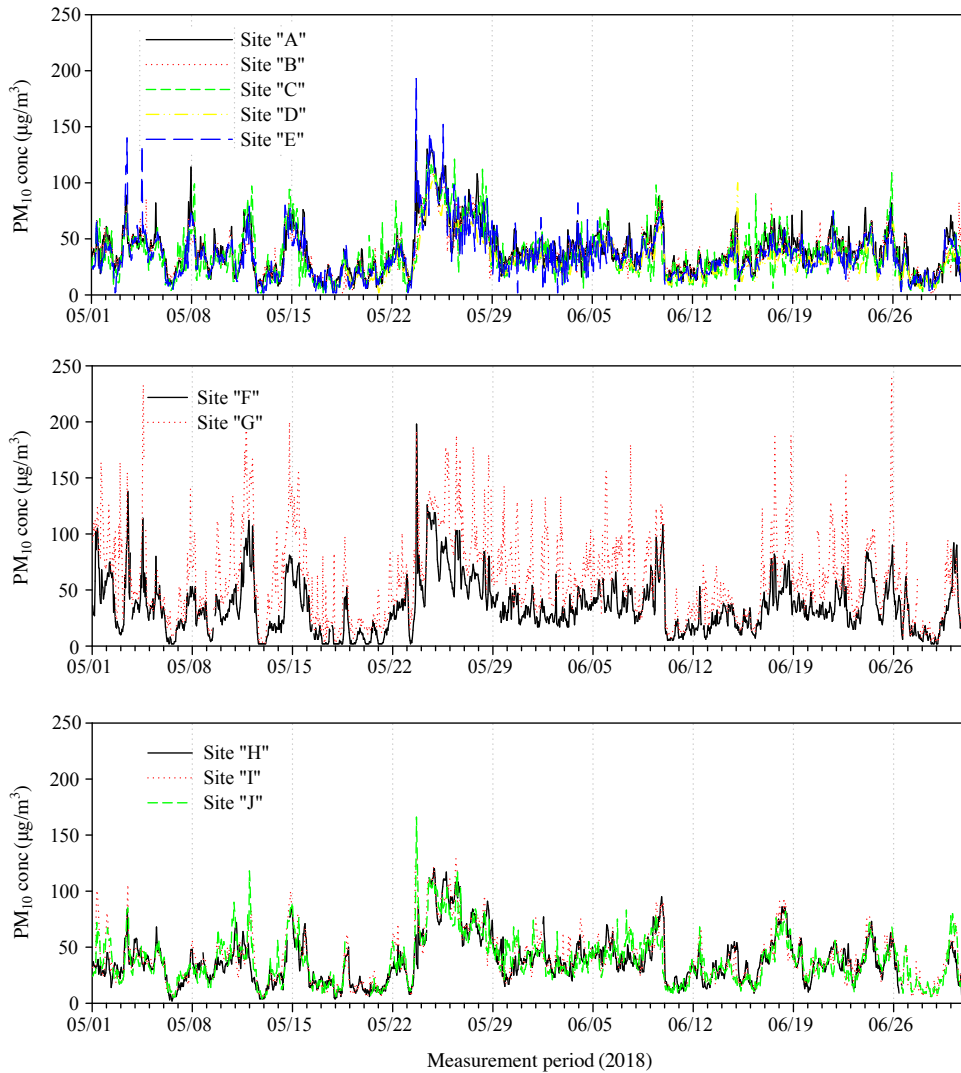


Fig. 2. Temporal variation of PM₁₀ concentration at 10 monitoring sites.

10463.6 톤/년이 발생되고 있다(표 1). 2017년 배출량 기준으로 대기오염물질을 다량 배출하는 사업장 상위 20개소 중 충청남도 지역에 위치한 현대제철 당진제철소와 세 곳의 화력발전본부가 10위 안에 포함되어 있으며 당진제철소가 상위 순위 2위에 해당하였다. 그리고 태안화력발전소는 다른 두 화력발전소와 비교해 배출되는 먼지의 양이 대략 230~250 톤/년 더 많았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 충남지역 대기환경기준물질의 공간적 및 시간적 농도 변화

표 3은 충남지역 10곳(표 1의 위치 A~J)의 대기오염측정소에서 2018년 5~6월에 1시간 단위로 측정된 대기환경기준물질(PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NO₂, O₃ 및 SO₂)의 월평균 농도를 정리한 것이다. 게다가 그림 2~6에

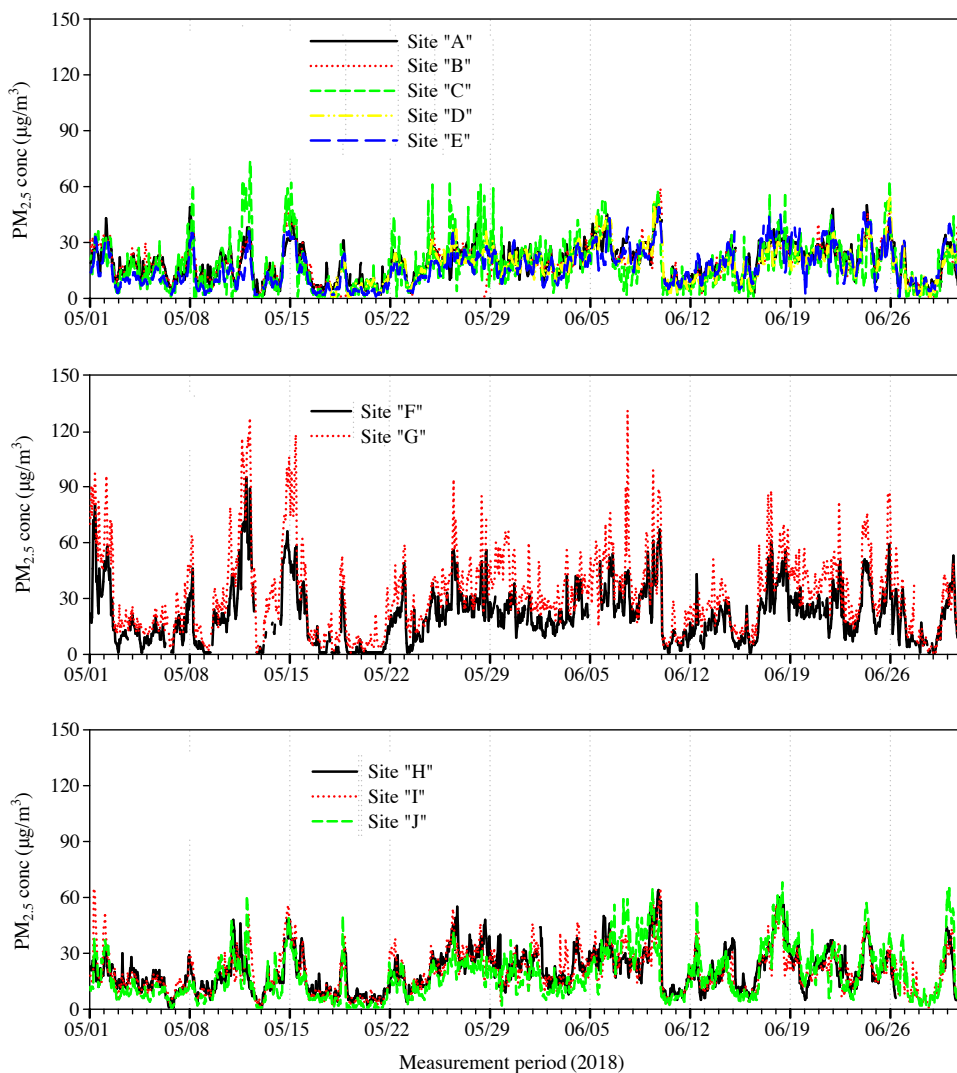


Fig. 3. Temporal variation of $PM_{2.5}$ concentration at 10 monitoring sites.

대기오염측정소 A~J의 PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , O_3 및 SO_2 의 시간별 농도 변화를 나타내었다. 기상청의 발표에 의하면 조사기간 중 충남지역에서 5월 24일에 황사가 관측되었으며 (<http://www.weather.go.kr/weather/asi-andust/observday.jsp>), 이때 모든 측정 지점에서 PM_{10} 의 농도가 높게 조사되었다(그림 2의 PM_{10} 시간별 농도추이 참조). 그러나 G 위치에서는 PM_{10} 의 농도가 황사가 발생했을 때(5월 24일)보다 더 높은 경우가 중

종 발생하였다. 충남지역의 5월의 PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 및 SO_2 의 월평균 농도는 각각 $38 \pm 25 \sim 65 \pm 42 \mu g/m^3$, $13 \pm 8 \sim 32 \pm 25 \mu g/m^3$, $33 \pm 20 \sim 49 \pm 17$ ppb, $3 \pm 1 \sim 8 \pm 9$ ppb이었으며 이들의 6월의 월평균 농도는 $28 \pm 12 \sim 55 \pm 33 \mu g/m^3$, $19 \pm 12 \sim 33 \pm 19 \mu g/m^3$, $34 \pm 12 \sim 48 \pm 17$ ppb, $3 \pm 1 \sim 10 \pm 9$ ppb이었다(표 3). 측정소 지점별 5월과 6월의 대기환경기준물질들의 평균 농도는 G 위치인 현대제철 당진제철소가 위치한 송산

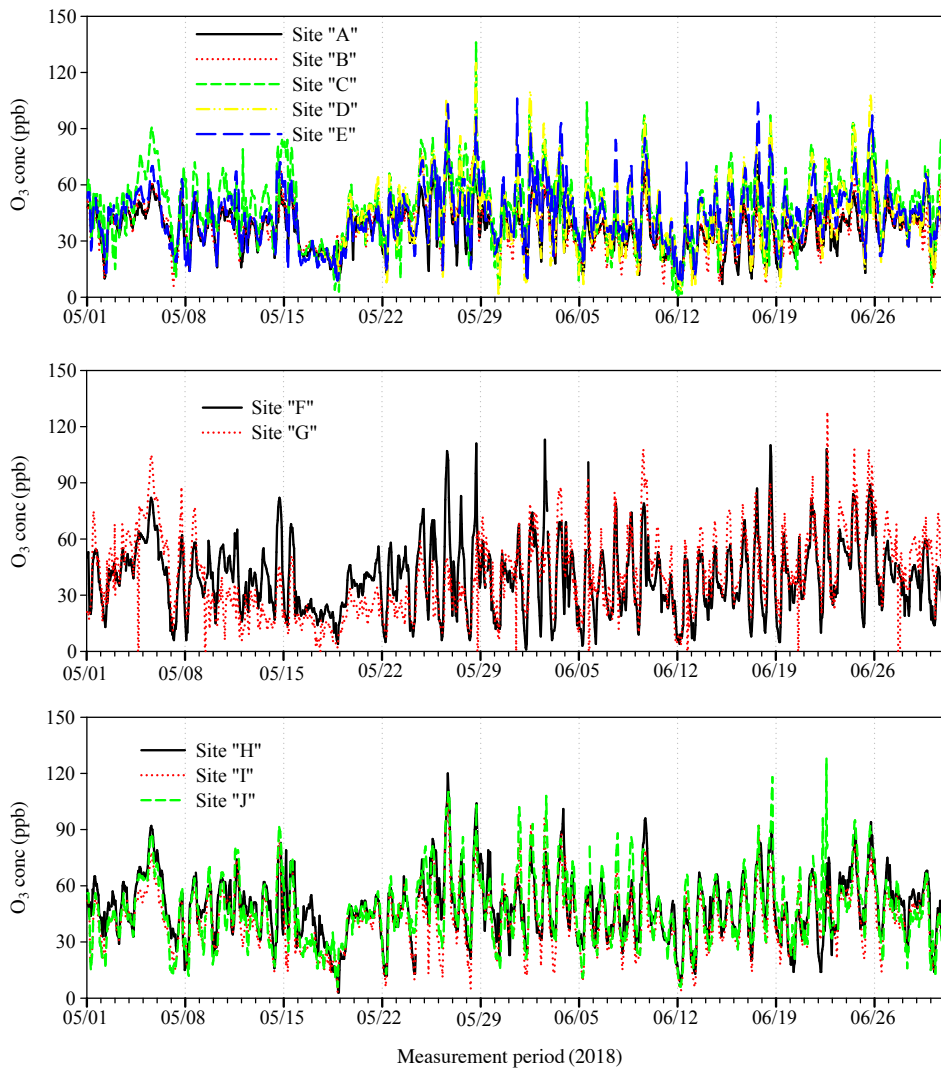


Fig. 4. Temporal variation of O_3 concentration at 10 monitoring sites.

면 측정소에서 가장 높았다. 그러나 O_3 의 평균 농도는 석유화학산업단지가 위치한 독곶리(C)와 보령시에 위치한 대천 2동 측정소(H)에서 가장 높았다. 서산시 독곶리 측정소(C)와 보령시 대천 2동 측정소(H)에서 O_3 농도가 다른 측정소보다 높은 이유는 아마도 석유화학산업단지에서 다량 배출된 휘발성 유기화합물과 대천 2동 주민 센터를 에워싸고 있는 중앙로에서 자동차 운행으로 배출된 휘발성 유기화합물이 햇빛과

상호 작용하여 O_3 생성을 더욱 더 촉진하였기 때문으로 판단된다. G 위치에서 O_3 의 월평균 농도는 6월(48 ppb)에는 C와 H 위치와 거의 비슷하였으나 5월에는 상당히 낮았다(33 ppb). NO_2 의 월평균 및 시간 최고 농도는 석유화학산업단지(C 위치)와 당진제철소(G 위치) 부근에서 높게 조사되었으며 C 위치에서 가장 높았으며 5월과 6월에 측정된 시간 최고농도는 각각 78 ppb, 99 ppb이었다. 각 지점별로 측정된 대기환경기

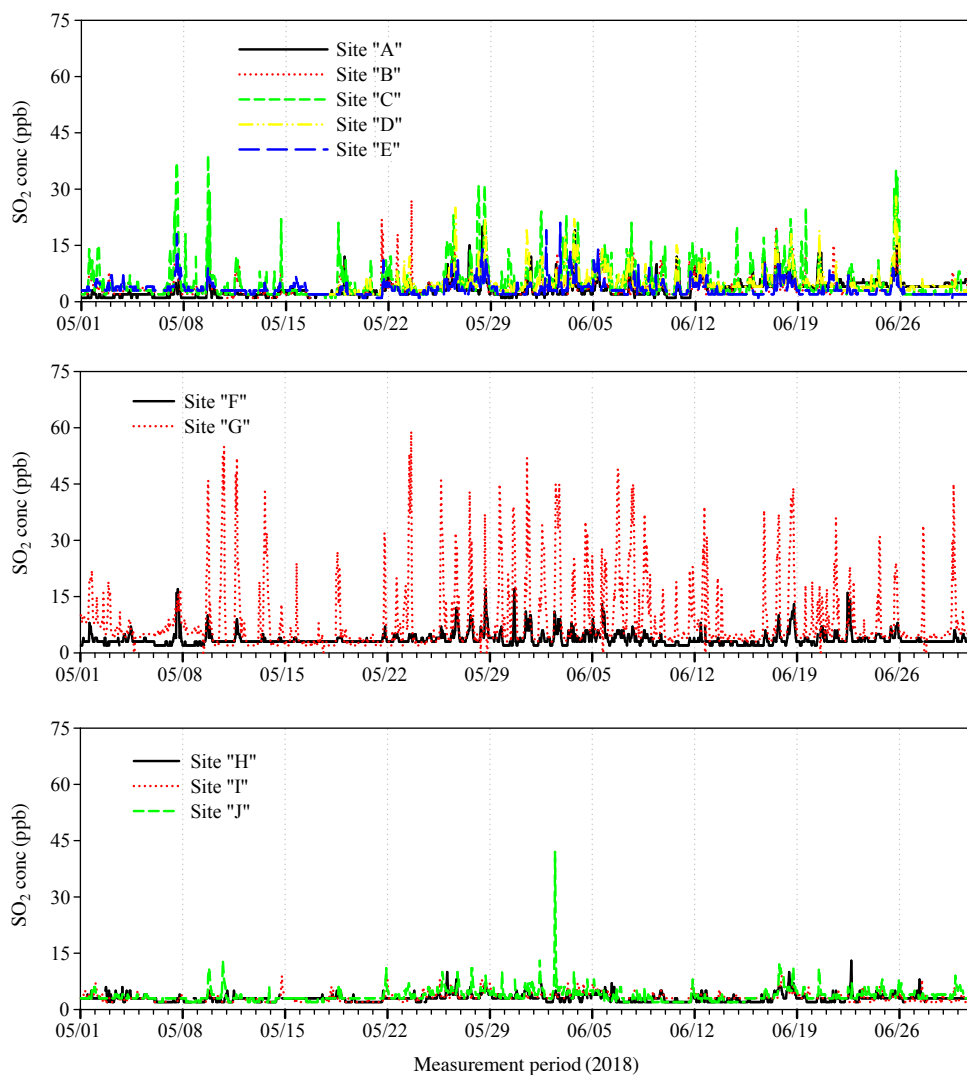


Fig. 5. Temporal variation of SO₂ concentration at 10 monitoring sites.

준물질의 농도 추이에서 주목할 내용은 당진제철소 부근(G)에서 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, 그리고 SO₂의 월평균 및 시간 최고농도가 충남지역에서 가장 높았으며 특히 시간 최고농도가 두드러지게 높았다. 5월의 경우, G 위치에서 PM₁₀의 월평균 및 시간 최고농도는 $65 \pm 42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $233 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 다른 지점들보다 1.5~1.7배와 1.2~2.0배 높았다. 또한 PM_{2.5}의 월평균 및 시간 최고농도는 $32 \pm 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서

다른 지점들보다 1.6~2.5배와 1.3~3.4배 높았다. SO₂의 월평균 및 시간 최고농도는 $8 \pm 9 \text{ ppb}$ 와 59 ppb 로서 다른 지점들의 농도보다 1.6~2.7배와 1.5~6.6배 높았다. 6월의 측정 결과에서도 비슷하게 G 위치에서 PM₁₀, PM_{2.5}, 그리고 SO₂의 월평균 및 시간 최고농도가 가장 높았다. SO₂의 월평균 및 시간 최고농도는 석유화학산업단지가 위치한 C와 D 위치에서 G 위치 다음으로 높게 조사되었다. SO₂의 월평균 및 시간 최고

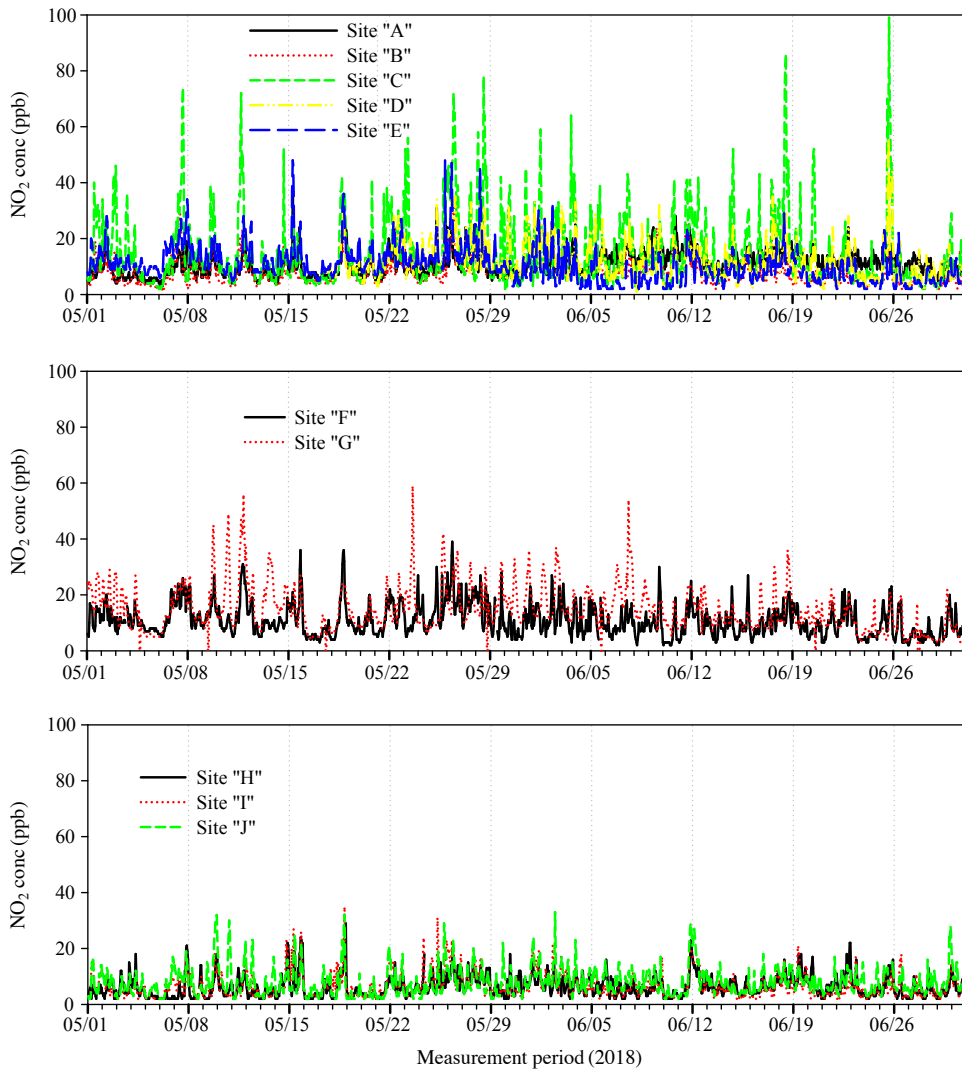


Fig. 6. Temporal variation of NO₂ concentration at 10 monitoring sites.

농도는 5~6 ppb와 35~39 ppb이었다. 그러나 C와 D 위치에서 PM₁₀과 PM_{2.5}의 월평균 및 시간 최고농도는 다른 지점과 큰 차이를 보이지 않았다. 그리고 대기환경기준물질의 농도 추이에서 특이한 점은 먼지, SO₂, 그리고 NO_x를 다량 배출하는 것으로 알려진 태안화력발전소(A 위치)와 보령화력발전소 주변(H 위치)의 대기오염측정소에서 PM₁₀, PM_{2.5}, 그리고 SO₂의 월평균 및 시간 최고농도는 G, C 및 D 위치를 제외한 다른

측정지점과 큰 차이를 보이지 않았다. 환경부의 다량배출사업장 오염물질 배출량 자료(상위 20개소)에 의하면 먼지의 경우는 태안화력발전소, 당진제철소, 보령화력발전소, 당진화력발전소 순으로 배출량이 많으며, SO₂는 당진제철소, 태안화력발전소, 보령화력발전소, 당진화력발전소 순으로 배출량이 많은 것으로 되어있다. 또한 NO_x는 태안화력발전소, 당진제철소, 보령화력발전소, 당진화력발전소 순으로 배출량이 많은



Fig. 7. Transport pathways of air masses arriving at 10 monitoring sites at the height of 500 m above ground level; (a) May 04, 14:00, (b) May 12, 05:00, (c) May 15, 10:00, and (d) May 23, 16:00.

것으로 알려져 있다(MOE, 2018, 표 1 참조). 환경부의 대기오염물질 배출량 자료를 고려했을 때 A와 H 위치에서 측정된 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 및 SO_2 의 비교적 낮은 농도는 두 가지 원인에 기인한 것으로 판단된다; 첫째는 측정 기간 중 두 석탄화력발전소(A와 H 위치)로부터 배출되는 연기의 이동 방향과 측정소의 위치가 일치하지 않은 점이며, 두 번째는 오염원의 배출 고도(150~200 m)와 연기상승고를 고려했을 때 오염원과 측정 지점 사이의 거리가 짧아서 나타난 결과로 추정된다. 이와 같은 결과는 충청남 지역에서 가동 중인 석탄

화력발전소들로부터 배출되는 오염물질들이 주변 지역에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 배출 오염원과 주변 지역의 기상 특성과 오염원으로부터의 측정 거리를 적절하게 고려한 측정이 이루어져야 함을 암시한다. 따라서 충남지역의 대기오염측정소에서 조사한 대기환경기준물질들의 농도 추이 분석결과에 의하면 충청남 지역에 위치한 대규모 점 오염원이 풍하 지역에 미치는 영향을 조사하기 위해서는 향후 서해안 상공에서 대기질 항공 관측 시 현대제철 당진제철소(G 위치), 석유화학산업단지(C와 D 위치), 그리고 석탄

화력발전소 주변과 기류의 방향을 따라 이루어져야 할 것으로 보인다.

충남지역에서 측정한 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도가 국지적 또는 외부로부터 장거리 수송에 의해서 나타난 결과인지를 판단하기 위하여 10곳의 측정소 중 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도가 가장 높았던 G 위치를 기준으로 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 고농도 사례를 선정하여 공기 역학적 계산을 수행하였다. G 위치에서 4종류의 고농도 사례를 선정하였으며 다음과 같다(그림 2 참조); (a) 5월 4일 14:00, (b) 5월 12일 05:00, (c) 5월 15일 10:00, 그리고 (d) 5월 23일 16:00. 이때 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 각각 233과 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 167과 $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 155와 $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 192와 $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. (a)와 (d) 사례에서 PM_{10} 이 $PM_{2.5}$ 의 농도보다 훨씬 높은 이유는 아마도 서해에서 유입되는 해염입자의 영향과 당진제철소에서 발생한 비산먼지의 영향으로 추정되지만 향후 대기 에어로졸 입자의 측정과 화학적 성상 분석을 통해서 이에 대한 원인 규명이 필요할 것으로 보인다. 각 사례에 대해서 G 위치를 제외한 대기오염측정소들의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 분포를 살펴보면, 사례(a)에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 각각 $33\sim 62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $4\sim 13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분포하였으며 G 위치의 풍하 지역인 F 위치(당진시 시청로)에서 G 위치 다음으로 높았다. 사례(b)의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 $19\sim 107 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $11\sim 89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분포하였으며 9곳의 측정소에서 F 위치에서 가장 높았다. 사례(c)에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 각각 $45\sim 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $24\sim 55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분포하였다. 그리고 사례(d)에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 각각 $27\sim 198 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $7\sim 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며 F 위치에서 이들의 농도(198 과 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 G 위치와 거의 비슷하였다. 선정된 4종류의 고농도 발생 시점에 10곳의 측정소로 유입되는 기단의 역궤적은 미국 NOAA의 HYSPLIT 모델(Rolph *et al.*, 2017)을 이용하여 2일 간격으로 500 m의 고도에서 계산하였다. 그 계산 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7의 공기 역학적 해석 결과에 의하면 PM_{10} 의 고농도 사례(a)와 (d)의 경우에 발생한 고농도 현상의 일부는 중국으로부터 장거

리 이동에 의해 영향을 받았을 것으로 판단되지만 다른 측정소의 PM_{10} 농도 수준을 고려했을 때 그 영향은 크지 않았을 것이다. 그리고 사례(b)와 (c)의 공기 역궤적을 보면 각 대기오염측정소에서 측정된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 대부분은 외부(중국)의 오염지역으로부터 장거리 수송에 의한 유입보다는 국지적인 배출과 생성에 의한 영향으로 판단된다. 특히 G 위치에서 발생한 $PM_{2.5}$ 의 고농도 사례(b)와 (c)는 외부 요인보다는 국지적인 요인이 중요하게 작용했을 것이다. 그러나 향후 대기관측을 통해 이에 대한 명확한 원인 규명이 필요하다. 또한 G 위치에서 PM_{10} 의 농도가 다른 측정소보다 훨씬 높은 이유는 공기 역학적 해석 결과를 고려하면 현대 당진제철소의 국지적인 영향이 크게 나타난 것으로 추정된다.

3.2 대기환경기준물질 농도의 시간별 변화

그림 8 (sites A~E), 9 (sites F와 G) 및 10 (sites H~J)은 10곳 대기오염측정소의 5월과 6월의 PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , O_3 및 SO_2 농도의 평균 시간별 변화(diurnal pattern)를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 G 위치를 제외한 거의 모든 측정소에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 는 뚜렷한 시간별 거동 특성이 보이지 않았다. 이에 대한 원인을 조사하기 위해서는 입자상 물질의 화학적 성분들에 대한 조성 자료와 사업장 배출저감시설의 조업 일지 등에 대한 자료가 있어야 하는데 이들의 확보가 어렵기 때문에 현 단계에서는 정확한 원인 규명은 어렵다. G 위치에서 PM_{10} 의 경우 12~20시 사이에 뚜렷한 농도 증가 현상이 확인되었으나, 이것은 현대제철 당진제철소에서 발생한 다양한 사업장의 먼지들이 비산되어 주변 지역에 영향을 주었기 때문으로 판단되지만 향후 이에 대한 추가연구가 필요하다.

NO_2 의 시간별 농도 변화를 보면 C와 G 위치를 제외한 다른 위치에서는 아침과 저녁 시간에 증가하고 낮 시간에 감소하는 전형적인 도시 지역의 특성을 보여주었다. NO_2 의 농도가 오전과 저녁 시간에 증가하는 이유는 측정소 주변에서 출·퇴근 시간에 이루어진 자동차 운행에 의한 질소 산화물의 배출과 산화

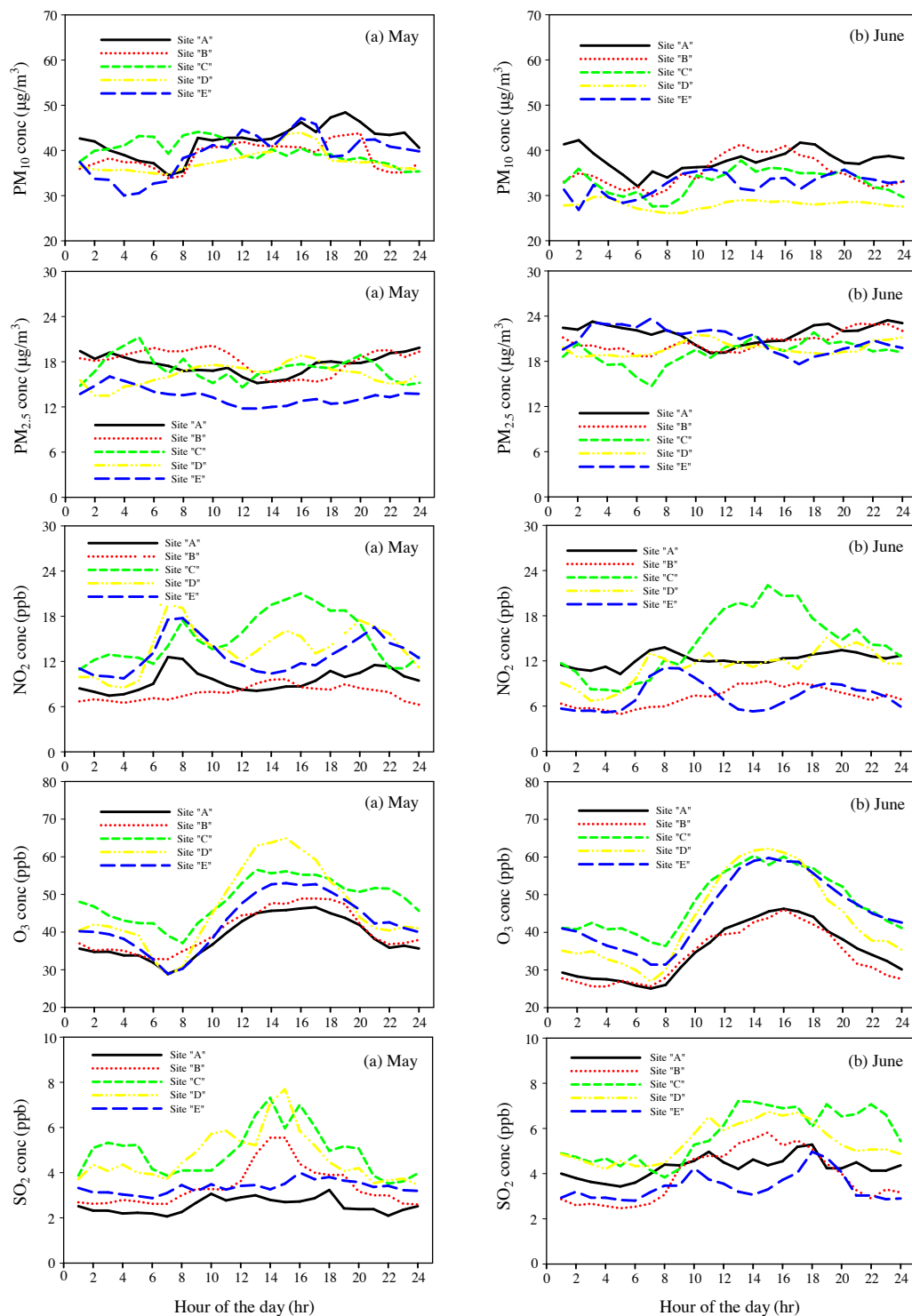


Fig. 8. Diurnal profiles of PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , O_3 , and SO_2 concentrations during May and June at A, B, C, D, and E monitoring sites.

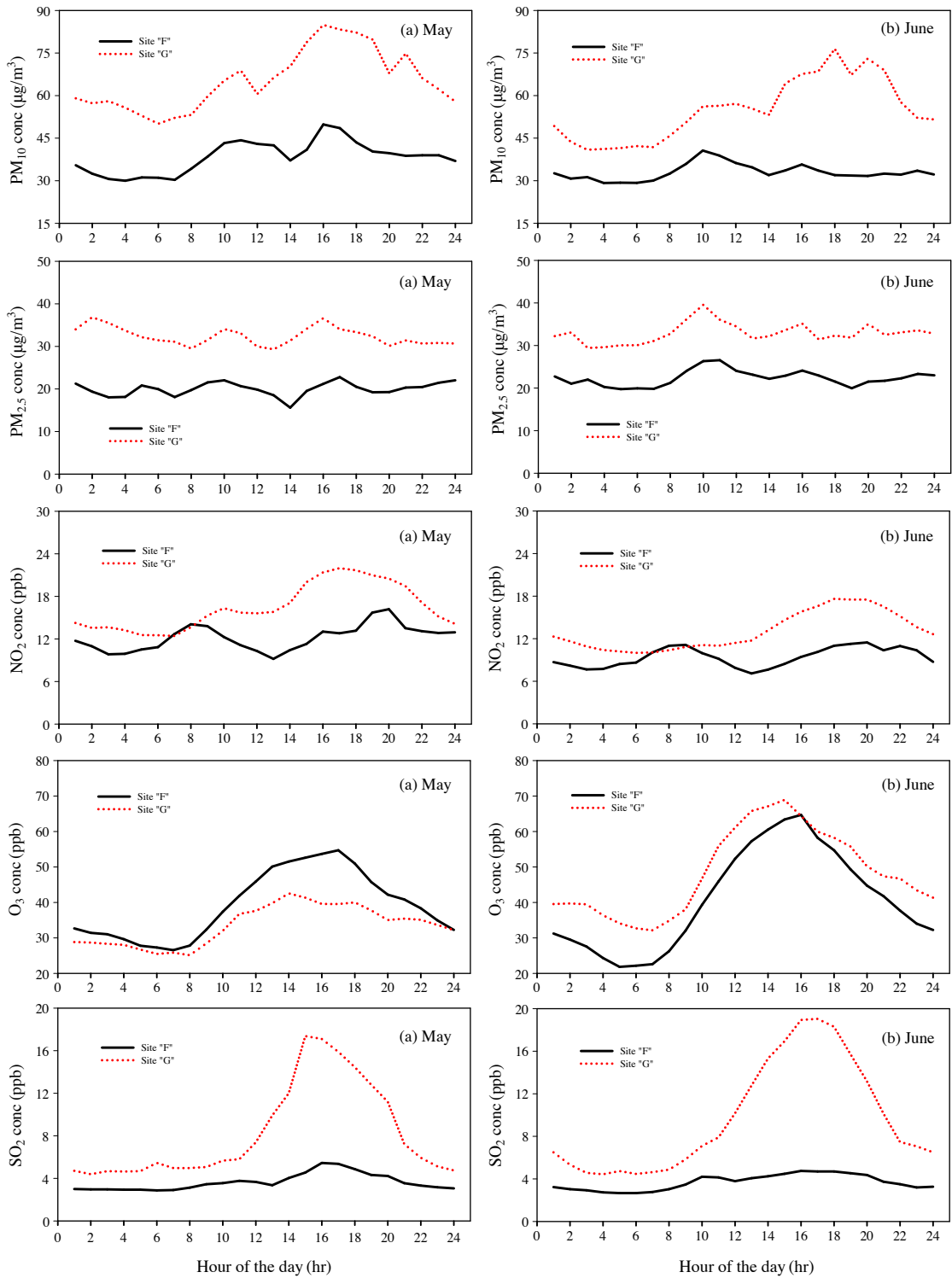


Fig. 9. Diurnal profiles of PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, O₃, and SO₂ concentrations during May and June at F and G monitoring sites.

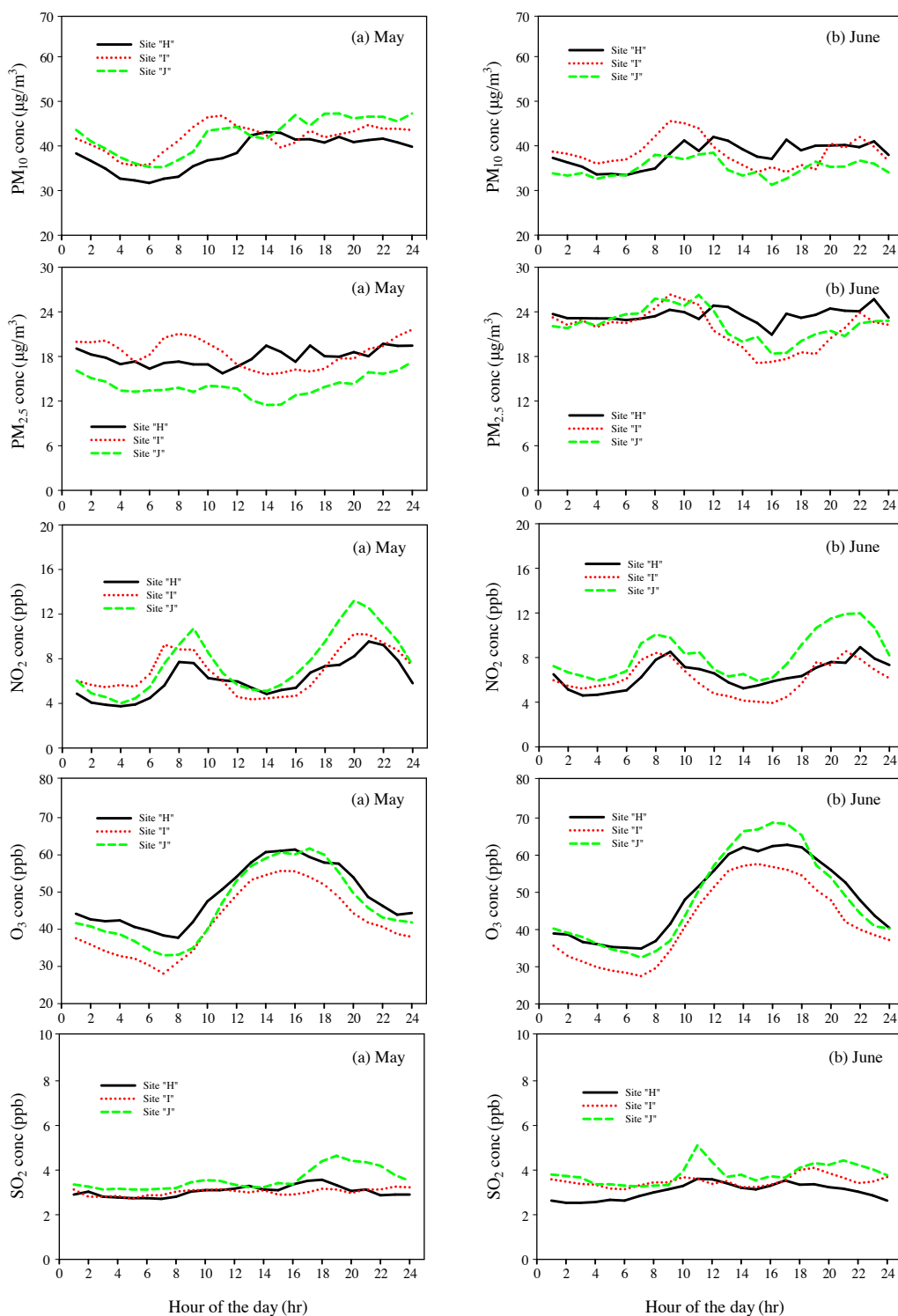


Fig. 10. Diurnal profiles of PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, O₃, and SO₂ concentrations during May and June at H, I, and J monitoring sites.

과정에 의한 결과에 기인한다. 그리고 낮에는 NO_2 의 광분해로 인하여 농도가 감소하는 특성을 보였으며 이것은 오후의 O_3 농도를 증가시키는 원인으로 작용하였다. 그림 8~10에서 볼 수 있듯이, O_3 의 경우는 모든 측정소에서 오후 시간에 최고치를 보이는 거동을 보여주었다. 그러나 C와 G 위치에서는 다른 측정 위치와 다르게 NO_2 의 시간별 농도가 12~18시 또는 12~20시 사이에 증가하는 경향을 보여주고 있으며 O_3 농도 역시 낮 시간에 증가하는 경향을 보여주었다. 보통 낮 시간에 O_3 은 NO_2 의 광분해 과정을 통해서 생성되므로 O_3 의 농도 증가는 전구물질인 NO_2 의 농도 감소로 나타난다. 그러나 낮 시간에 O_3 과 NO_2 가 동시에 증가하는 이유는 아마도 석유화학산업단지 및 당진제철소에서 제품 생산 활동 중 배출되거나 산화된 NO_2 가 광분해($\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}\cdot$) 또는 광화학 산화 과정($\text{NO}_2 + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{HNO}_3$)을 통해 O_3 이나 질산가스로 충분히 변환되지 못하여 나타난 결과로 판단된다. 게다가 O_3 과 NO_2 의 외부로부터 유입이 두 물질의 농도 증가의 한 원인으로 작용하였을 수도 있을 것이다. 그러나 향후 두 측정소 주변에서 질소 산화물, O_3 , HNO_3 , NH_3 , NO_3^- , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 등의 시간별 측정을 통해 이들 오염물질들 사이의 동적 거동 특성을 명확히 규명할 필요가 있다.

SO_2 의 경우는 태안화력발전소의 풍하 지역인 B, 석유화학산업단지가 위치한 C, 석유화학산업단지의 풍하 지역인 D와 당진제철소가 위치한 G를 제외한 측정소에서는 뚜렷한 시간별 특성을 보이지 않았다. 그림 8과 9에서 SO_2 의 농도 경향을 보면, B, C 및 D 위치에서는 10~18시 사이에 증가하고 G 위치에서는 12~20시 사이에 증가하는 경향을 보인 후 감소하였다. 이들 4곳의 측정소에서 오후 시간에 관측된 SO_2 의 농도 증가는 확실하지는 않지만 주변의 대형 점오염원인 태안화력발전소, 석유화학산업단지, 그리고 당진제철소로부터 주간 근무 시간에 배출하여 나타난 현상으로 보인다. 이와 같이 대형 석탄화력발전소, 석유화학산업단지 및 당진제철소 주변에서 관측된 대기오염물질들(NO_2 , SO_2 및 PM_{10})의 뚜렷한 시간별

거동 특성은 향후 대형 점오염원 주변에서 항공 관측 시 주간의 관측 시간을 결정하는데 활용이 가능할 것이다.

4. 요약 및 결론

논문에서는 충남지역에 위치한 대형 점오염원(석탄화력발전소, 제철소 및 석유화학산업시설)으로부터 배출되는 대기오염물질이 주변 지역의 대기질에 미치는 영향을 파악하고 향후 항공관측 시 비행경로와 관측시간을 사전에 조사하고자 10곳의 대기오염 측정소에서 2018년 5~6월에 생산한 대기환경기준물질의 농도 자료를 분석하였다. 충남지역에서 5~6월에 조사한 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO, O_3 및 SO_2 의 월평균 및 시간 최고농도는 현대제철 당진제철소가 위치한 대기오염측정소에서 가장 높았다. 특히 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 및 SO_2 의 농도 증가는 매우 두드러졌다. 게다가 석유화학산업단지가 위치한 대기오염측정소에서 O_3 의 월평균 및 시간 최고농도는 충남지역에서 거의 최고 수준에 도달하였으며 SO_2 의 월평균 및 시간 최고농도 역시 당진제철소 다음으로 높았다. 그러나 대기환경기준물질의 농도 추이에서 특이한 점은 당진제철소와 석유화학산업단지 주변의 결과와 비교해 태안화력발전소와 보령화력발전소 주변의 대기오염측정소에서 얻은 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 및 SO_2 의 농도는 비교적 낮았다. 이것은 아마도 측정 기간 중 두 석탄화력발전소에서 배출되는 연기의 이동 방향과 대기오염측정소의 위치가 일치하지 않은 점과 배출 오염원과 측정 지점사이의 짧은 거리 때문에 나타난 결과로 보인다. 그리고 대기환경기준물질의 시간별 변화 분석에서 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우는 거의 모든 측정소에서 뚜렷한 거동 특성이 보이지 않았으나, 당진제철소 주변 측정소에서 PM_{10} 과 SO_2 는 12~20시 사이에 급격한 증가 현상이 나타났으며 특히 SO_2 의 증가가 두드러졌다. 이것은 아마도 당진제철소의 제품 생산과정에서 주간에 발생한 SO_2 와 PM_{10} 이 주변 지역에 영향을 주어 나타난 결과로 추정되지만 심층적인 대기 관측을 통해 이에 대한

원인 규명이 필요하다. 이와 같이 충남지역의 대기오염측정소에서 조사한 대기환경기준물질들의 농도 추이 분석결과에 의하면 향후 서해안 상공에서 대기질 항공 관측 시 석탄화력발전소, 석유화학산업시설 및 현대제철 당진제철소와 같은 대형 점오염원으로부터 배출되는 대기오염물질의 영향을 조사하기 위해서는 해당 점오염원 주변 지역의 기류의 방향을 면밀하게 분석 후 수행되어야 할 것으로 보인다. 또한 풍하 지역에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 화학적 성상과 전구가스물질들을 실시간으로 측정하여 석탄화력발전소, 당진제철소 및 석유화학산업단지의 영향을 정성적 및 정량적으로 평가할 필요가 있을 것이다. 이와 같은 관측기반의 자료를 토대로 충남지역 대형 점오염원으로부터 풍하 지역에 미치는 정량적인 영향을 분석하기 위해서는 배출원 모델, 수송모델 및 수용모델의 종합적인 평가가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-국가전략프로젝트사업의 지원을 받아 수행하였음 (2017M

3D8A1092015). 논문에서 사용된 충남지역 대기오염 측정자료는 충남보건환경연구원으로부터 제공받았으며 이에 감사드립니다.

References

- 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. *JJournal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33, 159-173, (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2017.
- Ministry of Environment (MOE) (2017) A comprehensive plan of fine particle management.
- Ministry of Environment (MOE) (2018) An annual emission inventory for air pollutants in 2017.
- Rolph, G., Stein, A., Stunder, B. (2017) Real-time Environmental Applications and Display System: READY. *Environmental Modelling & Software*, 95, 210-228, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>.

Authors Information

이복진 (전남대학교 환경에너지공학과 석사과정)
박승식 (전남대학교 환경에너지공학과 교수)