



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

博士學位論文

수치모델링을 활용한 수도권
연무 발생의 기상학적 메커니즘 및
물리·화학적 특성 분석

濟州大學校 大學院

地球海洋科學科

韓承汎

2021年 8月



이학박사 학위논문

수치모델링을 활용한 수도권
연무 발생의 기상학적 메커니즘 및
물리·화학적 특성 분석

제주대학교 대학원

지구해양과학과

한 승 범

2021년 8월



수치모델링을 활용한 수도권 연무 발생의 기상학적 메커니즘 및 물리·화학적 특성 분석

지도교수 송 상 근

한 승 범

이 논문을 이학 박사학위 논문으로 제출함

2021年 8月

한승범의 이학 박사학위 논문을 인준함

심사위원장	<u>문 재 홍</u>	(인)
위	<u>원 송 상 근</u>	(인)
위	<u>원 김 정 현</u>	(인)
위	<u>원 손 장 호</u>	(인)
위	<u>원 차 주 완</u>	(인)

제주대학교 대학원

2021年 8月

Meteorological mechanisms and physical and chemical
characteristics for haze occurrences in the Seoul
metropolitan area using numerical modeling

Seung-beom Han
(Supervised by professor Sang-Keun Song)

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Doctor of Science

2021. 8.

This dissertation has been examined and approved.

Department of Earth and Marine Sciences

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 재료 및 방법	
2.1. 연구방법 및 자료	
2.1.1. 대상지역 및 연무 발생일 선정	6
2.1.2. 연무 유형 분류	8
2.2. 모델 구성 및 입력자료	
2.2.1. 기상모델과 자료동화 방법	11
2.2.2. 대기질 모델	22
2.2.3. 건강 편익 분석 모델	29
2.2.4. 후방궤적 분석 모델	30
제 3 장 연무 발생 기상학적 메커니즘 및 대기질 분석	
3.1. 연무 유형별 종관기상학적 특성 및 기류패턴 분석	
3.1.1. 연무 유형별 특성	32
3.1.2. 대표 사례일의 기상분류조건, 종관특성, 기류패턴 분석	39
3.2. 연무 유형별 발생빈도, 대기질 및 기상 분석	
3.2.1. 유형별 발생빈도	52
3.2.2. 연무 유형별 기상 및 대기질 분석	55
제 4 장 수치모의를 통한 연무의 물리·화학적 특성 분석	
4.1. 연무 유형 대표사례의 미세먼지 농도 특성 분석	
4.1.1. 복합형 연무 사례	60

4.1.1.1. 건강 영향 평가	73
4.1.2. 정체형 및 수송형 연무 사례	76
4.2. 미세먼지 생성에 대한 물리·화학적 공정 기여도 분석	
4.2.1. 복합형 연무 사례	93
4.2.2. 정체형 및 수송형 연무 사례	100
4.3. 미세먼지 예측에 대한 기상장 자료동화 효과 분석	
4.3.1. 자료동화에 의한 기상변화 분석	119
4.3.2. 자료동화 적용한 미세먼지 농도 예측 및 영향 분석	128
제 5 장 요약 및 결론	139
참 고 문 헌	142
Abstract	154

List of Tables

Table 2-1. Population density statistics in 2015 (Unit: Number of people per km ²).	7
Table 2-2. Criteria for the classification of meteorological patterns into Local emission stagnation (LES), Long-range transport (LRT), and Mixed types (MIX).	10
Table 2-3. Details of the grids and physical options used in the WRF model.	16
Table 2-4. Details of the physical and chemical options in the CMAQ model.	25
Table 2-5. Integrated process rates process codes.	28
Table 3-1. Analysis of frequency, air quality, and meteorological conditions for six weather types in Seoul during 2010-2019.	33
Table 3-2. The characteristics of three haze types, Local emission stagnation (LES), Long-range transported (LRT), and Mixed types (MIX). These were classified based on the several categories, such as meteorological parameters, synoptic features, or airflow patterns, for the haze events during 2010-2019.	37
Table 3-3. Frequencies of the haze days for the Long-range transported (LRT), Local emission stagnation (LES), and Mixed types (MIX) during 2010-2019.	38
Table 3-4. Statistical summary of haze occurrences according to three haze types: Local emission stagnant, Long range transport, and Mixed types during 2010~2019 around Seoul in Korean peninsula.	53
Table 4-1. Summary (mean \pm 1 σ) of the concentrations ($\mu\text{g m}^3$) of PM ₁₀ , PM _{2.5} , SIA for PM _{2.5} , and meteorological variables between the observed (OBS) and model-predicted values (MOD) at GJ on haze and	

	non-haze days.	64
Table 4-2.	Statistical evaluation of meteorological variables and PM ₁₀ concentrations for the observed and model-predicted variables: results compared at six monitoring sites for the entire simulation period. The PM ₁₀ data sites represent six air quality monitoring sites within Seoul metropolitan region, including Seoul, Incheon, and Gyeonggi-do, as shown in Fig. 2-3. The meteorological monitoring sites are located 3 - 5 km away from the air quality monitoring sites.	73
Table 4-3.	Changes in the PM _{2.5} concentrations and premature deaths attributable to the haze event.	76
Table 4-4	Summary (mean ± 1s) of the concentrations (mg m ⁻³) of PM ₁₀ , PM _{2.5} , SIA for PM _{2.5} , and meteorological variables between the observed (OBS) and model-predicted values (MOD) at GJ on haze and non-haze days.	83
Table 4-5	Statistical evaluation of meteorological variables and PM _{2.5} concentrations for the observed and model-predicted variables: results compared at six monitoring sites for the entire simulation period. The PM _{2.5} data sites represent six air quality monitoring sites within Seoul, as shown in Fig. 2-3. The meteorological monitoring sites are located 3 - 5 km away from the air quality monitoring sites.	92
Table 4-6	Comparison of the integrated process rate (IPR) (μg m ⁻³ h ⁻¹) for PM _{2.5} and NO ₃ ⁻ obtained from six air quality monitoring sites on haze and non-haze days. The processes of the IPR include aerosol process (AERO), horizontal advection/diffusion (HTRA), vertical advection/diffusion (VTRA), primary emission (EMIS), cloud process (CLDS), and dry deposition (DDEP).	98
Table 4-7	Comparison of the integrated process rate (IPR) (μg m ⁻³ h ⁻¹) for PM _{2.5} obtained from total mean of six air quality monitoring sites (JG, GC, JN, DB, GJ, YC) on LRT_E1 and LRT_E2 of haze day. ..	103

Table 4-8 Comparison of the integrated process rate (IPR) ($\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$) for $\text{PM}_{2.5}$ obtained from six air quality monitoring sites on LES_E1 and LES_E2 of haze day.	116
Table 4-9 Comparison of the integrated process rate (IPR) ($\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$) for $\text{PM}_{2.5}$ obtained from six air quality monitoring sites on LRT_E1 and LRT_E2 of haze day.	117
Table 4-10 Comparison of the integrated process rate (IPR) ($\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$) for SIA for $\text{PM}_{2.5}$ (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+) obtained from total mean of six air quality monitoring sites (JG, GC, JN, DB, GJ, YC) on LRT_E1, E2 and LRT_E1, E2 of haze day.	118
Table 4-11 Statistical evaluation of the meteorological variables between the observed and simulated values for WRF-NODA and WRF-DA cases: results compared at several monitoring sites (“All”, 20 sites each for meteorological variables, including JG, GC, JN, DB, GJ and YC (for meteorological variables) during the entire simulation period (February 26 – March 24, 2019).	126
Table 4-12 Statistical evaluation of the $\text{PM}_{2.5}$ concentrations between the observed and simulated values for WRF-NODA and WRF-DA: results compared at several monitoring sites (“All”, 20 sites each for $\text{PM}_{2.5}$, including JG, GC, JN, DB, GJ and YC (for $\text{PM}_{2.5}$), during the entire simulation period (February 26 – March 8, 2019).	134

List of Figures

Fig. 2-1. Geographical locations of the meteorological monitoring sites (ASOS(red), AWS(white)) of the study region.	8
Fig. 2-2. WRF-ARW modeling system flow chart (ARW, 2015).	13
Fig. 2-3. The nested model domains for WRF and CMAQ simulations and the geographical locations of air quality (triangles) and meteorological monitoring sites (circles). The model domains and geographical locations of air quality monitoring sites (a): Nam-gu (NG), Bongsan-dong (BS), Haengshin-dong (HS), Gangbuk-gu (GB), Gwangjin-gu (GJ), Changjeon-dong (CJ) and another sites (b): Jung-gu (JG), Geumcheon-gu (GC), Jungnang-gu (JN), Dobong-gu (DB), Gwangjin-gu (GJ), Yangcheon-gu (YC) for air pollutants (solid circles) in the Seoul metropolitan region, including Seoul, Incheon, and Gyeonggi-do, South Korea. The meteorological monitoring sites (open triangles) are located 3-5 km away from the air quality monitoring sites.	17
Fig. 2-4. WRFDA in the WRF modeling system (ARW, 2015).	19
Fig. 2-5. ADP Global Upper Air and Surface Weather Observations in the WRFDA modeling system.	21
Fig. 2-6. CMAQ chemistry-transport model and associated preprocessors.	24
Fig. 2-7. The spatial distribution of anthropogenic emissions (kg day ⁻¹): (a) PM _{2.5} in the 3-km model domain (D4) and (b) PM _{2.5} in the 1-km model domain (D4).	27
Fig. 2-8. Overview of Environmental Benefits Mapping and Analysis Program (BenMAP) flow Diagram.	30
Fig. 3-1. Flow chart for the classification of three haze types, such as Long-range transport (LRT), Local emission stagnation (LES), and Mixed	

types (MIX) using four meteorological parameters (Vorticity, Vorticity advection, Geostrophic wind speed, Geostrophic wind direction), based on the haze events during 2010-2019.	35
Fig. 3-2. Spatial distributions of 850 hPa, 500 hPa vorticity and geostrophic wind speed & direction simulated by the WRF model of Local emission stagnation (LES) and Long-range transported (LRT) in the East Asia domain.	40
Fig. 3-3. Synoptic weather charts for East Asia and the study area on March 1, 2019 for Local emission stagnation (LES) of haze days.	43
Fig. 3-4. Synoptic weather charts for East Asia and the study area on March 5-6, 2019 for Long-range transported (LRT) of haze days.	45
Fig. 3-5. Synoptic weather charts for East Asia and the study area on January 13-16, 2013 for Mixed types (MIX) of haze days.	47
Fig. 3-6. Backward trajectories for three haze types: Local emission stagnant (a), Long range transport, and (c) Mixed types starting from Seoul.	51
Fig. 3-7. Annual variations in occurrence days for three haze types (LES, LRT, and MIX) observed during 2010-2019.	54
Fig. 3-8. Monthly variations in occurrence days for three haze types (LES, LRT, and MIX) observed during 2010-2019.	54
Fig. 3-9. Mean concentrations of PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ and NO ₂ for several weather types observed in Seoul during 2010-2019.	57
Fig. 3-10. Diurnal variations of observed air pollutant concentrations (PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ and NO ₂) of three haze types (MIX, LRT, and LES) during 2010-2019.	59
Fig. 4-1. Time series plot of (a) PM ₁₀ concentrations observed at the air quality monitoring sites of Nam-gu (NG), Bongsan-dong (BS), Haengshin-dong (HS), Gangbuk-gu (GB), and Changjeon-dong (CJ) and (b) the concentrations of PM ₁₀ , PM _{2.5} , and SIA (SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , and	

	NH ₄ ⁺) for PM _{2.5} observed at Gwangjin-gu (GJ) on January 10–17, 2013.	62
Fig. 4-2.	Time series plot of air temperature and wind speeds observed at six meteorological monitoring sites located 3–5 km away from the air quality monitoring sites of Nam-gu (NG), Bongsan-dong (BS), Haengsing-dong (HS), Gangbuk-gu (GB), Gwangjin-gu (GJ), and Changjeon-dong (CJ) on January 10–17, 2013.	63
Fig. 4-3.	Spatial distributions of the PM _{2.5} concentrations simulated for the 81-km model domain (D1) on January 10 - 15, 2013.	66
Fig. 4-4.	Spatial distributions of the model-predicted PM _{2.5} concentrations averaged from all grids in the 3-km model domain (D4) (a) for haze days (January 12–16, 2013), (b) non-haze days (January 10–11 and 17, 2013), and (c) the difference in PM _{2.5} concentrations between haze and non-haze days.	68
Fig. 4-5.	Spatial distributions of PM _{2.5} concentrations simulated at 15:00 LST on January 15–16, 2013 for haze days and January 10–11, 2013 for non-haze days.	69
Fig. 4-6.	Contributions (%) of long-range transport from China and local emissions in South Korea to PM _{2.5} concentrations at six air quality monitoring sites (NG, BS, HS, GB, GJ, and CJ) during the day and night on haze days.	71
Fig. 4-7.	Spatial distributions of (a) the differences in the area mean PM _{2.5} concentrations for haze (January 12–16, 2013) and non-haze days (January 10–11 and 17, 2013) (i.e., [PM _{2.5}] _{haze} - [PM _{2.5}] _{non-haze}) and (b) the number of premature deaths related to the difference in the PM _{2.5} concentrations.	75
Fig. 4-8.	Time series plot of (a) PM ₁₀ concentrations observed at the air quality monitoring sites of Jung-gu (JG), Geumcheon-gu (GC), Jungnang-gu (JN), Dobong-gu (DB), Gwangjin-gu (GJ) and	

Yangcheon-gu (YC) and (b) the concentrations of PM _{2.5} observed on February 26 to March 24, 2019.	78
Fig. 4-9. Time series plot of air temperature and wind speeds observed at six meteorological monitoring sites located 3–5 km away from the air quality monitoring sites of Jung-gu (JG), Geumcheon-gu (GC), Jungnang-gu (JN), Dobong-gu (DB), Gwangjin-gu (GJ) and Yangcheon-gu (YC) on February 26 to March 24, 2019.	79
Fig. 4-10. Spatial distributions of the PM _{2.5} concentrations simulated for the 27-km model domain (D1) on March 3–8, 2019.	81
Fig. 4-11. Spatial distributions of the model-predicted PM _{2.5} concentrations averaged from all grids in the 3-km model domain (D4) (a) for haze days (February 27–March 6, 11–12, 15, 19–20, 2019), (b) non-haze days (February 26, March 7–10, 13–14, 16–18, 21–24, 2019), and (c) the difference in PM _{2.5} concentrations between haze and non-haze days.	85
Fig. 4-12. Spatial distributions of PM _{2.5} concentrations simulated for 3-km model domain (D3) at 04:00 LST to 22:00 LST on March 1, 2019 for local emission stagnant of haze days.	87
Fig. 4-13. Spatial distributions of PM _{2.5} concentrations simulated for 1-km model domain (D4) at 04:00 LST to 22:00 LST on March 1, 2019 for local emission stagnant of haze days.	88
Fig. 4-14. Spatial distributions of PM _{2.5} concentrations simulated for 3-km model domain (D3) at 00:00 LST and 12:00 LST on March 5–6, 2019 for long range transport of haze days.	90
Fig. 4-15. Spatial distributions of PM _{2.5} concentrations simulated for 1-km model domain (D4) at 00:00 LST and 12:00 LST on March 5–6, 2019 for long range transport of haze days.	91
Fig. 4-16. Temporal changes in PM _{2.5} concentrations (mg m ⁻³ h ⁻¹) from various physical and chemical processes at six sites of Nam-gu (NG),	

Gwangjin-gu (GJ), Nam-gu (NG), Bongsan-dong (BS), Haengsing-dong (HS), Gangbuk-gu (GB), Gwangjin-gu (GJ), and Changjeon-dong (CJ).

..... 95

Fig. 4-17. Temporal changes in PM_{2.5} concentrations (mg m⁻³ h⁻¹) from various physical and chemical processes at six sites of Jung-gu (JG), Geumcheon-gu (GC), Jungnang-gu (JN), Dobong-gu (DB), Gwangjin-gu (GJ) and Yangcheon-gu (YC) in Seoul on haze days (February 26–March 24, 2019). 104

Fig. 4-18. Process analysis module’s contribution of PM_{2.5} change during LES_E1, E2 and LRT_E1, E2 trajectory moving (AERO (black), HADV (red), VTRA (green), EMIS (yellow), CLDS (blue), DDEP (pink)). · 105

Fig. 4-19. Time series plot of the observed and simulated air temperature at six meteorological monitoring sites (JG, GC, JN, DB, GJ and YC) (≤ 3 km away from the air quality monitoring sites) for NODA and DA cases during the entire simulation period (February 26 – March 24, 2019). 121

Fig. 4-20. Same as Fig. 4-19 except for relative wind speed. 123

Fig. 4-21. Same as Fig. 4-20 except for relative relative humidity. 125

Fig. 4-22. Time series plot of the concentrations of observed and simulated PM_{2.5}, including SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ in PM_{2.5} (Nudging case only) at four air quality monitoring sites (JG, GC, JN, DB, GJ and YC) for NODA and DA cases during the entire simulation period (February 26 – March 24, 2019). 131

Fig. 4-23. Spatial distributions of PM_{2.5} concentrations averaged from all grids in the 3-km model (D3) for haze days simulated on March 4–5, 2019 for NODA and DA cases. 137

Fig. 4-24. Spatial distributions of PM_{2.5} concentrations averaged from all grids in the 1-km model (D4) for haze days simulated on March 4–5, 2019 for NODA and DA cases. 138

1. 서론

대기 중에 부유하는 에어로졸은 지구의 복사 평형에 영향을 주어 기후 변화에 관여할 뿐만 아니라 대도시에 존재하면서 가시거리를 저해하는 시정악화 현상을 가져오며, 인체의 호흡기 질환 등 여러 면에서 유해한 영향을 미친다(이민희 등, 1986). 대기질을 악화시키는 에어로졸과 연관된 기상현상에는 황사, 연무, 박무, 안개 등이 있으며, 그 중 연무는 주로 상대습도 75% 미만의 조건에서 대기 중에 연기, 먼지 등의 미세한 고체 입자가 수증기와 함께 응집되면서 시정을 1~10 km 정도로 크게 감소시키고, 대기가 우윳빛으로 흐려 보이는 현상을 말한다(KMA, 2016). 또한 연무는 도시 대기오염물질의 오염원으로 인해 발생하는 고농도 미세먼지 현상으로 입자 크기가 약 1 μm 정도로 황사에 비해 매우 작은 크기이며, 주로 BC와 유기탄소(organic carbon, OC) 성분의 농도가 높은 편이다(Singh et al., 2010). 이러한 주요 성분들의 배출강도가 높은 도시지역은 배경(또는 시골)지역에 비해 에어로졸의 복사효과도 크게 나타나는 특성이 있다(Singh et al., 2010; Song et al., 2017).

근래 동북아시아 지역은 다량의 에어로졸이 배출되는 지역으로서 최근 빈발하는 연무현상으로 고농도 에어로졸에 의한 건강피해나 지역적인 기후변화 문제가 사회적 이슈로 부상하고 있다(Charlson et al., 1992; IPCC, 2013). 특히, 중국지역은 식물과 동물의 활동, 화산, 산불, 황사, 해염입자 등 자연에서 발생하는 에어로졸뿐만 아니라, 최근 빠른 경제성장으로 인한 산업 활동 그리고 겨울철 댐감을 이용한 난방 등의 주거활동에 의해 다량의 인위적 에어로졸이 배출되고 있다. 이러한 에어로졸은 대기중 체류시간이 짧고 시·공간적인 변동성이 크기 때문에 지역적인 기상 및 기후 변화를 야기하기도 한다. 또한 태양 복사광을 산란 또는 흡수하는 직접효과와 구름의 생성과 수명을 변화시키는 간접효과(Twomey et al., 1974)를 통해 직·간접적 복사강제력(radiative forcing, RF)을 발생시키는(So et al., 2020) 등 지구 에너지 수지 변화에 영향을 줄 수 있다(Anderson et al., 2003; Charlson et al., 1992).

한반도는 북반구 중위도의 편서풍대로 중국의 풍하측에 위치하여 다양한 경로를 통해 에어로졸(예, PM_{10} , $PM_{2.5}$)이 유입 될 수 있다. 주로 $PM_{2.5}$ 의 고농도 현상을 나타내는 연무는 황사(주로 고농도 PM_{10})와 달리 주로 도시나 공업지대로부터 연기, 자동차 배기가스 등 인위적 오염물질에 의해 발생하는 미세먼지까지 포함하는 개념으로, 수도권 지역은 중국으로부터의 외부 유입과 함께 도시화 효과에 의한 국지배출 등 직·간접적 영향을 받고 있어 연무현상을 명확하게 이해하기 힘든 경우가 많다(김병곤, 2012). 이러한 국내의 극심한 연무현상은 지역 대기질을 악화시켜 광범위의 악 시정을 유발하고 매우 작은 크기로 인한 천식과 기관지염 등의 호흡기 질환을 유발시켜 인체 호흡기에 해로운 영향을 미친다(Lee et al., 2014; Pope and Dockery, 2006; Quan et al., 2014; Yang et al., 2015; Zhang et al., 2012).

현재까지 국내에서는 연무 등 에어로졸에 관한 많은 연구가 지속적으로 진행되어 왔으며, 여러 문헌을 통해 연무현상의 기상조건, 배출량 및 영향 등 다양한 선행연구가 보고된 바 있다. Moon 등(2011)은 서울 지역의 $PM_{2.5}$ 측정 자료를 분석하여 배출원별 기여도를 추정하였고, Kang 등(2011)과 Baek 등(2011)은 각각 광양 및 포항 지역의 $PM_{2.5}$ 농도 분포 특성을 분석하였다. 이러한 연구들은 대부분 대도시 또는 산업 지역을 대상으로 하고 있기 때문에 대상지역 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국지 배출원의 영향을 중점적으로 분석하였다. 한편, Hwang 등(2008)은 청정 배경 지역인 이어도에서 측정된 $PM_{2.5}$ 자료를 이용하여 장거리 수송 공기 궤의 $PM_{2.5}$ 화학 조성에 대해 분석하였고, Lee 등(2012)은 후방궤적 분석을 통해 충주 지역의 $PM_{2.5}$ 고농도가 중국 배출량의 장거리 수송에서 기인하고 있음을 파악하였다. 또한, Song 등(2014)은 제주지역의 PM_{10} 농도는 국지적 오염물질 배출에 의한 영향보다는 수송에 의한 외부유입과 야간 잔류층으로부터 연직이류 등의 기상조건이 큰 영향을 준다고 밝힌 바 있다. 이외에도, Park 등(2016)은 제주도의 PM_{10} 농도와 국지기상의 장기변화 경향 및 시·공간적 특성을 파악하고, 장기간의 농도변화에 영향을 주는 국지기상의 특성을 상세하게 살펴보았다. 그밖에 연무에 대한 물리·화학적 및 광학적 특성에 관한 연구로는 OPC (optical particle counter), APS (aerodynamic particle sizer), SMPS (scanning mobility particle sizer) 등을 이용한 에어로졸의 크기분포 (Kim et al., 2007; Lee et al., 2008)와

PM₁₀/PM_{2.5} 샘플러를 이용한 질량농도 및 화학조성(Kim et al., 2006; Han et al., 2006), 스카이라디오미터나 라이다 관측을 통한 에어로졸 광학 두께와 소산계수, 연직분포에 관한 연구(Kim et al., 2007; Won et al., 2004) 등이 이루어 졌다.

국외 연구로는 최근 중국에서 심각한 연무 오염의 생성 기작을 조사하기 위한 연구가 광범위하게 수행되어 왔다. 예를 들어, Gustafsson et al. (2009)은 남아시아에서 발생한 연무의 주요 원인이 바이오매스와 화석 연료의 연소로부터 발생한 탄소성 에어로졸의 배출량이라고 밝힌 바 있다. Yang et al. (2011)은 중국의 대표적인 거대 도시들에서 복잡한 대기오염과 2차 에어로졸 생성이 연무의 주요 원인이라고 하였다. 또한 2013년 초가을에 중국 베이징에서 발생한 전형적인 연무 오염 사례를 조사한 결과에 의하면, 휘발성 유기화합물, 질소산화물 및 황 황산화물로부터 생성된 2차 에어로졸 입자의 영향이 1차 배출원과 지역적 수송(regional transport)에 의한 영향보다 더 중요하다고 하였다(Guo et al., 2014). 같은 해 1월에 중국 베이징에 나타난 연무 오염에서 PM_{2.5}의 약 30~50%가 2차 수용성 이온 성분에 해당하였음을 밝혔다(Han et al., 2021; Ji et al., 2014; Tian et al., 2014; Yang et al., 2015).

국외 연무현상의 미세먼지에 대한 환경적 원인 및 영향을 분석하기 위한 연구로는 기상-대기질 모델링을 활용한 많은 연구가 수행되어왔다(Koo et al., 2008; Wang et al., 2012; Wang et al., 2014; Yu et al., 2019). 과거 10년간(2001~2010년) 중국 허베이 남부의 연무현상(시정 10 km 이하의 안개, 박무 등 제외)을 대상으로 인근 지역(베이징, 톈진, 산둥성 등)의 배출량 조절의 민감도 실험을 수행하였다. 그 결과, 이 지역은 자체 배출에 의한 기여보다 다른 지역에서의 오염물질 수송 영향이 더 크게 기여한 것으로 나타났다(Wang et al., 2012). 2013년 1월 중국에서 발생한 극심한 연무사례의 수치모델링 연구에서는 에어로졸의 피드백(feedback) 효과에 의한 기상변화가 고농도 PM_{2.5}(입자크기 2.5 μm 미만의 먼지)를 유발시켰음을 보였다(Wang et al., 2014).

대기질 모델(예, CMAQ)의 공정분석(PA: process analysis)을 활용한 연구로서, 김유근 등(2010)은 봄철과 여름철의 고농도 오존 사례에 대한 발생 과정 차이를 비교하기 위하여 봄철 8시간 기준을 초과한 양산과 응상 지역을 대상으로 오존 발생 과정별 기여도 평가 결과, 양산지역은 수직 확산, 수평 이류가 농도상승의

가장 큰 기여도를 보임을 발견하였다. 정여민 등 (2010)의 연구에서는 수도권 지역을 대상으로 배출량 저감 효과에 따른 오존농도의 변화를 평가하였으며, 서울 및 경기도의 도시지역을 대상으로 PA 분석을 통해 지역별 오존의 주요 생성과정을 분석하였다. 이렇듯 국내에서 진행된 대기질 모델의 PA 분석 연구를 살펴본 결과, 오존의 생성과정의 물리적 과정에 대한 집중적인 분석은 많이 진행되었으나 미세먼지(PM_{2.5})에 대한 대기화학적 분석 연구는 드물었고, 특히 미세먼지의 활발한 수용지(Receptor area)에 대한 수치모델을 이용하여 물리적·화학적 특성을 배출원(Source area)과 연관 시켜 이해하는 연구는 부족한 실정이었다. 앞서 설명하였듯이 우리나라의 연무 발생은 지리적 특성상 자체 배출량에 의한 기여도뿐만 아니라 중국으로부터 장거리 수송에 따른 기여도 경향이 매우 심한 상황으로 수치모델링을 통한 정량적 영향 연구가 연무 발생의 원인 물질 저감 차원에서 매우 중요하다고 사료된다.

기상-대기질 모델링을 통한 연무 현상의 원인과 영향을 정확하게 분석하는 것은 다양한 관측망의 부족, 화학적 상호작용, 배출량 및 기상모델 모의의 불확실성, 수치모델 자체의 예측 한계 등 여러 가지 오차를 포함하고 있어 매우 복잡하고 어렵다(Pun et al., 2006). 이러한 문제 중 기상모델의 결과는 대기질 모의의 초기 입력자료로 사용되어 오염물질의 확산, 침적, 수송 등 광화학 반응에 큰 영향을 미치므로 실제 대기의 관측값과 가까운 현실적인 기상모델의 결과를 생성하는 것은 매우 중요하다(Jeong et al., 2016; Jeon et al., 2011). 이에 많은 연구자들은 실제 대기와 유사한 기상모델을 모의하기 위해 다양한 연구들을 수행하여 왔다(Mun et al., 2020; Jo et al., 2017). 특히, 대기질 모의 정확도 향상을 위해 기상모델의 초기 및 경계조건을 개선시키는 방법으로 알려진 자료동화기법을 활용한 많은 연구들이 수행되어 왔다(Jeon et al., 2015; Kim et al., 2016; Lee et al., 2009; Otte, 2008). Otte (2008)은 기상모델의 분석 넛징(analysis nudging)을 적용한 수치모의 결과가 분석 넛징을 적용하지 않은 결과에 비해 기상요소(기온, 풍속 등)는 물론 시간별 및 일 최고 오존농도의 모의 정확도가 향상되었음을 보였다. Lee et al. (2009)은 기상 관측 및 MODIS 위성자료를 이용한 분석 넛징과 관측 넛징을 적용하여 기상모델을 개선하였고, 이를 통해 오존농도 모의가 향상되었음을 밝혔다. Kim et al. (2016)의 연구에 따르면, 2012년 봄철(4~5월) 오존

수치모의에 있어 넷징의 종류(관측 넷징, 분석 넷징)와 등지 격자 영역(domain)에 따른 자료동화 효과를 분석한 결과, 관측 넷징에 비해 모든 영역에 대하여 분석 넷징을 적용하였을 때 가장 향상된 결과를 보였다. 이외에도, 기상모델의 분석 넷징 자료동화를 적용한 기상장 개선(변화)은 PM_{2.5} 수치모의에 있어 관측 농도와 가깝게 향상된 모의결과를 가져왔다(Jeon et al., 2015).

본 연구에서는 최근 10년(2010~2019년)간 우리나라의 대도시인 서울 지역에서 나타난 연무 사례일에 대해 연무 유형별 분류조건과 일기도를 이용한 크게 3가지(정체형, 수송형, 복합형) 연무 유형을 분류하고, 각 유형별 발생빈도와 기상 및 대기질 특성을 살펴보았다. 또한 대상 지역을 중심으로 유형별 연무 발생과 관련한 기상학적 메커니즘을 분석하였다. 즉, 연무 사례 시 국내 자체배출의 영향이 우세한 사례(이하 정체형 사례), 장거리 수송이 우세한 사례(이하 장거리 수송형 사례), 그리고 두 사례가 복합적으로 나타난 사례(이하 복합형 사례)에 대해서 종관기상 특성을 분석하고, 대상 지역의 대기오염물질(예, SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, PM₁₀) 농도 수준과 변화를 유형별로 살펴보았다. 이것은 연무에 대한 기상상태별 장거리 수송 등과 같은 외부요인을 추정할 수 있는 중요 요인을 찾을 수 있을 뿐만 아니라 이와 관련된 대기질 수준 및 농도 특성 경향에 대한 지역적 특성까지 밝혀줄 것으로 판단된다. 또한 연무 유형별(정체 및 수송형과 복합형) 대표적인 사례를 선정하고, 대기질 모델의 PA 분석을 통해 미세먼지(예, PM_{2.5}) 생성에 관한 물리·화학적 공정의 상대적 기여도를 정량적으로 분석하였다. 마지막으로 연무 유형 대표 사례 시 기상모델의 자료동화(분석 넷징, 3차원 변분자료동화 등) 적용과 적용하지 않은 수치모의 결과를 통해 주변지역 기상변화에 미치는 자료동화 효과를 분석하였으며, 이러한 개선에 따른 국지기상 변화가 미세먼지 (PM_{2.5}) 수치모의에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구방법 및 자료

2.1.1. 대상지역 및 연무 발생일 선정

본 연구에서는 장기간(2010~2019년) 동안 연무의 발생을 동북아시아 장거리 수송과 한반도 대도시의 국지적 배출을 염두하고 진행하였다. 특히, 우리나라 대도시의 대표 지역인 서울지역은 한반도에서 가장 높은 인구밀도를 차지하는 도시이며 중부지방에 속하는 경기 지역에 속해있다(표 2-1). 따라서 수많은 인구가 밀집되어있는 대도시의 특성으로 인해, 서울 지역의 연무 현상은 주로 인위적 오염물질의 여러 형태와 자체 배출량에 의한 반응에 의해 연관되어 있으며 지리적 특성으로 인해 중국 기원의 장거리 수송 영향을 함께 받는 특징이 있다.

연무 발생일의 선정 및 일기유형에 대한 기상 및 대기질 특성을 파악하기 위해 서울지역의 지상기상관측자료를 사용하였다. 연무일은 ASOS (Automated Synoptic Observing System)의 일기 현상 자료와 도시대기측정망의 PM_{2.5} 농도 자료를 이용하여 정하였는데, ASOS 일기 현상의 “40”에 해당하고 환경부 대기환경기준치(일평균 PM_{2.5} 농도: 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 초과하는 날을 연무일로 정하였다. 일기유형에서 연무와 박무 및 안개의 구분을 위해 연무는 상대습도 75% 미만, 시정 1 km 이상 10 km 미만, 박무는 상대습도 75% 이상, 시정 1 km 이상 10 km 미만, 안개는 상대습도 75% 이상, 시정 1 km 미만으로 처리하였다(기상청, 2002). 그 외 대상 지역의 종관패턴을 알아보기 위해 종관 기본일기도(850 hPa, 500 hPa) 및 보조일기도를 사용하였다.

연무와 연무 이외의 일기유형에 대한 기상 및 대기질 수준을 비교하기 위해 6가지 일기유형(강수, 연무, 박무, 황사, 맑음, 구름)를 구분하여 유형별로 발생일을 분류하였다. 또한, 일기유형별로 연무일과 박무, 황사 등 연무 이외의 일기유

형 비교를 위한 기상 및 대기질 특성을 살펴보았는데, 기상 변수는 기온 (Temperature), 풍속(Wind speed), 상대습도(Relative humidity)의 시간별 자료를 사용하였고, 대기오염물질의 특성을 분석하기 위해 서울 전역을 포함하는 대기질 측정망 자료(그림 2-1)를 이용하였다. 이 자료는 환경부 산하 서울지역의 20개 측정소에서 측정한 시간별 PM₁₀ (2010~2019년)과 PM_{2.5} (2015년부터 관측) 농도 자료이다. 또한 이러한 측정 자료는 연무 사례시의 수치 모델링을 통한 모의결과와의 비교 검증에 이용되었다. 연무 사례의 수치모의를 위한 모델 구성은 2.2절에 나타내고 있다.

Table 2-1. Population density statistics in 2015 (Unit: Number of people per km²).

Administrative district	Population Density	Administrative district	Population Density
Nationwide	509.2	Gyeonggi-do	1226.4
Seoul	16364.0	Gangwon-do	90.2
Busan	4479.9	Chungcheongbuk-do	214.6
Daegu	2791.0	Chungcheongnam-do	256.6
Incheon	2755.5	Jeollabuk-do	227.4
Gwangju	2998.8	Jeollanam-do	146.1
Daejeon	2852.3	Gyeongsangbuk-do	140.8
Ulsan	1099.6	Gyeongsangnam-do	316.4
Sejong	439.0	Jeju	327.5

Source: Population Density Statistics (2015)

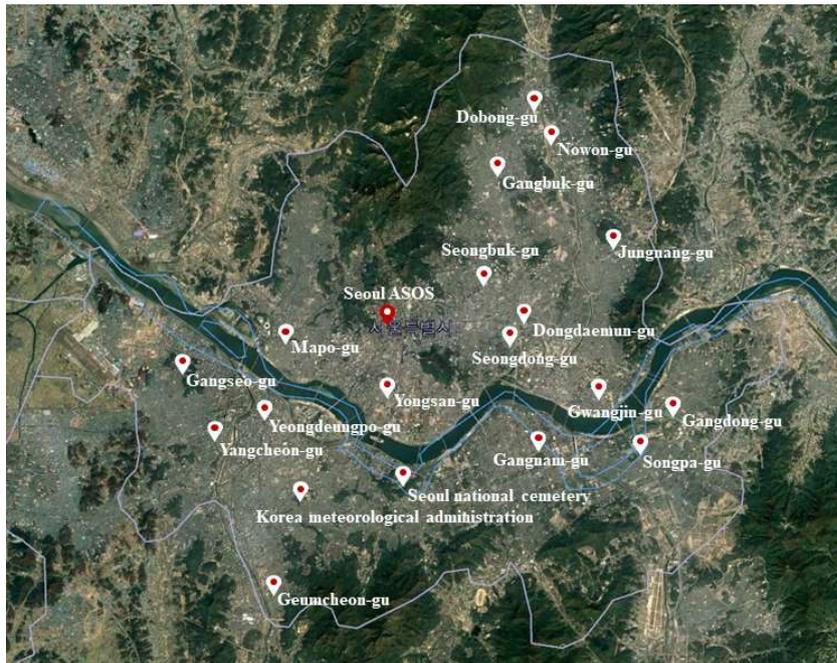


Fig. 2-1. Geographical locations of the meteorological monitoring sites (ASOS(red), AWS(white)) of the study region.

2.1.2. 연무 유형 분류

본 연구에서는 연무 발생일을 발생원에 따라 세 가지로 분류하였다. 먼저 연무의 주요 발생원이 우리나라 대도시의 배출량 그 자체에 있는 사례로서, 한반도 상공에 위치한 정체성 고기압의 존재로 인해 배출된 오염물질이 낮은 환기효과(ventilation effect)를 통해 대기오염물질의 수송과 확산이 원활하지 않게 되는 정체성 사례(LES: Local Emission Stagnant)와, 연무 발생과 연관된 물리·화학적 기여도가 중국을 포함한 외부에 의한 수송의 영향을 크게 받는 장거리 수송 사례(LRT: Long-range Transport)이다. 마지막으로 연무 발생일 동안 수송 및 정체 현상이 일정하게 지속되지 않고 복합적으로 형성되는 사례를 복합형 연무사례(MIX: LRT+LES)로 선정하였다. 정체형 연무사례의 경우 지표와 가까운 하층 대기(예를들어, 850 hPa)에서의 종관풍이 약하고 해당 지역 상공의 정체성 고기압으로 인해 상층 대기의 침강을 동반하여 대기가 전반적으로 안정한 경우가 대부분이며, 반대로 장거리 수송형 사례는 서풍 계열의 강한 풍속과 상대적으로 큰

상승기류를 통해 미세먼지가 국내로 유입되는 사례이다.

연무 발생에 관한 메커니즘을 정체형 사례와 장거리 수송형 사례 및 복합형 사례로 선정하기 위한 분류조건(표 2-2)으로 와도(vorticity), 와도이류(vorticity advection), 지균풍속(geostrophic wind speed), 지균풍향(geostrophic wind direction)을 사용하였다(Davis et al., 1993; Sanchez et al., 1990). 또한, 보다 정확하게 연무 유형을 분류하기 위하여 종관 특성을 살펴보았으며, 이를 위해 850 hPa 일기도와 우리나라를 포함한 동북아시아 지역의 NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) FNL 재분석 격자 자료를 동시에 사용하였다. 정체형 사례일은 먼저 FNL 재분석 자료에서 한반도 상공의 850 hPa 와도(vorticity, $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$)를 구하여 그 부호가 음수(-) 이고, 850 hPa 지균풍속이 4 m/s 이하인 날로 선정하였으며, 수송형 사례일은 와도의 부호가 양수(+) 이고 850 hPa 지균풍속이 4 m/s 이상인 날로 선정하였다(Jo and kim, 2011). 일반적으로 음의 와도와 양의 와도가 나타내는 의미는 다음과 같다. 먼저 음의 와도는 대상지역(우리나라 수도권) 상공의 기류가 고위도로 갈수록 절대와도를 보존하기 위해 상대와도의 감소를 일으키고, 상층 기압능을 지나면서 수렴이 형성되어 하강기류를 일으켜 결국 지상 부근에 시계방향의 고기압성 와도가 생성되는 것을 의미한다. 즉 한반도 주변에 고기압이 존재하는 특성이 있다. 반면, 양의 와도는 기류의 발산이 형성되어 상승기류를 일으켜 결국 지상 부근에 반시계 방향의 저기압성 와도가 생성되는 것을 의미한다. 즉, 한반도 주변에 저기압으로 인한 대기 불안정의 특성이 나타난다. 정체형 및 수송형으로 명확하게 분류되지 않는 날은 850 hPa의 와도이류(vorticity advection, $\nabla\zeta = u\frac{\partial\zeta}{\partial x} + v\frac{\partial\zeta}{\partial y}$)와 지균풍향을 계산하여 상층 대기에서의 이동성 여부를 최종 판단하였다. 여기서, 지균풍속 ($|V| = \sqrt{u_g^2 + v_g^2}$)은 대상지역의 서울(37.5°, 127.5°)을 중심으로 한 주변 4개의 격자점을 이용하여 지균풍의 동서(u_g) 및 남북(v_g) 성분을 통해 계산하였고, 지균풍향(θ)은 $\tan^{-1}(u_g/v_g)$ 를 이용하여 구하였다. 마지막으로 복합형 사례일은 일기도의 종관 패턴과 NOAA/ARL에서 제공하는 HYSPLIT-4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated

Trajectory) 모델의 후방궤적 분석을 통해 수송 및 정체형 사례가 복합적으로 3일 이상 유지되는 날로 선정하였다. 기타 분류되지 않은 사례는 본 연구의 분석에서 제외하였다(Jo and Kim., 2010).

Table 2-2. Criteria for the classification of meteorological patterns into Local emission stagnation (LES), Long-range transport (LRT), and Mixed types (MIX).

Types	Meteorological parameters	Criteria
LES (Local Emission Stagnation)	Vorticity (ζ)	< 0 (anti-cyclone)
	Vorticity advection	< 0
	Geostrophic wind speed	< 4.0 m/s
	Geostrophic wind direction	Unclassifiable
LRT (Long Range Transport)	Vorticity (ζ)	> 0 (cyclone)
	Vorticity advection	> 0
	Geostrophic wind speed	> 4.0 m/s
	Geostrophic wind direction	225°–330°
MIX		LES + LRT

2.2. 모델구성 및 입력자료

2.2.1. 기상모델과 자료동화 방법

본 연구에서는 연무 현상의 종관기상학적 발생 원인을 보다 상세히 분석하기 위해 중규모 기상모델 WRF(Weather Research & Forecasting model) version 3.6을 사용하였다. WRF 모델은 1970년대 초반 미국 국립기상연구소 NCAR와 국립환경예측센터 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 공동으로 개발한 모델로 기상에 관한 연구와 현업예보 모두에 적용될 수 있도록 설계된 수치기상예측모델이다. 그리고 이 모델은 ARW (Advanced Research WRF)와 NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model) 두 가지의 역학 코어 (dynamical cores), 자료동화시스템 그리고 병렬계산과 시스템 확장이 가능한 소프트웨어 아키텍처를 갖고 있다. 또한 WRF 모델은 수 미터에서 수천 킬로미터까지의 다양한 범위의 기상학적 스케일에 대해 적용이 가능한 장점이 있다. WRF는 1990년대 후반에 개발되기 시작하였으며 NCAR (National Center for Atmospheric Research), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), AFWA (Air Force Weather Agency), NRL (Naval Research Laboratory), OU (University of Oklahoma) 그리고 FAA (Federal Aviation Administration) 등에 의해 공동개발되었다. WRF 모델은 Arakawa-C 격자체계를 사용하며, 연직격자로는 Eulerian 질량 좌표계를 사용한다(Skamarock et al., 2008). 수치계는 3차 Runge Kutta split-explicit 시간 적분을 사용하여 이류항에 대해서 6차 중심 차분법을 도입하였고, 플럭스 형태의 진단 방정식을 사용하여 질량, 운동량, 엔트로피, 스칼라양을 보존한다. WRF 모델링 시스템 흐름은 그림 2-2 과 같다.

WRF 의 기본적인 구성은 전처리 과정인 WPS (WRF Preprocessing System)와 모델 수행단계 과정이다. WPS 는 WRF 모델의 전처리 입력 자료로, 3단계의 프로그램으로 구성되어있다. 먼저 지형 및 토지피복도 등의 지형 경계 자료 생성을

위한 GEOGRID 는 예측하고자 하는 대상 영역을 설정하는 단계이다. UNGRIB 는 초기 추정 입력 값으로부터 등기압면의 기상자료를 생성한다. WPS 의 마지막 단계인 METGRID 는 GEOGRID 에 의해 설정된 모델 격자에 UNGRIB에 의해 정리된 기상장을 METGRID.TBL 등기압면의 수평 격자점 자료로 내삽 하는 과정이다. 그 후 전처리 과정의 WPS 에서 생성된 METGRID 자료를 이용하여 진단적 계산과 연직적인 내삽과정을 통하여 자료의 재구성 등의 작업을 수행하는 REAL 단계를 거치게 되는데, REAL 작업으로부터 WRF의 초기값과 경계조건입력 자료가 생성되면 WRF 에서 생성된 자료를 수치 적분하여 사례일 내의 기상 상태를 모사한다(WRF-ARW V3: User's Guide, 2015; 윤민지, 2010; 손고은, 2014). WPS 의 마지막 단계인 METGRID 를 통해 생성된 초기 입력 자료와 경계 자료를 바탕으로 자료동화 과정인 WRF-3DVAR를 통해 지상 및 상층 관측 자료를 WRF 에 입력시켜 모델링을 수행한다. 마지막으로 후처리 과정에 포함되어 있는 그래픽 유틸리티인 NCL, ARWpost, RIP 등과 함께 3차원 동적 그래픽 시뮬레이션 구현을 가능하게 해주는 VAPOR 및 모델링 통계검증을 위한 MET 등의 다양한 유틸리티가 함께 제공되고 있다.

WRF Modeling System Flow Chart

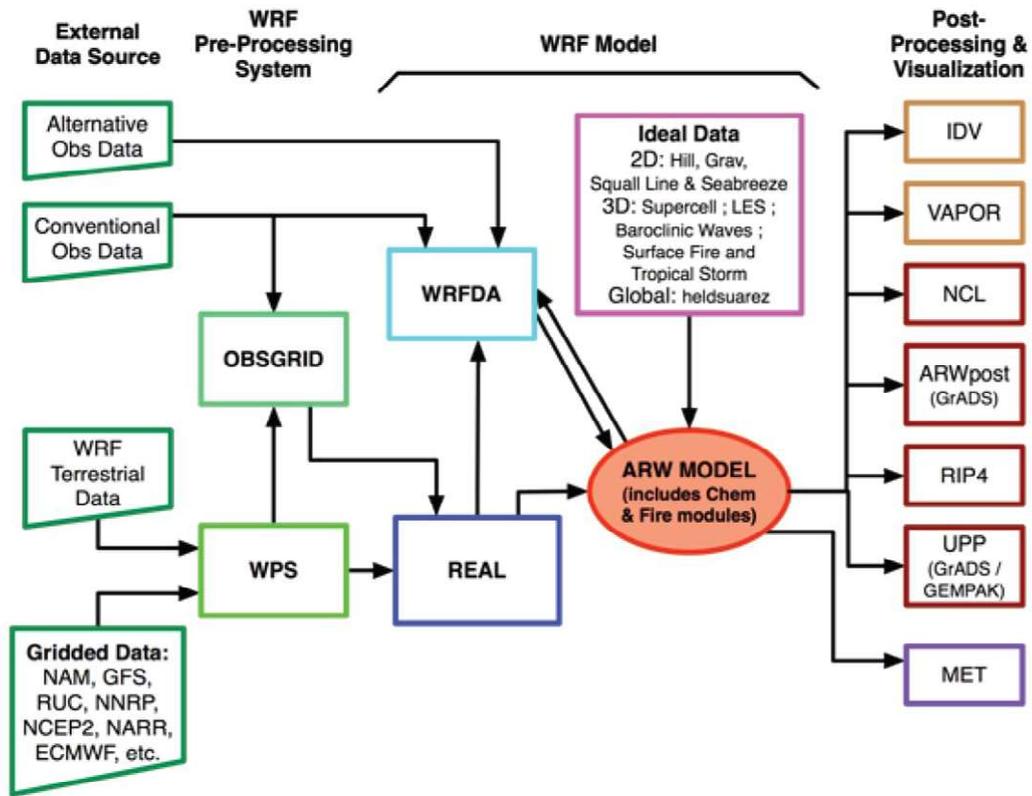


Fig. 2-2. WRF-ARW modeling system flow chart (ARW, 2015).

본 연구에서 WRF 모델의 초기/경계 자료에 사용된 입력 자료는 시·공간 해상도와 수집의 용이성을 고려하여 NCEP에서 제공하는 NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research)의 FNL 재분석 자료(6시간 간격, 1.0°×1.0°의 해상도)를 이용하였다. 모델링 기간은 복합형 연무 사례의 경우 3일간의 초기적응시간(spin-up time)을 제외하고 2013년 1월 09일 00 LST 부터 1월 18일 00 LST 까지 선정하였고, 정체형 및 수송형 사례일의 경우 10 일간의 초기적응시간(spin-up time)을 고려하여 2019년 2월 25일 00 LST 부터 3월 25일 00 LST 로 선정하였다. 또한, 정체형 및 수송형 연무 사례에서는 기상 및 대기질 수치모의의 정확도 향상을 위해 기상모델의 자료동화를 실행하였다. 자료동화는 우선적으로 기상모델의 초기 조건과 경

계 조건의 정확도 향상이 목적이며, 대기의 흐름을 실제와 가깝게 얻기 위해 이용 가능한 모든 정보들을 활용한다.

본 연구에서의 복합형 연무사례(2013년)와 정체 및 수송형 연무사례(2019년)의 연구 도메인과 모델 구성은 다음과 같다. 복합형 연무사례(2013년 사례)의 경우 LCP(Lambert Conformal Projection) 좌표계를 토대로 총 4개로 구성하였고, 동아시아 영역(D1, 140×118, 수평해상도 81 km), 한반도 영역(D2, 172×160, 수평해상도 27 km), 남한 영역(D3, 151×172, 수평해상도 9 km)과 수도권 영역(D4, 130×97, 수평해상도 3 km)으로 구성하였다(그림 2-3). 정체형 및 수송형 연무 사례(2019년 사례)는 동아시아 영역(D1, 58×44, 수평해상도 27 km), 한반도 영역(D2, 61×55, 수평해상도 9 km), 남한 영역(D3, 67×73, 수평해상도 3 km), 서울 영역(D4, 64×58, 수평해상도 1 km)로 구성하였다. 모델의 연직층은 총 30층으로 설정하였고, 대기오염물질의 시·공간 분포에 영향을 크게 미치는 대기경계층 내에서의 기상조건 및 공기괴의 연직흐름을 정확히 모의하기 위하여 대기하층 1 km 고도 이하는 11개 층(Sigma level=0.996, 0.990, 0.980, 0.970, 0.960, 0.950, 0.940, 0.930, 0.920, 0.910, 0.895)으로 조밀하게 구성하였다. 또한 본 연구의 특성상 해양 입력 자료의 정확도는 연무의 예측정확도에 크게 영향을 미칠 것이라 판단하여 FNL에서 기본적으로 제공하는 SST (Sea Surface Temperature)가 아닌 0.05°×0.05°의 수평공간해상도를 갖는 OSTIA-SST (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) 자료를 사용하였다.

모델 수행에서 토지피복도는 USGS (US Geological Survey)에서 제공하는 24개의 유형별 지표면 land-use 3초 자료를, 지형자료는 USGS의 3초 지형자료를 이용하였다(USGS, 2008). 모델의 적분과정에 사용된 물리 옵션은 표 2-3 과 같다. 미세물리과정(Microphysics)은 중규모 격자에서 얼음 생성과 눈 생성 모의에 적절한 WRF Single-Moment 3-class scheme을 최상위 도메인에 사용하였고(Hong, et al., 2004), Milbrandt-Yau Double-Moment 6-class scheme을 하위 도메인에 적용하여 작은 공간 규모에서 더욱 현실적인 모수화가 가능하도록 하였다(Milbrandt and Yao, 2005). 구름물리(Cumulus) 모수화 과정은 Kain-Fritsch 구름물리 모수화를 사용하였으며(Kain, 2004) 지표층(Surface layer) 모수화 과정은 Monin-Obukhov Surface layer scheme (Monin and Obukhov, 1954), 단파 및 장

과 모수화는 RRTMG를 사용하였다(Iacono et al. 2008). Land surface 모델은 지표의 수증기 flux와 열flux를 잘 모의하는 Noah-LSM을 사용하였으며, 마지막으로 대기경계층 (Planetary Boundary layer) 옵션은 YSU 모수화를 전 도메인에 설정하였다(Hong et al., 2006).

기상 및 대기질 모델의 모의결과 검증을 위해, 두 사례에 대한 수도권(2013년 사례) 및 서울지역(2019년 사례)의 총 20개 관측지점(그림 2-1)에서의 대기오염물질 농도와 기상요소(기온, 바람, 상대습도 등) 자료를 이용하여 통계적 분석을 수행하였다. 또한 보다 상세한 분석을 위해 두 사례에 대한 주요 6개 대기질 관측지점을 선정하였다. 2013년 사례에서는 수도권 내 남구(NG: Nam-gu), 봉산(BS: Bongsan-dong), 행신(HS: Haengshin-dong), 강북(GB: Gangbuk-gu), 광진(GJ: Gwangjin-gu), 창전(CJ: Changjeon-dong)으로 선정하였고, 2019년 사례에서는 서울지역을 중심으로 중구(JG: Jung-gu), 금천(GC: Geumcheon-gu), 중랑(JN: Jungnang-gu), 도봉(DB: Dobong-gu), 양천(YC: Yangcheon-gu), 광진(GJ)으로 선정하였다. 기상 관측지점은 선정된 대기질 관측지점으로부터 가장 가까운(약 3-5km 내 위치) 지점으로 선정하였다. 통계적 분석은 기상요소 및 PM_{2.5} 농도의 각 관측값과 모델값에 대해 IOA (index of agreement), RMSE (root mean square error), MBE (mean bias error)를 분석하는데, 0과 1 사이의 값을 가지는 IOA는 1에 가까울수록 모델값과 관측값 사이에 일치도가 높음을 의미하며, RMSE와 MBE는 0에 가까울수록 오차가 작아 서로 유사함을 의미한다. 또한 양(+)의 MBE는 과대모의를 나타내고 음(-)의 MBE는 과소모의를 나타낸다.

Table 2-3. Details of the grids and physical options used in the WRF model.

		D1	D2	D3	D4
Horizontal grid	Case 1	140×118	142×145	136×142	91×43
	Case 2	58×44	61×55	67×73	64×58
Horizontal Resolution (km)	Case 1	81	27	9	3
	Case 2	27	9	3	1
Vertical layers			30		
Microphysics		WSM3		WDM6	
Short wave radiation			Dudhia		
Long wave radiation			RRTM		
Planetary Boundary Layer			YSU		
Land surface		Noah Land Surface Model			
Surface layer		Monin–Obukhov			
Cumulus		Kain–Fritsch scheme for D1 and D2			

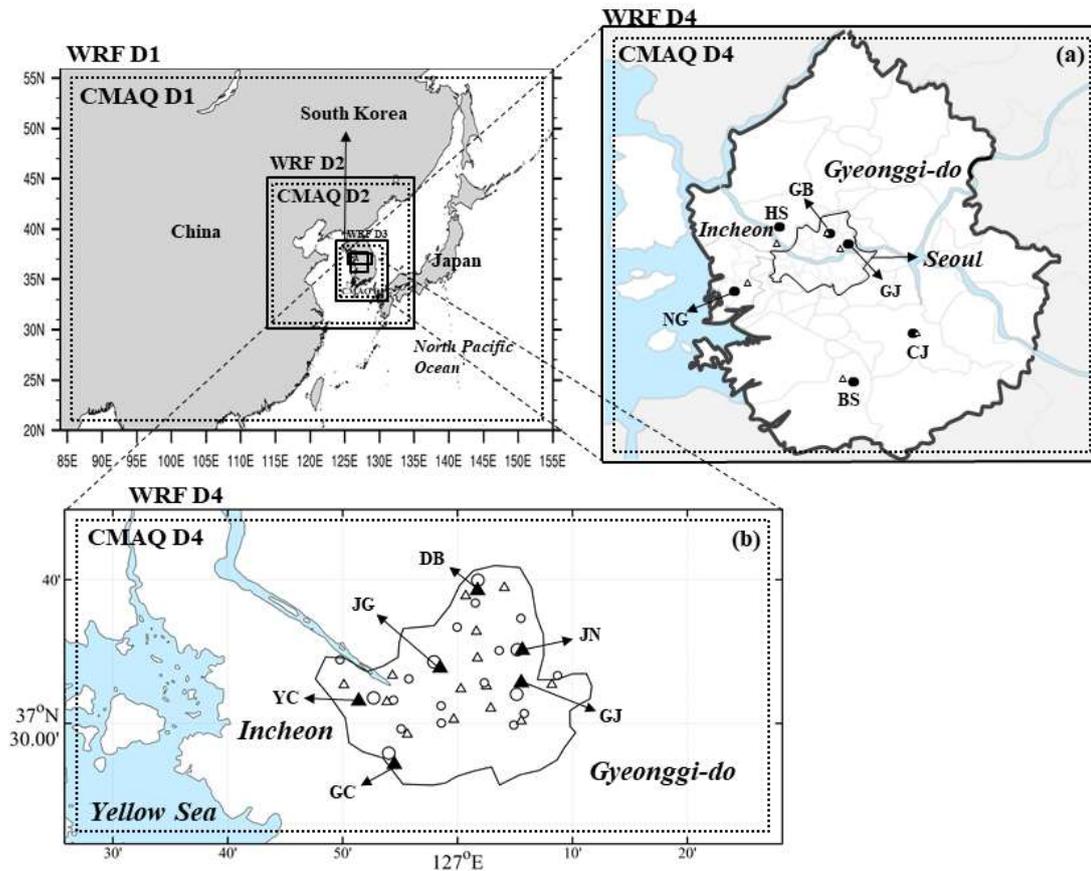


Fig. 2-3. The nested model domains for WRF and CMAQ simulations and the geographical locations of air quality (triangles) and meteorological monitoring sites (circles). The model domains and geographical locations of air quality monitoring sites (a): Nam-gu (NG), Bongsan-dong (BS), Haengshin-dong (HS), Gangbuk-gu (GB), Gwangjin-gu (GJ), Changjeon-dong (CJ) and another sites (b): Jung-gu (JG), Geumcheon-gu (GC), Jungnang-gu (JN), Dobong-gu (DB), Gwangjin-gu (GJ), Yangcheon-gu (YC) for air pollutants (solid circles) in the Seoul metropolitan region, including Seoul, Incheon, and Gyeonggi-do, South Korea. The meteorological monitoring sites (open triangles) are located 3–5 km away from the air quality monitoring sites.

본 연구에서는 선정된 연무 사례일에 대해 기상모델의 자료동화(3DVAR, 분석 넷징)를 적용하여 이로 인한 기상 변화가 대기질 모델의 PM_{2.5} 농도 모의에 미치는 영향을 분석하였다. 이때 기상 자료동화를 적용한 실험(DA)과 적용하지 않은 실험(NODA)의 PM_{2.5} 농도 차이를 비교함으로써 기상 자료동화가 주변 대기질에 미치는 영향을 평가하였다. 사용한 자료동화 방법은 3차원 변분자료동화(3DVAR: Three-dimensional variational analysis)와 FDDA (Four-Dimensional Data Assimilation) 방법의 분석 넷징(Analysis nudging)을 적용 하였다.

3차원 변분자료동화는 NCAR/UCAR (National Center for Atmospheric Research/University Corporation for Atmospheric Research)에서 개발한 자료동화 시스템인 WRFDA 을 이용하였는데, 이것은 다양한 관측 자료를 처리할 수 있으며, 국지 자료로 레이더, GPS PW 등의 동화가 가능하다. WRF 모델링 시스템에서 WRFDA 과정의 흐름은 그림 2-4에 나타내었다. 자료동화 수행 시 WRF의 REAL 작업으로부터 생성된 WRF의 초기값(wrf_input)과 경계조건(wrf_bdy)을 OBSPROC (관측과 오차자료)와 Background Error (배경오차 공분산)을 이용하여 실행하는데, OBSPROC 은 LITTLE_R 포맷의 관측 자료를 읽으며 선택한 시간과 영역 밖의 관측은 제거한다. 또한, 정역학 가정을 이용하여 기압과 고도를 추출하고 관측의 연직 일관성을 확인하고 관측 오차를 할당하며 WRFDA 에서 사용할 수 있는 관측 자료 형태로 출력한다. 본 연구에서는 OBSPROC 생성을 위해 PREPBUFR 포맷의 ADP Global Upper Air and Surface Weather Observations 자료를 LITTLE_R 포맷으로 변환 후 이용하였다. 즉, 지표 관측값인 SYNOP, 해양 선박에서 관측한 SHIP, Kalpana-1, METEOSAT-6, GMS, GOES 등 인공위성 관측자료인 SATOB, 그리고 상층에는 SOUND, PROFILER, METAR의 자료를 이용하였다(그림 2-5).

WRFDA in the WRF Modeling System

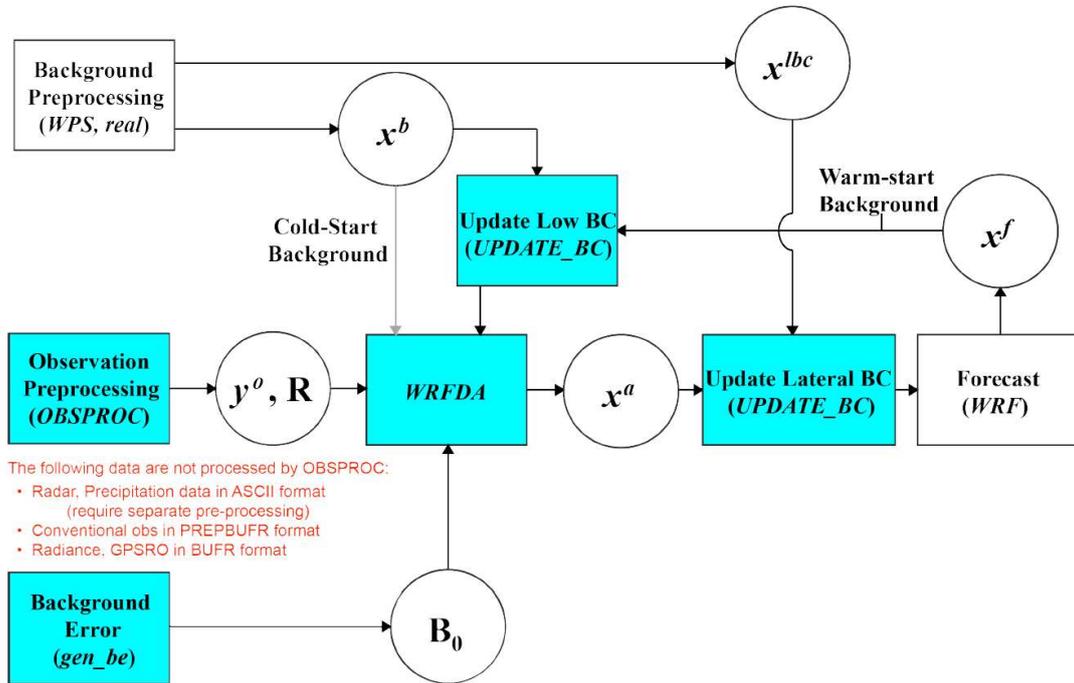


Fig. 2-4. WRFDA in the WRF modeling system (ARW, 2015).

배경오차는 배경장이 가지는 오차(모델이 가지는 오차)를 의미하며, 대부분의 현업기관에서 NMC (National Meteorological Center) 방법으로 배경 오차 공분산을 생성한다(Parrish and Derber, 1992). 본 연구에서는 배경 오차 공분산을 생성하기 위해 NMC 방법(24시간과 12시간의 모델 예측 차이 생성)으로 모델 내에서 제공하는 전지구 genbe 평균장(CV.3)을 사용하였다. 이는 컴퓨터 자원을 줄이기 위해 모델 변수를 그대로 이용하지 않고 control variable을 이용하는데 u , v , T , pseudo relative humidity (RH_s), surface pressure (P_s)이 포함된다.

FDDA 방법에는 관측치를 직접 내삽 하는 관측 넛징(Observation nudging) 과 종관장을 따르는 관측치를 이용하여 경계 조건을 변화시키고 격자 형태로 내삽 하는 분석 넛징(Analysis nudging)이 있다(Shafran et al., 2000). 본 연구에서는 동아시아 지역의 관측 데이터 부재로 2가지 FDDA 방법 중 분석 넛징을 적용하여 기상모델의 수치모의 능력을 향상시키고, 그로인한 대기질 모델의 연무

(PM_{2.5}) 현상에 대한 예측 능력을 향상시켰다. 사용한 분석 넛징은 기존 배경장의 격자점과 관측 간의 차이를 구하여 새로운 초기장의 격자점으로 내삽 하는 방법으로, 대기 경계층 내의 원하는 층 이상으로 효과를 주는 공간 분석 넛징(3D Analysis Nudging)과 모델 최하층 이하의 약 10m에 효과를 주는 지상 분석 넛징(Surface Analysis Nudging)으로 구분할 수 있다. 분석 넛징의 식은 각 격자점에서 계산된 관측의 분석값과 모델에서 모의된 값의 차이에 비례하는데(국립기상연구소, 2014), 넛징을 적용하고자 하는 도메인 영역에 따라 넛징 강도의 효과가 다르게 나타난다. 본 연구의 분석 넛징 적용은 도메인 4 영역(27km, 9km, 3km, 1km) 중 첫 번째 도메인 영역에만 적용하였는데, 이는 모델 수행 과정에서 도메인 간에 서로 상호작용(양방향 등지화 기법)을 통해 첫 번째 도메인에 적용된 넛징 효과가 도메인 영역 2, 영역 3, 영역 4에 간접적으로 영향을 미치게 되기 때문이다. 넛징 변수는 PBL 층 내에서의 u, v, t, q 성분을 넛징 하였으며 각 성분의 넛징 계수는 기본값인 $3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 으로 각각 설정하였다(유정우 등, 2017).

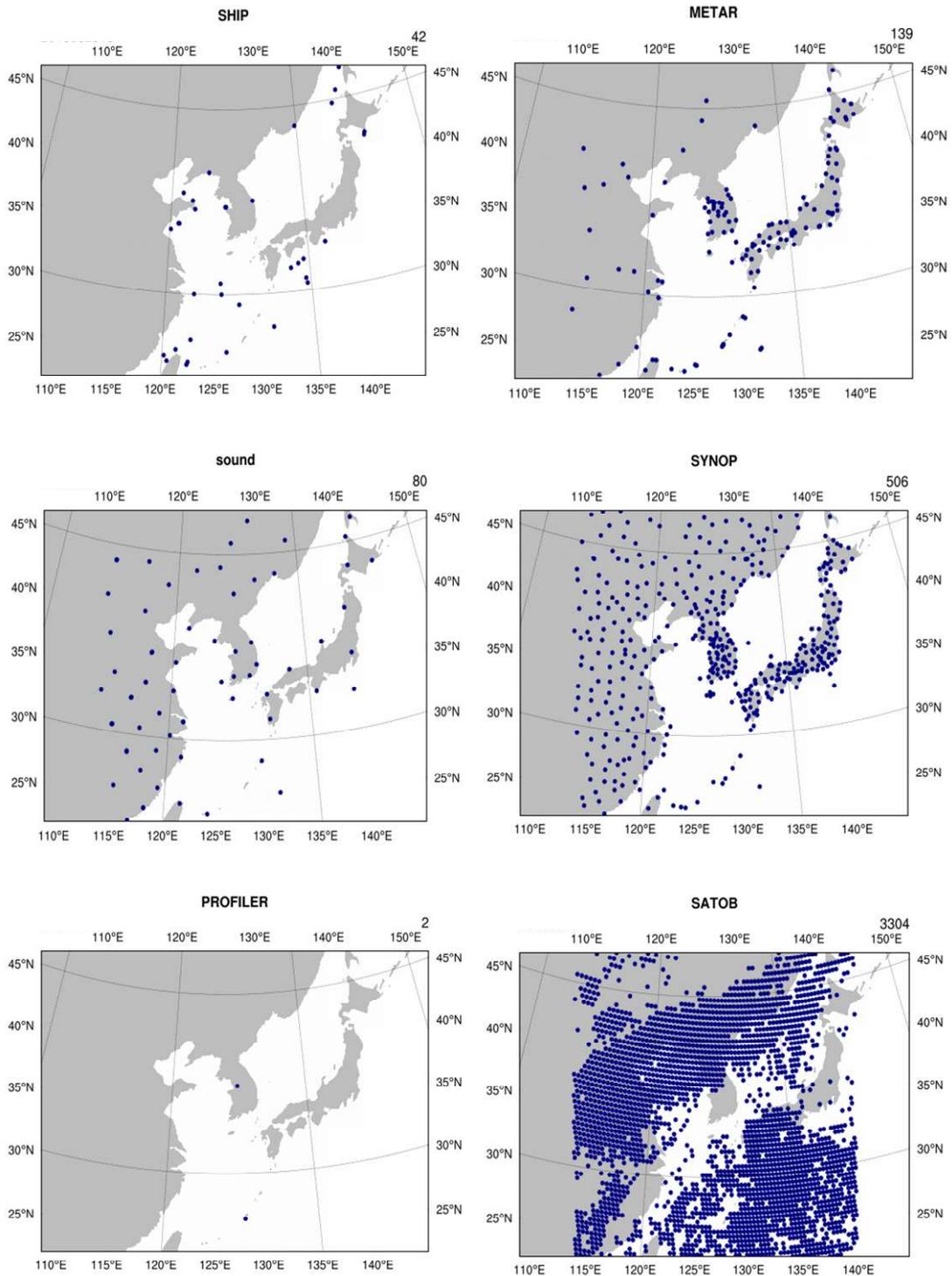


Fig. 2-5. ADP Global Upper Air and Surface Weather Observations in the WRFDA modeling system.

2.2.2. 대기질 모델

대기질의 수치모의를 위한 CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System) 모델은 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서 개발한 3차원 광화학 수송 모델로 대류권 내 오존, 미세먼지를 포함한 주요 가스상, 입자상 대기오염물질을 모의할 수 있으며 다양한 규모(Multi-scale)에 대한 동시 수치모의가 가능하다(Byun and Ching, 1999; Byun and Schere, 2006). 이 모델은 대기오염물질의 형성과정을 설명하기 위해 필요한 다중규모(multi-scale) 기상 현상과 함께 다중상(multi-phase)의 화학반응을 결합시켜 여러 가지 오염물질(multi-pollutants)을 동시에 고려할 수 있다. 또한 모듈 구조로 되어 있어 각 전처리 프로그램간 호환이 쉽고 효율적으로 모델을 업데이트 시킬 수 있는 장점이 있으며, 수평과 연직 규모가 유사한 도시규모의 대기현상 모의에 적합하도록 모델 내 비정역학 관계식을 적용하였다. CMAQ 구성과 실행과정은 그림 2-5 와 같으며, 5개의 주요 전처리 과정과 1 개의 화학·수송 모델(CCTM: CMAQ Chemical Transport Model)을 가진다. 전처리 과정은 기상모델 결과를 CCTM의 입력자료 형식으로 전환하는 기상장 처리모델 MCIP(Meteorology-Chemistry Interface Processor), 배출량 처리모델인 ECIP(Emission-Chemistry Interface Processor), 모델 수행 기간에 대한 광해리율을 산출하는 JPROC(Photolysis Rate Processor), 초기농도조건을 생성하는 ICON(Initial CONditions processor)과 매 시간 경계농도조건을 생성하는 BCON(Boundary CONditions processor)으로 되어있다(U.S. EPA, 1999). 각 프로그램에서 생성된 입력 자료는 화학 수송모델인 CCTM에 입력되어 오염물질의 화학반응, 수송·이류, 침적 과정을 거쳐 1시간 간격의 격자별 대기오염물질 농도를 계산한다.

대기질 모델의 도메인 좌표계는 앞서 언급한 WRF 모델과 동일하며(LCP 좌표계, 중심 위경도 126°E, 38°N), WRF 모델링 결과의 경계 오차를 줄이기 위하여 4개의 WRF 도메인을 기준으로 각 도메인을 동서남북 각각 3격자씩 줄여서 구성하였다. 먼저 복합형 연무 사례는 중국으로부터의 오염물질 장거리 수송을 고려하기 위해, 중국 동부와 일본을 포함하는 동아시아 영역(D1, 137×115, 수평해상도 81 km), 한반도 영역(D2, 169×157, 수평해상도 27 km), 남한 영역(D3,

148×169, 수평해상도 9 km)과 수도권 영역(D4, 127×94, 수평해상도 3km)으로 구성하였다. 정체형 및 수송형 연무 사례는 동아시아 영역(D1, 55×41, 수평해상도 27 km), 한반도 영역(D2, 58×52, 수평해상도 9 km), 남한 영역(D3, 64×70, 수평해상도 3km) 서울 영역(D4, 61×55, 수평해상도 1 km)으로 구성하였다. CMAQ 모델의 연직층은 총 29개로 구성하였고, 최하층 고도는 시그마(σ) 레벨 0.996 (half layer 고도: 약 16 m)로 설정하였고 고도 약 1 km 까지 29개 층으로 조밀하게 구성하여 인체에 미치는 영향이 큰 대기하층의 오염물질 혼합과 확산과정이 제대로 모의될 수 있도록 하였다. CMAQ 모델의 기상 입력 자료는 WRF 모델링 결과를 MCIP(4.2 버전) 전처리 프로세스를 이용하여 시간별 기상 입력자료(기온, 풍향, 풍속, U, V, PBL 등)로 변환하여 입력하였다. 모델링 기간은 모델의 초기 적응시간을 포함하여 복합형 연무 사례는 2013년 1월 10일 00 LST 부터 1월 18일 00시, 정체형 및 수송형 연무사례는 2019년 2월 26일 00 LST 부터 3월 25일 00 UTC 로 설정하였다.

CMAQ 모델의 초기/경계조건에 대해서 동아시아 영역(Domain 1)은 EPA에서 제공하는 대기오염물질 프로파일 자료(Stockwell et al., 1990)를 사용하였고, 한반도 영역(Domain 2)과 남한 영역(Domain 3), 수도권 및 서울 영역(Domain 4)에 대해서는 상위 도메인의 모델링 결과를 ICON(Initial condition)/BCON(Boundary condition) 모듈에 입력하여 초기/경계 입력자료를 생성하였다. 모델링에 사용된 에어로졸 메커니즘은 AERO-06, 화학메커니즘은 SAPRC-99 이며, 수평 및 연직확산에는 각각 Multiscale과 ACM2 (Asymmetric Convective Method) scheme을, 수직 Advection scheme은 vwrf 의 PPM(Piecewise Parabolic Method)을 사용하였다(표 2-4).

배출량 입력 자료는 효과적인 배출량 처리를 위해 자체 전처리 과정을 통하여 인위적 배출량과 자연적 배출량의 합으로 구성되었으며, 각각의 영역에 맞추어 재격자화 하였다. 먼저, 동아시아 영역의 인위적 배출량은 MICS-Asia (Model Inter-Comparison Study for Asia) 2010년 자료를 사용하였는데, 이는 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 수평해상도를 가지며 $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_x , CO_2 , CO , $NMVOC$, BC , OC , NH_3 등의 배출 인벤토리를 사용하여 월별 형태로 자료를 제시한다(Carmichael et al., 2002). 또한, 남한 영역의 인위적 배출량은 국립환경과학원에서 제공되는

CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2013년(복합형 사례)과 2015년(정체 및 수송형 사례) 배출 인벤토리 자료(TSP (PM₁₀ 포함), NO_x, SO_x, VOC, CO, NH₃)를 사용하였다(NIER, 2018). CAPSS 자료는 주로 연료 연소, 생산 공정, 이동 오염원, 폐기물 처리, 산불 및 화재 부문 등의 분류코드(Source Classification Codes, SCC)에 따라 1년 단위로 산정된 배출량(kg/year)이며, 공간적으로는 전국을 1 km × 1 km 격자별로 산출되어있다. 점·선·면 오염원 배출량은 연료사용량과 배출계수의 곱에 개별 방지시설에 대한 방지효율 등을 적용하여 산정하고, 이동오염원 배출량은 차종별 주행거리 VKT (Vehicle kilometers traveled)에 배출계수를 곱하여 산정한다. 이외에도, 또한 전체 연구 영역에 대한 자연 배출량 (Biogenic emissions) 부분은 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) version 2.04 모델을 통해 산정된 결과를 이용하였다 (Guenther et al., 2006). MEGAN은 지표 생태계에서부터 대기에 이르기까지 기체와 에어로졸의 순 자연 배출량을 산정하기 위한 전구 배출 모델이다. 최종 각 모델링 영역에 포함된 인위적 배출량과 자연배출량을 합산하여 CMAQ-ready emission input을 생성하였다. 그림 2-4는 PM_{2.5}에 대한 (a) 복합형 연무 사례와 (b) 정체형 및 수송형 연무 사례의 각각 수도권 영역(Domain 4)과 서울지역(Domain 4)의 배출량 공간분포를 나타낸다. 두 사례일의 배출량 공간분포는 주로 인천 연안지역(예, NG)과 도시 중심지역(예, JG)에 많이 집중되어 나타났다.

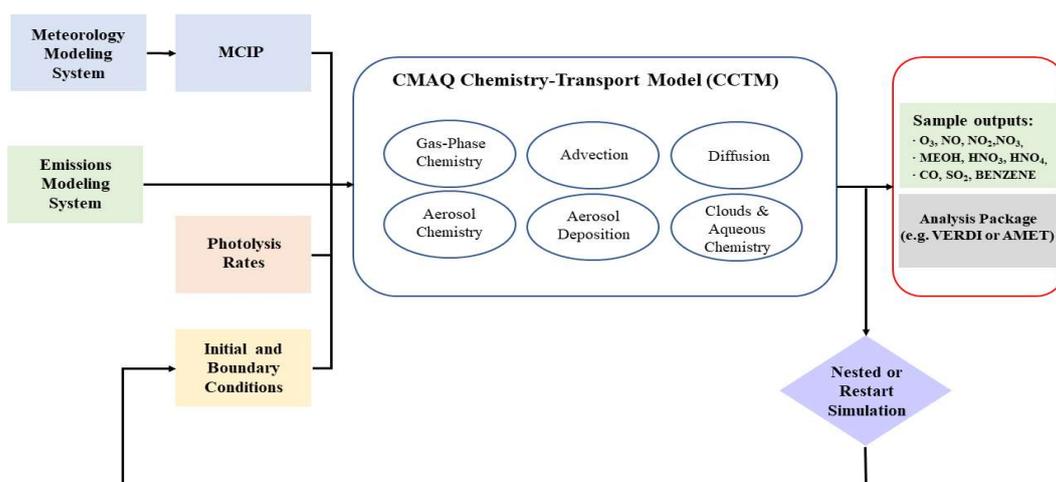


Fig. 2-6. CMAQ chemistry-transport model and associated preprocessors.

Table 2-4. Details of the physical and chemical options in the CMAQ model.

Module	Option
Horizontal advection(ModHadv)	hyamo
Vertical advection(ModVadv)	vwrf
Horizontal diffusion(ModHdiff)	multiscale
Vertical diffusion(ModVdiff)	acm2
Aerosol module(ModAero)	aero6
Gas-phase chemistry solver(ModChem)	EBI
Deposition velocity calculation(ModDepv)	m3dry
Cloud module(ModCloud)	cloud_acm_ae5
Gas-phase chemistry mechanism(Mechanism)	SAPRC99

본 연구에서는 유형별 연무 사례일에 대한 PM_{2.5} 의 물리·화학적 공정의 상대적 기여도를 평가하기 위하여 PA 분석을 수행하였다. 이 분석은 예측 농도를 모델링하는 과정에서 해당 물질 생성 과정의 기여도를 정량화할 수 있는 진단 과정으로 아래의 식과 같은 방법으로 연산하는 과정을 거친다. PA 분석의 공정 과정은 각 격자별 오염물질 농도의 생성·소멸에 대한 에어로졸 생성과정(AERO: Aerosol process), 수평이동(HADV: Horizontal advection), 수평확산(HDIF: Horizontal diffusion), 연직이동(ZADV: Vertical advection), 연직수송(VDIF: Vertical diffusion), 배출량 생성과정(EMIS: emissions source), 건성 침적과정(DDEP: dry deposition), 구름생성 및 수용성 화학과정(CLDS: cloud process) 등의 상대적 기여율을 계산하는 IPR(Integrated Process Rate)과 광화학 반응과정을 중점적으로 평가하는 IRR(Integrated Reaction Rate)로 구성되어있다(Gipson, 1999; <http://www.epa.gov/asmdner1/CMAQ/CMAQscienceDoc.html>). IPR 과정은 무게 단위로 각 과정을 추적하며 개별 과정이 시간당 농도 변화의 기여농도로써 고려될 수 있다. 자세한 물리적 항목은 Table 2-5에 나타냈다. 즉 이류, 확

산 및 화학 등 특정 그리드 셀에서 오염물질의 예측된 시간별 농도에 대한 배출량을 나타낸다. CMAQ에서 PA 분석을 수행하기 위해서는 PROCAN 프로그램을 우선적으로 수행해야 하며, 화학 메커니즘에 따라 화학종에 대한 family 변수 지정 및 분석 대상 오염물질에 대한 입력 자료를 pacp.inp로 마련한다. 또한, PROCAN 수행으로 출력되는 PA_CMN.EXT, PA_CTL.EXT, PA_DAT.EXT 파일들을 이용하여 CCTM에서 Process analysis를 비롯한 chemistry-transport 모델을 수행하게 된다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (u C_i) + \frac{\partial}{\partial y} (v C_i) \right] \quad ; \quad (1)$$

$$+ \left[- \frac{\partial}{\partial z} (w C_i) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_e \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) \right] \quad ; \quad (2)$$

$$+ (P_{chem} - L_{chem}) + E \quad ; \quad (3)$$

$$+ \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} \right)_{cloud} + \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} \right)_{dry} \quad ; \quad (4)$$

C_i : 화학종 농도 u, v, w : 모델 도메인에서 각 격자 지점의 삼차원 속도

K_e : 난류 확산 추적 종의 하부 격자 규모 난류 플럭스의 파라미터

P_{chem} and L_{chem} : 화학적 생산과 손실비율로 인한 화학적반응

E : 근원지 배출량 비율 (1) 수평 연직 이류 (2) 연직 수송을 포함한 연직 이류와 연직 확산 이류(수평 확산 기간 제외) (3) 화학종의 변화 + 근원지 배출량 비율

(4) 구름 형성과정과 건성 침적으로 인한 농도 변화의 시간 비율

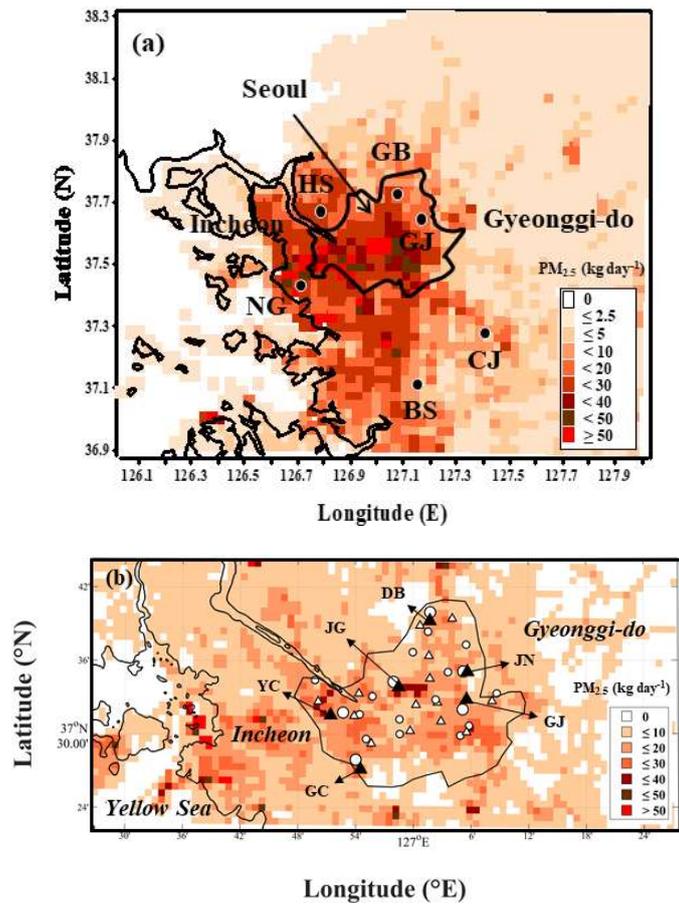


Fig. 2-7. The spatial distribution of anthropogenic emissions ($kg\ day^{-1}$): (a) $PM_{2.5}$ in the 3-km model domain (D4) and (b) $PM_{2.5}$ in the 1-km model domain (D4).

Table 2-5. Integrated process rates process codes.

Process	Definition
XADV	Advection in the E-W direction for the PPM scheme
YADV	Advection in the N-S direction for the PPM scheme
ZADV	Vertical advection
HADV	Total horizontal advection (XADV+YADV)
MADV	Total advection (XADV+YADV+ZADV)
TADV	Total advection for the PPM scheme (ADV3+ADJC)
ADJC	Mass adjustment for the PPM scheme
HDIF	Horizontal diffusion
VDIF	Vertical diffusion
EMIS	Emissions
DDEP	Dry deposition
CHEM	Chemistry
AERO	Aerosols
CLDS	Cloud processes and aqueous chemistry
TDIF	Total diffusion (HDIF+VDIF)
TRAN	Total transport (advection + diffusion)

Source : CMAS, 2012

2.2.3. 건강 편익 분석 모델

본 연구에 활용된 Environmental Benefits Mapping and Analysis Program (BenMAP)은 미국 환경보호청(EPA: Environmental Protection Agency)에서 대기질 개선정책에 따른 건강 편익분석을 위하여 개발된 모형으로 제3차 통합 환경전략(IES: Integrated Environmental Strategies) 연구 수행과정에서 도입되었다. 이 모형은 미국의 대기질에 관련한 환경법 및 규제, 정책 개발 및 수립 시에 필요한 근거를 마련하기 위하여 활용되어 왔으며(박정임 외, 2006), 최근에도 고정 및 이동 오염원 관리 정책 개발에 활발히 활용되고 있다. BenMAP 을 활용하기 위해서는 초기 입력자료 수집 및 가공 등의 과정이 필요하지만, 데이터베이스 구축 후에는 사용자 편의성이 높은 것이 특징이다(한국환경정책평가연구원, 2006). 특히 연구 지역에 대한 지리 정보(GIS: Geographic Information System)를 입력하면 연구 지역에 대한 결과를 그림으로 확인할 수 있어 모형 구동 후 즉시 결과 분석이 가능하다는 장점이 있다. EPA에서 제공하는 BenMAP은 IES 프로그램에 참여하는 일부 국가들을 위하여 BenMap International version으로 제공하기도 하였으며, 현재에는 BenMAP Community Edition(CE) version으로 통합하여 제공하고 있다. 본 연구에서 활용한 모형은 BenMAP-CE Version 1.5.0.4 모형(Fig. 2-7)으로 미국 EPA 사이트(<http://www.epa.gov/benmap>)를 통하여 다운로드할 수 있다.

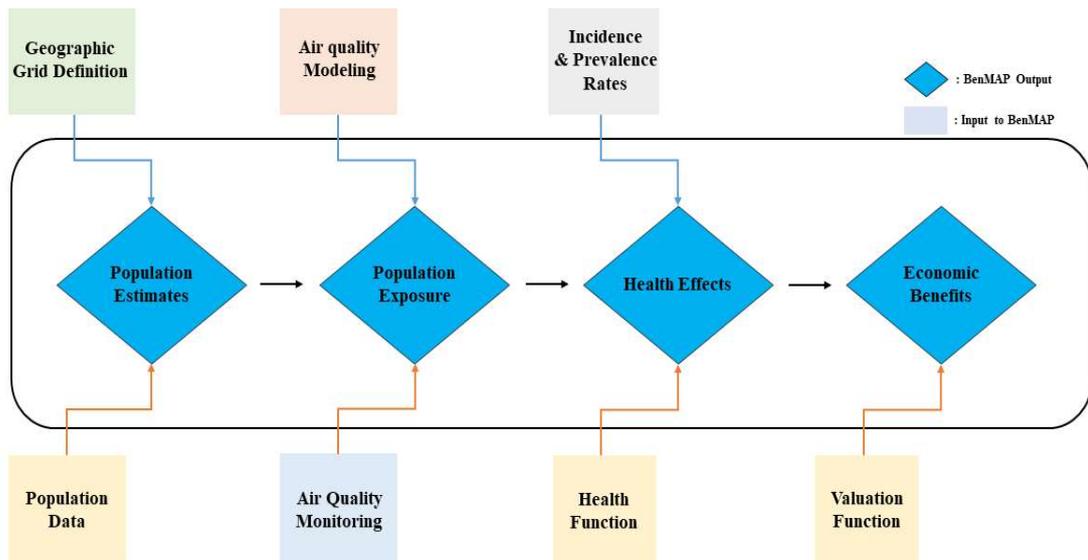


Fig. 2-8. Overview of Environmental Benefits Mapping and Analysis Program (BenMAP) flow Diagram.

2.2.4. 후방궤적 분석 모델

본 연구에서는 사례지역을 중심으로 종관규모의 기류 특성과 연무 현상의 이동 패턴을 파악하기 위해 NOAA/ARL에서 제공하는 HYSPLIT-4를 사용하였다. HYSPLIT-4는 라그랑지안 방법에 기초한 수송·확산 과정을 계산하여 오염물질의 농도 및 전방향 및 역방향으로의 궤적 추적이 가능하며, 다른 대기확산모델과 비교하여 계산 용량과 모델링 시간이 적게 소요된다는 장점이 있다. 모델 입력 자료로는 다양한 기상자료가 사용되는데, NCAR(National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료 또는 ECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecasts) 모델 결과를 주로 사용한다. HYSPLIT-4 모델은 Omega Field를 이용한 연직 운동을 기본 값으로 하고 Isentropic, Isosigma, Isobaric, Isopycnic 옵션들을 선택할 수 있는 특징을 가지고 있다(Draxler and Hess, 1998; Draxler et al., 1999). HYSPLIT-4 모델을 적용함에 따라 연무 현상의 기원에 대하여 공기괴의 궤적을 수평·연직적으로 분석 가능하며, 특정 시간대의 연구 사례지역에 대한 경로를 역학적으로 추적할 수 있다.

본 연구에서는 한반도 수도권을 중심으로 한 동아시아 주변의 종관 기상장에 대한 변화 특성과 중국으로부터의 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 및 전구물질 등이 수도권 및 서울지역에 수송되는 패턴을 구분하는데 사용하였다. HYSPLIT-4 모델 수행과 관련된 일련의 과정은 미국 NOAA Air Resource Lab.의 웹상 (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>)에서 이루어졌으며, 모델 수행에 사용된 기상 입력 자료는 NCEP에서 제공하는 FNL(The 6-hourly FNL archive data come from NCEP's GDAS) 자료이다. 사용한 옵션으로는 공기가 단열적인 운동을 통해 이동한다는 가정 하에 공기괴를 추적하는 방법인 Isentropic 후방 궤적 계산 방법을 사용하였고, 서울지역의 중심인 종로($33.50^{\circ}N-126.53^{\circ}E$) 지점에서 출발시켰으며 시작점의 고도는 500 hpa, 1000 hpa의 등압면으로서 하층 제트가 흐르고 지표면의 국지적 영향을 받지 않는 최저의 높이로 오염물질의 장거리 수송을 파악 할 수 있는 대표적 높이인 50 m, 500 m, 1000 m로 하였다(강동근 등, 1993).

제 3 장 연무 발생 기상학적 메커니즘 및 대기질 분석

3.1. 연무 유형별 종관기상학적 특성 및 기류패턴 분석

3.1.1. 연무 유형별 특성

본 연구에서는 최근 10년간(2010~2019년) 서울지역에서 관측된 연무와 다른 일기유형과의 비교분석을 위하여, 먼저 연무를 포함한 6가지 일기유형(강수, 연무, 박무, 황사, 맑음, 구름, Lee et al., 2013)에 대한 발생빈도(발생일수)와 기상 및 대기질 특성을 살펴보았다(표 3-1). 대상지역의 6가지 일기유형에 대한 기상요소는 기온, 풍속, 상대습도, 그리고 대기질은 PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂의 농도 특성을 분석하였다. 일기유형별 발생빈도 결과, 가장 높은 발생 빈도를 보인 유형은 구름(30%)이었고, 다음으로 맑음(26%), 박무(16%), 연무(14%), 강수(13%), 황사(1%) 순으로 높게 나타났다. 일기유형 중 연무의 경우, 서울에서 측정된 여러 대기오염물질의 농도는 PM₁₀을 제외하고 NO₂, PM_{2.5}, SO₂ 순으로 높게 나타났으며, 각각 일평균 농도가 45.4 ppb, 44.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 6.6 ppb으로 다른 일기유형에 비해 높은 수준이었다. 이것은 중국 등의 대도시에서 배출된 오염물질이 광역적으로 장거리 수송되었거나 혹은 한반도 대도시에서 자체 배출된 기체상 오염물질이 광화학 반응에 의해 입자상 오염물질로 2차 생성되었음을 유추 할 수 있다(Song et al., 2014).

황사의 경우, PM₁₀ 농도가 184.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 전체 일기유형 중에 최고치를 보였는데, 중국 대도시로부터의 먼지 입자가 수송에 의해 한반도로 이동한 것으로 판단된다. 국립환경과학원의 연구에 따르면(NIER, 2013), 대기오염물질 중 미세먼지가 중국으로부터 장거리 수송되어 우리나라로 유입되는 기여도가 연평균 30~50% 수준이라고 추정된 바 있다. 반면에, PM_{2.5} 농도는 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일기유형 중 연무일 다음으로 높게 나타났다. 또한, NO₂와 SO₂는 각각 28.3 ppb, 4.8 ppb의 일평균 농도를 보이며 연무일에 비해 낮은 수치를 보였다. 박무의 경우, PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도가 각각 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 48.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 전체 일기유형 중 3번째로 높은

수준을 보였고, 맑음과 구름의 경우 대부분 오염물질의 농도수준은 비슷하였으며, 강수 시 가장 낮은 농도가 관측되었다. 이것은 강수로 인한 세정작용에 의해 농도가 감소한 것으로 사료된다(Ahn et al., 2014).

다음으로 6가지 일기유형의 기상특성을 보면, 기온의 경우 강수(15.6 °C), 구름(15.5 °C), 박무(14.6 °C), 연무(12.4 °C), 황사(10.2 °C), 맑음(8.8 °C) 순으로 높게 나타났다. 일기유형 중 맑음보다 높은 구름의 높은 온도 특성은 구름 유형에 포함된 비교적 기온이 높은 계절에 의한 영향으로 판단된다. 풍속은 황사의 풍속이 3.4 m/s로 가장 높게 나타났고, 연무는 그보다 낮은 2.3 m/s를 보였다. 이는 황사의 경우 중국 고비사막의 조대입자가 강한 바람을 타고 수송되는 경우가 많으므로 상대적으로 강한 바람이 분 것으로 추정 할 수 있다. 그 외, 다른 일기유형에서는 2.8 m/s~2.1 m/s의 풍속을 보였고, 상대습도의 경우는 강수(84%)와 박무(84%)를 제외한 모든 유형에서 60% 이하를 보였다.

Table 3-1. Analysis of frequency, air quality, and meteorological conditions for six weather types in Seoul during 2010-2019.

Region	Case	Number (Days)	Frequency (%)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	Temp (°C)	W/S (m/s)	RH (%)
	Rain	1340	13	17.8	29.3	2.1	32.1	15.6	2.8	84
	Haze	1396	14	44.9	74.3	6.6	45.4	12.4	2.3	59
	Mist	1593	16	30.0	48.2	3.1	34.7	14.6	2.1	84
Seoul	Dust	80	1	35.0	184.9	4.8	28.3	10.2	3.4	50
	Clear	2686	26	22.9	44.7	5.1	33.9	8.8	2.4	51
	Cloud	3131	30	24.2	43.9	4.7	34.6	15.5	2.3	60
	Total	10226	100							

본 연구에서는 고농도 연무 사례일 중 3가지 연무 유형(LES, LRT, MIX)에 대해 분류하기 위해 2장의 연무 유형 분류 조건(표 2-2)을 사용하여 연무 유형 분류조건인 흐름도(Flow chart)를 제시하였다(그림 3-1). 유형 분류조건인 흐름도는 총 4단계로 구성 하였는데, 연무 사례일 중 와도가 > 0 으로 양(+)의 와도를 갖는 날들에 대하여 LRT 유형으로 분류하였고, 그 외 음(-)의 와도를 갖는 날에 대

해 LES 유형으로 구분하였다. 또한, 와도와 마찬가지로 와도 이류가 양의 부호를 갖는 날에 대해 LRT 유형으로, 음의 부호를 갖는 날에 대해 LES 유형으로 선정하였다. 다음 단계에서는 850 hPa 지균폭속이 4 m/s 이상으로 강한 지균폭이 발생한 날에 대해서 LRT 유형, 4 m/s 이하의 비교적 약한 지균폭이 발생한 날에 대해서는 LES 유형으로 각각 분류하였다.

마지막 단계는 한반도 서울을 중심으로 지균폭향의 바람이 $225^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 에서 불어올 때, 즉 서풍계열의 바람이 중국에서 우리나라로 이동할 때를 LRT 유형으로 선정하였고, 그 외 서풍계열의 바람을 제외한 분류하기 힘든 풍향에 대해서는 LES 유형으로 구분하였다. MIX 사례의 경우 3일 이상의 연무사례가 지속될 때, LRT 유형의 기류가 이동하는 조건에서 연무의 정체 현상을 보이는 LES 유형과 복합적인 성향을 보이는 사례들에 대해 분류하였다. 모든 분류조건 계산식에 대한 자세한 설명은 2.1.2에 기술하였다.

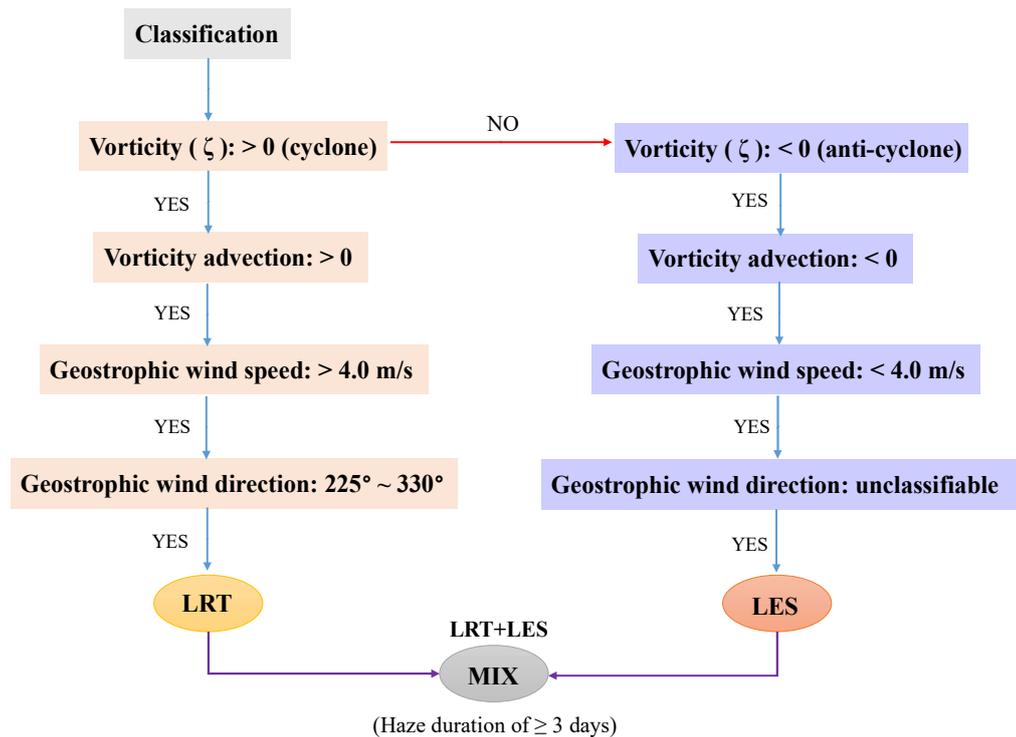


Fig. 3-1. Flow chart for the classification of three haze types, such as Long-range transport (LRT), Local emission stagnation (LES), and Mixed types (MIX) using four meteorological parameters (Vorticity, Vorticity advection, Geostrophic wind speed, Geostrophic wind direction), based on the haze events during 2010-2019.

위의 연무 유형 분류조건인 흐름도(Flow chart)를 통해 정확한 분류가 어려운 경우에 대해서는 추가적으로 종관기상(일기도 이용) 특성 및 후방궤적 모델의 기류패턴 특성을 분석하여 보다 명확한 연무 유형 분류를 정립하였다. 먼저 일기도를 통한 종관특성에 대한 설명은 다음과 같다. 전반적으로 정체형 유형은 대체로 풍속이 약하고 안정한 대기 상태의 특징을 가지며 안정한 고기압권 영향으로 인해 공기가 확산되지 않아 오염물질의 지속에 유리한 조건을 보였다. 반면 장거리 수송형 연무 대표사례의 종관기상 특성은 전반적으로 한반도 주변의 강한 기압경도력에 의해 강풍이 형성되어 불안정한 대기 상태가 유지되는 모습이 보였고, 풍상측의 풍계 또한 강한 북서풍 계열이 지속적으로 부는 모습을 보였다.

기류패턴을 분석을 통한 유형별 특징은 다음과 같다. 정체형 유형은 대부분 국

내에서 정체하는 기류의 형태를 보였고, 고도별로 한반도 내륙, 서해 남부 해상의 상층고도에서 대기경계층 이내로 이동하는 특징을 보이는 사례도 확인되었다. 장거리 수송형 유형의 기류패턴은 대부분 중국의 고 배출 지역 또는 고비사막에서 유입되는 형태를 보였으며, 고도별로 대기경계층 이내로 하강되어 서해 남부 해상을 통해 유입되는 형태의 사례일도 확인되었다. 복합형 유형은 연무 사례일 중 연무가 장기간(3일 이상) 유지되는 사례일에 대하여 분류하고, 장거리 수송 유형에서 정체형 유형의 분류조건(와도, 와도이류, 지군풍)으로 연속되는 날에 대해 분류 하였고, 지상 일기도와 후방궤적 분석 모델을 이용한 기류패턴 분석을 통해 기압 또는 기류의 움직임이 중국에서 국내로 수송되어 한반도의 종관 기상패턴에 의해 정체 또는 느린 기류의 이동을 보이는 날에 대해 선정하였다.

종합적으로, 2장에서의 연무 유형 분류조건(와도, 와도이류, 지군풍속, 지군풍향)과 일기도 종관특성, 그리고 후방궤적 분석을 통해 정립된 3가지 연무 유형의 특성을 요약하면 표 3-2와 같다. 아울러, 표 3-3은 최종적으로 각 연무 유형 분류 조건에 대해 정립된 표와 연무 유형 분류 기준, 사례분류법, 일기도 및 기류패턴 분석을 통해 최종적으로 분류된 최근 10년간(2010~2019년)의 유형별 연무 사례일을 나타낸다. 전반적으로 장거리 수송 유형에 가장 많은 날짜가 포함 되었으며, 대체로 과거 년도에 비해 비교적 최근(2017~2019년)에 연무 발생일에 대한 높은 빈도가 나타났다. 3.1.2절에서는 분류된 유형별 사례일 중 대표사례를 선정하여 기상분류 조건 및 종관특성과 후방궤적 분석을 통한 기류패턴을 분석하였다.

Table 3-2. The characteristics of three haze types, Local emission stagnation (LES), Long-range transported (LRT), and Mixed types (MIX). These were classified based on the several categories, such as meteorological parameters, synoptic features, or airflow patterns, for the haze events during 2010-2019.

Types	Meteorological parameters	Criteria	Synoptic features and airflow patterns	Emission sources
LES	Vorticity (ζ)	< 0 (anticyclone)	<ul style="list-style-type: none"> • Under the influence of stationary high pressure • Mostly stable atmospheric conditions • Slow-moving airflow with low wind speed 	<ul style="list-style-type: none"> • Mostly domestic emissions
	Vorticity advection	< 0		
	Geostrophic wind speed	< 4.0 m/s		
	Geostrophic wind direction	Unclassifiable		
LRT	Vorticity (ζ)	> 0 (cyclone)	<ul style="list-style-type: none"> • Migratory anticyclone • North high and south low • Extending high pressure system to South Korea • Long-range transport from urban and industrial areas in China along strong westerly/northwesterly airflows 	<ul style="list-style-type: none"> • Large emission sources in China
	Vorticity advection	> 0		
	Geostrophic wind speed	> 4.0 m/s		
	Geostrophic wind direction	Southwest-northwest (225°–330°)		
MIX		<ul style="list-style-type: none"> • LRT + LES • Haze duration of ≥ 3 days 	<ul style="list-style-type: none"> • The combined effects of air pollutant transport by northwesterly winds and local accumulation under high-pressure conditions or atmospheric blocking 	<ul style="list-style-type: none"> • Strong emission sources, such as industrial areas in China and domestic emissions

Table 3-3. Frequencies of the haze days for the Long-range transported (LRT), Local emission stagnation (LES), and Mixed types (MIX) during 2010-2019.

Type	Year	Date
LRT	2010	9.18~19 / 11.20~22 / 12.22~23
	2011	6.21
	2012	1.6~7 / 2.13~15 / 5.3~6 / 12.11
	2013	1.14~20 / 3.4~6 / 4.4~6 / 8.27~29 / 12.20~26
	2014	1.3~5 / 3.4
	2015	1.22~25 / 2.4~7 / 3.9~10
	2016	2.7~8
	2017	4.2 / 11.3~6
	2018	1.20~22 / 2.25~27 / 3.30~31 / 4.19~21 / 4.26~28 / 5.24~27 / 11.16~17 / 12.11~13 / 12.20~23
	2019	1.9~11 / 1.14 / 1.19~21 / 1.29~31 / 2.20 / 2.24~27 / 3.2 / 3.4~6 / 3.11~12 / 3.15~20 / 5.20~26
LES	2010	9.16~17 / 11.19 / 12.21
	2011	2.20~21 / 6.17~20 / 9.1~3
	2012	5.11~14 / 5.22
	2013	1.13
	2014	4.12~13 / 4.24~26
	2015	1.20~21 / 3.8
	2016	8.4~7 / 9.22~25
	2017	5.20~21 / 6.18 / 10.25~28
	2018	2.28 / 7.19~22
	2019	2.22~23 / 2.28 / 3.1 / 3.3 / 5.10~11
MIX	2010	2.22~25 / 4.14~17
	2011	4.2~5 / 12.6~9
	2012	5.23~24
	2013	3.12~16
	2014	2.20~3.3 / 10.28~31
	2015	4.8~12
	2016	-
	2017	3.16~26 / 4.24~5.4
	2018	6.4~6
	2019	5.14~17
Unclassified	2010	12.20
	2011	2.17~19
	2012	1.5 / 1.8~9 / 2.12 / 5.25~27 / 12.12~14
	2013	1.21 / 3.3 / 4.3 / 8.26
	2014	1.2 / 4.14~15 / 4.27
	2015	3.7
	2016	2.9~10
	2017	4.3~5 / 5.18~19 / 6.16~17 / 6.19
	2018	1.19 / 3.29 / 4.18 / 4.25 / 6.3 / 11.15 / 11.18 / 12.10 / 12.24
	2019	1.12~13 / 1.17~18 / 2.21 / 3.7~8 / 5.2~9 / 5.12

3.1.2. 대표사례일의 기상분류조건, 종관특성, 기류패턴 분석

그림 3-2은 보다 명확한 유형별 연무 사례의 구분을 위해 연무 유형 분류조건 의 흐름도(그림 3-1)로 분류한 연무의 정체 및 장거리 수송 유형의 대표사례를 각각 선정하여 와도 및 지균풍에 대한 공간장을 살펴보았다. 공간장은 FNL 데이터 1° 자료를 이용해 2.1.2절의 연무 유형 분류 조건 계산식을 이용하여 생성하였고, 각 유형별 대표 사례일에 대한 동아시아 지역의 850 hPa 및 500 hPa 와도와 850 hPa 지균풍속 및 풍향에 대한 특징을 나타내었다.

정체형 연무 유형에 대한 대표사례는 2019년 3월 1일로 850 hpa 및 500 hpa의 와도 공간장을 보면 우리나라의 상공에 음(-)의 와도가 나타나고 지균풍 또한 4 m/s 이하로 낮은 풍속을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 음(-)의 와도는 절대와도를 보존하기 위해 고위도로 갈수록 상대와도가 감소, 즉 상층의 기압능을 통과하고 수렴을 형성하여 대기의 하강기류를 일으켜 지상부근에 시계 방향인 고기압성 회전(고기압성 와도)이 생성되어 대기가 안정되는 특징이 있다. 반대로 장거리 수송형 연무 유형의 대표사례일인 2019년 3월 5일의 경우 우리나라 상공에 양(+)의 와도가 분포하고 지균풍 또한 4 m/s 이상의 빠른 서풍이 한반도 상공을 통과하는 모습을 잘 보여준다. 양(+)의 와도는 대기가 상층의 기압골을 통과하고 발산을 형성하므로 상승 기류를 일으켜 지상부근에서 반시계 방향인 저기압성 회전을 생성하여 대기가 불안정한 상태가 되는 특징이 있다. 또한, 바람이 225° ~ 330°에 포함되는 서풍계열의 바람이 중국에서 우리나라로 이동되는 모습을 잘 보여주었다.

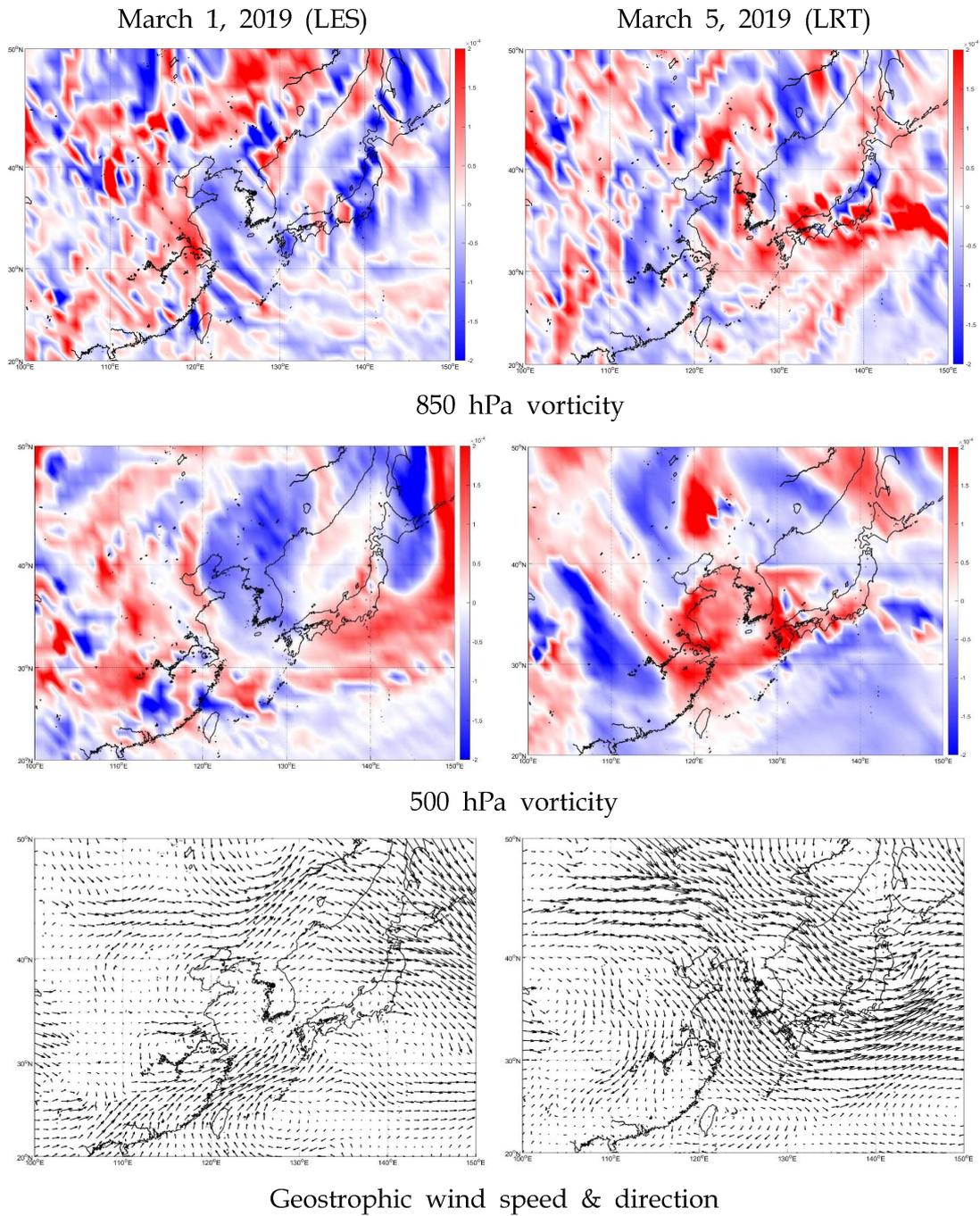
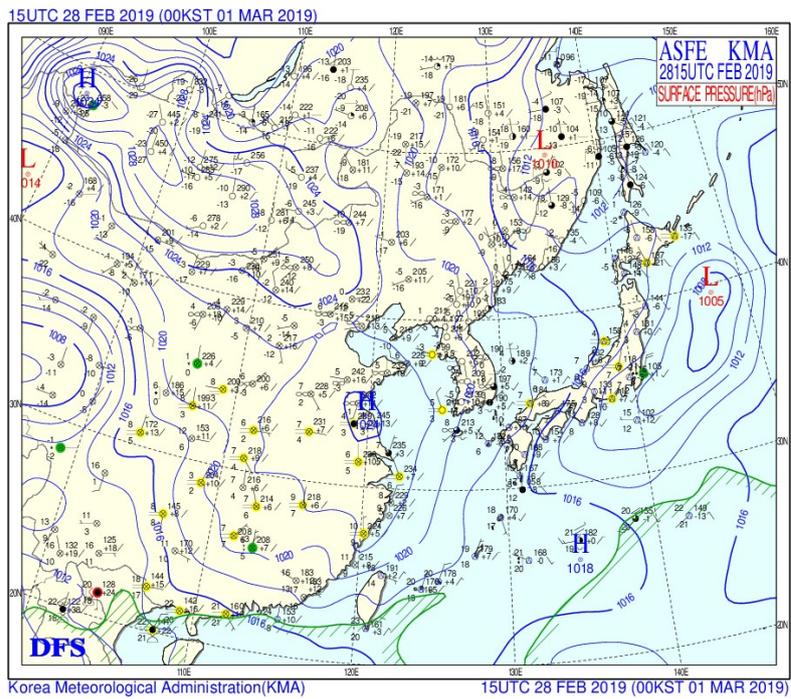


Fig. 3-2. Spatial distributions of 850 hPa, 500 hPa vorticity and geostrophic wind speed & direction simulated by the WRF model of Local emission stagnation (LES) and Long-range transported (LRT) in the East Asia domain.

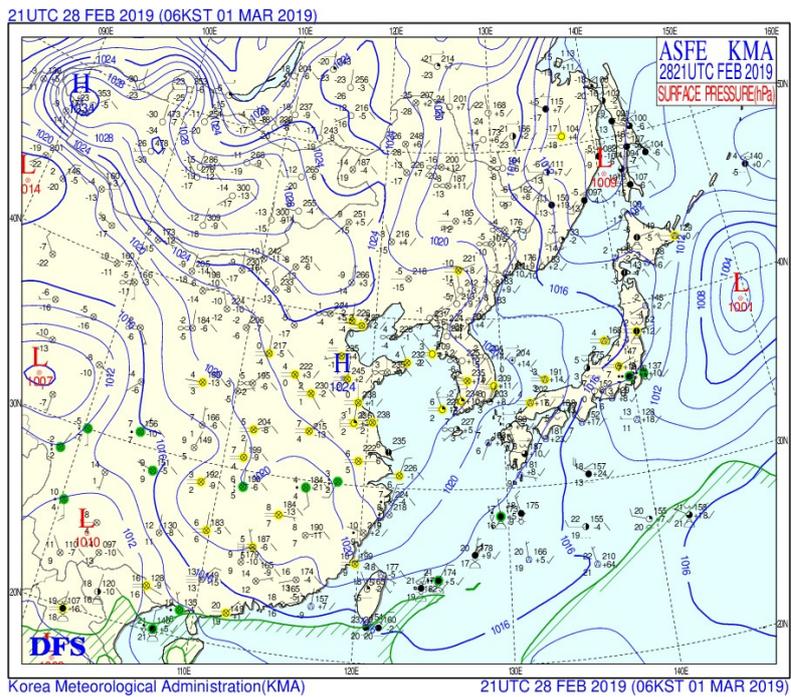
보다 명확한 유형별 연무 사례의 특징을 알아보기 위해 각 대표 사례일에 대한 일기도(그림 3-3 ~ 3-5)와 후방궤적 분석(그림 3-6)을 수행하였다. 먼저 정체형 고기압 패턴을 나타내는 대표적인 연무 사례일(2019년 3월 1일 00 LST ~ 18 LST, 6시간 간격)에 대한 그림 3-3의 2013년 3월 1일 00 LST (a)는 한반도 서쪽 베이징 지역에 고기압의 중심이 위치한 것을 볼 수 있고, 중국 베이징과 공업단지에 연무를 뜻하는 노란색 기호가 표시되어 고기압의 대기 안정 상태에서 연무가 광범위하게 분포되어 있는 모습을 볼 수 있다. 또한 한반도 북동쪽 부근에 저기압 중심이 위치하고 있는데, 이러한 중관기상특성 하에 있는 한반도는 이동성 고기압의 영향과 함께 등고선 간격이 넓고 풍속이 약한 고압대가 형성되어 기온이 높고 구름이 거의 없는 맑은 날씨를 보이는 특징이 있다. 대체로 이러한 이동성 고기압의 영향 하의 안정한 대기는 국지순환계(예, 해륙풍과 산곡풍)와 함께 고농도 미세먼지(PM_{2.5}) 발생에 깊이 관여하는 특징이 있다(김유근 등, 2002b; 이화운 등, 2001; Liu et al., 1994). 따라서 이 시기의 한반도는 강력한 정체성 고기압이 한반도에 영향을 주고 있음을 확인 할 수 있다. 또한, 그림 3-3의 (b), (c), (d)를 보면 시간이 경과한 후에도 한반도 서쪽의 고기압이 거의 이동하지 않는 특징을 보여준다. 이는 정체형 연무 사례일 동안 한반도 상공에서 약한 풍속으로 인한 안정한 대기 상태를 잘 나타내고 있다.

그림 3-4의 장거리 수송형 대표적 사례(2019년 3월 5일 ~ 6일)는 전형적인 장거리 수송형 고기압 패턴이 나타난 사례이며, 심한 연무 현상이 관측되었는데 2019년 3월 5일 06 LST (a)의 한반도 상공 부근에 위치하던 고기압 중심이 12시간 후인 2019년 3월 5일 18 LST (b)에 한반도 동쪽의 일본 상공까지 빠르게 이동된 특징을 잘 보여준다. 따라서 이러한 이동성 기류로 인하여 상대적으로 강한 풍속을 나타내며 미세먼지가 수송 되었을 것으로 판단된다. 2019년 3월 6일 06 LST (c)에서는 한반도 북쪽의 고기압 중심과 남쪽의 저기압 중심이 대치하는 북고남저 형태의 기압배치로 강한 북서풍이 생성되어 미세먼지가 빠르게 이동될 수 있음을 잘 보여준다. 또한, 12시간 후인 2019년 3월 6일 18 LST (d)에서도 한반도 북쪽의 고기압 중심과 남쪽의 저기압 중심이 약간 이동하며 북고남저의 기압배치를 유지하여 조밀한 등압선을 보이며 강한 풍속이 나타났을 것으로 예상된다.

그림 3-5은 복합형 연무 사례 유형을 대표하는 사례일의 일기도로 사례일 동안의 종관기상 특징을 보면, 2013년 1월 13일 15 LST (a)의 중국 대도시 및 공단지역 주변에서 안정한 고기압권 하에 대기확산이 원만하지 못하고 장기간 머무르는 느린 기압패턴이 보였으며, 서서히 북서풍/서풍 계열의 바람이 우리나라로 유입되기 시작하면서 연무발생 당일부터 상당히 높은 미세먼지 농도가 우리나라에 분포 할 수 있는 기상조건을 나타냈다. 아울러 2013년 1월 14일 15 LST (b) 일본의 동쪽 및 남동쪽 해역 주변에서 저기압의 매우 느린 기압배치가 북동쪽으로 이동하는 모습을 보였고, 2013년 1월 15일 15 LST (c)의 저기압성 중심이 일본의 북동쪽으로 이동하여 서쪽에서 동쪽으로 기류의 움직임을 방해하는 저지현상을 일으켜 장기간의 연무현상 및 고농도 미세먼지가 나타난 것으로 사료된다. 2013년 1월 16일 15 LST (d)부터 다시 한반도 동서쪽의 고기압과 동쪽의 저기압 배치가 이루어져 빠른 바람의 이동으로 정체 현상이 사라지고 미세먼지 농도가 낮아지는 기상 조건을 보였다. 수치모의를 통한 서울과 중국의 PM₁₀ 농도를 비교해보니, 서울에서 고농도 연무가 나타나기 약 1~2일 전에 중국에서 고농도가 나타나 이러한 고농도가 서울의 연무 현상에 영향을 미친 것으로 추정된다. 따라서 이러한 복합형 연무 사례일은 중국으로부터의 장거리 수송 및 기압배치 등의 기상조건과 국지적 오염물질의 배출이 복합적으로 영향을 미친 것으로 사료된다.

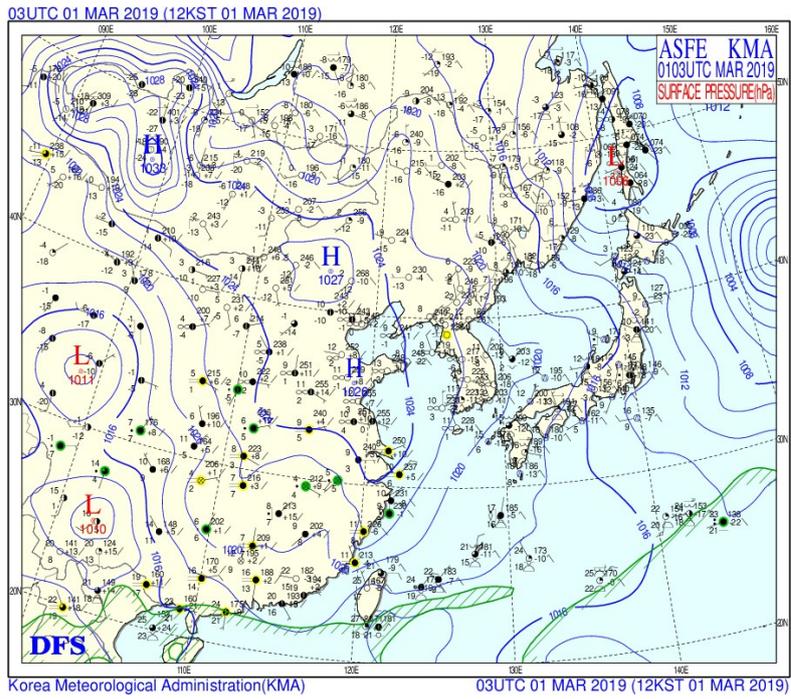


(a) 00 LST on March 1, 2019

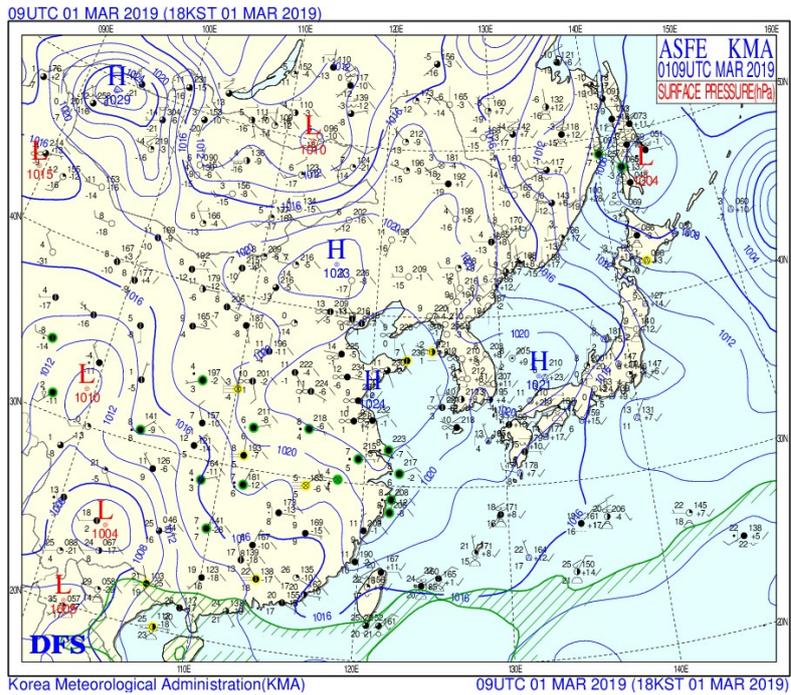


(b) 06 LST on March 1, 2019

Fig. 3-3. Synoptic weather charts for East Asia and the study area on March 1, 2019 for Local emission stagnation (LES) of haze days.

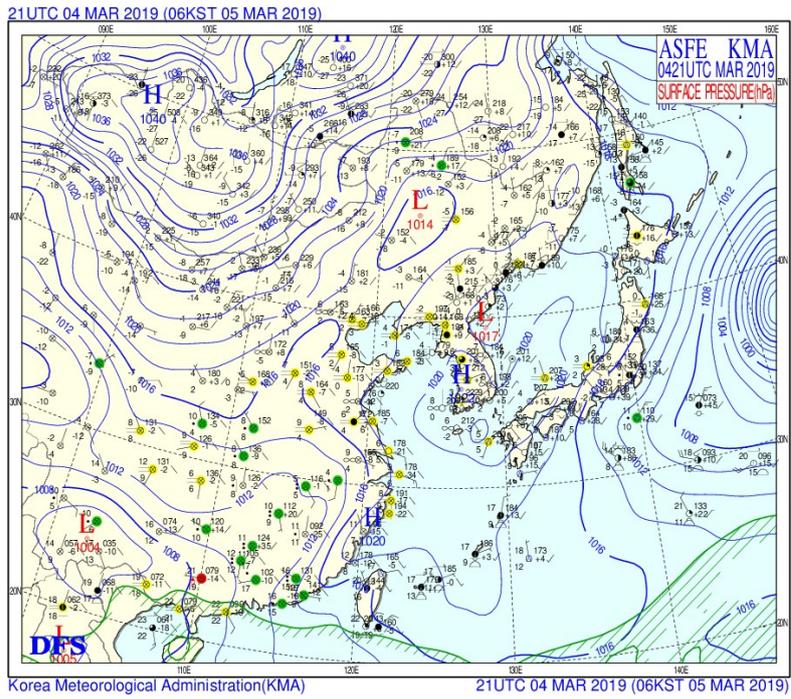


(c) 12 LST on March 1, 2019

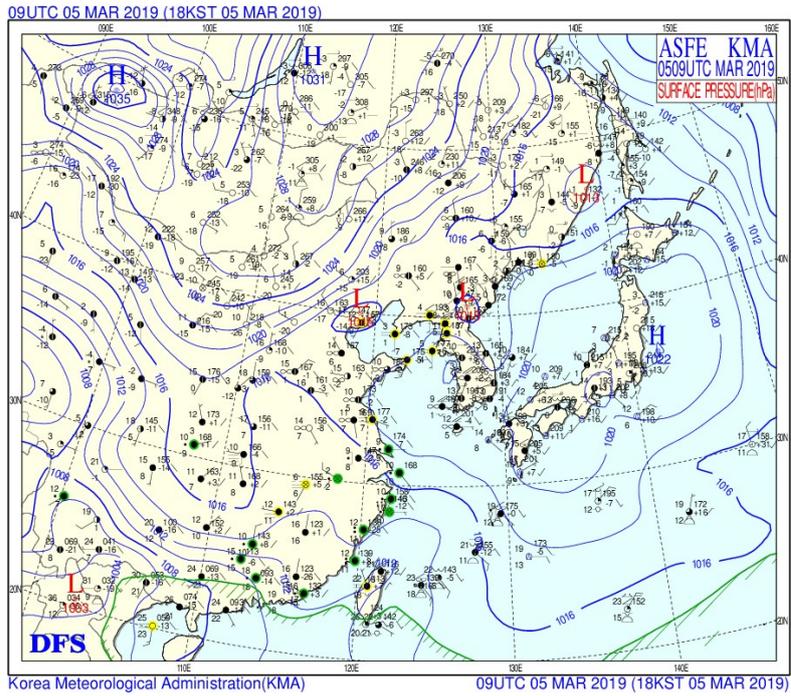


(d) 18 LST on March 1, 2019

Fig. 3-3. (Continued)

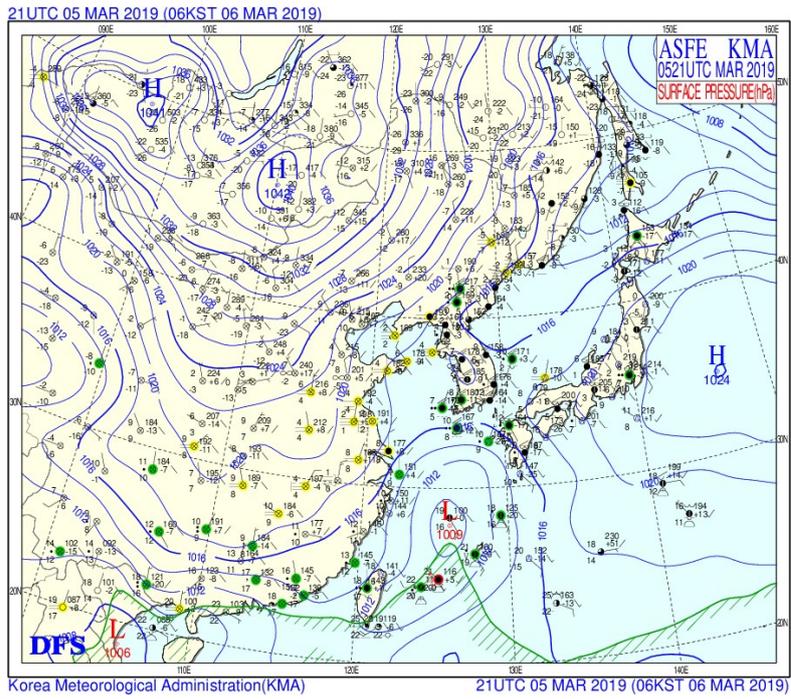


(a) 06 LST on March 5, 2019

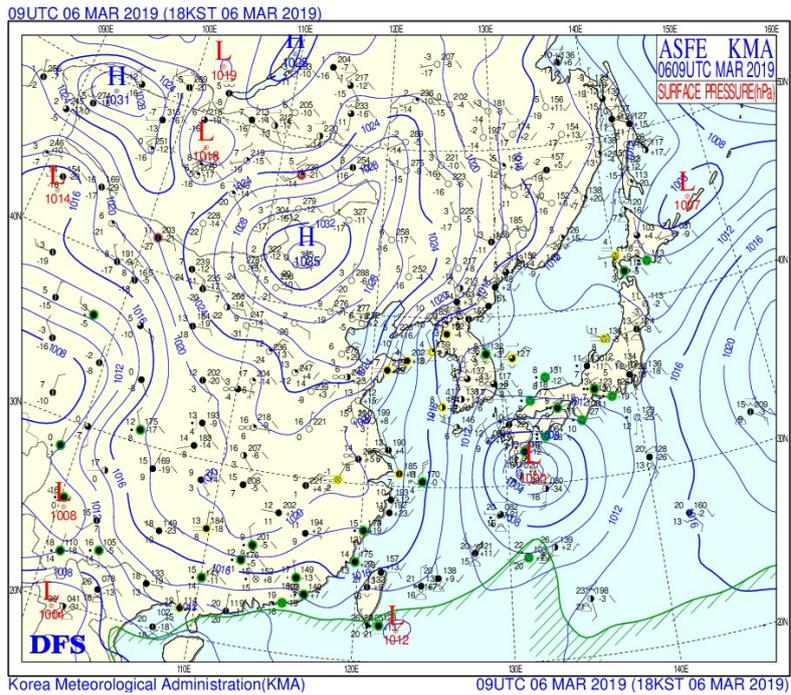


(b) 18 LST on March 5, 2019

Fig. 3-4. Synoptic weather charts for East Asia and the study area on March 5-6, 2019 for Long-range transported (LRT) of haze days.

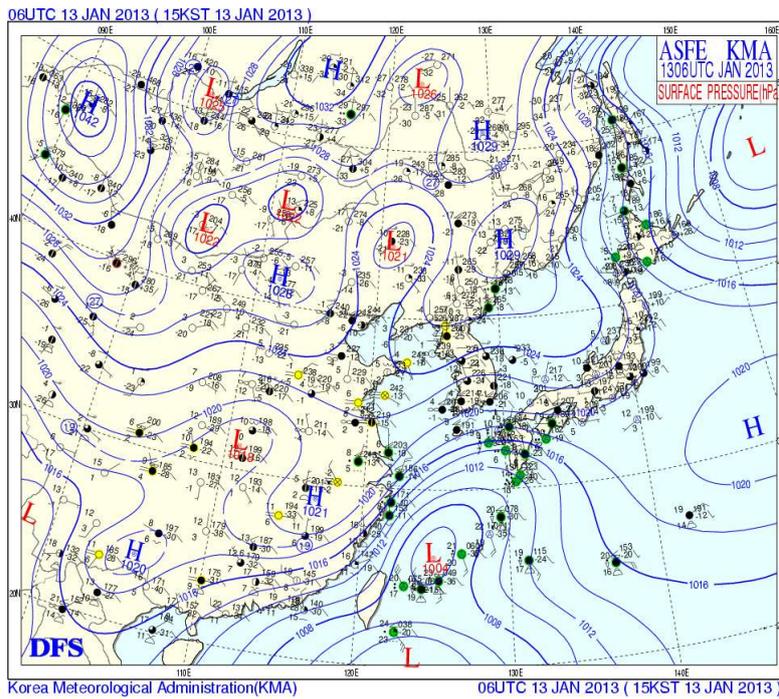


(c) 06 LST on March 6, 2019

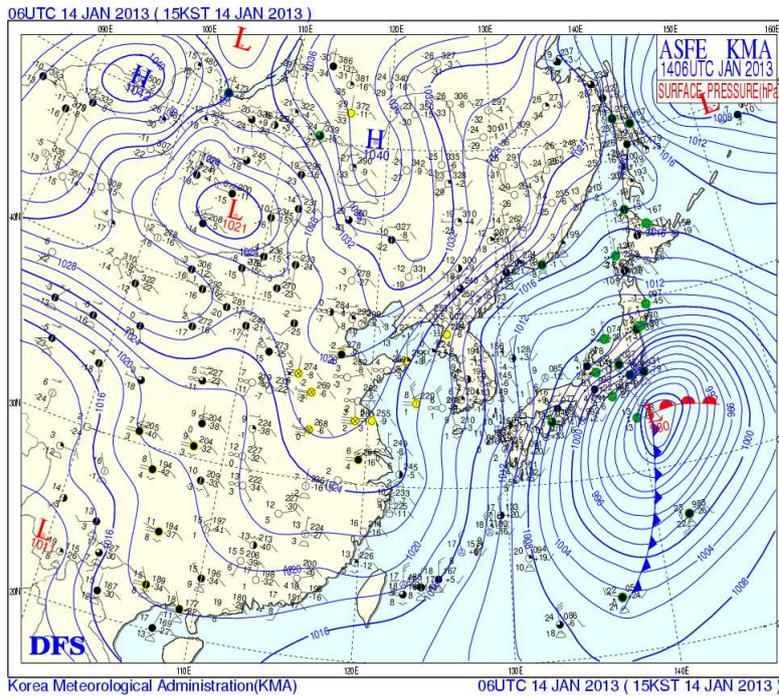


(d) 18 LST on March 6, 2019

Fig. 3-4. (Continued)

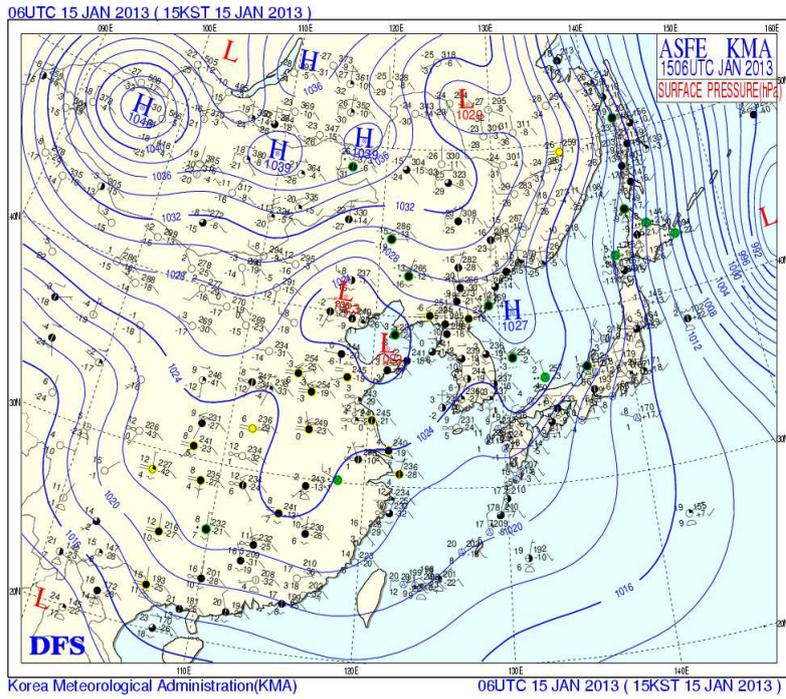


(a) 15 LST on January 13, 2013

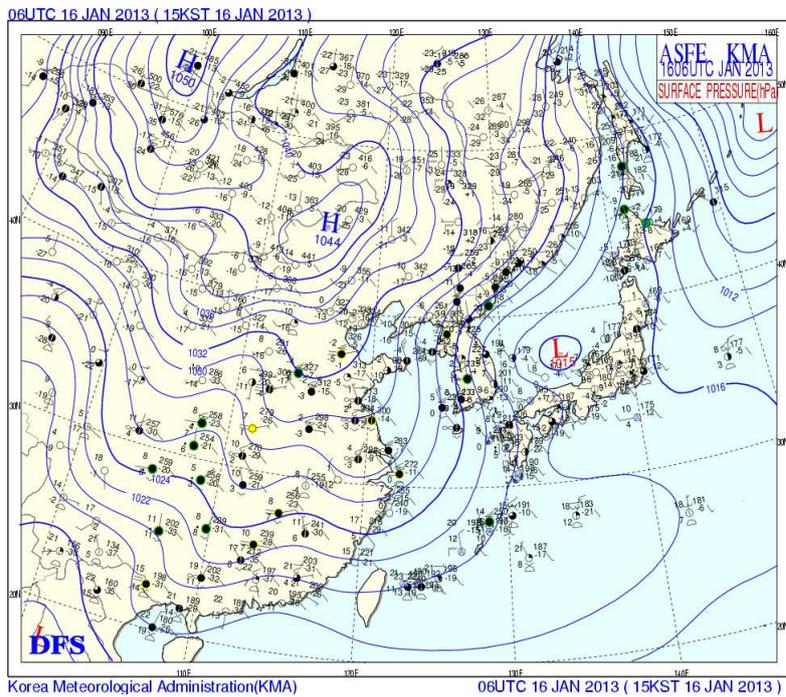


(b) 15 LST on January 14, 2013

Fig. 3-5. Synoptic weather charts for East Asia and the study area on January 13-16, 2013 for Mixed types (MIX) of haze days.



(c) 15 LST on January 15, 2013



(d) 15 LST on January 16, 2013

Fig. 3-5. (Continued)

일기도 이외에도 분류된 연무 유형별 대표 사례일(LES, LRT, MIX)에 대해 HYSPLIT-4 모델을 통한 기류패턴 분석을 수행하였다.

그림 3-6의 (a)는 분류된 정체형 연무 유형 중의 대표 사례일인 2019년 3월 3일에 대한 후방궤적 이동경로와 고도 변화를 나타내고 (b)는 장거리 수송형 유형의 대표 사례일로 2019년 3월 5일에 대한 후방궤적 이동경로와 고도변화를 나타낸다. 후방 기류의 흐름을 파악하기 위해 정체 및 수송 형 연무 대표 사례일의 후방궤적 분석 시간은 모두 48시간으로 설정하였다. (c)는 복합형 연무 유형의 대표 사례일로 2013년 1월 14에 대하여 72 시간 동안의 후방궤적 이동경로와 고도변화를 나타내었는데, 복합형 연무 사례의 경우 기류 수송에 의한 국내 유입의 정체 현상을 확인하기 위해 다른 두 사례(LES, LRT)와 다르게 72 시간 동안의 후방궤적 분석 시간을 설정하였다.

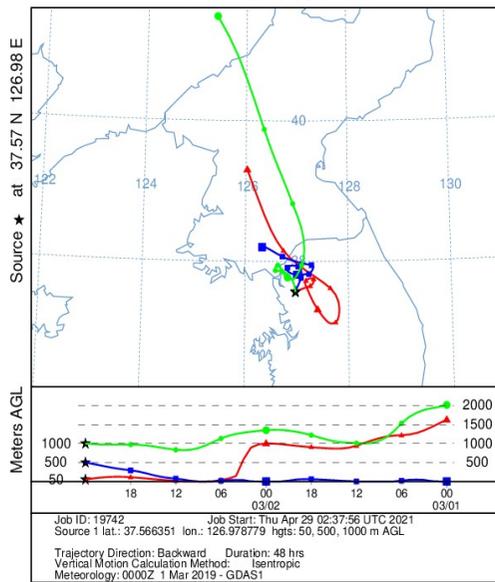
모든 연무 유형별 대표사례에 대해 공기 궤적은 서울 지역의 중심인 종로(33.50°N-126.53°E)지점에서 출발시켰으며, 시작점의 고도는 500 hpa, 1000 hpa의 등압면으로서 하층 제트가 흐르고 있고 지표면의 국지적 영향을 받지 않는 최저의 높이로 오염물질의 장거리 수송을 파악할 수 있는 대표적 높이인 50 m (빨간색), 500 m (파란색), 1000 m (초록색)로 설정하였고, 매 6시간마다 사각형 모형으로 위치를 표시하여 시간에 따른 공기궤 위치의 파악이 용이하도록 하였다.

정체형 연무 대표 사례인 그림 3-6의 (a)는 심한 연무 현상이 나타났던 사례 중에서 음(-)의 와도와 양(+)의 연직 대기안정도, 4 m/s 이하의 약한 지균풍속을 띄는 전형적인 정체형 사례로서 고도별 50 m의 기류이동이 서울의 북쪽으로부터 남쪽으로 흘러 내려와 회전하며 대기경계층 이내 고도로 하강하고 있어 연무 발생 시 기체상·입자상 오염물질이 유입되어 대기질 수준이 고농도로 나타났을 것으로 사료된다. 따라서 기류이동이 다른 특별한 고 배출원 지역에서 기원한 사례가 아닌 지역자체 발생원으로 인한 영향이 크다고 판단되는 사례이며, 선행연구에서 많이 연구 되었듯이 한반도의 서해 남부해상에 고기압의 중심이 정체되면서 동서 고압대의 영향을 받는 중관기상특성으로 인해 국지성 수송 및 확산이 적어 고농도의 대기질 수준을 나타냄을 잘 보였다(Jeon et al., 2014).

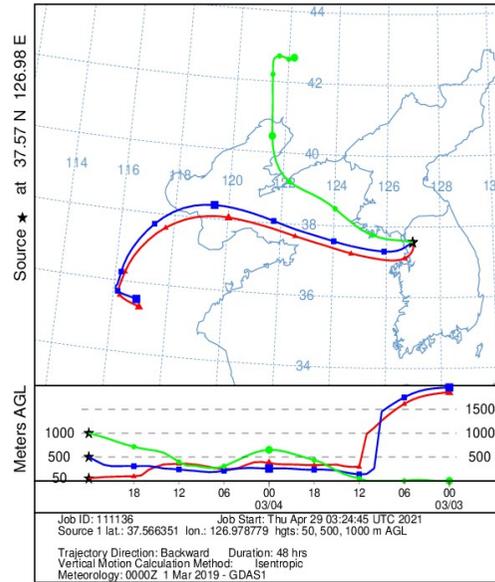
장거리 수송 연무 대표사례에는 베이징을 포함하여 고 배출 지역인 중국 화중(혹은 그 이남)지역에서 배출(혹은 경유)하는 경우와 그렇지 않고 황사 발원지와

인접한 만주 및 몽고 지역에서 북서풍을 따라 한반도로 직접 이동하거나 혹은 이동과정 중에서 중국 북쪽인 화북지역을 경유하는 사례로 분류할 수 있었다. 그림 (b) 는 장거리 수송 사례의 대표적인 패턴으로서 50 m와 500 m 고도 기류의 경우, 중국 고 배출 지역인 화중(혹은 그 이남)지역에서 배출(경유)된 대기오염물질들이 상승기류를 타고 서해안 상공을 거쳐 고도가 점점 낮아지면서 한반도로 유입되었고, 고도 1000 m 기류의 경우 중국의 북쪽인 북만주 지역에서 북서풍 계열의 바람을 타고 한반도로 직접 유입되는 패턴을 보였다. 따라서 비록 황사 사례로 분류되지는 않았으나 이와 유사한 연무 수송 사례로서 mineral dust 등의 입자상 오염물질들이 상대적으로 많이 장거리 수송되었을 것으로 판단되며, 이 경우 중국 화북지역을 거치기 때문에 중국의 대표적 도심지역인 대련 등을 경유하며 인위적 오염물질과의 물리 화학적 상호 작용이 있을 것으로 예상된다.

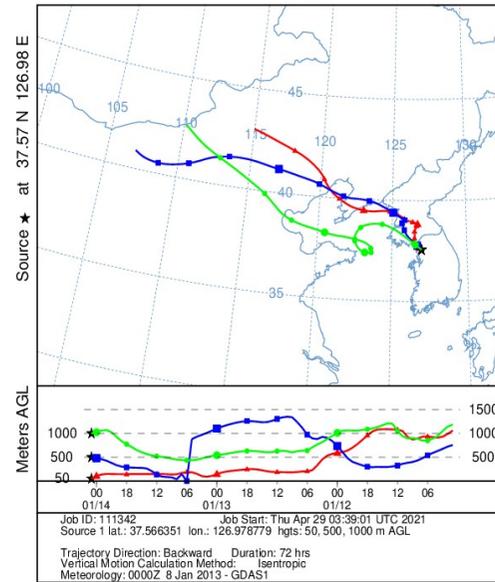
마지막으로 복합형 연무 대표 사례에서는 고비사막 근처에서 시작된 기류들이 중국 공업단지를 거쳐 매우 빠른 시간 동안(약 2일) 우리나라 서해에 도달하고, 그 후에 비교적 느린 속도(약 1일)로 서울지역에 도착하는 특징을 보였다. 특히 500 m 고도 기류의 경우 중국에서 해상을 통과하여 우리나라에 도달할 때 1000 m가 넘는 높은 고도까지 도달하였다가 하강하는 모습을 보였다. 이러한 특징은 일기도(그림 3-5)를 통한 복합형 연무 사례의 종관기상학적 특징과 일치하는 모습을 잘 보여준다.



(a) March 3, 2019



(b) March 5, 2019



(c) January 14, 2013

Fig. 3-6. Backward trajectories for three haze types: Local emission stagnant (a), Long range transport, and (c) Mixed types starting from Seoul.

3.2. 연무 유형별 발생빈도, 대기질 및 기상 분석

3.2.1. 유형별 발생빈도

표 3-4는 분석 기간의 연무 발생 유형에 대하여 각 사례별 발생빈도를 요약한 것이다. 서울 지역에서 연무 발생일은 장거리 수송 사례가 112일(36%)로 가장 높은 빈도를 차지하였고 다음으로 장거리 수송 및 정체가 복합적으로 나타난 복합형 사례가 72일(23%)로 높은 빈도를 나타내었다. 정체형 사례는 56일(18%)의 빈도를 차지하였으며 그 외, 유형별로 분류하기 힘든 사례일은 74일(23%) 정도로 분류되었다. 전반적인 연무현상에 대한 유형별 발생빈도를 통해 서울지역의 연무 발생빈도는 중국 고 배출지역에서 발생하는 오염물질에 의한 장거리 수송의 영향이 우세하게 나타난다는 것을 확인하였다. 아울러 정체형 사례에 대한 빈도도 상당한 수준으로 서울지역 자체에서 발생하는 오염물질에 의한 국지적인 배출 원인 또한 무시할 수 없는 빈도로 발생한다는 사실을 확인하였다.

3가지 연무 유형별 대기질($PM_{2.5}$, PM_{10}) 및 기상요소의 특성은 장거리 수송형 사례와 복합형 사례에서 PM_{10} 농도가 각각 평균 $85 \mu g/m^3$ (최고 $179 \mu g/m^3$), $87 \mu g/m^3$ (최고 $172 \mu g/m^3$)로 높은 수치를 나타내었고, 그에 비해 정체형 사례에서는 $80 \mu g/m^3$ (최고 $117 \mu g/m^3$)로 낮은 수치를 보였다. $PM_{2.5}$ 의 경우, 장거리 수송형 사례 $52.4 \mu g/m^3$, 정체형 사례 $52.9 \mu g/m^3$, 복합형 사례 $47.3 \mu g/m^3$ 으로 나타났다. 기온의 경우, 장거리 수송형 사례에서 $7.41^\circ C$, 정체형 사례에서 $17.33^\circ C$ 로 나타났고, 풍속은 장거리 수송형 사례와 복합형 사례에서 각 $2.26 m s^{-1}$ 와 $2.33 m s^{-1}$ 을 보였으며, 정체형 사례에서 이보다 낮은 $1.97 m s^{-1}$ 의 수치를 보였다. 이는 장거리 수송형 및 복합형 사례의 경우 비교적 온도가 낮은 봄·가을철에 중국의 황사 발원지(고비사막) 및 공업지대에서 강한 풍속을 타고 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)가 수송된 것으로 판단된다(Song et al., 2014). 이와 달리, 정체형 연무 사례는 주로 여름철에 낮은 풍속에서 국지적인 미세먼지의 배출 및 형성에 의한 것이 주요 원인 중 하나로 볼 수 있다(Jeon et al., 2014).

Table 3-4. Statistical summary of haze occurrences according to three haze types: Local emission stagnant, Long range transport, and Mixed types during 2010~2019 around Seoul in Korean peninsula.

Region	Haze day Pattern	Number (Events)	Frequency (%)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temp (°C)	WS (m/s)	RH (%)
Seoul	LRT	112	36	52.4±20.4	84.6±25.8(179) ^a	7.41	2.26	52.9
	LES	56	18	52.9±16.7	80.1±23.9(117)	17.33	1.97	52.8
	MIX (LRT + LES)	72	23	47.3±12.9	87.2±27.5(172)	2.33	2.33	47.4
	Unclassified	74	23					

^aMaximum.

연무의 유형별(MIX, LRT, LES) 연 변화를 보면(그림 3-7), 전반적으로 2013년의 장거리 수송형 사례를 제외하고 2017년부터 연무 발생일이 급격히 증가하는 모습을 보였다. 특히, 장거리 수송형 연무 사례와 복합형 연무 사례가 정체형 연무 사례보다 높은 비율로 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이는 최근 들어 우리나라의 대도시에서 중국의 고 배출지역 등 외부유입에 의한 미세먼지 피해가 심각하게 발생한 것으로 판단된다(Han et al., 2021). 연무의 유형별 월 변화(그림 3-8)에서도 마찬가지로 장거리 수송형 및 복합형 연무 사례가 우세하게 나타나는 경향을 보였으며 특히, 봄(3~5월)철과 겨울(12~2월)철에 높은 연무 일수가 나타나는 모습을 보였다.

일기도를 통하여 중관기상학적 특성을 살펴본 결과(그림 3-3, 3-4, 3-5), 봄철에 중국지역의 비교적 강한 풍속으로 인해 서울지역으로 수송된 미세먼지가 우리나라 상공에 형성된 고기압에 의한 대기 안정으로 정체하게 되는 복합형 연무 사례가 우세하게 나타났고, 겨울철(특히 12월, 1월)에는 한반도 동쪽의 고기압대와 서쪽의 저기압대가 분포하는 시베리아 기단의 영향(북서풍)으로 인해 강한 풍속을 타고 장거리 수송형 연무 사례가 우세한 빈도를 보이는 것을 확인하였다. 여름철(6~8월)에는 북태평양 기단의 영향으로 낮은 풍속에 의한 정체형 연무 사례가 우세하게 나타났으며, 여름철 고온다습한 날씨와 장마 전선의 형성 등으로 인해 미세먼지가 비에 의해 세정되어 연무 발생일이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

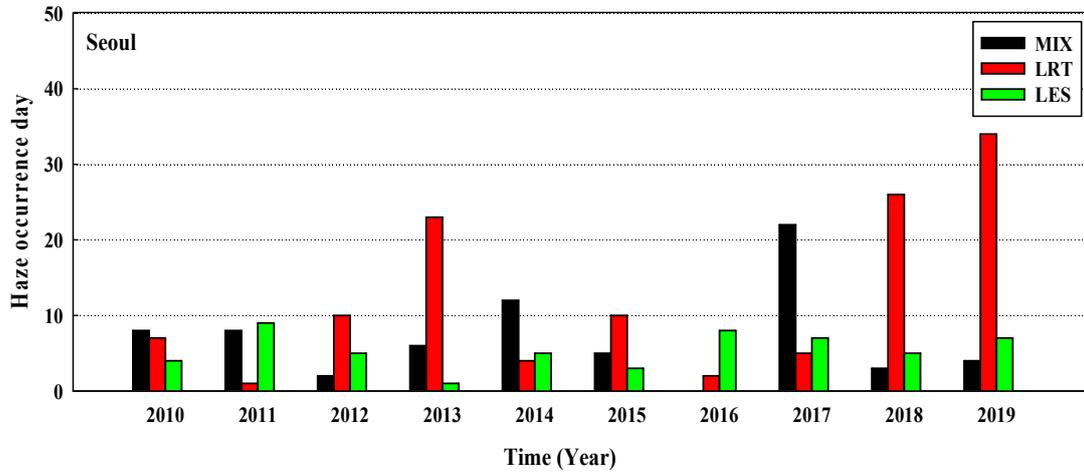


Fig. 3-7. Annual variations in occurrence days for three haze types (LES, LRT, and MIX) observed during 2010-2019.

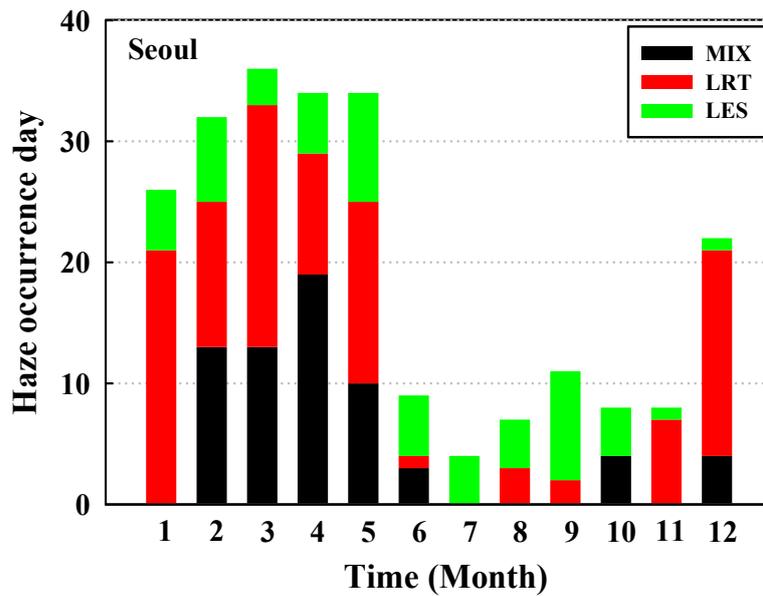


Fig. 3-8. Monthly variations in occurrence days for three haze types (LES, LRT, and MIX) observed during 2010-2019.

3.2.2. 연무 유형별 기상 및 대기질 분석

그림 3-9는 10년간(2010~2019년)의 3가지 연무 유형을 포함한 일기유형에 대해 서울에서 측정된 대기오염물질($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2)의 일평균 농도를 나타낸다. 서울에서 상대적으로 높은 대기오염 농도가 나타난 경우 대부분 연무 발생일에 해당하는 것을 확인하였으며, 이는 고농도 미세먼지 및 전구물질로 인해 연무 현상이 발생된다는 것을 확인할 수 있다. 먼저 미세먼지 중 $PM_{2.5}$ 농도의 경우 정체형 수송 사례(LES)가 $52.9 \pm 16.7 \mu g/m^3$, 장거리 수송형 사례(LRT)는 $52.4 \pm 20.4 \mu g/m^3$, 복합형 연무 사례(MIX) $47.3 \pm 12.9 \mu g/m^3$ 순으로 $PM_{2.5}$ 평균 농도가 나타났다. $PM_{2.5}$ 의 경우 PM_{10} 과 달리 국내 배출에 의한 화학 반응의 2차 생성이 기여됨을 추정할 수 있으나, 대체로 유사한 $PM_{2.5}$ 평균 농도를 보여 정체형 사례의 큰 특징을 발견하지 못하였다.

일기유형별 PM_{10} 평균 농도의 경우, 최고치를 보인 황사(Dust) 유형을 제외하고 연무의 복합형 사례($86.6 \mu g/m^3$)와 장거리 수송형 사례($84.9 \mu g/m^3$), 그리고 정체형 사례($79.9 \mu g/m^3$)가 다른 박무, 구름, 맑음, 강수의 일기유형보다 보다 높은 수치를 보였다. 연무 유형별(MIX, LRT, LES) 평균 농도는 대체로 유사한 수준을 보였으나 복합 및 장거리 수송형 연무 사례가 정체형 사례보다 소폭 높게 나타났다. 이는 PM_{10} 의 경우 조대입자인 황사가 주성분을 구성하고 있기 때문에 중국 도심지역 및 고비사막으로부터의 장거리 수송에 의한 영향이 클 것으로 판단된다.

SO_2 의 경우 다른 일기유형보다 연무일에서 장거리 수송형 사례(7.5 ppb), 복합형 사례(7.3 ppb), 정체형 사례(6.1 ppb) 순으로 제일 높게 나타났다. 이 결과는 PM_{10} 과 유사한 결과로 중국 공업지대의 매연 등으로 인한 SO_2 오염물질이 장거리 수송에 의해 국내에 영향을 미친 것으로 판단된다. 그 외 구름을 제외한 다른 일기유형에서는 모두 5 ppb 이하의 낮은 농도를 보여 연무 유형과 상대적으로 차이를 보였다. 특히, 서울의 경우 장거리 수송형 연무 사례에서 가장 큰 SO_2 농도가 나타난 것으로 보아 지역적으로 장거리 수송에 취약한 위치임을 유추할 수 있다. NO_2 의 경우, SO_2 와 마찬가지로 다른 사례보다 연무 사례에서 제일 높게 나타났으며 박무 혹은 청명한 날의 농도 수준보다 약 20% 내외로 높은 수준을

보였다. 정체형 연무와 장거리 수송형 연무의 사례별 NO₂ 농도 경향은 정체형 연무 사례(39 ppb)보다 복합형 연무 사례(45 ppb) 및 장거리 수송형 연무 사례(41 ppb)에서 소폭 높게 나타났으나 그 차이가 10% 이내로 유사한 수준으로 나타났다.

이상의 결과로 볼 때, 서울 지역의 연무 현상은 지역적인 영향을 받아 국지적인 영향보다 수송의 영향을 조금 더 받는 것으로 판단된다. 그러나 정체형 연무 사례의 영향도 복합적으로 유사하게 나타나므로 기체상 오염물질의 광화학 반응으로 인한 입자상 오염물질의 2차 생성 영향도 있을 것으로 판단된다. 이러한 2차 물질의 생성 기작은 장거리 수송 과정에서뿐만 아니라 정체형 혹은 자체 광화학 기여율이 높은 사례에도 발생하므로 향후보다 심도 있는 관련 연구가 필요할 것이다. 따라서 중국의 장거리 수송 및 국내 배출의 상대적 기여도 분석(Han et al., 2021)을 세부적으로 수행하여 4장에 자세히 나타내었다(표 4-2).

본 연구에서 유형별 연무 사례에 대한 PM₁₀과 NO₂ 농도 수준은 유사한 경향이었으나, SO₂ 농도는 장거리 수송형 사례가 상대적으로 20% 이상 높게 나타났다. 이는 SO₂의 경우, 수송에 의한 영향을 지배적으로 받아 중국 고 배출지역의 SO₂가 장거리 수송된 후 한반도 대기질에 광역적으로 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서는 연무 유형에 대한 한정된 분석결과인 만큼, 장거리 수송에 대한 SO₂의 정량적인 외부 기여도 추정은 장기간의 자료 고찰과 모델링 연구 결과가 축적되어야 할 것으로 판단된다. 그 외, 박무 현상은 연무와 마찬가지로 대기질을 악화시키는 기상 현상이지만 연무에 비해 입자상, 기체상 오염물질 모두 상대적으로 낮은 농도를 보였다. 그러나 서울의 박무 유형 상대습도(표 3-1)는 평균 84%로서 연무의 상대습도인 평균 59%보다 높으며, 높은 습도에서 2.5 μm 이하 크기의 작은 물방울이나 황산염, 질산염과 같은 흡습성 입자의 핵화 과정으로 에어로졸이 생성, 성장하는 기작을 고려해 볼 때, 그림 3-9에 나타난 박무의 미세먼지 농도 수준이 연무에 비해 결코 낮지 않음을 추론할 수 있다.

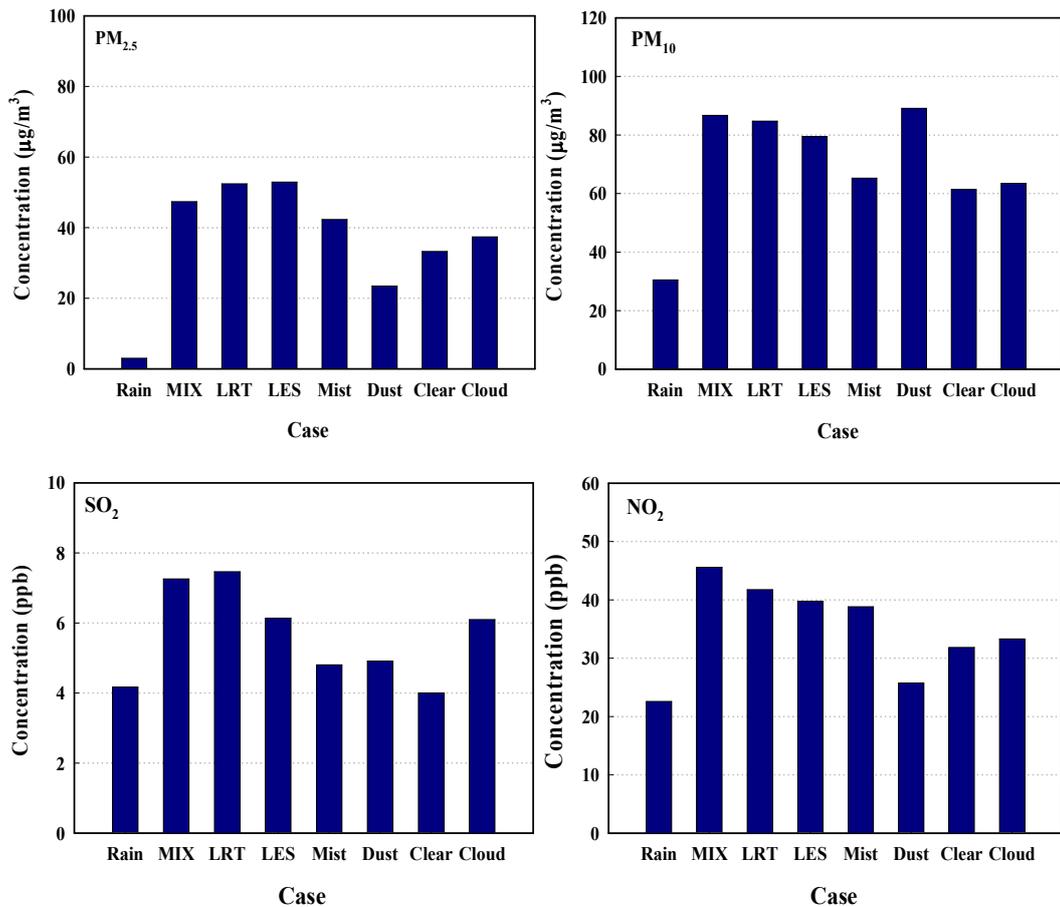


Fig. 3-9. Mean concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂ and NO₂ for several weather types observed in Seoul during 2010-2019.

그림 3-10은 연무 유형별(MIX, LRT, LES) 서울 지역의 대기오염물질(PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂) 농도의 일중 변화를 나타낸다. 먼저 PM_{2.5}의 경우 복합형 연무 사례보다 정체형 및 장거리 수송형 사례에서 약간 높은 수치를 나타내었지만 대체로 큰 차이는 아니었다. PM₁₀의 시간대별 평균 농도 변화 양상은 복합형 및 장거리 수송형 사례가 정체형 사례에 비해 높게 나타났는데, 이는 중국발 황사의 영향을 받은 것으로 판단된다(Kim et al., 2016). 또한, 세가지 유형의 농도 모두 6시 이후로 서서히 증가하여 9시경에 최대 농도 수치를 보였고, 오후 1시경에 혼합고의 성장에 따라 서서히 감소하다가 새벽 4시경에 최소 농도 수치를 나타냈다. 이는 전반적으로 기상 상태의 일변화에 의한 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. SO₂의 경우, PM₁₀의 변화 양상과 유사하게 오전 7시 이후로 서서히 증가하

여 11~12시 경에 최고 농도 수치를 보였고, 복합형 및 장거리 수송형 연무 사례가 정체형 연무 사례보다 높은 수치를 보이며 수송에 의한 영향이 지배적인 것을 확인 할 수 있었다. 이는 그림 3-9의 일평균 SO₂ 농도 결과와 유사한 경향으로, 국지배출에 의한 SO₂ 영향보다는 수송에 의해 중국 고 배출지역의 SO₂가 장거리 수송된 후 한반도에 영향을 주는 것이 지배적이라는 것을 알 수 있다.

NO₂의 시간대별 평균 농도 변화양상은 이른 아침과 초저녁 무렵에 최대 농도가 나타나는 이산형(bimodal peak) 분포를 보였는데, 이는 광화학 오존 생성에 의한 NO₂ 감소 및 일사량에 의한 혼합고의 성장과 출퇴근 자동차 배기가스에 의한 배출량 영향 등 여러 선행 사례 연구 결과와 동일한 맥락에서 해석될 수 있다. 특히, 서울은 많은 인구와 차량이 밀집된 대도시이므로 이동오염원의 영향에 의한 NO₂ 농도가 비교적 높게 나타났음을 추측할 수 있다.

전반적으로 연무 유형별 기상 및 대기질 분석에 대한 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 농도 수치와 SO₂, NO₂ 농도 경향을 비교하였을 때 물질별로 유사한 경향이 나타나 이차 생성에 의한 연무 생성에 대한 기여가 상당할 것으로 판단되며, 연무 유형 사례별로 다양한 물리적·화학적 특성이 나타날 것으로 판단된다. 따라서 4장에서는 미세먼지 농도의 상세한 특성 및 공간분포 분석을 위해 수치모의를 통해 유형별 연무 사례의 물리·화학적 특성 분석에 대한 연구를 진행하여 제시하였다.

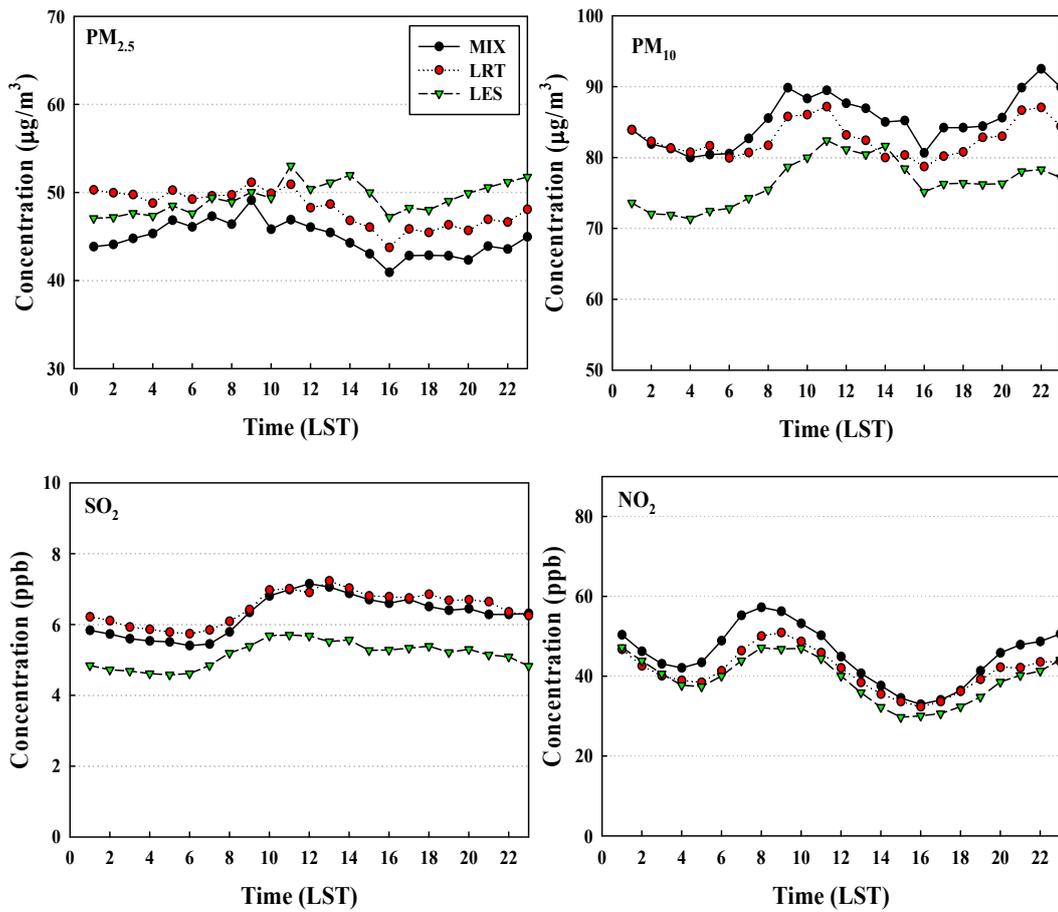


Fig. 3-10. Diurnal variations of observed air pollutant concentrations ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 and NO_2) of three haze types (MIX, LRT, and LES) during 2010-2019.

제 4 장 수치모의를 통한 연무의 물리·화학적 특성 분석

4.1. 연무 유형 대표사례의 미세먼지 농도 특성 분석

4.1.1. 복합형 연무 사례

그림 4-1은 전체 연구기간 동안 6개의 대기질 관측 지점(NG, BS, HS, GB, GJ, CJ)에서 관측된 PM_{10} 농도와 GJ에서 관측된 $PM_{2.5}$ 농도 및 2차 에어로졸(SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+) 농도의 시간적 변화를 보여준다. 연구기간 동안 GJ 지점을 제외한 나머지 5개 관측 지점의 $PM_{2.5}$ 농도와 화학 성분 농도는 자료의 부재로 인해 사용하지 못했다. 전반적으로 대다수의 관측 지점에서 높은 PM_{10} 농도($\geq 100 \mu g m^{-3}$)는 2013년 1월 12일 오후 (13:00~14:00 LST)부터 급격히 증가하기 시작하여 1월 16일 오전 또는 새벽까지 지속되었다. PM_{10} 농도 수치는 1월 13일 늦은 주간에 CJ 지점(동부 수도권)에서 약 $270 \mu g m^{-3}$, 1월 13일 야간에 HS (서부 수도권)에서 약 $260 \mu g m^{-3}$ 으로 최대 농도를 나타냈다. 또한, BS(남부 수도권)에서 PM_{10} 농도의 더 높은 사례($\geq 200 \mu g m^{-3}$)는 1월 14일 오후와 1월 15일 오후에서 1월 16일 늦은 주간 사이에 관측되었다.

연무 기간 동안 6개 관측 지점에서 총 평균 PM_{10} 농도($142 \mu g m^{-3}$)는 비연무 기간의 총 평균 농도($80 \mu g m^{-3}$) 보다 약 1.8배 더 높은 수치를 나타내었다(그림 4-1(a)). 또한, 평균 $PM_{2.5}$ 농도에서도 약 1.8배의 유의한 차이(연무 기간: $90 \mu g m^{-3}$ vs 비연무 기간: $49 \mu g m^{-3}$)를 나타내며 GJ 지점에서 관측되었다(그림 4-1(b), 표 4-1). $PM_{2.5}$ 에 대한 2차 무기 에어로졸(Secondary Inorganic Aerosol)에 대해서는 NO_3^- 농도가 $PM_{2.5}$ 농도의 증가에 크게 기여하였으며, $PM_{2.5}$ 농도와 NO_3^- 농도 사이에서($r = 0.71$, $p\text{-value} < 0.0001$) $PM_{2.5}$ 농도와 SO_4^{2-} 농도 사이($r = 0.71$, $p\text{-value} < 0.0001$)보다 더 강한 상관관계가 나타났다. 또한, 연무 기간 동안 GJ 지점에서 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 평균 주간 농도는 야간의 농도보다 약간 낮았으며, SIA (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+) 농도들도 비슷한 수치를 보였다(표 4-1).

연무 기간 동안 GJ 지점의 모델과 관측값 수치 비교에서는 PM_{10} , SO_4^{2-} 와 NO_3^-

농도에 대한 모델 예측 농도가 1.1~1.4 배로 관측값에 비해 과대모의 된 반면, PM_{2.5} 및 NH₄⁺ 농도는 1.2~1.4배로 관측값에 비해 과소모의 되었다. 이러한 모의 결과는 모델 도메인의 큰 격자 간격에 대한 혼합효과 뿐만 아니라 모델 입력 자료 (배출량 자료 등)의 불확실성에 기인한 것 일 수 있다.

그림 4-1(b)를 보면, GJ 지점의 연무 기간 동안 PM₁₀ 농도가 높은 경우(PM₁₀ ≥ 100 μg m⁻³; PM_{2.5} ≥ 70 μg m⁻³; NO₃⁻ 20~40 μg m⁻³) PM_{2.5} 및 NO₃⁻ 농도 또한 높은 패턴으로 유사하게 나타났다. 특히 야간의 무시 될 만한 광화학 반응에도 불구하고, 주간과 유사하게 높은 야간 농도의 패턴은 강한 배출원으로부터의 수송(산업시설 및 많은 교통량)에 의한 것일 수 있으며, 부분적으로 야간에서 미립자 NO₃⁻의 이질적 반응 및 증발의 감소에 의한 것일 수 있다. 예를 들어, Pathak et al. (2011)은 높은 습도 조건에서 야간에 N₂O₅ (N₂O₅ + H₂O(aq) → 2HNO₃)의 이질적 가수분해(Heterogeneous hydrolysis)가 에어로졸 농도에 영향을 미친다는 것을 나타낸 바 있다. 또한 GJ 지점의 연무 사례에서 주/야간의 농도의 향상 비율은(0.9) 비연무일의 주/야간 NO₃⁻ 농도 향상에 대한 비율(0.74) 보다 높은 비율로 나타났고(표 4-1), NH₄⁺에 의해서도 유사하게 나타났는데(연무기간: 0.94 vs 비연무기간: 0.81), 이러한 결과는 야간 입자 형성의 이질적 화학의 중요성을 뒷받침한다.

기상요소에 대한 전체 연구기간의 기상 변수(그림 4-2)는 6개 관측(NG, BS, HS, GB, GJ, CJ)지점 모두에서 비연무일(1월 10~11일과 17일)에 관측된 수치(-6.2 °C, 1.5 m s⁻¹)보다 연무일(1월 12~16일)에 관측된 수치가 평균 기온은 높게 나타났다(-2.1°C), 풍속은 낮게 나타났다(1.1 m s⁻¹). 기온의 경우, 연무일이 발생하기 유리한 종관패턴인 한반도 상공의 안정된 고기압의 영향으로 인해 비연무일에 비해 상대적으로 높은 온도가 나타난 것으로 판단되며, 풍속 또한 안정된 고기압 권에서의 낮은 풍속으로 인해 비연무일에 비해 상대적으로 낮은 수치를 보이는 것으로 판단된다.

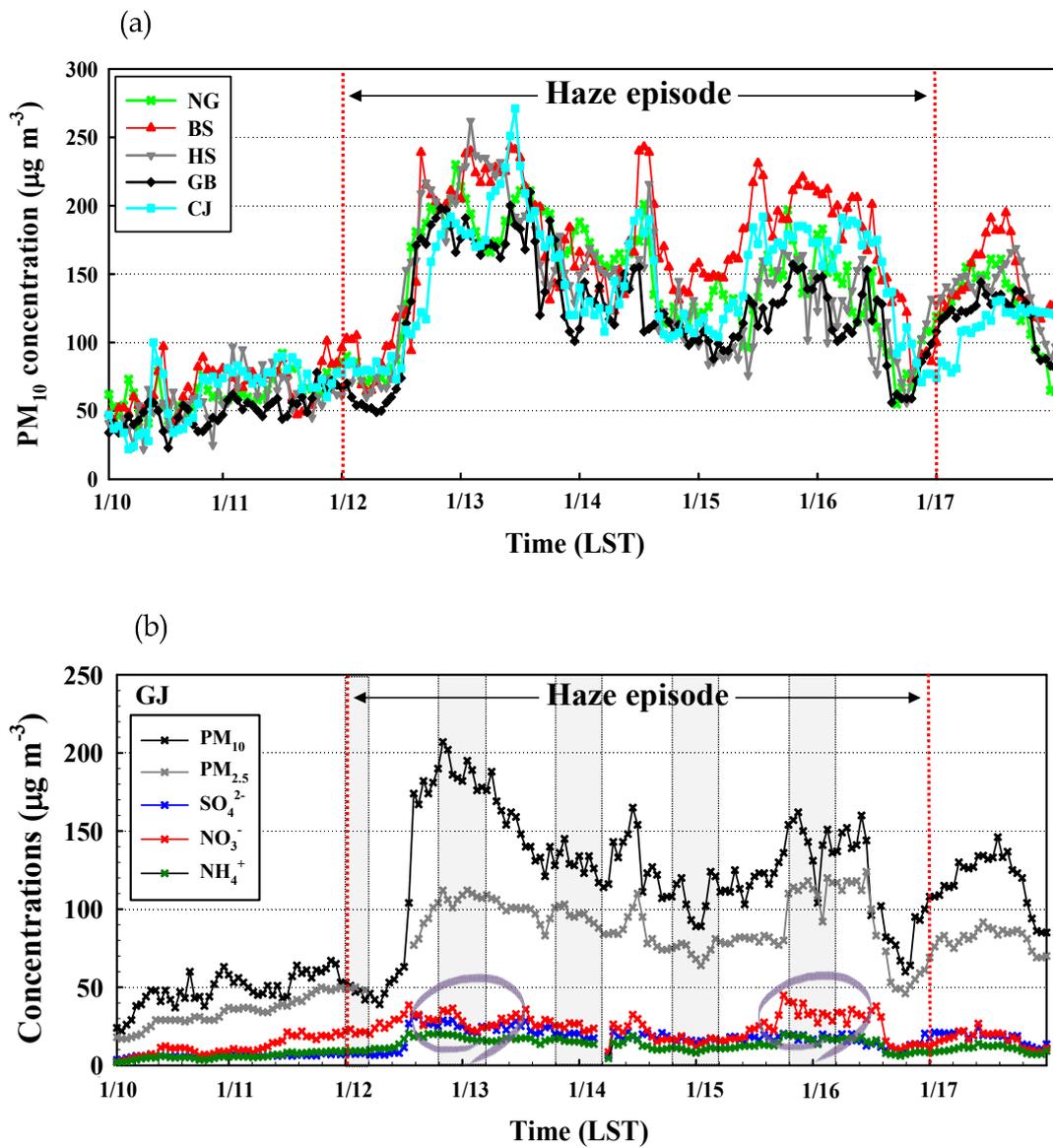


Fig. 4-1. Time series plot of (a) PM₁₀ concentrations observed at the air quality monitoring sites of Nam-gu (NG), Bongsan-dong (BS), Haengshin-dong (HS), Gangbuk-gu (GB), and Changeon-dong (CJ) and (b) the concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and SIA (SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺) for PM_{2.5} observed at Gwangjin-gu (GJ) on January 10-17, 2013.

(Source: Han et al., 2021)

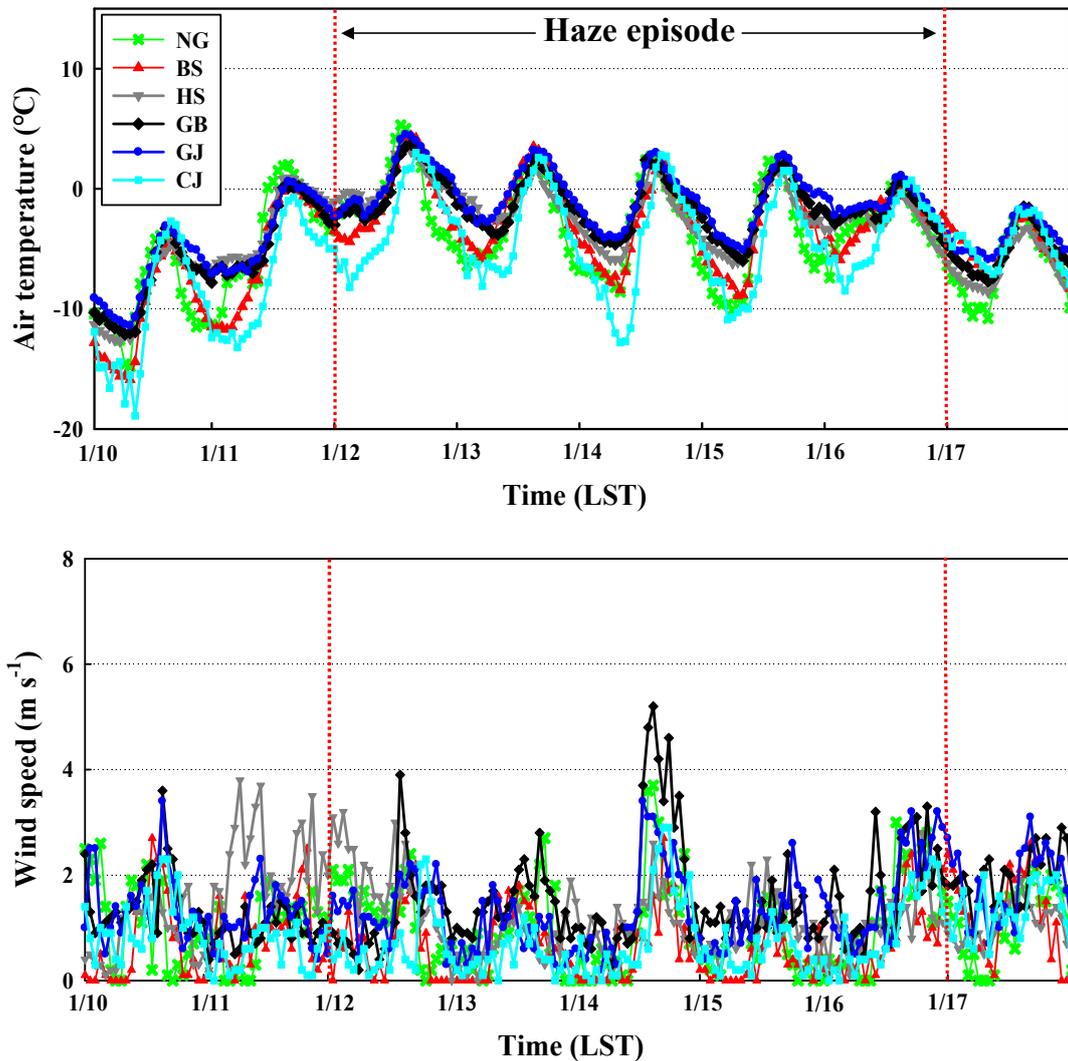


Fig. 4-2. Time series plot of air temperature and wind speeds observed at six meteorological monitoring sites located 3 - 5 km away from the air quality monitoring sites of Nam-gu (NG), Bongsan-dong (BS), Haengsing-dong (HS), Gangbuk-gu (GB), Gwangjin-gu (GJ), and Changeon-dong (CJ) on January 10 - 17, 2013.

Table 4-1. Summary (mean $\pm 1\sigma$) of the concentrations ($\mu\text{g m}^{-3}$) of PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SIA for $\text{PM}_{2.5}$, and meteorological variables between the observed (OBS) and model-predicted values (MOD) at GJ on haze and non-haze days.

Variables	Haze days				Non-haze days			
	OBS		MOD		OBS		MOD	
	Daytime	Nighttime	Daytime	Nighttime	Daytime	Nighttime	Daytime	Nighttime
PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	124.5 \pm 33.6	125.7 \pm 43.1	143.4 \pm 42.8	138.8 \pm 52.4	78.9 \pm 43.6	68.2 \pm 31.6	60.2 \pm 30.5	67.8 \pm 37.8
$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	87.5 \pm 15.9	91.1 \pm 21.1	73.3 \pm 20.3	64.7 \pm 20.5	53.0 \pm 27.6	48.7 \pm 23.4	29.1 \pm 15.5	28.4 \pm 19.3
SO_4^{2-}	18.7 \pm 6.1	17.5 \pm 5.6	20.2 \pm 8.9	18.2 \pm 6.7	10.5 \pm 6.3	9.7 \pm 5.9	6.3 \pm 3.5	7.5 \pm 4.4
NO_3^-	26.6 \pm 7.42	23.9 \pm 7.9	37.7 \pm 11.0	32.5 \pm 10.8	15.7 \pm 5.0	11.6 \pm 5.7	16.4 \pm 9.2	14.7 \pm 11.1
NH_4^+	14.5 \pm 3.6	13.6 \pm 4.0	13.1 \pm 3.6	11.2 \pm 3.6	8.3 \pm 3.1	6.7 \pm 2.7	5.4 \pm 2.9	5.0 \pm 3.6
Air temperature ($^\circ\text{C}$)	0.9 \pm 2.2	-1.6 \pm 1.7	-3.5 \pm 3.9	-8.0 \pm 2.1	-4.1 \pm 3.1	-5.4 \pm 2.9	-6.4 \pm 4.1	-10.9 \pm 2.7
Wind speed (m/s)	1.6 \pm 0.8	1.1 \pm 0.8	1.9 \pm 1.4	1.5 \pm 0.8	1.6 \pm 0.7	1.4 \pm 0.6	1.2 \pm 0.7	1.5 \pm 0.6
Relative humidity (%)	58 \pm 11	68 \pm 9	83 \pm 11	93 \pm 7	47 \pm 14	54 \pm 11	63 \pm 19	80 \pm 9

그림 4-3은 복합형 연무 사례에 대한 대기질 수치모델 결과로 2013년 1월 10일 15 LST ~ 1월 15일 15 LST 의 81-km 도메인에 대한 공간장을 나타낸다. 먼저 1월 10일 15 LST (a)를 보면, 중국 공업지대 및 북만주 지역에서 약 $80 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 $\text{PM}_{2.5}$ 가 고농도 배출지역에 걸쳐 분포되어 있는 모습이 보이고 2013년 1월 11일 15 LST (b)에서 시간의 흐름에 따라 점차 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 증가(최대 $140 \mu\text{g m}^{-3}$)하는 모습이 나타났다. 우리나라의 관측지점에서 $\text{PM}_{2.5}$ 가 급상승하는 1월 12일 15 LST (c)에는 중국 동부/남동부 및 북만주 지역에 약 $> 140 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 고농도 $\text{PM}_{2.5}$ 가 생성 및 넓은 지역에 걸쳐 분포하였고, 강한 서풍을 따라 확장된 고기압 시스템에 의해 한반도로 수송되는 모습을 잘 보여주었다. 1월 13일 15 LST (d)에는 북동풍으로 인한 북만주의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 한반도로 이동되는 모습이 보였고, 1월 14일 15 LST (e)에 일본 동쪽의 저기압성 중심이 강한 풍속을 일으키며 이동하여 한반도 서쪽의 강한 북서풍 계열의 바람 생성으로 인한 서쪽에서 동쪽으로 기류의 움직임을 방해하는 차단 효과를 일으켜 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 정체되는 모습을 보였다(그림 3-5). 마지막 날인 2013년 1월 15 LST (f)에서는 저기압성 중심이 일본의 북동쪽으로 이동하며 한반도 동쪽에 강한 북풍으로 인한 차단효과를 지속시켜 한반도의 고농도 $\text{PM}_{2.5}$ 가 지속되는 모습을 보였다(최대 $130 \mu\text{g m}^{-3}$).

Ji et al. (2014)에 따르면, 2013년 1월 베이징과 허베이 지역에서 극심한 연무 사례가 발생했으며, 1월 11~12일에 중국의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 약 $1,000 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 나타났다. 따라서, 중국 대도시 및 공장지대의 다량의 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)가 고기압 시스템(그림3-5) 및 서풍 계열의 수송으로 중국 동부에서 한국과 일본으로 수송되었을 것으로 판단된다(Chen et al., 2008; Ji et al., 2014). 또한, 일본 동쪽의 서쪽에서 동쪽으로 기류의 움직임을 방해하는 저기압성 패턴의 저지현상으로 인해 장기간의 연무현상 및 고농도 미세먼지가 나타난 것으로 사료된다.

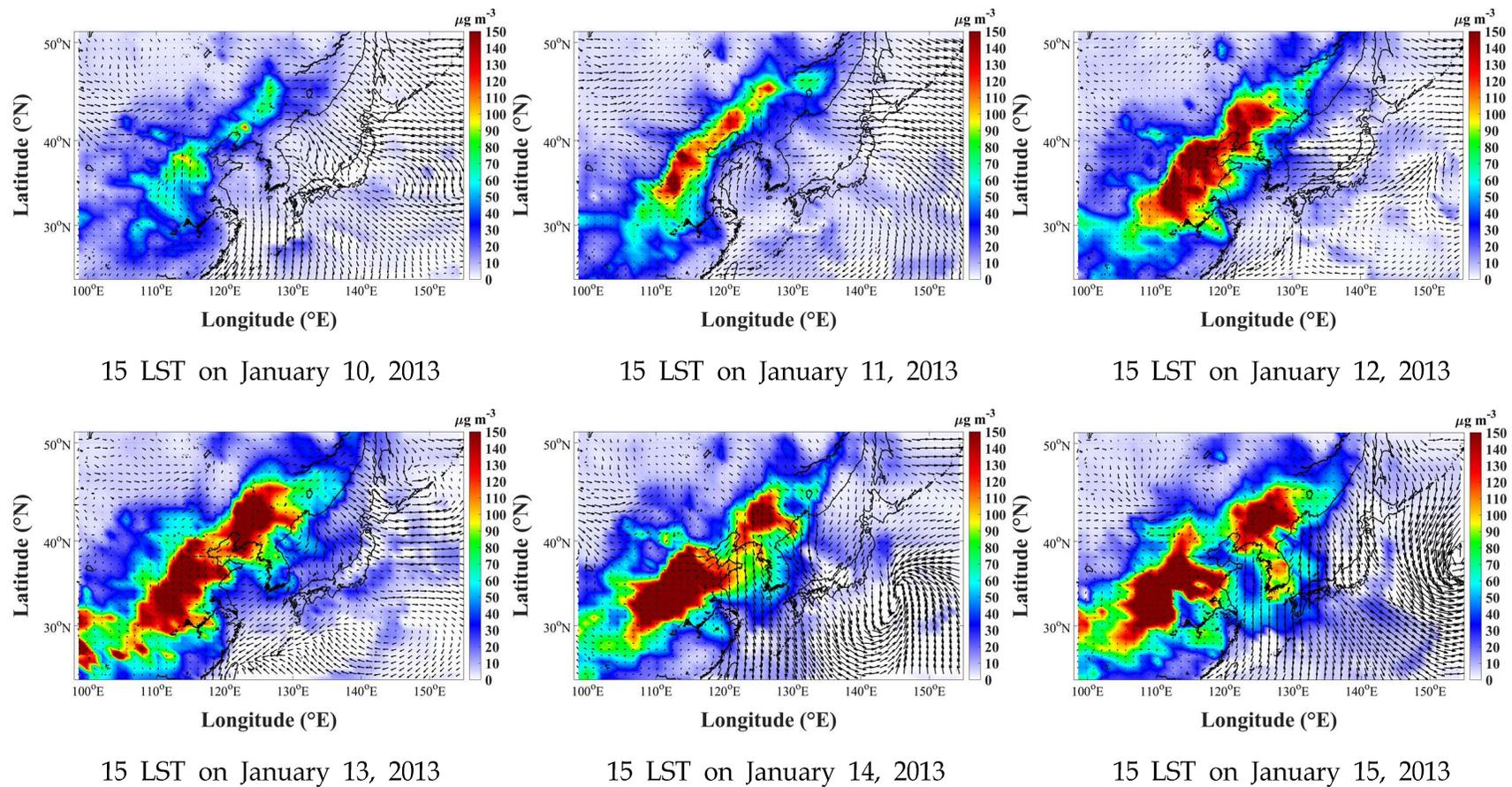
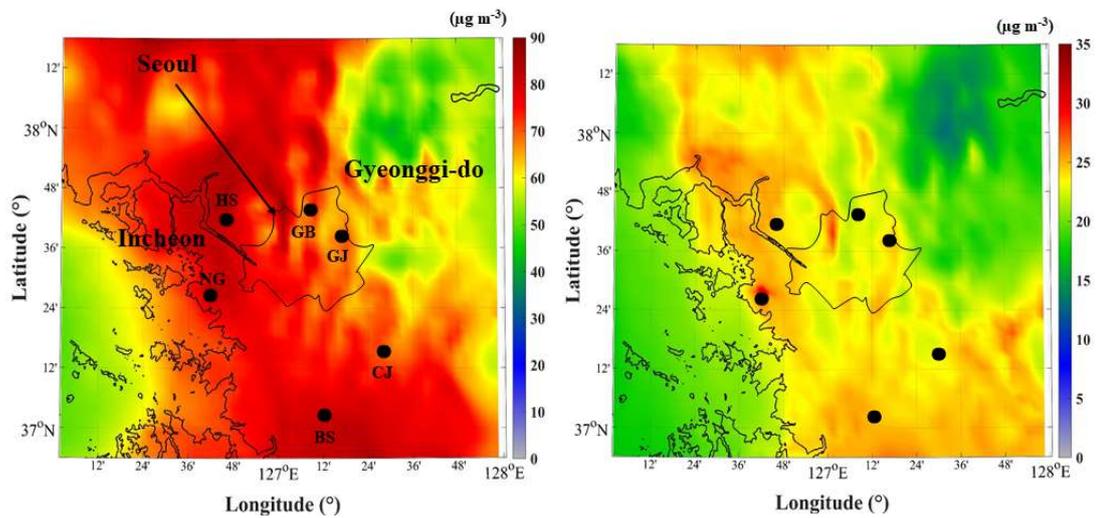


Fig. 4-3. Spatial distributions of the PM_{2.5} concentrations simulated for the 81-km model domain (D1) on January 10 - 15, 2013.

그림 4-4는 3-km 모델 도메인에 대한 모든 격자에서 평균된 PM_{2.5} 농도의 공간 분포를 연무 및 비연무 사례일에 대하여 분석하였다. 전반적으로 (a) 연무 사례일에 대한 총 평균 PM_{2.5} 농도가 78 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 수치를 보이며, 비연무 사례일에 대한 총 평균 24 $\mu\text{g m}^{-3}$ 보다 약 3.3배 정도 더 높게 나타났다. 특히, 연무 사례일의 공간적인 특성으로 높은 PM_{2.5} 농도(70 $\mu\text{g m}^{-3}$)는 남구(NG), 행신(HS) 및 봉산(BS) 지점과 같은 모델 도메인의 서부 및 남부 지역에서 예측되었다. 또한, 비연무 사례일 동안 PM_{2.5} 농도의 공간적 특성은 연무 사례일과 유사한 패턴을 보이며 남구(NG), 행신(HS) 및 봉산(BS) 지점에서 약간 높은 수치(약 25 $\mu\text{g m}^{-3}$)를 보였다. 연무 및 비연무 사례일의 농도 차이를 보기 위한 공간장에서는 수도권 서부 및 남부 지역(특히 행신(HS)와 남구(NG))에서 60~70 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 농도 차이가 나타났으며, 수도권의 동부 지역에서는 40 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 비교적 작은 차이가 나타났다.

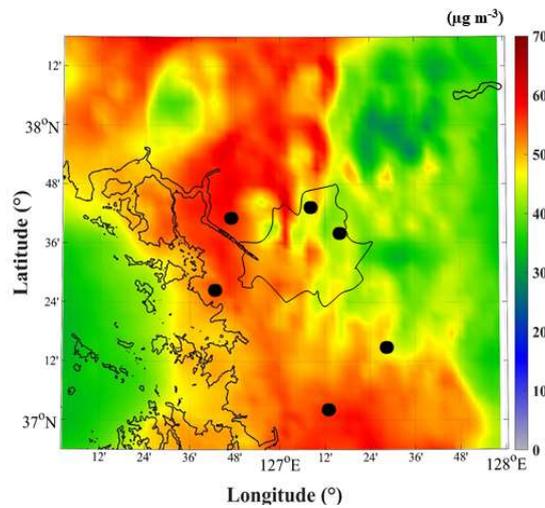
연무 사례일과 비연무 사례일의 공간적 특성을 시간적으로 알아보기 위해 1월 15~16일(연무 사례일)과 1월 10~11일(비연무 사례일) 15:00 LST에 대한 PM_{2.5} 농도의 공간 특성을 분석하였다(그림 4-5). 전반적으로, 연무 사례일 동안 모의된 PM_{2.5} 농도의 공간 분포는 모든 연무 사례일에(1월 12~16) 대한 평균 공간장과 유사한 공간 분포를 보였는데(그림 4-4), 특히 1월 15일에 매우 높은 PM_{2.5} 농도(100~150 $\mu\text{g m}^{-3}$)는 수도권의 서부 및 남부 지역(HS, NG와 BS)에 분포하여 평균장과 유사한 경향이 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 분포는 매우 낮은 풍속(< 2 m/s)을 특징으로 하는 기상 조건과 지역적인 강한 오염물질 배출의 효과에 의한 복합적인 영향이 기여된 것일 수 있다. 또한, 이러한 바람 조건은 북태평양의 강력한 저기압 시스템에 의해 차단된 낮은 속도의 기류에 의한 결과로 보인다(그림 3-5) (Lee et al., 2013; Kim et al., 2016). 다음 연무 사례일인 1월 16일의 경우, 높은 PM_{2.5} 농도(100~120 $\mu\text{g m}^{-3}$)가 모델 영역의 남쪽(BS 포함) 부분에 확산되어 있으며, 서쪽 부분에도 비교적 높은 농도가(60~90 $\mu\text{g m}^{-3}$)가 분포하고 있는 모습을 보였다. 수도권 남쪽(BS) 부근의 적은 오염 물질 배출량에도 불구하고 이 지역의 높은 PM_{2.5} 수준은 강한 배출원 지역(중국의 산업지역 및 국지 배출)으로부터 북서풍에 의한 장거리 및 단거리 수송에 기인한 것으로 보인다. 반대로, 1월 10~11일(비연무 사례일) 15:00 LST의 경우, 전체 모델 영역에서 연무일에 비

해 상대적으로 높은 풍속(약 5 m/s)을 동반한 낮은 $PM_{2.5}$ 농도($40 \mu g m^{-3}$)가 모의 되었으며 뚜렷한 공간 패턴이 나타나지 않았다.



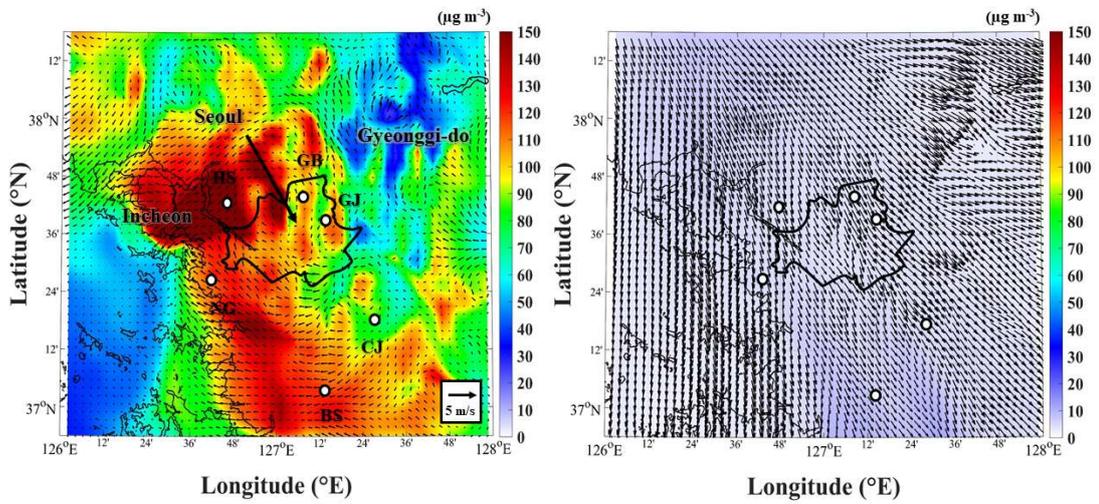
(a) Haze days

(b) Non-haze days



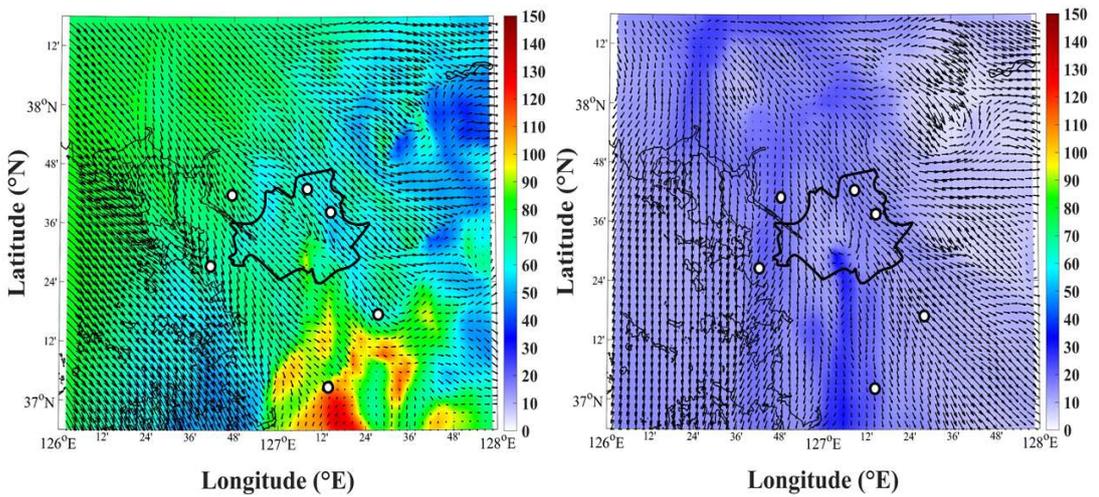
(c) Difference

Fig. 4-4. Spatial distributions of the model-predicted $PM_{2.5}$ concentrations averaged from all grids in the 3-km model domain (D4) (a) for haze days (January 12 - 16, 2013), (b) non-haze days (January 10 - 11 and 17, 2013), and (c) the difference in $PM_{2.5}$ concentrations between haze and non-haze days. (Source: Han et al., 2021)



(a) 15 LST on January 15, 2013

(b) 15 LST on January 10, 2013



(a) 15 LST on January 16, 2013

(b) 15 LST on January 11, 2013

Fig. 4-5. Spatial distributions of PM_{2.5} concentrations simulated at 15:00 LST on January 15 - 16, 2013 for haze days and January 10 - 11, 2013 for non-haze days. (Source: Han et al., 2021)

연무 사례일과 비연무 사례일의 공간적 특성(그림 4-5)에서 대기오염물질의 배출량이 적은 지역(수도권 남쪽, BS)에서의 다소 높은 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 원인을 중국의 장거리 수송과 국내 배출에 의한 복합적 영향으로 해석하였다. 따라서 본 연구에서는 연무 사례일 동안 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 장거리 수송 영향(LRT) 및 한반도의 국지적 배출(LES)의 상대적 기여도를 분석하기 위해 6개(NG, BS, HS, GB, GJ, CJ) 연구 지점 및 전체 지점 평균의 주간과 야간에 대한 기여도 분석을 실행하였다. 전반적으로 모든 지점에 대한 일평균 농도의 장거리 수송(일평균 55~62%) 기여도는 국지 배출(32~37%) 기여도 보다 1.6~1.9배 크게 나타났다. 또한, 일평균 기여도와 유사한 경향으로 주간(49~56%) 및 야간(58~68%)의 장거리 수송 기여도가 국지 배출 기여도 보다 크게 나타났다(주간의 경우 32~37%, 야간의 경우 30~39%). 이러한 결과로 미루어 볼 때, $PM_{2.5}$ 의 농도 증가 및 수도권으로의 유입은 주로 중국의 배출 원천 지역으로부터의 $PM_{2.5}$ 와 가스상 전구물질이 수송되어 수도권 주변 기상 조건의 영향으로 인해 부분적으로 국지적인 영향을 주었을 것으로 판단된다. 따라서 결과적으로 중국으로 부터의 장거리 수송에 대한 영향이 국지 자체 배출로 인한 생성 보다 연무 사례일의 $PM_{2.5}$ 농도 증가에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

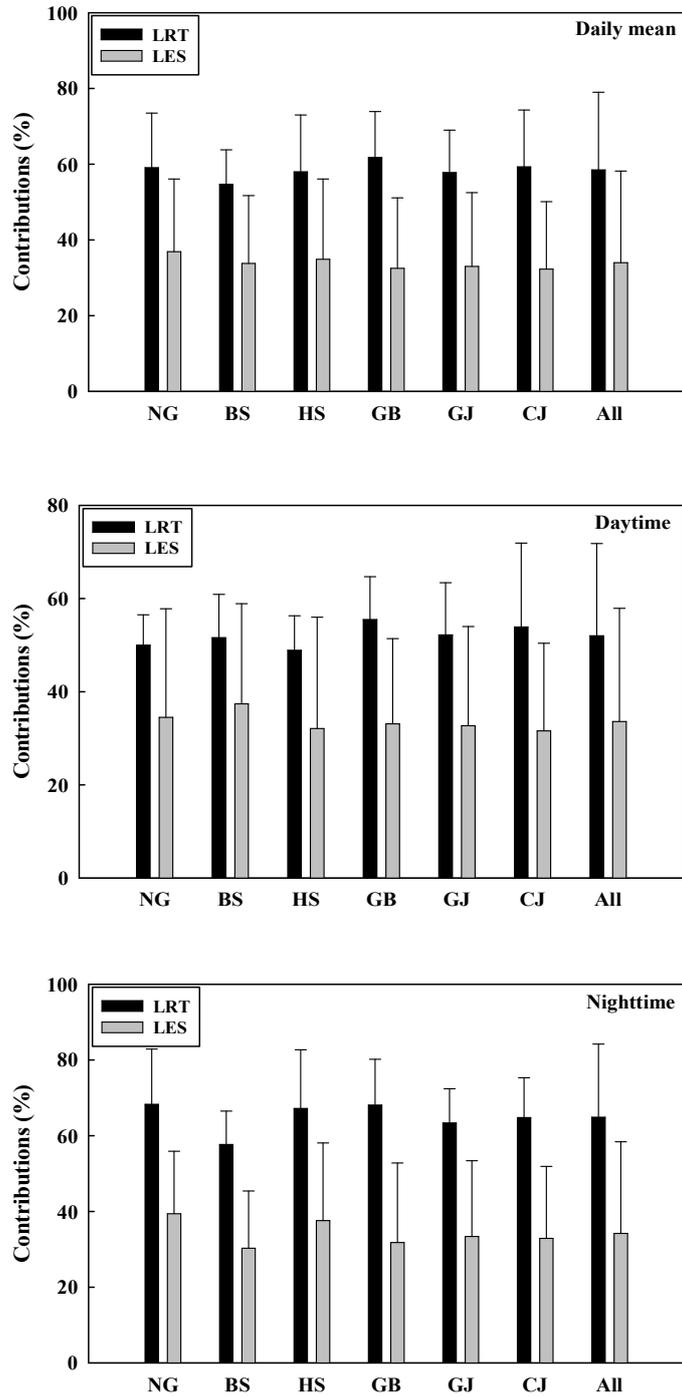


Fig. 4-6. Contributions (%) of long-range transport from China and local emissions in South Korea to PM_{2.5} concentrations at six air quality monitoring sites (NG, BS, HS, GB, GJ, and CJ) during the day and night on haze days.

표 4-2는 사례 기간 동안 모델의 예측 성능을 평가하기 위한 통계적 분석(IOA, RMSE 및 MBE)으로 기상변수(기온, 풍속)와 PM₁₀ 농도에 대하여 6개 지점(NG, BS, HS, GB, GJ, CJ)에 대한 관측 및 모의 수치를 비교하였다. 전반적으로 대부분의 관측 지점(NG 제외)에서 모델을 통해 예측된 기온은 MBE가 -1.9 °C~4.9 °C의 범위로 관측된 기온에 비해 과소모의 하는 경향이였다. 반면에 모든 관측 지점에서 풍속은 최소 0.01 m/s 부터 최대 1.9 m/s 미만의 과대모의가 나타났다. PM₁₀ 농도의 경우 GB와 GJ에서 모델의 과소모의가 나타났고, 나머지 4지점(NG, BS, HS와 CJ)에서 과대 모의가 나타났다. 또한, 기온과 PM₁₀ 농도의 IOA는 지점에 관계없이 각각 0.80과 0.71 이상으로 나타났으며, 상대적으로 풍속의 IOA는 조금 낮은 수치를 보였다(0.52~0.71). 풍속의 경우, 연구 지역의 지형지물 등에 의한 영향을 민감하게 받기 때문에 다른 변수에 비해 낮은 수치를 보인 것으로 판단된다. 그 외 지점별 기온, 풍속 및 PM₁₀의 가장 높은 IOA는 각각 NG에서 0.85, GB에서 0.71, NG에서 0.79이었다. 또한, 모든 관측 지점에서의 RMSE는 기온의 경우 4.1°C 미만, 풍속은 2.1 m/s 미만이었다. 결과적으로 본 연구의 모델 평가를 통해 기상모델을 이용한 대기질 모델의 서울 및 수도권 지역의 복합형 연무 사례일에 대한 기상 및 대기질 수치가 적합한 모의를 수행하였다고 판단하였다.

Table 4-2. Statistical evaluation of meteorological variables and PM₁₀ concentrations for the observed and model-predicted variables: results compared at six monitoring sites for the entire simulation period. The PM₁₀ data sites represent six air quality monitoring sites within Seoul metropolitan region, including Seoul, Incheon, and Gyeonggi-do, as shown in Fig. 2-3. The meteorological monitoring sites are located 3 - 5 km away from the air quality monitoring sites.

Meteorological and PM ₁₀ data sites*	Air temperature (°C)			Wind Speed (m s ⁻¹)			PM ₁₀ (µg m ⁻³)		
	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA	RMSE	MBE	IOA	RMSE	MBE
Nam-gu (NG)	0.85	3.17	3.16	0.60	1.87	1.86	0.79	60.6	31.8
Bongsan-dong (BS)	0.82	3.46	-2.59	0.52	2.10	1.89	0.76	63.9	8.5
Haengshin-dong (HS)	0.81	3.43	-3.91	0.56	1.76	1.64	0.72	67.7	31.5
Gangbuk-gu (GB)	0.81	3.76	-3.94	0.71	1.07	0.01	0.71	49.1	-29.0
Gwangjin-gu (GJ)	0.80	4.09	-4.87	0.59	1.07	0.03	0.73	46.1	-29.0
Changjeon-dong (CJ)	0.83	3.20	-1.89	0.65	1.39	0.97	0.74	61.9	17.4

^a IOA: index of agreement.

^b RMSE: root mean square error.

^c MBE: mean bias error.

(Source: Han et al., 2021)

4.1.1.1. 건강 영향 평가

표 4-3은 Benmap을 이용하여 수도권 지역의 연무 사례일과 비연무 사례일의 PM_{2.5} 농도 차이(즉, [PM_{2.5}]연무-[PM_{2.5}]비연무)에 따른 건강 영향 평가(즉, 조기 사망률)를 나타낸 것이다. 해당 연구에서 PM_{2.5} 농도 및 사망률의 차이는 각 권역 별로 평균값과 최소값, 최대값의 범위로 표시된다. 전반적인 연구결과를 살펴보면, 수도권의 모든 지역에 대해 PM_{2.5} 농도가 건강에 미치는 영향이 양의 상관관계를 나타내었다. 지역별로 겨울철 복합형 연무 현상에 인한 PM_{2.5} 농도의 평

균 차이는 서울, 인천, 경기도에서 각각 약 $94 \mu\text{g m}^{-3}$ ($80\sim 105 \mu\text{g m}^{-3}$), $112 \mu\text{g m}^{-3}$ ($89\sim 117 \mu\text{g m}^{-3}$), $93 \mu\text{g m}^{-3}$ ($65\sim 113 \mu\text{g m}^{-3}$)이며, 3지역 모두 합친 수도권의 총 평균은 약 $96 \mu\text{g m}^{-3}$ ($65\sim 117 \mu\text{g m}^{-3}$)로 나타났다. 또한, 각 지역에서 추정된 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 증가는 조기 사망률에 반영되어 연간 서울 570명, 인천 272명, 경기도 789명의 사망자 수를 예측하였다(표 4-3).

이러한 전체 수도권의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 증가는 모든 수도권 권역(연간 약 1,631명)의 총 조기 사망자 증가에 기여하였으며, 우리나라의 수도권에서 호흡기 질환으로 인한 사망자가 총 사망자의 12%를 차지한다(KOSIS, 2019)는 연구 결과를 뒷받침하였다. 또한, $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 공간 분포와 이와 관련된 조기 사망자의 공간 분포(그림 4-7)에서는 수도권의 서부 및 남부 지역에 많은 수의 조기 사망자가 분포하였으며, 연무 사례의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 증가의 공간적 패턴과 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 그러나 건강에 미치는 영향의 크기는 수도권 내부 및 주변 지역의 서로 다른 사망률 때문에 농도 변화와 직접적인 관련은 없었다.

다른 나라의 연구 결과와 비교를 위해, 전 세계 여러 국가(선진국 및 개발도상국)간의 $\text{PM}_{2.5}$ 와 관련된 조기 사망자의 영향 평가를 조사하였다. 먼저, 개발도상국의 중국은 2014년에 톈진에서 BenMAP-CE 와 IER(Integrated exposure-response) function 을 사용하여 연간 약 3,000명(Chen et al., 2017)의 조기사망자가 추정되었다. 그 밖에 인도의 델리, 뭍바이, 콜카타 등의 도시에서도 2000~2010년 동안 연간 11,020명, 2,420명, 2천190명의 조기 사망자가 추정되었다. 또한, 다른 개발도상국인 이란의 테헤란에서 AirQ 모델을 사용하여 추정된 조기 사망자 수는 2013년, 2014년, 2015년에 각각 1,500명, 1,471명, 1,365명이었다(Hadei et al., 2017). 그 외에도, 중국(시안, 광저우, 베이징, 톈진 등)의 극심한 연무 현상이 발생한 2013년 1월에 대도시에서 회귀분석 비율 모델(Poisson regression)을 사용하여 추정된 조기 사망자의 수는 85 ~ 725명으로 나타났다(Li et al., 2013). 그 밖에 선진국에서는 건강 편의 분석모델 AirQ와 AirQ programs 프로그램을 사용하여 $\text{PM}_{2.5}$ 에 기인한 조기 사망자를 추정하였는데, 일본 도쿄에서 2001년 659명, 2003년 263명으로 추정되었고(Yorifuji et al., 2005), 파리에서는 2007~2009년까지 (Kihal-talantikite, 2019) 3년간 총 2662명으로 추정되었다.

전반적으로 각기 다른 연구 기간과 다양한 건강 영향 평가 모델에 사용된 매

개 변수(예: PM_{2.5} 농도, 인구, 사망률)의 차이 때문에 다른 지역들 간의 조기 사망자 수를 직접 비교 하는데 한계가 있었으나 결과적으로 서울 수도권 지역의 결과(각각 서울, 인천, 경기도에서 발생한 조기 사망 570명, 272, 789명, 1631명)는 선진국의 도시 지역(도쿄, 파리)에 유사한 결과를 보였고 중국, 인도와 같은 개발도상국의 대도시에서 확인된 결과보다는 다소 낮게 나타나는 것을 확인하였다.

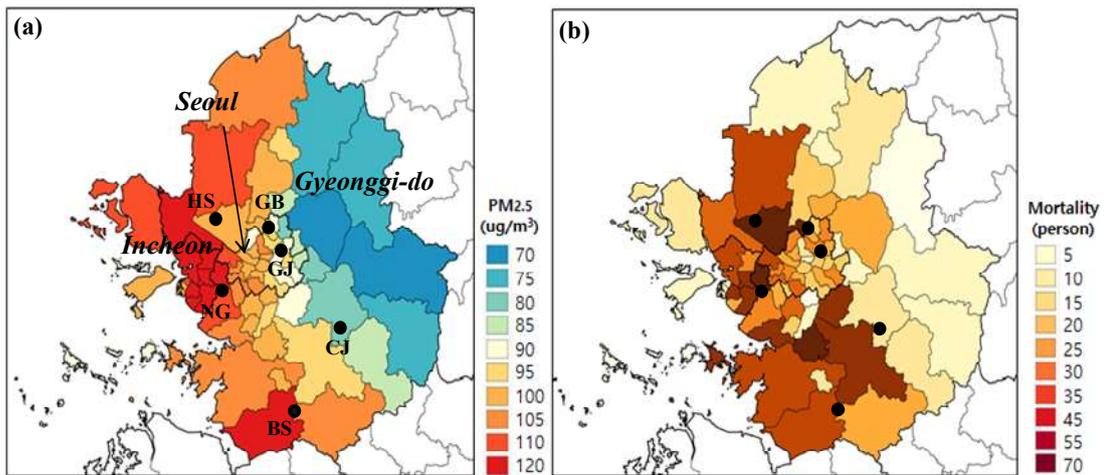


Fig. 4-7. Spatial distributions of (a) the differences in the area mean PM_{2.5} concentrations for haze (January 12 - 16, 2013) and non-haze days (January 10 - 11 and 17, 2013) (i.e., [PM_{2.5}]_{haze} - [PM_{2.5}]_{non-haze}) and (b) the number of premature deaths related to the difference in the PM_{2.5} concentrations.

(Source: Han et al., 2021)

Table 4-3. Changes in the PM_{2.5} concentrations and premature deaths attributable to the haze event. (Source: Han et al., 2021)

Region	No. of district	Area (Km ²)	PM _{2.5} concentration (µg m ⁻³)		PM _{2.5} -related health impact (person y ⁻¹)		
			Mean	Range	Mean	Range	Total districts
Seoul	25	605	94.3	79.6-105.2	22.8	9.9-41.4	570.0
Incheon	10	1063	111.5	88.7-117.1	29.9	1.9-52.7	271.5
Gyeonggi-do	31	10172	92.7	65.4-113.1	25.5	3.2-69.5	789.2
Total	66	11840	95.7	65.4-117.1	24.7	1.9-69.5	1630.7

4.1.2. 정체형 및 수송형 연무 사례

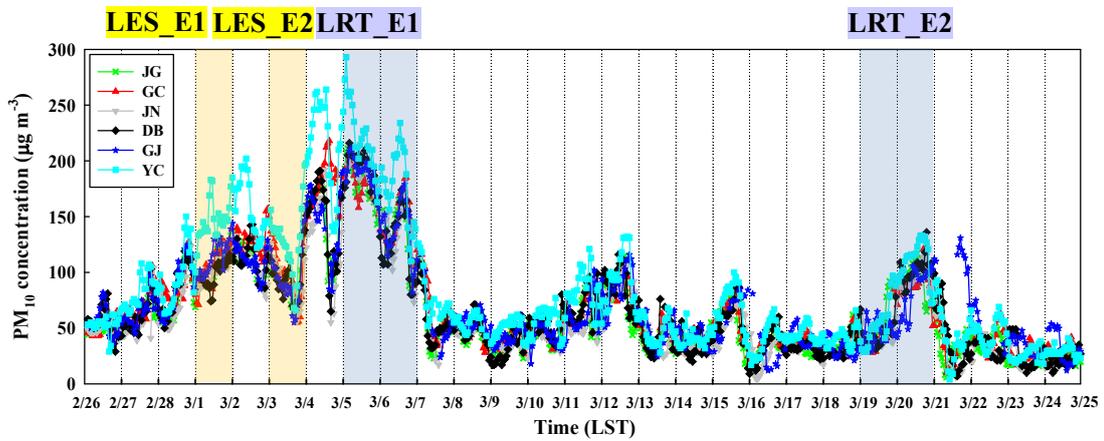
그림 4-8은 정체 및 수송형 연무 사례의 전체 연구 기간 동안(2019년 2월 26 ~ 3월 24일) 6개의 대기질 관측 지점 (JG, GC, JN, DB, GJ, YC)에서 관측된 (a) PM₁₀ 농도 시계열 및 (b) PM_{2.5} 농도의 시계열 변화를 나타낸다. 전반적으로 연무 사례일 기간에 대하여 대다수의 관측 지점에서 높은 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도($\geq 150 \mu\text{g m}^{-3}$, $\geq 100 \mu\text{g m}^{-3}$)가 발생하였다. 특히, 2019년 2월 27일 오전부터 PM_{2.5} 농도가 급격히 증가하기 시작하여 3월 2일 오전 11시에 가장 높은 수치(약 PM₁₀: 140 $\mu\text{g m}^{-3}$, PM_{2.5}: 100 $\mu\text{g m}^{-3}$)를 기록하였고 그 후 급격히 감소하여 3월 3일 오후 4시 최저 농도(PM₁₀: 약 50 $\mu\text{g m}^{-3}$, PM_{2.5}: 약 35 $\mu\text{g m}^{-3}$)를 보였다. 그 후 다시 급격히 증가하는 모습을 보이며 3월 5일 오전 2시경 최고 농도(약 PM₁₀: 200 $\mu\text{g m}^{-3}$, PM_{2.5}: 150 $\mu\text{g m}^{-3}$)를 보이고 서서히 감소하였으며, 다시 3월 6일 오후 15시경에 상승(약 PM₁₀: 180 $\mu\text{g m}^{-3}$, PM_{2.5}: 130 $\mu\text{g m}^{-3}$)하는 모습을 확인하였다.

정체 및 수송형 연무 사례의 전체 기간에 대하여 연무일과 비연무일로 구분하여 보았을 때, 연무 기간 동안(2019년 2월 27일~3월 6일, 11일~12일, 15일, 19~20일, 총 13일) 6개 관측지점의 총 평균은 PM₁₀의 경우 102 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났고, PM_{2.5} 농도는 43 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 비연무 사례기간(2019년 2월 26일, 3월 7일~10일, 13~14일, 16일~18일, 21~24일, 총 14일)의 PM₁₀ (71 $\mu\text{g m}^{-3}$) 및 PM_{2.5} 농도(23 $\mu\text{g m}^{-3}$)

m^3) 보다 각각 약 1.4배, 1.9배 더 높았다. 해당 사례에서는 연무 현상의 정체 및 수송형 사례를 구분지어 분석하기 위해 Local emission stagnant episode 1, 2(LES_E1, LES_E2)와 Long range transport episode 1, 2(LRT_E1, LRT_E2)로 분류하였다. LES_E1, E2은 정체형 연무 현상의 특성이 잘 나타나는 기간으로 2019년 3월 1일과 3월 3일로 선정하였고 LRT_E1, E2는 장거리 수송형 연무 현상이 잘 나타나는 기간으로 2019년 3월 5일 ~ 6일, 3월 19~20일로 각각 선정하였다. 이러한 연무의 유형별 대표적인 기간은 앞에서 설명한 연무 유형 분류 조건과 종관일기도 및 후방계적 분석을 통한 분석을 토대로 선정하였다. 연무 사례일의 기간 분류에 있어, 정체형 연무 기간은 국지적인 배출에 의한 연무 생성이 지배적일 것이라고 판단하여 1일로 선정하였고, 장거리 수송형 연무 기간은 국외 고배출 지역의 수송으로 인한 영향을 파악하기 위해 2일로 선정하였다. 유형별 사례에 대한 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 정체형 연무 사례의 두 기간(LES_E1, E2: 3월 1일, 3일)의 경우, 각각 $87 \mu\text{g m}^{-3}$ 과 $73 \mu\text{g m}^{-3}$ 을 기록했고, 장거리 수송형 연무 사례의 두 기간(LRT_E1, E2: 3월 5일~6일, 3월 19일~20일)은 각각 $116 \mu\text{g m}^{-3}$ 와 $54 \mu\text{g m}^{-3}$ 을 기록했다. 전반적으로 장거리 수송형 사례 중 LRT_E1 기간이 가장 높은 $\text{PM}_{2.5}$ 수치를 나타내었는데, 이는 강한 풍속(LRE_E1의 최대풍속 5 m/s)으로 인한 고배출지역의 오염물질이 수송된 것으로 판단된다.

그림 4-9은 전체 연구기간에 대한 6개(JG, GC, JN, DB, GJ, YC) 관측지점의 기상 변수(기온, 풍속)에 대한 시계열 변화로 기온의 경우, 양천 지점이 $7.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 최저 온도를 보였고 중량 지점이 $9.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 최대 온도를 보였다. 비연무일의 경우 도봉 지점이 $5.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 최저온도를 보였고, 중량 지점이 $6.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 최대온도를 나타냈다. 전반적으로 연무 사례의 기온(평균 $8.6 \text{ }^\circ\text{C}$)이 비연무 사례(평균 $6.2 \text{ }^\circ\text{C}$)보다 높게 나타났는데, 미세먼지 농도가 높게 나타나는 연무 기간의 경우 대부분 안정한 고기압성 패턴에 의한 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다. 풍속은 연무 사례일에 대해 도봉에서 최저 1.3 m/s , 중량 지점에서 최고 1.9 m/s 을 기록했으며, 비연무일에는 양천에서 최저 1.4 m/s , 중구에서 최고 2.2 m/s 를 기록했다. 풍속은 전반적으로 연무 사례에 평균 1.6 m/s 으로 비연무 사례 평균 1.8 m/s 보다 낮게 나타나는 모습을 보였는데, 약한 풍속으로 인해 미세먼지 농도가 정체 및 상승 했을 것으로 판단된다.

(a)



(b)

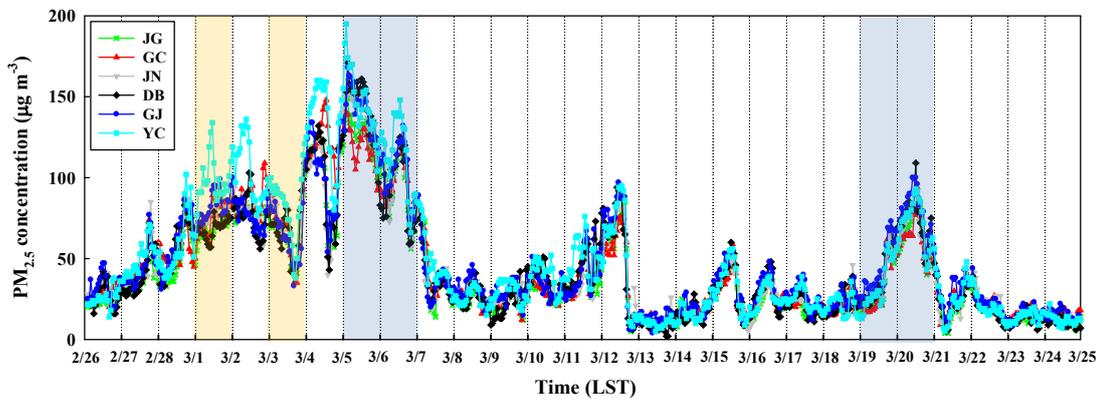


Fig. 4-8. Time series plot of (a) PM₁₀ concentrations observed at the air quality monitoring sites of Jung-gu (JG), Geumcheon-gu (GC), Jungnang-gu (JN), Dobong-gu (DB), Gwangjin-gu (GJ) and Yangcheon-gu (YC) and (b) the concentrations of PM_{2.5} observed on February 26 to March 24, 2019.

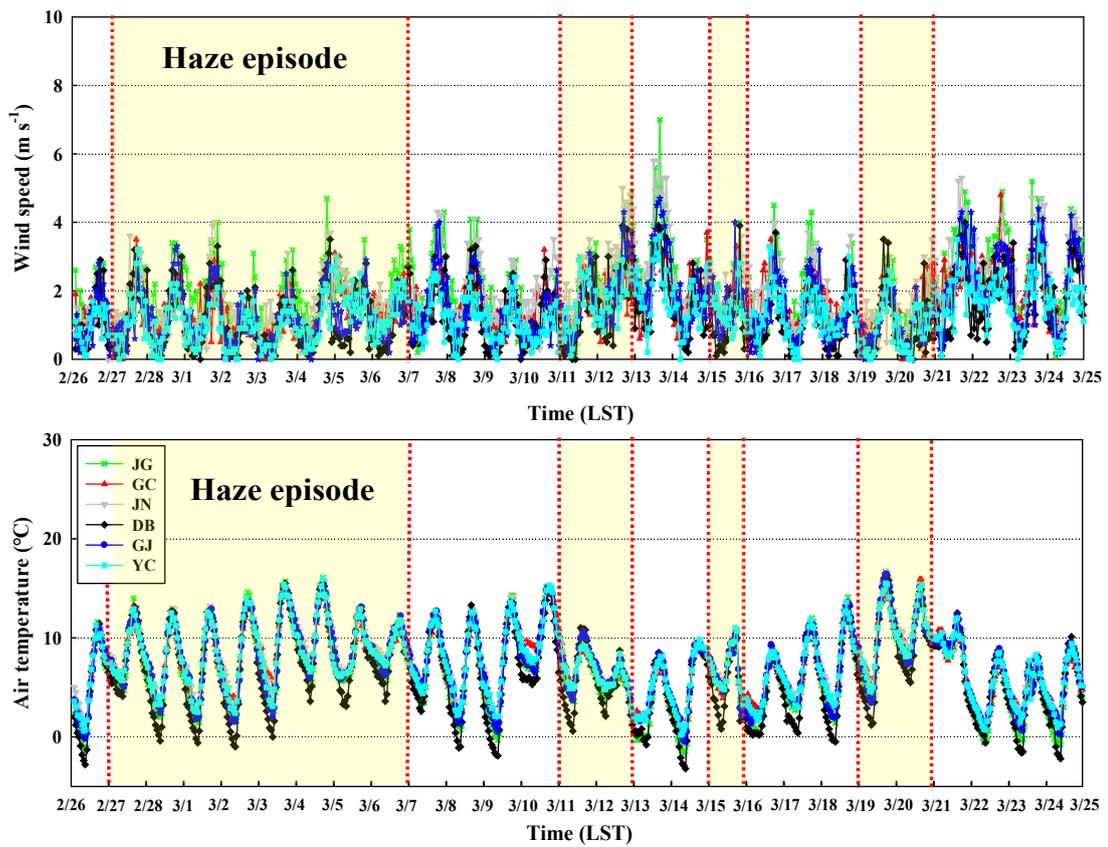


Fig. 4-9. Time series plot of air temperature and wind speeds observed at six meteorological monitoring sites located 3-5 km away from the air quality monitoring sites of Jung-gu (JG), Geumcheon-gu (GC), Jungnang-gu (JN), Dobong-gu (DB), Gwangjin-gu (GJ) and Yangcheon-gu (YC) on February 26 to March 24, 2019.

그림 4-10은 (a) 2019년 3월 3일 00 LST ~ (f) 2019년 3월 8일 00 LST 까지 24 시간 간격의 동아시아 지역에 대한 대기질 모델을 이용한 미세먼지($PM_{2.5}$) 공간장이다. 전반적으로 중국 고 배출 지역에서 생성된 고농도 미세먼지가 서풍계열의 강한 바람을 통해 한반도로 수송되는 경향(27-km 도메인)을 잘 보여주었다. 먼저 (a) 2019년 3월 3일 00 LST 의 경우 고농도의 $PM_{2.5}$ 가 고비사막을 포함한 중국의 공업 지대에 넓게 분포($>120 \mu\text{g m}^{-3}$)하는 모습을 보였으며, 한반도 북서쪽의 비교적 약한 서풍과 남한의 서해 및 수도권 서쪽 지역에서의 회전성 북동풍이 주로 한반도 서쪽(서울포함)지역에 영향(서울 지역에서 약 $90 \mu\text{g m}^{-3}$)을 미치는 모습을 보였다. 그 후 (b) 2019년 3월 4일 00 LST 에는 중국 도심지 및 공업지대를 포함한 지역의 미세먼지 농도가 전반적으로 상승($>140 \mu\text{g m}^{-3}$)했으며, 회전하는 바람이 지속되어 고농도 미세먼지가 한반도 서쪽에 정체되어 있는 모습을 보였다. 그러나 24 시간 후 (c) 2019년 3월 5일 00 LST 부터는 회전성을 띠는 바람이 한반도를 향해 강한 서풍으로 바뀌어 고농도 미세먼지가 수송되어 한반도 전체를 뒤덮었고, (d) 2019년 3월 6일 LST 에 고농도 미세먼지($>130 \mu\text{g m}^{-3}$)가 지속적으로 강한 서풍을 통해 한반도는 물론, 동해 해상을 거쳐 일본 영역까지 확장하는 모습을 보였다. 다음날인 (e) 2019년 3월 7일 00 LST 부터 매우 강한 북/북서풍의 바람을 통해 미세먼지 농도가 점차 감소하는 모습을 보였고 수도권을 포함한 한반도 남한 지역에 약 $100 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 미세먼지 농도가 분포하였으며 (f) 2019년 3월 8일 00 LST 에 강한 북서풍이 유지되며 국내 및 서울 지역의 미세먼지 농도가 점차 감소(약 $60 \mu\text{g m}^{-3}$)하는 모습을 보였다. 이처럼, 대기질 모델링의 시뮬레이션을 통해 연무 수송 사례일에 대한 미세먼지 농도의 이동 과정을 파악 하였고 전반적으로 강한 서풍계열의 바람의 영향으로 중국 대도시의 고농도 미세먼지가 우리나라로 이동하는 모습을 확인 할 수 있었다.

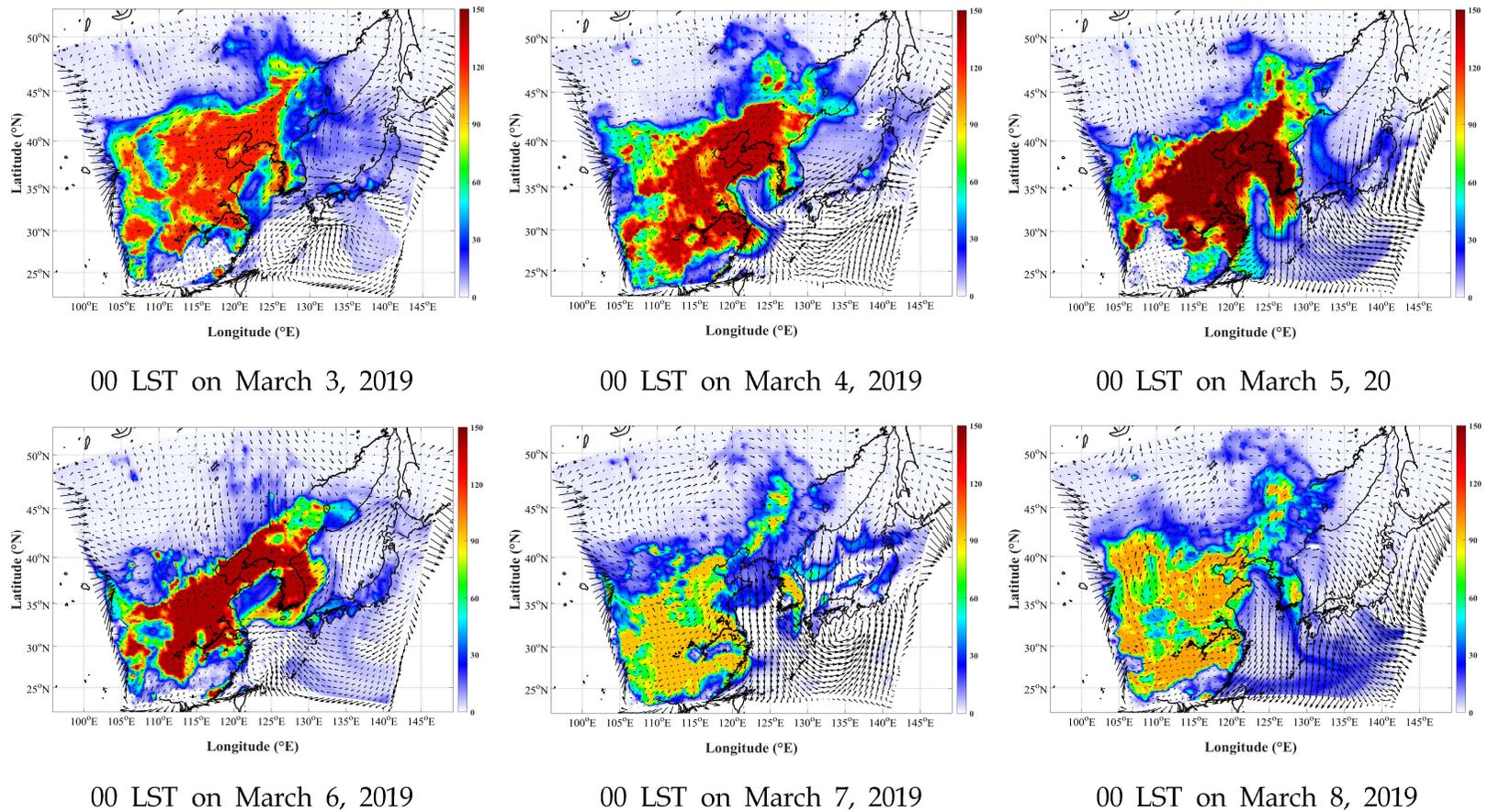


Fig. 4-10. Spatial distributions of the PM_{2.5} concentrations simulated for the 27-km model domain (D1) on March 3 - 8, 2019.

연무 사례일 기간 동안 6개(JG, GC, JN DB, GJ, YC) 지점의 연무기간 평균 PM_{10} 의 관측값은 $103 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 비연무 사례 기간의 평균 PM_{10} 농도 $39 \mu\text{g m}^{-3}$ 에 비해 약 2.6배 높게 나타나는 모습을 보였으며(표 4-4), $PM_{2.5}$ 의 경우에도 연무일의 평균 관측 값은 $77 \mu\text{g m}^{-3}$, 비연무일의 관측 값은 $24 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 PM_{10} 보다 더 큰 차이를 보이며 약 3.3배 정도 높게 나타나는 모습을 보였다. 또한, 연무일의 $PM_{2.5}$ 농도는 모든 지역에서 주간($72 \mu\text{g m}^{-3}$)보다 야간($83 \mu\text{g m}^{-3}$)이 높게 나타나 PM_{10} (주간 $105 \mu\text{g m}^{-3}$, 야간 $102 \mu\text{g m}^{-3}$)과 다른 양상을 보였다. 이는 복합형 연무 사례와 유사한 경향으로, 야간의 무시 될 만한 광화학 반응에도 주간보다 높은 농도의 폐턴이 강한 배출원으로부터의 수송(산업시설 및 많은 교통량)에 의해 발생한 것일 수 있으며, 부분적으로 야간 미립자 NO_3^- 의 이질적 반응 및 증발의 감소에 의한 것 일 수 있다.

사례일의 관측값과 수치모의 결과의 관련성에서는 PM_{10} 의 경우 주간에 전반적으로 관측값(평균 $105 \mu\text{g m}^{-3}$)에 비해 모델값($78 \mu\text{g m}^{-3}$)이 큰 농도 차이를 보이며 과소모의 하는 경향이 나타났으나, 야간에는 관측값(평균 $102 \mu\text{g m}^{-3}$)과 모델값($98 \mu\text{g m}^{-3}$)이 유사한 모의결과를 나타내었고, 부분적으로 JG 지점(관측값 $95 \mu\text{g m}^{-3}$, 모델값 $98 \mu\text{g m}^{-3}$)과 GJ 지점(관측값 $102 \mu\text{g m}^{-3}$, 모델값 $112 \mu\text{g m}^{-3}$)에서 모델이 과대모의 하는 경향도 보였다. 비연무일에 대해서는 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 모두 주·야간에 대해 모델값이 관측값에 비해 과대모의를 하는 경향을 보였는데. 특히, 야간의 경우 PM_{10} 평균 관측값 $37 \mu\text{g m}^{-3}$ 에 비해 모델값 $55 \mu\text{g m}^{-3}$ 와 $PM_{2.5}$ 평균 관측값 $24 \mu\text{g m}^{-3}$, 모델값 $32 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 각각 1.5 배, 1.3 배의 차이를 보였다. 그 밖에 기온의 경우 모든 지역에서 모델값이 과소모의 하는 경향을 보였으며, 반대로 풍속과 상대습도는 모든 지점에 대해 과대모의 하는 경향을 보였다.

Table 4-4. Summary (mean \pm 1s) of the concentrations (mg m^{-3}) of PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SIA for $\text{PM}_{2.5}$, and meteorological variables between the observed (OBS) and model-predicted values (MOD) at GJ on haze and non-haze days.

Sites	Variables	Haze days				Non-haze days			
		OBS		MOD		OBS		MOD	
		Daytime	Nighttime	Daytime	Nighttime	Daytime	Nighttime	Daytime	Nighttime
JG	PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	97.4 \pm 38.8	95.1 \pm 45.4	76.7 \pm 43.7	98.4 \pm 49.0	37.0 \pm 10.4	37.0 \pm 15.6	37.5 \pm 24.1	53.3 \pm 28
	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	65.1 \pm 29.8	75.5 \pm 33.6	61.5 \pm 34.7	67.7 \pm 35.2	20.5 \pm 8.1	21.5 \pm 11.5	27.4 \pm 14.7	31.3 \pm 14.5
	Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	9.5 \pm 3.9	6.2 \pm 2.5	7.6 \pm 3.5	4.6 \pm 2.7	7.5 \pm 4.1	3.8 \pm 3.2	5.7 \pm 3.2	2.3 \pm 2.9
	Wind speed (m s^{-1})	1.9 \pm 1.0	1.6 \pm 0.8	2.5 \pm 1.1	2.0 \pm 0.9	2.6 \pm 1.2	1.6 \pm 0.9	3.2 \pm 1.5	2.4 \pm 1.1
	Relative humidity (%)	45 \pm 19	50 \pm 17	65 \pm 17	78 \pm 11	41 \pm 21	52 \pm 19	58 \pm 17	78 \pm 14
GC	PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	107.5 \pm 45.2	98.6 \pm 45.5	85.0 \pm 44.5	98.3 \pm 42.9	40.7 \pm 10.6	38.8 \pm 15.7	42.9 \pm 23.8	55.7 \pm 23.5
	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	70.9 \pm 32.7	80.2 \pm 30.1	65.8 \pm 31.8	69.2 \pm 27.9	23.0 \pm 7.9	23.7 \pm 11.4	31.8 \pm 16.1	30.8 \pm 11.7
	Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	9.5 \pm 3.2	7.2 \pm 2.2	7.4 \pm 3.5	4.3 \pm 3.0	7.7 \pm 3.3	5.2 \pm 2.9	5.5 \pm 3.1	2.1 \pm 3.2
	Wind speed (m s^{-1})	1.7 \pm 0.7	1.2 \pm 0.8	2.4 \pm 1.3	1.6 \pm 1.6	2.1 \pm 0.7	1.5 \pm 0.6	3.1 \pm 1.6	2.0 \pm 1.4
	Relative humidity (%)	--	--	--	--	--	--	--	--
JN	PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	95.0 \pm 40.8	93.2 \pm 45.6	67.1 \pm 42.4	89.2 \pm 42.2	35.4 \pm 11.7	33.9 \pm 14.3	32.1 \pm 19.9	51.3 \pm 25.0
	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	70.5 \pm 32.2	82.4 \pm 34.8	54.8 \pm 29.7	61.5 \pm 28.2	23.6 \pm 9.5	23.6 \pm 11.0	24.4 \pm 13.1	30.2 \pm 12.9
	Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	9.8 \pm 3.6	7.8 \pm 2.4	8.8 \pm 4.1	4.7 \pm 2.9	7.84 \pm 3.65	5.4 \pm 2.9	6.8 \pm 3.6	2.4 \pm 3.2
	Wind speed (m s^{-1})	1.9 \pm 1.0	1.4 \pm 0.9	2.3 \pm 1.3	1.3 \pm 0.7	2.51 \pm 1.23	1.7 \pm 0.9	3.2 \pm 1.7	1.7 \pm 1.0
	Relative humidity (%)	48 \pm 18	51 \pm 16	60 \pm 18	79 \pm 11	44 \pm 21	52 \pm 18	53 \pm 18	78 \pm 13
DB	PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	101.1 \pm 41.1	97.0 \pm 45.6	62.6 \pm 36.6	72.7 \pm 35.4	40.2 \pm 14.9	35.3 \pm 16.0	28.9 \pm 16.0	33.3 \pm 17.7
	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	69.8 \pm 34.2	79.7 \pm 36.4	50.4 \pm 26.0	58.1 \pm 25.9	23.3 \pm 11.0	21.8 \pm 11.7	22.9 \pm 10.5	22.7 \pm 9.1
	Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	9.3 \pm 4.2	5.5 \pm 3.2	7.7 \pm 3.3	5.2 \pm 2.3	7.5 \pm 4.0	3.2 \pm 3.3	5.6 \pm 3.2	2.5 \pm 2.9
	Wind speed (m s^{-1})	1.5 \pm 0.9	0.8 \pm 0.8	3.2 \pm 2	3.3 \pm 2.1	1.8 \pm 1.0	1.0 \pm 0.7	4.3 \pm 2.3	3.6 \pm 2.2
	Relative humidity (%)	53 \pm 21	60 \pm 16	64 \pm 15	73 \pm 10	47 \pm 22	60 \pm 19	58 \pm 16	74 \pm 12
GJ	PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	102.8 \pm 39.5	101.7 \pm 43.9	84.3 \pm 43.8	112.3 \pm 49.4	42.8 \pm 13.3	39.4 \pm 15.3	41.4 \pm 28.3	62.4 \pm 35.3
	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	72.2 \pm 32.4	83.0 \pm 35.8	64.6 \pm 34.0	74.2 \pm 33.7	25.8 \pm 10	24.93 \pm 11.0	28.5 \pm 16.2	34.7 \pm 17.0
	Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	9.5 \pm 3.6	7.1 \pm 2.7	6.9 \pm 2.3	5.6 \pm 2.0	7.8 \pm 3.7	6.9 \pm 2.9	5.8 \pm 2.4	4.0 \pm 2.2
	Wind speed (m s^{-1})	1.5 \pm 0.8	0.1 \pm 0.6	2.7 \pm 1.6	1.8 \pm 0.9	2.1 \pm 1.1	1.4 \pm 0.9	3.8 \pm 2.0	2.8 \pm 1.5
	Relative humidity (%)	52 \pm 19	57 \pm 16	71 \pm 13	76 \pm 12	47 \pm 21	56 \pm 18	61 \pm 16	71 \pm 13
YC	PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	127.3 \pm 53.9	126.1 \pm 62.2	94.4 \pm 48.3	118.9 \pm 48.8	47.1 \pm 13.8	44.4 \pm 17.7	49.9 \pm 31.4	72.9 \pm 35.0
	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	79.8 \pm 38.7	97.5 \pm 42.4	73.4 \pm 39.5	86.9 \pm 39.8	23.9 \pm 11.1	24.1 \pm 13.0	33.8 \pm 19.5	38.7 \pm 17.0
	Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	9.8 \pm 3.3	6.9 \pm 2.4	7.1 \pm 3.4	4.2 \pm 2.8	8.0 \pm 3.3	5.1 \pm 2.8	5.5 \pm 3.0	2.4 \pm 2.8
	Wind speed (m s^{-1})	1.5 \pm 0.7	0.9 \pm 0.7	2.4 \pm 1.1	1.8 \pm 0.9	1.7 \pm 0.8	1.1 \pm 0.7	3.3 \pm 1.7	2.6 \pm 1.5
	Relative humidity (%)	--	--	--	--	--	--	--	--

그림 4-11은 대기질 모델의 1-km 격자 도메인의 모든 격자에서 평균된 $PM_{2.5}$ 농도의 공간 분포를 나타낸다. (a) 연무 사례일 및 (b) 비연무 사례일 그리고 (c) 연무 사례일과 비연무 사례일의 차이에 대하여 각각 분석하였다. 먼저, 연무 사례일은 정체 및 수송형 사례를 모두 포함한 2019년 2월 27~3월 6일, 11일~12일, 15일, 19~20일(총 13일)이며, 연무 사례일을 제외한 날 총 14일을 비연무일(2019년 2월 26일, 3월 7일~10일, 13~14일, 16~18일, 21~24일)로 선정하였다.

(a) 연무 사례일에 대한 공간장을 살펴보면, 총 격자의 평균 $PM_{2.5}$ 농도가 $59 \mu g m^{-3}$ 로 (b) 비연무 사례일에 대한 평균 $PM_{2.5}$ 농도인 $24 \mu g m^{-3}$ 보다 약 2.5 배 더 높게 모의 하였다. 공간적인 특징으로는 인천 및 서해 연안 지역과 서울(평균 $70 \mu g m^{-3}$)의 중심 부근(특히, YC 지점 $68 \mu g m^{-3}$, GJ 지점 $65 \mu g m^{-3}$, JG 지점 $64 \mu g m^{-3}$)에서 상대적으로 높은 농도가 나타났으며, 그 외 서울의 북쪽 및 동쪽(DB 지점 $55 \mu g m^{-3}$, JN 지점 $59 \mu g m^{-3}$)과 남쪽 지점(GC 지점 $63 \mu g m^{-3}$)에서는 상대적으로 약간 낮은 농도가 나타났다. 반면, 비연무 사례일의 경우도 연무 사례일과 유사한 공간적 패턴을 보였으나 (YC 지점 $28 \mu g m^{-3}$, GJ 지점 $27 \mu g m^{-3}$, JG 지점 $26 \mu g m^{-3}$, GC 지점 $27 \mu g m^{-3}$, JN 지점 $26 \mu g m^{-3}$, DB 지점 $22 \mu g m^{-3}$) 상대적으로 낮은 $PM_{2.5}$ 농도(약 $30 \mu g m^{-3}$)가 나타났다. (c) 연무 사례일과 비연무 사례일의 차이에 대한 $PM_{2.5}$ 공간장에서는 서해 연안과 인천 및 서울 중심지의 $PM_{2.5}$ 농도가 $40\sim 50 \mu g m^{-3}$ 로 유의한 차이를 보였고, 반면에 수도권의 동부 지역에서는 작은 차이가 나타났다(약 $20 \mu g m^{-3}$).

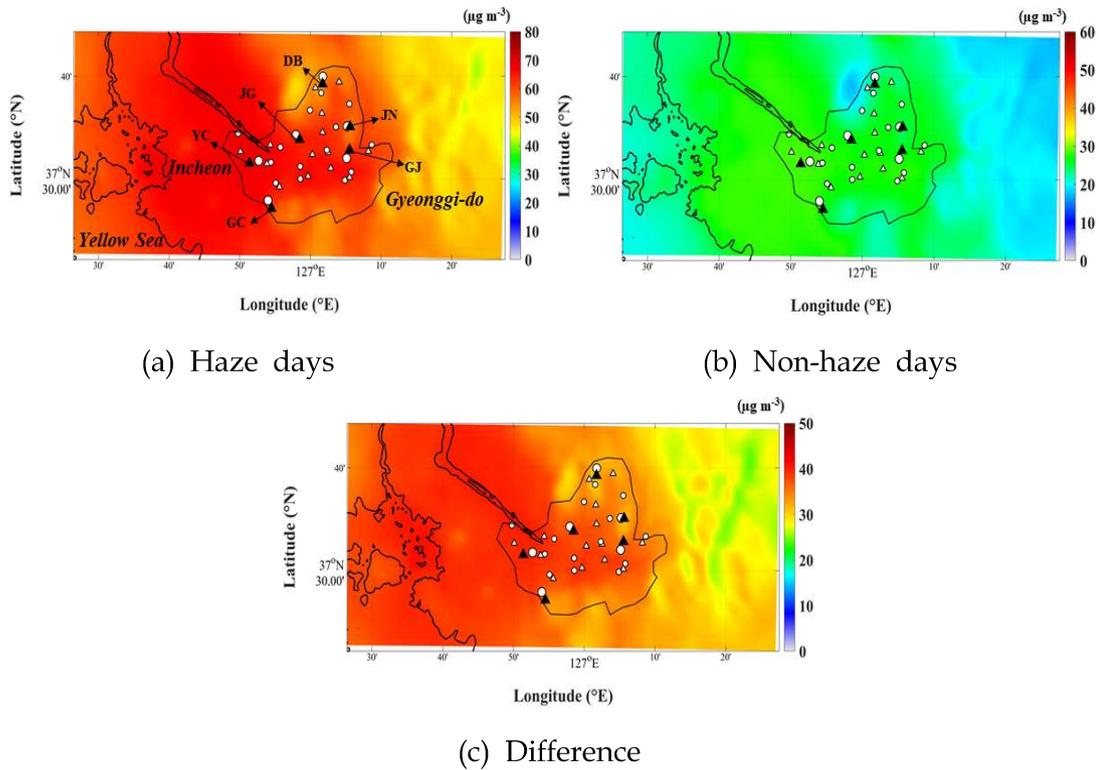
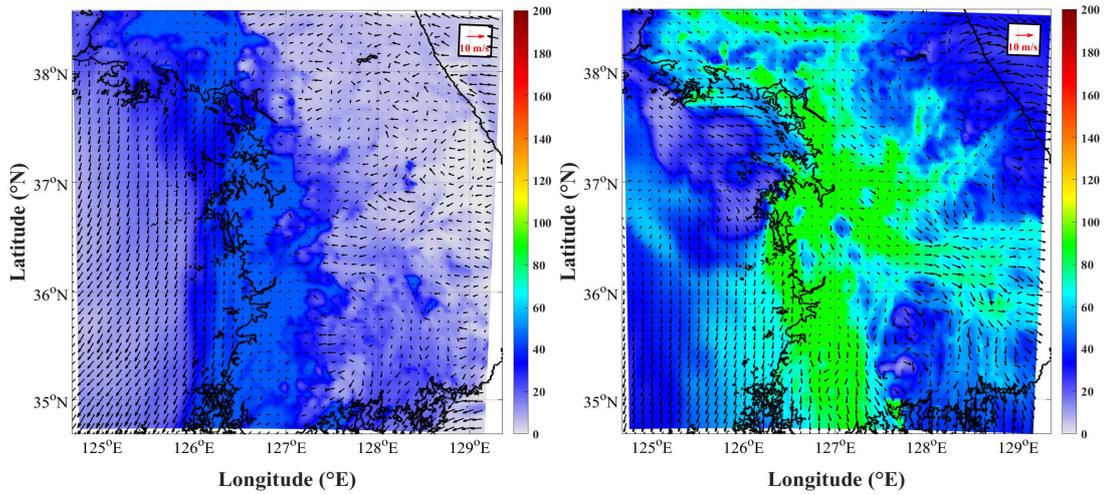


Fig. 4-11. Spatial distributions of the model-predicted $PM_{2.5}$ concentrations averaged from all grids in the 3-km model domain (D4) (a) for haze days (February 27-March 6, 11-12, 15, 19-20, 2019), (b) non-haze days (February 26, March 7-10, 13-14, 16-18, 21-24, 2019), and (c) the difference in $PM_{2.5}$ concentrations between haze and non-haze days.

더 자세한 정보를 얻기 위해, 본 연구에서는 3월 1일(정체형 연무 사례)에 대한 3-km 격자와 1-km 격자에 대해 모의된 $PM_{2.5}$ 농도의 공간 분포 특성을 분석하였다(그림 4-12, 4-13). 정체형 연무 사례일 동안 모의된 3-km 공간장의 $PM_{2.5}$ 농도 분포는 한반도의 서해안 및 수도권 지역의 서쪽에 낮은 풍속과 함께 약 $40\sim 50 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 $PM_{2.5}$ 농도가 분포하는 모습을 보였다 ((a) 2019년 3월 1일 04 LST). 6시간 후의 공간장 (b) 2019년 3월 1일 10 LST 에서도 낮은 풍속(약 2~3 m/s)은 유지되었으며 상대적으로 서쪽에서 비교적 강하게 불어오던 바람이 한반도의 육지로 들어오며 급격히 낮아지는 특징을 보였다. 이러한 분포는 매우 낮은 풍속을 특징으로 하는 기상 조건과 서울 및 수도권 지역에서의 강한 오염물질

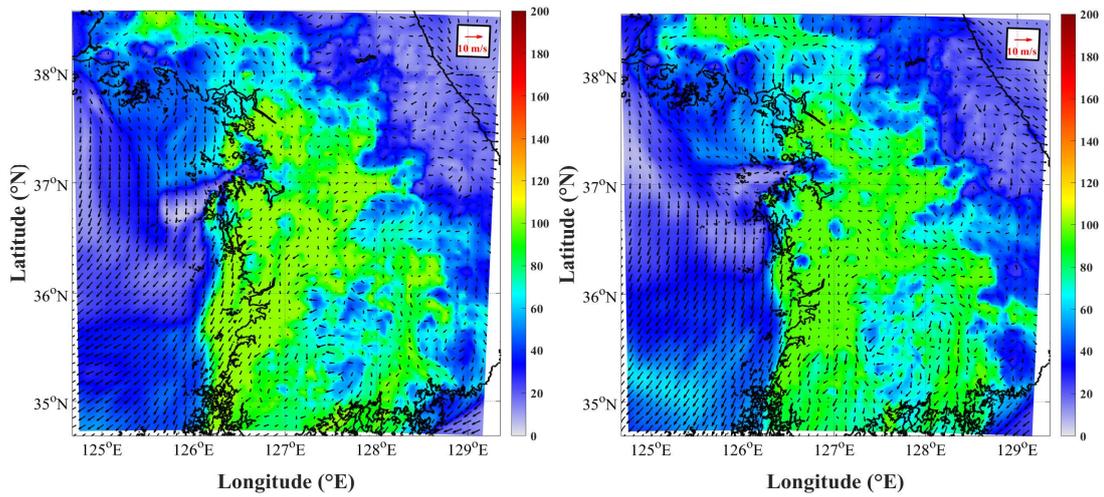
배출의 효과에 의한 복합적인 영향이 기여된 것일 수 있으며 수도권 서쪽 부근에서 80~100 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 확인되었다. 오후 시간대인 (c) 2019년 3월 1일 16 LST 에서는 수도권 및 한반도 서쪽 부근의 풍속이 더욱 약해져 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 상승(약 100~110 $\mu\text{g m}^{-3}$)하는 모습을 보였고, (d) 2019년 3월 1일 22 LST 에서 지속적으로 한반도 육상의 풍속이 매우 낮게 유지되며 고농도 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 (>100 $\mu\text{g m}^{-3}$)가 분포하는 모습을 보였다. 전반적으로 정체형 사례에서는 시간의 흐름에 따라 낮은 풍속 및 국지 순환의 영향으로 인해 한반도에서 $\text{PM}_{2.5}$ 고농도 현상이 유지되었다. 이는 중국 공업단지에서의 강한 풍속에 의한 오염농도의 수송이 아닌 국내의 자체적인 배출에 의한 고농도 발생과 한반도 지역의 종관기상학적인(그림 3-4) 특징에 의한 낮은 풍속을 동반한 정체 현상을 의미한다.

그림 4-13는 서울 지역에 대해 좀 더 세부적인 정체형 연무 사례의 공간 분포를 알아보기 위한 공간장으로 4-12와 동일한 시간대의 1-km 격자 공간장이다. 먼저 (a) 2019년 3월 1일 04 LST 에서 서울 및 서해안 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 서쪽 지역(서해안 및 인천지역)의 남/남동풍 등 다양한 방향의 풍향으로 20~40 $\mu\text{g m}^{-3}$ 정도의 농도 분포를 보였다. 반면에 서울의 동쪽 지역에서는 동풍계열의 풍향과 0~20 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 서쪽보다 낮은 농도 분포를 보였다. (b) 2019년 3월 1일 10 LST 에는 남서풍 계열의 풍향과 함께 평균 약 2 m/s 로 낮은 풍속으로 인해, $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 서해안 및 인천 지역과 서울 전역에서 상승하는 모습을 보였다(70~80 $\mu\text{g m}^{-3}$). 6시간 경과 후 (c) 2019년 3월 1일 16 LST 에서도 (b) 와 유사한 패턴을 유지하며 서울 및 서해안 지역에서 120 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 높은 수준으로 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 유지하였고, 동쪽으로 이동하는 모습을 보였다. (d) 2019년 3월 1일 22 LST에 낮은 풍속의 북풍/북서풍과 남풍/남서풍이 수렴하며 서풍이 생성되어 서울 지역 전역에 고농도 $\text{PM}_{2.5}$ (약 100 $\mu\text{g m}^{-3}$)가 유지되며 동쪽으로 이동하게 되는 모습을 잘 보여주었다.



(a) 04 LST on March 1, 2019

(b) 10 LST on March 1, 2019



(c) 16 LST on March 1, 2019

(d) 22 LST on March 1, 2019

Fig. 4-12. Spatial distributions of PM_{2.5} concentrations simulated for 3-km model domain (D3) at 04:00 LST to 22:00 LST on March 1, 2019 for local emission stagnant of haze days.

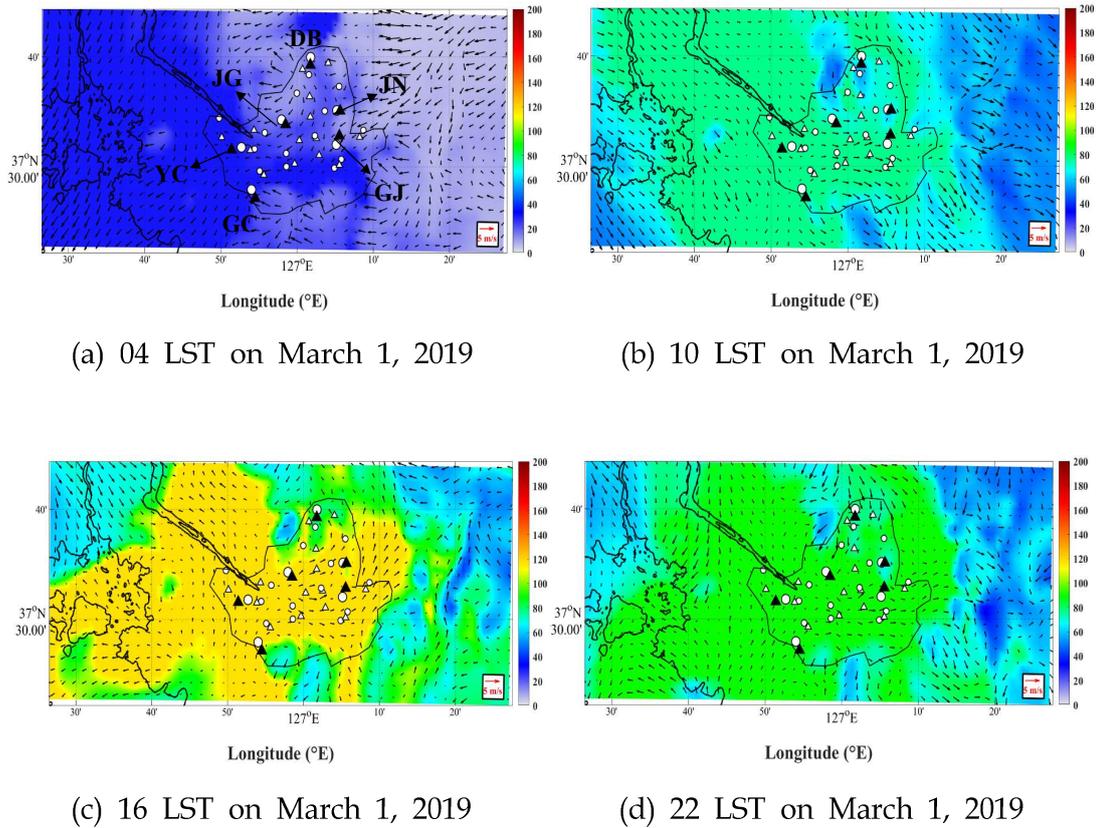


Fig. 4-13. Spatial distributions of $PM_{2.5}$ concentrations simulated for 1-km model domain (D4) at 04:00 LST to 22:00 LST on March 1, 2019 for local emission stagnant of haze days.

그림 4-14은 장거리 수송형 연무 사례(2019년 3월 5일~6일)에 대한 3-km 격자의 PM_{2.5} 공간 분포로 정체형 연무 사례와는 다른 양상을 보였다. 먼저 (a) 2019년 3월 5일 00 LST 공간 분포에서는 한반도 서쪽에서 강한 서풍/남서풍을 따라 고농도의 PM_{2.5} 농도(약 > 170 $\mu\text{g m}^{-3}$)가 한반도의 서쪽 지역에 분포되어 있는 모습을 보였다. 반면에 한반도 육상에서는 여러 방향으로 일정한 기준 없이 이동하는 풍향이 나타났는데, 이는 지표층의 도심지 및 건물 등 여러 지형지물이 영향을 주었을 것으로 판단된다. (b) 2019년 3월 5일 12 LST 에서는 한반도 서쪽 방향의 PM_{2.5} 농도가 강한 서풍/남서풍의 바람을 따라 동쪽으로 이동하였다. 그로 인해 농도 수치가 약간 낮아지는(150 $\mu\text{g m}^{-3}$) 모습을 보였으며, (c) 2019년 3월 6일 00 LST 에서 PM_{2.5} 농도(130~140 $\mu\text{g m}^{-3}$) 수치가 북서풍 및 남서풍을 따라 서쪽으로 이동하는 모습을 보였다. (d) 2019년 3월 6일 12 LST 에서는 수도권을 포함한 중부지방에서 강한 서풍(약 8 m/s)을 따라 PM_{2.5} 농도(100~110 $\mu\text{g m}^{-3}$)가 한반도를 빠져나가는 모습을 보였고, 서쪽에서 강한 북서풍을 따라 고농도 미세먼지가 이동되어 오고 있는 모습을 확인할 수 있다.

그림 4-15는 서울 지역에 대해 좀 더 세부적인 장거리 수송형 연무 사례의 공간 분포를 알아보기 위한 공간장으로 4-14과 동일한 시간대의 1-km 격자 공간 분포이다. 먼저 (a) 2019년 3월 5일 00 LST에서 서해안 지역 및 서울 지역의 서쪽 부근에 강한 남/남서풍이 이동하며 140 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이상의 높은 PM_{2.5} 농도가 분포하는 이동되어 오는 모습을 보였다. 반면에 서울의 동쪽 지역은 미세먼지가 도달하지 않아 서쪽보다 비교적 낮은 (약 80 $\mu\text{g m}^{-3}$) 농도 분포를 보였다. (b) 2019년 3월 5일 12 LST 에서는 강한 남서풍과 함께 고농도 PM_{2.5} 농도(> 180 $\mu\text{g m}^{-3}$)가 서울 및 수도권 전역에 분포하는 경향이 나타났다. (c) 2019년 3월 6일 00 LST 에서는 남서풍의 영향으로 서울 지역에 높은 PM_{2.5} 의 농도를 보였는데 광진 및 중구에서 가장 높은 농도(약 127 $\mu\text{g m}^{-3}$)를 보였고, 양천(119 $\mu\text{g m}^{-3}$), 중랑(111 $\mu\text{g m}^{-3}$), 금천(93 $\mu\text{g m}^{-3}$), 도봉(75 $\mu\text{g m}^{-3}$) 순으로 높은 농도 수치를 보였다. 마지막으로 (d) 2019년 3월 6일 12 LST 에는 강한 서풍계열의 바람을 통해 PM_{2.5} 농도가 낮아지며 동쪽으로 이동되는 모습을 보였다.

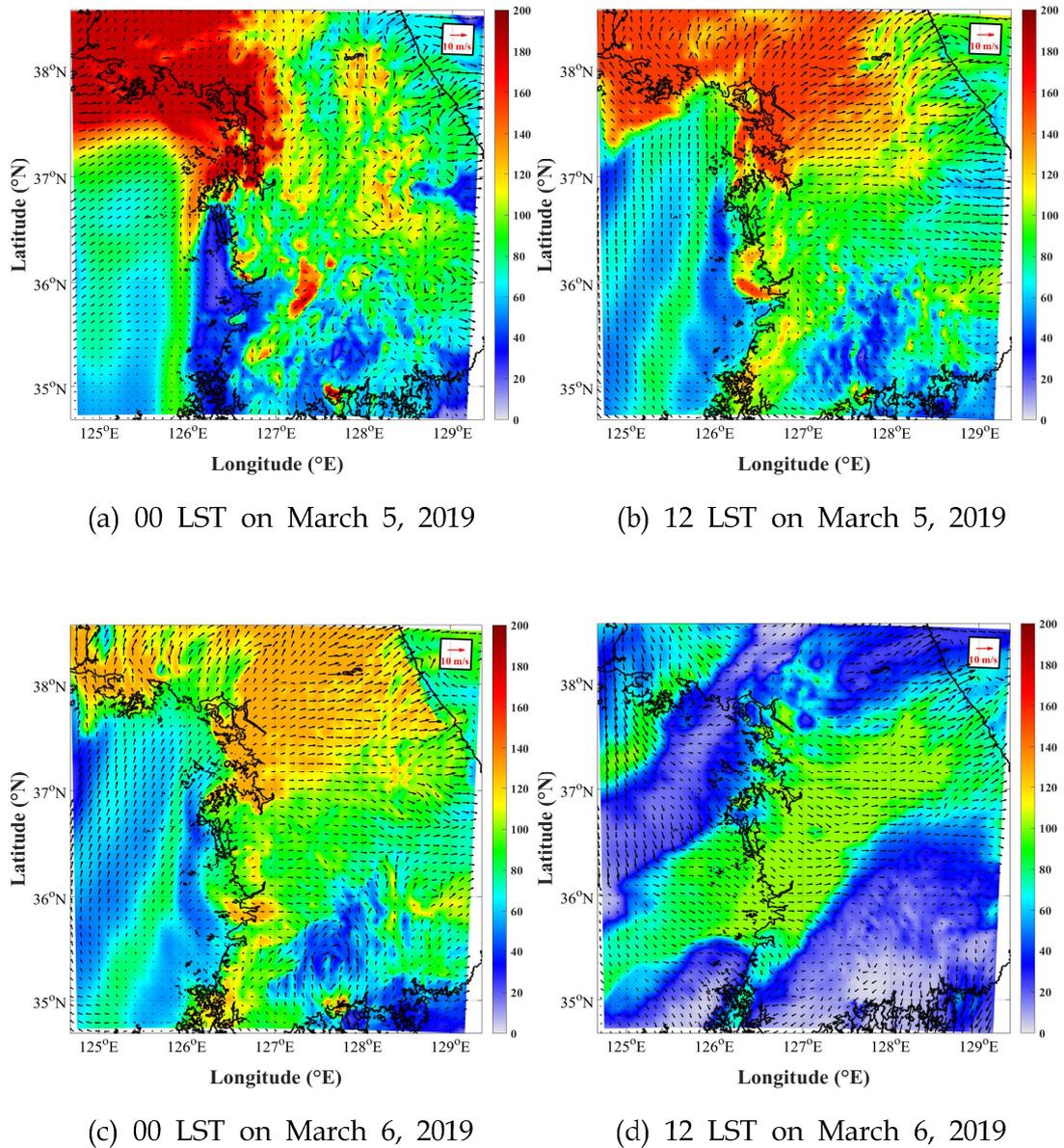


Fig. 4-14. Spatial distributions of PM_{2.5} concentrations simulated for 3-km model domain (D3) at 00:00 LST and 12:00 LST on March 5-6, 2019 for long range transport of haze days.

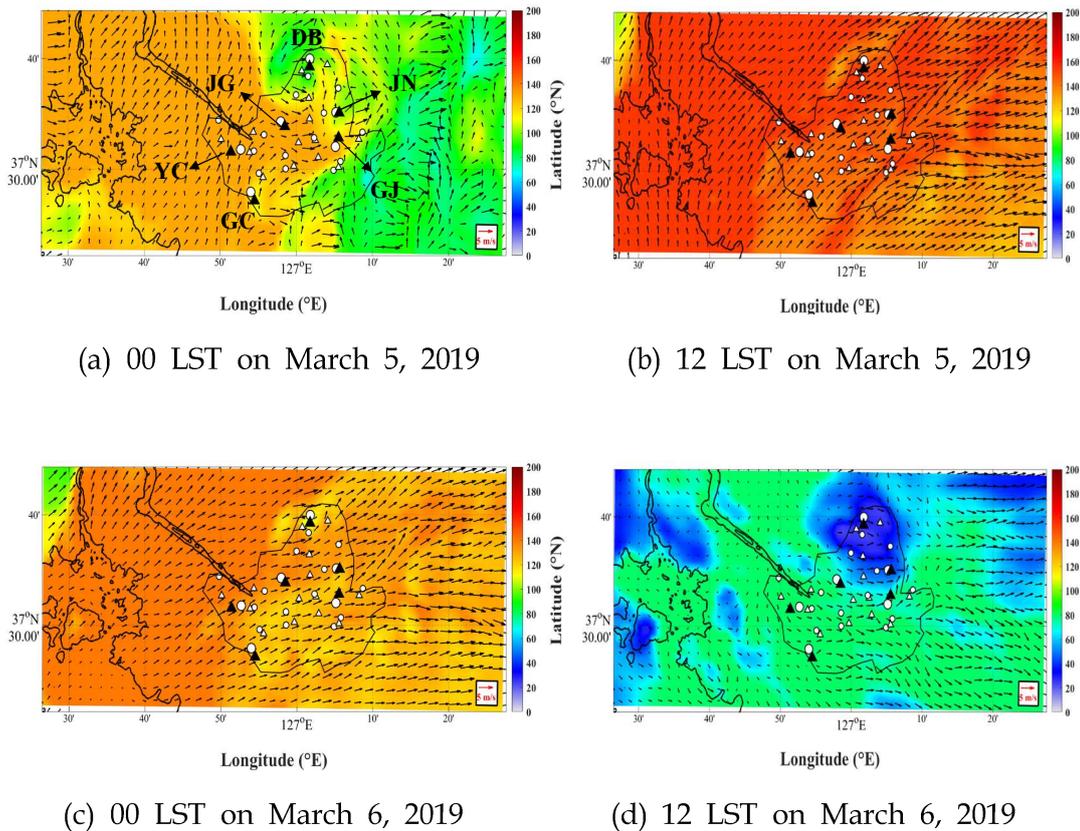


Fig. 4-15. Spatial distributions of $PM_{2.5}$ concentrations simulated for 1-km model domain (D4) at 00:00 LST and 12:00 LST on March 5-6, 2019 for long range transport of haze days.

모델 성능을 평가하기 위해 전체 모델링 기간 동안 각각의 관측 지점(JG, GC, JN, DB, GJ, YC)에 대한 다양한 통계 분석을(IOA, RMSE 및 MBE) 통해 기상변수(기온 및 풍속)와 $PM_{2.5}$ 수준에 대하여 관측 및 예측 값을 비교하였다(표 4-6). 전반적으로 모든 관측 지점에서 모델의 예측된 기온 농도는 $-1.4^{\circ}C \sim -2.6^{\circ}C$ 의 MBE 수치를 보이며 모델값이 관측값에 비해 과소모의 하는 경향을 보였다. 반면에 6개의 모든 관측 지점에서 풍속은 $0.3 \text{ m s}^{-1} \sim 2.36 \text{ m s}^{-1}$ 미만의 약한 과대모의가 나타났다.

$PM_{2.5}$ 농도의 경우 JN 지점과 DB 지점에서 $-3.41 \mu\text{g m}^{-3}$ 과 $-7.33 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 과소모의를, 나머지 4지점(JG, GC, GJ, YC)에서 $4.96 \mu\text{g m}^{-3}$, $3.08 \mu\text{g m}^{-3}$, 1.13μ

g m^{-3} , $5.21 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 수치를 보이며 과대 모의하였다. 또한, 기온과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 IOA는 지점에 관계없이 각각 0.82 과 0.85 이상으로 높은 수치를 나타내었으며, 풍속의 IOA는 조금 낮은 수치를 보였다(0.44 ~ 0.75). 가장 높은 기온, 풍속 및 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 수치를 나타낸 지점은 각각 DB 지점에서 0.91, JG 지점에서 0.75, GJ 지점에서 0.88 이었다. 모든 관측 지점에서의 RMSE는 기온의 경우 3.1°C 미만이었으며, 풍속은 2.9 m s^{-1} 미만이였다. 따라서, 본 연구의 통계 분석은 정체형 및 수송형 연무 사례 동안 연구 지역의 미세먼지 농도 특성을 조사하는데 효과적으로 사용될 수 있음을 시사한다.

Table 4-5. Statistical evaluation of meteorological variables and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations for the observed and model-predicted variables: results compared at six monitoring sites for the entire simulation period. The $\text{PM}_{2.5}$ data sites represent six air quality monitoring sites within Seoul, as shown in Fig. 2-3. The meteorological monitoring sites are located 3 - 5 km away from the air quality monitoring sites.

Meteorological and $\text{PM}_{2.5}$ data sites *	Air temperature ($^\circ\text{C}$)			Wind Speed (m s^{-1})			$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)		
	IOA	RMSE	MBE	IOA	RMSE	MBE	IOA	RMSE	MBE
Jung-gu (JG)	0.90	2.41	-1.8	0.75	1.25	0.61	0.86	22.75	4.96
Geumcheon-gu (GC)	0.84	2.96	-2.5	0.60	1.62	0.81	0.86	21.99	3.08
Jungnang-gu (JN)	0.88	2.77	-2.0	0.74	1.26	0.3	0.85	22.63	-3.41
Dobong-gu (DB)	0.91	2.28	-1.4	0.44	2.85	2.36	0.85	22.49	-7.33
Gwangjin-gu (GJ)	0.82	2.70	-1.9	0.59	1.99	1.42	0.88	21.72	1.13
Yangcheon-gu (YC)	0.82	3.05	-2.6	0.48	1.89	1.29	0.87	26.97	5.21

4.2. 미세먼지 생성에 대한 물리·화학적 공정 기여도 분석

4.2.1. 복합형 연무 사례

본 연구에서는 유형별 연무 사례일 각각의 미세먼지($PM_{2.5}$) 농도 증가에 영향을 미치는 환경적 원인(물리·화학적 공정 기여도)을 분석하기 위해 CMAQ에서 제공하는 IPR 분석을 수행하였다. IPR 분석은 궤적상의 모든 격자에 대하여 머문 시간 동안의 농도변화를 각 모듈(에어로졸 생성과정(AERO: Aerosol process), 수평이동(HADV: Horizontal advection), 수평확산(HDIF: Horizontal diffusion), 연직이동(ZADV: Vertical advection), 연직수송(VDIF: Vertical diffusion), 배출량 생성과정(EMIS: emissions source), 건성 침적과정(DDEP: dry deposition), 구름 생성 및 수용성 화학과정(CLDS: cloud process))에 대해 나타내어, 공기체가 각 격자에 머무는 동안 어떤 모듈에 의한 농도 변화를 겪었는지 확인할 수 있다. 따라서 미세먼지 농도의 생성 기여도에 대한 물리·화학적 특성을 확인할 수 있다.

그림 4-16과 표 4-7은 복합형 연무사례 기간 동안(2013년 1월 12~16일) 6개 지점(NG, GJ, HS, GB, BS, CJ)의 모델 수행을 통한 물리(예, HTRA, VTRA) 및 화학적 과정(예, AERO)에 의한 $PM_{2.5}$ 농도의 기여도 특성을 나타낸다. 전반적으로 수도권 서부지역(NG) 및 동부지역(HS, CJ)의 $PM_{2.5}$ 생성에 대한 주요 원인 및 특징은 연직 수송(VTRA)이 지배적이었고, 수도권의 중부지역(GB, GJ) 및 남부지역(BS)의 경우, 수평 수송(HTRA)에 의한 원인이 지배적이었다. 그 밖에 에어로졸 생성(AERO) 및 배출에 의한 영향(EMIS)은 상대적으로 미미하게 나타났다. 수치적으로 연무 사례일 동안 수도권 서부(NG) 및 동부(HS, CJ) 지역의 주간 연직수송(VTRA) 기여도는 $26\sim 50 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 로 비연무일의 $0.1\sim 22 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 에 비해 상당히 높은 수치였고, 연무 사례일의 수도권 중부에서는 수평수송(HTRA)의 기여도가 $26\sim 33 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 로 비연무 사례일의 $7\sim 14 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 보다 상당히 높은 수치를 보였다. 또한 6개 지점의 주간 에어로졸 형성(AERO) 기여도는 $4\sim 15 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 로 비연무 사례일의 $2\sim 4 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 보다 높게 나타났다.

야간 시간대의 경우, 수도권 지역의 서부와 동부 지역에서는 연직 수송(VTRA)

이 $3\sim 109 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 의 수치로 지배적인 영향을 주었고, 중앙 및 남부 지역에서는 수평 수송(HTRA)이 $24\sim 47 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 로 $\text{PM}_{2.5}$ 의 생성에 크게 기여하는 모습을 보였다(표 4-6 [A]). 이러한 연무 사례일의 수평 및 연직 수송과 에어로졸 형성 과정(주간, 야간)은 대상지역에서 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도를 증가시키는 주요한 원인으로 판단된다. 한편, 수도권 서쪽 및 동쪽 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 수평 수송(HTRA)에 의해 큰 영향을 받아 제거되었고, 중부 및 남부 지역은 연직 수송(VTRA)에 의해 제거되는 모습을 보였다. 또한, 모든 지역에서 건성 침적 과정(DDEP)과 구름 및 수용성 생성 과정(CLDS)은 낮은 수치를 보이며 $\text{PM}_{2.5}$ 의 생성과정에 큰 영향을 미치지 못했다.

$\text{PM}_{2.5}$ 의 2차 에어로졸 물질인 NO_3^- 의(표4-6 [B]) 경우, GJ 지점에서 관측된(표 4-1) 야간 NO_3^- 농도 증가 비율(0.9 배)이 비연무 사례일 야간의 농도 증가 비율(0.74 배)보다 높게 나타난 것으로 보아 NO_3^- 의 이질적 가수분해(Pathak et al., 2011)에 의한 영향으로 판단되며, 이로 인해 IPR 과정의 모든 6개 지점에서 연무 사례일 야간의 에어로졸 형성(AERO) 과정이 $0.40\sim 1.12 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 로 비연무 사례일의 $0.2\sim 0.5 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 에 비해 약 1.1~3.0 배 높은 수치를 보인 것으로 판단된다. 또한, 이러한 경향은 NH_4^+ 에 의한(연무 사례일에 0.94 VS 비연무 사례일의 0.81)야간 미세먼지 생성의 이질적 화학 반응의 결과를 뒷받침한다.

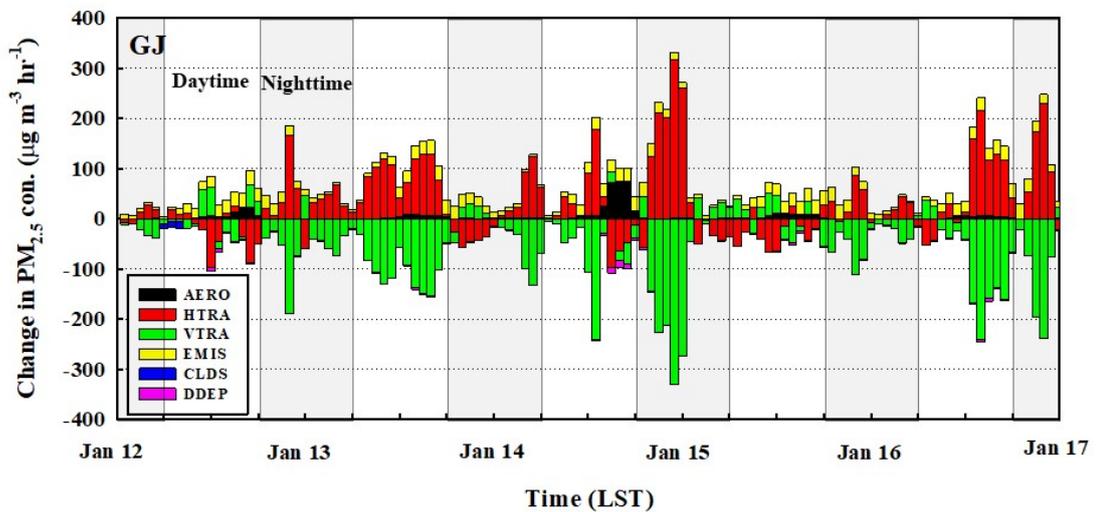
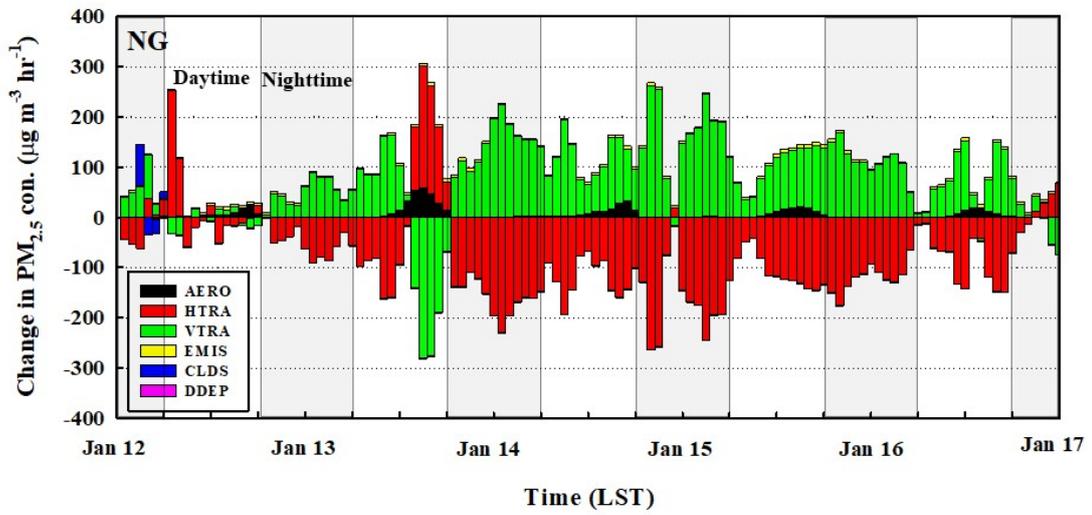


Fig. 4-16. Temporal changes in $PM_{2.5}$ concentrations ($mg m^{-3} h^{-1}$) from various physical and chemical processes at six sites of Nam-gu (NG), Gwangjin-gu (GJ), Nam-gu (NG), Bongsan-dong (BS), Haengsing-dong (HS), Gangbuk-gu (GB), Gwangjin-gu (GJ), and Changjeon-dong (CJ)

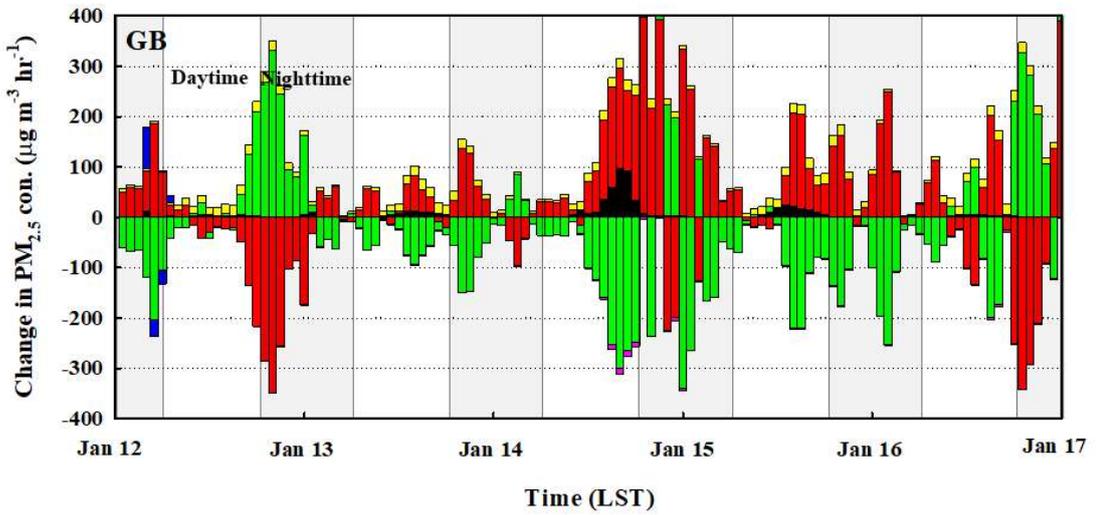
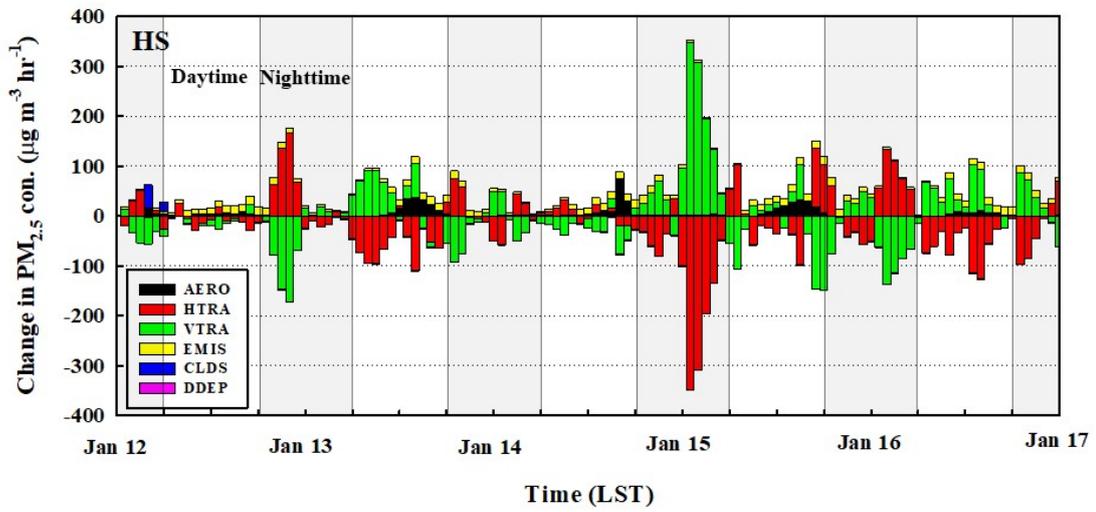


Fig. 4-16. (Continued)

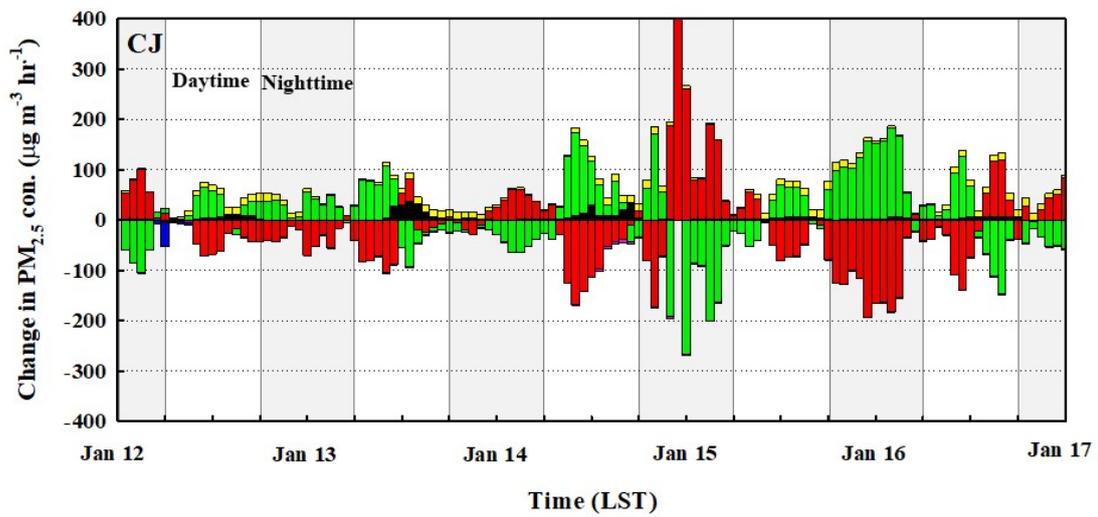
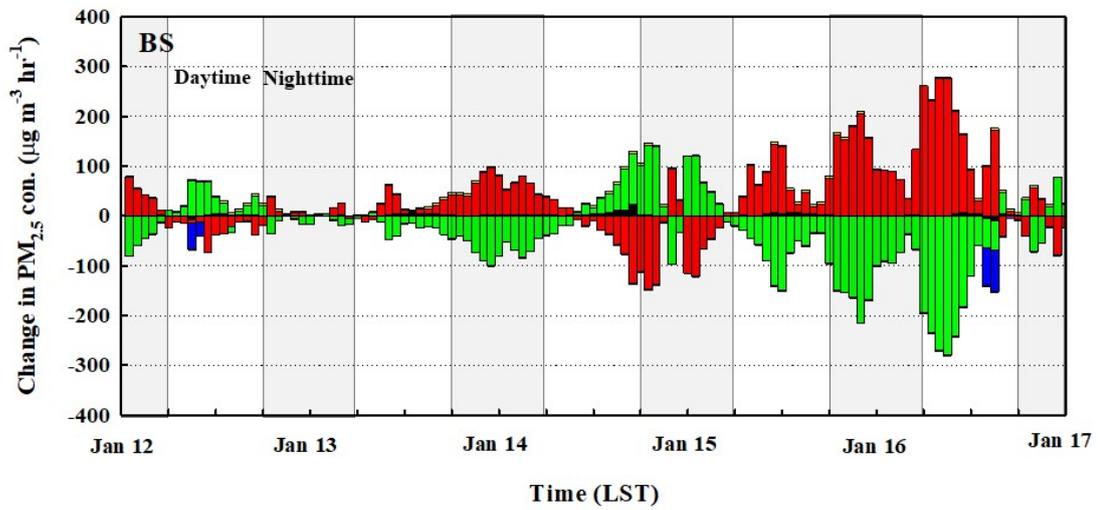


Fig. 4-16. (Continued)

Table 4-6. Comparison of the integrated process rate (IPR) ($\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$) for $\text{PM}_{2.5}$ and NO_3^- obtained from six air quality monitoring sites on haze and non-haze days. The processes of the IPR include aerosol process (AERO), horizontal advection/diffusion (HTRA), vertical advection/diffusion (VTRA), primary emission (EMIS), cloud process (CLDS), and dry deposition (DDEP).

[A] The IPR analysis of $\text{PM}_{2.5}$

Content	Daytime						Nighttime					
	NG	BS	HS	GB	GJ	CJ	NG	BS	HS	GB	GJ	CJ
AERO	15.11 ^a (4.45) ^b	4.05 (2.00)	12.52 (3.40)	14.13 (2.99)	11.87 (2.70)	10.09 (3.60)	0.71 (0.35)	0.53 (0.45)	0.67 (0.37)	1.34 (0.70)	0.88 (0.24)	1.37 (0.52)
HTRA	-64.70 (-31.03)	29.83 (-4.61)	-23.84 (-13.76)	32.63 (7.02)	25.58 (13.36)	-42.90 (-14.05)	-114.7 (-5.77)	46.71 (-3.31)	-12.91 (-14.05)	24.11 (35.10)	30.08 (17.02)	-11.02 (2.97)
VTRA	49.98 (22.11)	-35.81 (5.24)	2.66 (-2.79)	-58.42 (-26.01)	-55.21 (-36.92)	25.73 (0.17)	109.1 (13.55)	-44.92 (-0.93)	5.39 (5.85)	-34.57 (-46.17)	-43.66 (-29.81)	3.21 (-9.99)
EMIS	5.26 (5.25)	3.86 (4.13)	13.07 (13.90)	17.08 (18.23)	23.31 (25.07)	12.23 (13.40)	3.31 (3.45)	1.96 (2.20)	6.81 (7.57)	8.94 (9.94)	12.05 (13.48)	5.99 (6.86)
CLDS	<0.001 (<0.001)	-3.63 (-3.01)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (-0.70)	<0.001 (-0.14)	<0.001 (-9.27)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (1.40)	<0.001 (0.73)	<0.001 (-0.72)	<0.001 (-1.30)
DDEP	-1.19 (-0.78)	-1.15 (-1.02)	-1.17 (-0.77)	-2.26 (-1.49)	-2.86 (-1.72)	-1.62 (-0.88)	-1.04 (-0.46)	-0.88 (-0.33)	-0.92 (-0.40)	-0.80 (-0.34)	-0.71 (-0.23)	-0.91 (-0.33)

^a Haze day.

^b Non-haze day.

(Source: Han et al., 2021)

[b] The IPR analysis of PM_{2.5} NO₃⁻

Content	Daytime						Nighttime					
	NG	BS	HS	GB	GJ	CJ	NG	BS	HS	GB	GJ	CJ
AERO	10.36 ^a (2.99) ^b	3.17 (1.66)	8.40 (2.24)	9.98 (2.07)	8.45 (1.97)	7.18 (2.61)	0.52 (0.32)	0.43 (0.40)	0.40 (0.26)	0.86 (0.29)	0.55 (0.20)	1.12 (0.50)
HTRA	-31.96 (-14.41)	16.64 (-0.40)	-9.96 (-3.73)	14.94 (3.59)	11.72 (7.29)	-18.76 (-4.06)	-54.54 (-5.70)	24.83 (1.33)	-5.67 (-1.86)	14.01 (14.96)	13.77 (9.16)	-3.06 (4.76)
VTRA	26.33 (12.10)	-19.01 (0.78)	4.73 (2.01)	-19.29 (-4.15)	-12.64 (-7.95)	16.62 (2.10)	53.96 (7.10)	-22.36 (-2.39)	5.93 (2.91)	-14.16 (-14.31)	-14.07 (-8.77)	2.64 (-4.94)
EMIS	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)
CLDS	<0.001 (<0.001)	-1.37 (-0.65)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (-0.02)	<0.001 (-1.01)	<0.001 (<0.001)	<0.001 (-0.62)	<0.001 (-0.42)	<0.001 (-0.08)	<0.001 (-0.40)
DDEP	-2.41 (-0.55)	-1.37 (-0.60)	-1.88 (-0.54)	-4.39 (-1.55)	-5.95 (-1.32)	-3.48 (-0.64)	-1.04 (-0.25)	-0.69 (-0.20)	-0.93 (-0.20)	-1.05 (-0.23)	-0.80 (-0.17)	-0.95 (-0.22)

^a Haze day.

^b Non-haze day.

(Source: Han et al., 2021)

4.2.2. 정체형 및 수송형 연무 사례

서울 6개 지점(JG, GC, JN, DB, GJ, YC)의 정체 및 수송형 연무 사례에 대하여 PM_{2.5} 농도 변화의 원인이 되는 물리·화학 과정의 기여도를 살펴보기 위하여 IPR 결과를 살펴보았다. 전체 모델 수행기간은 2019년 2월 26일 ~ 3월 24일 까지이며, 연무의 발생 유형에 따라 정체형 연무 사례 1, 2(이하 LES_E1, LES_E2)와 수송형 연무 사례(이하 LRT_E1, LRT_E2)로 구분하였다. 이러한 연무 유형 분류 조건은 3.2절에서 자세히 설명하였다.

전반적으로 주간에 대한 연무 사례별 특성에서 에어로졸 형성 과정(AERO) 기여도는 정체형 사례($5.92 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$, $13.57 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$)가 수송형 사례($1.64 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$, $2.03 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$)에 비해 높은 기여도를 나타내었다(표 4-8). 또한, 수평 수송(HTRA) 및 연직 수송(VTRA)에 대한 기여도를 보면 정체형 사례의 수평 수송에서 $-2.08 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 로 수송 사례 1, 2의 $51.62 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 와 $46.85 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 보다 낮은 수치를 보였고, 연직 수송(VTRA)에서도 정체 사례 1, 2에서 각각 $7.12 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$, $-14.21 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 로 수송사례1, 2에 비해 ($-37.78 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 및 $-46.40 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$) 낮게 모의 되는 모습을 보였다. 이는 수송형 사례에서 바람의 수평 및 수송에 의한 미세먼지의 이동이 우리나라 서울지역의 PM_{2.5} 농도에 크게 기여하였음을 잘 나타낸다. 또한, 배출량 영향(EMIS)에 대한 기여도는 정체 사례에서 $24.82 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 및 $16.73 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 으로 수송형 사례 1, 2($16.19 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$, $6.21 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$)에 비해 높게 나타나, 정체형 연무 사례가 수송형 연무 사례에 비해 배출량에 의한 에어로졸 생성의 영향을 많이 받는 것으로 판단되었다. 이것은 정체형 연무가 서울 대도시 지역의 국지적인 오염물질 배출에 의한 PM_{2.5} 생성이 주된 원인인 것을 잘 나타낸다.

야간에 대한 유형별 연무 사례의 특징은 에어로졸 생성(AERO) 기여도의 경우 LES_1, LES_2에서 $10.53 \text{ m}^{-3} \text{h}^{-1}$, $7.09 \text{ m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 로 정체형 사례가 LRT_E1, LRT_E2의 $5.10 \text{ m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 및 $3.47 \text{ m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 의 기여도를 보인 수송형 사례 보다 높게 나타나, 주간과 유사한 경향(LES_E1, E2 > LRT_E1, E2)을 보였다. 또한 야간의 수평 및 연직 수송에서는 $-215.03 \text{ m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 및 $199.29 \text{ m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 로 LRT_E2 사례가 가장 높은 연직 및 수송의 영향을 받는 것으로 나타났다. 배출량 생성(EMIS) 기여도는

주간과 일치하는 경향으로 정체형 사례의 국지적인 화학반응으로 인한 생성이 주된 것으로 보였다.

그림 4-17의 지점별로 정체형 사례 및 수송형 사례에 대한 IPR 시계열 분석에서는 먼저 서울 지역의 중심에 위치한 JG 지점은 수평 수송(HTRA) 및 연직 수송(VTRA) 기여도의 영향이 지배적이었다. 특히 3월 1일(LES_E1) 오후 6시 부터 수평 수송(HTRA)이 급격하게 증가하는 모습을 보였다. 3월 3일(LES_E2)에는 전반적으로 양의 수평 수송(HTRA)과 음의 연직 수송(VTRA)으로 인해 PM_{2.5} 농도 수치가 감소하는 모습을 보였다. 3월 5일 수송형 사례일(LRT_E1)에서는 PM_{2.5} 농도가 약 150 $\mu\text{g m}^{-3}$ 까지 상승하는 모습을 보였는데, 대부분 매우 강한 양의 수평 수송(HTRA) 및 음의 연직 수송(VTRA)에 의한 영향인 것으로 나타났다. LRT_E2 사례에서는 19일 야간에 양의 수평 수송(HTRA)에 의해 PM_{2.5} 농도가 급격히 상승하여 높은 양의 연직 수송(VTRA)으로 최대 농도(약 125 $\mu\text{g m}^{-3}$)에 도달한 뒤 서서히 감소하는 모습을 보였다. 자세한 그림은 그림 4-18에 나타내었다. 전반적으로 다른 5개(GC, JN, DB, GJ, YC) 지점의 IPR 결과는 높은 PM_{2.5} 농도에 대한 기여도와 수평 및 연직 수송에 의한 영향이 지배적으로 JG 지점의 경향과 유사하게 나타났다. 그 외 양의 배출량 생성 기여도(EMIS) 및 구름 생성 기여도(CLDS), 그리고 음의 건성 침적 기여도(DDEP)의 영향은 미미하게 나타났다. 특히, DB 지점은 다른 지역에 비해 매우 높은 수평수송 및 연직 수송의 영향을 받은 것을 확인하였다. 또한, GJ 지점과 YC 지점은 양의 CLDS 기여도가 다른 지역에 비해 높게 나타났다.

표 4-9 [A]은 정체형 사례 1(LES_E1)의 기여도 특성을 살펴보기 위한 것으로 지점별로 주간 시간대에 AERO의 기여가 높은 순서는 GC(30.56 $\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), JN(26.06 $\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), GJ(23.17 $\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), YC(22.38 $\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), JG(16.99 $\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), DB(8.53 $\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$) 이었다. 이는 지도상에서 남쪽(GC) 지역에서부터 북쪽(DB) 지역으로 PM_{2.5} 농도가 낮아지는 모습을 보였고, 주간의 에어로졸 형성(AERO) 기여도가 야간에 비해 매우 높게 나타나는 모습을 보였다. 이는 6개 지점 모두 야간에 비해 주간 배출량(EMIS) 기여도가 높게 나타난 것으로 미루어 볼 때 광화학적 반응이 PM_{2.5} 생성에 기여한 것으로 판단된다. 정체형 사례 2(LES_E2)의 주간 에어로졸 형성(AERO) 기여도는 GJ(16.68 $\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), YC(7.99 $\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$),

JG($2.73 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), GC($6.86 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), DB($0.29 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), JN($-12.87 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$)로 LES_E1 사례와 다른 양상을 보였다. 또한, DB를 제외하고 모든 지역에서 야간의 AERO가 주간보다 낮게 나타나 LES_E1가 유사한 경향을 보였다. 수평 수송(HTRA)에 대해서는 JG가 주·야간에 가장 많은 영향($121.11 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, $116.89 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$)을 받았고 연직수송(VTRA)은 GJ 지점($52.59 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$)과 DB 지점($62.57 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$)이 가장 큰 영향을 받았다. 배출량(EMIS) 영향은 각 지점에 대해 주야간에 유사한 수치를 보였다.

표 4-10 [A]의 수송형 연무 사례(LRT_E1)의 AERO는 주간에 6개 지점에서 정체형 연무 사례와 유사한 경향을 보이며 양의 기여도를 보였다. 주간 수송의 영향에서 JG 지점($290.57 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$) 및 DB 지점($184.23 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), GC 지점($126.24 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$), YC 지점($24.58 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$)에서 양의 기여도가 나타났으며 GJ 지점($-182.84 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$)과 JN 지점($-18.52 \mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$)에서는 음의 기여도가 나타났다. 야간에는 JG 지점(390.41)과 YC지점(12.27)에서 양의 기여도를 보였다. 배출량(EMIS)의 기여도는 모든 지역에서 야간이 더 높은 양의 기여를 나타냈는데, 이는 야간의 무시 될 만한 광화학 반응에도 불구하고, 주간과 유사하게 높은 농도의 패턴은 강한배출원으로 부터의 수송(산업시설 및 많은 교통량)에 의한 것일 수 있으며, 부분적으로 야간에서 미립자 NO_3^- 의 이질적 반응 및 증발의 감소에 의한 것(표 4-11)일 수 있다. LRT_E2은 LRT_E1과 다르게 주간보다 야간에 높은 AERO의 양의 기여도(GC, GJ 제외)를 보였다. 또한 전반적으로 LRT_E1에 비해 약한 수평 수송(HTRA) 및 연직 수송(VTRA)의 기여도를 보였다. 2차 에어로졸(SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)에 대한 AERO 기여도(표 4-11)에서는 전반적으로 주간이 야간에 비해 대부분 높게 나타나는 모습(LRT_E2, NH_4^+ 제외)을 보였고 특히 LES_E1의 정체 사례가 다른 사례에 비해 매우 높은 수치를 보였다.

Table 4-7. Comparison of the integrated process rate (IPR) ($\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$) for $\text{PM}_{2.5}$ obtained from total mean of six air quality monitoring sites (JG, GC, JN, DB, GJ, YC) on LRT_E1 and LRT_E2 of haze day.

Content	Daytime				Nighttime			
	LES_E1	LES_E2	LRT_E1	LRT_E2	LES_E1	LES_E2	LRT_E1	LRT_E2
AERO	5.92	13.57	1.64	2.03	10.53	7.09	5.10	3.47
HTRA	-2.08	40.63	51.62	46.85	-146.51	138.13	9.97	-215.03
VTRA	7.12	-14.21	-37.78	-46.40	90.89	-175.52	-24.72	199.29
EMIS	24.82	16.73	16.19	6.21	25.18	16.95	16.46	6.29
CLDS	2.39	-0.44	-0.31	<0.001	11.34	4.76	2.86	<0.001
DDEP	-26.66	-60.16	-26.83	-3.89	-15.22	-28.13	-10.08	-3.09

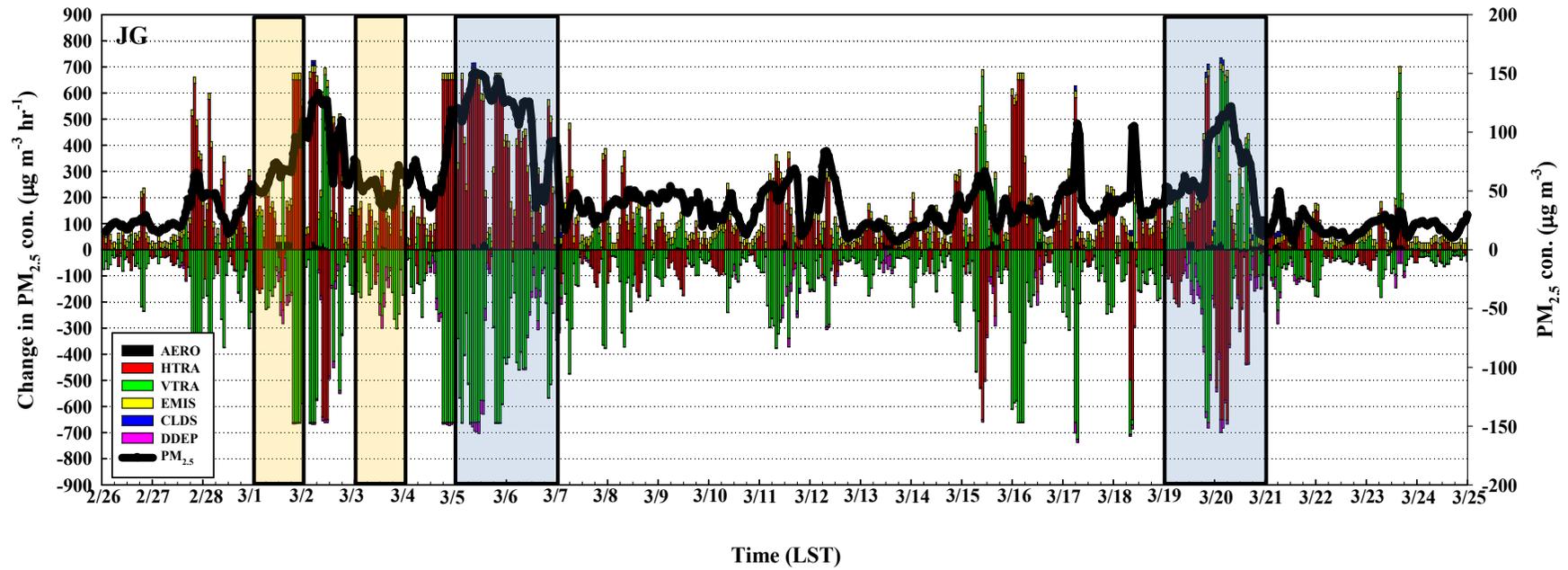


Fig. 4-17. Temporal changes in $PM_{2.5}$ concentrations ($mg\ m^{-3}\ h^{-1}$) from various physical and chemical processes at six sites of Jung-gu (JG), Geumcheon-gu (GC), Jungnang-gu (JN), Dobong-gu (DB), Gwangjin-gu (GJ) and Yangcheon-gu (YC) in Seoul on haze days (February 26-March 24, 2019).

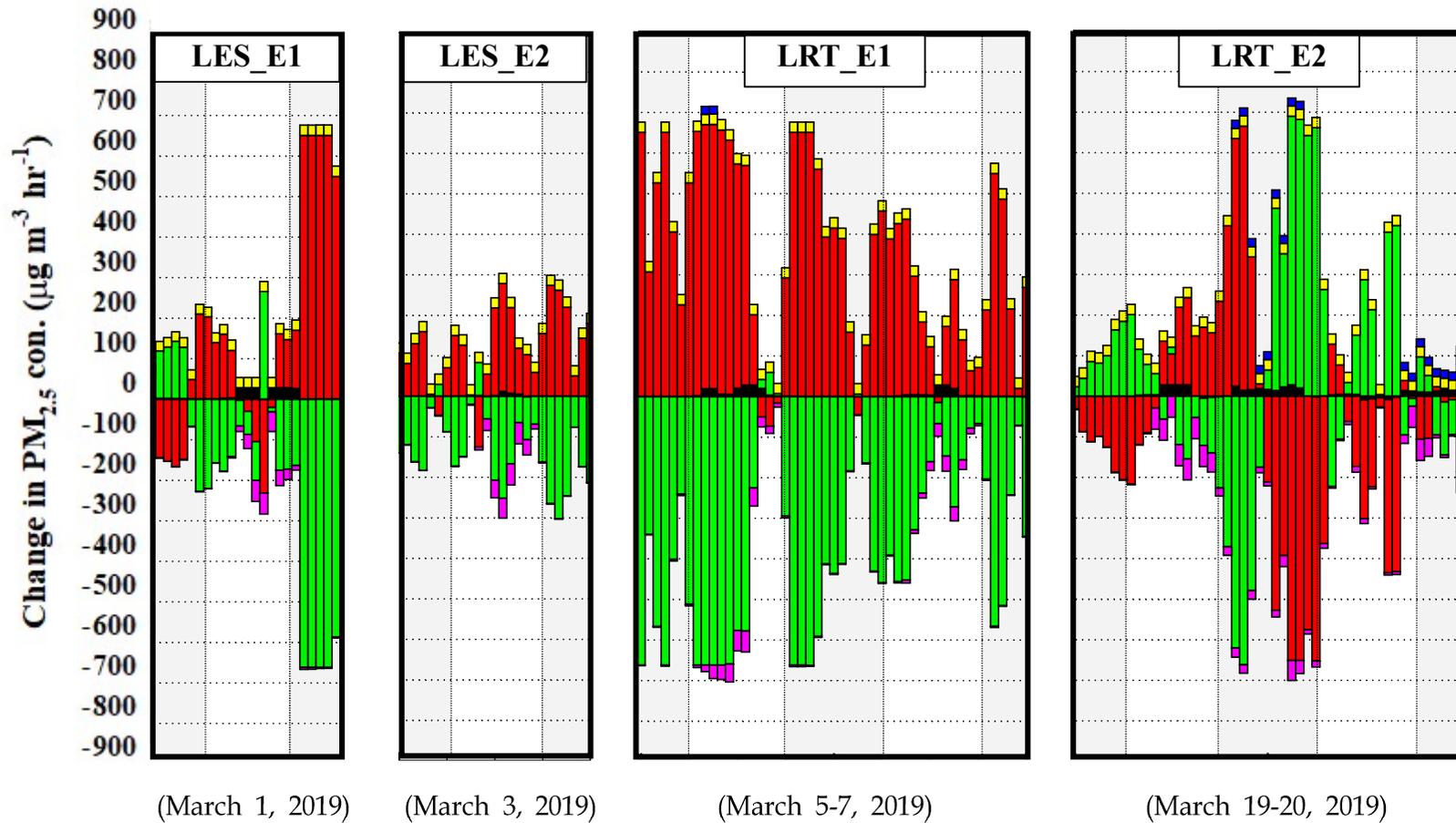


Fig. 4-18. Process analysis module's contribution of PM_{2.5} change during LES_E1, E2 and LRT_E1, E2 trajectory moving (AERO (black), HADV (red), VTRA (green), EMIS (yellow), CLDS (blue), DDEP (pink)).

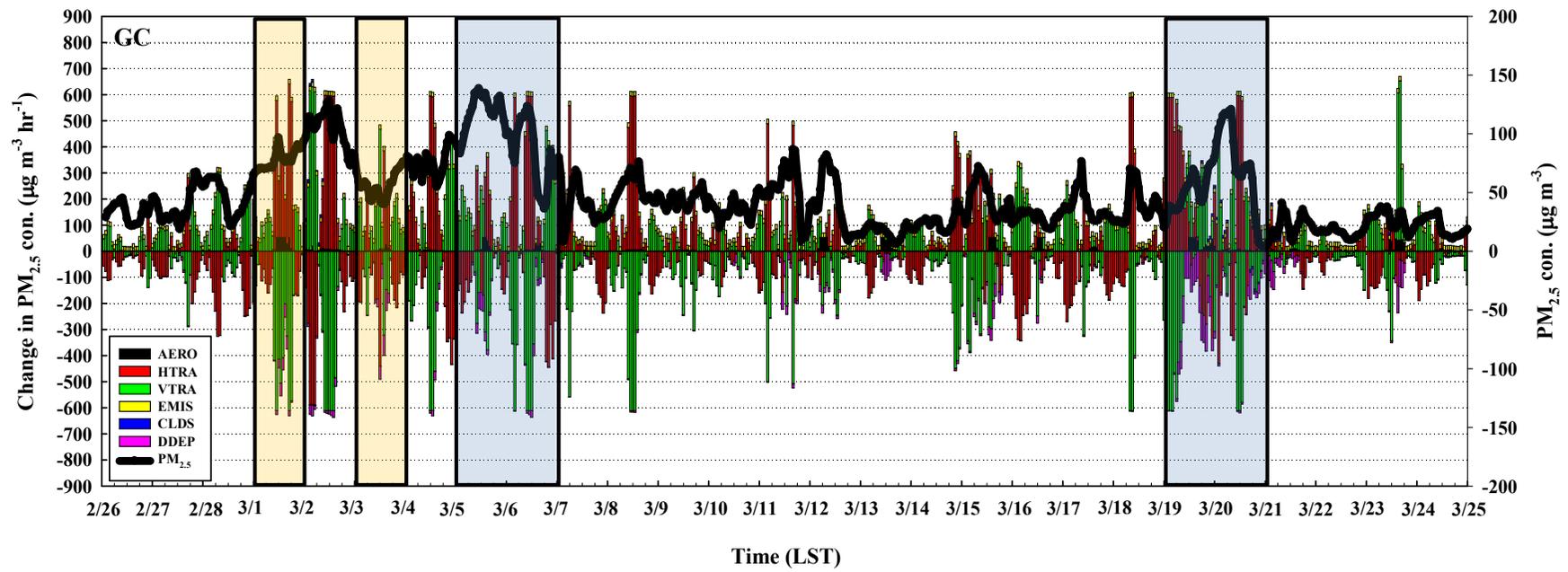


Fig. 4-17. Same as Fig. 4-16 except for GC site.

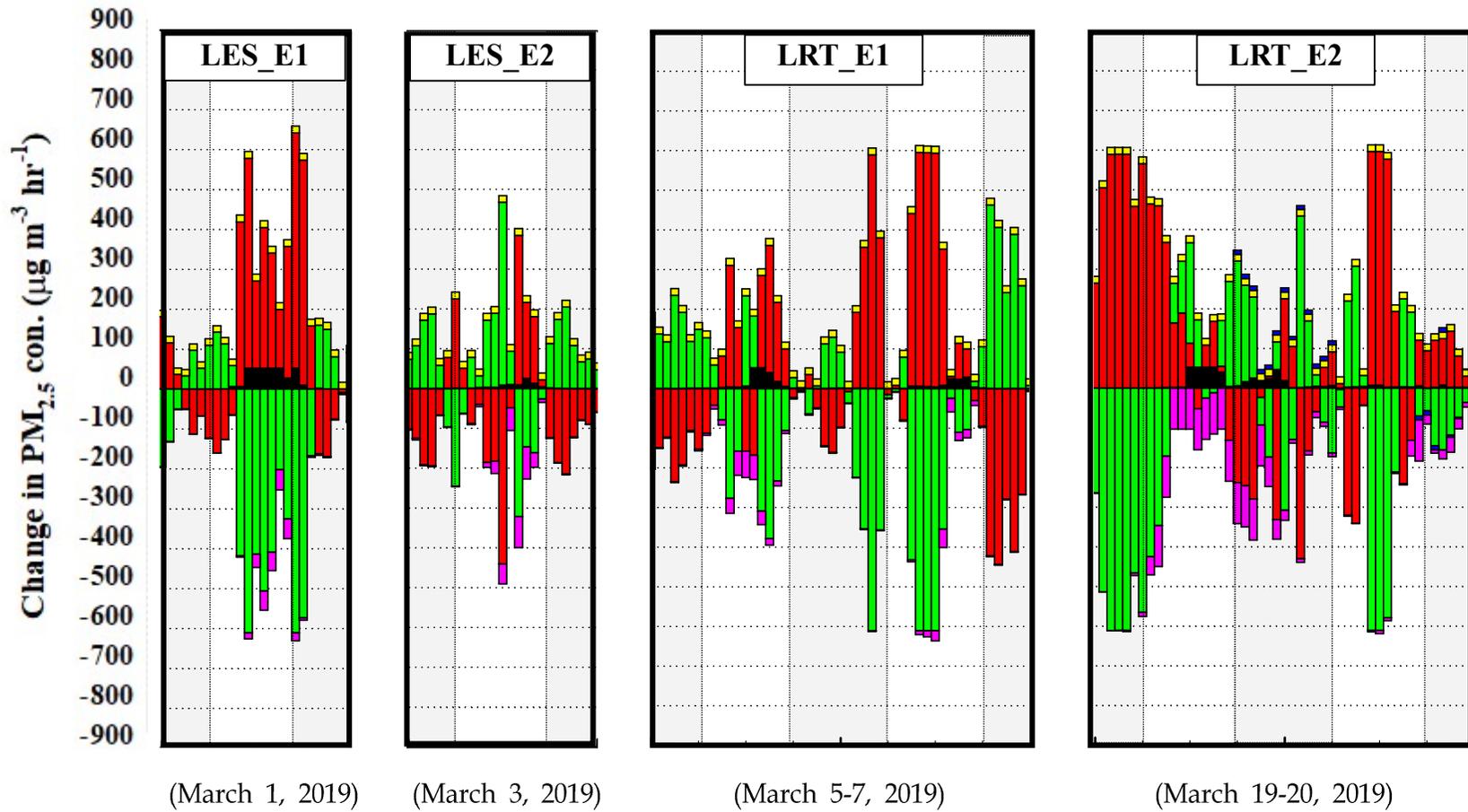


Fig. 4-18. Same as Fig. 4-18 except for GC site.

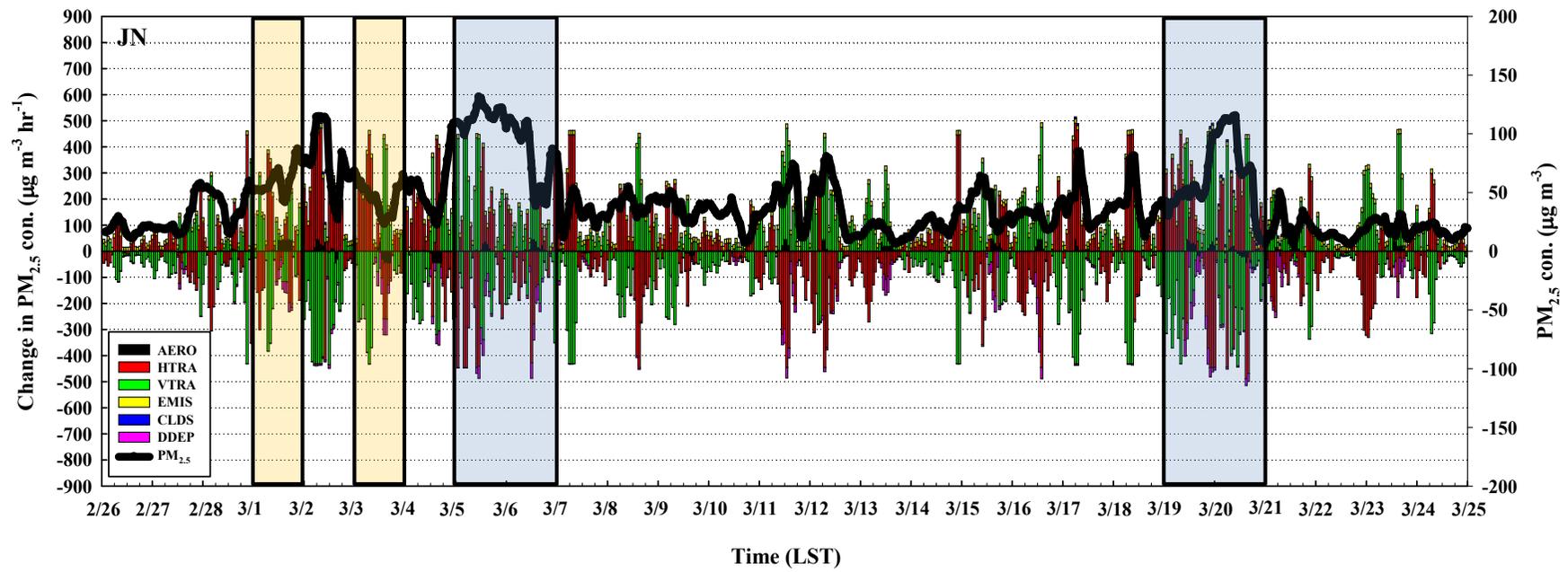


Fig. 4-17. Same as Fig. 4-17 except for JN site.

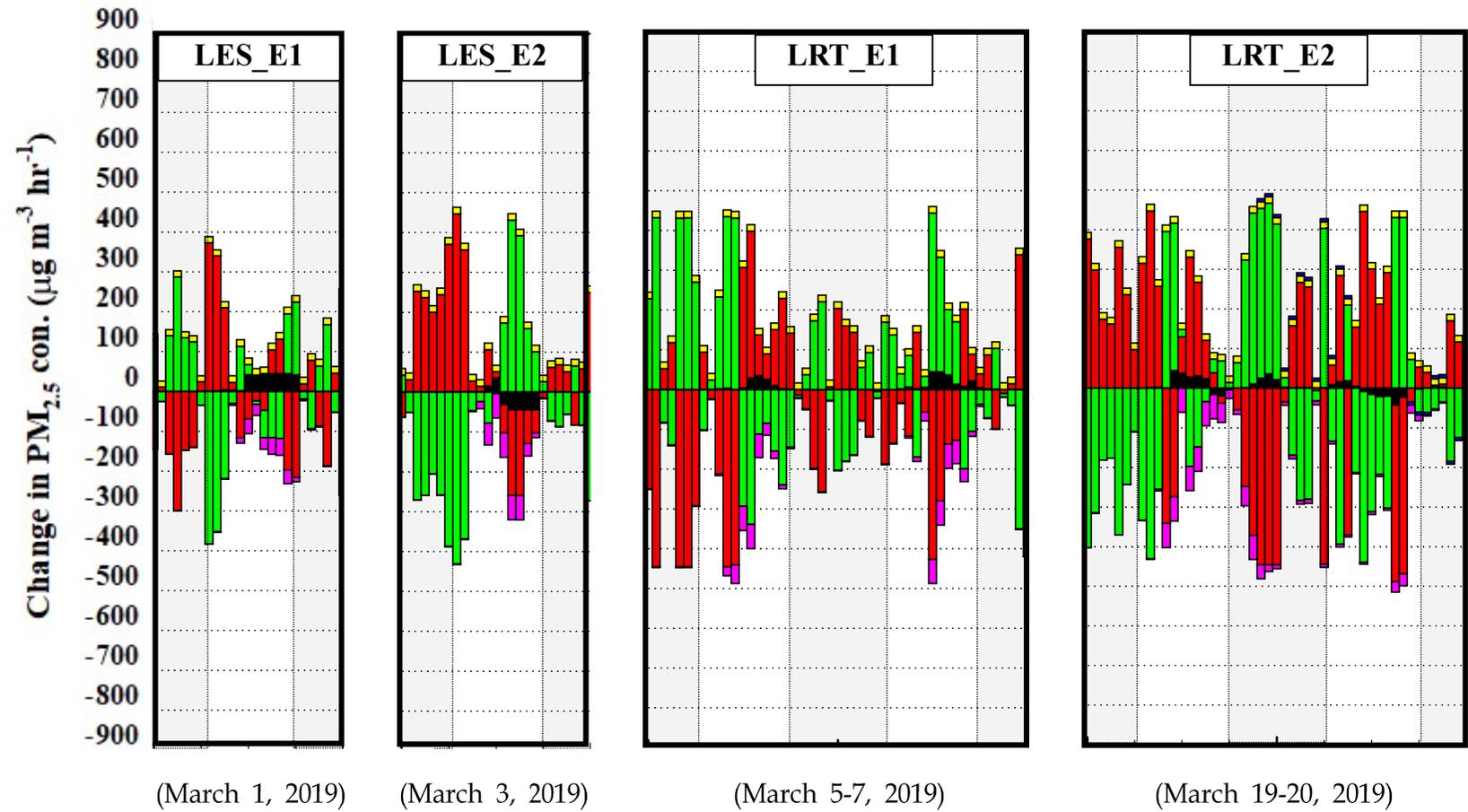


Fig. 4-18. Same as Fig. 4-18 except for JN site.

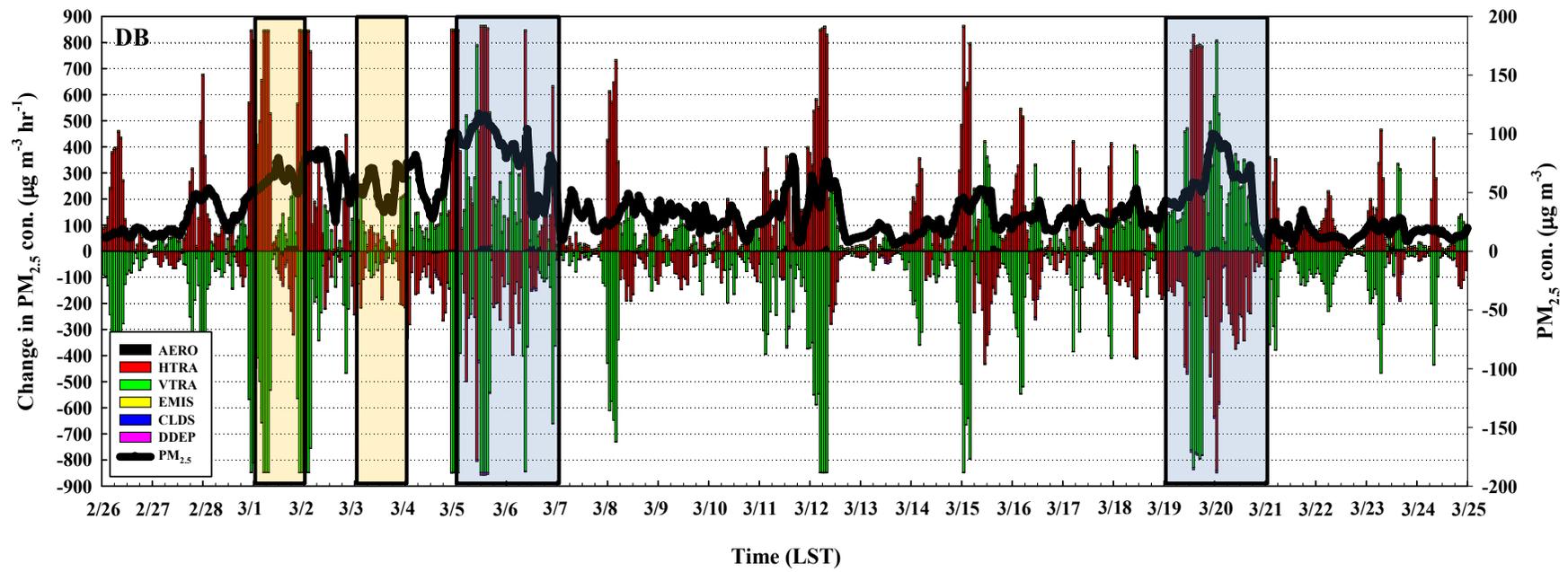


Fig. 4-17. Same as Fig. 4-17 except for DB site.

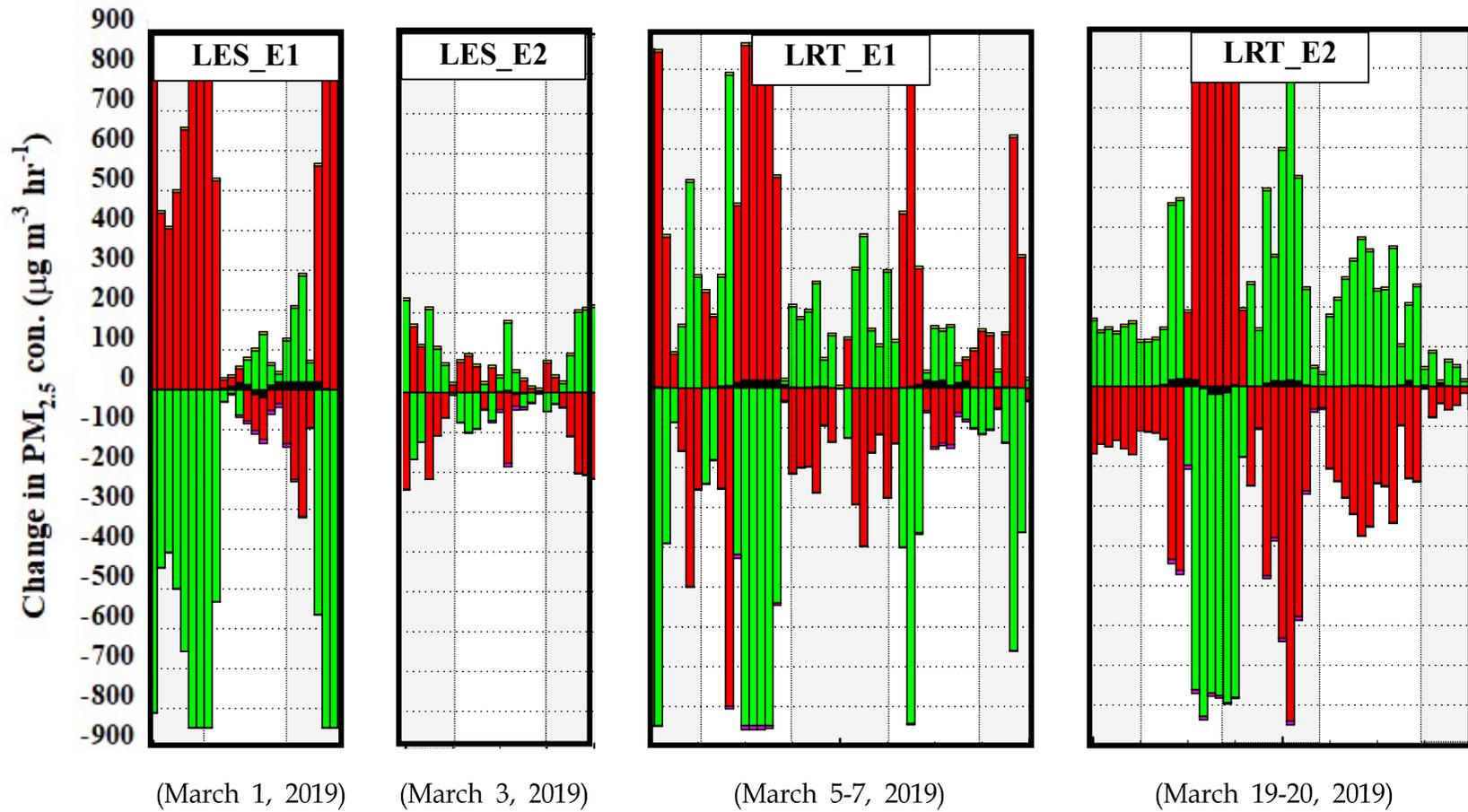


Fig. 4-18. Same as Fig. 4-18 except for DB site.

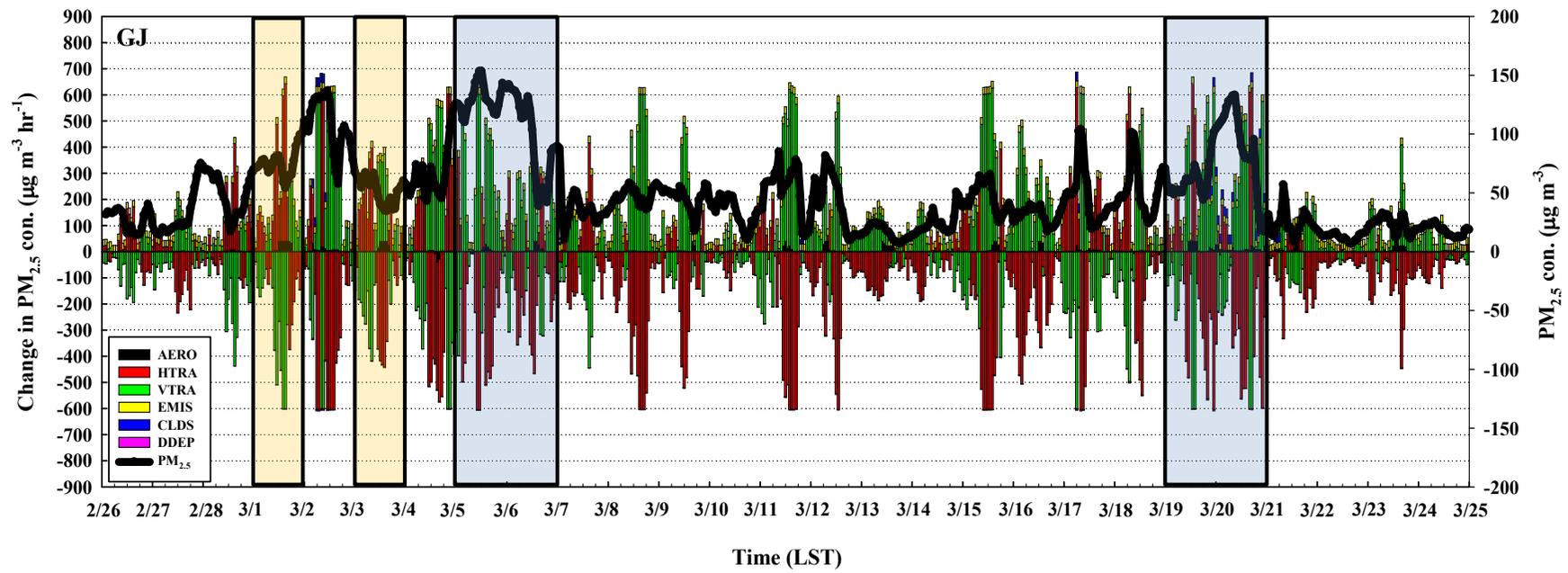


Fig. 4-17. Same as Fig. 4-17 except for GJ site.

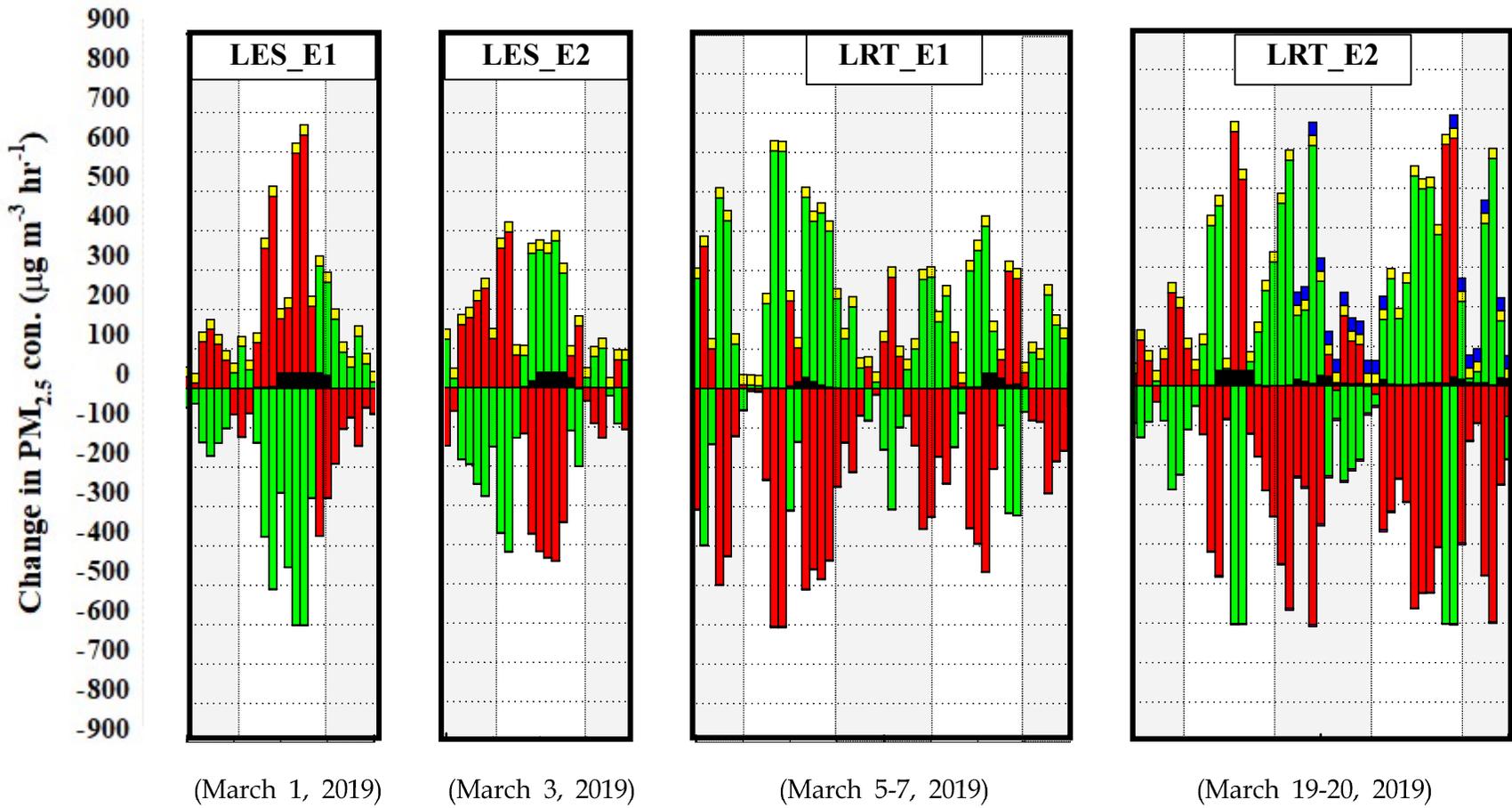


Fig. 4-18. Same as Fig. 4-18 except for GJ site.

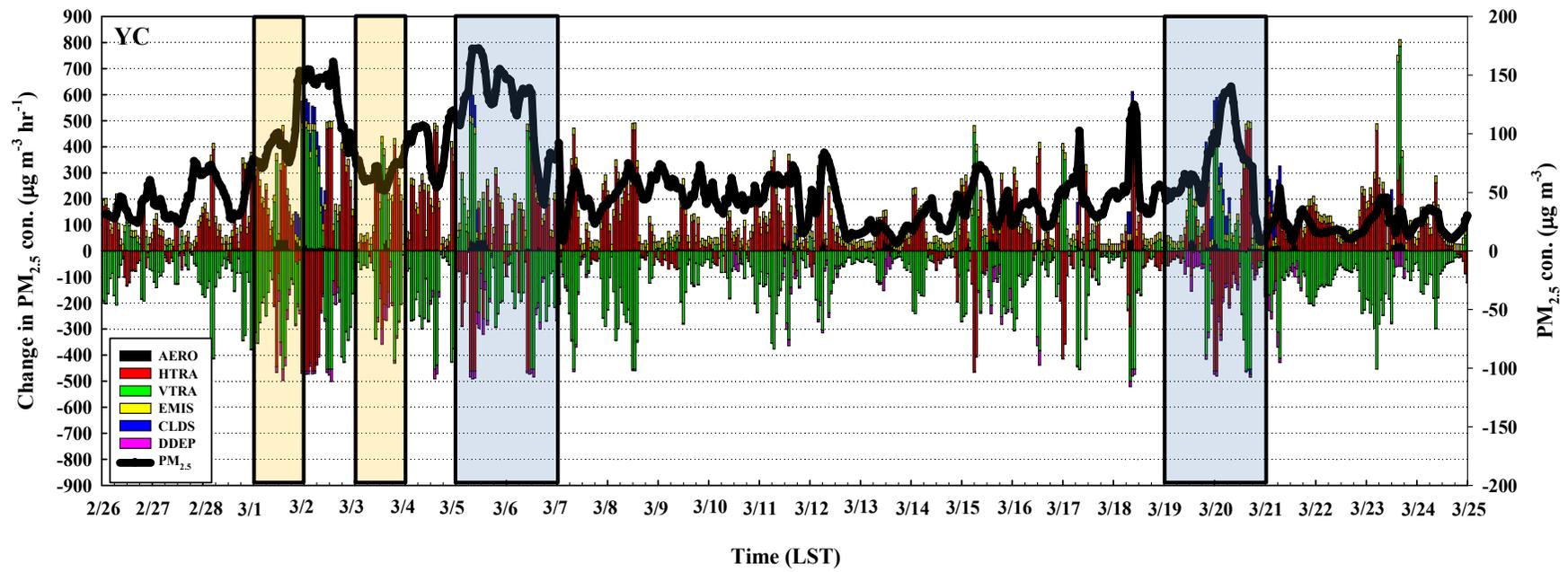


Fig. 4-17. Same as Fig. 4-17 except for YC site.

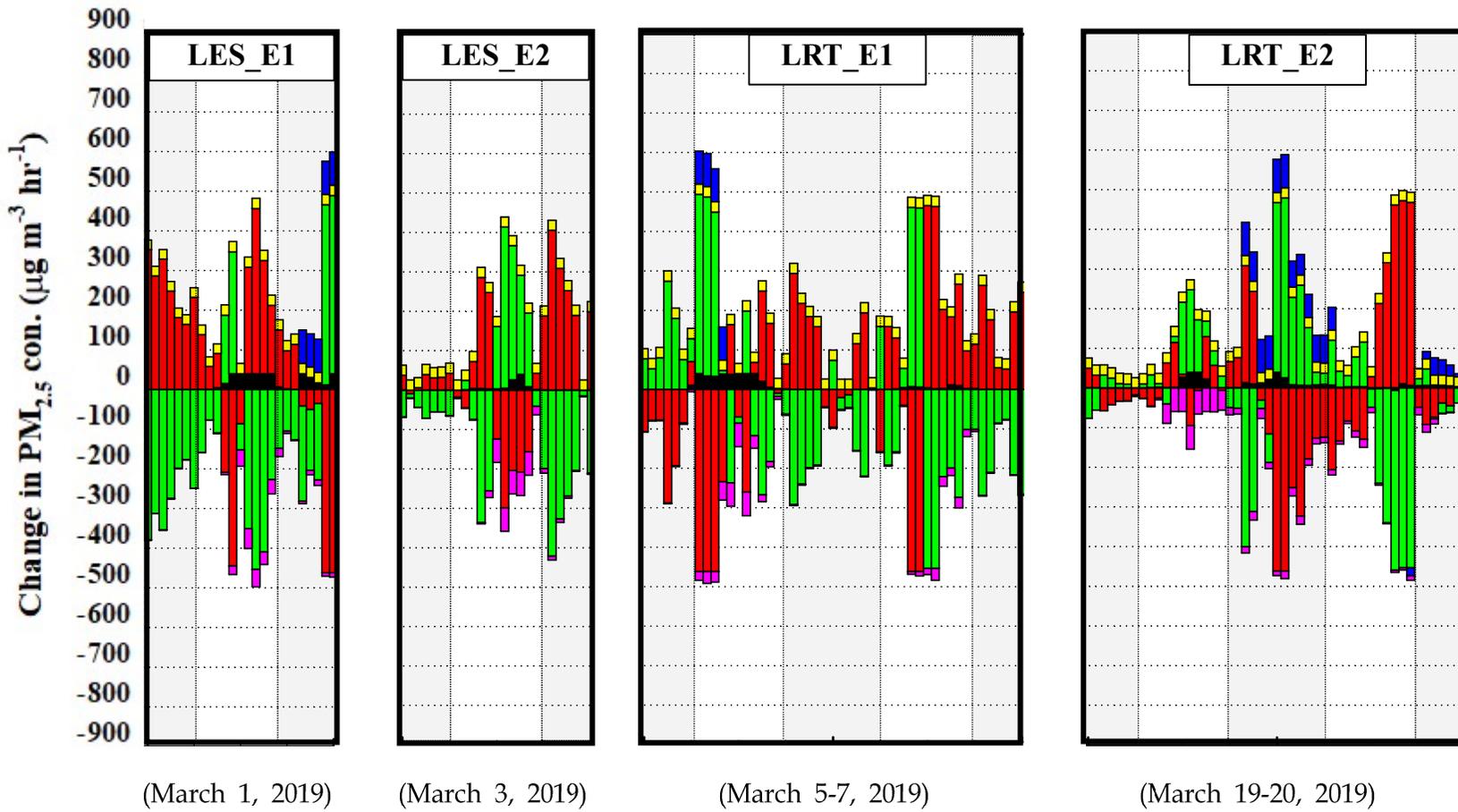


Fig. 4-18. Same as Fig. 4-18 except for YC site.

Table 4-8. Comparison of the integrated process rate (IPR) ($\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$) for $\text{PM}_{2.5}$ obtained from six air quality monitoring sites on LES_E1 and LES_E2 of haze day.

[A] The IPR analysis LES_E1 of $\text{PM}_{2.5}$

Content	Daytime						Nighttime					
	JG	GC	JN	DB	GJ	YC	JG	GC	JN	DB	GJ	YC
AERO	16.99	30.56	26.06	8.53	23.17	22.38	1.25	0.02	0.05	4.36	-0.29	11.49
HTRA	88.28	282.07	4.82	-36.53	139.38	74.92	205.96	-75.91	-20.67	623.48	-12.91	44.13
VTRA	-134.04	-339.04	-38.61	24.15	-207.95	-132.78	-231.84	60.95	5.56	-634.66	-6.93	-117.15
EMIS	24.97	16.86	16.17	6.26	25.46	25.51	16.42	16.42	15.61	6.14	24.91	24.96
CLDS	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	34.85
DDEP	-23.93	-23.07	-20.57	-5.99	-1.07	-21.67	-1.38	-1.38	-0.90	-0.85	-1.55	-4.83

[B] The IPR analysis LES_E2 of $\text{PM}_{2.5}$

Content	Daytime						Nighttime					
	JG	GC	JN	DB	GJ	YC	JG	GC	JN	DB	GJ	YC
AERO	2.73	6.86	-12.87	0.29	16.68	7.99	0.21	-0.43	0.01	0.44	-0.26	-0.24
HTRA	121.11	-45.37	-7.87	6.69	-129.44	16.00	116.89	-65.42	177.00	-65.32	89.47	89.46
VTRA	-119.39	52.59	57.28	-9.47	71.67	3.52	-144.22	51.86	-191.13	62.57	-113.87	-110.62
EMIS	24.93	16.83	16.27	6.23	25.48	25.47	25.15	16.95	16.43	6.28	25.64	25.67
CLDS	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
DDEP	-24.05	-30.29	-30.49	-4.18	-1.09	-30.31	-0.82	-1.68	-0.89	-0.98	-0.69	-2.05

Table 4-9. Comparison of the integrated process rate (IPR) ($\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$) for $\text{PM}_{2.5}$ obtained from six air quality monitoring sites on LRT_E1 and LRT_E2 of haze day.

[A] The IPR analysis LRT_E1 of $\text{PM}_{2.5}$

Content	Daytime						Nighttime					
	JG	GC	JN	DB	GJ	YC	JG	GC	JN	DB	GJ	YC
AERO	10.69	12.51	12.65	10.14	9.86	14.36	0.01	0.18	-0.07	0.91	-0.23	1.93
HTRA	290.57	126.24	-18.52	184.23	-182.84	24.58	390.41	-60.12	-54.44	-13.06	-88.74	12.27
VTRA	-312.71	-137.21	13.03	-193.11	144.95	-59.25	-413.06	44.39	34.36	5.48	65.51	-29.30
EMIS	25.20	16.98	16.40	6.29	25.68	25.70	25.36	17.07	16.55	6.34	25.84	25.82
CLDS	1.62	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	10.46	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	3.49
DDEP	-22.38	-21.75	-27.18	-5.43	-1.84	-21.67	-2.48	-2.11	-1.71	-1.65	-1.76	-3.07

[B] The IPR analysis LRT_E2 of $\text{PM}_{2.5}$

Content	Daytime						Nighttime					
	JG	GC	JN	DB	GJ	YC	JG	GC	JN	DB	GJ	YC
AERO	5.92	13.57	1.64	2.03	12.79	7.05	10.53	7.09	5.10	3.47	7.37	8.73
HTRA	-2.08	80.63	51.62	46.85	-161.26	68.90	-146.51	138.13	9.97	-215.03	-98.52	-87.46
VTRA	7.12	-14.21	-37.78	-46.40	107.50	-47.07	90.89	-175.52	-24.72	199.29	36.19	28.28
EMIS	24.82	16.73	16.19	6.21	25.36	25.29	25.18	16.95	16.46	6.29	25.70	25.65
CLDS	2.39	-0.44	-0.31	<0.001	5.50	-0.04	11.34	4.76	2.86	<0.001	20.56	44.29
DDEP	-26.66	-60.16	-26.83	-3.89	-2.13	-25.91	-15.22	-28.13	-10.08	-3.09	-2.92	-10.56

Table 4-10. Comparison of the integrated process rate (IPR) ($\mu\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$) for SIA for $\text{PM}_{2.5}$ (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+) obtained from total mean of six air quality monitoring sites (JG, GC, JN, DB, GJ, YC) on LRT_E1, E2 and LRT_E1, E2 of haze day.

Variables	Daytime				Nighttime			
	LES_E1	LES_E2	LRT_E1	LRT_E2	LES_E1	LES_E2	LRT_E1	LRT_E2
SO_4^{2-}	0.061	0.025	0.060	0.035	0.003	0.002	0.003	<0.001
NO_3^-	38.595	2.782	9.494	8.420	1.325	0.280	0.336	1.583
AERO NH_4^+	11.933	0.571	3.981	3.597	2.110	-0.212	0.212	5.878
OC	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
EC	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

4.3. 미세먼지 예측에 대한 기상장 자료동화 효과 분석

4.3.1. 자료동화에 의한 기상변화 분석

그림 4-19~4-21은 연무사례일(2019년 2월 26일~3월 24일)을 포함한 분석기간 동안 6개의 기상 관측지점(JG, GC, JN, DB, GJ, YC)에서 자료동화(3DVAR+분석넷징)를 적용하지 않은 실험(NODA)과 적용한 실험(DA) 결과와 관측요소(기온, 풍속, 상대습도)와의 비교를 나타낸다. 기상 관측지점은 각 대기질 관측지점과 가깝고(3 km 이내) 지형에 의한 방해가 없는 지점으로 선정하였다(그림 2-3(b)). 전반적으로, 관측지점에 따라 약간의 차이는 있지만 모든 기상요소에서 DA 실험이 NODA 보다 대체로 향상된 결과를 보였다. 한편, 본 연구에서 이용한 USGS land-use 자료는 대상지역(수도권)의 지표 특성이 일부 제대로 반영되어 있지 않아 NODA 실험의 오차는 다소 클 수 있으며, DA 효과가 이러한 오차를 보정하여 더욱 향상된 결과를 보인 것으로 사료된다.

먼저 기온에 대해 자세히 살펴보면(그림 4-19), 전반적으로 DA 및 NODA 모두 관측값에 비해 모델값이 과소 모의하는 경향을 보였다. 그러나 NODA 실험의 경우 약 5일에 한 번 정도 관측값에 비해 크게 과소모의 하는 경향이 보였는데 DA는 이러한 부분의 개선효과를 보여주었다. 지점 별 특징에서는 도봉(DB)과 광진(GJ) 지점에서 중구(JG), 금천(GC), 중량(JN) 지점에 비해 최저 기온을 더 잘 모의한 것으로 나타났고 전반적으로 DA 실험결과가 NODA 실험보다 관측값에 더 가깝게 모의되었으나, NODA 실험이 더 가깝게 모의된(특히 최고기온의 경우) 시간대도 일부 나타났다. 예를 들어, 수치모의 기간의 야간과 오전시간대에 자료동화를 적용한 DA 실험결과가 NODA 실험에 비해 대체로 뚜렷한 개선효과를 보였으나(특히, 3월 4일, 10일, 15일, 20일), 일부 낮 시간대(정오 전후)에는 자료동화를 적용하지 않은 NODA 실험에서 좀 더 향상된 모의결과도 나타났다.

풍속의 경우, 기온과는 다소 다르게 6지점 모두 DA 실험결과가 NODA 결과보다 뚜렷하게 향상된 것을 볼 수 있었다(그림 4-20). 또한 풍속 관측값에 대해서 NODA 실험은 대체로 과대모의 하는 경향을 보였지만, DA 실험에서는 이러한

부분이 개선되어 관측값과 더 가깝게 모의되었다. 예를 들어, 대부분 지점에서 하루 중 정오 및 자정 전후의 시간대에서 과대모의 된 NODA 실험에 비해 DA 실험에 의한 개선효과가 대체로 뚜렷하게 나타났다. 특히, 3월 12-13일과 21-23일 사이에 NODA 실험에서는 6지점 모두 강한 바람(각 약 5~8 m/s, 약 10~15 m/s)이 모의되었으나, DA 실험에서는 각각 약 5 m/s, 7 m/s 이하로 감소되어 관측값과 매우 유사한 특징을 보였다. 상대습도의 시계열 특성을 보면(그림 4-21), 연구 기간 동안 관측값의 다소 건조한 대기상태를 일부 모의하지 못한 것으로 나타났으나(특히, SO), 대체로 NODA 실험결과에 비해 DA 실험의 상대습도 모의가 보다 향상된 것을 확인할 수 있었다. 대상지역의 대부분 지점에서 특히 3월3~6일과 3월 9일~10일, 3월 18일~19일에 NODA 실험에 비해 DA 실험의 향상된 결과를 보였다.

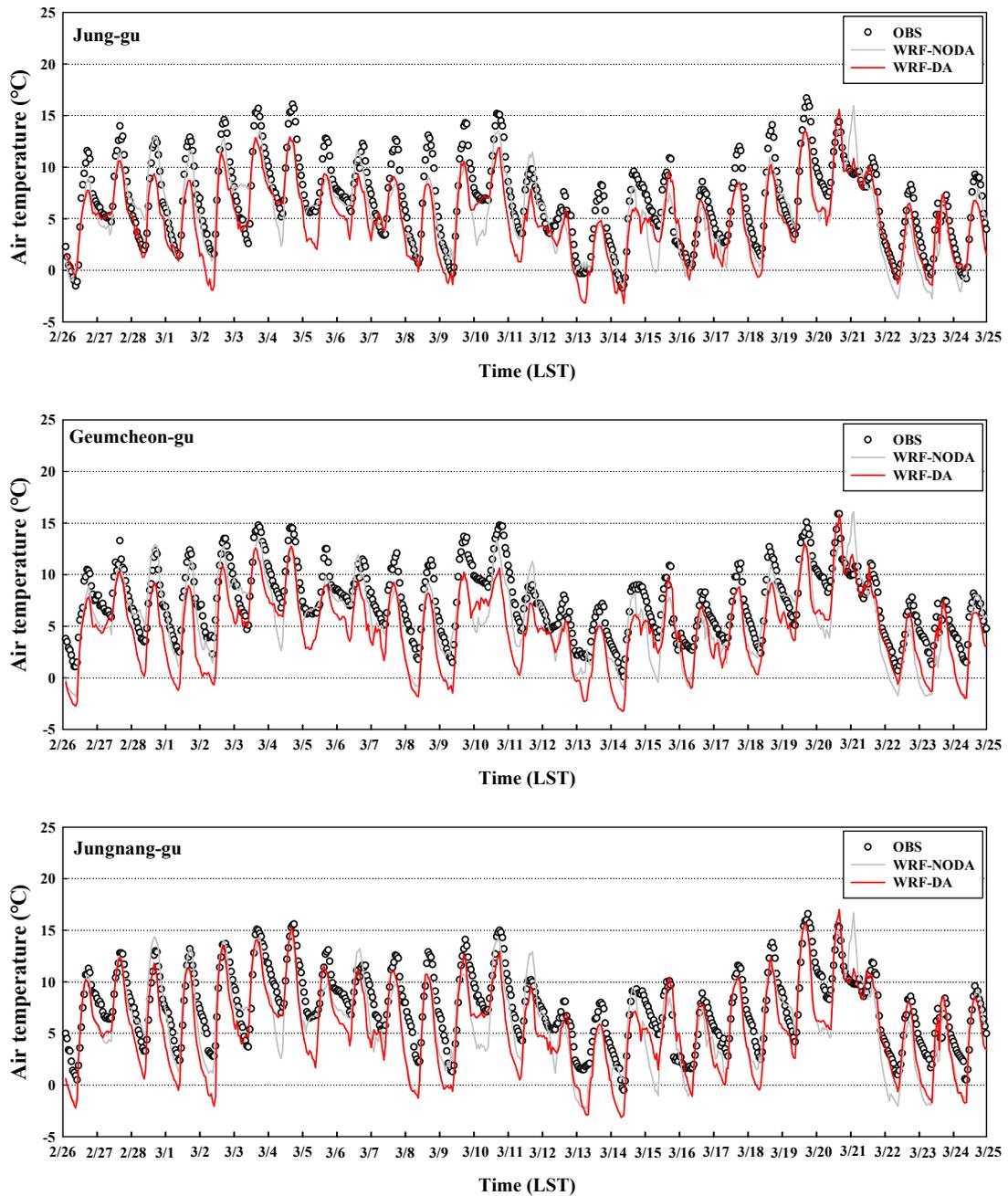


Fig. 4-19. Time series plot of the observed and simulated air temperature at six meteorological monitoring sites (JG, GC, JN, DB, GJ and YC) (≤ 3 km away from the air quality monitoring sites) for NODA and DA cases during the entire simulation period (February 26 - March 24, 2019).

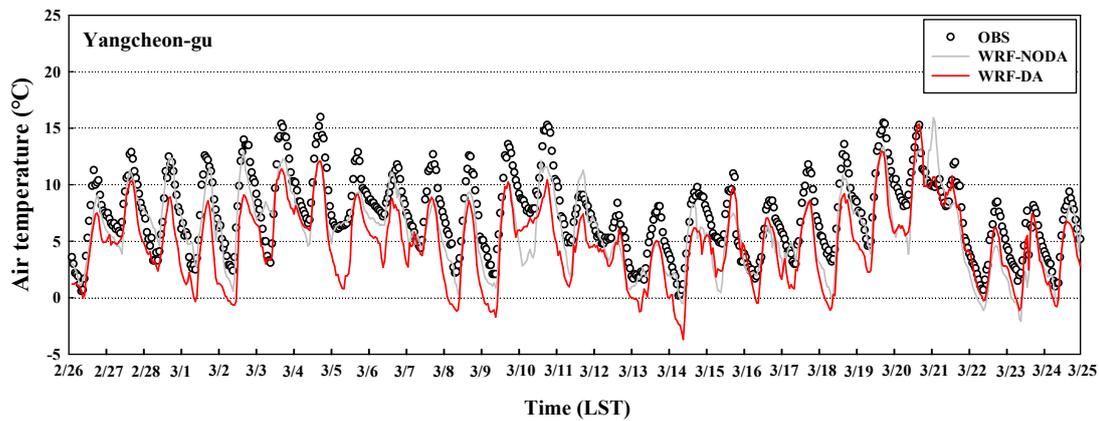
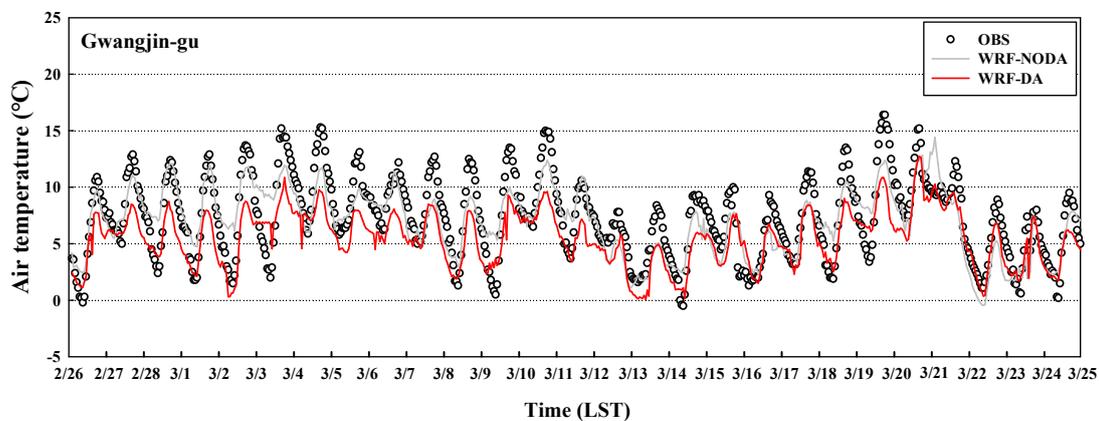
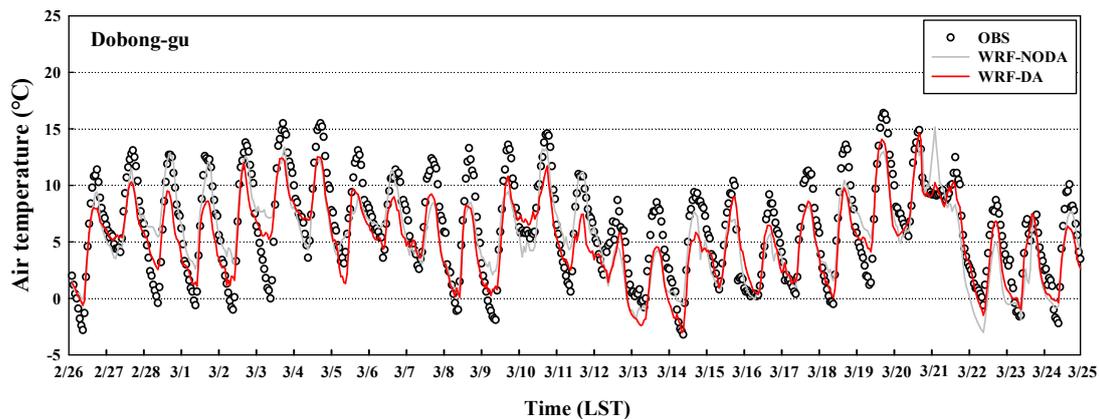


Fig. 4-19. (Continued)

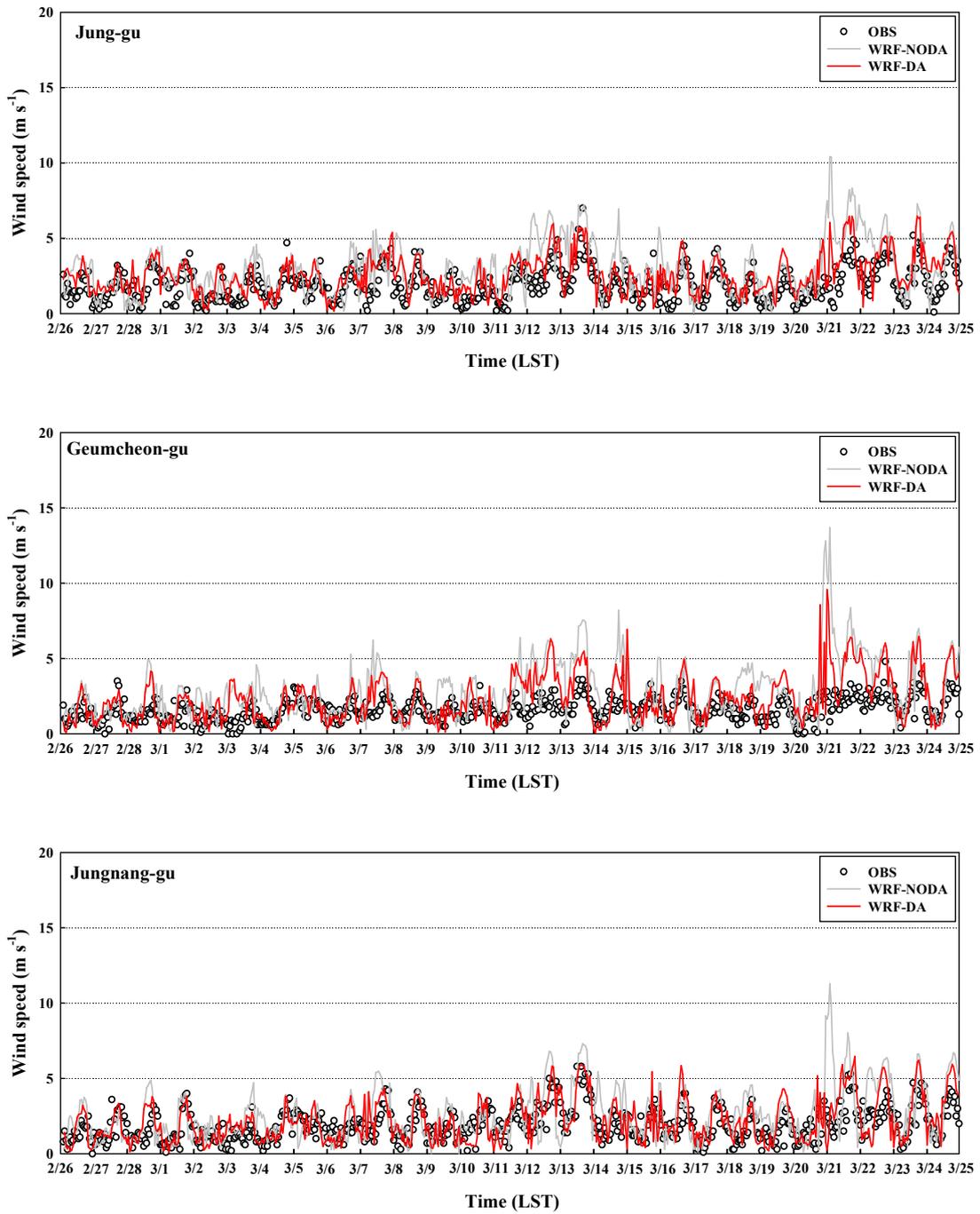


Fig. 4-20. Same as Fig. 4-19 except for relative wind speed.

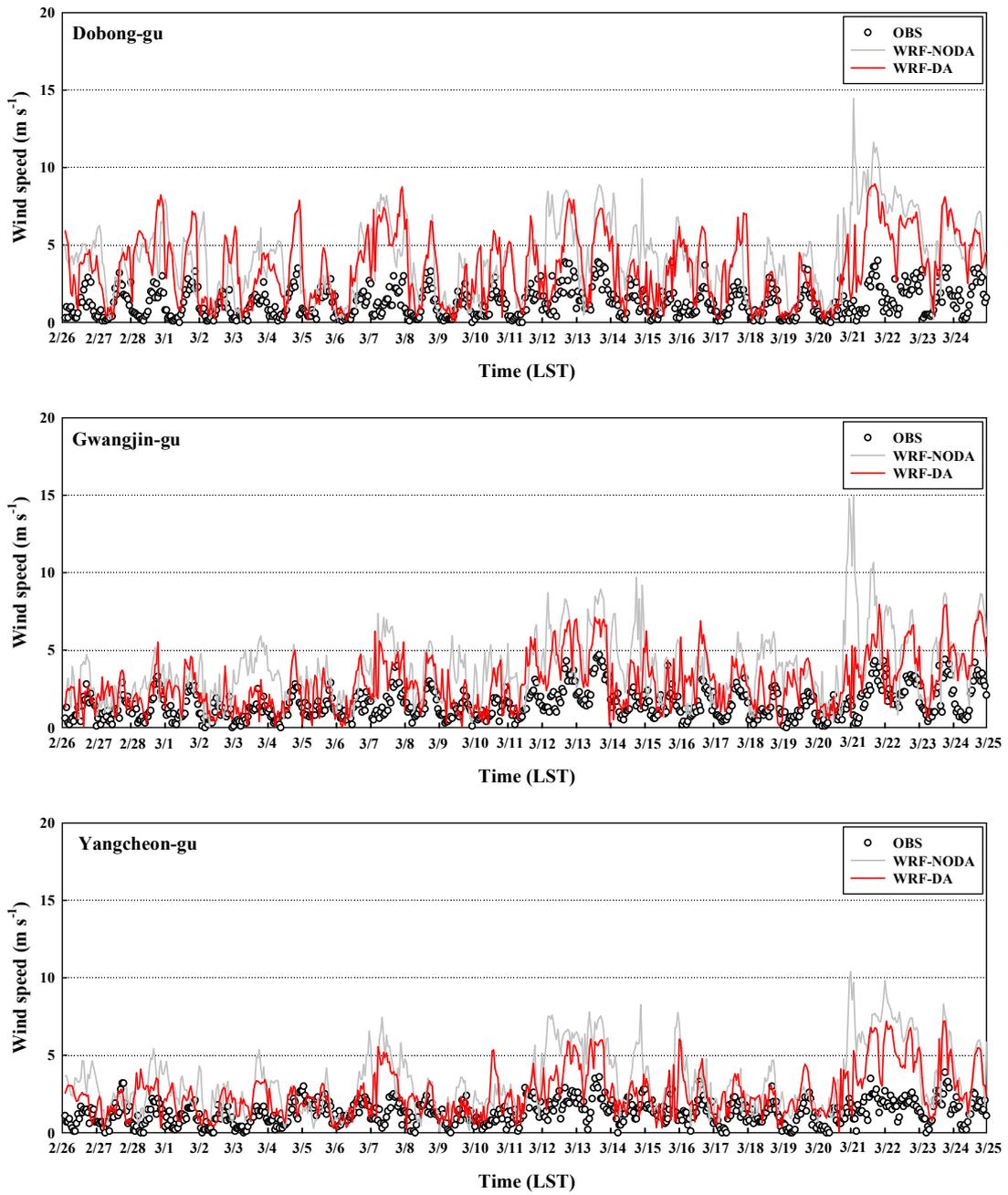


Fig. 4-20. (Continued)

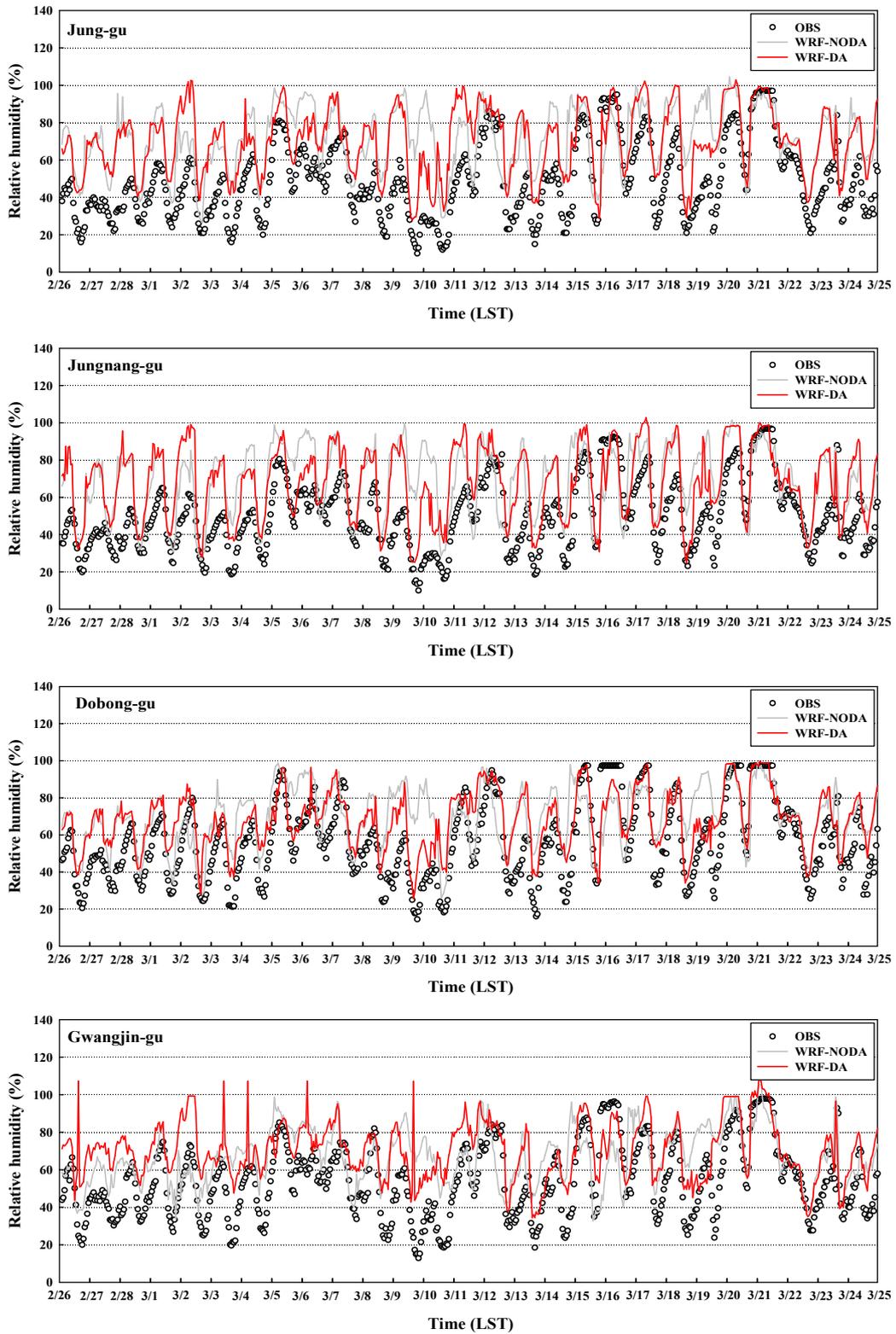


Fig. 4-21. Same as Fig. 4-20 except for relative relative humidity.

Table 4-11는 기상 자료동화(분석 넷징) 모의결과에 대한 정량적 검증을 위하여 모델값과 관측값 사이의 통계적(IOA, RMSE, MBE) 분석을 수행하였다(표2). 전반적으로, 수도권 6지점(JG, GC, JN, DB, GJ, YC)과 20개 지점(All)에서 기온을 제외하고 DA 실험결과가 NODA 실험에 비해 관측값과 더 가깝게 모의되어 향상되었다. 기온의 경우, DA 실험에 의한 IOA가 NODA 실험과 비교하여 지점별로 JG는 0.91에서 0.92로 JN은 0.87에서 0.88로 DB은 0.89에서 0.91로 향상되었고(All: 0.87 → 0.88), RMSE가 지점별로 중구(JG)는 2.35°C에서 2.31°C로 중랑(JN)은 2.72°C에서 2.70°C으로 도봉(DB)은 2.56°C에서 2.28°C로 낮아져 오차가 감소하였다(All: 2.57°C → 2.48°C). 풍속과 상대습도는 기온과 다르게 모든 지점에서 DA 실험이 NODA 실험에 비해 관측값과 더 가깝게 향상된 모의를 보였다. 예를 들어, 풍속의 IOA는 최소 0.35~최대 0.62에서 0.44~0.75로 향상되었고(All: 0.44 → 0.57), RMSE는 최소 1.68 m/s~최대 3.65m/s에서 1.25 m/s~3.05 m/s로 감소하였다(All: 2.77m/s → 2.04 m/s). 또한 상대습도의 IOA는 최소 0.62~최대 0.70에서 0.69~0.81으로 개선되었으며(All: 0.65 → 0.72), RMSE는 최소 21.6%~최대 27.2%에서 17.1%~25.0%로 오차가 감소(All: 24.5%→ 22.9%)한 것으로 추정되었다. 이외에도, 기상요소의 관측값에 대해 DA 및 NODA 실험의 기온은 대부분 지점에서 과소모의, 풍속과 상대습도는 6지점 모두 과대모의 하는 경향이 나타났다. 따라서 모델 결과의 검증을 종합해보면, 기상 자료동화를 적용한 DA 실험의 향상된 결과가 대상 지역의 PM_{2.5} 농도 분포에 영향을 주어 보다 향상된 모의를 예상할 수 있다.

Table 4-11. Statistical evaluation of the meteorological variables between the observed and simulated values for WRF-NODA and WRF-DA cases: results compared at several monitoring sites (“All”, 20 sites each for meteorological variables, including JG, GC, JN, DB, GJ and YC (for meteorological variables) during the entire simulation period (February 26 – March 24, 2019).

Site	Variable	WRF-NODA			WRF-DA		
		IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA	RMSE	MBE
JG	TEMP	0.91	2.35	-1.28	0.92	2.41	-1.8
	WS	0.62	1.77	0.97	0.75	1.25	0.61
	RH	0.62	27.16	21.22	0.69	25.02	21.24
GC	TEMP	0.87	2.54	-1.67	0.84	2.96	-2.53
	WS	0.47	2.11	1.25	0.60	1.62	0.81
JN	TEMP	0.87	2.72	-1.56	0.88	2.77	-2
	WS	0.62	1.68	0.65	0.74	1.26	0.3
	RH	0.63	25.09	17.67	0.72	22.68	17.45
DB	TEMP	0.89	2.56	-1.07	0.91	2.28	-1.35
	WS	0.35	3.65	2.89	0.44	3.05	2.36
	RH	0.7	21.6	13.15	0.81	17.07	11.94
GJ	TEMP	0.87	2.24	-0.61	0.82	2.7	-1.94
	WS	0.42	2.96	2.29	0.59	1.99	1.42
	RH	0.67	20.72	12.24	0.71	21.21	16.58
YC	TEMP	0.87	2.43	-1.57	0.82	3.05	-2.64
	WS	0.34	2.77	2.07	0.48	1.89	1.29
All	TEMP	0.87	2.57	-1.07	0.88	2.78	-1.92
	WS	0.44	2.77	1.82	0.57	2.04	1.19
	RH	0.65	24.53	16.6	0.72	22.87	17.55

IOA^a: index of agreement, RMSE^b: root mean square error, MBE^c: mean bias error.

TEMP: air temperature, WS: wind speed, RH: relative humidity.

4.3.2. 자료동화 적용한 미세먼지 농도 예측 및 영향 분석

그림 4-22은 연구 기간 동안 수도권 내 6개의 대기질 관측지점(JG, GC, JN, DB, GJ, YC)을 대상으로 DA(3DVAR+분석 넷징) 및 NODA(BASE) 실험의 PM_{2.5} 농도와 관측 농도와의 비교를 나타낸다. 또한 DA 실험의 PM_{2.5} 2차 무기 이온 성분 즉, 황산염(SO₄²⁻), 질산염(NO₃⁻), 암모늄(NH₄⁺)의 농도 시계열도 같이 분석하였다. 전반적으로, 대상지역에서(6지점 모두) 기상 자료동화를 적용한 DA 실험 결과가 NODA 실험에 비해 관측값과 더 유사하게 향상된 결과를 나타냈다. 지점별로 자세히 살펴보면, 먼저 서울 중구(JG) 지점의 NODA 실험결과는 대부분 PM_{2.5} 관측 농도의 패턴을 따라가지 못하고 있는 반면, DA 결과는 대체로 관측값과 유사한 경향을 보였다. 예를 들어, 이 지점의 3월 2일과 4일의 새벽에 NODA 실험은 관측값과 달리 PM_{2.5} 농도의 정점(각각 약 48 µg/m³, 25 µg/m³) 이 나타났으나, DA 결과는 상대적으로 관측값과 매우 유사하게 모의하여(약 150 µg/m³, 75 µg/m³) 크게 개선된 것을 확인하였다. 특히 3월 1일 정오~4일 정오와 3월 12일, 15일 고농도일에서 NODA 실험의 심각한 과소모의 경향을 DA 실험에서는 매우 크게 향상시킨 모습이 나타났다. 이것은 중구(JG) 인근의 관측값과 비교해 볼 때 DA를 통한 기상요소(특히, 풍속(그림 4-20))의 향상된 수치모의가 기여한 것으로 추정된다. 즉, 동일 시간대(3월 1일 정오~4일 정오, 3월 12일, 15일)에 NODA 실험의 풍속 과대모의는 PM_{2.5} 농도를 비교적 낮게 모의하여 관측값과 다른 결과를 초래한 반면, DA 실험에서는 야간의 풍속 감소와 지표냉각으로 인해 대기안정도가 강화되면서 (NODA에 비해 강한 기온역전) PM_{2.5}의 농도 증가에 영향을 준 것으로 사료된다(Jo and Kim, 2010; Lim et al., 2005).

중구(JG) 지점과 마찬가지로, 나머지 5지점(GC, JN, DB, GJ, YC)에서도 NODA에 비해 DA 실험에 의한 PM_{2.5} 농도가 대부분 관측값과 더 가깝게 모의된 것을 알 수 있었다. 즉, 5지점에서 NODA 실험의 과소모의 경향이 자료동화를 적용한 DA 실험을 통해 크게 향상된 모습이 확인되었다(특히, 3월 1일 정오~4일 정오, 3월 12일, 15일). 이것은 중구(JG) 지점과 유사하게 DA 실험에서의 보다 향상된 기상수치모의가 주요 원인인 것으로 사료된다. 그러나 고농도 미세먼지 기간 중 일부 (3월 16~20일) 기간에 대해서는 대부분의 지점에서 두 실험(NODA는 과소

모의, DA는 과대모의)모두 제대로 모의하지 못하였다. 이것은 기상모델의 긴 모델러닝 기간으로 인해 모델의 특성상 뒤로 갈수록 예측 능력이 저하되어, 지점 인근(특히, DB, GJ, YC)에서 두 실험의 풍속 과대모의 발생으로 PM_{2.5}의 농도감소에 일부 영향을 준 것으로 사료된다(그림 4-20).

본 연구의 사례 기간 동안 PM_{2.5} 농도에 대해 전체 2차 무기 이온 성분(NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺)이 차지하는 비율은 DA 결과의 경우, 6지점(JG, GC, JN, DB, GJ, YC)에서 각각 약 62.5%, 61.6%, 62%, 66.8%, 58.5%, 56.6% 였다(그림 4-22). 특징적으로, 6지점 모두 2차 무기 이온성분 중에서 NO₃⁻ 농도가 PM_{2.5} 농도의 패턴 및 크기에 가장 크게 기여(JG: 평균 30.7%, GC: 30.6%, JN: 30.6%, DB: 35.0%, GJ: 28.4% , YC: 27.3% 차지)한 것으로 나타났다. 이것은 대상지역이 서울이기 때문에 자동차 배출가스 등에서의 NO₃⁻ 전구물질인 NO_x의 많은 배출량과 함께 기상장 개선(자료동화 효과) 등의 복합적 영향으로 사료된다. 반면, SO₄²⁻와 NH₄⁺는 상대적으로 작게 기여(SO₄²⁻: 6지점 모두 약 15.6~16.6%, NH₄⁺: 약 13.7~15.6% 차지)한 것으로 나타났으며, 대체로 DA 결과의 경우 PM_{2.5} 농도 패턴과 유사한 경향을 보였으나 NODA 결과는 모두 다른 양상을 보였다. 특히, 하루 중 야간~새벽 시간대에 나타난 고농도 NO₃⁻는 PM_{2.5} 이온 성분 농도의 관측 부재로 정확한 원인은 알 수 없지만 야간에 NO₃⁻ 관련 이질적 반응(heterogeneous reaction)이 일부 영향을 준 것으로 추정된다.

PM_{2.5} 수치모의 검증 결과(표 4-12)는 전반적으로 6지점을 포함한 20개 지점(All)에서 DA 실험의 IOA, RMSE, MBE가 NODA 실험에 비하여 다소 향상되었음을 알 수 있었다(All: IOA 0.71 → 0.86, RMSE 33.01 μg/m³ → 24.51 μg/m³, MBE -15.97 μg/m³ → 0.05 μg/m³). 지점별로 상세히 보면, 중구(JG)와 금천(GC) 지점은 IOA가 각각 0.74, 0.72에서 0.86, 0.86로 크게 향상되었고, RMSE가 각각 27.88 μg/m³, 28.81 μg/m³에서 22.75 μg/m³, 21.99 μg/m³로 오차가 크게 감소, 그리고 두 지점에서의 MBE도 각각 -10.09 μg/m³, -11.50 μg/m³에서 3.08 μg/m³, 1.13 μg/m³로 과소모의 경향이 감소하여 낮은 수치로 과대모의 하였다. 나머지 4지점 역시 IOA가 각각 중랑(JN)의 경우 0.71에서 0.85로 향상, 도봉(DB)의 경우 0.67에서 0.85, 광진(GJ)의 경우 0.74에서 0.88, 양천(YC)은 0.72에서 0.87로 크게 향상되었다. RMSE도 전반적으로 중랑(JN)의 경우 31.17 μg/m³에서

22.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 감소, 도봉(DB)는 33.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 22.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, GJ은 29.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 21.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 양천(YC)은 35.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 26.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대폭 감소하는 모습을 보였다. MBE는 중랑(JN)의 경우 -16.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 -3.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 도봉(DB)는 -18.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 -7.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 광진(GJ)은 -13.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 1.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 양천(YC)은 -15.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 5.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 과소모의 하던 경향이 대체로 감소하는 모습을 보였다. 결과적으로, 기상 및 $\text{PM}_{2.5}$ 수치모의 분석과 통계적 검증으로부터 기상모델의 자료동화로 인한 개선효과가 대기질 모델(CMAQ)을 통한 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 예측 향상에 크게 영향을 준 것으로 사료된다.

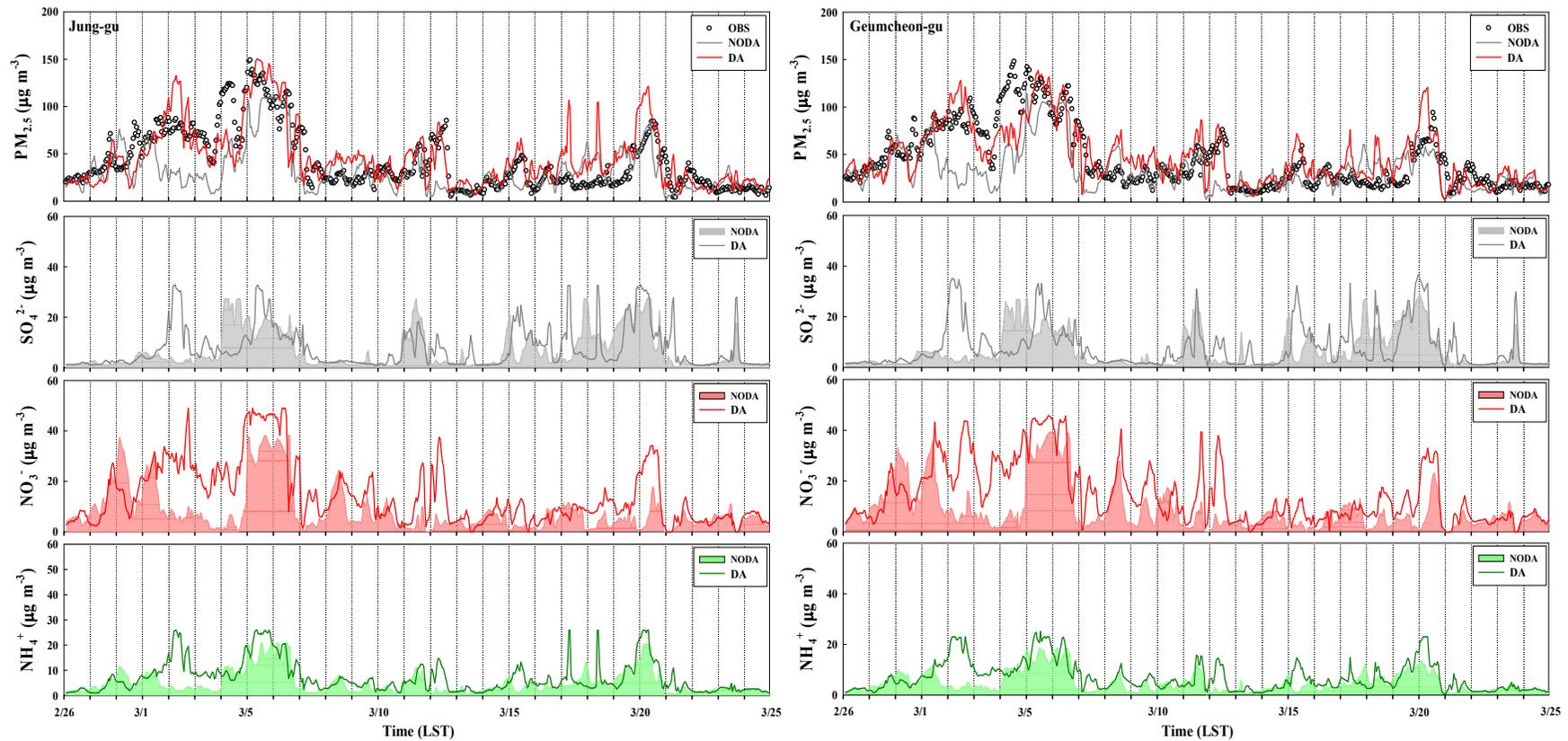


Fig. 4-22. Time series plot of the concentrations of observed and simulated $PM_{2.5}$, including SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+ in $PM_{2.5}$ (Nudging case only) at four air quality monitoring sites (JG, GC, JN, DB, GJ and YC) for NODA and DA cases during the entire simulation period (February 26 - March 24, 2019).

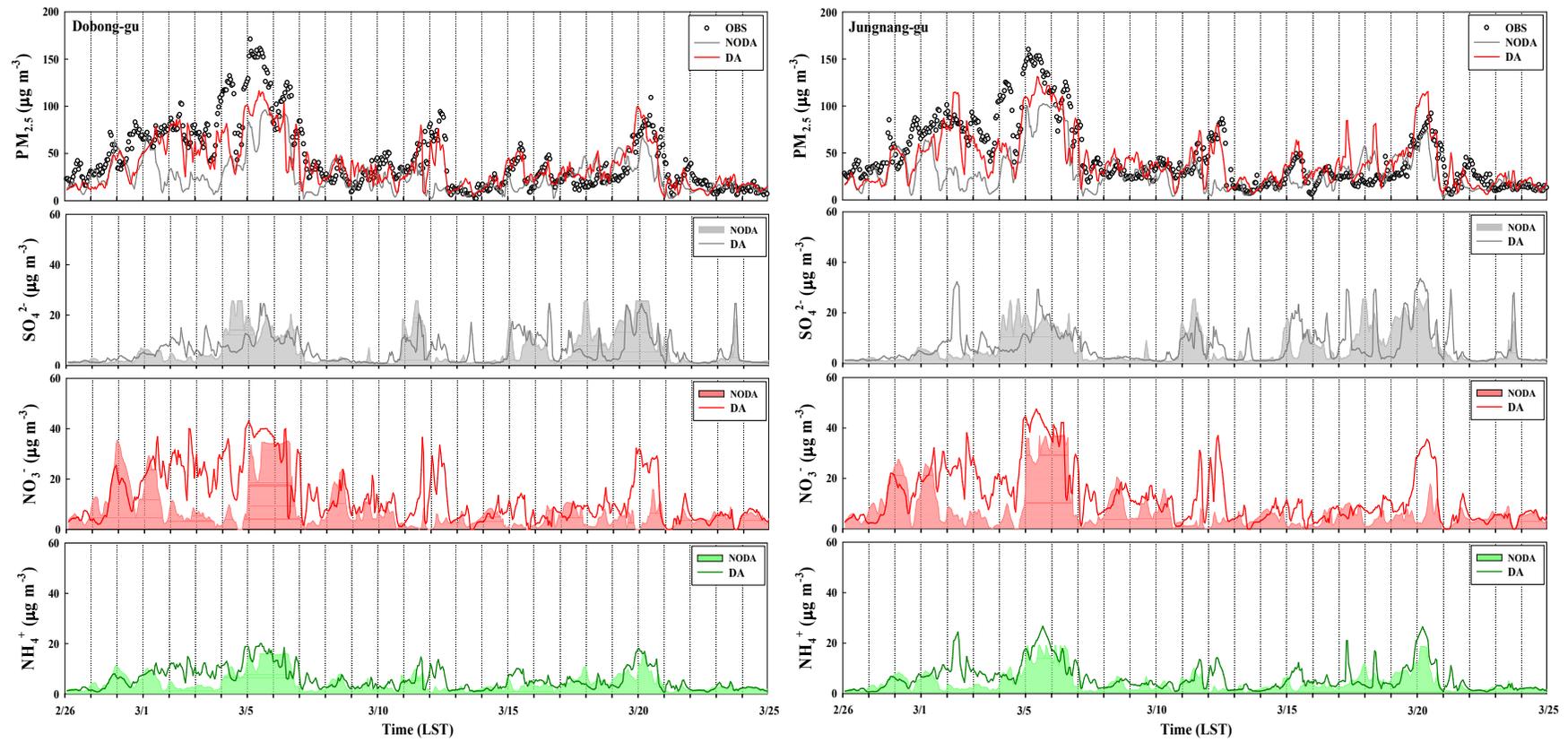


Fig. 6. (Continued)

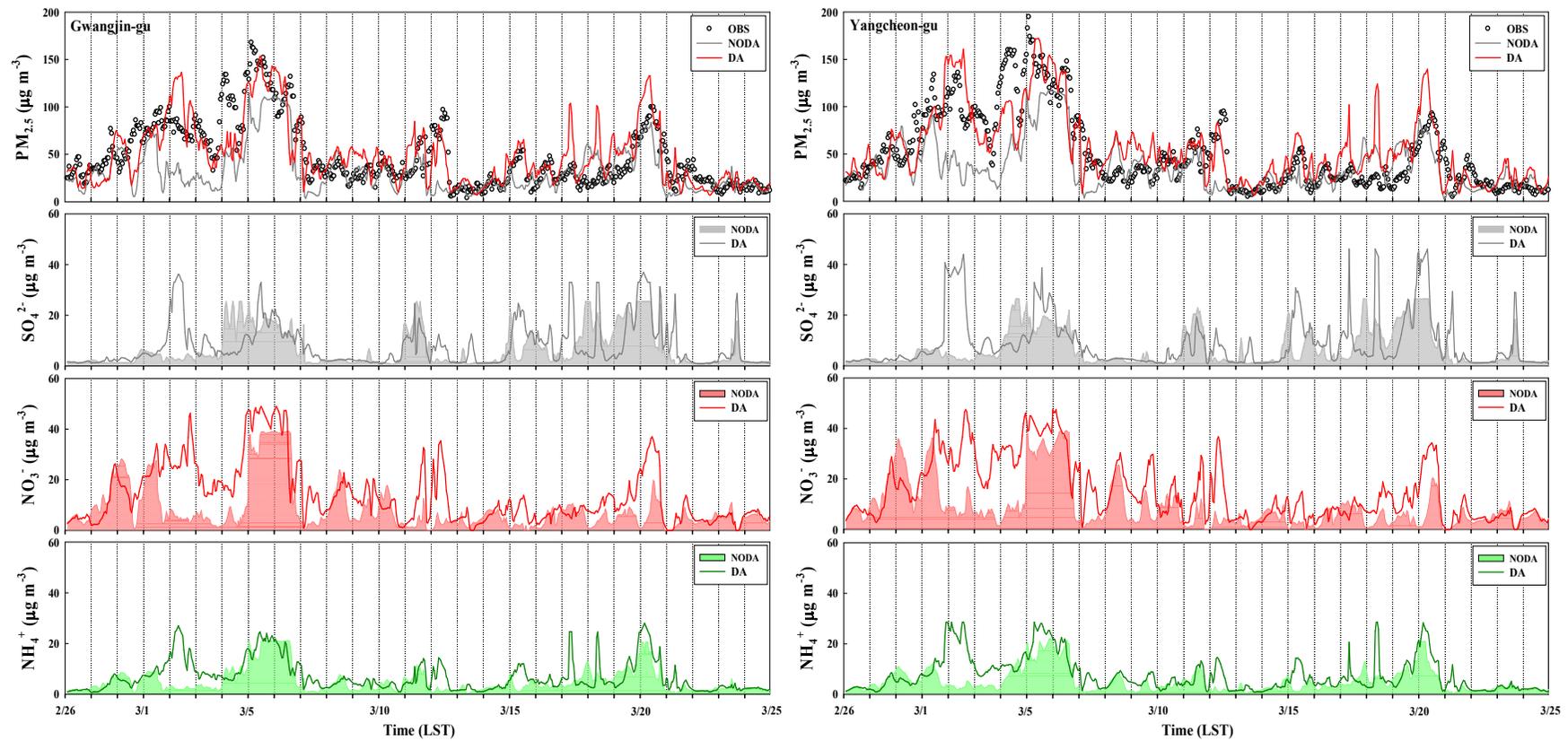


Fig. 6. (Continued)

Table 4-12. Statistical evaluation of the PM_{2.5} concentrations between the observed and simulated values for WRF-NODA and WRF-DA: results compared at several monitoring sites (“All”, 20 sites each for PM_{2.5}, including JG, GC, JN, DB, GJ and YC (for PM_{2.5}), during the entire simulation period (February 26 – March 8, 2019).

Site	WRF-NODA			WRF-DA		
	IOA	RMSE	MBE	IOA	RMSE	MBE
GC	0.72	28.81	-11.50	0.86	21.99	3.08
GA	0.71	35.67	-18.45	0.87	24.94	-1.53
SC	0.71	33.28	-17.65	0.87	23.56	-0.55
GJ	0.74	29.38	-13.61	0.88	21.72	1.13
JN	0.71	31.17	-16.30	0.85	22.63	-3.41
GJ	0.73	30.87	-15.84	0.86	24.31	1.93
DB	0.67	33.07	-18.26	0.85	22.49	-7.33
GB	0.66	33.84	-17.30	0.81	24.70	-6.62
SB	0.71	26.96	-12.12	0.85	21.08	-0.29
MP	0.69	35.37	-17.68	0.87	24.87	0.32
YDP	0.68	38.90	-22.59	0.87	25.58	-3.12
JG	0.74	27.88	-10.09	0.86	22.75	4.69
GN	0.70	35.33	-17.01	0.86	25.56	0.37
SP	0.76	27.23	-9.25	0.84	26.24	11.50
GS	0.71	35.07	-16.45	0.87	27.82	7.28
NW	0.69	34.11	-18.37	0.83	25.35	-5.29
DDM	0.69	33.25	-16.16	0.84	24.86	-1.50
YS	0.70	34.06	-14.91	0.86	25.41	1.27
YC	0.72	35.37	-15.00	0.87	26.97	5.21
SD	0.68	37.94	-21.66	0.85	26.16	-6.79
All	0.71	33.01	-15.97	0.86	24.51	0.05

본 연구에서는 연무 발생 시 기상 자료동화가 미세먼지 수치모의에 미치는 영향을 공간적으로 파악하기 위해, 연구 기간 중에서 DA 효과가 가장 크게 나타난 2019년 3월 4~5일의 남한지역에 해당하는 격자(3-km)와 서울지역에 해당하는 격자(1-km)에 대한 일평균 공간장의 PM_{2.5} 분포(그림 4-23, 4-24)를 각각 분석하였다. 참고로 그림 4-23의 (a)와 (c)는 NODA 실험의 모의결과이고 (b)와 (d)는 DA 실험의 모의결과이다. 전반적으로, NODA 실험의 PM_{2.5} 분포 (a)는 모델 영역 내 전체 격자에서 대략 30-60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 모의되었으며, 공간적으로 (b) DA 결과에 비하여 PM_{2.5} 농도가 높게 분포하는 위치에서 낮게 모의하는 모습을 보였다. 반면, DA 실험에서는 공간분포의 차이가 어느 정도 나타났으며, 주로 서해 해안가 주변, 수도권의 서/북서쪽 방향에서 상대적으로 높은 농도가 모의되었다. DA와 NODA 실험의 PM_{2.5} 농도 차이는 기상 자료동화의 효과로 인해 모델 영역 내 전반적으로 증가하는 경향이 보였으나 모델 영역 중 주변에 지형에 의한 장애물이 거의 없고 오염물질 배출량이 제한적인 해양에서의 자료동화 효과는 NODA가 오히려 높게 나타나는 모습도 보였다. 특히, 2019년 3월 5일 사례를 보면 ((c), (d)) 수도권의 북서쪽과 서울 및 수도권 지역에서 가장 큰 차이로 DA가 높은 PM_{2.5} 농도를 모의하는 경향이 나타났고(약 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상), 반면에 서해 먼바다 지역에서 약 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 차이로 오히려 NODA 결과가 높은 농도를 모의하는 것을 보였다. 이처럼 NODA 결과에서 수도권의 북/북서쪽과 해양 영역에 배출량이 매우 제한적인 지역임에도 불구하고 고농도 PM_{2.5} (약 60~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 나타난 것은 바람의 영향으로 인해 수도권 북서쪽 지역으로부터(예, 중국 오염원) 다량의 오염물질의 수송(바람 전환: 북풍(NODA) → 북서풍(DA))이 일부 영향을 준 것으로 추정된다. 연구영역에서의 이러한 농도 차이는 DA 실험에서의 기상장 개선효과(예, 바람 성분)와 함께 많은 오염물질 배출원으로부터의 장거리 수송(외부 유입, 그림제외) 및 자체 배출량에 의한 영향 등 복합적인 효과가 주요 원인인 것으로 사료된다.

서울지역의 자료동화 효과를 보다 상세하게 살펴보기 위해, 1-km 영역의 3월 4일과 3월 5일의 일평균 PM_{2.5} 농도의 공간분포를 분석하였다(그림 4-24). 전반적으로, 실험은 그림 4-23, 3-km 영역의 평균 농도 분포와 유사한 공간적 차이를 보였다. 특히, DA 실험에서는 상대적으로 공간적 변화 특성이 뚜렷하게 모의되

었다. 전체 1-km 영역에서 3월 4일 (a) NODA 사례에 비해 (b) DA 사례에서 북풍 및 북서풍이 NODA 보다 더 강하게 불며 높은 농도를 넓게 분포시키는 것(약 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이를 보임)을 알 수 있었다. 또한 3월 5일의 (d) DA 결과의 경우 $\text{PM}_{2.5}$ 분포는 (c) NODA 결과와 달리 서해 해안가 주변에서 약 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 차이로 고농도 $\text{PM}_{2.5}$ 가 모의되었고, 그 외 수도권의 동쪽지역에서 약 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 농도가 차이가 나타났다. 이러한 분포는 다량의 오염물질 배출량(그림 2-6)과 기상조건 등의 복합적 영향이 원인인 것으로 사료된다. NODA 실험에서는 전반적으로 강한 북풍 및 서풍 바람이 탁월한 반면 그림 4-23, 24 (a)(c)), DA 실험에서는 고농도 지역 주변으로 풍속 감소 또는 북/북서풍과 동풍 바람의 수렴 등 대기 정체가 나타나면서 농도 증가(축적)를 일으킨 것으로 사료된다(그림 4-23, 24 (b)(d)). 결론적으로, 기상모델의 자료동화 적용으로 인해 기상장이 개선(특히, 바람 성분) 되었으며, 결국 이러한 개선 효과로 인해 $\text{PM}_{2.5}$ 농도(2차 무기 이온성분이 약 00~00% 기여) 모의의 정확도가 향상된 것으로 볼 수 있다.

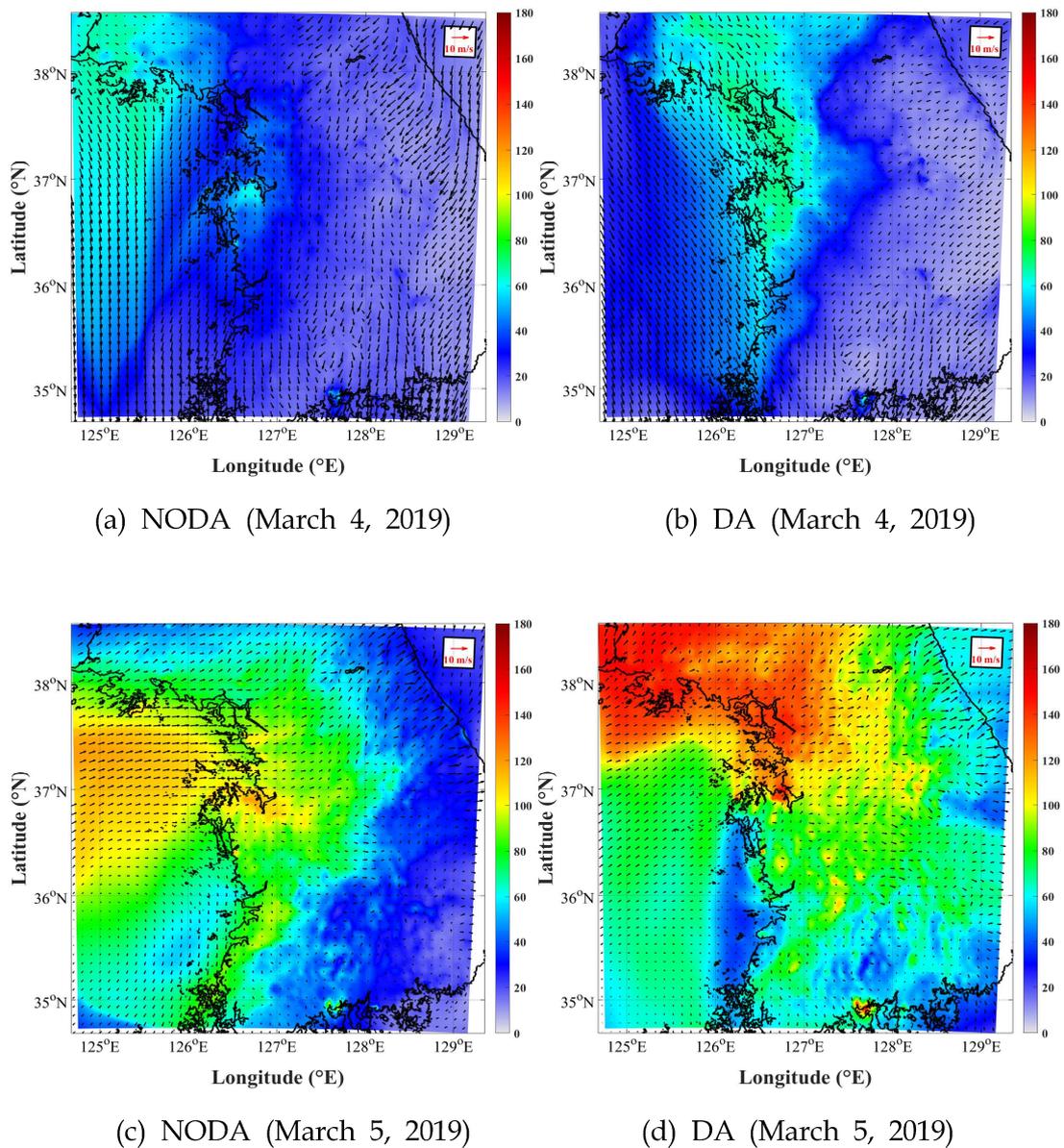
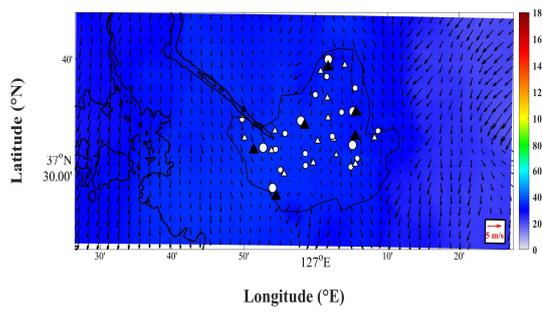
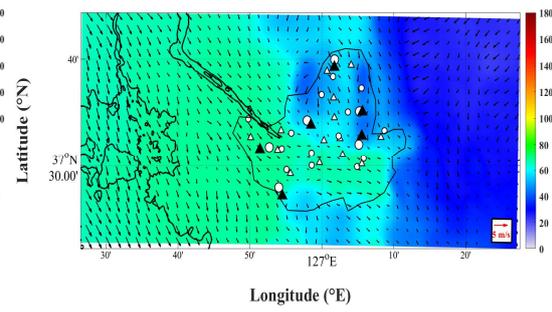


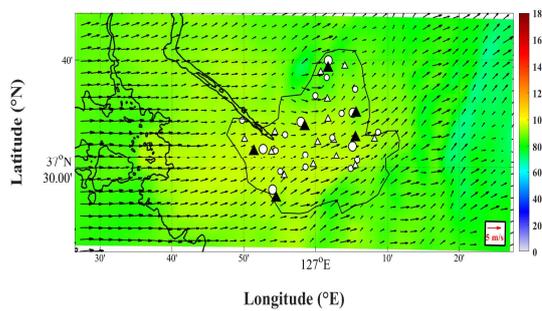
Fig. 4-23. Spatial distributions of $PM_{2.5}$ concentrations averaged from all grids in the 3-km model (D3) for haze days simulated on March 4-5, 2019 for NODA and DA cases.



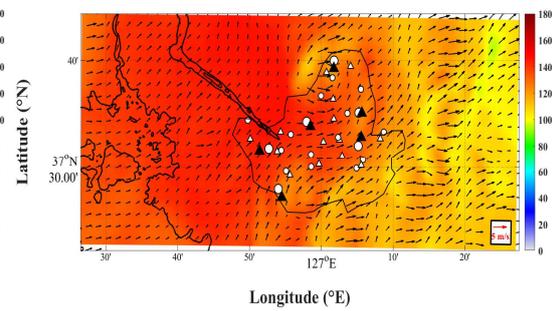
(a) NODA (March 4, 2019)



(b) DA (March 4, 2019)



(c) NODA (March 5, 2019)



(d) DA (March 5, 2019)

Fig. 4-24. Spatial distributions of $PM_{2.5}$ concentrations averaged from all grids in the 1-km model (D4) for haze days simulated on March 4-5, 2019 for NODA and DA cases.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 10년간(2010~2019년) 우리나라 대도시 서울지역의 연무 발생 현상에 대한 기상학적 메커니즘 및 대기질 분석을 위해 연무 유형별 발생빈도 및 기상 및 대기질 특성을 분석하였다. 또한 서울 지역의 연무 발생일에 대한 종관기상특성을 분석하기 위해 일기도 및 기류 패턴 분석을 수행하였다. 먼저 대도시인 서울의 일기유형에 따라 유형별 연무 사례의 발생 빈도를 통계적으로 분류하고, 각 분류된 기상상태별 기상 및 대기질 특성을 규명하였다. 연무 발생일의 선정에 위하여 2010~2019년 서울의 지상기상관측자료와 환경부가 운영하는 대기질 측정망 자료에서 얻은 매시간 $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 농도 자료를 활용하여 모든 기상상태(강수, 황사, 연무, 박무, 맑음) 중에서 연무 발생일을 선정하였다. 특히 연무 사례에 대해서는 발생한 연무의 발생원이 장거리 수송이 우세한 경우(LRT)과 자체적으로 배출된 오염물질의 우세한 경우(LES), 두 가지 영향이 복합적으로 발생하는 경우(MIX)로 구분하여 종관기상 및 대기 화학적 특징을 분석하였다. 연무 발생일에 대한 정체형 사례 및 장거리 수송형 사례와 복합형 사례를 구분하기 위해 850 hPa 상층 일기도상의 와도와 와도이류의 부호와 지균폭속과 지균폭향을 조사하여 각 사례를 구분하였다. 아울러 보다 정확한 구분을 위해 종관 일기도 및 기류 패턴의 후방궤적 분석을 통한 분류를 수행하였다. 또한, 유형별로 구분된 연무 사례에 대하여 수치모의를 수행하여 사례별 $PM_{2.5}$ 의 물리·화학적 특성과 미세먼지 생성에 대한 공정 기여도를 분석하였다. 마지막으로 기상모델의 자료동화 효과를 통한 기상요소의 예측 성능 향상과 그로 인한 대기질 모델의 $PM_{2.5}$ 향상 능력을 분석하였다.

그 결과 최근 10년간 서울지역의 연무 현상 시 종관기상패턴은 크게 정체형 사례와 중국으로부터 수송되어 한반도에 유입되는 수송형 사례, 두 사례가 동시에 발생하는 복합형 사례로 뚜렷이 구분되었으며 수송형 사례가 112일(36 %)로 정체형 사례의 56일(18%) 및 복합형 사례 72일(23%) 보다 통계적으로 높게 나타났다. 정체형 및 수송형 사례와 복합형 사례의 정확한 규명과 대기 오염 증가의

가능성을 판단하기 위해 각종 종관기상 변수와, 일기도를 통해 한반도를 포함한 동아시아 지역의 종관기상 패턴을 조사하였다. 그 결과, 연무 발생시 유형별로 3가지 종관기상 패턴의 뚜렷한 특징을 구분 할 수 있었으며, 정체형 사례의 경우 음(-)의 와도와 와도이류, 4 m/s 의 약한 지균풍을 갖는 반면 수송형 사례의 경우, 양(+)의 와도와 와도이류, 4 m/s 이상의 강한 지균풍을 갖는 반대 양상을 보였다.

전형적인 연무 발생의 사례분석을 위하여 분류된 사례별 850 hPa 일기도의 특성을 정체형 및 수송형, 복합형 사례로 구분해 본 결과 연무 현상 시에는 직·간접적으로 고기압의 영향으로 맑은 날씨를 나타내었으며 정체형 및 수송형 사례 모두 풍속의 차이는 있으나 안정한 대기 상태를 보였다. 연무 발생 시 일평균 대기오염 농도 변화는 입자상 오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 및 가스상 오염물질(SO_2 , NO_2) 모두 높게 나타났고, 연무현상과 같이 대기질을 악화시키는 박무현상은 비교적 높은 상대습도로 연무 발생 시 보다 낮게 모의되는 경향이 보였다. 유형별로 정체형 및 수송형, 복합형 사례별 나타난 대기오염농도의 일변화는 $PM_{2.5}$ 와 NO_2 는 서울에서 정체성과 장거리 이동 시 유사한 농도 수준을, SO_2 는 장거리 수송 사례가 높게 나타났다. 정체형 사례에서는 전반적으로 풍속이 약하고 안정한 대기 상태의 특징으로 고농도 시간대에 증가한 성분들이 높은 농도 수준을 꾸준히 유지하는 것을 볼 수 있었다. 수송형 사례의 경우 중국 고 배출지역의 영향으로 강한 풍속에 의해 인위적 오염물질과의 물리 화학적 상호 작용이 있을 것으로 분석되었다.

유형별 연무 사례기간의 고농도 $PM_{2.5}$ 현상에 대한 특성 분석을 위해 3차원 광화학 수송 모델인 CMAQ을 이용한 대기질 수치모의를 실시하였다. 서울 및 수도권 지역의 $PM_{2.5}$ 농도는 연직 혼합이 활발한 주간($87.5 \mu g/m^3$)이 야간($91.1 \mu g/m^3$)에 비해 낮게 나타났는데, 이는 주간의 높은 대기 혼합고에 의한 활발한 연직 확산 때문인 것으로 분석되었다. 화학 조성은 주요이온 성분인 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 의 비율이 전체의 절반가량을 차지하는 것으로 나타났고, 최대 배출원인 중국 공업단지 지역과 국내 서울 및 수도권의 $PM_{2.5}$ 기여도를 비교했을 때 전반적으로 장거리 수송에 의한 기여도(55~62%)가 국지적 배출의 기여도(32~37%) 보다 높게 나타났다. 또한, IPR을 이용한 과정분석 결과 수송과정과 에어로졸 과정이

지배적이었으며, 배출량에 의한 $PM_{2.5}$ 농도 변화는 매우 낮은 것으로 나타났다. 또한 기상모델의 자료동화를 통한 모델 평가에서는 대상 지역의 대부분 지점에서 NODA 실험에 비해 DA 실험의 향상된 결과를 보였고, 그로 인한 기상 및 $PM_{2.5}$ 수치모의 분석과 통계적 검증으로부터 기상모델의 자료동화로 인한 개선효과가 대기질 모델(CMAQ)을 통한 $PM_{2.5}$ 농도 예측 향상에 크게 영향을 준 것을 알 수 있었다. 결과적으로 모델 결과의 검증을 종합해보면, 기상 자료동화를 적용한 DA 실험의 향상된 결과가 대상지역의 $PM_{2.5}$ 농도 분포에 영향을 주어 보다 향상된 모의 결과가 수행되었다.

이상의 결과에서 연무 발생과 관련하여 일기유형별 대표적인 특성을 통계적으로 정리하여 그 특성을 파악하였고, 나아가 연무 발생 특성이 입자상 물질 혹은 그 전구 물질의 배출 특성에 따른 지역적 차이를 규명하였다. 또한 장거리 수송 등과 같은 외부요인까지 해석할 수 있는지에 대한 기상 특성을 분석하였으며 정체성 및 이동성 연무 발생일에 대하여 사례별 수치 모의를 통한 물리 화학적 특성을 살펴보았다. 연무 현상은 대기중의 고농도 오염물질을 부유시켜 대기오염과 대기질 악화의 원인 요소가 되며 그 결과 생태계 뿐만 아니라 기후변화에도 영향을 미치므로 대기질 모델링을 통한 더 활발한 발생 기작 및 영향연구, 측정 분석 연구가 병행되어야 할 것이다. 본 연구는 우리나라의 대도시인 서울지역의 대기질 연구에 있어 자체 기여요인과 외부 요인을 물리기상학 및 화학적으로 구분하고 그 특성을 이해하는데 충분한 기초 자료가 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 강동근, 김선태, 김정욱, 1993, 동북아시아 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 9(4), 329-339.
- 강병욱, 정만호, 전준민, 이학성, 2011, 광양산업단지 인근지역 대기 중 미세먼지 PM_{2.5}와 산성오염물질 특성. 한국대기환경학회지, 27(1), 16-29.
- 기상청, 2002, 지상기상관측지침, 245.
- 기상연구소, 2014, WRF-LES-FDDA 구축 및 검증.
- 김병곤, 2012, 에어로솔-구름-강수 상호작용 (CAPI) 연구를 위한 관측 방법론 고찰. 대기, 22(4), 437-447.
- 김석우, 송상근, 한승범, 2016, 2010년 3월 극심한 황사사례의 발생 및 수송과정에 관한 연구. 한국대기환경학회지, 32(3), 256-271.
- 김유근, 문윤섭, 오인보, 황미경, 2002, 서울 및 부산지역에서 기온과 국지풍이 지표 고농도 오존 발생에 미치는 영향. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 38(4), 319-331.
- 김유근, 박상현, 강재은, 송상근, 2010, MM5-CMAQ 모델 시스템을 이용한 양산 지역 봄, 여름 고농도 오존일의 발생 과정별 기여도 평가. 한국환경과학회지, 19(3), 269-279.
- 김태희, 김유근, 손장호, 정주희, 2016, 기상자료동화에 따른 CMAQ 모델의 오존 농도 모의 민감도 연구. 한국대기환경학회지, 32(4), 372-383.
- 문정혁, 전원배, 이화운, 2020, KORUS-AQ 기간 동안 초기 입력 자료에 따른 WRF 기상장 모의 결과 비교. 한국환경과학회지, 29(1), 33-44.
- 박정임, 2006, 통합환경전략(IES) 연구.
- 소윤영, 송상근, 한승범, 2020, 2013~2016년 연무 사례의 에어로졸 화학성분별 농도 특성 및 직접적 복사강제력 추정 연구. 한국대기환경학회지, 36(2), 198-215.
- 손고은, 정주희, 김현수, 김유근, 2014, WRF-SWAN 모델을 이용한 상세 연안기상 모의 특성 분석. 한국환경과학회지, 23(3), 409-431.

- 유근혜, 이복진, 박승식, 정선아, 조미라, 임용재, 김순태, 2019, 2014년 2월 광주도심에서 발생한 PM_{2.5} 고농도 사례 연구. 한국대기환경학회지, 35(2), 195-213.
- 유정우, 박순영, 전원배, 김동혁, 이화운, 이순환, 김현구, 2017, WRF-CMAQ 결합 모델을 이용한 에어로졸 피드백 효과가 한반도 일사량에 미치는 영향 연구. 한국대기환경학회지, 33(5), 435-444.
- 이민희, 한의정, 원양수. (1986). 황사현상이 우리나라에 미치는 영향 (Yellow Sand Phenomena Influence to the Atmosphere in Korea). 한국대기환경학회지, 2(3), 34-44.
- 이성희, 강병욱, 연익준, 최준락, 박현필, 박상찬, 조병렬, 2012, 충주시 미세입자 PM_{2.5} 농도특성에 대한 사례 연구. 한국대기환경학회지, 28(5), 595-605.
- 이영곤, 조천호, 김명수, 2008, Aerodynamic Particle Sizer (APS) 를 이용한 고농도 PM₁₀ 사례 중 황사 판별기법 개발. 대기, 18(1), 25-32.
- 이영재, 정선아, 조미라, 김선정, 박미경, 안준영, 임재현, 2014, 광주지역 고농도 및 황사 시의 미세먼지 화학적 성분 특성. 한국대기환경학회지, 30(5), 434-448.
- 이화운, 정우식, 2001, 대기오염물질의 중거리 수송에 대한 관측적 분석. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 37(5), 475-486.
- 전원배, 이화운, 이순환, 박재형, 김현구, 2014, 2009년 안면도 지역 고농도 PM_{2.5} 특성에 관한 수치 연구. 한국환경과학회지, 23(2), 249-259.
- 전원배, 이화운, 이순환, 최현정, 김동혁, 박순영, 2011, 기상 입력 자료가 연안지역 고농도 오존 수치 모의에 미치는 영향. 한국대기환경학회지, 27(1), 30-40.
- 정여민, 이화운, 이순환, 최현정, 전원배, 2010, 기후변화에 따른 기온상승이 한반도 동남지역 국지 기상장과 오존 분포에 미치는 영향에 관한 수치모의. 한국환경과학회지, 19(12), 1431-1445.
- 한국 환경 정책·평가연구원, 2006, 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 II, 연구보고서.
- Ahn, S. H., Park, S. Y., Kim, J. Y., Kim, B. J., (2014). Effect of the rainfall

- during typhoon periods on the variation of concentration of ambient air pollutants (PM₁₀, NO₂, CO, SO₂) in the Korean peninsula, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30, 128-138.
- Anderson, T. L., Charlson, R. J., Winker, D. M., Ogren, J. A., Holmén, K., (2003). Mesoscale variations of tropospheric aerosols. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(1), 119-136.
- Baek, J., Hu, Y., Odman, M. T., Russell, A. G., (2011). Modeling secondary organic aerosol in CMAQ using multigenerational oxidation of semi volatile organic compounds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D22).
- 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.
- Byun, D. W., Ching, J. K. S., (1999). Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) Modeling System, EPA Report. EPA/600/R-99/030, NERL, Research Triangle Park, NC.
- Carmichael, G. R., Calori, G., Hayami, H., Uno, I., Cho, S. Y., Engardt, M., Amann, M., (2002). The MICS-Asia study: model intercomparison of long-range transport and sulfur deposition in East Asia. *Atmospheric Environment*, 36(2), 175-199.
- Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley, J. J., Hansen, J. E., Hofmann, D. J., (1992). Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 255(5043), 423-430.
- Chen, L., Shi, M., Gao, S., Li, S., Mao, J., Zhang, H., Wang, Z., (2017). Assessment of population exposure to PM_{2.5} for mortality in China and its public health benefit based on BenMAP. *Environmental Pollution*, 221, 311-317.
- Chen, Z. H., Cheng, S. Y., Li, J. B., Guo, X. R., Wang, W. H., Chen, D. S., (2008). Relationship between atmospheric pollution processes and

- synoptic pressure patterns in northern China. *Atmospheric Environment*, 42(24), 6078-6087.
- Ching, J., Byun, D., (1999). Introduction to the Models-3 framework and the Community Multiscale Air Quality model (CMAQ). Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System.
- Davis, R. E., D. A. Gay., (1993) A synoptic climatological analysis of air quality in the Grand Canyon National Park. *Atmospheric Environment*, 5, 713-727.
- Draxler, R. R., Hess, G. D., (1998). An overview of the HYSPLIT4 modelling system for trajectories. *Australian meteorological magazine*, 47(4), 295-308.
- Draxler, R. R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A., Taylor, A., (1999). HYSPLIT4 Users's Guide (p.35). US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Air Resources Laboratory.
- Gipson, G. L., Young, J., (1999). Process analysis. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System.
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P. I., Geron, C., (2006). Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(11), 3181-3210.
- Guo, Y., Feng, N., Christopher, S. A., Kang, P., Zhan, F. B., Hong, S., (2014). Satellite remote sensing of fine particulate matter PM_{2.5} air quality over Beijing using MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 35(17), 6522-6544.
- Gustafsson, Ö., Kruså, M., Zencak, Z., Sheesley, R. J., Granat, L., Engström, E., Rodhe, H., (2009). Brown clouds over South Asia: biomass or fossil

- fuel combustion. *Science*, 323(5913), 495-498.
- Hadei, M., Hopke, P. K., Nazari, S. S. H., Yarahmadi, M., Shahsavani, A., Alipour, M. R., (2017). Estimation of mortality and hospital admissions attributed to criteria air pollutants in Tehran metropolis, Iran (2013-2016). *Aerosol and air quality research*, 17(10), 2474-2481.
- Han, J. S., Moon, K. J., Lee, S. J., Kim, Y. J., Ryu, S. Y., Cliff, S. S., Yi, S. M., (2006). Size-resolved source apportionment of ambient particles by positive matrix factorization at Gosan background site in East Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(1), 211-223.
- Han, S. B., Song, S. K., Shon, Z. H., Kang, Y. H., Bang, J. H., Oh, I., (2021). Comprehensive study of a long-lasting severe haze in Seoul megacity and its impacts on fine particulate matter and health. *Chemosphere*, 268, 129369.
- Hong, S. Y., Dudhia, J., Chen, S. H., (2004). A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly weather review*, 132(1), 103-120.
- Hong, S. Y., Noh, Y., Dudhia, J., (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly weather review*, 134(9), 2318-2341.
- Hwang, G., Lee, M., Shin, B., Lee, G., Lee, J., Shim, J., (2008). Mass concentration and ionic composition of PM_{2.5} observed at Jeodo Ocean Research Station. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(5), 501-511.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., Collins, W. D., (2008). Radiative forcing by long lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D13).
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the*

Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_TS_FINAL.pdf

- Jeong, J. H., Oh, I., Kang, Y. H., Bang, J. H., An, H., Seok, H. B., Kim, J., (2016). WRF modeling approach for improvement of air quality modeling in the Seoul metropolitan region: seasonal sensitivity analysis of the WRF physics options. *Journal of Environmental Science International*, 25(1), 67-83.
- Jeon, W., Choi, Y., Lee, H. W., Lee, S. H., Yoo, J. W., Park, J., Lee, H. J., (2015). A quantitative analysis of grid nudging effect on each process of PM_{2.5} production in the Korean Peninsula. *Atmospheric Environment*, 122, 763-774.
- Ji, D., Li, L., Wang, Y., Zhang, J., Cheng, M., Sun, Y., Miao, H., (2014). The heaviest particulate air-pollution episodes occurred in northern China in January, 2013: Insights gained from observation. *Atmospheric Environment*, 92, 546-556.
- Jo, H. Y., Kim, C. H., (2010). Characteristics of East Asia synoptic meteorological conditions in association with haze phenomena. *Atmosphere*, 20(2), 161-172.
- Jo, H. Y., Kim, C. H., (2011). Characteristics of air quality over Korean urban area due to the long-range transport haze events. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(1), 73-86.
- Jo, Y. J., Lee, H. J., Chang, L. S., Kim, C. H., (2017). Sensitivity Study of the Initial Meteorological Fields on the PM₁₀ Concentration Predictions Using CMAQ Modeling. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(6), 554-569.

- Kain, J. S., (2004). The Kain - Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of applied meteorology*, 43(1), 170-181.
- Kihal-Talantikite, W., Legendre, P., Le Nouveau, P., Deguen, S., (2019). Premature adult death and equity impact of a reduction of NO₂, PM₁₀, and PM_{2.5} levels in Paris—a health impact assessment study conducted at the census block level. *International journal of environmental research and public health*, 16(1), 38.
- Kim, H. C., Kim, S., Son, S. W., Lee, P., Jin, C. S., Kim, E., Stein, A., (2016). Synoptic perspectives on pollutant transport patterns observed by satellites over East Asia: Case studies with a conceptual model. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 1-30.
- Kim, J., Hwang, I., (2016). The characterization of PM, PM₁₀, and PM_{2.5} from stationary sources. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(6), 603-612.
- Kim, J., Jung, C. H., Choi, B. C., Oh, S. N., Brechtel, F. J., Yoon, S. C., Kim, S. W., (2007). Number size distribution of atmospheric aerosols during ACE-Asia dust and precipitation events. *Atmospheric Environment*, 41(23), 4841-4855.
- Kim, S. W., Yoon, S. C., Kim, J., Kim, S. Y., (2007). Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements. *Atmospheric Environment*, 41(8), 1634-1651.
- Koo, H. J., Park, S. U., (2008). Study on the Characteristics of Surface Ozone Distributions and the Ozone Critical Levels to Vegetation in the South Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(3), 310-320.
- Korea Meteorological Administration (KMA), (2016). Guidelines for Ground Weather Observation. KMA, South Korea, p. 282.
- Korean Statistical Information Service (KOSIS), (2019). Statistical

Database-Health.

- Lee, C. B., Kim, J. C., Cheon, T. H., (2009). Effects study on the accuracy of photochemical modeling to MM5 four dimensional data assimilation using satellite data. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(4), 264-274.
- Lee, H. D., Lee, G. H., Kim, I. D., Kang, J. S., Oh, K. J., (2013). The influences of concentration distribution and movement of air pollutants by sea breeze and mistaround Onsan industrial complex, *Clean Technology*, 19, 95-104.
- Lee, S., Ho, C. H., Lee, Y. G., Choi, H. J., Song, C. K., (2013). Influence of transboundary air pollutants from China on the high-PM₁₀ episode in Seoul, Korea for the period October 16 - 20, 2008. *Atmospheric Environment*, 77, 430-439.
- Lee, Y. J., Jung, S. A., Jo, M. R., Kim, S. J., Park, M. K., Ahn, J. Y., Lyu, Y. S., Choi, W. J., Hong, Y. D., Han, J. S., Lim, J. H., (2014) Characteristics of PM Chemical Component during Haze Episode and Asian Dust at Gwang-ju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30, 434-448, (in Korean with English abstract).
- Li, Y. J., Li, X. L., Liang, S., Fang, L. Q., Cao, W. C., (2013). Epidemiological features and risk factors associated with the spatial and temporal distribution of human brucellosis in China. *BMC infectious diseases*, 13(1), 1-12.
- Lim, Y. K., Kim, Y. K., Oh, I. B., Song, S. K., (2005). Nocturnal Inversion Layer observed by Tethersonde and AWS System and its Relation to Air Pollution at Ulsan. *Journal of Environmental Science International*, 14(6), 555-563.
- Liu, C. M., Huang, C. Y., Shieh, S. L., Wu, C. C., (1994). Important meteorological parameters for ozone episodes experienced in the Taipei basin. *Atmospheric Environment*, 28(1), 159-173.

- Milbrandt, J. A., Yau, M. K., (2005). A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description. *Journal of Atmospheric Sciences*, 62(9), 3065-3081.
- Monin, A. S., Obukhov, A. M., (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contributions to Geophysical institute Academy of Sciences. USSR*, 151(163), e187.
- Moon, K. J., Park, S. M., Park, J. S., Song, I. H., Jang, S. K., Kim, J. C., Lee, S. J., (2011). Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM_{2.5} in Seoul Metropolitan Area in 2010. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(6), 711-722.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2013). A Study on the Speciation and Control Measures of PM_{2.5} from Large Stationary Emission Source.
- NIER. (2018). 2015 National Air pollutants Emission, NIER NAPES, pp. 7-19.
- Otte, T. L., (2008). The impact of nudging in the meteorological model for retrospective air quality simulations. Part I: Evaluation against national observation networks. *Journal of applied meteorology and climatology*, 47(7), 1853-1867.
- Park, Y. H., Song, S. K., Lee, S. J., Kim, S. W., Han, S. B., (2016). An Analysis of Long-Term Variation of PM₁₀ Levels and Local Meteorology in Relation to Their Concentration Changes in Jeju. *Journal of Environmental Science International*, 25(1), 107-125.
- Parrish, D. F., Derber, J. C., (1992). The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Monthly Weather Review*, 120(8), 1747-1763.
- Pathak, R. K., Wang, T., Ho, K. F., Lee, S. C., (2011). Characteristics of summertime PM_{2.5} organic and elemental carbon in four major Chinese cities: Implications of high acidity for water-soluble organic carbon (WSOC). *Atmospheric Environment*, 45(2), 318-325.

- Pathak, R. K., Wang, T., Wu, W.S., (2011). Nighttime enhancement of PM_{2.5} nitrate in ammonia-poor atmospheric conditions in Beijing and Shanghai: plausible contributions of heterogeneous hydrolysis of N₂O₅ and HNO₃ partitioning. *Atmospheric Environment*, 45, 1183-1191.
- Pope III, C. A., Dockery, D. W., (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the air & waste management association*, 56(6), 709-742.
- Pun, B. K., Seigneur, C., Vijayaraghavan, K., Wu, S. Y., Chen, S. Y., Knipping, E. M., Kumar, N., (2006). Modeling regional haze in the BRAVO study using CMAQ MADRID: 1. Model evaluation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D6).
- Quan, J., Tie, X., Liu, Q., Li, X., Gao, Y., Zhao, D., (2014) Characteristics of Heavy Aerosol Pollution during the 2012-2013 Winter in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 88, 83-89.
- Sanchez, M. L., D. Pascual, C. Ramos, I. Perez, (1990). Forecasting particulate pollutant concentrations in a city from meteorological variables and regional weather patterns. *Atmospheric Environment*, 6, 1509-1519.
- Shafran, P. C., Seaman, N. L., Gayno, G. A., (2000). Evaluation of numerical predictions of boundary layer structure during the Lake Michigan Ozone Study. *Journal of Applied Meteorology*, 39(3), 412-426.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, 227(7), 3465-3485.
- Singh, S., Soni, K., Bano, T., Tanwar, R.S., Nath, S., Arya, B.C., (2010). Clear-sky Direct Aerosol Radiative Forcing Variation over Mega-city Delhi, *Annales Geophysicae*, 28, 1157-1166.
- Song, S. K., Han, S. B., Kim, S. W., (2014). Analysis of meteorological characteristics related to changes in atmospheric environment on Jeju Island during 2010-2012, *Journal of Environmental Science*

- International, 23, 1889-1907.
- Song, S. K., Shon, Z. H., Park, Y. H., (2017) Diurnal and seasonal characteristics of the optical properties and direct radiative forcing of different aerosol components in Seoul megacity, *Science of the Total Environment*, 599-600, 400-412.
- 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(D10), 16343-16367.
- Tian, S., Pan, Y., Liu, Z., Wen, T., Wang, Y., (2014). Size-resolved aerosol chemical analysis of extreme haze pollution events during early 2013 in urban Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 452-460.
- Twomey, S., (1974). Pollution and the Planetary Albedo, *Atmospheric Environment*, 8, 1251-1256.
- USEPA. (1999). Science Algorithms of the EPA Models 3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System.
- USGS. (2008). Global land cover characteristics data base version 2.0 users guide. US. Geological Survey (http://edc2.usgs.gov/glcc/globdoc2_0.php)
- Wang, L., Xu, J., Yang, J., Zhao, X., Wei, W., Cheng, D., Su, J., (2012). Understanding haze pollution over the southern Hebei area of China using the CMAQ model. *Atmospheric Environment*, 56, 69-79.
- Wang, Z., Li, J., Wang, Z., Yang, W., Tang, X., Ge, B., Su, D., (2014). Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control. *Science China Earth Sciences*, 57(1), 3-13.
- Won, J. G., Yoon, S. C., Kim, S. W., Jefferson, A., Dutton, E. G., Holben, B. N., (2004). Estimation of direct radiative forcing of Asian dust aerosols with sun/sky radiometer and lidar measurements at Gosan, Korea.

- Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 82(1), 115-130.
- WRF-ARW V3: User's Guide (2015).
- Yang, H. L., Xiao, H., Hong, Y. C., (2011). A numerical study of aerosol effects on cloud microphysical processes of hailstorm clouds. *Atmospheric research*, 102(4), 432-443.
- Yang, Y., Liu, X., Qu, Y., Wang, J., An, J., Zhang, Y., & Zhang, F. (2015). Formation mechanism of continuous extreme haze episodes in the megacity Beijing, China, in January 2013. *Atmospheric Research*, 155, 192-203.
- Yorifuji, T., Yamamoto, E., Tsuda, T., Kawakami, N., (2005). Health impact assessment of particulate matter in Tokyo, Japan. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 60(4), 179-185.
- Yun, M. J., Gu, Y. S., (2010). Optimization of WRF Model for Air Quality Model. In *Proceedings of the Korea Air Pollution Research Association Conference* (pp. 570-571). Korean Society for Atmospheric Environment.
- Zhang, X. Y., Wang, Y. Q., Niu, T., Zhang, X. C., Gong, S. L., Zhang, Y. M., Sun, J. Y., (2012). Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(2), 779-799.

Meteorological mechanisms and physical and chemical characteristics for haze occurrences in the Seoul metropolitan area using numerical modeling

Seung-beom Han

Department of Earth and Marine Sciences, Graduate School, Jeju National University, Jeju, Korea

Abstract

In an effort to investigate the characteristics of synoptic meteorological conditions in association with haze event occurred over Korea, we statistically classified characteristics of haze events into three types of haze: Local emission stagnation (LES), Long-range transported (LRT), and Mixed types (MIX), based on the synoptic meteorological parameters, and analyze comparatively the characteristics of synoptic meteorological conditions for each case. The results showed that the LES haze type and MIX type occurs less frequently with the occurrence frequency of 18% and 23% than LRT type

with the occurrence frequency of 36%. Analysis of frequency, air quality, and meteorological conditions for six weather types in Seoul during 2010-2019.

During the observed haze days, all pollutants have high concentration in comparison with those under other meteorological conditions (Rain, Mist, Dust, Clear, Cloud) except for only PM_{10} of Dust case where its level shows highest among total 6 categorized conditions. The LRT haze case shows similar levels of PM_{10} and NO_2 , but higher SO_2 compared with LES haze type, suggesting the importance of sulfur chemistry for LRT haze type and local photochemistry for LES haze type.

To analyze the characteristics of the high concentration $PM_{2.5}$ during the haze event by LRT, LES, MIX type, we conduct an air quality numerical simulation using a CMAQ. The $PM_{2.5}$ concentration in Seoul and the metropolitan area showed that the daytime ($87.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) was lower than the nighttime ($91.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), due to the active spread of the daytime atmospheric mix of PBL layer. In addition, the relative contributions of LRT from China and LES in South Korea to $PM_{2.5}$ concentrations at six study area during the day and night on haze days. Overall, the contributions of LRT (a daily mean of 55%–62%) for all the sites were somewhat larger than those (32%–37%) of local emissions, by a factor of 1.6–1.9. Similar to the daily mean, the contributions of LRT during the day (49%–56%) and night (58%–68%) were larger than those of local emissions (32%–37% for day and 30%–39% for night), especially in the western and central Seoul. This implies that a concentration increase in $PM_{2.5}$ and its inflow into the Seoul were primarily caused by the transport of $PM_{2.5}$ and its precursor gases from the Chinese source regions and in part by their local accumulation with the meteorological conditions around Seoul (e.g., blocking effect) Moreover, our results suggest that the long-range transport from China has a greater impact than local emissions on the increases in $PM_{2.5}$ concentrations on haze days.

The process analysis using IPR showed that transportation and aerosol

processes were dominant, and that the change in $PM_{2.5}$ concentration due to emissions was very low. Furthermore, the meteorological variables (air temperature, wind speed, and relative humidity) of DA case showed a higher improvement than those of NODA case, especially wind speed. In addition, the $PM_{2.5}$ concentrations in the NODA case were mostly underestimated in the study area compared to the DA case. The meteorological improvements contributed greatly to the increase in $PM_{2.5}$ concentrations in the DA case, and showed good agreement with its observed concentrations, especially to the nighttime $PM_{2.5}$ increase due to the enhancement of atmospheric stability by reduced wind speed. In terms of spatial distributions, high $PM_{2.5}$ concentrations in the DA case were mostly simulated in the western coastal area, northwestern or southwestern areas of the Seoul.