

Research Paper

동아시아 지역의 계절별 기상패턴에 따른 우리나라 PM_{2.5} 농도 및 기여도 특성 분석: 2015년 집중측정 기간을 중심으로

남기표 · 이대균 · 장임석

국립환경과학원 기후대기연구부 대기질통합예보센터

Analysis of PM_{2.5} Concentration and Contribution Characteristics in South Korea according to Seasonal Weather Patterns in East Asia: Focusing on the Intensive Measurement Periods in 2015

Ki-Pyo Nam · Dae-Gyun Lee · Lim-Seok Jang

Air Quality Forecasting Center, Climate and Air Quality Research Department, NIER

요약: 본 연구에서는 지상 PM_{2.5} 측정 자료와 일기도 자료, WRF 및 CMAQ 모델을 활용하여 동북아시아 지역의 계절별 PM_{2.5} 거동특성을 분석하였으며, 대기질 모델에 BFM을 적용하여 우리나라 PM_{2.5} 농도에 대한 계절별 국내의 기여도를 평가하였다. 일기도 자료를 기반으로 국내 PM_{2.5} 측정 자료 및 대기질 모사결과를 통해 PM_{2.5}의 거동특성을 분석한 결과, 동북아 지역에서의 PM_{2.5}는 장거리 수송된 대기오염 물질의 유입 및 대기정체 현상에 기인한 농도의 증가 또는 깨끗한 공기의 유입에 따른 농도의 감소 등의 특징이 계절별 종관기상 특성에 따라 상이하게 나타났다. 대기질 모델에 BFM (Brute-Force Method)을 적용하여 우리나라 6개 집중측정소 지점의 PM_{2.5} 농도에 대한 국내의 기여도 평가를 수행한 결과, 백령도 지역은 낮은 자체 배출량과 동시에 중국으로부터 인접한 지리적 특성으로 인해 국외로부터의 기여가 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면, 서울, 울산과 같이 높은 자체 배출량 특성을 나타내는 지역의 경우, PM_{2.5}에 대한 국외 기여도는 타 지역에 비해 상대적으로 낮게 나타남과 동시에 계절에 따른 기여도의 표준편차는 상대적으로 높게 나타나는 특징을 보였다. 본 연구는 우리나라를 중심으로 계절별 기상조건 변화에 따른 동북아 지역의 PM_{2.5} 거동특성을 분석하여 국내 대기오염물질 현상에 대한 이해를 증진함과 동시에, 지역 배출특성에 따라 PM_{2.5} 농도에 대한 국내의 기여도는 상이할 수 있음을 알려 향후 대기질 개선 대책 수립시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 초미세먼지, 동북아시아, 거동특성, WRF, CMAQ

Abstract: In this study, the characteristics of seasonal PM_{2.5} behavior in South Korea and other Northeast Asian regions were analyzed by using the PM_{2.5} ground measurement data, weather data,

First Author: Ki-Pyo Nam, Tel: +82-32-560-7722, E-mail: kipyonam@korea.kr, ORCID: 0000-0001-8067-8433

Corresponding Author: Dae-Gyun Lee, Tel: +82-32-560-7721, E-mail: hileedg@korea.kr, ORCID: 0000-0001-6012-7757

Co-Author: Lim-Seok Jang, Tel: +82-32-560-7660, E-mail: lschang@korea.kr, ORCID: 0000-0002-7538-493X

Received: 26 December, 2018. Revised: 17 April, 2019. Accepted: 14 May, 2019.

www.kci.go.kr

WRF and CMAQ models. Analysis of seasonal PM_{2.5} behavior in Northeast Asia showed that PM_{2.5} concentration at 6 IMS sites in South Korea was increased by long-distance transport and atmospheric congestion, or decreased by clean air inflow due to seasonal weather characteristics. As a result of analysis by applying BFM to air quality model, the contribution from foreign countries dominantly influenced the PM_{2.5} concentrations of Baengnyeongdo due to the low self-emission and geographical location. In the case of urban areas with high self-emissions such as Seoul and Ulsan, the PM_{2.5} contribution from overseas was relatively low compared to other regions, but the standard deviation of the season was relatively high. This study is expected to improve the understanding of the air pollutant phenomenon by analyzing the characteristics of PM_{2.5} behavior in Northeast Asia according to the seasonal weather condition change. At the same time, this study can be used to establish the air quality policy in the future, knowing that the contribution of PM_{2.5} concentration to the domestic and overseas can be different depending on the regional emission characteristics.

Keywords : PM_{2.5}, East Asia, Behavior characteristics, WRF, CMAQ

I. 서론

미세먼지(Particulate matter, PM)는 대기 중에 부유하고 있는 직경 10 μm 이하의 액체상 또는 입자상 물질이다. 많은 선행연구를 통해 미세먼지가 각종 호흡기 및 심혈관 질환과 연관성이 있음이 밝혀졌으며, 암을 유발함과 동시에 조기사망률의 증가에도 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려졌다(WHO 2000; Samet et al. 2000; Pope et al. 2002; Pope & Dockery 2006; Di et al. 2017). 미세먼지의 인체 유해성에 대한 국민들의 인식과 우려가 증가함에 따라 미세먼지는 최근 가장 큰 환경 문제로 급부상하였으며, 이에 대한 근본적인 대책마련의 필요성이 날이 증대되고 있다.

하지만 미세먼지는 배출원에서 직접 생성되는 1차 대기오염물질의 특성과 대기 중 전구물질들의 화학반응으로 생성 및 소멸되는 2차 대기오염물질의 특성을 동시에 지니고 있는 것으로 알려져 있으며(Seinfeld & Pandis 2016), 특히 작은 입자크기로 인해 PM₁₀보다 인체에 더 유해한 것으로 알려진 PM_{2.5}는 2차 대기오염물질의 특성이 매우 큰 것으로 알려져 있다(Choi et al. 2013; Kim et al. 2016). 이와 더불어 미세먼지는 기상 조건에 따라 대기 중에서 수송, 축적, 제거되며, 특히 지리적으로 편서풍대에 위치한 우리나라는 자체 영향에 주변국으로부터 장거리 수송된 미세먼지 및 그 전구물질의 영향이 더해져, 고

농도 미세먼지 현상의 원인 분석 및 대책 마련이 매우 복잡한 실정이다.

실효성 있는 미세먼지 저감대책의 수립을 위해서는 발생원에 대한 원인 분석과 동시에, 기상의 영향을 반영한 동북아시아의 미세먼지 수송현상에 대한 이해가 필수적이다. 이와 관련된 국내 선행연구로 Kim et al. (2017)은 CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions)를 기반으로 PSAT (Particulate Source Apportionment Technology)을 적용하여 2014년 2월 말 우리나라 수도권 지역에서 발생한 고농도 미세먼지 현상의 국내외 영향을 산정한 바 있다. 그리고 Lee et al (2013)은 종관기상자료, CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 위성자료, 서울 지역의 LiDAR (Light Detection And Ranging) 및 지상 측정자료, FLEXTRA (FLEXible TRAjectory model) 역궤적 분석자료 등을 통해, 2008년 10월 서울에서 발생한 고농도 PM₁₀ 현상이 중국에서 상승하여 서풍에 타고 한반도로 장거리 수송된 대기오염물질의 영향에 의한 것임을 밝혔다.

다만, 우리나라를 대상으로 수행된 기존 선행연구는 대부분 PM₁₀을 위주로 분석이 수행되어 PM_{2.5}에 대한 연구는 아직 부족한 실정이며, 이와 더불어 분석기간은 주로 고농도 미세먼지 현상이 발생한 사례 기간을 중심으로 분석이 이루어져 계절에 따른 미세

먼지 거동특성을 이해하는 것에는 한계를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 대기질 모델과 지상 PM_{2.5} 측정자료, 종관 기상 자료 등을 활용하여 계절별 사례 기간에 대한 동북아시아의 PM_{2.5} 거동 특성 분석을 수행하였다.

II. 연구방법 및 검증

1. 연구 대상 기간 및 측정 자료

본 연구의 분석대상 기간은 2016년부터 2018년까지 한·일 PM_{2.5} 협력회의의 모델링 분과에서 한국 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, NIER)과 일본 환경과학원(National Institute of Environmental Studies, NIES)이 공동분석을 수행한 기간을 대상으로 하였으며, 양국에서 PM_{2.5}와 PM₁₀의 주요 성분에 대해 공통적으로 관측을 수행한 2015년의 계절별 사례기간을 중심으로 기상 및 대기질 측정자료, 모델 모사결과를 이용한 분석을 수행하였다(Table 1). 분석대상 지역은 국내 대기질 집중측정소(Intensive Monitoring Station, IMS)가 위치한 6개 지역(백령도, 서울, 대전, 광주, 울산, 제주)으로 각 집중측정소에서 수집된 PM_{2.5} 농도자료를 대기질 모델의 모사능력 검증 및 대기질 현상 분석에 활용하였다.

Table 1. Seasonal analysis period in this study

Case	Season	Period
Case1	Winter	Jan. 21 ~ Feb. 3 in 2015
Case2	Spring	May 7 ~ May 21 in 2015
Case3	Summer	Jul. 22 ~ Aug. 5 in 2015
Case4	Autumn	Oct. 21 ~ Nov. 4 in 2015

2. 기상 및 대기질 모델

분석 대상기간 동안 동아시아 지역에서의 PM_{2.5} 거동현상을 이해하기 위해 중규모 기상 및 대기질 모델을 활용하여 매시간별 PM_{2.5} 농도에 대한 모사를 수행하였다. 모델링 수행을 위해 사용된 기상입력자료는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) FNL 1°×1° 재분석 자료를 사용하였으며(NCEP 2000), 기상 및 대기질 모델에서의 초기장에 의한 불확도를 감소하기 위해 각 분석 대상기간 전에 약 10일의 spin-up 시간을 주었다. 대기질 모델에 사용된 배출량 입력자료로 자연 배출량은 MEGAN2 (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2, Guenther et al, 1995), 동북아 지역의 국외 배출량은 MIX 2010(Li et al, 2017), 국내 배출량은 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 2010년 배출목록을 이용하였다.

대기질 모델의 모사영역은 27km의 수평공간해상

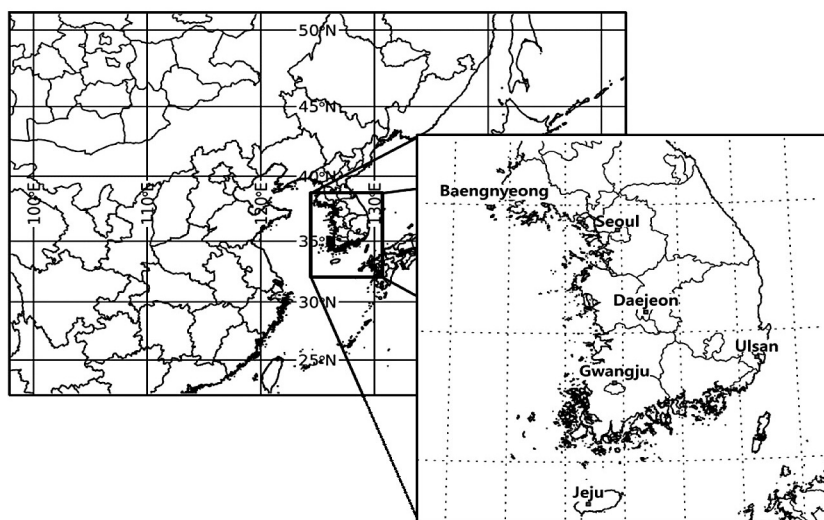


Figure 1. Domain settings for air quality modeling and IMS locations in South Korea.

도를 지니며 경도방향으로 174개, 위도방향으로 128개의 격자로 구성된 동북아 영역(Domain1)과 9km의 수평공간해상도를 지니며 경도방향으로 67개, 위도방향으로 82개의 격자로 구성된 한반도 영역(Domain2)으로 구성되었다. 두 모사 영역은 연직방향으로 15개 층을 가지며 동지격자(nesting) 체계로 구성되었다(Figure 1).

본 연구에서 동아시아 지역의 기상장을 모의하기 위해 사용된 모델은 WRF (Weather Research and Forecast, Skamarock et al. 2008) version 3.8.1이며, WRF 모델에서 적용된 주요 물리과정으로 미세물리과정은 WRF Single Moment 3 class (Hong et al. 2004), 대기경계층(Planetary Boundary Layer) 과정은 Yonsei University scheme (YSU, Hong et al. 2006)을 이용하였으며, 적운 모수화 과정은 Kain-Fritsch scheme (Kain 2004)을 이용하였다.

동아시아 지역의 대기질 모사를 위해 사용된 모델은 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality; Byun & Ching 1999) version 5.0.2이며, 대기질 모델에서 사용된 에어로졸 메커니즘은 5th generation CMAQ Aerosol Module (AERO5, Binkowski & Roselle 2003), 화학 메커니즘은 Statewide Air Pollution Research Center Version 99 (SAPRC 99, Carter 2000), 이류과정은 YAMO scheme (Yamartino 1993)을 이용하였다(Table 2). 대기질 모델은 시간 규모의 해상도로 동북아 및 남한지역의 $PM_{2.5}$ 농도를 모사하였으며, 추가적으로 대기질 모델에 EMEP (The European Monitoring and Evaluation Programme)에서 제시한 BFM (Brute-Force Method)을 적용하여 우리나라 6개

집중측정소 지점의 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국내외 기어도 분석을 수행하였다(Bartnicki 1999).

III. 연구결과 및 고찰

1. 모델 검증 결과

본 연구의 분석대상 기간에 대해 대기질 모델에서 모사된 지상 $PM_{2.5}$ 농도를 우리나라 6개 집중측정소에서 수집된 $PM_{2.5}$ 측정자료를 이용하여 통계 검증하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 통계 검증에 사용된 방법은 r (Correlation), RMSE (Root Mean Square Error), MB (Mean Bias), IOA (Index of Agreement)로 r과 IOA는 모델에서 모사된 $PM_{2.5}$ 농도가 실제 측정값의 변동경향성을 잘 모사하고 있는지를 나타내며, RMSE와 MB는 측정값과 모사값의 농도차이 수준을 나타낸다.

측정자료를 활용한 통계 검증결과, 대기질 모델은 6개 집중측정소 지점에서의 $PM_{2.5}$ 농도에 대해 평균적으로 0.69의 r 값을 나타내며 측정값과 유의한 상관관계를 나타냈다. 하지만 모델은 사례기간별로 평균 0.57에서 0.85의 r값 범위를 보이며 분석대상 기간에 따라 다소 차이를 보였으며, 특히 겨울철인 Case1 기간의 우리나라 중부 내륙지역(서울, 대전)과 봄철 Case2 기간의 백령도 및 서울지역의 $PM_{2.5}$ 농도에 대해 모델은 낮은 예측정확도를 보이는 한계점을 나타냈다.

본 연구의 분석대상 기간 중 지역적으로 모사값과 측정값이 가장 큰 차이를 보인 Case1의 경우, 모델은 $PM_{2.5}$ 가 Case1의 전반기 동안 서풍을 타고 국외로부터 장거리 수송되어 우리나라로 유입되는 것으로 모사하였다. 이때, 지리적으로 중국과 인접한 백령도

Table 2. WRF and CMAQ configurations

(a) WRF		(b) CMAQ	
Micro physics	WSM3	Chemical mechanism	SAPRC99
Long wave radiation	RRTM	Aerosol module	AERO5
Short wave radiation	Goddard	Advection scheme	YAMO
Land-Surface Model	Noah LSM	Horizontal diffusion	Multiscale
PBL scheme	YSU	Vertical diffusion	ACM2

Table 3. Results of statistical verification of simulated daily mean PM_{2.5} for 6 IMSs.

		Baengnyeongdo	Seoul	Daejeon	Gwangju	Ulsan	Jeju	Avg.
Case1	Obs. PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	27.2	34.4	47.2	27.5	26.8	13.2	29.4
	Sim. PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	27.3	34.0	25.6	20.9	21.2	10.3	23.2
	r	0.86	0.50	-0.05	0.58	0.83	0.70	0.57
	RMSE	9.1	12.6	25.7	9.8	8.4	5.1	11.8
	MB	0.1	-0.5	-21.7	-6.6	-5.6	-3.0	-6.2
	IOA	0.93	0.66	0.36	0.67	0.85	0.76	0.71
Case2	Obs. PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24.4	31.4	39.3	27.0	27.1	10.9	26.7
	Sim. PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	12.0	29.7	25.8	21.4	26.2	12.1	21.2
	r	0.35	0.41	0.65	0.59	0.72	0.91	0.61
	RMSE	14.8	12.7	16.4	10.4	7.4	2.8	10.7
	MB	-12.4	-1.7	-13.5	-5.7	-0.9	1.3	-5.5
	IOA	0.51	0.63	0.62	0.66	0.83	0.94	0.70
Case3	Obs. PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	19.4	23.6	22.1	18.8	22.5	5.1	18.6
	Sim. PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.8	24.4	12.4	11.5	13.8	3.1	11.8
	r	0.40	0.80	0.96	0.76	0.74	0.86	0.75
	RMSE	18.8	9.5	9.7	9.4	11.8	3.2	10.4
	MB	-13.6	0.8	-8.7	-7.3	-8.7	-2.0	-6.6
	IOA	0.50	0.86	0.83	0.74	0.73	0.83	0.75
Case4	Obs. PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	23.4	32.9	48.7	39.7	24.5	27.5	32.8
	Sim. PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	21.0	40.9	35.4	35.0	27.0	22.2	30.2
	r	0.86	0.87	0.86	0.87	0.72	0.92	0.85
	RMSE	9.4	17.2	20.0	14.5	12.6	7.4	13.5
	MB	-2.5	7.9	-13.3	-4.7	2.5	-5.3	-2.6
	IOA	0.91	0.90	0.87	0.92	0.82	0.91	0.89

지역에서는 0.86의 r값과 0.93의 IOA를 보이며 모델은 높은 모사 정확도를 나타냄과 동시에 측정값과 유사한 수준의 PM_{2.5} 농도를 모사한 반면, 상대적으로 풍하측에 위치한 대전과 서울에 대해서는 상대적으로 낮은 모사 정확도를 나타냈으며, 특히 1월 25일과 1월 29일의 PM_{2.5} 농도의 증가시점을 실제보다 빠

르게 모사하는 한계를 나타냈다(Figure 2). 이러한 오차는 본 연구에서 대기질 모사에 사용된 국외 배출량이 2010년을 기준으로 작성됨에 따라, 대기질 모델이 해당기간 동안 발원지에서의 PM_{2.5} 농도 수준 및 분포를 잘 모사하지 못해 월경성 PM_{2.5}의 영향을 부정확하게 모사한 것에 기인함으로 판단된다.

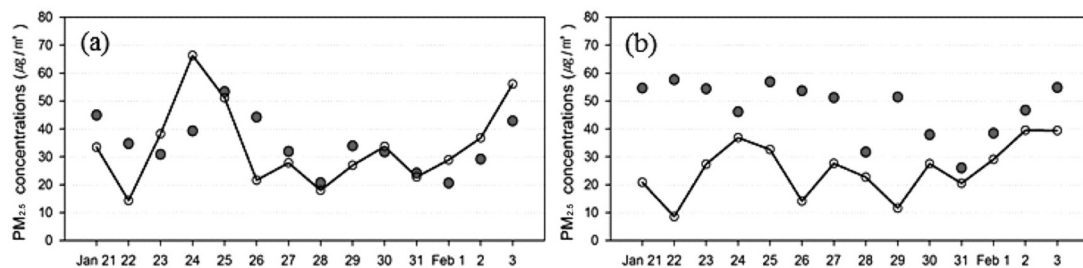


Figure 2. Time series of simulated (line) and measured (dot) daily mean PM_{2.5} concentrations for Case 1 period (a: Seoul, b: Daejeon).

그리고 Case1에서 Case4의 각 사례기간 동안 우리나라 6개 집중측정소 지역에 대한 $PM_{2.5}$ 모사값은 측정값과 평균적으로 각각 $-6.2 \mu g/m^3$, $-5.5 \mu g/m^3$, $-6.6 \mu g/m^3$, $-2.6 \mu g/m^3$ 의 MB값을 보이며 모델은 $PM_{2.5}$ 를 전반적으로 과소모의 하는 것으로 나타났다. 특히, 모델은 Case2 기간의 백령도, 대전 등 우리나라 서부지역을 중심으로 $PM_{2.5}$ 농도의 변화경향을 잘 모사하지 못함과 동시에 실제 $PM_{2.5}$ 농도를 크게 과소모의하는 한계점을 나타냈으며 이러한 모델의 한계점을 아래 3.4절에서 다루었다.

2. 계절별 $PM_{2.5}$ 거동특성 분석

1) 겨울철(Case1) 사례 분석

동북아 지역에서의 계절별 $PM_{2.5}$ 거동특성을 이해하기 위해 지상일기도 자료(Appendix)와 국내 6개 집중측정소에서 수집된 $PM_{2.5}$ 자료, 대기질 모델을 통해 모사된 $PM_{2.5}$ 공간분포도를 이용하여 종합적인 분석을 수행하였으며, Case 1 기간동안 6개 집중측정소에서 측정된 $PM_{2.5}$ 농도의 시계열 자료를 Figure 3에, 모델에서 모사된 동북아 지역의 $PM_{2.5}$ 공간분포를 Figure 4에 나타내었다. 분석을 수행한 결과, 우리나라는 2015년 1월 23일에 중국 남동부 지역에 중심을 둔 고기압의 영향으로 서해상에 서풍계열의 바

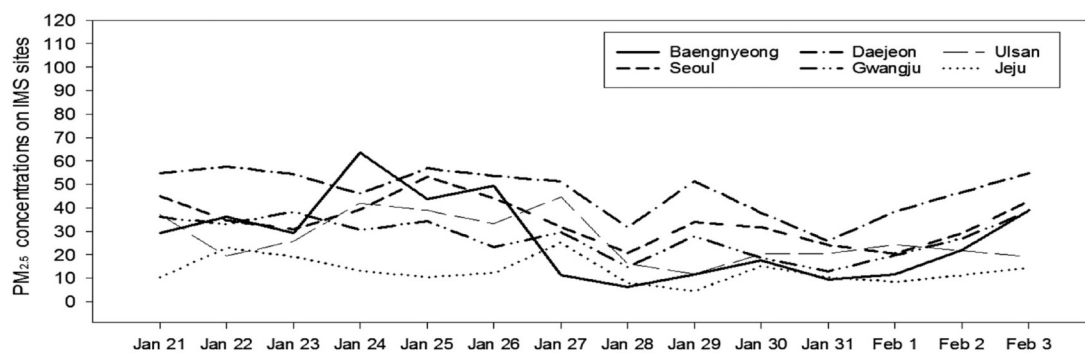


Figure 3. Time series of daily mean $PM_{2.5}$ concentrations at 6 IMS sites during Case1.

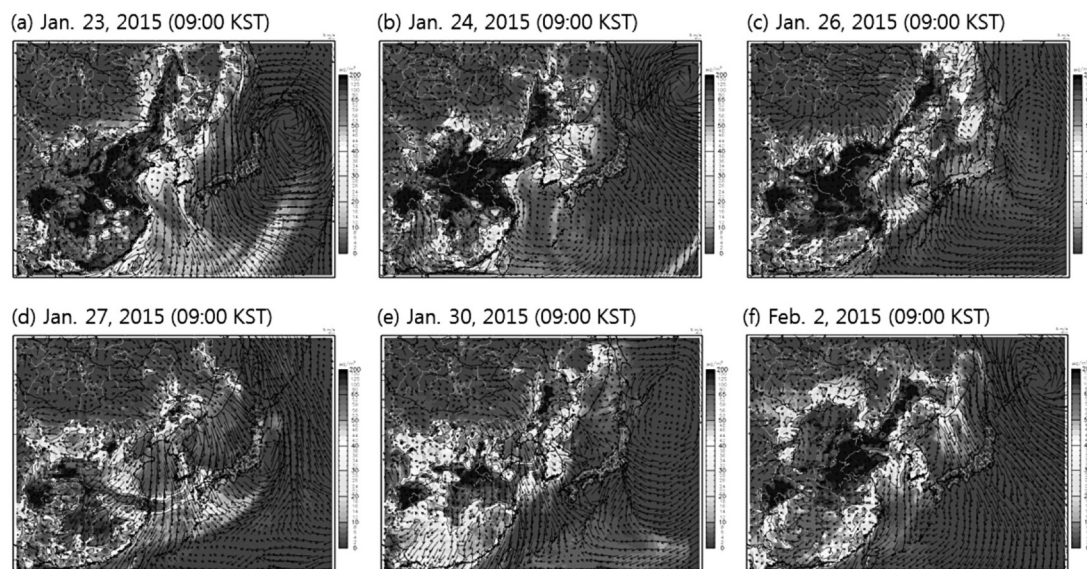


Figure 4. Spatial distributions of hourly $PM_{2.5}$ representing the Case1 period.

람이 형성됨에 따라 중국으로부터 PM_{2.5}가 수송되기 시작한 것으로 나타났으며(Figure 4, a), 장거리 수송된 PM_{2.5}는 이후 1월 24일부터 25일까지 서울과 1월 25일과 26일의 대전지역에서의 고농도 PM_{2.5} 현상에 영향을 미친 것으로 나타났다(Figure 4, b). 이후 1월 26일에 우리나라는 시베리아 고기압 영향권의 가장자리에 위치함과 동시에 남동쪽 해상부근에 중심을 둔 저기압의 영향으로 대기가 정체되어, 우리나라 내륙지역의 PM_{2.5}가 뚜렷하게 해소되지 못한 것으로 나타났다(Figure 4, c). 하지만 1월 27일에 우리나라는 강한 북풍계열 바람의 영향으로 깨끗한 공기가 유입됨에 따라 백령도, 서울, 대전 지역의 PM_{2.5} 농도가 감소하기 시작하여 1월 28일에는 모든 집중측정소 지점에서 PM_{2.5} 농도가 감소한 것으로 나타났다(Figure 4, d). 이후 1월 30일에는 다시 국외로부터 장거리 수송된 PM_{2.5}의 영향으로(Figure 4, e), 2월 2일에는 장거리 수송의 영향과 더불어 내륙지역을 중심으로 대기가 정체되어 PM_{2.5} 농도가 높아진 것으로 나타났다(Figure 4, f).

최근 Lee et al. (2018)은 2009년에서 2014년 사이 서울에서 장기간 지속된 네 차례의 고농도 PM₁₀ 사례가 모두 겨울철에 발생했으며, 이는 서풍을 타고 서해를 통해 중국으로부터 장거리 수송된 PM₁₀의 영향과 정체된 기상조건이 장기간 지속된 연무현상의 원인이 되었음을 밝혔다. 이와 같이 우리나라의 겨울철은 시베리아 고기압의 영향으로 주로 서풍계열의

바람이 형성됨에 따라 국외로부터 장거리 수송된 대기오염 물질의 영향을 받기에 유리한 기상조건이 형성되는 것으로 알려져 있으며, Case1 기간의 우리나라 PM_{2.5} 농도변화 특성은 이러한 시베리아 고기압의 영향범위에 따라 기상조건이 달라지는 동아시아 지역의 겨울철 특징을 반영하고 있는 것으로 판단된다.

2) 봄철(Case2) 사례 분석

Case2 기간을 대상으로 국내 6개 집중측정소에서 수집된 PM_{2.5} 농도의 시계열 자료와 모델을 통해 모사된 동북아 지역의 PM_{2.5} 공간분포를 Figure 5와 Figure 6에 나타내었다. Case2는 5월 7일부터 21일까지의 봄철 사례로 5월 7일부터 9일 사이 우리나라 내륙지역에서는 대기정체의 영향을 받아 자체 배출량이 많은 서울과 울산지역을 중심으로 높은 수준의 PM_{2.5} 농도를 나타낸 뒤(Figure 6, a), 10일 오후부터 11일까지 동풍계열 바람의 영향을 받아 내륙지역을 중심으로 PM_{2.5} 농도가 낮아지는 경향을 보였다(Figure 6, b). 이후 서풍계열 바람의 영향으로 국외로부터 장거리 수송된 PM_{2.5}가 5월 12일에 백령도 지역을 시작으로 5월 13일까지 우리나라 대부분의 지역에 영향을 미친 것으로 나타났다(Figure 6, c, d). 그리고 5월 14일에는 남풍계열 바람이 형성된 뒤 중부 내륙지역을 중심으로 대기가 정체됨에 따라, 서울, 대전 등 중부 내륙지역에서는 PM_{2.5} 농도가 뚜렷하게 증가한 반면, 제주 지역에서는 PM_{2.5} 농도가 낮

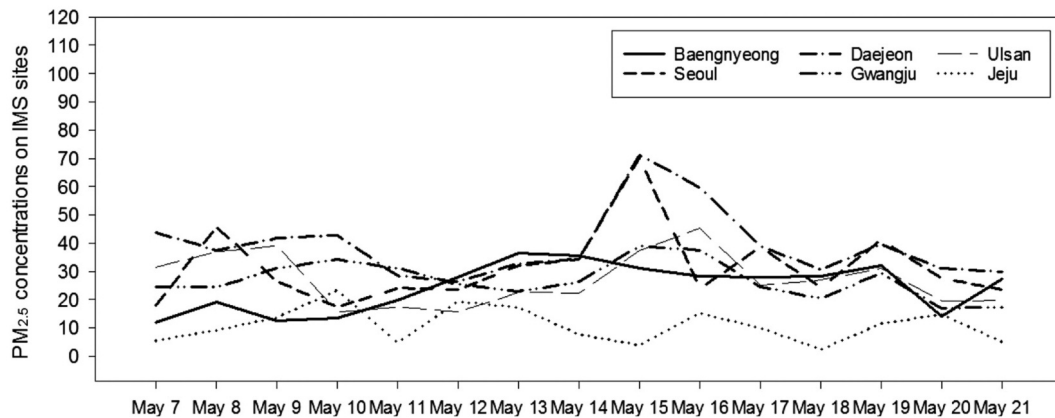
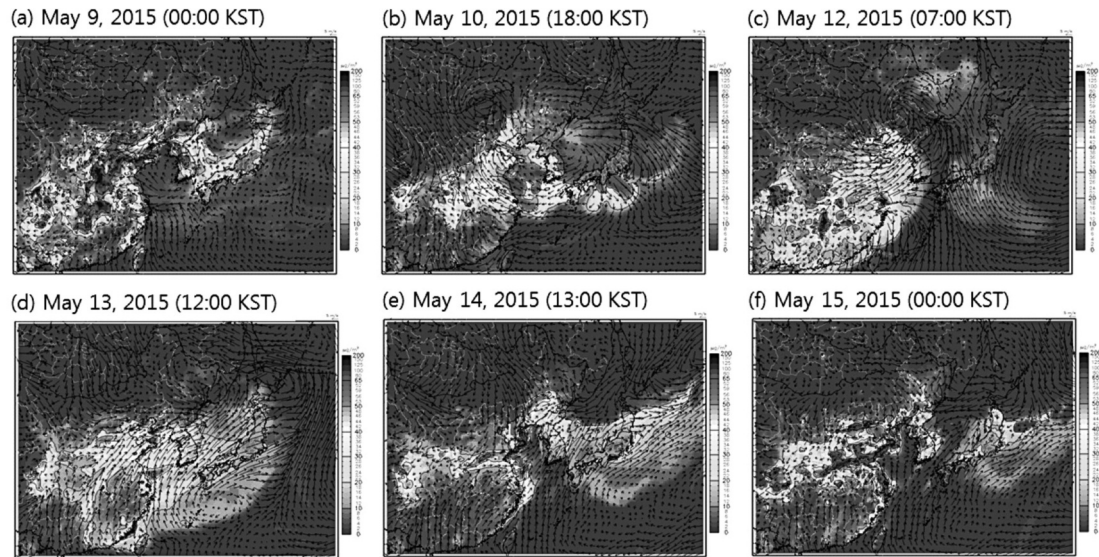


Figure 5. Time series of daily mean PM_{2.5} concentrations at 6 IMS sites during Case2.

Figure 6. Spatial distributions of hourly PM_{2.5} representing the Case2 period.

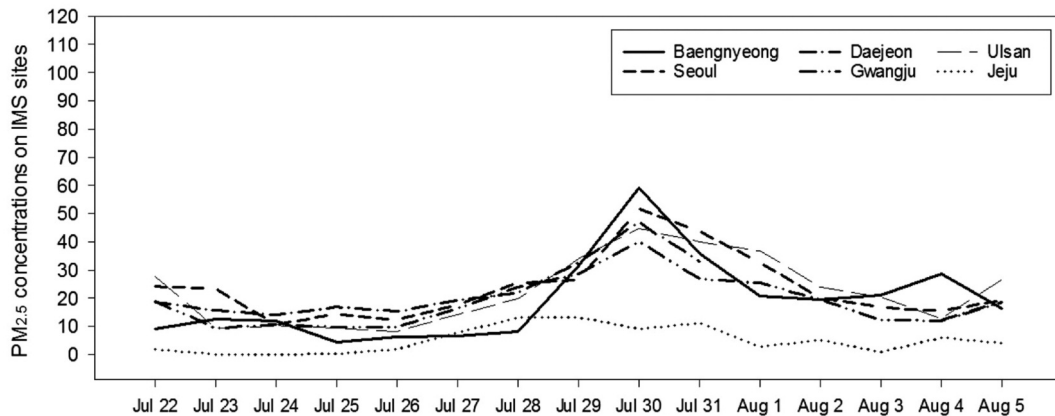
아지는 특징이 나타났다(Figure 6, e). 이후 5월 15 일에는 우리나라 내륙지역을 중심으로 대기가 정체 되어 PM_{2.5} 농도가 뚜렷하게 증가하였으며(Figure 6, f), 5월 16일부터 21일 사이에 우리나라는 잦은 주 풍계의 변화로 인해 PM_{2.5} 농도의 증감 경향성이 빈번히 바뀐 것으로 나타났다.

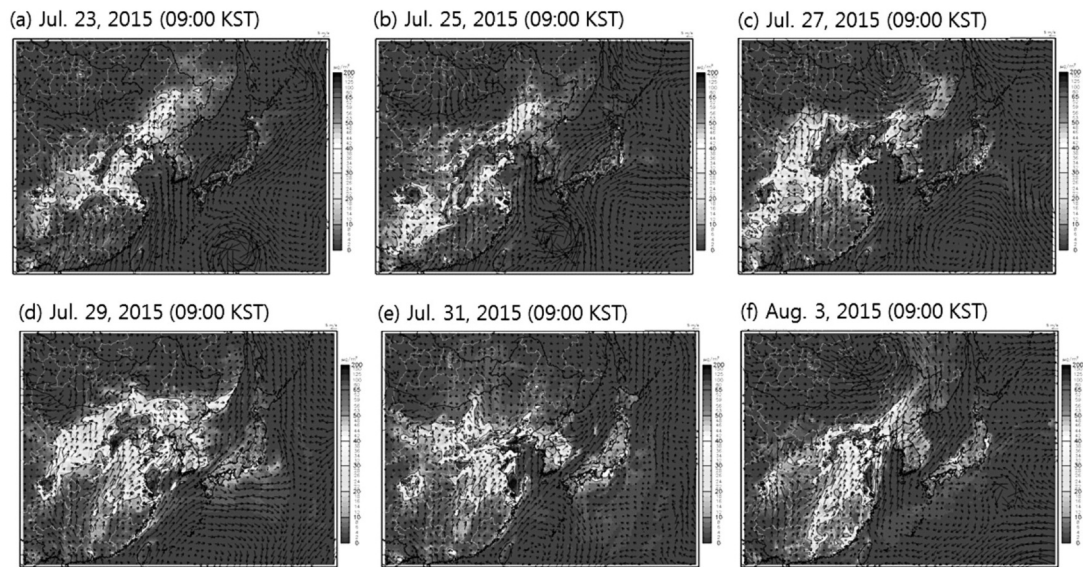
Case2 동안에 우리나라는 잦은 국외유입의 영향과 대기정체의 영향을 받아 겨울철의 Case1 사례와 유사한 수준의 PM_{2.5} 농도를 나타냈다. 그리고 이와 동시에 이동성 고기압과 그 후면에 형성되는 저기압

이 우리나라에 짧은 주기로 번갈아가며 영향을 미치는 봄철 기상특성으로 인해 PM_{2.5}의 장거리 수송 효과 및 대기정체에 의한 농도 상승이 짧은 주기로 번갈아가며 발생하는 특징이 나타났다.

3) 여름철(Case3) 사례 분석

Case3 기간 동안 지상에서 측정된 PM_{2.5}의 시계열을 Figure 7에 나타내었으며, Figure 8에 대기질 모델에서 모사한 PM_{2.5} 공간분포를 나타내었다. 여름철 사례인 Case3 기간 중 7월 22일부터 28일 사이 우리

Figure 7. Time series of daily mean PM_{2.5} concentrations at 6 IMS sites during Case3.

Figure 8. Spatial distributions of hourly PM_{2.5} representing the Case3 period.

나라는 북태평양 고기압의 영향으로 깨끗한 남풍계열 바람이 유입됨에 따라 모든 지역에서 대체로 청정한 대기 상태를 나타내었다(Figure 8, a~c). 이후 7월 29일 낮부터 남서계열의 바람을 타고 중국 화동지역으로부터 장거리 수송된 PM_{2.5}가 남한으로 유입된 것으로 나타났으며(Figure 8, d), 7월 30일부터 8월 1일까지 3일에 걸쳐 우리나라는 남풍계열의 깨끗한 공기의 유입으로 인해 우리나라 대부분의 지역에서 PM_{2.5} 농도가 감소하는 것으로 나타났지만, 서울과 울산의 PM_{2.5} 농도 감소 폭은 상대적으로 타 지역에 비해 작게 나타났다(Figure 8, e, f).

동북아 지역의 여름철은 북태평양 고기압이 확장되고 대륙에 저기압이 자리 잡아, 해양성 공기덩어의 영향으로 비가 많이 내리거나 무더운 날씨가 계속되는 계절적 특성을 지니고 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 Case3 기간에서도 우리나라는 국외로부터 장거리 수송된 대기오염물질의 영향과 대기정체로 인해 일시적으로 PM_{2.5} 농도가 증가한 것으로 나타났지만, 대체로 남풍계열의 바람이 형성됨에 따라 깨끗한 공기의 유입으로 인해 상대적으로 다른 사례기간에 비해 깨끗한 수준의 PM_{2.5} 농도를 나타내었다. 또한, 북태평양 기단의 영향범위의 변동으로 인해 우리나라에서의 월경성 PM_{2.5} 영향 또는 남풍계

열 바람의 영향에 따른 PM_{2.5} 해소 현상이 발생하는 특징이 나타났다.

4) 가을철(Case4) 사례 분석

Case4 기간에 대해 6개 집중측정소에서 측정된 PM_{2.5} 농도의 시계열 자료와 대기질 모델을 통해 모사된 Case4 기간의 PM_{2.5} 공간분포를 각각 Figure 9와 Figure 10에 나타내었다. Case4 기간 중 10월 21일에 우리나라는 대기정체와 월경성 PM_{2.5}의 영향으로 우리나라 모든 집중측정소에서 약 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 높은 PM_{2.5} 농도가 나타난 반면(Figure 10, a), 10월 22일과 23일 양일간 우리나라는 깨끗한 동풍계열 바람의 영향을 받아 대전과 광주를 제외한 대부분 지역에서 PM_{2.5} 농도가 감소한 것으로 나타났다. 이후 10월 24일에 우리나라는 서풍계열 바람의 영향으로 국외로부터 장거리 수송된 PM_{2.5}의 영향을 받아 백령도와 제주 등 일부지역에서의 PM_{2.5} 농도가 상승하였지만(Figure 10, b), 25일부터 26일 사이에 형성된 동풍계열 바람과 27일에서 28일에 형성된 북풍계열 바람으로 인해 깨끗한 공기가 유입되어 우리나라 대부분의 지역에서 낮은 수준의 PM_{2.5} 농도를 나타내었다(Figure 10, c). 그러나 10월 29일에는 우리나라 남부지역을 중심으로 대기가 정체됨에 따라 울산과

제주지역에서 $PM_{2.5}$ 농도가 증가한 뒤 30일과 31일에 강한 북풍계열 바람이 불어와 $PM_{2.5}$ 농도가 일시적으로 낮아졌지만, 11월 1일은 대기정체(Figure 10, d), 11월 2일에는 중국으로부터의 장거리 영향(Figure 10, e), 11월 3일부터 4일에는 대기정체가 발생하여 $PM_{2.5}$ 농도가 점차 증가하는 특징을 나타내었다(Figure 10, f).

대기질 모델은 다른 사례와 비교하여 Case4 기간에 상대적으로 높은 수준의 모사 정확도를 나타내었으며, 이는 상대적으로 국외로부터 장거리 수송에 따른 고농도 $PM_{2.5}$ 현상의 기간이 상대적으로 적음

과 동시에 대기정체로 인한 국내의 $PM_{2.5}$ 농도 변화를 대기질 모델이 잘 모사한 것에 기인한 것으로 판단된다. Case4 기간에 발생한 우리나라 $PM_{2.5}$ 거동 특성은 중국 대륙에서 발생한 온대 저기압이나 이동성 고기압의 영향으로 굵은 날과 갠 날이 짧은 주기로 반복되는 동북아 지역의 계절특성과 관련이 있는 것으로 판단되며, 이러한 특징은 잦은 기압계의 변화에 따라 $PM_{2.5}$ 농도의 변동이 빈번히 발생하였던 봄철 사례(Case2)와 유사한 특징을 나타낸 것으로 분석되었다.

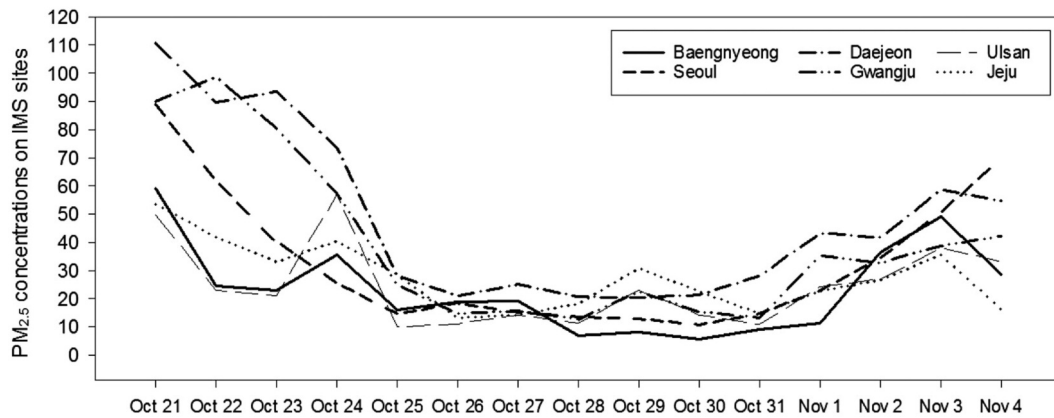


Figure 9. Time series of daily mean $PM_{2.5}$ concentrations at 6 IMS sites during Case4.

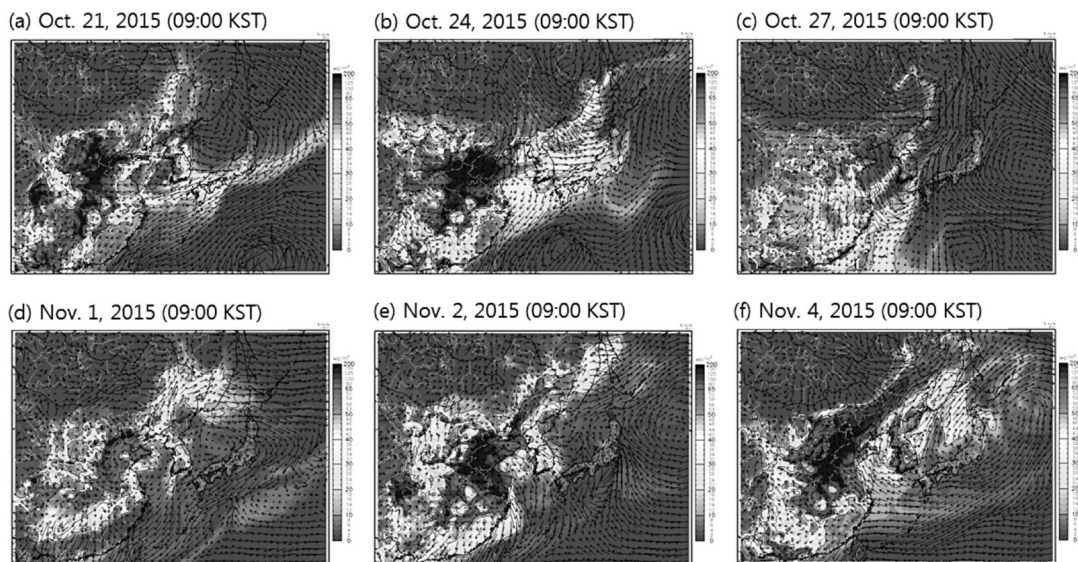


Figure 10. Spatial distributions of hourly $PM_{2.5}$ representing the Case4 period.

3. BFM 분석

우리나라 집중측정소 지점에서 나타난 사례기간별 PM_{2.5} 농도의 국내외 기여도를 산정하기 위해, CMAQ 모델에 배출량-민감도 분석방법인 BFM를 적용하여 분석을 수행하였다. BFM은 기본 배출량을 적용하였을 때 대기질 모델에서 모사된 농도와 배출량에 변화를 주었을 때 재모의된 농도를 비교하여 민감도를 산출하는 방법으로(Bartnicki 1999), 이를 통해 산정한 사례기간별 평균 PM_{2.5} 농도와 국외 기여도를 Table 4에 나타내었다. 그리고 BFM을 이용하여 산정된 분석대상 기간에 따른 지역별 국외 기여도의 범위를 Figure 11에 상자 그림 형태로 나타내었다. 그림에서의 검은색 실선은 각각 5, 25, 50, 75, 95 백분위수의 위치를 나타내며 붉은색 실선은 평균값을 나타낸다.

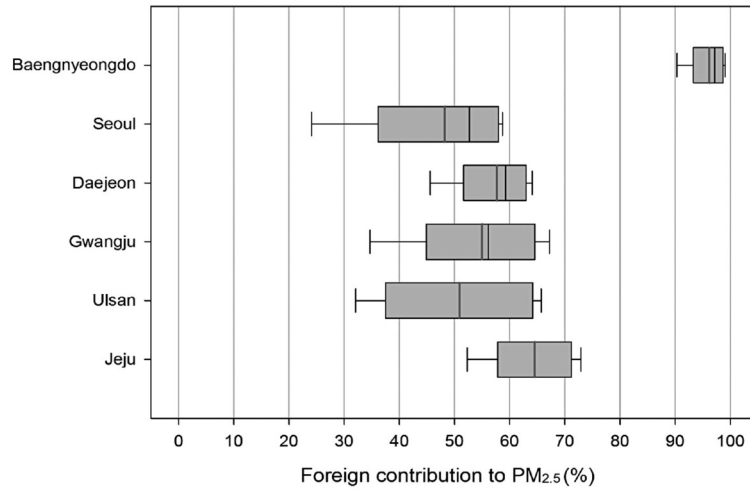
6개 집중측정소 지점을 대상으로 한 국내외 기여도 산정 결과, 백령도 지역의 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 기여도는 평균적으로 약 96.2%로 나타났으며, 모든 사례기간에 대해 국외 기여도가 90% 이상으로 6개

집중 측정소 지역 중 가장 높게 나타났다. 또한, 국외 기여도의 계절별 표준편차는 약 4.0%로 6개 지점 중 가장 낮게 나타나 계절에 따른 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이러한 결과는 백령도 지역의 낮은 자체 배출량의 영향과 중국으로부터 인접한 지리적 특성으로 인해 장거리 수송되는 월경성 미세먼지의 영향을 직접적으로 받은 결과로 판단된다.

이와 반대로 서울과 울산의 경우 사례기간 평균 국외 기여도는 각각 48.2% 50.8% 수준으로 타 지역(대전:57.7%, 광주:55.5%, 제주:64.5%)에 비해 상대적으로 낮은 국외기여도를 나타냄과 동시에, 국외기여도의 계절별 표준편차는 각각 16.3%, 16.1%로 다른 지역(대전 8.3%, 광주 14.2%, 제주 9.0%)에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 본 연구에서 국내 배출량 입력 자료의 기준연도인 2010년의 대기오염물질 배출량 보고서에 따르면(NIER 2012) 서울은 산림을 제외한 면적당 NO_x 배출량이 168,141 kg/km²으로 16개 광역 지자체 중 가장 높았으며, 울산의 경우 152,210 kg/km²으로 산림을 제외한 면적당 NO_x 배출량이 서울에 이어 두 번째로 높게 나타남과 동시에 면적

Table 4. Simulated mean PM_{2.5} concentration with standard deviation (μg/m³) and domestic and foreign contribution (%) by case

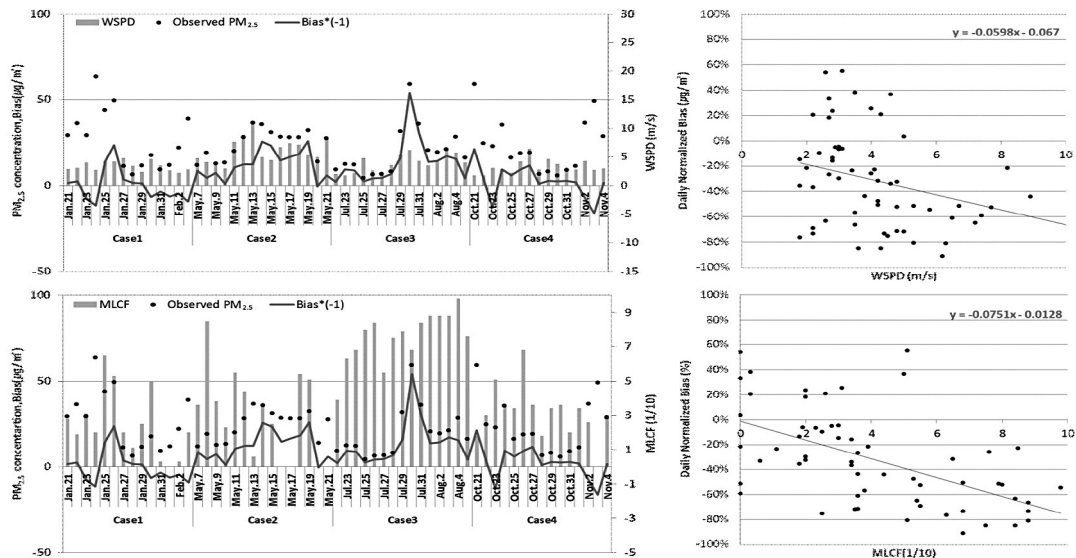
Region		Case1	Case2	Case3	Case4
Baengnyeongdo	PM _{2.5} conc.	27.3 (18.3)	12.0 (5.7)	5.8 (4.3)	21.0 (18.2)
	Domestic	1.7	1.0	9.7	2.9
	Foreign	98.3	99.0	90.3	97.1
Seoul	PM _{2.5} conc.	34.0 (14.9)	29.7 (9.6)	24.4 (16.0)	40.9 (31.7)
	Domestic	42.8	47.3	75.9	41.3
	Foreign	57.2	52.7	24.1	58.7
Daejeon	PM _{2.5} conc.	25.6 (9.8)	25.8 (11.1)	12.4 (11.7)	35.4 (26.4)
	Domestic	35.9	40.8	54.4	38.2
	Foreign	64.1	59.2	45.6	61.8
Gwangju	PM _{2.5} conc.	20.9 (7.8)	21.4 (11.1)	11.5 (9.0)	35.0 (26.3)
	Domestic	32.8	43.9	65.3	38.1
	Foreign	67.2	56.1	34.7	61.9
Ulsan	PM _{2.5} conc.	21.2 (11.4)	26.2 (10.7)	13.8 (9.6)	27.0 (18.3)
	Domestic	34.3	57.1	67.9	37.3
	Foreign	65.7	42.9	32.1	62.7
Jeju	PM _{2.5} conc.	10.3 (5.3)	12.1 (6.0)	3.1 (3.0)	22.2 (13.3)
	Domestic	36.6	27.1	47.7	30.5
	Foreign	63.4	72.9	52.3	69.5

Figure 11. Box plot of foreign contributions to PM_{2.5} by region.

당 SO_x 배출량이 172,525 kg/km²으로 전국에서 가장 높아 두 지역에서 발생하는 자체 배출량이 해당지역의 PM_{2.5} 농도에 미치는 기여가 컸을 것으로 추정된다. 그리고 이러한 결과는 높은 자체 배출량을 지니는 고배출 지역의 경우, 미세먼지 수준을 저감하기 위해 자체 배출량의 영향을 줄이는 노력의 중요성을 나타냄과 동시에 계절 및 기상조건을 반영한 대책 마련의 필요성을 시사한다.

4. 기상 측정 자료를 활용한 PM_{2.5} 모사 불확도 원인 분석

본 연구에 활용한 대기질 모델은 전체 분석대상 기간 동안 측정값과 평균적으로 약 0.7의 r값을 나타내며 실제 PM_{2.5}의 증감 경향을 유의하게 모사하는 것으로 나타났지만, 우리나라 중서부지역을 중심으로 낮은 모사정확도를 나타내는 한계를 보였다. 대기 중

Figure 12. Time series (left) and box-plot (right) of measured PM_{2.5} concentrations and model bias for meteorological variables (upper: wind speed, lower: middle-low cloud fraction).

에서의 PM_{2.5} 농도는 국내외 배출량의 영향과 기상조건, 지형효과 등 다양한 요소들에 의해 영향을 받으므로, 서해상을 통한 장거리 수송 과정에서의 모사 불확도 원인을 분석하기 위하여 백령도 집중측정소 지점을 대상으로 불확도 원인분석을 수행하였다(Figure 12).

본 연구 대상기간에 대해 백령도 지점에서 측정된 일평균 풍속과 평균 중하층운량, PM_{2.5} 측정값과 이에 대한 모델의 편차(bias)를 이용하여 분석을 수행한 결과, 측정된 PM_{2.5} 농도에 대한 모델의 편차는 풍속과 뚜렷한 상관성을 나타내지는 않았지만 약 5 m/s 이상의 풍속 조건에서 PM_{2.5} 농도를 과소모의하는 특징을 나타냈다. 그리고 PM_{2.5} 모사결과는 평균 중하층운량과 PM_{2.5} 농도가 동시에 높게 측정되었던 CASE2와 CASE3의 상황에서 오차를 증가하는 특징이 나타났으며, 표준화된 편차(normalized bias)와 중하층운량은 -0.55의 유의미한 r값을 나타내며 측정값에 대한 모델의 편차는 중하층운량과 음의 관계가 있음을 나타냈다. 따라서 본 연구에 사용된 대기질 모델은 구름 주변부에 위치한 PM_{2.5}의 생성 및 소멸기작을 충분히 반영하지 못하는 것으로 나타났으며, 이는 NIER (2017)에서 나타낸 바와 같이 CMAQ의 강수 세척모사 과정에서 구름아래의 미세먼지 세척효과가 과대하게 평가되는 문제와 관련이 있을 것으로 사료된다. 그리고 이와 같은 구름 주변에서의 PM_{2.5} 모사 불확도 문제는 봄과 가을과 같이 잦은 기상변화가 발생하는 계절의 모사정확도를 감소시킬 것으로 보이며 향후 대기질 모델 내 구름 주변부에서의 PM_{2.5} 생성 및 소멸기작에 대한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 PM_{2.5} 지상 측정자료와 일기도 자료, 기상 및 대기질 모델을 활용하여 2015년의 사례기간을 중심으로 우리나라를 비롯한 동북아시아 지역에서의 계절별 PM_{2.5} 거동특성을 분석하였다. 동북아시아의 계절별 PM_{2.5} 거동특성을 분석한 결과, 겨울철과 여름철 사례기간에는 각각 시베리아 고기압과 북태평양 고기압의 영향 범위에 따라 PM_{2.5}의 장

거리 수송 영향, 대기 정체 및 대기 환기 등의 현상이 상이하게 나타났다. 이와 달리 봄철과 가을철 사례의 경우 이동성 고기압과 그 후면에 형성되는 저기압의 영향으로 잦은 기압변화가 나타나 월경성 PM_{2.5}의 유입과 해소, 대기정체로 인한 농도의 변화가 짧은 주기로 번갈아가며 발생하는 특징이 나타났다.

대기질 모델에 BFM을 적용하여 우리나라 6개 집중측정소 지점의 PM_{2.5} 농도에 대한 국내외 기여도분석을 수행한 결과, 백령도지역의 PM_{2.5} 농도에 대한 국외기여도는 모든 사례기간에 대해 90% 이상의 수준을 나타내며 국외로부터의 영향이 지배적으로 나타났다. 이는 백령도의 낮은 배출량과 더불어 중국과 인접한 지리적 위치에 기인한 것으로 판단된다. 이와 반대로 자체 배출이 높은 서울과 울산지역의 PM_{2.5} 농도에 대한 국외기여도는 사례기간 평균 각각 48.2%, 50.8% 수준으로 타 지역에 비해 상대적으로 낮게 나타남과 동시에 계절에 따른 국외기여도의 표준편차는 각각 16.3%, 16.1%로 타지역에 비해 상대적으로 높게 나타나 기상조건에 따른 국내외 기여도의 차이가 크게 나타났다. 이러한 연구결과는 높은 자체 배출량을 지니는 도심지역의 경우, 미세먼지 농도저감을 위한 자체 배출량 저감의 중요성을 알림과 동시에 계절에 따른 기상조건을 반영한 미세먼지 저감대책 수립의 필요성을 나타내는 것으로 판단된다.

본 연구는 우리나라를 중심으로 계절별 기상조건 변화에 따른 동북아 지역의 PM_{2.5} 거동특성을 분석하여 미세먼지 현상에 대한 이해를 증진함과 동시에, PM_{2.5} 농도에 대한 국내외 기여도는 지역 배출특성에 따라 상이할 수 있음을 알려 향후 대기질 대책 수립시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 대기질 모델은 운량이 많았던 시기에 측정된 PM_{2.5} 농도값과 큰 차이를 나타내 향후 구름 주변부에서의 PM_{2.5} 생성 및 소멸기작에 대한 한계점을 나타냈다. 그리고 대기질 모델은 이 외에도 기상 및 배출량 입력자료를 비롯하여 모델이 내포하고 있는 다양한 물리·화학 과정 및 모수화, 지형효과 등에 의해 복합적인 영향을 받으므로, 향후 지속적이고 다각적인 모델의 불확도 발생원인 분석 및 모사 정확도 개선에 대한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-RP-2017-149).

References

- Bartnicki J. 1999. Computing source-receptor matrices with the EMEP Eulerian Acid Deposition Model. Norwegian Meteorological Institute.
- Binkowski FS, Roselle SJ. 2003. Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model aerosol component 1. Model description. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 108(D6).
- Byun DW, Ching JKS. 1999. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA Report. EPA/600/R-99/030.
- Carter WPL. 2000. Documentation of the SAPRC-99 Chemical Mechanism for VOC Reactivity Assessment. Contract. 92(329): 95-308.
- Choi JK, Heo JB, Ban SJ, Yi SM, Zoh KD. 2013. Source apportionment of PM_{2.5} at the coastal area in Korea. Science of the Total Environment. 447: 370-380. [Korean Literature]
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. Monthly Weather Review. 129(4): 569-585.
- Di Q, Wang Y, Zanobetti A, Wang Y, Koutrakis P, Choirat C, Dominici F, Schwartz J. 2017. Air pollution and mortality in the Medicare population. New England Journal of Medicine. 376(26): 2513-2522.
- Guenther A, Hewitt CN, Erickson D, Fall R, Geron C, Graedel T, Harley P, Klinger L, Lerdau M, Mckay WA, Pierce T, Scholes B, Steinbrecher R, Tallamraju R, Taylor J, Zimmerman P. 1995. A global model of natural volatile organic compound emissions. Journal of Geophysical Research. 100: 8873-8892.
- Hong SY, Dudhia J, Chen SH. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. Monthly Weather Review. 132(1): 103-120.
- Hong SY, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with and explicit treatment of entrainment processes. Monthly Weather Review. 134(9): 2318-2341.
- Kain JS. 2004. The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. Journal of Applied Meteorology. 43(1): 170-181.
- Kim BU, Kim OG, Kim HC, Kim ST. 2016. Influence of fossil-fuel power plant emissions on the surface fine particulate matter in the Seoul Capital Area, South Korea. Journal of the Air and Waste Management Association. 66(9): 863-873.
- Kim BU, Bae CH, Kim HC, Kim EH, Kim ST. 2017. Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event. Atmospheric Environment. 162(2017): 55-70.
- Lee HJ, Kim JE, Cha JW, Song SJ, Ryoo SB, Kim YP. 2018. Characteristics of long-lasting haze episodes observed in Seoul, South Korea, for 2009-2014. Theoretical and Applied Climatology. 1-10.
- Lee SM, Ho CH, Lee YG, Choi HJ, Song CK. 2013. Influence of transboundary air pollutants

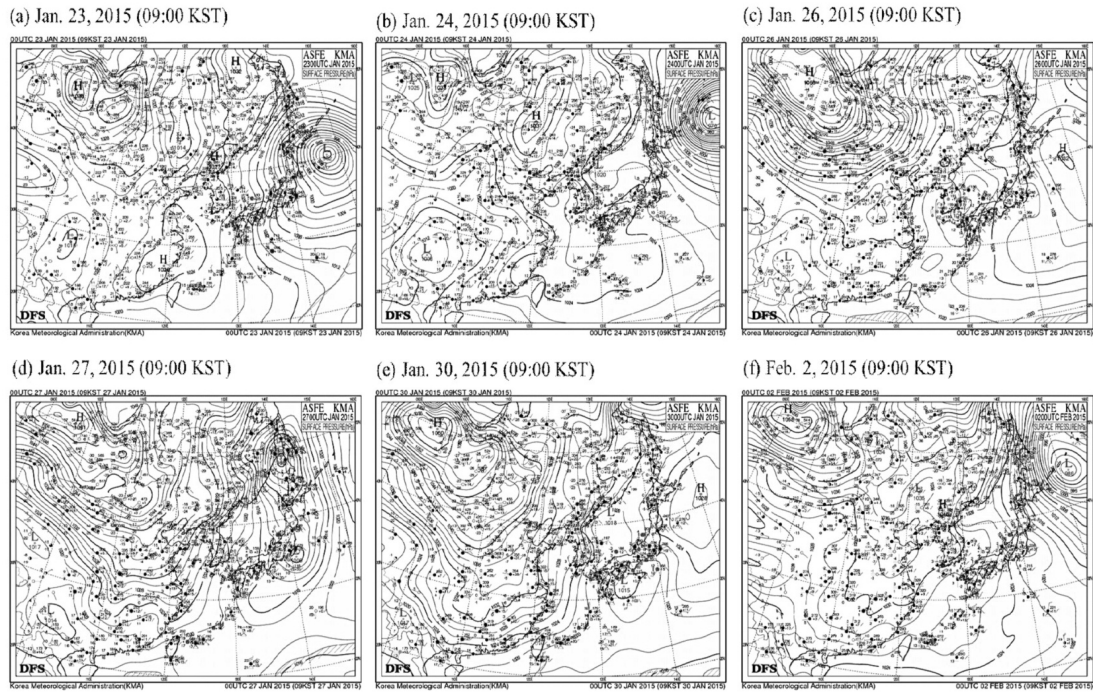
- from China on the high-PM₁₀ episode in Seoul, Korea for the period October 16-20, 2008. *Atmospheric Environment*. 77(2013): 430-439.
- Li M, Zhang Q, Kurokawa J, Woo JH, He KB, Lu Z, Ohara T, Song Y, Streets DG, Carmichael GR, Cheng YF, Hong CP, Huo H, Jiang XJ, Kang SC, Liu F, Su H, Zheng B. 2017. MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 17(2): 935-963.
- Louis JF. 1979. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology*. 17(2): 187-202.
- Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 102(D14): 16663-16682.
- National Centers for Environmental Prediction. 2000. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analysis, continuing from July, 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research. Computational and Information System Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6M043C6> (accessed on Sep. 27, 2018)
- National Institute of Environmental Research. 2012. National air pollutants emission 2010. NIER-GP2012-318. 245 pp. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research. 2017. A study of accuracy improvement of numerical air quality forecasting model(III). NIER-SP2016-435. 279 pp. [Korean Literature]
- Pleim JE. 2007a. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 46: 1383-1395.
- Pleim JE. 2007b. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part II: Application and evaluation in a mesoscale meteorological model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 46: 1396-1408.
- Pope III CA, Burnette RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, Thurston GD. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *The Journal of the American Medical Association*. 287(9): 1132-1141.
- Pope III CA, Dockery DW. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste management Association*. 56(6): 709-742.
- Samet JM, Dominici F, Curriero FC, Coursac I, Zeger SL. 2000. Fine particulate air pollution and mortality in 20 US cities, 1987-1994. *New England Journal of Medicine*. 343(24): 1742-1749.
- Seinfeld JH, Pandis SN. 2016. *Atmospheric chemistry and physics: From Air Pollution to Climate Change*, third edition. John Wiley & Sons Inc. Hoboken, New Jersey, USA.
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Huang XY, Wang W, Powers JG. 2008. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Rep. TN-475+STR, 113 pp.
- World Health Organization. 2000. *Air Pollution including WHO's 1999 Guidelines for Air Pollution Control*. Geneva: World Health

Organization.

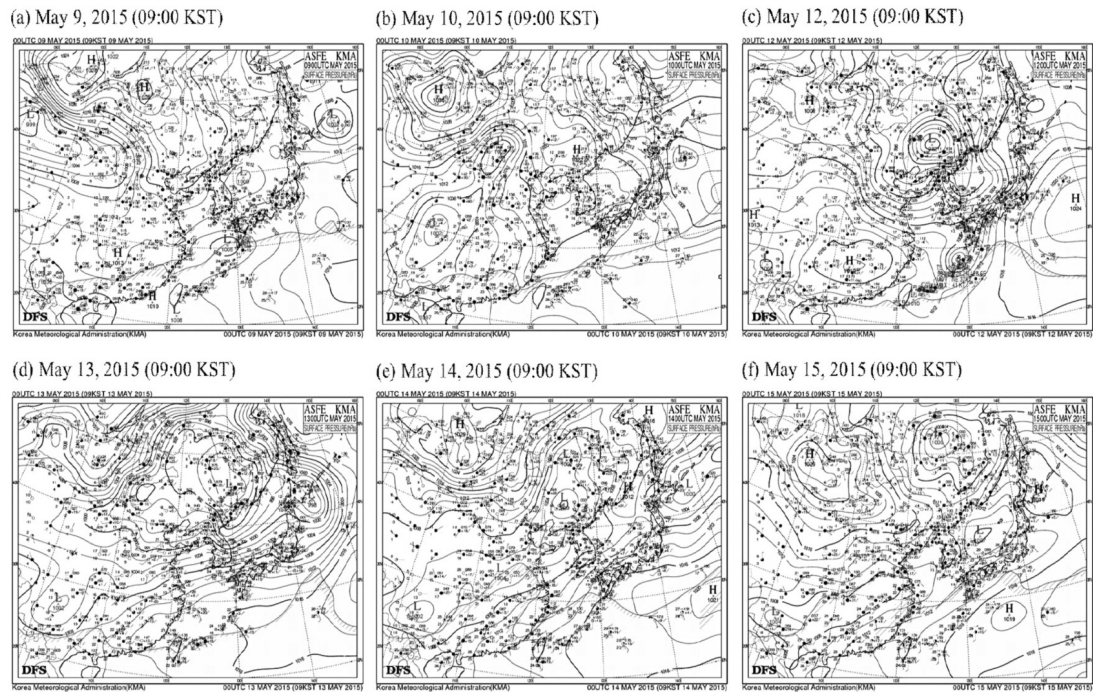
Tao WK, Simpson J, McCumber M. 1989. An
ice-water saturation adjustment. Monthly
Weather Review. 117(1): 231-235.
Yamartino RJ. 1993. Nonnegative, conserved

scalar transport using grid-cell-centered,
spectrally constrained Blackman cubics for
applications on a variable-thickness mesh.
Monthly Weather Review. 121(3): 753-763.

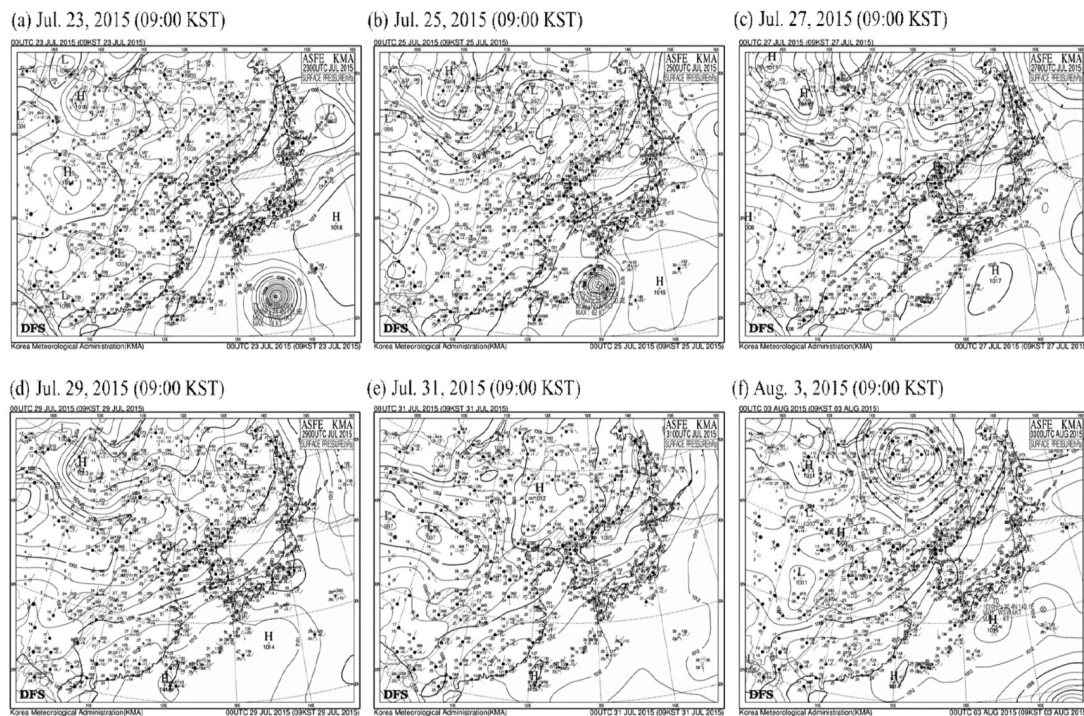
Appendix. 사례기간 대표 지상일기도



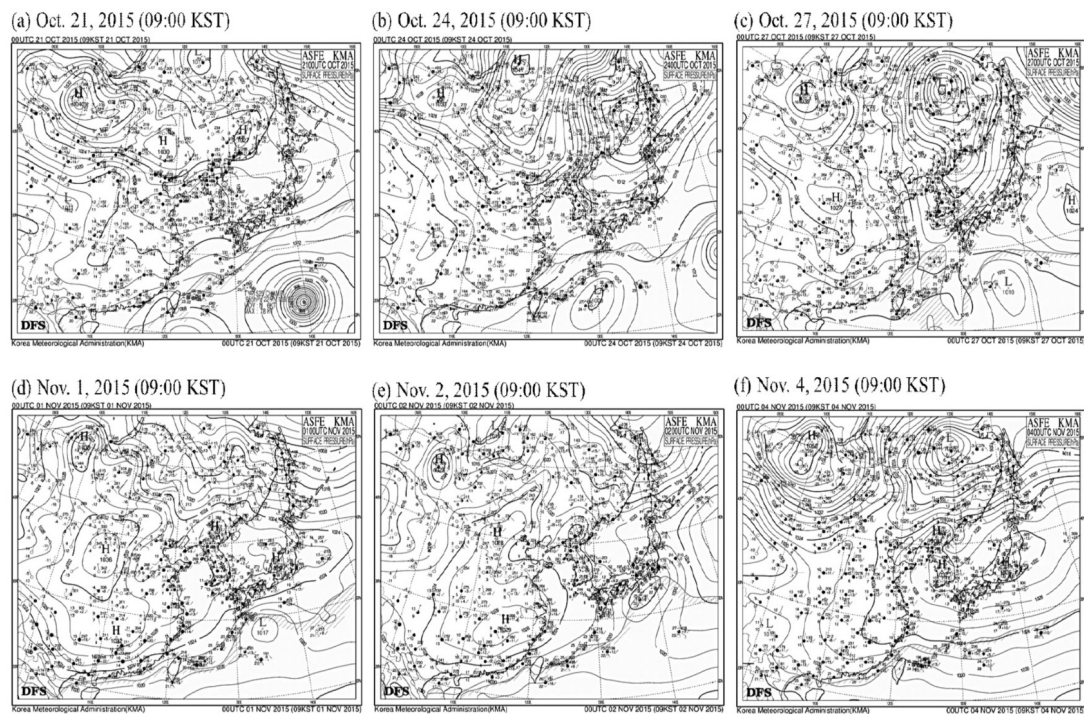
Appendix-1. Surface weather map representing Case1.



Appendix-2. Surface weather map representing Case2.



Appendix-3. Surface weather map representing Case3.



Appendix-4. Surface weather map representing Case4.