

ORIGINAL ARTICLE

연안 지역 고농도 PM_{2.5} 사례에 대한 국지 규모 공기괴 재순환 지수 적용 연구

유정우 · 김지선¹⁾ · 김은지²⁾ · 이순환²⁾*

부산대학교 환경연구원, ¹⁾부산대학교 지구과학과, ²⁾부산대학교 지구과학교육과

A Study on the Application of Local-scale Air Mass Recirculation Factor to High-concentration PM_{2.5} Episode in Coastal Areas

Jung-woo Yoo, Ji Seon Kim¹⁾, Eun Ji Kim²⁾, Soon-Hwan Lee²⁾*

Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 46241, Korea

¹⁾*Department of Earth Science, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

²⁾*Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

Abstract

This study analyzed the impact of recirculation on high-concentration PM_{2.5} in the coastal area. Through the analysis of observational data, it was observed that the development of sea breeze led to an increase in PM_{2.5} and SO₄²⁻ concentrations. Hysplit backward trajectory analysis confirmed the occurrence of air mass recirculation. Results from WRF and CMAQ numerical simulations indicated that pollutants transported from land to sea during the night were re-transported to the land by daytime sea breeze, leading to high-concentration PM_{2.5} in Busan. To quantitatively investigate the recirculation a recirculation factor (RF) was calculated, showing an increase in RF values during high-concentration PM_{2.5} episodes. However, the RF values varied slightly depending on the time resolution of meteorological data used for the calculations. This variation was attributed to the terrain characteristics at observation sites. Additionally, during long-range transported days leading to nationwide high-concentration PM_{2.5} events, synoptic-scale circulation dominated, resulting in weaker correlation between PM_{2.5} concentration and RF values. This study enhances the understanding of the influence of recirculation on air pollution. However, it is important to consider the impact of temporal resolution and terrain characteristics when using RF for evaluating recirculation during episodes of air pollution.

Key words : Recirculation factor, local scale circulation, PM_{2.5}, WRF/CMAQ, numerical simulation

1. 서 론

한국은 산업화와 도시화가 급속도로 진행되면서 대기오염으로 인한 건강 및 환경 문제에 직면해 있다. 인간의 건강과 생태계, 생물 다양성에도 영향을 미치는 것으로 알려진 대기오염은 주로 인간 활동으로부터 발생하는 오염물질들의 배출과 기상 조건, 그리고 지형적 요

인의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Agathokleous et al., 2020). 특히 바람, 대기 경계층 고도, 상대습도, 기온과 같은 기상 조건은 오염물질의 수송, 축적, 분산, 화학 반응에 영향을 미치며(Chen et al., 2018), 극심한 대기오염 발생 사례에 대한 기상 조건의 기여도가 50% 이상으로 나타나기도 한다(Zhang et al., 2018). 부산은 한국의 대표적인 연안 도시로 바다와 인접해

Received 30 July, 2023; Revised 5 August, 2023;

Accepted 7 August, 2023

*Corresponding author : Soon-Hwan Lee, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone : +82-51-510-2706
E-mail : withshlee@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있으며, 산지가 많아 지형이 매우 복잡하다. 이러한 지형 및 지리적 특성으로 인해 부산 지역에는 종관 및 중규모의 다양한 기상 현상이 발생한다. 종관 규모 순환은 오염물질의 장거리 수송에 영향을 끼치며, 특히 고기압 조건에서는 대기가 정체되어 오염물질이 축적될 수 있다(Lee et al., 2019; Liu et al., 2019). 중규모 순환은 지역 규모에서 발생하는 기상 현상을 의미하며, 오염물질의 지역 간 수송 및 분포에 영향을 준다. 중규모 순환의 대표적인 예로 해륙풍(land-sea breeze)은 해양과 육지 간의 온도 차이로 인해 발생하는 바람으로서, 종관 규모 순환의 영향이 약한 날에 해륙풍이 발달할 수 있다. 해륙풍은 오염물질의 수송에도 영향을 미치는데 해륙풍 순환이 강하게 유지되면 오염물질이 풍하측 지역으로 수송되는 것을 막아 국지적으로 축적되어 대기오염이 강화될 수 있다(Lam et al. 2005; Zhang et al. 2013). 또한 육풍에서 해풍으로 전환 시 육풍에 의해 바다로 쓸려간 오염물질이 해풍과 함께 되돌아오는 현상이 나타나는데, 이를 재순환(Recirculation)이라고 한다. 이러한 재순환 현상은 오염물질의 확산에 불리한 기상 조건으로 대기오염에 부정적인 영향을 끼친다(Ye et al., 2016). 재순환 현상은 해풍이 부는 해안 지역과 곶풍이 부는 산악 지역의 대기오염에 기여하는 것으로 알려지고 있다(Levy et al., 2009; Liao et al., 2017). Oh et al.(2006)에 의하면, 종관장이 약한 날 바다에서 오존 전구물질의 광화학 반응이 활발해져 해풍이 불 때 육지의 오존 농도가 증가함을 밝혔다. 또 Tao et al.(2016)은 정체된 기상 조건에서 재순환을 통해 최대 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 축적됨을 보였다.

선행연구들을 통해 해륙풍과 같은 국지 순환으로 인한 공기괴의 재순환 현상으로 연안 지역의 고농도가 발생할 수 있음을 밝혔다. 따라서 연안 지역의 오염물질의 수송으로 인한 농도 변동과 고농도 발생 메커니즘을 정확하게 파악하기 위해서는 국지 순환에 의한 재순환 발생을 정량적으로 파악할 필요가 있다. 재순환 현상의 발생으로 인한 대기오염의 발생 가능성을 추정하기 위해 재순환 지수(RF, Recirculation Factor)라는 지수를 사용하였다. Allwine and Whiteman(1994)은 대기 중의 수평 이동의 특성을 매개변수화하기 위해 RF를 개발하였다. 산출된 RF를 통해 재순환 발생과 오존 농도의 변화 분석을 통해 재순환 발생 시 오존 농도가 증가하는 것을 확인하였다(Levy et al., 2008; Lee et al., 2015).

그러나 바람(풍속 및 풍향) 자료를 바탕으로 산출되는 RF는 바람의 변동성에 따라 값의 변화가 크게 나타날 수 있다. 또한 RF 산출에 필요한 바람 자료는 지상 기반 관측 자료나 재분석 자료를 이용할 수 있으나 이 자료들은 시간 해상도가 다양하다. 바람 자료의 경우 시간 해상도에 따라 변동성이 크기 때문에 산출된 RF값이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국지 순환에 의한 재순환 현상 발생이 부산 지역 $\text{PM}_{2.5}$ 발생에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 또한 재순환 현상의 발생 가능성을 정량적으로 평가할 수 있는 RF 산출에 사용되는 바람 자료의 시간 해상도 차이에 따른 차이를 비교하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 자료

부산 지역에 대해 재순환 지수를 산출하기 위해 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 FNL(Final operational global analysis) 재분석 자료를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 FNL 재분석 자료는 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 수평 해상도와 6시간 간격의 시간 해상도(0000, 0600, 1200, 1800 UTC)를 가진다. 재분석 자료에서 제공되는 기상 변수 중 10 m 및 975 hPa 고도에 대한 동서 바람 성분(u-component)과 남북 바람 성분(v-component)을 이용하여 RF를 산출하였다. 바람 자료의 시간 해상도에 따라 산출된 RF의 성능을 평가하기 위해 부산 종관기상 관측시스템(ASOS, Automated Synoptic Observing System)에서 1시간 간격으로 관측된 10 m 풍속 및 풍향 자료를 이용하였다. $\text{PM}_{2.5}$ 농도 자료는 부산 23개 도시대기측정망(AQMS, Air Quality Monitoring Stations) 지점에서 측정한 자료를 사용하였으며, $\text{PM}_{2.5}$ 구성 성분의 농도 자료를 부산과 인접한 울산에 위치한 영남권 대기오염집중측정소에서 측정한 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 농도 자료를 이용하였다.

또한 미국 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 개발한 라그랑지안 방법 기반의 HYSPLIT (Hybrid single particle lagrangian integrated trajectory) 모델을 이용하여 역궤적 분석을 수행하여 공기괴의 이동 패턴을 분석하였다.

2.2. 재순환 지수

본 연구에서는 대기의 재순환 현상 발생을 정량으로 평가하기 위해 재순환 지수(RF)를 산출하였다. Allwine and Whithman(1994)은 재순환 지수를 제안했는데 식은 다음과 같다.

$$L = \sqrt{\left(\sum_{i_s}^{i_e} \Delta T \times u_i\right)^2 + \left(\sum_{i_s}^{i_e} \Delta T \times v_i\right)^2} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i_s}^{i_e} \sqrt{(\Delta T \times u_i)^2 + (\Delta T \times v_i)^2} \quad (2)$$

$$RF = 1 - \frac{L}{S} \quad (3)$$

i_s 는 분석 지점의 분석 시작 시간, i_e 는 분석 종료 시간, ΔT 는 데이터의 시간 간격, u_i 와 v_i 는 분석 시간의 동서 바람 성분과 남북 바람 성분을 의미한다.

1일 24시간을 기준으로 할 때, 식 (1)은 공기가 24시간 동안 이동한 순 이동 거리를 의미하며, 식 (2)는 공기괴가 각 시간의 u_i, v_i 의 풍속으로 이동한 실제 이동 거리를 의미한다(Fig. 1). RF는 두 거리의 비율로 결정되며 0에서 1 사이의 값을 가진다. RF값이 클수록 시작

지점에서 종료 지점까지의 거리가 짧은 것을 의미하는데, 이는 곧 공기괴의 실제 이동 거리에 비해 순 이동 거리가 짧은 것을 말한다. RF값이 0이면 공기괴가 재순환하지 않고 24시간 동안 직선으로 이동한 것과 같다. 결과적으로 RF는 공기괴의 이동에 따라 오염물질의 수송 잠재력과 특정 지점에서의 대기 흐름에 대한 정보를 포함한다. 바람은 기상 조건 및 지형, 지리적 요인 등에 의해 영향을 받기 때문에 시간과 공간에 따라서 빠르게 변할 수 있다. 따라서 바람 관측 자료의 시간 해상도에 따른 바람 변동성이 RF 산출에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

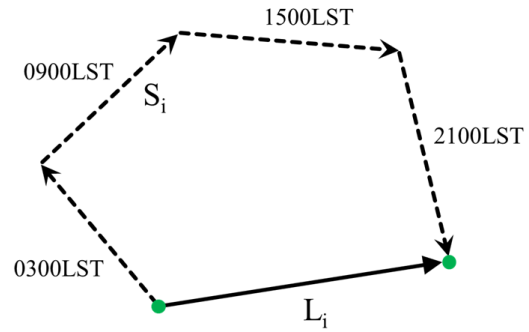


Fig. 1. Schematic diagram of S_i and L_i .

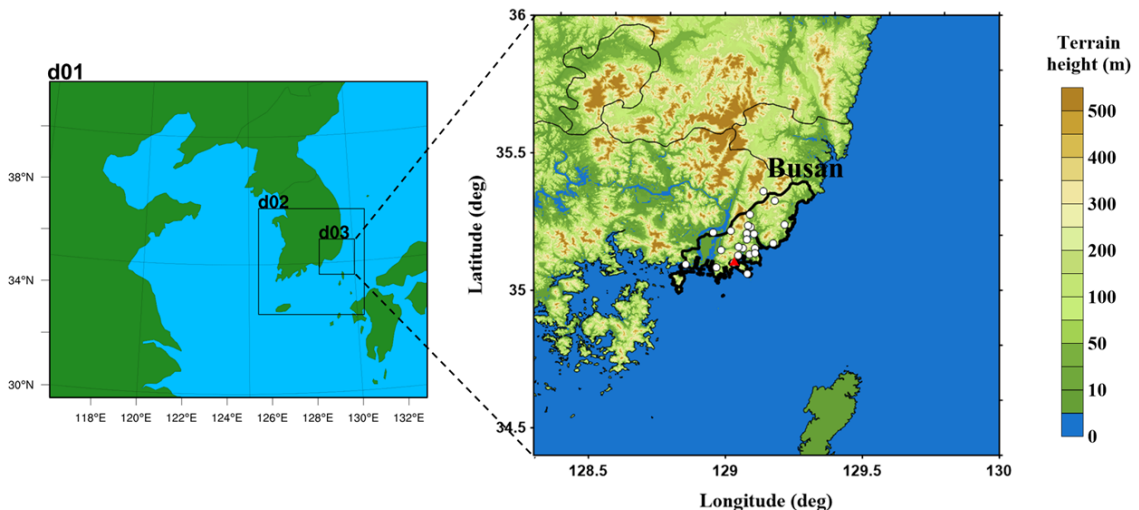


Fig. 2. The model domain and topography in Busan. The red circle is ASOS(Automated synoptic observing system) stations and white circles are AQMS(Air quality monitoring stations) in Busan.

Table 1. The configuration of WRF model

	d01	d02	d03
Horizontal grid	180×150	151×151	151×151
Resolution	9 km	3 km	1 km
Vertical layers	40 Layers		
Physical process	Morrison double-moment scheme (Morrison et al., 2009)		
	RRTMG radiation scheme (Lacono et al., 2008)		
	YSU planetary boundary layer (PBL) scheme (Hong et al., 2006)		
	Noah Land Surface Model (Chen and Dudhia, 2001)		
Initial data	Kain-Fritsch scheme (Kain, 2004)		
	NCEP FNL Operational Global Analysis data		

2.3. 수치모델 구성

공기괴의 재순환 현상 발생 및 국지 순환에 따른 오염물질의 이동에 대한 시간별 공간 분포를 상세히 분석하기 위해 3차원 기상 및 대기질 수치모의를 수행하였다. 기상 수치 모델인 WRF(Weather research and forecasting; Skamarock et al, 2008)와 대기질 모델인 CMAQ(Community multiscale air quality modeling system; Byun and Schere, 2006)을 이용하였다. 도메인은 연구 대상 지역인 부산을 중심으로 최종 d03 도메인을 수평 해상도 1 km로 구성하였다(Fig. 2). WRF 모델의 초기 및 경계 자료는 NCEP의 FNL 재분석 자료를 사용하였으며, WRF 모델에 사용된 자세한 물리 옵션은 Table 1에 나타내었다.

CMAQ 모델의 인위적 배출량은 국외는 수평 해상도 0.25° x 0.25°인 the mosaic Asian anthropogenic emission (MIX) 2010년 (Li et al., 2017) 자료를 사용하였으며, 국내는 NIER(National Institute of Environmental Research)에서 제공하는 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 2017년 자료를 사용하였다. 식생 배출량 자료는 MEGAN (Model of emissions of gases and aerosols from nature)을 사용하였다. WRF 및 CMAQ 모델의 수치모의 기간은 재순환이 발생한 24일을 중심으로 spin-up을 포함하여 2017년 9월 22일 0900 LST ~ 25일 0900 LST까지로 설정하였다.

3. 연구 결과

3.1. 사례일 분석

본 연구는 재순환 현상의 발생 가능성이 높은 2017년 9월 24일을 사례일로 선정하였다. Fig. 3은 2017년 9월 24일의 0000 LST와 1200 LST에 대해 기상청에서 제공하는 지상 일기도를 나타낸 것이다. 한반도를 중심으로 고기압이 자리 잡고 있으며, 등압선 간격이 넓게 유지돼 종관장의 영향이 적은 날이다. 고기압의 영향으로 부산은 24일에 운량이 1.9로 구름이 없고 날씨가 맑아 약한 종관장의 영향으로 국지 순환에 의해 공기괴의 재순환이 나타날 가능성이 높은 사례일이다.

사례일에 대한 재순환 발생 가능성을 알아보기 위해 HYSPLIT 모델을 이용하여 부산 지역을 대상으로 24시간의 역궤적 분석을 수행하였다(Fig. 4). 낮은 고도(100, 300 m)의 역궤적 결과에서 내륙에서 바다로 이동한 공기괴가 다시 내륙으로의 이동이 나타났다. 특히 100 m 고도의 결과에서는 공기괴의 재순환으로 인해 24시간 이전과 출발 지점이 거의 동일하게 나타나, 역궤적 분석을 통해 사례일인 2017년 9월 24일에 재순환 현상이 발생함을 확인할 수 있었다.

Fig. 5에 2017년 9월 22~26일에 대해 부산 AQMS 지점에서 측정된 PM_{2.5} 농도와 영남권 대기오염집중측정소에서 측정된 SO₄²⁻와 NO₃⁻ 농도, ASOS 지점의 관측한 기상 요소(풍속 및 풍향)를 시계열로 나타냈다. 9월 25일 1500 LST의 PM_{2.5} 농도는 자료 누락으로 인해 표기되지 않았다. 22일부터 24일까지 PM_{2.5} 농도는 점차 증가하는 경향이 나타났으며, 25일 새벽 감소한 농도는 오전부터 다시 증가하는 추세가 나타났다. 사례일인 24일의 일평균 PM_{2.5} 농도는 42 µg/m³이며, 1400 LST에 63 µg/m³으로 가장 높게 나타났다. PM_{2.5} 구성 성분을 보면, 농도의 증감은 있으나 뚜렷한 경향

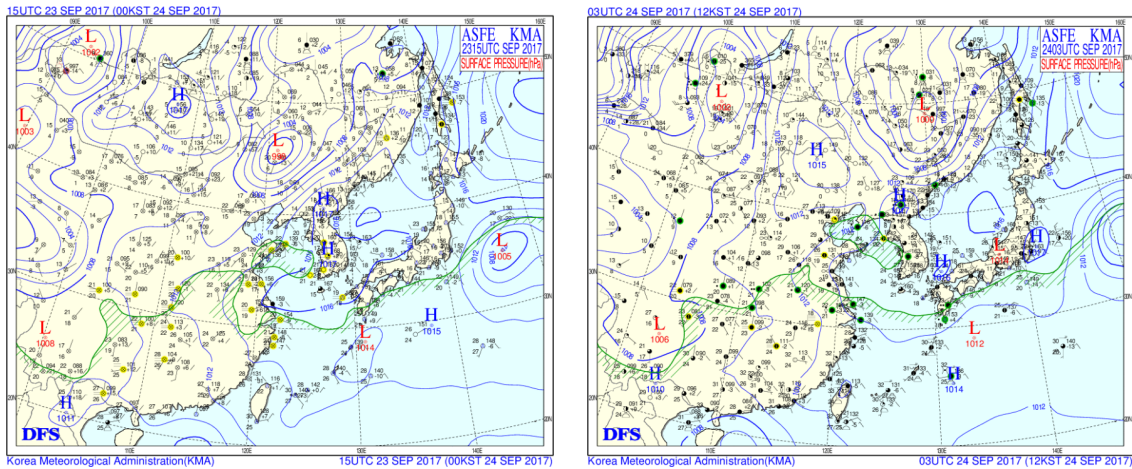


Fig. 3. Surface synoptic weather map for September 24, 2017 at 0000 and 1200 LST.

성이 나타나지 않는 NO₃⁻ 농도와 달리 SO₄²⁻ 농도는 PM_{2.5} 농도와 유사하게 25일 오전부터 증가하는 경향이 나타나, 24일 1500 LST에 13.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났다.

사례일인 24일 0900 LST 이후 부산의 바람은 동남풍에서 남풍, 남서풍으로 풍향이 변화하면서 풍속의 증가가 나타났다. 남풍 계열의 바람은 앞선 hysplit 역궤적 분석(Fig. 4)에서 나타난 공기과 이동 패턴과 일치한다. 남쪽에 바다가 위치한 부산의 지리적 특성으로 미루어 볼 때, 남풍 계열의 바람은 바다에서 육지로 불어 들어오는 해풍 발달을 의미한다. 해풍 발달과 더불어서 PM_{2.5} 및 SO₄²⁻ 농도가 증가가 두드러지게 나타났으며, 1400 LST에 최고 농도가 나타났다. 이는 해풍 발달로 인해 전날 육지에서 바다로 수송된 오염물질이 해풍에 의해 재순환되어 농도 증가가 나타난 것으로 판단된다.

3.2. 수치모델 검증

WRF 기상 수치모델의 검증하기 위해 기상청에서 제공하는 ASOS 관측 지점의 기상 관측 자료를 사용하였다. 기상 관측 자료는 도메인 3 내의 ASOS 11개 지점의 2 m 기온 및 10 m 풍속 자료를 사용하였다. 수치모델의 결과의 검증을 위해 통계 검증 지표인 MB(Mean bias), IOA(Index of agreement), R(correlation coefficient)를 활용하였다. R과 IOA는 1에 가까울수록, MB는 0에 가까울수록 수치모델의 결과가 관측값과 유사하다는 것을 의미한다. 수치모델 검증은 spin-up

time을 제외하고 재순환이 발생한 24일을 중심으로 23~25일에 대해 검증을 수행하였다.

Fig. 6은 2 m 기온 및 10 m 풍속에 대해 관측값과 WRF 수치모델의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 기온의 경우 MB가 1.46 $^{\circ}\text{C}$ 으로 관측값에 비해 WRF 수치모델의 결과가 과대모의 하는 것으로 나타났으나, IOA가 0.86, R이 0.84로 기온의 변동성을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 풍속의 경우에 MB가 0.68 m/s로 관측값에 비해 과대모의하는 결과가 나타났으나 IOA(0.70), R(0.60) 모두 일변동성을 잘 모의하여 양호한 수치모델의 결과가 나타났다. Emery et al.(2001)은 기상 수치모델의 결과 검증의 기준을 기온 Bias $\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$, IOA ≥ 0.7 , 풍속 Bias $\leq \pm 2.0$ m/s, IOA ≥ 0.6 으로 제안하였다. 본 연구에서는 기온의 Bias가 다소 높게 나타났으나 나머지 기준은 모두 충족하는 것으로 나타났다.

3.3. 수평 분포 분석

Fig. 7은 기상 및 대기질 수치모델의 결과를 바탕으로 24일의 PM_{2.5} 농도와 바람 벡터를 나타낸 것이다. 0600 LST에 북풍 계열의 바람에 의해 육지에서 바다로 PM_{2.5}가 수송되어 바다에서 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도가 나타났다. 이후 바다에 존재하던 고농도 PM_{2.5}가 남풍 계열의 바람에 의해 바다에서 육지로 수송되어 오전에 비해 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 농도가 증가하여 부산 내륙에서 1400 LST에 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 고농도가 나타났다. PM_{2.5} 수평 분포 분석을 통해 야간에 육풍에 의해 육지에서 바다

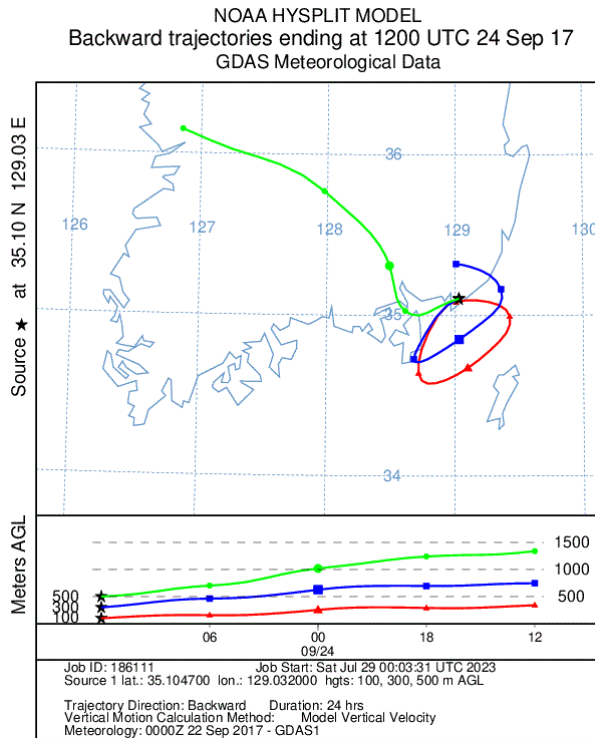


Fig. 4. 24-h back-trajectories calculated every 6-h at Busan.

로 수송된 오염물질이 주간에 해풍에 의해 바다에서 육지로 다시 재순환 되는 것을 확인하였으며, 재순환 발생으로 연안 지역의 오염물질의 농도가 증가함을 확인할 수 있었다.

3.4. RF 분석

본 연구에서는 RF 산출을 통해 통한 재순환 현상의 발생 가능성을 정량적으로 분석하고 고농도 사례에 대한 적용 가능성을 살펴보고자 하였다. 또한 RF 산출에 사용되는 기상 자료의 시간 해상도에 따라 RF 수치의 차이를 비교하고자 하였다. 본 연구에서는 부산 ASOS 지점에서 1시간 간격으로 관측된 10 m 풍속 및 풍향 자료를 이용하여 산출된 RF_OBS와 6시간 간격의 FNL 재분석 자료의 10 m 및 975 hPa 고도에 대한 동서 바람 성분과 남북 바람 성분을 이용하여 산출된 RF_10m와 RF_975 hPa를 산출하였다.

본 연구의 사례일의 전날인 23일에는 RF_OBS와 RF_10 m, RF_975 hPa이 각각 0.48, 0.15, 0.03으로

재분석 자료를 기반으로 산출한 RF값이 매우 낮았다. 사례일인 24일에는 RF_OBS와 RF_10 m, RF_975 hPa이 각각 0.64, 0.78, 0.89로 전날에 비해 증가하여 1에 가까운 수치로 나타났다. 해당 기간에 PM_{2.5} 농도도 전날에 비해 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하여 고농도 발생과 산출된 RF의 경향성이 유사하게 나타났다.

RF와 PM_{2.5}의 상관성을 알아보기 위해 2017년 9월에 대해 산출된 RF와 PM_{2.5} 측정값을 시계열로 나타내었다(Fig. 8). 6시간 간격의 FNL 재분석 자료를 기반으로 산출된 RF_10 m와 RF_975 hPa의 경향성은 매우 유사하며, PM_{2.5} 농도와 상관 계수가 각각 0.52, 0.50으로 나타났다. 반면 1시간 간격의 지상 관측 자료를 바탕으로 산출된 RF_OBS는 재분석 자료 기반 RF(RF_10 m와 RF_975 hPa)와 경향성은 유사하지만 부분적으로 차이가 큰 날이 나타났으며, PM_{2.5} 농도와 상관 계수는 0.20으로 낮게 나타났다.

지수별로 차이가 크게 나타나는 주요 일에 대해 살펴보면, 9일에는 RF_10 m와 RF_975 hPa이 각각 0.88, 0.82로 높게 나타났으나, RF_OBS는 0.22로 차이가 크

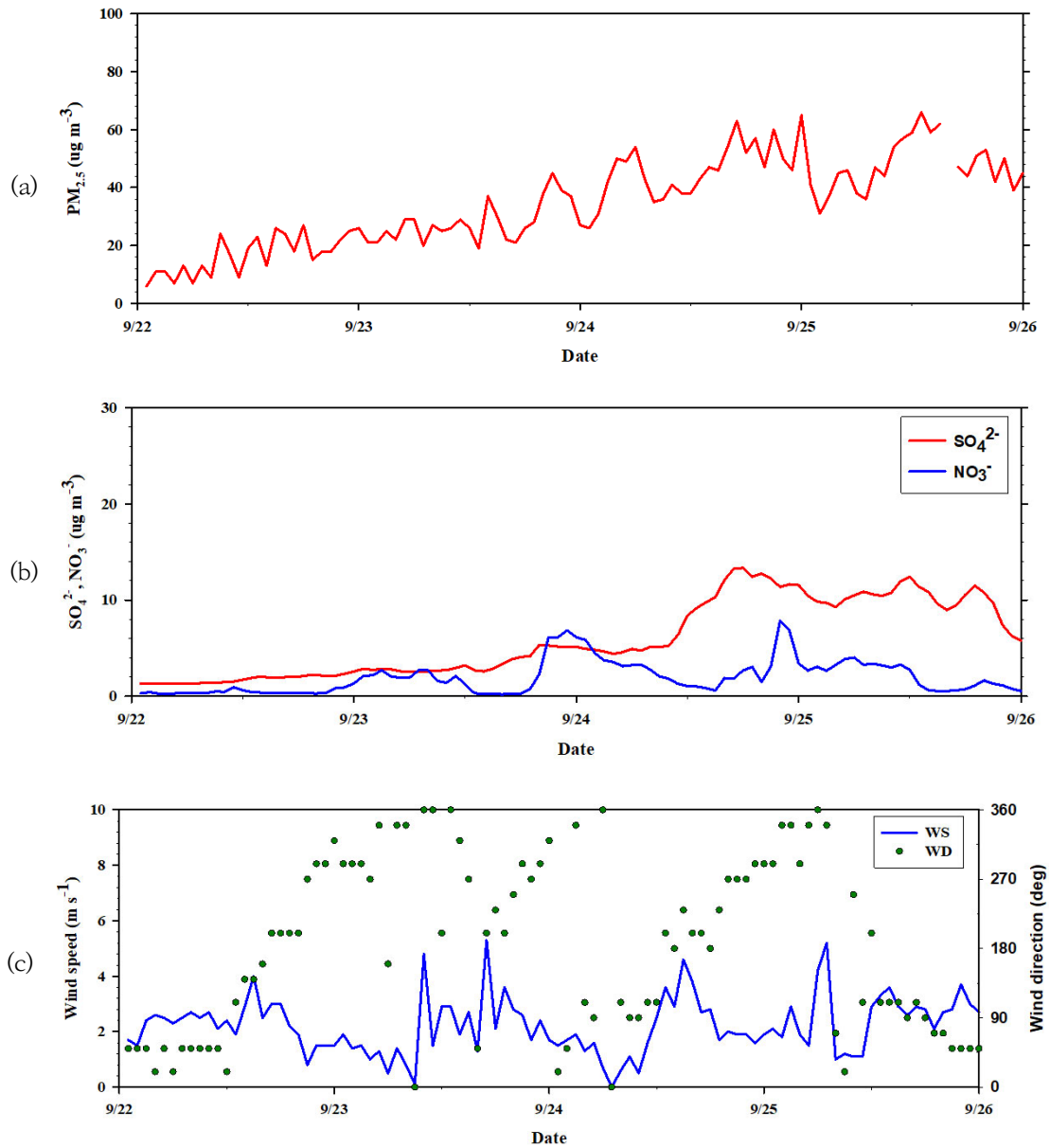


Fig. 5. Time series of (a) PM_{2.5}, (b) SO₄²⁻ and NO₃⁻ concentrations and (c) wind speed and direction.

게 나타났다. 9일의 RF값의 차이는 흐린 날씨와 풍속의 영향인 것으로 판단된다. 9일은 평균 운량이 5.9로 구름이 많았으며, 일평균 풍속이 관측 자료는 1.6 m/s, 재분석 자료의 10 m 일평균 풍속 1.84 m/s, 975 hPa 1.51 m/s로 차이가 크지 않았으나 시간별 풍속에서 약

한 바람이 다수 관측되었다. 지상 기반 관측 자료에서 24시간 중 5시간 자료에서 바람이 약하게 부는 calm이 관측되었으며, 9개 시간에서 2 m/s 이하의 약한 바람이 관측되었다. 이러한 경우에는 calm 또는 약한 바람의 영향으로 S(공기과의 이동 거리)가 매우 낮기 때문

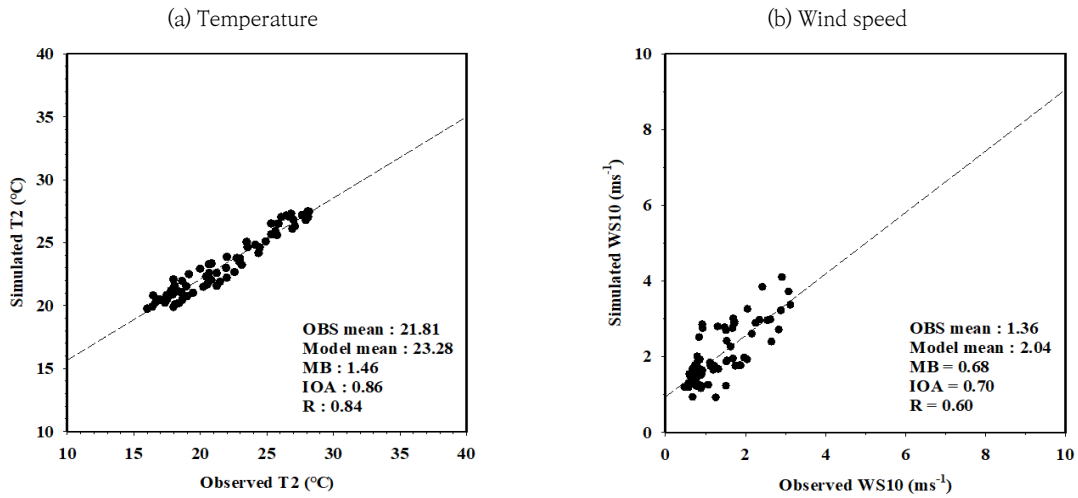


Fig. 6. Observed and simulated for (a) 2-m temperature and (b) 10-m wind speed during the study period.

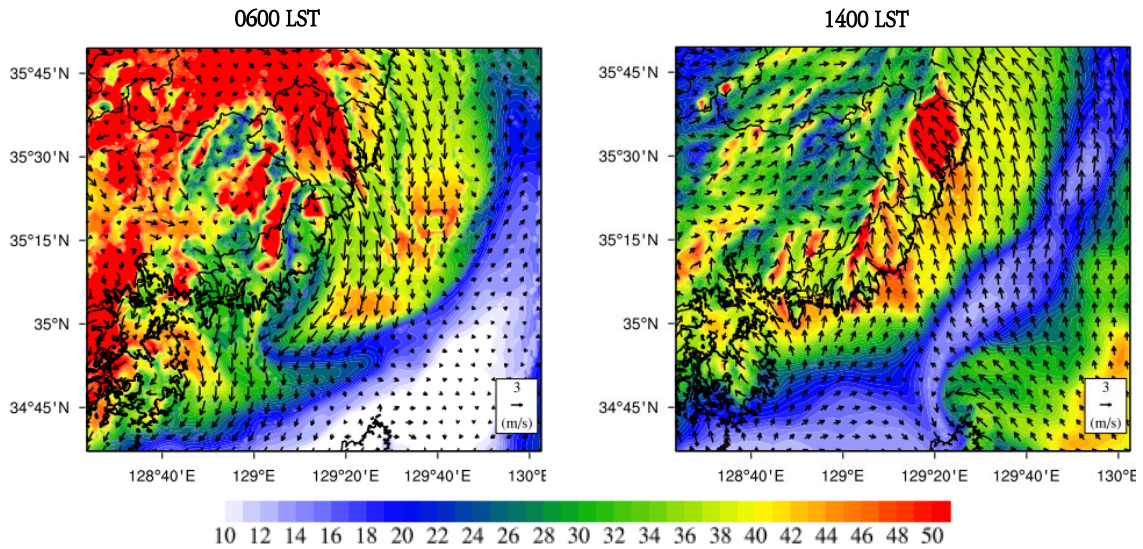


Fig. 7. Horizontal distribution of $PM_{2.5}$ concentrations on 24 September, 2017.

에 RF의 값이 낮게 산출될 수 있다. 반면에 12일은 RF_10 m와 RF_975 hPa이 각각 0.34, 0.20으로 낮았으나, RF_OBS는 0.72로 높게 나타났다. 9일과 달리 12일에 RF_OBS가 재분석 자료를 기반으로 산출한 RF보다 값이 크게 나타난 이유는 FNL 재분석 자료와 지상 관측 자료의 시간 해상도 차이에 의한 것으로 판단된다. 해당일은 지상 관측 자료에서 서로 정반대의 바람(북풍 계열의 바람 7시간, 남풍 계열의 바람 6시간)이 주로 불

어 공기괴의 이동 거리(S)에 비해 순 이동거리(L)가 짧게 나타나 상대적으로 높은 RF값이 산출되었다. 또한 9월 19일에는 일평균 $PM_{2.5}$ 농도가 $53 \mu g/m^3$ 으로 9월 중 가장 높은 날이었으나, RF_OBS와 RF_10 m, RF_975 hPa은 각각 0.12, 0.05, 0.03으로 매우 낮게 산출되었다. 9월 19일은 전국 일평균 $PM_{2.5}$ 농도가 $45 \mu g/m^3$ 으로 부산 지역만 고농도가 나타났던 24일과 달리 전국적으로 농도가 높았던 날이다. 이는 국지 배출의 영

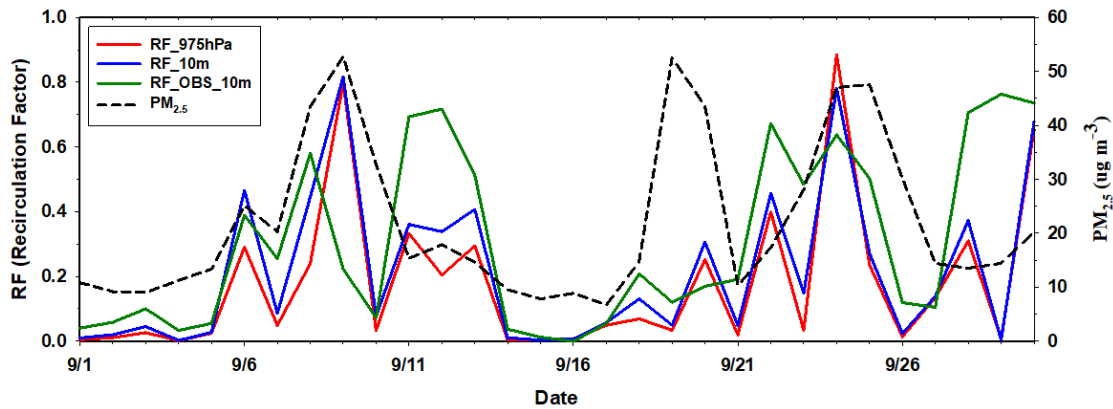


Fig. 8. Time series of RF_OBS, RF_10m, RF_975hPa, and PM_{2.5} concentrations.

향과 더불어 장거리 수송의 영향에 의해 전국적으로 고농도가 발생하는 날에는 국지 순환보다 종관장의 영향이 크기 때문에 RF값이 낮게 산출된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 국지 순환에 의해 발생하는 공기회 재순환 현상이 부산 연안 지역의 고농도 PM_{2.5} 발생에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 또한 재순환 현상의 발생 가능성을 정량적으로 평가하기 위해 재순환 지수를 산출하였으며, RF 산출에 필요한 바람 자료의 시간 해상도 차이에 따른 RF 산출 결과를 비교하였다.

2017년 9월 24일 고농도 사례에 대해 부산 지역의 기상 관측 및 PM_{2.5} 측정 자료 분석을 통해 남풍 계열이 바람이 빨라지는 시기에 PM_{2.5}와 SO₄²⁻ 농도가 증가하는 경향성을 확인하였다. 부산은 남쪽에 바다가 위치해 있어, 남풍 계열의 바람은 바다에서 육지로 불어 들어오는 해풍 발달을 의미하며, hysplit 역궤적 분석을 통해 9월 24일에 공기회가 재순환 하는 것을 확인하였다. 기상 및 대기질 수치모델의 수평 분포에서 야간에 육지에서 바다로 빠져나간 오염물질이 주간 해풍에 의해 바다에서 육지로 다시 재수송 되어 부산의 고농도 PM_{2.5}를 유발시키는 것으로 나타났다.

연안 지역의 대기오염을 유발시키는 공기회의 재순환 현상을 정량적으로 파악할 수 있는 재순환 지수(RF)를 산출하여 고농도 PM_{2.5} 발생일에 RF값이 증가하는 것을 확인하였다. 바람은 시간에 따라 그 변동성이 매우 크다. 따라서 RF를 산출에 필요한 바람(풍속, 풍향) 자

료는 1시간 간격의 지상 기반 10 m 관측 자료와 6시간 간격의 FNL 재분석 자료의 10 m와 975 hPa 자료를 사용하여 시간 해상도 차이에 따른 RF값을 비교하였다. 기상 자료의 시간 해상도 차이로 산출된 RF의 경향성은 다소 불일치하는 부분이 나타났으나, 사례일과 같이 재순환 현상이 발생한 날에는 RF_OBS, RF_10 m, RF_975 hPa 모두 높은 수치가 나타났다. 그러나 상대적으로 조밀한 시간 해상도를 가지는 RF_OBS의 공기회의 이동 거리(S)가 순 이동거리(L)보다 더 짧거나 길 수 있기 때문에 RF_OBS보다 상대적으로 재분석 자료를 이용한 RF_10 m와 RF_975 hPa가 PM_{2.5} 고농도 발생과 유사한 경향성이 나타났다. 또한 장거리 수송의 영향으로 전국적으로 고농도가 발생한 사례에는 국지 순환보다 종관장의 영향을 크게 받아 RF값이 낮게 산출되어 농도와 상관성이 떨어졌다.

2017년 9월 한 달 기간에 대해 RF_10 m와 RF_975 hPa는 PM_{2.5} 농도와 상관 계수가 각각 0.52, 0.50으로 PM_{2.5} 농도가 높은 시기에 RF 또한 증가하는 경향성이 나타나 연안 지역 고농도 대기오염 발생 사례에 대한 활용 가능성을 확인하였으나, 지상 기반 관측 자료는 관측 지점의 지형적 및 지리적 특성이 반영될 수 있기 때문에 RF_OBS(0.20)는 상대적으로 상관성이 떨어졌다.

본 연구를 통해 연안 지역의 대기환경 관리 및 대기오염 예측에 RF의 활용 가능할 것으로 사료된다. 다만 RF 산출에 필요한 바람 자료의 시간 해상도 차이나 관측 지점의 지형적 특성을 고려해야 할 것이다. 또한 재순환 현상이 발생함에도 불구하고 대기오염 발생의 유

무가 다르기 때문에 장기간에 대한 대기오염과 RF의 관계는 달라질 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2020R1A6A3A01100038 and 2020R1A6A1A03044834).

REFERENCES

- Agathokleous, E., Feng, Z., Oksanen, E., Sicard, P., Wang, Q., Saitanis, C., Araminiene, V., Blande, J., Hayes, F., Calatayud, V., Domingos, M., Veresoglou, S., Penuelas, J., Wardle, D., Marco, A., Li, Z., Harmens, H., Yuan, X., Vitale, M., Paoletti, E., 2020, Ozone affects plant, insect, and soil microbial communities: A threat to terrestrial ecosystems and biodiversity, *Sci. Adv.*, 6, eabc1176.
- Allwine, K. J., Whiteman, C. D., 1994, Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation, *Atmos. Environ.*, 28(4), 713-721.
- 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, *Appl. Mech. Rev.*, 59, 51-76.
- Chen, F., Dudhia, J., 2001, Coupling and advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity, *Mon. Weather Rev.*, 129, 569-585.
- Chen, Z., Xie, X., Cai, J., Chen, D., Gao, B., He, B., Cheng, N., Xu, B., 2018, Understanding meteorological influences on PM_{2.5} concentrations across China: a temporal and spatial perspective, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 5343-5358.
- Emery, C., Tai, E., Yarwood, G., 2001, Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes, *Env. Int. Corp.*, 235.
- Hong, S. Y., Noh, Y., Dudhia, J., 2006, A New vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Mon. Weather Rev.*, 134, 2318-2341.
- Kain, J. S., 2004, The Kain-Fritsch convective parameterization: an update, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 43, 170-181.
- Lacono, 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, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113, D13103.
- Lam, K. S., Wang, T. J., Wu, C. L., Li, Y. S., 2005, Study on an ozone episode in hot season in Hong Kong and trans-boundary air pollution over Pearl River Delta region of China, *Atmos. Environ.*, 39(11), 1967-1977.
- Lee, S. H., Park, G. Y., Chang, L. S., Song, C. K., 2015, Behavior of air particles associated with atmospheric recirculation over complex coastal area, *Korean. J. Atmos. Sci.*, 51(4), 311-322.
- Lee, H. J., Jo, H. Y., Kim, S. W., Park, M. S., Kim, C. H., 2019, Impacts of atmospheric vertical structures on transboundary aerosol transport from China to South Korea, *Sci. Rep.*, 9, 1-9.
- Levy, I., Dayan, U., Mahrer, Y., 2008, A five-year study of coastal recirculation and its effect on air pollutants over the East Mediterranean region, *J. Geophys. Res.*, 113, 1-14.
- Levy, I., Mahrer, Y., Dayan, U., 2009, Coastal and synoptic recirculation affecting air pollutants dispersion: a numerical study, *Atmos. Environ.*, 43(12), 1991-1999.
- Li, M., Zhang, Q., Kurokawa, J. I., Woo, J. H., He, K., Lu, Z., Ohara, T., Song, Y., Streets, D. G., Carmichael, G. R., Cheng, Y., Hong, C., Huo, H., Jiang, X., Kang, S., 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, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 935-963.
- Liao, T., Wang, S., Ai, J., Gui, K., Duan, B., Zhao, Q., Zhang, X., Jiang, W., Sun, Y., 2017, Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter of 2013 in Chengdu (China), *Sci. Total Environ.*, 584, 1056-1065.
- Liu, N., Zhou, S., Liu, C., Guo, J., 2019, Synoptic circulation pattern and boundary layer structure associated with PM_{2.5} during wintertime haze pollution episodes in Shanghai, *Atmos. Res.*, 228, 186-195.
- Morrison, H., Thompson, G., Tatarskii, V., 2009, Impact of cloud microphysics on the development

- of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: comparison of one- and two-moment schemes, *Mon. Weather Rev.*, 137, 991-1007.
- Oh, I. B., Kim, Y. K., Lee, H. W., Kim, C. H., 2006. An Observational and numerical study of the effects of the late sea breeze on ozone distributions in the Busan metropolitan area, Korea, *Atmos. Environ.*, 40, 1284-1298.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version3, National Center for Atmospheric Research Technical Note, NCAR, Boulder.
- Tao, M., Chen, L., Li, R., Wang, L., Wang, J., Wang, Z., Tang, G., Tao, J., 2016, Spatial oscillation of the particle pollution in eastern China during winter: implications for regional air quality and climate, *Atmos. Environ.*, 144, 100-110.
- Ye, X., Song, Y., Cai, X., Zhang, H., 2016, Study on the synoptic flow patterns and boundary layer process of the severe haze events over the North China Plain in January 2013, *Atmos. Environ.*, 124, 129-145.
- Zhang, R., Sarwar, G., Fung, J. C. H., Lau, A. K. H., 2013, Role of photoexcited nitrogen dioxide chemistry on ozone formation and emission control strategy over the pearlriver delta, China, *Atmos. Res.*, 132-133, 332-344.
- Zhang, H., Yuan, H., Liu, X., Yu, J., Jiao, Y., 2018, Impact of synoptic weather patterns on 24h-average PM_{2.5} concentrations in the North China Plain during 2013-2017, *Sci. Total Environ.*, 627, 200-210.
-
- Research professor. Jung-Woo Yoo
Institute of Environmental Studies, Pusan National University
jungwoo27@pusan.ac.kr
 - Graduate student. Ji-Seon Kim
Department of Earth Science, Pusan National University
jssk@pusan.ac.kr
 - Ph.D. Eun-Ji Kim
Department of Earth Science Education, Pusan National University
eunzee1024@naver.com
 - Professor. Soon-Hwan Lee
Department of Earth Science Education, Pusan National University
withshlee@pusan.ac.kr