

TECHNICAL NOTE

부산지역 2018년 11월 28일과 11월 30일 황사 발생 시의 기상과 PM_{2.5} 중의 이온성분 특성

전병일*

신라대학교 항공교통관리학과

Characteristics of Meteorological Parameters and Ionic Components in PM_{2.5} during Asian Dust Events on November 28 and 30, 2018 at Busan

Byung-Il Jeon*

Department of Air Traffic & Operation Management, Silla University, Busan 46958, Korea

Abstract

This study investigated characteristics of meteorological parameters and ionic components of PM_{2.5} during Asian dust events on November 28 and 30, 2018 at Busan, Korea. The seasonal occurrence frequencies of Asian dust during 1960~2019 (60 years) were 81.7% in spring, 12.2% in winter, and 6.1% in autumn. Recently, autumn Asian dust occurrence in Busan has shown an increasing trend. The result of AWS (automatic weather station), surface weather chart, and backward trajectory analyses showed that the first Asian dust of Nov. 28, 2018, in Busan came with rapid speed through inner China and Bohai Bay from Mongolia. The second Asian dust of Nov. 30, 2018, in Busan seems to have resulted from advection and deposition of proximal residual materials. These results indicated that understanding the characteristics of meteorological parameters and ionic components of PM_{2.5} during Asian dust events could provide insights into establishing a control strategy for urban air quality.

Key words : Asian dust, Meteorological parameter, Backward trajectory, PM_{2.5}

1. 서론

우리나라에 황사가 발생하기 위해서는 발원지에 먼지 발생량이 많고, 발원지로부터 황사가 이동해 올 수 있도록 강한 편서풍이 불어야 하며, 상공에 부유중인 황사가 우리나라 지표면에 낙하하기 위한 적절한 기상조건이 구비되어야 한다(Jeon, 2012). 황사는 대기혼탁도 증대, 태양에너지 감쇠, 강수빙정핵의 역할과 정밀기계의 손상, 호흡기질환, 안질환 등에 영향을 미친다(Monn et al.,

1997).

황사는 중국대륙의 건조지대에서 상승한 토양성 입자의 장거리 수송현상이지만, 수송경로에서 대기오염물질이 많이 배출되는 지역의 영향을 받을 수 있다(Uematsu et al., 2002; Lin et al., 2007; Tsuji and Hoki, 2013). 또한 중국 서부연안지역의 산업화에 따라 내륙으로부터 수송된 황사를 포함한 기괴는 중국연안부에서 인위기원의 가스상과 에어로졸을 포함한 기괴와 혼합되고, 그 결과 동중국해 해상에서 해염이 포함된 에어로졸과 가스가

Received 2 May, 2022; Revised 20 May, 2022;
Accepted 3 June, 2022

*Corresponding author: Byung-Il Jeon, Department of Air Traffic & Operation Management, Silla University, Busan 46958, Korea
Phone : +82-51-999-5056
E-mail : bijeon@silla.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.

화학반응을 일으키고 에어로졸의 변질이 일어난다 (Takami et al., 2006). $PM_{2.5}$ 는 주로 인위적 기원인 2차 생성입자이지만, 자연기원의 해양입자와 광물성입자의 일부를 포함하고, 하루 중에도 그 성분조성의 변동이 있다(Whitby and Sverdrup, 1980). 이러한 $PM_{2.5}$ 거동을 파악하기 위해서는 시간분해능이 높은 관측자료의 확보가 요구되고, 황사 등의 자연기원 입자의 기여를 평가하기 위해 입경이 큰 초대입자 ($PM_{10-2.5}$)의 관측도 중요하다(Tsuji and Hoki, 2013).

Uematsu et al.(2002)은 1996년 4월 일본 나가사키에서 황산염을 많이 포함한 미소입자가 한랭전선 전면에 나타난 것과 12시간 후에 광물성입자를 포함한 공기괴의 도달을 보고하였다. Lin et al.(2007)은 2005년 3월 타이완의 타이베이에서 황사가 날아오기 2~3시간 전 $PM_{2.5}$ 중의 NO_3^- 및 SO_4^{2-} 를 포함한 구형입자가 도달한 것을 보고하였다. Takami et al.(2006)은 2005년 11월 일본 오키나와에서 고기압 주변부를 따라 수송된 황사와 그보다 수시간 빨리 인위기원 에어로졸이 날아오는 것을 확인해서 보고하였다. Tsuji and Hoki(2013)는 2009년 일본 교토에서 2009년 12월 26일에 교토에서 관측된 황사 사례를 가지고 한랭전선 통과시의 기상의 변화에 대응하여 1시간마다의 입경별 에어로졸을 채취하여 이온성분과 무기원소성분을 측정하여 황사와 인위기원물질의 장거리 수송과정을 연구하였다. Kim et al.(2017)은 서울 지역에서 초미세먼지 중 이온성 물질에 대한 통계학적 특성 분석을 통해 환경조건에 따른 월별, 계절별 특성 및 상관분석을 한 바 있다.

우리나라에서 황사 발생 시 초미세먼지 중의 이온성분 분석을 통한 토양입자와 인위적인 물질의 수송과정에 대한 구체적인 분석이 아직 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 부산에서 2018년 11월 28일과 11월 30일에 발생한 황사의 기상요소 변화 특성을 알아보고, 초미세먼지($PM_{2.5}$) 중의 이온성분 분석을 통해 황사(토양성 입자)와 인위적인 물질의 장거리 수송과정에 대해 체계적인 고찰을 하고자 한다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 자료는 기상자료와 대기질자료로 나눌 수 있다. 기상자료는 부산지방기상청에서 측정된

일기상통계표와 AWS (Automatic Weather Station) 측정 그래프 그리고 일본기상청 발행 지상일기도이다. 그리고 황사 발생 시의 공기괴의 추적을 위해 미국의 해양기상청 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 backward trajectory를 사용하였다. Backward trajectory는 NOAA에 의해 개발된 HYSPLIT-4 (hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory) 모형을 사용하였다(Draxler and Rolph, 2013). 공기괴의 착지점은 부산지방기상관측소 ($35^{\circ}06'N$, $129^{\circ}02'E$)로 하였고, 궤적의 모사 시간을 48시간(6시간 간격)으로 하고, 공기덩어리의 고도는 공기괴의 상·하층 고도의 이동을 고찰하기 위해 500 m, 1,000 m, 2,000 m로 하였다.

대기질 자료는 황사 발생 시 미세먼지 특성을 고찰하기 위해 부산광역시 보건환경연구원에서 관리하는 시간별 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 농도 자료를 사용하였다. 또한 토양입자와 인위적물질의 장거리 수송과정을 이해하기 위해 황사 발생 시 초미세먼지($PM_{2.5}$) 중의 양이온인 NH_4^+ 와 Ca^{2+} , 음이온인 NO_3^- 과 SO_4^{2-} 농도자료를 사용하였다. 이외에도 Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- 등을 측정하고 있지만, 본 연구에서는 황사와 관련된 주요물질인 NH_4^+ 와 Ca^{2+} , NO_3^- 과 SO_4^{2-} 만을 사용하였다.

2020년 현재 부산시의 대기오염측정망은 20개의 도시대기측정망과 4개의 도로변측정망으로 구성되어 있으며, 초미세먼지($PM_{2.5}$) 중의 성분의 측정은 연산동, 장립동, 부산신항의 3곳에서 운영되고 있다. 본 연구에서는 사례기간에 유효한 측정자료가 확보된 것을 기준으로 하여, 연산동에서 측정된 자료를 사용하였다. 연산동 지점은 부산시청 청사 뒤에 있는 녹음광장 창고 옥상에서 대기오염물질을 측정하고 있으며, 측정소 주변에는 거대점오염원이 없으며, 높고 낮은 빌딩과 주택이 밀집되어 있고 크고 작은 상가들이 있어 주거지역이 아닌 상업지역으로 분류되고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 부산지역 2018년 28일과 11월 30일 황사의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도 특성

Table 1은 부산지역에서 1960년부터 2019년까지 60년간 10년마다 계절별 황사발생일수를 조사하여 나타난

Table 1. Seasonal occurrence days of Asian dust for 60 years in Busan

	Spring	Summer	Fall	Winter	Total
1960~1969	9	-	1	2	12
1970~1979	23	-	2	5	30
1980~1989	20	-	-	-	20
1990~1999	38	-	-	4	42
2000~2009	64	-	4	9	77
2010~2019	34	-	7	8	49
Total	188(81.7%)	-	14(6.1%)	28(12.2%)	230

것이다. 봄철(3, 4, 5월)이 전체의 81.7%로 가장 많이 발생하였고, 겨울철(1, 2, 12월)이 전체의 12.2%로 두 번째였으며, 여름철(6, 7, 8월)엔 전혀 발생하지 않았다. 가을철(9, 10, 11월)은 전체의 6.1%로, 2000년 전에는 발생빈도가 없거나 작았으나 2000년대 들어오면서 발생빈도가 증가하는 추세에 있으며 겨울의 발생일수와 비슷하였다. 특히 최근에 추계와 동계의 발생빈도가 점차 증가하는 추세에 있다. 부산지역에서 초미세먼지(PM_{2.5}) 중의 성분 분석은 2018년 5월 이후에 개시되어, 자료의 사용에 한계가 있었으나, 다행히 부산지역에서 2018년과 2019년도 봄철에는 황사가 발생하지 않았다.

Fig. 1은 부산지역 연산동에서 2018년 11월 27일부터 12월 1일까지 5일간 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 그리고 PM_{2.5}/PM₁₀비의 시간별 변화를 나타낸 것이다. 먼저 PM₁₀농도를 보면, 11월 28일 0900 LST에 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었고, 이후 급격히 상승하여 1400 LST에 215 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 최대농도를 나타내었다. 이후 급격히 농도가 하강하여 1900 LST에는 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었고 다시 황사가 오기 전까지 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 전·후의 비교적 높은 농도를 나타내었다. 11월 30일 0700 LST에 95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내면서 다시 황사가 유입되었고 1200 LST에 194 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내어 두 번째 피크를 나타내었으며, 12월 1일 0200 LST에 102 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타낸 후 점차 하강하였다. 12월 1일 1100 LST와 1200 LST에 일시적으로 128 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 고농도를 나타내었는데, 국지적인 요인에 의해 발생한 것으로 보인다. 다음으로 PM_{2.5}농도를 보면, 황사가 발생하기 전날인 11월 27일은 PM₁₀농도와 같이 오전(1100 LST)과 오후(2100 LST)에 두 번의 피크를 보이는 전형적인 일변화를 나타내고 있다. 그러나 첫 번째 황사가 발생한 11월 28일 0800 LST부터 1500 LST까지 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

이상의 고농도를 나타내었다. 이후 PM_{2.5}농도는 급격히 하강하였으며, 11월 30일 오전까지 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하를 농도를 보였다. 두 번째 황사가 발생한 11월 30일 1200 LST에 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내어 최대농도를 나타내었고, 이후 2400 LST까지 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외의 고농도를 나타내었다. PM_{2.5}/PM₁₀비를 보면, 11월 27일은 0.52~0.85 이상의 통상적인 값을 나타내었으나, 첫 번째 황사가 유입되면서 11월 28일 0800 LST에 0.79에서 1400 LST의 0.24로 급격히 하강하였다. 이후 PM_{2.5}/PM₁₀비는 0.5 이하의 값이 두 번째 황사가 끝날 때까지 지속되었다. 첫 번째 황사가 종료된 후 PM₁₀과 PM_{2.5}농도는 급격히 하강하여 통상과 비슷한 농도를 보여주었지만, PM_{2.5}/PM₁₀비는 0.4 내외의 낮은 값을 나타내고 있다. 즉 이 기간에도 어느 정도 황사의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 이는 나중에 언급할 Fig. 5의 11월 29일 0900 LST의 backward trajectory에서 어느 정도 뒷받침을 하고 있다.

부산지방기상청의 일기상통계표를 보면, 부산지역의 첫 번째 황사 발생기간을 11월 28일 0745 LST~1745 LST로 나타내었으며, 두 번째 황사는 11월 30일 0045 LST~2345 LST라고 하였다. 그러나 본 연구에서 부산지역 연산동의 PM₁₀과 PM_{2.5}농도 그리고 PM_{2.5}/PM₁₀비 자료를 종합적으로 고려하여 볼 때, 첫 번째 황사는 11월 28일 1000 LST부터 1900 LST까지로 보았고, 두 번째 황사는 11월 30일 0700 LST부터 12월 1일 0200 LST까지로 판단하였다. 본 연구의 황사 발생 시작시각과 종료시각은 부산지방기상청 일기상통계표에 비해 다소 time lag가 나타났다. 편의상 Fig. 1과 같이 첫 번째 황사 발생 이전 시기를 I구간으로, 첫 번째 황사 발생 시기를 II구간, 첫 번째 황사와 두 번째 황사 발생 사이 시기를

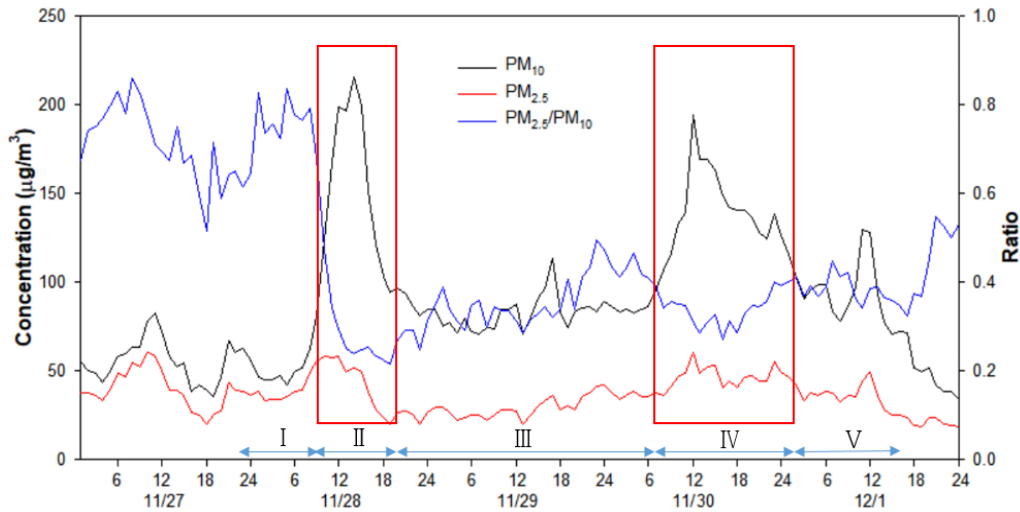


Fig. 1. Hourly variations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{2.5}/PM₁₀ ratio from Nov. 27 to Dec. 1, 2018 at Yeonsandong in Busan.

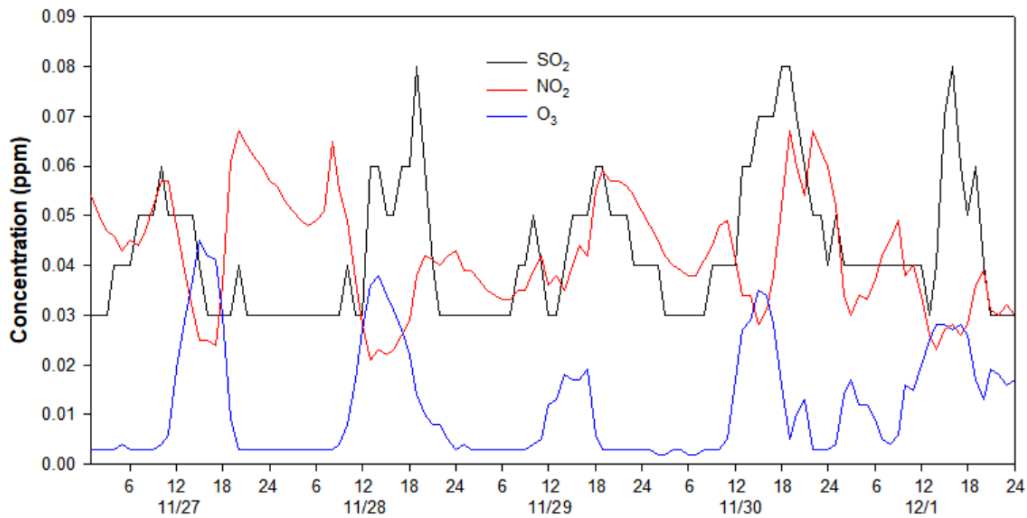


Fig. 2. Hourly variations of SO₂, NO₂ and O₃ concentrations from Nov. 27 to Dec. 1, 2018 at Yeonsandong in Busan (SO₂×10).

Ⅲ구간으로, 두 번째 발생 시기를 IV구간으로, 두 번째 황사 발생 후 시기를 V구간이라고 정의하였다.

Fig. 2는 부산지역 연산동에서 2018년 11월 27일부터 12월 1일까지 5일간 SO₂와 NO₂ 그리고 O₃농도의 시간별 변화를 나타낸 것이다. 먼저 SO₂를 보면, 연구기간

중 오전(1000 LST경)과 오후(1900 LST경) 두 번의 피크를 나타내는 전형적인 일변화를 보였다. 그러나 첫 번째와 두 번째 황사 발생기간이 오후시간대임에도 불구하고 고농도 SO₂를 보인 것이 특징이다. NO₂농도도 SO₂와 마찬가지로 농도의 편차는 있지만 오전과 오후에

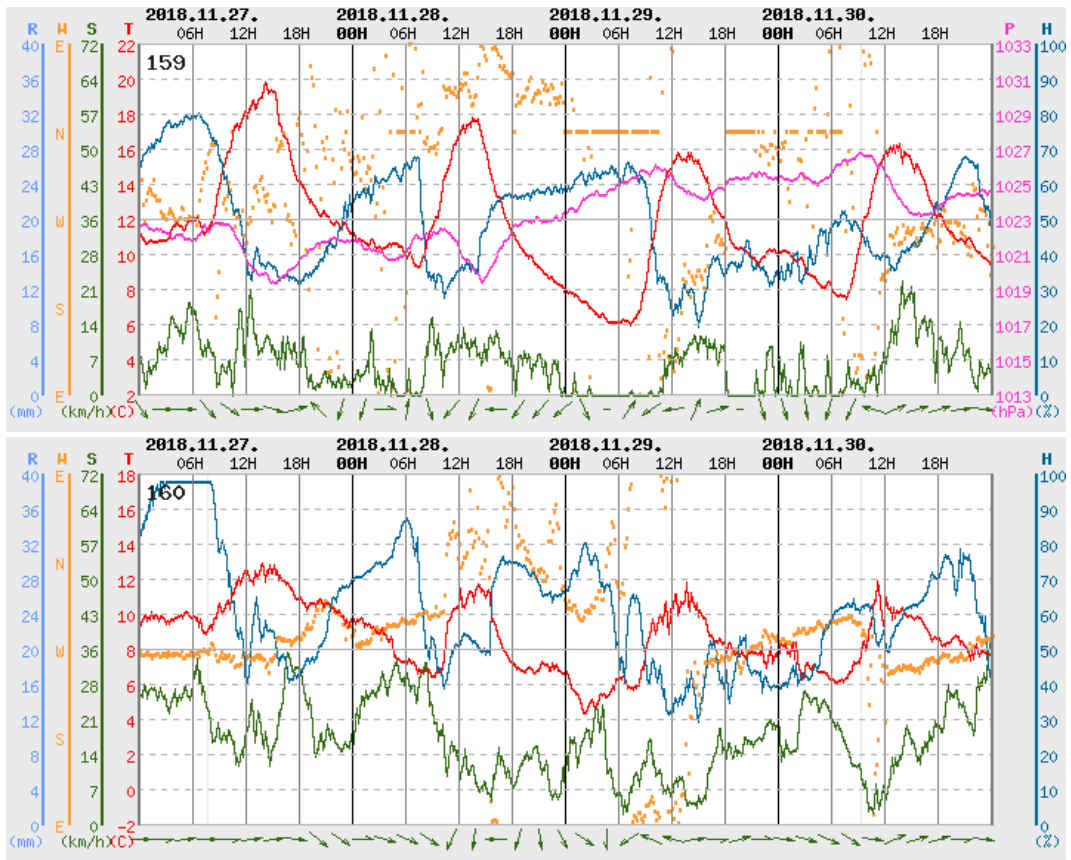


Fig. 3. Hourly variations of meteorological parameters from Nov. 27 to Nov. 30, 2018 at Busan Meteorological Administration (upper, 46 m) and Guducsan radar observatory (below, 518 m).

피크를 나타내는 전형적인 일변화를 보이고 있으나, 황사 발생과 관계없는 일변화 추세를 보여주고 있다. 그리고 O₃농도는 광화학반응이 가장 왕성할 시간인 1500 LST경에 최대농도를 나타내고 있으며, NO₂농도와 마찬가지로 황사 발생과 관계없는 일변화를 보여주고 있다. 따라서 SO₂만이 황사 발생과 어느 정도 관련성이 있는 것으로 나타났다.

3.2. 부산지역 2018년 28일과 11월 30일 황사의 기상 특성

Fig. 3은 2018년 11월 27일부터 11월 30일까지 부산 지방기상관측소(46 m)와 구덕산레이더관측소(518 m)에서 관측한 기상요소의 일변화를 나타낸 것이다. 먼저 지상인 부산지방기상관측소의 자료를 보면, 첫 번째 황

사 발생일인 11월 30일의 오전과 오후는 북동풍 계열의 바람이 불었으며, 풍속은 3 m/s 이하로 약했고 최고기온은 17.8°C (1320 LST), 최저기온은 7.9°C (2336 LST) 이었다. 두 번째 황사발생인 11월 30일의 경우, 새벽과 오전은 대부분 정온(calm) 상태이었고, 오후는 해풍으로 판단되는 서남서풍이 5 m/s 정도로 다소 강하게 불었다. 지상관측소 인근의 고산지역인 구덕산레이더관측소의 경우, 첫 번째 황사 발생일의 오전은 지상과 같이 북풍~북동풍이 나타났고 풍속은 지상과 달리 오전이 오후보다 강한 바람이 불었다. 두 번째 황사 발생의 풍향은 지상과 비슷하였고 풍속은 첫째 날과 같이 새벽에 강하고 정오 경에는 약한 바람이 불었다. 일조시간과 일사량은 각각 9 hr 내외와 12 MJ/m² 내외로 매우 높았으며, 운량은 SCD

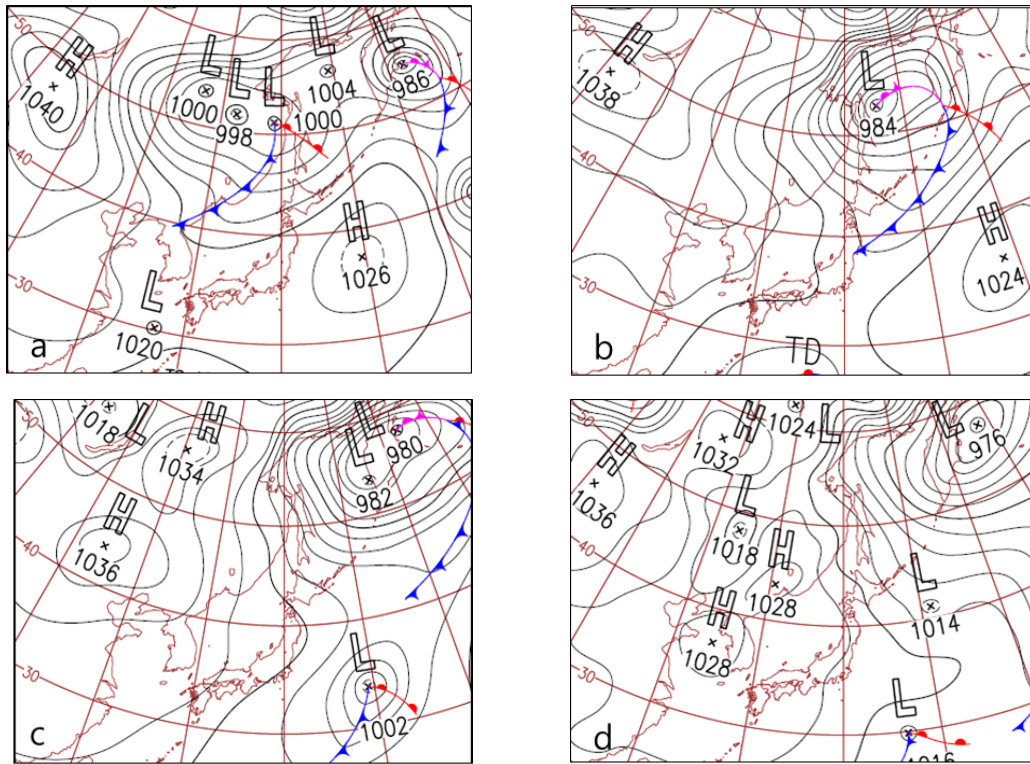


Fig. 4. Synoptic weather charts in Nov. 27(a), 28(b), 29(c) and 30(d) 0900 LST, 2018.

(Scatter)로 매우 작았다. 부산지역에 해륙풍이 발생할 경우 지상의 부산지방관측소와 고산지역인 구덕산레이더관측소의 오전과 오후의 풍속이 서로 반대가 되는 경향이 있다(Jeon, 2015). 즉 지상은 오전에 약풍, 오후에 강풍인데 비해 고산지역은 오전에 강풍, 오후에 약풍이다. 따라서 부산지역에 해륙풍이 발생하였다는 것은 중관풍이 약하고 날씨가 좋은 상태였다고 할 수 있다.

Fig. 4는 2018년 11월 27일부터 11월 30일까지 우리나라 부근의 지상일기도를 나타낸 것이다. 11월 27일 0900 LST 지상일기도를 보면, 몽골지역에 중심을 둔 1,040 hPa의 강력한 고기압이 러시아 캅차가 반도에서 동해 북부까지 뻗어있는 한랭전선을 동쪽으로 밀어내고 있다. 첫 번째 황사 발생일인 11월 28일의 0900 LST 지상일기도를 보면, 한랭전선은 일본 북동부로 빠져 나가고 몽골의 고기압이 확장하여 발해만을 지나 우리나라 남부지방까지 영향을 미치고 있다. 일기도에서 보듯이 부산지방은 동해에서 비교적 깨끗한 북동풍이 불어오면

서 황사 영향의 강도가 급속히 감소하였다. 11월 29일 0900 LST를 보면, 기압경도가 매우 약해서 Fig. 3에서 보듯이 부산지역은 새벽과 오전 및 야간에는 거의 바람이 없는 정온 상태였고, 오후에는 해풍이 약하게 불어 부산지역의 공기괴는 하루 종일 정체된 것으로 보인다. 두 번째 황사 발생일인 11월 30일 0900 LST를 보면, 1,028 hPa의 이동성 고기압이 우리나라 서해상에 위치하면서 부산지역은 전날과 같이 새벽과 오전에 정온 내지 약한 북북동풍이 불었고, 오후는 해풍계열인 서남서풍이 다소 강하게 불었다. 따라서 첫 번째 황사는 몽골에서 발생한 황사 기괴의 직접적인 영향으로 보이고 두 번째 황사는 공기괴의 성향과 황사발생 지속시간(11월 30일 0700 LST~12월 1일 0200 LST) 등으로 보아 직접적인 영향보다는 국지적인 요인과 고기압권에서 공기의 침강으로 상층에 남아 있는 황사가 지상으로 하강하여 발생한 것으로 판단된다. 이에 대해서는 향후 수치모델을 통해 검증할 필요가 있을 것으로 사료된다.

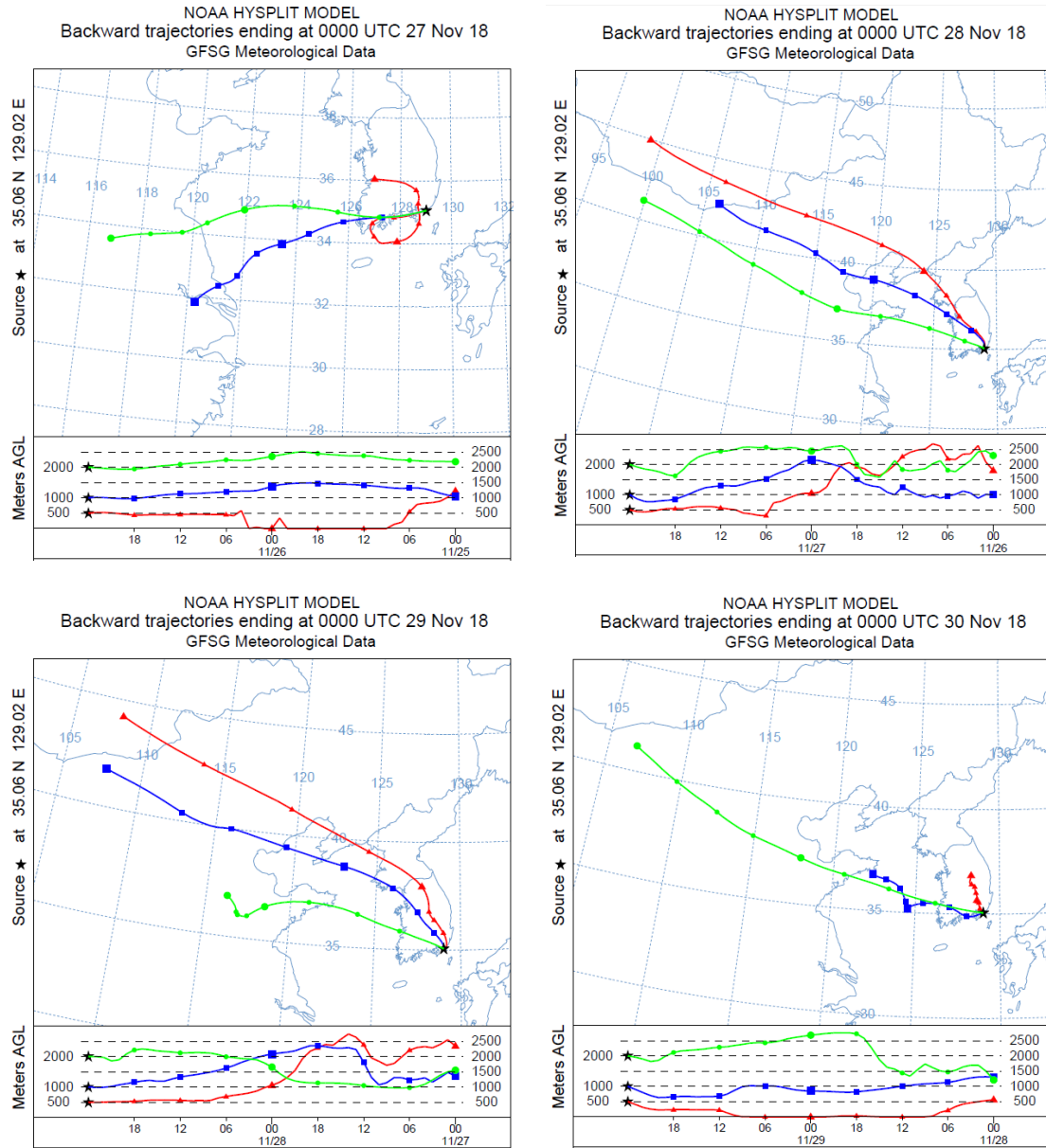


Fig. 5. Backward trajectories at Busan (36°02'N 129°02'E) from Nov. 27 to Nov. 30, 2018.

Fig. 5는 위에서 언급한 첫 번째 황사와 두 번째 황사의 발생 기원을 고찰하기 위해 부산지방기상관측소를 착지점으로 하는 2018년 11월 27일부터 11월 30일까지 backward trajectory를 나타낸 것이다. 첫 번째 황사 발생일 이전인 11월 27일 0900 LST를 보면, 저고도는 우

리나라 중부지방에서 남해안을 돌아 부산지역에 도달하였고, 중·상고도는 중국 서안공업지역을 출발하여 서해안을 거쳐 부산지역에 도착한 것으로 나타났다. 그리고 첫 번째 황사 발생일인 11월 28일 0900 LST를 보면, 세 고도 모두 몽골에서 중국 내륙과 발해만을 거쳐 부산

지역에 도달한 것으로 나타났다. 48시간 만에 아주 먼 거리를 아주 빠른 시간에 이동한 것을 알 수 있다. 특히 저고도는 몽골에서 발원하여 중국 내륙과 북한 그리고 중부지방을 거쳐 부산에 도달하였고, 2,000 m의 공기괴는 화중지방과 산둥반도를 거쳐 부산지역에 도달한 것으로 나타났다. 10월 29일 0900 LST를 보면, 하중고도는 전일과 같은 경로를 따라 기괴가 이동하였으나, 저고도는 중국 산둥반도와 서해를 거쳐 부산지역에 도달하였다. 두 번째 황사 발생일인 11월 30일 0900 LST를 보면, 저고도인 500 m 공기괴는 48시간 동안 부산지역 인근인 우리나라 중부 지방에서 이동해 왔으며, 거의 정체 상태인 것을 알 수 있다. 1,000 m 고도의 공기괴는 산둥 반도 동부 끝자락에서 서해와 호남지방을 지나 부산지역에 도달하였으며, 2,000 m 고도의 공기괴는 몽골 남쪽에서 발원한 것으로 나타났다. 따라서 부산지역에 영향을 미친 두 번째 황사는 중국이나 몽골에서 발원하여 부산지역에 직접 영향을 미친 것이 아니라, 부산 지역 인근이나 상공에 남아 있던 황사가 이류나 침강에 의한 것으로 판단된다. 이에 대해서는 향후 상세한 기상자료를 이용해 확인해 볼 필요가 있다고 판단된다.

3.3. 부산지역 2018년 28일과 11월 30일 황사의 PM_{2.5} 중 이온성분 특성

Fig. 6은 부산지역 연산동에서 2018년 11월 27일부터 12월 1일까지 PM_{2.5} 중의 양이온인 NH₄⁺과 Ca²⁺, 음이온인 SO₄²⁻과 NO₃⁻농도의 시간별 변화를 나타낸 것이다. 편의상 Fig. 1과 같이 첫 번째 황사 발생 이전 시기를 I구간으로, 첫 번째 황사 발생 시기를 II구간, 첫 번째 황사와 두 번째 황사 발생 사이 시기를 III구간, 두 번째 황사 발생 시기를 IV구간, 두 번째 황사 발생 후 시기를 V구간이라고 정의하였다.

먼저 I구간인 11월 28일 0900 LST 경에 NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺ 농도가 각각 11.6 µg/m³, 8.5 µg/m³, 6.0 µg/m³로 하루 중 최대농도를 나타내었으며, 황사가 도달한 1000 LST 이후부터 이들 농도는 급속히 하강하였다. 그러나 황사가 도달했다는 결정적인 단서인 Ca²⁺은 황사 발생 이후인 1000 LST부터 1700 LST까지 5.0 µg/m³ 내외의 고농도를 나타내었다. 특히 I구간인 11월 27일의 Ca²⁺는 하루 종일 1 µg/m³ 이하의 낮은 농도를 보였으나, 황사가 유입되면서 통상보다 5배 정도의 높은 농도를 나

타낸 것이다. 따라서 II구간은 토양기원의 Ca²⁺으로부터 황사발생 개시시각과 소멸시각을 정확하게 유추할 수 있는 좋은 단서가 된다고 생각한다. 또한 Fig. 1의 PM₁₀ 농도와 PM_{2.5}/PM₁₀ 비의 변화를 Ca²⁺와 연계하면 황사 도달시각을 유추하는데 좋은 근거를 얻을 수 있다.

그리고 I구간의 11월 27일과 11월 28일 아침의 NO₃⁻와 NH₄⁺농도는 매우 높게 나타났는데, 이는 아침 rush hour의 국지적인 요인으로 판단된다(Kim et al., 2017). 그리고 황사가 발생하기 바로 이전인 11월 28일 오전의 농도는 전날보다 낮게 나타났다. 그러나 동일한 아침 시간대의 SO₄²⁻는 11월 27일보다 11월 28일에 더 높은 농도를 나타내어 대조적인 모습을 보였다. 즉 첫 번째 황사가 유입되기 전에 SO₄²⁻농도의 급상승이 확인된 것이다. 따라서 이러한 높은 SO₄²⁻농도는 중국의 산업지대와 대도시로부터 인위적 기원의 오염물질이 황사가 도달하기 전에 장거리 수송되어 발생한 것으로 판단된다. 이러한 사례는 일본과 대만에서 보고된 바 있다(Uematsu et al., 2002; Zhang et al., 2006; Lin et al., 2007; Tsuji and Hoki, 2013). 따라서 I구간에 중국 동부 연안의 산업지역으로부터 인위적 기원의 오염물질과 국지적인 오염물질이 부산지역에 영향을 미친 것으로 보인다. 이는 Fig. 5의 11월 27일 0900 LST의 backward trajectory에서와 같이 저고도의 공기괴는 우리나라 남부 지방 공기괴의 영향을 받았고, 1,000 m와 2,000 m의 공기괴는 중국 동부 연안의 산업단지로부터의 공기괴가 부산지역에 영향을 미친 것을 확인할 수 있었다.

두 번째 황사 발생시기인 IV구간인 11월 30일의 경우, NO₃⁻는 통상의 아침 rush hour와 같이 높은 농도를 보였는데, 이는 11월 29일과 12월 1일과 같은 일변화 경향을 보였다. NH₄⁺는 11월 29일보다는 높았으나 다른 날에 비해 낮은 농도를 보였다. 그러나 SO₄²⁻는 황사 발생 시각(1100 LST)부터 종료시(2400 LST)까지 5 µg/m³ 내외의 높은 농도를 나타내었다. 특히 토양기원인 Ca²⁺는 SO₄²⁻와 마찬가지로 IV구간 기간 내내 높은 농도를 나타내었으나 II구간보다는 다소 낮은 농도를 보였다. V구간인 12월 1일의 NH₄⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻농도를 보면, 4개 이온 모두 동시에 1100 LST에 최대농도를 보이는 통상적인 형태의 양상을 나타내고 있다.

따라서 두 번째 황사 발생시기인 IV구간은 첫 번째 황사 발생 시기인 II구간과의 다르게 토양기원인 Ca²⁺과

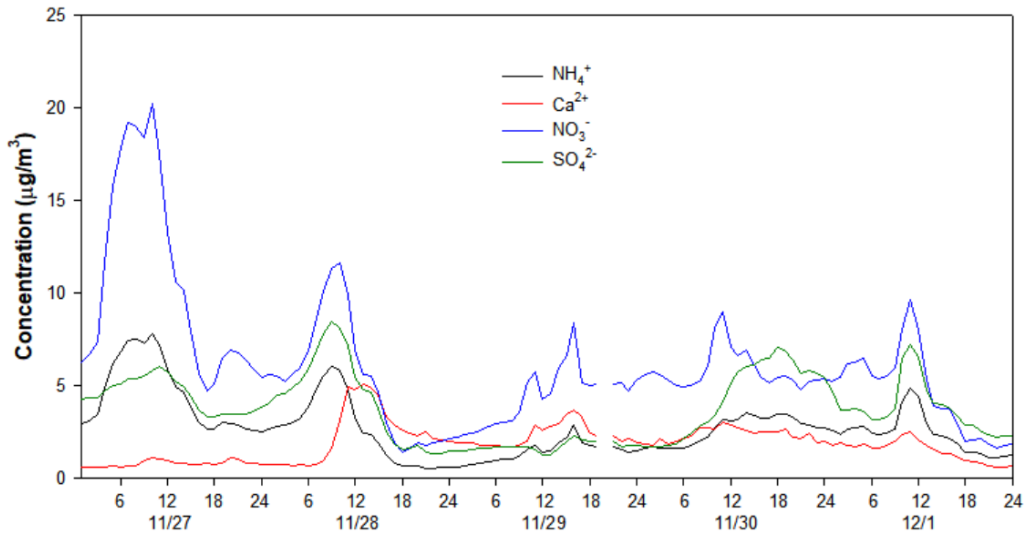


Fig. 6. Hourly variations of ionic component concentrations of NH₄⁺, Ca²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, from Nov. 27 to Nov. 30, 2018 at Yeonsandong in Busan.

장거리수송과 국지적 기원인인 SO₄²⁻ 동시에 높은 농도를 보이고 있다는 것이다. 따라서 두 번째 황사는 Fig. 5의 11월 30일 0900 LST의 backward trajectory에서 보듯이 저·중고도에서는 우리나라와 중국 산둥반도에서 발원하고 장시간 정체한 공기괴의 영향을 받고 있는 것으로 보아 국지적 기원의 오염물질과 첫 번째 황사 발생 시 상층에 잔존해 있던 공기괴가 침강하여 부산지역에 영향을 주었을 것으로 판단된다. 이는 Fig. 4의 11월 30일 0900 LST 지상일기도에서도 어느 정도 뒷받침하고 있다. 이에 대해서는 향후 수치모델을 통해 확인해 볼 가치가 있다고 판단한다.

따라서 2018년 28일과 30일 황사 발생시 I구간은 중국으로부터 인위적인 기원의 물질과 국지기원의 오염물질이 영향을 미쳤고, II구간은 토양기원물질의 영향을, III구간은 국지적인 오염물질이 주를 이루었으며, IV구간은 장거리 수송된 오염물질과 국내의 국지적인 오염물질이 혼재하였고, V구간은 국내의 국지적인 오염물질만이 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 결론

부산 지역에서 2018년 11월 28과 11월 30일에 발생한 황사의 기상요소 변화와 초미세먼지 (PM_{2.5}) 중의 이

온성분을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 부산지역에서 1960년부터 2019년까지 60년간 10년마다 계절별 황사발생일수를 조사한 결과, 봄철이 81.7%, 겨울철이 12.2%, 여름철은 전혀 발생하지 않았고 가을철이 6.1%로 2000년대 들어오면서 발생빈도가 증가하는 추세를 나타내었다.

2) 부산지역 2018년 11월 27일부터 12월 1일까지 5일간 PM₁₀농도는 11월 28일 1400 LST에 황사의 영향으로 215 µg/m³로 첫 번째 피크를 보였고, 11월 30일 1200 LST에 194 µg/m³로 두 번째 피크를 나타내었다. PM_{2.5}농도는 11월 28일 0800 LST부터 1500 LST까지 50 µg/m³이상의 고농도를 나타내었고, 두 번째 황사가 발생한 11월 30일 1200 LST에 60 µg/m³를 나타내었다. PM_{2.5}/PM₁₀비는 첫 번째 황사가 유입되면서 11월 28일 0800 LST에 0.79에서 1400 LST의 0.24로 급격히 하락하였다.

3) 부산지역의 AWS 관측자료, 지상일기도, backward trajectory를 분석한 결과, 2018년 11월 28일의 첫 번째 황사는 몽골에서 중국 내륙과 발해만을 거쳐 비교적 빠른 속도로 부산지역에 도달한 것으로 나타났고, 11월 30일의 두 번째 황사는 부산 지역 인근이나 상공에 잔존해 있던 황사가 이류나 침강에 의해 부산 지역에 영향을

미친 것으로 판단된다.

4) 첫 번째 황사 발생 이전(I 구간)인 11월 28일 0900 LST 경에 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 농도가 각각 $11.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $8.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $6.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 하루 중 최대농도를 나타내었고, 황사가 도달한 1000 LST 이후(II구간)부터 이들 농도는 급속히 하강하였다. 그러나 Ca^{2+} 은 황사가 유입되면서 1000 LST부터 1700 LST까지 통상의 5배 정도인 $5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외의 고농도를 나타내었다.

5) 첫 번째 황사 발생 이전(I 구간)인 11월 28일 아침의 NO_3^- 와 NH_4^+ 농도는 11월 27일에 비해 낮는데 비해, SO_4^{2-} 는 11월 27일보다 11월 28일에 더 높은 농도를 나타내었다. 이는 황사가 유입되기 전에 SO_4^{2-} 농도의 급상승이 확인된 것으로 중국의 산업지대와 대도시로부터 인위적 기원의 오염물질이 황사가 도달하기 전에 장거리 수송된 것으로 판단된다.

6) 두 번째 황사 발생 시기(IV 구간)인 11월 30일의 경우, SO_4^{2-} 는 황사 발생 시각(1100 LST)부터 종료시(2400 LST)까지 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외의 높은 농도를 나타내었고, 토양기원인 Ca^{2+} 도 SO_4^{2-} 와 마찬가지로 높은 농도를 나타내었다. 두 번째 황사는 국지적 기원의 오염물질과 첫 번째 황사 발생시 상층에 잔존해 있던 공기과가 침강하여 부산지역에 영향을 주었을 것으로 사료된다.

7) 이러한 부산지역 가을철에 발생한 황사 사례의 기상 특성과 초미세먼지 중의 이온성분에 대한 체계적인 평가는 향후 부산지역 황사 발생 시 미세먼지의 효율적 관리에 통찰력을 제공할 것으로 기대된다. 향후 부산지역에서 기상조건에 따른 화학적 반응을 통한 초미세먼지 중 기체상과 액체상에 상변화뿐만 아니라 각 반응에 대한 메커니즘, 습도에 따른 초미세먼지 내 수분과 조해성으로 인한 이온성 물질의 변화 등 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

REFERENCES

- Draxler, R. R., Rolph, G. D., 2013, HYSPLIT (hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory) model access via NOAA ARL READY Website (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php).
- Jeon, B. I., 2012, Characteristics of wintertime Asian dust occurrence at Busan, Kor. Environ. Impact Assess., 21, 581-591.
- Jeon, B. I., 2015, Meteorological relations and characteristics of fine particles at Guducksan in Busan, Inter. Kor. Environ. Sci., 24, 883-892.
- Kim, K. J., Ahn, M. J., Kim, S. P., Im, Y. S., Seol, K. S., Rho, S. G., Kim, Y. H., Yoo, S. S., Eo, S. M., Jung, K., 2017, A Study on the statistical analysis of ionic substances in $\text{PM}_{2.5}$ in Seoul, Korea, Report S.I.H.E., 53, 186-196.
- Lin, C. Y., Wang, Z., Chen, W. N., Chang, S. Y., Chou, C. C., Sugimoto, K. N., Zhao, X., 2007, Long-range transport of Asian dust and air pollutants to Taiwan: observed evidence and model simulation, Atmos. Chem. Phys., 7, 423-434.
- Monn, C., Carabias, V., Junker, M., Waeber, R., Karrer, M., Wanner, H. U., 1997, Small-scale spatial variability of particulate matter <10 μm (PM_{10}) and nitrogen dioxide, Atmos. Environ., 31, 2243-2247.
- Takami, A., Imai, T., Shimizu, A., Matsui, I., Sugimoto, N., Hatakeyama, S., 2006, Transport of anthropogenic and dust aerosol observed at Cape Hedo, Okinawa, Aerosol Res., 21, 341-347.
- Tsuji, A., Hoki, T., 2013, Detailed analysis of transboundary transport of kosa and anthropogenic substances by size-segregated and highly time-resolved observation of ionic components and inorganic elements in ambient aerosols, Jpn. Soc. Atmos. Environ., 48, 82-91.
- Uematsu, M., Yoshikawa, A., Muraki, H., Arao, K., Uno, I., 2002, Transport of mineral and anthropogenic aerosols during a kosa event over east Asia, Geophys. Res., 107, D7, 4059.
- Whitby, K. T., Sverdrup, G. M., 1980, California aerosols: their physical and chemical characteristics, Adv. Environ. Sci. Technol., 8, 477-524.
- Zhang, D., Iwasaka, Y., Matsuki, A., Ueno, K., Matsuzakaki, T., 2006, Coarse and accumulation mode particles associated with Asian dust in southwestern Japan, Atmos. Environ., 40, 1205-1215.

• Professor. Byung-II Jeon
Department of Air Traffic & Operation Management, Silla University
bijeon@silla.ac.kr