

ORIGINAL ARTICLE

여름철 북태평양고기압 하에서 사쿠라지마 화산 분출(2018년 7월 16일)이 부산지역 초미세먼지 농도에 미치는 영향

전병일*

신라대학교 항공교통관리학과

Effect of Sakurajima Volcanic Eruption (July 16, 2018) on PM_{2.5} Concentration in Busan under Summertime North Pacific High Pressure Condition

Byung-Il Jeon*

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

Abstract

This research investigated the effect of the eruption of Japan Sakurajima volcano on the concentration of ultrafine particle when the north Pacific high pressure exists in the Busan in summer. As a result of analyzing the forward trajectory using the HYSPLIT model, the air parcel from Sakurajima volcano passed through the sea in front of Busan at 1500 LST on July 17, 24 hours after the volcanic eruption. As a result of analyzing the PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in the Busan for two days from July 16 to 17, 2018, the Sakurajima eruption in Japan, it can be seen that there was a high increase in PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations compared to the previous day. As a result of analyzing the backward trajectory, the air mass that reached Busan at 1300 LST on July 17, 2018 has moved near the Sakurajima volcano at 1,500 m, 2,000 m, and 3,000 m. The concentration of SO₄²⁻ in PM_{2.5}, the concentration of all three stations in Busan showed a sharp increase from 1000 LST on July 17th. Looking at the NH₄⁺ concentration in PM_{2.5}, it shows a very similar variation trend to SO₄²⁻, and the correlation coefficient between the two components is 0.96 for Jangrimdong and Yeonsandong, and 0.85 for Busan New Port. Looking at the NO₃⁻ concentration in PM_{2.5}, the same high concentrations as SO₄²⁻ and NH₄⁺ were not observed in the afternoon of July 17th.

Key words : Sakurajima volcano, North Pacific high pressure, Ultrafine particle

1. 서론

화산분화로 대기 중으로 방출되는 에어로졸은 대기환경을 악화시켜 사람의 건강에 영향을 미친다(Ishimine, 2015). 화산은 잘 알려진 자연오염원으로서, 거대한 화산 분출은 화산재와 화산가스를 대류권 상부 또는 성층

권으로 진입 시켜 항공기 운항 장애와 취소 그리고 경제적 피해를 야기한다(Langmann et al., 2012). 화산가스는 화산마다 다르지만, 수증기(H₂O), 이산화탄소(CO₂), 이산화황(SO₂), 황화수소(H₂S) 등을 배출한다(von Glasow et al., 2009). 이중 SO₂는 인체에 유해한 대기 오염물질로서 대기 중에서 2차 상(phase) 전환을 통해

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.

황산염(sulfate)으로 변환되며 초미세먼지의 주요 성분 중 하나로 대기오염 및 기후변화에 기여한다(Sakamoto and Kinoshita, 2015).

부산지역을 포함한 한반도의 남부지역은 지리적 특성으로 환태평양화산대에 인접하여 백두산과 일본 화산들의 분화에 의한 피해에 민감하지 않을 수 없다(Lee et al., 2017). 특히 최근 백두산은 지진활동의 급증, 화산체 내의 암석 붕괴, 화산가스에 의한 수목의 고사 발생, GPS 관측을 통한 산 정상부의 팽창, 지진파 분석을 통한 마그마방울 분석한 결과 대규모 분화 가능성이 높은 것으로 알려졌다(Lee and Yun, 2011). Lee and Yun(2011)은 평균화한 바람장을 적용하여 백두산 화산 분출물의 확산 예측 수치실험을 실시하여 백두산의 폭발적 분화가 한반도에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서 가능한 짧은 시간대의 평균 기상장 자료의 이용이 매우 중요하다고 하였다. Lee et al.(2012)은 대기역학모형과 입자확산모형을 결합하여 다양한 백두산 분화 조건에서 화산재의 이동과 침적량 분포 특성을 고찰하였다. Lee et al.(2017)은 오일러 기반의 FALL3D 모형을 이용하여 백두산과 일본의 아소산이 분화하는 경우에 대한 확산 시뮬레이션을 수행하였으며, 이 결과를 이용하여 국내 지역별 대기 중 화산재 농도 및 지상 퇴적물량에 대한 확률적인 공간분포를 구축하였다. 그리고 Lee and Lee(2014)은 2014년 9월 17일 대규모 분화로 인해 전 세계적으로 주목을 집중하였던 일본 온타케 화산의 화산재 확산 범위를 예측하고 그 결과를 검증한 바 있다. Kim et al.(2014)은 2013년 8월 18일 사쿠라지마 분화 당시의 국내의 지자기 관측 자료와 일본 지자기 관측 자료를 이용하여 화산 분화와 지자기장 변동성과의 관계를 확인한 바 있다.

부산지역은 국내 오염원 및 중국으로부터의 인위적 오염 외에 일본 지역의 활화산으로부터 자연 기원 오염물질의 영향을 받을 수 있는 지리적 조건을 가지고 있다. 특히 화산에서 배출된 입자상 황산염은 대기 중 체류시간이 길고 먼 지역까지 이류하여 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 부산지역에서 여름철 북태평양고기압이 존재하는 조건에서 남남동쪽으로 430 km 떨어진 일본 사쿠라지마 화산이 분화하였을 때 수송된 입자상 황산염이 부산 지역의 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 고찰하였다. 이 연구는 부산지역 여름철 고농도 초미세

먼지 발생을 인위적인 원인뿐 만 아니라 자연적인 원인에 의해 발생할 가능성이 있다는 것을 보여주는 사례이고 향후 부산지역 고농도 초미세먼지를 이해하는 데 도움을 줄 것이라고 본다.

2. 재료 및 연구방법

본 연구에서 사용된 자료는 크게 기상자료와 대기질 자료로 나눌 수 있다. 기상자료는 부산지방기상청에서 측정된 일기상통계표와 AWS (Automatic Weather Station) 측정 그래프 그리고 일본 기상청에서 발행한 인쇄 지상일기도를 이용하였다. 그리고 화산분출 시의 공기괴를 추적하기 위해 미국의 해양기상청(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 backward trajectory와 forward 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°06'N, 129°02'E)로 하였고, 궤적의 모사 시간을 48시간(6시간 간격)으로 하고 공기덩어리의 고도는 공기괴의 상하층 고도의 이동을 보기 위해 1,500 m, 2,000 m, 3,000 m로 하였다. Forward trajectory는 본 연구의 사례 지점인 일본 사쿠라지마 화산을 출발점으로 하여 공기괴의 궤적 모사 시간은 72시간(6시간)으로 하고 공기괴의 이동 고도는 2,000 m으로 하였다.

대기질 자료는 사쿠라지마 화산 분출 시 부산지역의 미세먼지 특성을 고찰하기 위해 부산광역시 보건환경연구원에서 관리하는 시간별 PM₁₀, PM_{2.5} 농도, 초미세먼지(PM_{2.5}) 중의 SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻ 농도자료를 사용하였다. 2022년 현재 부산시의 대기오염측정망은 23개의 도시대기측정망과 4개의 도로변측정망으로 구성되어 있으며, 초미세먼지(PM_{2.5}) 중의 성분의 측정은 공업지역인 장림동, 주거지역의 연산동, 도로변 지역의 부산신항 등 3곳에서 운영되고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 일본 사쿠라지마 화산의 개요

일본 사쿠라지마 화산은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 부산에서 남남동 방향으로 약 430 km 떨어져 있으며

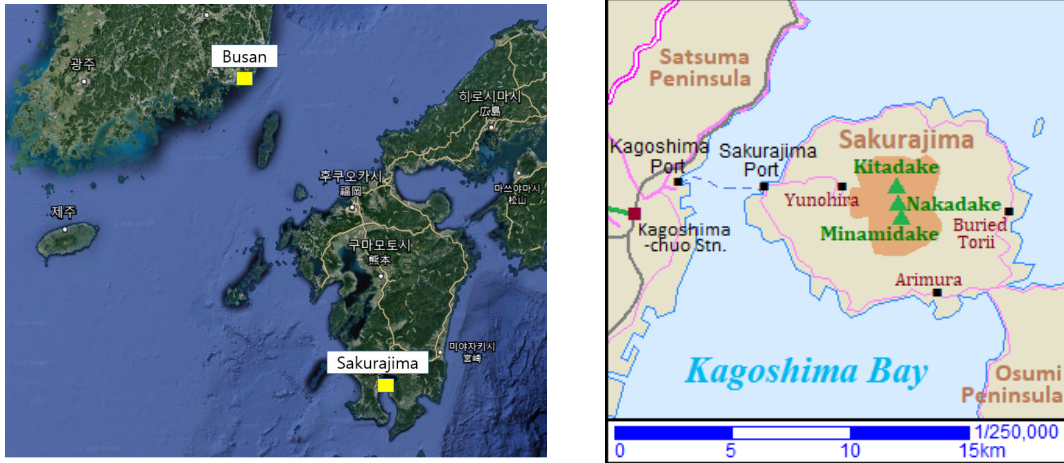


Fig. 1. Location of Busan and Sakurajima from Google earth.

1955년 이후 65년 이상 장기간에 걸쳐 분화활동을 계속하는 세계에서 손꼽히는 활화산이다(Tameguri and Iguchi, 2019). 이 화산은 아이라 칼데라(남북 17 km, 동서 23 km)의 남쪽 가장자리에 위치하며 안산암질의 성층 화산으로 키타다케(北岳, 1,117 m)와 마나마다케(南岳, 1,060 m) 두 봉우리가 있고 인구가 밀집한 가고시마 시가지와 근접해 있다(Kim et al., 2014). 사쿠라지마는 화산분화지수(Volcanic Explosivity Index; VEI)가 4를 기록한 1914년의 대분화 이전은 가고시마만 내의 화산 섬이었지만, 분출된 용암에 의해 폭 400 m의 해협이 메워져 건너편의 오스미 반도(大隅半島)와 육지로 연결되었다. 26,000년 전에 사쿠라지마가 탄생한 후부터 약 5,000년 전까지 키타다케의 활동이 있었고, 그 후 화구의 위치가 남쪽으로 옮겨져 4,500년 전부터 마나미다케의 활동이 시작되어 지금까지 계속되고 있다. 1955년 이후 활발한 분화활동을 지속했던 마나미다케는 2,000년 대 들어와서 감소하고, 그 옆에 새롭게 만들어진 쇼와(昭和) 분화구의 활동이 2006년에 시작하여 2009년부터 분화활동이 활발해졌고 주변 대기에 큰 영향을 미치고 있다(Watanabe et al., 2015). 남동풍이 부는 여름철에 사쿠라지마 화산이 대규모로 분화할 경우, 우리나라의 남부지방이 화산재와 화산 가스의 영향을 받을 수 있는 가능성이 있다. 특히 우리나라 남부 대도시인 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시 등은 지리적으로

백두산보다 사쿠라지마 화산과 더불어 아소산, 운젠산 등의 일본 서부 지역의 화산들이 더 가깝게 위치하기 때문에 겨울철의 백두산 분화보다 일본 서부지역 화산들의 여름철 분화가 더 민감한 문제라고 할 수 있다.

3.2. 2018년 7월 16일 일본 사쿠라지마 화산의 분화

2018년 7월 16일 15시 38분 폭발적 분화로 인해 다량의 분연이 화구 위 4,600 m까지 상승하였고(Fig. 2a), 탄도를 그리며 비산한 큰 분석이 4부 능선(마나미다케 산정 화구 1,300 m부터 1,700 m)까지 도달하였다. 마나미다케 산정 화구 및 쇼와 화구로부터 약 2 km 범위에서 분화에 동반되어 비산하는 큰 분석 및 화쇄류가 관측되었고, 풍하측에서는 화산회뿐만 아니라 작은 분석(화산력)이 멀리까지 바람에 흩날려 내려갔다. 폭발적인 분화에 동반되는 큰 공진에 의해 창유리가 깨지는 등의 공포가 있었다. 7월 17일 현지에서 실시한 조사에 의하면 이산 화황의 방출량은 1일당 1,300~2,100 톤이었다. 7월 14일부터 산체가 약간 팽창(용기)한 것이 확인되었고 7월 16일 15시 38분에 발생한 폭발적 분화에 의해 산체가 수축(침강)하였다. 그 외 일부의 분화 시에도 분화 전에 약간 산체의 팽창(용기)과 분화 후에 약간 수축(침강)이 관측되었다. 그리고 Fig. 2b와 같이 도로면의 백선이 보이지 어려울 정도로 다량의 응회가 확인되었다(JMA, 2018).



Fig. 2. Eruption status of the crater of Mt. Sakurajima July 16 1538 LST, 2018 (left) and situation of tuff in Kagoshima city area (right).

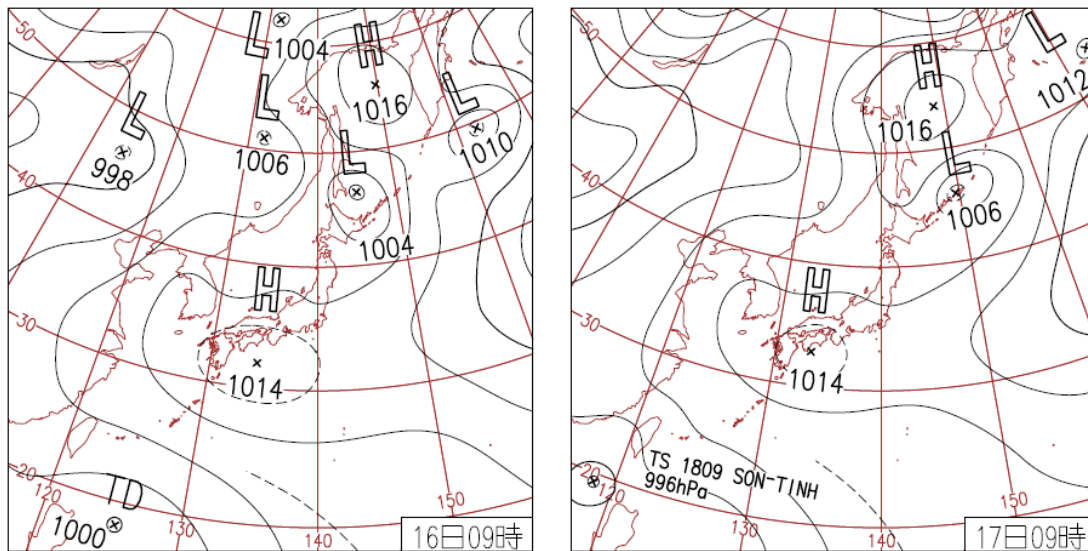


Fig. 3. Synoptic weather charts in July 16~17 0900 LST, 2018.

3.3. 일본 사쿠라지마 화산 분화 시의 부산지역의 기상

Fig. 3은 2018년 7월 16일과 7월 17일의 우리나라와 일본을 포함한 주변의 기압배치를 나타낸 지상일기도이다. 먼저 7월 16일 0900 LST의 일기도를 보면, 1,014 hPa의 고기압이 일본 혼슈 남동쪽에 자리 잡고 있다. 이 고기압은 고온다습한 북태평양고기압에서 떨어져 나온 것으로 일본 중남부지방과 우리나라 남부지방에 걸쳐 영향을 미치고 있다. 전형적인 우리나라 여름철의 남고북

저형의 기압배치를 보이고 있다. 하루 뒤인 7월 17일 0900 LST 일기도도 전날과 거의 유사한 기압배치를 하고 있다. 다만, 7월 16일 대만 남동쪽 해상에서 발생한 1,000 hPa의 열대성저기압이 7월 17일에 대만 남서쪽 해상으로 이동하여 996 hPa의 열대성폭풍으로 발달하여 일본의 1,014 hPa 고기압을 북쪽으로 약간 밀어올리고 있다. 그러나 전체적인 기압패턴을 변화시키지 못했다.

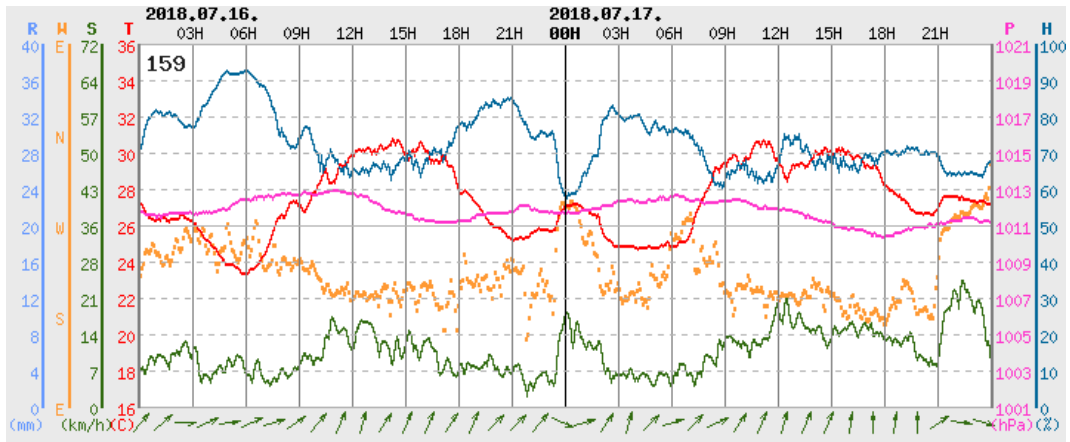


Fig. 4. Hourly variations of meteorological parameters from July 16 to July 17, 2018 in Busan Regional Meteorological Administration.

Fig. 4는 2018년 7월 16일부터 17일까지 부산지방기상청 AWS에서 관측한 기상요소의 일변화를 나타낸 것이다. 먼저 부산지방의 풍향을 보면, 7월 16일 새벽부터 서풍에서 서남서풍이 불었고 이후 계속해서 7월 17일 저녁까지 남서풍 내지 남남서풍이 유입되었다. 이는 앞서 일기도에서 보았듯이 북태평양고기압의 영향을 지속적으로 받았다고 할 수 있다. 7월 17일 자정과 07시에 일시적으로 서풍이 나타난 것은 내륙과 해양의 비열차에 의한 육풍이 발생한 것으로 보인다. 그러나 주간은 북태평양고기압에 의한 기압계 바람과 해풍의 결합으로 남풍계열이 더욱 강화되었고 풍속도 7월 16일과 7월 17일의 12시경에 5 m/s 정도로 다소 강한 바람이 불었다. 따라서 본 사례 기간 중 부산지역은 여름철 북태평양고기압 하에서 지속적으로 남풍계열의 바람이 유입되었다고 할 수 있다. 기온본포를 보면, 7월 16일의 경우, 최저기온이 0539 LST에 23.4°C이었고 일출 후 기온이 급격히 상승하여 12시부터 16시까지 30°C이상의 고온을 나타내었고 최고기온은 1410 LST에 30.8°C이었다. 일몰 후 기온은 급격히 하강하였고 7월 17일 자정부근에 일시적으로 27°C까지 상승하였는데, 이는 육풍(서북서풍)의 영향으로 보인다. 이후 남남서풍이 유입되면서 새벽에 25°C를 보였고 최저기온은 0358 LST에 24.7°C이었다. 일출 후 급격히 기온이 상승하여 최고기온은 1108 LST에 30.8°C이었다. 12시 이후 일시적으로 기온이 하강하였다가

다시 상승하여 16시 30분까지 30°C를 유지하고 있다. 부산지역의 여름철 기온 변화의 특성상 기압계의 바람이 없는 해풍만이 있는 주간의 경우는 11시경에 최고기온이 나타나고 이후 해풍이 유입되면서 지속적으로 기온이 하강하는 패턴을 보여준다. 그러나 온난다습한 북태평양고기압의 기압계 바람이 있을 경우, 11시경에 최고기온이 나타나고 이후에도 지속적으로 높은 기온이 유지되는 경향을 보인다. 상대습도의 변화를 보면, 7월 16일과 7월 17일의 새벽과 야간에 기온의 하강으로 80% 이상의 높은 습도를 나타내고 있다. 기온이 올라가는 주간에도 60% 이상의 습도를 보여주고 있다. 7월 17일 자정 경에도 일시적으로 58%의 낮은 습도를 보여준 것은 앞에서 언급한 육풍의 영향으로 보인다. 기압의 변화를 보면, 오전에 최대, 오후에 최저인 전형적인 기압의 일변화 경향을 보이고 일교차는 2 hPa로 매우 작은 값을 나타내어 기압계의 변화가 없음을 나타내고 있다. 따라서 7월 16일과 17일 부산지역은 여름철 북태평양고기압의 영향을 받고 있다는 것을 바람, 기온, 상대습도 그리고 기압의 분포로부터 확실하게 알 수 있었다.

Fig. 5(좌)는 일본 사쿠라지마 화산 (31°59'N 130°6'E)으로부터 분출된 물질의 이동방향을 추적하기 위해 NOAA에서 제공하는 HYSPLIT 모델을 이용하여 forward trajectory 분석을 한 것이다. 공기괴의 출발지점은 일본 사쿠라지마 화산이며 출발시각은 2018년 7월

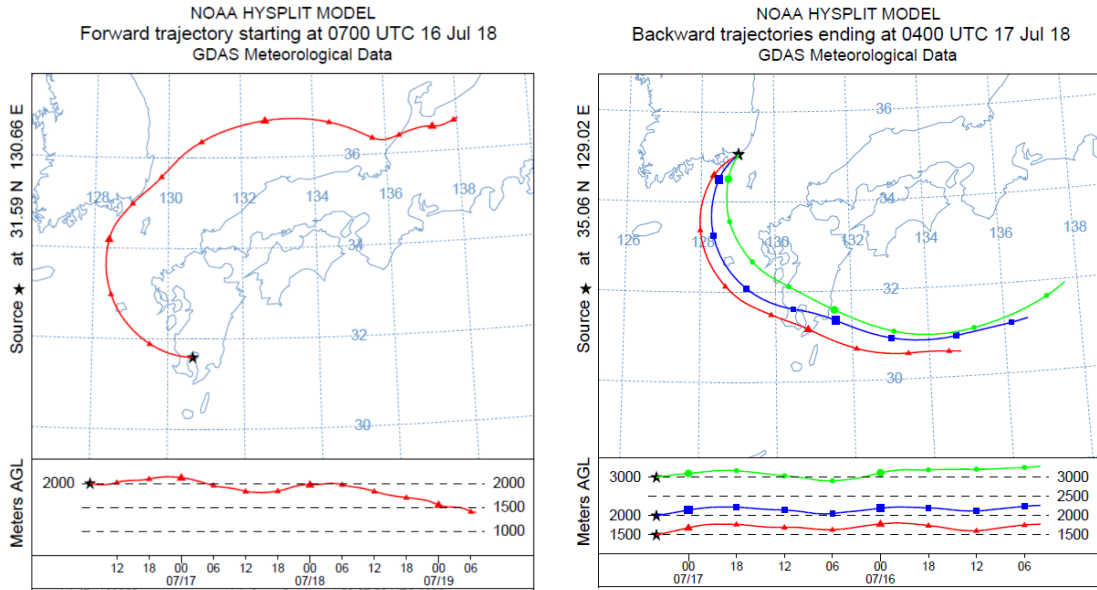


Fig. 5. Forward trajectory from Sakurajima (31°59'N 130°66'E) at July 16 07Z, 2018, and backward trajectory from Busan (36°02'N 129°02'E) at July 17 04Z, 2018.

16일 1600 LST로 하였고 공기괴의 고도는 2,000 m이며, 72시간 동안 6시간 간격으로 하였다. 실제 분화시각은 7월 16일 15시 38분이지만 상층으로 분출하여 기류를 타고 이동하는 시간을 감안하여 공기괴의 출발시각을 16시로 하였다. 전방궤적선을 보면, 분출 후 북태평양고기압에서 불어오는 남서풍을 타고 12시간 후에 일본 고토(五島)시를 지나 18시간 후에는 우리나라 거제도 남쪽해상까지 도달하였고 24시간 후인 7월 17일 1500 LST에 부산 앞 해상을 통과하고 있다. 부산 지역을 통과한 기괴는 비교적 빠른 속도로 이동하여 동해를 지나 7월 20일 0600 LST에 일본 가나자와(金澤)시에 상륙하였다. 이와 같이 7월 16일 15시 38분에 분화한 일본 사쿠라지마 화산의 분출물은 분화 후 하루 만에 우리나라 부산지역에 도달한 것이다. Fig. 5(우)는 우리나라 부산지역을 착지점으로 하는 2018년 7월 17일 1300 LST의 backward trajectory를 나타낸 것이다. 공기괴의 착지점은 부산지방기상관측소(35°06'N, 129°02'E)로 하였고, 궤적의 모사 시간을 48시간(6시간 간격)으로 하고 공기괴의 고도는 상·하층의 이동상황을 고찰하기 위해 1,500 m, 2,000 m, 3,000 m로 하였다. 세고도 모두 일정한 높

이를 유지한 채 이동하였다. 전방궤적선에서 보았듯이 2,000 m 고도의 공기괴는 7월 16일 1500 LST 경의 사쿠라지마 화산 지점과 거의 일치하였고, 3,000 m 공기괴는 사쿠라지마 화산의 북쪽에서 빠른 속도로 도달하였고, 1,500 m 공기괴는 사쿠라지마 화산의 남쪽에서 비교적 느린 속도로 이동한 것을 알 수 있다. 따라서 2018년 7월 17일 1300 LST에 부산에 도달한 공기괴를 역추적하니 일본 사쿠라지마 화산 근처로부터 이동된 것을 확실하게 알 수 있었다.

3.4. 일본 사쿠라지마 화산 분화과 부산지역의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도

Fig. 6은 일본 사쿠라지마 화산 분출 시인 2018년 7월 16일부터 17일까지 2일간 부산지역에서 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 나타낸 것이다. 부산지역에서 지역용도별로 상업지역의 광복동, 공업지역의 장림동, 주거지역의 연산동 그리고 녹지지역의 태종대 지점을 대표적으로 선정하였다. 장림동과 연산동은 부산 지역에서 PM_{2.5} 중의 이온성분을 측정하는 곳이기 때문에 포함시켰다. 먼저 PM₁₀ 농도를 보면, 사쿠라지마 화산 분출물이 부산지역에 도달한 시각으로 판단되는 7월 17일 오후에 PM₁₀ 농도가

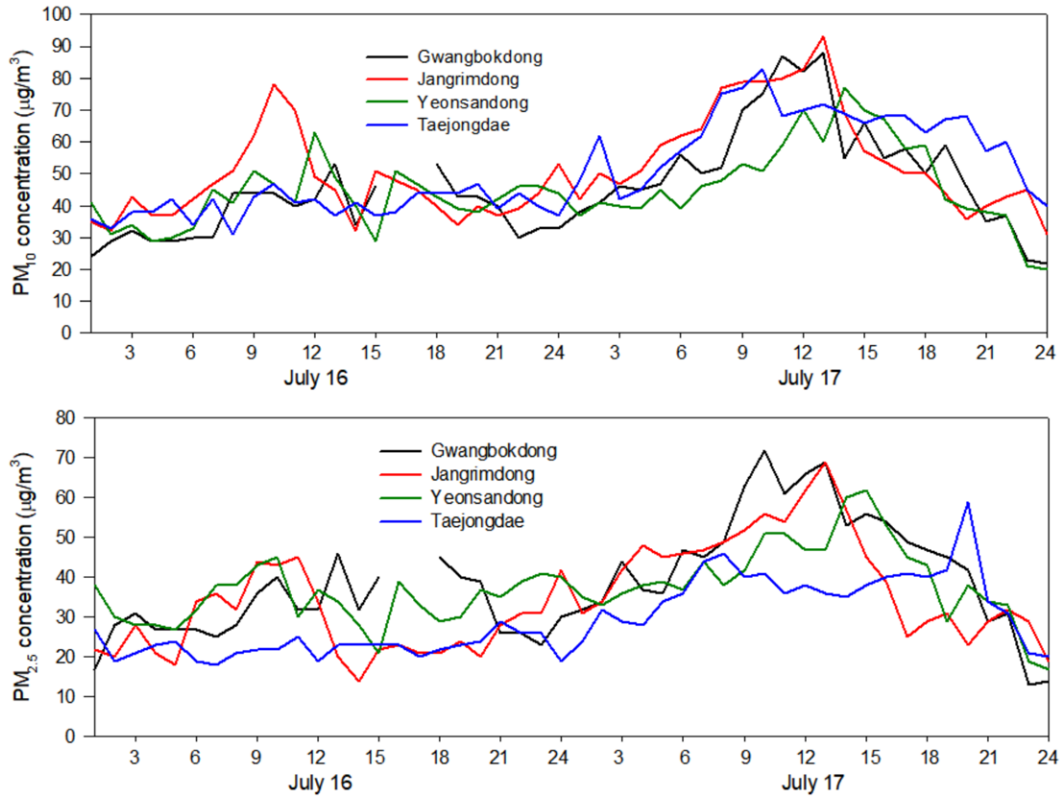


Fig. 6. Diurnal variation of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations from July 16 to July 17, 2018 at Gwangbokdong, Jangrimdong, Yeonsandong and Taejongdae in Busan.

전날의 농도에 비해 높은 상승이 있었다는 것을 알 수 있다. 7월 16일의 농도는 공업지역인 장림동에서 1000 LST에 78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대농도를 보였고, 연산동에서 1200 LST에 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 광복동에서 1300 LST에 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 태종대에서 1000 LST에 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일최대농도를 나타내었다. 공업지역인 장림동에서 탁월하게 높은 농도를 보인 것을 알 수 있다. 7월 17일의 최대농도는 장림동에서 1300 LST에 93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 광복동에서 1300 LST에 88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연산동에서 1400 LST에 77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 태종대에서 1000 LST에 83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 농도를 나타내었다. 7월 17일 오후에 네 지점 모두 전날에 비해 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과한 고농도를 기록한 시간이 월등히 늘어났다. 7월 17일의 기상조건이 7월 16일과 거의 비슷하다는 것에 비추어보면, 7월 17일 오후의 고농도 미세먼지 발생은 외부로부터 유입되었다는 것을 강하게 시사하고 있다.

다음으로 PM_{2.5} 농도를 보면, 7월 16일의 농도는 공업지역인 장림동에서 1100 LST에 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대농도를 나타내었고, 연산동에서 1000 LST에 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 광복동에서 1300 LST에 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 태종대에서 1100 LST에 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최대농도를 나타내었다. 7월 17일의 최대농도는 광복동에서 1000 LST에 72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 장림동에서 1300 LST에 69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연산동에서 1500 LST에 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 태종대에서 2000 LST에 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 7월 17일 오후의 PM_{2.5} 농도는 전날에 비해 상승폭이 훨씬 컸다. 광복동의 경우 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 농도가 0800 LST부터 1700 LST까지 장시간 나타났다. 특히 녹지대인 태종대에서 일시적으로 2000 LST에 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 나타나기도 하였다. PM₁₀과 마찬가지로 7월 17일 오후의 이례적인 높은 PM_{2.5} 농도는 앞에서 언급하였듯이 외부요인인 일본 시쿠라지마 화산이 분화하면서 분출된 물질이 부산

지역에 수송되어 높은 농도를 보인 것으로 판단된다.

3.5. 일본 사쿠라지마 화산 분화와 부산지역의 PM_{2.5} 중의 이온 성분

Fig. 7은 2018년 7월 16일부터 17일까지 2일간 부산 지역에서 사쿠라지마 화산 분출시 PM_{2.5} 중의 SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻ 농도를 나타낸 것이다. 부산지역은 PM_{2.5} 중의 이온 성분을 2018년 5월부터 공업지역인 장림동, 주거지역인 연산동, 도로변 지역인 부산신항에서 측정하고 있다. 그림에서 보듯이 사쿠라지마 화산 분출물이 부산지역에 도달되었다고 추정되는 7월 17일 1400 LST부터 1900 LST까지의 측정자료가 결측되어 매우 아쉽다. 추측컨대 일시적으로 농도가 급상승하니 이상치(outlier)라고 생각하고 검증과정에서 삭제된 것이 아닌가 추측된다.

먼저 PM_{2.5} 중의 SO₄²⁻ 농도는 7월 16일의 경우 세 지역 모두 완만하게 상승하는 추세를 나타내고 있다. 공업지역인 장림동이 가장 높은 농도인 10~15 µg/m³를 나타내었으며, 연산동과 부산신항은 5~10 µg/m³ 정도의 비슷한 농도를 보였다. 본 연구의 사례일인 7월 17일의 경우, 세 지역 모두 1000 LST부터 농도가 급격하게 증가하는 추세를 나타내었다. 장림동은 1300 LST에 33.4 µg/m³로 최대농도를 나타내었고, 연산동과 부산신항은 1500 LST와 1300 LST에 각각 23.1 µg/m³과 23.3 µg/m³를 나타내었다. 하지만 연산동과 부산신항은 이후 자료가 누락되었지만 계속 상승추세에 있었다는 것을 유추할 수 있다. 이러한 PM_{2.5} 중의 SO₄²⁻ 농도가 급격한 상승은 Fig. 6에서 본 바와 같이 PM_{2.5} 농도 상승에 SO₄²⁻가 큰 기여를 한 것으로 볼 수 있으며, 이러한 고농도 SO₄²⁻의 발생은 화산분출물 중의 SO₂ 가스가 수송 중에 SO₄²⁻로 변환된 것으로 추정된다(Sakamoto and Kinoshita, 2015).

PM_{2.5} 중의 NH₄⁺ 농도는 SO₄²⁻와 거의 동일한 패턴을 보여주고 있다. 7월 16일의 경우 세 지역 모두 오전의 primary peak가 장림동과 부산신항이 1000 LST, 연산동이 0900 LST에 나타났고, 오후의 secondary peak가 1600~1700 LST경에 나타난 것이 특징적이다. 7월 17일의 NH₄⁺ 농도는 SO₄²⁻와 같이 지속적으로 상승하여 장림동은 1300 LST에 10.1 µg/m³, 연산동은 1500 LST에 8.5 µg/m³, 부산신항은 1300 LST에 7.4 µg/m³로 최대

농도를 나타내었다. SO₄²⁻와 같이 이후 자료가 결측되어 매우 아쉽다. NH₄⁺농도는 SO₄²⁻와 매우 유사한 변화 경향을 보이며, 두 성분간의 상관계수가 장림동과 연산동은 0.96, 부산신항은 0.85로 나타났다. SO₄²⁻과 NH₄⁺농도는 농도변동이 같고 화학당량은 거의 1:1이기 때문에 주로 (NH₄)₂SO₄ 형태로 존재한다고 추측된다(Tsuji et al. 2015).

PM_{2.5} 중의 NO₃⁻농도는 장림동과 연산동에서 7월 16일에 뚜렷한 primary peak를 보여주고 있다. 장림동은 1000LST에 5.5 µg/m³, 연산동은 0900 LST에 4.9 µg/m³로 최대농도를 보였다. 부산신항은 뚜렷한 peak를 보이지 않았다. 7월 17일의 경우, 전날에 비해 약하지만 오전에 primary peak를 나타내었다. 하지만, 오후에 SO₄²⁻와 NH₄⁺ 농도와 같이 고농도를 보이지 않았다. 이는 화산분출물 중에 NO₃⁻농도를 높일 만한 기인물질이 없기 때문으로 보인다.

일본 사쿠라지마 화산 분화와 부산지역의 초미세먼지 중의 황산염농도의 급상승은 앞에서 언급한 대로 화산분출물 중의 SO₂ 가스가 수송 중에 SO₄²⁻로 변환된 것으로 추정된다. 즉, 화산가스 중에는 수증기와 CO₂, HCl, H₂S 등이 포함되어 있고, 특히 SO₂는 대량으로 포함되어 장시간 체류하여 그 검출이 용이하다. SO₂의 산화에 의한 SO₄²⁻의 생성속도는 기온, 기압, 자외선량과 수증기량에 의해 의존한다. 우리나라 부근의 7월과 8월은 고온다습하고 일사량이 높기 때문에 SO₂ → SO₄²⁻으로 변환이 촉진된다(Mori et al., 1999). 사쿠라지마 화산의 황산화물 배출량은 1,000~2,000 톤/일로 일본 전체의 인위적 기원 SO₂의 총배출량(약 100만 톤)의 40~70%에 달한다. 사쿠라지마 화산의 분화구가 비교적 높기 때문에 기상조건에 따라 상당히 광범위하게 SO₂ 고농도 오염을 일으킬 수 있다(Uno et al., 1997). 대기 중에 방출된 분연과 화산가스의 이류확산은 바람의 강도에 의존하고 바람이 강한 경우는 산악파에 붙어서 하강이 일어나지만, 바람이 약한 경우에 연류고도(煙流高度)는 거의 수평으로 이류한다. 본 연구의 사쿠라지마 화산이 분화한 2018년 7월 16일은 북태평양 고기압 조건 하에서 바람이 약했기 때문에 사쿠라지마으로부터 분출된 SO₂는 약한 남동풍에 의해 고도를 보존한 채로 큐슈 서쪽 해상을 지나 부산까지 수평으로 이류된 것으로 볼 수 있다(Yamamura et al. 2020). 따라서 본 연구의 7월 17일의 오후의 부산지역

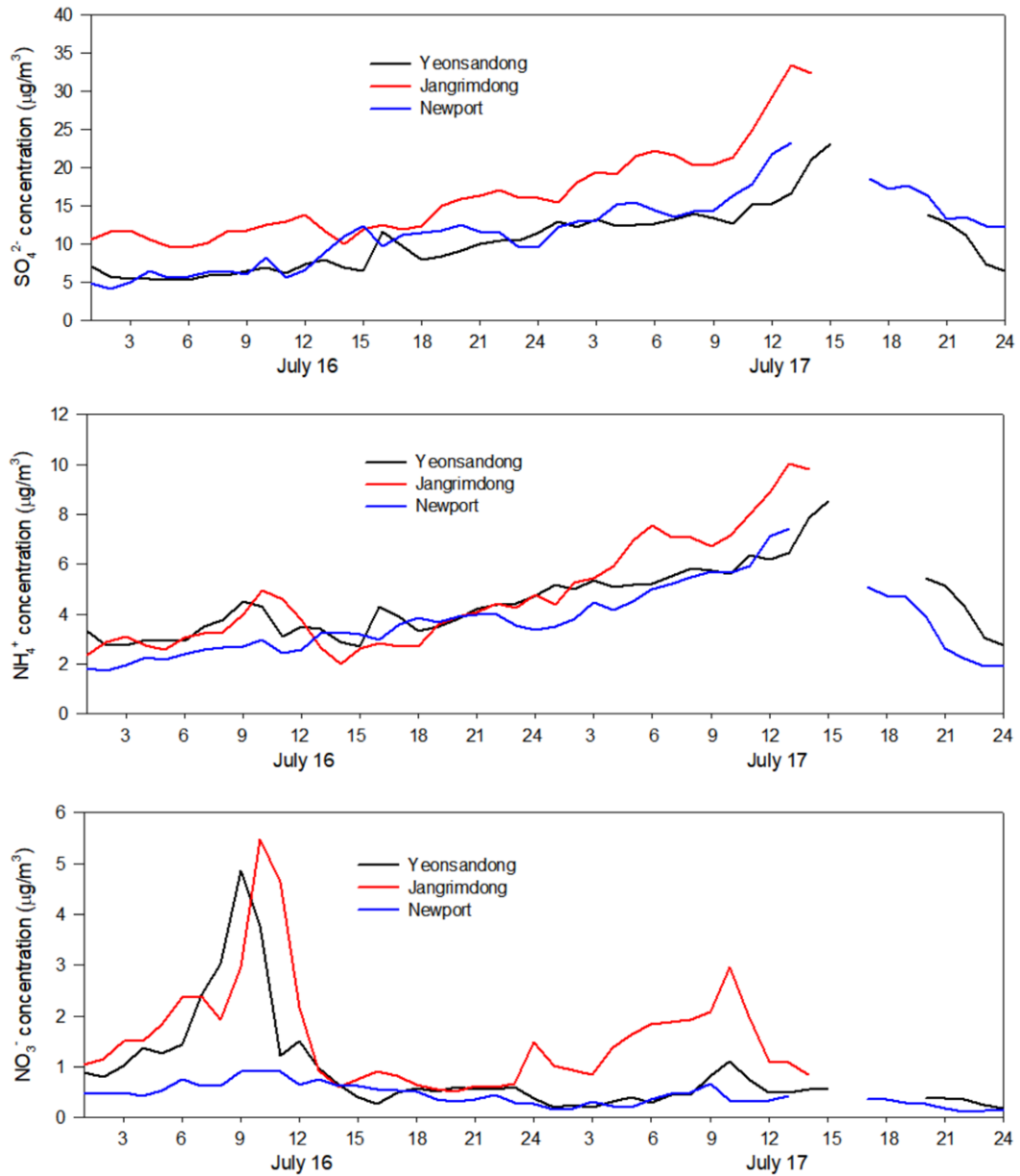


Fig. 7. Diurnal variation of SO_4^{2-} , NH_4^+ , and NO_3^- in $\text{PM}_{2.5}$ from July 16 to July 17, 2018 at Yeonsandong, Jangrimdong, and Newport in Busan.

황산염 고농도 원인은 국내요인 물질의 광화학반응에 의한 산화와 일본 사쿠라지마 분화에서 수송된 이산화황의 산화에 의한 것으로 판단된다. 어느 요인이 더 우세하게 작용한 것인지에 대해서는 좀 더 연구가 진행되어야 할

것으로 사료된다. Watanabe et al.(2015)은 2012년 7월 하순 일본 石川県 能登半島の 珠洲市에서 관측된 고농도 SO_4^{2-} 는 O_3 과 CO일산화탄소 농도가 동시에 증가하지 않았기 때문에 인위적 기원 오염물질의 영향일 가능성이

낮고, 후방유적선 해석의 결과로부터 사쿠라지마 분연의 영향으로 추정하였다. Nakagomi et al.(2015)은 일본 나가노시에서 2012년 7월 26일과 27일 그리고 7월 28일과 29일에 SO_4^{2-} 농도가 특이하게 높은 사례에 대해 후방유적선 분석을 통해서 그 요인을 검토한 결과, 사쿠라지마 등의 큐슈지방의 화산의 영향으로 보았고 중회귀식을 기초로 그 기여율이 50~60%이라고 하였다.

4. 결론

부산지역에서 여름철 북태평양고기압이 존재하는 조건에서 남남동쪽으로 430 km 떨어진 일본 사쿠라지마 화산이 분화하였을 때 수송된 입자상 황산염이 부산 지역의 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 체계적으로 고찰한 결과 다음과 결론을 얻었다.

1) HYSPLIT 모델을 이용하여 forward trajectory를 분석한 결과, 일본 사쿠라지마 화산을 출발지점으로 한 공기괴는 화산 분화 24시간 후인 7월 17일 1500 LST에 부산 앞 해상을 통과하였다. backward trajectory를 분석한 결과, 2018년 7월 17일 1300 LST에 부산에 도달한 공기괴는 1,500 m, 2,000 m, 3,000 m 세 고도 모두 일본 사쿠라지마 화산 근처에서 이루어 온 것을 확실하게 알 수 있었다.

2) 일본 사쿠라지마 화산 분출 시인 2018년 7월 16일부터 17일까지 2일간 부산지역에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도를 분석한 결과, 사쿠라지마 화산 분출물이 부산지역에 도달한 시각으로 판단되는 7월 17일 오후에 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도가 전날의 농도에 비해 상당히 높은 상승이 있었다는 것을 알 수 있었다.

3) 일본 사쿠라지마 화산 분출 시인 2018년 7월 16일부터 17일까지 2일간 부산지역에서 $PM_{2.5}$ 중의 SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- 농도를 분석한 결과, $PM_{2.5}$ 중의 SO_4^{2-} 농도는 부산지역 세 지점 모두 7월 17일 1000 LST부터 농도가 급격하게 증가하는 추세를 나타내었다. $PM_{2.5}$ 중의 NH_4^+ 농도는 SO_4^{2-} 와 매우 유사한 변화 경향을 보였으며, 두 성분간의 상관계수는 상당히 높았다. $PM_{2.5}$ 중의 NO_3^- 농도는 7월 17일 오후에 SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 농도와 같은 고농도를 보이지 않았다.

4) 이러한 북태평양고기압 하에서 부산지역의 여름철 고농도 초미세먼지 발생은 인위적인 원인뿐만 아니라 자

연적인 원인에 의해서도 발생할 가능성이 있다는 것을 보여주는 사례이며, 향후 부산지역 고농도 초미세먼지를 이해하는데 도움을 줄 것이라고 본다. 특히 본 연구는 이러한 기압패턴 하에서 일본의 화산 분화에 의해 분출된 자연기원의 오염물질이 우리나라에 영향을 미쳤다는 결과를 도출한 것으로, 향후 우리나라 남부지방의 고농도 초미세먼지 생성 원인 연구에 대한 통찰력을 제공할 것으로 기대한다.

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).
- Ishimine Y., 2015, The health hazard of volcanic ash and gases, *Eurozoru Kenkyu*, 30, 177-182.
- JMA, 2018, Sakurajima volcanic activity commentary, July 2018, 12.
- Kim, K. Y., Hwang, E. H., Lee, Y. K., Lee, C. W., 2014, Sakurajima volcano eruption detected by GOCI and geomagnetic variation analysis - A case study of the 18 Aug. 2013 eruption-, *Kor. Remote Sen.*, 30, 259-274.
- Langmann, B., Folch, A., Hensch, M., Volker, M., 2012, Volcanic ash over Europe during the eruption of Eyjafjallajökull on Iceland, April-May 2010, *Atmos. Environ.*, 48, 1-8.
- Lee, J. Y., Lee, S. S., Son, H. A., Hwang, S. T., Heo, D. Y., 2017, Probabilistic estimation of spatial distribution of volcanic ashes from Mt. Baekdu and Mt. Aso, *Kor. Wind Eng. Ins.*, 21, 113-120.
- Lee, S. H., Jang, E. S., Lee, H. M., 2012, A Case analysis of volcanic ash dispersion under various volcanic explosivity index of the Mt. Baegdu, *Kor. Ear. Sci. Soc.*, 33, 360-372.
- Lee, S. H., Yun, S. H., 2011, Impact of meteorological wind fields average on predicting volcanic tephra dispersion of Mt. Baekdu, *Kor. Ear. Sci. Soc.*, 32, 360-372.
- Lee, S. K., Lee, C. W., 2014, Predicting the hazard area of the volcanic ash caused by Mt. Ontake eruption, *Kor. Remote Sen.*, 30, 777-786.
- Mizuno, T., Tanaka, C., Fujimura, M., 1996, A Case study of particulate sulfur concentration over the Kanto plain

- effect of long distance transport of volcanic gas from Sakurajima-, *Jpn. Atmos. Environ.*, 31, 20-29.
- Mori, A., Uno, I., Wakamatsu, S., Murano, K., 1999, SO₂ concentration and aerosol compositions observed at Mt. Unzen dodake, *Jpn. Atmos. Environ.*, 34, 176-191.
- Nakagomi, K., Hanaoka, Y., Homma, D., Igarashi, A., Miyaji, T., Sasaki, K., Hosoi, Y., 2015, Source apportionment of sulfate in PM_{2.5} in Nagano city during the summer, *Jpn. Atmos. Environ.*, 50, 176-184.
- Sakamoto, M., Kinoshita, K., 2015, Effect of volcanic ejecta from Sakurajima on the atmospheric environment, *Bul. Kagoshima Pre. Mus.*, 34, 49-64.
- Tameguri, T., Iguchi, M., 2019, Characteristics of microearthquake swarms preceding eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, *Jpn. Volcanol. Geotherm. Res.*, 372, 4-33.
- Tsuji, A., Hioki, T., Saito, Y., 2015, Characteristic analysis based on temporal and spatial variations of ionic components and inorganic elements in relation to a PM_{2.5} pollution episode on February 25-26, 2014, *Kyoto Heal. & Environ. Report*, 60, 57-64.
- Uno, I., Wakamatsu, S., Ueda, H., Murano, K., Sakamaki, F., Kurita, H., Satsumabayashi, H., Horai, S., 1997, Behavior of secondary pollutants and volcanic SO₂ over Kyushu during a spring-time high pressure system, *Jpn. Atmos. Environ.*, 32, 404-424.
- von Glasow, R., Bobrowski, N., Kern, C., 2009, The effects of volcanic eruptions on atmospheric chemistry, *Chem. Geol.*, 263, 131-142.
- Watanabe, K., Yamazaki, N., Mizuochi, R., Iwamoto, Y., Matsuki, A., Sadanaga, Y., Bandow, H., Iwasaka, Y., 2015, High concentrations of sulfur dioxide and sulfate particles observed in Suzu city, the Noto peninsula in late July 2012: on the influence of the smoke of Sakurajima, *Tenki*, 43-50.
- Yamamura, Y., Niiya, S., Chikara, H., Nakagawa, S., Wang, Z., Uno, I., 2020, Contribution of volcanic SO₂ emission to high concentration PM_{2.5} under summertime Pacific high condition, *Jpn. Atmos. Environ.*, 55, 169-181.

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