

ORIGINAL ARTICLE

부산지역 2021년 2월 1일~2일 연속적인 2개의 한랭전선 통과 시 기상요소와 미세먼지 농도의 특성

전병일*

신라대학교 항공교통관리학과

Meteorological Parameters and Fine Particle Concentration during Two Successive Cold Fronts in Busan on 1~2 February 2021

Byung-Il Jeon*

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

Abstract

This study investigated the weather conditions, fine particle concentration, and ion components in PM_{2.5} when two cold fronts passed through Busan in succession on February 1 and 2, 2021. A analysis of the surface weather chart, AWS, and backward trajectory revealed that the first cold front passed through the Busan at 0900 LST on February 1, 2021, with the second cold front arriving at 0100 LST on February 2, 2021. According to the PM₁₀ concentration of the KMA, the timing of the cold front passage had a close relationship with the occurrence of the highest concentration of fine particles. The transport time of the cold front from Baengnyeongdo to Mt. Gudeok was approximately 11 hours. The PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Busan started to increase after the first cold front had passed, and the maximum concentration occurred two hours after the second cold front passed. The SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ concentration in PM_{2.5} started to increase from 1100 to 1200 LST on February 1, after the first cold front passed, and peaked at 0100 LST to 0300 LST on February 2. However, the highest Ca²⁺ concentration was recorded 2-3 hours after the second cold front had passed.

Key words : Cold front, PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations, Ion component

1. 서 론

한랭전선은 찬 공기와 따뜻한 공기 사이에서 기상요소의 급격한 변화가 일어나는 좁은 지역이다. 또한 한랭전선은 대기확산 조건의 변화를 일으키는 원인이 되고 대기오염 농도에 영향을 미친다(Feng and Wang, 2012). 한랭전선이 통과하는 좁은 지역에 차고 건조한 공기가 유입되기 때문에 호흡기질환, 근육의 수축 그리고 천식 등의 발작이 일어나기 쉽다(Murayama,

2009). 특히 어지럼증, 이명, 난청, 귀의 멍멍함을 동반하는 메니에르병(Meniere's disease)은 한랭전선 통과에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다(Watanabe et al., 1993). 한편, 한랭전선 부근에서 증가한 초미세먼지(PM_{2.5})는 호흡기질환을 야기하여 인체의 건강에 영향을 미친다(Shima et al., 2002).

Wang et al.(2000)은 한랭전선이 대기확산 상태에 큰 영향을 미치며, 최소농도는 한랭전선 통과 전에 나타나고 최대농도는 한랭전선 통과 후에 나타난다고 하였

Received 31 October, 2022; Revised 6 December, 2022;

Accepted 13 December, 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.

다. Zhang and Li(2011)는 한랭전선이 중국에서 가장 활발하게 활동하는 기상현상 중의 하나로서 한랭전선 통과 전·후의 기상요소의 차이와 한랭전선 전방에서의 연직순환구조는 오염물질의 축적 및 수송에 영향을 미친다고 하였다. Feng and Wang(2012)은 한랭전선이 통과하기 전 경계층에서 온도역전이 일어나며, 한랭전선이 통과하면서 기온역전층이 파괴되고 한랭전선 경계에서 연직방향으로 오염물질의 강한 수송이 발생한다고 하였다. Cheng et al.(2013)은 2011년 3월 31일부터 4월 3일까지 중국 북동부를 가로지르는 전형적인 한랭전선의 대기오염과정을 고찰하기 위해 광범위한 관측자료와 CMAQ과 HYSPLIT 모델을 사용하여 분석한 결과, 한랭전선이 통과하기 전에 고농도 오염이 나타났고 통과 후에 급속도로 농도가 하강하였다고 하였다. Yu et al.(2017)은 중국 항주에서 강도가 다른 한랭전선은 대기오염물질에 미치는 영향은 동일하지 않으며, 약한 한랭전선은 오염물질의 수송에 주요한 역할을 하고, 강한 한랭전선은 오염물질의 제거에 주요한 역할을 한다고 하였다. Yue et al.(2018)은 중국 우한에서 2013년부터 2016년까지 한랭전선과 강수의 영향을 받은 93개의 과정을 한랭전선 영향의 강도에 따라 5개의 유형으로 분리하여 PM_{2.5} 농도와와의 관계를 분석한 바 있다. Kang et al.(2019)은 2015년 1월 중국 양쯔강 삼각주에서 일련의 안정한 기상상태에서 한랭전선 통과와 PM_{2.5} 농도의 오염원과 형성과정을 조사하기 위해 WRF와 CMAQ를 이용하여 고찰하였다. Zhang et al.(2020)은 2015년 3월 7일부터 11일까지 중국 6개 지역에서 한랭전선이 북쪽에서 남쪽으로 이동하는 동안 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 대기 각층에서의 순환 형태, 대기경계층에서의 기상학적 요소의 연직구조에 초점을 맞추어 조사하였다. Wang et al.(2021)은 2019년 12월 10일과 11일 중국 중부 및 동부 지방에서 대규모 연무현상을 유발한 한랭전선을 분석하여, 한랭전선이 북쪽에서 남쪽으로 이동하는 동안 상류의 오염물질이 하류 지역에 미치는 영향과 중국 북부와 남부의 세 지점에서 초미세먼지 농도의 변화과정을 후방궤적선, 대기오염수송지수, 대기오염수송플럭스 분석을 통해 보여주었다. Jeon(2021)은 2020년 3월 19일 우리나라에 한랭전선 통과 시 기상상황과 미세먼지농도의 변화 그리고 초미세먼지 중의 성분 분석을 통해 한랭전선의 통과가 실제로 입자상물질 농도에 어떠한 영향을 미치는지를 정량적으로 고찰하였다.

따라서 본 연구에서는 한반도에 2021년 2월 1일과 2일에 연속적으로 발생한 두 개의 한랭전선이 통과할 때 부산지역의 미세먼지에 어떠한 영향을 미치는지를 체계적으로 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 사용한 기상자료는 부산지방기상청에서 측정된 일기상통계표와 AWS (Automatic Weather Station) 측정 그래프 그리고 일본 기상청에서 발행한 인쇄 지상일기도를 이용하였다. 그리고 한랭전선 통과 전과 후의 공기괴를 추적하기 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°06'N, 129°02'E)로 하였고, 궤적의 모사 시간을 48시간(6시간 간격)으로 하였으며, 공기덩어의 고도는 공기괴의 상·하층 고도의 이동을 보기 위해 500 m, 1,000 m, 1,500 m로 하였다.

대기질 자료는 한랭전선 통과 시 미세먼지 특성을 고찰하기 위해 부산광역시 보건환경연구원에서 관리하는 연산동, 장림동, 부산신항의 3곳에서 측정된 시간별 PM₁₀, PM_{2.5} 농도 자료를 사용하였다. 또한 한랭전선 통과 전·후의 초미세먼지(PM_{2.5}) 중의 SO₄²⁻, NO₃⁻, Ca²⁺, NH₄⁺, Na⁺, K⁺ 농도 자료를 사용하였다. 또한 한랭전선 통과 시 부산지역 뿐만 아니라 전국적인 미세먼지 발생 상황을 파악하기 위해 기상청에서 관리하는 황사측정망의 PM₁₀ 자료를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 부산지역 2021년 2월 1일과 2일의 한랭전선 통과 시의 기상 특성

Fig. 1은 2021년 1월 31일과 2월 1일 0900 LST의 일본기상청 발행 우리나라 주변의 지상일기도를 나타낸 것이다. 1월 31일 0900 LST의 일기도를 보면, 화북지방과 화중지방에 각각 1,012 hPa과 1,020 hPa의 저기압이 위치하고, 연해주와 동해상 그리고 일본 남쪽해상에 각각 1,032 hPa, 1,030 hPa 고기압이 자리하면

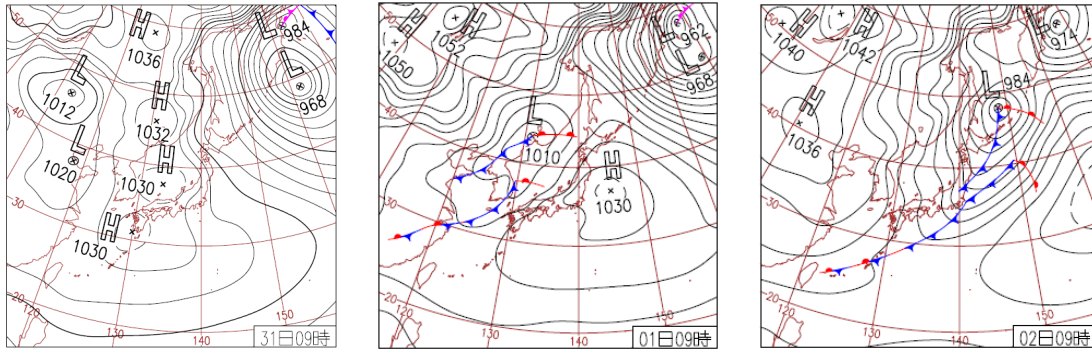


Fig. 1. Surface weather chart of 0900 LST, from Jan. 31 to Feb. 2, 2021.

서 우리나라는 고기압 연변부에 위치하면서 저기압의 통과를 앞두고 있는 상황이다. 2월 1일 0900 LST의 일기도를 보면, 중국 북부 및 몽골지역에 각각 1,050 hPa와 1,052 hPa의 강한 고기압이 위치하며 일본 혼슈 동쪽 태평양에 1,030 hPa 고기압이 자리 잡고 있다. 우리나라는 양쪽 두 고기압 사이에 두 개의 온대성 저기압에서 발달한 한랭전선이 우리나라 남부지방과 북부지방에 위치하고 있다. 아래쪽 한랭전선은 강원도 동쪽 해상에 중심을 둔 저기압에서 부산지역을 지나 동중국해역까지 발달해 있다. 위쪽 한랭전선은 연해주의 1,010 hPa의 저기압에서 발해만과 중국 산둥반도까지 발달해 있다. 2월 2일 0900 LST를 보면, 북서쪽의 강한 고기압에 의해 두 개의 한랭전선은 동쪽으로 빠르게 이동하여 일본 동쪽해상까지 진출했다. 따라서 우리나라 북쪽과 남쪽에 두 개의 한랭전선이 발생하여 부산지역에 연이어 두 개의 한랭전선이 통과하는 경우가 발생하였다. 따라서 한랭전선 통과와 관련하여 미세먼지 특성을 연구하는데 매우 좋은 사례라고 할 수 있다.

Fig. 2는 부산지방기상청에서 2021년 2월 1일부터 2월 2일까지 측정된 기상요소의 일변화를 나타낸 것이다. 한랭전선이 통과할 때 기상요소의 급격한 변화가 발생한다. 기온의 하강, 상대습도의 감소, 기압의 증가, 남서풍에서 북서풍으로의 풍향 변화, 풍속의 증가 등이 있으며, 이러한 기상요소 변화로부터 한랭전선 통과 시각을 유추할 수 있다(Jeon, 2021). 본 사례는 Fig. 1의 지상일기도에서 보는 바와 같이 두 개의 한랭전선이 연속적으로 통과하여 뚜렷한 기상요소의 변화를 찾기가 어려웠으나, 지상일기도와 AWS 측정자료를 종합하여 부산지역을 통과한 첫 번째 한랭전선의 통과 시각을 2월

1일 0900 LST경으로 추정하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 0900 LST경에 기온과 상대습도가 하강하였고, 풍향이 남서풍에서 서풍으로 변하였으며, 풍속이 갑자기 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 한랭전선 전면에서 많은 강수량을 기록하였다. 두 번째 한랭전선의 통과 시각을 2월 2일 0100 LST경으로 추정하였다. Fig. 2에서와 같이 상대습도의 급속한 하강(75%에서 50%로 하강)은 기온의 하강보다 다소 빠른 시각에 나타났다. 그리고 기압의 일시적인 하강이 0300 LST 이후에 나타났으나 풍향의 변화(서풍계열에서 북서풍계열로)와 기온 및 상대습도를 고려하여 2월 2일 0100 LST경으로 추정하였다. 따라서 첫 번째 한랭전선과 두 번째 한랭전선은 16시간 간격을 가지고 부산지역을 통과하였다고 추론할 수 있다. 두 개의 한랭전선이 연이어 통과하는 사례는 매우 드문 것이다. 첫 번째 한랭전선과 두 번째 한랭전선이 통과한 2월 1일 0900 LST와 2월 2일 0100 LST 사이의 기상요소의 변화는 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 기압은 2월 1일 1530 LST에 1012.7 hPa로 최저 기압을 나타내었고 서풍계열의 바람이 지속적으로 불었으며, 풍속은 6 m/s 내외로 매우 강하게 불었고 기온과 상대습도는 완만하지만 지속적으로 하강하는 추세를 보였다. 일시적으로 2월 1일 1500 LST경에 약한 강수현상이 있었고, 이때 상대습도의 급격한 하강과 풍속의 변화가 있었다. 두 번째 한랭전선(2월 2일 0100 LST)의 통과 후에 부산지역의 기온과 상대습도는 급격히 하강하였고 풍향은 북서풍으로 급변하였으며 풍속은 4 m/s 정도를 유지하였고 기압은 급속히 상승하는 경향을 보였다.

두 개의 한랭전선이 부산지역을 통과할 때, 풍향의

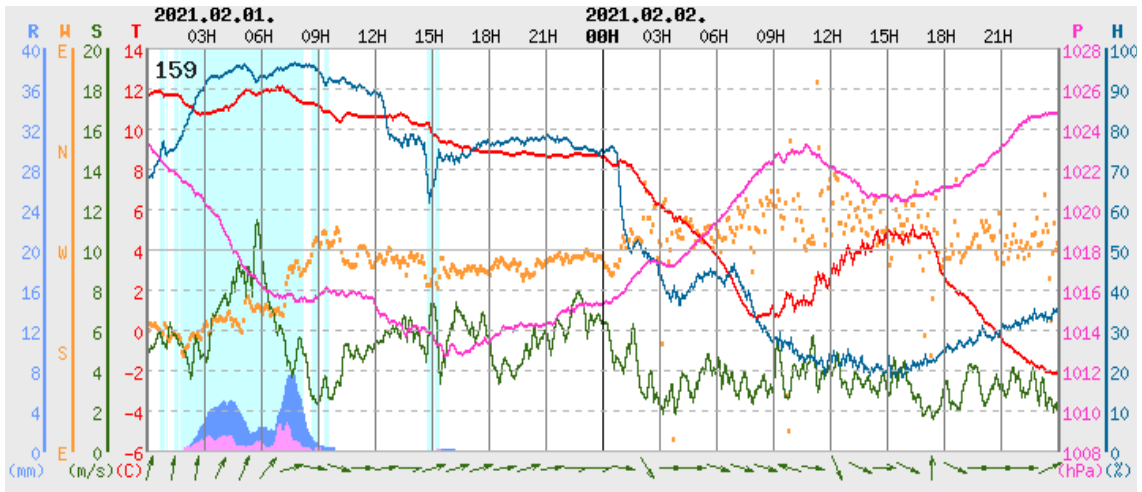


Fig. 2. Diurnal variation of meteorological parameters Feb. 1~2, 2021 in Busan meteorological administration.

변화는 남서풍(첫 번째 한랭전선 통과전)에서 서풍(첫 번째 한랭전선 통과 후와 두 번째 한랭전선 통과 전) 그리고 북서풍(두 번째 한랭전선 통과 후)으로 시계방향으로 바뀌었다. 기온과 상대습도는 지속적으로 감소했으며, 두 개의 한랭전선 통과 후에 감소폭이 더욱 크게 나타났다. 통상 기온이 하강하면 상대습도가 상승하는데 비해 감소하는 것으로 보아 차고 건조한 북쪽의 공기가 유입된 것으로 볼 수 있다. 기압은 두 개의 한랭전선이 통과할 때 마다 일시적으로 상승하는 경향을 보였으며, 전체적으로 볼 때, 첫 번째 한랭전선 전면과 후면에 포함된 공기는 기압골의 형태이므로 전반적으로 기압은 하강하였으며, 두 번째 한랭전선이 통과하면서 급격한 상승을 나타내었다. 그리고 2월 1일 1500 LST경의 강수로 인해 기온과 상대습도의 급격한 하강, 그리고 풍향과 풍속의 변화폭이 일시적으로 크게 나타났는데, 이는 저기압 중심이 통과하면서 상승기류에 의한 대류현상으로 강수가 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 부산 지역에서 두 개의 한랭전선이 통과하기 전·후의 backward trajectory를 나타낸 것이다. 첫 번째 한랭전선이 통과하기 전인 2월 1일 0600 LST(1월 31일 21Z)의 후방궤적선을 보면, 500 m와 1,000 m의 공기는 우리나라 남쪽에서 저층을 따라 이루어졌으며, 1,500 m 공기구는 화남지방에서 출발하여 동중국해와 우리나라 남해안을 거쳐 빠른 시간에 도달한 것으로 판단된다. 첫 번째 한랭전선이 통과한 후인 2월 1일 1200 LST(2월 1일 03Z)의 후방궤적선을 보면, 500 m,

1,000 m, 1,500 m 세 고도 모두 중국 동부해안에서 출발하여 우리나라 서해를 가로질러 남부 해안을 따라 부산에 도달하였다. 두 번째 한랭전선이 통과하기 전인 2월 1일 2100 LST(2월 1일 12Z)의 후방궤적선을 보면, 500 m와 1,000 m 공기구는 2월 1일 1200 LST와 비슷한 경로를 거쳤지만, 1,500 m 공기구는 중국 내륙 황토 고원에서 출발하여 비교적 빠른 시간에 부산 지역으로 도달하였다. 두 번째 한랭전선이 통과한 후인 2월 2일 0300 LST(2월 1일 18Z)의 후방궤적선을 보면, 500 m 공기구는 화중지방 동쪽에서 출발하여 요동반도와 발해만 그리고 우리나라 중부지방을 거쳐 부산에 이류해 왔고, 1,000 m와 1,500 m 공기구는 몽골에서 매우 빠른 속도로 이동해 온 것을 알 수 있다. 따라서 첫 번째 한랭전선 통과 전·후와 두 번째 한랭전선 통과 전·후의 후방궤적선을 분석한 결과, 부산지역의 기류는 Fig. 2에서 살펴본 대로 두 개의 한랭전선이 차례로 통과하면서 남서풍 → 서풍 → 북서풍으로 변하는 것과 동일한 변화 양상을 나타내었다.

3.2. 부산지역 2021년 2월 1일과 2일의 한랭전선 통과 시의 미세먼지 농도 특성

Fig. 4는 기상청에서 황사발생 시 미세먼지 상황을 파악할 목적으로 전국의 각 기상관서에 설치된 미세먼지 채취기에서 베타선흡수법으로 측정된 2021년 2월 1일부터 2월 2일까지 2일간 시간별 PM₁₀ 농도 변화를 나

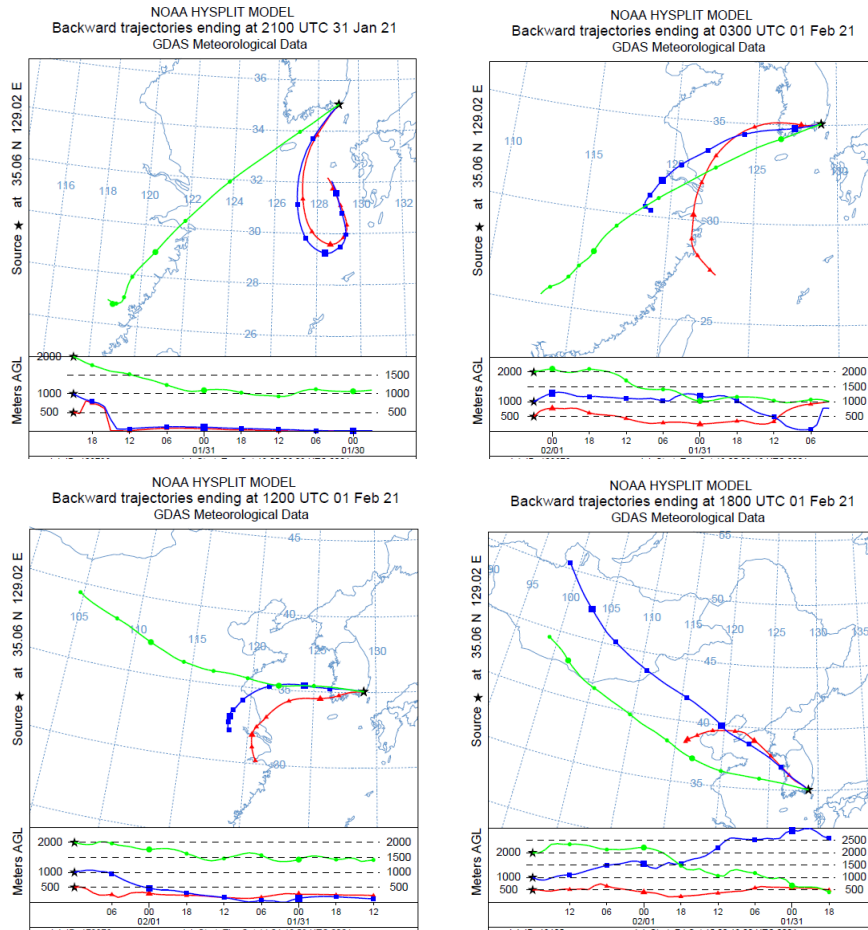


Fig. 3. Backward trajectory at Busan(35°06'N 129°02' E) at (a) 21Z 31 Jan., (b) 03Z 1 Feb., (c) 12Z 1 Feb., (d) 18Z 1 Feb. 2021.

타낸 것이다. 전국을 서울·경기도, 강원도, 충청남·북도, 전라남·북도, 경상남·북도, 제주특별자치도의 6개 권역으로 나누어 나타내었다. 먼저 서울·경기도 권역을 보면, 최고농도를 나타낸 시각이 2월 1일 1400 LST에 백령도(110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 1500 LST에 관악산(85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 1600 LST에 서울 송월동(180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 1700 LST 연평도(86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 나타내었다. 백령도에서 2021년 2월 1일 측정된 AWS 자료에 의하면 2월 1일 1230 LST경에 기온과 상대습도의 급격한 하강, 서풍에서 북서풍으로의 풍향의 변화, 풍속의 증가, 기압의 최소(1013.9 hPa)가 발생한 것으로 보아 백령도에서의 한랭전선 통과 2월 1일 1230 LST경으로 보인다. 따라서 백령도에

서 최대 PM_{10} 농도는 한랭전선이 통과한 1시간 30분 뒤에 발생한 것으로 볼 수 있다. 강원도 권역은 1800 LST에 광덕산(109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2000 LST에 춘천(96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 속초(85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2100 LST에 대관령(92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 영월(105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었고, 충청남·북도 권역은 1700 LST에 격렬비도(115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 1900 LST에 안면도(98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 1800 LST에 천안(142 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2100 LST에 추충령(95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었고, 전라남·북도 권역은 1200 LST에 진도(121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 1600 LST에 흑산도(109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 군산(162 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2000 LST에 전주(181 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 광주(115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었고, 경상남·북도 권역은 2100 LST에 문경(115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2200 LST에 안동(129 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2월 2일

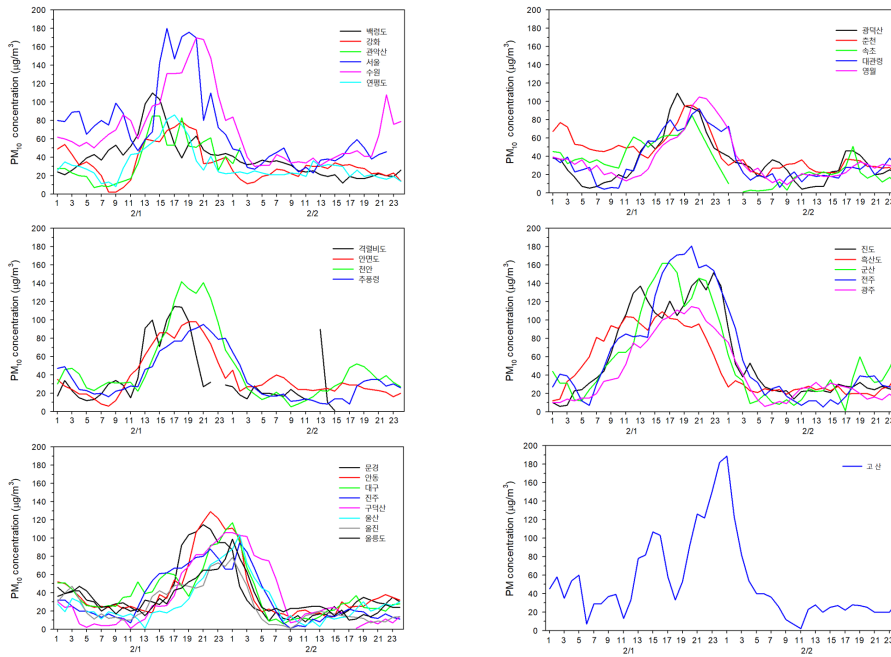


Fig. 4. Diurnal variation of PM₁₀ concentration during Feb. 1~2, 2021 in Korea.

0100 LST에 대구(117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 구덕산(106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 울릉도(99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 0200 LST에 진주(95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 울산(104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 울진(63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었고 마지막으로 제주특별자치도의 2월 2일 0100 LST에 189 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 정리하면 한랭전선이 우리나라 북서부에서 남동부로 통과하면서 2월 1일 1400 LST 백령도를 시작으로 서울 경기 지역은 1500~1600 LST, 강원도 권역은 1800~2000 LST, 충청남·북도 지역과 전라남·북도 지역은 1700~2000 LST, 경상남·북도 지역과 제주특별자치도 지역은 2월 1일 2100~2월 2일 0200 LST경에 최고농도를 나타내었다. 즉 한랭전선 통과와 미세먼지 최고농도 발생은 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 우리나라 최북단인 백령도에서 동남부 구덕산까지 11시간 정도 걸리는 것으로 나타났다. 2018년 3월 19일 부산지역에서 발생한 한랭전선의 연구에서 0600 LST 백령도에서 1600 LST의 부산과 울릉도까지 통과하는데 10시간 정도가 소요된 것으로 나타났으며, 각 지점에서 한랭전선이 통과하는 시각에 PM₁₀ 최대농도가 발생하였다(Jeon, 2021).

Fig. 5는 부산지역에서 두 개의 한랭전선이 연이어 통과한 2021년 2월 1일부터 2월 2일까지 부산지역 연

산동, 장림동 그리고 부산신항의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도, 그리고 PM_{2.5}/PM₁₀ 비의 일변화를 나타낸 것이다. 먼저 PM₁₀농도를 보면, 연산동, 장림동 그리고 부산신항 모두 2월 1일 1100 LST부터 농도가 급상승하기 시작하여 2월 2일 0300 LST에 연산동 129 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 장림동 118 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 부산신항 121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최고농도를 보였다. 이 시각 이후 농도는 1000 LST까지 급격히 하강하였다. 일반적으로 부산지역의 PM₁₀농도는 0600 LST경에 최소 농도를 나타내고 1100 LST경에 최대 농도를 나타내는 전형적인 일변화를 보인다(Jeon, 2010). 그런데 본 사례는 최대농도를 나타내는 1100 LST경에 최소농도를 나타내었고 농도가 하강하는 0300 LST 경에 최대농도를 나타낸 것은 미세먼지 배출량이 일시적으로 배출되었거나 아니면 기상학적인 요인이 작용했을 가능성이 크다. 앞에서 언급하였듯이 첫 번째 한랭전선이 부산지역을 통과한 시각이 2월 1일 0900 LST경이고 두 번째 한랭전선이 통과한 시각이 2월 2일 0100 LST경이라고 하였다. 따라서 부산지역의 PM₁₀농도는 첫 번째 한랭전선이 통과하고 난 다음 바로 농도가 증가하기 시작하였고 두 번째 한랭전선이 통과하고 난 다음 2시간 후에 최고농도가 발생하였다. 따라서 첫 번째 한

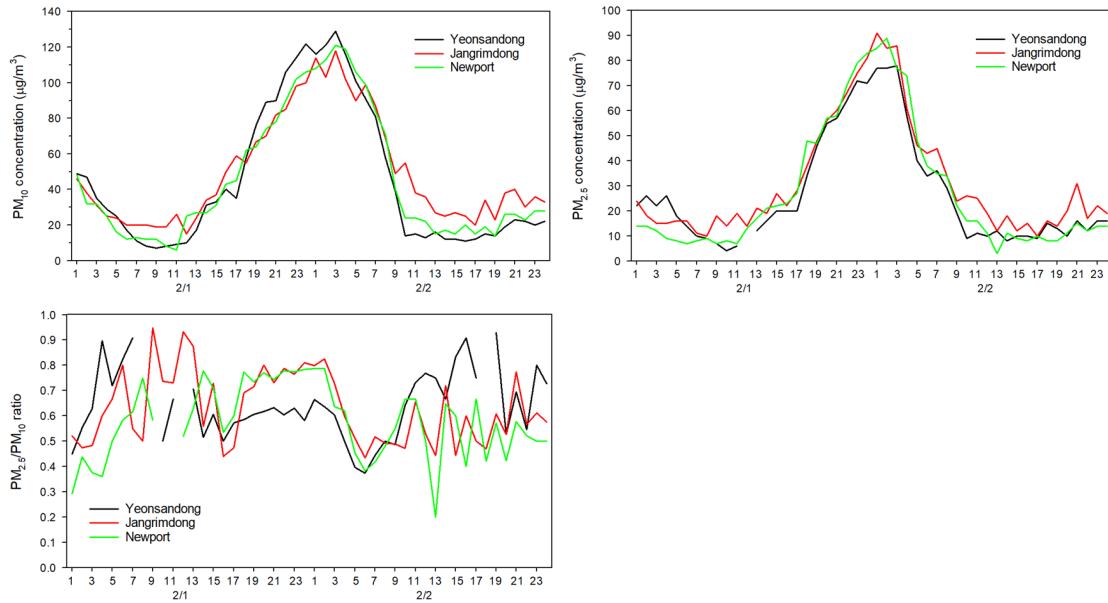


Fig. 5. Diurnal variation of PM₁₀, PM_{2.5} concentrations and PM_{2.5}/PM₁₀ ratio during Feb. 1~2, 2021 at Yeonsandong, Jangrimdong, and Busan Newport in Busan.

랭전선 후면에 미세먼지가 유입되었거나 혹은 한랭전선의 영향으로 미세먼지가 축적되어 농도를 높게 만들었을 가능성이 있다. 어느 요인이 더 크게 기여를 하였는지 모르지만 부산지역의 풍향과 후방궤적선을 통해 판단하면, 첫 번째 한랭전선 통과 후 중국내륙으로부터 기류의 이동이 있었던 것으로 보아 중국 내륙으로부터 오염물질의 유입이 있었고, 그리고 한랭전선의 특성 상 공기의 수렴으로 인한 오염물질의 축적이 있었다 (Wang et al., 2000).

PM_{2.5} 농도를 보면, PM₁₀ 농도와 유사한 패턴을 보여주고 있다. 다만, 최소농도를 나타낸 시각이 연산동 2월 1일 1000 LST, 장림동 0800 LST, 부산신항 0900 LST로 PM₁₀보다 이른 시각에 발생하였다. 최대농도 발생 시각은 연산동 2월 2일 0300 LST(78 µg/m³), 장림동 0100 LST(91 µg/m³), 부산신항 0200 LST(89 µg/m³)로 PM₁₀농도와 다른 시각에서 발생하였다. 그러나 최소농도와 최대농도의 발생시각이 1~2시간 빠르거나 느렸고 전체적인 경향은 PM₁₀농도와 비슷하였다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비를 보면, 2월 1일 1500 LST까지 세 지역 모두 뚜렷한 일관성을 나타내지 않았다. 1600~1700 LST에 일시적으로 0.4 내외의 낮은 값을 보였고, 2월 1일 1800 LST부터 2월 2일 0300 LST까지 연산동은 약

0.6 내외를, 장림동과 부산신항은 0.8 내외의 높은 값을 나타내었다. 2월 2일 0600 LST부터 0900 LST까지 일시적으로 세 지역 모두 0.4~0.5 내외의 값을 보였다. 이 시각 이후는 전날 새벽과 오전과 같이 뚜렷한 일관성이 보여주지 못했다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 높으면 인위적인 기원의 비중이 높고, 낮으면 자연기원의 비중이 높다는 의미한다(Jeon et al., 2010). 통상 부산지역의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 0.6 정도이다. 따라서 첫 번째 한랭전선이 통과한 2월 1일 0900 LST 이후(1600~1700 LST는 예외)에 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.6이상이므로 인위적인 요인의 영향을 받았다고 볼 수 있으며, 두 번째 한랭전선이 통과 2월 2일 0100 LST 이후 북쪽으로부터 비교적 오염되지 않는 자연기원의 물질이 유입되었다는 것을 알 수 있다. 즉 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 그리고 PM_{2.5}/PM₁₀ 비를 참고하여 판단하면 황사 현상에 의한 영향이라고 할 수 있으며, 황사의 영향이 매우 일시적으로 영향을 미쳤다고 할 수 있다. 부산지역에서 2018년 3월 19일 한랭전선이 통과할 때 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 광복동과 학장동이 0.10 정도, 덕천동이 0.20 정도, 태종대가 0.30 정도로 매우 낮은 값을 나타내었는데, 이는 한랭전선 후면에서 강한 황사가 유입되었다는 것을 시사하였다(Jeon, 2021).

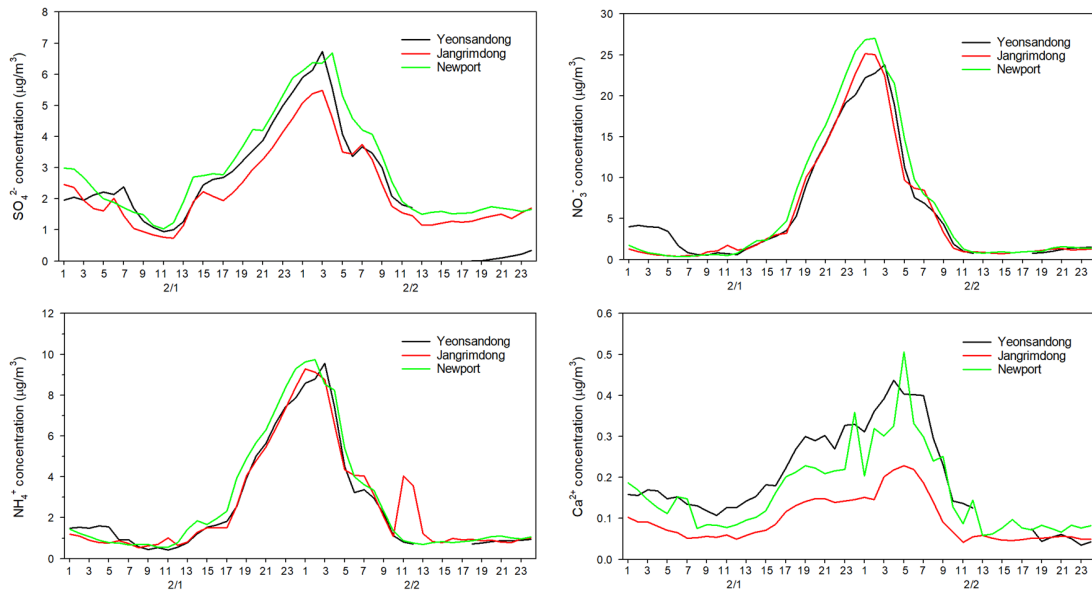


Fig. 6. Diurnal variation of SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , and Ca^{2+} concentrations during Feb. 1~2, 2021 at Yeonsandong, Jangrimdong, and Busan newport in Busan.

Cheng et al.(2013)은 한랭전선 후면의 강한 고기압 권에서 대기오염물질이 축적되고 다시 농도가 상승하며, 한랭전선 이동과정에서 대기오염물질은 “국지적인 오염물질 축적-전선 전면에서 오염물질 연직 상승-상층공기 이류 수송-강한 바람에 의한 희석-국지적인 축적” 등의 일련의 순환을 거친다고 하였다. 위의 다섯 가지 과정 중에 본 연구사례가 모두 다 포함될지 아니면 한두 가지가 빠질 지는 향후의 수치모형을 통해 검증해 볼만하다고 판단된다. Kang et al.(2019)은 한랭전선이 양쯔강 삼각주 지역의 대기질에 미치는 영향을 예로 들면서, 한랭전선이 양쯔강 삼각주 지역에 영향을 미치기 시작할 때, 한랭전선 전면의 공기 강제상승에 의해 오염물질을 자유대류층으로 들어올리고, 이후 한랭전선의 영향이 강화되면서 강한 북서기류에 의해 중국 북부의 오염물질이 수송되어 오염 물질 농도를 급격히 증가시킨다고 하였다. 한랭전선이 통과한 후, 이 지역은 강한 고기압의 영향으로 발산기류가 존재하면서 오염물질이 확산되고 농도가 감소한다. 이후 대기가 성층화되면서 안정되고 또 다음의 한랭전선이 오기까지 오염물질은 점차적으로 축적되는 일련의 과정을 거친다고 하였다.

3.3. 부산지역 2021년 2월1일부터 2월 2일 한랭전선 통과 시 $\text{PM}_{2.5}$ 중의 이온 성분 특성

Fig. 6은 부산지역 연이어 2개의 한랭전선이 통과한 2021년 2월1일부터 2월 2일까지 연산동, 장림동 그리고 부산신항에서 측정한 $\text{PM}_{2.5}$ 중의 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} 농도의 변화를 나타낸 것이다. 먼저 SO_4^{2-} 농도를 보면, 부산지역 세 지점 모두 첫 번째 한랭전선이 통과한 이후인 2월 1일 1100~1200 LST부터 상승하기 시작하여 2월 2일 0300 LST에 연산동($6.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 장림동($5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이, 0400 LST에 부산신항($6.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 각각 최고농도를 나타내었다. 공업지역인 장림동이 주거지역인 연산동과 도로변지역인 부산신항보다 낮은 농도를 나타내었다. NO_3^- 를 보면, 세 지점 모두 2월 1일 0900 LST부터 1700 LST까지는 완만한 상승추세를 보였고, 이후 최대농도를 나타낸 2월 1일 0100~0300 LST까지 급격한 상승을 나타내었다. 최고농도는 연산동이 0300 LST, 장림동이 0100 LST, 부산신항이 0200 LST에 각각 $23.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $25.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $27.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. $\text{PM}_{2.5}$ 중에 NO_3^- 성분이 가장 높은 비율을 차지하였다. 이는 국내·외 대기오염물질이 장거리 이동 중 산화반응으로 생성된 2차 초미세먼지의 유입이 큰 것으로 보인다(BMCIHE, 2021).

NH_4^+ 를 보면, NO_3^- 와 유사한 패턴을 보여주고 있다. 최고농도는 연산동이 2월 2일 0300 LST, 장림동은 0100 LST, 부산신항은 0200 LST에 각각 $9.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $9.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $9.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 공업지역인 장림동에서 2월 2일 1100~1200 LST의 일시적인 상승은 국지적인 영향으로 보인다. Ca^{2+} 를 보면, SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 농도와 달리 첫 번째 한랭전선 통과 후의 급격한 증가를 보이지 않고 완만한 증가 추세를 보이고 있다. 최고농도는 연산동이 2월 2일 0400 LST, 장림동과 부산신항은 0500 LST에 각각 $0.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 즉 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 농도는 두 번째 한랭전선이 통과(2월 2일 0100 LST) 후 급격히 하강하였지만, Ca^{2+} 는 2~3시간 늦은 2월 2일 0400~0500 LST이후에 나타났다. Ca^{2+} 은 자연기원의 토양성 물질로서 몽골지방으로 수송된 물질이 부산지역에 영향을 미친 것으로 판단되는데, 이는 Fig. 3(d)의 후방궤적선으로부터도 확인된다.

4. 결론

부산 지역에서 2021년 2월 1일과 2일 연이어 2개의 한랭전선이 부산지역을 통과한 사례를 기상상황과 미세먼지농도의 변화 그리고 초미세먼지 중의 이온 성분을 체계적으로 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 우리나라 주변의 지상일기도, 부산지방기상청에서 측정한 AWS 그리고 부산지역을 착지점으로 하는 backward trajectory를 분석한 결과, 2021년 2월 1일 0900 LST에 첫 번째 한랭전선이, 2월 2일 0100 LST경에 두 번째 한랭전선이 부산지역을 통과하였다.
- 2) 기상청 황사측정망의 PM_{10} 농도를 보면, 한랭전선 통과와 미세먼지 최고농도 발생은 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 한랭전선은 우리나라 최북단인 백령도에서 동남부 구덕산까지 11시간 정도 걸리는 것으로 나타났다.
- 3) 부산지역의 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 첫 번째 한랭전선이 통과하고 후 농도가 증가하기 시작하여 두 번째 한랭전선이 통과 2시간 후에 최고농도가 발생하였다. 따라서 첫 번째 한랭전선 후면에 미세먼지가 유입되었거나 혹은 한랭전선의 영향으로 미세먼지가 축적되어 농도를 높게 만들었을 가능성이 있다.
- 4) 부산지역에서 측정한 $\text{PM}_{2.5}$ 중의 SO_4^{2-} , NO_3^- ,

NH_4^+ 농도를 보면, PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도와 거의 동일하게 첫 번째 한랭전선이 통과한 이후인 2월 1일 1100~1200 LST부터 상승하기 시작하여 2월 2일 0100 LST~0300 LST에 최고농도를 나타내었다. 그러나 Ca^{2+} 농도는 두 번째 한랭전선이 통과하고 2~3 시간 후에 최고농도를 나타내었다.

- 5) 이러한 부산지역 한랭전선 통과 시 기상 특성과 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 및 초미세먼지 중의 이온성분에 대한 체계적인 평가는 향후 부산지역 고농도 미세먼지의 효율적 관리에 통찰력을 제공할 있을 것으로 기대된다. 향후 한랭전선과 같은 특이 기상현상 발생을 대비해 더욱더 촘촘한 대기질 측정과 합리적인 수치모의 실험이 요구된다.

REFERENCES

- BMCIHE, 2021, 2021 first quarter ultrafine dust composition analysis report, Busan Metro. City Heal. & Environ., 27.
- Cheng, N. L., Meng, F., Xu, J., He, Y. J., 2013, Process analysis about the impact of a strong cold front on air pollution transportation in eastern China in spring, Res. Environ. Sci., 26.
- 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).
- Feng, X. Y., Wang, S. G., 2012, Influence of different weather events on concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China, Environ. Sci., 24, 665-674.
- Jeon, B. I., 2010, Characteristics of spacio-temporal variation for PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Busan, J. Korean Environ. Sci. Soc., 19, 1013-1023.
- Jeon, B. I., 2021, Characteristics of fine particles during cold front passage in Busan, J. Inter. Kor. Environ. Sci., 30, 475-485.
- Kang, H. Q., Zhu, B., Gao, J. H., 2019, Potential impacts of cold frontal passage on air quality over the Yangtze River Delta, China, Atmos. Chem. Phys., 19, 3673-3685.
- Murayama, K., 2009, Introduction to health meteorology, Nihigashi, 36-37.
- Shima, M., Nitta, Y., Ando, M., Adachi, M., 2002, Effects of air pollution on the prevalence and incidence of asthma in children, Arch. Environ. health, 57, 529-535.
- Wang, L. J., Liu, X. H., Lu, W., Zhang, C., Tang, W. Y.,

- Zhu, B., 2021, Impact of a cold front transport process on haze weather in eastern China in early winter, *China Environ. Sci.*, 41, 2,004-2,013.
- Wang, S. G., Jiang, D. B., Yang, D. B., Shang, K. Z., Qi, B., 2000, A Study on characteristics of change of maximum mixing depths in Lanzhou, *Plateau Meteorology*, 19, 363-370.
- Watanabe, Y., Shojaku, H., Ito, M., Ishikawa, M., Mizukoshi, K., 1993, Influence of a cold front upon the onset of Meniere's disease, *Equi. Res. Suppl.*, 9, 21-24.
- Yu, B., Zhu, B., Dou, J. J., Zhang, W. W., Hu, D. Y., 2017, Classification of air pollution synoptic patterns and air pollutants transport/purification effect by cold front over Hangzhou, *China Environ. Sci.*, 37, 452-459.
- Yue, Y., Zhou, Y., Wang, X., Zhu, B., 2018, Analysis on transport/purification effect by cold front and precipitation during haze day in Wuhan, *Acta Sci. Circum.*, 38, 4, 612-4,619.
- Zhang, C., Zhu, B., Liu, X., Hou, X., Mu, N., Kang, H., Wang, L., 2020, Boundary layer characteristics of an air pollution event in China during a cold front, *China Environ., Sci.*, 40, 4, 284-4, 291.
- Zhang, Q, Li, H. Y., 2011, A Study of the relationship between air pollutants and inversion in the ABL over the city of Lanzhou, *Adv. Atmos. Sci.*, 28, 879-886.
-
- Pfofessor. Byung-Il Jeon
Department of Air Traffic & Operation Management,
Silla University
bijeon@silla.ac.kr