Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 34, No. 4 (2024) pp. 417-428
https://doi.org/10.14191/Atmos.2024.34.4.417
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 논 문
(Article)

라디오존데 관측을 활용한 양평지역 5월 대기 특성 분석

구자호[1)*] · 김상준[1)] · 권혁도[1)] · 나성균[1)] · 신우주[1)] · 홍제우[2)] · 선우효준[1)] · 차혜지[1)] · 이명주[3)] · 홍진규[1)] · 김준[1)]
[1)]연세대학교 대기과학과, [2)]한국환경연구원, [3)]웨더비전

(접수일: 2024년 8월 29일, 수정일: 2024년 9월 19일, 게재확정일: 2024년 9월 20일)

Analysis of Atmospheric Pattern in May at Yangpyeong, Korea Based on the Radiosonde Measurement

Ja-Ho Koo[1)*], Sangjun Kim[1)], Hyeogdo Kweon[1)], Seonggyun Na[1)], U-Ju Shin[1)], Je-Woo Hong[2)], Hyojun Sunwoo[1)], Hyeji Cha[1)], Myoung-Joo Lee[3)], Jinkyu Hong[1)], and Jhoon Kim[1)]

[1)]Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea
[2)]Korea Environmental Institute, Sejong, Korea
[3)]Weather Vision, Seoul, Korea

(Manuscript received 29 August 2024; revised 19 September 2024; accepted 20 September 2024)

Abstract We analyzed 3 radiosonde measurements in May at Yangpyeong (10 May 2019, 19 May 2023, and 10 May 2024), as conducted for the educational purpose. While the number of measurements is limited, we find interesting features using these measured data. First, the Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications version 2 (MERRA-2) reanalysis data at the same time at Yangpyeong show the similar vertical temperature profile to that of radiosonde measurements. Vertical profiles of wind speed and relative humidity from the MERRA-2 data also look similar to those of radiosonde measurements, but the consistency was not much guaranteed in the upper atmosphere (higher than 5 km altitude). Second, the temperature profile from the radiosonde measurement and MERRA-2 dataset at Yangpyeong (located in the east of Seoul) is very analogous to that from the radiosonde measurement at Osan (located in the south of Seoul). Considering that the straight distance between Yangpyeong and Osan is about 60 km, the consistency of temperature profile is remarkable. Vertical wind profile is also generally similar between two regions, but the gap becomes larger as the altitude goes up. While the vertical profile of relative humidity is somewhat different between two regions, the vertical profile of water vapor mixing ratio derived from the relative humidity is rather similar between two regions. This study shows that only small number of additional radiosonde measurements enable us much better evaluation of regional meteorology in a vertical scale.

Key words: Radiosonde, MERRA-2, Vertical profile, Yangpyeong

*Corresponding Author: Ja-Ho Koo, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea.
Phone: +82-2-2123-5694, Fax: +82-2-2123-8640
E-mail: zach45@yonsei.ac.kr

© 2024 Korean Meteorological Society

1. 서 론

대기의 시공간 특성을 정확하게 이해하기 위해선 지상 관측뿐만 아니라 연직 프로파일 관측이 크게 요구된다. 예컨대 기상 정보의 연직 분포를 알 수 있게 되면 대기 안정도 특성, 구름 생성 고도 위치, 대기 조성 물질의 연직 방향 수송 및 섞임 과정 등 지역의 여러 대기 현상을 확인하고 분석할 수 있게 된다. 이런 기상 정보의 연직 고도별 정보가 매우 중요함에도 불구하고 그 측정 난이도가 높기 때문에 대부분의 관측이 지상에서 이루어지고 있으며 여전히 연직 분포 측정의 상시 관측망은 충분하게 구축되지 못한 상황이다. 그나마 최근에는 라이다와 같은 원격탐사 관측과 차량 및 항공 관측의 수행을 통해 연직 분포 자료의 확보가 이전 보다는 용이해진 측면이 있지만 소요 인력 및 비용이 상대적으로 높기 때문에 상시 관측화하기에 아직 많은 어려움이 존재한다. 이런 측면에서는 여전히 풍선을 이용한 라디오존데 관측이 고도별 기상 정보를 측정하는데 있어서 가장 용이한 방법이라고 볼 수 있다(e.g., Kim et al., 2009a, 2009b). 최근에는 오존 존데 관측도 활발하게 이루어지면서 기상의 연직 고도 분포 관측에 기여하고 있다(Koo et al., 2024).

국내에서는 약 9개의 라디오존데 관측소가 상시로 운영되고 있고(오산, 백령도, 강릉, 포항, 창원, 광주, 덕적도, 흑산도, 제주도), 속초에서 특별관측이 이루어지고 있다. 이를 통해 6~12시간 간격으로 지역의 기온, 바람, 상대습도의 연직 프로파일 관측 결과가 제공되어 일기예보 및 여러 기상 연구에 유용하게 활용되고 있다(참고: https://datawiki.kma.go.kr). 그러나 라디오존데 상시 관측소의 숫자는 여전히 충분하다고 볼 수 없다. 한반도의 경우 삼면이 바다로 둘러싸여 있는데다 태백산맥과 같은 높은 표고를 갖는 지역이 많아 지역별로 지형효과의 영향력을 매우 크게 받기 때문에 특정 관측소의 측정값을 성급히 일반화하기 어려운 면이 존재하기 때문이다. 게다가 인구 밀집도가 매우 높은 수도권의 경우 보안 문제 등으로 인하여 라디오존데 관측을 다수의 지역에서 빈번하게 수행하기 어려운 상황이다. 최근 북한의 오물 풍선 비양 사례 등을 생각해 보면 쉽게 이해될 수 있으며, 이런 이유로 인해 서울에서 꽤나 멀리 떨어진 경기도 오산 지역의 라디오존데 관측이 수도권에서 유일하게 라디오존데 상시관측망의 역할을 담당하고 있다. 즉, 수도권 지역의 기상 정보 모델링 자료의 연직 분포 특성을 실제 관측을 통해 검증할 수 있는 경우는 일부 집중관측 사례를 제외하고는 이 오산 지역 라디오존데 관측이 유일하다.

이에 많은 경우 기상 모델 결과 또는 재분석 자료에서 제공되는 기상장을 이용하여 대기의 연직 특성 분석을 수행하는 경우가 많다(Jang et al., 2016; Yoon and Min, 2016). 물론 이들 자료들은 나름대로 체계적인 과정에 의해 관측자료와의 면밀한 검증을 거쳐 어느 정도 우수한 품질이 보장되어 있는 상황이지만(Carvalho 2019; Luo et al., 2020), 앞서 논의했듯이 연직 기상 관측망 자체가 충분하게 구축되어 있지 않다는 말은 이런 모델, 재분석 자료의 품질이 좁은 지역의 기상 현상을 어느 정도 정확하게 나타내는지를 보장하기 쉽지 않음을 의미한다. 그리고 최근 장마기간 강수 특성의 변화 등에서 볼 수 있듯이 기상 현상의 특징이 좁은 지역 안에서도 꽤나 큰 차이를 보여주는 경우가 종종 발생함을 감안하면, 또 기후변화에 의해 기존에 알고 있던 각 지역의 기상 특성이 계속 유지되지 못하는 경우도 나타나는 만큼 지역별 실측 자료에 기반하여 기상의 연직 분포 특성을 고해상도의 시공간 범위에서 비교, 검증해야 하는 필요성은 여전히 매우 높게 존재하는 실정이다. 이를 위해서 상시 관측망의 확장이 이루어지면 가장 좋겠지만 비용, 인력 등 현실적인 문제로 인해 그와 같은 접근이 쉽지 않은 것이 사실이다. 그렇다면 단기간에 수행된 관측 자료도 허투루 여기지 말고 최대한으로 연구에 활용하는 것이 현시점에서 최선의 노력이 아닐까 생각한다.

연세대학교 대기과학과는 매년 봄(주로 5월)에 학부 및 대학원 학생들을 대상으로 야외공동관측 워크샵 일정을 갖고 있다. 이 워크샵을 통해 기상 및 대기 조성 물질 관측 등을 실습해 보고 서로 결과물을 공유하며 토론하며 연구 경험을 쌓아 나가고 있다. 2019년부터는 학과에서 비용을 조금 더 부담하여 라디오존데 비양 실습을 수행하고 있는데, 코로나 바이러스 사태로 인해 워크샵이 원활하게 진행되지 못한 시기를 제외하곤 2019년, 2023년, 2024년 5월에 모두 양평에서 라디오존데 비양 실습을 통해 기온, 바람, 상대습도의 연직 분포 관측을 수행하였다. 비록 단 3회 이루어졌지만 연직 기상의 실측 자료를 거의 찾아보기 힘든 양평 지역에서 같은 5월에 맞추어 다년간의 관측을 수행했다는 점에서 이 자료들은 나름의 활용도를 갖는다고 판단된다. 본 연구에서는 이 자료를 이용하여 인근의 오산 지역 라디오존데 관측 자료 및 재분석 자료의 기온, 풍속, 상대습도 연직 분포와의 비교를 통해 수도권 범위에서 기상 연직 분포 특성의 지역차가 어느 정도 되는지 및 재분석 자료와 어느 정도 유사한지 또는 차이 나는지를 살펴보고자 한다. 교육목적으로 수행된 실험 자료를 기반으로 특정 지역의 기상 현상을 부분적으로나마 살펴보는 연구까지 확장될 수 있음을 보여주는 것 역시 본 연구의 또 다른 목적으로 볼 수 있겠다.

2. 자료 및 분석 방법

본 연구의 대상 지역인 양평은 서울의 동쪽에 위치하고 있다. 본 연구에서 활용할 3회의 라디오존데 비양을 수행한 지역과, 양평 대기의 기본적인 특성 분석을 위해 보조적으로 활용한 기상청의 자동 기상 관측소(automatic weather station, AWS) 및 환경부의 Air Korea 지표 관측망 위치를 함께 비교하여 그림 1에 나타내었다(Fig. 1). AWS에서 측정한 기온, 풍속, 상대습도 자료를 2001년부터 2024년까지 확보하여 5월 양평지역 평균 기상 특징을 살펴보았으며 환경부 Air Korea 관측망에서는 2015년부터 2024년까지의 초미세먼지 질량농도($PM_{2.5}$), 오존(O_3) 혼합비, 및 이산화질소(NO_2) 혼합비 관측자료를 확보하여 5월 평균 양평지역 대기질 특성을 보는데 활용하였다.

라디오존데 관측과 관련한 전반적인 절차 및 방법론에 대해서는 최근 Kang et al. (2024)가 매우 상세하게 다루어서 참고하기 용이하다. 본 연구에서 다루는 양평지역 라디오존데 관측은 2019년 5월 10일, 2023년 5월 19일, 2024년 5월 10일 이렇게 3회 관측이 수행되었다. 모두 오후에 관측이 수행되었으며 2019년에는 약 13 km 고도까지, 2023년에는 약 23 km 고도까지, 2024년에는 약 29 km 고도까지 연직 프로파일 관측 자료가 수집되었다. 관측에 활용된 라디오존데는 메테오모뎀(Meteomodem)사에서 제작된 것으로서 기상 관측 센서 및 송수신 장치로 구성되어 있으며 여기에 헬륨 가스를 주입한 풍선 기구 및 최상층에서 풍선이 터지고 난 후 안전하게 낙하할 수 있도록 낙하산과 얼레를 연결하여 비양을 수행하게 된다. 본 연구에 사용된 라디오존데 센서는 M20 모델로써 약 36 g의 무게를 가지며 기온은 thermistor 타입 센서를 이용 −100°C에서 60°C 범위에서 약 ±0.3°C 정확도에서 관측하고, 습도는 Capacitor 타입 센서를 이용하여 약 ±3% 정도 정확도에서 관측하며, 3차원 GPS 센서가 비양 과정에서 측정한 위치 및 시간 정보를 바탕으로 기압과 바람장이 계산되어 제공된다

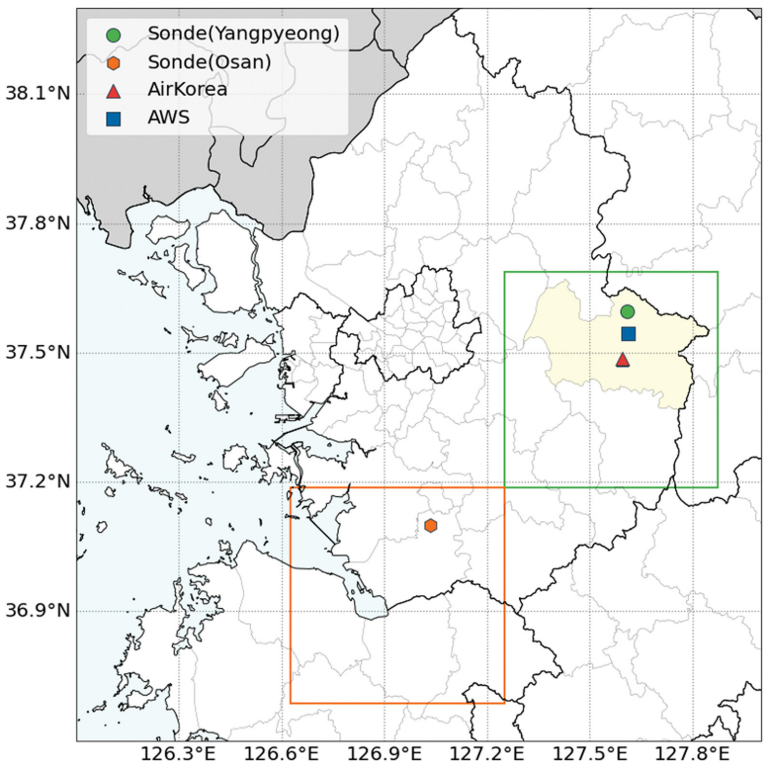

Fig. 1. Location map for the radiosonde launch (green circle), Airkorea air pollutants' monitoring (red triangle), and automatic weather station (AWS) monitoring (blue square) at Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do, Korea. Radiosonde launching place is located in 37.60°N and 127.61°E, Airkorea station is located in 37.49°N and 127.60°E, and AWS is located in 37.55°N and 127.61°E. In addition, radiosonde site at Osan (37.10°N and 127.03°E) is shown (orange hexagon), and the grid size of MERRA-2 including the Yangpyeong (green box) and Osan (Orange box) is depicted.

(Meteomodem, 2024). 여러 제조회사에서 생산하는 라디오존데 관측값의 비교 결과 이 메테오모뎀사의 라디오존데의 성능은 전체에서 1, 2위를 다투는 것으로 알려져 있어 자료의 신뢰도는 높은 수준이다(Dirksen et al., 2024). 본 연구에서는 이 양평 지역 라디오존데 3회 관측 자료를 살펴봄과 동시에, 비교 검증을 위하여 공군에서 운용하는 오산 관측소의 라디오존데 자료 역시 기상자료 개방포털을 통해(https://datawiki.kma.go.kr/) 확보하여 분석에 활용하였다.

추가적으로, 라디오존데가 관측한 기온, 풍속, 상대습도의 연직 분포 특성을 재분석 자료(reanalysis dataset)와 비교하여 재분석 자료 기상장의 품질도 간략히 살펴보고자 한다. 이러한 목적에서 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA) Goddard Earth Sciences 연구팀에서 제공하는 Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications version 2 (MERRA-2) 재분석 자료를 연구에 활용하였다(GMAO, 2015). 다른 재분석 자료와 대비하여 MERRA-2 자료는 위성 기반 고해상도 복사관측 및 마이크로파 관측 자료의 자료동화를 전구 범위에서 1980년 이후 장기간 시간대에 대해 수행한 최초의 재분석 자료라는 점에서 큰 의미를 갖는다(Gelaro et al., 2017). 본 자료에서 살펴보는 MERRA-2 자료의 기온, 바람장, 습도는 그 동안 여러 연구를 통해 검증이 이루어져 왔지만(Carvalho 2019; Luo et al., 2020) 지역 규모에서의 검증은 여전히 실측 자료 기반으로 좀 더 수행될 필요가 있다고 판단되기에 본 연구에서는 라디오존데 비양 위치, 날짜 및 시간에 가장 가까운 자료를 발췌하여 비교하고자 한다. 이에 라디오존데 비양 및 관측이 주로 수행된 시간이 점심시간 이후 오후였기 때문에 16시 30분 자료 기준으로 분석을 수행하였다. 지표에서 30 km 고도까지 총 47개의 대기층에 대해 자료가 제시되고 있으며(mid-layer height라는 고도에 맞추어 정리함) 대기층 사이 간격은 고도가 높아짐에 따라 증가하여 지표 근처에서는 수십 미터, 30 km 인근에서는 1 km 이상 나타난다.

3. 결과 및 분석

3.1 양평 지역 5월 대기 특성

우선 양평 지역의 5월 기상 특성이 일반적으로 어떤 특징을 갖고 있는지 기상청 AWS 관측망 및 환경부 Air Korea 대기 오염 농도 관측망의 자료들을 이용하여 살펴보았다. 우선 라디오존데에서 관측되는 기온, 풍속, 상대습도에 대해서 양평지역 지상 AWS가 관측한 자료를 통해 기후학적 평균과 라디오존데 비

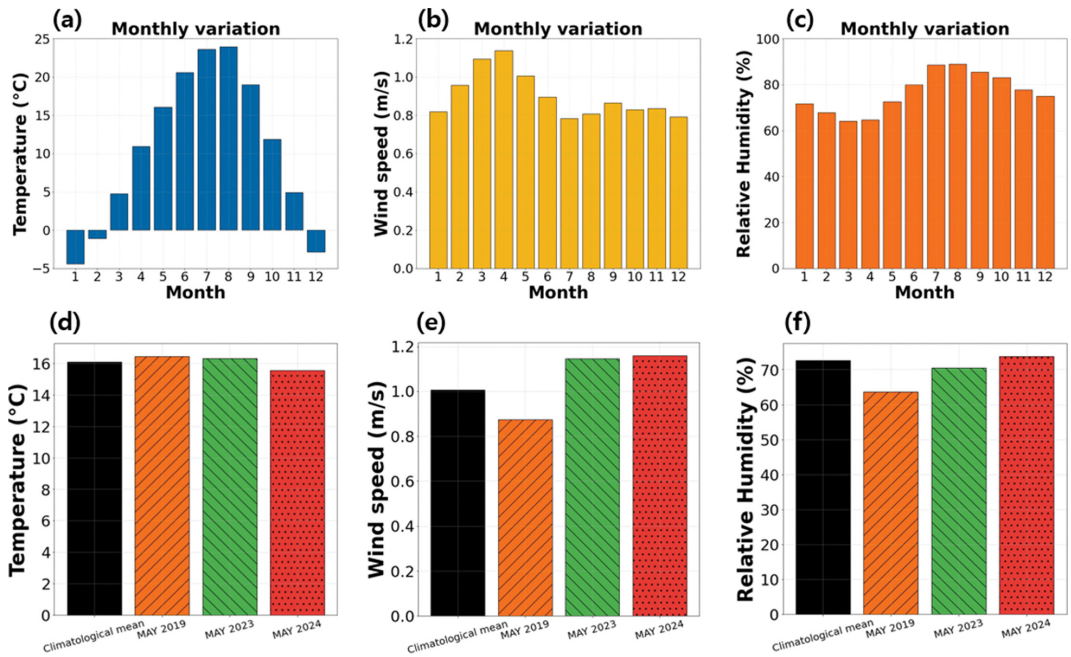

Fig. 2. Monthly mean pattern of (a) temperature, (b) wind speed, and (c) relative humidity at Yangpyeong using all AWS data from 2001 to 2022. Monthly mean values in May 2019 (orange bar), 2023 (green bar), and 2024 (red bar) are also compared to the climatological mean in May (black bar) for the (d) temperature, (e) wind speed, and (f) relative humidity.

양이 이루어진 2019년, 2023년, 2024년 5월 평균 특성을 살펴보았다(Fig. 2). 월평균 변동성 관점에서 보면 5월 양평의 지표 평균 기온은 약 16°C이며 연중 가장 기온이 높은 8월에 비해 7~8°C 정도 낮게 나타난다. 2019, 2023년 5월에도 비슷한 평균 기온을 나타내며 2024년에는 조금 낮게 나타나지만 그 차이가 1°C보다 작아서 실질적으로 연도별 기온차이가 두드러지는 편은 아니다. 5월 양평 평균 풍속의 경우 약 1 m s^{-1} 수준으로서 연중 가장 높게 나타나는 4월에 비해선 낮아진 편이나 1년 전체로 보면 여전히 풍속이 높은 수준이다. 2023년과 2024년에는 5월 평균 풍속이 약 0.1 m s^{-1} 정도 소폭 높아졌지만 2019년에는 반대로 0.1 m s^{-1} 정도 다소 낮아져 상대적으로 대기 정체가 좀 더 크게 나타난 것으로 보인다. 5월 양평의 평균 상대습도의 경우 약 70% 이상으로서 가장 건조한 3, 4월 봄철의 특성을 벗어나 습윤한 여름으로 접어드는 경향을 보여주고 있고, 2023, 2024년과는 달리 2019년엔 65% 이하의 값을 보이며 상대적으로는 소폭 건조한 특성을 보이는 것이(즉 낮은 상대습도를 나타냄이) 확인된다.

환경부 지상 관측자료를 통해 $PM_{2.5}$ 및 O_3과 NO_2의 평균 특징도 살펴보았다(Fig. 3). $PM_{2.5}$와 NO_2와 같이 대기 중 농도가 배출량의 정도에 1차적으로 크게 영향을 받는 경우는 일반적으로 난방 목적의 화석연료 연소가 높게 나타나는 겨울에 고농도를 보이며 상대적으로 여름에 낮은 농도를 보인다(Lee et al., 2022). 이에 5월 두 물리량의 농도는 겨울에서 여름으로 낮아지는 지점에 위치하여 1년 중 보통 수준을 보여주고 있다. 반면 오존은 광화학적 과정에 의해서 주로 발생되기 때문에 태양 고도가 연중 가장 높고 가조 시간이 가장 긴 5~6월에 가장 높은 농도를 나타내고 있다. 5월 평균 $PM_{2.5}$가 기후학적 평균에 비해 2019년에 높게, 2023년과 2024년에 높게 나타나고 있는데 이 패턴은 풍속의 특성과 매우 흡사하게 나타난다(Fig. 2e). 이는 풍속과 미세먼지 농도 사이의 역상관성에 대한 선행연구를 통해서도 잘 나타난 특징으로서(Kim et al., 2017; Li et al., 2021) 특히 양평과 같이 미세먼지의 직접 배출원을 크게 갖지 않는 지역의 경우 낮은 풍속일 경우 대기 정체가 심해져서 대기 중 미세먼지 축적이 일어나 농도가 증가하는 특성이 훨씬 더 잘 발견되는 것으로 보인다. 5월 평균 오존은 기후학적 평균에 비해 2019년에 높고 2023년, 2024년에는 낮으며 NO_2는 이와 완전히 반대 특성을 나타내는데, 이는 한반도가 대기화학적으로 VOC-

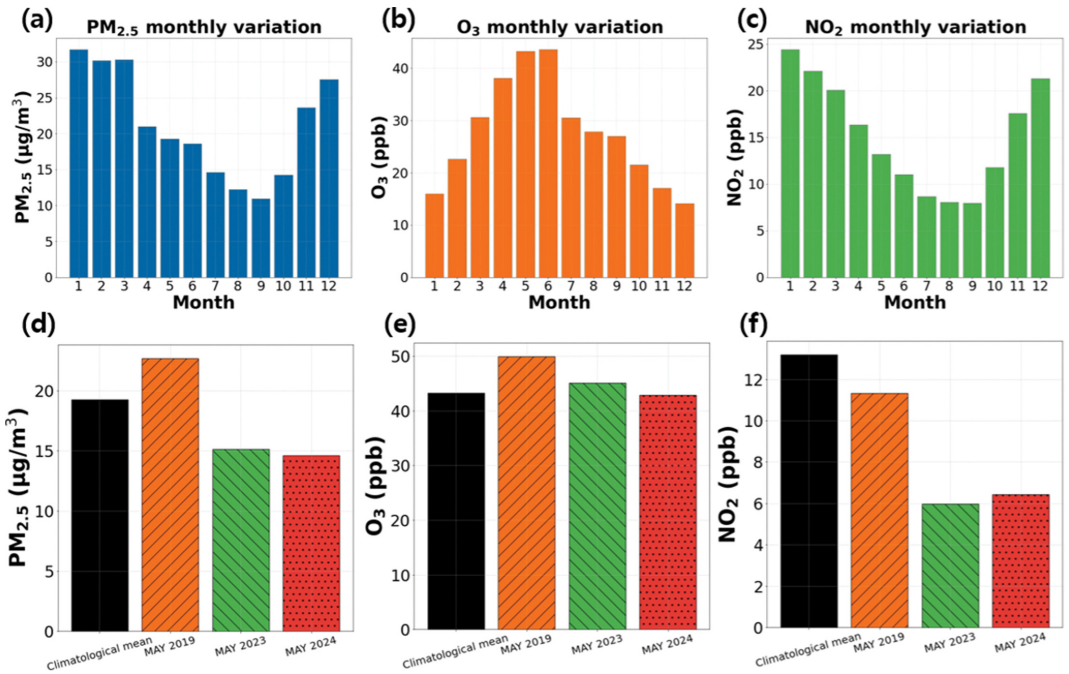

Fig. 3. Monthly mean pattern of (a) particulate matter having the diameter larger than 2.5 μm ($PM_{2.5}$, hereafter), (b) ozone (O_3), and (c) nitrogen dioxide (NO_2) at Yangpyeong using all AWS data from 2001 to 2022. Monthly mean values in May 2019 (orange bar), 2023 (green bar), and 2024 (red bar) are also compared to the climatological mean in May (black bar) for the (d) $PM_{2.5}$, (e) O_3, and (f) NO_2.

limited regime에 속하면서 나타나는 전형적인 오존-질소산화물 사이 역상관성으로 해석된다(Kim et al., 2018; Kim et al., 2020).

3.2 양평 지역 5월 기상의 연직 분포 특성

먼저 2019년 5월 10일, 2023년 5월 19일, 2024년 5월 10일에 양평에서 라디오존데로 관측한 기온, 풍속, 상대습도의 연직 분포를 비교해 보았다(Fig. 4). 세 경우가 인접한 시기가 아님에도 불구하고 기온의 연직 분포는 모두 비슷하게 나타났다. 약 10 km 고도까지는 대략 8 K km^{-1} 정도의 연직 기온 감률을 퍽 흡사하게 나타내고 있으며 10 km 고도 위에서 보면 2024년 5월엔 좀 더 온도가 감소하는 추이가 이어지지만 2019년과 2023년에는 기온 감률이 크게 줄어들면서 성층권-대류권 경계 부근에 다다른 느낌을 보여주고 있다. 풍속의 경우에는 세 경우 사이에 다소 차이가 있으나 전반적으로는 고도 10~15 km 사이에서 가장 풍속의 최대치가 나타나는 경향은 제법 비슷하게 나

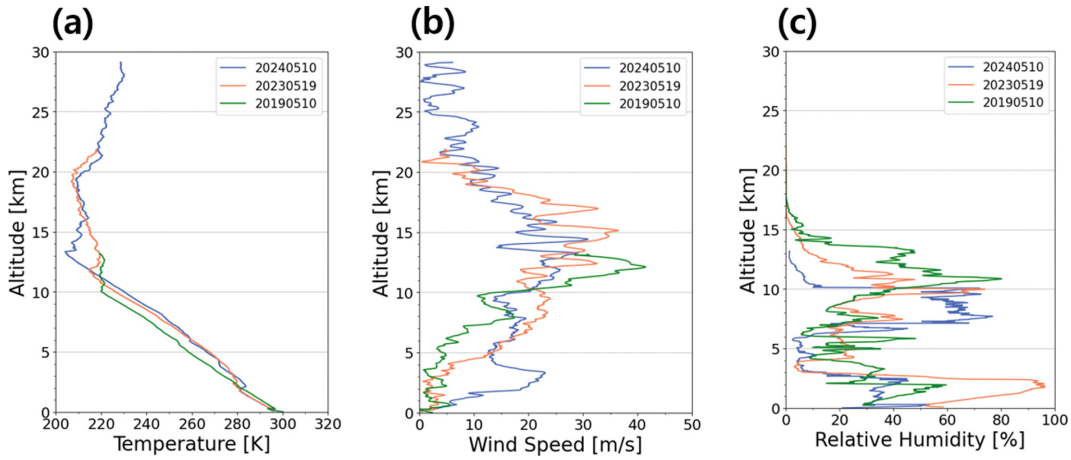

Fig. 4. Vertical profile comparison of (a) temperature, (b) wind speed, and (c) relative humidity based on the radiosonde measurement in 10 May 2019 (green), 19 May 2023 (red), and 10 May 2024 (blue) at Yangpyeong.

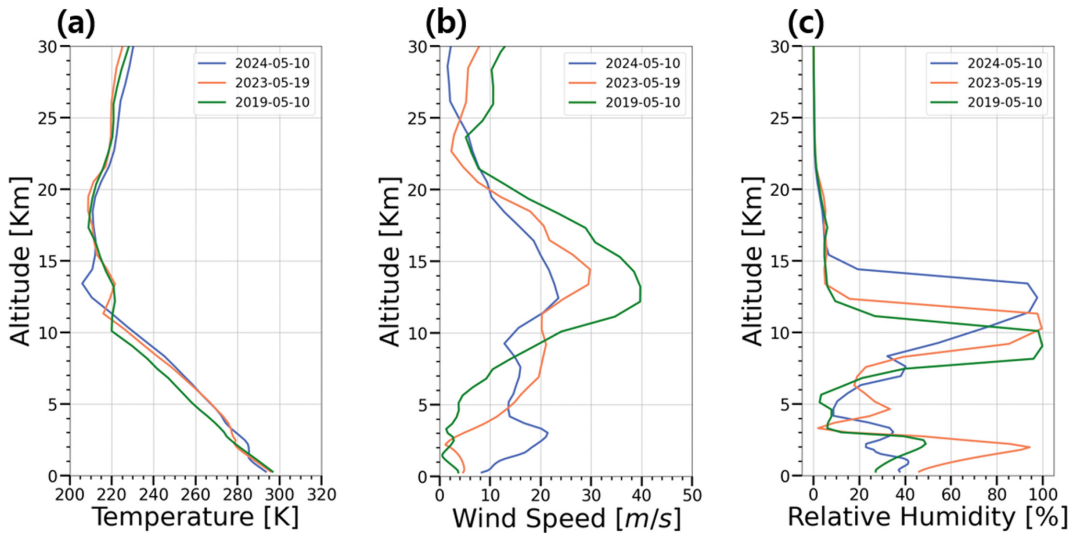

Fig. 5. Vertical profile comparison of (a) temperature, (b) wind speed, and (c) relative humidity based on the MERRA-2 reanalysis. Used data are obtained from the grid including the radiosonde launching place at Yangpyeong, and selected at 16:30 local time in 10 May 2019 (green), 19 May 2023 (red), and 10 May 2024 (blue), the closest time of real radiosonde measurements.

타나고 있다. 고도 5 km 이하에서는 2019년의 풍속이 가장 낮게 나타나고 2024년에 가장 크게 나타나는데 비록 연도별로 무작위 사례 하나의 비교이긴 하나 앞서 지상 AWS 자료를 통해 살펴본 2019, 2023, 및 2024년 5월의 평균 풍속 특성과(Fig. 2) 유사하게 나타남이 확인된다. 상대습도의 경우는 세 경우가 모두 다른 고도에서 최대치를 나타내어 어떤 일관된 공통점을 찾기는 어려웠다. 요약하면, 비록 1년에 하나씩 3년 동안 세 사례를 비교했을 뿐이지만 기온의 연직 분포는 꽤나 비슷하게, 풍속의 연직 분포는 다소간의 차이가 있지만 최고 풍속이 나타나는 고도는 비슷하게, 상대습도의 연직 분포는 사례별 차이가 크게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

이 세 사례와 같은 장소와 같은 시간대에 해당하는 MERRA-2 재분석 자료의 격자 정보를 이용하여 연직 분포 특성을 비교해 보았다(Fig. 5). 기온의 연직 분포는 놀랍게도 라디오존데 관측 결과와 매우 흡사하게 나타나는 것이 확인된다. 10 km 고도까지의 기온감률도 거의 흡사하고 각 연도별 기온의 최솟값 및 급격한 변동이 나타나는 고도가 거의 그대로 재현되고 있는 것을 확인할 수 있다. MERRA-2 자료 풍속의 경우도 라디오존데 풍속 관측이 보여주는 연직 구조, 최대, 최솟값이 나타나는 패턴이 상당히 유사함이 확인된다. 다만 정량적으로 2019년 풍속이 라디오존데 관측에 비해 10 km 고도 이상에서 다소 과대평가되는 측면 등 정량적으로 다소 큰 차이를 보여주는 부분이 존재하여 기온만큼 라디오존데 관측 값을 그대로 재현하는 느낌은 아니다. MERRA-2 자료 상대습도의 경우도 지표 근처에서 높고 5 km 고도 부근에서 낮다가 그 위에서 높아지는 큰 특징은 어느 정도 잡아내지만 10 km 고도 부근 및 그 이상에서 상대습도의 정량적인 범위가 큰 차이가 나고 연도별로 가장 높은 상대습도를 나타내는 고도의 위치도 많이 차이를 보인다. 요약하면, 양평 지역에 상시적인 기상 연직 분포 관측망이 존재하지 않음에도 불구하고 MERRA-2 재분석 자료의 기온, 풍속, 상대습도의 연직 분포 특성은 라디오존데 관측값과 비교적 유사하게 나타나는 것이 확인된다. 그 중에서 기온의 연직 분포는 매우 비슷하게 나타나는 편이고 풍속과 상대습도는 10 km 고도 이상 상층에서 정량적인 차이를 다소 크게 나타내는 것이 확인된다.

비록 세 경우지만 양평지역에서 라디오존데와 MERRA-2 재분석 자료의 기온 연직 분포가 상당히 흡사하게 나타남이 확인되었기에 추가적으로 기온의 연직분포를 기반으로 대류권계면 고도를 추정하여 비교해 보았다(Fig. 6). 온도 기반으로 구할 수 있는 대류권계면 고도는 크게 기온 감률 기반 대류권계면(lapse-rate tropopause, LRT)과 최저 기온 대류권계면(cold-point tropopause, CPT)의 고도 두 가지를 꼽을 수 있다. LRT 고도는 대류권에서는 기온이 연직방향으로 감소, 성층권에서는 연직방향으로 증가하는 차이를 이용하여 그 변곡점이 대류권계면 위치가 된다는 개념으로서 세계 기상 기구(World Meteorological Organization, WMO)에서 가장 표준적으로 활용하는 개념이며, WMO가 제시한 방법론에 기반하여(WMO, 1957) 계산된다. CPT 고도는 이렇게 대류권의 기온 감소와 성층권의 기온 증가의 변곡점에서 대기 온도가 가장 낮게 나타날 것이라는 관점에서 정의된 개념이다(Seidel et al., 2001). 이상적으로는 LRT와 CPT 고도가 거의 비슷하게 나타나야 하지만 실제로 대기의 역학적 특성 등에 의해 차이를 보이며 실제로 이 두 고도의 차이를 통해 대류권계면 인근의 대기 역학적 특성 및 조성 특성을 많이 연구하고 있다(e.g., Pan et al., 2018). 양평지역 세 사례의 비교 결과(Fig. 6) LRT 고도는 라디오존데 기반 추정값과 MERRA-2 자료 기반 추정값이 거의 비슷하게 나타났고, CPT 고도는 2019년 5월 10일 경우는 약 6 km 정도 차이를 보이나 다른 두 날짜에는 비슷하게 나타나는 것이 확인된다. 적어도 LRT 고도에 대해서는 MERRA-2 재분석 자료를 활용해도 라디오존데 관측 수준으로 추정해낼 수 있는 것으로 보인다.

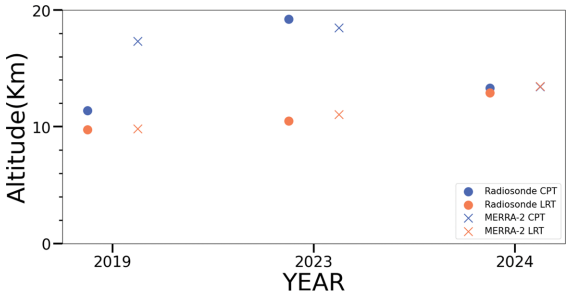

Fig. 6. Comparison of cold-point tropopause (CPT) height (blue) and lapse-rate tropopause (LRT) height (orange) in 10 May 2019, 19 May 2023, and 10 May 2024 from the radiosonde measurement (circle) and MERRA-2 reanalysis dataset (cross).

3.3 양평과 오산 지역의 5월 기상 연직 분포 비교

양평지역의 라디오존데 관측값과 MERRA-2 재분석 자료의 기온, 풍속, 상대습도의 연직 분포가 비교적 유사하게 나타나는 점을 살펴본 것에 추가하여, 양평의 라디오존데 관측 정보가 같은 경기도 행정구역에 속하는 오산의 라디오존데 관측 정보와 어느 정도 유사한지를 살펴보고자 세 날짜에 대해 비교를 수행해 보았다(Fig. 7). 양평은 경기 동부 지역, 오산은 경기 남부 지역에 위치하며 두 지역의 직선 거리가 약 60

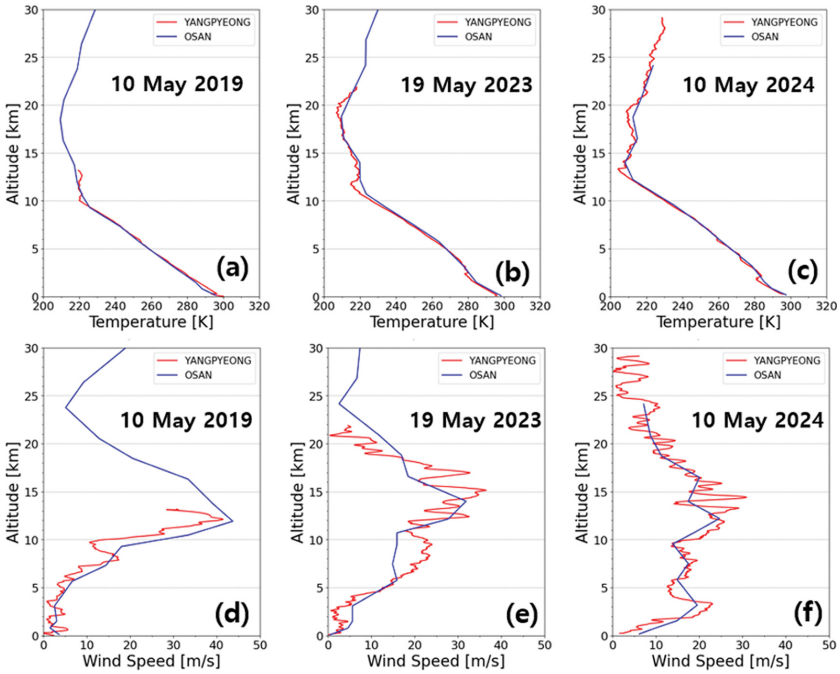

Fig. 7. Vertical profile comparison of radiosonde measurements between Yangpyeong (red) and Osan (blue) for the temperature in (a) 10 May 2019, (b) 19 May 2023, and (c) 10 May 2024, and for the wind speed in (d) 10 May 2019, (e) 19 May 2023, and (f) 10 May 2024.

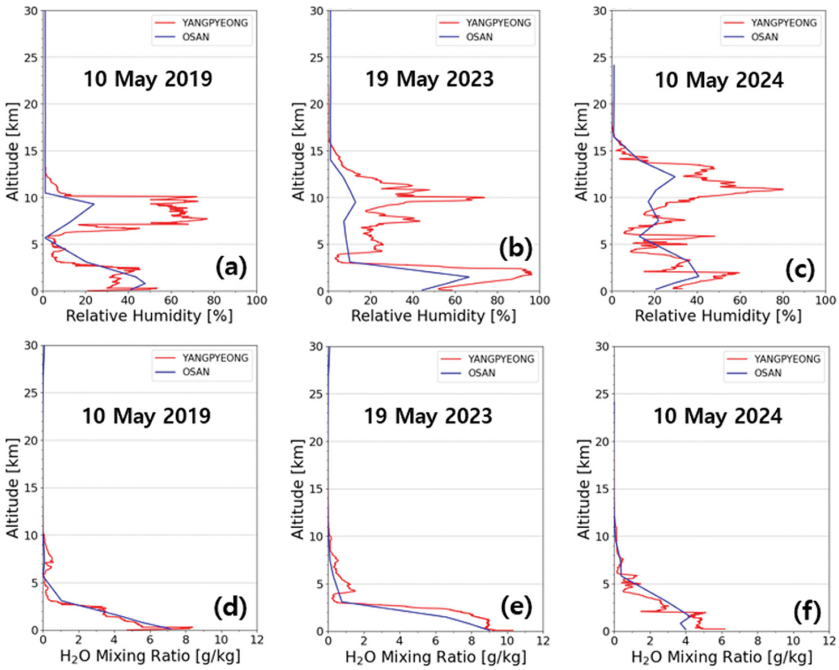

Fig. 8. Vertical profile comparison of radiosonde measurements between Yangpyeong (red) and Osan (blue) for the relative humidity in (a) 10 May 2019, (b) 19 May 2023, and (c) 10 May 2024, and for the water vapor mixing ratio in (d) 10 May 2019, (e) 19 May 2023, and (f) 10 May 2024.

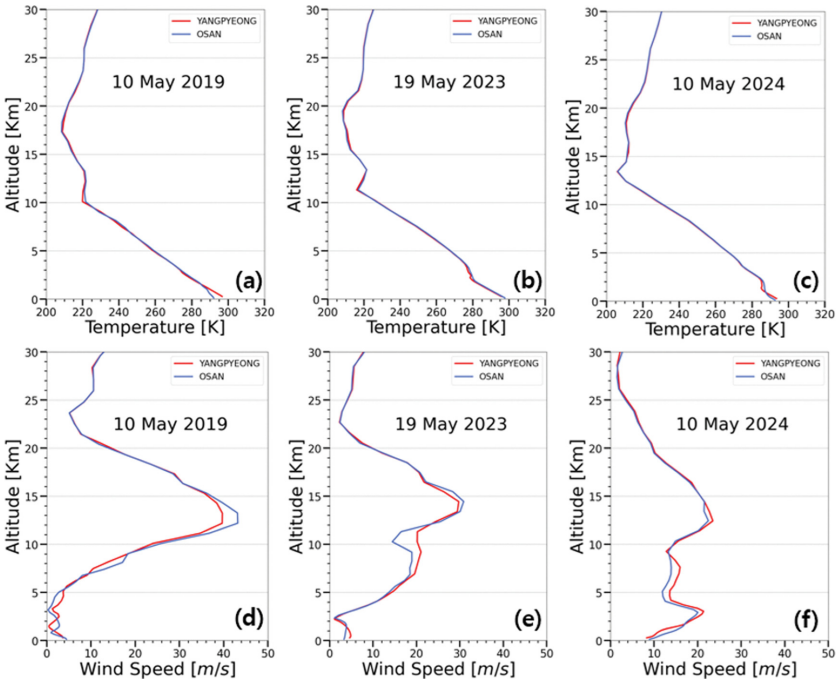

Fig. 9. Same as Fig. 7, but based on the MERRA-2 dataset.

km 정도 범위로 떨어져 있음에도 양 지역의 라디오존데 관측이 보여주는 기온의 연직분포는 3개의 사례(2019년 5월 10일, 2023년 5월 19일, 2024년 5월 10일) 모두 매우 흡사하게 나타나는 것이 확인된다(Figs. 7a, b, and c). 풍속의 경우도 전체적인 연직 분포 패턴은 꽤나 비슷하게 나타나는 편이다. 다만 기온 자료와는 다르게, 고도의 변화에 따른 풍속 변화의 폭이 큰 편이라 특정 기압고도 중심으로 자료를 제공해주는 오산 상시 관측망의 자료에 비해 조금 더 변동성이 큰 측면이 있고, 2023년 사례에서는 그래서 양평과 오산의 풍속 연직 분포 차이가 다소 일치하지 않는 부분도 나타나는 편이다(Figs. 7d, e, and f).

기온과 풍속과는 달리 상대습도의 경우는 양평과 오산지역의 차이가 꽤 크게 나타나는 것이 확인된다(Figs. 8a, b, and c). 지표 부근에서도 차이가 존재하지만 고도 5 km 이상에서 양평에서 비양한 라디오존데가 보여주는 상대습도 크기가 오산에 비해 훨씬 더 크게 나타남이 확인된다. 다만 기온과 기압 정보 등을 활용하여 상대습도를 수증기 혼합비로 바꾼 후에 연직 분포를 두 지역에 대해 비교해보면 전반적으로 비슷한 연직 분포를 보여주는 것이 확인된다(Figs. 8d, e, and f). 즉, 대기 밀도가 낮은 상층에서는 기온, 기압 등의 작은 차이에 의해서도 상대습도가 크게 변할 수 있다는 점을 감안할 필요가 있음을 알 수 있다. 수증기 혼합비로 보면 기온, 풍속 정보와 마찬가지로 양평과 오산의 대기 특징이 그렇게 크게 차이나지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

라디오존데 자료가 양평과 오산에서 유사하게 나타났던 것과 마찬가지의 특징을 MERRA-2 자료에서도 발견할 수 있을지도 살펴보았다. 그림 1에서 나타나듯이 양평 및 오산 지역을 포함한 MERRA-2 재분석 자료의 격자는 대각선으로 인접해 있다(Fig. 1). 여기에서 발췌한 자료를 연직으로 비교한 결과 라디오존데 비교 결과와 마찬가지로 온도의 연직 분포는 두 지역이 거의 흡사하게(Figs. 9a, b, and c), 풍속의 연직 분포도 꽤나 비슷하게 나타나는 것이 확인된다(Figs. 9d, e, and f). 이 분석에서는 재분석 자료가 양평과 오산에서 비슷하게 나타나는 것뿐만 아니라 그 유사성이 라디오존데 자료가 양평과 오산에서 보여주는 것과 비슷하다는 것 역시 인상적이다. 예컨대 2019년에는 양평의 풍속이 오산보다 살짝 낮은 부분, 2023년에 약 10 km 고도에서 양평의 풍속이 오산보다 다소 두드러지게 높게 나타나는 부분, 2024년에는 양평의 풍속이 오산보다 살짝 높게 나타나는 부분(Figs. 9d, e, and f), 이런 세밀한 차이가 라디오존데와 같이 재분석 자료에서도 매우 잘 구현되고 있음을 확인할 수 있다.

상대습도의 경우는 라디오존데가 양평과 오산에서

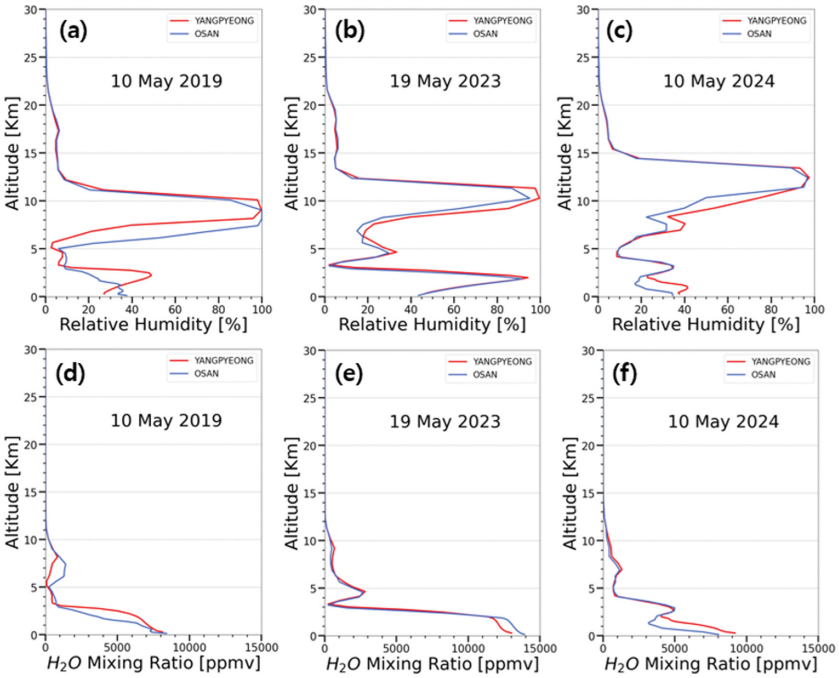

Fig. 10. Same as Fig. 8, but based on the MERRA-2 dataset.

연직 분포를 꽤 다르게 나타내던 것과는(Figs. 8a, b, and c) 달리, MERRA-2 재분석 자료는 꽤나 비슷한 연직분포를 보여주고 있다(Figs. 10a, b, and c). 당연히 그에 따라 수증기의 혼합비가 보여주는 연직분포도 양평과 오산 지역에서 비슷하게 나타나는데(Figs. 10d, e, and f), 이 수증기 혼합비 연직 분포 특성이 라디오존데의 그것과 큰 차이가 없다는 점을(Figs. 8d, e, and f), 감안하면 상층에서의 상대습도의 차이가 수증기의 연직분포를 이해하는 부분에는 크게 영향이 없다는 점을 다시 한 번 더 확인할 수 있다. 상층 대기에 대해선 상대습도 정보를 활용하기 보다 수증기 혼합비 또는 비습 정보를 직접 활용하는 것이 바람직하다고 생각된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 연세대학교에서 매년 진행되는 야외공동관측 워크샵에서 확보된 양평지역 5월 라디오존데 3회 관측 자료를 바탕으로 그간 실측 자료가 거의 존재하지 않았던 양평 지역의 기온, 풍속 및 상대습도의 연직 분포 특성을 분석한 결과를 제시하였다. 비록 3회 관측 자료에 기반한 사례 분석이지만 라디오존데 관측 자료와 재분석 자료를 비교했을 때 기온의 연직분포가 꽤나 유사하게 나타난다는 점, 풍속은 5 km 고도 이상 상층에서 다소 정량적인 차이를 보이지만 전체적인 연직 프로파일 모양은 유사하게 나타난다는 점, 상대습도는 다소 큰 차이를 보인다는 특징을 확인할 수 있었다. 또한 오산 지역의 라디오존데 관측과 비교해 보았을 때 기온의 연직 분포는 꽤나 유사하게, 풍속의 연직분포도 비교적 전체적인 형태가 유사하게, 상대습도의 경우는 비록 차이를 보이지만 수증기 혼합비로 변환했을 때 그 연직 구조가 퍽 흡사하게 나타나는 것을 확인함으로써 수도권에서 단 한 군데만 존재하는 경기 남부 지역 오산 관측소의 라디오존데 관측 정보가 적어도 경기 동부 지역의 대기 특성을 나름 대표할 수 있음을 확인할 수 있었다.

물론 본 연구 결과는 겨우 3회의 단순 사례 분석인데다가 5월이라는 시기가 대기 불안정성이 매우 강한 장마철이나 대기 역학적 특징이 강하게 나타나는 겨울철에 비해선 대기의 요란함이 크지 않은 시기이기 때문에 이 결과를 일반화하기엔 무리가 있다. 하지만 이런 교육용 관측 자료를 통해서도 얼마든지 지역 대기 특징을 파악하는데 유용한 정보를 마련할 수 있다는 점을 보여주고자 하는 것이 본 연구의 가장 큰 목적으로서 특히 대기의 연직 구조는 아직 현장 관측 자료가 충분하지 않기에 이런 사례 분석 결과가 나름대로 유의미한 참고자료가 될 수 있을 것이라 생각된다. 모델링 기술의 발전에 의해 이전에 비해 훨씬 복잡한 물리과정을 포함한 수치모델이 활용되고 있는 요즘에도 여전히 장난감 모델(toy model) 기반의 연

구를 통해 대기과학 분야의 새로운 발견들이 이어지고 있음을 감안할 때(Balogh et al., 2021; Bednář and Kantz, 2022), 관측 분야에서도 교육용 자료의 적극적인 활용 역시 큰 가치를 가질 수 있다고 생각한다. 특히 고가의 장비를 기반으로 하는 연구, 대규모 연구팀이 동원된 집중 연구들이 다룰 수 없는 지역 규모의 연구나 여전히 공백으로 남아 있는 시공간 규모의 자료 검증 연구 등에서 충분히 유의미한 정보를 제공해줄 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 성과는 연세대학교 대기과학과 실험실습비 재원 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00219830).

REFERENCES

Balogh, B., D. Saint-Martin, and A. Ribes, 2021: A toy model to investigate stability of AI-based dynamical systems. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2020GL092133, doi:10.1029/2020GL092133.

Bednář, H., and H. Kantz, 2022: Prediction error growth in a more realistic atmospheric toy model with three spatiotemporal scales. *Geosci. Model Dev.*, **15**, 4147-4161, doi:10.5194/gmd-15-4147-2022.

Carvalho, D., 2019: An assessment of NASA's GMAO MERRA-2 reanalysis surface winds. *J. Climate*, **32**, 8261-8281, doi:10.1175/JCLI-D-19-0199.1.

Dirksen, R., and Coauthors, 2024: Report of WMO's 2022 Upper-Air instrument intercomparison campaign. *World meteorological organization instruments and observin methods report*, No. 143, 140 pp.

Gelaro, R., and Coauthors, 2017: The Modern-Era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, **30**, 5419-5454, doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

GMAO, 2015: inst3 3d asm Cp: MERRA-2 3D IAU State, Meteorology Instantaneous 3-hourly (p-coord, 0.625x0.5L42), version 5.12.4, Greenbelt, MD, USA: Goddard Space Flight Center Distributed Active Archive Center (GSFC DAAC). Accessed in 1 June 2024, Global Modeling and Assimilation Office, doi:10.5067/VJAFPLI1CSIV.

Jang, M., C.-H. You, J.-B. Jee, S.-H. Park, S.-I. Kim, and Y.-J. Choi, 2016: Three-dimensional analysis of heavy rainfall using KLAPS re-analysis data. *Atmosphere*, **26**, 97-109, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.097.

Kang, H., J. Kim, M. Park, and S. An, 2024: Radiosonde observation using general purpose radio receiving instruments. *Atmosphere*, **34**, 325-336, doi:10.14191/Atmos.2024.34.3.325.

Kim, H., and Coauthors, 2020: Factors controlling surface ozone in the Seoul Metropolitan Area during the KORUS-AQ campaign. *Elem. Sci. Anth.*, **8**, 46, doi:10.1525/elementa.444.

Kim, H. C., and Coauthors, 2017: Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea. *Sci. Rep.*, **7**, 4710, doi:10.1038/s41598-017-05092-8.

Kim, K.-H., Y.-H. Kim, and D.-E. Chang, 2009a: The Analysis of Changma structure using radiosonde observational data from KEOP-2007: Part I. the Assessment of the radiosonde data. *Atmosphere*, **19**, 213-226.

_____, _____, and _____, 2009b: The Analysis of Changma structure using radiosonde observational data from KEOP-2007: Part II. The dynamic and thermodynamic characteristics of Changma in 2007. *Atmosphere*, **19**, 297-307.

Kim, S., and Coauthors, 2018: The controlling factors of photochemical Ozone production in Seoul, South Korea. *Aerosol Air Qual. Res*. **18**, 2253-2261, doi:10.4209/aaqr.2017.11.0452.

Koo, J.-H., and Coauthors, 2024: The analysis of summertime tropospheric Ozone at anmyeon using Ozonesonde measurements in 2021~2022. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **40**, 373-383, doi:10.5572/KOSAE.2024.40.3.373.

Lee, T., S. Go, Y. G. Lee, S. S. Park, J. Park, and J.-H. Koo, 2022: Temporal variability of surface air pollutants in megacities of South Korea. *Front. Environ. Sci.*, **10**, 915531, doi:10.3389/fenvs.2022.915531.

Li, Z., X. Yang, C. Zhao, and T. Fan, 2021: Ratio of PM2.5 to PM10 mass concentrations in Beijing and relationships with pollution from the North China plain. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci*., **57**, 421-434, doi:10.1007/s13143-020-00203-4.

Luo, B., P. J. Minnett, M. Szczodrak, N. R. Nalli, and V. R. Morris, 2020: Accuracy assessment of MERRA-2 and ERA-Interim sea surface temperature, air temperature, and humidity profiles over the atlantic ocean using AEROSE measurements. *J. Climate*, **33**, 6889-6909, doi:10.1175/JCLI-D-19-0955.1.

Meteomodem, 2024: Homepage. Accessed 21 August 2024, [Available online at https://www.meteomodem.com].

Pan, L. L., S. H. Honomichl, T. V. Bui, T. Thornberry, A. Rollins, E. Hintsa, and R. J. Jensen, 2018: Lapse rate

or cold point: The tropical tropopause identified by in situ trace gas measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 10756-10763, doi:10.1029/2018GL079573.

Seidel, D. J., R. J. Ross, J. K. Angell, and G. C. Reid, 2001: Climatological characteristics of the tropical tropopause as revealed by radiosondes. *J. Geophys. Res.*, **106**, 7857-7878, doi:10.1029/2000JD900837.

WMO, 1957: Meteorology—A three dimensional science: Second session of the Commission for Aerology. WMO Bulletin, IV(4), World Meteorological Organization, 134-138.

Yoon, J.-H., and K.-H. Min, 2016: Characteristic analysis of multicell convective system that occurredon 6 August 2013 over the Korean peninsula. *Atmosphere*, **26**, 321-336, doi:10.14191/Atmos.2016.26.2.321.