

## 도플러 라이다와 라디오존데의 바람 관측 자료 품질 관리

김주섭<sup>1</sup>, 김정훈<sup>1</sup>, 이주현<sup>1</sup>, 최은호<sup>2</sup>, 서성호<sup>2</sup>, 김홍일<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교, 지구환경과학부

<sup>2</sup>한국항공우주연구원, 나로우주센터

기상은 발사 임무의 성패를 좌우하는 요소 중 하나이며, 발사 임무 계획 및 수행에 있어 필수적으로 고려된다. 지난 2022년 6월 15일 나로우주센터에서 발사 예정이었던 한국형 발사체 누리 2호기는 강한 바람으로 인해 발사가 하루 연기된 바 있으며, 1986년 1월 28일에 미합중국에서 발생한 우주왕복선 챌린저호 사고가 발생했을 당시 강한 윈드시어에 의한 비행 하중이 발사체 파괴에 기여했을 가능성이 제시된 바 있다. 따라서 나로우주센터 주변의 정확한 바람 정보를 얻는 것은 한국형 발사체 발사 임무의 성공뿐만 아니라 한국형 발사체 신뢰성 확보에 필수적이다. 본 연구에서는 나로우주센터에서 윈드라이다와 라디오존데를 통해 관측되는 바람의 정확도 향상을 위해 품질 관리 절차를 고안하고, 그 효과를 평가하는 것이다. 먼저 본 연구에서 고안한 품질 관리 절차는 총 네 가지 기준이 있으며 각 기준을 모두 충족하여야 한다. 1. 관측된 바람의 풍속(Wind Speed; WS)  $\geq$  최소 풍속 임계값(MIN<sub>thr</sub>). 2. WS  $\leq$  최대 풍속 임계값(MAX<sub>thr</sub>). 3. 국지 질감 (Local Texture; TXT)  $\leq$  임계값(TXT<sub>thr</sub>). 4. 국지 결측 비율(Local Missing Ratio; MR)  $\leq$  임계값(MR<sub>thr</sub>). 첫 번째 기준은 보다 정교한 풍향 정보를 갖는 바람 자료를 선별하기 위해, 두 번째 기준은 풍속이 지나치게 높게 관측된 비물리적인 바람 자료를 선별하기 위한 기준이다. 본 연구에서 MIN<sub>thr</sub>은 1.5 m s<sup>-1</sup>로, MAX<sub>thr</sub>은 ERA5의 바람 자료를 활용하여 나로우주센터 주변 바람의 기후값을 바탕으로 설정하였다. TXT와 MR은 일정 크기의 윈도우를 고도 방향으로 이동하며 윈도우에 포함된 바람 자료들을 통해 계산하는 변수이다. TXT는 윈도우 내 바람 자료들의 공간적 변동을 정량화한 변수이며, MR은 윈도우 내 모든 자료 개수(관측+결측)에 대한 결측 자료 개수의 비율을 의미한다. TXT<sub>thr</sub>은 모든 TXT 자료의 누적확률밀도함수를 기반으로 설정하였으며, MR<sub>thr</sub>은 0.3으로 설정하였다. 바람 관측 자료와 ERA5 바람 자료를 비교한 결과 본 연구에서 고안된 품질 관리 기준들이 매우 효과적인 것으로 나타났다. 본 연구 결과를 통해 나로우주센터에서는 보다 정확한 바람 프로파일을 확보할 수 있게 되었으며, 이는 발사체 안전성 확보에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

**Keywords:** 도플러 라이다, 라디오존데, 바람, 품질 관리

※ 이 연구는 한국항공우주연구원의 2024년 기본사업인 ‘우주센터 선진화사업’, 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」 (RS-2022-KM220310)의 지원으로 수행되었습니다.

## 위상배열 레이더를 활용한 위험기상 민첩 관측

김권일<sup>1</sup>, Edward Luke<sup>2</sup>, Mariko Oue<sup>3</sup>, Pavlos Kollias<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 지구시스템과학부 천문대기과학전공, 대기원격탐사연구소

<sup>2</sup>Environmental Science and Technologies Department, Brookhaven National Laboratory

<sup>3</sup>School of Marine and Atmospheric Sciences, Stony Brook University

위상배열 레이더(Phased Array Radar, PAR)는 기존의 접시형(parabolic) 레이더의 기계적 빔 조향 한계를 극복하고, 전자적 빔 조향을 통해 필요한 관측 방향으로 민첩하게 방향을 전환할 수 있다. 이러한 빔 민첩성(beam agility)은 1분 내로 3차원 부피 관측을 가능하게 하고, 특정 관심영역(Region of Interest, ROI)을 대상으로 PPI 및 RHI 관측을 동적으로 수행할 수 있도록 한다.

이러한 강점을 기반으로 개발된 SPARS (Saccadic Phased Array Radar Sampling)는 ROI를 동적으로 탐지하고 자동으로 빔을 해당 영역으로 재지향하는 적응식(adaptive)관측 알고리즘이다. 이 알고리즘은 선택된 ROI에 대한 조향시간을 극대화함으로써, 빠르게 발달하는 강수 시스템의 진화를 라그랑주(Lagrangian) 관점에서 높은 시간 해상도로 포착할 수 있도록 한다. 그 결과, SPARS가 적용된 PAR은 기존 체적 스캔의 관측 공백을 보완할 뿐만 아니라, 급변하는 강수 시스템의 역학 분석에 필요한 연직 프로파일을 높은 시간 해상도로 제공한다.

본 연구에서는 2023년 8월 13일 미국 뉴욕 롱아일랜드에서 발생한 마이크로버스트 사례에 대한 SPARS 활용 관측을 소개한다. 동일 시점의 인근 현업 S-밴드 레이더의 체적 관측과 비교분석해 SPARS와 PAR의 유용성을 제시한다.

**Keywords:** 위상배열 레이더, SPARS, 민첩 관측, 마이크로버스트, 위험기상

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「고해상도 도시기상서비스 기술개발(KMA2018-00627)」의 지원으로 수행되었습니다.

## 라디오존데 상승·하강 관측자료의 상호비교 및 특성 분석

인소라, 황성은, 최영길, 김기훈, 이철규

국립기상과학원 관측연구부

라디오존데는 자유기구(풍선)에 탑재되어 기온, 기압, 습도, 바람 등을 관측하는 장비로, 우리나라 기상청은 1966년 11월 12일 포항에서 라디오존데 관측을 시작하였다. 전통적인 라디오존데 관측은 배터리 용량과 송신기 성능 등의 기술적 제약으로 상승 자료만을 활용할 수 있었으나, 장비 성능 향상으로 하강 자료도 수신·활용이 가능해졌다. 기상청은 2019년부터 하강 관측자료를 생산하고 있다. 본 연구에서는 기상청에서 생산 중인 라디오존데 상승·하강 관측자료의 특성을 분석하고 상호 비교함으로써 하강 자료의 품질을 평가하고자 하였다. 분석 기간은 2020년 1월 1일부터 2024년 12월 31일까지 5년이며, 00 및 12 UTC 자료를 사용하였다. 분석 지점은 백령도, 북강릉, 포항, 창원, 흑산도, 태풍센터로 총 6곳이다. 자료는 상호 비교를 위해 0~30 km 구간을 50 m 간격(총 601개 층)으로 재처리하였으며, 기준 고도와 최근접한 관측값을 적용하되, 고도 차이가 10 m 이상일 경우 결측으로 처리하였다.

상승·하강 종말 고도를 분석한 결과, 평균 상승 종말 고도는 약 30.5 km로 포항이 약 32.3 km로 가장 높았다. 평균 하강 종말 고도는 약 4.4 km였으며, 태풍센터가 약 2.2 km로 가장 낮았고, 창원은 9 km로 상대적으로 높았다. 이는 지형적 요인으로 하층에서 신호가 차폐된 결과로 판단된다. 비양 시간과 이동 거리를 비교한 결과, 상승에는 평균 1시간 49분이 소요되며 약 109 km 이동하였고, 하강에는 평균 40분이 소요되며 약 54 km 이동하였다. 평균 상승 속도는 5.1 m/s, 평균 하강 속도는 13.4 m/s였다. 또한 동일 고도에서 상승·하강 기온과 습도를 비교한 결과, 기온 mean bias는 -0.15 °C로 하강 자료가 상승자료보다 기온을 낮게 측정하는 것으로 나타났으며, 습도 mean bias는 0.87%였다. 두 변수의 차이는 모두 센서 측정 불확도 범위 내에 포함되어, 상승·하강 자료의 유사성을 확인할 수 있었다.

**Keywords:** 라디오존데, 하강관측, 상승·하강비교, 레윈존데

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「국가 기상관측장비 및 관측자료 표준화」(KMA2018-00221)의 지원으로 수행되었습니다.

## 관측환경별 연구용 기상관측차량 기상측기 비교관측

이진화, 김건태, 김대열, 임병환

국립기상과학원 예보연구부 재해기상연구소

재해기상연구소는 연구용 기상관측차량의 기상측기 구조물 개선으로 기온의 주·야간 편차가 감소함을 확인하였지만, 차량의 영향을 최소한 경우에도 관측환경 등의 영향으로 기온 오차는 발생하였다. 개선된 구조물은 2024년 12월에 신규 차량(이하, MOVE2)에 이전 설치하였고, 관측환경(아스팔트, 초지)에 따라 비교 실험을 추가하여 관측 자료의 안정성을 확보하고자 한다. 종관기상관측장비(북강릉 ASOS)를 기준으로 기온 오차(차량 기온-북강릉 ASOS 기온)를 계산하였고, MOVE2(온도센서와 차량과의 수평거리를 90cm 이격)와 현업용 기상관측차량(강원청, 차량과의 수직거리를 2.5m 이격, 2025년 봄철부터 비교함)의 기온 오차를 비교하였다. 2025년은 겨울(2.17. 일몰~2.24. 일출/잔디), 봄(5.1. 일몰~5.12. 일출/아스팔트, 5.16. 일몰~5.26. 일출/잔디), 그리고 여름(7.7. 일몰~7.13. 일출, 7.14. 일몰~7.16. 일출/잔디, 7.18. 일몰~7.24. 일출/아스팔트)에 비교관측을 수행하였고, 추가로 가을철(9~10월)과 겨울(12월)도 비교관측 예정이다. 본 연구에서는 계절별·관측환경별 비교관측을 통해 차체 가열·냉각이 온도센서에 미치는 영향을 주·야간으로 나누어 분석하였다.

잔디 관측환경에서는 차량 외장(복사열) 영향으로 겨울철과 여름철의 경우 주간 온난편차와 야간 한랭편차가 발생하였지만, 봄철은 모두 한랭편차가 발생하였다. 야간의 한랭편차는 겨울(약 90%), 봄(75% 이상), 여름(50%) 순서였고, 강원청의 경우 차량의 영향이 더해져 온난편차(봄철은 50%, 여름철은 75% 이상)가 강화되었다.

아스팔트 관측환경에서는 봄철 주간 아스팔트에 축적된 열이 지표면에서 방출되는 열과 차량 외장(복사열) 영향으로 온난편차가 발생하였고, 이는 봄철 주간 아스팔트에서 저장된 열을 야간에 방출하면서 2m 기온의 야간 냉각을 지연시켰다. 반면에 여름철 아스팔트 관측환경에서는 MOVE2와 강원청 모두 봄철에 비해 온난편차가 상대적으로 감소하였다.

또한 본 연구에서는 인공지능 기법과 교차검증을 사용하여 MOVE2 기온을 보정하였고, 사용한 자료는 지상관측자료, 관측환경, 고도각, 방위각 등이다. 겨울철과 봄철에 대한 독립 변수의 중요도는 관측환경, 기온, 방위각 순서이고, 한랭편차의 개선이 뚜렷하게 나타났다. 향후 계절별 누적 관측 자료를 확보한 후 계절별 보정식을 개발할 예정이다.

**Keywords:** 연구용 기상관측차량, 지상관측자료, 기상측기, 비교관측, 기온 보정

※ 이 연구는 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 사업의 '재해기상 목표관측·분석·활용기술 개발 (KMA2018-00123)' 의 지원으로 수행되었습니다.

관측 및 예보 분과 / 관측 및 예보 1-5

## EM27/SUN FTIR 분광기의 지상 기반 온실가스 관측 특성 분석

강민주<sup>1</sup>, 안명환<sup>1</sup>, 강민아<sup>2,3</sup>, 오영석<sup>4</sup>

<sup>1</sup>이화여자대학교 기후·에너지시스템공학부

<sup>2</sup>뉴욕 시립대학교

<sup>3</sup>미국해양대기청 Cooperative Science Center for Earth System Sciences and Remote Sensing Technologies

<sup>4</sup>국립기상과학원 기후연구부

EM27/SUN은 휴대성과 운용의 용이성 덕분에 전 세계적으로 널리 활용되고 있는 이동형 푸리에 변환 적외선 분광기(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)이다. 최근 기상청 국립기상과학원에서 국내에 도입하여 운용을 시작함에 따라, 고정형의 고해상도 푸리에 변환 적외선 분광기인 IFS125HR과의 비교를 통해 해당 기기의 관측 특성을 정량적으로 평가하고 정확도 및 신뢰성을 검증할 필요가 있다. 본 연구에서는 EM27/SUN의 관측 신뢰성과 체계적 오차를 평가하기 위해, 2024년 동안 안면도 기후변화감시소에서 IFS125HR과 EM27/SUN의 복합 관측을 수행하였다. 두 기기의 이산화탄소(XCO<sub>2</sub>)와 메탄(XCH<sub>4</sub>) 연직평균농도를 산출해 비교한 결과, 동일 일자 내 시간별 관측에서는 일관된 체계적 오차가 확인되었다. 그러나 계절에 따라 오차의 크기가 달라지는 양상이 나타났으며, 그 편차는 XCO<sub>2</sub>의 경우 약 0.45 ~ 1.74 ppm, XCH<sub>4</sub>의 경우 약 -3.43 ~ -9.18 ppb의 범위로 확인되었다. 단일 보정 계수를 적용했을 때, XCH<sub>4</sub>는 두 기기 간 높은 일치성(회귀선 기울기 0.97)을 보였으나, XCO<sub>2</sub>에서는 회귀선 기울기가 1.14로 단일 보정의 한계가 나타났다. 이러한 결과는 오차의 시기별 변동성을 고려한 정밀한 분석과 보정이 필요함을 시사한다. 또한 태양천정각이 큰 저녁 시간대와 구름이 부분적으로 존재할 때 EM27/SUN의 관측 정확도가 뚜렷하게 저하되는 양상이 확인되었다. 이러한 결과를 토대로 본 연구에서는 체계적 오차의 원인을 규명하고, 보정계수 산정 및 품질 관리(Quality Control) 기준을 수립하고자 한다. 나아가, 위성·항공기·지상 기반 관측이 통합적으로 수행된 국제 공동 관측 캠페인 ASIA-AQ(Airborne and Satellite Investigation of Asian Air Quality) 기간 동안 이화여자대학교에서 관측한 EM27/SUN 자료에 해당 기준을 적용하여 온실가스 농도 특성을 분석하고자 한다. 본 연구는 EM27/SUN 관측 특성에 대한 이해를 심화시키며, 향후 온실가스 모니터링 활용성을 제고하는 기반을 제공할 것으로 기대된다.

**Keywords:** 온실가스, 지상 원격 관측, EM27/SUN, IFS125HR, ASIA-AQ

※ 이 연구는 기후 및 기후변화 감시·예측 정보 응용 기술개발 사업(RS-2025-02316767)의 지원으로 수행되었습니다.

## C-밴드 레이더 관측변수 시스템오차 산출기술 개발

강은비, 권수현, 석미경

기상청 기상레이더센터 레이더분석과

기상청은 안전한 항공기 운항의 기상지원을 위해 인천공항에 C-밴드 이중편파레이더를 교체 설치하여('22) 운영하고 있다. 공항 및 서해상의 위험기상 탐지를 위한 효율적인 C-밴드 레이더의 활용을 위해서는 안정적인 레이더 관측변수 산출이 필요하다.

본 연구에서는 C-밴드 이중편파레이더 관측변수의 시스템 오차를 산출하기 위해 고품질 자료를 추출하는 전처리 과정을 거친 후, 자기일치성(self-consistency)을 이용하여 반사도와 차등반사도의 시스템오차를 계산하는 기술을 개발하였다. 우선, 전처리 과정으로 레이더 중심에서의 강한 강우로 인해 레이더 관측변수가 전체적으로 감쇠되는 젖은 레이돔 영향(wet-radome effect)을 최소화하기 위해 레이돔 중심 영역의 반사도와 비차등위상의 평균 임계치를 이용하여 감쇠 영향을 판단하고 제외하였다. 그리고 강한 강우의 후면에서 감쇠되는 반사도와 차등반사도에 대해 보정량을 적용하여 고품질의 자료를 확보하였다. 최종적으로 자기일치성을 이용하여 시스템오차를 산출하기 위해 진천 레이더비교관측소의 2차원영상우적계(2DVD)에서 관측된 우적크기분포를 이용하여 C-밴드 레이더 주파수에 해당하는 관측변수를 산란모의하고 시스템 오차 산출 관계식( $KDP(Z_H, Z_{DR}), ZDR(Z_H)$ )을 도출하고 적용하였다. 산출된 반사도 및 차등반사도 시스템오차는 C-밴드 이중편파레이더와 중첩영역이 존재하는 관악산 및 백령도레이더의 관측변수와 비교하여 시스템오차의 정확도를 검증하였다.

**Keywords:** 기상레이더, C-밴드 레이더, 시스템오차, 자기일치성(self-consistency)

※ 이 연구는 기상청 기상레이더센터 R&D 연구개발사업 “국가레이더 통합 활용 기술개발”의 “레이더 기반 위험 기상 감시기술 개발(KMA2021-03121)”의 지원으로 수행되었습니다.