

범용 라디오 수신장비를 활용한 라디오존데 관측

강현규¹⁾ · 김주완^{1)*} · 박민성²⁾ · 안상현³⁾

¹⁾공주대학교 대기과학과, ²⁾국립기상과학원 예보연구부, ³⁾스페이스웨어(주)

(접수일: 2024년 5월 14일, 수정일: 2024년 5월 21일, 게재확정일: 2024년 5월 24일)

Radiosonde Observation Using General Purpose Radio Receiving Instruments

Hyungyu Kang¹⁾, Joowan Kim^{1)*}, Minseong Park²⁾, and Sanghyun An³⁾

¹⁾Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

²⁾Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea

³⁾SPACEWARE Co., Ltd., Daejeon, Korea

(Manuscript received 14 May 2024; revised 21 May 2024; accepted 24 May 2024)

Abstract Radiosonde is an important in-situ profiling instrument that measures atmospheric temperature, moisture, and wind structure from the surface to the middle stratosphere. The operational radiosonde measurements are carried out more than twice (at 0000 UTC and 1200 UTC) daily at approximately 1,300 World Meteorological Organization (WMO) stations and play a pivotal role in daily weather forecasts. It also contributes to the monitoring of atmospheric structure by providing the key physical information like temperature and pressure, forming the backbone of atmospheric (re)analyses and numerical weather forecasts. Additionally, high-resolution radiosonde profiles are used for calibration and evaluation of satellite products. Despite these advantages, radiosonde measurements are mostly limited to operational uses due to the high initial cost of ground instrument setup required for data transmission and reception. This study outlines a cost-effective (roughly one-tenth of the operational cost) method for establishing the ground station and the necessary radiosonde measurement procedures, offering guidance for individual researchers or university-level instructors.

Key words: Radiosonde, Observation, Balloon-born measurement

1. 서 론

라디오존데(radiosonde)는 기상 관측용 풍선(weather balloon)에 소형 센서를 부착하여 대기의 온도, 습도, 바람을 고도별로 측정하는 고층기상관측 장비이다. 라디오존데를 이용한 고층기상관측은 직접 측정(in-situ)에 기반하므로 우수한 정확도와 높은 연직해상도의 자료를 제공하며 이는 상층 일기도 생성 및 수치예보 모델의 예측 성능 향상을 위해 필수적인 자료로 활용

된다. 현재 세계적으로 약 1,300개의 지점(Fig. 1)에서 일 2회(0000 UTC, 1200 UTC) 관측이 규칙적으로 수행되고 있으며, 데이터의 양이 늘어날수록 대기분석 자료의 성능과 예측모델의 정확도가 개선되므로 태풍, 집중 호우, 대설과 같은 현상의 연구를 위한 특별 관측에도 빈번하게 활용된다.

직접 측정과 원격송수신 기법을 이용한 대표적인 고층기상관측 장비에는 라디오존데와 드롭존데(dropsonde)가 있다. 라디오존데는 헬륨과 같이 공기보다 가벼우면서도 안정한 기체를 주입한 관측용 풍선에 관측과 자료의 송신 기능이 있는 소형 센서를 결합하여 지상에서 대기 상층까지 관측하고, 드롭존데는 라디오존데와 같은 기능이 있는 소형 센서를 항공기에서 투하하여 대기 상층에서 지상으로 낙하하며

*Corresponding Author: Joowan Kim, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56 Gongjudaehakro, Gongju 32588, Korea.
Phone: +82-41-850-8530, Fax: +82-41-850-8530
E-mail: joowan.k@gmail.com

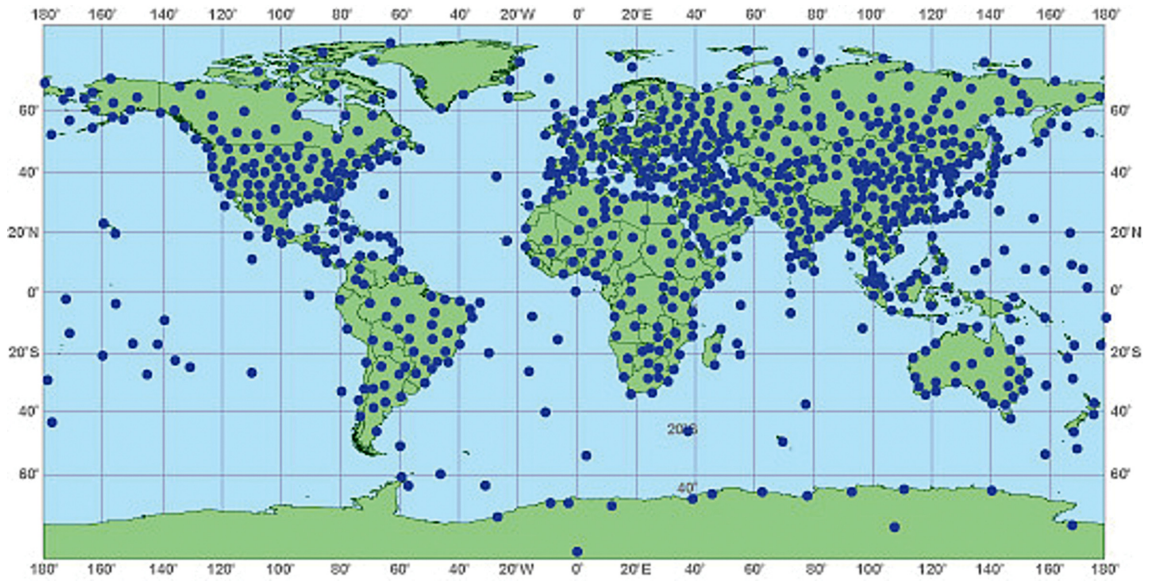


Fig. 1. Global distribution of operational radiosonde stations (figure source: NOAA, <http://www.noaa.gov/jetstream/upperair/radiosondes>).

대기 관측을 수행한다. 드롭존데 관측은 해상, 태풍과 같이 현실적으로 지상에서 관측하기 어려운 장소의 자료를 얻을 수 있다는 이점이 있지만, 관측을 수행할 때 항공기가 필요하므로 상대적으로 관측 비용이 높은 편이다. 라디오존데 관측은 드롭존데 관측에 비해 소요되는 비용이 적고(회당 약 50만원) 중요한 기상 요소인 온도, 습도, 기압, 풍향 및 풍속을 높은 해상도로 관측할 수 있을 뿐만 아니라, 실시간으로 관측자료가 수집되므로 신속하게 기상 예보에 활용할 수 있다. 풍선의 종류와 주입하는 헬륨의 양으로 관측 고도를 조절할 수 있으며, 소수의 인원만으로 관측 수행이 가능하다는 이점도 갖는다. 이와 같은 장점으로 인해, 라디오존데는 수 십 년 동안 대기 연직 관측에 활용되었으며, 대기의 상태를 진단하고 예측하는데 필요한 필수 정보를 생산하고 있다(Dirksen et al., 2020). 또한 라디오존데 관측은 초기에 기상 관측만을 목적으로 수행되었으나, 이후에는 모델 검증, 기상 및 기후 연구, 위성 데이터의 검증(Finger and Schmidlin, 1991; NRC, 2000; Free et al., 2002; Durre et al., 2006; Zhang et al., 2022)에 다양하게 활용되며, 지구온난화에 따른 대기 온도 변화를 감시하는 표준 자료로 활용되고 있다(Seidel et al., 2009).

이러한 장점에도 불구하고 라디오존데는 지상 수신 장비의 구축에 상대적으로 높은 비용(3,000~5,000만원)이 소요되기 때문에 현업 관측 이외의 교육 및 연구 활동에는 제한적으로 활용되어왔다. 본 기술노트에서는 SDR (Software-Defined Radio) 기반의 범용라디오

수신장비를 활용하여 1/10 수준의 비용으로 연구용 라디오존데 수신장비를 구축하는 방법을 소개하고자 한다. 해당 지상 수신장비는 시중에서 쉽게 구매가 가능한 400 MHz 대역의 일반 안테나와 SDR 장비를 활용하여 라디오존데 신호를 수신하고 이를 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 프로그램으로 분석하는 방법으로 구성되었다. 미국 해양대기청의 프로그램은 XDATA 형태로 자료를 송신하는 모든 라디오존데에 활용할 수 있으며 본 연구에서는 인터넷 시스템스(InterMet Systems, 2024a)사의 iMet-4RSB 라디오존데를 활용하였다. 관련 구성으로 2022년 1월 당진 지역에서 57회, 2023년 2~3월 서산 지역에서 28회의 라디오존데 관측을 수행하였으며 높은 품질의 자료를 95% 이상 수신하였다. 2장에서는 라디오존데 관측을 위한 사전 준비에 대한 내용을 담았으며, 관측에 필요한 장비와 소프트웨어에 대해 자세히 서술하였다. 3장에서는 실질적인 라디오존데 관측에 필요한 내용을 서술하였으며, 4장에서는 관측 후 데이터처리 과정에 대한 전반적인 내용과 간단한 데이터 분석을 제시하였다.

2. 사전 준비

라디오존데 지상 수신장비는 관측자료를 수신하고 실시간으로 모니터링할 수 있는 기능을 제공하며, 안테나-프리앰프 및 전원공급장치(바이어스티 등)-수신기-컴퓨터(노트북)로 구성된다. 라디오존데 관측 장비

를 개발하고 제작하는 기업은 인터멧 시스템스, 바이살라(Vaisala, 2024), 메테오모뎀(Meteomodem, 2024), 웨텍스(Weather, 2024), 그라우(GRAW, 2024), 메이세이(Meisei, 2024) 등이 대표적이며, 일반적으로는 회사간 장비의 호환이 잘 이루어지지 않으므로 동일회사의 센서와 지상 수신장비를 활용한다. 그러나 해당 연구에서 활용된 방식은 특정 회사와 관계없이 일반화된 라디오파 수신기를 이용하여 자료를 수신하므로, 사용하는 라디오존데의 자료 전송 프로토콜이 XDATA 형태만 지원하면 활용이 가능하다.

2.1 지상 수신 장비

수신기는 컴퓨터에 연결되어 라디오존데의 주파수 변조 신호를 컴퓨터가 인식할 수 있는 원시 디지털 정보로 변환해주는 역할을 한다. 본 연구에서는 무게가 가볍고 부피가 작아 지상관측 사이트 관측 구성에 용이한 SDRplay사의 RSPdx를 사용하였다. RSPdx는 가격이 저렴하고(약 30만원) USB 케이블로 일반 컴퓨터에 설치가 쉽고 회사 홈페이지(<https://www.sdrplay.com>)를 통해서 드라이버가 잘 제공되며 NOAA의 소프트웨어와도 호환이 잘 되는 장점이 있다(Allen, 2021). 해당 수신기는 단일 시스템 내의 소프트웨어 조작만으로 다수의 무선 주파수 대역을 수신할 수 있는 Software Defined Radio (SDR) 기술이 적용되어 있어 라디오존데가 송신하는 400~405 MHz 대역의 신호를 안정적으로 수신함을 확인하였다.

안테나는 관측 수행 시 멀리 떨어져 있는 라디오존데로부터 송신되는 신호를 효율적으로 수신하기 위해서 사용한다. 라디오존데(또는 오존존데)는 연직으로 약 35 km 고도, 수평으로 약 200 km의 거리까지 이동하며 관측을 수행하므로 안테나를 활용하여 수신율을 높이는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 지향성 안테나인 Yagi 안테나(Fig. 2a)와 무지향성 안테나인 Helical 안테나(Fig. 2b)를 사용하여 2대의 지상 수신

장비를 구축하였다. 안테나의 가격은 종류별로 차이가 크나 라디오존데 관측에 필요한 400 MHz 대역의 Yagi 안테나는 약 10만원, Helical 안테나는 약 50~80만원 수준에서 구매할 수 있다. 본 연구에서 Yagi 안테나는 HYS사(<http://www.hystwowayradio.com>)의 YG05F 모델을, Helical 안테나는 전문 기상관측에 많이 활용되는 Harsh/Synergetics사(<https://www.harshenviro.com>)의 14A-N 모델을 사용하였다. Yagi 안테나는 가격이 Helical 안테나에 비해 저렴하고 신호 수신율이 좋으나 효율적으로 신호를 받기 위해서는 안테나가 비양중인 라디오존데 방향을 향해야 한다. 반면 Helical 안테나는 일반적으로 수신 각도 범위가 넓어(Fig. 2) 라디오존데의 위치에 관계 없이 안정적으로 신호를 수신하므로 Yagi 안테나와 함께 사용하여 자료의 수신율을 높였다. 그러나 Yagi 안테나만으로도 대부분의 라디오존데 자료를 수신하는데 문제가 없음을 확인하였다. 안테나와 수신기를 연결하는 용도로는 LMR-200 케이블을 권장하나 실질적으로는 관리가 편리한 일반 RF 케이블을 사용해도 무방하다. 라디오존데는 연직 이동보다 수평 이동이 약 5~10배가량 크므로, 안테나는 주변 지형 또는 건물에 의한 차폐가 없는 위치에 설치하는 것이 좋으며 안테나와 수신기를 연결하는 케이블의 길이는 30 m 이하를 권장한다.

안테나와 수신기를 연결한 케이블의 길이가 길어지면 수신기로 전달되는 신호의 감쇠가 발생한다. 이러한 현상을 보완하기 위해 안테나에 프리앰프(pre-amplifier)를 장착하여 안테나 신호를 증폭시켜 수신기로 전송한다. 프리앰프는 전기 신호의 잡음을 제거하고 원하는 주파수의 신호를 강하게 증폭시켜 잡음 대비 신호비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 높여주는 역할을 하므로, 필수적인 것은 아니지만 설치하는 것이 자료 수신율을 높이는데 도움이 된다. 프리앰프는 신호 증폭을 위해서 전원공급을 필요로 하는데 외장배터리로 직접 전원을 공급하거나 바이어스티(bias-tee)

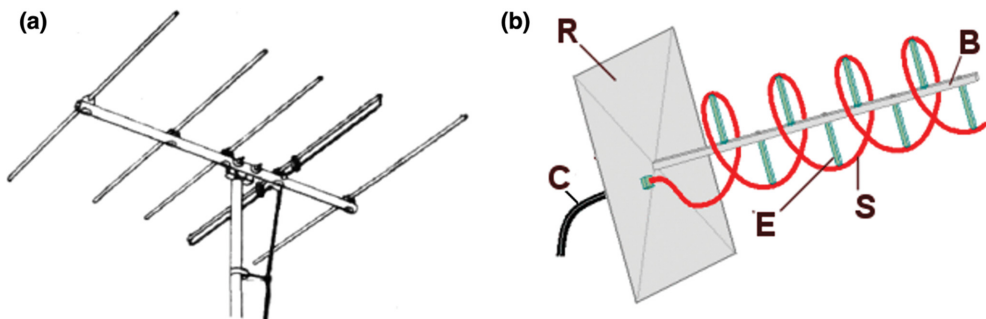


Fig. 2. Structure and schematic diagram of (a) Yagi and (b) Helical antennas (figure source: Wikimedia Commons. It follows their sharing policy).

장비를 이용하여 안테나 케이블로 전원을 공급할 수도 있다. 바이어스티는 주파수 신호(RF)와 직류전원(DC)을 합성하거나 분리하는 T자 형태의 장비로, 3개의 입출력 포트(RF, DC, RF+DC)가 있으며 RF는 수신기로, DC는 직류전원으로, RF+DC는 안테나 방향으로 연결하면 된다. 전원 공급부가 없는 프리앰프의 경우 바이어스티가 필요하며, 바이어스티에 전력을 공급하는 직류 전원 장치를 준비하여야 한다. 프리앰프의 전압(5 또는 12 V)을 확인하여 보조 배터리 또는 어댑터를 사용하여 관측이 이루어지는 동안 지속적으로 전력을 공급할 수 있다.

2.2 지상 수신장비의 설치

라디오존데 관측을 위한 지상 수신장비는 Fig. 3a와 같이 안테나-(프리앰프-바이어스티)-수신기-노트북 순으로 연결된다. 라디오존데에서 특정 주파수를 통해 안테나로 전달된 신호는 프리앰프를 통해 증폭되고, 수신기를 거쳐 노트북으로 전달된다. 안테나는 신호의 차폐가 없도록 충분히 개방된 장소에 설치해야 하

고, 전파를 방해하는 지형지물이 최대한 적은 것이 좋다. 지향성 안테나는 안테나가 향하는 방향으로부터의 신호를 효율적으로 수신한다. 따라서 비양 전 기상 상황 및 풍향을 확인하여 라디오존데의 이동 방향을 예측하고, 안테나가 해당 방향을 향하도록 설치하면 좋다. 무지향성 안테나는 안테나가 위치한 방향을 중심으로 원뿔 형태의 수신 범위를 갖고 있다. 일반적으로는 다각도에서 오는 신호를 안정적으로 수신하기 위해서 지면에 수직인 방향으로 안테나를 설치하나, 필요시 라디오존데 이동 방향으로 적절히 기울여 설치해도 무방하다.

프리앰프의 안테나(ANT)와 수신기(RX) 단자는 각각 안테나 케이블, 수신기 케이블과 연결한다. 프리앰프가 보조배터리를 사용하여 전력을 공급받을 경우에는 전력 차단 기능이 없는 보조배터리를 연결하여 안정적으로 전력이 공급되도록 한다. 신호의 감쇠 현상을 줄이기 위해서는 안테나와 프리앰프를 최대한 가깝게 설치해야 한다. 또한 안테나는 야외에 두는 경우가 많으므로 우전에 의한 프리앰프 및 전원 장비의 손상 방지를 위해 프리앰프에 덮개를 덮어두는 것이 좋다.

2.3 센서 및 비양 장비

지상 수신장비의 설치가 끝나면 라디오존데 비양을 준비한다. 라디오존데를 안전하게 비양하기 위해서는 풍선, 낙하산, 열레가 필요하다. 풍선은 라텍스 재질로 제작된 것을 주로 사용하며, 무게는 연구 목적에 따라서 결정한다. 관측하고자 하는 높이에 따라 50~500 g 사이의 풍선을 사용하는데, 본 연구에서는 성층권 하부까지의 연직 프로파일을 안정적으로 얻기 위해 200 g 풍선을 사용하였다. 낙하산은 대기 상층에서 풍선이 터진 이후에 충분히 낮은 속도로 낙하할 수 있도록 장비에 따라 적절한 크기의 것을 준비한다. 열레는 풍선이 센서에 미치는 영향을 최소화하기 위해 사용하며, 충분히 길고(약 20~30 m) 비양 시 자연스럽게 풀릴 수 있도록 준비한다.

라디오존데는 내장된 센서를 활용하여 기온, 습도, 기압 등의 기상 요소를 관측하고 그 데이터를 송신하는 장비로, 일반적으로 온도 센서는 써미스터(thermistor), 습도 센서는 축전성 박막 폴리머(thin-film capacitive polymer)로 제작되며 태양 복사 가열에 의한 오류를 줄이기 위해 추가로 탑재된 온도 센서로 보정된다(InterMet Systems, 2024b). 풍속 및 풍향은 라디오존데의 GPS 위치 정보를 활용하여 측정하며, 압력 센서는 꼭 필요한 것은 아니나 많은 경우 GRUAN(Global Climate Observing System Reference Upper-Air Network)에서 권장하는 센서를 사용한다. 라디오존데에서 자료를 보내기 위한 반송주파수는 기상관측용으로 활용되는 400~405 MHz 사이의 값을 사용하

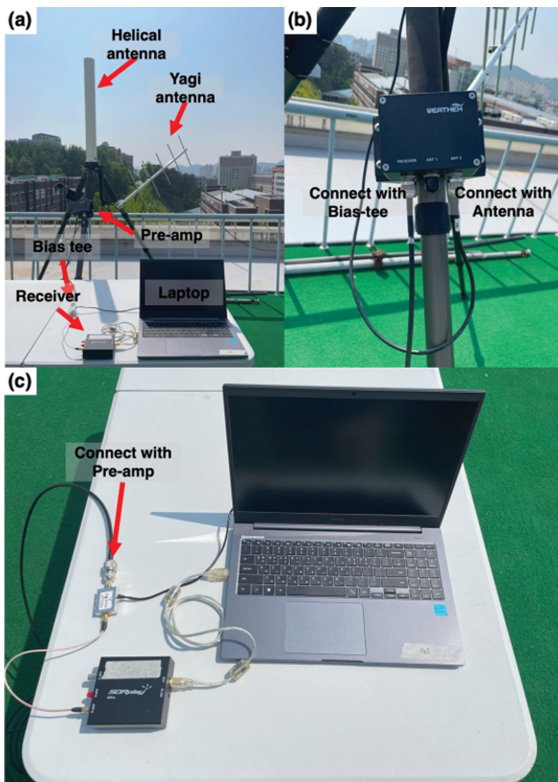


Fig. 3. (a) Antenna and overall ground station set up. Data cable connection of (b) Preamplifier, (c) bias-tee, receiver, and laptop.

며 일반적으로 최대 200 km 거리까지 자료를 송신한다. 본 관측에서는 인터넷 시스템사사의 iMet-4RSB를 사용하였다. iMet-4 라디오존데는 기본적으로 402.0~405.0 MHz 범위에서 0.5 MHz 간격으로 7개의 주파수 운영이 가능하여, 라디오존데의 주파수를 서로 다르게 설정하여 다수의 라디오존데를 동시에 비양하여 데이터를 얻을 수 있다. 고성능 수증기(NOAA FPH), 에어로졸(POPS, COBALD, LOPC 등), 대기 중 오존(ECC Ozonesonde) 측정 장비에 부착하여 사용하는 연구용 iMet-4RSB는 추가적인 기상 요소의 데이터를 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용한 라디오존데와 다른 종류의 존데를 관측에 사용하는 경우 관련 회사의 소프트웨어와 메뉴얼을 활용할 것을 추천한다.

2.4 데이터 수신용 소프트웨어

본 연구에서는 iMet-4 라디오존데로부터 송신되는 데이터를 실시간으로 수집, 표출하기 위해서 NOAA

의 Global Monitoring Laboratory (GML)에서 개발한 SkySonde Server (Fig. 4)와 SkySonde Client (Fig. 5) 소프트웨어를 사용하였다(Allen and Hall, 2016). 해당 소프트웨어는 설치 및 정상적인 실행을 위해 Windows (XP/Vista/7/8/10) 운영체제와 NET Framework 4.0 이상이 요구된다. 실행 시 필요한 계산량이 많지 않아 일반적인 Windows 기반 컴퓨터에서는 대부분 사용이 가능하나, 설치 전에 사용하는 장비와 소프트웨어의 호환 여부를 확인해 보는 것이 좋다.

수신된 라디오존데의 신호는 컴퓨터에 설치된 SkySonde Server를 실행하여 확인할 수 있다. 라디오존데에서 설정한 주파수를 iMet Frequency [MHz] 창에 기입하여 신호가 배경 잡음보다 충분히 큰 것을 확인하고 주변의 다른 라디오존데와 혼선이 없는 것을 확인한다(Fig. 4a). 기상 라디오존데는 400~405 MHz 대역을 나누어서 사용하므로 다른 연구 또는 현업 기관의 라디오존데와 혼선이 있을 수 있어 비양

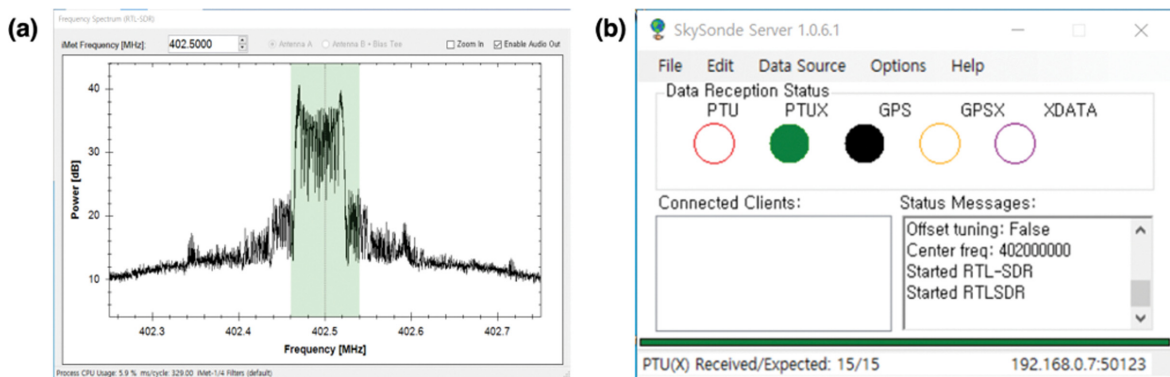


Fig. 4. SkySonde Server display window for (a) radio signal power and (b) type of receiving signal. PTU means pressure, temperature and humidity.

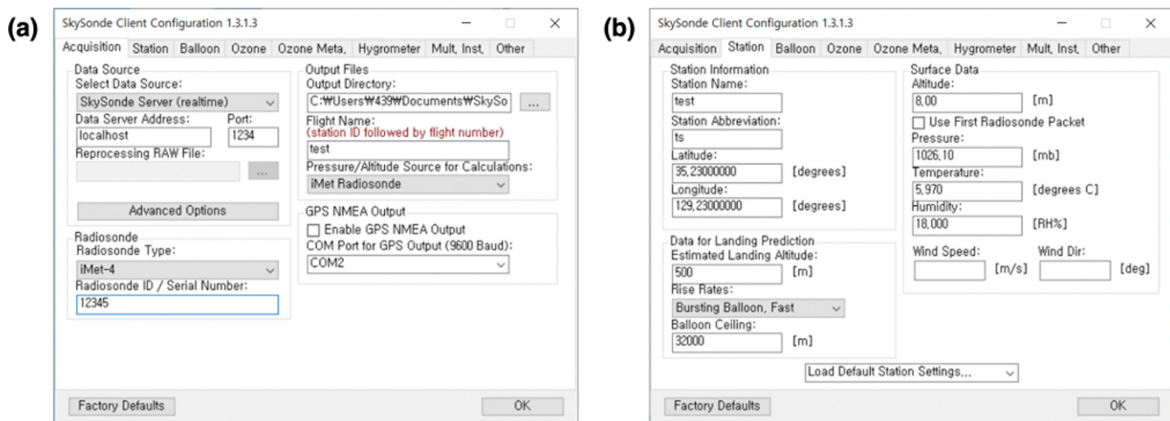


Fig. 5. SkySonde Client setup windows for (a) Acquisition and (b) Station information.

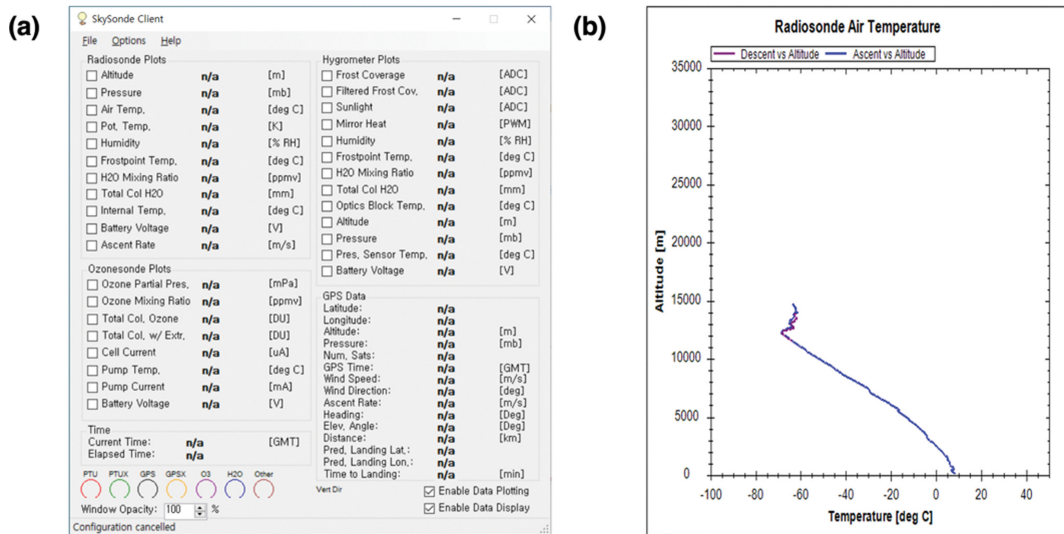


Fig. 6. SkySonde Client (a) data fields and (b) Temperature window.

전에 확인을 하여 주파수 대역을 피해주어야 한다. SkySonde Server 창의 “Data Reception Status” 내 PTUX는 기압, 기온, 습도 등이 포함되어 있는 정보의 수신 여부를 의미하며, 해당 항목의 점멸로 정상적인 자료 수신이 이루어지고 있는지 확인할 수 있다(Fig. 4b). GPS 또는 GPSX의 점멸은 GPS 기반의 위치 데이터의 수신 상태를 알려준다. PTUX 또는 GPSX는 기존에 정보에 더하여 더 정확한 계산을 위한 추가 정보를 수신하고 있음을 의미한다. XDATA의 점멸은 라디오존데에 별도의 장비를 추가로 부착할 경우에 해당 장비로부터의 신호 수신 여부이며 오존센서, 고정밀 수증기, 에어로졸 센서 등을 부착하면 해당 신호의 점멸을 통해서 자료의 수신을 확인할 수 있다. 창 하단의 녹색 선은 라디오존데가 보내는 신호의 횟수를 의미하며 길이가 길수록 신호가 잘 수신되고 있음을 의미한다. 녹색 선의 좌하단에서는 기댓값 대비 실제 수신되고 있는 신호의 횟수를, 우하단에서는 SkySonde Server에 접속한 Client의 IP 주소 및 포트 번호를 확인할 수 있다.

SkySonde Server에서 라디오존데 신호가 잘 수신되는 것을 확인하면 SkySonde Client를 실행하여 실제적인 관측자료(온도, 습도, 기압, 위치 등)를 확인한다. SkySonde Client를 실행하면 우선 관측과 관련된 정보(메타데이터)를 기입할 수 있도록 SkySonde Client Configuration 창이 나타나며(Fig. 5a), 해당 창에서 관측자료명과 자료 저장 위치 그리고 관측 지점 정보 등 메타데이터를 기입할 수 있다. 라디오존데의 경우 자료의 저장과 같은 일반적인 설정을 하는 Acquisition 탭과 관측 지점의 정보 그리고 비양 전 지상 대기상

태(온도, 습도, 압력, 바람) 정보를 기입하는 Station 탭만 기입을 하면된다(Fig. 5b). Station 정보는 향후에 추가하거나 수정할 수 있으므로 정보를 모르면 공란으로 두어도 실행은 가능하다.

최종적으로 기입한 값들을 확인하고 창 우하단의 OK 버튼을 클릭하면 Fig. 6a와 같은 SkySonde Client 관측 모니터링 창이 나타난다. SkySonde Client에서는 관측 중인 기상 요소를 실시간으로 확인할 수 있으며, 해당 요소의 박스를 클릭하면 데이터가 그래프의 형태(Fig. 6b)로 표출되어 실시간 갱신되므로 연직 구조 및 분포를 쉽게 파악할 수 있고, 다수의 기상 요소를 동시에 분석하는 것도 가능하다. Options 탭의 “Track Balloon on Map”을 선택하면 라디오존데의 현 위치를 지도에서 확인하는 것이 가능하다. Station 탭 “Data for Landing Prediction” 정보를 기입한 경우 해당 정보에 기반하여 존데의 대략적인 낙하 위치를 파악할 수 있으며, 초반에는 수치 모델 예측 정보에 기반하여 낙하 위치를 파악 가능하나 라디오존데 관측으로 얻어진 바람장 데이터를 이용하여 위치정보가 지속적으로 업데이트 되므로 자료의 수신율이 높으면 상당히 정확한 낙하 위치 정보를 얻을 수 있다. 차량을 이용하여 실시간으로 라디오존데(혹은 같이 부착된 고가의 관측 장비)를 추적하며 회수를 시도할 때 유용한 정보를 제공한다.

3. 관 측

3.1 관측 지점 선정

관측 지점을 선정할 때에는 충분한 사전 조사 및

준비가 필요하다. 우리나라는 북반구 중위도에 위치하여 편서풍의 영향을 받으므로, 동해와 인접한 지점에서 비양하면 주로 동해 바다에 낙하하여 이에 따른 안전사고에 대해서 크게 민감하지 않지만, 서해안 혹은 내륙 지방에서 비양을 할 시에는 인구 및 차량의 이동이 많은 도심에 낙하할 확률이 있으므로 사전에 미리 낙하 예상 지점을 확인 후 관측 지점과 관측 계획을 정하는 것이 좋다. 라디오존데의 대략적인 이동 경로 및 낙하지점은 Online Balloon Prediction (<https://predict.habhub.org>) 을 이용하여 확인이 가능하다. 라디오존데는 경량의 무인기상기기로 항공법상의 문제는 없으나 인구밀집지역, 군사지역, 고속도로와 같은 장소에 라디오존데의 낙하지 않게 관측 계획을 세우고 필요시 헬륨의 양을 가감하여 낙하 위치를 조정해 주어야 한다. 다음은 관측 계획을 세울 때 확인해야 할 사항들이다. 첫 번째로, 법적으로 비양이 가능한 지역인지 파악해야 한다. 관측 지점 주변에 군사보안지역 혹은 비행금지구역이 위치할 경우 관측이 불가능 할 수도 있다. 해당 지역에서 관측을 실시할 경우에는 해당 지역의 관계자와 사전 연락을 하여 관측 가능 유무와 관측 시간을 협의하여 비양이 원활하게 진행되도록 한다. 두 번째로 비양 장소 근처에 높은 건축물은 없는지 확인해야 한다. 비양 당시 풍향 및 풍속을 고려하여 라디오존데가 지상 근처의 높은 건물이나 전봇대 등에 걸리지 않도록 주의해야 하며, 안정적으로 상승할 수 있는 충분한 공간을 확보해야 한다. 세 번째로 비양 시 사용되는 헬륨통을 안전하게 보관 및 운반할 수 있는 장소가 있는지 확인해야 한다. 헬륨통은 직사 광선을 피해 그늘진 곳에 보관

하고, 관측 지점으로 헬륨을 운반하는데 필요한 반입로가 잘 확보되어 있는지 확인해야 한다. 마지막으로 관측 지점 주변에 전파 발생원을 확인해야 한다. 전파 발생원이 있다면 전자 통신 장비의 전파 수신을 방해할 수 있다.

3.2 비양준비 및 비양

관측 당일의 라디오존데 비양 준비과정은 다음과 같다. SkySonde Server를 이용하여 사용하고자 하는 라디오존데 주파수를 확인한다. 기상청 혹은 공군기상단과 같은 정기적인 관측과 주파수 대역대가 겹치지 않게 Frequency Spectrum 창을 확인하여 라디오존데의 주파수를 적절히 조절한다. SkySonde Sever가 정상적으로 작동하면 SkySonde Client를 이용하여 관측 지점의 온도, 습도, 기압과 같은 메타데이터 값을 기입한다. 이후 라디오존데를 비양 소모품들과 결합한다. 라디오존데 비양에 필요한 소모품은 풍선, 열데, 낙하산 그리고 라디오존데가 있으며 Fig. 7a와 같이 풍선을 제외한 소모품들을 낙하산-열데-라디오존데 순서로 사전에 결합해 놓으면 편리하다. 이후 관측용 풍선에 헬륨을 주입하는데, 헬륨 주입 중 발생할 수 있는 돌풍과 같은 비상 상황에 대비하여, 헬륨통에서 헬륨의 양을 조절하는 연구원과 풍선을 잡고 있는 연구원은 실시간으로 진행 상황을 공유하면 좋다. 의사 소통이 가능한 거리 내에서 주입을 진행해야 하며, 부득이하게 거리가 먼 경우 무선 통신 장비를 사용하는 것이 좋다. 본 연구에서는 성층권 하부까지 측정하기 위해 200 g 풍선을 사용하여 관측을 수행하였으며, 47 L 헬륨통을 기준으로 약 25 bar의 헬륨을 주입하

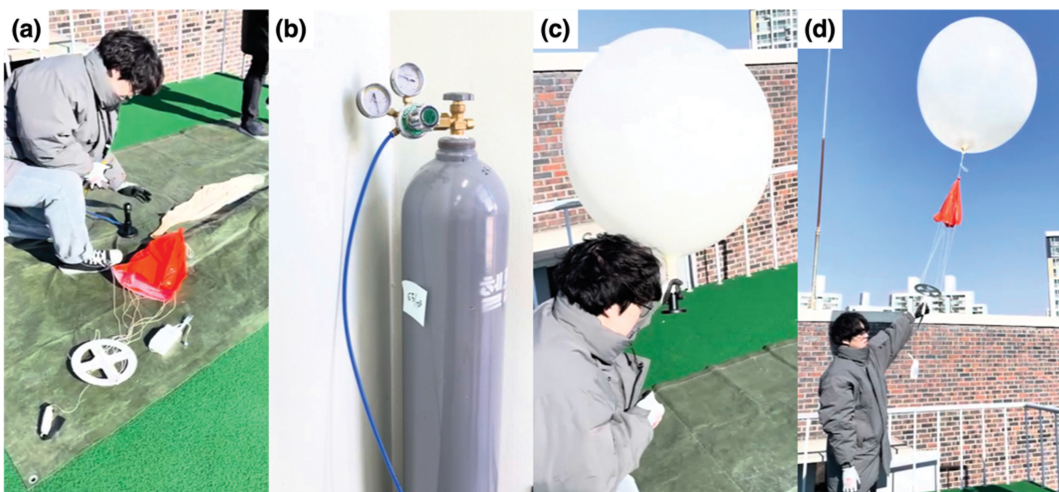


Fig. 7. Radiosonde launch tools and procedure. (a) Overview of combined instruments (balloon, parachute, reel, and radiosonde sensor), (b) helium cylinder with the regulator, (c) weather balloon inflated with the helium, (d) radiosonde launch.

여 WMO (World Meteorological Organization)에서 권장하는 $5\sim7\text{ m s}^{-1}$ 의 상승 속도를 유지하도록 하였다. 가스 레귤레이터(Fig. 7b)를 활용하여 주입하는 헬륨의 압력을 조절하고 잔여 헬륨 양을 확인하였으며, 주입 완료 후에는 남아있는 헬륨의 양을 헬륨 통에 별도로 표기하였다. 강한 하강기류가 예상될 경우에는 헬륨의 양을 늘리는 등 비양 당시 날씨에 따라서 풍선에 들어가는 헬륨의 양을 조절하였다.

헬륨 주입 시 관측 실패로 이어질 수 있는 사항이 많아 주의해야 할 사항을 공유하고자 한다. 첫 번째로 가능하면 풍선의 가스 주입구 이외의 부위를 직접적으로 만지지 않게 조심하 다루는 것이 좋다(Fig. 7c). 관측용 풍선은 라텍스 재질로 튼튼한 편이나 손톱이나 날붙이에 의해서 손상될 수 있으므로 주의해야 한다. 두 번째로 관측 지점에서의 돌풍을 주의해야 한다. 헬륨 주입중에 풍선이 심하게 흔들리면 주입구가 뒤틀리며 헬륨이 비정상적으로 주입되거나 풍선이 터질 수 있다. 따라서 풍선 주입구 부분을 잡아 꼬이지 않도록 주의를 하며 가끔씩 바람의 영향을 받지 않는 공간에서 헬륨 주입을 권장한다. 관측 지점의 상황이 좋지 않아 바람의 영향을 크게 받는 장소에서 준비를 하게 된다면, 추가 인원이 풍선을 받쳐 흔들리지 않도록 하는 등 헬륨을 주입하는데 주의하도록 한다. 마지막으로, 비양 시 주변의 높은 건물 혹은 전봇대나 전선 등에 라디오존데가 걸리지 않도록 비양 위치를 조정한다. 이 때 라디오존데의 센서 부위가 손상되지 않도록 아래 Fig. 7d와 같이 열레를 잡고 팔을 뻗어 라디오존데를 지면 및 신체로부터 충분히 떨어뜨리는 것이 좋다. 충분한 공간을 확보하고 라디오존데로부터

터의 데이터 수신이 정상적으로 이루어지고 있음을 확인한 후, 지상에서의 풍향과 풍속을 고려하여 비양을 실시한다.

3.3 모니터링

비양 후 SkySonde Client에서 나타나는 정보를 이용하여 관측되는 자료를 모니터링 할 수 있다. 관측 수행 시 안테나 케이블의 잘못된 연결 또는 프리앰프의 오작동 등으로 데이터의 수신이 끊어지는 경우가 있으므로 주기적으로 모니터링을 해주는 것이 좋다. 관측용 컴퓨터에 인터넷이 연결된 경우, SkySonde Client (Fig. 8) Options 탭의 “Track Balloon on Map”을 사용하여 풍선의 예상경로와 착륙지점을 예측할 수 있다(Fig. 8b). 성층권 하부까지 관측이 가능한 200 g 풍선을 기준으로 풍선이 터지기까지 대략 한 시간이 소요되며, 다시 지면으로 도착하는 데 약 45분이 걸린다. 상층풍이 강한 경우 수평 이동이 심해서 고도 각이 10° 이하가 되면 지형에 의한 차폐가 생겨 자료 수신이 끊어질 수 있으며, 이 경우 헬륨의 양을 늘려 라디오존데가 빠르게 상승할 수 있도록 준비하면 고도각을 유지하는데 도움이 된다.

SkySonde Client 자료 모니터링 창(Fig. 8a)은 Time 과 점멸 신호를 빼고 크게 4개의 자료 구간으로 구성된다. 왼쪽 상단은 Radiosonde Plot으로 라디오존데가 측정하는 기상 요소 데이터값이 나타나고, 오른쪽 하단은 GPS Data로 위치 및 속도 관련 정보가 나타난다. 해당 정보를 이용하여 비양 전에는 센서가 정상적으로 작동하는지, 비양 후에는 라디오존데 센서가 정상적으로 작동하는지 모니터링이 가능하다. 그 밖

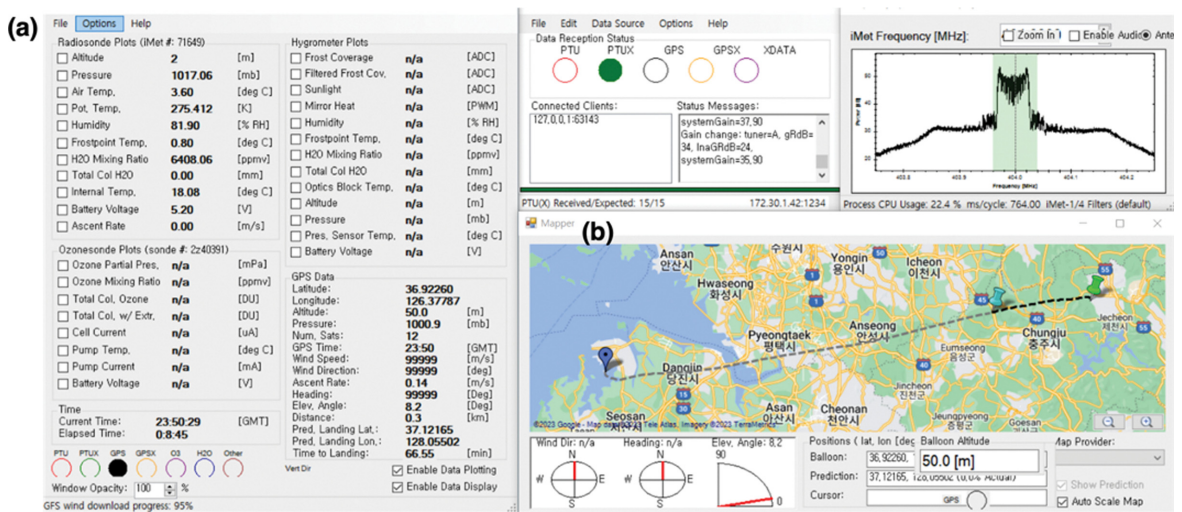


Fig. 8. SkySonde Client monitoring window for data fields, signal strength, and (b) balloon trajectory and trajectory prediction.

에 Ozone Sonde Plots (좌측 하단)과 Hygrometer Plots (우측 상단)은 추가로 부착된 오존 센서와 고성능 수증기 센서를 추가로 연결할 경우 활용하는 구간이다. 각 변수의 왼쪽 네모박스를 클릭하면 고도 혹은 시간에 따른 그래프가 호출되어 간단하게 누적된 자료와 대기의 연직 구조를 확인할 수 있다. 관측을 진행할 당시에 초록색의 위로 향하는 화살표의 모양이 표시가 되며, 대기 상층에서 풍선이 터진 후 하강 시 아래로 향하는 빨간색 화살표의 모양이 표시가 된다.

4. 데이터 처리 및 결과

4.1 데이터 처리

관측을 마치면 SkySonde Client에서 설정한 관측자료명과 저장위치에 KML, CSV, FLT, RAW 형태의 파일이 생성된다. KML 파일은 지리적 정보를 담고 있는 파일로 라디오존데의 이동 경로에 따른 경도, 위도, 고도 정보가 저장되어 있으며, 풍선이 터진 좌표와 예상 착륙 지점 또한 확인할 수 있다. 구글어스의 프로젝트 기능을 이용할 경우 KML 파일에 담긴 정보를 시각화하여 확인할 수 있다. CSV, FLT는 자료가 기입된 텍스트 파일로 관측 데이터를 간단히 확인할 수 있으나, 라디오존데에서 수신한 데이터를 그대로 저장한 형태이므로 자료의 품질검사 및 내삽등의

후처리를 수행한 이후에 연구에 활용한다. 마지막으로 RAW는 수신된 원시자료로 16진수 텍스트로 기록되어 있다.

후처리 시에는 관측 때와 마찬가지로 NOAA에서 제공하는 SkySonde Processor 소프트웨어를 이용한다. 해당 소프트웨어를 이용하여 관측된 자료의 품질검사를 수행하고 다양한 형태로 자료를 저장할 수 있다. SkySonde Processor 상단의 메뉴바에서 “File > Open”을 클릭한 후 후처리할 데이터(FLT 또는 RAW) 파일을 연다. 파일을 열면 해당 데이터의 기본적인 정보를 시각화 할 수 있는데, 우측 Quick Plot의 변수 목록 중 확인하고자 하는 변수명을 클릭하면 각 변수의 연직 구조를 확인할 수 있다(Fig. 9). 또한 좌측 “File Information”에서 비양 날짜 및 시간, 지표면의 온도 습도 및 위·경도, 비양 종말고도, 수신율 등 비양에 관한 정보를 확인할 수 있다. 품질검사를 수행하고 특이 사항이 확인되지 않으면 좌측 하단의 “Create Standard Output Files”을 통해 일정한 고도에 따라 데이터를 생성한다. 지정된 디렉토리에서 후처리 과정을 거친 파일들을 확인할 수 있다.

일반적으로 후처리된 처리된 자료는 .lev (250 m 해상도 연직 자료), .1100 (100 m 해상도 연직 자료), fleout.dat (1초 간격 자료) 파일의 형태로 저장되어 사용되며, 필요에 따라 NASA 특별관측 형식인 ICARTT

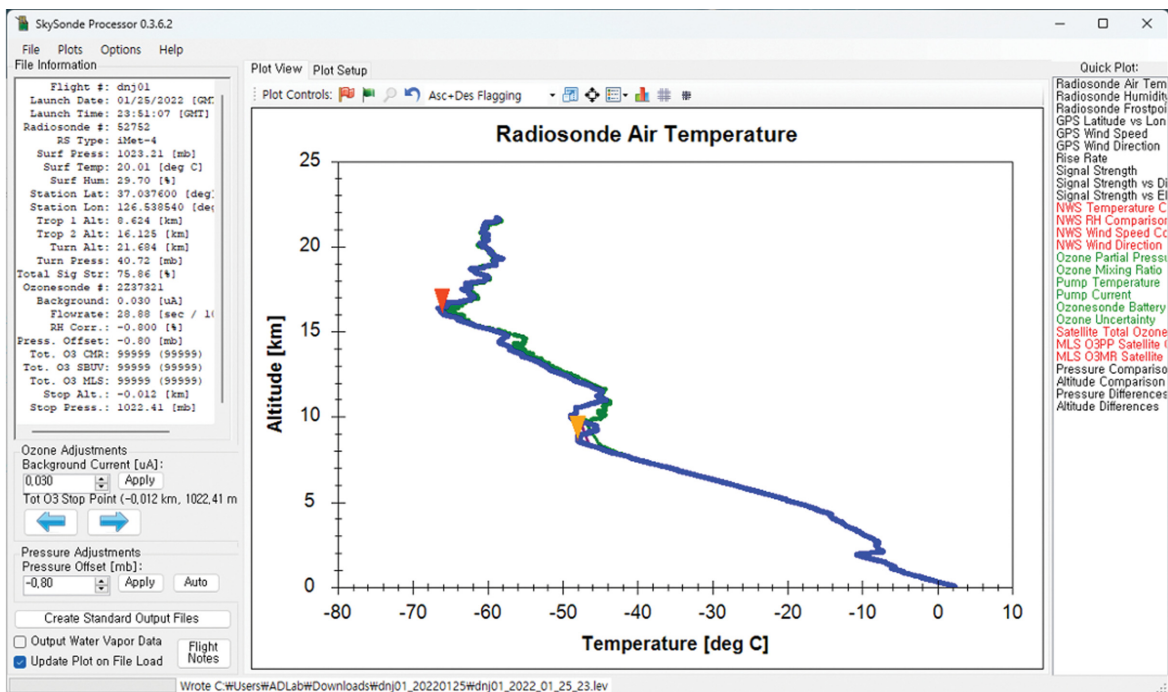


Fig. 9. Example of radiosonde temperature data process in SkySonde Processor.

(International Consortium for Atmospheric Research on Transport and Transformation, .icartt) 또는 기상자료 저장에 많이 활용되는 NetCDF (Network Common Data Form, .nc) 형태도 생성이 가능하다. 해당 자료들은 라디오존데의 비양에 대한 간단한 설명이 머리말로 제공되며 fleout.dat 파일의 경우 해당 데이터에 대한 자세한 설명과 함께 풍향, 풍속 등의 정보도 얻을 수 있어 다양한 연구에 활용이 용이하다. 머리말 정보에 SkySonde 소프트웨어를 제공한 NOAA의 정보가 기본으로 입력되기 때문에 배포 시에는 해당 머리말을 수정하는 것이 좋다.

4.2 기본 분석 예시

파일에 저장된 기온, 습도 등의 대표적인 기상 요소 데이터를 지상에서부터 고층까지 시각화하여 표출함으로써 대기의 연직 구조를 간단히 분석하였다.

Figure 10은 2023년 2월 10일 오후(1500 KST)와 11일 새벽(0300 KST)의 기온과 상대 습도(Figs. 10a, c), 풍향 및 풍속(Figs. 10b, d)을 표출한 것이다. 주간 기온(Fig. 10a)의 경우 고도가 상승함에 따라 점차적으로 감소하다가 10 km 부근에서 온도가 상승하여 해당 고도에 겨울철 대류권계면이 위치함을 확인할 수 있다. 오존존데를 부착하여 관측하는 경우(그림 미포함) 해당 고도부터 오존의 양이 빠르게 증가하여 성층권 오존층의 최하층임을 알 수 있다. 바람장(Fig. 10b)은 고도가 상승함에 따라 풍속이 강해져 대류권계면이 위치하는 10 km 고도에 풍속 60 m s⁻¹ 이상의 중위도 상층제트의 위치함을 알 수 있다. 대류권 하부(0~5 km)의 풍향은 북풍에서 서풍으로 점차적으로 바뀌어 반전(backing)에 의한 한랭이류가 있는 날임을 확인할 수 있다. 새벽에 관측한 Figs. 10c, d를 보면 야간에 발생한 복사냉각으로 지표 부근의 대기

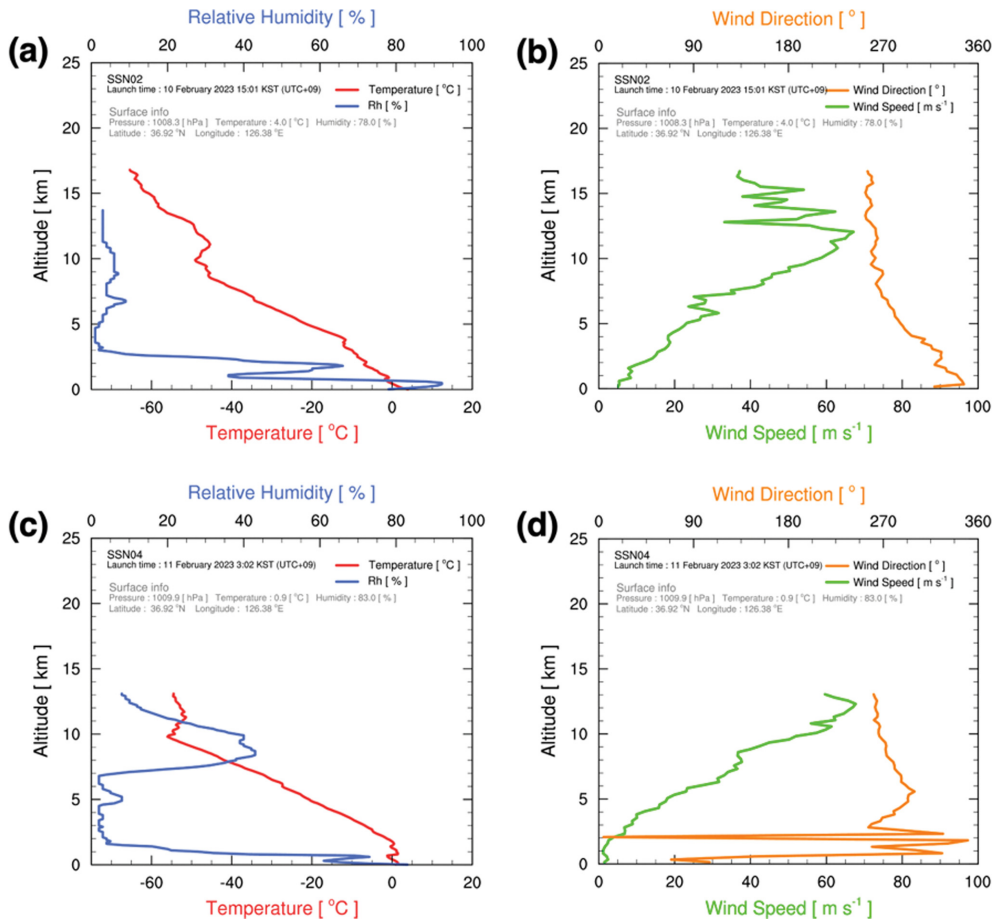


Fig. 10. Example of post-processed radiosonde data. (a, c) Temperature (°C) and relative humidity (%), (b, d) wind speed (m s⁻¹) and wind direction (degree) for 11 February 2023, 0600 UTC (upper panel) and 1800 UTC (lower panel).

온도가 감소하여 안정층이 생성되는 것을 볼 수 있다. 해당 안정층은 지상 1 km 고도까지 잘 나타나고 연직 혼합뿐 아니라 수평바람의 강도도 매우 약해져 난류활동이 억제되는 것을 추정할 수 있다. 또한, 주간과 마찬가지로 10 km 부근에 대류권계면이 있음을 확인할 수 있다. 해당 관측일의 대류권 하층 중관 바람장은 북서풍이나 대류권 하부 0.5 km 구간에서는 해륙풍(육풍)의 영향으로 지표 부근의 풍향이 동풍임을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 기술노트는 일반 안테나와 범용 라디오 수신장비를 활용하여 라디오존데 지상 수신장비를 구축하는 방법을 자세히 서술하였다. 해당 장비를 이용하여 서해안 지역에서 80회 이상의 라디오존데 관측을 수행하였으며 95% 이상의 높은 자료 수신율로 안정적인 관측이 가능함을 확인하였다. 고층관측을 계획하는 연구자 및 교육자를 위해 지상 시스템을 구축하기 위한 안테나, 수신 장비 및 소프트웨어에 대한 정보를 자세히 정리하였으며 실제 라디오존데 관측 과정 및 데이터 처리 예시를 함께 다루어 활용성이 높은 연구노트를 제공하고자 하였다.

라디오존데를 이용한 고층기상관측은 높은 관측 수월성에도 불구하고 다양한 연구에 직접적으로 활용이 가능한 높은 정확도의 데이터를 산출하는 장점이 있다. 지상 수신장비의 구축 비용이 상대적으로 높은 점이 라디오존데 관측의 걸림돌이 되었으나, 수요가 많고 가격이 저렴한 범용 안테나 및 수신장비를 활용하면 관련 비용을 혁신적으로 줄일 수 있다. 다소 이해해야 할 부분이 많으나 상업용으로 제공되는 고가의 수신장비에 비해 1/10의 낮은 비용으로 관측 장비를 구축할 수 있으며 양질의 관측 정보를 깊이 있게 다룰 수 있는 장점이 있어 연구 및 교육용으로 활용도가 높을 것으로 판단된다. 추가적으로 NOAA에서 무상으로 제공하는 SkySonde 소프트웨어 체계(Server, Client, Processor)를 활용하여 관측한 데이터를 쉽게 관리할 수 있고 관련 자료 체계와 기능을 잘 이해하면 심도 있는 분석 또한 가능하다.

라디오존데 관측은 연직 관측만을 수행하므로, 넓은 범위에서 기상 요소의 공간 분포 및 변화를 확인하기 위해서는 다수의 관측 지점을 확보하고 동시 관측을 진행하는 것이 도움이 된다. 기상청에서는 현업 라디오존데를 활용하여 일 2회 정기 고층기상관측(오전 9시, 오후 9시)을 수행하고 있고, 태풍과 집중 호우를 비롯한 위험 기상이 예측되거나 발생했을 경우 추가적으로 특별 기상 관측(오전 3시, 오후 3시)을 수행하고 있으나, 2023년 5월 기준으로 관측 지점이 8

곳(종료된 관측 지점까지 포함하여 11곳)으로 충분한 시공간 범위의 값을 얻기에는 어려움이 있다. 따라서 본 기술 노트는 라디오존데를 활용한 고층기상관측에 대한 연구자들의 접근성을 높이고, 이를 바탕으로 고층기상관측이 다양하게 활용되는 것을 목표로 하였다.

본 기술 노트를 참고하여 연구자들이 안전하고 수월하게 고층기상관측을 수행하고, 다양한 분야에서 그 결과가 응용되기를 바란다.

감사의 글

본 연구의 관측은 환경부 국립환경과학원 미세먼지연구관리센터 지정운영 과제(NIER-2021-03-03-007)의 지원으로 수행되었습니다. 교신저자인 김주완은 공주대학교 연구년 사업의 지원으로 연구를 수행하였고, 1저자인 강현규는 정부(기상청) 재원 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받았습니다. 본 연구에는 미국 해양대기청(NOAA)에서 개발하여 공유하는 SkySonde 소프트웨어가 사용되었으며 자료 및 소프트웨어 활용과 관련하여 많은 정보를 제공해주신 미국 해양대기청과 항공우주국(NASA) SHADOZ (Southern Hemisphere Additional OZonesondes) 관측팀에 감사드립니다. 본 관측연구에 활용된 소프트웨어는 NOAA Global Monitoring Laboratory 웹사이트(<https://gml.noaa.gov/aftp/user/jordan>) 다운로드 하였습니다.

SkySonde Server: "SkySonde Server Setup.exe"

SkySonde Client: "SkySonde Client Setup.exe"

SkySonde Processor: "SkySonde Processor Setup 0.3.2.7.exe"

REFERENCES

- Allen, J., 2021: Software-Defined Radio (SDR) Setup Instructions for SkySonde. *Natl. Oceanic and Atmos. Administration*, Accessed 21 May 2024 [Available online at <https://gml.noaa.gov/aftp/user/fritz/SDR%20Setup%20Instructions.pdf>].
- _____, and E. Hall, 2016: SkySonde User Manual, *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Accessed 21 May 2024 [Available online at <https://gml.noaa.gov/aftp/user/fritz/SkySonde%20User%20Manual.pdf>].
- Dirksen, R. J., and Coauthors, 2020: Managing the transition from Vaisala RS92 to RS41 radiosondes within the Global Climate Observing System Reference Upper-Air Network (GRUAN): a progress report.

- Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, **9**, 337-355, doi:10.5194/gi-9-337-2020.
- Durre, I., R. S. Vose, and D. B. Wurtz, 2006: Overview of the integrated global radiosonde archive. *J. Climate*, **19**, 53-68, doi:10.1175/JCLI3594.1.
- Finger, F. G., and F. J. Schmidlin, 1991: Upper-air measurements and instrumentation workshop. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **72**, 50-56, doi:10.1175/1520-0477-72.1.50.
- Free, M., and Coauthors, 2002: Creating climate reference datasets: CARDS workshop on adjusting radiosonde temperature data for climate monitoring. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 891-900, doi:10.1175/1520-0477(2002)083<0891:CCRDCW>2.3.CO;2.
- GRAW, 2024: Homepage. Accessed 21 May 2024 [Available online at <https://www.graw.de>].
- InterMet Systems, 2024a: Homepage. Accessed 21 May 2024 [Available online at <https://www.intermet-systems.com>].
- _____, 2024b: iMet-4 RSB Research Radiosonde. Accessed 21 May 2024 [Available online at <https://www.intermet-systems.com/products/imet-4-rsb-research-radiosonde>].
- Meisei, 2024: Homepage. Accessed 21 May 2024 [Available online at <https://www.meisei.co.jp>].
- Meteomodem, 2024: Homepage. Accessed 21 May 2024 [Available online at <https://www.meteomodem.com>].
- NRC, 2000: Reconciling Observations of Global Temperature Change. *The National Academies Press*. doi: 10.17226/9755 [Available online at <https://nap.national-academies.org/catalog/9755/reconciling-observations-of-global-temperature-change>].
- Seidel, D. J., and Coauthors, 2009: Reference upper-air observations for climate: Rationale, progress, and plans. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 361-369, doi:10.1175/2008BAMS2540.1.
- Vaisala, 2024: Homepage. Accessed 21 May 2024 [Available online at <https://www.vaisala.com/en>].
- Weather, 2024: Homepage. Accessed 21 May 2024 [Available online at <https://www.weather.co.kr>].
- Zhang, Y., B. Zhang, and N. Yang, 2022: Characteristics of temperature and humidity inversions based on high-resolution radiosonde observations at three Arctic stations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **61**, 415-428, doi: 10.1175/JAMC-D-21-0054.1.