



## 오존존데를 이용한 2021–2024년 기간 연직 기상 및 오존 측정 자료

강현규<sup>1</sup> , 김형규<sup>1</sup> , 김주완<sup>2,\*</sup> , 이태형<sup>3</sup> , 구자호<sup>4</sup> , 박상서<sup>5</sup> , 최용주<sup>6</sup> , 이원진<sup>7</sup> , 신선아<sup>7</sup> , 박진수<sup>8</sup>

<sup>1</sup>박사과정생, 국립공주대학교 대기과학과, 충청남도 공주시 공주대학로 56, 32588, 대한민국

<sup>2</sup>부교수, 국립공주대학교 대기과학과, 충청남도 공주시 공주대학로 56, 32588, 대한민국

<sup>3</sup>정교수, 한국외국어대학교 환경학과, 경기도 용인시 처인구 모현읍 외대로 81, 17035, 대한민국

<sup>4</sup>부교수, 연세대학교 대기과학과, 서울특별시 서대문구 연세로 50, 03722, 대한민국

<sup>5</sup>부교수, 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, 울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 44919, 대한민국

<sup>6</sup>조교수, 한국외국어대학교 환경학과, 경기도 용인시 처인구 모현읍 외대로 81, 17035, 대한민국

<sup>7</sup>연구관, 국립환경과학원 환경위성센터, 인천광역시 서구 환경로 42, 22689, 대한민국

<sup>8</sup>연구관, 국립환경과학원 대기환경연구과, 인천광역시 서구 환경로 42, 22689, 대한민국

## Atmospheric and Ozone Profiling Data Measured with Ozonesonde from 2021 to 2024

Hyungyu Kang<sup>1</sup>, Hyeong-Gyu Kim<sup>1</sup>, Joowan Kim<sup>2,\*</sup>, Taehyoung Lee<sup>3</sup>, Ja-Ho Koo<sup>4</sup>, Sang-Seo Park<sup>5</sup>, Yongjoo Choi<sup>6</sup>, Won-Jin Lee<sup>7</sup>, Sun A Shin<sup>7</sup>, and Jinsoo Park<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Ph.D Student, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56 Gongjudaehak-ro, Gongju-si, 32588 Chungcheongnam-do, South Korea

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56 Gongjudaehak-ro, Gongju-si, 32588 Chungcheongnam-do, South Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, 81 Oedae-ro, Mohyeon-eup, Cheoin-gu, Yongin-si, 17035 Gyeonggi-do, South Korea

<sup>4</sup>Associate Professor, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, 03722 Seoul, South Korea

<sup>5</sup>Associate Professor, Department of Civil, Urban, Earth, and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, 50 UNIST-gil, Eonyang-eup, Ulju-gun, 44919 Ulsan, South Korea

<sup>6</sup>Assistant Professor, Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, 81 Oedae-ro, Mohyeon-eup, Cheoin-gu, Yongin-si, 17035 Gyeonggi-do, South Korea

<sup>7</sup>Senior Researcher, Environmental Satellite Center, National Institute of Environmental Research, 42 Hwangyeong-ro, Seo-gu, 22689 Incheon, South Korea

<sup>8</sup>Senior Researcher, Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, 42 Hwangyeong-ro, Seo-gu, 22689 Incheon, South Korea

Received November 1, 2024

Accepted December 3, 2024

### Corresponding Author

Joowan Kim

Tel: +82-41-850-8528

E-mail: [joowan.k@gmail.com](mailto:joowan.k@gmail.com)

From 2021 to 2024, balloon-borne in-situ observations were conducted to study the vertical ozone distribution over the Korean Peninsula. The electrochemical concentration cell (ECC) ozonesondes that produce high-resolution ozone profiles from the surface to 30 km based on balloon sounding and KI redox reactions were used, and a total of 123 ozone profiles were produced at Anmyeon, Osan, and Yongin sites. Consecutive daily measurements were made at the Anmyeon site, focusing on ozone transport processes through the Asian summer monsoon. Twice a day (AM, PM) measurements were done at the Yongin site to understand the diurnal cycle of ozone due to photochemical reactions and vertical transport. The ozone data were integrated into netCDF for each measurement year and location, along with the atmospheric profiles of temperature, pressure, humidity, and wind from radiosonde. The ECC ozonesonde provides ozone information with reference-level accuracy, and the data could be further used to improve satellite- and model-based ozone products.

**Keywords:** Ozone; Ozonesonde; Electrochemical concentration cell; Anmyeon; Yongin

## 1. 서론

오존은 대기 조성에서 낮은 비율을 차지하는 미량 기체임에도 불구하고 높은 복사효과와 화학적 반응성으로 인하여 대기에 중요한 영향을 미친다(Montzka et al., 2011). 대기 중 오존의 약 90%는 성층권에 존재하며 자외선을 흡수하여 생명체를 보호하고 대기의 온도 및 순환 구조를 유지하는 중요한 역할을 한다. 그러나 전체의 약 10%를 차지하는 대류권 오존은 상당량이 인간의 오염 물질 배출에 의해서 형성되며(Seinfeld and Pandis, 2016) 지표면 근처에서 높은 생화학적 피해를 유발하기 때문에 감시의 대상이 되는 환경 오염 물질이다(Lefohn et al., 2018). 또한 성층권의 오존의 변화는 복사강제력을 통해 성층권과 대류권의 순환에 영향을 미치고(de Forster and Shine, 1997; Son et al., 2010) 날씨 및 대류 현상에 의해서 대류권으로 빠르게 섞이기도 한다(Holton et al., 1995; Olsen et al., 2004). 이러한 오존의 복합적인 특성으로 인하여 성층권과 대류권의 연직 오존 분포를 지속적으로 감시하는 것은 매우 중요하다.

대기 오존의 감시는 주로 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 주도하에 수행되고 있으며 다양한 연구기관의 참여로 Brewer 분광계 또는 Dobson 분광계와 같은 지상 원격, 오존존데(ozonesonde)와 같은 직접 관측, 위성 관측을 통해 이루어진다. WMO는 글로벌 관측 네트워크를 묶는 Global Atmosphere Watch (GAW) 프로그램을 통해서 세계 각지의 오존 관측을 지원하고 전지구적 오존 변화를 감시하고 있다(WMO, 2017). 특히 세계적으로 약 60개소 정도만 운영되는 오존존데 관측소의 자료는 대기 오존의 연직 분포와 기온, 습도, 기압, 풍향, 풍속의 종합적인 기상정보를 높은 정확도와 해상도로 제공하여 대기 감시 프로그램에 핵심적인 기반을 제공한다. WMO의 GAW 프로그램은 이러한 오존존데의 중요성을 인정하여 전기화학 농도셀(electrochemical concentration cell, ECC) 기반의 오존존데 준비 및 관측 절차를 개선하고 국제적으로 표준화하였다(Smit et al., 2021).

국내에서는 유일하게 기상청의 포항관측소에서 오존존데 관측을 지속적으로 수행하고 있다. 1994년에 WMO/GAW 지구대기감시소로 등록된 포항관측소는 1995년부터 매주 한

번씩 오존존데를 비양하여 한반도 및 동아시아 지역의 오존 연직 분포 및 변동성을 이해하는 데 중요한 역할을 수행하고 있다. 포항 관측소는 동아시아 오존의 지역적인 특성을 잘 반영하나 인구 밀집 지역인 수도권에서 멀리 떨어져 있기 때문에 국지적인 특성이 강한 대류권의 오존 분포를 반영한다고 보기에는 어려움이 있다. 특히 수도권 지역의 대류권 오존은 차량 배기가스와 산업 활동으로 인한 질소산화물( $\text{NO}_x$ )과 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)의 광화학 반응을 통해서 생성되므로 오염 물질의 국지적인 수송 및 오존 생성 메커니즘을 잘 반영하는 관측이 요구된다. 이러한 요구를 반영하기 위하여 2016년 Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) 한미 공동 대기질 연구(Crawford et al., 2021), 2024년 Airborne and Satellite Investigation of Asian Air Quality (ASIA-AQ)와 같은 동아시아 주요 도시에 대한 국제 관측 연구가 진행되기도 하였다.

관측용 풍선을 사용하여 대류권과 성층권의 오존을 직접 측정하는 오존존데는 높은 정확도를 인정받고 있으며 지상 원격, 항공, 위성, 모델 오존 산출물을 검보정하는 데 활용되는 기준 자료이다(Boynard et al., 2009; Fadnavis et al., 2023; Park et al., 2020; Wang et al., 2022). 따라서 오존존데 측정을 표준화하고 추가적인 정확성을 확보하기 위하여 Jülich OzoneSonde Intercomparison Experiment (JOSIE), Ozone Sonde Data Quality Assessment (O3S-DQA)와 같은 국제 오존존데 비교 프로그램들이 WMO를 중심으로 진행되고 있으며(Smit and Straeter, 2004; Smit and Kley, 1998) 오존존데 측정을 고도화하기 위한 연구가 꾸준히 수행되고 있다(Tarasick et al., 2021). 국내에서도 대기환경 및 해양환경 감시를 목적으로 한 정지궤도 환경 위성(geostationary environmental monitoring spectrometer, GEMS)을 2020년 2월에 세계 최초로 발사하였으며(Kim et al., 2020) 한반도를 포함한 동아시아 지역의 대기 오존 분포를 상시 산출할 수 있게 되었다. 위성 기반 자료의 산출 정확도를 높이기 위해서는 오존존데와 같이 높은 정확도를 가진 관측 자료의 축적을 통한 위성 자료의 검보정 및 산출 알고리즘 개선이 필수적으로 이루어져야 한다(Kroon et al., 2011; Mettig et al., 2021).

본 논문에서는 GEMS 위성의 검증과 한반도 서부 및 수

도권 지역의 연직 오존 분포를 이해하기 위하여 수행된 오존존데 관측 자료에 대해 설명하고 관측된 결과를 간단하게 논의하였다. 해당 자료는 GEMS 검증을 위한 2021-2024년 용인 관측 자료와 아시아 몬순의 오염 물질 수송 관측 캠페인(Asian Summer Monsoon Chemical and Climate Impact Project) 지원을 위한 2021-2022년 안면도, 2022년 오산 오존존데 관측을 포함한다. 자료의 활용성을 높이기 위하여 관측 자료의 특성과 관측 결과물에 대한 간단한 해석을 같이 수록하였다.

## 2. 관측 지역 및 자료 처리

### 2.1 관측 지역

오존존데 관측은 안면도(36.54°N, 126.33°E), 오산(37.09°N, 127.03°E), 용인(37.31°N, 127.31°E)의 3개 지점에서 수행되었다. 안면도 지점에서는 기상 악화로 인한 결측과 지연을 제외하고 매일 오후 3시(15 KST)를 목표 시간으로 하여 관측을 수행하였다. 2021년에는 8월 5일-31일 기간 동안 25개의 대기 프로파일 자료를, 2022년에는 7월 27일-9월 2일 기간 동안 38개의 프로파일을 획득하였다. 오산을 기반으로 ACCLIP 항공 관측이 수행된 2022년에는 추가로 오산 지점에서도 8월 3일-8월 27일 기간동안 총 11회의 오존존데 비양과 대기 프로파일 자료를 수집하였다. GEMS 위성 검증 및 오존의 일변동 이해를 목표로 하는 용인 지점에서는 2021년부터 2024년까지 4년간 다양한 기간에 대하여 연 10-17회의 오존존데 관측을 수행하였다. 오전과 오후의 연직 오존 농도

변화를 이해하고자 오전(9 KST)과 오후(14-15 KST)를 목표로 관측을 수행하였으며 인근 공항의 보안 문제로 주말 관측만을 진행하였다. 해당 관측소의 정보와 상세 관측 정보를 각각 Table 1과 Appendix 1-7에 명시하였다.

오존존데 센서가 연결된 관측용 풍선은 성층권 중층(약 30 km)까지 도달하는 동안 기상 상황에 따라서 50-200 km 정도 수평적으로 이동한다. Fig. 1A는 편서풍 기류가 강하게 나타났던 2021년 10월 24일 용인 지점에서 비양한 오존존데의 비양 경로를 표현한 예시이다. 풍선은 약 5 m/s의 속도로 상승하며 관측일 한반도에 위치한 편서풍 제트를 타고 동쪽으로 이동한 후(주황색 실선) 성층권 중층인 33.1 km 위치에서 터지면서 하강(보라색 실선)하였다. 해당 논문에서 서술된 자료의 공간 대표성을 나타내기 위하여 안면도, 용인, 오산 지점에서 비양한 오존존데의 경로를 함께 제시하였다(Fig. 1B-D). 한반도는 편서풍의 영향을 받는 중위도에 위치하기 때문에 일반적으로 오존존데는 상승하면서 동쪽으로 이동한다. 그러나 여름 기간에는 성층권에 편동풍이 형성되므로 일부 오존존데는 다시 서쪽으로 돌아오는 경로를 보이고 있다. 이러한 관측 특성 때문에 오존존데의 수평 이동이 적은 대류권 하부에서만 국지적인 자료로 활용될 수 있으며 대류권 전체 또는 성층권과 관련해서는 약 100 km 규모의 지역의 샘플링 정보로 활용하여야 한다.

### 2.2 관측 장비

본 연구에 사용된 오존존데는 ECC 기반으로 두 개의 소형 셀(cell) 안에 주입된 다른 농도의 포타슘 아이오다이드

**Table 1.** Summary of the ozonesonde measurement sites and records

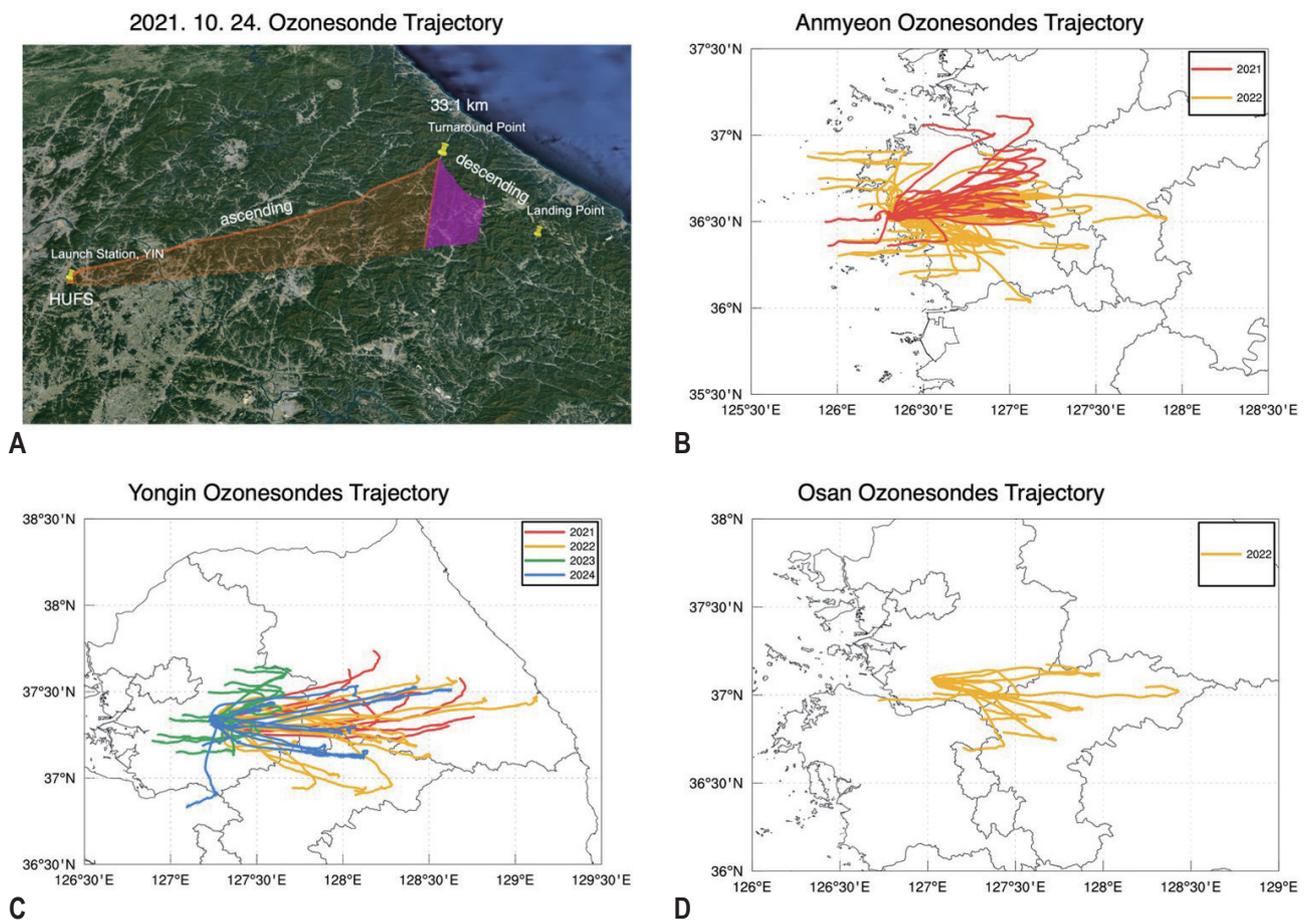
Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)	Record (month/year)	Number of profiles
AMY	36.54	126.33	8	Aug/2021	24
				Jul-Sep/2022	38
YIN	37.31	127.31	135	Oct-Nov/2021	10
				May-Jun/2022	17
				Aug/2023	12
				Sep-Oct/2024	12
OSN	37.09	127.03	10	Aug/2022	11

AMY, Anmyeon; YIN, Youngin; OSN, Osan.

(KI) 용액을 이용하여 오존을 측정하는 장비이다. KI 농도가 낮은 환원셀로 주입된 대기 중의 오존이 용액과 반응하며 미세 전류가 형성되고 생성된 전류의 강도를 측정하여 오존 농도를 산출하는 원리를 활용한다(Komhyr, 1969; Smit et al., 2014). 이 장비는 1,050-1,054 hPa의 넓은 압력 범위에서 작동하며 내부 온도 0°C에서 40°C, 외부 온도 영하 90°C에서도 안정적으로 작동한다. 건식 배터리를 포함한 본체 무게는 약 480 g이며 폴리스티렌 비행 상자는 240 g으로 경량화되어 있다. 비행 상자의 크기는 19.1×19.1×25.4 cm로 휴대하기 용이하다. ECC 오존존데는 화학 반응을 기반으로 대기 중 오존 분자의 수를 직접 계산하며 측정 오차가 5% 이하인 매우 신뢰받는 표준 측정 장비이다(Tarasick et al., 2021). 오존존데는 다양한 고도에서 높은 정확도와 정밀도를 제공한다. 1,000 hPa에서는 ±5%의 정확도와 ±4%의 정밀도를 가지며 10 hPa에

서는 ±5%의 정확도와 ±3%의 정밀도를 보여준다. 오존존데는 일반적으로 약 5 m/s 상승 속도로 지상에서 30-35 km (12-15 hPa) 고도까지 상승하며 매초마다 오존을 측정하고 약 20-30초의 반응 속도를 가지고 있어 100-150 m 수준의 높은 물리적 연직 해상도로 오존을 측정할 수 있다(Smit and Kley, 1998). 측정된 오존값은 라디오존데를 통해서 지상으로 송신되는데 본 연구에서는 iMet-4RSB 라디오존데(InterMet Systems, Grand Rapids, MI, USA)를 사용하여 자료를 수신하였다. 추가로 라디오존데에서 산출되는 온도, 습도, 기압, global positioning system (GPS) 기반의 위치 정보를 함께 수집하였다. 자료에 포함된 풍향, 풍속 정보는 GPS 기반의 위치 정보로부터 산출되었다.

오존존데가 상승하면서 측정된 값은 라디오존데에 탑재된 송신 장비와 지상에 있는 안테나 및 수신 장비들을 통해

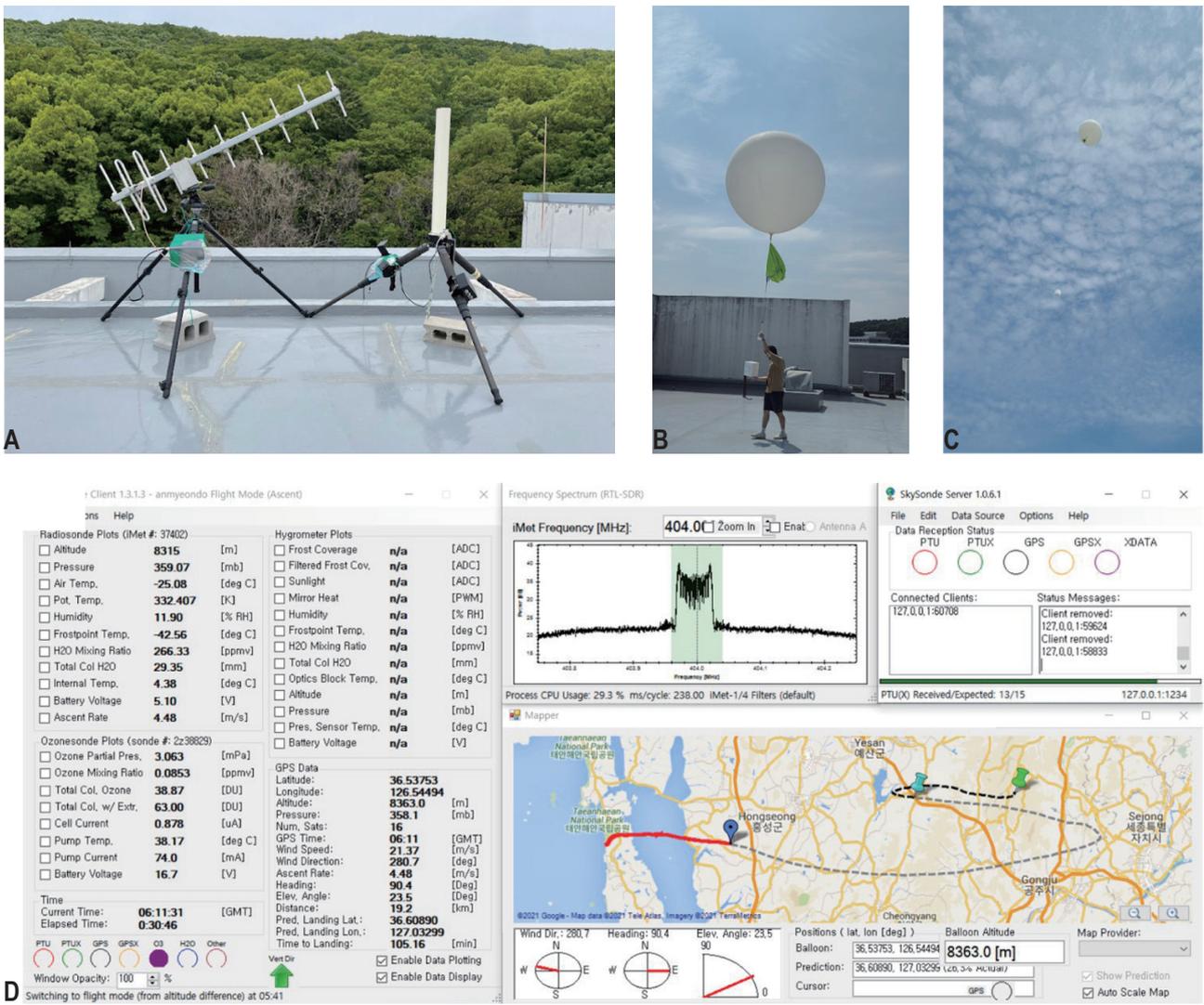


**Fig. 1.** (A) Example of 3-dimensional balloon trajectory of the ozonesonde. Figure is produced using Google Earth (Mountain View, CA, USA; <https://earth.google.com>). Balloon trajectories of the each ozonesonde measurements from (B) Anmyeon, (C) Yongin, and (D) Osan.

서 지상에서 실시간으로 수집된다(Fig. 2). 본 연구에서는 송수신의 문제로 인한 자료 손실을 최소화하기 위해서 지향성 안테나와 무지향성 안테나를 사용한 2개의 수신 장비를 설치하여 자료를 수신하였다(Fig. 2A). 자료 수신 프로그램으로는 Skysonde 소프트웨어(National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], Washington DC, USA)를 사용하였으며 오존존데의 비양 후 현장에서 관측되는 오존 및 대기 상태 정보와 자료의 수신 감도를 실시간으로 모니터링하였다(Fig. 2D).

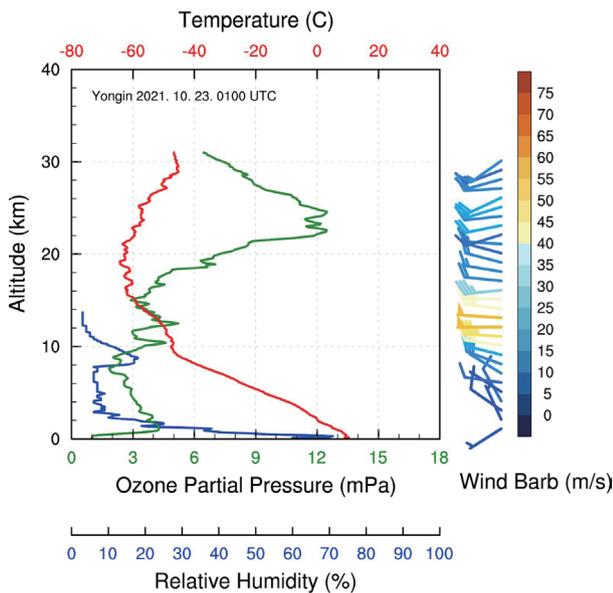
### 2.3. 자료 처리

관측이 종료된 후 오존존데 펌프 온도 변화에 의하여 발생하는 오차와 성층권에서 고도와 기압 고도의 차이를 보정하는 후처리 과정을 수행하였다. 오존존데가 상승하면서 초 단위로 관측한 자료를 후처리한 뒤 이를 최대 물리적 해상도인 100 m 자료로 내삽하여 최종적으로 network common data form (netCDF)으로 저장하였다. 자료 관리의 효율성을 높이기 위하여 관측 지점과 연도별로 파일을 생성하였고 관측 프로파일은 파일 내에서 관측일(YYYYMMDD) 기반의 그룹으로 묶어 저장하였다. netCDF 파일에는 관측 지점



**Fig. 2.** (A) Ground data receiving instruments: (left) helical and (right) Yagi antennas. (B) Pre-launch and (C) initial ascent phases of the ozonesonde. (D) Real-time acquisition and monitoring of the ozonesonde data using telemetry tools and software.

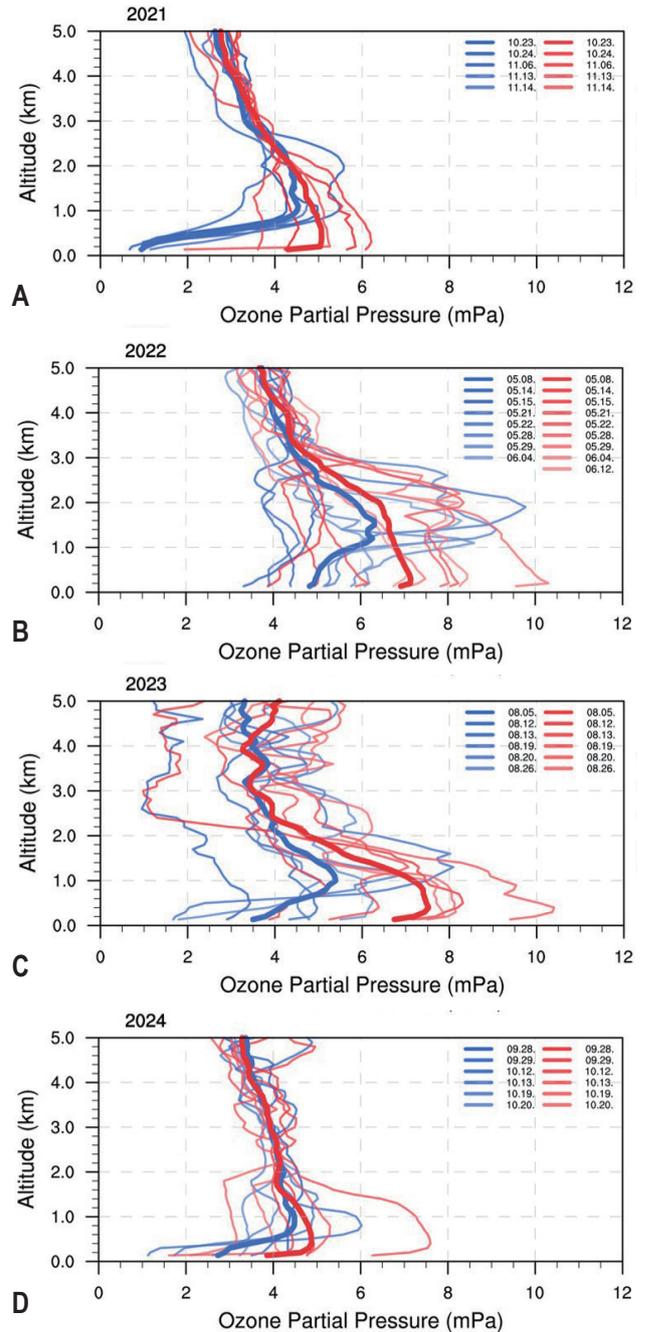
의 위경도 정보와 자료 생성 담당자에 대한 연락처가 함께 포함되어 있다. 각 관측 프로파일은 관측 시작 시간(LST), 종료 시간(LST), 대류권계면 고도(km), 관측 최대 높이(km, mb), 오존 전량(DU)에 대한 비양 정보가 포함되어 있다. 또한 오존존데, 라디오존데, GPS 센서의 정보를 담고 있으며 모두 동일한 연직 고도 좌표계를 사용한다. 오존존데 센서로부터 산출된 오존 정보는 오존 분압(partial pressure: mPa), 오존 혼합비(mixing ratio: ppmv), 층별 누적 오존량(column ozone: DU)이며 라디오존데 센서에서 산출된 정보는 온도(temperature: K), 기압(pressure: hPa), 습도(humidity: %)이다. 기압은 고도로부터 산출된 값이 아닌 직접 측정값이므로 추가적인 물리적 정보를 가지며 습도는 라디오존데 센서의 민감도 문제로 대류권에서만 활용성이 있다. GPS 센서로부터 얻은 위도(latitude: °), 경도(longitude: °), 고도(altitude: km) 정보와 이를 바탕으로 산출된 바람장 정보(풍향[wind direction]: °, 풍속[wind speed]: m/s, 동서 바람[u: m/s]과 남북 바람[v: m/s])를 함께 저장하였다. 추가로 대류권계면 높이, 종말 고도와 기압, 오존 전량(total column ozone) 등의 프로파일별 특성 정보는 각 그룹의 속성으로 저장하였다.



**Fig. 3.** Examples of atmospheric and ozone variables measured from an ozonesonde. Temperature (red), relative humidity (blue), ozone partial pressure (green), and wind barbs are shown as a function of wind speed.

### 3. 관측 결과

오존존데 자료의 특징과 활용 예시로 단일 프로파일 관측



**Fig. 4.** Diurnal variations of boundary layer and lower tropospheric ozone measured at Yongin site in (A) 2021, (B) 2022, (C) 2023, and (D) 2024. Bluish colors represent morning profiles, and reddish colors are afternoon profiles. Thick curves are the average of the morning and afternoon profiles, respectively.

자료에서 나타나는 기상 특성 및 오존 분포에 대하여 분석하였다. Fig. 3은 용인 지점에서 2021년 10월 23일 오전에 관측한 오존 농도, 온도, 습도, 풍속, 풍향을 나타낸 그림이다. 이는 온도의 경우 지상에서부터 약 10 km까지 온도가 일정하게 감소하는 모습을 나타낸다. 이후 대류권 상부에서 성층권 하부(upper troposphere and lower stratosphere, UTLS)로 전이하는 층(10-18 km)에서는 온도의 감소 경향이 줄어들고 성층권 영역에서는 온도가 고도에 따라 다시 증가하는 모습의 전형적인 중위도 온도 구조를 확인할 수 있다. 성층권 영역의 온도 프로파일은 작은 규모의 변동성을 보이는데 이는 안정적인 성층권에서 자주 나타나는 증력파의 영향으로 보인다. 상대습도는 오전의 복사냉각으로 지표에서는 높은 값을 나타내지만 고도가 높아짐에 따라 급격하게 감소하여 해당일의 날씨가 건조하고 맑았음을 나타낸다. GPS 센서로 산출된 바람은 대류권계면 근처에서 25 m/s 이상의 강한 편서풍을 보여 한반도 상부에 제트기류가 일부 존재함을 알 수 있으며 대류권 하층에서는 풍향의 순전(veering)에 의한 약한 온난이류가 있음을 알 수 있다.

오존존데에서 산출된 변수인 오존 분압의 연직 구조를 살펴보면 지표에서는 약 1 mPa의 값을 보여 오전에 10 ppbv 수준의 낮은 값이 관측된다. 이는 야간에 질소산화물과의 화학 반응에 의한 오존 감소(ozone titration)의 영향으로 판단된다. 일반적으로 태양 복사량이 많은 오후 관측에서는 오존의 농도가 빠르게 증가하여 40 ppbv 수준의 높은 값을 보인다(Fig. 4). 지표면 오존량이 적은 오전 시간에도 행성경계층 상부의 자유대기(약 1 km 이상)에서는 오존의 분압이 4 mPa 수준으로 높게 관측되었는데 이는 질소산화물 반응에 의한 야간의 오존 감소가 행성경계층의 하부에 국한되어 있음을 시사한다. 이후 감소한 오존 분압은 성층권 하부(약 24 km) 지역에서 12 mPa 이상의 최댓값을 보여 오존존데가 성층권의 오존층을 잘 관측하고 있음을 알 수 있다. 흥미로운 점은 대류권과 성층권의 전이 지역인 UTLS에서 오존이 2차 피크(Park et al., 2012)를 보이는데 이는 대기 순환과 대기 파동의 쇄파에 의한 성층권 오존 유입의 영향으로 판단된다. 대기 재분석 및 오존존데와 라디오존데가 측정된 오존 농도와 상대습도를 활용해서 이러한 대류권-성층권 혼합 현상을 추가적으로 파악할 수 있다(Müller et al., 2024).

Fig. 4는 용인 지역에서 지난 4년간 관측한 오존 분압을 지표에서부터 5 km까지 나타낸 그림이다. 용인 지역의 경우 하루에 오전, 오후 두 번의 관측이 진행되었으므로 광화학 반응과 오염 물질의 2차 반응에 의한 대류권 하층의 오존 농도 변화를 확인할 수 있다. 광화학 반응에 의한 오존의 일변화는 주로 대기경계층 내에서 뚜렷하며 2 km 이상의 고도에서는 해당 특성이 잘 나타나지 않는다. 오후의 경우 지표면과 자유대기의 오존 분압이 유사하여 연직으로 오존 농도의 변화가 크지 않으나 오전의 경우 지표면의 낮은 오존 농도로 인하여 행성경계층 내의 연직 오존 농도 변화가 매우 크다. 고도에 따른 오존의 변화는 가을에 관측한 2021년에 가장 뚜렷하게 나타났다(Fig. 4A). 지표에서 오후 오존 농도가 증가하는 이유는 인간의 인위적인 활동으로 발생하는 질소산화물과 VOCs의 광화학 반응으로 인하여 온도가 높고 태양복사량이 많은 오후에 오존이 빠르게 생성되기 때문이다(Kim et al., 2023; Ran et al., 2009). 이와 동일한 이유로 다른 계절의 관측에서도 오전, 오후 지표에서의 오존 차이가 확인된다(Fig. 4).

#### 4. 결론

본 연구 자료는 2021년부터 2024년까지 용인, 안면도, 오산 지역에서 오존존데와 라디오존데를 활용하여 측정된 연직 기상정보와 오존 농도에 대한 관측 자료이다. 위성 자료의 검보정과 서해안 및 도심 지역의 오존 연직 분포에 대한 이해를 위하여 총 123개의 연직 프로파일 자료를 성공적으로 수집하였다. 안면도와 오산 지점의 관측은 아시아 여름 몬순 기간을 목표로 수행되어 티벳 고기압의 강도 변화에 따른 오존 수송과 한반도 오존 분포 변화를 이해하는 자료로 활용될 수 있다. 특히 안면도 지점의 경우 일 단위 연속 관측으로 편서풍에 의해 유입되는 오존의 월경성 수송 과정을 이해하는 데 활용될 수 있다. 용인 지역의 자료는 늦은 봄부터 가을까지 일 2회 생산되어 계절에 따른 오존의 일변동 구조 및 광화학 반응을 통한 지표 근처의 오존 변동성을 이해하는 기초 연구 자료로 활용될 수 있다. 해당 자료들은 GEMS 위성과 같은 원격 탐사 자료를 개선하고 수치 모델 및 재분석 자료의 성능을 평가하는 데 활용할 수 있다. 지속적인 측정을 통해 한반도의 점진적인 오존 농도 증가 추세를 분석하는 데 유용한 정보를 제공할

며 대류권 및 성층권의 오존 농도 프로파일을 상세히 제공함으로써 오존의 공간적 및 시간적 변동성에 대한 중요한 통찰을 제공한다. 이를 통해 한반도 주변 지역의 오존 수송 메커니즘과 관련된 연구를 지원할 수 있다.

## Conflict of Interest

On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

## Funding Information

This research was supported by National Institute of Environmental Research (NIER-2024-0555-01, NIER2023-01-01-142) of Ministry of Environment in South Korea.

## Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are openly available in DataOn at <https://doi.org/10.22711/idr/1046>.

## References

- Boynard A, Clerbaux C, Coheur PF, et al (2009) Measurements of total and tropospheric ozone from IASI: comparison with correlative satellite, ground-based and ozonesonde observations. *Atmos Chem Phys* 9(16):6255-6271
- Crawford JH, Ahn JY, Al-Saadi J, et al (2021) The Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) field study. *Elem Sci Anth* 9(1):00163
- de Forster PMF, Shine KP (1997) Radiative forcing and temperature trends from stratospheric ozone changes. *J Geophys Res* 102(D9):10841-10855
- Fadnavis S, Sagalgile A, Sonbawne S, et al (2023) Comparison of ozonesonde measurements in the upper troposphere and lower Stratosphere in Northern India with reanalysis and chemistry-climate-model data. *Sci Rep* 13(1):7133
- Holton JR, Haynes PH, McIntyre ME, Douglass AR, Rood RB, Pfister L (1995) Stratosphere-troposphere exchange. *Rev Geophys* 33(4):403-439
- Kim J, Jeong U, Ahn MH, et al (2020) New era of air quality monitoring from space: geostationary environment monitoring spectrometer (GEMS). *BAMS* 101(1):E1-E22
- Kim SW, Kim KM, Jeong Y, Seo S, Park Y, Kim J (2023) Changes in surface ozone in South Korea on diurnal to decadal time scale for the period of 2001–2021. *Atmos Chem Phys Discuss* 23(19):12867-12886
- Komhyr WD (1969) Electrochemical concentration cells for gas analysis. *Ann Geoph* 25:203-210
- Kroon M, De Haan JF, Veeffkind JP, et al (2011) Validation of operational ozone profiles from the Ozone Monitoring Instrument. *J Geophys Res* 116:D18305
- Lefohn AS, Malley CS, Smith L, et al (2018) Tropospheric ozone assessment report: global ozone metrics for climate change, human health, and crop/ecosystem research. *Elem Sci Anth* 6:27
- Mettig N, Weber M, Rozanov A, et al (2021) Ozone profile retrieval from nadir TROPOMI measurements in the UV range. *Atmos Meas Tech* 14(9):6057-6082
- Montzka SA, Reimann SCLA, Engel A, et al (2011) Ozone-depleting substances (ODSs) and related chemicals, chapter 1. In: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 52*. World Meteorological Organization, Geneva, 516p
- Müller K, von der Gathen P, Rex M (2024) Air mass transport to the tropical western Pacific troposphere inferred from ozone and relative humidity balloon observations above Palau. *Atmos Chem Phys* 24(8):4693-4716
- Olsen MA, Schoeberl MR, Douglass AR (2004) Stratosphere-troposphere exchange of mass and ozone. *J Geophys Res* 109:D24114
- Park S, Son SW, Jung MI, Park J, Park SS (2020) Evaluation of tropospheric ozone reanalyses with independent ozonesonde observations in East Asia. *Geosci Lett* 7:12
- Park SS, Kim J, Cho HK, Lee H, Lee Y, Miyagawa K (2012) Sudden increase in the total ozone density due to secondary ozone peaks and its effect on total ozone trends over Korea. *Atmos Environ* 47:226-235
- Ran L, Zhao C, Geng F, et al (2009) Ozone photochemical production in urban Shanghai, China: analysis based on ground level observations. *J Geophys Res* 114:D15301
- Seinfeld JH, Pandis SN (2016) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 1152p
- Smit HGJ, Kley D (1998) JOSIE: The 1996 WMO International intercomparison of ozonesondes under quasi flight conditions in the environmental simulation chamber at Jülich. In: *WMO Global Atmosphere Watch report series No. 130*. World Meteorological Organization, Geneva, 108p
- Smit HGJ; Panel for the Assessment of Standard Operating Procedures for Ozonesondes (ASOPOS) (2014) *Quality assurance and quality control for ozonesonde measurements in GAW*. World Meteorological Organization, Geneva, GAW Report No. 201, 100p
- Smit HGJ, Straeter W (2004) JOSIE-1998, Performance of ECC Ozone Sondes of SPC-6A and ENSCI-Z Type. In: *WMO Global Atmosphere Watch report series No. 157*. World Meteorological Organization, Geneva, 69p

- Smit HGJ, Thompson AM; the ASOPOS 2.0 Panel (2021) Ozone-sonde Measurement Principles and Best Operational Practices. In: WMO Global Atmosphere Watch Report Series, No. 268. World Meteorological Organization, Geneva, 173p
- Son SW, Gerber EP, Perlwitz J, et al (2010) Impact of stratospheric ozone on Southern Hemisphere circulation change: a multi-model assessment. *J Geophys Res* 115:D00M07
- Tarasick DW, Smit HG, Thompson AM, et al (2021) Improving ECC ozonesonde data quality: assessment of current methods and outstanding issues. *Earth Space Sci* 8(3):e2019EA000914
- Wang H, Lu X, Jacob DJ, et al (2022) Global tropospheric ozone trends, attributions, and radiative impacts in 1995-2017: an integrated analysis using aircraft (IAGOS) observations, ozonesonde, and multi-decadal chemical model simulations. *Atmos Chem Phys* 22(20):13753-13782
- World Meteorological Organization (WMO) (2017) WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016-2023. World Meteorological Organization, Geneva, 81p

## Meta Data for Dataset

Essential		
Field	Sub-Category	
Title of Dataset	Atmospheric and Ozone Profiling Data Measured with Ozonesonde from 2021 to 2024	
DOI	<a href="https://doi.org/10.22711/idr/1046">https://doi.org/10.22711/idr/1046</a>	
Category	Climatology, Meteorology, Atmosphere	
Temporal Coverage	2021.08.-2024.10.	
Spatial Coverage	Address	Anmyeon, Yongin, Osan
	WGS84 Coordinates	36.54°N, 126.33°E
		37.31°N, 127.31°E 37.09°N, 127.03°E
Personnel	Name	Hyungyu Kang
	Affiliation	Kongju National University
	E-mail	hyungyu.m.k@gmail.com
CC License	BY NC-ND	
Optional		
Field	Sub-Category	
Summary of Dataset	Ozone vertical distribution observed with the ozonesonde from 2021 to 2024	
Project	Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS) Full Layer Concentration Calculation Algorithm and Input Data Improvement Study	
Instrument	Electrochemical Concentration Cell Ozonesonde Radiosonde (EN-SCI, 2Z-model, InterMet Systems, iMet-4RSB)	

**Appendix 1.** Anmyeon ozonesonde measurement information, 2021

Measurement date (YYYYMMDD)	Start time (LST, hh:mm)	End time (LST, hh:mm)	Maximum height (km)	Status (issue)
20210805	15:21	17:11	32.8	Normal
20210806	14:43	17:12	33.6	Normal
20210807	14:44	17:04	33.6	Normal
20210808	15:19	15:30	3.2	Signal loss
20210809	14:36	16:27	33.4	Normal
20210810	14:40	16:34	34.0	Normal
20210811	14:39	16:07	31.1	Normal
20210812	14:43	16:27	33.4	Normal
20210813	14:43	16:33	34.3	Normal
20210814	14:57	16:26	30.9	Normal
20210815	14:49	16:21	31.7	Normal
20210816	14:46	16:39	34.2	Normal
20210817	14:41	16:20	32.0	Normal
20210818	14:28	16:22	33.1	Normal
20210819	14:46	16:28	32.8	Normal
20210820	14:38	16:34	32.3	Normal
20210821	16:04	-	35.2	GPS time error
20210824	15:18	16:54	33.5	Normal
20210825	14:45	16:19	32.2	Normal
20210826	14:33	16:15	33.9	Normal
20210827	14:37	16:26	33.9	Normal
20210828	14:33	-	34.6	GPS time error
20210830	14:34	16:13	33.8	Normal
20210831	14:30	16:12	33.8	Normal

LST, local standard time; GPS, global positioning system.

**Appendix 2.** Anmyeon ozonesonde measurement information, 2022

Measurement date (YYYYMMDD)	Start time (LST, hh:mm)	End time (LST, hh:mm)	Maximum height (km)	Status (issue)
20220727	14:30	16:14	33.7	Normal
20220728	14:30	16:10	31.7	Normal
20220729	14:30	16:15	32.5	Normal
20220730	14:30	16:24	34.4	Normal
20220731	17:56	19:44	34.3	Normal, weather delay
20220801	14:30	16:14	33.8	Normal
20220802	14:30	16:10	32.3	Normal
20220803	14:30	16:16	32.7	Normal
20220804	14:29	16:08	33.7	Normal
20220805	17:53	19:34	33.4	Normal, second launch
20220806	14:30	15:53	32.4	Normal
20220807	18:02	19:51	34.0	Normal, second launch
20220808	14:22	15:43	26.9	Normal
20220809	13:49	15:32	32.0	Normal
20220810	13:29	15:14	32.0	Normal
20220811	14:29	16:25	33.8	Normal
20220812	14:30	16:05	32.8	Normal
20220813	14:38	17:09	33.8	Normal
20220814	14:35	16:40	33.2	Normal
20220815	14:36	18:13	27.9	Normal
20220816	14:30	16:26	33.6	Normal
20220817	14:32	16:04	32.7	Normal
20220818	14:29	16:19	32.4	Normal
20220819	16:31	18:32	35.5	Normal, second launch
20220820	14:29	16:09	31.9	Normal
20220821	14:29	16:33	26.2	Normal
20220822	14:29	16:09	32.4	Normal
20220823	14:29	16:04	33.2	Normal
20220824	14:29	15:55	31.1	Normal
20220825	14:29	16:08	32.4	Normal
20220826	17:59	19:40	32.9	Normal, process delay
20220827	14:30	16:07	33.8	Normal
20220828	14:29	16:06	32.4	Normal
20220829	14:29	16:14	32.5	Normal
20220830	16:24	18:09	34.7	Normal, process delay
20220831	17:19	19:02	33.1	Normal, process delay
20220901	14:29	16:04	33.2	Normal
20220902	13:59	15:38	32.7	Normal

LST, local standard time.

**Appendix 3.** Yongin ozonesonde measurement information, 2021

Measurement date (YYYYMMDD)	Start time (LST, hh:mm)	End time (LST, hh:mm)	Maximum height (km)	Status (issue)
20211023	10:30	12:06	31.0	Normal
20211023	14:43	16:24	32.8	Normal
20211024	09:12	10:40	31.3	Normal
20211024	15:42	17:21	33.0	Normal
20211106	09:31	11:06	32.5	Normal
20211106	14:31	16:28	33.0	Normal
20211113	10:07	11:42	32.0	Normal
20211114	15:05	16:46	32.6	Normal
20211114	10:17	11:56	31.1	Normal
20211106	13:25	15:29	33.6	Normal

LST, local standard time.

**Appendix 4.** Yongin ozonesonde measurement information, 2022

Measurement date (YYYYMMDD)	Start time (LST, hh:mm)	End time (LST, hh:mm)	Maximum height (km)	Status (issue)
20220508	09:16	11:10	33.8	Normal
20220508	14:27	15:58	31.6	Normal
20220514	09:21	11:07	31.0	Normal
20220514	14:33	16:06	31.8	Normal
20220515	08:55	10:39	31.9	Normal
20220515	12:55	14:25	31.2	Normal
20220521	10:00	11:42	30.9	Normal
20220521	14:20	16:11	31.7	Normal
20220522	09:31	11:12	32.4	Normal
20220522	13:40	15:34	32.4	Normal
20220528	09:33	11:31	32.1	Normal
20220528	14:20	16:00	31.7	Normal
20220529	09:39	11:33	31.6	Normal
20220529	13:44	15:30	31.9	Normal
20220604	08:59	10:31	30.2	Normal
20220604	14:30	16:51	32.3	Normal
20220612	14:06	16:15	34.5	Normal

LST, local standard time.

**Appendix 5.** Yongin ozonesonde measurement information, 2023

Measurement date (YYYYMMDD)	Start time (LST, hh:mm)	End time (LST, hh:mm)	Maximum height (km)	Status (issue)
20230805	09:47	12:20	33.0	Normal
20230805	15:45	18:17	33.6	Normal
20230812	09:44	11:44	33.7	Normal
20230812	15:07	17:08	33.1	Normal
20230813	09:30	11:18	33.5	Normal
20230813	14:47	16:44	33.5	Normal
20230819	09:18	10:53	32.0	Normal
20230819	15:29	17:27	34.2	Normal
20230820	09:10	10:57	32.8	Normal
20230820	14:08	15:49	31.4	Normal
20230826	09:41	11:29	32.2	Normal
20230826	14:11	15:43	32.2	Normal

LST, local standard time.

**Appendix 6.** Yongin ozonesonde measurement information, 2024

Measurement date (YYYYMMDD)	Start time (LST, hh:mm)	End time (LST, hh:mm)	Maximum height (km)	Status (issue)
20240928	09:30	11:05	31.8	Normal
20240928	14:30	16:26	33.0	Normal
20240929	09:45	11:26	32.0	Normal
20240929	14:31	16:53	32.5	Normal
20241012	09:30	11:55	33.0	Normal
20241012	14:30	16:15	32.5	Normal
20241013	09:29	11:21	33.7	Normal
20241013	14:09	16:24	35.2	Normal
20241019	09:53	11:34	30.9	Normal
20241019	14:38	16:12	25.4	Signal loss
20241020	09:33	11:12	33.0	Normal
20241020	14:31	15:53	29.7	Normal

LST, local standard time.

**Appendix 7.** Osan ozonesonde measurement information, 2022

Measurement date (YYYYMMDD)	Start time (LST, hh:mm)	End time (LST, hh:mm)	Maximum height (km)	Status (issue)
20220803	13:40	15:16	32.1	Normal
20220805	12:57	14:36	33.0	Normal
20220812	13:32	15:13	32.8	Normal
20220816	09:36	11:26	32.7	Normal
20220818	14:19	16:05	32.8	Normal
20220819	10:23	11:54	31.9	Normal
20220820	13:03	14:51	32.4	Normal
20220821	11:08	12:57	31.2	Normal
20220823	14:09	15:39	30.8	Normal
20220825	10:36	12:15	30.9	Normal
20220827	11:01	12:37	30.0	Normal

LST, local standard time.