

연구논문

헬륨풍선을 이용한 대기 중 오존 밀도 측정 및 대기 높이 척도 분석: 한반도 남부 지역의 대류권 및 성층권 하부

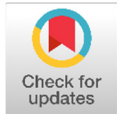
유승우¹, 김민준¹, 한병현², 김어진^{3†}, 김기남¹, 정종균⁴

¹충남대학교 천문우주과학과

²김해분성고등학교

³충남대학교 자연과학연구소

⁴한국천문연구원



Received: July 29, 2024
Revised: August 19, 2024
Accepted: August 21, 2024

†Corresponding author :

Eojin Kim
Tel : +82-42-821-7492
E-mail : jinastro23@cnu.ac.kr

Copyright © 2024 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Seungwoo Yoo
<https://orcid.org/0009-0007-6250-7252>
Min Jun Kim
<https://orcid.org/0009-0008-4351-5465>
Byeong-Hyeon Han
<https://orcid.org/0009-0001-5592-5858>
Eojin Kim
<https://orcid.org/0000-0003-4518-8468>
Ki-nam Kim
<https://orcid.org/0009-0009-4836-128X>
Jong-Kyun Chung
<https://orcid.org/0000-0003-4493-8378>

Ozone Concentration Measurement and Atmospheric Scale Height Analysis Using Helium Balloon in the Troposphere and the Lower Stratosphere Over the Southern Korean Peninsula

Seungwoo Yoo¹, Min Jun Kim¹, Byeong-Hyeon Han², Eojin Kim^{3†}, Ki-nam Kim¹, Jong-Kyun Chung⁴

¹Department of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Gimhae Bunseong High School, Gimhae 50899, Korea

³Natural Science Institute, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

⁴Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

요약

이 연구는 헬륨풍선을 사용하여 한반도 전라북도 상공 대기층의 오존 밀도를 측정하고 높이 척도를 기반으로 대기 밀도의 변화를 분석하는 실험을 다룬다. 실험에서는 아두이노 Uno를 사용하여 데이터를 수집하고 MQ131 센서를 통해 오존 밀도를 측정했다. 또한 BMP280 센서를 사용하여 온도 및 대기 압력을 다양한 고도에서 측정했다. 실험 결과, 한반도 상공 대기의 높이 척도는 6,828.30 m로 나타났으며, 이를 기반으로 대기 밀도의 감소 패턴을 확인했다. 또한, 측정된 오존 수준의 그래프를 분석하여 8 km에서 9 km 고도 사이에서 오존 수준이 급격히 감소하는 현상이 관찰되었다. 이러한 결과들은 대기 환경 및 오존 밀도 변화를 이해하고 환경 모니터링에 중요한 정보를 제공할 수 있다.

Abstract

This study deals with an experiment to measure ozone concentration in the atmosphere over the Korean Peninsula, Jeollabuk-do, using a helium balloon and analyze the change in atmospheric density based on the scale height. In the experiment, Arduino Uno was used to collect data and ozone concentration was measured using the MQ131 sensor. In addition, the BMP280 sensor was used to measure temperature and atmospheric pressure at various altitudes. The experimental results showed that the scale height of the atmosphere over the Korean Peninsula was 6,828.30 m, and the decreasing pattern of atmospheric density was confirmed based on this. In addition, by analyzing the graph of the measured ozone level, a phenomenon of a rapid decrease in the ozone level was observed between 8 km and 9 km altitude. These

results can provide important information for understanding the atmospheric environment and ozone concentration changes and for environmental monitoring.

핵심어 : 오존 밀도, 높이 척도, 대류권, 성층권, 헬륨풍선

Keywords : ozone concentration, scale height, troposphere, stratosphere, helium balloon

1. 서론

지구의 대기는 고도에 따라 대류권, 성층권, 중간권, 열권으로 구분되며 대기 중 오존 (ozone, O₃)은 90%가 성층권에, 10%가 대류권에 존재한다. 성층권(14-50 km 고도) 내의 15-35 km 고도 지역에서 주로 형성되는 오존층(ozone layer)은 태양 자외선에 의해 산소분자가 산소원자로 나뉘진 후 주변의 산소분자와 결합하여 생성된다. 오존 분자도 자외선에 의해 나뉘지나 다시 산소 분자나 원자와 결합하는 산소 사이클에 의해 성층권 내에서 오존 밀도는 안정적으로 유지된다. 이러한 오존의 생성과 파괴 과정에서 150-320 nm 파장 영역의 자외선이 흡수되므로 오존층은 태양으로부터 오는 생물학적으로 유해한 자외선(200-315 nm 파장대)의 대부분을 흡수하여 막아주기 때문에 지구의 생명체에 있어 매우 직접적인 역할을 한다. 또한 대류권의 오존은 대기오염 물질 중의 하나인 질소화합물과 휘발성유기화합물이 태양빛을 받아 생성되며 일정 시간 동안 공기에 잔류하고 자극성과 산화력이 강하기 때문에 감각기와 호흡기 등에 급격한 영향을 미칠 수 있다고 알려져 있다. 이처럼 지구의 대기 중 오존은 환경과 인간 건강에 중요한 영향을 미치는 기체 중 하나로 인식되고 있다(Fig. 1)[1].

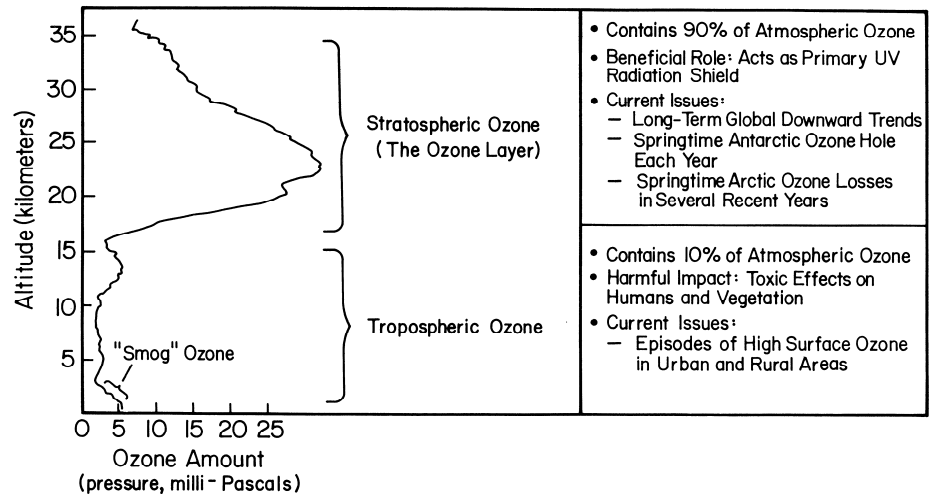


Fig. 1. Text and figure are adapted from the Introduction to "Frequently Asked Questions" of the World Meteorological Organization/United Nations Environment Programme report, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998 (WMO Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 44, Geneva, 1999). Science - Ozone Basics (<https://www.noaa.gov>) [1].

지구 성층권의 대기는 비행기로 관측하기에는 고도가 높고, 로켓으로 관측하기에는 빠른 속도로 인해 적절하지 않으며 인공위성으로 관측하기에는 고도가 너무 낮다. 전세계의 기상청에서는 주기적으로 수소나 헬륨을 채운 풍선(balloon)을 띄워 대기의 속도, 온도, 습도 등을 측정하는데 고고도 기상풍선은 고고도(성층권 높이)의 대기 질을 측정하는 편리하고 저렴한 방식이다(Fig. 2)[2]. 고고도 기상풍선(High Altitude Balloon)은 1800년대에 대류권계면과 성층권을 발견한 프랑스 기상학자 레옹 테세랑 드 보르트가 발명한 기상 관측기에서 파생되었다. 보르트는 수소를 채운 계측 풍선을 약 8-17 km 고도 구간의 공기질 측정을 위해 사용하였다. 풍선을 이용한 이러한 관측은 전자 부품들이 기성화 되면서 대기 질 또는 특정 대기 오염 물질 측정을 포함하여 근거리 우주 실험에 다양하게 활용되고 있다. 특히 라텍스 풍선을 사용하면 무게의 제한은 있으나 관측 탑재물을 저렴한 비용으로 우주 공간에 쉽게 도달시킬 수 있다는 장점이 있어 연구자들은 물론 일반 학생들을 위한 교육용으로도 많이 사용된다 [3,4].

이러한 배경 아래 본 연구는 헬륨을 활용한 고고도 기상 풍선을 활용하여 대기 중 오존 밀도를 측정하고 높이 척도를 기반으로 대기 밀도의 변화를 분석하는 것을 목표로 한다. 한반도 상공 성층권을 중심으로 실시된 이 실험은 대기 중 오존 밀도의 고도별 분포 및 변화를 조사하여 대기 환경 모니터링을 목적으로 한다. 일련의 과정을 통해 일반인들도 쉽게 구매가 가능한 헬륨풍선과 전자기기를 사용하여 수행할 수 있는 근우주 대기 관측을 소개하고자 한다.

2. 실험 과정

오존 측정을 위한 사운드링 벌룬(sounding balloon)의 구상 및 제작을 위해 다양한 실험 사례를 참고하여 관측 기기의 전체적인 외관을 디자인하였다. 오존 관측 실험 기기 외관은 1,200 g의 라텍스 풍선과 소형 낙하산(38인치), 낙하산을 연결할 줄, 그리고 관측 기기를 내부에 실을 스티로폼 박스로 구성된다(Fig. 3). 스티로폼 박스 내부에 고정된 실험 기기는 다음의 기기들로 구성되었다. 아두이노 우노(Arduino Uno, Devicemart / NTREX Co., Ltd., Incheon, Korea)



Fig. 2. Korea Meteorology Agency flying radiosonde using helium balloon [2].



Fig. 3. Appearance of the observation device.

를 자료 측정에 활용하였다. 고도별 오존 측정을 위해 MQ131 센서를, 대기 온도와 압력 측정을 위해 BMP280 센서(Bosch, Gerlingen, Germany)를 사용하였다(Figs. 4-7). 센서의 자료를 저장하기 위해 SD 카드 리더기가 사용되었다. 성층권 고도에서 대기 온도는 -40°C 에서 -50°C 사이로 저온에서 견딜 수 있는 Panasonic Eneloop 배터리(Panasonic, Kadoma, Japan)를 사용하였다(아두이노 우노는 9 V 배터리 팩을 사용하는 것이 적당하다). 진동에 강하고 저온에서도 작동에 문제가 없는 U-PRO 카메라를 활용하여 영상촬영을 하였다. 추가적으로 GPS 수신기 용도로 스마트폰을 사용하였다. 헬륨 풍선을 비롯한 전체 관측기기 제작에 사용된 물품과 구매처는 Table 1에 자세하게 소개되었다.

안전한 실험 진행을 위해 우선 헬륨 풍선 발사와 관련된 기관의 허가 사항을 확인하였다. 서울지방항공청 공역관리과 및 청주와 군산 공항 출장소에 문의한 결과, 총 길이가 3 m 미만이고 무게가 2 kg 미만인 비행물체에 대해서는 추가 허가 요청이 필요하지 않다는 것을 확인하고 실험을 진행하였다. 본 실험에서 가장 중요한 측면은 시료의 회수이므로 이를 위해 적절한 발사 장소, 풍선의 예상 궤적 및 GPS 수신을 고려하는 것이 중요하다. 한반도는 일반적으로 편서풍이 부는 지역으로 풍선이 내륙에 착륙되도록 최대한 서쪽에서 발사하는 것이 유리하다. Fig. 8a에서 보여주는 바와 같이 '<https://predict.sondehub.org/>' 사이트에서 제공되는 예측된 풍선의 예상 이동 경로를 확인할 수 있다[5,6]. 따라서, 본 실험에서는 한반도 내의 최대한 서쪽에 위치한 장소에 해당하는 변산 해변에서 풍선을 발사하기로 결정했다. Fig. 8b에서 보여주는 바와 같이 위치정보 프로그램을 활용하면 1번부터 26번까지 헬륨 풍선이 비행하는 동안의 실제 위치를 표시된다(<http://www.gnali.net>). 이 프로그램은 위치 정보를 입력한 후 일정한 간격으로 위치 정보를 받기에 적합하다. 추가적으로 GPS 통신 스마트폰에서 사이렌이나 비슷한 알람을 발생시켜 관측기기가 정확하게 위치하도록 하는데 유용하다. 프로그램 아래의 압력 필드에는 발사 장소의 위도와 경도를 입력하였다. 그 후 발사시간, 최대 고도, 상승 속도 및 하강 속도를 입력한 후 예상 착륙 지점을 확인하였다.

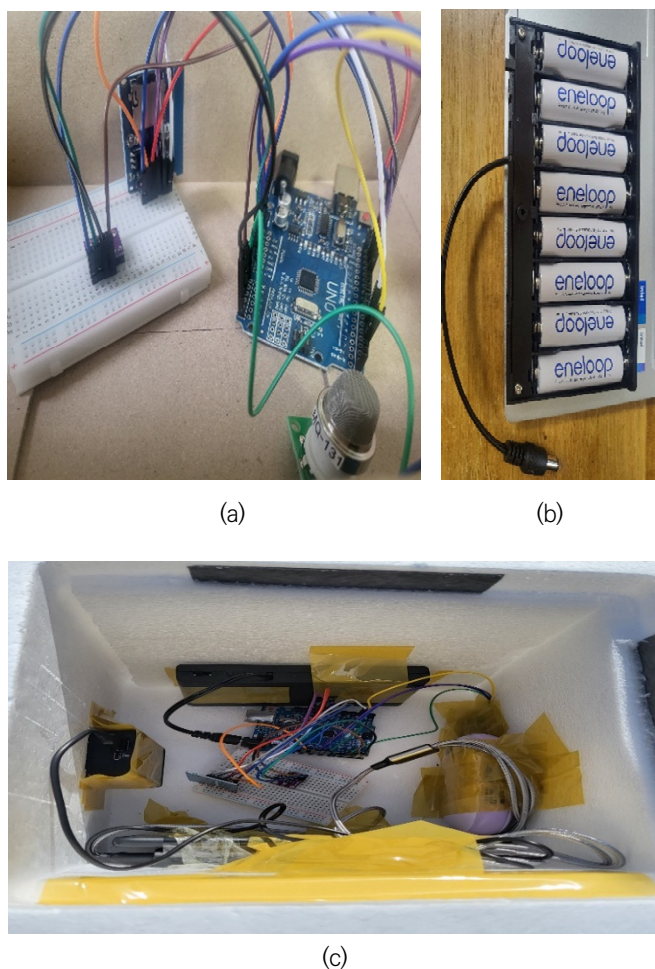


Fig. 4. Inside of the Experiment preparation of the observation device. (a) Internal configuration. (b) A pack of batteries. (c) Completed interior.

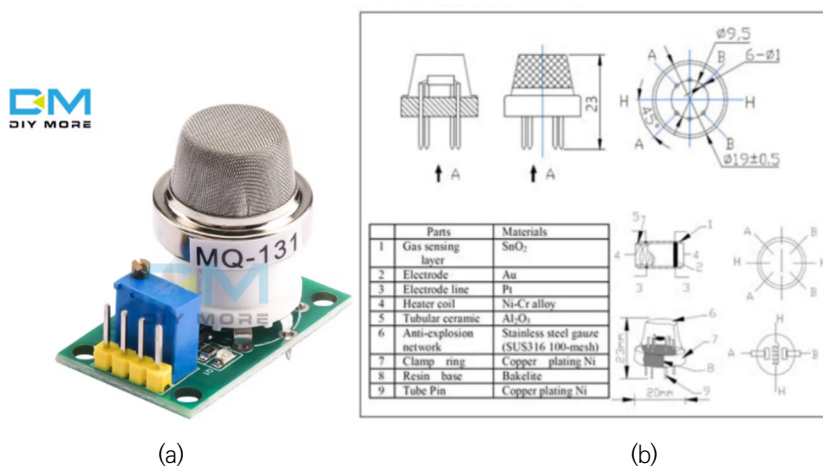


Fig. 5. Measurement device of ozone concentration. (a) MQ-131 sensor module. (b) Specifications of MQ131.

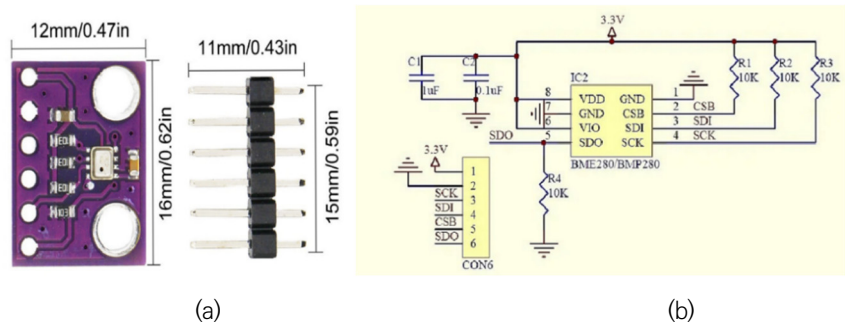


Fig. 6. Atmospheric pressure and temperature measurement module. (a) BMP280 sensor module, (b) circuit diagram of BMP280.



Fig. 7. Arduino Uno R3 compatible board.

Table 1. List of purchased items

| | Items | Object | Price (₩) | Purchase site |
|---|---|--|--------------------------------|---------------|
| 1 | U-pro premium 128 G black | Dustproof/waterproof camera | 170,050 | COUPANG |
| 2 | Styrofoam box | Insulating and overall frame role | 6,400 | COUPANG |
| 3 | Duino Rechargeable Hand Warmer Battery (10,000 mAh) | For use in charging electronic devices and preventing them from turning off due to heat generation | 32,220 | COUPANG |
| 4 | PE foam cushioning insulation | For insulation and shock prevention in observation boxes | 10,080 | COUPANG |
| 5 | High altitude weather balloon (1,200 g) | For use in ascending observation boxes into the stratosphere | 225,756 (shipping included) | AliExpress |

Table 1. (Continued)

| | Items | Object | Price (₩) | Purchase site |
|----|---|--|--------------------------------|---|
| 6 | Small parachute (38 inch) | For safe ground landing of observation devices | 45,100 (shipping included) | AliExpress |
| 7 | Heium Gas | Uses for filling weather balloons | 390,000 (Shipping included) | Kumkang Gas |
| 8 | String | For connecting parachute and observation box | 51,100 (shipping included) | AliExpress |
| 9 | CAN communication module | Arduino board communication module | 2,000 | INTOPION (https://www.intopion.com) |
| 10 | Arduino atmospheric pressure altitude sensor module (BMP280) | For atmospheric pressure measurement | 16,500 | INTOPION |
| 11 | Arduino Uno R3 Compatible board | Arduino board BASE | 7,370 | INTOPION |
| 12 | Ozone gas sensor module | Ozone detection | 14,054 | AliExpress |
| 13 | Arduino board delivery fee | | 2,500 | INTOPION |
| 14 | BreadBoard | | 990 | INTOPION |
| 15 | Arduino cable | | 590 | INTOPION |
| 16 | Arduino SD module | | 770 | Off-line |
| 17 | Arduino USB connecting cable | | 6,000 | Off-line |
| 18 | Soldering | | 5,000 | Off-line |
| 19 | SD card | | 7,200 | Off-line |
| 20 | Tariff of balloon | | 55,320 | Off-line |
| 21 | Arduino battery pack | | 5,500 | COUPANG |
| 22 | Panasonic Eneroop pro AA battery 8EA | | 41,010 | COUPANG |
| | Total | | 1,095,490 | |

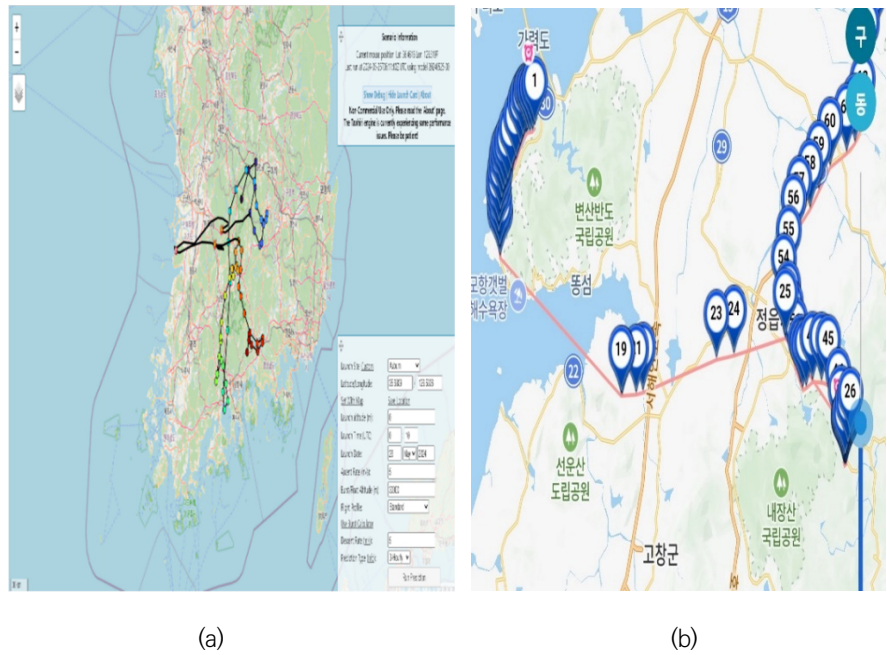


Fig. 8. Predicted balloon position before the experiment and position of the observation device during observation. Prediction of the balloon path (a) [5], GPS position of the balloon during observation (b) [6].

3. 결과 및 분석

본 실험은 2024년 5월 6일 00:30(UTC)에 전라북도 부안군 변산 해변에서 시작되었다. 시작 시간(00:30 UTC) 이후 약 30분간은 GPS 위치 측정이 불가능하였고 약 2시간 이후에 위치 측정이 가능하였다. 헬륨 풍선은 출발위치(전라북도 부안군 변산면 대항리 621-5)에서 착륙 위치(전라북도 부안군 쌍치면 정안리 12)까지 수평 방향으로 약 45 km로 직선거리를 이동하였다. 측정장비를 회수한 후 데이터 분석 결과 대기권을 수직 방향으로 약 20 km 상승한 것으로 확인되었다. 관측 기기와 함께 탑재된 카메라를 통해 촬영된 한반동 상공 대기층은 Fig. 9의 영상과 같이 촬영되었다.

실험결과 고도에 따른 대기압의 변화는 Fig. 10에 보여지는 바와 같은 관측 결과를 얻었다. 대기의 압력과 고도의 상관관계는 식 (1)과 같고, 대기의 압력은 고도가 증가함에 따라 지수 관계로 감소함을 의미한다.

$$P(h) = P_0 e^{-h/H} \tag{1}$$

$P(h)$: 고도 h 에서의 대기 압력, P_0 : 해수면 고도에서의 대기 압력, H : 스케일 고도, h : 고도

대기의 높이 척도는 대기의 밀도가 지수($e = 2.71828$)의 배수로 줄어드는 거리를 의미하며 식 (2)로 계산할 수 있다.

$$H = RT / mg \tag{2}$$

R : 기체상수($8.314 \text{ J} / (\text{mol} \times \text{k})$), T : 온도(K), m : 대기 평균 분자질량, g : 중력가속도

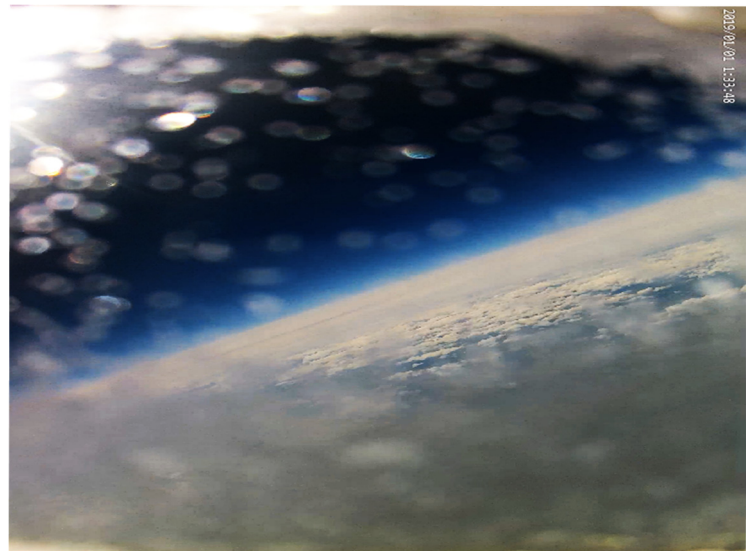


Fig. 9. Images taken from U-pro camera during observation.

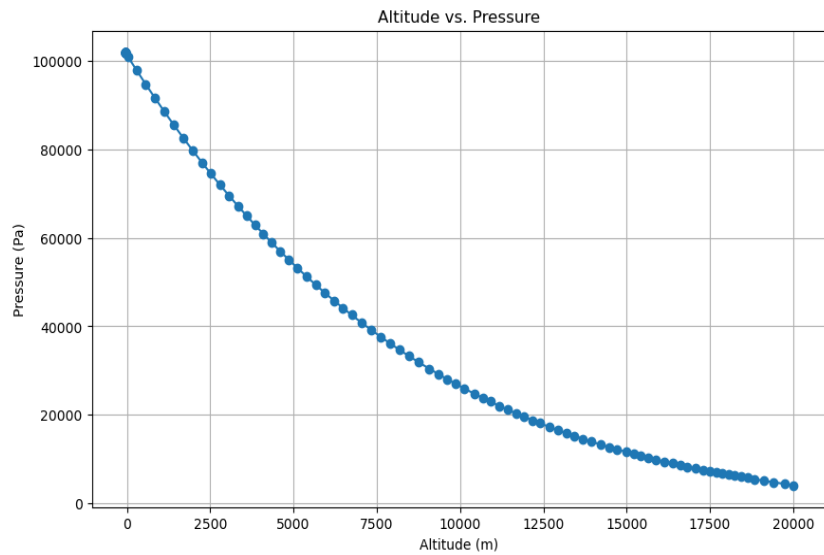


Fig. 10. Results of the atmospheric pressure variation with the altitude.

Fig. 11과 같이 관측된 대기의 고도에 따른 압력의 지수 값의 상관관계를 살펴보면 경사도 (slope)는 -0.0001464493 , 절편(intercept)은 11.55810403223 , 결정 계수(R^2)는 0.995768554193 와 같은 계수를 얻을 수 있다. 이를 바탕으로 결과적으로 관측 당시 한반도 전라북도 상공 대기의 스케일 고도는 $6,828.30$ m로 계산되었다. 고도에 따른 오존의 밀도(ppm)는 Fig. 12에 나타나는 바와 같고, 측정된 오존의 그래프를 분석하여 8 km에서 9 km 고도 사이에서 오존 밀도가 0.02 에서 0.01 ppm으로 급격히 감소하는 현상이 관찰되었다. 이는 Jeon(2001)에 따르면 이전 날의 잔류층에서 오존이 하위층으로 이동하여 표면에서 더 높은 오존 수준이 측정되었고 $8-9$ km 고도 근처에서 낮아진 것으로 추론된다[7].

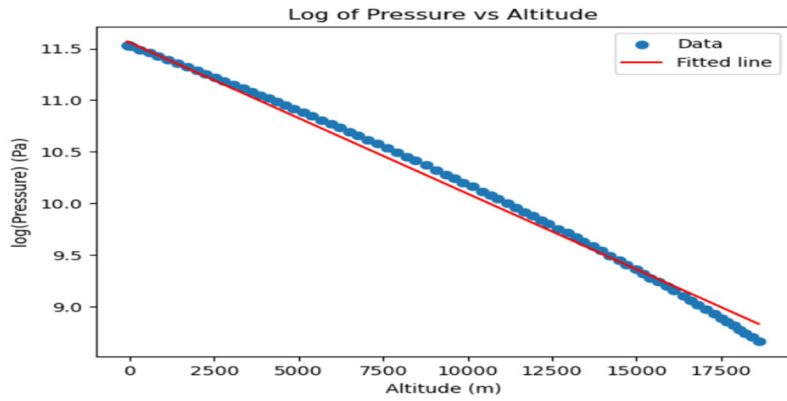


Fig. 11. Log pressure variation with altitude observed over the Korean Peninsula.

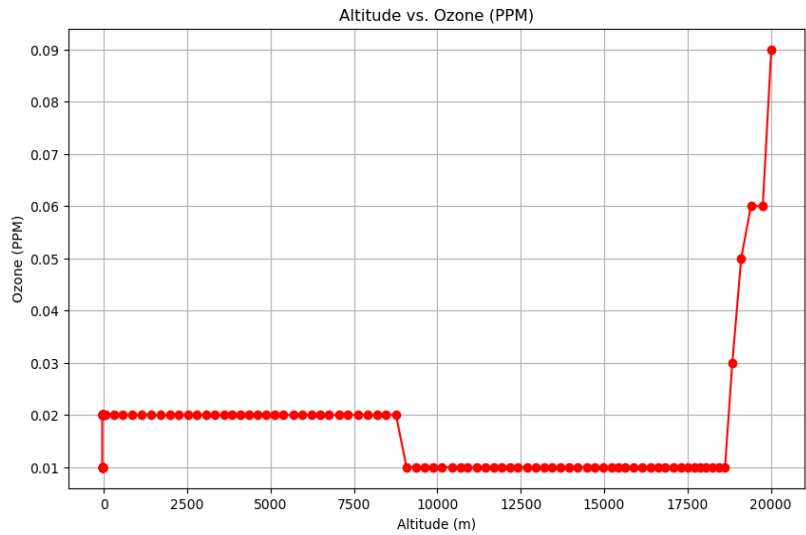


Fig. 12. Results of the ozone concentration variation with the altitude.

4. 결론

본 논문에서는 헬륨풍선을 사용하여 한반도 상공 대기층의 오존 밀도를 측정하고 높이 척도를 기반으로 대기 밀도의 변화를 분석하는 관측 과정을 소개하였다. 오존측정기(MQ131 센서), 온도 및 대기 압력 측정기(BMP280 센서), 데이터 수집 모듈(아두이노 Uno)로 구성된 실험기기를 1,200 g의 라텍스 고고도 풍선을 사용하여 약 20 km 고도까지 상승시키며 고도 별로 오존을 측정했다. 2024년 5월 6일 00:30(UTC)에 전라북도 부안군 변산 해변에서 띄운 관측기기는 수평 방향으로 약 45 km로 떨어진 지역에서 회수되었다. 상공 대기의 높이 척도는 6,828.30 m로 나타났으며, 이를 기반으로 대기 밀도의 감소 패턴을 확인했다. 또한, 측정된 오존 수준의 그래프를 분석하여 8 km에서 9 km 고도 사이에서 오존 수준이 급격히 감소하는 현상을 관찰했는데, 이는 이전 날의 잔류층에서의 오존이 하위층으로 이동하는 결과로 추론된다. 이러한 결과들은 대기 환경 및 오존 밀도 변화를 이해하고 환경 모니터링에 중요한 정보를 제공할 수 있다. 본 논문에서 소개된 관측 실험의 구상, 관측기기의 제작 및 실험, 데

이더 분석에 이르기까지의 과정을 통해 지구 고층대기에 관심있는 연구자들은 물론 일반인들도 직접 관측을 시도해 보는데 활용되기를 기대해 본다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2022R1A2C1092602).

References

1. Ozonelayer, Science: ozone basics (2008) [Internet], viewed 2024 May 6, available from: <http://www.ozonelayer.noaa.gov/science/basics.htm>
2. Korea Meteorological Administration [KMA], Rawinsodne (n.d.) [Internet], viewed 2024 May 6, available from: <https://data.kma.go.kr/data/hr/selectRdsdRltnList.do?pgmNo=49>
3. Kumar S, Balloon-based remote sensing of the atmosphere, in Atmospheric Remote Sensing, eds. Singh AK, Tiwari S (Amsterdam, Netherland, Elsevier, 2023), 211-226.
4. Dabberdt WF, Cole H, Paukkunen, A, Horhammer J, Antikainen V, et al., Radiosondes, in Encyclopedia of Atmospheric Sciences, ed. Holton JR, Pyle JA, Curry JA (Elsevier Science, Amsterdam, the Netherlands, 2002) 1900-1913.
5. Predict, Scenario Information (n.d.) [Internet], viewed 2024 May 6, available from: <https://predict.sondehub.org/>
6. Gnali, Kids & business manage employee time and attendance office assistants (n.d.) [Internet], viewed 2024 May 6, available from: <https://www.gnali.net/ko/>
7. Jeon BI, Variation of surface ozone concentration by vertical downward mixing of ozone in the residual layer of the atmospheric boundary layer at the Busan Coastal Area, J. Korean Environ. Sci. Soc. 10, 417-422 (2001).

Author Information

유 승 우 yaopoi123@naver.com



현재 충남대학교 천문우주과학과 학부 4학년에 재학 중이다. 기상학에 대해 관심이 많으며, 군 복무 당시 기상관측병으로서의 경험을 토대로 위의 연구를 진행하였다. 이러한 실험 경험과 연구 성과들을 바탕으로 하여 향후 기상학에 대해 꾸준히 공부해 나갈 예정이다.

김 어 진 jinastro23@cnu.ac.kr



충남대학교 천문우주과학과에서 위성 및 이오노스페어 자료를 활용하여 전리권을 연구하였고, 장기간 이오노스페어 자료를 모델링하여 한반도 상공 전리권 예측 모델링을 연구하여 박사학위를 취득하였다. 현재 충남대학교 자연과학연구소에서 박사후 연구원으로 달 및 행성 환경 연구를 수행하고 있다.

김 민 준 mg78439@gmail.com



현재 충남대학교 천문우주과학과 학부 4학년에 재학 중이다. 기상학과 대기과학에 대한 관심과 호기심으로 위 연구를 계획 및 진행하였으며, 이를 통해 얻은 연구 성과를 바탕으로 계속해서 대기과학 분야에 대해 공부해 나갈 계획이다.

김 기 남 astropacekim@cnu.ac.kr



충남대학교 천문우주과학과에서 대한민국 상시 GPS 관측소 자료의 신뢰도를 분석하면서 GNSS 신호 오차의 주된 원인인 전리권의 연구에 관심을 가졌고 한국천문연구원에서 우주측지통합활용시스템 개발에 참여했다. 현재는 국내 천문우주과학 분야의 저변확대 및 지역 연구인력양성에 관심을 갖고 있다.

한 병 현 gksqudgsu1@naver.com



충남대학교 기술교육과를 졸업하였고, 중고등학교 기술교사로 근무 중이다. 과학과 기술, 공학에 관심이 많아 학생들과 새롭고 도전적인 다양한 과제들을 수행하며 아이들이 자신의 꿈에 확신을 갖고 한 걸음씩 나아가도록 격려하고, 꿈에 대한 도전을 포기하지

않도록 동기부여가 될 만한 활동들을 끊임없이 찾아보며 늘 새로운 수업을 시도하고 있다.

정 종 균 jkchung@kasi.re.kr



충남대학교 천문우주과학과에서 2005년 이학 박사 학위 취득 후, 2006년부터 한국천문연구원에서 위성항법시스템 신호의 전리층 시간지연과 페이딩 현상을 연구하고, 남극내륙 고원 무인우주탐사 플랫폼 모듈을 개발하여 운영 중에 있다. 현재 위성항법시스템 지상시스템 개발과 우주측지기술을 이용한 기후변화 연구 등을 수행하고 있다.