남극 성층권 오존의 기후학적 특성 및 시공간적 변동성 진단

KOPRI
극지연구소

연세대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 기후변화의 지역적 차이 원인 규명 (본과제명)” 과제의 위탁연구 “남극 성층권 오존의 기후학적 특성 및 시공간적 변동성 진단 (위탁과제명)” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

KOPRI 극지연구소

2020. 1. 30

(본과제) 총괄연구책임자 : 김 성 중

위탁연구기관명 : 연세대학교

위탁연구책임자 : 구 자 호

위탁참여연구원 : 이 하 나

“ : 안 다 현

“ : 김 송 강

“ : 이 동 희

보고서 초록

<table>
<tr><td>위탁연구과제명</td><td colspan="5">남극 성층권 오존의 기후학적 특성 및 시공간적 변동성 진단</td></tr>
<tr><td>위탁연구책임자</td><td>구자호</td><td>해당단계
참여연구원수</td><td>4</td><td>해당단계
연구비</td><td>60,000,000원/년
× 3년</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">연세대학교 대기과학과</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 :　　상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)</td><td>보고서
면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">본 연구는 남극에서 여러 가지 방법으로 성층권 오존 변동성을 측정, 분석하여 시공간적 특징을 살피고, 기상장과의 상관성 분석을 통해 주변 대기 특성 및 순환 패턴이 성층권 오존에 어떤 변화를 미칠 수 있을지를 분석하여 남극 성층권 오존의 기후학적 특성 및 시공간적 변동성을 진단해보았다. 추가적으로 오존 외 다른 감시 기체의 특성을 통해 오존 분포에 영향을 줄 수 있는 화학적 배경 역시 일부 살펴보았다.
우선 세종 및 장보고 과학기지에서 브루어 분광광도계를 이용한 지상 원격 탐사를 정상화시켜 오존 전량 및 오존의 연직 분포를 감시할 수 있는 기반을 마련하였다. 이 두 관측 기지에서 생산된 오존 전량 자료는 인근 WOUDC 관측소 및 위성 자료와의 비교를 통해 검증하였고 관측이 우수하게 이루어지고 있음을 확인하였다. 또한 장보고 기지에서 수행된 오존존데 관측을 이용, 남극 성층권 오존홀이 발견되는 시점의 오존의 연직 분포와 기온 등의 기상 변수의 연직 분포 사이 관계에 대해서도 분석을 진행하였다.
이어서 위성으로 관측한 오존전량과 재분석 자료에서 생산하는 기온, 잠재와도, 풍속과 같은 기상 정보 사이의 상관성 분석을 고도별로 수행하였고, 상관성이 고도에 따라 반대로 나타날 정도로 큰 차이를 보이고 있음을 확인하였다. 일반적으로 알려진 극 소용돌이의 강화에 따른 성층권 오존 파괴 현상은 성층권 하층에서 분명하게 드러나고 있었지만 그 아래 대류권계면에서는 중위도 대류권 오존과 극지역 성층권 오존이 섞일 수 있는 특성이 발견되고 보다 높은 고도인 성층권 상층에서는 극 소용돌이 내의 염소-오존 화학 반응보다 기본적인 오존의 광화학 반응이 더 중요한 역할을 할 수 있는 것으로 나타나는 등, 고도별로 오존 변동성에 관련되는 영향 인자의 차이가 크게 다를 수 있음을 볼 수 있었다. 특히 이러한 차이는 월별로도 존재하여 남극지역 오존의 변동성이 기상 및 기후 특성에 미치는 영향의 시간적 변화도 중요하게 고려할 필요가 있음을 알 수 있었다.
추가적으로 오존에 화학적으로 영향을 줄 수 있는 에어러졸, 이산화탄소와 같은 감시 기체 물질들이 남극 주변에서 어떠한 기후학적 분포 특성을 갖는지를 여러 위성 자료 및 재분석 자료를 확인하여 살펴보았다. 이 분석 결과들은 향후 오존의 시공간적 변동성을 이해하는 과정에서 요긴하게 활용할 수 있는 참고자료가 될 것으로 여겨진다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">남극, 성층권, 오존, 기후변화, 오존 존데, 브루어 분광광도계, 세종과학기지, 장보고과학기지</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Antarctica, stratosphere, ozone, climate change, ozonesonde, Brewer spectrophotometer, King Sejong station, Jang Bogo station</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

남극 성층권 오존의 기후학적 특성 및 시공간적 변동성 진단

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

다양한 관측 자료를 활용하여 남극 성층권 오존의 일반적인 분포 특성을 이해하고 기상장 및 다른 대기 환경 인자들과 어떤 관계를 가지고 있는지 살펴보고자 함. 남반구 기후변화에 성층권 오존 변동성이 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있기에 오존의 시공간 분포 특성을 상세하게 조사하여 확보한 결과들은 추후 오존 변동성에 따른 기후변화 가능성, 또는 반대로 기후변화에 따른 성층권 오존홀 규모 변화를 이해하는데 매우 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 여겨짐.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 세종 및 장보고 과학기지에서 브루어 분광광도계 및 오존존데를 이용한 지상 오존 감시 업무 시스템을 구축하고 현재까지 측정된 자료들을 기본적으로 분석하여 세종기지가 위치한 서남극 지역과 장보고 기지가 위치한 동남극 지역의 오존 변동성 특징의 유사/차이 특징을 살펴봄.
- 위성 관측 자료와 재분석 기상장 자료를 이용, 오존과 기상장 사이 상관성 분석을 남반구 봄, 여름 시기에 수행. 오존과 기온, 잠재와도, 풍속과의 상관성이 시간적으로 (월별 변화), 또 공간적으로 (고도별 변화) 어떻게 차이가 나타날 수 있는지를 살펴봄.
- 오존과 관련된 기타 대기 조성 물질의 기후학적 변동성 추적, 남극 오존 화학에 잠재적으로 줄 수 있는 영향을 살펴봄.

Ⅳ. 연구개발결과

- 세종 및 장보고 기지에서 브루어 분광광도계 오존 감시 업무 정상화. 지상 관측 자료를 위성 관측 자료와 비교 검증. 관측 자료의 다양한 시계열 분석을 통한 남극 오존 장기 변동성 진단. 오존존데 관측을 이용하여 장보고 기지 상공 오존 및 기온의 연직 분포 조사 완료
- 위성 관측 오존전량과 재분석 자료의 기온, 잠재와도, 풍속과의 상관관계를 통해 오존과 기상장의 관계가 고도별로 달리 나타날 수 있음을 발견. 크게 대류권계면 부근, 성층권 중/하층, 성층권 상층 이렇게 세 지역으로 각각 다른 특징이 구분되는 것을 발견

- 에어로졸 혼탁도, 일산화탄소, 질소산화물, 포름알데히드 등 오존과 화학적으로 관련될 수 있는 물질들의 기후학적 분포 특성 및 트렌드의 현황을 남극 및 남반구 주변에서 확인함.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

Southern Annular Mode(SAM) 및 해빙 면적 변화와 같은 남극, 남반구 대기 순환 및 기후 변동성 특징에 성층권 오존 변화가 미칠 수 있는 영향을 분석하는 과정에 본 연구 결과들을 적용해 볼 예정.

KOPRI
극지연구소

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Investigation for the climatology pattern and spatiotemporal variation of Antarctic stratospheric ozone.

II. Purpose and Necessity of R&D

We would find the spatiotemporal distribution of Antarctic stratospheric ozone using various measurements and examine the relationship with other meteorological / environmental factors. Since it has been well known that the change of stratospheric ozone strongly influence to the atmospheric circulation and variability in the southern hemisphere, our findings in this project will be very useful to analyze the potential relationship or feedback process between the stratospheric ozone and climate change.

III. Contents and Extent of R&D

- Installation of measurement platform using the Brewer spectrophotometer at the King Sejong and Jang Bogo station in Antarctica. The analysis of obtained ozone data from these Brewer spectrophotometer and additional ozonesonde observations to figure out the consistency/difference of stratospheric ozone pattern between West and East Antarctic regions.

- Analysis about the relationship between the satellite-measured ozone and meteorological factors from the reanalysis dataset (air temperature, potential vorticity, and wind speed). Examination if there is a spatiotemporal difference of relationship between ozone and meteorological factors.

- Climatological patterns of other atmospheric components related to the ozone chemistry in Antarctic and Southern Hemispheric regions.

IV. R&D Results

- Simultaneous total ozone measurements between the King Sejong and Jang Bogo station are newly started using the Brewer spectrophotometer.

Inter-comparison between ground-based and satellite ozone measurements. Diagnosis of long-term variation of stratospheric ozone based on the various time-series analysis. Investigation of vertical ozone and temperature profile using the ozonesonde observations at the Jang Bogo station.

- Vertical different ozone-meteorology relationship is found based on the relationship of total ozone to the air temperature, potential vorticity, and wind speed: roughly among tropopause, lower stratosphere, and upper stratosphere.

- Climatological distributions and long-term variations of aerosol optical depth, carbon monoxide, nitrogen oxides, and formaldehyde are found.

V. Application Plans of R&D Results

We would apply our finding to the investigation of relationship between the stratospheric ozone variation and Southern Annular Mode(SAM) or Antarctic sea ice concentration, which is significantly believed for the better understanding of climate change in the Southern Hemisphere.

KOPRI
극지연구소

목 차

제출문 ····· i
보고서 초록 ····· ii
요약문 ····· iii
영문요약문 ····· v
목차 ····· vii

제 1 장 서론 ····· 1
제 1 절 연구 동기 ····· 1
제 2 절 연구 목표 ····· 1
제 3 절 추진전략 및 체계 ····· 2
제 4 절 목표 달성 및 방법 ····· 2
제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 3
제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과 ····· 5
제 1 절 장보고 과학기지 오존존데 관측자료 분석 ····· 5
1. 연구 대상 기간 오존존데 전체 자료 특성 분석 ····· 5
2. 오존존데 자료 연도별 일별 특성 분석 ····· 13
가. 2015년 ····· 13
나. 2016년 ····· 23
다. 2017년 ····· 32
라. 2018년 ····· 38
3. 오존 존데 관측 자료의 월평균 분석 ····· 44
가. 오존과 온도 ····· 44
나. 바람 ····· 48
다. 비습 ····· 48
라. 오존존데와 위성자료 비교분석(2015-2018) ····· 49
제 2 절 세종 및 장보고 과학기지 브루어 분광광도계 오존 관측 자료 분석 ····· 55
1. 세종 과학기지 브루어 분광광도계 설치 과정 ····· 55
가. 개요 ····· 55
나. 세종 기지 설치를 위한 사전 여분의 준비 품목 ····· 56
다. 2018년 세종기지 브루어 분광광도계 설치 계획 ····· 57
라. 세종 과학기지 브루어 분광광도계 설치 과정 ····· 57
2. 동/서남극 지상, 위성 오존 전량 관측 상호 비교 (2017-2019년 분석 위주) ····· 68
3. 브루어 분광광도게 UMKEHR 방법을 활용한 오존 연직 분포 측정 자료 분석 ····· 83
4. 브루어 자외선 관측 자료 분석 ····· 89

KOPRI 극지연구소

제 3 절. 남극 지역 오존 전량 변동성을 설명하기 위한 기상장 및 해빙과의 상관관계 분석 ····95
1. 분석 지점 및 연구 접근 방법 ····95
2. 서남극 주변의 오존 감소 패턴 ····95
3. 기상 조건과의 관계 ····107
4. 해빙과 남극 기지 지역 오존 전량 간의 관계 분석 ····114
제 4 절 남극 및 주변 남반구 지역 대기 조성의 기후학적 특성 분석 ···· 122
1. 분석 개요 및 연구 접근 방법 ····122
2. 에어로졸 및 미량기체의 기후학적 평균 패턴 ····125
3. 중위도 지역에서 남극으로의 수송 패턴 ····134
4. 에어로졸 및 미량기체 트렌드 분석 ····136
5. 재분석 자료를 이용한 극 지역 AOD 패턴 분석 ····156
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 ····168
제 1 절 1차년도 (2017) 연구목표: 세종 및 장보고 과학기지 오존 관측 자료 구축 ····168
제 2 절 2차년도 (2018) 연구목표: 남극 상공 오존의 시공간적 특성 분석 ····168
제 3 절 3차년도 (2019) 연구목표: 남극 상공 오존 변동성과 기상장 연관 분석169
제 4 절 대외 기여도 ····169
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····171
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····172
제 7 장 참고문헌 ····173

제 1 장 서론

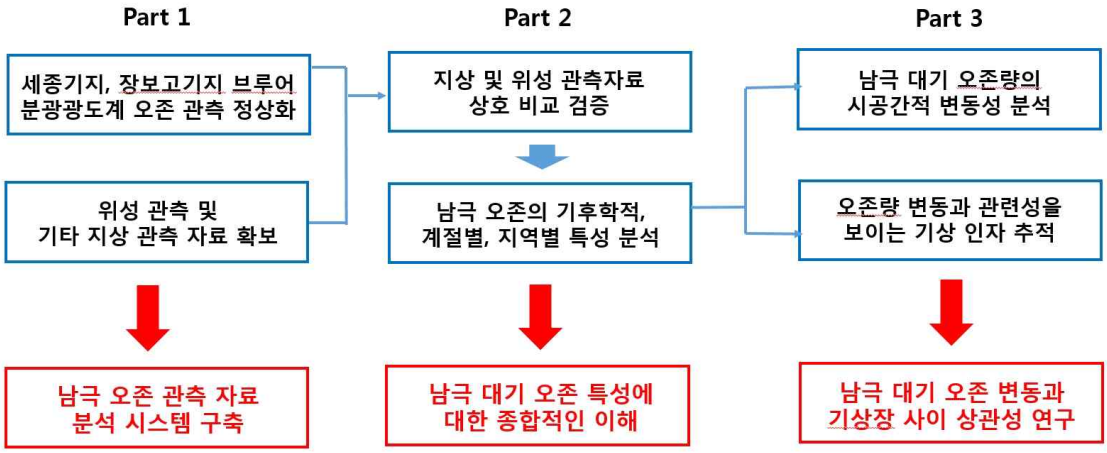
제 1 절 연구 동기

- 남극 성층권 오존은 지표 자외선 총량을 조절하여 (Lee et al., 2015) 생태계에 영향을 끼칠 뿐 아니라, 남극/남반구 기후 현상에도 영향을 미치는 것으로 알려짐 (Son et al., 2010; Thompson et al., 2011).
- 1987년의 몬트리올 의정서에서 오존층 파괴 원인 물질인 염화불화탄소 감축이 결의된 후 오존층의 파괴 속도의 둔화가 보였고 (Salby et al., 2011), 최근에는 남극 오존의 복원이 본격적으로 시작되었다는 학술적인 보고가 있었음 (Solomon et al., 216).
- 이와 같은 상황에서 남극 상공 오존량 진단에 초점을 두고 그 변동성이 극지 환경 및 기상 현상, 대규모 기후변화와 어떤 연관성이 있는지 살펴볼 필요가 있음. 이 과정에서 세종 및 장보고 기지에서의 성층권 오존 상시 관측 역량 구축 역시 중요한 목표가 됨 (브루어 분광광도계를 이용).
- 남극 성층권 오존 변동성과 대기 온도와의 상관성 (Solomon et al., 2014), 남극 환상 진동(southern annular mode, SAM)과의 연관성 (Thompson et al., 2011), 및 성층권-대류권 대기 교환 현상 (Stratosphere-troposphere exchange, Thompson et al., 2005)과의 관계 등에 초점을 두고 분석. 이러한 연구는 특히 최근 보고되고 있는 동남극/서남극의 남극 기상/기후 특성 차이(Steig et al., 2009; Screen and Simmonds, 2012)에 대한 이해도 증가에도 도움이 될 것으로 생각됨.
- 또한 지상 및 위성 원격탐사와 오존존데와 같은 실제 관측 자료를 활용하여 오존의 연직 분포에 대한 연구를 보다 심도있게 진행, 오존층 파괴/회복이 연직 고도별로 미치는 영향의 차이에 대해서도 살펴보고자 함.

제 2 절 연구 목표

- 세종 및 장보고 과학기지 브루어 분광광도계 관측 정상화
- 두 기지에서 브루어 분광광도계로 관측한 오존값(오존 전량 및 연직 분포)을 존데 관측 및 위성 관측 자료를 이용하여 비교 분석 및 검증
- 두 기지에서 관측된 지상 및 위성 오존 관측 자료를 이용하여 서남극과 동남극 지역 성층권 대기 조성 및 기후학적, 시공간적 특성에 대한 비교 분석
- 남극 상공 오존량 변동과 주위 기상 인자들과의 연관성 분석

제 3 절 추진전략 및 체계



제 4 절 목표달성 및 방법

- 남극 세종 및 장보고 과학기지에서의 브루어 분광광도계 지상 관측을 중심으로 동남극 / 서남극의 오존량(오존 전량 및 오존 연직 분포) 감시 시스템을 기본적으로 구축. 또한 장보고 기지에서 극지연구소가 수행하는 오존존데 관측 자료를 이용하여 지상 관측 자료 사이의 비교 검증을 수행한다.
- 또한 남극 상공에서 오존 감시 업무를 수행하는 여러 위성 자료를 활용. 오존 전량을 관측하는 Ozone Monitoring Instrument (OMI) 위성 자료를 기본적으로 분석에 활용. 또한 오존 연직 분포 자료가 현재 여러 Nadir-viewing 및 Limb-viewing 위성 관측 미션에 의해 제공되고 있고 오존 관측에 사용하는 파장대도 다르기 때문에 이런 관측 방식의 차이에 따라 오존의 시공간적 분포 및 장기 변동성을 진단, 자료의 선택에 따른 해석의 차이에 대해서도 연구 및 검토한다
- 자료동화 기술의 발달로 관측 및 모델링 자료를 통계적으로 결합하여 생산되는 재분석 자료의 품질이 좋아지고 있으므로 남극 오존 변동성과 기상, 기후 변화의 연관성을 살펴보는데 재분석 기상장 및 기타 대기환경 자료를 적극 활용, 오존의 시공간적 특성 및 변동성에 영향을 끼칠 수 있는 기상/환경인자를 찾아내고 그 영향력에 대해서 분석한다. 이 과정에서 여러 위성 자료의 활용도 함께 모색해보고자 한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 국내에서 성층권 오존을 최초로 모니터링하기 시작한 것은 1984년 연세대학교 연구팀으로서 돕슨 분광광도계를 이용하여 측정을 시작, 현재까지 이어져오고 있다. 이 관측소는 현재 세계 기상 기구 전구 대기 감시 관측소(WMO-GAW) 중 하나로 등록되어 있으며 같은 장소에서 1998년부터 브루어 분광광도계를 이용하여 오존 전량을 측정해오고 있다. 이에 따라 연세대학교가 현재 국내에서 지상 원격 탐사 자료를 이용한 성층권 오존 감시 부분에서 최고 수준을 가지고 있다. 이에 남극에서의 브루어 분광광도계 관측은 세종 기지에서 1996년, 장보고 기지에서 2013년부터 수행되었고 극지연구소 연구원들과 함께 일부 연세대 참여 연구원들 역시 측정 및 분석에 기여하고 있다. 국제적으로는 International Ozone Service (IOS)의 Volodya 박사가 세계적으로 브루어 분광광도계 관리 및 검보정 업무를 중심적으로 수행하고 있으며 네덜란드에 위치한 세계적인 관측 기기 전문 회사 Kipp & Zonen에서도 브루어 분광광도계 관련 기술을 확보하고 있다. 이론적으로는 현재 캐나다 York University의 명예교수로 재직 중인 Tom McElroy 박사가 관측의 전문적인 지식을 가지고 있고 종종 한국에도 방문하여 관련 특강을 진행하고 있다.

- 오존존데 관측의 경우 세계적으로는 NASA의 Anne Thompson 박사가 세계적인 오존존데 관측 네트워크를 운영하고 생산되는 자료를 학술적으로 분석하는 역할의 중심을 맡고 있는 것으로 알려져 있다. 또한 같은 NASA의 Gorden Labow 박사 역시 큰 역할을 하고 있는데 이들 전문가들이 한국의 다른 대기 환경 팀들과의 협업을 종종 진행하고 있기에 자문을 구하기 크게 어려운 상황은 아니다. 다만 한국은 상시적인 오존존데 관측을 하는 곳이 포항 기상대 밖에 없는 상황이라 자료를 많이 확보하고 있지는 못하다. 극지연구소에서는 2015년부터 장보고 기지에서 오존 존데 관측을 1년에 수십차례 수행하고 있는데 장보고 기지 자체가 그동안 남극 연구에서 많이 소외되어 왔던 남극의 동남쪽에 위치하고 있기에 여기서 확보된 오존존데 자료는 매우 희소한 자료로서 높은 활용도를 가진다고 볼 수 있다. 이 오존존데 자료를 통한 위성의 극지 관측 성능 평가 및 오존의 연직 분포 분석은 국내 뿐 아니라 세계적으로도 극지 대기 이해에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 여겨진다.

- 위성을 이용한 오존의 관측은 일찌감치 폭넓게 수행되어 왔다. 보통은 지표를 수직으로 바라보는 Nadir viewing 관측과 지구 대기를 수평방향으로 훑으면서 지나가는 Limb sounding 방식으로 분류되는데 이 두 가지 방법으로 오존을 측정하여 기

록하는 미션은 이미 상당히 많이 수행되고 있다. 그중에서 Nadir viewing 관측의 대표로는 Ozone Monitoring Instrument (OMI) 위성 센서 관측이, Limb sounding 관측에서는 Microwave Limb Sounder (MLS) 관측이 대표로 꼽히고 있다. 국내에서는 아직 자체적인 위성을 이용하여 오존을 관측하고 있지는 못하고 있으나 2020년 발사 예정인 Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS) 위성이 동아시아 중심의 오존 관측을 수행할 예정이다. 다만 이것은 Nadir viewing 관측이며 아직 국내에서 Limb sounding 위성을 띄울 계획은 없고, 역시 극지를 대상으로 하는 위성 관측 계획은 현재 전무한 실정이다. 그러나 여러 국제적인 위성 사업이 진행되어 많은 자료들이 생산되고 있으므로 이 자료들을 잘 활용하는 것만으로도 충분히 훌륭한 연구를 수행할 수 있을 정도이다.

- 남극 및 남반구에서 성층권 오존의 변동성이 SAM과 같은 기후 변동성과 크게 상관있다는 연구는 2000년대 초반부터 꾸준히 발표되어 왔으며 2011년 그 동안의 연구결과가 Nature Geoscience에 리뷰 논문으로 게재가 되었다 (Thompson et al., 2011). 다만 이와 같은 연구 결과는 남극/남반구를 아우르는 대륙, 반구 규모에서의 분석에 거의 머무르고 있는 수준이며 아직도 남극 지역별 차이라든지 월별 변동성과 관련하여 매우 많은 부분이 알지 못하는 영역이 많다. 특히 이런 연구의 대부분이 기후모델에서 시나리오에 따라 민감도의 차이를 나타내는 부분으로 설명되고 있기에 지상 및 위성 관측 자료를 이용한 확인 및 추가연구가 매우 요구되는 실정이다.

KOPRI 극지연구소

제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 장보고 과학기지 오존존데 관측자료 분석

1. 연구 대상 기간 오존존데 전체 자료 특성 분석

장보고 기지(위도: 74.7°, 경도: 164.2°)는 오존존데를 23:00에서 00:00 UTC 사이에 비양하고 있다. 오존존데는 라디오 존데에 오존 센서를 부착한 것을 의미하며, Vaisala의 라디오 존데(RS92-SGP, GPS 포함)와 Electrochemical concentration cell (ECC) 오존 센서를 사용하였다. 표 1-1은 2015년부터 2018년도까지 월별 오존존데 비양 횟수를 나타낸 것이다. 2015년부터 2017년은 성층권 오존의 파괴와 관련된 남극의 봄철(9월, 10월, 11월)에 집중적으로 관측되었다. 나머지 기간에는 격 달에 한 번씩 관측되었고, 2018년은 매달 오존 관측이 수행되었다. 오존존데 비양은 2015년에 27회, 2016년에 24회, 2017년에 29회, 2018년에 22회가 관측되어 총 92회 관측을 수행하였다.

오존존데는 오존 농도를 Partial pressure의 단위로 제공하지만, 오존존데에서 함께 제공하는 기압, 고도, 온도 자료를 이용하여 Volumn mixing ratio (VMR)로 변환하였다. 이후 분석한 그림은 오존농도를 VMR로 변환한 자료를 사용하였다. 또한 오존존데의 자료에 음수가 나오는 자료와 오존 전량을 계산하였을 때 70 DU의 이하인 날짜의 자료는 제거하여 사용하였다.

장보고 과학기지에서 비양한 오존존데는 GPS가 부착되어 보다 정확한 위치 정보를 확인할 수 있다. 그림 1-1과 1-2는 오존존데에서 제공하는 위도와 경도 자료를 이용하여, 이동 경로의 비양 고도(단위: km)와 오존 혼합비(단위: ppmv)를 나타낸 그림이다. 대부분 오존 존데의 비양 궤적은 장보고 기지에서 시계 방향으로 이동하였으며, 연도 별 비양 거리는 차이를 보였다. 비양 거리가 길어지면서 관측고도가 높아지고 측정되는 오존의 혼합비 역시 크게 나타나는 특징이 잘 발견된다. 또한 그림 1-1과 같이 오존존데의 비양 고도는 남극의 겨울철을 제외하고 30km까지 관측되었고 이후 고도에서는 주변 대기 기압의 차이로 풍선이 터져, 최대 30km 이상 관측을 수행하지 못하였다.

장보고 기지와 비양한 오존존데의 위·경도 차이를 계산하였을 때, 최대 비양거리는 2017년 10월에 나타났으며 장보고 기지에서 경도 180°까지 이동하였다(장보고 기지와 오존존데의 경도의 절대값 차이: 15.8°). 최소 이동 거리는 2015년도 9월로 경도 169.4°(경도의 절대값 차이: 5.4°)를 이동하였다. 2016년은 10월에 최대 경도 176.5°까지(경도의 절대값 차이: 12.3°)를이동하였으며, 2018년은 10월에 경도 방향으

로 171.6°(경도의 절대값 차이: 7.4°)를 이동하였다. 비양 거리를 통해 알 수 있는 내용은 2015년과 2018년은 상대적으로 2016년과 2017년에 비해 대기가 고립되어 있음을 유추할 수 있다. 이와 관련하여 비양고도 별 오존 농도(그림 1-2)를 살펴보았을 때, 2015는 다른 연도에 비해서 오존의 농도가 매우 낮게 나타났고, 2016년과 2017년의 오존농도는 상대적으로 높게 나타났다.

그림 1-3은 오존존데 비양한 자료의 연도별 연직 오존 프로파일 그림이다. 2015년 8월부터 오존존데 비양을 수행하였기 때문에, 이전의 자료는 존재하지 않는다. 2015년 장보고 기지의 오존량은 극야가 끝나는 시기인 9월 말부터 10월 말까지 오존의 감소가 매우 심하게 나타났으며 20km 이하의 고도에서 오존의 ppmv가 0에 가까운 매우 낮은 농도를 보였다. 2016년과 2017년은 2015년에 비해 상대적으로 오존의 감소가 크지 않았지만, 9월과 10월에 오존의 증가와 감소 패턴이 나타난다. 이는 장보고 기지의 경우 Polar vortex의 경계에 위치하기 때문에 대기의 역학적인 영향으로 인해 오존의 변동성을 보이는 것으로 생각되며, 오존전량과 Polar vortex의 관계는 그림 1.1.5에서 자세히 설명하고자 한다. 2015년도와 2017년의 오존의 증감 패턴은 Solomon et al. (2016)의 연구에서 제시하는 연도별 오존 트렌드 결과와 비슷한 결과를 보였다. 2018년은 오존존데가 멀리 날아가지 않았지만, 오존의 감소는 2015년만큼 크게 나타나지 않았다.

그림 1-4는 오존존데 비양한 자료의 연도별 연직 온도 프로파일을 나타낸 그림이다. 2015년이 가장 낮은 온도 분포를 보였으며, 오존의 농도가 낮았던 9월 말부터 10월까지 성층권의 온도가 영하 90 ℃이상까지 낮아지는 온도 패턴을 보였다. 해가 뜨기 시작하는 8월 말부터 시간이 지날수록 온도가 조금씩 높아지는데 가장 낮은 온도가 오래 유지되는 곳이 약 10-15 km 고도임을 확인할 수 있다. 낮은 온도가 오존층 파괴 과정에 기여하는 부분이 크기 때문에 향후 성층권 오존의 연직 분포가 시공간에 따라 어떤 변동성을 가질 수 있는지 살피는 과정에서 이들 온도 프로파일의 성격을 주의 깊게 관찰할 필요성이 있을 것으로 보인다. 다만 보통 온도가 낮을 때 오존 파괴가 크게 일어난다고 해석하는 이유가 극 성층권 구름의 형성이 오존 파괴 화학 반응에 영향을 끼치기 때문인데 다른 고도에 비해 온도가 낮다고 할 지라도 온도 자체가 극 성층권 구름을 형성할 수 있을 만큼 충분히 냉각되지 않은 경우라면 (보통 극 성층권 구름은 영하 75도 이하 정도 되어야 발견할 수 있는 것으로 알려짐) 오히려 다른 오존 화학의 발생(낮은 온도에서 오히려 화학적으로는 오존 생성이 발생할 수도 있다는 선행 연구 결과가 있음)을 생각해볼 필요도 있으므로 주의깊은 해석이 필요한 부분으로 보인다.

그림 1-5는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

(ECMWF)의 ERA5 475K 온위고도의 Potential vorticity와 OMI L3의 오존전량 자료를 이용하여 두 변수의 상관성을 분석하였다. 과거 Kuttipurath et al. (2010)과 Gazeaux et al. (2013)에서 남극 지역의 475K 온위고도와 오존전량의 상관성에 대해 분석을 수행하였기 때문에 동일한 고도의 자료를 이용하였다. 2015년은 오존전량이 220DU를 넘는 일이 거의 없으며, Potential vorticity도 9월과 10월에 -30PVU보다 크게 나타났다. 2016년과 2017년의 오존 전량은 일정한 주기를 가지며 오존의 증가와 감소 패턴을 보였으며, 오존이 증가할 때 Potential vorticity가 줄어드는 음의 상관성을 보였다.

표 1-1. 2015년부터 2018년까지의 월별 오존존데 비양 횟수

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	총계
2015	0	0	0	0	0	0	0	3	8	10	6	0	27
2016	1	0	1	0	1	0	1	2	6	6	6	0	24
2017	1	0	1	0	1	0	1	2	6	6	1	0	19
2018	1	1	1	1	1	1	1	1	4	5	4	1	22
총합	3	1	3	1	3	1	3	8	24	27	17	1	92

KOPRI 극지연구소

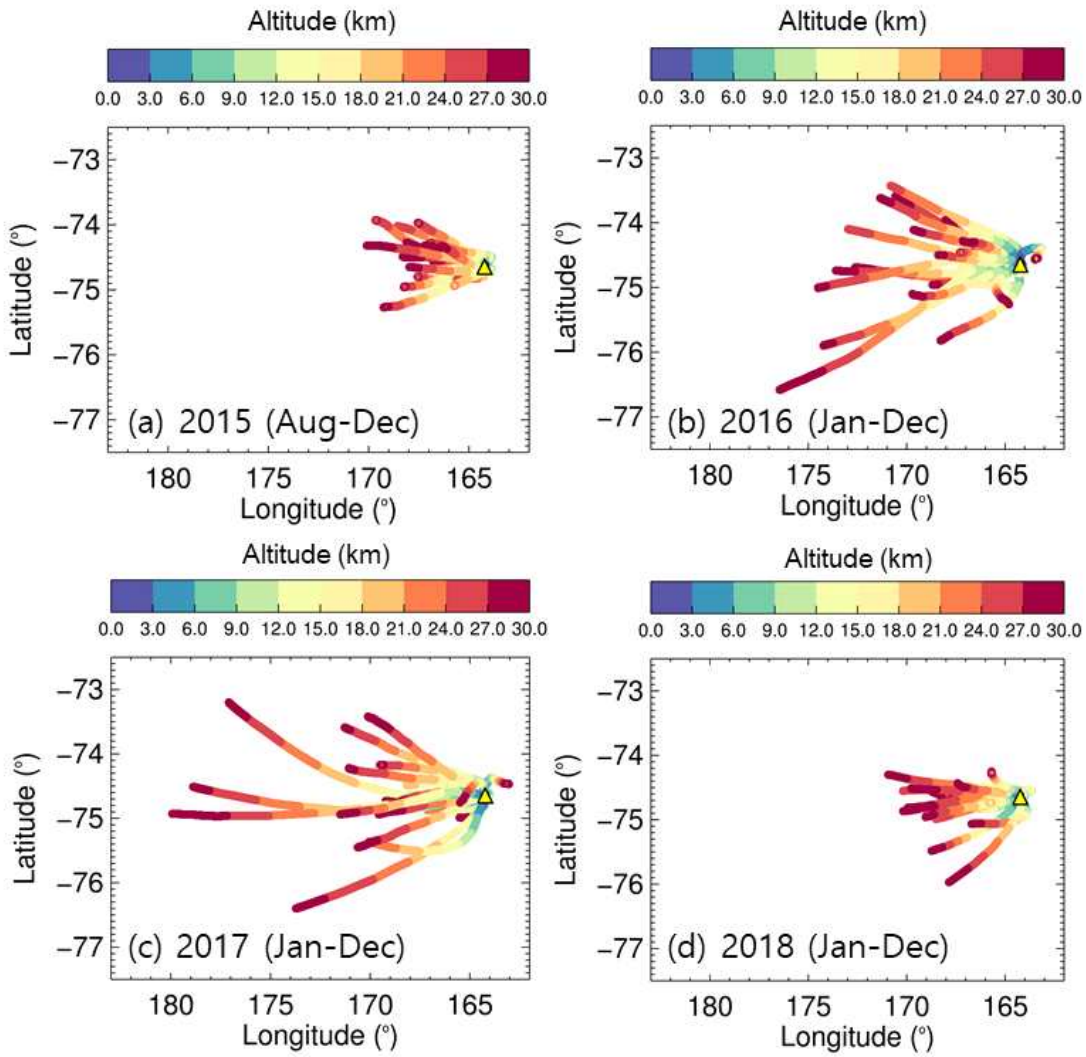


그림 1-1. 장보고 기지의 2015년부터 2018년까지 오존존데 자료를 이용한 비양 경로 그림으로 (a) 2015, (b) 2016, (c) 2017, (d) 2018을 나타낸다. 컬러바는 오존존데의 비양 고도를 나타내고(단위: km), 삼각형은 장보고 기지를 의미한다.

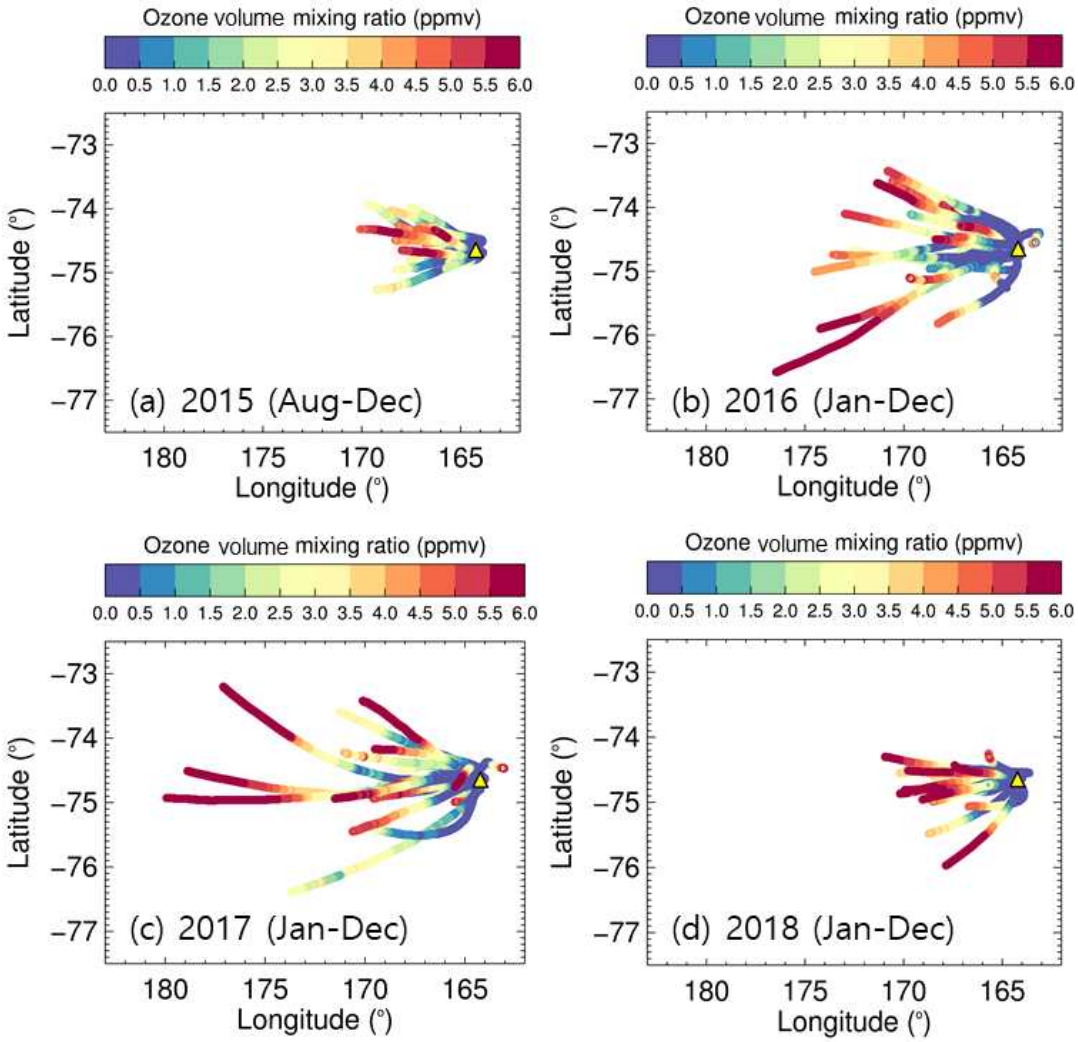


그림 1-2. 장보고 기지의 2015년부터 2018년까지 오존존데 자료를 이용한 비양경로 그림으로 (a) 2015, (b) 2016, (c) 2017, (d) 2018을 나타낸다. 컬러바는 오존존데가 관측한 혼합비 크기(volume mixing ratio)를 나타내고 삼각형은 장보고 기지를 의미한다.

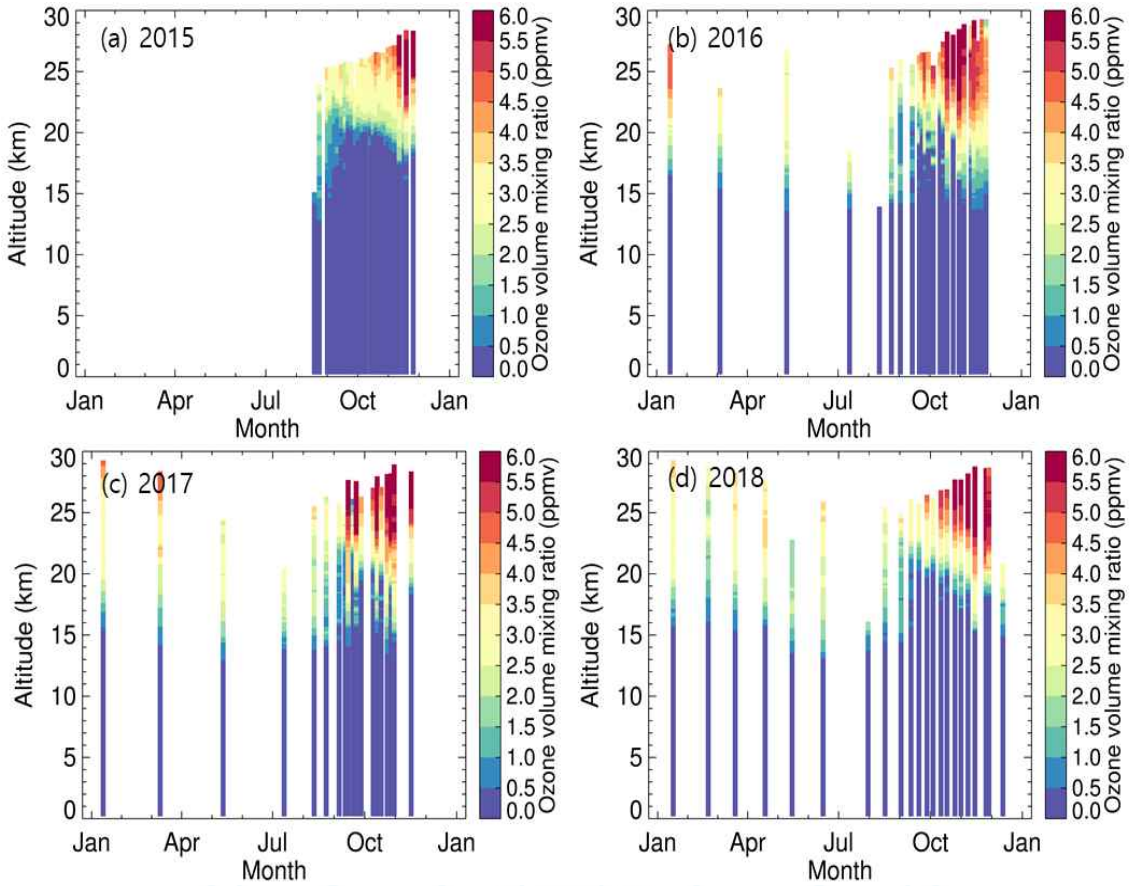


그림 1-3. 2015년부터 2018년의 오존존데 자료의 오존 농도(단위: ppmv)의 연직분포를 나타낸다. (a)는 2015년, (b)는 2016년, (c)는 2017년, (d)는 2018년 자료를 나타낸다.

극지연구소

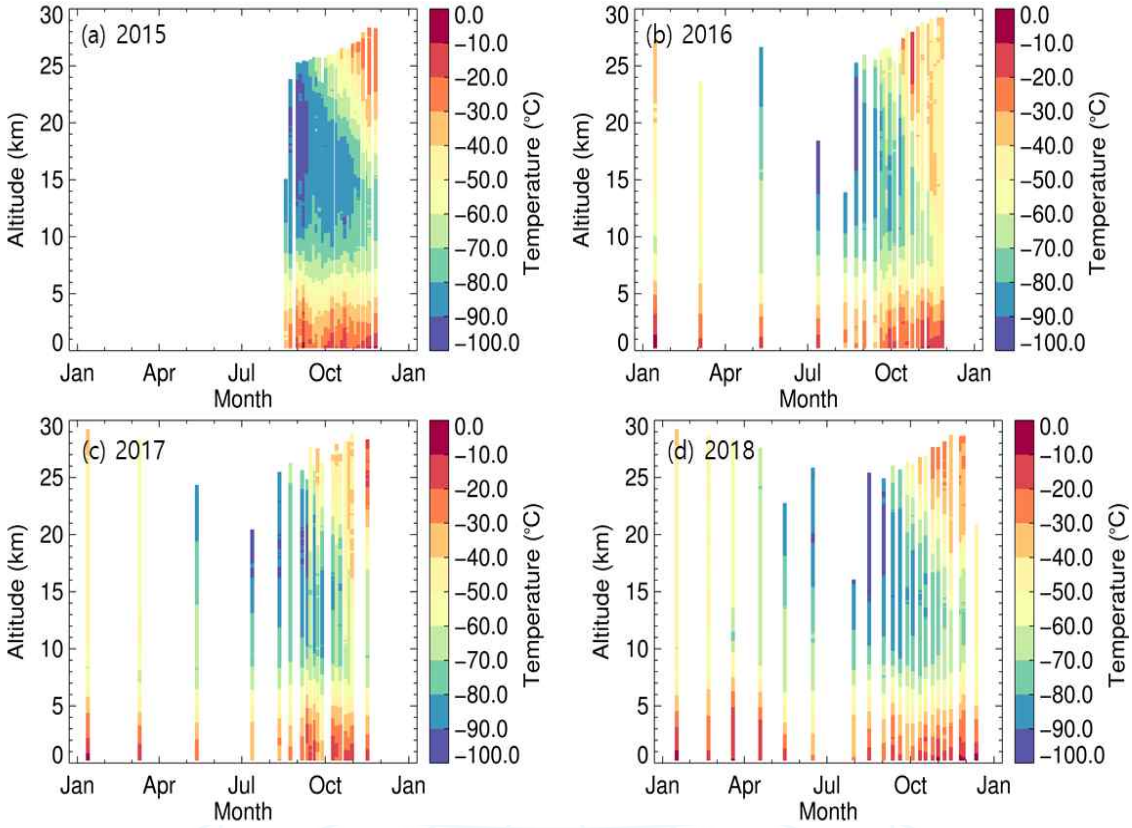


그림 1-4. 2015년부터 2018년의 오존존데 자료의 온도(단위:℃)의 연직 분포를 나타낸다. (a)는 2015년, (b)는 2016년, (c)는 2017년, (d)는 2018년 자료를 나타낸다.

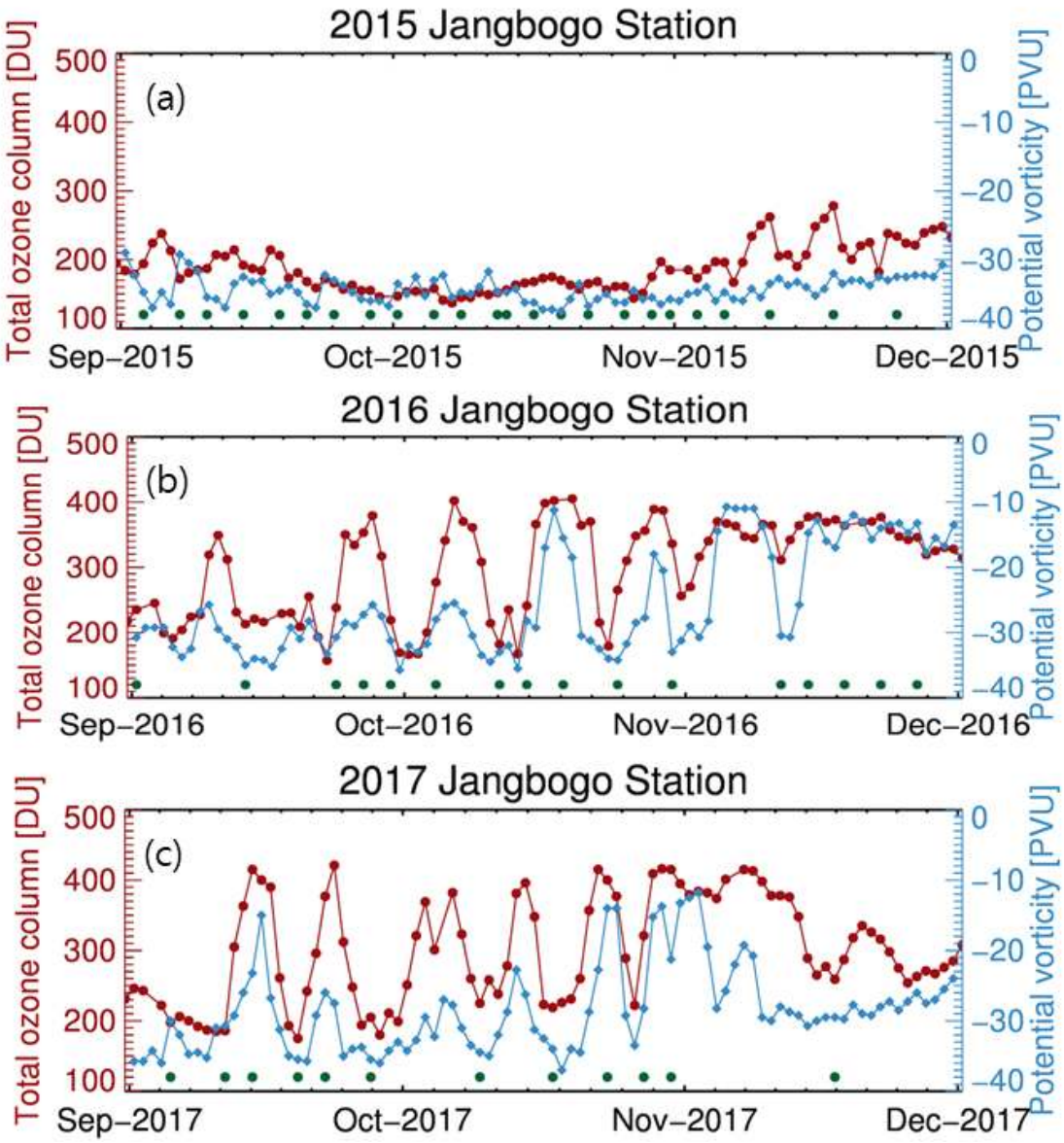


그림 1-5. 장보고 기지의 9월부터 11월의 오존전량(빨간색)과 ERA5의 354K의 Potential vorticity(하늘색)과 오존존데 비양 날짜(초록색)을 나타낸다. (a)는 2015년, (b)는 2016년, (c)는 2017년 자료를 나타낸다.

2. 오존존데 자료 연도별 일별 특성 분석

가. 2015년

2015년는 8월부터 11월까지 총 27개의 오존존데를 비양하였다. 성층권 오존층 파외과 관련된 시기에 관측이 이루어졌고, 8월에 3회(그림 1-6), 9월에 8회(그림 1-7, 1-8), 10월에 10회(그림 1-9, 1-10, 1-11), 11월에 6회(그림 1-12, 1-13)의 관측을 수행하였다. 충분한 자료라고 보기 어려울 수 있으나 남극점의 존데 관측이 1주에 1회 정도 수행되는 것을 감안하면 충분히 많은 정보를 관측을 통해서 확보하고 있는 것으로 볼 수 있다. 게다가 장보고 기지가 위치한 남극의 동남권 지역은 미국의 맥머도 기지 정도를 제외하고는 남극 대기 상시 관측 업무를 수행하고 있는 경우가 극히 드물기 때문에 (한시적으로 운영하는 경우 정도) 오존 존데 관측 자료를 수집하는 그 자체가 국제적으로 남극 연구를 수행하는 집단에게 유의미한 정보를 제공할 수 있는 장점을 가지고 있다. 아래에는 확보한 모든 오존존데 관측 경우를 다루어 향후 여러 분석 과정에서 참고로 활용하고자 한다.

분석 결과 9월 14일 관측부터 오존량 감소의 특성이 잘 보이고 있으며, 9월 24일에는 상당량의 오존이 공기 중에서 사라진 것을 확인할 수 있다. 9월 24일, 9월 28일, 10월 4일 오존 연직 분포를 보면 연직 방향으로 오존량의 변화가 하부 성층권 오존층 부근에서 급격하게 변하는 것을 살펴볼 수 있는데 15-20 km 고도 하부에서 강하게 오존 감소가 관측되는 반면 바로 위에는 크게 줄어들지 않으면서 급격한 변화를 나타내고 있다. 10월 11일에는 9월 23일과 마찬가지로 상당량의 오존이 파괴된 것을 살펴볼 수 있고 이후 10월 13일까지는 어느 정도 오존의 감소 양상을 보인다. 10월 16일부터 고도 20 km 근처에서부터 오존량이 다소 회복되는 현상이 나타나고 10월 22일과 10월 26일을 거치면서 17 km 고도 이상의 오존량은 9월 이전의 오존량과 유사한 정도까지 되돌아오는 것을 볼 수 있다. 다만 10월 31일에도 여전히 대류권계면 부근의 오존량은 여전히 낮게 나타나는 특징을 보인다. 즉, 대류권계면 바로 윗 부분의 성층권에서 훨씬 더 오존 감소 현상이 크다는 특징을 의미하는 것으로 염화불화탄소(프레온 가스) 같은 인위적 오존 감소 물질이 주로 하층에서 유입되어 머무르기 때문인 것으로 보인다.

11월로 접어들면서(그림 1-12) 20 km 부근의 오존량은 더 이상의 파괴를 보이지 않고 오존 연직 분포 모습 자체가 유선형의 모양을 가지는 것을 확인할 수 있다. 다만 특이하게 대류권계면 하부로 보이는 곳에서(약 10 km 정도 고도) 오존의 작은 증가가 관측된다. 이것은 북반구에서도 연구로 보여진 적이 있는 오존의 2차 피크(Hwang et al., 2007, Park et al., 2012)로 보여지며 대기 역학/순환적 특성에

의해서 발생하는 것으로 보인다. 결론적으로 2016년에는 9월 초에서 10월 중순까지가 성층권 오존 파괴 양상이 가장 강하게 나타나는 현상을 오존 존데 관측을 통해서 살펴볼 수 있다.

9월에 관측된 8번의 관측으로 얻어진 온도 연직 분포는 모두 비슷하게 고도 10-20 km 사이 영역에서 가장 낮은 온도 분포를 보이는 것이 확인되며 대략 -80℃ 정도 범위에서 온도의 최소치를 보이는 경향이 존재한다. 9월 10일과 9월 14일은 지표에서 작은 온도의 감소/증가로 인한 변곡점이 존재하는데 정확한 이유는 확인되지 않으나 극지에서 차가운 공기가 지표 경계면으로 유입이 되면서 발생하는 현상일 수 있다. 실제로 동남극 지역은 지표 해발고도가 3 km가 넘는 고원지대라서 고원 정상에서 냉각된 공기가 낮은 고도쪽으로 강하게 흘러내려가는 하강 기류(katabatic flow)가 발생하는 경향이 있고 이 katabatic flow로 인해 대기경계층에서 역전층이 발생하는 경우가 있는 것으로 알려져 있다(Davis et al., 2004).

10월 31일부터 온도의 최소치가 조금씩 상승하는 모습을 보이고 11월에 접어들면서 온도의 최솟값은 65 ℃ 정도까지 회복이 되는 모습을 확인할 수 있다.

KOPRI 극지연구소

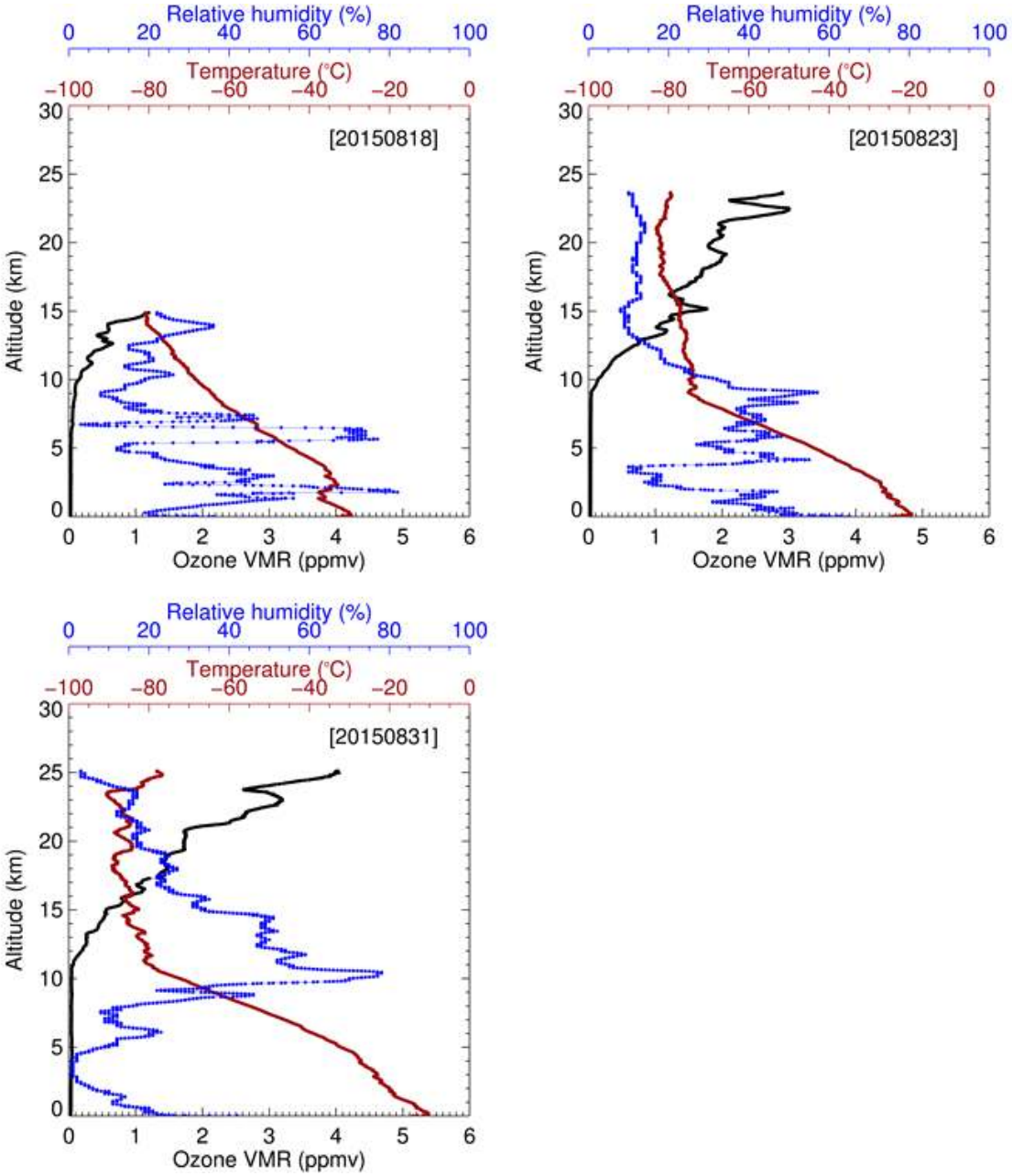


그림 1-6. 2015년 8월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2015년 8월 18일, 2015년 8월 23일, 2015년 8월 31일 오존존데 사례

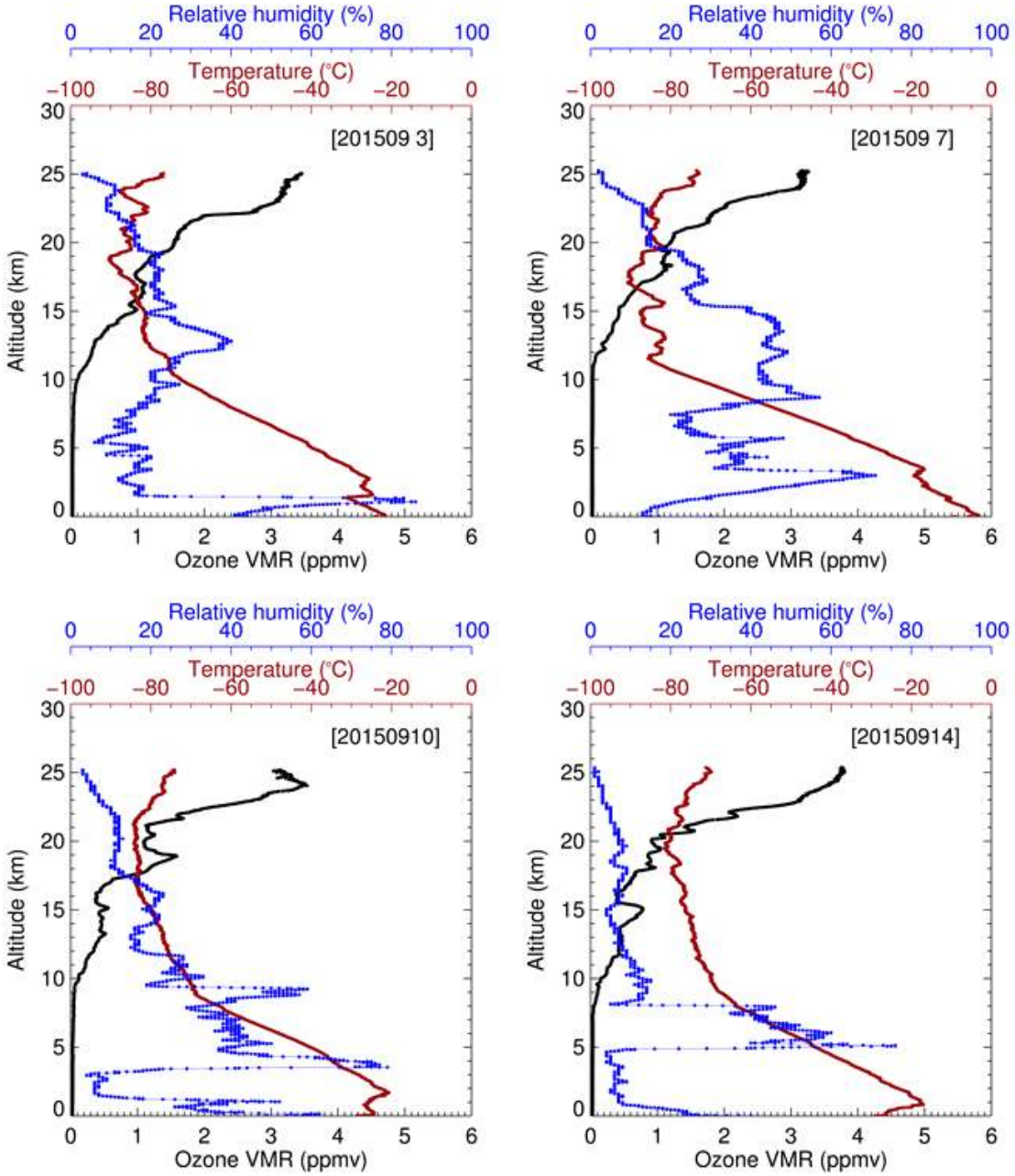


그림 1-7. 2015년 9월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2015년 9월 3일, 2015년 9월 7일, 2015년 9월 10일, 2015년 9월 14일 오존존데 사례

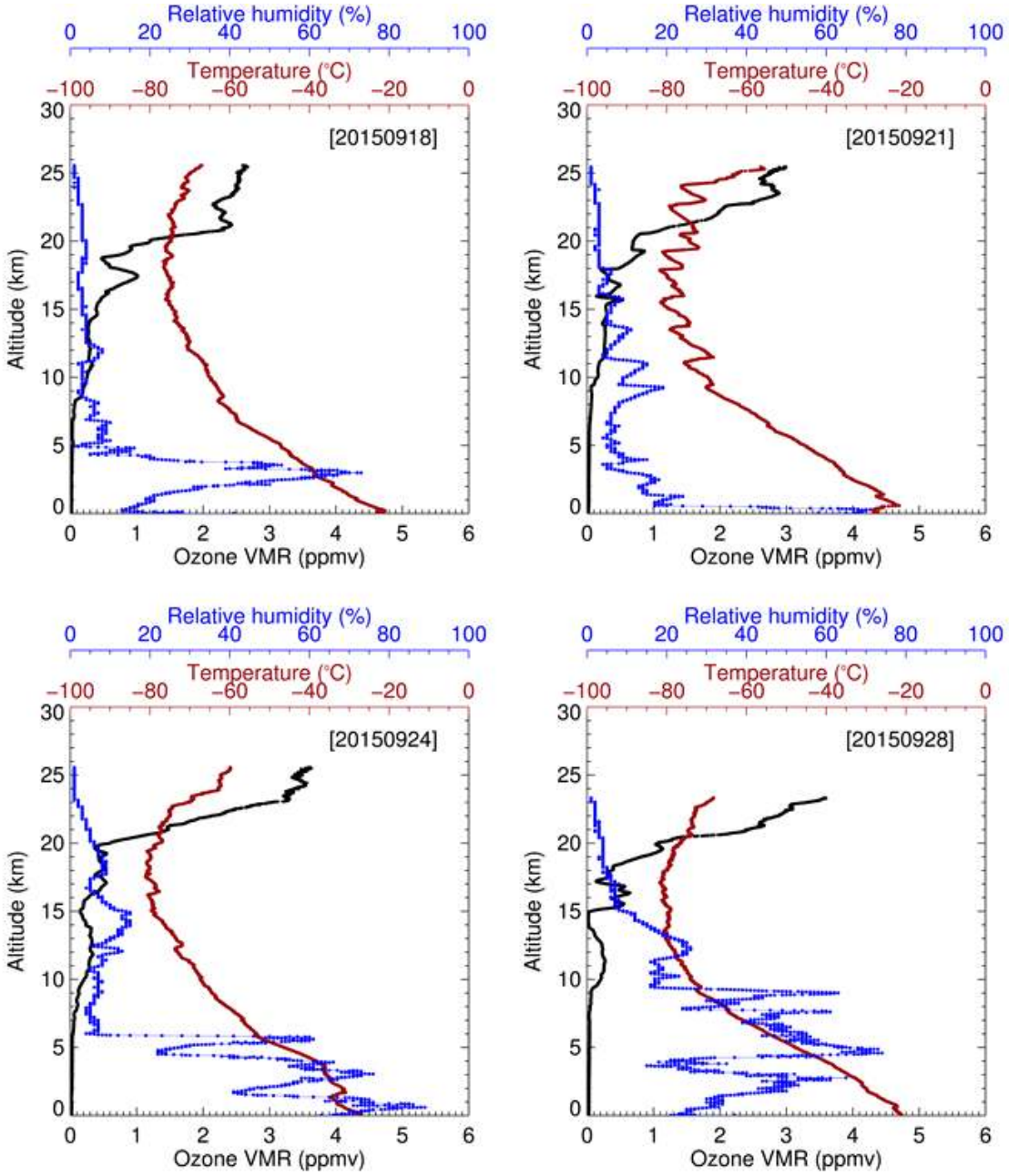


그림 1-8. 2015년 9월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2015년 9월 18일, 2015년 9월 21일, 2015년 9월 24일, 2015년 9월 28일 오존존데 사례

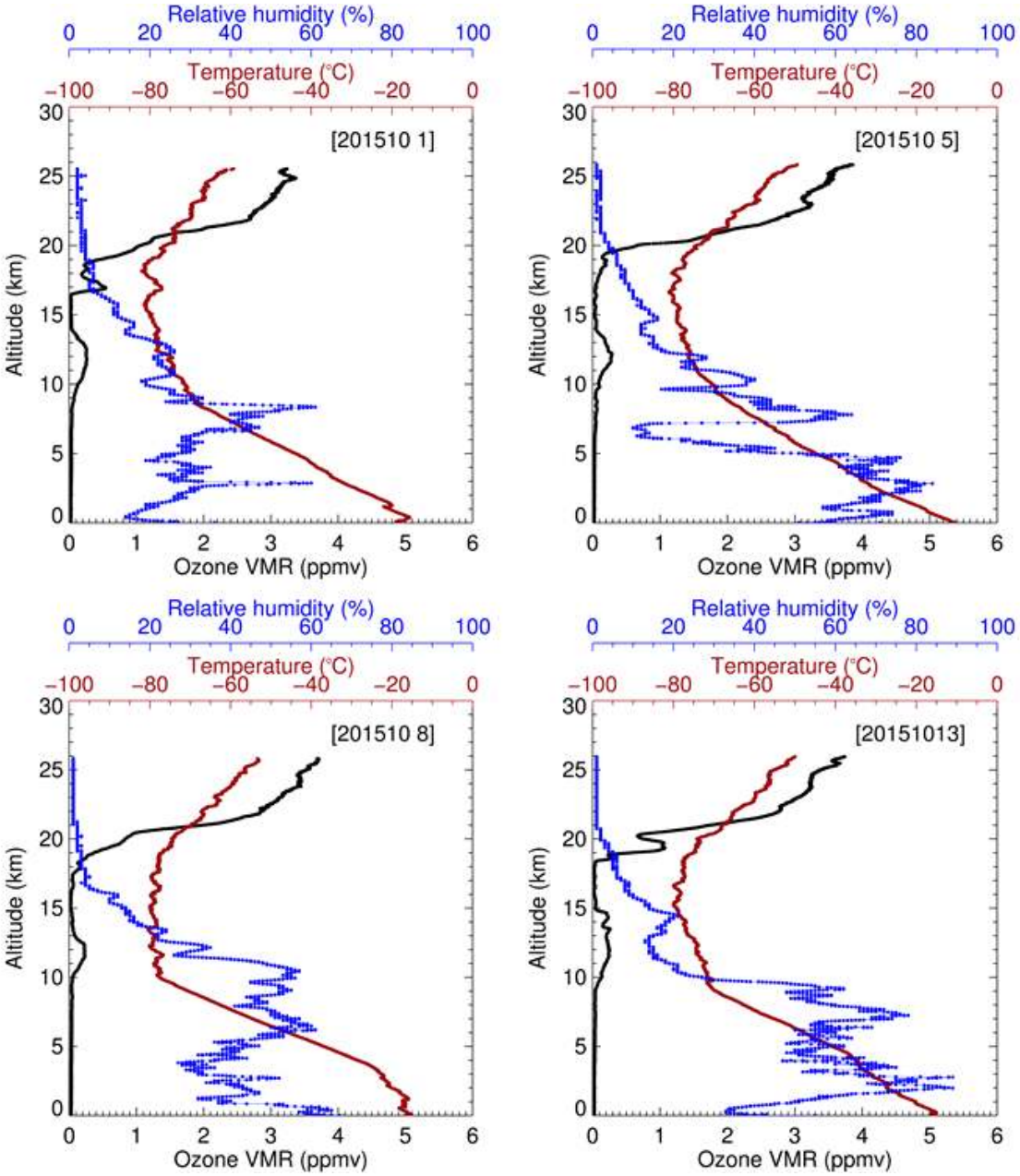


그림 1-9. 2015년 10월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2015년 10월 1일, 2015년 10월 5일, 2015년 10월 8일, 2015년 10월 13일 오존존데 사례

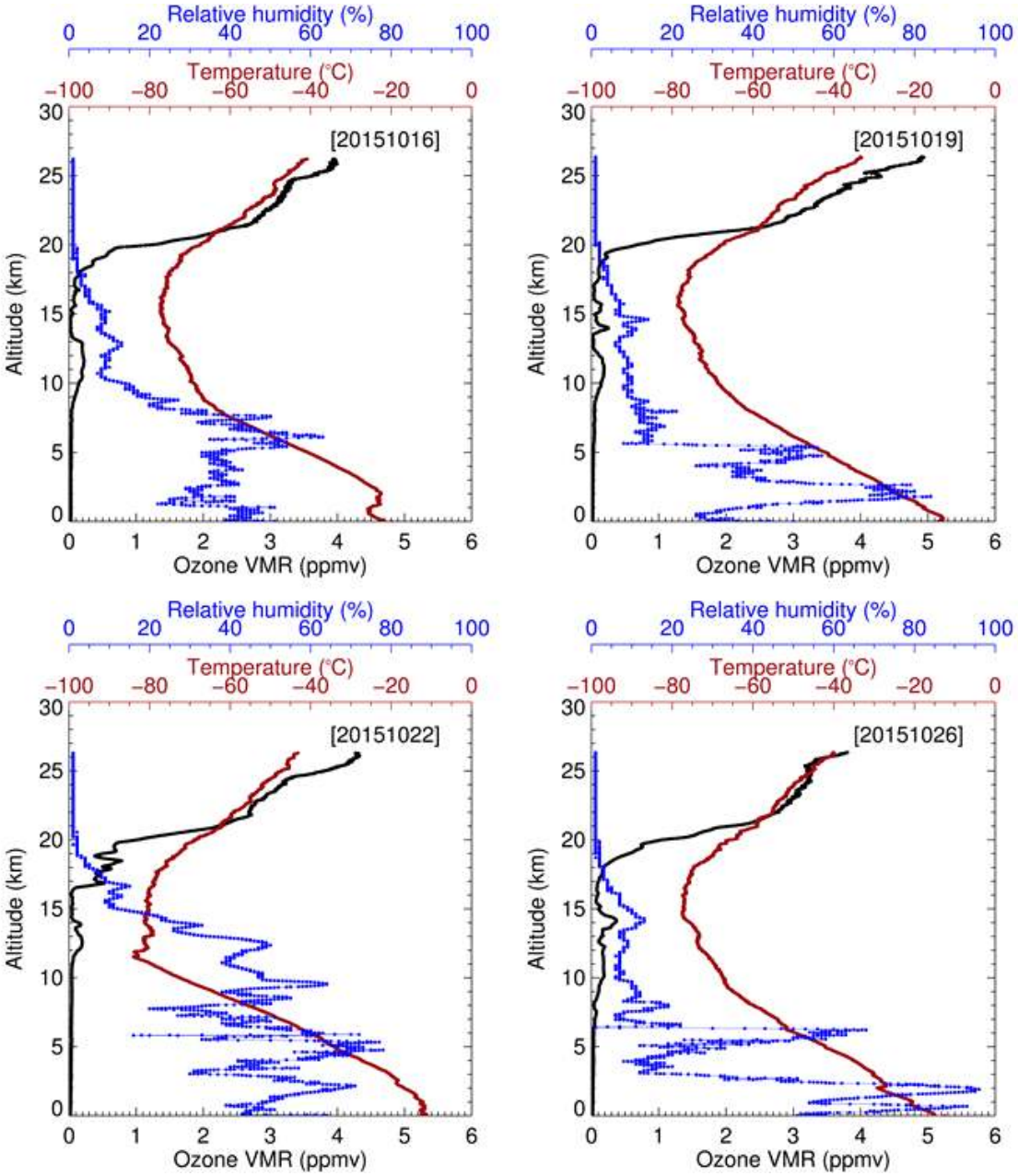


그림 1-10. 2015년 10월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2015년 10월 16일, 2015년 10월 19일, 2015년 10월 22일, 2015년 10월 26일 오존존데 사례

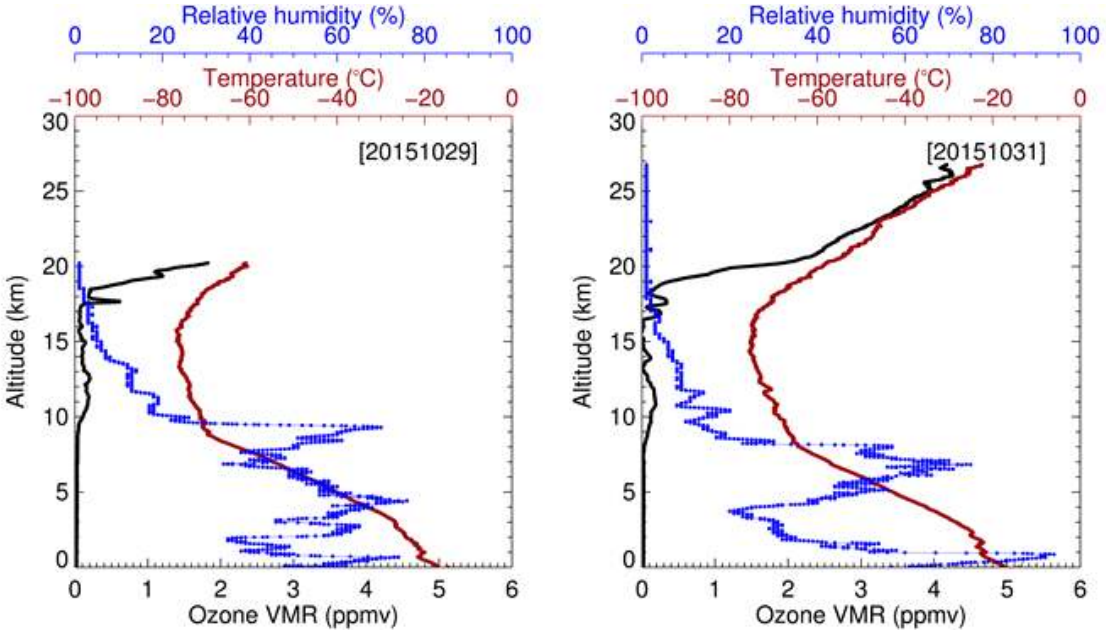


그림 1-11. 2015년 10월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 201510월 29일, 2015년 10월 31일 오존존데 사례

KOPRI 극지연구소

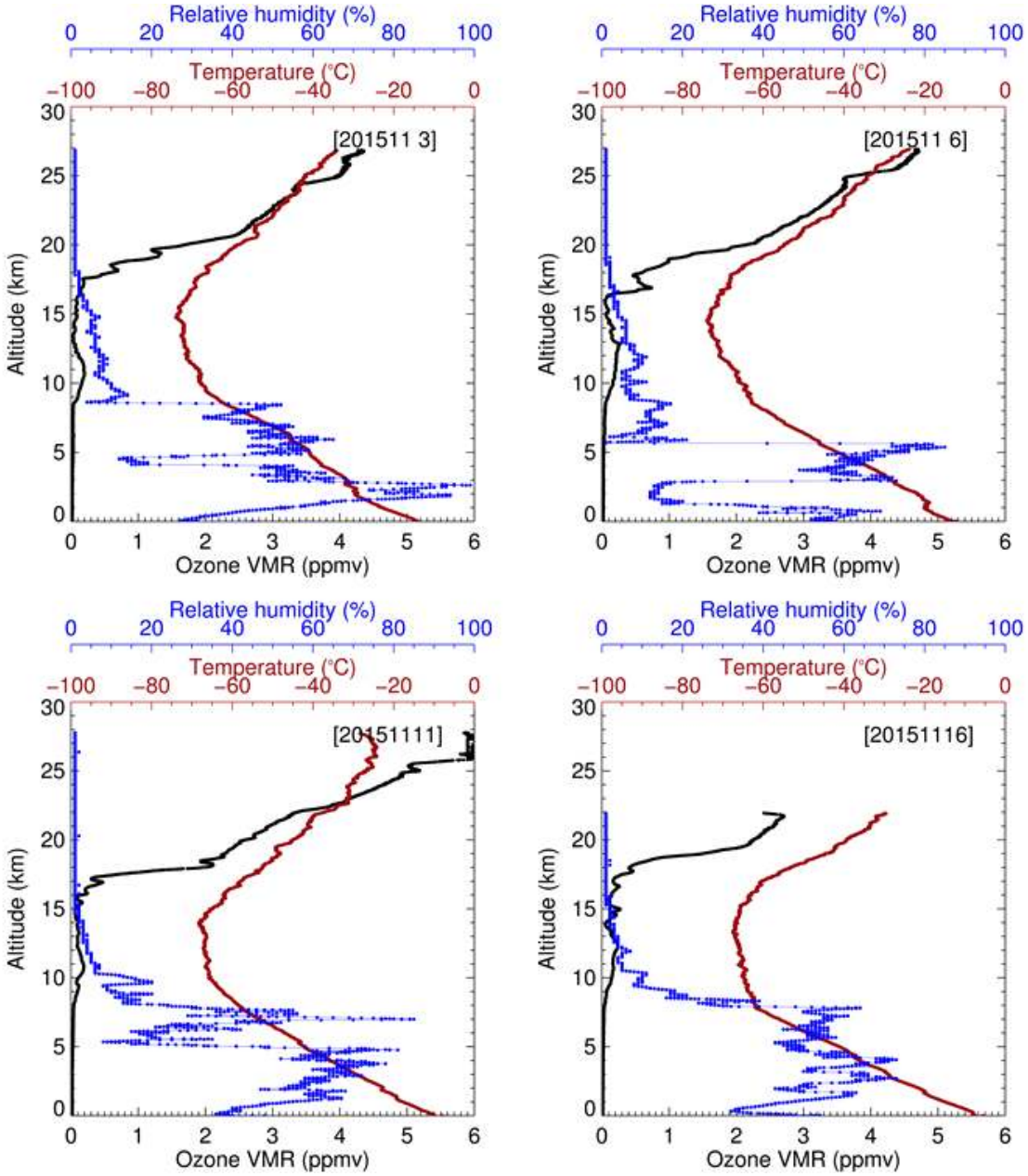


그림 1-12. 2015년 11월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2015년 11월 3일, 2015년 11월 6일, 2015년 11월 11일, 2015년 11월 16일 오존존데 사례

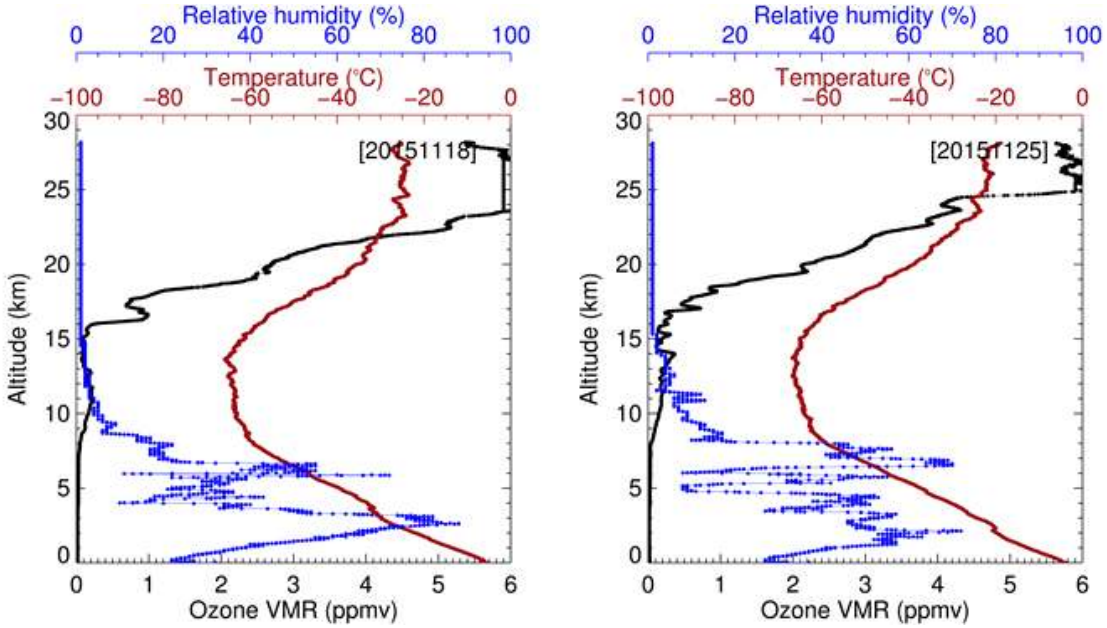


그림 1-13. 2015년 11월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2015년 11월 18일, 2015년 11월 25일 오존존데 사례

KOPRI 극지연구소

나. 2016년

2016년은 1월부터 11월까지 총 24개의 오존존데를 비양하였다. 1월, 3월, 5월, 7월에 각각 1회(그림 1-14), 8월에 3회(그림 1-15), 9월에 6회(그림 1-16, 그림 1-17), 10월에 6회(그림 1-18, 그림 1-19), 11월에 6회(그림 1-20, 그림 1-21)의 관측을 수행하였다.

1월 13일과 3월 3일의 경우는(그림 1-14) 일반적으로 알려진 오존의 연직 분포 양상이 잘 드러나며 오존층이 주로 분포하는 25 km 상공에서 최대 오존값을 보이는 걸 확인할 수 있다. 5월로 접어들면서(5월 10일 사례) 이 오존 최대 고도가 다소 아래로 하강하는(20 km 이하) 경향을 보이는데 이는 보통 전구 범위에서 볼 수 있는 특성처럼 여름에는 지표/대기 가열로 인하여 상대적으로 상승 기류가 발달하면서 대류권 및 대기 층높이가 상승하고 반대로 겨울에는 지표/대기 냉각이 발생하면서 하강 기류에 의해 대기 층높이가 낮아질 수 있는 경향과 연관되는 것으로 보인다. 실제 남극 겨울에 해당하는 7월 12일, 8월 11일의 관측을 보면 고도 20 km 이상 관측값을 보이지 못하는 것을 확인할 수 있다. 오존 연직 분포와 같은 경우에 대해서 관측된 온도의 연직 분포 역시 분석을 수행해 보았다. 기본적으로 대류권의 온도는 고도가 상승할수록 감소하고 대류권계면을 지나 성층권으로 접어들면서 온도의 증가를 보이는 패턴을 보인다. 장보고 기지 상공에서 대류권계면은 대개 10 km 정도의 고도를 나타내는 것으로 보인다. 1월 14일에는 10 km 상공까지 온도가 감소한 후에 다시 증가하는 일반적인 패턴을 잘 보이고 있으나 3월 3일에는 성층권에서 크게 고도별로 온도 변화가 일어나지 않는 중립형태의 대기를 보이고 있고 5월 10일에는 성층권에서 오히려 온도가 계속 감소하는 양상을 보이고 있다(그림 1-14). 봄철 겨울로 접어들면서 상층 온도의 감소는 훨씬 더 강하게 일어나서 7월 11일, 8월 11일에는 20 km 상공 고도의 온도가 무려 180 K(- 93 ℃)까지 떨어지는 것을 보이고 있다. 상층 20 km 고도 이상에서 비로소 온도의 상승이 미약하게 관측되는 것을 볼 때 성층권 하부에서 온도의 감소가 상당히 크게 발생하는 것을 살펴볼 수 있다. 9월부터 11월까지의 오존 감소는 2015년과 유사한 형태를 보였으나 오존의 감소는 2015년에 비해 적었다.

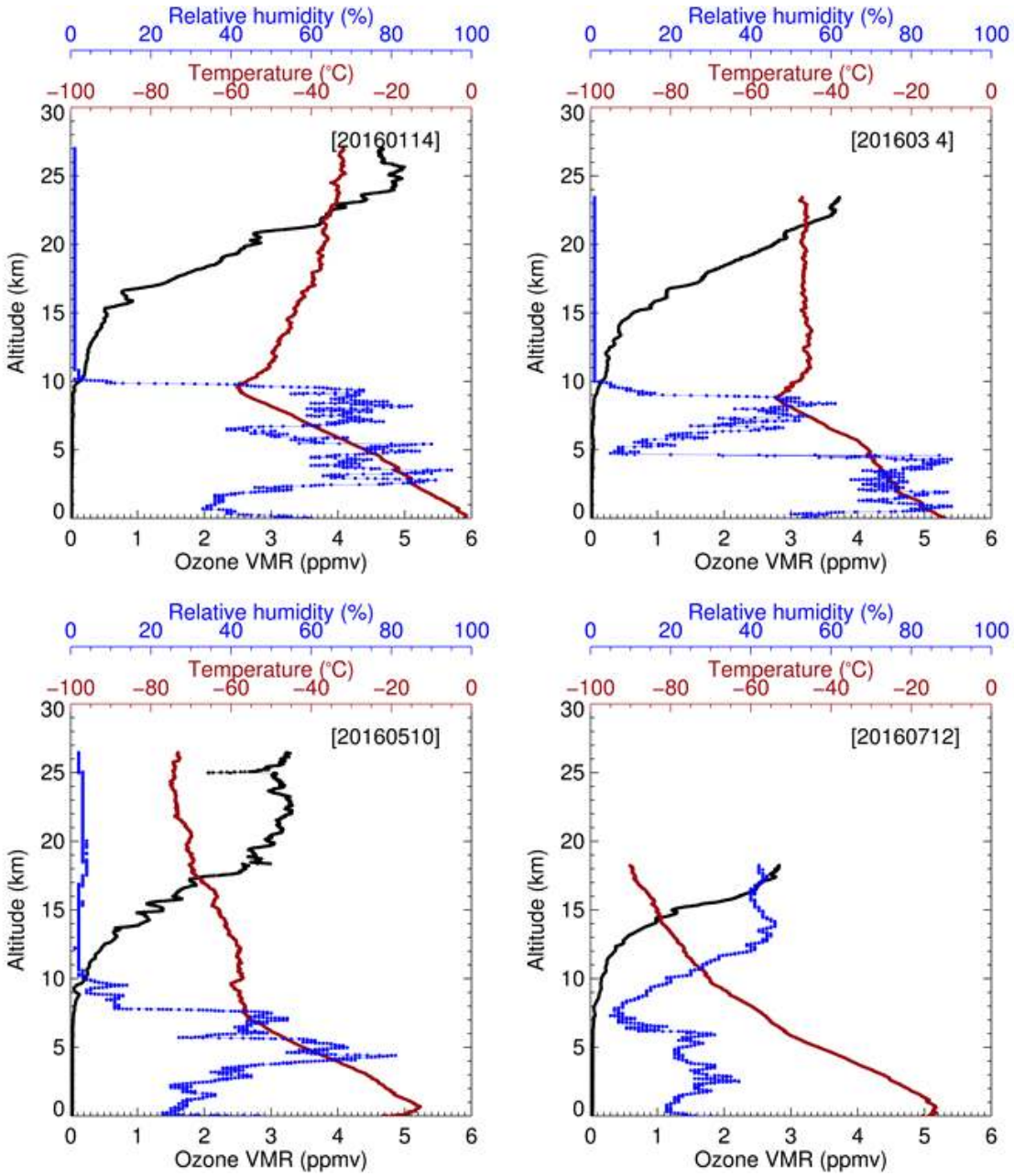


그림 1-14. 2016년 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2016년 1월 14일, 2016년 3월 4일, 2016년 5월 10일, 2016년 7월 12일 오존존데 사례

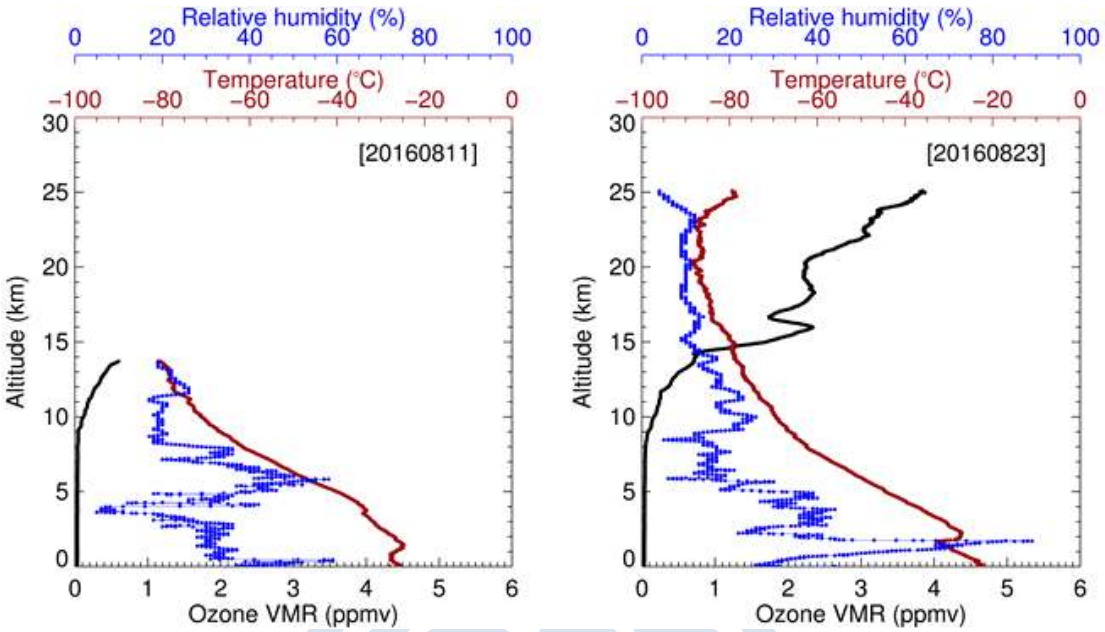


그림 1-15. 2016년 8월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2016년 8월 11일, 2016년 8월 23일 오존존데 사례

KOPRI 극지연구소

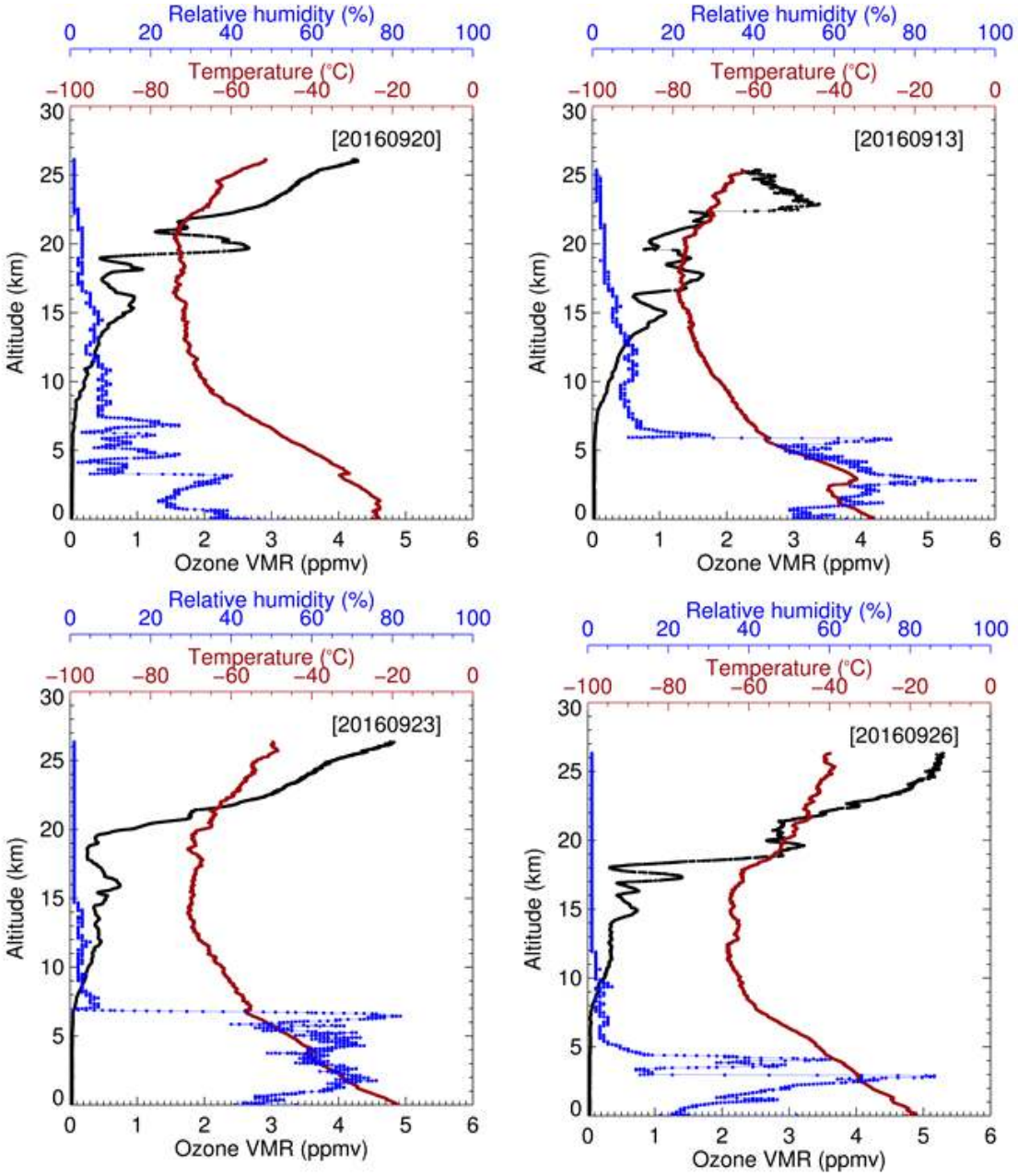


그림 1-16. 2016년 9월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2016년 9월 20일, 2016년 9월 13일, 2016년 9월 23일, 2016년 9월 26일 오존존데 사례

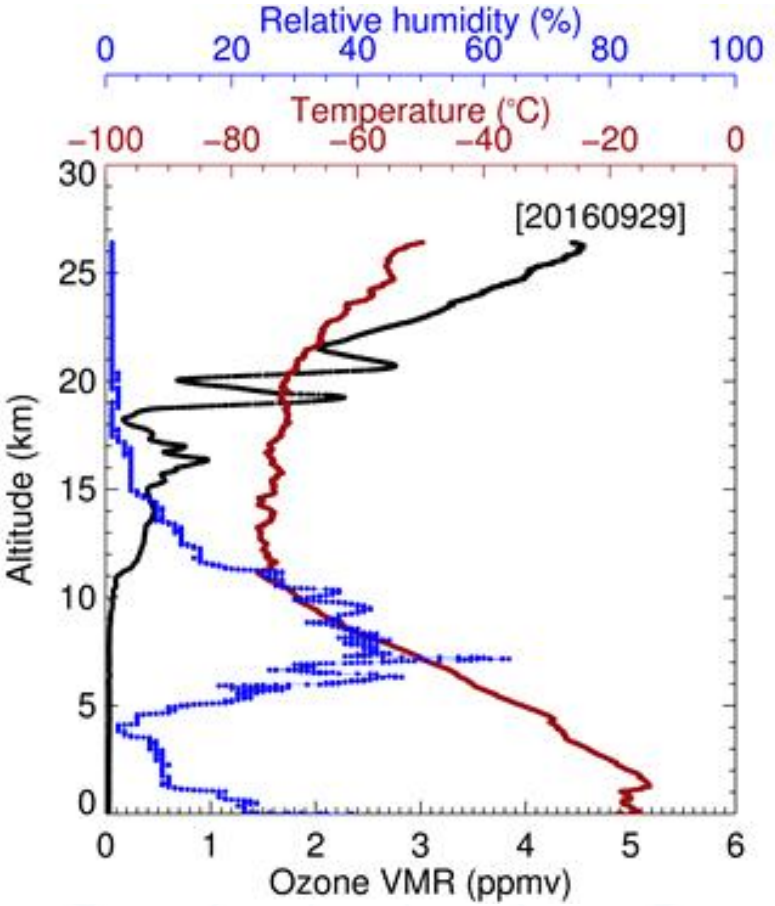


그림 1-17. 2016년 9월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2016년 9월 29일 오존존데 사례

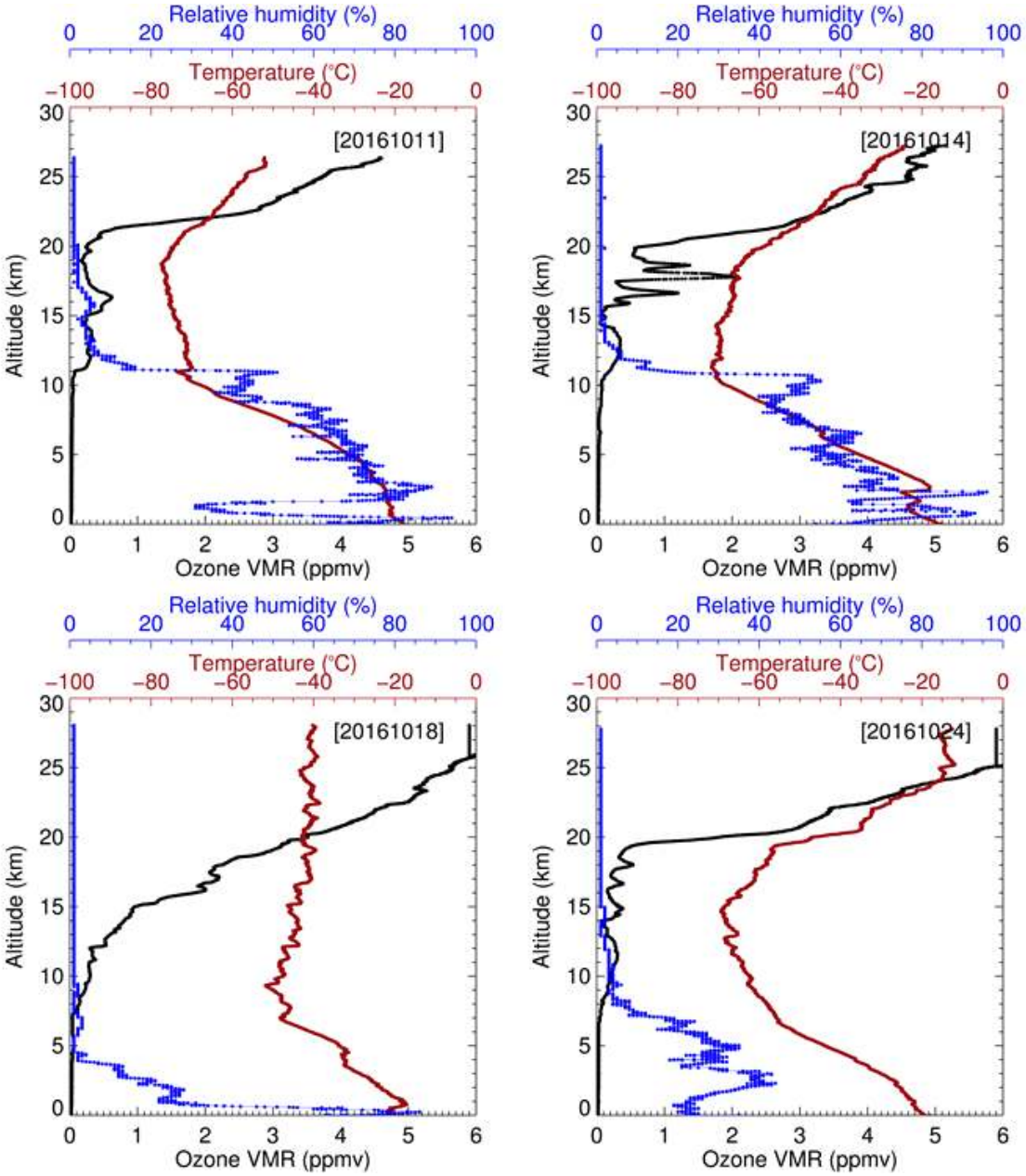


그림 1-18. 2016년 10월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2016년 10월 11일, 2016년 10월 14일, 2016년 10월 18일, 2016년 10월 24일 오존존데 사례

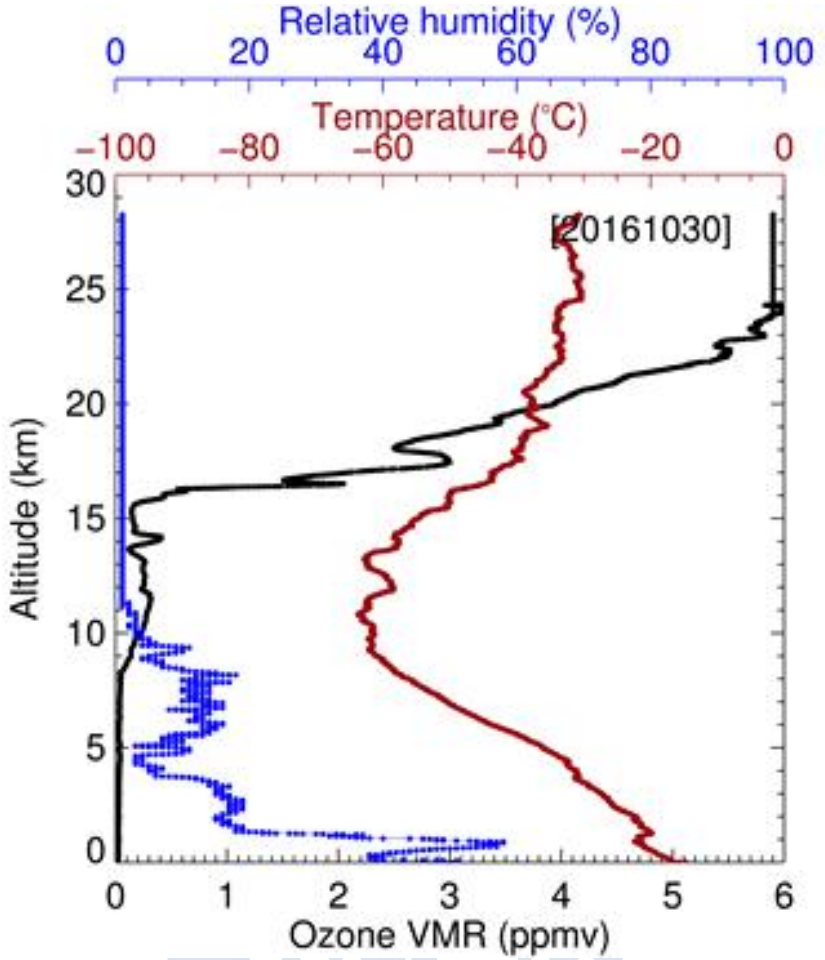


그림 1-19. 2016년 10월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존 농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2016년 10월 30일 오존존데 사례

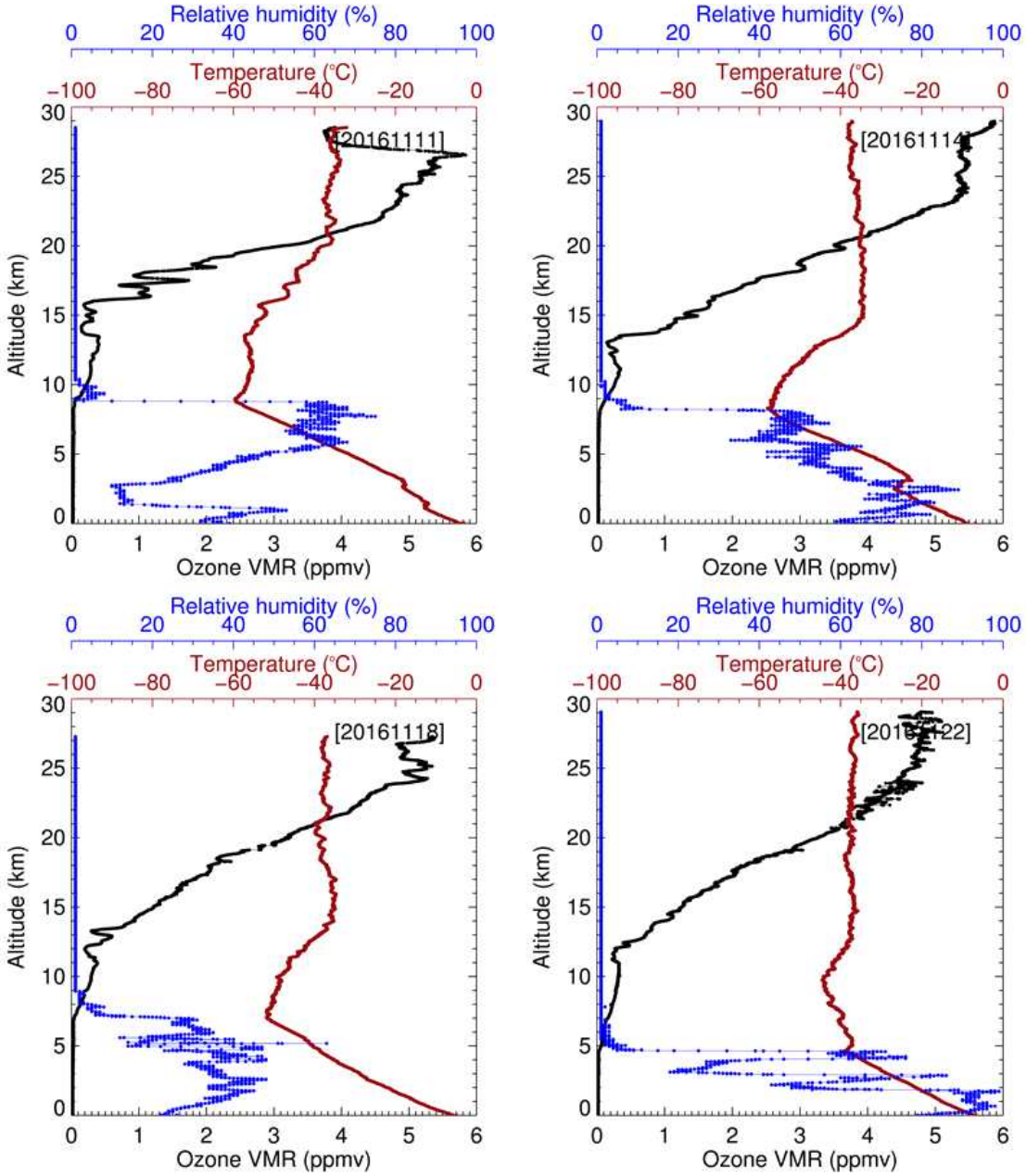


그림 1-20. 2016년 11월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2016년 11월 11일, 2016년 11월 14일, 2016년 11월 18일, 2016년 11월 22일 오존존데 사례

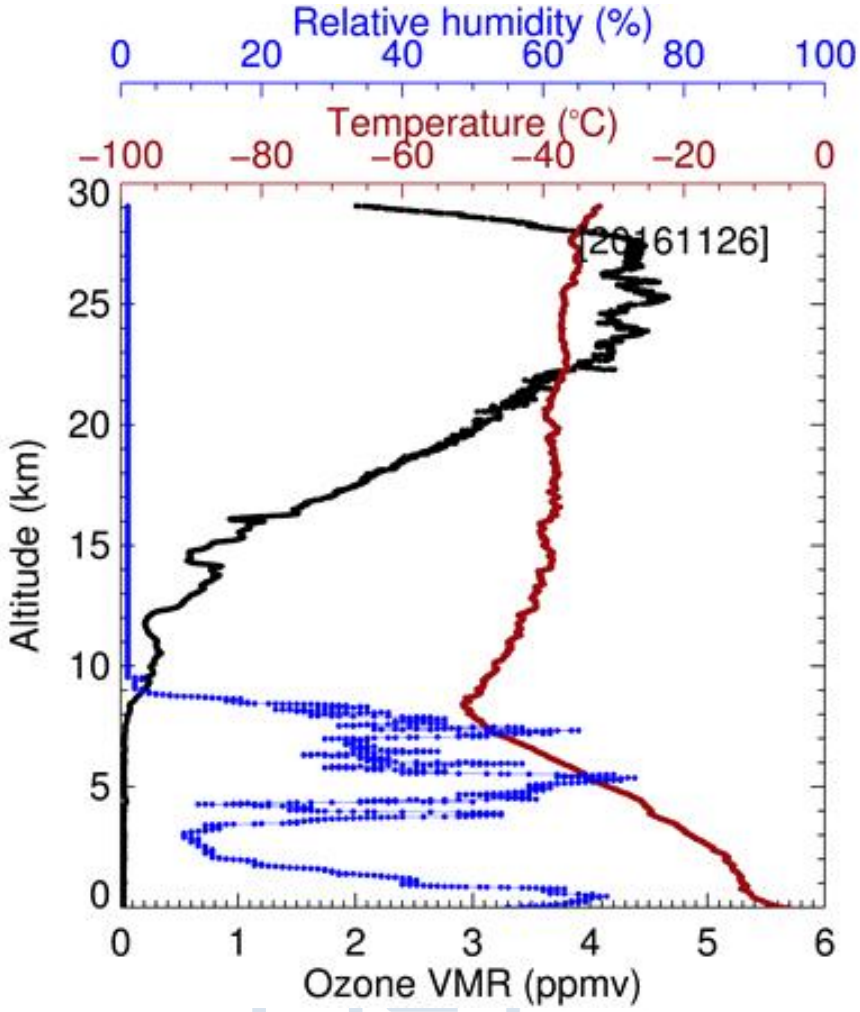


그림 1-21. 2016년 11월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2016년 11월 26일 오존존데 사례

다. 2017년

2017년는 1월부터 11월까지 총 19개의 오존존데를 비양하였다. 1월, 3월, 5월, 7월에 각각 1회 (그림 1-22), 8월에 2회 (그림 1-23), 9월에 6회 (그림 1-24, 그림 1-25), 10월에 6회 (그림 1-26), 11월에 1회(그림 1-27)의 관측을 수행하였다. 1월부터 11월까지 2016 오존과 유사한 특징을 보였다.

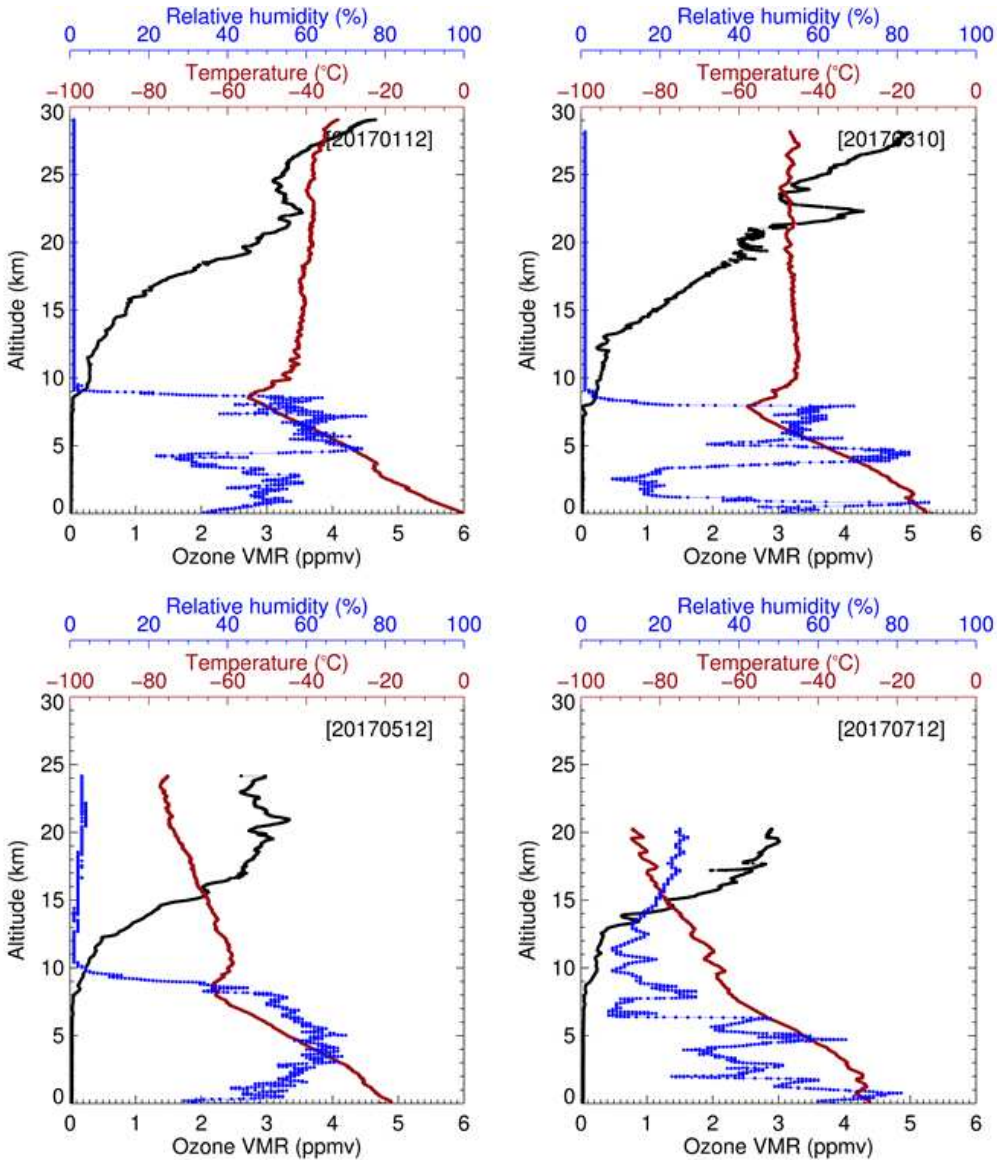


그림 1-22. 2017년 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2017년 1월 12일, 2017년 3월 10일, 2017년 5월 12일, 2017년 7월 12일 오존존데 사례

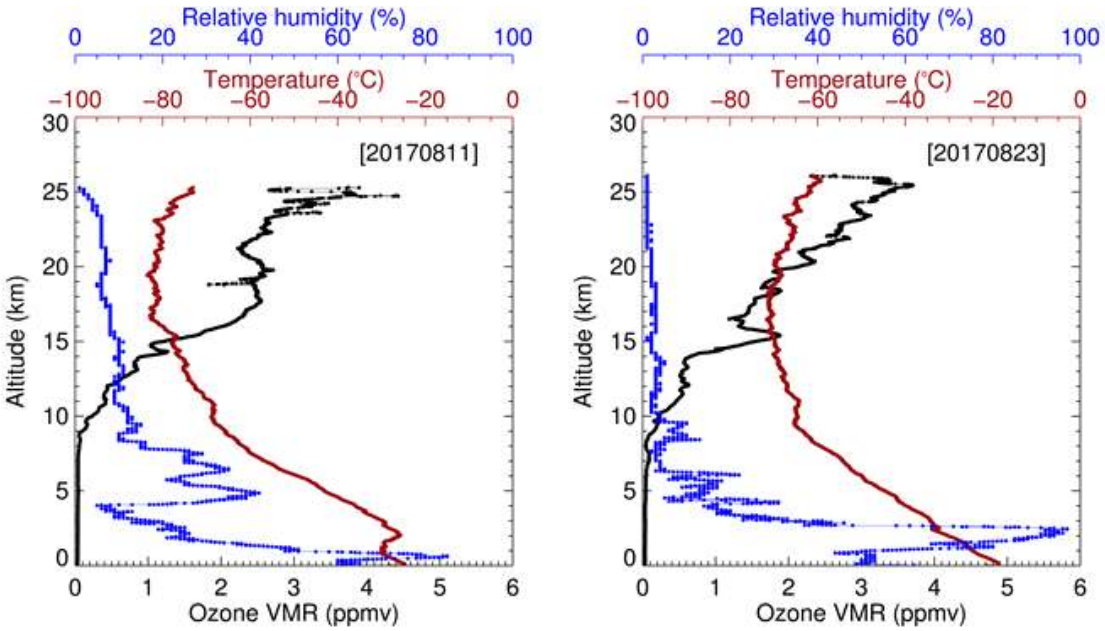


그림 1-23. 2017년 8월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2017년 8월 11일, 2017년 8월 23일 오존존데 사례

KOPRI 극지연구소

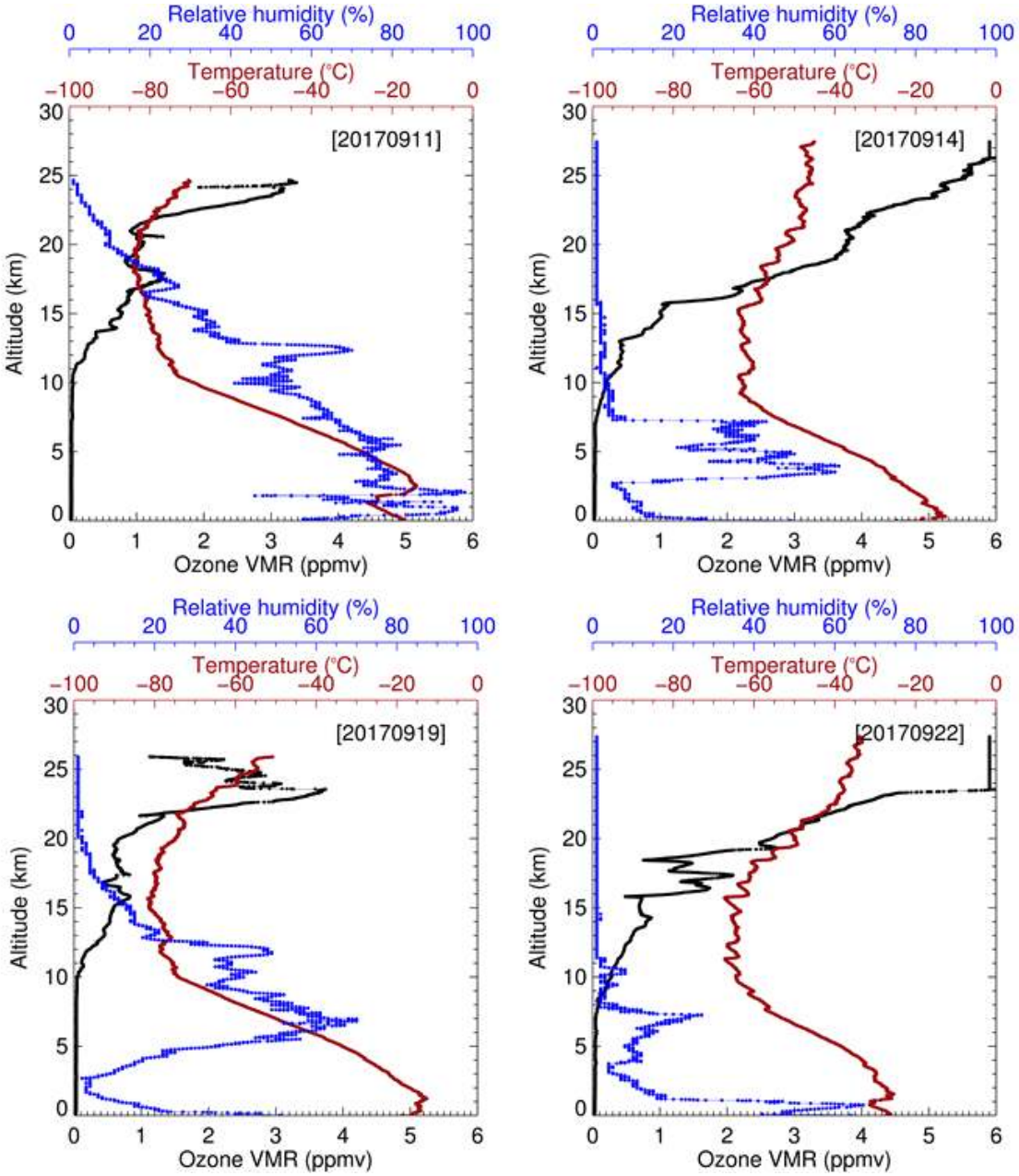


그림 1-24. 2017년 9월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2017년 9월 11일, 2017년 9월 14일, 2017년 9월 19일, 2017년 9월 22일 오존존데 사례

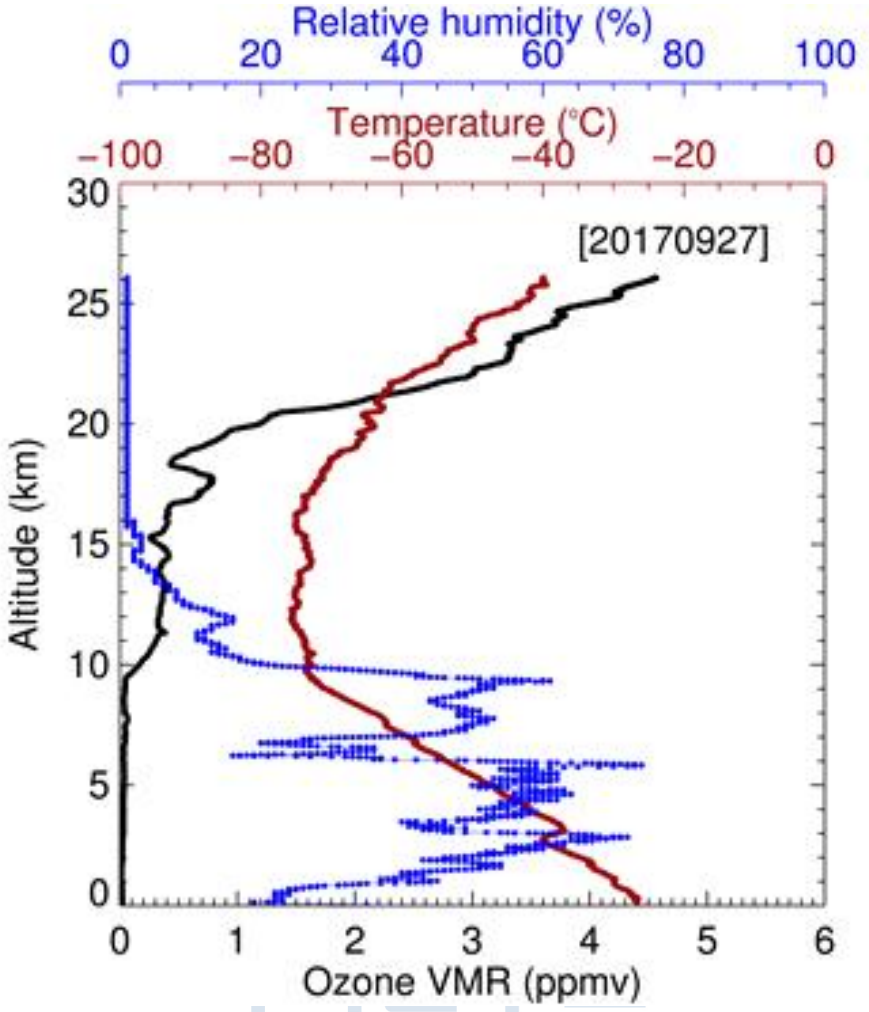


그림 1-25. 2017년 9월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2017년 9월 27일 오존존데 사례

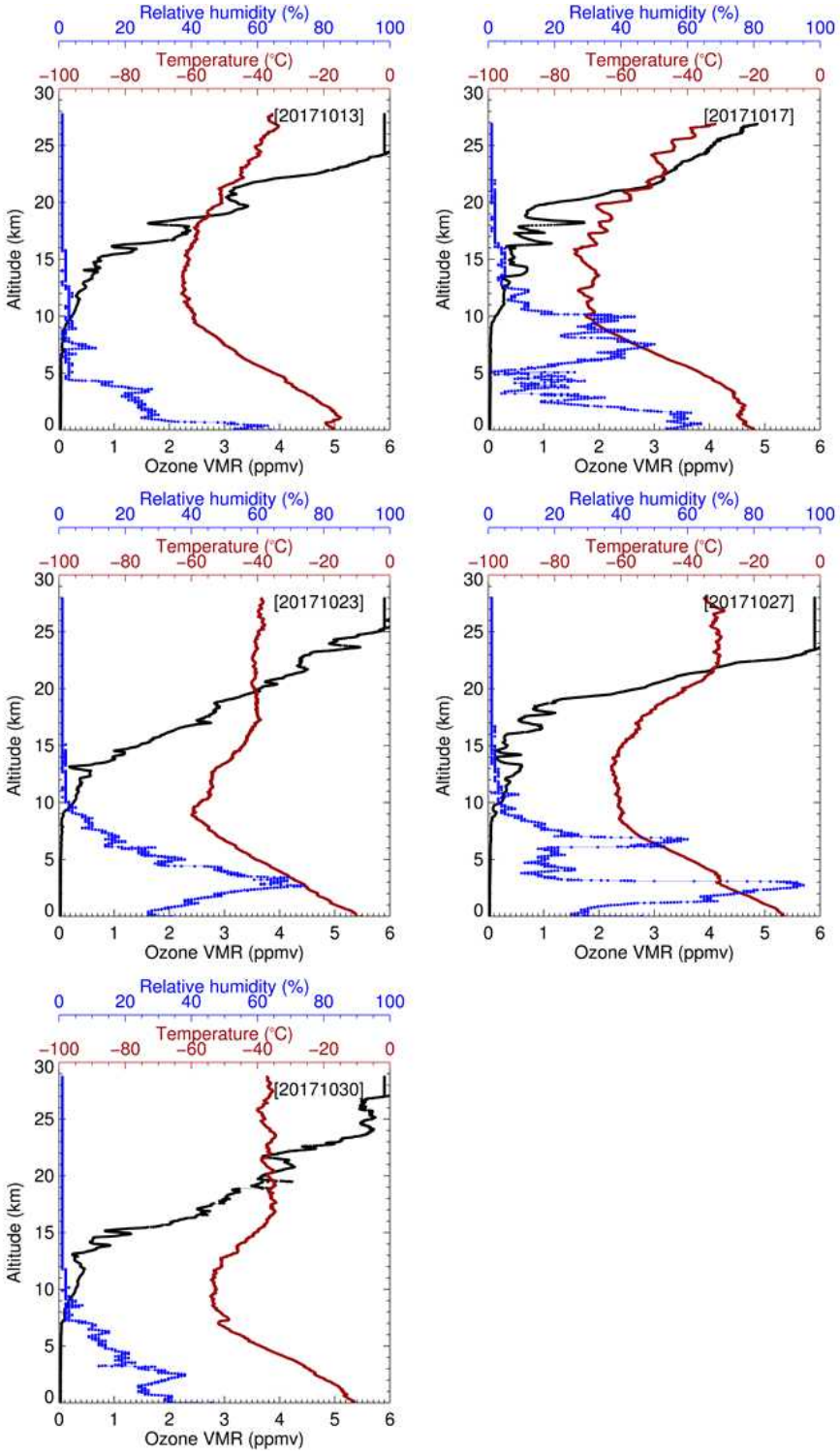


그림 1-26. 2017년 10월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2017년 10월 13일, 2017년 10월 17일, 2017년 10월 23일, 2017년 10월 27일, 2017년 10월 30일 오존존데 사례

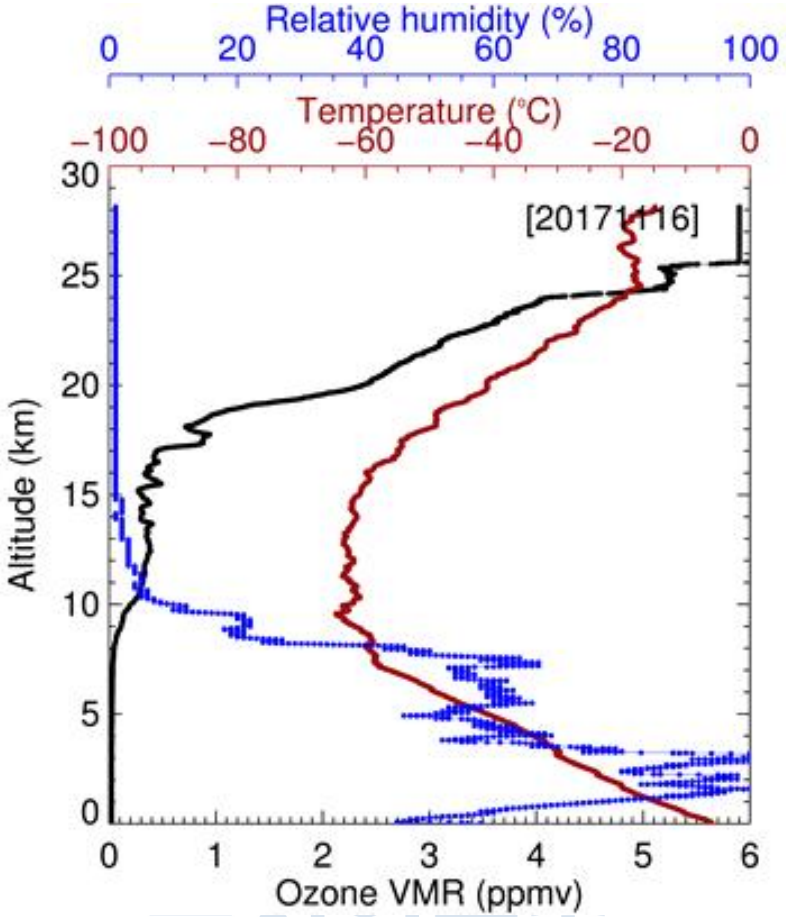


그림 1-27. 2017년 11월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2017년 11월 16일 오존존데 사례

라. 2018년

2018년은 1월부터 12월까지 총 22개의 오존존데를 비양하였다. 1월부터 8월까지 각각 1회 (그림 1-28, 1-29), 9월에 4회 (그림 1-30), 10월에 4회 (그림 1-31), 11월에 3회(그림 1-32), 12월에 1회(그림 1-33)의 관측을 수행하였다. 오존의 패턴은 이전 연도와 비슷하게 나타났다.

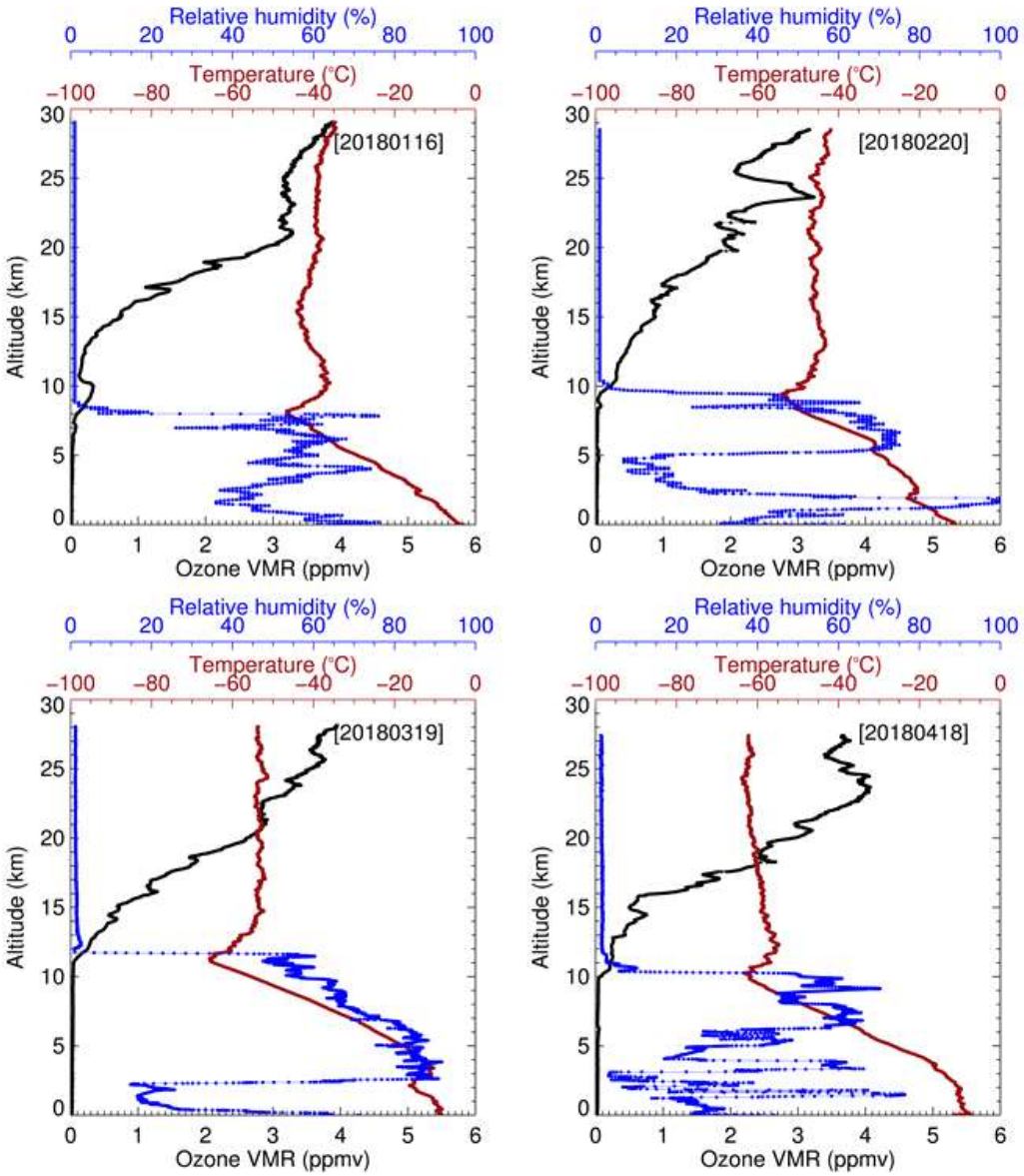


그림 1-28. 2018년 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2018년 1월 16일, 2018년 2월 20일, 2018년 3월 19일, 2018년 4월 18일 오존존데 사례

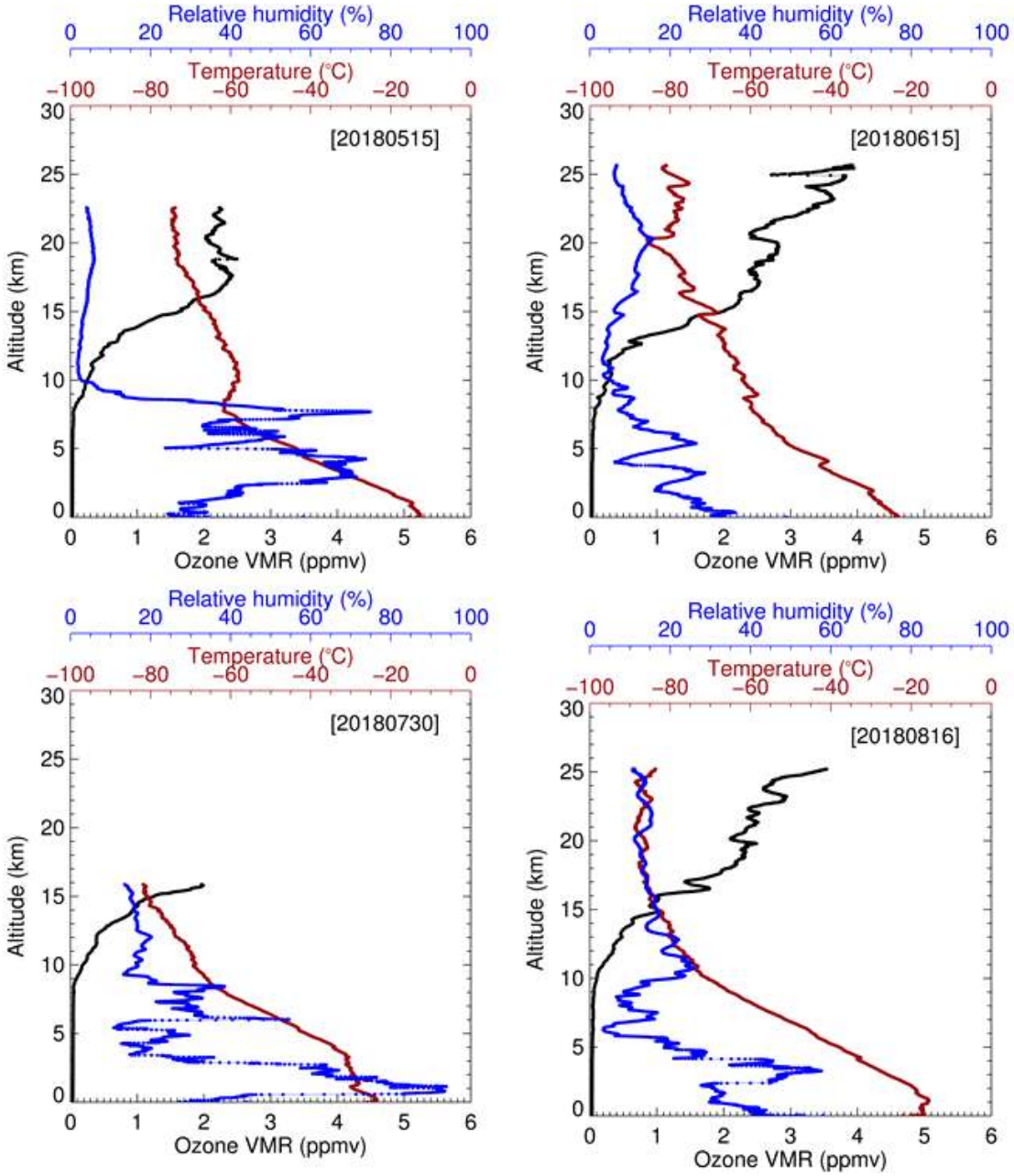


그림 1-29. 2018년 5월부터 8월까지의 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2018년 5월 15일, 2018년 6월 15일, 2018년 7월 30일, 2018년 8월 16일 오존존데 사례

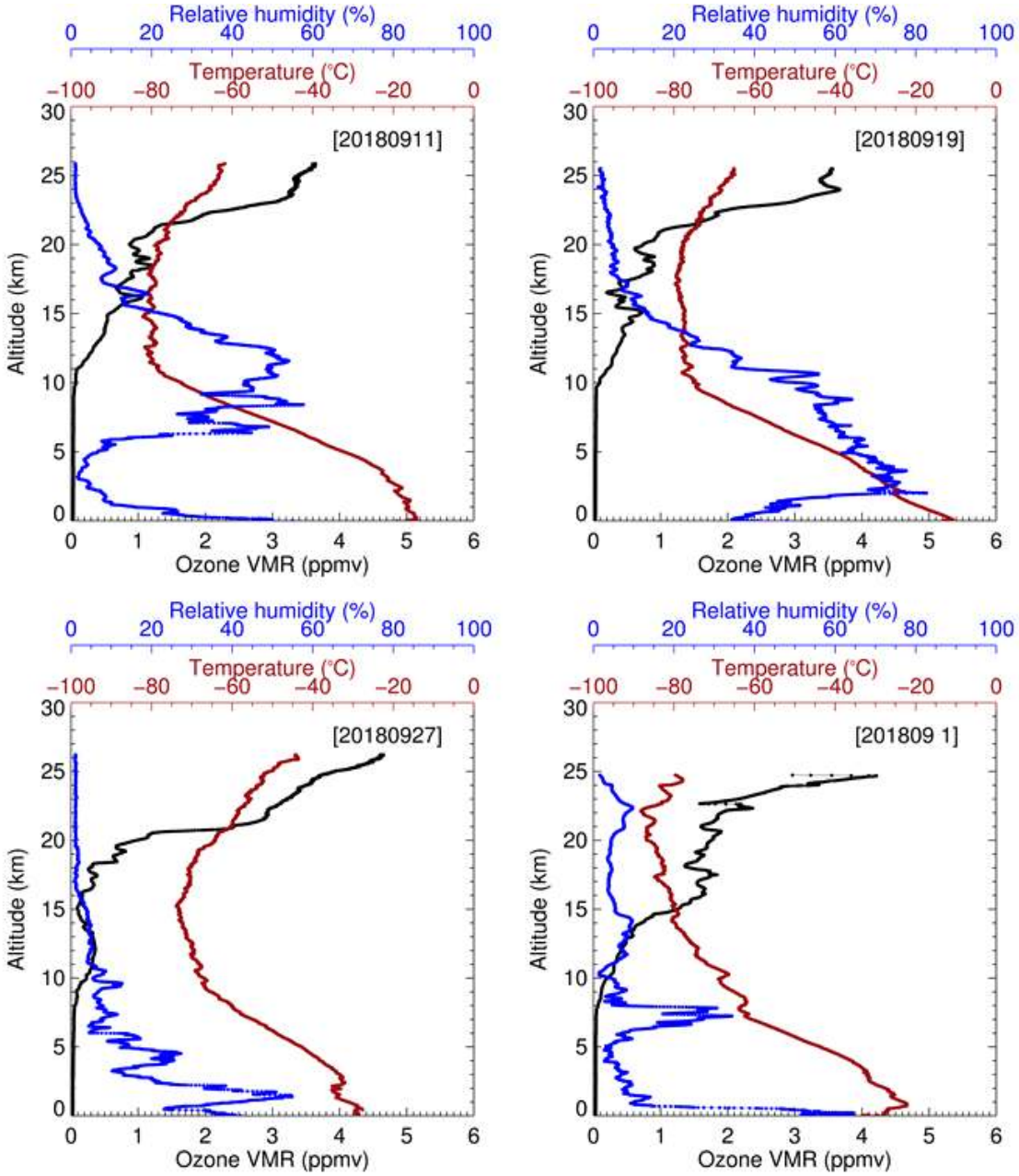


그림 1-30. 2018년 9월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2018년 9월 11일, 2018년 9월 19일, 2018년 9월 27일, 2018년 9월 1일 오존존데 사례

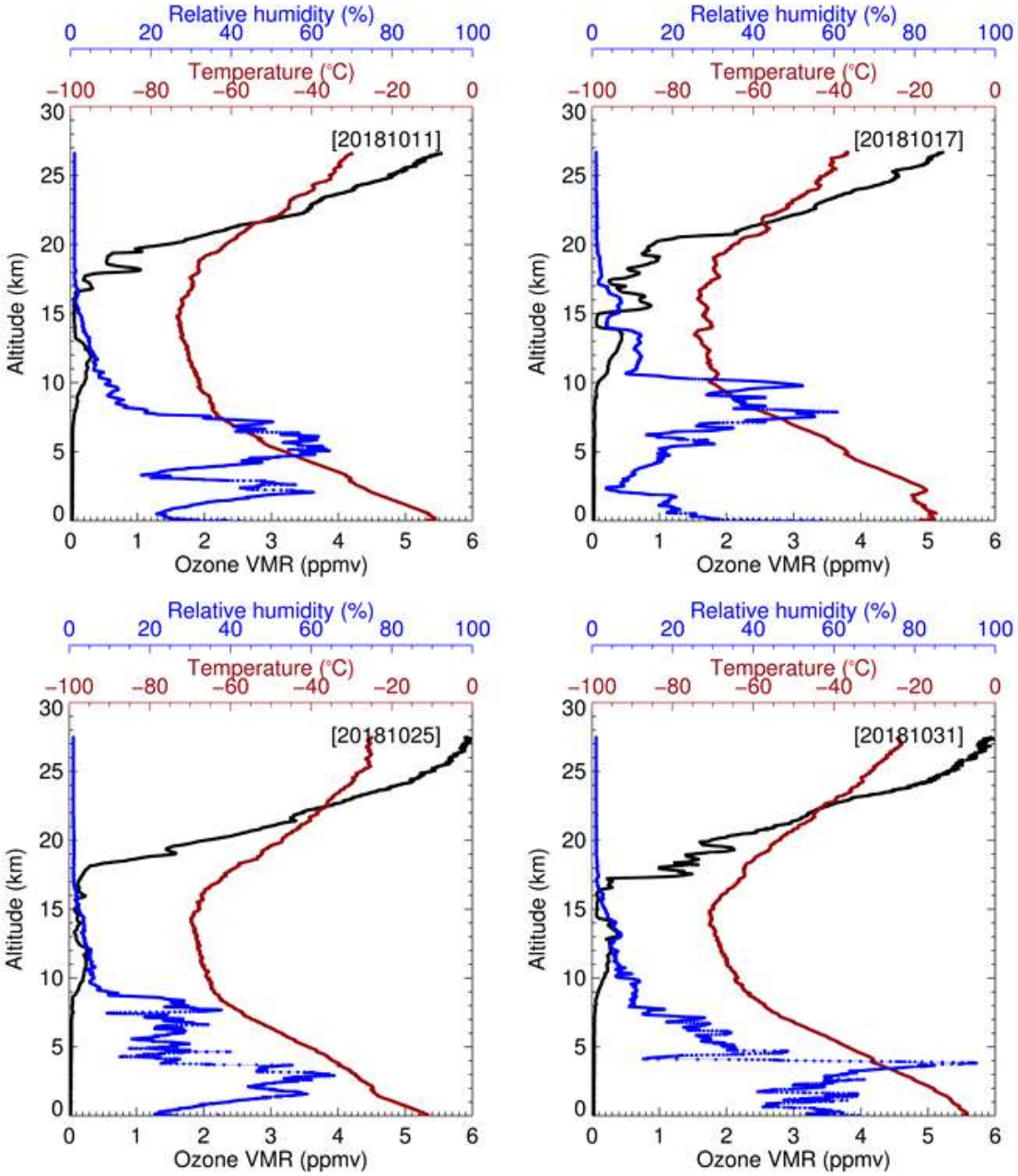


그림 1-31. 2018년 10월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2018년 10월 11일, 2018년 10월 17일, 2018년 10월 25일, 2018년 10월 31일 오존존데 사례

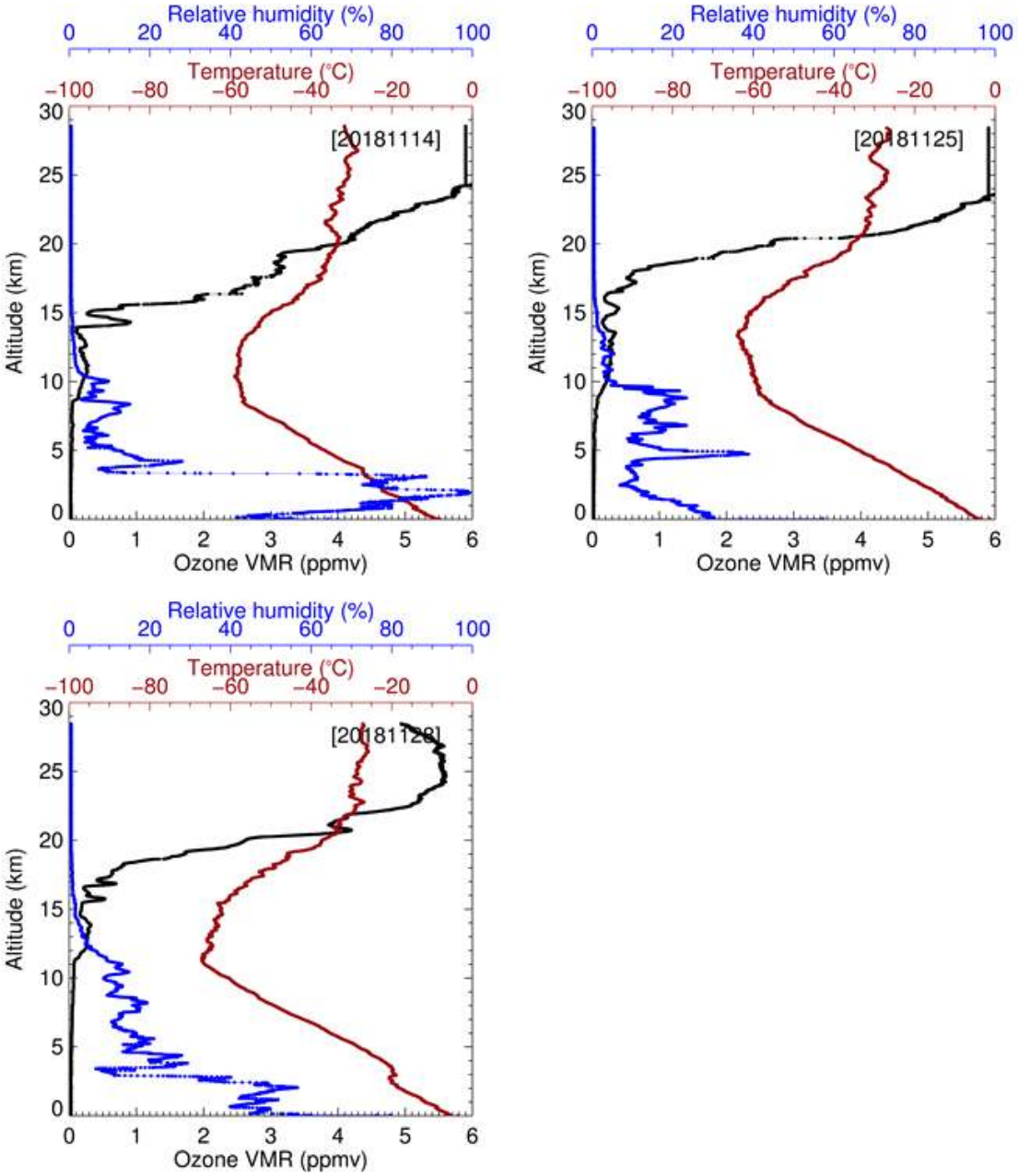


그림 1-32. 2018년 11월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2018년 11월 14일, 2018년 11월 25일, 2018년 11월 29일 오존존데 사례

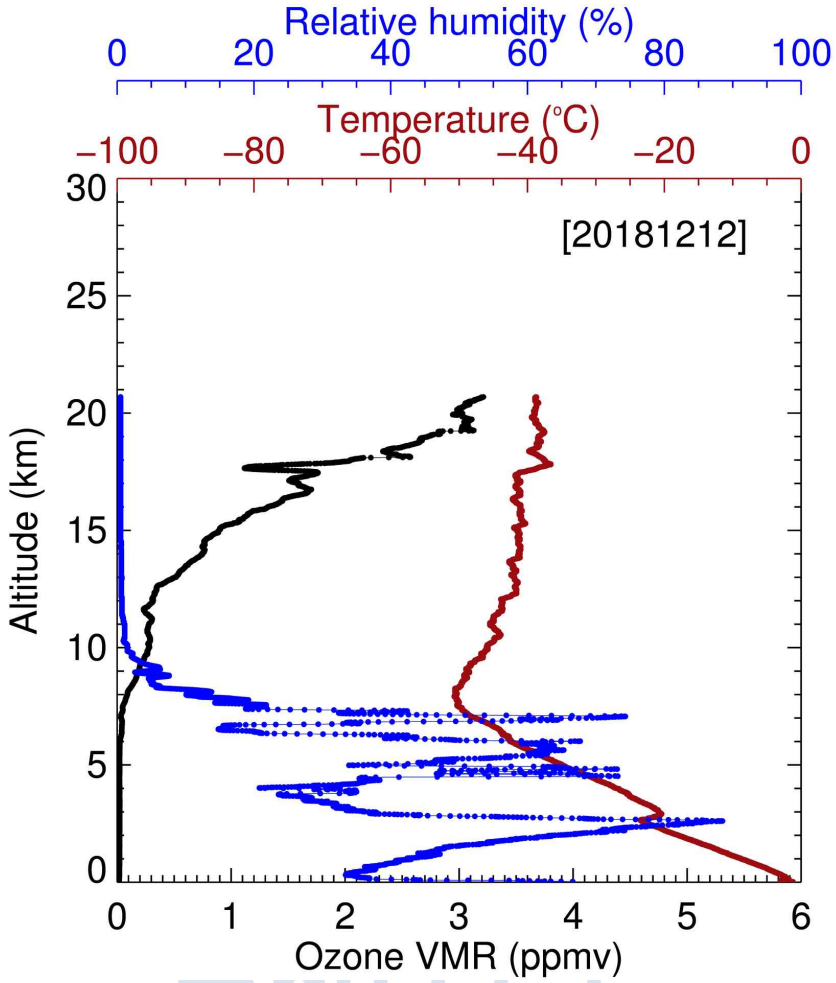


그림 1-33. 2018년 12월 장보고 기지 오존존데의 고도 별 오존농도(검은색, 단위: ppmv), 온도(빨간색, 단위: ℃), 습도(파란색, 단위: %)의 관측 사례. 왼쪽 상단부터 2018년 12월 12일 오존존데 사례

3. 오존 존데 관측 자료의 월평균 분석

2015년부터 2018년까지의 오존존데 자료를 이용하여 연도별 월별 오존, 온도, 바람의 평균을 계산하였다. 2017년 11월부터 오존존데 자료의 형식이 변경되어 이후의 기간에 대해서 바람의 월 평균은 계산하지 못하였다.

가. 오존과 온도

그림 1-34와 그림 1-35는 2015년부터 2018년까지 오존존데에서 제공하는 Partial pressure (mPa) 자료와 온도의 고도별 평균과 표준편차를 나타낸 그림이다. 오존존데의 자료는 3km 간격으로 평균하여 사용하였다. 앞의 오존존데 연별 분석과 동일하게 나타났으며, 2016년과 2017년보다 2015년 10월에 15-20 km 고도의 오존의 농도가 급격하게 감소하였다. 또한 온도의 평균도 2015년에 매우 낮게 나타났기 때문에 성층권 하부에서 온도와 오존의 감소가 나타남을 확인하였다.

세부적으로 들여다보면 고도별로 오존의 최소값이 나타나는 시간대가 다르다는 것이 관찰된다. 상대적으로 오존의 감소가 크게 나타난 2015년과 2018년의 경우에는 오존의 최소치가 10월에 가장 크게 나타남이 확인된다. 다만 고도별로 비교하면 약 20 km 이하에선 10월에 오존 감소가 더 크지만 오히려 20 km 이상에서는 9월의 오존량이 더 크게 나타나는 특징이 나타난다. 한편 상대적으로 오존 감소가 작게 나타난 2016년과 2017년의 경우에는 약 15 km 고도까지는 9월과 10월에 큰 차이가 없다가 15 km 이상 고도에서는 10월에 오존량이 9월에 비해 크게 회복되는 경향을 보인다. 이렇게 살펴보면 성층권에서 오존 파괴가 크게 일어나는 고도는 약 15 km 정도, 높게 잡아도 20 km 정도로 볼 수 있고 20 km 이상에서는 상대적으로 민감도가 많이 떨어지는 것이 확인된다. 그림 1-34에서도 확인되듯이 성층권에서 오존의 최대치는 대략 20 km 고도 정도에서 나타나고 위아래로 대칭형태의 감소를 보이는데 20 km 고도 기준 아래 위에서 오존의 감소 패턴이 월별로 차이를 나타낼 수 있다는 부분은 성층권 오존 파괴 특성을 해석하는 과정에서 퍽 중요한 정보로 활용될 여지가 있어 보인다.

이와 관련한 중요한 해석은 그림 1-35에서 보여주는 온도의 연직 분포 특성을 통해 가능할 수 있을 거라 본다. 연직 온도 분포는 9월에 가장 낮은 온도를 15-20 km 고도, 즉 오존의 최대값이 나타나는 지역에서 가지는데 10월로 들어서면 15 km 이상 고도에서 온도가 급증하는 패턴이 나타난다. 오존의 연직 분포와 온도의 연직 분포가 비슷한 영역에서 곡률 형태를 보이는 것처럼 볼 수 있지만 실제로는 약 5 km 정도의 peak height 차이가 존재하는 느낌이 있기에 향후에 이 부분을 좀 더 자세히 들여다볼 필요가 있을 것으로 생각된다.

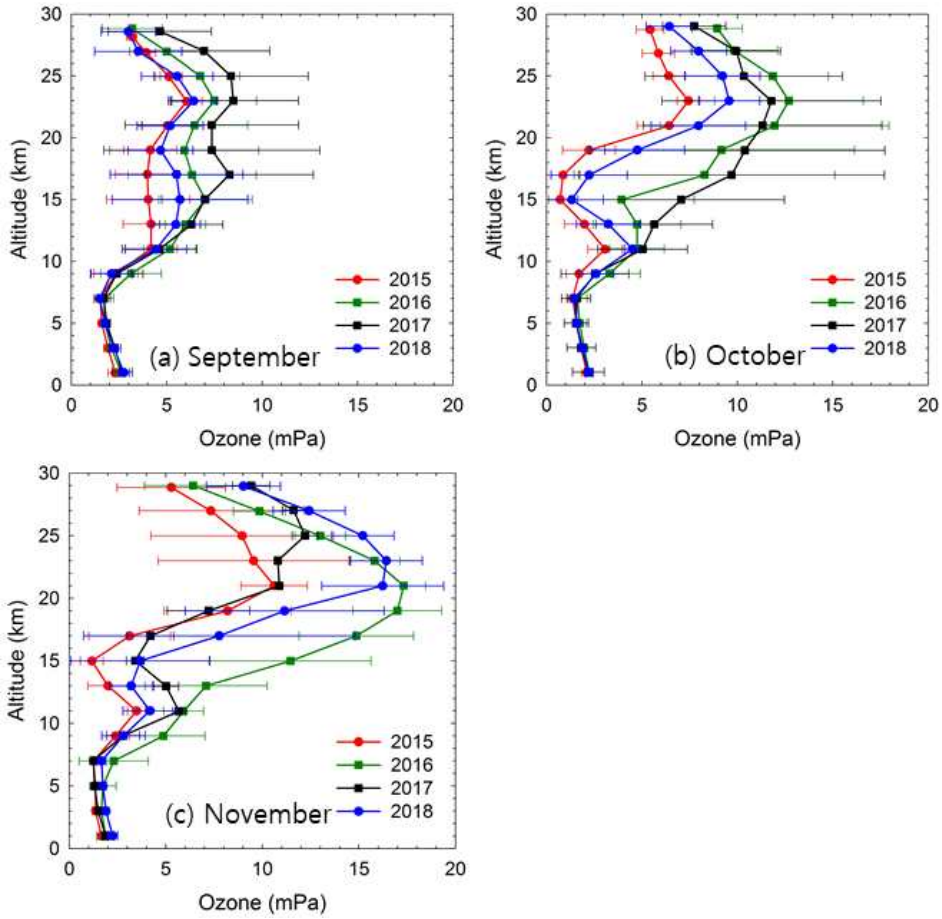


그림 1-34. 2015년부터 2018년 오존존데의 고도별 오존 농도 변화(단위: mPa)와 표준편차를 나타낸다. (a)는 9월, (b)는 10월, (c)는 11월을 나타낸다.

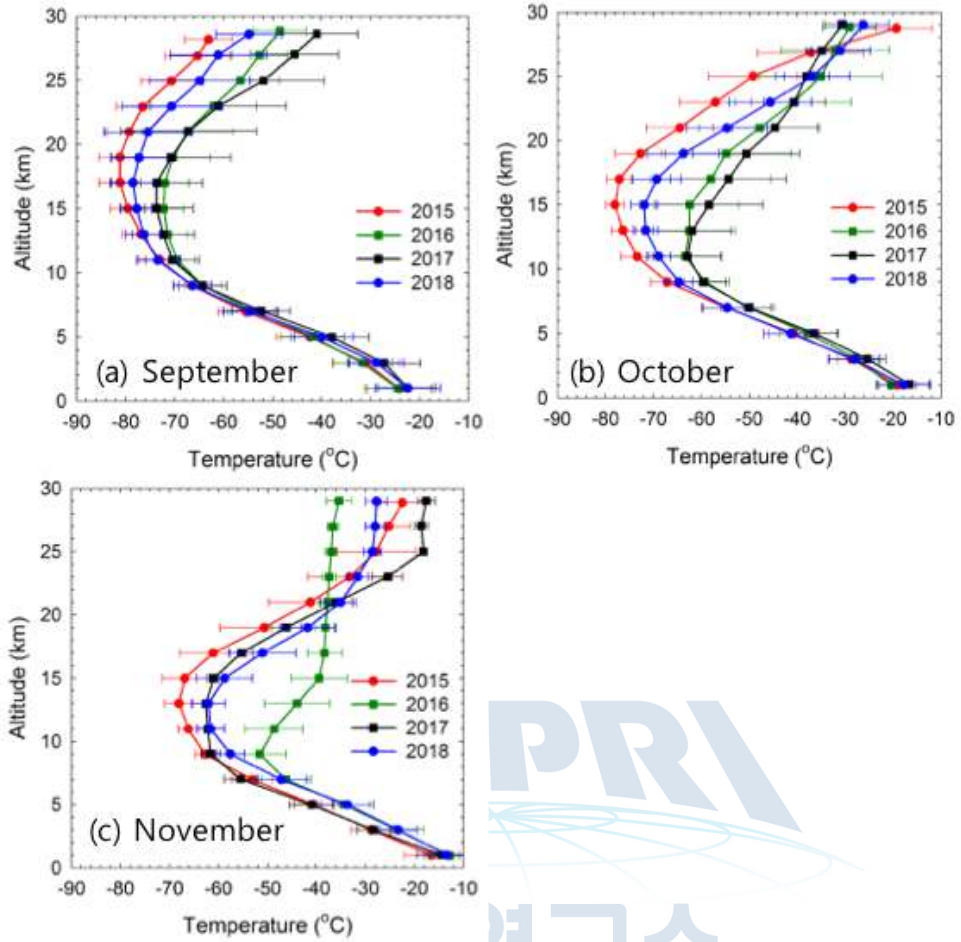


그림 1-35. 2015년부터 2018년 오존존데의 고도별 온도 변화와 표준편차를 나타낸다. (a)는 9월, (b)는 10월, (c)는 11월을 나타낸다.

그림 1-36은 온위고도 별 월별 오존량의 변화를 나타낸다. 온위 고도는 오존존데에서 제공하는 기압과 온도 자료를 이용하여 계산하였다. 그림 1-34와 유사하게 2015년 10월에 오존의 감소가 크게 나타났다. 고도별로 살펴볼 때 400K 온위 고도에서 오존의 농도가 가장 적게 나타났으며 300-500K 고도가 가장 오존 파괴가 심각하게 나타나는 온위고도인 것으로 보인다. 이는 남극의 온위고도에 대한 오존 분석을 수행한 Kuttippurath et al. (2018)과 유사하게 나타났다. 오존의 연직분포를 나타날 때 여러 가지 고도 자료를 활용할 수 있는데 일반적인 meter 단위의 geometrical height(그림 1-34)를 비롯하여 지금 살펴본 potential temperature height(그림 1-36), 또 pressure height 등을 꼽을 수 있다. 어떤 단위의 고도에서 오존의 연직분포를 표현하느냐에 따라 미묘하게 분석의 차이가 존재할 수 있기 때문에 목적에 맞는 고도를 택하여 분석하는 과정이 필요하다 (예컨대 온위 고도는 잠재와도와 비교할 때 사용하기 좋다고 여겨진다).

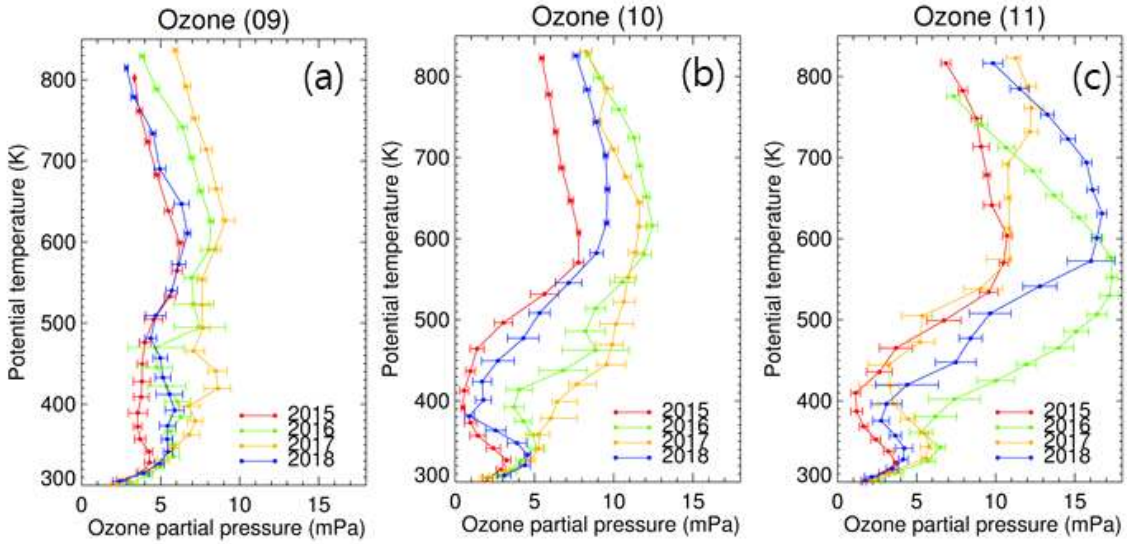


그림 1-36. 2015년부터 2018년 오존존데의 온위 고도별 오존의 농도 변화(단위: mPa)와 표준편차를 나타낸다. (a)는 9월, (b)는 10월, (c)는 11월을 나타낸다.

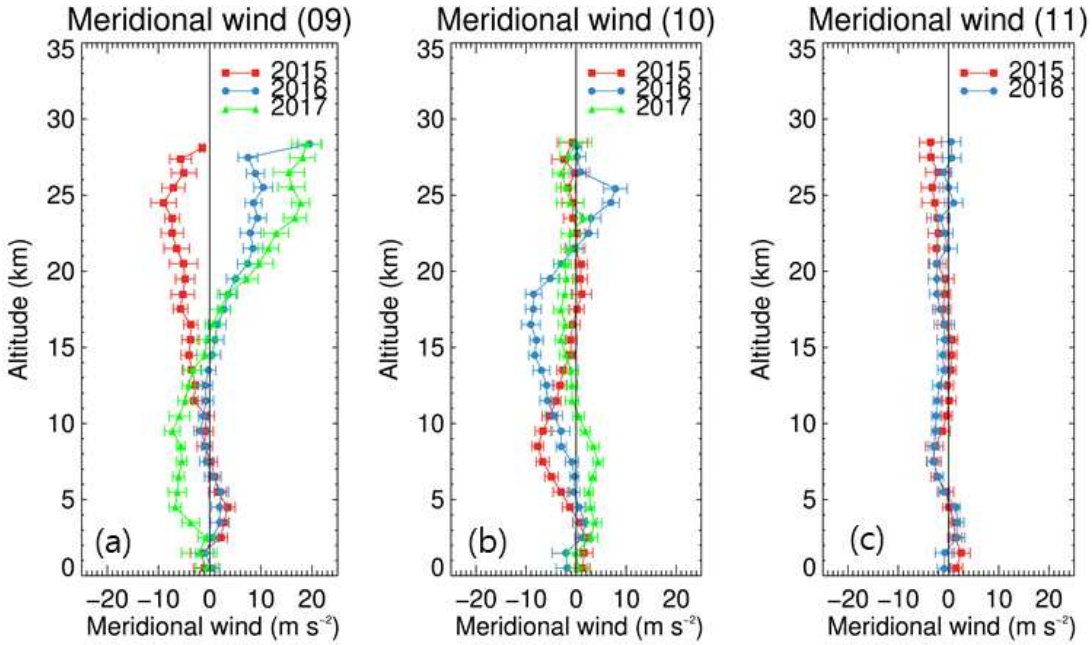


그림 1-37. 2015년부터 2018년 오존존데의 고도별 Meridional 바람(단위: m s^{-1})의 변화와 표준편차를 나타냄. (a)는 9월, (b)는 10월, (c)는 11월을 나타낸다.

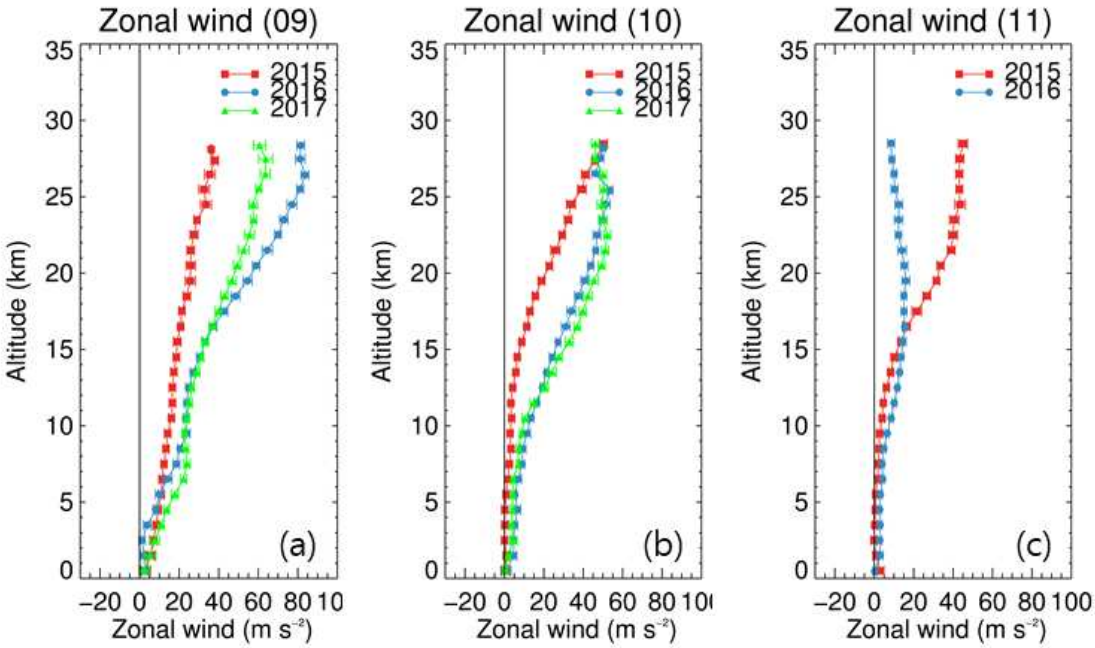


그림 1-38. 2015년부터 2018년 오존존데의 고도 별 Meridional 바람(단위: m s^{-1})의 변화와 표준편차를 나타냄. (a)는 9월, (b)는 10월, (c)는 11월을 나타낸다.

나. 바람

오존존데에서 제공하는 Meridional wind와 Zonal wind를 연도별 평균을 분석하였다. 아래의 그림은 1 km로 평균한 오존존데 자료의 평균과 표준편차를 나타내고 그림 1-37은 Meridional wind와 그림 1-38는 Zonal wind의 월별 평균을 나타낸 그림이다. 2015년 9월은 10 km 이하의 고도에서는 상층으로 올라갈수록 Southward (northerly)가 강했고, 2016년과 2017년은 Northward (southerly)가 주로 나타났다. Zonal wind는 장보고 기지에서 Westerly 방향으로 불었으며, 2015년도는 2016년과 2017년에 비해 Zonal wind의 세기가 약했다.

다. 비습

오존존데에서 제공하는 수증기의 비습(Specific humidity, 단위: g/kg)을 연도별 월별로 분석해보았다. 아래의 그림 1-39는 1km로 평균한 오존존데 자료의 평균과 표준편차를 나타낸다. 9월부터 11월까지 비습은 상층으로 올라갈수록 비습의 양이 감소하는 특징을 보이다가 성층권 상부에서 다시 증가하는 형태를 보인다. 수증기의 연직 분포가 대기권역별로 달라지는 특성이 존재하기 때문에 비습 역시 그 부분을 따르며 성층권은 오존량과 무관하게 매우 건조한 특성을 보이는 게 확인된다.

KOPRI 극지연구소

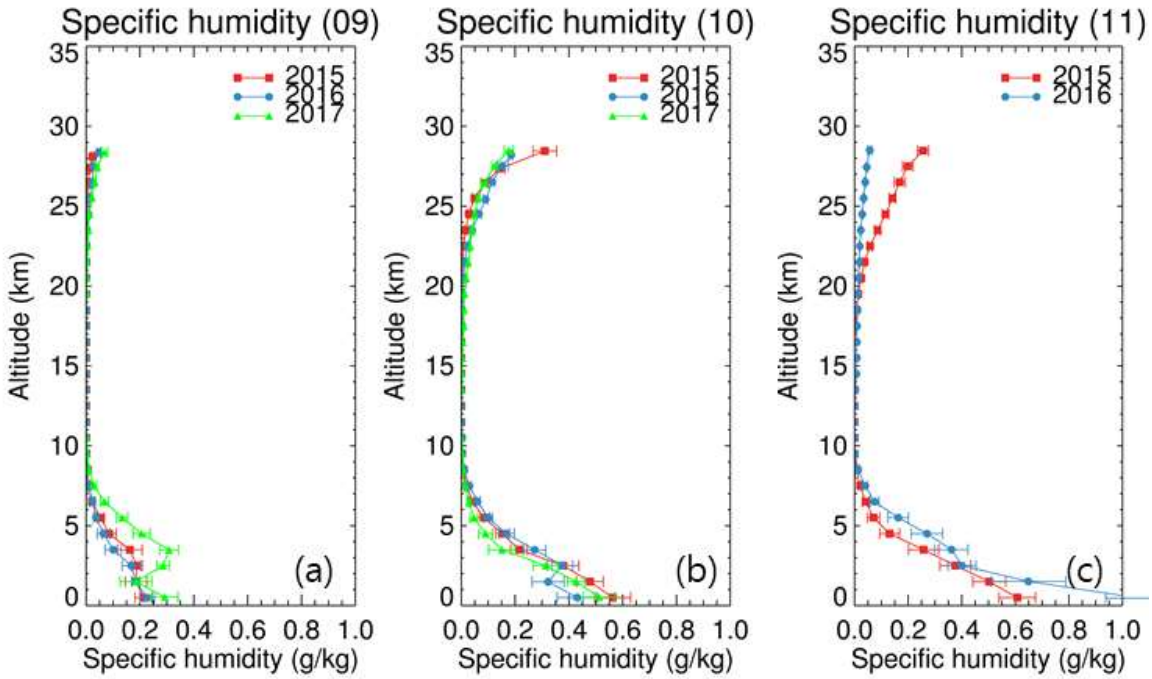


그림 1-39. 2015년부터 2017년 오존존데의 고도별 수증기의 비습의 변화와 표준편차를 나타냄. (a)는 9월, (b)는 10월, (c)는 11월을 나타낸다.

4. 오존존데와 위성자료 비교 분석 (2015-2018)

오존존데는 관측을 수행할 때, 현재 고도의 오존농도($\Delta\Omega_s$)와 근사식을 이용하여 Residual Ozone($\Delta\Omega_R$)을 제공하고 있으며, 오존농도와 Residual ozone의 합으로 오존전량을 계산할 수 있다.

그림 1-40은 오존존데에서 계산한 오존전량과 OMI 위성에서 제공하는 Level 3 오존전량(OMTO3)와 장보고 기지에서 관측하고 있는 브루어 분광광도계(MKIII, #220)를 이용하여 그린 시계열이다. 오존존데의 오존전량은 위성과 브루어 자료와 비슷한 오존 패턴의 시계열을 보였다. 하지만 오존존데가 매우 낮은 오존전량값을 보이고 있는데, 이는 오존이 비양고도가 낮을 경우 오존 전량의 계산에 오차를 유발하기 때문에 차이를 보인다.

그림 1-41은 오존존데의 오존전량, 브루어 분광광도계, 위성자료의 비교 그림이다. 세 그림 자료 모두 높은 오존의 일별 변동성이 유사하게 나타났다. 또한 각각의 자료에 대해서 비교를 하였을 때, 자료에 따라서 차이를 보였지만, 세 자료 모두 높은 상관계수와 적은 오차를 보였다. 향후 관측 데이터가 누적되면 많은 자료를 이용하여 오차 분석 특징을 살펴보고자 한다.

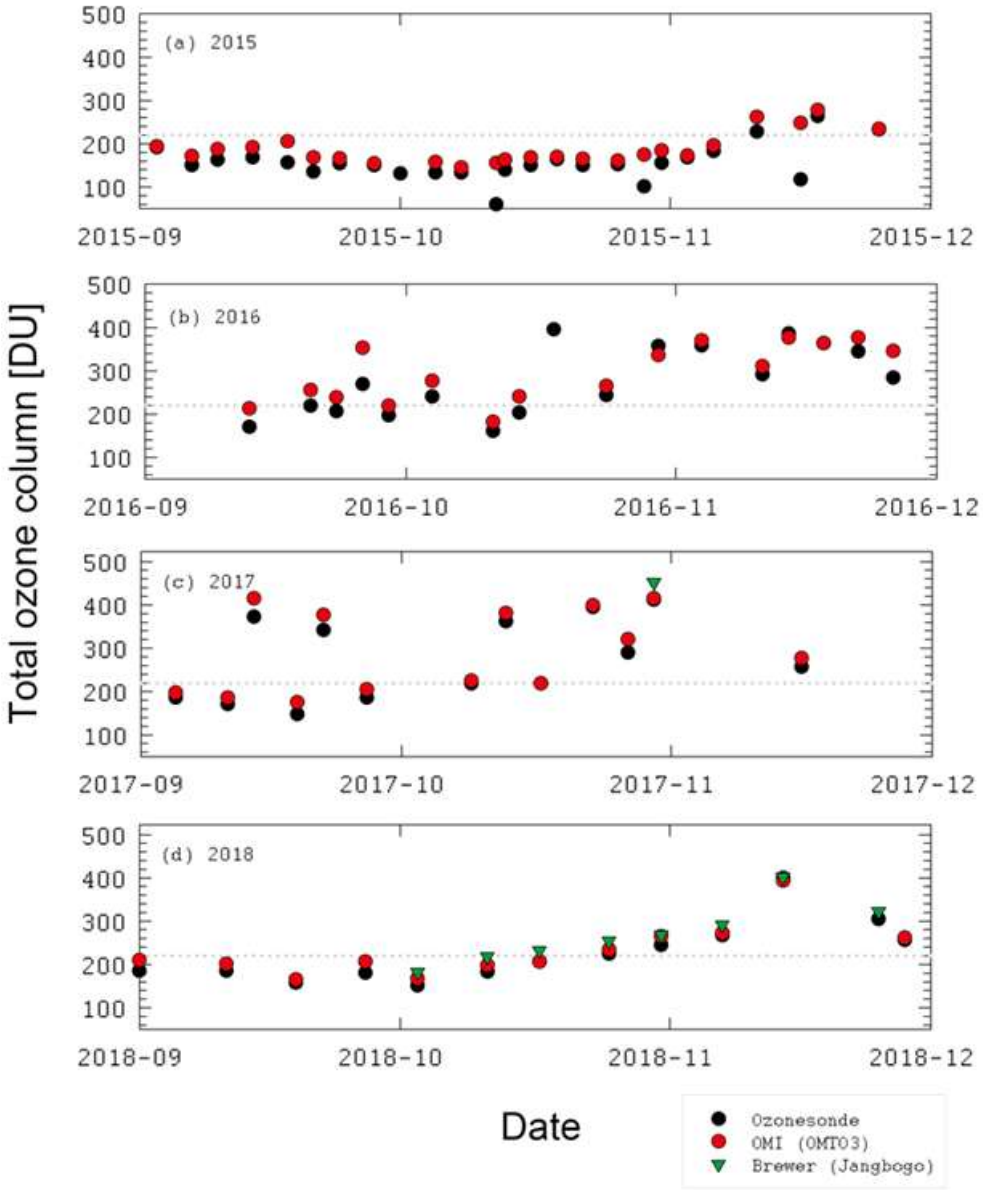


그림 1-40. 2015년부터 2018년까지의 장보고 기지의 오존존데와 브루어 분광광도계(#220) 및 OMI위성의 오존전량 월별 대푯값 시계열 비교 결과

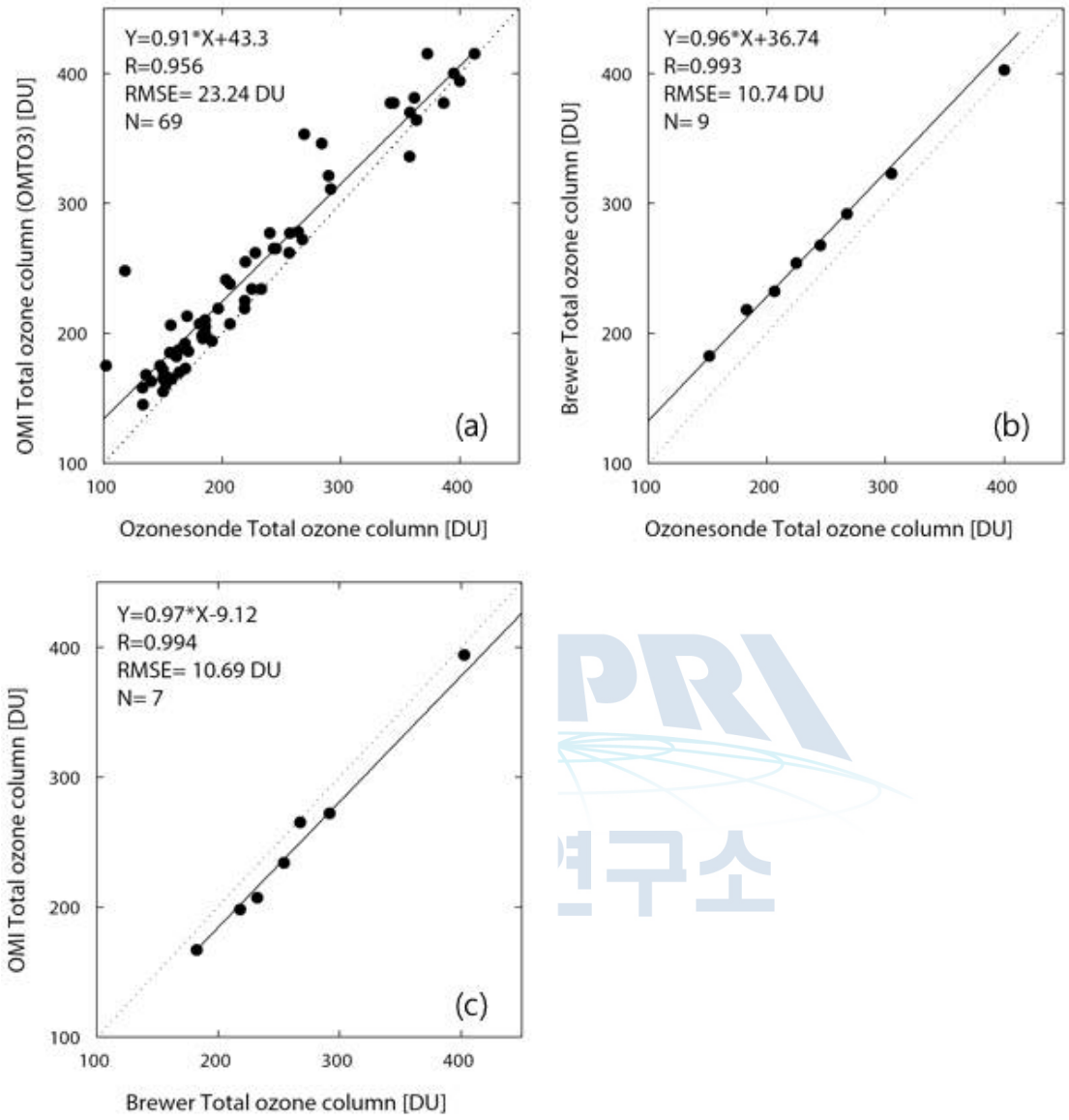


그림 1-41. 선형회귀방법을 이용한 비교 분석 결과: 오존존데의 오존전량과 브루어 분광광도계와 위성자료의 비교. (a) 오존존데와 위성자료의 비교, (b) 오존존데와 브루어 분광광도계의 비교 및 (c) 브루어 분광광도계와 위성자료의 비교.

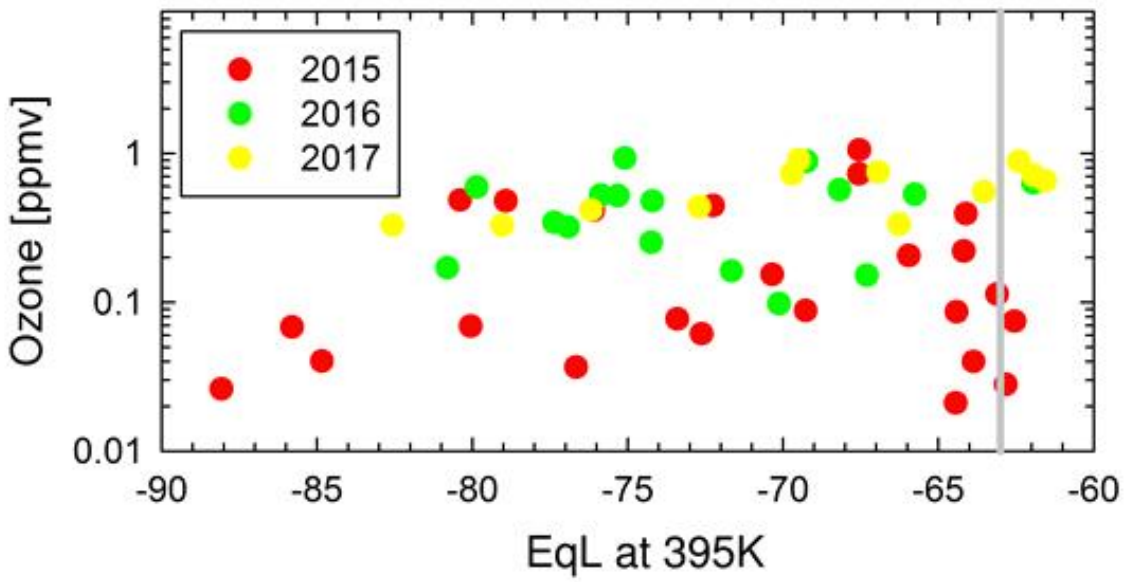


그림 1-42. ERA-5 자료를 이용하여 계산한 온위고도 395K의 Equivalent latitude (EqL, 단위: Degree)와 오존존데의 395K 고도에서의 오존량의 비교(단위: ppmv)

그림 1-42는 최근 공개된 ECMWF의 새로운 재분석 자료, ERA-5의 Potential vorticity 자료를 이용하여 Equivalent latitude (EqL)을 계산하고 오존의 감소가 크게 나타났던 오존존데의 395K의 오존량을 비교한 그림이다. 앞서 확인한 결과들과 유사하게 2015년의 오존은 2016년과 2017년에 비해 매우 낮은 오존 감소가 나타난 것을 알 수 있고 오존이 매우 낮게 떨어지는 경우 EqL도 거의 남극 지방 인근까지 다다르는 것을 확인할 수 있다. 이 EqL 자료는 Polar vortex의 영역을 살펴보는 과정에서도 중요하게 활용할 수 있는데 Kuttipurath et al. (2018)에서는 EqL을 이용하여 Polar vortex의 경계를 찾는 과정에서 EqL이 -65°이상일 경우 해당 지역은 Polar vortex 내부로 들어왔다고 정의하였다. 이 기준에 따르면 장보고 기지는 대부분 Polar vortex의 내부에 들어오지만 경계에 위치하게 되는 경우도 발견이 되었고, 특히 2015년은 Polar vortex의 경계에 위치하여 오존의 감소가 크게 나타나는 관측도 많이 있었던 것으로 나타난다. 추후 추가적인 분석을 통하여 장보고 기지의 이러한 특성을 좀 더 세밀하게 살펴야할 필요가 있다.

분석 결과에 참고하기 위해 끝으로 남극점에서 지상 관측 및 위성 관측으로 확보한 오존 전량 값을 시계열 형태로 비교하여 살펴보았다 (그림 1-43 및 1-44). 1986-2016년 30년의 장기간 동안 전체적으로 잘 일치하는 듯이 보이나 의외로 차이가 크게 나타나는 지점도 존재한다 (예: 1990년, 1997년). 이런 차이를 이해하기 위해 지상 관측과 위성 관측을 비교 검증하는 작업이 필요하다. 이 결과는 이어지는 2절에서 좀 더 상세히 다루고자 한다.

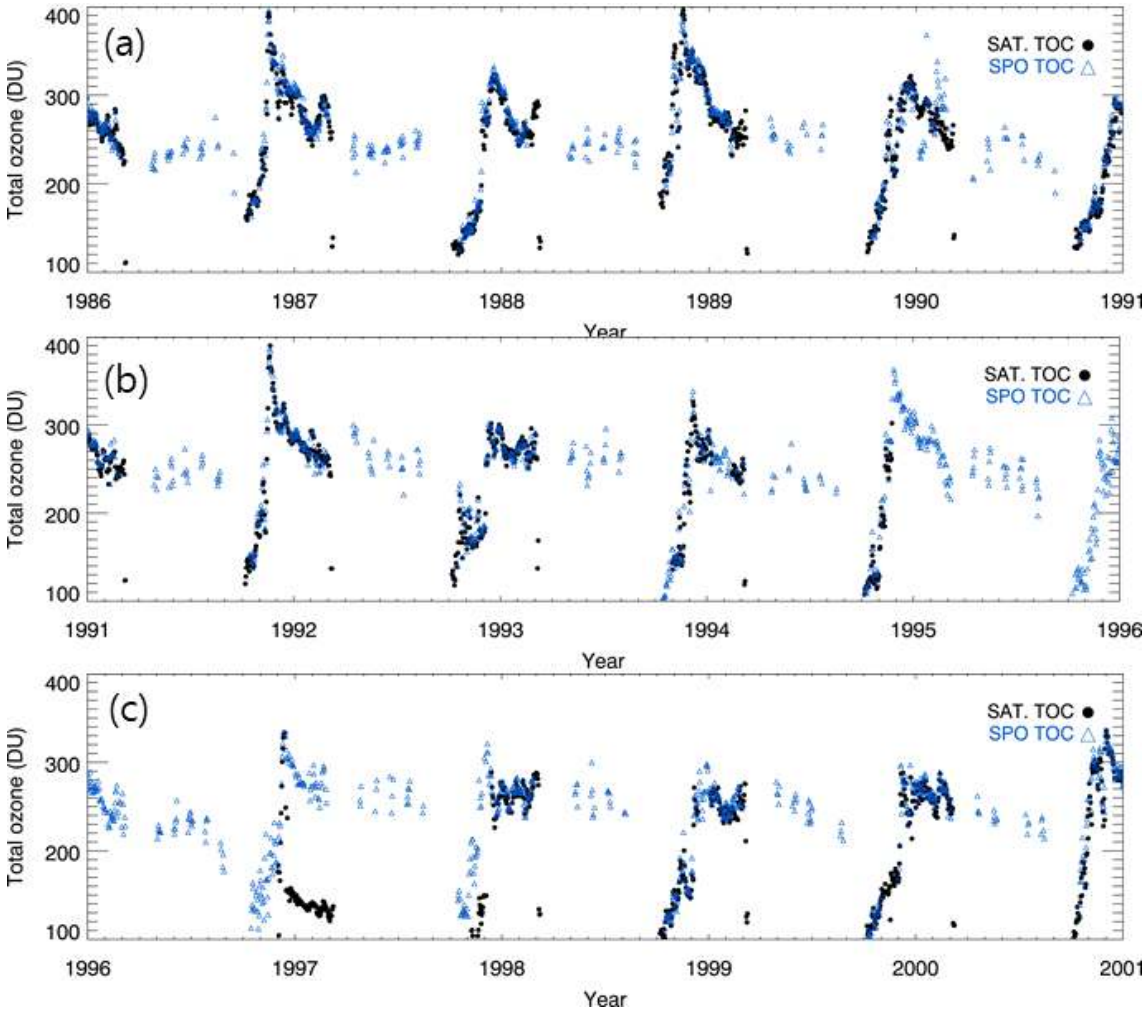


그림 1-43. WOUDC의 South pole 사이트에서 제공하는 오존전량(DU, 파란색)와 위성에서 제공하는 오존전량의 시계열 그림(위성자료: TOMS, OMI, 검은색)이다. (a)는 1986년부터 1990년, (b)는 1991년부터 1995년, (c)는 1996년부터 2001년까지를 나타낸다.

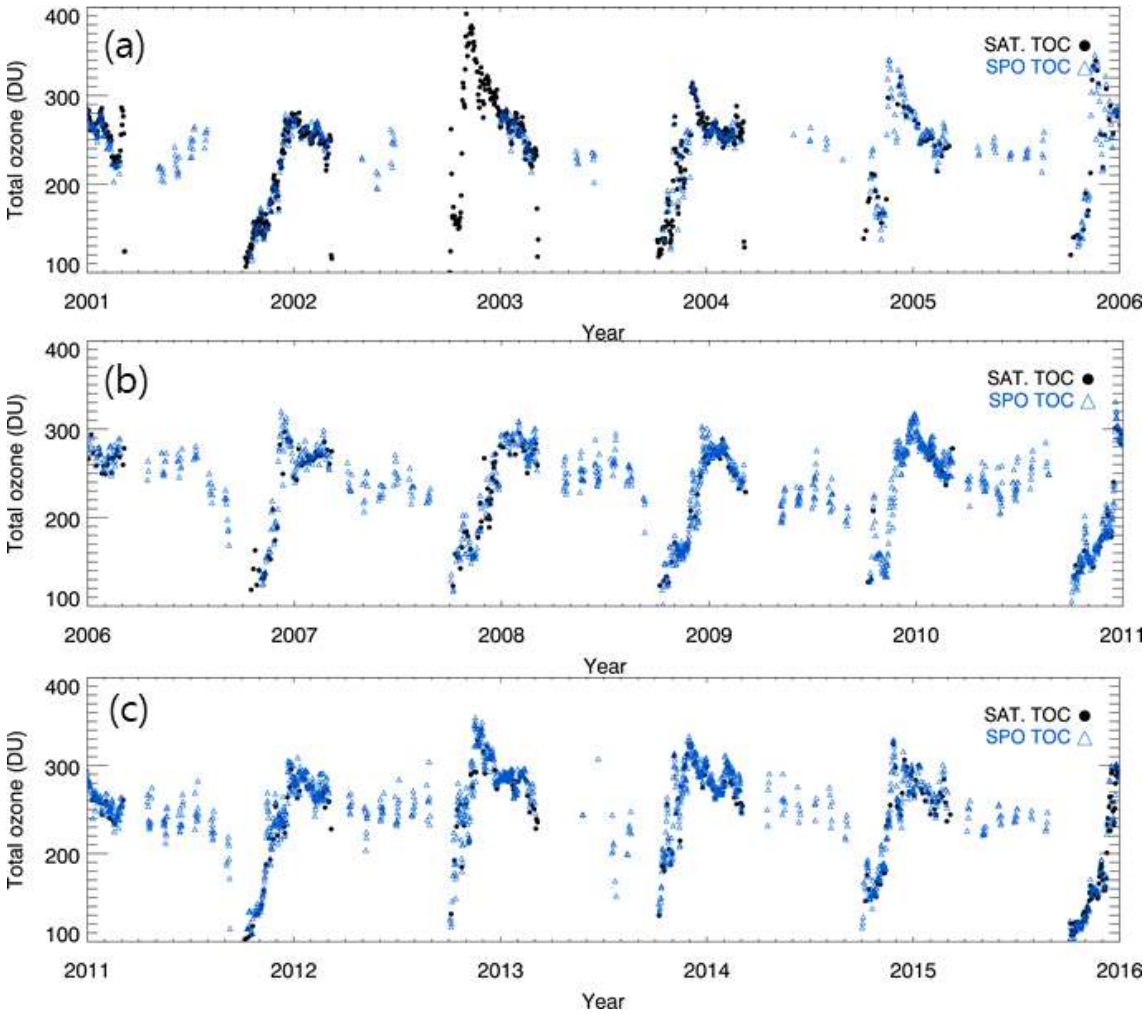


그림 1-44. WOUDC의 South pole 사이트에서 제공하는 오존전량(DU, 파란색)와 위성에서 제공하는 오존전량의 시계열 그림(위성자료: TOMS, OMI, 검은색)이다. (a)는 2001년부터 2005년, (b)는 2006년부터 2010년, (c)는 2011년부터 2015년까지를 나타낸다.

제 2 절 세종 및 장보고 과학기지 브루어 분광광도계 오존 관측 자료 분석

1. 세종 과학기지 브루어 분광광도계 설치 과정

가. 개요

그림 2-1 연세대학교에 시험 설치된 세종과학기지의 브루어 분광광도계(MKIV, #122)이다. 브루어는 관측부, 트랙커, 삼발이로 구성되어 있으며, 위의 사진은 관측부와 트랙커 연결 부위 손실로 임시적으로 케이블 타이를 십자형태로 묶어 최소한의 고정을 해두었다. 세종기지에는 관측부와 트랙커의 연결 부위를 설치하여 정상적으로 고정하였다.

세종기지에 설치된 극지연구소 브루어 분광광도계는 태양 복사 중에서 자외선 영역 특정 파장대의 복사량을 이용하여 오존전량, 파장별 자외선 복사량(286nm-363nm, 0.5nm), 에어로졸 광학두께(AOD, 320.1nm) 등을 측정하는 광학 지상관측 장비이다. 기본적으로 기기 고정부인 삼발이(Tripod), 태양을 따라서 돌아가는 트랙커(Tracker), 그 위에 놓이게 되는 브루어 관측부(Brewer) 이렇게 세 부분

이 함께 설치된 후(그림 2-1), 통신케이블로 관측 모드를 제어하는 컴퓨터와 연결, 설치된 브루어 분광광도계 전용 소프트웨어를 통해서 관측 스케줄이 입력되어 그에 따라 대기 오존량 감시 업무 및 자외선 측정 업무 등을 수행하게 된다.

세종기지 브루어 분광광도계 관측은 1996년부터 시작되어 현재까지 유지되어오고 있다. 극한의 환경속에서 고가의 민감한 광학 장비를 운영하는 일은 쉽지 않으나 오존 및 자외선 관측의 표준 기기로 꼽히는 브루어 분광광도계를 남극에서 운용하는 일은 남극 성층권 오존량 감시 업무의 가장 기본이 되는 중요한 업무이다. 그 과정에서 환경의 영향으로 불가피하게 관측이 중지되는 경우도 많고 검정, 보정을 위해 관측을 쉬게 되는 경우도 많다. 세종과학기지의 브루어 관측 역시 기기의 노후화 문제로 인하여 2013년 이후 관측 자료가 잘 유지되지 못한 상태로 머물러 있었는데 이번 위탁과제를 통하여 다시 세종과학기지에서의 브루어 기기 관측을 재개하고자 하였다. 기기는 캐나다의 관련 업체가 2017년 한국에 방문했을 때 검사 및 검보정 절차를 통해 재관측이 가능함을 확인받았고, 재설치를 위해 수리된 기기를 2017년 가을 세종기지로 수송하였다.

이후 극지연구소 위탁과제 수행 목표 중 하나인 세종과학기지의 브루어 분광광도계 관측 재개를 위해 2018년 1월 구자호 참여연구원이 직접 세종과학기지 하계대로 방문하여 브루어 분광광도계의 재설치 및 시험 운영, 초기 자료의 검토 및 상시 관측을 위한 환경 마련과 같은 업무를 약 3주간 수행하였다. 그 과정에 대한 상세 기록을 아래와 같이 남기며 이는 향후 같은 과정을 반복하게 되었을 때 실제 환경에 맞는 조치를 취하기 위한 자료로서 유의미하게 활용될 것으로 기대한다.

나. 세종 기지 설치를 위한 사전 여분의 준비 품목

세종 기지에서 브루어 기기 설치를 위해 미리 준비된 품목은 표 2-1과 같다.

표 2-1. 세종 과학 기지 브루어 분광광도계 설치 이전 준비할 품목

내용	품목
케이블의 오류 및 끊어짐 대비	- 통신케이블 - 전원케이블
수은램프 손상에 대비	- 수은램프 - 표준램프
브루어의 습도 유지 및 관리	- 제습제

다. 2018년 세종기지 브루어 분광광도계 설치 계획

1) 브루어 설치 장소 파악 및 컴퓨터 설치 위치 확인

2) 브루어가 고정되어 있는 삼발이 접지 상태 확인

3) 브루어 삼발이 고정 상태 파악

4) 매설되어 있는 통신 케이블 저항 측정

5) 새로운 통신 케이블 관측에 이용되는 허용 길이를 제외하고 케이블 보호 작업 후 매설(매설된 케이블이 손상된 경우)

6) 운반된 브루어가 이상이 없는지 내부, 외부 점검 (사진으로 기록)

7) 트랙커 설치

8) 브루어 관측부 (본체) 설치

9) 브루어의 수평 맞춤

10) 브루어의 접지 확인 및 외부 케이블의 Sealing 작업 (유동적인 작업)

11) 제습제 교체, 통신 케이블 및 전원 케이블 설치

12) 브루어 ICF 파일의 위경도 변경, Port 번호 확인 후 브루어 프로그램을 실행하여 에러가 나타나지 않는지 확인

13) 브루어 컴퓨터 시간이 컴퓨터 시간을 따라가는지 아니면 인터넷 시간을 따라가는지 확인

14) 브루어 프로그램 실행

15) “AZ” 명령어를 확인하여 트랙커의 작동확인 및 케이블의 연결선 확인 (최소 3번 이상 확인 하여 선이 걸리는 부분이 없는지 확인)

16) 브루어의 “EPA2” 스케쥴 수행 후 연속적으로 관측이 수행되는지 확인

17) 태양이 떴을 때, SR, SI 수행

18) 외부 램프 테스트 수행

19) “EPA2” 스케쥴 수행

20) 통신 연결이나 기기가 에러 없이 자동적으로 관측이 수행되는지 확인

21) 데이터 관측 값 확인하여 불연속적인 값이 나타나지 않는지 확인

라. 세종 과학기지 브루어 분광광도계 설치 과정

세종 브루어 분광광도계가 설치된 장소는 기존에 설치된 장소와 동일하며, 세종기지 경계층 관측동에서 근처에 설치되었다. 2018년 1월에 직접 방문하여 월동대원의 조력을 받아 재설치를 진행하였다. 기본적으로는 이미 설치되어있는 50m 높이의 브루어 기기용 플랫폼 위에 트랙커와 브루어 기기 본체를 설치하였다(그림 2-2).

KOPRI 극지연구소

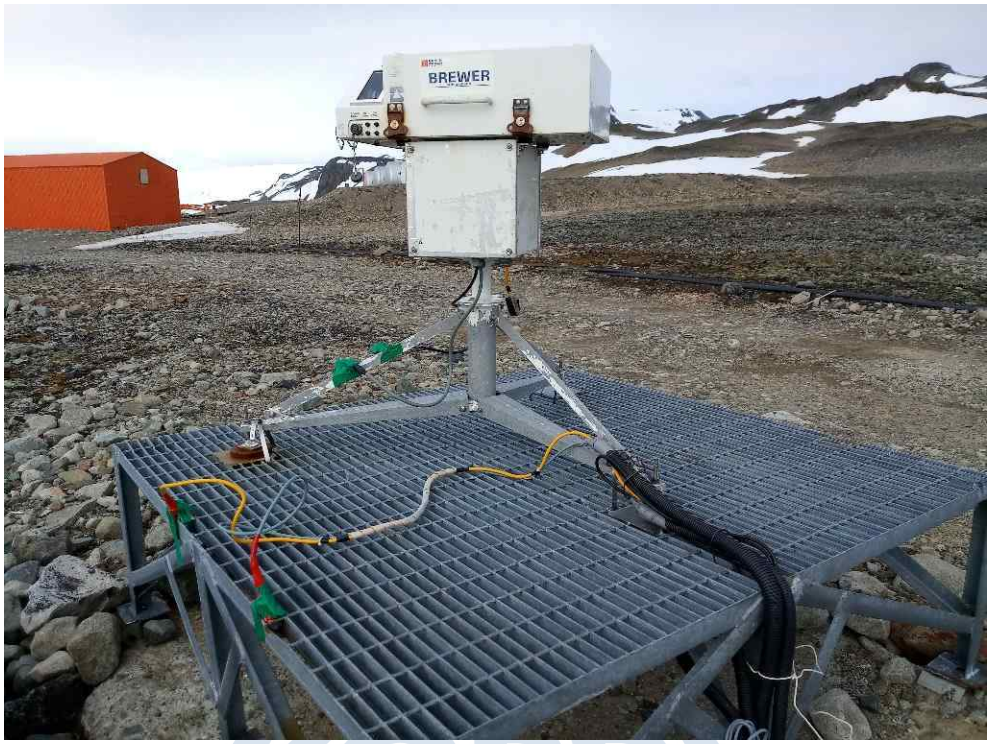


그림 2-2. 세종기지에 설치된 브루어 분광광도계(#122)

최종적으로 기기 문제를 점검하는 과정에서 확인된 부분과 확인할 부분들을 일지형식으로 기록해두었는데, 예상치 않은 문제가 발생했을 경우 대처하는 과정에서 유의미한 정보로 활용될 가능성이 있기에 아래의 내용과 같이 기록하였다.

- 1월 6일: 브루어 장비 배송되어 온 현황 및 브루어 장비 설치 위치, 연결된 PC가 놓인 관측동 위치 등에 대해서 간단히 점검함.
- 1월 7일: 기기 설치 완료. 트랙커 내부에 Safety switch가 끊어져 있었으며, 전원 통신 케이블이 전기 테이브로 밀봉되어 있었지만, 야외에 방치되어 있어서 건조 작업이 필요함. 또한 브루어의 제습제를 교체하고 수평을 제대로 맞출 필요가 있었음. 세종 과학 기지 대기 관측동 내부 브루어 기기용 PC는 통신 케이블과 RS232 컨버터로 직접 연결되어있는 상태
- 1월 8일

  1) 트랙커의 Safety switch를 재설치함.

  2) 브루어를 가동하여 통신연결을 확인하였고, 스케쥴을 통해 HG 테스트를 정상적으로 수행하는 것을 확인하였지만 지속적인 통신 연결은 실패하였음. 이 과정에서 관측동 주위에 있는 고층대기 관측 기기에서 노이즈가 관측된다는 담당 월동대원의 문의가 있어서, 이를 제거하기 위한 용도의 금속 물체를 설치하였음.

3) 전원연결을 해제하고 모든 케이블 분리 후 다시 트랙커를 남향으로 하고(아직 정확하게 GPS를 이용한 정남 방향을 찾지 못하였으나, 현 시점에서 가장 남쪽을 향하고 있는 삼발이 발을 기준으로 연결) 본체 및 케이블까지 재연결 하였음. 작동이 되다가 멈춘 이유에 대한 점검을 위해 9일 월동대 전기 설비 대원에게 문의할 예정임. 현재는 전원 케이블의 단선을 가장 큰 원인으로 의심하고 있음 (트랜스와 전원 플러그 연결 상태가 좋지 못했고 그 사이에 케이블 무게에 의해 전원 케이블 플러그 부분에서 단선이 생겼을 가능성을 추측).

- 1월 9일

1) 점검 결과 브루어 110V 전원 플러그와 트랜스의 110V 전원 연결이 좋지 않아서 브루어 전원이 잘 들어오지 않았던 것으로 추측됨. 전기 대원이 전원의 플러그 연결을 새로 개선하여 브루어 전원이 정상적으로 들어오는것을 확인하였음.

2) 오류 해결 후, 소프트웨어를 이용하여 가동을 시작하였고, EPA2 스케줄 실행하여 브루어 작동을 점검함. 기기 자체는 스케줄대로 작동하고 있는 것을 확인(현재 비가 오는 환경에서 solar alignment가 전혀 이루어지지 않아서 직달 관측은 불가하고 오존의 천정 관측과 UV도 관측 수행 중임을 확인.

- 현재 세종 브루어에 사용되는 파일
  icf22217.122 zsf30994.122 dcf22117.122 uvr22317.122

- 브루어에 연결되는 컨버터가 COM포트가 1 ,2이 아닌 경우, 프로그램 사용은 불가능함(Com-error). 이 경우 장치 관리자에서 포트 번호를 바꿔준 다음 icf 파일에 정확하게 넣어줘야 함.

참고) 겨울철 브루어 보관 여부: 과거 세종기지에서는 동절기에 브루어 덮개를 사용했다가(Volodia 통해 구했다고 함) 이 덮개가 낡아서 더 이상 사용하기 어려워진 이후로는 그냥 브루어를 있는 그대로 방치했다고 함(기본 물품 인 브루어 광학 돔 덮개도 현재 없음). 월동대 박상종 박사와의 논의를 통해 패트병 등으로라도 광학부를 보호한 후 방수천등을 이용하여 동절기에 브루어를 덮어두는 형태로 보호할 예정임.

참고) 현재 세종기지 브루어 트랙커는 on/off 스위치 작동이 안됨. 전원 연결하면 무조건 켜지는 상태임.

- 1월 10일

짙은 안개와 구름, 옅은 비로 인하여 직달 관측이 쉽지 않은 상황. 현재 일기예보상으로는 1월 13일까지 이와 같은 날씨가 이어질 것으로 예상되기 때문에, 이후에 직달 관측 조정을 할 수 있을 것으로 생각됨.

- 월동대원: 실리카겔은 드라이 오븐 등을 이용하여 다시 사용 가능할 수 있을

것으로 보임. Wet lab 정리되고 나면 실리카겔 건조 부탁드릴 것.

- 추가 확인할 상황: 과거 세종기지에서 브루어 기기 110V 플러그를 다루던 방법 확인, 통신 케이블 단선 경우 납땜할 필요 (통신케이블 예비품은 후에 연세대에서 구입하여 물품을 보낼 예정+킴와이프스 등).
- 고층대기 대원: 고층 대기 쪽 기기에서 노이즈 관측 더이상 없음.

• 1월 11일

1) 11시경부터 태양이 나타난 시간을 활용하여 SR 및 SI 테스트를 수행. SR 테스트 결과 5 정도 차이가 발생하여 새로운 테스트 값을 저장하였고 SI 테스트 결과 up/down 값에서 많은 보정이 이루어졌음. Iris viewer를 통해 태양의 위치가 한가운데 올 수 있도록 조정하였음.

2) GPS를 이용하여 남쪽 방위 확인하였음. 삼발이의 남향이 약 20-30° 틀어져서 설치되어있는 것을 확인. 수평계를 이용하여 살펴본 결과 수포가 약간 기울어진 부분이 존재함. 현재 이슬비가 내리고 있어서 수평 작업은 이후로 계획함.

• 1월 12일

블리자드 후, 기기에 눈이 달라붙어 얼게 되면 특정 부위에 무게가 증가하여 불균형이 일어날 수 있음(그림 2-3). 월동대가 매일 관리하면서 제거할 필요가 보이고 겨울에 씌워 둘 보호막을 준비할 필요가 있음.

그림 2-3 세종기지의 블리자드 후, 브루어 기기의 상태

• 1월 13일

1) 기기의 수평을 조정하려고 했으나 본체 상부 평면이 평평하지 않고 조금씩 뒤틀려 있어서 수평계를 사용하기 쉽지않은 상황(육안으로도 뒤틀려 있는 것을 확인). 일단 여러 지점에 수평계를 놓고 살펴본 결과(그림 2-4), 지점별로 수평계 수포의 상태가 달라서 어느 부분을 기준으로 삼아 수평을 조절해야 하는지를 정하기 쉽지 않은 상황. 전체적으로 크게 수평이 어긋나 있는 느낌은 아니라 현재 상태 그대로 두고 관측을 진행하는 것으로 결정.

그림 2-4 세종기지 브루어의 위치에 따른 수평 상태

2) GPS로 확인한 남쪽 방향을 청색 테이프 띠로 표시해둠. 삼발이 발이 가리 키는 방향이 약 20-30도 정도 비스듬하게 위치하고 있음(그림 2-5).

그림 2-5 세종기지 삼발이 설치 상태(녹색 선: 실제 GPS에서 나타나는 남향의 위치)

3) 일 변동을 살펴보았을 때 zenith 관측 오존전량과 이산화황의 경우, 태양고도의 변동성 패턴을 그대로 보이고 있었음(그림 2-6). Zenith O_3을 통해 추측해보면 태양의 고도가 높아서 자외선 복사량이 높아짐에 따라 오존량을 낮게 관측하는 경향을 보이고 있음. 남극의 다른 관측기지에서도 세종기지와 동일한 특징이 나타나는지 생각해 볼 필요가 있음.

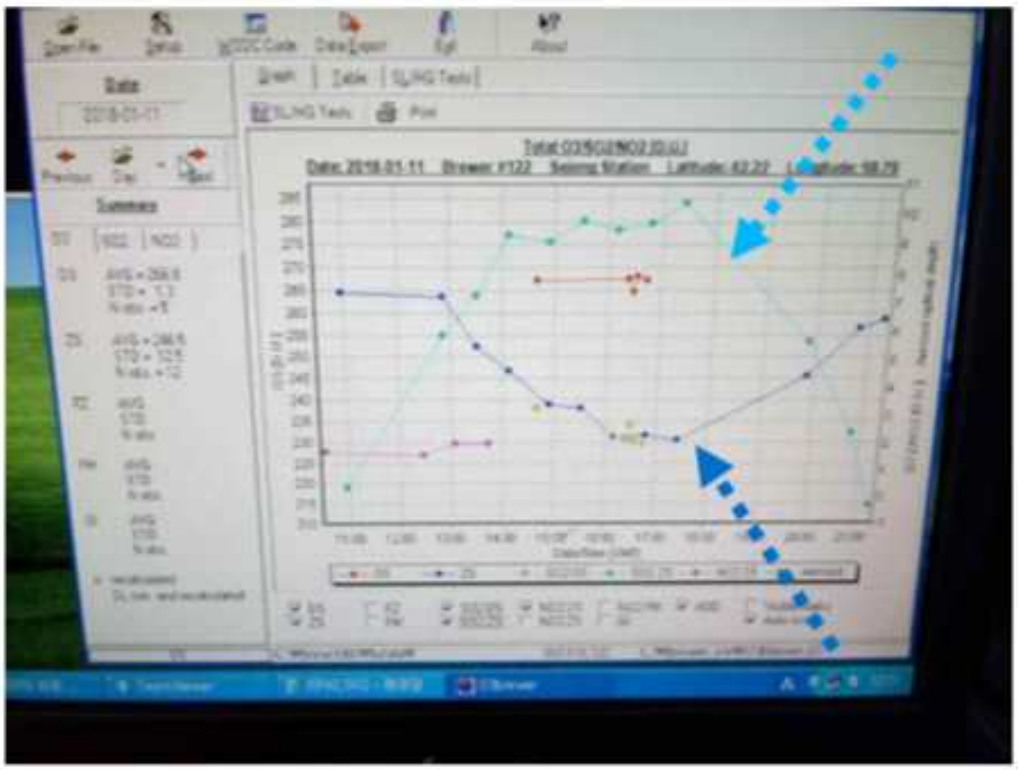


그림 2-6 세종기지의 2018년 1월 11일의 오존전량과 이산화질소 변화 추이

그림 2-7 트래커의 수평 나사의 상태

- 1월 14일

1) 온난한 날씨로 전원끄고 트랙커 청소실시(킴와이프스를 이용하여 회전 원판둘레 닦음)

2) 기기의 수평을 맞추는 작업을 실시. 문제는 본체 상부에서 수평계의 위치에 따라 수평이 달라지기 때문에 수평을 정확하게 평가하기가 어려움. 트랙커와 본체의 수평을 조절해주는 상부의 세 개 나사 중 한 개만 조절 이 가능함(그림 2-7). 나머지 두개는 완력으로 도저히 조절할 수 없는 수준으로 굳어져 있어서 높이 조절이 불가능한 상황임.

- 1월 15일

1) WD-40을 구해서 트랙커 높이 조절 나사에 뿌려가며 돌려보았으나 나사가 움직일 기미가 보이지 않음. 다시 수평조절 나사를 돌리는 시도를 해보았으나, 기기 외부에 손상을 가할 수 있을 정도로 굳어 있음을 확인(오랜 시간 사용하지 않음이 원인으로 보임, 그림 2-8).

2) 브루어 zenith 관측에서 수평의 중요성이 상당하기 때문에 자료의 품질을 많이 포기하게 되는 결정이긴 하나 일단 가장 기본인 직달 오존 관측은 SR, SI 테스트만 제대로 하면 어느 정도 품질을 보장할 수 있기 때문에 기본 목적에 충실할 수 있게 준비를 수행함.

3) Kit를 이용하여 램프테스트를 하려고 했으나 이 역시 오랜 미사용이 문제로, 일부 연결부위 문제(핀의 망실), 미세 전류 조절의 어려움(12.00V로 고정되지 않음)으로 일단 철수.

4) 세종기지에 외부램프 테스트 장비는 두 박스가 있음. 2009년 12월 이전까지 사용하던 박스와 그 이후. 그 이전 kit 박스는 더 이상 사용하지 않는다는 메모가 박스에 남겨져 있음. 램프 키트의 경우 전압이 12.000 볼트에서 고정되지 않아(미세 조정 기능이 정확하지 않은 상태로 보임) 일단 키트 테스트를 정지하였으며, 2019년 현재까지 외부 램프 테스트를 수행하고 있지 않음. 향후 연구비 지원이 있거나 극지연구소 자체적으로 재료비의 여유가 있을 경우 브루어 분광광도계 검보정용 키트를 추가 구매를 하는 방법, 또는 향후 검보정 수행시 키트 박스도 함께 업체에 점검을 의뢰하여 필요할 경우 수리를 진행하는 것도 생각해 볼 필요가 이음 (비용을 잘 비교해볼 필요가 있음)

5) 월동대원에게 수은램프 교체법, 트랙커 휠 청소법, 실리카겔 교체 및 마이크로미터 청소법 등을 인수인계함. 날씨 맑은 날에 박상종 박사님과 함께 SR/SI 테스트 진행하여 태양 정렬하는 법만 인수인계하면 큰 틀에서 기기 유지 방법의 전수가 완료될 것으로 생각됨.

그림 2-8 세종기지 브루어의 수평 상태

마. 세종기지 브루어와 연세대학교 브루어 설치 상태 및 구조

- 연세대학교와 세종기지 브루어의 버전은 MKIV으로 단일 Micrometer를 가지고 있음(그림 2-9)
- 연세대 브루어는 서지 프로텍터가 트랙커에 용접되어 있지만, 세종기지 브루어는 떨어져 있는 상태(그림 2-10, 그림 2-11). 또한 연세대와 같이 트랙커에 부착되

어 있지 않아 내부 회로가 외부로 그대로 노출되어 있기때문에 이로 인한 파손 여부가 의심됨(세종기지에서 어떤 형태로 노장에 연결되어 있었는지 파악이 필요함).

그림 2-9 세종기지와 연세대 브루어의 본체의 사진

KOPRI

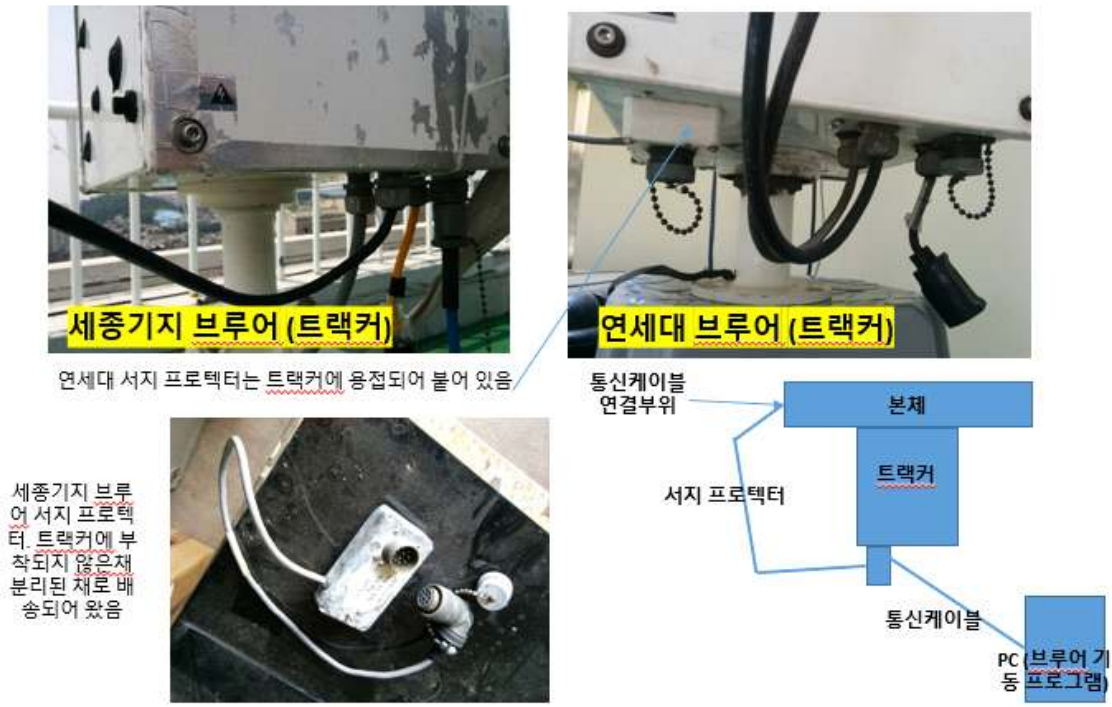


그림 2-10 세종기지와 연세대 브루어 트랙커의 차이

그림 2-11 세종기지 브루어의 서지 프로텍터 내부의 모습

그림 2-12 세종기지와 연세대 브루어의 트랙커의 차이

- 연세대 트랙커는 철제로 된 연결부위 4곳이 존재하여 브루어 본체와 트랙커를 나사로 연결되어 결합되게 되었음 (그림 2-12). 현재 세종기지 브루어 트랙커에는 이

부분이 강제적으로 분리되어 있어 있어서 확인이 필요함.
- 세종기지는 그림 2-13과 같이, SI 테스트에 사용되는 버튼이 작동 불가하여 조절하기 어렵기 때문에 컴퓨터의 키보드로 조절해야 함.
-

그림 2-13 세종기지 브루어의 버튼

극지연구소

바. 과거 세종기지 브루어의 오류 내용
- 2015. 12. 18, 월동 대원 보고
Brewer 장비 경우, 스케쥴이 계속 돌아가지 않고, 매번 재작동을 해줘야 하는 상태. 장비 자체도 값은 나오지만, 방위각 설정을 위한 조정이 불가함.

- 2016. 1. 20, 1차 보고, 월동 대원 보고
스케줄프로그램이 정상적으로 적용되지 않는 문제에 대하여 정비예정

- 2016. 2. 5, 2차 보고, 월동 대원 보고
스케줄프로그램이 정상적으로 적용되지 않는 문제에 대하여 정비예정

- 2016. 2. 20, 3차 보고, 월동 대원 보고
스케줄프로그램이 정상적으로 적용되지 않는 문제에 대하여 정비중. SI test오류 / BREWER 내부 정비 예정

- 2016. 3. 3, 4차 보고, 월동 대원 보고
스케줄프로그램이 정상적으로 적용되지 않는 문제에 대하여 정비중. BREWER 내

부 정비 예정

- 2016. 3. 20, 5차 보고, 월동 대원 보고
tracking이 제대로 이루어지고 있지 않는 것으로 추정. BREWER 내부 습도가 높음

- 2016. 4. 3, 6차 보고, 월동 대원 보고
· BREWER Tracker 청소
· BREWER 내부 제습제 교체
· 문제보고
  - SI test 시 Azimuth zeroing 실패 메시지와 함께 test가 진행되지 않음.
  - SR test 시 조리개 뷰포트를 통해 집광점을 맞출 수 없음.
. 조치사항
  - BREWER Tracker 청소
  - SI test 재실행하였으나 실패

- 2016. 4. 20, 7차 보고-11차 보고 (6.20), 월동 대원 보고
"보고된 문제 미해결상태로 운영중"

2. 동/서남극 지상, 위성 오존 전량 관측 상호 비교 (2017-2019년 분석 위주)

서남극 지역의 세종과학기지와 동남극 지역의 장보고 과학기지에 각각 1994년, 2014년에 설치된 지상 오존 관측장비 브루어 분광광도계는 해당 지역의 오존 전량과 오존 Profile 값을 관측하게 한다. 해당 3개년 과제에서 보고자 하였던 남극 지역적 차이 원인 규명을 위해 세종과학기지와 장보고 과학기지에서 관측하였던 각각의 오존 전량 값을 Time series에 대하여 비교를 하는 작업을 하였다.

더불어 두 지역에 대한 지상관측 값과 동시에 Aura 위성의 Ozone Monitoring Instrument (OMI) 센서에서 산출된 오존 전량을 사용하여 위성에서 관측한 두 지역의 오존 전량의 차이를 비교하는 과정을 가졌다. Aura 위성에 탑재된 OMI 센서는 2004년부터 극 지역의 오존 전량 값을 관측해왔다. 그리고 각각의 기지에 대하여 지상 오존 관측장비 브루어 분광광도계의 오존 전량값과 위성자료 값과의 비교하는 작업을 수행하였다.

먼저 서남극 지역에 위치한 세종과학기지에서 관측한 지상 관측 오존전량과 동남극 지역에 위치한 장보고 과학기지에서 관측한 지상 관측 오존전량과의 비교 및 분석 결과를 다음 그림들과 같이 정리해보았다. 시계열 그래프에서 세종과학기지 자료는 빨간색 점으로, 장보고 과학기지 자료는 파란색 점으로 표시되었다.

먼저 브루어 분광광도계의 direct sun 및 zenith sky 관측모드로 측정한 오존전

량 값을 비교해보았다 (그림 2-14). 두 기지의 지상에서 측정한 오존 전량값 중 표준편차(Standard deviation)의 값이 1.0 이하인 값들에 한해서 두 지역을 비교하였다. 지상 오존 관측의 정확성을 높여주기 위하여 이러한 방식을 사용하는데 그림을 살펴보면 장보고 과학기지의 경우 2017년도 상반기에는 Direct Sun 관측 없이 Zenith Sky의 관측만 이루어졌다. 또한 세종과학기지의 경우 2018년 초에 브루어 장비가 철수 후 재설치되는 과정에서 2017년까지의 관측기록이 누락되어 자료가 존재하지 않음을 알 수 있다. 비교 결과 장보고 기지에서의 오존 전량 값이 상대적으로 다소 높게 관측되는 특징을 찾아볼 수 있었는데 이는 세종 과학 기지가 위치하는 서남극 지역의 성층권 오존 파괴가 보다 더 크고 강하게 발생할 수 있음을 의미한다.

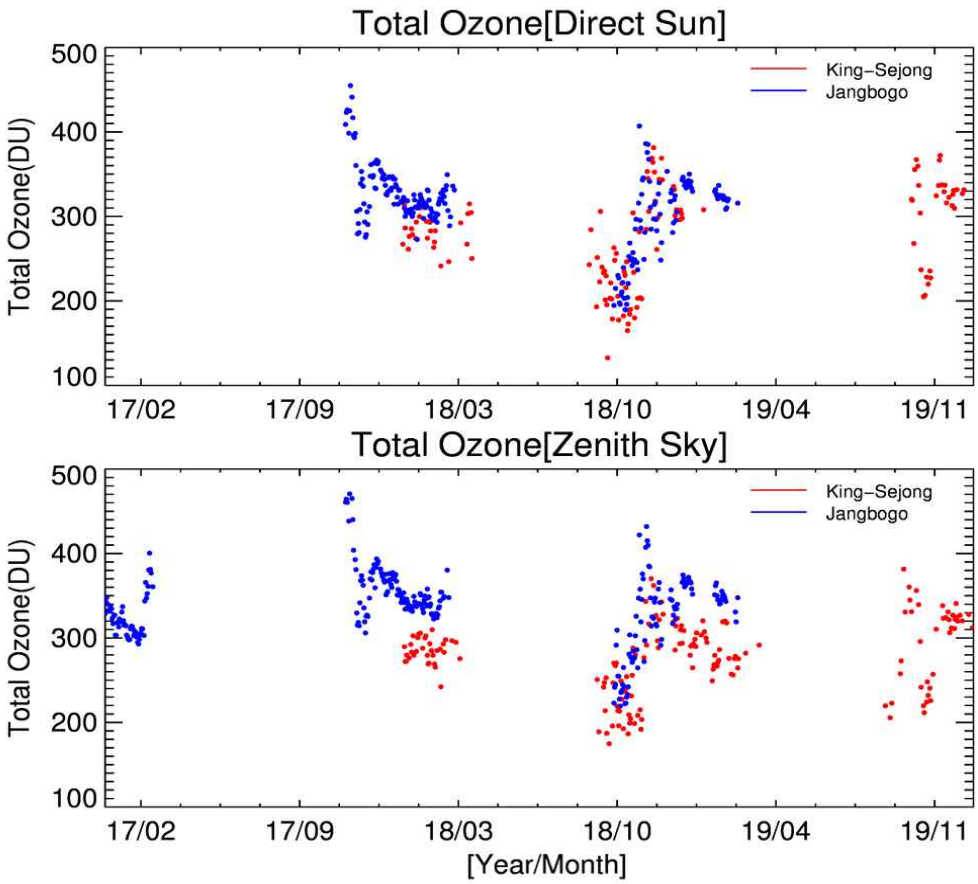


그림 2-14. 세종과학기지와 장보고 과학기지에 설치된 Brewer을 통해 각각 측정한 지상 오존 전량. 태양을 바라보며 관측하는 Direct Sun 비교(위) 및 태양없이 하늘을 보며 관측하는 Zenith Sky 비교(아래).

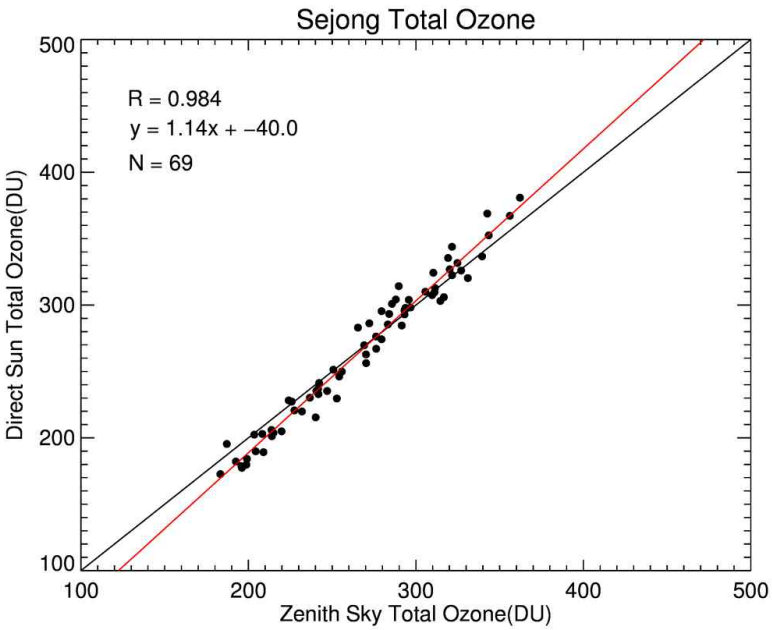


그림 2-15. 세종과학기지에 설치된 브루어 분광광도계를 사용하여 관측한 지상 오존 전량값 중 Direct Sun과 Zenith Sky 간의 상관관계 비교.

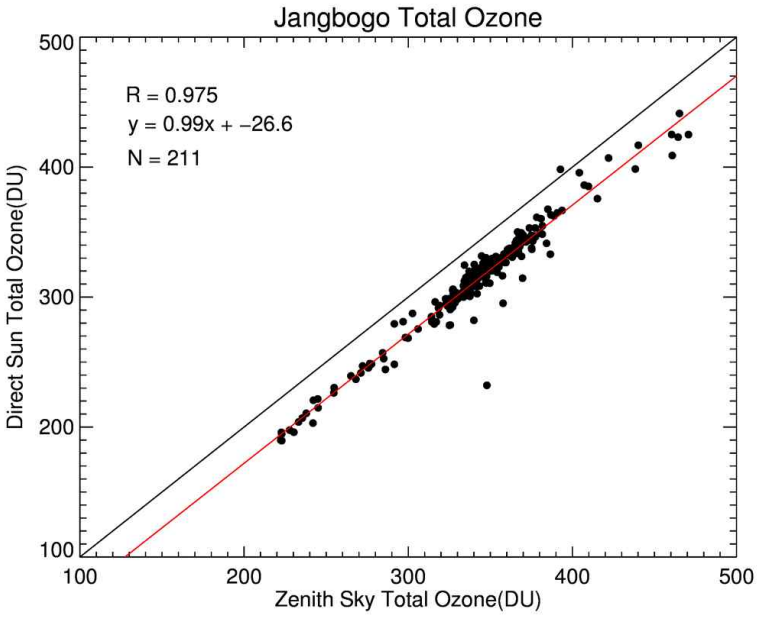
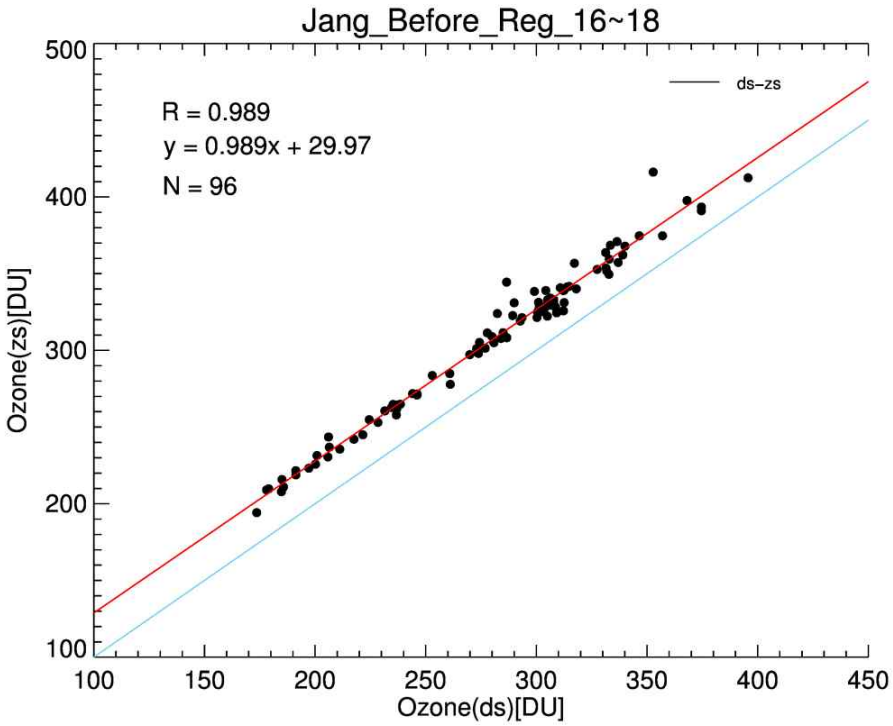


그림 2-16. 장보고과학기지에 설치된 브루어 분광광도계를 사용하여 관측한 지상 오존 전량값 중 Direct Sun과 Zenith Sky 간의 상관관계 비교.



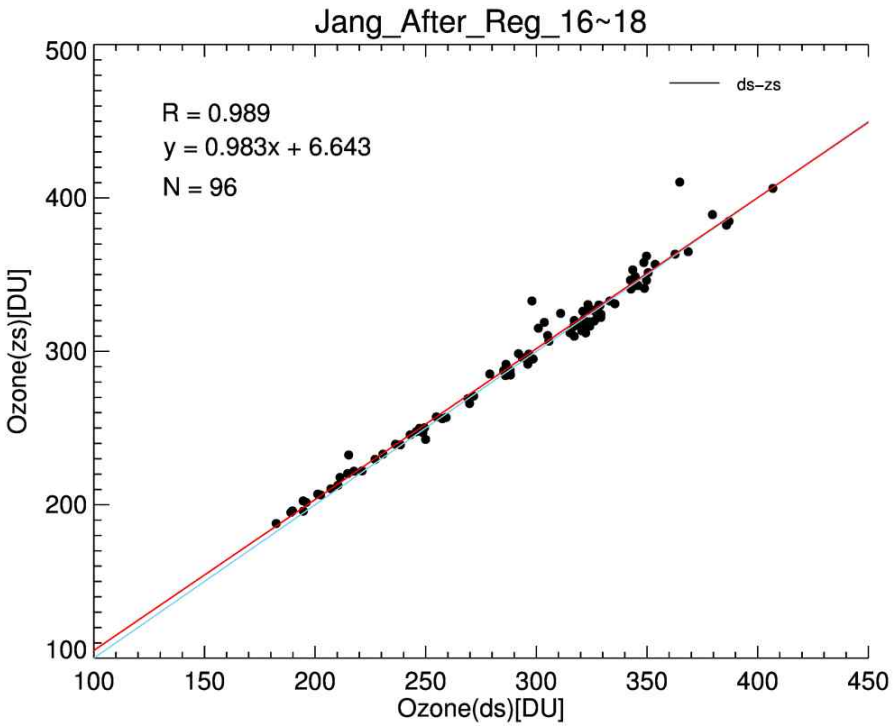


그림 2-17. 장보고기지의 2016년도 ICF 보정파일 적용 및 Skychart 적용 후 Direct sun과 Zenith Sky 오존측정값 비교 결과

시계열 분석 이후 세종 및 장보고 과학 기지에서 브루어 분광광도계의 direct sun 관측과 zenith sky 관측 사이의 일치도를 상관관계 그림을 통해 각각 살펴보았다 (그림 2-15, 2-16). 두 기지에서 관측한 값 중 결과 값이 존재하면서 동시에 두 기지 모두 존재하는 날에 대하여 상관관계를 분석하고자 했는데 2017-2019년 분석 기간 동안 이런 분석을 가능하게 하는 Direct Sun의 관측결과 수는 60개이고, Zenith Sky의 관측결과 수는 86개로 태양없이 관측한 지상 오존 전량관측 횟수가 26회 정도 더 많은 것을 확인할 수 있다. 두 관측소 모두 direct sun 오존전량과 zenith sky 오존 전량 사이의 일치도가 나쁘지 않게 나타났으며 특히 세종기지의 경우에는 거의 1:1 비율을 유지하고 있음을 확인할 수 있었다. 다만 장보고 기지의 경우 상관관계는 좋으나 일괄적으로 zenith sky 오존전량값이 크게 나타나고 있는 특징이 확인된다 (그림 2-16). 선형회귀식 결과를 감안하면 일관되게 25 DU 정도 높게 나타나는데, 비록 bias가 존재하지만 굉장히 일관적인 차이가 나타나기 때문에 이 offset값의 조절을 통해 두 관측자료의 일치되는 부분을 찾을 수 있는 점은 고무적이다.

zenith sky 관측은 direct sun 관측 모드와 달리 직달 일사가 존재하지 않아도 산란된 태양복사 값을 이용하여 오존 전량 측정을 할 수 있기 때문에 흐린 날의 관측을 추가적으로 수행할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 관측 방식의 차이로 인하여 이 두 관측 자료를 어떻게 활용해야 할지는 반드시 상호간의 비교를 통해서 결정해야 한다. 일반적으로는 가장 이론에 가까운 상황, 즉 태양광의 직달 일사 값을 이용하여 측정한 direct sun 오존전량 관측 결과를 가장 표준값으로 생각하기 때문이다. 하지만 위 그림 2-15 및 2-16 결과를 보면 zenith sky 오존전량값 결과가 크게 차이나지 않음을 확인할 수 있어서 관측 경우의 숫자가 더 많은 zenith sky 결과를 어느 정도 사용해볼 수 있는 여지가 확인된다. 물론 이 비교는 direct sun 및 zenith sky 관측 모드가 모두 가능한 상황, 즉 clear sky에 준하는 경우에 해당하기 때문에 direct sun 관측이 완전히 어려운 상황에서 zenith sky 값을 어디까지 신뢰할 수 있을지는 엄밀하게 또 다른 문제라고 할 수 있지만 기본적으로는 zenith sky 관측값의 신뢰도를 보여주는 결과로 볼 수 있다. 향후 운량 자료를 복합적으로 고려하여 운량에 따른 direct sun과 zenith sky 오존 전량 관계의 특성을 비교한다면 조금 더 zenith sky 오존 전량값을 잘 활용할 수 있는 방법을 얻을 수 있을 것으로 보인다. 단 이러한 분석을 위해서는 좀 더 장기간의 관측 자료가 요구되난.

브루어 분광광도계 제작, 관리사에서는 Skychart 라는 프로그램을 통해 장보고 기지의 데이터가 1:1축에서 멀어지는 것을 보정할 수 있게 도와주고 있다. 그림 2-17은 이 Skychart 프로그램 시행 이전, 이후에 오존전량 비교 결과에 대해서 살펴본 것이다. 이 과정에서 요구되는 기본 정보가 세종과학기지에는 존재하지 않아서 해당 프로그램은 장보고 기지 관측 결과에만 적용하여 살펴보았다.

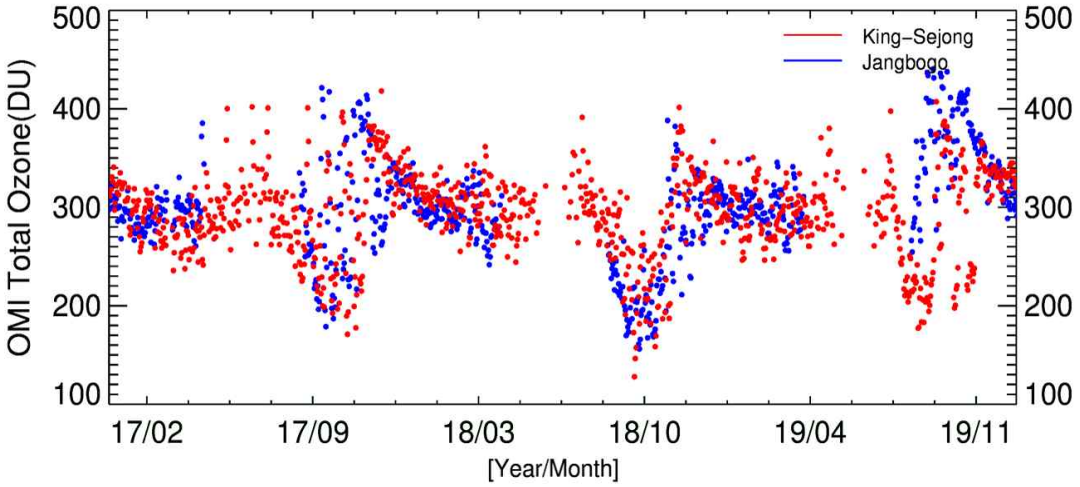


그림 2-18. 세종 과학기지와 장보고 과학기지에서 각각 OMI 센서로 측정한 3년간의 오존 전량을 시계열에 따라 비교한 결과

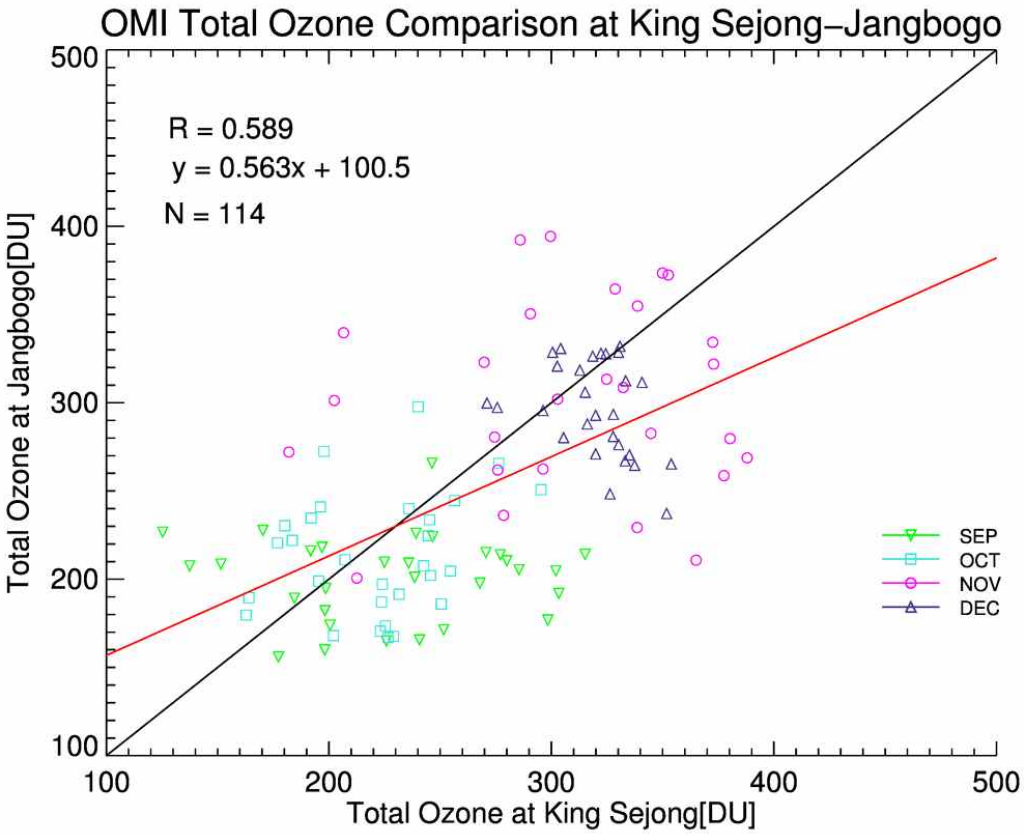


그림 2-19. 2018년 1년간 세종과 장보고 기지에서 관측한 오존전량과 OMI 센서의 계절별 (9, 10, 11 및 12월) 상관관계 결과

세종 및 장보고 기지 상공에서 OMI 위성 센서로 관측한 오존 전량값에 대한 비교는 그림 2-18 및 그림 2-19와 같다. 그림 2-18을 보면 장보고 기지와 세종 기지에서의 오존 전량값이 분석 기간 (2017 - 2019년) 사이에 그렇게 차이를 크게 보이지 않고 있는데 이것은 그림 2-14 결과와 약간의 차이가 있다. 그림 2-14의 브루어 분광광도계가 관측한 오존 전량의 경우는 direct sun 관측은 비슷한 값의 범위를 가지지만 zenith sky 관측의 경우는 장보고 기지에서 조금 더 오존 전량이 크게 나타나는 경향이 발견되었기 때문이다. 이는 앞서 이야기한 브루어 분광광도계 관측에서 존재하는 offset 값의 영향으로 봐야할 필요가 있다. 일반적으로 지상 관측 자료를 표준값으로 사용하기 때문에 브루어 분광광도계 자료를 표준값으로 만드는 작업을 수행해야 할 필요가 있다고 본다.

그림 2-19 결과는 장보고 기지와 세종 기지 상공 OMI 센서의 오존 전량 관측값의 상관관계를 남반구 봄철인 9, 10, 11, 12월에 대해 나누어 살펴본 결과이다. 11월에 가장 차이가 크게 퍼지는 느낌이 나타나는데 이것은 세종 기지의 위도 (약 남위 63도)와 장보고 기지의 위도 (약 남위 72도) 차이에 의한 성층권 오존 파괴 특성의 차이가 11월 정도가 되면 크게 나타나기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 또는 11월에 기상 패턴의 차이가 세종 및 장보고 기지 사이에 크게 발생하기 때문에 오존 전량 관측치의 차이가 나타나는 것으로도 해석할 수 있다. 이 부분에 대한 상세한 분석이 추후 좀 더 이루어져야 할 것으로 보인다.

이어서 세종기지 브루어 분광광도계 direct sun 관측 오존 전량과 OMI 오존 전량과의 시계열 비교 및 상관관계 분석 (그림 2-20 및 2-21), 세종기지 브루어 분광광도계 zenith sky 관측 오존 전량과 OMI 오존 전량과의 시계열 비교 및 상관관계 분석 (그림 2-22 및 2-23), 장보고기지 브루어 분광광도계 direct sun 관측 오존 전량과 OMI 오존 전량과의 시계열 비교 및 상관관계 분석 (그림 2-24 및 2-25), 장보고기지 브루어 분광광도계 zenith sky 관측 오존 전량과 OMI 오존 전량과의 시계열 비교 및 상관관계 분석 (그림 2-26 및 2-27)을 각각 차례로 수행하였다. 상관관계 자체는 세종기지에서는 상관관계계수 0.9 이하, 장보고 기지에서는 0.9 이상으로서 장보고 기지 쪽이 좀 더 좋게 나타나는데 이건 일단 분석에 활용한 자료의 숫자 차이가 크게 나타나는 부분을 감안해야할 필요가 있다. 즉 장보고 기지의 관측이 상대적으로 짧기 때문에 나타나는 특성으로 볼 수 있다. 훨씬 더 크게 짚어봐야 할 부분은 offset 부분인데 세종기지에서는 브루어 기기 관측 오존 전량 자료와 OMI 오존 전량 자료가 상대적으로 1:1 선에서 수렴하는 경향을 보이는 반면 장보고 기지 브루어 기기 관측 오존 전량은 OMI 관측 오존 전량에 비해 아주 일관적인 크기로 크게 나타나는(과대평가) 경향을 보이고 있다. 무언가 장보고 기지의 관측이 전반적으로 일정한 bias를 나타내고 있는데 이것이 브루어 기기 자체의 문제 때문인지 지역 특성에 따른 문제인지는 조금 더 고민해야할 필요가 있다.

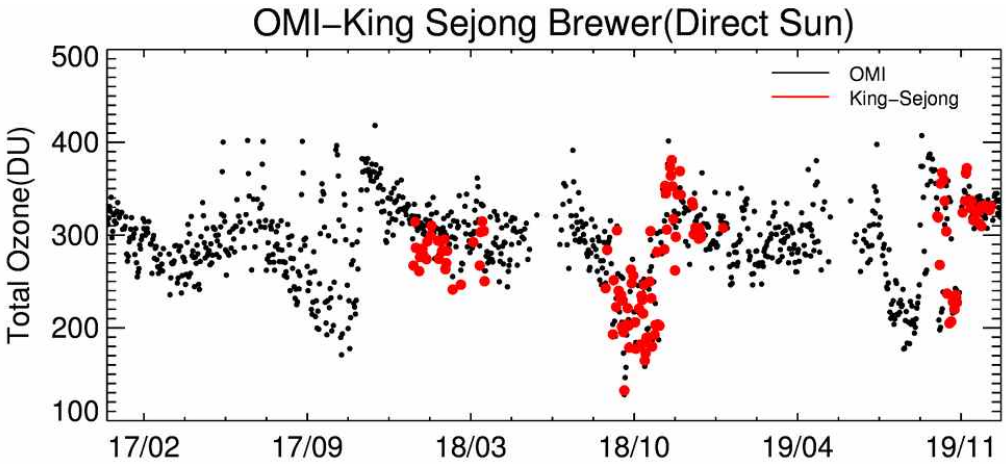


그림 2-20 .세종과학기지 관측소에서 3년간 브루어 분광광도계로 측정한 오존 전량(Direct Sun)과 관측소 상공의 OMI 오존 전량과의 시계열 비교

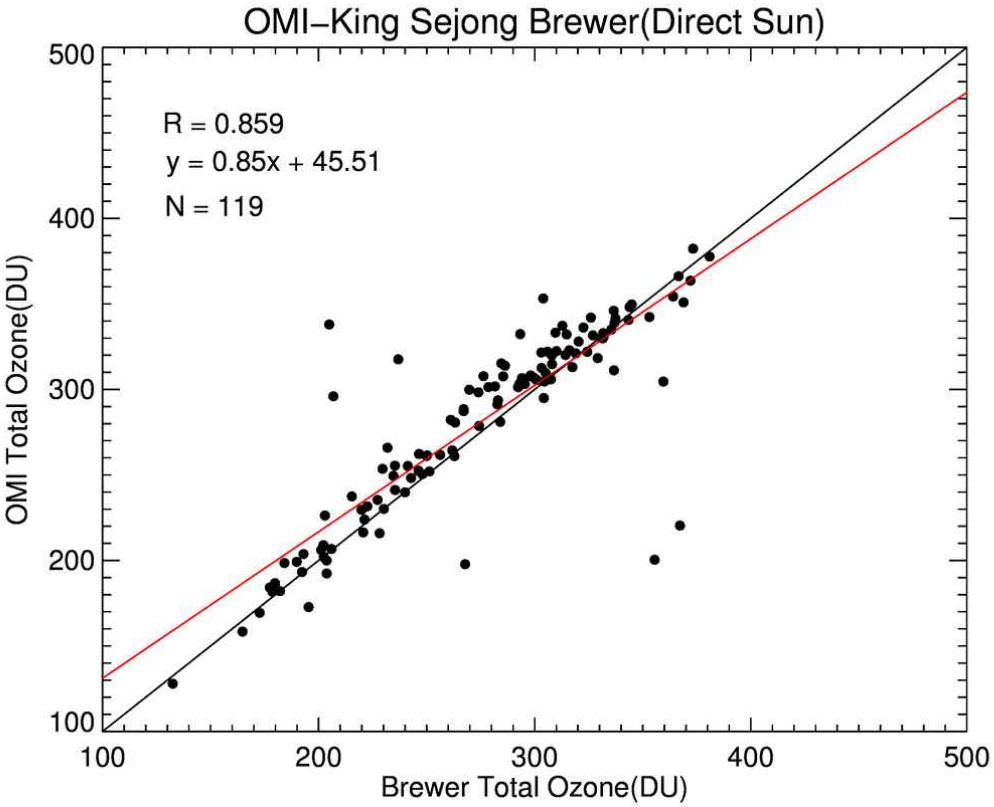


그림 2-21. 세종과학기지 관측소에서 3년간 브루어 분광광도계로 측정한 오존 전량(Direct Sun)과 관측소 상공의 OMI 오존 전량과의 상관관계 비교

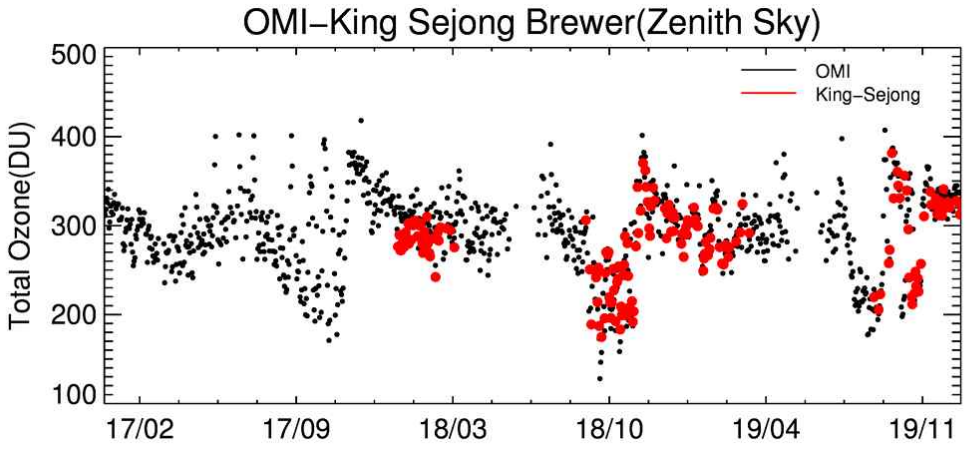


그림 2-22. 세종과학기지 관측소에서 3년간 브루어 분광광도계로 측정한 오존 전량(Zenith Sky)과 관측소 상공의 OMI 오존 전량과의 시계열 비교

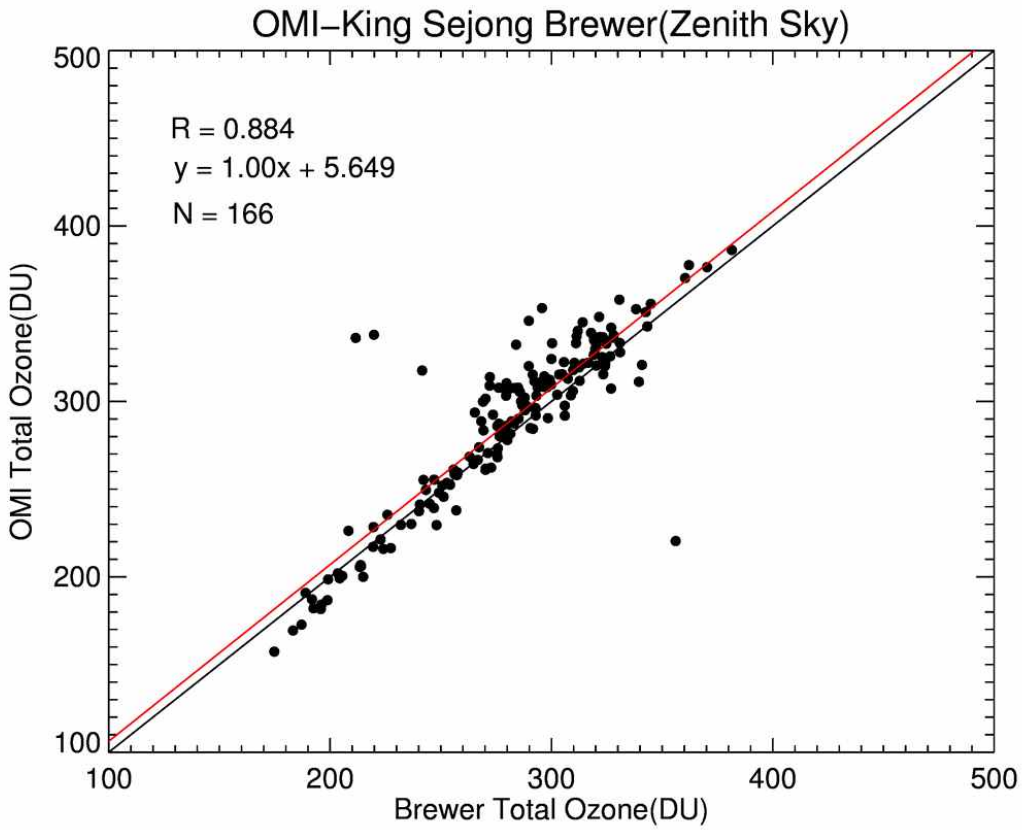


그림 2-23. 세종과학기지 관측소에서 3년간 브루어 분광광도계로 측정한 오존 전량(Zenith Sky)과 관측소 상공의 OMI 오존 전량과의 상관관계 비교

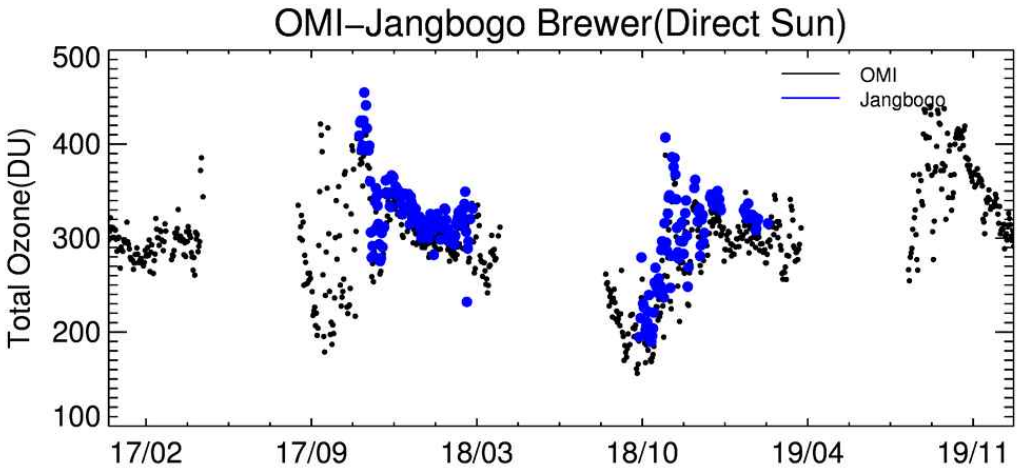


그림 2-24. 장보고과학기지 관측소에서 3년간 브루어 분광광도계로 측정한 오존 전량(Direct Sun)과 관측소 상공의 OMI 오존 전량과의 시계열 비교

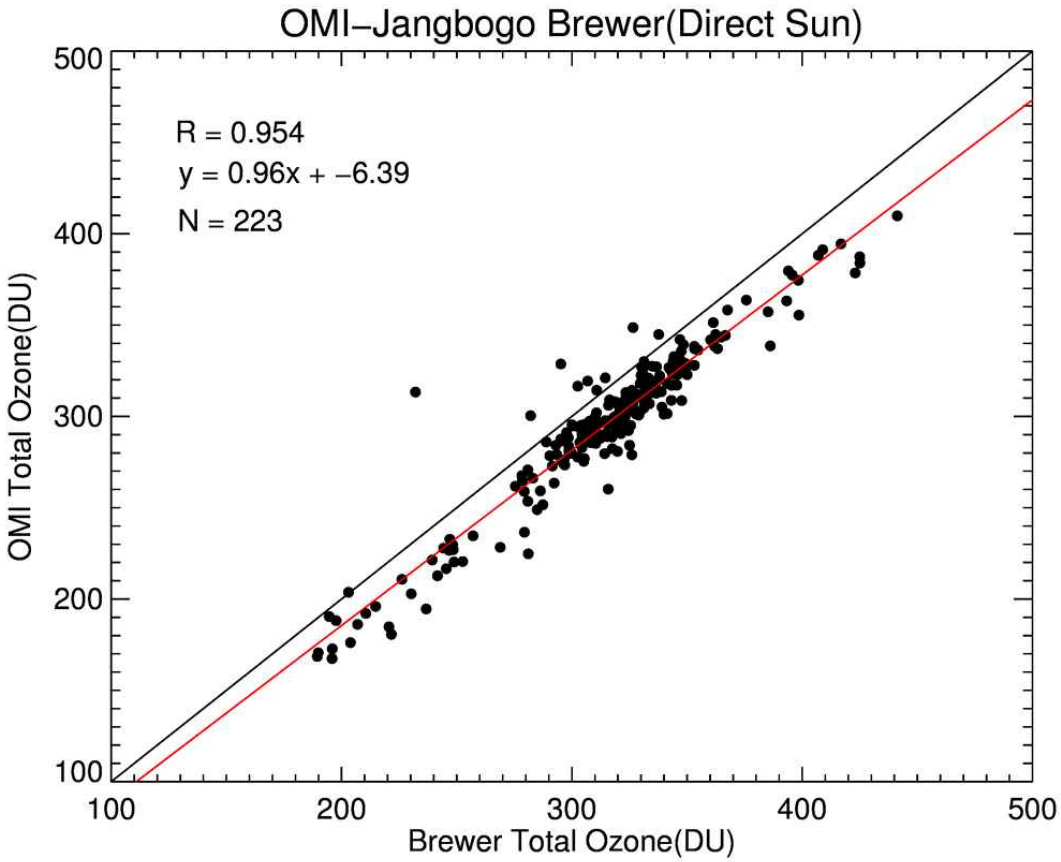


그림 2-25. 장보고과학기지 관측소에서 3년간 브루어 분광광도계로 측정한 오존 전량(Direct Sun)과 관측소 상공의 OMI 오존 전량과의 상관관계비교

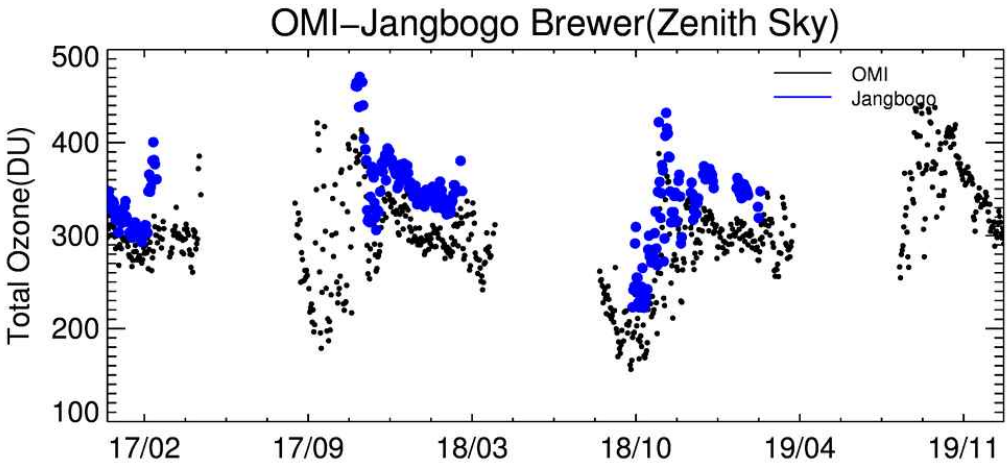


그림 2-26. 장보고과학기지 관측소에서 3년간 브루어 분광광도계로 측정한 오존 전량(Zenith Sky)과 관측소 상공의 OMI 오존 전량과의 시계열 비교

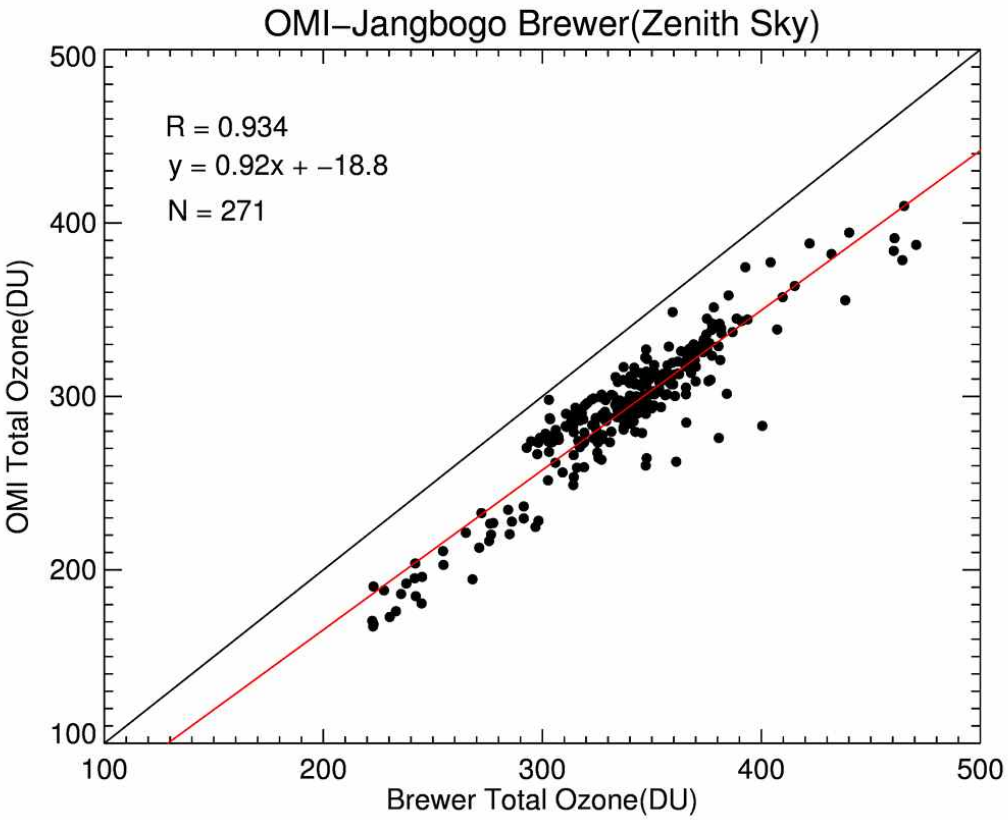


그림 2-27. 장보고과학기지 관측소에서 3년간 브루어 분광광도계로 측정한 오존 전량(Zenith Sky)과 관측소 상공의 OMI 오존 전량과의 상관관계 비교

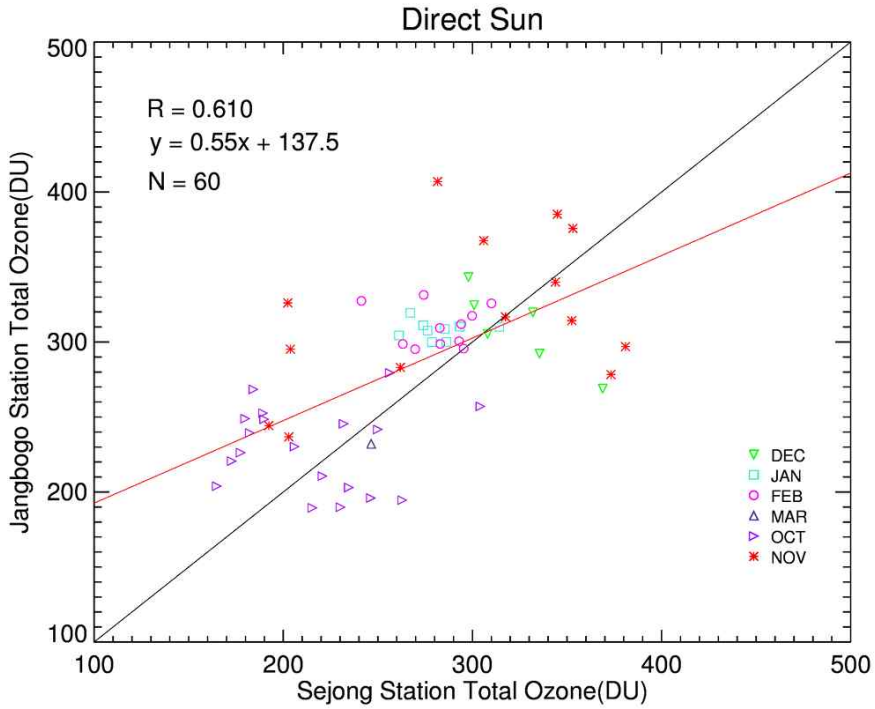


그림 2-28. 세종과학기지와 장보고과학기지에서 관측한 결과로 상관관계 및 월별 오존 전량값 비교 (Direct Sun)

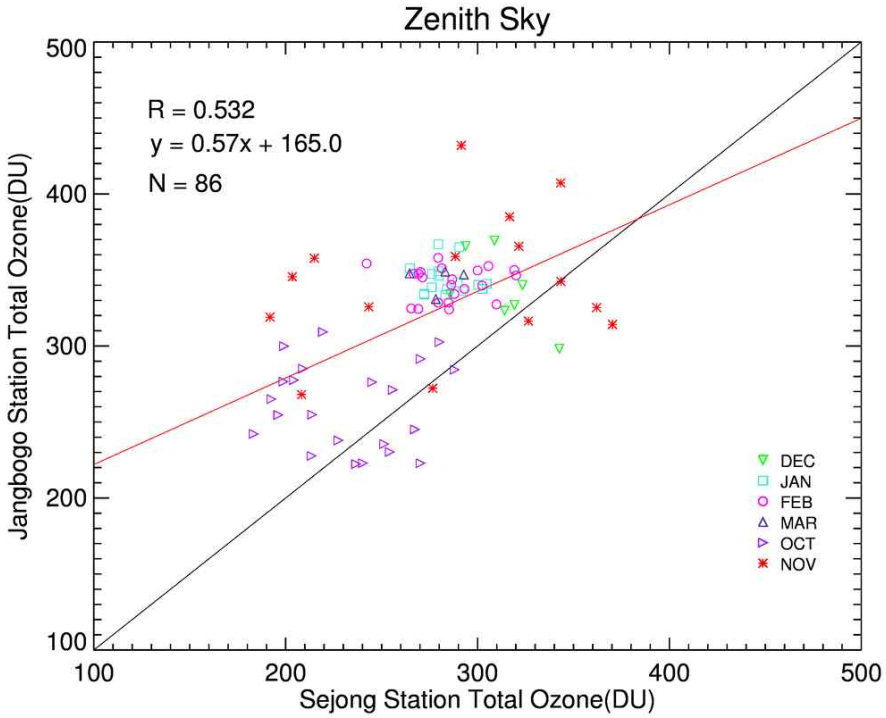


그림 2-29. 세종과학기지와 장보고과학기지에서 관측한 결과로 상관관계 및 월별 오존 전량값 비교 (Zenith Sky)

그림 2-28 및 2-29는 브루어 분광광도계 오존 전량 관측값을 (direct sun 및 zenith sky 관측 각각) 세종 및 장보고 과학 기지 사이에서 비교한 결과 값이다. 그림 2-19에서 OMI 위성 센서 관측 오존 전량의 비교 결과와 유사하게 11월에 가장 서로 상관성이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 11월 이전 남반구 봄에는 성층권 오존 파괴 현상이 양 지역에서 함께 일어나고 11월 이후 12월 남반구 여름부터는 성층권 오존 파괴 현상에서 자유로워지는 특징 역시 양 지역에서 함께 나타나지만 11월에는 일종의 transition 기간으로 두 지역의 오존 전량 특성 차이가 충분히 생길 수 있다고 볼 수 있다. 즉, 동남극과 서남극의 차이를 살펴보는 과정에서 11월의 특성을 주목해서 들여다볼 필요가 있음을 의미한다.

표 2-2. 1999년 1월부터 2018년 6월까지 세종 기지 브루어 분광광도계의 direct sun 모드와 zenith sky 모드로 수행된 오존 전량 관측 횟수

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Direct Sun (DS)	325	364	235	301	674	355	87	52	89	3
Zenith Sky (ZS)	1556	991	1235	1332	2865	1183	1487	1409	1499	455
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Direct Sun (DS)	99	556	817	1387	123	0	180	24	0	7
Zenith Sky (ZS)	523	1397	6721	5987	1497	0	516	1108	0	34

현재까지는 세종 기지와 장보고 기지의 비교에 중점을 두어서 2017, 2018, 2019년 중심으로 분석을 수행하였다. 다만 세종기지는 관측 기간이 좀 더 길기 때문에 분석 기간을 확장해볼 수 있다. 세종 과학기지에서 측정된 전 기간의 오존전량 자료의 퀄리티 컨트롤을 마친 이후 1999년부터 2018년까지의 20년 기간에 대해 시계열 분석을 수행해볼 수 있었다 (물론 중간에 결측된 날짜가 많이 존재하지만 시작과 끝 시간대를 기준으로 20년 기간의 분석을 수행해볼 수 있었다). 이에 20년간의 오존 전량 관측 자료를 토대로 선형회귀 분석을 통하여 월별 오존 전량의 변화 경향과 트렌드를 진단해보고자 하였다. 브루어 분광광도계는 Direct sun과 zenith sky의 두 가지 모드로 오존 전량을 관측하는데, direct sun 모드는 직달 일사를 이용하여 오존을 관측하기에 zenith sky 모드보다 그 정확도가 높다. 세종 기지의 환경은 운량이 높은 흐린 날이 대부분이기에 두 모드로 관측된 오존 전량의 값을 개별적으로 분석하여 정확도가 높은 direct sun 모드로 관측한 오존 전량의 트렌드를 보고, zenith sky 모드로 관측한 오존 전량의 트렌드가 같은 결과를 보이는지 살펴보았다. 이 분석 기간의 연도별 관측 횟수는 표 2-2와 같이 정리하였다.

표 2-3. 세종 기지 브루어 분광광도계의 direct sun 모드와 zenith sky 모드로 관측된 월평균 오존전량의 트렌드 (DU/year)

	1월	2월	3월	4월	5월	6월
Direct Sun (DS)	0.88	1.73	2.66	1.53		
Zenith Sky (ZS)	0.94	1.21	1.74	2.53		
	7월	8월	9월	10월	11월	12월
Direct Sun (DS)		0.57	0.53	-0.6	-5.56	2.86
Zenith Sky (ZS)		2.33	1.83	0.31	-3.52	1.81

트렌드를 보기에 앞서 그림 2-30과 2-31에서 두 모드로 관측한 오존 전량의 월변동을 살펴보았다. 앞서 언급한 것과 같이 세종 기지의 브루어 분광광도계의 노후화 등의 이슈로 20년의 기간 중 후반부에는 지속적인 관측이 제대로 이루어지지 않았다. 2002년 결과가 조금 특이하게 보이는데 2002년은 이례적으로 남극의 오존층 파괴가 크게 나타나지 않았던 시기로 알려져 있는 기간으로서 (예: Solomon et al., 2005) 실제 그림 2-30 및 2-31에서도 10월 오존층 파괴가 심각하게 일어날 시기의 오존 전량이 높게 나타나는 것이 확인된다. 그런데 특이하게도 같은해 12월의 오존 전량이 다른 시기에 비해 오존이 뚝 떨어지는 것이 확인되고 있다. 추측이지만, 봄철 오존층 파괴가 잘 일어나지 않는 환경(극 소용돌이의 약화, 또는 그에 따른 성층권 온도 상승 등)이 여름철 오존의 감소와 연계가 될 수 있는 부분이 혹시 존재한다면 주목해야 할 필요가 있다 (보통 남극의 봄철은 오존 파괴현상만 없다면 돕슨-브루어 순환에 의해 성층권 오존량이 높아질 수 있다). 아직 아무 근거는 없지만 생각할 필요가 있는 내용이라 보고서에 기록을 해둔다.

시간에 따른 선형회귀식을 구성하여 각 모드로 관측한 오존 전량의 트렌드를 월별로 구하여 그 결과를 표 2-3에 정리하였다. 해당 관측이 존재하는 1999-2018년까지의 기간은 Equivalent effective stratospheric chlorine (EESC)의 양이 peak를 보인 후 감소하여 오존이 회복할 것으로 기대되는 기간으로 알려져 있고 (Newman et al., 2007), 세종 기지의 오존 전량 분석 결과에서도 이러한 오존의 회복 트렌드가 나타난다. 다만, 오존 파괴 현상이 주로 발생하는 9-10월 중 10월의 direct sun 모드 관측 결과에서는 이러한 회복 트렌드가 나타나지 않으며, 이후 오존이 회복하는 것으로 알려진 11월에는 알려진 회복세와는 반대되는 뚜렷한 감소 트렌드가 나타난다. 이에 대해서는 주변 기지들의 관측 결과 및 위성, 모델 결과와의 상호 비교를 통해 추후 연구해 볼 필요가 있을 것으로 보인다.

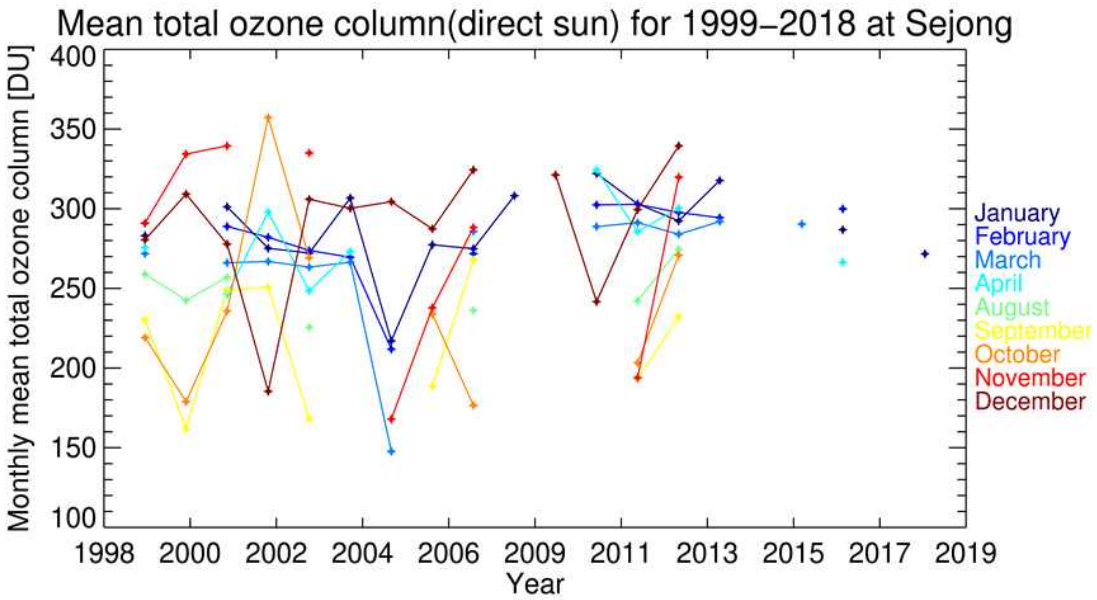


그림 2-30. 세종 기지 브루어 분광광도계의 direct sun 모드에서 관측된 월평균 오존전량의 연변화

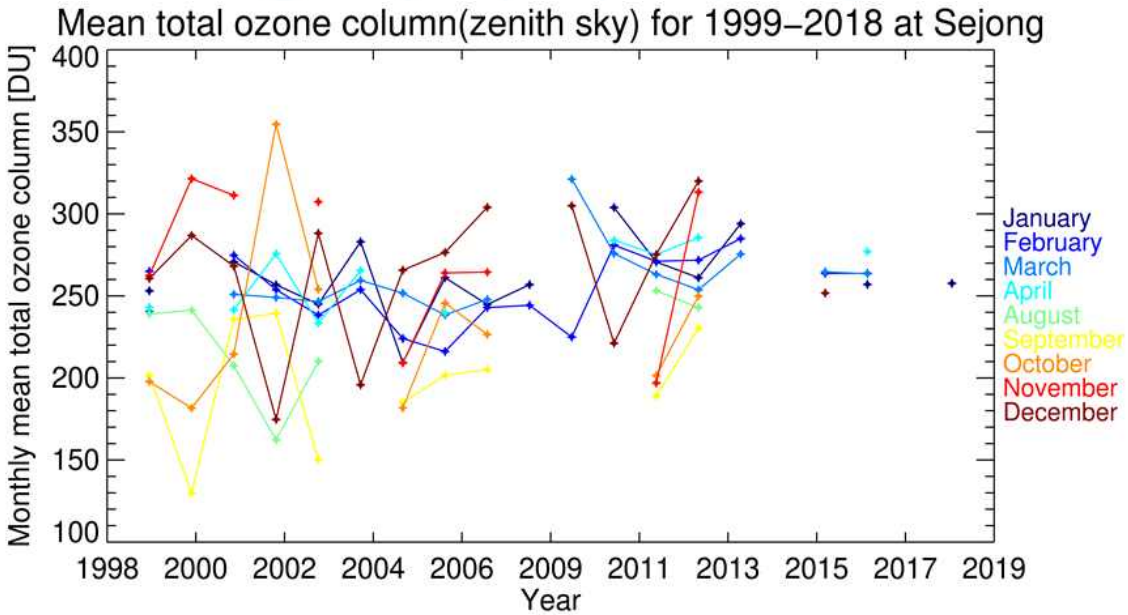


그림 2-31. 세종 기지 브루어 분광광도계의 zenith sky 모드에서 관측된 월평균 오존전량의 연변화

3. 브루어 분광광도계 UMKEHR 방법을 활용한 오존 연직 분포 측정 자료 분석

움케어(Umkehr) 방법은 브루어 분광광도계에서 오존 연직 분포를 관측할 수 있게 해주는 방법으로서 일출 및 일몰 과정에서 태양천정각이 변하며 대기의 여러층을 태양복사량이 통과하는 특성을 이용하여 수행된다. 2017년 1월 1일 - 2019년 12월 31일 기간 사이에 브루어 분광광도계의 움케어 방법으로 측정한 Vertical Profile 값을 분석하기 위해 먼저 유의미한 관측 자료를 걸러내는 과정을 수행하였다. Missing Zenith Angle 및 결측 일을 제외하였고, Max Iteration = 3 이상의 불안정한 데이터는 제거하였으며 그 결과 분석에 유의미한 데이터의 수는 세종과학기지와 장보고 과학기지에 각각 32개, 178개였으며 동시 관측이 이루어진 날짜는 총 29일임을 확인하였다. 움케어 관측은 구름이 많이 존재하는 경우 불확실도가 높아지는 것으로 알려져 있기에 이 자료에서 두 기지 중 어느 한쪽이라도 운량이 4이상 ~ 6 미만, 그리고 6이상인 두 경우를 나누어 살펴보았다. 이 결과를 통해 운량이 6 미만인 결과만을 그나마 살펴볼 수 있다고 판단하고 최종적으로 비교 가능한 오존 연직 분포 관측 경우들 대해 각각 오전, 오후의 상황을 각각 살펴보았다 (총 7일, 13개의 연직 오존 프로파일). 해당 데이터의 날짜에 대한 운량은 다음과 같다.

- 2018. 3. 11: 세종기지 운량 3.4, 장보고기지 운량 3.6 (오전, 오후) (그림 2-32)
- 2018. 10. 24: 세종기지 운량 3.4, 장보고기지 운량 0.6 (오전, 오후) (그림 2-33)
- 2018. 2. 19: 세종기지 운량 5.4, 장보고기지 3.3 (오전, 오후) (그림 2-34)
- 2018. 10. 28: 세종기지 운량 6, 장보고기지 운량 5.8 (오후) (그림 2-35)
- 2018. 10. 29: 세종기지 운량 4.8, 장보고기지 운량 4.6 (오전, 오후) (그림 2-36)
- 2018. 11. 2: 세종기지 운량 4.2, 장보고기지 운량 0 (오전, 오후) (그림 2-37)
- 2018. 11. 5: 세종기지 운량 5.1, 장보고기지 운량 2.4 (오전, 오후) (그림 2-38)

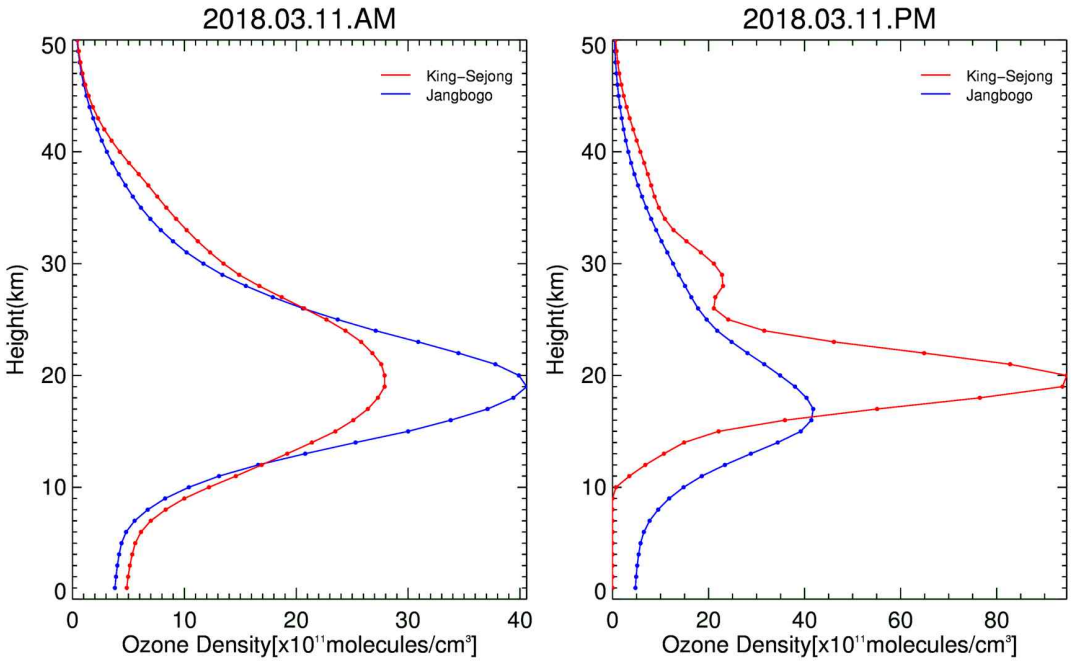


그림 2-32. 두 기지의 운량이 4이하(세종기지 운량 3.4, 장보고기지 운량 3.6)일 때의 오존 프로파일. 2018년 3월 11일 오전(왼쪽), 오후(오른쪽)

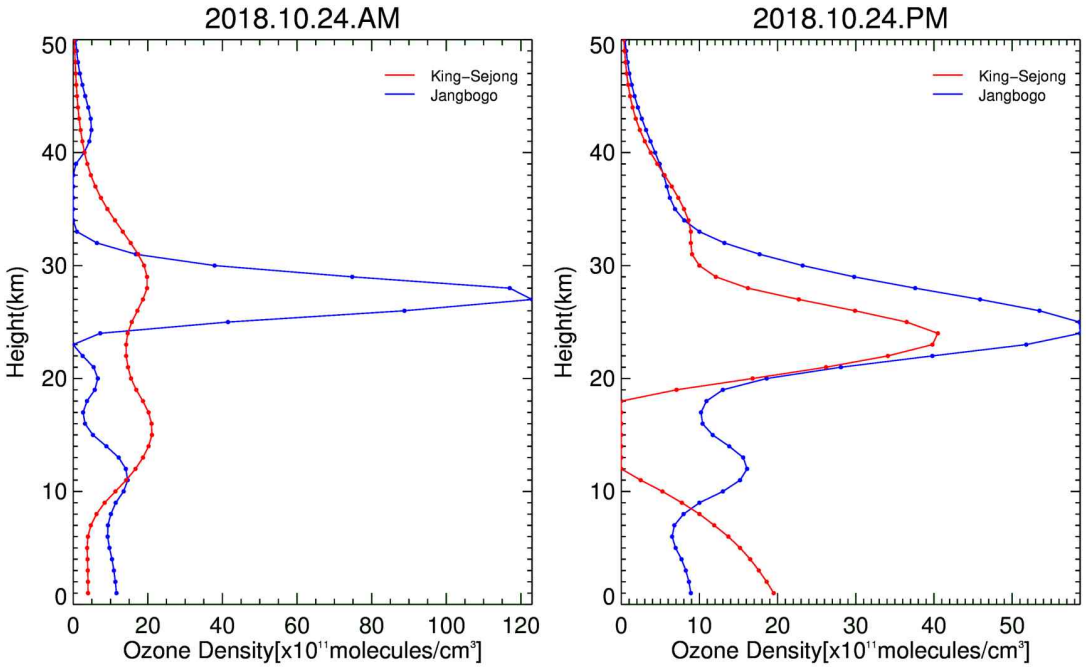


그림 2-33. 두 기지의 운량이 4이하(세종기지 운량 3.4, 장보고기지 운량 0.6)일 때의 오존 프로파일. 2018년 10월 24일 오전(왼쪽), 오후(오른쪽).

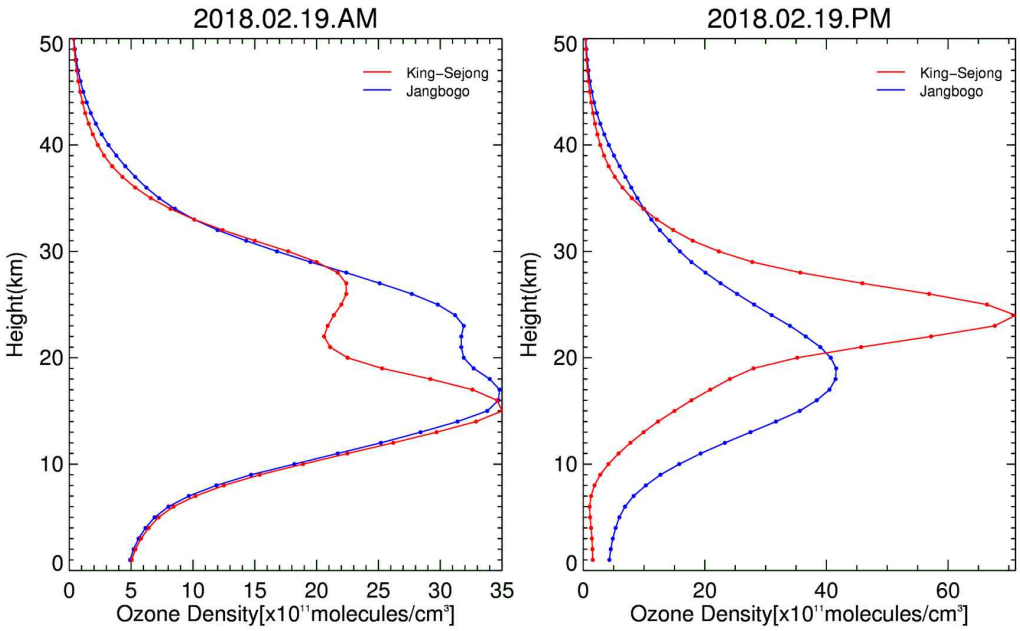


그림 2-34. 두 기지의 운량이 6이하(세종기지 운량 5.4, 장보고기지 3.3)일 때의 오존 프로파일. 2018년 2월 19일 오전(왼쪽), 오후(오른쪽).

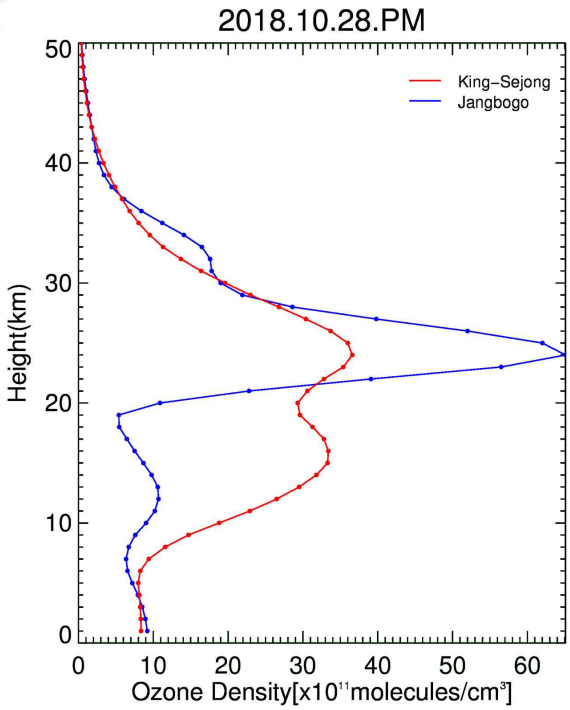


그림 2-35. 두 기지의 운량이 6이하(세종기지 운량 6, 장보고기지 운량 5.8)일 때의 오존 프로파일. 2018년 10월 28일 오후(오전 없음)

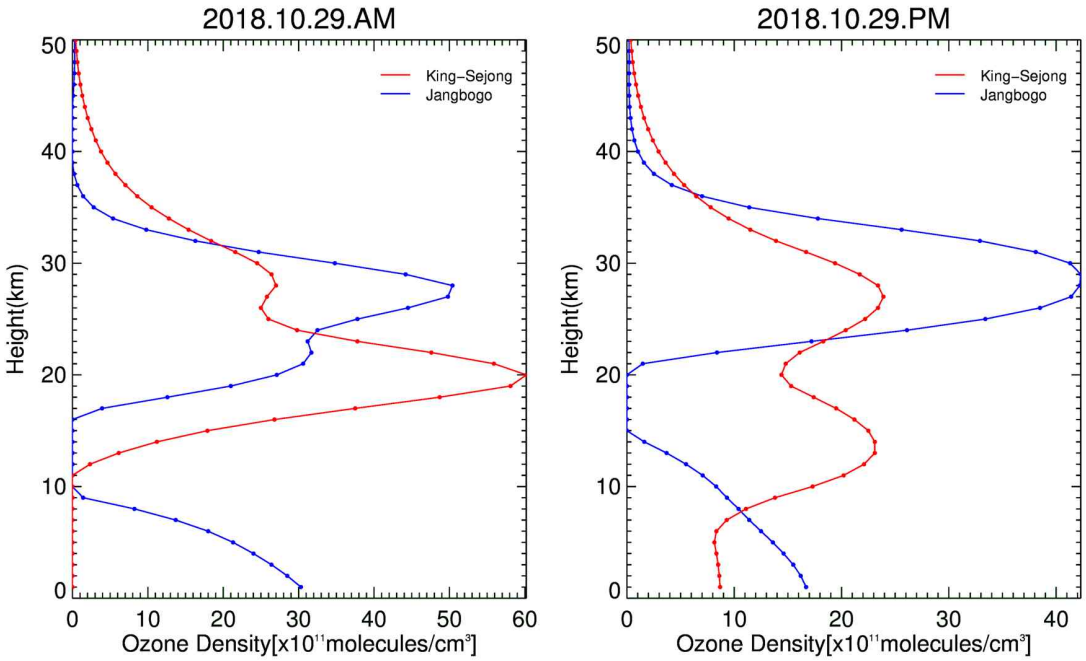


그림 2-36. 두 기지의 운량이 6이하(세종기지 운량 4.8, 장보고기지 운량 4.6)일 때의 오존 프로파일. 2018년 10월 29일 오전(왼쪽), 오후(오른쪽)

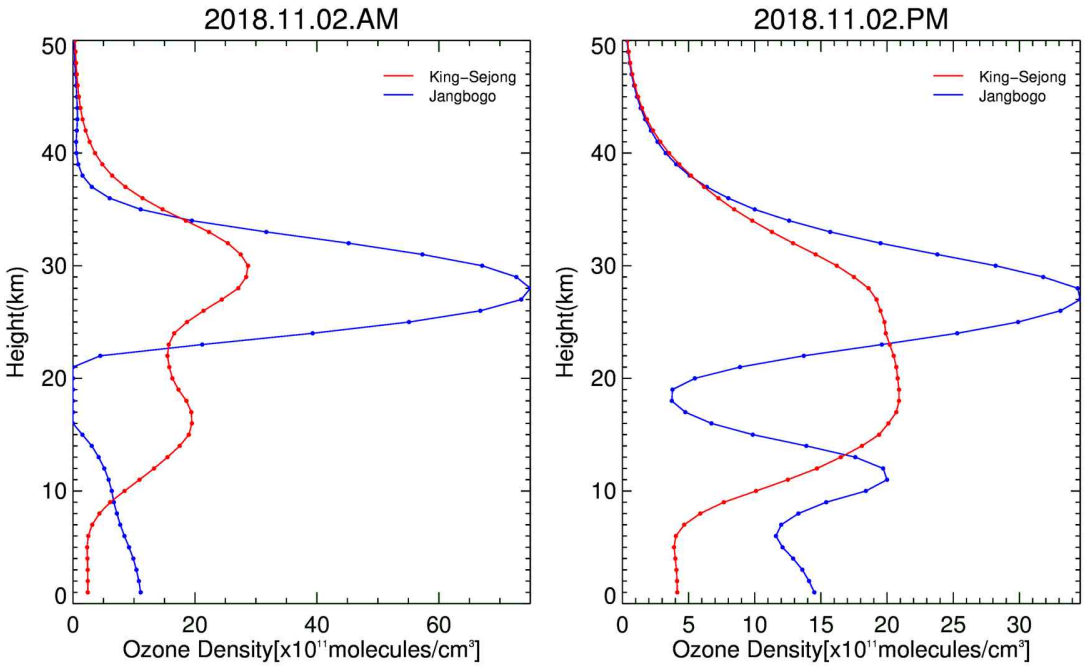


그림 2-37. 두 기지의 운량이 6이하(세종기지 운량 4.2, 장보고기지 운량 0)일 때의 오존 프로파일. 2018년 11월 2일 오전(왼쪽), 오후(오른쪽).

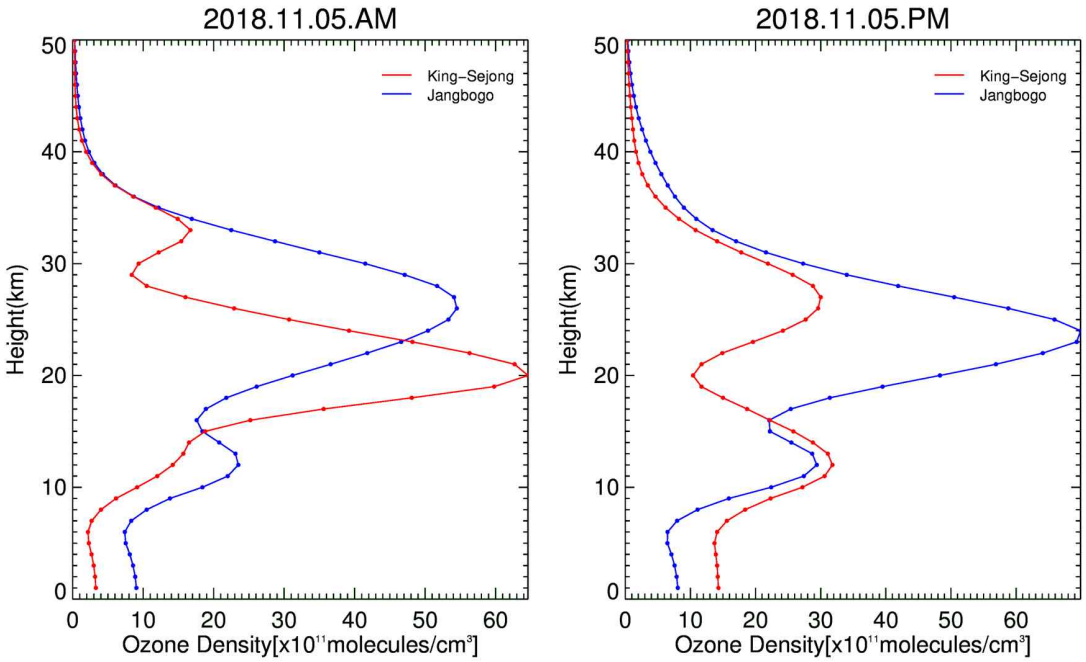


그림 2-38. 두 기지의 운량이 6이하(세종기지 운량 5.1, 장보고기지 운량 2.4)일 때의 오존 프로파일. 2018년 11월 5일 오전(왼쪽), 오후(오른쪽).

결과를 보면 매끄러운 곡선을 나타나는 지역도 있지만 고도별로 오존량의 변동을 매우 급격하게 보이는 경우들도 종종 보이고, 같은 날이지만 오전 오후의 차이를 크게 보이는 경우도 확인된다. 세종 기지와 장보고 기지의 비교 결과 역시 어느 정도까지 유사하다, 다르다고 말하기엔 쉽지 않은 상황이다. 향후 오존 존데 관측 자료 (장보고 기지) 및 위성 관측 오존 연직 분포 자료를 활용하여 이 움케어 자료를 비교, 검증할 필요가 있다. 일반적으로 세종 기지는 매우 흐린날이 지속되는 경우가 많아서 움케어 관측이 효용성이 없다고 판단, 과거에는 움케어 관측을 아예 측정 스케줄에 고려하지 않았지만 위성 관측이 활발해지고 모델링의 개선도 늘어가면서 대기 조성 물질의 연직 분포 정보가 중요하게 활용될 가능성이 늘어가고 있기에 소수의 경우라도 움케어 관측을 통한 남극의 오존 연직 분포 자료를 확보하는 과정은 필요할 것으로 생각된다. 또한 NASA 가다드 연구소 같은 곳에서는 최근 브루어 분광광도계의 여러 기능을 좀 더 잘 활용하여 움케어 관측을 보다 정확하게 할 수 있는 방안을 연구 중에 있다. 이런 알고리즘이 새로 개발되어 등장하게 되면 과거의 관측 자료를 다시 재처리하여 오존의 연직 분포를 재계산할 수 있는 여지가 있기 때문에 당장에 좋은 자료를 얻지 못하더라도 지속적으로 관측 자료를 수집하는 과정이 필수적으로 생각된다. 이는 혹한의 환경에서 월동대 연구원이 수고를 감안하고 수행하는 오존존데 관측 자료를 활용하는 과정에서도 중요한 의미를 가진다.

그림 2-39는 가장 움케어 관측 조건이 양쪽 기지 모두에서 좋았던 2018년 10월 24일 오후 케이스에 대해 OMPS 위성에서 제공한 연직 오존 프로파일과 비교를 수행해본 결과로서 preliminary result이다. 그럼에도 불구하고 기본적인 프로파일의 전개 양상은 퍽 비슷하게 나타나고 있어서 앞으로 이와 같은 비교를 좀 더 깊게 수행할 필요가 있다고 보여진다.

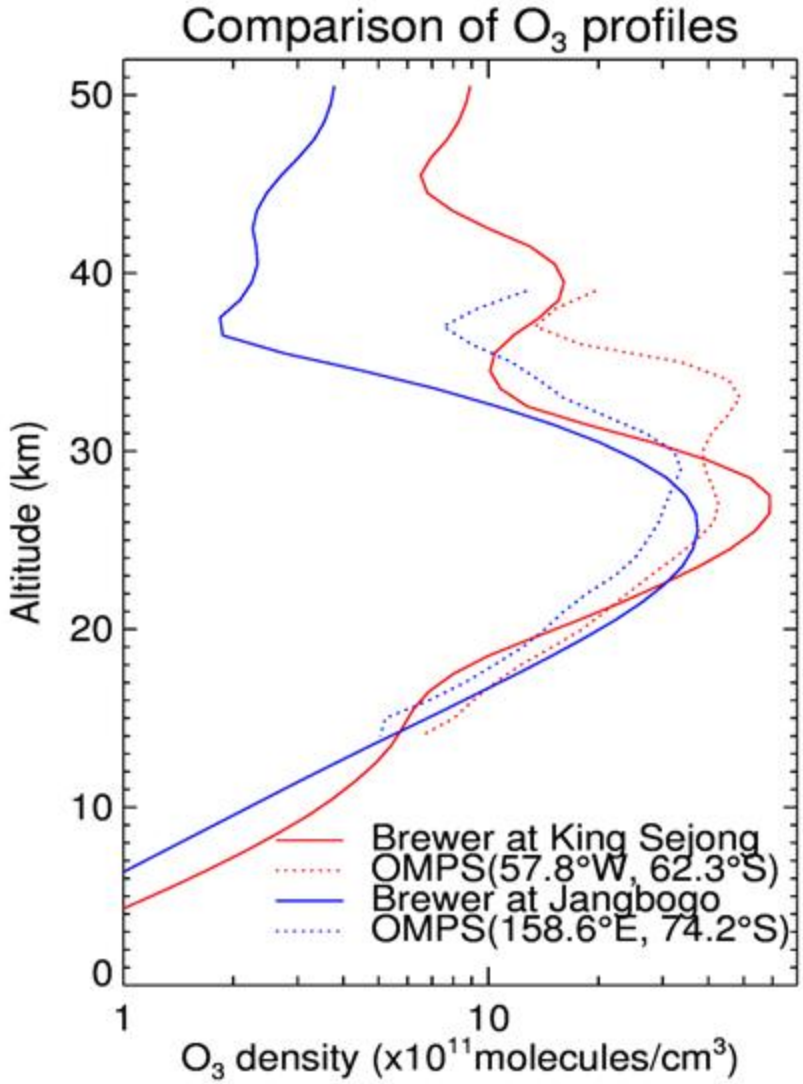


그림 2-39. 2018년 10월 24일 오후 세종 및 장보고 과학기지의 브루어 기기 Umkehr 관측과 OMPS 위성 관측으로 얻어낸 오존 프로파일 비교 결과

4. 브루어 자외선 관측 자료 분석

관측형식	기간					
UV	1999	01	01	~ 2000	11	21
UX	2000	11	23	~ 2000	11	23
UV	2000	11	23	~ 2000	11	24
UX	2000	11	24	~ 2000	11	24
UV	2000	11	24	~ 2001	04	24
UX	2001	04	27	~ 2001	06	20
UV	2001	06	21	~ 2001	06	22
UX	2001	06	23	~ 2001	06	23
UV	2001	06	24	~ 2001	09	30
UX	2001	10	01	~ 2001	12	05
UV	2001	12	17	~ 2004	05	09
UX	2004	12	17	~ 2004	12	29
UV	2004	12	31	~ 2004	12	31
UX	2005	01	01	~ 2005	01	02
UV	2005	01	02	~ 2005	01	04
UX	2005	01	04	~ 2005	01	15
UV	2005	01	15	~ 2005	01	31
UX	2005	01	31	~ 2005	05	30
UV	2005	05	31	~ 2005	12	08
UX	2005	12	09	~ 2005	12	10
UV	2005	12	11	~ 2005	12	12
UX	2005	12	13	~ 2005	12	18
UV	2005	12	18	~ 2006	01	07
UX	2006	01	07	~ 2006	01	07
UV	2006	01	07	~ 2009	12	08
UX	2009	12	08	~ 2010	12	12
UV	2010	12	19	~ 2010	12	19
UX	2010	12	19	~ 2010	12	31
UV	2010	12	31	~ 2011	01	02
UX	2011	01	02	~ 2018	06	30

그림 2-40. 세종 과학기지 브루어 분광광도계의 자외선 관측자료 기간별 UV와 UX 스케줄 분류

세종기지 브루어 분광광도계는 오존 뿐만 아니라 자외선을 관측할 수 있는 역량을 가지고 있다. 다만 워낙 운량이 높은 지역에서 기록되고 있는 자료인데다 오존에 비해 상대적으로 덜 중요하게 고려되는 자료이다 보니 크게 분석을 수행해오지

않았다. 이번 과제 중에 그래서 1999년부터 2008년까지의 관측 자료를 이용, 20년 정도 범위에서 세종 기지에서 관측한 자외선 복사량의 자료를 분석해보았다.

브루어 분광광도계의 자외선 관측 스케줄은 UV관측모드와 UX관측모드로 구분되는데, 이는 UVA 파장의 관측 포함 여부에 따라 구분된다. UV관측모드 (UV-B Observation)은 관측파장 영역이 290-325nm(0.5nm 간격)이며 매 스케줄마다 Forward, Backward 두 번의 관측을 수행한다. UX 관측모드 (Extended UV Wavelength scan) 경우에는 관측파장 영역이 286.5 (290nm)-363nm(0.5nm 간격)로서 보다 넓은 범위를 다루고 있고 그러다보니 1회 스케줄 수행시간이 좀 더 걸린다는 특징이 있다. 그림 2-40은 분석 기간 UV 및 UX 관측모드 수행 스케줄을 정리한 표인데 이렇게 스케줄이 시기별로 달라졌기 때문에 (각 기간별 연구 목적의 차이에 기인한 것으로 보임) 전체 기간을 살펴보기 위해 보다 짧은 파장 영역을 가지는 UV 관측모드 구간에 맞추어 분석을 진행하였다 (2011년 이후 UX 관측이 되고 있지만, 이전의 관측에 대해서는 자료 사용 및 분석에 있어 파장 범위를 잘 구분하여 사용할 필요가 있다).

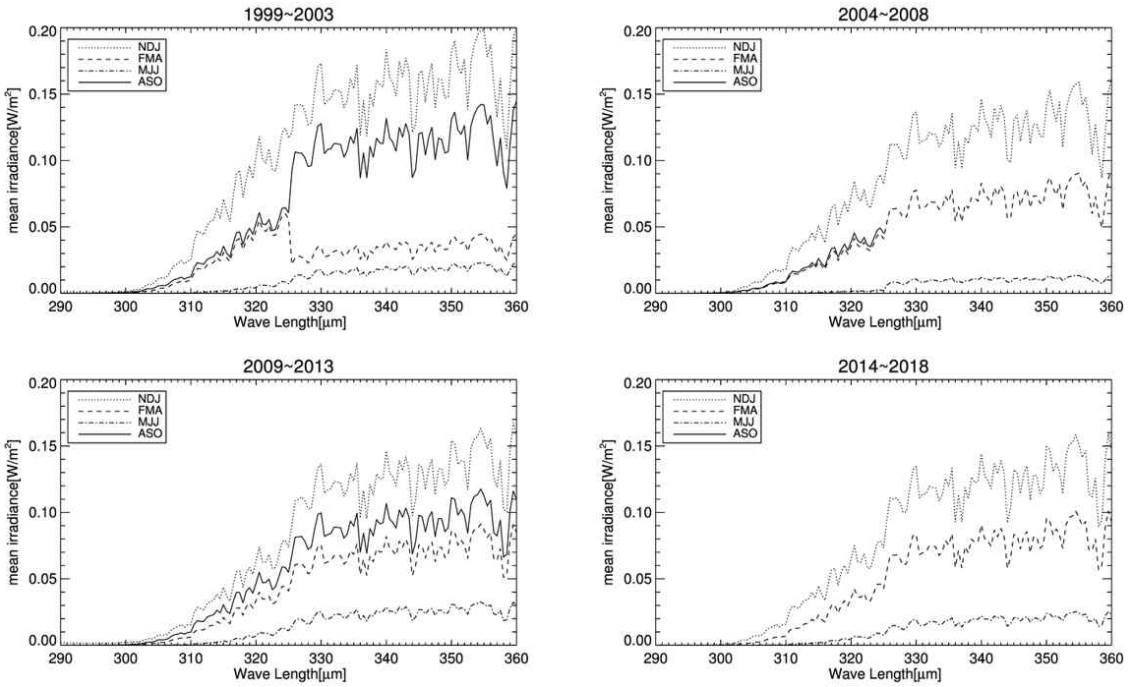


그림 2-41. 세종과학기지 브루어 분광광도계가 관측한 자외선 복사 관측값 계절별 비교 (290-360 nm 구간). NDJ는 11, 12, 1월, FMA는 2, 3, 4월, MJJ는 5, 6, 7월, ASO는 8, 9, 10월 평균을 의미. 1999년부터 2018년까지 20년간 5년 간격으로 자료를 묶어서 비교하였음.

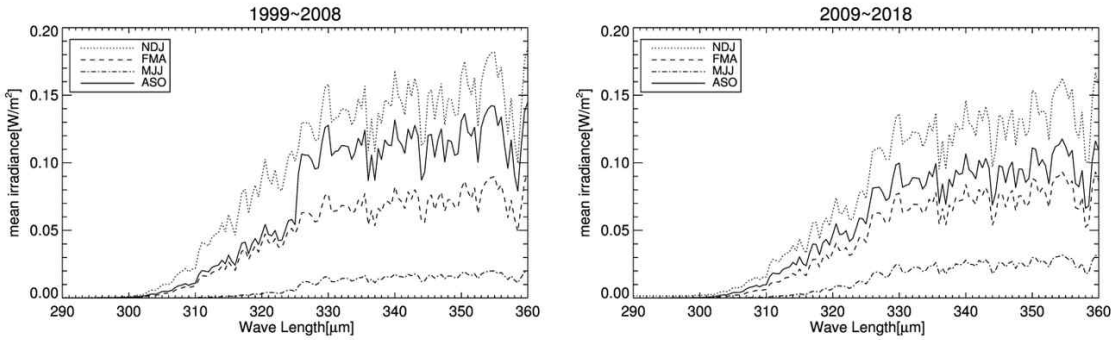


그림 2-42. 그림 2-39과 같은 방식의 분석. 다만 1999-2008 및 2009-2018 이렇게 10년씩 두 기간을 나누어 비교 분석

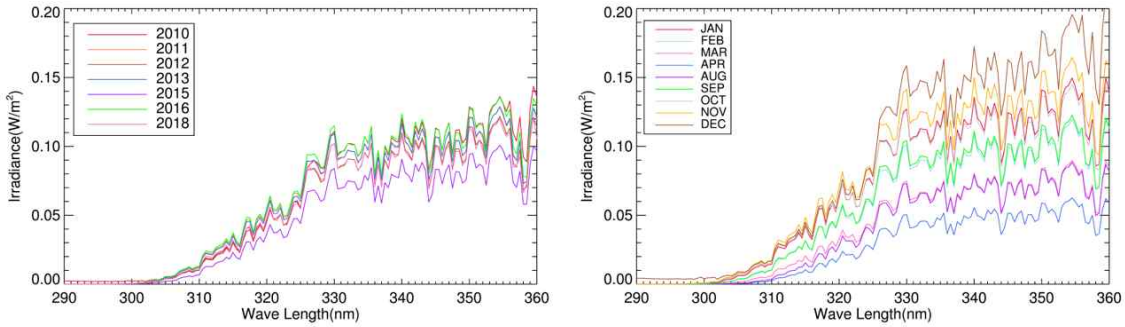


그림 2-43. 290-360 nm 파장 구간 관측된 자외선 자료의 시간별 평균 변동 특성. 전체 분석 기간 내 매년 평균값 (왼쪽) 및 매월 평균값 (오른쪽). 파장 0.5 nm 간격으로 평균 계산 수행

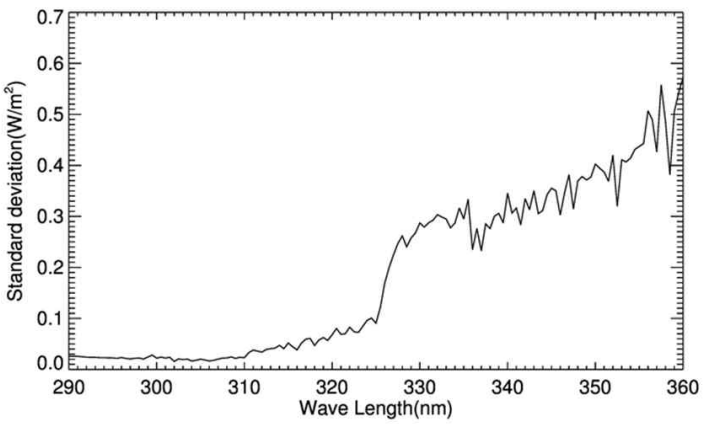


그림 2-44. 전체 분석 기간 (1999-2008) 동안 측정된 모든 자외선 관측 자료를 파장 구간별로 평균할 때 존재하는 표준편차 크기 비교

1999-2008년 기간의 자외선 관측의 경우 중간에 검보정, 기기 이상 등의 이유로 관측이 중단된 기간이 많아서 어느 정도 기간을 설정하여 평균적인 패턴을 비교해 보는 것이 좋을 것으로 판단되었다. 그래서 5년 평균 (그림 2-41), 10년 평균 (그림 2-42), 전체 기간에서 매년 및 매월 평균 (그림 2-43)을 구해서 살펴보고 표준편차 역시 파장 구간별로 살펴보았다 (그림 2-44). 흔히 알고 있는 것처럼 오존의 강한 자외선-B 흡수로 인하여 320 nm 이하 파장에서의 자외선 침투량은 그리 크지 않다. 하지만 파장이 짧을수록 에너지가 커지기 때문에 이 구간의 자외선 변동성은 매우 중요하게 살펴봐야 하는데 11-12-1월의 남반구 여름철의 자외선량이 흑야기간이 존재하는 5-6-7월 기간에 비해 당연하게도 훨씬 자외선 값이 크게 나타남이 확인된다. 월별로 보면 11 및 12월에 자외선이 최고치, 4월에 자외선이 최저치를 나타나는 것이 보인다 (그림 2-43). 그림 2-42를 보면 최근 10년 (2009-2018년) 평균 자외선이 과거 10년 (1999-2008년) 평균보다 값이 낮게 나타나서 어느 정도 오존 회복세의 효과를 보고 있는 것으로 생각된다. 5년 평균(그림 2-40)로 보면 이미 2004년 정도부터는 성층권 오존의 파괴가 더뎌짐으로서 자외선 총량이 증가하는 속도가 주춤해지는 것을 확인할 수 있다.

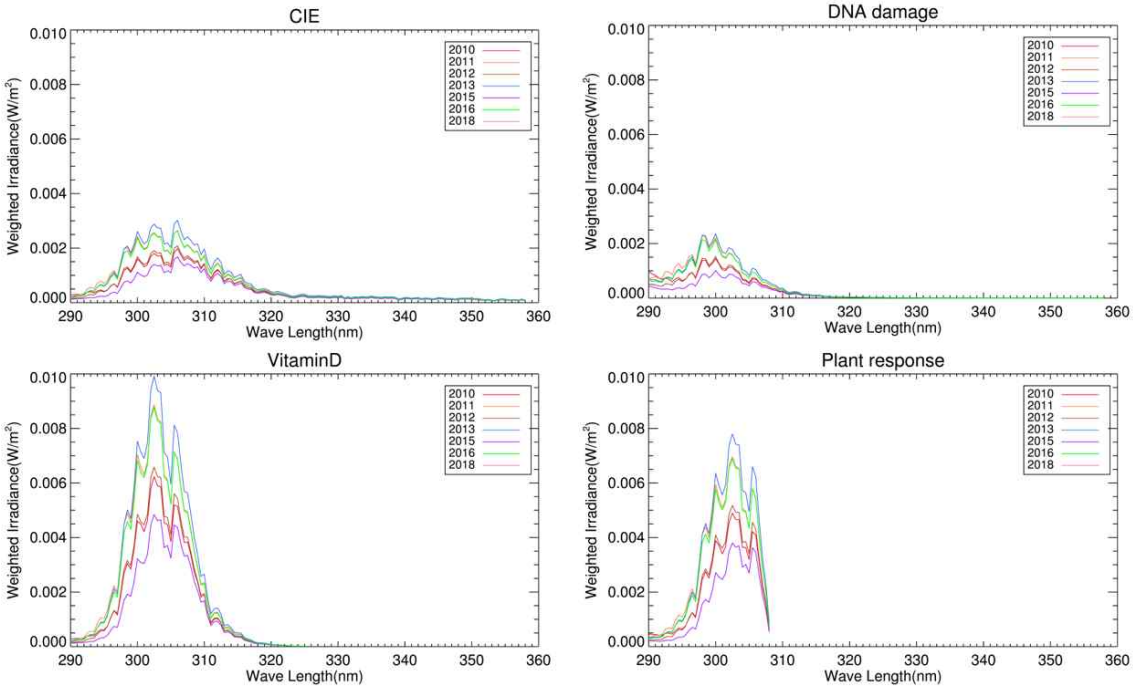


그림 2-45. 가중함수를 적용하였을 경우 계산되는 다양한 자외선 복사량 값의 연도별 변화. CIE는 홍반 유발 자외선, DNA damage는 DNA를 파괴시킬 수 있는 자외선, Vitamin D는 비타민 D를 합성시키는데 도움을 주는 자외선, Plant response는 식물 생육에 영향을 주는 자외선 복사를 의미.

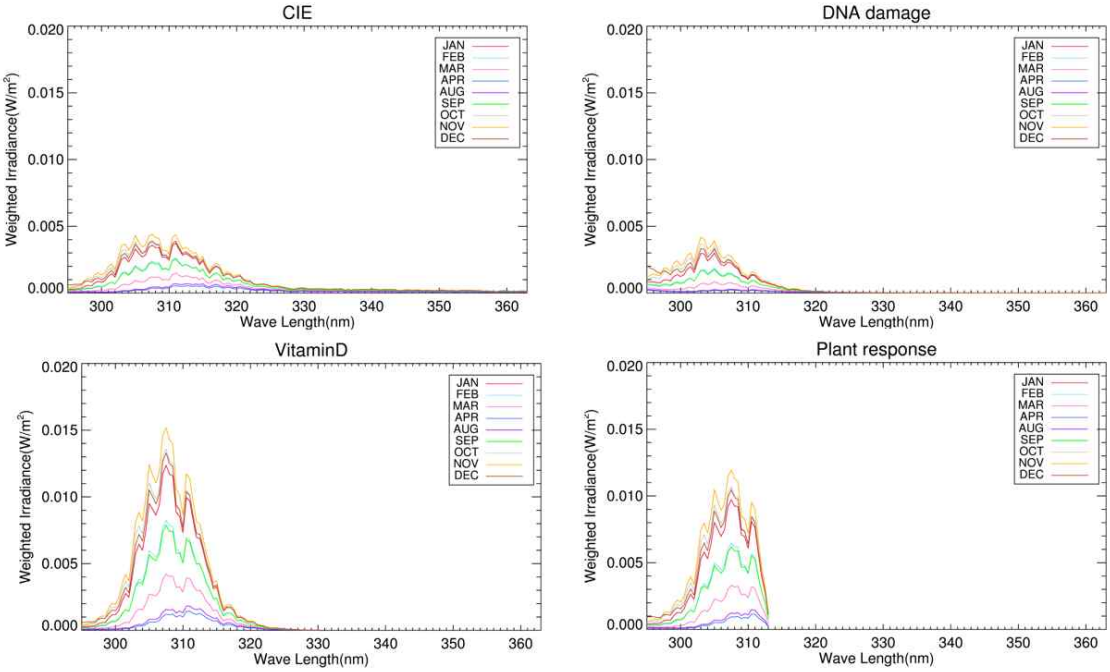


그림 2-46. 가중함수를 적용하였을 경우 계산되는 다양한 자외선 복사량 값의 월별 변화. 상세 내용은 그림 2-42와 동일.

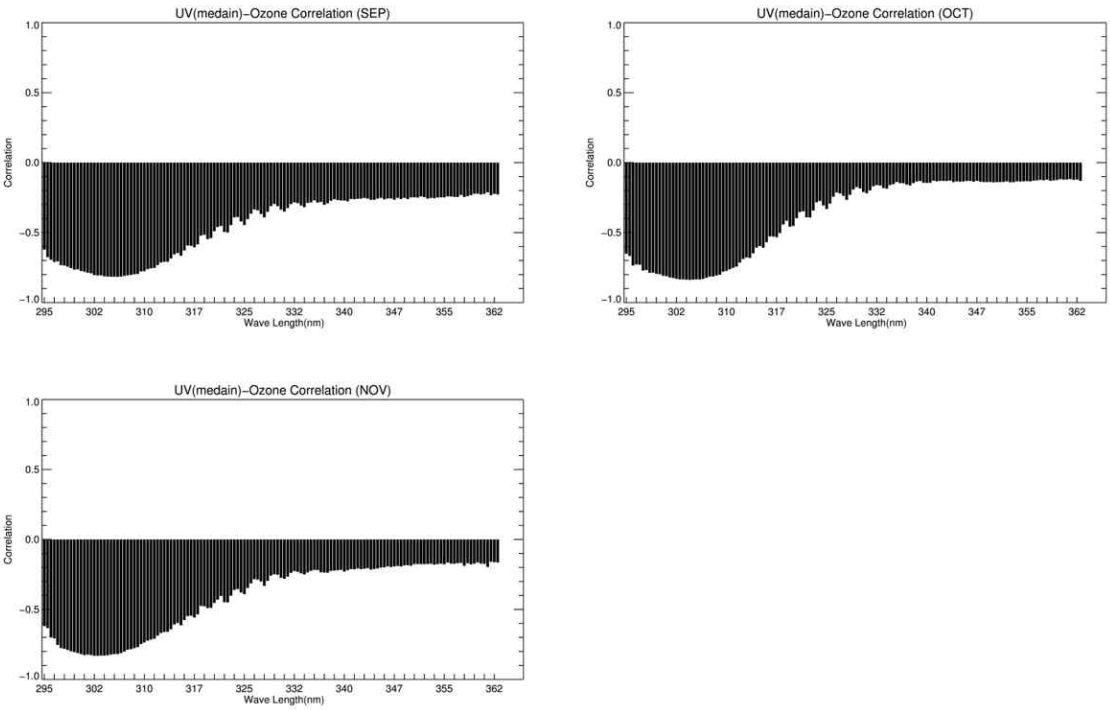


그림 2-47. 브루어 분광광도계로 관측한 오존전량과 파장별 (0.5 nm 간격) 자외선 관측값 사이 상관관계 결과 (9, 10, 11월로 나누어 분석).

자외선은 우리 건강에 피해를 주는 측면과 도움을 주는 측면 모두 가지고 있다. 보통 피부의 홍반 발생, DNA 파괴와 같은 피해와 비타민 D 합성과 같은 장점이 함께 이야기되곤 한다. 이 외에도 식물 성장, 생육에 영향을 주기도 한다. 다만 같은 자외선-B 영역의 영향이라고 할지라도 파장별 민감도는 상황에 따라 많이 차이가 난다 (예컨대 A파장이 DNA 파괴에 영향을 크게 주지만 비타민 D 합성에는 그닥 큰 기여를 못한다든지). 그래서 보통은 자외선 B 파장 영역에 가중함수(weighting function)를 고려하여 파장별 민감도를 고려하게 된다. 그림 2-45와 2-46은 피부 홍반, DNA 파괴, 비타민 D 합성, 식물 생육 반응에 영향을 주는 파장별 가중함수를 고려하여 같은 자외선 B관측값에서 상황별 자외선 복사량을 계산하여 연도별, 월별 평균을 수행한 값이다. 이것을 보면 2013년이 다른 연도에 비해 자외선 복사량이 전반적으로 강하게 나타나는 것이 확인되며 11, 12월에 피해 또는 도움되는 부분의 특성이 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 2-47은 세종기지에서 브루어 분광광도계로 관측한 오존 전량과 자외선 복사량의 상관관계를 0.5 nm 간격으로 파장별 계산을 수행한 결과이다. 전반적으로 자외선 B 영역에서 강한 음의 상관성이 나타나는데 오존이 줄어들면 자외선의 침투량이 높아지기 때문에 충분히 해석 가능한 결과로서 이런 상관성이 대략 300 - 305 nm 범위에서 가장 크게 나타남이 확인된다. 흥미로운 부분은 상관관계가 미세하게 높아졌다 낮아졌다 하는 봉우리 모양이 매우 짧은 파장 사이에서도 발견된다는 점인데 이것은 현재 정확하게 해석되지 않았다. 다만 매우 특이한 형태가 주기적으로 보이는 것을 통해 뭔가 관측 특성, 또는 오류가 반영된 것이 아닌가 추측하고 있어서 향후 다른 관측소에서 동일한 실험을 반복하여 비교한 후 그 의미를 살펴보고자 한다.

이러한 오존과 자외선의 상관성 분석은 오존 감소의 영향이 태양복사량 변화라는 측면에서 극지 지표에 어떤 차이를 유발할 수 있을지 살펴볼 수 있다는 점에서 중요한 분석이 될 수 있다. 다만 아직 고려해야 할 변수가 퍽 많은데 특히 세종기지의 경우에는 구름의 발생이 자주 나타나기 때문에 구름에 의한 산란이 자외선 복사를 얼마나 변화시킬 수 있을지에 대한 논의가 반드시 뒤따라야 할 필요성이 제기된다. 실제로 오존에 의해 자외선의 유입이 더 커진다고 해도 구름이 더 광범위하고 짙게 발생하면 자외선의 차단 효과가 더 클 수 있고 반대로 산란이 더 크게 일어날 확률도 적지 않다. 추가적으로 세종, 장보고 기지의 표면이 눈, 얼음 등으로 덮여있을 확률이 높아 지표 반사에 의한 자외선량의 변화도 신경 쓸 필요가 있다. 본 연구가 오존량 변화를 궁극적으로 기후변화 해석에 활용하고자 한다면 이러한 복사량의 환경에 따른 변화를 좀 더 구체적으로 고려하여 좀 더 정확한 분석 결과를 얻을 수 있도록 신경을 써야 할 것이다.

제 3 절. 남극 지역 오존 전량 변동성을 설명하기 위한 기상장 및 해빙과의 상관관계 분석

1. 분석 지점 및 연구 접근 방법

남극 지역 오존 전량 변동성은 극 성층권 구름, 극 소용돌이와 같은 대기 순환, 역학과정과 관련이 있기 때문에 기상 및 기후, 환경정보와 비교하여 분석할 필요가 있다. 본 과제에서는 일단 세종 과학기지가 위치한 서남극 지역을 최초 분석 지점으로 설정하여 연구를 진행하였다. 서남극의 오존 전량을 지상 기반 관측을 이용하여 살펴보기 위해, 그림 3-1 및 표 3-1과 같이 Weddell Sea 부근 5개의 관측소를 선정하였다. 한국의 극지연구소로부터 세종관측소의 자료를 받았으며, 나머지 네 관측소의 자료는 World Ozone and Ultraviolet radiation Data Centre (WOUDC)에 공개된 자료를 이용하였다. 5개 관측소 중 3개 관측소 (King Sejong, Marambio, Faraday)는 남위 70 °S보다 저위도인 남극 반도의 경계에 위치한다. 나머지 두 관측소 (Halley, Belgrano)는 남위 70 °S보다 고위도인 Weddell Sea의 해안가 근처에 위치한다. 관측소 간의 위도는 최대 15도의 차이를 보인다. 이 관측소들에서는 자외선 태양 복사를 이용하여 Dobson과 Brewer 분광광도계로 오존 전량을 측정한다. 따라서, 서남극의 오존 전량 관측은 태양 복사가 약하거나 존재하지 않는 극야에는 불가능하다. 본 연구에서는 최근 20년간 남극의 봄과 여름 (9월에서 이듬해 3월)의 오존 전량을 분석하였다.

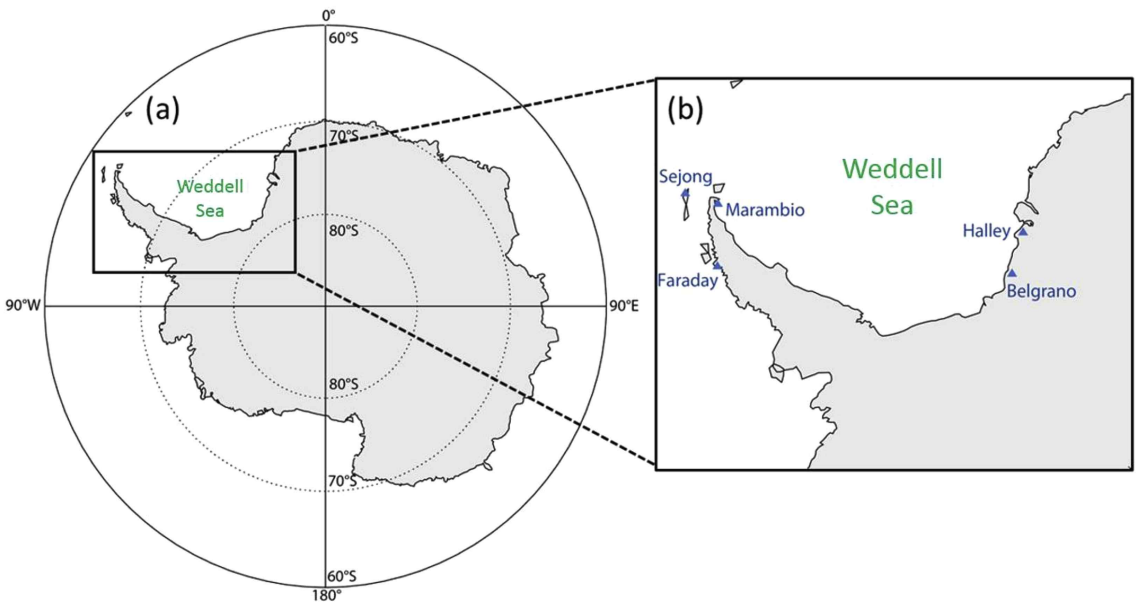


그림 3-1. 분석 지점: 서남극 Weddell Sea에 위치한 5개 과학관측소

표 3-1 연구에 이용된 남극 5개 관측소 정보0

관측소 이름	위도	경도	관측장비
Belgrano	77.87°S	34.63°W	브루어 분광광도계
Faraday	65.25°S	64.26°W	돕슨 분광광도계
Halley	74.35°S	26.93°W	돕슨 분광광도계
King Sejong	62.13°S	58.47°W	브루어 분광광도계
Marambio	64.24°S	56.63°W	돕슨 분광광도계

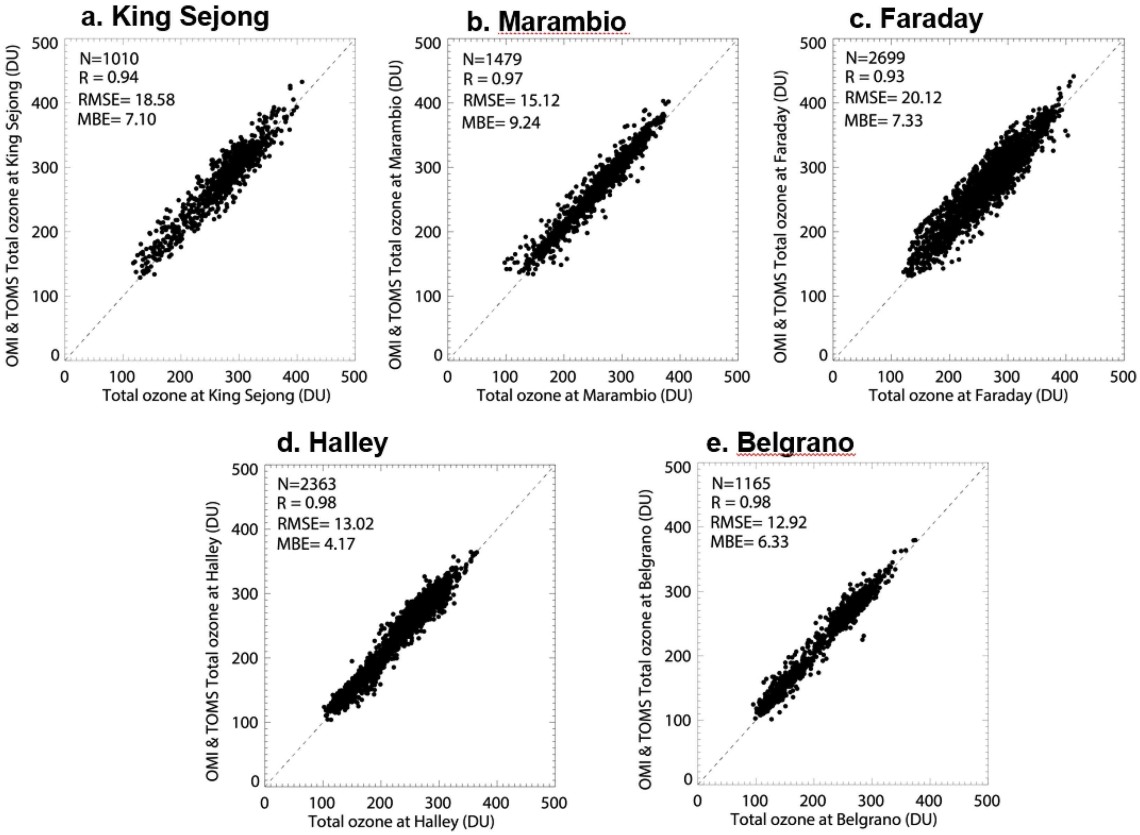


그림 3-2. Weddell Sea 부근 다섯 관측소에서 관측된 지상 기반 관측 오존 전량과 위성 관측 오존 전량의 비교 (1996-2015)

위성 관측 오존 전량은 수십 년간의 관측을 통해 장기간의 자료, 1970년대 후반 이후로 TOMS와 OMI가 대표적인 위성 관측 기기이다. 1996년부터 2015년까지, 본 연구에서는 Earth Probe (EP) 위성에 탑재된 TOMS와 Aura 위성에 탑재된 OMI의 Level 3 자료 (공간 해상도 1° x 1°)를 이용하였다. 위성으로 관측한 오존 전량은 몇몇 남극의 과학관측소의 지상관측 자료와의 비교를 통해 검증된 바 있다 (Balis

et al., 2007; Kuttippurath et al., 2018). 중위도 지역과 비교하여 남극에서는 지상의 관측소 수 자체가 적기 때문에, 본 연구에서 이용하고자 하는 자료에 대한 추가적인 검증을 수행하였다.

오존 전량의 분석을 위해, 본 연구에서는 지상관측 (돕슨, 브루어 분광광도계)과 위성 관측 (TOMS, OMI)의 상호비교를 수행하였다. Kuttippurath et al. (2018)에서는 검증을 목적으로 지상 기반과 위성 오존 전량 관측값 간의 정밀한 상호비교를 수행하였고 통계적인 결과에 대해 자세하게 논한 바 있다. 본 연구에서는 세종관측소라는 새로운 지상 관측소를 추가함으로써 선행연구에서 수행되었던 검증을 뒷받침하고자 하였다 (그림 3-2 및 3-3). 기존 연구와의 추가적인 차별성은 기존 연구에 비해 낮은 해상도를 가지는 level 3의 격자화된 위성 자료를 이용했다는 점이다. Level 3의 위성 자료가 자료의 크기 면에서 경제적이고 활용이 용이하기 때문에 오존 모니터링과 분석에 많이 이용되는데, 따라서 지상 기반 관측 자료와 비교하여 자료의 품질을 검사하는 단계가 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 지상 기반 관측 자료와 격자화된 위성 관측 자료 (level 3 자료)의 오존 전량을 비교하고 level 2의 위성 관측 자료를 이용하여 검증을 수행한 Kuttippurath et al. (2018)의 결과를 이용하여 자료의 품질에 대해 논하였다.

그림 3-2는 위에 언급한 관측소에서 관측된 지상 기반 오존 전량 관측과 격자화된 위성 오존 전량 관측이 밀접한 연관성을 가짐을 보여준다. Kuttippurath et al. (2018)에서 level 2 자료를 이용한 비교 결과를 고려하면, 연구 대상 기간이 서로 다름에도 불구하고 다음과 같이 본 연구의 상관계수 (R)가 선행연구의 상관계수와 유사하게 나타났다. 본 연구에서 Marambio 관측소에서의 상관계수는 R=0.97 (선행연구 기준: R=0.90 - 0.97), Faraday 관측소에서의 상관계수는 R=0.93 (선행연구 기준: R=0.93 - 0.96), Halley 관측소에서의 상관계수는 R=0.98 (선행연구 기준: R=0.96 - 0.98), Belgrano 관측소에서의 상관계수는 R=0.98 (선행연구 기준: R=0.94 - 0.98)로 나타났다. King Sejong 관측소의 오존 전량 관측은 본 연구에서 처음 공개되었기 때문에 이 자료에 한해 1996년부터 2015년까지의 기간에 대해 위성 level 3 자료뿐 아니라 level 2 자료와도 비교검증을 수행하였다 (그림 3-3). 결과적으로, 지상 기반 오존 전량 관측과의 상관관계는 level 3 자료의 경우 R=0.94의 값을, level 2 자료의 경우 R=0.97로 나타났다. Level 2 자료와의 상관계수가 더 높긴 하지만, level 3 자료와의 상관계수 또한 안정적인 값으로 나타났기에 본 연구에서 이용하였다. 이 결과는 남극 성층권 오존 파괴 현상 관련하여 오존 전량 분석시, 위성 자료의 spatial resolution에 너무 크게 구애받지 않아도 됨을 의미한다.

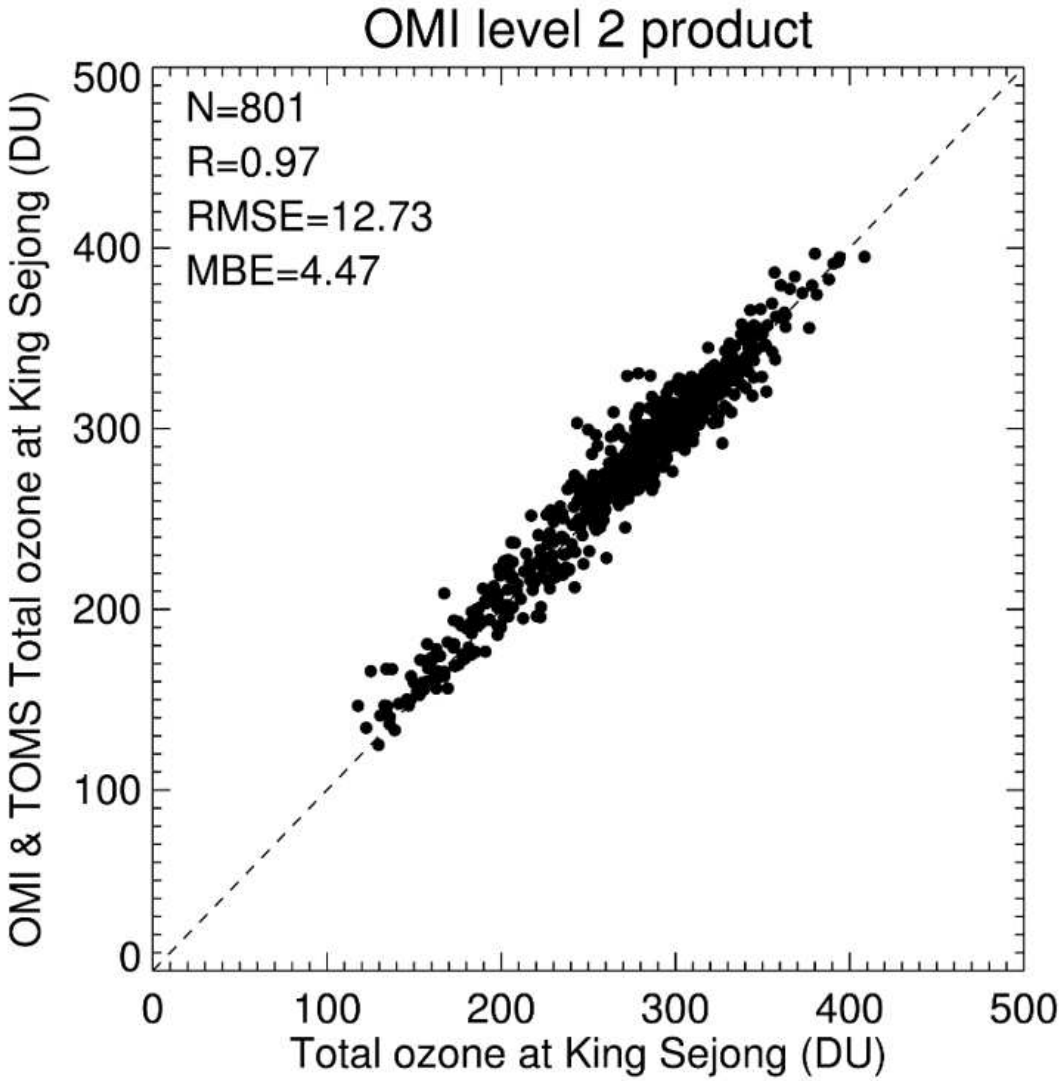


그림 3-3. King Sejong 관측소에서 TOMS-OMI로 관측된 Level 2 오존 전량과 브루어 분광광도계로 관측된 오존 전량의 비교 (1996-2015)

표 3-2 지상 기반 관측과 위성 관측 오존 전량의 비교: 상관계수 (R), Root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE)

관측소 이름	R		RMSE		MBE	
	level 2	level 3	level 2	level 3	level 2	level 3
Belgrano	0.97, 0.98	0.98	13.7, 17.9	12.92	4.8, 14.1	6.33
Faraday	0.96, 0.96	0.93	16.1, 15.9	20.12	-5.4, -7.8	7.33
Halley	0.98, 0.97	0.98	11.1, 12.7	13.02	-1.0, -1.3	4.17
King Sejong	0.97	0.94	12.73	18.58	4.47	7.10
Marambio	0.94, 0.97	0.97	19.9, 13.4	15.12	8.2, 4.9	9.24

Root mean square error (RMSE)와 mean bias error (MBE) 값 또한 Kuttippurath et al. (2018)의 결과와 비교하였을 때의 결과를 표 3-2에 요약하였으며, 이를 통해 격자화된 위성 관측 오존 전량 값을 과학적인 분석에 이용할 수 있음을 확인하였다. 하지만 이 값에는 지역적인 차이가 존재하는데, Marambio, Halley 및 Belgrano 관측소의 오존 전량은 일관성 있는 결과를 보이지만 King Sejong과 Faraday 관측소의 오존 전량은 약한 변동성을 가진다. King Sejong과 Faraday 관측소에서는 level 2 자료 대신 level 3 자료를 이용했을 때 R이 감소하고 RMSE 및 MBE가 증가하는 반면 다른 관측소에서는 큰 차이가 없다. 오존 전량은 polar vortex의 가장자리가 존재하는 남극 대륙 연안에서 크게 변화하는데 (Zhang et al., 2017), 이 변화는 King Sejong과 Faraday 관측소에서 나타나는 지상 관측과 위성 관측 오존 전량 사이의 큰 차이와 관련 있는 것으로 보인다.

오존 전량 변동에 대한 기상 요소의 영향을 보기 위해, 본 연구에서는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts interim reanalysis (ERA-interim)의 각 고도별 기온과 잠재와도, 바람장 자료를 이용하였다 (Dee et al., 2011). 기온과 바람장 자료는 상부 성층권부터 하부 성층권에 이르는 12개의 기압 고도 (5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 125, 150, 175 및 200 hPa) 값을 이용하였고, 잠재와도는 같은 구간에 대해 isentropic 고도로 제공이 되기에 12개의 potential temperature 단위 고도 (300, 315, 330, 350, 370, 395, 430), 475, 530, 600, 700 및 850K)에서의 값을 이용하였다. 분석에는 일평균 값을 이용하였다.

2. 서남극 주변의 오존 감소 패턴

앞에서 언급한 것과 같이 1996년부터 2015년까지의 기간 동안 오존 전량의 시계열을 Weddell Sea에 위치한 5개 관측소의 관측 자료를 이용하여 살펴보았다 (그림 3-4). 지상 및 위성 관측 모두 오존 전량이 약간 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 낮게 나타났던 오존 전량이 증가하였고 연간 변동의 폭이 감소하였다는 점은 최근 10년간 오존 감소현상이 약화되었음을 의미한다. 봄철 오존 전량의 월별 중앙값과 최솟값은 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다 (그림 5). 오존홀이 주로 생성되는 봄철에 대부분의 관측소에서의 관측값들은 특히 10월보다는 9월에 두드러지는 회복세를 최근 들어 보인다 (그림 6). 이러한 양상은 성층권 오존 회복이 시작되었음을 시사하는 최근의 연구들을 뒷받침한다 (Solomon et al., 2016). 5개 관측소에서 관측된 오존 전량은 Belgrano에서 가장 낮고 King Sejong에서 가장 높은 모습을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

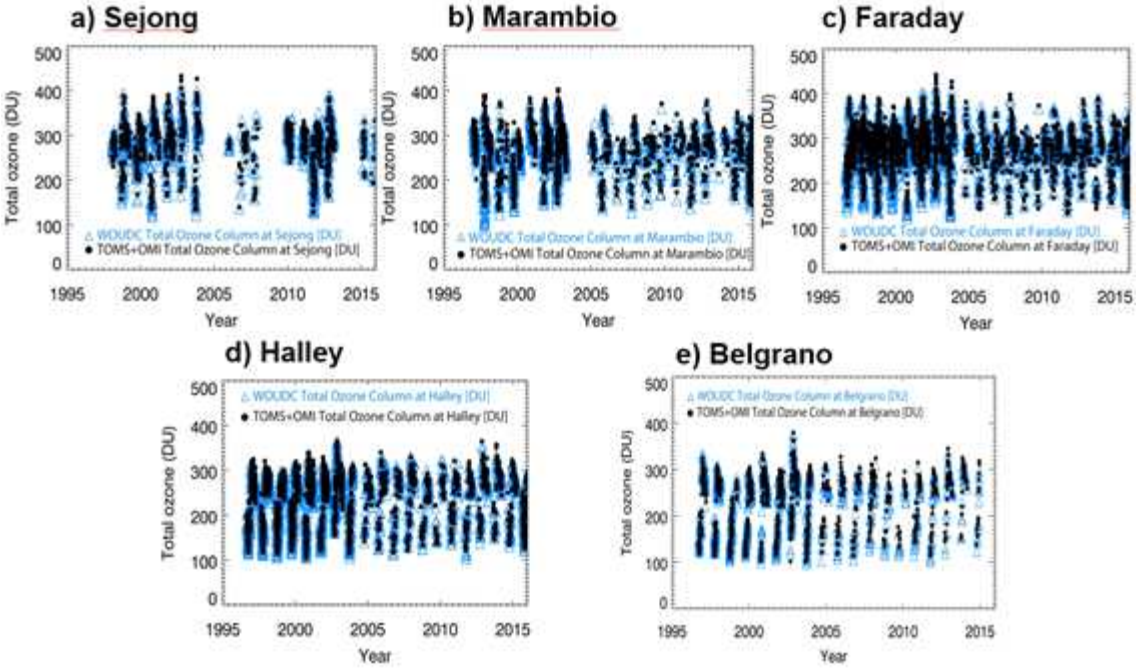


그림 3-4. King Sejong, Marambio, Faraday, Halley 및 Belgrano 관측소에서 관측한 일평균 오존 전량의 시계열. 검은 점은 TOMS와 OMI로 관측한 오존 전량을 의미하며, 파란 점은 브루어와 돕슨 분광광도계로 관측한 오존 전량을 의미

5개 관측소 모두에서 일관된 장기 추세가 나타났지만, 관측소마다 연도별 변화와 연간 변동은 다르게 나타남을 그림 3-5 및 그림 3-6을 통해 확인하였으며 이는 선행연구 결과들(e.g., Grytsai et al., 2005; Huck et al., 2005)과도 유사하게 나타났다. 이는 오존층 파괴 패턴이 공간적으로 불균일하다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 오존 전량의 상관성 분석을 기반으로 하여 관측소 간 오존 전량의 관계가 일관성이 있는지 살펴보았다. 이를 위해 King Sejong 관측소의 오존 전량과 다른 관측소의 오존 전량을 비교하였다. King Sejong 관측소의 오존 전량은 Marambio (그림 3-7a) 및 Faraday (그림 3-7b) 관측소의 오존 전량과 높은 상관관계를 보인다. 두 관측소는 남극 반도의 King Sejong 관측소 근처에 위치한다 (그림 3-8). 그러나 관측소 간 거리가 멀어질수록 Halley (그림 3-7c)와 Belgrano 관측소 (그림 3-7d)와 같이 오존 전량의 상관관계가 약해진다. 이러한 낮은 상관관계는 그림 3-7c와 3-7d에서 확인할 수 있는 바와 같이 9월에서 11월까지의 봄철에 점차 높아진다. 이 계절 동안, King Sejong 관측소의 오존량은 부분적으로 오존 파괴 현상의 영향을 받지만 70°S 이상의 위도에 위치하는 Halley 및 Belgrano 관측소의 오존 전량은 대부분 오존홀의 결정 임계값인 220 Dobson Unit (DU) 이하에 분포한다 (Bodeker et al., 2002; Newman et al., 2004). 74°S 위도 부근에 위치하는 Halley 관측소의 오존 전량은 부분적으로 King Sejong 관측소의 오존 전량과 비슷하다

(그림 7c). 하지만 79°S 위도 부근에 위치하는 Belgrano 관측소의 오존 전량은 대부분 220 DU보다 낮아 King Sejong 관측소의 오존 전량과 약한 상관관계를 보인다.

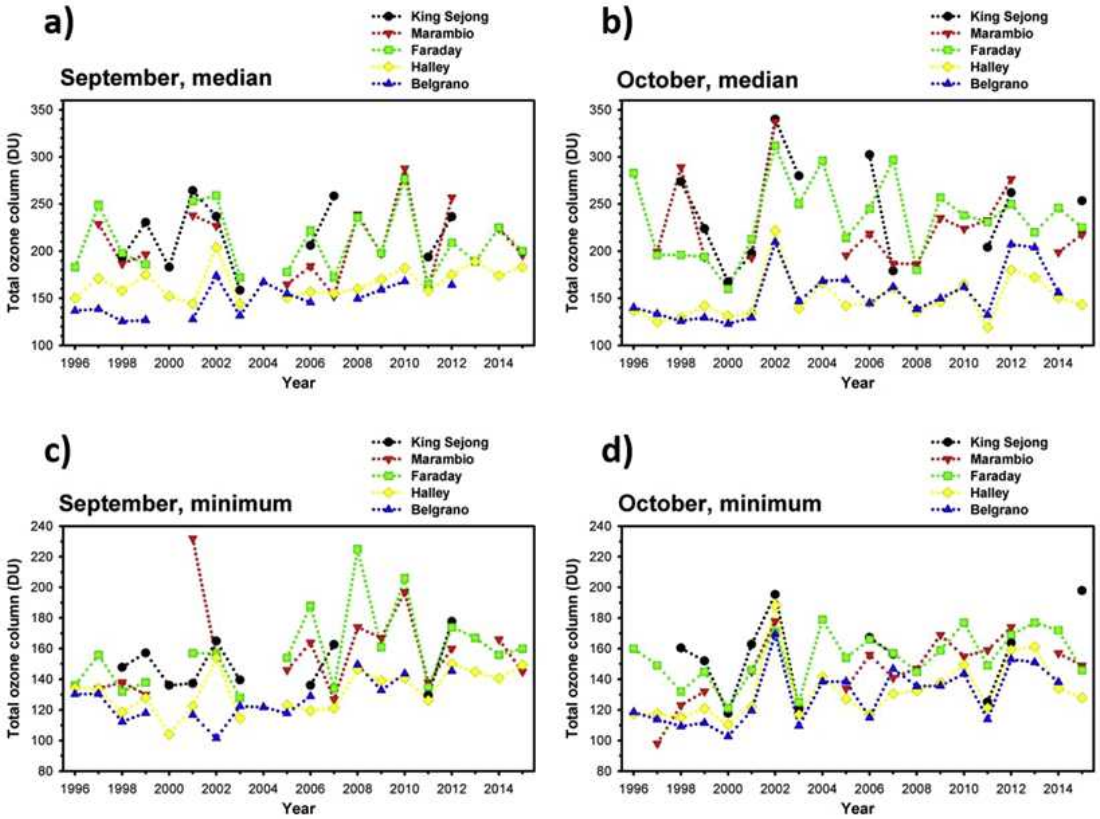


그림 3-5. 오존 감소 현상이 가장 크게 나타나는 9, 10월 오존 전량 중앙값 (a, b)과 최솟값 (c, d)의 연간 변동

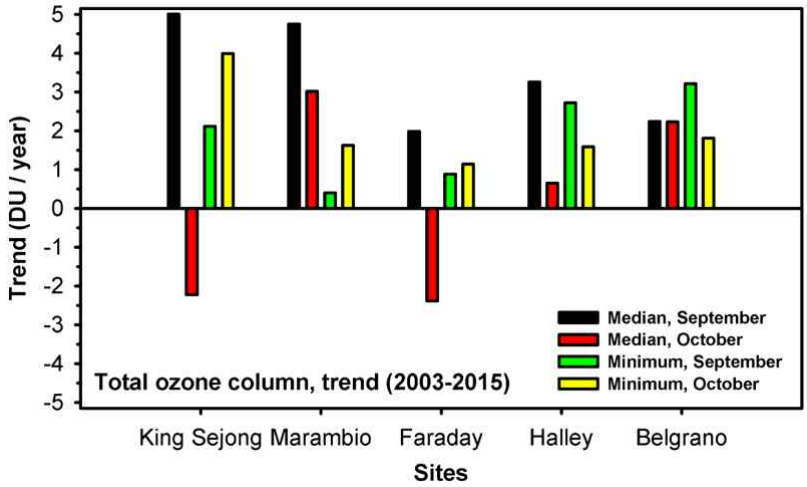


그림 3-6. 오존 감소 현상이 가장 크게 나타나는 9, 10월 5개 분석 지점에서 오존전량의 중간값 및 최솟값이 가지는 트렌드 값 계산 (2003-2015년 기간).

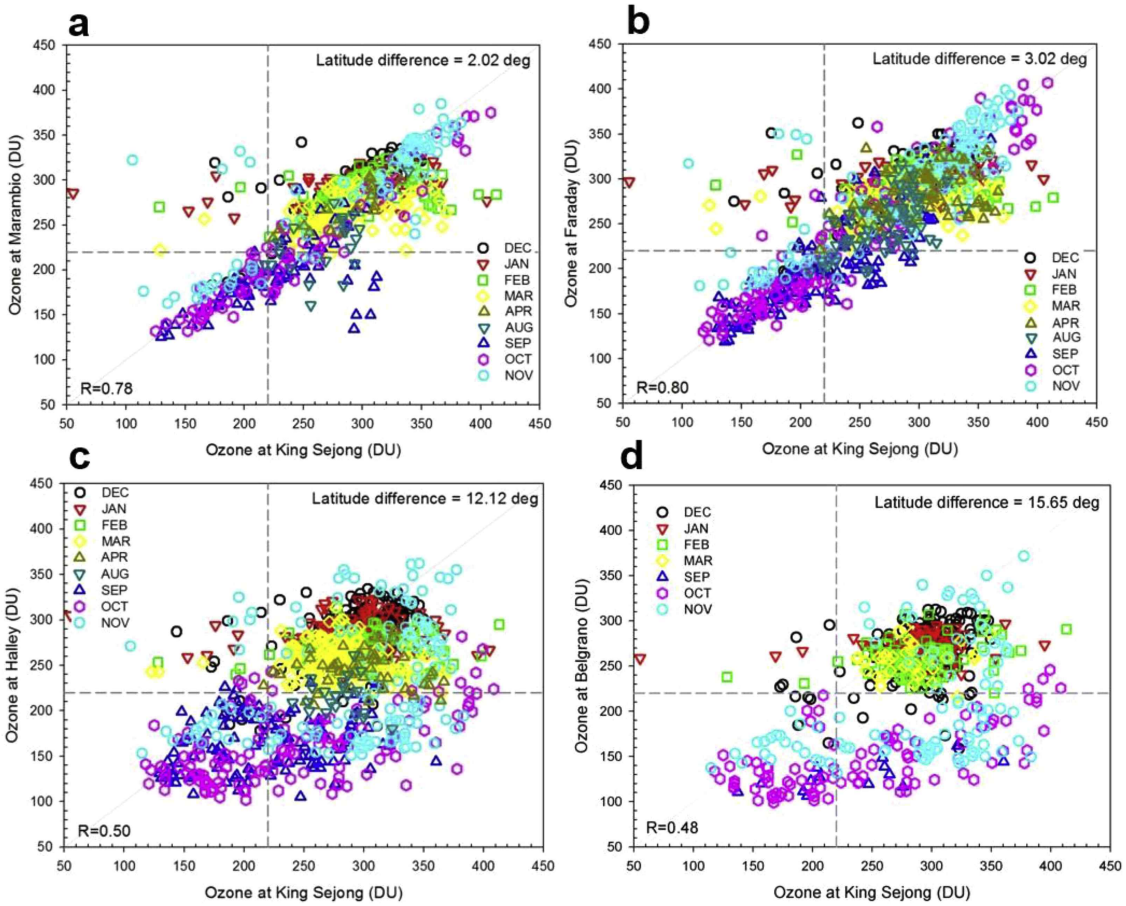


그림 3-7. (a) Marambio, (b) Faraday, (c) Halley, (d) Belgrano 관측소에서 관측된 오존 전량과 King Sejong 관측소에서 관측된 오존 전량 간의 비교. 색은 각기 다른 달을 의미하며, 점선은 220DU를 나타냄

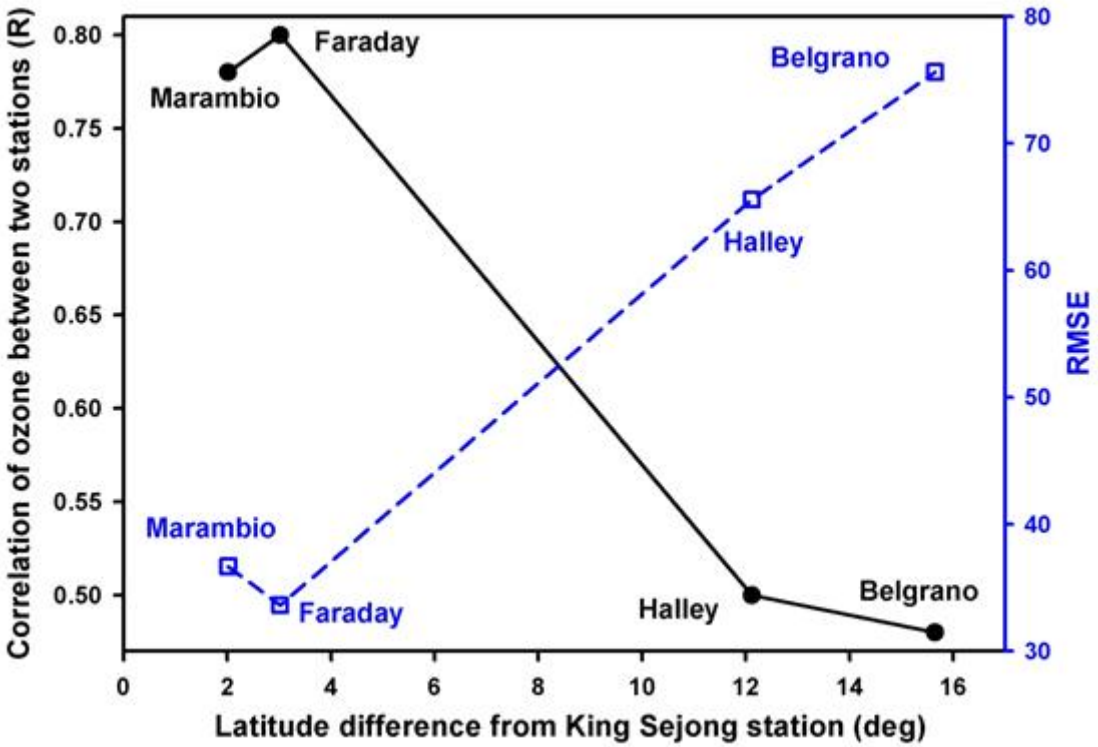


그림 3-8. King Sejong 관측소와 다른 4개 관측소에서 관측된 오존 전량 간의 correlation coefficient (검정), root-mean-square deviation (RMSE, 파랑) 및 관측소별 위도 차이 (그림 3-7 참고)

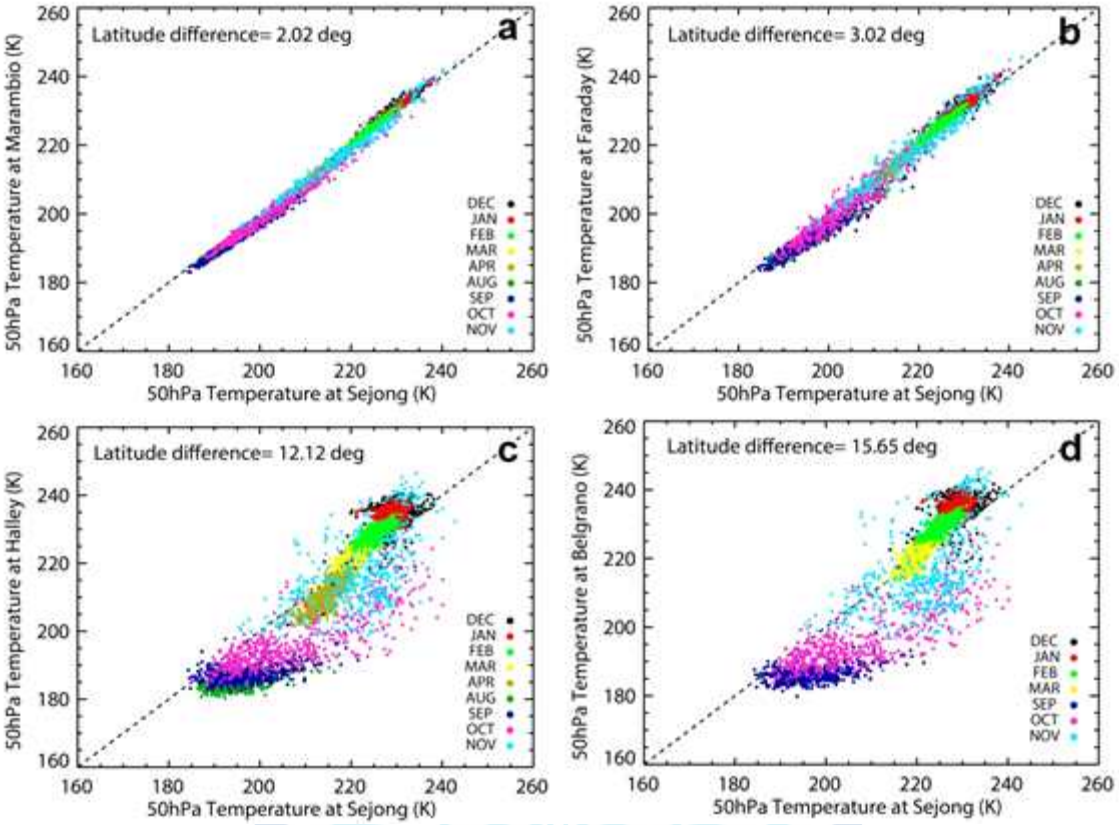


그림 3-9. King Sejong 관측소와 (a) Marambio, (b) Faraday, (c) Halley, (d) Belgrano 관측소의 50-hPa 기온 비교. 색은 각기 다른 달을 의미

지역적으로 나타나는 성층권 오존 파괴 현상의 특징은 위도가 증가함에 따라 나타나는 뚜렷한 대기의 차이와 관련되어 있다. 즉, 70°S의 북쪽과 남쪽의 관측소에서 관측된 오존 전량의 약한 상관관계는 성층권 오존 파괴 현상과 관련된 기상 조건이 Weddell Sea 전역에 걸쳐 같게 나타나지 않는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 가설을 확인하기 위해, 그림 3-7의 오존 전량 비교와 같은 방식으로 기상 요소를 이용하여 5개 관측소 간의 상관관계 분석을 수행하였다. 그림 3-9와 그림 3-10은 가장 가까운 관측소들 (King Sejong vs. Marambio)부터 가장 먼 관측소들 (King Sejong vs. Belgrano)까지 각각 50-hPa 기온과 850-K 잠재와도의 상관관계를 나타낸다. 기대한 것과 같이, 서로 근접한 관측소 간 기온 및 잠재와도는 선형 상관관계를 가졌으며 (예. 3-9a 및 3-10a), 먼 관측소 간 상관관계는 약했다 (예. 3-9d 및 3-10d). 특히 Belgrano 관측소는 King Sejong 관측소보다 기온이 훨씬 낮고 잠재와도가 강하게 나타났으며, 이러한 차이는 특히 오존홀이 생성되는 봄철에 크게 나타났다.

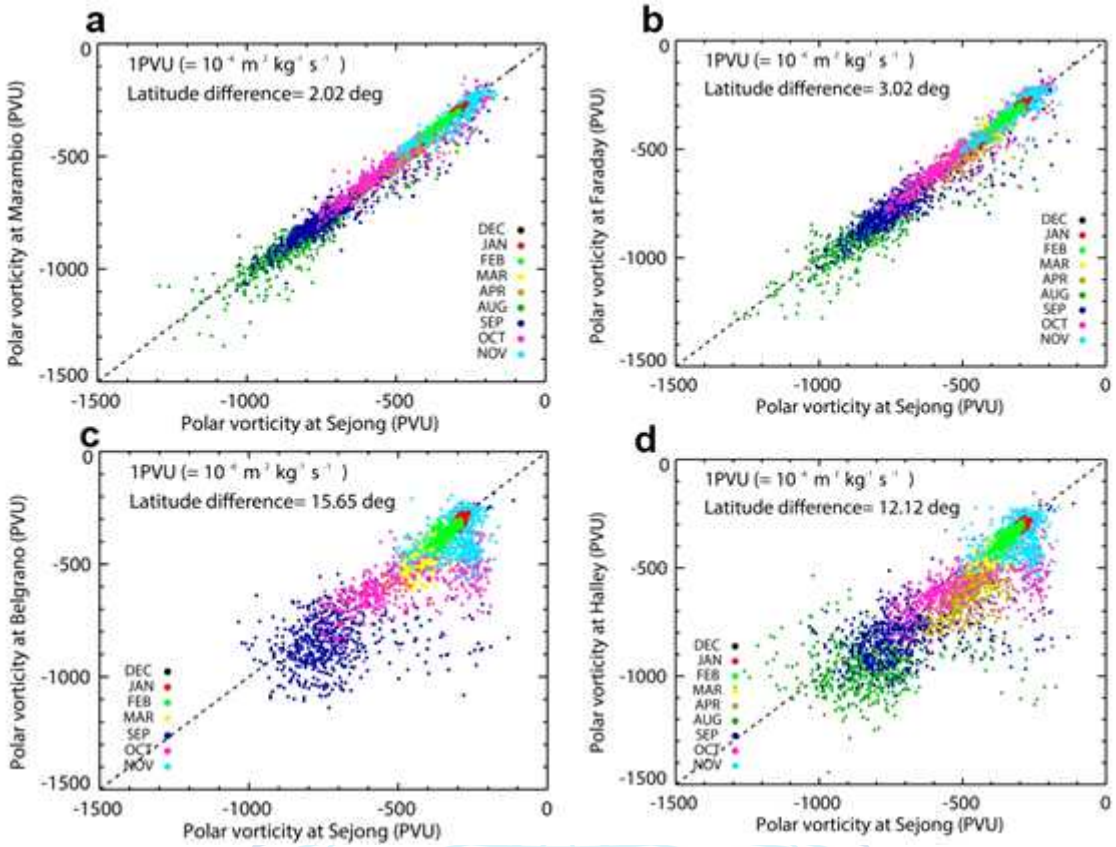


그림 3-10. King Sejong 관측소와 (a) Marambio, (b) Faraday, (c) Halley, (d) Belgrano 관측소의 850-K 잠재와도 비교. 색은 각기 다른 달을 의미

성층권 polar vortex 안에서 오존홀이 발생한다는 것을 고려하면, 이 결과들은 고위도일수록 오존 전량 변동이 polar vortex에 의해 크게 영향을 받지만, 이보다 낮은 위도에서의 오존 전량 값은 polar vortex에 의해 영향을 받지 않음을 나타낸다고 볼 수 있다. 즉 같은 남극의 관측소에서 측정한 자료라 하더라도 위도차이를 고려하여 남극 성층권 오존홀을 진단할 필요가 있음을 나타냄과 동시에, 만약 남극 전체 지역별로 polar vortex가 변하는 위도 범위가 일정하지 않을 경우 오존홀에 수반되는 자외선 복사량 변화 및 기상, 기후 변동성과의 관계성이 균일하게 나타나지 않을 수 있음을 가리킨다.

위에서 polar vortex 영역은 5개의 서남극 관측소 사이에서 이동하고, 이로 인해 관측소 간 기상 요소에 차이가 발생함을 보였다. 앞서 살펴본 그림 3-5에서 2010년 (높은 오존전량)과 2011년 (낮은 오존전량) 사이의 큰 오존 전량 변동을 확인할 수 있으며, 이를 여러 온위고도에서의 polar vortex 크기 및 세기와 관련하여 설명할 수 있다 (그림 3-11 및 3-12).

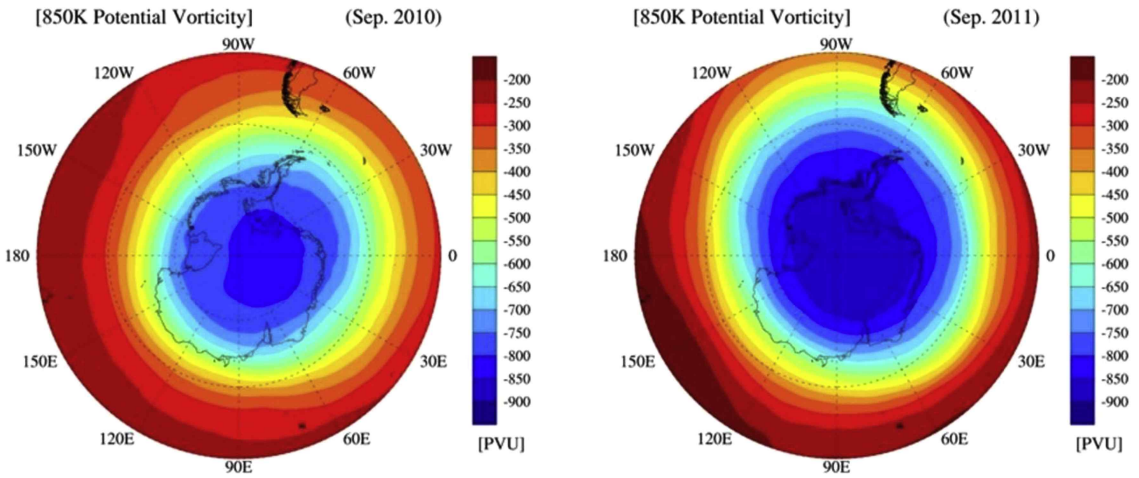


그림 3-11. 2010년 (왼쪽)과 2011년 (오른쪽) 9월 850-K 고도 월평균 잠재와도의 공간 분포

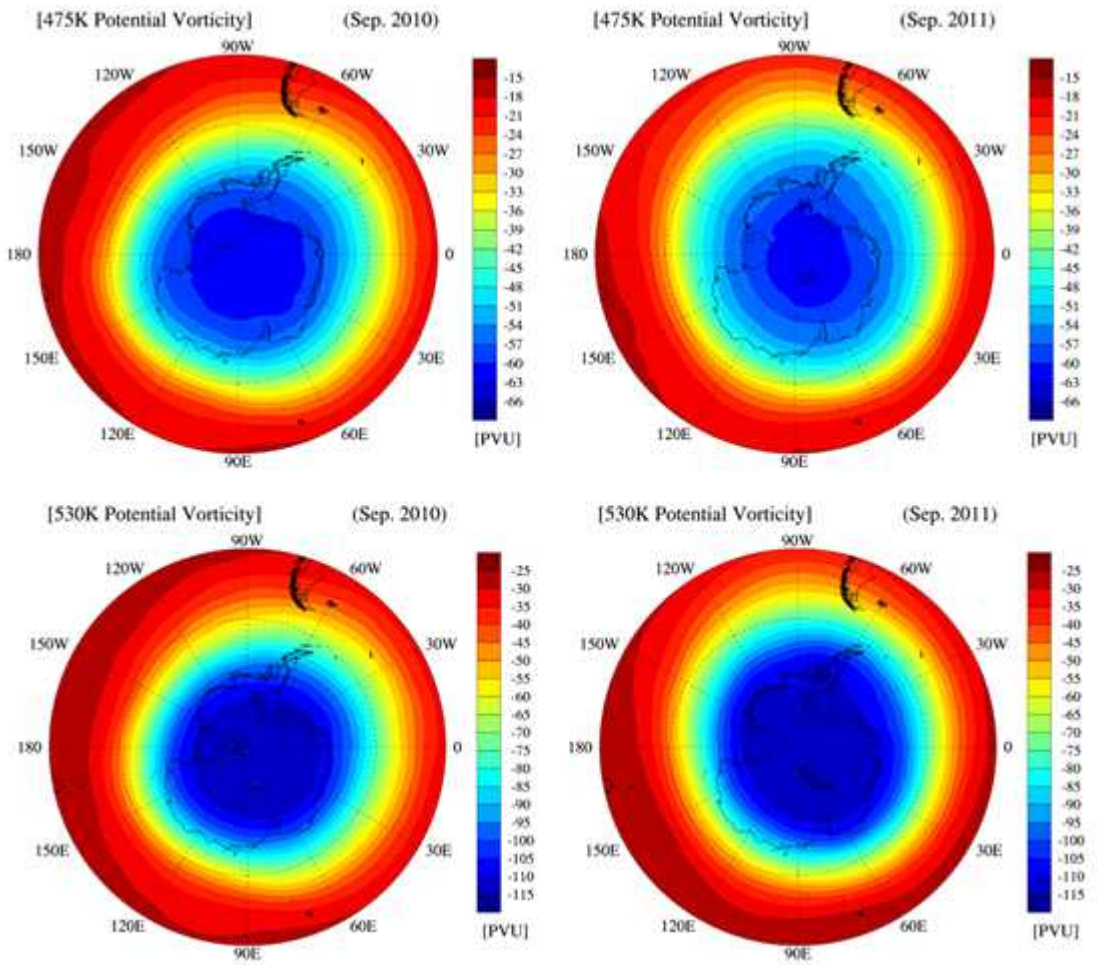


그림 3-12. 2010년 (왼쪽)과 2011년 (오른쪽) 9월 475-K (위쪽), 530-K (아래쪽) 고도 월평균 잠재와도의 공간 분포

3. 기상 조건과의 관계

이전에서 논의된 바와 같이, 오존 전량의 변화는 polar vortex와 매우 밀접하게 관련되어 있다. 이 관계에 대해 세부적으로 규명하기 위하여 ERA-Interim 재분석장의 기온, 잠재와도 및 바람장의 연직 분포를 이용하였다. 성층권 오존과 대기순환 간의 관계가 보일 것으로 기대되는 (Thompson et al., 2011) 9월부터 이듬해 3월까지 각 고도별 기상 요소들과 오존 전량 간의 상관관계를 계산하였다.

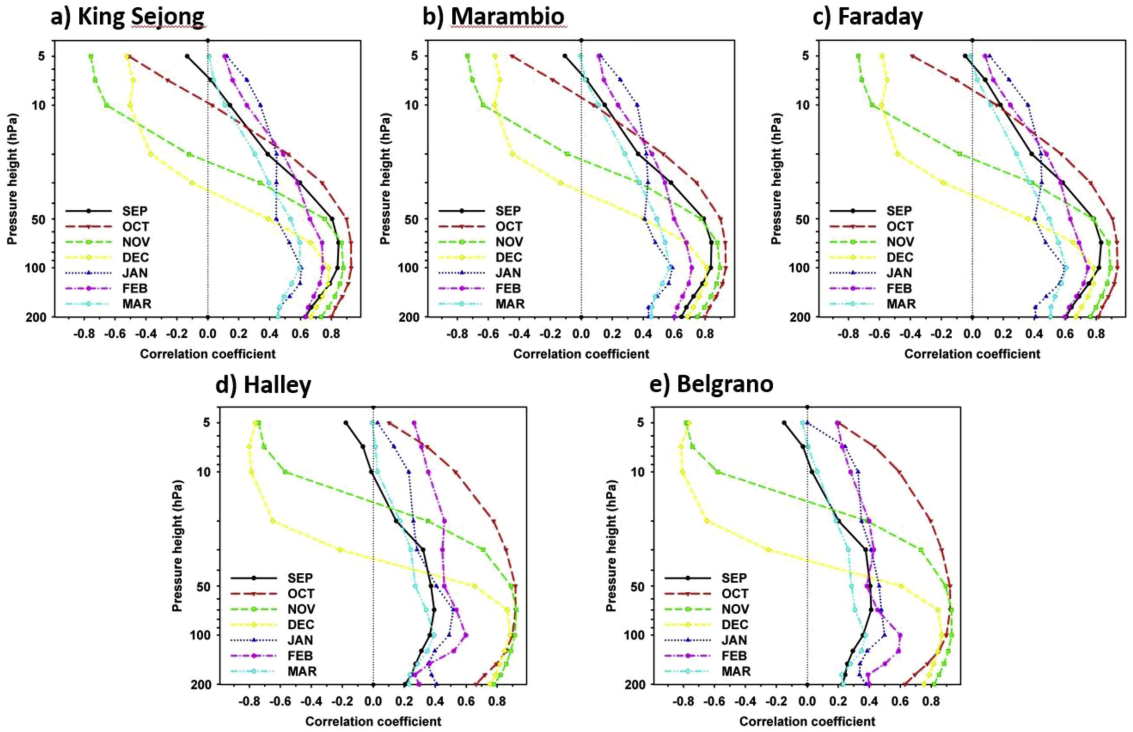


그림 3-13. (a) King Sejong, (b) Marambio, (c) Faraday, (d) Halley, (e) Belgrano 관측소에서의 오존 전량과 12개 기압 고도(5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 125, 150, 175, 및 200hPa) 기온 간의 상관관계

그림 3-13은 각 관측소에서 오존 전량과 성층권 기온 (200-5hPa 사이 12개 고도) 간의 상관관계를 나타낸다. 일반적으로, 하부 성층권 (50hPa 이상)에서는 높은 양의 상관관계, 상부 성층권에서는 높은 음의 상관관계 (10hPa 이하)를 보이는 연직 분포를 볼 수 있다. 하부 성층권에서 보이는 양의 상관관계는 봄-여름 동안 일관되게 나타나나 상부 성층권에서 보이는 음의 상관관계는 계절적인 차이를 보인다. 이러한 패턴은 상부와 하부 성층권 사이 오존 화학과 관련된 대기 조건의 역할을 나타낸다.

하부 성층권에서 나타나는 오존과 기온 사이 양의 상관관계는 polar vortex 내

부에서 나타나는 성층권 오존 파괴 현상을 의미한다. 선행연구들에서 polar vortex가 강화되면서 경도 방향의 열 교환이 제한되기 때문에 기온이 낮아짐을 밝힌 바 있다. 이때, 얼음 입자로 구성된 극 성층권 구름 (polar stratospheric cloud)이 polar vortex 내부에 형성될 수 있다. 이 PSC는 HNO_3을 흡수하여 염소 라디칼의 reservoir인 $ClONO_2$의 형성을 억제할 수 있다 (Keeble et al., 2014). 결과적으로, PSC는 위의 denitrification (Salawitch et al., 1989) 과정을 통해 성층권 질소의 양을 줄이고 성층권에서 염소 라디칼의 재순환에 기여하여 강한 오존 파괴를 초래한다. 이 과정은 일부 이전 연구에서 논의된 바와 같이 오존과 기온 사이의 양의 상관관계를 설명한다 (Solomon et al., 2005, 2014).

상부 성층권의 오존과 기온 사이의 음의 상관관계는 오존 화학의 온도 의존성으로 설명할 수 있다. 성층권 오존 생성 및 손실 과정은 Chapman 메커니즘 (예 : Velasco et al., 2008)에 의해 설명된다. Chapman 반응에 기초한 이전의 연구는 저온 환경에서 오존 파괴가 느리게 일어나기 때문에 상부 성층권 오존이 상당하게 존재할 수 있음을 보인 바 있다 (Jonsson et al., 2004; Shepherd and Jonsson, 2008). 예를 들어, Jonsson et al. (2004)는 $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$ 반응이 음의 온도 의존성을 가지는 것을 밝힌 바 있고, 이는 이후 온실기체의 증가가 성층권 오존과 기온 변화에 미치는 영향과 관련하여 논의되어 왔다 (Jonsson et al., 2009; Plummer et al., 2010; Gillett et al., 2011). 뿐만 아니라 Limb sounding 관측으로 상부 성층권에서 오존과 기온이 음의 상관성을 가진다는 것이 밝혀졌다 (Stolarski et al., 2012).

연직적으로 변하는 상관관계는 오존 전량의 변화가 하나의 대기 특성에 기인하는 것이 아님을 시사한다. 강한 polar vortex 내부에서 성층권 오존 파괴 현상이 강하게 나타나는 것이 전형적인 패턴이지만, 오존 전량의 변동은 다른 요인들에 대해 민감도를 가지기 때문에 오존과 기온의 관계가 대기 환경 조건에 의존한다고 생각할 수 있다. 실제로, 오존과 기온의 상관관계의 연직적인 모양은 큰 월별 변동성을 보이고 이를 그림 3-13에 나타내었다. 봄에는 극 와도 이류가 강화됨에 따라 대규모의 오존 파괴 현상이 일어나지만 이 현상이 시작되는 날짜는 지역적인 태양 복사의 차이 때문에 위도에 따라 달라질 수 있다. 따라서 하부 성층권에서 나타나는 오존 전량과 기온 간의 양의 상관관계는 9월에 King Sejong, Marambio, Faraday 관측소에서만 나타난다. 이보다 고위도에 위치한 Halley와 Belgrano 관측소에서는 이와 같은 상관관계를 볼 수 없는데, 이는 이 시기에 아직 광화학적인 오존 파괴 현상이 나타나지 않기 때문으로 생각된다. 10월에는 모든 관측소에서 오존과 하부 성층권 기온 간의 상관관계가 높은 양의 값을 보인다. 상부 성층권의 경우 10월에

70°S 이하의 위도에 위치한 관측소에서는 음의 상관관계를 보이기 시작하는 반면 70°S 이상의 위도에 위치한 관측소에서는 이와 같은 패턴이 보이지 않는다.

11월에는 5개 관측소 모두 상부 성층권에서 오존과 기온의 높은 음의 상관관계를 나타내기 시작했다. 이 음의 상관관계 패턴은 12월까지 나타나며 여름이 되면서 기온이 증가하면 상부 성층권에서 오존 생성에 더이상 기여하지 않기 때문에 이후에는 약화된다. 상부 성층권과는 반대로 하부 성층권에서는 봄-여름에 걸쳐 오존과 기온 사이의 양의 상관관계가 계속해서 나타난다.

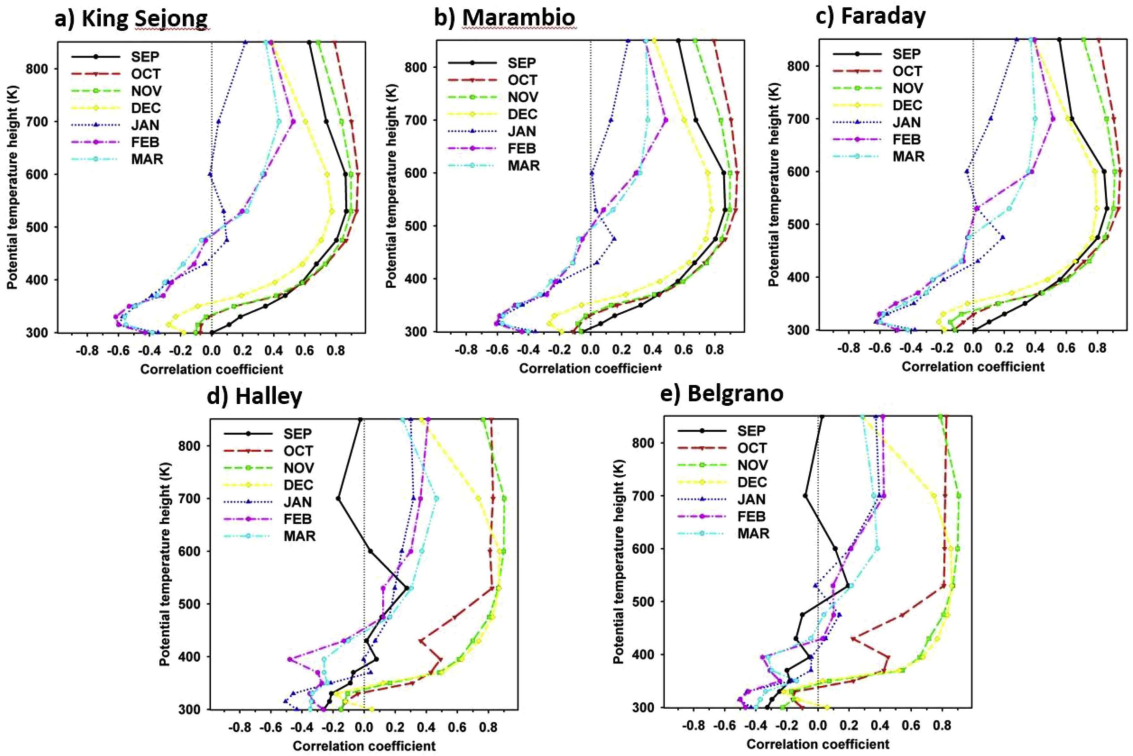


그림 3-14. (a) King Sejong, (b) Marambio, (c) Faraday, (d) Halley, (e) Belgrano 관측소에서의 오존 전량과 12개 온위 고도(300, 315, 330, 350, 370, 395, 430, 475, 530, 600, 700 및 850K) 잠재와도 간의 상관관계

추가적으로, 오존 전량과 잠재와도를 이용하여 위와 같은 상관관계 분석을 수행하였다. 그림 3-14는 온위 고도에 따라 오존과 잠재와도의 상관관계의 연직 분포를 나타낸 것이다. 오존과 기온의 상관관계 분석과 유사하게 연직적으로 대비되어 나타나는 패턴을 여기서도 확인할 수 있는데, 중-하부 성층권 (400K 이상 고도)에서는 강한 양의 상관관계가 나타나지만 대류권 계면 근처 (400K 이하 고도)에서는 강한 양의 상관관계를 볼 수 있다. 중-하부 성층권에서 나타나는 강한 양의 상관관계는 위도에 따라 월별로 정도의 차이를 보이며 봄에 나타나는데, King Sejong,

Marambio 및 Faraday 관측소에서는 9월부터 11월까지 나타나고 Halley와 Belgrano 관측소에서는 10월부터 11월까자 나타난다. 여름이 되면서 polar vortex가 약화하면서 성층권 오존 파괴 현상에 주는 영향 또한 감소하기 때문에 이러한 양의 상관관계가 감소한다.

이와는 반대로 대류권 계면 부근에서는 오존 전량의 감소와 polar vortex의 약화로 인한 음의 상관관계가 나타난다. polar vortex의 약화 시 mixing 과정이 활발해지기에 이러한 특징은 더 낮은 오존 농도를 갖는 공기 질량이 수송되면서 polar vortex의 강도에 변동을 주는 것을 나타낸다. 실제로, 선행연구들 (Pan et al., 2009; Gettelman et al., 2011)에서 극 지역 하부 성층권에서 낮은 오존 농도가 나타나는 것이 논의되었으며, 이와 극 성층권으로 중위도 대류권의 공기가 meridional 방향으로 수송되는 것이 연관되어 있다는 것이 밝혀진 바 있다. Pan et al. (2009)은 또한 낮은 오존량을 보유한 이 중위도 대류권의 공기 질량의 유입이 subtropical 대류권 계면을 변화시키고 이와 같은 유입은 주로 370-400K 사이의 온위 고도 사이에서 일어난다고 설명했다. 그림 3-14에서 보인 것과 같이, 오존 전량과 잠재와도 사이의 음의 상관관계는 400K 고도 아래에서도 나타난다. 이 음의 상관관계 패턴은 Halley와 Belgrano 관측소보다 King Sejong, Marambio 및 Faraday 관측소에서 더 높았으며, 이는 중위도 대류권 공기 질량의 유입이 polar vortex 내부에서 약해진다는 것을 뒷받침한다. 오존과 잠재와도의 음의 상관관계가 오존홀 생성 이후의 계절인 여름에만 뚜렷하게 나타난다는 것 또한 흥미로운 특징 중 하나인데, 이를 polar vortex가 깊게 발달하지 않을 때 낮은 오존 농도의 유입이 용이하다는 것과 연관지어 생각할 수 있다.

이 정도 범위에서만 살펴보아도 우리가 얻을 수 있는 중요한 교훈이 있는데, 오존 전량의 변동성과 기상장의 상관관계가 고도별로 완전히 다르게 나타날 수 있다고 하는 점이다. 온도와 잠재와도와의 상관관계로 정리를 하자면 크게 대류권계면 부근, 성층권 하부 및 중간 지역, 성층권 상층 지역 이렇게 세 군데의 regime이 나누어지는 것을 확인할 수 있으며 성층권 하부 및 중간 지역에서 전통적으로 알려진 오존홀과 polar vortex의 관계가 잘 성립되는 반면 그 아래 대류권계면 근처에서는 대류권 대기와 섞이는 현상(소위 stratosphere-troposphere exchange라고 함)이, 중간권계면에 가까운 성층권 상층의 경우는 오존 화학 그 자체의 특성에 좀 더 초점을 두고 살펴볼 필요성이 제시된다. 이것은 제 1절에서 오존존데 관측으로 오존 및 기온의 연직 상관성을 비교해서 볼 때도 어느 정도 확인되었던 부분으로서, 남극 성층권 오존 파괴 반응 연구 과정에서 그 동안 소홀했던 연직 분포 차이에 좀 더 초점을 두고 분석할 필요가 있음을 의미한다.

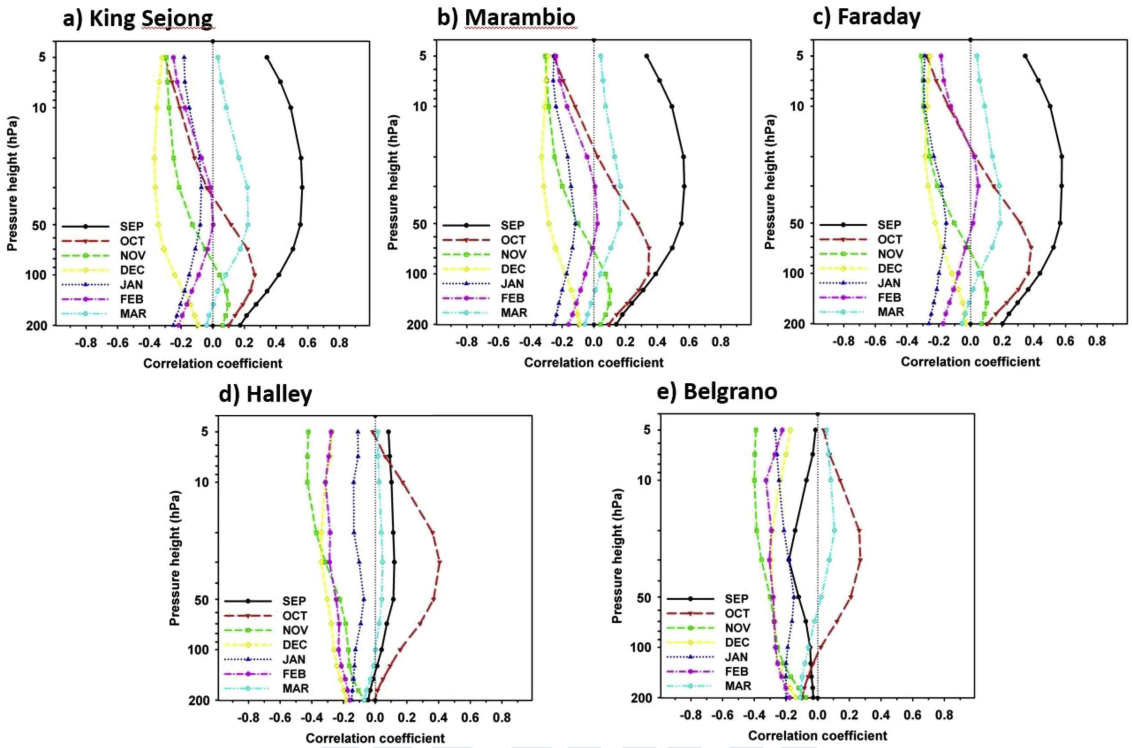


그림 3-15. (a) King Sejong, (b) Marambio, (c) Faraday, (d) Halley, (e) Belgrano 관측소에서의 오존 전량과 12개 기압 고도(5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 125, 150, 175, 및 200hPa) zonal wind 간의 상관관계

마지막으로, 오존 전량과 zonal(그림 3-15) 및 meridional(그림 3-16) 풍속의 관계 조사하여 오존 전량 변동에 대한 대기 질량 수송 또는 mixing 과정의 영향을 보았다. 풍속과의 상관관계는 기온(그림 3-13)과 잠재와도(그림 3-14)의 결과와 비교할 때 강하게 나타나지는 않았지만 여기서도 흥미로운 부분을 발견할 수 있었다. 약 20-50hPa의 고도에서 9월에는 King Sejong, Marambio 및 Faraday 관측소(그림 3-15a, 3-15b, 및 3-15c)에서, 10월에는 Halley 및 Belgrano 관측소에서 다소 높은 양의 상관관계가 나타났다(그림 3-15d, 3-15e). 오존 전량과 zonal 풍속 사이의 산점도(그림 17)는 약한 zonal 풍속과 함께 나타난 오존 전량의 감소가 양의 상관관계를 나타낼 수 있음을 보여준다. 이 패턴은 외부 공기 질량과의 mixing이 없을 때 polar vortex 내부에서 성층권 오존이 할로겐과 관련된 화학 반응에 의해 감소하기 때문에 나타날 수 있다. 또한, 오존 전량과 zonal 풍속 사이의 상관관계를 통해 성층권 오존이 가장 많이 감소한 기간을 알 수 있는데, 실제로 오존 전량의 중앙값은 실제로 9월에 70°S 이하의 관측소에서 가장 낮고, 10월에는 70°S 이상의 관측소에서 가장 낮게 나타났다(그림 3-5). 아직 바람장과의 관계는 좀 더 깊은 분석을 통해 구체적으로 해석할 필요가 있다고 보여진다.

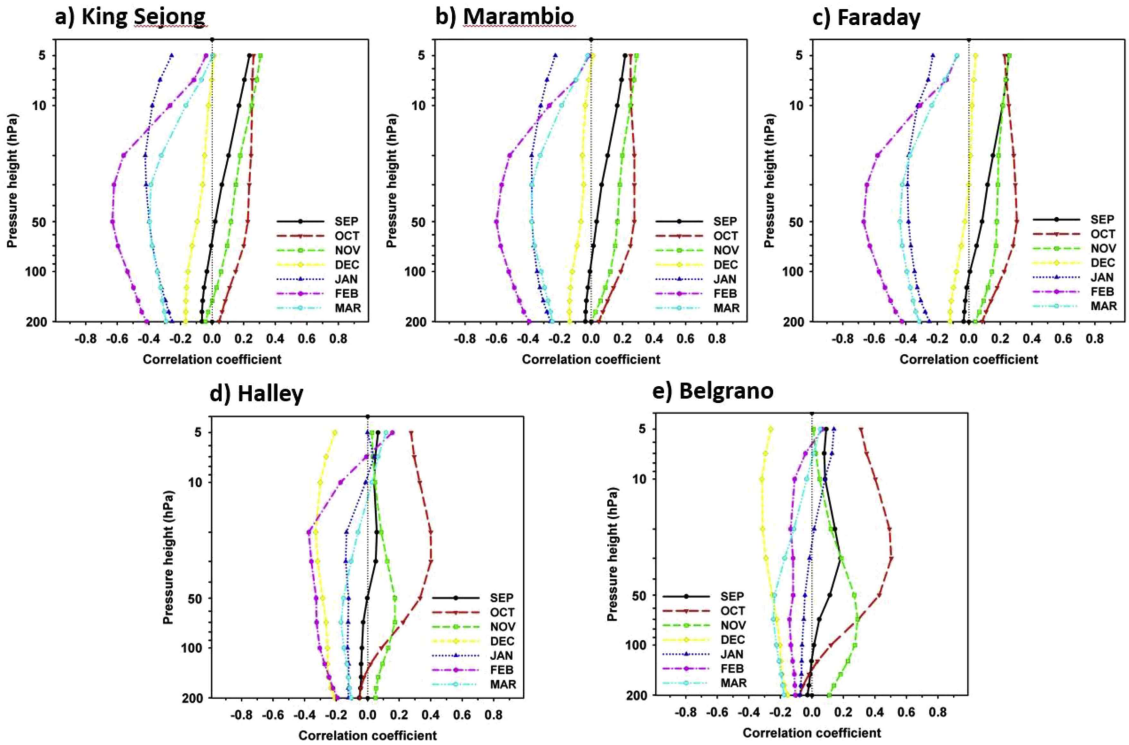


그림 3-16. (a) King Sejong, (b) Marambio, (c) Faraday, (d) Halley, (e) Belgrano 관측소에서의 오존 전량과 12개 기압 고도(5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 125, 150, 175, 및 200hPa) meridional wind 간의 상관관계

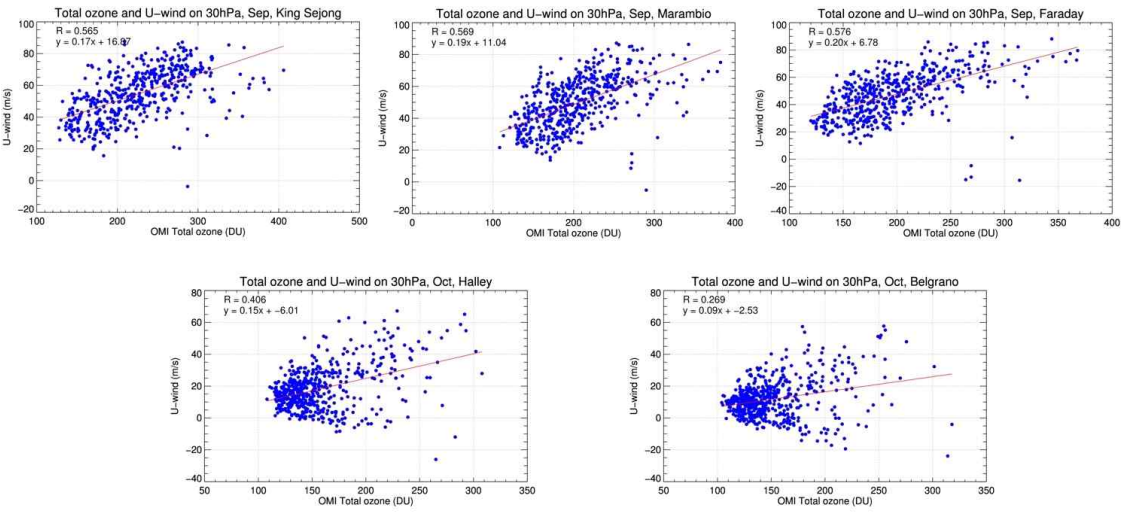


그림 3-17. 9월 (a) King Sejong, (b) Marambio, (c) Faraday, 10월 (d) Halley, (e) Belgrano 관측소에서의 오존 전량과 30-hPa 고도 zonal 풍속 (U-wind)의 상관관계

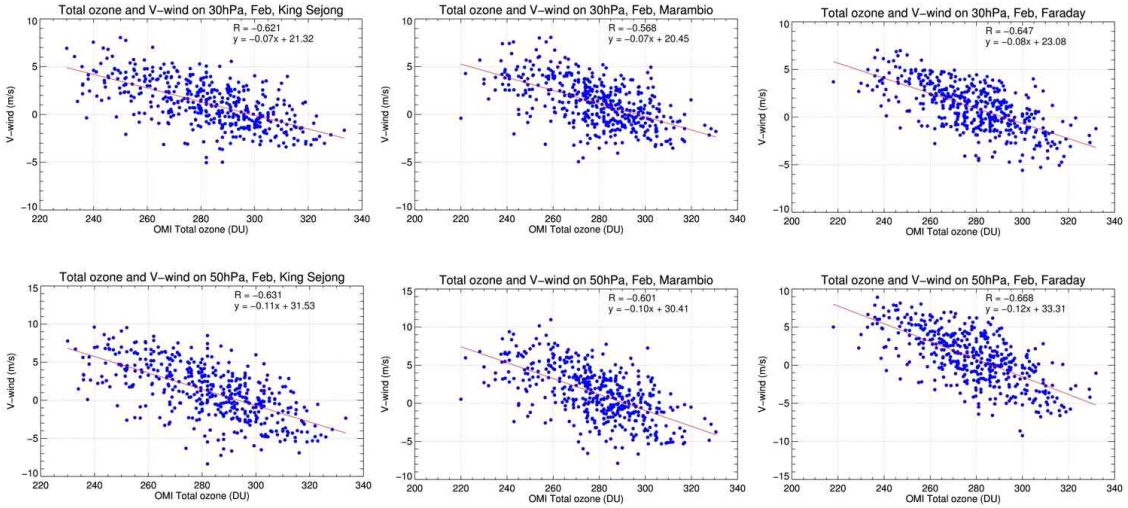


그림 3-18. 2월 (a) King Sejong, (b) Marambio, (c) Faraday, 10월 (d) Halley, (e) Belgrano 관측소에서의 오존 전량과 50-hPa 고도 meridional 풍속 (V-wind)의 상관관계

상관관계 분석시 상관관계 계수만을 보고 판단할 경우 자료가 실제로 가지는 특성을 놓치는 경우가 많다. 특히 그 상관관계 값이 애매한 범위에서 변할 경우는 실제로 큰 의미 없는 변화가 차이를 만들어내는 것처럼 만들 수도 있기 때문에 반드시 산포도를 직접 보아가며 분석할 필요가 있다. 오존 전량과 바람장의 상관관계의 경우에 대해 zonal 및 meridional 방향 상관성에 대한 산포도 결과를 일부 선별해서 분석에 활용하였다 (그림 3-17 및 3-18). 오존 전량과 meridional 풍속 사이의 상관관계(그림 3-16)에서 여름(1월-3월) 20-50hPa 고도에서 나타나는 음의 상관관계는 특히 70°S 이하의 관측소에서 가장 두드러지게 나타난다. 오존 전량과 meridional 풍속 사이의 산포도(그림 3-18)는 이 음의 상관관계가 높은 오존량을 수송하여 극으로 향하는 바람과 적도로 향하는 바람에 의한 낮은 오존량 유입의 결과임을 보여준다. 이러한 패턴은 남극점 근처의 오존 전량이 항상 중위도 또는 그보다 낮은 위도대 지역의 오존 전량보다 항상 낮다는 것을 생각했을 때 타당함을 알 수 있다. 그림 3-13에서, 하부 성층권에서 오존과 기온 간의 상관관계가 polar vortex가 약화되는 여름 동안에도 양의 값을 보이는 것을 확인하였다. 이 패턴은 중위도의 대기가 극의 대기보다 따뜻하고 오존을 더 많이 함유하고 있기 때문에 여름에 오존 전량과 meridional 풍속 사이에 음의 상관관계가 나타나는 것을 이용하여 설명할 수 있다. Polar vortex가 깨지면 meridional 방향의 air mixing이 활성화되고, 이로 인해 성층권에서 여름철 오존 전량과 meridional 풍속 사이의 높은 음의 상관관계가 나타나는 것으로 추정되는데 아직은 많이 모호하므로 향후 보다 더 자세한 분석을

통해 현재까지 살펴본 내용들을 다시 점검할 필요가 있다.

위의 분석을 정리하면, 서남극 Weddell Sea 주변의 오존 전량 변동에는 여러 대기 과정이 관여한다. 중하부 성층권에서는 할로겐으로 인한 오존 파괴 과정이 주로 일어나 polar vortex의 강도에 의해 그 정도가 달라지며, 상부 성층권에서 오존 농도의 변화는 기온에 따라 그 생성과 파괴가 달라지는 Chapman 매커니즘으로 설명할 수 있다. 대류권 계면 근처에서는 중위도 대류권 공기 질량의 meridional 방향의 유입이 성층권 공기 질량의 유입보다 낮은 오존 농도 보이는 것을 발견했다. 바람장과의 상관관계를 통해 남극 대기의 수송과 mixing이 어떻게 Weddell Sea 주변의 오존 전량 변동의 지역적 차이에 영향을 미치는지에 대해 분석하였다. 각 요인이 미치는 공간적 규모와 계절적 영향이 다르기 때문에 서남극에서 각 요소와 오존 전량의 관계가 전체적으로는 일관된 패턴을 보이나, 고도 분포 및 계절적 변동은 지역적으로 다르게 나타났다.

4. 해빙과 남극 기지 지역 오존 전량 간의 관계 분석

기상장과의 상관성 분석에 더하여 오존전량과 남극 해빙 자료의 상관성에 대한 분석도 간단히 진행해보았다. 이는 기후 변동성이 남극 성층권 오존에 미치는 영향을 살펴보는 과정에서 남극 성층권 오존과 해빙연구 간의 연구가 필요하다고 생각하였기 때문이다. 오존은 태양복사를 흡수하기 때문에 오존홀이 발생하는 Austral Spring에는 남극 성층권 온도가 감소한다. 이러한 온도 차이는 바람의 가속에 영향을 주기 때문에 남극 성층권 오존 감소는 남극 지역의 와도가 더 가속하는 것에 큰 영향을 주었다. 더욱이 오존 파괴가 심해지면 남극 성층권의 온도 하강이 대류권계면의 높이가 감소하는 것에 영향을 주고 동시에 중위도 지역의 성층권 높이를 상승시킨다. 이러한 대류권계면의 기압 Anomaly는 기압 면의 진동을 증폭시켜 남극 환상진동(Southern Annular Mode)이 더 강해지는 데에 영향을 주곤 한다. 이 같은 대기 역학적 이론들을 설명하기 위하여 여러 모델들을 도입하여 설명하려 노력하였다. 성층권 온도 하강에 대한 대기순환의 이상적 모델, IPCC에 소개된 전 지구 기후모델, 화학-기후모델, 성층권 오존의 변화를 살피는 기후모델 등의 모델링 결과자료는 남반구의 봄철 발생하는 오존홀과 남극 환상진동 간의 강건적인 상관성에 많은 증거를 내놓고 있다 (Thompson et al., 2011).

또한 오존홀의 주기성이 나타나는 같은 기간에 남반구 해양에서 남극환상진동과 같은 주기를 가진 해수면 온도변화가 1년마다의 주기성을 가지는 것을 발견하였고, 이에 두 모델(MITgcm, CCSM3.5)을 사용하여 오존홀에 의해 남극환상진동과 남극 주변 해수면 온도가 큰 상관관계가 있음을 밝혔다 (Ferreira and Marshall, 2014).

다른 연구에서는 남극 대기순환과 남극 주변 해수면 온도의 1979-2005년도 자료에 대한 두 기후모델(Canadian Middle Atmosphere Model, NCOM1.3)의 상관성을 분석한 결과, 해빙 영역이 크게 감소하는 8-10월에 해양이 따뜻해지는 현상과 남극 환상진동 사이의 상관성이 존재한다는 결론을 가졌다. (Sigmond et al., 2010). 이러한 결과에 대하여 오존홀은 남반구 해양 온도에 영향을 주어서 주변 해빙에 1년 만에 나타나는 빠른 반응과 12년에 걸쳐 나타나는 느린 반응이 존재한다는 것을 알아내었다. 빠르게 나타나는 결과로는 해수면 온도가 마치 남극 환상진동과 같은 1년 주기를 가지는 온도의 변화 현상이고, 이는 평년에 비해 북쪽으로 강한 에크만 수송을 유발시켜 남극 주변의 수온에 강한 Negative Anomaly를 발생시키는 것과 동시에 남극 주변 해수면 온도를 낮춘다. 차가워진 해수면이 얼어붙어 해빙의 영역이 넓어지는 것처럼 보이지만 강해진 에크만 수송풍은 남극 주변 수온약층의 따뜻한 바닷물을 용승시킨다. 이로 인해 해빙이 녹게 되는데 에크만 수송이 온도를 낮추는 강도보다 수온약층에서 용승되는 따뜻한 바닷물이 해빙을 녹이는 강도가 더 세기 때문에 전체적으로 해빙이 녹는 현상이 발생한다. 느리게 나타나는 반응으로는 12년 정도의 긴 스케일의 결과로써 남극 주변 해수면의 온도상승이 장기간에 걸쳐 이루어지며 단년빙의 영역을 감소시키는 결과를 가져온다.(Ferreira and Marshall, 2014).

더불어 남극 환상진동은 남반구 해양의 기후변화 폭을 예측할 수 있게 하는 것에 척도가 되기도 한다. 특히나 남반구의 여름철 남극 환상진동은 남반구 해양의 약 1km 깊이까지 물을 순환시키곤 하는데, 이는 남극 지역뿐 아니라 중위도 해양에도 영향을 준다. 아직 연구가 깊게 진행되진 않았지만 이러한 남극 환상진동의 경향은 잠정적으로 해양의 이산화탄소를 배출시키는 것에도 지대한 영향을 끼칠 것으로 예상한다 (Thompson et al., 2011).

해빙자료는 NSIDC(National Snow and Ice Data Center)에서 2012년 7월 1일에서 2019년 10월 7일까지의 기간에 대한 AMSP_Level 3, resolution : 12.5km x 12.5km 자료를 사용하였다. 오존자료는 Aura 위성에 탑재된 Ozone Monitoring Instrument(OMI)의 TOC자료(Level 3 : OMTO3)를 해빙과 동일한 기간에 제공받아 사용하였다. 해빙의 Concentration을 보는 것과 동시에 Ice Thickness 또한 보아야 하는데 해당 자료는 위성으로 남극 전체 면적이 아닌 어느 한 경로선 상만 보여주어서 같은 기간 동안 남극 전체 면적은 분석하기 힘들다는 문제가 있다. 자료 개수는 2009년에서 2013년까지 52개의 자료밖에 없기 때문에 전체기간에 대해 분석하지는 못하였다.

이와 같은 과정으로 확보한 자료를 통해 세종 및 장보고 기지 지역에서의 오존 전량과 남극 전체 해빙 간의 상관관계를 해빙의 변화가 큰 남극의 여름 12, 1, 2월에 대해 각각 구하여 남극 지역에 표시하였다 (그림 3-19, 3-20, 3-21, 3-22, 3-23

및 3-24). 높게 나타나는 지역은 약 0.6 정도의 상관관계 지수를 가지고 있는데 상관성이 아주 크게 보인다고 말하기는 어려우나 어느 정도 의미있는 메커니즘을 살펴볼 여지는 있는 것으로 생각된다. 흥미로운 것은 웨델해 지역의 해빙 변화가 세종 및 장보고 기지의 오존 전량과 일관성 있는 음의 상관성을 보이는 부분인데 향후 지표 기압배치등을 통해 이 부분을 좀 더 신중히 살펴볼 필요가 있다.

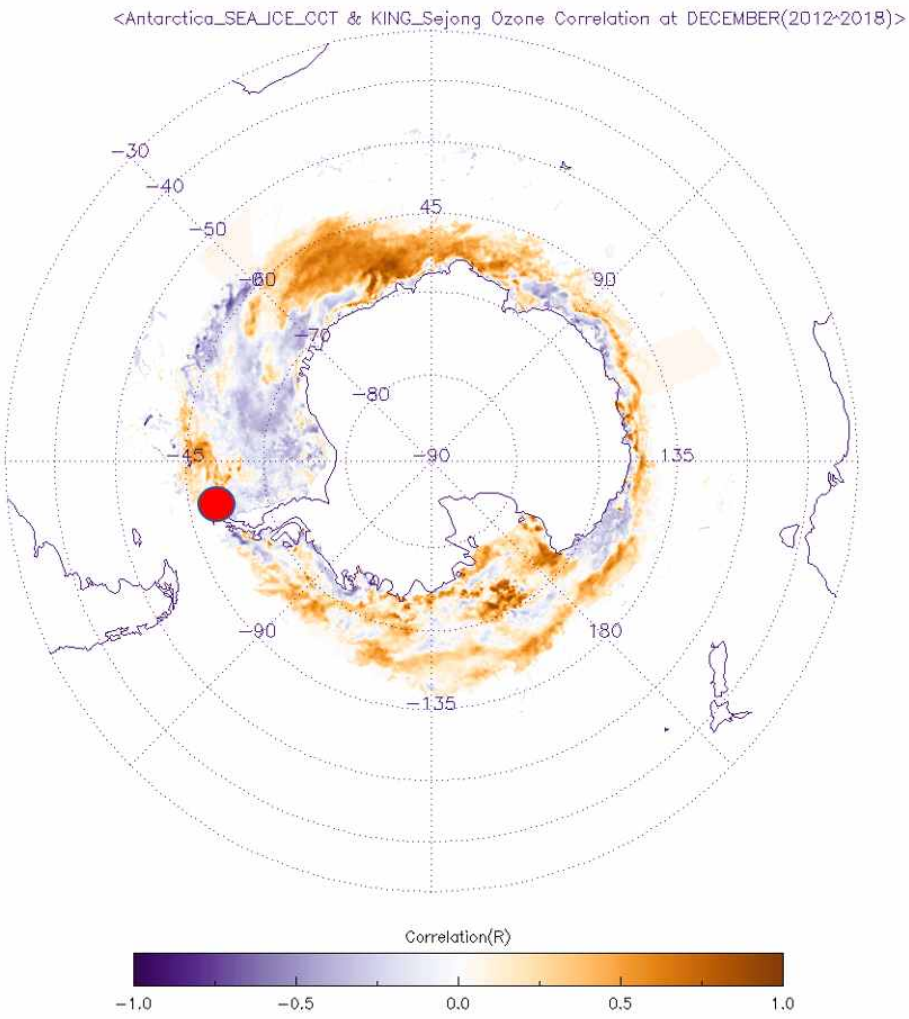


그림 3-19. 2012-2018년 기간 동안 12월의 세종기지 지역 OMI 센서로 관측한 오존전량과 남극 Sea Ice Concentraion의 상관관계를 구함.

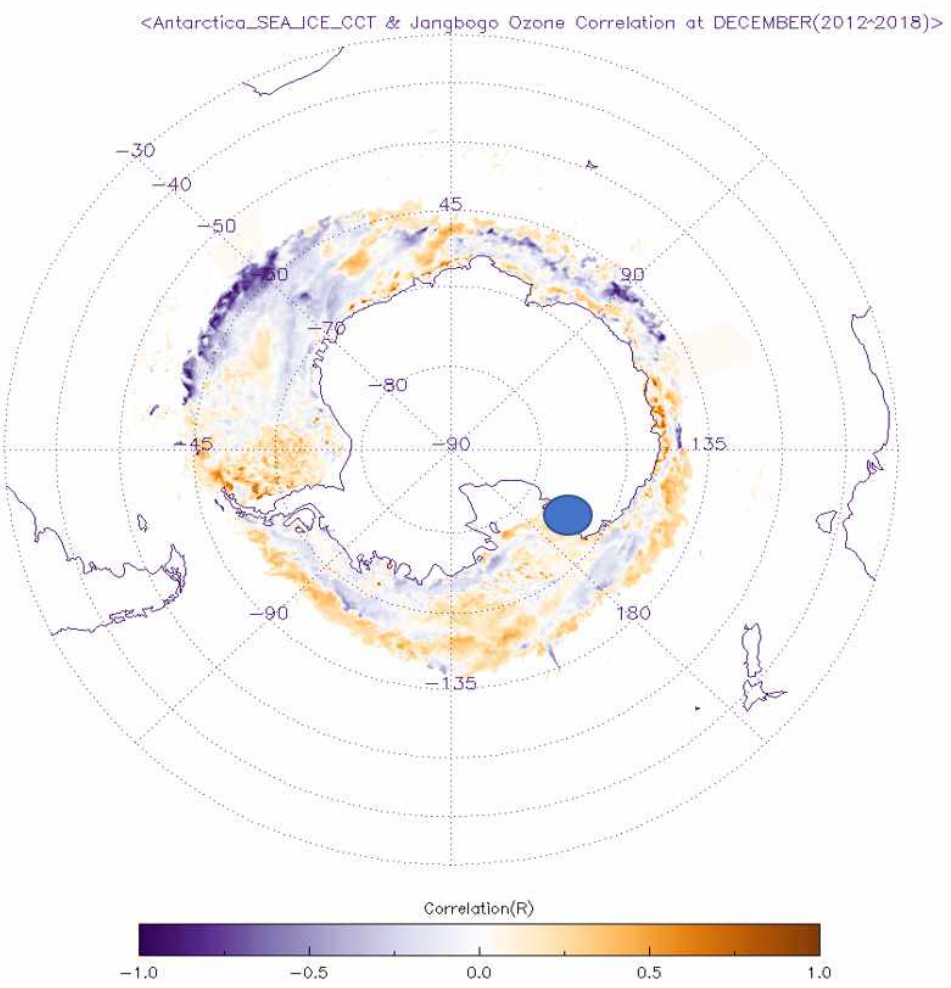


그림 3-20. 2012-2018년 기간 동안 12월의 장보고 과학기지 지역 OMI 센서로 관측한 오존전량과 남극 Sea Ice Concentraion의 상관관계를 구함.

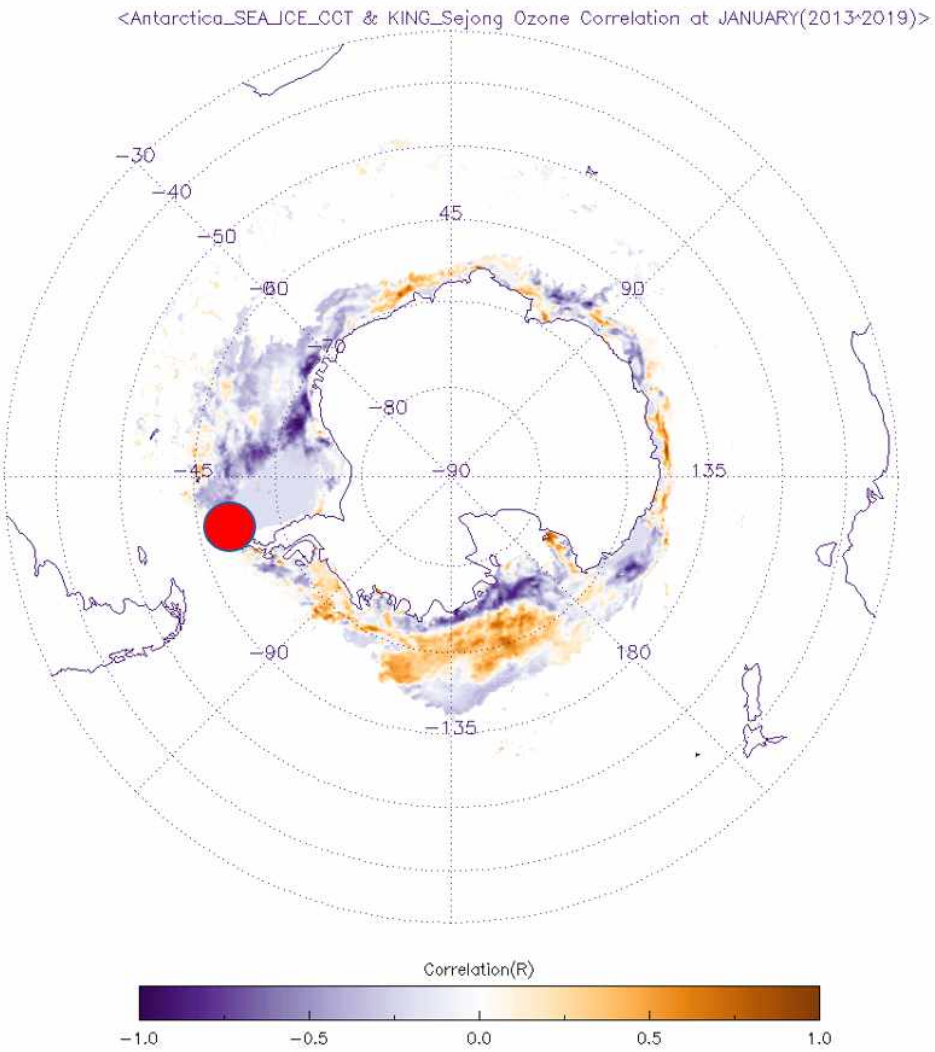


그림 3-21. 그림 2012-2018년 기간 동안 1월 세종 과학기지 지역 OMI 센서로 관측한 오존전량과 남극 Sea Ice Concentraion의 상관관계를 구함.

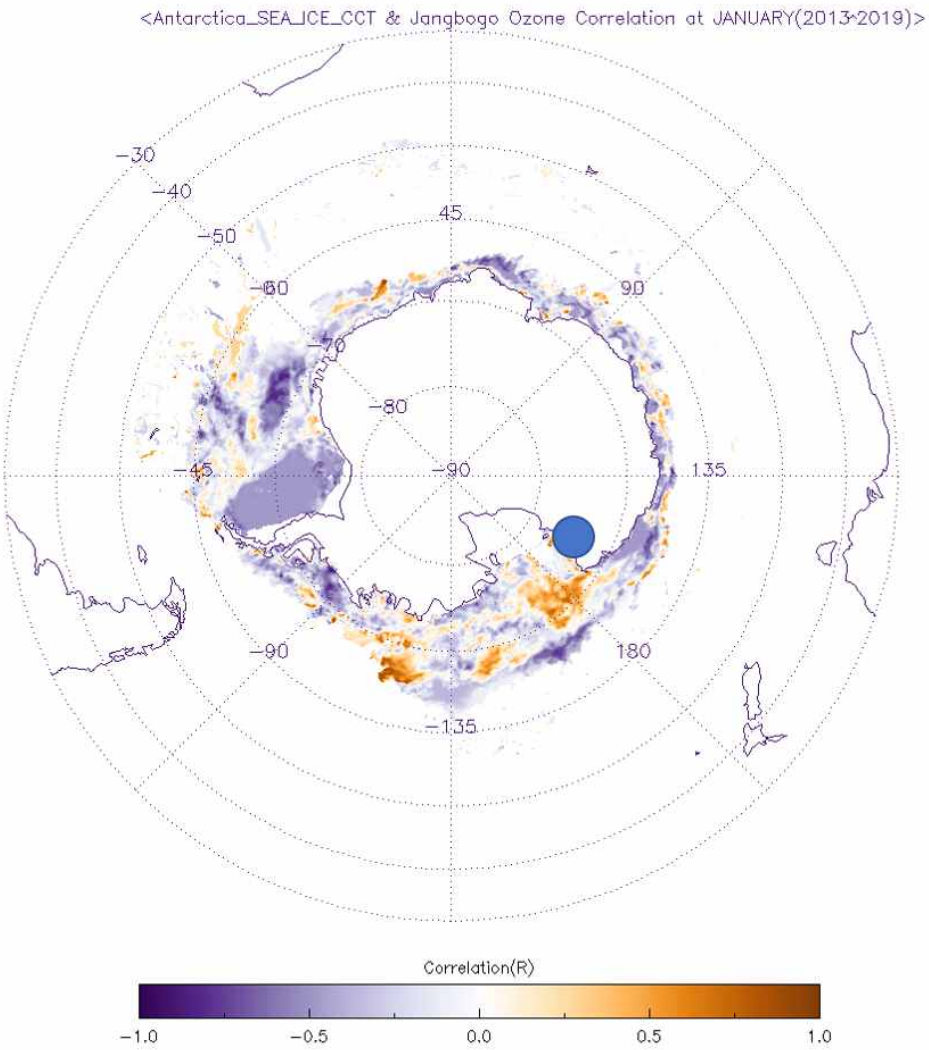


그림 3-22. 그림 2012-2018년 기간 동안 1월 장보고 과학기지 지역 OMI 센서로 관측한 오존전량과 남극 Sea Ice Concentraion의 상관관계를 구함.

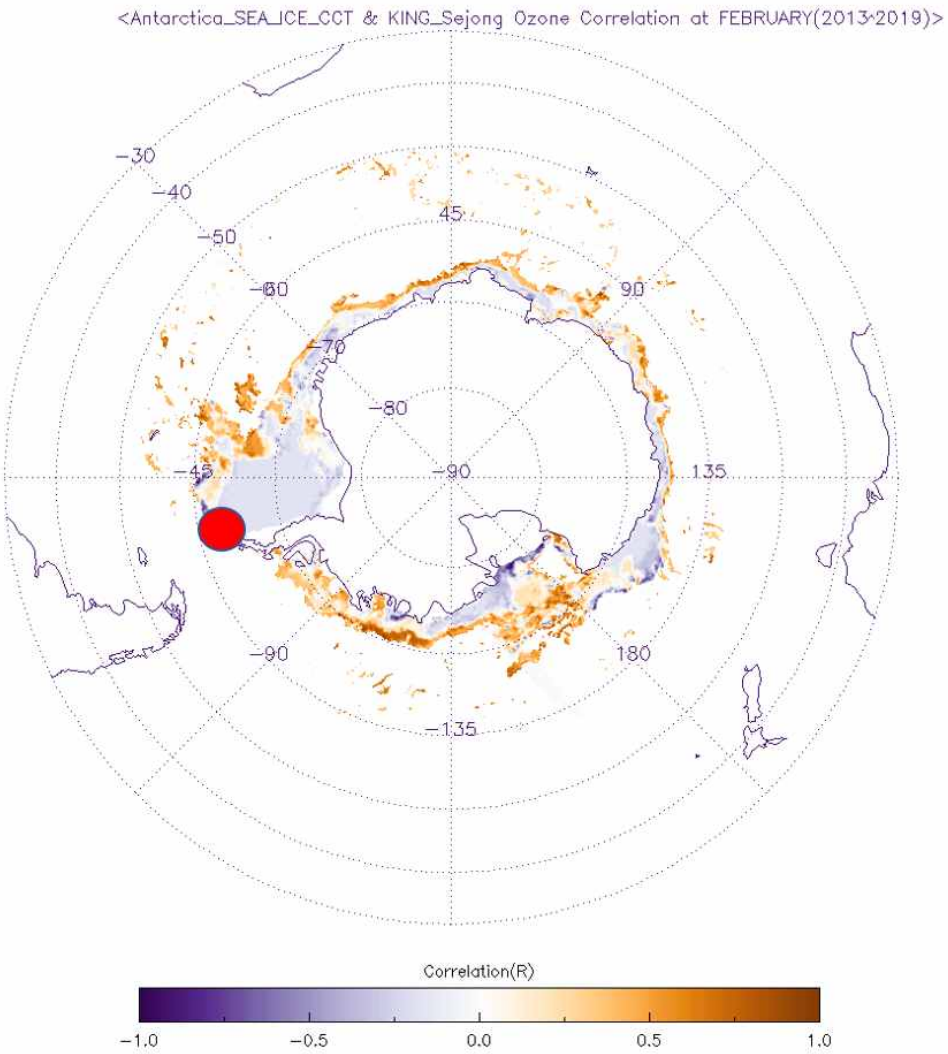


그림 3-23. 2012-2018년 기간 동안 2월 세종기지 지역 OMI 센서로 관측한 오존전량과 남극 Sea Ice Concentraion의 상관관계를 구함.

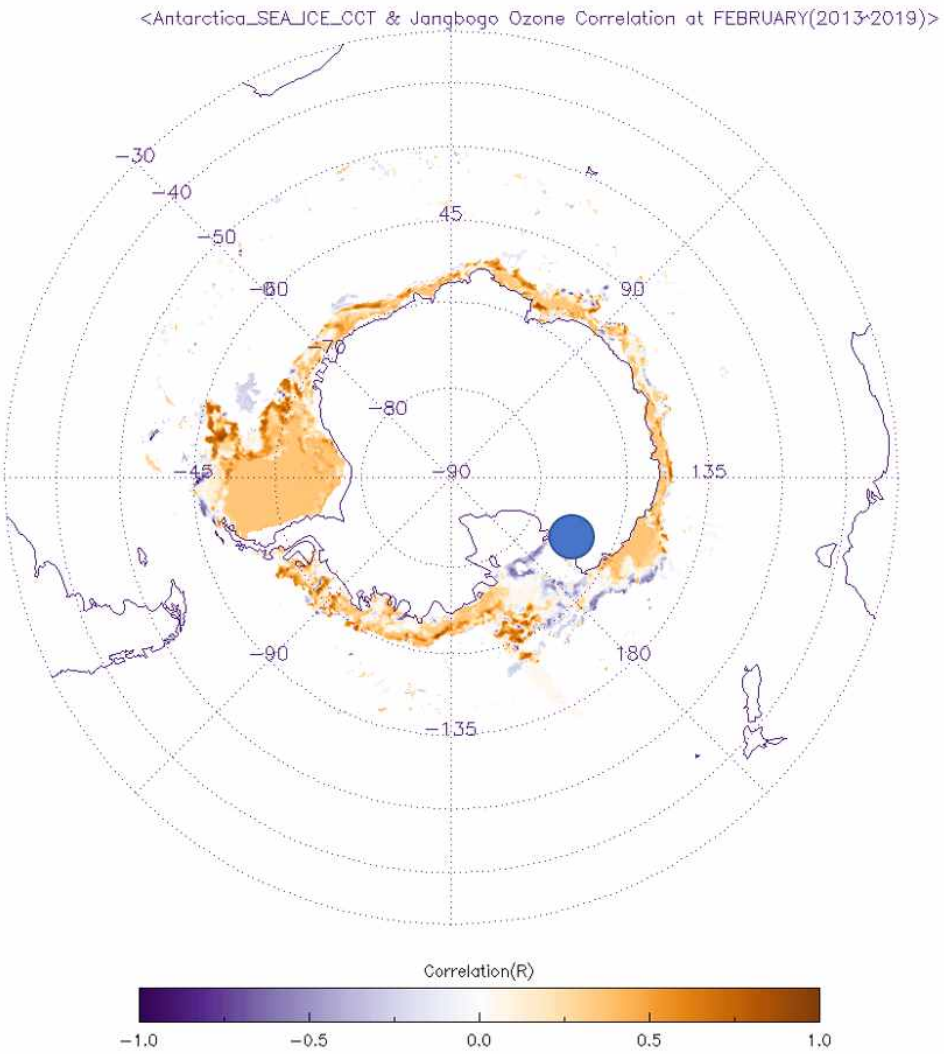


그림 3-24. 2012-2018년 기간 동안 2월 세종기지 지역 OMI 센서로 관측한 오존전량과 남극 Sea Ice Concentraion의 상관관계를 구함.

제 4 절 남극 및 주변 남반구 지역 대기 조성의 기후학적 특성 분석

1. 분석 개요 및 연구 접근 방법

남극 대기 조성 물질 중 가장 중요한 역할을 하는 것은 당연히 오존이지만 그 이외에도 여러 감시 기체 물질 및 에어로졸이 존재하고 있다. 특히 전구 범위에서 대기 오염이 증가함에 따라 중위도 지역에서 발생한 대기 오염물질이 장거리 수송 등을 통해 남극에 유입이 되고 있는데 남극과 같은 매우 깨끗한 지역이기에 작은 양이 수송되어도 대기 환경에 큰 영향을 끼칠 수가 있다. 오존과 기상/기후 변동성의 연관성을 살펴보는 입장에서는 이러한 다른 대기 조성 물질이 어떤 특징을 가지고 있는지를 미리 살펴두어야 향후 오존 자료 분석 과정에서 기타 요인의 영향을 분리하여 평가할 수 있기에 별도로 남극 및 주변 남반구 지역 대기 조성의 기후학적 특성 분석을 수행하였다.

앞서 언급한 바와 같이, 남극 대륙에서 외부로부터의 수송의 증거가 발견되고 있기에 남반구의 위성 관측 자료를 통하여 이들의 시공간적 분포와 그 변화가 남극에 미칠 수 있는 영향을 평가하고자 한다. 남극 대륙에서는 극한의 환경으로 인해 충분한 지상관측 자료가 존재하지 않기 때문에, 이를 이용하여 남반구의 대기 오염물질의 특성을 조사하기에는 부족하다. 또한, 남반구 면적의 대부분은 해양이 차지하고 있기에 남극 외의 다른 지역의 지상관측 자료 또한 부족한 실정이다. 모델 시뮬레이션의 적용은 이러한 한계점을 극복할 수 있는 대안이지만, 이 역시 직접 관측의 부족함으로 인한 모델 결과 검증의 어려움으로 신뢰할 만한 결과를 얻기는 어렵다. 위성 관측은 위에서 언급한 한계들을 극복할 수 있으나 이 역시 남반구에서는 불확실성의 문제가 있다. 위성 관측 자료에서 나타날 수 있는 outlier들을 제외하기 위해, 장기간의 데이터로부터 중앙값을 이용하는 방법을 통해 기후학적 분포 및 트렌드를 분석할 수 있다.

이를 위해 에어로졸 광학 깊이 (AOD), 일산화탄소 (CO), 이산화질소 (NO_2) 및 포름알데히드 (HCHO)의 장기 위성 측정을 사용하여 기후학적 평균 패턴, 특히 시공간 분포 및 장기 트렌드를 분석하였다. AOD는 Moderate resolution imaging spectrometer (MODIS), CO는 Measurements of pollution in the Troposphere (MOPITT), NO_2와 HCHO는 OMI에서 2005년부터 2016년까지 관측된 자료를 이용하였다. 이 결과와 역궤적 모델 결과를 함께 분석하여 중위도의 에어로졸과 미량

기체가 남극 대륙으로 수송될 수 있는지를 분석하였다. 역궤적 모델로는 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Air Resources Laboratory에서 개발한 Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) 모델을 이용하여 남극 대륙 주변의 6개 관측소에 (그림 4-1) 도달하는 역궤적을 계산하였다. 역궤적은 2005년부터 2016년까지 하루 2번 (00 및 12 UTC)에 걸쳐 계산하여 일변화를 고려하고자 하였고, 도착 고도를 1km로 두었다. 위 분석을 통해 우리는 남반구의 중위도 대기 조성의 변화가 남극 대기 오염에 미치는 영향을 진단할 수 있을 것으로 기대된다.

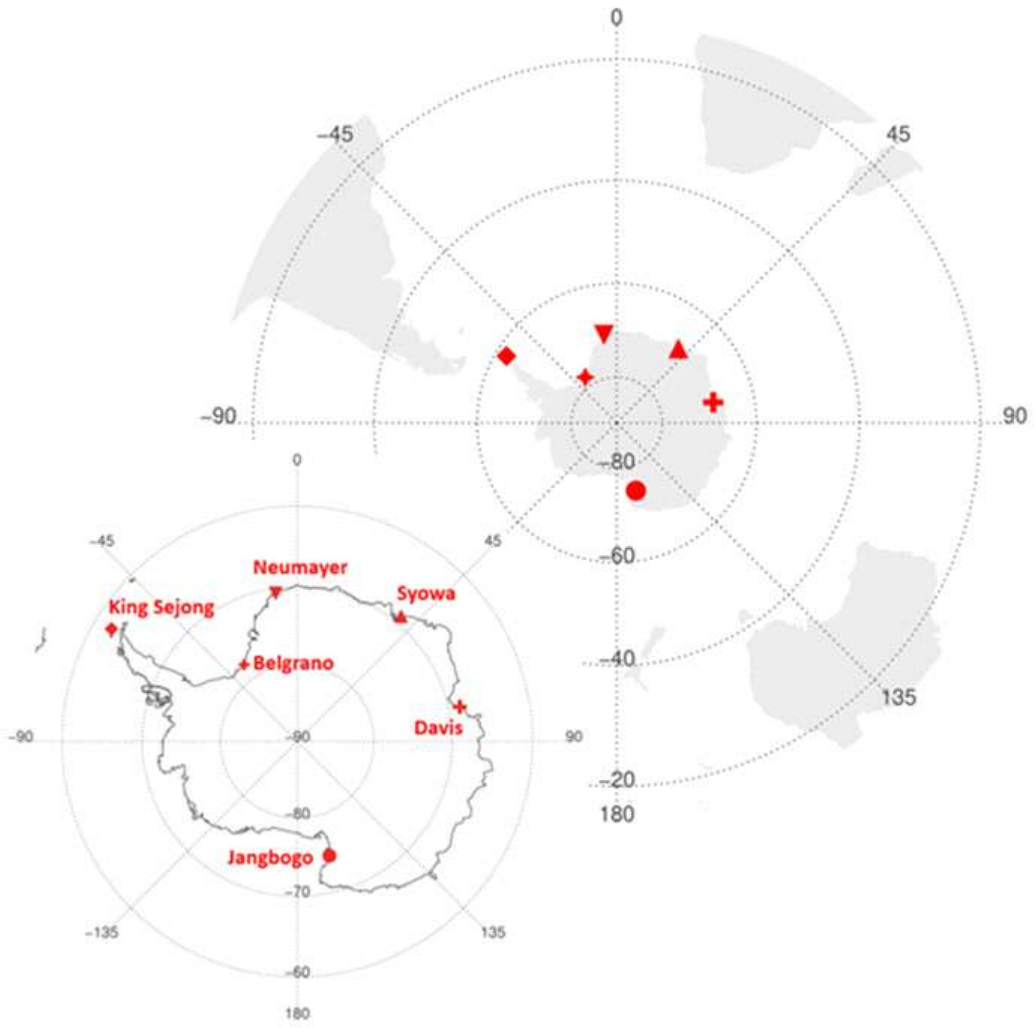


그림 4-1. 역궤적 모델 결과가 계산된 남극 King Sejong, Belgrano, Neumayer, Syowa, Davis, Jangbogo 관측소의 위치

남반구 중위도에서 위성 자료는 빈번한 구름 발생으로 인한 낮은 진폭 및 큰 샘플링 오류로 인해(McKenzie et al., 2001; Nazaryan et al., 2008) 큰 불확실성을 가진다(Zhang et al., 2005). 하지만 중앙값을 이용하여 outlier의 영향을 제거한다면 대표적인 기후학적 평균을 계산할 수 있다. 이를 위해 남반구의 중위도 영역 (30 - 60°S)을 각각 경도 방향 45° × 위도 방향 5°의 크기를 가진 48개의 영역으로 나누어. 각 픽셀 안에 속하는 특정 달의 자료 중 중앙값을 찾아 해당 달의 해당 영역에 대한 대푯값으로 이용한다. 기후학적 월평균은 최종적으로 각 영역에 대해 2005년부터 2016년까지의 모든 월별 값을 평균하여 구하였다.

AOD, CO, NO_2 및 HCHO의 장기 변동을 나타내기 위해 2005년부터 2016년까지 위의 과정을 통해 구한 각 지역의 대표 월별 값을 사용하여 트렌드를 계산하였다. 일반적으로 대기 에어로졸 및 미량 기체의 변동에는 계절적 변동이 포함되므로 deseasonalization을 수행하여 이러한 변동성을 제거하였다. 위에서 구한 월별 중앙값의 시계열로부터 월별 평균값을 빼서 얻은 anomaly 시계열에 Weatherhead et al. (1998)에 제시된 방법론을 적용하여 아래와 같이 트렌드 분석을 수행하였다 (De Meij et al., 2012; Hsu et al., 2012).

먼저 주어진 데이터를 사용하여 간단한 선형 트렌드 모델을 구성한다.

$$Y_t = \mu + \omega X_t + N_t, t = 1, \cdots, T$$

여기서 Y_t는 에어로졸 또는 미량 기체의 시계열이고, μ는 offset 항이며, ω는 선형 트렌드 ($year^{-1}$)이며 X_t는 시간이다. t가 매 달을 나타내므로 X_t는 t/12로 정의된다. 마지막 항 N_t는 noise 항이며 시계열 및 fitting 선의 residual을 나타낸다. 일반적으로 기상 요소에는 auto-regression의 특성이 있으므로 1개월의 lag를 가지는 autoregressive 모델을 가정했다. noise 항은 아래와 같이 계산하였다.

$$N_t = \phi N_{t-1} + \epsilon_t$$

여기서 ϕ는 autoregression 계수이고 ε_t는 random noise이다.

위 방법을 통해 계산한 선형 트렌드 ω가 유의미한지 보기 위해 트렌드의 불확실성 (σ_w)을 아래와 같이 계산하였다.

$$\sigma_W = \frac{\sigma_W}{n^{3/2}} \sqrt{\frac{1+\phi}{1-\phi}}$$

여기서 σ_N은 noise의 표준 편차이고 n은 시계열의 총 햇수이다. 트렌드가 유의미한지는 위 불확실성에 대한 선형 트렌드 기울기의 비 ($|\omega / \sigma_\omega|$)로 살펴보았다. 이 값이 1.96을 넘으면 95%의 유의 수준에서 이 트렌드가 유의미하고, 1.65를 넘으면 90%의 유의 수준에서 이 트렌드가 유의미한 것으로 판단할 수 있으며, 본 기준은 정규 분포의 z-score를 따랐다 (Hsu et al., 2012).

이 수식들을 이용하여 계절별 시계열의 선형 트렌드 또한 계산하였다. 계절별 시계열은 각 계절의 연속된 월별 중앙값의 시계열로 구성된다 (Hsu et al., 2012). 계절별 시계열의 temporal resolution이 균일하지 않으므로 Student's t-test를 사용하여 트렌드의 유의성을 계산하였다. p-value는 regression mean squared error에 대한 residual mean squared error의 비율로 정의되는 F-ratio로부터 계산할 수 있다. 일반적으로 p 값이 0.05 미만일 때 95% 신뢰 수준에서 트렌드가 유의미한 것으로 판단한다.

2. 에어로졸 및 미량기체의 기후학적 평균 패턴

그림 4-2는 앞서 언급한 각 픽셀 범위마다 분석 전체 기간 측정된 AOD값의 월별 중간값을 나타낸 그림이다. 이 결과에서 전봄 (SON, 9-11월)과 여름 (DJF, 12-2월)에 높고 가을 (MAM, 3-5월)과 겨울 (JJA, 6-8월)에 낮은 AOD 월평균의 분포를 확인할 수 있다. 아프리카에서 AOD의 최댓값은 9월에 나타나며 이는 아프리카에서 바이오매스 연소가 최대로 나타나는 시기와 일치한다 (Das et al. 2017). 남아메리카의 월간 분포는 아프리카와 같은 패턴을 가지며, 바이오매스 연소가 AOD에 영향을 끼칠 수 있음을 나타낸다. 호주의 연간 AOD는 상대적으로 바이오매스 연소에 의한 영향이 작기 때문에 다른 대륙에 비해 그 값이 낮게 나타난다. 대신 호주 남부의 AOD 월간 변동 (그림 20)은 dust의 영향을 더 많이 받는 것으로 생각할 수 있다. 9-11월에 높게 나타나는 호주의 AOD는 선행연구 (Prospero et al., 2002)에서 보고된 9-10월에 시작해서 12-2월에 최대치에 도달하고 5월에 끝나는 호주 dust storm의 연변동 패턴과 같다. 2019년 가을부터 발발한 호주에서의 산불 발생이 역대 최고 수준인 것을 생각해보면 이 결과가 앞으로 다소 바뀔 수 있는 여지가 존재한다. 호주 지역이 바이오매스 연소와 dust 입자라는 두 가지 완전히 다른 유형의 에어로졸의 영향을 받는다는 점은 향후 추가 연구를 생각해볼 수 있는 흥미로운 요소로 보인다.

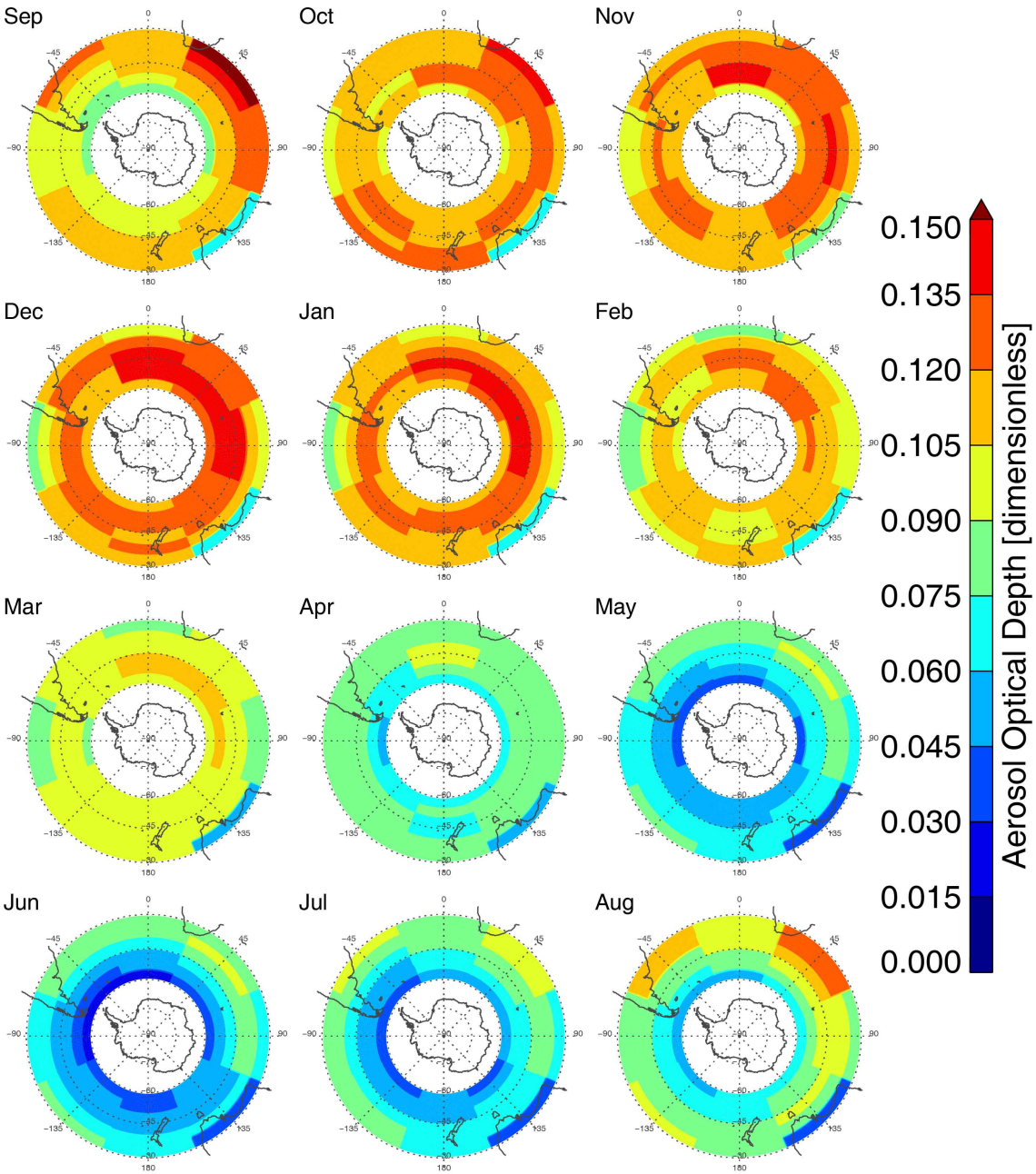


그림 4-2. 남위 30-60° 지역에서 MODIS 에어로졸 광학 깊이의 기후학적 평균. 각 픽셀의 색은 2005년부터 2016년까지의 관측값 중 중앙값을 의미함

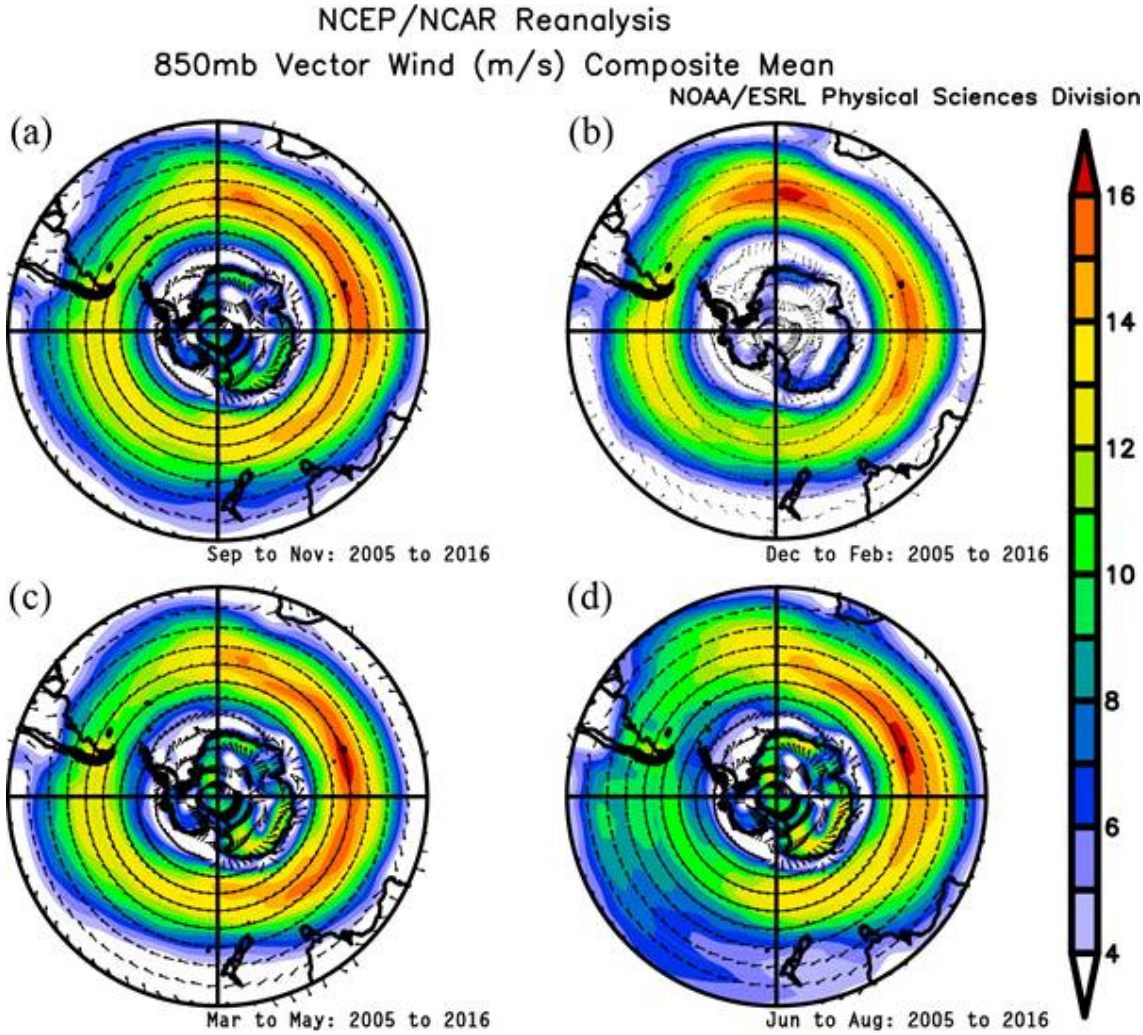


그림 4-3. 2005년부터 2016년까지의 기간 동안 남극 상공에서 850hPa 고도에서의 계절별 평균 바람장. (a) 9-11월, (b) 12-2월, (c) 3-5월, (d) 6-8월

계절에 따라 고위도 지역에서 나타나는 AOD의 변동 패턴은 중위도 대륙 근처에서 나타나는 변동 패턴과 일치한다 (Mao et al. 2014; Mehta et al. 2016). 이로부터 중위도의 에어로졸이 수송되어 고위도 지역까지 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다. 추가적으로, 해양에서 발견되는 AOD 증가 패턴 중 특히 남대서양 (22.5°W-22.5°E, 45°S-55°S)에서 발견되는 패턴은 대륙의 AOD 값만큼 증가하기도 한다 (그림 20). 이 지역의 높은 AOD는 강한 바람 (그림 4-3)에 의해 해염입자가 활성화되면서 관측되는 것으로 보인다 (Kishcha et al., 2009; Wilson et al., 2010). 또는, 구름의 영향 (Kishcha et al. 2009)과 다른 고위도 지역에 비해 오염원과의 거

리가 상대적으로 짧기에 이에 의한 오염의 영향으로 보인다 (Mao et al. 2014).

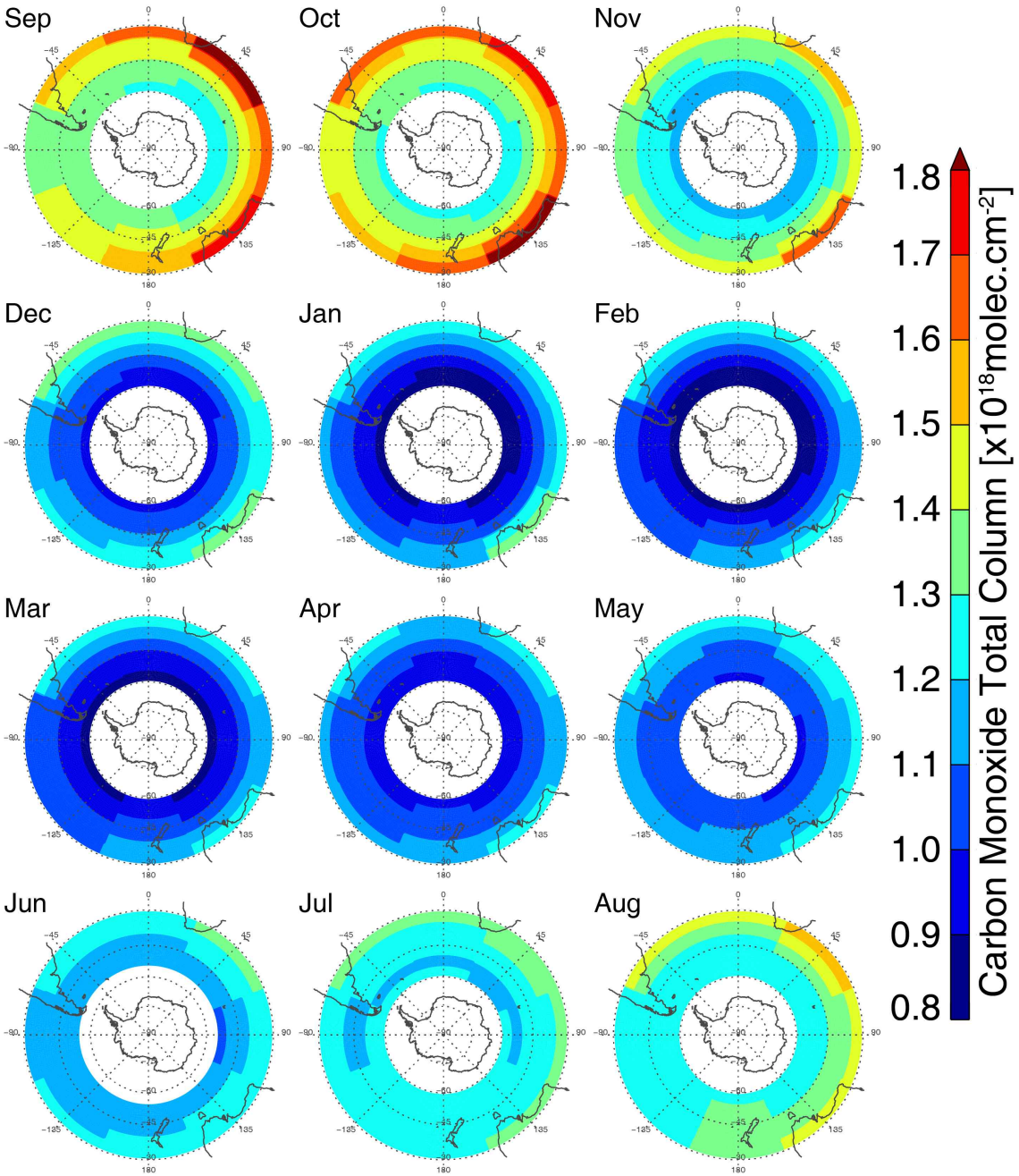


그림 4-4. 남위 30-60° 지역에서 MOPITT CO 기주 농도 (단위: 10^{18} molecule.cm^{-2})의 기후학적 평균. 각 픽셀의 색은 2005년부터 2016년까지의 관측값 중 중앙값을 의미함.

일반적으로 CO의 주요 발생원은 화석 연료 연소에 의한 배출이지만 (Holloway et al., 2000), 남반구에서 CO는 주로 바이오매스 연소로 인해 배출된다. 따라서 CO 농도는 주로 fire count와 관련되어 있다. CO는 대류권에서 약 1개월의 긴 lifetime을 가지고 (Wang et al., 1997) 이를 이용하여 공기 질량 수송을 모니터링할 수 있다. 따라서, CO 기주농도의 기후학적 평균 (그림 4-4)을 통해 아프리카, 호주 및 남아메리카에서 CO의 주요 배출원을 탐지할 수 있다. 아프리카와 남아메리카의 바이오매스 연소 지역에서 CO 농도가 높아지기 때문에 SON 및 JJA에 보이는 대륙의 높은 CO 농도는 건기의 활발한 바이오매스 연소와 관련이 있다 (Edwards et al., 2006; Torres et al., 2010). 호주 지역의 배출원에는 바이오매스 연소 (Das et al., 2017)와 도시 지역에서의 화석 연료 연소가 모두 포함되어있기 때문에 (Lamarque et al., 2010; Té et al., 2016) 그림 22와 같은 패턴을 보이는 것으로 생각된다. CO는 대부분 대륙의 배출원에서 기인하기 때문에 이로부터 거리가 멀어질수록 점차 감소하는 패턴을 볼 수 있다. 그러나 일부 해양 지역에서는 높은 CO 농도가 관측되므로 어느 정도 수송의 영향이 있다고 볼 수 있다.

NO_2는 일반적으로 운송 수단 및 발전소와 같은 인위적인 배출원에서 배출되는 미량 기체이다 (Beirle et al., 2003; McDonald et al., 2012). 따라서 NO_2의 시공간적 분포는 도시 지역의 대기 오염 정도를 모니터링 하는데 이용할 수 있다. 그림 23에서 OMI 대류권 NO_2의 기후학적 평균을 확인할 수 있다. CO와 유사하게 대류권 NO_2의 분포는 아프리카, 남아메리카 및 호주 등 중위도의 대륙에서 높게 나타내는데, 이는 도시 지역뿐만 아니라 바이오매스 연소에서도 NO_2가 배출되기 때문이다 (Beirle et al., 2003). 그림 4-5에서 NO_2의 최댓값은 호주에서는 겨울에, 아프리카와 남아메리카에서는 겨울과 이른 봄에 발생하는 것을 확인할 수 있고, 이는 선행연구의 결과와도 일치한다 (van der et al., 2008). 추가적으로, 남반구에서 JJA에 높은 NO_2 값을 볼 수 있는데, 3개 대륙 중에서도 특히 호주 ($>4.0\times10^{14}$ molecules/cm^2)에서 남아메리카 (>2.5-3.0×10^{14} molecules/cm^2) 및 아프리카 (>3.0-3.5×10^{14} molecules/cm^2)에서 더 높게 나타났다. NO_2가 1일 정도의 짧은 lifetime을 갖고 있음 (Beirle et al., 2003)에도 불구하고 나타나는 배출원 지역 부근에서의 높은 NO_2는 NO_2가 배출원 지역으로부터 수송될 수 있음을 의미한다. 일반적으로 NO_2의 수송은 peroxyacetyl nitrates(PAN)과 같은 reservoir의 형태의 물질이 온도, 기압변화에 따라 NO_2 작용기가 다른 화학 작용기에 어느 정도 결합, 분리되는지에 따라 그 범위가 정해진다 (Liu et al., 2003; Zhu et al., 2017). 분석 지역에서 고위도일수록 낮아지는 NO_2의 농도는 극지역 부근에 도시 또는 산업시설의 NO_2 공급원이 없음을 의미한다.

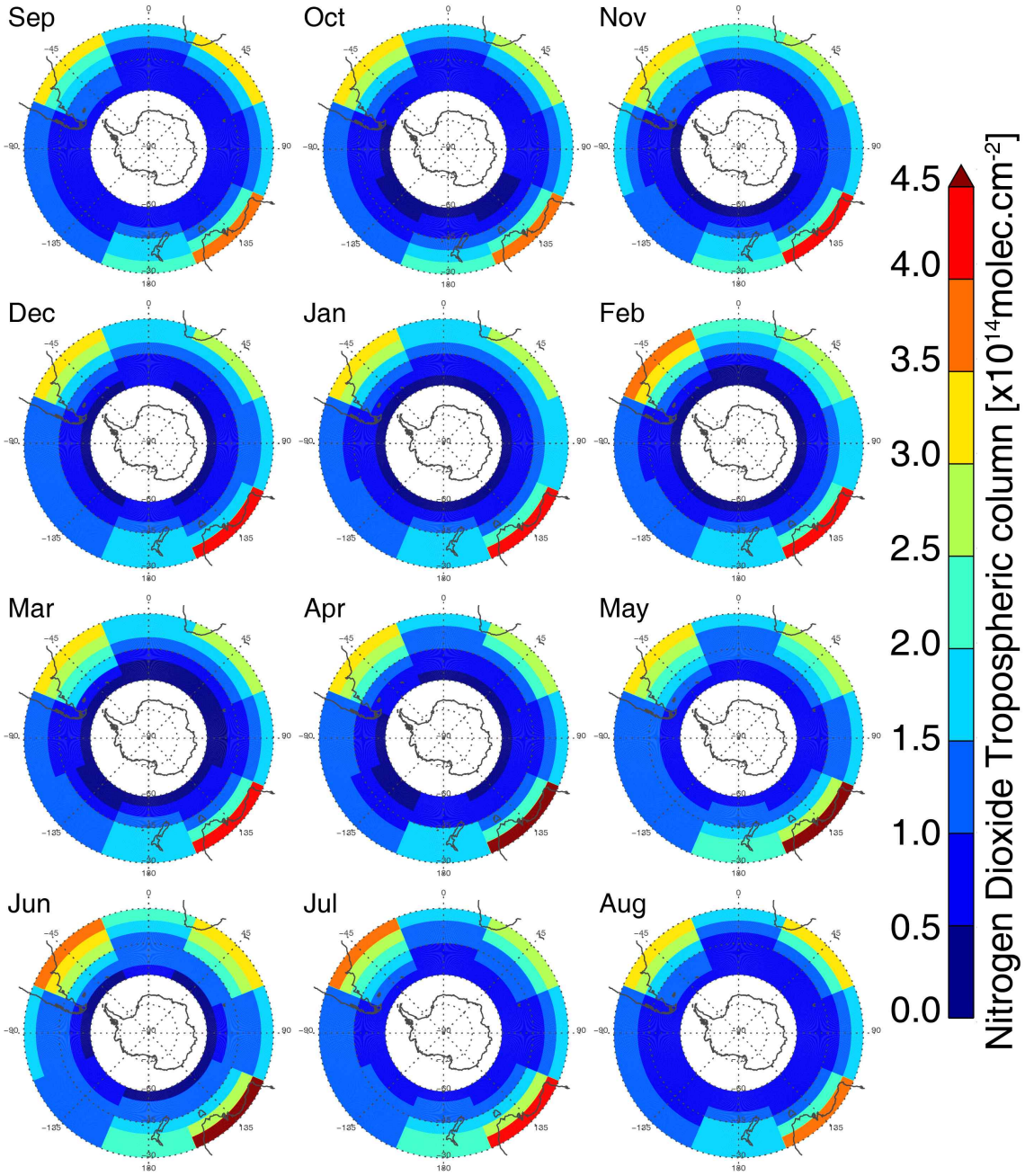


그림 4-5. 남위 30-60° 지역에서 OMI NO_2 대류권 기주 농도 (단위: 10^{14} molecule.cm^{-2})의 기후학적 평균. 각 픽셀의 색은 2005년부터 2016년까지의 관측값 중 중앙값을 의미함.

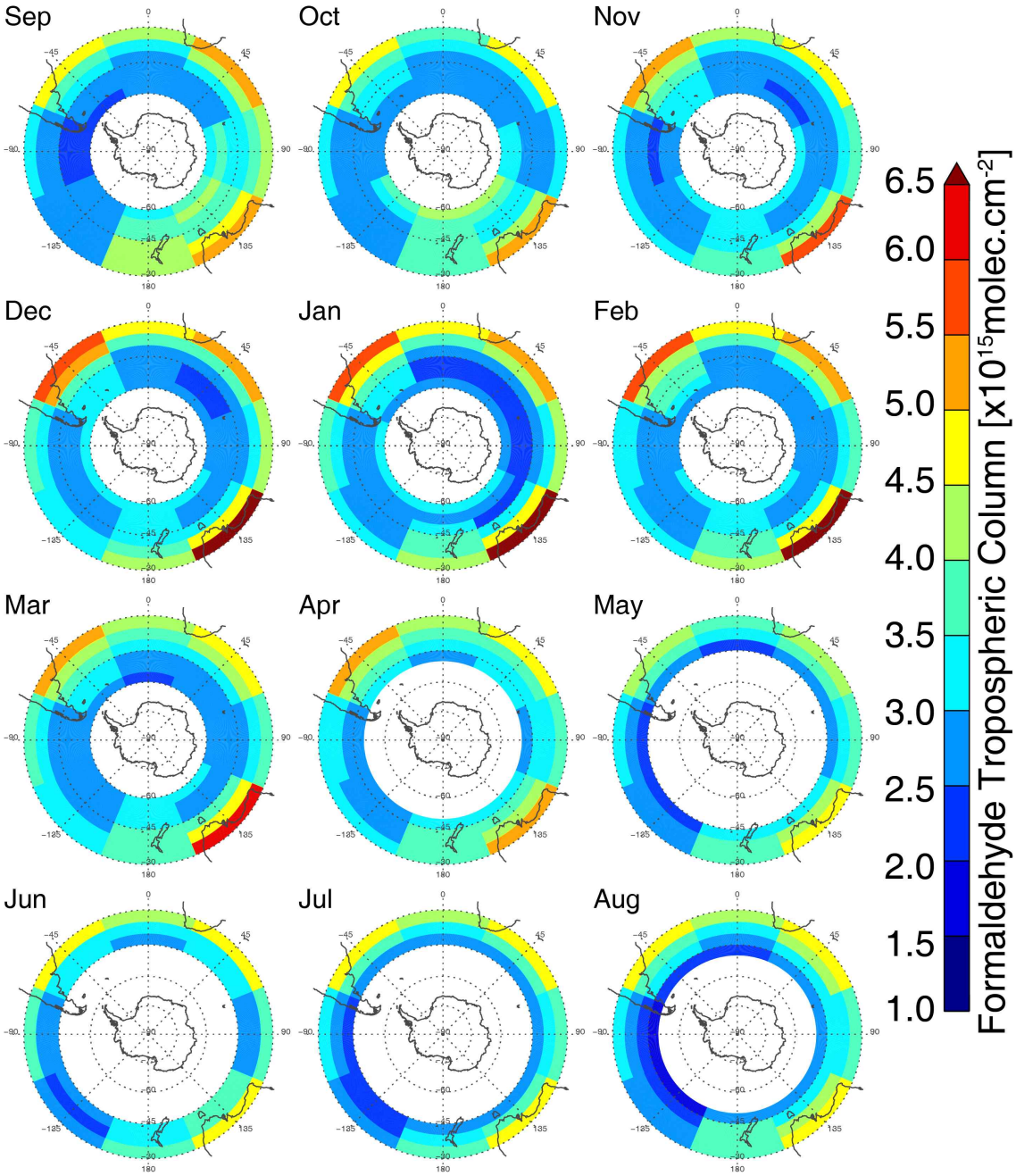


그림 4-6. 남위 30-60° 지역에서 OMI HCHO 대류권 기주 농도 (단위: 10^{15} molecule.cm^{-2})의 기후학적 평균. 각 픽셀의 색은 2005년부터 2016년까지의 관측값 중 중앙값을 의미함.

OMI 대류권 HCHO 기주농도의 기후학적 평균을 그림 4-6에서 볼 수 있다. 일반적으로 HCHO는 CH_4 및 기타 탄화수소의 산화로부터 생성되기 때문에 (Wagner

et al., 2002; Palmer et al., 2006) 산림, 바이오매스 연소, 산업 단지 및 운송 수단이 있는 지역에서 높은 HCHO 농도가 관측된다. 위에서 언급한 AOD, CO 및 NO_2의 분석결과와 마찬가지로, 가장 높은 HCHO 농도는 아프리카, 남아메리카 및 호주 대륙에서 관측된다. HCHO의 계절적인 변동 패턴은 SON에 증가하기 시작해서 DJF에 최댓값을 보이며 3월 이후 감소해서 JJA에 최솟값을 보인다. HCHO가 CH_4와 탄화수소의 광화학적 분해 과정에 의해 생성되는 것을 생각해보면 (Leuchner et al., 2016)는 태양 복사가 강한 여름에 최댓값을 보이는 원인을 찾을 수 있다. 또한, 이러한 연간 변동은 biogenic 배출과 바이오매스 연소의 계절 변동성 또한 반영하고 있는 것으로 보인다 (Dufour et al., 2009). 추가적으로, HCHO의 분포 (그림 4-6)는 HCHO와 NO_x 사이의 관계 때문에 NO_2 분포 (그림 4-5)와도 유사하게 나타나는데 (Jones et al., 2009), 따라서 호주에서 나타나는 높은 HCHO 농도는 위에서 언급한 것처럼 도시 지역에서 나타나는 높은 NO_2의 효과와 동반되는 것으로 볼 수 있다.

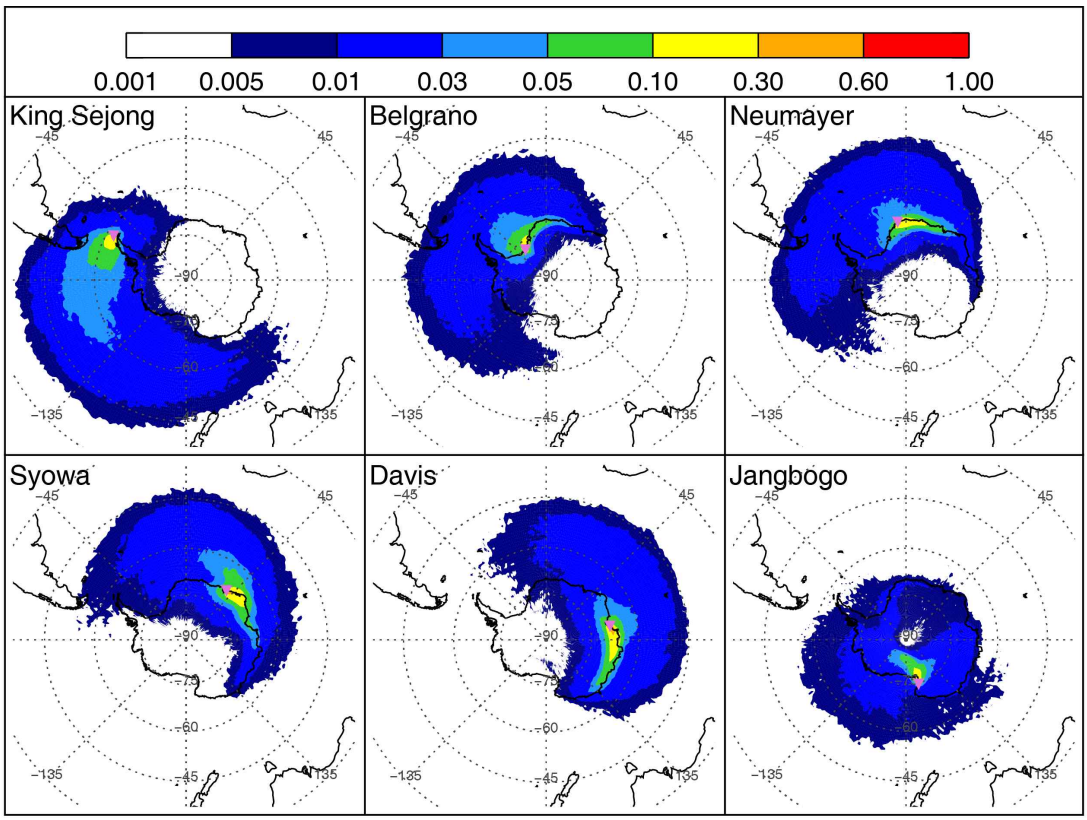


그림 4-7. (왼쪽 상단부터 시계방향) King Sejong, Belgrano, Neumayer, Jangbogo, Davis, Syowa 과학관측소에서의 10일간의 역궤적 분포. 삼각형은 각 관측소의 위치를 나타내며, 그림의 색은 역궤적이 해당 픽셀을 지날 확률을 의미.

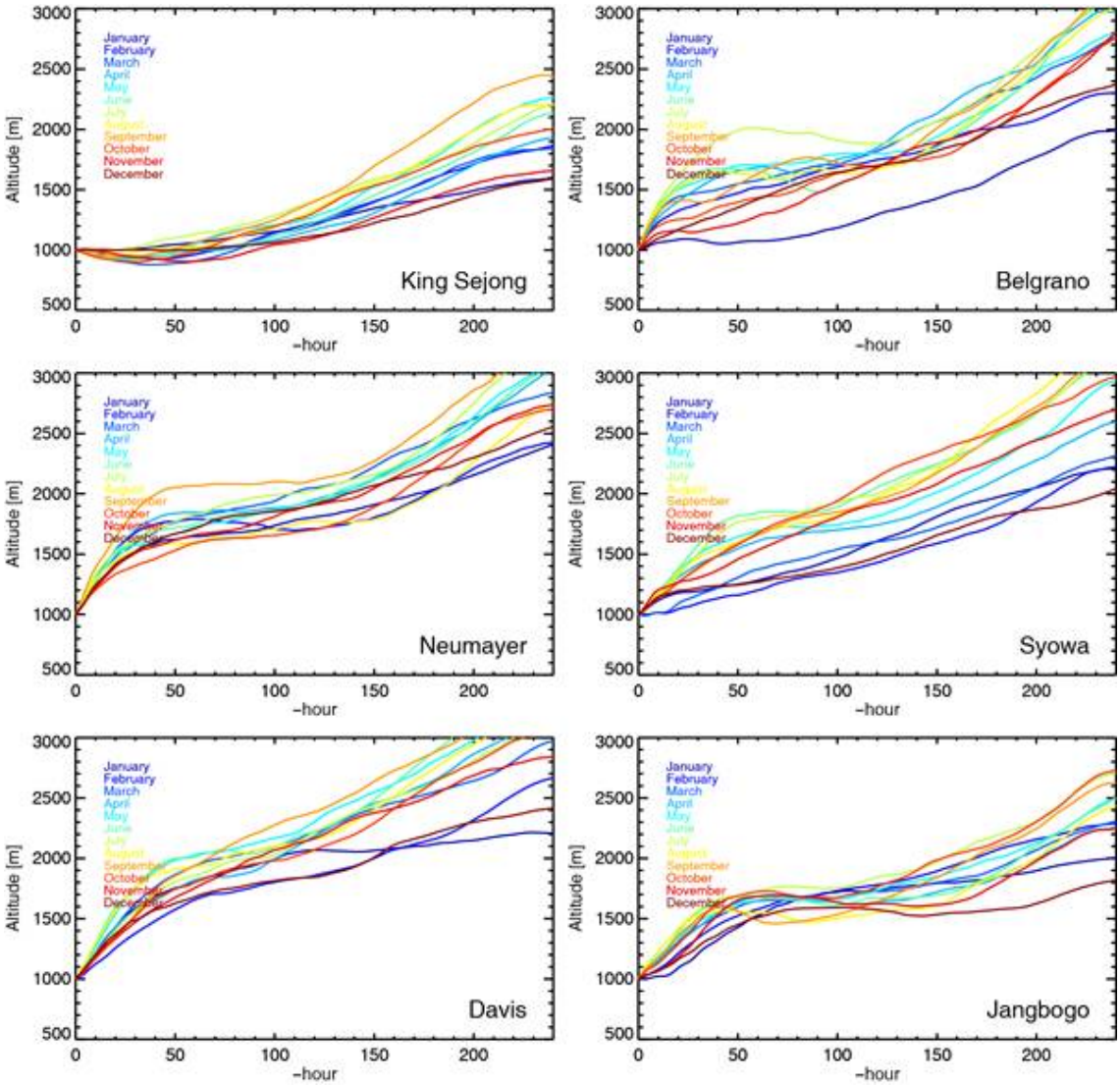


그림 4-8. 역궤적 평균 고도의 월별 변화 (수송 시작 지점이 도착 지점보다 고위도인 경우). (위) King Sejong, Belgrano, (중간) Neumayer, Syowa, (아래) Davis, Jangbogo

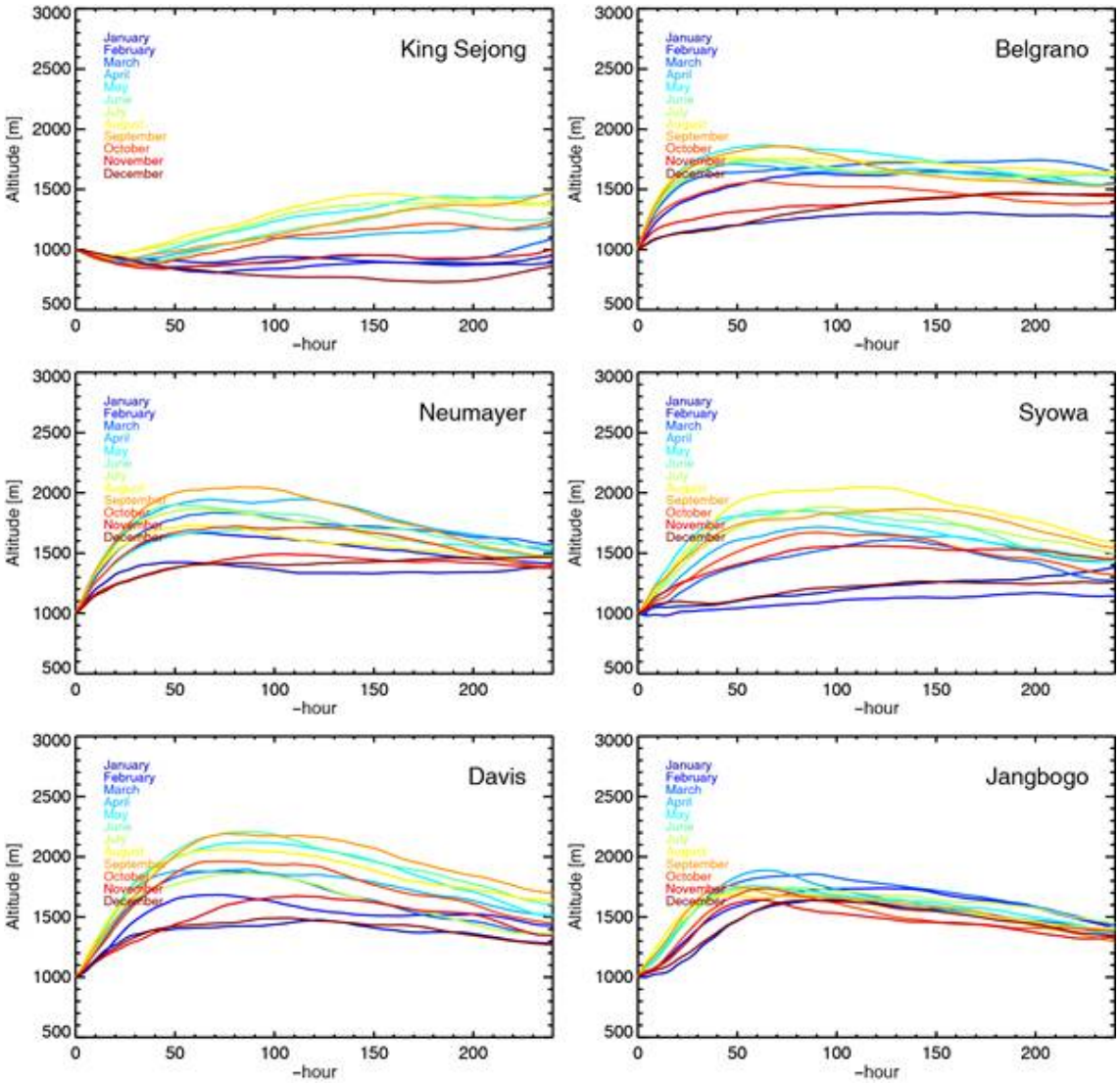


그림 4-9. 역궤적 평균 고도의 월별 변화 (수송 시작 지점이 도착 지점보다 저위도인 경우). (위) King Sejong, Belgrano, (중간) Neumayer, Syowa, (아래) Davis, Jangbogo

3. 중위도 지역에서 남극으로의 수송 패턴

남극 환경에 대한 중위도 대기 오염의 영향을 추정하기 위해 앞에서 분석한 AOD, CO, NO_2 및 HCHO의 기후학적 평균 (그림 4-2, 4-4, 4-5 및 4-6)과 역궤적 결과를 함께 분석하였다. 수송의 영향을 평가하기 위해 남극 해안의 모든 관측소 중 전체를 커버할 수 있는 6개의 관측소를 대표적으로 선정하였다.

그림 4-7은 각 관측소에 대해 계산한 10일치 역궤적이 각 위치를 지나가는 빈도수를 비율로 나타낸 것이다. 전체적인 수송 패턴은 Jangbogo 관측소를 제외한 모든 관측소가 남극 대륙 외부로부터 대기 질량의 수송에 영향을 받을 수 있음을 보

여준다. 기본적으로 이 수송 패턴은 남극을 둘러싸고 있는 polar vortex의 경계를 따르는 모습을 보이지만 일부 궤적은 중위도로부터의 대기 질량의 유입을 나타낸다. 남극 대륙 내부에서 시작된 역궤적의 출발 고도 패턴 (그림 4-8)과 중위도에서 시작된 역궤적의 출발 고도 패턴 (그림 4-9)을 비교하면, 대부분의 궤적이 대부분 10일 동안 고도 2km 아래에서 존재한다. 이러한 모습은 중위도 지역의 지표 부근의 대기가 남극 지역에 실제로 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 그림 4-7a에서는 남아메리카 남부에서 오는 공기 질량의 영향권 안에 서남극의 반도에 위치한 King Sejong 관측소가 있음을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 이 관측소는 호주 남부 지역의 영향권 안에도 들 수 있다. 이는 남극 반도가 남극 대륙의 다른 지역보다 상대적으로 더 오염되어 있음을 보고한 선행연구의 결과와도 일관된다 (Pereira et al., 2004; Bargagli., 2008).

King Sejong 관측소 뿐만 아니라 Belgrano, Neumayer 및 Syowa 관측소 또한 위 결과로부터 남아메리카의 영향을 받음을 알 수 있다. 반면, Jangbogo 관측소에 도착하는 역궤적의 대부분은 남극의 내륙 (그림 4-7)을 지나오는데, 이는 동남극 고원지대에서 발생하는 강한 활강기류의 영향으로 보인다 (Parish., 1992). 따라서 동남극 고원지대의 풍하측에 위치한 Jangbogo 관측소에서는 중위도 오염원의 영향을 받기 어렵다. 동남극 해안가의 Davis 관측소는 이전에 다른 해안 관측소들과 달리 중위도로부터의 역궤적 패턴을 보이지 않는다. 상당수의 대기 오염 수송이 선행연구에 따라 10일 안에 이루어질 것이 예상되므로 (예 : Hara et al. 2010) 본 결과에 따르면 Davis 관측소에서는 다른 관측소 (King Sejong, Belgrano, Neumayer 및 Syowa)에 비해 중위도에서 기인한 오염 물질의 영향을 작게 받는 것으로 보인다.

위 분석을 요약하자면, 서남극은 동남극에 비해 중위도의 오염물질이 더 많이 유입될 수 있는 것으로 나타났다 (Tomasi et al., 2015). 역궤적 분석 결과와 AOD, CO, NO_2 및 HCHO의 기후학적 평균을 함께 고려하면 (그림 4-2, 4-4, 4-5, 및 4-6) 남아메리카에서 배출되는 대기 오염 물질은 타 대륙에서 배출된 것보다 남극에 영향을 미칠 가능성이 더 큰 것으로 보인다. 이와는 대조적으로, 아프리카에 가장 가까운 남극 해안은 그림 21에서 확인할 수 있는 것과 같이 강한 zonal 이류로 인해 중위도와의 대기 교환이 어렵기 때문에 남부 아프리카의 대기 오염 물질이 남극 대기에 영향을 미칠 것이라고 보기는 어렵다. 그림 4-3은 고도 850 hPa의 기후학적 평균 풍속을 보여주는데, 동남극에서는 최고 풍속이 16m/s 이상으로 나타나는 반면 서남극에서는 최고 풍속이 13 m/s 미만으로 나타난다. 이번 2019년 호주 산불이 남극에 미칠 수 있는 영향 역시 추후에 이와 같은 풍속 및 수송 패턴 정보를 활용하여 해석할 수 있어야 할 것이다.

4. 에어로졸 및 미량기체 트렌드 분석

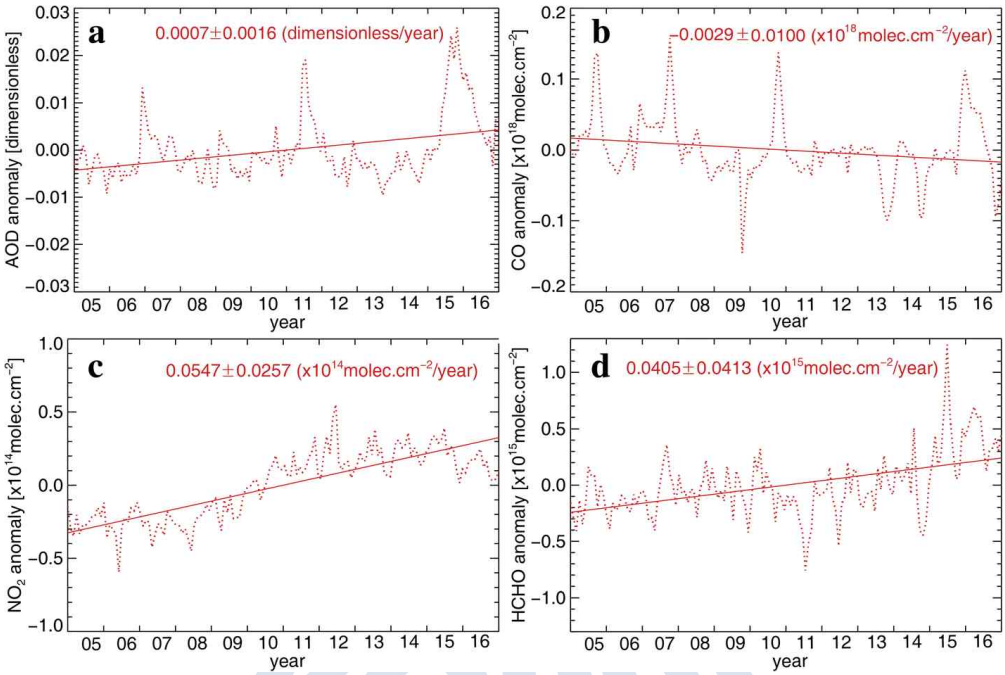


그림 4-10. 2005년부터 2016년까지 위도 30-60°S 지역의 (a) 550nm 에어로졸 광학 깊이, (b) CO 기주 농도, (c) NO_2 대류권 기주 농도, (d) HCHO 대류권 기주 농도 평균의 시계열 (점선)과 선형 트렌드 (실선). 계절 변동성을 제거한 월별 평균 자료 이용.

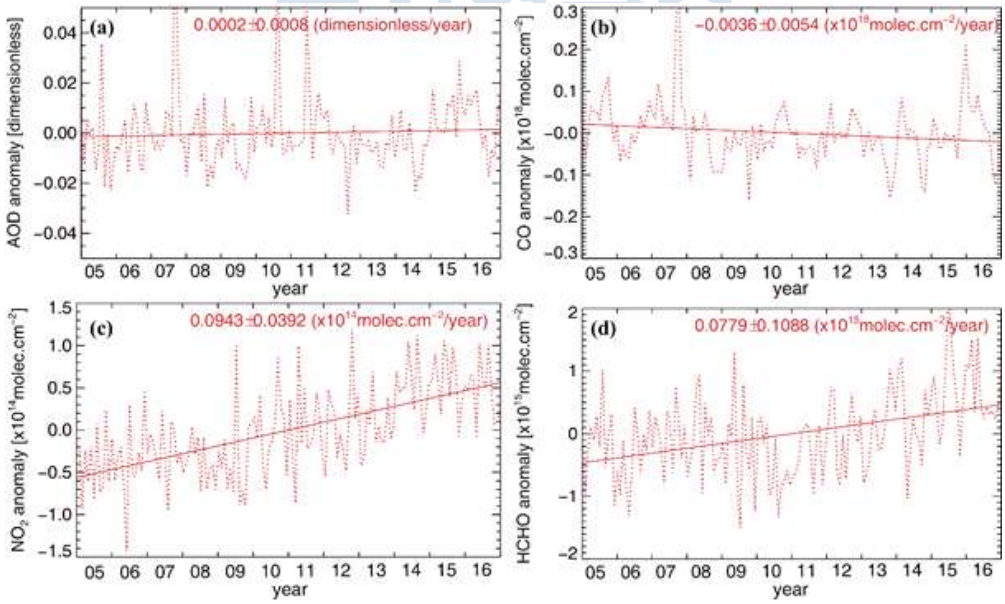


그림 4-11. 2005년부터 2016년까지 위도 30-35°S, 경도 22.5-67.5°W 지역의 (a) 550nm 에어로졸 광학 깊이, (b) CO 기주 농도, (c) NO_2 대류권 기주 농도, (d) HCHO 대류권 기주 농도 평균의 시계열 (점선)과 선형 트렌드 (실선). 계절 변동성을 제거한 월별 평균 자료 이용.

앞에서 제시한 트렌드 분석 방법에 따라 AOD, CO, NO_2 및 HCHO의 추세를 계산하였다. 그림 4-10은 남반구 전체 중위도 지역(30-60 °S)에 대한 각 물질의 추세를 나타내며 이에 따르면 AOD, NO_2 및 HCHO는 다소 증가하지만 CO는 감소하는 모습을 보인다. 지역별 추세를 조사하기 위해 그림 4-11와 같이 경도 방향 45° × 위도 방향 5°의 픽셀의 시계열을 분석한다.

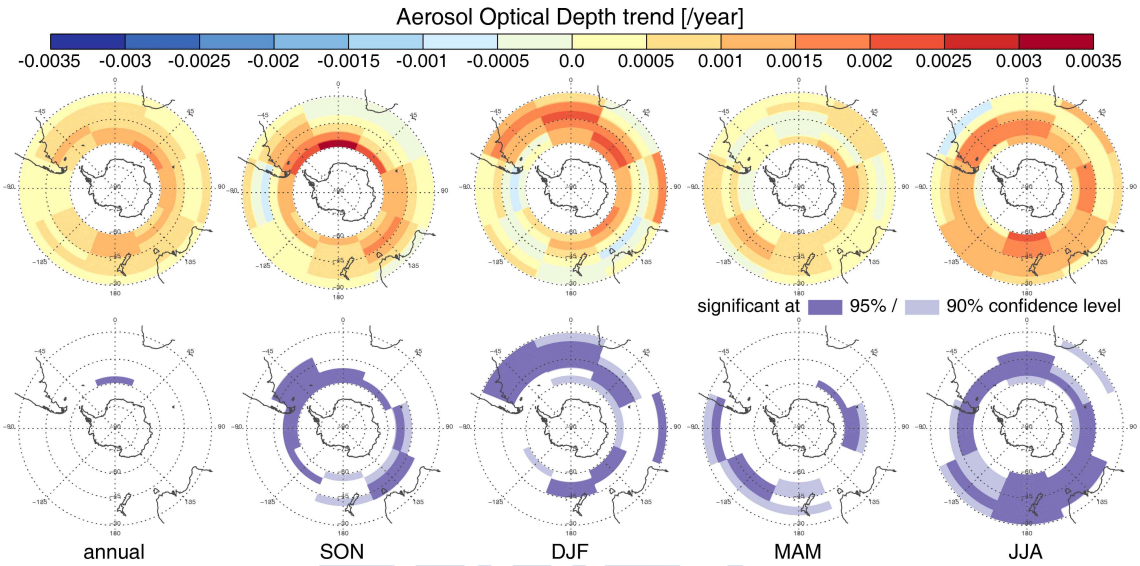


그림 4-12. 2005년부터 2016년까지 위도 30-60°S 지역의 550nm 에어로졸 광학 깊이의 선형 트렌드 (위, 단위: $year^{-1}$)와 p-value (아래). 계절 변동성을 제거한 월별 평균 자료를 이용하여 연간 트렌드 (왼쪽)와 계절별 트렌드 (SON: 봄, DJF: 여름, MAM: 가을, JJA: 겨울)로 나누어 나타냄. 통계적으로 유의미한 지역은 각각 진한 보라색 (95% 유의수준)과 연한 보라색 (90% 유의수준)으로 나타냄.

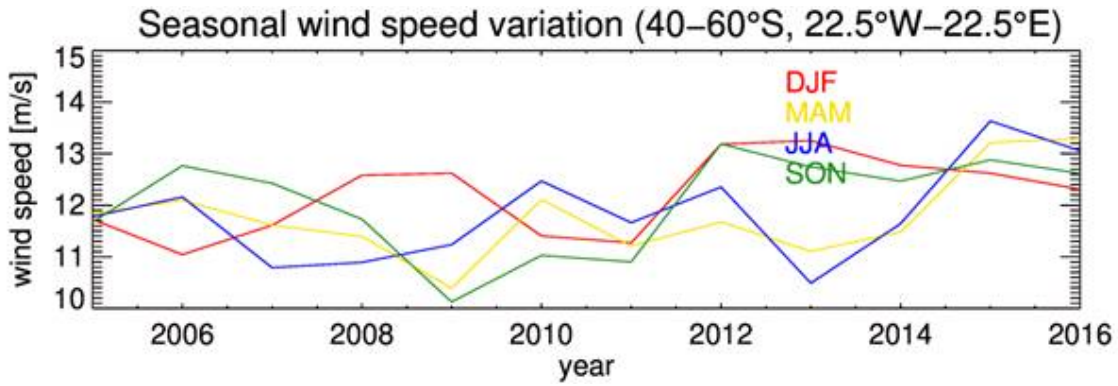


그림 4-13. 위도 40-60°S, 경도 22.5°W-22.5°E 지역의 계절별 평균 풍속의 연변동

그림 4-12에서 남반구 중위도의 전반적인 AOD가 계절에 상관없이 증가하는 추세를 보이며 이는 선행연구와도 일치한다 (De Meij et al., 2012; Hsu et al., 2012). 그림 4-10의 시계열에서 2015-2016년에 Calbuco 화산의 폭발로 인한 AOD 피크를 확인할 수 있고, 이로 인한 신호가 전체적인 증가 트렌드에 기여했을 가능성이 있다. 따라서 추가적으로 개별 픽셀의 시계열을 분석해본 결과, Calbuco 화산과 인접한 픽셀인 그림 4-11에서 2015-2016년의 AOD가 다른 기간에 비해 두드러지게 높게 나타나지 않았다. 이는 남반구 전체에 걸친 평균적인 중위도의 AOD 변화 트렌드가 각 지역의 AOD 변화 트렌드를 대표할 수 없음을 시사한다. 따라서 각 지역별로 유의미한 트렌드를 보이는 곳에 대해 추가적으로 분석하였다. 그림 4-3에서 나타났던 강한 바람으로 인하여 높은 AOD가 관측되었던 SON, DJF 기간의 남대서양 지역에서는 강한 증가 트렌드가 나타났다. 따라서 이는 풍속의 증가로 인한 해염 생성의 증가 (Kishcha et al., 2009)로 추론할 수 있기에 이 효과를 보기 위해 850hPa 풍속 트렌드를 분석하였다. 그림 4-13에서 보이는 해당 지역의 풍속 증가는 해양 표면으로에서 바람에 의한 해염 생성을 통해 AOD를 향상시킬 것으로 보인다. JJA에 Mehta et al. (2016)과 같이 남극 대륙 주변부 전반에 걸쳐 AOD의 증가 트렌드가 나타나고 이는 표 4-1에서도 확인할 수 있다.

이러한 증가 트렌드는 후에 남극 대륙의 AOD가 meridional 방향의 수송을 통해 증가할 수 있음을 암시한다. 제 3절에서 오존량과 기상장과의 상관성을 통해 대류권계면 부근에서 성층권 공기와 대류권 공기가 섞일 수 있는 여지가 있음을 확인하였다. 과거 선행 연구에 따르면 성층권 오존의 크기는 남극 환상 진동(SAM) 변동성에 영향을 미치며 이 SAM의 위상 변화에 따라 meridional 수송 패턴도 결정될 수 있는 것으로 알려져 있다 (Thompson et al., 2011). 즉, 성층권의 오존량 변화에 따라 남반구 중위도에서 배출되는 물질들, 특히 대기 중의 잔존시간이 반응성 높은 기체들보다 길게 나타나는 에어로졸이 남극으로 더 유입이 될 수 있는 여지가 결정될 수 있다는 것이다. 2019년 호주 산불의 심각성을 고려해보았을 때 (갈수록 지구온난화에 따른 화재 발생 위협이 증가하므로 에어로졸 배출량 증가가 예상됨. 이는 본 연구에서 찾아낸 AOD 증가 트렌드와도 다소 연관되는 결과) 만약 이 때 성층권 오존량이 meridional 순환을 강화시키는 특징을 갖게 된다면 훨씬 남극은 에어로졸의 효과를 많이 받을 수 있다는 이야기가 된다.

표 4-1. 2005년부터 2016년까지 deseasonalized AOD anomaly의 트렌드 및 불확실성. 빨간색은 95% 유의수준에서 유의미할 경우, 보라색은 90% 유의수준에서 유의미할 경우를 나타냄

Aerosol optical depth linear trend (year^{-1})

Latitude(°)	Longitude(°)	annual	SON	DJF	MAM	JJA
	whole	0.0007 ± 0.0016	0.0008 ± 0.0004	0.0007 ± 0.0003	0.0004 ± 0.0002	0.001 ± 0.0004
55-60°S	112.5-157.5°W	0.0006 ± 0.0006	0.001 ± 0.0008	0.0009 ± 0.0005	0.0001 ± 0.0005	0.0003 ± 0.0005
	67.5-112.5°W	0.0002 ± 0.0008	0.0014 ± 0.0006	-0.0002 ± 0.0006	-0.0003 ± 0.0005	-0.0001 ± 0.0005
	22.5-67.5°W	0.0007 ± 0.0019	0.0022 ± 0.0006	0.0002 ± 0.0007	0 ± 0.0005	0.0004 ± 0.0005
	22.5°W-22.5°E	0.0015 ± 0.0007	0.003 ± 0.0008	0.0012 ± 0.0006	0.0006 ± 0.0005	0.0011 ± 0.0006
	22.5-67.5°E	0.0015 ± 0.0019	0.0022 ± 0.0007	0.0016 ± 0.0009	0.0013 ± 0.0004	0.0011 ± 0.0007
	67.5-112.5°E	0.0012 ± 0.0021	0.0012 ± 0.0007	0.0015 ± 0.0008	0.0014 ± 0.0004	0.0009 ± 0.0005
	112.5-157.5°E	0.0009 ± 0.0013	0.0009 ± 0.0006	0.0016 ± 0.0007	0.0007 ± 0.0006	0.0005 ± 0.0006
	157.5°E-157.5°W	0.0012 ± 0.0008	0.0013 ± 0.0006	0.0008 ± 0.0006	0.0006 ± 0.0005	0.0021 ± 0.0005
50-55°S	112.5-157.5°W	0.0008 ± 0.0008	0.0013 ± 0.0006	0.0004 ± 0.0006	0.0003 ± 0.0005	0.0011 ± 0.0006
	67.5-112.5°W	0.0004 ± 0.001	0.0013 ± 0.0005	-0.0009 ± 0.0006	-0.0001 ± 0.0005	0.0011 ± 0.0005
	22.5-67.5°W	0.001 ± 0.0012	0.0018 ± 0.0004	0 ± 0.0005	0.0004 ± 0.0004	0.0017 ± 0.0005
	22.5°W-22.5°E	0.0012 ± 0.0015	0.0018 ± 0.0007	0.0013 ± 0.0008	0 ± 0.0006	0.0016 ± 0.0006
	22.5-67.5°E	0.0012 ± 0.0017	0.0009 ± 0.0006	0.0022 ± 0.0008	0.0004 ± 0.0004	0.0014 ± 0.0006
	67.5-112.5°E	0.0013 ± 0.0021	0.0012 ± 0.0006	0.0013 ± 0.0008	0.0011 ± 0.0004	0.0017 ± 0.0006
	112.5-157.5°E	0.0011 ± 0.0014	0.0011 ± 0.0006	0.0012 ± 0.0005	0.0006 ± 0.0005	0.0013 ± 0.0005

	157.5°E-157.5°W	0.0012 ± 0.0008	0.0006 ± 0.0006	0.0012 ± 0.0005	0.0009 ± 0.0005	0.0019 ± 0.0005
45-50°S	112.5-157.5°W	0.0006 ± 0.0009	0.0003 ± 0.0005	-0.0002 ± 0.0006	0.0011 ± 0.0004	0.0013 ± 0.0006
	67.5-112.5°W	0.0004 ± 0.0009	0.0002 ± 0.0005	-0.0004 ± 0.0008	0.0005 ± 0.0004	0.0014 ± 0.0006
	22.5-67.5°W	0.0011 ± 0.0012	0.0011 ± 0.0005	0.0011 ± 0.0005	0.0003 ± 0.0003	0.0017 ± 0.0005
	22.5°W-22.5°E	0.0008 ± 0.0018	0.0007 ± 0.0007	0.0016 ± 0.0005	-0.0004 ± 0.0004	0.0015 ± 0.0006
	22.5-67.5°E	0.0008 ± 0.0024	0.0005 ± 0.0006	0.002 ± 0.0006	-0.0001 ± 0.0004	0.0009 ± 0.0005
	67.5-112.5°E	0.0009 ± 0.0011	0.0012 ± 0.0006	0.0004 ± 0.0005	0.0006 ± 0.0004	0.0015 ± 0.0005
	112.5-157.5°E	0.0008 ± 0.0012	0.0015 ± 0.0006	0.0003 ± 0.0005	0.0004 ± 0.0004	0.0012 ± 0.0005
	157.5°E-157.5°W	0.001 ± 0.0009	0.0009 ± 0.0006	0.0009 ± 0.0004	0.0007 ± 0.0004	0.0016 ± 0.0005
40-45°S	112.5-157.5°W	0.0005 ± 0.0006	0 ± 0.0005	-0.0005 ± 0.0005	0.001 ± 0.0003	0.0013 ± 0.0006
	67.5-112.5°W	0.0004 ± 0.001	-0.0005 ± 0.0005	0.0006 ± 0.0007	0.0004 ± 0.0004	0.0011 ± 0.0006
	22.5-67.5°W	0.0009 ± 0.0014	0.001 ± 0.0005	0.0015 ± 0.0005	-0.0002 ± 0.0006	0.0015 ± 0.0009
	22.5°W-22.5°E	0.0008 ± 0.0026	0 ± 0.0007	0.0022 ± 0.0007	-0.0001 ± 0.0004	0.0012 ± 0.0006
	22.5-67.5°E	0.0005 ± 0.0011	0.0001 ± 0.0006	0.001 ± 0.0005	0.0005 ± 0.0004	0.0005 ± 0.0005
	67.5-112.5°E	0.0004 ± 0.0019	0.0008 ± 0.0007	0 ± 0.0006	0.0002 ± 0.0004	0.0005 ± 0.0006
	112.5-157.5°E	0.0006 ± 0.0014	0.0011 ± 0.0005	-0.0005 ± 0.0006	0.0003 ± 0.0004	0.0014 ± 0.0005
	157.5°E-157.5° W	0.0007 ± 0.0008	0.0008 ± 0.0005	0.0002 ± 0.0004	0.0005 ± 0.0004	0.0014 ± 0.0006
35-40°S	112.5-157.5°W	0.0006 ± 0.0006	0.0003 ± 0.0005	0.0001 ± 0.0005	0.0005 ±	0.0014 ±

					0.0003	0.0006
	67.5–112.5°W	0.0004 ± 0.001	−0.0002 ± 0.0005	0.0004 ± 0.0005	0.0008 ± 0.0003	0.0007 ± 0.0005
	22.5–67.5°W	0.0006 ± 0.0013	0.0008 ± 0.0006	0.0018 ± 0.0006	0 ± 0.0005	0 ± 0.0009
	22.5°W–22.5°E	0.0006 ± 0.0015	−0.0004 ± 0.0007	0.0016 ± 0.0006	0.0005 ± 0.0004	0.0005 ± 0.0006
	22.5–67.5°E	0.0003 ± 0.0012	−0.0002 ± 0.0007	0.0004 ± 0.0005	0.0007 ± 0.0005	0.0001 ± 0.0005
	67.5–112.5°E	0.0003 ± 0.0015	0.0005 ± 0.0006	0.0006 ± 0.0005	−0.0001 ± 0.0004	0.0003 ± 0.0006
	112.5–157.5°E	0.0006 ± 0.0015	0.0006 ± 0.0005	−0.0001 ± 0.0006	0.0003 ± 0.0003	0.0014 ± 0.0004
	157.5°E–157.5°W	0.0006 ± 0.001	0.0005 ± 0.0005	−0.0002 ± 0.0004	0.0006 ± 0.0003	0.0013 ± 0.0006
30–35°S	112.5–157.5°W	0.0004 ± 0.0008	0.0001 ± 0.0005	0.0005 ± 0.0005	−0.0002 ± 0.0003	0.001 ± 0.0005
	67.5–112.5°W	0.0005 ± 0.0008	0.0006 ± 0.0004	0.0004 ± 0.0004	0.0006 ± 0.0003	0.0003 ± 0.0005
	22.5–67.5°W	0.0002 ± 0.0008	0.0002 ± 0.0009	0.0013 ± 0.0003	0.0003 ± 0.0003	−0.0008 ± 0.001
	22.5°W–22.5°E	0.0003 ± 0.0008	0 ± 0.0005	0.0007 ± 0.0004	0.0004 ± 0.0005	0.0002 ± 0.0005
	22.5–67.5°E	0.0004 ± 0.0008	0 ± 0.0008	−0.0003 ± 0.0004	0.0005 ± 0.0004	0.0013 ± 0.0007
	67.5–112.5°E	0.0006 ± 0.0009	0.0001 ± 0.0006	0.0015 ± 0.0005	0 ± 0.0004	0.0007 ± 0.0005
	112.5–157.5°E	0.0003 ± 0.001	0 ± 0.0007	0.0002 ± 0.0006	0.0004 ± 0.0004	0.0004 ± 0.0003
	157.5°E–157.5°W	0.0004 ± 0.001	0.0004 ± 0.0005	0 ± 0.0005	0.0003 ± 0.0003	0.001 ± 0.0004

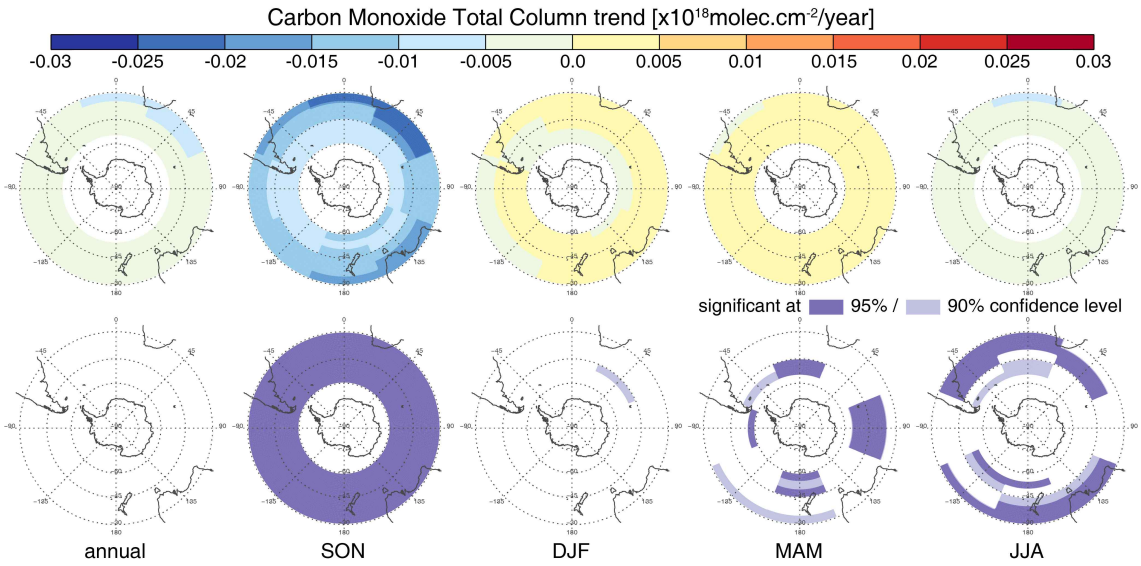


그림 4-14. 2005년부터 2016년까지 남위 30-60° 지역의 CO 기주 농도의 선형 트렌드 (위, 단위: year^{-1})와 p-value (아래). 계절 변동성을 제거한 월별 평균 자료를 이용하여 연간 트렌드 (왼쪽)와 계절별 트렌드 (SON: 봄, DJF: 여름, MAM: 가을, JJA: 겨울)로 나누어 나타냄. 통계적으로 유의미한 지역은 각각 진한 보라색 (95% 유의수준)과 연한 보라색 (90% 유의수준)으로 나타냄.

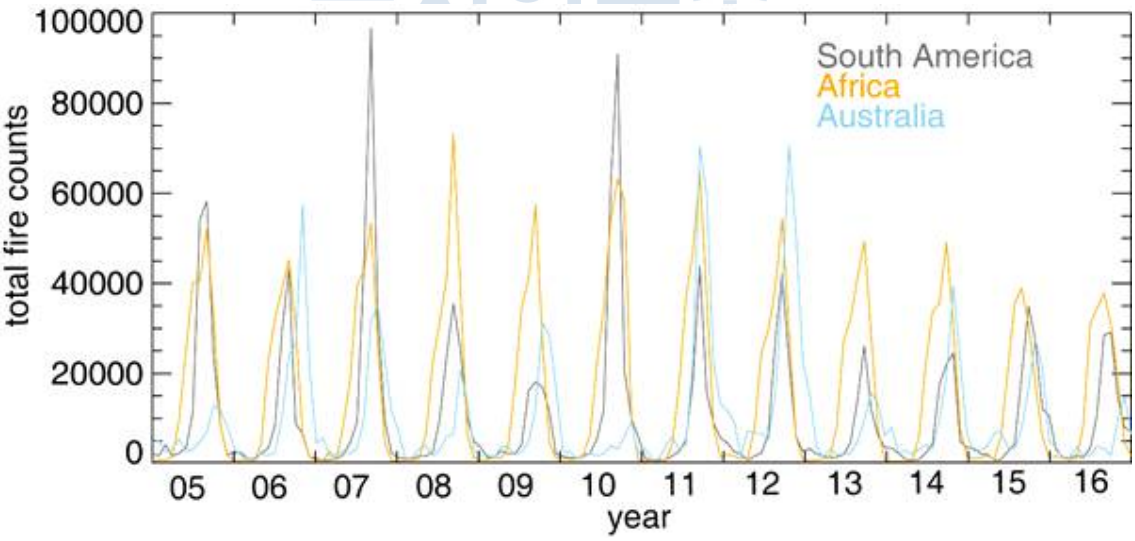


그림 4-15. 2005년부터 2016년까지 남아메리카 (검정), 아프리카 (주황), 오스트레일리아 (하늘)에서의 total fire count의 시계열.

CO의 전기간 트렌드 및 계절별 트렌드는 그림 4-14와 표 4-2에 기술된 것과 같다. 전기간 트렌드는 통계적 유의미성은 없으나 남반구 전체에 걸쳐 약한 감소 추세를 보인다. 반면, 계절별 트렌드에서는 몇몇 유의미한 트렌드가 보이는데, 대표적인 것이 SON에 보이는 CO의 급격한 감소 트렌드이다. SON의 감소 트렌드는 DJF와 MAM에 나타나는 약한 증가 트렌드를 상쇄하고도 전기간 트렌드를 감소로 나타낼만큼 유의미하다. 이러한 남반구 CO의 감소 트렌드는 인위적 배출과 바이오매스 연소 의 감소로 설명된 바 있다 (Zeng et al., 2012; Worden et al., 2013). 남부 아프리카와 같이 바이오매스 연소가 발생하는 대륙에서는 특히나 CO의 감소가 두드러진다. 바이오매스 연소가 실제로 줄어드는지 보기 위해 남아메리카, 아프리카 및 호주의 total fire count를 분석하였다 (그림 4-15). 각 대륙의 total fire count가 각기 다른 연변동 패턴을 갖고 있음에도 불구하고, 세 대륙 모두에서 감소 트렌드를 보이며 특히 이러한 패턴은 2009년과 2010년 이후에 두드러지게 나타난다. 남반구에서 바이오매스 연소 배출이 CO의 시간적 변동에 큰 영향을 끼친다는 것을 고려할 때 (Zeng et al., 2012), 이러한 total fire count의 감소 트렌드가 CO의 감소 트렌드와 깊게 연관되어 있음을 생각할 수 있다. 즉, 분석 기간 (2005-2016) 동안 total fire count의 감소로 인한 바이오매스 연소의 감소가 CO 트렌드를 감소를 이끌어내는데 중요한 역할을 한다는 것을 나타낸다.

다만 fire count라는 변수가 화재의 특징을 아주 잘 반영하는 요소가 아닐 수 있음을 고려해야 할 필요가 있다. Fire count는 말 그대로 화재의 발생 여부를 표현하는 변수이기 때문에 화재의 강도나 그 화재로 인해 실제 연소된 면적과 같은 정보를 반영하기 어렵다는 문제가 있다. 이런 측면에서 많은 연구들은 burned area라는 정보를 활용하기도 하는데 이 정보는 실시간 모니터링이 쉽지 않다는 단점이 있어서 원하는 분석 기간에 자료를 활용할 수 있는지 여부를 먼저 확인할 필요가 있다. 다른 지표로서는 fire radiative power(FRP)와 같은 자료가 있는데 이 변수는 화재가 발생했을때 나타나는 복사 강도를 측정하여 제공하는 변수로서 화재가 얼마나 강하게 발생했는지를 살펴보는데 적합한 변수이다. 향후에는 이러한 여러 화재 관련 정보들을 좀 더 복합적으로 활용하여 화재에서 발생되는 여러 대기 오염물질의 특성 및 남극 지역에 미칠 수 있는 영향을 더 상세히 진단하고자 한다.

표 4-2. 2005년부터 2016년까지 deseasonalized CO anomaly의 트렌드 및 불확실성. 빨간색은 95% 유의수준에서 유의미할 경우, 보라색은 90% 유의수준에서 유의미할 경우를 나타냄

Carbon monoxide linear trend (10^{18} molec.cm^{-2}year^{-1})

Latitude(°)	Longitude(°)	annual	SON	DJF	MAM	JJA
	whole	−0.0029 ± 0.01	−0.0115 ± 0.0033	0.0008 ± 0.0018	0.0016 ± 0.0012	−0.0023 ± 0.001
55–60°S	112.5–157.5°W		−0.0073 ± 0.0024	0.0013 ± 0.0015	0.0009 ± 0.0012	
	67.5–112.5°W		−0.0072 ± 0.0027	0.0015 ± 0.0016	0.003 ± 0.0014	
	22.5–67.5°W		−0.0083 ± 0.0024	−0.0022 ± 0.0014	0.0013 ± 0.0011	
	22.5°W–22.5°E		−0.0095 ± 0.0023	−0.0018 ± 0.0013	0.0009 ± 0.0011	
	22.5–67.5°E		−0.0088 ± 0.0024	−0.0015 ± 0.0015	0.0006 ± 0.0011	
	67.5–112.5°E		−0.0099 ± 0.0023	−0.0019 ± 0.0014	0.0014 ± 0.0008	
	112.5–157.5°E		−0.0103 ± 0.0022	−0.0008 ± 0.0014	0.0005 ± 0.0009	
	157.5°E–157.5°W		−0.0102 ± 0.0028	0.0005 ± 0.0015	0.0024 ± 0.001	
50–55°S	112.5–157.5°W	−0.0022 ± 0.0038	−0.0076 ± 0.0028	0.0018 ± 0.0017	0.0001 ± 0.0012	−0.003 ± 0.0013
	67.5–112.5°W	−0.0011 ± 0.0018	−0.0067 ± 0.0029	0.0023 ± 0.0015	0.0012 ± 0.0013	−0.0012 ± 0.0013
	22.5–67.5°W	−0.0023 ± 0.0046	−0.0074 ± 0.0027	−0.0017 ± 0.0016	0.002 ± 0.001	−0.0023 ± 0.0013
	22.5°W–22.5°E	−0.0023 ± 0.002	−0.009 ± 0.0024	0 ± 0.0013	0.0019 ± 0.0009	−0.0022 ± 0.0012
	22.5–67.5°E	−0.0024 ± 0.0031	−0.009 ± 0.0025	−0.0004 ± 0.0013	0.0014 ± 0.0011	−0.0017 ± 0.0012
	67.5–112.5°E	−0.0022 ± 0.0021	−0.0099 ± 0.0023	−0.0006 ± 0.0014	0.0027 ± 0.0008	−0.0009 ± 0.0013
	112.5–157.5°E	−0.0024 ± 0.0026	−0.01 ± 0.0024	0.001 ± 0.0017	0.0003 ± 0.001	−0.001 ± 0.0012
	157.5°E–157.5°W	−0.0021 ± 0.0036	−0.0097 ± 0.0034	0.0023 ± 0.0019	0.0021 ± 0.0011	−0.0031 ± 0.0013

45–50°S	112.5–157.5°W	−0.0019 ± 0.0046	−0.0075 ± 0.0031	0.0014 ± 0.002	0.0007 ± 0.0013	−0.0022 ± 0.0012
	67.5–112.5°W	−0.0012 ± 0.0029	−0.0071 ± 0.0031	0.0021 ± 0.0017	0.0011 ± 0.0014	−0.0007 ± 0.0014
	22.5–67.5°W	−0.002 ± 0.0049	−0.0074 ± 0.0032	−0.0011 ± 0.0019	0.0021 ± 0.0013	−0.0015 ± 0.0013
	22.5°W–22.5°E	−0.0018 ± 0.0022	−0.0088 ± 0.0026	0.0011 ± 0.0015	0.0028 ± 0.001	−0.0021 ± 0.0011
	22.5–67.5°E	−0.0017 ± 0.0027	−0.0099 ± 0.003	0.0027 ± 0.0015	0.0016 ± 0.0012	−0.001 ± 0.0012
	67.5–112.5°E	−0.0018 ± 0.003	−0.0109 ± 0.0029	0.0008 ± 0.0018	0.0042 ± 0.0012	−0.0012 ± 0.0016
	112.5–157.5°E	−0.0015 ± 0.0036	−0.0094 ± 0.0032	0.003 ± 0.002	0.0013 ± 0.0012	−0.001 ± 0.0011
	157.5°E–157.5°W	−0.002 ± 0.0041	−0.0112 ± 0.0038	0.0018 ± 0.0021	0.0027 ± 0.0013	−0.0015 ± 0.0013
40–45°S	112.5–157.5°W	−0.0025 ± 0.0043	−0.01 ± 0.0035	0.0003 ± 0.0021	0.0016 ± 0.0015	−0.0019 ± 0.0013
	67.5–112.5°W	−0.0016 ± 0.0039	−0.0094 ± 0.0033	0.0008 ± 0.0019	0.0022 ± 0.0014	−0.0002 ± 0.0015
	22.5–67.5°W	−0.0033 ± 0.0047	−0.0103 ± 0.0034	−0.0014 ± 0.0018	0.0009 ± 0.0013	−0.0026 ± 0.0012
	22.5°W–22.5°E	−0.0022 ± 0.0037	−0.0102 ± 0.0035	0.001 ± 0.0019	0.0015 ± 0.0013	−0.0013 ± 0.0013
	22.5–67.5°E	−0.0039 ± 0.0043	−0.0161 ± 0.004	0.0037 ± 0.0023	0.0003 ± 0.0018	−0.0033 ± 0.0014
	67.5–112.5°E	−0.002 ± 0.0036	−0.0128 ± 0.0039	0.0013 ± 0.002	0.0041 ± 0.0014	−0.0008 ± 0.0015
	112.5–157.5°E	−0.0024 ± 0.0048	−0.0117 ± 0.0046	0.0038 ± 0.0023	0.0008 ± 0.0014	−0.0023 ± 0.0013
	157.5°E–157.5°W	−0.0029 ± 0.0037	−0.0124 ± 0.0042	0.0014 ± 0.0022	0.0018 ± 0.0015	−0.0024 ± 0.0014
35–40°S	112.5–157.5°W	−0.0031 ± 0.0044	−0.0107 ± 0.0037	−0.0018 ± 0.0021	0.0017 ± 0.0016	−0.0017 ± 0.0012
	67.5–112.5°W	−0.0028 ± 0.0047	−0.0125 ± 0.0033	−0.0007 ± 0.0019	0.002 ± 0.0016	−0.0001 ± 0.0013

	22.5–67.5°W	−0.004 ± 0.0047	−0.0139 ± 0.0038	0.0001 ± 0.0023	0.0007 ± 0.0015	−0.0029 ± 0.0011
	22.5°W–22.5°E	−0.0043 ± 0.0052	−0.015 ± 0.0042	0.0015 ± 0.0028	0.0002 ± 0.002	−0.004 ± 0.0016
	22.5–67.5°E	−0.0066 ± 0.0071	−0.0235 ± 0.0061	0.002 ± 0.0031	0.0001 ± 0.0018	−0.005 ± 0.0017
	67.5–112.5°E	−0.0027 ± 0.0061	−0.0128 ± 0.0047	0.0003 ± 0.0029	0.0029 ± 0.0014	−0.0011 ± 0.0013
	112.5–157.5°E	−0.0043 ± 0.0054	−0.0153 ± 0.0055	0.0012 ± 0.0027	0.0002 ± 0.0015	−0.0034 ± 0.0013
	157.5°E–157.5°W	−0.0036 ± 0.0044	−0.0142 ± 0.0048	0.0006 ± 0.0022	0.0023 ± 0.0017	−0.0034 ± 0.0014
30–35°S	112.5–157.5°W	−0.0027 ± 0.0057	−0.0109 ± 0.004	−0.0005 ± 0.0025	0.0025 ± 0.0015	−0.0019 ± 0.001
	67.5–112.5°W	−0.0031 ± 0.0049	−0.012 ± 0.0038	−0.0009 ± 0.0021	0.0015 ± 0.0013	−0.0009 ± 0.001
	22.5–67.5°W	−0.0036 ± 0.0054	−0.0155 ± 0.005	0.0048 ± 0.0031	−0.0001 ± 0.0022	−0.0035 ± 0.0014
	22.5°W–22.5°E	−0.0051 ± 0.0054	−0.02 ± 0.0057	0.0024 ± 0.0032	0.0022 ± 0.0023	−0.0051 ± 0.0021
	22.5–67.5°E	−0.0059 ± 0.0081	−0.0237 ± 0.0071	0.002 ± 0.0036	0.0008 ± 0.0017	−0.0029 ± 0.0018
	67.5–112.5°E	−0.0026 ± 0.0068	−0.0125 ± 0.0054	0.0016 ± 0.0031	0.0022 ± 0.0015	−0.0017 ± 0.0013
	112.5–157.5°E	−0.0048 ± 0.0065	−0.0164 ± 0.0064	0.0013 ± 0.0031	0.0008 ± 0.002	−0.0049 ± 0.0013
	157.5°E–157.5°W	−0.0035 ± 0.0057	−0.0151 ± 0.0053	0.0004 ± 0.0025	0.0031 ± 0.0017	−0.0026 ± 0.0012

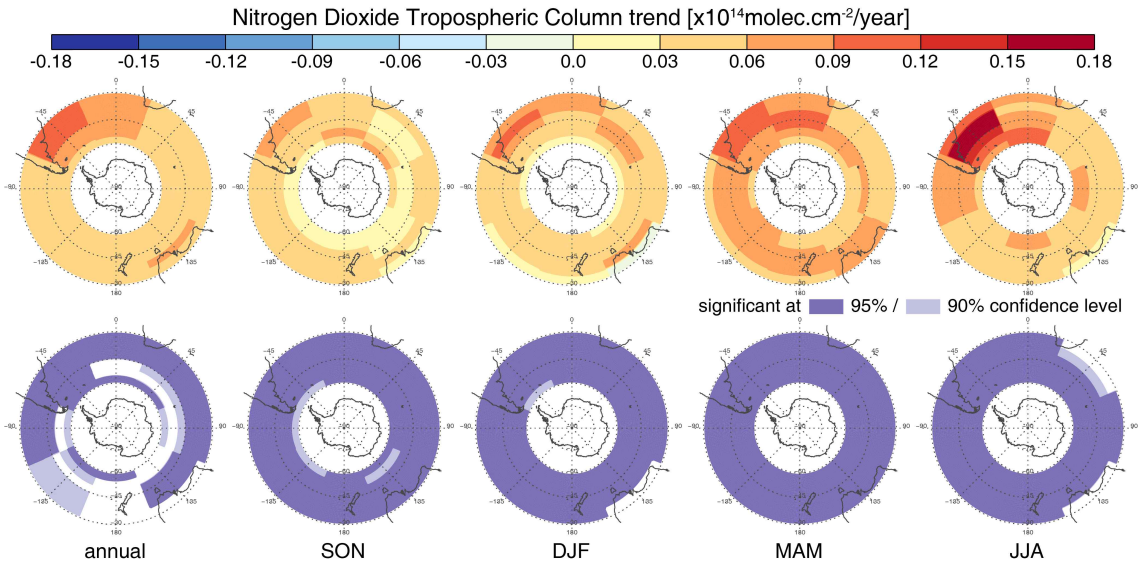


그림 4-16. 2005년부터 2016년까지 남위 30-60° 지역의 NO_2 대류권 기주 농도의 선형 트렌드 (위, 단위: $year^{-1}$)와 p-value (아래). 계절 변동성을 제거한 월별 평균 자료를 이용하여 연간 트렌드 (왼쪽)와 계절별 트렌드 (SON: 봄, DJF: 여름, MAM: 가을, JJA: 겨울)로 나누어 나타냄. 통계적으로 유의미한 지역은 각각 진한 보라색 (95% 유의수준)과 연한 보라색 (90% 유의수준)으로 나타냄.

대류권 NO_2는 높은 통계적 유의미성을 가지면서 증가하는 트렌드를 보인다 (그림 4-16 및 표 4-3). 모든 연간 및 계절별 트렌드가 증가하는 것으로 나타나지만 특히 남아메리카의 남부 지역의 증가 트렌드가 다른 지역 대비 뚜렷하게 나타난다. 이 결과는 남아메리카의 대류권 NO_2 증가에 관한 선행연구와 관련지어 생각할 수 있다 (Schneider et al., 2015). 이러한 대류권 NO_2 의 증가는 도시화로 인한 대기 오염 물질의 증가로 인해 발생하며 (Lamsal et al.,. 2013), 겨울철에 나타나는 증가 트렌드의 최댓값은 겨울철에 감소하는 NO_2 광분해와 증가하는 anthropogenic 에너지 소비의 결과로 보인다. 남아메리카에서 서남극, 특히 세종기지 (그림 4-7)로 공기 질량이 다량으로 유입되는 것을 고려하면, 서남극 지역의 눈에서 관측되는 NO_x 농도가 이러한 질소 화합물 (예. HNO_3) 수송의 영향으로 점차 증가할 것으로 예상된다. 지금까지는 중위도에서 발생한 오염물질이 남극 대기 조성 변화에 영향을 미치지 않는 것으로 보였지만 (Weller et al., 2011), 위의 분석과 같이 증가 트렌드가 지속된다면 남극 대기에서 중위도의 영향이 나타날 수 있다 (Weller et al., 2013).

표 4-3 2005년부터 2016년까지 deseasonalized NO_2 anomaly의 트렌드 및 불확실성. 빨간색은 95% 유의수준에서 유의미할 경우, 보라색은 90% 유의수준에서 유의미할 경우를 나타냄

Nitrogen dioxide linear trend (10^{14} molec.cm^{-2}year^{-1})

Latitude(°)	Longitude(°)	annual	SON	DJF	MAM	JJA
	whole	0.0547 ± 0.0257	0.0381 ± 0.0063	0.0471 ± 0.0048	0.0678 ± 0.0064	0.0662 ± 0.007
55-60°S	112.5-157.5°W	0.0402 ± 0.009	0.0146 ± 0.0081	0.0327 ± 0.0062	0.0628 ± 0.0092	0.0507 ± 0.0104
	67.5-112.5°W	0.0378 ± 0.0215	0.0228 ± 0.0114	0.0233 ± 0.0057	0.0595 ± 0.0131	0.0456 ± 0.0126
	22.5-67.5°W	0.0459 ± 0.0164	0.0226 ± 0.0121	0.0128 ± 0.0076	0.0629 ± 0.0127	0.0853 ± 0.0143
	22.5°W-22.5°E	0.0595 ± 0.0236	0.0541 ± 0.0138	0.0199 ± 0.0081	0.0505 ± 0.0072	0.1139 ± 0.0153
	22.5-67.5°E	0.0474 ± 0.0227	0.0605 ± 0.0112	0.0296 ± 0.0082	0.0534 ± 0.0064	0.0464 ± 0.0134
	67.5-112.5°E	0.043 ± 0.0251	0.0391 ± 0.0131	0.0288 ± 0.0073	0.0441 ± 0.0073	0.06 ± 0.0122
	112.5-157.5°E	0.0369 ± 0.027	0.0214 ± 0.0072	0.0268 ± 0.0064	0.0456 ± 0.0064	0.0537 ± 0.0086
	157.5°E-157.5°W	0.0385 ± 0.0088	0.0184 ± 0.0089	0.0302 ± 0.0063	0.0428 ± 0.0082	0.0628 ± 0.0075
50-55°S	112.5-157.5°W	0.0486 ± 0.0265	0.0226 ± 0.0074	0.0518 ± 0.0063	0.0718 ± 0.0082	0.0483 ± 0.0082
	67.5-112.5°W	0.0552 ± 0.0436	0.029 ± 0.0109	0.0513 ± 0.0056	0.0766 ± 0.0175	0.064 ± 0.0094
	22.5-67.5°W	0.0626 ± 0.0219	0.0345 ± 0.0125	0.0379 ± 0.0091	0.0727 ± 0.0146	0.1056 ± 0.0136
	22.5°W-22.5°E	0.0778 ± 0.0592	0.0724 ± 0.0121	0.0483 ± 0.0099	0.074 ± 0.0085	0.1169 ± 0.0152
	22.5-67.5°E	0.0584 ± 0.0375	0.0505 ± 0.0134	0.0531 ± 0.0078	0.0721 ± 0.0076	0.0579 ± 0.0126
	67.5-112.5°E	0.0486 ± 0.0362	0.0271 ± 0.0083	0.0472 ± 0.0074	0.0539 ± 0.0072	0.0663 ± 0.0121
	112.5-157.5°E	0.0407 ± 0.0271	0.0126 ± 0.0074	0.0386 ± 0.0073	0.0536 ± 0.0094	0.058 ± 0.0087
	157.5°E-157.5°W	0.049 ± 0.0377	0.0172 ± 0.0082	0.0557 ± 0.0071	0.0597 ± 0.0082	0.0634 ± 0.0086

45–50°S	112.5–157.5°W	0.0541 ± 0.0329	0.0361 ± 0.0067	0.0542 ± 0.0051	0.0726 ± 0.0094	0.0536 ± 0.0082
	67.5–112.5°W	0.0543 ± 0.0277	0.0334 ± 0.0081	0.0418 ± 0.0061	0.082 ± 0.0161	0.0604 ± 0.0078
	22.5–67.5°W	0.0781 ± 0.0137	0.0503 ± 0.0083	0.0499 ± 0.011	0.0785 ± 0.0152	0.1338 ± 0.0163
	22.5°W–22.5°E	0.0718 ± 0.0451	0.0529 ± 0.0087	0.0494 ± 0.008	0.1001 ± 0.01	0.0851 ± 0.0121
	22.5–67.5°E	0.0576 ± 0.034	0.0284 ± 0.0074	0.0737 ± 0.0081	0.0702 ± 0.0093	0.0581 ± 0.0109
	67.5–112.5°E	0.0486 ± 0.0288	0.0239 ± 0.0064	0.0497 ± 0.0061	0.0616 ± 0.0082	0.0596 ± 0.0126
	112.5–157.5°E	0.0445 ± 0.0201	0.0217 ± 0.0079	0.0408 ± 0.0071	0.0575 ± 0.0085	0.0581 ± 0.0098
	157.5°E–157.5°W	0.0565 ± 0.0408	0.0348 ± 0.0096	0.0599 ± 0.0083	0.0735 ± 0.0092	0.0581 ± 0.0123
40–45°S	112.5–157.5°W	0.049 ± 0.0294	0.031 ± 0.0067	0.0487 ± 0.0052	0.0687 ± 0.0094	0.0477 ± 0.0055
	67.5–112.5°W	0.0537 ± 0.0192	0.0313 ± 0.0078	0.0366 ± 0.0056	0.0835 ± 0.0126	0.0636 ± 0.0072
	22.5–67.5°W	0.0973 ± 0.034	0.0485 ± 0.0101	0.0814 ± 0.0125	0.098 ± 0.0167	0.1618 ± 0.0205
	22.5°W–22.5°E	0.0712 ± 0.0316	0.0475 ± 0.0074	0.0552 ± 0.0057	0.1157 ± 0.0128	0.0668 ± 0.0136
	22.5–67.5°E	0.0543 ± 0.0234	0.0231 ± 0.0082	0.082 ± 0.0085	0.0533 ± 0.0097	0.0591 ± 0.0136
	67.5–112.5°E	0.0487 ± 0.0203	0.0322 ± 0.007	0.0527 ± 0.0068	0.0546 ± 0.0091	0.0554 ± 0.0095
	112.5–157.5°E	0.0487 ± 0.0194	0.0296 ± 0.0086	0.0538 ± 0.0071	0.0634 ± 0.0108	0.0481 ± 0.0093
	157.5°E–157.5°W	0.055 ± 0.035	0.0456 ± 0.0101	0.0556 ± 0.0072	0.0708 ± 0.0107	0.0482 ± 0.0125
35–40°S	112.5–157.5°W	0.0439 ± 0.0249	0.0346 ± 0.0085	0.0325 ± 0.0061	0.0619 ± 0.0096	0.0466 ± 0.007
	67.5–112.5°W	0.0531 ±	0.0336 ±	0.0308 ±	0.0706 ±	0.0776 ±

		0.0073	0.0084	0.0059	0.0102	0.0084
	22.5–67.5°W	0.103 ± 0.0462	0.0605 ± 0.0126	0.1054 ± 0.0168	0.0952 ± 0.0187	0.1514 ± 0.0215
	22.5°W–22.5°E	0.0667 ± 0.0251	0.0549 ± 0.009	0.0654 ± 0.0088	0.0898 ± 0.0107	0.0568 ± 0.0137
	22.5–67.5°E	0.0406 ± 0.0149	0.0286 ± 0.0105	0.0592 ± 0.0096	0.0424 ± 0.0123	0.0324 ± 0.018
	67.5–112.5°E	0.0483 ± 0.0181	0.0402 ± 0.0081	0.0517 ± 0.009	0.0573 ± 0.0107	0.0441 ± 0.0065
	112.5–157.5°E	0.0625 ± 0.0143	0.0476 ± 0.0095	0.0664 ± 0.0102	0.0877 ± 0.0133	0.0486 ± 0.0168
	157.5°E–157.5°W	0.0582 ± 0.0475	0.0574 ± 0.013	0.0526 ± 0.0095	0.0716 ± 0.0085	0.0514 ± 0.0117
30–35°S	112.5–157.5°W	0.0376 ± 0.0219	0.0326 ± 0.0102	0.016 ± 0.0072	0.0467 ± 0.0082	0.055 ± 0.0077
	67.5–112.5°W	0.0533 ± 0.009	0.0419 ± 0.0089	0.0352 ± 0.0072	0.0532 ± 0.0104	0.0829 ± 0.0121
	22.5–67.5°W	0.0943 ± 0.0392	0.0745 ± 0.0194	0.0812 ± 0.0172	0.1136 ± 0.0195	0.1082 ± 0.0234
	22.5°W–22.5°E	0.069 ± 0.0141	0.0488 ± 0.0121	0.0755 ± 0.0162	0.0854 ± 0.0125	0.0664 ± 0.0133
	22.5–67.5°E	0.0402 ± 0.0149	0.0487 ± 0.015	0.0368 ± 0.0105	0.0418 ± 0.0166	0.0334 ± 0.0206
	67.5–112.5°E	0.048 ± 0.0244	0.0503 ± 0.0091	0.0494 ± 0.0123	0.0469 ± 0.0095	0.0455 ± 0.0084
	112.5–157.5°E	0.0302 ± 0.0298	0.0265 ± 0.0099	−0.0003 ± 0.0142	0.0747 ± 0.0153	0.0199 ± 0.0137
	157.5°E–157.5°W	0.0446 ± 0.032	0.0573 ± 0.0119	0.0273 ± 0.008	0.0535 ± 0.0075	0.0402 ± 0.0107

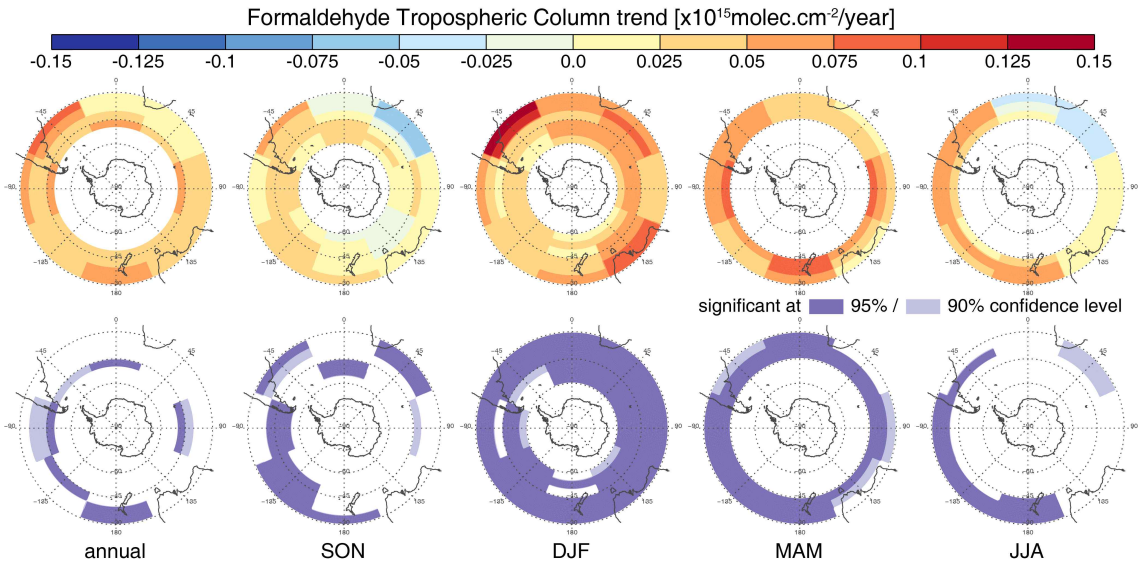


그림 4-17. 2005년부터 2016년까지 남위 30-60° 지역의 HCHO 대류권 기주 농도의 선형 트렌드 (위, 단위: year^{-1})와 p-value (아래). 계절 변동성을 제거한 월별 평균 자료를 이용하여 연간 트렌드 (왼쪽)와 계절별 트렌드 (SON: 봄, DJF: 여름, MAM: 가을, JJA: 겨울)로 나누어 나타냄. 통계적으로 유의미한 지역은 각각 진한 보라색 (95% 유의수준)과 연한 보라색 (90% 유의수준)으로 나타냄.

대류권 HCHO는 전반적으로 남반구 중위도(그림 4-17 및 표 4-4)에서 증가하는 트렌드를 보인다. 가장 큰 증가 트렌드는 여름철 남아메리카에서 나타나는데, 여기에는 강한 광화학 생성 반응의 영향도 있는 것으로 생각된다. 남아메리카에서 나타나는 이러한 증가 트렌드는 도시화로 인한 anthropogenic non-methane volatile organic compounds (NMVOCs)의 증가의 결과일 수 있다 (De Smedt et al., 2010). 전반적인 증가 트렌드와는 달리 JJA와 SON 동안 남아프리카에서는 감소 트렌드가 나타나는데, 이에 대해서는 아프리카의 peak fire season 동안의 배출량 감소에 대한 선행연구 (Bauwens et al., 2016)와 total fire count의 감소 트렌드를 나타내는 그림 33으로 이 트렌드를 설명할 수 있다. 가장 큰 CO 감소 트렌드가 남아프리카에서 발생하는 것을 고려하면 (표 4-2), 남아프리카의 바이오매스 연소가 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 NO_2와 HCHO는 증가하나 CO는 감소하는 남아메리카의 경우와는 다르게 나타난다.

표 4-4. 2005년부터 2016년까지 deseasonalized HCHO anomaly의 트렌드 및 불확실성. 빨간색은 95% 유의수준에서 유의미할 경우, 보라색은 90% 유의수준에서 유의미할 경우를 나타냄

Formaldehyde linear trend (10^{15} molec.cm^{-2}year^{-1})

Latitude(°)	Longitude (°)	annual	SON	DJF	MAM	JJA
	whole	0.0405 ± 0.0413	0.0157 ± 0.0111	0.0496 ± 0.0089	0.0625 ± 0.0096	0.0344 ± 0.0162
55-60°S	112.5-157.5°W		0.0185 ± 0.0192	0.0404 ± 0.0161		
	67.5-112.5°W		0.0255 ± 0.018	0.0308 ± 0.0178		
	22.5-67.5°W		0.0021 ± 0.018	0.0045 ± 0.0172		
	22.5°W-22.5°E		0.0357 ± 0.0224	0.0333 ± 0.0139		
	22.5-67.5°E		0.003 ± 0.0188	0.04 ± 0.0142		
	67.5-112.5°E		0 ± 0.0283	0.0429 ± 0.0145		
	112.5-157.5°E		-0.0072 ± 0.0317	0.0234 ± 0.0136		
	157.5°E-157.5°W		-0.004 ± 0.0226	0.0196 ± 0.0119		
50-55°S	112.5-157.5°W		0.0219 ± 0.0162	0.0442 ± 0.0128	0.0706 ± 0.022	
	67.5-112.5°W		0.0425 ± 0.0174	0.0472 ± 0.016	0.106 ± 0.0249	
	22.5-67.5°W		0.0074 ± 0.0188	0.022 ± 0.0182	0.0275 ± 0.0272	
	22.5°W-22.5°E		0.0483 ± 0.0156	0.0558 ± 0.0146	0.0737 ± 0.0158	
	22.5-67.5°E		0.0311 ± 0.0196	0.058 ± 0.0122	0.0674 ± 0.0223	
	67.5-112.5°E		0.0092 ± 0.0274	0.0634 ± 0.0138	0.0836 ± 0.0295	

KOPRI 극지연구소

	112.5–157.5°E		−0.0106 ± 0.0322	0.0478 ± 0.0137	0.1043 ± 0.0318	
	157.5°E–157.5°W		0.0023 ± 0.0203	0.0287 ± 0.0111	0.0616 ± 0.0262	
45–50°S	112.5–157.5°W	0.0293 ± 0.0238	0.0422 ± 0.0137	0.0464 ± 0.0125	0.052 ± 0.0122	−0.0234 ± 0.0379
	67.5–112.5°W	0.0695 ± 0.0269	0.038 ± 0.0151	0.0454 ± 0.0148	0.0818 ± 0.014	0.1131 ± 0.0771
	22.5–67.5°W	0.0344 ± 0.0178	0.0364 ± 0.0222	0.0338 ± 0.0181	0.0609 ± 0.0191	0.0068 ± 0.0372
	22.5°W–22.5°E	0.0598 ± 0.0294	0.0385 ± 0.0183	0.0571 ± 0.0126	0.0653 ± 0.013	0.0784 ± 0.0566
	22.5–67.5°E	0.0497 ± 0.0459	0.0116 ± 0.0196	0.0634 ± 0.0143	0.0563 ± 0.0166	0.0677 ± 0.0496
	67.5–112.5°E	0.0665 ± 0.0322	0.0183 ± 0.0221	0.0611 ± 0.0109	0.0871 ± 0.0142	0.0996 ± 0.0577
	112.5–157.5°E	0.0392 ± 0.0383	−0.0034 ± 0.0281	0.0568 ± 0.0134	0.0724 ± 0.0157	0.0312 ± 0.0487
	157.5°E–157.5°W	0.0406 ± 0.0255	0 ± 0.0208	0.0208 ± 0.0148	0.0946 ± 0.014	0.0471 ± 0.0521
40–45°S	112.5–157.5°W	0.0383 ± 0.0143	0.0418 ± 0.0119	0.0346 ± 0.0092	0.0561 ± 0.0143	0.021 ± 0.021
	67.5–112.5°W	0.0453 ± 0.0236	0.0387 ± 0.0158	0.0239 ± 0.0148	0.088 ± 0.0139	0.0308 ± 0.0211
	22.5–67.5°W	0.042 ± 0.0386	0.0326 ± 0.0204	0.0488 ± 0.0196	0.0603 ± 0.0191	0.0264 ± 0.0245
	22.5°W–22.5°E	0.0285 ± 0.0222	0.0205 ± 0.0172	0.0403 ± 0.0142	0.0461 ± 0.0141	0.0072 ± 0.0167
	22.5–67.5°E	0.0151 ± 0.0688	−0.0212 ± 0.0189	0.0642 ± 0.0191	0.0475 ± 0.0142	−0.0303 ± 0.02

	67.5–112.5°E	0.0401 ± 0.0219	0.0264 ± 0.0144	0.0333 ± 0.0114	0.0783 ± 0.0158	0.0224 ± 0.0209
	112.5–157.5°E	0.0345 ± 0.062	−0.0011 ± 0.0211	0.0624 ± 0.0138	0.0669 ± 0.0178	0.0097 ± 0.0229
	157.5°E–157.5°W	0.0414 ± 0.036	0.0112 ± 0.0183	0.0342 ± 0.0156	0.0814 ± 0.0168	0.0391 ± 0.0188
35–40°S	112.5–157.5°W	0.0453 ± 0.0279	0.0481 ± 0.0101	0.0301 ± 0.009	0.0463 ± 0.011	0.0569 ± 0.0162
	67.5–112.5°W	0.0482 ± 0.0282	0.0229 ± 0.0161	0.0363 ± 0.014	0.0741 ± 0.0174	0.0598 ± 0.0195
	22.5–67.5°W	0.0618 ± 0.0886	0.0331 ± 0.0187	0.1027 ± 0.0256	0.0514 ± 0.0231	0.06 ± 0.0253
	22.5°W–22.5°E	0.0211 ± 0.0469	−0.008 ± 0.0154	0.0574 ± 0.0168	0.0428 ± 0.0174	−0.0077 ± 0.0204
	22.5–67.5°E	0.0054 ± 0.0873	−0.0512 ± 0.0178	0.0771 ± 0.0223	0.0393 ± 0.0183	−0.0434 ± 0.0241
	67.5–112.5°E	0.0328 ± 0.0317	0.01 ± 0.0158	0.0347 ± 0.017	0.062 ± 0.0153	0.0244 ± 0.0214
	112.5–157.5°E	0.0348 ± 0.0829	0.0073 ± 0.024	0.0803 ± 0.0187	0.0417 ± 0.0229	0.0101 ± 0.0246
	157.5°E–157.5°W	0.0519 ± 0.0262	0.0206 ± 0.0147	0.049 ± 0.0157	0.079 ± 0.0168	0.0591 ± 0.0197
30–35°S	112.5–157.5°W	0.0421 ± 0.0319	0.0365 ± 0.0116	0.0444 ± 0.0099	0.039 ± 0.0094	0.0486 ± 0.0154
	67.5–112.5°W	0.0509 ± 0.0322	0.0246 ± 0.0151	0.067 ± 0.012	0.0541 ± 0.0136	0.0581 ± 0.0165
	22.5–67.5°W	0.0779 ± 0.1088	0.0552 ± 0.0231	0.1489 ± 0.0268	0.0528 ± 0.0303	0.0551 ± 0.0351
	22.5°W–22.5°E	0.016 ± 0.0411	−0.0117 ± 0.0159	0.0644 ± 0.0185	0.0458 ± 0.02	−0.0344 ± 0.0236

	22.5-67.5°E	0.0009 ± 0.0488	-0.0527 ± 0.018	0.0721 ± 0.0233	0.024 ± 0.0219	-0.0397 ± 0.0233
	67.5-112.5°E	0.0285 ± 0.0275	0.0154 ± 0.0146	0.0495 ± 0.0161	0.03 ± 0.0166	0.0194 ± 0.0189
	112.5-157.5°E	0.0313 ± 0.1051	0.0159 ± 0.0281	0.0826 ± 0.032	0.017 ± 0.0264	0.0098 ± 0.03
	157.5°E-157.5°W	0.0535 ± 0.0234	0.0315 ± 0.0126	0.0574 ± 0.0148	0.0666 ± 0.0146	0.0585 ± 0.0156

KOPRI
극지연구소

5. 재분석 자료를 이용한 극 지역 AOD 패턴 분석

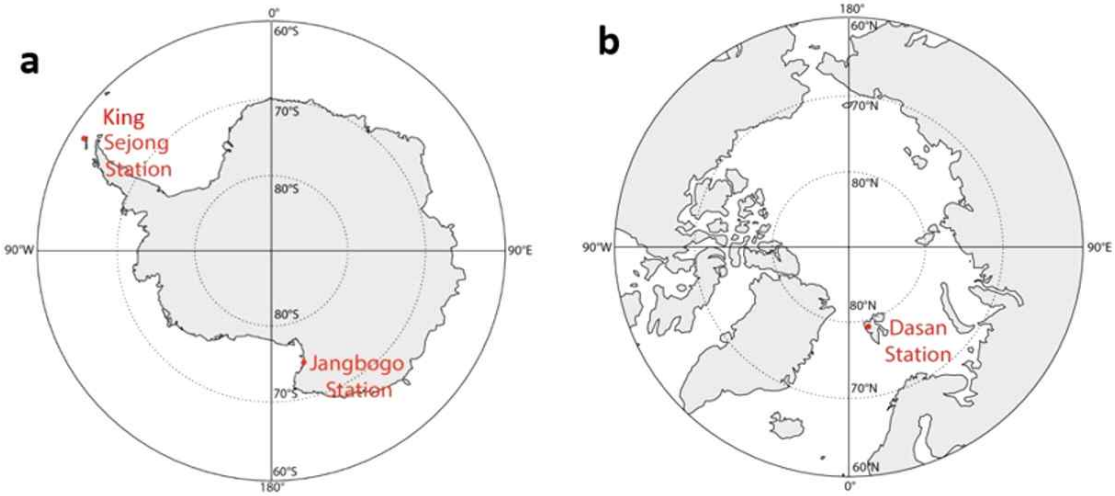


그림 4-18. 남극 및 북극에서 운용하는 한국의 극지 관측소 위치: 남극의 세종 및 장보고 과학기지 (a) 및 북극의 다산 과학기지 (b)

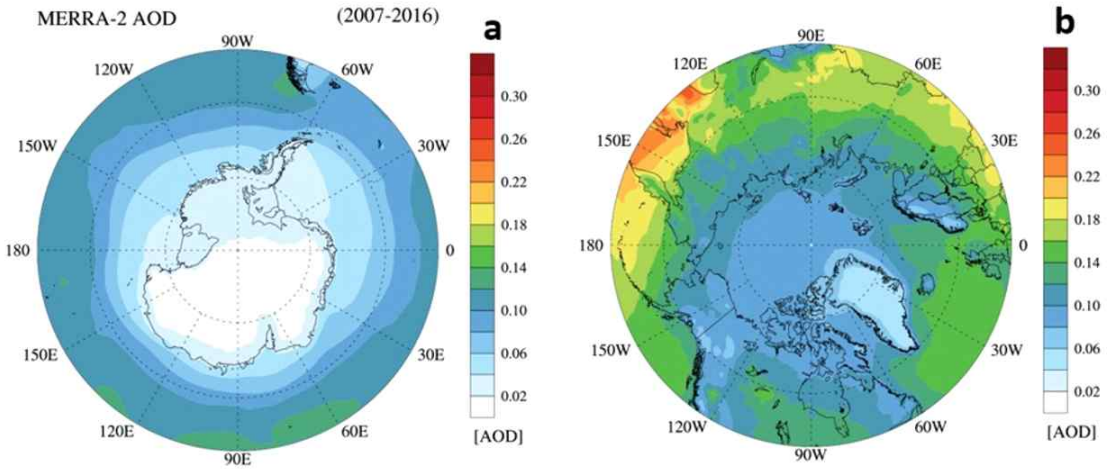


그림 4-18. 2007-2016년 기간 10년 평균한 MERRA-2 재분석 자료 AOD 값: 남극 지역(a) 및 북극 지역 (b)

북극 및 남극 극지 지역의 대기 환경은 흔히 청정한 상태인 것으로 알려져 있다. 하지만 산업화 이후 전구 범위에서 대기 오염이 심각해지는 현상을 겪으면서 극지 대기 환경 역시 그 영향에서 자유롭지 못한 상황이다(Law and Stohl, 2007). 예컨대 북극 연무(Arctic haze) 현상 같은 경우 북극의 겨울 및 봄철에 주로 중위도에서 발생한 대기 입자상 물질들이 북극으로 유입 후 축적되어 발생하며 태양 복사와의 상호 작용에 의해 북극 지역 복사 강제력의 변화를 크게 줄 수 있는 여지를

지니고 있다. 특히 블랙카본(black carbon) 계열의 복사 흡수성을 크게 가지는 에어로졸이 지표 눈 표면에 침전되는 경우 지표 반사도 역시 바꿀 수 있기 때문에 극지 기후에도 상당한 영향을 미칠 수 있다(McConnell et al., 2007). 남극의 경우는 북극보다 대기 오염 물질 배출원으로부터 더더욱 고립되어 있는 편이지만 남아메리카 및 아프리카에서 생체 연소(biomass burning) 작용에 의해 주로 배출되는 오염물질들이 남극 대기 오염에 미치는 영향이 발견되고(Stohl and Sodemann, 2010) 사막 지역으로부터 모래 입자 역시 장거리 수송으로 유입되는 것들이 확인되고 있기에(Li et al., 2008) 역시 대기 에어로졸의 현황 연구의 필요성이 존재한다.

북극 및 남극의 대기 에어로졸 오염의 정도를 감시하는 과정에서 가장 어려운 부분은 혹독한 기상 조건 및 고립된 지역적 특성에 의해 지상에서 상시 관측을 운용하기 쉽지 않다는 점에 있다. 실제로 극지 에어로졸 대다수의 관측들이 집중 관측 캠페인을 통해서 이루어지고 있는 실정이기에 장기적인 특성을 살펴보는 일이 쉽지 않은 측면이 있다. 게다가 관측에 적합한 입지 조건 선정이 쉽지 않아서 넓은 극지역을 조밀하게 감시하기에도 어려움이 크다. 위성 관측의 경우 이러한 어려움을 일정 부분 극복할 수 있으나 대기 중 에어로졸의 양적 변화를 추적할 수 있는 위성 관측 산출물인 에어로졸 광학 깊이(Aerosol Optical Depth, AOD)의 경우 주로 자외선 및 가시광선 영역에서 산출되기 때문에 해빙에 의해 높은 지표 반사도를 가지는 극지역의 경우 그 산출 정확도가 많이 낮아지는 경향이 있다. 다만 대기 감시 기체 중 일부는 적외선 영역에서 산출되고 있어서 극지 대기 오염 감시에 유용하게 쓰이고 있다. 이러한 자료의 한계를 극복하기 위해 최근에는 가용한 모든 관측 및 모델링 자료를 통계적으로 조합하는 자료동화 방법을 통해 재분석(reanalysis) 자료를 생산, 구축하여(Randles et al., 2017) 극지 대기 에어로졸 특성 분석에 활용하고 있다.

대한민국은 현재 남극에서 두 지점, 북극에서 한 지점에 과학 기지를 설치, 운용 중에 있다. 그러나 아직까지 과학기지가 설치된 지역 상공의 에어로졸이 어떠한 시간적 변동성을 나타내고 있는지, 장기간 평균적인 특성이 어떻게 나타나는지에 대해 살펴본 연구가 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 국제적으로 활용도가 높은 미국 항공 우주국(NASA)의 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications 버전 2(MERRA-2) AOD 자료를 이용하여 북극 다산 과학기지, 남극 세종 및 장보고 과학기지 상공에서의 에어로졸 농도의 기본적인 변동성을 살펴보고 이를 일산화탄소(Carbon monoxide, CO) 위성 관측 자료와 비교하여 중위도 지역에서 발생하는 화재/연소 현상의 기여도를 살펴보았다.

대한민국이 극지에 운용 중인 과학기지들의 위치는 그림 4-18과 같이 요약된다.

남극 세종 과학기지(62.13°S, 58.47°E)는 1988년에 남극 반도 끝 맥스웰 만(Maxwell Bay) 연안에 건설되어 현재까지 운용 중이고 최근 2013년에는 동남극 테라노바 만(Terra Nova Bay) 근처에 장보고 과학기지(74.37°S, 164.14°E)가 건설되어 새롭게 극지 관측 활동을 수행 중에 있다. 세종기지와 장보고 기지의 위치를 통해 두 관측소에서의 연구 결과를 이용하면 남극의 서쪽과 동쪽의 특성을 비교 분석할 수 있음을 엿볼 수 있다. 북극 다산 과학 기지(78.55°N, 11.56°E)는 2002년에 개설되어 현재까지 관측 업무를 수행 중에 있으며 북극에서도 북대서양 지역의 특성을 잘 보여주는 지역에 위치하고 있다. 기본적으로 대기가 깨끗한 지역에 위치해 있으나 최근 전세계의 오염 증가는 이들 지역에도 영향을 주는 것으로 알려져 있기에 에어로졸의 양적 분석 수행이 요구된다.

이 세 지역의 에어로졸의 양적 변화를 살펴보기 위해 MERRA-2 AOD 자료를 이용하였다. MERRA-2 재분석 AOD 자료는 NASA에서 보유한 여러 기상 관측 자료, 에어로졸 관련 지상 및 위성 관측 자료, Goddard Earth Observing System 모델 버전 5(GEOS-5) 자료 등을 근간으로 자료 동화 과정을 거쳐 생성된 자료이다(Randles et al., 2017). AOD 자료는 0.5 x 0.625° 격자에 맞춰 제공된 자료를 사용했으며, 매일 0시부터 3시간 간격으로 산출되고 있는 자료를 일 평균하여 사용하였다. 본 연구에서는 이어서 언급할 일산화탄소 자료와 비교하여 2000년대의 극지역 에어로졸의 특성을 살펴보기 위해 2001년부터 2016년까지의 자료를 이용하여 분석을 진행하였다.

극지 대기 에어로졸 오염 농도에 가장 큰 영향을 끼치는 요인 중 하나로 중위도로부터의 오염 물질의 수송을 꼽을 수 있다. 특히 자연 화재 및 생체 연소 과정에서 배출된 물질들이 극지 대기 환경에 지대한 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Law and Stohl, 2007). 이러한 영향력을 살펴보기 위해서 위성으로 관측한 일산화탄소 자료를 AOD와 비교하여 살펴보았다. 일산화탄소의 경우는 일반적으로 대기 중에 4-5개월 정도 체류하는 것으로 알려져 있어서 중위도 지역 배출원의 영향을 살펴보기 좋고, 극지에서 관측에 어려움을 가지는 자외선, 가시광선이 아닌 적외선 원격탐사 방식으로도 산출될 수 있어 자료 확보가 용이하다. 본 연구에서는 2002년 발사된 NASA Aura 위성에 탑재된 Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) 기기 관측으로 산출된 일산화탄소 자료(Worden et al., 2013)를 AOD와 비교 분석에 사용하였다. 일산화탄소 자료는 AIRS 관측에서 4.58 - 4.50 μm(2183 - 2220 cm-1) 채널을 이용하여 산출된다.

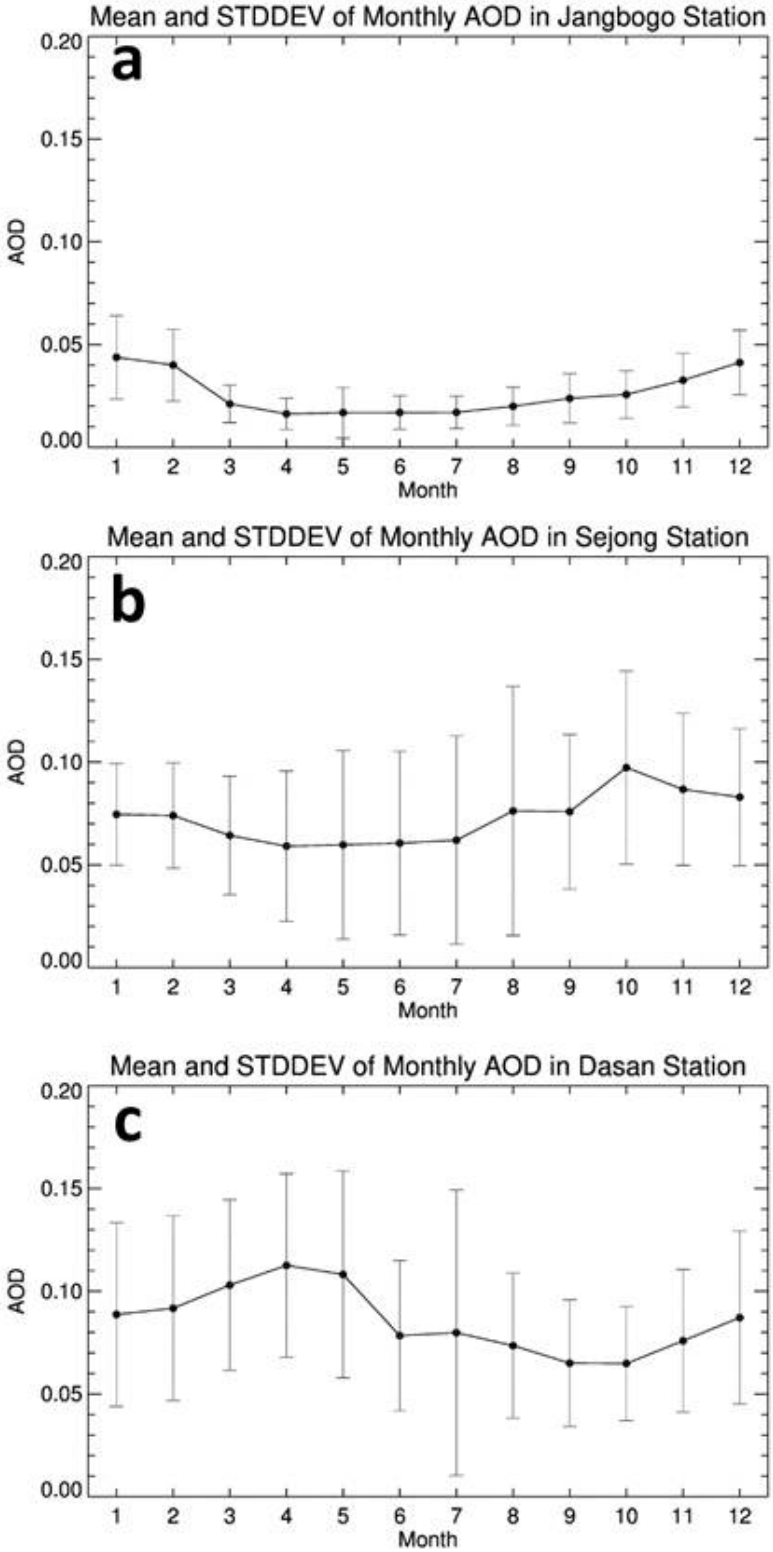


그림 4-19. 2007-2016년 기간의 월 평균 MERRA-2 재분석 자료 AOD 값: 장보고 과학기지(a), 세종 과학기지(b) 및 다산 과학기지(c). 표준 편차는 연직 막대로 표시.

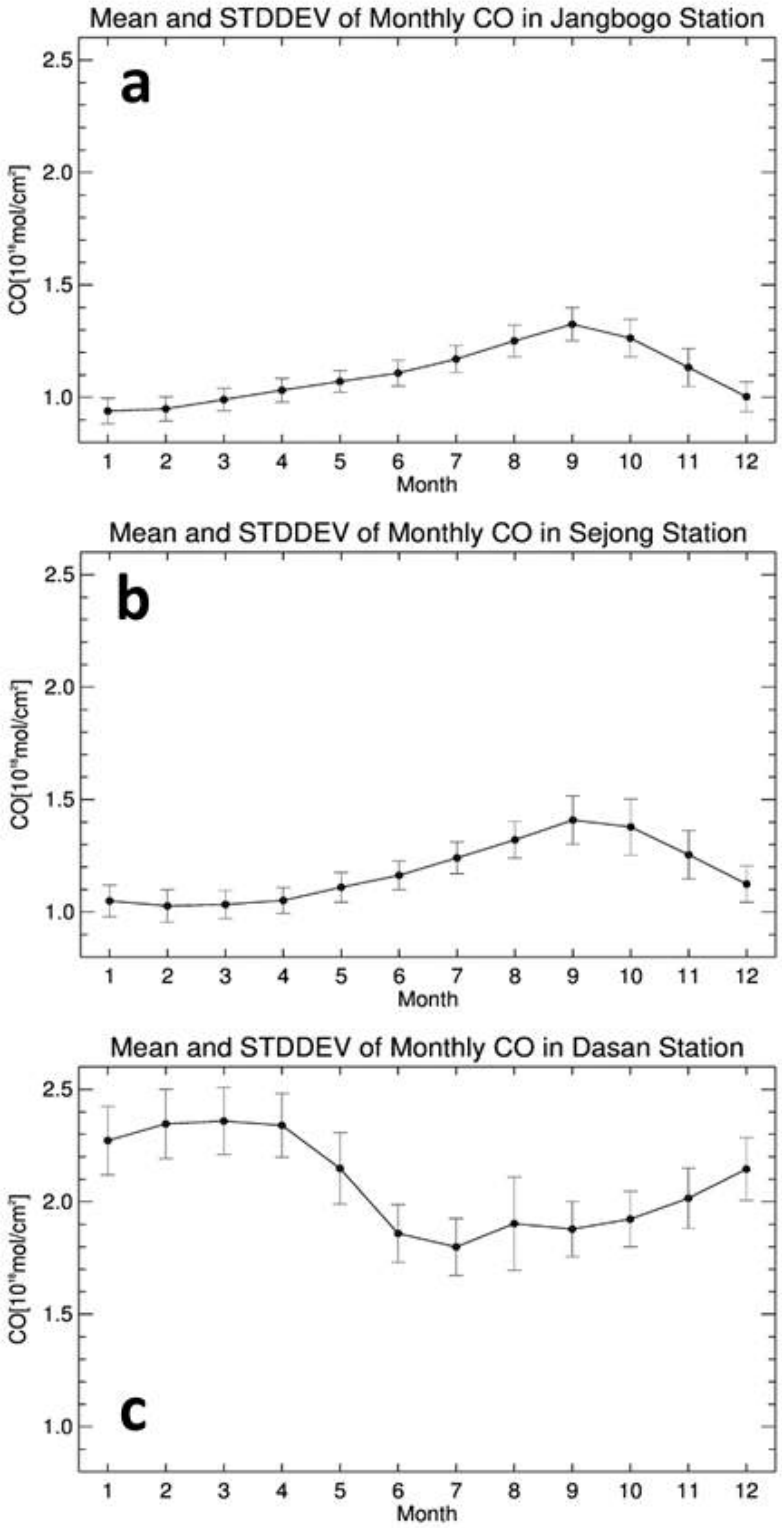


그림 4-20. 2007-2016년 기간의 월 평균 AIRS 위성 관측 CO 값: 장보고 과학기지 (a), 세종 과학기지(b) 및 다산 과학 기지(c). 표준 편차는 연직 막대로 표시.

먼저 기본적으로 남극과 북극 상공 AOD 패턴의 최근 10년 평균을 살펴보았다 (Fig. 2). 남극의 경우(그림 4-18a) 절대적으로 낮은 AOD의 값을 보이나 미세하게 서남극이 동남극 지역보다는 높은 AOD값을 보이는데 이는 상대적으로 남아메리카와 같이 대기 오염 물질 배출량이 높은 지역에 근접해 있기 때문인 것으로 보인다. 북극의 경우(그림 4-18b)는 유라시아 및 시베리아와 인접한 지역에서 가장 높은 AOD 값이 나타남을 확인할 수 있고 그 뒤를 이어 중앙아시아 및 유럽 북부, 캐나다 북부 순으로 AOD값 크기가 낮아지는 것을 살펴볼 수 있다. AOD 평균의 크기는 북반구에서 절대적으로 높기 때문에 북극 다산 과학 기지에서 가장 높은 AOD를 살펴볼 수 있을 것으로 예상된다.

이어서 월별 및 계절별 평균 AOD의 변동성에 대해서 살펴보았다. 그림 4-19a에서 4-19c까지는 월별 MERRA-2 AOD 값을 장보고, 세종, 다산 과학기지에 대해서 비교한 결과를 보이고 있다. 장보고 기지의 경우 남위 74도 정도에 위치하여 남극 와도(Antarctic vortex)의 영향력 아래 중위도 지역 기류와는 크게 차단되어 있기 때문에 다른 두 과학기지보다도 더욱 더 청정한 공기질의 특성을 보이고 있다. AOD의 평균값은 12월, 1월 남극 여름철에 가장 크게 나타나고 있으며 이 시기에도 0.05를 넘지 않는 것이 확인된다. 한편 가장 낮은 시기는 3월부터 7월까지로 대략 0,02 정도의 AOD 값을 평균적으로 보이고 있다. 즉 장보고 기지 여름철에는 AOD가 높은 반면 태양 일사가 거의 존재하지 않는 늦가을, 겨울철에는 낮은 AOD값을 보이므로 남극 외부 중위도로부터의 오염 물질 유입의 영향보다는 광화학 작용의 활성화에 따른 에어로졸 생성의 변동성의 특징으로 장보고 기지 월별 평균 AOD 변화를 추정해 볼 수 있다.

장보고 기지에 비해 세종 과학 기지 상공의 AOD는 약 두 배 정도 높은 값을 보이고 있다. 가장 높은 AOD 값을 나타내는 시점은 10월로 역시 장보고 기지와 차이점을 보이는 반면 최소값은 비슷하게 남반구 겨울에 해당하는 4월에서 7월까지 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 또 하나 장보고 기지와의 큰 차이는 매월 AOD의 표준편차가 높게 나타나고 있다는 점인데, 이를 통해 장보고 기지의 에어로졸 농도 변화는 거의 일정하게 유지되는 반면 상대적으로 저위도에 위치한 세종 기지에서는 외부 유입 정도와 같이 외부 요인에 따라 AOD의 변동성이 좀 더 높게 나타날 수 있음을 생각해볼 수 있다.

북극 다산 기지의 경우 남극 장보고 및 세종 과학 기지보다 높은 고위도에 위치하고 있지만 북반구 대기 오염이 남반구보다 높게 나타나기 때문에 AOD의 값 역시 다른 과학기지에 비해 높게 나타남을 확인할 수 있다. 다산 기지에서는 AOD의 연중 최고치가 3,4,5월 봄철에 집중 되는 것을 확인할 수 있는데 이는 이 시기

북극에서 주로 발생하는 북극 연무(Arctic haze) 현상과 연관된 것으로 짐작되며(Shaw, 1995), 일부 지상관측 자료의 분석결과(Tomosi et al., 2007)와도 유사성을 보인다. 이후 급격하게 AOD값은 감소하면서 10월 부근에 최소값을 보이다가 다시 겨울로 접어들면서 증가하는 모습을 보인다. 이와 같은 월별 변동성은 북반구 상공 오존 전량의 변화 경향(Park et al., 2011)과도 상당히 흡사한 면을 보이고 있는데, 향후 좀 더 넓은 범위의 대기 순환 특성과 연계하여 살펴볼 필요가 있는 것으로 여겨진다.

앞서 언급했듯이 자체적인 오염원이 거의 존재하지 않는 남북극 상공의 대기 에어로졸 농도의 변동성은 낮은 위도 지역에서의 배출량에 크게 영향을 받을 수 있다. 남북극 부근에서 가장 높은 에어로졸을 배출할 수 있는 현상으로 자연 화재 및 생체 연소 과정을 생각할 수 있으므로, 그 과정에서 배출되는 일산화탄소 자료의 월별 특성을 AOD 변동성에 비교하여 분석을 진행하였다 (그림 4-20). 그림 4-20a, 4-20b를 보면 남극 장보고 및 세종 과학기지 상공의 일산화탄소 농도는 유사하게 9월에 최대값, 남반구 여름철에 최소값을 나타내는 특성을 보이고 있는데 이는 선행 연구에서 제시된 남반구 지역 지상관측 일산화탄소 크기의 변동성(Edwards et al., 2006)과도 일치하는 것으로 확인된다. 반면 북극의 경우는 2, 3, 4월에 높게 나타나고 6, 7월 여름에 낮게 나타나는 현상을 보이는데 이 역시 겨울, 초봄에 북반구에서 일산화탄소 배출량이 높게 나타나는 경향을 보인 선행연구 내용(Koo et al., 2017)과 일관성을 보인다.

AOD 변화와 일산화탄소의 연관성이 계절적으로 어떻게 나타나는지 살펴보고자 3-4-5월(March-April-May, MAM), 6-7-8월(June-July-August, JJA), 9-10-11월(September-October-November, SON), 그리고 12-1-2월(December-January-February, DJF)로 구분하여 분위수를 계산, 비교해보았다 (그림 4-21). 비교 결과 북극 다산 및 남극 세종 과학 기지의 경우는 AOD값과 일산화탄소 크기의 변화 양상이 상당히 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 두 기지 모두 AOD와 일산화탄소의 가장 높은 수치를 봄(북반구에서는 MAM, 남반구에서는 SON)에 공통적으로 보이고 있음이 흥미로운 부분인데 생체연소에 의한 블랙카본 배출량이 봄에 높게 나타나는 경향이 있다는 선행연구(Bond et al., 2013) 결과와 연관성이 높은 것으로 보인다. 반면 장보고 기지에서는 AOD와 일산화탄소의 계절 변동성의 상관성이 오히려 반대로 나타나는 경향이 있는(AOD가 높은 시기에 반대로 일산화탄소가 낮은 경향) 것처럼 보인다.

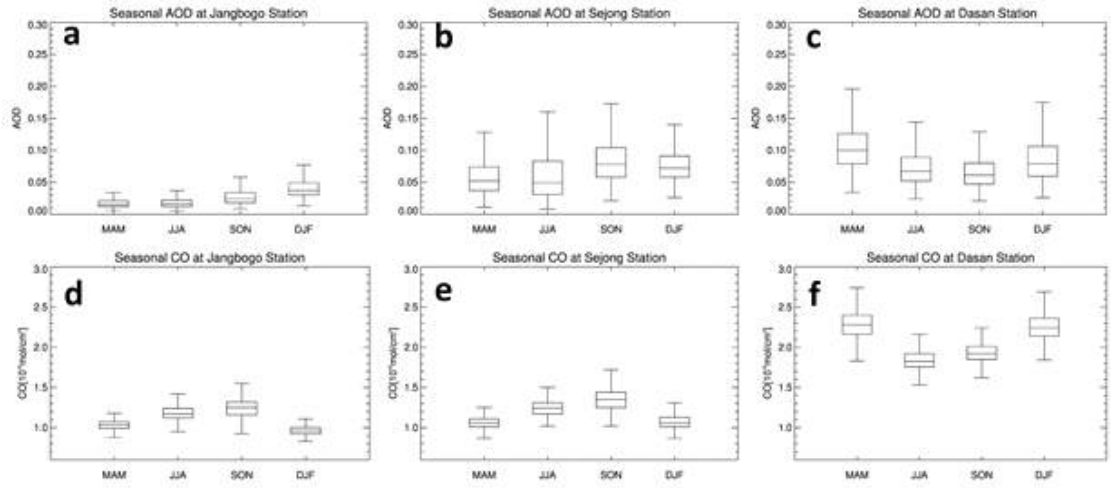


그림 4-21. 2007-2016년 기간의 계절별 평균 MERRA-2 AOD 값(위) 및 AIRS 위성 관측 CO 값 (아래): 장보고 과학기지(a,d), 세종 과학기지(b,e) 및 다산 과학 기지(c,f). 표준 편차는 연직 막대로 표시.

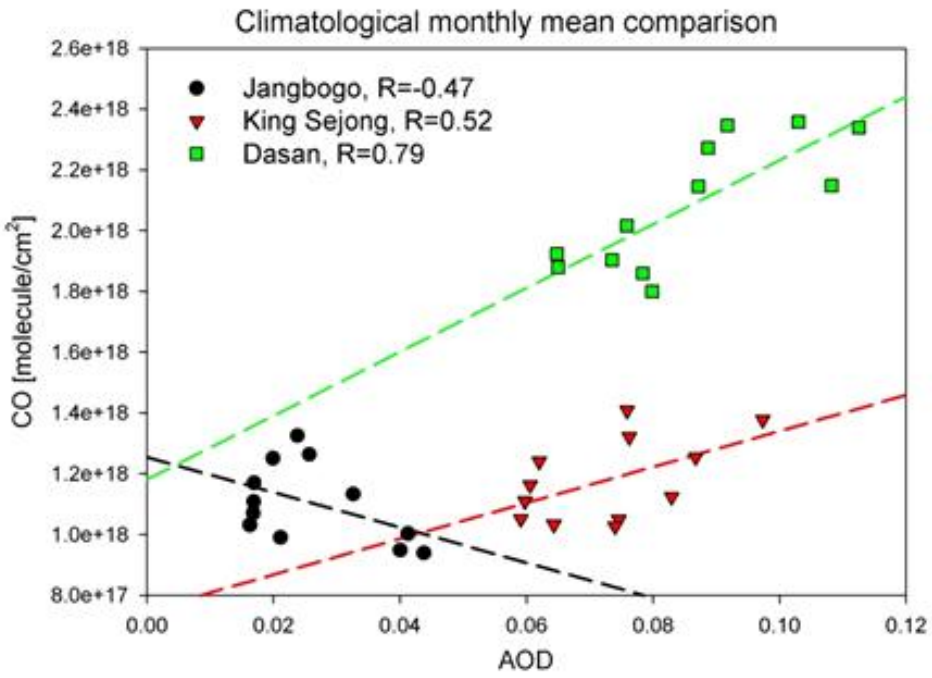


그림 4-22. 월 평균 AOD와 CO의 상관관계: 장보고 과학기지(흑색), 세종 과학기지(적색) 및 다산 과학 기지(녹색).

그림 4-22는 1월부터 12월까지 AOD와 일산화탄소 기후학적 월 평균 값 사이의 상관관계를 살펴본 그림으로서 앞선 분석 결과와 마찬가지로 남극 세종 및 북극 다산 기지에서의 AOD와 일산화탄소의 양의 상관관계가 잘 나타나고 있다. 특히 다산 기지의 경우 그 상관관계가 훨씬 더 뚜렷하게 나타나는 것을 통해 북극 에어로졸 변동성에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 생체 연소 및 화재에서 발생되는 대기오염 물질이라는 사실이 분명히 드러난다. 특이한 부분은 장보고 기지에서 보이는 AOD와 일산화탄소 사이의 상관관계 지수가 약 -0.47 정도로 음의 상관성을 나타낸다는 점이다. 즉 장보고 기지 지역 대기 에어로졸 변동성이 중위도 지역으로부터의 수송의 영향에 크게 좌우되지 않음을 의미한다.

월별, 계절별 변동성 분석에 이어서 AOD 값이 극지 기지 상공에서 장기간 어떻게 변해왔는지를 살펴보았다. 최근의 변동성에 중점을 두고자 2000년대 시점을 기준으로(2001년부터 2016년까지) 세 곳 과학기지의 AOD 값에 대한 분석을 진행하였다(그림 4-23). 에어로졸 농도 장기간 변동성의 분석에서 평균값을 사용할 경우 특징적인 고농도/저농도 사례 또는 높은 오차들이 걸러지지 않고 모두 포함될 수 있기 때문에 중간값(median)과 같은 percentile 통계값을 이용해서 분석하는 것이 보다 더 정확할 수 있다는 최근 연구 결과(Yoon et al., 2016)에 근거하여 본 연구에서도 매년 MERRA-2 AOD의 10th, 50th, 90th 백분위수(percentile)값을 선택하여 그 추이를 살펴보는 분석을 진행하였다. 높은 백분위수(90th percentile) 값은 고농도 사례의 변동성을, 낮은 백분위수(10th percentile) 값은 배경대기 오염도의 변동성을 살펴볼 수 있는 지표라고 볼 수 있다.

그림 4-23의 패턴을 전체적으로 살펴보면 남북극 과학 기지 상공에서 중간값의 시간적 변동성은 모두 미약하게 증가하는 경향을 보여주고 있는데, 이런 특성은 과거 2000년대 초까지의 AOD 감소 추세 분석 결과(Tomasi et al., 2007)와 잘 비교해서 살펴볼 필요가 있다. 기본적으로 전반적인 증가 추세 결과는 극지 대기 에어로졸의 오염도가 최근 조금씩 증가하고 있는 상황을 의미하는 것으로 생각된다. 남극 기지 상공보다는 북극 다산 기지 상공에서 증가하는 트렌드가 조금 더 일관적으로 잘 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 10th, 50th, 90th percentile AOD가 모두 증가하는 특성으로 보아 고농도 에어로졸의 배출이 높은 상황이 좀 더 빈번하게 발생하면서 전체 배경대기 오염농도의 상승을 이끌고 있는 것으로 생각할 수 있다. 다만 최근 북반구에서의 일산화탄소 배출량은 꾸준한 감소 추이를 보이기 때문에(Worden et al., 2013) 앞서 언급한 AOD와 일산화탄소의 상관성 이외의 다른 원인을 생각해볼 필요가 있을 것으로 보인다.

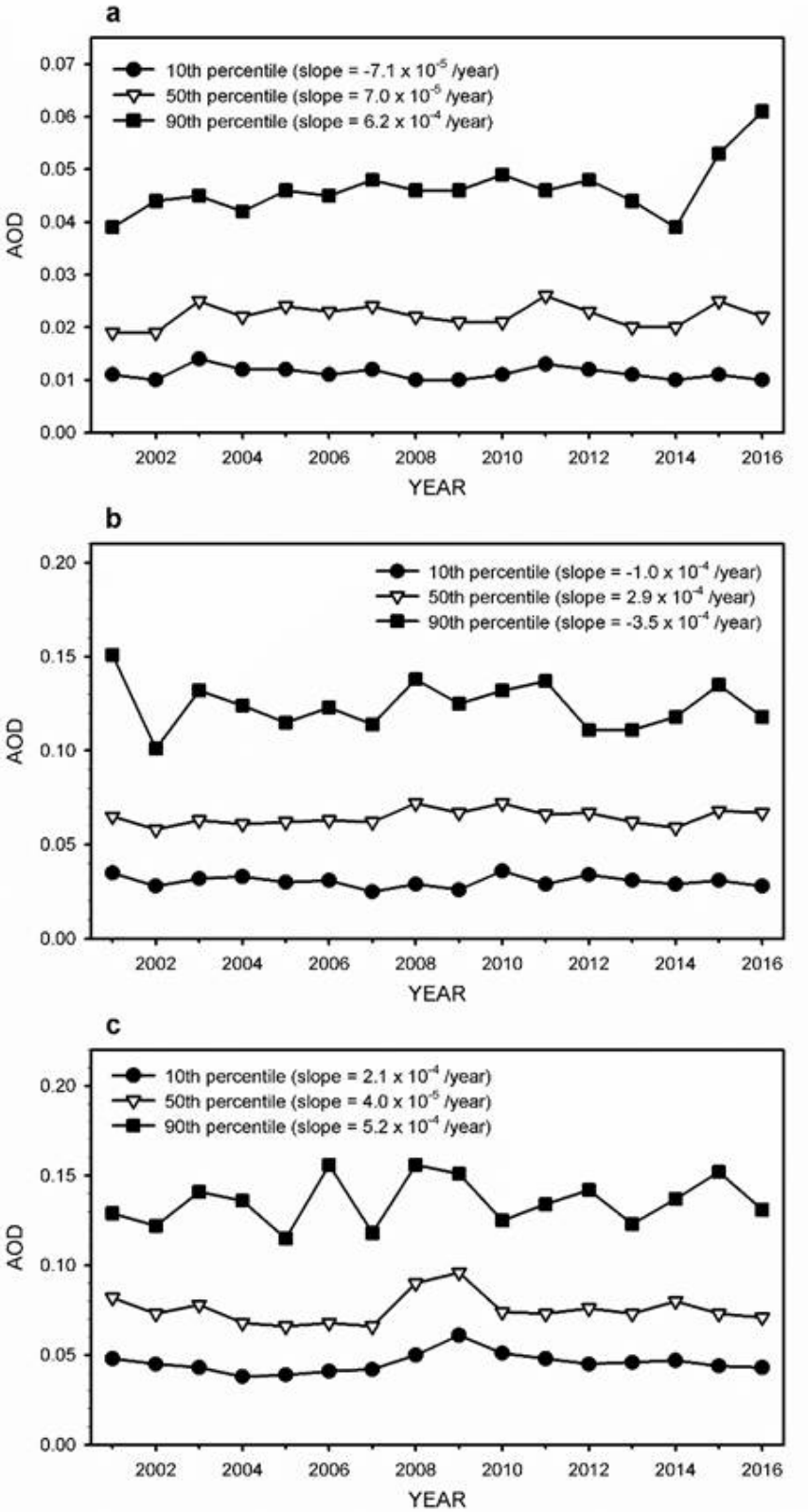


그림 4-23. 10th, 50th, 및 90th percentile AOD값의 연간 변동성 비교: 장보고 과학기지(a), 세종 과학기지(b) 및 다산 과학 기지(c).

	Jangbogo			King Sejong			Dasan		
	10th	50th	90th	10th	50th	90th	10th	50th	90th
MAM	*WD*	*SD*	*SD*	*SI*	*SI*	*SD*	*SD*	*SD*	*SD*
JJA	*WD*	*WI*	*WD*	*SD*	*SD*	*SD*	*WD*	*SD*	*WD*
SON	*WI*	*WI*	*SI*	*WD*	*SI*	*SI*	*SI*	*SI*	*SI*
DJF	*SI*	*SI*	*SI*	*SI*	*SI*	*WI*	*WD*	*SI*	*SI*

그림 4-24. 장보고 과학기지, 세종 과학기지 및 다산 과학 기지에서의 10^{th}, 50^{th}, 및 90^{th} percentile AOD값 비교: WD는 약한 감소 (AOD trend > -10^{-4}/year), SD는 강한 감소 (AOD trend < -10^{-4}/year), WI는 약한 증가 (AOD trend < 10^{-4}/year), 및 SI는 강한 증가 (AOD trend > 10^{-4}/year)를 의미.

이러한 추세 분석을 선형 회귀 분석을 이용해 계절별로 나누어서 살펴보고 그림 4-24처럼 정리해보았다. 그림 4-24에서는 AOD 증가 추세가 10^{-4}/년 보다 큰 변화가 존재하는지 여부를 기준으로 하여 증가/감소 추세를 강한 증가, 약한 증가, 약한 감소, 강한 감소 4단계로 구분하여 표시하였다. 흥미롭게도 세 과학기지 상공에서 전반적으로 유사하게 MAM, JJA 시기에 AOD의 강한 감소를, SON, DJF 시기에 AOD의 강한 증가 추세를 주로 보이는 것을 확인할 수 있다. 남극 장보고 기지에서는 DJF 시기에 강한 증가, MAM 시기에 강한 감소가 나타나고 나머지 시기에는 크게 특별한 추세가 나타나지 않는 편이다. 한편 남극 세종 기지는 남극 겨울에 해당하는 JJA 기간을 제외하고는 나머지 계절에서 모두 일반적인 AOD 증가 추세를 보이고 있어서 훨씬 더 대기 에어로졸 농도 증가의 특징을 잘 보여준다. 이런 추세 분석 결과 역시 같은 남극임에도 장보고 기지와 세종 기지 사이 대기 에어로졸 변동성을 설명하는 원인이 다를 수 있음을 보여주고 있다.

북극 다산기지의 경우 가을, 겨울에 해당하는 SON, DJF 기간에 AOD의 증가를, 봄, 여름에 해당하는 MAM, JJA 기간에 AOD의 감소 추이를 보이고 있는데, 앞서 북극에서 AOD와 일산화탄소의 최고치 모두 봄에 나타나고 있다는 분석결과와 (그림 4-21) 일반적으로 북반구 일산화탄소 변동 추이가 감소세에 있음을(Worden et al., 2013) 고려할 때, 화재 및 생체 연소 현상의 증가 및 관련 오염입자 배출의 증가로 다산 기지 AOD 변동성을 설명하기는 어려울 것으로 보인다. AOD가 낮은

SON 시기에 강한 증가 추세를 보이는 것을 감안하면 인위적 활동의 증가에 의한 배경대기 에어로졸 오염도의 증가라는 측면을 고려해야 할 것으로 보인다. 향후 추가 연구를 통해 관련 영향 인자를 분석해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 남극 장보고 및 세종 과학 기지, 북극 다산 기지 상공의 대기 에어로졸 농도 변화를 살펴보기 위해 MERRA-2 재분석 자료의 AOD 값을 분석해보았다. 북극 다산 기지와 남극 세종 과학 기지에서는 AOD의 크기가 봄에 가장 높게 나타나는 특성을 확인할 수 있었다. 반면 남극 장보고 기지 상공 AOD는 다른 두 지역보다 훨씬 더 낮게 나타났으며 남반구 여름 시기에 가장 높은 값을 나타내는 차이점을 보였다. 장보고 기지에서 다른 두 기지에 비해 AOD 월별 변동성 작게 나타나는 편인데 흔히 월별 변동성에 영향을 미치는 대규모 대기 순환 및 대기 광화학 작용의 강도가 어느 정도 중위도의 영향 범위에 있는 극지 지역과 달리 장보고 기지와 같이 고립된 지역에서는 큰 영향력을 발휘하지 못하기 때문인 것으로 보인다. 극지 대기 에어로졸 농도에 큰 영향을 줄 수 있는 중위도 지역 화재/연소 과정의 영향력을 살펴보기 위해 AIRS 위성 관측 일산화탄소 자료를 이용하여 비교 분석을 진행한 결과, 북극 다산 기지 및 남극 세종 기지의 AOD 변화량은 일산화탄소와 높은 양의 상관성을 나타내는 반면 장보고 기지에서는 이런 특성을 발견하기 어려웠다.

최근 극지 대기 에어로졸 농도의 변화를 살펴보기 위해 2001년부터 최근까지의 AOD 변동성을 살펴보았고 세 관측소에서 모두 점진적인 AOD 증가 추세를 발견할 수 있었다. 다만 계절별 추세 분석 결과 AOD 및 일산화탄소가 높게 나타나는 계절이 아닌 시기에 오히려 AOD가 크게 증가하는 경향을 확인할 수 있었기에 화재/연소로 인해 배출되는 물질 이외의 다른 대기 입자 배출원을(예컨대 산업 현장 및 인위적인 활동에 의한 배출) 향후 추가 분석을 통해 생각해볼 필요가 있을 것으로 보인다. 이 과정에서 특히 생체연소 과정과 연관성이 큰 블랙카본 및 갈색카본(brown carbon)과 같은 입자상 물질과 메탄올(CH_3OH) 및 포름알데히드(CH_2O) 같은 탄화수소(hydrocarbon) 계열 기체상 물질의 관측이 AOD 변화량 이해에 도움이 될 것으로 보인다. 이와 같은 연구들은 현재 남극 기후 변동성을 살펴보는 과정에서도 중요한 정보를 제공해줄 수 있을 것으로 생각된다. 특히 성층권 대기 오존의 복원이 예상되고 있는 현재, 그에 따른 기후 변동성이 극지 대기 조성에 미치는 영향 및 명확히 설명되지 않은 여러 극지 대기 기후의 특성들(예: 서남극과 동남극의 대기 현상 차이)을 살펴보는데 도움이 될 수 있는 정보로서 본 연구의 의미를 생각해볼 수 있을 것이다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1. 1차년도 (2017) 연구목표: 세종 및 장보고 과학기지 오존 관측 자료 구축

세부연구내용

- 장보고 과학기지 브루어 분광광도계 오존 관측 정상화: 완료
- 세종 과학기지 브루어 분광광도계 보정 및 시험 운영: 완료
- 남극 지역 장기간 지상 및 위성 관측 자료 확보 및 상호 비교 검증: 완료

→ 2016년 참여연구원이 직접 방문하여 설치한 장보고 기지의 브루어 분광광도계의 관측을 정상화 하여 과제 기간 동안 자료를 최대한도로 수집하였고 2018년 1월에 역시 참여 연구원이 세종 기지를 방문하여 브루어 분광광도계를 재설치한 후 보정과 시험 운영까지 마쳤음 (이 과정은 제 3장 2절에 정리되었음). 또한 세종기지에서 1996년 이후 브루어 분광광도계로 관측한 모든 자료를 수집하여 자료의 퀄리티를 1차적으로 일일이 점검하여 사용 가능한 자료들만 추려 내었으며 이 자료를 주위 해외 관측소에서 측정한 자료와 비교하고 OMI 위성 센서 자료와 (level 2 및 3) 비교 검증하였음. 이 결과는 제 3장 3절에 정리하였음.

2. 2차년도 (2018) 연구목표: 남극 상공 오존의 시공간적 특성 분석

세부연구내용

- 세종기지 브루어 분광광도계 오존 관측 정상화: 완료
- 세종 및 장보고기지 브루어 분광광도계 관측값을 이용, 동남극/서남극 사이 오존특성 차이점 분석 착수: 완료
- 지상 및 위성 관측 자료를 이용하여 오존 및 관련 감시 기체 농도의 상호 비교 및 기후학적 패턴 분석 진행: 완료

→ 1차년도에 설치한 세종 기지 브루어 분광광도계를 이용한 오존 관측 모드를 정상화하여 꾸준히 자료를 수집하고 있음. 세종 및 장보고 기지의 브루어 기기 및 위성 관측 오존전량 자료를 상호 비교하여 어떤 차이점이 있는지에 대한 분석을 수행하였고 이 결과는 제 3장 1절에 정리되어 있음. 오존과 관련이 있을 수 있는 대기감시 기체 농도를 위성 관측 자료를 이용하여 기후학적 특성을 살펴보고 같은 지역에서 상호간의 시공간적 분포 특징을 비교하는 연구를 수행하였음 (제 3장 4절에 관련 내용 정리되었음).

3. 3차년도 (2019) 연구목표: 남극 상공 오존 변동성과 기상장 연관 분석

세부연구내용

- 지상 및 위성 자료를 이용한 남극 상공 오존량 장기간 변동성 분석: 완료
- 동남극, 서남극 오존 관측값과 연관된 기상/기후 인자 추적 분석: 완료
- 지상 및 위성 관측이 진단하는 오존 변화 특성의 고도별 차이 진단: 완료

→ 브루어 분광광도계 및 위성 관측 자료를 이용하여 장기 트렌드를 계산하여 월별로 비교하였음 (제 3장 3절에 관련 내용 정리). 남극의 오존 관측값과 관련된 기상, 기후인자를 크게 기온, 잠재와도, 풍속의 관점에서 살펴보고 오존전량과의 상관성이 연직 고도에 따라 달라질 수 있음을 분석하였음 (제 3장 3절에 관련 내용 정리). 오존 존데 관측 자료를 이용하여 오존의 연직분포와 기온의 연직 분포가 어떻게 다르게 나타나는지, 어느 범위에서 연관성을 찾아야 하는지에 대한 분석을 수행하여 고도별 차이를 살펴보았음 (제 3장 1절에 관련 내용 정리).

4. 대외 기여도:

- 본 과제에서 수행한 연구 내용은 아래와 같이 3편의 SCI 저널로 출판되었음.

Koo, J.-H., T. Choi, Y. Cho, H. Lee, J. Kim, D. H. Ahn, J. Kim, and Y. G. Lee (2018), The variation of aerosol optical depth over the polar stations of Korea (Secondary publication), Aerosol Air Qual. Res., 18, 3202-3210, doi: 10.4209/aaqr.2018.08.0308 .

Koo, J.-H., T. Choi, H. Lee, J. Kim, D. H. Ahn, J. Kim, Y.-H. Kim, C. Yoo, H. Hong, K.-J. Moon, and Y. G. Lee (2018), Total ozone characteristics associated with regional meteorology in West Antarctica, Atmos. Environ., 195, 78-88, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.09.056.

Ahn, D. H., T. Choi, J. Kim, S. S. Park, Y. G. Lee, S.-J. Kim, and J.-H. Koo (2019), Southern Hemisphere mid- and high-latitudinal AOD, CO, NO2, and HCHO: spatiotemporal patterns revealed by satellite observations, Progress in Earth and Planetary Science, 6, 34, doi:10.1186/s40645-019-0277-y.

- 본 과제에서 수행한 장보고 과학기지 오존존데 분석과 관련하여 이탈리아의 Davide Putero 박사와 STEAR (Stratosphere-to-Troposphere Exchange in the Antarctic Region) 프로젝트를 부분적으로 함께 수행하는 것으로 이야기가 되었음.

- 세종 과학기지에서 측정한 브루어 분광광도계 오존 전량 자료는 World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC)에 등록 예정. 국제 성층권 오존 감시에 학술적인 기여를 하게 됨.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

현재 남극 오존층 파괴의 둔화는 발견되고 있어도 북반구 중위도 하층 성층권의 오존량은 오히려 감소추세를 계속해서 보이고 있고 중위도 지역에서의 염화불화탄소 배출량은 도리어 증가추세를 보이고 있다는 연구 결과가 계속해서 발표되는 중. 이것은 남극 오존층 파괴의 둔화가 인류가 배출하는 인위적인 염화불화탄소의 감축 때문이 아닐 수 있음을 의미하는 것으로서 만약 그렇다면 많은 사람들의 기대와는 자못 다른 결과이기 때문에 심각하게 생각할 필요가 있음. 오히려 지구 온난화의 가속화로 인하여 극지 기온이 높아지면서 극 소용돌이 약화, 극 성층권 구름 생성의 부족으로 인한 오존층 파괴가 약해지는 현상으로 설명이 된다면 이것은 오히려 기후 변화에 따른 영향으로 보아야할 필요가 있다는 의미가 된다.

그러므로 단순히 관측 자료를 이용하여 남극 오존의 시공간 분포 특성을 살피는 것에서 그치지 말고 보다 더 기상장과의 관계성을 상세하게 살피고 연직 방향으로의 대기 교환 특성 및 알려진 기후변동성과의 관계를 살피는 연구가 보다 더 광범위하게 요구된다. 2017-2019년 3년간의 연구를 통해서 오존 전량의 변화를 기온, 잠재와도, 풍속, 해빙 등에 비교, 상관성을 살펴보는 분석을 일부 수행하여 새롭게 발견한 결과물들을 발표하였으나 다수의 분석이 세종 과학기지가 위치하는 서남극 중심인데다가 분석도 오존 전량을 기준으로 하다보니 오존의 연직 분포 특성을 완전하게 고려했다고 보기는 어렵다.

이번 분석 결과 자체는 분명히 흥미로운 특징을 보여주고 있기 때문에 향후에도 유용한 참고 정보를 줄 수 있다고 생각된다. 이번 과제 결과를 바탕으로 오존과 기상장 사이의 분석을 전 남극으로 확장하고 오존전량에 추가하여 고도별 오존 자료 역시 활용하게 된다면 이번 과제에서 알게된 점을 확장할 수 있을 것이다. 기상 및 기후변동성과 성층권 오존 변동성 사이 주고받는 피드백 현상이 염화불화탄소에서 생성되는 염소에 의한 오존의 화학적 파괴반응보다 더 역할이 크게 되거나 그런 시기, 지역이 존재함을 발견하게 된다면 앞서 언급한 염화불화탄소의 배출량 증가에도 불구하고 남극 오존이 회복되는 현상을 좀 더 자세히 설명할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 보다 추가된 연구가 필요하다고 생각한다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 최근 여러 가지 위성 자료를 활용하여 남극 지역 오존층의 회복세를 진단해본 결과 일관적으로 오존층의 회복세가 확인이 되어서 남극 성층권 오존 파괴 현상이 둔화된 것만은 분명한 것으로 이해되고 있음 (e.g., Solomon et al., 2016; Chipperfield et al., 2017; Kuttippurath and Nair, 2017; Kuttipurath et al., 2018).

- 2019년 10월 NASA에서는 남극 오존홀의 크기가 역대 최소치를 보였다고 발표 (https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/2019-ozone-hole-is-the-smallest-on-record-since-its-discovery)

- 이와 같은 결과와는 다소 반대되는 느낌으로 북반구 중위도 지역에서 염화불화탄소의 배출량이 증가하는 추세에 있다는 연구 결과가 계속해서 발표 중 (예: Rigby et al., 2019; Stanley et al., 2020).

- 오히려 중위도에서는 성층권 상층, 중층에서 오존의 회복세가 보이는 것과는 달리 성층권 하층에서 여전히 강한 오존량의 감소 추세가 나타나고 있어 그 원인을 주목할 필요가 있음 (Ball et al., 2018). 극지 오존층의 회복세와는 반대되는 모습이기 때문에 매우 중요하게 살펴보아야 할 부분으로 여겨짐.

- 캐나다 Scisat 위성에 탑재된 ACE-FTS 센서는 태양 엄폐법을 이용하여 성층권 오존을 포함한 약 20여 종의 대기 조성 물질을 관측하는 업무를 수행 중임. 2003년에 시작된 이 관측은 여전히 큰 문제 없이 미션을 수행 중이라 3년 정도 더 성공적인 관측이 이루어지면 순수하게 한 위성으로 20년 관측 자료를 생산하게 되는 쾌거를 이루게 될 예정. 이 ACE-FTS 자료가 최근 업데이트 되어 version 4로 격상되었고 이 자료는 거의 매달 자료가 바로바로 업데이트 되는 시스템으로 바뀌어서 사용성이 훨씬 증가하게 된 것으로 파악됨 (https://databace.scisat.ca/level2/).

제 7 장 참고문헌

Ahn, D. H., Choi, T., Kim, J., Park, S. S., Lee, Y. G., Kim, S. J., Koo, J. H.., 2019, Southern Hemisphere mid-and high-latitudinal AOD, CO, NO2, and HCHO: spatiotemporal patterns revealed by satellite observations, Progress in Earth and Planetary Science, 6(1), 34, https://doi.org/10.1186/s40645-019-0277-y.

Balis, D., Kroon, M., Koukouli, M.E., Brinksma, E.J., Labow, G., Veefkind, J.P., McPeters, R.D., 2007, Validation of Ozone Monitoring Instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations, J. Geophys. Res., 112, D24S46, https://doi.org/10.1029/2007JD008796.

Ball, W. T., Alsing, J., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., Wild, J., Yu, P., Ziemke, J. R., and Rozanov, E. V., 2018, Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery, Atmos. Chem. Phys., 18, 1379 - 1394, https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018.

Bargagli, R, 2008, Environmental contamination in Antarctic ecosystems, Sci. Total Environ., 400(1 - 3), 212-226, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.062.

Bauwens, M., Stavrakou, T., Müller, J.-F., De Smedt, I., Van Roozendael, M., van der Werf, G. R., Wiedinmyer, C., Kaiser, J. W., Sindelarova, K., and Guenther, A., 2016, Nine years of global hydrocarbon emissions based on source inversion of OMI formaldehyde observations, Atmos. Chem. Phys., 16, 10133-10158, https://doi.org/10.5194/acp-16-10133-2016.

Beirle, S., Platt, U., Wenig, M., and Wagner, T., 2003, Weekly cycle of NO2 by GOME measurements: a signature of anthropogenic sources, Atmos. Chem. Phys., 3, 2225-2232, https://doi.org/10.5194/acp-3-2225-2003.

Bodeker, G.E., Struthers, H., Connor, B.J., 2002, Dynamical containment of Antarctic ozone depletion, Geophys. Res. Lett, 29, 1098, https://doi.org/10.1029/2001GL014206.

Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, S. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunta, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G., and Zender, C. S., 2013, Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, J. Geophys. Res. At

mos., 118, 5380-5552, https://doi.org/10.1002/jgrd.50171Chipperfield, M., Bekki, S., Dhomse, S., Neil, R. P. Harris, Hassler, B., Hossaini, R., Steinbrecht, W., Thiéblemont, R. & Weber, M., 2017, Detecting recovery of the stratospheric o zone layer, Nature 549, 211 - 218, https://doi.org/10.1038/nature23681.

Das, S., Harshvardhan, H., Bian, H., Chin, M., Curci, G., Protonotariou, A.P., Mie lonen. T., Zhang, K., Wang, H., Liu, X., 2017, Biomass burning aerosol transp ort and vertical distribution over the south African-Atlantic region, J. Geophy s. Res., 122, https://doi.org/10.1002/2016JD026421.

Davis, D., G. Chen, M. Buhr, J. Crawford, D. Lenschow, B. Lefer, R. Shetter, F. Eisele, L. Mauldin, and A. Hogan, 2004, South Pole NOx Chemistry: an asses sment of factors controlling variability and absolute levels, Atmos. Environ., 3 8, 5375-5388, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.039.

De Meij, A., Pozzer, A., Lelieveld, J., 2012, Trend analysis in aerosol optical dept hs and pollutant emission estimates between 2000 and 2009, Atmos. Environ., 51, 75-85, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.059.

Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., An drae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépau t, J.-N., Vitart, F., 2011, The ERA-Interim reanalysis: configuration and perfo rmance of the data assimilation system, Q. J. Roy. Meteorol. Soc, 137, 553-59 7, https://doi.org/10.1002/qj.828.

Dufour, G., Szopa, S., Barkley, M. P., Boone, C. D., Perrin, A., Palmer, P. I., and Bernath, P. F., 2009, Global upper-tropospheric formaldehyde: seasonal cycles observed by the ACE-FTS satellite instrument, Atmos. Chem. Phys., 9, 3893-3910, https://doi.org/10.5194/acp-9-3893-2009.

Edwards, D. P., Emmons, L.K., Gille, J.C., Chu, A., Attie, J.L., Giglio, L., Wood, S.W., Haywood, J., Deeter, M.N., Massie, S.T., Ziskin, D.C., Drummond, J.R., 2006, Satellite observed pollution from Southern Hemisphere biomass burnin g, J. Geophys. Res., 111, D14312, https://doi.org/10.1029/2005JD006655.

Ferreira, D., Marshall, J., Bitz, C. M., Solomon, S. and Plumb, A., 2015, Antarct ic ocean and sea ice response to ozone depletion: a two timescale problem, Jo urnal of Climate, 28(3), 1206-1226, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00313.1

Gazeaux, J., Clerbaux, C., George, M., Hadji-Lazaro, J., Kuttippurath, J., Coheur, P.-F., Hurtmans, D., Deshler, T., Kovilakam, M., Campbell, P., Guidard, V., R

abier, F., and Thépaut, J.-N., 2013, Intercomparison of polar ozone profiles by IASI/MetOp sounder with 2010 Concordiasi ozonesonde observations, Atmos. Meas. Tech., 6(3), 613, https://doi.org/10.5194/amt-6-613-2013.

Gettelman, A., Hoor, P., Pan, L.L., Randel, WlJ., Hegglin, M.I., Birner, T., 2011, The extratropical upper troposphere and lower stratosphere, Rev. Geophys, 49, RG3003, https://doi.org/10.1029/2011RG000355.

Gillett, N.P., Akiyoshi, H., Bekki, S., Braesicke, P., Eyring, V., Garcia, R., Karpechko, A.Y., McLinden, C.A., Morgenstern, O., Plummer, D.A., Pyle, J.A., Rozanov, E., Scinocca, J., Shibata, K., 2011, Attribution of observed changes in stratospheric ozone and temperature. Atmos. Chem. Phys., 11, 599-609, https://doi.org/10.5194/acp-11-599-2011.

Grytsai, A., Grytsai, Z., Evtushevsky, A., Milinevsky, G., 2005, Interannual variability of planetary waves in the ozone layer at 65°S, Int. J. Rem. Sens., 26, 3377-3387, https://doi.org/10.1080/01431160500076350.

Hara, K., Osada, K., Yabuki, M., Hashida, G., Yamanouchi, T., Hayashi, M., Shiobara, M., Nishita, C., and Wada, M., 2010, Haze episodes at Syowa Station, coastal Antarctica: Where did they come from?, J. Geophys. Res., 115(D14205), https://doi.org/10.1029/2009JD012582.

Holloway, T., Levy, H., and Kasibhatla, P., 2000, Global distribution of carbon monoxide, J. Geophys. Res., 105(D10), 12123-12147, https://doi.org/10.1029/1999JD901173.

Hsu, N. C., Gautam, R., Sayer, A. M., Bettenhausen, C., Li, C., Jeong, M. J., Tsay, S.-C., and Holben, B. N., 2012. Global and regional trends of aerosol optical depth over land and ocean using SeaWiFS measurements from 1997 to 2010, Atmos. Chem. Phys., 12, 8037-8053, https://doi.org/10.5194/acp-12-8037-2012.

Huck, P.E., McDonald, A.J., Bodeker, G.E., Struthers, H., 2005, Interannual variability in Antarctic ozone depletion controlled by planetary waves and polar temperature, Geophys. Res. Lett., 32, L13819, https://doi.org/10.1029/2005GL022943.

Hwang, S.-H., J. Kim, and G.-R. Cho, 2007, Observation of secondary ozone peaks near the tropopause over the Korean peninsula associated with stratosphere-troposphere exchange, J. Geophys. Res., 112, D16305, https://doi.org/10.1029/2006JD007978.

Jones, N. B., Riedel, K., Allan, W., Wood, S., Palmer, P. I., Chance, K., and Notholt, J., 2009, Long-term tropospheric formaldehyde concentrations deduced from ground-based fourier transform solar infrared measurements, Atmos. Chem. Phys., 9, 7131-7142, https://doi.org/10.5194/acp-9-7131-2009.

Jonsson, A. I., Fomichev, V. I., and Shepherd, T. G., 2009, The effect of nonlinea

rity in CO heating rates on the attribution of stratospheric ozone and tempera ture changes. Atmos. Chem. Phys., 9, 8447-8452, https://doi.org/10.5194/acp-9-8447-2009.

Jonsson, A.I., de Grandpre, J., Fomichev, V.I., McConnell, J.C., Beagley, S.R., 200 4, Doubled CO2-induced cooling in the middle atmosphere: photochemical anal ysis of the ozone radiative feedback, J. Geophys. Res., 109, D24103, https://do i.org/10.1029/2004JD005093.

Keeble, J., Braesicke, P., Abraham, N.L., Roscoe, H.K., Pyle, J.A., 2014, The impa ct of polar stratospheric ozone loss on Southern Hemisphere stratospheric circ ulation and climate, Atmos. Chem. Phys., 14, 13705-13717, https://doi.org/10.51 94/acp-14-13705-2014.

Kishcha, P., Starobinets, B., Kalashnikova, O., Long, C. N., and Alpert, P., 2009, Variations of meridional aerosol distribution and solar dimming, J. Geophys. R es., 114(D00D14), https://doi.org/10.1029/2008JD010975.

Koo, J. H., Choi, T., Cho, Y., Lee, H., Kim, J., Ahn, D.H., Kim, J. and Lee, Y.G., 2018, The Variation in Aerosol Optical Depth over the Polar Stations of Kore a, Aerosol Air Qual, Res. 18: 3202-3210, https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.08.030 8.

Koo, J. H., Choi, T., Lee, H., Kim, J., Ahn, D. H., Kim, J., Kim, Y. -H., Yoo, C., Hong, H., Moon, K. -J., and Lee, Y. G., 2018, Total ozone characteristics asso ciated with regional meteorology in West Antarctica, Atmospheric environmen t, 195, 78-88, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.056.

Koo, J. H., Walker, K. A., Jones, A., Sheese, P. E., Boone, C. D., Bernath, P. F., and Manney G. L., 2017, Global climatology based on the ACE-FTS version 3.5 dataset: Addition of mesospheric levels and carbon-containing species in t he UTLS, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 186, 52 -62, https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.07.003.

Kuttippurath, J., Goutail, F., Pommereau, J.-P., Lefèvre, F., Roscoe, H. K., Pazmi ño, A., Feng, W., Chipperfield, M. P., and Godin-Beekmann, S., 2010, Estimati on of Antarctic ozone loss from ground-based total column measurements, At mos. Chem. Phys., 10, 6569-6581, https://doi.org/10.5194/acp-10-6569-2010.

Kuttippurath, J., Kumar, P., Nair, P.J., Chakraborty, A., 2018, Accuracy of satellit e measurements in polar vortex conditions: comparisons with ground-based m easurements. Remote Sens. Environ, 209, 648-659, https://doi.org/10.1016/j.rse.2 018.02.054.

Kuttippurath, J., Kumar, P., Nair, P.J., Pandey, P. C., 2018, Emergence of ozone r ecovery evidenced by reduction in the occurrence of Antarctic ozone loss satu

ration, npj Clim Atmos Sci 1, 42, https://doi.org/10.1038/s41612-018-0052-6.

Kuttippurath, J., Nair, P.J., 2017, The signs of Antarctic ozone hole recovery, Sci Rep. 7, 585, https://doi.org/10.1038/s41598-017-00722-7.

Lamsal, L.N., R. V. Martin, D. D. Parrish, and N. A. Krotkov, 2013, Scaling relationship for NO2 pollution and urban population size: a satellite perspective. Environ Sci Technol, 47(14), 7855-7861, https://doi.org/10.1021/es400744g.

Lamarque, J.-F., Bond, T. C., Eyring, V., Granier, C., Heil, A., Klimont, Z., Lee, D., Liousse, C., Mieville, A., Owen, B., Schultz, M. G., Shindell, D., Smith, S. J., Stehfest, E., Van Aardenne, J., Cooper, O. R., Kainuma, M., Mahowald, N., McConnell, J. R., Naik, V., Riahi, K., and van Vuuren, D. P., 2010, Historical (1850 – 2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application, Atmos. Chem. Phys., 10, 7017-7039, https://doi.org/10.5194/acp-10-7017-2010.

Law, K. S., and Stohl, A., 2007, Arctic Air Pollution: Origins and Impacts, Science (New York, N.Y.), 315, 1537-40, https://doi.org/10.1126/science.1137695.

Lee, Y.G., Koo, J.-H., Kim, J., 2015, Influence of cloud fraction and snow cover to the variation of surface UV radiation at King Sejong station, Antarctica, Atmospheric Research 164, 99-109, https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.04.020.

Leuchner, M., Ghasemifard, H., Lüpke, M., Ries, L., Schunk, C. and Menzel, A., 2016, Seasonal and Diurnal Variation of Formaldehyde and its Meteorological Drivers at the GAW Site Zugspitze. Aerosol Air Qual. Res., 16, 801-815, https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0334.

Li, F., Ginoux, P., and Ramaswamy, V., 2008, Distribution, transport, and deposition of mineral dust in the southern ocean and Antarctica: contribution of major sources, J. Geophys. Res., 113, D10207, https://doi.org/10.1029/2007JD009190.

Liu, H., Jacob, D. J., Bey, I., Yantosca, R. M., Duncan, B. N., and Sachse, G. W., 2003, Transport pathways for Asian pollution outflow over the Pacific: Interannual and seasonal variations, J. Geophys. Res., 108, 8786(D20), https://doi.org/10.1029/2002JD003102.

Mao, K.B., Y. Ma, L. Xia, Wendy Y. Chen, X.Y. Shen, T.J. He, T.R. Xu, 2014, Global aerosol change in the last decade: an analysis based on MODIS data, Atmos. Environ., 94, 680-686, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.053.

McConnell, J. R., Edwards, R., Kok, G. L., Flanner, M. G., Zender, C. S., Saltzman, E. S., Banta, J. R., Pasteris, D. R., Carter, M. M. and Kahl, J. D. W., 2007, 20th-Century Industrial Black Carbon Emissions Altered Arctic Climate Forcing, Science (New York, N.Y.), 317, 1381-4, https://doi.org/10.1126/science.1144856.

McDonald, B. C., Dallmann, T. R., Martin, E. W., and Harley, R. A., 2012, Long term trends in nitrogen oxide emissions from motor vehicles at national, state, and air basin scales, J. Geophys. Res., 117(D00V18), https://doi.org/10.1029/2012JD018304.

McKenzie, R. L., Seckmeyer, G., Bais, A. F., Kerr, J. B., and Madronich, S., 2001, Satellite retrievals of erythemal UV dose compared with ground based measurements at northern and southern midlatitudes, J. Geophys. Res., 106(D20), 24051-24062, https://doi.org/10.1029/2001JD000545.

Mehta, M., Singh, R., Singh, A., Singh, N.K., & Anshumali, 2016, Recent global aerosol optical depth variations and trends—a comparative study using MODIS and MISR level 3 datasets, Remote Sens. Environ., 181, 137-150, https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.004.

Nazaryan, H., McCormick, M. P., and Menzel, W. P., 2008, Global characterization of cirrus clouds using CALIPSO data, J. Geophys. Res., 113(D16211), https://doi.org/10.1029/2007JD009481.

Newman, P.A., Kawa, S.R., Nash, E.R., 2004, On the size of the Antarctic ozone hole, Geophys. Res. Lett., 31, L21104, https://doi.org/10.1029/2004GL020596.

Newman, P.A., Daniel, J.S., Waugh, D.W., and Nash, E.R. 2007, A new formulation of equivalent effective stratospheric chlorine (EESC), Atmos. Chem. Phys., 7, 4537 - 4552, https://doi.org/10.5194/acp-7-4537-2007.

Palmer, P.I., Abbot, D.S., Fu, T.-M, Jacob, D.J., Chance, K., Kurosu, T.P., Guenther, A., Wiedinmyer, C., Stanton, J.C., Pilling, M.J., Pressley, S.N., Lamb, B., Sumner, A.L., 2006, Quantifying the seasonal and interannual variability of North American isoprene emissions using satellite observations of the formaldehyde column, J. Geophys. Res., 111(D12), https://doi.org/10.1029/2005JD006689.

Pan, L.L., Randel, W.J., Gille, J.C., Hall, W.D., Nardi, B., Massie, S., Yudin, V., Khosravi, R., Konopka, P., Tarasick, D., 2009, Tropospheric intrusions associated with the secondary tropopause, J. Geophys. Res., 114, D10302, https://doi.org/10.1029/2008JD011374.

Parish, T.R., 1992, On the role of Antarctic katabatic winds in forcing large-scale tropospheric motions, J Atmos. Sci., 49(15), 1374-1385, https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<1374:OTROAK>2.0.CO;2.

Park, S. S., J. Kim, H. K. Cho, H. Lee, Y. Lee, and K. Miyagawa, 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, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.011.

Park, S. S., Kim, J., Cho, N., Lee, Y. G., and Cho, H. K., 2011, The variations of

stratospheric ozone over the Korean peninsula 1985-2009, Atmosphere, 21, 349-359, https://doi.org/10.14191/ATMOS.2011.21.4.349.

Pereira, K.C.D., Evangelista, H., Pereira, E.B., Simões, J.C., Johnson, E. and R. Melo, L., 2004, Transport of crustal microparticles from Chilean Patagonia to the Antarctic Peninsula by SEM EDS analysis, Tellus B, 56, 262-275, https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2004.00105.x.

Plummer, D.A., Scinocca, J.F., Shepherd, T.G., Raeder, M.C., Jonsson, A.I., 2010, Quantifying the contributions to stratospheric ozone changes from ozone depleting substances and greenhouse gases, Atmos. Chem. Phys., 10, 8803-8820, https://doi.org/10.5194/acp-10-803-2010.

Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., and Gill, T. E., 2002, Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product., Rev. Geophys., 40(1), 1002, https://doi.org/10.1029/2000RG000095.

Randles, C. A., Da Silva, A. M., Buchard, V., Colarco, P. R., Darmenov, A., Govindaraju, R., Smirnov, A., Holben, B., Ferrare, R., Hair, J., Shinozuka, Y., and Flynn, C. J., 2017, The MERRA-2 aero- sol reanalysis, 1980 onward. Part I: system description and data assimilation evaluation, Journal of Climate, 30, 6823-6850, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0609.1.

Rigby, M., Park, S., Saito, T., Western, L. M., Redington, A. L., Fang, X., Henne, S., Manning, A. J., Prinn, R. G., Dutton, G. S., Fraser, P. J., Ganesan, A. L., Hall, B. D., Harth, C. M., Kim, J., Kim, K. -R., Krummel, P. B., Lee, T., Li, S., Liang, Q., Lunt, M. F., Montzka, S. A., Mühle, J., O'Doherty, S., Park, M. -K., Reimann, S., Salameh, P. K., Simmonds, P., Tunnicliffe, R. L., Weiss, R. F., Yokouchi, Y. & Young, D., 2019, Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations, Nature 569, 546 - 550, https://doi.org/10.1038/s41586-019-1193-4.

Salawitch, R.J., Gobbi, G.P., Wofsy, S.C., McElroy, M.B., 1989, Denitrification in the Antarctic stratosphere, Nature, 339, 525-527, https://doi.org/10.1038/339525a0.

Salby, M., Titova, E., and Deschamps, L., 2011, Rebound of Antarctic ozone, Geophys. Res. Lett., 38, L09702, https://doi.org/10.1029/2011GL047266.

Schneider, P., Lahoz, W. A., and van der A, R., 2015, Recent satellite-based trends of tropospheric nitrogen dioxide over large urban agglomerations worldwide, Atmos. Chem. Phys., 15, 1205-1220, https://doi.org/10.5194/acp-15-1205-2015.

Screen, J. A., Simmonds, I., Half-century air temperature change above Antarctic a: Observed trends and spatial reconstructions, J. Geophys. Res., 117, https://doi.org/10.1029/2012JD017885.

Shaw, G. E., 1995, The Arctic haze phenomenon, Bull. Amer. Meteor. Soc., 76, 2403-2414, https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<2403:TAHP>2.0.CO;2.

Shepherd, T. G. and Jonsson, A. I., 2008, On the attribution of stratospheric ozone and temperature changes to changes in ozone-depleting substances and well-mixed greenhouse gases, Atmos. Chem. Phys., 8, 1435-1444, https://doi.org/10.5194/acp-8-1435-2008.

Sigmond, M., and Fyfe, J. C., 2010, Has the ozone hole contributed to increased Antarctic sea ice extent?, Geophys. Res. Lett., 37, L18502, https://doi.org/10.1029/2010GL044301.

Smedt, I.D., Stavrakou, T., Mueller, J., & Roozendael, M.V., 2010, Trend detection in satellite observations of formaldehyde tropospheric columns, Geophys Res Lett 37(18), https://doi.org/10.1029/2010GL044245.

Solomon, S., Haskins, J., Ivy, D.J., Min, F., 2014, Fundamental differences between Arctic and Antarctic ozone depletion, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 111, 6220-6225, https://doi.org/10.1073/pnas.1319307111.

Solomon, S., Ivy, D. J., Kinnison, D., Mills, M. J., Neely, R. R., & Schmidt, A., 2016, Emergence of healing in the Antarctic ozone layer, Science, 353(6296), 269-274. https://doi.org/10.1126/science.aae0061.

Solomon, S., Portmann, R.W., Sasaki, T., Hofmann, D.J., Thompson, D.W.J., 2005, Four decades of ozonesonde measurements over Antarctica, J. Geophys. Res, 110, D21311, https://doi.org/10.1029/2005JD005917.

Son, S.-W., Gerber, E. P., Perlwitz, J., Polvani, Lorenzo M., Gillett, N. P., Seo, K.-H., Eyring, V., Shepherd, T. G., Waugh, D., Akiyoshi, H., Austin, J., Baumgaertner, A., Bekki, S., Braesicke, P., Brühl, C., Butchart, N., Chipperfield, M. P., Cugnet, D., Dameris, M., Frith, S., Dhomse, S., Garny, H., Garcia, R., Hardiman, S. C., Jöckel, P., Lamarque, J. F., Mancini, E., Marchand, M., Nakamura, T., Michou, M., Morgenstern, O., Pitari, G., Plummer, D. A., Pyle, J., Rozanov, E., Scinocca, J. F., Shibata, K., Smale, D., Teyssèdre, H., Tian, W., Yamashita, Y., 2010, Impact of stratospheric ozone on Southern Hemisphere circulation change: A multimodel assessment, J. Geophys. Res., 115, D00M07, https://doi.org/10.1029/2010JD014271.

Stanley, K. M., Say, D., Mühle, J. C., Harth, M., Krummel, P. B., Young, D., O'Doherty, S. J., Salameh, P. K., Simmonds, P. G., Weiss, R. F., Prinn, R. G., Fraser, P. J. & Rigby, M., 2020, Increase in global emissions of HFC-23 despit

e near-total expected reductions, Nat Commun 11, 397, https://doi.org/10.1038/s41467-019-13899-4.

Steig, E. J., Schneider, D. P., Rutherford, S. D., Mann, M. E., Comiso, J. C., Shindell, D. T., 2009, Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year, Nature, 457, 459-462, https://doi.org/10.1038/nature07669.

Stohl, A., and Sodemann, H., 2010, Characteristics of atmospheric transport into the Antarctic troposphere, J. Geophys. Res., 115, D02305, https://doi.org/10.1029/2009JD012536.

Stolarski, R.S., Douglass, A.R., Remsberg, E.E., Livesey, N.J., Gille, J.C., 2012, Ozone temperature correlations in the upper stratosphere as a measure of chlorine content, J. Geophys. Res., 117, D10305, https://doi.org/10.1029/2012JD017456.

Thompson, D. W. J., Baldwin, M. P., Solomon, S., Stratosphere-Troposphere coupling in the Southern Hemisphere, 2005, J. Atmos. Sci., 62, 708-715, https://doi.org/10.1175/JAS-3321.1.

Thompson, D.W.J., Solomon, S., Kushner, P.J., England, M.H., Grise, K.M., Karoly, D.J., 2011, Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change, Nat. Geosci., 4, 741-749, https://doi.org/10.1038/ngeo1296.

Tomasi, C., Kokhanovsky, A.A., Lupi, A., Ritter, C., Smirnov, A., O'Neill, N.T., Stone, R.S., Holben, B.N., Nyeki, S., & Wehrli, C., 2015, Aerosol remote sensing in polar regions, Earth - Science Reviews, 140, 108-157, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.001.

Tomasi, C., Vitale, V., Lupi, A., Di Carmine, C., Campanelli, M., Herber, A., Treffeisen, R., Stone, R. S., Andrews, E., Sharma, S., Radionov, V., von Hoyningen-Huene, W., Stebel, K., Hansen, G. H., Myhre, C. L., Wehrli, C., Aaltonen, V., Lihavainen, H., Virkkula, A., Hillamo, R. Ström, J., Toledano, C., Cachorro, V. E., Ortiz, P., de Frutos, A. M., Blindheim, S., Frioud, M., Gausa, M., Zielinski, T., Petelski, T., and Yamanouchi, T., 2007, Aerosols in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations, J. Geophys. Res., 112, D16205, https://doi.org/10.1029/2007JD008432.

Torres, O., Chen, Z., Jethva, H., Ahn, C., Freitas, S. R., and Bhartia, P. K., 2010, OMI and MODIS observations of the anomalous 2008 - 2009 Southern Hemisphere biomass burning seasons, Atmos. Chem. Phys., 10, 3505-3513, https://doi.org/10.5194/acp-10-3505-2010.

van der A, R. J., Eskes, H. J., Boersma, K. F., van Noije, T. P. C., Van Roozendael, M., De Smedt, I., Peters, D. H. M. U., and Meijer, E. W., 2008, Trends,

seasonal variability and dominant NOx source derived from a ten year record of NO2 measured from space, J. Geophys. Res., 113(D04302), https://doi.org/2007JD009021.

Velasco, R.M., Uribe, F.J., Pérez-Chavela, E., 2008, Stratospheric ozone dynamics according to the Chapman mechanism, J. Math. Chem. 44, 529-539, https://doi.org/10.1007/s10910-007-9326-7.

Wagner, V., von Glasow, R., Fischer, H., and Crutzen, P. J., 2002, Are CH2O measurements in the marine boundary layer suitable for testing the current understanding of CH4 photooxidation?: A model study, J. Geophys. Res., 107(D3), https://doi.org/10.1029/2001JD000722.

Wang, T., Lam, K. S., Chan, L. Y., Lee, A. S. Y., and Carroll, M. A., 1997, Trace gas measurements in coastal Hong Kong during the PEM-West B, J. Geophys. Res., 102(D23), 28575-28588, https://doi.org/10.1029/96JD03750.

Weatherhead, E.C., Reinsel, G.C., Tiao, G.C., Meng, X.L., Choi, D., Cheang, W.K., Keller, T., DeLuisi, J., Wuebbles, D.J., Kerr, J.B., Miller, A.J., Oltmans, S.J., Frederick, J.E., 1998, Factors affecting the detection of trends: statistical considerations and applications to environmental data, J Geophys Res. Atmos., 103. (D14), 17149-17161, https://doi.org/10.1029/98JD00995.

Weller, R., Minikin, A., Petzold, A., Wagenbach, D., and König-Langlo, G., 2013, Characterization of long-term and seasonal variations of black carbon (BC) concentrations at Neumayer, Antarctica. Atmos. Chem. Phys., 13, 1579-1590, https://doi.org/10.5194/acp-13-1579-2013.

Weller, R., Wagenbach, D., Legrand, M., Elsässer, C., Tian-Kunze, X. and König-Langlo, G., 2011, Continuous 25-yr aerosol records at coastal Antarctica - I: inter-annual variability of ionic compounds and links to climate indices, Tellus B, 63(5), 901-919, https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2011.00542.x.

Wilson, D.I., S.J. Piketh, A. Smirnov, B.N. Holben, B. Kuyper, 2010, Aerosol optical properties over the South Atlantic and Southern Ocean during the 140th cruise of the M/V S.A. Agulhas, Atmos Res, 98(2), 285-296, https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.07.007.

Worden, H. M., Deeter, M. N., Frankenberg, C., George, M., Nichitiu, F., Worden, J., Aben, I., Bowman, K. W., Clerbaux, C., Coheur, P. F., de Laat, A. T. J., Detweiler, R., Drummond, J. R., Edwards, D. P., Gille, J. C., Hurtmans, D., Luo, M., Martínez-Alonso, S., Massie, S., Pfister, G., and Warner, J. X., 2013, ecadal record of satellite carbon monoxide observations, Atmos. Chem. Phys., 13, 837-850, https://doi.org/10.5194/acp-13-837-2013.

Yoon, J., Pozzer, A., Chang, D. Y., Lelieveld, J., Kim, J., Kim, M., Lee, Y. G., K

oo, J.-H., Lee, J., and Moon, K. J., 2016, Trend estimates of AERONET-observed and model-simulated AOTs between 1993 and 2013, Atmospheric Environment, 125, 33-47, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.058.

Zeng, G., Wood, S. W., Morgenstern, O., Jones, N. B., Robinson, J., and Smale, D., 2012, Tends and variations in CO, C2H6, and HCN in the Southern Hemisphere point to the declining anthropogenic emissions of CO and C2H6, Atmos. Chem. Phys., 12, 7543-7555, https://doi.org/10.5194/acp-12-7543-2012.

Zhang, J., Reid, J. S., and Holben, B. N., 2005, An analysis of potential cloud artifacts in MODIS over ocean aerosol optical thickness products, Geophys. Res. Lett., 32, L15803, https://doi.org/10.1029/2005GL023254.

Zhang, Y., Li, J., Zhou, L., 2017, The relationship between polar vortex and ozone depletion in the Antarctic stratosphere during the period 1979-2016, Adv. Meteorol., 2017, 3078079, https://doi.org/10.1155/2017/3078079.

Zhu, L., Payne, V. H., Walker, T. W., Worden, J. R., Jiang, Z., Kulawik, S. S., and Fischer, E. V., 2017, PAN in the eastern Pacific free troposphere: A satellite view of the sources, seasonality, interannual variability, and timeline for trend detection, J. Geophys. Res. Atmos., 122, 3614-3629, https://doi.org/10.1002/2016JD025868.

KOPRI 극지연구소

편집순서 8

뒷 면

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서 입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.