

2020년 봄에 발생한 북반구 오존 감소의 역학적 메커니즘 및 배경 조건 분석

우채연 · 김형규 · 김주완* · 문지수

국립공주대학교 대기과학과

(접수일: 2025년 7월 19일, 수정일: 2025년 9월 2일, 게재확정일: 2025년 9월 24일)

Dynamical Mechanisms and Background Conditions of the 2020 Spring Arctic Ozone Depletion

Chaeyeon Woo, Hyeong-Gyu Kim, Joowan Kim*, and Jisu Moon

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

(Manuscript received 19 July 2025; revised 2 September 2025; accepted 24 September 2025)

Abstract The Arctic ozone depletion in 2020 spring drew significant scientific attention due to its rare occurrence in the Northern Hemisphere. Although relatively small in amplitude compared to the Antarctic ozone hole, the 2020 Arctic ozone depletion is the most extensive and markedly prolonged event in the Northern Hemisphere. This study investigates the 2020 Arctic ozone depletion within the context of the background conditions in the stratosphere by comparing it to the 2019 conditions when the stratospheric ozone concentration was high. In early spring 2020, the enhanced meridional temperature gradient strengthened the polar vortex and maintained a cold Arctic condition in the stratosphere, which is markedly different from the 2019 spring and climatological conditions. These background fields create favorable conditions for forming polar stratospheric clouds, which could efficiently cause chemical ozone destruction. Wave activity analysis reveals that the vertical Rossby wave propagation from the high-latitude troposphere and associated stratospheric drag were noticeably weaker than normal in the preceding winter. This contributed to the strong polar jet and weaker Brewer-Dobson circulation in the stratosphere. The strong positive Arctic Oscillation in early 2020 indicates a weaker Rossby wave drag in the high-latitude regions, and 3D stationary wave activity flux (Plum flux) manifests a clear decrease in vertical wave activity over the high-latitude Atlantic. However, its physical causes remain unclear.

Key words: Arctic ozone hole, Polar jet, Wave activity, Arctic Oscillation

1. 서 론

오존은 대기 중에 소량으로 존재하는 미량 기체이
나 대기의 복사 특성 및 연직 구조에 영향을 미치는

중요한 요소이다. 유해한 오염 물질로 분류되는 대류권 오존(e.g., Selin et al., 2009; Nuvolone et al., 2018; Zhang et al., 2019)과는 다르게, 전체의 약 90%를 차지하는 성층권 오존은 태양으로부터 방출되는 자외선을 흡수하여 지구의 생명체를 지키는 중요한 역할을 한다(Cicerone, 1987; Rowland, 2006; WMO, 2022). 성층권의 오존은 대기 중 할로젠(e.g., Cl, Br 등) 물질의 촉매 반응에 의해서 쉽게 파괴되며(e.g., Molina and Rowland, 1974; Stolarski and Cicerone, 1974), 냉

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

매와 스프레이 분사제 등의 용도로 사용되었던 염화불화탄소(chlorofluorocarbon, CFCs)의 배출에 의한 남극 오존층 파괴(오존홀)가 심각해지면서 주목받기 시작하였다(e.g., Chubachi, 1984; Stolarski, 1988; Anderson et al., 1991). 이러한 남극의 오존층 파괴는 1980년대부터 뚜렷하게 관측되었으며(e.g., Farman et al., 1985; Hofmann et al., 1987), 남극 성층권의 한랭한 기상학적 조건이 극 성층운(polar stratospheric clouds, PSC) 형성을 통해 오존층의 화학적 파괴를 돕는 것으로 알려졌다(e.g., Crutzen and Arnold, 1986; Solomon et al., 1986; Hegglin et al., 2015). 이후 다수의 국제 협력을 통해 몬트리올 의정서(1987)가 채택되면서 CFC를 포함한 오존파괴물질의 사용이 금지되어 대기 중 오존파괴물질 농도는 꾸준히 감소하고 있으며, 최근 성층권 오존의 회복 추세가 일부 확인되었다(e.g., Chipperfield et al., 2015; Hegglin et al., 2015; Kuttippurath and Nair, 2017; WMO, 2022).

남반구에서는 매년 봄철(9~11월)에 주기적으로 오존홀이 발생하지만, 북반구에서는 매우 드물게 나타난다. 지형과 대기 순환의 효과로 남극 성층권에 비해 상대적으로 온도를 유지하는 북반구 성층권의 겨울은 극 성층운 형성이 어려운 조건을 제공하여 대규모의 오존층 파괴가 잘 발생하지 않는다. 따라서 북극 성층권에서 오존홀이 발생한 것은 이례적인 현상이지만, 특정 조건에서 예외적으로 오존홀이 관측되기도 한다. 일반적으로 북반구에서의 오존 전량(total column ozone, TCO)은 가을철에 감소하는 추세를 보이다가 겨울철에 약 300 DU까지 회복되나, 1997년과 2011년, 2020년 봄철(3월)에는 220~250 DU 수준으로 오존 전량의 감소가 보고되었다(e.g., Newman et al., 1997; Manney et al., 2011; Dameris et al., 2021). 특히 2020년 북반구에서 발생한 오존층에서의 저농도 오존 현상은 그린란드 면적의 약 3배에 달하는 규모로 발생하였으며(Varotsos et al., 2020), 일부 지역의 TCO가 220 DU 이하로 감소하는 기록적인 오존 파괴가 확인되었다(Dameris et al., 2021).

2020년에 관측된 북반구의 오존 감소는 관측된 이래로 넓은 지역에 남반구 오존홀 수준으로 오존 감소가 발생한 이례적인 현상으로 알려져 있다(Lawrence et al., 2020; Dameris et al., 2021). 2020년은 성층권 온도가 평년에 비해 매우 낮았고 강한 극 소용돌이가 발생하여(Lawrence et al., 2020; Dameris et al., 2021; Xia et al., 2021; Manney et al., 2022) PSC 형성에 유리한 환경을 조성한 것으로 보고되었다(Inness et al., 2020; Wohltmann et al., 2021). 북극의 추운 겨울과 PSC 형성에 따른 오존 감소는 통계적으로 뚜렷한 상관관계가 있으며(e.g., von der Gathen et al., 2021), PSC의 형성은 화학적 반응을 통해 오존 파괴를 활성화

화시키는 것으로 알려져 있다(e.g., Sinnhuber et al., 2000; Rex et al., 2004; Chipperfield et al., 2005; Rieder and Polvani, 2013). 일부 연구에서는 온실기체 증가로 인한 성층권의 온도 감소가 북반구 성층권의 오존 파괴를 촉진하여 21세기에 북반구 오존홀이 더 강하게 나타날 가능성이 있음을 시사하였다(von der Gathen et al., 2021; Manney et al., 2022). 그러나 기존 연구들은 성층권 오존 감소에 영향을 미치는 파동 활동에 대해서 주로 시계열 혹은 동서 평균 관점으로 분석하였으며, 고도 및 지역별 파동 구조에 대한 정량적 분석은 제한적이었다.

본 연구에서는 2020년 봄에 발생한 북반구 오존 감소를 중심으로 오존층의 변화와 성층권 배경장의 관계를 이해하고, 북반구 오존 감소 발생의 역학적 원인을 이해하고자 하였다. 이를 위해 2020년과는 반대로 극 소용돌이가 약하고 성층권 오존 농도가 높았던 2019년과의 배경장 특성 비교를 통해 역학적 기여도를 분석하였다. 특히 기존 연구에서 진행되었던 파동 활동의 연직 전파 특성을 고도 및 지역별로 확장하여 분석하고, 북극 성층권 오존 감소에 기여한 역학적 원인을 3차원적으로 규명하고자 하였다. 2장에서는 오존홀 분석을 위해 사용된 자료들과 분석 지역, 기간을 자세히 설명하며, 배경장 특성을 분석하기 위한 방법론을 논의한다. 3장에서는 분석된 2020년 오존 감소의 특성을 제시하고, 해당 현상의 역학적인 원인을 설명한다. 마지막으로, 4장에서는 이전 장에서 논의한 결과들을 종합하고 요약한다.

2. 자료 및 방법

2.1 분석 자료

본 연구에서는 재분석자료인 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)의 ECMWF reanalysis version 5 (ERA5; Hersbach et al., 2019)와 미국항공우주청의 The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2; Gelaro et al., 2017)를 분석에 사용하였다. ERA5는 1시간 간격의 시간 해상도와 31 km의 공간 해상도의 자료를 제공하며, 앙상블 기반으로 종관 관측 및 위성 자료를 동화한다. 본 연구에서는 북반구 배경장 이해를 위해 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 수평해상도와 1000 hPa부터 1 hPa까지 37개의 연직층, 6시간 간격의 시간해상도로 구성된 바람장, 온도, 지위고도를 이용하였으며, 평년값 정보 산출을 위해 1991년부터 2020년까지 30년 동안 북반구 겨울철을 중심으로 11월부터 다음해 4월까지의 기간에 대해 분석하였다.

또 다른 재분석자료인 MERRA-2는 $0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$ 수

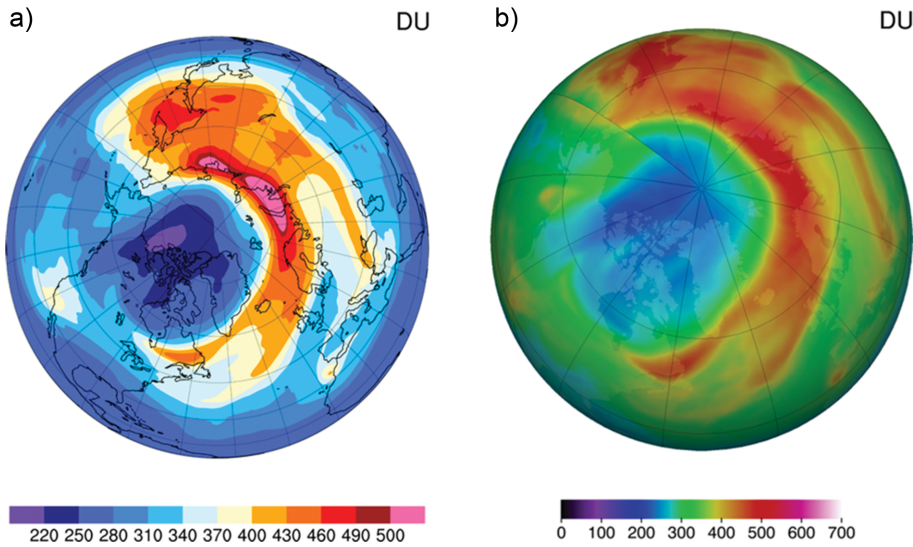


Fig. 1. Daily averaged TCO (DU) on March 18, 2020 from (a) MERRA-2 data and (b) NASA ozone watch (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>).

Table 1. Datasets and analysis periods.

	Period	Horizontal Resolution	Vertical Resolution	Variables	Data Source	Reference
ERA5	1991.05.01.~2021.04.30. (6-hourly)	$1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$	L37	U, V-component of wind, Vertical velocity, Geopotential height, Temperature	ECMWF	Hersbach et al. 2019
MERRA-2	1991.05.01.~2021.04.30. (daily)	$0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$	L72	Total Column Ozone	NASA	Gelaro et al. 2017
SWOOSH	1992.03.~2020.03. (monthly)	2.5° (Zonal mean)	L31	Stratospheric water vapor	NOAA CSL	Davis et al. 2016
AO Index	1991.05.01.~2021.04.30. (daily)			Arctic Oscillation	NOAA	

평해상도로 3시간 간격의 대기장 및 오존 정보를 제공한다. 두 재분석 자료 모두 자료동화 과정에서 Ozone Monitoring Instrument (OMI), Microwave Limb Sounder (MLS)의 중요 관측기반 오존 산출물과 Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI), Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)와 같이 오존에 민감한 적외 채널 정보를 포함하여 다른 재분석 대비 신뢰도 있는 오존정보를 산출하는 것으로 알려져 있다(Gelaro et al., 2017). 특히 전반적인 자료 동화 시스템과 오존 처리 개선에 대한 신뢰도를 통해 성층권 오존의 변동성을 잘 표현하는 것으로 알려져 있다(Wargan et al., 2017). 본 연구에서 분석하고자 하는 2020년 3월 18일 오존홀 사례에 대해 NASA ozone watch ([https://](https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/)

ozonewatch.gsfc.nasa.gov/)에서 제공하는 관측기반 자료와의 비교를 통해, MERRA-2가 해당 시기의 오존홀 특성을 잘 재현하고 있어(Fig. 1), 본 연구의 오존 분석 자료로 사용하였다. 추가적으로 1991~2020년 3월 월평균 TCO 분포도 비교를 수행하여, 장기적인 오존 변동성 또한 신뢰성 있게 재현함을 확인하였다.

PSC 형성에 영향을 미치는 수증기와 오존의 연직 분포를 확인하고자 The Stratospheric Water and Ozone Satellite Homogenized (SWOOSH; Davis et al., 2016)를 사용하였다. SWOOSH는 SAGE-II/III, UARS HALOE, UARS MLS, Aura MLS 위성에서 산출된 동서 평균 오존 및 수증기 자료를 1,316 hPa 범위에서 31개의 조밀한 연직층과 위도 방향 2.5° 수평해상도로 제공

된다. 본 연구에서 SWOOSH는 V2.6을 이용하였으며, 이 자료는 1984년부터 자료를 제공하나 80°N 이상의 일부 고위도 지역에 자료 공백이 존재하여, UARS HALOE 및 UARS MLS 위성 자료가 반영된 1991년부터의 자료를 분석에 사용하였다.

마지막으로 북극진동(Arctic Oscillation; AO)과 오존홀의 관련성을 확인하기 위해 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate Prediction Center (CPC)에서 제공하는 AO 일별 지수를 사용하였다. 일반적으로 AO는 북반구 위도 20° 이상 지역에 대한 평균 해수면 기압에 경험적 직교함수(empirical orthogonal function)를 적용하여 얻어진 첫번째 변동성 모드로 정의되며(Thompson and Wallace, 1998), 극소용돌이의 강도와 양의 상관성이 있다. 분석에 사용된 자료에 대한 정보들은 Table 1에 정리하였다.

2.2 분석 방법

본 연구에서는 성층권에서의 오존홀 형성에 기여한 역학적 메커니즘을 분석하기 위해 구면좌표계 상의 변형된 오일러 평균 방정식계(transformed Eulerian mean, TEM)를 통해 분석하였으며, 이때 동서 방향 운동량 방정식은 Andrews et al. (1987)에서 제안한 것처럼 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\bar{u}_t + \bar{v}^*[(a \cos \phi)^{-1}(\bar{u} \cos \phi)_\phi - f] + \bar{w}^* \bar{u}_z - \bar{X} = (\rho_0 a \cos \phi)^{-1} \nabla \cdot \mathbf{F} \quad (1)$$

위 식에서 ($\bar{}$)는 동서방향의 평균, ($\bar{}^*$)는 동서 평균으로부터의 편차를, 아래 첨자는 해당 차원에 대한 편미분을 나타내며, ϕ, z, t 는 남북, 연직, 시간 좌표들, u, v, w 는 각각 동서, 남북, 연직 바람, θ 는 온위, ρ_0 는 로그기압좌표계에서의 표준 밀도, a 는 지구 반경, f 는 코리올리 파라미터를 의미한다. 식(1)의 좌변의 첫 번째 항은 동서 바람의 가속항을, 두 번째와 세 번째는 질량 가중치를 고려한 평균 수송에 의한 이류이며, $\bar{v}^*$, $\bar{w}^*$ 는

$$\bar{v}^* \equiv \bar{v} - \rho_0^{-1}(\rho_0 \bar{v} \theta' / \bar{\theta}_z), \quad (2)$$

$$\bar{w}^* \equiv \bar{w} + (a \cos \phi)^{-1}(\cos \phi \bar{v} \theta' / \bar{\theta}_z)_\phi \quad (3)$$

로 정의된다. 네 번째 항($\bar{X}$)은 명시되지 않은 마찰 또는 소산에 의한 잔여항이며, 마지막으로 $\nabla \cdot \mathbf{F}$ 는

$$\nabla \cdot \mathbf{F} \equiv (a \cos \phi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \phi} (F^{(\phi)} \cos \phi) + \frac{\partial F^{(z)}}{\partial z} \quad (4)$$

식(4)과 같이 표현할 수 있다. 이는 Eliassen-Palm (EP) flux의 발산으로, EP flux의 벡터 $\mathbf{F} = (0, \mathbf{F}^{(\phi)}, \mathbf{F}^{(z)})$ 는

$$F^{(\phi)} \equiv \rho_0 a \cos \phi (\bar{u}_z \bar{v}' \theta' / \bar{\theta}_z) - v' u' \quad (5)$$

$$F^{(z)} \equiv \rho_0 a \cos \phi [f - (a \cos \phi)^{-1} (\bar{u} \cos \phi)_\phi] \bar{v}' \theta' / \bar{\theta}_z - \bar{w}' u' \quad (6)$$

와 같이 정의된다. 식(1)의 각 항들은 앞서 언급한 ERA5 재분석자료를 이용해 계산하였으며, 모든 미분항은 중앙차분을 적용하였다. 추가로 동서 방향의 파동 전파를 고려한 파동속(wave activity flux)을 분석하기 위해 EP-flux 계산과 동일하게 ERA5 재분석자료를 사용하여 3차원 파동속(Plumb, 1985)을 분석하였다.

3. 관측 결과 분석

3.1 2019년과 2020년의 상층 배경장 비교

Figure 2a는 MERRA-2 자료에서 얻어진 1991~2020년 기간에 대한 북극지역(60~90°N)의 일 최저 TCO 시계열이며, 초록색 점선은 오존홀의 기준값인 220 DU (Newman et al., 2004)를 나타낸다. 일반적으로 북극의 일 최저 TCO는 10월에 가장 적은 수준을 보이며, 다음해 4월까지 증가한다. 이는 겨울동안 강해지는 북반구의 브루어-돕슨 순환(Brewer-Dobson circulation, BDC)에 의해서 극지역으로의 오존 수송량이 많아지기 때문이다(Weber et al., 2011; Feng et al., 2021). 일례로 성층권 극 소용돌이가 약했던 2018~2019년에는 이러한 특성이 잘 나타나며, 평년에 비해 다소 많은 일 최저 TCO를 보인다. 특히 성층권 돌연승온이 발생했던 2019년 1월에는 오존의 증가 경향이 매우 크게 나타나 BDC 강화와 혼합으로 인한 극향 오존수송이 활발했음을 알 수 있다(Weber et al., 2021). 2019년 3월의 극지역 오존 분포를 보면 극지역에 400 DU 이상의 높은 값과 오후크크해 지역을 중심으로 약 450 DU 이상의 최대값이 확인된다(Fig. 2b). 이와 반대로 오존 감소가 관측되었던 2020년 사례에서는 2019년 10월부터 간헐적으로 오존홀의 기준값인 220 DU 이하의 일 최저 TCO가 확인되었다. 2020년 1월 말에 TCO의 일시적인 감소가 나타난 후로 하위 30% 보다 낮은 TCO가 지속되며, 3월부터 4월 초반까지 이례적으로 낮은 일 최저 TCO가 확인된다. 2020년 3월은 오존홀 발생 기준을 만족하며, 북극린란드를 중심으로 광범위한 지역에서 오존 파괴가 발생했음을 보여준다(Fig. 2c).

이전 선행 연구에 따르면, 봄철의 급격한 오존 감소에 PSC가 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다 (Schoeberl and Hartmann, 1991; Hegglin et al., 2015). 성층권에서 PSC가 형성되기 위해서는 195 K 이하의 낮은 온도가 형성되어야 하며, 이는 한랭한 극 공기와 온난한 중위도 공기를 구분하는 극야제트(polar

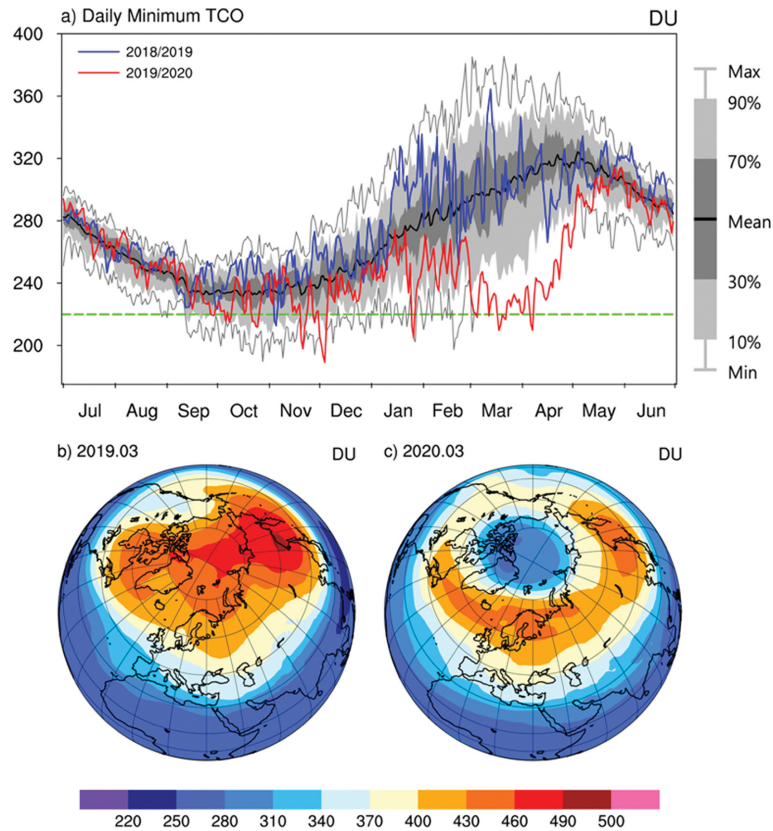


Fig. 2. (a) Daily minimum TCO (DU) from 60~90°N latitude for 2018/2019 (blue), 2019/2020 (red), and climatology (1991~2020, black). Gray lines the maximum and minimum. Light gray shading denotes the 10th/90th percentiles, and dark shading shows the 30th/70th percentiles, respectively. The green line marks the ozone hole threshold (220 DU). Horizontal distribution of TCO for (b) March 2019 and (c) March 2020. These figures are reproduced from <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>.

night jet)와 밀접한 관계를 갖는다. 2020년 오존 감소가 발생한 배경장의 이해를 위해 하부 성층권의 온도와 동서 바람장을 분석하였다. Figure 3은 이전해의 11월부터 4월까지 50 hPa의 북극지역(60~90°N) 일 최저온도를 Fig. 2와 유사하게 분석한 결과이며, 비균질(heterogeneous) 화학반응을 통해 성층권 오존 파괴를 촉진하는 PSC와 빙정으로 구성된 ICE-PSC의 생성 온도(195 K, 188 K)를 초록색 점선으로 표시하였다(e.g., Pawson et al., 1995). 봄철에 상대적으로 높은 TCO를 나타내는 2019년의 경우 선행하는 겨울철의 온도가 평년보다 높은 수준을 보인다. 특히 성층권 돌연승온이 발생했던 2019년 겨울철에는 빠른 온도 증가(Fig. 3a)와 함께 평년에 비해 15 K 이상 온난한 지역이 성층권에 광범위하게 나타난 것을 확인할 수 있다(Fig. 3b). 반면 봄에 오존 파괴가 발생한 2020년의 경우 선행하는 겨울철의 온도는 평년보다 낮으며,

PSC가 생성되는 조건을 평년보다 이른 11월부터 평년보다 늦은 다음해 3월까지 만족하였다. 특히 1월 말부터 3월 중순까지 하위 10% 수준의 낮은 값을 보였다. 동일한 기간에 ICE-PSC가 생성될 수 있는 온도에 도달하며, 이례적으로 추운 성층권이 장기간 형성되었다.

Figure 4는 극소용돌이 경계(70°N)에서의 10 hPa 동서 바람 분석 결과이다. 성층권 돌연승온이 발생했던 2019년 겨울철에는 서풍이 약화되며 동풍으로 전환되었다(Fig. 4b). 이로 인해 약화된 극소용돌이는 저위도의 공기가 고위도로 유입될 수 있도록 하며, 성층권 돌연승온의 발생 가능성을 높인다(e.g., Lee and Butler, 2020). 반면 오존 감소가 발생한 2020년 겨울철에는 상위 10% 수준($\sim 50 \text{ m s}^{-1}$)의 강한 서풍이 나타나 평년에 비해 강한 극소용돌이가 형성된 것을 알 수 있다. 이는 저위도의 공기 유입을 막을 뿐만 아니

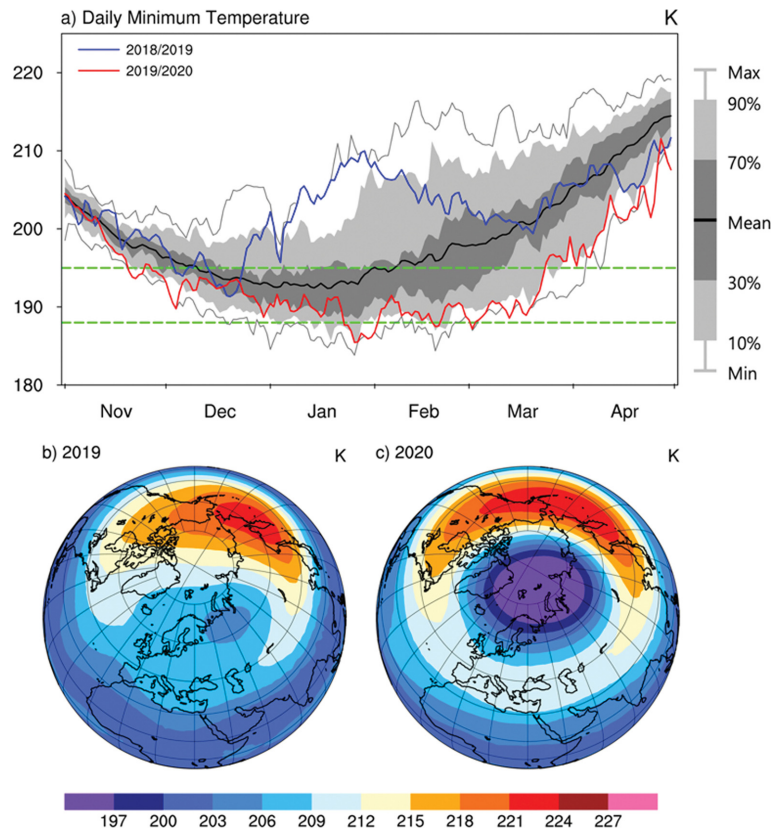


Fig. 3. (a) Same as Fig. 2a, but for daily minimum temperature (K). Green lines indicate PSC and ICE-PSC saturation temperatures (195 K and 188 K). DJF temperature (K) at 50 hPa for (b) 2018/2019 and (c) 2019/2020.

라 겨울철 북극의 한랭한 온도는 남북 방향의 온도 경도를 강화시키며(Fig. 3c), 온도풍 방정식에 의해 강한 상층의 극야제트가 형성되었다(Fig. 4c).

강한 극야제트는 연직으로 깊게 발달하며, 이는 2020년 겨울철 연직 배경장에서 확인된다. 오존 감소가 발생한 봄 이전의 연직 배경장을 확인하기 위해 2019년 12월부터 2020년 2월까지의 동서 평균된 온도와 동서 바람 연직 아노말리 분포를 분석하였다(Fig. 5). 북위 60°N 이상에서 평년에 비해 낮은 온도가 나타나며, 50 hPa를 중심으로 5 K 이상의 강한 한랭 편차가 하부 성층권에 존재한다(Fig. 5a). 한랭 편차의 경계 부근인 60°N 상공에서 평년에 비해 동서 바람이 강하며(Fig. 5b), 특히 성층권에서 10 m s⁻¹ 이상의 편차는 극야제트가 특정 층이 아닌 전반적으로 강하게 나타난다. 따라서 2020년 겨울철 동안 북극에서 강한 극소용돌이에 의해 찬 공기가 고립되어 오존을 파괴하는 PSC 형성에 우호적인 환경을 조성하였으며(Kuttippurath et al., 2021; Weber et al., 2021), 추가적으로 성층권의 BDC 순환이 상대적으로

약했음을 암시한다.

오존 파괴에 기여하는 PSC 형성과 성장에는 수증기가 중요한 역할을 하며(Poole and McCormick, 1988; Stenke and Grewe, 2005), 이를 고려하여 SWOOSH 자료를 이용해 북극지역(60~90°N)의 오존 혼합비 및 수증기 혼합비에 대한 연직 분포를 분석하였다(Fig. 6). 오존이 감소한 고도에서 수증기와 비교하기 위해, PSC가 형성되는 1월이 아닌 오존 감소가 나타난 3월에 대해 분석하였다. 2020년 3월 오존 혼합비는 성층권 전체에서 평년보다 낮은 값을 보였으며, 특히 오존층이 존재하는 30~50 hPa에서 1 ppmv 이상의 오존 감소와 수증기 증가가 확인된다(Figs. 5a, b). 수증기 존재는 성층권에서 복사 냉각을 통해 PSC 형성 뿐만 아니라(e.g., Forster and Shine, 1999), 할로겐 가스 활성화에 우호적인 환경을 조성하는 것으로 알려져 있다(Vogel et al., 2011). 해당 과정에 대한 자세한 이해는 추가적인 연구가 필요하나, 2020년 겨울철 성층권에 존재한 다량의 수증기 또한 일부 오존 파괴에 기여한 것으로 보인다.

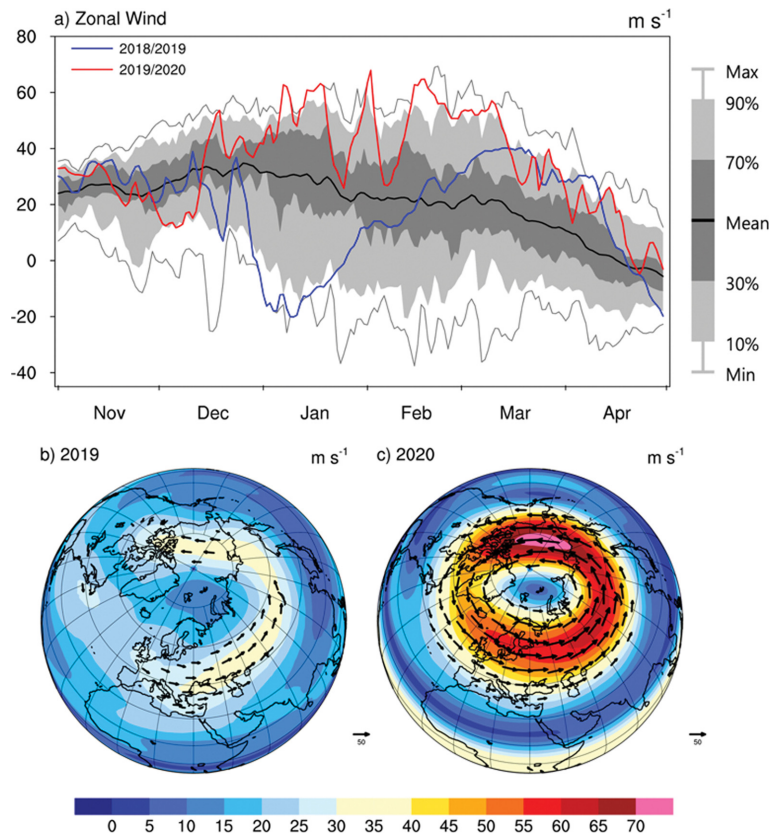


Fig. 4. (a) Same as Fig. 2a, but for daily maximum zonal wind (m s^{-1}) at 70°N . Zonal wind speed (m s^{-1} , shading) and horizontal wind (m s^{-1} , vector) at 10 hPa for (b) DJF 2018/2019 and (c) DJF 2019/2020. The vectors indicate zonal wind where it exceeds 25 m s^{-1} .

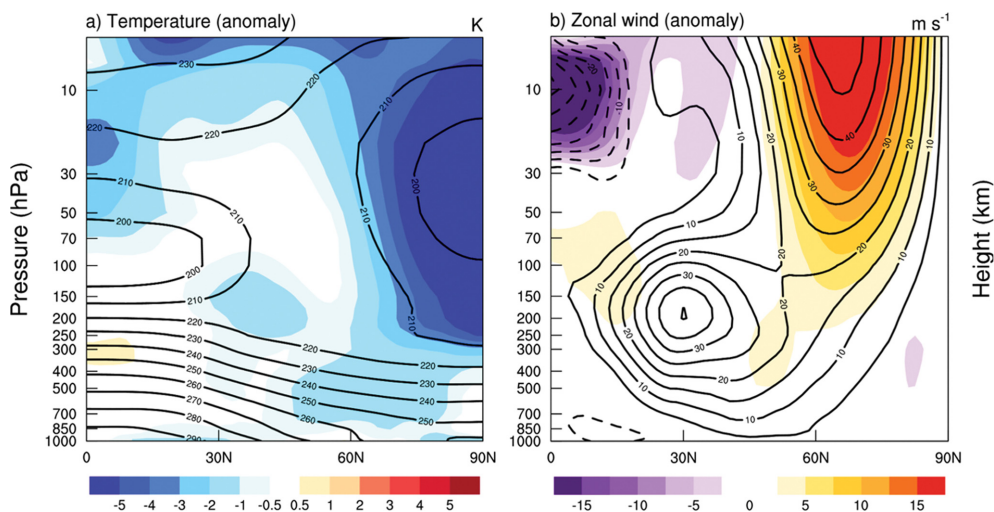


Fig. 5. Zonal-mean vertical structure of (a) temperature and (b) zonal wind anomalies (shading) for DJF 2019/2020 with climatology (contour).

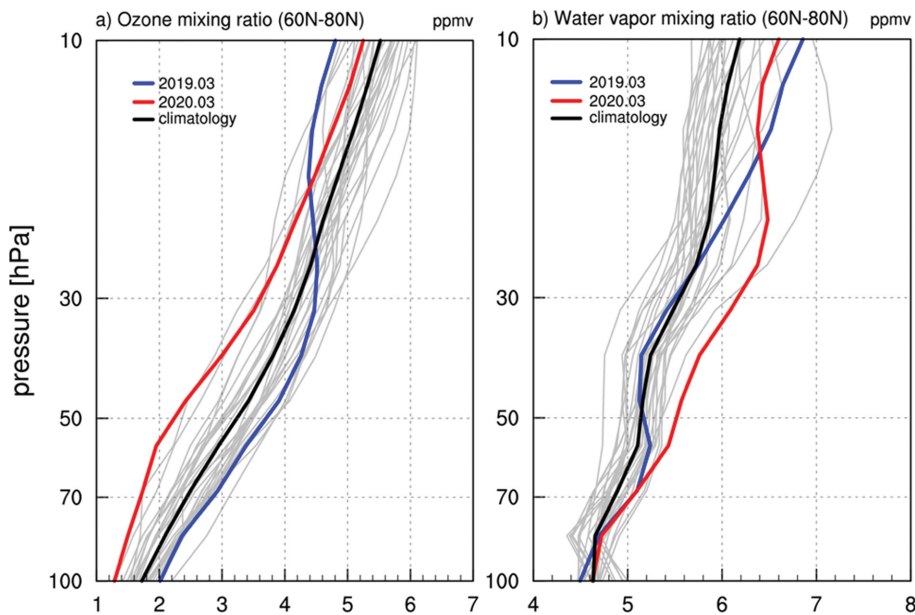


Fig. 6. (a) Ozone mixing ratio (ppmv) averaged over 60–80°N in March from SWOOSH data. (b) Same as (a), but for stratospheric water vapor (ppmv). Gray lines represent individual years. Red, blue, and black lines indicate 2019, 2020, and climatology, respectively.

3.2 2019~2020년 북반구 오존 감소의 역학적 메커니즘

배경대기의 상태 이외에 오존 감소에 직접적으로 기여한 역학적 과정을 추가로 분석하기 위해, 로스비파의 활동 및 BDC 강도를 분석하였다. Figures 7a-d는 TEM 방정식을 통해 계산한 북반구 겨울철 EP-flux 및 EP-flux 발산, 평균 수송, 유선 함수의 기후값 및 아노말리를 나타낸다. 일반적으로 EP-flux는 중위도에서 연직으로 전파되어 성층권에서 수렴하는 특성을 보이며, 식(1)의 우변이 음의 값을 나타내어 동서 바람의 감속에 기여한다(Fig. 7a). 이를 상쇄하기 위해 평균 수송은 적도 대류권계면의 공기를 극으로 수송하며, 이는 BDC로 확인된다(Fig. 7b). 일반적으로 겨울철에는 여름철에 비해 BDC가 강해져 적도로부터 공급되는 오존이 증가해 극 지역의 TCO가 증가한다고 알려져 있다(Shepherd, 2008). 그러나 2020년 겨울철에는 평년에 비해 BDC가 약화되었으며 저위도로부터의 오존 유입량이 감소한 것으로 확인된다(Fig. 7d). 동일 기간에 대류권에서 성층권으로 유입되는 EP-flux의 연직 전파 또한 평년보다 약하게 나타나며(Fig. 7c), 이는 성층권 내 EP-flux 수렴이 약화되었음을 시사한다. 식(1)에 따르면, 이러한 변화는 동서 바람을 강화시키며 제트의 강화를 유도한다. 따라서 오존 감소가 발생한 2020년의 선행하는 겨울철에 EP-flux의 연직 성분이 약화됨에 따라 제트가 강화되었으며, 이

에 맞물려 BDC가 약화된 것으로 확인된다.

식(1)에서 각 항들의 기여도를 비교하기 위해 Fig. 6과 동일 지역에서 10 hPa 아노말리 시계열을 분석하였다(Fig. 7e). 빨간색 실선은 EP-flux 발산, 파란색 점선은 나머지 순환을 나타내며, 두 값은 15일 이동 평균을 적용하였다. EP-flux 발산에 따른 제트의 강화는 2019년 12월 초부터 나타나며, 2020년 2월에 최대에 도달하였다. 반면 남북 평균 수송의 아노말리는 대부분 음의 값을 보이며, 평년에 비해 북향 수송이 약화되었다. 오존이 감소한 2020년 겨울철에는 BDC가 약화되었으며, 이는 저위도에서의 오존 유입 감소를 의미한다. 이러한 제트의 강화는 북극 성층권을 한랭하게 조성하였으며, 평년에 비해 많은 PSC 형성과 이에 따른 오존 파괴를 촉진한 것으로 보인다.

EP-flux 발산에 따른 제트의 가속을 상세히 분석하기 위해, 오존 파괴가 발생하기 전인 2019년 12월부터 2020년 2월 성층권의 동서 바람과 EP-flux의 연직 성분들의 아노말리를 확인하였다(Fig. 8). 2020년 성층권에는 1월부터 전반적으로 강한 동서 바람이 유지되었으며, 2월 초부터 더욱 강화되는 경향이 나타났다(Fig. 8a). 이는 하층에서 상승하는 EP-flux의 연직 성분이 약화됨에 따라, 평년에 비해 EP-flux 발산이 강하게 모의된 것으로 보인다(Fig. 8b). 같은 기간 남북 방향 에디 열속은 성층권 전층에서 평년보다 작게 나타났으며, 그 차이는 최대 10 K m s^{-1} 이상에 달한

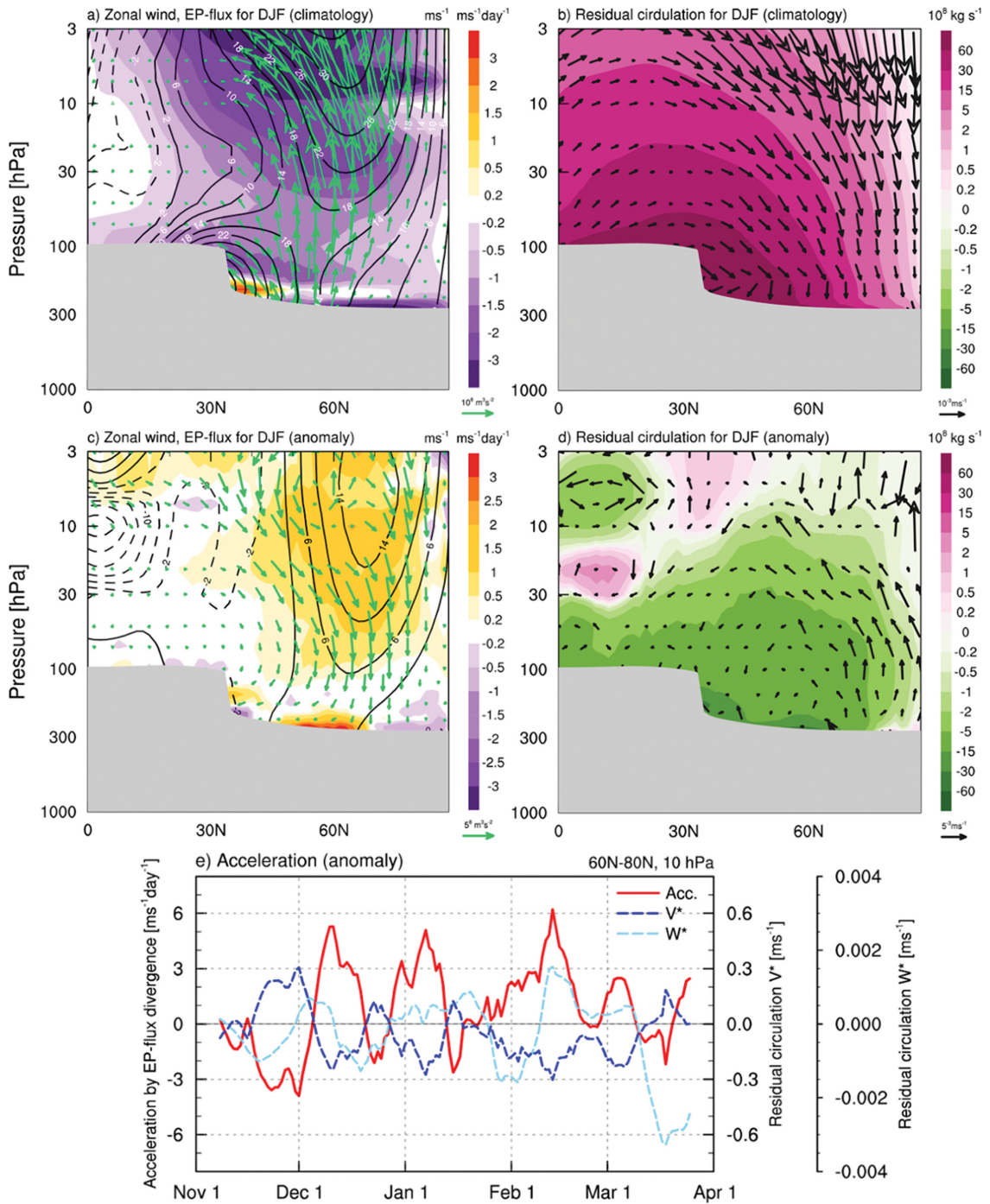


Fig. 7. (a) Climatology of EP-flux (vector), acceleration ($\text{m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$, shading) of zonal wind by EP-flux divergence, and zonal wind (m s^{-1} , contour) for DJF. (b) Same as (a), but for residual circulation (vector) and streamfunction (10^8 kg s^{-1} , shading). (c, d) Same as (a, b), but for the 2019/2020 anomaly. The troposphere is shaded in gray, and EP-flux vectors are scaled by multiplying $e^{z/H}$ for visual clarity. (e) Time series of zonal wind acceleration by EP-flux divergence ($\text{m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$, red), meridional and vertical components of the residual circulation (m s^{-1} , blue dashed) averaged at 10 hPa, 60–80°N with 15-day running mean.

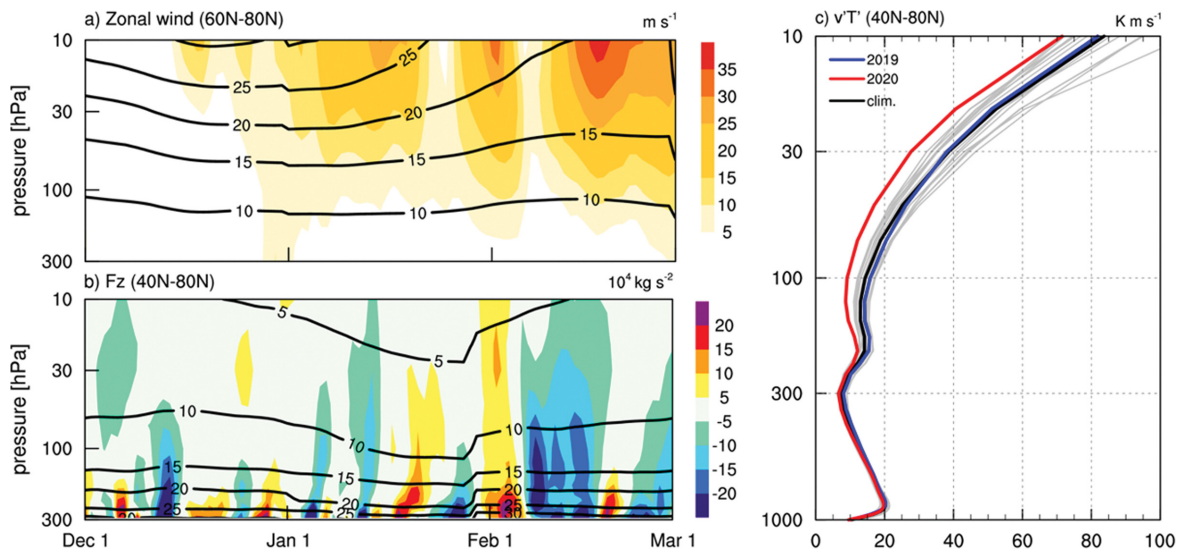


Fig. 8. Time-height section for (a) zonal wind (m s^{-1}) and (b) vertical component of EP-flux anomalies (shading) during DJF 2019/2020. Climatology is also shown in contour. (c) Meridional eddy heat flux (K m s^{-1}) for DJF 2018/2019 (blue), 2019/2020 (red), and climatology (black). The gray lines show individual years.

다(Fig. 8c). 식(5)에 따르면, EP-flux의 연직 성분은 에디 열속에 비례한다. 2020년 2월 에디 열속은 평년에 비해 약화됨에 따라, EP-flux의 연직 성분도 상대적으로 약하게 모의된 것으로 보인다(Fig. 7c 참고). 이러한 변화는 EP-flux 발산의 강도를 조정하여 성층권에서의 제트의 강화를 초래했음을 암시한다.

2020년 겨울철 EP-flux의 연직 성분 약화 원인을 분석하기 위해, AO 시계열을 분석하였다(Fig. 9a). 이벤트가 발생하지 않은 평년을 대표하는 2018년과 비교하기 위해 분석 기간을 2018년부터 2020년까지 선정하였다. 성층권 돌연승온이 관측된 2019년 겨울철에는 AO가 음의 위상을 보인 반면, 2020년 겨울철에는 AO가 장기간 양의 위상이 나타난다. 2020년 2월에는 1 표준편차 이상의 값을 보이며, 최대 6.0에 달하는 강한 양의 위상을 기록하였다. AO는 해면기압의 공간 분포를 반영하는 지표로서, 음의 AO는 북극의 해면기압이 평년보다 높음을 의미하며, 남북 방향의 기압경도 약화에 따른 제트의 사행을 설명한다. 양의 AO는 북극의 해면기압이 평년보다 낮음을 의미하며, 이는 남북 방향 기압경도의 강화로 이어져 제트의 강화를 유도한다. 이러한 AO의 위상 변화는 대기 중 파동 전파와 발산에 직접적인 영향을 미치는데, 이는 EP-flux의 연직 전파에도 반영된다. AO가 강한 양의 위상 시기에는 대류권에서 성층권으로 전파되는 EP-flux의 연직 성분이 약화되어 강한 동서 바람과 제트의 강화를 유도한다. 따라서 오존 감소가 나타난 2020년의 선행하는 겨울철에는 강한 양의 AO가 관측되었

으며, 이에 따른 제트의 강화는 EP-flux의 연직 성분 약화와 연관이 있는 것으로 보인다. EP-flux의 연직 성분 약화가 발생한 지역을 확인하기 위해 지위고도와 Plumb flux 아노말리를 분석하였다(Figs. 9b, c). Hardiman et al. (2020)에 따르면, 11월의 IOD 음의 위상에 따른 해양 강제력이 12월에 파수 1에 해당하는 행성과 활동이 감소와 1월에 성층권 제트의 강화를 유도하여 2월에 북반구 AO가 강한 양의 위상을 보인 것으로 나타낸다고 보고하였다. 이러한 시간 지연 특성을 고려하여, 본 연구에서는 EP-flux 분석 시점을 AO가 가장 강했던 2월의 선행 월인 2020년 1월에 대해 분석하였다. 일반적으로 Plumb flux는 북태평양과 북아메리카 지역에서 강하게 발생하여 성층권 상부로 연직 전파되며, 편서풍 제트 상에서 파동 활동의 중심이 형성된다. Zonal mean을 제거한 지위고도는 전반적으로 서쪽으로 기울어진 경사를 가지며(Fig. 9b), 이는 파동에너지가 북동 방향으로 전파됨을 의미한다. 2020년 1월 Plumb flux의 연직 성분은 평년에 비해 전반적으로 약화되었으며(Fig. 9c), 특히 북부 중위도 지역($35^{\circ}\text{--}55^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E--}120^{\circ}\text{W}$)의 하층에서 강한 감소가 나타났다. 이는 파동 에너지의 성층권 수송이 제한되었음을 의미하며, Fig. 9a에서 확인된 양의 AO 위상과 일치한다. 결과적으로 대류권에서 성층권으로의 파동 에너지 공급이 감소하여 성층권 제트의 유지 및 강화가 가능했음을 시사한다.

비슷한 사례로, 2020년과 유사하게 북반구에서 오존 감소가 발생했던 2011년에 대한 AO 시계열 분석

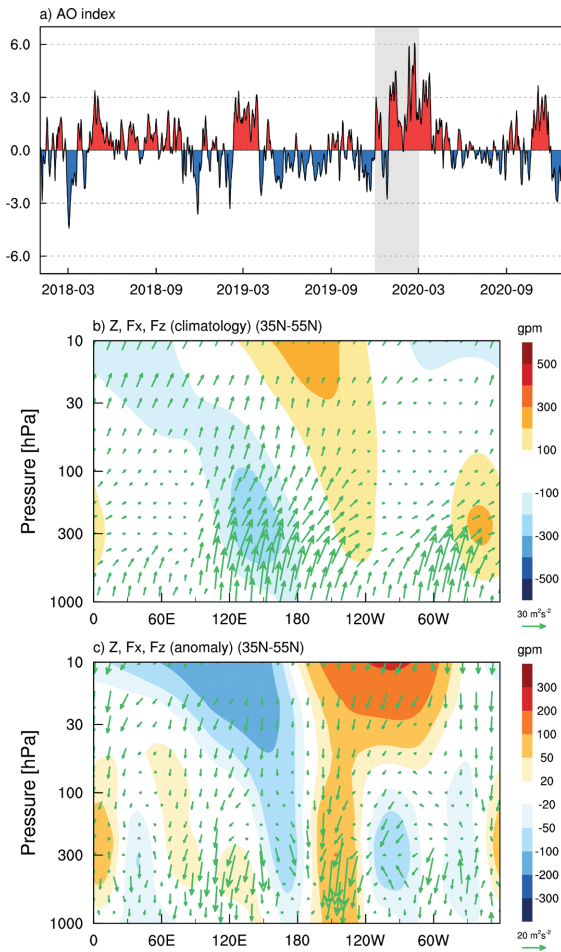


Fig. 9. (a) Time series of the AO index for 2018–2020. The gray box indicates the DJF 2019/2020 periods. (b) Climatology of geopotential height (gpm, shading) and Plumb's flux ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$, vector) averaged over 35–55°N for January. The geopotential anomaly is computed by removing the zonal mean. Vectors are scaled in height by multiplying by $e^{z/H}$ for visual clarity. (c) Same as (b), but for the difference between 2019/2020 and climatology.

결과, 2월에 AO가 1 표준편차 이상의 양의 위상을 보였다(Fig. 10 참고). 두 사례 모두 겨울철에 강한 극 소용돌이와 낮은 성층권 온도가 동반된 것으로 알려져 있으며(Dameris et al., 2021), 이러한 AO의 양의 위상은 유사한 역학적 특성이 있었음을 암시한다. 이는 선행하는 겨울철의 배경장을 함께 고려하는 것은 북반구 오존의 변동성 분석에 있어 중요한 요소로 작용할 수 있음을 보여준다.

해당 파동 활동 약화가 발생한 지역과 연직 구조를 구체적으로 파악하기 위해, Fig. 11에서는 500, 100,

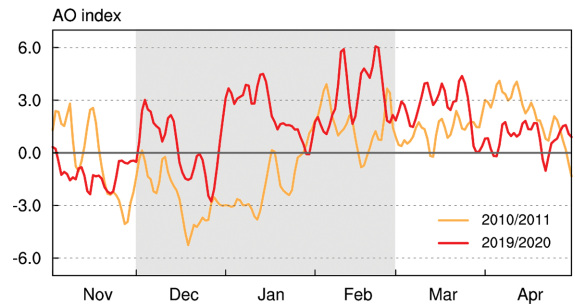


Fig. 10. Time series of the AO index from November to April for 2010/2011 (orange) and 2019/2020 (red). The gray box indicates the DJF periods.

30 hPa에서의 지위고도 편차 및 Plumb flux를 수평적으로 분석하였다. 2020년 1월 북태평양 지역에서의 양의 지위고도 편차는 500 hPa부터 성층권 상부인 30 hPa까지 연속된 구조로 나타나며(Figs. 11a-c), 해수면 온도 상승에 따른 하층 기온 증가 및 대기 팽창의 결과로 해석될 수 있다. 이로 인해 남북 방향 기압경도가 약화되고, 해당 영역에서의 대규모 파동 활동 또한 억제된 것으로 보인다. 이러한 결과는 Fig. 9에서 나타난 연직 전파 약화 지역과 공간적으로도 일치한다. 따라서 북태평양 지역에서 발달한 양의 지위고도 편차는 남북 방향 기압경도를 약화시켜 파수 1, 2에 해당하는 행성파의 상승을 억제하였으며, 이로 인한 파동 전파의 차단이 성층권 제트 및 극 소용돌이 강화에 기여한 것으로 판단된다. 선행 연구에 따르면, 겨울철 북태평양의 해수면 온도 상승이 경압성 약화를 유도하여 파동 활동을 억제할 수 있음이 보고된 바 있으며(Xia et al., 2021), 2011년 3월에 발생한 북극 오존 감소 사례에도 유사한 메커니즘이 논의된 바 있다(Hurwitz et al., 2011). 본 연구에서도 북태평양 지역에서 낮은 파수에 대한 연직 Plumb flux의 약화를 확인하여 선행 연구와 일관된 결론을 제시하며, 북태평양의 높은 해수면 온도가 2020년 강한 AO와 오존 파괴에 중요한 원인 중 하나로 작용된 것으로 판단된다.

선행 연구에 따르면, 북태평양 해수면 온도 외에도 다양한 요인들이 극 소용돌이 강도 변동에 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있다. 과거 오존 감소 사례들에서도 태평양 지역의 양의 해수면 아노말리와 연관되어 있으며(Hurwitz et al., 2011, 2012), 인도양 지역 또한 극 소용돌이 강화에 기여할 수 있음이 제시된 바 있다(Hoerling et al., 2004; Li et al., 2010; Fletcher and Kushner, 2011). 열대 대류권의 Madden-Julian 진동(Garfinkel et al., 2012, 2014; Liu, 2014; Lee et al., 2019)과 열대 성층권 준2년 주기(quasi-biennial oscillation

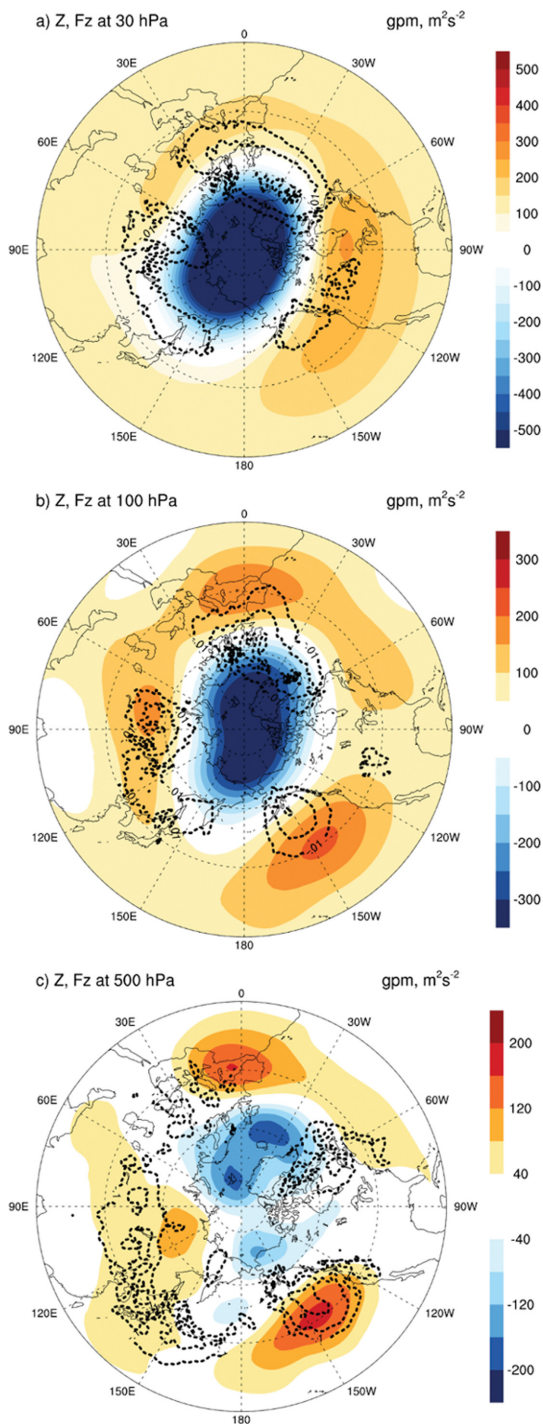


Fig. 11. Anomaly of geopotential height (gpm, shading) and vertical components of Plumb's flux ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$, contour) at (a) 30 hPa, (b) 100 hPa, and (c) 500 hPa for January 2020. Only negative contours are shown for Plumb's flux to highlight the reduced vertical wave propagation.

Baldwin et al., 2001; Garfinkel et al., 2012; Lubis et al., 2016; White et al., 2016; Lu et al., 2020)도 극 소용돌이 강도 변동에 영향을 미치는 주요 요인으로 알려져 있다. 최근 모델링 연구에서는 북극의 오존 감소가 남극 오존홀 사례와 유사하게 AO가 양의 위상 가능성을 증가시켜, 극 소용돌이 강도에 피드백을 유발할 수 있음을 제시하고 있다(Calvo et al., 2015; Ivy et al., 2017; Xie et al., 2018; Stone et al., 2019; Wang et al., 2021). 따라서 본 연구 결과는 북태평양 해수면 온도 이상이 2020년 강한 극 소용돌이 유지에 중요한 역할을 강조하며, 다양한 기후 요인과의 복합적 상호작용 가능성을 시사한다.

4. 결론 및 요약

2020년 북반구 봄철에 발생한 오존 감소는 기존 관측 사례 대비 규모와 강도 면에서 기록적인 수준을 보였다. 본 연구에서는 재분석 자료를 기반으로 2020년 겨울철(DJF) 북반구 성층권의 역학적 특성과 봄철 오존 파괴에 기여한 요인들을 분석하였다.

분석 결과, 2020년 겨울철 동안 북반구 성층권은 평년에 비해 낮은 온도와 강한 동서 바람 구조를 보이며, 상층 극 소용돌이가 강화되고 장기간 유지되었다. 이러한 구조는 극야제트의 강화를 유도하고 PSC 형성에 유리한 조건을 제공함으로써, 성층권 오존 파괴 반응을 촉진시켰다.

동서 평균 에디 열속과 EP-flux의 연직 성분 분석 결과, 겨울철 북위 60° 부근에서의 연직 파동 전파는 전반적으로 약화되었으며, EP-flux 수렴 감소에 따라 극야제트의 강화를 유도하고 BDC는 약화된 것으로 나타났다. 이는 저위도에서의 오존 유입량의 감소를 의미하며, 성층권 남북방향의 에디 열속이 주된 원인으로 보인다. 또한, AO 지수가 강한 양의 위상을 보였던 2020년 겨울철에 500-30 hPa까지 3차원으로 EP-flux를 분석하여 약화된 연직 파동 전파는 주로 북태평양 지역에서 발생하였다. 유사하게 오존 감소가 나타났던 2011년 사례에서도 2월에 AO가 양의 위상을 보였으며, 선행하는 겨울철의 배경장 구조가 비슷했음을 확인할 수 있었다. 해당 지역에서는 지위고도가 전 층에서 양의 편차를 나타냈으며, 상승한 해수면 온도로 인한 하층 온도 증가가 남북 방향 기압경도의 약화를 유도한 것으로 보인다. 이로 인해 알류산 저기압과 파수 1에 해당하는 행성파의 연직 에너지 전파가 약화될 수 있음이 선행 연구에서 보고된 바 있으며(Hu et al., 2018; Xia et al., 2021), 본 연구에서도 해수면 온도 이상과 연직 Plumb flux 강화 간의 공간적 일치를 확인하였다. 이는 북태평양 지역의 해수면 온도가 극 소용돌이 강화와 오존 파괴에 간접적

으로 기여했을 가능성을 제시하며, 향후 오존홀 발생 예측에 중요한 인자로 활용될 수 있음을 시사한다. 결론적으로, 2020년에 발생한 북반구 오존 감소는 해수면 온도 이상, 지위고도 편차-파동 활동 억제, EP-flux 연직 약화, BDC의 약화, 극 소용돌이 강화, PSC 형성, 오존 감소로 이어지는 복합적인 메커니즘에 의한 결과로 보인다.

본 연구는 2020년 북반구 오존 감소의 역학적 원인을 이해하기 위해, 고도별·지역별 파동 에너지의 구조적 변화를 3차원적으로 분석하였다. 이를 통해 겨울철 양의 AO 및 극 소용돌이 강화로 연직 EP-flux 약화가 작용하였고, 주요 발생 지역이 북태평양임을 확인하였다. 북태평양 지역의 해수면 온도 상승이 파동 활동 약화와 연직 에너지 전과 감소로 이어졌으며, 이는 극 성층권의 장기간 한랭 상태 유지 및 오존 파괴에 간접적으로 기여한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 파동 활동을 고도와 지역별로 정밀하게 분석하는 방식이 오존 감소 현상의 이해에 중요하며, 특히 북태평양 해수면 온도는 향후 오존 예측 및 극 소용돌이 진단에 고려되어야 함을 시사한다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(2023R1A2C1007401). 이 논문은 기상청의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Anderson, J. G., D. W. Toohey, and W. H. Brune, 1991: Free radicals within the Antarctic vortex: The role of CFCs in Antarctic ozone loss. *Science*, **251**, 39-46, doi:10.1126/science.251.4989.39.
- Andrews, D. G., 1987: On the interpretation of the Eliassen-Palm flux divergence. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **113**, 323-338, doi:10.1002/qj.49711347518.
- Baldwin, M. P., and Coauthors, 2001: The quasi-biennial oscillation. *Rev. Geophys.*, **39**, 179-229, doi:10.1029/1999RG000073.
- Calvo, N., L. M. Polvani, and S. Solomon, 2015: On the surface impact of Arctic stratospheric ozone extremes. *Environ. Res. Lett.*, **10**, 094003, doi:10.1088/1748-9326/10/9/094003.
- Chipperfield, M. P., S. S. Dhomse, W. Feng, R. L. McKenzie, G. J. M. Velders, and J. A. Pyle, 2015: Quantifying the ozone and ultraviolet benefits already achieved by the Montreal Protocol. *Nat. Commun.*, **6**, 7233, doi:10.1038/ncomms8233.
- Chipperfield, M. P., W. Feng, and M. Rex, 2005: Arctic ozone loss and climate sensitivity: Updated three-dimensional model study. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L11813, doi:10.1029/2005GL022674.
- Chubachi, S., 1984: Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February 1982 to January 1983. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **34**, 13-19.
- Cicerone, R. J., 1987: Changes in stratospheric ozone. *Science*, **237**, 35-42, doi:10.1126/science.237.4810.35.
- Crutzen, P. J., and F. Arnold, 1986: Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: A major cause for the springtime 'ozone hole'. *Nature*, **324**, 651-655, doi:10.1038/324651a0.
- Dameris, M., G. D. Loyola, M. Nützel, M. Coldewey-Egbers, C. Lerot, F. Romahn, and M. Van Roozendael, 2021: Record low ozone values over the Arctic in boreal spring 2020. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 617-633, doi:10.5194/acp-21-617-2021.
- Davis, S. M., K. H. Rosenlof, B. Hassler, D. F. Hurst, W. G. Read, H. Vömel, H. Selkirk, M. Fujiwara, and R. Damadeo, 2016: The Stratospheric Water and Ozone Satellite Homogenized (SWOOSH) database: A long-term database for climate studies. *Earth Syst. Sci. Data*, **8**, 461-490, doi:10.5194/essd-8-461-2016.
- Farman, J. C., B. G. Gardiner, and J. D. Shanklin, 1985: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, **315**, 207-210, doi:10.1038/315207a0.
- Feng, W., S. S. Dhomse, C. Arosio, M. Weber, J. P. Burrows, M. L. Santee, and M. P. Chipperfield, 2021: Arctic ozone depletion in 2019/20: Roles of chemistry, dynamics and the Montreal Protocol. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2020GL091911, doi:10.1029/2020GL091911.
- Fletcher, C. G., and P. J. Kushner, 2011: The role of linear interference in the annular mode response to tropical SST forcing. *J. Climate*, **24**, 778-794, doi:10.1175/2010JCLI3735.1.
- Forster, P. M. de F., and K. P. Shine, 1999: Stratospheric water vapour changes as a possible contributor to observed stratospheric cooling. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3309-3312, doi:10.1029/1999GL010487.
- Garfinkel, C. I., J. J. Benedict, and E. D. Maloney, 2014: Impact of the MJO on the boreal winter extratropical circulation. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 6055-6062,

- doi:10.1002/2014GL061094.
- Garfinkel, C. I., T. A. Shaw, D. L. Hartmann, and D. W. Waugh, 2012: Does the Holton-Tan mechanism explain how the quasi-biennial oscillation modulates the Arctic polar vortex? *J. Atmos. Sci.*, **69**, 1713-1733, doi:10.1175/JAS-D-11-0209.1.
- Gelaro, R., and Coauthors, 2017: The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, **30**, 5419-5454, doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- Hardiman, S. C., and Coauthors, 2020: Predictability of European winter 2019/20: Indian Ocean Dipole impacts on the NAO. *Atmos. Sci. Lett.*, **21**, e1005, doi:10.1002/asl.1005.
- Hegglin, M. I., D. W. Fahey, M. McFarland, S. A. Montzka, and E. R. Nash, 2015: Twenty questions and answers about the ozone layer: *Scientific assessment of ozone depletion: 2015*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 84 pp.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, G. Biavati, D. Dee, A. Horányi, and Coauthors, 2019: The ERA5 global atmospheric reanalysis at ECMWF as a comprehensive dataset for climate data homogenization, climate variability, trends and extremes. *Geophys. Res. Abstr.*, **21**, EGU2019-19092.
- Hoerling, M. P., J. W. Hurrell, T. Xu, G. T. Bates, and A. S. Phillips, 2004: Twentieth century North Atlantic climate change. Part II: Understanding the effect of Indian Ocean warming. *Clim. Dyn.*, **23**, 391-405, doi:10.1007/s00382-004-0433-x.
- Hofmann, D. J., J. W. Harder, S. R. Rolf, and J. M. Rosen, 1987: Balloon-borne observations of the development and vertical structure of the Antarctic ozone hole in 1986. *Nature*, **326**, 59-62, doi:10.1038/326059a0.
- Hu, D., Z. Guan, W. Tian, and R. Ren, 2018: Recent strengthening of the stratospheric Arctic vortex response to warming in the central North Pacific. *Nat. Commun.*, **9**, 1697, doi:10.1038/s41467-018-04138-3.
- Hurwitz, M. M., P. A. Newman, and C. I. Garfinkel, 2011: The Arctic vortex in March 2011: A dynamical perspective. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 11447-11453, doi:10.5194/acp-11-11447-2011.
- Hurwitz, M. M., P. A. Newman, and C. I. Garfinkel, 2012: On the influence of North Pacific sea surface temperature on the Arctic winter climate. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **117**, D19118, doi:10.1029/2012JD017819.
- Inness, A., S. Chabrillat, J. Flemming, V. Huijnen, B. Langenrock, J. Nicolas, and Coauthors, 2020: Exceptionally low Arctic stratospheric ozone in spring 2020 as seen in the CAMS reanalysis. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **125**, e2020JD033563, doi:10.1029/2020JD033563.
- Ivy, D. J., S. Solomon, N. Calvo, and D. W. J. Thompson, 2017: Observed connections of Arctic stratospheric ozone extremes to Northern Hemisphere surface climate. *Environ. Res. Lett.*, **12**, 024004, doi:10.1088/1748-9326/aa57a4.
- Kuttippurath, J., W. Feng, R. Müller, P. Kumar, S. Raj, G. P. Gopikrishnan, and R. Roy, 2021: Exceptional loss in ozone in the Arctic winter/spring of 2019/2020. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 14019-14037, doi:10.5194/acp-21-14019-2021.
- Kuttippurath, J., and P. J. Nair, 2017: The signs of Antarctic ozone hole recovery. *Sci. Rep.*, **7**, 585, doi:10.1038/s41598-017-00722-7.
- Lawrence, Z. D., J. Perlwitz, A. H. Butler, G. L. Manney, P. A. Newman, S. H. Lee, and E. R. Nash, 2020: The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic Oscillation and ozone loss. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **125**, e2020JD033271, doi:10.1029/2020JD033271.
- Lee, R. W., S. J. Woolnough, A. J. Charlton-Perez, and F. Vitart, 2019: ENSO modulation of MJO teleconnections to the North Atlantic and Europe. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 13535-13545, doi:10.1029/2019GL084683.
- Lee, S. H., and A. H. Butler, 2020: The 2018-2019 Arctic stratospheric polar vortex. *Weather*, **75**, 52-57, doi:10.1002/wea.3643.
- Li, S., 2010: A comparison of polar vortex response to Pacific and Indian Ocean warming. *Adv. Atmos. Sci.*, **27**, 469-482, doi:10.1007/s00376-009-9116-1.
- Liu, P., 2014: MJO structure associated with the higher-order CEOF modes. *Clim. Dyn.*, **43**, 1939-1950, doi:10.1007/s00382-013-2017-0.
- Lu, H., M. H. Hitchman, L. J. Gray, J. A. Anstey, and S. M. Osprey, 2020: On the role of Rossby wave breaking in the quasi-biennial modulation of the stratospheric polar vortex during boreal winter. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1939-1959, doi:10.1002/qj.3775.
- Lubis, S. W., K. Matthes, N. E. Omrani, N. Harnik, and S. Wahl, 2016: Influence of the quasi-biennial oscillation and sea surface temperature variability on downward wave coupling in the Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 1943-1965, doi:10.1175/JAS-D-15-0072.1.
- Manney, G. L., and Coauthors, 2011: Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature*, **478**, 469-475, doi:10.1038/nature10556.
- Manney, G. L., A. H. Butler, K. Wargan, and J. U. Groöb,

- 2022: Introduction to special collection “The exceptional Arctic stratospheric polar vortex in 2019/2020: Causes and consequences.” *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **127**, e2022JD037381, doi:10.1029/2022JD037381.
- Molina, M. J., and F. S. Rowland, 1974: Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine-atom catalysed destruction of ozone. *Nature*, **249**, 810-812, doi:10.1038/249810a0.
- Newman, P. A., J. F. Gleason, R. D. McPeters, and R. S. Stolarski, 1997: Anomalous low ozone over the Arctic. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2689-2692, doi:10.1029/97GL52831.
- Newman, P. A., S. R. Kawa, and E. Nash, 2004: On the size of the Antarctic ozone hole. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L21104, doi:10.1029/2004GL020596.
- Nuvolone, D., D. Petri, and F. Voller, 2018: The effects of ozone on human health. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **25**, 8074-8088, doi:10.1007/s11356-017-9239-3.
- Pawson, S., B. Naujokat, and K. Labitzke, 1995: On the polar stratospheric cloud formation potential of the northern stratosphere. *J. Geophys. Res.*, **100**, D11108, doi:10.1029/95JD01918.
- Plumb, R. A., 1985: On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 217-229, doi:10.1175/1520-0469(1985)042<0217:OTTDPO>2.0.CO;2.
- Poole, L. R., and M. P. McCormick, 1988: Polar stratospheric clouds and the Antarctic ozone hole. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **93**, 8423-8430, doi:10.1029/JD093iD07p08423.
- Rex, M., R. J. Salawitch, P. von der Gathen, N. R. P. Harris, M. P. Chipperfield, and B. Naujokat, 2004: Arctic ozone loss and climate change. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L04116, doi:10.1029/2003GL018844.
- Rowland, F. S., 2006: Stratospheric ozone depletion. *Philos. Trans. Roy. Soc. B: Biol. Sci.*, **361**, 769-790, doi:10.1098/rstb.2005.1783.
- Rieder, H. E., and L. M. Polvani, 2013: Are recent Arctic ozone losses caused by increasing greenhouse gases? *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4437-4441, doi:10.1002/grl.50835.
- Schoeberl, M. R., and D. L. Hartmann, 1991: The dynamics of the stratospheric polar vortex and its relation to springtime ozone depletions. *Science*, **251**, 46-52, doi:10.1126/science.251.4989.46.
- Selin, N. E., S. Wu, K. M. Nam, J. M. Reilly, S. Paltsev, R. G. Prinn, and M. D. Webster, 2009: Global health and economic impacts of future ozone pollution. *Environ. Res. Lett.*, **4**, 044014, doi:10.1088/1748-9326/4/4/044014.
- Shepherd, T. G., 2008: Dynamics, stratospheric ozone, and climate change. *Atmosphere-Ocean*, **46**, 117-138, doi:10.3137/ao.460106.
- Sinnhuber, B. M., M. P. Chipperfield, S. Davies, J. P. Burrows, K.-U. Eichmann, M. Weber, P. von der Gathen, M. Guirlet, G. A. Cahill, A. M. Lee, and J. A. Pyle, 2000: Large loss of total ozone during the Arctic winter of 1999/2000. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 3473-3476, doi:10.1029/2000GL011772.
- Solomon, S., R. R. Garcia, F. S. Rowland, and D. J. Wuebbles, 1986: On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, **321**, 755-758, doi:10.1038/321755a0.
- Stenke, A., and V. Grewe, 2005: Simulation of stratospheric water vapor trends: Impact on stratospheric ozone chemistry. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 1257-1272, doi:10.5194/acp-5-1257-2005.
- Stone, K. A., S. Solomon, D. E. Kinnison, C. F. Baggett, and E. A. Barnes, 2019: Prediction of Northern Hemisphere regional surface temperatures using stratospheric ozone information. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **124**, 5922-5933, doi:10.1029/2018JD029626.
- Stolarski, R. S., 1988: The Antarctic ozone hole. *Sci. Am.*, **258**, 30-37.
- _____, and R. J. Cicerone, 1974: Stratospheric chlorine: A possible sink for ozone. *Can. J. Chem.*, **52**, 1610-1615, doi:10.1139/v74-233.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 1998: The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297-1300, doi:10.1029/98GL00950.
- Varotsos, C. A., M. N. Efstathiou, and J. Christodoulakis, 2020: The lesson learned from the unprecedented ozone hole in the Arctic in 2020: A novel nowcasting tool for such extreme events. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **207**, 105330, doi:10.1016/j.jastp.2020.105330.
- Vogel, B., T. Feck, and J. G. Grunow, 2011: Impact of stratospheric water vapor enhancements caused by CH₄ and H₂O increase on polar ozone loss. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **116**, D05301, doi:10.1029/2010JD014234.
- von der Gathen, P., R. Kivi, I. Wohltmann, R. J. Salawitch, and M. Rex, 2021: Climate change favours large seasonal loss of Arctic ozone. *Nat. Commun.*, **12**, 3886, doi:10.1038/s41467-021-24089-6.
- Wang, S., J. Liu, X. Cheng, T. Kerzenmacher, Y. Hu, F. Hui, and P. Braesicke, 2021: How do weakening of the stratospheric polar vortex in the Southern Hemisphere affect regional Antarctic sea ice extent? *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL092582, doi:10.1029/

- 2021GL092582.
- Wargan, K., G. Labow, S. Frith, S. Pawson, N. Livesey, and G. Partyka, 2017: Evaluation of the ozone fields in NASA's MERRA-2 reanalysis. *J. Clim.*, **30**, 2961-2988, doi:10.1175/JCLI-D-16-0699.1.
- Weber, M., and Coauthors, 2021: The unusual stratospheric Arctic winter 2019/20: Chemical ozone loss from satellite observations and TOMCAT chemical transport model. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **126**, e2020JD034386, doi:10.1029/2020JD034386.
- Weber, M., S. Dikty, J. P. Burrows, H. Garny, M. Dameris, A. Kubin, and U. Langematz, 2011: The Brewer-Dobson circulation and total ozone from seasonal to decadal time scales. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 11221-11235, doi:10.5194/acp-11-11221-2011.
- White, I. P., H. Lu, and N. J. Mitchell, 2016: Seasonal evolution of the QBO-induced wave forcing and circulation anomalies in the northern winter stratosphere. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **121**, 10411-10431, doi:10.1002/2015JD024507.
- Wohltmann, I., P. von der Gathen, R. Lehmann, H. Deckelmann, G. L. Manney, J. Davies, and M. Rex, 2021: Chemical evolution of the exceptional Arctic stratospheric winter 2019/2020 compared to previous Arctic and Antarctic winters. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **126**, e2020JD034356, doi:10.1029/2020JD034356.
- World Meteorological Organization (WMO), 2022: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022. GAW Report No. 278, 509 pp., WMO, Geneva.
- Xia, Y., Y. Hu, J. Zhang, F. Xie, and W. Tian, 2021: Record Arctic ozone loss in spring 2020 is likely caused by North Pacific warm sea surface temperature anomalies. *Adv. Atmos. Sci.*, **38**, 1723-1736, doi:10.1007/s00376-021-0359-9.
- Xie, F., X. Zhou, J. Li, C. Sun, J. Feng, and X. Ma, 2018: The key role of background sea surface temperature over the cold tongue in asymmetric responses of the Arctic stratosphere to El Niño-Southern Oscillation. *Environ. Res. Lett.*, **13**, 115010, doi:10.1088/1748-9326/aae79b.
- Zhang, J. J., Y. Wei, and Z. Fang, 2019: Ozone pollution: A major health hazard worldwide. *Front. Immunol.*, **10**, 2518, doi:10.3389/fimmu.2019.02518.

SUPPLEMENTARY

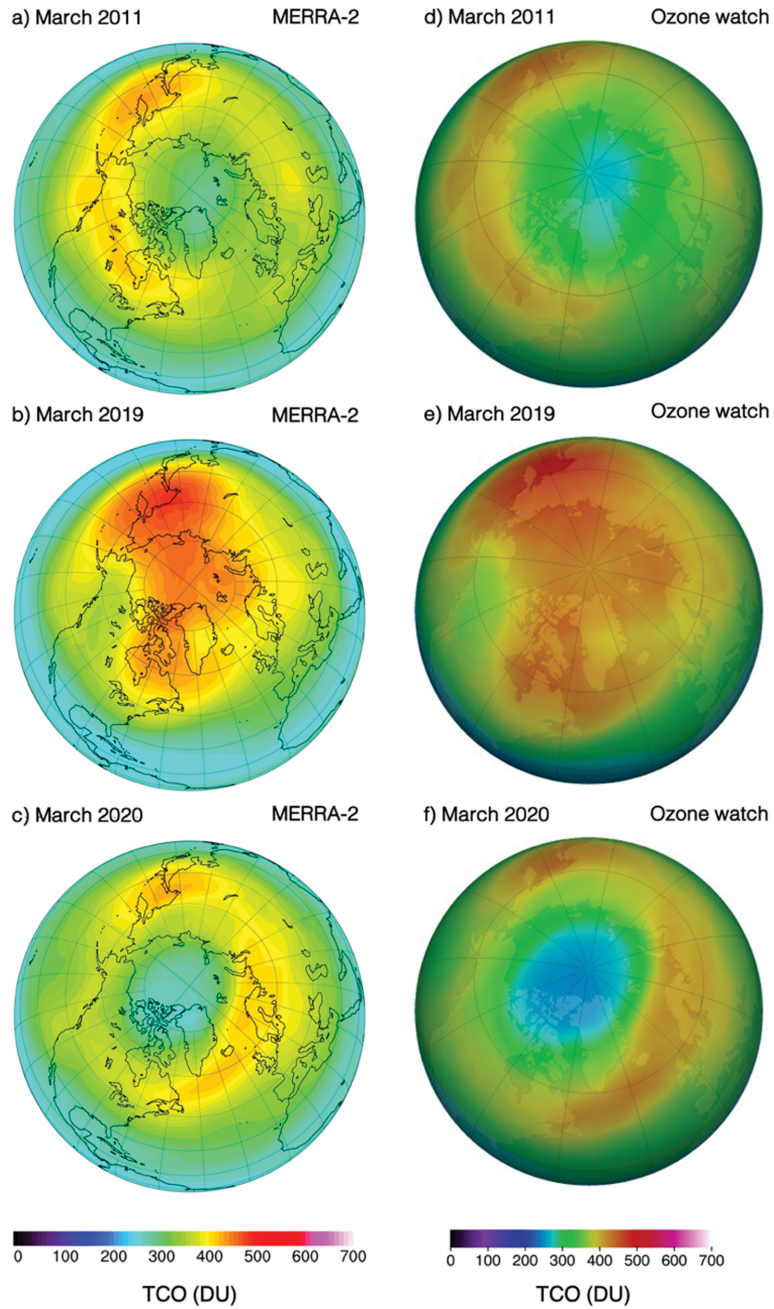


Fig. S1. Monthly mean TCO (DU) for March 2011, 2019, and 2020 from (a-c) MERRA-2 data and (d-f) NASA ozone watch (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>).