

논문

# EEMD 분석 기반 국내 배경지역 오존 농도의 장기 추세와 미국 서부 해안 지역과의 비교 및 고찰

## Long-Term Trends of Ozone Concentrations in National Background Stations in Korea and Comparison with those in the West Coast Regions of the U.S.: Insights from EEMD Analysis

이준영, 최원식\*

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

Junyeong Lee, Wonsik Choi\*

Major of Environmental Atmospheric Sciences, Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2025년 7월 8일  
수정일 2025년 8월 14일  
채택일 2025년 8월 14일

Received 8 July 2025  
Revised 14 August 2025  
Accepted 14 August 2025

\*Corresponding author  
Tel : +82- (0)51-629-6640  
E-mail : wschoi@pknu.ac.kr

**Abstract** This study examined long-term trends and mid-term variability of ozone concentrations in Korea's background regions using the ensemble empirical mode decomposition method and compared them with those of U.S. west coastal regions. While the U.S. sites showed clear declining trends in background ozone ( $-0.29$  ppb/yr), Jeju and Ulleung in Korea exhibited rising trends ( $0.26$  and  $0.51$  ppb/yr, respectively). In 2023, background concentrations at these sites reached 85% and 73% of Korea's MDA8 standard (60 ppb), implying that domestic mitigation alone may be insufficient. However, the background contribution to extremely high ozone concentrations—defined as the 3-year average of the 4<sup>th</sup> highest MDA8 in each year (ozone design value)—remained constant at 48~60% since 2003. These findings suggest that rising background ozone levels, combined with persistent anthropogenic emissions, present structural challenges to ozone management in Korea. While the daily mean ozone concentration levels were higher in background regions than in major cities, the daily ozone production (DOP) in urban areas was more than twice as high as in background regions, suggesting that  $\text{NO}_x$  emissions in cities may locally suppress ozone concentrations but can enhance ozone production in downwind areas. This study also explored mid-term ozone variability ( $\sim 5$ – $8$  years) in relation to ENSO and solar activity, revealing distinct regional responses: Jeju showed stronger ENSO sensitivity during low solar activity, whereas Ulleung appeared more influenced by solar cycles, possibly due to upwind anthropogenic transport. These findings emphasize the need for integrated ozone management strategies that address both background and anthropogenic sources, as well as coordinated international efforts and further investigation into climate-ozone interactions.

**Key words:** Background ozone, Ensemble empirical mode decomposition, Ozone design value, Daily ozone production, Climate-ozone interactions

### 1. 서론

대류권에서의 오존은 인간 건강과 생태계에 부정적인 영향을 끼치는 중요한 이차 대기오염물질이다

(Fiore *et al.*, 2015). 특히, 대기경계층(planetary boundary layer) 내에서 오존(지표 오존; surface ozone)은 호흡기 질환을 악화시키고(Jerrett *et al.*, 2009; Bell *et al.*, 2006), 농작물의 생산성을 저하시킬 수 있어(Feng

*et al.*, 2008) 그 심각성이 더욱 강조되고 있다(Lee *et al.*, 2020). 이러한 문제로 인해 미국, 유럽연합(EU) 등 세계 각국에서는 오존 전구물질인 질소산화물(nitrogen oxides, NO<sub>x</sub>)과 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)의 배출을 줄이기 위한 대기질 개선 정책을 시행해 왔으며, 미국과 서유럽에서는 2000년대 이후 오존 전구물질의 배출이 감소함에 따라, 지표 오존 농도도 장기적으로 감소하는 경향을 보이고 있다(Lin *et al.*, 2017; EEA, 2016). 실제로 TOAR(Tropospheric Ozone Assessment Report)의 분석 결과, 2000년부터 2014년까지 미국과 유럽 대부분의 지역에서는 4~9월 주간 평균 오존 농도가 유의미하게 감소한 것으로 나타났다(Gaudel *et al.*, 2018; Chang *et al.*, 2017). 그러나 이와는 달리, 한국에서는 2000년대 이후 지표 오존 농도가 수도권을 포함한 21개 지역 대부분에서 통계적으로 유의미한 증가 추세를 보이고 있다(Lee *et al.*, 2020). Lee *et al.* (2020)은 2001년부터 2018년까지 수도권을 포함한 전국 21개 지역의 지표 오존 농도가 유의미하게 증가하고 있음을 보고하였다. 이는 국내에서 NO<sub>x</sub> 및 VOCs에 대한 배출 저감 정책이 지속적으로 시행되어 왔음에도 불구하고, 해당 정책들이 지표 오존 농도 감소로 이어지지 못하고 있다는 점을 보여준다. 전구물질 간의 비선형적인 상호작용(Li *et al.*, 2019)뿐 아니라, 오존의 상대적으로 긴 수명(약 3주; Young *et al.*, 2013; Stevenson *et al.*, 2006)으로 인한 장거리 수송 효과(Monks *et al.*, 2015) 등이 정책 효과를 제한했을 가능성이 제기된다. 따라서 오존의 지역적 배출뿐만 아니라 외부에서 유입되는 오존 농도와 그 변화 양상을 이해하는 것이 더욱 중요해지고 있으며, 이에 따라 배경 오존(background ozone)에 대한 이해와 관측의 중요성이 더욱 부각되고 있다(Vingarzan, 2004; Fiore *et al.*, 1998). Yeon and Kim (2021)은 2001년부터 2018년까지의 기간 동안 전국 43개 지점의 장기 오존 농도 변동을 분석한 결과, 배경 지역에서 지표 오존 농도가 가장 높고 증가 추세도 뚜렷하게 나타났다고 보고하였다. 이는 한국의 지표 오존 농도 결정에 있어

배경 오존이 중요한 요인으로 작용함을 시사한다.

이러한 배경 오존의 중요성은 해외의 선행연구에서도 꾸준히 강조되고 있다. Nopmongkol *et al.* (2016)은 1970년부터 2020년까지 아시아에서 NO<sub>x</sub>와 VOCs의 배출량이 각각 75%와 159% 증가하였으며, 이와 같은 전구기체 배출의 증가가 미국 서부의 배경 오존 농도를 3.4~5.0 ppb 증가시킨 것으로 제시하였다. 또한 Parrish *et al.* (2022)은 미국 캘리포니아 지역에서 고농도 오존의 지표인 ODV(MDA8 중 연간 네 번째로 높은 값을 3년 이동 평균한 수치; Ozone Design Values)를 배경농도와 인위적 생성 농도로 구분하여 평가하였다. MDA8(Maximum Daily 8-hour Average)은 하루 동안 오존 농도에 대한 8시간 이동 평균 값 중 가장 높은 값을 의미한다. 이들은 관측된 ODV에서 인위적 생성의 기여도는 1980년부터 2020년까지 6배 이상 감소하였으나, 배경농도의 변화는 미미하였음을 제시하였고, 결론적으로 배경농도가 유지되고 있기 때문에 지속적인 전구물질 배출 규제에도 불구하고 미국 대기질 기준(NAAQS, National Ambient Air Quality Standards, 70 ppb 이하)을 달성하는 것이 쉽지 않다고 보고하였다. 또한, Parrish *et al.* (2022)은 후속 연구에서 지표 오존의 대기 중 수명이 북반구 중위도에서의 대기 순환 시간규모와 유사하기 때문에 배경오존 농도 저감을 위한 국제적인 협력이 필수적이라는 점을 강조하였다.

그러나 해당 연구 결과는 태평양의 동쪽에 위치한 미국에서의 장기간 오존 관측 데이터에만 기반하였기 때문에, 태평양 서쪽의 대규모 전구물질 배출원이며 높은 오존 농도를 보이는 동아시아에서의 장기간 오존 배경농도 변동 경향성 분석을 통해 이러한 주장의 확인이 필요하다. 특히, 한국은 전구물질 배출원이 밀집한 아시아대륙의 직접적 영향을 최종적으로 받음과 동시에 태평양의 풍상 지역으로 장거리 수송을 통해 북아메리카 대륙의 배경농도에 영향을 줄 수 있는(Lin *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2008) 중위도 서태평양 경계에 위치하여 북반구 중위도의 전지구적 배경농도 변동성 규명을 위한 중요한 지리적 특성을

가진다.

또한, 한국에서의 선행연구들은 서울과 같은 대도시의 대기질에 초점을 맞춰, 인위적 전구물질 배출과 특정한 기상조건에서의 고농도 오존 생성과 같은 사례 연구에 집중하여 온 경향이 있어(예를 들면, Bak *et al.*, 2022; Hong and Song, 2022) 배경농도의 장기 변동성과 이들이 오존 농도에 미치는 영향 등에 대한 연구는 부족한 실정이다. 특히 한국은 여름 몬순 기후와 아시아 대륙과의 지리적 근접성으로 인하여 배경 오존의 농도 수준과 변동 특성이 서구와는 다를 가능성이 높으며, 이에 따라 한국에서의 배경 오존의 장기 추세와 특성을 정량적으로 규명하는 연구가 필요하다(Han *et al.*, 2019).

본 연구에서는 한국의 배경 지역인 제주도, 울릉도, 백령도에서 관측된 오존 농도의 장기간 데이터를 활용하여 오존의 장기적 변동 추세를 분석하고, 이를 동아시아 유래 오존과 전구물질의 장거리 수송 영향을 지속적으로 받는(Nopmongcol *et al.*, 2016; Christensen *et al.*, 2015; Monks *et al.*, 2015; Lin *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2008) 미국 서부 캘리포니아의 배경 오존 변동성과 비교함으로써 북반구 중위도의 배경 오존 변동성의 차이를 살펴보고자 하며, 이를 통해 Parrish *et al.* (2020)의 오존 오염 저감을 위한 국제적 공조의 필요성을 검토하고자 한다. 또한 한국 배경지역과 미국 서부 해안지역의 ODV 변동성을 비교하여 한국과 미국의 고농도 오존 변동 특성을 평가하고자 한다. 추가적으로 도시와 배경 지역의 일일 오존 생성량(DOP; Daily Ozone Production) 지표를 활용하여, 국내에서의 국지적 전구물질 배출이 오존 농도에 미치는 영향과 도시와 배경지역 간의 오존 생성 강도의 장기 변동 특성의 차이를 살펴보고자 한다. 마지막으로 시계열 분해를 통해 추출한 경년 변동 성분과 기후 지표(ENSO 및 태양 흑점 수)의 상관성 분석을 통해 기후 요인이 한국 배경지역에서 오존 농도의 경년 변동성에 미치는 영향을 탐색적으로 살펴보고자 한다. 이를 통해 본 연구는 한국 배경 오존의 지역적 특성 및 중·장기적인 추세를 규명하고, 배경 오존 관

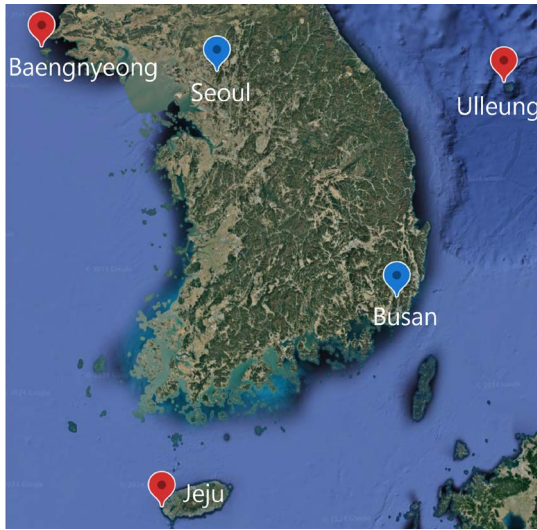
리 및 저감을 위한 정책적 통찰을 제공하는 것을 목표로 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 한국 배경지역의 지표 오존 농도 데이터와 결측치 처리 방법

국가측정망 에어코리아에서 제공하는 국가배경농도측정소 중 제주도 고산, 울릉도, 백령도의 3개 측정소를 선정하여, 1시간 평균 오존 데이터를 수집하였다(<https://www.airkorea.or.kr>). 추가적으로, 국가 배경 오존 농도와 비교를 목적으로 서울과 부산의 도시 대기측정소 오존 농도 데이터를 수집하였다(그림 1). 도시대기측정소 데이터는 자동차 및 산업활동 등 전구물질 배출이 활발한 환경을 반영하기 위하여, 서울의 25개 측정소와 부산의 28개 측정소에서 수집된 데이터를 평균하여 구성하였다. 본 연구에서는 제주도 고산 및 울릉도 국가배경농도 측정소와 서울 및 부산의 도시대기 측정소에 대해서는 2001년 1월 1일부터 2023년 12월 31일까지의 데이터를, 백령도 국가배경농도 측정소에 대해서는 2014년 1월 1일부터 2023년 12월 31일까지의 데이터를 분석에 활용하였다. 1시간 평균 오존 데이터의 결측률은 제주도(고산) 6.18%, 울릉도 7.17%, 백령도 4.85%, 부산 0.04%이고, 서울은 결측값이 없다.

본 연구에서는 일평균, 월평균, 연평균, 8시간 이동평균의 일 최고 농도(MDA8; maximum daily 8-hour average)를 사용하였다. 일평균, 월평균, 연평균 오존 농도는 국립환경과학원의 자료처리 기준에 따라 1시간 평균 데이터를 바탕으로 기간 내 75% 이상의 자료가 유효할 경우에만 산출하였다. 본 연구에서는 연속된 시계열 자료가 요구되어(2.2절 참조) 결측치 보간이 필요하다. 분석에 사용된 일 평균 오존 농도 자료의 결측률은 제주도(고산) 4.1%, 울릉도 5.8%, 백령도 1.6%였고, 부산과 서울의 결측률은 0.04%와 0%로 미미하였다. 선행연구들(Kalsoon *et al.*, 2021; Boleti *et*



**Fig. 1.** Locations of the air quality monitoring stations. Red markers represent national background monitoring stations, including Baengnyeong, Ulleung, and Jeju. Blue markers represent urban air quality monitoring stations, constructed by averaged data from 25 monitoring stations in Seoul and 28 monitoring stations in Busan.

al., 2018)에서는 연평균 값을 이용하여 결측치를 대체하였으나, 이는 한국에서의 지표 오존의 큰 계절적 변동성을(Lal *et al.*, 2000) 반영할 수 없다. 예를 들어, 제주도에서는 2012년 3월 2일부터 6월 8일까지 99일간 연속된 결측이 발생하였는데, 이는 우리나라 오존의 전형적인 쌍봉분포 중 첫 번째 기간에 해당한다(3.2절 후술). 이 기간을 연 평균값으로 보간할 경우, 계절적 특성이 반영되지 않아 고농도 시기의 오존 수준을 충분히 반영하지 못하고, 이는 계절적 변동성과 그 외 변동 분석에 왜곡을 초래할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 계절성을 반영하여 실제 오존 농도에 보다 근접한 값으로 결측값을 보간하기 위하여 다음과 같은 방법을 적용하였다. 먼저, 종관기상의 시간 규모인 단기 결측 구간(5일 이하)에 대해서는 선형 보간법(linear interpolation)을 적용하였고, 그 결과 결측률은 제주도, 울릉도, 백령도에서 각각 3.3%, 4.2%, 0.6%로 감소하였다. 장기 결측 구간(5일 이상)에 대해서는 동일 기간의 전년도 및 다음 연도 자료의 평

균값으로 보간하였다. 앞의 두 방법으로도 보간할 수 없는 소수의 구간에 대해서는 해당 월의 월평균 값으로 대체하였다.

## 2.2 앙상블 경험적 모드분해(EEMD, Ensemble Empirical Mode Decomposition)

Ensemble empirical mode decomposition (EEMD)은 모수적 시간 척도 분해와 달리 기저 함수가 미리 정의되지 않고 데이터에 의존하여 각각의 독립적인 주파수를 가지는 모드(IMF; Intrinsic Mode Function)를 추출하는 비모수적 시계열 분석 기법인 empirical mode decomposition (EMD)를 개선한 방법이다. Huang *et al.* (1998)이 제시한 EMD는 원신호로부터 고유한 시간 척도를 가지는 IMF를 반복적으로 추출하여 시계열을 분해한다. 그러나 EMD는 때때로 서로 다른 시간 규모의 신호가 한 IMF에 섞여 나타나는 모드 혼합(mode mixing) 문제를 유발할 수 있으며, 이는 해석의 정확성을 저해할 수 있다(Boleti *et al.*, 2018; Lee, 2015; Wu and Huang, 2009). 이러한 문제를 해결하기 위해 Wu and Huang (2009)은 EEMD (Ensemble EMD)를 제안하였다. EEMD는 백색 잡음(white noise)을 원시 시계열에 여러 번 추가하여, 다양한 잡음 조건 하에서의 EMD 결과를 평균함으로써 모드 혼합을 줄이고 분해의 안정성을 확보하는 방식이다(Wu and Huang, 2009). EEMD는 시간 규모가 상이한 신호가 혼재된 시계열을 효과적으로 분해할 수 있는 장점을 가진다는 점에서 다양한 분야의 복합 시계열 분석에 폭넓게 활용되고 있다(예를 들어, 지진파 신호 분석: Wang *et al.*, 2012, 전기 시스템의 잡음 제거: Jin *et al.*, 2019, 호흡 신호 분석: Hadiyoso *et al.*, 2020, 풍속 예측: Huang *et al.*, 2018).

EEMD가 수행되는 간략한 절차는 다음과 같다(Wu and Huang, 2009). 먼저, 분석 대상 시계열,  $x(t)$ 에 임의의 백색 잡음  $n_i(t)$ 를 더해  $N$ 개의 새로운 시계열  $x_i(t) = x(t) + n_i(t)$ 를 생성한다. 이후 각각의  $x_i(t)$ 에 대해 EMD를 적용하여 IMF들을 산출한다. 각 반복에서 얻어진 동일 순번의 IMF들을 평균하여 최종 IMF

를 결정한다(식 1).

$$IMF_k(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IMF_t^i(t) \quad (1)$$

여기서,  $IMF_k(t)$ 는  $k$ 번째  $IMF$ ,  $IMF_t^i(t)$ 는  $i$ 번째 반복에서의  $k$ 번째  $IMF$ ,  $N$ 은 백색 잡음을 추가하여 EMD를 수행한 총 반복 횟수를 의미한다.

이와 같이 평균된  $IMF$ 들을 모두 합산하고 남은 잔차항  $r(t)$ 를 더함으로써 원래 시계열을 다음과 같이 재구성할 수 있다(식 2).

$$x(t) = \sum_{i=1}^N IMF_k(t) + r(t) \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 전체  $IMF$ 의 개수를 의미하며,  $r(t)$ 는 추세 또는 저주파 신호를 나타내는 잔차항이다. 백색 잡음은 분해 과정에서 다양한 주파수를 유도함으로써 EMD가 더 정확하게 진폭별 또는 주기별 모드를 구분할 수 있도록 도와주며, 다수의 반복을 통해 잡음 효과는 상쇄되고 데이터의 본질적인 구성 요소만 남게 된다. 이로 인해, EEMD는 EMD보다 더욱 안정적이고 신뢰도 높은 분해 결과를 제공한다(Boleti *et al.*, 2018; Lee, 2015; Wu and Huang, 2009).

본 연구에서는 일평균 오존 농도 시계열을 EEMD 분석에 활용하였다. Boleti *et al.* (2018)은 스위스 취리히에서 관측한 오존 농도 시계열에 대하여 EEMD를 활용해 추출한 시간 규모별  $IMF$ 를 재구성하여 장기, 계절, 단기 변동성으로 분류하였다. 스위스 취리히는 연중 일정한 강수량으로 인하여 계절 변동성이 단순한 단봉우리 형태를 나타내는 반면, 한국은 여름철에 장마로 인해 강수량이 집중되어(8월 강수량 227.8 mm vs. 12월 강수량 55.6 mm; WWIS, 2024) 보다 복잡한 쌍봉우리 형태의 계절 변동성을 나타낸다. 따라서, 본 연구에서는 한국의 기후적 특성을 고려하여 쌍봉 계절 변동을 재현하도록  $IMF$ 를 재구성하였다. 또한 선행연구에서의 분류체계를 한국 배경지역의 오존 시계열에 적용하면, 선행연구의 장기 변동 추세를와는 달리 장기 변동성 내에 10년 이내의 짧은 주기

의 변동성이 반영된 것으로 판단되어, 본 연구에서는  $IMF$  구성을 보다 세분화하여 약 5~8년의 주기를 보이는 경년 변동성을 추가하였다(그림 S1b). 최종적으로 제주도와 울릉도의 시계열에서는 13개의  $IMF$ 가, 백령도의 시계열에서는 12개의  $IMF$ 가 도출되었고, 각  $IMF$ 와 장기, 경년, 계절, 단기 변동성에 대한 주파수 범위를 부록에 제시하였다(그림 S1b).

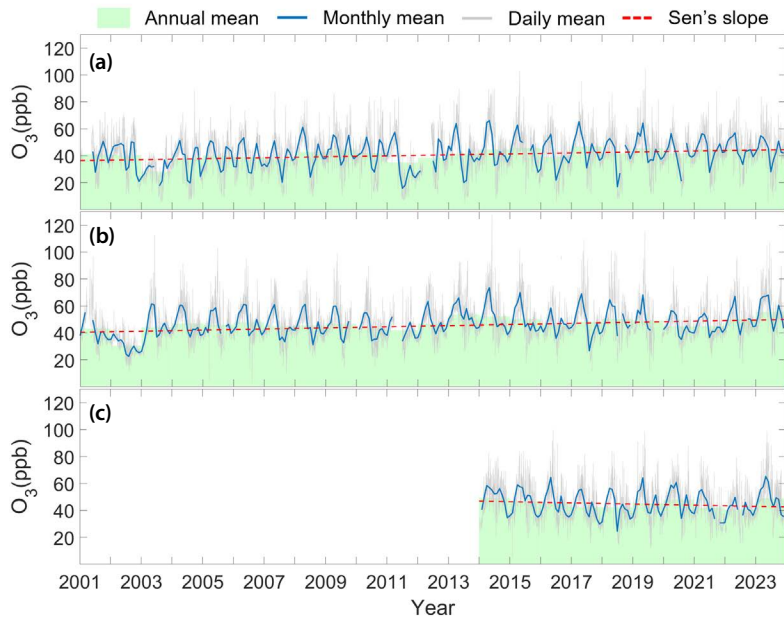
### 2.3 통계적 방법(Sen's slope과 Mann-Kendall test)

배경 오존 농도의 장기 변동 추세를 정량적으로 평가하기 위해 Sen's slope과 Mann-Kendall (MK) 검정을 함께 활용하였다. Sen's slope는 시계열 데이터에서 중앙값 기반의 기울기를 계산하는 비모수적 방법으로, 이상치나 비정규성을 가정하지 않고도 안정적인 추세 분석이 가능한 장점이 있다. Mann-Kendall 검정은 시계열 데이터의 단조 추세 유의성을 평가하기 위한 비모수적 통계 검정으로, 특히 기상학 및 대기 환경 분야에서 널리 사용된다(Hong and Song, 2022; Gaudel *et al.*, 2018; Chang *et al.*, 2017). 본 연구에서는 유의수준  $\alpha = 0.05$ 를 기준으로, p-value가 이보다 작을 경우 통계적으로 유의한 추세가 존재하는 것으로 판단하였다. 보다 자세한 방법은 Mann (1945), Kendall (1948), Sen (1968), Hirsch (1982)에 제시되었다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 한국 배경지역 월평균 오존 농도의 장기 시간적 변동성

2001년부터 2023년까지 한국 배경지역인, 제주, 울릉, 백령도의 오존 농도는 지역별 차이를 보이며 변화해왔으나, 세 지역 모두 최고 월 평균 오존 농도는 대부분 5월에 발생하였다(그림 2). 이는 늦봄에 강해진 자외선 강도와 높은 대기 중 전구물질( $NO_x$ , VOCs 등)의 농도에 의해 활발해진 오존 생성의 결과로 해석된다. 오존의 계절 변동성은 세 배경지역에서



**Fig. 2.** Time series of  $O_3$  concentrations from 2001 to 2023 observed at (a) Jeju, (b) Ulleung, and (c) Baengnyeong stations. Green shaded area shows annual mean, blue lines denote monthly mean, and gray lines represent daily mean concentrations. Red dashed lines show Sen's slope obtained with monthly mean concentrations.

모두 4~5월에 첫 번째 고농도 피크가 발생한 이후 9~10월경 두 번째 피크가 나타나는 복합적인 쌍봉 분포를 보였다.

제주도와 울릉도에서의 월평균 오존 농도 시계열에 대한 Sen's slope은 각각 0.36 ppb/yr와 0.41 ppb/yr로, 두 배경 지역에서 모두 지속적으로 상승하는 경향을 보였고, 울릉도에서 제주도보다 다소 가파른 상승 추세가 나타났다. 이러한 단조 추세의 유의성을 판단하는 Mann-Kendall (MK) 검정 결과는 두 지역에서 모두 0.001 이하의 p-value를 제시하여 이러한 농도 상승 추세는 통계적으로 유의하였다(표 1). 백령도에서는 관측이 시작된 2014년부터의 데이터를 바탕으로 분석을 진행하였으며, 이 기간에 오존 농도가 감소하는 경향을 보였다. 월 평균 농도에 대한 Sen's slope은 연평균  $-0.43$  ppb/yr로 감소하였으나, MK 검정 결과는 p-value 0.15로 통계적으로는 유의하지 않았다(표 1).

세 지역 모두 인위적 배출의 영향이 적은 배경 지

역으로, 이러한 지역별 오존 농도의 장기 변동 추세의 차이는 해당 지점의 국지적 전구기체 배출에 의한 생성과 제거보다는 편서풍에 의한 오존 및 오존 전구기체의 수송(Han *et al.*, 2019)과 동아시아 지역 전구기체의 배출량 변화(Lee *et al.*, 2021; Mijling *et al.*, 2013) 및 성층권으로부터의 오존 유입(Collins *et al.*, 2003)에 영향을 주는 기상 변동성의 차이 등의 복합적 요인에 기인하였을 가능성이 높다. 따라서, 배경지역별 장기 변동성의 차이를 야기한 작용 메커니즘 규명을 위한 추가 연구가 요구된다.

그러나 Sen's slope과 같은 단순한 선형 장기 변동 분석은 각 지역의 오존 농도 변화율을 직관적이고 정량적으로 평가할 수는 있으나, 계절적 요인을 포함한 단기 변동성을 완전히 배제하지 못한다는 한계가 있다. 예를 들어, 백령도의 경우 분석 시작 연도에 따라 추정 기울기가 달라지며, 일부 구간(예: 2017년 시작: 0.22 ppb/yr, p-value = 0.65; 2018년 시작: 0.07 ppb/yr, p-value = 0.89)에서는 양의 기울기가 산출되기도 한

**Table 1.** Summary of Sen's slope and Mann-Kendall trend test results for monthly ozone concentrations at three background monitoring stations (Jeju, Ulleung, and Baengnyeong).

Station	Jeju	Ulleung	Baengnyeong
Sen's slope (ppb/yr)	0.36	0.41	-0.43
Z*	3.80	4.87	-1.43
p-value*	<0.001	<0.001	0.15
First monthly peak conc. (ppb)	55.8	61.1	58.9
Second monthly peak conc. (ppb)	46.8	47.4	48.8
Monthly minimum conc. (ppb)	25.4	35.9	33.0

\*The Z-statistic (standardized test statistic from the Mann-Kendall test) and p-values indicate the statistical significance of the linear trends.

다. 이는 통계적 유의미성은 미미하지만 최근에는 배경 오존 농도가 증가 추세로 전환되었을 가능성을 내포하기도 한다. 따라서, 장기적인 배경 농도 변동성과 계절적 변동성과 같은 보다 단기적인 변동성을 분리함으로써 해당 지역의 오존 농도 변동성에 대한 보다 정밀한 분석을 위한 추가적인 접근이 필요하며, 다음 장에서 이에 대한 논의를 다루고자 한다.

### 3.2 EEMD 방법을 통한 배경지역 오존 농도의 장기 및 계절적 변동성

EEMD 방법을 일평균 오존 농도 시계열에 적용하여 이로부터 단기 변동성, 계절 변동성, 경년 변동성 및 장기 변동성을 분리하였다(그림 3). EEMD의 모든 IMF 성분을 합산하여 재구성한 시계열은 세 곳의 배경지역에서 모두 원 시계열(일 평균 오존 농도)과 잘 일치하여 EEMD 방법을 활용한 시계열 분해가 적절히 이루어졌음을 제시한다(제주, 울릉, 백령에서의  $R^2$  값은 각각 0.97, 0.96, 0.96; 그림 S2).

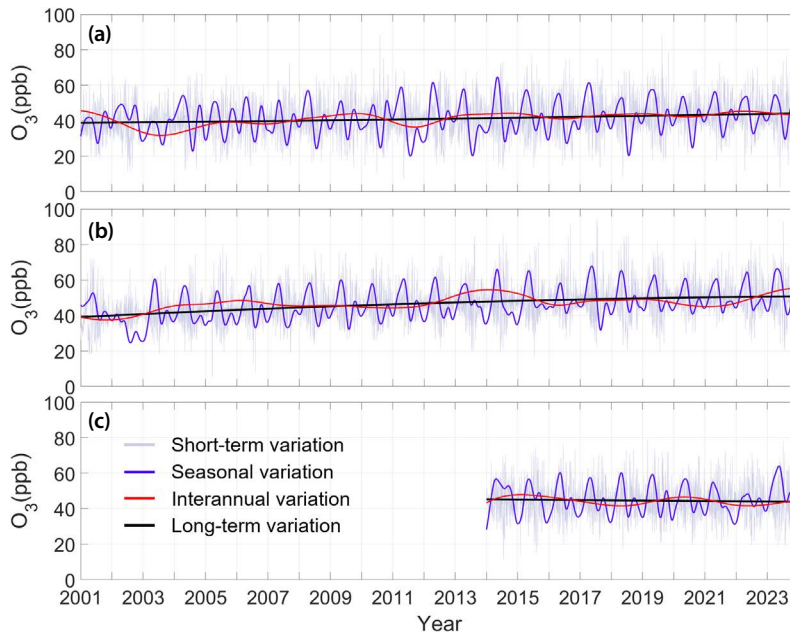
단기 변동은 종관기상 조건(일사량, 풍속, 강수)과 전구기체 배출(예를 들면 주말과 주중)의 영향을 받는 국지적인 농도 변동성을 반영하여 큰 폭의 변동성을 보였다. 계절적 변동은 광화학 과정이 활발해지는 늦은 봄철과 여름에 증가하고 겨울에 감소하는 패턴이 연중 반복적으로 나타나는 주기적인 농도 변화를 보였다. 그러나, 한국에서의 계절 변동 패턴은 늦봄(4~5월)에 큰 봉우리가 나타나고 가을(9~10월)에 작은 봉우리가 나타나는 쌍봉분포를 나타내어 유럽대륙의 단봉분포(예, 스위스; WMO, 2024)와는 다른 양

상을 나타내었다. 이러한 쌍봉분포는 두 봉우리 사이 기간 장마의 영향으로 오존의 농도가 감소한 것에 기인한 것으로 사료된다. 경년 변동은 장기적 변동과 계절적 변동 주기 사이에 발생할 수 있는 기후 영향(예를 들면, 엘니뇨나 태양 흑점 변화 등)을 고려하기 위하여 본 연구에서 추가하였다. 실제로 본 배경측정 지에서의 경년 변동성은 약 5~8년 주기로 나타나는 것으로 판단된다(그림 3a와 3b). 본 연구에서는 경년 변동성을 추가함으로써 장기 변동 경향을 단순화하여 해외지역의 장기 변동성과 비교하고자 하였고, 경년 변동과 관련된 추가 논의는 뒤에서 보다 자세히 논의하고자 한다.

장기 변동은 10년 이상의 기간에 걸쳐 나타나는 추세로 배출원과 기후의 장기적 변화가 복합적으로 작용한 영향을 반영한다. 본 연구에서 비교하고자 하는 해외지역에 대한 선행연구(Parrish *et al.*, 2020)에서는 배경농도를 인위적 배출원의 영향이 적은 배경지역(미국과 중국)에서 계절 변동성을 제거한 월평균 오존 농도를 기반으로 획득하였다. 본 연구에서는 한국의 배경지역인 국가 배경측정소에서의 일평균 오존 농도 시계열에서 단기, 계절 및 경년 변동성을 제거한 장기 변동성을 추출하였고, 이는 선행연구의 배경농도 정의와 일관성을 갖기 때문에 장기 변동성을 한국의 배경농도 변동성으로 정의하였다.

### 3.3 배경농도의 장기 변동성 경향

본 절에서는 미국, 유럽 및 중국의 배경농도 장기 변동성과 울릉도 및 제주도 국가배경 측정소의 장기

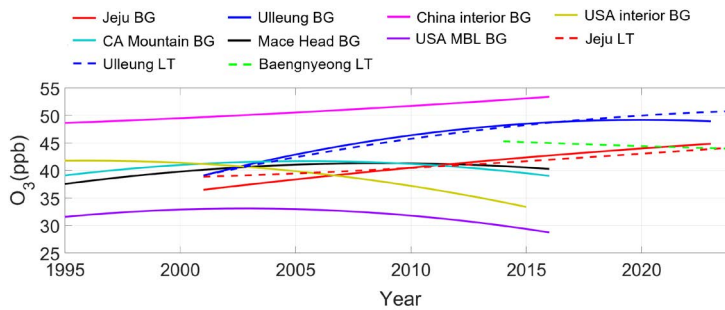


**Fig. 3.** Decomposition of daily mean  $O_3$  concentrations at (a) Jeju, (b) Ulleung, and (c) Baengnyeong sites using the EEMD method. The short-term, seasonal, interannual, and long-term variations are shown in light gray, purple, red, and black lines, respectively. For improved visual clarity, the long-term variation is additionally overlaid on the other components.

추세를 비교하였다. 울릉도 및 제주도의 배경농도 변동성은 3.2절에서 획득한 장기 변동성을 활용하였으며, 비교를 위한 외국의 배경농도 변동성은 Parrish *et al.* (2020)에서 제시한 배경농도 추세 함수를 사용하였다. 이는 월평균 관측 시계열에 대해 Fourier series를 통해 계절성을 제거한 후, 시간에 대한 2차 회귀함수로 산출한 결과이고 회귀분석은 2016년까지의 자료에 대해 수행되었다. 이 적합(fitting) 함수는 예측(prognostic) 함수가 아니라 진단(diagnostic) 함수이기 때문에 이를 본 연구의 자료 기간까지 외삽하는 것은 적절하지 않다. 따라서, 해외의 비교 자료는 2016년까지의 데이터로 한정하였다. 대신, 울릉도 및 제주도 관측 시계열에 대해 Parrish *et al.* (2020)과 동일한 2차 회귀 적합 방법을 적용한 추세선을 병행하여 제시함으로써, 분석 방법 간 비교와 정량적 해석이 가능하도록 하였다(그림 4). EEMD에서 추출한 배경농도와 Parrish *et al.* (2020)의 방법으로 산출한 배경농도는 전반적으로 일치하고 있으나 울릉도에서

는 2021년 이후부터, 제주도에서는 초기인 2001~2005년에 약간의 차이를 보였다. 이는 Parrish *et al.* (2020) 방법은 계절 변동성을 제거한 월평균 농도를 대상으로 시간에 대한 이차함수로 적합(fitting)시키기 때문에 경년 변동성을 반영하지 못하고 2021년 이후 회복된 COVID-19 팬데믹에 의한 사회경제적 활동 제한의 영향이 분석기간에서 제외되었기 때문인 것으로 판단된다.

배경 농도는 미국과 유럽에서는 2000년대 이후 감소하는 경향을 보인 반면(Parrish *et al.*, 2020), 중국 동북부의 산악 배경지역인 Waliguan 관측소와 한국의 제주도 및 울릉도에서는 같은 시기 지속적으로 증가하는 추세를 나타내었다(그림 4; 표 2). 중국의 측정지 고도는 3.8 km로 한국의 배경측정소에 비해 높기 때문에 전반적으로 한국의 배경농도보다는 높은 수준을 보였을 것으로 보이지만, 시간적 변동성은 이러한 농도 수준 차이에는 영향을 받지 않는다(Parrish *et al.* 2020). 따라서, 중국의 배경농도 증가율



**Fig. 4.** Temporal variations in background O<sub>3</sub> concentrations at various locations. Jeju (red), Ulleung (blue), and Baengnyeong (green) represent Korea's background sites (2001~2023). China interior denotes Waliguan Mountain, USA interior include Whiteface Mountain in New York, and CA Mountain represents Lassen Volcanic National Park in California. USA MBL represents marine boundary layer sites along the California coast, including Olympic N.P., Redwood N.P., Trinidad Head, and Point Reyes N.S.. Mace Head (0.02 km a.s.l.) in Ireland is also included for comparison.

**Table 2.** Comparison of Sen's slopes obtained from the time series of background concentrations in Jeju, Baengnyeong, and Ulleung vs. global locations.

	Station (altitude)	Sen's slope (since 2001)	Period
Global locations in Parrish <i>et al.</i> (2020)	USA MBL (sea level)	-0.29 ppb/yr	2001~2016
	CA Mountain (1.74 km a.s.l.)	-0.15 ppb/yr	
	Mace Head (sea level)	0.01 ppb/yr	
	USA Interior (1.5 km a.s.l.)	-0.56 ppb/yr	
	China Interior (3.8 km a.s.l.)	0.25 ppb/yr	2001~2015
This study	Jeju (0.08 km a.s.l.)	0.26 ppb/yr	2001~2023
	Ulleung (0.15 km a.s.l.)	0.51 ppb/yr	
	Baengnyeong (0.12 km a.s.l.)	-0.15 ppb/yr	2014~2023

(0.25 ppb/yr)에 비하여 한국의 배경농도가 더 가파르게 증가하는 경향을 보인 것은(울릉도: 0.51 ppb/yr, 제주도: 0.26 ppb/yr) 고도의 차이에 기인한 것보다는 실제 한국 배경농도의 빠른 증가 추세를 나타내는 것으로 판단된다. 미국과 아일랜드(Mace Head 관측소)에서의 배경농도는 2000년도 초반까지는 한국의 배경지역 농도보다 높았으나, 울릉도에서는 2004년, 제주에서는 2012년 이후 농도 수준이 역전되었고 그 차이는 점차 커지는 추세를 나타내었다. 한국과 유사한 고도에서 측정된 미국 서부 해안 지역의 배경농도는 가장 높았던 2002년에도 한국의 배경대기측정소 보다는 약 4 ppb 정도 낮았고 시간이 지날수록 그 차이가 더욱 벌어지고 있다. 또한, 울릉도에서의 배경농도

는 제주도보다 높은 경향을 보여주었고, 이는 울릉도에 도달하는 기단이 편서풍의 영향으로 한국 내륙을 거침으로써 제주도에 비해 인위적 배출에 의한 추가적인 광화학생성의 영향을 더 받았을 가능성을 제시한다.

울릉도와 제주도의 배경농도는 2023년 약 44 ppb와 51 ppb를 기록하고 있고, 이는 한국 오존 환경기준인 MDA8 60 ppb의 73%와 85% 수준이다. 따라서, 현재 추세대로 지속적으로 증가한다면 Parrish *et al.* (2020)이 주장하는 것처럼 강력한 오존 저감 정책을 시행한다고 하여도 환경기준을 충족하기 어려울 가능성이 있기에 오존 배경농도 저감을 위한 국제적 공동 노력이 필요한 것으로 판단된다.

### 3. 4 한국과 미국 캘리포니아 서부의 ODV (Ozone Design Value)와 배경농도 기여도의 장기 추세 비교

본 절에서는 미국 캘리포니아 지역과 한국 배경지역의 ODV를 비교함으로써, 북반구 중위도 지역에서 최고농도 오존 장기 변동성과 그에 대한 인위적 생성 기여율 변화를 고찰하고자 한다. 비교를 위해, Parrish *et al.* (2022)이 제시한 미국 ODV 회귀 모델의 구조를 기반으로 한국의 ODV 시계열에도 동일한 형태의 모델 적용을 시도하였으나(식 3), 한국에서의 ODV 변동성 경향이 미국과 매우 상이하여(그림 5), 이 방법은 실제 현상을 반영하지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 배경농도를 독립적으로 산출하고, 이를 관측된 ODV와 비교함으로써 인위적 생성과 배경농도의 기여율을 평가하였다(식 4). 이는 Parrish *et al.* (2022)이 fitting 방법을 통해 인위적 생성과 배경농도 기여율을 구분한 방법과 개념적으로는 동일하다.

$$ODV = a + b \cdot t + c \cdot t^2 + A \cdot \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

여기서, 우변의 첫 세 항은 장기적인 배경 오존 농도의 변동성을 나타내며, 마지막 항은 인위적으로 생성된 오존 농도의 변동성을 나타낸다.  $t$ 는 시간 변수로, 기준 연도인 2000년에서  $t=0$ 이며, 단위는 연(year)이다. 계수  $a$ 는 기준 연도( $t=0$ , 2000년)의 연평균 배경 오존 농도를 나타낸다. 계수  $b$ 와  $c$ 는 시간에 따른 배경 오존 농도의 장기 변화 경향을 나타내고, 계수  $A$ 는 기준 연도(2000년)의 인위적 오존 농도 기여도를 의미하며,  $\tau$ 는 인위적 오존 농도가 시간에 따라 얼마나 빠르게 감소해 왔는지를 나타내는 시간 상수이다. 미국에서는 지속적으로 강화된 배출 저감 정책으로 인하여 고농도 오존에 대한 인위적 오존 생성 기여도가 1980년대 이후 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다(Parrish *et al.*, 2022; Parrish *et al.*, 2017).

$$ODV_{anth} = ODV_{obs} - BG \quad (4)$$

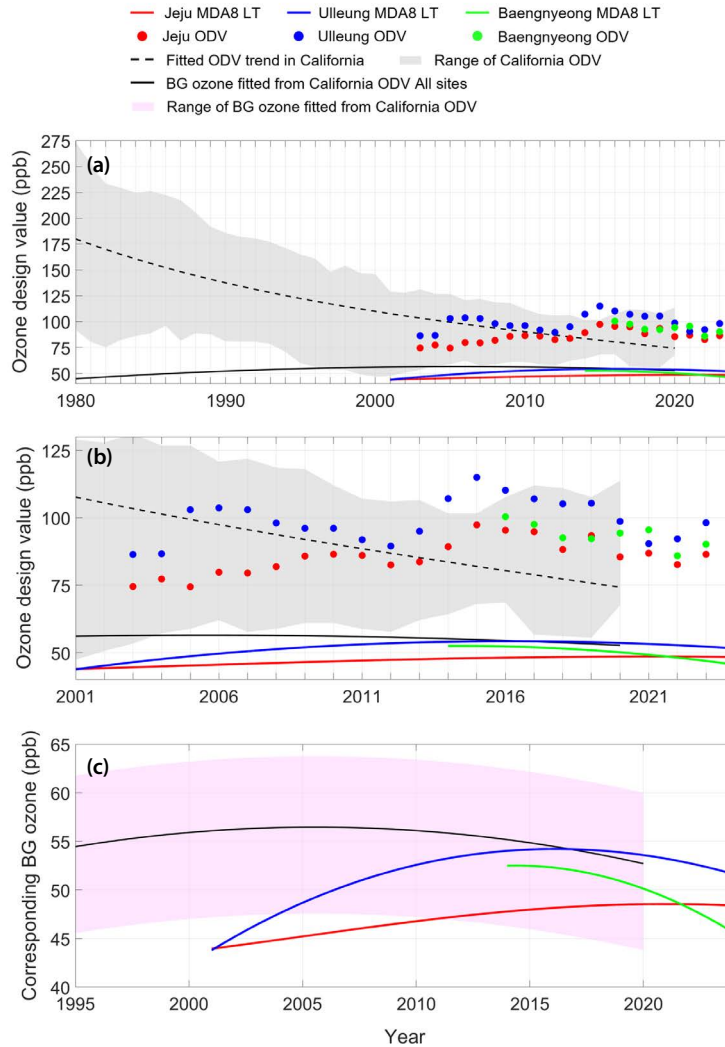
여기서  $ODV_{obs}$ 와  $ODV_{anth}$ 는 각각 ODV 관측값과 인

위적 생성에 의해 발생한 고농도 오존 농도를 의미하고,  $BG$ 는 그 당시의 배경농도를 나타낸다.

ODV는 고농도 오존 노출의 건강과 환경영향을 평가하는 데 특화된 지표로, MDA8의 연중 4번째 고농도의 3년 평균값으로 정의하기 때문에 오존의 농도가 가장 높은 낮 시간 대에 발생할 확률이 매우 높다. 따라서, 이에 포함된 배경농도 역시 광화학 생성이 포함된 일 최고농도를 가질 것으로 예상되며, 이는 앞절에서 사용하였던 일평균 오존 농도 기반의 장기 변동 분석과는 통계적 정의와 해석의 기준이 상이하다. 본 절에서는 ODV 기반 미국 회귀모델과의 비교 적합성을 확보하기 위하여 한국 배경지역의 MDA8 시계열에 EEMD를 적용하여 추출한 장기 변동성을 ODV 발생 기간의 배경농도로 정의하였다.

한국 배경지역에서의 ODV는 2003~2012년 기간에는 미국 서부지역 ODV의 최대-최소 범위 안에 포함되고 평균 ODV 변동성과 유사한 경향과 농도 수준을 보였다. 그러나 미국의 ODV 분포는 그 이후에도 지속적인 감소 추세를 보인 반면, 한국 배경지역의 ODV는 2015년까지 급격히 증가하였다가 미국의 감소 추세와 유사한 속도로 감소하면서 농도 수준은 미국 서부지역의 최대 ODV에 근접할 정도로 증가한 특성을 보였다(그림 5). 2023년에는 한국 배경지역의 ODV가 전년에 비해 다시 증가하여 향후의 변동 경향성의 지속적인 모니터링이 필요하다.

Parrish *et al.* (2022)이 경험적 회귀모형 결과로부터 계산한 미국 서부지역에서 관측된 ODV에 대한 배경농도의 기여율( $BG/ODV_{obs}$ )은 1980년 약 25%에서 2020년 약 70%까지 지속적으로 증가하고 있는 추세를 보였다(그림 6). 그러나, 식 (4)를 통해 한국 배경지역에서 산출한 ODV에 대한 배경농도의 기여율은 2003년 이후 48~60% 사이에서 변화하였으나 전체기간에 대한 변동 경향성은 나타나지 않았다(그림 6). 동일 기간 배경농도의 변동성은 완만하게 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었기 때문에 ODV와 배경농도 기여율의 연도별 변동성은 배경농도의 변화보다는 연도별 기상학적 환경의 단기적 변화와 COVID-19

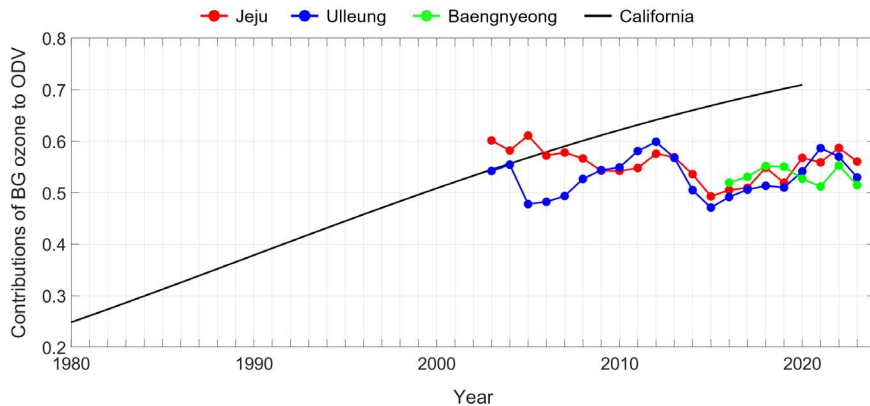


**Fig. 5.** Temporal variations in ODV observed in the west coast regions of California, U.S. (gray shade area indicates the range from max. to min. values adopted from Parrish *et al.*, 2022) and in background regions in Korea (Ulleung: blue dots; Jeju: red dots; Baengnyeong: green dots). (a) Trend for the period 1980~2023, (b) a close view of 2001~2023, and (c) background (BG) concentrations during ODV occurrences (black line with pink shading: California's west coast; blue, red, and green lines: Ulleung, Jeju, and Baengnyeong, respectively).

팬데믹과 같은 사회경제적 환경의 변화에 따른 인위적 생성의 변동성에 의해 야기된 것으로 판단된다. 그러나 이에 대한 세부적인 분석은 본 연구의 주제에서 벗어나 여기서는 다루지 않는다.

연중 상위 1%의 고농도 MDA8인 ODV에서도 배경농도의 기여율은 최근(2022~2023년) 제주도, 울릉

도 그리고 백령도에서는 각각 약 56%, 53% 그리고 51%에 달한다. 이는 비록 미국의 배경농도 기여율 70%보다는 상당히 작으며, 여전히 오존 저감 정책을 통한 인위적 생성의 감소가 필요함을 보여주기도 하지만, 앞절에서 논의한 평균 배경농도의 경우와 유사하게 초고농도 오존 발생 조건에서도 배경농도에 의



**Fig. 6.** Temporal variations in the ratios of background ozone levels to ODV values. The solid line represents results for the California's South Coast Air Basin, adapted from Parrish *et al.* (2022), while the red, blue, and green dotted lines indicate those for Jeju, Ulleung, Baengnyeong, respectively.

해 고강도의 오존 저감 정책의 시행 효과가 반감될 가능성이 있음을 시사한다. 따라서, 평균 오존 농도뿐만 아니라 고농도 오존 발생의 경우에도 국제적 공조를 통한 오존 배경농도의 감소가 개별 국가의 오존 저감 정책의 효율성을 높일 수 있음을 시사한다.

### 3.5 한국 배경지역과 도심지역의 오존 일일 생성강도 장기 변동 특성

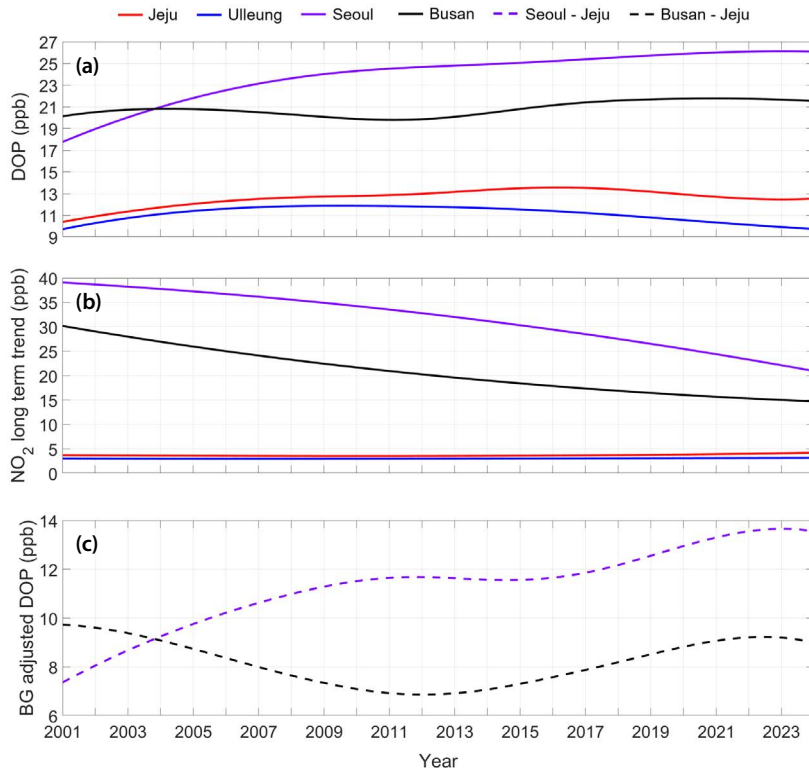
본 연구에서는 낮 기간 오존 생성강도의 장기 변동 특성을 살펴보기 위하여 일일 오존 생성량(DOP; Daily Ozone Production)을 MDA8과 8시간 평균 일최소 농도(MinDA8; Minimum Daily Average 8 hours)의 차이로 정의하였다. 국가배경측정소에서는 지역 내에서 생성된 오존보다 외부로부터 유입된 오존 농도의 기여도가 크다고 가정하면 이는 낮기간 배경농도의 오존 DOP로 볼 수 있다. 따라서, 도심지역 DOP와의 차이를 통해 한국 내에서의 지역적 생성강도를 살펴보았다. 본 연구에서는 이 DOP 지표의 장기 변동성을 분석하고자, 앞선 3.1절의 오존 배경농도 분석과 동일하게 EEMD를 적용하여 DOP 시계열에서 장기 변동 요소를 추출하였다(그림 7).

울릉도와 제주도의 DOP는 각각 2010년과 2016년 이후 점차 감소하는 경향을 보였다. 그러나 서울지역

의 DOP는 2008년까지 급격히 증가하다가 이후 NO<sub>2</sub>의 농도가 감소함에도 불구하고 꾸준히 유지되는 경향을 보였고, 부산지역의 DOP는 NO<sub>2</sub> 농도의 감소 경향에도 불구하고 큰 변동성을 보이지 않았다(표 3; 그림 7a와 b). 이는 도시지역의 오존 생성이 전구물질의 농도와 비선형적인 과정에 의해 발생함을 나타내며 이에 대한 충분한 연구가 수행되어야 함을 제시한다(Karl *et al.*, 2023). 그러나, 이러한 메커니즘 연구는 본 연구 범위를 벗어나기 때문에 향후 연구에서 다루고자 한다.

배경지역(제주)에서의 DOP가 배경환경에서의 오존 생성량을 대표한다고 가정하고 도심지역과 배경지역의 DOP 차이를 도심지역 자체 배출에 의한 오존 생성량으로 정의하였다. 서울 및 인근 풍상지역 배출에 의한 오존 생성량(서울과 제주의 DOP 차이)는 지속적인 증가 추세를 보이고 있는 반면(Sen's slope = 0.29;  $p < 0.001$ ), 부산에서의 DOP는 변동성은 있으나 장기 추세는 큰 변화가 없었다(Sen's slope = 0.005;  $p = 0.001$ )(그림 7b; 표 3). 이러한 도시별 차이는 지역 특성을 고려한 오존 저감 정책의 필요성을 제시한다.

오존 일 평균 농도의 장기 변동은 제주와 울릉도와 같은 배경지역이 도시지역보다 높지만(그림 S3),



**Fig. 7.** (a) Long-term trends of DOP (Daily Ozone Production). (b) Long-term trends of NO<sub>2</sub> concentrations, (c) Differences in DOP long-term trends between urban regions and background region (Jeju).

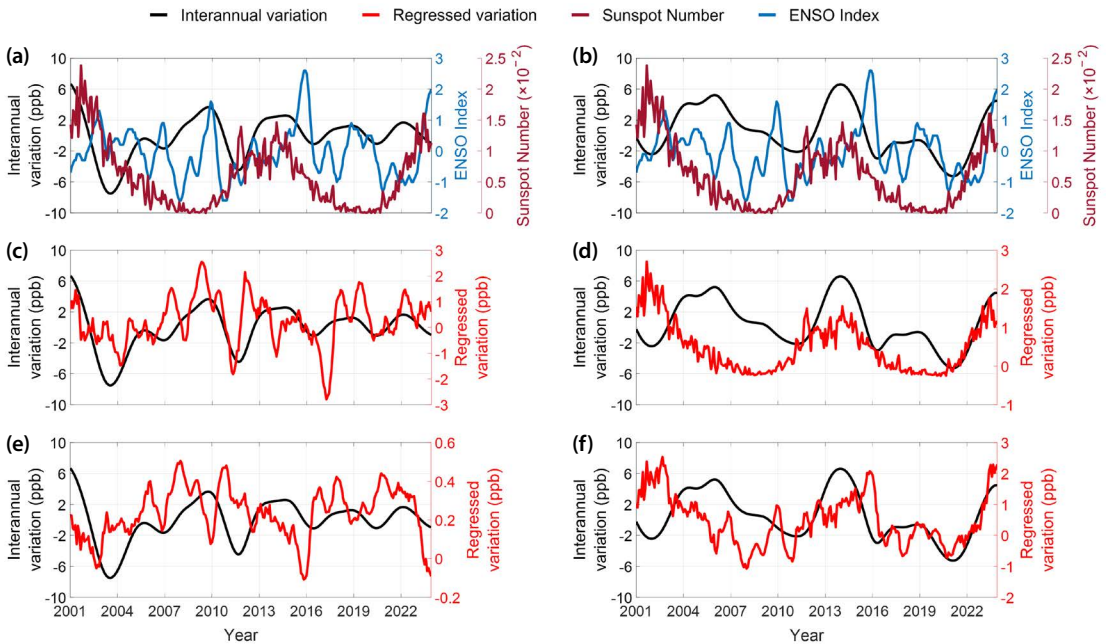
DOP는 도심지역이 배경지역보다 2배 이상 높은 특성을 보여, 전구물질 배출에 의한 지역적 생성 잠재력은 도심지역이 더 큼을 제시한다(그림 7a). 전반적인 DOP의 강도는 서울, 부산, 제주도 그리고 울릉도 순서를 보였고 이 순위는 동일한 EEMD 방법으로 추출한 NO<sub>2</sub> 장기 변동성 농도의 순위와 동일하였다(그림 7a와 b). 이는 높은 NO<sub>2</sub> 농도가 그 지역과 풍하 지역의 오존 생성 잠재력을 강화시킬 수 있음을 제시한다. 이와는 반대로 일 평균 오존 농도는 NO<sub>2</sub> 농도 순위와 역의 상관성을 나타내었다(그림 S3). 일 평균 농도는 야간과 광화학 과정이 활발하지 않고 상대적으로 대기가 안정한 출퇴근 시간을 포함하여 높은 농도의 NO<sub>x</sub>에 의한 Ozone-titration 효과가 크게 반영될 수 있다. 따라서 도심지역에서의 배출 저감 정책에 의한 NO<sub>x</sub> 농도 감소가 도시 내에서 국지적으로는 오

**Table 3.** Results of the Mann-Kendall trend test (MK test) and Sen's slope for the long-term trends of Daily Ozone Production (DOP) at each station. Z is the MK test statistic, and p-value shows the significance level.

Station	Sen's slope (ppb/yr)	Z	p-value
Jeju	0.11	64.17	<0.001
Ulleung	-0.07	-44.41	<0.001
Seoul	0.22	136.43	<0.001
Busan	0.07	57.13	<0.001
Seoul-Jeju*	0.29	137.45	<0.001
Busan-Jeju*	0.005	3.19	0.001

\*Differences in DOP long-term trends between urban stations and background station (Jeju).

히려 평균 오존 농도를 증가시키는데 기여하였을 가능성을 제시한다(Simon *et al.*, 2013; Cohan *et al.*, 2005; Mannschreck *et al.*, 2004). 이러한 결과는 평균



**Fig. 8.** Time series of interannual ozone variations and climate factors (ENSO index and sunspot number) at two background sites from 2001 to 2023. Left panels (a, c, and e) show results for Jeju, and right panels (b, d, and f) for Ulleung. (a) and (b) present the interannual ozone variation (black), ENSO index (blue), and sunspot number divided by 100 (dark red). (c) and (d) compare the interannual ozone variation (black) with regression results (red) using a 17-month time lag. (e) and (f) show the same comparison without time lag (lag 0).

오존과 고농도 오존 환경에서, 그리고 NO<sub>x</sub> 고배출 지역과 그 풍하지역에서 NO<sub>x</sub>의 영향이 다르게 나타날 수 있으며 (Marshall *et al.*, 2008), 정책 수립 방향에 이러한 점이 고려되어야 함을 제시한다.

### 3.6 경년 기후 변동성이 중규모 오존 농도 변동성에 미치는 영향

EEMD를 이용하여 계절 변동성과 단기 변동성을 제거한 장기 변동성을 분석한 해외의 선행연구(예, Kalsoom *et al.*, 2021; Boleti *et al.*, 2018)와 동일한 기준을 한국 배경지역에서의 오존 시계열에 적용하면, 장기 변동성 내에 보다 짧은 주기의 변동성이 포함되어 선행연구에 비해 상당히 복잡한 형태를 나타내었다. 장기 경향 내의 이러한 변동성은 주기가 약 5~8년 정도를 가지는 것으로 판단되어(그림 A1), 본 연구에서는 이러한 주기의 변동성을 장기 변동성으로

부터 분류하여 경년 변동성으로 정의하였다. 이러한 주기의 변동성은 자연적 기후요인(예, 엘니뇨와 태양 흑점 변동성)과 유사한 주기를 가지는 것으로 보이며, 선행연구에서는 ENSO지수와 태양활동이 오존 농도에 미치는 영향을 보고한 바 있다(Jeong *et al.*, 2023; Wie *et al.*, 2021; Ziemke *et al.*, 2010; Angell, 1989).

울릉도와 제주도에서의 경년 변동성은 2011~2020년 기간에는 규모는 다르지만 변동 추이는 유사하였으나 그 외의 기간에는 일치하지 않았다(그림 8a와 b). 이러한 차이는 울릉도와 제주도의 경년 변동성에 영향을 주는 주요 인자가 다르기 때문일 가능성이 있다. 2011~2018년 기간에는 태양 흑점 개수가 증가한 기간이었고 울릉도에서는 이와 유사한 강한 경년 변동의 증감이 나타났다(그림 8b). 제주에서도 같은 기간 유사한 경년 변동성이 나타났지만 울릉도에 비해

**Table 4.** Time-lag-dependent changes (0~17 months) in standardized regression coefficients and relative contributions of ENSO index and sunspot number to overall R<sup>2</sup> values for interannual ozone variations obtained with multiple linear regression.

Lag (month)	Jeju					Ulleung				
	Coefficients		Contribution to R <sup>2</sup>		R <sup>2</sup>	Coefficients		Contribution to R <sup>2</sup>		R <sup>2</sup>
	ENSO index	Sunspot number	ENSO index	Sunspot number		ENSO index	Sunspot number	ENSO index	Sunspot number	
0	-0.09	-0.05	64.2%	22.2%	0.11	<b>-0.01</b>	<b>0.21</b>	<b>0.1%</b>	<b>88.5%</b>	<b>0.26</b>
2	-0.11	-0.05	74.2%	17.0%	0.13	-0.01	0.21	0.1%	88.5%	0.25
4	-0.18	-0.07	87.9%	13.4%	0.19	-0.01	0.21	0.1%	88.5%	0.22
6	-0.22	-0.09	91.6%	14.1%	0.23	0.02	0.22	1.2%	100.0%	0.21
8	-0.26	-0.11	93.8%	15.9%	0.27	-0.00	0.21	0.0%	97.6%	0.21
10	-0.31	-0.13	95.4%	18.2%	0.31	-0.01	0.21	0.2%	93.0%	0.21
12	-0.36	-0.16	96.5%	19.4%	0.35	-0.01	0.21	0.1%	88.0%	0.21
14	-0.41	-0.19	97.2%	20.5%	0.39	-0.01	0.21	0.1%	89.0%	0.21
17	<b>-0.43</b>	<b>-0.20</b>	<b>97.5%</b>	<b>21.2%</b>	<b>0.41</b>	-0.01	0.21	0.1%	88.5%	0.21

\*Correlation coefficient between multiple regression results and interannual variability

뚜렷하지는 않았다(그림 8a). 또한 흑점 개수가 다시 증가하기 시작한 2022년 이후 울릉도에서는 이를 반영하여 증가하는 경년 변동성을 보였으나 제주에서는 이러한 패턴이 나타나지 않았다. 반면, 제주에서의 경년 변동성은 흑점 활동이 약했던 시기(2006~2012와 2016~2022)에 ENSO 지수(Niño 3.4)의 변동에 따라 음의 ENSO 지수(라니냐) 발생기에는 농도가 상승하고 양의 ENSO 지수(엘리뇨) 발생기에는 농도가 감소하는 패턴이 발생한 것으로 보인다(그림 8a). 이러한 패턴은 Jeong *et al.* (2023)에서 제시한 포항과 일본 츠크바의 오존 존데 측정 결과와도 일치한다. 또한, Jeong *et al.* (2023)의 모델 결과에서도 엘리뇨와 라니냐 기간 지표 오존 농도의 차이가 울릉도와 제주도에서 다른 패턴으로 나타날 수 있음을 암시한다(예, Jeong *et al.* (2023)의 그림 5).

이를 통계적으로 확인하고자 ENSO index와 흑점 개수를 입력변수로 경년 변동성 오존 농도를 설명하기 위한 다변량선형회기(multivariate linear regression)를 적용하였다. 선행연구에서 ENSO 지수가 오존 컬럼농도에 4~6개월의 시간 지연으로 영향을 주는 것으로 제시하였기 때문에(Wie *et al.*, 2021; Olsen *et al.*, 2019), 이를 고려하여 ENSO 지수에 시간 지연

을 0~17개월까지 적용하였고, 흑점 개수는 광화학 과정에 영향을 주는 것으로 판단하여 시간 지연 없이 적용하였다. 지연 시간을 17개월까지 연장한 이유는 제주에서 17개월의 시간 지연을 적용하였을 때, 공분산이 가장 크게 계산되었기 때문이다.

울릉도에서는 흑점 개수의 영향이 지배적이어서 ENSO 지수의 시간 지연 변동의 영향이 크지 않았고(표 4), 흑점 개수와 양의 상관성을 나타내었다. 그러나 제주에서는 전체 분석기간에 대해서는 흑점 개수보다는 ENSO 지수의 영향이 더 지배적이었고 그에 따라 ENSO 지수의 시간 지연이 증가할수록 다변량 선형회귀 결과가 개선되는 특징을 보였다. ENSO 지수와 오존 경년 변동성은 음의 상관성을 보여 엘리뇨 기간(양의 ENSO 지수)은 음의 경년 변동성 농도를 라니냐 기간(음의 ENSO 지수)은 양의 경년 변동성 농도와 연관이 있음을 제시한다. 이는 선행연구 결과와도 일관성을 보인다(Jeong *et al.*, 2023; Wie *et al.*, 2021). 제주도에서의 회귀분석에서 흥미로운 결과는 ENSO 지수의 시간 지연을 약 6개월 정도까지 적용하였을 때는 두드러진 변동성을 보이지 않다가 그보다 긴 시간 지연 이후로 회귀된 경년 변동성이 커지면서 15~17개월의 시간 지연을 고려하였을 때 관측

자료의 경년 변동성을 반영하는 것으로 보인다는 점이다. 선행연구에서는 3~6개월의 시간 지연을 제시하였는데(Jeong *et al.*, 2023; Wie *et al.*, 2021), 본 연구에서는 이보다 더 지속적인 영향을 미칠 수 있음을 제시한다. 또한, 제주에서는 흑점 개수의 영향이 ENSO 지수에 비해 약하기는 하지만 예상과 달리 오히려 음의 상관성을 나타내었다. 이는 흑점활동이 활발한 기간에는 ENSO 지수와 흑점 개수 영향을 동시에 받지만 전체기간의 약 절반인 흑점 활동이 약한 기간에는 울릉도에 비해 ENSO 지수의 영향을 강하게 받아 큰 변동성을 보였고, 이 시기의 영향이 전체 회귀분석 결과에 크게 영향을 주었기 때문인 것으로 판단된다.

본 분석은 기후변동성이 오존 농도의 경년 변동성에 미치는 영향에 대한 파일럿 분석으로 본 연구의 핵심 목표는 아니지만, 선행연구 결과처럼(Wie *et al.*, 2021; Olsen *et al.*, 2019) 경년 변동성 내에서 기후요인과의 통계적 연관성이 관찰되었다는 점은 향후 오존 변화의 원인을 보다 정밀하게 이해하는 데 중요한 단서를 제공할 수 있다. 그러나, 경년 변동성에도 중국 및 국내의 인위적 배출 변화, 기온 상승과 같은 장기적 기후 트렌드, 국지적 기상 조건 등의 다양한 요인이 복합적으로 작용할 수 있으므로, ENSO나 태양 흑점 활동만으로 이를 전적으로 설명하기에는 한계가 있을 수 있다. 그럼에도 불구하고, 본 결과는 효과적인 오존 저감 정책 수립을 위해 중기적 기후 변동성이 지상의 오존 농도에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요함을 제시한다.

#### 4. 결 론

본 연구는 EEMD 기법을 활용하여 한국 배경지역(제주도와 울릉도)의 오존 장기 변동 특성을 분석하고, 이를 미국 서부 해안지역과 비교함으로써 배경 오존의 증가가 고농도 오존 관리에 미칠 수 있는 영향을 고찰하였다. 제주와 울릉도의 배경농도는 각각

0.26 ppb/yr 및 0.51 ppb/yr의 증가 추세를 보였으며, 이는 미국 서부 해안의 지속적인 감소 추세(-0.29 ppb/yr)와 대조적이다. 이처럼 상반된 경향은 한국이 아시아 대륙의 풍하측에 위치하여 인위적 영향이 상대적으로 더 직접적으로 반영된 결과일 수 있다.

2023년 기준 제주와 울릉도의 배경농도는 각각 51 ppb와 44 ppb로, 환경기준(MDA8 60 ppb)의 85%와 73% 수준이다. 이는 현재 추세의 배경농도 상승이 지속될 경우, 강력한 국내 저감정책만으로는 환경기준 충족이 어려울 수도 있음을 시사하며, Parrish *et al.* (2022, 2020)이 제안한 것처럼 국제적 공조를 통한 배경농도 저감이 필요함을 강조한다. 또한, 미국 캘리포니아 지역에서는 ODV에 대한 배경농도 기여율이 1980년 약 25%에서 2020년 약 70%까지 꾸준히 증가한 반면, 한국 배경지역에서는 2003년 이후 약 48~60% 수준에서 정체되어 있다. 이는 한국 배경지역에서 인위적 배출의 영향이 여전히 크게 작용하고 있지만, 고농도 오존 관리에 있어 배경 농도 상승이 구조적인 제약으로 작용할 수 있음을 시사한다. 따라서 한국에서는 배경 오존과 인위적 오존을 모두 포괄하는 통합적 관리 전략의 수립과 더불어, 국외 유입 영향을 고려한 국제적 협력 또한 중요함을 강조한다.

일 평균 오존 농도의 장기 변동은 제주와 울릉도에서 서울과 부산 같은 대도시보다 높았으며, 이는 밀집된 도로망을 갖춘 대도시에서는 신규 NO<sub>x</sub> 배출에 의한 오존의 화학적 제거가 국지적 평균 농도에 기여하였음을 제시한다(Han *et al.*, 2013; Cohan *et al.*, 2005; Mannschreck *et al.*, 2004). 그러나 일일 오존 생성량(DOP)은 도시지역이 배경지역에 비하여 2배 이상 높았으며, 이는 도시지역에서의 NO<sub>x</sub> 배출이 국지적으로는 오존 농도 증가를 억제할 수 있지만 인근 풍하지역의 오존 생성을 강화시킬 수 있음을 시사한다.

오존의 경년 변동성은 약 5~8년의 주기를 가지는 것으로 판단되어 이와 유사한 주기의 기후 변동성(ENSO 지수와 흑점 수)의 영향에 대한 파일럿 분석을 수행하였다. 두 기후 요인의 영향은 제주와 울릉

도에서 다르게 작용하는 것으로 판단된다. 제주에서의 경년 변동성은 태양활동이 약할 때, ENSO 지수에 상대적으로 강하게 반응하는 반면(라니냐 발생기에 양의 경년 변동성 및 엘니뇨 발생기에 음의 경년 변동성), 울릉도에서는 ENSO 지수보다는 태양활동이 더 강하게 작용하는 것으로 보인다. 이는 울릉도에서 풍상지역인 한국을 포함한 아시아 대륙의 인위적 배출 영향이 더 강하게 작용하였을 가능성을 제시한다. 본 연구 결과는 장기적인 오존 관리 전략 수립 시 이러한 기후요인의 영향을 함께 고려할 필요가 있으며 이를 위해 기후-오존 상호작용에 대한 추가 연구가 필요함을 제시한다.

결론적으로, 한국에서는 아직 인위적 배출 저감을 통한 오존 저감 정책이 요구되지만 일 평균 농도와 MDA8의 관점에서는 이미 배경 농도의 기여도가 상당하며, 현재와 같은 배경농도의 증가 추세가 지속된다면 정책 효과가 반감될 수 있기 때문에 Parrish *et al.* (2022)이 제시한 것처럼 배경농도 저감을 위한 국제적 공조 역시 요구된다. 또한, 급변할 것으로 예상되는 기후 변동성이 오존 농도 변동에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구도 필요한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원께 감사를 드립니다. 본 연구에서 사용한 오존 농도는 한국환경공단의 에어코리아([www.airkorea.or.kr](http://www.airkorea.or.kr))에서 제공받았기에 이에 감사드립니다. 본 연구는 2022/2023학년도 국립부경대학교 연구년 교수 지원사업을 통하여 수행되었습니다.

## References

- Angell, J.K. (1989) On the relation between atmospheric ozone and sunspot number, *Journal of Climate*, 2(11), 1404-1416. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<1404:OTRBAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<1404:OTRBAO>2.0.CO;2)
- Bak, J., Song, E.J., Lee, H.J., Liu, X., Koo, J.H., Kim, J., Jeon, W., Kim, J.H., Kim, C.H. (2022) Temporal variability of tropospheric ozone and ozone profiles in the Korean Peninsula during the East Asian summer monsoon: insights from multiple measurements and reanalysis datasets, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(21), 14177-14187. <https://doi.org/10.5194/acp-22-14177-2022>
- Bell, M.L., Peng, R.D., Dominici, F. (2006) The exposure-response curve for ozone and risk of mortality and the adequacy of current ozone regulations, *Environmental Health Perspectives*, 114(4), 532-536. <https://doi.org/10.1289/ehp.8816>
- Boleti, E., Hueglin, C., Takahama, S. (2018) Ozone time scale decomposition and trend assessment from surface observations in Switzerland, *Atmospheric Environment*, 191, 440-451. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.039>
- Chang, K.L., Petropavlovskikh, I., Cooper, O.R., Schultz, M.G., Wang, T. (2017) Regional trend analysis of surface ozone observations from monitoring networks in eastern North America, Europe and East Asia, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 5, 50. <https://doi.org/10.1525/elementa.243>
- Christensen, J.N., Weiss-Penzias, P., Fine, R., McDade, C.E., Trzepla, K., Brown, S.T., Gustin, M.S. (2015) Unraveling the sources of ground level ozone in the Intermountain Western United States using Pb isotopes, *Science of The Total Environment*, 530-531, 519-525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.054>
- Cohan, D.S., Hakami, A., Hu, Y., Russell, A.G. (2005) Nonlinear response of ozone to emissions: source apportionment and sensitivity analysis, *Environmental Science & Technology*, 39(17), 6739-6748. <https://doi.org/10.1021/es048664m>
- Collins, W.J., Derwent, R.G., Garnier, B., Johnson, C.E., Sanderson, M.G., Stevenson, D.S. (2003) Effect of stratosphere-troposphere exchange on the future tropospheric ozone trend, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D12), 8528. <https://doi.org/10.1029/2002JD002617>
- European Environment Agency (EEA) (2016) Air quality in Europe-2016 report. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-in-europe-2016> (accessed on June 17, 2025).
- Feng, Z., Kobayashi, K., Ainsworth, E.A. (2008) Impact of elevated ozone concentration on growth, physiology, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): a meta-analy-

- sis, *Global Change Biology*, 14(11), 2696-2708. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01673.x>
- Fiore, A.M., Jacob, D.J., Logan, J.A., Yin, J.H. (1998) Long-term trends in ground level ozone over the contiguous United States, 1980-1995, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D1), 1471-1480. <https://doi.org/10.1029/97JD03036>
- Fiore, A.M., Naik, V., Leibensperger, E.M. (2015) Air quality and climate connections, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(6), 645-685. <https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1040526>
- Gaudel, A., Cooper, O.R., Ancellet, G., Barret, B., Boynard, A., Burrows, J.P., Clerbaux, C., Coheur, P.F., Cuesta, J., Cuevas, E., Doniki, S., Dufour, G., Ebojje, F., Foret, G., Garcia, O.E., Granados-Muñoz, M.J., Hannigan, J.W., Hase, F., Huang, G., Hurtmans, D., Kalabokas, P., Kerridge, B., Kulawik, S.S., Latter, B., Leblanc, T., Le Flochmoën, E., Lin, W., Liu, J., Liu, X., Mahieu, E., McClure-Begley, A., Neu, J.L., Osman, M., Palm, M., Petropavlovskikh, I., Querel, R., Rahpoe, N., Rozanov, A., Schultz, M.G., Schwab, J., Siddans, R., Smale, D., Steinbacher, M., Tanimoto, H., Tarasick, D., Thouret, V., Thompson, A.M., Trickl, T., Weatherhead, E.C., Wespes, C., Worden, H.M., Vigouroux, C., Xu, X., Zeng, G., Ziemke, J.R. (2018) Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day distribution and trends of tropospheric ozone relevant to climate and air quality, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6(1), 39. <https://doi.org/10.1525/elementa.291>
- Hadiyoso, S., Giao, M., Chang, L., Zhou, Z. (2020) Comparison of EMD, VMD and EEMD methods in respiration wave extraction based on PPG waves, *Journal of Physics: Conference Series*, 1577, 012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1577/1/012040>
- Han, J., Kim, H., Lee, M., Kim, S., Kim, S. (2013) Photochemical air pollution of Seoul in the last three decades. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 389-404, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.4.390>
- Han, H., Liu, J., Yuan, H., Wang, T., Zhuang, B., Zhang, X. (2019) Foreign influences on tropospheric ozone over East Asia through global atmospheric transport, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(18), 12495-12514. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12495-2019>
- Hirsch, R.M., Slack, J.R., Smith, R.A. (1982) Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research*, 18(1), 107-121. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p0107>
- Hong, S.O., Song, S.K. (2022) Analysis of long-term variation trends of ozone in the past 20 years and recent high concentration cases on Jeju Island, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(1), 138-158. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.1.138>
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C., Liu, H.H. (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903-995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- Huang, Y., Liu, S., Yang, L. (2018) Wind speed forecasting method using EEMD and the combination forecasting method based on GPR and LSTM, *Sustainability*, 10(10), 3693. <https://doi.org/10.3390/su10103693>
- Jeong, Y., Kim, S.W., Kim, J., Shin, D., Kim, J., Park, J.H., An, S.I. (2023) Influence of ENSO on tropospheric ozone variability in East Asia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2023JD038604. <https://doi.org/10.1029/2023JD038604>
- Jerrett, M., Burnett, R.T., Pope, C.A. III, Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., Shi, Y., Calle, E., Thun, M. (2009) Long-term ozone exposure and mortality, *New England Journal of Medicine*, 360(11), 1085-1095. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa0803894>
- Jin, T., Li, Q., Mohamed, M.A. (2019) A Novel Adaptive EEMD Method for Switchgear Partial Discharge Signal Denoising, *IEEE Access*, 7, 58139-58147. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2914064>
- Kalsoom, U., Wang, T., Ma, C., Shu, L., Huang, C., Gao, L. (2021) Quadrennial variability and trends of surface ozone across China during 2015-2018: a regional approach, *Atmospheric Environment*, 245, 117989. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117989>
- Karl, T., Lamprecht, C., Graus, M., Cede, A., Tiefengraber, M., Vila-Guerau de Arellano, J., Gurarie, D., Lenschow, D. (2023) High urban NO<sub>x</sub> triggers a substantial chemical downward flux of ozone, *Science Advances*, 9(3), eadd2365. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add2365>
- Kendall, M.G. (1948) *Rank Correlation Methods*, Charles Griffin and Co., London, 160 pp.
- Lal, S., Naja, M., Subbaraya, B.H. (2000) Seasonal variations in surface ozone and its precursors over an urban site in India, *Atmospheric Environment*, 34(17), 2713-2724. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00510-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00510-5)
- Lee, G.B. (2015) Data-driven signal decomposition using improved ensemble EMD method, *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 19(2), 279-286, (in Korean with English

- abstract). <https://doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.2.279>
- Lee, G., Park, J.H., Kim, D.G., Koh, M.S., Lee, M., Han, J.S., Kim, J.C. (2020) Current status and future directions of tropospheric photochemical ozone studies in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 419-441, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.419>
- Lee, H.J., Chang, L.S., Jaffe, D.A., Bak, J., Liu, X., González Abad, G., Jo, H.Y., Jo, Y.J., Lee, J.B., Kim, C.H. (2021) Ozone continues to increase in East Asia despite decreasing NO<sub>2</sub>: causes and abatements, *Remote Sensing*, 13(11), 2177. <https://doi.org/10.3390/rs13112177>
- Li, K., Jacob, D.J., Liao, H., Zhu, J., Shah, V., Shen, L., Bates, K.H., Zhang, Q., Zhai, S. (2019) A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate air quality in China, *Nature Geoscience*, 12, 906-910. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0464-x>
- Lin, M., Fiore, A.M., Horowitz, L.W., Cooper, O.R., Naik, V., Holloway, J., Johnson, B.J., Middlebrook, A.M., Oltmans, S.J., Pollack, I.B., Ryerson, T.B., Warner, J.X., Wiedinmyer, C., Wilson, J., Wyman, B. (2012) Transport of Asian ozone pollution into surface air over the western United States in spring, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D00V07. <https://doi.org/10.1029/2011JD016961>
- Lin, M., Horowitz, L.W., Payton, R., Fiore, A.M., Tonnesen, G. (2017) US surface ozone trends and extremes from 1980-2014: quantifying the roles of rising Asian emissions, domestic controls, wildfires, and climate, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(4), 2943-2970. <https://doi.org/10.5194/acp-17-2943-2017>
- Mann, H.B. (1945) Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mannschreck, K., Gilge, S., Plass-Duelmer, C., Fricke, W., Berresheim, H. (2004) Assessment of the applicability of NO-NO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub> photostationary state to long-term measurements at the Hohenpeissenberg GAW station, Germany, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(5), 1265-1277. <https://doi.org/10.5194/acp-4-1265-2004>
- Marshall, J.D., Nethery, E., Brauer, M. (2008) Within-urban variability in ambient air pollution: Comparison of estimation methods, *Atmospheric Environment*, 42(6), 1359-1369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.012>
- Mijling, B., van der A, R.J., Zhang, Q. (2013) Regional nitrogen oxides emission trends in East Asia observed from space, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(23), 12003-12012. <https://doi.org/10.5194/acp-13-12003-2013>
- Monks, P.S., Archibald, A.T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K.S., Mills, G.E., Stevenson, D.S., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidmesser, E., Sommariva, R., Wild, O., Williams, M.L. (2015) Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(15), 8889-8973. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>
- Nopmongcol, U., Jung, J., Kumar, N., Yarwood, G. (2016) Changes in US background ozone due to global anthropogenic emissions from 1970 to 2020, *Atmospheric Environment*, 140, 200-209. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.026>
- Olsen, M.A., Manney, G.L., Liu, J. (2019) The ENSO and QBO impact on ozone variability and stratosphere-troposphere exchange relative to the subtropical jets, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(13), 7379-7392. <https://doi.org/10.1029/2019JD030435>
- Parrish, D.D., Young, L.M., Newman, M.H., Aikin, K.C., Ryerson, T.B. (2017) Ozone design values in Southern California's air basins: temporal evolution and U.S. background contribution, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(19), 11166-11182. <https://doi.org/10.1002/2016JD026329>
- Parrish, D.D., Derwent, R.G., Steinbrecht, W., Stübi, R., Van Malderen, R., Steinbacher, M., Trickl, T., Ries, L., Xu, X. (2020) Zonal similarity of long-term changes and seasonal cycles of baseline ozone at northern mid-latitudes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(13), e2019JD031908. <https://doi.org/10.1029/2019JD031908>
- Parrish, D.D., Faloona, I.C., Derwent, R.G. (2022) Observational-based assessment of contributions to maximum ozone concentrations in the western United States, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 72(5), 434-454. <https://doi.org/10.1080/10962247.2022.2050962>
- Sen, P.K. (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Simon, H., Baker, K.R., Akhtar, F., Napelenok, S.L., Possiel, N., Wells, B., Timin, B. (2013) A direct sensitivity approach to predict hourly ozone resulting from compliance with the National Ambient Air Quality Standard, *Environmental Science & Technology*, 47(5), 2304-

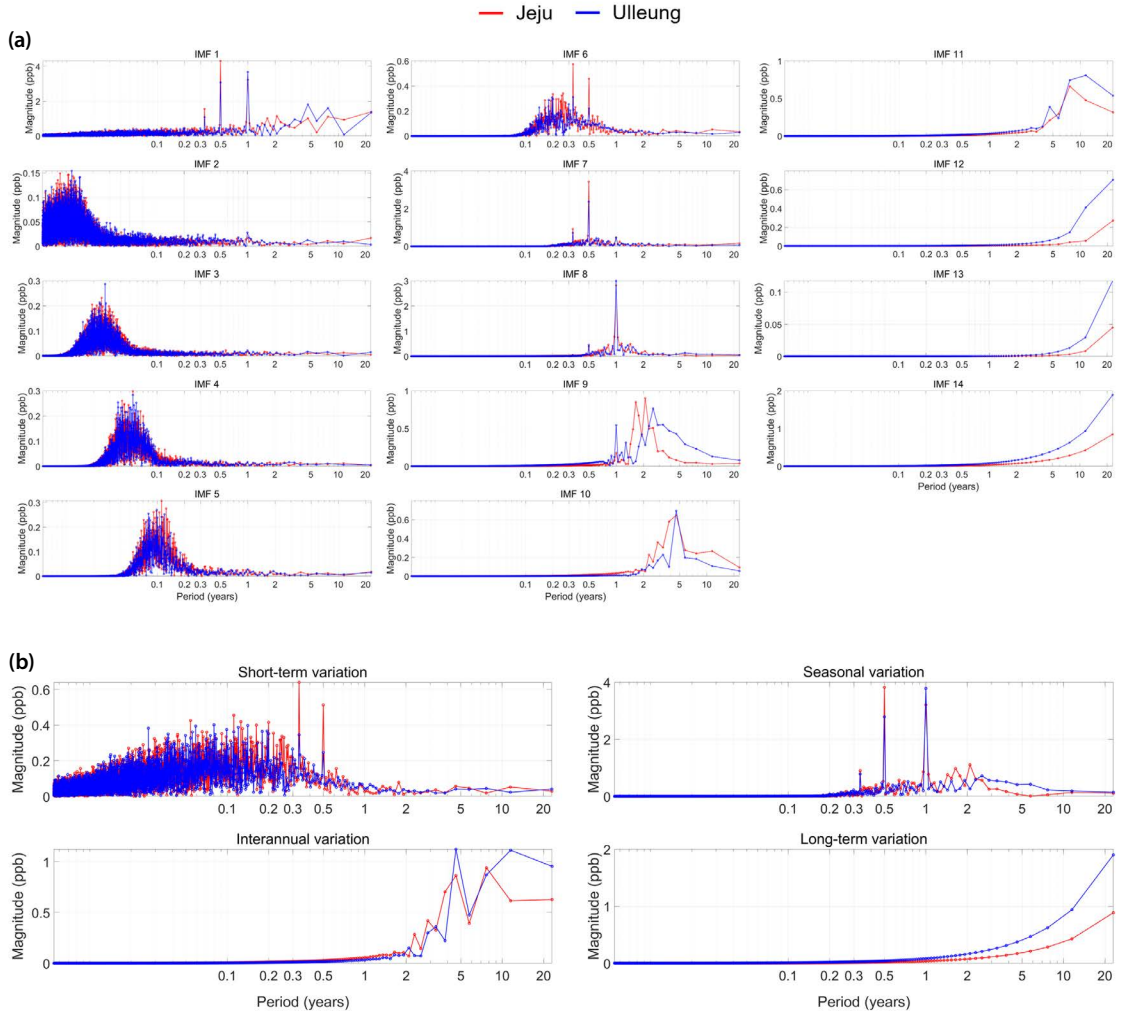
2313. <https://doi.org/10.1021/es303674e>
- Stevenson, D.S., Dentener, F.J., Schultz, M.G., Ellingsen, K., van Noije, T.P.C., Wild, O., Zeng, G., Amann, M., Atherton, C.S., Bell, N., Bergmann, D.J., Bey, I., Butler, T., Cofala, J., Collins, W.J., Derwent, R.G., Doherty, R.M., Drevet, J., Eskes, H.J., Fiore, A.M., Gauss, M., Hauglustaine, D.A., Horowitz, L.W., Isaksen, I.S.A., Krol, M.C., Lamarque, J.F., Lawrence, M.G., Montanaro, V., Müller, J.F., Pitari, G., Prather, M.J., Pyle, J.A., Rast, S., Rodriguez, J.M., Sanderson, M.G., Savage, N.H., Shindell, D.T., Strahan, S.E., Sudo, K., Szopa, S., van Dingenen, R. (2006) Multi-model ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D8), D08301. <https://doi.org/10.1029/2005JD006338>
- Vingarzan, R. (2004) A review of surface ozone background levels and trends, *Atmospheric Environment*, 38(21), 3431-3442. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.030>
- Wang, T., Zhang, M., Yu, Q., Zhang, H. (2012) Comparing the applications of EMD and EEMD on time-frequency analysis of seismic signal, *Journal of Applied Geophysics*, 83, 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.05.002>
- Wie, J., Moon, B.K., Yeh, S.W., Park, R.J., Kim, B.G. (2021) La Niña-related tropospheric column ozone enhancement over East Asia, *Atmospheric Environment*, 261, 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118575>
- World Meteorological Organization (WMO) (2024) World Weather Information Service (WWIS), <https://world-weather.wmo.int> (accessed on June 17, 2025).
- Wu, Z., Huang, N.E. (2009) Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(1), 1-41. <https://doi.org/10.1142/S1793536909000047>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2021) Long-term trends of surface ozone in Korea, *Journal of Cleaner Production*, 294, 125352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125352>
- Young, P.J., Archibald, A.T., Bowman, K.W., Lamarque, J.-F., Naik, V., Stevenson, D.S., Tilmes, S., Voulgarakis, A., Wild, O., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Cionni, I., Collins, W.J., Dalsøren, S.B., Doherty, R.M., Eyring, V., Faluvegi, G., Horowitz, L.W., Josse, B., Lee, Y.H., MacKenzie, I.A., Nagashima, T., Plummer, D.A., Righi, M., Rumbold, S.T., Skeie, R.B., Shindell, D.T., Strode, S.A., Sudo, K., Szopa, S., Zeng, G. (2013) Pre-industrial to end 21st century projections of tropospheric ozone from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Inter-comparison Project (ACCMIP), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(4), 2063-2090. <https://doi.org/10.5194/acp-13-2063-2013>
- Zhang, L., Jacob, D.J., Boersma, K.F., Jaffe, D.A., Olson, J.R., Bowman, K.W., Worden, J.R., Thompson, A.M., Avery, M.A., Cohen, R.C., Dibb, J.E., Flock, F.M., Fuelberg, H.E., Huey, L.G., McMillan, W.W., Singh, H.B., Weinheimer, A.J. (2008) Transpacific transport of ozone pollution and the effect of recent Asian emission increases on air quality in North America: an integrated analysis using satellite, aircraft, ozonesonde, and surface observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 6117-6136. <https://doi.org/10.5194/acp-8-6117-2008>
- Ziemke, J.R., Chandra, S., Oman, L.D., Bhartia, P.K. (2010) A new ENSO index derived from satellite measurements of column ozone, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(8), 3711-3721. <https://doi.org/10.5194/acp-10-3711-2010>

## Authors Information

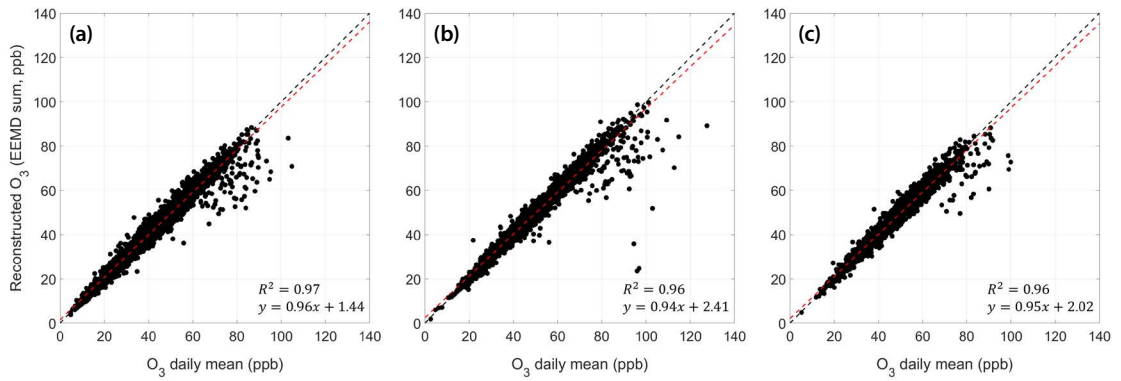
이준영 (국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학 전공 석사과정 학생) ([sun06270@pukyong.ac.kr](mailto:sun06270@pukyong.ac.kr))

최원식 (국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학 전공 교수) ([wschoi@pknu.ac.kr](mailto:wschoi@pknu.ac.kr))

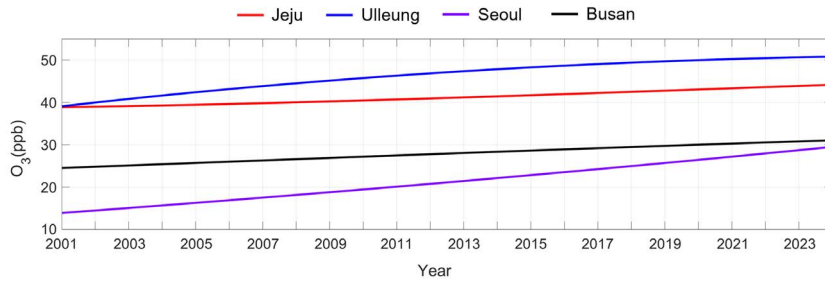
## Supplementary Materials



**Fig. S1.** (a) Magnitude spectra of the 13 IMF components (IMF 2–14) decomposed from monthly mean ozone concentrations at Jeju (red) and Ulleung (blue) using EEMD, calculated by fast Fourier transform. IMF 1 represents the original daily mean ozone data before decomposition. (b) Magnitude spectra of the recombined components classified into short-term (combined IMF 2–6), seasonal (combined IMF 7–9), interannual (combined IMF 10–12) and long-term (combined IMF 13–14) variations.



**Fig. S2.** Scatter plots comparing the daily mean ozone concentrations (x-axis) and the reconstructed ozone from EEMD components (y-axis) at (a) Jeju, (b) Ulleung, and (c) Baengnyeong. The black dashed line indicates the 1 : 1 line and the red dashed line represents the linear regression.



**Fig. S3.** Long-term components of daily mean ozone concentrations, decomposed using the EEMD method in four regions: Seoul (purple), Busan (black), Jeju (red), Ulleung (blue).