

논문

수도권 오존 증가에 기상 변수가 미치는 영향

Impact of Recent Meteorological Changes on Surface Ozone Increases in Seoul Metropolitan Area

이해인, 박록진*, 정재인

서울대학교 지구환경과학부

Haein Lee, Rokjin Park*, Jaein Jeong

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2024년 8월 2일
수정일 2024년 8월 7일
채택일 2024년 8월 7일

Received 2 August 2024
Revised 7 August 2024
Accepted 7 August 2024

*Corresponding author
Tel : +82-(0)2-880-6715
E-mail : rjpark@snu.ac.kr

Abstract Surface ozone concentrations in the Seoul Metropolitan Area (SMA) have persistently increased over the past two decades (2003~2022), especially during the ozone season. This study examines the meteorological drivers behind this trend using long-term observations and a Random Forest model. We analyzed annual trends of meteorological factors at three Automated Synoptic Observing Systems (ASOS) stations (Seoul, Suwon, Incheon) and observed a steady increase in insolation by 0.8% per year, with less significant changes in temperature and relative humidity. Analysis of the ozone data reveals that observed increasing trends remained generally similar among stations, implying shared major drivers influencing these trends. Correlation analyses between meteorological factors and maximum daily 8-hour average (MDA8) ozone anomalies indicated that insolation, sun duration, and temperature had positive associations, whereas relative humidity and cloud fraction showed negative correlations. Insolation emerged as the most influential factor, followed by temperature and relative humidity. We used the Random Forest model to calculate the contributions of meteorological variables to ozone changes. The model explained 69% of the observed variance in surface ozone, with predictions closely tracking observed median values. Meteorological factors, particularly increasing insolation, were significant drivers of the ozone increase in the SMA. Further investigations into the rising trend of insolation and the natural and anthropogenic factors contributing to this increase are necessary for understanding various aspects of photochemical air pollution and developing practical policies for air quality management.

Key words: Surface ozone, Random Forest model, Meteorological impact

1. 서론

지표 오존(O₃)은 폐를 손상시키고 호흡기 감염을 유발하며, 대사 장애를 일으키는 대기오염물질이다 (Silva *et al.*, 2013; Burnett *et al.*, 1997). 특히, 고농도 오존의 장기간 노출은 만성질환을 유발하거나 심지어 사망으로 이어질 수 있으며, 매년 백만 명 이상의 아동이 피해를 받는다 (Malley *et al.*, 2017; Turner *et al.*, 2016). 오존은 식물을 포함한 생태계에도 악영향을 끼

치며 특히 곡물 성장에 영향을 끼쳐 농업 생산성에도 밀접한 관련성이 알려져 있다 (Hollaway *et al.*, 2012).

대류권 오존은 태양복사에너지와 전구물질들의 화학반응을 통해 생성된다 (Seinfeld and Pandis, 2016). 오존 생성에 기여하는 주요 전구물질은 질소산화물 (NO_x = NO + NO₂)과 휘발성 유기 화합물 (VOCs)이며 NO_x는 주간 광화학 반응을 통해 오존 생성에 기여하며, 밤이 되면 오존과 반응하여 오존을 제거하는 역할을 한다. 주간의 오존 생성은 VOCs와 NO_x의 농

도에 따라 비선형적인 관계를 가지며 이는 오존 감소를 위한 여러 환경정책 개발의 큰 어려움을 초래한다 (Sillman, 1999).

기온, 일사량, 습도, 풍속, 등의 기상 요소 역시 지표 오존 생성에 영향을 준다(Rao and Zurbenko, 1994). 환경부(MOE, 2016)는, 25°C를 초과하는 고온, 일출부터 정오까지의 총 일사량이 6.4 MJ/m²를 초과하는 맑은 날씨, 상대 습도가 75% 이하인 상대적으로 건조한 환경과, 풍속이 4 m/s 이하로 공기가 정체되어 있는 경우 고농도 오존 발생 가능성이 급격히 증가한다고 보고하고 있다.

지난 20년간 한반도를 포함한 아시아의 지표 오존 농도는 꾸준히 증가해 왔으며 그 원인에 관한 많은 연구가 수행되었다(Ziemke *et al.*, 2019). Kim *et al.* (2021)은 한국에서 50년에 걸친 관측 자료 분석을 토대로, 종관기상 패턴의 변화가 있으며, 특히, 건조열대성 기압 패턴이 300% 증가하였으며 고농도 오존 발생(MDA8 O₃ > 80 ppbv)에 63% 정도 기여한 것으로 분석하였다. Colombi *et al.* (2023)은 2015년부터 2019년까지 국내 지표 오존 증가에는 국내 NO_x 배출량의 감소와 중국으로부터의 직접적인 오존 유입이 중요한 영향을 끼친다고 분석했다. Seo *et al.* (2014)은 1999년부터 2010년까지의 서울 관측 자료 장기 분석에서 온도 증가가 고농도 오존 발생에 기여하며, 단기적으로는 국내와 중국의 전구물질 배출이 중요한 영향을 끼쳤다고 보고하고 있다.

이전 연구에서는 고농도 오존 발생 빈도에 주목하거나, 짧은 기간을 대상으로 한 연구이거나, 넓은 지역의 중규모 기압 패턴 변화로 오존 농도의 증가를 설명하였으며 이는 앞으로 기후변화에 따른 복잡한 기상 변화가 끼칠 오존 농도 변화를 충분히 고찰하기에는 부족하다. 본 연구는 2003년부터 2022년까지 20년간의 수도권 지역의 지표 오존 농도가 급격하게 증가하는 4~6월의 관측 자료 분석에 초점을 맞추었다. 또한 전구물질의 배출량 산정에 따라 편차가 클 수 있음을 감안하여 오존 생성에 대한 기상 요소의 기여를 이해하고자 한다. 지구 온난화와 기후 변화가 지역 기상 패

턴을 변화시키고 있는 상황에서 (Howe *et al.*, 2013), 대류권 오존에 영향을 미치는 기상 요소의 영향을 정확하게 이해하는 것은 수도권에서의 오존 농도를 줄이기 위한 효과적인 규제 정책을 수립하는 데 중요하다.

2. 연구 방법

2.1 분석 자료

본 연구에서 사용한 오존(O₃) 농도 자료는 환경부 환경측정망 자료이며 AirKorea 웹에서(www.airkorea.or.kr) 제공하고 있다(MOE, 2016). 서울(25개 관측소), 경기(70개 관측소), 인천(17개 관측소) 내 도시대기 관측소의 시간별 데이터를 사용하여 8시간 이동 평균 오존 농도(MDA8)를 계산한 후 이를 사용하였다(그림 1).

분석에 사용한 기상 자료는 한국기상청의 자동기상 관측시스템(Automated Synoptic Observing System; ASOS)에서 관측되었다. 기상 자료는 오존 생성 과정에 직접적으로 영향을 끼치거나 그 과정에 영향을 미치는 것으로 알려진 일일 평균 기온(T_{2m}), 시간별 측정된 일사량의 일일 합계, 일평균 습도(Relative humidity; RH), 일조 시간, 운량(CF)이며 오존 데이터

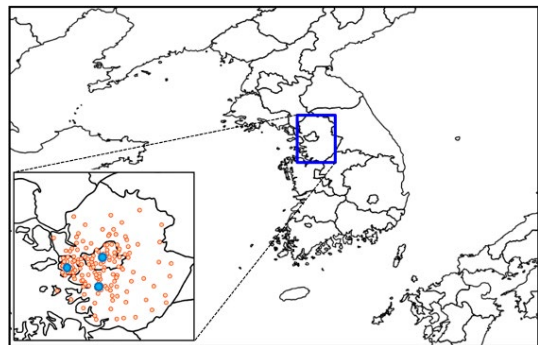


Fig. 1. Map of Seoul metropolitan area and surface observing stations. Orange dots indicate air pollution monitoring sites at AirKorea (www.airkorea.or.kr) and blue dots indicate ASOS sites.

와 동일한 시간 해상도의 자료를 이용하였다. 오존 자료를 측정하는 관측소는 수도권 전역에 위치한 반면, ASOS 관측소 중 일사량을 측정하는 지점은 서울, 수원, 인천에 각 1곳씩 존재한다. 대기환경측정망과 ASOS 관측 지점의 불일치는 지역 대표성 문제로 인해 각 지역에서 평균된 오존과 기상 요소의 상호관계 분석의 불확실성을 야기할 수 있다. 예를 들면, 수원에서 관측한 기상 요소와 경기 전역의 평균 오존 농도의 상관관계를 구했을 때, 근거리 지점의 상관계수와 경기 북부의 상관계수에 각각 0.63, 0.53으로 차이가 있었다. 이러한 불일치 문제를 해결하기 위해 아래 RF 모델 학습에 사용되는 대기환경측정망 관측 자료를 다음과 같이 적용하였다. ASOS 관측소와 대기환경측정망 관측소의 위도, 경도 값을 사용하여 지점 간 거리를 계산한 후, 각 ASOS 관측소에서 가장 가까운 3곳의 대기환경측정망 관측소에서 관측한 오존 농도를 평균한 후 모델 학습에 사용하였다.

수도권 내에서 일사량을 제공하는 지점이 상대적으로 적어 Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) 위성 데이터를 함께 사용하였다(NASA/LARC/SD/ASDC, 2017). CERES 프로젝트는 극지 궤도와 정지 궤도 위성의 측정 자료를 사용하여 지구의 복사 에너지 수지를 제공한다(Doelling *et al.*, 2013). 태양빛이 대기를 통과할 때 산란, 흡수, 재방출되는데(Myrhe *et al.*, 2013), 이러한 과정에 관여하는 구름 효과 및 직접, 간접 에어로졸 효과를 포함하여 재분석된 자료를 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 해상도로 제공한다(Su *et al.*, 2005). 지상에서 관측된 ASOS 태양복사 자료와 구름, 에어로졸 효과를 고려한 CERES 지표 복사를 비교했을 때 두 자료는 잘 일치함을 보였다. 아래 장기 추세 분석에서는 지표 오존 농도와 기상 자료의 계절적 변화의 상관성을 최소화하고 지난 20년간의 변화에 집중하기 위해 일평균 아노말리를 계산하여 분석을 수행하였다.

2.2 학습 모델

본 연구에서는 랜덤 포레스트(RF) 모델을 사용하

여 기상 변수 변화가 지표 오존 농도 변화를 얼마나 설명하는지 분석한다. RF 모델은 학습 변수 중 일부를 무작위로 선택하여 결정 트리를 형성하고(Breiman, 2001), 이 과정을 반복한 결과를 평균하는 방법으로 모델의 정확도를 높인다. 또한 해당 모델은 장기간의 시계열 데이터를 학습할 때 특정 기간의 데이터를 제외하지 않는다는 장점이 있어 20년간의 데이터를 사용하는 본 연구에 적합하다(Vaswani *et al.*, 2017).

RF 모델에서 입력 변수의 중요성을 평가하는 방법은 Permutation importance와 Feature importance이다(Wei *et al.*, 2015). Permutation importance는 변수의 순서를 무작위로 바꿔가며 새로운 예측 결과를 만들고, 이전 결과와 새로운 결과의 차이를 통해 변수가 예측에 기여한 정도를 계산하는 방법이다(Breiman *et al.*, 1984). Feature importance는 결정 트리 형성 시 어떤 변수가 중요하게 고려되었는지 계산하여 각 변수의 중요도를 결정하는 방법이다(Raileanu and Stoffel, 2004).

본 연구는 'normalweather' (Grange *et al.*, 2018)를 참조하여 시계열 변수를 처리하는 RF 모델을 작성하였다. 오존과 기상 변수 간의 Pearson 상관계수를 통해 학습 변수를 선택하고, 데이터의 70%를 학습에, 30%를 테스트에 사용한다. 이때 전체 시계열에 대한 결과를 얻기 위해 모델 실행을 1000번 반복한 후, 모든 결과를 평균하여 최종 값을 도출했다. 이 과정에서 Feature importance와 Permutation importance를 계산하여 기상 변수의 중요도를 판단한다.

3. 오존 및 기상 자료 장기 변화

그림 2는 지난 20년간 수도권 내 112개의 대기환경측정망 sites에서 관측된 오존의 월평균, 연평균 MDA8 O₃ 농도를 나타낸다. 월평균 MDA8 O₃ 농도는 다른 달에 비해 4월, 5월, 6월에 상대적으로 높았으며, 본 연구에서는 이 시기를 오존 시즌으로 정의한다. 연평균 MDA8 오존은 2003년 40 ppb 미만에서 2022년 50

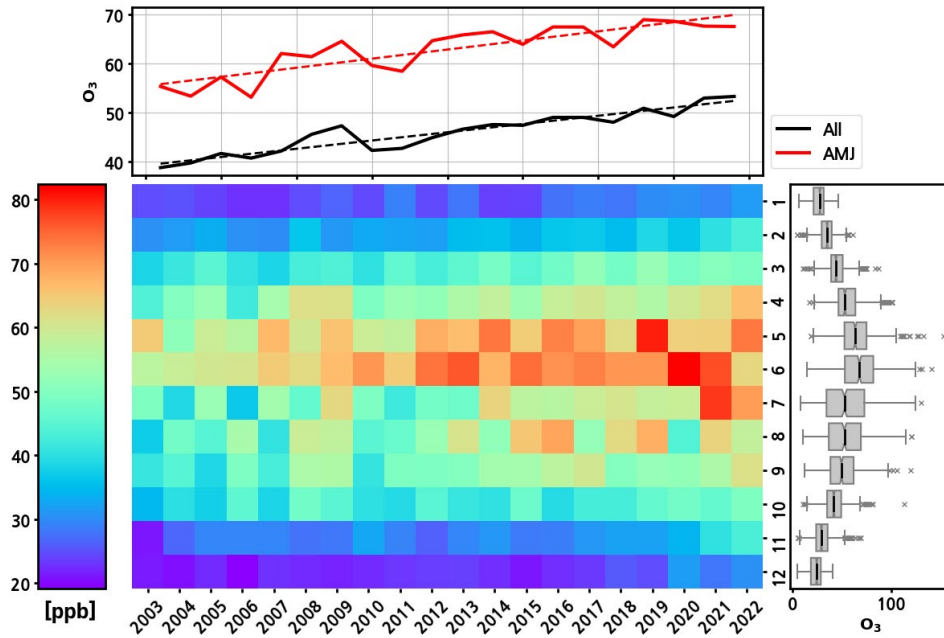


Fig. 2. Heatmap displaying monthly averages of MDA8 ozone concentrations. Annual average of MDA8 ozone and linear regression slope (black), annual average of April, May, and June and linear regression slope (red). Monthly distribution of MDA8 ozone (right).

ppb까지 연간 0.79 ppb 증가하였다. 오존 시즌 오존 농도는 55 ppb에서 70 ppb로 연간 0.94 ppb가 증가하였다.

그림 3은 본 연구에 사용된 각 측정소별 오존 시즌 동안 지표 오존의 연평균 증가율을 보여주고 있다. 대부분의 측정소에서 오존 농도가 증가하였지만 6개 지점에서 감소하는 추세가 있었으며, 4개는 경기 북부에 위치하고 1개는 인천에 위치하였다. 서울의 오존 증가는 0.9 ppb/yr로 0.5 ppb/yr과 0.6 ppb/yr인 인천과 경기도에 비해서 상대적으로 높게 나타났으며, 서울의 모든 측정소에서 0.6 ppb/yr의 오존 증가를 보였다. 평균적인 증가 추세는 서울이 가장 높았으며, 모든 측정소에서 연간 0.6 ppb 이상의 오존 증가를 보였다.

Mann-Kendall 검증을 통해 오존 농도의 변화를 증가, 감소, 추세 없음 세 그룹으로 분류하였다. 인천에 위치한 운서에서 오존이 감소하는 추세를 보였고, 다른 지점에서는 통계적으로 명확한 감소 추세가 발견되지 않았다. 48개의 측정소에서 오존 농도가 증가하

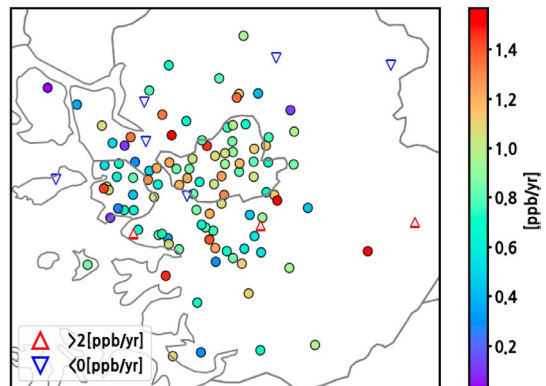


Fig. 3. Annual changes of MDA8 ozone during the ozone season (closed circles). Blue triangles indicate sites showing decreasing trend and red triangles show sites with increasing rates greater than 2 ppb per year.

였고, 20개의 측정소에서는 유의한 추세가 관찰되지 않았다. 서울에서는 모든 측정소에서 오존이 증가했으며, 이는 선형 회귀 결과를 뒷받침한다고 볼 수 있다. 경기 북부에서는 유의한 증감 추세가 나타나지 않

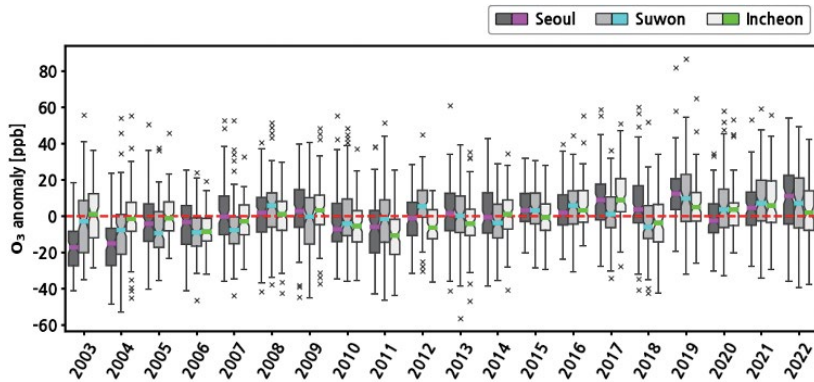


Fig. 4. Anomaly of MDA8 ozone concentrations averaged at air pollution monitoring sites close to the ASOS site in Seoul, Suwon, and Incheon during the ozone season. Magenta, cyan, and lime lines indicate the median values of daily anomalies in Seoul, Suwon, and Incheon, respectively.

는 측정소가 많았다. 이는 오존 변화 정도가 수도권 내에서도 지역에 따라 다를 수 있음을 보여준다. 수도권 내 상세지역별 오존 농도 변화의 차이는 기상 변수의 영향만으로 쉽게 설명하기 힘들다고 판단되며 추후 오존생성에 기여하는 전구물질의 배출변화, 화학과정변화, 그리고 풍상쪽에서 유입되는 장거리 수송되는 물질들의 변화까지 포함한 분석이 필요하다고 판단된다.

그림 4는 세 지역의 MDA8 오존 아노말리 분포를 보여준다. 이때 중앙값은 증가하는 경향을 보인다. 각 연도의 사분위 범위(하위 사분위수에서 상위 사분위수까지)는 중앙값과 유사한 추세가 나타났고, 최대 및 최소값 또한 20년 동안 증가하는 추세를 보였다. 세 지역 모두 중앙값이 증가하는 경향을 보였지만 일부 기간에서 지점 간 차이가 존재하였다. 2003년부터 2009년까지 서울의 오존 아노말리는 지속적으로 증가한 반면, 수원과 인천에서는 지속적인 증가가 관찰되지 않았다. 2009년 이후, 세 지점에서 최소 및 최대값, 그리고 분산의 정도 차이는 존재하나 전반적인 증가 경향은 유사함을 확인할 수 있었다.

3.1 기상 변수 분석

ASOS 측정소에서 관측된 기상 자료의 연 변화를 살펴보았다. 그림 5는 오존 시즌 동안 수도권의 연평

균된 일사량, 기온, 상대 습도, 일조 시간, 운량의 장기 간 변동을 보여준다. 일사량은 2003년 16 MJ/m² 미만에서 2022년 20 MJ/m²로 상당히 가파른 증가를 보이며, 연간 0.14 MJ/m² (0.8%) 증가하였다. 서울과 인천에서 기온은 유사했지만, 수원에서의 증가율은 두 지점에 비해 낮았다. 기온은 연간 0.24% 증가하였으나, 회귀선과의 데이터 간 상관관계수는 0.096이었고, p-값은 0.47로 유의미하지 않았다. 2003년부터 2011년까지 일일 평균 온도는 약간의 감소 추세를 보였고, 2011년 이후로 온도는 상승하기 시작하였다. 상대 습도는 20년 동안 증감을 반복하였다. 선형 회귀를 통해 계산했을 때 상대 습도는 연간 0.17% 증가함을 나타내지만, 기온과 비슷하게 낮은 상관관계수가 나타났다. 연평균 운량은 다른 변수들과는 다르게 조금 감소하는 추세가 발견되었으나 통계적으로 유의하지는 않았다 (R = -0.06). 일사량과 마찬가지로, 일조 시간 역시 뚜렷한 증가 추세가 관찰되었다. 2003년에 연평균 일조 시간은 10시간 미만이었으며, 2022년에 12시간 이상으로 상승하였다.

수도권 내 지표 일사량 관측소 수가 적다는 점을 보완하기 위해 CERES 재분석 자료를 살펴보았다. 일사량은 일반적으로 0.39에서 0.76 μm 파장을 가지는 단파 복사를 의미한다 (Duffie and Beckman, 2006). All sky 하향 단파 복사는 구름과 에어로졸을 고려한 단파

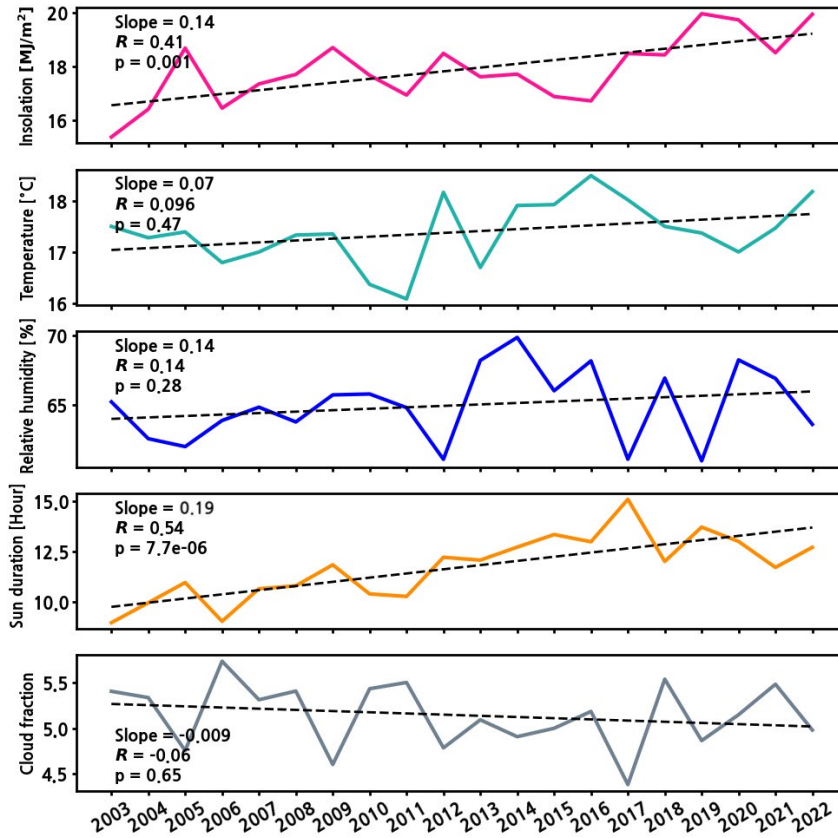


Fig. 5. Long term trend of annual meteorological variables averaged at ASOA sites in SMA during the ozone season.

복사 플럭스인데, 일사량과 가장 비슷한 해당 복사 자료를 지표 측정 일사량과 비교하였다. 두 자료의 유사성을 확인하기 위해 각각의 지상 관측소가 위치하는 위성 자료 격자를 선정한 후, 해당 격자의 자료와 지상 관측 자료를 한 그룹으로 묶었다. 위성 자료와 지표 관측 자료의 단위가 각각 W/m², MJ/m²로 달라 단위 변환을 거친 뒤 동일 단위로 비교하였다. 2003년부터 2022년까지의 오존 시즌 동안, 두 자료는 유사한 분포를 보였다(그림 6). CERES 자료가 ASOS 자료보다 낮은 복사에너지 값에서 약간 높은 값을 보이는 경향이 있으나 상관관계수 R²은 0.94였고, 중앙값은 거의 일정하게 유지되어 두 자료가 보여주는 추세가 비슷하고, 위성 자료를 통해 일사량 증가를 검증할 수 있음을 확인하였다.

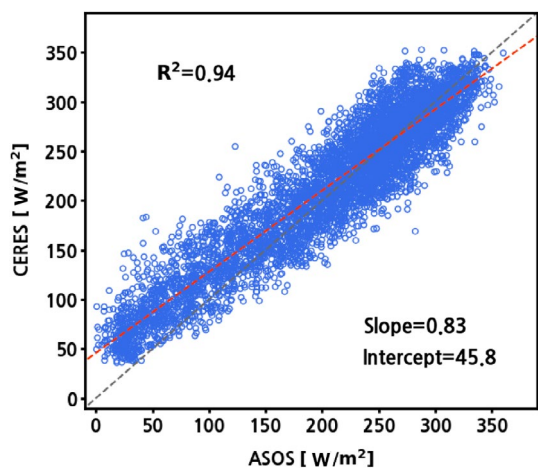


Fig. 6. Scatter plot comparison between CERES downward solar fluxes and ASOS observations in SMA.

CERES의 하향 단파 복사는 연간 0.7%씩 증가하고 있으며, 이는 지표 관측을 이용해 계산한 추세와 거의 동일하다. 지표에 도달하는 단파 복사가 증가하는 것과는 달리 대기 상층부(Top of Atmosphere; TOA)의 태양복사는 연평균 값이 20년 동안 일정하게 유지됨을 확인했다. 지표와 대기 상층부의 복사 데이터를 비교함으로써, 지표에 도달하는 일사량이 태양 상수 변화가 아닌 다른 요인의 영향을 받았음을 추측할 수 있다.

4. 수도권 오존 농도 증가에 끼치는 기상변수의 영향

위에 언급했듯이 수도권 오존 증가에 끼치는 기상 변수 영향을 살펴보기 위해 각 변수의 일평균 농도에서 전체기간의 평균값을 뺀 anomalies 값을 이용해서 분석하였다. RF 모델을 이용해서 학습하기 전에 오존과 각 기상 변수들 간의 통계적인 상관성을 살펴보았다.

표 1은 오존 농도의 아노말리와 각 기상 변수 아노말리의 Pearson 상관계수를 나타낸다. 수도권 평균과 세 지역의 오존과 기상 변수의 상관관계는 유사하게 나타났다. 태양복사, 온도, 일조 시간이 오존 농도와 양의 상관성을 보였으며 상대 습도와 운량은 음의 상관성을 보였다. 수도권에서 오존 시즌 동안의 일사량과 MDA8 오존의 상관계수는 0.61이었으며, 기온은 0.46이었고, 일조 시간과의 상관계수는 일사량과 동일했다. 상대 습도와 운량의 R 값은 각각 -0.45와 -0.54였다. 서울에서는 일사량과 일조 시간의 R 값이 각각 0.59였으며, 기온은 0.46이었다. 상대 습도와 운

량의 상관계수는 각각 -0.46, -0.52로 음의 값을 보였다. 수원에서는 일사량과 일조 시간의 R 값이 각각 0.55와 0.54였고, 기온과의 R 값은 0.47이었다. 상대 습도와 운량의 경우 -0.38, -0.48의 값을 보였다. 인천에서는 일사량과 일조 시간의 R 값이 각각 0.53과 0.55로, 서울보다 약간 낮았다. 기온과의 R 값은 0.35로, 서울과 수원보다 약간 낮았다. 상대 습도와 운량의 R 값은 수원과 비슷하였다.

위의 분석을 토대로 RF 모델 학습 변수로 일사량, 기온 및 상대 습도를 선택하였다. 일조 시간은 일사량과 높은 상관관계(>0.95)를 가지는 것으로 나타났으며, 큰 다중공선성은 기여도 계산 시 정확성을 감소시킬 수 있다(Garg and Tai, 2013). 운량은 목적 관측이라는 한계점과 안개, 강우 시에 가정이 들어가며, 구름 밀도와 두께가 고려되지 않아 자료의 정확성이 낮을 수 있어 본 연구에서는 제외하였다(KMA, 2022). 전체 기간의 자료에서 무작위로 추출한 70%를 RF 모델 학습에, 학습된 결과를 이용해서 예측한 오존 농도 검증에는 나머지 30% 자료를 이용했다.

그림 7은 수도권의 평균한 값을 사용해서 RF 모델을 학습한 후 관측된 오존의 아노말리와 랜덤 포레스트 모델을 통해 예측된 값의 통계적 비교이다. 두 오존 값의 R²은 0.69였으며, 기울기는 0.5임을 나타내었다. RF 모델을 이용한 예측값이 관측된 오존의 변동성의 69%를 설명하고 있으며 관측된 오존 농도 변화에 큰 영향을 끼치고 있음을 나타낸다. 서울, 수원, 인천, 각각 세 지역의 자료만을 이용해서 산출한 결과도 비슷한 통계적인 상관성을 보였다.

그림 8은 수도권 전체의 오존 아노말리의 관측값과 예측값의 연도별 분포를 보여준다. 이때 관측과 예측의 중앙값 경향은 유사했으며, 두 값 간 차이의 절댓

Table 1. Correlation coefficient between anomalies of meteorological variables and MDA8 ozone in SMA, Seoul, Suwon, and Incheon.

	Insolation	Temperature	Relative humidity	Cloud fraction	Sun duration
SMA averaged	0.61	0.46	-0.45	-0.54	0.61
Seoul	0.59	0.46	-0.46	-0.52	0.59
Suwon	0.55	0.47	-0.38	-0.48	0.54
Incheon	0.53	0.35	-0.38	-0.49	0.55

값은 10 ppb 이하였다. 그러나 관측된 오존의 최댓값과 아노말리는 예측된 값보다 높아 다른 요인이 기여했을 가능성을 나타낸다. 세 지점에서 관측값과 예측

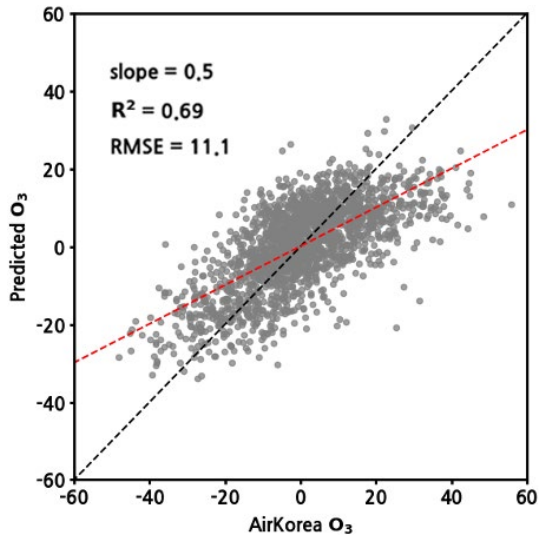


Fig. 7. Scatter plot comparison between observed and predicted anomalies of MDA8 ozone concentrations using a RF model and meteorological data in SMA.

값의 중앙값 추세는 유사하였으며, 예측값의 연간 분산이 관측값의 연간 분산보다 작았다.

그림 9는 RF 모델 학습을 통해 예측된 값을 설명하는 중요 인자를 분석한 결과이다. 앞서 언급된 feature importance와 permutation importance 방법을 사용하여 계산했다. 수도권 오존 아노말리를 설명할 때, 학습에 사용된 변수 중 일사량이 가장 중요한 변수였으며, 기온이 뒤를 이음을 알 수 있다. Feature importance 결과는 일사량, 기온, 상대 습도 순으로 각각 0.58, 0.24, 0.18이었다. Permutation importance는 일사량, 기온, 상대 습도가 각각 1.08, 0.5, 0.23으로, feature importance와 순서가 동일하였다. 이 두 결과에 따르면 수도권 오존 증가에 가장 큰 영향을 끼친 기상 인자는 일사량 증가였다. 일사량 증가의 원인 파악은 본 연구의 범위를 벗어나기 때문에 진행하지는 않았지만 후속 연구를 통해서 그 원인 파악 및 기상 변수의 영향과 더불어 오존 전구물질 배출량 변화의 영향까지 정량적으로 파악하는 연구는 지난 20년간 꾸준히 증가하고 있는 수도권 오존 농도의 감소 정책 개발에 중요한 요소가 될 것으로 생각한다.

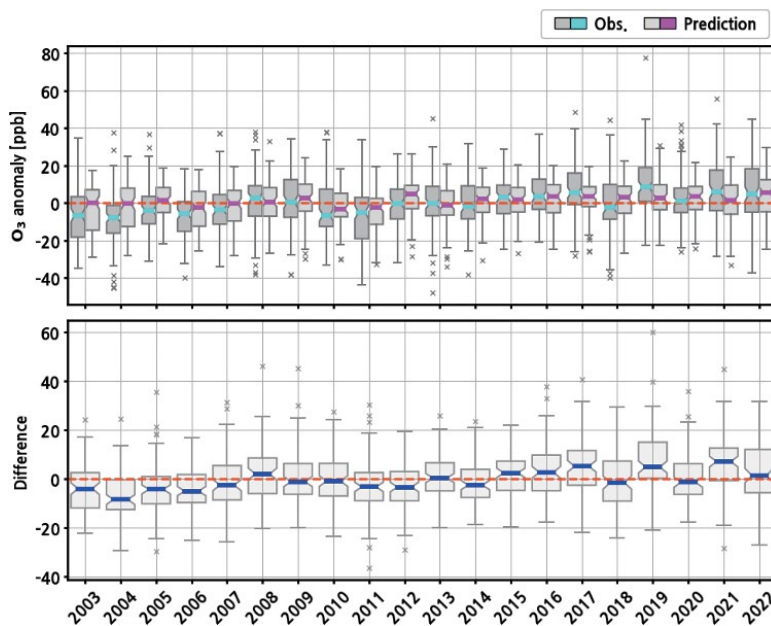


Fig. 8. Observed and predicted ozone anomaly in SMA (up), difference between observation and prediction (down).

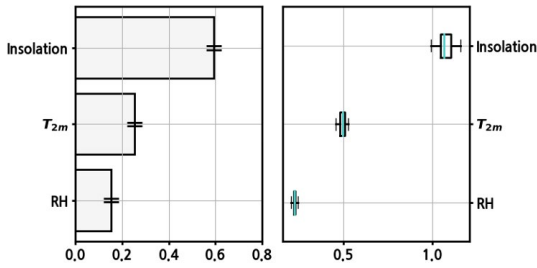


Fig. 9. Contributions of individual meteorological variables to predicted ozone concentrations in a RF model using feature importance (left) and permutation importance (right).

5. 결 론

본 연구에서는 2003년부터 2022년까지 20년간 수도권 내 지표 오존 변화에 기상 요소의 기여 정도를 알아보았다. 수도권에서 MDA8 오존 농도는 연간 0.79 ppb 증가하였으며, 이 중 오존 농도가 높은 4, 5, 6 월에는 연간 0.94 ppb로 더 큰 증가세가 관찰되었다. 기상 요소 분석을 위해서 기온, 일사량, 상대 습도, 일조 시간, 운량 자료를 이용하였다. 선형 회귀 분석과 Mann-Kendall 검정을 통해 추세를 계산한 결과, 일사량과 일조 시간이 증가했음을 확인하였다. 지표 오존과 기상 변수의 계절성을 배제하기 위하여 아노말리를 구한 후 상관관계를 계산하였다. 수도권에서 지표 오존과 일사량, 기온, 상대 습도, 운량, 일조 시간의 상관관계수는 각각 0.61, 0.46, -0.45, -0.54, 0.61이었다. 운량의 관측 한계와 일사량, 일조 시간 간의 다중공선성을 고려하여 랜덤 포레스트 모델 학습에는 일사량, 기온, 상대 습도를 사용하였다. 세 가지 기상 변수는 서울, 수원, 인천에서 각각 63%, 61%, 59%의 아노말리를 설명하였으며 수도권 전체를 보았을 때 69%를 설명하였다. 기상 요소 중 광화학 반응과 직접적으로 연관된 일사량이 모든 지점에서 가장 기여도가 높음을 보였으며, 상대 습도의 기여도가 가장 낮았다. 본 연구는 기상 요인의 변화가 수도권 오존 증가의 중요한 요인으로 작용하고 있음을 보여주었다. 즉, 오존 농도 개선을 위해서는 기상에 대한 이해, 특히 일사량 증가의 자연적, 인위적 요인을 분석하는 추가적인 연구가 필

요할 것이다. 나아가 동아시아의 환경정책으로 인한 지표오존 생성에 기여하는 전구물질 배출 변화, 국외 유입량 변화 등이 끼치는 영향을 규명하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- Breiman, L. (2001) Random Forests, *Machine Learning*, 45, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010950718922>
- Breiman, L., Friedman, J., Stone, C.J., Olshen, R.A. (1984) Classification and regression trees. Wadsworth, Belmont.
- Burnett, R.T., Brook, J.R., Yung, W.T., Dales, R.E., Krewski, D. (1997) Association between ozone and hospitalization for respiratory diseases in 16 Canadian cities, *Environmental Research*, 72, 24-31. <https://doi.org/10.1006/enrs.1996.3741>
- Colombi, N.K., Jacob, D.J., Yang, L.H., Zhai, S., Shah, V., Grange, S.K., Yantosca, R.M., Kim, S., Liao, H. (2023) Why is ozone in South Korea and the Seoul metropolitan area so high and increasing? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(7), 4031-4044. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4031-2023>
- Digital Signal Processing (2019) Decomposing time series into deterministic and stochastic influences: A survey, *Digital Signal Processing*, 95, 102582. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2019.102582>
- Doelling, D.R., Loeb, N.G., Keyes, D.F., Nordeen, M.L., Morstad, D., Nguyen, C., Wielicki, B.A., Young, D.F., Sun, M. (2013) Geostationary enhanced temporal interpolation for CERES flux products, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(6), 1072-1090. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00136.1>
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2006) Solar engineering of thermal processes. Wiley, New Jersey, 908pp.
- Garg, A., Tai, K. (2013) Comparison of statistical and machine learning methods in modelling of data with multicollinearity, *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 18, 295-312. <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2013.053535>
- Grange, S.K., Carslaw, D.C., Lewis, A.C., Boleti, E., Hueglin, C. (2018) Random forest meteorological normalization models for Swiss PM₁₀ trend analysis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(9), 6223-6239. <https://doi.org/10.5194/acp-18-6223-2018>
- Hollaway, M.J., Arnold, S.R., Challinor, A.J., Emberson, L.D. (2012) Intercontinental trans-boundary contributions to ozone-induced crop yield losses in the Northern

- Hemisphere, *Biogeosciences*, 9(1), 271-292. <https://doi.org/10.5194/bg-9-271-2012>
- Howe, P., Markowitz, E., Lee, T., Ko, C.-Y., Leiserowitz, A. (2013) Global perceptions of local temperature change, *Nature Climate Change*, 3, 352-356. <https://doi.org/10.1038/nclimate1768>
- Kim, H.C., Lee, D., Ngan, F., Kim, B.-U., Kim, S., Bae, C., Yoon, J.-H. (2021) Synoptic weather and surface ozone concentration in South Korea, *Atmospheric Environment*, 244, 117985. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117985>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2022) Guidelines for Ground Weather Observation. KMA, South Korea, p. 51.
- Malley, C.S., Henze, D.K., Kuylenstierna, J.C.I., Vallack, H.W., Davila, Y., Anenberg, S.C., Turner, M.C., Ashmore, M.R. (2017) Updated global estimates of respiratory mortality in adults ≥ 30 years of age attributable to long-term ozone exposure, *Environmental Health Perspectives*, 125(8), 087021.
- Ministry of Environment (MOE) (2016) Ozone, Be prepared after you know the right way to go. <https://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=146119&fileSeq=1>
- Myhre, G., Myhre, C.E.L., Samset, B.H., Stordal, T. (2013) Aerosols and their relation to global climate and climate sensitivity, *Nature Education Knowledge*, 4(5), 7.
- NASA/LARC/SD/ASDC (2017) CERES and GEO-enhanced TOA, within-atmosphere and surface fluxes, clouds and aerosols daily Terra-Aqua Edition4A, NASA Langley Atmospheric Science Data Center DAAC. https://doi.org/10.5067/Terra+Aqua/CERES/SYN1degDay_L3.004A
- Raileanu, L.E., Stoffel, K. (2004) Theoretical comparison between the Gini index and information gain criteria, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 41(1), 77-93. <https://doi.org/10.1023/B:AMAI.0000017584.56585.8f>
- Rao, S.T., Zurbenko, I.G. (1994) Detecting and tracking changes in ozone air quality, *Air & Waste*, 44(9), 1089-1092. <https://doi.org/10.1080/10473289.1994.10467303>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change*. Wiley.
- Seo, J., Youn, D., Kim, J.Y., Lee, H. (2014) Extensive spatiotemporal analyses of surface ozone and related meteorological variables in South Korea for the period 1999-2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 6395-6415. <https://doi.org/10.5194/acp-14-6395-2014>
- Sillman, S. (1999) The relation between ozone, NOx and hydrocarbons in urban and polluted rural environments, *Atmospheric Environment*, 33, 1821-1845.
- Silva, R.A., West, J.J., Zhang, Y., Anenberg, S.C., Lamarque, J.-F., Shindell, D.T., Collins, W.J., Dalsoren, S., Faluvegi, G., Folberth, G., Horowitz, L.W., Nagashima, T., Naik, V., Rumbold, S., Skeie, R., Sudo, K., Takemura, T., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Cionni, I., ..., Zeng, G. (2013) Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change, *Environmental Research Letters*, 8(3), 034005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034005>
- Su, W., Charlock, T.P., Rose, F.G. (2005) Deriving surface ultraviolet radiation from CERES surface and atmospheric radiation budget: Methodology, *Journal of Geophysical Research*, 110(D14209). <https://doi.org/10.1029/2005JD005794>
- Turner, M.C., Jerrett, M., Pope, C.A., 3rd, Krewski, D., Gapstur, S.M., Diver, W.R., Beckerman, B.S., Marshall, J.D., Su, J., Crouse, D.L., Burnett, R.T. (2016) Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 193(10), 1134-1142. <https://doi.org/10.1164/rccm.201508-1633OC>
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N., Kaiser, L., Polosukhin, I. (2017) Attention is all you need. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 6000-6010). Curran Associates.
- Wei, P., Lu, Z., Song, J. (2015) Variable importance analysis: A comprehensive review, *Reliability Engineering & System Safety*, 142, 399-432. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.04.009>
- Ziemke, J.R., Oman, L.D., Strode, S.A., Douglass, A.R., Olsen, M.A., McPeters, R.D., Bhartia, P.K., Froidevaux, L., Labow, G.J., Witte, J.C., Thompson, A.M., Haffner, D.P., Kramarova, N.A., Frith, S.M., Huang, L.-K., Jaross, G.R., Sefort, C.J., Deland, M.T., Taylor, S.L. (2019) Trends in global tropospheric ozone inferred from a composite record of TOMS/OMI/MLS/OMPS satellite measurements and the MERRA-2 GMI simulation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(6), 3257-3269. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3257-2019>

Authors Information

이해인 (서울대학교 지구환경과학부 석사과정)
(shb03157@snu.ac.kr)

박록진 (서울대학교 지구환경과학부 교수) (rjpark@snu.ac.kr)

정재인 (서울대학교 지구환경과학부 연구부교수)
(ss99@snu.ac.kr)