Check for updates
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 41, No. 5, October 2025, pp. 778-790
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2025.41.5.778
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문

충청남도 지역 국지 순환과 지상 오존 농도 간의 연관성 분석

Analysis of the Relationship between Local Circulation Patterns and Ground-Level Ozone Concentrations in Chungcheongnam-do

마서아[1),2)], **이상현**[1),2),*]

[1)]국립공주대학교 대기과학과, [2)]중부권 미세먼지연구·관리센터

Seo-A Ma[1),2)], **Sang-Hyun Lee**[1),2),*]

[1)]*Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Republic of Korea*
[2)]*Particle Pollution Research and Management Center, Gongju, Republic of Korea*

접수일 2025년 8월 5일
수정일 2025년 8월 22일
채택일 2025년 8월 22일

Received 5 August 2025
Revised 22 August 2025
Accepted 22 August 2025

***Corresponding author**
Tel : +82-(0)41-850-8526
E-mail : sanghyun@kongju.ac.kr

Abstract Ground-level ozone concentration in Chungcheongnam-do has consistently increased, frequently exceeding the Korea Ambient Air Quality Standards (KAAQS). While previous studies have primarily examined the relationship between ozone concentrations and anthropogenic precursor emissions, as well as regulatory measures aimed at reducing those concentrations, the influence of local circulation patterns, particularly the sea breeze, has received limited attention in the region. This study aims to investigate the relationship between local circulation patterns and ground-level ozone concentrations in Chungcheongnam-do, addressing a gap in understanding local ozone air quality. We analyzed the summer months from May to September in 2021, during which the highest ground-level ozone concentrations were recorded across the 1989~2022 period. Three local circulation patterns were classified based on criteria suggested using routine meteorological measurements at a coastal site: sea-breeze days, southerly non-sea-breeze days, and northerly non-sea-breeze days. Among these, sea-breeze days occurred on 26.8% of non-precipitation days during the analysis period, while southerly and northerly non-sea-breeze days accounted for 29.4% and 30.7%, respectively. Sea-breeze days in Chungcheongnam-do exhibited the largest diurnal ozone variation and highest peak concentrations, reaching up to 66 ppb in the cluster mean concentrations, which is substantially greater than other local circulation clusters. Analysis of 14 air quality monitoring stations in Chungcheongnam-do revealed that sea-breeze days exhibited the highest median MDA8 ozone concentration (64 ppb) and exceedance rate (63%) relative to southerly and northerly clusters, surpassing the KAAQS threshold up to 1.8 times more frequently. The strong association between sea breezes and ground-level ozone concentrations underscores the importance of incorporating local circulation patterns into the interpretation of ozone air quality in Chungcheongnam-do, and highlights the need for future research into the mechanisms by which these patterns regulate ozone concentrations. These findings suggest that future air quality assessments and policy frameworks should account for the dynamic role of sea breeze circulation in shaping ozone distributions at the local scale.

Key words: Chungcheongnam-do, Local circulation, Sea breeze, Surface ozone

1. 서 론

지상 오존은 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)의 광화학 반응으로 생성되는 대표적인 2차 오염물질이다. 지속적인 고농도 오존에 노출될 경우 기관지염, 심장질환 등 보건적 영향과 농작물 고사 등 환경적 피해가 발생할 수 있어 전 세계 여러 국가에서 체계적인 관리 노력이 이루어지고 있다(Agathokleous *et al.*, 2020; Jerrett *et al.*, 2009; Jakab *et al.*, 1995). 지상 부근의 오존 농도 수준은 태양복사, 기온, 상대습도, 풍속 등의 기상 요소의 영향을 받으며, 일반적으로 강한 태양복사, 높은 기온, 약한 풍속 조건에서 고농도

오존의 발생이 유리하다(Wang *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2024). 또한, 화학 전구물질의 인위 및 자연 배출량과 그 종류에 따라서도 오존의 농도 수준은 크게 달라질 수 있다(Li *et al.*, 2024; Shen *et al.*, 2023; Orlando *et al.*, 2010). 우리나라의 지상 오존 농도는 2000년대부터 꾸준히 증가하고 있으며, 2010년 이후의 증가 추세는 3.1 ppb $year^{-1}$로 세계적으로도 높은 수준이다(Jeong *et al.*, 2020). 따라서, 체계적인 오존 오염 관리가 요구되고 있으며, 지상 오존의 시공간 분포 특성은 지리적 입지와 배출원의 분포 등 국지적 요소에 크게 달라질 수 있으므로 이를 고려한 종합적인 분석이 중요하다(Yeo and Kim, 2021).

충청남도는 서해안 지역에 위치하고 있으며, 태안반도와 경기만은 복잡한 해안선을 형성하고 있고 내륙에는 차령 산맥과 평야 지역이 복잡한 지형 분포를 보인다. 이로 인해 복잡한 해안선을 따라 해륙풍 발달이 뚜렷하고, 내륙 산악 지역을 중심으로는 산곡풍 순환이 형성되는 독특한 국지 순환 패턴을 보여준다(KMA, 2016). 오염물질의 주요 배출원인 대형 화력 발전소와 제철 및 화학 산업 단지가 밀집되어 있고 축산 배출량의 비중도 높다(Hwang *et al.*, 2023). 주요 오염물질의 연간 배출량은 2008년 이후 꾸준히 증가 추세에 있으며, 전국에서 경기도에 이어 두 번째로 높은 배출량을 나타낸다(Kim *et al.*, 2020). 또한, 수도권 지역이 인접하고 있어 해당 지역에서 배출된 대기오염물질의 충청권 유입 가능성도 높은 지역이다. 이러한 지역적 특징하에서 충청남도의 지상 오존 농도는 제주에 이어 전국에서 두 번째로 높은 농도 수준을 나타내며, 오존의 농도가 높아지는 여름 기간에는 지속적으로 대기환경기준을 초과하고 있다(NIER, 2023; Yeo and Kim, 2021).

국지 순환은 지상 오존 농도의 시공간 분포에 크게 영향을 미치며, 특히 해안 지역에서는 해륙풍에 의한 영향을 크게 받는다(Miller *et al.*, 2003). 최근, 미국(Geddes *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2011), 포르투갈(Monteiro *et al.*, 2016), 중국(Hu *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2022; Tie *et al.*, 2009) 등의 주요 도시 지역에서 해륙풍 순환과 지상 오존 농도의 관계를 이해하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. Zhao *et al.* (2022)은 중국 양쯔강 삼각주 지역에서 발생하는 고농도 오존 현상이 야간 육풍에 의해 바다로 수송된 잔류층(residual layer) 오존이 다음날 주간의 해풍 발달에 의해 재수송되어 형성될 수 있음을 보였다. Lee *et al.* (2011)은 미국 뉴욕시의 광화학 플룸이 안정한 해양 경계층 위로 이동한 후 다음날 주간에 PAN (peroxiacetyle nitrate) 열분해 과정을 통해 생성된 NO_2의 광화학 반응으로 해양에서 100 ppbv 이상의 고농도 오존이 생성되며, 해풍 발달과 함께 뉴욕시로 재수송될 수 있음을 보였다. Tie *et al.* (2009)은 중국 상하이 지역에서 생성된 130 ppb 이상의 고농도 오존이 해풍에 기인한 해양 공기의 유입으로 급격한 농도의 감소(최대 30 ppb)가 일어날 수 있음을 보였다. Geddes *et al.* (2021)은 미국 보스턴 지역에서 서풍이 불 때 높은 배경 오존 농도와 전구물질의 유입으로 평균 오존 농도는 해풍일에 비해 3~5 ppb 높다고 보고하였다.

국내에서도 서울, 부산, 울산 등의 주요 도시를 대상으로 지상 오존과 해륙풍 순환에 관한 연구가 다수 수행되었다(Kang *et al.*, 2012; Oh *et al.*, 2006; Oh and Ghim, 1999; Chung and Chung, 1991). Kim *et al.* (1996)은 부산 지역에서 고농도 오존일(1시간 평균 60 ppb 이상인 날)의 63%가 해풍 발생일과 일치함을 보이면서 고농도 오존의 발생이 해풍 발생과 연관될 수 있음을 암시하였다. Lee (2001)는 남해안과 동해안 주요 도시들을 대상으로 해풍의 발달이 오존 농도의 상승에 기여할 수 있을 뿐 아니라, 고농도 오존의 발생 위치에도 영향을 줄 수 있음을 보였다. 한편, 강한 해풍의 발달은 오히려 해안가 지역의 오존 농도를 낮추는 결과를 보여주기도 하였다. Oh *et al.* (2006)은 부산 지역에서 해풍이 평균보다 늦게 발달하는 날에 오존 농도는 약 1.5배 높게 나타나며, 해풍을 따라 내륙으로 이류됨을 보였다. Chung and Chung (1991)은 서울 잠실 지역에서 해풍에 의해 인천 지역에서 수송된 화학 전구물질의 영향으로 지상 오존 농도가 206 ppb까지 상승하였다고 보고하였다. 또한, 서울 광화문 지역에서

는 약한 종관 강제력하에서 발달한 해풍이 대상 지역에 정체하면서 322 ppb의 매우 높은 오존 농도가 보고되기도 하였다(Oh and Ghim, 1999). Kang *et al.* (2012)은 경남 양산시에서 해풍 유입 시점이 지상 오존의 최고 농도(87 ppb) 발생 시점과 연관이 있음을 보고하였으며, 해풍에 의한 부산 연안 지역의 전구물질 수송을 원인으로 분석하였다.

지금까지의 국내외 기존 연구들은 특정 지역에서 해륙풍 순환이 지상 오존의 농도 수준과 고농도 오존 현상 발생에 밀접한 영향을 미치고 있음을 보여주고 있으며, 오존 농도의 시공간 분포에 미치는 영향은 지역의 특성에 따라 긍정적 또는 부정적 영향을 나타낼 수 있음을 보여주고 있다. 본 연구에서는 충청남도 지역에서의 국지순환 패턴과 지상 오존 농도의 연관성을 분석하고자 한다. 충청남도 지역에서 나타날 수 있는 복잡한 국지 순환 패턴에 관한 측정 분석 연구(KMA, 2016), 지역에 연관된 다양한 배출원과 배출 특성에 관한 분석 연구(Hwang *et al.*, 2023), 그리고 빈번한 지상 오존 기준 초과에 관한 측정 농도 분석 연구(Yeo and Kim, 2021) 등이 제한적으로 이루어지고 있으나, 국지 순환 패턴과 지상 오존 농도의 연관성에 관한 분석 연구는 수행된 바가 없다. Lee *et al.* (2024)은 충청남도 지역의 해륙풍 순환이 겨울철 $PM_{2.5}$ 농도와 높은 연관성을 보인 바 있다. 따라서, 본 연구는 충청남도 지역의 여름 기간의 해륙풍 순환과 지상 오존 농도의 연관성에 관한 기초 연구가 될 수 있다. 본 연구의 수행을 위해 2021년 5~9월 기간을 대상으로 국지 순환 패턴을 군집 분류하고, 국지 순환 패턴의 특성과 지상 오존 농도와의 연관성을 분석하였다. 이를 위해, 충청남도 지역의 국지 순환 패턴 군집 분류를 위한 기준을 제시하였다. 2장에서는 분석 영역과 기간, 국지 순환 패턴의 분류 방법, 지상 기상 및 대기질 측정 자료, 그리고 분석에 사용된 크리깅 내삽 방법을 설명한다. 3장은 충청남도 지역의 국지 순환 패턴별 지상 바람 및 오존 농도 특성, 그리고 국지 순환 패턴과 지상 오존 농도의 연관성에 대한 분석 결과를 제시한다. 마지막으로, 4장에서는 연구의 요약과 결론을 제시한다.

2. 연구 방법 및 자료

2.1 분석 영역과 기간

분석 영역은 위도 35.7~37.2°N와 경도 125.5~127.8°E이며, 충청남도 지역을 중심으로 인접한 행정 지역인 수도권, 대전시, 세종시, 충청북도, 그리고 전라북도 지역을 포함한다(그림 1). 충청남도 지역은 화력발전 시설이 위치한 보령시, 태안군, 그리고 서천군, 석유 화학 단지가 위치한 서산시, 제철 산업 단지가 위치한 당진시, 그 외 홍성군, 천안시, 부여군, 금산군, 아산시, 청양군, 공주시, 예산군, 논산시의 14개 시군 지역을 포함한다. 또한, 북쪽 방향으로 경기도, 인천시, 서울시의 인구 밀도가 높은 수도권 지역이 인접하고 있고 내륙 방향으로 세종시, 대전시, 그리고 충청북도가 위치하고 있다. 남쪽 방향으로는 전라북도 지역이 인접해 있다.

분석 기간은 2021년 5월에서 9월까지의 5개월을 선정하였으며, 해당 기간은 1989~2022년 기간 중 평균 오존 농도가 가장 높았으며 전국적인 오존 주의보 발

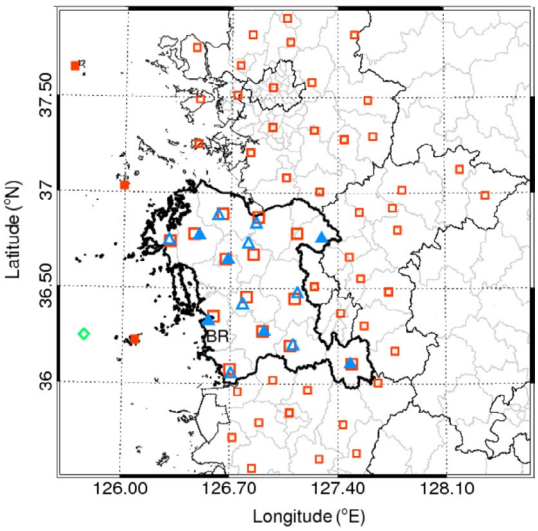

Fig. 1. Locations of meteorological measurement sites (ASOS: solid triangles, AWS: open triangles, Buoy: diamond) and air quality monitoring sites (open squares). BR denotes the Boryeong meteorological measurement site and the buoy station is located at Oeyeondo.

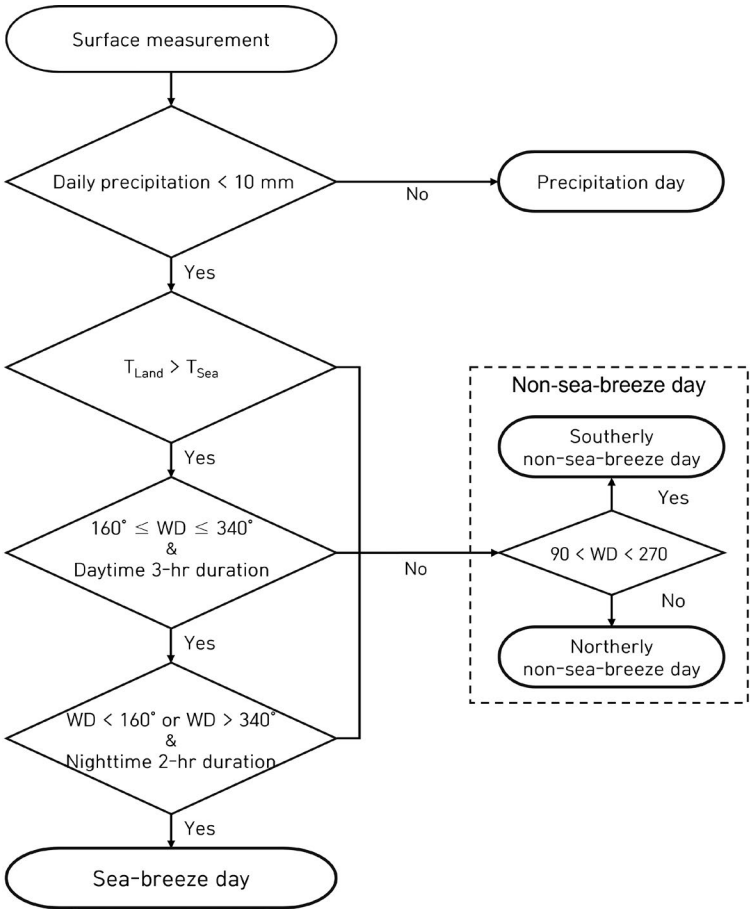

Fig. 2. Flowchart for classifying local circulation patterns into sea-breeze days, southerly non-sea-breeze days, and northerly non-sea-breeze days in Chungcheongnam-do (Modified from Lim and Lee, 2019). Daytime hours are defined as 09~18 LST, and nighttime hours include both early morning (00~08 LST) and evening (17~23 LST) periods.

령 일수도 67일로 가장 많았다(NIER, 2023). 특히, 충청남도 지역의 2021년 오존 주의보 발령 일수는 24일로 경기도와 전라남도에 이어 세 번째로 높은 빈도를 기록하였다.

2.2 국지 순환 패턴의 분류 방법

충청남도 지역의 국지 순환 패턴을 분류하기 위해 KMA (2016)와 Lim and Lee (2019)를 기반으로 분류 기준을 제시하였다(그림 2). Lim and Lee (2019)는 전라남도 보성 해안 지역에 설치된 300 m 기상 관측탑의 측정 바람과 기온 자료를 활용하여 보성 지역의 해풍 발생일 판별 기준을 제시하였다. 충청남도 지역의 해풍 발생일을 판별하기 위해 본 연구에서는 서해안에 인접한 보령 종관기상관측소(Automatic Synoptic Observing System: ASOS)와 외연도 부이(buoy) 측정 바람과 기온 자료를 이용하였다. 보령 지점은 서해안 해안선 근처에 위치하여 충청남도 지역의 해륙풍 발달과 유입의 영향을 가장 뚜렷하게 보여줄 수 있다(KMA, 2016). 또한, 해풍일로 분류되지 않은 날들은 강수일, 남풍 비해풍일, 그리고 북풍 비해풍일로, 다음의 5단계 기준을 순차적으로 적용하여 분류하였다. 첫 번째 기준으로, 강수일은 일 강수량이 10 mm 이상

인 날로 정의하였다. 그리고, 강수일은 국지 순환 패턴과 지상 오존 농도의 연관성 분석에서 제외하였다. 두 번째 기준으로 육지와 해양의 차등 가열 효과를 고려하기 위해 낮시간의 육지와 해양의 기온 차를 고려하였다. 육지 기온(T_{land})은 보령 ASOS 지점에서 측정된 일간 최고 기온을 사용하였고, 해양 기온(T_{sea})은 동일 시각에 외연도 부이(buoy)에서 측정된 기온 값을 사용하였다. 세 번째 판단 기준은 해풍의 발달을 확인하기 위한 풍향에 관한 기준으로, 보령 주변 해안선을 기준으로 160°(북서 방향)에서 340°(남동 방향)의 풍향을 해풍 풍향으로 설정하였다. 대상 지역의 복잡한 해안선 형태를 고려하여 100 km 규모의 평균 해안선 방향을 기준으로 설정되었다. 또한, 해풍 발생일의 조건은 주간 시간 동안 3시간 이상 연속으로 해풍 풍향이 유지된 날로 판정하였다. 네 번째 판별 조건은 강한 종관풍에 의한 해풍일 탐지를 피하고 하루 주기 내에서 해풍과 육풍 순환 여부를 판단하기 위한 기준으로 새벽과 야간 시간 동안 각각 2시간 이상 육풍 지속 시간을 설정하였다. 마지막으로, 해당 조건들을 모두 만족하는 날을 해풍일로 분류하고, 해풍일에 포함되지 않은 비강수일은 보령 지점의 시간 단위 풍향을 남풍(90~270°)과 북풍(0~90°; 270~360°)으로 구분한 뒤 하루 중 풍향 발생 빈도가 높은 풍향을 기준으로 남풍 군집과 북풍 군집으로 세분하였다. 북쪽 지역은 인위적 배출량이 높은 서울시, 인천시, 경기도가 위치하고, 남쪽에는 상대적으로 인위적 배출량이 낮은 전라북도가 위치한다(Lee *et al.*, 2019).

2.3 지상 기상 요소와 오존 측정 자료

그림 1은 연구 대상 지역인 충청남도 지역과 분석에 사용된 기상 측정소와 대기질 측정소의 위치를 보여준다. 지상 바람은 기상청 종관기상관측소 6개소(보령, 천안, 서산, 홍성, 부여, 금산)와 자동기상관측소(Automatic Weather Station: AWS) 8개 지점(당진, 아산, 태안, 청양, 공주, 예산, 서천, 논산)에서 측정된 시간별 풍향과 풍속 자료가 사용되었다. 강수량은 보령 종관기상관측소에서 측정된 시간별 강수 자료가 사용되었다. 한편, 지상 오존 농도는 환경부에서 운영되고 있는 대기오염자동측정망(Air Quality Monitoring Station: AQMS)에서 측정된 시간별 농도 자료를 활용하였다. 충청남도 지역에 위치한 14개 도시대기측정망 측정소 자료는 대상 지역의 지상 오존 농도 수준을 분석하기 위해 사용하였다. 또한, 국지 순환 패턴별 지상 오존 농도의 공간 분포를 파악하기 위해 충청남도, 수도권, 충청북도, 전라북도에 위치한 60개소 대기질 측정소 자료를 사용하였다. 해양 지역의 오존 농도 수준을 공간 분포 분석에서 현실적으로 반영하기 위해 국가배경대기 측정소 3곳(외연도, 울도, 연평도)과 서해안 해안선 부근에 위치한 다수의 도시대기측정소 자료를 분석에 포함하였다.

2.4 지상 오존 농도의 공간 내삽 방법

지상 오존 농도의 공간 분포는 대기질 측정소에서 측정된 오존 농도 값에 정규 크리깅 내삽 기법(Ordinary Kriging Interpolation Method)을 적용하여 계산하였다. 정규 크리깅 내삽 기법은 측정 지점 간의 공간적 자기상관성을 반영할 수 있는 대표적인 방법으로 대기오염 농도의 공간 분포 분석에 자주 사용된다(Berman *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2014). 정규 크리깅 내삽 기법의 계산 수식은 다음과 같다.

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i)$$

여기서 $\hat{Z}(x_0)$는 내삽 추정 위치 x_0에서의 추정된 값이며, n은 측정 지점의 수, $Z(x_i)$은 측정 지점 위치 x_i의 측정된 값, 그리고 λ_i는 측정값에 적용되는 가중치이다. 가중치는 두 지점 간의 공간 상관성을 수치화한 세미베리오그램(semivariogram) $\gamma(h)$를 포함하는 다음의 선형 방정식계를 통해 계산된다.

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_0)$$

여기서 $\gamma(x_i - x_j)$는 측정 지점 간의 세미베리오그램 값을 나타내고, $\gamma(x_i - x_0)$는 추정 지점과 측정 지점 간의

세미베리오그램 값을 의미한다. μ는 라그랑주 승수(Lagrange multiplier)로 가중치의 비편향 조건($\sum_{j=1}^{n}\lambda_j=1$)을 만족시키기 위한 항이다. 본 연구에서는 점진적 공간 변동이 예상되는 자료의 해석에 적절한 구형 함수(spherical function) 기반의 세미베리오그램을 사용하였다.

3. 결 과

3.1 국지 순환 패턴 군집 특성

표 1은 국지 순환 패턴 분류 방법을 따라 구분된 충청남도 지역의 해풍일, 남풍 비해풍일, 그리고 북풍 비해풍일의 발생 빈도를 보여준다. 2021년 5월부터 9월까지의 분석 기간 중 강수일은 20일로 나타났으며, 전체 기간의 13.1%를 차지하였다. 해풍 발생일은 전체 기간의 26.8%인 41일로 나타났다. 이는 충청남도 지역에서 과거 2006~2015년(10년간) 5~9월 기간의 해풍일 평균 발생 일수(34.7일)에 비해 4.1% 높았다(KMA, 2016). 한편, 남풍과 북풍 계열의 비해풍일 빈도는 각각 45일(29.4%)과 47일(30.7%)로 나타났다. 따라서, 국지 순환 패턴의 군집 분류를 통해 충청남도 지역에서 5~9월 기간 동안의 국지 순환 발생 빈도는 북풍 비해풍일, 남풍 비해풍일, 그리고 해풍일 순으로 높게 나타났다.

그림 3은 충청남도 지역에서 국지 순환 패턴 군집의

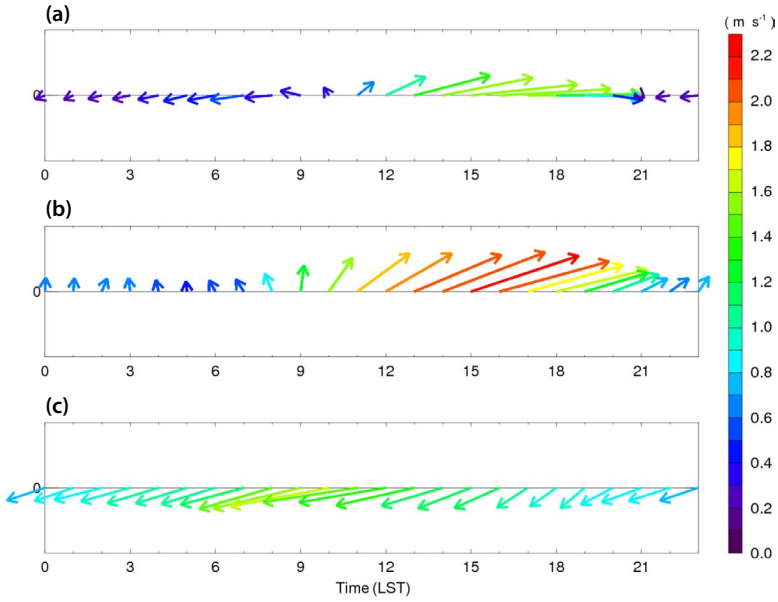

Fig. 3. Hourly mean wind directions and speeds for (a) sea-breeze days, (b) southerly non-sea-breeze days, and (c) northerly non-sea-breeze days.

Table 1. Occurrence frequencies of local circulation patterns in Chungcheongnam-do during the period of May to September in 2021.

Precipitation days	Sea-breeze days	Southerly non-sea-breeze days	Northerly non-sea-breeze days	Total
20 (13.1%)	41 (26.8%)	45 (29.4%)	47 (30.7%)	153 (100%)

평균 풍향과 풍속의 일변화를 보여준다. 충청남도 지역의 해륙풍 순환 특징을 잘 드러낼 수 있도록 해안 근처에 위치한 기상측정소 5지점(보령, 태안, 서산, 홍성, 서천)의 시간별 풍향과 풍속 자료를 군집 평균값 계산에 사용하였다. 해풍 발생일 군집은 야간의 약한 육풍과 주간의 잘 발달된 해풍을 뚜렷하게 보여준다(그림 3a). 대략 09~11 LST에서 육풍에서 해풍으로의 전환이 나타나며, 12~19 LST 동안 풍속의 증가와 시계 방향으로의 풍향 변화를 특징으로 하는 해풍 발달 단계를 보여주며, 20~21 LST에는 풍속의 감소와 일시적 정체를 보이고, 이후 야간 시간대에 동풍 계열의 육풍으로 전환함을 볼 수 있다. 한편, 남풍 비해풍일 군집에서는 야간 시간대에 남풍 계열의 약한 바람이 지속되다가 주간 시간대에는 시계 방향의 풍향 전환을 거쳐 남서풍 계열의 바람으로 전환되는 특징을 보여준다(그림 3b). 해풍일 군집에 비해 주간에는 더 강한 풍속이 나타나며, 09 LST에 남풍 계열의 바람에서 남서풍 계열의 바람으로 전환이 시작되고 있어, 주간 시간대에 풍향의 전환도 1~2시간 빠르게 시작되는 특징을 보여준다. 이를 통해 해당 군집은 여름 기간의 종관규모 남풍 계열 조건과 충청남도 지역의 해륙풍 발달과 연계된 지표 열 강제력이 일변동이 중첩된 국지 순환 패턴의 특징을 보여주는 것으로 볼 수 있다. 반면, 북풍 비해풍일 군집은 북동풍 계열의 바람이 일중 내내 지속되고, 풍속의 변화도 크지 않은 특징을 보인다(그림 3c).

3. 2 국지 순환 패턴과 지상 오존 농도의 연관성

그림 4는 충청남도 지역 야간(04 LST) 시간대의 국지 순환 패턴 군집별로 평균 지상 바람과 오존 농도와 편차장의 공간 분포를 나타낸다. 지상 바람과 오존 농도의 편차는 군집 평균값에서 전체 군집의 평균값을 뺀 값으로 계산하였다. 모든 군집에서 해양 오존 농도가 내륙에 비해 높고, 해안선 근처에서 오존 농도의 공간 경도가 큰 특징을 보였다(그림 4a, 4c, 4e). 해양 오존 농도는 35~45 ppb로 나타나며, 내륙에서는 대부분 30 ppb 이하의 낮은 값을 보였다. 하지만, 국지 순환 패턴 군집에 따른 오존 농도의 수준은 뚜렷한 차이를 보였다(그림 4b, 4d, 4f). 충청남도 지역의 지상 오존 농도는 해풍 발생일 군집에서 가장 낮은 수준을 보였다(그림 4b). 특히, 해안선 부근 지역에서는 전체 군집 평균값에 비해 3~5 ppb 낮은 수준을 나타냈다. 반면, 남풍 비해풍일 군집에서 충청남도 지역의 평균 오존 농도는 전체 군집 평균값보다 4~8 ppb 높게 나타났다(그림 4d). 북풍 비해풍일 군집의 경우, 전체 군집 평균값에 비해 1~3 ppb 낮은 농도 수준을 보였다(그림 4f).

그림 5는 충청남도 지역 주간(14 LST) 시간대의 국지 순환 패턴 군집별로 평균 지상 바람과 오존 농도와 편차장의 공간 분포를 나타낸다. 주간 시간대에는 오존 광화학 반응에 관여하는 전구물질의 배출량이 높은 내륙 지역의 지상 오존 농도 수준이 해양보다 높게 나타난다. 특히, 해풍 발생일의 오존 농도가 비해풍일 군집들에 비해 뚜렷하게 높은 값을 보였다(그림 5a, 5c, 5e). 해풍 발생일 군집에서 충청남도 북부(당진, 아산, 천안)와 수도권 남부(경기도, 인천) 지역에서 고농도 오존(~70 ppb)이 형성됨을 확인할 수 있으며, 충청남도 남부(보령, 서천) 지역에서도 유사한 수준의 고농도 오존이 나타났다(그림 5a). 반면, 남풍 및 북풍 비해풍일 군집에서 충청남도 지역의 오존 농도는 50~60 ppb 수준을 보였으며, 충청남도 북부(당진, 아산, 천안)와 남부(보령, 서천) 지역에서 상대적으로 높은 농도 수준을 보였다(그림 5c, 5e). 특히, 주간 시간대에 충청남도 지역의 평균 오존 농도는 국지 순환 패턴 군집에 따라 뚜렷한 차이를 보였다(그림 5b, 5d, 5f). 해풍 발생일 군집의 평균 오존 농도 수준은 야간 시간대와는 달리 전체 군집 평균값에 비해 높은 특징을 보였다. 충청남도 지역에서는 5~10 ppb 높은 농도를 보였으며, 충청남도 북부(천안) 지역과 경기도 남부 지역에서는 10 ppb 이상의 큰 차를 보였다(그림 5b). 남풍 및 북풍 비해풍일 군집에서 충청남도 지역의 평균 오존 농도는 전체 군집 평균에 비해 대체로 2~6 ppb 낮은 값을 보였으며, 남풍 군집에 비해 북풍 군집에서 상대적으로 낮은 값을 보였다(그림 5d, 5f).

그림 6은 국지 순환 패턴 군집의 평균 오존 농도의

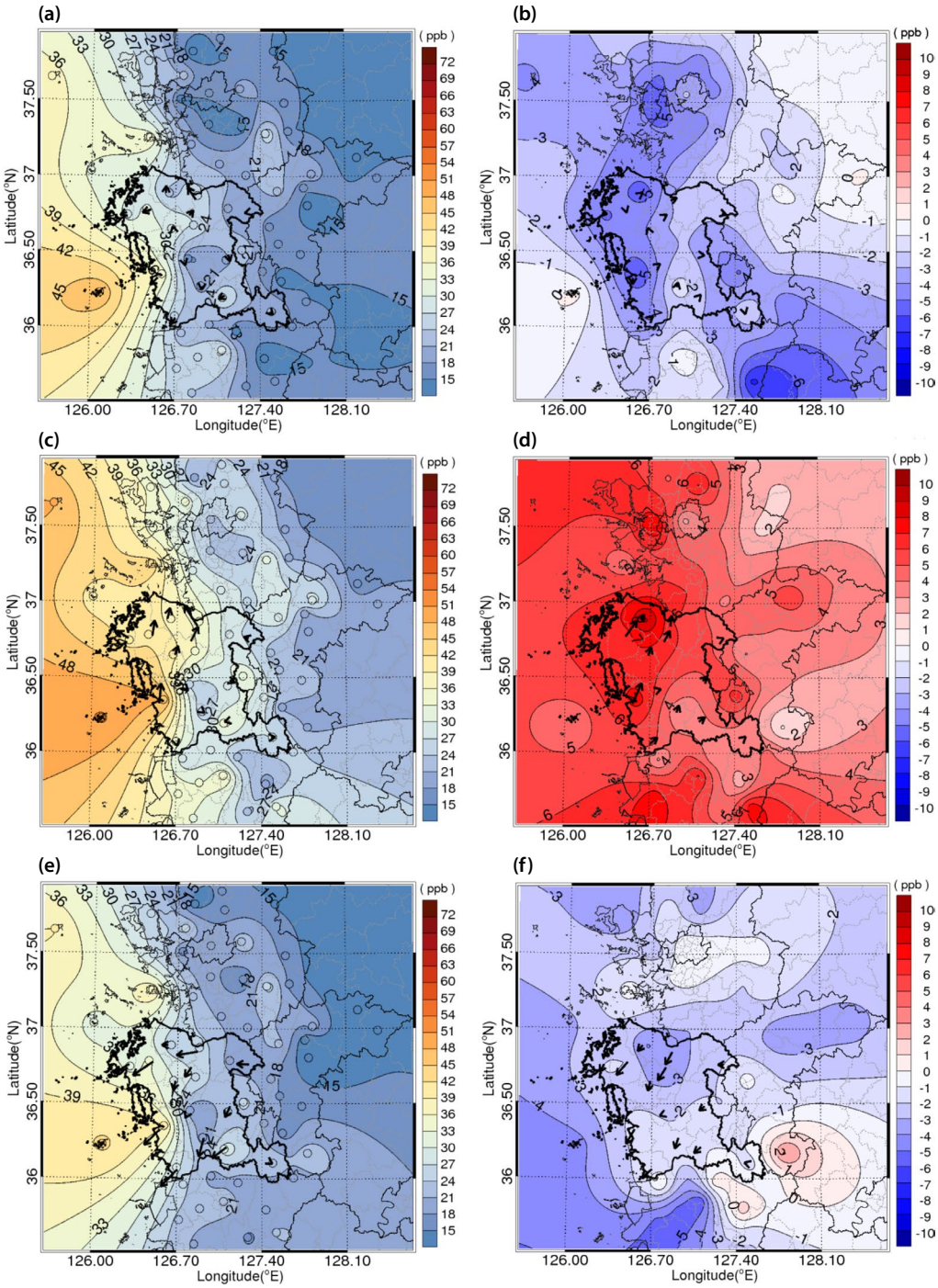

Fig. 4. Spatial distributions of nighttime ozone concentrations at 04 LST (left panels) and deviations from the mean ozone concentrations (right panels) under different local circulation patterns: (a) sea-breeze days, (c) southerly non-sea-breeze days, and (e) northerly non-sea-breeze days. Mean concentrations were calculated using all days except those with precipitation.

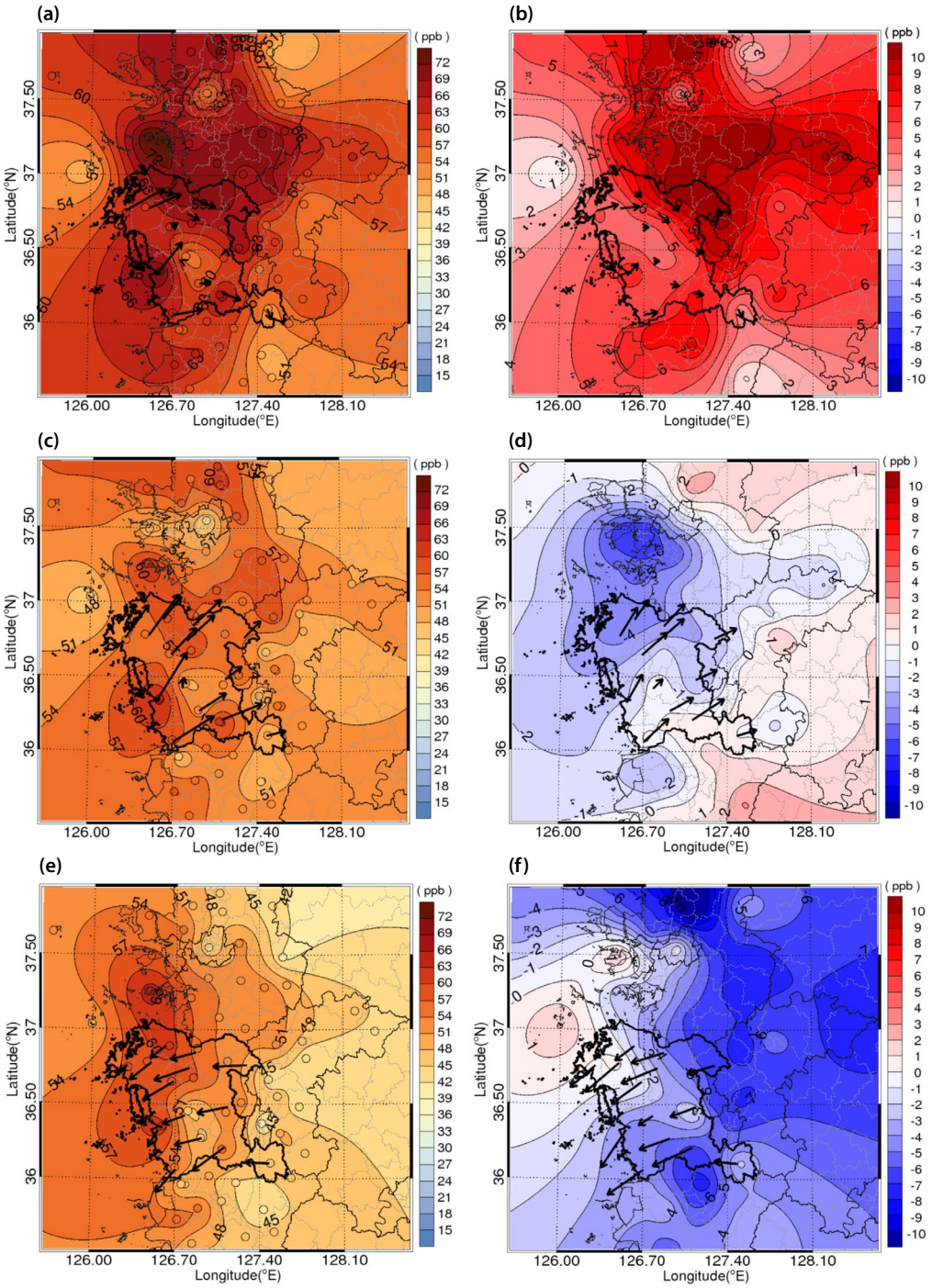

Fig. 5. Spatial distributions of daytime ozone concentrations at 14 LST (left panels) and deviations from the mean ozone concentrations (right panels) under different local circulation patterns: (a) sea-breeze days, (c) southerly non-sea-breeze days, and (e) northerly non-sea-breeze days. Mean concentrations were calculated using all days except those with precipitation.

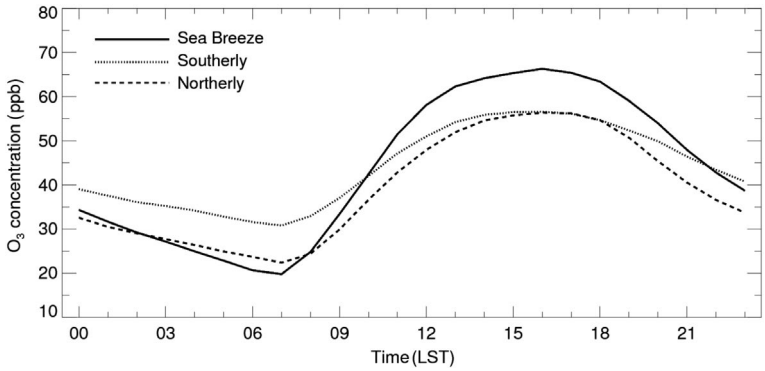

Fig. 6. Diurnal variations of cluster-mean ozone concentrations in Chungcheongnam-do for sea-breeze days, southerly non-sea-breeze days, and northerly non-sea-breeze days.

일변화를 비교하고 있다. 시간별 평균 오존 농도는 충청남도 지역에 위치한 AQMS 14 지점의 평균 오존 농도로 계산하였다. 모든 군집의 평균 오존 농도는 전형적인 일변화 패턴을 보이지만, 오존 농도의 일변동 크기는 국지 순환 패턴에 따라 큰 차이를 보여준다. 해풍 발생일의 지상 오존 농도는 07 LST과 16 LST에 각각 최소값(~20 ppb)과 최대값(~66 ppb)을 나타내며, 약 46 ppb의 농도 일변화를 보였다. 반면, 남풍 비해풍일 군집에서 오존 농도의 최소값과 최대값은 각각 31 ppb와 56 ppb로 나타났다. 주야간 지상 오존 농도의 일변화 폭은 약 25 ppb였다. 한편, 북풍 비해풍일 군집에서는 오전 최저 농도가 약 22 ppb였고, 오후 최고 농도는 약 56 ppb로, 약 34 ppb의 일변화 폭을 보였다. 전체 군집 중에서 지상 오존 농도의 일 최고 농도와 가장 큰 일변화는 모두 해풍 발생일 군집에서 나타났다.

그림 7은 국지 순환 패턴 군집별로 계산된 최대 일 8시간 평균(Maximum Daily 8-h Average: MDA8) 오존 농도의 빈도 분포를 보여준다. MDA8는 하루 동안 측정된 오존 농도 중 연속된 8시간 평균값 중 가장 높은 값으로 계산하며(Park *et al.*, 2024), 환경부 국립환경과학원에서 제시한 계산 방법을 따라 충청남도 지역에 위치한 AQMS 14 지점을 대상으로 계산하였다. MDA8 오존 농도의 중앙값은 해풍일 군집에서 약 64 ppb로 가장 높게 나타났으며, 남풍 및 북풍 비해풍일 군집에서는 각각 58 ppb와 55 ppb의 값을 나타냈다.

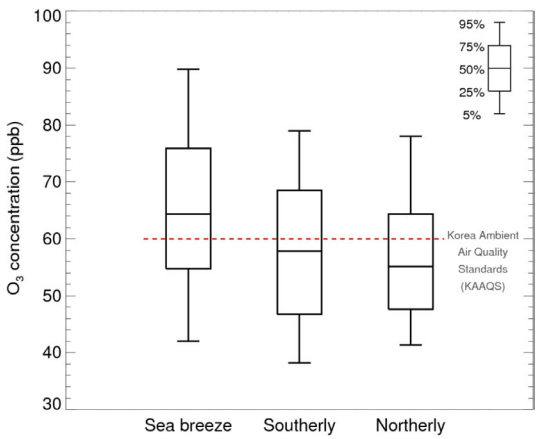

Fig. 7. Distribution of maximum daily 8-hour average ozone concentrations for sea-breeze days, southerly non-sea-breeze days, and northerly non-sea-breeze days. The dotted line represents the Korea Ambient Air Quality Standards (KAAQS) for the maximum daily 8-hour average ozone concentration.

따라서, 환경부의 MDA8 오존 대기환경기준인 60 ppb를 초과하는 빈도도 해풍 발생일에 63%로 가장 높게 나타났고, 남풍 및 북풍 비해풍일 군집에서 각각 44%와 35%로 나타났다. 즉, 충청남도 지역에서 지상 오존의 대기환경기준 초과 빈도는 해풍 발생일과 뚜렷한 연관성을 보이고 있으며, 비해풍일에 비해 1.4~1.8배 높은 빈도를 나타내고 있다. 한편, 각 군집의 MDA8 오존 농도 최저값은 38~42 ppb 수준을 유지하였으며, 이를 2021년 연평균 오존 농도(32 ppb)와 비교할 때,

여름 기간 충청남도 지역에서는 저농도 조건에서도 일정 수준 이상의 오존이 지속적으로 유지되는 경향을 보여준다.

4. 요약 및 결론

충청남도 지역의 지상 오존 농도는 측정이 시작된 1990년대 이후 지속적인 상층 추세에 있으며, 빈번하게 대기환경기준을 초과하는 지역으로, 대기질 개선을 위한 다양한 노력이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 충청남도 지역에서의 국지 순환 패턴과 지상 오존 농도의 연관성을 처음으로 분석하였다. 분석을 위해 충청남도 지역의 국지 순환 패턴을 분류하는 기준을 제시하였고, 이를 기반으로 최근 고농도 오존 발생 빈도가 가장 높았던 2021년 5~9월 기간을 대상으로 분석을 수행하였다. 분석 결과, 해풍 발생일은 전체 기간(153일) 중에서 26.8%를 차지하였으며, 남풍 및 북풍 비해풍일 군집은 각각 29.4%와 30.7%로 나타났다. 2021년 해풍 발생일 빈도는 기존 연구에서 제시된 충청남도 지역의 2006~2015년(10년간) 5~9월의 평균 발생 빈도(34.7일)보다 약 4% 높게 나타났다. 해륙풍 군집은 약한 풍속과 시계 방향의 주간 풍향 전환, 남풍 비해륙풍 군집은 강한 풍속과 시계 방향의 주간 풍향 전환, 그리고 북풍 비해륙풍 군집은 보통 풍속과 일중 북동 풍향 지속으로 특징지을 수 있었다.

이러한 충청남도 지역의 특징적인 국지 순환 패턴은 지상 오존 농도의 시공간 분포에 직접적인 영향을 미침을 확인하였다. 야간 시간대에는 해풍 발생일의 평균 오존 농도는 전체 군집 평균에 비해 3~5 ppb 낮은 농도 수준을 나타냈으며, 남풍 비해풍일 군집에서는 4~8 ppb 높은 농도 수준을 보였다. 한편, 주간 시간대에 해풍 발생일 군집의 평균 오존 농도는 남풍 및 북풍 비해풍일 군집보다 5~10 ppb 높은 값을 보였으며, 충청남도 북부(당진, 아산, 천안) 및 남부(보령, 서천) 지역에서는 약 70 ppb의 고농도 오존이 형성됨을 확인하였다. 비해풍일 군집에서는 남풍 군집의 평균 오존 농도가 북풍 군집에 비해 다소 높은 값을 보였다. 해풍일 군집에서 MDA8 오존 농도의 대기환경기준 초과 빈도는 63%로 나타나, 남풍 및 북풍 비해풍일 군집보다 40~80% 높은 빈도를 보였다.

본 연구를 통해 충청남도 지역에서의 국지 순환 패턴과 지상 오존 농도의 밀접한 연관성이 존재함을 정량적으로 확인하였으며, 이는 오존 대기질 개선을 위한 노력에 국지 순환의 영향이 중요하게 고려되어야 함을 시사한다. 다만, 대상 지역에서 특징적인 국지 순환이 형성되는 과정과 지상 오존의 형성에 관여하는 일련의 물리/화학 과정(배출, 화학 변환, 장/단거리 수송 및 확산 과정 등) 간의 상호 작용에 대한 물리/화학적 메커니즘의 이해를 위해서는 향후 연구가 필요할 것으로 생각한다. 예를 들어, 국지 해륙풍 순환에 의한 잔류층 오존 재수송 메커니즘을 제시한 Zhao *et al.* (2022)의 연구와 대도시 오염 플룸의 해양 경계층 수송 메커니즘과 PAN 열분해 화학 과정을 결합한 Lee *et al.* (2011)의 연구는 충청남도 지역의 국지 순환과 오존 형성 메커니즘을 이해하기 위한 기반 연구가 될 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

이 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원(NIER-2021-03-03-007)의 지원을 받아 수행하였고, 마서아는 기상청의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받았습니다.

References

Agathokleous, E., Feng, Z., Oksanen, E., Sicard, P., Wang, Q., Saitanis, C.J., Araminiene, V., Blande, J.D., Hayes, F., Calatayud, V., Domingos, M., Veresoglou, S.D., Peñuelas, J., Wardle, D.A., Marco, A.D., Li, Z., Harmens, H., Yuan, X., Vitale, M., Paoletti, E. (2020) Ozone affects plant, insect,

and soil microbial communities: A threat to terrestrial ecosystems and biodiversity, Science Advances, 6(33). https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1176

Berman, J.D., Breysse, P.N., White, R.H., Waugh, D.W., Curriero, F.C. (2015) Evaluating methods for spatial mapping: Applications for estimating ozone concentrations across the contiguous United States, Environmental Technology & Innovation, 3, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.eti.2014.10.003

Chung, Y.-S., Chung, J.-S. (1991) On surface ozone observed in the Seoul Metropolitan Area during 1989 and 1990, Journal of Korea Air Pollution Research Association, 7(3), 169-179, (in Korean with English abstract).

Geddes, J.A., Wang, B., Li, D. (2021) Ozone and nitrogen dioxide pollution in a coastal urban environment: The role of sea breezes, and implications of their representation for remote sensing of local air quality, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126(18), e2021JD035314. https://doi.org/10.1029/2021JD035314

Hu, J., Shi, C., Ni, E., Liu, J., Zhai, S., Zhao, T., Jiang, B., Jiang, D., Wang, H., Huang, Q. (2024) Recirculated transport mechanism aggravates ozone pollution over the mountainous coastal region: Increased contribution from vertical mixing, Atmospheric Environment, 332, 120617. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120617

Hwang, K., Park, S., Lee, G., Noh, S., Kim, J., Lee, J.Y., Park, J.-S., Kim, J.B. (2023) Policy Recommendation for Region Air Quality Management and Change of Air Pollutants Emission in ChungNam base on Modified CAPSS, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 39(4), 492-524, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.4.492

Jakab, G.J., Spannhake, E.W., Canning, B.J., Kleeberger, S.R., Gilmour, M.I. (1995) The effects of ozone on immune function, Environmental Health Perspectives, 103(suppl 2), 77-89. https://doi.org/10.1289/ehp.95103s277

Jeong, Y., Lee, H.W., Jeon, W. (2020) Regional Differences of Primary Meteorological Factors Impacting O_3 Variability in South Korea, Atmosphere, 11(1), 74. https://doi.org/10.3390/atmos11010074

Jerrett, M., Burnett, R.T., Pope, C.A., 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

Kang, J.-E., Oh, I.-B., Song, S.-K., Kim, Y.-K. (2012) Characteristics of surface ozone in a valley area located downwind from coastal cities under sea-breeze condition: Seasonal variation and related winds, Journal of the Environmental Sciences, 21(2), 153-163, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5322/JES.2012.21.2.153

Kim, J.B., Yoon, S.H., Lee, S.S., Kim, K.H., Noh, S., Bae, G.-N. (2020) Spatial and Temporal Distributions of PM_{10} and $PM_{2.5}$ Concentrations in Chungcheongnam-do, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(4), 464-481, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.464

Kim, S.-Y., Yi, S.-J, Eum, Y.S., Choi, H.-J., Shin, H., Ryou, H.G., Kim, H. (2014) Ordinary kriging approach to predicting long-term particulate matter concentrations in seven major Korean cities, Environmental Analysis Health and Toxicology, 29, e2014012. https://doi.org/10.5620/eht.e2014012

Kim, Y.-K., Lee, H.-W., Jeon, B.-I., Hong, J.-H. (1996) The influences of sea breeze on surface ozone concentration in Pusan coastal area, Korea, Journal of Korean Environmental Sciences Society, 5(3), 265-275, (in Korean with English abstract).

Korea Meteorological Administration (KMA) (2016) A Study on Local Sea Breeze Circulations along the West Coast of Chungcheongnam-do Based on Intensive Three-Dimensional Observations, (in Korean), Daejeon Regional Meteorological Administration, Korea Meteorological Administration, Daejeon, Korea. Available at: https://dl.nanet.go.kr/search/searchInnerDetail.do?controlNo=MONO1201707610 (accessed on May 16, 2025).

Lee, E.-H. (2001) Impacts of Land-Sea Breeze Circulation on the Concentrations of Air pollutants in the Southeastern Coastal Region of Korea, (in Korean), College of Natural Sciences Dept. of Earth and Environmental Sciences Master's Degree. http://dcollection.snu.ac.kr:80/jsp/common/DcLoOrgPer.jsp?sItemId=000000065473

Lee, J.-H., Lee, S.-H., Kim, H.C. (2019) Detection of Strong NO_X Emissions from Fine-scale Reconstruction of the OMI Tropospheric NO_2 Product, Remote Sensing, 11(16), 1861. https://doi.org/10.3390/rs11161861

Lee, S.-H., Kim, S.-W., Trainer, M., Frost, G.J., McKeen, S.A., Cooper, O.R., Flocke, F., Holloway, J.S., Neuman, J.A., Ryerson, T., Senff, C.J., Swanson, A.L., Thompson, A.M. (2011) Modeling ozone plumes observed downwind of New York City over the North Atlantic Ocean during the ICARTT field campaign, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 7375-7397. https://doi.org/10.5194/acp-11-7375-2011

Lee, S.J., Lee, S.-H., Choi, H.-J., Kim, J., Kim, M.-K. (2024) Influence

of Local Circulation on Short-term Variations in Ground-level $PM_{2.5}$ Concentrations, Aerosol and Air Quality Research, 24(10), 240042. https://doi.org/10.4209/aaqr.240042

Li, W., Wang, Y., Bernier, C., Estes, M. (2020) Identification of sea breeze recirculation and its effects on ozone in Houston, TX, during DISCOVER-AQ 2013, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(22), e2020JD033165. https://doi.org/10.1029/2020JD033165

Li, Y., Wu, Z., Ji, Y., Chen, T., Li, H., Gao, R., Xue, L., Wang, Y., Zhao, Y., Yang, X. (2024) Comparison of the ozone formation mechanisms and VOCs apportionment in different ozone pollution episodes in urban Beijing in 2019 and 2020: Insights for ozone pollution control strategies, Science of The Total Environment, 908, 168332. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168332

Lim, H.-J., Lee, Y.-H. (2019) Characteristics of Sea Breezes at Coastal Area in Boseong, Atmosphere, 29(1), 41-51, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.1.041

Miller, S.T.K., Keim, B.D., Talbot, R.W., Mao, H. (2003) Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts, Reviews of Geophysics, 41(3), 1011. https://doi.org/10.1029/2003RG000124

Monteiro, A., Gama, C., Cândido, M., Ribeiro, I., Carvalho, D., Lopes, M. (2016) Investigating ozone high levels and the role of sea breeze on its transport, Atmospheric Pollution Research, 7(2), 339-347. https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.013

National Institute of Environmental Research (NIER) (2023) Annual Report of Air Quality in Korea, 2022 (in Korean) NIER-GP2023-046.

Oh, H.S., Ghim, Y.S. (1999) Characteristics of surface and synoptic meteorology during high ozone episodes in the greater seoul area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 15(4), 441-455, (in Korean with English abstract).

Oh, I.-B., Kim, Y.-K., Lee, H.w., Kim, C.-H. (2006) An observational and numerical study of the effects of the late sea breeze on ozone distributions in the Busan metropolitan area, Korea, Atmospheric Environment, 40(7), 1284-1298. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.049

Orlando, J.P., Alvim, D.S., Yamazaki, A., Corrêa, S.M., Gatti, L.V. (2010) Ozone precursors for the São Paulo Metropolitan Area, Science of The Total Environment, 408 (7), 1612-1620. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.060

Park, S.-M., Han, J.-S., Ahn, J.-Y., Park, J.-S., Kim, D.-G., Park, J.M., Yoo, M., Lee, G. (2024) Assessment of WHO Seasonal Ozone Standard Using Long-term Trends of Ambient Ozone in South Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 40 (4), 477-485, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.4.477

Shen, Y., Jiang, F., Feng, S., Xia, Z., Zheng, Y., Lyu, X., Zhang, L., Lou, C. (2023) Increased diurnal difference of NO_2 concentrations and its impact on recent ozone pollution in eastern China in summer, Science of The Total Environment, 858(1), 159767. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159767

Tie, X., Geng, F., Peng, L., Gao, W., Zhao, C. (2009) Measurement and modeling of O_3 variability in Shanghai, China: Application of the WRF-Chem model, Atmospheric Environment, 43(28), 4289-4302. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.008

Wang, N., Du, Y., Chen, D., Meng, H., Chen, X., Zhou, L., Shi, G., Zhan, Y., Feng, M., Li, W., Chen, M., Li, Z., Yang, F. (2024) Spatial disparities of ozone pollution in the Sichuan Basin spurred by extreme, hot weather, Atmospheric Chemistry and Physics, 24, 3029-3042. https://doi.org/10.5194/acp-24-3029-2024

Yang, Y., Zhou, Y., Wang, H., Li, M., Li, H., Wang, P., Yue, X., Li, K., Zhu, J., Liao, H. (2024) Meteorological characteristics of extreme ozone pollution events in China and their future predictions, Atmospheric Chemistry and Physics, 24, 1177-1191. https://doi.org/10.5194/acp-24-1177-2024

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

Zhao, D., Xin, J., Wang, W., Jia, D., Wang, Z., Xiao, H., Liu, C., Zhou, J., Tong, L., Ma, Y., Wen, T., Wu, F., Wang, L. (2022) Effects of the sea-land breeze on coastal ozone pollution in the Yangtze River Delta, China, Science of The Total Environment, 807(2), 150306. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150306

Authors Information

마서아(국립공주대학교 대기과학과 석사과정 학생)
(sma@smail.kongju.ac.kr)

이상현(국립공주대학교 대기과학과 교수)
(sanghyun@kongju.ac.kr)