

논문

광양만권 오존 발생특성 연구 - 군집분석 중심으로 -

Characteristics of High Ozone Concentration in Gwangyang Bay Area - Based on Cluster Analysis -

박현수, 김학림, 박혜영, 이보람, 최희진, 임희정, 박찬오, 박귀환,
박종수, 김득수^{1),*}

전라남도보건환경연구원, ¹⁾국립군산대학교 환경공학과

Hyun-Soo Park, Hak-Rim Kim, Hye-Young Park, Bo-Ram Lee, Hee-Jin Choi,
Hui-Jeong Im, Chan-O Park, Gui-Hwan Park, Jong-Soo Park, Deug-Soo Kim^{1),*}

Jeollanam-do Institute of Health and Environment, Muan, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Gunsan,
Republic of Korea

접수일 2021년 12월 9일

수정일 2022년 1월 11일

채택일 2022년 2월 17일

Received 9 December 2021

Revised 11 January 2022

Accepted 17 February 2022

*Corresponding author

Tel : +82-(0)63-469-4764

E-mail : dskim@kunsan.ac.kr

Abstract The recent increase in the number of measurement points has caused changes to appear in the high-concentration ozone (O_3) measurement points in the Gwangyang Bay area. Thus, it is necessary to plan emission characteristics and management measures through clustering rather than managing existing points. In the present study, cluster analysis was used to cluster measuring stations with high similarities in the daily average and daily maximum O_3 concentration using the NbCluster Package of R-program. The cluster analysis divided the daily average O_3 concentration into three groups (average A, B, and C clusters), and the daily maximum O_3 concentration into two groups (max A, B clusters). NO_x and O_3 concentrations were compared for each cluster. The average concentration of O_3 was high for average C cluster and max B cluster, and the average concentration of NO_x was high for average C cluster and max A cluster. Average C cluster represents urban areas with high-rise building and heavy traffic, which have higher O_3 and NO_x concentrations than in other clusters. Comparing the $VOCs/NO_x$ in Gwangyang Bay area gave the following results: $VOCs/NO_x$ in average C cluster was 9.84, similar to the highest 8 ratio in O_3 generation, and $VOCs/NO_x$ in average B cluster was 3.68, indicating a $VOCs$ -limited environmental condition. To reduce O_3 by cluster, a method of controlling $VOCs$, which act as a common precursor for higher O_3 concentrations, is effective, and to this end, measures must be taken to reduce VOC emissions in Yeosu Industrial Complex. Further, it is necessary to simultaneously measure O_3 precursors and O_3 concentrations by installing a photochemical measuring station to establish countermeasures against higher O_3 concentrations at the points of Sindae and Yeonhyang-dong in Suncheon.

Key words: Gwangyang Bay area, O_3 , Cluster analysis, $VOCs/NO_x$, $VOCs$ -limited environmental condition

1. 서론

여수, 순천, 광양을 중심으로 하는 광양만권은 오존(Ozone)의 전구물질인 NO_x (Nitrogen oxides)와 $VOCs$ (Volatile organic compounds)를 대규모로 배출하는 산업단지가 위치하고 있는 임해공업지역으로 환경부는 다른 지역에 비해 오존에 대한 관리가 필요하다고 보고한 바 있다(NIER, 2011).

오존은 지상에서 약 15~50 km 상공의 성층권에서 생성되는 성층권 오존과 지표면에서 NO_2 의 광화학 반응에 의해 생성되는 지표 오존으로 구분할 수 있다. 성층권 오존은 태양에서 발생하는 유해한 자외선을 차단시켜 지상의 생물을 보호하는 등 긍정적인 역할을 하지만, 지표 오존은 대류권에서 광화학 반응에 의해 생성되며 산화력이 강하여 장시간 흡입하면 호흡기관에 영향을 미쳐서 천식과 기관지 질환을 악화시

켜 인체에 심각한 피해를 끼치는 대기오염물질로 알려져 있어 대기환경기준물질로 지정하여 관리하고 있다(Kim *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2013).

광양만 권역에 오존 개선을 위해 광양만권을 ‘대기환경규제지역’으로 지정하고 여수 국가산업단지를 ‘대기보전특별대책지역’으로 지정하는 등 지속적인 노력으로 아황산가스(SO₂), 일산화탄소(CO)와 같은 1차 대기오염물질은 감소하고 있으나 오존과 같은 2차 대기오염물질은 고농도 발생빈도가 증가하는 등 해당지역에서 가시적인 오존 저감효과를 나타내지 못하고 있다(Bae *et al.*, 2018; Do and Yoo, 2014).

광양만권 오존에 대한 선행 연구를 살펴보면 Park *et al.* (2020)은 HYSPLIT 모델링을 이용하여 고농도 오존 발생 시 대기오염물질은 장거리 수송(33%)보다 단거리 수송(67%)의 영향이 높았음을 보고하였고, Bae *et al.* (2018)은 CMAQ-HDDM을 이용하여 광양만 지역의 오존농도에 대한 국외 배출량의 기여도가 45% 정도로 보고하였다. Lee and Seo (2017)는 광양시의 고농도 오존 발생 시 기상조건은 기온 24°C 이상, 상대습도 40~80%, 일평균 풍속 3 m/s 이하, 일사량 1.5~3.5 MJ/m², 일조시간 7시간 이상, 그리고 광양만에서는 부는 남풍계열의 풍향으로 보고하였고, Song and Kim (2008)은 광양만 권역에서의 측정소별 오존 농도자료 분석한 결과 남쪽에서 발생한 고농도 오존이 북쪽으로 이동하는 패턴을 보고한 바 있다. Choi *et al.* (2008)은 광양만 권역에서의 고농도 오존 사례에 대한 기상 및 대기질 자료를 바탕으로 이 지역 오염물질의 이류와 확산에 대한 분석결과 종관규모의 대기운동과 국지규모의 대기운동이 발생하거나 대기정체의 유형이 나타나는 종관상태에서 고농도 오존 빈도가 높음을 보고하였고, Kim and Lee (2011)는 광양만권은 연안지역으로 해륙풍·종관규모 순환계 및 복합적인 지역 특성에 따라 오염물질의 확산과 이류가 불리하다고 보고된 바 있다.

최근 측정지점이 증가하면서 광양만권의 고농도 오존 측정지점에 변화가 나타나고 있으며, 기존 지점별 관리보다는 군집화를 통해서 배출특성과 관리대책을

계획할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 광양만권 내 17개 도시대기측정소의 최근 2016년~2020년까지 관측자료와 2개 광화학측정소의 자료를 이용하여 오존 경보제 기간 동안의 일 평균농도, 일 최대 농도를 기준으로 군집화하여 군집별 원인을 분석하고 군집별 저감방안을 제시하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 대상지역

본 연구의 대상지역인 광양만권은 도서간 길이가 27 km, 남북의 폭이 15 km로 광양, 여수, 순천, 남해, 하동으로 둘러싸인 폐쇄된 지형이며, 대규모 산업단지인 여수 화학산업단지, 광양 철강산업단지가 위치해 있어 대기오염에 취약한 지역이다(NIER, 2009). 최근 2016년~2020년까지 5년간의 전남 오존주의보 발령현황을 보면 총 161회 중 139회가 광양만권역에 집중 발령되어 고농도 오존의 심각성이 대두되고 있다(그림 1).

광양만권 지역별 오존의 분포 및 발생특성을 파악하기 위하여 여수지역 8개, 순천지역 5개, 광양지역 4

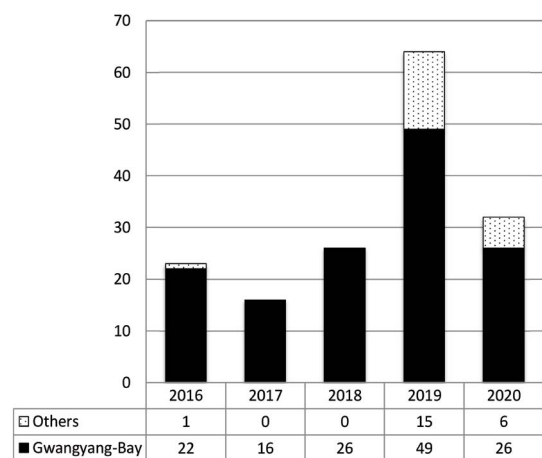


Fig. 1. Ozone warning of Jeonnam in last five years. Gwangyang Bay: three cities in Jeonnam, Others: nineteen cities and counties in Jeonnam.

개 총 17개 도시대기측정소의 오존, 질소산화물 관측 자료와 2개 광화학측정소의 휘발성 유기화합물질 자료를 이용하였다(표 1, 그림 2). 측정소는 주위의 직접



Fig. 2. Locations of air quality and photochemical assessment monitoring stations in Gwangyang Bay area (19 sites).

적인 영향을 받지 않는 건물 옥상에 위치하고 있으며, 채취구는 신대측정소가 지면으로부터 16 m로 가장 높은 위치에 있고 태인동, 여천동, 호두리는 5~6 m로 낮은 위치에 있어 지표 오존을 측정하고 있다.

관측자료는 최근 5년간(2016년~2020년)의 오존 경보제 기간(4월 15일~10월 15일) 동안 측정된 자료 중 국립환경과학원에서 확정된 자료를 사용하였으며, 기상자료는 순천, 광양지방기상청에서 측정된 시간별 풍속, 풍향자료를 사용하였다. 군집분석은 조사대상 17개 측정지점의 모든 자료가 동시에 존재하는 2019년~2020년의 관측 자료를 사용하였다.

2.2 통계방법

2.2.1 군집분석

군집분석(Cluster Analysis)과 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 이용하여 자료의 적정 군집 수와 지점 간 평균 비교 등을 통해 측정소 그룹별 차이에 대한 비교분석을 실시하였다.

Table 1. Status of air quality monitoring stations and photochemical assessment monitoring stations (19 sites).

No.	Monitoring station	City	Station name	Site characteristics	Sampling height (m)
1	Air quality	Yeosu	Seogwang	Residential area	9
2			Wolnae	Industrial area	9
3			Munsu	Residential area	9
4			Yeocheon	Natural green area	6
5			Deokchung	Commercial area	13
6			Hwayang	Planning management area	9
7			Yulchon	Industrial area	9
8			Samil	Residential area	12
9		Suncheon	Jangcheon	Commercial area	12
10			Yeonhyang	Residential area	13
11			Suncheon-Bay	Productive green area	15
12			Hoduri	Natural green area	5
13		Gwangyang	Sindae	Residential area	16
14			Jungdong	Residential area	13
15			Taein	Industrial area	6
16			Jinsang	Residential area	10
17			Gwangyang-eup	Residential area	14
18	Photochemical assessment	Yeosu	Jungheung	Industrial area	18
19		Gwangyang	Golyak	Industrial area	9

군집의 수를 결정하는 가장 대표적인 방법으로는 계층적 군집화 방법(Hierarchical clustering Method)과 비계층적 군집화 방법(Non-Hierarchical clustering Method)으로 나눌 수가 있다(Lee, 2016; Do and Yoo, 2014).

계층적 군집화 방법은 유사한 집단끼리 순차적으로 묶어가는 방법으로 집단 간 거리를 측정하는 방법에 따라 최단 연결법(Single Linkage), 최장 연결법(Complete Linkage), 평균 연결법(Average Linkage), 중심 연결법(Centroid Linkage)으로 구분된다(Do and Yoo, 2014). 최단 연결법은 두 군집 사이의 거리를 각 군집에 속하는 임의의 두 데이터들 사이의 거리 중 최단거리로 묶어 나가는 방법이고, 최장 연결법은 두 군집 사이의 거리를 각 군집에 속하는 임의의 두 데이터들 사이의 거리 중 최장거리로 묶어 나가는 방법이다(Lee, 2016). 평균 연결법은 두 군집 사이의 거리를 각 군집에 속하는 모든 데이터들의 평균 거리로 묶어 나가는 방법이며, 중심 연결법은 두 군집의 중심점 사이의 거리로 묶어 나가는 방법이다(Lee, 2016).

비계층적 군집분석은 다양한 형태의 데이터에 대해 적용이 가능하며, 대표적인 방법으로는 K-means 군집분석, K-medoids 군집분석이 있다(Lee, 2016). K-means 군집분석은 유사한 특성을 지니는 데이터들을 K개의 그룹으로 분할하는 방법으로 각 군집의 데이터 평균값을 중심점으로 근접한 거리에 있는 데이터를 묶어 분할하는 방법이다(Bae and Roh, 2005). K-medoids 군집분석은 임의의 클러스터 내부의 객체들이 다른 클러스터 내부의 객체들보다 유사한 패턴을 보이도록 객체들을 분할하는 방법으로 클러스터의 무게 중심점을 대표 값으로 분할해 나가는 방법이다(Bae and Roh, 2005). 본 연구에서는 R-program의 NbClust Package의 평균연결법을 이용하여 측정소별 일 평균, 일 최대 오존농도의 유사성이 높은 측정소끼리 군집화하였다. NbClust Package는 Charrad *et al.* (2015)이 R-program 기반 군집분석에서 적정클러스터 수를 결정하기 위해 개발한 프로그램이다.

2.2.2 분산분석

분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)은 3개 이상 다수의 집단의 평균에서 분산값을 비교하는 데 사용되는 통계기법이다. 분산분석의 종류는 독립변인 1개와 종속변인 1개일 때 일원분산분석(One-way ANOVA)과 독립변인 2개와 종속변인 1개일 때 이원분산분석(Two-way ANOVA)과 독립변인 2개와 종속변인 1개~2개일 때 다원변량분석(MANOVA; multiple analysis of variance)으로 나눌 수가 있다(Jung, 2011). 분산분석에서 모집단의 평균들 간에 다중비교(multiple comparison)를 위한 사후검정방법에는 피셔(Fisher)의 최소유의차(Least Significant Difference: LSD), 쉘페(Scheffe)의 검정법, 던칸(Duncan)의 다중범위(multiple range), 투키(Turkey)의 검정 등이 있다(Jung, 2011).

피셔의 LSD 방법과 던칸의 다중범위검정법은 모집단의 평균들 간의 차이가 유의한지 검정하는 방법이고, 투키의 검정법, 쉘페의 검정법은 모집단의 평균들 간의 차이에 대한 동시 신뢰구간을 이용하여 검정하는 방법이다. 자료의 수가 같거나 비슷할 때는 던칸, 투키, 자료수가 다를 때는 쉘페의 사후검증을 실시한다(Jung, 2011). 이번 연구에서는 측정소별 관측자료를 가지고 지점 간 차이가 있는지 확인하기 위해 일원분산분석을 실시하였고 자료수가 다르면서 다중대조(multiple contrast)를 검증하는 쉘페의 검증법(Scheffe's method)을 사용하였다.

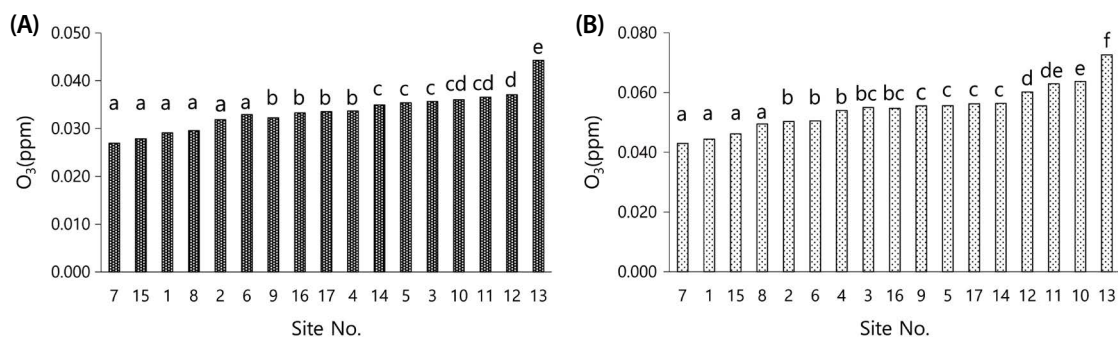
3. 연구 결과 및 고찰

3.1 측정 결과

최근 5년간 오존정보제 기간의 광양만권의 각 측정소별 일 평균(Daily average concentration), 일 최대 평균(Average of daily max), 일 최대(Daily max value) 오존농도를 계산한 결과는 표 2와 같았고, 일원분산분석을 통해서 지점별 차이가 있는지 검토한 결과는 그림 3과 같다.

Table 2. Ozone concentrations at each station from 2016 to 2020.

No.	Station name	Daily average concentration (ppm)	Average of daily max (ppm)	Daily max value (ppm)	Number of data (ea)
1	Seogwang	0.029 ± 0.012	0.044 ± 0.019	0.166	920
2	Wolnae	0.032 ± 0.011	0.050 ± 0.019	0.169	919
3	Munsu	0.036 ± 0.014	0.055 ± 0.023	0.169	917
4	Yeocheon	0.034 ± 0.013	0.054 ± 0.024	0.232	918
5	Deokchung	0.035 ± 0.014	0.056 ± 0.022	0.166	920
6	Hwayang	0.033 ± 0.012	0.050 ± 0.020	0.159	443
7	Yulchon	0.027 ± 0.011	0.043 ± 0.019	0.110	444
8	Samil	0.030 ± 0.011	0.049 ± 0.021	0.147	444
9	Jangcheon	0.032 ± 0.013	0.056 ± 0.024	0.155	920
10	Yeonhyang	0.036 ± 0.015	0.064 ± 0.028	0.204	894
11	Suncheon-Bay	0.037 ± 0.013	0.063 ± 0.027	0.209	884
12	Hoduri	0.037 ± 0.014	0.060 ± 0.025	0.169	915
13	Sindae	0.044 ± 0.016	0.073 ± 0.031	0.195	364
14	Jungdong	0.035 ± 0.012	0.056 ± 0.024	0.210	909
15	Taein	0.028 ± 0.011	0.046 ± 0.018	0.170	913
16	Jinsang	0.033 ± 0.011	0.055 ± 0.022	0.178	879
17	Gwangyang-eup	0.034 ± 0.013	0.056 ± 0.023	0.155	915

**Fig. 3.** The bar graph of means for each level of the independent variable of one-way ANOVA. The values separated by the same character are not significantly different according to Scheffe's method (A) daily average concentration, (B) Average of daily maximum concentration.

ANOVA 검정을 실시한 결과, 일 평균 오존농도는 a (서강동, 월내동, 화양면, 울춘면, 삼일동, 태인동), b (여천동, 장천동, 진상면, 광양읍), c (문수동, 덕충동, 중동), d (호두리), e (신대) 순으로 나타났다. 연향동, 순천만은 c, d 그룹과 차이가 없는 것으로 조사되었다. 일 최대 평균 오존농도는 a (서강동, 울춘면, 삼일동, 태인동), b (월내동, 여천동, 화양면), c (덕충동, 장천동, 중동, 광양읍), d (호두리), e (연향동), f (신대) 순으로 나타났다. 문수동, 진상면은 b, c 그룹과 차이가 없

는 것으로 나타났으며, 순천만은 d, e 그룹과 차이가 없는 것으로 나타났다.

일 평균, 일 최대 평균 오존농도 모두, 순천지역의 측정소가 다른 지역의 측정소보다 높은 농도를 보였다. 일 최대 오존농도는 0.232~0.110 ppm으로 여천동에서 가장 높은 값을 보였고, 울춘면이 가장 낮은 값을 보였다. 높은 오존농도를 보이는 지역들은 해풍시 화학, 철강 산업단지의 풍하지역에 위치하고 있었다.

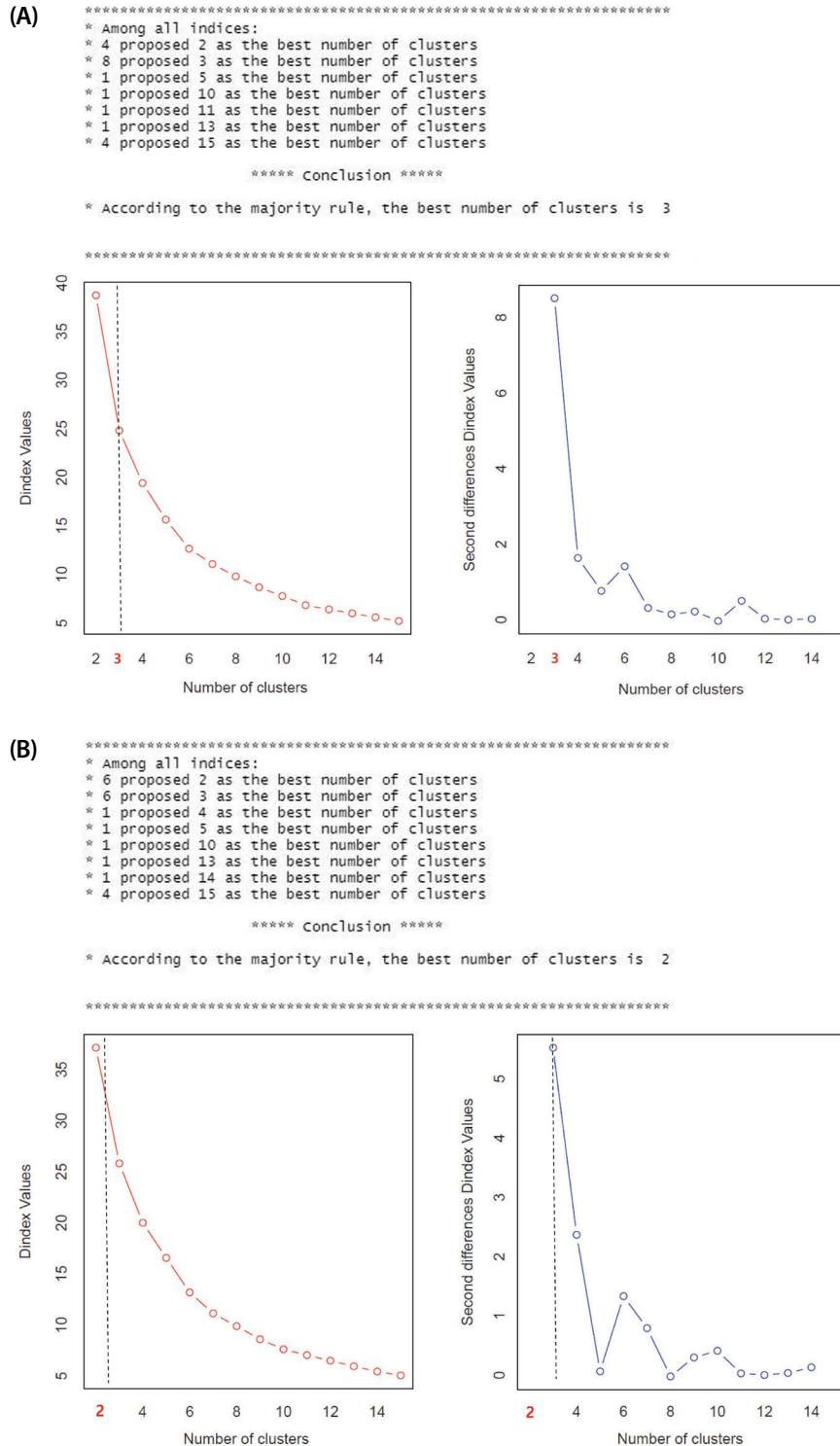


Fig. 4. Hubert index and D index. (A) Daily average ozone concentration, (B) Daily maximum ozone concentration.

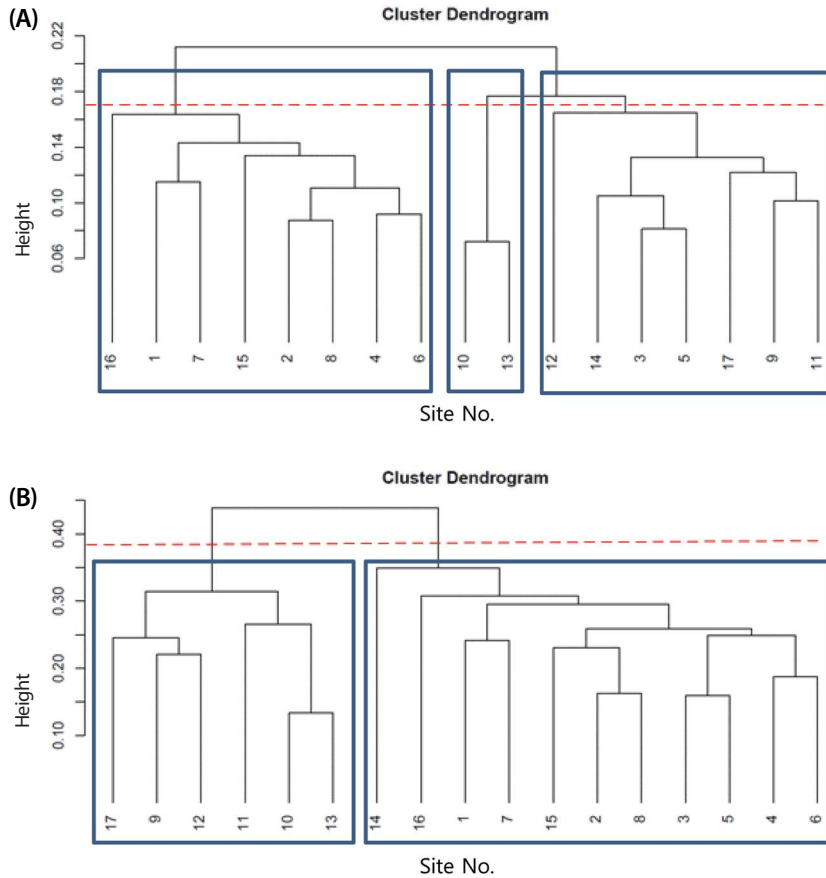


Fig. 5. Dendrogram through hierarchical cluster analysis. (A) Daily average ozone concentration, (B) Daily maximum ozone concentration.

3.2 측정소별 군집화

측정소별 일 평균, 일 최대 오존농도에 대한 군집분석을 위하여 17개 도시대기측정소가 모두 설치된 2019년~2020년까지 2년간의 데이터를 사용하였고, 계층적 군집화 방법인 평균연결법을 적용하여 유사한 지점 간의 군집화하였다. 군집수는 NbClust Package의 휴버트 지수(Hubert index)와 D index를 이용하여 구하였으며, 그 결과 일 평균 오존농도의 군집수는 3개, 일 최대 오존농도의 군집수는 2개로 제시되었다(그림 4). 군집수는 판정기준의 값을 플롯(Plot)하여 그래프 내 급격한 변화가 발생하는 곳에 대응되는 값을 이용한다(Kim and Jeon, 1980).

그림 5와 그림 6은 그림 4에서 제시된 군집수를 이용하여 군집을 나누어 덴드로그램(Dendrogram)과 지도에 표시한 결과이다.

일 평균 오존농도를 이용한 군집분석 결과, Average A cluster는 여수의 서강동, 월내동, 여천동, 화양면, 울촌면, 삼일동, 광양의 태인동, 진상면으로 여수, 광양 산업단지에 인접한 지역이고, Average B cluster는 여수의 문수동, 덕충동, 순천의 장천동, 순천만, 호두리, 광양의 중동, 광양읍으로 해안, 내륙, 도심 등 다양한 지역을 포함하고 있으며, 마지막으로 Average C cluster는 순천의 도심지역인 연향동, 신대로 나타났다(그림 5A, 6A).

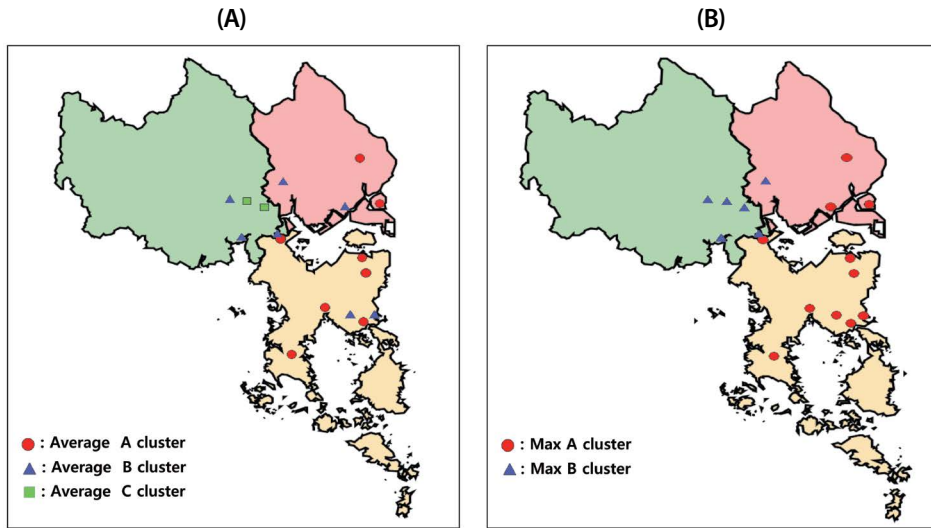


Fig. 6. Air quality monitoring stations by clusters. (A) Daily average ozone concentration, (B) Daily maximum ozone concentration.

일 최대 오존농도를 이용하여 군집분석 결과 2개 군집으로 나눌 수 있었으며, Max A cluster는 여수의 서강동, 월내동, 문수동, 여천동, 덕충동, 화양면, 울촌면, 삼일동, 광양의 중동, 태인동, 진상면이며, Max B cluster는 순천의 장천동, 연향동, 순천만, 호두리, 신대, 광양의 광양읍을 포함하였다. 일 최대 오존농도의 군집에서는 위치적으로 인접한 지역 간에 유사성이 나타났으며 광양지역의 측정소는 지점의 특성에 따라 여수, 순천지역으로 나누어졌다(그림 5B, 6B).

3.3 군집별 O₃과 NO, NO₂, NO_x 농도 특성

대기 중 NO₂는 광분해 (Photolysis) 과정을 통해 NO와 O로 분해되고 O는 대기 중 O₂와 결합하여 O₃을 생성한다고 알려져 있다(Kim *et al.*, 2016). 오존생성 전구물질로 알려진 NO_x와 O₃ 농도를 비교하여 오존에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 군집별 O₃과 NO, NO₂, NO_x 농도의 평균값, 표준편차, 최대, 최소값을 구하였다(표 3).

O₃ 평균농도의 경우, 일 평균 군집에서는 Average A cluster < Average B cluster < Average C cluster, 일 최대 군집에서는 Max A cluster < Max B cluster 순으

로 높은 값을 보였다.

NO_x 평균농도의 경우, 일 평균 군집에서는 Average B cluster < Average A cluster < Average C cluster, 일 최대 군집에서는 Max B cluster < Max A cluster 순으로 높은 값을 보였다.

일 평균 군집의 경우, Average C cluster는 도심지역으로 고층건물과 아파트가 밀집해 있으며, 차량통행량도 많아 다른 군집에 비해 O₃, NO_x 평균농도가 높은 것으로 판단된다. Average B cluster는 O₃, NO_x 최댓값이 각각 97 ppb, 144 ppb 가장 높은 값을 보여 고농도 오존의 발생할 수 있는 지역으로 판단된다. Average A cluster는 O₃ 평균농도, O₃, NO_x 최댓값 모두 가장 낮은 값을 보였다. 이는 산업단지에 인접한 해안지역으로 다른 군집에 비해 산업단지의 풍상에 위치한 결과로 판단된다.

일 최대 군집은 해풍 시 산업단지를 기준으로 풍상, 풍하지역으로 구분할 수 있었다. 풍상지역인 Max A cluster는 O₃ 평균농도가 51.28 ± 21.77 ppb로 풍하지역인 Max B cluster 60.67 ± 26.30 ppb보다 낮은 농도값을 보였다. Song and Kim (2008)이 해풍의 영향으로 산업단지의 오존의 전구물질인 VOCs, NO_x 등을

Table 3. NO, NO₂, NO_x, and O₃ concentrations by group.

Cluster name		NO (ppb)	NO ₂ (ppb)	NO _x (ppb)	O ₃ (ppb)
Average A cluster	Mean	3.21	11.18	15.00	30.83
	SD	2.40	7.00	8.24	11.97
	Min	1.00	1.00	2.00	3.00
	Max	43.00	58.00	60.00	87.00
Average B cluster	Mean	3.24	11.19	14.42	35.10
	SD	2.76	5.55	7.07	13.36
	Min	1.00	1.00	2.00	2.00
	Max	105.00	42.00	144.00	97.00
Average C cluster	Mean	4.49	11.47	15.89	38.15
	SD	2.83	6.01	7.48	15.80
	Min	1.00	2.00	4.00	6.00
	Max	19.00	52.00	61.00	95.00
Max A cluster	Mean	3.33	12.28	15.60	51.28
	SD	2.54	6.74	8.07	21.77
	Min	1.00	1.00	2.00	3.00
	Max	98.00	58.00	111.00	232.00
Max B cluster	Mean	3.37	10.06	13.41	60.67
	SD	2.81	5.01	6.61	26.30
	Min	1.00	1.00	2.00	3.00
	Max	105.00	52.00	144.00	209.00

풍하지역으로 이동시켜 풍하지역의 오존농도가 높게 나타났다는 보고와 유사한 결과를 보였다.

3.4 군집별 고농도 오존 분포 특성

오존의 대기환경기준은 1시간 평균농도 100 ppb 이하, 8시간 평균농도 60 ppb 이하 규정하고 있다. 따라서 1시간 환경기준치인 오존농도가 100 ppb 이상인 자료를 고농도 오존으로 분류, 군집별로 나누어 고농도 오존 분포 특성을 분석하였다.

각 군집의 연도별 100 ppb 이상 발생일수를 표 4와 그림 7에 나타냈다. 3개의 군집에서 100 ppb 이상 발생한 평균일수가 많은 군집은 53~123일로 Average C cluster로 조사되었다. 특히 Average C cluster 중 순천 신대지역은 2019년에 신설된 이후 2019년 179일, 2020년 67일로 100 ppb 이상의 오존이 많이 발생하는 지역으로 나타났다(그림 7C). 다음은 Average B cluster로 19~37일 발생하였으며 Average B cluster 중에서는 순천만이 15~74일로 가장 많은 일수를 보였다

(그림 7B). Average A cluster는 1~25일로 군집 중 낮은 발생빈도를 보였다. Average A cluster 중에서는 태인동의 경우는 0~2일로 가장 낮은 일수를 보였고 여천동은 8~48일로 점차 감소하는 경향을 보였다(그림 7A).

연도별로 분석한 결과 2016년~2018년, 2020년은 17~19일로 유사한 일수를 보인 반면 2019년은 고농도 오존 발생일수가 42일로 2배 이상 많았다.

3.5 NO_x와 VOCs의 오존생성 기여도 평가

군집별 NO_x와 VOCs의 오존생성 기여도를 확인하여 오존 제어 인자를 추정함으로써 효과적인 오존 저감을 위한 전구물질 배출량 제어하는 것이 중요하다.

오존생성 기여도 평가를 위해서 연구기간 중 고농도 오존 발생일수가 많은 2019년도의 NO_x와 VOCs의 자료를 이용하였다. NO_x는 오존 평균농도가 높은 Average C cluster (연향동, 신대)와 골약동 광화학측정소에 인접한 Average B cluster (중동) 자료를 이용

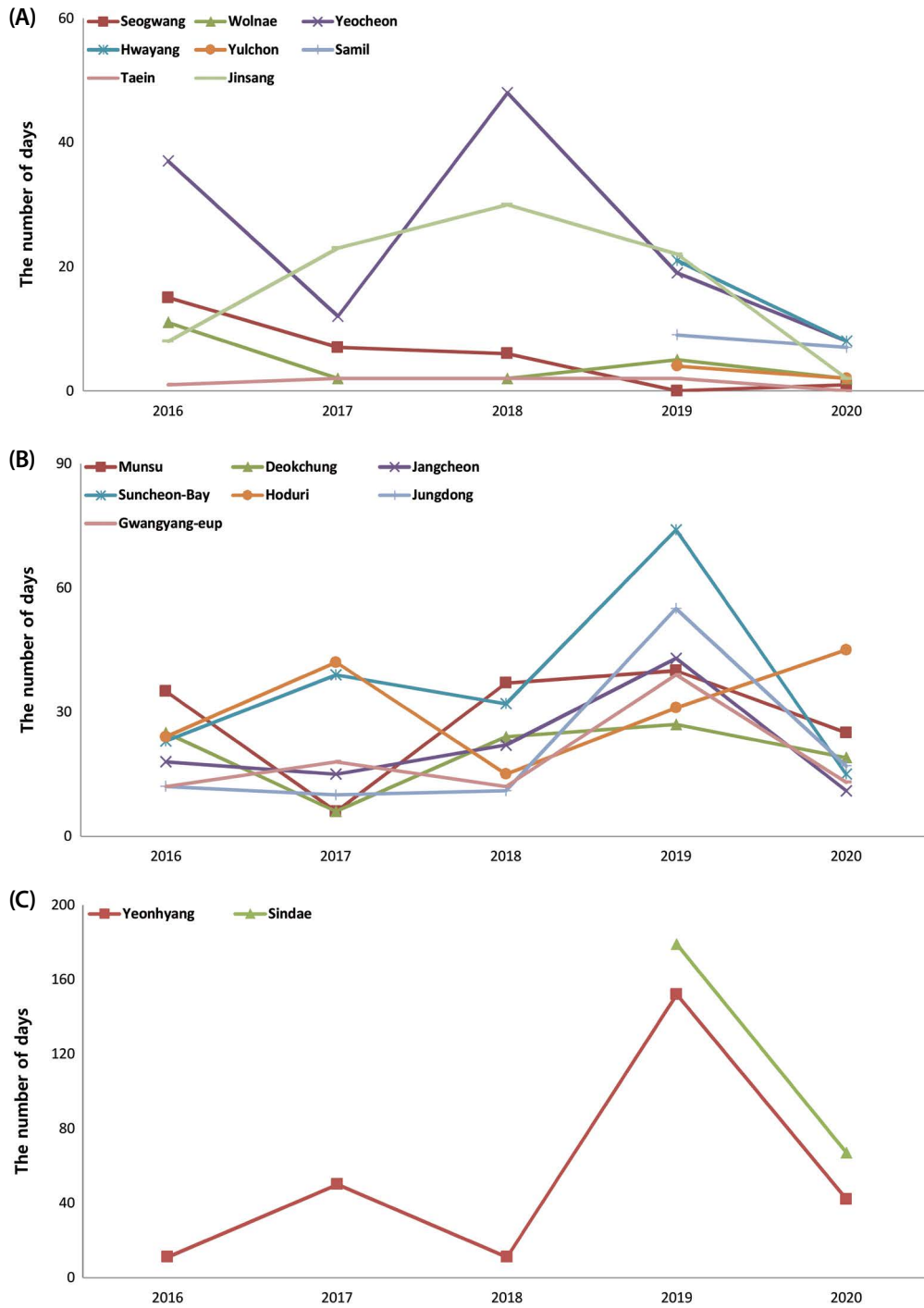
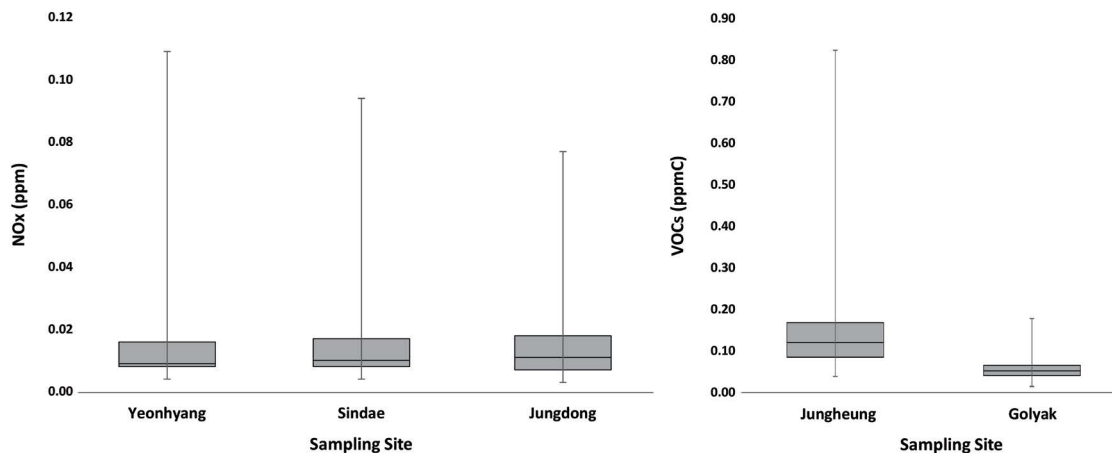


Fig. 7. Number of days of occurrence of 100 ppb or more per year in each cluster. (A) Average A cluster, (B) Average B cluster, (C) Average C cluster.

Table 4. Number of days of occurrence of 100 ppb or more per year in each cluster.

Cluster	Site	2016	2017	2018	2019	2020	Average
Average A	Seogwang	15	7	6	0	1	6
	Wolnae	11	2	2	5	2	4
	Yeocheon	37	12	48	19	8	25
	Hwayang	-	-	-	21	8	15
	Yulchon	-	-	-	4	2	3
	Samil	-	-	-	9	7	8
	Taein	1	2	2	2	0	1
	Jinsang	8	23	30	22	2	17
Average B	Munsu	35	6	37	40	25	29
	Deokchung	25	6	24	27	19	20
	Jangcheon	18	15	22	43	11	22
	Suncheon-Bay	23	39	32	74	15	37
	Hoduri	24	42	15	31	45	31
	Jungdong	12	10	11	55	17	21
	Gwangyang-eup	12	18	12	39	13	19
Average C	Yeonhyang	11	50	11	152	42	53
	Sindae	-	-	-	179	67	123
Sum/site		232/13	232/13	252/13	722/17	284/17	
Average		18	18	19	42	17	

**Fig. 8.** Comparison of VOCs and NOx concentrations using box plot.

하였고, VOCs는 중흥동 광화학측정소와 골약동 광화학측정소 자료를 이용하였다.

조사지점에서 NOx 농도는 연향동 0.004 ppm~1.109 ppm, 신대 0.004 ppm~0.094 ppm, 중동 0.003 ppm~0.077 ppm 범위로 유사하게 분포하였고, VOCs

농도는 중흥동 0.0395 ppmC~0.8236 ppmC, 골약동 0.0148 ppmC~0.1783 ppmC 범위로 평균값 비교 시 중흥동이 골약동보다 2.6배 정도 높은 값을 보였고, 그림 8에 나타냈다.

Dodge (1997)는 오존의 생성이 NOx와 VOCs의 농

도뿐만 아니라 VOCs와 NOx의 농도비와 오존농도의 관계가 있으며 VOCs/NOx 값이 4 이하인 경우면 VOCs-limited 환경으로 VOCs 농도가 오존농도 증감의 주요요인이며, VOCs/NOx 값이 8에 가까우면 VOCs와 NOx가 모두 오존 제안인자로 오존 발생이 가장 높은 환경이며, VOCs/NOx 값이 15 이상인 경우 NOx-limited 환경으로 오존농도의 주요요인은 NOx로 보고하였다(그림 9).

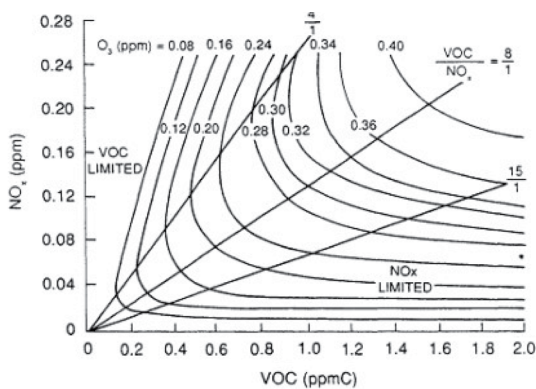


Fig. 9. Typical peak ozone isopleths generated from initial mixtures of VOC and NOx in atmosphere (Dodge, 1977; Do and Yoo, 2014).

연구기간 중 NOx와 VOCs의 오존생성 기여도를 계산한 VOCs/NOx를 그림 10A와 10B에 나타냈다. 그림 10A는 Average C cluster (연향동, 신대)의 NOx 값과 중흥동 광화학측정소의 VOCs 자료를 이용하였고, VOCs/NOx의 평균값은 연향동 10.06, 신대 9.62로 오존 발생이 가장 높은 8비율과 유사한 값을 보였는데 이는 국립환경과학원(2011)에서 보고한 여수산업단지(석유산업)에서 배출되는 VOCs에 의한 영향은 광양만 지역 및 풍하지역에 오존농도를 증가시킨다는 결과와도 일치하였다.

그림 10B는 Average B cluster (중동)의 NOx 농도와 직선거리로 4.8 km 떨어진 골약동 광화학측정소의 VOCs 농도를 이용하여 VOCs/NOx를 구하였다. VOCs/NOx의 평균값은 3.68로 VOCs-limited 환경조건으로 Do and Yoo (2014)이 보고한 부산시에서 공업지역 또는 교통량이 많은 지역의 고농도 오존일 VOCs/NOx의 평균값인 3.16~3.43과 유사한 값을 보였다. 광양시 중동은 NOx를 대규모로 배출하는 광양산업단지(철강산업)와 하동화력발전소가 위치한 지역적 특성에 기인하는 것으로 사료된다.

2019년도 Average C cluster (연향동, 신대), Average

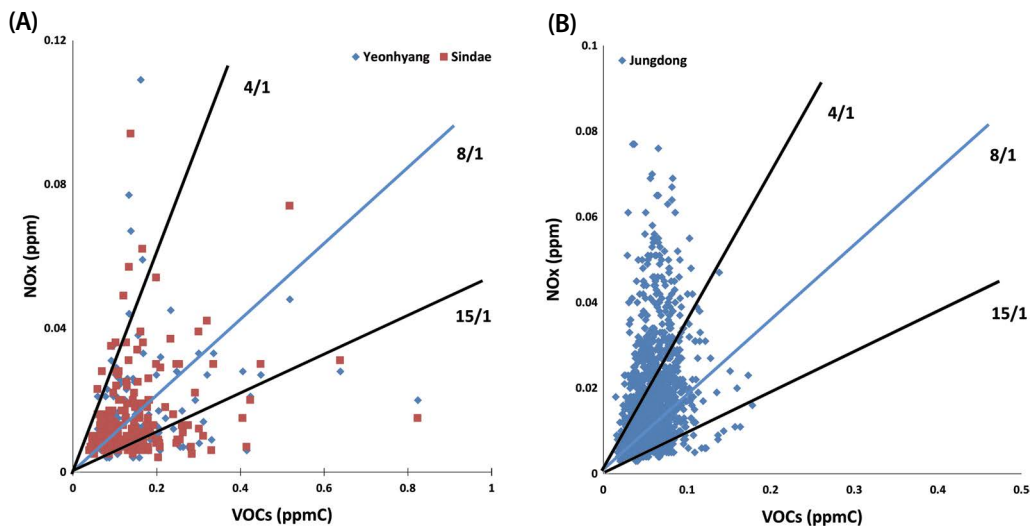


Fig. 10. Comparison of VOCs and NOx concentrations. (A) Average C cluster (NOx) - Jungheung (VOCs), (B) Jungdong (NOx) - Golyak (VOCs).

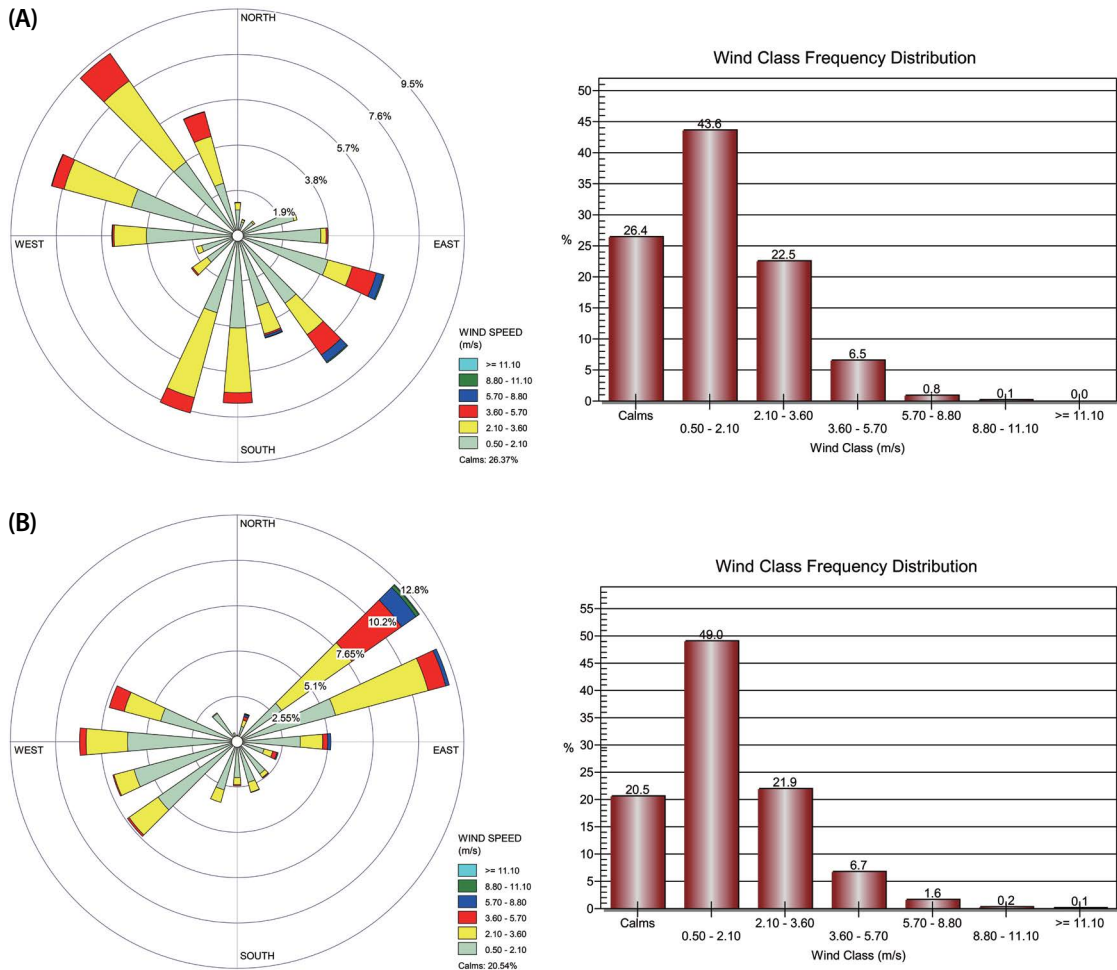


Fig. 11. Windrose and wind class frequency distribution in 2019. (A) Average C cluster, (B) Average B cluster.

B cluster (중등)의 풍향, 풍속을 분석한 결과를 그림 11에 나타내었다. Average C cluster에서 북서풍, 남풍이 우세하였으며, 여수산업단지에서 불어오는 바람인 남동풍은 최고 풍속이 8.80 m/s~11.10 m/s으로 높아 산업단지에서 발생한 VOCs가 측정지점에 영향을 주는 것으로 판단된다. Average B cluster에서 주 풍향은 광양산업단지에서 불어오는 동동북풍임을 확인할 수 있었다.

군집별 고농도 오존 저감을 위해서 Average C cluster는 VOCs와 NO_x가 모두 오존 제한인자로 작용하는 오존 발생이 가장 높은 환경으로 NO_x와 VOCs 모

두를 저감해야 하며, Average B cluster는 VOCs-limited 환경조건으로 NO_x에 비해 상대적으로 낮은 농도인 VOCs를 저감하는 것이 효과적일 것으로 알 수 있다. 이처럼 각각의 군집에서는 고농도 오존 발생의 공통적인 원인으로 작용하는 VOCs를 제어하는 방법이 효과적이며 이를 위해서 여수산업단지의 VOCs 배출량을 감소시키기 위한 대책을 세워서 고농도 오존에 대한 피해를 예방해야 한다. 또한, 순천의 신대, 연향동 지점의 고농도 오존에 대한 대책수립을 위해 광화학측정소를 설치하여 오존전구물질과 오존농도를 동시 측정할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구는 고농도 오존 발생이 잦은 광양만권의 지역별 오존 분포 및 발생특성을 파악하기 위하여 2016년~2020년 광양만권 내 17개 도시대기측정소의 관측 자료를 가지고 오존 경보제 기간 동안의 일 평균농도, 일 최대 농도를 기준으로 군집화하여 군집별 원인을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

군집 분석한 결과 일 평균 오존농도는 3개, 일 최대 오존농도는 2개로 나누었다. 일 평균 오존농도를 이용한 군집분석 결과, Average A cluster는 여수, 광양 산업단지에 인접한 지역이고, Average B cluster는 해안, 내륙, 도심 등 다양한 지역을 포함하고 있으며, 마지막으로 Average C cluster는 순천의 도심지역으로 나타났다. 일 최대 오존농도의 군집(Max A cluster, Max B cluster)에서는 위치적으로 인접한 지역 간에 유사성이 나타났으며 광양지역의 측정소는 지점의 특성에 따라 여수, 순천지역으로 나누어졌다.

군집별로 오존생성 전구물질로 알려진 NO_x와 O₃ 농도를 비교하였다. O₃ 평균농도의 경우, 일 평균 군집에서는 Average A cluster < Average B cluster < Average C cluster, 일 최대 군집에서는 Max A cluster < Max B cluster 순으로 높은 값을 보였다. NO_x 평균농도의 경우, 일 평균 군집에서는 Average B cluster < Average A cluster < Average C cluster, 일 최대 군집에서는 Max B cluster < Max A cluster 순으로 높은 값을 보였다.

광양만권 지역의 VOCs/NO_x비를 비교한 결과, Average C cluster (연향동, 신대)의 VOCs/NO_x 비는 연향동 10.06, 신대 9.62로 오존 발생이 가장 높은 8비율과 유사한 값을 보였고, Average B cluster (중동)의 VOCs/NO_x 비는 3.68로 VOCs-limited 환경조건이었다.

군집별로 오존을 저감하기 위해서는 고농도 오존 발생의 공통적인 원인으로 작용하는 VOCs를 제어하는 방법이 효과적이며 이를 위해서 여수산업단지의 VOCs 배출량을 감소시키기 위한 대책을 세워서 고농

도 오존에 대한 피해를 예방해야 한다. 또한, 순천의 신대, 연향동 지점의 고농도 오존에 대한 대책수립을 위해 광화학측정소를 설치하여 오존전구물질과 오존 농도를 동시 측정할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원(NIER) “환경분야 시험·검사의 국제적 적합성 기반 구축” 사업에 따른 국고보조금이 일부 지원되어 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

References

- Bae, C.-H., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, S.-T. (2018) Quantitative Assessment on Contributions of Foreign NO_x and VOC Emission to Ozone Concentrations over Gwangyang Bay with CMAQ-HDDM Simulations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 708-726. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.708>
- Bae, W.-S., Roh, S.-W. (2005) A Study on K-Means Clustering, *Journal of Korean Statistical Society*, 12(2), 497-508.
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., Niknafs, A. (2015) Determining the Best Number of Clusters in a Data Set. <https://sites.google.com/site/malikacharrad/research/nbc-lust-package>
- Choi, H.-J., Lee, H.-W., Leem, H.-H., Song, J.-H. (2008) The Analysis of Atmospheric Flow Field and Air Quality According to the High Level Ozone Case on Gwangyang Bay, *Journal of Environmental Sciences*, 17 (7), 743-753.
- Do, W.-G., Yoo, E.-C. (2014) The Characteristics of High Ozone Days in Busan, *The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment*, 24(1), 161-173.
- Dodge, M.C. (1977) Combined Use of Modeling Techniques and Smog Chamber Data to Derive Ozone-Precursor Relationships, *Proceedings of the international conference on photochemical oxidant pollution and its control*, 881-889.
- Jung, M.-M. (2011) Comparison of post-hoc of Two-Way ANOVA Interaction Effect: Monte Carlo Simulation Method

- Study, Dept. of Sports Science Graduate School of Sung Kyun Kwan University.
- Kim, D.-S., Jeong, J.-S., Ahn, J.-Y. (2016) Characteristics in Atmospheric Chemistry between NO, NO₂ and O₃ at an Urban Site during MAPS (Megacity Air Pollution Study)-Seoul, Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(4), 422-434. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.4.422>
- Kim, S.-T., Lee, C.-B. (2011) Estimating Influence of Local and Neighborhood Emissions on Ozone Concentrations over the Kwang-Yang Bay based on Air Quality Simulations for a 2010 June Episode, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(5), 504-522. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.5.504>
- Kim, K.-Y., Jeon, M.-S. (1980) SAS Cluster analysis. www.freeeac.com
- Lee, K.-Y., Kwak, K.-H., Park, S.-B., Baik, J.-J. (2013) Sensitivity of Ozone to NOx and VOCs in a Street Canyon, Korean Journal of Atmospheric Environment, 29(3), 307-316, (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-D., Seo, S.-G. (2017) Characteristics Analysis of Ozone Concentrations in Gwangyang-City, A Collection of Environmental Research Papers, 17, 23-30.
- Lee, Y.-H. (2016) Regionalization of Watershed Parameter using Cluster Analysis, Dept. of Urban & Environmental System Eng. Graduate School of Seokyeog University.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2009) Investigation to Analysis of High Ozone Concentration (I), (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2011) Investigation to Analysis of High Ozone Concentration (III), (in Korean).
- Park, H.-Y., Park, H.-S., Kim, H.-R., Oh, G.-Y., Lee, H.-H., Park, J.-S. (2020) Investigation of Ozone Concentration Characteristics on Gwangyang Bay, Journal of Korean Society for Environmental Technology, 21(4), 290-298.
- Song, J.-H., Kim, S.-H. (2008) Spatial Pattern Analysis of High Level Ozone Case on Gwangyang Bay, Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST), 22(1), 9-12.

Authors Information

박현수 (전라남도보건환경연구원 환경연구부 대기질관리과 지방환경연구사) (art3828@korea.kr)

김학림 (전라남도보건환경연구원 환경연구부 대기질관리과 지방환경연구사) (nuno0611@korea.kr)

박혜영 (전라남도보건환경연구원 환경연구부 대기질관리과 지방환경연구사) (phy0921@korea.kr)

이보람 (전라남도보건환경연구원 환경연구부 대기질관리과 지방환경연구사) (2boram@korea.kr)

최희진 (전라남도보건환경연구원 환경연구부 대기질관리과 지방환경연구사) (hj1231@korea.kr)

임희정 (전라남도보건환경연구원 환경연구부 대기질관리과 공무원직) (answhdfuf@korea.kr)

박찬오 (전라남도보건환경연구원 환경연구부 대기질관리과 과장) (pco2020@korea.kr)

박귀환 (전라남도보건환경연구원 환경연구부장) (pgh3777@korea.kr)

박종수 (전라남도보건환경연구원 원장) (bjs1119@korea.kr)

김득수 (국립군산대학교 환경공학과 교수) (dskim@kunsan.ac.kr)