

ORIGINAL ARTICLE

부산지역 고농도 오존일의 선행 기상 특성 연구

도우곤 · 정우식^{1)*}

부산광역시 보건환경연구원, ¹⁾인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터

A Study on the Characteristics of Antecedent Meteorologic Conditions on High Ozone Days in Busan

Woo-Gon Do, Woo-Sik Jung^{1)*}

Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, Busan 616-110, Korea

¹⁾Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

Abstract

Comparing to the other air pollutants like SO₂, CO, the number of exceedance of the ozone national ambient air quality standard(NAAQS) and the ozone warning increased recently in Busan. The purpose of this study is to find out the preliminary symptoms for high ozone days in Busan area. In order to find out the preliminary symptoms, the hourly ozone data at air quality monitoring stations and the hourly meteorological parameters at Busan regional meteorological 2007 to 2013 were used for the analysis. Averaged daily max ozone concentration was the highest(0.055 ppm) at Noksan and Youngsuri in the ozone season from 2007 to 2013. The horizontal distributions of daily max. ozone including all stations in Busan at high ozone days(the day exceeding 0.1 ppm of ozone concentration at least one station) were classified from two to five clusters by hierarchical cluster analysis. The meteorological variables showing strong correlation with daily max. ozone were the daily mean dew point temperature, averaged total insolation, the daily mean relative humidity and the daily mean cloud amount. And the most frequent levels were 19-23°C in dew point temperature, 21-24 MJ/m² in total insolation on the day before, 2.6-3.0 MJ/m² on the very day, 67-80% in relative humidity and 0-3 in cloud amount.

Key words : High ozone, Cluster analysis, Antecedent Meteorologic

1. 서론

우리나라의 경우, 중앙정부와 지자체의 지속적인 대기환경개선 정책의 실행과 배출원 관리 등을 통하여 SO₂, CO와 같은 1차 대기오염물질 농도는 꾸준히 감소하는 추세를 보이고 있으나 오존과 같은 2차 대기오염물질

의 농도는 현 시점에서 지속적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 일반적으로 지표 오존의 생성은 질소산화물, 휘발성 유기화합물, 일산화탄소 등 전구물질들의 태양광에 의한 광화학 반응과 매우 밀접하게 연관되어 있다. 또한 이들 지표부근에서의 오존은 기온, 일사량, 풍속, 대기안정도, 역전층 고도 및 강수 등 기상요소에 의해

Received 13 April, 2015; Revised 17 June, 2015;
Accepted 1 July, 2015

*Corresponding author : Woo-Sik Jung, Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea
Phone: +82-55-320-3932
E-mail: wsjung1@inje.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서도 큰 영향을 받는다. 강력한 산화제로 작용을 하는 오존은 다른 물질과 쉽게 반응하는 화학적 특성을 이용해 약취제거나 소독에 효과적이어서 일부 유용한 목적으로 활용될 수도 있다. 하지만 대기 중에서의 농도 측면에서 본다면 0.1 ppm을 넘어 고농도로 존재하는 경우, 장시간 노출시 호흡기관에 영향을 미쳐 폐기능이 약해지고 기침이 심해지며 눈이 따갑게 되고 식물의 수확량도 감소되는 등 유해한 측면의 작용이 월등히 강화되므로 유해 대기오염물질로 취급될 수밖에 없다.

이러한 고농도 오존의 발생빈도가 증가하면서 생생매카니즘을 규명하기 위한 다양한 연구들이 오랫동안 수행되어 왔는데, 지금까지 이루어진 오존에 대한 연구 경향을 살펴보면, 고농도 오존 예측 모델의 개발 또는 지역적으로 오존의 연중 변화 경향이나 고농도 발생 원인을 밝히기 위한 자료의 통계적 분석, 그리고 기상인자와의 관련성을 밝히는 연구 등이 많았으며, 최근에는 광화학 수치모형을 활용하여 고농도 발생 사례를 모사하거나 원인을 규명하는 연구도 진행되는 경향을 보이고 있다. Kim 등은(2001) 전국 5대 도시의 오존농도 변화 특성을 분석하고 고농도 오존일의 종관패턴을 분류한 바 있고, Choi 등은(2002) 다중회귀분석을 활용하여 대구지역의 오존농도 예측모델을 구성하였다. Shin은(2003) 관측기반 모형을 활용하여 서울시의 고농도 오존 사례를 분석하였으며 Kim 등은(2007) 중회귀 모형을 이용하여 울산 지역의 오존 포텐셜 모형을 설계하였고 Choi 등은(2008) 광양만권의 고농도 오존 발생사례를 분석하기도 하였다. 국외의 경우 Finlayson-Pitts 등은(1993) 지표오존의 생성원인을 전구물질 화학반응의 관점에서 밝힌 바 있으며 Viney 등은(2000) North Carolina 지역의 오존농도 변화 경향과 생성원인을 연구하였다. Shiu 등은(2007) 관측기반 모형을 활용하여 대만지역의 오존 저감 대책을 수립하기도 하였으며 Louise Camalier 등은(2007) 미국 주요 도시에 대하여 오존농도와 상관이 높은 기상변수들을 제안하고 오존농도에 대한 이들의 영향을 분석하기도 하였다. Pavón-Domínguez 등(2014)은 다변량 통계분석법을 활용하여 스페인 도시지역의 지표오존 예측식을 제안하였다. 이처럼 오존농도 분포를 분석하고 원인규명을 위한 연구가 비교적 활발히 진행되어 온 것은 오존이 인체나 주변환경에 미치는 영향이 크므로 오존관련 대책이나 관리방안이 중요하다는 것과 맥락

을 같이 한다고 할 수 있다. 특히, 인구가 과대하게 밀집되어 있는 대도시 지역이나, 대규모 공단 및 산업단지가 밀집된 공업지역에서의 오존관리 대책이나 특성파악은, 최근 중요시되고 있는 삶의 질을 향상시켜 쾌적한 생활환경을 요구하는 시대적 요구 측면에서 볼 때, 지속적으로 중요한 가치를 지니고 있다 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 동남권역의 대표적 대도시인 부산지역을 대상으로 오존측정망의 농도분포 유사성에 따라 측정소의 권역을 구분하고 고농도 오존일의 기상요인 특성에 따른 사전 징후를 파악하여 오존의 피해를 예방하고 효율적인 대기오염 경보제 수행을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다. 기존 연구에서 수행한 동일시간대의 오존농도 및 기상자료, 그리고 대기오염도 자료를 활용한 방법과 달리, 본 연구에서는 고농도 오존일 전일과(1시~17시) 당일(1시~9시) 기상 및 대기오염도 자료를 분석하여 고농도 오존발생의 사전 특성을 파악하였다.

2. 연구방법

2.1. 대기오염 및 기상자료

2013년 부산지역 오존의 평균 농도는 0.029 ppm으로 광역시 중에서는 광주와 함께 비교적 높은 수준을 보였으며 2001년에 0.025 ppm 농도였던 점을 고려하면 농도가 약하게 증가하는 추세이다. 부산지역 오존농도의 시간별 환경기준 초과횟수를 살펴보면 8시간 환경기준 99백분위수 값의(0.06 ppm) 초과횟수는 2001년 270회에서 2014년 677회로 전반적으로 증가하고 있으며 1시간 환경기준 999천분위수 값의(0.1 ppm) 초과횟수 또한 2001년 52회에서 2012년 187회로 최근까지 증가하는 경향을 보이고 있다. 부산지역의 오존주의보 발령횟수도 2001년 3회에서 2012년 14회로 환경기준 초과횟수의 증가와 비슷하게 최근까지 증가하는 경향을 보이고 있어 오존 저감을 위한 원인 규명과 대책이 필요한 상황이라 판단할 수 있다(Fig. 1).

부산지역 고농도 오존일 사전징후 파악을 위하여 본 연구에서는 부산지역의 19개 도시대기측정소의 오존 측정자료를 이용하였다. 측정장비 오류 등의 영향을 제외하기 위하여 일 가동율이 75%(일 자료 18개 이상) 이상인 날을 대상으로 하여 각 측정소별로 일 최고 오존농도

2.2. 군집분석

군집분석(Cluster analysis)은 데이터를 구성하고 있는 관측대상을 어떠한 기준에 의해서 분류하는 통계적인 분석방법을 말한다. 군집분석의 데이터 분류기준은 여러 가지가 있지만 관측대상간의 유사성(또는 거리)을 기초로 해서 전체 데이터를 몇 개의 그룹으로 분리하는 방법과 데이터 및 그룹 내의 분산을 기초로 그룹간 분리정도를 기준으로 해서 분류하는 방법, 또한 관측대상을 군집화하는 연산법에 따라 계층적 군집화방법과 비계층적 군집화방법이 있다. 본 연구에서는 오존시즌의 측정소별 일 최고 오존농도가 거리의 유사성을 계산하는 계층적 군집분석을 수행하여 일 최고 오존농도 분포에 따른 측정소별 권역을 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 일 최고 오존농도 분포

Fig. 3은 2007년부터 2013년까지 7년간을 대상으로 오존시즌인 5월부터 9월까지 각 측정소별 일 최고 오존농도의 분포범위를 나타낸 것이다. 그림에서 숫자는 일 최고 오존농도의 평균값이다. 그림을 보면, 일 최고 오존농도가 가장 높은 측정소는 대신동측정소로 평균값이

0.056 ppm으로 나타났다. 그러나 대신동측정소는 2012년 설치된 측정소로 자료수가 비교적 적기 때문에 좀 더 지속적인 추적관찰이 필요한 측면이 있다. 연구기간 전체에 걸쳐 일 최고 오존농도가 가장 높은 측정소는 녹산동과 용수리측정소로 평균이 0.055 ppm으로 나타났으며 다음으로 덕천동측정소에서 0.054 ppm 높은 농도를 보였다. 이들 측정소들은 환경기준 초과빈도나 오존주의보 발령횟수도 많은 지점인데, 녹산동 지역은 인접한 해안에서 불어오는 해양대기의 영향, 덕천동과 용수리 지역은 분지형태 지형에 의한 대기의 정체 및 고립 가능성에 의한 영향과도 밀접한 관련이 있을 것으로 사료된다. 일 최고 오존농도가 비교적 낮은 지점은 광복동측정소로 평균 0.040 ppm으로 나타났으며 장림동, 연산동, 대연동, 기장읍 측정소에서도 0.045 ppm으로 낮은 경향을 보였다.

3.2. 오존측정소 권역설정

Fig. 4는 2007년부터 2013년까지 7년간 오존시즌의 측정소별 일 최고 오존농도에 분포에 대하여 계층적 군집화 방법인 평균결합방식(average linkage)을 적용하여 유사한 측정소간의 권역을 구분한 그림이며, Fig. 5는 군집화 과정을 보여주는 덴드로그램이다. Fig. 5의 군집

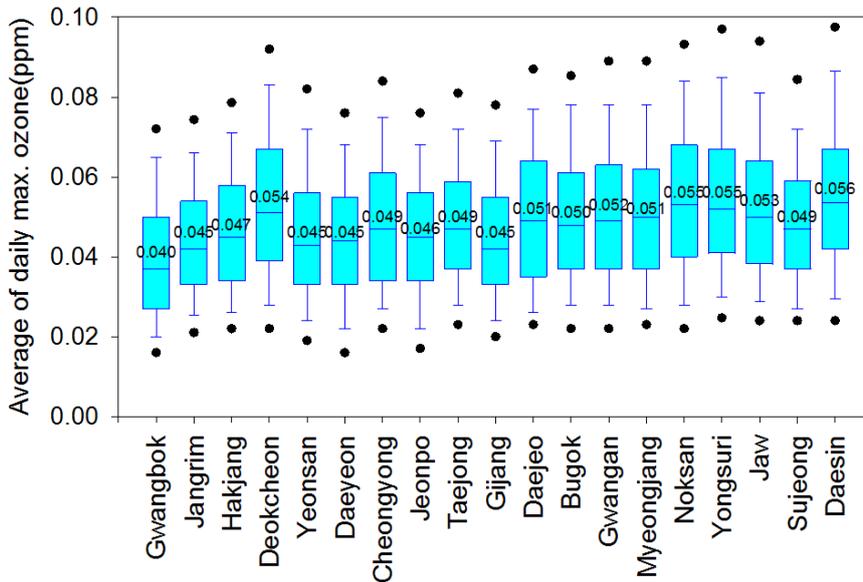


Fig. 3. The distributions of daily max. ozone concentration at each station from 2007 to 2013.

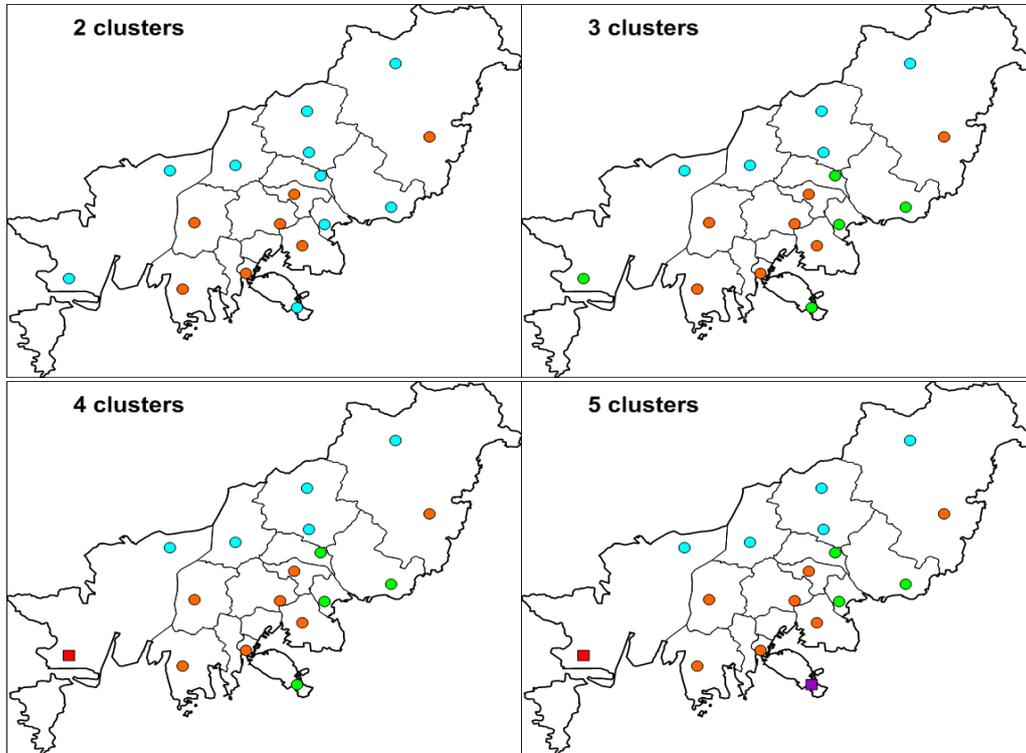


Fig. 4. Delineation of the daily max. ozone using hierarchial cluster analysis from 2007 to 2013.

화 과정을 통하여 각각의 군집은 일별 일 최고 오존농도의 변화경향을 반영하여 유사성이 높은 측정소끼리 구분된다. Fig. 4의 왼쪽 위(2 clusters)그림은 부산지역의 측정소를 2개 권역으로 설정한 경우이다. 2개 권역으로 나눌 경우 사상, 사하 공업지역과 인접한 시내중심 지역이 하나의 권역으로 설정되고(주황색) 해운대구와 수영구 또 북쪽으로 연결되는 동래구와 북쪽 경계지역, 강서구 지역이 하나의 권역(하늘색)으로 설정된다. 일부 측정소를 제외한 대부분의 측정소에서 위치적으로 인접한 지역 간에 유사성이 나타나고 있다. 3개의 권역으로 구분된 '3 clusters'의 결과를 보면, '2 clusters'의 하늘색 권역 중에서 광안동, 좌동, 명장동, 녹산동, 태종대 5개 측정소가 별도의 권역으로 설정된 것을 볼 수 있는데, 이 5개 측정소는 기존 '2 clusters'의 하늘색 권역에 포함되는 측정소 중에서도 해안에 인접해 있는 지점이라는 공통점이 있다. 4개와 5개의 권역으로 구분된 '4 clusters'와 '5 clusters'의 결과를 보면, '3 clusters'의 초록색 권역에서 녹산동

과 태종대 측정소가 각각 새로운 권역으로 설정된 결과이다. 즉, 광안동과 좌동, 그리고 명장동이 하나의 권역으로 일관되게 나타나는 것은, 부산지역의 해풍 유입경로에 대해 구체적으로 살펴본 Jung 등의(2003)의 연구에서 분석한 바와 같이, 저지대인 수영천을 따라 해풍이 내륙으로 유입될 때, 광안지역과 해운대지역 일대의 바람이 남동풍계열의 바람군을 이루어 내륙도심인 동래지역으로 유입되는 단일경로를 가지는 것과 일치되는 결과이다. 따라서, 동일한 해풍 유입경로에 위치하고 있는 광안동, 좌동, 그리고 명장동에서의 농도경향성이 유사하여 동일한 권역으로 분류된 것으로 분석할 수 있다. 더불어, 군집수를 늘리면 태종대와 녹산동 측정소가 별도의 권역으로 설정되기는 하지만, 이들 5곳의 측정소 또한 전반적으로 해안에 가까운 위치에 있는 측정소로 내륙에 위치한 다른 측정소들에 비해 비교적 유사한 농도변화 경향성을 보이는 것으로 분석할 수 있다.

다음으로 '5 cluster' 군집결과에서, 부산의 내륙쪽 경

계 부근에 위치한 대저동, 덕천동, 청룡동, 부곡동, 용수리 측정소가 하나의 군집으로 분류되는데, 이들 군집은 앞서 분석에서 언급된 측정소들에 비해 위치적 특성이 내륙이라는 점과 배출원도 비교적 적은 지역이라는 특성이 반영되어 동일군집으로 분류된 것으로 판단된다. 마지막으로 광복동, 장림동, 학장동, 연산동, 대연동, 전포동, 기장읍 측정소가 하나의 군집으로 분류되는데, 이들 측정소 대부분은 앞서 언급된 다른 측정소들에 비해 부산에서 인구밀집도와 차량통행 및 산업시설이 많이 분포된 주거 밀집지역과 공업지역에 위치하고 있어 상대적으로 오염물질의 배출량이 많고 이와 연관되어 이들 측정소가 하나의 군집으로 분류되는데 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

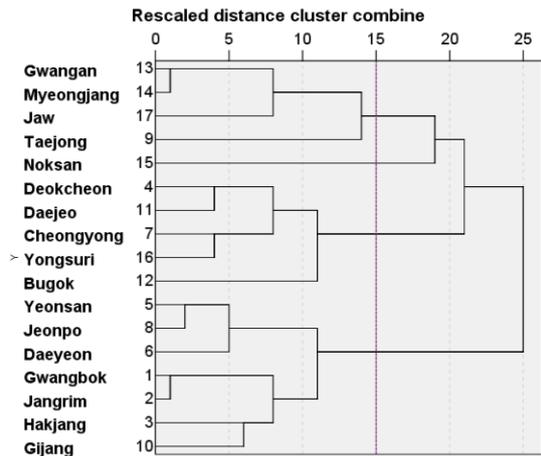


Fig. 5. Dendrogram resulting hierarchial cluster analysis using the daily max. ozone from 2007 to 2013.

3.3. 선행 기상조건 분석

Table 1은 2007년부터 2013년까지 7년간 오존시즌의 부산지방 기상청에서 측정된 기상요소들의 평균값을

나타낸 것이다. 측정소별 일 최고 오존농도의 평균은 0.049 ppm으로 나타났으며 상대습도가 72.6%, 일별 일사량 평균은 17.4 MJ/m², 이슬점온도 평균은 17.2℃, 운량 평균은 6.1로 나타났다.

고농도 오존발생일의 사전징후를 파악하기 위해 Table 1의 기상요소별로 당일 1시부터 9시까지 평균을 당일변수로, 전일 1시부터 17시까지 평균을 전일변수로 설정하였다. 예를 들면, 일 최고기온의 경우 당일변수로는 1시부터 9시까지의 기온 중 가장 높은 기온을 대상으로 하였고, 전일변수로는 바로 전날 1시부터 17시까지 기온 중 가장 높은 기온을 대상으로 하였다. 일사량의 경우에는 각 시간대의 일사량 합계를 각각 당일변수, 전일변수로 정의하였다.

Table 2는 당일 및 전일 기상변수들과 측정소별 일 최고 오존농도의 부산전체 평균과의 Pearson 상관관계를 나타낸 것이다. 당일과 전일 모두 이슬점온도, 일사량합계, 상대습도, 운량이 일 최고 오존농도와 상관성이 비교적 높은 것으로, 기온, 풍속, 현지 기압은 상대적으로 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 당일변수 중 상관성이 가장 높은 요소는 ‘운량’이었으며, 전일변수는 ‘이슬점온도’가 가장 높은 상관성을 보였고 전일변수에 비해 당일변수의 상관성이 비교적 높은 것으로 나타났다.

다음으로, 당일변수와 전일변수 모두에서 일 최고 오존농도와 상관성이 높게 나타났던 이슬점온도, 일사량합계, 상대습도, 그리고 운량 자료를 이용하여 고농도 오존일의 특성을 파악하기 위하여 빈도 분석을 실시하였다. Fig. 6은 이슬점온도, 일사량, 상대습도와 운량 각각의 당일변수에 대하여 오존시즌과 고농도일의 발생빈도를 나타낸 그림이며 점선은 오존시즌의 추세선을 의미한다. 이슬점온도의 경우 오존시즌과 고농도일 각각 16.8℃, 23.9℃로 나타나서 고농도일이 높게 나타났으나 구간별 발생빈도는 비슷하였다. 당일변수의 운량평균은 오존시즌과 고농도일 각각 6.1, 3.1로 고농도일의 경우에 낮게

Table 1. Average of daily mean(sum) meteorological variables on ozone season from 2007 to 2013

Average of daily max. ozone (ppm)	Average of daily mean temperature (℃)	Average of daily max. temperature (℃)	Average of wind speed (m/s)	Average of relative humidity (%)	Average of total solar radiation (MJ/m ²)	Average of atmospheric pressure (hPa)	Average of dew point temperature (℃)	Average of cloud amount (10)
0.049	22.7	26.2	3.3	72.6	17.4	1001.9	17.2	6.1

Table 2. The Pearson correlation coefficient between averaged daily max ozone concentrations and meteorological variables on ozone season from 2007 to 2013

	Temp.	Max. temp.	Wind speed	Dew point	Insolation	Relative humidity	Cloud	Pressure
Variables on the very day	-.256**	-.120**	-.286**	-.414**	.433**	-.419**	-.464**	-.024
Variables on the day before	-.229**	-.134**	-.105**	-.365**	.248**	-.328**	-.302**	-.070*

** Correlation is significant at the 0.01 level, * Correlation is significant at the 0.05 level

나타났으며, 0~3 범위에서 높은 발생빈도를 보이고 있다. 당일변수의 일사량 합계는 오존시즌 2.00 MJ/m², 고농도일 4.08 MJ/m²로 고농도일이 높았으며 2.5~3.5 MJ/m²의 구간에서 발생빈도가 높았다. 당일변수 상대습도의 평균은 오존시즌 76.5% 고농도일 68.5%로 고농도일에 낮아지는 경향이 있으나 발생빈도는 70~90%에서 높은 빈도를 보이고 있으며 오존시즌과 크게 차이를 나타내지 않았다.

Fig. 7은 이슬점온도, 일사량, 상대습도와 운량의 전

일변수에 대하여 오존시즌과 고농도일의 발생빈도를 나타낸 그림이다. 이슬점온도의 경우 오존시즌과 고농도일의 평균은 각각 17.1, 23.8℃로 당일변수와 비슷하였고 구간별 발생빈도 유사하게 나타났다. 전일변수의 운량평균은 오존시즌과 고농도일 각각 6.1, 3.9로 고농도일에서 낮았으며 당일변수와 유사하게 0~3의 범위에서 높은 발생빈도를 보이고 있다. 전일변수의 일사량 합계는 오존시즌 16.68 MJ/m², 고농도일 28.87 MJ/m²로 고농도일이 높았으며 25 MJ/m²의 구간에서 발생빈도가 높았

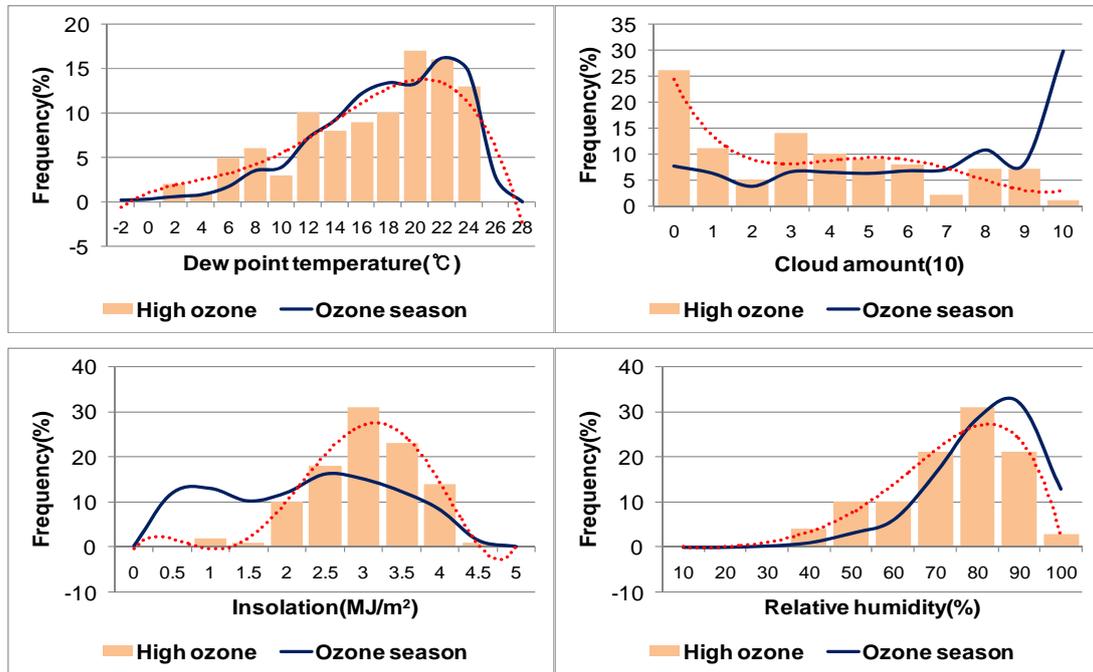


Fig. 6. Histograms of the major meteorological variables between high ozone episode days and ozone seasons on the very days. The red dashed line denotes the trend of the high ozone days.

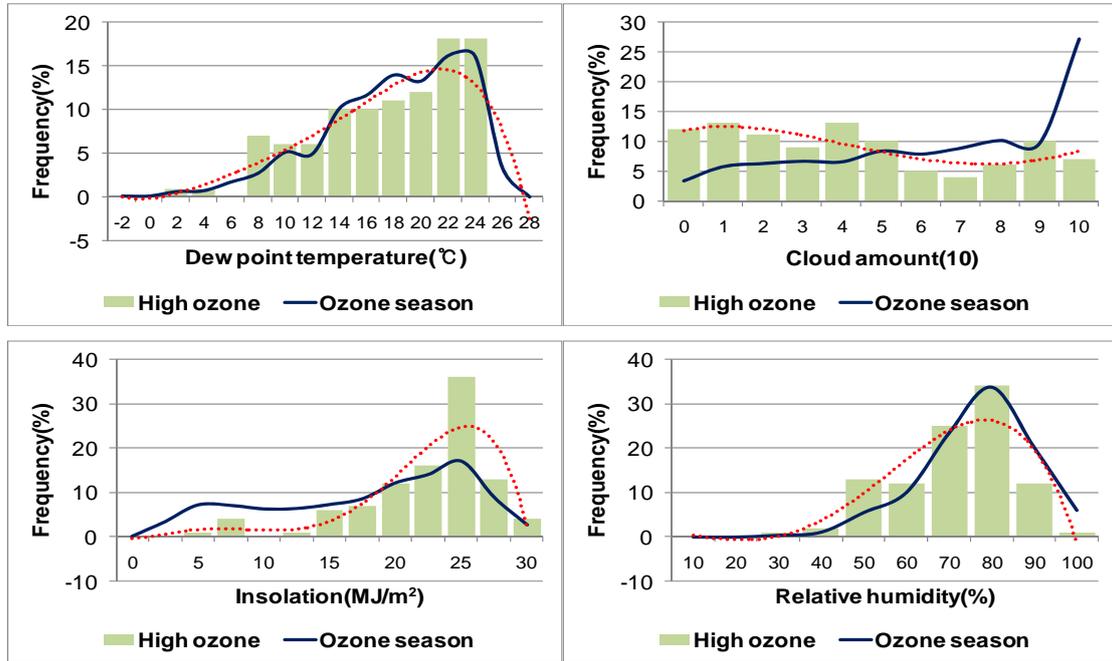


Fig. 7. Histograms of the major meteorological variables between high ozone episode days and ozone seasons on the days before. The red dashed line denotes the trend of the high ozone days.

다. 전일변수 상대습도의 평균은 오존시즌 71.7% 고농도일 66.1%로 고농도일에 다소 낮았으나 발생빈도는 70-90%에서 높은 빈도를 보였으며 오존시즌과 크게 차이를 보이지 않았다. 고농도 오존일의 전일에도 당일과 비슷하게 운량이 적고 일사량이 높아지는 특징이 있음을 알 수 있었다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 고농도 오존일의 사전 예측에 활용 가능한 고농도 오존일 선행 기상 특성에 관하여 살펴보고자 하였다. 이를 위해, 동일한 시간대의 오존 및 기상, 대기오염도 자료를 활용한 기존 연구와 달리, 고농도 오존일의 전일과 당일 오전의 기상 및 대기오염도 자료를 분석하여 고농도 오존 발생 전의 특성을 파악해 보았다.

2007년부터 2013년까지 7년간 오존시즌(5~9월간)의 일 최고 오존농도가 가장 높은 측정소는 녹산동과 용수리측정소로 평균이 0.055 ppm이었으며 광복동측정소(0.040 ppm)와 장림동, 연산동, 대연동, 기장읍 지점에

서 비교적 낮은 농도(0.045 ppm)를 보였다. 지점별 일 최고 오존농도 분포에 대하여 계층적 군집분석을 적용한 결과 전반적으로 해안에 인접한 지역인 명장동, 광안동, 좌동, 태종대, 녹산동 권역과, 북쪽 경계에 위치한 대저동, 덕천동, 청룡동, 부곡동, 용수리측정소가 속한 권역, 부산의 중심부에 위치하면서 공업지역과 주거 밀집지역을 포함하는 광복동, 장림동, 학장동, 연산동, 대연동, 전포동, 기장읍측정소 권역으로 크게 구분할 수 있었으며 군집수의 확장에 따라 태종대와 녹산동측정소가 별도의 권역으로 구분되었다.

기상요소에 대하여 당일 1시부터 9시까지의 평균을 당일 변수로, 전일 1시부터 17시까지의 평균을 전일변수로 설정하고 일 최고 오존농도의 부산전체 평균과 상관성을 분석한 결과 당일과 전일 모두 이슬점온도, 일사량 합계, 상대습도, 운량이 일 최고 오존농도와 상관성이 높은 것으로 나타났으며 온도, 풍속, 현지 기압은 상대적으로 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 일 최고 오존농도와 상관성이 높았던 기상요소들의 고농도일 전일과 당일의

발생빈도를 산정한 결과 이슬점온도는 19~23℃, 일사량 합계는 전일 21~24 MJ/m², 당일 오전에 2.6~3.0 MJ/m² 이었으며 상대습도는 67~80%, 운량은 0~3의 값이 발생 빈도가 높은 것을 알 수 있었다.

REFERENCE

- Kim, Y. R., Yoon, I. H., Kim, H. J., 2001, Synoptic weather patterns and variation of ozone concentrations association with high ozone days at five major cities in Korea, *J. of the Korean Environmental Science Society*, 10(6), 437-444.
- Choi, H. J., Lee, H. W., Leem, H. H., Song, J. H., 2008, Analysis of atmospheric flow field and air quality according to the high level ozone case on Gwangyang bay, *J. of the Korean Environmental Science Society*, 17(7), 743-753.
- Busan metropolitan city institute of health and environment, 2013, http://ihe.busan.go.kr/00_main/.
- Lee, J. H., 2005, Evaluation of incremental reactivity and ozone production contribution of VOCs using the PAMS data, master's dissertation, Inha University, Incheon, Korea.
- Choi, S. W., Choi, S. K., Doh, S. H., 2002, Prediction of ozone concentration by multiple regression analysis in Daegu area, *J. of the Korean Environmental Science Society*, 11(6), 687-696.
- Kim, Y. K., Lee, S. Y., Lim, Y. K., Song, S. K., 2007, Design and assessment of an ozone potential forecasting model using multi-regression equations in Ulsan metropolitan area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(1), 14-28.
- You, S. J., Jo, J. G., 2008, Study on the estimation for the contribution of VOCs and nitric oxides in creating photochemical ozone, *The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment*, 18(1), 181-192.
- Viney, P. A., Andrea, A. A., Arya, S. P., 2000, An observational based analysis of ozone trends and production for urban areas in North Carolina, *Chemosphere-Global Change Science* 2, 2000, 157-165.
- Finlayson-Pitts, B. J., Pitts Jr., J. N., 1993, *Atmospheric Chemistry of Tropospheric Ozone Formation: Scientific and Regulatory Implications*, *AIR & WASTE*, 43, 1091-1100.
- Shiu, C. J., Liu, S. C., Chang, C. C., Chen, J. P., Chou, C. C. K., Lin, C. Y., Young, C. Y., 2007, Photochemical production of ozone and control strategy for Southern Taiwan, *Atmospheric Environment*, 41, 9324-9340.
- Pavón-Domínguez, P., Jiménez-Hornero, F. J., Gutiérrez de Ravé, E., 2014, Proposal for estimating ground-level ozone concentrations at urban areas based on multivariate statistical methods, *Atmospheric Environment*, 90, 59-70.
- Camalier, L., Cox, W., Dolwick, P., 2007, The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends, *Atmospheric Environment*, 41, 7127-7137.