인접지역간 오존 농도 차이에 대한 기상요소의 영향분석 (부산광역시 기장군을 대상으로)

김민경 · 이화운¹⁾ · 정우식^{2)*} · 도우곤³⁾

부산대학교 환경시스템협동과정, ¹⁾부산대학교 대기환경과학과,

²⁾인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터, ³⁾부산광역시 보건환경연구원

(2012년 5월 3일 접수; 2012년 8월 20일 수정; 2012년 8월 31일 채택)

Analysis on the Effect of Meteorological Factors related to Difference of Ozone Concentration at the Neighboring Areas in Gijang Busan

Min-Kyoung Kim, Hwa Woon Lee¹⁾, Woo-Sik Jung^{2)*}, Woo-Gon Do³⁾

*Department of Interdisciplinary Program of Environmental System Pusan National University,
Busan 609-735, Korea*

¹⁾*Department of Atmospheric Environmental Sciences, Pusan University, Busan 609-735, Korea*

²⁾*Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information
Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea*

³⁾*Busan Metropolitan City of Institute of Health and Environment, Busan 613-806, Korea*

(Manuscript received 3 May, 2012; revised 20 August, 2012; accepted 31 August, 2012)

Abstract

Ozone is the secondary photochemical pollutant formed from ozone precursor such as nitrogen dioxide and non-methane volatile organic compounds(VOCs). The ambient concentration of ozone depends on several factors: sunshine intensity, atmospheric convection, the height of the thermal inversion layer, concentrations of nitrogen oxides and VOCs. Busan is located in the southeast coastal area of Korea so the ozone concentration of Busan is mainly affected from the meteorological variables related to the sea such as sea breeze. In this study the ozone concentrations of Busan in 2008~2010 were used to analyse the cause of the regional ozone difference in eastern area of Busan. The average ozone concentration of Youngsuri was highest in Busan however the average ozone concentration of Gijang was equal to the average ozone concentration of Busan in 2008~2010. The two sites are located in eastern area of Busan but the distance of two sites is only 9km. To find the reason for the difference of ozone concentration between Youngsuri and Gijang, the meteorological variables in two sites were analyzed. For the analysis of meteorological variables the atmospheric numerical model WRF(Weather Research and Forecasting) was used at the day of the maximum and minimum difference in the ozone concentration at the two sites. As a result of analysis, when the boundary layer height was lower and the sea breeze was weaker in Youngsuri, the ozone concentration of Youngsuri was high. Furthermore when the sea breeze blew from the south in the eastern area of Busan, the sea breeze at Youngsuri turned into the southeast and the intensity of sea breeze was weaker because of the mountain in the southern region of Youngsuri. In that case, the difference of ozone concentration between Youngsuri and Gijang was considerable.

Key Words : Ozone, Meteorological variable, Boundary layer height, Sea breeze, WRF

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

1. 서론

오존은 대기 중에 배출된 질소산화물 또는 휘발성 유기화합물질 등이 광화학 반응을 일으켜 생성되는 2

차 대기오염물질로서 인간의 호흡기 건강과 농작물 생산량에 부정적 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 대기질 관리 항목 중 하나로 관리되고 있다. 우리나라에서는 1983년 오존에 대한 대기환경기준이 신설되었다. 시간당 최고 100 ppb, 연평균 20 ppb를 대기환경기준으로 설정하여 1992년까지 운영되었으며, 1993년 이후에는 시간당 최고 100 ppb, 8시간 평균 60 ppb로 기준이 강화되어 지금까지 운영되고 있다. 환경부에서 발행한 대기환경연보에 따르면 우리나라 연평균 오존 농도는 1997년까지 증가하다가 1998년 이후 연평균 20 ppb ~ 24 ppb의 비교적 일정한 수준을 유지하고 있다고 보고한 바 있다(환경부, 2011). 2010년 말 현재 전국에는 대기환경기준 달성 여부를 판정하고 지역 대기질 상태를 모니터링하기 위해 대기오염 측정망 236개소가 운영 중에 있다. 오존의 대기환경기준 달성률은 대기환경연보에 보고되고 있으며, 2010년 자료에 따르면 시간당 오존 최고 농도 100 ppb 이내 기준을 달성한 측정소는 전체 236개소의 48.1 %였으며 8시간 평균 오존 농도 60 ppb 이내 기준을 달성한 측정소는 불과 2.6 %인 것으로 보고되었다. 따라서 우리나라에서 오존은 PM-10과 더불어 환경기준 달성률이 낮은 항목으로 분석되고 있는 실정이다(환경부, 2011).

이처럼 환경기준 달성률이 낮은 오존에 대해서는 이전부터 국내외에서 많은 연구가 이루어져 왔다. 오존의 발생원에 대한 접근으로 질소산화물 또는 휘발성유기화합물질과 오존간의 관계를 밝힌 연구들이 수행되었으며(정과 유, 2010; Arsic 등, 2011), 기온, 강수량, 오염물질 확산정도, 대기안정도 등의 기상학적 요인과 오존과의 관계를 살펴본 연구들도 있다(전 등, 1996). 이외에도 지역별로 오존의 특성을 분석한 연구들도 있었는데(환경부, 2011), 이 연구들에 따르면 배경지역의 오존 농도가 도시지역보다 다소 높은 농도를 유지하는 것은 배경지역의 질소산화물 농도가 도시지역보다 낮아 오존이 산화되지 못하여 높은 수준을 유지하고 있다고 분석하고 있다. 또한 오존 농도 특성과 대기의 기류 흐름과의 관계를 살펴본 연구도 있었으며(Carvalho 등, 2010; Lee 등, 2008; Zabkar 등, 2011), 해안지역에서 해풍의 발생과 지형적 조건이 해당 지역의 국지기상뿐만 아니라 오존 농도 특성과 밀

접한 관련이 있음을 살펴본 연구들도 있다(김 등, 1996; 오 등, 2004; 이 등, 2000; 정 과 이, 2000; Ding 등, 2004; Evtyugin 등, 2007; Ma 와 Lyons, 2003). 연안에 위치하면서 지형적 경사나 굴곡이 복잡한 지역에서는 육지와 해양 간의 열적특성차이로 해륙풍과 산곡풍이라는 국지순환계가 나타날 수 있으며 이러한 국지순환계는 해당지역의 고농도 오존 발생 및 특성과 밀접하게 연관되어 있다. 부산지역의 경우 대체적으로 동남방향으로 바다와 접하고 있으며, 그 반대방향에 복잡한 지형의 산지가 위치해 있다.

부산지역의 오존 농도는 대기오염측정망에 의해 지속적으로 모니터링 되고 있는데, 이 중에서도 부산의 동쪽에 위치한 용수리 측정소와 좌동 측정소가 다른 지역에 비해 다소 높은 농도를 나타내고 있는 반면 용수리 측정소에서 남남동방향으로 약 9 km 인근의 기장읍 측정소에서는 부산지역 평균이하의 오존농도를 나타내고 있다(부산광역시보건환경연구원, 2009). 따라서 본 연구에서는 이처럼 부산의 외곽이며 비교적 청정지역에 위치하고 있는 인근 두 지점에서 나타나는 오존 농도 차이에 대한 원인을 기상학적 관점에서 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상

부산지역의 지리적, 지형적 특징을 살펴보면(Fig. 1), 동남방향로 바다와 접해 있으며 북서방향으로 내륙지형이 형성되어 있어 복잡다양한 형태를 띠고 있다. 이러한 지리적, 지형적 특징은 대기오염물질 배출원의 분포에도 상당한 영향을 미치고 있다. 즉, 부산지역은 도심지에도 높고 낮은 구릉지가 자리잡고 있어 선오염원 배출의 주요대상인 도심지 도로의 형태 또한 산발적으로 복잡하게 형성되어 있고, 남쪽 해안을 따라 항만이 형성되어 있어 선박오염원이 이 지역을 따라 집중되어 있다. 이와 함께 부산의 남서쪽에 위치한 사하, 사상, 강서지역의 공단에서는 오존의 전구물질인 휘발성유기화합물질 배출원이 위치해 있다. 부산지역 주변으로는 북동방향에 울산지역의 석유화학단지 등 국가산업단지라는 배출원이 위치해 있으며, 서쪽으로는 경상남도 창원지역의 공단이 밀집해 있다.

Fig. 1. Map showing the location of air quality monitoring network in Busan.

부산지역의 오존 농도는 17개소의 대기오염측정망에 의해 상시 모니터링 되고 있는데, Fig. 2는 2008년~2010년 기간 동안의 시간별 평균 오존농도를 나타낸 것이다. 그림을 보면, 부산의 동부지역에서 평균 오존농도가 다소 높게 나타나고 있으며 도심지에서는 다소 낮은 농도를 보이고 있음을 알 수 있다. 이 기간

동안 부산지역에 위치한 17개 측정소의 시간평균농도는 0.026 ppm으로 나타났다.

본 연구에서는 부산지역의 동쪽에 위치한 ‘용수리 측정소’와 용수리 측정소에서 남쪽으로 9.2 km 떨어진 ‘기장읍 측정소’를 연구 대상으로 설정하였다. 두 지점 모두 부산의 동부지역에 위치해 있으나, 지점 간

Fig. 2. Ozone concentrations of air quality monitoring network in Busan(2008~2010).

에 오존 농도차가 나타나고 있었다. 용수리 측정소의 2008년~2010년 기간동안 평균 오존농도는 0.034 ppm으로 부산지역에서 최고 농도를 나타내었고, 기장읍 측정소는 0.026 ppm을 나타내었다. 즉, 기장읍 측정소는 부산지역 평균 정도의 농도를 나타내었지만, 기장읍 지역과 멀리 떨어지지 않은 용수리 측정소에서는 기장읍 측정소보다 훨씬 높은 오존농도를 나타내고 있었다.

이들 두 측정소가 위치해 있는 용수리 지역과 기장읍 지역의 지형적 조건을 살펴보면(Fig. 1), 용수리 지역 주변으로는 북쪽, 남쪽, 서쪽으로 고도 약 500여 m 정도의 산악지형이 형성되어 있으며, 기장읍 지역은 북쪽에 고도 약 400여 m의 산악지형이 위치해 있다.

오존 농도는 오존 전구물질인 질소산화물(NO_x)과 휘발성유기화합물(VOCs)에 밀접한 관련이 있다. Fig. 3은 환경부에서 발표한 부산지역의 면오염원과 선오염원에 의한 NO_x 와 VOCs 배출량을 나타낸 것이다(국립환경과학원, 2008). 그림에서 a NO_x 는 면오염원 형태의 NO_x 배출량을 나타내고 있으며, i NO_x 는 선오염원 형태의 NO_x 배출량을 나타내고 있다. aVOCs는

면오염원 형태의 VOCs 배출량을 나타내고 있으며, iVOCs는 선오염원 형태의 VOCs 배출량을 나타내고 있다. 부산지역에서 면오염원의 NO_x 배출량은 부산의 도심지를 중심으로 많은 것을 알 수 있으며, 특히 광복동이 위치한 도심지역에서 높은 수준을 나타내고 있다. 선오염원에 의한 NO_x 배출량은 점오염원에 의한 배출량보다 다소 높은 수준으로 배출되고 있으며 부산지역의 도심지를 포함한 주요도로를 따라 많이 배출되고 있는 것을 비교적 뚜렷하게 알 수 있다. 그림을 보면 본 연구의 대상인 용수리 측정소와 기장읍 측정소가 위치한 지역일대에서의 NO_x 배출정도는 부산의 도심지와 주요도로에서의 배출량과 비교해 볼 때 낮은 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다.

면오염원에 의한 VOCs 배출량은 선오염원에 의한 배출량에 비해 훨씬 많은 것을 알 수 있는데, 부산의 전통적 공단지역인 사상과 장림공업지역을 중심으로 다소 높은 수준을 나타내고 있다. NO_x 와 마찬가지로 VOCs의 경우에도 용수리 지역과 기장읍 지역은 부산 도심지에서의 배출량에 비해 훨씬 적은 배출량을 나타내고 있다. 특히, 기장읍 지역은 용수리 지역보다도

Fig. 3. NO_x and VOCs emission amounts of Busan in 2008.

더 적은 배출량을 보이고 있다.

이들 결과를 볼 때, 용수리 지역과 기장읍 지역은 부산의 도심지를 포함한 다른 지역에 비해 NO_x 와 VOCs의 배출량이 적어서 지역 자체의 오염원에 의한 오염기여도는 크지 않을 것으로 예상할 수 있다. 특히, 용수리 지역에서의 고농도 경향은 지역배출원에 의한 직접적 영향보다는 다른 기여 요인(기상학적 요인, 지형적 요인 등)에 의해 나타나는 현상일 가능성이 높다고 할 수 있다.

2.2. 연구사례일

용수리지역 오존 고농도 경향의 원인을 분석하기 위해 2008년부터 2010년까지 용수리 측정소에서 관측된 오존자료 중에서 하루 중 시간별 최고농도가 80 ppb 이상인 날을 조사한 결과, 총 76일이 선정되었는데, 연도별로 보면, 2008년에는 36일, 2009년에는 22일, 그리고 2010년에는 18일로 나타났다. 본 연구에서는 선정된 76일을 대상으로 종관규모 기상장의 영향과 기류의 패턴을 파악하기 위해 역궤적 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 역궤적 분석을 위해 미국의 NOAA/ARL에서 제공하는 HYSPLIT-4(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory)모델을 이용하였으며, 역궤적 분석에 사용된 기상 자료는 미국의 NCEP/NCAR(National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)의 GDAS(Global Data Assimilation System)를 사용하였는데, 이 GDAS 자료를 사용한 HYSPLIT-4 모델을 이용하여 96시간 동안의 공기 이동경로를 분석하였다. 1차 대상일에 대한 역궤적 분석 결과를 이용하여 HYSPLIT-4 모델에서 제공하는 군집 분석을 실시하였으며 그 결과 4개의 특성을 가진 군집을 추출할 수 있었다. 그 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 군집 1은 정체성 사례를 나타내고 있었으며 장거리 수송이 아닌 지역적인 영향을 크게 받는 특징이 있다. 군집 2~4는 장거리 수송 사례를 나타내고 있었으며, 군집 2는 중국 북부지역에서 발원하여 북서풍 계열의 바람을 타고 한반도로 유입되는 사례이다. 군집 3은 중국 화중 지역에서 서해안 상공을 거쳐 한반도로 유입된 사례이며 군집 4는 내몽골에서 북한지역을 경유하여 한반도로 유입된 사례이다.

Fig. 4. Four cluster-mean back trajectories arriving at Youngsuri 76 episode days.

각 4개의 군집에 속한 사례일별로 연구대상지점인 용수리 측정소와 기장읍 측정소의 오존 시간 농도를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 굵은 회색막대는 군집 별로 각 군집에 해당되는 날들의 부산지역 평균 오존 농도를 나타낸 것이다. 분석 결과, 군집 2에서 두 측정소간 농도 차이가 가장 작게 나타나는 특징이 있었다. 군집 2는 장거리 수송이 가장 뚜렷하게 나타나는 군집이다. 따라서 종관 규모의 기상 현상이 뚜렷이 나타날 때 두 측정소간 농도 차이가 가장 작게 나타날 수 있음을 Fig. 5에서 설명하고 있다.

Fig. 5. Ozone concentrations according to each cluster at YS and GJ sites.

각각의 군집별로 두 측정소의 시간 최고 오존 농도가 가장 크게 나타나는 사례일과 가장 작게 나타나는 사례일로 구분하여 Table 1에 나타내었으며, 각 사례일에 대한 용수리 측정소와 기장읍 측정소의 시간별 오존 농도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 'Ave'는 해당 사례일의 부산지역 평균 오존농도를 나타낸 것이며, 'Max'는 용수리 측정소와 기장읍 측정소의 시간 최고 오존 농도차가 가장 크게 나타난 사례일을 나타내고, 'Min'은 시간 최고 오존 농도차가 가장 작게 나타난 사례일이다. 4개의 군집 중에서도 군집 3에서 시간별 최고오존 농도의 차이가 최대로 나타난 2008년 7월 7일의 두 측정소간 오존 농도차가 가장 크게 나타났다. 군집 2에서 최대 농도차가 나타난 2008년 10월 16일은 다른 군집에서의 최대차가 나타나는 사례일에 비해 비교적 작은 차이를 나타내고 있

었다. 또한 군집 2에서 두 지점간 시간 최고 오존 농도의 차이가 최소로 나타난 2009년 9월 10일은 용수리 측정소의 오존 농도, 기장읍 측정소의 오존 농도, 부산 지역 전체 평균 오존 농도 간 차이가 가장 작게 나타난 사례일이었다. 이는 군집별 부산지역 오존 농도 평균을 나타내었던 Fig. 5 분석 결과와 같은 것으로 종관규모의 기상 현상이 뚜렷하게 나타났을 때는 종관 기상이 강하게 작용하여 부산지역 전체에 국지 기상이 아닌 종관 기상의 영향을 받게 되며, 측정소간 오존 농도차는 크게 나타나지 않는 것으로 분석할 수 있다.

2.3. 연구방법

본 연구에서는 이들 군집별로 최대 오존 농도차와 최소 오존 농도차가 나타난 각 사례일을 대상으로, 부산을 포함한 일대의 상세한 기상요소의 변화와 그 경

Table 1. Date of maximum and minimum difference in hourly maximum ozone concentration between YS and GJ sites according to each cluster

Cluster	Days	Max Difference			Min Difference		
		Date	Maximum Hourly Ozone Concentration (ppm)		Date	Maximum Hourly Ozone Concentration (ppm)	
			YS site	GJ site		YS site	GJ site
cluster I	24	08.07.10.	0.099	0.035	10.07.24.	0.113	0.111
cluster II	12	08.10.16.	0.105	0.057	09.09.10.	0.087	0.082
cluster III	22	08.07.07.	0.139	0.051	09.09.18.	0.087	0.088
cluster IV	10	08.07.09.	0.119	0.046	10.06.06.	0.089	0.091

Fig. 6. Diurnal variations of ozone concentrations at the day of the maximum and minimum difference in maximum hourly ozone concentration between YS and GJ sites according to each cluster.

향성이 오존 농도 차이와 변화와 어떠한 연관이 있는지 살펴보기 위하여 기상장 수치모의를 수행하였다. 이를 위해 WRF(Weather Research and Forecasting model) 시스템을 이용하여 기상요소의 상세한 정보를 도출하였다. 본 연구에서 사용한 WRF 시스템은 역학 해석에 따라 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 ARW(The Advanced Research WRF)와 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 개발된 NMM(The Nonhydrostatic Mesoscale Model)의 두 종류가 있으며, 본 연구에서는 ARW(3.3 버전)를 사용하였다. ARW는 수 m에서 수천 km 규모에 적용이 가능하며, 모수화 연구, 자료 동화 연구, 예보연구, 실시간 수치예보 등에 사용되고 있다. 초기 입력장으로는 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 의 해상도를 가지며, 6시간 간격으로 제공되는 NCEP FNL(Final Analyses) 자료를 사용하였다. 지형 및 토지이용자료는 미국항공우주국에서 제공하는 3초 지형자료인

SRTM(Shuttle Radar Topography Pission)3초와 환경부에서 제공하는 1초 토지이용 자료인 KLU(Korea Land Use)를 사용하여 정확도를 향상시켰다(이 등, 2010; 전 등, 2009).

수치모의 수행을 위한 시스템 설정은 Table 2와 같다. domain 1은 한반도를 중심으로 한 동북아시아 일부를 포함하는 수평 격자 27 km의 영역이며, domain 2, domain 3은 수평 해상도를 9km, 3km로 높여 갇고 최종 도메인인 domain 4에는 수평해상도 1 km로 설정하였다(Fig. 8). 연직 층수는 28개의 층으로 설정하였다. 모델의 초기장과 경계자료에 사용된 입력자료는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)의 FNL(Final Analysis)자료이며 6시간 간격의 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 자료를 사용하였다. 이러한 실험 설계를 바탕으로 각 사례일마다 60시간동안 수치 적분을 실시하였다.

Table 2. Description of WRF system

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain4
Horizontal grid	107×107	91×91	61×55	60×57
Horizontal resolution	27 km	9 km	3 km	1 km
Vertical layers	28 layers			
Physical options	Kain-Fritsch scheme RRTM Longwave Dudhia Shortwave YSU PBL			
Initial data	NCEP FNL Operational Global Analysis data

Fig. 8. Numerical model domains for WRF simulation.

3. 결 과

3.1 관측과 수치모의 결과 비교

상세 기상장 수치모의 결과에 대한 타당성을 평가하기 위해 수치모의 결과와 기상청 자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)에서 측정된 관측값을 비교하였다. 부산지역에 설치된 기상청 AWS 위치는 Fig. 9에 나타난 바와 같다. 군집별로 두 지점간 시간 최고오존농도의 차이가 최대로 나타난 날과 최소로 나타나는 차가 나타나는 각 사례일에 대한 수치모의 결과와 AWS에서 관측된 시간별 기온 및 풍속에 대한 RMSE를 분석하였는데(Table 3), 분석결과, 기온에 대한 RMSE는 1.397, 풍속에 대한 RMSE는 1.083으로 나타났다. 일최저, 일중간값, 일최고에 대한 RMSE를 분석한 결과, 일최고 기온에 대한 RSME는 1.853, 일최대 풍속의 RSME 1.268로 일최저, 일중간값 보다 다소 높게 나타났다. Fig. 10은 본 연구의 사례일에 대하여 부산 기장지역에 설치된 기상청 AWS에서 관측된 시간별 기온, 풍향, 풍속과 수치모

의된 시간별 기온, 풍향, 풍속을 비교한 것이다. 그림에서 ‘I~IV’는 4개의 군집을 나타낸 것이고, ‘Max’는 용수리와 기장에서 오존 농도차가 최대로 나타난 사례일이며, ‘Min’은 두 지점에서 오존 농도차가 최소로 나타난 사례일이다. 그림에서 나타난 바와 같이, 대부분의 사례일에 대해 관측에서 나타난 기상요소별 변화경향과 특성을 수치모의 결과가 비교적 잘 나타내고 있음을 볼 수 있다. 특히, 풍향과 풍속은 주변의 지형지물과 조건에 매우 민감하게 반응하는 기상요소라는 점을 고려해 볼 때, 일부를 제외하고는 대부분의 사례에 대해 좋은 결과를 보이고 있다.

따라서 앞서 분석한 RMSE결과와 기상요소별 시간별 일변화 경향과 특성의 일치도를 고려해 볼 때, 본 연구에서 도출한 수치모의 결과가 사례일의 실제 기상학적 특성과 현황을 비교적 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 그러므로 인접 지역인 기장을 측정소와 용수리 측정소의 오존농도 차이에 대한 기상학적 분석에 본 수치모의 결과를 이용하여 분석하는데 대한 타당성이 있을 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 9. Map showing the location of the investigated site(YS, GJ) and AWS in Busan.

Table 3. RMSE(Root Mean Square Error) of temperature and wind speed between simulated and AWS(Automated weather system) results

	Temperature (°C)	Wind speed (m/s)
Hourly	1.397	1.083
Daily min	1.141	0.490
Daily median	1.160	0.813
Daily max	1.853	1.268

Fig. 10. Diurnal variation of simulated and observed results for temperature, wind speed, wind direction at Gijang AWS at each episode.

3.2. 수평바람장 분석

각 군집별 사례일에 대해서 부산을 포함한 인근 지역 일대의 바람특성을 살펴보기 위하여 지표부근(고도 10m) 수평바람장 분석을 수행하였는데, 여기서는 각 사례일별로 용수리 지점에서 최대 오존농도를 보인 시간대의 수평바람장을 나타내었다(Fig. 11). 그림에서 ‘I~IV’는 4개의 군집을 나타낸 것이고, ‘Max’는 용수리 측정소와 기장읍 측정소에서 오존 농도차가 최대로 나타낸 사례일이며, ‘Min’은 두 지점에서 오존 농도차가 최소로 나타낸 사례일이다.

앞선 분석에서 살펴본 바와 같이, 종관 기상장의 영향이 작은 군집1에서 두 지점간 시간 오존농도의 최대차이를 보였던 2008년 7월 10일은 두 측정소 모두 남쪽에서 불어 들어오는 해풍의 영향을 직접적으로 받고 있다. 용수리에서는 남동풍 계열의 풍향이, 기장읍에서는 남풍 계열의 풍향이 나타나고 있다. 군집1에서 두 지점간 오존 농도 차이가 최소를 보였던 2010년 7월 24일은 부산지역 전반에 걸쳐 남서풍이 불어, 인근한 두 지점인 용수리와 기장읍 지역에서의 오존농도 차이가 작게 나타난 것으로 판단된다. 즉, 부산지역

전반에 걸쳐 남서풍이 지배적으로 나타나서 부산의 동부지역에 위치한 이들 두 지점은 기온저감효과를 가져올 수 있는 바닷바람(해풍, 연안풍)의 영향을 작게 받는 대신 부산의 내륙 도심지 등의 영향을 받아 기온 저감 효과도 없고 따라서 이는 부산의 동부지역에 위치한 이들 두 지점에서의 오존농도가 부산 전체의 평균보다 다소 높게 나타난 것으로 분석할 수 있다.

장거리 수송에 의한 종관 기상장의 영향이 가장 크게 나타난 군집 2에서 두 지점간 최대 오존 농도차를 보였던 2008년 10월 16일과 최소 농도차를 보였던 2009년 9월 10일에는 전반적으로 두 지점이 위치한 부산 동부권역 연안을 따라 전반적으로 동풍계열의 바람이 균일하게 나타나고 있다. 군집 2의 두 지점간 최대 오존농도 차이는 다른 군집과 비교해 가장 작은 값을 보이는 경우이다. 군집 3의 사례일인 2008년 7월 7일에는 용수리와 기장읍이 위치한 부산의 동부권역 일대에 걸쳐 남풍계열의 바람이 비교적 균일하게 분포하고 있다. 특히, 용수리에는 남동풍이, 기장읍 일대에는 남풍이 형성되어 있다. 그리고 2009년 9월 18일에는 두 지역 일대에 모두 북동풍 계열의 바람이 균일

Fig. 11. Horizontal distributions of the simulated wind vector at the time of the maximum hourly ozone concentration of YS site at each episode.

Fig. 11. continue.

하게 나타나고 있다. 군집 4에서 최대 농도차를 보였던 2008년 7월 9일은 용수리 일대에 동풍 계열의 바람이, 기장읍에서는 남동풍 계열의 바람이 해안에서부터 불어 들어오고 있다. 군집 4에서 최소 농도차를 보였던 2010년 6월 6일에는 두 측정소 모두 동풍계열의 바람이 바다로부터 불어 들어오고 있다.

군집 1에서의 두 지점간 최소 오존농도 차이를 보였던 사례일을 제외하고는 모든 사례일에서 해륙풍 순환계에 의해 유발된 해풍이 나타났거나, 해륙풍 순환계의 형성이 뚜렷하지 않더라도 바다에서부터 불어 들어오는 풍계의 바람이 나타났다. 특히, 군집 1과 군집 3에서 두 지점간 최대 오존농도 차이가 나타났던 각각의 사례일에서는 기장읍 지역에서는 남풍의 바람이 불어 들어오고 있으나 용수리 지역에서는 남동풍 계열의 풍향이 나타나고 있다.

이러한 결과는 다음과 같이 분석할 수 있다. 군집 1과 군집 3에서 최고차가 나타나는 사례일에는, 기장읍 지역은 지형적 조건상 북쪽에 위치한 고지대를 제외하고는 낮은 고도의 지형으로 구성되어 있어 남쪽과 동쪽, 그리고 서쪽에서 불어 들어오는 해풍이나 연안풍이 이 지역에 용이하게 도달할 수 있는 구조를 형성하고 있다. 그러나 용수리 측정소가 위치한 지역 일대

는 북쪽과 남쪽, 그리고 서쪽으로 고도 약 500여 m의 고지대 구릉지가 형성되어 있어 남풍이나, 서풍계열의 비교적 청정한 해풍이나 연안풍이 이 지역에 도달하는 것이 용이하지 않은 지형적 구조를 보이고 있다. 즉, 예를 들어, 남풍계열의 청정한 해풍이 부산권역에 형성되는 조건에서 기장읍 지역은 남풍의 바람이 별다른 장애나 저항없이 이 지역에 쉽게 도달할 수 있지만, 용수리 지역은 남쪽에 형성된 고지대(이것은 기장읍 지역의 북쪽에 형성된 고지대와 동일한 지형이다.)에 의해 용수리 지역으로 해풍의 유입이 어렵게 되거나, 유입이 된다 하더라도 용수리 지역의 동쪽으로 열려 있는 저지대를 통해 들어오게 되므로 결과적으로 지형에 의해 약해진 풍속의 남동풍이나 동풍계열의 해풍이 불어 들어오는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 조건에서는 대기질 측면에서 볼 때, 용수리 지역은 지형적 구조상 고지대에 둘러싸여 환기효과가 좋지 않을 수 있게 되며, 이는 정체에 따른 대기질의 악화와 깊게 연관될 수 있는 기상학적 조건이 될 수 있다. 반면, 기장읍 지역은 북쪽을 제외하고는 개방된 구조의 지형조건으로 인해 대기의 환기효과가 용수리 지역보다 우수할 수 있다.

군집 2의 경우는 강한 종관장과 이와 연관된 지형

조건의 영향이 커서 두 지점간 최대 오존농도 차이가 가장 작게 나타난 경우인데, 두 지점 모두 동풍계열의 종관 바람장이 뚜렷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 지형조건상 동쪽방향이 저지대로 연결되어 있는 용수리 지역과 서쪽, 남쪽과 더불어 동쪽으로도 저지대가 형성되어 있는 기장을 지역 모두는 동일한 동풍계열의 바람과 유사한 바람이동의 지형조건(저지대 통과)에 영향을 받게 되므로 두 지점간 농도차이가 다른 군집에 비해 작게 나타나게 된 것으로 분석된다.

3.4. 연직단면도 분석

앞의 수평바람장 분석에서 살펴본 바와 같이, 군집 1의 두 지점간 최소오존 농도차이를 나타냈던 사례일을 제외하고는 거의 대부분 경우에서 두 지점이 해풍의 영향을 받거나 또는 연안풍의 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 대부분의 사례에서 바다로부터 불어 들어오는 바람의 영향을 받는 것으로 분석되었다. 따라서 여기서는 이러한 해풍 또는 연안풍이 불어 들어올 때 이들 지역 연직대기의 특징을 살펴보기 위하여 연직 단면의 바람과 기온의 분포특성을 분석해 보았다. Fig. 12는 각 사례일별로 용수리 지점에서 최대 오존 농도를 보인 시간대의 연직 바람과 기온분포를 나타낸 것으로, 용수리 지역과 기장지역 각각에 대해서, 바람이 불어 들어오는 방향의 직각인 단면에서의 연직 바람과 기온 분포를 나타낸 것이고, Fig. 13은 용수리와 기장을 지점의 수치모의된 대기경계층 높이 변화를 나타낸 것이다.

군집 1의 두 지점간 최고 오존농도 차이를 보였던 2008년 7월 10일에는 바다에서 불어 들어오는 바람이 용수리 지역까지 도달하지 못하고 있다. 이것은 Fig. 11에서 분석한 바와 같이, 부산의 동부지역 전반에 걸쳐서는 남풍이 나타나고 있지만, 용수리 지역 남쪽의 고지대와 동쪽의 저지대가 용수리 지역으로 이 바람의 진행과 강도를 약화시키고 또한 풍향의 변위(남동풍으로)를 형성한 것으로 분석할 수 있다. 또한 Fig. 13에서 볼 수 있는 바와 같이 용수리 지역에서의 대기경계층 높이가 약 500여 m 정도로서 여름철 1500LST의 대기경계층 높이로 볼 때 낮은 것으로 분석할 수 있다. 따라서 이러한, 용수리 지역으로 바닷바람(해풍, 연안풍) 유입의 약화, 낮은 대기경계층으로 인한 연직

대기확산의 약화가 용수리 지역 오존 농도 상승에 기상학적인 측면에서 큰 영향을 미친 것으로 판단할 수 있다. 군집 1의 두 지점간 최소 오존농도 차이를 나타낸 2010년 7월 24일은 부산전역에 남서풍이 나타났던 사례일로써, 이 사례일 또한 낮은 대기경계층 고도의 영향으로 다른 군집의 두 지점간 오존농도 차이가 최소로 나타나는 사례일에 비해 다소 높은 오존농도를 보이고 있는 것으로 분석된다.

군집 2에서 두 지점간 오존농도의 최대차와 최소차가 나타나는 사례일들은 용수리와 기장을 측정소 모두에서 유사하게 동풍 계열의 바람이 나타났었는데, Fig. 13의 대기경계층 고도를 살펴보면 군집 2에서는 동쪽 바다의 경계층 높이가 다른 군집 사례일들에 비해 상대적으로 다소 높게 나타남을 확인할 수 있다. 이것은 군집 3에서 두 지점간 오존 농도차이가 최소로 나타난 사례일에서도 확인할 수 있는데, 이날을 포함해서 3개 사례일들은 모두 9월과 10월로써 계절상으로 가을에 발생한 사례이다. 군집 2에서 최대차를 나타내는 사례일에는 용수리와 기장에서 대기경계층 높이가 낮게 나타나서 대기확산 측면에서는 좋지 않은 기상학적 조건을 형성하고 있다. 특히, 용수리 지역은 서쪽에 고도 약 500여 m의 고지대가 형성되어 있는데 이 날은 용수리 지역에서의 대기경계층 고도 또한 약 500여 m 정도로 나타나서 동쪽에서 유입되는 동풍에 의해서도 용수리 지역 내에 존재하고 있던 오존이 용수리 밖으로 확산되기 어려운 기상학적 조건에 있었으므로 이 또한 용수리 지역의 고농도 현상과 밀접한 관련이 있다고 판단된다. 그러나 기장을 지역은 서쪽으로 고도 약 350여 m의 지형이 존재하고 있고 이 고도보다 높은 대기경계층이 이 지역에 형성되었다는 것이 기장을 지역에서 오존의 정체나 이에 따른 고농도가 나타나지 않았다고 분석할 수 있다. 군집 2에서 최소 오존농도 차이를 보였던 사례일에서는 두 지점이 위치한 지역의 대기경계층 고도가 모두 1 km로 비교적 높게 나타나 대기확산이 다소 원활하였을 것으로 판단할 수 있으며 이로 인하여 용수리와 기장을, 두 지역의 오존 농도차가 크게 나타나지 않았던 것으로 분석된다.

Fig. 12. Vertical distributions of the simulated wind vector at the time of the maximum hourly ozone concentration of YS site at each episode.

Fig. 12. Continue.

군집 3에서 두 지점간 오존농도의 최대차가 나타난 사례일은 부산 동부연안지역을 중심으로 남풍과 남동풍계열의 바닷바람이 비교적 뚜렷하게 나타난 경우이다. 그러나 바람의 연직단면도를 보면, 용수리 지역으로 이들 바람의 유입은 다소 약하게 나타나고 있는데, 상대적으로 차가운 바닷바람이 유입되지 못함은 용수리 지역에서 지상기온이 상승을 저감하거나 하강시키는 효과가 약하게 되고 이것은 결론적으로 주간 오존농도의 상승을 방해하는 기상학적 역할이 이 지역에서는 약했을 것으로 판단할 수 있다. 그러나 용수리와 인근한 기장을 지역에서는 남풍에서 불어 들어오는 남풍계열의 바닷바람이 기장으로 충분히 도달하고 있고 이것은 용수리에서와 달리 기장 지역에서 기온저감과 이와 연관된 주간 오존농도 상승의 둔

화 또는 하강에 영향을 미쳐 오존농도가 용수리에 비해 상대적으로 낮아서 두 지점간 오존농도 차이가 크게 나타나는 조건이 된 것으로 분석된다. 군집 3에서 두 지점간 오존농도가 최소로 나타난 사례일에는 두 지점 모두 동풍계열의 바닷바람이 나타나고 있는데 특히, 용수리 지역에서도 이러한 바람이 뚜렷하게 나타나고 있다. 즉, 동쪽으로 고지대 등 지형적 장애물이 없는 용수리와 기장을 지역 모두 이들 바닷바람이 지역 내로 충분히 불어 들어온 것으로 분석된다. 또한 사례일의 대기경계층 높이가 두 지점 모두 500여 m 이상으로 나타나서 용수리 지역 서쪽의 고지대보다 높게 나타난 점과 이 지역내로 유입된 바닷바람에 의한 용수리 지역의 대기확산 효과는 충분할 수 있는 기상학적 조건에 있다. 따라서 인접한 두 지점 모두 원활한

Fig. 13. PBL height at the same latitude of YS and GJ sites at the time of the maximum hourly ozone concentration of YS site at each episode.

대기확산에 의한 오존농도의 지역적 차이가 작게 나타난 것으로 판단된다.

군집 4에서 두 지점간 오존농도의 최대차가 나타나는 사례일은 군집 2의 최대 농도차가 나타났던 사례일과 유사한 조건이다. 즉, 용수리 지역의 서쪽과 남쪽에 위치한 고지대에 의해 지역내로 바닷바람의 유입이 약화되고, 이날의 대기경계층 높이도 비교적 낮게 나타나 용수리 지역의 오존 농도가 비교적 높게 나타난 것으로 분석된다. 군집 4에서 최소차가 나타나는 사례일은 두 지역 모두에서 동풍 계열의 바닷바람이 유입되고 있으며, 용수리 지점에서의 바람 강도가 약화된 현상도 나타나지 않아 두 지점에서 균등하게 바닷바람의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과로 군집 3의 최소 농도차이가 나타났던 경우와 유사하게 두 지역간 오존농도 차이가 작게 나타난 것으로 분석된다.

4. 결론

부산지역에서 비교적 청정지역에 위치해 있는 도시대기측정소인 용수리 측정소와 기장을 측정소의 오존 농도 차이에 대한 원인을 기상장 수치모의를 이용하여 기상학적 관점에서 살펴보았다. 먼저 2008년부터 2010년까지 용수리 측정소에서 시간별 최고 오존 농도 80 ppb 이상인 날 76일을 대상으로 역궤적 분석 후 군집 분석하였으며, 분석결과 4개의 군집을 추출하였다. 특히 군집 2는 중국 북부지역에서 발원하여 한반도로 유입되는 사례로서 장거리 수송이 가장 뚜렷하게 나타나 종관규모의 기상 현상이 뚜렷이 나타날 때 두 측정소간 농도 차이가 가장 작게 나타났다. 군집 분석한 결과를 바탕으로 군집별 사례일 중 두 지점간 최대 오존농도 차이를 나타낸 사례일과 최소 오존농도 차이를 나타낸 사례일에 대하여 기상장 모델을 이용하여 수평바람장과 연직단면도를 분석하였다. 군집 1과 군집 3에서 최고차가 나타나는 사례일에는 부산

의 동부지역에 남풍이 나타나고 있으나, 용수리 지역의 남쪽의 고지대와 동쪽의 저지대로 인해 풍향이 남동풍으로 변위되었고 바람의 강도는 약화되었으며, 사례일의 대기경계층 높이도 약 500여 m 정도로 낮게 나타났다. 즉, 용수리 지역으로 바닷바람 유입의 약화, 낮은 대기경계층 형성과 같은 기상학적 요소가 용수리 지역 오존 농도 상승에 영향을 미친 것으로 판단되었다. 군집 2와 군집 4에서 최고차가 나타난 사례일에는 용수리 지역에 동풍이 나타났으나, 서쪽에 고도 약 500여 m의 고지대가 형성되어 있으면서 이 날 대기경계층 높이가 약 500여 m로 나타나, 용수리 지역에서 형성된 오존이 용수리 밖으로 확산되기 어려운 지형적, 기상학적 조건이 나타난 것으로 분석되었다. 군집 1, 2, 3에서 두 지역간 오존 농도차가 최소로 나타난 사례일은 대기경계층 높이가 두 지점 모두 500여 m 이상으로 나타나 용수리 지역 서쪽 고지대보다 높게 나타난 점과 이 지역내로 유입된 바닷바람에 의한 용수리 지역의 대기확산 효과로 인하여 두 지역간 오존 농도차가 최소로 나타난 것으로 판단된다. 군집 4에서 두 지역간 오존 농도차가 최소로 나타난 사례일은 두 지점 모두 대기경계층 높이가 약 500여 m 정도로 낮게 나타났으나, 두 지점에서 균등하게 바닷바람이 유입되어 두 지역간 오존 농도차이가 작게 나타난 것으로 분석되었다. 즉, 부산 동부지역에 남풍이 불면서 대기경계층 높이가 500여 m로 낮게 형성될 때 용수리 지역으로 유입되는 차가운 바닷바람이 남동풍으로 약하게 변위되고 용수리 지역 서쪽에 위치한 지형으로 오존 농도 상승을 유발한 것으로 판단되었으며, 동부지역에 동풍이 불면서 대기경계층 높이가 500여 m로 낮게 형성될 때에도 용수리 지역 서쪽에 위치한 지형으로 오존 농도 상승이 나타난 것으로 분석되었다.

본 연구를 통하여 특정지역의 지형적 조건과 풍향, 대기경계층 고도와 같은 기상학적 조건에 의하여 국지적으로 오존 농도 상승이 나타날 수 있음을 보여주었다. 따라서 지역의 대기질을 평가하고 예측함에 있어 지형적 조건과 기상요소를 정확하게 진단하는 과정은 중요하다고 할 수 있으며, 향후 대기질 수치모의를 통하여 기상요소와 대기질과의 관계를 좀더 정량적으로 비교, 판단할 필요가 있다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원, 2008, 대기오염물질 배출량 2007.
- 김유근, 이화운, 전병일, 홍정혜, 1996, 부산 연안역의 오존 농도에 미치는 해풍의 영향, 한국환경과학회지, 5(3), 265~275.
- 부산광역시보건환경연구원, 2009, 부산광역시보건환경연구원보 조사보고서 제18-2/2008년.
- 오인보, 김유근, 황미경, 2004, 연안도시지역 해풍지역이 오존분포에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 20(3), 345~360.
- 이화운, 김유근, 정우식, 2000, 복잡한 연안지역에서 해풍시작시 지형의 영향에 대한 수치모의, 한국기상학회지, 36(5), 561~572.
- 이화운, 이현미, 이순환, 최현정, 2010, 라그랑지안 입자 확산모델을 이용한 광양만 권역에서의 공기과 재순환 현상의 수치모의, 한국환경과학회, 19(2), 157~170.
- 전원배, 이화운, 이순환, 최현정, 임현호, 2009, 상세 해수면 온도자료의 반영에 따른 국지 기상장 개선에 관한 수치연구, 한국대기환경학회지, 25(4), 304~315.
- 전병일, 김유근, 이화운, 황수진, 1996, 해풍 효과에 의한 저층대기구조 변화의 측정, 한국환경과학회지, 5(4), 441~451.
- 정우식, 이화운, 2000, 연안복잡지역에서 해풍시작에 대한 지형의 영향, 한국기상학회지, 36(2), 245~256.
- 정장표, 유숙진, 2010, 휘발성유기화합물질과 질소산화물의 오존생성 기여도 평가에 관한 연구, 대한환경공학회지, 32(2), 209~218.
- 환경부, 2011, 대기환경연보(2010).
- Arsic, M., Nikolic, D., Djordjevic, P., Mihajlovic, I., Zivkovic, Z., 2011, Episodes of extremely high concentrations of tropospheric ozone in the urban environment in Bor-Serbia, Atmospheric Environment, 45, 5716~5724.
- Carvalho, A., Monteiro, A., Ribeiro, I., Tchepel, O., Miranda, A.I., Borrego, C., Saavedra, S., Souto, J.A., Casares, J.J., 2010, High ozone levels in the northeast of Portugal: Analysis and characterization, Atmospheric Environment, 44, 1020~1031.
- Ding, A., Wang, T., Zhao, M., Wang, T., Li, Z., 2004, Simulation of sea-land breezes and a discussion of their implications on the transports of air pollution during a multi-day ozone episode in the Pearl River Delta of China, Atmospheric Environment, 38, 6737~6750.

- Evtyugina, M. G., Pio, C., Nunes, T., Pinho, P. G., Costa, C. S., 2007, Photochemical ozone formation at Portugal West Coast under sea breeze conditions as assessed by master chemical mechanism model, *Atmospheric Environment*, 41, 2171-2182.
- Lee, S. H., Sung, K. H., Lee, H. W., 2008, Impact of regional trans-boundary ozone associated with complex terrain on urban air quality, *Atmospheric Environment*, 42, 7384-7396.
- Ma, Y., Lyons, T. J., 2003, Recirculation of coastal urban air pollution under a synoptic scale thermal through in Perth, Western Australia, *Atmospheric Environment*, 37, 443-454.
- Zabkar, R., Rakovec, J., Koracin, D., 2011, The Roles of regional accumulation and advection of ozone during high ozone episodes in Slovenia: A WRF/Chem modelling study, *Atmospheric Environment*, 45, 1192-1202.