



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

濟州地域 高濃度 大氣污染
原因糾明에 觀한 氣象學적 특성:
觀測資料 分析과 數值모델링 研究

濟州大學校 大學院

地球海洋科學科

韓承汎

2016年 2月



석사학위논문

제주지역 고농도 대기오염
원인규명에 관한 기상학적 특성:
관측자료 분석과 수치모델링 연구

제주대학교 대학원

지구해양과학과

한 승 범

2016년 2월



제주지역 고농도 대기오염
원인규명에 관한 기상학적 특성:
관측자료 분석과 수치모델링 연구

지도교수 송 상 근

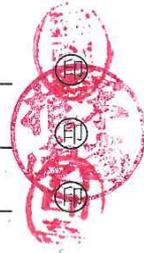
한 승 범

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2015年 12月

한승범의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 윤 재 흥
위 원 송 상 근
위 원 김 태 훈



제주대학교 대학원

2015年 12月

Meteorological analysis to examine the cause of high
concentration air pollution in Jeju:
Observations and modeling study

Seungbeom Han
(Supervised by professor Sang-Keun Song)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree
of Master of Science

2016. 2.

This thesis has been examined and approved.

Department of Earth and Marine Sciences

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 재료 및 방법	4
2.1. 자료 및 분석방법	4
2.2. 모델 구성	7
2.2.1. HYSPLIT 4	7
2.2.2. 기상모델 WRF	8
2.2.3 대기질모델 CMAQ	13
제 3 장 결과 및 고찰	17
3.1. 고농도 오존 및 미세먼지의 기류패턴 분류 및 패턴별 농도 분석	17
3.1.1 후방궤적 분석을 통한 기류패턴 분류	17
3.1.2 패턴별 고농도 오존 및 미세먼지 발생빈도 및 농도분석	22
3.2. 고농도 오존 및 미세먼지에 영향을 주는 기상 조건 분석	27
3.2.1 오존 및 미세먼지일의 기상조건과의 관계 상관성 분석	27
3.2.2 기온과 풍속 구간별 오존 및 미세먼지 농도의 초과빈도	30
3.3. 오존의 광화학 생성기작 및 고농도 오존일의 수치모의 분석	36
3.3.1 오존의 광화학 생성기작	36
3.3.2 기상모델 평가	39
3.3.3 오존 수치모의 분석	44
제 4 장 요약 및 결론	60
참 고 문 헌	63
Abstract	68

List of Figures

Fig. 1. Geographical locations of 3 monitoring sites (Yeon-dong, Ido-dong and Donghong-dong) for air pollutants (open circle, A) on Jeju Island. The meteorological monitoring sites (triangle, M) are located less than approximately 2 km (Yeon-don, Ido-dong and Donghong-dong) away from the air pollutant monitoring sites, respectively.	6
Fig. 2. The WPS modelingsystem flow chart.	9
Fig. 3. The flow chart of the WRF modeling system.	10
Fig. 4. The nested model domains for WRF simulation.	10
Fig. 5. CMAQ chemistry-transport model and associated preprocessors. ...	14
Fig. 6. 168-h backward trajectories of the air mass arriving at 500 m and 1 km AGL over Jeju Island for the representative air mass patterns (Types A-D) of high ozone concentration days.	18
Fig. 7. Same as Fig. 5 except for the representative air mass patterns (Types E-G) of high PM ₁₀ concentration days.	20
Fig. 8. Relationship between the occurrence frequency of O ₃ (≥ 80 ppb) and PM ₁₀ (≥ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and air temperature at 3 sites on Jeju Island during 2009-2013.	32
Fig. 9. Same as Fig. 8. except for surface wind speed.	34
Fig. 10. Time series of the observed and WRF model-predicted meteorological variables such as (a) air temperature and (b) wind speed.	40
Fig. 11. Same as in Fig. 10.	41

Fig. 12. Spatial distributions of hourly mean NO _x emissions derived from INTEX-B (East Asia) and CAPSS (South Korea) at the surface layer of the study area (in kg/h).	45
Fig. 13. Spatial distributions of hourly mean VOCs emissions derived from INTEX-B (East Asia) and CAPSS (South Korea) at the surface layer of the study area (in kg/h).	46
Fig. 14. Spatial distributions of (a) hourly Ozone concentrations simulated by the CMAQ modeling system and (b) wind vectors simulated by the WRF model in the East Asia.	48
Fig. 15. Spatial distributions of hourly mean Ozone concentrations simulated by the CMAQ modeling system around Jeju Island.	52
Fig. 16. Time series of the observe and CMAQ model-predicted meteorological variables such as (a) 15 air quality monitoring sites in Busan, (b) 7 sites in Gwangju, (c) 4 air quality monitoring sites in Yeosu, (d) 4 sites in Gwangyang, (e) 4 air quality monitoring sites in Suncheon, (f) 7 sites in Changwon., and (g) 3 air quality monitoring sites in Jeju.	56

List of Tables

Table 1. Details of the grids and physical options used in the WRF model	11
Table 2. CMAQ configurations	16
Table 3. Frequencies of the high ozone concentration days exceeding 80 ppb/h for the different air mass types during 2009-2013.	23
Table 4. Frequencies of the high PM ₁₀ concentration days exceeding 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for the different air mass types during 2009-2013.	24
Table 5. A statistical summary of the mean concentrations of O ₃ and PM ₁₀ at Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong sites according to the different air mass types (Types A-D and Types E-G).	26
Table 6. Correlation between daily mean pollutant concentrations and meteorological variables in the study area during 2009-2013.	29
Table 7. Statistical evaluation of meteorological variables between observations and model-predicted values: results compared at several monitoring sites during the study period (01 LST 25 June ~ 00 LST 29 June 2011).	43

1. 서론

전국적인 경제성장과 도시화로 인해 대기오염물질은 지속적으로 증가하는 추세이며, 지역규모 이상의 대기오염물질 수송량을 증가시켜 대도시를 중심으로 보다 넓은 지역에서 심각한 대기질 오염현상이 나타나고 있다. 지금까지 대기질의 특성 및 변동과 관련된 많은 연구는 대부분이 대도시 또는 대도시 인접지역을 중심으로 이루어져 왔으며, 주로 국지적 배출과 다양한 기상조건이 가장 큰 원인이라고 보고된 바 있다(Ghim, 2000; Kim and Ghim, 2002; Kim et al, 2007; Oh et al, 2004; 오인보와 김유근, 2004). 이러한 연구로부터 대도시에서의 대기질, 특히 오존과 미세먼지의 변동 특성 및 기타 오염물질과의 관계 등에 대한 많은 자료가 축적 되어왔다.

오존과 미세먼지는 대표적인 도시지역의 대기오염 물질이며 오존의 경우일반적으로 전구물질들(NO_x 와 VOCs 등)의 광화학 반응을 통해 오후에 최고농도가 나타나고, 야간에는 NO와의 반응(NO_x titration)으로 농도가 감소하게 된다. 그러나 이러한 농도변화 패턴 또한 해당지역의 배출환경과 기상조건에 따라 크게 달라질 수 있다. 특히 기상의 역학적 효과가 큰 기여를 하게 되는데, 야간에 나타나는 오존농도의 상승은 이와 관련된 하나의 현상으로 볼 수 있다. 야간 오존농도 상승의 주요 원인으로는 대기안정층 파괴와 결부되어 나타나는 상층 오존의 연직 혼합과정을 들 수 있는데, 도시지역의 잔류층내에 존재하는 풍부한 오존이 역전층 상부의 풍속 증가에 의한 안정층 파괴와 함께 하향수송 되어 지상의 오존농도를 상승시킬 수 있다.(Eliasson et al., 2003; Liu et al., 1990; Samson, 1978; 김유근 등, 2002). 또한 야간 하층제트(Low-level Jets, LLJ)의 발달과 전선 통과에 의한 연직적인 바람쉬어를 통해 나타나기도 한다(Corsmeier et al., 1997; Reitebuch et al., 2000; Salmond and Mckendry, 2002).

최근 전 지구적인 경제 발전과 배출원 증가로 인해 지역규모 이상의 대기오염

물질 수송에 의한 영향을 주목 할 수 있다. 여러 선행연구에서 오존을 포함한 대기오염물질 장거리 수송이 지역 오존 농도의 상승과 관련함을 제시하였고(Chan and Chan, 2000; Jaffe et al., 2003; Lam et al., 2001; 김유근 등, 2007), 특히 중국을 포함한 동북아시아 지역에서의 배출원 환경과 기상조건은 풍하측에 위치한 우리나라와 일본지역의 오존농도 상승에 기여할 수 있음을 보여주었다(Akimoto et al., 1996; Pochanart et al., 1999; Pochanart et al., 2002; 김용표 등, 1996; 송상근 등, 2009). 이러한 연구들은 대도시의 오존과 미세먼지 농도가 대도시내에서의 생성 및 소멸에만 국한되어 있는 것이 아니라 대기운동과 관련된 수송과도 밀접한 관련이 있다고 나타내고있다(Brulfert et al., 2007; Cheng, 2002; Ding et al., 2004; Mayer, 1999; Ma and Lyons, 2000; Oh et al., 2006).

제주지역은 다른 대도시에 비해 산업시설이 적고, 인구밀도가 낮아 대체로 고정배출원에 의한 영향이 적어, 국내에서 가장 청정한 지역중의 하나로 꼽히나 지리적으로 한반도와 중국, 일본의 중앙에 위치하여 주변 지역의 대기오염 영향을 비교적 크게 받고 있는 것으로 판단된다(Carmichael et al., 1997; Chen et al., 1997; Kang et al., 1999; Kim et al., 2000, 1998a, b; Moon et al., 1999; Ro et al., 2001; 김유근 등, 2009). 제주도 서부지역 연평균 오존 농도의 경우 우리나라의 다른 대도시 지역보다 높은 것으로 보고되고 있을 뿐 아니라 제주시에서는 질소산화물($\text{NO}_x = \text{NO}_2 + \text{NO}$)의 농도가 국가 환경기준을 넘나드는 경우가 빈번해지고 있는 상황이다(Lee et al., 2005). 또한 점차적으로 도시 팽창과 관광객 급증, 그리고 오염물질의 장거리 수송 영향 등 복합적인 요인으로 인해 대기환경이 더욱 더 악화될 가능성이 있다. 오존과 유사하게 미세먼지 역시, 배출원에 의한 직접적인 영향을 제외 할 경우 기상학적 요인인 기상요소, 장거리 수송과 국지적 배출, 지형 및 지리적 특성에 의해 많은 영향을 받는다는 것을 파악할 수 있다(Chea et al., 2009; Shin et al., 2007; 송상근 등, 2010). 제주지역 역시 매년 황사로 인해 도민과 관광객들의 건강과 사회 그리고 관광활동에 큰 어려움을 겪고 있는 실정이며, 대표적으로 2010년 3월 황사 사례에서 서귀포시 동홍동 지점의 고농도 미세먼지(PM_{10})와 더불어 2011년 5월 초 같은 지점에서 PM_{10} 농도가 무려 $1,027 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 우리나라 2011년 황사 사례들 중에서 최고농도를 기록한바 있다(KMOE: Korean Ministry of Environment, 2011, 2012).

본 연구에서는 제주지역 중 오존과 미세먼지의 고농도 원인 추정을 위해 HYSPLIT 모델을 이용하여 고농도 사례일의 기류 패턴을 분류하였다. 패턴별 농도 분석과 고농도 O₃과 PM₁₀ 발생시, 기상인자 간의 상관성 분석을 통하여 오존 및 황사에 미치는 기상인자에 대한 특성을 분석하고자 하였다. 또한 기온과 풍속 구간별 O₃ 및 PM₁₀ 농도의 초과빈도를 조사하여 어떤 관련성을 갖고 있는지 밝히고자 하였다. 마지막으로 중국 공업지역의 급속한 산업화로 인해 배출된 많은 양의 대기오염물질이 제주지역으로 수송되어 영향을 줄 가능성을 고려하기 위해, 기상모델(WRF)과 대기질모델(CMAQ)을 이용하여 오존 및 오존 전구물질이 중국으로 부터 바람의 패턴에 따라 제주지역에 어떠한 영향을 미치는지 밝히고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 자료 및 분석방법

본 연구에서는 제주지역 대기오염물질(O_3 과 PM_{10})의 농도 분포 특성과 기원 및 이동경로를 분석하고, 고농도 현상에 영향을 주는 기상 조건을 분석하기 위해 최근 5년(2009~2013년) 동안 제주지역 내 오존과 미세먼지 관측자료와 주요 기상요소(기온, 풍향, 풍속 등) 자료를 이용하였다. 대기환경기준 오염물질 자료는 환경부 산하 제주지역 내 3개 측정지점(이도동, 연동, 동홍동)에서의 시간별 자료이다. 3개 측정지점의 위치 및 일반적인 특징은 다음과 같다. 이도동과 연동은 다른 두 측정지점에 비해 도심지역이며, 차량이 많고 건물이 밀집되어 있는 특징이 있고 동홍동 지점은 주거지역으로 서귀포시 중심의 북동쪽에 위치하고 있다. 기상요소는 기상청에서 제공하는 여러 관측지점 중 대기오염물질 측정지점에 가장 가까운 3개 관측지점의 시간별 자료를 이용하였다. 일반적으로 대기오염물질의 농도 수준은 대상지역을 포함한 인근의 기상조건에 의해 크게 영향을 받기 때문에, 보다 정확한 해석을 위하여 대기오염물질과 기상요소의 측정소는 서로 가장 가까운 지점끼리 묶어서 비교하였다. 즉 제주시의 기상관측지점은 제주지방 기상청(이도동 대기질 측정지점에서 약 1.6 km 떨어진 지점)과 KBS방송총국(연동 지점에서 약 500 m), 그리고 서귀포시의 기상관측지점은 서귀포기상대(동홍동 지점에서 약 2 km)에 위치하고 있다(Fig. 1).

연구기간동안 제주지역의 각 고농도 선정일에 대한 대기오염물질의 이동경로를 추정하기 위해 미국 해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 HYSPLIT 4(HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였다. HYSPLIT 4는 라그랑지안 방법에 기초한 수송·확산 과정을 계산하여(Kim and Song, 2003) 오염물질의 농도뿐만 아니라 오염물질의 전방향 및 역방향으로의 궤적 추적이 가능하며, 다른 대기확산모

델과 비교하여 계산용량과 모델링 시간이 적게 소요된다는 장점이 있다. 기상자료는 GDAS (Global Data Assimilation System)를 이용하였고, 중국에서 발생한 대기오염물질의 경우 대략 4~5일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 고려하여 역궤적 분석의 모사시간을 5일(120시간)로 설정하였고, 측정 지점의 좌표는 각각 이도동(33.50°N, 126.53°E), 연동(33.49°N, 126.53°E), 동홍동(33.25°N, 126.57°E)을 기점으로 설정하였다. 출발점 고도는 500, 1000m로 설정하였고, 출발시간은 우리나라 시간의 오전 9시와 오후 12시에 해당하는 때 00 UTC와 03 UTC로 정하였다. 사례일 중에서 일부 모호한 이동 궤적을 객관화 시키기 위한 방법으로, 군집 분석(cluster analysis)을 이용하였다. 군집분석이란 대상들이 지니고 있는 다양한 특성의 유사성을 바탕으로 거리가 가까우면 같은 군집에 속하게 되며 일정거리 이상으로 먼 개체들은 다른 군집에 속하게 됨으로써 동일 군집 내에 속해있는 공통된 특성들을 조사하는 방법이다(Wilks, 1995).

오존 및 미세먼지의 고농도 사례일을 선정하기 위한 방법으로는 연보를 이용한 제주지역 3지점의 최근 5년(2009~2013)간 오존 80ppb 이상의 사례일 및 미세먼지 발생일을 선정하였다. 제주의 경우 환경부의 대기환경연보에 따르면 (KMOE, 2013) 5가지 오염물질 중 SO₂, NO₂, CO는 국가 환경기준치를 전혀 초과하지 않는 반면, O₃과 PM₁₀은 자주 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 예를 들어, 2010~2012년 동안 제주지역 O₃ 1시간 평균 60 ppb, PM₁₀ 24시간 평균 100 µg/m³ 초과빈도를 살펴보면, 3개 측정지점 중 이도동, 연동, 동홍동 지점의 O₃ 초과빈도의 합은 108회(2012년) ~ 197회(2010년), PM₁₀은 3회(2012년) ~ 74회(2010년)으로 다른 대기오염물질에 비해 월등히 높게 나타났다(KMOE, 2011, 2012, 2013). 따라서 본 연구에서는 기상조건(기온과 풍속 구간)에 따른 O₃과 PM₁₀에 대해서만 초과빈도를 분석하였으며, O₃은 1시간 평균 100 ppb 초과횟수가 없는 관계로 국가 환경기준치보다 조금 낮은 80 ppb를 기준으로 정하였고 PM₁₀은 대기환경연보의 황사 발생일을 기준으로 선정한 후 1시간 평균 PM₁₀ 농도가 100 µg/m³ 초과하는 날만 추가로 골라내어 최종 선정하였다.

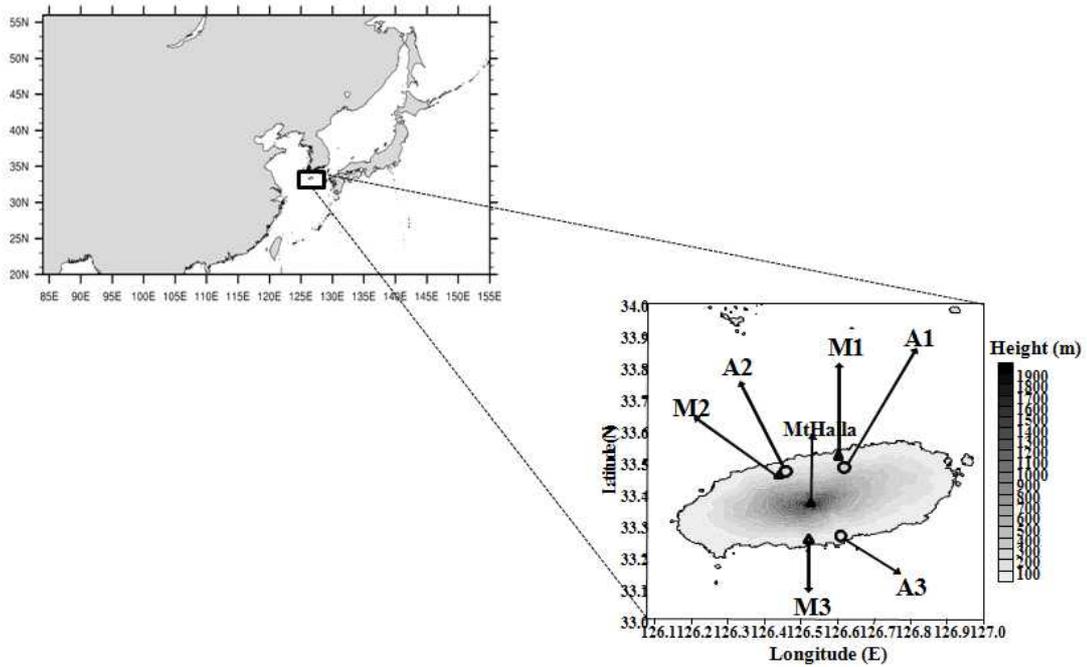


Fig. 1. Geographical locations of 3 monitoring sites (Yeon-dong, Ido-dong and Donghong-dong) for air pollutants (open circle, A) on Jeju Island. The meteorological monitoring sites (triangle, M) are located less than approximately 2 km (Yeon-don, Ido-dong and Donghong-dong) away from the air pollutant monitoring sites, respectively.

2.2 모델구성

2.2.1 HYSPLIT4

본 연구에서는 중국과 제주지역을 중심으로 한 중관규모의 기류특성과 공기괴의 이동경로를 추적하기 위해 NOAA와 Australia's Bureau of Meteorology 가 개발한 HYSPLIT 4 모델을 사용하였다. 모델 입력 자료로는 다양한 기상자료가 사용되는데, NCAR(National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료 또는 ECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecasts) 모델결과가 사용 가능하다. 또한 Omega Field를 이용한 연직운동을 기본 값으로 하고 Isentropic, Isosigma, Isobaric, Isopycnic 옵션들을 선택할 수 있는 특징을 가지고 있다(Roland, 1999). HYSPLIT 4 모델의 적용에 있어 오존의 기원에 대하여 공기괴의 궤적을 수평, 연직적으로 분석할 수 있고, 원하는 시각에 원하는 지점의 공기가 지나온 경로를 시간을 거슬러가면서 역추적 하는 방식으로 분석할 수 있다.

본 연구에서는 동아시아 지역을 중심으로 한 한반도 주변의 중관장 변화특성과 중국으로부터의 오존 및 전구물질이 제주지역에 수송되는 패턴을 구분하는데 사용되었다. HYSPLIT 4 모델 수행의 일련의 과정은 미국 NOAA Air Resource Lab.의 웹상(<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>)에서 이루어졌다. 모델 수행에 있어 사용된 기상 입력자료는 NCEP에서 제공하는 FNL(The 6-hourly FNL archive data come from NCEP's GDAS) 자료를 사용하였으며, 모델 수행에 있어 공기가 단열적 운동을 한다는 가정 하에 공기괴를 추적하는 방법인 등온위면에서의 후방궤적 계산 방법을 선택하였다. 궤적은 제주지역의 이도동과 연동, 동흥동 각각 33.50°N-126.53°E, 33.49°N-126.50°E, 33.25°N-126.57°E 지점에서 출발시켰으며, 시작점의 고도는 약 700 hpa의 등압면으로서 하층 제트가 흐르고 있고 지표면의 국지적 영향을 받지 않는 최저의 높이로 오염물질의 장거리 수송을 파악 할 수 있는 대표적 높이인 500, 1000 m로 하였다(강동근 등, 1993). 또한 모델수행의 시작 시간은 0000 UTC와 0300 UTC(현지시각 09시와 12시)로 하였으며 5일간의 기류이동 경로를 계산하였다.

2.2.2 WRF 모델

본 연구에서 이용된 중규모 기상모델은 차세대 대기모델 WRF(Weather Research & Forecasting model) version 3.5.1 이다. WRF 모델은 1970년대 초반 미국 국립기상연구소 NCAR와 국립환경예측센터 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 공동으로 개발한 모델로 NOAA산하 단체 NCEP 과 AFWA(Air Force Weather Agency)에서 기상모델로 사용되고 있다. WRF 모델은 Arakawa-C 격자체계를 사용하며, 연직격자로는 Eulerian 질량좌표계를 사용한다(Skamarock et al., 2008). 수치계는 3차 Runge Kutta split-explicit 시간적분을 사용하여 이류항에 대해서 6차 중심차분법을 도입하였고, 플럭스 형태의 진단 방정식을 사용하여 질량, 운동량, 엔트로피, 스칼라양을 보존한다. WRF 모델링 시스템 흐름은 Fig. 3과 같다.

WRF의 기본적인 구성은 전처리 과정인 WPS(WRF Preprocessing System)와 모델 수행단계 과정이다. WPS는 WRF 모델의 전처리 입력자료로, 3단계의 프로그램으로 구성되어있다. 먼저 지형 및 토지피복도 등의 지형경계자료 생성을 위한 GEOGRID는 예측하고자하는 대상 영역을 설정하는 단계이다. UNGRID는 초기 추정 입력값으로 부터 등기압면의 기상자료를 생성한다. WPS 마지막 단계인 METGRID는 GEOGRID에 의해 설정된 모델 격자에 UNGRID에 의해 정리된 기상장을 METGRID.TBL 등기압면의 수평 격자점 자료로 내삽하는 과정이다(Fig. 2). 그 후 전처리 과정의 WPS에서 생성된 자료를 이용하여 진단적 계산과 연직적인 내삽과정을 통하여 자료의 재구성 등의 작업을 수행하는 REAL 단계를 거치게 되는데, REAL 작업으로부터 WRF의 초기값과 경계조건인 입력 자료가 생성되면 WRF에서 생성된 자료를 수치 적분하여 사례일 내의 기상상태를 모사한다(WRF-ARW V3: User's Guide, 2015).

WRF 모델의 초기/경계 자료에 사용된 입력자료는 시·공간 해상도와 수집 용이성을 고려하여 NCEP에서 제공하는 NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research)의 FNL 재분석 자료(6시간 간격, $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 의 해상도)를 이용하였다.

본 연구의 모델링은 30 km, 10 km, 3.333 km, 수평해상도를 갖는 3개의 도메인으로 구성하였으며(Fig 4), 연직해상도는 29층으로 설정하였다. 최종 분석도메인에 해당하는 D3는 한반도의 남해안과 제주지역으로 설정하였다. 남동해안과 제주지역은 해안선이 복잡하고 불규칙하며, 특히 제주도의 경우 좁은 면적과 대비하여 섬 전체가 한라산을 중심으로 산지의 형태를 지닌 대상지역으로 도서가 연안 근처에 산재하고 있는 지형적인 특성을 가지고 있으므로 연안기상의 변화가 클 것으로 예상되는 지역이다. 사용된 물리과정과 도메인 상세정보는 하단 (Table 1)에 제시하였다.

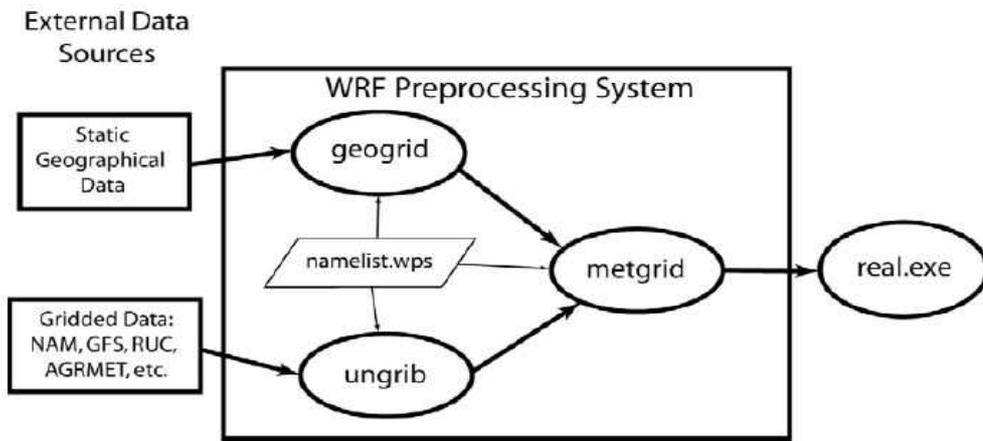


Fig. 2. The WPS modelingsystem flow chart.

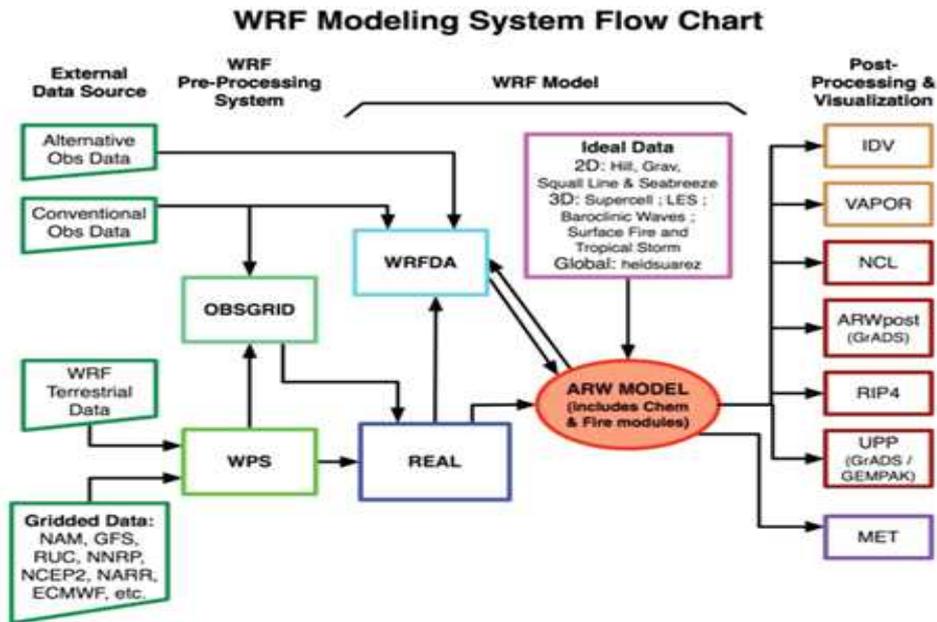


Fig. 3. The flow chart of the WRF modeling system.

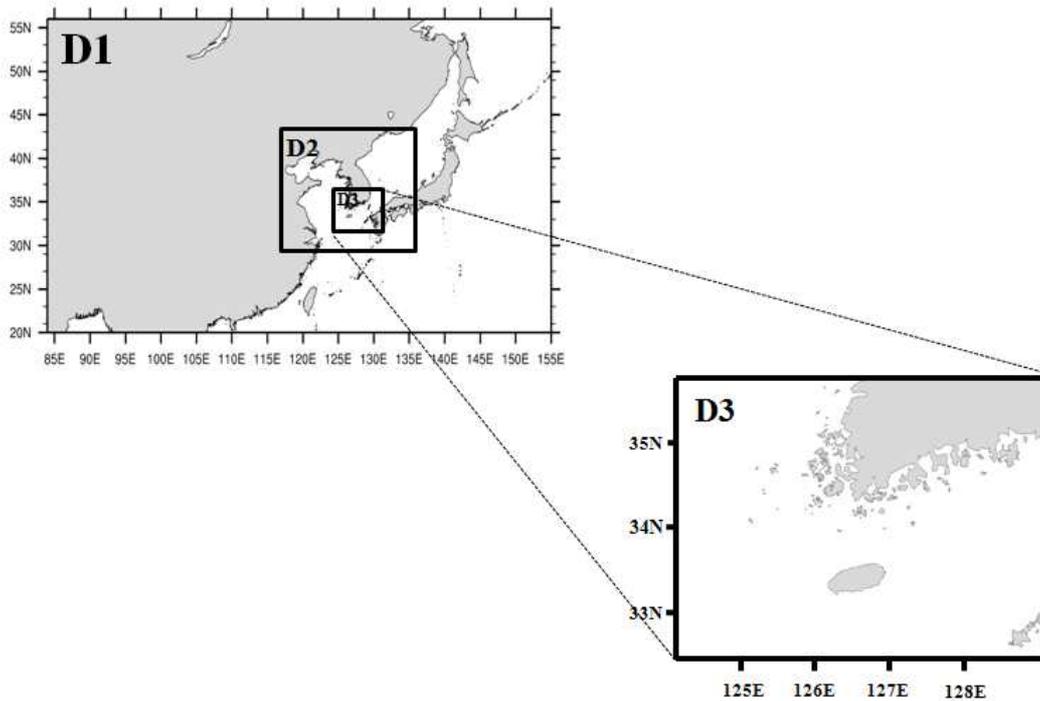


Fig. 4. The nested model domains for WRF simulation.

모델링 수행시 사용된 물리과정은 YSU 경계층 모수화 방안(Hong and Pan, 1996), 아격자 규모의 적운에 의한 강수를 계산하기 위한 Kain-Fritsch의 적운 대류 모수화 방안(Kain and Fritsch, 1993), RRTM 단파/장파 복사 모수화 방안(Iacono et al., 2008)과 30~3.333 km 격자규모에 대한 해상도에 따른 구름 모수화와 메조스케일에 적합한 Single Moment 3-class scheme(Hong et al., 2004)을 사용하였다. 지표 모수화 방안은 Noah LSM(Land Surface Model)을 사용하였다 (Table 1).

Table 1. Details of the grids and physical options used in the WRF model.

Domains	Domain1	Domain2	Domain3
	(D1)	(D2)	(D3)
Cells in x-direction	160	148	133
Cells in y-direction	130	118	103
Vertical layers	29	29	29
Horizontal resolution (Km)	30	10	3.3
Microphysics	WRF Single Moment 3-class scheme		
Cumulus	Kain-Fritsch scheme for D1, D2		
Radiation (long/short wave)	RRTM/ Dudhia		
Planetary Boundary layer	YSU		
Surface layer	MM5 similarity		
Land Surface	Noah Land Surface Mode		

기상모델의 검증을 위해 이용된 통계비교 방법은 평균 MBIAS(Mean Bias), RMSE(RootMean SquareError), IOA(Index ofAgreement), NMB(Normalized Mean Bias)를 사용하였으며 그 식은 아래와 같다. 모델링 정합도 분석에 이용되는 주요 통계인자들의 자세한 내용은 다음과 같다. IOA는 모델결과와 측정값의 일치도를 보기위한 항목으로 0~1사이의 값은 가지고 1일때 완벽한 일치를 나타낸다.

$$IOA = 1 - \frac{\sum_1^N (Model - Obs)^2}{\sum_1^N (|Model - AVG(Obs)| + |Obs - AVG(Obs)|)^2}$$

MBIAS는 모델값과 측정값의 차이를 전기간에 대하여 평균하여 구하는 값으로 +값이면 측정값에 비해 모델값이 과대평가 -값이면 과소평가 된 것으로 파악 할 수있다.

$$MBIAS = \frac{1}{N} \sum_1^N (Model - Obs)$$

RMSE는 모델값과 측정값의 평균 제곱근 오차를 보기 위한 항목이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (Model - Obs)^2}$$

NMB는 모델값과 측정값의 차이의 합을 측정값의 합으로 평균화 하여 주는 항목이다.

$$NMB = \frac{\sum_1^N (Model - Obs)}{\sum_1^N Obs} \times 100\%$$

2.2.3 CMAQ 모델

오존 수치모의를 위한 광화학 대기질 모델은 미국 환경청(U.S. Environmental Agency)에서 개발한 Models-3/CMAQ(Third Generation Community Multiscale Air Quality Modeling System, Byun and Ching, 1999; Byun and Schere, 2006)의 ver 5.0.1이다. 이 모델은 오존 형성과정을 설명하기 위해 필요한 다중규모(multi-scale) 기상현상과 함께 다중상(multi-phase)의 화학반응을 결합시켜 여러 가지 오염물질(multi-pollutants)을 동시에 고려할 수 있다. 수평과 연직 규모가 유사한 도시규모의 대기현상 모의에 적합하도록 모델 내 비정역학 관계식을 적용하였다.

CMAQ 구성과 실행과정은 Fig. 5와 같으며, 5개의 주요 전처리 과정과 1 개의 화학·수송 모델(CCTM, CMAQ Chemical Transport Model)을 가진다. 전처리 과정은 기상모델 결과를 CCTM의 입력자료 형식으로 전환하는 기상장 처리모델 MCIP(Meteorology-Chemistry Interface Processor), 배출량 처리모델인 ECIP(Emission-Chemistry Interface Processor), 모델 수행기간에 대한 광해리율을 산출하는 JPROC(Photolysis Rate Processor), 초기농도조건을 생성하는 ICON(Initial CONditions processor)과 매시간 경계농도조건을 생성하는 BCON(Boundary CONditions processor)이 있다(U.S. EPA, 1999). 본 연구에서는 국내 배출량 자료를 효과적으로 처리하기 위해 자체 전처리 프로그램을 이용하여 CCTM의 배출량 입력자료를 생성하였다. CCTM은 전처리 과정에서 생성된 자료들을 이용해 광화학 반응식을 고려하여 매시간 연속적인 대기오염(오존) 농도값을 산출한다. CMAQ 과정에서 WRF의 기상모델 결과를 토대로 MCIP 단계를 거치게 되는데 WRF의 수평격자체계는 Arakawa C로, 스칼라 변수인 온도와 비습 등은 MM5에 적용된 Arakawa B와 동일한 격자 중앙에서 계산되나 동서(u) 바람성분은 격자의 동쪽과 서쪽 모서리(dot point)에, 남북(v) 바람성분은 격자의 남쪽과 북쪽 모서리에서 계산된다. 따라서 바람 벡터성분의 계산위치 차이를 고려하기 위한 내삽과정이 MCIP에 고려되어있다. 연직격자는 모델 내 일반화된 좌표계(generalized coordinate)를 통해 기상모델 좌표계인 σ -좌표계로 일관성을 유지하였다.

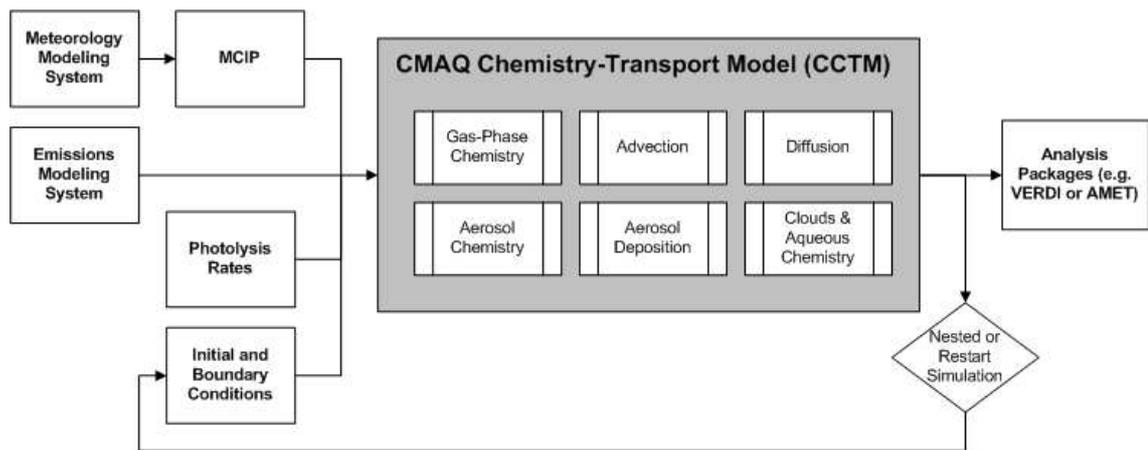


Fig. 5. CMAQ chemistry-transport model and associated preprocessors.

CMAQ은 아래의 식과 같이 계산된 농도값에 대한 물리·화학적 과정의 기여도를 제시하는 Process Analysis 기법을 내재하고 있으며, 각 격자별 오존 농도 생성·소멸에 대한 수평과 연직 이류(advection) 및 확산(diffusion), 침적(deposition), 그리고 화학반응(in-situ chemical production) 등의 상대적 기여율을 계산하는 IPR(Integrated Process Rate)과 광화학 반응과정을 중점적으로 평가하는 IRR(Integrated Reaction Rate)로 구성되어있다(Gipson, 1999; <http://www.epa.gov/asmdner1/CMAQ/CMAQscienceDoc.html>).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial X} (u C_i) + \frac{\partial}{\partial Y} (v C_i) \right] \quad ; \quad (1)$$

$$+ \left[- \frac{\partial}{\partial Z} (w C_i) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(K_e \frac{\partial C_i}{\partial Z} \right) \right] \quad ; \quad (2)$$

$$+ (P_{chem} - L_{chem}) + E \quad ; \quad (3)$$

$$+ \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} \right)_{cloud} + \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} \right)_{dry} \quad ; \quad (4)$$

C_i : 화학종 농도 u, v, w : 모델 도메인에서 각 격자 지점의 삼차원 속도

K_e : 난류 확산 추적종의 하부격자 규모 난류 플럭스의 파라미터

P_{chem} and L_{chem} : 화학적 생산과 손실비율로 인한 화학적반응

E : 근원지 배출량 비율 (1) 수평 연직 이류 (2) 연직 수송을 포함한 연직이류와 연직확산이류(수평 확산기간 제외) (3) 화학종의 변화 + 근원지 배출량 비율

(4) 구름 형성과정과 건성 침적으로 인한 농도 변화의 시간 비율

CMAQ 모델의 초기/경계 조건은 coarse domain에 대해서는 EPA에서 제공하는 프로파일 자료, fine domain에 대해서는 coarse domain을 nested down하여 입력하였다(Fig.1). 모델링에 사용된 에어로솔 메커니즘은 AERO-05, 화학메커니즘은 SAPRC-99이며, 수평 및 연직확산에는 각각 Multiscale과 ACM2 (Asymmetric Convective Method) scheme을, 수직 Advection scheme은 PPM(Piecewise Parabolic Method)을 사용하였다.

배출량 자료는 국립환경과학원의 대기보전 정책수립 지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)을 통해 산정되었다. CAPSS는 점, 선, 면 오염원별 배출원 분류코드(Source Classification Codes, SCC)에 따라 1년 단위로 산정된 배출량(kg/year)이며, 공간적으로는 전국을 1 km × 1 km 격자별로 산출되어 있다.

Table 2. CMAQ configurations.

	Options
CMAQ	Version 5.0.1
Chemical Mechanism	SAPRC99
MCIP	FINAL-Data
Advection scheme	Piecewise Parabolic Method
Aerosol Mechanism	AERO-05
Horizontal Diffusion	Multiscale
Vertical Diffusions	Asymmetric Convective Method

3. 결과 및 고찰

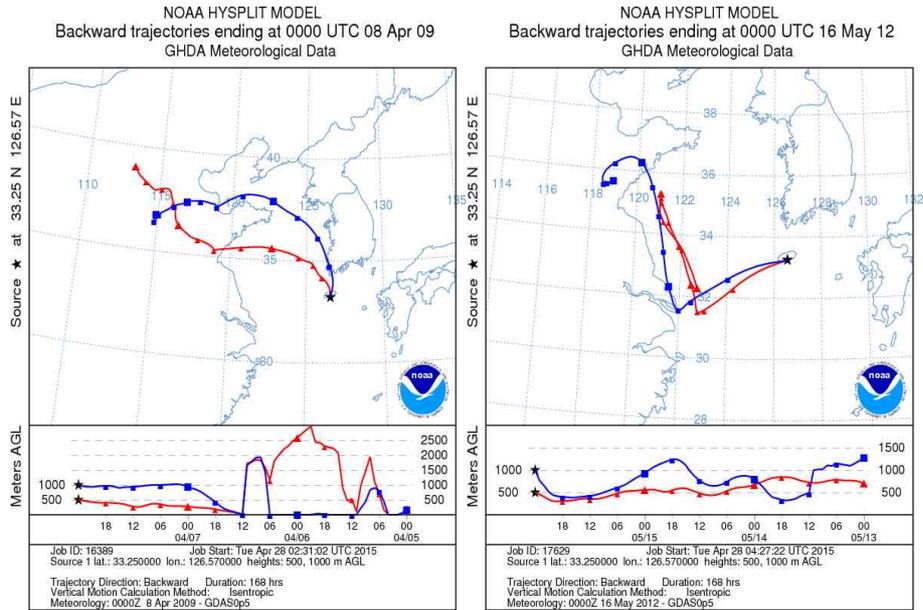
3.1 고농도 오존 및 미세먼지의 기류패턴 분류 및 패턴별 농도 분석

3.1.1 후방계적 분석을 통한 기류패턴 분류

제주지역 오존 발생시 오존 입자와 함께 제주도 상공으로 유입되는 기류의 이동경로를 기류의 방향에 따라 4가지 타입으로 구분 하였다(Fig. 6). 중국의 공장 또는 차량 등 오염물질의 배출량이 많은 공업지역으로부터 수송되는 기류타입을 Type A으로 선정하였고, 상대적으로 Type A에 비해 오염물질의 배출이 적을 것으로 판단되는 북만주 방향에서 수송되는 기류를 Type B로 선정하였다. 그 외 Type C은 주로 연안 및 해양에서 순환하는 기류들로 구분하였고, 마지막으로 일본 연안쪽을 거쳐 제주도로 유입되는 기류들을 Type D로 선정하였다. 이렇게 제주도 내로 유입되는 기류의 분석을 바탕으로 오존 발생 시 발원지 상공의 주된 기류가 어떠한 경로를 통해 제주도 부근을 통과해 가는지 비교하였다. 발원지 상공의 고도는 AGL 500m와 1000m에서 지위고도를 통해 분석하였다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 제주지역으로 유입되는 고농도 미세먼지 기류는 대부분 중국 황사 발원지로부터 생성되어 고비사막을 거쳐 기압골을 통과 후 북서 기류를 타고 유입됨을 알 수 있다. 각각 기류 타입별로 유입 특성을 살펴보면 먼저 Type E의 경우 대표적인 황사발원지로 고비사막과 타클라마칸사막, 황토고원 부근에서 발원하여 남서풍 계열의 바람을 타고 유입되는 사례이다. Type F은 Type E 정도의 고농도는 아니지만 북만주 부근의 황사가 남풍 위주로 한반도를 거쳐 제주도까지 유입되는 사례이다. Type G은 비발원지 위주의 사례로 해양을 순환하는 기류 및 한반도의 서쪽인 일본열도에서 불어오는 기류를 나타낸다.

(a) Type A



(b) Type B

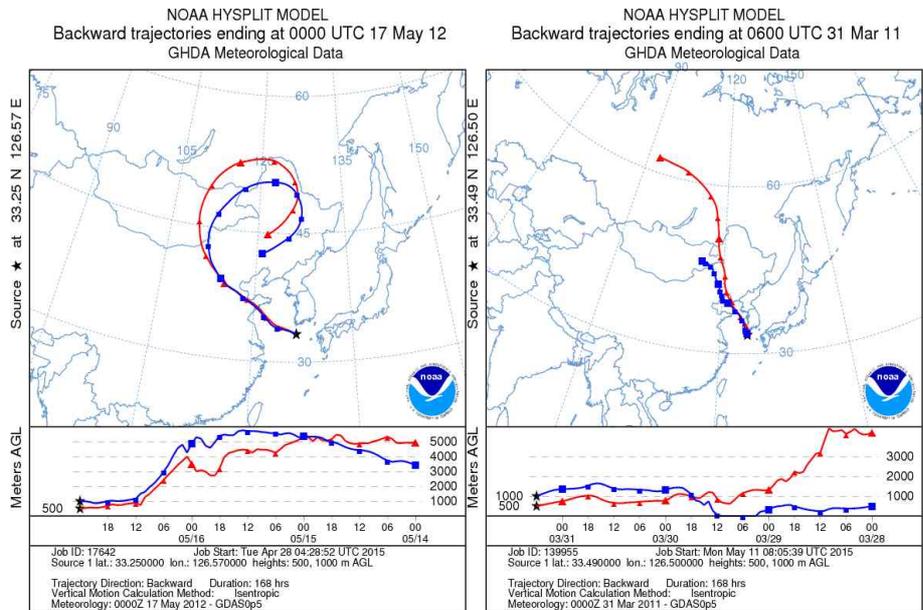
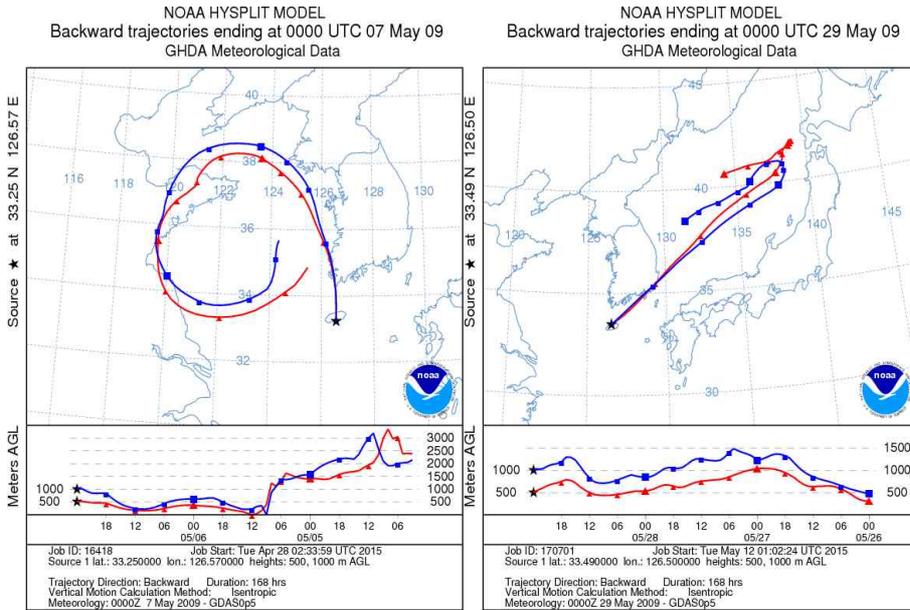


Fig. 6. 168-h backward trajectories of the air mass arriving at 500 m and 1 km AGL over Jeju Island for the representative air mass patterns (Types A-D) of high ozone concentration days.

(c) Type C



(d) Type D

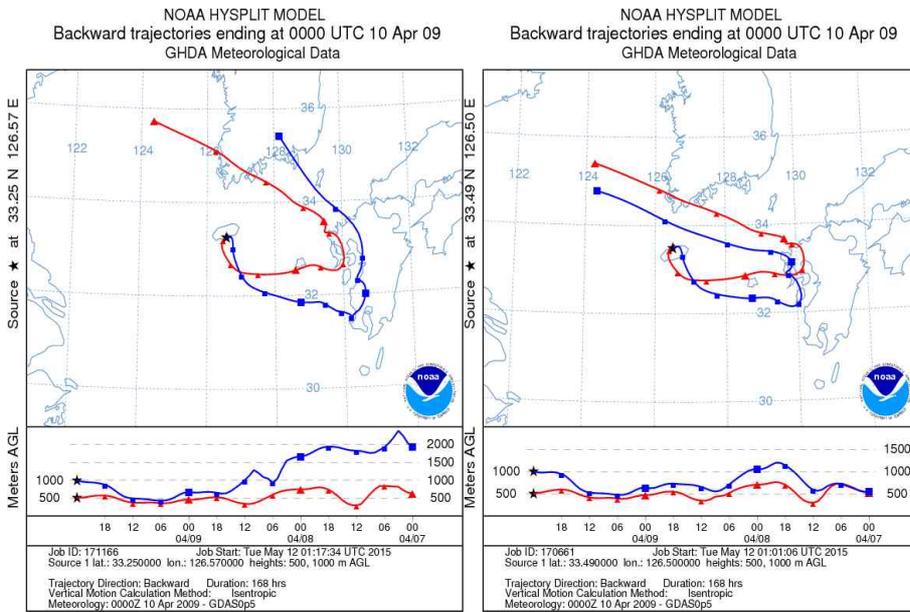
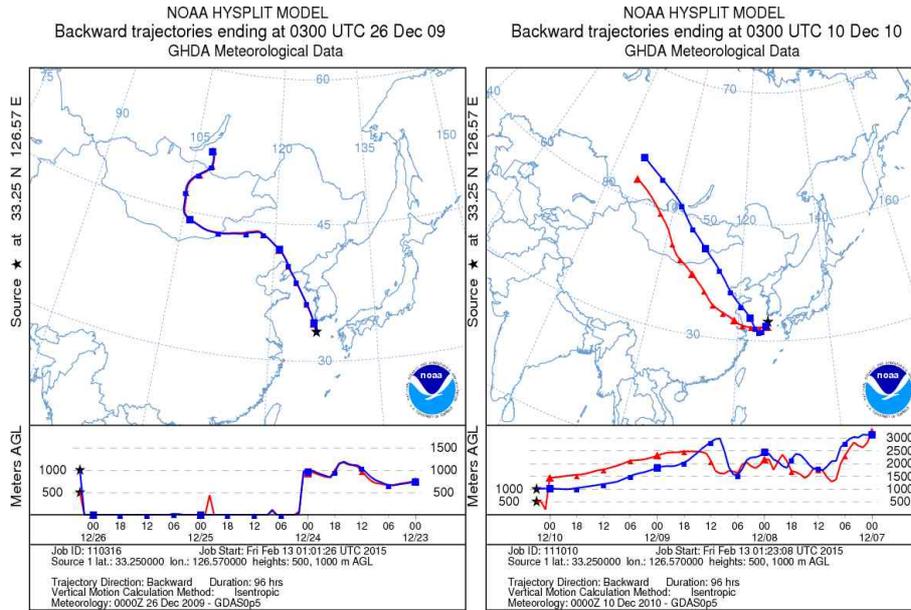


Fig. 6. (Continued)

(a) Type E



(b) Type F

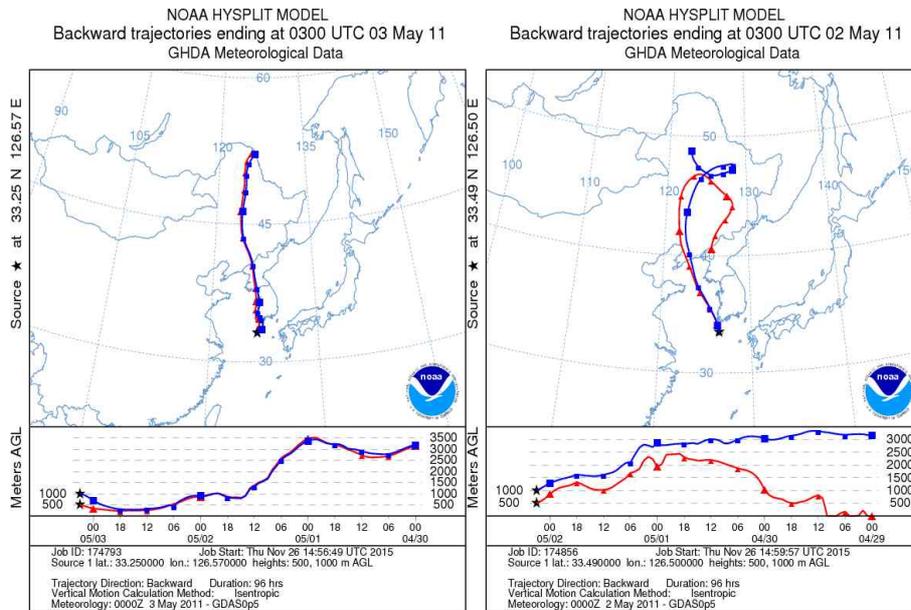


Fig. 7. Same as Fig. 5 except for the representative air mass patterns (Types E-G) of high PM₁₀ concentration days.

3.1.2 패턴별 고농도 오존 및 미세먼지 발생빈도 및 농도분석

제주지역으로부터 168시간 이전의 유적선 위치에서 제주지역으로 향하는 방향을 기류의 유입방향으로 정의하고, 이에 따른 고농도 오존일과 황사일의 기류패턴 발생 빈도율을 수행한 결과(Table 3), 각각 오존은 4개의 타입, 황사는 3개의 타입으로 분류 되었다(Figs. 6~7). 오존은 중국 도심지 방향에서 수송된 기류(Type A)가 총 66일중 45(68.2%)일로 가장 많았는데 이는 중국 도심지와 공업단지의 자동차 및 산업체에서 배출되는 오존전구물질인 VOCs와 NOx가 지속적으로 오존 생성을 증가시켰을 것으로 추정된다. 북만주 부근에서 수송된 기류(Type B)는 7(16.7%)일, 해양을 순환하여 수송된 기류(Type C)는 7(10.6%)일, 일본 연안 도시를 거쳐 제주도로 수송된 기류(Type D)는 3일(4.5%) 순으로 나타났다. 미세먼지의 경우, 주요 황사 발원지인 고비사막 부근에서 수송(Type E)되는 기류가 총 114일의 사례일 중 107(93.9%)일로 대부분을 차지했고, 그 외 북만주 방향에서 수송(Type F)되는 기류는 3(2.8%)일, 해양과 일본열도 방향 등 비발원지 부근에서 수송(Type G)되는 기류는 4(3.3%)일을 차지했다. 황사 발생일의 기류 패턴 분류임에도 불구하고 비발원지에 대해 약 3%의 분류는 HYSPLIT 모델의 불확실도에서 오는 한계라고 사료된다.

Table 3. Frequencies of the high ozone concentration days exceeding 80 ppb/h for the different air mass types during 2009-2013.

Air mass type	Number of Ozone Days	Ozone days belong to each type				
		2009	2010	2011	2012	2013
	Total					
	66					
Type A	45 (68.2)*	4.07-08/5.08/6.01/8.28/10.19	10.17/5.15/6.27/10.06	5.15/6.27/10.06	3.28/5.16	5.24
	Ido-dong	10.17			5.17/5.28	
	Yeon-dong	6.12	10.17		5.17/5.28	
	Donghong-dong	6.12	10.17			
Type B	11 (16.7)		9.13-14	3.31		
	Ido-dong	6.12				
	Yeon-dong					
	Donghong-dong				5.17	
Type C	7 (10.6)	5.07/5.29				
	Ido-dong					
	Yeon-dong					
	Donghong-dong				5.28	
Type D	3 (4.5)	4.10				
	Ido-dong					
	Yeon-dong					
	Donghong-dong					

*The number in parenthesis represents percentage (%)

Table 4. Frequencies of the high PM₁₀ concentration days exceeding 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for the different air mass types during 2009-2013.

Air mass type	Number of Dusty Days	Dusty days belong to each type				
		2009	2010	2011	2012	2013
	Total					
	114					
Type E	107 (93.9)*	2.20/3.16/10.19/12.25-26/ 12.29-30	11.11-13/11.27/12.03/ 12.10-11	3.19/3.22/4.15/5.01-04/ 5.13-14	3.24/3.31/11.28-29	1.01-02/3.01/3.09-10/3.19/ 4.09
	Ido-dong			4.16		
	Yeon-dong		12.02		12.03	
	Donghong-dong		12.02	4.16		
Type F	3 (2.8)					
	Ido-dong				12.03	
	Yeon-dong			4.16		
	Donghong-dong				12.03	
Type G	4 (3.3)			5.12		
	Ido-dong		12.02			
	Yeon-dong					
	Donghong-dong					

*The number in parenthesis represents percentage (%)

제주지역(이도동, 연동, 동홍동)으로 유입되는 오존 및 미세먼지 농도분포 (Table 4)에서는 오존과 미세먼지의 타입별 총 평균농도와 표준편차, 최고값, 최소값 등을 살펴보았다. 오존 농도의 경우 타입별로 뚜렷한 특징은 없으나 상대적으로 차량과 인구가 밀집된 지역인 연동지점에서 평균농도가 약간 높게 나타났고 일본 연안쪽을 거쳐서 오는 기류(Type D)의 평균 농도값은 상대적으로 작게 나타났다. 미세먼지의 경우, 오존과 다르게 타입별로 확연한 차이를 보였는데 황토고원과 고비사막을 포함한 황사 발원지로부터 기원한 Type E의 경우 총 평균 농도는 $136(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 으로 가장 높은 수치를 보였다. 이는 예상 할 수 있는 결과로 황사 발원지로부터의 수송이 강하다는 것을 보여주고 있다. 그 외 북만주 지역으로부터 기원한 Type F는 $60.6(\mu\text{g}/\text{m}^3)$, 비발원지로부터 기원한 Type G는 $42.3(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 으로 황사발원지(고비사막)에서 수송된 기류가 압도적으로 높은 농도를 나타냈으며 표준편차와 최고값 또한 Type E가 가장 높게 나타났다.

Table 5. A statistical summary of the mean concentrations of O₃ and PM₁₀ at Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong sites according to the different air mass types (Types A-D and Types E-G).

Air mass type	O ₃ Total average density (ppb)	Ido-dong (ppb)			Yeon-dong (ppb)			D.hong-dong (ppb)		
		Mean±1s	max	min	Mean±1s	max	min	Mean±1s	max	min
Type A	66	62.8±18.4	96	16	67.8±18.6	99	14	67.3±16.7	98	27
Type B	66.4	63.7±16.1	94	22	68.1±15.6	91	26	67.8±14.5	96	40
Type C	68.8	65.6±13.5	89	33	72.8±15.3	98	31	68.4±16	96	25
Type D	54.3	45.1±26.1	93	12	56.5±24.2	91	22	61.3±19.7	90	26

Air mass type	PM ₁₀ Total average density (μg/m ³)	Ido-dong (μg/m ³)			Yeon-dong (μg/m ³)			D.hong-dong (μg/m ³)		
		Mean±1s	max	min	Mean±1s	max	min	Mean±1s	max	min
Type E	136	128.1±151.4	1224	13	144.1±162.5	1034	3	135.3±167.4	1027	3
Type F	60.6	44.3±59.8	238	6	96±21.8	129	62	41.4±53	199	3
Type G	42.3	42.1±54.7	313	8	44.3±74.4	337	8	41.4±18.5	136	6

3.2 고농도 오존 및 미세먼지에 영향을 주는 기상 조건 분석

3.2.1 오존 및 미세먼지일의 기상조건과의 관계 상관성 분석

연구기간동안(2009~2013년) 제주지역의 대기환경 변화와 관련된 기상 특성을 면밀하게 살펴보기 위해 대기오염물질 농도와 기상요소와의 상관성(Table 6), 기온과 풍속 구간별 대기오염물질 농도의 초과빈도(Figs. 8~9)를 분석하였다. 먼저 상관분석은 SPSS 통계프로그램을 사용하여 얻은 제주지역의 계절별 일 평균 기상요소와 일 평균 대기오염물질(O_3 , PM_{10}) 농도와의 상관관계를 나타내었다. 기상요소는 대기오염물질 측정지점에서 가장 가까운 3곳(제주지방기상청, KBS방송총국, 서귀포기상대)의 기상관측지점을 선정하여 지점별로 공통적으로 관측되고 있는 항목 즉 기온, 풍속, 강수의 일 평균값을 이용하였다.

O_3 의 경우, 봄철에 기온과의 상관성은 모두 양의 상관을 보였으나 대부분 통계적으로 유의하지 않게 나타났다. 여름철은 이도동과 동홍동 지점에서 강한 음의 상관이 나타났는데(특히 이도동), 이것은 O_3 이 광화학 오염물질이라는 관점에서 볼 때 대상지역 O_3 은 전구물질의 국지배출과 함께 광화학적 생성을 주요 원인으로 보기는 어렵다고 판단된다. 아마 다른 요인(예, 수평 및 연직 수송과 같은 기상조건)에 의한 영향이 더 크지 않을까 사료된다. 게다가 O_3 과 풍속과의 관계를 보면, 특히 이도동에서의 O_3 과 풍속은 상관의 정도는 약하지만 양의 관련성을 보이고 있어 다소 센 바람을 따라 오염물질(예, O_3)의 수송이 대상지역 O_3 농도를 높이는데 일부 기여한 것으로 추정된다. 한편 가을철과 겨울철은 O_3 농도와 기온 및 풍속 사이에 뚜렷한 상관을 보이지 않았으며 대부분 통계적으로도 유의하지 않았다.

PM_{10} 의 경우 기온은 3 지점 모두 가을철에 다소 강한 음의 상관을 보인 반면, 풍속은 지점에 따라 다양한 상관관계가 나타났다. 봄철과 겨울철은 이도동과 연동 지점에서 주로 기온과 양의 상관을 나타내며 통계적으로 유의한 반면, 여름철과 가을철은 대부분의 지점에서 기온의 음의 상관을 나타내고 있다(모두 통계적으로 유의함, Table 6). PM_{10} 과 풍속에 있어서는 봄, 가을철의 이도동과 여름철의

연동 지점에서의 양의 상관을 제외하고는 대부분 약한 음의 상관이 나타났다. 이것은 O_3 과 풍속과의 관계처럼 대기 중 수송에 의해 일부 영향을 받을 수 있겠지만 두 지점에서처럼 풍속과의 양의 상관이 나타난 계절도 있는 것으로 봐서 단순히 풍속의 변화만으로 대기수송에 의한 오염물질의 농도를 설명하는 것은 한계가 있다고 판단된다. 예를 들어, 매우 강한 풍속은 저기압의 영향과 관련하여 오히려 대기 중 입자상물질의 농도를 감소시킬 수 있는 조건이 될 수도 있다 (Makra 등, 2007). 이 외에도 강수의 경우는 2가지 오염물질에 대해 뚜렷한 역상관을 보이고 있는데, 이것은 일반적으로 대기 중 세정효과(wash-out)가 주요 원인 중 하나인 것으로 볼 수 있다.

Table 6. Correlation between daily mean pollutant concentrations and meteorological variables in the study area during 2009-2013

Site	Meteorological variables ^a	PM ₁₀	O ₃
Ido-dong	Airtemperature(°C), daily mean	0.148 ^{**} / -0.341 ^{**} / -0.190 ^{**} / 0.280 ^{**}	0.112 [*] / -0.501 ^{**} / 0.170 ^{**} / -0.165 ^{**}
	Wind Speed(m s-1), daily mean	0.013 / -0.155 ^{**} / 0.005 / -0.175 ^{**}	0.172 ^{**} / 0.129 ^{**} / 0.048 / 0.198 ^{**}
	Precipitation(mm), daily total	-0.176 ^{**} / -0.161 ^{**} / -0.104 [*] / -0.167 ^{**}	-0.159 ^{**} / -0.079 / -0.058 / -0.141 ^{**}
Yeon-dong	Airtemperature(°C), daily mean	0.117 [*] / 0.172 ^{**} / -0.073 / 0.166 ^{**}	0.184 ^{**} / 0.106 [*] / 0.033 / -0.082
	Wind Speed(m s-1), daily mean	-0.012 / 0.175 ^{**} / -0.101 [*] / -0.112 [*]	0.077 / 0.111 [*] / -0.062 / 0.146 ^{**}
	Precipitation(mm), daily total	-0.149 ^{**} / 0.173 ^{**} / 0.004 / -0.221 ^{**}	-0.131 ^{**} / 0.118 [*] / -0.003 / -0.143 ^{**}
Donghong-dong	Airtemperature(°C), daily mean	0.070 / -0.173 ^{**} / -0.129 ^{**} / 0.144	0.205 / -0.578 ^{**} / 0.181 ^{**} / 0.071
	Wind Speed (m s-1), daily mean	-0.013 / -0.042 / -0.047 / 0.064	0.166 / 0.035 / 0.154 ^{**} / 0.398 ^{**}
	Precipitation(mm), daily total	-0.142 ^{**} / -0.203 ^{**} / -0.123 ^{**} / -0.179 ^{**}	-0.081 ^{**} / -0.123 ^{**} / -0.134 ^{**} / -0.028

Spring/Summer/Fall/Winter

*, ** Correlation is significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively (2-tailed).

a The meteorological variables were obtained from the meteorological monitoring sites located less than approximately 2 km (Yeon-dong, Ido-dong, and Donghong-dong) away from the air pollutant monitoring sites, respectively.

3.2.2 기온과 풍속 구간별 오존 및 미세먼지 농도의 초과빈도

Fig. 8과 9는 대상지역 3 지점에서 관측한 기온과 풍속 구간별 O₃과 PM₁₀ 농도의 초과빈도(O₃은 1시간 평균 80 ppb 초과, PM₁₀은 1시간 평균 100 µg/m³ 초과)를 각각 나타낸다. 선행논문(송상근 등, 2014)에서 언급하였듯이, 제주도는 5가지 환경기준 오염물질 중 SO₂, NO₂, CO는 국가 환경기준치를 전혀 초과하지 않으므로 초과빈도 분석에서 제외하였다. 전반적으로 기온과 풍속 구간에 따라 두 오염물질 농도의 초과빈도는 다양한 변화를 나타냈다. 기온 구간에 따른 O₃의 초과빈도를 보면(Fig. 8), 2009년 이도동과 동홍동 지점은 15~20°C 기온 구간에서 높은 빈도를 보인 반면, 연동 지점은 0.0~0.5°C와 15~20°C 기온 구간에서 낮은 빈도를 보였고, 2010년 이도동 지점은 20.0~25.0°C 기온 구간에서 연동 지점은 15.0~20.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타난 반면, 동홍동 지점은 다소 낮은 5.0~10.0°C와 10.0~15.0°C에서 높은 빈도가 나타났다. 2011년의 이도동은 20.0~25.0°C에서 연동은 10.0~15.0°C와 20.0~25.0°C에서 그리고 동홍동은 15.0~20.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타났다. 2012년은 다른 두 년도와 비교하여 다소 상이한 패턴을 보였다. 이도동, 동홍동은 모두 20.0~25.0°C에서 그리고 연동은 15.0~20.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타났다. 2013년의 경우, 이도동은 15~20°C 기온 구간에서 동홍동은 20.0~25.0°C 구간에서 높은 빈도를 나타냈지만 다른 년도에 비해 상대적으로 낮은 초과빈도를 보였다. 연구기간동안 제주지역의 O₃ 변화는 광화학반응이 가장 활발한 여름철보다는 오히려 봄철에 높은 농도를 나타낸 것을 알 수 있으며, 이는 대상지역 국지배출의 영향보다는 다른 오염지역으로부터 대기 중 수송 및 확산에 의한 영향이 더 크다는 것을 시사한다.

PM₁₀의 경우, 2009년의 이도동, 연동, 동홍동 모두 10.0~15.0°C 구간에서 가장 높은 빈도를 보였고, 2010년의 이도동은 10.0~15.0°C에서 연동은 0.0~5.0°C와 5.0~10.0°C에서 동홍동은 5.0~10.0°C에서 높은 빈도가 나타났으며, 2011년의 이도동은 15.0~20.0°C에서 연동은 10.0~15.0°C에서 동홍동은 0.0~5.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타났다. 2012년의 이도동은 각각 5.0~10.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타난 반면, 연동과 동홍동은 0.0~5.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타났다.

2013년의 이도동과 연동은 5.0~10.0℃에서 가장 높은 빈도를 보였고, 연동은 조금 낮은 0.0~5.0℃에서 높은 빈도를 보였다. 즉 제주지역 PM₁₀의 높은 초과빈도는 주로 봄철과 가을철의 기온 구간에서 뚜렷하게 나타났으며, 이것은 대상지역 황사현상에 의한 기여가 가장 큰 것으로 판단된다.

풍속 구간에 따른 O₃과 PM₁₀의 초과빈도 변화 특성은 기온 구간에 따른 두 오염물질의 초과빈도 특성과 다른 양상을 보였다. 2009년의 O₃의 경우 이도동과 동홍동 지점에서는 2.0~4.0 m/s구간에서 높은 초과빈도를 나타낸 반면 연동 지점은 2.0 m/s 미만의 저풍속에서 높은 초과빈도가 나타났다. 연동에서의 이러한 특징은 다른 지점에 비해 많은 건물과 차량으로 인해 배출된 국지오염의 영향이 일부 기여한 것으로 추정할 수 있다. 2010년은 2009년에 비해 이도동의 수치가 많이 낮아졌지만 유사한 형상을 띄고 있고, 2011년 또한 두 오염물질의 초과빈도 변화 특성은 2010년의 특성과 일부 유사하게 나타났다. 그러나 연동 지점에서 2010년 보다 조금 강한 풍속 구간에서 O₃의 높은 초과빈도가 나타났다. 2012년과 2013년으로 갈수록 초과빈도 변화 특성은 유사하게 나타나나 수치가 낮게 나타나는 양상을 보였다.

PM₁₀은 2009년의 경우 이도동과 동홍동은 2.0~4.0 m/s 구간에서 높은 초과빈도를 보인 반면, 연동은 0.0~2.0 m/s 의 비교적 낮은 구간에서 높은 초과빈도를 보였는데 연동에서의 이러한 특징은 다른 지점에 비해 많은 건물과 차량으로 인해 배출된 국지오염의 영향이 일부 기여한 것으로 추정할 수 있다. 그 뒤로 2010, 2011, 2012, 2013년 모두 유사한 양상을 보이고 있으나 뒤로 갈수록 초과빈도 수치는 점점 낮아지는 추세를 보인다. 또한 O₃은 동홍동에서 PM₁₀은 이도동과 동홍동 두 지점에서 4.0~6.0 m/s 와 6.0~8.0 m/s 풍속 구간에 다소 높은 빈도가 나타났다. 즉 풍속 구간과 오염물질 초과빈도와의 관계를 보면, 연동을 제외한 대부분 관측지점에서 다소 강한 바람을 따라 수송(외부 유입)되어 농도가 증가한 것으로 추정된다.

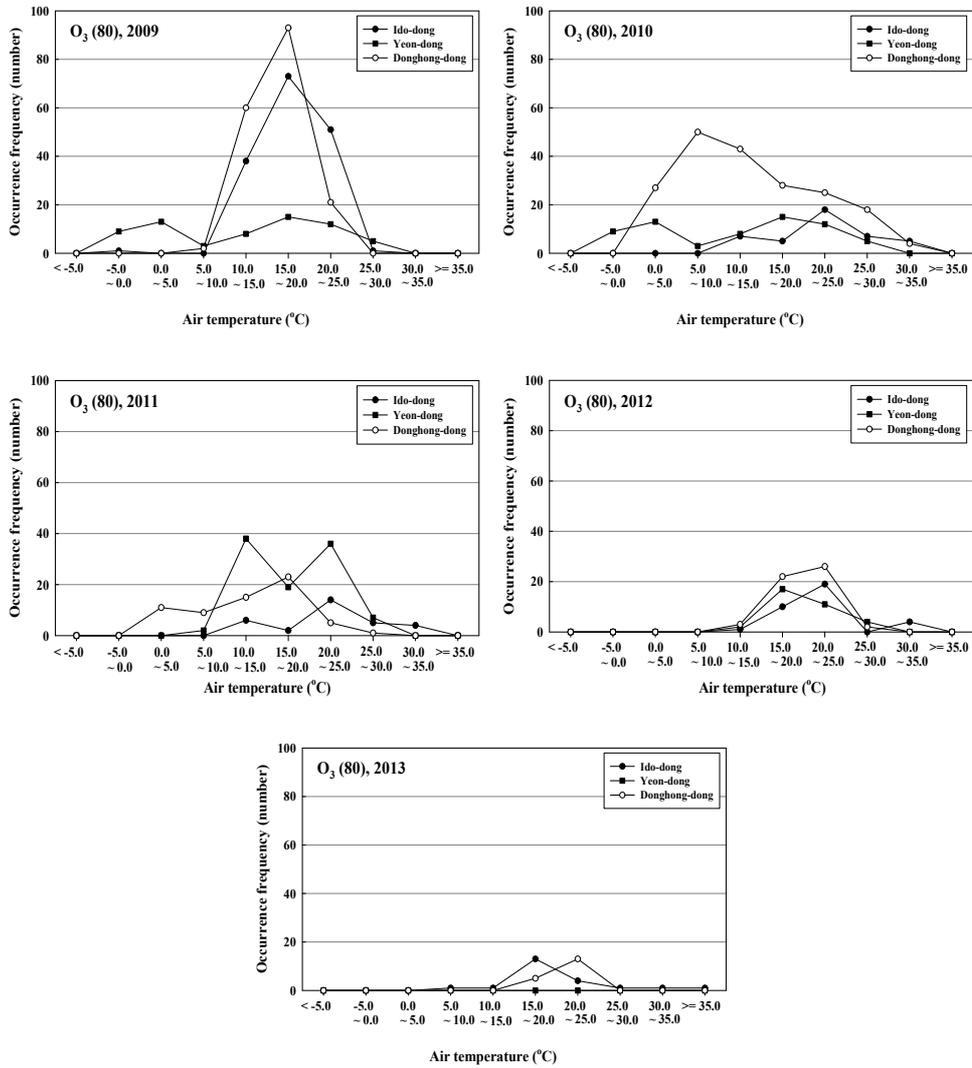


Fig. 8. Relationship between the occurrence frequency of O_3 (≥ 80 ppb) and PM_{10} ($\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and air temperature at 3 sites on Jeju Island during 2009-2013.

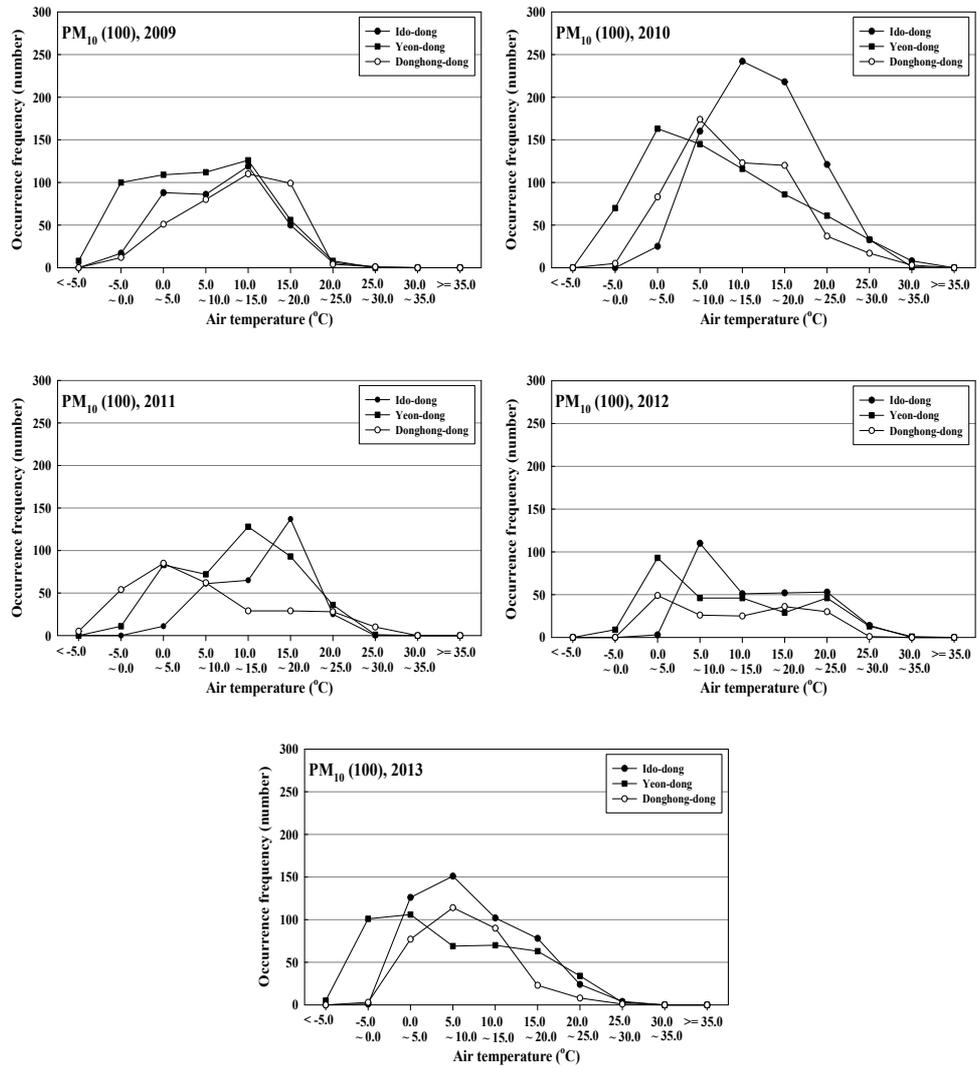


Fig. 8. (Continued)

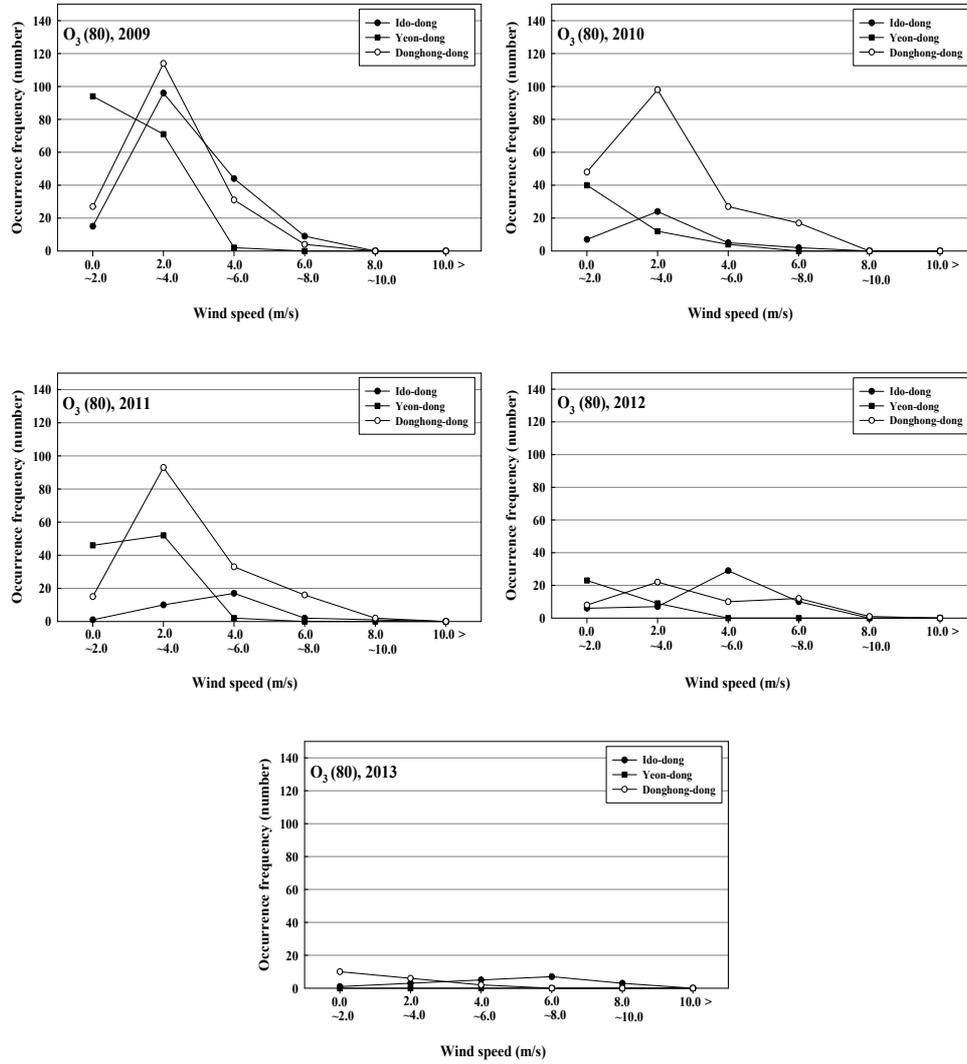


Fig. 9. Same as Fig. 8 except for surface wind speed.

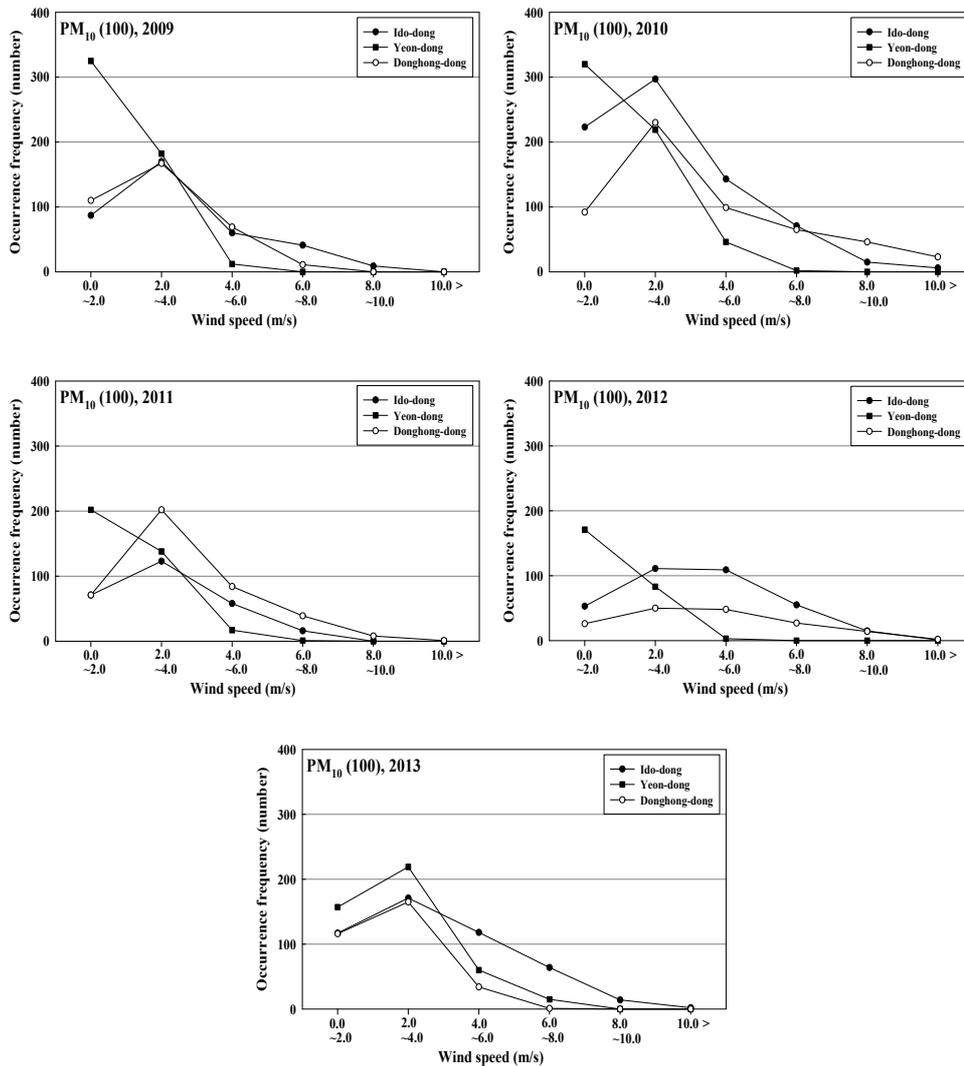


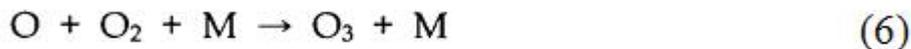
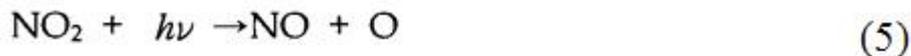
Fig. 9. (Continued)

3.3 오존의 광화학 생성기작과 고농도 오존일의 수치모의 분석

3.3.1 오존의 광화학 생성기작

대기 중의 오존생성은 강한 태양복사(< 424 nm)의 존재 하에 지표의 오염원(산업 및 교통수단 등)으로부터 대기 중으로 방출되는 질소산화물(NO_x), 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)과 일산화탄소(Carbon monoxide, CO) 등의 전구물질간 상호 유기적인 화학반응을 통해 일어난다.

우선 오존의 광화학 생성에 있어 NO_x의 역할을 살펴보면, NO가 지표오염원으로부터 대기 중으로 배출되면 NO₂로 산화하게 된다(2NO + O₂ = 2NO₂). 물론 대기 중의 NO 및 오존의 농도에 따라 산화되는 시간은 달라지게 된다. 이후 아래의 반응식 (5)~(6)를 통해 오존이 생성된다.



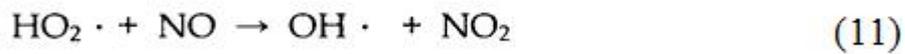
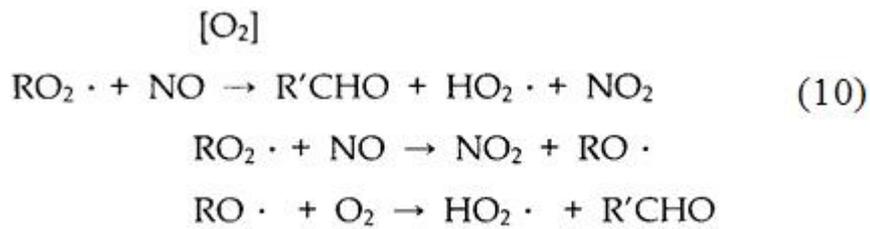
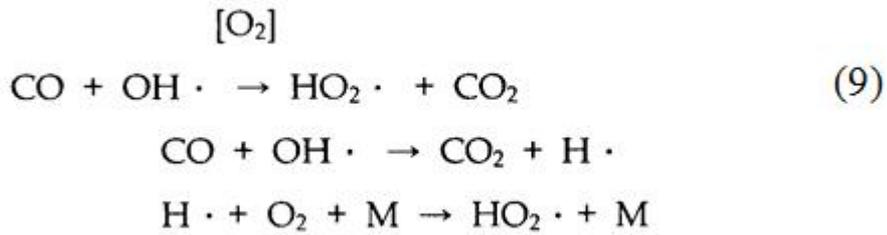
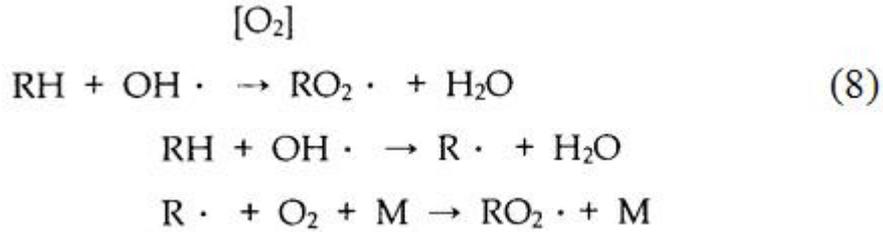
즉, NO₂는 광해리(photolysis)반응을 통해 산소원자 O를 만들게 되고(식 (5)), O는 산소분자 O₂와 급격히 반응하여 오존을 생성시키게 된다(식 (6)). 일반적으로 이러한 반응은 매우 짧은 time scale을 가지며 NO에 의한 오존 소멸반응(식 (7))과 상호평형을 이루며 오존수지에 변화를 주지 않는다. 하지만 오염물질 배출이 풍부한 대도시지역에서는 오존의 광화학 생성이 없는 야간에 특히 다량의 NO_x 배출 조건에서 NO에 의한 오존제거과정(O₃+NO titration)에 의해 오존수지에 변화를 가져오게 된다. 후자의 경우는 NO_x 배출의 대부분을 차지하는 NO가 오존을 급격히 제거시키는 과정을 의미한다.

대기중에 VOCs(alkanes, alkenes, aromatic hydrocarbons 등)가 존재 할 때 오존수지의 변화가 나타나게 되는데, NO_x 및 CO와 함께 광화학 오존 생성에 밀접히 관련하여 대기경계층 내의 오존생성, 소멸과정을 복잡하게 만들게 된다. 특히

대도시지역과 같은 NO_x와 VOCs의 배출량이 많은 곳에서는 NO_x와 VOCs의 비에 따라 오존생성량의 큰 변화가 나타난다. NO_x 농도 증가에 따라 오존의 생성량이 증가하기도 하며(VOCs의 변화에는 상대적으로 작은 변화), VOCs 농도 증가에 따라 오존생성량이 증가하기도 한다(NO_x의 증가에 따라 오히려 오존생성량이 감소). 전자의 경우 "NO_x-sensitive" 조건으로 VOCs/NO_x가 높을 경우이며, 후자의 경우는 "VOC-sensitive" 조건으로 VOCs/NO_x가 낮을 경우이다(Sillman, 1999). Seinfeld(1989)는 VOCs/NO_x가 5이하 일 때 오존의 생성에 제약을 받게 되는데, 이는 NO에 의한 오존소멸반응(식 (7))이 이후 제시되는 식 (8)의 반응보다 효과적으로 나타나기 때문으로 설명하였다. 결국 오존제어 측면에서 본다면, NO_x-sensitive 조건에서는 NO_x의 양을 감소시키는 것이 같은 양의 인위적 VOCs 농도를 줄이는 것보다 대기 중의 오존생성량을 효과적으로 감소시킬 수 있는 방법이며, VOC-sensitive 조건에서는 반대로 VOCs 농도의 감소가 오존감소에 큰 효과를 보이게 된다.

NO_x, VOCs, CO가 대기 중에 존재 시 오존생성과정을 구체적으로 살펴보면, 식 (3)의 과정 외에 NO_x-VOCs-CO 화학과정을 통해 NO가 NO₂로 산화하게 되어 이후 식(5), (6)과정을 통해 오존을 추가적으로 생성시키게 된다. 이러한 반응은 탄화수소(RH: alkyl radical R and H atom) 또는 CO가 원자상태의 산소와 물이 반응하여 생긴 OH기(hydroxyl radical)와 반응하면서 시작하게 된다(식 (8)~(11)). 우선 OH기와 반응한 RH와 CO는 각각 R기(alkyl radical)과 H기를 각각 형성시키며 이들은 산소분자와의 반응을 통해 RO₂기(Peroxy radical)와 HO₂(hydroperoxyl radical)를 생성시킨다(식 (8), (9)). 이후 이들은 NO와 반응하여 NO를 NO₂로 산화시키게 된다(식 (10), (11).)

RO₂기는 NO와 반응하여 R'CHO(carbonyl compounds including aldehydes and ketones)와 HO₂를 생성시킨다(식 (10)). 여기서 R'CHO는 다시 OH기와 반응하여 HO₂기를 생성시키기도 한다. 결과적으로 식 (10), (11)의 반응을 통해 NO가 NO₂로 산화하게 되며, 이는 식(5)과 (6)의 반응을 통해 오존을 생성시키게 된다. 즉 대기 중의 VOCs나 CO의 존재는 오존생성의 중요한 지표로 볼 수 있는 NO와 NO₂의 비(NO₂/NO)를 증가시켜 오존의 생성과 축적에 기여하게 된다.



3.3.2. 기상모델 평가

WRF 모델 평가를 위해 고농도 오존 사례일(6/23~28) 5일간 제주지역 13개 지점에서의 기온, 풍속 관측치와 해당 지점 모델치의 시간별 변화를 나타내었다. 6월 23일 00시~24일 12시 까지는 모델의 정밀한 모의를 위한 스펀업 타임 기간을 나타내고 Fig. 10(a)는 기온에 대한 시계열을 Fig. 11(b)는 풍속에 대한 시계열

을 나타내는데, 대부분의 지점에서 기온의 경우 고온으로 상승하는 낮 시간대에서 모델값이 과소모의 되는 경향을 나타내었다. 반대로 기온이 하강하는 밤 시간대의 낮은 온도에서의 모델값은 관측값 보다 과대모의 하는 경향을 보였다. 다른 지점의 경우 사례일 시간 동안 관측값과 모델값이 적절하게 모의되나, 기온의 변동이 뚜렷한 제주지방기상청 (JRMA, Jeju Regional Meteorology Administration)의 경우 사례일 기간에서 모델값이 과소모의 되는 특징을 뚜렷하게 확인 할 수 있다. 풍속은 제주도의 특성상 대부분의 관측지점이 바닷가에 위치하여 전반적으로 강하게 나타나는 모습을 보이는데 모델값 역시 각 지점에서 과대모의 하는 경향을 보였다(Fig. 11). 특히 바람이 가장 높게 나타나는 26일 00시의 야간 풍속 구간에서 뚜렷한 과대모의 현상을 확인 할 수 있었으나 사례일의 경우는 대부분 적절하게 모의하는 모습을 보였다.

WRF 모델값의 통계검증 결과를 Table 6에 나타내었는데, 기온부터 살펴보면 RMSE는 대부분 1~2°C 수준으로 양호하게 나타났고, MB 경우 고산(Gosan), 연동(Yeon-dong), 우도(Udo), 마라도(Marado), 서광(Seogwang), 가파도(Gapado)를 제외한 지점에서 수치가 음의 값을 보이므로 모델값이 과소모의 한 것으로 평가되었다. IOA는 서귀포(Seogwipo)와 우도지점의 약 0.65와 제주지방기상청과 남원(Namwon)의 약 0.68을 제외하고는 제일 높은 수치인 고산의 0.85등 모두 0.7, 0.8 정도의 적절한 값을 나타낸다. 풍속을 살펴보면, RMSE는 전반적으로 3~4m/s 정도의 값을 보였는데 특히 서광지점에서 약 5m/s의 높은 수치를 보였다. MB는 RMSE와 특징과 유사하게 서광 지점에서 높은 편차를 보이고 모든 지점에서 양의 값을 보여 전반적으로 과대모의 했다고 볼수 있다. 풍속의 IOA 역시 서귀포와 연동, 서광, 남원, 구좌(Gujwa)의 0.6정도의 수치를 제외하고는 대부분 0.7~0.8로 높은 수치의 일치율을 보였다. 모든 지점(Total)을 비교했을 때 기온, 풍속 모두 RMSE, MB 등 편차는 비교적 크나 IOA의 경우 높은 수치(기온 약 8, 풍속 약 0.8)를 보이기 때문에 기상모델링의 결과는 대기질 수평 분포 모델링(예, 오존 수치모의)을 수행하기에 대체적으로 합리적이라고 사료된다.

(a)

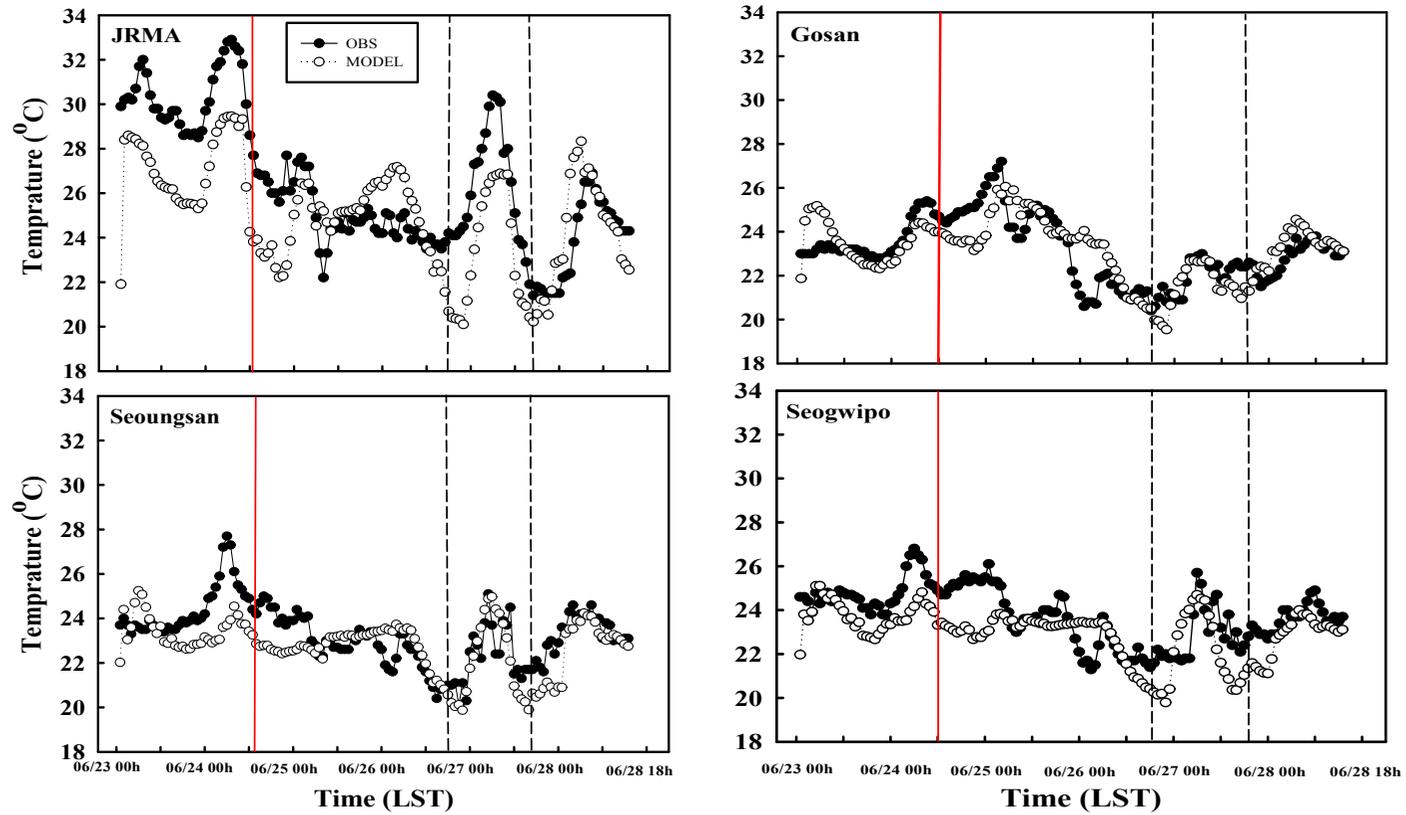


Fig. 10. Time series of the observed and WRF model-predicted meteorological variables such as (a) air temperature and (b) wind speed.

(b)

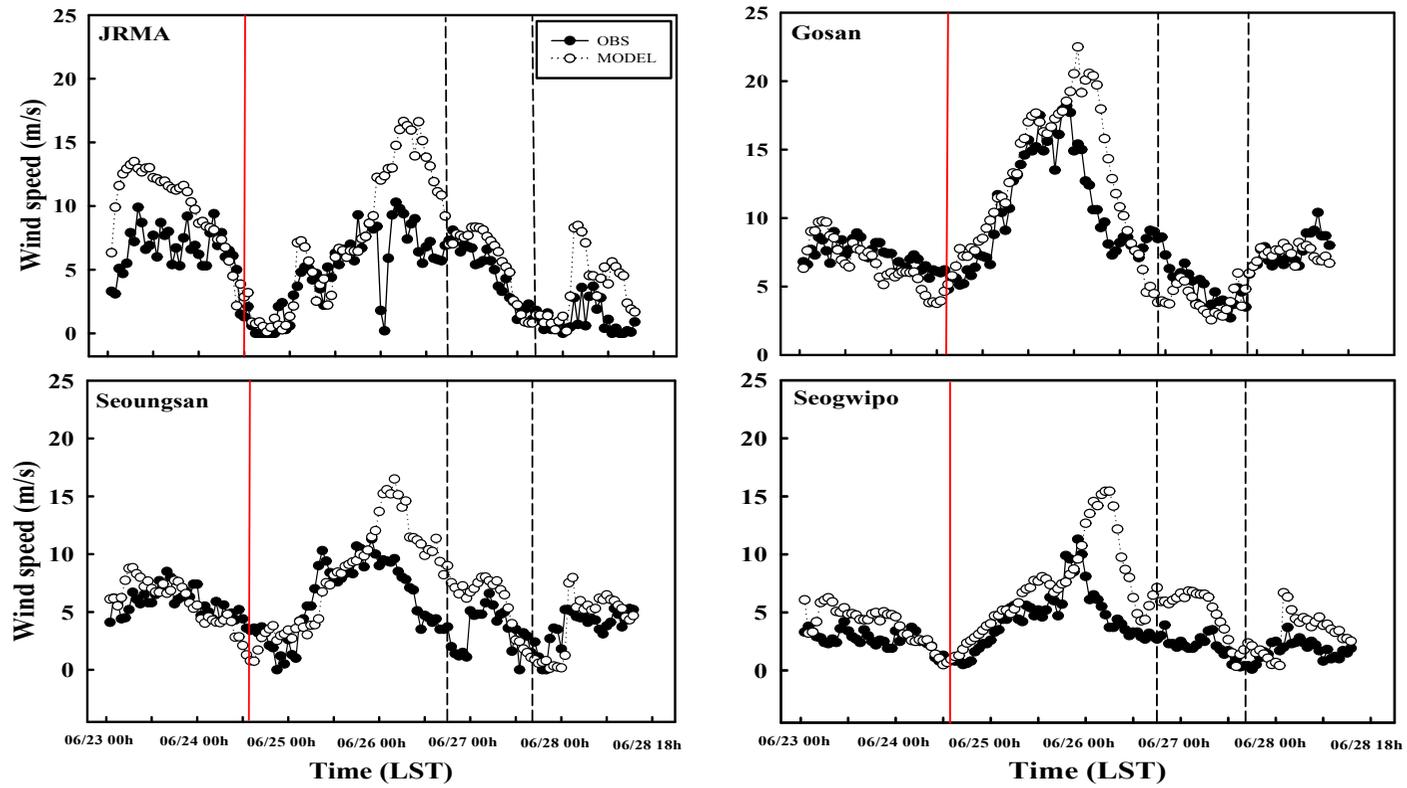


Fig. 11. (Continued)

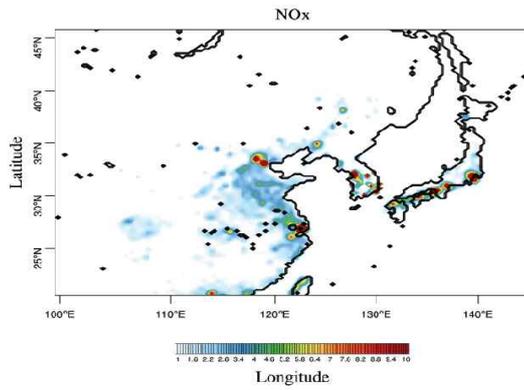
Table 7. Statistical evaluation of meteorological variables between observations and model-predicted values: results compared at several monitoring sites during the study period (01 LST 25 June ~ 00 LST 29 June 2011).

Total site (13 Site)	Air temperature (°C)			Wind speed (m/s)		
	RMSE	IOA	MB	RMSE	IOA	MB
JRMA	2.18	0.68	-0.55	3.77	0.76	2.2
Gosan	1.16	0.85	0.09	2.97	0.89	0.84
Seongsan	1.05	0.79	-0.3	3.32	0.76	1.73
Seogwipo	1.38	0.65	-0.68	3.17	0.64	2.52
Yeondong	2.31	0.71	1.14	4.81	0.63	2.92
Udo	0.9	0.65	0.26	4.02	0.78	1.89
Marado	0.8	0.72	0.33	4	0.79	1.93
Seogwang	1.24	0.82	0.16	5.25	0.64	3.72
Namwon	1.16	0.68	-0.15	4.15	0.63	2.98
Hanrim	1.75	0.81	-1.1	2.86	0.85	1.79
Gujwa	1.63	0.77	-1.02	4.42	0.67	2.74
Moslepo	1.15	0.75	-0.39	3.75	0.83	2.26
Gapado	0.65	0.74	0.03	3.7	0.85	1.13
Total	1.34	0.74	-0.17	3.86	0.75	2.20

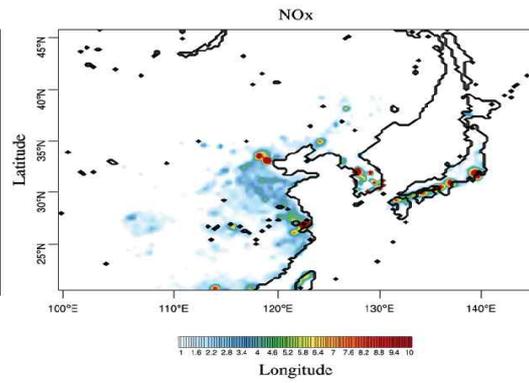
3.3.3. 오존 수치모의 분석

제주시는 해안선과 인접지역에 위치하고 있어 해풍과 같이 연안으로부터 발달된 기류 유입시 대상지역의 O_3 오염은 이들 두 대도시 내 배출된 다량의 오염물질 수송에 의한 영향을 받게 된다. 실제 제주도는 지형특성에 따라 편서풍의 영향으로 오염물질 수송의 영향을 무시 할 수 없으므로 중국공업지역의 밀집된 오염원에서 배출되는 오염물질의 수송은 종관 규모의 바람조건 영향을 크게 받게 된다. Fig. 13은 동아시아를 포함한 대상지역인 제주도의 주요 O_3 전구물질인 NO_x 와 VOCs의 배출량을 나타낸 것이다. 제주도는 최근(2009년) 지역 내 NO_x 배출량이 과거에 비해 다소 감소하는 경향을 가지나 인근 도시 배출량의 증가로 수송 가능한 배출량은 증가하였고, VOCs 배출량의 경우 과거부터 현재까지 높은 수준을 유지하고 있음을 알 수 있다. Fig. 13-1은 사례일 기간 동안(6월 26일 15:00 LST~27일 04:00 LST) O_3 수치에 영향을 주는 전구물질인 NO_x 배출량에 관한 그림으로 사례일 전날인 6월 25일 12:00 LST(a)를 살펴보면 한반도 남한지역과 중국지역(특히 중국내 공업단지 부근), 일본열도에서 약한 정도의 NO_x 배출량이 나타나는 모습을 볼 수 있다. 그 후 6월 26일 00:00 LST에서 NO_x 배출이 강하게 나타나는데, 이는 중국 공업지역의 공장에서 배출된 것으로 추정된다. 일반적으로 O_3 전구물질인 NO_x 는 수시간 후의 O_3 생성에 영향을 주므로 다량의 NO_x 배출이 O_3 생성에 큰 영향을 준후, 수송을 통해 제주지역까지 이동 하였을 것으로 판단된다. VOCs의 경우 6월 26일 00:00 LST에서 NO_x 보다 상대적으로 많은 배출을 보이고 있으나 패턴은 거의 유사하게 나타남을 확인 할 수 있다. NO_x 배출과 마찬가지로 VOCs의 배출량 또한 사례일 기간 동안 오존 생성에 큰 영향을 주었을 것으로 판단된다.

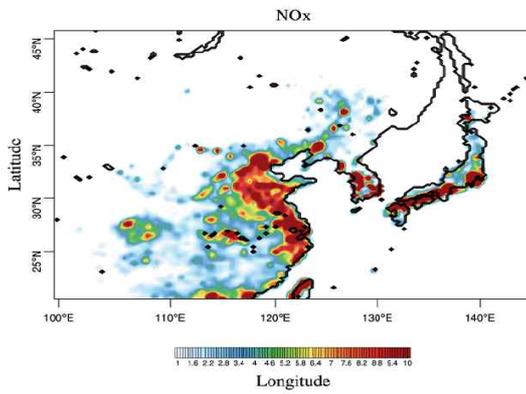
(a) 6/25 12h



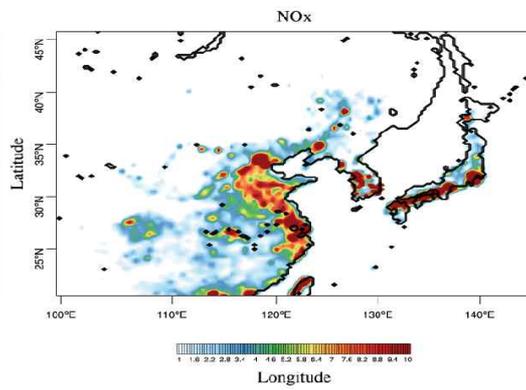
(b) 6/25 18h



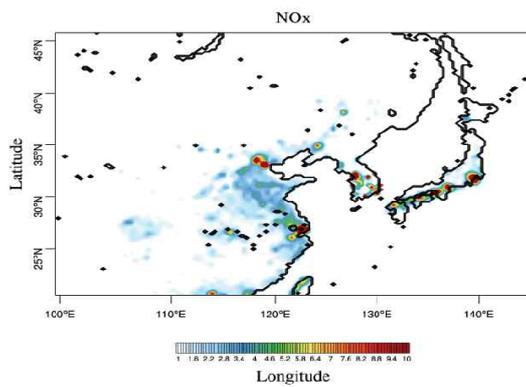
(c) 6/26 00h



(d) 6/26 06h



(e) 6/26 12h



(f) 6/26 18h

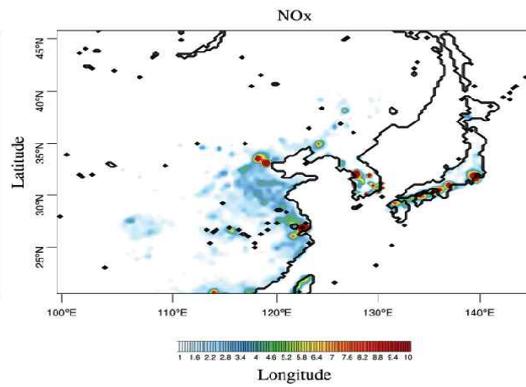
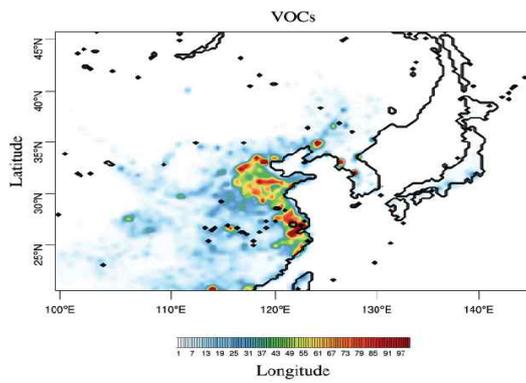
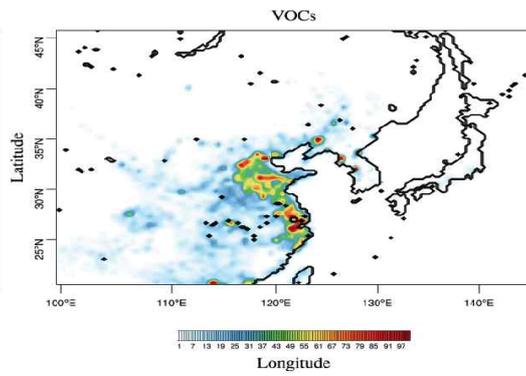


Fig. 12. Spatial distributions of hourly mean NO_x emissions derived from INTEX-B (East Asia) and CAPSS (South Korea) at the surface layer of the study area (in kg/h)..

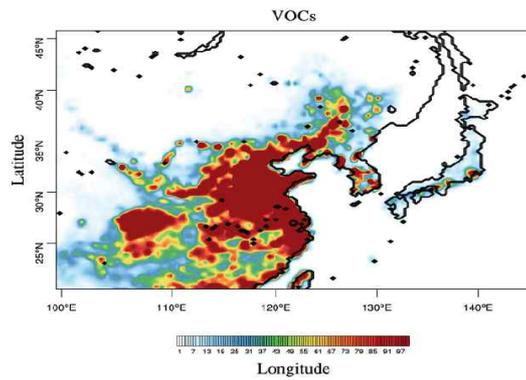
(a) 6/25 12h



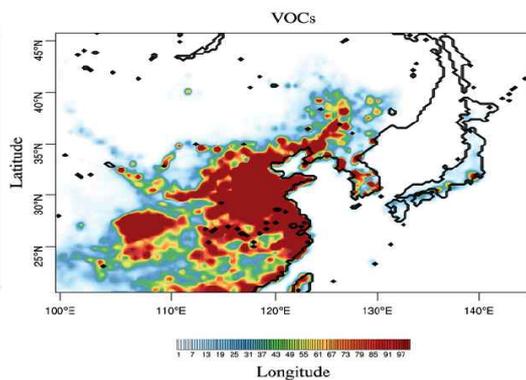
(b) 6/25 18h



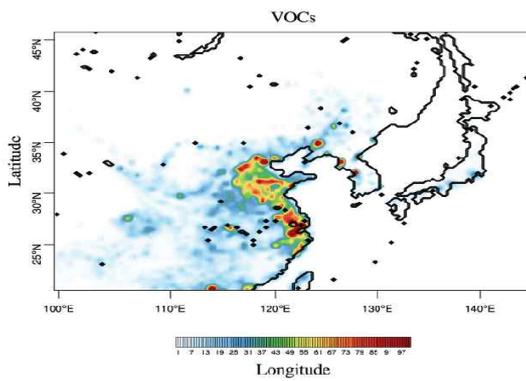
(c) 6/26 00h



(d) 6/26 06h



(e) 6/26 12h



(f) 6/26 18h

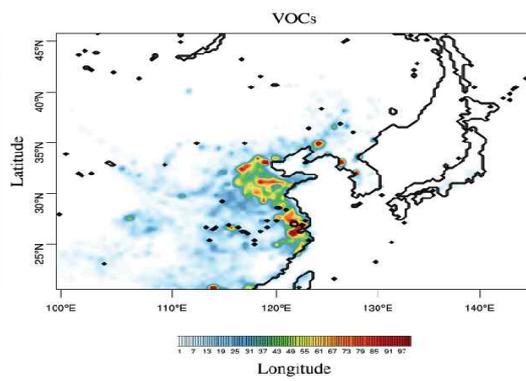


Fig. 13. Spatial distributions of hourly mean VOCs emissions derived from INTEX-B (East Asia) and CAPSS (South Korea) at the surface layer of the study area (in kg/h).

Fig. 14는 CMAQ 결과에서 O₃의 수송 경향 및 특성을 보기위한 모델치의 수평분포(Fig. 14(a))와 그 시간에 따른 바람벡터를 보기위한 공간분포도(Fig. 14(b))를 나타낸다. 사례일 전인 6월 26일 00:00 LST의 그림을 보면 중국의 공업지역이 아닌 황토고원 및 바오터우, 란저우, 청두 지역 등 외곽지역에서 O₃이 넓게 분포하는 모습을 볼 수 있다. 이는 같은 시간대의 바람벡터 공간분포도(Fig. 14(b))를 보면 설명이 되는데, 강한 바람이 상하이와 난징 부근을 통과 하면서 공업지역 부근의 O₃ 수치가 크게 감소한 것으로 판단된다. 그 후 강한 바람은 북만주 방향으로 불고 26일 08:00 LST에서는 잠시동안 상대적으로 높은 O₃ 수치가 베이징과 칭다오, 상하이 등 공업지역을 덮은 모습을 보인다. 26일 12:00 LST부터는 다시 O₃ 수치가 조금씩 감소하며 강한 바람은 북만주와 일본을 사이에 두고 계속적으로 북동하는 모습을 보이고 있다. 강한 바람의 영향으로 중국 공업지역 부근은 6월 26일 20:00 LST까지 O₃ 수치가 계속 감소하는 추세를 보이지만 한반도 남해안 지역과 제주지역은 오존 수치가 상대적으로 높게 유지되는 형상을 볼 수 있다.

6월 27일 00:00 LST의 공간분포 그림(Fig. 14(a))을 보면 Fig. 13에서 26일 21:00 LST 부터 발생한 NO_x와 VOCs 배출의 영향을 받아 생성된 중국 공업지역의 밀집된 오염원 지역과 한반도의 남해안 및 제주지역 그리고 일본연안 지역에 확대된 O₃ 오염 분포를 확인 할 수 있다. 바람벡터 그림을 보면 O₃ 오염이 생성되는 지역으로부터 강하게 수렴되는 서풍이 부는 것으로 보아 중국 공업지역에 배출되어 있던 NO_x와 VOCs으로 인해 생성된 고농도의 O₃ 오염이 한반도 남해안과 제주지역으로 수송되는 것으로 추정된다. 고농도 사례일인 27일 04:00 LST에서 강한 바람은 완전히 북서쪽으로 빠져나가고 극심한 O₃ 농도가 강한 바람 기류의 여파로 한반도와 제주지역에 이동한 수평장을 확인 할 수 있다. 그 후 12시간 정도 후인 27일 16:00 LST정도 까지 한반도 남해안 지역과 제주지역에서 높은 O₃ 수치가 유지되다가 강한 바람의 세력이 약해짐에 따라 북상하는 바람에 의해 O₃ 범위가 미세하게 북상하는 모습을 보이고 비교적 열은 O₃이 지속적으로 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

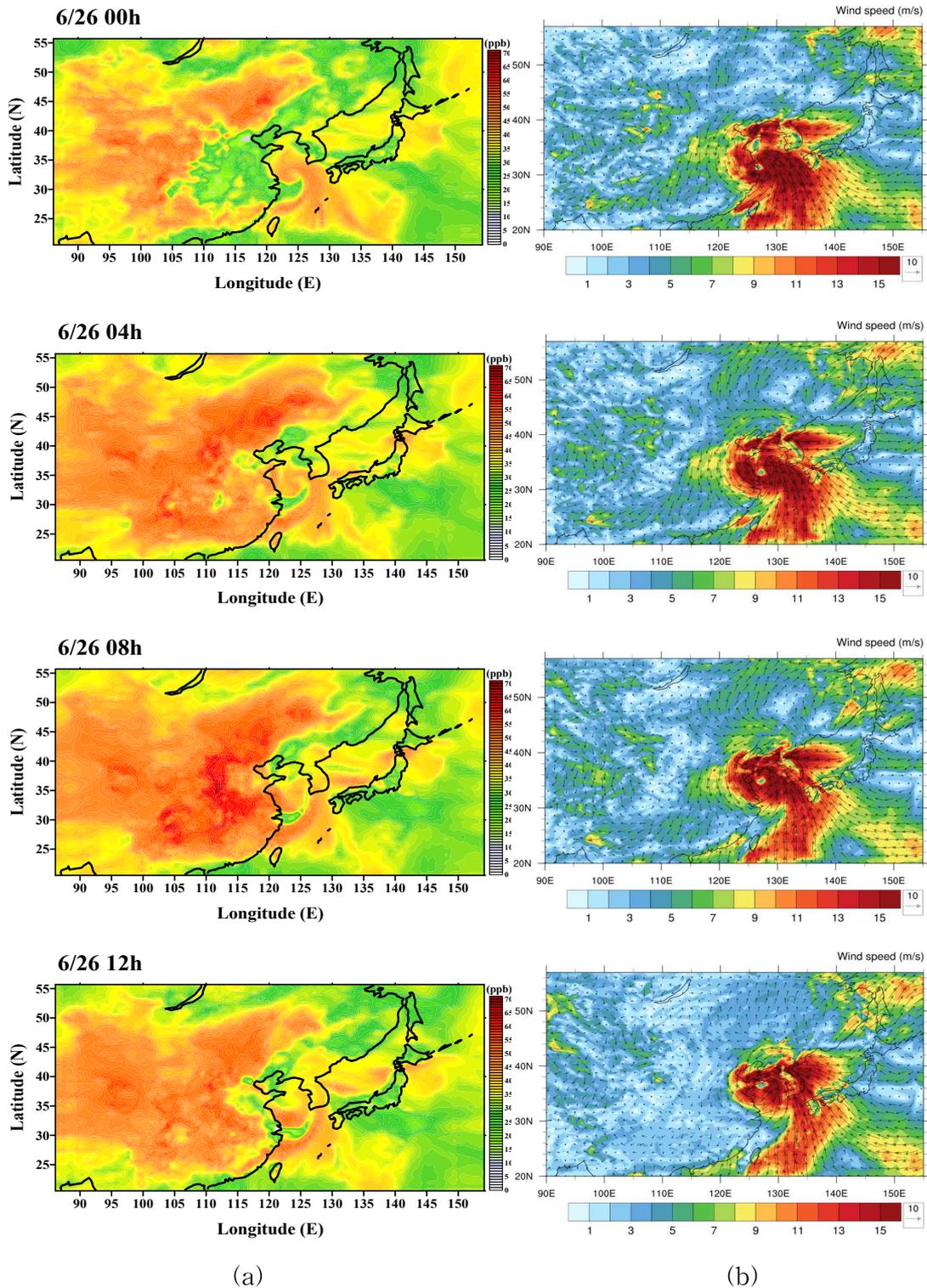


Fig. 14. Spatial distributions of (a) hourly Ozone concentrations simulated by the CMAQ modeling system and (b) wind vectors simulated by the WRF model in the East Asia.

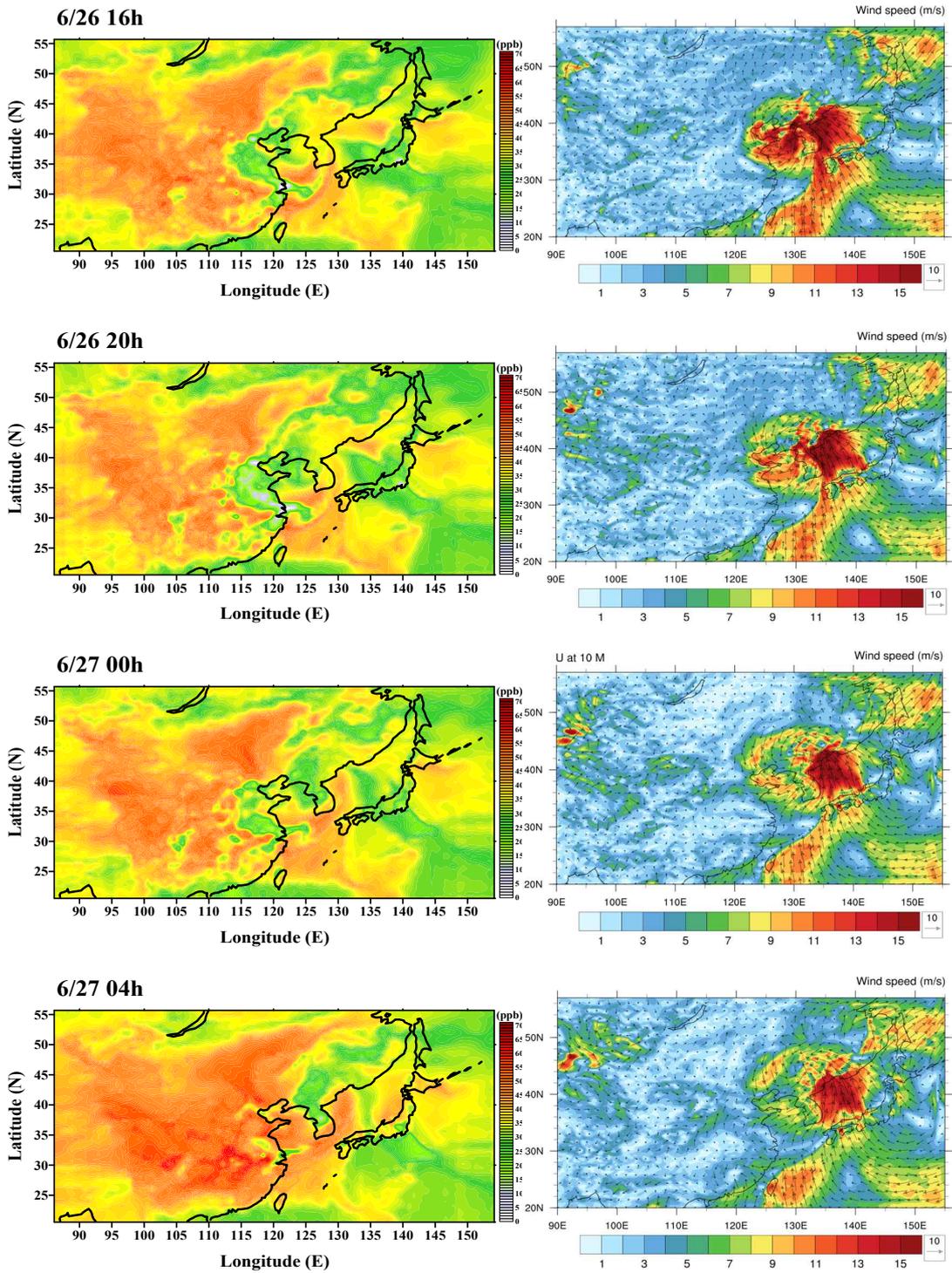


Fig. 14. (Continued.)

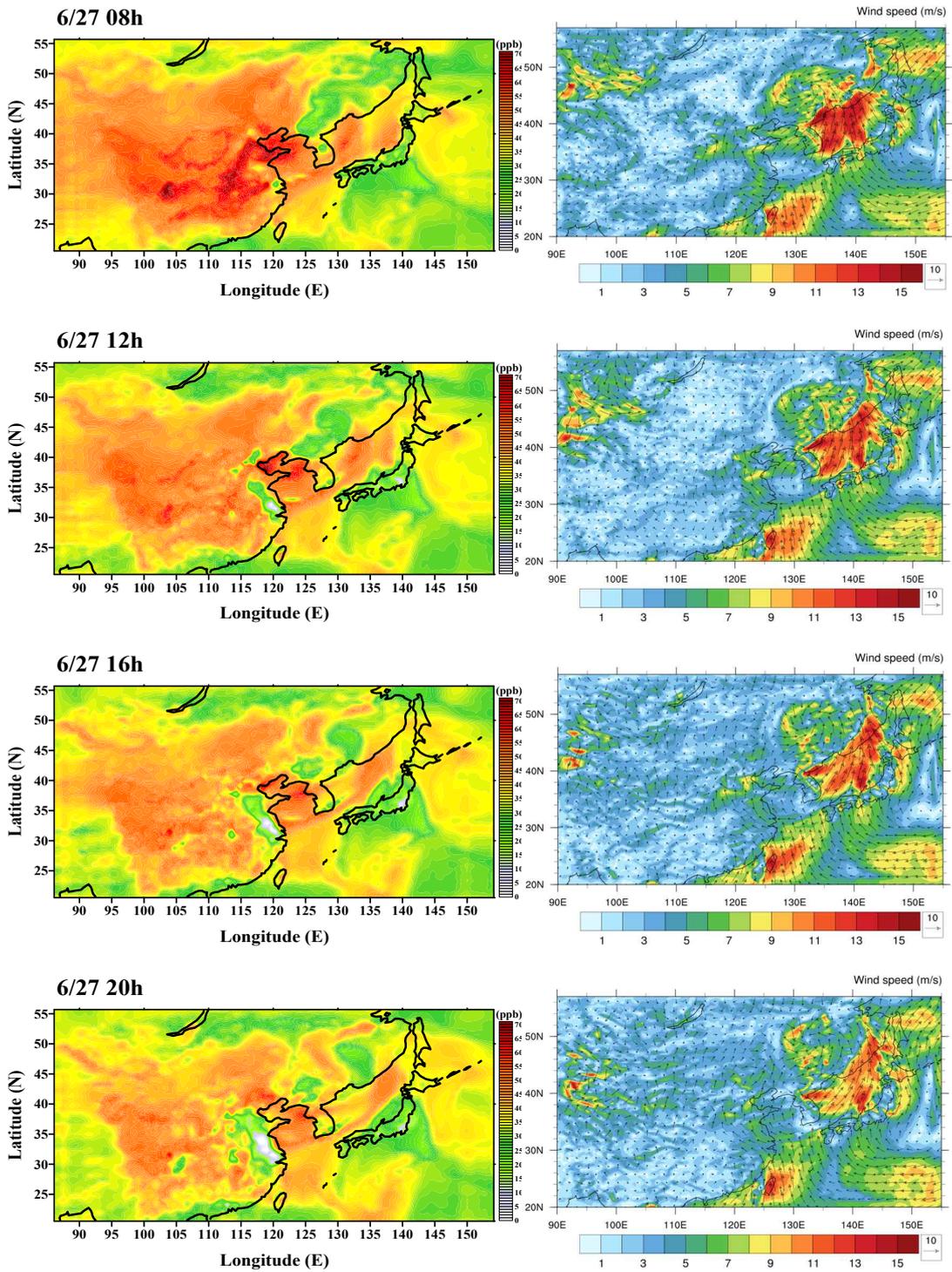


Fig. 14. (Continued.)

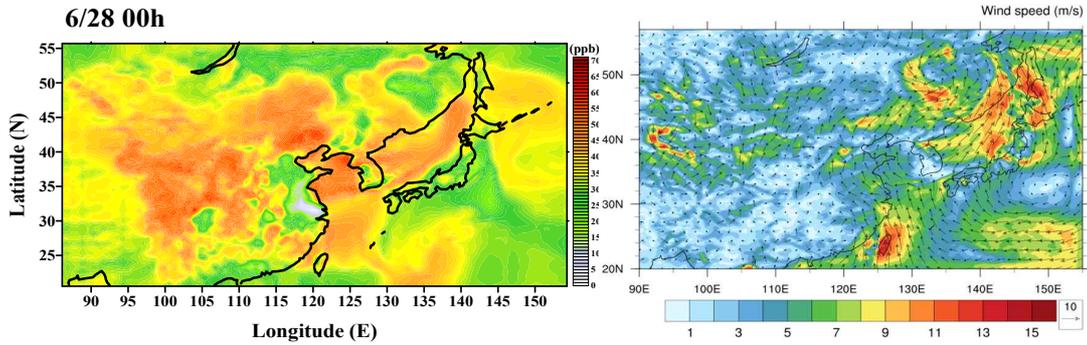


Fig. 14. (Continued.)

Fig. 15는 중심 연구대상지역인 제주도의 O₃ 농도 수평장이다. 26일 04:00 LST 경 제주도의 O₃ 수치는 한반도 남해안 지역에 비해 상대적으로 높으나 대체적으로 미미한 경향을 보인다. 26일 16:00 LST부터 고농도의 O₃이 제주도 남쪽 부근에서 북쪽으로 이동하기 시작하고 4시간 후인 26일 20:00 LST부터 고농도 O₃이 제주도 남쪽 부근 마라도 지점에 다다르며, 26일 22:00 LST부터 제주지역을 절반 이상 덮는 모습을 볼 수 있다. 그 후 사례일인 27일 01:00 LST부터 완벽하게 제주지역에 고농도 O₃이 도달하였으며 한반도 남해안지역으로 이동하는 모습도 확인할 수 있다. 이는 Fig. 13에 나타난 NO_x, VOCs 배출량과 Fig. 14의 수평장과 바람벡터 그림의 O₃ 농도가 본격적으로 높아지기 시작하는 패턴이 거의 유사하다. 농도가 가장 강하게 나타나는 시간인 27일 04:00 LST에서 피크를 보이고 고농도 O₃은 이동하며 제주도를 점점 빠져나가는 모습을 보이며 비교적 열은 O₃이 지속적으로 제주도에 영향을 미치는 모습을 볼 수 있다.

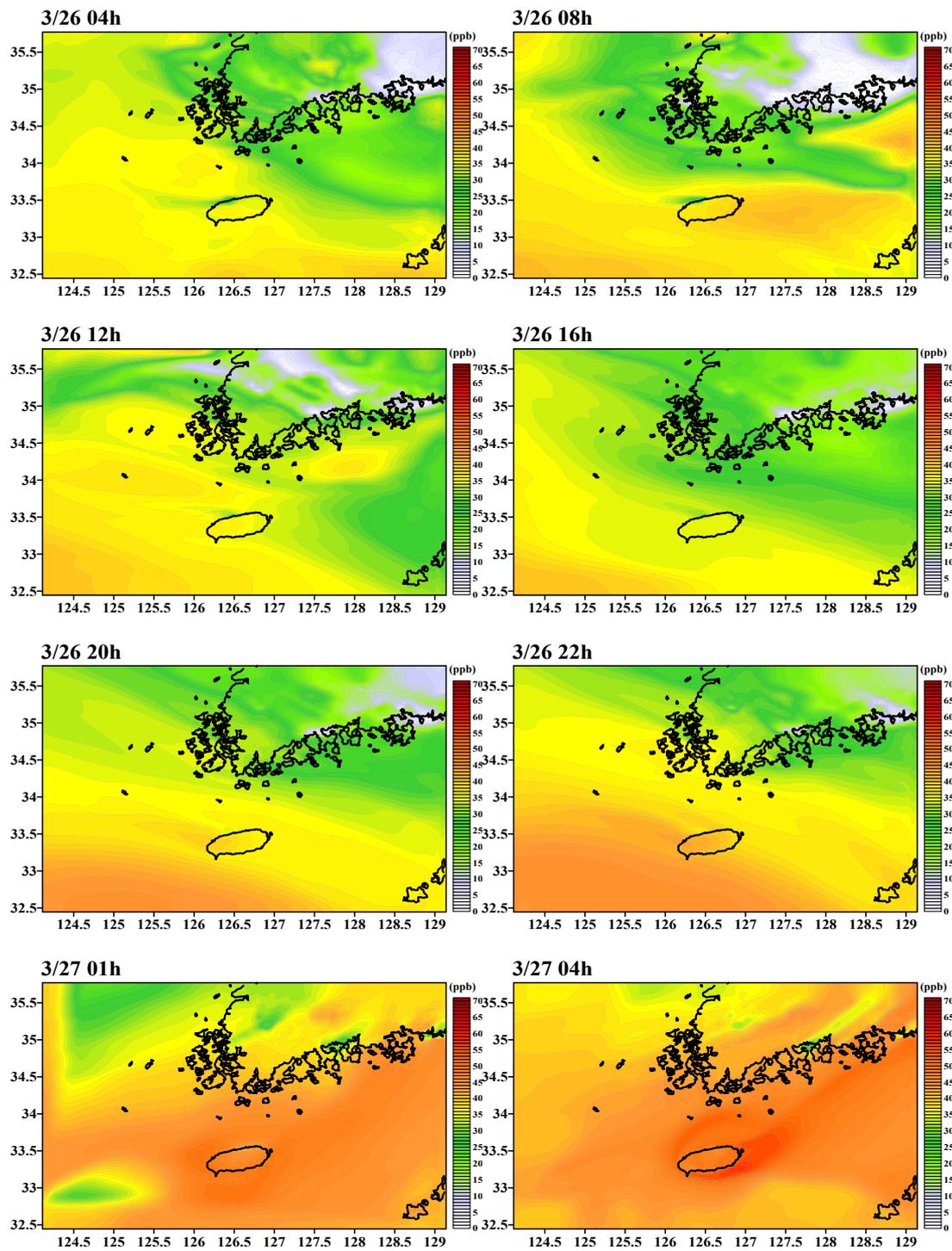


Fig. 15. Spatial distributions of hourly mean Ozone concentrations simulated by the CMAQ modeling system around Jeju Island.

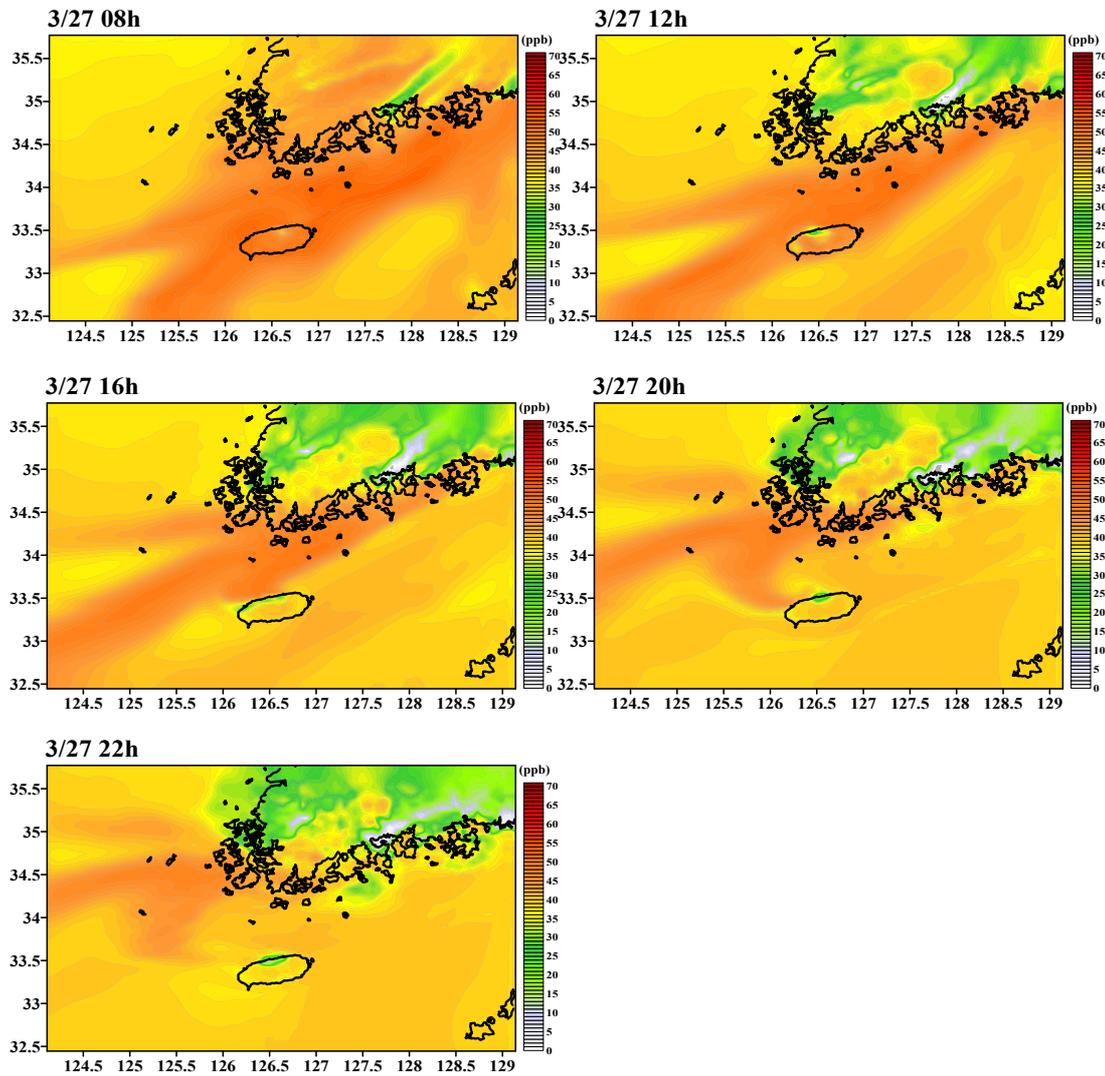


Fig. 15. (Continued.)

CMAQ 모델의 경우 O_3 의 주요 전구물질인 NO_x 와 VOCs의 인위적 배출량 (CAPSS)의 분포로 생성된 농도를 최종 O_3 농도로 산정하였고 이를 같은 도메인 상의 인접지역(부산(Busan), 광주(Gwangju), 여수(Yeosu), 광양(Gwangyang), 순천(Suncheon), 창원(Changwon))의 O_3 영향을 많이 받은 6개 도시와 비교하였다. Fig. 12의 모든 그림에서 6월 26일 저녁시각부터 O_3 의 농도가 높아졌고 고농도 사례일인 27일 00~06시경 최고 농도를 보였다. 이는 제주지역 뿐만 아니라 부산을 포함한 한반도 남해안 주변에서 거대하게 O_3 이 분포하고 있었음을 보여준다.

부산지역의 대기질 관측지점(15지점)과 비교한 그림(Fig. 16(a))에서 BS3(감전동)의 경우 사례일 기간에 가장 높은 오존값을 보이는데 모델값은 관측값에 비해 전체적으로 20~25정도 낮게 모의 한것을 볼수 있다. 이는 도메인 선정 지역이 해양과 밀접하게 관련되어있어 O₃수치에 영향을 준 것으로 판단된다. 그러나 약간의 과소모의를 제외한 O₃의 패턴경향은 대부분의 관측 경향과 유사하였다.

광주의 대기질 관측지점(7지점)과 모델값의 비교 그림(Fig. 16(b))에서는 부산지점과 유사하게 26일 00시부터 12시 정도 까지를 제외하고는 전체적으로 관측지점에 비해 모델값이 과소모의 한 것으로 보이나 O₃ 농도가 증가하는 사례일(06/27)기간 부터 관측값과 유사한 패턴을 갖는 모습을 보이고 있다.

여수지점(Fig. 16(c))에서는 광주지점과 다르게 관측값이 지점별로 다르게 분포되는 모습을 보였다. 여수지점의 경우 모델값의 패턴은 YS1과 가장 유사하게 나타났으므로 광무동 지점과 모델값의 위·경도가 가장 가까운 지점일 것으로 사료된다.

광양지점의 그림(Fig. 16(d))은 4지점의 관측값이 다른 지점에 비해 불규칙한 패턴을 갖는 모습을 보였다. 특히 GY2(태인동)지점의 경우 다른지점에 비해 O₃ 수치가 낮게 나타났는데, 이는 GY2 지점이 다른 지점에 비해 바다와 인접하고 있기 때문인 것으로 추정된다. 광양지점에서 O₃ 모델값의 패턴과 가장 농도가 비슷했던 관측지점은 GY4로 모델값에서 나타내는 광양지역의 위·경도는 칠성리 지점과 가장 가까울 것이라 추정된다.

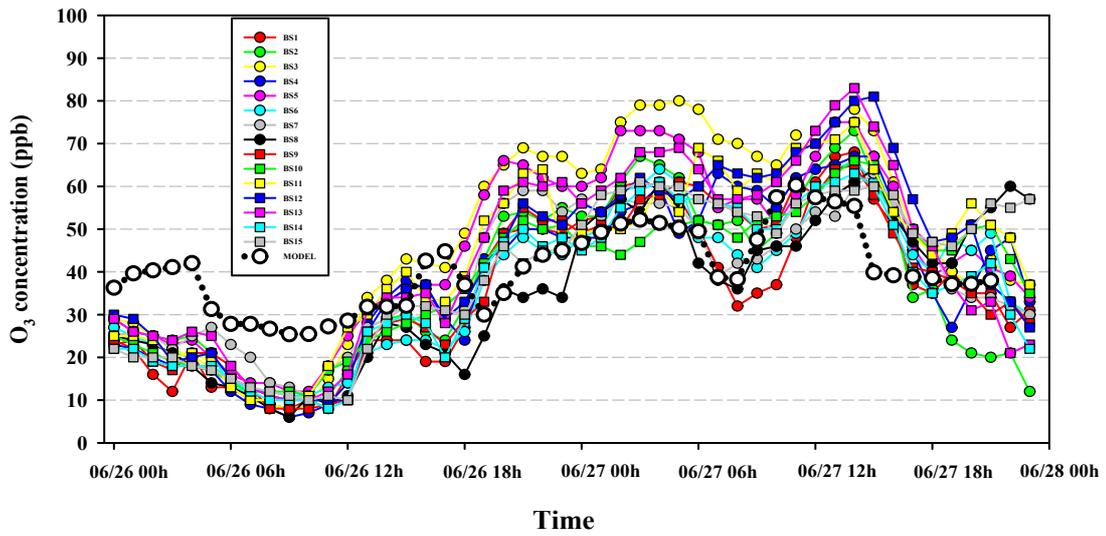
순천지점(Fig. 16(e))은 광양지점과 달리 O₃ 수치는 지점별로 차이가 있지만 패턴은 유사하게 나타나는 모습을 보인다. 모델값은 다른 지점과 마찬가지로 관측값에 비해 낮게 나타나며 O₃ 수치가 상승하기 시작하는 26일 저녁 부터는 관측값과 유사한 패턴을 나타낸다. 순천지점의 경우 모델값의 패턴은 SC1과 가장 유사하게 나타났으므로 장천동 지점과 모델값의 위·경도가 가장 가까운 지점일 것으로 사료된다.

창원지점(Fig. 16(f))은 다른 지점들의 특성과 유사한 특징을 보이며 모델값의 패턴은 CW6과 가장 유사하게 나타났으므로 사파동 지점과 모델값의 위·경도가 가장 가까운 지점일 것으로 사료된다.

제주지역 O₃의 관측값과 모델값의 비교 그림(Fig. 16(g))에서 관측값의 패턴을

보면 JJ1(이도동) 지점과 JJ2(연동) 지점은 유사한 패턴을 보이나 JJ3(동홍동)의 경우 두 지점과 약간 다른 패턴을 나타낸다. 이는 비교적 근접한 거리인 제주시에 위치하는 이도동, 연동 지점과 서귀포시에 위치하는 동홍동 지점이 한라산을 기점으로 다른 지역적 특성을 갖고 있기 때문이라고 사료된다. 모델값의 위·경도는 각 관측값의 위경도와 크게 차이가 없을 것으로 추정되나, 서귀포시의 동홍동 보다 제주시에 위치한 이도동과 연동지점에서 더욱 유사하게 나타나므로 모델값의 위·경도가 JJ3에 비해 JJ1, JJ2에 더 가까운 것으로 사료된다. 제주지역은 연구 대상지역인 만큼 O₃ 수치가 다른 지점에 비해 가장 높게 나타남을 확인 할 수 있다.

(a)



(b)

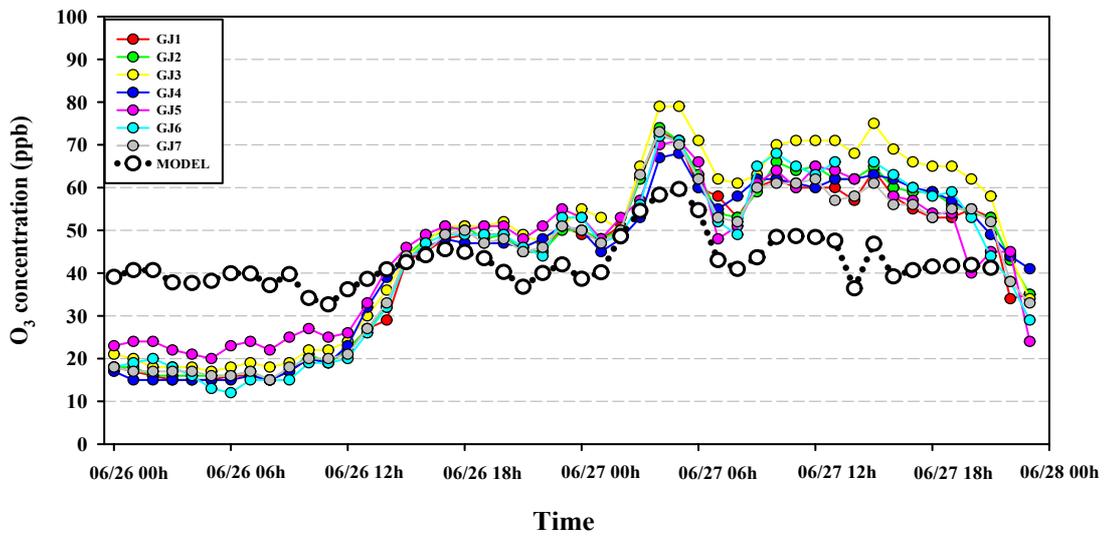
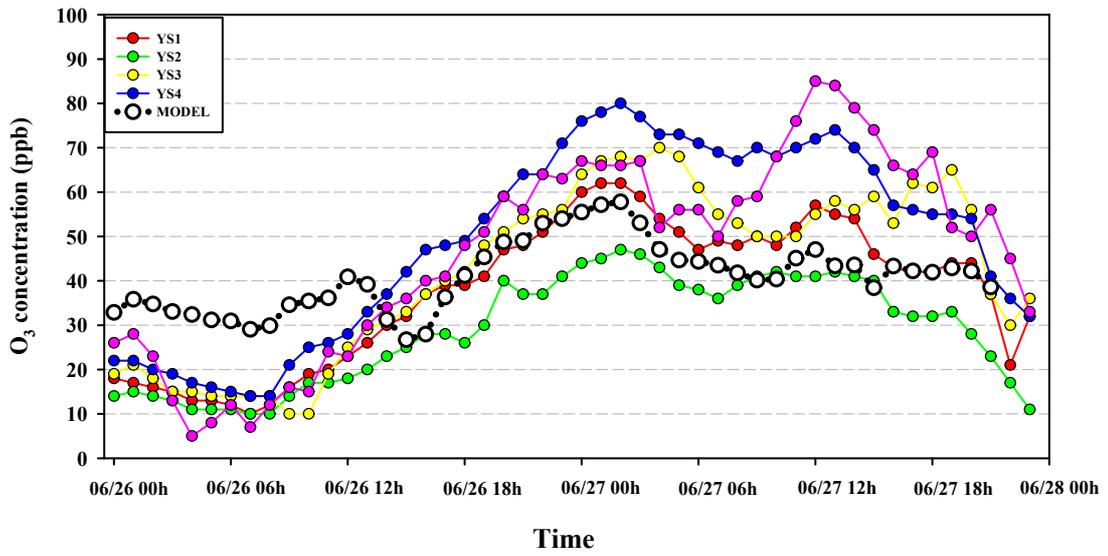


Fig. 16. Time series of the observe and CMAQ model-predicted meteorological variables such as (a) 15 air quality monitoring sites in Busan, (b) 7 sites in Gwangju, (c) 4 air quality monitoring sites in Yeosu, (d) 4 sites in Gwangyang, (e) 4 air quality monitoring sites in Suncheon, (f) 7 sites in Changwon., and (g) 3 air quality monitoring sites in Jeju.

(c)



(d)

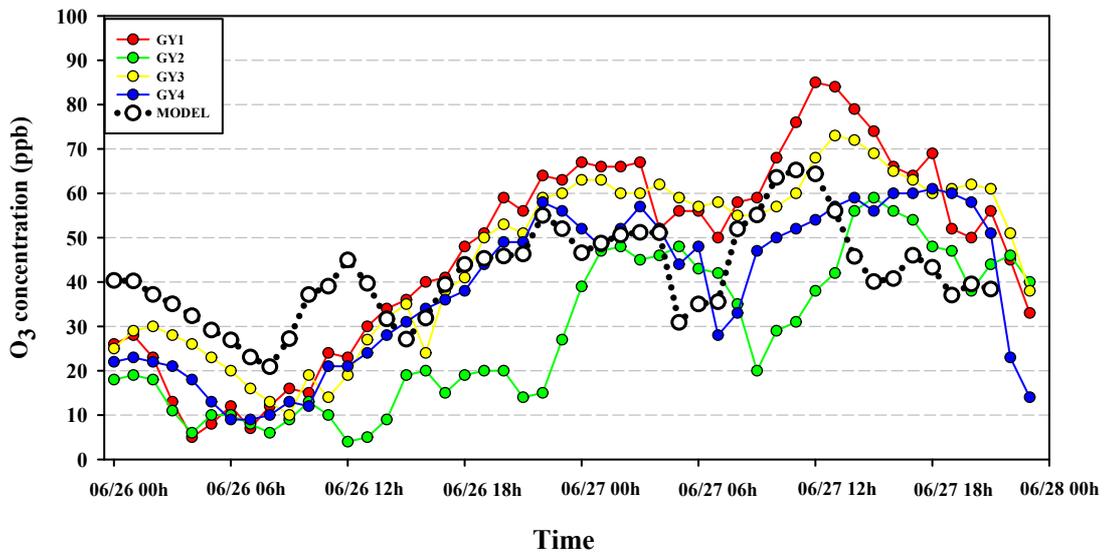
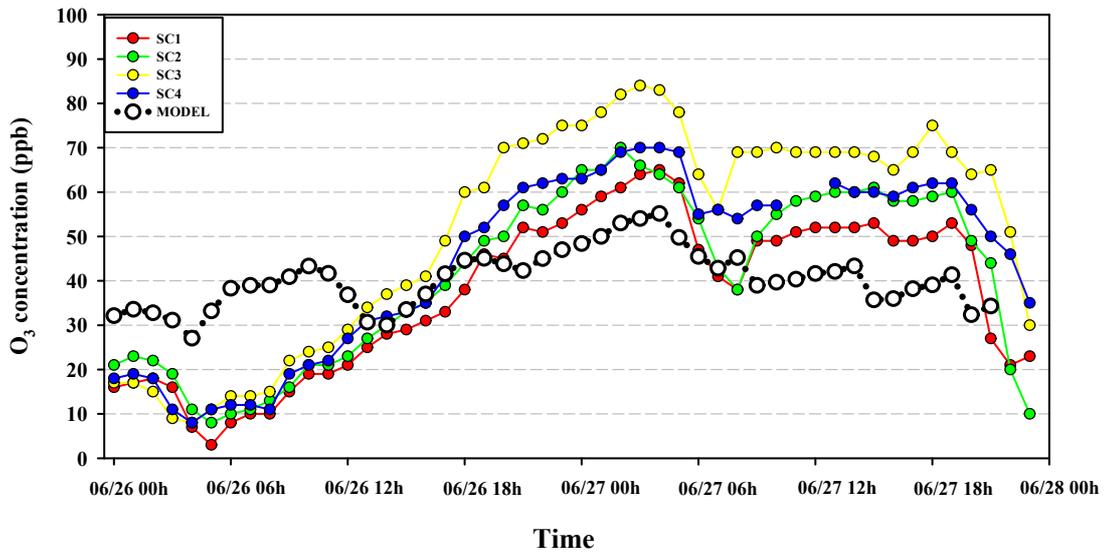


Fig. 16. (Continued.)

(e)



(f)

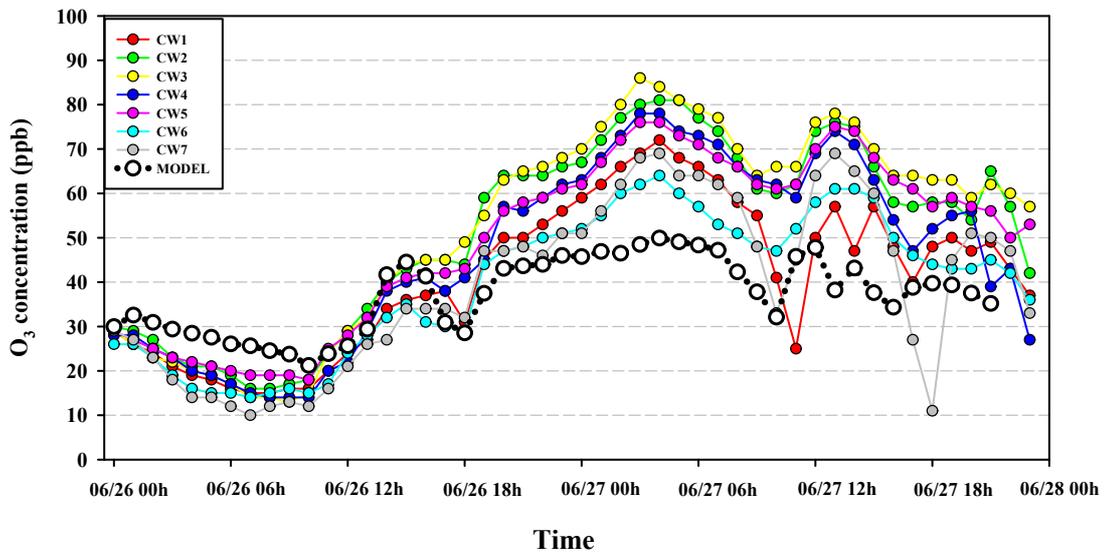


Fig. 16. (Continued.)

(c)

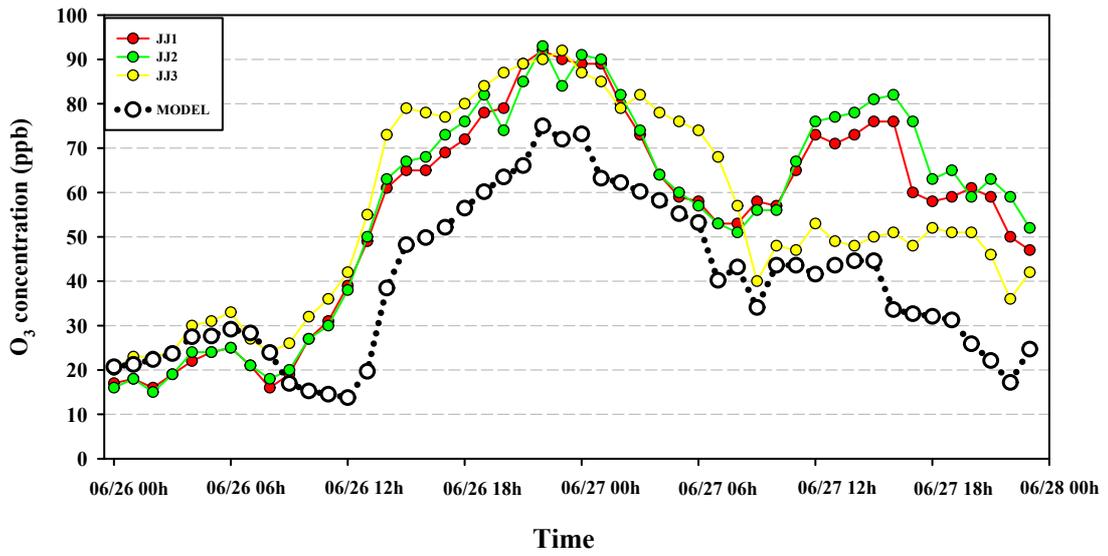


Fig. 16. (Continued.)

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 제주지역에 나타나는 대기오염물질(O_3 과 PM_{10})의 농도 분포 특성과 기원 및 이동경로를 분석하고, 고농도 O_3 및 PM_{10} 에 영향을 주는 기상 조건을 분석하기 위해 최근 5년(2009~2013년) 동안 제주에서 가장 악영향을 미치는 2가지 대기환경기준 오염물질(O_3 , PM_{10})의 고농도 사례일을 선정하고, 주요 기상요소(기온, 풍향, 풍속 등)와의 상관관계를 파악하였다. 또한 기온과 풍속 구간별로 O_3 및 PM_{10} 농도의 초과빈도를 조사하였고, 제주지역의 고농도 O_3 사례일을 선정하여 3차원 수치모델링(WRF, CMAQ)을 통한 수치모의 분석을 실행하였다.

1) HYSPLIT 모델의 후방궤적 분석결과, O_3 고농도일의 기류패턴은 총 4개, PM_{10} 고농도일의 기류패턴은 총 3개로 분류되었다. O_3 의 경우, 중국 도심지 방향에서 수송된 기류가 가장 많았으며, 이는 도심지의 자동차 및 산업지역에서 배출되는 O_3 전구물질인 VOCs와 NO_x 가 지속적으로 O_3 생성을 증가시켰을 것으로 추정된다. 다음으로 북만주 부근에서 수송된 기류, 해양을 순환하여 수송된 기류, 일본 도시를 거쳐 수송된 기류 순으로 빈도가 나타났다.

PM_{10} 의 경우, 주요 황사 발원지인 고비사막 및 황토고원 부근에서 수송되는 기류가 대부분을 차지하였고, 이외 북만주 방향에서 수송되는 기류, 해양과 일본 열도 방향 등 비발원지 부근에서 수송되는 기류 순으로 차지 하였다. 본 연구에서 PM_{10} 고농도일의 기준 선정에 있어 황사 발생일을 적용 했음에도 불구하고, 비발원지로부터 오는 기류패턴이 분류된 것은 HYSPLIT의 초기 입력 자료의 해상도 등 모델의 불확실도에 의해 기인된 것으로 추정할 수 있다.

2) 연구기간동안(2009~2013년) 제주지역의 대기환경 변화와 관련된 기상 특성을 면밀하게 살펴보기 위해 대기오염물질 농도와 기상요소와의 상관성, 기온과 풍속 구간별 대기오염물질 농도의 초과빈도를 분석하였다. 먼저 제주지역 계절별 일 평균 기상요소와 대기오염물질(O_3 , PM_{10}) 농도와의 상관관계에서 O_3 의 경우,

여름철에 이도동과 동홍동 지점에서 강한 음의 상관성이 나타났는데(특히 이도동), 이것은 O₃이 광화학 오염물질이라는 관점에서 볼 때 대상지역 전구물질의 국지 배출과 광화학적 생성을 주요 원인으로 보기는 어렵다고 판단된다. 게다가 O₃과 풍속의 경우도 상관의 정도는 약하지만 양의 관련성을 보이고 있어 다소 센 바람을 따라 오염물질(예, O₃)의 수송이 대상지역 O₃ 농도를 높이는데 일부 기여한 것으로 추정된다.

PM₁₀과 풍속에서는 봄, 가을철의 이도동과 여름철의 연동 지점에서의 양의 상관성을 제외하고는 대부분 약한 음의 상관성이 나타났다. 이것은 O₃과 풍속과의 관계처럼 대기 중 수송에 의해 일부 영향을 받을 수 있겠지만 두 지점에서처럼 풍속과의 양의 상관성이 나타난 계절도 있는 것으로 봐서 단순히 풍속의 변화만으로 대기수송에 의한 오염물질의 농도를 설명하는 것은 한계가 있다고 판단된다. 이외에도 강수의 경우는 2가지 오염물질에 대해 뚜렷한 역 상관성을 보이고 있는데, 이것은 일반적으로 대기 중 세정효과(wash-out)가 주요 원인 중 하나인 것으로 볼 수 있다.

기온과 풍속 구간별 대기오염물질 농도의 초과빈도에서는 전반적으로 구간에 따라 다양한 변화를 나타냈다. 기온 구간에 따른 O₃의 초과빈도를 보면, 대체적으로 제주지역의 경우 O₃ 변화가 광화학반응이 가장 활발한 여름철보다는 오히려 봄철에 높은 농도를 나타낸 것을 알 수 있으며, 이는 대상지역 국지배출의 영향보다는 다른 오염지역으로부터 대기 중 수송 및 확산에 의한 영향이 더 크다는 것을 시사한다. PM₁₀의 경우 O₃과 유사하게 주로 봄철의 기온구간에서 뚜렷하게 초과빈도가 나타났는데, 이것은 대상지역 황사현상에 의한 기여가 가장 큰 것으로 판단된다.

풍속 구간에 따른 초과빈도 변화 특성은 기온 구간에 따른 초과빈도 특성과 다른 양상을 보였다. 특히 연동에서의 낮은 풍속에서 초과빈도가 높은 특징은 다른 지점에 비해 많은 건물과 차량으로 인해 배출된 국지오염의 영향이 일부 기여한 것으로 추정할 수 있다. 그러나 연동을 제외한 대부분 관측지점에서는 다소 강한 바람을 따라 수송(외부 유입)되어 농도가 증가한 것으로 추정된다.

3) CMAQ 모델링을 통한 제주지역의 오존 수치모의에서는 O₃의 수송 경향 및 특성을 살펴보기 위하여 모델치의 수평분포와 동일시간대의 바람벡터 공간분포도를 살펴보았다. 일반적으로 O₃ 전구물질인 NO_x는 수시간 후의 O₃ 생성에 영향을 주므로 중국 공업지역의 공장에서 NO_x와 관련된 오염물질 배출이 높은 O₃ 생성에 영향을 준후 수송을 통해 제주지역까지 이동 하였을 것으로 판단된다. NO_x 배출과 마찬가지로 VOCs의 배출량 또한 유사한 패턴으로 사례일 기간 동안 오존 생성에 큰 영향을 주었을 것으로 판단되며 이러한 NO_x 와 VOCs 배출량의 증가와 감소는 사례일의 O₃ 생성에 영향을 줄 것으로 판단 되었다.

O₃의 수송 경향 및 특성을 보기위한 모델치의 수평분포와 공간분포도에서는 사례일 시작 시점에 발생한 NO_x와 VOCs 배출의 영향을 받아 생성된 중국 공업지역의 밀집된 오염과 한반도의 남해안 및 제주지역 그리고 일본연안 지역에 확대된 O₃ 오염 분포를 확인 할 수 있다. 바람벡터 그림을 보면 O₃ 오염이 생성되는 되는 지역으로부터 강한 서풍이 부는 것으로 보아 중국 공업지역에 배출되어 있던 NO_x와 VOCs으로 인해 생성된 고농도의 O₃ 오염이 한반도 남해안과 제주지역으로 수송되는 것으로 추정된다. 그 후 극심한 O₃ 농도가 강한 바람의 여파로 한반도와 제주지역에 이동한 수평장 그림을 확인 할 수 있다.

제주도의 O₃ 농도 수평장 그림에서는 O₃이 제주도 남쪽 부근에서 북쪽으로 이동하는 모습이 잘 나타났다. 고농도 O₃은 제주도 남쪽 부근 마라도 지점에 다다르며, 제주지역을 절반 이상 덮고 사례일 시점부터는 완벽하게 제주지역에 고농도 O₃이 도달한 것을 나타내었다. 그 후 한반도 남해안지역으로 이동하는 모습도 확인 할 수 있다. 농도가 가장 강하게 나타나는 시간인 27일 04:00 LST에서는 O₃ 농도가 최대를 보였으며 시간이 지날수록 북쪽으로 이동하며 제주도를 점점 빠져나가는 모습을 보였다.

본 연구를 통해 제주지역에 나타나는 오존 및 미세먼지 농도의 상승은 장거리 오존수송에 의한 외부효과가 중요한 기여 원인인 것으로 분석되었다. 후방궤적 분석결과, 대기오염물질의 대부분이 서쪽으로 부터의 공기괴가 유입되는 패턴에서 나타났고 무엇보다 중국 동쪽 공업단지에서 이동해오는 패턴이 상당히 높은 빈도를 보임을 알 수 있었다. 이는 중국으로부터 오염된 공기괴의 수송이 제주지

역의 오존농도 상승에 상당부분 기여함을 나타낸다. 하지만 화학 측정자료와 연직적인 기상 및 대기질 정보가 충분치 않은 실정에서 장거리 수송의 영향이 지표 오존농도 상승에 미치는 직접적인 영향을 정확히 해석하기는 불가능하며, 다른 여러 가지 역학적 효과의 기여를 배제할 수는 없다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해 대상지역에서의 기상 및 주요 대기오염물질 농도의 연직관측이 지속적으로 수행되어야 하고 관측자료로 부터 얻어진 다양한 역학적 인자들과 오염물질 농도와의 관계 분석이 필수적이다. 아울러 광화학 수송모델링을 통한 수송 메카니즘 파악과 정량적인 분석연구가 병행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 강동근, 김선태, 김정욱, 1993: 동북아시아 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), 329-339.
- 김용표, 김진영, 박세욱, 김성주, 심상규, 문길주, 박경윤, 허철구(1996) 고산에서의 1994년 3~4월 측정연구: (II) 기체상 대기오염물질의 특성, 한국대기보전학회지, 12(1), 91-99pp.
- 김현수, 2000: UAM을 이용한 부산지역 고농도 오존일의 수치모의, 부산대학교, 석사학위 논문. 77pp.
- 강재은, 2003: 한반도 황사의 지속시간과 관련된 종관 기상학적 특성 및 수치모의, 부산대학교, 석사학위 논문, 86pp.
- 강재은, 2012: 연안인근 계곡도시 오존오염의 모델링 최적화 방안 및 발생원인 정량평가, 부산대학교 대기과학과 박사학위논문, 178pp.
- 김유근, 문윤섭, 송상근, 오인보, 2002: 대류권오존의 연직수송과 관련한 부산지역 고농도 오존 사례분석, 한국기상학회지, 38(4), 307-317
- 김유근, 이소영, 임윤규, 송상근, 2007: 중회귀 모형을 이용한 울산지역 오존 포텐셜 모형의 설계 및 평가, 한국대기환경학회지, 23(1), 14-28
- 김유근, 박상현, 강재은, 송상근, 2009: MM5-CMAQ 모델 시스템을 이용한 양산지역 봄, 여름 고농도 오존일의 발생과정별 기여도 평가, 한국환경과학회지, 19(3), 269-279
- 손고은, 2014: WRF-SWAN 모델을 이용한 상세규모 연안기상 예측, 부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공 석사학위논문, 71pp.
- 송상근, 김유근, 강재은, 2009: 2006년 봄, 여름철 대기오염물질 집중측정을 통한 도시 계곡지역의 오존농도 특성 분석, 한국대기환경학회지, 25(4), 289-303
- 송상근, 손장호, 김유근, 2010: 항공관측자료를 이용한 2006년 멕시코시티 주변 기류의 물리-화학적 성질에 따른 오존의 광화학적 특성 연구, 한국대기환경학회지, 26(2), 118-136
- 송상근, 한승범, 김석우, 2014: 최근(2010~2012년) 제주지역 대기환경 변화에 관한 기상특성 분석, 한국환경과학회지, 23(11), 690-756.

- 오인보, 2003: 대도시지역 고농도 오존발생의 기상학적 메카니즘: 관측자료 분석과 수치모델링 연구, 부산대학교, 박사학위 논문, 241pp.
- 오인보, 김유근, 2004: 봄철 서울지역 야간 오존농도 상승에 미치는 장거리 수송의 영향, 한국대기환경학회지, 20(4), 503-514.
- 이종범, 천태훈, 2006: 오존 및 오존전구물질의 장거리수송이 우리나라 중부지방의 오존농도에 미치는 영향, 한국대기환경학회 학술대회논문집, 453-454.
- 윤민지, 2010: 자료동화 및 physics scheme에 따른 기상모델 WRF의 민감도 분석, 안양대학교 환경공학과 석사학위논문, 86pp.
- Akimoto, H., H. Mukai, M. Nishikawa, K. Murano, S. Hatakeyama, C.M. Liu, M. Buhr, K.J. Hsu, D.A. Jaffe, L. Zhang, R. Honrath, J.T. Merrill, and R.E. Newell(1996) Long range transport of ozone in the East Asian Pacific rim region. *J. Geophys. Res.*, 101, 1999-2010.
- Byun, D.W., Ching, J.K.S., 1999, Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA Report N. EPA-600/R-99/030, Office of Research and Development. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC., CARB, 2003.
- Byun, D., Schere, K.L., 2006, Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, *Applied Mechanics Reviews* 59, 51-77.
- Brulfert, G., Galvez, O., Yang, F., Sloan, J. J., 2007, A regional modelling study of the high ozone episode of June 2001 in southern Ontario, *Atmos. Environ.*, 41, 3777-3788.
- Corsmeier, U., N. Kalthoff. O. Kolle, M. Kotzian, and F. Fiedler (1997) Ozone concentration jump in the stable nocturnal boundary layer during a LLJ-event, *Atmos. Environ.*, 31(13), 1977-1989.
- Chan, C.Y. and L.Y. Chan (2000) The effect of meteorology and air pollution transport on ozone episodes at a subtropical coastal Asian city, Hong

- Kong, J. *Geophys. Res.*, 105, 20707-20724.
- Cheng, W. L., 2002, Ozone distribution in coastal central Taiwan under sea-breeze conditions, *Atmos. Environ.*, 36, 3445-3459.
- Draxler, R. R., Hess, G. D., 1998, An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories dispersion and deposition, *Australian Meteorological Magazine*, 47, 295-308.
- Ding, A., Wang, T., Zhao, M., Wang, T., Li, Z., 2004, Simulation of sea-breezes and a discussion of their implications on the transport of air pollution during a multi-day ozone episode in the Pearl River Delta of China, *Atmos. Environ.*, 38, 6737-6750.
- Eliasson, I., S. Thorsson, and A.S. Yvonne (2003) Summer nocturnal ozone maxima in Goteborg, Sweden, *Atmos. Environ.*, 37, 2615-2627.
- Gipson, G.L., 1999, Process analysis. In: Byun, D.W. and J.K.S. Ching (Eds.), *Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System*, EPA Report No. EPA/600/R-99/030 (chapter 16)
- Ghim, Y. S., 2000, Trends and factors of ozone concentration variations in Korea, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 16, 607-623.
- Gomiscek, B., Frank, A., Puxbaum, H., Stopper, S., Preining, O., Hauck, H., 2004, Case study analysis of PM burden at an urban and a rural site during the AUPHEP project, *Atmospheric Environment*, 38, 3935-3948.
- Hong, Song-You, Hua-Lu Pan, 1996, Nonlocal Boundary Layer Vertical Diffusion in a Medium-Range Forecast Model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322-2339.
- Hong, Song - You, Jimy Dudhia, and Shu - Hua Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103 - 120.
- Hee-jeong Chea, 2009, Effect on the PM10 Concentration by Wind Velocity and Wind Direction, *Journal of Environmental and Sanitary*

- Engineering, 24(3), 37-54 (2009).
- Jaffe, D., I. McKendry, T. Anderson, and H. Price (2003) Six 'new' episodes of trans-Pacific transport of air pollutants, *Atmos. Environ.*, 37, 391-404.
- Klemm, O., Bachmeier, A.A., Talbot, R.W. Klemm, K.I., 1994, Fog chemistry at the New England coast : influence of air mass history, *Atmospheric Environment*, 28, 1181-1188.
- Kim, J. Y., Ghim, Y. S., 2002, Effects of the density of meteorological observations on the diagnostic wind fields and the performance of photochemical modeling in the greater Seoul area, *Atmos. Environ.*, 36, 201-212.
- Kim, Y. K., Moon, Y. S., Song, S. K., Oh, I. B., 2002, Case study of surface ozone enhancement due to vertical transport of tropospheric ozone, *J. Kor. Meteorol. Soc.*, 38, 307-317.
- Kim, Y. K., Oh, I. B., Kang, Y. H., Hwang, M. K., 2007, Modeling of the air pollutant recirculation using the MM5-CAMx on ozone episode in Greater Seoul Area during June, 2004, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 23, 297-310.
- Korean Ministry of Environment, 2011, Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2010, Republic of Korea.
- Korean Ministry of Environment, 2012, Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2011, Republic of Korea.
- Korean Ministry of Environment, 2013, Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2012, Republic of Korea.
- Liu, C.M., S.C. Liu, and S.H. Shen (1990) A study of Taipei ozone problem. *Atmos. Environ.*, 24A, 1461-1472.
- Lam, K.S., T.J. Wang, L.Y. Chan, T. Wang, and J. Harris (2001) Flow patterns influencing the seasonal behavior of surface ozone and carbon monoxide at a coastal site near Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 35, 3121-3135.
- Mayer, H., 1999, Air pollution in cities, *Atmos. Environ.*, 33, 4029-4037.

- Ma, Y., Lyons, T. J., 2000, Numerical simulation of a sea breeze under dominant synoptic condition at Perth, Meteorol. Atmos. Phys., 73, 89-103.
- Moon-Khee Shin, 2007, "The Influence of Meteorological Factors on PM₁₀ Concentration in Incheon", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 23(3), 322~331 (2007).
- Oh, I. B., Kim, Y. K., Hwang, M. K., 2004, Effects of late sea-breeze on ozone distributions in the coastal urban area, J. Kor. Soc. Atmos. Environ., 20, 345-360.
- 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, Atmos. Environ., 40, 1284-1298.
- Pochanart, P., J. Hirokawa, Y. Kajiii, and H. Akimoto (1999) Influence of regional-scale anthropogenic activity in northeast A_{PM} on seasonal variations of surface ozone and carbon monoxide observed Oki, Japan, J. Geophys. Res., 103, 3621-3631.
- Pochanart, P., H. Akimoto, Y. Kinjo, and H. Tanimoto (2002) Surface ozone at four remote island sites and the preliminary assessment of the exceedances of its critical level in Japan, Atmos. Environ., 36, 4235-4250.
- Roland, R.D. (1999) HYSPLIT_4 USER'S GUIDE, NOAA Technical Memorandum ERL ARL-230.
- Reitebuch, O., A. Strassburger, S. Emeis, and W. Kuttler (2000) Nocturnal secondary ozone concentration maxima analysed by sodar observations and surface measurements, Atmos. Environ., 34, 4315-4329.
- Samson, P.J. (1978) Nocturnal ozone maxima, Atmos. Environ., 12, 951-953.
- Seinfeld J.H. (1989) Urban air pollution: State of the science, Science 243, 745-752.
- Salmond, J.A., and I.G. Mckendry (2002) Secondary ozone maxima in a very stable nocturnal boundary layer: observations from the Lower Fraser

- Valley, BC, Atmos. Environ., 36, 5771-5782.
- Skamarock W.C., J. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang and J.G. Powers, 2008, A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR. Mesoscale and Micro scale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- WRF-ARW V3: User's Guide, 2015.
- Xia, X., Chen, H., Zhang, W., 2007, Analysis of the dependence of column-integrated aerosol properties on long-range transport of air masses in Beijing, Atmospheric Environment, 41, 7739-7750.

Meteorological analysis to examine the cause of high
concentration air pollution in Jeju:
Observations and modeling study

Seungbeom Han

*Department of Earth and Marine Sciences, Graduate
School, Jeju National University, Jeju, Korea*

Abstract

In this study, the high concentration episode day of 2 pollutants of the atmosphere environmental standards (O_3 and PM_{10}), which had the most adverse impact on Jeju island in the past 5 years (2009 to 2013), was selected and the correlation between this episode day and the main meteorological elements (temperature, wind direction and wind velocity) were identified in order to analyze the concentration distribution characteristics, origin and moving path of the air pollutants (O_3 and PM_{10}) appeared in Jeju island and also to identify the climatic conditions influencing the high concentration O_3 and PM_{10} . Moreover, this study was conducted to investigate the exceeding frequency of O_3 and PM_{10} concentration for each segment of temperature and wind velocity. In addition, the analysis on the numerical model was

performed through the three-dimensional numerical modeling (WRF and CMAQ) after selecting the episode day of high concentration O₃ in Jeju island. As a result, it was analyzed that the increase in the concentration of ozone and fine dust appeared in Jeju island was the important cause of the external effects resulting from the long-range transport of ozone.

As a result of the backward trajectory analysis, a majority of the air pollutants appeared in the pattern of air masses flowing from the west. In particular, the pattern of air pollutants flowing from the industrial complex in east China had a significantly high frequency. This result indicates that the transport of contaminated air masses from China makes a huge contribution to an increase in the ozone concentration of Jeju island. Moreover, the main causes of the temporal and spatial air quality variation were clearly evidenced in the correlation with the meteorological elements and the exceeding frequency of pollutant concentration for each segment of temperature and wind velocity.

Overall, it can be assumed that the atmospheric environment variation of Jeju island is more significantly affected by the horizontal or vertical transport in the atmosphere than the local emissions. However, it is impossible to accurately analyze the direct effects of long-range transport on an increase in the ground-level ozone concentration considering that there is not a sufficient amount of chemical measurements and vertical weather and air quality information. Therefore, it is not possible to rule out a contribution of other mechanical effects. On that account, it is imperative to conduct vertical observations on the weather and the concentration of main air pollutants in a target area for a more accurate analysis. In addition, it is essential to analyze the relationship between the pollutant concentration and various epidemiological factors obtained from observation data. Furthermore, it would also be required to identify the transport mechanism and conduct a quantitative analysis research through the photochemical transport modeling.