

ORIGINAL ARTICLE

## 최근(2010~2012년) 제주지역 대기환경 변화에 관한 기상특성 분석

송상근\*, 한승범, 김석우

제주대학교 해양과학대학 지구해양학과

### Analysis of Meteorological Characteristics related to Changes in Atmospheric Environment on Jeju Island during 2010-2012

Sang-Keun Song\*, Seung-Bum Han, Suk-Woo Kim

Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

#### Abstract

The characteristics of meteorological conditions related to changes in atmospheric environment on Jeju Island were investigated during recent years (2010-2012). This analysis was performed using the hourly observed data of meteorological variables (air temperature, wind speed and direction) and air pollutants ( $O_3$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , and  $CO$ ). Out of 5 pollutants,  $O_3$  and  $PM_{10}$  concentrations have frequently exceeded national environmental standards in the study area during the study period, with relatively higher concentrations than the others. The concentrations of  $O_3$  and  $PM_{10}$  in 2010 and 2011 were somewhat higher than those in 2012, and their highest concentrations were mostly observed in spring followed by fall. Nighttime  $O_3$  concentrations (with relatively high concentration levels) were almost similar to its daytime concentrations, due to less  $O_3$  titration by very low  $NO$  concentrations in the target area and in part to  $O_3$  increase resulting from atmospheric transport processes. The transport effect related to the concentration variations of  $O_3$  and  $PM_{10}$  was also clarified in correlation between these pollutants and meteorological variables, e.g. the high exceedance frequency of concentration criteria with strong wind speed and the high concentrations with the westerly/northwesterly winds (e.g., transport from the polluted regions of China). The overall results of this study suggest that the changes in atmospheric environment in the study area were likely to be caused by the transport effect (horizontal and vertical) due to the meteorological conditions rather than the contribution of local emission sources.

**Key words** : Jeju Island,  $PM_{10}$ ,  $O_3$ , Wind speed and direction, Air temperature

#### 1. 서론

우리나라는 급속한 도시화와 산업화, 그리고 이에 따른 자동차 급증과 인구 증가 등으로 야기되는 대기오염 물질의 배출량 증가로 인해 심각한 대기오염과 환경파

괴가 가속화되고 있다. 특히 대기오염물질의 발생 및 고농도 오염의 원인에 대한 연구를 보면, 고농도 현상이 주로 대상지역 고유의 지리·지형적 특성(해안, 분지, 산간 도시 등)과 국지기상조건(약한 풍속, 해륙풍 순환 등)으로 인한 오염물질의 수송 및 축적에 의해서 나타나는

Received 26 September, 2014; Revised 16 October, 2014;

Accepted 20 October, 2014

\*Corresponding author : Sang-Keun Song, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Phone: +82-64-754-3431

E-mail: [songsk@jejunu.ac.kr](mailto:songsk@jejunu.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.

것으로 밝혀졌다(Brulfert 등, 2007; Cheng, 2002; Ding 등, 2004; Ma와 Lyons, 2000; Mayer, 1999; Oh 등, 2006). 이러한 지역 대기질 특성 및 변동과 관련된 많은 연구는 대부분 대도시와 인근지역을 중심으로 이루어져 왔으며, 그 원인이 주로 국지적 배출과 다양한 기상 조건에 의해서 나타난다고 보고된바 있다(Ghim, 2000; Kim과 Ghim, 2002; Kim 등, 2007; Oh 등, 2004). 예를 들어, 국지배출이 많은 대도시지역의 경우 강한 일사 및 높은 기온 조건이 형성되면 광화학 반응이 활발해져 오존(O<sub>3</sub>) 농도의 상승이 뚜렷하며, 바람(풍향과 풍속) 및 대기안정도 등의 다양한 기상조건에 따라 생성된 O<sub>3</sub>이 도시 내 축적되거나 인근으로 수송 혹은 재순환현상에 의해 주변지역에 영향을 미치게 되므로 기상의 역할이 매우 중요하다고 볼 수 있다(Ghim, 2000; Kim 등, 2007; Song과 Shon, 2008; Kang 등, 2012).

지역 대기환경에 있어 국지배출을 제외한다면, 일반적으로 기온, 풍향, 풍속, 강수 등의 기상조건은 대기오염물질의 시·공간적 농도 분포에 크게 영향을 미친다. 아울러 도시 대기오염은 도시 내에서의 생성 및 소멸에만 국한되어 있는 것이 아니라 오염물질의 거동(이류와 수송)과도 밀접한 관련이 있으므로 인근 교외지역이나 청정지역에서의 대기환경 특성 연구에 대한 필요성이 증가하고 있다(Lin 등, 2007; Liu와 Chan, 2002). 특히 대기오염물질의 국지배출이 거의 없는 청정지역에서는 고유의 기상조건이 그 지역의 대기환경을 결정하는 주요 역할을 할 것으로 사료된다. 우리나라에서 가장 청정한 대기로 알려져 있는 제주지역은 고정배출원에 의한 영향은 매우 적으나 점차적으로 도시 팽창과 관광객 급증으로 인해 이동오염원(차량, 항공 등)에 의한 영향이 조금씩 나타나기 시작하고 있어, 제주지역의 대기환경은 기상조건에 따른 외부로부터의 유입과 함께 일부 차량의 영향 등 복합적인 요인에 의해 지배를 받는 것으로 보고된바 있다(Lee 등, 2013).

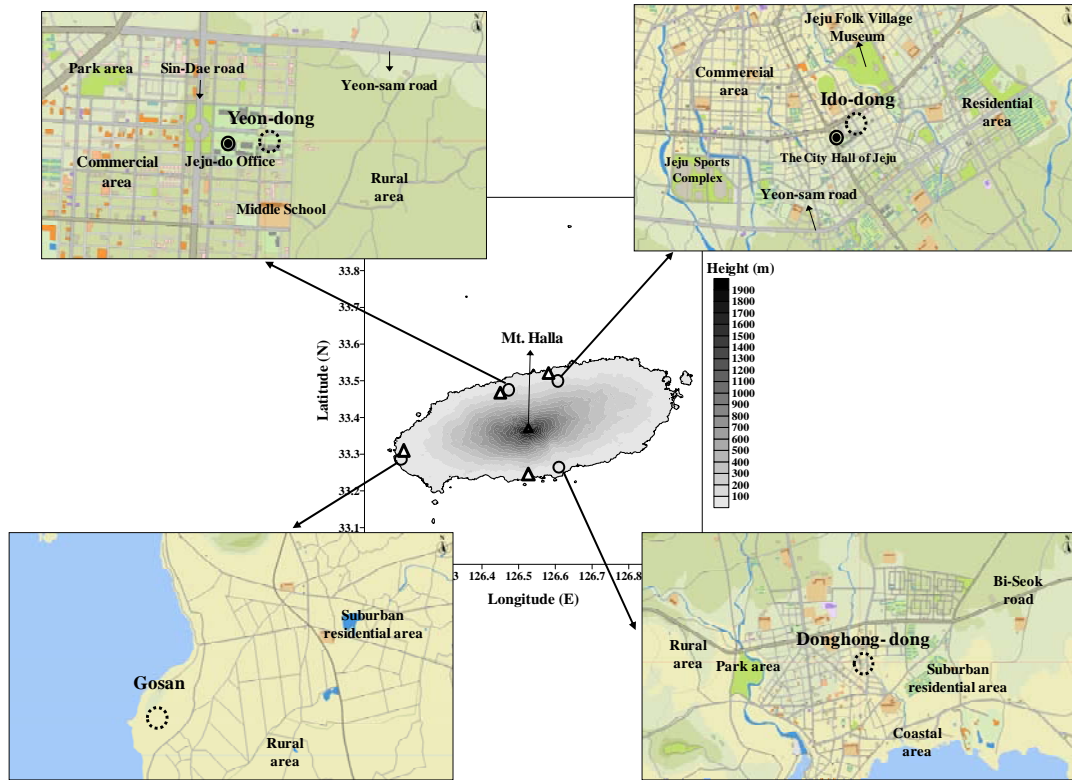
제주지역은 매년 황사로 인해 도민과 관광객들의 건강과 사회 그리고 관광활동에 큰 어려움을 겪고 있는 실정이다. 2010년 3월 황사 사례에서 서귀포시 동홍동 지점의 고농도 미세먼지(PM<sub>10</sub>)와 더불어 2011년 5월 초 같은 지점에서 PM<sub>10</sub> 농도가 무려 1,027  $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 나타나 우리나라 2011년 황사 사례들 중에서 최고농도를 기록한바 있다(KMOE: Korean Ministry of Environment,

2011, 2012). 이외에도, 2011년 6~7월 동안 한국환경공단의 실시간 도시대기측정망 측정결과에 의하면, 제주지역은 강원도와 경남뿐만 아니라 다른 대도시인 광주와 대전에 비해서도 대기질 악화가 일부 심한 것으로 나타났다(http://www.newsje.com/news/articleView.html?idxno=13010). 이러한 최근 몇 번의 대기오염 에피소드(episode)를 제외하고는 여전히 제주지역은 다른 대도시에 비해 심각한 수준은 아니지만, 점차적으로 도시 팽창과 관광객의 급증 그리고 오염물질의 장거리 수송 영향 등으로 인해 이 지역의 대기환경은 더욱 더 악화될 가능성이 있으므로 종합적이고 체계적인 연구가 필요한 시점이라고 사료된다. 이에 기초 연구로서 최근 3년(2010~2012년) 동안 제주지역 대기오염물질 농도의 시·공간적(연변화, 월변화, 주야간) 분포 특성을 분석하였다. 아울러 제주지역 대기환경에 영향을 주는 기상조건들의 특성을 살펴보기 위하여 기상요소와 대기오염물질 농도와의 상관성, 기온 및 풍속 구간별 대기오염물질 농도의 초과빈도, 풍계 패턴에 따른 오염물질 농도의 공간 분포를 분석하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 제주 전역에 나타나는 대기오염물질의 농도 분포 특성을 분석하고, 대상지역 대기환경 변화와 관련된 기상특성을 살펴보기 위해 최근 3년(2010~2012년) 동안 5가지 대기환경기준 오염물질(O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO)과 주요 기상요소(기온, 풍향, 풍속 등) 자료를 이용하였다. 대기환경기준 오염물질 자료는 환경부 산하 제주지역 내 4개 측정지점(이도동, 연동, 동홍동, 고산 지점)에서의 시간별 자료이다. 이 중에서 고산 지점은 2010년 시간별 측정 자료 부재로 인해 2011년과 2012년 자료만 분석에 이용하였다. 4개 측정지점의 위치 및 일반적인 특징은 다음과 같다. 이도동과 연동은 다른 두 측정지점에 비해 도심지역이며, 차량이 많고 건물이 밀집되어 있는 특징이 있다. 동홍동 지점은 주거지역으로 서귀포시 중심의 북동쪽에 위치하고 있으며, 고산 지점은 제주도 서쪽 바닷가에 바로 인접하면서 오염원의 영향이 거의 없는 배경지점에 위치한다(Fig. 1).

기상요소는 기상청에서 제공하는 여러 관측지점 중



**Fig. 1.** Geographical locations of 4 monitoring sites (Yeon-dong, Ido-dong, Donghong-dong, and Gosan) for air pollutants (open circle, O) on Jeju Island. The meteorological monitoring sites (triangle, Δ) are located less than approximately 2 km (Yeon-dong, Ido-dong, and Gosan) and 10 km (Donghong-dong) away from the pollutant sites, respectively.

대기오염물질 측정지점에 가장 가까운 4개 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 기상 관측지점은 제주지방기상청(이도동 대기질 측정지점에서 약 1.6 km 떨어진 지점)과 KBS방송총국(연동 지점에서 약 500 m), 그리고 서귀포시의 기상관측지점은 회수정수장(동홍동 지점에서 약 10 km)과 국가배경관측 지점으로 서쪽에 위치한 고산기상대(고산 지점에서 약 200 m)를 선정하였다(Fig. 1). 아울러 연구기간 중 자료의 신뢰성을 높이기 위하여 하루 중 75% 이상의 자료개수가 있는 날(유효측정일)의 자료만 선정하여 이용하였다.

연구기간동안(2010~2012년) 제주지역의 대기환경 변화와 관련 있는 기상조건을 상세히 살펴보기 위하여 기상요소와 대기오염물질 농도와의 상관성, 기온 및 풍속 구간별 대기오염물질 농도의 초과빈도, 풍계 패턴에 따른 오염물질 농도의 공간 분포 등을 분석하였다. 환경부의 대기환경연보에 따르면(KMOE, 2013), 대상지역인 제주도는 5가지 오염물질 중 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO는 국가환경기준치를 전혀 초과하지 않는 반면, O<sub>3</sub>과 PM<sub>10</sub>은 자주 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 예를 들어, 2010~2012년 동안 제주지역 O<sub>3</sub> 1시간 평균 60 ppb, PM<sub>10</sub> 24시간 평균 100 μg m<sup>-3</sup> 초과빈도를 살펴보면, 4개 측정지점 중 이도동, 연동, 동홍동 지점의 O<sub>3</sub> 초과빈도의 합은 108회(2012년) ~ 197회(2010년), PM<sub>10</sub>은 3회(2012년) ~ 74회(2010년)으로 2010년에 월등히 높게 나타났다(KMOE, 2011, 2012, 2013). 따라서 본 연구에

서는 기상조건(기온과 풍속 구간)에 따른  $O_3$ 과  $PM_{10}$ 에 대해서만 초과빈도를 분석하였으며,  $O_3$ 은 1시간 평균 100 ppb 초과횟수가 없는 관계로 국가 환경기준치보다 조금 낮은 80 ppb를 기준으로 정하였고  $PM_{10}$ 은 1시간 평균 100  $\mu g m^{-3}$  초과를 기준으로 분석하였다. 보다 정확한 분석을 위하여 풍속자료 중  $0.5 m s^{-1}$  이하의 무풍(Calm) 상태에 해당하는 자료를 제외하였다. 또한 두 기상요소의 구간에서 기온은 10개 구간( $<-5^{\circ}C$ ,  $-5\sim 0^{\circ}C$ ,  $0\sim 5^{\circ}C$ ,  $5\sim 10^{\circ}C$ ,  $10\sim 15^{\circ}C$ ,  $15\sim 20^{\circ}C$ ,  $20\sim 25^{\circ}C$ ,  $25\sim 30^{\circ}C$ ,  $30\sim 35^{\circ}C$ ,  $\geq 35^{\circ}C$ )으로, 풍속은 6개 구간( $<2 m s^{-1}$ ,  $2\sim 4 m s^{-1}$ ,  $4\sim 6 m s^{-1}$ ,  $6\sim 8 m s^{-1}$ ,  $8\sim 10 m s^{-1}$ ,  $\geq 10 m s^{-1}$ )으로 선정하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 제주 전역 대기오염물질 농도의 시·공간적 분포 특성

##### 3.1.1. 대기오염물질 농도의 연변화

본 연구에서는 제주 전역의 5가지 대기환경기준 오염물질 농도의 시·공간적 분포 특성을 살펴보기 위해 연구기간동안(2010~2012년) 4개 측정지점(이도동, 연동, 동홍동, 고산)에서  $O_3$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , CO의 연변화(Fig. 2), 월변화(Fig. 3), 주·야간 농도 분포 특성(Table 1)을 분석하였다. 먼저 Fig. 2를 보면, 측정지점 모두  $O_3$ 과  $PM_{10}$ 의 농도는 2010년과 2011년에 높고 2012년에 가장 낮은 경향을 보였다(고산 지점의 2010년 시간별 측정 자료 부재로 제외). 이러한 특징과 유사하게, 2010년 3월과 2011년 5월 황사 사례시 대상지역의 동홍동 측정지점에서 상당히 높은  $PM_{10}$  농도(2010년 2,985  $\mu g m^{-3}$ , 2011년 1,027  $\mu g m^{-3}$ )가 관측되어 연구기간동안(2010~2012년) 우리나라 전체 황사사례 중에서 거의 최고치를 기록한바 있다(KMOE, 2011, 2012). 반면, 나머지 오염물질( $SO_2$ ,  $NO_2$ , CO)의 농도는 대부분 측정지점에서 3년 모두 거의 유사하였으며(2012년 이도동 지점의  $SO_2$  제외), 매우 낮은 수준이었다.

5가지 오염물질별로 특징을 살펴보면(Fig. 2),  $O_3$ 의 경우 다소 건물이 밀집되어 있고 차량이 많은 이도동과 연동에 비해 상대적으로 오염원이 적은 서귀포 동홍동과 고산 지점에서 평균적으로 높은 농도를 나타낸 반면, 도심의 차량이 주요 배출원인  $NO_2$ 는 이도동과 연동이

다른 두 지점에 비해서 훨씬 높은 농도가 관측되었다(특히 2010년과 2011년). 2001년에 제주지역에서 관측된  $O_3$ 과  $NO_2$ 와의 관계에서도 이와 유사한 패턴( $O_3$ 이 높을 때  $NO_2$ 가 낮은)이 나타났다(Song 등, 2012). 이러한  $O_3$ 의 생성은 주요 전구물질( $NO_x$ , VOC)의 농도와 비선형 관계에 있으므로 단순히 농도 자료만 가지고 해석하기는 어렵고 두 전구물질간의 상대적인 배출강도(예,  $NO_x/VOC$  배출 비율) 특성 및 광화학적 생성과 소멸 등의 상세한 분석이 요구된다(Kleinman 등, 1997; Sillman, 1999).  $PM_{10}$ 의 경우, 연구기간동안 지점별로 큰 차이가 나타나지 않았는데, 이것은 국지배출에 의한 영향보다는 오히려 다른 오염지역(예, 중국 황사발원지)으로부터 수송되어 온 미세먼지가 제주도 전역에 골고루 분포한 것으로 예상된다. 또한 CO는 다른 지점 및 다른 년도와 달리 2011년 고산 지점에서 상대적으로 높은 농도가 관측되었다. CO의 일반적인 주요 발생원이 산불, 유기성 물질(석탄, 유류 등)의 연소, 그리고 자동차 배기가스의 불완전 연소라는 점을 볼 때, 고산은 배경지역이므로 2011년의 높은 CO 농도는 대기 중 수송에 의한 영향이라고 추정할 수 있다. 한편,  $SO_2$ 는 2012년 연동 지점에서 상대적으로 높은 농도가 관측된 것을 제외하고는 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다.

##### 3.1.2. 대기오염물질 농도의 월/계절 변화

Fig. 3은 연구기간동안(2010~2012년) 제주지역 4개 측정지점에서 측정된 대기오염물질 농도의 월변화 및 계절 특성을 나타낸다. 먼저 연변화(Fig. 2)에서 뚜렷한 특징을 보인  $O_3$ 과  $PM_{10}$  농도의 월별 특성을 살펴보면 다음과 같다. 대표적 도시 광화학 오염물질인  $O_3$ 은 모든 측정지점에 대해 광화학반응이 활발한 여름철의 평균 농도(29~35 ppb)보다 봄철의 평균 농도(44~54 ppb)가 더 높음을 확인할 수 있으며, 특히 4월, 5월에 가장 높게 관측되었다. 이는 여름철 많은 강수(세정효과)로 인해 상대적으로 봄철에 높은 농도가 나타난 것으로 사료되며, 또한 봄철의 경우 장거리 수송이나 다소 낮은 빈도이지만 성층권오존의 하향수송이 지표부근 농도 상승에 일부 영향을 준 것으로 추정된다(Austin과 Follows, 1991; Kim 등, 2002; Song과 Shon, 2008; Stohl 등, 1999). 게다가, 대부분 측정지점에서 년도와 관계없이 가을철(특히, 9월과 10월)에 2차 정점(peak)

Table 1. Daytime and nighttime concentrations of 5 criteria air pollutants at 4 air quality monitoring sites on Jeju Island during 2010-2012

[A] Daytime		[B] Nighttime			
Year	Site	PM <sub>10</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	SO <sub>2</sub> (ppb)	NO <sub>2</sub> (ppb)	CO (ppm)
2010	Ido-dong	60.8±37.4/37.1±25.1	1.2±0.6/1.7±1.4	9.9±7.6/6.0±5.9	0.4±0.1/0.4±0.1
	Yeon-dong	49.2±39.4/28.9±23.3	1.8±1.2/2.8±1.7	11.5±7.7/6.6±1.0	0.3±0.1/0.2±0.1
	Donghong-dong	46.6±34.7/30.5±22.7	1.9±1.4/2.0±1.2	6.4±4.9/5.0±3.5	0.3±0.1/0.3±0.1
	Gosan	-	-	-	-
2011	Ido-dong	50.5±62.0/34.7±22.6	2.4±1.7/2.4±1.7	10.8±8.1/1.4±7.3	0.5±0.2/0.2±0.1
	Yeon-dong	63.5±88.9/29.6±23.4	3.2±2.4/2.4±2.1	10.5±7.6/9.0±6.8	0.3±0.1/0.2±0.1
	Donghong-dong	67.3±101.2/29.2±20.1	3.5±2.0/2.2±1.9	6.9±6.4/4.4±3.7	0.5±0.1/0.4±0.1
	Gosan	65.2±68.2/39.5±16.7	2.6±2.0/1.1±0.6	5.0±2.5/3.6±2.4	0.5±0.3/0.3±0.2
2012	Ido-dong	50.4±37.0/20.0±16.8	4.3±3.1/3.1±2.1	12.4±9.7/6.1±5.8	0.5±0.2/0.3±0.1
	Yeon-dong	41.4±30.9/21.8±16.4	2.5±2.1/2.2±1.5	13.3±9.0/8.2±7.0	0.4±0.1/0.3±0.1
	Donghong-dong	41.2±29.2/24.8±17.5	2.7±2.0/3.1±1.5	10.1±6.8/8.0±5.9	0.5±0.1/0.3±0.1
	Gosan	49.2±26.1/27.2±12.4	0.8±0.7/0.4±0.3	3.7±1.7/2.5±1.4	0.3±0.1/0.1±0.1
2010	Ido-dong	73.9±149.3/38.5±26.3	1.1±0.3/1.4±1.0	10.0±8.4/6.1±6.6	0.5±0.1/0.4±0.1
	Yeon-dong	60.2±159.2/29.2±23.7	1.4±0.7/2.4±1.2	11.4±8.3/8.3±7.7	0.3±0.1/0.2±0.1
	Donghong-dong	65.1±197.2/29.2±22.4	1.6±0.9/1.8±1.1	6.6±5.5/5.1±3.5	0.3±0.1/0.3±0.1
	Gosan	-	-	-	-
2011	Ido-dong	54.6±53.1/38.0±24.8	1.9±1.2/2.1±1.2	10.7±9.6/10.9±8.0	0.5±0.2/0.3±0.1
	Yeon-dong	65.0±77.6/33.1±25.9	2.7±1.8/2.0±1.7	10.6±9.4/4.8±8.9	0.3±0.1/0.3±0.1
	Donghong-dong	61.3±85.5/39.7±24.4	3.1±1.7/2.2±1.9	6.6±5.4/4.2±3.6	0.5±0.1/0.4±0.1
	Gosan	65.7±70.5/39.6±16.5	2.7±1.8/1.1±0.4	5.1±2.6/4.0±2.3	0.5±0.3/0.3±0.2
2012	Ido-dong	50.2±35.6/19.9±15.4	3.5±2.3/2.6±1.4	12.6±9.7/6.9±6.2	0.5±0.2/0.3±0.1
	Yeon-dong	40.5±31.5/21.4±14.5	2.0±1.8/1.8±0.9	12.2±10.2/8.1±6.8	0.4±0.1/0.3±0.1
	Donghong-dong	41.5±29.5/24.8±17.9	2.5±1.8/3.1±1.5	9.8±6.1/8.2±6.4	0.5±0.1/0.3±0.1
	Gosan	48.3±24.4/26.6±12.7	0.7±0.7/0.3±0.3	3.7±1.8/2.7±1.4	0.3±0.1/0.1±0.1

Spring/Summer/Fall/Winter <sup>a</sup> Mean±1σ. <sup>b</sup> Not measured.

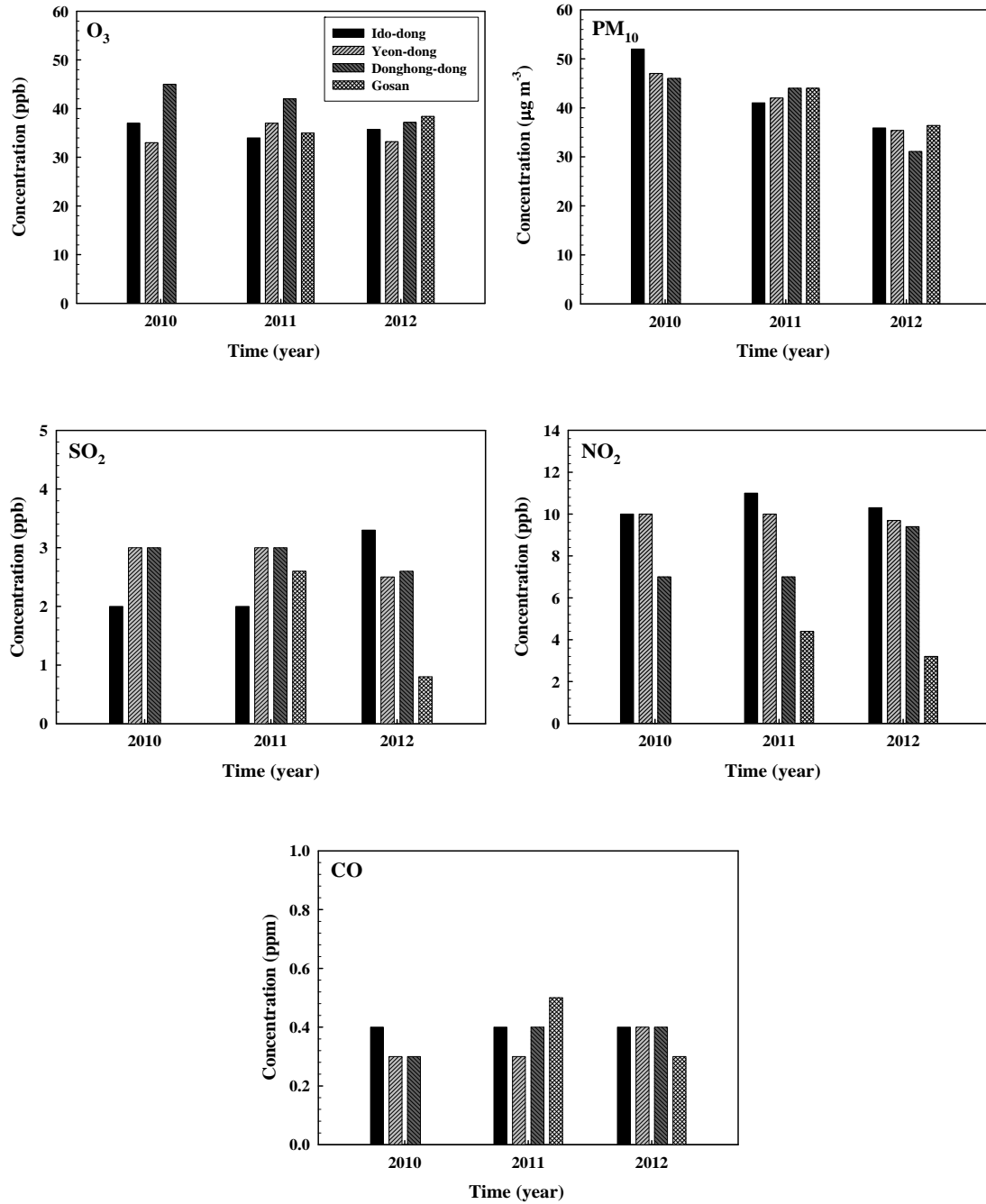


Fig. 2. Annual mean concentrations of air pollutants observed at 4 air quality monitoring sites on Jeju Island during 2010-2012. Air quality data at Gosan site in 2010 was excluded due to the paucity of the available data.

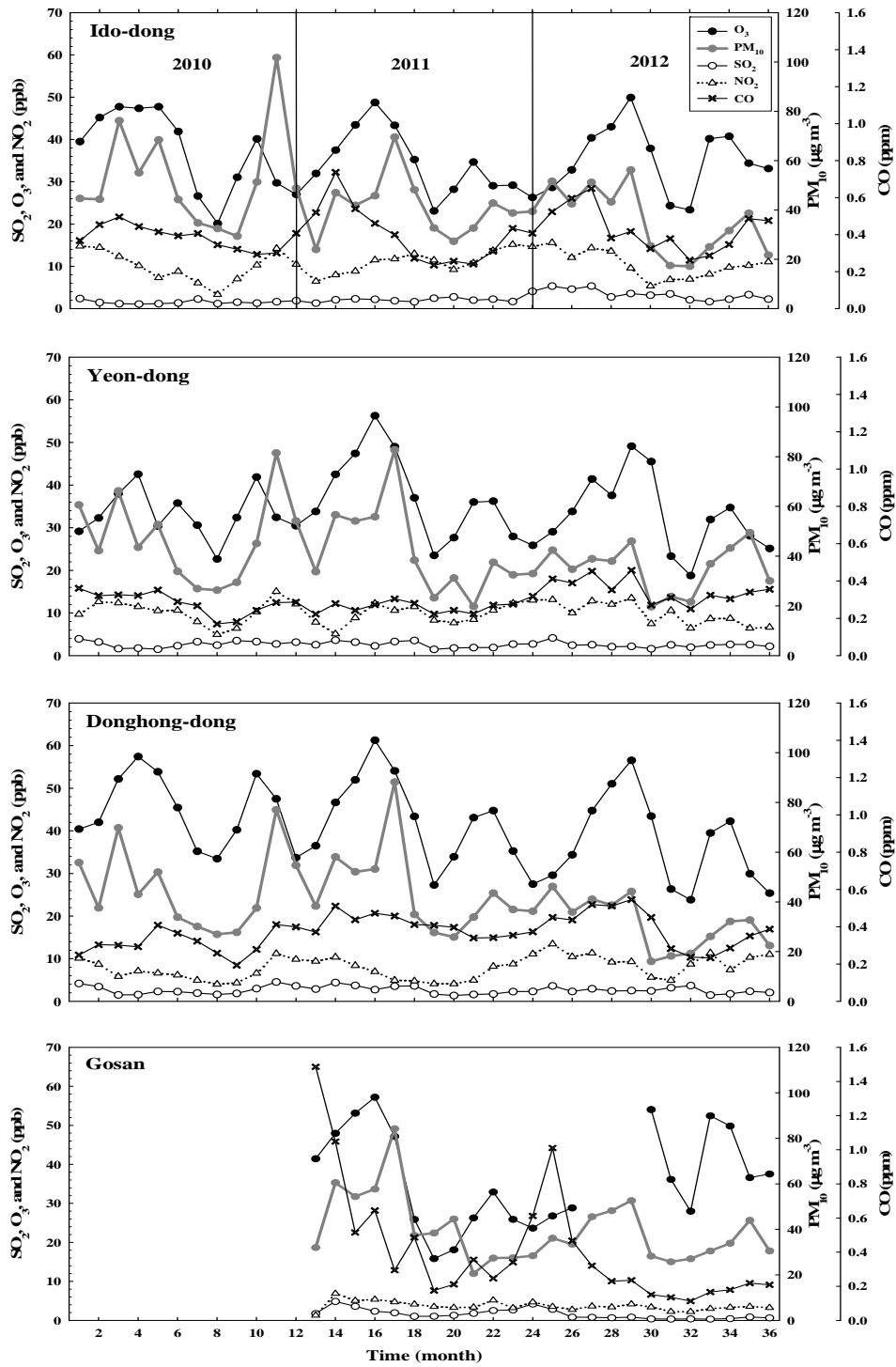


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for monthly mean concentrations of air pollutants.

이 관측되었으며, 차량이 많은 이도동과 연동에 비해 상대적으로 오염원이 적은 동흥동 지점에서 더 높은 평균  $O_3$  농도(최고 62 ppb 정도)가 관측되었다(Fig. 3). 이것은 연변화 패턴과 크게 다르지 않았으며, 그 원인도 유사하게 국지배출 보다는 대기 수송에 의한 영향이 더 큰 것으로 추정된다.

$PM_{10}$ 의 경우는 모든 측정지점에서 주로 봄철에 가장 높은 농도가 나타났는데(Fig. 3), 이것은 중국 발원지에서 유입되는 황사의 영향이 가장 크게 지배적인 것으로 사료된다. 또한 2010년 11월에 상당한  $PM_{10}$  농도가 관측(특히 이도동)되었는데, 이것은 2003년 제주지역 황사 계기관측 이후 가장 강력한 11월 가을 황사(최고 약  $900 \mu g m^{-3}$ ) 영향이 주요 원인인 것으로 사료된다(<http://www.jejusori.net/news/articleView.html?idxno=90881>). 이외에도,  $NO_2$ 는 주로 늦가을부터 겨울철 사이에, CO는 주로 겨울철부터 이른 봄 사이에 상대적으로 다른 계절에 비해 높은 농도를 나타내고 있으며, 특히  $NO_2$ 는 차량이 많은 이도동과 연동이 다른 두 지점(동흥동과 고산)에 비해 약 1.5~3배까지 높게 관측되었다. 한편,  $SO_2$ 는 다른 오염물질에 비해 상대적으로 매우 낮은 농도를 나타내며 대체로 뚜렷한 월변화 및 계절별 특징이 보이지 않았지만, 4지점에서 겨울철(난방 영향)이 다른 계절에 비해 높게 나타났다(약 1.4(연동) ~ 약 3.4배(고산)).

### 3.1.3. 주·야간 대기오염물질 농도 특성

Table 1은 연구기간동안 제주지역(4개 측정지점)에서 측정된 주야간의 대기오염물질 농도 특성을 비교한 것이다. 전반적으로 측정지점에 관계없이 대부분 오염물질의 주야간 농도 수준이 서로 비슷하거나 일부 주간 농도가 야간 농도보다 약간 높게 나타났다. 오염물질별로 상세히 살펴보면, 연구기간동안  $O_3$ 은 대부분 측정지점에서 봄철, 여름철, 가을철에 주간 농도가 야간보다 약간 높게 나타났지만 큰 차이는 아니었다. 이와 달리 겨울철은 대부분 연구기간과 측정지점에서 주간과 야간 농도는 거의 유사하였다. 한편, 2012년 이도동과 연동에서는 오히려 주간의  $O_3$  농도보다 야간 농도가 약간 더 높았다. 이러한 제주지역  $O_3$ 의 주야간 패턴은 일반적인 대도시  $O_3$  농도의 일변화(주간이 야간보다 수배 이상 높음)와는 상이한 것을 알 수 있었다. 이는 제주지

역이 다른 대도시에 비해 NO 농도가 매우 낮기 때문에 야간의  $O_3+NO$  적정(titration)으로 인한  $O_3$  감소가 적게 일어난 것으로 추정된다. 즉, 대상지역 대부분 지점에서의 3년간 평균 NO 농도는 약 3~4 ppb (야간  $\leq 3$  ppb 이하) 정도 관측되는데(그림 제외), 이것은 2005~2006년 부산의 평균 NO 농도 약 6~14 ppb 보다 대략 2~4배 낮은 수치였으며(Song과 Shon, 2008), 2009년 광양만의 평균 NO 농도 약 2~6 ppb 보다 2배 가까이 낮은 수치였다(Shon 등, 2010). 대상지역 주야간  $O_3$  농도가 서로 비슷하게 나타나는 또 다른 일부 원인은 다른 오염지역으로부터  $O_3$  자체가 수평 수송되거나 상층으로부터 하향 수송되어 야간  $O_3$  농도가 증가한 것으로 추정할 수 있다. 그러나  $O_3$  생성은 기상조건과 함께 주요 전구물질인  $NO_x$ 와 VOC의 상대적인 배출 비율이 매우 중요하므로(Kleinman 등, 1997; Sillman, 1999), 향후 VOC 측정 자료가 확보된다면 보다 정확한 원인을 찾을 수 있을 것으로 사료된다. 한편,  $SO_2$ 는  $O_3$ 의 계절별 주야간 농도 패턴과 유사하게 대부분 지점에서 주간 농도가 야간 농도보다 약간 높게 또는 거의 비슷한 수준이었다.

$PM_{10}$ 의 계절별 농도 패턴은  $O_3$  및  $SO_2$ 와 약간 다른 양상을 보였다(Table 1). 특히 봄철에는 대부분 측정지점에서 주간  $PM_{10}$  농도보다 야간에 다소 높게 관측되었으며, 이러한 특징은 다른 년도에 비해 2010년에 가장 뚜렷하였다. 일반적으로, 도시의 전형적인  $PM_{10}$  일변화는 낮 12시를 전·후로 최고 농도가 나타나는 패턴이다(Jeon, 2012; Jung 등, 2013). 그러나 연구지역인 제주도는 다소 다른 결과가 나타났는데 이것은 일부 바람에 의한 수송(예, 황사수송)과 야간 잔류층으로부터 연직이류 등의 기상조건에 의한 결과라고 추정된다. 야간에 강한 풍속조건과 관련하여 대기하층의 안정층이 파괴될 수 있는데, 이때 상·하층의 공기가 혼합하게 되어 결국 위에 잔류하는 오염물질이 지상부근의 농도 상승에 기여하게 되는 것이다(Corsmeier 등, 1997; Reitebuch 등, 2000). 또한 주간에는 지표면 가열로 인한 대기혼합고의 성장이 오염물질 확산을 용이하게 하므로, 상대적으로 대기가 안정한 야간에 비해 주간 농도가 더 낮은 결과를 초래한 것으로 판단된다. 여름철의 경우는 측정지점에 따라 서로 다른 양상을 보였다. 이도동과 연동은 주로 야간에 농도가 약간 더 높게 나타난 반면, 동흥동



과 고산은 주간에는 좀 더 높은 경향을 보였다. 가을철과 겨울철은 대부분 측정지점에서 주간의  $PM_{10}$  농도가 야간보다 높게 나타났으며, 특히 2010년에 2011~2012년에 비해 그 차이가 뚜렷하였다(Table 1). 2010년 가을철 주간  $PM_{10}$  농도가 높은 것은 앞서 언급한 바와 같이 심한 가을(11월) 황사에 기인한 것으로 사료된다. 한편,  $NO_2$ 와  $CO$ 의 경우는 전반적으로 계절에 관계없이 대부분 측정지점에서 주야간 농도차이가 뚜렷하지 않았다.

### 3.2. 제주지역 대기오염물질 농도와 기상조건과의 관계

3.2.1. 대기오염물질 농도와 기상요소와의 상관관계  
연구기간동안(2010~2012년) 제주지역의 대기환경 변화와 관련된 기상 특성을 면밀하게 살펴보기 위해 대기오염물질 농도와 기상요소와의 상관성(Table 2), 기온과 풍속 구간별 대기오염물질 농도의 초과빈도(Fig. 4와 5), 풍계 패턴에 따른 대기오염물질 농도의 공간 분포(Fig. 6)를 분석하였다. 먼저 Table 2는 SPSS 통계프로그램을 사용하여 얻은 제주지역 계절별 일 평균 기상요소와 일 평균 대기오염물질( $O_3$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ ) 농도와의 상관관계를 나타낸다. 기상요소는 2장에서 설명한 바와 같이 대기오염물질 측정지점에서 가장 가까운 4곳의 기상관측지점을 선정하여 지점별로 공통적으로 관측되고 있는 항복, 즉, 기온, 풍속, 강수의 일 평균값을 이용하였다. 전반적으로, 대부분 오염물질의 농도에 대해 기온은 4 지점 모두 여름철 또는 가을철에 다소 강한 음의 상관을 보인 반면, 풍속은 지점에 따라 다양한 상관관계가 나타났다.

보다 면밀한 상관관계 분석을 위하여 대기오염물질별로 구분하여 기상요소와의 관계를 살펴보았다.  $O_3$ 의 경우, 봄철에 기온과의 상관성은 이도동과 동홍동은 양의 상관, 연동과 고산은 음의 상관을 보였으나 대부분 통계적으로 유의하지 않게 나타났다(고산만 통계적으로 유의). 여름철은 대부분 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 관

련성을 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, 봄철과 겨울철은 이도동과 연동 지점에서 주로 기온과 양의 상관을 나타내며 통계적으로 유의한 반면, 여름철과 가을철은 모든 지점에서 기온의 음의 상관을 나타내고 있다(모두 통계적으로 유의함, Table 2).  $PM_{10}$ 과 풍속에 있어서는 여름철에 이도동과 연동 지점에서의 음의 상관을 제외하고는 대부분 약한 양의 상관이 나타났다. 이것은  $O_3$ 과 풍속과의 관계처럼 대기 중 수송에 의해 일부 영향을 받을 수 있겠지만 여름철 두 지점에서처럼 풍속과의 음의 상관이 나타난 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).  $SO_2$  농도는 계절에 관계없이 대부분 지점에서 기온 및 풍속과 뚜렷한 관련성이 없었으며, 대부분 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타났다.  $NO_2$ 의 경우, 대부분 지점에서 여름철과 가을철에 강한 음의 상관을 보였고 봄철과 겨울철에 주로 양의 상관이 나타났다. 이것은  $O_3$ 과 기온과의 상관관계 특징과 유사한 반면,  $NO_2$ 와 풍속과의 관계는  $O_3$ 과 달리 대부분 음의 상관을 보였다(특히 이도동과 연동에서). 즉 약한 풍속일 때 대기 중 확산을 저지하여 국지적으로 배출된 오염물질이 일부  $NO_2$  농도 증가의 원인으로 추정할 수 있는데, 이것은 최근 이동오염원(예, 차량)에 의해 제주지역의 대기질( $NO_2$ )이 일부 영향을 받고 있다는 선행연구(Lee 등, 2013)의 결과와 유사하였다.  $CO$ 의 경우도  $NO_2$ 와 유사하게 계절과 상관없이 대부분 지점에서 기온 및 풍속과 음의 상관이 주로 나타났다. 이 외에도 강수의 경우는 5가지 오염물질에 대해 뚜렷한 역 상관을 보이고 있는데, 이것은 일반적으로 대기 중 세정효과(wash-out)가 주요 원인 중 하나인 것으로 볼 수 있다.

#### 3.2.2. 기상조건별 $O_3$ 과 $PM_{10}$ 농도의 초과빈도

Fig. 4와 5는 대상지역 4 지점에서 관측한 기온과 풍

Table 2. Correlation between daily mean pollutant concentrations and meteorological variables in the study area during 2010-2012

Site	Meteorological variables <sup>a</sup>	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO
Ido-dong	Air temperature (°C), daily mean	0.097/-0.651 <sup>**</sup> /0.138 <sup>*</sup> /-0.109	0.121 <sup>*</sup> /-0.374 <sup>**</sup> /-0.201 <sup>**</sup> /0.277 <sup>**</sup>	-0.046/0.068/-0.135 <sup>*</sup> /0.068	-0.045/-0.359 <sup>**</sup> /-0.314 <sup>**</sup> /0.418 <sup>**</sup>	-0.357 <sup>**</sup> /-0.205 <sup>**</sup> /-0.275 <sup>**</sup> /0.180 <sup>**</sup>
	Wind speed (m s <sup>-1</sup> ), daily mean	0.173 <sup>**</sup> /0.159 <sup>**</sup> /0.023/0.152 <sup>*</sup>	0.059/-0.169 <sup>**</sup> /0.017/-0.263 <sup>**</sup>	0.001/-0.133 <sup>*</sup> /0.011/-0.102	-0.499 <sup>**</sup> /-0.462 <sup>**</sup> /-0.427 <sup>**</sup> /-0.588 <sup>**</sup>	-0.016/-0.250 <sup>**</sup> /-0.125 <sup>*</sup> /-0.331 <sup>**</sup>
	Precipitation (mm), daily total	-0.022/-0.113/-0.045/-0.064	-0.145 <sup>*</sup> /-0.177 <sup>**</sup> /-0.109/-0.168 <sup>**</sup>	-0.102/-0.044/-0.115/-0.042	-0.066/-0.097/-0.167 <sup>**</sup> /0.025	-0.093/-0.099/-0.061/-0.023
Yeon-dong	Air temperature (°C), daily mean	-0.053/-0.557 <sup>**</sup> /0.106/-0.034	0.080/-0.148 <sup>*</sup> /-0.191 <sup>**</sup> /0.147 <sup>*</sup>	0.016/-0.094/0.132 <sup>*</sup> /0.056	0.161 <sup>**</sup> /-0.307 <sup>**</sup> /-0.243 <sup>**</sup> /0.382 <sup>**</sup>	0.199 <sup>**</sup> /-0.322 <sup>**</sup> /-0.244 <sup>**</sup> /0.179 <sup>**</sup>
	Wind speed (m s <sup>-1</sup> ), daily mean	0.085/0.041/-0.002/0.205 <sup>**</sup>	0.027/-0.151 <sup>*</sup> /-0.104/-0.175 <sup>**</sup>	-0.121 <sup>*</sup> /-0.221 <sup>**</sup> /-0.092/-0.213 <sup>**</sup>	-0.543 <sup>**</sup> /-0.451 <sup>**</sup> /-0.374 <sup>**</sup> /-0.316 <sup>**</sup>	-0.312 <sup>**</sup> /-0.366 <sup>**</sup> /-0.371 <sup>**</sup> /-0.246 <sup>**</sup>
	Precipitation (mm), daily total	-0.166 <sup>**</sup> /-0.168 <sup>**</sup> /-0.109/-0.118	-0.143 <sup>*</sup> /-0.207 <sup>**</sup> /-0.080/-0.233 <sup>**</sup>	-0.183 <sup>**</sup> /-0.132 <sup>*</sup> /-0.071/-0.178 <sup>**</sup>	-0.086/-0.198 <sup>**</sup> /-0.171 <sup>**</sup> /0.045	-0.063/-0.156 <sup>**</sup> /-0.059/0.001
Donghong-dong	Air temperature (°C), daily mean	0.107/-0.470 <sup>**</sup> /0.016/-0.016	0.066/-0.159 <sup>**</sup> /-0.184 <sup>**</sup> /0.020	0.020/-0.273 <sup>**</sup> /-0.485 <sup>**</sup> /-0.015	0.032/-0.143 <sup>*</sup> /-0.383 <sup>**</sup> /0.327 <sup>**</sup>	0.397 <sup>**</sup> /-0.393 <sup>**</sup> /-0.306 <sup>**</sup> /0.416 <sup>**</sup>
	Wind speed (m s <sup>-1</sup> ), daily mean	0.009/-0.034/-0.095/0.063	0.023/-0.074/-0.064/-0.127 <sup>*</sup>	0.285 <sup>**</sup> /-0.087/-0.167 <sup>**</sup> /-0.107	-0.173 <sup>**</sup> /-0.315 <sup>**</sup> /-0.309 <sup>**</sup> /-0.271 <sup>**</sup>	0.172 <sup>**</sup> /0.093/0.028/0.049
	Precipitation (mm), daily total	-0.182 <sup>**</sup> /-0.193 <sup>**</sup> /-0.150 <sup>*</sup> /-0.014	-0.115/-0.190 <sup>**</sup> /-0.098/-0.198 <sup>**</sup>	-0.144 <sup>*</sup> /-0.093/-0.058/-0.134 <sup>*</sup>	-0.038/0.055/-0.131 <sup>*</sup> /-0.067	0.080/-0.167 <sup>**</sup> /-0.033/0.010
Gosan	Air temperature (°C), daily mean	-0.212 <sup>**</sup> /-0.329 <sup>**</sup> /0.095/-0.032	0.113/-0.201 <sup>**</sup> /-0.280 <sup>**</sup> /0.098	-0.322 <sup>**</sup> /-0.083/-0.046/0.127	-0.040/-0.345 <sup>**</sup> /0.023/0.590 <sup>**</sup>	-0.370 <sup>**</sup> /-0.681 <sup>**</sup> /0.123/-0.280 <sup>**</sup>
	Wind speed (m s <sup>-1</sup> ), daily mean	0.104/-0.194 <sup>**</sup> /-0.109/0.017	0.044/-0.113/0.180 <sup>*</sup> /0.010	0.127/-0.168 <sup>*</sup> /-0.052/0.067	-0.246 <sup>**</sup> /-0.401 <sup>**</sup> /-0.330 <sup>**</sup> /-0.092	0.063/-0.087/-0.046/0.347 <sup>**</sup>
	Precipitation (mm), daily total	-0.152 <sup>*</sup> /-0.008/-0.085/-0.026	-0.171 <sup>*</sup> /-0.175 <sup>*</sup> /-0.101/-0.151 <sup>*</sup>	-0.244 <sup>**</sup> /-0.182 <sup>*</sup> /-0.060/-0.198 <sup>**</sup>	-0.191 <sup>**</sup> /-0.105/-0.031/0.079	-0.119/0.042/-0.025/-0.225 <sup>**</sup>

Spring/Summer/Fall/Winter

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

<sup>a</sup> The meteorological variables were obtained from the meteorological monitoring sites located less than approximately 2 km (Yeon-dong, Ido-dong, and Gosan) and 10 km (Donghong-dong) away from the air pollutant sites, respectively.

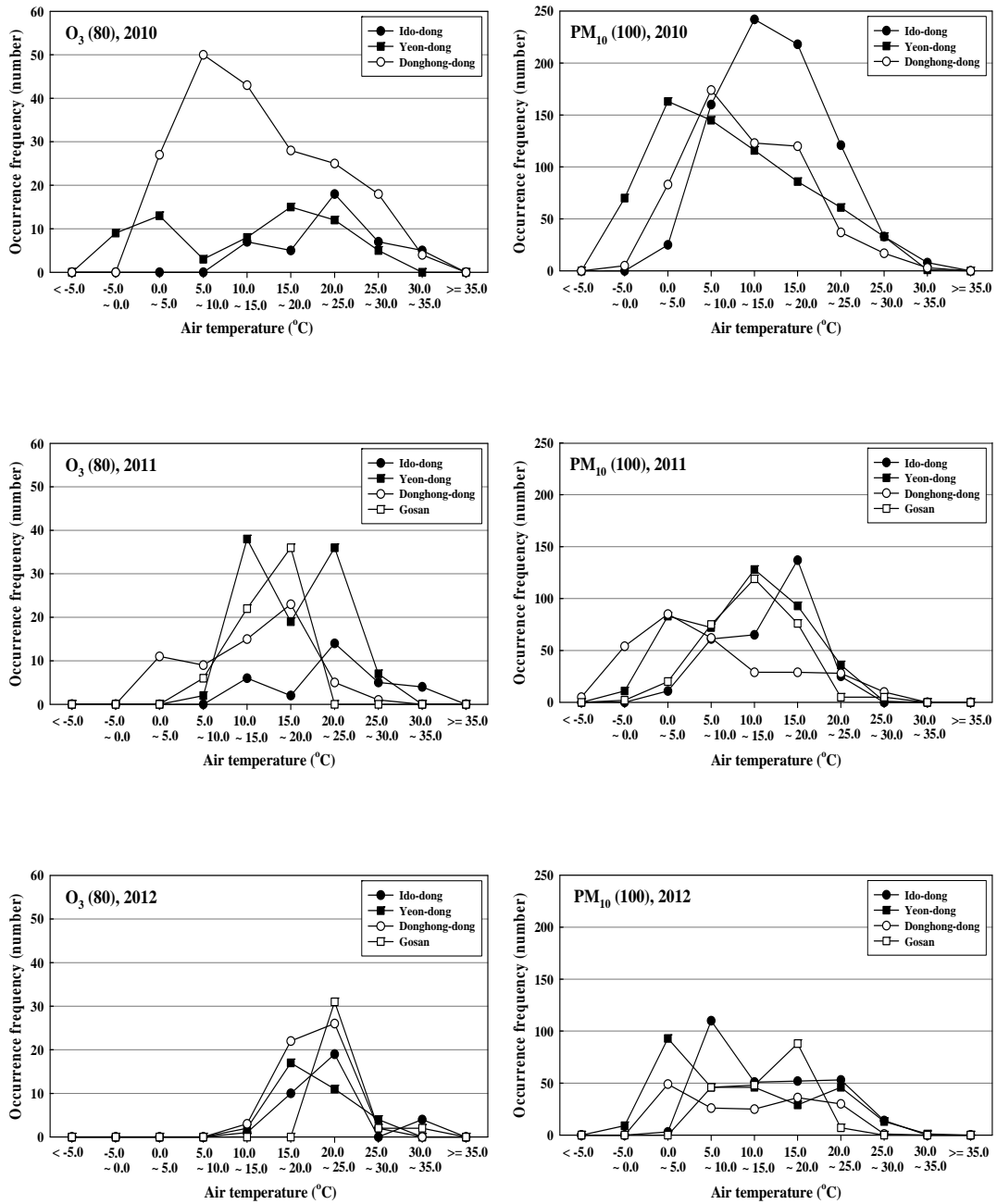


Fig. 4. Relationship between the occurrence frequency of O<sub>3</sub> (≥80 ppb) and PM<sub>10</sub> (≥100 µg m<sup>-3</sup>) and air temperature at 4 sites on Jeju Island during 2010-2012. O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub> concentration data at Gosan site in 2010 was excluded due to the paucity of the available data.

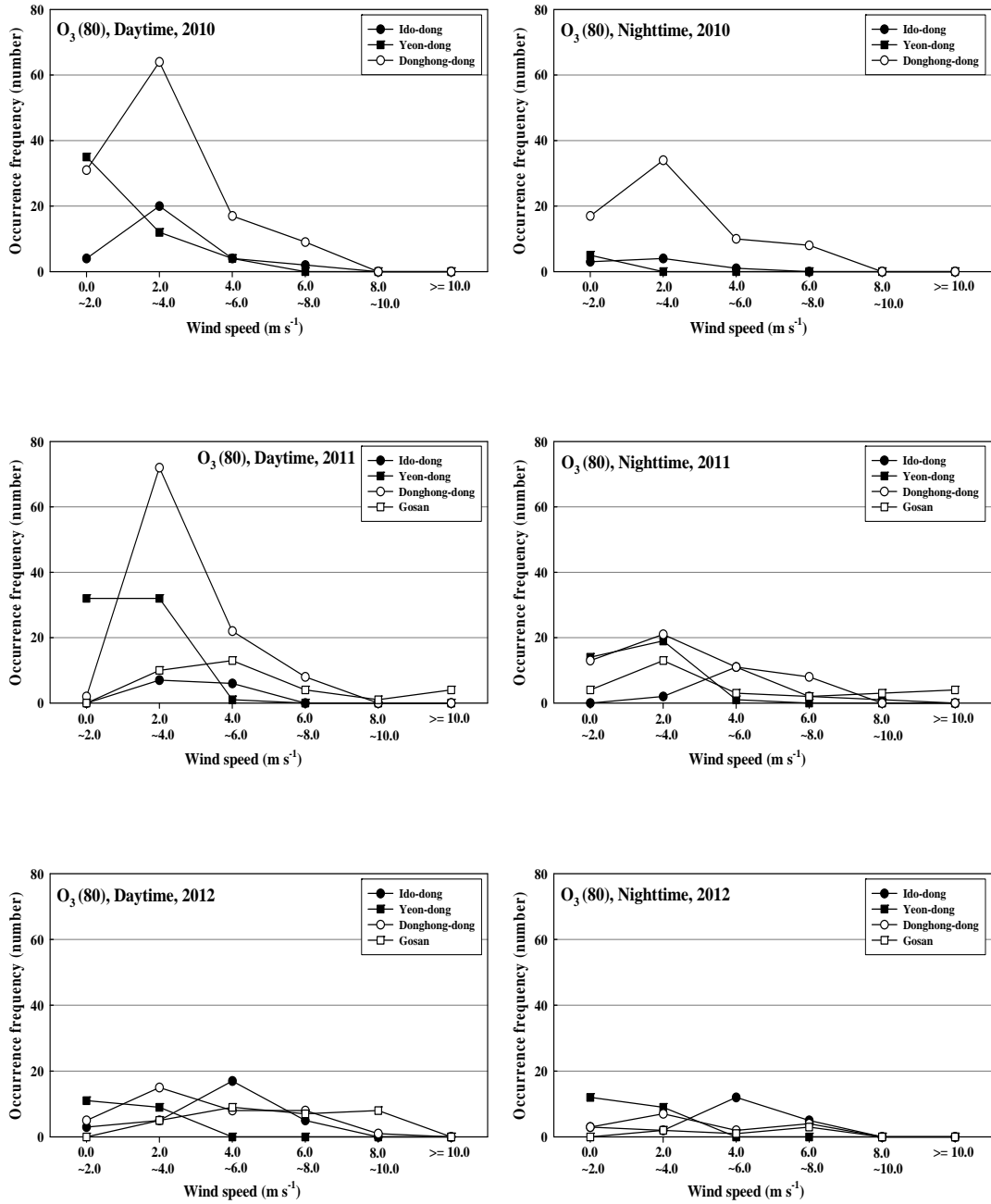


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for surface wind speed.

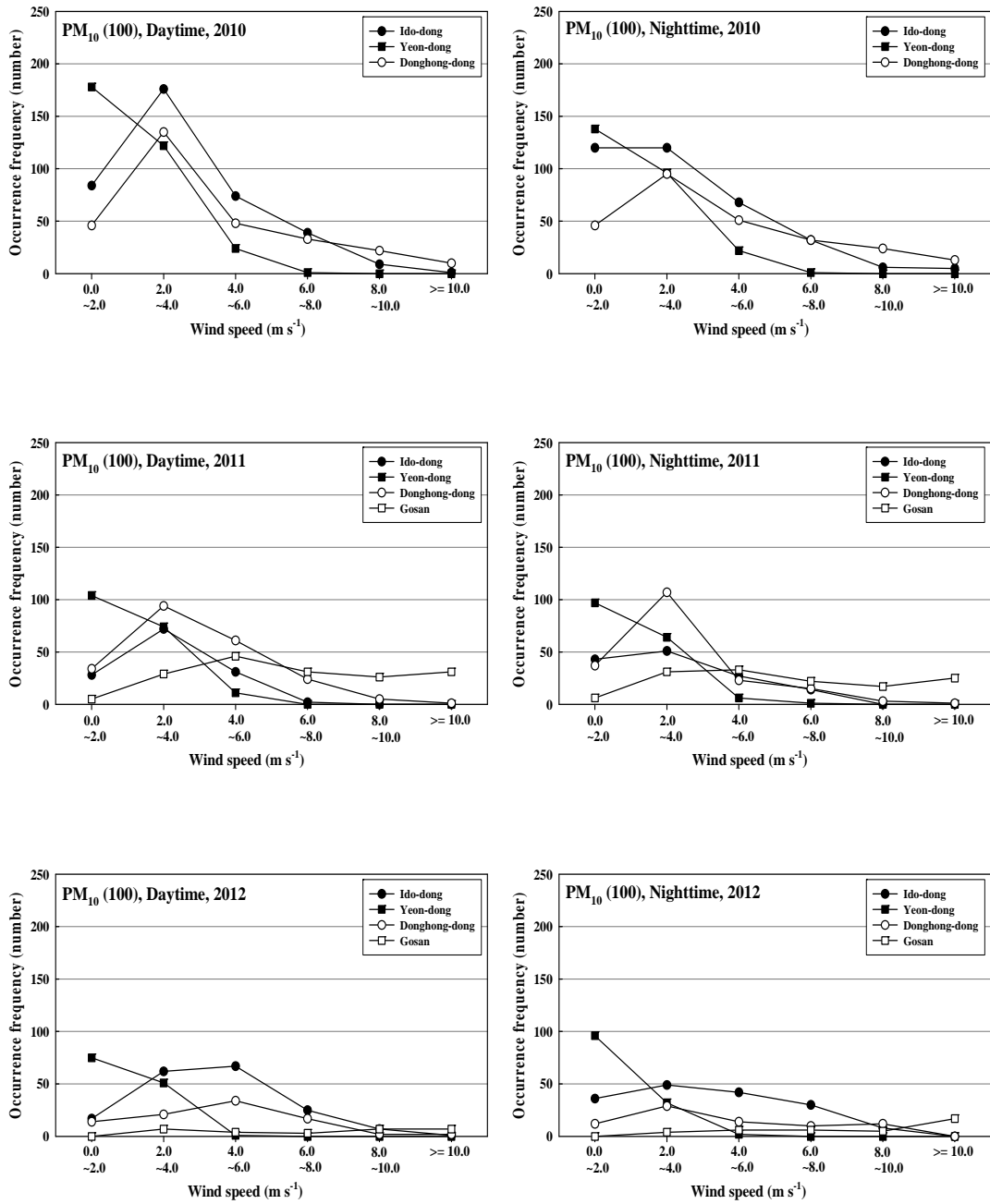


Fig. 5. Continued.

속 구간별  $O_3$ 과  $PM_{10}$  농도의 초과빈도( $O_3$ 은 1시간 평균 80 ppb 초과,  $PM_{10}$ 은 1시간 평균  $100 \mu g m^{-3}$  초과)를 각각 나타낸다. 2장에서 언급하였듯이, 제주도는 5가지 환경기준 오염물질 중  $SO_2$ ,  $NO_2$ , CO는 국가 환경기준치를 전혀 초과하지 않으므로 초과빈도 분석에서 제외하였다. 전반적으로 기온과 풍속 구간에 따라 두 오염물질 농도의 초과빈도는 다양한 변화를 나타냈다. 기온 구간에 따른  $O_3$ 의 초과빈도를 보면(Fig. 4), 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 동홍동과 고산은 15.0~20.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타났다. 2012년은 다른 두 년도와 비교하여 다소 상이한 패턴을 보였다. 이도동, 동홍동, 고산은 모두 20.0~25.0°C에서 그리고 연동은 15.0~20.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타났다. 즉 연구기간동안 제주지역의  $O_3$  변화는 광화학반응이 가장 활발한 여름철보다는 오히려 봄철에 높은 농도를 나타낸 Fig. 3의 결과와 일치하는 것을 알 수 있으며, 이는 대상지역 국지배출의 영향보다는 다른 오염지역으로부터 대기 중 수송 및 확산에 의한 영향이 더 크다는 것을 시사한다.

$PM_{10}$ 의 경우, 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 연동과 고산은 10.0~15.0°C에서 동홍동은 0.0~5.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타났다. 2012년의 이도동과 고산은 각각 5.0~10.0°C와 15.0~20.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타난 반면, 연동과 동홍동은 0.0~5.0°C에서 가장 높은 빈도가 나타났다. 즉 제주지역  $PM_{10}$ 의 높은 초과빈도는 주로 봄철과 가을철의 기온 구간에서 뚜렷하게 나타났으며, 이것은 대상지역 황사현상에 의한 기여가 가장 큰 것으로 판단된다. 이러한  $PM_{10}$  농도의 초과빈도 특성은 Fig. 3의 월별 및 계절별 변화에서도 비슷한 특징이 나타났음을 확인할 수 있었다.

풍속 구간에 따른  $O_3$ 과  $PM_{10}$ 의 초과빈도 변화 특성은 기온 구간에 따른 두 오염물질의 초과빈도 특성과 다른 양상을 보였다(Fig. 5). 그리고 보다 면밀한 분석을

위하여 하루를 주야간으로 나누어 농도 초과빈도를 살펴 보았으며, 일출과 일몰 시간을 고려하여 계절별로 다음과 같이 주야간 시간대를 구분하였다. 봄철과 가을철의 주간은 06~18시 야간은 19~05시로, 여름철의 주간은 05~19시 야간은 20~04시로, 겨울철의 주간은 08~17시 야간은 18~07시로 나누었다. 전반적으로 두 오염물질 모두 주간보다는 조금 낮은 빈도이지만 야간에도 상당히 높은 농도 초과빈도를 보였으며, 특히 야간에 광화학 생성인 없는  $O_3$ 의 경우 최고 약 40회(2010년)에 이르는 빈도를 나타냈다. 이것은 주간과 거의 유사하게 야간에도 높은  $O_3$  농도가 관측되었다는 Table 1의 해석과 일치함을 나타낸다. 2010년의 경우, 대부분 관측지점(이도동과 동홍동)에서  $2.0\sim 4.0 m s^{-1}$ 와  $4.0\sim 6.0 m s^{-1}$  풍속 구간에서 두 오염물질 모두 높은 초과빈도를 보인 반면, 연동 지점은  $2.0 m s^{-1}$  미만의 저풍속에서 높은 초과빈도가 나타났다( $O_3$ 은 주간,  $PM_{10}$ 은 주야간 모두). 연동에서의 이러한 특징은 다른 지점에 비해 많은 건물과 차량으로 인해 배출된 국지오염의 영향이 일부 기여한 것으로 추정할 수 있다. 2011~2012년 동안 두 오염물질의 초과빈도 변화 특성은 2010년의 특성과 일부 유사하게 나타났다. 그러나 대부분 지점에서 2010년 보다는 조금 강한 풍속 구간에서 두 오염물질의 높은 초과빈도가 나타났다. 예를 들어,  $O_3$ 은 동홍동에서  $PM_{10}$ 은 이도동과 동홍동 두 지점에서  $4.0\sim 6.0 m s^{-1}$ 와  $6.0\sim 8.0 m s^{-1}$  풍속 구간에 다소 높은 빈도가 나타났으며, 고산 지점은  $8.0 m s^{-1}$  이상의 풍속 구간에서도 상대적으로 높은 초과빈도(특히,  $PM_{10}$ )를 보였다. 즉 풍속 구간과 오염물질 초과빈도와의 관계를 보면, 연동을 제외한 대부분 관측 지점에서 다소 강한 바람을 따라 수송(외부 유입)되어 농도가 증가한 것으로 추정된다.

### 3.2.3. 풍계 패턴에 따른 $O_3$ 과 $PM_{10}$ 농도의 공간 분포

제주지역 대기환경 변화에 영향을 주는 기상조건을 보다 면밀하게 살펴보기 위하여 연구기간동안(2010~2012년) 대상지역 풍계 패턴에 따른 대기오염물질( $O_3$ 과  $PM_{10}$ 을 중심으로) 농도의 공간 분포를 분석하였다(Fig. 6). 먼저 제주도의 북쪽에 위치하고 주거지역인 이도동 지점을 보면 4계절 모두 북/북동풍 계열이 주풍이지만, 매우 낮은 빈도의 바람이 북서쪽(예, 중국)에서 불

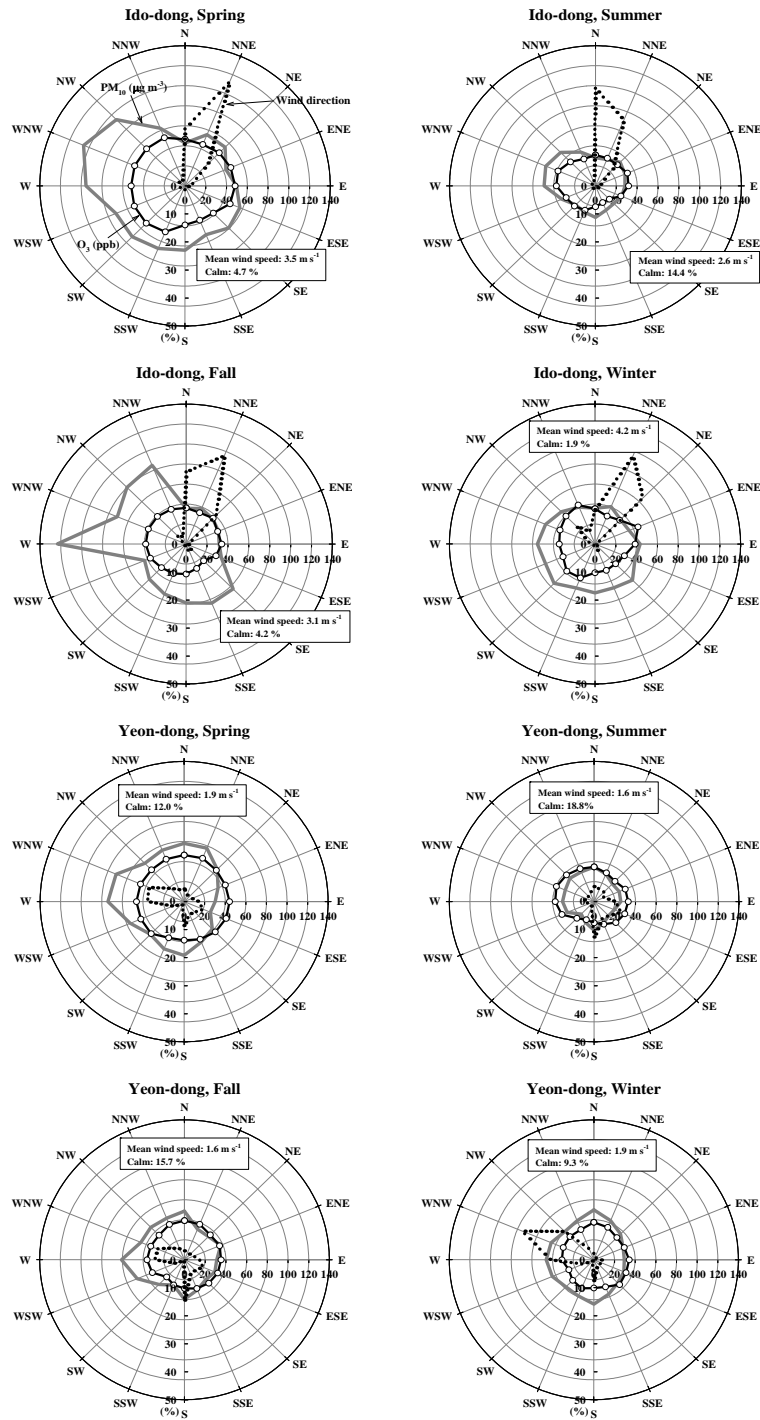


Fig. 6. Comparison of air pollutant concentrations (O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub>) for each wind rose pattern at 4 sites on Jeju Island during 2010 through 2012.

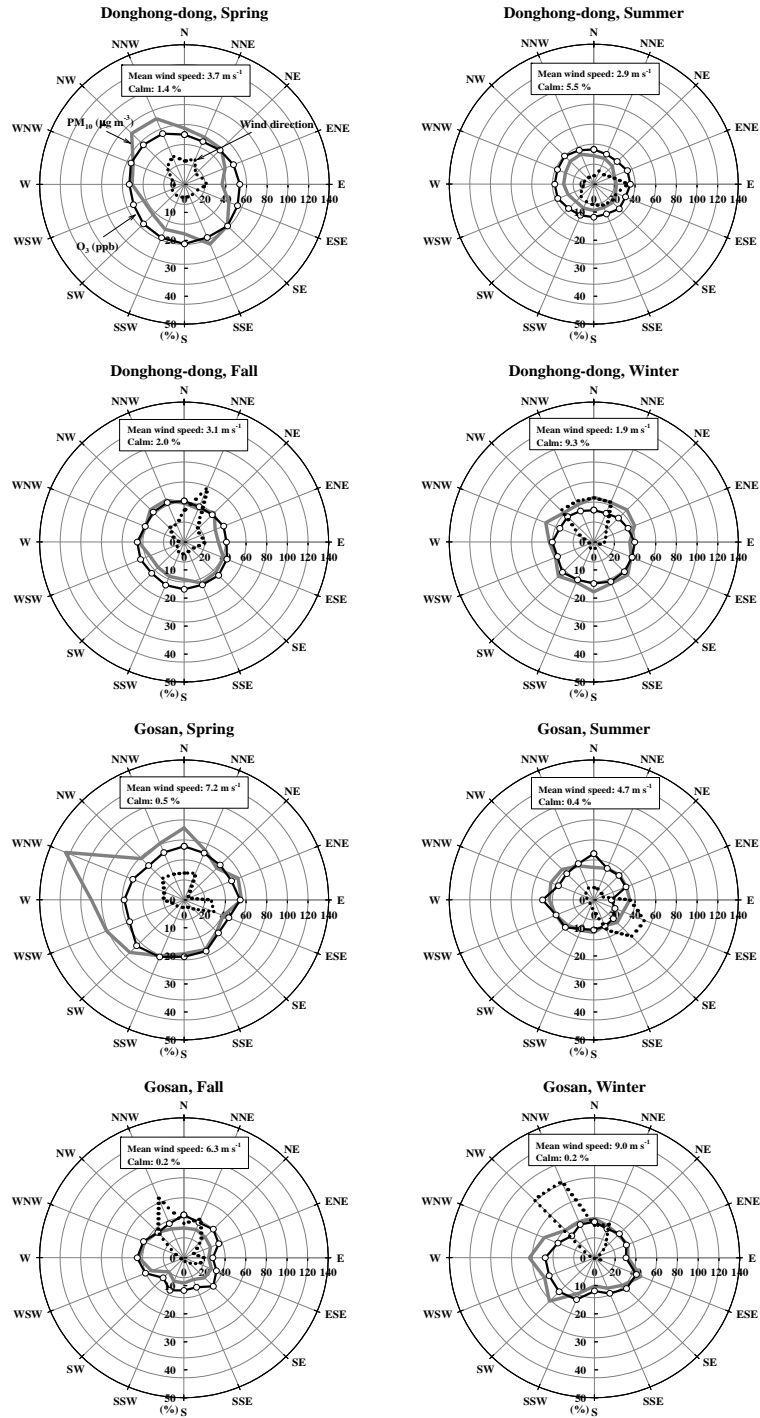


Fig. 6. Continued.



어 올 때 상대적으로 훨씬 높은 평균  $O_3$  (봄철에 최고 약 60 ppb) 및  $PM_{10}$  농도(가을철에 최고 약  $120 \mu g m^{-3}$ )가 관측되었다. 연동 지점의 경우, 4계절 모두 평균 풍속이  $2 m s^{-1}$  이하로 저풍속이었으며, 여름철을 제외하고는 대부분 서풍계열의 주풍이 특징적이었다. 연동 지점의 대부분 계절은 풍계에 따라 두 오염물질의 농도변화가 뚜렷하지 않았지만, 봄철과 가을철의  $PM_{10}$  농도는 서풍계열의 바람이 불 때 상대적으로 높게 나타났다.

제주도의 남쪽에 위치하고 있는 동홍동 지점은 봄철과 겨울철에 북서풍계열이 주풍으로 나타났으며 여름철과 가을철은 북동 및 동풍계열이 주풍으로 나타났다. 이 지점에서 봄철의 경우 북서풍계열의 주풍이 불어 올 때 다소 높은  $PM_{10}$  (약  $80 \mu g m^{-3}$ ) 및  $O_3$  농도(약 60 ppb)가 나타났으며, 여름철에는 매우 낮은 빈도이지만 북서풍 불 때 다른 풍계와 비교하여 상대적으로 높은  $O_3$  농도(약 40 ppb)가 나타난 것으로 관측되었다. 반면 다른 계절의 경우는 풍계에 따라 두 오염물질의 농도변화가 크게 관련이 없는 것으로 사료된다. 한편 제주도의 서쪽 해안가에 위치하고 있는 배경지점인 고산은 여름철(남동풍계열)을 제외하고는 모두 서쪽 또는 북서쪽계열이 주풍으로 관측되었다. 이 지점에서는 대부분 계절에서 서풍 또는 북서풍이 불어 올 때 두 오염물질의 농도가 다소 높게 나타났다. 그러나 여름철에는 낮은 빈도지만 서풍계열의 바람이 불 때 다소 높은  $O_3$ 과  $PM_{10}$  농도, 그리고 북풍계열의 바람이 불 때 상대적으로 높은  $O_3$  농도가 관측되었다. 일반적으로 도시 및 지역 규모에서 대기오염물질 농도의 분포 특성은 대상지역의 배출환경, 지리·지형적 특성, 그리고 기상조건에 따라 크게 영향을 받는다(Mayer, 1999). 따라서 Fig. 5와 6에서와 같이 단순히 풍속 구간별 또는 풍계 패턴만으로 대기오염물질의 농도 변화를 설명하기는 어려우며, 또한 대상지역의 부족한 측정망으로 인해 좀 더 정확하고 객관적인 해석에 많은 한계점이 있는 것으로 사료된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 3년(2010~2012년) 동안 제주지역 대기환경 변화와 관련된 기상특성을 분석하기 위하여 5가지 대기환경기준 오염물질( $O_3$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ ) 농도의 시·공간적(연변화, 월변화, 주야간) 분포

및 기상조건(기온, 풍향, 풍속 등)에 따른 특성을 살펴본다. 기상조건에 대한 상세 특성은 기상요소와 오염물질 농도와와의 상관성, 기온 및 풍속 구간별 오염물질 농도의 초과빈도, 풍계 패턴에 따른 오염물질 농도의 공간 분포 등을 통해 면밀하게 분석되었다.

전반적으로, 제주지역은 5가지 대기오염물질 중  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ 는 국가 환경기준치를 전혀 초과하지 않는 반면,  $O_3$ 과  $PM_{10}$ 은 상대적으로 높은 농도수준과 함께 국가 환경기준치를 초과하는 빈도가 다소 높은 경향이 있었다.  $O_3$ 과  $PM_{10}$ 에 대하여, 연구기간 중 2010년과 2011년이 2012년과 비교하여 두 오염물질 모두 다소 높은 농도가 관측되었으며, 대부분 다른 계절에 비해 봄철에 가장 높고 그 다음으로 가을철 순이었다. 그리고  $O_3$ 은 이도동과 연동에 비해 상대적으로 오염원이 적은 서귀포 동홍동 지점에서 더 높은 농도가 관측된 반면,  $PM_{10}$ 은 대부분 지점(2010년 이도동 제외)에서 비교적 골고루 분포(대부분 지점 황사수송에 의해)하는 것으로 나타났다. 이외에도, 대부분 지점에서 오염물질의 주간 농도가 야간과 비슷하거나 약간 높게(또는 낮게) 나타났으며 큰 차이는 아니었다. 특히  $O_3$ 은 다른 대도시(주간이 야간보다 수배 이상 높음)와 달리 야간 농도가 주간과 거의 비슷한 수준으로 높게 나타났다. 이는 제주지역의 낮은  $NO$  농도로 인해 야간  $O_3$  감소( $O_3+NO$  titration에 의한)가 매우 적었으며, 아울러 대기 중 수송(수평 또는 연직)에 의한 농도 상승이 주요 원인인 것으로 사료된다. 이러한 시·공간적인 대기질(특히  $O_3$ 과  $PM_{10}$ ) 변화의 주요 원인은 기상요소와의 상관관계(기온에 대해 봄철 양의 상관과 여름철 음의 상관, 풍속에 대해 양의 상관), 기온 및 풍속 구간별 오염물질 농도의 초과빈도(봄철 또는 가을철 기온구간에서 또한 대부분 다소 강풍에서 높은 초과빈도), 그리고 풍계 패턴에 따른 오염물질 농도의 공간 분포 특성(대부분 서/북서풍 계열에서 높은 농도수준)에서도 뚜렷하게 나타났다. 전체적으로 볼 때, 제주지역 대기환경(대기질) 변화는 국지적 오염물질 배출에 의한 영향보다는 대기 중 수평 또는 연직 수송에 의한 영향이 더 크게 작용하는 것으로 추정할 수 있다.

본 연구는 제주지역 대기환경에 영향을 주는 기상특성 분석에 관한 기초연구이며, 대상지역의 4지점에서 관측한 기상요소 및 대기오염물질 농도 자료를 이용하여 최근(2010~2012년) 지역 대기환경 변화를 살펴보는

데 의의를 두고 있다. 그러나 매우 부족한 지상 및 연직 관측(특히 혼합고)으로 인해 보다 정확한 해석을 하기에는 여러 가지 한계점이 있으므로, 향후 보다 면밀하고 입체적인 분석을 위해 다양한 관측망의 확충은 물론 대상지역의 특징적인 대기오염 사례를 중심으로 그 지역의 지리·지형적 특성과 기상 및 화학작용이 모두 고려된 수치모델링 연구가 필요하다고 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2014학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- Austin J. F., Follows M. J., 1991, The ozone record at Payerne: an assessment of the cross-tropopause flux, *Atmos. Environ.*, 25, 1873-1880.
- 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.
- Cheng, W. L., 2002, Ozone distribution in coastal central Taiwan under sea-breeze conditions, *Atmos. Environ.*, 36, 3445-3459.
- Corsmeier, U., Kalthoff, N., Kolle, O., Kotzian, M., Fiedler, F., 1997, Ozone concentration jump in the stable nocturnal boundary layer during a LLJ event, *Atmos. Environ.*, 31, 1977-1989.
- 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.
- Ghim, Y. S., 2000, Trends and factors of ozone concentration variations in Korea, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 16, 607-623.
- Jeon, B. I., 2012, Meteorological characteristics of the wintertime high PM<sub>10</sub> concentration episodes in Busan, *J. Environ. Sci.*, 21, 815-824.
- Jung, W. S., Lee, B. R., Park, J. K., Do, W. G., 2013, Analysis on high concentration air pollution cases in Gimhae region using the WRF numerical model, *J. Environ. Sci.*, 22, 1029-1041.
- Kang, J. E., Oh, I. B., Song, S. K., Kim, Y. K., 2012, Characteristics of surface ozone in a valley area located downwind from coastal cities under sea-breeze condition: Seasonal variation and related winds, *J. Environ. Sci.*, 21, 153-163.
- Kleinman, L. I., Daum, P. H., Lee, J. H., Lee, Y. N., Nunnermacker, L. J., Springston, S. R., Newman, L., Weinstein-Lloyd, J., Sillman, S., 1997, Dependence of ozone production on NO and hydrocarbons in the troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2299-2302.
- 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.
- Lee, K. H., Go, T. W., Lee, E. S., 2013, PAH of atmospheric deposition in Jeju area, Proceeding of the 56th Meeting of KOSAE, Busan BEXCO, 144.
- Lin, C. Y., Wang, Z., Chou, C. C. K., Chang, C. C., Liu, S. C., 2007, A numerical study of an autumn high ozone episode over southwestern Taiwan, *Atmos. Environ.*, 41, 3684-3701.
- Liu, H., Chan, J. C. L., 2002, An investigation of air-pollutant patterns under sea-land breezes during a severe air-pollution episode in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 36, 591-601.
- Ma, Y., Lyons, T. J., 2000, Numerical simulation of a sea

- breeze under dominant synoptic condition at Perth, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 73, 89-103.
- Makra, L., Juhász, M., Mika, J., Bartzokas, A., Béczi, R., Sümegehy, Z., 2007, Relationship between the Péczeley's large-scale weather types and airborne pollen grain concentrations for Szeged, Hungary, *Grana*, 46, 43-56.
- Mayer, H., 1999, Air pollution in cities, *Atmos. Environ.*, 33, 4029-4037.
- 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.
- Reitebuch, O., Strassburger, A., Emeis, S., Kuttler, W., 2000, Nocturnal secondary ozone concentration maxima analysed by sodar observations and surface measurements, *Atmos. Environ.*, 34, 4315-4329.
- Sillman, S., 1999, The relation between ozone, NO<sub>x</sub> and hydrocarbons in urban and polluted rural environments, *Atmos. Environ.*, 33, 1821-1845.
- Shon, Z.-H., Song, S.-K., Lee, G., 2010, Photochemical analysis of ozone levels in the Gulf of Gwangyang in the spring and summer of 2009, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 26, 161-176.
- Song, S. K., Shon, Z. H., 2008, Analysis of chemical and meteorological effects on the concentration difference of photochemical air pollutants between coastal and inland regions in Busan, *J. Environ. Sci.*, 17, 1169-1182.
- Song, S. K., Kim, Y. K., Shon, Z. H., Ryu, J. Y., 2012, Photochemical analyses of ozone and related compounds under various environmental conditions, *Atmos. Environ.*, 47, 446-458.
- Stohl A., Spichtinger-Rakowsky N., Bonasoni P., Feldmann H., Memmesheimer M., Scheel H. E., Trickl T., Hubener S., Ringer W., Mandl M., 1999, The influence of stratospheric intrusions on alpine ozone concentrations, *Atmos. Environ.*, 34, 1323-1354.