

ORIGINAL ARTICLE

제주지역 오존 및 미세먼지 고농도일의 기류패턴에 따른 농도변화와 기상조건 분석

한승범 · 송상근* · 최유나
제주대학교 지구해양학과

Variations of Ozone and PM₁₀ Concentrations and Meteorological Conditions according to Airflow Patterns of their High Concentration Episodes on Jeju Island

Seung-Bum Han, Sang-Keun Song*, Yu-Na Choi

Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Abstract

The classification of airflow patterns during high ozone (O₃) and PM₁₀ episodes on Jeju Island in recent years (2009-2015), as well as their correlation with meteorological conditions according to classified airflow patterns were investigated in this study. The airflow patterns for O₃ and PM₁₀ were classified into four types (Types A-D) and three types (Types E-G), respectively, using the HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPPLIT) model and synoptic weather charts. Type A was the most dominant airflow pattern for O₃ episodes, being characterized by the transport of airflows from urban and industrial areas in China with the highest frequency (about 69%, with a mean of 67 ppb). With regard to the PM₁₀ episodes, Type E was the most dominant airflow pattern, and was mostly associated with long distance transport from Asian dust source regions along northwesterly winds, having the highest frequency (about 92%, with a mean of 136 µg/m³). The variations in the concentration of O₃ and PM₁₀ during the study period were clarified in correlation with two pollutant and meteorological variables; for example, the high (low) O₃ and PM₁₀ concentrations with high (low) air temperature and/or wind speed and vice versa for precipitation. The contribution of long-range transport to the observed PM₁₀ levels in urban sites for different airflow patterns (Types E-F), if estimated in comparison to the data from the Gosan background site, was found to account for approximately 87-93% (on average) of its input. The overall results of the present study suggest that the variations in O₃ and PM₁₀ concentrations on Jeju Island are mainly influenced by the transport effect, as well as the contribution of local emissions.

Key words : Jeju Island, PM₁₀, O₃, Airflow pattern, Transport

1. 서론

오늘날 지역별 대기질 특성과 대기오염의 원인 규

명에 관한 많은 연구는 주로 대도시 또는 인근지역을 중심으로 이루어져 왔으며, 주로 국지적 배출과 다양한 기상조건이 주요 원인 중 하나라고 보고된바 있다

Received 29 October, 2016; Revised 12 January, 2017;
Accepted 18 January, 2017

*Corresponding author: Sang-Keun Song, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Phone: +82-64-754-3431
E-mail: 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.

(Oh et al., 2004; Xia et al., 2007; Song et al., 2012). 이러한 연구로부터 대도시에서의 대기질, 특히 오존(O₃)과 미세먼지(예, PM₁₀)의 농도변화 및 기타 오염물질과의 관계 등 많은 자료가 축적 되어왔다. 예를 들면, 국지 배출이 많은 대도시 지역의 경우 강한 일사 및 높은 기온조건이 형성되면 광화학 반응이 활발해져 오존농도의 상승이 뚜렷하며, 바람 및 대기안정도 등의 다양한 기상조건에 따라 생성된 오존이 도시 내 축적되거나 인근으로 수송 혹은 재순환현상에 의해 주변지역에 영향을 미치게 된다(Song and Shon, 2008; Kang et al., 2012). 이외에도, 도시 대기오염은 도시 내에서의 생성과 소멸에만 국한된 것이 아니라, 지역규모 이상의 대기운동과 연관된 장거리수송(LRT: Long-Range Transport)의 영향으로 인해 나타날 수 있다(Ding et al., 2004; Oh et al., 2006; Brulfert et al., 2007). 여러 선행연구에서 오존을 포함한 대기오염물질의 LRT가 지역 오존농도의 상승에 영향을 준 사례가 있고(Kim et al., 2007; Song et al., 2010; Kang, 2012), 특히 중국을 포함한 동북아시아 지역에서 배출원환경과 기상조건이 풍하측에 위치한 우리나라와 일본지역의 오존농도 상승에 기여한 사실이 밝혀졌다(Pochanart et al., 1999; Pochanart et al., 2002; Song et al., 2009).

일반적으로 대기오염물질 농도는 많은 오염원을 포함하고 있는 대도시와 오염이 덜한 청정 또는 배경지역과는 서로 다른 양상을 나타낸다(Yoon et al., 2005). 인구와 차량이 밀집되어 있는 대도시에서는 주로 고정 및 이동배출원에 의해 대기오염물질 농도가 결정될 수 있는 반면, 비교적 청정지역(예, 시골, 섬 등)에서는 자체적인 국지배출이 적기 때문에 배출원에 의한 영향보다 외부로부터의 수송 영향이 큰 역할을 하게 된다. 국립환경과학원의 연구에 따르면(NIER, 2013), 대기오염물질 중 미세먼지가 중국으로부터 장거리 수송되어 우리나라로 유입되는 기여도가 연평균 30~50% 수준이라고 추정된 바 있다.

우리나라의 대표 청정지역인 제주도는 다른 대도시와 비교해 대기오염물질의 배출원(특히, 점오염원과 면오염원) 영향은 매우 적으나, 지리적으로 중국과 일본에서 장거리 수송/유입되는 오염물질의 영향을 크게 받고 있는 것으로 나타났다(Kim et al., 2009;

Song et al., 2014). 2002~2014년 동안 제주지역 연평균 오존 농도(특히, 서귀포시 동홍동에서 약 36 ppb)는 우리나라의 다른 대도시(예, 서울에서 약 18 ppb) 지역보다 높은 것으로 보고된바 있으며(KMOE, 2003~2015), 아울러 제주도의 대기질은 도시 팽창과 관광객 급증 그리고 오염물질의 LRT 영향 등 복합적인 요인으로 인해 점점 악화될 것으로 예상된다. 오존과 유사하게 미세먼지(예, PM₁₀) 역시, 국지적 배출원에 의한 영향을 제외 할 경우 기상학적 요인인 LRT와 지형·지리적 특성에 의해 많은 영향을 받는다는 연구결과가 발표되었다(Song et al., 2014).

환경부의 대기환경연보에 따르면(KMOE, 2015), 제주도는 5가지 대기환경기준 오염물질 중 이산화황(SO₂), 이산화질소(NO₂), 일산화탄소(CO)는 환경기준을 전혀 초과하지 않는 반면, O₃과 PM₁₀은 자주 기준치를 초과 하는 것으로 나타났다. 2009~2015년 동안 제주지역(이도동, 연동, 동홍동 지점) O₃ 1시간 평균 100 ppb와 8시간 평균 60 ppb 환경기준 초과횟수를 보면, 2009~2013년에는 1시간 평균 100 ppb 초과 횟수가 전혀 없었으나 2014년과 2015년에는 각각 전체 54회와 18회로 나타났으며, 8시간 평균 60 ppb 초과빈도는 전체 70회(2013년) ~ 258회(2009년)로 2009년에 월등히 높게 나타났다. PM₁₀ 24시간 평균 100 µg/m³ 초과빈도는 3지점 전체 9회(2012년) ~ 74회(2010년)로 2010년에 가장 높게 나타났다(KMOE, 2010~2016). 본 연구는 제주지역 대기환경변화와 관련된 기초 연구로서, 먼저 오존과 미세먼지의 고농도 원인 및 이동경로를 파악하기 위하여 두 오염물질의 고농도 사례일을 선정하고, 각 고농도일의 기류패턴을 분류하였다. 또한 기류패턴별 농도 변화, 기상인자와의 상관성, 기온과 풍속 구간별 오존 및 PM₁₀ 농도의 초과빈도, 그리고 도심 측정지점의 PM₁₀ 농도 수준에 대한 LRT 기여도의 간접분석 등 고농도에 영향을 주는 기상특성을 면밀히 분석하였다.

2. 재료 및 방법

제주지역(이도동, 연동, 동홍동 지점)의 대기질은 5가지 대기환경기준 물질 중에서 O₃과 PM₁₀만 환경기준치를 초과하므로, 본 연구에서는 이러한 두 오염

물질에 대해 중점적으로 연구를 진행하였다. 먼저, 최근 7년간(2009~2015년) 제주지역의 오존 및 미세먼지(예, PM_{10}) 고농도 사례일을 선정하기 위하여 대기환경연보의 환경기준치 농도 자료를 이용하였다(KMOE, 2010~2016). 대상지역 오존의 경우 1시간 평균 100 ppb 초과가 최근(2014~2015년)에만 나타났고 과거에는 전혀 없었던 관계로 환경기준치보다 조금 낮은 80 ppb를 기준으로 하루에 1시간 이상 초과하는 날을 고농도 사례일로 선정하였고, 미세먼지는 대기환경연보에 제시된 황사발생일을 먼저 선정한 후, 1시간 평균 PM_{10} 농도가 $100 \mu g/m^3$ 초과하는 날을 추가로 골라내어 최종 고농도 사례일을 선정하였다.

연구기간동안 제주지역 3지점의 오존 및 미세먼지 고농도 사례일을 대상으로 오염물질의 기류패턴을 분류하기 위해 미국 해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 HYSPLIT 4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델의 후방궤적 분석을 수행

하였으며, 궤적의 이동경로 모습을 통해 3지점에 대한 기류패턴을 분류하였다. 또한 분류과정에서 일부 애매한 부분은 각 해당 고농도 사례일의 종관일기도(기상청 제공)를 관찰/분석하여 보다 객관적으로 분류하였다. HYSPLIT 4 모델은 라그랑지안 방법에 기초한 수송·확산 과정을 계산하여 오염물질의 농도뿐만 아니라 오염물질의 전방 및 후방 궤적 추적이 가능하며, 다른 대기확산모델과 비교하여 계산용량과 모델링 시간이 적게 소요된다는 장점이 있다(Kim and Ghim, 2002). 후방궤적 분석의 모의시간은 중국에서 발생한 대기오염물질의 경우 최대 5일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 고려하여 5일로 정하였고, 후방궤적 출발지점의 좌표는 제주도 내 3곳의 대기질 측정지점인 제주시 이도동(33.50°N, 126.53°E)과 연동(33.49°N, 126.53°E), 서귀포시 동홍동(33.25°N, 126.57°E)을 기점으로 선정하였다(Fig. 1). 출발지점의 고도는 정확한 구분을 위해 하층 제트가 나타나고 지표면의 국지적 영향을 덜 받는 최저의 높이로 오염물질의 수송

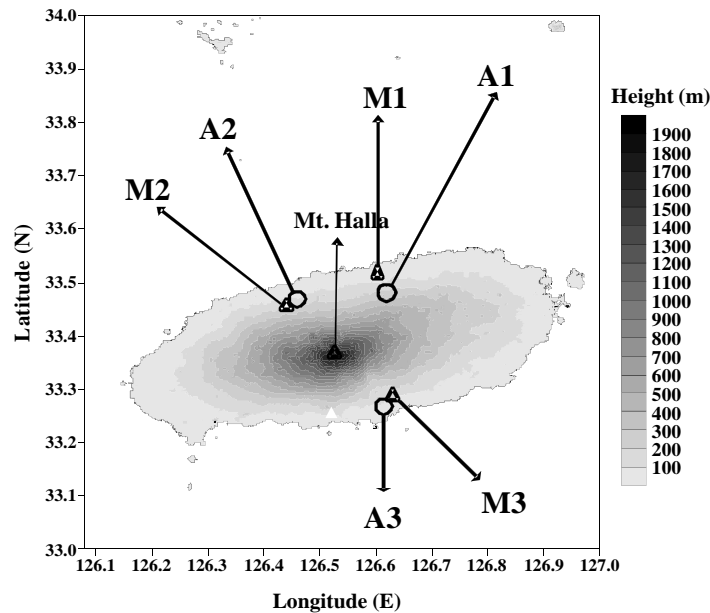


Fig. 1. Geographical locations of 3 monitoring sites (A1: Ido-dong, A2: Yeon-dong, and A3: Donghong-dong) for air pollutants (open circle) on Jeju Island. The meteorological monitoring sites (triangle) are located less than approximately 2 km away from the air quality monitoring sites, respectively. M1: Jeju Regional Meteorological Administration, M2: KBS Jeju Broadcasting Station, and M3: Seogwipo Weather Station.

과정을 파악 할 수 있는 대표적 높이인 1,000 m와 그 아래인 500 m로 선정하였다.

제주지역의 오존 및 미세먼지 고농도 사례일의 기류패턴별 농도 변화 및 기상요소와의 상관성, 그리고 기온과 풍속 구간별 두 물질의 초과빈도를 분석하기 위하여, 제주지역 3곳의 대기질 측정지점(연동, 이도동, 동홍동)의 오존 및 PM₁₀ 농도 자료와 각 측정지점 인근 기상관측지점의 주요 기상요소(기온, 풍속 등) 자료를 이용하였다. 연동 지점은 제주시에 위치하며 비교적 차량이 많고 건물이 밀집되어 있으며, 이도동 지점은 제주시청 인근으로 주로 관공서 및 상업지역에 속해 있다. 동홍동 지점은 주거지역으로서 서귀포시 중심의 북동쪽에 위치하고 있다. 기상관측지점은 일반적으로 대기오염물질의 농도 수준이 대상지역을 포함한 인근의 기상조건에 의해 크게 영향을 받기 때문에 보다 정확한 해석을 위하여 각 대기질 측정지점과 가장 가까운 지점을 선정하였으며, 비교적 주변 건물 등에 의한 장애가 없는 곳을 선정하였다. 즉 제주시의 기상관측지점은 제주지방기상청 옥상(이도동 대기질 측정지점에서 약 1.6 km 떨어진 지점)과 KBS방송총국 옥상(연동 지점에서 약 500 m), 그리고 서귀포시의 기상관측지점은 서귀포기상대 옥상(동홍동 지점에서 약 1 km 이내)에 위치하고 있다. 대기오염물질(O₃과 PM₁₀)과 기상요소와의 관계는 통계분석에서 유의성 검정 및 상관성 분석에 흔히 쓰이는 SPSS 통계 프로그램을 이용하여 살펴보았다. 이외에도 기온과 풍속 구간별 O₃ 및 PM₁₀ 농도의 초과빈도를 분석함에 있어, 보다 정확한 분석을 위하여 풍속자료 중 0.5 m/s 이하의 무풍(Calm) 상태에 해당하는 자료를 제외하였다. 기온은 총 10개의 구간(<-5°C, -5~0°C, 0~5°C, 5~10°C, 10~15°C, 15~20°C, 20~25°C, 25~30°C, 30~35°C, ≥35°C)으로, 풍속은 6개 구간(<2 m/s, 2~4 m/s, 4~6 m/s, 6~8 m/s, 8~10 m/s, ≥10 m/s)으로 구분하여 분석하였다.

연구기간동안(2009~2015년) 제주지역 미세먼지 고농도일의 기류패턴별 도심 측정지점의 PM₁₀ 농도에 영향을 주는 기상조건을 보다 면밀히 살펴보기 위해, 도심지점의 PM₁₀ 농도 수준에 대한 LRT 기여도를 간접적으로 분석하였다. 이러한 분석을 위해 여러 선행연구에서 제시한 단순 선형 회귀방법을 적용하였

다(Karppinen et al., 2004; Timonen et al., 2013; Ahmed et al., 2015). 일반적으로 LRT에 의한 PM₁₀ 농도 증가는 자유대류권(free troposphere)에서 자주 나타나므로, 비교적 높은 고도에 위치한 배경지점에서 관측된 PM₁₀이 LRT로 인해 크게 영향을 받음을 가정하며, 도심 내륙과 같은 국지지역에서의 PM₁₀ 농도는 LRT에 의한 영향과 거의 상관관계가 없다고 가정한다(Jaffe et al., 2003; Timonen et al., 2013). 하지만 제주도는 자유대류권 고도에 위치한 대기질 측정지점이 없는 관계로 국가배경측정소인 고산지점(도심으로 부터 약 40 km로 떨어진 지점)을 배경지점으로 선정하여 도심 측정지점(제주시 이도동과 연동, 서귀포시 동홍동)과 비교·분석하였다. 전체 연구기간 중 고산지점의 2010년에 대한 LRT 기여도 분석은 시간별 자료의 부재로 인해 제외되었다. 본 연구에 이용된 단순 선형 회귀식은 다음과 같다: $PM_{10_Local} = k_l PM_{10_Back} + k_0$. 여기서 PM_{10_Local} 과 PM_{10_Back} 은 각각 도심 측정지점(이도동, 연동, 동홍동)과 배경지점(고산)의 농도자료이며, 회귀변수 k_l 과 k_0 는 각각 회귀직선의 기울기와 y절편을 의미한다. 그리고 $k_l PM_{10_Back}$ 와 k_0 는 각각 LRT와 국지배출의 기여를 나타낸다. 이러한 LRT 기여도 분석 및 단순 선형 회귀식에 대한 자세한 설명은 여러 선행연구에 잘 나타나 있다(Timonen et al., 2013; Ahmed et al., 2015; Park et al., 2016).

3. 결과 및 고찰

3.1. 오존과 미세먼지 고농도일의 기류패턴 분류 및 패턴별 농도 변화

Table 1은 오존 및 미세먼지 고농도일 선정방법(O₃은 1시간 평균 80 ppb 초과, 미세먼지는 황사발생일에 추가로 PM₁₀ 1시간 평균 100 µg/m³ 초과)에 따라 정해진 각각의 고농도 사례일 전체를 대상으로 HYSPLIT 모델 및 종관일기도를 통해 분류된 3지점의 기류패턴에 해당하는 모든 날짜를 나타낸다. 여기서 지점별로 각각 모델링을 수행하였으므로 기류패턴별 각 지점에 중복되는 고농도일의 일수를 각각 따로 포함하여 최종 총합도 함께 나타내었다. 그리고 Figs. 2와 3은 120시간 동안의 HYSPLIT 모델 수행결과로서

[B] High PM₁₀ concentration days

Airflow pattern	Total sum	Site	Dusty (or PM ₁₀) days belong to each type									
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015			
Type E	183 (91.5)*	Ido-dong (68 days)	2.20/3.16/10.19 /12.25-26/12.29-30	11.11-13/11.27 /12.2-3/12.10-11	3.19/3.22/4.15-16 /5.1-4/5.13-14	3.24/3.31 /11.28-29	1.1-2/3.1/3.9-10 /3.19/4.9	1.1-2/1.20/2.27/3.19/5.2 /5.13/5.26-31/7.11-12 /8.13/12.29-30	1.10-11/1.16/1.19/2.7 /2.17/2.23-24/3.2 /3.21-22/3.30/6.12-13			
		Yeon-dong (63 days)	2.20/3.16/10.19 /12.25-26/12.29-30	11.11-13/11.27 /12.2-3/12.10-11	3.19/3.22/4.15-16 /5.1-4/5.13-14	3.24/3.31 /11.28-29/12.3	1.1-2/3.1/3.9-10 /3.19/4.9	1.1/1.20/2.27/3.19/5.2 /5.26-31/8.13/12.30	1.10-11/1.16/1.19/2.7 /2.17/2.23-24/3.21-22 /3.30/6.12/10.22			
Type F	3 (1.5)	Donghong-dong (52 days)	2.20/3.16/10.19 /12.25-26/12.29-30	11.11-13/11.27 /12.2-3/12.10-11	3.19/3.22/4.15-16 /5.1-4/5.13-14	3.24/3.31 /11.28-29	1.1-2/3.1/3.9-10 /3.19/4.9	1.1-3/1.20/1.31/3.19 /5.26/8.13	1.19/2.7/2.23-24/3.2 /3.22/3.30/6.12			
		Ido-dong (1 day)	-	-	-	12.3	-	-	-			
		Yeon-dong (1 day)	-	-	4.16	-	-	-	-			
		Donghong-dong (1 day)	-	-	-	12.3	-	-	-			
Type G	14 (7.0)	Ido-dong (5 days)	-	-	5.12	-	-	2.28/3.18/6.1	6.11			
		Yeon-dong (6 days)	-	12.2	5.12	-	-	2.28/3.18/6.1	10.21			
		Donghong-dong (3 days)	-	-	5.12	-	-	2.28/3.18	-			
All	200 (100)											

*The number in parenthesis represents percentage (%)

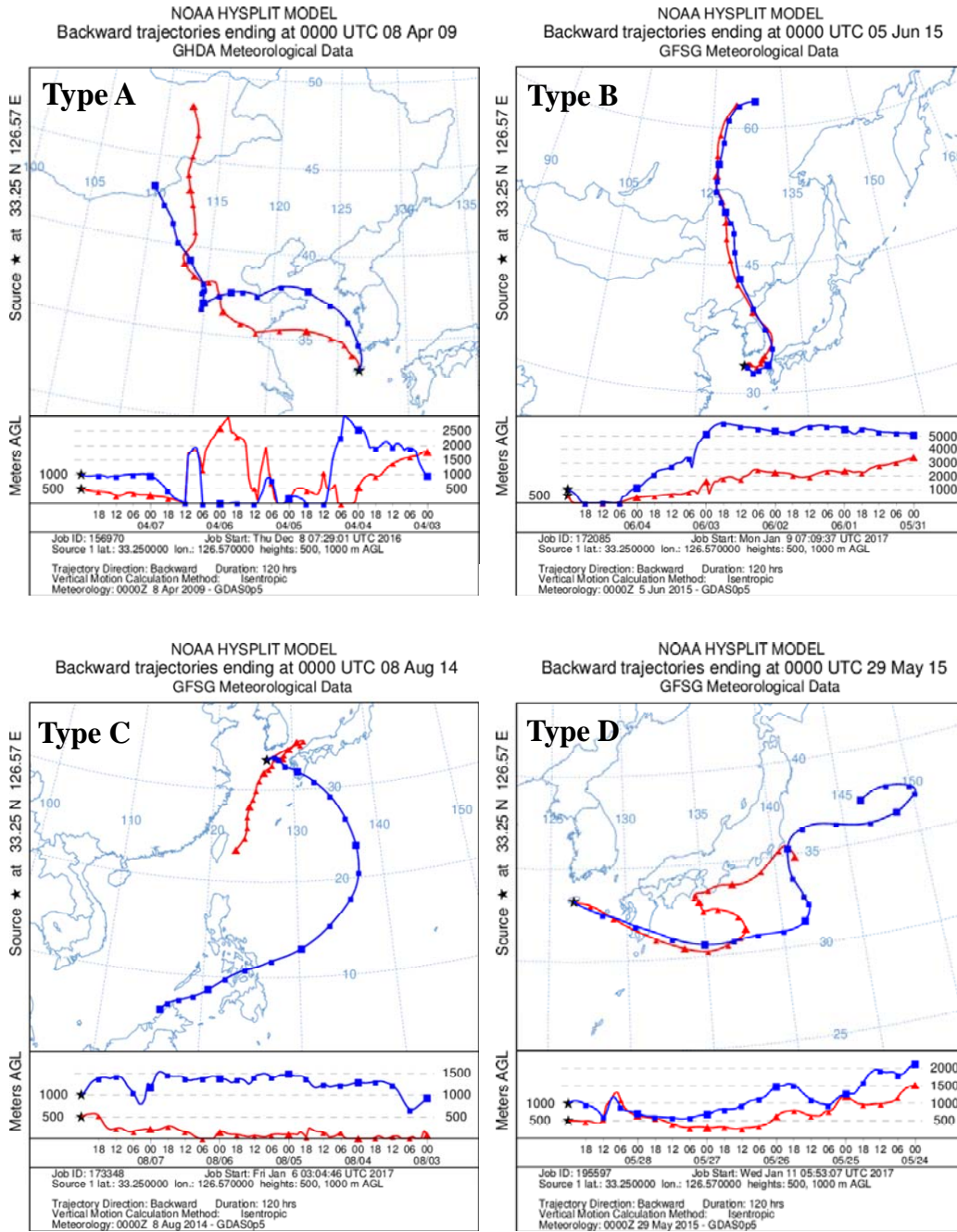


Fig. 2. 120-h backward trajectories of the air mass arriving at 500 m and 1 km AGL over Jeju Island for the representative airflow patterns (Types A-D) on high ozone concentration days.

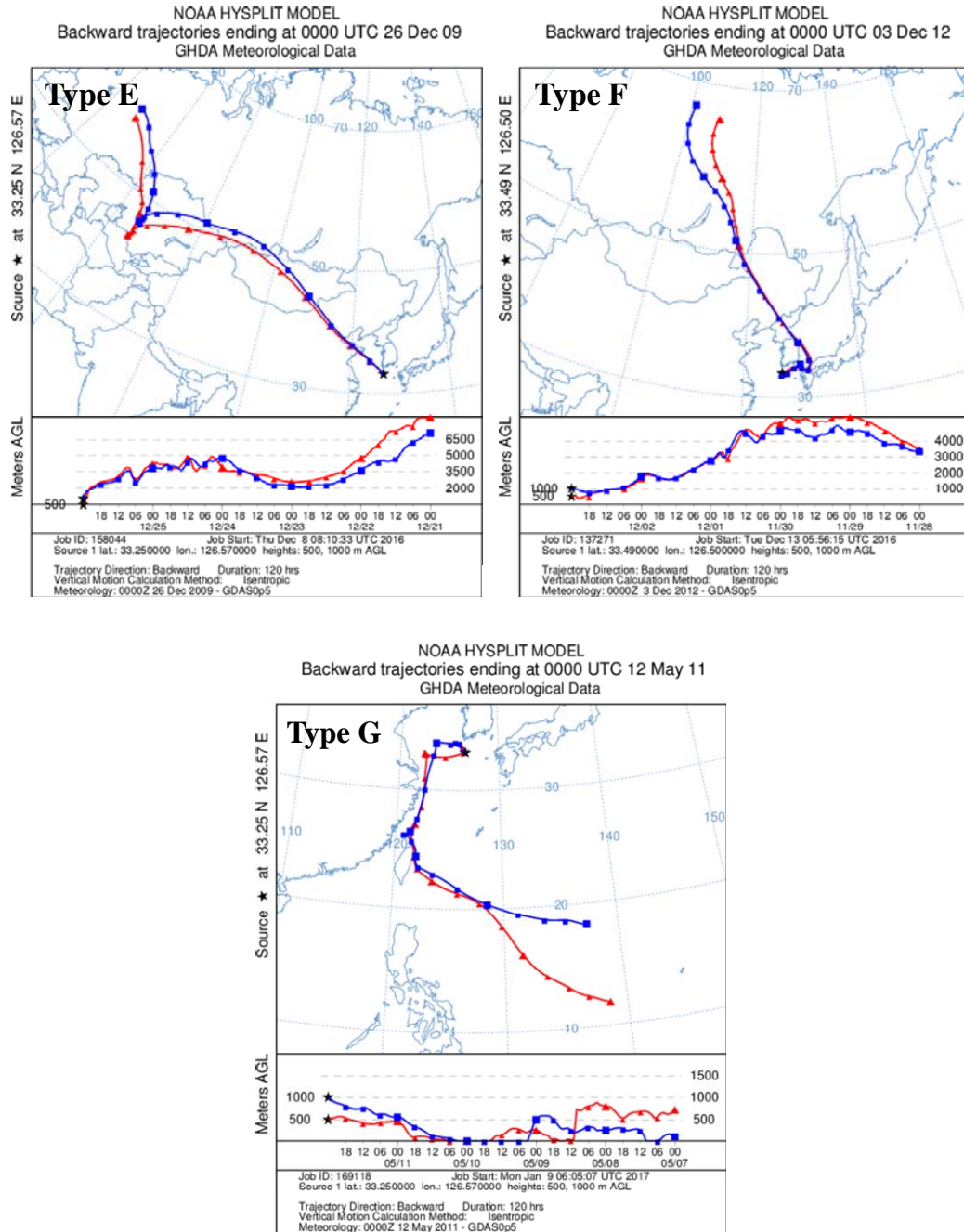


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for the representative airflow patterns (Types E-G) on high PM₁₀ concentration days.

Table 2. A statistical summary of the hourly mean concentrations of O₃ and PM₁₀ at Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong sites according to the different airflow patterns during 2009-2015

[A] High ozone concentration days

Airflow pattern	All	Ido-dong	Yeon-dong	Donghong-dong
Type A	67.2±20.4 ^a (3-138) ^b	63.4±20.5 (6-138)	70.6±22.1 (3-134)	67.5±18.6 (12-114)
Type B	66.7±14.8 (22-117)	62.9±15.1 (22-94)	69.9±14.9 (26-91)	67.8±14.5 (40-117)
Type C	65.3±20.6 (11-160)	59.3±17.8 (11-101)	70.4±24.2 (19-125)	66.1±20.0 (15-160)
Type D	57.9±21.3 (12-96)	56.0±20.0 (12-96)	56.5±24.2 (22-91)	61.3±19.7 (26-90)

[B] High PM₁₀ concentration days

Airflow pattern	All	Ido-dong	Yeon-dong	Donghong-dong
Type E	135.8±131.3 ^a (3-1224) ^b	134.6±122.4 (12-1224)	139.7±132.1 (3-1034)	133±140.4 (3-1027)
Type F	60.6±53.5 (3-238)	44.3±59.8 (6-238)	96.0±21.8 (62-129)	41.4±53.0 (3-199)

The analysis related to Type G was excluded, possibly due to the uncertainty of HYSPLIT model.

^aMean±1σ; ^bMin.-Max

제주도 상공으로 유입되는 후방궤적의 이동경로에 따라 분류한 대표적 고농도 사례일의 기류패턴을 나타내며, 오존은 4가지 패턴(Types A~D), 미세먼지는 3가지 패턴(Types E~G)으로 구분되었다. 오존의 경우 (Fig. 2), 중국 대도시 부근의 공장 또는 차량 등 오염물질의 배출량이 많은 공업지역으로부터 한반도 쪽으로 수송되는 기류(예, 북서기류)패턴을 Type A로 정하였다. Type A는 총 4가지 패턴 중 가장 높은 비율을 차지하였는데(3지점의 4 기류패턴에 대한 총합 177일 중 Type A는 122일로 68.9%), 연구기간 7년 내내 빈번하게 나타났으며 특히 2014~2015년에 집중되어 나타났다(Table 1). 그 외 상대적으로 Type A에 비해 오염물질의 배출이 적을 것으로 예상되는 북만주 방향에서 수송되는 기류를 Type B로 선정하였고, Type C은 주로 중국 동쪽/남쪽 또는 해양을 순환하는 기류들로 구분하였다. 마지막으로 일본 연안지역을 거쳐

제주도로 유입되는 기류들을 Type D로 선정하였다. Type A와 달리 Type B는 3지점의 4 기류패턴(Types A~D)의 총합 177일 중 18일로 10.2%, Type C는 29일로 16.4%, 그리고 Type D는 8일로 4.5%를 차지하였다(Table 1).

전반적으로 제주지역으로 유입되는 미세먼지의 고농도일 기류 패턴은 대부분 중국 황사 발원지로부터 생성되어 고비사막을 거쳐 기압골을 통과 후 북서기류를 타고 유입됨을 알 수 있다(Fig. 3). 각 기류 패턴 별로 상세히 살펴보면, Type E는 대표적인 황사발원지인 고비사막과 타클라마칸사막, 황토고원 부근에서 발원하여 북서풍 계열의 바람을 타고 유입되는 패턴이며, 3지점의 3 기류패턴(Types E~G)의 총합 200일 중 183일로 91.5%를 차지했다. 또한 연구기간동안 골고루 분포되어 매년 빈번하게 나타났으며, 이것은 최근 7년간 한반도(제주도 포함)로 유입된 고농도 미세

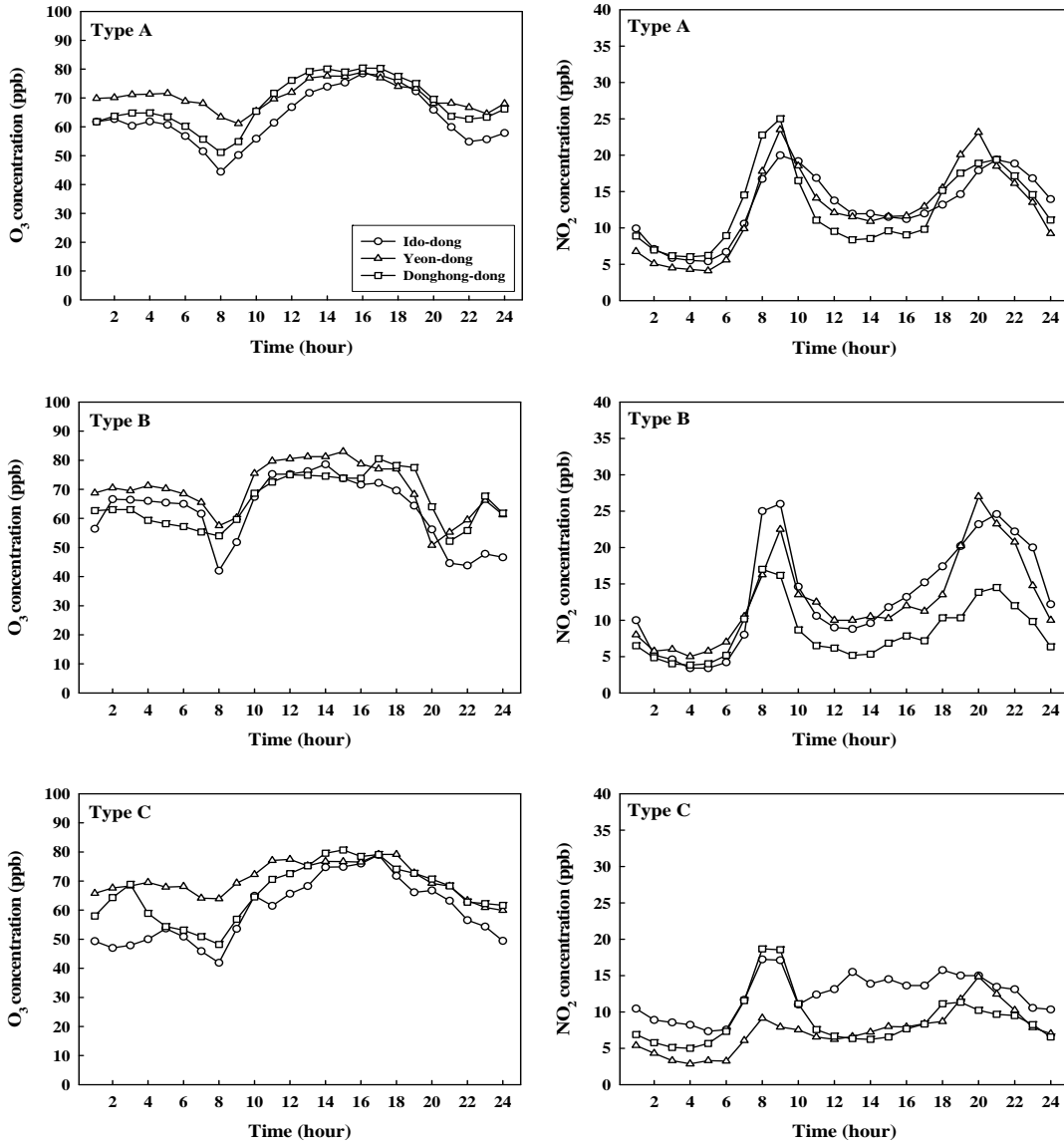


Fig. 4. Diurnal variations of the concentrations of O₃ and NO₂ at three sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) for the different airflow patterns (Types A-C) on O₃ high concentrations days during the study period (2009-2015). The analysis related to Type D was excluded due to a small number of data.

면지가 황사에 의한 영향이 매우 컸음을 시사한다. Type F는 북만주 부근의 황사가 북풍 계열의 바람을 따라 한반도를 거쳐 제주도까지 유입되는 패턴으로 차지하는 비율이 전체에 비해 무시할 정도로 매우 낮

았다(3일, 1.5%). Type G는 비발원지 위주의 패턴으로 주로 한반도 남쪽 해양에서 유입되는 기류로서, 14일(7.0%)을 차지하였다. 황사 발생일의 기류 패턴 분류임에도 불구하고 Type G와 같이 비발원지로 분류

되는 것은 HYSPLIT 모델의 불확실도에 의한 오차라고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 Type G가 분석대상이 아니라 판단되어, 이를 제외한 나머지 기류패턴에 대하여 오염물질 농도수준 비교, 농도변화에 관한 기상조건 분석 등을 수행하였다.

Table 2는 최근 7년간(2009~2015년) 분류된 제주지역(이도동, 연동, 동홍동)의 기류패턴에 따른 O₃과 PM₁₀농도 분포(또는 변화)의 통계적 분석을 나타낸다. 먼저 오존의 4가지 패턴 중 Type D를 제외하고 전체 평균농도는 큰 차이(65~67 ppb)를 보이지 않았다. 그러나 다른 기류패턴에 비해 중국으로부터 수송되는 Type A의 평균농도가 미세하지만 조금 더 높게 나타났다. 그 외, 북만주로부터 수송되는 Type B는 Type A와 평균농도가 비슷하였으며, 중국 동쪽/남쪽 또는 해양을 순환하는 Type C는 평균 65 ppb 정도, 일본 연안지역을 거쳐 유입되는 Type D는 약 58 ppb로 상대적으로 가장 낮게 나타났다. 지점별 평균농도를 보면, Types A~C 기류패턴에서 대부분 연동지점의 농도가 매우 높은 경향을 보였다. 이것은 기류를 따라 오염물질의 수송 영향과 함께 연동지점이 다른 두 지점에 비해 상대적으로 차량과 건물이 밀집되어 있고 저풍속으로 인해 오염물질이 정체되어 보다 높은 농도가 나타난 것으로 추정할 수 있다. 한편 Type D의 경우, 주거지역인 동홍동지점에서 평균 O₃ 농도가 가장 높게 나타났는데, 이는 기류가 일본 연안지역을 따라 주변도시의 오염물질을 일부 포함하여 서귀포시 동홍동으로 유입된 것으로 추정할 수 있다(Fig. 2).

오존 고농도일의 Type A는 중국 대도시 및 공업지역을 거쳐 유입되는 특징이므로, 주요 오염원의 배출 오염물질(예, NO_x와 VOCs) 영향이 O₃ 농도 증가에 기여할 것으로 추정된다. 그러나 Table 2에 나타나듯이 Type A의 O₃ 평균농도는 다른 기류패턴(Type D 제외)의 농도와 뚜렷한 차이가 나타나지 않으므로, 단순히 기류 분포만으로 수송에 의한 농도 변화를 설명하는 것은 다소 한계가 있다고 판단된다. 이외에 O₃ 농도 상승의 주요한 다른 원인으로 O₃ 전구물질의 국지배출에 의한 광화학 반응을 들 수 있다(Xia et al., 2007). 그러나 제주지역에서는 O₃ 전구물질인 VOCs (Volatile Organic Compounds, 휘발성유기화합물) 등의 측정망이 없는 관계로 O₃의 광화학적 특성을 명확

하게 설명하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 오존 고농도 사례일의 기류패턴별 O₃과 NO₂ 농도의 시계열을 분석하여 오존 광화학에 대해 간접적으로 살펴 보았다.

Fig. 4는 제주지역 3지점의 오존 고농도일의 기류패턴별(Types A~C) O₃ 및 NO₂ 농도의 일변화를 각각 나타낸다. 여기서 Type D는 자료 개수가 매우 적은 관계로 분석에서 제외하였다. 대부분 기류패턴에서 O₃은 이른 아침에 최저농도를 나타내고 오후에 최고 농도를 나타내었다. 이른 아침의 낮은 O₃ 농도는 야간의 지속적인 NO_x 적정과 러시아워(rush hour)에 집중된 차량의 NO 배출로 인한 O₃의 화학적 소멸이 일부 원인인 것으로 추정할 수 있다(Lal et al., 2000). 오후에는 NO₂ 농도가 매우 낮으므로 대기 중 OH 라디칼과 NO₂와의 반응(결국 O₃ 소멸)보다 OH 라디칼이 VOCs와 더 우세한 반응을 하게 되고, 이로 인해 생성된 페록시 라디칼(예, RO₂)은 결국 오후의 O₃ 농도 증가(특히, 연동)에 기여할 가능성이 있다(Seinfeld and Pandis, 2006). 한편, 대상지역은 다른 대도시와 달리 모든 기류패턴에서 3지점 모두 새벽에 특징적으로 높은 O₃ 농도(50 ppb 이상)가 관측되었다. 만약 대상지역에 오염물질의 국지배출이 존재하더라도 새벽에는 광화학 반응이 이루어지지 않으므로, 이러한 특징은 외부로부터의 수송 영향이 O₃ 농도 증가에 크게 기여한 것으로 추정할 수 있다. 그러나 앞서 언급한바와 같이 VOCs 등 측정 자료의 부재로 인해 정확하게 해석하기에는 많은 무리가 있으므로, 향후 다양한 오염물질의 측정망 구축과 함께 3차원 기상-대기질 수치모의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

PM₁₀ 농도의 변화는 오존과 달리 각 기류패턴에 따라 그리고 지점별로 뚜렷한 차이를 보였다(Table 2). 황토고원과 고비사막을 포함한 황사 발원지로부터 기원한 기류 Type E는 모든 지점에서 평균농도 136 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높은 수치를 보였다. 이는 예상할 수 있는 결과로 황사 발원지로부터의 수송영향이 가장 크다는 것을 보여주고 있다. 이외 북만주 지역으로부터 북풍을 따라 유입되는 기류 Type F는 약 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 지점별 PM₁₀ 평균농도는 기류패턴에 관계없이 모두 연동지점에서 가장 높은 농도가 관측되었다. 이것은 오존농도의 변화 특성과 유사하게 기류에

Table 3. Correlation between hourly pollutant concentrations (O_3 and PM_{10}) and three meteorological variables according to the dominant airflow patterns (Types A and E) of their high concentration days on Jeju Island

Air pollutant	O_3	PM_{10}
Airflow pattern	Type A	Type E
Air temperature ($^{\circ}C$), hourly	0.441 ^{**} / 0.277 ^{**} / 0.135 ^{**}	0.132 ^{**} / 0.114 ^{**} / 0.187 ^{**}
Wind speed (m/s), hourly	0.415 ^{**} / -0.092 [*] / 0.320 ^{**}	-0.008 / -0.071 [*] / -0.116 ^{**}
Precipitation (mm), hourly	-0.336 [*] / -0.030 / -0.248 [*]	-0.222 [*] / -0.129 [*] / -0.207 [*]

Ido-dong/Yeon-dong/Donghong-dong

^{**}Correlation is significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively

의한 영향과 함께 연동지점의 배출환경 및 기상조건 (저풍속 등)으로 인한 복합적 영향으로 사료된다.

3.2. 기류패턴별 농도변화와 관련된 기상조건 분석

연구기간동안(2009~2015년) 제주지역의 오존 및 미세먼지 고농도일의 농도변화와 관련된 기상특성을 면밀하게 살펴보기 위해, 오염물질 농도와 기상요소와의 상관관계(Table 3), 기온 및 풍속 구간별 오염물질 농도의 초과빈도(Figs. 5와 6), 그리고 도심지점 PM_{10} 농도 수준에 대한 LRT의 기여도(Table 4)를 분석하였다. 먼저 Table 3은 SPSS 통계프로그램을 사용

하여 얻은 제주지역의 기류패턴별 기상요소와 대기오염물질(O_3 , PM_{10}) 농도와의 상관관계를 3지점(이도동, 연동, 동홍동)에 대해 나타낸다. 상관성 분석에 이용된 기류패턴은 오존과 미세먼지 고농도일의 기류패턴 중 각각 가장 높은 빈도를 차지한 Type A와 Type E이며, 자료의 수가 작은 패턴들은 결과의 객관성을 위해 제외하였다. 기상요소는 2장에서 설명한 바와 같이 대기오염물질 3지점(이도동, 연동, 동홍동)에서 가장 가까운 3곳(제주지방기상청, KBS방송총국, 서귀포기상대)의 관측지점에서 공통적으로 관측되고 있는 항목 즉 기온, 풍속, 그리고 강수의 시간별 자료를

Table 4. Statistical parameters of the linear regressions for the measured PM_{10} concentrations between urban and background sites (Gosan) according to two airflow patterns (Types E-F) of its high concentration days and their estimated long-range transported portions ($k_l PM_{10_Back}$)

Airflow pattern	Period	Slope (k_l)	Intercept (k_o)	R^2	PM_{10} at the local site ($\mu g/m^3$)	Regression $k_l PM_{10_Back}$ ($\mu g/m^3$)	Contribution from LRT sources ^a
Type E	Total (2009-2015)	0.96	10.67	0.7	135.82	118.69	0.87
	2009	1.07	2.94	0.74	113.34	110.95	0.98 (0.92) ^b
	2010	- [*]	-	-	-	-	-
	2011	1.02	7.76	0.72	183.29	171.24	0.93 (0.76)
	2012	0.86	8.64	0.63	74.17	65.53	0.90 (0.59)
	2013	0.86	17.81	0.62	100.78	84.16	0.84 (0.78)
	2014	0.64	42.75	0.48	131.92	84.18	0.64 (0.73)
Type F	Total (2011-2012)	0.81	6.36	0.81	60.58	56.36	0.93

The analysis related to Type G was excluded, possibly due to the uncertainty of HYSPLIT model.

^aValues were calculated from $(k_l PM_{10_Back}) / (PM_{10_Local})$

^bThe values in parenthesis were estimated using the hourly PM_{10} concentrations during the whole given year including the high PM_{10} concentration days

^{*}Not available due to data unavailability at the Gosan background site

이용하였다.

오존의 경우, 중국 도시 및 공업지역 인근으로부터 수송되는 기류 Type A는 3지점의 기상요소와의 관계에서 기온과 풍속은 대부분 양의 상관(연동지점의 풍속 제외)을 보이고 통계적으로 유의하게 나타난 반면, 강수는 음의 상관을 보였다. O₃과 기온과의 관계에서 양의 상관을 보인 것은 중국의 오염원(도시 및 공업지역)으로부터 오염물질의 수송 영향도 있겠지만, O₃이 광화학 오염물질이라는 관점에서 볼 때 대상지역 오존 전구물질의 광화학적 생성도 기여한 것으로 판단된다(특히 이도동과 연동). O₃과 풍속과의 양의 상관(연동 제외)은 강한바람을 따라 오염물질의 수송이 대상지역 O₃ 농도를 높이는데 기여한 것으로 추정된다. 연동의 경우 O₃과 풍속과의 음의 상관은 다른 지점에 비해 차량과 건물이 보다 밀집되어 있어 저풍속일 때 O₃ 농도가 상승한 것으로 판단되며, 이는 외부로부터의 유입과 함께 국지적 광화학 생성의 영향도 추정할 수 있다.

PM₁₀의 경우, 황사발원지로부터 기원한 기류 Type E는 3지점 모두 기상요소와의 관계에서 기온은 양의 상관을 나타내며 통계적으로 유의하게 나타났다. 이는 대상지역의 상층으로 기압골이 통과할 경우 이동성고기압과 저기압의 영향으로 남서풍의 따뜻한 공기의 유입과 낮 동안의 일사에 의한 것으로 추정된다(Son and Kim, 2009). PM₁₀과 풍속과의 대체로 약한 음의 상관은 Type E의 북서기류 특성과 비교해 볼 때 강한 풍속의 바람에 의한 수송효과와는 다소 상이한 결과이다. 이와 같이 풍속과의 음의 상관이 나타난 것으로 봐서 단순히 풍속의 변화만으로 대기수송에 의한 오염물질의 농도를 설명하는 것은 한계가 있다고 판단된다. 예를 들어, Makra et al.(2007)의 연구에서 매우 강한 풍속은 저기압의 영향과 관련하여 오히려 대기 중 입상물질의 농도를 감소시킬 수 있는 조건이 된다고 밝힌바 있다. 이 외에도 강수와 PM₁₀에 대해 뚜렷한 음의 상관을 보이고 있는데, 이것은 일반적으로 대기 중 세정효과(wash-out)가 주요 원인 중 하나인 것으로 사료된다.

Figs. 5와 6은 제주지역 오존 및 미세먼지 고농도일의 기류패턴에 따른 기온과 풍속 구간별 O₃과 PM₁₀ 농도의 초과빈도(초과빈도 선정기준은 2장에 제시)를

각각 나타낸다. 전반적으로 기온과 풍속 구간에 따라 두 오염물질 농도의 초과빈도는 기류패턴별로 다양한 변화를 보였다. 먼저 O₃ 농도의 초과빈도를 보면, Type A의 이도동, 연동, 동홍동 3지점 모두 15~20℃ 기온 구간에서 가장 높은 초과빈도(약 70~130회)가 나타났다. Type B에서는 연동, 이도동, 동홍동 지점 순으로 5~10℃ 구간에서 가장 높은 초과빈도가 나타났으며, 빈도수는 상대적으로 Type A에 비해 작은 편이었다. Type C와 Type D는 각각 10~15℃와 15~20℃구간에서 가장 높은 초과빈도를 보였으며, 연동을 제외하고 빈도수는 Type A에 비해 훨씬 낮은 수치였다(30회 이내). 이와 같이 제주지역 기류패턴에 따른 측정지점별 오존변화는 광화학반응이 가장 활발한 여름철보다 오히려 봄철 또는 가을철의 기온 구간(주로 10~15℃와 15~20℃)에서 높은 농도를 나타내고 있는데, 이는 O₃이 반응성 물질이기 때문에 국지적 광화학반응에 의한 영향도 있겠지만 외부로부터의 수송 영향도 크다는 것을 추정할 수 있다. 측정지점별로 PM₁₀ 초과빈도를 보면, Type E의 이도동과 동홍동 지점은 5~10℃ 구간에서 가장 높은 초과빈도(약 190~250회) 연동 지점은 0~5℃ 구간에서 가장 높은 초과빈도(약 200회)를 나타냈다. Type F에서 연동 지점은 5~10℃ 구간, 이도동과 동홍동 지점은 0~5℃ 구간에서 가장 높은 초과빈도를 보였으나 대체로 10회 미만으로 낮은 수치였다. 따라서 제주지역 PM₁₀ 농도의 높은 초과빈도는 주로 3~5월의 봄철 기온 구간에서 매우 뚜렷한데, 이것은 중국 발원지로부터의 황사수송에 의한 기여가 가장 큰 것으로 추정된다.

풍속 구간에 따른 O₃과 PM₁₀ 농도의 초과빈도 특성은 기온 구간에 따른 특성과 비교해 다른 양상을 보였다(Fig. 6). 먼저 O₃ 농도의 초과빈도를 보면, Type A에서 연동 지점은 2 m/s 이하의 저풍속에서 가장 높은 초과빈도(약 100회)를 보였으며, 2~4 m/s의 구간에서도 상당히 높은 편이었다(약 80회). 이것은 오존 고농도일의 대부분 기류패턴(Types A~C)에서 연동지점이 다른 두 지점(이도동, 동홍동)에 비해 상당히 높은 농도가 나타난 것과 연관 지어 해석할 수 있다(Table 2). 이외에도, 동홍동 지점은 2~4 m/s의 저풍속에서 그리고 이도동 지점은 4~6 m/s의 강한 풍속 구간에서 가장 높은 초과빈도(각각 150회와 80회)를 보였다.

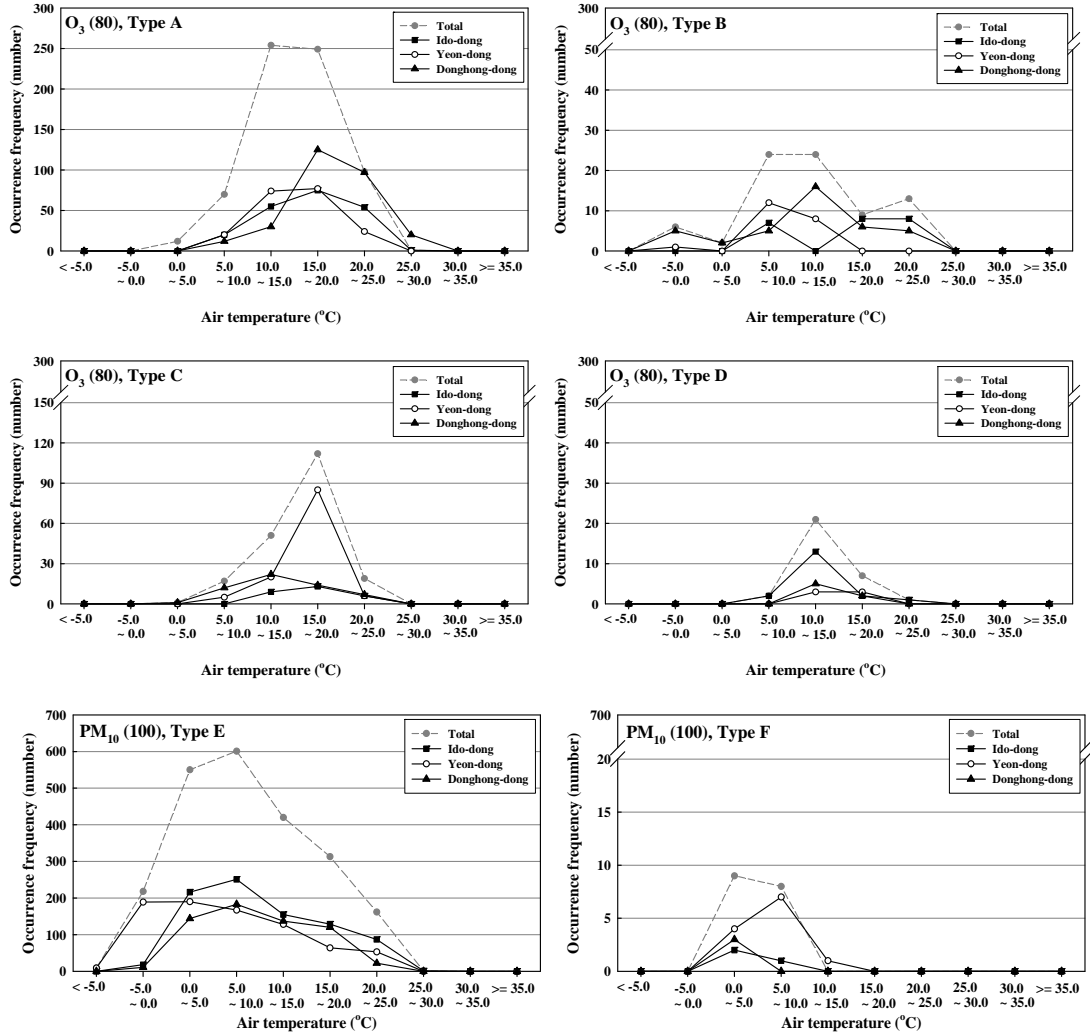


Fig. 5. Relationship between the occurrence frequency of O_3 (≥ 80 ppb) and PM_{10} ($\geq 100 \mu g/m^3$) and air temperature according to the classified airflow patterns on their high concentrations days during 2009-2015. The analysis related to Type G was excluded, possibly due to the uncertainty of HYSPLIT model.

한편, 다른 3가지 기류패턴 Types B~D에서는 대부분 2 m/s 이하 또는 2~4 m/s의 구간에서 가장 높은 초과빈도를 보였으나, 빈도수가 작은 편이어서(약 30회 미만) Type A와 비교하여 대상지역 고농도 O_3 에 미치는 영향은 미비한 것으로 사료된다. 풍속 구간에 따른 PM_{10} 의 초과빈도를 보면, 기류패턴별(Types E~G) 연동과 동홍동 지점은 대부분 2 m/s 이하 또는 2~4 m/s의 구간에서 높은 초과빈도를 보인 반면, 이도동 지점

은 2~4 m/s 구간부터 심지어 8~10 m/s의 매우 강한 풍속의 구간에서도 상당히 높은 초과빈도가 나타났다. 이런 점을 유추해 볼 때 이도동 지점은 다른 지점에 비해 기류수송에 의한 영향이 상대적으로 클 것으로 추정할 수 있다. 이외에도, Type E는 Type F에 비해 상당히 높은 빈도수가 나타나 대상지역 고농도 PM_{10} 에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 추정된다.

Table 4는 연구기간동안(2009~2015년) 미세먼지

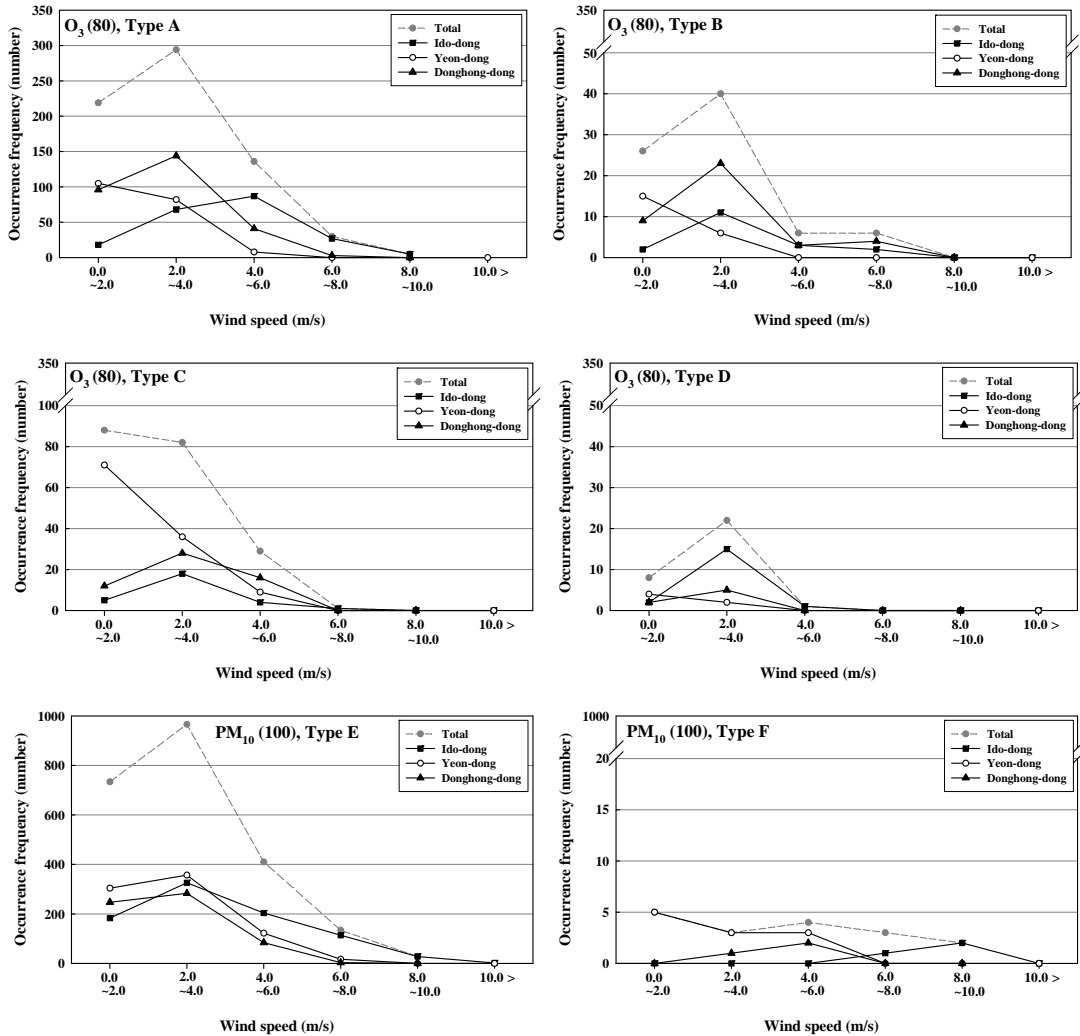


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for surface wind speed.

고농도의 기류패턴(Type E, Type F)에 따른 도심지점(연동, 이도동, 동홍동)의 PM₁₀ 농도변화에 대한 LRT 효과를 간접적으로 나타낸다. 황사발원지로부터 유입되는 기류 Type E에서 3곳의 도심지점에서의 LRT 기여도는 약 87%, 북만주 부근에서 유입되는 기류 Type F에서는 약 93%가 나타났다. 이것은 미세먼지 고농도 사례일을 대상으로 오염물질의 유입경로(예, 황사발원지로부터 유입), 즉 기류패턴에 따른 분석결과이므로 수송의 효과가 훨씬 크다는 것은 당연한 결과라

고 사료된다. 따라서 보다 자세한 해석을 위하여 연구기간동안(2009~2015년) 연도별 자료 수(고농도 사례일)가 많은 Type E에 대해 상세분석을 수행하였다. 연도별로 고농도 사례일에 대해서만 추정된 LRT 기여도는 64%(2014년) ~ 98%(2009년) 정도로 나타난 반면, 고농도일을 포함한 전체 1년간의 LRT 기여도는 다소 낮은 59%(2012년) ~ 92%(2009년)을 차지하였다. 특히 2011년과 2012년에는 각각 전체 1년간의 LRT 기여도가 76%와 59%인 반면, 고농도일 대해서만

추정된 LRT 기여도는 각각 93%와 90%를 차지하여 상대적으로 큰 차이를 보였다. 다른 선행연구의 결과를 보면, 핀란드의 Vallila와 Kallio 지역 도심 미세먼지에 대한 LRT 기여도는 약 64~76%(Karppinen et al., 2004), 그리고 2004년~2013년 우리나라 서울에서의 LRT 기여도는 48~79%(Ahmed et al., 2015)로 추정되었다. 따라서 본 연구의 LRT 기여는 선행연구의 결과보다 다소 높게 추정되었는데, 이는 선행연구의 배경측정지점 고도와 비교해 볼 때 본 연구의 고산배경지점이 상대적으로 낮은 고도에 위치하여 LRT에 의한 영향뿐만 아니라 주변지역으로부터 국지이류에 따른 오염물질 수송 또한 배제할 수 없는 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 제주지역(이도동, 연동, 동홍동)의 5가지 대기오염물질 중에서 환경기준치 초과빈도가 나타난 오존과 미세먼지(예, PM_{10})를 대상으로 고농도 사례일을 선정하고, 각각의 기류패턴을 분류 및 분석하였다. 또한 기류패턴별 두 오염물질의 농도변화와 기상 조건을 면밀하게 살펴보았다. 연구기간동안(2009~2015년) 오존 고농도일의 기류패턴은 총 4개(Types A-D), 미세먼지 고농도일은 총 3개(Types E-G)로 분류되었다. 오존의 경우, 중국 도심과 공업단지 부근에서 수송되는 기류패턴 Type A가 가장 높은 빈도와 높은 농도를 나타냈으며(약 69%, 평균 67 ppb), 다음으로 중국 동쪽/남쪽 또는 해양을 순환하는 Type C(약 16%, 65 ppb), 북만주 방향에서 수송되는 Type B(약 10%, 67 ppb), 일본 연안지역을 거쳐 제주도로 수송되는 Type D(약 5%, 58 ppb) 순으로 나타났다. 미세먼지의 경우, 황사발원지 부근에서 북서풍을 따라 유입되는 Type E가 가장 높은 빈도와 농도 수치를 보였으며(약 92%, 평균 136 $\mu g/m^3$), 그 외 북만주 부근에서 북풍을 따라 제주도로 유입되는 Type F와 비발원지 패턴으로 주로 해양을 순환하는 Type G는 Type E에 비해 상대적으로 낮은 빈도(10% 미만)와 낮은 농도를 나타냈다.

오존과 미세먼지 고농도일의 대표 기류패턴인 Type A와 Type E에 대해 기상요소와의 관계를 보면,

오존과 기온 및 풍속과의 관계에서 대부분 양의 상관관계를 보였으나(연동 제외), 미세먼지는 기온과의 관계에서 양의 상관관계를 풍속과의 관계에서 약한 음의 상관관계를 보였다. 또한 오존과 미세먼지 모두 대부분 봄철 또는 가을철 기온 구간에서 높은 초과빈도가 나타났으며, 상대적으로 강한 풍속 구간에서 높은 초과빈도가 나타났다(연동 제외). 이러한 결과는 단순히 기온 또는 풍속 변화만으로 대기오염물질의 농도 변화를 정확하게 해석하는 것은 많은 어려움이 있으나, 대부분 지점에서 국지배출의 영향(특히, O_3 의 경우)과 함께 외부로부터의 대기수송(확산)에 의한 영향도 크다는 것을 시사한다. 이외에도, 고농도 사례일의 도심지 PM_{10} 농도변화에 대한 LRT 기여도는 고농도일을 포함한 전체 기간에 대한 기여도보다 상대적으로 크게 나타났으며, 또한 선행연구 결과에 비해 높게 추정되었다. 이는 본 연구의 고산배경지점이 비교적 낮은 고도에 위치하여 LRT의 영향과 함께 주변의 국지이류에 의한 오염물질 유입 가능성도 일부 있는 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 제주지역 오존 및 미세먼지의 농도변화는 전반적으로 국지적 영향은 물론 외부수송 영향도 큰 것으로 해석할 수 있으나, 대상지역 면적에 비해 많이 부족한 대기질 관측망으로 인해 제주도 전역의 대기환경 변화를 설명하기에는 많은 어려움과 한계가 있다. 향후 보다 정확한 해석을 위하여 다양한 관측망 확충과 함께 3차원 광화학 수송모델링을 통한 상세연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2016학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Ahmed, E., Kim, K. H., Shon, Z. H., Song, S. K., 2015, Long-term trend of airborne particulate matter in Seoul, Korea from 2004 to 2013, *Atmos. Environ.*, 101, 125-133.
- 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.
- 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.
- Jaffe, D., McKendry, I., Anderson, T., Price, H., 2003, Six 'new' episodes of transpacific transport of air pollutants, *Atmos. Environ.*, 37, 391-404.
- 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. Int.*, 21(2), 153-163.
- Kang, J. E., 2012, Optimized numerical simulation and quantitative process analysis to ozone episodes in a valley city near coastal metropolitan cities, Ph. D. Dissertation, Pusan National University, Busan, Korea.
- Karppinen, A., Härkönen, J., Kukkonen, J., Aarnio, P., Koskentalo, T., 2004, Statistical model for assessing the portion of fine particulate matter transported regionally and long range to urban air, *Scand. J. Work Environ. Health*, 30, 47-53.
- 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., Lee, S. Y., Lim, Y. K., Song, S. K., 2007, Design and assessment of an ozone potential forecasting model using multi-regression equations in Ulsan metropolitan area, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 23(1), 14-28.
- Kim, Y. K., Park, S. H., Kang, J. E., Song, S. K., 2009, Numerical simulation and process analysis using the MM5-CMAQ in Yangsan on high ozone days during spring and summer, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 19(3), 269-279.
- Korean Ministry of Environment (KMOE), 2003-2016, Annual report of ambient air quality in Korea 2002-2015, Korea.
- Lal, S., Naja, M., Subbaraya, B. H., 2000, Seasonal variations in surface ozone and its precursors over an urban site in India, *Atmos. Environ.*, 34, 2713-2724.
- Makra, L., Juhász, M., Mika, J., Bartzokas, A., Bécz, R., Süümegehy, Z., 2007, Relationship between the Pééczely's large-scale weather types and airborne pollen grain concentrations for Szeged, Hungary, *Grana*, 46, 43-56.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2013, Korea.
- 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.
- Park, Y. H., Song, S. K., Lee, S. J., Kim, S., Han, S. B., 2016, An Analysis of long-term variation of PM₁₀ levels and local meteorology in relation to their concentration changes in Jeju, *J. Environ. Sci. Int.*, 25, 107-125.
- Pochanart, P., Hirokawa, J., Kajii, Y., Akimoto, H., Nakao, M., 1999, Influence of regional-scale anthropogenic activity in northeast Asia on seasonal variations of surface ozone and carbon monoxide observed Oki, Japan, *J. Geophys. Res.*, 103, 3621-3631.
- Pochanart, P., Akimoto, H., Kinjo, Y., Tanimoto, H., 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.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2006, *Atmospheric chemistry and physics : From air pollution to climate change*, second ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Son, H. Y., Kim, C. H., 2009, The spectral characteristics of climatological variables over the Asian dust source regions and its association with particle concentrations in Busan, *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, 30(6), 734-743.
- 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.*

- Int., 17, 1169-1182.
- Song, S. K., Kim, Y. K., Kang, J. E., 2009, Characteristics of ozone concentrations around an urban valley based on the intensive air quality measurement during spring and summer of 2006, J. Kor. Soc. Atmos. Environ., 25(4), 289-303.
- Song, S. K., Shon, Z. H., Kim, Y. K., Kang, Y. H., Oh, I. B., Jung, C. H., 2010, Influence of ship emissions on ozone concentrations around coastal areas during summer season, Atmos. Environ., 44, 713-723.
- 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.
- Song, S. K., Han, S. B., Kim, S. W., 2014, Analysis of meteorological characteristics related to changes in atmospheric environment on Jeju Island during 2010-2012, J. Environ. Sci. Int., 23, 1889-1907.
- Timonen, H., Wigder, N., Jaffe, D., 2013, Influence of background particulate matter (PM) on urban air quality in the Pacific Northwest, J. Environ. Manag., 129, 333-340.
- 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, Atmos. Environ., 41, 7739-7750.
- Yoon, S. C., Won, J. G., Omar, A. H., Kim, S. W., Sohn, B. J., 2005, Estimation of the radiative forcing by key aerosol types in worldwide locations using a column model and Aeronet data, Atmos. Environ., 39, 6620-6630.