

ORIGINAL ARTICLE

제주지역 미세먼지의 장기변동 및 농도변화에 관한 국지기상 분석

박연희 · 송상근* · 이수정 · 김석우 · 한승범

제주대학교 해양과학대학 지구해양학과

An Analysis of Long-Term Variation of PM₁₀ Levels and Local Meteorology in Relation to Their Concentration Changes in Jeju

Yeon-Hee Park, Sang-Keun Song*, Soo-Jeong Lee, Suk-Woo Kim, Seung-Bum Han

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

Abstract

Long-term variations of PM₁₀ and the characteristics of local meteorology related to its concentration changes were analyzed at 4 air quality sites (Ido-dong, Yeon-dong, Donghong-dong, and Gosan) in Jeju during two different periods, such as PI (2001-2006) and PII (2007-2013), over a 13-year period. Overall, the long-term trend of PM₁₀ was very slightly downward during the whole study period, while the high PM₁₀ concentrations in PII were observed more frequently than those in PI. The concentration variations of PM₁₀ during the study period was clarified in correlation between PM₁₀ and meteorological variables, e.g. the low (high) PM₁₀ concentration with large (small) precipitation or high (low) radiation and in part high PM₁₀ concentrations (especially, Donghong-dong and Gosan) with strong wind speed and the westerly/northwesterly winds. This was likely to be caused by the transport effect (from the polluted regions of China) rather than the contribution of local emission sources. The PM₁₀ concentrations in "Asian dust" and "Haze" weather types were higher, whereas those in "Precipitation", "Fog", and "Thunder and Lighting" weather types were lower. The contribution of long-range transport to the observed PM₁₀ levels in the urban center (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong), if estimated by comparison to the data of the background site (Gosan), was found to explain about 80% (on average) of its input.

Key words : Long-term variation, PM₁₀, Transport, Wind speed and direction, Jeju

1. 서론

일반적으로 미세먼지는 화석연료의 연소 또는 공장과 자동차 등의 배출가스에서 나오며, 미세먼지 농도는 주변지역의 지리-지형적 특성, 장거리수송에 의한 외부유입, 국지기상조건 등에 의해 좌우된다(KMOE: Korean Ministry of Environment, 2013). 특히, 국지적 기상요소의 시-공간적 변화는 대기 중 오염물질의 확산, 농도축

적, 침적에 큰 영향을 주므로 미세먼지의 농도 변화(증가와 감소)와 밀접한 관련이 있다(Shin et al., 2007). 한편, 미세먼지 농도는 대도시와 청정지역에서 서로 다른 양상을 나타낸다(Yoon et al., 2005). 인구와 차량이 밀집되어 있는 대도시에서는 주로 고정배출원에 의해 미세먼지의 농도가 결정되는 반면, 비교적 인구와 차량이 적고 공장 등 산업 발달이 덜한 청정지역(예, 도서, 시골, 섬 등)에서는 자체 오염물질 배출이 적기 때문에 고정배출원에

Received 8 October, 2015; Revised 13 November, 2015;

Accepted 16 November, 2015

*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.

의한 국지영향보다 외부 유입에 의한 영향이 미세먼지 농도를 결정하는데 큰 역할을 한다. 우리나라는 중국의 풍하층에 위치한 지리적 특성에 의해 중국으로부터 장거리 수송되는 오염물질의 영향을 많이 받게 되는데, 국립환경과학원의 연구에 따르면 중국으로부터 장거리 수송되는 미세먼지의 국내기여도는 연평균 30~50% 수준에 이른다고 추정된 바 있다(KMOE, 2013).

우리나라의 미세먼지 농도는 황사발생이 많은 봄철에 가장 높게 나타나는 것이 일반적이거나, 최근 들어 중국으로부터 오염물질의 장거리수송과 국지기상조건(대기 안정 및 정체)에 따른 미세먼지의 고농도발생 사례가 계절과 상관없이 자주 나타나기도 한다(Lee and Hills, 2003). 이러한 고농도 발생은 생태계는 물론 인간의 건강 즉, 천식 등의 호흡기 질환과 혈관 기능 장애 및 부정맥 등 심혈관 질환을 유발하며 사망률 증가에도 상당한 연관성이 있다(Bae, 2014; Janssen et al., 2013; Samoli et al., 2013). 아울러 미세먼지로 인한 피해가 점차 심각해짐에 따라 대중들의 관심이 점차 증가하고 있어 이에 따른 미세먼지 농도변화의 원인규명, 인체에 미치는 위해성에 대한 평가 등 다각적인 측면에서 많은 연구들이 수행되고 있다(Kim et al., 2007; Kim et al., 2010; Kim et al., 2013; Shin et al., 2007; Yang et al., 2010). 그러나 지금까지의 선행연구는 대부분 대도시 오염지역을 대상지역으로 수행되어 왔고, 제주지역의 경우 고산 배경지점만을 대상으로 미세먼지를 분석한 연구가 대부분이었다(Kim et al., 2014; Shin et al., 2010).

최근 제주지역의 대기환경 변화에 관한 연구에 따르면(Song et al., 2014), 제주지역의 PM₁₀ 농도는 다른 대부분의 대기환경기준 오염물질과 달리 국가환경기준치를 빈번하게 초과하는 것으로 나타났으며, 대상지역 내 대부분 지점에서 골고루 분포하는 특징이 나타났다. 또한 일반적으로 낮 12시를 전·후로 최고 농도가 나타나는 도시의 패턴과 달리 제주지역은 주야간에 비슷한 농도 특성을 보였고 대부분 서/북서풍 계열에서 높은 농도 수준을 나타내, 국지적 오염물질 배출로 인한 영향보다는 수송에 의한 외부유입과 야간 잔류층으로부터 연직이류 등의 기상조건이 더 큰 영향인 것으로 밝힌바 있다(Song et al., 2014). 이러한 제주지역은 지속적인 인구 및 관광객 증가, 도시팽창(발달) 및 차량 급증 등으로 인해 향후 점차적으로 미세먼지의 영향이 커질 것으로 예상되는 바,

본 연구에서는 이 지역의 미세먼지(PM₁₀)와 국지기상의 장기변화 경향 및 사공간적 특성을 파악하고 장기간 동안 농도변화에 영향을 주는 국지기상의 특성을 상세하게 살펴보고자 하였다. 또한 대상지역 PM₁₀ 농도 수준에 대한 국지 배출 또는 장거리수송의 기여도를 분석하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 최근 13년간(2001~2013년) 제주지역 미세먼지의 장기변동 및 농도변화에 영향을 주는 국지기상을 상세하게 분석하기 위하여 대기환경기준 오염물질인 PM₁₀(미세먼지)과 주요 기상요소(기온, 풍향, 풍속, 강수량 등) 자료를 이용하였다. PM₁₀ 자료는 환경부 산하 제주지역 내 대기질 측정지점(이도동, 연동, 동홍동, 고산)에서 관측한 시간별 자료이다(Fig. 1). 이도동, 연동, 동홍동 지점은 각각 오염물질이 측정된 시작시점이 다르므로 본 연구에 이용된 총 연구기간은 지점별로 약간 다르다. 즉 이도동은 2001~2013년(총 13년), 연동은 2007~2013년(총 7년), 동홍동은 2002~2013년(총 12년)으로 선정하였다. 고산은 여러 해 동안의 시간별 자료 측정 부재로 인해 2005년, 2009년, 2011~2013년 총 5년간의 자료를 이용하였다.

일반적으로 특정 대상지역의 대기오염 정도와 오염물질 농도는 그 지역과 인근의 국지기상 조건에 의해 크게 좌우된다. 따라서 제주지역 내 PM₁₀ 농도의 사공간적 변화를 보다 정확하게 해석하기 위하여 기상관측지점을 대기질 측정지점과 최대한 가까운 곳으로 선정하였다. 즉, 이도동 대기질 측정지점에 대해서는 제주지방기상청(S1), 연동 지점에 대해서는 KBS제주방송총국(S2), 서귀포 동홍동 지점에 대해서는 서귀포기상대(S3), 고산 지점에 대해서는 고산기상대(S4)를 선정하였다(Fig. 1). 연구기간(2001~2013년)의 각 기상관측 지점별(S1~S4) 기온, 풍향, 풍속, 강수량, 상대습도 자료는 시간별 자료를 이용하였고, 일사량 자료는 기상청의 기상연보(KMA, 2002~2014) 자료를 이용하였다. 한편, 상대습도는 S2 지점에서 일사량은 S2와 S3 지점에서 각각 자료 부재로 인해 분석에서 제외하였다. 본 연구에서는 대상지역 PM₁₀ 농도변화의 특성을 상세하게 분석하기 위하여 연무발생 빈도(기상연보 자료 이용)가 증가하기 시작하는 2007년을 기점(2007년 이전에는 대부분 지점에

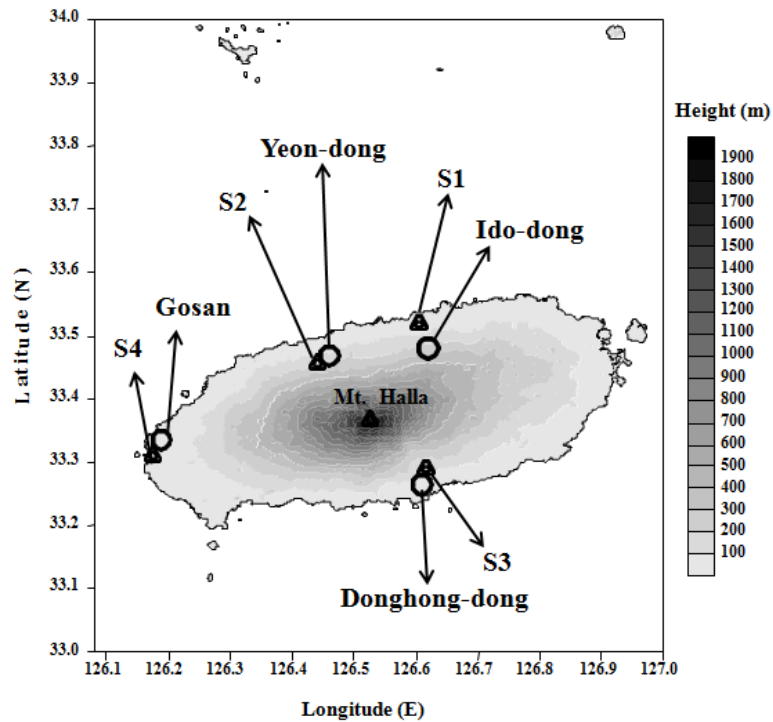


Fig. 1. Geographical locations of four monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, Donghong-dong, and Gosan) for air pollutants (open circle, O) in Jeju. The meteorological monitoring sites (triangle, Δ) are located less than 2 km away from the air quality monitoring sites, respectively. S1: Jeju Regional Meteorological Administration, S2: KBS Jeju Broadcasting Station, S3: Seogwipo Weather Station, and S4: Gosan Weather Station.

서 2회 이하, 2007년 이후에는 약 4~31회 발생, 그림 제외)으로 전체 연구기간(2001~2013년)을 Period I (PI, 2001~2006년)과 Period II (PII, 2007~2013년)로 분류하였다.

제주지역의 미세먼지(PM₁₀)와 국지기상의 장기변화 경향을 연변화와 월변화로 구분하여 분석하였으며, 연구기간 전체의 연평균 증가율을 산정하기 위하여 Mann-Kendall 검정법(MK test)을 적용하였다. MK 검정은 증가와 감소 추세를 반복하는 자료의 경향을 분석하기 위하여 주로 적용되는 방법으로 선형 추세의 기울기(slope) 즉, 평균 증가율을 추정하기 위하여 흔히 이용되는 방법이다(Anttila and Tuovinen, 2010; Simmonds et al., 2004). 대기질 측정지점(총 4 지점) 중 이도동과 동홍동은 각각 13년과 12년의 PM₁₀에 대해 MK 검정을 수행하였고, 고산의 경우는 이용된 자료의 기간이 너무 짧고 연속성이 없어서 대기환경연보(KMOE: Korean

Ministry of Environment, 2002~2014)의 월평균 PM₁₀ 자료를 이용하여 MK 검정을 수행하였다. 그러나 연동 지점은 시간별 측정 자료와 대기환경연보의 월자료 모두 자료기간이 너무 짧아 MK 검정에서 제외하였다. 이외에도, 연구기간을 두 기간(PI과 PII)으로 나누어 고농도 PM₁₀의 빈도 변화를 상세하게 알아보기 위하여 황사 예보기준 중 짙은 황사 기준치(1시간 평균 400~800 μg/m³)와 그 이상의 농도에 대해 전체를 6개 구간(400~600 μg/m³, 600~800 μg/m³, 800~1000 μg/m³, 1000~1200 μg/m³, 1200~1400 μg/m³, 1400 μg/m³ 이상)으로 나누어 분석하였다.

PM₁₀과 기상요소의 상관관계를 알아보기 위하여 일반적으로 통계분석에서 상관성 분석 및 유의성 검정에 흔히 쓰이는 SPSS 통계 프로그램을 이용하였다. 일기유형에 따른 PM₁₀ 농도변화를 살펴보기 위해 이용된 일기 유형의 자료는 제주지역 종관기상관측시스템(ASOS:

Automated Synoptic Observing System)에서만 제공하는 기상현상표를 근거로 하였으며, 일기유형 관측지점은 ASOS인 S1(제주지방기상청), S3(서귀포기상대), S4(고산기상대) 3 지점이다(S2는 ASOS 지점이 아니므로 제외). 또한 일기유형은 전체 8개의 카테고리 즉, 전운량이 8할 이하인 맑음(clear) 및 9할 이상인 흐림(cloud)(Oh et al., 2004), 그리고 황사(dust), 강수(precipitation), 안개(fog), 연무(haze), 박무(mist), 천둥 및 번개(thunder and lighting)로 분류하고 각 일기유형별 발생하는 모든 시간대의 자료를 분석에 이용하였다(Lee et al., 2013).

제주지역 내 도심대기 중 PM₁₀ 농도변화에 영향을 주는 기상조건을 면밀히 살펴보기 위하여 도심 측정지점에 대해 PM₁₀의 장거리수송(LRT: Long-range transport)의 효과를 간접적으로 살펴보았다. 이러한 분석은 여러 선행연구에서 이용되고 있는 단순 선형 회귀방법에 기초하여 적용하였다(Ahmed et al., 2015; Karppinen et al., 2004; Timonen et al., 2013). 일반적으로 장거리수송에 따른 PM₁₀ 농도 증가는 자유대류권(free troposphere)에서 빈번하게 나타나므로, 비교적 높은 고도에 위치한 배경지점에서 관측된 PM₁₀은 LRT 오염원에 의해 크게 영향을 받음을 가정할 수 있으며, 국지지역(예, 도심 내륙)에서의 PM₁₀ 농도변화는 장거리수송에 의한 영향과 거의 상관관계가 없음을 가정한다(Jaffe et al., 2003; Timonen, 2013). 하지만 본 연구의 대상지역인 제주도는 자유대류권에 위치한 대기질 배경 측정지점이 없는 관계로 국가배경측정소인 고산지점(도심 지점으로부터 약 40 km 떨어진 지점)을 배경 측정지점으로 선정하여 도심 측정지점인 이도동 및 연동(제주시) 그리고 동홍동 지점(서귀포시)과 비교·분석하였다. 고산 배경지점에서는 시간별 측정 자료(2005년, 2009년, 2011~2013년 만 있음) 부재인 연도가 많아 추가로 대기환경연보 자료를 분석에 이용하였다. 아래 식(1)은 본 연구에 이용된 단순선형 회귀식을 나타낸다(Ahmed et al., 2015; Karppinen et al., 2004; Timonen et al., 2013).

$$PM_{10_Local} = k_I PM_{10_Back} + k_0 \quad (1)$$

여기서, PM_{10_Local}과 PM_{10_Back}은 각각 도심 측정지점

(이도동, 연동, 동홍동)과 배경측정지점(고산)의 농도자료이며, 회귀변수 k_I 과 k_0 는 각각 회귀직선의 기울기와 y 절편을 의미한다. k_I 에 대한 통계적 추정 의미는 배경지점과 도심지점 사이에서 PM₁₀ 농도의 시간적 연관성(Temporal association, 두 지점간의 거리 및 이동속도 등)의 강도를 나타낸다. 따라서 k_I PM_{10_Back}와 k_0 는 각각 LRT 수송과 국지배출로부터의 기여를 의미한다(Ahmed et al., 2015; Karppinen et al., 2004; Timonen et al., 2013).

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세먼지와 국지기상의 장기변화 경향

3.1.1. 연변화

본 연구에서는 제주지역의 미세먼지(PM₁₀)와 국지기상의 장기변화(2001~2013년 동안) 경향을 연변화 및 월변화를 통해 분석하였다. PM₁₀ 분석은 대기질 측정지점(이도동, 연동, 동홍동, 고산)에서 측정된 PM₁₀ 자료를 이용하였으며, 국지기상 분석은 대기질 측정지점에서 가장 가까운 기상관측지점(S1, S2, S3, S4)의 기상요소(기온, 강수량, 풍속, 일사량, 상대습도) 자료를 이용하였다.

PM₁₀의 연변화를 보면(Fig. 2), 전체적으로 PI 기간의 연평균 PM₁₀ 농도가 PII 기간보다 약간 높은 것으로 나타났다. 제주지역 PM₁₀ 배출량도 PI 기간(평균 약 484 ton)이 PII 기간(약 463 ton)보다 조금 더 많은 양으로 나타났다. 특이하게도 2004~2007년 동안 PM₁₀ 배출량은 전년도 대비 감소하는 추세인데 오히려 PM₁₀ 농도는 증가하고 있다. 이와 같이 국지배출량이 작음에도 불구하고 농도가 증가한 것은 제주도의 지리적 위치 특성에 의해 중국의 사막 등 황사발원지로부터 많은 양의 황사가 유입되어 나타난 것으로 추정된다. 또한 고산 지점을 제외한 대부분 지점에서 PI의 평균농도(40.5~46.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 PII (39.2~43.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 약간 높은 편이었다(Table 2). 측정지점별로 보면, 이도동 지점에서 가장 높은 연평균 농도(2010년에 최고 52.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타냈으며, 동홍동에서 가장 낮은 농도(2012년에 약 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타냈다. 연동과 고산 지점에서는 측정 자료의 부재로 연변화를 분석하기에 짧은 기간이지만 대체로 중간 정도의 농도(전체 연구기간에 35~45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 관측되었다. MK 검정을 통해 지점별(연동은 자료 부재로 제

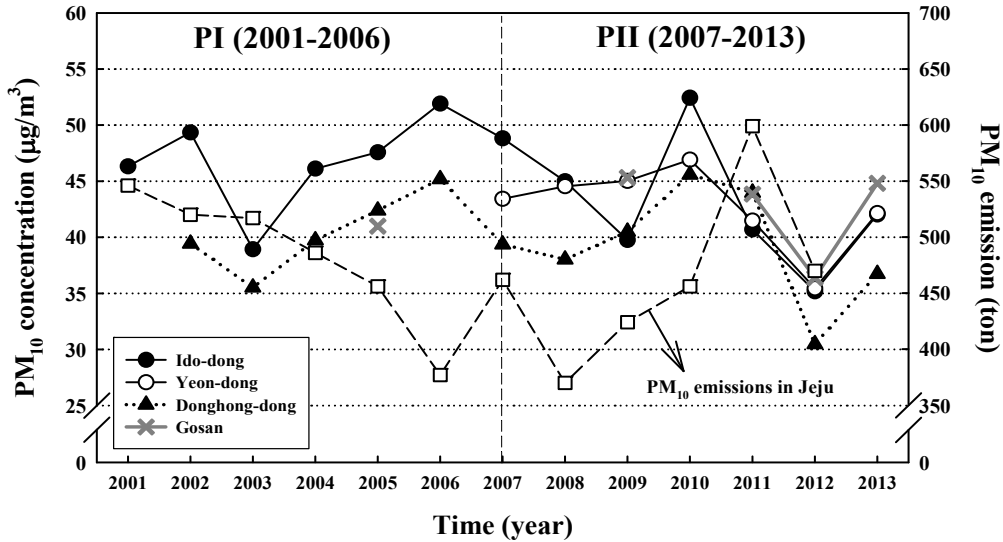


Fig. 2. Annual mean concentrations of PM₁₀ observed at four air quality monitoring sites and annual PM₁₀ emissions in Jeju during PI (2001-2006) and PII (2007-2013). Yeon-dong site for PI was excluded due to data unavailability.

외) PM₁₀의 연평균 증가율을 계산해 본 결과, 이도동 지점은 $-0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 고산은 $-0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하는 추세를 보였고, 동홍동은 $+0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약간 증가하는 추세를 보였다(그림 제외). 보다 객관적인 연평균 증가율을 산정하기에는 총 연구기간(13년: 2001~2013년)이 다소 짧은 것으로 사료되지만, 전반적으로 제주도 PM₁₀의 장기변동 추세는 미세하게 감소하는 것으로 추정된다.

대상지역 모든 지점에서 PII의 2010년에 연평균 최고 농도를 보이고, 2003년과 2012년에 상대적으로 가장 낮은 농도를 기록하였다(Fig. 2). Table 2에서도 알 수 있듯이, 모든 지점에서 2010년에 시간별 최고농도가 $2,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였으며, 2003년과 2012년에는 최고농도 중에서 가장 낮은(이도동은 2003년에 $249 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 동홍동은 2012년에 $199 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 편이었다. 2010년의 고농도 PM₁₀은 비교적 오염이 덜한 제주지역 국지배출 보다는 중국 발원지로부터 유입되는 황사의 영향이 크게 작용한 것으로 사료된다(예, 2010년 3월 황사, 동홍동에서 최고 $2,985 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 또한 이것은 인근 기상관측지점에서 관측한 2010년의 적은 강수와 일부 관련이 있는 것으로 해석되며, 이러한 대기 중 PM₁₀ 고농도로 인해 태양복사가 차단되어 그 해(2010년) 일사량이 전후 연도와 비교하여 감소한 것으로 사료된다(Fig. 3). 반면, 낮은 농도를

보인 2003년과 2012년은 황사 발원지에서의 강설 등으로 평년보다 황사유입이 적었던 것으로 보고된 바 있다(NIMR: National Institute of Meteorological Research, 2012). 또한 2003년과 2012년의 낮은 PM₁₀ 농도는 다른 연도에 비해 상대적으로 많은 양의 강수(세정 효과)와 상관이 있는 것으로 볼 수 있다. 특히 2003년의 경우에는 높은 상대습도와도 일부 관련이 있으며, 2012년의 고산 지점은 낮은 PM₁₀ 농도로 인해 일사량이 다른 연도와 비교하여 다소 많은 것으로 나타났다(Fig. 3). 대상지역의 풍향 빈도를 보면(Table 1), 이도동 인근의 S1 지점에서는 북풍과 남풍계열, 연동 인근의 S2는 북서풍과 남풍계열, 동홍동 인근의 S3는 서풍과 북풍계열, 고산 인근의 S4는 북풍계열이 가장 뚜렷하게 나타났다. 이러한 풍계 특성을 보아 제주지역의 PM₁₀ 농도 변화는 북서쪽에 위치한 중국(황사 발원지 포함) 또는 한반도의 도시로부터 유입과 큰 관련이 있는 것으로 판단된다. 한편, 기온과 풍속의 연평균 변화는 PM₁₀ 농도의 연변화와 관련성을 찾기가 어려웠다. PM₁₀ 농도와 기상요소와의 상관성 분석은 3.2절에서 자세히 다루고자 한다.

대상지역 고농도 PM₁₀의 특성을 자세히 살펴보기 위하여, 연구기간 PI과 PII에 대해 황사예보 발표기준 중에서 짙은 황사(1시간 평균 $400 \sim 800 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 이상의 농도

Table 1. Frequency (%) of wind direction at four meteorological monitoring sites (S1-S4) close to (less than 2 km) four air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, Donghong-dong, and Gosan) during PI (2001-2006) and PII (2007-2013)

Period	Year	Wind direction										
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW			
Period I (PI)	2001	25.3/4.9/19.7/34.1 ^a	5.9/3.6/16.1/10.0	23.7/5.0/15.8/19.1	3.8/9.5/4.2/7.9	15.2/17.9/8.8/16.4	3.5/10.4/5.6/1.7	10.4/16.1/21.4/6.9	8.2/27.8/3.9/3.8			
	2002	29.4/7.2/17.5/38.0	6.4/6.0/9.3/8.7	18.6/10.0/19.6/11.3	3.3/13.5/4.1/7.1	14.9/16.8/11.6/20.0	4.5/9.6/6.4/1.9	11.8/11.4/24.1/6.8	8.7/21.2/4.0/5.6			
	2003	32.0/6.7/18.7/39.1	6.1/6.3/10.8/7.2	19.8/11.2/19.6/13.5	3.1/14.0/4.9/11.1	14.4/15.7/10.4/14.5	4.3/9.8/6.7/1.7	11.1/12.2/21.2/6.5	7.2/21.0/4.5/5.5			
	2004	30.4/7.6/21.1/39.3	6.0/5.6/11.5/8.8	13.6/8.3/14.0/13.9	2.5/13.5/5.7/7.2	18.6/21.7/12.6/20.2	4.2/9.4/7.1/1.4	11.2/12.0/19.7/5.5	7.3/18.8/5.1/2.7			
	2005	34.6/7.2/18.0/45.5	5.9/5.1/8.2/6.2	12.5/7.2/19.8/9.7	2.4/12.0/3.8/7.5	16.8/17.6/13.0/18.6	4.1/11.0/2.9/2.3	13.1/13.2/23.8/6.9	9.1/24.0/7.9/2.7			
	2006	26.3/6.7/12.0/38.6	8.1/7.0/10.2/9.3	17.9/11.6/29.6/14.7	3.9/14.5/4.1/7.4	17.2/17.4/14.0/17.4	3.4/10.5/2.6/1.7	12.1/11.4/18.8/6.8	8.6/17.7/6.5/2.9			
Period II (PII)	2007	22.3/6.8/16.1/41.7	5.2/6.0/9.9/8.8	14.8/9.5/22.9/11.5	3.3/11.8/3.3/6.7	18.4/17.6/14.8/19.3	3.6/10.9/2.4/1.5	18.0/13.1/22.2/6.8	12.3/19.7/6.5/2.8			
	2008	25.7/7.3/22.9/42.5	5.9/5.7/12.3/7.0	16.6/9.0/10.8/12.2	3.4/13.9/5.6/9.0	16.6/17.7/9.3/16.4	3.5/7.8/6.8/1.5	13.3/12.8/18.7/7.8	12.9/19.1/5.2/2.9			
	2009	25.6/7.6/24.5/44.5	6.4/5.6/11.6/7.8	14.0/11.0/11.7/9.7	3.7/8.3/5.9/6.6	16.9/15.0/10.4/14.1	3.7/2.2/7.6/2.2	14.6/17.6/20.3/6.7	13.1/18.0/5.9/7.7			
	2010	26.4/8.1/21.2/32.1	4.2/5.4/12.3/5.4	13.4/8.5/14.2/19.5	4.7/11.2/6.7/10.9	13.8/17.1/11.4/8.1	2.6/2.0/7.8/2.2	13.1/18.1/19.6/9.2	12.7/15.4/4.7/12.0			
	2011	30.2/8.3/20.6/35.8	6.0/6.1/8.0/3.4	12.3/10.2/19.3/22.6	3.3/9.0/4.4/5.5	13.6/14.1/12.1/4.8	2.5/2.7/6.1/1.6	12.3/20.5/22.4/9.0	12.7/17.3/4.2/16.9			
	2012	25.0/5.6/19.8/39.4	7.4/4.7/8.8/6.3	17.7/12.4/24.1/14.5	3.0/10.7/3.4/9.5	14.8/13.2/10.8/9.8	3.2/2.0/4.2/1.2	14.5/20.4/20.6/6.2	11.6/15.4/5.1/12.9			
	2013	23.9/6.3/21.0/39.2	8.2/5.4/8.1/4.8	11.3/9.7/17.8/12.4	2.8/8.3/2.0/12.6	17.6/17.1/10.3/9.1	4.0/5.5/8.3/1.8	18.0/22.8/25.8/9.6	11.9/17.9/4.1/10.0			

^aS1/S2/S3/S4, S1: Jeju Regional Meteorological Administration, S2: KBS Jeju Broadcasting Station, S3: Seogwipo Weather Station, and S4: Gosan Weather Station.

Table 2. A statistical summary of PM₁₀ concentration (µg/m³) at four air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, Donghong-dong, and Gosan) in Jeju during the study period (2001-2013)

Period	Year	Ido-dong	Yeon-dong	Donghong-dong	Gosan
All	2001-2013	44.9±45.0 ^a (35) ^b 1-2533 ^c (112,365) ^d	42.7±48.7 (33) 1-2857 (60,619)	39.8±40.5 (32) 1-2985 (101,865)	42.3±32.4 (36) 1-672 (41,854)
Period I (PI)	2001-2006	46.7±46.1 (35) 1-1060 (51,607)	- ^e	40.5±30.9 (33) 1-873 (39,942)	41.1±39.1 (32) 1-672 (8,479)
Period II (PII)	2007-2013	43.4±44.0 (35) 1-2533 (60,758)	42.7±48.7 (33) 1-2857 (60,619)	39.2±45.7 (31) 1-2985 (61,012)	42.6±30.4 (36) 1-641 (33,375)
PI	2001	46.3±56.0 (29) 2-647 (8,390)	-	-	-
	2002	49.3±68.2 (31) 1-1060 (8,595)	-	39.4±37.6 (32) 1-879 (7,155)	-
	2003	38.9±27.8 (31) 1-249 (8,707)	-	35.5±25.0 (29) 1-260 (8,504)	-
	2004	46.1±34.4 (37) 1-685 (8,669)	-	39.8±29.7 (33) 1-382 (8,489)	-
	2005	47.6±38.4 (38) 2-780 (8,604)	-	42.7±31.8 (35) 1-462 (8,482)	41.1±39.1 (32) 1-672 (8,479)
	2006	51.9±38.4 (41) 3-429 (8,642)	-	45.3±31.1 (38) 1-308 (8,223)	-
PII	2007	48.8±52.6 (39) 1-995 (8,551)	43.5±65.9 (31) 1-1948 (8,213)	39.4±43.4 (30) 1-999 (8,680)	-
	2008	45.0±33.1 (37) 1-537 (8,717)	44.6±38.4 (36) 1-672 (8,759)	38.0±34.5 (30) 1-848 (8,660)	-
	2009	39.8±33.0 (31) 1-510 (8,684)	45.0±37.9 (36) 1-580 (8,712)	40.5±31.0 (34) 1-461 (8,753)	45.3±27.8 (39) 2-363 (8,553)
	2010	52.4±72.7 (39) 1-2533 (8,646)	46.9±72.2 (34) 1-2857 (8,745)	45.6±79.5 (34) 1-2985 (8,757)	-
	2011	40.7±36.8 (33) 1-663 (8,738)	41.5±49.8 (31) 1-961 (8,747)	44.0±53.1 (35) 1-1027 (8,713)	43.9±41.2 (36) 2-641 (7,929)
	2012	35.2±28.8 (29) 1-258 (8,751)	35.4±26.0 (30) 1-278 (8,754)	30.5±23.4 (26) 1-199 (8,751)	36.4±21.7 (32) 1-283 (8,541)
	2013	42.0±31.5 (35) 1-290 (8,671)	42.2±31.4 (34) 1-290 (8,689)	36.7±26.9 (31) 3-272 (8,698)	44.8±27.4 (39) 1-319 (8,352)

^aMean±I.o.

^bMedian.

^cMin.-Max.

^dNumber of data.

^eNot measured.

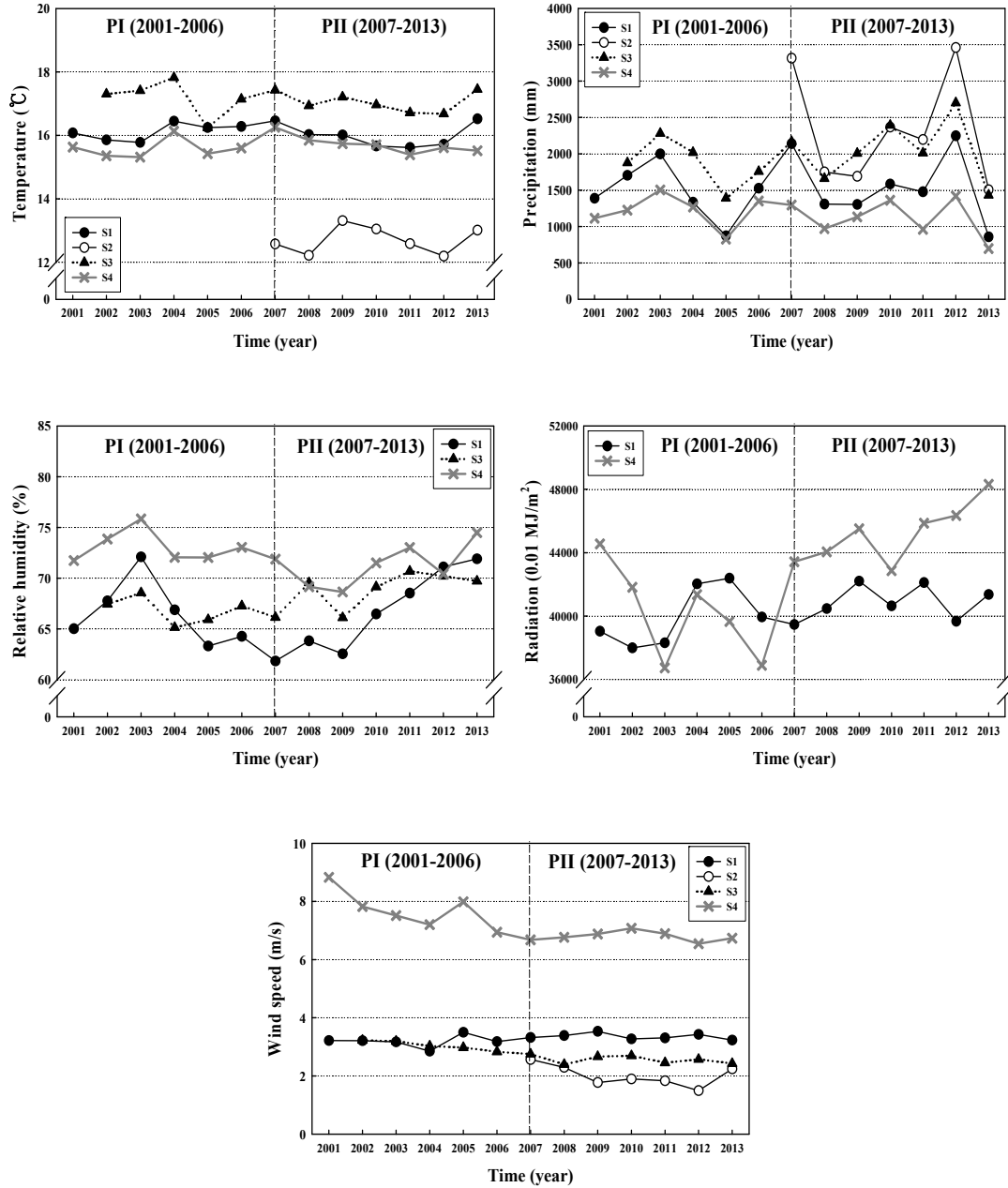


Fig. 3. Annual mean values of five meteorological variables observed at four meteorological monitoring sites (S1-S4) in Jeju during PI (2001-2006) and PII (2007-2013). The meteorological monitoring sites are located less than 2 km away from the air quality monitoring sites. S2 for PI was excluded due to data unavailability. S2 for relative humidity and S2 and S3 for radiation were excluded due to data unavailability.

자료를 6개 구간으로 나누어 각각의 빈도 패턴을 분석하였다(Fig. 4). 전반적으로, PI 기간에 이도동 지점에서 총 115회로 가장 높은 빈도를 보였으며, 다음으로 고산(총 24회), 동홍동 지점(총 11회)의 순으로 나타났다. PII 동안에는 연동에서 가장 높은 빈도 총 127회를 보였으며, 다음으로 동홍동에서 총 101회, 이도동에서 총 97회, 고산에서 총 27회로 기록되었다. 또한 대체로 PI 기간의 고농도 PM₁₀ 발생빈도와 비교하여 PII 기간에 다소 높은 발생빈도가 나타났다. 특히 황사 예보기준 중에서 매우 짙은 황사(1시간 평균 800 µg/m³ 이상)의 농도 구간을 보면, PI 기간에 이도동은 총 19회, 동홍동은 총 4회 발생하였고, 연동과 고산은 전혀 발생하지 않은 반면, PII 기간에 연동은 총 33회, 이도동은 총 26회, 동홍동은 총 26회로 상대적으로 발생빈도가 높게 나타났다(PII 기간 고산은 발생하지 않음). 즉 제주지역의 연평균 PM₁₀ 농도는 미세하게 감소하는 추세(Fig. 2와 Table 2)이지만, 과거보다 최근으로 올수록 고농도 발생빈도는 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4).

3.1.2. 월/계절 변화

Figs. 5와 6은 각각 제주지역의 PM₁₀과 국지기상의 월변화 및 계절 특성을 PI (2001~2006년)와 PII (2007~2013년)로 구분하여 나타낸 것이다. PM₁₀ 농도는 PI과 PII 기간 모두 봄철(3~5월)에 가장 높게 나타났으며, 여름철(7~8월) 또는 초가을(9월)에 가장 낮은 농도를 나타냈다(Fig. 5). 이것은 봄철에 많이 발생하는 황사로 인해 PM₁₀ 농도가 높아졌으며, 여름철 많은 강수로 야기되는 세정효과(wash-out)로 인해 농도가 감소한 것으로 사료된다(8월 평균 약 700 mm, 여름철 상대습도 80% 이상, Fig. 6). 또한 PI 기간의 봄철 4월에 서귀포 동홍동 지점에서 가장 낮은 PM₁₀ 농도를 나타낸 것은 다른 지점에 비해 봄철 강수량이 상대적으로 많았기 때문인 것으로 추정된다(Fig. 6). 지점별로는 PI 기간에 이도동 지점이 가장 높은 농도(평균 46.7 µg/m³, 최고 74.2 µg/m³)를 보이고 지점별로 약간의 농도 차이가 있으나, PII 기간에는 모든 지점에서 거의 유사한 농도 패턴을 보였다. 한편 기온과 일사의 월변화는 지점별로 거의 유사하였으며, PM₁₀ 농도의 월변화와 관련성을 찾기가 어려웠다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이, 대부분 측정지점에서 PI과 PII 기간 모두 가을철(특히 11월)에 2차 정점(peak)이 관

측되었으며, 지점별로 차이는 PI 기간(특히 고산)이 PII보다 더 크게 나타났다. PI 기간의 11월의 경우, 상대적으로 인구가 밀집되고 차량이 많은 이도동에 비해 오염원이 적은 고산지점에서 더 높은 PM₁₀ 농도가 관측되었는데, 이것은 이도동과 동홍동은 PI 전체 기간의 11월 평균값인 반면, 고산은 시간별 자료의 부재로 인해 2005년 11월 농도(예, 고산 11월 황사시 최고 672 µg/m³, 그림 제외)만 분석에 이용되었기 때문이다. PII의 경우는 PI과 달리 이도동과 연동에서의 농도가 동홍동과 고산에 비해 약간 높은 농도를 보였으나 큰 차이는 아니었다. 이러한 PII 기간의 가을철 2차 정점은 2010년 11월에 발생한 황사(최고 1,224 µg/m³)에 의한 영향이 주된 것으로 사료된다(그림 제외). 따라서 제주지역의 PM₁₀ 농도 분포는 봄철이 높고 여름철이 낮은 패턴으로 계절별 차이는 있지만, 어떤 특정지점의 농도가 매우 높은 패턴이 아니라 대체로 지점별 작은 차이의 농도 패턴(특히 PII)을 보이며 또한 가을철 높은 농도를 나타내고 있어, 이는 국지배출에 의한 영향보다 대기 수송에 따른 외부 유입(예, 황사)의 영향이 더 큰 것으로 해석된다.

3.2. 미세먼지 농도변화와 관련된 국지기상 특성

연구기간에 제주지역 PM₁₀ 농도변화와 관련된 국지기상의 특성을 면밀히 살펴보기 위하여 PM₁₀과 기상요소와의 상관관계(Table 3), 일기유형에 따른 PM₁₀ 농도변화(Table 4), 그리고 PM₁₀ 농도 수준에 대한 장거리수송의 기여도(Table 5)를 분석하였다. 여기서 이용된 기상요소는 2장에서 설명한 바와 같이 대기오염물질 측정 지점에서 가장 가까운 4 지점의 기상관측지점으로부터 수집된 자료이다. 먼저 SPSS 통계 프로그램을 이용하여 계산된 PM₁₀ 농도와 기상요소와의 상관관계를 보면(Table 3), 기온과 강수량의 경우 모든 지점에서 음의 상관관계를 보이며 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 이것은 대기 중 PM₁₀ 농도가 증가하면 알베도가 증가하여 상대적으로 일부 기온이 낮아질 수 있으며(Twomey, 1974), 한편 기온이 증가함에 따라 광화학반응에 의한 2차 에어로솔이 증가할 수도 있다(Drewnick et al., 2004; Sarnat et al., 2006; Wojas and Almquist, 2007). 따라서 보다 정확한 상관관계를 설명하기 위하여 에어로솔 화학조성별 상세한 상관성 분석 연구가 필요한 것으로 사료된다. 또한 강수량이 많을수록 세정작용에 의해 PM₁₀ 농도가

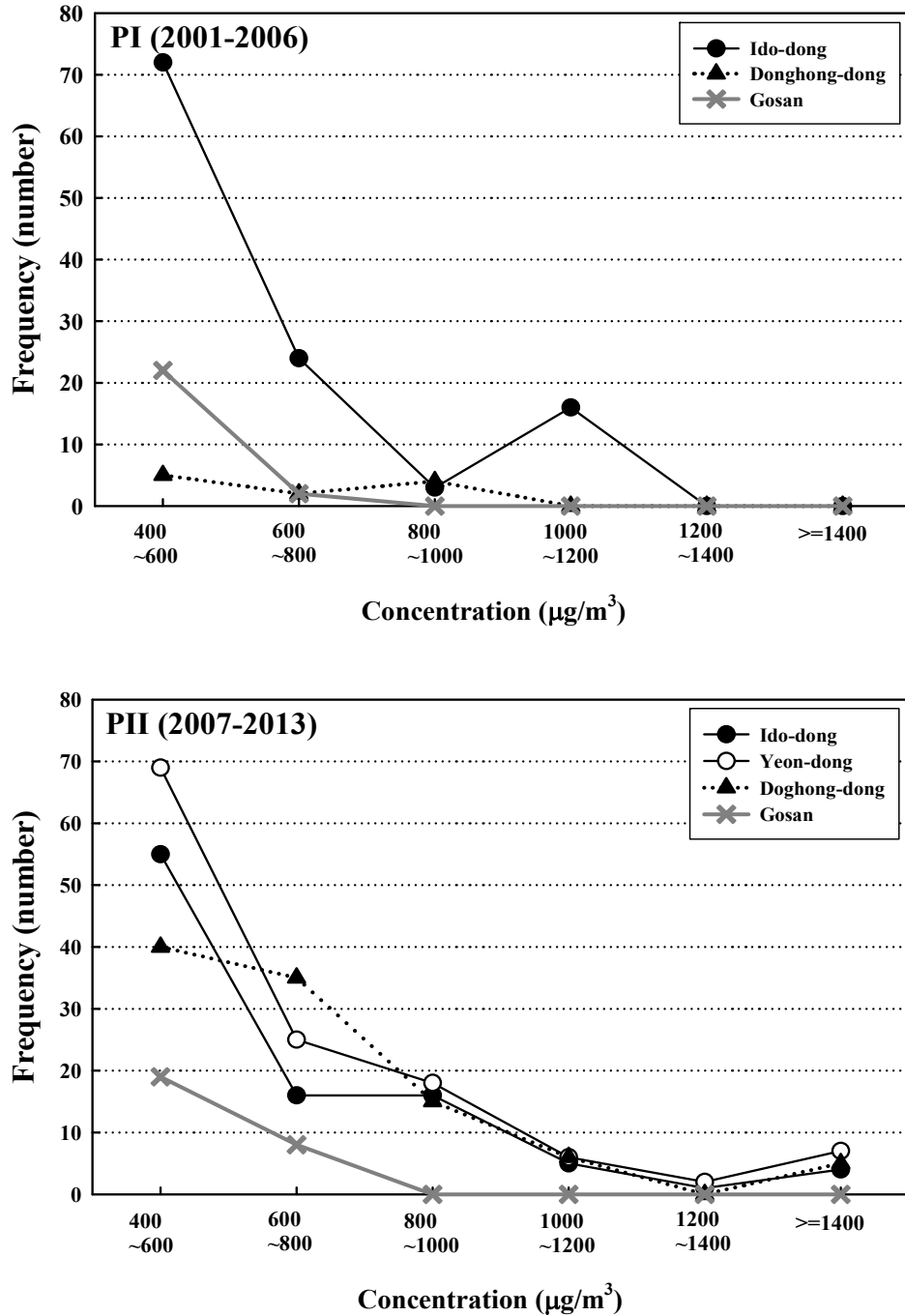


Fig. 4. Frequency patterns (number) according to PM_{10} concentration intervals at 4 air quality monitoring sites in Jeju during PI (2001-2006) and PII (2007-2013). Yeon-dong site for PI was excluded due to data unavailability.

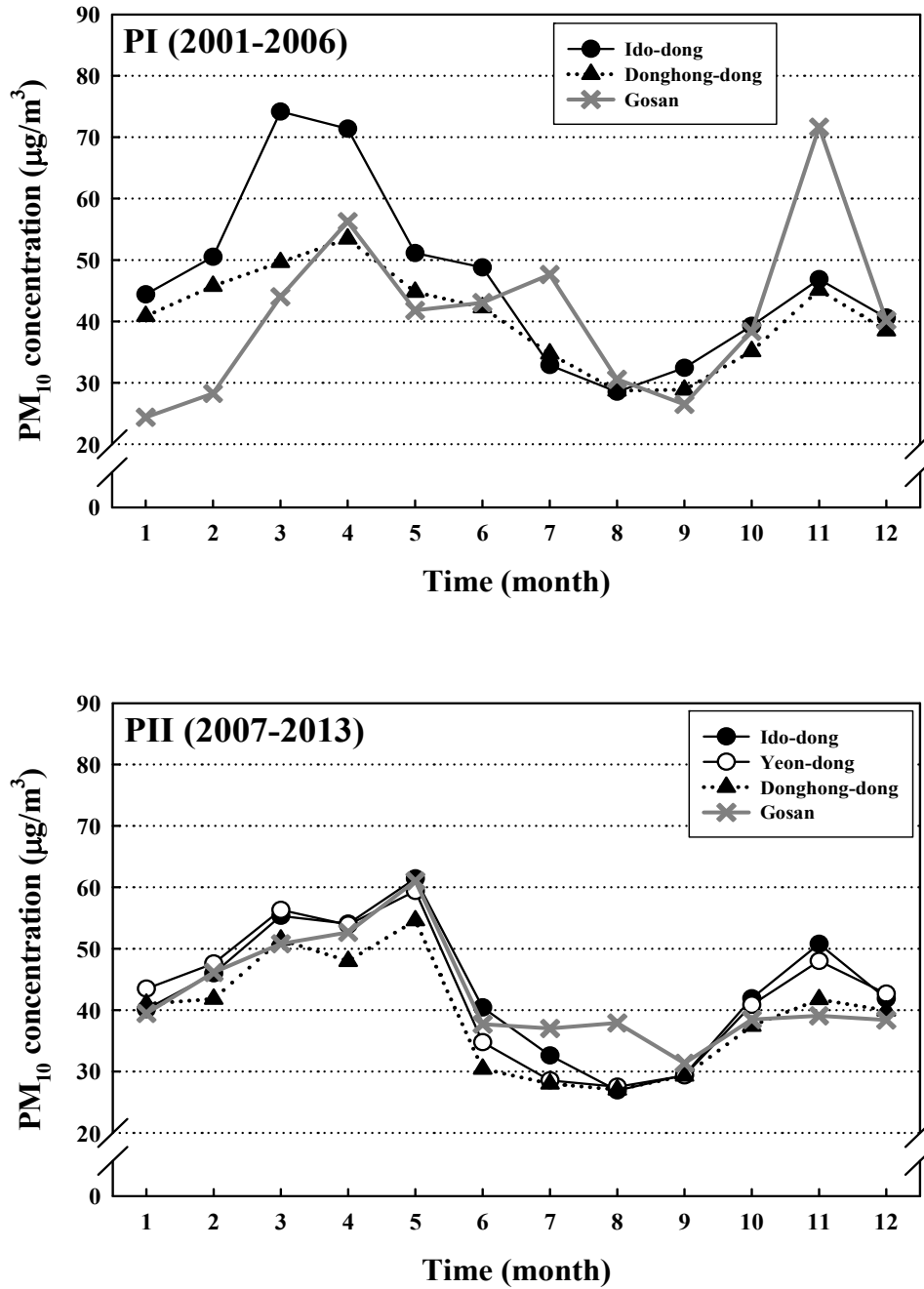


Fig. 5. Same as Fig. 2 but for monthly mean concentrations of PM₁₀.

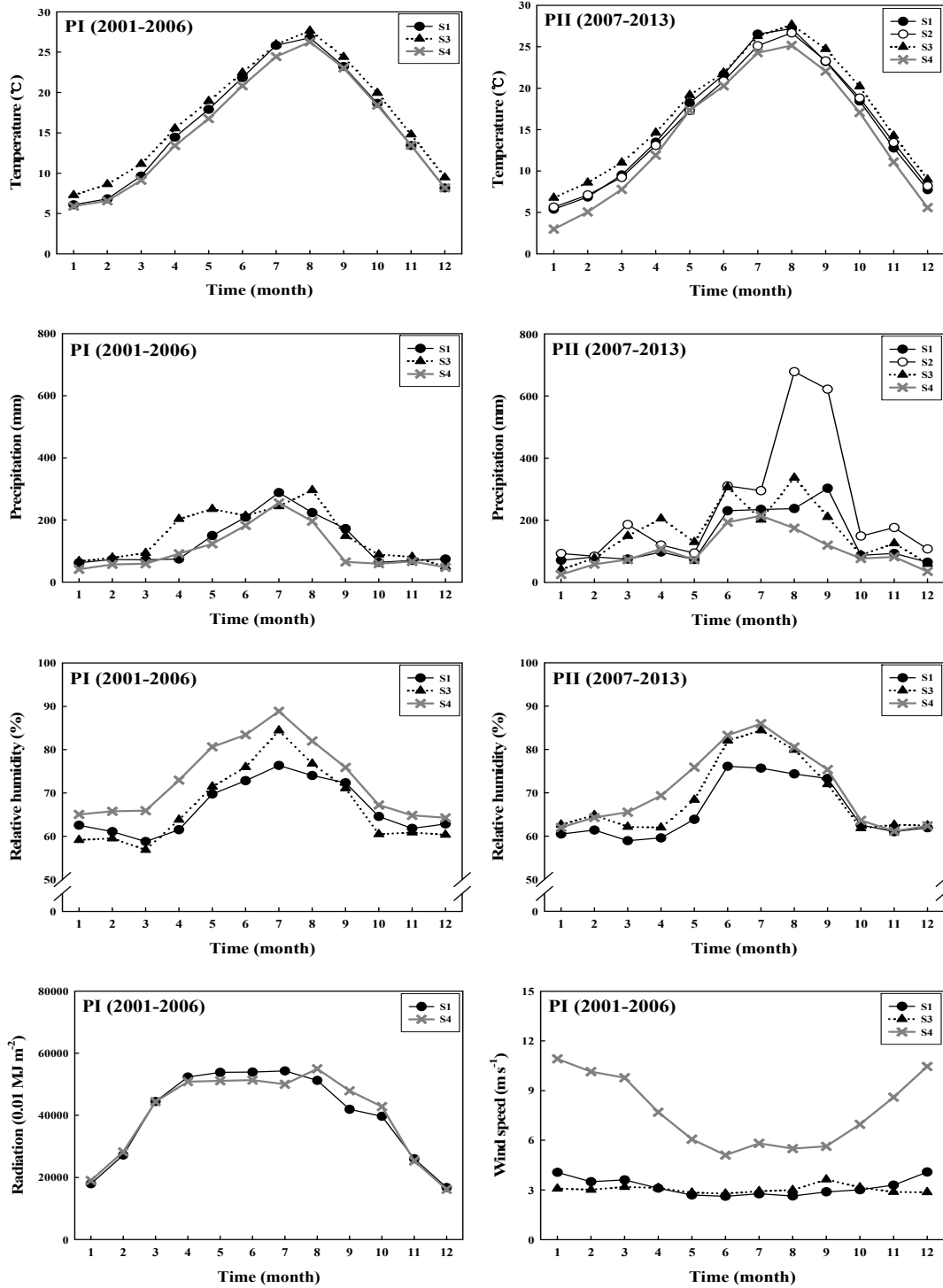


Fig. 6. Same as Fig. 3 but for monthly mean values of five meteorological variables.

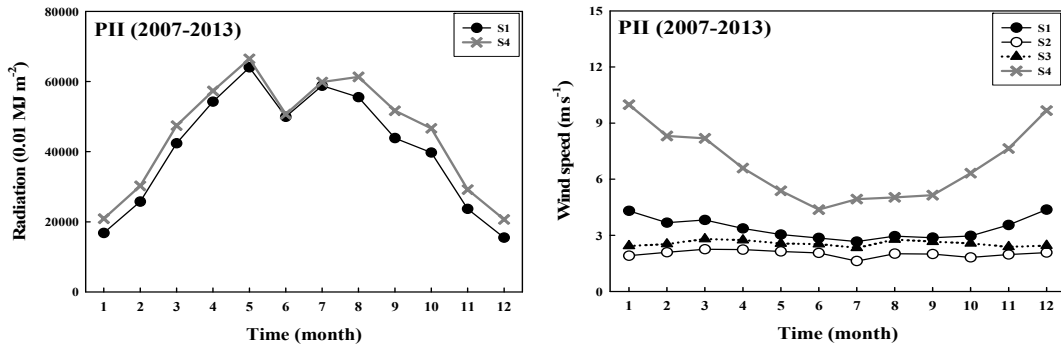


Fig. 6. Continued.

감소하기 때문인 것으로 추정된다. 이는 PM₁₀ 농도의 월/계절 변화에서 기온이 높고 강수량이 많은 여름철의 PM₁₀ 농도가 4 계절 중 가장 낮은 것과 같은 이유로 설명된다(Figs. 5와 6). 상대습도의 경우 모든 지점(연동은 자료 부재로 제외)에서 음의 상관을 보였다. 일반적으로 상대습도는 대기 중 공기의 포화 정도와 수증기 함량 등을 나타내므로 PM₁₀ 농도와 음의 상관관계는 상대습도가 증가(감소)하면 농도가 감소(증가)한다는 것을 의미한다.

국지기상과 PM₁₀ 농도와의 관계에서 일사량의 경우는 계절별로 나누어 분석하였는데, 그 결과 이도동에서는 여름(양의 상관)을 제외한 나머지 3 계절에 음의 상관을 보였으며, 고산에서는 여름과 가을에 음의 상관관계를 보였고 겨울에 양의 상관관계가 나타났다. 대기 중에 미세먼지(PM₁₀) 등 에어로솔이 많으면(적으면) 태양복사를 차단시켜 일사량이 작아지는(많아지는) 것이 일반적인데, 본 연구의 결과는 이도동의 여름과 고산의 봄과 겨울에 상이한 결과가 나타났다. 이것은 일사량의 시간별 자료 부재로 인해 기상연보의 월자료를 이용하였기 때문에 보다 정확한 상관성을 나타내지 못한 것으로 사료된다. 한편 PM₁₀과 일사량과의 상관관계는 이도동의 가을과 겨울, 고산의 겨울을 제외하고는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 풍속의 경우, 고산(양의 상관)을 제외한 3 지점에서는 음의 상관관계가 나타났다. 즉 고산을 제외한 3 지점에서는 풍속과 농도가 서로 반비례하여 풍속이 약할수록 PM₁₀의 대기 중 확산이 원활하지 못하므로 지역 내 정체되어 농도가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 그러나 고산은 3 지점에 비해 상대적으로 오염원이 적기 때문에 서로 양의 상관, 즉 풍속이 강할수록 PM₁₀ 농도가 증가하

는 것은 국지배출에 의한 영향보다 외부 유입에 의한 영향이 더 큰 것으로 추정할 수 있다(Kang et al., 2012; Gong et al., 2003; Song et al., 2014; Uno et al., 2004).

Table 4는 3 지점의 ASOS 지점인 S1(제주지방기상청, 이도동 인근), S3(서귀포기상대, 동홍동 인근), S4(고산기상대, 고산 인근)의 기상자료를 통해 분류된 8개의 일기유형(흐림, 맑음, 황사, 강수, 안개, 연무, 박무, 천둥 및 번개)에 따른 PM₁₀의 농도 특성을 나타낸다. 전체 일기유형 중에서 황사발생시 PM₁₀ 농도가 가장 높은 반면(전 기간 평균 약 258 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PII의 동홍동에서 최고 435 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 안개발생시 가장 낮은 농도(전 기간 평균 약 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PI의 고산에서 최저 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 기록하였다. 인천지역의 일기유형에 따른 PM₁₀ 농도 결과를 보면(Shin et al., 2010), 황사발생시 PM₁₀ 농도(평균 약 196 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 본 연구의 농도보다 매우 낮은 편이지만, 강수(약 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 및 안개 발생시(약 114 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 오히려 본 연구의 농도보다 높게 나타났다. 일기유형별로 상세히 살펴보면, 3 지점 모두 맑음의 PM₁₀ 농도가 흐림에 비해 높은 편(약 1.2~1.3배)이었다. 그 외 6개의 일기유형 중에서는 황사와 연무 발생시 높은 농도를 보이며, 나머지 강수, 안개, 천둥 및 번개 발생시 상대적으로 낮은 농도가 나타났다. 특히, 황사를 제외하고는 연무발생시 대부분 지점에서 PII 기간 동안에 PM₁₀ 농도가 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 과거에 비해 최근 연무발생 빈도가 증가하여 이로 인한 대기오염물질의 증가를 추정할 수 있다. 반면, 안개와 천둥 및 번개의 경우는 일반적으로 강수를 동반하기 때문에 강수와 마찬가지로 세정효과에 의해 PM₁₀ 농도가 감소한 것으로 사료된다.

Table 3. Correlation between PM₁₀ concentrations and meteorological variables in the study area during the study period (2001-2013)

Site	Meteorological variables ^a	Air temperature (°C), daily mean	Precipitation (mm), daily mean	Relative humidity (%), daily mean	Radiation (0.01 MJ/m ²), monthly mean	Wind speed (m/s), daily mean
Ido-dong		-0.122**	-0.139**	-0.270**	-0.185/0.214/-0.356 [*] /-0.483**	-0.022
Yeon-dong		-0.053**	-0.088*	- ^b	-	-0.008
Donghong-dong		-0.131**	-0.151**	-0.270**	-	-0.025
Gosan		-0.095**	-0.158**	-0.141**	0.311/-0.113/-0.490/0.538 [*]	0.021

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

^aThe meteorological variables were obtained from 4 meteorological monitoring sites (S1-S4) located less than 2 km away from 4 air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, Donghong-dong, and Gosan), respectively.

^bNot measured.

Table 4. Characteristics of PM₁₀ concentrations according to several weather conditions in the study area during the study period (2001-2013)

Weather condition*	Ido-dong			Donghong-dong			Gosan		
	Period I (PI)	Period II (PII)	Period I (PI)	Period I (PI)	Period II (PII)	Period I (PI)	Period I (PI)	Period II (PII)	
Cloud	40.2±42.9 ^a 1-1060 ^b (13,783) ^c	37.5±37.3 1-999 (18,555)	34.3±25.6 1-877 (12,243)	32.3±61.7 1-2985 (14,678)	36.3±40.7 1-672 (2,610)	35.0±20.3 1-289 (8,190)			
Clear	49.1±47.0 1-1001 (37,828)	46.0±46.4 1-2533 (42,204)	43.1±33.1 1-879 (28,708)	41.4±39.0 1-1109 (46,341)	40.6±38.7 1-672 (8,739)	45.0±32.6 1-641 (25,171)			
Dust	255.7±188.1 {43.9±33.0} ^c 9-1060 (682) {0-469 (50,929)} ^e	357.0±321.0 {41.8±30.3} 47-2533 (311) {0-537 (60,450)}	163.6±93.8 {39.7±32.2} 3-462 (233) {0-877 (9,797)}	434.8±416.4 {40.1±37.7} 32-2985 (238) {0-360 (12,701)}	83.7±106.2 {40.4±37.7} 11-338 (53) {0-672 (8,707)}	254.1±148.0 {42.2±28.2} 44-641 (171) {1-641 (33,322)}			
Precipitation	31.6±36.5 0-1000 (7,942)	29.2±31.2 1-982 (9,334)	28.6±21.5 1-379 (5,508)	25.8±26.2 1-908 (7,771)	31.9±28.1 1-344 (1,056)	37.9±36.2 1-641 (9,159)			
Fog	48.6±29.4 1-171 (528)	42.9±33.3 1-181 (1,001)	32.8±26.3 1-167 (956)	27.9±27.3 1-186 (676)	25.1±34.7 4-176 (71)	36.5±29.3 5-167 (365)			
Haze	- ^d	127.9±53.3 4-399 (1,017)	-	121.3±43.1 4-328 (684)	-	102.2±43.1 22-284 (732)			
Mist	64.3±55.2 1-1060 (6,624)	55.2±39.2 1-601 (7,333)	47.9±36.8 1-131 (5,437)	46.8±49.9 1-999 (6,344)	44.0±48.2 1-672 (958)	50.1±30.5 2-253 (4,546)			
Thunder and Lighting	30.3±22.0 1-150 (366)	29.9±43.4 1-537 (336)	31.2±22.0 1-131 (186)	25.7±33.3 1-353 (287)	26.8±23.4 1-98 (28)	26.2±17.2 3-109 (105)			

^aMean±Iσ; ^bMin.-Max.; ^cNumber of data.; ^dNot measured; ^eNon-dust.

*The weather conditions were obtained from three meteorological monitoring sites such as Jeju Regional Meteorological Administration (SI), Seogwipo Weather Station (S3), and Gosan Weather Station (S4). These meteorological monitoring sites are located less than 2 km away from the air quality monitoring sites (Ido-dong, Donghong-dong, and Gosan).

Table 5. Statistical parameters of the linear regressions for the measured PM_{10} concentrations between urban (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) and background sites (Gosan) and their estimated long-range transported portions ($k_l PM_{10,Back}$) at the three urban sites

Period	Year	Ido-dong				Yeon-dong				Donghong-dong			
		Slope Intercept (k_l)	R^2	PM_{10} at the local site ($\mu g/m^3$)	Regression Contribution from LRT sources ^a ($\mu g/m^3$)	Slope Intercept (k_l)	R^2	PM_{10} at the local site ($\mu g/m^3$)	Regression Contribution from LRT sources ^a ($\mu g/m^3$)	Slope Intercept (k_l)	R^2	PM_{10} at the local site ($\mu g/m^3$)	Regression Contribution from LRT sources ^a ($\mu g/m^3$)
	2001 ^b	0.70	0.19	33.22	22.48	0.68	-	-	-	-	-	-	-
	2002 ^b	0.92	0.46	46.74	46.29	0.99	-	-	-	0.85	0.89	38.68	38.05
Period I (PI)	2003 ^b	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2004 ^b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2005 ^c	0.93	0.85	47.59	37.13	0.78	-	-	-	0.72	13.03	42.80	29.72
	2006 ^b	1.13	0.89	52.01	44.75	0.86	-	-	-	0.62	20.26	44.97	24.71
	2007 ^b	0.92	0.85	48.85	43.01	0.88	-	-	-	0.75	4.13	39.38	35.24
	2008 ^b	0.76	0.85	45.00	38.26	0.85	-	-	-	-	-	-	-
	2009 ^c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Period II (PII)	2010 ^b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011 ^c	0.44	0.41	40.87	19.24	0.47	0.93	1.08	0.83	0.93	8.38	44.36	35.98
	2012 ^c	0.71	0.34	35.18	24.68	0.70	0.51	17.76	0.37	0.49	13.43	30.47	17.04
	2013 ^c	0.92	0.38	40.97	40.37	0.99	0.83	4.88	0.44	0.78	1.70	36.62	34.92

^aValues were calculated from $(k_l PM_{10,Back})/(PM_{10,Local})$.^bValues in the given years were estimated using the Annual Report of Ambient Air Quality in Korea due to data unavailability at the background site (Gosan).^cValues in the given years were estimated using the hourly PM_{10} concentrations observed at the urban and background sites.

*Not available.

참고로 비황사시에는 PI 기간에 평균 약 40~44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PII 기간에는 평균 약 40~42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 두 기간이 서로 유사하였다.

Table 5는 연구기간에 제주지역 도심지점의 PM_{10} 농도변화에 대한 장거리수송(LRT) 효과를 간접적으로 나타낸다. 대상지역 내 도심 측정지점인 이도동 및 연동(제주시) 그리고 동홍동(서귀포시)을 분석한 결과, 각 지점에서 LRT 기여도는 이도동에서 약 47(2011년)~99%(2002년), 연동에서 약 50(2012년)~97%(2011년), 동홍동에서 약 55%(2006년)~98%(2002년)로 나타났다. 2002년의 상당한 LRT 기여도(98~99%)는 그 해 3월 한반도 전역에 발생한 최악의 황사현상으로 인해 국지배출보다는 대부분 LRT의 영향인 것으로 추정된다. 2002년과 같이 최악의 황사현상을 제외하여도 본 연구의 결과는 과거 유사한 선행연구의 결과보다 다소 높게 추정되었는데, Karppinen et al.(2004)의 연구에서는 64~76%의 LRT 기여도, Timonen et al.(2013)에서는 36~50%, Ahmed et al.(2015)에서는 48~79%로 추정되었다. 이것은 선행 연구의 배경측정지점 고도에 비해 본 연구의 배경지점(고산)이 상대적으로 낮은 고도에 위치하여 LRT 기여도뿐만 아니라 인근지역으로부터 국지적 이류(advection)로 인한 오염물질 유입 가능성이 추가된 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 총 13년간의 연구기간을 PI (2001~2006년)과 PII (2007~2013년)으로 구분하여 제주지역 미세먼지(PM_{10})와 국지기상의 장기변화 경향을 분석하고(연변화 및 월변화), 장기간 동안의 농도변화와 관련된 국지기상의 특성을 면밀히 살펴보았다. 전반적으로, 제주지역 PM_{10} 의 장기변동은 미세하게 감소하는 경향이었지만, PI 기간보다 PII 기간으로 올수록 고농도 PM_{10} 이 자주 관측되는 추세였다. 제주지역 PM_{10} 농도의 연변화 및 월변화 패턴은 기상요소 중에서 주로 강수량, 상대습도, 일사량의 변화패턴과 일부 관련이 있으며, 또한 연구기간 전체에 북풍 및 북서풍의 풍계가 주풍으로 나타나 중국 등 외부로부터 오염물질의 유입과 관련이 있는 것으로 추정된다. 예를 들어, 2010년 적은 양의 강수는 PM_{10} 고농도가 기록된 것과 서로 연관성이 있으며, 이러

한 대기 중 고농도 현상으로 인해 태양복사가 차단되어 그 해 일사량이 감소한 것으로 판단된다. 또한 2003년과 2012년의 낮은 PM_{10} 농도는 상대적으로 많은 양의 강수로 인한 세정효과가 원인인 것으로 사료되며, 이러한 강수의 세정효과로 인한 PM_{10} 농도의 감소는 월/계절 변화(특히, 여름철 낮은 농도)에서도 뚜렷이 볼 수 있었다.

PM_{10} 과 기상요소와의 상관관계는 기온, 강수량, 상대습도의 경우 음의 상관을 보였으며 일사량은 지점별/계절별 뚜렷한 특징이 나타나지 않았다. 풍속의 경우, 이도동과 연동에서 음의 상관을 동홍동과 고산에서는 양의 상관이 나타났다. 이것은 이도동과 연동에 비해 동홍동과 고산이 상대적으로 오염원이 적기 때문에 풍속이 강할수록 PM_{10} 농도가 증가하는 것은 국지배출에 의한 영향보다 외부 유입에 의한 영향이 더 큰 것으로 사료된다. 일기유형에 따른 PM_{10} 농도는 황사와 연무 발생시 매우 높은 농도가 나타났고, 강수, 안개, 천둥 및 번개 발생시에 낮은 농도가 나타났다. 이외에도, 제주지역 도심 측정지점(이도동, 연동, 동홍동)에 대해 PM_{10} 의 장거리수송(LRT)의 간접효과를 살펴본 결과, 본 연구의 도심지점에서 LRT 효과는 선행연구의 결과에 비해 비교적 높은 것으로 추정되었다. 이것은 본 연구의 배경지점(고산지점)이 상대적으로 낮은 고도에 위치하여 LRT에 의한 영향뿐만 아니라 인근지역으로부터 국지적 이류로 인한 오염물질 유입 가능성이 있는 것으로 사료된다.

결론적으로, 제주지역 PM_{10} 농도의 장기변동은 최근으로 올수록 고농도 발생빈도가 증가하고 있어 이로 인한 심각한 피해가 예상되며, 대체로 국지배출에 의한 영향보다 대기 수송에 따른 외부 유입(예, 황사)의 영향이 더 큰 것으로 해석할 수 있다. 그러나 제주지역의 대기질 관측망(4 지점)의 부족으로 제주도 전역을 해석하기에는 많은 한계가 있으므로 향후 제주지역 내 관측망 확충이 요구되며, 또한 보다 상세하고 정확한 대기환경 및 기상 분석을 위하여 3차원 기상 및 대기질 모델을 이용한 수치모의 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2015학년도 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.
- Anttila, P., Tuovinen, J. P., 2010, Trends of primary and secondary pollutant concentrations in Finland in 1994-2007, *Atmos. Environ.*, 44, 30-41.
- Bae, H. J., 2014, Effects of short-term exposure to PM₁₀ and PM_{2.5} on mortality in Seoul, *J. Environ. Health Sci.*, 40, 346-354.
- Drewnick, F., Schwab, J. J., Jayne, J. T., Canagaratna, M., Worsnop, D. R., Demerjian, K. L., 2004, Measurement of ambient aerosol composition during the PMTACS-NY 2001 using an Aerosol Mass Spectrometer, Part I: Mass concentrations, *Aerosol Sci. Tech.*, 38, 92-103.
- Gong, S. L., Zhang, X. Y., Zhao, T. L., McKendry, I. G., Jaffe, D. A., Lu, N. M., 2003, Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 2. Model simulation and validation, *J. Geophys. Res.*, 108(D9), 4262.
- Jaffe, D., McKendry, I., Anderson, T., Price, H., 2003, Six 'new' episodes of transpacific transport of air pollutants, *Atmos. Environ.*, 37, 391-404.
- Janssen, N. A. H., Fischer, P., Marra, M., Ameling, C., Cassee, F. R., 2013, Short-term effects of PM_{2.5}, PM₁₀ and PM_{2.5-10} on daily mortality in the Netherlands, *Sci. Total Environ.*, 20-26.
- 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(2), 153-163.
- 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, H. S., Yoon, M. B., Sohn, J. J., 2010, An analysis on the episodes of large-scale transport of natural airborne particles and anthropogenically affected particles from different sources in the East Asian continent in 2008, *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, 31, 600-607.
- Kim, J. A., Jin, H. A., Kim, C. H., 2007, Characteristics of time variations of PM₁₀ concentrations in Busan and interpreting its generation mechanism using meteorological variables, *J. Environ. Sci.*, 16, 1157-1167.
- Kim, K. J., Lee, S. H., Hyeon, D. R., Ko, H. J., Kim, W. H., Kang, C. H., 2014, Composition comparison of PM₁₀ and PM_{2.5} fine particulate matter for Asian dust and haze events of 2010-2011 at Gosan site in Jeju Island, *Anal. Sci. Technol.*, 27, 1-10.
- Kim, M. K., Jung, W. S., Lee, H. W., Do, W. G., Cho, J. G., Lee, K. O., 2013, Analysis on meteorological factors related to the distribution of PM₁₀ concentration in Busan, *J. Environ. Sci.*, 22, 1213-1226.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2002~2014, Annual Climatological Report, 2001-2013, Republic of Korea.
- Korean Ministry of Environment (KMOE), 2002~2014, Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2001-2013, Republic of Korea.
- Lee, Y. C., Hills, P. R., 2003, Cool season pollution episodes in Hong Kong, 1996 - 2002, *Atmos. Environ.*, 37, 2927 - 2939.
- Lee, H. D., Lee, G. H., Kim, I. D., Kang, J. S., Oh, K. J., 2013, The influences of concentration distribution and movement of air pollutants by sea breeze and mist around Onsan industrial complex, *Clean Technology*, 19, 95-104.
- National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2012, Asian Dust Report, 11-1360395-000347-01, Republic of 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.
- Samoli, E., Stafoggia, M., Rodopoulou, S., Ostro, B., Declercq, C., Alessandrini, E., et al., 2013, Associations between fine and coarse particles and mortality in Mediterranean cities: results from the MED-PARTICLES project, *Environ. Health Perspect.*, 121, 932-938.

- Sarnat, S. E., Coull, B. A., Schwartz, J., Gold, D. R., Suh, H. H., 2006, Factors affecting the association between ambient concentrations and personal exposures to particles and gases, *Environ. Health Persp.*, 114, 649-654.
- Shin, M. K., Lee, C. D., Ha, H. S., Choe, C. S., Kim, Y. H., 2007, The influence of meteorological factors on PM₁₀ concentration in Incheon, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 23, 322-331.
- Shin, S. E., Kim, Y. P., Kang, C. H., 2010, Comparison of the PM₁₀ concentration in different measurement methods at Gosan site in Jeju Island, *J. Environ. Impact Assess.*, 19, 421-429.
- Simmonds, P. G., Derwent, R. G., Manning, A. L., Spain, G., 2004, Significant growth in surface ozone at Mace Head, Ireland, 1987-2003, *Atmos. Environ.*, 38, 4769-4778.
- 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.*, 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.
- Twomey, S., 1974, Pollution and the planetary albedo, *Atmos. Environ.*, 8, 1251-1256.
- Uno, I., Satake, S., Carmichael, G. R., Tang, Y., Wang, Z., Takemura, T. et al., 2004, Numerical study of Asian dust transport during the springtime of 2001 simulated with the Chemical Weather Forecasting System (CFORS) model, *J. Geophys. Res.*, 109, D19S24.
- Wojas, B., Almquist, C., 2007, Mass concentrations and metals speciation of PM_{2.5}, PM₁₀, and total suspended solids in Oxford, Ohio and comparison with those from metropolitan sites in the Greater Cincinnati region, *Atmos. Environ.*, 41, 9064-9078.
- Yoon, S. C., Won, J. G., Omar Ali 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.
- Yang, J. H., Kim, S. R., Jung, J. H., Han, Y. J., 2010, Long-term trend of atmospheric concentrations of fine particles in Chuncheon, Korea, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 27, 494-503.