

ORIGINAL ARTICLE

최근 10년간(2007~2016년) 한반도 대도시 일기유형 빈도의 시·공간 특성 및 유형별 대기질 변화 분석

박형식 · 송상근* · 한승범 · 조성빈

제주대학교 지구해양학과

Spatio-temporal Characteristics of the Frequency of Weather Types and Analysis of the Related Air Quality in Korean Urban Areas over a Recent Decade (2007-2016)

Hyeong-Sik Park, Sang-Keun Song*, Seung-Beom Han, Seongbin Cho

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

Abstract

Temporal and spatial characteristics of the frequency of several weather types and the change in air pollutant concentrations according to these weather types were analyzed over a decade (2007-2016) in seven major cities and a remote area in Korea. This analysis was performed using hourly (or daily) observed data of weather types (e.g., mist, haze, fog, precipitation, dust, and thunder and lightning) and air pollutant criteria (PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂, CO, and SO₂). Overall, the most frequent weather type across all areas during the study period was found to be mist (39%), followed by precipitation (35%), haze (17%), and the other types (≤4%). In terms of regional frequency distributions, the highest frequency of haze (26%) was in Seoul (especially during winter and May-June), possibly due to the high population and air pollutant emission sources, while that of precipitation (47%) was in Jeju (summer and winter), due to its geographic location with the sea on four sides and a very high mountain. PM₁₀ concentrations for dust and haze were significantly higher in three cities (up to 250 µg/m³ for dust in Incheon), whereas those for the other four types were relatively lower. The concentrations of PM_{2.5} and its major precursor gases (NO₂ and SO₂) were higher (up to 69 µg/m³, 48 ppb, and 16 ppb, respectively, for haze in Incheon) for haze and/or dust than for the other weather types. On the other hand, there were no distinct differences in the concentrations of O₃ and CO for the weather types. The overall results of this study confirm that the frequency of weather types and the related air quality depend on the geographic and environmental characteristics of the target areas.

Key words : Weather types, Mist, Haze, Dust, Long-term period, Air quality, Geographic and environmental characteristics

1. 서론

과거 오랫동안 중관규모(Synoptic scale)의 기상과 관련된 많은 연구들은 주로 강수 발생 및 강수량 예보 관련,

일기 및 기후예측 분야, 다양한 일기도 분석 연구 등 주로 날씨예측과 예보를 위하여 다루어져 왔다(Lee and Kim, 1997). 세부적으로 보면, 연구대상지역의 기상관측 자료, 일기도 등을 이용하여 서로간의 상관관계 분석을 통해

Received 16 October, 2018; Revised 10 November, 2018;

Accepted 12 November, 2018

*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@jeju.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.

일기유형을 분류하는 연구, 장기간의 기압배치를 분석하여 그 지역의 계절을 대표하는 일기유형 분류 연구, 강수 확률 예보에 이용하기 위해 상세히 일기유형을 분류한 연구 등이 있었다(Lee and Kim, 1997; Shin et al., 2007). 한편 최근 들어, 우리나라는 정부차원에서 많은 관심이 고조되고 있는 기후변화에 따라 특이 기상 즉, 폭염, 장마, 안개 등의 유형을 구분하고, 각 유형별 상세 기상관측 분석과 모델링 예측 및 예보기술력 향상에 많은 노력을 기울이고 있다.

일기유형과 대기오염과의 관계를 분석한 선행연구에 따르면(Shin et al., 2007; Hwang et al., 2009), 대기오염 농도가 증가할수록 일반적인 일기유형(예, 맑음, 흐림, 비)의 빈도는 낮아지고, 박무, 안개, 연무 등의 대기정체와 관련된 일기유형의 빈도는 높아진 것으로 밝혀졌다. 일반적으로 대기오염의 분포는 대상지역 오염물질의 배출량, 그 지역의 지리·지형적 특성, 기류에 의한 수송 및 기압배치 등 기상조건의 영향을 많이 받으며, 이 중에서 오염물질 배출원을 제외하고는 기상인자에 의한 영향을 가장 많이 받는다고 알려져 있다(Park et al., 1991; Shin et al., 1992; Lee et al., 1993; Lee et al., 1997; Jung et al., 1998; Cheng, 2002; Ding et al., 2004; Brulfert et al., 2007). 한편, 종관 기압배치 유형에 따른 대기오염 농도 변화 특성에서, 주로 고기압 또는 이동성 고기압이 위치하고 안정한 대기조건일 때 대상지역의 대기오염 농도가 증가한 것으로 나타났다(Lee and Han, 1992). 이와 유사한 연구로, 질소산화물(NO_x)은 주로 이동성 고기압이 위치하여 지상기압이 높고 강수가 적어 건조하며 바람이 약할 때 그 농도가 높게 나타났다(Kim et al., 1997). 이러한 일기유형 분류 및 분석에 대한 기상학적 연구는 대기오염물질의 장거리 이동과 관련하여 농도분포를 예측하고 이해하는데도 다루어져 왔다(Jo and Kim, 2011). 그들은 연구기간(2000~2007년) 동안의 연무사례일(69일) 중 종관기상(예, 일기도) 분석을 통하여 장거리 수송형 연무사례가 전체의 약 1/3 정도, 정체성 연무사례가 전체의 약 2/3 정도라고 밝혔다. 한편, 우리나라에 영향을 미치는 일기유형 중에서 황사와 연무는 주로 유해한 입자로 구성되어 있어 대기질 및 시정 악화는 물론 호흡기 및 안질환을 야기하는 등 인간의 건강에도 치명적일 수 있다(Chen et al., 2004; Onishi et al., 2012).

앞서 언급한 것처럼 그 지역의 날씨 예측과 예보는 물론 대기질 특성 및 오염물질 수송에 있어 종관 기압배치와 일기유형의 특성은 매우 중요함에도 불구하고, 과거 여러 선행연구들은 주로 특정 연구기간에 국한되어 수행되어 왔다. 또한 우리나라 여러 도시지역을 대상으로 일기유형의 특성을 분석하고 동시에 장기간에 걸쳐 일기유형별 대기오염 농도 특성을 비교분석한 연구도 거의 수행되지 않았다. 이에 본 연구에서는 최근 10년간(2007~2016년) 한반도 주요 대도시(7개 대도시 및 제주도)를 중심으로 일기유형 빈도의 시·공간적 특성을 비교분석하였다. 또한 이러한 장기간 일기유형에 따른 대기오염물질의 농도변화 및 특성에 대해 상세히 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

최근 10년간(2007~2016년) 한반도 주요 대도시를 중심으로 일기유형 빈도의 특성을 분석하고 이에 따른 대기오염물질 농도변화를 살펴보기 위하여 이용된 일기유형 자료는 기상청 종관기상관측시스템(ASOS: Automated Synoptic Observing System)에서 제공하는 기상현상표(지상기상관측)에 근거한 자료이다. 연구대상지역으로 우리나라 주요 대도시인 서울, 부산, 인천, 대전, 대구, 광주, 울산과 제주도를 선정하였다(Fig. 1). 또한 일기유형 자료는 여러 카테고리 즉, 맑음(Clear)과 흐림(Cloudy)을 포함하여 강수(Precipitation), 연무(Haze), 안개(Fog), 박무(Mist), 황사먼지(Dust), 천둥 및 번개(Thunder and lightning)로 분류된다(Lee et al., 2013). 이 중에서 맑음과 흐림은 오직 그 날의 전운량으로 결정되는 일반적 유형이므로 본 연구의 일기유형 빈도 및 대기질 특성 분석에서 제외하였으며, 최종 6개의 특징적인 일기유형(강수, 연무, 안개, 박무, 황사먼지, 천둥 및 번개) 자료(일별 자료)를 분석에 사용하였다.

일반적으로 대상지역의 대기오염물질 농도 수준과 대기오염의 정도는 그 지역 및 주변의 기상조건에 의해 크게 영향을 받는다(Liu and Chan, 2002; Lin et al., 2007; Song et al., 2014). 따라서 본 연구에서는 일기유형에 따른 대기질 농도의 시·공간 변화와 특성을 보다 정확하게 해석하기 위하여 대기질 측정지점을 해당지역 ASOS 지점과 최대한 가깝고 비교적 주변 건물 등에 의한 방해가 없는 곳으로 선정하였다(Fig. 1). 즉, 서울은

중구 대기질 측정지점(서울 ASOS 지점에서 약 1.1 km 떨어진 지점), 부산은 광복동 측정지점(부산 ASOS에서 약 0.5 km), 인천은 신흥동 측정지점(인천 ASOS에서 약 1.6 km), 대전은 구성동 측정지점(대전 ASOS에서 약 0.2 km), 대구는 만촌동 측정지점(대구 ASOS에서 약 1.8 km), 광주는 농성동 측정지점(광주 ASOS에서 약 2 km), 울산은 성남동 측정지점(울산 ASOS에서 약 0.4 km), 제주는 이도동 측정지점(제주 ASOS에서 약 1.6 km)에 위치하고 있다. 본 연구에 이용된 대기오염물질의 농도 자료는 대기환경기준 오염물질 즉, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂, CO, SO₂이며, 환경부 산하 각 해당지역의 대기질 측정지점에서 제공하는 시간별 자료이다. 위의 일기유형 빈도 분석과 마찬가지로, 각 일기유형에 따른 대기오염 특성과 변화를 살펴보기 위한 목적으로 6개의 특징적 유형(강수, 연무, 안개, 박무, 황사먼지, 천둥 및 번개)에 대해서만 분석하였으며, 각각 시간별 자료를 이용하였다. 또한 전체 연구기간 중 자료의 신뢰성을 높이기 위하여 하루 중 75% 이상의 자료개수가 있는 날(유효 측정일)의 자료만 선정하여 분석에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 장기간 일기유형의 빈도 및 변화 특성

Fig. 2는 최근 10년간(2007~2016년) 한반도 주요 대도시(서울, 인천, 대전, 대구, 광주, 부산, 울산, 제주)에서 관측된 총 6개 일기유형(강수, 연무, 안개, 박무, 황사먼지, 천둥 및 번개)의 빈도를 나타낸다. 연구기간동안 전 지역을 합한 총 빈도를 보면, 박무가 약 39%(12,564일)로 가장 높게 차지하였으며, 다음으로 강수가 35%(11,026일), 연무가 17%(5,270일), 천둥 및 번개가 4%(1,394일), 안개가 3%(1,024일), 황사먼지가 2%(571일) 정도를 차지하였다.

지역별 상세한 빈도 특성을 보면(Fig. 2), 지역에 관계 없이 대체로 박무와 강수의 일기유형 빈도가 높은 편이었으며, 안개와 연무의 빈도는 공간적으로 지역에 따라 조금씩 다른 특징을 보였다. 예를 들어, 서울에서는 박무와 강수의 빈도가 각각 36%와 30%로 매우 높게 나타났고, 다음으로 연무가 26%로 다소 높은 빈도를 보인 반면, 천둥 및 번개, 황사먼지, 안개는 모두 5% 이내로 낮은 빈도를 보였다. 인천지역은 특히 박무의 빈도가 43%로 가장 높았으며, 다음으로 강수가 27%, 연무와 안개는 각각 16%와 8%, 그리고 천둥 및 번개와 황사먼지는 둘 다 4% 이내로 매우 낮은 빈도를 차지하였다. 이러한 일기유형 빈도의 공간적/지역적 차이는 대상지역의 지리·지형적 그리고 주변 환경적 특성에 기인한 것으로 사료된다. 서울은 우리나라에서 인구가 가장 많은 지역이고 대기오염원 또한 매우 많으므로 상대적으로 다른 도시에 비해 연무의 빈도가 높게 나타난 것으로 볼 수 있다. 또한 서해(연안 포함) 지역은 해기차로 인해 안개발생 빈도가 높기 때문에(Son, 2010), 인천의 안개 빈도는 다른 대도시와 비교해서 상대적으로 다소 높게 나타난 것으로 해석할 수 있다. 또한, 나머지 대도시 지역인 대전, 대구, 광주, 부산, 울산에서도 역시 박무 및 강수의 빈도가 대략 30~40%로 매우 높게 차지하였으며, 연무가 14%~20% 사이, 그리고 다른 3개의 일기유형(안개, 천둥 및 번개, 황사

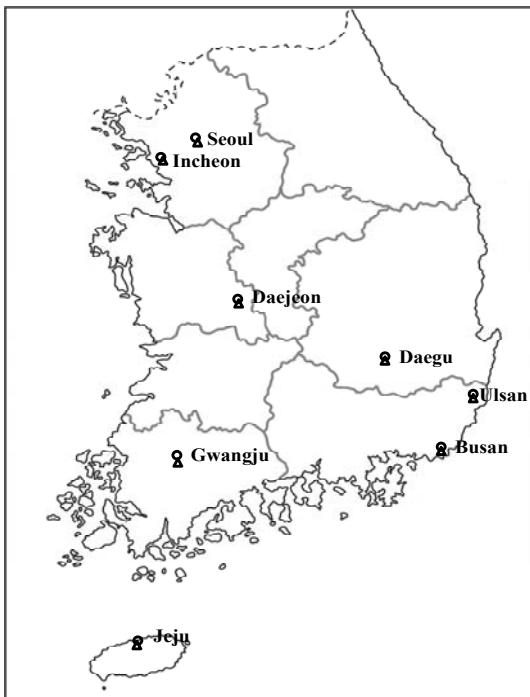


Fig. 1. Geographical locations of 8 Automated Synoptic Observing System (ASOS) in the study area (Seoul, Incheon, Daejeon, Daegu, Gwangju, Busan, Ulsan, and Jeju) for weather types (open circle, ○). The air quality monitoring sites (triangle, △) are located less than 2 km away from the ASOS sites, respectively.

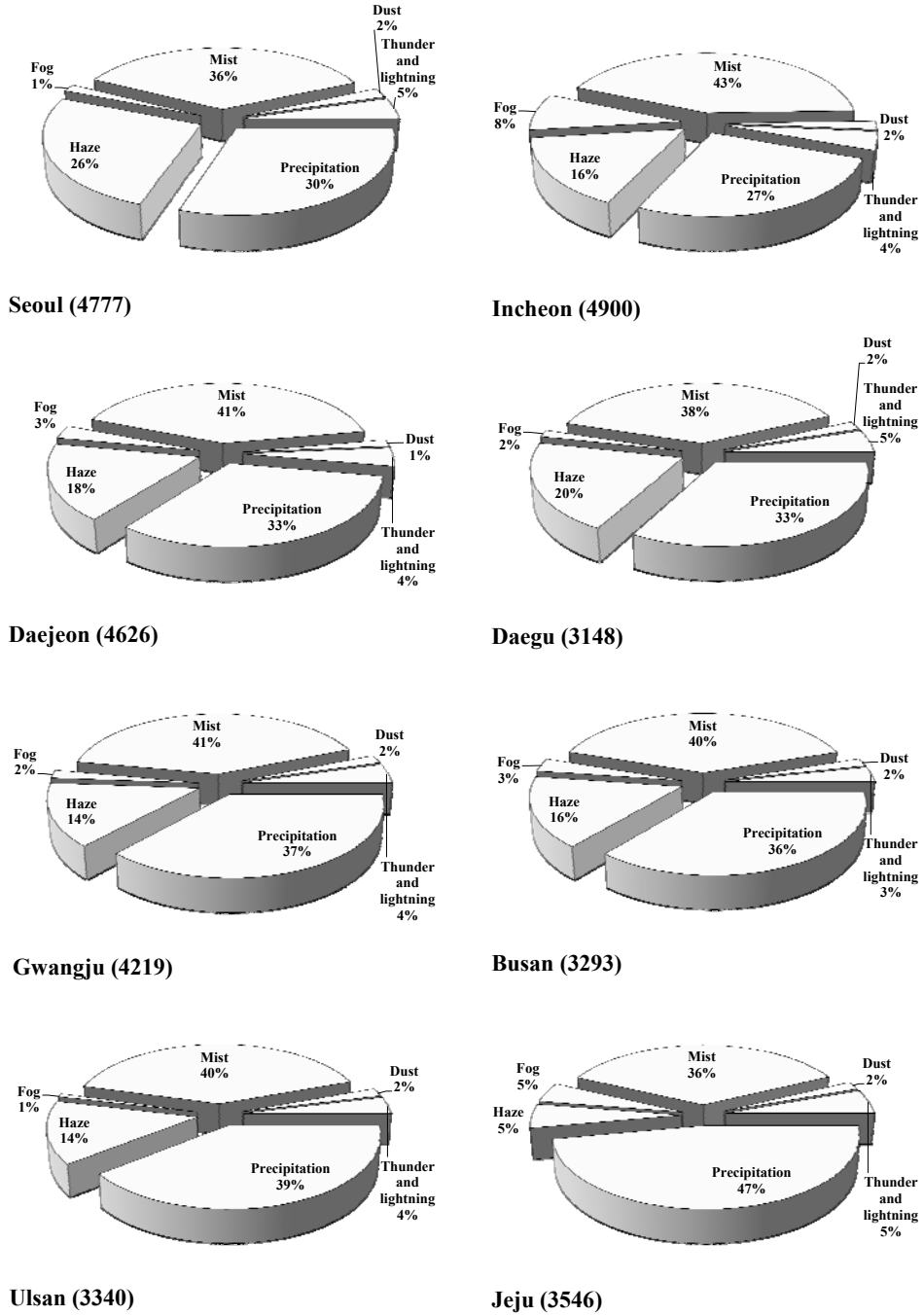


Fig. 2. Frequency (%) of 6 weather types in several major cities (Seoul, Incheon, Daejeon, Daegu, Gwangju, Busan, and Ulsan) and a remote area (Jeju) in Korea during the study period (2007-2016). The number in parenthesis represents the total occurrence day of weather types.

먼지)은 대부분 5% 이내의 낮은 빈도를 보였다. 한편, 한반도 제일 끝단에 위치한 제주에서의 일기유형 빈도의 특성은 다른 대도시와 일부 차이를 보였다. 섬 지역인 제주는 지리·지형적 특성(4면이 바다, 매우 높은 산)에 의해 강수의 빈도(약 47%)가 가장 높았으며, 상대적으로 대기오염물질의 발생원이 적기 때문에 연무의 빈도가 매우 낮게(약 5%) 나타났다.

Figs. 3~5는 연구기간동안(2007~2016) 한반도 주요 대도시를 대상으로 일기유형 빈도의 연변화, 월변화, 계절 변화를 각각 나타낸다. 연변화를 보면(Fig. 3), 전반적으로 대부분 지역에서 박무 또는 강수의 빈도가 높게 나타났으며, 다음으로 연무, 그리고 나머지 3개의 유형(안개, 천둥 및 번개, 황사먼지) 순으로 나타났다. 또한 전체 일기유형의 연변화 패턴은 대부분 지역에서 증가와 감소를 반복하는 특징을 보였으며, 큰 폭의 연변화 패턴은 아닌 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 2의 일기유형 빈도 분석에서처럼, 제주지역은 섬 지역이면서 높은 산이 있는 지리·지형적 특성상 전체 연구기간동안 강수 유형의 패턴이 뚜렷하게 높게 나타났으며, 다음으로 박무, 그리고 나머지 4개 유형은 매우 낮게 나타났다(특히 연무는 다른 지역과 달리 매우 낮음). 지역별로 세부적인 특성을 보면, 서울지역의 일기유형 연변화는 대체로 증가와 감소를 반복하는 특징이고, 2012년에 박무의 빈도가 감소하다가 다시 2013년 이후 증가하는 모습을 보였다. 인천지역 역시 증가와 감소 패턴을 보이다가 2013년 이후 박무 빈도가 큰 폭으로 증가하여 꾸준히 지속되는 특징을 보였다. 특히 인천지역은 안개의 빈도가 다른 지역에 비해 2배 이상 높게 나타난 것을 볼 수 있는데, 이 지역에서 이와 같이 높은 안개 빈도가 나타난 공간적/지역적 특성은 앞에서 언급한 것처럼 우리나라 서해지역의 높은 안개발생이 주요 원인인 것으로 사료된다(Son, 2010). 부산지역은 2013년에 연무의 빈도가 다소 큰 증가 폭을 보인 것을 제외하고는 전반적으로 뚜렷한 변화가 나타나지 않았으며, 그 외 대전, 대구, 광주, 울산 지역에서도 대체로 큰 폭의 변화 패턴은 아닌 것으로 나타났다.

Figs. 4~5의 월 및 계절 변화를 보면, 전체 연구기간동안 대부분 지역에서 여름철인 6~7월에 박무의 빈도가 가장 높았으며, 7~8월에는 강수의 빈도가 가장 높게 나타났다. 천둥 및 번개 또한 강수와 자주 동반 되므로 7~8월

에 높은 빈도를 볼 수 있는 반면, 대기오염물질을 포함하고 있는 연무의 발생빈도는 7~8월 사이 강수로 인한 세정효과(wash-out) 때문에 오히려 그 빈도가 큰 폭으로 감소하는 것을 볼 수 있었다(Ahn et al., 2014). 한편, 일기유형 중 강수의 빈도는 우리나라 서쪽과 남쪽에 위치한 지역(서울, 인천, 대전, 제주)에서 동쪽에 위치한 지역(부산, 대구, 울산)보다 다소 높게 나타난 것을 볼 수 있었다(특히, 7~8월의 여름철과 12월과 1월의 겨울철). Park et al.(2008)에 따르면, 지난 수십 년간 한반도 강수량 분포는 여러 기상학적/환경적 요인(장마, 저기압성 강수, 지형고도, 해기차 등)에 의해 우리나라 서해 및 남해 인근, 경기 북부, 제주도, 영동 지방 등지에서 많은 강수량이 나타났다는 것을 발표한 바 있다.

일반적으로 연무 유형은 주로 도시나 공업지대로부터 연기나 자동차 배기가스 등 인위적 오염물질에 의한 발생과 산불 등에 의한 자연적 발생을 포함하는 대기오염 현상으로 대부분 지역(제주 제외)에서 주로 겨울철과 5~6월에 높은 빈도를 보였으며(Sun et al., 2006; Rahman, 2013; Liu et al., 2016), 나머지 월(계절)에는 다소 낮은 빈도의 특징을 보였다(Jo and Kim, 2011). 이와 달리, 황사는 발원지의 기상조건과 편서풍 등의 영향으로 발생하는 월경성 대기오염물질로서 주로 봄철(3~5월)에만 다소 높은 빈도가 나타났다(Chun et al., 2000; Choi et al., 2002; Kim et al., 2004; Kim et al., 2016). 안개는 다른 지역에 비해 주로 바다가 인접해 있는 서해 인천지역, 부산지역, 4면이 바다로 둘러싸인 제주지역에서 상대적으로 높게 나타났으며, 주로 봄철(4~5월) 또는 여름철(6~7월)에 빈도가 높은 편이고, 8월부터 조금씩 빈도가 줄어들다가 가을철에 가장 낮은 빈도가 관측되었다.

3.2. 일기유형에 따른 대기오염물질 농도 변화 특성

Table 1은 연구기간동안(2007~2016) 우리나라 주요 대도시인 서울, 인천, 대전 지역에서의 6개 일기유형(강수, 연무, 안개, 박무, 황사먼지, 천둥 및 번개)에 따른 대기오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , NO_2 , CO , SO_2) 농도의 통계분석을 나타낸다. 대도시 중에서 비교적 일기유형의 빈도가 높고 뚜렷한 특징을 가지는 서쪽지역의 도시들을 선택하였으며, 그 중에서도 인구가 많고 대기오염물질 농도가 높은 서울, 인천, 대전 3곳을 중심으로 일기유형별

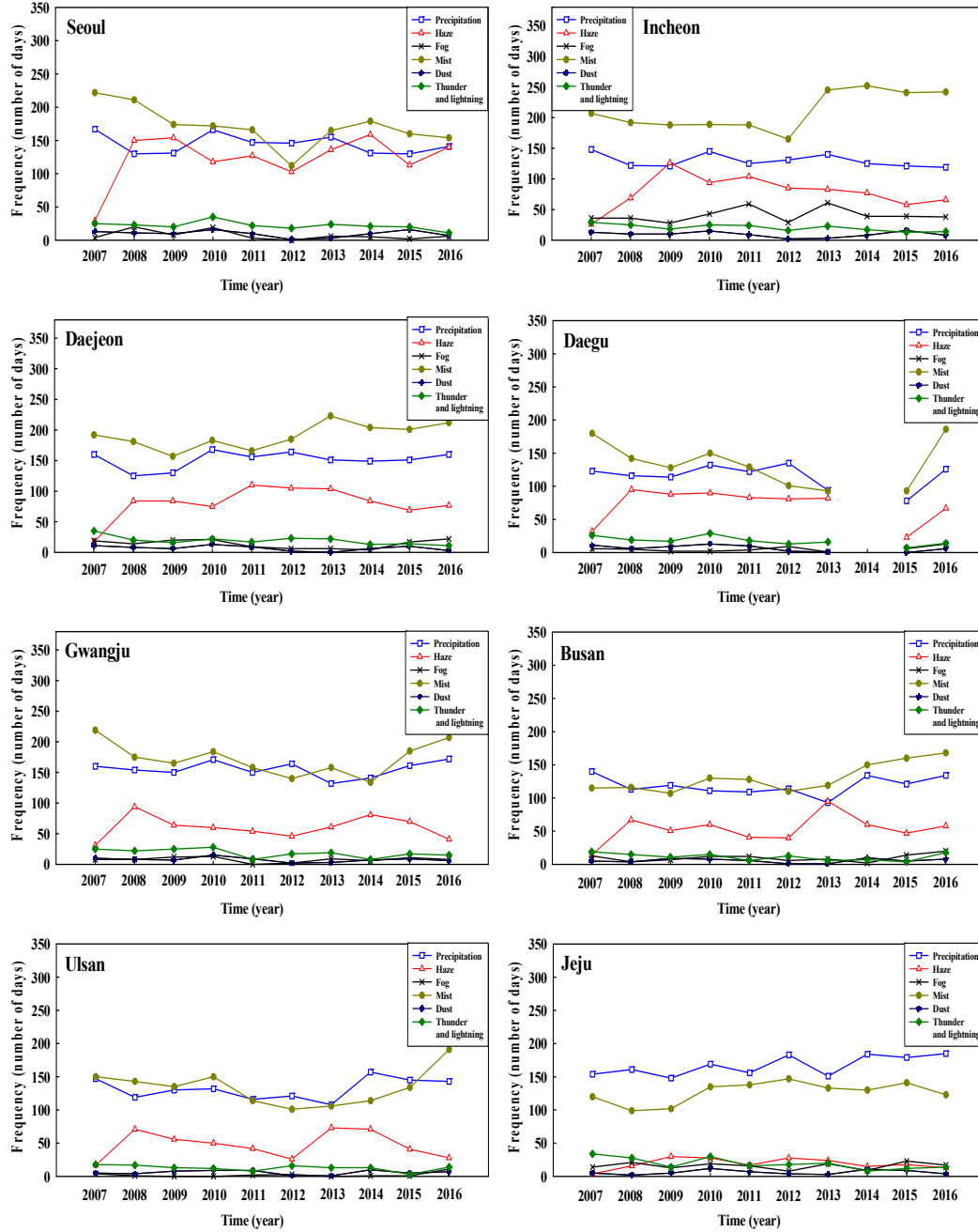


Fig. 3. Yearly variations of the occurrence day of 6 weather types in several major cities (Seoul, Incheon, Daejeon, Daegu, Gwangju, Busan, and Ulsan) and a remote area (Jeju) in Korea during the study period (2007-2016).

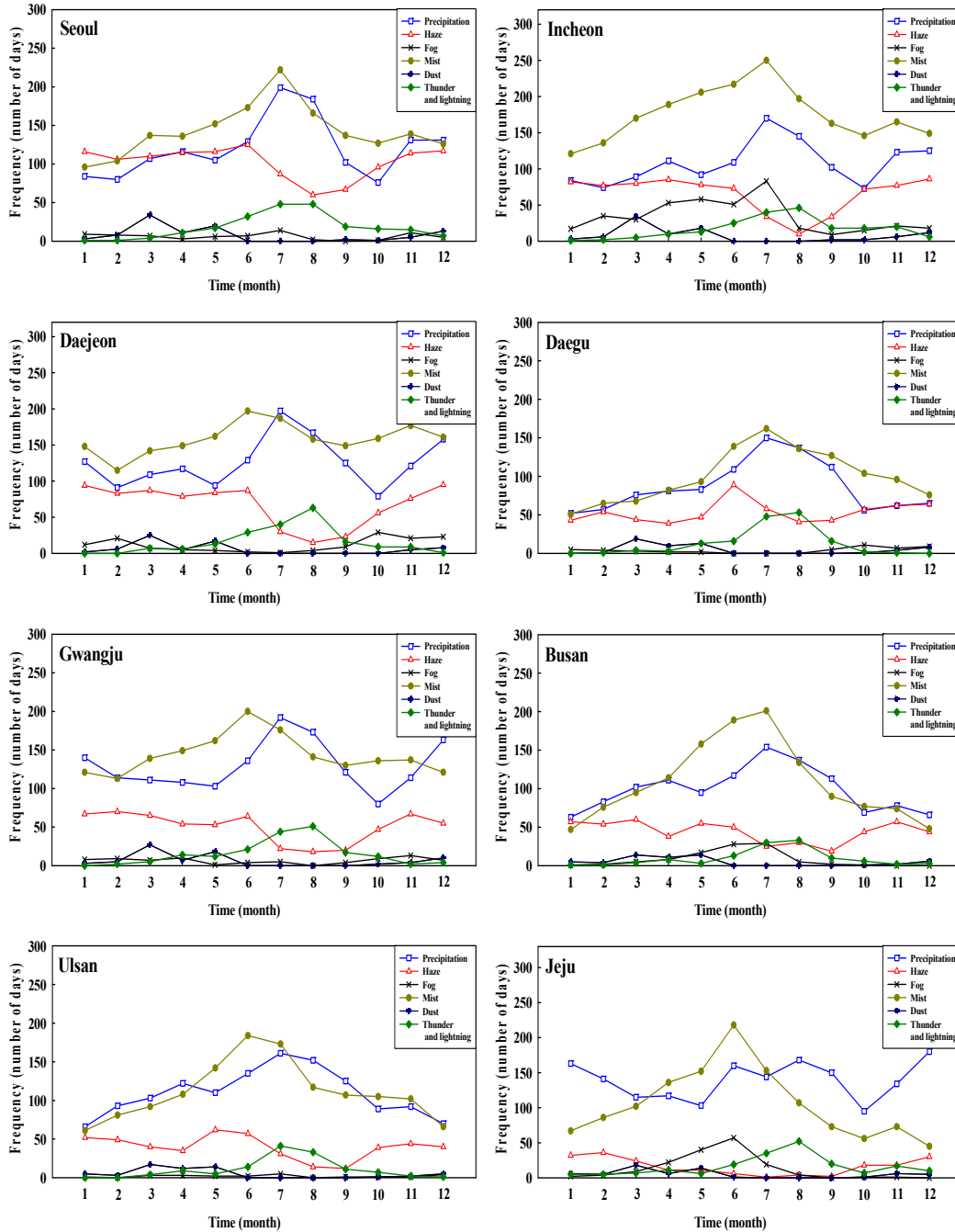


Fig. 4. Same as Fig. 3 but for the monthly variations of 6 weather types.

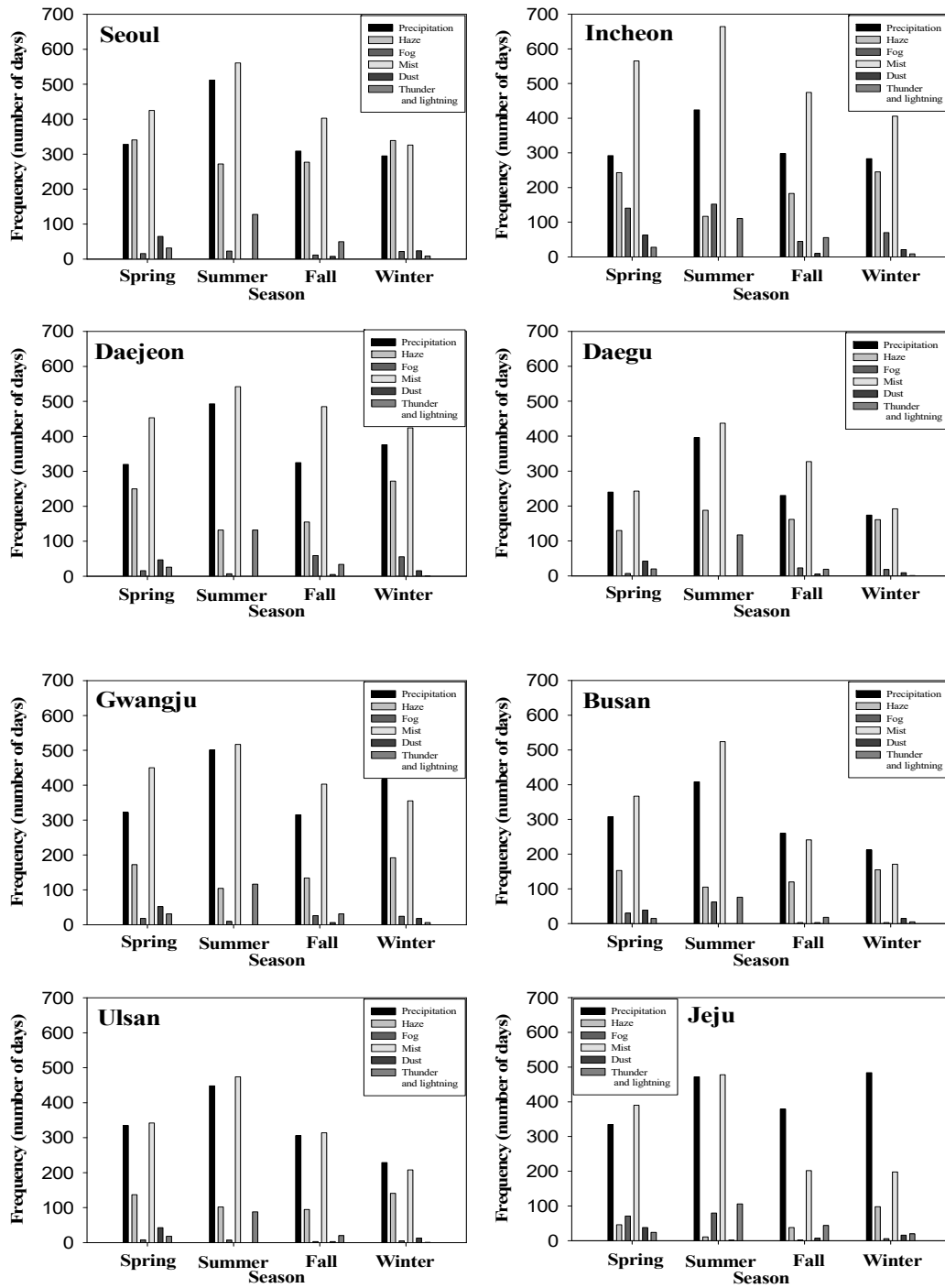


Fig. 5. Same as Fig. 3 but for the seasonal variations of 6 weather types.

Table 1. Characteristics of the concentrations of criteria air pollutants according to several weather types in the study area (Seoul, Incheon, and Daejeon) during a decade (2007-2016)

Region	Weather type*	Air pollutant						
		PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	O ₃ (ppb)	NO _x (ppb)	CO (ppm)	SO ₂ (ppb)	
Seoul	Precipitation	32.6±32.7 ^a , 1-1011 ^b	18.9±13.5, 1-82	20.2±12.3, 10-100	47.4±18.5, 10-110	0.56±0.30, 0.1-3.3	10.0±0.6, 10-20	
	Haze	82.1±33.7, 8-324	43.6±14.4, 2-113	30.0±21.4, 10-140	47.4±18.5, 10-130	0.84±0.39, 0.1-3.0	10.6±2.5, 10-30	
	Fog	72.8±61.3, 3-247	9.7±7.3, 2-30	17.1±10.8, 10-60	38.6±16.7, 10-110	0.92±0.52, 0.3-3.0	10.3±1.6, 10-20	
	Mist	56.6±41.9, 1-896	32.0±16.9, 1-97	21.9±13.9, 10-130	37.1±16.2, 10-110	0.73±0.39, 0.1-3.3	10.6±2.7, 10-40	
	Dust	241±171, 35-1191	47.0±23.0, 10-112	30.3±17.2, 10-120	33.7±19.5, 10-110	0.65±0.34, 0.1-2.4	10.3±1.7, 10-20	
	Thunder and lightning	34.1±30.1, 1-304	27.0±15.3, 2-82	24.8±15.9, 10-100	34.5±14.8, 10-80	0.55±0.28, 0.1-2.4	10.0±0.01, 10-10	
Incheon	Precipitation	45.4±40.1, 4-1388	27.7±20.1, 1-150	20.1±11.5, 10-80	30.1±15.2, 10-100	0.52±0.28, 0.1-4	10.7±3.2, 10-50	
	Haze	117±53.0, 24-1077	68.6±19.9, 22-131	25.9±17.5, 10-110	47.9±23.4, 10-170	0.93±0.52, 0.1-4.2	16.5±9.0, 10-90	
	Fog	73.1±54.8, 7-309	43.3±32.3, 1-149	23.3±13.2, 10-80	33.2±17.5, 10-150	0.65±0.44, 0.1-3.8	11.7±5.1, 10-50	
	Mist	77.3±52.0, 4-1311	49.3±24.9, 1-153	24.4±15.3, 10-120	37.1±18.2, 10-170	0.70±0.43, 0.1-6	12.4±5.6, 10-90	
	Dust	250±180, 28-1388	42.7±16.2, 18-90	24.6±15.8, 10-90	33.6±19.5, 10-90	0.59±0.32, 0.2-2.6	13.3±7.0, 10-70	
	Thunder and lightning	45.2±31.0, 7-237	28.6±15.6, 6-64	21.8±13.1, 10-70	28.6±13.9, 10-80	0.48±0.23, 0.1-1.6	10.5±2.1, 10-20	
Daejeon	Precipitation	31.7±28.9, 1-607	23.6±19.9, 2-109	25.4±12.9, 10-90	16.8±10.4, 10-110	0.37±0.24, 0.1-3.7	10.1±0.9, 10-20	
	Haze	86.3±29.9, 14-417	60.7±16.9, 12-122	36.0±21.0, 10-110	24.0±15.3, 10-90	0.59±0.30, 0.1-2.3	10.7±2.8, 10-30	
	Fog	67.1±37.2, 10-184	48.7±20.0, 8-94	15.3±10.0, 10-50	26.9±14.4, 10-110	0.85±0.48, 0.2-3.7	10.0±0.01, 10-10	
	Mist	53.9±30.9, 1-393	43.6±22.7, 2-138	25.2±15.0, 0-110	20.8±12.4, 10-90	0.53±0.32, 0.1-3.1	10.3±1.7, 10-20	
	Dust	221±143, 36-1077	62.2±28.3, 7-137	38.4±21.8, 10-100	13.6±7.1, 10-50	0.47±0.28, 0.1-1.9	10.2±1.4, 10-20	
	Thunder and lightning	32.3±25.0, 1-163	23.3±14.4, 4-62	30.3±15.3, 10-70	15.2±8.4, 10-50	0.31±0.16, 0.1-0.8	10.0±0.01, 10-10	

^aMean±1 σ ; ^bMin-Max.

*The weather types were provided by the Automated Synoptic Observing System (ASOS) in Seoul, Incheon, and Daejeon during 2007-2016. The air quality monitoring sites are located less than 2 km away from the ASOS of three cities.

대기질 특성을 분석하였다. 전반적으로, 대부분 지역에서 6개의 일기유형 중 황사먼지와 연무 발생시 오염물질의 농도가 가장 높게 나타났으며, 다음으로 박무 또는 안개 발생시이며, 가장 낮은 농도는 대체로 강수와 천둥 및 번개 발생시에 관측되었다. 이것은 강수로 야기되는 세정작용에 의해 농도가 감소한 것으로 사료되며(Ahn et al., 2014), 보통 천둥 및 번개는 강수를 동반하기 때문에 강수와 마찬가지로 매우 낮은 농도가 나타난 것으로 사료된다.

Table 1에서 알 수 있듯이, 대기오염물질 PM₁₀은 전체 일기유형 중에서 황사먼지 발생시 가장 높은 농도를 보였으며(인천에서 최고 250±180 µg/m³), 이것은 다른 일기유형에 비해 2~7배 정도 높은 수준이었다. 다음으로 연무발생시 높은 PM₁₀ 농도가 기록되었으며(인천에서 최고 117±53 µg/m³), 가장 낮은 농도는 강수발생시 나타났다(대전에서 최저 32±29 µg/m³). PM_{2.5}는 PM₁₀의 패턴과 유사하게 연무 또는 황사먼지 발생시 가장 높은 농도가 나타났으며(인천에서 연무발생시 최고 69±20 µg/m³), 강수 또는 안개 발생시 가장 낮은 농도를 기록하였다(서울에서 안개발생시 최저 9.7±7.3 µg/m³). NO₂와 SO₂의 경우는 둘 다 연무발생시 가장 높은 농도가 나타난 반면, 천둥 및 번개와 황사먼지 발생시 상대적으로 낮은 농도를 기록하였다. 예를 들어, NO₂ 농도는 연무발생시 서울과 인천에서 각각 최고 47.4±18.5 ppb와 47.9±23.4 ppb로 나타났으며, SO₂ 농도 역시 연무발생시 최고 최고 16.5±9.0 ppb를 기록하였다. 이처럼 황사발생시에는 주로 먼지농도만 높게 나타난 반면 연무발생시에는 입자상 및 기체상 오염물질 모두 높게 나타나 같은 먼지현상이라도 황사와 연무 유형은 서로 다른 대기질 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다(Jo and Kim, 2011). 아울러 연무발생의 주요 전구물질인 NO₂와 SO₂는 화학작용을 통해 질산염(NO₃⁻)과 황산염(SO₄²⁻)으로 바뀌어 연무 형성에 기여한 것으로 사료된다(Shon et al., 2012; Liu et al., 2016; Seinfeld and Pandis, 2016). 한편, 일기유형에 따른 O₃ 농도는 황사먼지 발생시 가장 높고 강수 또는 안개 발생시 가장 낮게 나타났으나, 대부분 지역에서 유형별(대전의 안개 유형 제외) 농도변화의 폭이 크지는 않았다. CO는 농도는 3지점 모두 가장 높게 나타난 일기유형이 서로 달랐으며 대부분 천둥 및 번개와 강수 발생시 가장 낮게 나타났으나, 전반적으로 일기유형별로

큰 농도 차이는 아니었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 10년간(2007~2016) 한반도 주요 대도시(서울, 인천, 대전, 대구, 광주, 부산, 울산, 제주)를 중심으로 일기유형의 빈도 특성을 시·공간적으로 분석하고, 일기유형에 따른 대기오염물질의 농도 변화를 살펴보았다. 먼저 총 연구기간(10년간)의 전체 지역을 모두 합한 일기유형의 빈도를 보면 박무(약 39%)가 가장 높은 빈도를 차지하였고, 다음으로 강수(약 35%)와 연무(약 17%)의 순이었으며, 나머지 천둥 및 번개, 안개, 황사먼지는 약 4% 이내로 매우 낮은 빈도를 보였다(각각 약 4%, 3%, 2%의 빈도). 지역별 그리고 시·공간적으로 상세히 보면, 서울은 많은 인구와 대기오염 배출원이 많이 분포하고 있어 상대적으로 다른 도시에 비해 연무의 빈도(전체 26%)가 매우 높았으며(주로 겨울철, 5~6월에 높게 나타남), 인천지역은 우리나라 서해의 높은 안개발생으로 인해 안개의 빈도가 다른 대도시에 비해 상대적으로 다소 높게(2배 이상) 나타난 것으로 사료된다(봄 및 여름철). 또한 4면이 바다로 둘러싸인 제주는 강수의 빈도(전체 47%)가 가장 높았으며(여름 및 겨울철), 대기오염물질을 포함하고 있는 연무의 빈도(전체 5%)는 대부분 계절에서 매우 낮은 빈도를 보였다.

장기간(2007~2016년) 일기유형별 대기오염물질 농도 변화를 분석한 결과, 일기유형에 따른 PM₁₀ 농도는 대부분 황사먼지와 연무 발생시 고농도(황사먼지시 인천에서 최고 250 µg/m³)가 나타났으며(다른 일기유형에 비해 2~7배), 다음으로 박무 또는 안개, 가장 낮은 농도는 강수와 천둥 및 번개 발생시에 나타났다. PM_{2.5} 농도는 다른 일기유형에 비해 연무 또는 황사먼지 발생시 가장 높았으며(연무발생시 인천에서 각각 최고 69 µg/m³), PM_{2.5}의 주요 전구물질인 NO₂와 SO₂는 둘 다 연무발생시에 가장 높은 농도가 관측되었다(연무발생시 인천에서 최고 48 ppb 및 16 ppb). 이와 같이 연무와 황사먼지는 같은 먼지현상이라도 서로 다른 대기질 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 연구기간동안 일기유형에 따른 O₃과 CO 농도는 대부분 지역에서 유형별 큰 농도 차이가 나지 않았다.

이상의 연구결과는 우리나라 주요 대도시를 중심으로

장기간 일기유형 빈도의 시·공간적 특성과 여러 일기유형에 따른 대기질(대기오염물질 농도) 특성을 살펴본 것으로, 대상지역의 지리·지형적 및 환경적 특성, 그리고 기상조건 등에 따라 일기유형의 빈도 및 대기질 특성이 시·공간적으로 조금씩 다르게 나타났음을 확인하였다. 따라서 본 연구결과는 최소한 한반도 내 장기간 일기유형의 빈도 변화 및 대기질 특성과의 관계를 이해하는데 중요한 기초자료가 될 것으로 기대된다. 그러나 본 연구는 단순히 관측 자료만을 이용하여 분석한 기초연구이므로, 향후 일기유형에 따른 대기오염물질의 생성 메커니즘 및 농도 변화를 보다 정량적으로 분석하기 위해서는 관측자료의 분석과 병행하여 고해상도 수치모의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 <기상·지진See-At기술개발연구>(KMI2018-07610)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017R1A2B2003616).

REFERENCES

- Ahn, S. H., Park, S. Y., Kim, J. Y., Kim, B. J., 2014, Effect of the rainfall during typhoon periods on the variation of concentration of ambient air pollutants (PM₁₀, NO₂, CO, SO₂) in the Korean peninsula, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30, 128-138.
- 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.
- Chen, Y. S., Sheen, P. C., Chen, E. R., Liu, Y. K., Wu, T. N., Yang, C. Y., 2004, Effects of Asian dust storm events on daily mortality in Taipei, Taiwan, *Environ. Res.*, 95, 151-155.
- Cheng, W. L., 2002, Ozone distribution in coastal central Taiwan under sea-breeze conditions, *Atmos. Environ.*, 36, 3445-3459.
- Choi, J. C., Cha, J. W., Bang, S. Y., Youn, Y. H., 2002, Study on physical and chemical characteristics of yellow sand at Anmyeon-do, Chungnam, *J. Korean Meteorol. Soc.*, 38(2), 105-117.
- Chun, Y. S., Kim, J. Y., Boo, K. O., Kim, N. O., 2000, The features associated with the yellow sand phenomenon observed in Korea in wintertime, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 16(5), 487-497.
- 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.
- Hwang, Y. J., Lee, S. J., Do, H. S., Lee, Y. K., Son, T. J., Kwon, J. W., Kang, D. H., Kim, J. W., 2009, The analysis of PM₁₀ concentration and the evaluation of influences by meteorological factors in ambient air of Daegu area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(5), 459-471.
- Jo, H. Y., Kim, C. H., 2011, Characteristics of air quality over Korean urban area due to the long-range transport haze events, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27(1), 73-86.
- Jung, Y. J., Lee, D. I., Han, Y. H., Lee, H. H., 1998, On the prediction and variation of air pollutants concentration in relation to the meteorological condition in Pusan area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 14(3), 177-189.
- Kim, S. W., Park, S. U., Lee, B. R., 1997, Variations of SO₂, NO_x, CO and O₃ concentrations in association with synoptic meteorological conditions, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 33(2), 273-287.
- Kim, S., Song, S. K., Han, S. B., 2016, A Study on the outbreak and transport processes of the severe Asian dust event observed in March 2010, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 32(3), 256-271.
- Kim, Y. K., Song, S. K., Kang, J. E., 2004, Characteristics of concentration variations and synoptic conditions by the lasting time of Asian Dust, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(4), 465-481.
- Lee, D. I., Han, Y. H., 1992, Vertical distribution of aerosol concentrations in the boundary layer observed by a tethered balloon (part II: distribution of aerosol concentrations in relation to the sea breeze front), *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 28(4), 498-507.
- Lee, D. K., Kim, Y. A., 1997, Springtime weather types over northeast Asia and relationship with Yellow Sand events during 1980-1989, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 33(1), 17-40.

- 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.
- Lee, J. Y., Lee, D. I., Han, Y. H., Ok, H. G., 1997, Vertical distribution of O₃ and NO₂ concentrations in the atmospheric boundary layer during temperature inversion, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 33(2), 315-326.
- Lee, K. W., Kwon, S. P., Chung, Y., 1993, Yearly variation and influencing factors of ozone concentration in the ambient air of Seoul, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 9(1), 107-115.
- 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.
- Liu, Q., Ma, T., Olson, M. R., Liu, Y., Zhang, T., Wu, Y., Schauer, J. J., 2016, Temporal variations of black carbon during haze and non-haze days in Beijing, *Sci. Rep.*, 6, 1-10.
- Onishi, K., Kurosaki, Y., Otani, S., Yoshida, A., Sugimoto, N., Kurozawa, Y., 2012, Atmospheric transport route determines components of Asian dust and health effects in Japan, *Atmos. Environ.*, 49, 94-102.
- Park, C., Moon, J. Y., Cha, E. J., Yun, W. T., Choi, Y., 2008, Recent changes in summer precipitation characteristics over South Korea, *J. Korean Geography. Soc.*, 43(3), 324-336.
- Park, I. S., Rhee, D. G., Kang, I. G., 1991, The meteorological factors governing SO₂ concentrations during the wintertime in Seoul area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 7(2), 96-104.
- Rahman, H. A., 2013, Haze phenomenon in Malaysia: domestic or transboundary factor?, *Proceedings of the 3rd International Journal Conference on Chemical Engineering and its Applications (ICCEA'13)*, Phuket, Thailand.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2006, *Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change*, Second ed. JohnWiley & Sons, New Jersey.
- Shin, C. K., Han, J. S., Kim, Y. S., 1992, A Study on the relationship of air pollution and meteorological factors, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 8(4), 213-220.
- 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. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(3), 322-331.
- Shon, Z. H., Kim, K. H., Song, S. K., Jung, K., Kim, N. J., Lee, J. B., 2012, Relationship between water-soluble ions in PM_{2.5} and their precursor gases in Seoul megacity, *Atmos. Environ.*, 59, 540-550.
- Son, H. J., 2010, Characteristic analysis of long-term variability of fog occurrence in South Korea, M. Sc. Dissertation, Kongju National University, Kongju.
- 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(11), 1889-1907.
- Sun, Y., Zhuang, G., Tang, A., Wang, Y., An, Z., 2006, Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 3148-3155.