



한반도 미세먼지 발생과 연관된 대기패턴 그리고 미래 전망

이현주* · 정여민** · 김선태*** · 이우섭****

*APEC 기후센터 기후사업본부 기후분석팀 연구원, **APEC 기후센터 기후사업본부 융합기술팀 연구원,
 ***APEC 기후센터 기후사업본부 기후분석팀 선임연구원

Atmospheric Circulation Patterns Associated with Particulate Matter over South Korea and Their Future Projection

Lee, Hyun-Ju*, Jeong, YeoMin**, Kim, Seon-Tae*** and Lee, Woo-Seop****

*Researcher, Climate Analytics Team, Climate Services and Research Department, APEC Climate Center, Busan, Korea
 **Researcher, Integrative Climate Research Team, Climate Services and Research Department, APEC Climate Center, Busan, Korea
 ***Research Fellow, Climate Analytics Team, Climate Services and Research Department, APEC Climate Center, Busan, Korea

ABSTRACT

Particulate matter air pollution is a serious problem affecting human health and visibility. The variations in PM₁₀ concentrations are influenced by not only local emission sources, but also atmospheric circulation conditions. In this study, we investigate the temporal features of PM₁₀ concentrations in South Korea and the atmospheric circulation patterns associated with high concentration episodes of PM₁₀ during winter (December-January-February) 2001-2016. Based on those analyses, a Korea Particulate matter Index (KPI) is developed to represent the large-scale atmospheric pattern associated with high concentration episodes of PM₁₀. The atmospheric patterns are characterized by persistent high-pressure anomalies, weakened lower-level north-westerly anomalies, and northward shift of the upper-level meridional wind anomalies near the Korean Peninsula. To evaluate the change in occurrence of high concentration episodes of PM₁₀ under a possible future warmer climate, we apply KPI analysis to CMIP5 climate simulations. Here, historical and two representative concentration pathway (RCP) scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) are used. It is found that the occurrence of atmospheric conditions favorable for high PM₁₀ concentration episodes tends to increase over South Korea in response to climate change. This suggests that large-scale atmospheric circulation changes under future warmer climate can contribute to increasing high PM₁₀ concentration episodes in South Korea.

Key words: Particulate Matter 10, Atmospheric pattern, Climate change, Korea Particulate matter Index

1. 서 론

전 세계 도시지역에 인구집중화가 심화되면서 수도권과 인구 밀집지역의 대기질 문제, 특히 미세먼지로 인한 사회경제적 피해가 급증하고 있다. 특히, 1952년 영국 런던에서는 5일간의 스모그로 인하여 약 4,000여명이 사망하게 되었고, 대중들이 대기오염이 건강에 미치는 영향에 대한 관심을 가지는 중요한 계기가 되었다. 이 사건 이후로 대기오염에 관한 연구 및 국가적 관리가 본격적으로 시작되었다고 할 수 있다.

PM₁₀은 대기 중 장기간 떠다니는 입경 10 μm 이하의 먼지로, 사망률 및 유병률에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 특히 입경 2.5 μm 이하의 미세 먼지의 증가는 심혈관 및 호흡기 질환 등 건강에 대한 심각한 부정적 영향을 가져올 수 있다 (Jo et al., 2017; Hong and Cho, 2001; Shin, 2007). OECD (Organization for Economic Cooperation and Development, 2016) 보고서에 따르면 미세먼지와 같은 대기 오염의 증가로 2015년 기준 약 22조의 의료 비용이 발생하며 2060년에는 약 200조의 피해가 발생할 것으로 추정하고 있

*Corresponding author: wslee@apcc21.org (APEC Climate Center, 12 Centum 7-ro, Haeundae-gu, Busan, 48058, Korea. Tel:+82-51-745-3981)

Received November 6, 2018 / Revised November 28, 2018 / Accepted December 12, 2018

다. 보고서에서 특히, 우리나라는 2060년에 이르러서는 대기 오염으로 인한 조기 사망자가 중국 다음으로 많을 것으로 경고하고 있다. 또한 미세먼지 고농도 현상은 시정을 악화시켜 교통·운행에 장애를 발생시키고, 실외 기계·건물 설비의 고장 원인이 되는 등 사회·경제적 피해 비용을 발생시킨다. 더욱이 우리나라의 수도권 지역의 미세먼지 농도는 OECD 국가의 주요도시들과 비교했을 때, 2~3배정도 높으며, 오염물질 배출 사업장들의 미세먼지 배출기준 초과 횟수도 연간 700여건에 달하고 있다. 미세먼지로 인한 대기질 문제는 사람의 건강문제와 직결되어 국민들의 관심이 매우 높아지고 있다. 또한 사회·경제적 피해가 막대한 점을 고려할 때, 피해 예방 및 피해 비용 절감을 위해서는 미세먼지 발생 원인 및 미세먼지를 정체시키는 기상학적 패턴에 대한 연구가 필요하다 (Park et al., 2013).

우리나라는 지리적으로 중위도 편서풍대에 위치하고 있어 중국과 몽골에서 발생한 미세먼지 또는 황사 장거리 수송에 영향을 받는다. 최근 들어 급격한 산업화와 도시화를 겪고 있는 중국에서 발생한 대기 오염물질이 우리나라로 유입되는 양이 늘어나고 있다. 보통 인위적 요인에 의해 유입된 미세먼지는 대기 중의 강수 시스템에 의해 제거된다. 그러나 우리나라의 겨울철과 봄철에는 적은 강수량으로 인해 강수에 의한 세정효과를 기대하기 어려우며, 한반도 주변에 자주 형성되는 대륙성 고기압으로 인한 대기정체가 고농도 미세먼지 현상을 자주 발생시킨다 (Smith et al., 2001; Lee et al., 2011; Kim et al., 2016). 또한 Lee et al.(2011)과 Park and Kim(2014)는 미세먼지 고농도 현상의 발생 특성은 배출량 변화 뿐만 아니라 대기패턴의 변화에 따라 매년 다른 변동성을

보이고 있다고 언급한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 고농도 미세먼지의 발생과 연관된 대기패턴을 조사하고, 이를 바탕으로 미세먼지를 예측할 수 있는 지수를 개발하였다. 또한 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)에 참여한 모형들을 이용하여 한반도 미세먼지 정체와 연관된 대기패턴의 변화를 조사하여 미래의 한반도 미세먼지 발생의 잠재적 영향을 조사하였다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 대기오염 자료

국립환경과학원은 도시지역의 평균 대기질 농도를 파악하고 이를 바탕으로 환경기준 달성여부를 판정하기 위해 2006년부터 도시대기 측정망을 운영하고 있다. 본 연구에서는 한반도 지역 82개 시·군의 264개 도시 대기 측정망 자료 중 서울시 25개 대기오염 자동 측정망 자료를 사용하였으며 (Fig. 1a, 1b), 서울시 25개 지점의 PM_{10} 자료를 평균하여, 서울지역의 대표 미세먼지 농도자료로 사용하였다. PM_{10} 자료에서 결측이 발생한 측정소는 제외하였으며, 통계자료의 신뢰성을 제고하기 위해 유효자료가 75% 이상이 되지 않을 경우에는 분석에서 제외하였다.

미세먼지의 대기환경 기준은 24시간 평균치 $100 \mu g/m^3$ 으로 규정하고 있다. 본 연구에서는 미세먼지 예·경보제의 기준과 대기환경기준에 따라 24시간 평균 PM_{10} 농도가 $100 \mu g/m^3$ 이상일 경우를 고농도 사례일로 정의 하였다.

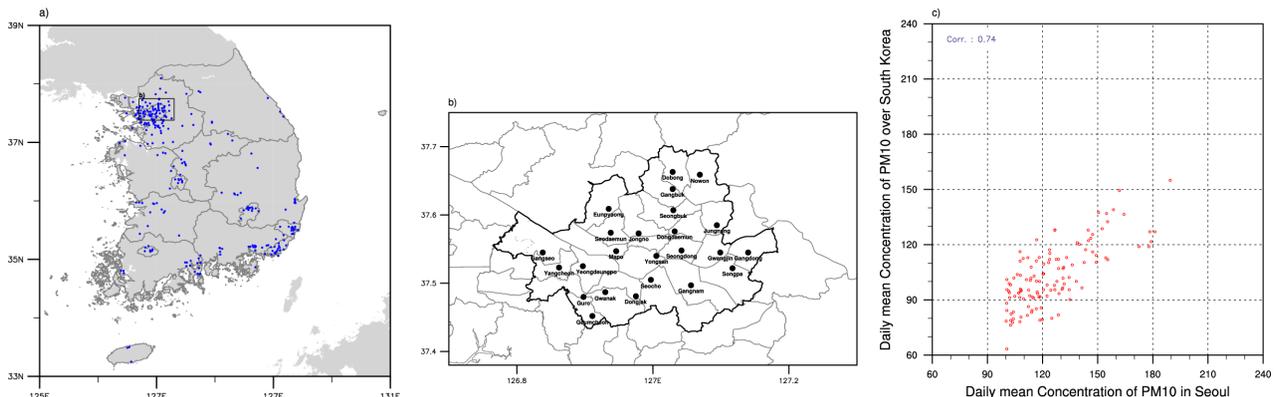


Fig. 1. Distribution of stations for measuring urban air quality over a) South Korea and b) Seoul used in this study. c) Scatter plot of daily mean concentrations of PM_{10} averaged in Seoul versus those averaged in South Korea for PM_{10} high concentration episodes from 2001 to 2016.

2.2 기상 자료

일반적으로 PM₁₀ 고농도 사례 발생은 여러 요인에 의해 발생할 수 있는데 주로 배출량과 기상조건, 황사와 같은 외부 영향에 의해 좌우된다. 즉 대기오염 물질의 배출량이 일시적으로 비 정상적으로 많은 경우 그리고 바람이 약하거나 미세먼지가 정체할 수 있는 조건의 대기패턴이 형성되었을 때 고농도 현상이 발생할 가능성이 높다. 본 연구에서는 PM₁₀ 고농도 사례일을 황사와 같은 외부 영향과 비 황사일의 PM₁₀ 고농도 사례일로 구분하여 대기패턴을 조사하고, 관련 메커니즘을 분석하였다. 여기서, 황사에 의한 PM₁₀ 고농도 사례일은 황사주의보(황사로 인해 1시간 미세먼지 농도 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때)와 황사 경보(황사로 인한 1시간 미세먼지 농도 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 2시간 이상 지속 될 것으로 예상될 때)를 포함하여 기상청에서 황사 관측일로 발표한 날로 황사발원지에서 발생한 황사가 기상청의 관측지점에서 하루 중 짧은 시간 동안이라도 관측되었을 때를 모두 황사 사례일로 하였다. 고농도 미세먼지와 연관된 대기패턴을 분석하기 위해 미국 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 재분석 II 자료를 이용하였다 (Kanamitsu et al. 2002).

이 자료는 위도와 경도 모두 2.5도 간격의 격자로 구성되어 있으며, 연직으로는 1000 hPa부터 10 hPa까지 17개의 연직층으로 이루어져 있다. 사용된 변수는 500 hPa 지위고도, 850 hPa 지위고도, 500 hPa 동서 방향 바람과 남북 방향 바람, 850 hPa 동서 방향 바람과 남북 방향 바람, 기온이다. 분석에는 2001년부터 2016년까지 16년의 기간이 사용되었으며, 월별 기후 평균 (1981~2010)을 제거한 편차장을 이용하

였다. 또한 분석된 한반도 고농도 미세먼지와 연관된 대기패턴을 기반으로 Korea Particulate matter Index (KPI)를 개발하였으며, 그 방법은 3장에 상세히 제시하였다.

2.3 기후변화 시나리오 자료

고농도 PM₁₀ 발생과 연관된 대기패턴의 미래 전망을 분석하기 위해 CMIP5에 참여한 기후모형의 자료를 이용하였다. 현재 CMIP5에서는 미래 전망을 위해 총 33개의 기후 모형의 자료를 제공하고 있으나, 고농도 PM₁₀ 발생과 연관된 대기패턴의 분석에 필요한 변수 (500 hPa와 850 hPa 지위고도, 850 hPa 동서 방향 및 남북 방향 바람, 500 hPa 동서 방향 및 남북 방향 바람, 기온)를 일자료로 모두 포함하고 있는 10개 기후 모형의 자료를 사용하였다. 사용된 10개 모형에 관한 정보는 Table 1에 제시하였다. 또한 다양한 기후모형들이 가지고 있는 불확실성을 줄이고자 다중모형 앙상블을 사용하였고, 모형별로 상이한 공간해상도를 NCEP 재분석 자료와 동일한 위경도로 변환하여 사용하였다. 과거기후 모의 실험 (Historical Run)과 IPCC-AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report)에서 채택된 4개의 온실가스 배출 시나리오 중 RCP (Representative Concentration Pathways) 2종 (4.5, 8.5)을 사용하였다. 미래 기후변화 시나리오 중 RCP 4.5는 21세기 말까지 복사강제력이 증가하다가 그 이후에 약 4.5 Wm^{-2} 으로 안정될 것으로 가정한 실험이며, RCP 8.5는 온실가스 배출 저감 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우로 기후변화가 극단적으로 진행될 것으로 가정한 실험이다. 과거기후 모의 실험 자료의 사용기간은 1950년부터 1999년까지 총 50년이며, 미래 기후 변화 전망 자료의 사용기간은 2050년에서 2099년까지 총 50년의 자료를 이용하여 미래기

Table 1. CMIP5 models used in this study

No	Model	Institution	Resolution (Lon.×Lat.)
1	CanESM2	CCCma	2.8125° × 2.8125
2	CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	1.40625° × 1.40625°
3	GFDL-ESM2M	NOAA GFDL	2.5° × 2°
4	HadGEM2-CC	MOHC	1.875° × 1.24°
5	MIROC-ESM	JAMSTEC, AORI, NIES	2.8125° × 2.8125°
6	MIROC-ESM-CHEM	JAMSTEC, AORI, NIES	2.8125° × 2.8125°
7	MPI-ESM-LR	MPI-M	1.875° × 1.875°
8	MPI-ESM-MR	MPI-M	1.875° × 1.875°
9	MRI-CGCM3	MRI	1.125° × 2.25°
10	NorESM1-M	NCC	2.5° × 1.875°

후의 미세먼지 발생 빈도수와 강도를 비교 분석하였다. 고농도 미세먼지 발생 빈도수 및 강도의 미래 전망을 위해, 본 연구에서는 미세먼지와 연관된 기상 패턴에서 얻어진 KPI를 활용하였다.

3. 미세먼지 발생 특성

먼저 서울 지역 미세먼지 고농도 사례일에 대한 대기순환 패턴을 분석하기 이전에 서울 지역의 미세먼지 고농도 사례일로 한반도 주변 대기 순환 패턴을 설명할 수 있는지 알아보기 위해 서울 지역 미세먼지 고농도 사례일의 일평균 미세먼지 농도와 한반도 전역의 일평균 미세먼지 농도의 피어슨 상관계수를 살펴보았다. Fig 1c에 나타난 것과 같이 2001년부터 2016년까지 서울 지역에서 발생한 미세먼지 고농도 사례일의 일평균 미세먼지 농도와 한반도 전역의 도시 대기질 측정망 자료의 미세먼지 일평균 농도와의 상관계수는 0.74로 높은 상관관계를 보였다. 비행사일의 PM₁₀ 고농도 사례일의 경우 정체성 고기압의 영향으로 한반도는 동일한 중관 기상 조건하에 놓이게 되어 국지 수송 및 확산의 영향이 상대적으로 작아 우리나라 대부분의 지역은 비슷한 농도 분포를 보이는 경향이 있다 (Kim et al., 2005).

다음으로 서울 지역의 미세먼지 발생 특성을 알아보기 위해서, 평균 PM₁₀ 농도와 고농도 사례에 대해서 조사하였다. 전체 분석기간인 2001년부터 2016년까지 서울지역의 미세먼지 평균 농도는 52.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 표준편차는 28.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 최근 5년 (2012~2016년) 미세먼지 평균 농도는 43.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 표준편차는 32.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 미세먼지 연평균 농도는 2001년부터 꾸준히 감소하는 경향을 보이며, 2012

년 이후에 감소 추세가 주춤하는 것으로 보인다 (Fig. 2a). 2000년대 들어 정부는 대기환경개선을 위해 2003년 『수도권 대기환경개선 특별법』을 제정하고 『수도권 대기환경 관리 기본계획』등을 수립하여 이행하면서 대기오염 배출량 뿐만 아니라 미세먼지 농도 또한 감소하였다 (Kim et al., 2017). 연도별 PM₁₀ 농도가 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 고농도 사례일의 빈도를 살펴보면, 2003년부터 2016년까지의 고농도 사례일 수가 대체로 감소하였으며, 이는 미세먼지 연평균 농도 감소 경향과 동일하다. 2001년부터 2016년까지 서울에서 PM₁₀ 농도가 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날은 총 366일이었다. 2002년에 55일로 가장 많이 발생하였으며, 2015년에는 2일 (10월, 12월)로 가장 적은 날수가 발생하였다.

전체 연구 기간 동안의 미세먼지 농도와 최근의 미세먼지 농도 변화를 알아보기 위해 각 농도 구간별 미세먼지 발생확률을 Fig. 2b와 같이 비교하였다. 그래프 내의 값은 전체 기간과 최근 5년 자료에 대한 PM₁₀ 농도 구간별 발생확률의 차를 의미한다. 최근 5년동안 미세먼지는 일평균 농도 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 구간에서 증가를 하였고, 반면에 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 농도 사례일은 최근 들어 감소를 하였다. 이러한 감소 경향은 PM₁₀ 농도가 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날들에서 모두 나타난다.

Fig. 3은 연도별 PM₁₀ 고농도 사례일의 지속기간과 지속기간에 따른 미세먼지 평균 농도 변화를 나타낸 것이다. 미세먼지 고농도 일수의 지속기간을 보면 최근 2001년, 2007년에 7일로 가장 긴 사례가 발생하였으며, 최근 2011년과 2014년에 6일의 지속기간이 나타났다. 4일 이상 지속되었던 고농도 사례만을 살펴보면 2001년과 2003년을 제외하고 뚜렷한 감소

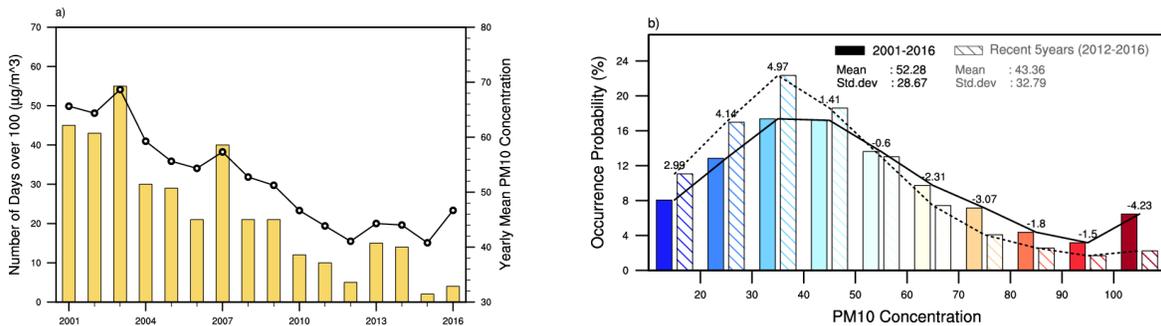


Fig. 2. a) The frequency of high concentration episodes of PM₁₀ (bar) and annual mean PM₁₀ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$; solid line) in Seoul from 2001 through 2016. b) The percentage probability of occurrence for PM₁₀ concentration for the periods 2001-2016 (filled bar) and recent 5 years (i.e., 2012-2016; cross-hatched bar). The number in b) indicates the difference of percentage probability of occurrence for PM₁₀ concentration between the periods 2001-2016 and recent 5 years.

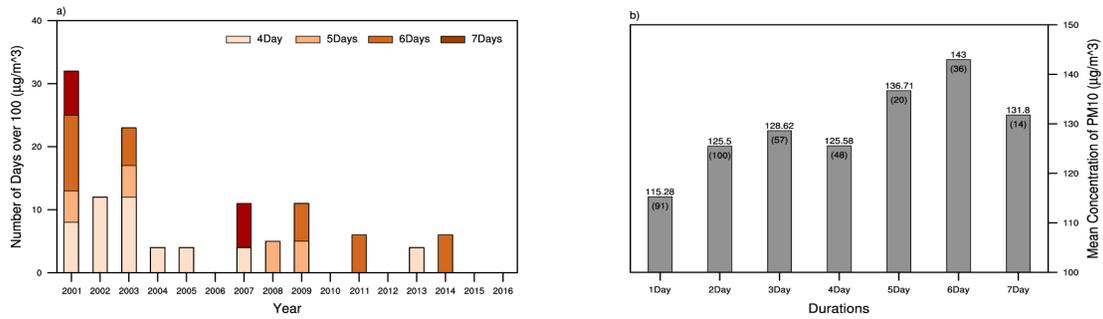


Fig. 3. a) The number of high concentration episodes of PM₁₀ (when PM₁₀ concentration exceeds 100 µg/m³) and b) PM₁₀ concentrations averaged for the duration of the high concentration episodes. In a), colors indicate the duration of the high concentration episodes.

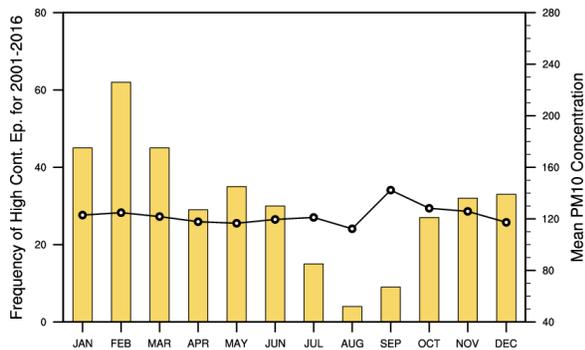


Fig. 4. Seasonal variation of monthly frequency of high concentration episodes of PM₁₀ (bar) and monthly mean PM₁₀ concentrations (solid line) from 2001 to 2016.

경향을 찾아보기 어렵고, 전반적인 대기질 향상과 PM₁₀ 배출량 감소에도 불구하고 지속적으로 발생하는 것을 알 수 있다 (Fig. 3a). 4일이상 지속되는 고농도 사례는 2001년과 2003년에 가장 빈도수가 많으며, 2014년에는 6일 이상 지속된 고농도 사례가 발생하였다. 4일 이상 지속된 고농도 사례는 2001년부터 2003년을 제외하면, 뚜렷한 경향성을 보이지 않는다. 따라서 고농도 사례에 대한 대기 순환장 특성을 살펴볼 필요가 있다. 미세먼지 고농도 지속기간에 따른 평균농도 변화를 살펴보면, PM₁₀의 고농도 지속기간이 1일인 경우, PM₁₀ 농도는 약 115.28 µg/m³이며, 6일인 경우에는 143 µg/m³으로 평균농도가 가장 높게 나타났다. PM₁₀ 고농도의 지속기간이 길어 질수록 PM₁₀의 농도는 증가하는 것으로 나타났다. PM₁₀의 고농도 지속기간이 길어질수록 PM₁₀ 농도가 증가한다는 것은 일시적인 배출량 증가에 의해 고농도가 발생하기 보다는 대기의 정체와 같은 외적 요인에 의한 영향으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 NCEP 자료를 사용하여 서울에서 발생

한 고농도 현상이 어떤 대기 조건에서 발생하였는지 살펴보았다.

4. 고농도 발생일과 연관된 대기 패턴

Fig. 4는 2001년부터 2016년까지의 월별 평균 서울지역 PM₁₀ 고농도 사례일수와 평균 PM₁₀ 농도를 나타낸다. 월별로 살펴보면 2월에 62회로 가장 많은 발생빈도를 보였으며, 1월, 3월, 12월 순으로 대체로 봄철과 겨울철에 고농도의 미세먼지가 많이 발생하였다. 특히 겨울철은 대기가 건조하여 비가 적고 (겨울철 평균 강수량: 23.4 mm, 여름철 평균강수량: 809.2 mm), 오염물질의 배출이 많다. 여름철에는 상대적으로 미세먼지 고농도 사례가 적게 발생하는 것은 강수에 의한 세정효과 때문인 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 고농도 사례일과 연관된 대기 순환 패턴을 살펴보기 위해 고농도 사례 일이 많은 겨울철을 주로 분석하였다.

한반도의 겨울철 대기 순환은 동아시아 겨울철 몬순과 관련된 북서풍과 한반도 상공의 기압계의 위치에 따라 특정지어진다. 특히 미세먼지를 정체시키는 대기 조건이 형성되면 미세먼지의 농도는 급격히 증가하게 된다. 이로 인해 시정이 급격히 떨어지며, 항공기와 교통의 위험을 초래하고, 경제활동에도 악영향을 미친다. 이러한 미세먼지는 심혈관계, 면역계에 유해한 영향을 미치는 호흡기 및 순환기 계통의 독성물질을 포함하고 있으며, 입원률과 사망률을 증가시킬 수 있다 (Jo et al, 2017).

PM₁₀ 고농도 사례와 연관된 기상조건을 알아보기 위해서, NCEP 재분석 자료를 사용하여 서울 지역에서 발생한 PM₁₀ 고농도 현상이 어떤 기상 조건에서 발생하였는지 살펴보았다. 여기서 미세먼지 고농도 사례일은 자연적 요인에 의한 PM₁₀ 고농도가 발생한 황사 사례일 (이후, 황사 사례일)과

황사 일을 제외하여 인위적인 요인에 의한 PM₁₀ 고농도 사례일 (이후, 고농도 사례일)로 정의하였다. 2001년부터 2016년까지의 총 16년의 기간 동안 황사 사례일은 31일, 황사 사례일을 제외한 고농도 사례일은 140일 발생한 것으로 분석

되었다.

Fig. 5는 2001년부터 2016년까지 서울지역에서 나타난 황사 사례일과 고농도 사례일의 위도 평균 (30°N -50°N)된 연직 온도 편차의 합성장을 나타낸 것이다. 고농도 사례일의

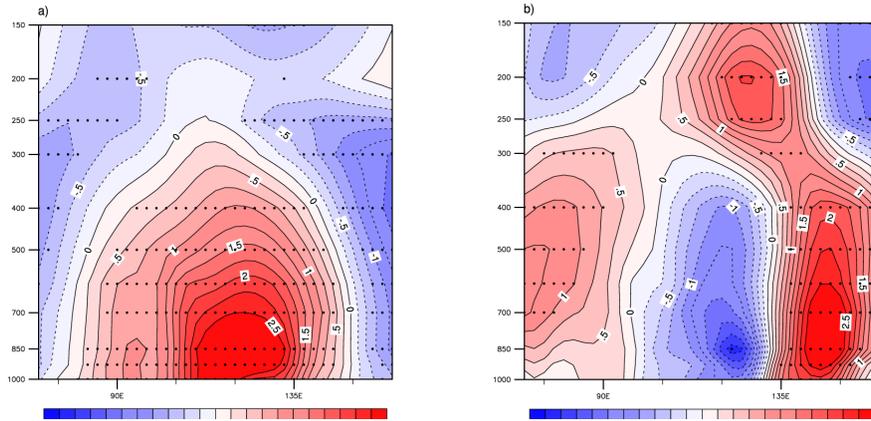


Fig. 5. Composite maps of vertical temperature anomaly (shading, 0.25°C interval) averaged over 30°N-50°N for a) PM₁₀ high concentration episodes and b) yellow dust episodes. The dots indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level based on a Student's t-test.

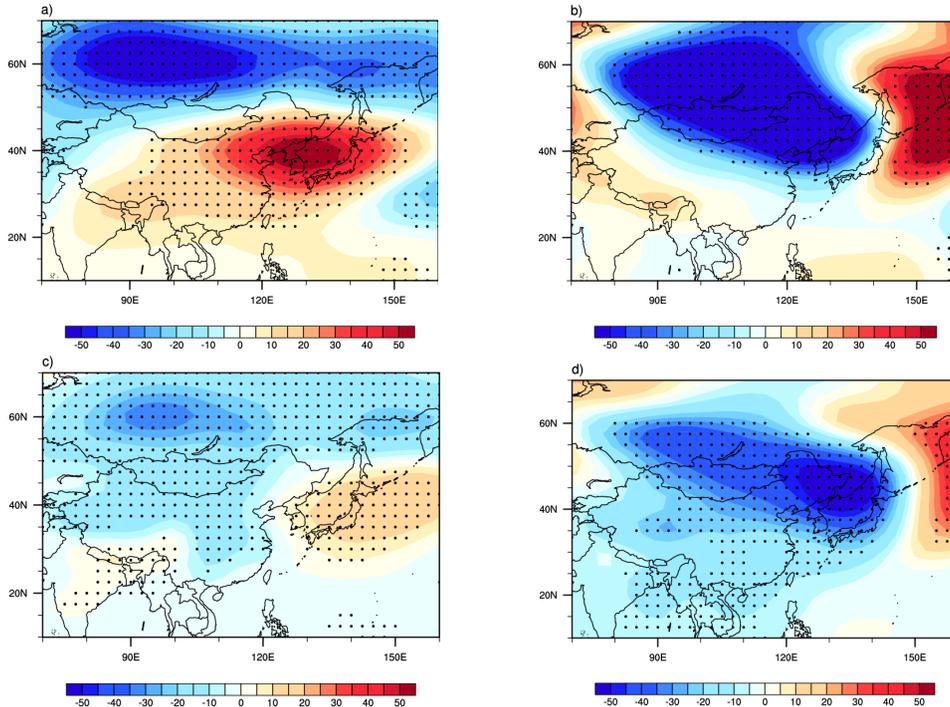


Fig. 6. Composite maps of a) 500 hPa geopotential height anomaly (shading, 5gpm interval) and c) 850 hPa geopotential height anomaly (shading, 5gpm interval) for (upper panels) PM₁₀ high concentration episodes and (lower panels) yellow dust episodes. The dots indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level based on a Student's t-test.

연직 온도 분포는 하층에서 양의 기온 편차, 상층에서는 음의 기온 편차를 보이고 있으며, 특히 한반도 주변에서 기온편차는 지표에서부터 850 hPa까지 기온이 증가하는 모습을 보이고 있다 (Fig. 5a). 지표 부근의 대기가 매우 안정하여, 오염물질의 연직확산을 저지할 수 있는 호조건을 보이고 있다. 이는 상층의 약한 풍속과 하층 대기가 매우 안정할 때 미세먼지 농도가 높다는 선행 연구 결과와 동일하다 (Lee et al., 2007). 반면에 황사가 발생하였을 때는 연직 분포에서 고농도 사례와 반대의 특징을 보인다 (Fig. 5b). 즉 한반도 주변에 음의 기온 편차를 갖고, 오염물질의 활발한 연직 확산이 가능한 대기 조건을 보여준다. 이와 같은 온도 분포는 Fig. 6의 고농도 사례와 황사 사례일의 500 hPa 지위고도의 편차장의 합성장에서 잘 설명된다. 황사 사례일의 경우, Fig. 6b의 500 hPa 지위고도장의 편차장에서 보면 음의 지위고도가 중국 북부를 포함한 몽골지역 즉, 황사 발원지역에서 한반도까지 확장되어 있고, Fig. 6d의 850 hPa 지위고도에서도 동일한 분포를 보이고 있다. 연직으로 하층대기에서부터 상층대기까지 저기압성 편차가 형성되어 있음을 알 수 있다. 이는 황사 발원지

역에서 상승 기류에 의해 대기 상층으로 오염물질이 확산 되고, 북서풍을 타고 한반도에 도달하여 서울지역의 미세먼지 농도에 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 한반도 북서쪽으로 북서풍의 증가는 Fig. 7b의 황사사례일 동안의 850 hPa의 동서 방향의 바람장과 Fig. 7d의 500 hPa의 남북 방향의 바람장에서 확인할 수 있다. 다시 말해서, 황사는 전반적으로 상층을 통해서 이동하며, 한반도 상하층에 저기압 편차가 위치하면서, 중국 사막지역(고비)의 모래먼지가 한반도로 불어 들어 올 수 있는 호조건을 생성한다.

이에 반해, PM₁₀ 고농도 사례일 경우, Lee et al. (2011)과 Ho (2014)의 선행연구에서 언급된 바와 같이 한반도 상층에 고기압성 편차가 위치하는 것을 알 수 있다 (Fig. 6a). Fig. 5a의 고농도 미세먼지 사례일 동안의 연직 기온 편차 합성장에서 나타난 하층대기에서의 양의 기온편차는 만주 및 한반도 주변의 저기압과 동해, 일본의 고기압 편차와 관련되며 (Fig. 6c), 이러한 기압배치는 겨울철에 우세한 차가운 북풍의 유입을 감소시키고, 한반도 남쪽에서 불어오는 남풍이 우세하게 된다 (Fig. 7c). 이는 중국 산둥반도 부근에 위치한 석탄화력

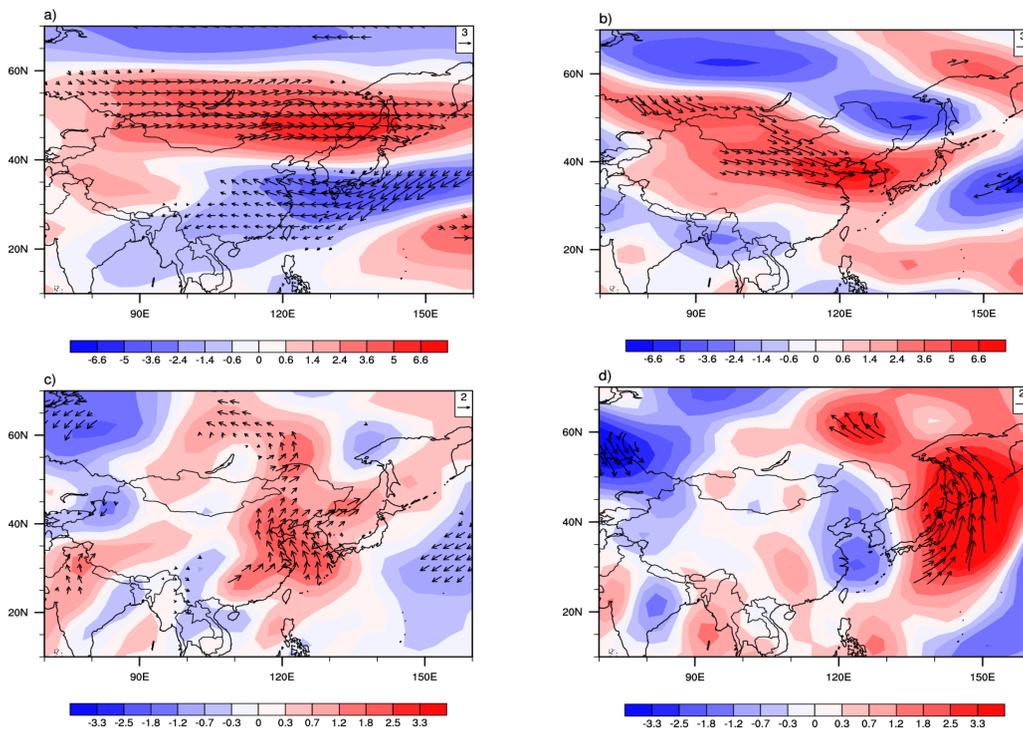


Fig. 7. Composite maps of wind anomaly (vector, m/s) and zonal wind anomaly (shade, m/s) at 500 hPa for a) PM₁₀ high concentration episodes and b) yellow dust episodes. (c, d) Same as (a, b) except for 850 hPa. The vectors in (a, b) and (c, d) are shown when the zonal or meridional wind anomalies, respectively, are significant at 95% confidence level based on a Student's t-test.

발전소, 대규모의 공장 등에서 발생한 대기오염물질이 우리나라로 유입될 수 있다는 것을 의미한다.

더불어 한반도 상공에 고기압이 위치하면서 (Fig. 6a), 극의 찬공기의 유입을 차단하며, 상층 동서 방향 바람은 한반도 북쪽으로 흐르게 된다. 따라서 한반도 지역은 차고 건조한 북서풍이 약화되고, 풍속이 감소된다. 이렇게 약화된 대기의 흐름은 500 hPa 동서 방향의 바람 편차장에서 확인할 수 있다 (Fig. 7a). 동서 방향의 바람장은 한반도 중부와 남부지역에서 약한 음의 편차를 보이며, 한반도 북부지역에서는 양의 편차를 보이고 있다. 강한 고기압 편차와 편서풍대에 속한 한반도 주변에서의 동서 방향의 바람장 약화에 의해 한반도 지역에 오염물질의 축적이 용이해지고, 정체되어 있는 대기로 인해 오염물질의 이동이 어려워지게 된다. 따라서 PM₁₀의 수송량이 적어지고, PM₁₀의 지속기간이 증가함에 따라 고농도 PM₁₀ 사례가 발생할 수 있음을 시사한다. 그러므로 PM₁₀ 고농도 사례일에서 대기장 분포는 한반도에서 미세먼지가 정체할 수 있게 하고, 중국 남동부 지역에서 유입된 오염물질이 더해져서 한반도의 미세먼지가 더욱 증가하도록 만들 수 있다는 것을 의미한다.

또한 본 연구에서는 기후변화에 따른 한반도 겨울철 고농도 미세먼지 사례일을 전망하고 그 변동성을 살펴보기 위해, PM₁₀ 고농도 사례와 관련된 대기 패턴을 지수로 정의하여 사용하였다. 앞서 살펴본 바와 같이 황사 사례일과 PM₁₀ 고농도 사례 (황사일 미포함)일의 대기패턴의 특징이 상이하여 황사 사례일은 지수 분석에서 제외하였다. 먼저 500 hPa 지위고도, 500 hPa 동서 방향 바람 성분, 850 hPa 남북 방향 바람 성분 편차장과 PM₁₀ 농도와의 유의한 상관성을 가지는 지역

을 영역 평균하여 각각의 지수로 정의하였으며, 500 hPa 지위고도 편차장의 지수는 Z500, 500 hPa 동서 방향 바람 성분 편차는 U500, 850 hPa에서의 남북 방향 바람 성분 편차는 V850으로 명명하였다. 변수별 PM₁₀ 농도와의 유의 상관 지역은 Fig. 8에 나타내었다. 2001년부터 2016년까지의 겨울철 (12월, 1월, 2월) 동안 일평균 PM₁₀ 농도 (표본의 개수 : 1409) 와 Z500의 상관성은 0.28 이며, U500은 0.31로 가장 높다. 그리고 V850과의 상관성은 0.22이다. 세 변수의 상관계수는 모두 95% 신뢰수준에서 유의미한 값이다. 그러나 고농도 PM₁₀ 사례일들과 연관된 기상조건은 독립적으로 일어나는 것이 아니라 인과관계를 가지고 동시에 일어나므로 각각의 지수에 대한 표준편차를 나누어 표준화하였다. 표준화된 세 개의 지수를 합한 후 그 값을 다시 표준화하여 한반도 미세먼지 지수 (KPI)를 개발하였다. 관측된 PM₁₀ 농도와 KPI의 상관계수는 약 0.32이다. 더 많은 기상 변수를 추가하는 것은 사실상 상관관계를 증가시키지는 못할 것으로 판단하였다. 다른 변수의 효과가 3가지 주요변수와 관련되어 KPI에 직·간접적으로 영향을 주기 때문이다. 새롭게 개발된 KPI가 PM₁₀ 고농도 현상이 발생하였을 때의 대기 패턴을 잘 모의하는지 살펴보기 위해 1981년부터 2016년까지의 KPI와 Z500, U500, V850 변수들과 회귀 (regression)분포를 분석하였다 (Fig. 8). KPI에 의해 회귀된 500 hPa 지위고도, 850 hPa 동서 방향의 바람 성분, 500 hPa 남북 방향 바람 성분 편차장은 앞서 제시한 고농도 미세먼지 사례일의 대기순환 패턴의 합성장과 매우 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 KPI는 고농도 미세먼지 발생시의 대기 패턴을 대표하는 지수로 사용 가능할 것으로 판단하였다.

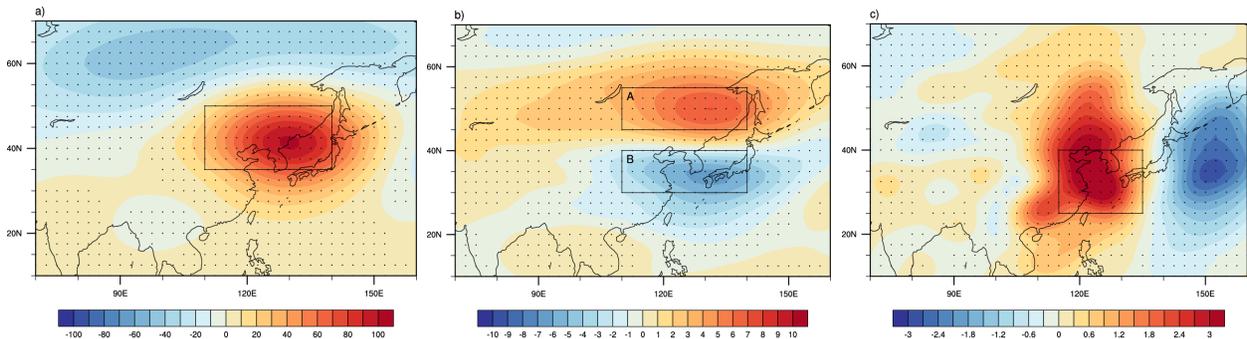


Fig. 8. Regression maps of a) geopotential height anomaly at 500 hPa (shade, gpm), b) zonal wind anomaly at 850hPa (shading, m/s) and c) meridional wind anomaly at 500 hPa (shade, m/s) onto the Korea Particulate matter Index (KPI) from 1981 to 2016. The dots indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level based on a Student's t-test. The boxes indicate areas considered for estimating the KPI in this study.

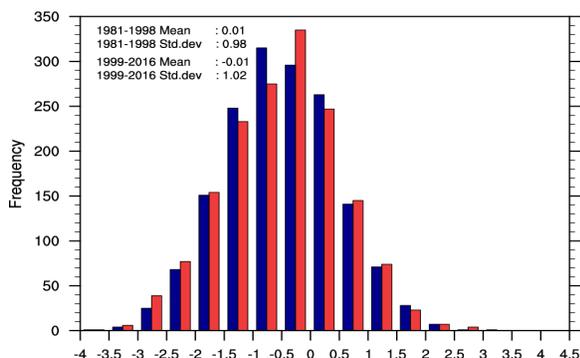


Fig. 9. Comparison of frequency distribution of Korea Particulate matter Index during two periods: 1981 ~ 1998 (blue), 1999 ~2016 (red).

5. 한반도 미세먼지의 미래 전망

Fig. 9는 1981년부터 2016년까지의 NCEP 재분석 자료를 이용하여 겨울철 KPI의 빈도수를 나타낸 것이다. KPI의 빈도수는 총 36년의 기간을 단순히 둘로 나누어 1981년에서 1998년 (푸른색)까지의 전반기와 1999년부터 2016년 (붉은색)까지의 후반기로 구분하였다. 전반기 (1981~1998년)와 후반기 (1999~2016년)의 KPI 빈도수를 비교했을 때, KPI가 0보다 클 때의 빈도수가 후반기에 증가하는 경향을 보인다. 특히 KPI가 3보다 큰 구간에서 전반기에 비해 후반기에 빈도수가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 고농도 미세먼지의 발생 빈도수가 증가함을 의미한다. 그러나 이러한 증가 경향은 기후변화에 의한 것인지 뚜렷하지 않다. 관측자료의 부족 때문에 고농도 미세먼지와 기후변화를 관련 짓는 연구는 기후 모형의 자료에 의존할 수 밖에 없다.

본 연구에서는 기후변화에 의한 미래 KPI의 변화를 평가하기 위해, CMIP5에 참여하는 모형 중 10개의 기후모형의 자료를 이용하여 과거 50년 (1950~1999년)과 미래 50년 기후 평균 (2050~2099년) 사이에 겨울철 고농도 대기패턴의 빈도수를 비교하였다. 이 실험은 2006년 이전의 과거 배출량과 2006~2100년까지 상당한 온실가스 저감 정책의 실현을 가정한 RCP4.5와 2100년까지 온실가스 저감 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 가정한 RCP8.5 시나리오에 의해 강제된다. 모형의 과거 50년 KPI지수를 생성하기 위해 관측과 동일하게 일별 Z500, V850, U500 자료를 사용하였다. 앞서 개발된 KPI지수와 동일한 지역에 대해 일 평균자료의 시계열을 추출하여 편차를 구하고, 표준편차로 정규화하였다. Fig. 10은 관측자료와 과거 기후모의 자료의 KPI지수를 나타

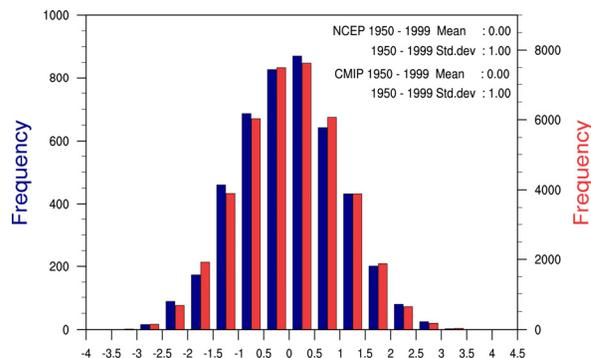


Fig. 10. Comparison of frequency distribution of Korea Particulate matter Index from the reanalysis (blue) and the historical simulations of the CMIP5 (red) from 1950 to 1999. For the comparison, the magnitudes of the mean and standard deviation from the reanalysis and CMIP5 are also shown.

낸 것이다. 관측자료의 KPI 빈도수는 0~0.5사이에서는 모형의 KPI보다 많지만, 0.5~1사이에서는 적게 모의하는 것을 알 수 있다. 하지만 전체기간에 대한 평균과 표준편차는 각각 0과 1로 동일하다. 따라서 과거 50년 모형의 KPI 빈도수는 관측의 KPI 빈도수와 매우 유사하게 모의하는 것을 알 수 있다 (Fig. 10).

미래의 KPI지수는 과거 50년 (1950~1999년)의 일별 기온값을 이용하여 편차를 구한 후, 과거 50년의 표준편차를 사용하여 표준화하였다. 그리고 10개의 CMIP5 모형의 KPI지수를 합산하여 분석하였다. 기후변화에 따라 고농도 미세먼지 발생과 연관된 기상조건의 빈도수는 현저하게 증가하는 것을 알 수 있다. 다시 말해 북풍이 약화되고, 안정된 대기 환경, 그리고 한반도 상공에서의 고기압성이 강화된다. 이러한 현상은 RCP4.5 보다 RCP8.5에서 더욱 더 뚜렷하게 나타난다 (Fig. 11). 대기오염과 연관된 기상조건의 빈도 증가는 한반도 지역의 평균장 변화의 변화를 의미한다. 첫 번째로, 하층 대기가 빨리 데워지면서 상층의 기온과의 큰 온도 편차를 가져와 대기는 더욱 정체하게 되며, 육지와 해양 사이의 온도차가 감소해서 동아시아 겨울철 몬순이 약화되며, 한반도로 북서풍 유입이 감소한다. 지표근처에서 평균 해수면 기압은 극 지역에서 감소하지만 중위도에서는 증가한다 (Cai et al., 2017).

6. 요약

본 연구에서는 고농도 미세먼지의 발생과 연관된 대기패턴을 조사하고, 이를 바탕으로 한반도의 고농도 미세먼지의

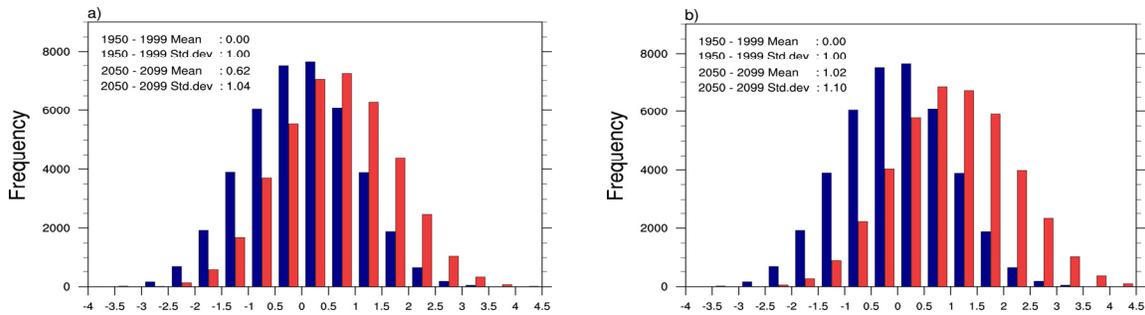


Fig. 11. Comparison of frequency distribution of Korea Particulate matter Index for historical periods from 1950 to 1999 (blue) and future scenario from 2050 to 2099 (red) in a) RCP 4.5. b) Same as a) but for RCP8.5.

발생을 예측할 수 있는 지수를 개발하였다. 또한 개발된 지수를 이용하여 미래의 한반도 고농도 미세먼지 발생과 연관된 대기 패턴의 변화를 살펴보았다.

서울지역 미세먼지 농도의 변동성을 조사하기 위해, 황사 발생 사례일을 제외한 미세먼지 고농도 사례일은 대기환경기준에 따라 24시간 평균 PM_{10} 농도가 $100 \mu g/m^3$ 이상일 경우로 정의하였다.

미세먼지 연평균 농도는 2001년부터 꾸준히 감소하는 경향을 보이며, 2012년 이후에 감소 추세가 주춤하였으며, PM_{10} 고농도 사례일수도 2003년부터 2016년까지 대체로 감소하였다. 그러나 4일 이상 지속되었던 고농도 사례만을 살펴보면 2001년과 2003년을 제외하고 뚜렷한 감소 경향을 찾아보기 어렵고 전반적인 대기질 향상에도 불구하고 지속적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 4일이상 지속되는 고농도 사례는 최근 들어 뚜렷한 경향을 보이지 않고, 기상조건 등의 다른 발생원이 있음을 알 수 있다. 그러므로 고농도 사례에 대한 대기 순환상의 특징을 살펴보기 위해 한반도의 고농도 사례일에 대한 대기패턴의 합성장을 분석하였다. 고농도 사례가 발생하였을 경우, 한반도 상공에 고기압에 위치하면서, 극의 찬 공기의 유입을 차단하며, 상층 동서 방향 바람은 한반도 북쪽으로 흐르게 된다. 따라서 한반도 지역은 차고 건조한 북서풍이 약화되고, 풍속이 감소된다. 이러한 한반도 미세먼지 고농도 사례와 연관된 대기패턴을 바탕으로 겨울철 한반도 PM_{10} 농도를 전망하기 위한 미세먼지 고농도 지수를 정의하여 사용하였다. 먼저 500 hPa 지위고도, 500 hPa 동서 방향 바람 성분, 850 hPa 남북 방향 바람 성분과 PM_{10} 과의 상관성이 높은 지역에서 각 변수를 영역 평균하고 표준화 과정을 거친 후 각 변수에 대한 지수를 계산하고, 각 지수의 합으로 한반도 미세먼지 고농도 지수 (KPI)를 정의하였다.

한반도 미세먼지 고농도 지수를 CMIP5에 참여하는 10개

의 기후모형에 적용하여 미래 한반도의 고농도 미세먼지를 발생시킬 수 있는 대기패턴의 변동성을 살펴보았다. 겨울철 한반도에서 대기의 정체를 유발하여 심한 대기오염을 발생시킬 수 있는 기상 조건의 빈도가 기후변화에 따라 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 증가는 한반도 주변의 평균 대기상태의 변화와 일치한다 (Cai et al, 2017).

이 연구는 PM_{10} 관측자료 기간이 2001년부터 2016년까지의 총 16년 동안의 자료만을 이용하여 한반도 고농도 미세먼지 발생과 관련된 대기패턴을 분석하였기에 대기오염과 연관된 기상조건을 완벽하게 식별하지는 못하였을 것이다. 향후 연구를 통해서 PM_{10} 과 더불어 $PM_{2.5}$ 의 자료를 활용하여 상세한 분석이 필요할 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고, 본 연구의 결과는 지구 온실가스 배출로 인한 대기 순환의 변화가 한반도 고농도 미세먼지 발생 사례를 증가시키는 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다. 지구 온난화가 심해진다면, 작은 대기 오염 배출이라도 축적이 되어 고농도 미세먼지 현상이 발생 할 수 있다. 따라서 대기 오염 배출 저감 노력뿐만 아니라, 온실가스 배출량을 줄이기 위한 노력이 동시에 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다.

REFERENCES

Cai W, Li K, Liao H, Wang H, Wu L. 2017. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change. *Nature Climate Change* 7(4): 257 - 262.

- Ho C.-H. 2014. A study on the development of high-PM₁₀ episode forecast technique in statistics-dynamics hybrid system (I). Inchoen, Korea: National Institute of Environmental Research. NIER-SP2014-259 (in Korean with English abstract).
- Hong YC, Cho SH. 2001. Health Effects of Ambient Particulate Pollutants. Korean Journal of the Preventive Medicine 34(2): 103~108.
- Jo EJ, Lee WS, Jo HY, Kim CH, Eom JS, Mok JH, Kim MH, Lee K, Kim KU, Lee Mk, Park HK. 2017. Effects of particulate matter on respiratory disease and the impact of meteorological factors in Busan. Korea. Respiratory Medicine 124: 79 - 87.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, Yang SH, Hnilo JJ, Fiorino M, Potter GL. 2002. NCEP - DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). Bulletin of the American Meteorological Society 83: 1631~1643.
- Kim C.-H., Park I.-S., Lee S.-J., Kim J.-S., Jin H.-A., Sung H.-G. 2005. On the Recent Air Pollution Levels Observed in the Regional Air Monitoring Network. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment (in Korean with English abstract) 20(2):215-224.
- Kim HC, Kim S, Son SW, Lee P, Jin CS, Kim E, Kim BU, Ngan F, Bae C, Song CK, Stein A. 2016. Synoptic perspectives on pollutant transport patterns observed by satellites over East Asia: Case studies with a conceptual model. Atmospheric Chemistry and Physics Discuss. <https://doi.org/10.5194/acp-2016-673>.
- Lee J.-Y., Han J.-S., Kong B.-J., Hong Y.-D., Lee J.-H., Chung I.-R. 2007. Variation of PM₁₀ Concentration in Seoul in Association with Synoptic Meteorological Conditions. Journal of Environmental Impact Assessment (in Korean with English abstract) 16(5): 351-361.
- Lee S, HO C.-H., Choi YS. 2011. High-PM₁₀ concentration episodes in Seoul, Korea: Background sources and related meteorological conditions, Atmospheric Environment. 45: 7240 - 7247.
- OECD. 2016. The economic consequences of outdoor air pollution. Paris, France: OECD. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264257474-en>.
- Park RJ, Kim SW. 2014. Air quality modeling in East Asia: present issues and future directions, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences 50(1): 105 - 120.
- Park RS, Han KM, Song CH, Park ME, Lee SJ, Hong SY, Kim J, Woo J-H. 2013. Current Status and Development of Modeling Techniques for Forecasting and Monitoring of Air Quality over East Asia. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment (in Korean with English abstract) 29(4): 407 - 438.
- Shin DC. 2007. Health effects of Ambient Particulate Matter. Journal of the Korean medical association (in Korean with English abstract) 50(2): 175~182.
- Smith S, Stribley F.T., Milligan P., Barratt B. 2001. Factors influencing measurements of PM₁₀ during 1995-1997 in London, Atmospheric Environment 35: 4651 - 4662.