

TSPE19900-001-13

북극온난화에 따른 중위도 제트기류 이상난동이  
동아시아 대기질 변화에 미치는 영향

The Effects of Abnormal Behavior of Jet Streams Induced by  
Polar Warming on Air Quality Changes in East Asia



부경대학교

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “국내 학·연 극지연구진흥프로그램(PAP사업)”에 관한 연구 “북극온난화에 따른 중위도 제트기류 이상난동이 동아시아 대기질 변화에 미치는 영향” 과제의 최종보고서(보고서명: 북극온난화에 따른 중위도 제트기류 이상난동이 동아시아 대기질 변화에 미치는 영향)로 제출합니다.

2020. 12. 30



연구책임자	: 최 원 식
참여연구원	: 김 백 민
“	: 구 호 영
“	: 한 수 빈
“	: 박 용 미
“	: 한 광 희
“	: 안 찬 중
“	: 송 한 결
“	: 변 명 화
“	: 박 호 선
“	: 고 민 희

# 요 약 문

## I. 제 목

북극 온난화에 따른 중위도 제트기류 이상 난동이 동아시아 대기질 변화에 미치는 영향

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 본 연구개발의 목적은 기후연구와 대기환경 연구를 융합하여 극지기후 변화와 한반도 대기질의 원격상관을 규명함에 있음.
- 현재 한국의 대기질 정책은 배출량 감소에 초점이 맞춰져 있음. 그러나 미세먼지를 포함한 대기질은 기상조건의 영향을 강하게 받고, 북극의 급변하는 기후변동이 동아시아 중관기상 패턴에 영향을 줄 수 있음을 고려하면 북극의 기후변화가 동아시아 기상장에 미치는 영향을 규명하고 그로 인해 야기되는 대기질 변화를 규명하는 연구는 학제간 융합에 기반한 도전적인 주제에 해당하나 국가적으로 필요성이 큰 분야임.
- 이에 본 과제에서는 북극의 폴라볼텍스 및 제트기류의 이상난동이 한반도 지역 대기질에 미치는 영향을 관측자료 통계분석과 대기화학수송모형을 통해 규명하고자 함.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 북극 고온현상 발생 시 예상되는 폴라볼텍스 및 제트기류의 이상난동 현상에 의한 동아시아 주변 편서풍 흐름 강도 추이 분석
- 편서풍 변화에 의한 동아시아 주변 이동성 고/저 기압 이동속도 및 궤적추적
- 3차원 대기질수치모델 실험과 관측자료 통계분석을 통해 북극 고온현상 발생시 동아시아 기상장 및 대기질의 유의미한 변화 존재 여부 평가
- 북극요인 기상장 변화와 한반도 대기질 변동의 상호작용 메커니즘 규명
- 고농도 미세먼지 오염의 발생 시 한국 내에서의 초미세먼지 농도의 시공간적 분포 변동과 이와 연관된 기상/기후 아노말리 패턴 분석

## IV. 연구개발결과

위에 제시한 연구개발의 내용 및 범위를 포괄적으로 정리하여 본 보고서에서는 다음과 같이 크게 3가지의 연구개발 결과를 제시한다.

- 북극 기후변동(고온현상)이 야기하는 파동활동속 변화가 동아시아 종관기상 특성에 미치는 영향과 결과적으로 한국 고농도 미세먼지 사건에 미치는 영향에 대한 정량적 결과 제시
  - 군집분석에 기반한 한반도 고농도 미세먼지 대표 대기순환 유형 파악
  - 군집 대표패턴들 중 한국 미세먼지 고농도 사례 발생에 극지역 기원의 상층 파동 전파 패턴이 주요 모드임을 입증
- 한국에서 발생한 고농도 초미세먼지 오염사건에 대해 한국 내의 시공간적 변동 특성과 이를 종관기상 특성 및 기후 아노말리 패턴과 연계하여 해석한 결과 제시
  - 한국 고농도 초미세먼지 오염과 연계된 종관기상 및 기상 아노말리 분포 패턴
  - 고농도 오염 발생 시 한국 내의 초미세먼지 농도의 시공간적 분포는 3가지 유형으로 나타나며 한국 내 농도의 시공간적 농도 변동에 대한 시간지연을 보정하면 한국 전역이 동일한 시간적 변동 패턴을 보여 한국 전역의 고농도 초미세먼지 오염이 동일한 종관기상장의 영향을 받음을 제시
- 위의 두 연구결과의 북극 영향 사례에 대해 대기질수치모델을 이용한 사례연구 수행결과 제시
  - 대기질수치모델(WRF-CMAQ) 구축
  - 북극변동에 기인한 유형인 파동전파 유형에 해당하는 고농도 미세먼지 오염사례와 정체고기압 유형에 해당하는 사례에 대해 WRF-CMAQ 모델링 결과 제시와 북극 요인 고농도 미세먼지 현상에 대한 역학 분석 결과 제시

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 세계적으로 기후변화와 대기오염은 지속발전가능 사회를 이룩하기 위해 해결해야 하는 가장 중요한 사회적 문제로 인식되지만, 과거 많은 연구가 기후변화와 대기오염문제를 독립적으로 접근하여 왔음. 본 연구는 기후변화에 민감하게 반응하는 북극온난화와 한반도 부근의 대기질을 연계하는 연구라는 점에서 한국의 기후변화-대기오염의 interdisciplinary 연구기반을 마련할 수 있을 것으로 기대됨.
- 기후변화는 대기질 변화의 driving force로 작용할 수 있고 대기질의 변화는 다시 되먹임 작용으로 기후변화의 속도에 영향을 줄 수 있음. 이는 대기오염 개선을 위한 정책적 판단이 단순히 방출량 저감의 관점에서만 이루어진다면 대기오염 개선효과가 반감될 수도 있음을 의미함. 본 연구 제안은 북극온난화에 의한 한반도 부근의 기상조건 변화가 대기질에 미치는 영향을 규명하고 방출량 저감 효과 대비 상대적 기여도를 제시함으로써 향후 대기오염 개선을 위한 정책 결정에

중요한 기초자료를 제시할 것으로 기대됨.

○ 또한 향후 예측되는 기후변화가 미세먼지를 포함한 대기질에 미치는 영향을 이해함으로써 미래에 기후변화에 따른 대기질의 변화를 예측할 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대되며 이를 통해 변화한 대기질이 되먹임작용을 통해 기후변화에 미치는 영향을 규명하는 기후연구에도 도움을 줄 수 있을 것으로 기대됨.



# Summary

## I. Project Title

The Effects of Abnormal Behavior of Jet Streams Induced by Polar Warming on Air Quality Changes in East Asia

## II. Needs and Objectives

One of the major driving forces causing air pollution (including particulate matter, PM) is meteorological conditions, although emissions and chemical processes are also critical. In this respect, understanding the synoptic weather patterns leading to severe PM pollution is a prerequisite for improving the forecast accuracy and preparing the predicted severe PM pollution. The Arctic climate has been changing most rapidly in the world. This rapid Arctic climate change can affect East Asia's synoptic weather patterns, and subsequently, air quality (including PM pollution) in Korea. Here, the goal of this research project is quantitatively the effects of abnormal behavior of polar vortex and jet streams on air quality (with a focus on particulate pollution) over the Korean peninsula based on both observations and numerical model simulation.

## III. Research Contents

The research contents in this study include:

- 1) to estimate the variations in the patterns and magnitudes of westerlies over East Asia induced by abnormal behavior of polar vortex and jet streams due to Arctic warming.
- 2) to investigate subsequent variations of meteorological fields related to changes in polar vortex and jet streams, including trajectories and moving rates of migratory Highs and Lows.
- 3) to link the changes in meteorological fields originated from the Arctic warming to consecutive severe air quality by both the numerical model simulations (Community Multiscale Air Quality Modeling System, CMAQ) and statistical analyses of observations.
- 4) to elucidate the mechanisms for the interactions between Arctic warming-related climate change and air quality over the Korean Peninsula.

#### IV. Results

The results section (Chapter 3) consists of three chapters, including the research contents mentioned above:

Chapter 3-1: The effects of divergence of wave activity flux due to Arctic climate change on East Asia's atmospheric circulation and consequently on the PM pollution

- Atmospheric circulation patterns representative for PM<sub>10</sub> pollution events were classified by the k-mean clustering method

- Of classified patterns, wave-activity propagation patterns originated from the Arctic region is a major mode.

Chapter 3-2: Typical nationwide patterns of spatiotemporal PM<sub>2.5</sub> distributions and synoptic weather anomalies for severe pollution events in Korea.

- Synoptic weather and climate anomaly patterns related to severe PM<sub>2.5</sub> pollution events are presented

- Three distinct spatiotemporal distributions of PM<sub>2.5</sub> for severe pollution events were classified over Korea. Once time-lags at each monitoring stations were adjusted, the spatiotemporal variations in PM<sub>2.5</sub> for pollution events over Korea are similar, implying severe PM pollution in Korea is controlled by a synoptic weather system,

Chapter 3-3: Mechanisms for severe PM pollution in Korea led by Arctic climate change based on a case study by WRF-CMAQ simulations.

#### V. Expected Contribution

○ Despite the global perception that climate change and air pollution are critical social issues to be solved for a sustainable society, past scientific studies tend to deal with these problems independently. This study is expected to lay a cornerstone in climate-air pollution interdisciplinary research in that this research relates the Arctic warming sensitive to climate change to air quality over the Korean Peninsula.

○ Climate change and air quality affect each other, reflecting that policy focused only on emissions reductions could fail to improve air quality to expected degree. This study will attempt to quantify the relative contributions of Arctic warming and emissions reductions to air quality changes, which is expected to provide important data for policy decisions to improve air

quality.

○ Additionally, this study is expected to help predict air quality changes attributed to projected climate change in the future and subsequently improve climate model results considering the feedback effects of air quality with more accurate atmospheric composition prediction.





# Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b>	<b>17</b>
1-1 Need for the Research Project	17
1-2 Importance of the Research Project	19
1-3 Research Objectives and Scope	19
<b>Chapter 2 Current Status in This Field of Research</b>	<b>21</b>
<b>Chapter 3 Results and Findings</b>	<b>23</b>
3-1 The effects of divergence of wave activity flux due to Arctic climate change on East Asia's atmospheric circulation and consequently on the PM pollution	23
3-1-1. Variations in the patterns of atmospheric circulation and pressure fields in East Asia due to Arctic warming	23
3-1-2. The types and characteristics of East Asia's atmospheric circulation and PM <sub>10</sub> pollution events related to Arctic Climate Change	32
3-2 Typical nationwide patterns of spatiotemporal PM <sub>2.5</sub> distributions and synoptic weather anomalies for severe pollution events in Korea	40
3-2-1. Long-term trend in PM <sub>2.5</sub> and severe PM <sub>2.5</sub> pollution events in Korea based on nationwide air quality monitoring stations (402 stations)	40
3-2-2. Severe PM <sub>2.5</sub> pollution events	44
3-2-3. Spatiotemporal variations in PM <sub>2.5</sub> distributions for severe PM <sub>2.5</sub> pollution events over Korea	51
3-2-4. Synoptic weather and climate anomalies related to three classified severe PM <sub>2.5</sub> pollution patterns	64
3-3 Mechanisms for severe PM pollution in Korea led by Arctic climate change based on a case study by WRF-CMAQ simulations	68

3-3-1. WRF-CMAQ .....	68
3-3-2. Input files for the cases of the changes in emissions inventories in East Asia .....	88
3-3-3. Mechanisms for severe PM pollution in Korea led by Arctic climate change based on a case study by WRF-CMAQ simulations .....	92
<b>Chapter 4 Achievement of the Research Goals and Contributions to Society .....</b>	<b>104</b>
4-1 Achievement of research goals .....	104
4-2 Contributions to society .....	108
4-2-1. Fostering the next generation of academics .....	108
4-2-2. Academic contributions .....	108
4-2-3. Economic contributions .....	109
<b>Chapter 5 Plans to Extend the Current Research Project .....</b>	<b>110</b>
<b>Chapter 6 References .....</b>	<b>111</b>



# 목차

<b>제 1 장 서론</b> .....	<b>17</b>
제 1 절 연구의 필요성 .....	17
제 2 절 연구의 중요성 .....	19
제 3 절 연구의 목표와 범위 .....	19
<b>제 2 장 국내외 기술개발 현황</b> .....	<b>21</b>
<b>제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과</b> .....	<b>23</b>
제 1 절 북극 기후변화에 따른 동아시아 대기순환변화가 한국 고농도 미세먼지 오염에 미치는 영향 .....	23
1. 북극 고온현상에 따른 동아시아 대기순환과 기압계 패턴 변화 .....	23
2. 북극 기후변화 관련 동아시아 대기순환과 고농도 미세먼지 오염의 유형과 특성 .....	32
제 2 절 고농도 초미세먼지 오염 발생 시 한국 내 시공간적 변동 특성과 종관기상과 기후 아노말리 패턴 .....	40
1. 전국 대기오염측정소 데이터 분석 .....	40
2. 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례 분석 .....	44
3. 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 오염 패턴 .....	51
4. 종관 기상 분석 .....	64
제 3 절 북극 관련 동아시아 대기순환에 따른 고농도 미세먼지 발생의 이해 (대기질수치모델의 사례 연구를 중심으로) .....	68
1. 대기질수치모델 (WRF-CMAQ) 구축 .....	68
2. 한반도 주변 배출량 소스변화에 따른 대기질 모델 입력자료 산출 방안 .....	88
3. 대기질수치모델(WRF-CMAQ)을 이용한 북극발 기상장 변화에 기인한 사례 연구 및 고농도 미세먼지 발생역학 분석 .....	92
<b>제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도</b> .....	<b>104</b>
제 1 절 연구개발목표 달성도 .....	104
제 2 절 대외기여도 .....	108
1. 인력양성 .....	108

2. 학문발전 기여도 .....	108
3. 경제적 기여도 .....	109
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	110
제 6 장 참고문헌 .....	111



## 그림 목차

그림 1. 지상온도(T2m) 편차의 합성분석 (양의 북극진동(좌), 음의 북극진동(우))	24
그림 2. 중층지위고도(Z500) 편차의 합성분석 (양의 북극진동(좌), 음의 북극진동(우))	24
그림 3. 상층동서바람(U200) 편차의 합성분석 (양의 북극진동(좌), 음의 북극진동(우))	24
그림 4. 지상온도(T2m) 편차의 합성분석 (바렌츠·카라해 고온(좌), 바렌츠·카라해 저온(우))	26
그림 5. 중층지위고도(Z500) 편차의 합성분석 (바렌츠·카라해 고온(좌), 바렌츠·카라해 저온(우))	26
그림 6. 상층동서바람(U200) 편차의 합성분석 (바렌츠·카라해 고온(좌), 바렌츠·카라해 저온(우))	26
그림 7. (a) 북극지역(65°N 이상) 지상온도 편차 시계열 (Kim et al., 2017)과 (b) 폭풍 Flank에 의한 북극고온 시기인 2016년 1월 에어코리아 시도별 미세먼지(PM <sub>10</sub> ) 농도 시계열	28
그림 8. 고농도 미세먼지 사례 1의 지상온도(SAT) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)	29
그림 9. 고농도 미세먼지 사례 1의 500 hPa 지위고도(Z500) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)	29
그림 10. 고농도 미세먼지 사례 2의 지상온도(SAT) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)	30
그림 11. 고농도 미세먼지 사례 2의 500 hPa 지위고도(Z500) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)	30
그림 12. 고농도 미세먼지 사례 3의 지상온도(SAT) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)	31
그림 13. 고농도 미세먼지 사례 3의 500 hPa 지위고도(Z500) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)	31
그림 14. 고농도 미세먼지 유형별 상층(500 hPa) 지위고도 편차와 파동활동속(벡터)의 합성장(대기질 장기예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화- 최종보고서, 국립환경과학원, 2020)	34
그림 15. 고농도 미세먼지 유형별 하층(850 hPa) 지위고도 편차와 수평바람 편차(벡터)의 합성장, 보라색 직선(a-b)은 Hovmöller 도표에서 연직단면이 정의되는 위도(35-45°N)를 표시(대기질 장기예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화- 최종보고서, 국립환경과학원, 2020)	36
그림 16. 유형별 상층(500 hPa) 지위고도 편차의 Hovmöller 도표(고농도 미세먼지 사례 시작일을 중심으로 전후 10일간의 시간지연 합성장), x축의 검은 곱표는 서울의 경도(대기질 장기예측 모델	

개발(II) - 예측인자 고도화- 최종보고서, 국립환경과학원, 2020) .....	37
그림 17. 우랄블로킹 형성 시 500 hPa 지위고도 합성장(좌) (Gong and Luo., 2017), 유형1과 5의 500 hPa 지위고도 편차와 파동활동속 합성장(우)(대기질 장기예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화- 최종보고서, 국립환경과학원, 2020) .....	39
그림 18. 양의 북극진동 시 지상기압(SLP) 합성장(좌) (Park et al., 2016), 유형 2의 500 hPa 지위고도 편차와 파동활동속 합성장(우)(대기질 장기예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화- 최종보고서, 국립환경과학원, 2020) .....	39
그림 19. 전국 대기오염측정소(AQMS) 분포 지도. 오른쪽 상단의 그림은 서울 지역 AQMS 분포	· 41
그림 20. (a) 전국 측정소 연평균 PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> 농도의 상자 그림, (b) 월평균 PM <sub>2.5</sub> 농도 오차 막대 그림. 오차 막대는 각 측정소 월평균 농도의 표준편차, 주황색 실선은 연평균 PM <sub>2.5</sub> 농도의 선형 추세선 .....	43
그림 21. (a) 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 연평균 농도(원), 지속시간(네모), 사례 수(세모), (b) 겨울철(1-3월) 고농도 사례의 연평균 농도, 지속시간, 사례 수 .....	46
그림 22. (a) 연평균 PM <sub>2.5</sub> 농도 변화율 분포, (b) 겨울철(1-3월) 평균 PM <sub>2.5</sub> 농도 변화율 분포, (c) 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 연평균 농도 변화율 분포, (d) 겨울철(1-3월) 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 연평균 농도 변화율 분포 .....	48
그림 23. 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례 최대 농도 평균. (a) 2015년, (b) 2016년, (c) 2017년 .....	50
그림 24. 농도 규모에 따른 COD 변화 .....	53
그림 25. 회색 점은 2015년 12월부터 2019년 12월까지 PM <sub>2.5</sub> 일평균 농도이고, 검은색 점은 겨울철 PM <sub>2.5</sub> 일평균 농도(12-3월). 주황색 선은 연평균의 추세선이고(기울기=0.01), 검은색 선은 겨울철 PM <sub>2.5</sub> 농도의 평균값이며, 파란색 선은 겨울철 PM <sub>2.5</sub> 농도의 하위 10% 농도 평균값, 빨간색 선은 상위 10% 농도 평균값 .....	55
그림 26. 서울 지역 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 연평균 농도(원), 지속시간(네모), 사례 수(세모) .....	55
그림 27. 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 Case 별 오염 패턴, (a-c) COD 분포, (d-f) R 분포 .....	57
그림 28. Case 별 고농도 PM <sub>2.5</sub> 오염 사례 수. (a) 연간 사례 수, (b) 월별 사례 수 .....	58
그림 29. 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 Case 별 time-lag 분포 .....	60
그림 30. 시간 보정한 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 Case 별 오염 패턴. (a-c) COD 분포, (d-f) R 분포 .....	62
그림 31. 각 Case에 속하는 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 아노말리 합성장. (a-c) 500 hPa 지위고도, (d-f) 850 hPa 지위고도, (g-i) 850 hPa 풍속, (j-l) 지상 10 m 풍속, (m-o) 연직 온도와 바람 벡터. 점으로 나타내어진 부분은 two tailed student's t-test의 95% 신뢰구간 .....	66
그림 32. 각 Case에 속하는 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 아노말리 합성장. (a-c) 500 hPa 풍속, (d-f) 지상 기압 .....	67

그림 33. 각 Case에 속하는 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 평균 해면 기압과 지상 10 m 바람 벡터 합성장	67
그림 34. 대기질 모델링 시스템의 구성	70
그림 35. 대기질 모델의 연속방정식	71
그림 36. CMAQ 모델의 구성	72
그림 37. 배출목록(Emission Inventory)의 종류	74
그림 38. 인간기원 배출목록의 분포( <a href="https://eccad3.sedoo.fr">https://eccad3.sedoo.fr</a> ). REAS는 빨간 원으로 표시	76
그림 39. 일산화탄소(CO) 농도의 계절별 공간분포 (주중(상), 주말(하))	78
그림 40. 이산화황(SO <sub>2</sub> ) 농도의 계절별 공간분포 (주중(상), 주말(하))	78
그림 41. 질소산화물(NO <sub>x</sub> ) 농도의 계절별 공간분포 (주중(상), 주말(하))	79
그림 42. 암모니아(NH <sub>3</sub> ) 농도의 계절별 공간분포 (주중(상), 주말(하))	79
그림 43. 대기오염물질의 계절 경향	80
그림 44. 서울의 미세먼지(PM <sub>10</sub> ) 및 초미세먼지(PM <sub>2.5</sub> ) 시계열 (에어코리아 확정자료)	82
그림 45. 기상수치모델 WRF의 도메인 영역 (수평해상도 36 km)	83
그림 46. 시험 운용 기간 중 일산화질소(NO) 농도의 공간분포	85
그림 47. 시험 운용 기간 중 미세먼지(PM <sub>10</sub> ) 농도의 공간분포	86
그림 48. 시험 운용 기간 중 초미세먼지(PM <sub>2.5</sub> ) 농도의 공간분포	87
그림 49. 중국지역 주요 대기오염물질의 연간변동 경향 (우정현 외, 2018)	89
그림 50. 한중일 3국의 대기오염물질 연평균 농도 시계열 변화 (국립환경과학원, 2019b). (a) SO <sub>2</sub> , (b) NO <sub>2</sub> , (c) PM <sub>10</sub> , (d) PM <sub>2.5</sub> .	90
그림 51. 시험 운용 설계 내의 화학메커니즘(CB05/SAPRC07) 미세먼지(PM <sub>10</sub> ) 모의성능 비교 (상좌: 20160112 00UTC, 상우: 06UTC, 하좌: 12UTC, 하우: 18UTC)	93
그림 52. 한반도 주요 7개 도시에 대한 화학 스핀업의 대기질 모의 성능 향상 효과 (좌측: 화학 스핀업 미적용, 우측: 화학 스핀업 적용) (이재형 외, 2015)	96
그림 53. 파동전파 유형의 고농도 미세먼지 발생 사례(2016. 01. 03)의 지상기온 편차(상) 및 500 hPa 지위고도 편차(하)	98
그림 54. 정체고기압 유형의 고농도 미세먼지 발생 사례(2017. 01. 02)의 지상기온 편차(상) 및 500 hPa 지위고도 편차(하)	99
그림 55. 2016년 1월 3일 사례에 대한 대기질 모델(CMAQ) 산출 미세먼지(PM <sub>10</sub> ) 농도의 공간분포(상) 및 ECMWF CAMS 미세먼지(PM <sub>10</sub> ) 농도의 공간분포(하)	101

그림 56. 에어코리아 서울지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 관측(파랑) 및 대기질 모델(CMAQ)에서 추출한 서울지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도(주황)의 변동 추이 (2016년 1월 3일 사례) ..... 101

그림 57. 2017년 1월 2일 사례에 대한 대기질 모델(CMAQ) 산출 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도의 공간분포(상) 및 ECMWF CAMS 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도의 공간분포(하) ..... 103

그림 58. 에어코리아 서울지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 관측(파랑) 및 대기질 모델(CMAQ)에서 추출한 서울지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도(주황)의 변동 추이 (2017년 1월 2일 사례) ..... 103





## 표 목차

표 1. 초미세먼지(PM <sub>2.5</sub> ) 경보제 기준 .....	44
표 2. 시도별 NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM <sub>2.5</sub> 배출량 순위 .....	50
표 3. 서울 평균 PM <sub>2.5</sub> 농도와 비교한 서울 지역 측정소의 계절별 COD 범위와 공간적으로 균질한(COD<0.2) 측정소 비율 .....	54
표 4. 고농도 PM <sub>2.5</sub> 사례의 Case 별 COD, R, 시간 보정한 COD, 시간 보정한 R의 평균(표준편차)과 공간적으로 균질한(COD<0.2 또는 R>0.8) 측정소의 비율(%) .....	63
표 5. CMAQ-ready data 산출에 사용된 배출목록 .....	75
표 6. 메커니즘별 화학종 비교 (SAPRC/CB05) .....	94



# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구의 필요성

중국과 한국을 포함한 동아시아는 빠른 경제성장과 도시화 팽창 등에 기인한 심각한 대기오염 문제에 직면하고 있으며 (Cai et al., 2017; Chen et al., 2018; Park and Kim, 2014) 대기오염물질 중 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>: 지름 2.5  $\mu\text{m}$ 와 10  $\mu\text{m}$  이하의 대기 중 입자상물질) 오염은 최근 정부에서 국가재난으로 지정하여 관리할 정도로 큰 사회적 문제로 인식되고 있다. 많은 한국에서의 보건역학연구는 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)가 호흡기, 심혈관계, 뇌혈관계 질환과 연관이 있음을 제시하고 있다(Han et al., 2018; Heo et al., 2014; Kim et al., 2018). 또한 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>은 건강의 악영향뿐만 아니라 태양복사를 산란시켜 시정에도 영향을 미치며 구름의 형성과 특성을 변화시켜 지구복사평형에 영향을 주어 지구 기후변화에도 큰 역할을 담당하는 것으로 알려져 있다 (Lu et al., 2017; Jung et al., 2019).

대기 중 입자상물질 오염에 대한 사회적 관심 증대와 고농도 오염현상의 빈번한 출현으로 한국정부는 2018년 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 기준농도를 각각 일평균 50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 과 100  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  에서 35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 과 80  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 낮추었다 (국립환경과학원, 2019a). 이러한 노력으로 한국의 연평균 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 농도는 점차 감소하고 있는 추세이지만, 2018년 기준 연평균 PM<sub>2.5</sub> 기준인 15  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 를 달성한 대기측정소는 하나도 존재하지 않았다 (Han et al., 2020). 또한 비록 연평균 농도가 점차 감소하고 있는 추세이기는 하지만, 초고농도 오염사례 (PM<sub>2.5</sub> > 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )의 발생 빈도와 강도, 그리고 지속시간은 대기오염측정망이 구축된 2015년 이후 꾸준히 증가하는 추세를 나타내었다 (Han et al., 2020). 정부와 시민사회의 노력으로 대기 중 입자상물질을 형성하는 기체상 전구물질들(gaseous precursors)이 점차 감소하고 있는 추세에 있음에도 불구하고 이러한 고농도 오염사건 특성의 변화는 아직 과학적으로 규명이 되지 못하였다. 이는 아직까지 한국에서의 입자상오염물질 형성기작 규명이 미흡한 것도 중요한 원인이지만 고농도 오염사건을 야기할 수 있는 중관기상과 기후의 역할과 연결고리를 규명하지 못한 것도 중요한 원인으로 볼 수 있다.

미세먼지가 다양한 산업과 연료연소 배출원(도로, 항공, 선박배출 등과 같은)으로부터 직접적으로 배출되지만 대부분의 PM<sub>2.5</sub>는 황산화물(SO<sub>x</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 휘발성유기화합물(VOCs; Volatile Organic Compounds), 암모니아(NH<sub>4</sub>)와 같은 다양한 기체 전구물질로부터 대기 중에서 이차적으로 생성된다 (deGouw and Jimenez, 2009). 일단 대기 중으로 배출되거나 생성된 PM<sub>2.5</sub>는 비효율적인 제거기작으로 인하여 대기 중에 오래 머무르게 되고(수 일에서 수 주)(Seinfeld

and Pandis, 2016), 긴 대기 중 수명으로 인해 1000 km 이상까지의 장거리 수송이 가능하다 (Choi et al., 2019). 고농도 입자상물질 오염이 장거리수송에 기인하였는지, 국내 배출과 전구물질의 축적에 기인하였는지, 또는 이 둘의 결합의 결과인지 간에 입자상물질의 농도는 기상조건과 밀접한 연관이 있다 (Chen et al., 2018; Liu et al., 2017; Xu et al., 2018). 기상조건이 입자상물질의 농도에 미치는 영향은 시간적으로 공간적으로 변화하기 때문에 한 시점의 입자상물질 농도의 공간분포를 살펴본다면 한국 전역의 고농도 (초)미세먼지 오염 사건의 시공간적 특성을 관련 종관기상 패턴과 연계시키기 쉽지 않다. 많은 선행연구에서 고농도 (초)미세먼지 농도의 시간적 변동성을 화학적 조성 (Han et al., 2011; Kim et al. 2011), 배출원 기여도 (Heo et al., 2009; Park et al., 2020), 장기간 변동성 등에 초점을 맞추어 제한된 측정지점에 대하여 연구한 바가 있으나 한국 전역에서의 장기간 측정자료에 기반하여 시공간적 변동 특성을 평가하는 연구는 거의 시도된 바 없다.

특히, 북극의 기후변동이 동아시아 지역의 종관기상 패턴을 변화시키고, 이러한 종관기상의 패턴 변화가 동아시아 지역의 (초)미세먼지 오염 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하는 연구는 많지 않으며 국내에서는 거의 시도된 바가 없다. 국내·외적으로 2000년대 이후 급격한 북극 고온현상이 중위도 제트기류의 이상난동을 초래함을 언급한 연구결과가 존재하고 국내에서는 급격한 북극 해빙감소가 겨울철 중위도 제트기류의 이상난동을 초래하는 근본 원인을 밝힌 바 있다 (Kim et al., 2014). 그러나 기존 연구들은 폭염, 한파, 가뭄 등의 이상기후와의 연결고리 이해와 같은 기후학적 관점에서만 다루어져 제트기류의 이상난동이 미세먼지 오염특성의 변화 및 다양한 광화학 반응에 기반한 대기오염 연구에 필요한 기후학적 데이터를 제공한 사례는 찾기 어렵다. 기후와 기상조건이 한국 (초)미세먼지 오염의 중요한 유발 인자임을 고려하면, 과거 한국 전역에서의 고농도 초미세먼지 오염특성을 규명하고 이를 종관기상 특성과 연결시키며, 북극의 기후변동이 고농도 (초)미세먼지 오염 사건과 연관된 동아시아 종관기상 패턴에 미치는 영향을 규명하는 것은 향후 북극 기후변동에 의한 한국에서의 (초)미세먼지 오염 패턴 변동을 예측하고 대비하는데 중요한 기초자료로 본 연구의 필요성이 인정된다.

## 제 2 절 연구의 중요성

본 연구과제의 주제는 극지기후 변화와 한국을 포함하는 동아시아의 대기질의 teleconnection을 규명하는 것으로 국제적으로 선행연구가 드문 독창적이고 도전적인 과제이다. 또한 기후와 대기화학/대기환경을 결합한 융합연구로 그 중요성을 갖는다. 현재 대기질 개선을 위한 정책은 국내 배출량 저감에 초점을 맞춘 경향이 있으나 미세먼지를 포함한 대기질 악화는 기상조건의 영향을 강하게 받는다. 따라서 기후변화에 따른 중관기상 패턴의 변화는 향후 고농도 (초)미세먼지 오염 사건의 빈도와 강도, 지속성에 중요한 변수가 될 것으로 예상된다. 특히 동아시아 지역의 경우, 북미와 함께 북극의 심각한 기후변화로 인해 초래된 제트기류의 이상난동의 영향을 가장 많이 받는 지역인 동시에 급격한 대기질 악화가 진행되고 있는 지역이다. 따라서 북극의 기후변화에 기인하여 동아시아 대기질 변화를 초래하는 기상/기후학적 순환정 패턴을 추출하고 그 영향을 정량화하는 연구가 요구된다.

본 연구는 북극 기후변화가 동아시아 기상장에 미치는 영향을 규명하고 그로 인해 야기되는 대기질 변화를 배출량 변화 기여도와 상대적으로 비교함으로써 대기질 개선에 보다 효율적이고 효과적인 정책을 수립하는데 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다. 이런 점에서 본 연구는 학문적 중요성뿐만 아니라 국가 경제와 대중 보건의 관점에서도 그 중요성이 있다고 판단된다. 또한, 본 연구를 수행하기 위해서는 기후학적 관점에서 북극 기후변화 및 중위도 제트기류 흐름과 대기순환 데이터를 분석할 수 있는 연구역량과 함께 대기오염분석 및 모델링 연구역량의 결합이 요구된다. 따라서 본 연구를 통해 극지-기후-기상-환경의 융합연구 저변을 확대하고 융합적 사고를 갖춘 우수 학생인력이 관련분야에 지속적으로 유입되는데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 한국 전역(국가규모)의 402곳 모든 측정지점에 대한 시계열 통계분석을 통해 2015 - 2019년에 발생한 모든 고농도 초미세먼지 오염 기간에 대한 초미세먼지 시·공간 농도 및 시간 지연 분포 특성 파악을 시도한 연구는 사례를 찾기 어려워 이에 본 연구의 도전성과 독창성이 강조된다.

## 제 3 절 연구의 목표와 범위

앞 절의 연구 필요성과 중요성을 바탕으로 본 연구의 최종목표는 최근 북반구 이상기후 현상의 주요 원인으로 지목되고 있는 폴라블텍스 및 제트기류의 이상난동이 한반도 지역

대기질(미세먼지를 중심으로)에 미치는 영향을 측정자료 통계분석과 3차원 대기질 수치모델링을 통해 규명하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 세부목표를 설정하였다.

먼저 본 연구를 위한 기초자료 수집 및 현황 이해를 위해 북극고온현상에 따른 동아시아 대기순환변화를 이해하고자 하였다. 이를 위해 북극 고온현상에 따른 동아시아 주변 바람장 및 온도장과 기압계 패턴 변화 분석을 목표로 하였다. 이와 함께 동아시아 주변 기상장 변화 및 한반도와 주변 배출 인벤토리 민감도 실험을 위해 3차원 대기질 모델링 시스템(WRF-CMAQ) 구축을 두 번째 세부목표로 설정하였다. 또한 북극고온현상에 따른 동아시아 대기순환변화의 이해를 대기질과 연계하고 평가하기 위해 한국 전역의 대기질 측정자료 데이터베이스를 구축하고 한국 전역에서의 측정자료 통계분석을 통해 고농도 (초)미세먼지 오염사건 특성 분석을 추가 세부목표로 설정하였다. 이를 토대로 2차년도 연구 세부목표를 다음과 같이 설정하였다. 먼저 한국 고농도 미세먼지 현상에 따른 기상장 유형 분류 및 유형별 모델 입력자료 확보와 한반도를 포함하는 주변 배출량 입력자료 확보를 통해 기 구축된 대기화학수송모델(WRF-CMAQ)의 운용을 목표로하였다. 두 번째로는 파동활동속(wave activity flux) 분석을 통해 폴라볼텍스 및 제트기류의 이상난동이 한반도 대기질에 미치는 영향을 규명하는 것을 목표로 하였고 북극이 동아시아 종관기상에 미치는 영향과 종관기상이 한국의 미세먼지 변동에 미치는 영향을 대기화학수송모델로 재현하는 것을 추가 목표로 하였다. 마지막으로 한국에서 초미세먼지측정망 운용기간인 5년간(2015-2019년) 한국 전역(402곳의 대기질 측정소)의 초미세먼지 측정자료의 시계열 통계분석을 통해 한국 전역을 대상으로 모든 고농도 PM<sub>2.5</sub> 오염 사건에 대한 시공간 변동 패턴을 분석하여 종관기상과 기후 아노말리 패턴과의 연계성을 파악하고자 하였다.

위와 같은 목표를 토대로 본 보고서에서는 크게 3가지 연구개발 결과를 제시한다. 첫째, 북극 기후변동(이상 고온현상)이 야기하는 파동활동속의 변화가 동아시아 종관기상 특성에 미치는 영향과 결과적으로 한국 고농도 미세먼지 사건에 미치는 영향을 정량적으로 제시한다(3장 1절). 둘째, 한국에서 발생한 모든 고농도 초미세먼지 오염사건에 대해 한국 전역의 측정자료를 기반으로 한국 내의 시공간적 변동 특성과 이를 종관기상 특성 및 기후 아노말리 패턴과 연계하여 해석한 결과를 제시한다(3장 2절). 마지막으로 측정 및 기상 재분석장 결과자료에 기반한 위 두 연구결과의 몇몇 사례에 대해 대기화학수송모델에 적용하여 수치적으로 재현한 결과를 제시한다(3장 3절). 이를 통해 북극기후 변동이 동아시아의 종관기상 특성과 결과적으로 한국 (초)미세먼지 오염에 미치는 영향 규명이라는 본 연구 목표를 달성하고자 하였다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

과거 (초)미세먼지 오염의 연구는 화학적특성 규명과 배출원 중심의 상대적으로 좁은 공간영역에 대해 이루어졌으나 최근 다양한 기상요인이 대기질에 미치는 영향에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 특히, 대기오염물질의 수평수송을 결정하는 대기경계층 내 풍속, 연직확산을 결정하는 대기경계층고도, 광화학 반응의 강도에 관여하는 지상 기온 등의 인자가 중요함이 밝혀진 바 있지만 대부분 대기화학수송모델에 기반한 모델링 연구결과이다 (Kim et al., 2007; Park et al., 2013). 현재 사용되고 있는 가장 종합적이고 포괄적인 대기화학수송모델 (예를 들면, CMAQ, WRF-Chem, GEOS-Chem 등) 조차도 아직은 (초)미세먼지의 시공간적 변동성과 정확도를 정확히 재현하는데 어려움을 겪고 있다 (Chang et al., 2016). 이는 이러한 모델들이 PM<sub>2.5</sub>의 전구기체 배출량, 생성기작과 기상/기후조건이 미치는 영향, 물리/화학 프로세스 모수화의 불확실성 등에 대한 우리의 불완전한 이해에 기초하고 있음을 제시한다. 또한, 한반도 고농도 미세먼지의 원인으로 오염물질의 배출 이외에도 오염물질의 확산 또는 집적에 영향을 미치는 종관규모 대기패턴의 중요성이 대두되고 있다. 이에 최근 겨울철 한반도 미세먼지 농도의 증가 추세는 지표 풍속의 감소 경향과 연관이 있음이 제시된 바 있다 (Kim et al., 2017). 이러한 기상장의 영향을 평가하고자 고농도 미세먼지와 관련된 대기장의 군집분석을 통해 관련 대기패턴의 특성을 파악하는 연구가 진행되고 있으나 (Jung et al. 2019) 한반도 주변 지역에 국한된 분석이 대부분으로 북극의 변동에 의한 영향을 원격상관을 평가하기에는 공간적 제약으로 어려움이 있다.

중국의 급속한 경제발전과 공업화 진행에 따라 초고농도의 (초)미세먼지 오염이 국제적으로 큰 이슈가 되었고, 이에 중국에서 발생한 고농도 (초)미세먼지가 풍하 측에 위치한 한국에 미치는 영향에 대한 장거리수송 연구도 활발히 진행되고 있다 (He et al., 2003; Park et al., 2018). 그러나 장거리수송에 관한 연구는 서울을 중심으로 한 한국의 한 두 지점 (태안, 백령도, 또는 서울 등)에 대해 제한적으로 이루어져 주로 한지점에 대한 시간적 변동성에 초점을 맞추었고 한국 내에서의 관측자료에 기반한 시공간적 변동성을 다룬 연구는 매우 미미한 실정이다. 이러한 연구 부족은 한국 내의 상세한 시공간적 (초)미세먼지 오염 예보에 어려움을 더하고 있다.

최근 중국을 중심으로 기후변화와 중국 대기질의 변동을 연결시키는 연구가 활발히 수행되고 있으나 (Zhang et al., 2016; Zou et al., 2017) 주로 단순 사례에 대한 case 연구가 대부분이며 기후변화가 종관기상, 그리고 결과적으로 동아시아의 대기질에 미치는 영향에 대해 종합적인 관점에서 접근한 연구는 미미한 실정이다. 국내·외적으로 2000년대 이후 급격한 북극 고온현상이 중위도 제트기류의 이상난동을 초래함을 언급한 다수의 연구결과가 존재하지만 (예를 들면, Kim et al.,

2014), 기존 연구들은 폭염, 한파, 가뭄 등의 이상기후와의 연결고리 이해와 같은 기후학적 관점에서만 다루어져 제트기류의 이상난동이 미세먼지 증가 및 다양한 광화학 반응에 기반한 대기 오염 연구에 필요한 기후학적 데이터를 제공한 사례는 드물다. 또한 많은 연구들이 기후학적으로 접근하여 개별 사례에 대한 자세한 원인 규명을 제시한 연구는 많지 않다 (Cai et al., 2017; Kim et al., 2017; Lee et al., 2016; Lee et al., 2018).



## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 북극 기후변화에 따른 동아시아 대기순환변화가 한국 고농도 미세먼지 오염에 미치는 영향

#### 1. 북극 고온현상에 따른 동아시아 대기순환과 기압계 패턴 변화

##### 가. 북극 고온현상에 따른 동아시아 주변 바람장 및 온도장 특성

###### (1) 북극진동지수 (AO Index) 시계열 분석을 통한 북극 고온사례 정의 및 특성

북극 고온현상에 따른 동아시아 대기순환의 변화를 살펴보기 위하여 북극진동 지수(Arctic Oscillation Index)를 기반으로 북극 고온사례를 정의하고 북극 고온사례 발생 시 대기순환구조의 특성을 파악하였다. 북극진동의 일별 지수는 미국 해양대기청(NOAA)의 기후예측센터 웹사이트 (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>)로부터 수집하였다. 분석기간은 1979년부터 2019년까지 미세먼지가 주로 발생하는 늦겨울(1, 2, 3월)이며, 해당 기간동안 북극진동 지수(AO Index) 시계열 분석을 통하여 1 표준편차 이상을 양의 북극진동(Positive AO), 1 표준편차 이하를 음의 북극진동(Negative AO) 사례일로 정의하였다.

북극진동 지수에 따른 동아시아 주변 대기순환의 변화를 살펴보기 위하여, JRA55 재분석 자료를 활용하여 지상온도(T2m), 중층지위고도(Z500), 상층동서바람(U200) 편차의 합성분석을 진행하였다. 지상기온(T2m) 편차의 합성분석 결과, 양의 북극진동 발생 시 우랄산맥부터 동아시아 지역까지 양의 기온편차가 나타나며, 음의 북극진동 발생 시 음의 기온편차가 나타난다 (그림 1). 중층지위고도(Z500) 편차의 합성분석 결과, 양의 북극진동 발생 시 한반도에 양의 지위고도 편차가 나타나며, 음의 북극진동 발생 시 한반도에 음의 지위고도 편차가 나타난다 (그림 2). 상층동서바람(U200) 편차의 합성분석 결과, 양의 북극진동 발생 시 북극을 중심으로 강하게 상층 제트기류가 형성되며, 음의 북극진동 발생 시 상층 제트기류가 중위도 지역까지 남하하여 한반도 상공에 강한 양의 동서바람 편차가 나타난다 (그림 3).



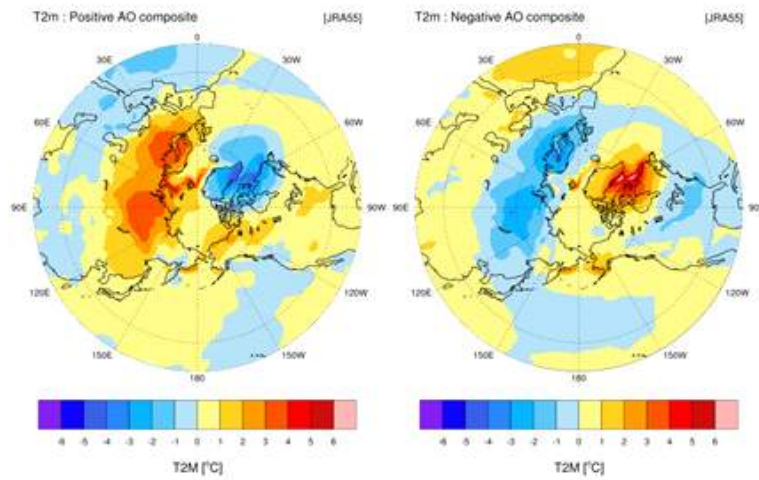


그림 1. 지상온도(T2m) 편차의 합성분석 (양의 북극진동(좌), 음의 북극진동(우))

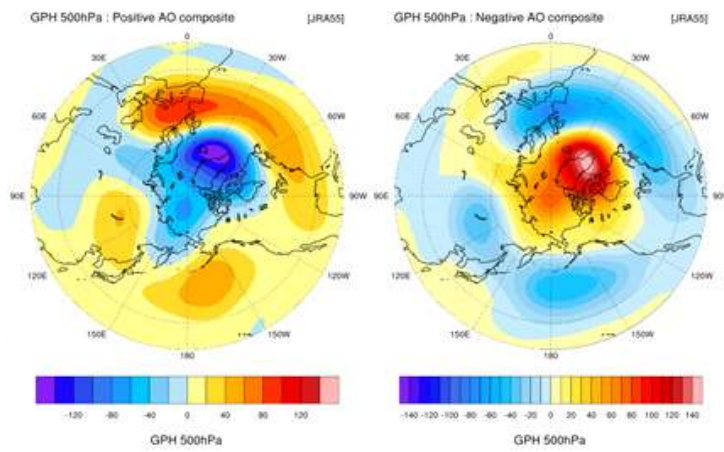


그림 2. 중층지위고도(Z500) 편차의 합성분석 (양의 북극진동(좌), 음의 북극진동(우))

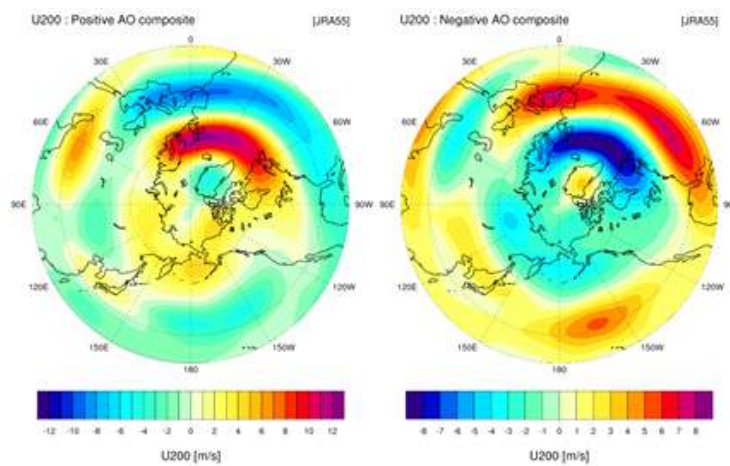


그림 3. 상층동서바람(U200) 편차의 합성분석 (양의 북극진동(좌), 음의 북극진동(우))

## (2) 북극 지표온도의 시계열 분석을 통한 북극 고온사례 정의 및 특성

바렌츠·카라해의 고온현상은 한파를 비롯한 동아시아 기상현상과 밀접한 관련이 있다고 알려져 있다 (Kim et al., 2014). 바렌츠·카라해(Barents Kara Sea, [30°~70°E, 70°~80°N]) 지역의 지표온도 시계열 분석을 통하여 1 표준편차 이상을 북극 고온 사례, 1 표준편차 이하를 북극 저온 사례로 정의하였다.

북극 고온사례 발생 시 동아시아 주변 대기순환의 변화를 살펴보기 위하여, JRA55 재분석 자료를 활용하여 지상온도(T2m), 중층지위고도(Z500), 상층동서바람(U200) 편차의 합성분석을 진행하였다. 지상온도(T2m) 편차의 합성분석 결과, 바렌츠·카라해 고온 시 바렌츠·카라해 지역에 강한 양의 기온편차가 나타나며 동아시아 지역은 음의 기온편차가 나타난다. 바렌츠·카라해 저온 시 바렌츠·카라해 지역에 강한 음의 기온편차가 나타나며, 한반도를 포함한 동아시아 지역에는 양의 기온편차가 나타난다 (그림 4).

중층지위고도(Z500) 편차의 합성분석 결과는 지상온도(T2m) 편차의 합성분석 결과와 유사하게 바렌츠·카라해 고온 시 바렌츠·카라해 지역에 강한 양의 지위고도 편차가 나타나며 동아시아 지역은 음의 지위고도 편차가 나타난다. 바렌츠·카라해 저온 시 바렌츠·카라해 지역에 강한 음의 지위고도 편차가 나타나며, 한반도를 포함한 동아시아 지역에는 양의 지위고도 편차가 나타난다 (그림 5). 상층동서바람(U200) 편차의 합성분석 결과, 바렌츠·카라해 고온 시 한반도에 상층에 강한 양의 동서바람 편차가 형성되며, 바렌츠·카라해 저온 시 한반도 상층에 음의 동서바람 편차가 형성된다 (그림 6). 본 연구를 통해 북극 고온현상의 정의를 북극진동지수 기준으로 하는 경우와 바렌츠·카라해 지역의 온도를 기준으로 하는 경우의 동아시아 기온, 지위고도 및 제트기류의 위치가 상이한 것을 확인하였고 이러한 점은 향후 북극 기후변화에 따른 동아시아 대기순환 변동특성을 파악할 때 중요하게 활용될 수 있다.

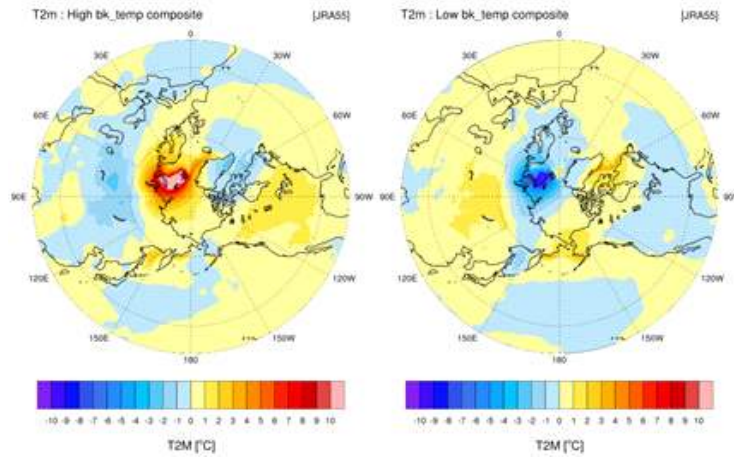


그림 4. 지상온도(T2m) 편차의 합성분석 (바렌츠 · 카라해 고온(좌), 바렌츠 · 카라해 저온(우))

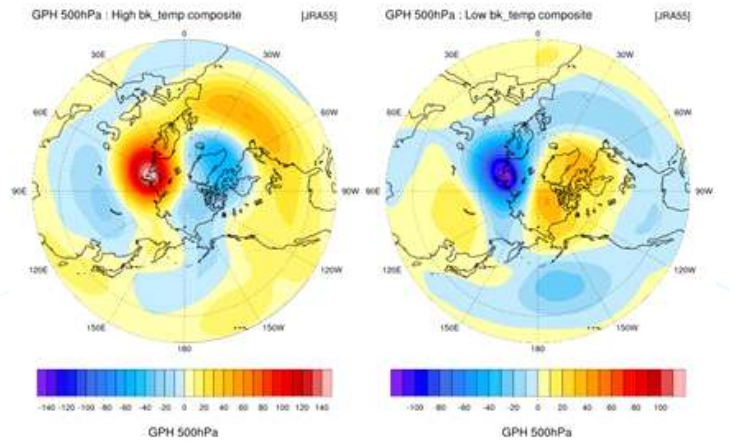


그림 5. 중층지위고도(Z500) 편차의 합성분석 (바렌츠 · 카라해 고온(좌), 바렌츠 · 카라해 저온(우))

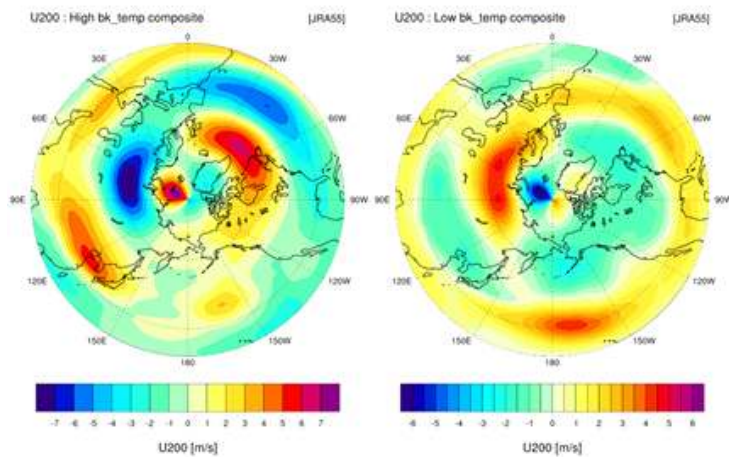


그림 6. 상층동서바람(U200) 편차의 합성분석 (바렌츠 · 카라해 고온(좌), 바렌츠 · 카라해 저온(우))

## 나. 동아시아 기압계 패턴 변화

북극고온현상에 따른 동아시아 대기순환의 변화를 분석하기 위하여, 역사상 가장 강력했던 2016년 1월 북극고온현상 시기에 집중적으로 분석하였다. 2015년 12월 말 북극으로 유입된 폭풍 Frank에 의해 2016년 1월 북극에는 전례없이 강력한 고온현상이 발생하였다 (Kim et al., 2017) (그림 7a).

북극고온현상에 따른 동아시아 대기순환 변화가 한반도 미세먼지( $PM_{10}$ ) 농도에 미친 영향을 분석하기 위하여 환경부 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr/>)에서 제공하는 시도별 대기정보의 미세먼지( $PM_{10}$ ) 시계열을 분석한 결과, 2016년 1월 동안 한반도에는 3번의 고농도 미세먼지 사례가 발생하였다. 첫 번째 사례는 2016년 1월 3일, 두 번째 사례는 2016년 1월 17일, 세 번째 사례는 2016년 1월 28일에 발생하였다 (그림 7b).

각 사례의 고농도 피크일을 기준으로 3일 간격 전후의 지상온도(SAT) 및 500 hPa 지위고도(Z500) 편차장 분석을 통하여 동아시아 주변 이동성 고/저기압의 패턴을 분석하고 북극 기후변동과의 관련성을 파악하였다. 첫 번째 사례의 사례 발생일은 2016년 1월 3일이며, 사례 발생 3일 전의 지상온도(T2m) 편차에서 바렌츠·카라해 지역에 강한 양의 기온편차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 바렌츠·카라해 고온현상으로 야기된 상층과동으로 인하여 한반도 상층 고기압성 편차가 나타나 미세먼지 집적의 호조건이 나타나는 사례이다 (그림 8, 9).

두 번째 사례의 사례 발생일은 2016년 1월 17일이다. 몽고를 포함한 동아시아 지역의 음의 지위고도 편차가 넓게 분포하며, 한반도 북쪽 및 만주에 위치한 음의 저기압성 순환의 후면을 따라 황사가 유입되기 용이한 기압패턴이다 (그림 10, 11).

세 번째 사례의 사례 발생일은 2016년 1월 28일이며, 북극고온-유라시아 한파 패턴 소멸 시 한반도 상공에 강한 고기압성 편차가 형성되며 미세먼지 집적 조건을 유발하는 대기패턴이다 (그림 12, 13). 사례 발생 3일 전의 지상온도(T2m) 편차를 보면 한반도에 음의 기온편차가 나타나며, 사례 발생일의 500 hPa 지위고도(Z500) 편차를 보면 한반도에 강한 고기압성 편차가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

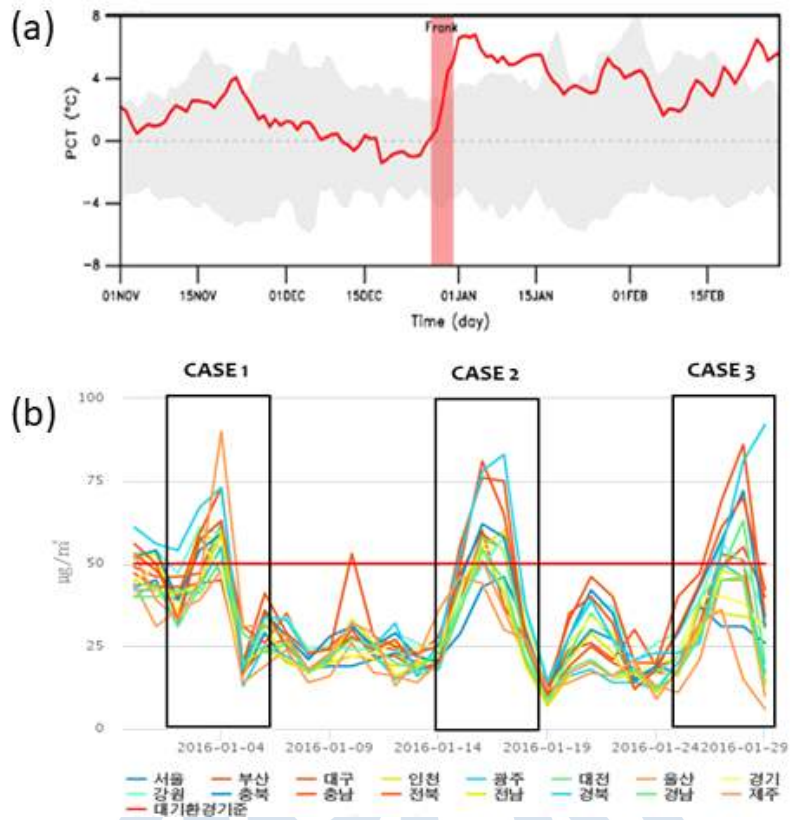


그림 7. (a) 북극지역(65°N 이상) 지상온도 편차 시계열 (Kim et al., 2017)과 (b) 폭풍 Flank에 의한 북극고온 시기인 2016년 1월 에어코리아 시도별 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 시계열

극지연구소

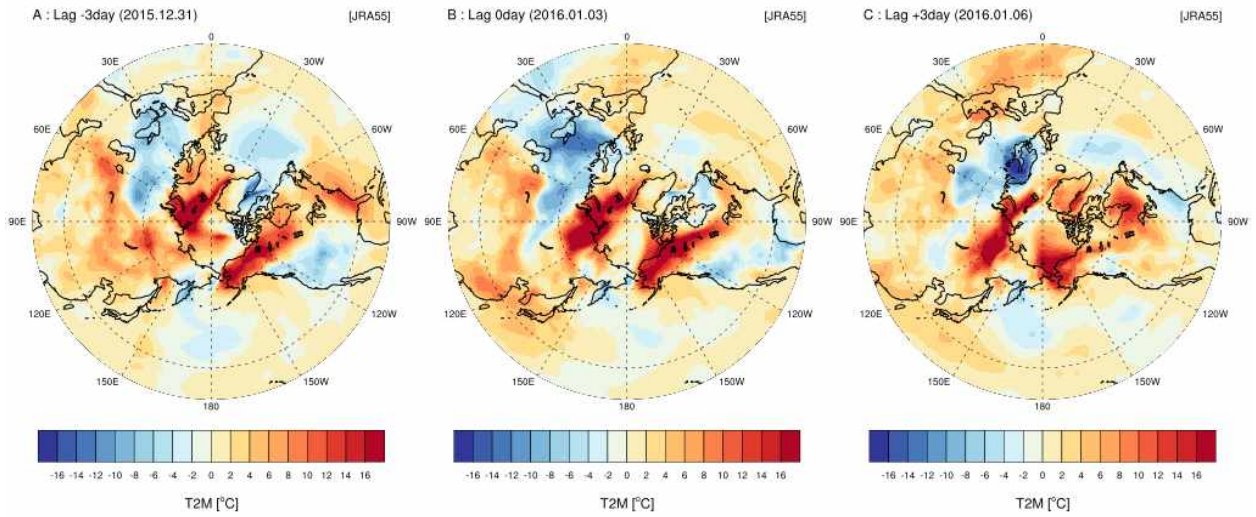


그림 8. 고농도 미세먼지 사례 1의 지상온도(SAT) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)

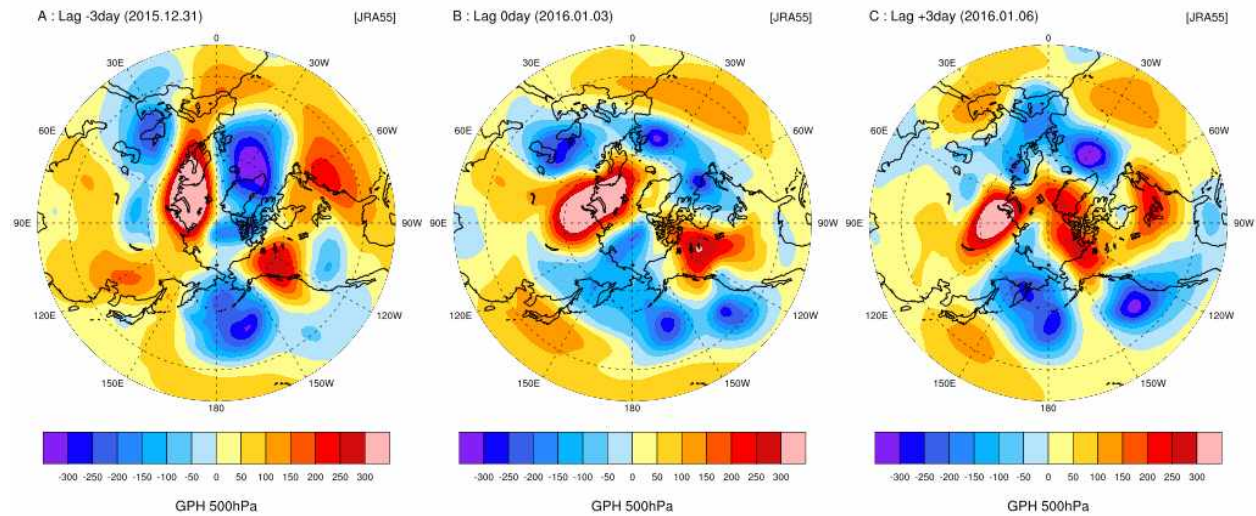


그림 9. 고농도 미세먼지 사례 1의 500 hPa 지위고도(Z500) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)

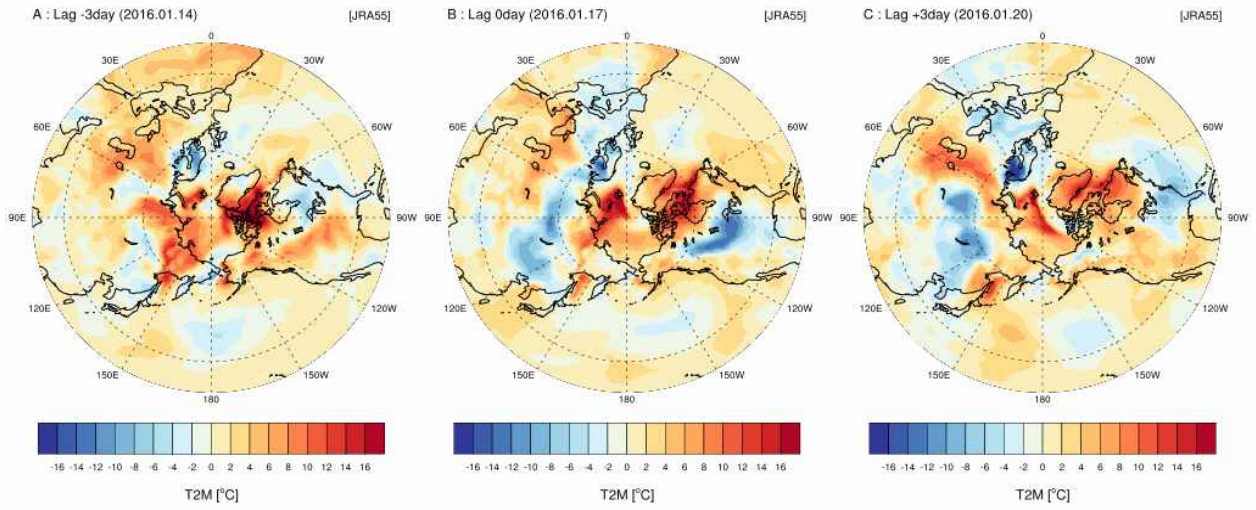


그림 10. 고농도 미세먼지 사례 2의 지상온도(SAT) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)

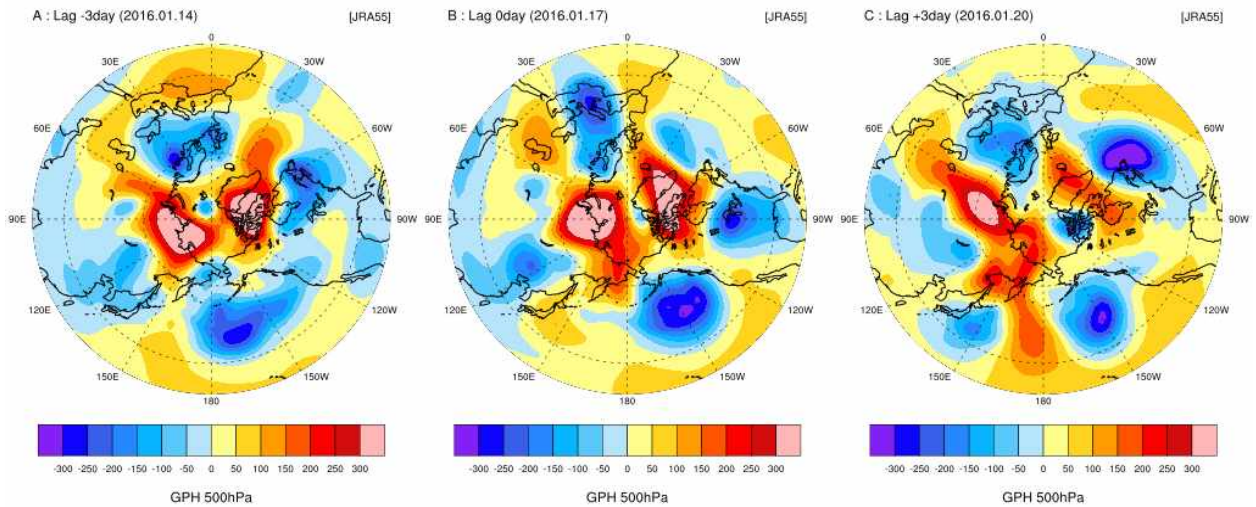


그림 11. 고농도 미세먼지 사례 2의 500 hPa 지위고도(Z500) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)

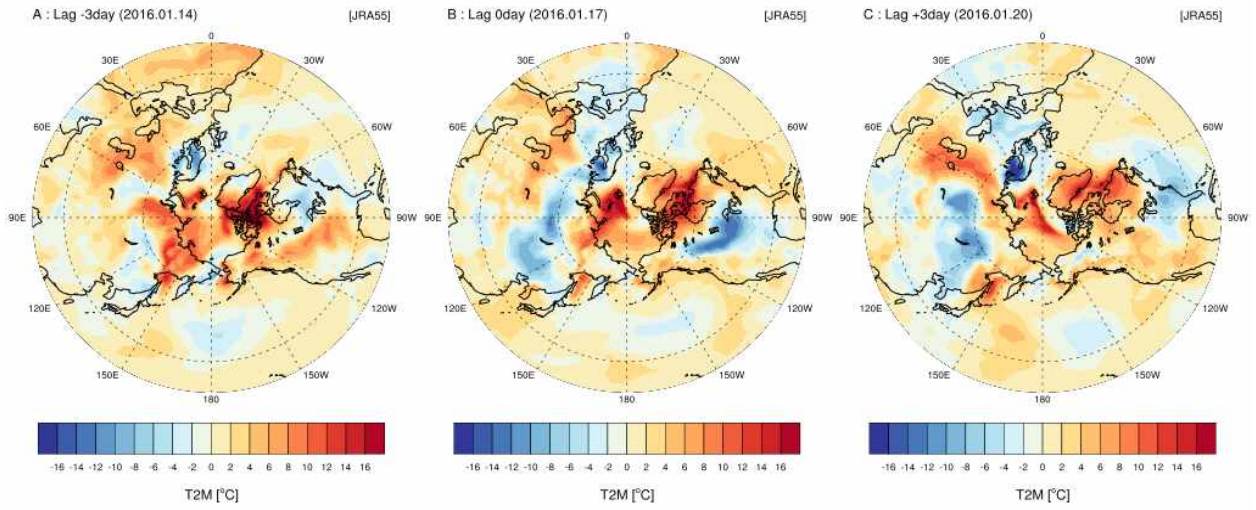


그림 12. 고농도 미세먼지 사례 3의 지상온도(SAT) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)

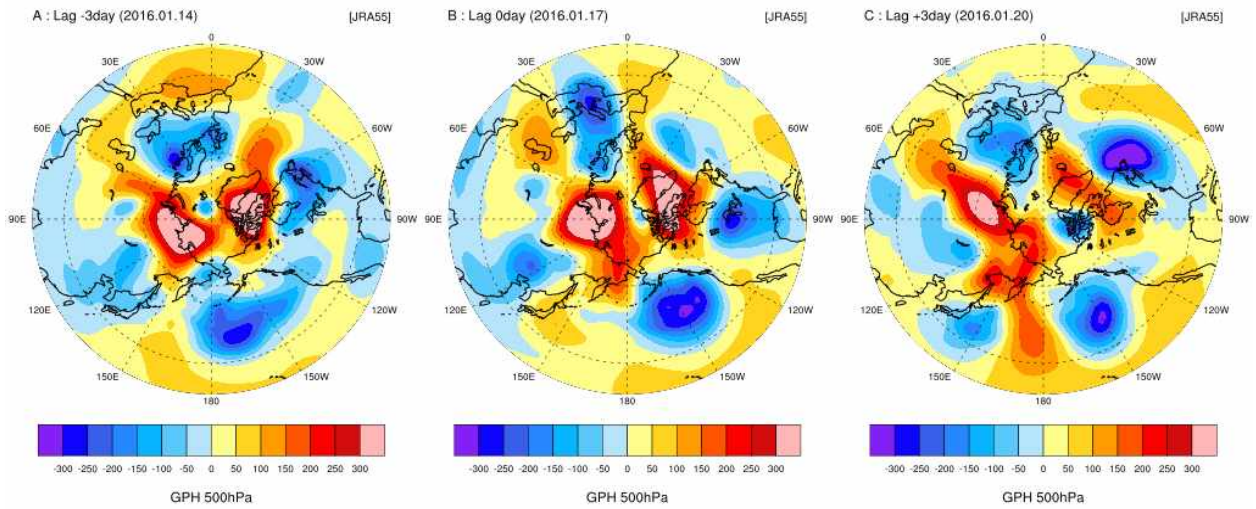


그림 13. 고농도 미세먼지 사례 3의 500 hPa 지위고도(Z500) 편차 (A: 사례 발생 3일 전, B: 사례 발생일, C: 사례 발생 3일 후)



## 2. 북극 기후변화 관련 동아시아 대기순환과 고농도 미세먼지 오염의 유형과 특성

### 가. 한반도 고농도 미세먼지 오염과 관련된 동아시아 대기순환 유형 및 특성

북극 기후변화에 따른 한반도 고농도 미세먼지 변동을 파악하기 위해 앞서, 한반도 고농도 미세먼지 오염과 관련된 북반구 대규모 대기순환 유형 및 특성에 대한 이해가 필요하다. 이에 따라 유라시아 서쪽부터 캄차카반도까지의 넓은 영역을 기준으로 한반도 고농도 미세먼지와 관련된 대기순환 유형을 산출한 선행연구 (대기질 장기예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화- (NIER-2020-01-02-021), 국립환경과학원, 2020)를 참고하여 한반도 고농도 미세먼지 관련 대기순환 유형의 특성을 정리하고 대기순환 유형별 북극 기후변화와의 연관성을 파악하였다.

해당 연구에서는 한반도 고농도 미세먼지 현상 발생 시 북극과의 연관성을 살펴보기 위하여, 2007년 12월부터 2019년 3월까지의 12, 1, 2, 3월에 한반도에서 발생한 고농도 미세먼지 사례의 500 hPa 지위고도 편차를 객관적 군집분석 기법(k-means clustering)을 이용하여 분류하였다. 고농도 사례의 기준은 환경부 PM<sub>10</sub> 예·경보제 기준 중 '나쁨' 등급인 81  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 을 참고하여, 일평균 PM<sub>10</sub> 농도가 81  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  이상인 날을 고농도 사례일로 지정하였다. 고농도 사례일들이 연속되는 경우 단일 사례로 간주하여, 사례 대표일은 고농도 PM<sub>10</sub> 사례의 시작일로 설정하였다. 2007년부터 2018년의 겨울철/봄철동안 총 91개의 사례가 선정되었다.

군집분석에 사용된 지위고도 편차는 JRA55 재분석 자료로부터 산출하였으며, 주요 기압계 패턴에 초점을 맞추기 위하여 1.25도 간격의 격자 자료를 5도 간격의 격자 자료로 변환하여 사용하였다. 연구영역은 선정된 미세먼지 사례와 연관된 북극발 기압계 변화를 탐지할 수 있도록 우랄산맥부터 동아시아 지역을 모두 포함하는 영역 (22.5-72.5°N, 30-170°E)으로 설정하였다. 군집분석을 위한 최적의 군집수를 결정하기 위해 각 그룹의 대표패턴과 멤버간의 패턴상관계수와 표준편차를 계산하여 그룹 멤버간의 유사성과 응집도를 판단하였다. 그에 따라 최적 군집수를 5로 설정하였다.

군집분석을 통하여 획득한 다섯 유형의 상층 수평 기압계 배치와 상층파동 전파 특성을 나타내는 파동활동속의 합성장 결과는 다음과 같다 (그림 14). 파동활동속의 수렴/발산을 통해 기압계의 이동 경향을 파악할 수 있다. 유형1과 5는 북극을 비롯한 고위도 지역에서 발생한 상층파동이 중위도 지역으로 전파되며 한반도 부근에 고기압성 편차를 생성하는 파동전파(Wave Train) 패턴이다 (그림 14a, 14e). 유형 1과 5의 대표패턴간의 패턴상관계수는 0.7로 매우 높지만 고·저기압성 지위고도 편차의 위치와 강도가 다소 상이하다. 파동전파 패턴의 파동활동속 분포를 살펴보면 유형 1과 5는 다른 유형에 비해 파동이 빠르게 진행되는

것을 알 수 있다. 유형 2는 북극고온-유라시아 한파 패턴 소멸 시 한반도 상층에 고기압을 형성하는 구조로 파동활동속의 발산이 없기 때문에 한반도 상층 고기압이 정체되는 패턴이다. 이와 같은 패턴은 고기압의 위치가 한반도 상공에 있는 경우 국내오염물질의 장기간 집적에 용이한 구조이다 (그림 14b). 유형 3은 캄차카 지역에 형성된 고기압의 영향으로 기압계의 동향 흐름이 저지되어 한반도에서 미세먼지가 소산되지 못하고 집적되는 패턴이다 (그림 14c). 유형 4는 한반도 북쪽에 위치한 저기압의 한랭전선 후면으로 미세먼지가 유입될 수 있는 패턴이다 (그림 14d).



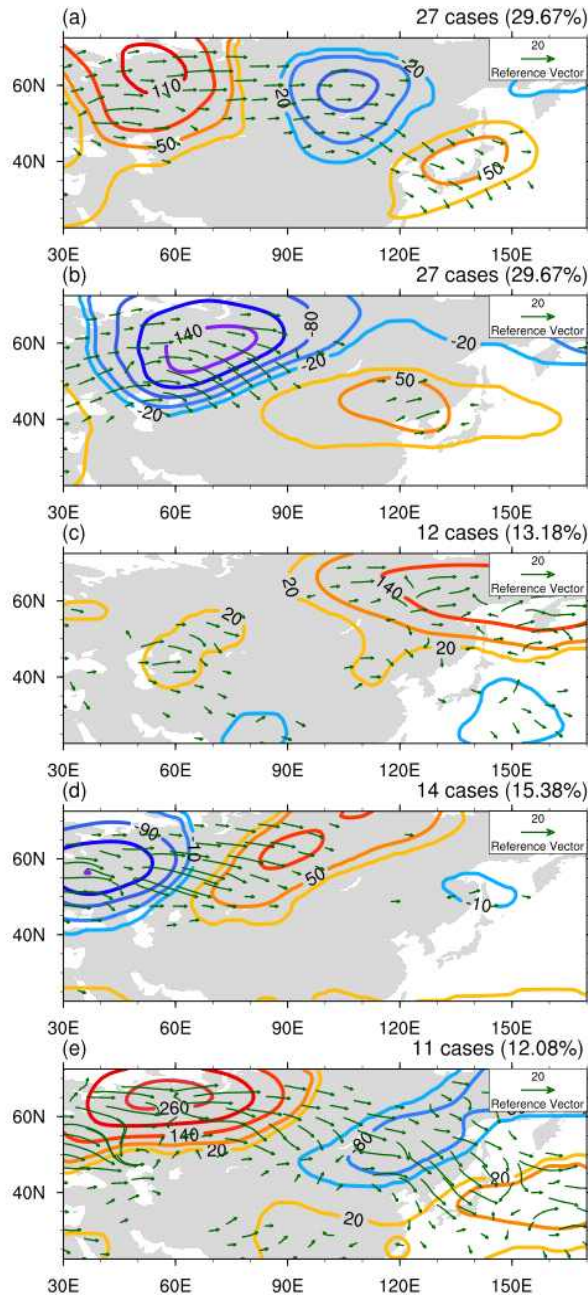


그림 14. 고농도 미세먼지 유형별 상층(500 hPa) 지위고도 편차와 파동활동속(벡터)의 합성장(대기 질 장기예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화- 최종보고서, 국립환경과학원, 2020)

유형별 하층 기압분포와 유입류 존재를 파악하기 위해 850 hPa 지위고도 편차와 바람 편차를 분석하였다 (그림 15). 파동전과 패턴인 유형 1과 5의 경우, 한반도상 고기압성 편차와 중국 남동부에 위치한 저기압성 편차의 영향으로 미세먼지 오염원인 중국 남동부로부터 유입류가 형성되는 하층 바람장이 나타난다 (그림 15a, 15e). 정체고기압 패턴인 유형 2의 경우, 한반도에 위치한 고기압 편차와 유라시아 지역에 분포한 강한 저기압 편차는 겨울철 북풍의 유입을 감소시키고 남풍의 유입이 우세한 기압배치이며, 한반도상 정체고기압으로 인해 오염물질이 오래 집적될 수 있다 (그림 15b). 유형 3의 경우, 캄차카 지역에 위치한 고기압의 영향으로 한반도 북쪽에 강한 음의 동서바람 편차가 나타나 대기의 흐름이 정체되고 오염물질이 축적에 용이한 순환장 특성을 보였다 (그림 15c). 유형 4에서는 미세먼지 오염원인 중국 남동부로부터 하층 유입류가 유의미하게 나타난다 (그림 15d).

각 유형별 시간변동 특성을 파악하기 위하여 상층(500 hPa) 지위고도 편차의 시간지연 합성장을 이용한 Hovmöller 도표를 분석하였다 (그림 16). 시간지연의 범위는 미세먼지 사례 시작일 기준으로 전후 10일로 설정하였으며 x축의 검은 곱표는 서울의 경도를 나타낸다. 파동전과 패턴인 유형 1과 5은 타유형에 비하여 비교적 기압계의 이동이 빠른 순환장으로 한반도 상공에 약 1주일 간격으로 고기압이 위치하는 것을 확인할 수 있다 (그림 16a, 16e). 이는 미세먼지 고농도 사례일에 한반도 상층에 고기압이 위치하였다가 몽골지역에 위치하던 저기압의 유입으로 미세먼지가 해소되는 메커니즘이 약 1-2주 간격으로 반복되는 더블 피크 사례가 발생할 수 있음을 시사한다. 파동전과 유형의 평균 지속기간이 1.7일과 1.5일로 짧은 편에 속하는 것도 이를 뒷받침하는 결과이다. 유형 2의 경우, 사례시작일 기준으로 5일 전부터 5일 후까지 약 10일동안 한반도에 고기압이 위치하여 미세먼지의 장기간 집적이 용이하며, 유형 2의 지속기간은 3일로 다섯 유형 중 가장 긴 지속기간을 갖는다 (그림 16b).

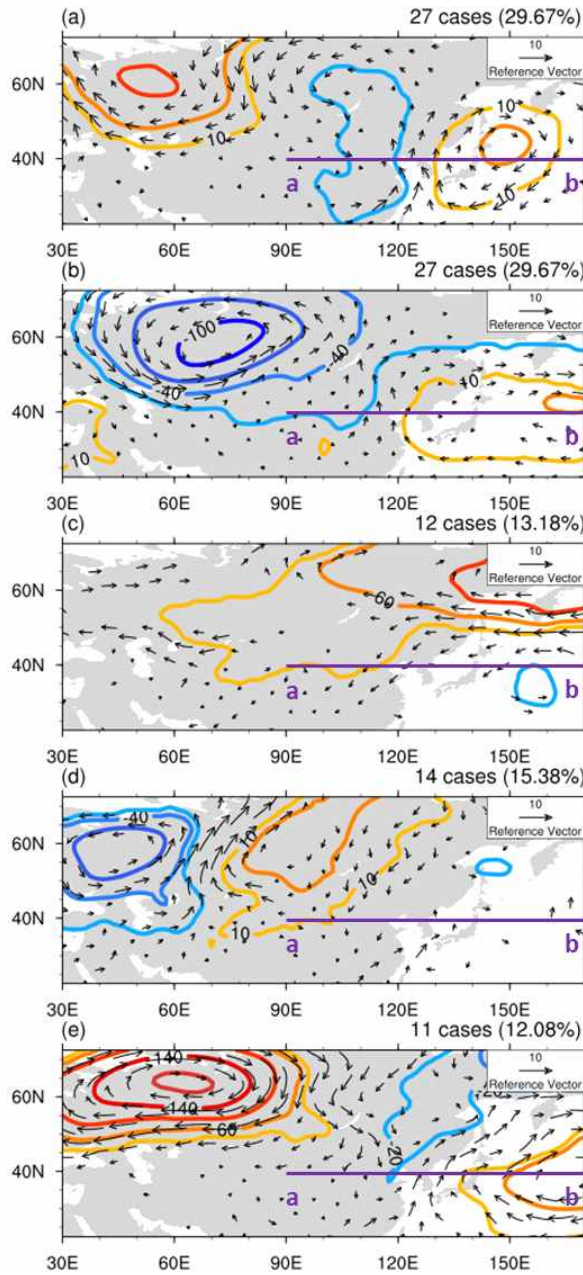


그림 15. 고농도 미세먼지 유형별 하층(850 hPa) 지위고도 편차와 수평바람 편차(벡터)의 합성장, 보라색 직선(a-b)은 Hovmöller 도표에서 연직단면이 정의되는 위도(35-45°N)를 표시(대기질 장기 예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화- 최종보고서, 국립환경과학원, 2020)

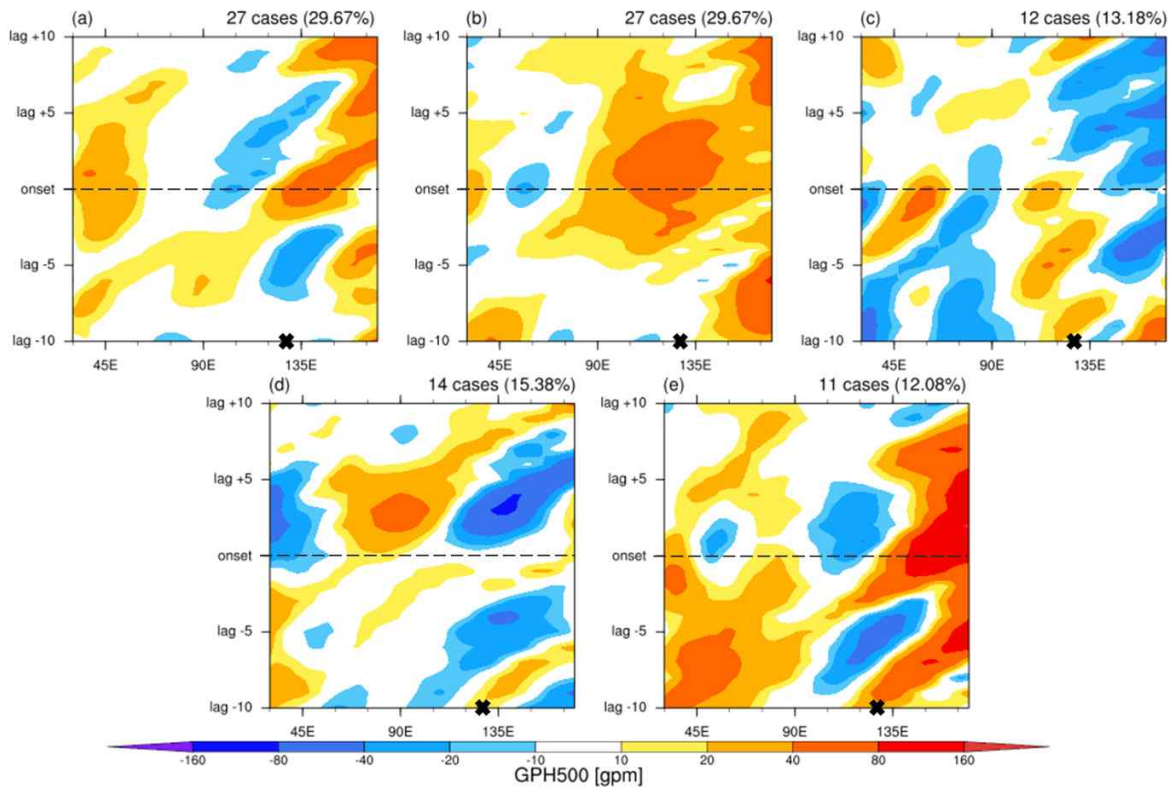


그림 16. 유형별 상층(500 hPa) 지위고도 편차의 Hovmöller 도표(고농도 미세먼지 사례 시작일을 중심으로 전후 10일간의 시간지연 합성장), x축의 검은 곱표는 서울의 경도(대기질 장기예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화- 최종보고서, 국립환경과학원, 2020)

극지연구소

## 나. 북극기후변화와 관련된 고농도 미세먼지 유형

한반도 고농도 미세먼지 사례의 군집분석 결과(대기질 장기예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화- (NIER-2020-01-02-021), 국립환경과학원, 2020)로부터 북극기후변화와 관련된 2개의 고농도 미세먼지 유형을 발견하였다. 첫 번째는 바렌츠-카라해 고온현상으로 인하여 우랄지역에 블로킹이 형성되고, 파동전파에 따라 한반도 동해안 및 일본 열도 상공에 고기압이 형성되는 파동전파 패턴이다. 군집분석 결과 중 유형 1과 5가 파동전파 패턴에 해당하며 이와 같은 패턴은 중국으로부터 대기 오염물질의 유입이 용이한 동아시아 기압배치를 유도한다. 유형1과 5의 대표패턴은 Gong and Luo. (2017)의 겨울철 우랄블로킹 발생 시 500 hPa 지위고도 합성장의 패턴과 유사하다 (그림 17).

두 번째는 양의 북극진동과 약한 상관관계를 보이는 정체고기압 패턴이다. 군집분석 결과 중 유형 2가 정체고기압 패턴에 해당하며, 이와 같은 패턴은 고기압의 위치가 한반도 상공에 있는 경우 국내오염물질의 집적이 장기간 발생하기에 용이한 패턴이다. 유형 2의 대표패턴의 기압배치는 Park and Ahn., (2016)의 양의 북극진동 패턴과 유사하다 (그림 18).

두 가지 발생기작을 각각 파동전파(wave train) 패턴, 정체고기압(stationary high) 패턴으로 명명하고, 각 발생기작에 해당하는 2016년 1월 3일 고농도 미세먼지 사례와 2017년 1월 2일 고농도 미세먼지 사례에 대해서 기상장 자료를 확보하였다.

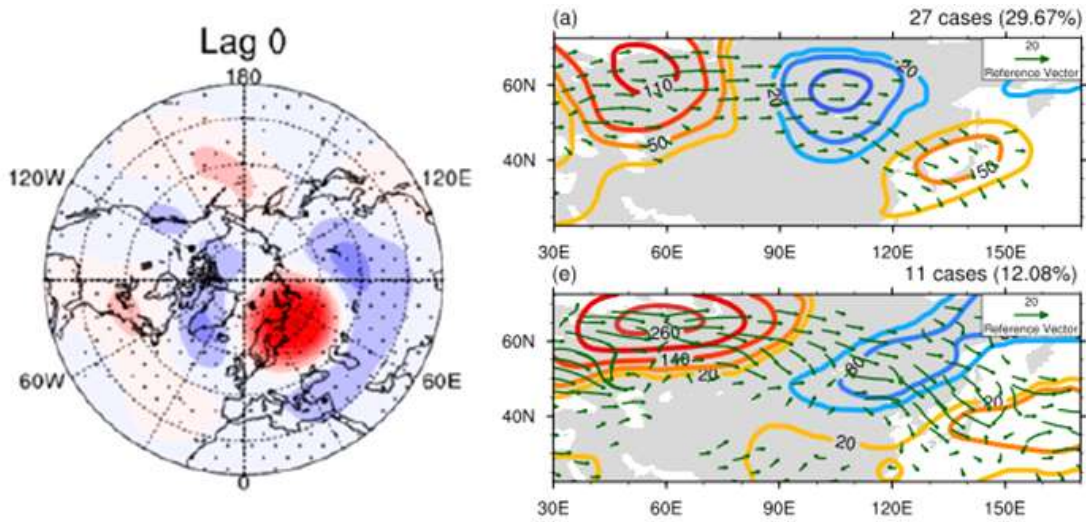


그림 17. 우랄블로킹 형성 시 500 hPa 지위고도 합성장(좌) (Gong and Luo., 2017), 유형1과 5의 500 hPa 지위고도 편차와 파동활동속 합성장(우)(대기질 장기예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화 - 최종보고서, 국립환경과학원, 2020)

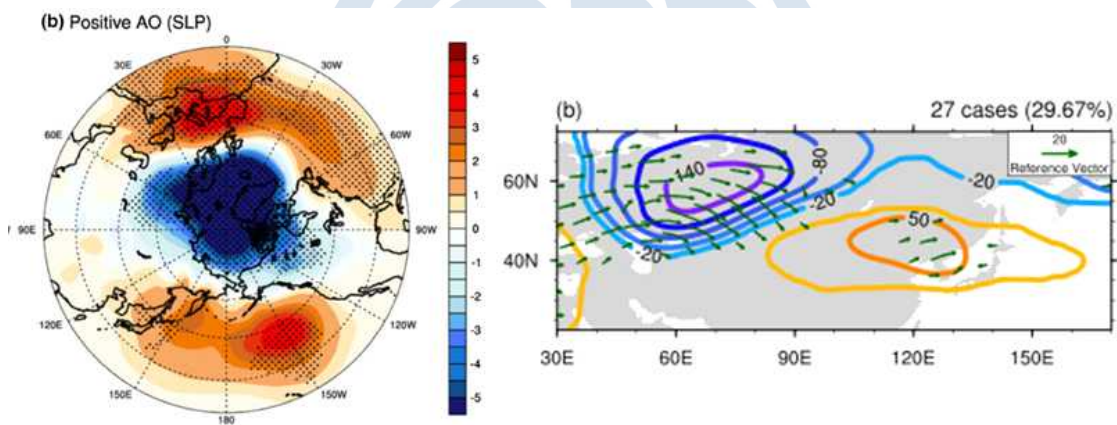


그림 18. 양의 북극진동 시 지상기압(SLP) 합성장(좌) (Park et al., 2016), 유형 2의 500 hPa 지위고도 편차와 파동활동속 합성장(우)(대기질 장기예측 모델 개발(II) - 예측인자 고도화 - 최종보고서, 국립환경과학원, 2020)



## 제 2 절 고농도 초미세먼지 오염 발생 시 한국 내 시공간적 변동 특성과 종관기상과 기후 아노말리 패턴

### 1. 전국 대기오염측정소 데이터 분석

#### 가. 자료 수집 및 처리 방법

2019년 12월말 기준 환경부 및 지방자치단체에서 운영 중인 일반대기오염측정망은 4개(도시대기, 도로변대기, 국가배경농도, 교외대기)로, 일반대기오염측정망에 포함된 측정소 개수는 전국 총 472개소이다. 본 연구에서는 2015년부터 2019년까지 전국 402개 일반대기오염측정소(Air Quality Monitoring Stations, AQMS)로부터 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 시간 농도 자료를 수집하였다 (그림 19). 교외대기측정망의 자료는 제공되어있지 않아 제외하였고, 본 절에서의 연구 목표가 동아시아 기상장 분석과 연계한 고농도 PM<sub>2.5</sub> 발생의 오염 분포 분석이므로 차량 배출이나 도로 재비산먼지와 같은 지역 오염원의 영향이 큰 도로변대기측정망의 자료도 제외하였다.

본 연구에서는 농도 변동, Coefficient of divergence(COD), Time-lag, Pearson coefficient(R)를 계산하여 PM<sub>2.5</sub>의 공간 분포를 가시화하였는데, 농도 변동과 계수들을 지도에 나타내기 위하여 ArcMap 소프트웨어 v10.5(ESRI, Redlands, CA)의 Empirical Bayesian Kriging(EBK) tool을 이용하였다. Kriging 방법은 넓은 지역에 흩어진 데이터 자료로부터 연속적인 지표면 예측값을 생성하는 지구 통계학적 기법이다. Kriging 방법은 가까이 위치한 측정값들이 유사한 값을 갖는 spatial autocorrelation을 반영한다고 가정하고, 예측 지점에 대하여 임의로 지정한 개수의 주변 실제값 또는 임의로 지정한 반경 내의 모든 실제값의 가중 선형 조합으로 예측값을 산출하는 방법이다. Kriging 방법의 계산은 spatial autocorrelation을 나타내는 지표인 semivariogram을 추정하면서 이루어진다. EBK는 예측값을 반복 계산하여 semivariogram을 추정하는 과정에서 발생하는 오차를 최소화하는 방법이다.

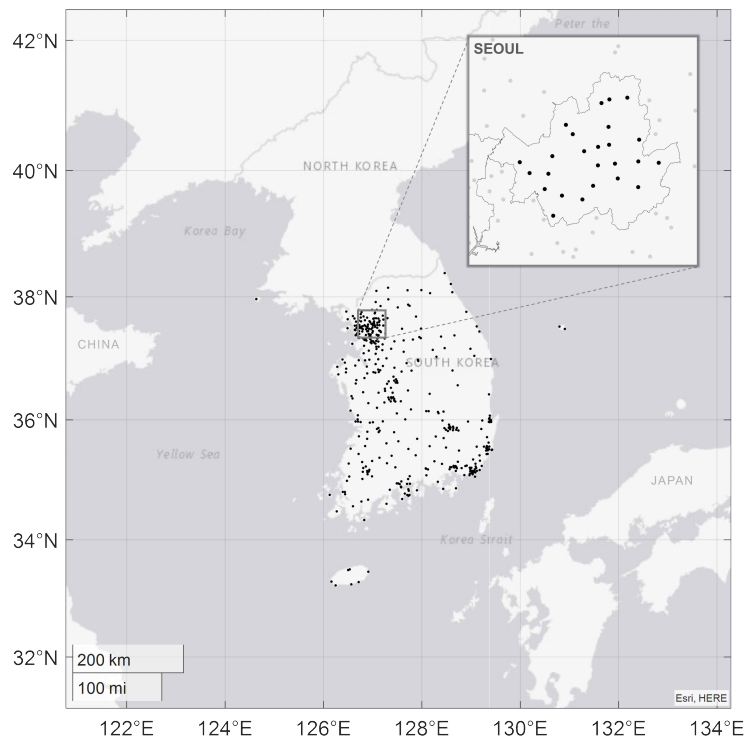


그림 19. 전국 대기오염측정소(AQMS) 분포 지도. 오른쪽 상단의 그림은 서울 지역 AQMS 분포



## 나. PM 농도의 장기적 변동

고농도 PM<sub>2.5</sub> 오염 사례의 분석에 앞서 2015년부터 2019년까지 PM 농도의 장기적 변동이 어떠한지 분석하였다. 월평균, 연평균 농도는 국립환경과학원의 측정 자료 통계처리 방법을 참고하여 계산되었다. 1시간 농도 자료를 이용하여 월평균, 연평균을 계산하며, 통계처리 시 대상 기간 중 75% 이상의 측정 자료가 확보된 경우에만 통계자료를 산출하여 분석에 사용하였다.

연평균 PM<sub>10</sub> 농도는 2015년 48.4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 에서 2019년 41.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 감소하였으며, 매년 1.98  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{yr}^{-1}$ 의 비율로 꾸준한 감소추세에 있었다 (그림 20a). 특히, 상위 10% 농도와 하위 10% 농도 차이가 2015년 17.0  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 에서 2019년 15.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 감소하여 측정소 사이의 농도 격차도 줄어들었다. 또한, 2018년에는 95%, 2019년에는 93%의 측정소가 연평균 PM<sub>10</sub> 기준 농도인 50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  이하를 충족하였다. 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 2015년 25.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 에서 2016년 25.9  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 3.3% 증가한 후 2019년 23.3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 10.2% 감소하였다. 2016년 농도 상승이 있었음에도 2015년부터 2019년까지 0.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{yr}^{-1}$ 의 감소추세에 있었다. 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 기준은 2018년 25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 에서 15  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 강화되었는데, 2019년에 연평균 농도 기준을 충족한 측정소는 단 두 곳이었다.

월평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 그 범위가 겨울철(1-3월)에는 25-40  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 여름철(7-9월)에는 10-25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 겨울철이 여름철보다 대체로 높았다 (그림 20b). 이는 겨울철 낮은 기온으로 안정된 기층이 형성되어 PM<sub>2.5</sub>가 대기 중에 체류하기 좋은 조건이 형성되기 때문으로 보인다. 주황색 실선으로 나타내어진 월평균 농도의 추세를 보면, 여름철 월평균은 감소하는 추세지만 겨울철 월평균은 증가하는 추세를 나타냈다. 이를 통하여 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 감소했음에도 불구하고 계절 변화에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도 변동은 더욱 뚜렷해졌음을 알 수 있다.

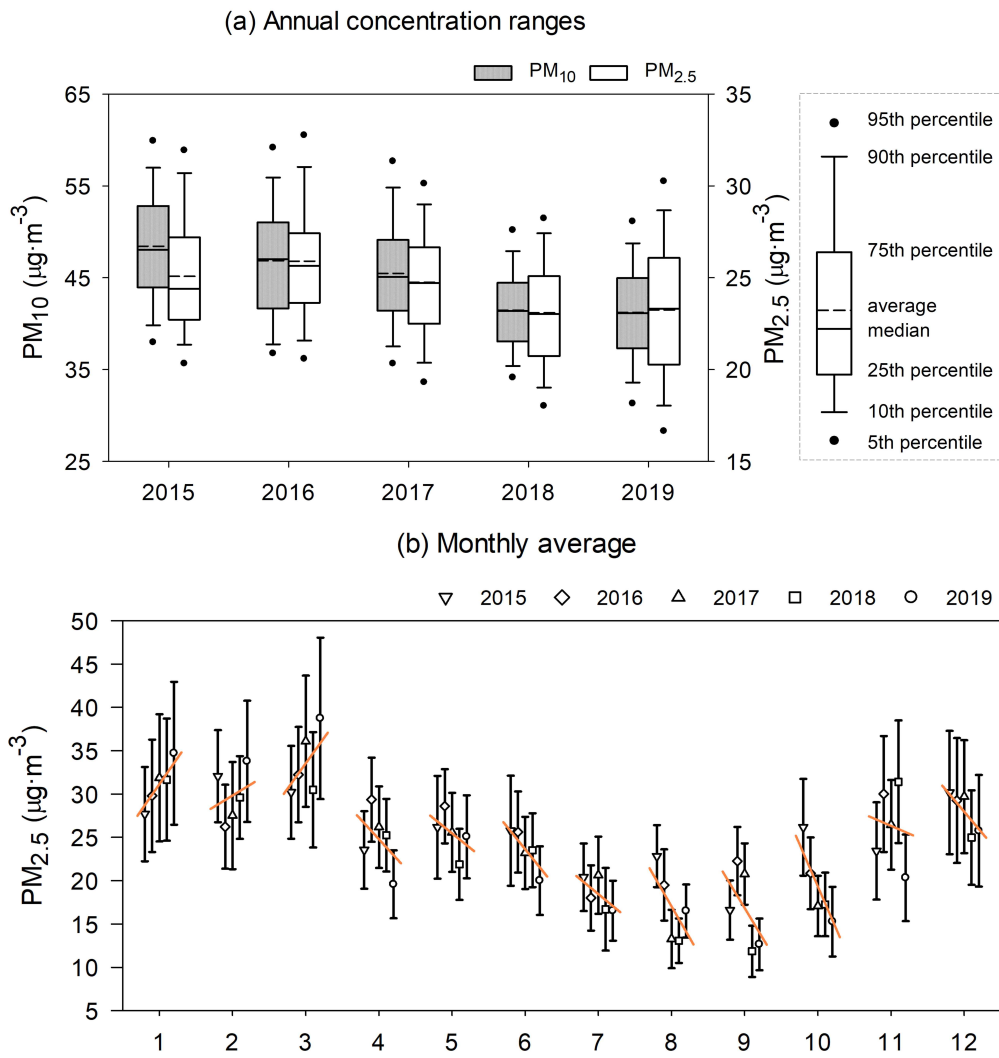


그림 20. (a) 전국 측정소 연평균  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  농도의 상자 그림, (b) 월평균  $PM_{2.5}$  농도 오차 막대 그림. 오차 막대는 각 측정소 월평균 농도의 표준편차, 주황색 실선은 연평균  $PM_{2.5}$  농도의 선형 추세선

## 2. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 분석

### 가. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 정의

한국은 국민의 건강과 생활환경의 피해를 최소화하기 위해 대기 중 오염물질 농도 및 기상 상태를 고려하여 대기오염 예·경보제를 시행하고 있다. 대기오염 경보제는 지역별 측정소의 실시간 대기오염물질 농도가 위험 수준으로 증가할 시 주의보 및 경보를 발령하여 시민의 건강을 보호할 수 있는 조치를 하고 대기환경 개선의 지표로 삼을 수 있도록 하는 제도이다. 규제 대상 대기오염물질 중 PM<sub>2.5</sub>는 2015년부터 대기환경기준이 설정되어 경보제를 시행하여왔다. PM<sub>2.5</sub> 경보제는 시·도별 PM<sub>2.5</sub> 시간 평균치를 기준으로 발령되며 <표 1>와 같이 주의보, 경보의 2단계로 운영된다.

본 절에서는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 기간을 PM<sub>2.5</sub> 경보제의 주의보 기준을 참고하여 정의하였다. 분석 지역 AQMS의 PM<sub>2.5</sub> 시간당 평균 농도가 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  이상 2시간 지속일 때부터 주의보가 발령된 지역의 PM<sub>2.5</sub> 시간당 평균 농도가 35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  미만일 때까지의 기간을 하나의 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례로 정하였다.

표 1. 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 경보제 기준

대상물질	경보단계	발령기준	해제기준
초미세먼지 (PM <sub>2.5</sub> )	주의보	기상 조건 등을 고려하여 해당 지역의 대기자동측정소 PM <sub>2.5</sub> 시간당 평균 농도가 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이상 2시간 이상 지속일 때	해당 주의보가 발령된 지역의 기상 조건 등을 검토하여 대기자동측정소의 PM <sub>2.5</sub> 시간당 평균 농도가 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 미만일 때
	경보	기상 조건 등을 고려하여 해당 지역의 대기자동측정소 PM <sub>2.5</sub> 시간당 평균 농도가 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이상 2시간 이상 지속일 때	해당 경보가 발령된 지역의 기상 조건 등을 검토하여 대기자동측정소의 PM <sub>2.5</sub> 시간당 평균 농도가 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 미만일 때 주의보로 전환

## 나. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 장기적 농도 변동

고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 연평균, 월평균은 측정소마다 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례에 속하는 시간 농도를 나열하여 대상 기간에 대해 평균한 값으로 하였다. 고농도 기간의 75% 이상 측정 자료가 확보된 경우에만 통계자료를 산출하였다.

### (1) 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 장기적 변동

2015년부터 2019년까지 각 측정소에서 발생했던 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 규모와 지속시간의 변동을 확인하였다. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 평균 사례 수는 연간 12-14회로 뚜렷한 변동은 없었다. 하지만 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 평균 농도와 지속시간은 각각  $2.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{yr}^{-1}$ 과  $1.7 \text{hr}\cdot\text{yr}^{-1}$ 의 비율로 증가 추세에 있었다 (그림 21a). 겨울철(1~3월)에는 평균 농도와 지속시간이 증가(각각  $2.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{yr}^{-1}$ ,  $3.4 \text{hr}\cdot\text{yr}^{-1}$ ) 하였을 뿐만 아니라 사례 수도 증가하였다 (그림 21b). 이러한 결과는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 계절적인 격차가 심해졌음을 나타낸다. 즉, 과거에서 최근으로 올수록 더욱 높은 강도와 긴 지속시간을 갖는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례가 겨울철에 집약적으로 발생했음을 의미한다.

극지연구소

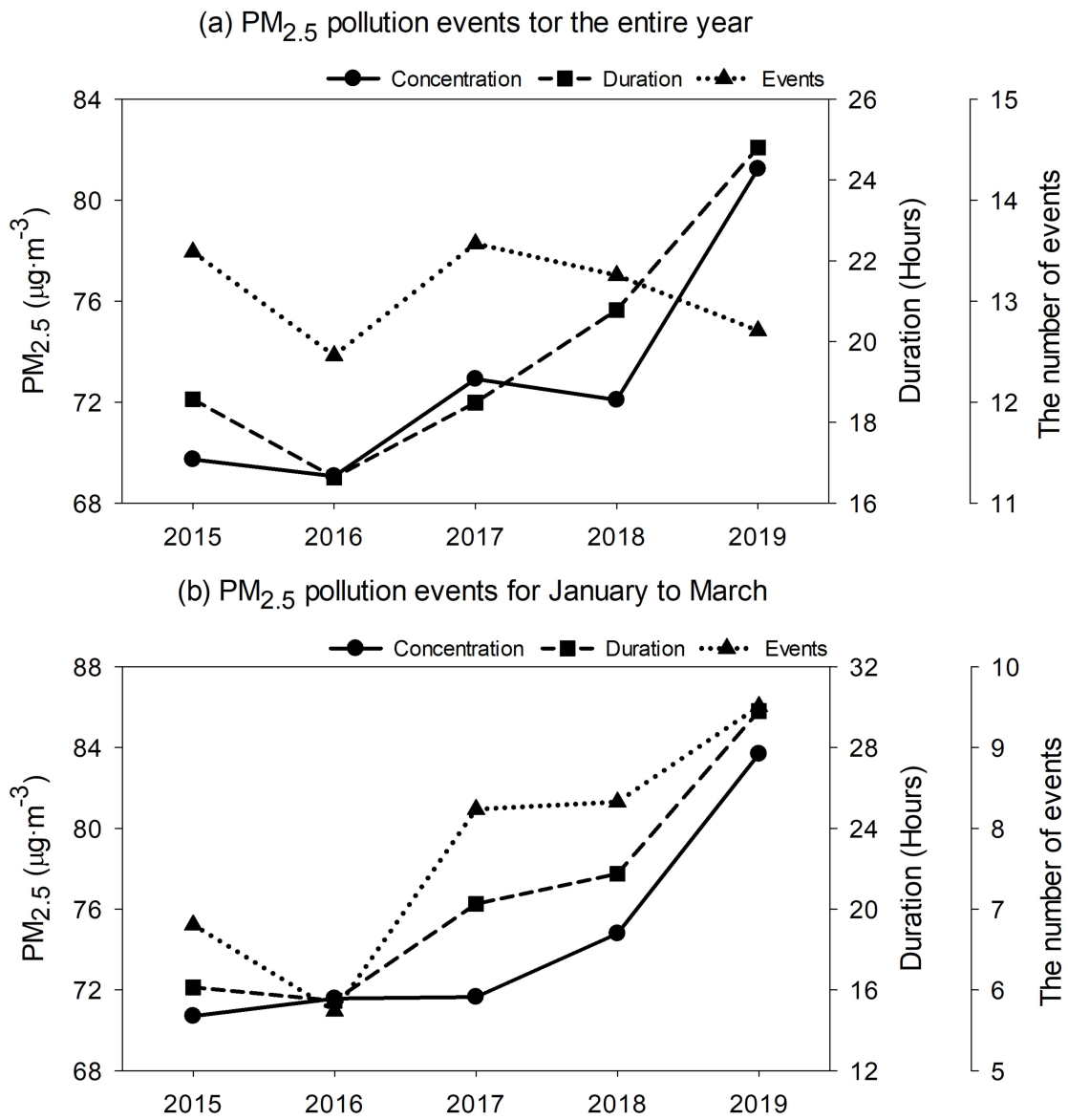


그림 21. (a) 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 연평균 농도(원), 지속시간(네모), 사례 수(세모), (b) 겨울철(1-3월) 고농도 사례의 연평균 농도, 지속시간, 사례 수

## (2) 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화율

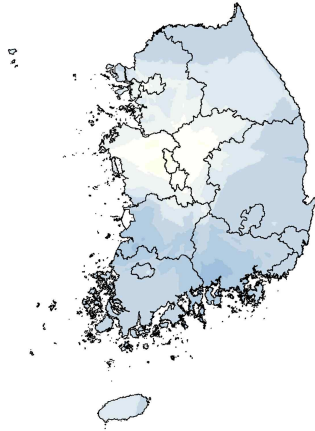
PM<sub>2.5</sub> 농도 변동의 공간적인 분포를 알아보기 위해 해당 기간 측정소별 PM<sub>2.5</sub> 농도의 선형 회귀선을 구한 뒤, 선형 회귀선의 기울기로부터 변화율을 산출하였다. 연평균 농도의 경우 자료가 3년 이상 존재하는 측정소만 분석에 사용하였으며, 공간적 분포를 확인하기 위해 EBK 방법을 이용하여 지도에 나타내었다.

연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 195개 중 145개 측정소(74%)에서 감소하는 추세를 보였다 (그림 22a). 충청권에서는 농도가 증가하는 추세를 나타냈는데, 충청권의 11개 측정소 중 9개 측정소가 증가 추세에 있었다. 겨울철(1-3월) 평균 농도는 183개 중 120개 측정소(66%)가 증가 추세를 보였고, 경남을 제외한 대부분 지역에서 증가하는 추세에 있었다 (그림 22b). 특히, 연평균 증가율에서 증가 추세를 보였던 충남을 중심으로 더욱 확장된 분포를 보였다.

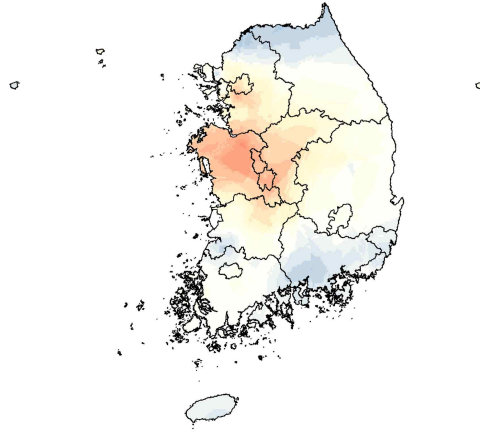
연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 대부분 지역에서 감소하였지만 (그림 22a), 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 평균 농도는 한국 내 서부지역과 강원권에서 뚜렷한 증가를 나타냈다 (그림 22c). 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 평균 농도는 분석에 사용된 234개 중 145개 측정소(86%)에서 증가 추세에 있었다. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 평균 농도는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례가 빈번했던 겨울철(1-3월)에는 더욱 심하게 증가하였다 (그림 22d). 겨울철 PM<sub>2.5</sub> 고농도 사례 평균 농도는 199개 중 167개 측정소(83%)에서 증가 추세에 있었다.



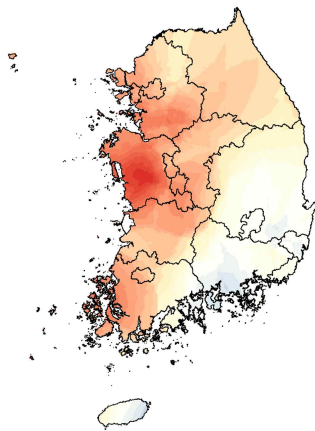
(a) Annual average



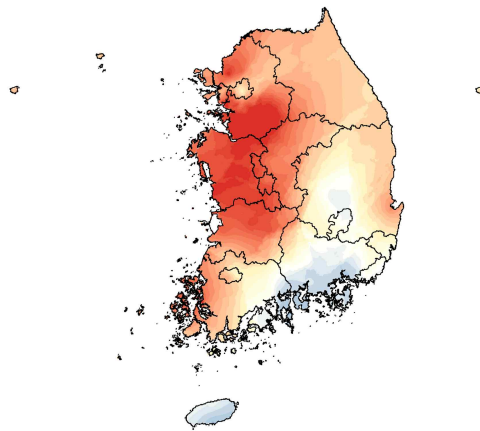
(b) Average for Jan. to Mar.



(c) High PM<sub>2.5</sub> events



(d) Events for Jan. to Mar.



Concentration changing rate ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{yr}^{-1}$ )



그림 22. (a) 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화율 분포, (b) 겨울철(1-3월) 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화율 분포, (c) 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 연평균 농도 변화율 분포, (d) 겨울철(1-3월) 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 연평균 농도 변화율 분포

#### 다. 연도별 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub> 배출량

앞서 연평균 농도와 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 연평균 농도 변화율을 통해 지역별로 농도 변동이 있음을 확인할 수 있었다. PM<sub>2.5</sub>의 성장에는 산업활동이나 연료 연소에 의한 직접 배출의 영향도 있어 지역 특성에 따라 PM<sub>2.5</sub> 농도의 변동이 다를 수 있다. 한국은 대기환경정책 수립, 대기질 예보 등을 위해 8가지 국가 대기오염물질(CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, VOC, NH<sub>3</sub>)의 배출량을 매년 산정하여 지자체 단위 배출량으로 제공하고 있다. 8가지 대기오염물질 중 PM<sub>2.5</sub>의 생성과 성장에 큰 영향을 미치는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>와 PM<sub>2.5</sub>의 시도별 배출량 자료를 수집하여 분석하였다. PM<sub>2.5</sub> 배출량은 2020년 기준으로 2017년까지의 자료가 제공되어 있으므로 2015-2017년까지의 배출량 자료를 수집하였다.

연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 증가 추세에 있었던 충남은 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub> 배출량에서 매년 상위권에 있었다 (표 2). PM<sub>2.5</sub>를 생성하는 전구물질인 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 배출량은 각각 2위, 1위였고, PM<sub>2.5</sub> 배출량은 2015년 3위, 2016년과 2017년에는 2위에 있었다. 디젤 차량의 연료 연소가 주요 배출 원인으로 알려진 NO<sub>x</sub>는 경기도에서 매년 가장 많은 양이 배출되었고, 생산 공정이나 에너지산업 연소가 주요 배출 원인으로 알려진 SO<sub>x</sub>는 충남에서 매년 가장 많은 양이 배출되었다.

충남은 매년 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 배출량이 상위권에 있지만, 2017년 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 최대 농도 평균이 다른 지역에 비해 낮았다. 경북은 매년 PM<sub>2.5</sub> 배출량이 가장 많았음에도 불구하고 2016년 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 최대 농도는 다른 지역에 비해 낮았다. 강원도는 2017년 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 최대 농도가 다른 지역에 비해 월등히 높았지만, 배출량 상위에는 속하지 않았다. 배출량과 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 농도 분포가 서로 맞지 않는 것은 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례가 지역 배출의 영향보다는 다른 요인(기상 요소)에 의해 주도될 가능성이 있다는 것을 의미한다.

표 2. 시도별 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub> 배출량 순위

(단위: 톤)

오염물질	2015			2016			2017		
	순위	시도	배출량 (%)	순위	시도	배출량 (%)	순위	시도	배출량 (%)
NO <sub>x</sub>	1	경기도	185,176 (17.2%)	1	경기도	203,655 (17.6%)	1	경기도	184,239 (16.8%)
	2	충청남도	135,487 (12.6%)	2	충청남도	134,889 (11.6%)	2	충청남도	112,876 (10.3%)
	3	전라남도	104,037 (9.7%)	3	경상북도	109,746 (9.5%)	3	전라남도	103,750 (9.4%)
SO <sub>x</sub>	1	충청남도	77,465 (22.6%)	1	충청남도	81,843 (23.6%)	1	충청남도	69,905 (23.0%)
	2	전라남도	64,649 (18.9%)	2	전라남도	62,171 (17.9%)	2	전라남도	56,844 (18.7%)
	3	울산광역시	47,979 (14.0%)	3	울산광역시	49,214 (14.2%)	3	울산광역시	46,018 (15.1%)
PM <sub>2.5</sub>	1	경상북도	21,255 (22.2%)	1	경상북도	22,670 (23.3%)	1	경상북도	19,738 (22.3%)
	2	전라남도	16,140 (16.8%)	2	충청남도	18,822 (19.4%)	2	충청남도	16,021 (18.1%)
	3	충청남도	13,845 (14.4%)	3	전라남도	13,613 (14.0%)	3	전라남도	11,272 (12.7%)

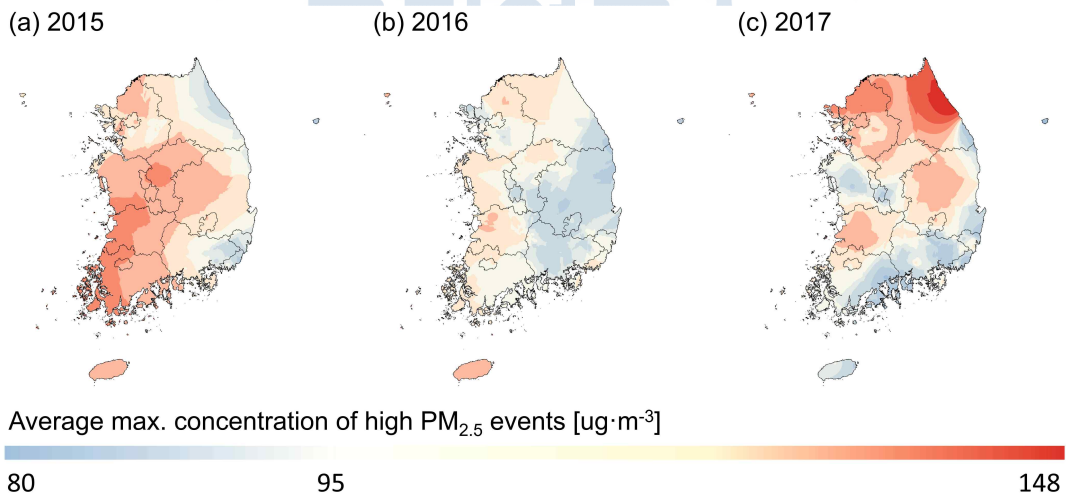


그림 23. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 최대 농도 평균. (a) 2015년, (b) 2016년, (c) 2017년

### 3. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 오염 패턴

가. 시계열 통계 분석: COD, R, Time-lag

PM<sub>2.5</sub> 고농도 사례의 시공간적 변동 패턴 분석을 위해 Time-lag correlation, Coefficient of Divergence(COD), Pearson correlation coefficient(R)의 3가지 시계열 통계 분석을 이용하여 변동을 나타내는 계수를 구하였다.

Time-lag correlation은 서로 다른 두 농도 시계열의 시간 지연을 산출하는 방법으로 측정소별 고농도 발생의 시간 차이를 계산하기 위해 사용되었다. 우선, 하나의 농도 시계열을 고정하고 다른 하나의 시계열을 단위시간만큼 옮기면서 상관계수를 반복 계산한다. 기준 시계열과 시간 보정된 시계열이 최적의 상관계수를 가질 때 처음의 위치로부터 이동한 시간을 지연 시간으로 산출한다. Time-lag을 구하는 식은 다음과 같다 (식 1).

$$r = \frac{1}{N\sigma_a\sigma_b} \int_{t_0}^{t_0+N} (a(t) - \bar{a})(b(t+\tau) - \bar{b}) dt \quad \text{식 (1)}$$

여기서  $a$ 와  $b$ 는 동시에 측정된 농도 시계열,  $t$ 는 시간( $t_0$ 는 초기 시간),  $\tau$ 는 시계열  $b$ 에 보정된 시간,  $\sigma$ 는 두 시계열  $a, b$ 의 표준편차,  $N$ 은 데이터 포인트 수,  $r$ 은 두 시계열  $a, b$ 의 상관 계수,  $\bar{a}, \bar{b}$ 는 각각 시계열  $a$ 와  $b$ 의 평균을 의미한다 (Choi et al., 2012).

Coefficient of divergence(COD)는 공간적 비균질성을 정량화하는 계수로 서로 다른 장소에서 측정된 두 농도 측정값의 유사성을 나타낸다. 두 농도 시계열의 각 측정값이 유사하면 0에 가까워지고, 반대로 측정값이 다르면 1에 가까워진다. 두 농도 시계열이 완전히 일치할 경우 COD는 0이다. COD를 구하는 식은 다음과 같다 (식 2).

$$COD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{a_n - b_n}{a_n + b_n} \right)^2} \quad \text{식 (2)}$$

$a_n, b_n$ 은 각각  $a$ 와  $b$  시계열의  $n$ 번째 농도 측정값,  $N$ 은 측정 개수를 의미한다 (Pinto et al., 2004; Wongphatarakul et al., 1998). PM의 공간적 비균질성을 분석한 많은 선행연구에서

COD의 기준점을 0.2로 설정하고 COD가 0.2보다 크면 비균질, 작으면 균질한 농도 분포를 나타내는 것으로 정의하였다 (Krudysz et al., 2009; Moore et al., 2009; Turner and Allen, 2008; Wilson et al., 2005). 그러나 COD는 비교할 두 관측소의 농도 변화가 같더라도 절대적인 농도 규모의 차이가 있을 때 비균질성이 커질 수 있다. 농도 변동이 같은 두 시계열 중 하나의 시계열의 농도 규모를 조정하였을 때(임의의 배수를 곱하여 농도를 증가시키거나 감소시켰을 때) 원래의 시계열보다 농도가 33% 낮아지거나 50% 높아지면 두 시계열의 COD 값은 0.2보다 커지는 것으로 나타났다 (그림 24). Pinto et al. (2004)의 PM<sub>2.5</sub> 농도의 공간 비균질성을 비교한 연구에서도 미국의 3개 대도시(Columbia, Detroit, Chicago)에서 일평균 PM<sub>2.5</sub> 농도의 상관관계수가 0.9 이상임에도 불구하고 두 지역 사이의 절대 농도 차이에 의해 COD 값이 증가하였음을 보였다. 이는 COD만으로 균질성을 판단하는 것에는 다소 무리가 있음을 나타낸다. 따라서 우리는 농도 규모와 상관없이 시계열의 유사성을 나타내는 Pearson correlation coefficient(R)를 함께 비교하여 COD가 0.2보다 작고 R이 0.7보다 높은 지역을 공간적으로 균질한 지역으로 판단하였다. Pearson correlation coefficient(R)를 구하는 식은 다음과 같다 (식 3).

Pearson correlation coefficient(R)는 교차곱 형태의 통계량으로 두 변수 x,y 사이의 상관관계 정도를 나타내는 변수이다. Pearson correlation coefficient를 구하는 식은 다음과 같다 (식 3).

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N (a_n - \bar{a})(b_n - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (a_n - \bar{a})^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (b_n - \bar{b})^2}} \quad \text{식 (3)}$$

$a_n$ ,  $b_n$ 은 각각  $a$ 와  $b$  시계열의  $n$ 번째 농도 측정값,  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ 는 각 시계열의 평균값,  $N$ 은 측정 개수를 의미한다. 상관관계수(R)의 값은 -1에서 +1 사이의 범위에 있다. 상관관계수의 절대값의 크기는 선형관계에 가까운 정도를 나타내고 부호는 선형관계의 방향을 나타낸다. 값이 -1이면 완벽한 음의 상관관계를 뜻하며, 값이 +1이면 완벽한 양의 상관관계를 의미한다. 값이 0이면 상관관계가 없음을 나타낸다.

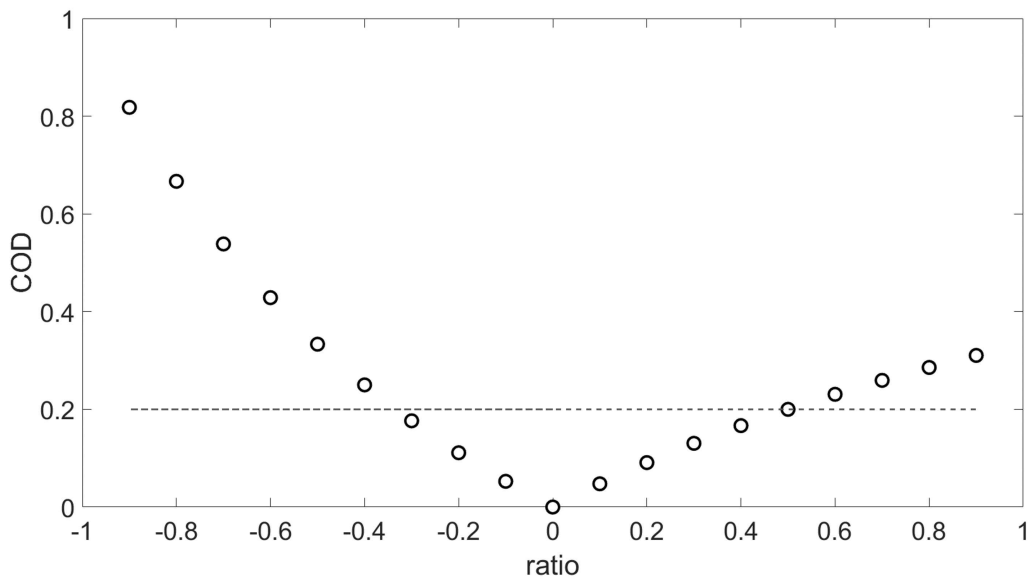


그림 24. 농도 규모에 따른 COD 변화



#### 나. 기준 지역 선정

시간적, 공간적으로 변동하는 PM<sub>2.5</sub> 농도를 하나의 고정된 오염 패턴으로 나타내기 위해서는 시공간의 기준이 되는 지역을 선정하여야 한다. 본 연구에서는 서울 지역 25개 AQMS의 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도를 오염 분포의 기준점으로 설정하였다 (그림 19). 서울은 인구밀도가 가장 높고, 서북부에 위치하여 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례가 많은 겨울철 북서풍의 영향을 다른 지역들보다 일찍 받는다. 따라서 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 발생 초기에 공기의 흐름이 먼저 도달하여 다른 지역으로 흐를 것으로 예상하였다. 또한, 2015년 1월부터 PM<sub>2.5</sub> 농도 자료를 제공하여 전국에서 가장 많은 자료를 확보할 수 있다. 마지막으로, 2015년부터 2019년까지 서울 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도와 서울 지역 측정소 사이의 계절별 COD가 대부분 측정소에서 공간적으로 균질하였고 (COD<0.2, 표 3), 이는 서울 지역 측정소 사이의 농도 변동과 규모가 서울 평균과 비슷하다는 것을 의미한다. 따라서 서울 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 서울 지역 내의 측정소들을 대표할 수 있다고 판단하였고, 서울 평균을 고농도 PM<sub>2.5</sub> 오염 패턴 분석의 기준 지역으로 선정하였다.

서울 지역 측정소의 2015년부터 2019년까지 PM<sub>2.5</sub> 연평균 농도는 22.8 - 26.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 뚜렷한 차이를 보이지 않았다 (그림 25). 겨울철 (12-3월) 평균 농도는 연평균 농도보다 높은 농도를 보였지만, 뚜렷한 변동은 없었다 (27.7 - 35.3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 연도별 겨울철 농도의 하위 10% 값을 배경농도라고 가정하였을 때, 연도별로 차이를 보였지만, 4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  이내였다. 하지만 상위 10% 농도 평균값을 비교해보았을 때, 19  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{yr}^{-1}$  비율로 증가 추세에 있었다 (그림 25).

서울 겨울철 평균 농도는 전국 겨울철 평균 농도보다 높은 비율로 증가하였을 뿐만 아니라 (3.9  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{yr}^{-1}$  vs 2.9  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{yr}^{-1}$ ) 고농도 지속시간과 사례 수도 증가하였다 (그림 26).

표 3. 서울 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도와 비교한 서울 지역 측정소의 계절별 COD 범위와 공간적으로 균질한 (COD<0.2) 측정소 비율

	Spring (4-5)	Summer (6-8)	Fall (9-11)	Winter (12-3)
COD (Avg.)	0.11-0.19 (0.14)	0.12-0.20 (0.16)	0.11-0.22 (0.16)	0.10-0.16 (0.13)
% of station (COD<0.2)	100%	96%	88%	100%

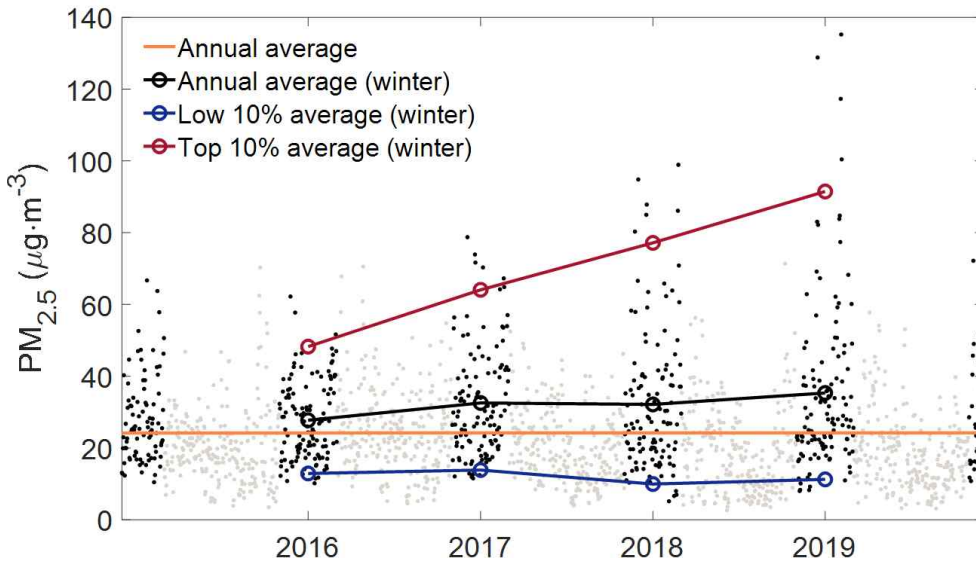


그림 25. 회색 점은 2015년 12월부터 2019년 12월까지 PM<sub>2.5</sub> 일평균 농도이고, 검은색 점은 겨울철 PM<sub>2.5</sub> 일평균 농도(12-3월). 주황색 선은 연평균의 추세선이고(기울기=0.01), 검은색 선은 겨울철 PM<sub>2.5</sub> 농도의 평균값이며, 파란색 선은 겨울철 PM<sub>2.5</sub> 농도의 하위 10% 농도 평균값, 빨간색 선은 상위 10% 농도 평균값



Annual high PM<sub>2.5</sub> events average for Seoul

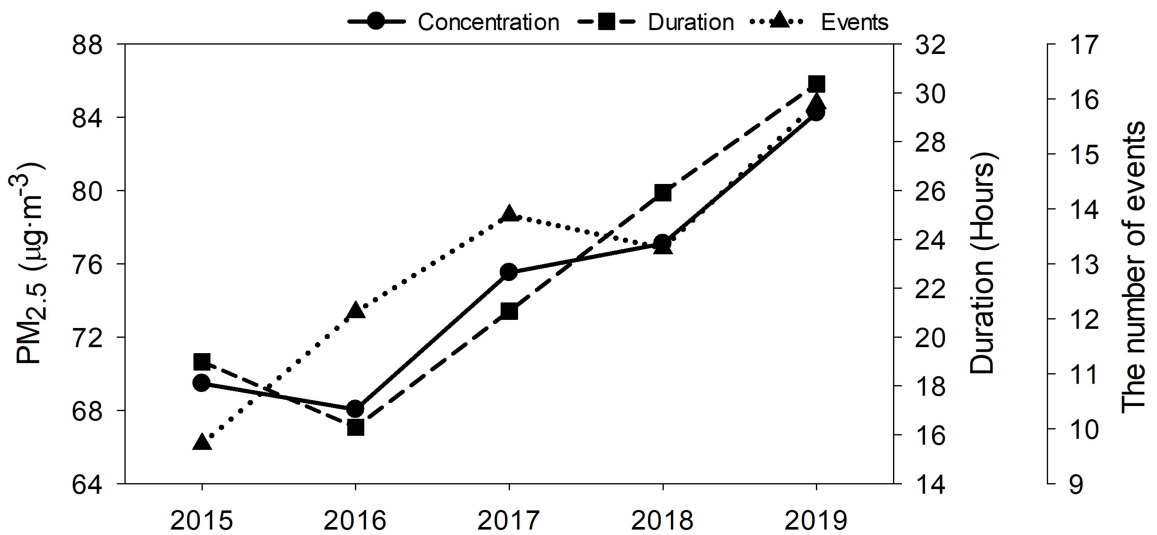


그림 26. 서울 지역 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 연평균 농도(원), 지속시간(네모), 사례 수(세모)



## 다. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 오염 패턴

### (1) COD, R 패턴

고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례가 발생 시의 오염 패턴을 확인하기 위해 서울 지역의 평균 농도가 고농도에 속한 기간을 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례로 선정하였다. 이 기간의 서울 평균 농도를 전국 측정소의 농도 자료와 각각 비교하여 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례에 대한 COD를 산출하였다. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례별 COD를 EBK 방법을 이용하여 연속적인 오염 분포를 그렸고, 총 3개의 주요 패턴을 찾을 수 있었다. 각 대표 패턴에 속한 사례들의 COD를 평균하여 3개의 대표 오염 패턴으로 나타냈다(Case I-III).

2015년부터 2019년까지 서울 지역에는 총 40번의 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례가 발생하였다. 각 사례에 대한 COD의 공간 분포는 3가지 대표 패턴(Case I, Case II, Case III)으로 분류할 수 있었다. 분류된 패턴 Case I, Case II, Case III는 각각 13개(32.5%), 12개(30.0%), 7개(17.5%)의 사례를 대표한다. 분류되지 않은 8개(20%)의 사례는 분석에 이용된 측정소의 개수가 부족하거나 대표 패턴과의 유사성이 다소 떨어져 제외하였다.

Case I은 한국 내 서쪽 지역에서 공간적으로 균질(COD<0.2)하고 남동쪽으로 갈수록 비균질해지는 분포를 보였다 (그림 27a). 공간적으로 균질한 서쪽 지역은 강한 양의 상관관계(R>0.7)를 나타냈고 남동쪽으로 갈수록 상관관계가 약해졌다 (그림 27d). Case I에 속한 13개의 사례 중 9개의 사례가 2019년에 발생하였고, 12개의 사례가 겨울철인 12-4월에 발생하였다. 2019년은 Case I에 속한 사례가 많았던 해로 (그림 28), Case I의 오염 패턴이 최근 들어 집중적으로 발생한 고농도 사례를 대표하는 패턴일 가능성이 있다.

Case II는 서울과 경기 지역 부근에서 공간적 균질성(COD<0.2)과 강한 양의 농도 상관관계(R>0.7)를 보였다 (그림 27b, 27e). Case II의 사례는 주로 겨울철에 발생하였지만, 6월과 11월에 발생한 사례도 Case II에 포함되었다 (그림 28). 오염 분포의 범위가 경기 지역에 한정되어있는 것과 계절과 관계없이 발생하는 것은 안정된 대기 조건에서 고농도가 해소되지 못하고 지역 배출의 영향과 더불어 PM<sub>2.5</sub>가 축적되었기 때문일 가능성이 있다.

Case III는 북쪽에서 공간적으로 균질한 분포(COD<0.2, R>0.7)를 보였고, 이는 남쪽으로 갈수록 비균질해졌다 (그림 27c, 27f). Case III의 사례들은 매년 1-2회, 12-3월에 발생했기 때문에 겨울과 봄에 발생하는 일반적인 고농도 오염 패턴을 나타내는 것으로 생각해볼 수 있다 (그림 28).

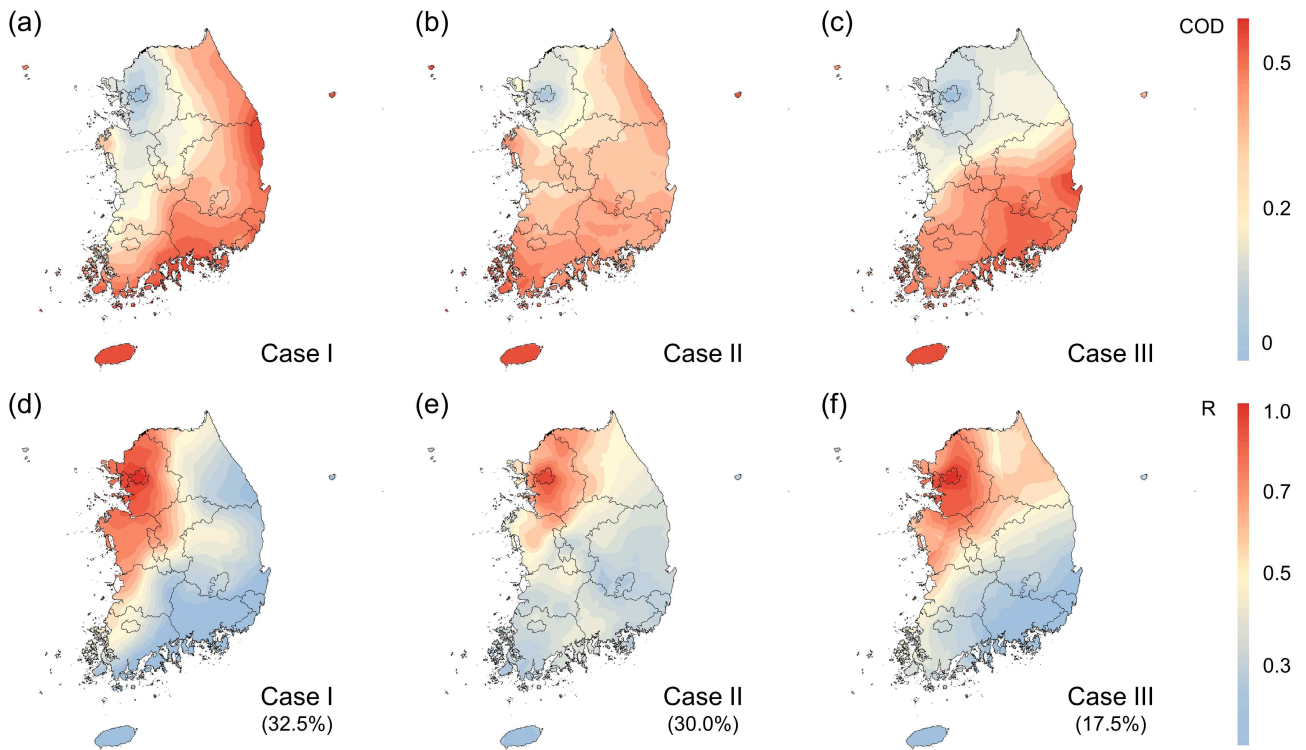
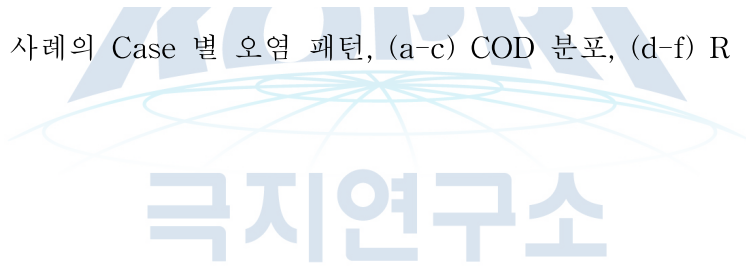


그림 27. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 Case 별 오염 패턴, (a-c) COD 분포, (d-f) R 분포



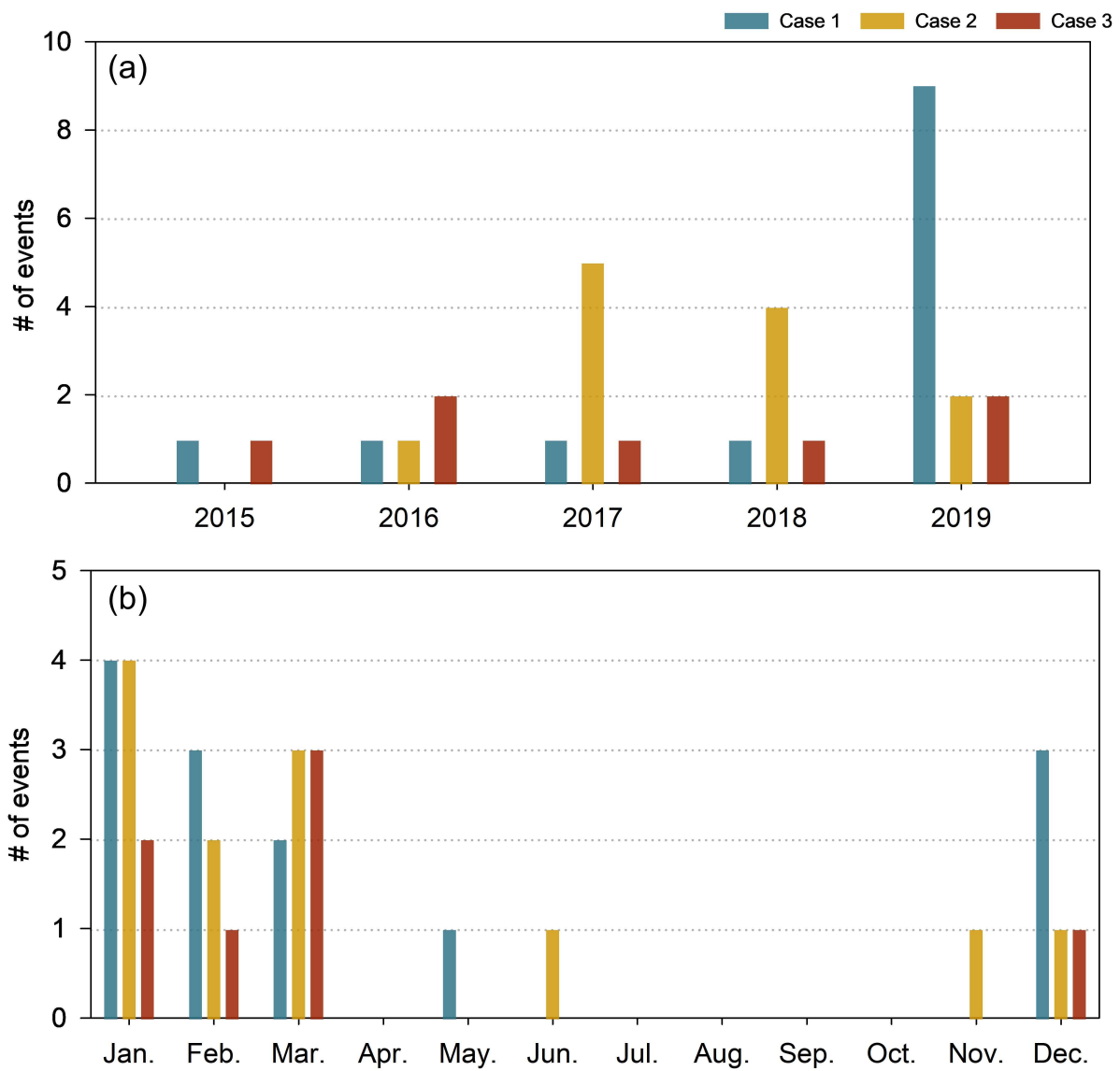


그림 28. Case 별 고농도 PM<sub>2.5</sub> 오염 사례 수. (a) 연간 사례 수, (b) 월별 사례 수

## (2) time-lag 패턴

기준 지역(서울)과 다른 측정소 사이의  $PM_{2.5}$  농도 시계열 시간 지연은 여러 기상학적 요인(예: 대기 정체 지속, 종관 규모 기상의 이동 시간 등)이 시간적, 공간적 변동성에 크게 작용한다. 각 대표 오염 패턴에 속하는 사례의 수가 적기 때문에 평균 시간 지연은 극한값을 갖는 일부 사례에 의해 크게 달라질 수 있다. 이러한 영향을 고려하여 관측소마다 상위 및 하위 25%에 속하는 시간 지연 값은 평균에서 제외하였다.

각 사례의 시간 지연은 그림 29에서의 COD, R 패턴과 유사한 패턴을 보였다. Case I의 경우 서울 지역으로부터 남동쪽으로 멀어질수록 시간 지연이 증가하였다. Case II의 경우, 경북지역을 중심으로 양의 시간 지연을 보였는데, 시간 지연이 흐름이 뚜렷하게 나타나지 않았다. Case III의 경우 남쪽으로 갈수록 시간 지연이 증가하였다.

시간 지연의 분포 패턴은 Kim et al. (2016)의 수도권  $PM_{10}$  오염 사례의 종관 기상패턴을 분석한 연구결과와 일치한다. Kim et al. (2016)의 연구에서는 수도권  $PM_{10}$  오염 사례를 3가지 종관 기상패턴(Type 1-3)으로 분류하였다. Type 1 기상패턴은 시베리아 고기압의 확장하여 중국 동부나 서해상에 고기압이 위치하여 있을 때 발생하는 고농도 사례로, 중국 동부해안과 북부 지역으로부터 발생한 오염물질이 강한 서풍을 타고 수송되어 국내에 영향을 미치는 패턴이다 (그림 29a). 본 연구에서 Case I로 분류한 시간 지연과 공간적(COD), 시간적(R) 변화도 같은 방향성(북서에서 남동)을 갖는다는 점에서 선행연구와 일치한다. Type 2는 북쪽(또는 북서쪽)에서 내려오는 한랭전선이 통과하면서 오염물질을 밀어내면서 수송하는 특징이 있다 (그림 29b). 이는 Case III에서 나타난 남북 방향의 오염 패턴을 설명할 수 있는 패턴이다. Type 3는 중국 남부와 서해상에 자리 잡은 정체 고기압의 영향으로 오염물질이 정체되는 패턴이며 (그림 29c), 국내 대기 정체로 인한 고농도 사례를 나타내는 것으로 보이는 Case II의 오염 패턴과 유사하다. 선행 연구의 결과와 많은 부분이 일치한다는 점에서 COD, R, time-lag 분포 패턴이 종관 기상패턴의 영향이 컸을 것으로 생각된다.

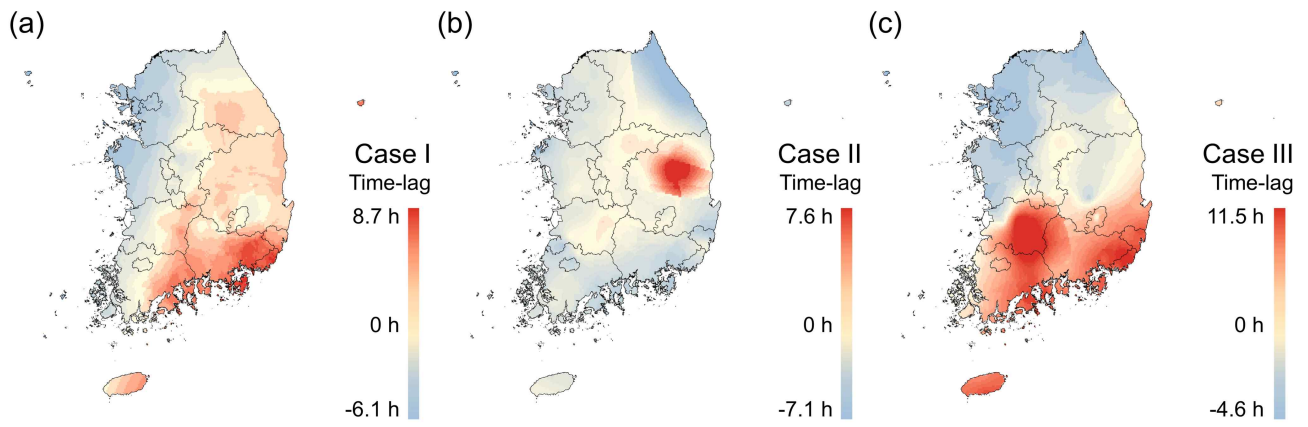


그림 29. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 Case 별 time-lag 분포



### (3) time-adjusted COD and R

COD와 R로 나타내어진 오염 분포는 시공간 변동성을 고정된 시간에서만 보여줄 수 있다. 서로 다른 지역의 고농도 사례가 같은 기작 (종관 기상)에 의해 발생하여도 수송 시간, 풍상 지역으로부터의 이류, 경계층 위쪽으로의 수송 등과 같은 지역적인 원인으로 인해 측정소마다 고농도 사례의 발생 시간이 다를 수 있다. 농도의 시간 지연이 있을 때는 COD와 R의 오염 분포로부터 시공간 균질성에 대한 정확한 정보를 얻을 수 없다. 따라서 구해진 time-lag 값을 이용하여 측정소별 PM<sub>2.5</sub> 농도 시계열의 시간을 기준 지역(서울 농도 평균)에 맞추어 PM<sub>2.5</sub> 오염 분포의 시공간적 변동(time-adjusted COD, R)을 살펴보았다.

Case I와 III에서는 시간 보정 후 COD가 많은 지역에서 감소하여 공간적으로 균질한 범위가 더욱 넓어졌다 (그림 30a, 30c). Case II의 경우 많은 지역에서 시간 보정 후 COD가 감소하였지만, 시간 보정 전과 균질한 범위는 크게 차이 나지 않았다. 공간적으로 균질한(COD<0.2, R>0.7) 측정소의 수는 시간 보정 전과 비교하여 Case I은 11.9%, Case II는 2.9%, Case III는 6.3% 증가하였다 (표 4). COD가 전체적으로 감소하였음에도 COD가 0.2보다 작은 측정소의 수는 뚜렷하게 증가하지 않았다. 이는 측정소가 서울과 경기권에 집중되어 있어 경기권을 벗어난 지역에서의 공간적 균질성 증가는 경기권 내부에서보다 측정소 수에 상대적으로 큰 영향을 미치지 않기 때문이다 (그림 19). 또한, COD는 농도의 규모가 다를 때 큰 값을 가질 수 있으므로 지역 배출의 특성에 따라 공간적 비균질성이 증가하는 원인이 될 수 있다. 시간 보정 후 R 계수는 대부분 지역에서 강한 양의 상관관계를 나타냈다. Case I은 70.2%, Case II는 56.9%, Case III는 83.2%의 측정소에서 시간 보정 후의 R 계수가 0.7보다 컸다. 대부분 측정소에 대한 강한 양의 상관관계는 시계열의 농도가 규모에서는 차이가 있어도 변동은 비슷했음을 보여준다. 이러한 결과로부터 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 공통된 요인에 의해 영향을 받으며, 지역마다 고유의 배출 특성으로 인한 영향은 있지만, 가장 중요한 요인은 특징적인 종관 기상 패턴일 것으로 생각된다.

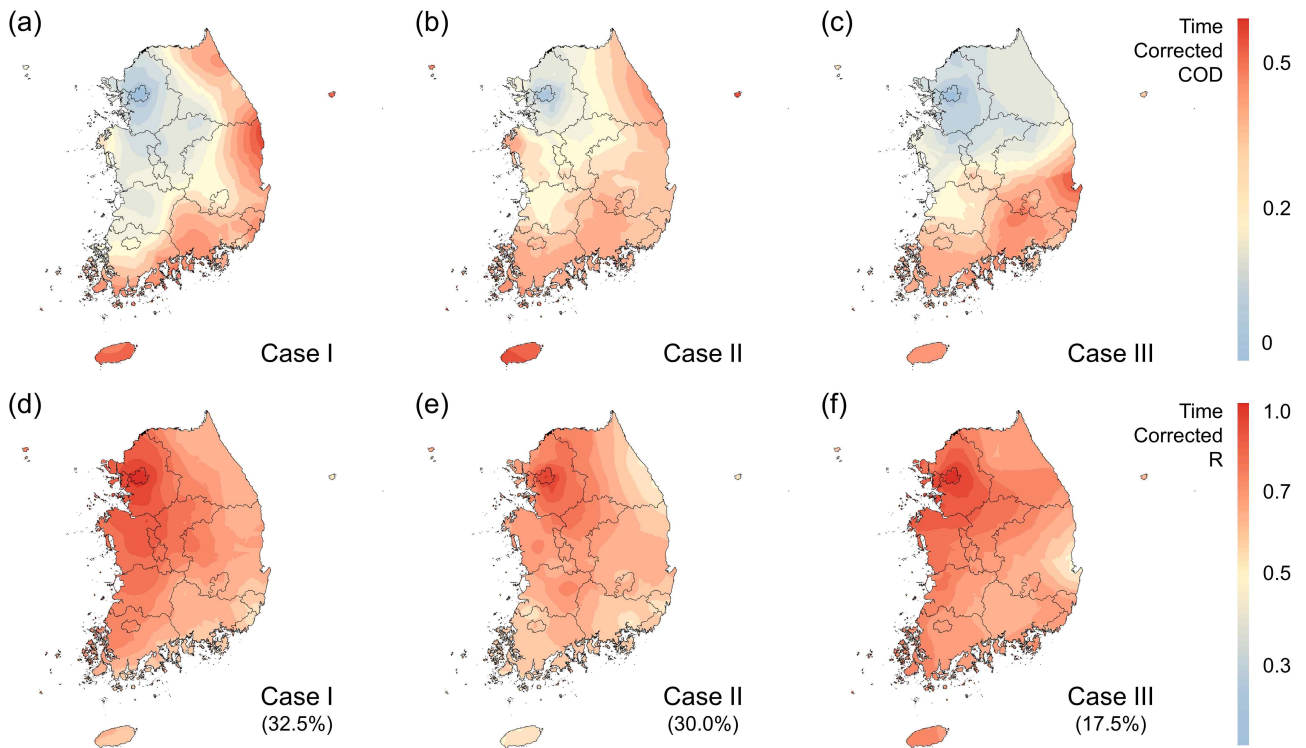


그림 30. 시간 보정한 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 Case 별 오염 패턴. (a-c) COD 분포, (d-f) R 분포



표 4. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 Case 별 COD, R, 시간 보정한 COD, 시간 보정한 R의 평균(표준편차)과 공간적으로 균질한(COD<0.2 또는 R>0.8) 측정소의 비율(%)

	Case I		Case II		Case III	
	mean (std.)	% of stations	mean (std.)	% of stations	mean (std.)	% of stations
COD	0.25 (0.10)	39.5	0.25 (0.08)	33.6	0.24 (0.11)	45.3
Time-lag adjusted COD	0.21 (0.09)	51.4	0.23 (0.08)	36.5	0.21 (0.09)	51.6
R	0.54 (0.35)	44.2	0.55 (0.25)	35.4	0.55 (0.37)	44.7
Time-lag adjusted R	0.80 (0.13)	70.2	0.74 (0.12)	56.9	0.81 (0.12)	83.2





#### 4. 종관 기상 분석

오염분포 분석을 통해 국내 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례는 동아시아의 특징적인 종관규모 기상패턴에 기인한 것이라 가정하였다. 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례에 해당하는 특징적인 종관 기상패턴을 찾아내는 것은 기상 시스템의 유기적인 움직임과 시공간적 변동을 고려해야 하므로 분석이 매우 까다롭다. 본 연구에서는 국내 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례일의 재분석 자료를 기후 자료(1989-2019)와 비교하여 기상 요소(기압, 온도, 바람 성분)의 분포를 찾고자 하였다. 재분석 자료란 지상 관측 기기, 라디오존데, 위성 등 다양한 관측 수단을 이용해 오랜 기간 쌓은 관측자료를 자료동화 방법과 수치모델로 다시 가공한 자료를 말한다. 고농도 사례의 여러 기상 요소의 분포가 평년과 비교하여 어떠한 특징을 보였는지 분석하였다.

##### 가. 종관 기상 분석 방법

동아시아의 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례에 대한 기후 분포를 확인하기 위해, 1.25° × 1.25°의 위도, 경도 해상도를 갖는 Japanese 55-year Reanalysis(JRA-55)의 재분석 자료로부터 일평균 지위고도, 온도, 바람(U, V, W 성분) 자료를 획득하였다(Harada et al.,2016; Kobayashi et al., 2015). JRA-55의 1989년부터 2019년까지 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례일의 기후값으로부터 해당 날짜의 기상 요소와의 아노말리를 계산하여 종관 기상 패턴을 분석하였다.

##### 나. 종관 기상 분석 내용

Case I의 경우, 중국 북동부 지역 대류권 상층과 중층(각각 500 hPa과 850 hPa)에 자리 잡은 저기압 아노말리의 영향으로 몽골 서부와 중국 북부 지역에서 강한 양의 풍속 아노말리가 존재하였다 (그림 31a, 31d). 한국 주변에서 300 hPa까지 높게 뻗은 양의 기온 아노말리와 상층으로부터 하강하는 기류의 흐름이 존재하였고 (125-135°E, 그림 31m), 음의 풍속 아노말리로부터 평년보다 지상 바람의 흐름이 정체되었음을 확인할 수 있다 (그림 31j). 이러한 조건들은 대기 중에 체류하는 오염물질의 흐름을 악화시키고 상층에서 흐르는 오염물질 하강 기류를 따라 지상에 축적되는 결과를 가져올 수 있다.

Case II의 경우, 한국과 중국 동부, 일본 서부까지 넓은 지역에 걸쳐 자리 잡은 고기압 아노말리의 영향으로 대류권 상층에서의 오염물질 유입이 차단되기 쉬운 조건이 형성되었다 (그림 31e, 31h). 지상에서부터 대류권 중층까지 음의 풍속 아노말리를 보여 평년보다 풍속이

약했고, 대류권 중층(500 hPa)까지 높게 뻗은 양의 온도 아노말리와 하강 기류는 한국 부근에 안정된 기층을 형성하였다 (115-130°E, 그림 31n). 이러한 대기 상태에서는 높은 고도에서 외부 오염물질의 유입이 차단되고 지상에서 배출된 오염물질이 축적되기 좋은 조건이 형성된다.

Case III의 경우, 대류권 상층 (500 hPa)의 기압 아노말리 분포는 Case I 패턴과 유사하지만 편차는 크지 않았다 (그림 31c). 중층(850 hPa)에서는 중국 동부와 한반도 북쪽에 널리 퍼진 저기압 아노말리와 태평양 서쪽 경계에 자리 잡은 고기압 아노말리가 대칭을 이루고 있으며, 상층의 분포보다 더욱 뚜렷한 편차를 보였다 (그림 31f). 고기압과 저기압 아노말리의 대칭으로 평년보다 큰 기압경도가 발생하였고, 이는 중국 남동부부터 한국까지 높은 고도에서 오염물질이 수송될 수 있는 강한 양의 풍속 아노말리를 형성하였다 (그림 31i). 또한, 지상에서부터 850 hPa 부근까지 뻗은 양의 온도 아노말리와 강한 하강 기류는 오염물질이 지상에 축적되기 좋은 조건을 만들었다 (125-135°E, 그림 31o).

가장 안정한 대기 상태에서의 고농도 사례를 대표하는 Case II의 경우, 동아시아의 넓은 범위에 걸쳐 지상(10 m)부터 대류권 상층(500 hPa)까지의 풍속이 평년보다 약하였다 (500 hPa에서는 하층보다 더 강한 음의 풍속 아노말리를 보였다; 그림 32b). Case I과 Case III에서는 지상 풍속은 평년보다 낮은 풍속을 나타냈지만, 대류권 중층(850 hPa)과 상층에서 평년보다 더 강한 풍속을 나타냈다 (그림 31g, 31i, 그림 32a, 32c). 이러한 결과로부터 높은 고도까지의 양의 온도 아노말리와 음의 풍속은 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례가 유발되는 중요한 대기 조건으로 보인다. Case I과 Case III의 경우, 상층의 양의 풍속 아노말리는 PM<sub>2.5</sub>를 수송하는 역할을 하였고, 이는 상층까지 뻗은 양의 온도 아노말리와 음의 지상 풍속 아노말리로 인해 PM<sub>2.5</sub>가 지상에 축적되어 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례를 유발했을 가능성이 있다.

추가로 Case 별 평균 해면 기압과 지상 바람 벡터를 이용하여 지상에서의 고농도 PM<sub>2.5</sub> 오염 패턴이 어떻게 결정되는지 살펴보았다 (그림 33). 모든 Case에서 내륙의 지상 바람은 약했다. Case I에서는 한국 서쪽에는 고기압, 동쪽에는 저기압이 자리 잡아 서고동저의 겨울철 기압 배치가 뚜렷하게 나타났다 (그림 33a). 이러한 기압 배치로 한국 주변은 고농도 PM<sub>2.5</sub> 기간 동안 북서풍의 영향을 주로 받았고, 서울에서부터 남동쪽으로 비균질해지는 오염 분포를 나타낸 것으로 보인다. Case II는 중국 동부에 자리 잡은 고기압이 동쪽으로 넓게 확장하면서 한국은 고기압 아래에서 안정적인 기층을 형성하였다 (그림 33b). 안정적인 기층에서의 약한 풍속으로 인해 지역 배출로 인한 PM<sub>2.5</sub> 오염이 쉽게 해소되지 않고 축적되어 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례가 발생한 것으로 보인다. Case III에서는 동해상에 자리 잡은 저기압이 반시계방향의 회전을 만들면서 한국에서 북에서 남으로 향하는 대기 흐름을 형성하였다 (그림 33c). 그 결과 서울에서 남쪽으로 갈수록 비균질해지는 오염 패턴을 나타낸 것으로 보인다.

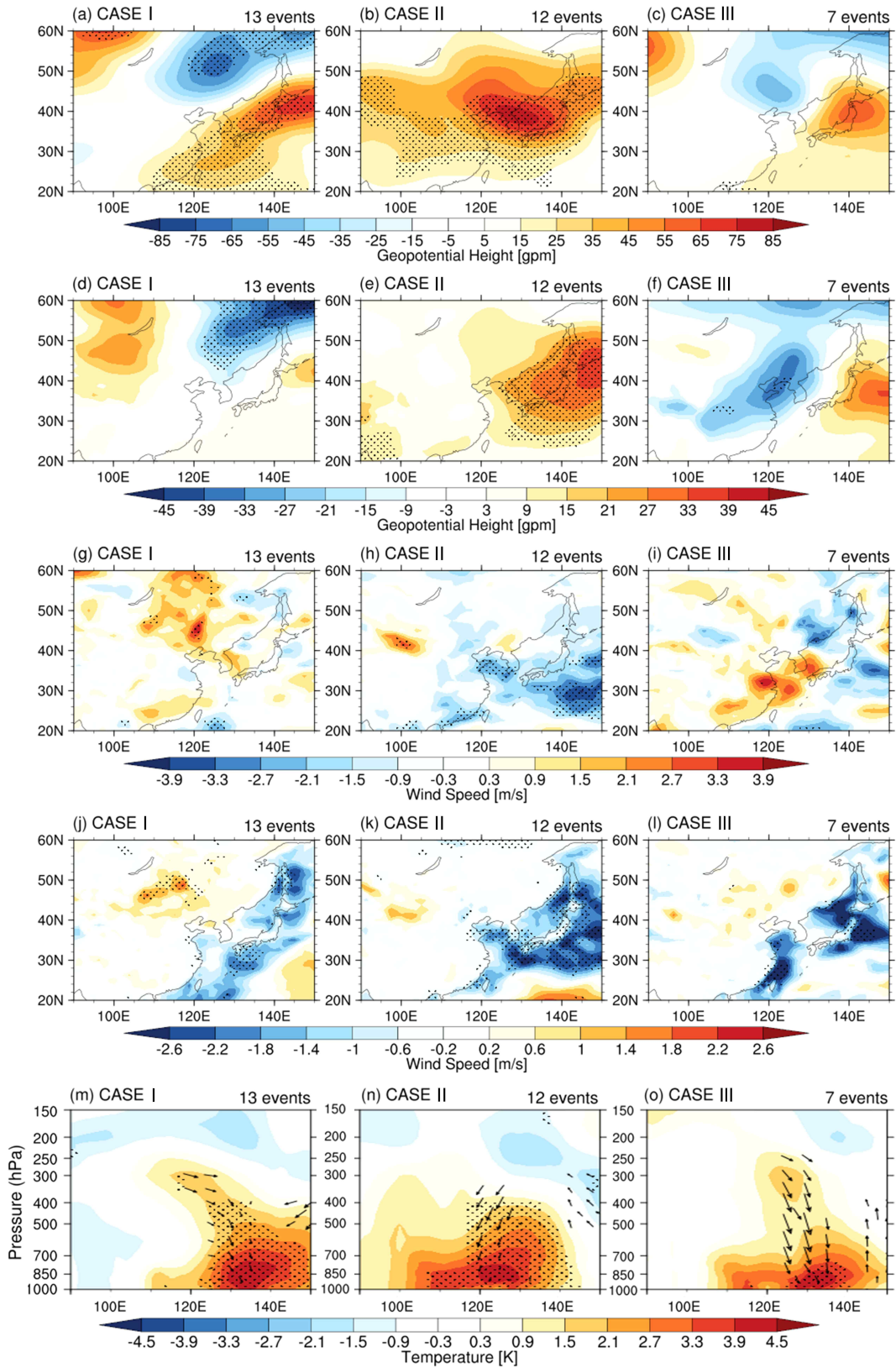


그림 31. 각 Case에 속하는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 아노말리 합성장. (a-c) 500 hPa 지위고도, (d-f) 850 hPa 지위고도, (g-i) 850 hPa 풍속, (j-l) 지상 10 m 풍속, (m-o) 연직 온도와 바람 벡터. 점으로 나타내어진 부분은 two tailed student's t-test의 95% 신뢰구간

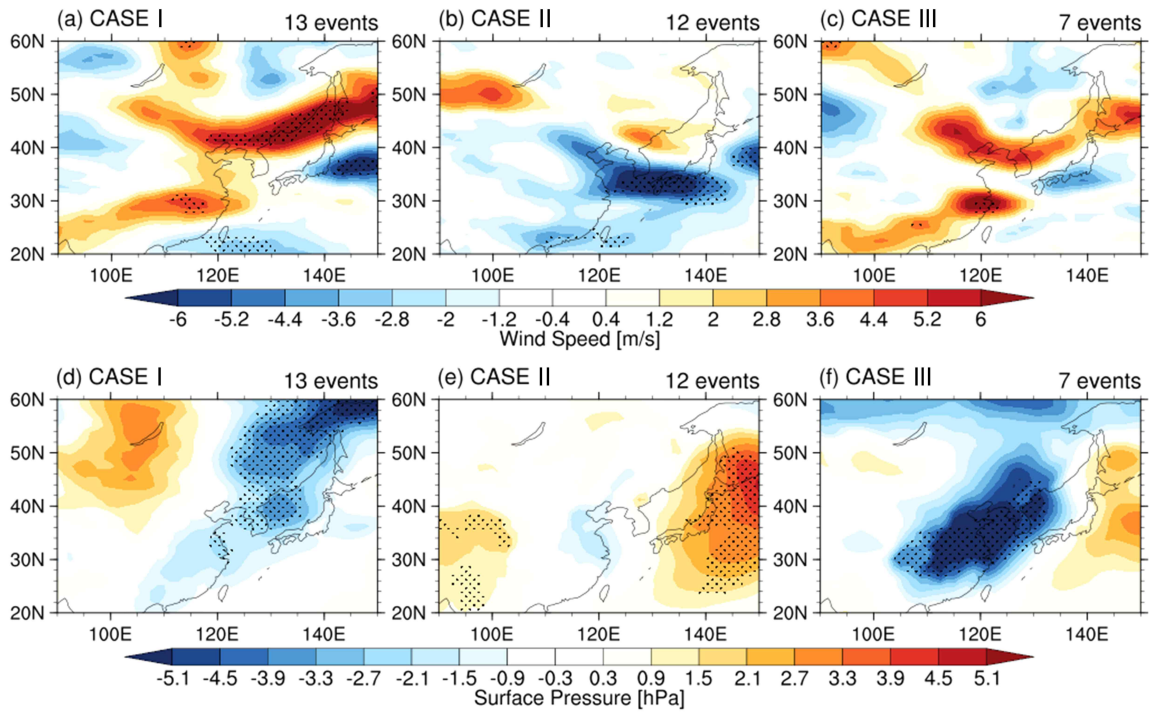


그림 32. 각 Case에 속하는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 아노말리 합성장. (a-c) 500 hPa 풍속, (d-f) 지상 기압

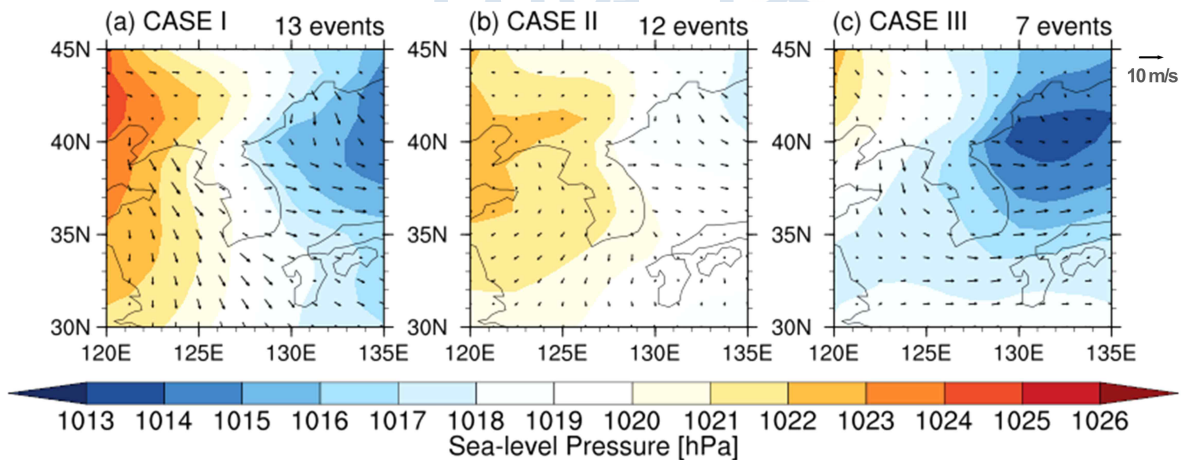


그림 33. 각 Case에 속하는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 평균 해면 기압과 지상 10 m 바람 벡터 합성장

# 제 3 절 북극 관련 동아시아 대기순환에 따른 고농도 미세먼지 발생의 이해 (대기질수치모델의 사례 연구를 중심으로)

## 1. 대기질수치모델 (WRF-CMAQ) 구축

### 가. 시스템 개요

화학수송모델(CTM, Chemical Transport Model)은 대기질의 변동을 모의하기 위해 고안된 수치방정식계로서, 오염원에서 배출된 대기오염물질이 연직안정도, 수평바람장 분포 등의 대기순환에 따라 확산/이류하고 대기화학반응에 의해 1차 오염물질이 2차 오염물질로 변화하는 과정을 다룬다 (그림 34). 현재 현업에서 사용되는 대기질모델로는 CAMx, CMAQ, WRF-Chem, CEOS-Chem 등이 있다. 본 연구에서는 최근 국내에서 현업 대기질 예보에 사용되는 CMAQ(Community Multiscale Air Quality Modeling System) 모델을 채택하였다. 대기질모델(CTM)을 사용하기 위해서는 기상자료 및 배출량 자료가 필요하다. 이를 위해 기상모형으로 WRF v3.7, 배출모형으로는 난징대학교에서 자체 개발한 CMAQ 배출량 자료처리 모듈을 이용하였다. 대기질모델의 초기자료(IC, Initial Condition)와 경계자료(Boundary Condition)는 CMAQ 모델에 내장되어 있는 기본자료를 사용하였다.

CMAQ 모델은 미국 환경보호국(EPA, United States Environmental Protection Agency)에서 개발한 대기질 모델로 고정된 격자계에서 정의되는 오일러리안(Eulerian) 연속방정식을 기준으로 각 격자에서 일어나는 물리/화학 과정을 계산하여 시간에 따른 화학종의 농도변화를 기술한다 (그림 35). CMAQ 모델 체계는 기상 및 배출량 자료의 전처리 과정과 초기 및 경계조건 처리 과정 등으로 구성된다. CMAQ 모델의 화학수송부분을 관장하는 메인모듈인 CCTM(CMAQ Chemical Transport Model)은 기상자료와 배출량 자료를 입력자료로 하여 오염물질의 이동, 확산, 화학반응 및 제거(침적) 과정을 계산한다. NCAR의 중규모 기상수치모델인 WRF를 이용하여 산출된 기상자료는 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) 모듈을 통해 CMAQ이 사용할 수 있는 입력자료 형태로 변환되며, JPROC은 광해리계수를 실시간으로 계산하는 과정으로 CMAQ 모델에 포함되어 있는 텍스트 형태의 광해리계수를 사용하는 것도 가능하다. 그리고 지표의 특성에 따른 초기 및 경계조건(화학종 농도)는 각각 ICON과 BCON 처리과정을 통해 CMAQ 모델의 입력자료로

변환된다 (그림 36).



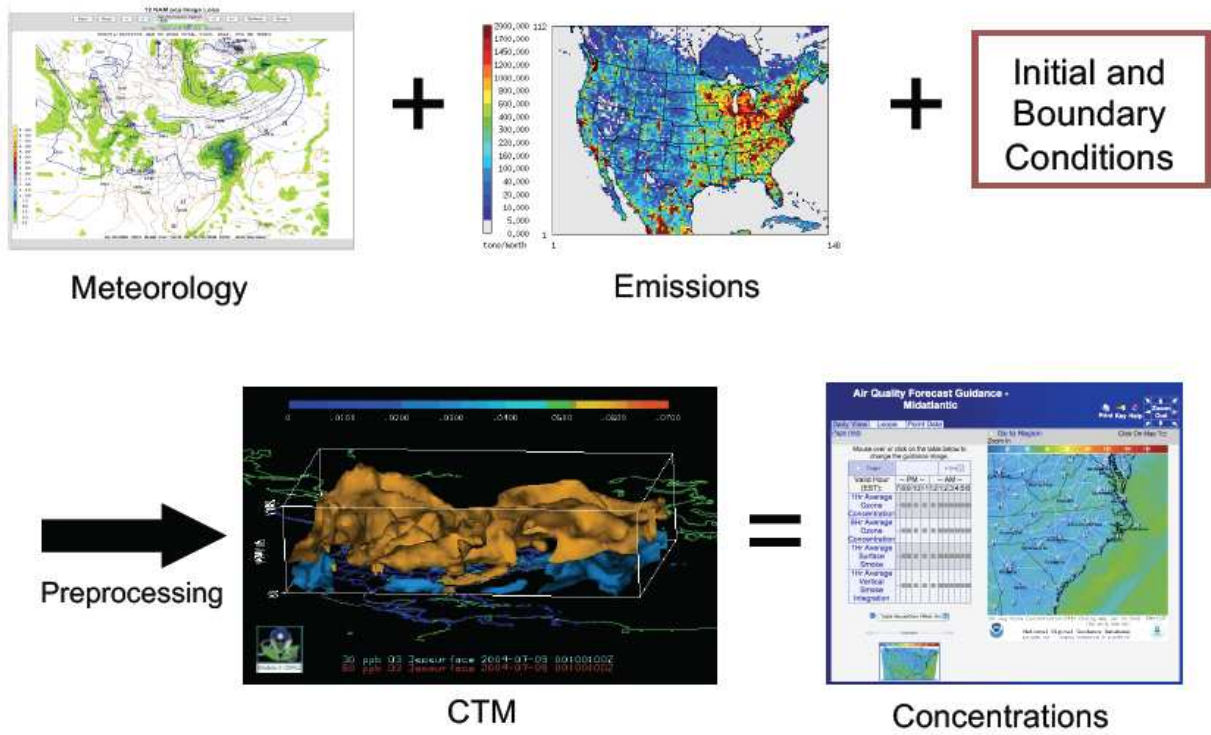
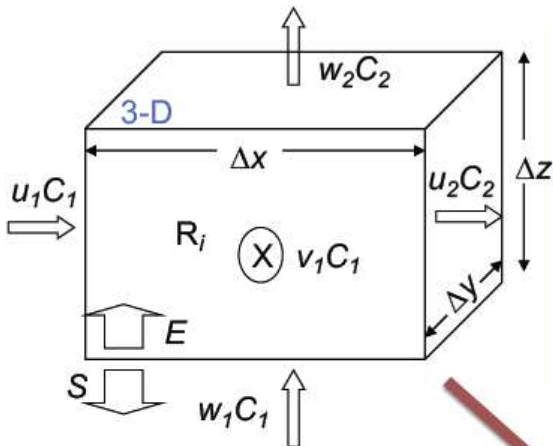


그림 34. 대기질 모델링 시스템의 구성





Expanded Continuity Equation Derivation:

Expand to flux or advection in 3-D:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial(uC)}{\partial x} - \frac{\partial(vC)}{\partial y} - \frac{\partial(wC)}{\partial z}$$

$$= -\nabla \cdot (vC) \quad (\text{flux divergence form})$$

Add additional production and loss terms:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (vC) = D \nabla^2 C + R + E - S$$

$u, v, w$  = wind vectors

$E$  = emissions

$S$  = loss processes

$R_i$  = Chemical formation of species  $i$

$D$  = Molecular diffusion coefficient

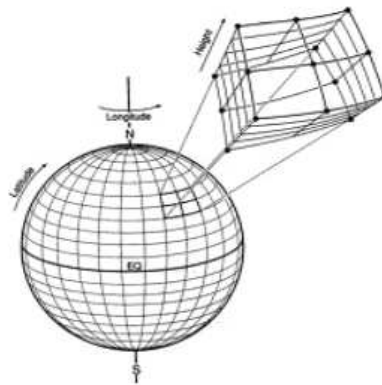


그림 35. 대기질 모델의 연속방정식

극지연구소



## CMAQ Modeling System

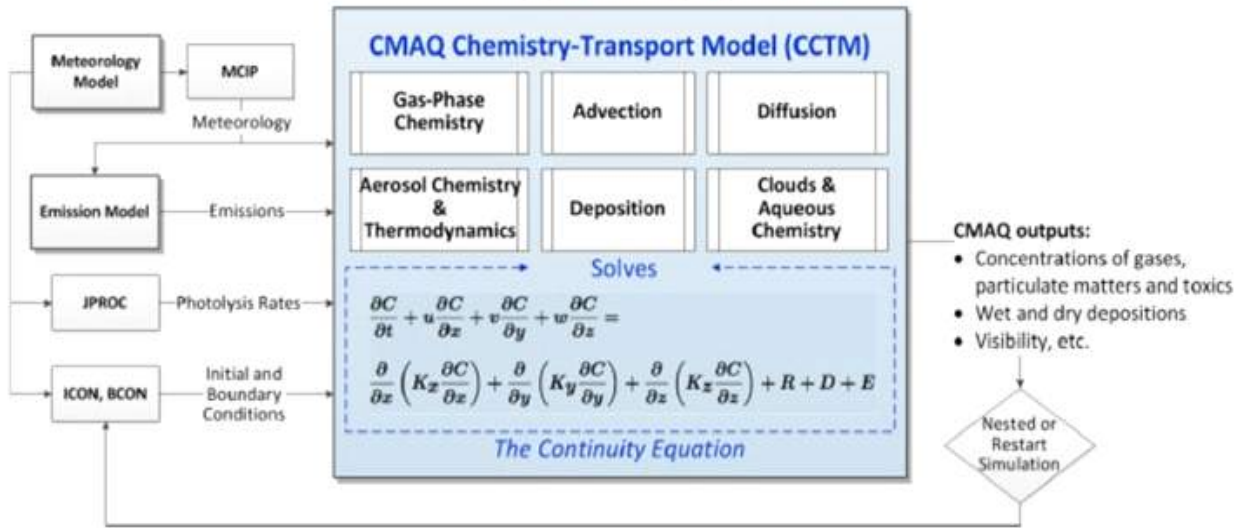


그림 36. CMAQ 모델의 구성



#### 나. 대기질수치모델 운용을 위한 기초자료 산출과 분석

대기질 모델링 시스템 운용을 위해서는 CMAQ 모델이 사용할 수 있는 형태의 배출량 자료 산출이 반드시 필요하다. 현재 국제적으로 제공되는 동아시아 배출량은 2000년대 후반의 상황을 반영하여 산출된 자료인데 반해 동아시아 배출량의 많은 부분을 차지하고 있는 중국배출량은 10년 전과 매우 다른 양상을 보이고 있다. 이에 본 연구에서는 중국의 난징대학교(NUIST, Nanjing Univ. of Information Science and Technology)와의 협업을 통해 2016년 기준의 동아시아 지역의 배출량 자료를 산출하여 대기질 모델 결과의 정확도 향상을 도모하였다.

CMAQ에서 사용되는 배출량 자료는 각국에서 발표하는 대기오염물질 배출량을 기준으로 작성된 배출목록(Emission Inventory)을 기준으로 산출된다. 배출목록이란 특정 지리적 영역 및 특정 시간 범위 내에서 대기 중으로 방출되는 오염물질을 산정하여 월/년단위로 기록한 자료로서 인간기원(농업, 공업, 거주, 내연기관 등), 식생, 산불 등을 총망라하여 다룬다 (그림 37).

본 연구에서는 인간기원의 배출목록으로 REAS2.1(Regional Emission Inventory in Asia)을 사용하였다 (그림 38). REAS2.1은 국립환경과학원의 CAPSS(Clean Air Policy Support System) 배출량 자료를 반영한 배출목록으로서 동아시아를 포함한 아시아 전체 지역 및 러시아의 아시아 지역을 기준으로 0.25도 간격으로 작성되었다. 포함하고 있는 오염물질은 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NMVOC, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, BC, OC, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, 그리고 CO<sub>2</sub> 등이 있다.

식생을 관장하는 배출목록으로는 MEGAN(Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)을 사용하였다. MEGAN은 지표의 식생과정을 모의하여 식생에 따른 배출목록을 1도 간격으로 제공한다. 그리고 MEGAN에서 지표의 식생과정을 모의할 때, CMAQ에서 사용하는 화학 메커니즘을 동일하게 사용하여 구현할 수 있다.

산불로 인한 식생총량연소(biomass burning)는 NCAR의 FINN(Fire Inventory from NCAR)를 사용하였다. FINN 자료의 산출 과정에서 산불 정도는 위성관측을 통해 추정되는 특징이 있다. FINN 자료도 MEGAN과 같이 1도 간격으로 제공되며 CMAQ에서 사용하는 화학 메커니즘을 사용하여 산출할 수 있다.

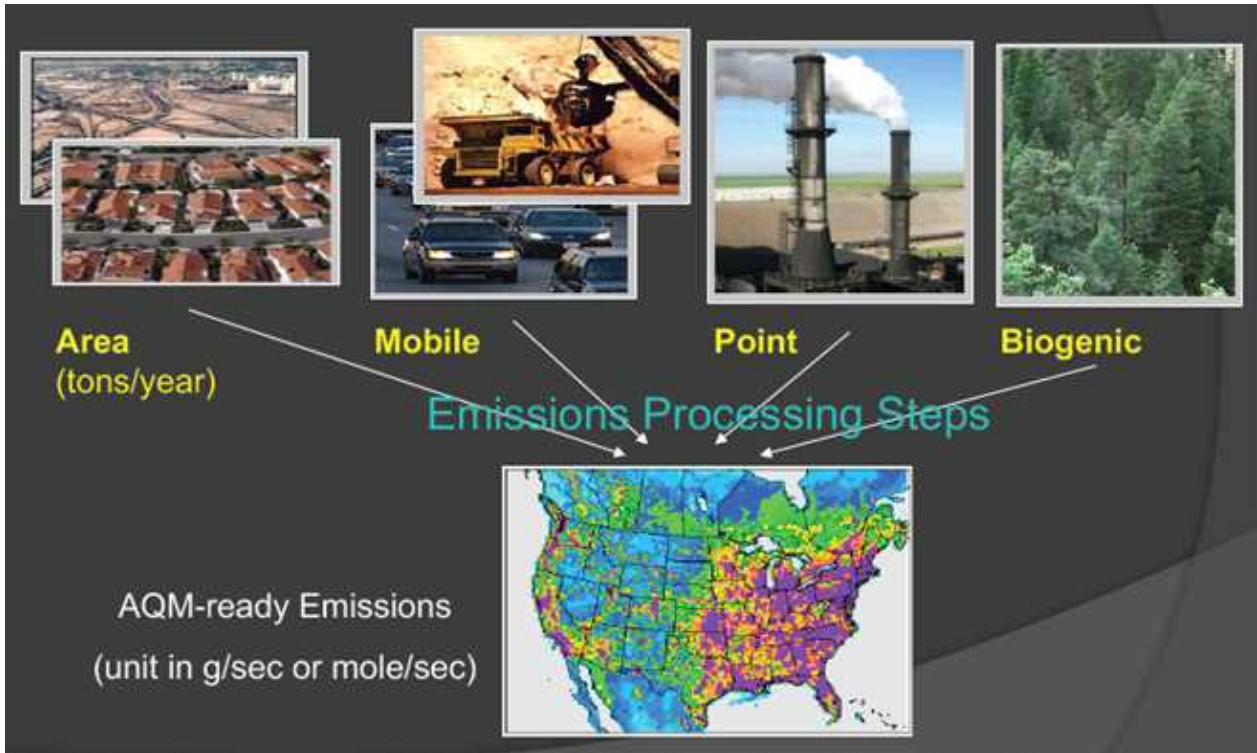


그림 37. 배출목록(Emission Inventory)의 종류



표 5. CMAQ-ready data 산출에 사용된 배출목록

배출목록 종류	배출목록	배출목록의 특징
인간기원배출량 (Anthropogenic)	REAS2.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NMVOC, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, BC, OC, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub></li> <li>- 해상도: 0.25° x 0.25°</li> <li>- Monthly data</li> </ul>
식생배출량 (Biogenic)	MEGAN	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 20 categories and 150 chemical compounds (CB5, CB6, SAPRC99, MOZART, etc.)</li> <li>- 해상도: 1 km x 1 km</li> <li>- Global emission model forestimating emissions from terrestrial ecosystems</li> </ul>
산불배출량 (Wildfire)	FINN	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Global emission estimates from open biomass burning</li> <li>- 해상도: 1 km x 1 km</li> <li>- Daily data</li> </ul>



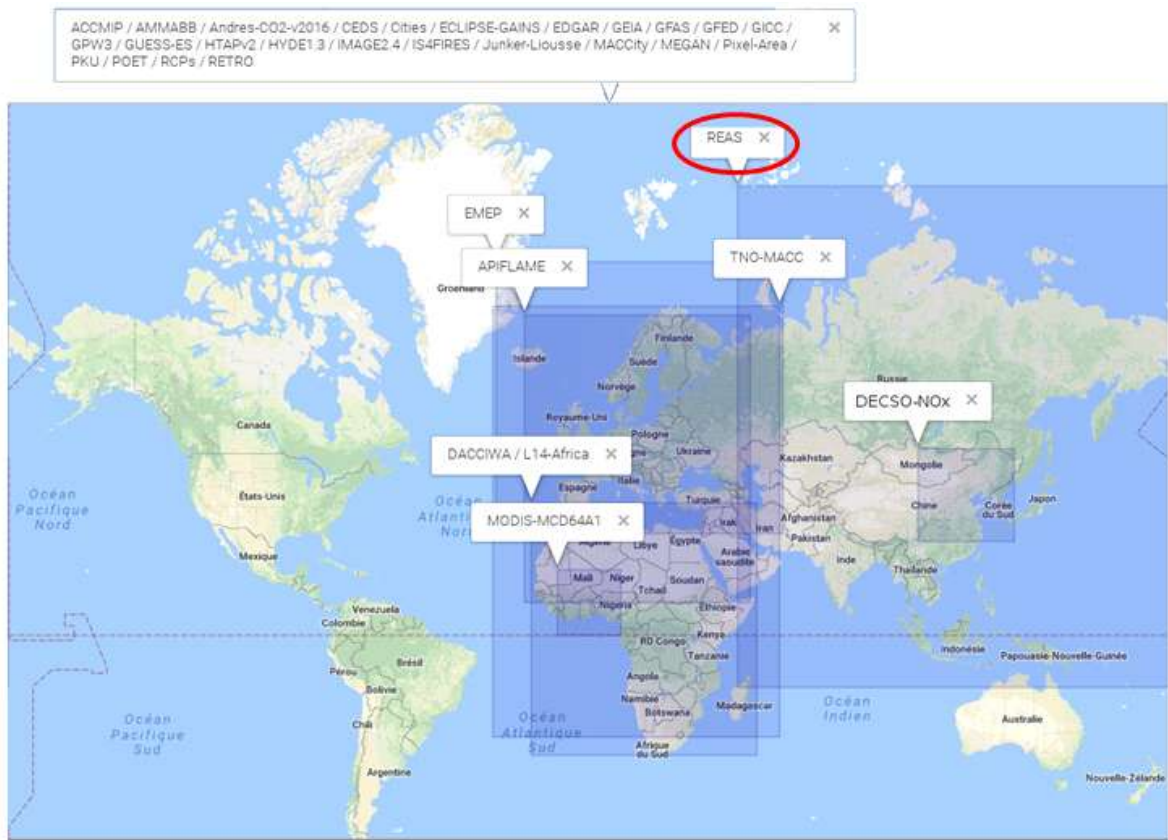


그림 38. 인간기원 배출목록의 분포(<https://eccad3.sedoo.fr>). REAS는 빨간 원으로 표시

극지연구소

이와 더불어 인간기원 배출목록으로 REAS2.1, 식생 배출목록으로 MEGAN, 산불 배출목록으로 FINN을 사용하여 산출한 동아시아 2016년 배출량 자료의 특성분석을 시행하였다. 먼저 대기오염물질 중 주요물질인 일산화탄소(CO), 암모니아(NH<sub>3</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>)에 대해 계절별 공간분포를 주중과 주말을 구분하여 살펴보았다. 겨울, 봄, 여름, 가을에 대하여 각 계절을 대표할 수 있는 1월, 4월, 7월, 10월의 자료를 사용하여 계절을 구분하였고 주중의 자료는 월요일의 자료를, 주말의 자료는 토요일의 자료를 사용하였다.

주요 오염물질 모두에서 한반도보다는 중국지역의 농도가 더 높게 나타나는 경향을 확인하였다. 일산화탄소의 경우 봄, 여름, 가을은 화중/화북지역의 도심 및 해안가 중심으로 높은 오염물질 농도가 나타나는데 반해 겨울에는 중국 내륙지역까지 높은 오염물질 농도가 나타났다 (그림 39). 이러한 분포 특성은 이산화황의 분포에서도 보였는데 다만 이산화황의 분포에서는 겨울철과 다른 계절의 분포차이가 일산화탄소의 분포에 비해서는 작았다 (그림 40). 그리고 일산화탄소와 이산화황의 분포 모두에서 히말라야 산맥을 따라 띠 모양의 약한 오염물질 농도 분포를 보였다.

질소산화물의 경우에는 중국 지역의 농도가 한반도보다 높은 경향은 여전히 나타나지만 그 격차가 다른 오염물질에 비해서는 작았고 계절별 분포 차이도 거의 없었다. 주중/주말의 차이도 크지 않았다. 이는 질소산화물의 주요 원인이 내연기관의 연소이기 때문에 보이는 특징이라고 할 수 있다. 내연기관의 연소를 대표하는 자동차의 경우 계절별로 통행량의 크기가 크지 않다. 질소산화물의 높은 농도가 나타나는 지역이 한국과 중국 모두 도시지역이라는 부분도 이러한 분석을 뒷받침한다 (그림 41). 암모니아는 일산화탄소 및 이산화황과는 달리 여름철에 중국 화중지역을 중심으로 넓게 분포하는 특징을 보였고 히말라야 산맥을 경계로 띠 모양의 강한 오염물질 분포를 나타냈다 (그림 42).

대기오염물질 배출농도의 계절 변동을 좀 더 자세히 보기 위해 계절별 동아시아 지역합산 배출속도(moles/s)를 살펴보았다 (그림 43). 분석한 대기오염물질 모두에서 주중 배출속도가 주말 배출속도 보다 높게 측정되었다. 대기오염물질 별로 살펴보면 일산화탄소와 이산화황은 1월에 상대적으로 배출속도가 높다가 4, 7, 10월에 낮아지는데 4, 7, 10월의 차이는 거의 없다. 질소산화물은 공간분포와 마찬가지로 배출속도의 계절변화가 두드러지지 않았고 암모니아의 경우에는 날이 따뜻해 질수록 증가하는 경향을 보였다. 이와 더불어 암모니아는 주중 배출속도가 주말 배출속도보다 높기는 하지만 그 차이가 다른 오염물질에 비해 미미하다.

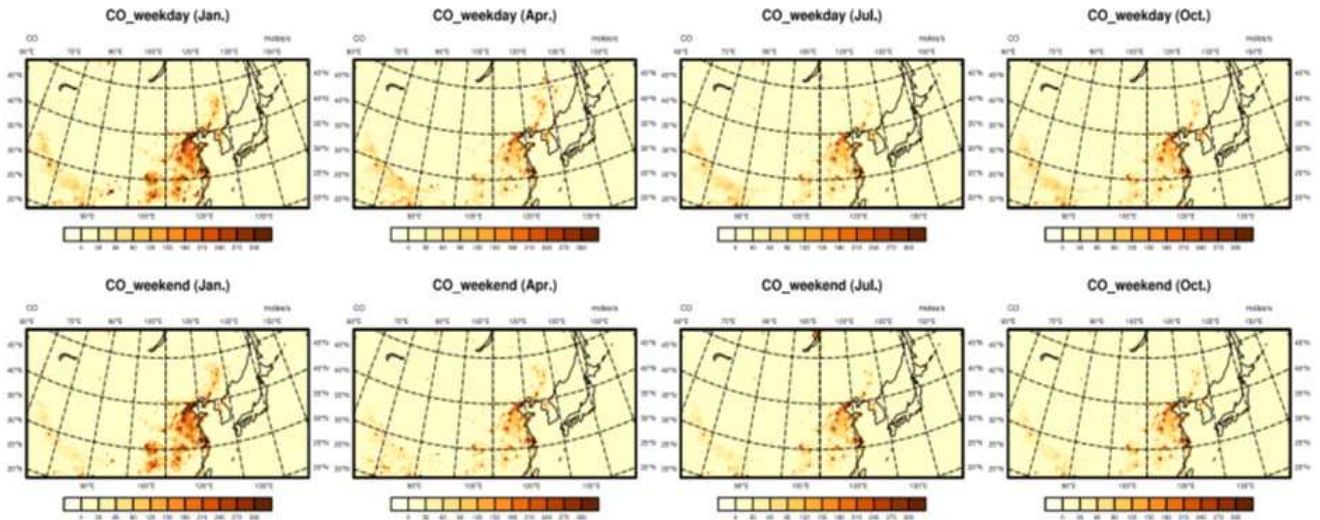


그림 39. 일산화탄소(CO) 농도의 계절별 공간분포 (주중(상), 주말(하))

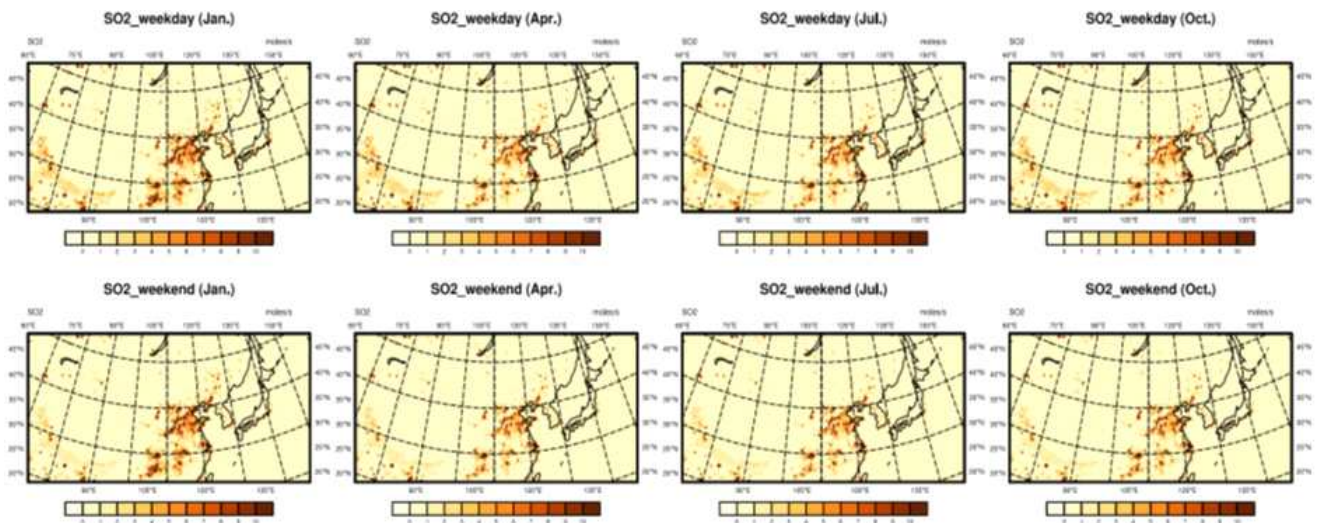


그림 40. 이산화황(SO<sub>2</sub>) 농도의 계절별 공간분포 (주중(상), 주말(하))

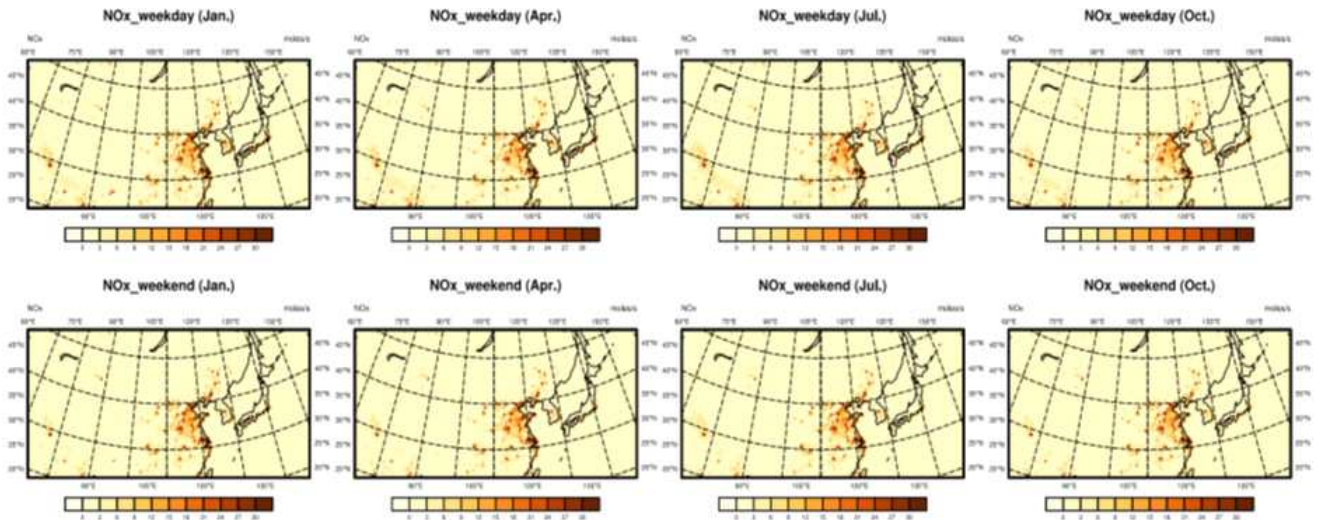


그림 41. 질소산화물(NOx) 농도의 계절별 공간분포 (주중(상), 주말(하))

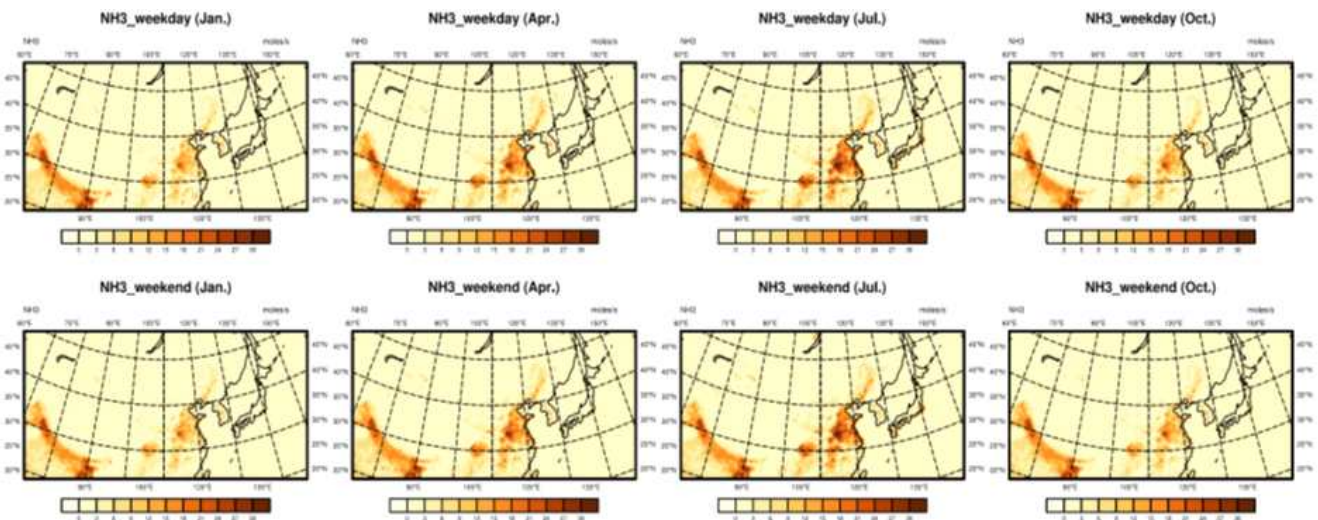


그림 42. 암모니아(NH3) 농도의 계절별 공간분포 (주중(상), 주말(하))



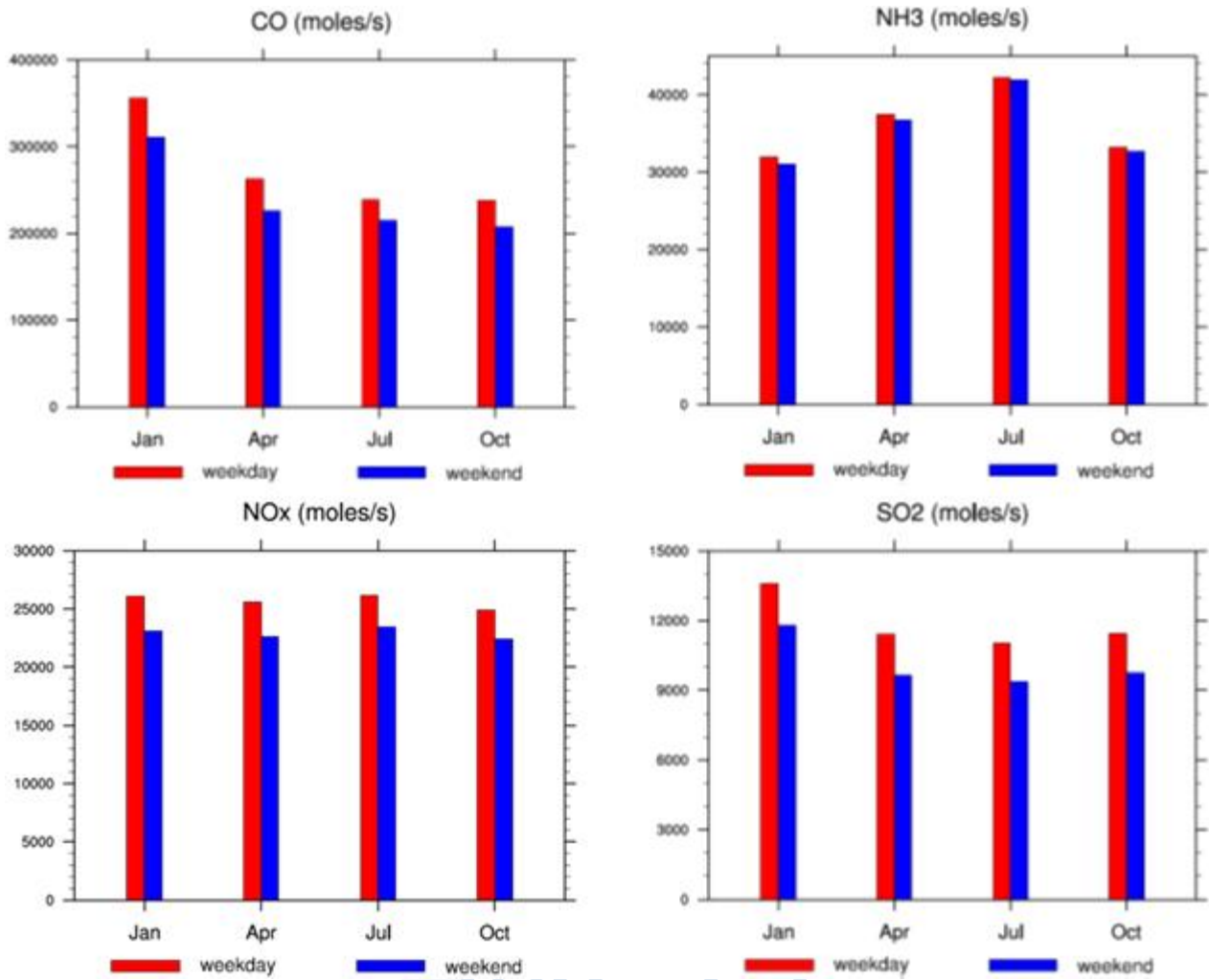


그림 43. 대기오염물질의 계절 경향

#### 다. 대기질 모델링 시스템 구축과 시험 운용

대기질 모델링을 위해서는 대기질 모델과 기상수치모델이 각각 필요하다. 본 절에서는 대기질 모델 CMAQ v5.2를 중규모 기상수치모델 WRF v3.7과 함께 구축하고 난징대학교와의 협업으로 산출한 동아시아 대기오염물질 배출량 자료를 사용하여 대기질 모델링 시스템을 시험 운용한 결과를 제시한다.

난징대학교의 배출량 자료는 2016년을 기준으로 산출된 자료이다. 이에 2016년에 발생한 고농도 미세먼지 사례를 선택하여 구축한 대기질 모델링 시스템을 시험 운용하였다. 고농도 사례일은 한국환경공단의 미세먼지 및 초미세먼지 24시간 평균치 기준인  $PM_{10}$   $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  이하,  $PM_{2.5}$   $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  이하를 기준으로 2016년 1월 3일로 결정하였다 (그림 44). 미세먼지 자료는 에어코리아의 확정자료를 사용하였으며 기상청에서 제공하는 황사일 정보를 이용하여 황사일은 고농도 사례일에서 제거하였다.

대기질 모델링 시스템에서 사용될 기상자료는 WRF v3.7을 수행하여 산출하였다. 기상모델의 초기입력자료는 NCAR에서 제공하는 6시간 간격의 공간 해상도  $1^\circ \times 1^\circ$ 인 FNL 재분석자료를 사용하였다. 스핀업 시간을 고려하여 2016년 1월 2일 00UTC 부터 72시간 적분하였고 수평해상도는 36 km로 설정하여 동아시아 지역에 대해 수치모의를 수행하였다 (그림 45). 물리과정으로 행성경계층은 YSU scheme을, Land-surface 물리과정은 unified Noah scheme을 사용하였고, 구름물리 과정은 WRF Double-Moment 6-class (WDM6) scheme을, 적운 모수화 과정은 Kain-Fritsch scheme을 적용하였다.

기상수치모델의 결과를 CMAQ이 활용할 수 있도록 CMAQ의 기상모듈인 MCIP을 이용하여 자료의 형태를 변환시켰다. 난징대학교와의 협업으로 산출한 CMAQ-ready 배출량 자료의 형식에 맞게 기상자료의 연직해상도와 연직층의 높이를 조절하였다. 그리고 ICON과 BCON 모듈을 이용하여 CMAQ의 화학종 초기조건과 경계조건을 생성하였다. CMAQ 수행 시 화학 메커니즘으로 CB05 메커니즘을 사용하였다. 에어로졸은 CF(coarse and fine) scheme에 의해 미세먼지를 에이트겐 입자 (Aitken Particle), 초미세먼지( $PM_{2.5}$ ) 및 조대입자( $PM_{10}$ )로 구분하고 CB05 메커니즘에 의한 크기별 에어로솔 화학반응 계산을 수행하였다.

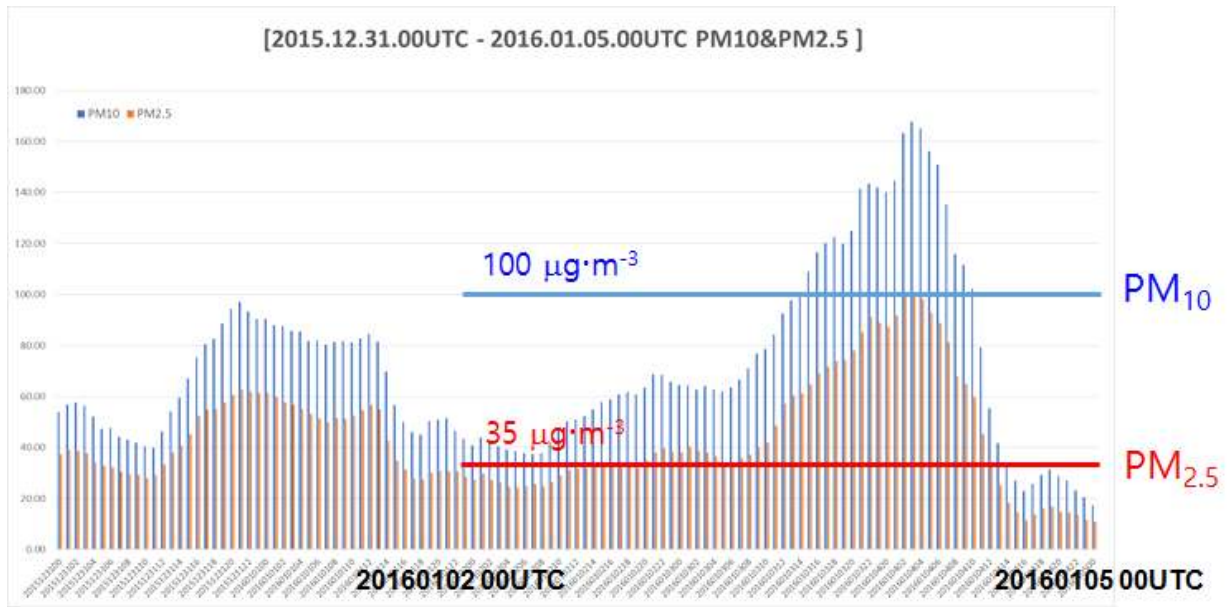


그림 44. 서울의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 및 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 시계열 (에어코리아 확정자료)



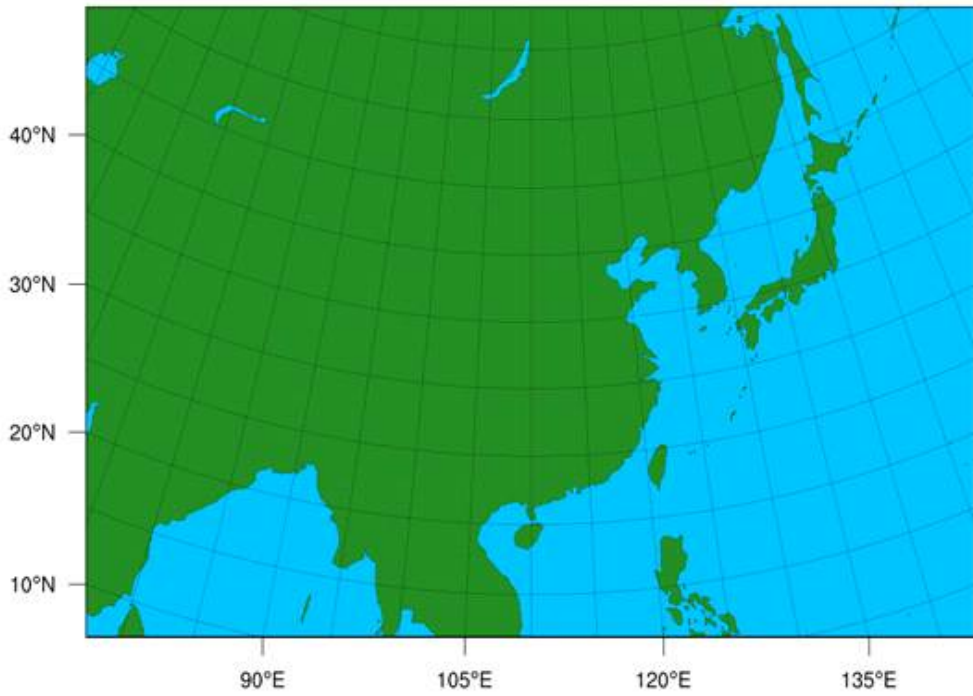


그림 45. 기상수치모델 WRF의 도메인 영역 (수평해상도 36 km)



CMAQ 모델의 적분기간은 기상모델 WRF와 같이 2016년 1월 2일 00UTC 부터 72시간 적분하였다. CMAQ 모델이 제대로 수행되었는지 판단하기 위해 질소산화물 중 일산화질소(NO)의 공간분포 및 일변화 정도를 검토하였다 (그림 46). 전반적인 일산화질소의 공간분포를 살펴보면 중국의 화중/화북 지역 및 중국 동해안 지역의 고농도를 확인할 수 있다. 시간 흐름에 따른 농도 변화를 살펴보면 00UTC와 06UTC에서 농도의 강세, 12UTC와 18UTC에서 농도의 약화를 확인할 수 있는데 이는 일산화질소가 자동차 배기가스와 관련성이 깊은 배출가스라는 점을 감안하면 지극히 타당한 결과이다. 특히 한반도에서는 자동차 통행량이 줄어드는 한밤중에 농도가 가장 희박한 모습을 보이고 통행량이 증가하는 시간대에 들어서면 일산화질소의 농도가 증가하는 경향이 뚜렷하다. 그러나 중국 동해안 근처에서는 자정 근처의 경우에도 일산화질소의 농도 감소가 명확하게 보이지 않는다.

CMAQ 시스템은 CB05 메커니즘 이외에도 여러 화학 메커니즘을 보유하고 있다. 그리고 각 화학 메커니즘에는 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 및 미세먼지(PM<sub>10</sub>)를 포함한 가스, 입자 및 침적 종을 예측하기 위해, CMAQ의 결과로써 산출되는 화학종이 결합되어야 하는 방법을 규정하고 있다. 메커니즘별로 초미세먼지 및 미세먼지 산출 방법이 다른 이유는 메커니즘에 따라 취급하는 화학종 및 화학식의 반응계수가 다르기 때문이다. 본 연구에서는 CB05 메커니즘의 규정에 따라 초미세먼지와 미세먼지의 공간분포를 산출하였다. 먼저 미세먼지의 공간분포 및 시간에 따른 변동경향을 살펴보면 일산화질소와 같이 중국 화중/화북 지역에 높은 농도, 한반도 지역에 약한 농도가 나타난다 (그림 47). 그리고 한반도 지역의 미세먼지 농도 변화 경향을 살펴보면 관측 (그림 44)과 마찬가지로 13일 12UTC부터 14일 00UTC까지 미세먼지 농도가 피크를 보인다. 그러나 농도값 자체를 관측과 비교할 경우, 관측값에 비해 매우 낮은 수준의 농도만 모의된 결과를 보였다. 이는 기상수치모델인 WRF의 물리모수 또는 대기질 모델 CMAQ의 화학메커니즘의 민감도 실험을 통한 모델의 최적화 과정이 필요함을 의미한다. 초미세먼지의 공간분포 및 시간에 따른 변동경향에서도 미세먼지의 결과와 같은 경향의 결과를 보였다 (그림 48).

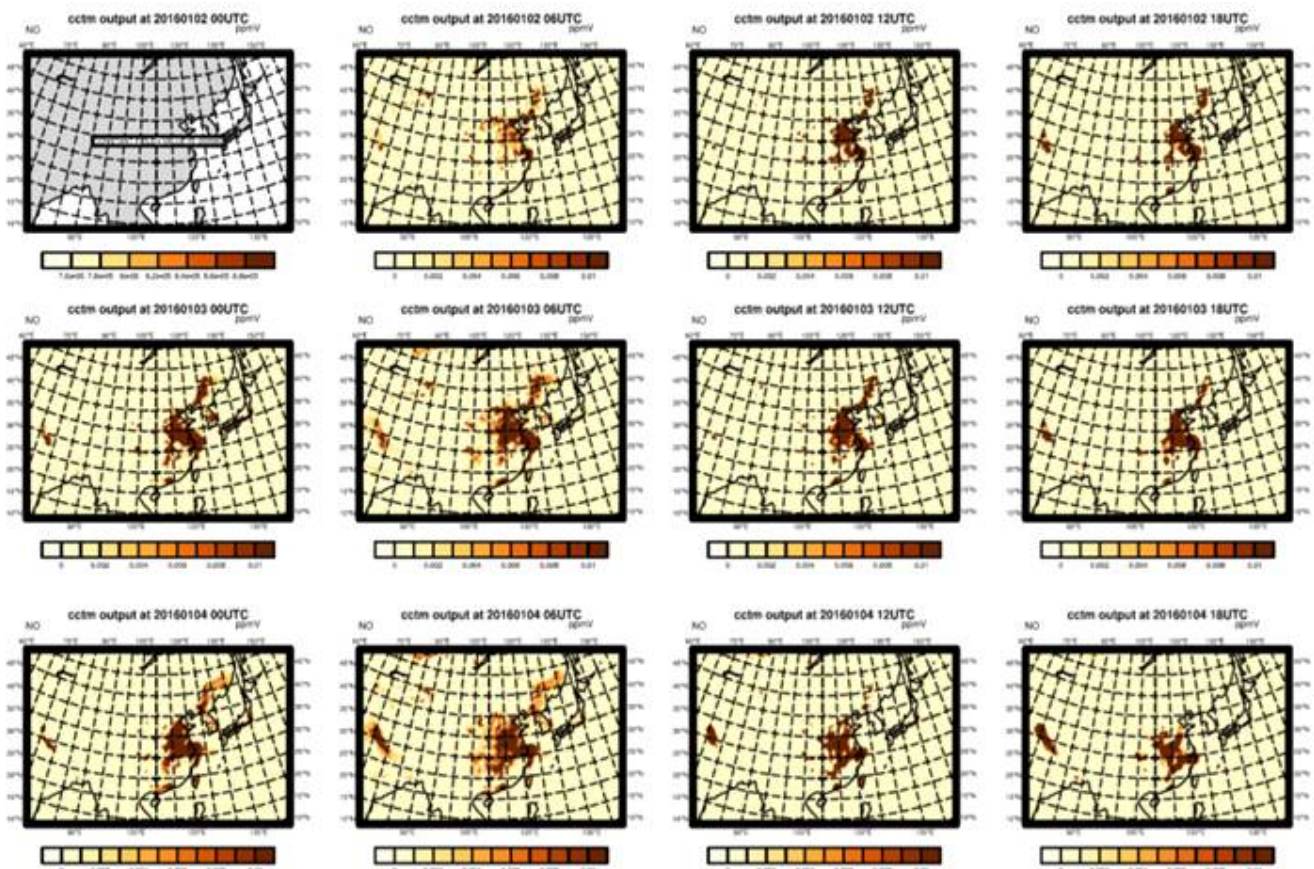


그림 46. 시험 운용 기간 중 일산화질소(NO) 농도의 공간분포

극지연구소

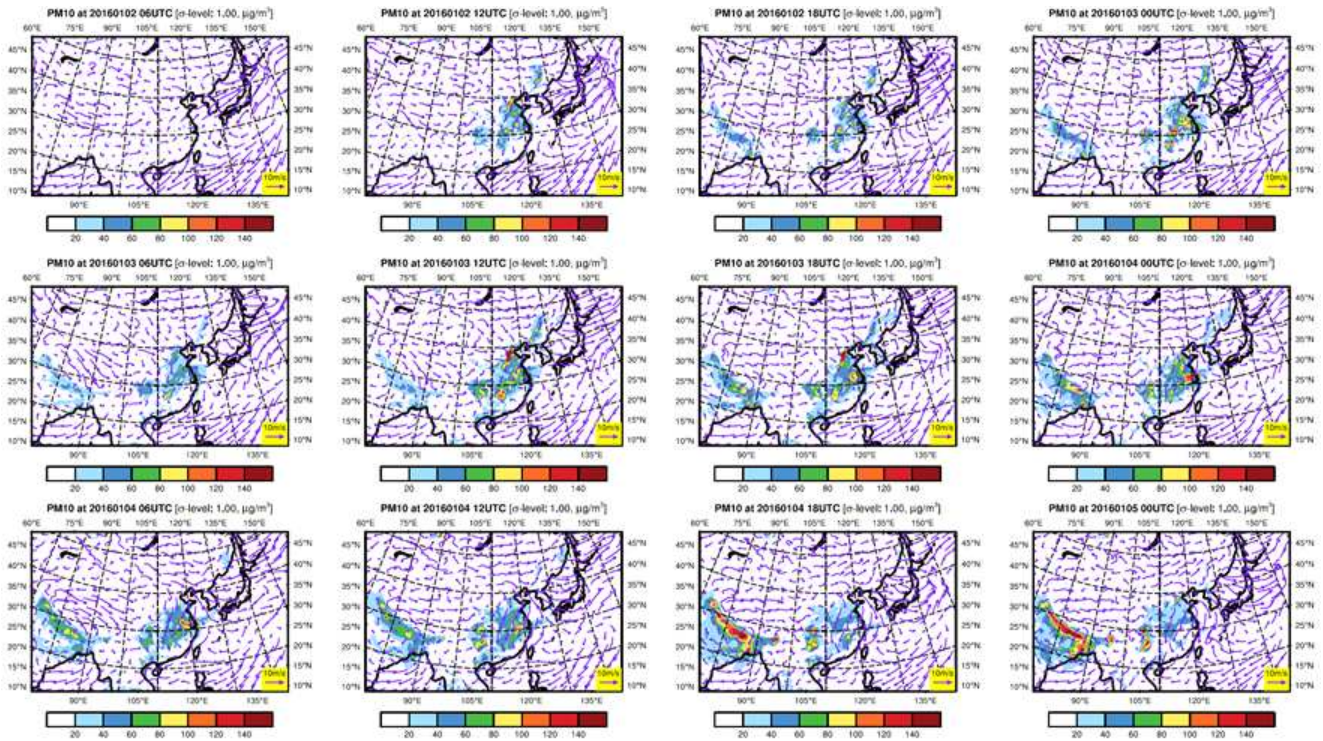
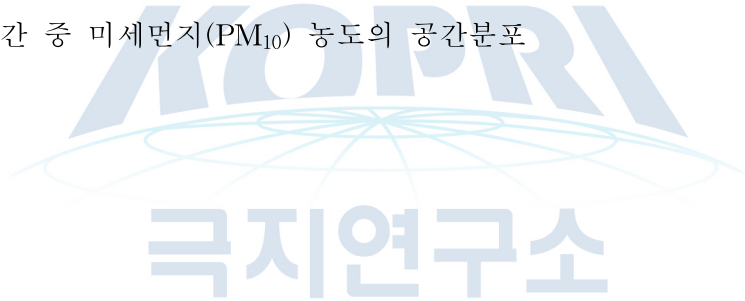


그림 47. 시험 운용 기간 중 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도의 공간분포



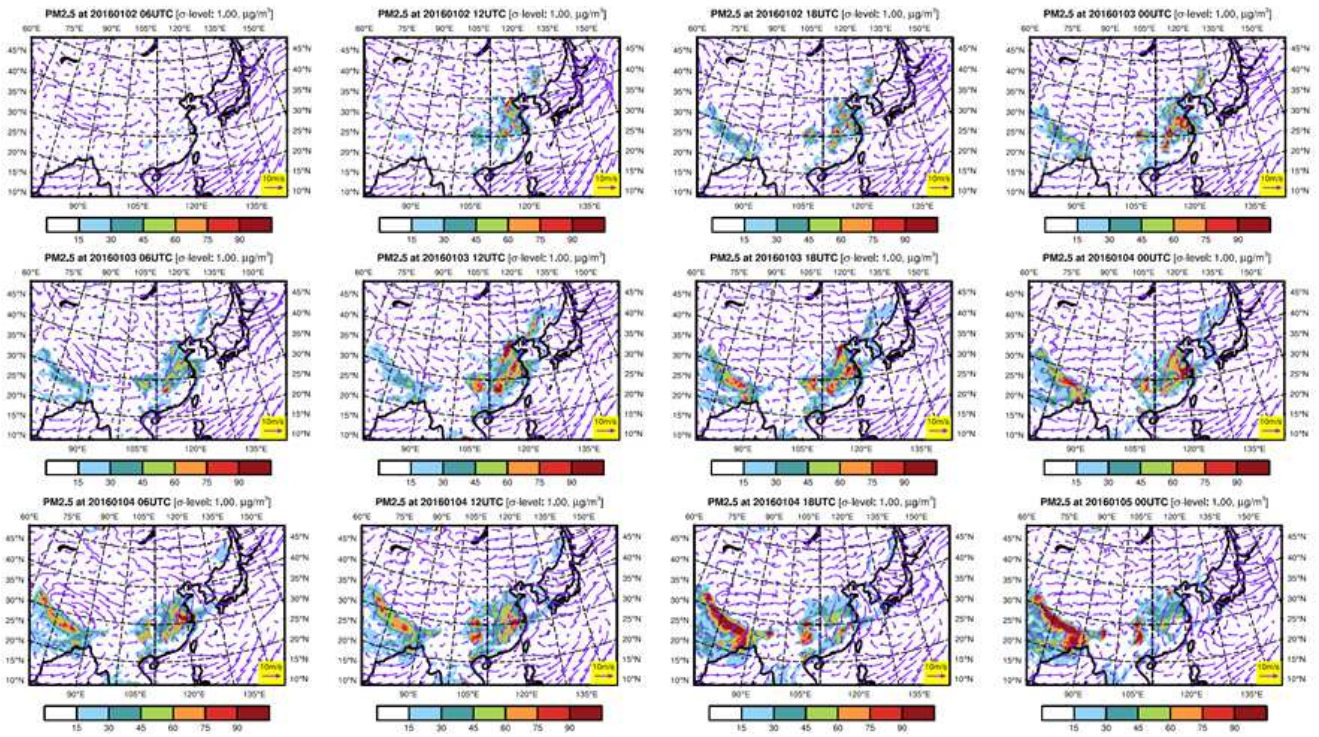
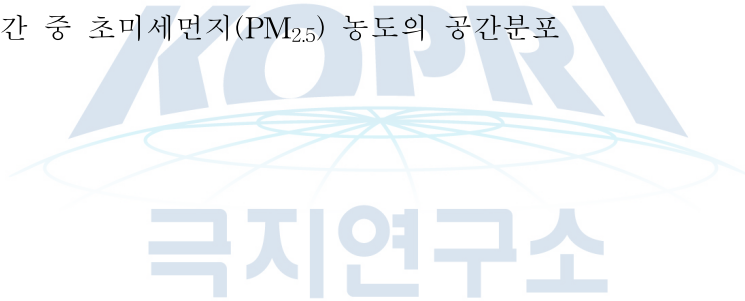


그림 48. 시험 운용 기간 중 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 농도의 공간분포





## 2. 한반도 주변 배출량 소스변화에 따른 대기질 모델 입력자료 산출 방안

북반구 중위도 편서풍 지대에 위치한 우리나라는 중국에서 배출된 대기오염물질의 영향을 받으며, 한반도 내에서도 주요 오염원들이 서해안에 위치하는 특징을 갖는다. 우리나라 고농도 미세먼지 현상의 대부분은 서풍 또는 남서풍이 지배적인 상황에서 발생하는데, 이러한 종관대기순환 구조에서는 중국에서 건너온 미세먼지가 한반도의 대기질에 영향을 미치게 된다.

기상수치모델의 입력자료로 동시간의 기상상황을 비교적 정확하게 모의한 재분석장 또는 예측장이 사용되는 것과는 달리 대기질 모델의 입력자료인 배출목록은 일반적으로 현재보다 2-5년 전의 자료인 경우가 대부분이다. 대기환경정책이 안정적으로 시행되어 에너지 사용에 따른 대기오염물질 배출 정도가 비교적 균일한 선진국의 경우 2-5년의 편차가 크지 않을 수 있다. 그러나 대기환경관리가 엄격하지 않으며, 제조업 중심의 급격한 경제성장을 이루고 있는 중국의 경우, 2-5년 전의 배출목록의 구성과 현재의 구성은 크게 다를 수 있다.

우정현 외(2018)는 중국의 배출 정보의 시공간적 분포 분석을 통해 최근의 대기오염물질 배출 변화 정도를 추정하였는데 (그림 49), 해당 연구에서 산출한 주요 오염물질의 변동경향을 이용하면 중국지역의 배출량 정보를 현재 상황에 맞게 수정 가능하다.

중국지역의 주요 대기오염물질의 연간변동 경향을 살펴보면, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 1990년 이후로 일관된 증가추세를 보이고 있으나, 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>)은 2010년 이후로 감소추세에 있다. 휘발성 유기화합물(VOC)은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 같이 꾸준한 증가추세를 보이다 최근 5년 내에는 약한 감소 경향을 나타낸다 (그림 49). 이와 같은 경향은 대기환경 정책지원을 위해 한·중·일 3국의 과학자들이 공동으로 진행한 ‘동북아 장거리이동 대기오염물질 국제공동연구(LTP, Joint research project for Long - range Transboundary Air Pollutans in Northeast Asia)’의 결과에서도 나타난다. (그림 50).

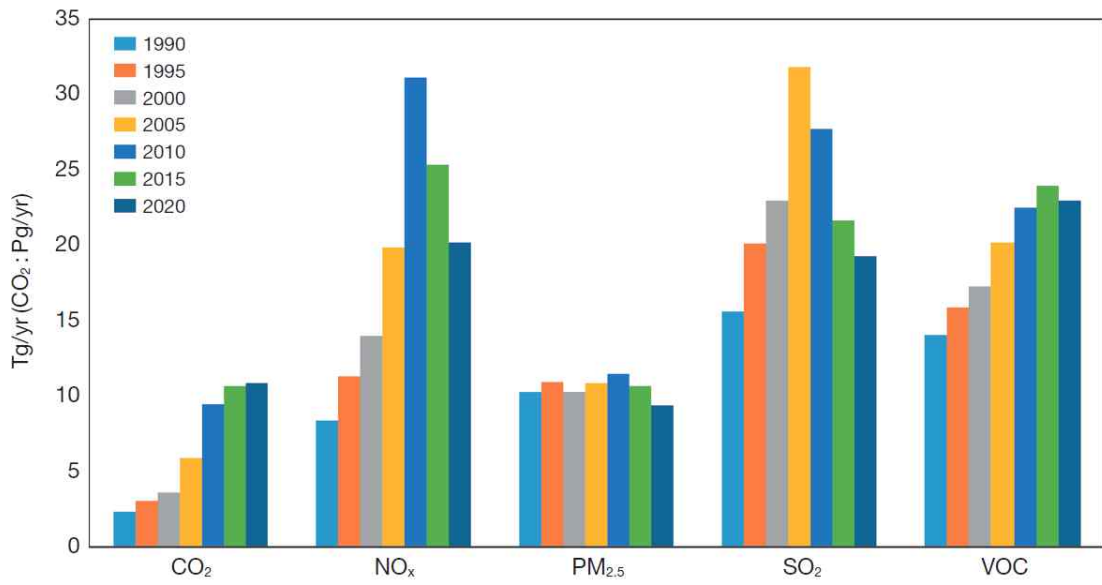


그림 49. 중국지역 주요 대기오염물질의 연간변동 경향 (우정현 외, 2018)



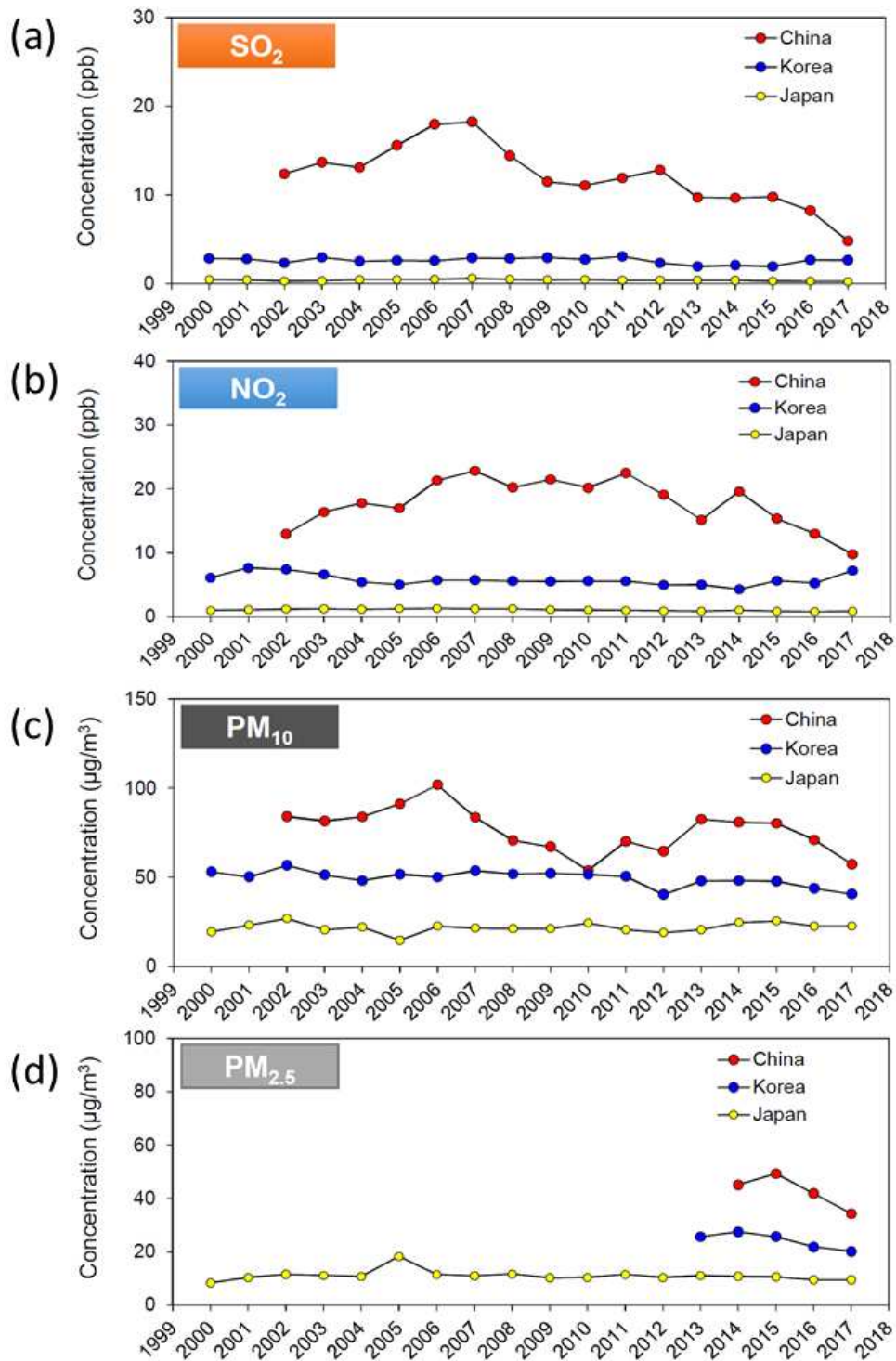


그림 50. 한중일 3국의 대기오염물질 연평균 농도 시계열 변화 (국립환경과학원, 2019b). (a) SO<sub>2</sub>, (b) NO<sub>2</sub>, (c) PM<sub>10</sub>, (d) PM<sub>2.5</sub>.

각 국의 배경농도 관측지점(한국(백령, 강화, 태안, 고산), 중국(다롄, 옌타이, 샤먼), 일본(리시리, 오키))에서 2000-2017년 기간 동안의 장기 관측 자료를 분석한 결과, 한·중·일 3국 모두에서 황산화물(SO<sub>2</sub>), 질소산화물(NO<sub>2</sub>), 미세먼지(PM<sub>10</sub>), 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 연평균농도가 감소 추세를 보였다. 이와 더불어 진행된 대기질 모델 기법을 이용한 초미세먼지의 국내외 영향 분석 결과, 중국 배출원의 우리나라 3개 주요 도시(서울/대전/부산)에 대한 평균 기여율은 32%로 나타났다(국립환경과학원, 2019b).

중국지역의 주요 오염배출원의 변동 경향을 반영하여 중국지역 오염물질(이산화황, 질소산화물) 농도를 미세조정하여 2016년 1월 3일 사례에 대해 시험 운용한 결과, 기존의 연구결과와 거의 차이를 보이지 않았다. 이는 오염물질의 변동 경향 정도가 크지 않아 배출량 입력자료의 변동폭이 크지 않았기 때문이기도 하지만, 해당 고농도 미세먼지 사례(2016년 1월 3일)는 대기순환 구조가 고농도 미세먼지를 유발하는데 주도적인 역할을 했음을 나타내는 결과라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 중국의 대기오염물질의 배출량이 한반도 고농도 미세먼지 발생에 미치는 영향이 자명하므로, 대기질 모델의 성능 개선을 위해서는 대기순환 구조의 정확한 예측과 함께 중국 배출원에 대한 모니터링 및 배출목록의 신속한 업데이트가 반드시 지속적으로 수행되어야 한다.



### 3. 대기질수치모델(WRF-CMAQ)을 이용한 북극발 기상장 변화에 기인한 사례 연구 및 고농도 미세먼지 발생역학 분석

#### 가. 대기질 모델링 시스템 최적화 방안

대기질 모델링 시스템 구축 및 시험 운용에서 대기질 모델에 의해 산출된 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 및 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 농도가 관측에 비해 현저히 낮게 나오는 문제를 해결하고자 하였다. 먼저 기존에 사용했던 화학 메커니즘 CB05와 함께 CMAQ 모델링에서 가장 폭넓게 사용되는 SAPRC07 메커니즘을 채택하여 시험 운용의 설계대로 대기질 모델을 수행하였다 (그림 51). SAPRC07 메커니즘을 채택한 결과, 한반도에서 나타나는 밴드 형태의 고농도 미세먼지가 관측에 더 가깝게 모의되었다. 그리고 두 메커니즘 적용 결과의 미세먼지 밴드 공간분포와 주변 중관바람장에 의한 미세먼지 밴드 이동이 거의 일치하는 것으로 미루어보아 두 실험 사이의 농도 차이는 화학메커니즘의 차이임이 명확하다. 이에 CB05 대신 SAPRC07 화학 메커니즘을 채택하여 이후 연구를 수행하였다. 두 메커니즘이 다루는 화학종을 <표 6>에서 제시한다.

대기질 모델은 대기 화학종의 이류, 확산, 배출, 침적, 화학 과정에 의한 종변환 등을 다루는 모델로서 이를 지역규모에 적용할 때는 화학종별 경계조건이 필요하다. 경계조건이 정확도가 낮을 경우, 이류 등의 과정이 정확히 모의되지 못할 수 있다. 경계조건 못지않게 초기조건 역시 대기질 모델의 정확도에 많은 영향을 미치는데, 대기질 모델 시험 운용에서는 통계 자료와 관측에서 얻어진 대기 농도의 연직 분포를 모의 영역에 균일하게 할당하는 방식을 사용하였다. 그러나 본 연구에서는 기존에 사용했던 초기조건 및 경계조건이 해당 사례의 대기상태를 충분히 모사하는데 부족하다고 판단하여 미국환경보호국(EPA)의 CMAS(Community Modeling and Analysis System) 데이터센터에 제공하는 계절 평균 반구형 CMAQ 출력 파일에서 초기 및 경계 조건을 만드는 프로세스를 이용하여 초기조건과 경계조건을 새로 산출하였다.

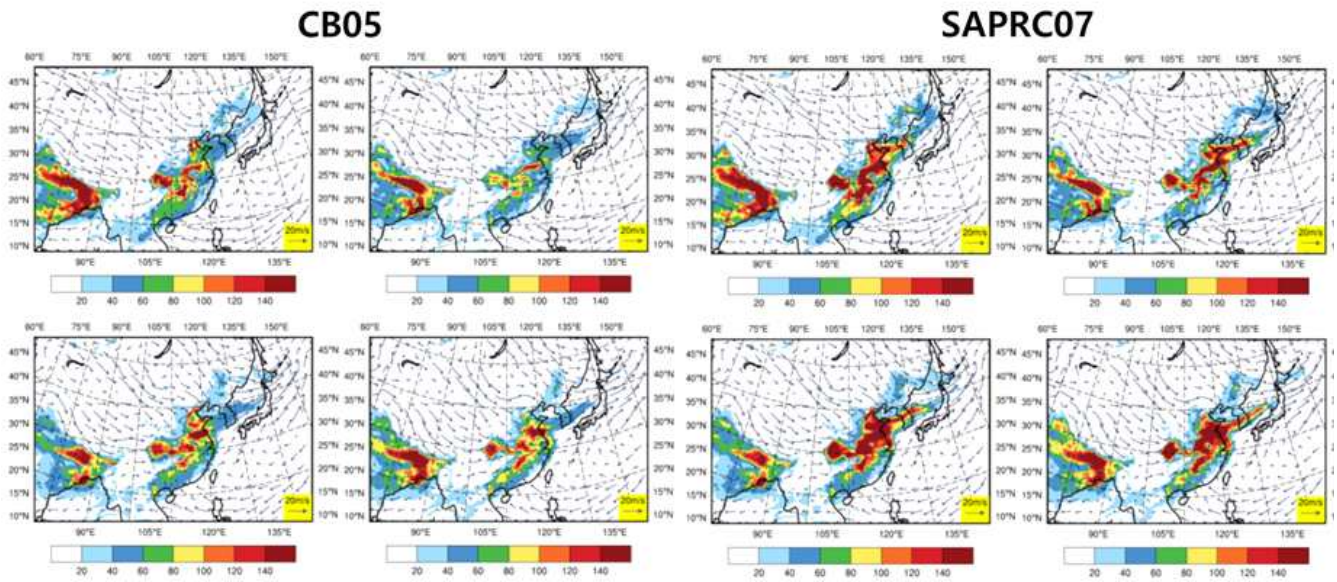


그림 51. 시험 운용 설계 내의 화학메커니즘(CB05/SAPRC07) 미세먼지(PM10) 모의성능 비교 (상좌: 20160112 00UTC, 상우: 06UTC, 하좌: 12UTC, 하우: 18UTC)



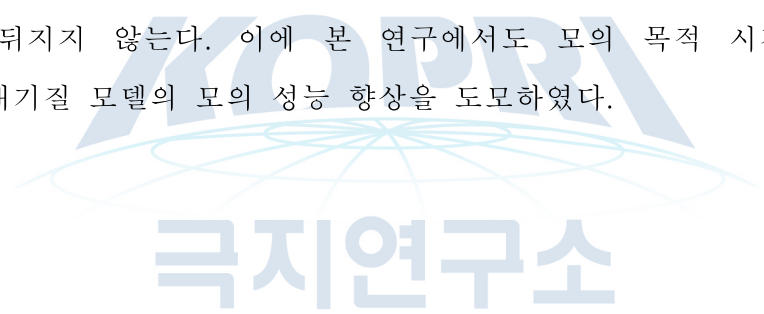
표 6. 메커니즘별 화학종 비교 (SAPRC/CB05)

SAPRC		CB05	
<b>Constant Species</b>			
O2	oxygen		
M	air		
H2O	water		
H2	hydrogen molecule		
HV	light		
<b>Active Inorganic Species</b>			
O3	ozone	O3	ozone
NO	nitric oxide	NO	nitric oxide
NO2	nitrogen dioxide	NO2	nitrogen dioxide
NO3	nitrate radical	NO3	nitrate radical
N2O5	nitrogen pentoxide	N2O5	dinitrogen pentoxide
HONO	nitrous acid	HONO	nitrous acid
HNO3	nitric acid	HNO3	nitric acid
HNO4	peroxynitric acid	PNA	peroxynitric acid
HO2H	hydrogen peroxide	H2O2	hydrogen peroxide
CO	carbon monoxide	CO	carbon monoxide
SO2	sulfur dioxide	SO2	sulfur dioxide
<b>Active Radical Species</b>			
OH	hydroxyl radical	OH	hydroxyl radical
HO2	hydroperoxide radical	HO2	hydroperoxy radical
MEO2	methyl peroxy radical	MEO2	methyl peroxy radical

CMAS 데이터센터에서 제공하는 계절 평균 반구형 CMAQ 출력 파일은 WRF v3.8 및 CMAQv5.3 beta2를 사용하여 산출한 자료로써, 연직층은 44개 층을 사용하며 수평해상도는 북반구를 덮는 극 입체 그리드에서 108 x 108 km이다. 화학 메커니즘은 CB6R3M\_AE7\_KMTBR를 사용하였는데 CMAS에서 제공하는 화학 메커니즘 변환 프로세스를 통해 SAPRC07의 화학종으로 변환하였다.

마지막 대기질 모델의 최적화 방안으로 화학 스핀업을 고려하였다. 이재형 외(2015)는 WRF-Chem을 이용한 초기/경계조건 민감도 연구를 진행함에 있어 모의목적 시간 이전에 약 6일 정도의 적분 스핀업이 적용될 경우 예측 성능이 크게 향상됨을 보였다.

그림 52에서 WRF\_MOZART는 WRF-Chem을 이용한 대기질 모의 시 MOZART 모델에서 동적 경계조건을 제공한 실험이다. 기본적으로 WRF\_MOZART가 WRF-Chem 단독 실험에 비해 좋은 품질의 경계조건을 제공받으므로 WRF\_MOZART의 모의 결과가 WRF-Chem 단독 실험 결과에 비해 관측에 가까운 경향을 보이고 있다. 그러나 화학 스핀업을 충분히 고려한 우측열의 실험 결과에서는 WRF-Chem 단독 실험의 결과가 WRF\_MOZART 성능에 비해 크게 뒤지지 않는다. 이에 본 연구에서도 모의 목적 시간 전에 6일의 화학 스핀업을 고려하여 대기질 모델의 모의 성능 향상을 도모하였다.





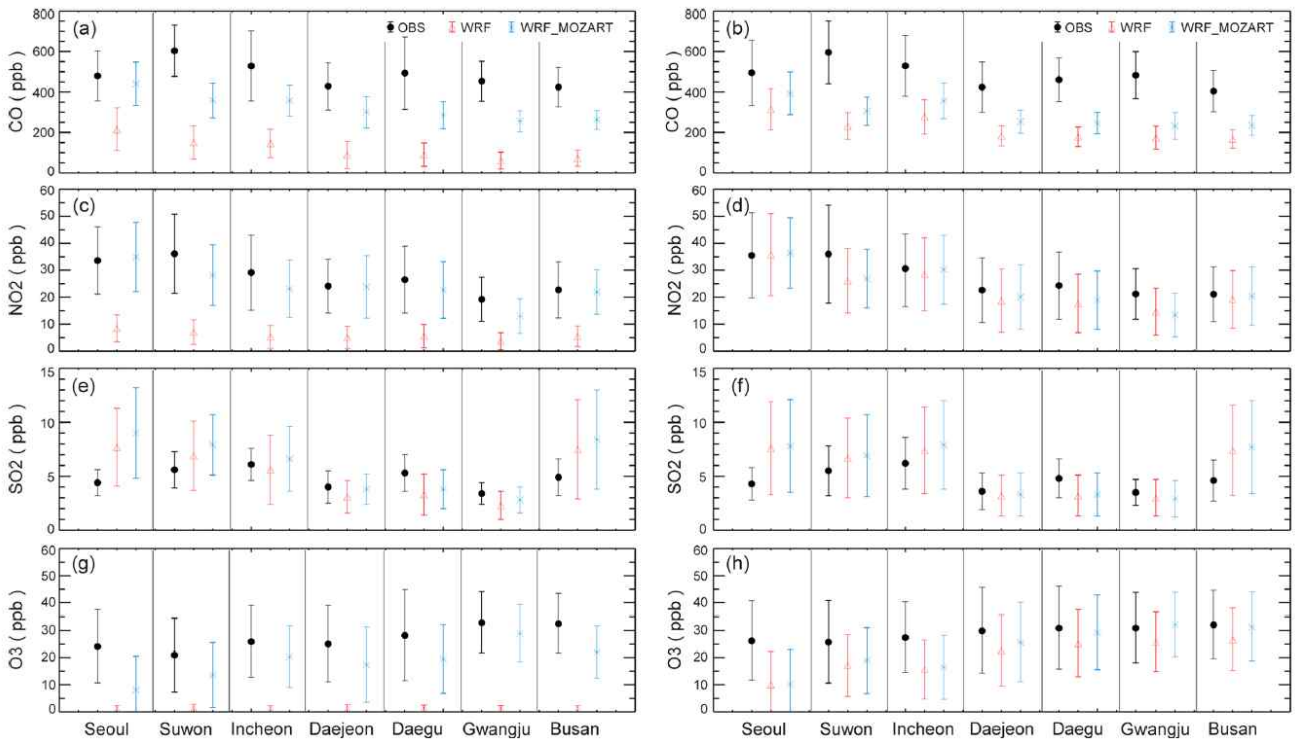
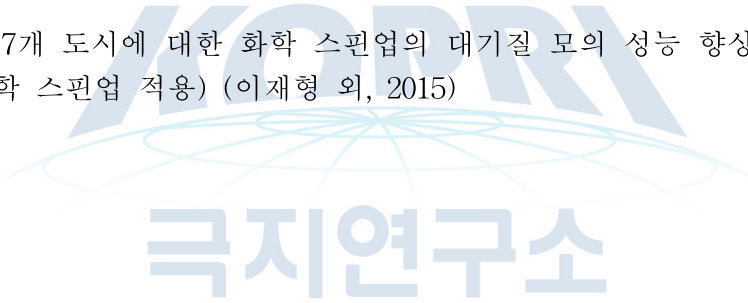


그림 52. 한반도 주요 7개 도시에 대한 화학 스핀업의 대기질 모의 성능 향상 효과 (좌측: 화학 스핀업 미적용, 우측: 화학 스핀업 적용) (이재형 외, 2015)



## 나. 북극발 기상장 변화에 기인한 한반도 고농도 미세먼지 사례 종관 분석

북극기후변화와 관련된 고농도 미세먼지 유형 중 파동전파 패턴에 해당하는 2016년 1월 3일 사례와 정체고기압 패턴에 해당하는 2017년 1월 2일 사례에 대해 북반구 기준으로 종관분석을 실시하였다. 유형별 고농도 미세먼지 사례일 기준으로 3일 간격 전후의 지상온도 및 500 hPa 지위고도 편차장을 산출하여 동아시아 주변 기압계의 공간분포와 북극기온변동과의 상관성을 파악하였다.

2016년 1월 3일에 발생한 고농도 미세먼지 사례는 파동전파 유형의 고농도 미세먼지 사례이다. 해당 사례는 바렌츠-카라해의 고온현상으로 야기된 상층파동이 동아시아로 전파되며 한반도 동해상과 일본 열도의 상층에 고기압성 편차를 형성하는 대기순환 구조를 보인다 (그림 53). 한반도 동해상과 일본 열도 상층에 위치한 고기압성 순환은 남풍/남서풍 계열의 바람을 유도하여 중국 화북/화중 지역으로부터의 대기오염물질 유입을 유도한다.

2017년 1월 2일에 발생한 고농도 미세먼지 사례는 정체고기압 유형의 고농도 미세먼지 사례이다. 해당 사례는 중국 남동부 및 한반도 전역에 분포한 고기압성 편차가 비교적 강하게 정체하면서 미세먼지의 집적을 유도한다 (그림 54). 유라시아 지역에 분포한 저기압성 편차와 동북아시아 중심으로 정체하는 고기압성 편차가 해당 사례의 특징적인 구조이다.

극지연구소

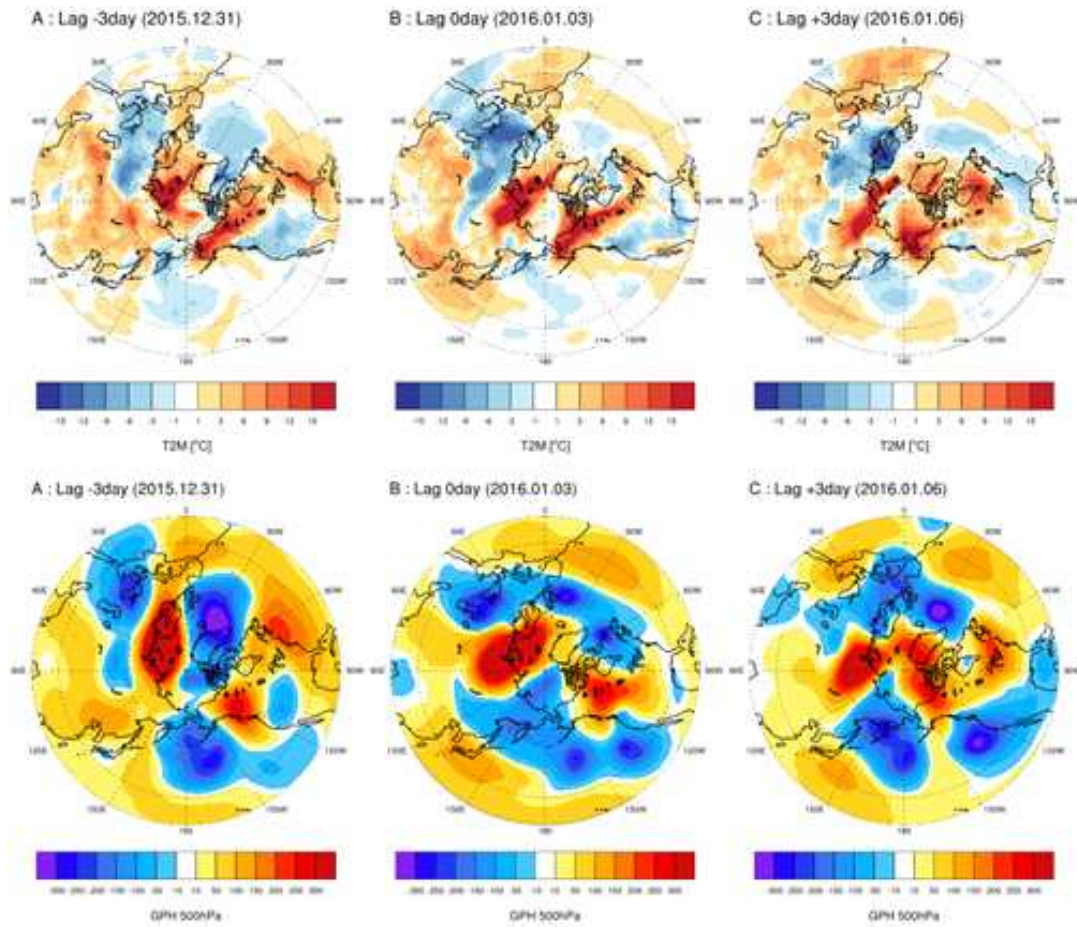


그림 53. 파동전과 유형의 고농도 미세먼지 발생 사례(2016. 01. 03)의 지상기온 편차(상) 및 500 hPa 지위고도 편차(하)

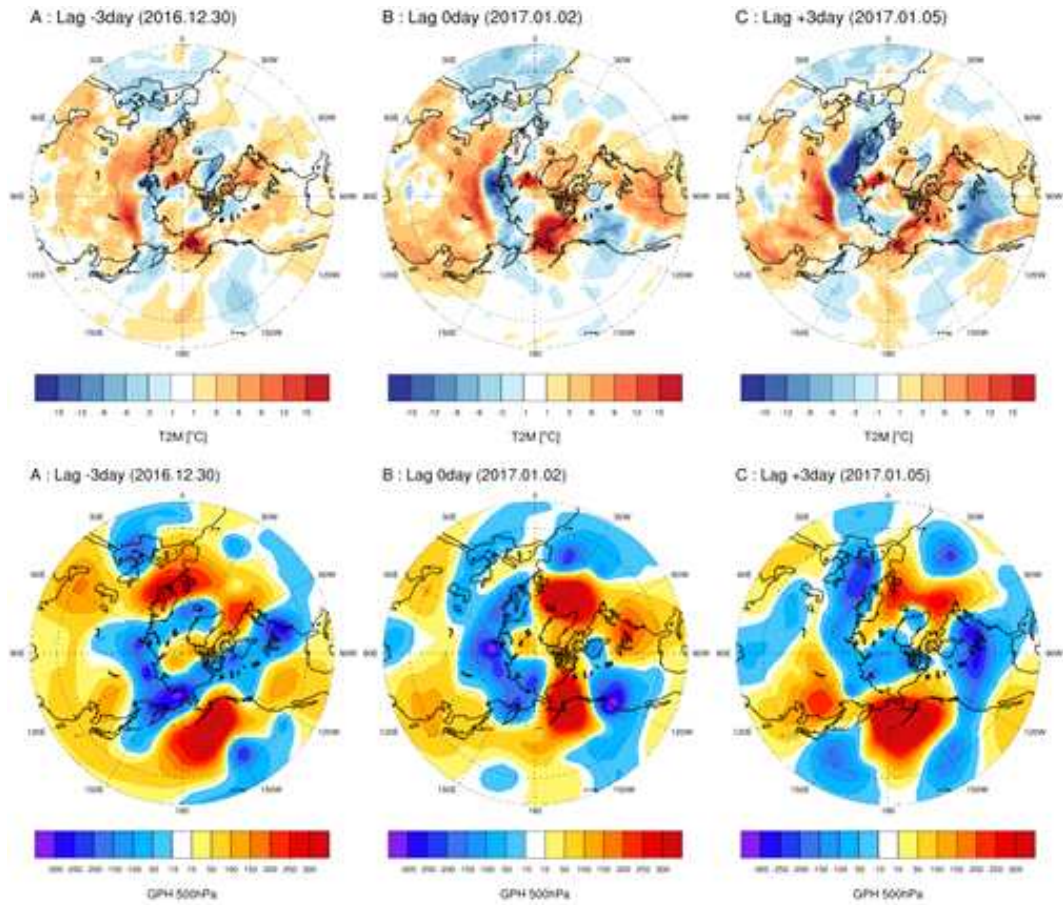


그림 54. 정체고기압 유형의 고농도 미세먼지 발생 사례(2017. 01. 02)의 지상기온 편차(상) 및 500 hPa 지위고도 편차(하)

#### 다. 대기질 모델링 시스템을 이용한 고농도 미세먼지 사례 역학 분석

북극기후변화와 관련된 고농도 미세먼지 유형 중 파동전파 패턴에 해당하는 2016년 1월 3일 사례와 정체고기압 패턴에 해당하는 2017년 1월 2일 사례에 대해 대기질 모델링 시스템(CMAQ) 최적화 방안을 적용하여 사례 연구를 수행하였다.

배출량 자료는 인간기원배출량(REAS2), 식생배출량(MEGAN), 산불배출량(FINN)을 포함한 오염물질 배출량 자료를 사용(중국 NUIST와 협업)하였고, 미국환경보호국(EPA)에서 CMAQv5.3을 이용하여 생산한 2016년 북반구 계절평균 대기화학종 자료에 기반하여 초기조건(IC)/경계조건(BC)을 산출하였다. WRF 3.7.1 및 MCIP v4.0을 이용하여 CMAQ의 기상장 입력자료를 생산하였는데, 물리과정으로 행성경계층은 YSU scheme을, Land-surface 물리과정은 unified Noah scheme을 사용하였고, 구름물리 과정은 WRF Double-Moment 6-class (WDM6) scheme을, 적운 모수화 과정은 Kain-Fritsch scheme을 적용하였다. 생산된 기상자료의 수평해상도와 수평범위는 시험 운영에서 설정한 해상도(36 km)와 범위(동아시아 전체)와 같다 (그림 45).

대기질 모델링 시스템으로부터 산출한 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도의 공간분포는 유럽중기예보센터(ECMWF)의 CAMS(Copernicus Atmosphere Monitoring Service) 정보 및 에어코리아 관측 자료를 통해 검증하였다. CAMS는 유럽 연합의 지구 관측 프로그램인 Copernicus를 구성하는 서비스 중 하나로서, Copernicus는 위성 지구 관측, 현장 (비위성) 데이터 및 모델링을 기반의 기상정보를 제공한다. CAMS에서 제공하는 미세먼지(PM<sub>10</sub>)와 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 데이터는 위성 관측 데이터(AOD, Aerosol Optical Depth)를 기반으로 추정되는 값이다.

2016년 1월 3일 사례는 한반도 남부 해상의 고기압과 중국 화북 및 만주지역의 저기압으로 인해 유도된 하층 유입류를 통해 중국 화북, 화동지역의 오염물질이 한반도에 내습하여 발생하는 고농도 미세먼지 사례이다 (그림 55). CMAQ과 CAMS의 결과에서 유입류를 통해 한반도에 미세먼지가 유입되는 과정을 확인할 수 있다. 다만 강도 측면에서 CMAQ의 결과가 다소 강하게 모의하였다. 그리고 에어코리아의 서울지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 관측 정보와 CMAQ이 모의한 서울지역 미세먼지 시계열을 비교 분석한 결과, 시계열 패턴은 유사하나 CMAQ이 약 24시간 정도 피크를 일찍 모의하였다 (그림 56). 관측에 비해 피크를 다소 일찍 모의한 CMAQ의 결과는 기상수치모형의 행성경계층(PBL) 물리 과정 최적화와 관계가 있을 수 있다(문난경 외, 2011).

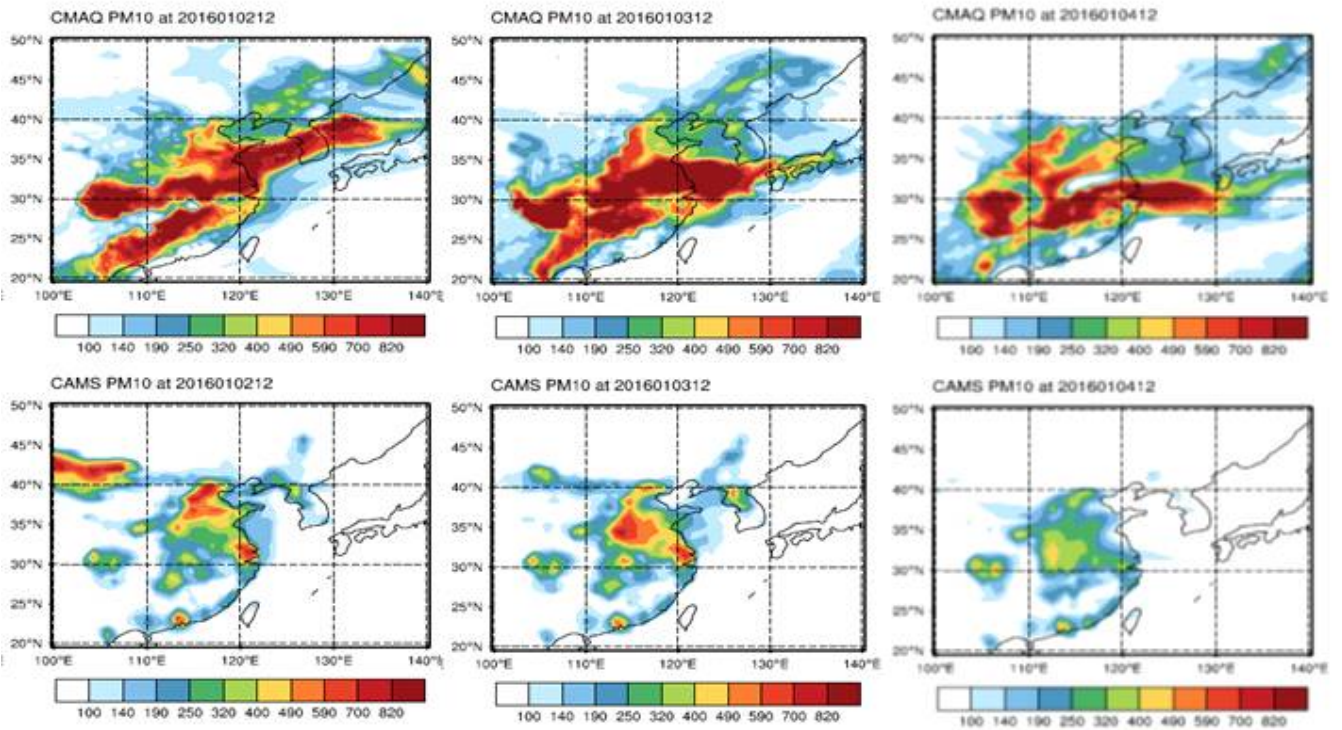


그림 55. 2016년 1월 3일 사례에 대한 대기질 모델(CMAQ) 산출 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도의 공간분포(상) 및 ECMWF CAMS 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도의 공간분포(하)

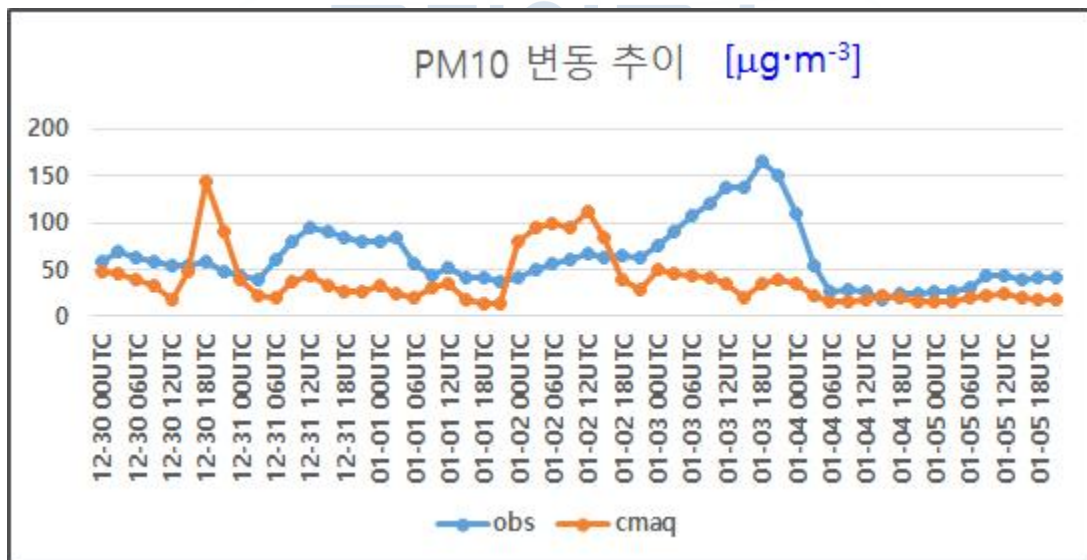


그림 56. 에어코리아 서울지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 관측(과량) 및 대기질 모델(CMAQ)에서 추출한 서울지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도(주황)의 변동 추이 (2016년 1월 3일 사례)

2017년 1월 2일 사례는 중국 동북 지역 및 몽골 지역의 오염물질이 중국 남동부에 넓게 자리한 고기압 가장자리를 따라 한반도에 내습하여 발생하는 고농도 미세먼지 사례이다 (그림 57). 해당 유형의 대표패턴과 고기압 중심 위치가 다소 상이하지만 종관규모 구조를 비교하면 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. CMAQ과 CAMS의 결과는 이와 같은 기압 배치에 따른 미세먼지의 공간 분포를 잘 모의하였다. 강도 측면에서 CMAQ의 결과가 CAMS에 비해 다소 강하게 모의되는 경향은 2017년 1월 2일의 사례 모의에서도 나타났다. 그리고 에어코리아의 서울지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 관측 정보와 CMAQ이 모의한 서울지역 미세먼지 시계열을 비교하였을 때, 최적화 과정을 적용한 CMAQ이 관측에서 나타난 처음의 강한 피크와 뒤이어 발생하는 두번째 약한 피크를 성공적으로 모의한 것을 확인할 수 있다 (그림 58).



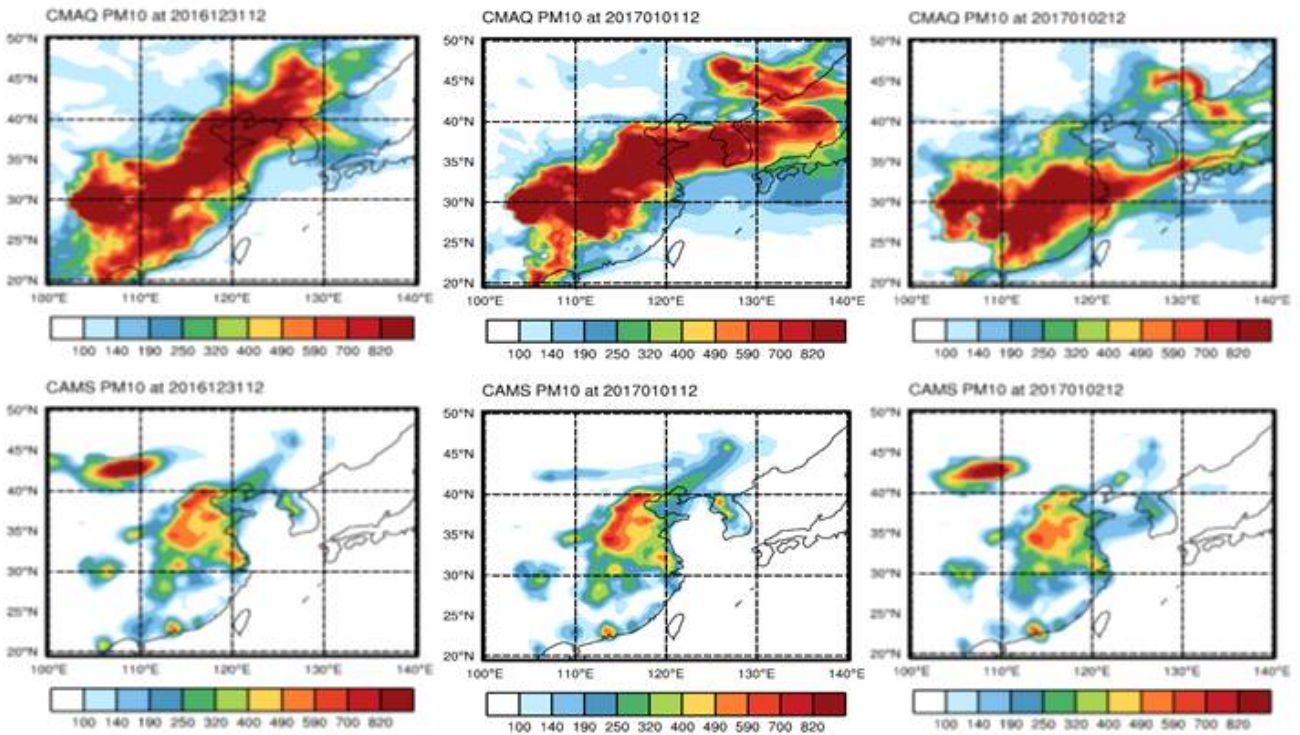


그림 57. 2017년 1월 2일 사례에 대한 대기질 모델(CMAQ) 산출 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도의 공간분포(상) 및 ECMWF CAMS 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도의 공간분포(하)

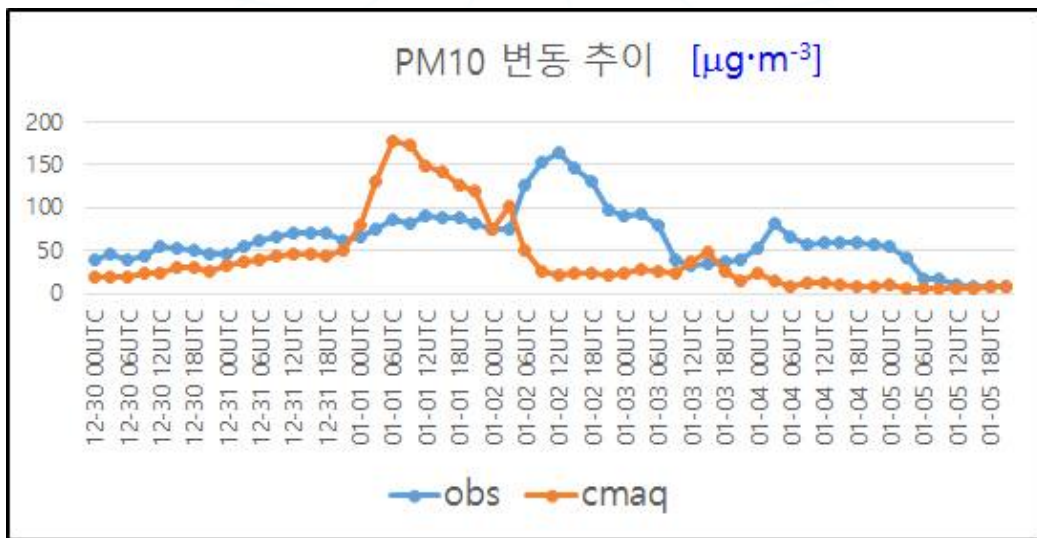


그림 58. 에어코리아 서울지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 관측(파랑) 및 대기질 모델(CMAQ)에서 추출한 서울지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도(주황)의 변동 추이 (2017년 1월 2일 사례)



## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 제 1 절 연구개발목표 달성도

본 연구에서 제시한 연구개발의 궁극적인 목표는 북극기후 변동에 따른 폴라블텍스 및 제트기류의 이상난동이 한반도 지역 대기질(미세먼지)에 미치는 영향을 관측자료 통계분석과 대기질 수치모델링을 통해 규명하는 것이다. 이를 위해 1장에서 제시한 세부 목표를 세우고 연구를 수행하였다. 본 장에서는 세부 목표별 달성도를 정성적으로 제시하고자 한다.

1차년도의 연구개발목표는 본 연구개발의 목표 달성을 위한 기반 마련이 주요한 목표였고, 세부적으로는 다음과 같다.

- 목표 1-1: 북극고온현상에 따른 동아시아 대기순환변화 이해
  - 목표 1-2: 동아시아 주변 기상장 변화 및 한반도 주변 배출소스 민감도 실험을 위한 대기질 모델링 시스템 구축
  - 목표 1-3: 한반도 내 미세먼지를 포함한 대기질 관측자료 데이터베이스 구축
- 위의 세부 목표는 다음과 같이 달성하였다.

먼저 목표 1-1을 위해서 북극진동 지수(AO Index), 북극 지표온도의 시계열 분석을 통한 북극 고온 사례를 정의하고 바람장(U200), 온도장(T2m), 기압장(Z500) 합성 분석을 수행하였다. 또한 500 hPa 기압장의 시간 지연 합성 분석(lag composite)을 통하여 동아시아 주변 이동성 고/저기압 이동패턴 분석을 수행하였다. 목표 1-2를 위해서는 배출량 소스자료를 분석하여 인간기원 배출량 DB(REAS2), 생물배출량 DB(MEGAN), 산불배출량 DB(FINN)을 확보하여 종합 배출량 DB를 확보하였다. 특히 중국의 배출량은 2016년 최신 배출량 자료를 중국 현지 연구팀으로부터 확보하였다. 대기질모델링시스템(WRF-CMAQ)의 구축을 위해 기상모델은 전세계에서 많은 연구진들이 사용하는 Weather Research and Forecasting(WRF) 모델을 선택하였고 대기화학모델은 현업 대기질 예보에 사용하고 있는 CMAQ 모델을 선택하여 이를 결합한 WRF-CMAQ 모델을 도입하여 구축하였다. 모델 운용을 위한 초기조건과 경계조건은 CMAQ 모델에 탑재된 기후값

기준으로 계산한 초기 및 경계조건 자료의 구조를 분석하여 적용하였다. 또한 모델 운용을 위해 모든 참여대학원생들이 본 대기화학수송모델 개발자인 미국 EPA에서 제공하는 온라인 1:1 교육프로그램(1주일간의 집중 교육프로그램)에 참여하여 직접 모델에 대한 이해와 운용법을 습득하도록 하였다. 이를 통해 확보한 배출량 자료 및 WRF를 통해 생산한 기상장을 이용한 WRF-CMAQ 모델의 시험 운용을 수행하였다. 마지막으로 목표 1-3을 위해서 과거 관측자료 통계분석을 통해 고농도 미세먼지 및 대기오염 이벤트 특성을 분석하였다. 관측자료는 2001년부터 2019년까지 한국 전역의 대기오염망 자료 DB를 확보(총 402개 지점; PM<sub>2.5</sub>는 2015년 이후)하여 사용하였다. (초)미세먼지에 대해 농도 시계열 분포로부터 고농도 초미세먼지 오염 특성 변화를 분석하였고 한국 전역에 대해 고농도 초미세먼지 사건 발생 시 이들의 공간분포 특성 분석을 수행하였다.

2차년도 연구개발목표는 1차년도 연구개발목표를 기반으로 북극기후 변동에 따른 한국에서의 고농도 (초)미세먼지 오염 특성을 규명하고자 하였고 이를 위한 세부 연구목표는 다음과 같다.

- 목표 2-1: 북극발 기상장 변화에 따른 대기질 모델 민감도 실험 입력자료 확보
- 목표 2-2: 한반도 배출량소스 변화에 따른 대기질 모델 민감도 실험 입력자료 확보
- 목표 2-3: 플라볼텍스 및 제트기류의 이상난동이 한반도 대기질에 미치는 영향 규명
- 목표 2-4: 관측자료 기반 모델 결과 해석(목표 2-1)

위의 세부 목표는 다음과 같이 달성하였다.

목표 2-1 달성을 위해서 한반도 고농도 미세먼지 발생일(PM<sub>10</sub> 기준)의 기압장(Z500) 자료를 바탕으로 군집분석(k-mean clustering)을 수행하여 도출된 고농도 미세먼지 유발 기상장의 유형을 다음과 같이 파악하였다: 파동전파 유형, 정체고기압 유형, 캄차카블로킹 관련 유형. PM<sub>2.5</sub>는 2015년 이후 관측자료가 존재하기 때문에 자료의 부족으로 k-mean clustering 결과를 신뢰할 수 없어 시계열 통계분석을 통해 한국 내에서 고농도 발생 시 PM<sub>2.5</sub>의 공간분포 특성에 따라 오염패턴을 3가지로 분류하였다(Case I - III). 유형별 기압장(Z500) 합성분석을 통해 고농도 미세먼지 관련 대기패턴을 산출하고 패턴별 모델 입력 기상장 자료를 확보하였다. 목표 2-2 달성을 위해서는 한반도 주변지역 오염물질 배출경향을 분석하고 이를 활용하여 배출량 자료를 조정하였다. 이를 위해 선행연구 조사를 통해 중국 대기오염물질 배출량 변동 경향을 분석하고 1차년에 확보한

2016년 중국지역 오염물질 배출량 변동 경향을 반영하였다. 목표 2-3 달성을 위해서는 유형별 기압장(Z500, Z850), 연직 온도장, 연직 바람장 합성분석으로 고농도 미세먼지 발생에 영향을 미치는 대기순환 구조를 파악하였고 대기순환에 따른 한반도 미세먼지 농도에 대해 정량적으로 분석하였다. 또한 유형별 기압장(Z500)의 시간지연 합성분석을 통해 중관기상 패턴을 분석하고 유형별 고농도 미세먼지 시간 규모에 대해 분석하였다. 특히, 파동활동속(wave activity flux) 분석을 통한 북극 영향을 분석하여, 한반도 고농도 미세먼지 유발 기상장 유형에 북극의 영향이 직접적으로 작용한 사례를 정량적으로 추출함으로써 북극변동이 동아시아 중관기상장에 미치는 영향과 결과적으로 한국의 미세먼지 오염에 미치는 영향을 규명하였고 한국의 고농도 미세먼지 오염에 북극변동과 관련이 있는 사례를 정량적으로 제시하였다. 목표 2-4 달성을 위해 한국 전역 400 측정지점으로부터 획득한 초미세먼지 시계열 통계분석 확장을 통해 2015 - 2019년 사이 발생한 모든 고농도 초미세먼지 사례에 대한 한국 전역의 전반적 특성을 분석하였다. 먼저 시계열 통계분석을 통해 한국 전역의 고농도 초미세먼지 오염의 시공간적 변동 패턴을 3가지 유형으로 분류하여 고농도 오염 발생과 연관된 중관기상장과 기상 아노말리 합성 분석을 수행하였다. 관련 기상요소는 기압장(Z500, Z850), 바람장(U850, U10), 연직 온도장, 연직 바람장 등을 포함하였다. 이를 목표 2-3에서 파악한 동아시아 고농도 미세먼지 대표패턴 결과와 비교함으로써 WRF-CMAQ 사례연구에 북극변동 영향에 기인한 유형과 부합하는 초미세먼지 분포유형을 포함하여 두 결과를 연계할 수 있도록 하였다. 마지막으로 위의 목표를 종합하여 대기화학수송모델(WRF-CMAQ)을 이용하여 북극 영향 사례에 대해 사례연구를 수행하였다. 이를 위해 북극변동에 기인한 유형인 파동전과 유형에 해당하는 고농도 미세먼지 오염사례와 정체고기압 유형에 해당하는 사례에 대해 WRF-CMAQ 모델링을 수행하였다. WRF-CMAQ의 초기 및 경계조건은 미국 EPA에서 제공하는 전구 화학모델 자료를 이용한 동적 초기/경계 조건을 적용하였다. 모델링 결과는 ECMWF에서 운용하는 CAMS(the Copernicus Atmosphere Monitoring Service)와 서울지역 PM<sub>10</sub> 측정자료와 비교함으로써 한국 미세먼지 대기질에 북극변동이 미치는 영향을 재현하였다.

위의 정성적 달성도를 종합하면 연구계획서에 제시하였고 연차실적보고를 통해 계획하였던 본 연구의 목표를 적절히 달성하였다고 판단된다. 본 연구의 짧은 연구기간(2년)과 본 연구주제가 한국 (초)미세먼지 오염에 대한 북극변동의 영향 규명이라는 한국뿐만 아니라 국제적으로도 찾기 어려운 매우 독창적이고 도전적인 주제라는 점에서 본 연구의 달성도는 인정될 수 있다고 생각되며 본 연구는 향후 극지기후 변동이 동아시아의 대기질에 미치는 영향에 대한 예측 연구의 중요한 발판이 될 수 있을 것으로 판단된다.

<정성적 목표 달성도>

구분	년도	연구개발목표	연구개발내용	달성도 (%)
1차년도	2018	북극고온현상에 따른 동아시아 대기순환변화 이해	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 북극 고온현상에 따른 동아시아 주변 바람장 및 온도장 분석</li> <li>• 동아시아 기압계 패턴 변화 분석</li> </ul>	100
		동아시아 주변 기상장 변화 및 한반도 주변 배출소스 민감도 실험을 위한 대기질 모델링 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 배출량 소스자료 분석</li> <li>• 초기/경계조건 확보</li> <li>• CMAQ 모델링 시스템 구축 및 시험 운용</li> </ul>	100
		한반도 내 미세먼지, 오존을 포함한 대기질 관측자료 데이터베이스 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 과거 관측자료 통계분석을 통해 고농도 미세먼지 및 대기오염 이벤트 특성 분석</li> </ul>	100
2차년도	2019	북극발 기상장 변화에 따른 대기질 모델 민감도 실험 입력자료 확보	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 북극발 이상난동 및 정상흐름에 해당하는 3차원 바람 및 온도장 제작</li> </ul>	100
		한반도 주변 배출량 소스변화에 따른 대기질 모델 민감도 실험 입력자료 확보	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중국 배출량 소스 변화에 따른 대기질 모델 민감도 실험을 위해 고배출량/ 저배출량 시나리오 제작</li> </ul>	100
		플라볼렉스 및 제트기류의 이상난동이 한반도 대기질에 미치는 영향 규명	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 북극요인 기상장 변화와 한반도 및 인근 지역 배출량 소스 변화의 상대적 기여도 정량 평가</li> <li>• 북극온난화와 관련성 높은 고농도 미세먼지 대표 사례 선정, 대기질 수치모델 및 관측자료를 이용한 북극발 기상변화와 동아시아 미세먼지 변화의 관계 규명</li> </ul>	100
		관측자료 기반 모델 결과 해석	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 북극고온현상 발생시와 평상시에 대한 자료 추출과 농도 및 분포 특성 차이 분석</li> <li>• 모델 결과와 결합한 자료 해석</li> </ul>	100

<정량적 목표>

○ SCI 논문 2편 투고 (심사중)

- **Ku, H.-Y., Noh, N., Jeong, J.-H. Koo, J.-H., Choi, W., Lee, D., Ban, S.-J., Kim, B.-M., 2020. Classification of large-scale circulation patterns and their spatio-temporal variability during High-PM10 events over the Korean Peninsula, Atmospheric Environment under review.**
- **Han, S., Park, Y., Noh, N., Kim, J.-H., Kim, J.-J., Kim, B.-M., Choi, W., 2020.**

Typical patterns of spatiotemporal PM2.5 distributions and synoptic weather anomalies for severe pollution events: based on observations from 402 air quality monitoring stations over South Korea. **Atmospheric Environment**, under review.

## 제 2 절 대외기여도

### 1. 인력양성

본 연구를 통해 총 3명의 석사를 배출하였고 그중 2명이 박사과정에 진학하여 극지변동-대기질 연계 연구를 지속하고 있다. 또한, 연구기반 확대를 통해 연구 참여 연구실에 과제 참여대학원생 포함 총 15명의 학생연구인력을 확보하였고(박사과정 3명, 석사과정 11명), 본 연구주제에 관심이 있는 여러 명의 학부과정 학생들이 석사진학을 희망하며 해당 연구실에서 인턴으로 연구를 준비하고 있다. 본 연구주제가 한국에서 드문 극지-대기환경 융합연구임을 감안하면 본 과제를 통해 신규 연구인력의 배출에 큰 기여를 하였다고 판단된다. 특히 본 연구 수행을 통해, 참여 연구실이 공동으로 수행할 수 있는 (1) WRF-CMAQ 대기질모델링시스템 기반 구축(모델링 수행역량 강화); (2) 지리정보시스템(GIS) 운용기반 구축; (3) 기후정보 처리 능력 함양 등의 연구기반을 구축한 것은 큰 성과라고 생각하며 이에 극지연구소에 감사를 드린다. 구축된 연구기반을 토대로 향후 국내에서는 드물게 극지-동아시아 연계 기후 변동성 연구와 극지-동아시아-한국 연계 대기환경 변동성 연구의 지속적 수행과 극지 연구를 위한 꾸준한 인력양성을 기대한다.

### 2. 학문발전 기여도

본 연구를 통해 극지의 환경변화를 중위도 동아시아의 대기질과 연계함으로써 극지연구의 연구범위 확장에 기여했다고 판단된다. 이를 통해 극지연구의 저변확대에 기여할 수 있을 것이다. 또한 본 연구진이 아는 한 본 연구는 특정한 극지환경의 변화와 한국의 대기질을 연계하는 첫 시도로 대기질의 변화 연구에 대한 새로운 지표를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

궁극적으로 본 연구는 극지기후-기상-대기화학-환경과학의 융합연구라는 점에서 현재 세계적 추세인 지속가능한 발전사회를 위한 다학제간 융합연구이므로 본 연구를 통해 한국 대기환경 분야에서의 다학제간 융합연구의 초석이 될 수 있을 것으로 기대한다.

### 3. 경제적 기여도

현재 한국의 대기질 개선 노력은 초미세먼지의 화학적 형성기작과 발생원의 배출량 감소에 초점을 맞추어 진행되고 있다. 본 연구는 극지 기후변화에 영향을 받은 기상장의 변화가 대기질에 미치는 영향을 정성 평가함으로써 대기질 개선을 위한 국가정책에 중요한 기초자료를 제공할 것으로 기대한다. 이를 통하여 보다 정확한 진단에 기반한 효율적인 정책수립에 기여할 수 있으며, 효율적인 대기질 개선정책은 시행착오를 줄임으로써 국가 경제에 기여할 것으로 기대된다.



## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통해 북극에 기인한 대기순환 변동이 한국의 고농도 (초)미세먼지 오염에 미치는 영향을 규명함으로써 다음과 같은 활용방안이 있을 것으로 기대된다.

첫째, 현재까지 한국에서의 (초)미세먼지 대기질 연구는 주로 화학적 생성과정 규명과 화학조성을 통한 발생원 규명 및 국내 발생원 배출량 연구에 초점이 맞춰졌다. 그러나 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>)를 포함한 대기 중 오염물질의 농도는 주변 기상장의 영향에 매우 민감하게 반응한다. 따라서 기상장의 변화를 보다 정확하게 예측하는 것이 고농도 오염 이벤트의 예측에 매우 중요하다. 특히, 본 연구를 통해 북극에서 전파되는 파동현상의 존재가 중요함을 확인하여 이러한 기초 연구를 기반으로 향후 극지연구소와 협력 연구를 통해 북극이 한반도에 미치는 환경적 영향과 오염물질 장기변화 예측 연구가 활성화될 수 있을 것으로 기대되며 이에 본 연구 결과가 기초자료로 활용될 수 있다.

둘째, 본 연구결과를 활용하여 장기적 대기질의 변화 정확도를 향상시킴으로써 기후모델에서 미래 대기조성의 영향을 고려하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

셋째, 본 연구로부터 향후 보다 다양한 요소를 고려한 북극 기후변동이 한국과 동아시아 대기질에 미치는 영향으로 연구범위를 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 결과와 향후 추가 연구 결과를 결합하여 극지 기후변동이 동아시아 대기질에 미치는 기작에 대한 보다 확실적인 규명을 통해 미래 북극의 기후변화에 대한 대기질 변화 예측에 관한 추가 논문을 생산할 계획을 세우고 있다. 또한 본 연구과제인 극지-중위도 환경변화의 연결고리에 관한 기초연구 결과를 바탕으로 극지연구소 중심으로 이를 활용한 국가연구개발사업으로 발전시킴으로써 극지-동아시아 대기환경 융합연구 개발이 더욱 활성화되기를 기대한다.

## 제 6 장 참고문헌

- 국립환경과학원, 2019a. 대기환경연보 2018. 국립환경과학원, 인천.
- 국립환경과학원, 2019b. 동북아 장거리이동 대기오염물질 국제공동연구(LTP) 요약보고서. 국립환경과학원, 인천.
- 국립환경과학원, 2020. 대기질 장기예측 모델 개발(II) -예측인자 고도화- (NIER-2020-01-02- 021) 최종보고서. 국립환경과학원, 인천.
- 문난경, 김순태, 서지현, 2011. PBL Scheme에 대한 WRF-CMAQ 민감도 분석, 한국대기환경학회지, 27(6), 791-804. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.6.791>
- 우정현, 부찬중, 김진수, 김영성, 김윤하, 2018. 중국 대기오염물질 배출의 시공간적 변화 분석, 한국대기환경학회지, 34(1), 87-100. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.087>
- 이재형, 장임석, 이상현, 2015. WRF-Chem 모형을 이용한 한반도 대기질 모의: 화학 초기 및 측면 경계 조건의 영향, 대기, 25(4), 639-657. <http://dx.doi.org/10.14191/Atmos.2015.25.4.639>
- 이현주, 정여민, 김선태, 이우섭, 2018. 한반도 미세먼지 발생과 연관된 대기 패턴 그리고 미래 전망, 한국기후변화학회지, 9(4), 423-433. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.4.423>
- Cai, W., Li, K., Liao, H., Wang, H., Wu, L., 2017. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 7, 257 - 262. <https://doi.org/10.1038/nclimate3249>
- Chang, L.S., Cho, A., Park, H., Nam, K., Kim, D., Hong, J.H., Song, C.K., 2016. Human-model hybrid Korean air quality forecasting system. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 66, 896 - 911. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1206995>
- Chen, J., Zhou, C., Wang, S., Li, S., 2018. Impacts of energy consumption structure, energy intensity, economic growth, urbanization on PM2.5 concentrations in countries globally. *Appl. Energy* 230, 94 - 105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.089>
- Choi, W., He, M., Barbesant, V., Kozawa, K.H., Mara, S., Winer, A.M., Paulson, S.E., 2012. Prevalence of wide area impacts downwind of freeways under pre-sunrise stable atmospheric conditions. *Atmos. Environ.* 62, 318 - 327. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.084>
- De Gouw, J., Jimenez, J.L., 2009. Organic Aerosols in the Earth's Atmosphere. *Environ. Sci. Technol.* 43, 7614 - 7618. <https://doi.org/10.1021/es9006004>



- Gong, T., Luo, D., 2017. Ural Blocking as an Amplifier of the Arctic Sea Ice Decline in Winter. *J. Clim.* 30, 2639 - 2654. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0548.1>
- Han, C., Kim, S., Lim, Y.-H., Bae, H.-J., Hong, Y.-C., 2018. Spatial and Temporal Trends of Number of Deaths Attributable to Ambient PM<sub>2.5</sub> in the Korea. *J Korean Med Sci* 33. <https://dx.doi.org/10.3346%2Fjkms.2018.33.e193>
- Han, Y.-J., Kim, S.-R., Jung, J.-H., 2011. Long-term measurements of atmospheric PM<sub>2.5</sub> and its chemical composition in rural Korea. *J. Atmos. Chem.* 68, 281 - 298. <https://doi.org/10.1007/s10874-012-9225-6>
- Han, S., Park, Y., Noh, N., Kim, J.-H., Kim, J.-J., Kim, B.-M., Choi, W., 2020. Typical patterns of spatiotemporal PM<sub>2.5</sub> distributions and synoptic weather anomalies for severe pollution events: based on observations from 402 air quality monitoring stations over South Korea. *Atmos. Environ.* (under review)
- HARADA, Y., KAMAHORI, H., KOBAYASHI, C., ENDO, H., KOBAYASHI, S., OTA, Y., ONODA, H., ONOGI, K., MIYAOKA, K., TAKAHASHI, K., 2016. The JRA-55 Reanalysis: Representation of Atmospheric Circulation and Climate Variability. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II* 94, 269 - 302. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2016-015>
- He, Z., Kim, Y.J., Ogunjobi, K.O., Hong, C.S., 2003. Characteristics of PM<sub>2.5</sub> species and long-range transport of air masses at Taean background station, South Korea. *Atmos. Environ.* 37, 219 - 230. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00834-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00834-8)
- Heo, J.-B., Hopke, P.K., Yi, S.-M., 2009. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Seoul, Korea. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 4957 - 4971. <https://doi.org/10.5194/acp-9-4957-2009>
- Heo, J., Schauer, J.J., Yi, O., Paek, D., Kim, H., Yi, S.-M., 2014. Fine Particle Air Pollution and Mortality: Importance of Specific Sources and Chemical Species. *Epidemiology* 25. <https://doi.org/10.1097/ede.0000000000000044>
- Jung, M.-I., Son, S.-W., Kim, H.C., Kim, S.-W., Park, R.J., Chen, D., 2019. Contrasting synoptic weather patterns between non-dust high particulate matter events and Asian dust events in Seoul, South Korea. *Atmos. Environ.* 214, 116864. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116864>
- Kim, B.-M., Hong, J.-Y., Jun, S.-Y., Zhang, X., Kwon, H., Kim, S.-J., Kim, J.-H., Kim, S.-W., Kim, H.-K., 2017. Major cause of unprecedented Arctic warming in January 2016: Critical role of an Atlantic windstorm. *Sci. Rep.* 7, 40051. <https://doi.org/10.1038/srep40051>

- Kim, B.-M., Son, S.-W., Min, S.-K., Jeong, J.-H., Kim, S.-J., Zhang, X., Shim, T., Yoon, J.-H., 2014. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat. Commun.* 5, 4646. <https://doi.org/10.1038/ncomms5646>
- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S., 2017. Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory. *Atmos. Chem. Phys.* 17, 10315 - 10332. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10315-2017>
- Kim, H.C., Kim, S., Son, S.-W., Lee, P., Jin, C.-S., Kim, E., Kim, B.-U., Ngan, F., Bae, C., Song, C.-K., Stein, A., 2016. Synoptic perspectives on pollutant transport patterns observed by satellites over East Asia: Case studies with a conceptual model. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2016, 1 - 30. <https://doi.org/10.5194/acp-2016-673>
- Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.-U., Jin, C.-S., Hong, S., Park, R., Son, S.-W., Bae, C., Bae, M., Song, C.-K., Stein, A., 2017. Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea. *Sci. Rep.* 7, 4710. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05092-8>
- Kim, H.-S., Huh, J.-B., Hopke, P.K., Holsen, T.M., Yi, S.-M., 2007. Characteristics of the major chemical constituents of PM<sub>2.5</sub> and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004. *Atmos. Environ.* 41, 6762 - 6770. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.04.060>
- Kim, N.K., Kim, Y.P., Kang, C.-H., 2011. Long-term trend of aerosol composition and direct radiative forcing due to aerosols over Gosan: TSP, PM<sub>10</sub>, and PM<sub>2.5</sub> data between 1992 and 2008. *Atmos. Environ.* 45, 6107 - 6115. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.051>
- Kim, T.-Y., Kim, H., Yi, S.-M., Cheong, J.-P., Heo, J., 2018. Short-term Effects of Ambient PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> on Mortality in Major Cities of Korea. *Aerosol Air Qual. Res.* 18, 1853 - 1862. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.11.0490>
- KOBAYASHI, S., OTA, Y., HARADA, Y., EBITA, A., MORIYA, M., ONODA, H., ONOGI, K., KAMAHORI, H., KOBAYASHI, C., ENDO, H., MIYAOKA, K., TAKAHASHI, K., 2015. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II* 93, 5 - 48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- Krudysz, M., Moore, K., Geller, M., Sioutas, C., Froines, J., 2009. Intra-community spatial variability of particulate matter size distributions in Southern California/Los Angeles. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 1061 - 1075. <https://doi.org/10.5194/acp-9-1061-2009>

- Ku, H.-Y., Noh, N., Jeong, J.-H., Koo, J.-H., Choi, W., Lee, D., Ban, S.-J., Kim, B.-M., 2020. Classification of large-scale circulation patterns and their spatio-temporal variability during High-PM10 events over the Korean Peninsula, *Atmos. Environ.* (under review)
- Kug, J.-S., Jeong, J.-H., Jang, Y.-S., Kim, B.-M., Folland, C.K., Min, S.-K., Son, S.-W., 2015. Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nat. Geosci.* 8, 759 - 762. <https://doi.org/10.1038/ngeo2517>
- Lee, G., Lee, J.-B., Oh, H.-R., Ho, C.-H., Park, D.-S.R., Kim, J., Chang, L.-S., Choi, J., Sung, M., 2018. Slow Decreasing Tendency of Fine Particles Compared to Coarse Particles Associated with Recent Hot Summers in Seoul, Korea. *Aerosol Air Qual. Res.* 18, 2185 - 2194. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.10.0403>
- Lee, G., Oh, H.-R., Ho, C.-H., Kim, J., Song, C.-K., Chang, L.-S., Lee, J.-B., Lee, S., 2016. Airborne Measurements of High Pollutant Concentration Events in the Free Troposphere over the West Coast of South Korea between 1997 and 2011. *Aerosol Air Qual. Res.* 16, 1118 - 1130. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.06.0407>
- Liu, Y., Zhao, N., Vanos, J.K., Cao, G., 2017. Effects of synoptic weather on ground-level PM2.5 concentrations in the United States. *Atmos. Environ.* 148, 297 - 305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.052>
- Lu, X., Lin, C., Li, Y., Yao, T., Fung, J.C.H., Lau, A.K.H., 2017. Assessment of health burden caused by particulate matter in southern China using high-resolution satellite observation. *Environ. Int.* 98, 160 - 170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.002>
- Moore, K., Krudysz, M., Pakbin, P., Hudda, N., Sioutas, C., 2009. Intra-Community Variability in Total Particle Number Concentrations in the San Pedro Harbor Area (Los Angeles, California). *Aerosol Sci. Technol.* 43, 587 - 603. <https://doi.org/10.1080/02786820902800900>
- Park, E.H., Heo, J., Kim, H., Yi, S.-M., 2020. Long term trends of chemical constituents and source contributions of PM2.5 in Seoul. *Chemosphere* 251, 126371. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126371>
- Park, H.-J., Ahn, J.-B., 2016. Combined effect of the Arctic Oscillation and the Western Pacific pattern on East Asia winter temperature. *Clim. Dyn.* 46, 3205 - 3221. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2763-2>
- Park, R.J., Kim, S.-W., 2014. Air quality modeling in East Asia: present issues and future directions. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 50, 105 - 120. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0030-9>

- Park, S.-S., Jung, S.-A., Gong, B.-J., Cho, S.-Y., Lee, S.-J., 2013. Characteristics of PM<sub>2.5</sub> Haze Episodes Revealed by Highly Time-Resolved Measurements at an Air Pollution Monitoring Supersite in Korea. *Aerosol Air Qual. Res.* 13, 957 - 976. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.07.0184>
- Park, Y., Park, K., Kim, H., Yu, S., Noh, S., Kim, M., Kim, J., Ahn, J., Lee, M., Seok, K., Kim, Y., 2018. Characterizing isotopic compositions of TC-C, NO<sub>3</sub>-N, and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in PM<sub>2.5</sub> in South Korea: Impact of China's winter heating. *Environ. Pollut.* 233, 735 - 744. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.072>
- Pinto, J.P., Lefohn, A.S., Shadwick, D.S., 2004. Spatial Variability of PM<sub>2.5</sub> in Urban Areas in the United States. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 54, 440 - 449. <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470919>
- Turner, J.R., Allen, D.T., 2008. Transport of Atmospheric Fine Particulate Matter: Part 2—Findings from Recent Field Programs on the Intraurban Variability in Fine Particulate Matter. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 58, 196 - 215. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.2.196>
- Wilson, J.G., Kingham, S., Pearce, J., Sturman, A.P., 2005. A review of intraurban variations in particulate air pollution: Implications for epidemiological research. *Atmos. Environ.* 39, 6444 - 6462. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.030>
- Wongphatarakul, V., Friedlander, S.K., Pinto, J.P., 1998. A Comparative Study of PM<sub>2.5</sub> Ambient Aerosol Chemical Databases. *Environ. Sci. Technol.* 32, 3926 - 3934. <https://doi.org/10.1021/es9800582>
- Xu, Y., Xue, W., Lei, Y., Zhao, Y., Cheng, S., Ren, Z., Huang, Q., 2018. Impact of Meteorological Conditions on PM<sub>2.5</sub> Pollution in China during Winter. *Atmosphere (Basel)*. 9, 429. <https://doi.org/10.3390/atmos9110429>
- Zhang, Z., Zhang, X., Gong, D., Kim, S.-J., Mao, R., Zhao, X., 2016. Possible influence of atmospheric circulations on winter haze pollution in the Beijing - Tianjin - Hebei region, northern China. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 561 - 571. <https://doi.org/10.5194/acp-16-561-2016>
- Zou, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Koo, J.-H., 2017. Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China. *Sci. Adv.* 3, e1602751. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602751>

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 PAP사업 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 PAP 사업으로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.