TIGGE data를 이용한 고농도 미세먼지와 황사 사례에 대한 종관기상장 예보 검증

연세대학교 대학원

대 기 과 학 과

류 승 우

TIGGE data를 이용한 고농도 미세먼지와 황사 사례에 대한 종관기상장 예보 검증

지도교수 박 상 훈

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2020년 12월 17일

연세대학교 대학원

대 기 과 학 과

류 승 우

류승우의 석사 학위논문을 인준함

심사위원 박 상 훈 (인)

심사위원 구 자 호 (인)

심사위원 유 창 현 (인)

연세대학교 대학원

2020년 12월 17일

감사의 글

2년여 간의 석사 학위 과정의 끝이 다가왔습니다. 대학원 진학과 졸업을 통해 저는 한단계 성장했고, 학위 과정을 마무리 짓기까지 많은 사람들의 도움을 받았습니다. 이 자리를 빌어서 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저, 지도 교수님이신 박상훈 교수님께 감사드립니다. 또한, 학위 논문 심사에 흔쾌히 응해 주신 구자호 교수님, 유창현 교수님께도 감사드립니다. 교수님께서 심사를 통해 해 주신 말씀들 덕분에 더욱 고민하고 분석하여 학위 논문을 작성할 수 있었습니다. 또한, 많은 가르침을 주신 대기과학과 모든 교수님들께도 감사의 말씀드립니다.

석사학위과정 동안 많은 시간을 함께 해 온 대기모형연구실 동료들에게도 감사의 말씀 전합니다. 부족한 점이 많아 잦은 질문과 도움을 요청했음에도 성심성의껏 가르쳐 줘서 정말 고맙다고 전하고 싶습니다. 특히, 코딩 관련해서 아무것도 모르는 백지 같은 상황에서 동료들의 조언과 가르침 덕분에 학위 과정을 끝까지 잘 마무리할 수 있었습니다. 또한, 고민이 있거나 힘든 일이 있을 때마다 들어주고 찾아와주던 친구들과 항상 믿고 지지해주신 가족에게도 감사의 말씀 전합니다.

석사 학위 과정 동안, 그리고 학위논문을 작성하는 과정 동안 느꼈던 여러 어려움과 느낀 점을 통해 앞으로 더욱 발전되는 연구 생활 이어 나갈 수 있도록 하겠습니다. 감사합니다.

차 례

그림 차례 iv

표 차례 xii

국문 요약 xiii

제1장 서론 1

1.1 연구 배경 1

1.2 연구 동기와 목적 12

제2장 자료 및 방법론 20

제3장 연구 결과 23

3.1 고농도 미세먼지와 황사의 연도별 통계 분석 23

3.2 각 사례의 종관기상장 분석과 예보 검증 27

3.2.1 전체 기간(2014/15~2018/19년) 30

3.2.1.1 종관기상장 분석 30

3.2.1.2 RMSE 34

3.2.1.3 500hPa gph 편차 35

3.2.1.4 블로킹지수 편차 42

3.2.2 2014/15년 44
3.2.1.1 종관기상장 분석 44
3.2.1.2 RMSE 48
3.2.1.3 500hPa gph 편차 49
3.2.1.4 블로킹지수 편차 55
3.2.3 2015/16년 57
3.2.1.1 종관기상장 분석 57
3.2.1.2 RMSE 61
3.2.1.3 500hPa gph 편차 62
3.2.1.4 블로킹지수 편차 67
3.2.4 2016/17년 69
3.2.1.1 종관기상장 분석 69
3.2.1.2 RMSE 73
3.2.1.3 500hPa gph 편차 74
3.2.1.4 블로킹지수 편차 79
3.2.5 2018/19년 81
3.2.1.1 종관기상장 분석 81
3.2.1.2 RMSE 85
3.2.1.3 500hPa gph 편차 86

3.2.1.4 블로킹지수 편차 92

제4장 요약 및 결론 94

참고 문헌 99

Abstract 101

그 림 차 례

Figure 1. Schematic diagram of the source regions and transport pathways of high-PM_{10} concentrations in Seoul, South Korea. Desert regions are shaded. The geographical location of Seoul is denoted by the red triangle 2

Figure 2. Composite of anomalous 850hPa air temperature (a,b); 500hPa geopotential height (c,d); precipitation (e,f); 850hPa wind speed (g,h); and 200hPa wind speed (i,j). The left and right panels are periods of high- and low-PM_{10} episodes, respectively. Dots indicate grids with the 95% statistical significance based on a t-test 3

Figure 3. Spatial distributions of simulated PM_{10} concentrations from using (a) FNL(1st panel), (b) GFS(2nd panel) data, and (c) its differences(3rd panel). The red area in (c) means the PM_{10} concentrations from FNL data is higher than GFS 7

Figure 4. The correlation between the monthly frequency of high−PM_{10} events and the monthly frequency of blocking. The contour interval is 0.1. The white area indicates that there is no blocking during the study period. The hatched pattern denotes the statistical significance at a 95% confidence level 8

Figure 5. The change of (a) accuracy and (b) HSS for the anomaly (AN, black solid line) and gradient (GR, red dashed line) methods 9

Figure 6. (a) Climatological 500hPa geopotential height and wind anomalies during MAM. (b−g) Composite 500hPa geopotential height and wind anomalies from lag −2 to lag 0 days during (left) High PM_{10} events and (right) Asian Dust events. The shading and black vectors dunote statistically significant values at the 95% confidence level. The red triangle indicates the geographical location of Seoul 11

Figure 7. 500hPa geopotential height(contour) and 500hPa gph anomalies(shading)(a,b); 850hPa geopotential height(contour) and 850hPa wind speed anomalies(shading)(c,d); and 200hPa geopotential

height(contour) and 200hPa wind speed anomalies(shading)(e,f). The left and right panels are high- PM_{10} (2018/11/06) and Yellow dust (2018/11/27) periods, respectively 14

Figure 8. Same as Figure 7, but 850hPa temperature anomalies(a,b), 850hPa relative humidity(c,d), and sea surface temperature(e,f) 15

Figure 9. Composite of 500hPa geopotential height(contour) and 500hPa gph anomalies(shading)(a,b); 850hPa geopotential height(contour) and 850hPa wind speed anomalies(shading)(c,d); and 200hPa geopotential height(contour) and 200hPa wind speed anomalies(shading)(e,f) during Oct-Mar 2001/02~2019/20. The left and right panels are high-PM_{10} and Yellow dust periods, respectively 18

Figure 10. Same as Figure 8, but 850hPa temperature anomalies(a,b), 850hPa relative humidity(c,d), and sea surface temperature(e,f) 19

Figure 11. Annual timeseries of days(black line), duration(blue line), and intensity of high- PM_{10} and Yellow dust in Oct-Mar

2001/02~2019/20 25

Figure 12. Annual timeseries of latitude(top) and intensity(bottom) of jet streak of high- PM_{10} (red) and Yellow dust(blue) in Oct-Mar 2001/02~2019/20 26

Figure 13. Composite of 500hPa geopotential height(contour) and 500hPa gph anomalies(shading) during Oct-Mar 2014/15~2018/19. Domain of Forecast verification is green box (20-50N, 100-150E) 29

Figure 14. Same as Figure 7, but during Oct-Mar 2014/15~2018/19 32

Figure 15. Same as Figure 14, but 850hPa temperature, 850hPa relative humidity, and sea surface temperature 33

Figure 16. RMSE of 500hPa geopotential height and blocking index of forecasting field of TIGGE models during Oct-Mar 2014/15~2018/19 ...35

Figure 17. Bias of 500hPa geopotential height of 0(a,b), 120(c,d),

240(e,f)hours forecast field of TIGGE models about high−PM_{10} periods during Oct−Mar 2014/15~2018/19; left column−ECMWF, right column−NCEP 38

Figure 18. Same as Figure 17, but left column−KMA, right column−JMA 39

Figure 19. Same as Figure 17, but about Yellow dust periods 40

Figure 20. Same as Figure 18, but about Yellow dust periods 41

Figure 21. Bias of blocking index of 0, 120, 240hours(top, middle, bottom) forecast field of TIGGE models about high− PM_{10} (left) and Yellow dust(right) periods during Oct−Mar 2014/15~2018/19 43

Figure 22. Same as Figure 14, but during Oct−Mar 2014/15 46

Figure 23. Same as Figure 15, but during Oct−Mar 2014/15 47

Figure 24. Same as Figure 16 but during Oct–Mar 2014/15 48

Figure 25. Same as Figure 17, but during Oct–Mar 2014/15 51

Figure 26. Same as Figure 18, but during Oct–Mar 2014/15 52

Figure 27. Same as Figure 19, but during Oct–Mar 2014/15 53

Figure 28. Same as Figure 20, but during Oct–Mar 2014/15 54

Figure 29. Same as Figure 21, but during Oct–Mar 2014/15 56

Figure 30. Same as Figure 14, but during Oct–Mar 2015/16 59

Figure 31. Same as Figure 15, but during Oct–Mar 2015/16 60

Figure 32. Same as Figure 16 but during Oct–Mar 2015/16 61

Figure 33. Same as Figure 17, but during Oct–Mar 2015/16 63

Figure 34. Same as Figure 18, but during Oct–Mar 2015/16 64

Figure 35. Same as Figure 19, but during Oct–Mar 2015/16 65

Figure 36. Same as Figure 20, but during Oct–Mar 2015/16 66

Figure 37. Same as Figure 21, but during Oct–Mar 2015/16 68

Figure 38. Same as Figure 14, but during Oct–Mar 2016/17 71

Figure 39. Same as Figure 15, but during Oct–Mar 2016/17 72

Figure 40. Same as Figure 16 but during Oct–Mar 2016/17 73

Figure 41. Same as Figure 17, but during Oct–Mar 2016/17 75

Figure 42. Same as Figure 18, but during Oct–Mar 2016/17 76

Figure 43. Same as Figure 19, but during Oct–Mar 2016/17 77

Figure 44. Same as Figure 20, but during Oct–Mar 2016/17 78

Figure 45. Same as Figure 21, but during Oct–Mar 2016/17 80

Figure 46. Same as Figure 14, but during Oct–Mar 2018/19 83

Figure 47. Same as Figure 15, but during Oct–Mar 2018/19 84

Figure 48. Same as Figure 16 but during Oct–Mar 2018/19 85

Figure 49. Same as Figure 17, but during Oct–Mar 2018/19 88

Figure 50. Same as Figure 18, but during Oct–Mar 2018/19 89

Figure 51. Same as Figure 19, but during Oct–Mar 2018/19 90

Figure 52. Same as Figure 20, but during Oct–Mar 2018/19 91

Figure 53. Same as Figure 21, but during Oct–Mar 2018/19 93

표 차 례

Table 1. Statistics of model performance for the simulated temperature and wind speed 6

Table 2. TIGGE model data information in ECMWF, NCEP, KMA, JMA 21

Table 3. Number of high-PM_{10} and Yellow dust days and yearly-mean concentration($\mu g/m^3$) of PM_{10} for each year during the period Oct-Mar 2014/15~2018/19 28

국문요약

TIGGE data를 이용한 고농도 미세먼지와 황사 사례에 대한 종관기상장 예보 검증

최근 들어 중국의 높은 경제 성장에 따른 공해 배출의 증가와 그에 따른 기상요인, 기후변화, 국민들의 건강에 대한 큰 관심, 여러 환경적 문제로 인해 PM_{10}, $PM_{2.5}$와 같은 미세먼지에 대한 관심이 사회적으로 점점 커지고 있다. 이에 따라 기존에 우리나라에 환경적 영향을 끼쳤던 PM_{10}을 포함하는 황사뿐만 아니라 미세먼지의 배출량 분석 및 정확한 진단과 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히 미세먼지의 발생요인, 장거리 수송 등은 수치모델을 이용한 연구가 많이 수행되고 있으며, 이를 활용한 예보의 성능도 최근 많은 관심을 받고 있다. 미세먼지와 황사를 예측하는 모델은 기본적으로 대기 화학 성분 자료와 종관기상장이 초기값으로 활용되어 미세먼지 또는 황사의 공간적 분포와 농도를 예측하는 원리를 가지나, 이중 종관기상장과 연관된 수치모델의 예보 능력은 고농도 미세먼지 사례의 종관기상장에 대한 예보적중성과 깊은 연관을 가진다.

본 연구에서는 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상 시스템이 서로 고기압 아노말리 시스템과 저기압 아노말리 시스템이 지배적인 특징을 나타낸다는 선행 연구에 근거하여 이러한 종관 기상 시스템의 차이에서 두 사례의 예보장에서도 각각의 기상장을 잘 모의할 수 있는지에 대한 연구를 진행할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 TIGGE data를 이용한 고농도 미세먼지와 황사에 영향을 미치는 기상 시스템의 예보장에 대한 예보 검증을 통해 두 사례의 예보 적중성을 비교, 분석하려고 한다.

핵심되는 말: 미세먼지, 황사, 종관기상장, 예보장, 예보 검증

제 1 장. 서론

1.1. 연구 배경

미세먼지는 크게 두가지 경로를 통해 우리나라에 영향을 미치게 되는데, 국내 대도시 또는 산업단지에서 발생하거나 중국 동부 지역의 공단 등에서 수송되어 오는 인위적인(anthropogenic) 오염물질이 주가 되는 고농도 미세먼지, 중국 고비 사막 또는 내몽골 지역에서 자연적으로 발원하여 우리나라에 수송되는 사막 모래 먼지인 황사가 있다(Figure 1, Jung et al. 2019). 특히, 최근 들어 중국의 높은 경제 성장에 따른 공해 배출의 증가와 그에 따른 기상요인, 기후변화, 국민들의 건강에 대한 큰 관심, 여러 환경적 문제로 인해 PM_{10}, $PM_{2.5}$와 같은 미세먼지에 대한 관심이 사회적으로 점점 커지고 있다. 이에 따라 기존에 우리나라에 환경적 영향을 끼쳤던 PM_{10}을 포함하는 황사뿐만 아니라 미세먼지의 배출량 분석 및 정확한 진단과 연구가 활발히 진행 중에 있다.

미세먼지 농도와 관련된 종관기상장과 미세먼지 농도를 예측하는 모델에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. Lee et al.(2011)에서는 PM_{10} 농도를 기준으로 고농도 미세먼지(high- PM_{10})와 저농도 미세먼지(low- PM_{10}) 사례에서의 종관기상장에 대한 특징을 분석하였다(Figure 2, Lee et al. 2011). 여러 종관기상변수에 대한 anomaly를 분석하였다. 그 중 뚜렷하게 차이가 난

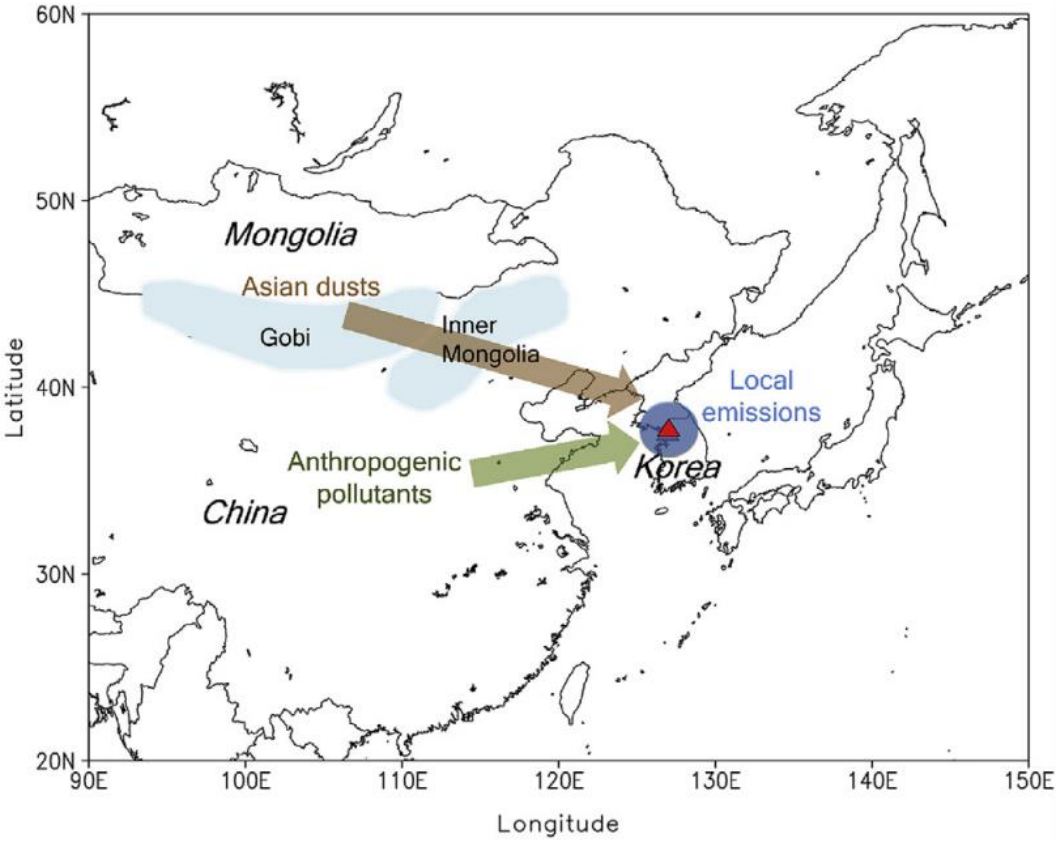

Figure 1. Schematic diagram of the source regions and transport pathways of high−$\mathbf{PM_{10}}$ concentrations in Seoul, South Korea. Desert regions are shaded. The geographical location of Seoul is denoted by the red triangle. (Jung et al. 2019)

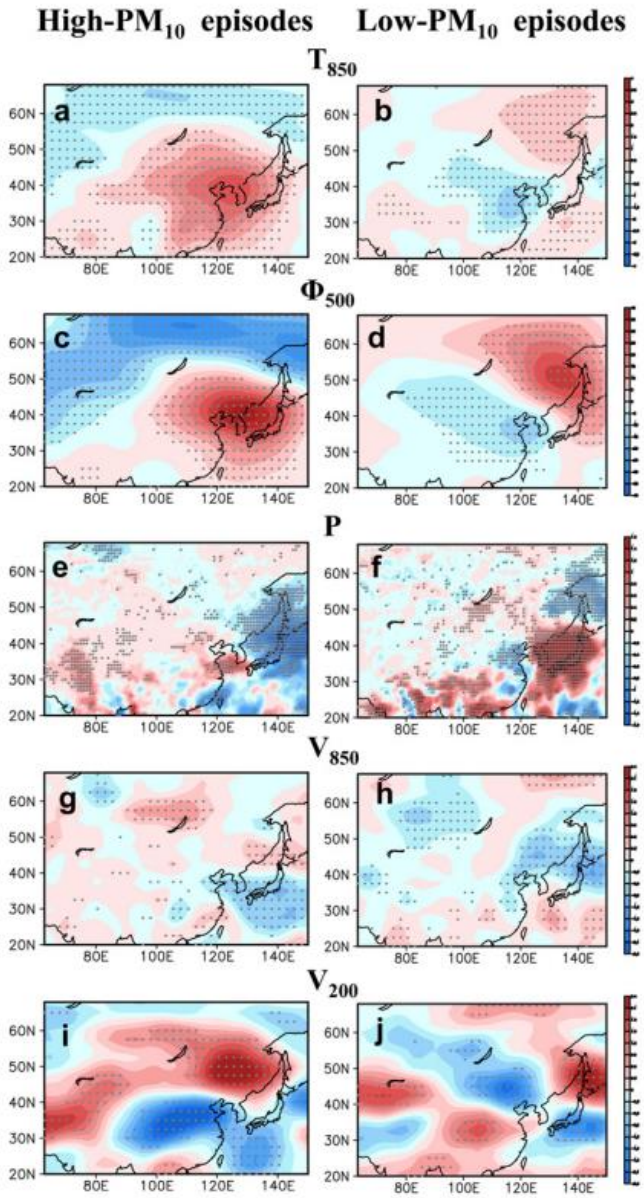

Figure 2. Composite of anomalous 850hPa air temperature (a,b); 500hPa geopotential height (c,d); precipitation (e,f); 850hPa wind speed (g,h); and 200hPa wind speed (i,j). The left and right panels are cases of high- and

low-PM_{10} episodes, respectively. Dots indicate grids with the 95% statistical significance based on a t-test.

변수는 850hPa temperature, 500hPa geopotential height가 있었다. 고농도 미세먼지에서는 한반도 근처에 양의 500hPa geopotential height anomaly가 나타나고 마찬가지로 850hPa temperature 도 양의 anomaly가 나타나지만, 저농도 미세먼지에서는 음의 500hPa geopotential height anomaly가 나타나고, 850hPa temperature는 음의 anomaly가 나타나는 것을 분석하였다. 이에 따라 고농도 미세먼지 사례에서는 한반도 근처에 고기압 anomaly 시스템이 형성될 수 있으며, 저농도에서는 저기압 anomaly 시스템이 형성되는 것을 알 수 있다. 이 연구를 통해 미세먼지의 농도에 기여하는 종관기상장의 패턴이 존재하는 것을 알게 되었다.

미세먼지 농도를 예측하기 위한 수치 모델들에 대한 연구도 활발히 진행되었다. 조유진 등 (2017)에서는 초기 기상장에 대한 CMAQ 모델의 미세먼지 농도 예측 민감도에 대한 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 초기 기상장을 FNL과 GFS를 사용해서 WRF 모델을 이용하여 기상 예보장을 생성하여 PM_{10}농도를 예측하는 실험을 진행하였다. 초기 기상장에 따라 WRF 기상 모델에서의 퍼포먼스가 온도와 풍속에 대해서 RMSE나 평균, 편차들이 차이가 생기고(Table 1, 조유진 등 2017), 이러한 기상장의 차이에 따라

PM_{10}농도 분포도 FNL과 GFS가 차이가 생기는 걸 확인할 수 있다(Figure 3, 조유진 등 2017). 한반도 부근에서는 FNL이 GFS보다 더 큰 값으로 PM_{10} 농도를 모의하는 것을 알 수 있다. 이 연구를 통해 미세먼지 농도 예측에는 초기 기상장이 매우 중요하며, 이러한 기상장을 생성하는 데에 필요한 예보장의 정확도에 대한 판단이 중요하다.

Shin et al. (2020)에서는 GFS 예보장에서 블로킹지수를 활용하여 $PM_{2.5}$ 농도를 예측하는 연구를 진행하였다. 블로킹 현상과 high- PM_{10} events와 연관성을 밝힌 Yun and Yoo (2019)의 연구 결과를 기반으로 블로킹지수와 $PM_{2.5}$ 의 연관성을 밝히고, 블로킹지수의 값을 기반으로 $PM_{2.5}$ 농도를 예측하였다. Yun and Yoo (2019)에서 겨울과 봄에 따라 블로킹의 발생 횟수와 PM_{10} 농도의 연관성이 다르게 나타나는 걸 확인하였고, 특히 겨울철에 우리나라 부근에 블로킹과 PM_{10} 농도의 상관관계가 양의 값을 나타남(Figure 4, Yun and Yoo 2019)에 따라 블로킹이 자주 발생할수록 PM_{10} 의 농도가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그리하여 Shin et al. (2020)에서는 Tibaldi and Molteni (1990)와 Sausen et al. (1995)에서 사용한 블로킹지수를 이용하여 블로킹지수와 $PM_{2.5}$ 농도의 상관관계가 양의 관계를 가진다는 걸 알아내어 블로킹지수의 일정 값을 기준으로 $PM_{2.5}$ 의 고농도를 GFS 예보장에서 산출한 블로킹지수를 이용하여 $PM_{2.5}$ 농도를 예측하였다(Figure 5). 5일까지의 예보장에 대해서는 좋은 예측성을 보였지만,

그 이후 예보 시간에 대해서는 좋은 예측성을 담보하지는 못하였다. 예보장 자체가 5일 이후가 되면 예측성이 떨어지는 걸 감안하면, 좋은 연구 결과라고 볼 수 있다. 이를 통해 블로킹지수로 미세먼지를 예측하는 것이 좋은 연구 방법이 될 수 있으며, 블로킹지수를 잘 예측하는 것이 미세먼지 농도를 잘 예측할 수 있다는 의미를 가질 수 있다.

Table 1. Statistics of model performance for the simulated temperature and wind speed(조유진 등 2017).

Meteorological variables	CASE	I/B condition	MEAN	MB	R	RMSE	IOA
Temperature	CASE1	FNL	−1.09	−2.12	0.85	2.79	0.82
	OBS: 1.04°C	GFS	−1.20	−2.24	0.87	2.86	0.79
	CASE2	FNL	18.32	4.22	0.71	7.95	0.48
	OBS: 14.1°C	GFS	17.66	3.56	0.73	6.88	0.53
	CASE3	FNL	7.94	1.49	0.84	4.23	0.71
	OBS: 6.44°C	GFS	9.41	2.97	0.85	5.11	0.64
Wind Speed	CASE1	FNL	2.19	1.24	0.53	1.44	0.53
	OBS: 0.95 m/s	GFS	2.57	1.62	0.59	1.86	0.47
	CASE2	FNL	2.20	1.42	0.48	2.02	0.38
	OBS: 0.78 m/s	GFS	2.73	1.95	0.54	2.33	0.34
	CASE3	FNL	1.55	0.28	0.62	0.76	0.75
	OBS: 1.28 m/s	GFS	2.01	0.73	0.04	1.22	0.41

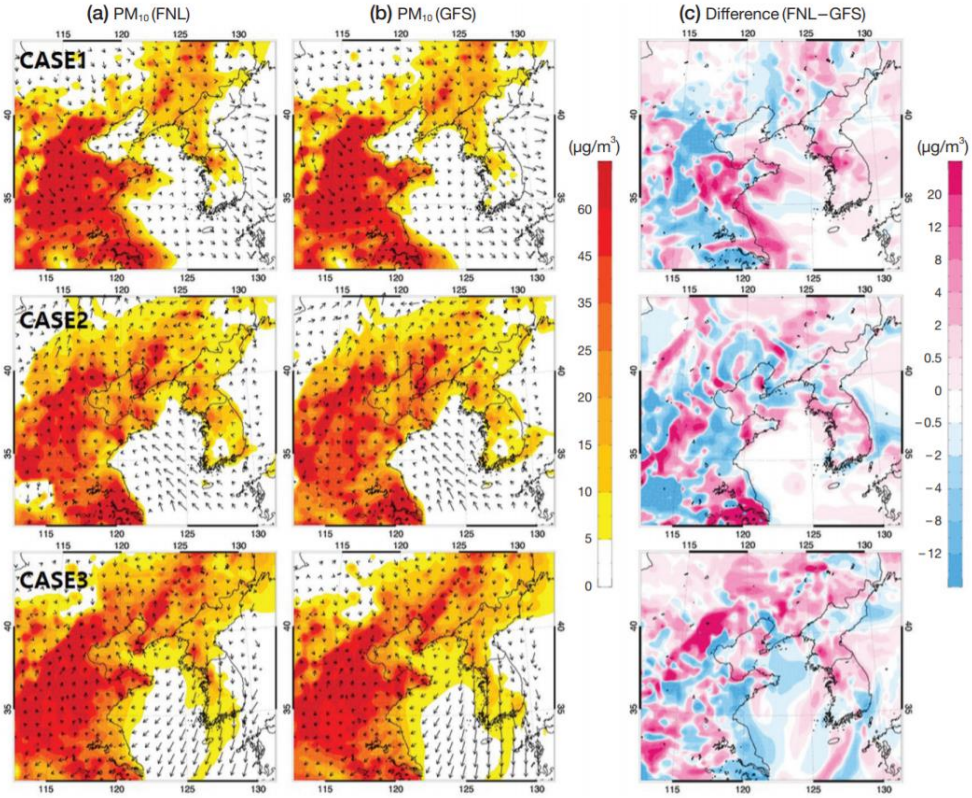

Figure 3. Spatial distributions of simulated PM_{10} concentrations from using (a) FNL(1st panel), (b) GFS(2nd panel) data, and (c) its differences(3rd panel). The red area in (c) means the PM_{10} concentrations from FNL data is higher than GFS data(조유진 등 2017).

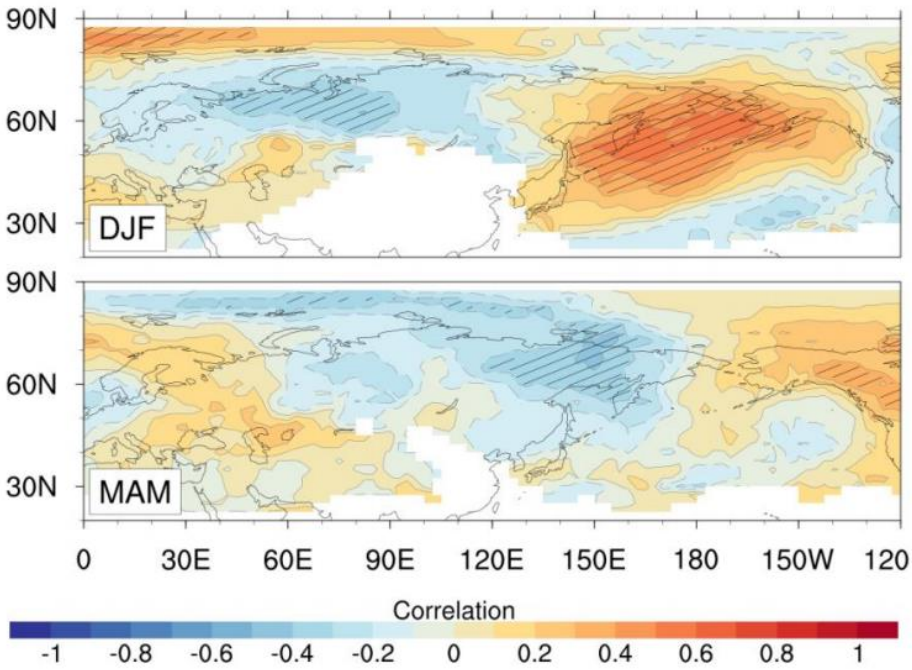

Figure 4. The correlation between the monthly frequency of high PM_{10} events and the monthly frequency of blocking. The contour interval is 0.1. The white area indicates that there is no blocking during the study period. The hatched pattern denotes the statistical significance at a 95% confidence level(Yun and Yoo 2019).

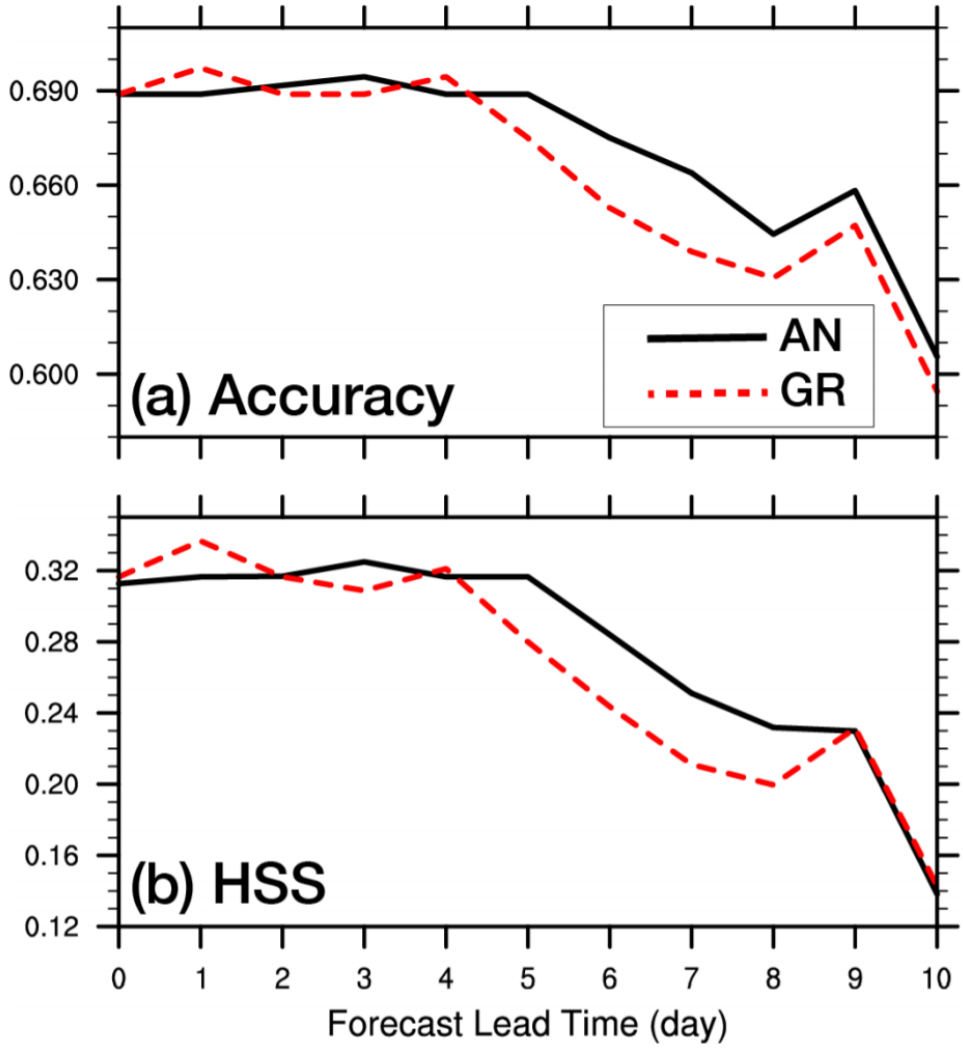

Figure 5. The change of (a) accuracy and (b) HSS for the anomaly (AN, black solid line) and gradient (GR, red dashed line) methods(Shin et al. 2020).

논문 첫 도입 부분에서 언급한 한반도에 영향을 미치는 미세먼지의 수송경로에 따른 사례를 고농도 미세먼지와 황사, 두가지로 분류하여 볼 수 있는데, Jung et al. (2019)에서는 고농도 미세먼지(high-PM_{10}) 사례와 황사(Asian Dust) 사례의 종관기상장을 비교, 분석하였다(Figure 6). 그림은 500hPa geopotential height anomaly와 wind anomaly vector를 나타냈다. 고농도 미세먼지 사례에서는 한반도 근처에서 강한 양의 anomaly를 보이며, 이는 고기압 anomaly 시스템을 나타나는 것이며, 황사 사례에서는 이와 반대로 한반도 북쪽 만주지역에 강한 음의 anomaly가 나타나며, 저기압 anomaly 시스템이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 종관 기상 시스템은 고농도 미세먼지 사례와 황사 사례를 유발하는 기상 조건으로 각 사례를 예측하는 데에 중요한 역할을 하게 된다.

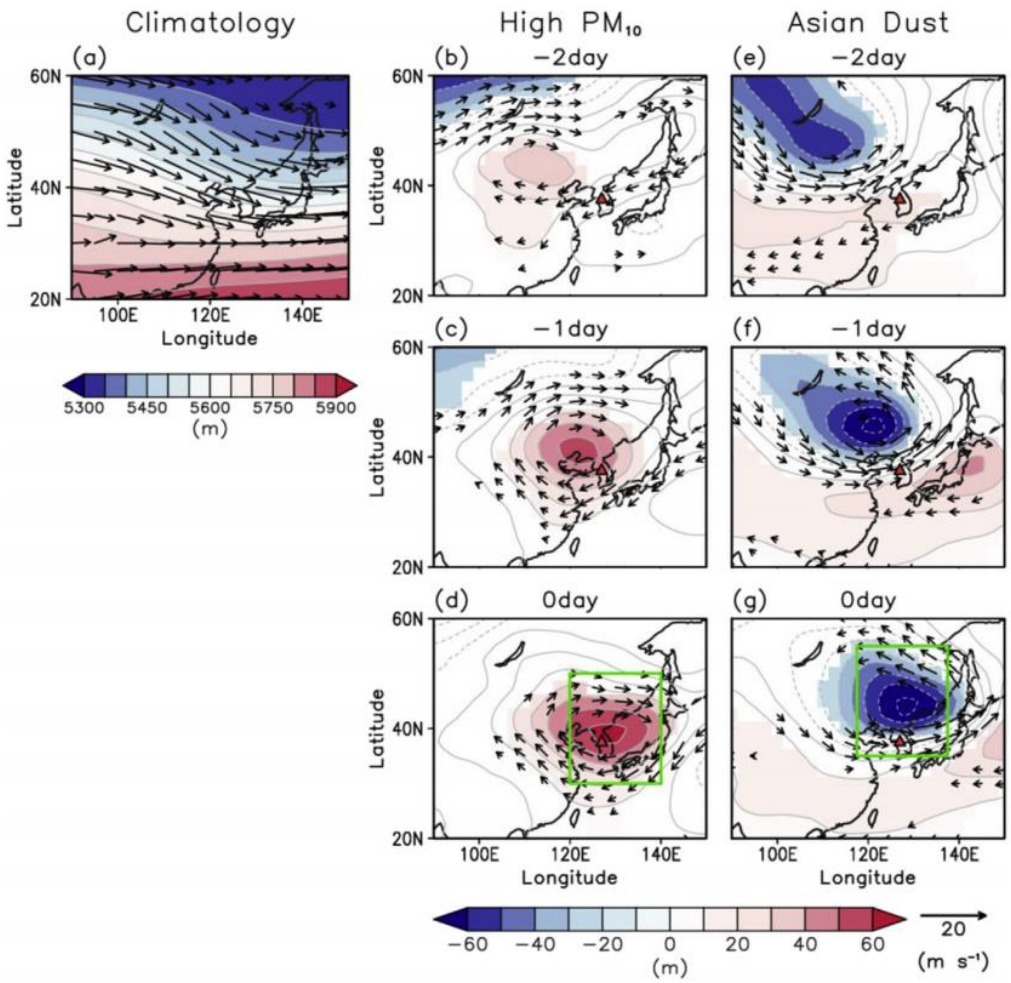

Figure 6. (a) Climatological 500hPa geopotential height and wind anomalies during MAM. (b−g) Composite 500hPa geopotential height and wind anomalies from lag −2 to lag 0 days during (left) High PM_{10} events and (right) Asian Dust events. The shading and black vectors dunote statistically significant values at the 95% confidence level. The red triangle indicates the geographical location of Seoul(Jung et al. 2019).

1.2. 연구 동기와 목적

위의 선행 연구를 통해 미세먼지 농도를 예측하는 수치 모델에서 종관기상장과 예보장이 필수적인 요소임을 알 수 있다. 따라서, 우리가 관심있게 보고자 하는 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 미세먼지 농도를 잘 예측하기 위해서는 예보적중성이 좋은 예보장을 사용해야한다. 이에 따라, 고농도 미세먼지(high- PM_{10})와 황사(Yellow dust) 사례에서의 기상 예보장에 대한 수치 예보 모델들의 정확도에 대한 분석이 필요하기 때문에 각 사례를 유발하는 종관 기상 시스템에 대한 분석이 필요하다.

먼저, 고농도 미세먼지가 나타나는 날과 황사가 관측된 날의 종관기상장을 비교, 분석하였다. 고농도 미세먼지 사례는 2018년 11월 6일, 황사 사례는 2018년 11월 27일로 설정하였다. 분석한 종관기상변수는 500hPa geopotential height, 850hPa windspeed, 200hPa windspeed, 850hPa temperature, 850hPa relative humidity(이하 RH), 그리고 sea surface temperature(이하 SST)이며, 이후 본 연구에서 분석한 사례들의 모든 종관기상장 분석은 이 변수들의 anomaly를 다뤘다. Figure 7,8에서는 각 사례 날짜의 종관기상변수에 대한 종관기상장을 나타냈다. 우선 500hPa geopotential height는 고농도 미세먼지에서 한반도 주변과 동서방향 전반적으로 양의 anomaly가 형성되어 있지만, 황사에서는 한반도에는 약한

양의 anomaly가 있지만, 만주지역에 강한 음의 anomaly가 형성되어 있다. Windspeed는 gph에 비해서 뚜렷하게 대비되지는 않는다. 850hPa windspeed는 고농도 미세먼지는 한반도 주변에 음의 anomaly가 나타나지만, 황사에서는 한반도 주변에 양의 anomaly가 나타난다. 200hPa windspeed는 한반도 근처의 양의 anomaly 영역이 고농도 미세먼지에서는 만주 지역, 황사에서는 한반도에 걸쳐 있으면서 한반도 중심으로 고농도 미세먼지는 음의 anomaly, 황사는 양의 anomaly를 보이지만, 850hPa 만큼 뚜렷하지는 않다. 850hPa temperature에서 고농도 미세먼지는 한반도 중심으로 양의 anomaly를 나타내고 있고, 황사에서는 한반도에는 양의 anomaly를 보이지만, 만주와 몽골지역에 음의 anomaly를 보인다. 이는 500hPa geopotential height anomaly와 거의 흡사한 패턴을 보인다. 850hPa RH는 고농도 미세먼지, 황사 모두 뚜렷한 패턴을 찾기 어렵고, SST는 고농도 미세먼지에서는 북서태평양 전반적으로 양의 anomaly를 보이고, 황사에서는 음의 anomaly를 보이지만, 이는 사례 전반의 특징으로 볼 수 없다. 그 이유는 추후에 설명하도록 하겠다.

고농도 미세먼지와 황사 사례의 개별 날짜에 대한 종관기상장 분석을 토대로 2001/02~2019/20년의 10~3월 사이의 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상장에 대한 분석을 진행하였다(Figure 9,10). 500hPa geopotential height에서 고농도 미세먼지에서는 한반도를 중심으로 주변에

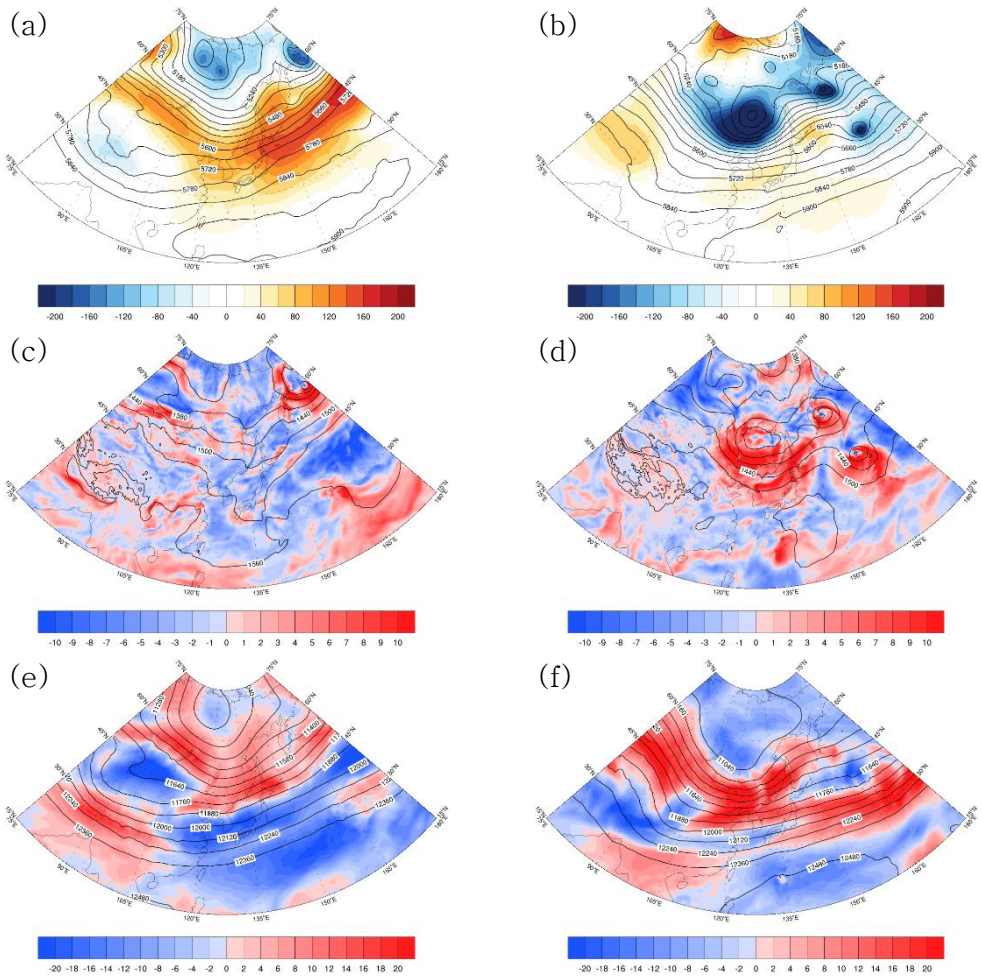

Figure 7. 500hPa geopotential height(contour) and 500hPa gph anomalies(shading)(a,b); 850hPa geopotential height(contour) and 850hPa wind speed anomalies(shading)(c,d); and 200hPa geopotential height(contour) and 200hPa wind speed anomalies(shading)(e,f). The left and right panels are high- PM_{10} (2018/11/06) and Yellow dust

(2018/11/27) periods, respectively.

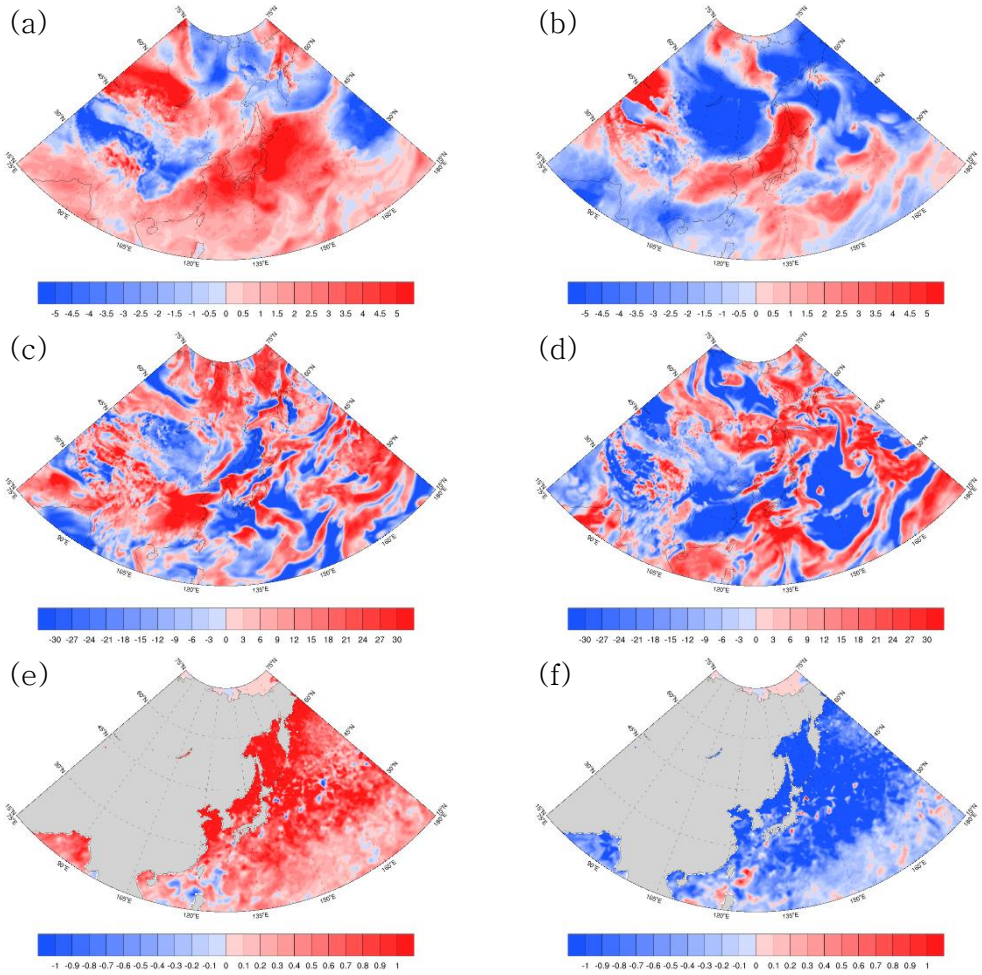

Figure 8. Same as Figure 7, but 850hPa temperature anomalies(a,b), 850hPa relative humidity(c,d), and sea surface temperature(e,f).

양의 anomaly가 나타나며, 황사에서는 일본 열도와 북서태평양 지역에 양의 anomaly가 나타나지만, 한반도 북쪽 만주 지역에 강한 음의 anomaly가 나타나며, 두 사례의 패턴이 대비되는 특징을 보인다. 850hPa windspeed에서 고농도 미세먼지는 한반도 주변에 음의 anomaly가 나타나지만, 황사에서는 양의 anomaly가 나타난다. 200hPa windspeed에서 고농도 미세먼지는 한반도 주변과 동서방향으로의 비슷한 위도 대의 지역에 음의 anomaly가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 반대로 황사는 양의 anomaly가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 850hPa temperature는 개별 사례 분석 때와 마찬가지로 500hPa gph와 비슷한 패턴을 보이는데, 고농도 미세먼지에서는 한반도 주변에 강한 양의 anomaly를 보이지만, 반면에 황사에서는 일본 열도 부근에는 양의 anomaly, 만주와 몽골 지역에는 강한 음의 anomaly를 보인다. 850hPa RH는 고농도 미세먼지에서는 한반도 주변에 강한 음의 anomaly를 보이며, 건조한 상태를 보이지만, 황사에서는 한반도 주변에 양의 anomaly를 보이며, 다소 습한 상태를 보인다. SST에서는 개별 사례 분석의 결과와는 다르게 고농도 미세먼지에서는 전반적으로 음의 anomaly를 보이지만, 황사에서는 동중국해와 남중국해 해역에서 양의 anomaly를 보인다. 이후, 연구 결과에서도 보이겠지만 SST는 고농도 미세먼지와 황사의 개별 사례마다 각기 다른 패턴을 보이기 때문에 두 사례의 구별되는 종관기상변수로 보기는 어려워 보인다.

결론적으로, 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 종관기상장의 패턴을 비교해본 결과 Jung et al. (2019)에서 보였던 것처럼 500hPa gph기준으로 고농도 미세먼지에서는 한반도 주변에 강한 양의 anomaly가, 황사에서는 한반도 북쪽의 만주 지역에 강한 음의 anomaly가 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이러한 종관 시스템은 각각 고기압 anomaly 시스템과 저기압 anomaly 시스템으로 볼 수 있으며, 고농도 미세먼지에서는 고기압 anomaly 시스템, 황사에서는 저기압 anomaly 시스템이 지배적인 종관 기상장의 구조를 갖게 된다. 따라서, 본 연구에서는 고농도 미세먼지와 황사 사례의 이와 같은 종관 기상 시스템의 차이가 두 사례의 예보장의 예측성에 어떠한 차이가 생기는지 TIGGE 데이터를 사용하여 예보 검증을 실시하고자 한다.

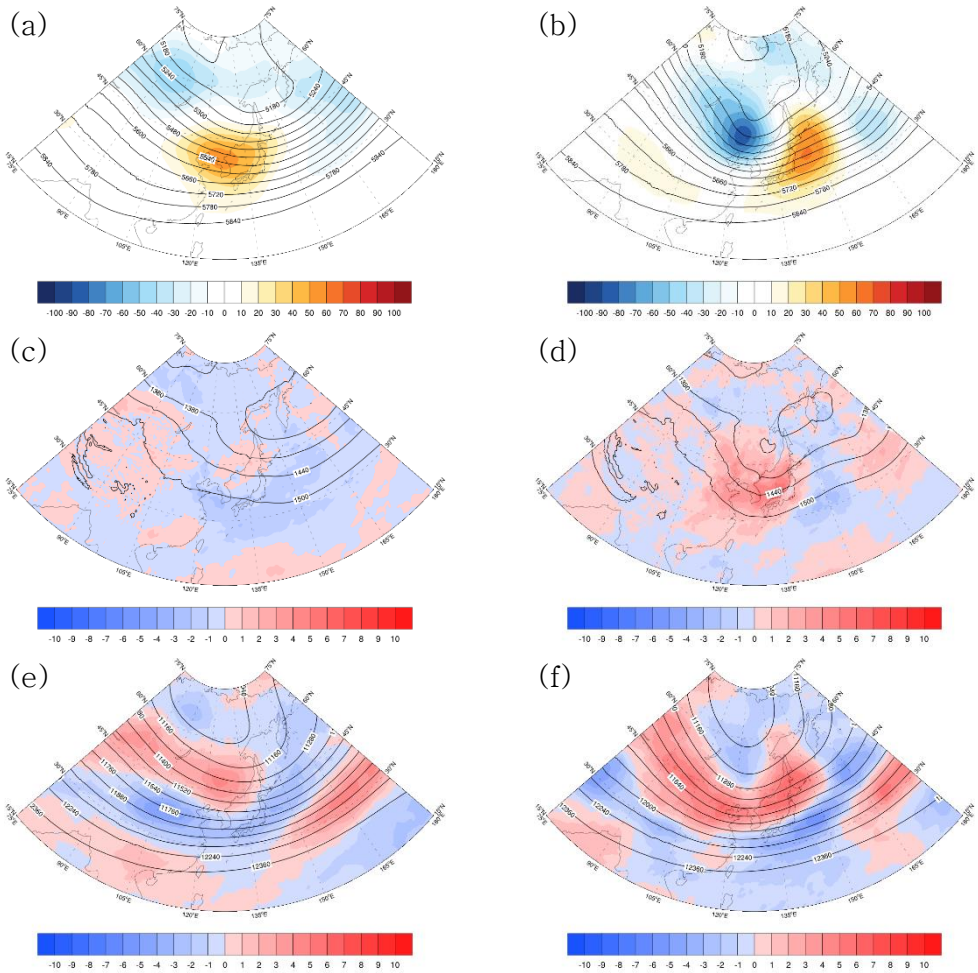

Figure 9. Composite of 500hPa geopotential height(contour) and 500hPa gph anomalies(shading)(a,b); 850hPa geopotential height(contour) and 850hPa wind speed anomalies(shading)(c,d); and 200hPa geopotential height(contour) and 200hPa wind speed anomalies(shading)(e,f) during Oct−Mar 2001/02~2019/20. The left and right panels are high−PM_{10} and

Yellow dust periods, respectively.

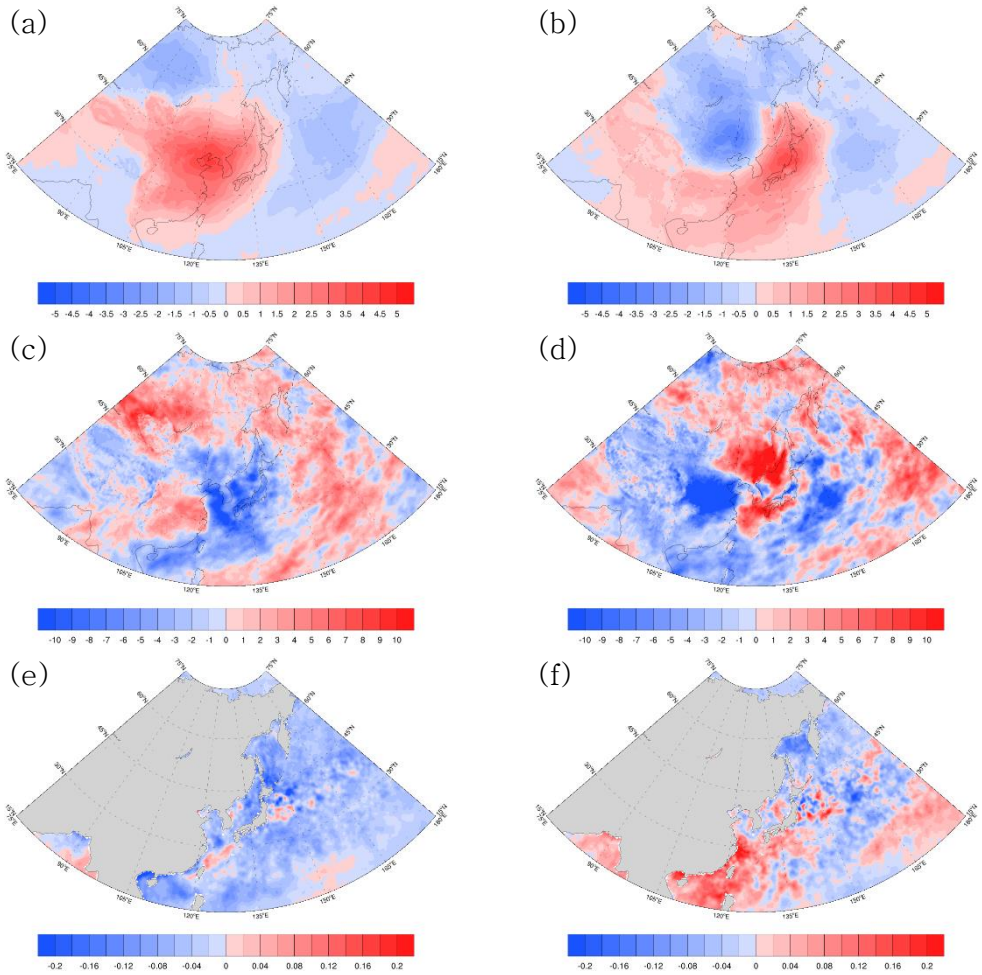

Figure 10. Same as Figure 8, but 850hPa temperature anomalies(a,b), 850hPa relative humidity(c,d), and sea surface temperature(e,f).

제 2 장. 자료 및 방법론

미세먼지 농도 데이터는 에어코리아에서 제공하는 서울의 25개 관측소에서 관측한 시간 당 PM_{10} 농도이며, 일별로 24시간 평균하여 일 간격의 PM_{10} 농도를 사용하였다. 고농도 미세먼지 사례는 PM_{10} 농도가 100 $\mu g/m^3$ 을 넘는 날을 선정하였으며, 황사 사례와 비교하기 위해 황사가 관측된 날은 제외하였다. 황사 관측일은 기상청에서 제공하는 데이터를 사용했으며, 기상청에서는 세계기상기구(WMO)의 권고에 따라 목측을 실시하며, 황사 특보를 위해 계기 관측 결과를 활용하기도 한다. 예보 검증에 사용된 기간은 2014년~2019년 10월~3월이며, 예보 검증에 사용된 재분석장은 ERA5 reanalysis이며, 수치 예보 모델은 TIGGE의 데이터를 사용하였다.

TIGGE는 THORPEX International Grand Global Ensemble의 약자로 WMO 산하의 WWRP의 프로그램 중 하나인 THORPEX에서 전세계 현업 기관에서 사용하는 앙상블 모델들을 이용하여 1일에서 2주 규모의 위험 기상에 대한 예측성을 향상시키기 위하여 2005년부터 진행하고 있는 사업이다(). 유럽, 영국, 한국, 일본, 미국 등의 전세계 10여개 현업 기관들이 앙상블 모델 자료를 ECMWF 아카이브 센터를 통해 제공하고 있다. 모든 모델 자료들의 수평해상도는 0.5*0.5로 내삽되어 제공된다. 본 연구에서는

Table 2. TIGGE model data information in ECMWF, NCEP, KMA, JMA(https://confluence.ecmwf.int/display/TIGGE/Models).

Models	Time range	Resolution (original)	Resolution (original) [km]	Resolution (archived) [°]	Ens. Size
ECMWF	d 0–15	Tco639/319 (after day 10) L91	16/32	O640 (ORGG)	51
NCEP	d 0–16	TL1534/382 (after day 10) L64	12/55	1 x 1 (360 x 181)	21
KMA	d 0–10	0.3° x 0.45° (800 x 600)	33	as original	25
JMA	d 0–11	1.25° x 1.25° (288 x 145, TL479 L100)	139	as original	27

ECMWF, NCEP, KMA, JMA 4개의 모델 데이터를 사용했으며, 각 모델의 세부 사항은 Table 2(https://confluence.ecmwf.int/display/TIGGE/Models)에 게시하였다.

예보 검증에 사용된 변수는 2가지로 500hPa geopotential height와 블로킹지수를 사용했으며, 블로킹지수는 Shin et al.(2020)에서 사용한 변수로 Tibaldi and Molteni(1990)의 방법을 변형하여 값을 산출하였다.

$$\mathrm{GHGS} = \frac{Z(\phi_o) - Z(\phi_s)}{\phi_o - \phi_s},$$

where

$$\phi_o = 40^\circ N + \Delta, \quad \phi_s = 25^\circ N + \Delta, \ \Delta = 0^\circ .$$

예보 검증을 하기 위한 방법으로는 RMSE의 값을 산출하여 각 모델의 예측성을 비교하였다. RMSE는 검증 영역의 모든 격자점에 대해 각 앙상블 모델의 예보값과 ERA5 재분석장의 차이를 제곱하여 평균을 구한 후 제곱근을 취한 값으로 재분석장 값과의 차이에 대한 크기를 나타낸다. 값이 클수록 예측성이 떨어지는 것을 의미하며, 식은 아래와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum(f_i - o_i)^2}$$

f_i = forecast fields(TIGGE), o_i = observation fields(ERA5)

제 3 장. 연구 결과

3.1. 고농도 미세먼지와 황사의 연도별 통계 분석

제1장에서 분석했던 기간인 2001/02~2019/20년 10월~3월의 고농도 미세먼지(high−PM_{10})와 황사(Yellow dust)사례에서의 사례 날짜수, 지속기간, 강도를 연도별로 분석을 진행하였다(Figure 11). 날짜수는 고농도 미세먼지와 황사가 발생한 날의 개수를 의미하며, 지속기간은 고농도 미세먼지와 황사 사례가 발생되어서 지속되는 기간을 각 사례가 나타난 기간 별로 평균하여 나타낸 값이다. 강도는 고농도 미세먼지와 황사 사례가 발생한 기간 중에서 첫날의 PM_{10} 농도 값을 나타낸 값이다. 고농도 미세먼지에서는 2001/02년 이후로 사례 날짜수와 강도가 감소하는 추세를 보이지만, 최근 2014/15년 이후로는 날짜수와 지속기간이 증가하는 추세를 보이고 있다. 반면에 황사에서는 강도는 2001/02년 이후로 감소하는 추세이지만, 나머지 변수들은 특정한 경향성을 보이지는 않는다. 따라서, 14/15~18/19년의 기간에 대해서 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 분석을 진행하려 한다.

Figure 12에서는 Figure 11과 마찬가지로 같은 기간에서의 각 사례의 종관기상장에서 제트스트리크의 위도와 강도에 대한 연 변화를 나타냈다. 각 사례에 대해서 연도별로 제트와의 연관성을 찾으려고 했지만, 제트스트리크의 위도에서는 연도별로 위도가 유동성이 높게 나타나서 의미 있는 분석을 하기

힘들다. 제트스트리크의 강도는 위도에 비해 연도별 변동성이 크지는 않지만, 황사 사례에서는 뚜렷한 경향성을 보이지 않으며, 고농도 미세먼지에서는 2012/13년 이후로 점차 강도가 약해지는 경향성을 보인다. 이러한 연도별 경향성은 각 사례의 연도별 경향성에 대한 유의미한 분석을 하기 어렵다.

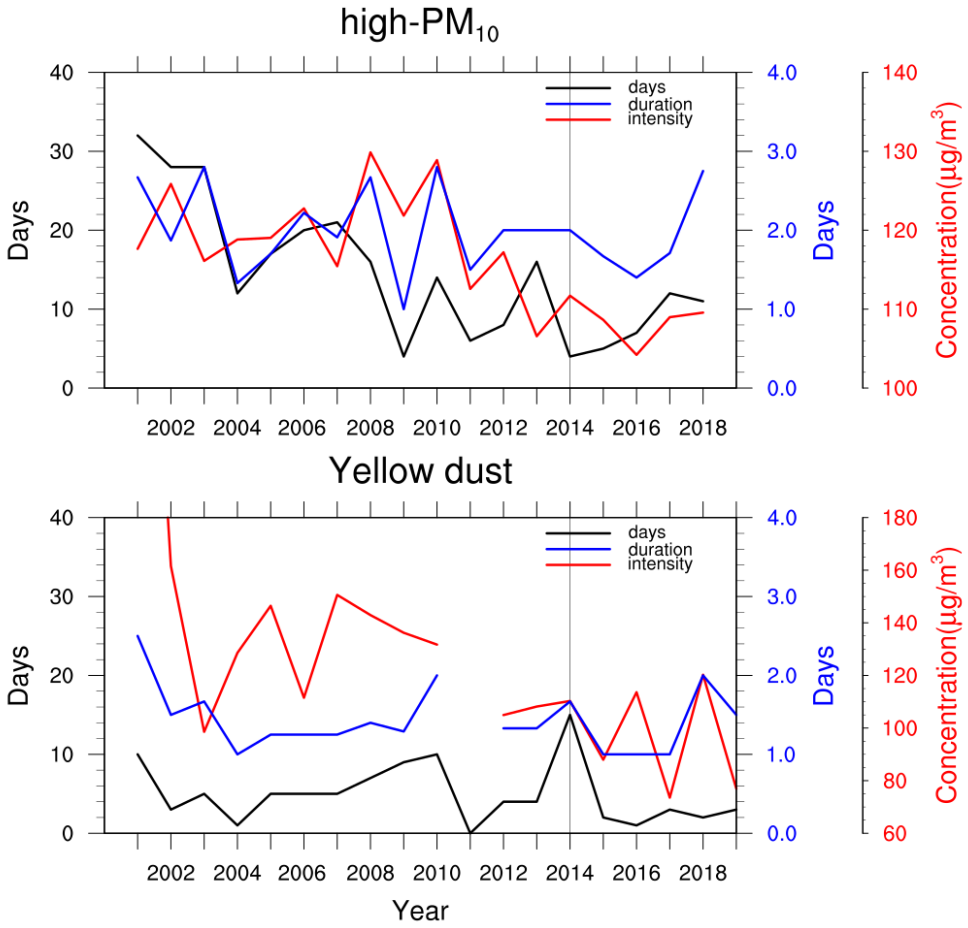

Figure 11. Annual timeseries of days(black line), duration(blue line), and intensity of high-PM_{10} and Yellow dust in Oct-Mar 2001/02~2019/20.

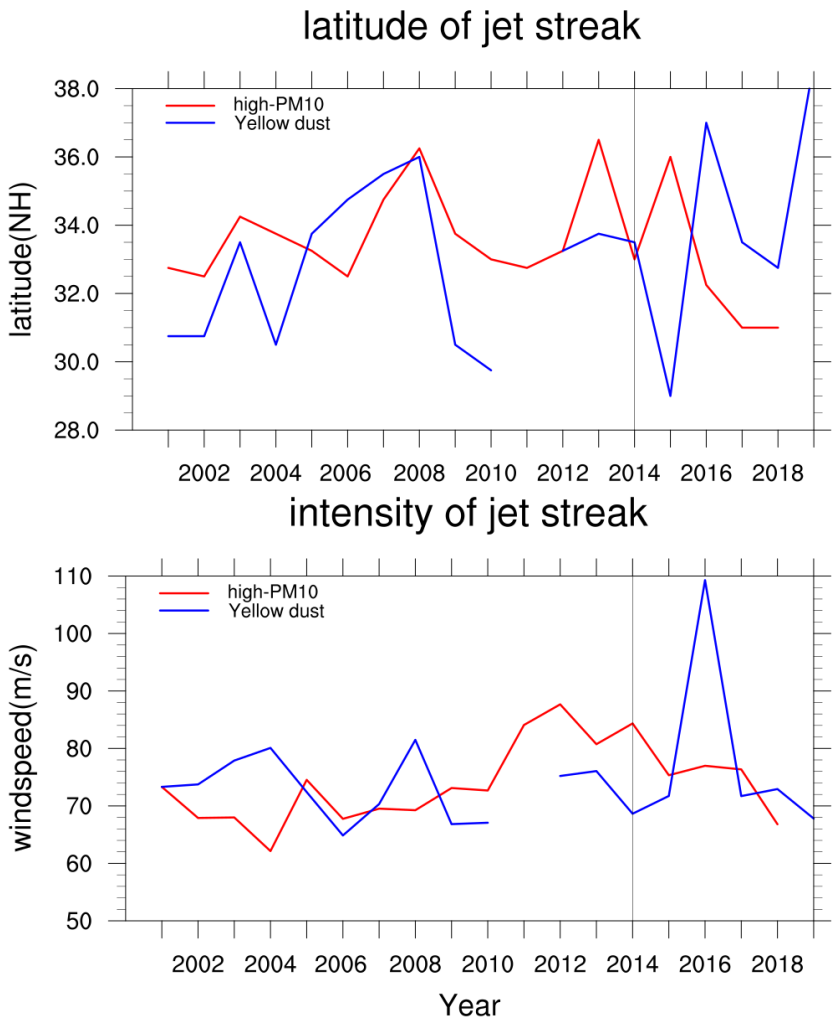

Figure 12. Annual timeseries of latitude(top) and intensity(bottom) of jet streak of high- PM_{10} (red) and Yellow dust(blue) in Oct-Mar 2001/02~2019/20.

3.2. 각 사례의 종관기상장 분석과 예보 검증

예보 검증을 하기에 앞서 연구를 진행하는 분석 기간의 종관기상장과 PM_{10}에 관련된 여러 지표들에 대해 분석을 진행하였다. Table 3에는 예보 검증 분석 기간의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 날짜수와 PM_{10}농도, 그리고 사례 구분 없이 전체 기간에 대한 PM_{10}농도를 연도별로 나타냈다. Figure 11에서 보였던 것과 마찬가지로 고농도 미세먼지의 PM_{10}농도는 최근 3년간 증가하는 추세를 보이며, 특히 가장 최근 연도인 2018/19년도에서는 132.64 $\mu g/m^3$ 라는 5년간 측정 연도 중에 최대치가 산출되어 고농도 미세먼지에 대한 경각심을 느끼게 해주었으며, 황사는 뚜렷한 증감세를 보이지는 않는다. 사례 날짜는 최근 들어 황사는 눈에 띄게 줄어든 걸 보이지만, 고농도 미세먼지는 5년간 꾸준하게 증가하는 경향을 보인다. 이에 반해, 모든 날짜에 대해서 PM_{10} 농도를 평균한 All days열에서는 2014/15년 이후로 점차 농도가 감소하는 추세를 보이며, 오히려 고농도 미세먼지의 농도 증가세와 반대되는 특징을 보인다.

Figure 13에서 예보 검증 분석 기간 5개년의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 500hPa geopotential height와 그에 대한 anomaly를 보였다. 고농도 미세먼지 사례에서는 한반도와 동해 부근에서 강한 고기압 anomaly 패턴이 보이는 반면에, 황사 사례에서는 만주 지역에 강한 저기압 anomaly

패턴이 보이는 걸 알 수 있다. 이를 통해 분석 기간에서의 예보 검증을 하기에 적합하며, 본 연구에서는 한반도를 중심으로 20~50N, 100~150E의 영역에 대한 예보 검증을 실시하였다.

Table 3. Number of high-PM_{10} and Yellow dust days and yearly-mean concentration($\mu g/m^3$) of PM_{10} for each year during the period Oct-Mar 2014/15~2018/19.

Year	High-PM_{10} days	Yellow dust days	High-PM_{10} concentrations	Yellow dust concentrations	All days
2014/15	4	15	110.86	149.26	59.21
2015/16	5	2	107.68	87.96	54.03
2016/17	7	1	104.79	113.61	54.36
2017/18	12	3	112.72	73.56	50.13
2018/19	11	2	132.64	122.11	54.05
Total	39	23	116.08	130.14	54.35

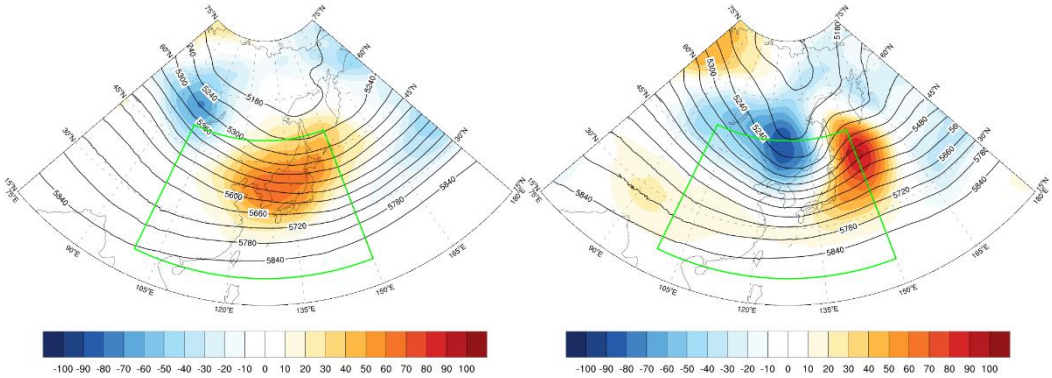

Figure 13. Composite of 500hPa geopotential height(contour) and 500hPa gph anomalies(shading) during Oct-Mar 2014/15~2018/19. Domain of Forecast verification is green box(20-50N, 100-150E).

3.2.1. 전체 기간(2014/15~2018/19)

3.2.1.1. 종관기상장 분석

분석 기간의 고농도 미세먼지와 황사 사례에 대해서 예보 검증을 하기에 앞서 분석 사례의 종관기상장에 대한 전반적인 분석을 진행하고자 한다. Figure 14,15는 2014/15~2018/19 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 종관기상변수들의 anomaly를 평균하여 나타냈다. Figure 9,10에서 2001/02~2019/20년에 대해서 분석한 종관기상장과 거의 비슷한 패턴을 보인다. 500hPa gph에서 고농도 미세먼지는 양의 anomaly, 황사는 음의 anomaly가 지배적이며, 850hPa과 200hPa의 windspeed에서는 고농도 미세먼지는 음의 anomaly, 황사는 양의 anomaly, 850hPa temperature에서 고농도 미세먼지는 양의 anomaly, 황사는 음의 anomaly가 지배적으로 나타난다. 이러한 특징은 고농도 미세먼지에서는 한반도 주변에 강한 고기압 anomaly 시스템이 발생해서 대기를 정체시켜서 상하층의 windspeed를 약하게 해서 미세먼지의 축적을 더욱 촉진시키게 된다(Lee et al. 2011). 또한, 높은 온도는 여러 대기 오염물질의 반응을 더 잘 일으키게 해서 미세먼지 농도를 높이는 기상요인으로 볼 수 있다(Lee et al. 2011). 황사에서는 몽골, 고비 사막에서 발생한 저기압이 사막의 모래 먼지를 상승시킨 뒤 빠르게 동진하여 우리나라에 영향을 준다(Jung et al. 2019). 이러한 저기압으로 인해

황사에서는 windspeed가 강하고, 그로인해 온도도 낮아지는 기상현상을 볼 수 있다.

이렇게 예보 검증 기간에서 분석한 두 사례의 종관기상장은 고농도 미세먼지에서는 고기압성 anomaly 시스템, 황사의 저기압성 anomaly 시스템을 판단할 수 있게 한다. 다음은 이러한 종관 기상장 시스템의 차이에 기반하여 기상장의 예측성을 비교, 분석하고자 한다.

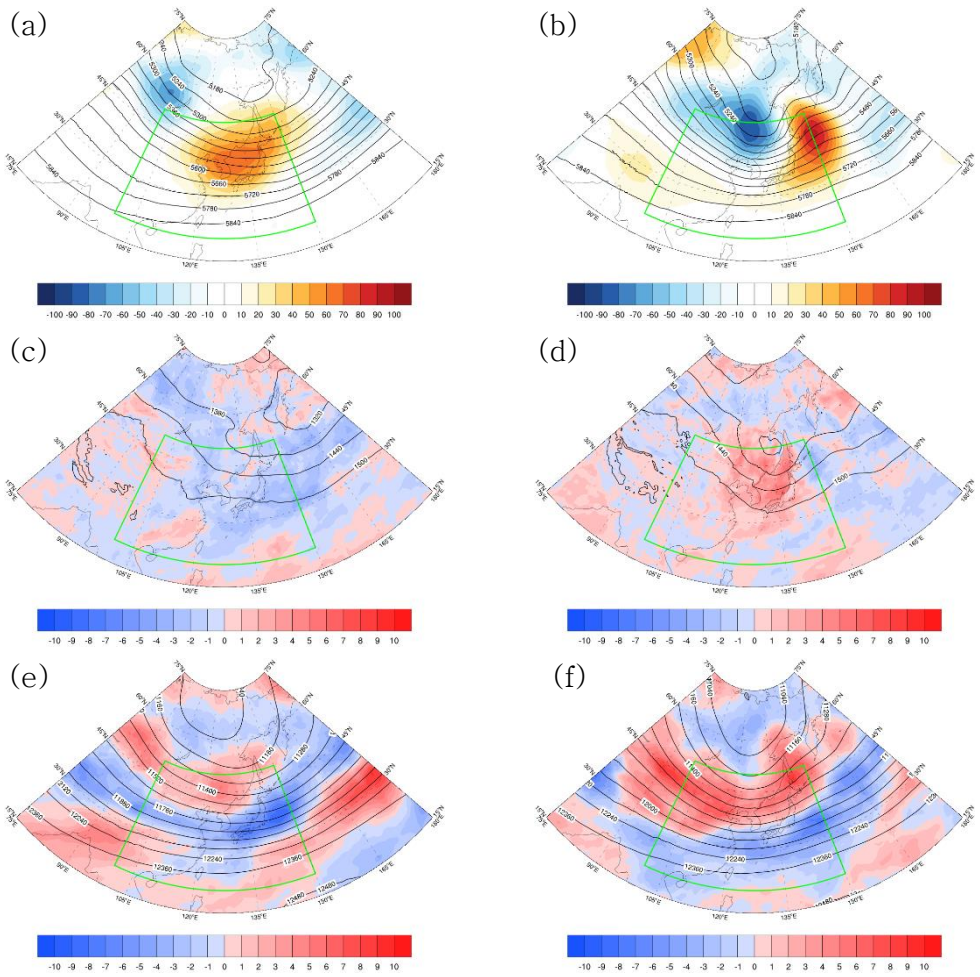

Figure 14. Same as Figure 7, but during Oct−Mar 2014/15~2018/19.

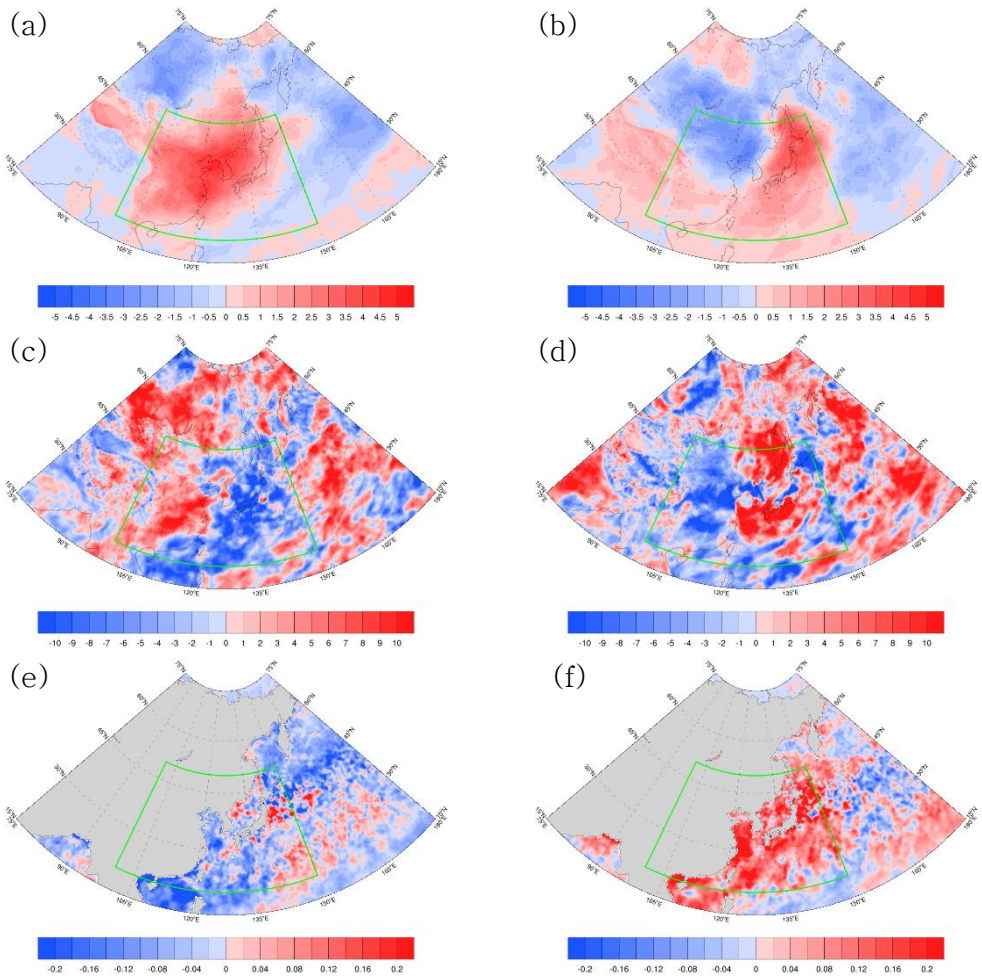

Figure 15. Same as Figure 14, but 850hPa temperature, 850hPa relative humidity, and sea surface temperature.

3.2.1.2. RMSE

고농도 미세먼지 사례에서는 고기압 anomaly 시스템, 황사 사례에서는 저기압 anomaly 시스템이 종관시스템에서 지배적인 기상장의 패턴임을 확인할 수 있었다. 이러한 차이가 예측성에 차이가 있는지 Figure 16에서는 TIGGE 데이터를 이용해 ECMWF, NCEP, KMA, JMA 4개 모델의 초기장부터 240시간 예보장까지 24시간 간격의 예보장에 대해서 Figure13에서 보였던 green box의 도메인(20~50N,100~150E)에서의 500hPa geopotential height와 Tibaldi and Molteni(1990)의 방법을 수정하여 Shin et al.(2020)에서 사용한 블로킹지수의 RMSE를 분석하였다. 초기장부터 96시간 예보장까지는 고농도 미세먼지와 황사 사례의 RMSE 차이가 크게 두드러지지는 않는다. 하지만, 120시간 예보장부터는 육안으로 확인할 수 있을 만큼 두 사례의 차이가 생기는 것을 확인할 수 있다. 예보 시간이 긴 예보장에서 고농도 미세먼지(red line)에 비해 황사(blue line)가 4개 모델 전반적으로 RMSE가 더 높게 나타나는 걸 확인할 수 있다. 이를 통해 분석 기간 중에 고농도 미세먼지보다 황사 사례에서 종관기상변수, 블로킹지수에 대해 예측성이 낮다는 걸 알 수 있고, 예측 시간이 길어질수록 그 차이는 더 커지는 걸 확인할 수 있다.

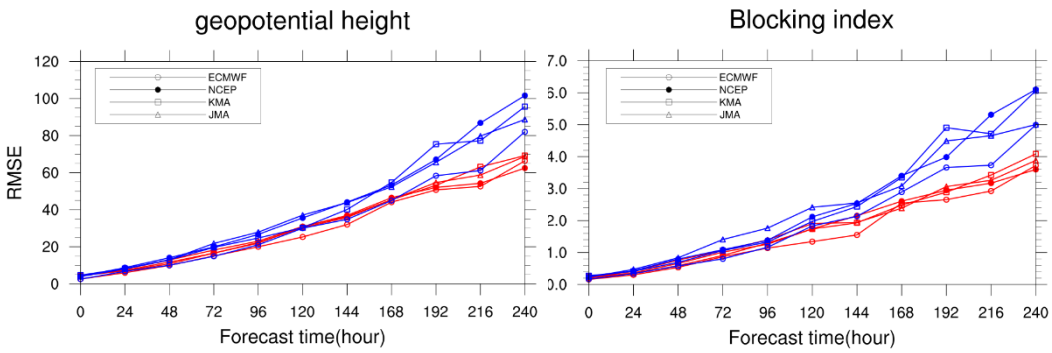

Figure 16. RMSE of 500hPa geopotential height and blocking index of forecasting field of TIGGE models during Oct-Mar 2014/15~2018/19.

3.2.1.3. 500hPa gph 편차

TIGGE의 4개 모델에 대한 예보장을 통해 고농도 미세먼지와 황사 사례의 예측성에 대해 살펴보았다. 고농도 미세먼지가 황사 사례에 비해 예보장의 예보 시간에 상관없이 전반적으로 예측성이 좋은 걸 확인하였다. 이러한 결과에 대해서 세부적으로 예보 검증을 진행하고자 TIGGE의 4개 모델에 대해 개별적으로 분석을 진행하였다. 각 모델 별로 초기장 000시, 120시간 예보장, 240시간 예보장에서의 500hPa geopotential height 등고선과 예보장의 예보 시간에 대응되는 날짜의 ERA5 재분석장에서의 500hPa geopotential height와의 편차를 분석하여 각 모델의 예보 기상장과 ERA5 재분석장이 어떤 차이가 있는지 분석을 진행하였다. Figure 17은

고농도 미세먼지 사례에서 ECMWF와 NCEP에서의 초기장, 120시간 예보장, 240시간 예보장에 대한 500hPa geopotential height의 등고선과 재분석장과의 편차를 나타냈고, Figure 18는 KMA와 JMA에 대해서 나타낸 그림이다. 4개 모델 모두 예보 시간이 길어질수록 gph의 편차는 더 커지는 걸 확인할 수 있다. 120시간 예보장에서는 ECMWF와 NCEP는 중국과 몽골 대륙에 gph의 과대모의가 나타나는 것을 볼 수 있으며, KMA, JMA는 ECMWF와 NCEP에 비해서 편차가 작게 나타나는 특징을 보인다. 240시간 예보장에서 한반도 북서쪽의 몽골 지역(green box)에서 4개 모델 모두 gph가 과대모의가 되는 것을 확인할 수 있다. ECMWF가 가장 큰 편차를 보이며, NCEP과 JMA는 비교적 작은 편차를 보인다.

Figure 19, 20은 Figure 17,18와 마찬가지로 황사 사례에서의 TIGGE 4개 모델의 500hPa geopotential height의 ERA5 재분석장에 대한 편차를 예보 시간에 따라서 보였다. 120시간 예보장에서는 4개 모델 모두 각기 편차의 패턴이 각기 비슷한 상황이 나타나지는 않으며 240시간 예보장에서는 고농도 미세먼지 사례보다 편차가 4개 모델 모두 더 큰 것을 확인할 수 있으며, 한반도 부근(green box)의 지역에서 서쪽에는 과대모의가 나타나고, 동쪽에는 과소모의가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 황사 사례에서 나타나는 한반도 북쪽의 만주지역에 내려오는 기압골을 정확하게 모의하지 못하는 결과를 보이는 것과 같은 의미를 지니고 있다. 이렇게 기압골을 잘

모의하지 못하는 상황은 이후 연도 별 분석에서도 비슷하게 보이고, 전반적인 수치 모델에서의 한계로 볼 수 있다.

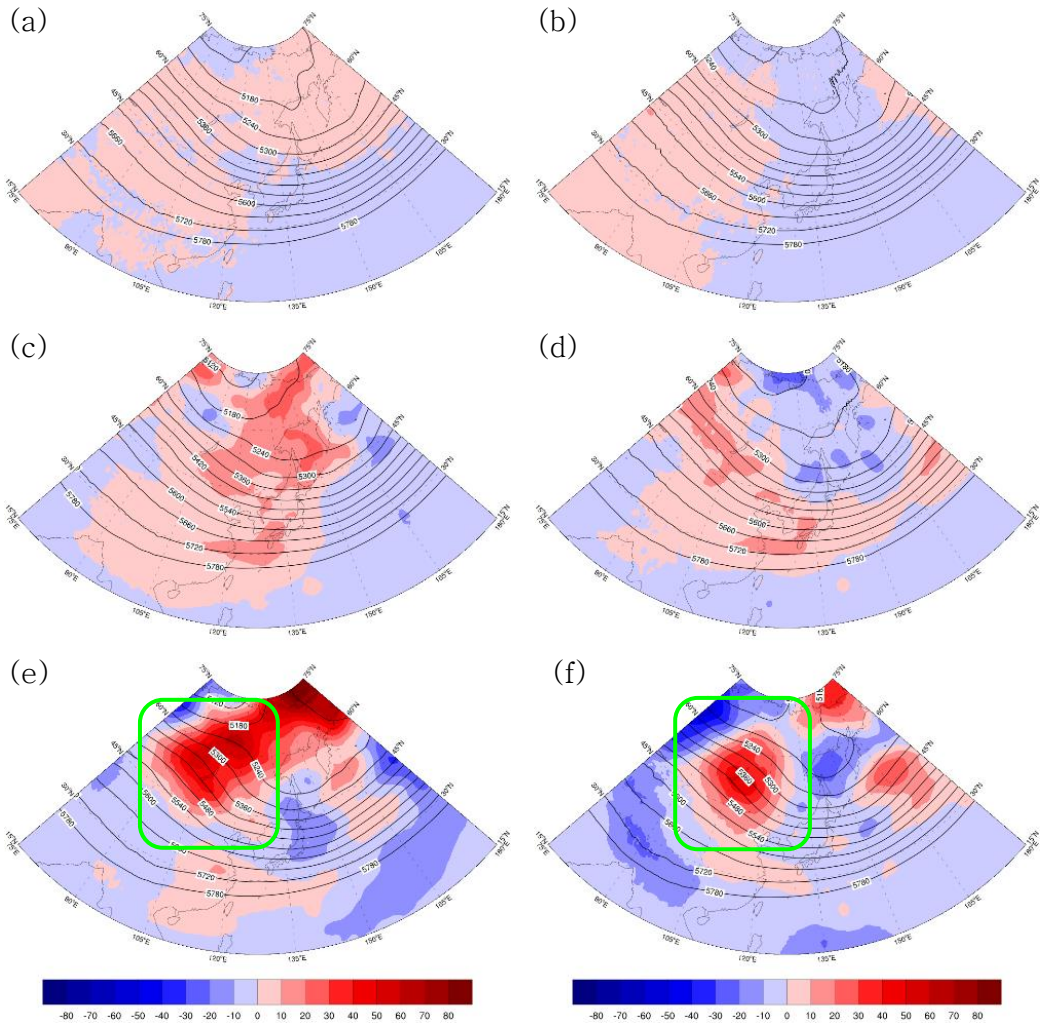

Figure 17. Bias of 500hPa geopotential height of 0(a,b), 120(c,d), 240(e,f)hours forecast field of TIGGE models about high-PM_{10} periods during Oct-Mar 2014/15~2018/19; left column-ECMWF, right column-NCEP.

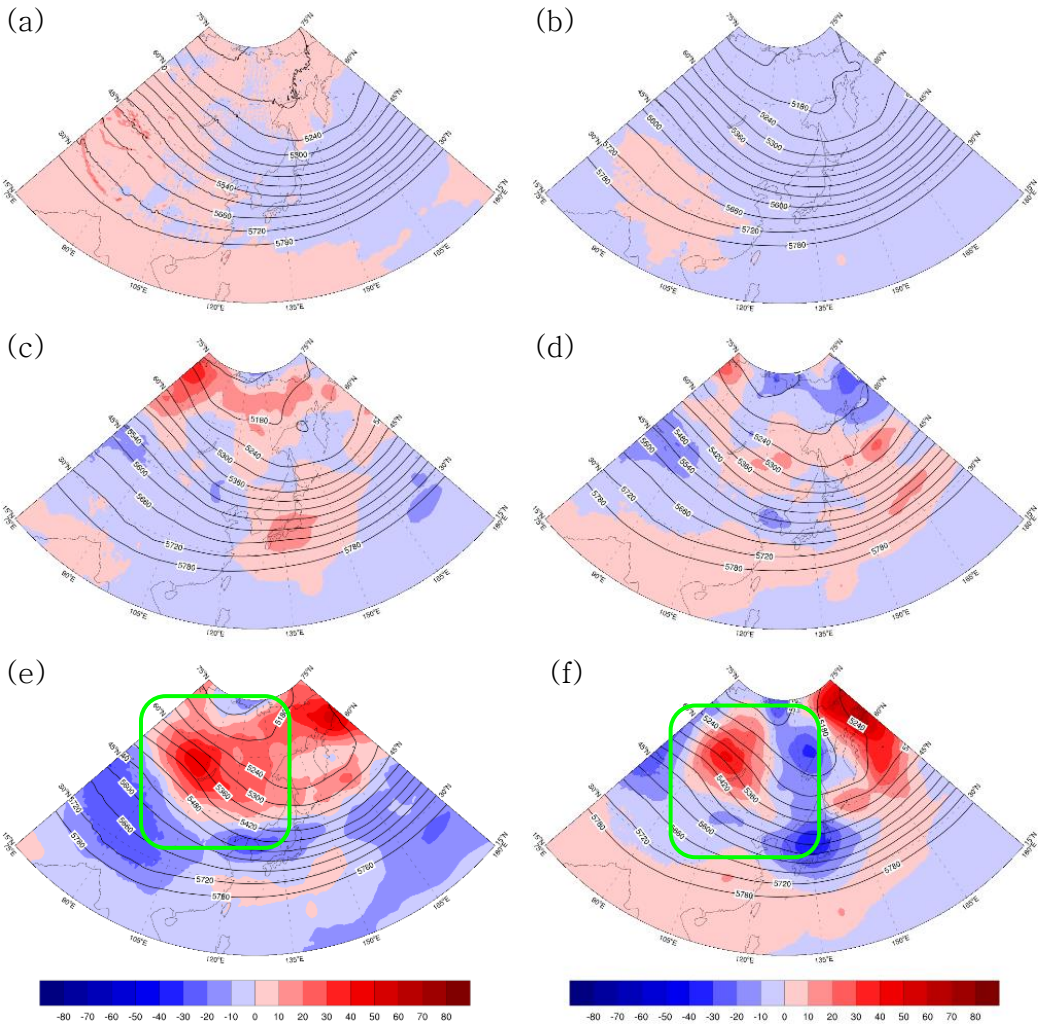

Figure 18. Same as Figure 17, but left column−KMA, right column−JMA.

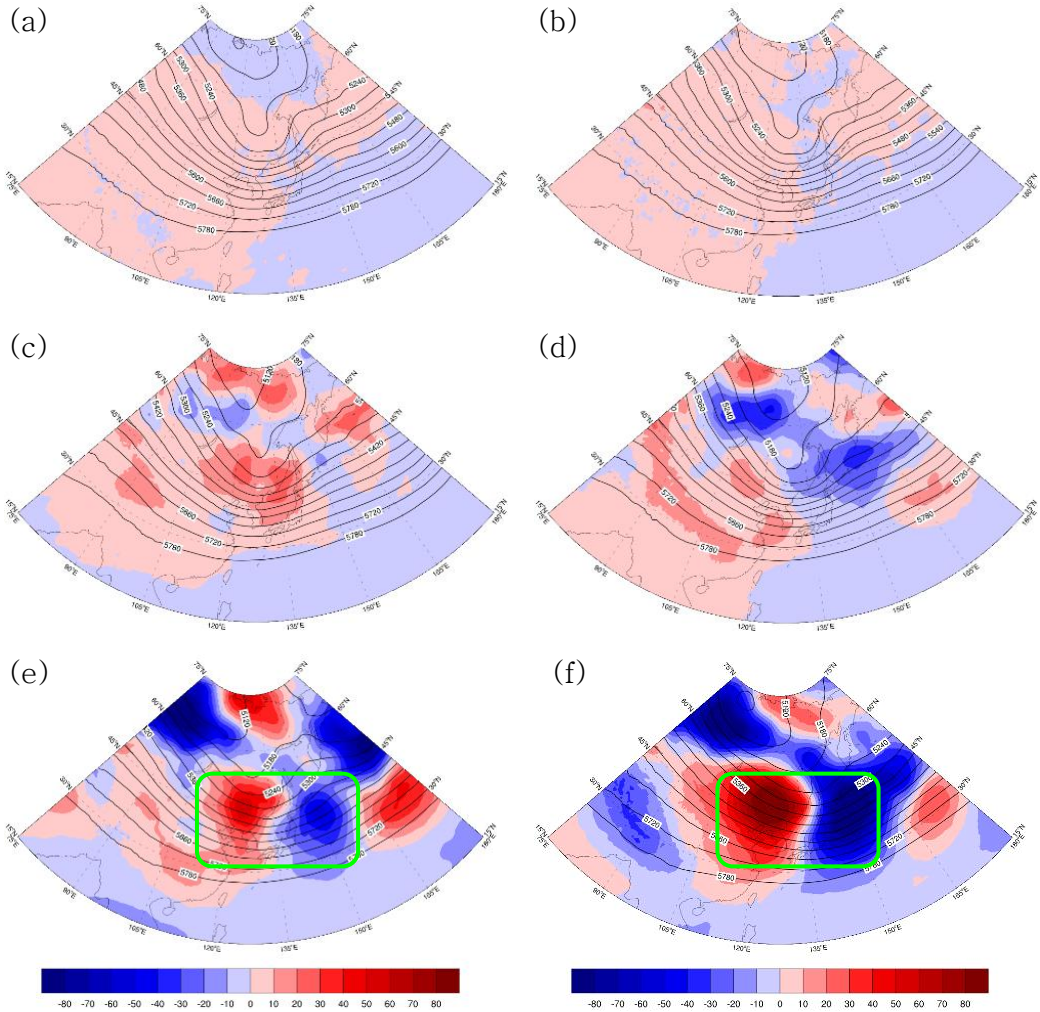

Figure 19. Same as Figure 17, but about Yellow dust periods.

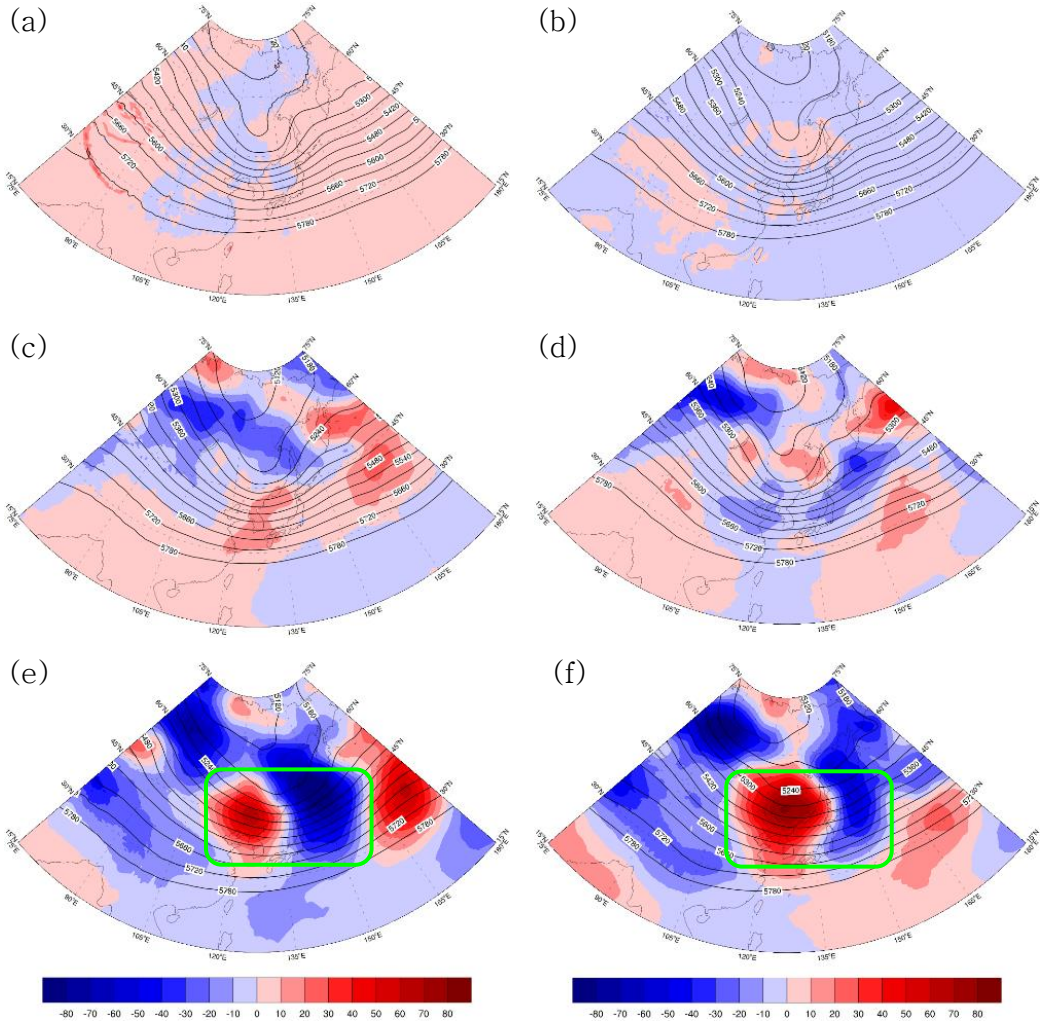

Figure 20. Same as Figure 18, but about Yellow dust periods.

3.2.1.4. 블로킹지수 편차

500hPa geopotential height뿐만 아니라 블로킹지수에 대해서도 TIGGE 4개 모델 별로 ERA5에서 산출한 블로킹지수와의 편차를 예보 시간에 따라서 분석을 진행하였다. Figure 17~20과 마찬가지로 초기장, 120시간 예보장, 240시간 예보장에서 TIGGE의 4개 모델 ECMWF, NCEP, KMA, JMA에서 산출된 블로킹지수와 ERA5 재분석장의 편차를 예보 검증 도메인에서 보였다(Figure 21). 예보 시간이 길어짐에 따라 블로킹지수의 편차는 두 사례 모두 커지는 걸 확인할 수 있다. 하지만, 고농도 미세먼지에 비해서 황사 사례가 블로킹지수 편차가 도메인 영역 전반에서 큰 걸 보이고 있고, 특히 120~130E 영역에서 4개 모델 모두 과대모의를 보이며, 150E 부근에서는 과소모의하는 것을 볼 수 있다. 이는 고농도 미세먼지가 정체된 고기압 anomaly 시스템을 보이며 블로킹지수 또한 다른 기상변수와 마찬가지로 예측을 더 실제에 가깝게 한다는 걸 의미하고 황사에서는 저기압 anomaly 시스템으로 블로킹지수 또한 예측성이 고농도 미세먼지에 비해 떨어지는 걸 의미한다.

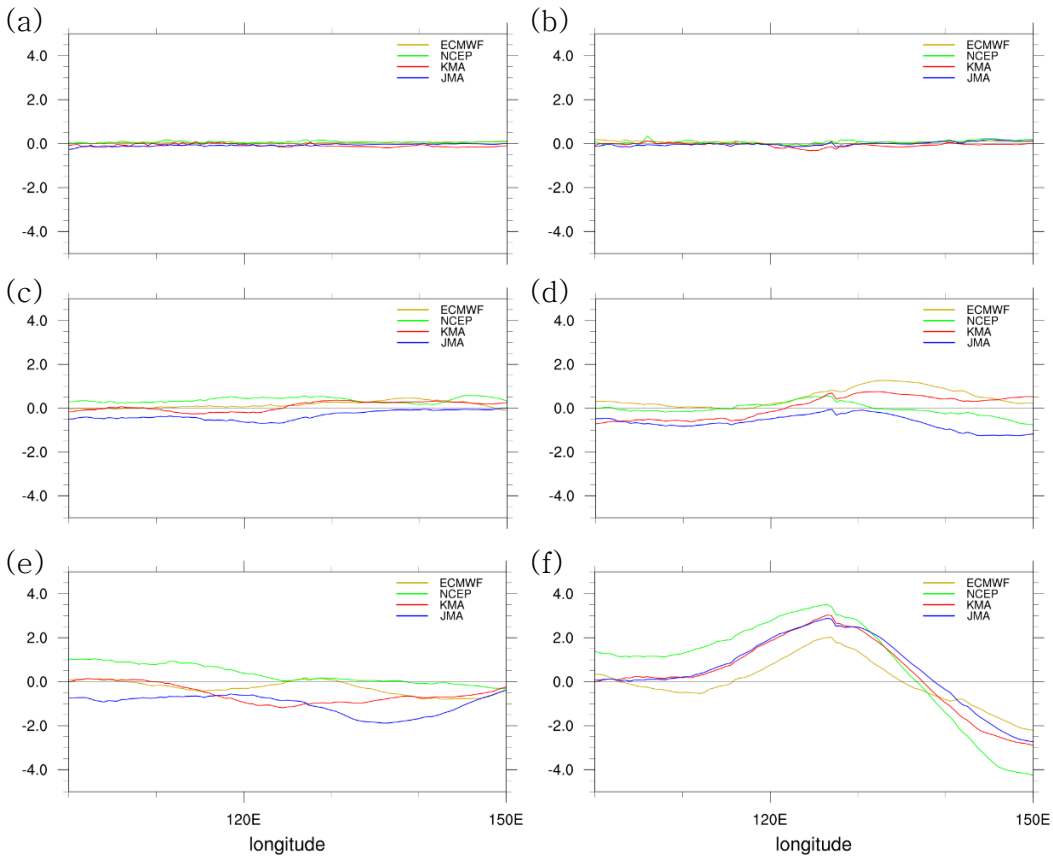

Figure 21. Bias of blocking index of 0, 120, 240hours(top, middle, bottom) forecast field of TIGGE models during high-PM_{10} (left) and Yellow dust(right) periods.

3.2.2. 2014/15년

3.2.2.1. 종관기상장 분석

3.2.2부터는 분석 기간 중에 연도별로 종관기상장 분석과 예보 검증을 하려 한다. 먼저 2014/15년 10~3월에 해당되는 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상장에 대해 분석을 진행한다. Figure 22,23에서는 2014/15년 10~3월에서의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 종관기상변수들의 anomaly를 평균하여 나타냈다. 이 연도에서는 고농도 미세먼지 사례의 종관기상장 특징이 예보 검증 기간에서 분석한 종관기상장과 다르다는 게 두드러지는 결과다. 500hPa geopotential height에서는 고농도 미세먼지가 한반도 주변에 양의 anomaly를 나타내지만, 2014/15에서는 한반도와 남쪽 지역에 음의 anomaly가 나타나고, 오호츠크 해 지역에는 기압골이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 황사는 한반도와 만주 지역에 걸쳐서 음의 anomaly가 나타나는 걸 확인할 수 있으며, 850hPa와 200hPa windspeed에서는 고농도 미세먼지는 한반도 주변에 음의 anomaly가 나타나지만, 황시는 양의 anomaly가 나타난다. 850hPa temperature에서 고농도 미세먼지는 500hPa gph에서 봤던 비교적 양의 anomaly가 나타나는 중국과 한반도 지역에 양의 anomaly가 나타나며, 기압골이 있는 동해와 오호츠크 해 부근에는 음의 anomaly가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 황사에서는 만주 지역 인근에

음의 anomaly가 나타나며 일본 열도 부근에는 양의 anomaly가 나타난다. 850hPa RH는 두 사례에서 뚜렷한 대비되는 특징이 보이지 않으며, SST에서는 고농도 미세먼지는 전반적으로 음의 anomaly를 보이며 황사에서는 양의 anomaly를 보인다. 이러한 특징은 14/15년에서의 고농도 미세먼지 사례가 기존의 기상적 요인으로 인한 현상으로는 설명하기 어려운 시기이며 황사 사례는 기존의 기상적 요인으로 설명가능한 종관기상적 특징을 보이고 있다. 이러한 종관기상장의 패턴에 대해서 각 사례의 기상장의 예측성을 다음 장에서 알아보고자 한다.

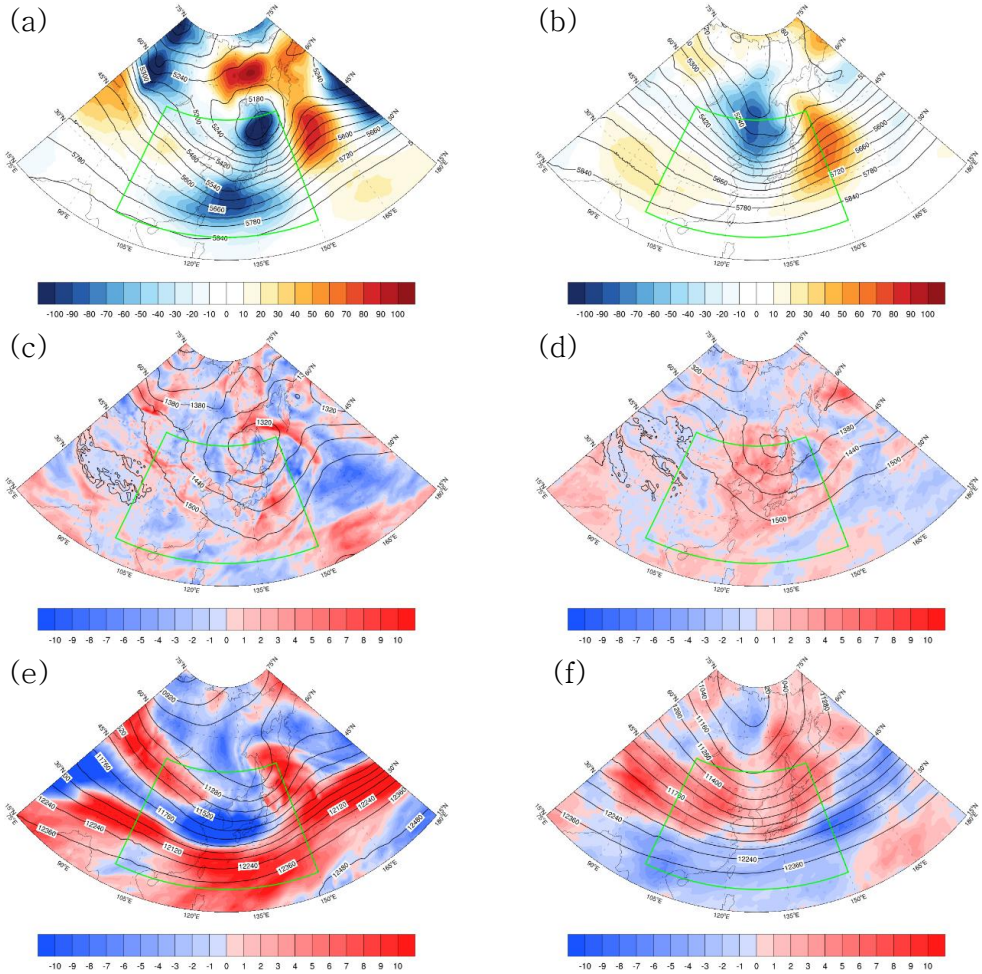

Figure 22. Same as Figure 14, but during Oct−Mar 2014/15.

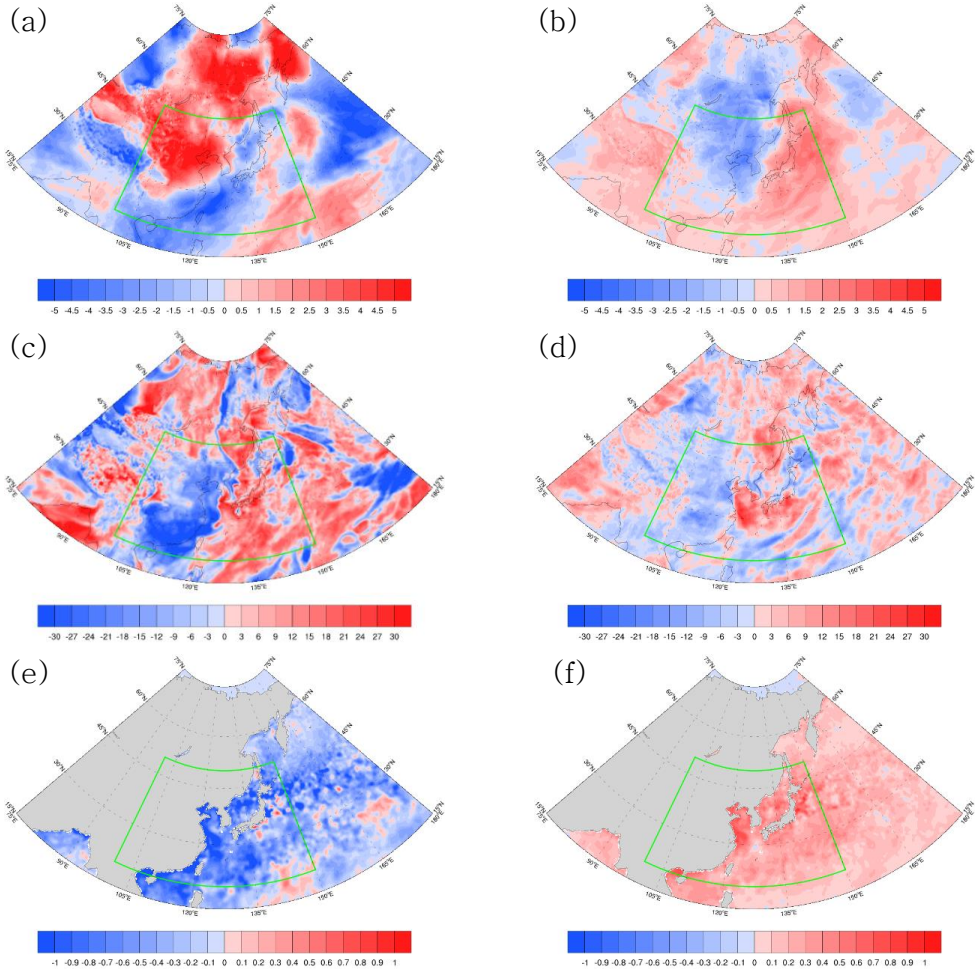

Figure 23. Same as Figure 15, but during Oct–Mar 2014/15.

3.2.2.2. RMSE

3.2.1.2에서 했던 것과 마찬가지로 2014/15년 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 RMSE에 대해 분석을 진행하였다(Figure 24). 500hPa gph에서는 240시간 예보장을 제외한 다른 예보장에서는 모델마다 차이가 있지만, 전체 분석 결과와 비교했을 때 고농도 미세먼지와 황사 사례의 뚜렷한 차이가 보이지 않는다. 블로킹지수에서는 192시간 예보장부터 고농도 미세먼지보다 황사 사례에서 RMSE가 4개 모델 전반적으로 큰 값을 보이며 뚜렷한 차이를 보인다. 이렇게 14/15년에서의 두 사례의 500hPa gph와 블로킹지수의 예측성이 전체 분석 기간보다 두드러지는 특징이 적은 이유는 이 연도에서의 고농도 미세먼지와 황사 사례 모두 저기압 anomaly가 한반도 지역에 지배적으로 나타나기 때문이라고 판단된다.

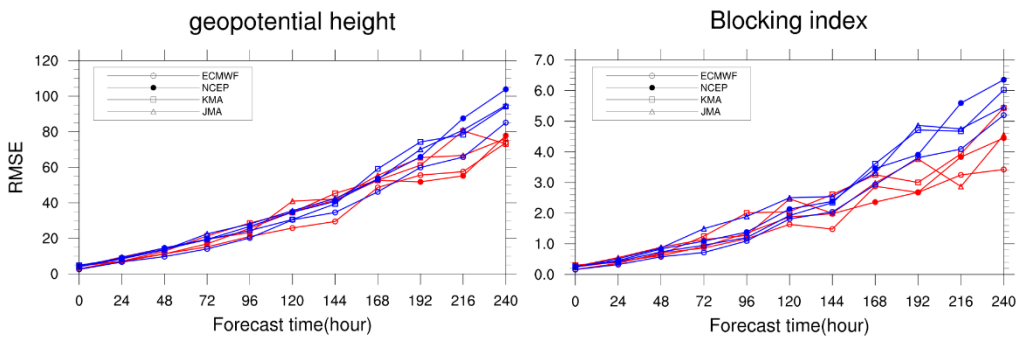

Figure 24. Same as Figure 16 but during Oct-Mar 2014/15.

3.2.2.3. 500hPa gph 편차

전과 마찬가지로 세부적으로 예보 검증 결과를 분석하기 위해 각 모델별로 예보장에서 산출한 500hPa geopotential height의 편차에 대해 Figure 25~28에서 분석을 진행하였다. Figure 25,26에서는 고농도 미세먼지에 대해서, Figure 27,28은 황사에 대해서 분석을 진행하였다. 고농도 미세먼지 사례(Figure 25,26)에서는 각 모델에서 한반도 주변(green box)에 편차의 특징이 다르게 나타난다. 120시간 예보장에서는 대체적으로 4개 모델 모두 한반도 북동쪽의 기압골을 대체적으로 잘 모의하고 있고 240시간 예보장에서는 4개 모델 모두 전반적으로 오호츠크해에 있는 기압골에 대해 골을 강하게 모의하는 것을 볼 수 있지만, NCEP과 JMA은 한반도 주변에 gph를 과대모의하는 것을 보이며, ECMWF와 KMA은 한반도 서쪽에는 과소모의를 하지만 동쪽은 과대모의를 하는 특징을 보인다. 특히 KMA에서는 다른 모델과 달리 황해 지역에 강한 기압골을 모의하게 되는 결과를 보인다.

황사 사례(Figure 27,28)는 Table 2에서의 사례 날짜수를 기반으로 종관기상장과 마찬가지로 2014/15년 사례의 날짜수가 전체 분석 기간 중에 다수이기 때문에 500hPa gph 편차 또한 2014/15년 분석 결과와 전체 기간 분석 결과와 패턴이 거의 유사하게 나타난다. 120시간 예보장에서는 JMA를 제외한 3개 모델은 기압골 주변에 약간의 과대모의를 하면서 기압골을

약하게 모의하는 것을 볼 수 있다. 240시간 예보장에서는 전체 분석 기간의 패턴과 유사하게 한반도 근처(green box)에서 서쪽에서는 과대모의, 동쪽에서는 과소모의를 하며 만주 지역의 기압골을 예측하는 데에 예측성이 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

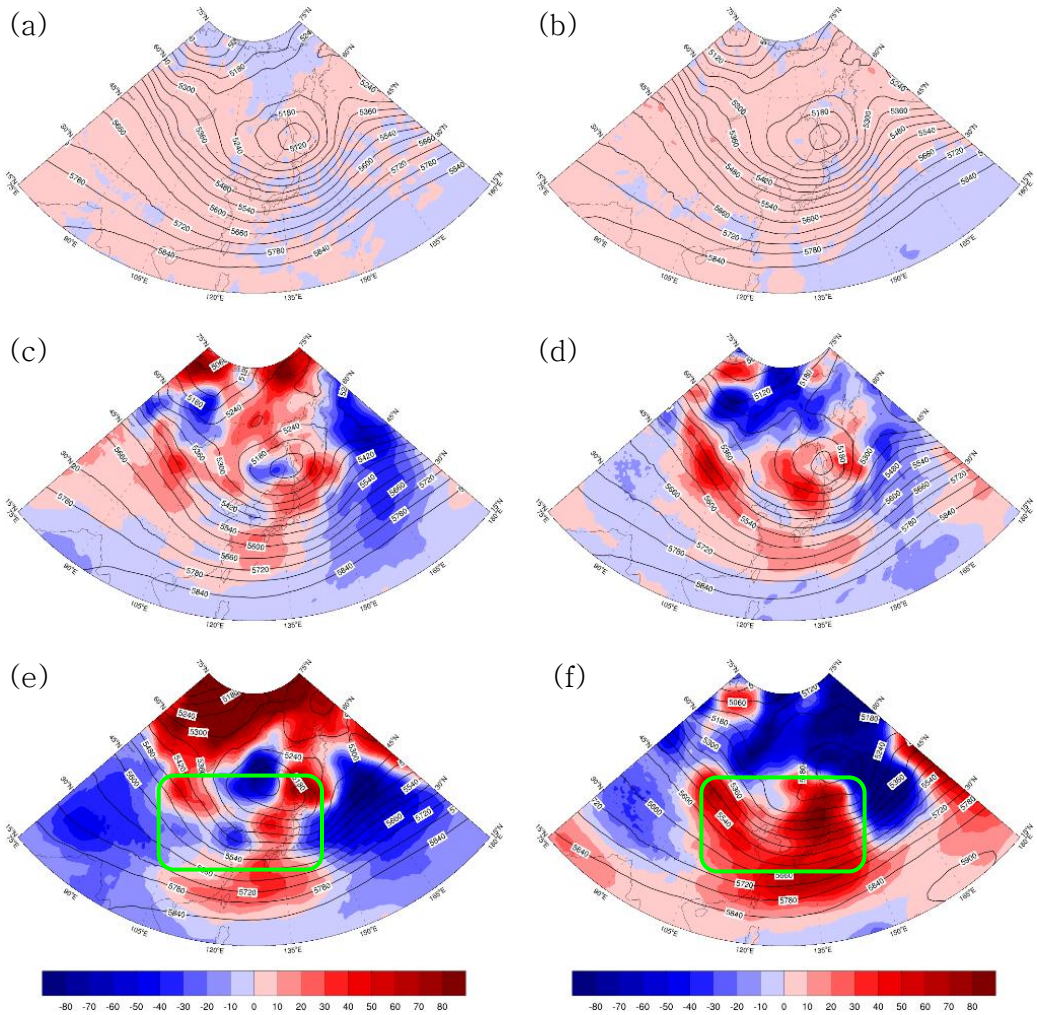

Figure 25. Same as Figure 17, but during Oct–Mar 2014/15.

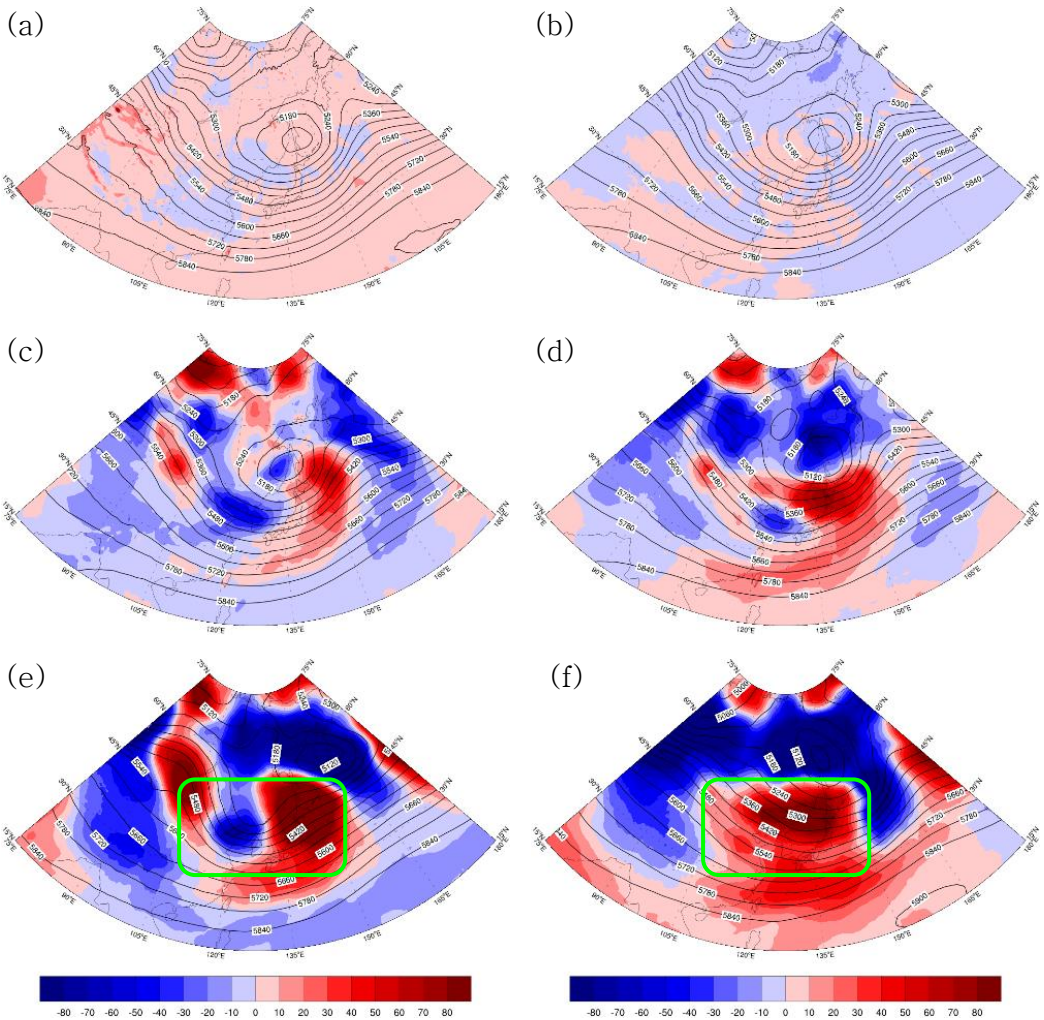

Figure 26. Same as Figure 18, but during Oct−Mar 2014/15.

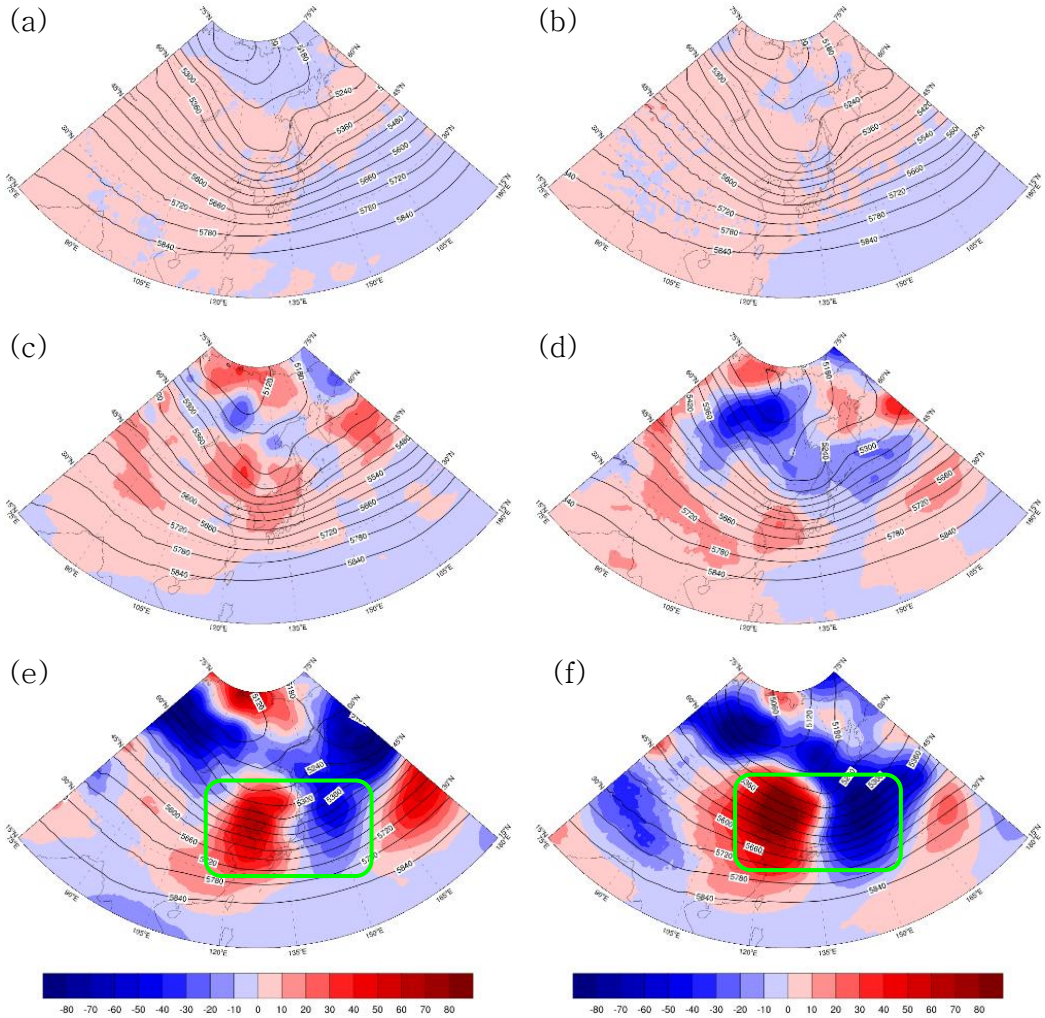

Figure 27. Same as Figure 19, but during Oct−Mar 2014/15.

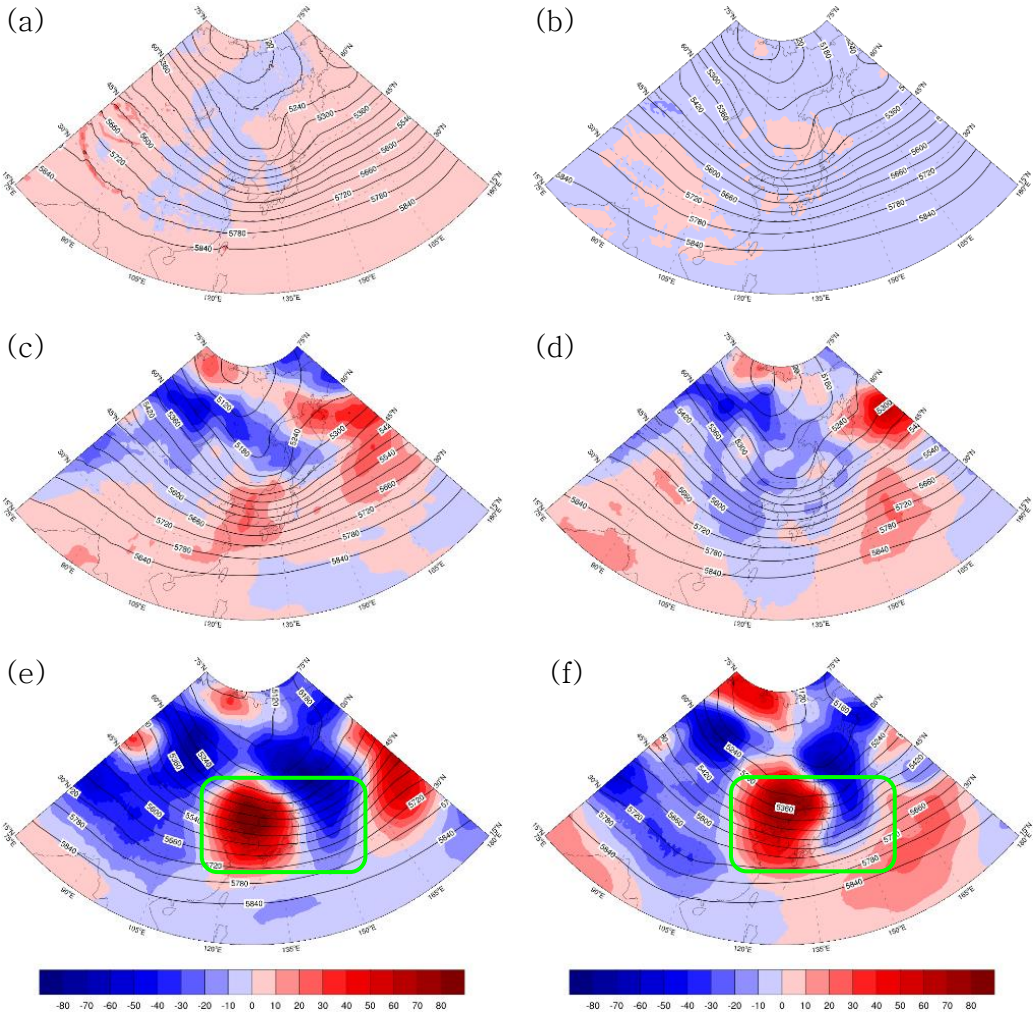

Figure 28. Same as Figure 20, but during Oct−Mar 2014/15.

3.2.2.4. 블로킹지수 편차

500hPa gph뿐만 아니라 블로킹지수에 대해서도 Figure 21와 마찬가지로 분석을 진행하였다(Figure 29). 2014/15년도에서 예보장에서 산출된 블로킹지수는 전체 분석 기간에서 산출된 결과(Figure 21)와는 다소 차이가 있다. 120시간 예보장에서는 고농도 미세먼지가 황사 사례보다 4개 모델 전반적으로 편차의 크기가 도메인 전반에 걸쳐서 크게 나타난다. 하지만 240시간 예보장에서는 KMA를 제외한 나머지 3개 모델들은 고농도 미세먼지가 황사 사례보다 비교적 편차가 작게 나타난다. KMA는 고농도 미세먼지에서 다른 모델에 비해 편차가 두드러지게 차이가 나며 특히, 135~150E에서 굉장히 큰 값을 보인다. 황사 사례에서는 4개 모델 모두 예보 시간이 길어지면서도 비슷한 편차 패턴을 보이며, 120~130E에서는 양의 편차를 보이고, 150E부근에는 음의 편차를 보이며 100~110E에서는 편차의 값이 0에 가까운 패턴을 보임을 알 수 있다. 이렇게 14/15년에서의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서 블로킹 지수에 대해 편차의 크기가 크지 않은 이유는 고농도 미세먼지와 황사 사례의 500hPa gph에서의 anomaly가 모두 한반도에서 음의 anomaly가 나타났기 때문이라고 판단된다.

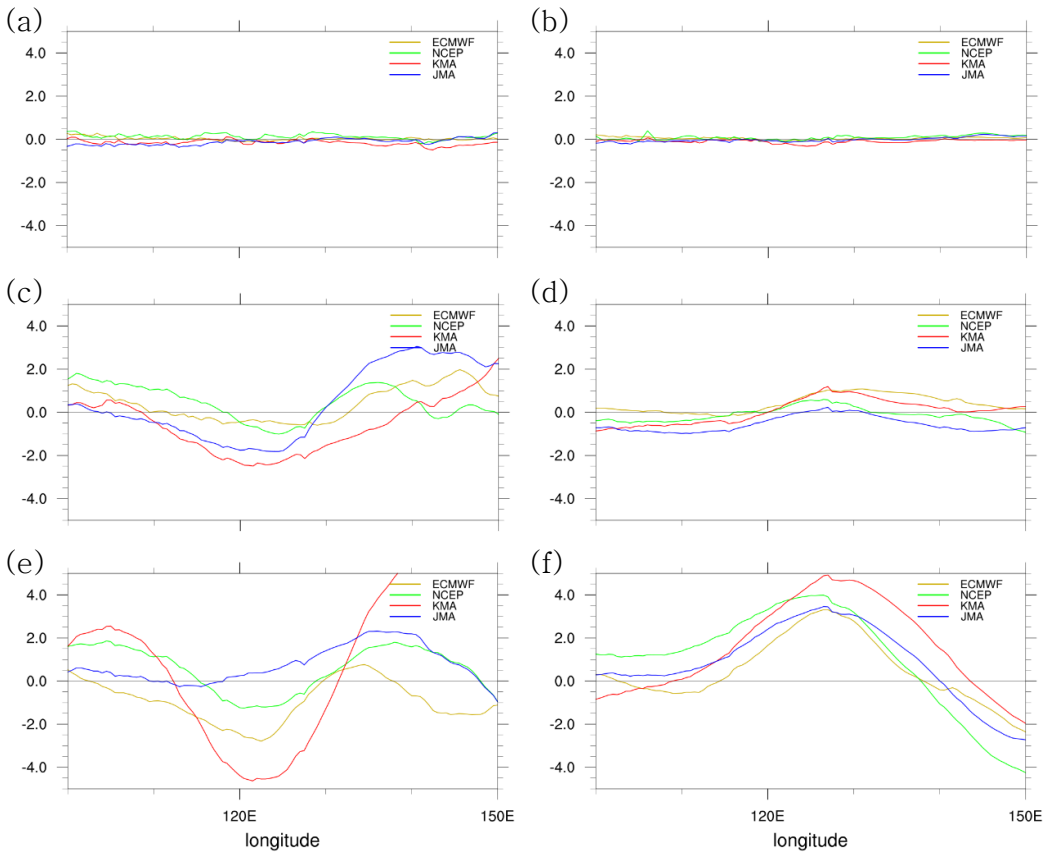

Figure 29. Same as Figure 21, but during Oct−Mar 2014/15.

3.2.3. 2015/16년

3.2.3.1. 종관기상장 분석

이전 연도와 마찬가지로 2015/16년 10~3월에서의 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상장을 분석하였다(Figure 30,31). 2015/16년에서의 사례별 종관기상장의 두드러지는 특징은 고농도 미세먼지와 황사 사례의 500hPa geopotential height의 anomaly 패턴이 서로 비슷하다는 점이다. 한반도부터 오호츠크 해 부근까지 둥근 초승달 형태의 양의 anomaly가 나타나고, 한반도 북서쪽에는 음의 anomaly가 나타난다는 점이다. 그리고 200hPa windspeed의 anomaly 또한 한반도를 포함한 중국 화북지역과 동해 지역에 강한 양의 anomaly가 나타난다. 하지만, 500hPa geopotential height의 등고선을 보면 고농도 미세먼지보다 황사 사례에서 한반도 북서쪽에 더 강한 기압골이 형성되어 있고, anomaly 또한 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 850hPa windspeed에서 고농도 미세먼지는 약한 음의 anomaly가 한반도 주변에 형성되어 있지만, 황사는 양의 anomaly가 형성되어 있다. 850hPa temperature에서는 고농도 미세먼지와 황사 모두 비슷하게 한반도 북쪽 몽골 지역에 음의 anomaly, 한반도와 동해, 일본 열도와 북서태평양 지역에 양의 anomaly가 나타난다. 850hPa RH는 뚜렷하게 대비되는 특징이 나타나지 않으며, SST 또한 뚜렷하게 대비되는 특징을 찾기 어렵다.

2015/16년의 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상장의 특징은 500hPa gph기준으로 서로 비슷한 패턴을 보이지만 anomaly의 강도는 황사가 더 크게 나타난다. 이는 고농도 미세먼지에서 나타나는 한반도 북서쪽의 기압골의 세기보다 황사에서 나타나는 기압골의 세기가 더 큰 것을 의미한다. 이러한 종관기상장의 차이가 예측성에도 차이가 있는지 다음 장에서 예측성 평가를 진행한다.

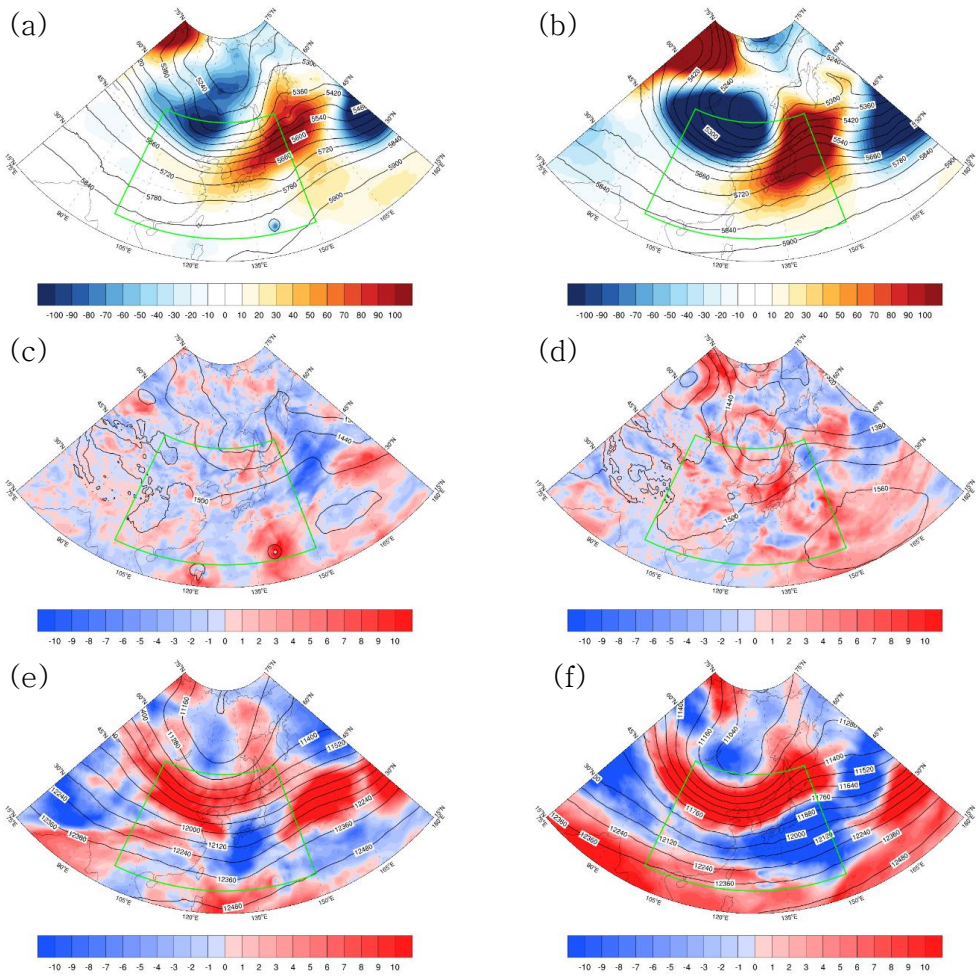

Figure 30. Same as Figure 14, but during Oct−Mar 2015/16.

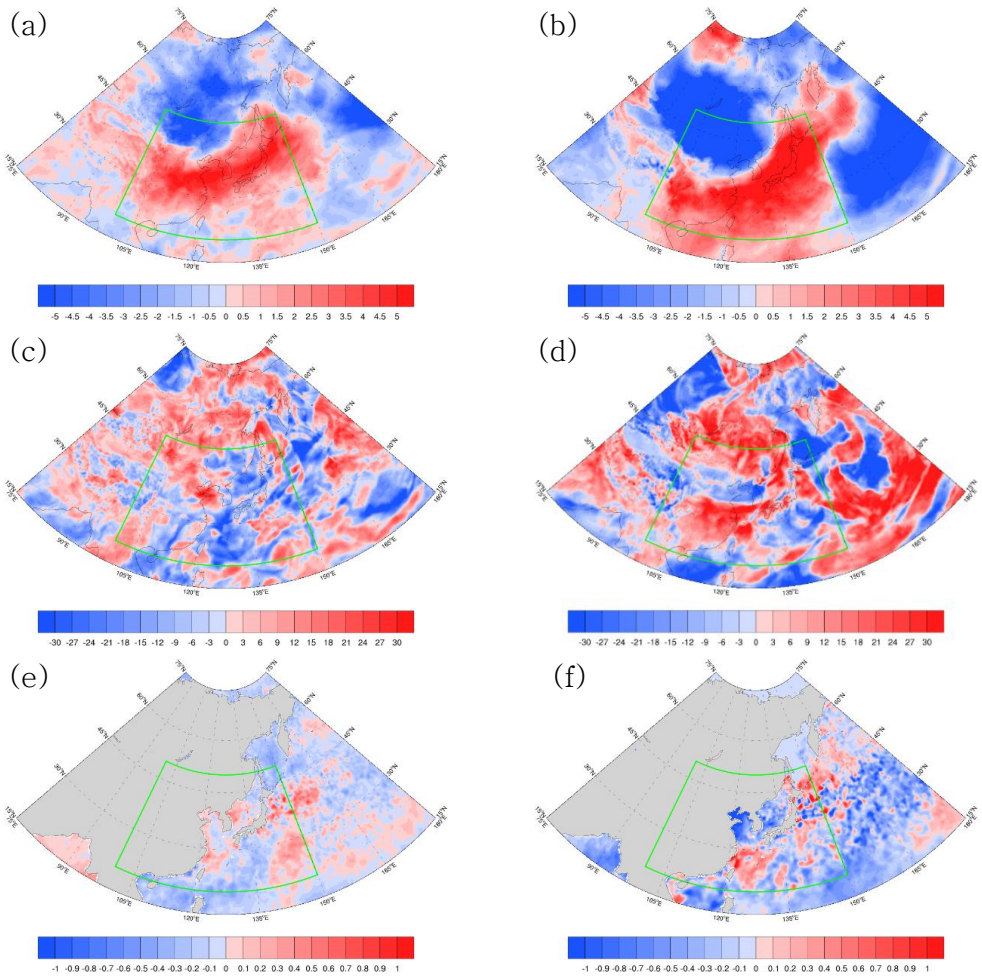

Figure 31. Same as Figure 15, but during Oct–Mar 2015/16.

3.2.3.2. RMSE

이전 장에서 했던 것과 마찬가지로 2015/16년 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 RMSE에 대해 분석을 진행하였다(Figure 32). 이전 연도와 달리 2015/16년에서는 기존보다 다른 결과가 나타난다. Figure 24와 달리 Figure 32에서는 gph, 블로킹지수 모두 모델 전반적으로 고농도 미세먼지와 황사 사례의 예보 시간에 따른 RMSE의 차이를 보이지 않는다. 이는 두 사례의 종관기상장의 패턴의 특징이 비슷한 데에서 오는 특징이라고 판단된다. 다만, KMA 모델에서는 gph와 블로킹지수 둘 다 192시간 예보장부터 그 이상의 예보 시간에 대한 예보장에서 RMSE 값이 다른 3개 모델에 비해 두드러지게 커지는 걸 확인할 수 있다.

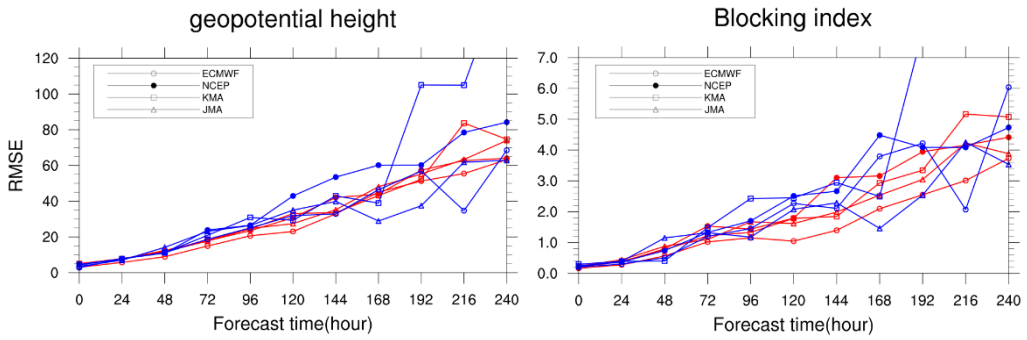

Figure 32. Same as Figure 16 but during Oct−Mar 2015/16.

3.2.3.3. 500hPa gph 편차

2015/16년 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서 세부적으로 예보 검증 결과를 분석하기 위해 각 모델 별로 예보장에서 산출한 500hPa geopotential height의 편차에 대해 Figure 33~36에서 분석을 진행하였다. Figure 33,34은 고농도 미세먼지에 대해서, Figure 35,36은 황사에 대해서 분석을 진행하였다. 고농도 미세먼지 사례(Figure 33,34)에서 120시간 예보장은 ECMWF예서는 기압골 부근에 과대모의를 하면서 기압골을 약하게 모의하는 것을 확인할 수 있으며, 240시간 예보장에서는 4개 모델 모두 편차의 크기 차이는 있지만, 한반도와 산둥반도, 일본 열도의 동서 방향으로 gph를 과소모의하는 패턴을 보인다. 모델 중에서는 ECMWF가 가장 편차가 적게 나타나며, KMA는 가장 큰 편차를 보인다.

황사 사례(Figure 35,36)는 4개 모델 모두 전반적으로 고농도 미세먼지 사례보다 편차가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 한반도 주변에 강한 음의 편차가 나타나며, 강한 과소모의를 하는 것을 알 수 있다. 이는 황사 사례에서 발생하는 강한 기압골을 모의하는 데에 어려움이 있으며, 각 모델 들이 기압골을 한반도 쪽으로 더욱 강하게 모의하는 것으로 판단할 수 있다. 이를 통해 15/16년에서의 고농도 미세먼지와 황사 사례의 500hPa gph는 둘 다 비슷하게 한반도 북서쪽에 기압골이 발달되어 있으나 고농도

미세먼지에 비해 황사의 기압골의 모의를 더 잘 하지 못하는 것으로 판단된다.

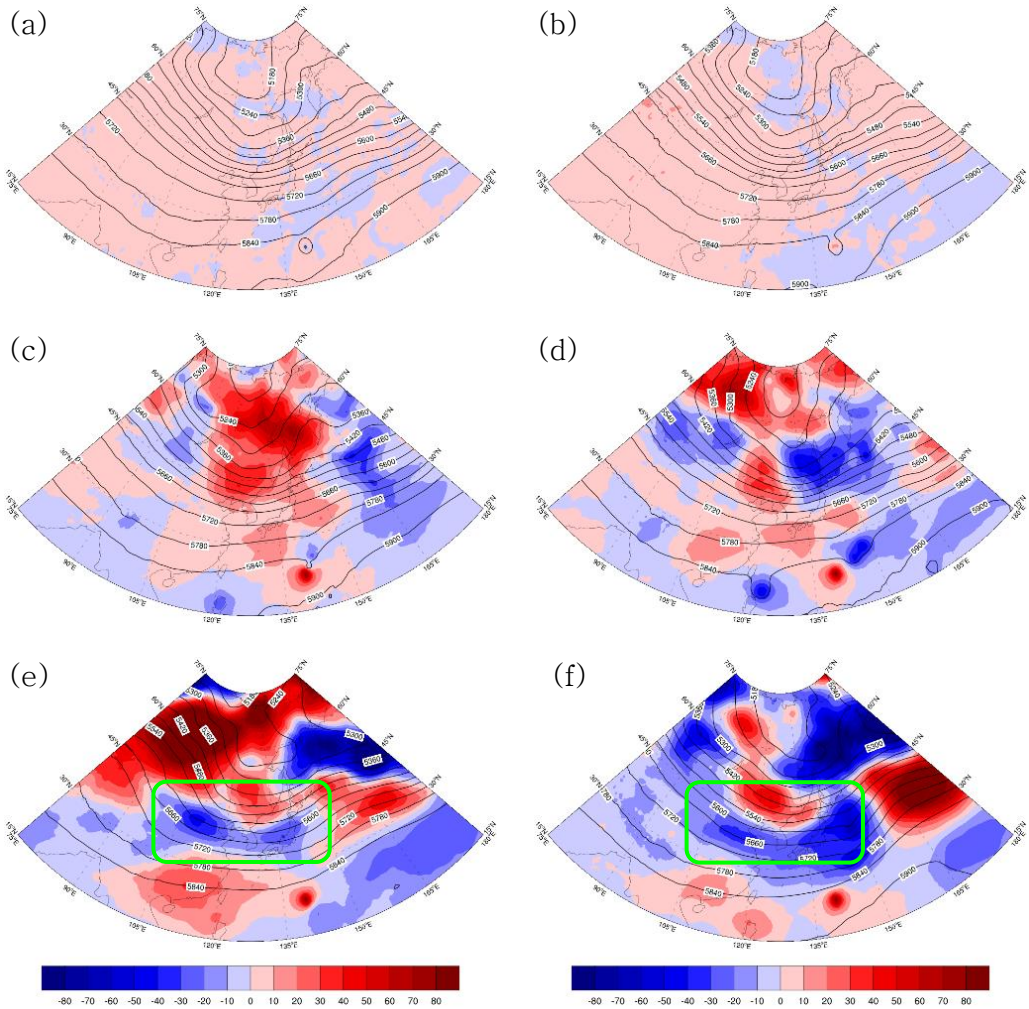

Figure 33. Same as Figure 17, but during Oct–Mar 2015/16.

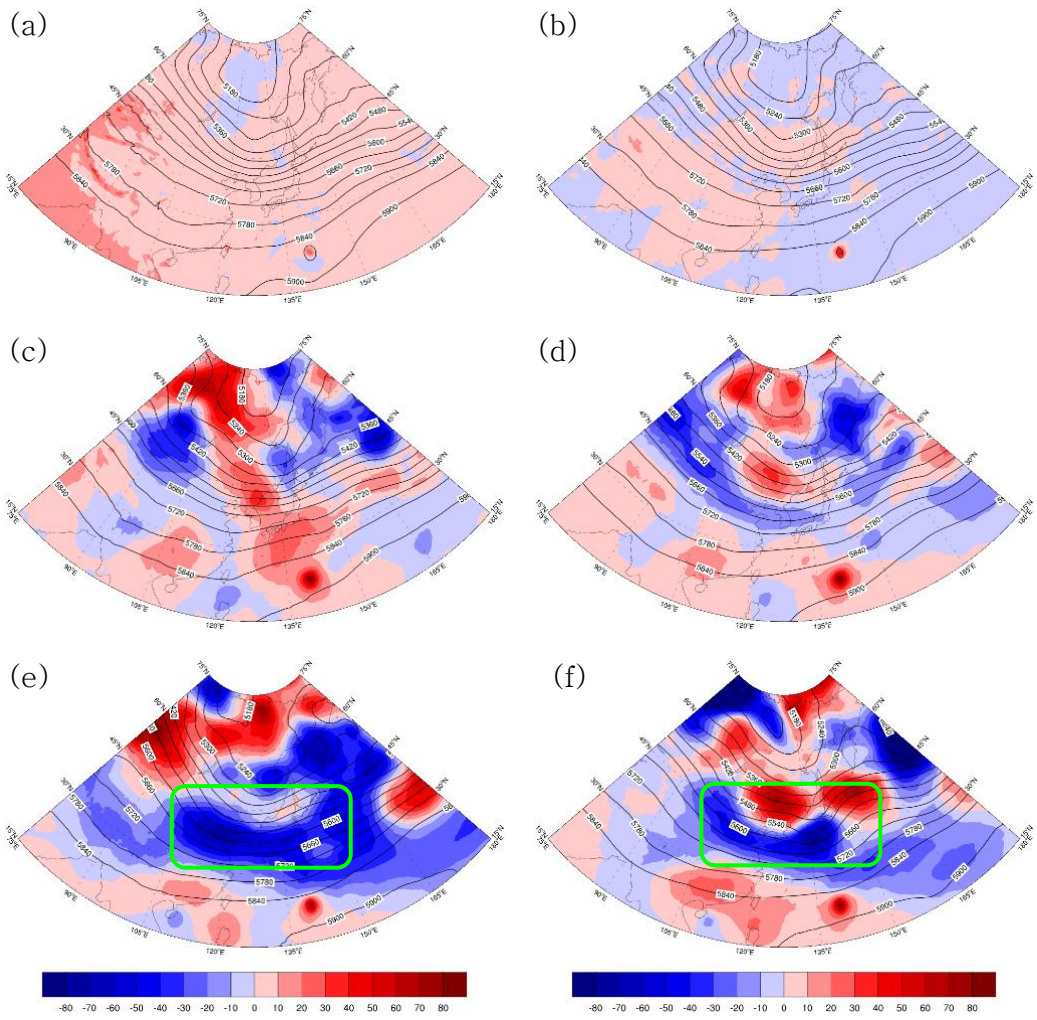

Figure 34. Same as Figure 18, but during Oct–Mar 2015/16.

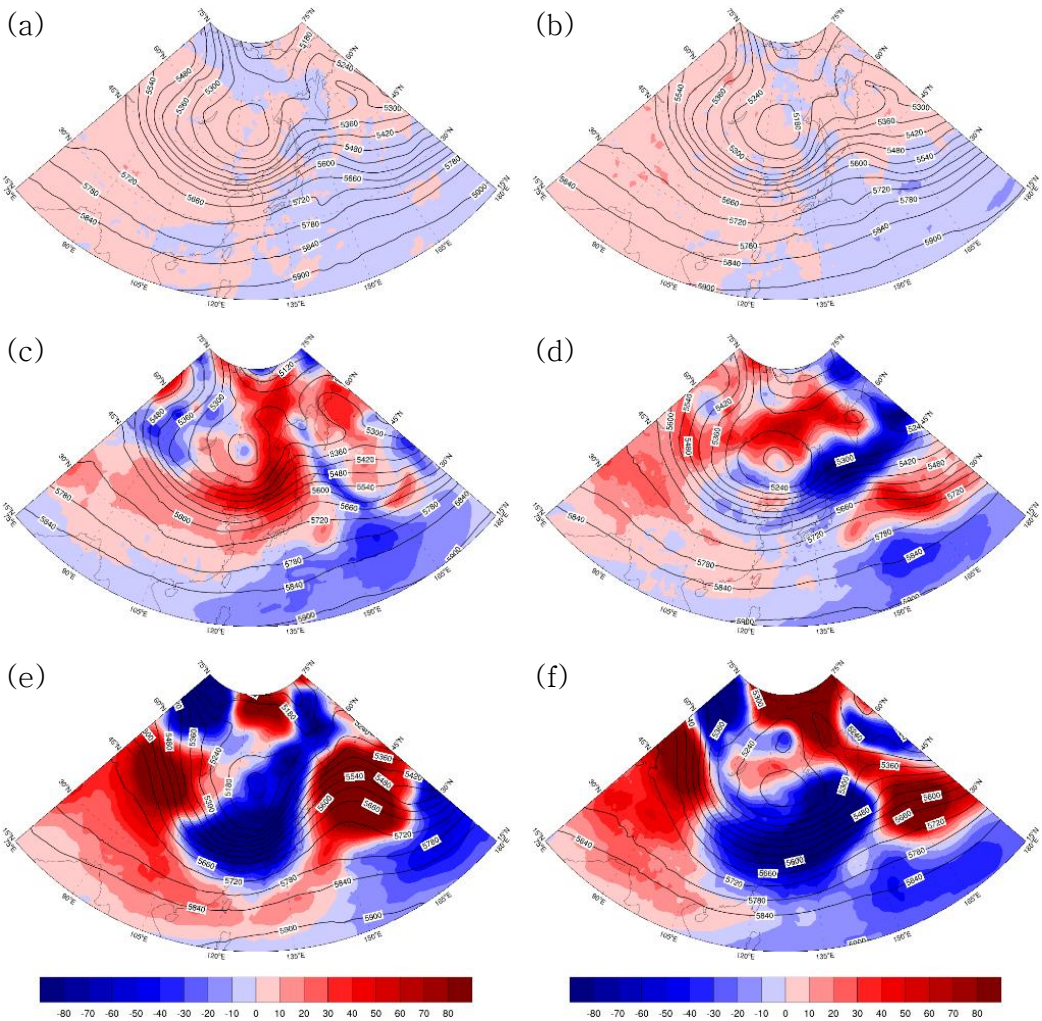

Figure 35. Same as Figure 19, but during Oct−Mar 2015/16.

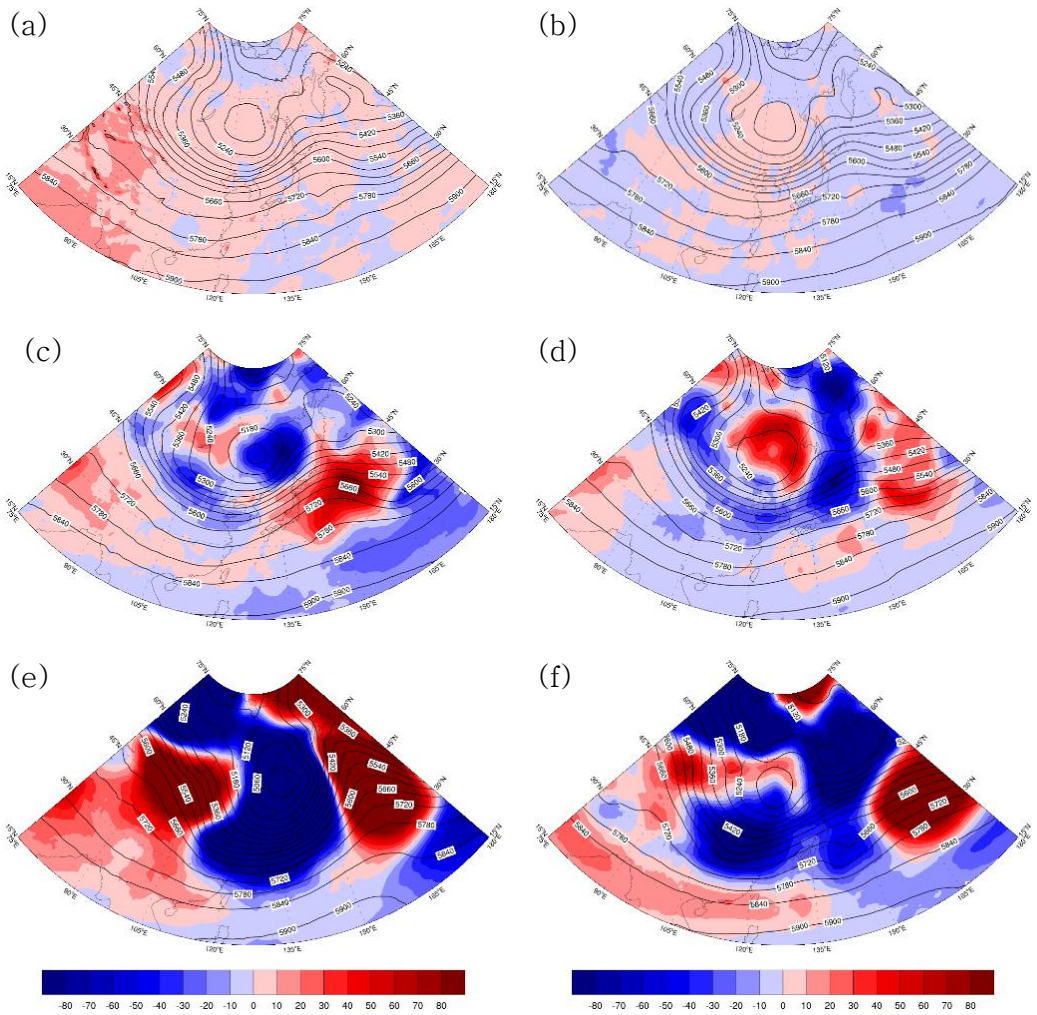

Figure 36. Same as Figure 20, but during Oct–Mar 2015/16.

3.2.3.4. 블로킹지수 편차

이전 장에서 했던 것처럼 2015/16년 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에 대해서 예보장에서 산출한 블로킹지수의 편차 분석을 진행하였다 (Figure 37). 2015/16년은 고농도 미세먼지와 황사 사례의 편차에 대한 차이가 전체 분석 기간에 대한 분석과 비슷한 결과를 보인다. Figure 37의 240시간 예보장을 보면, 고농도 미세먼지 사례에서의 편차가 황사의 편차보다 더 작은 값을 나타내며, 고농도 미세먼지에서는 도메인 영역 전반에서 블로킹지수를 과소모의하는 결과를 보인다. 황사 사례는 120시간 예보장에서도 130~150E 영역에서 모델들의 블로킹지수 편차가 커진 것을 확인할 수 있으며, 240시간 예보장에서는 KMA 모델이 매우 큰 음의 편차를 보인다. 나머지 3개 모델도 도메인 영역 전반에 걸쳐 고농도 미세먼지 사례보다 더 큰 편차를 보인다. 이를 통해 2015/16년의 사례에서도 고농도 미세먼지보다 황사 사례에서 블로킹지수의 예측성이 더 좋지 않은 것을 확인할 수 있다. 이 또한 500hPa gph와 마찬가지로 고농도 미세먼지보다 황사의 한반도 북서쪽의 기압골을 예측하는 데에 있어 두 사례의 차이가 나타나는 것으로 볼 수 있다.

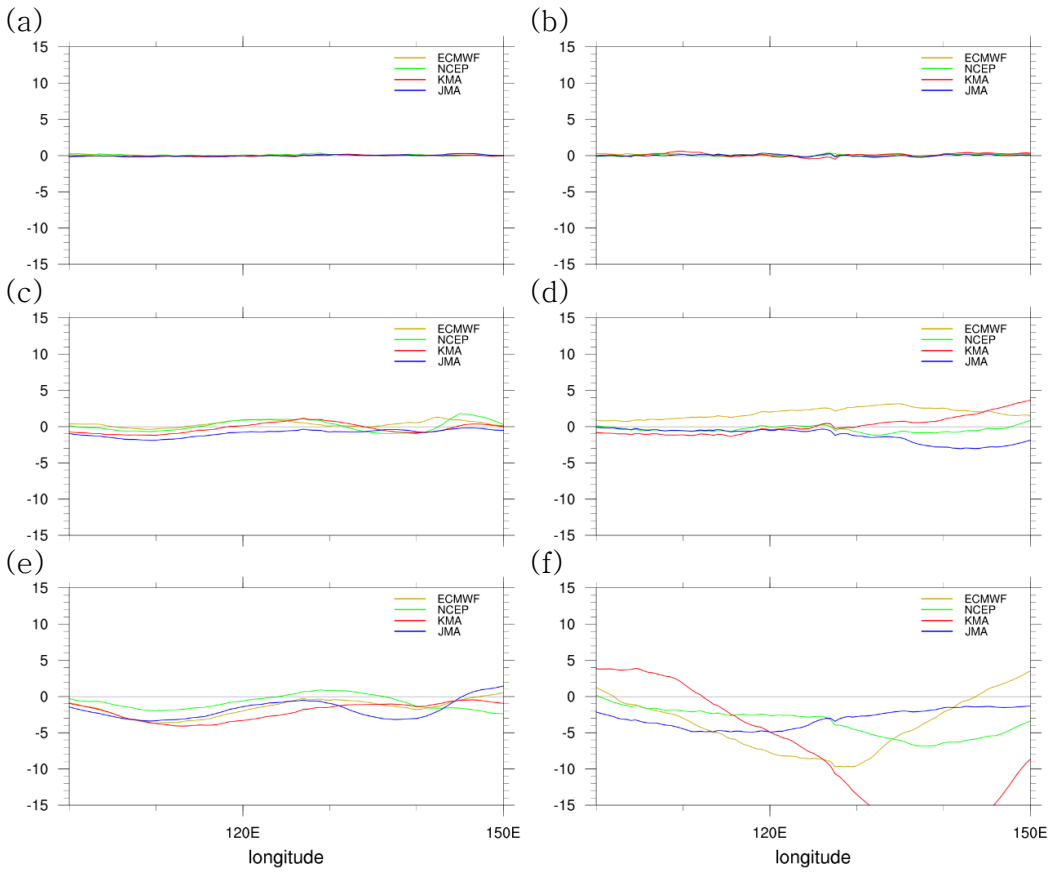

Figure 37. Same as Figure 21, but during Oct–Mar 2015/16.

3.2.4. 2016/17년

3.2.4.1. 종관기상장 분석

2016/17년 10~3월에서의 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상장을 분석하였다(Figure 38,39). 2016/17년에서는 이전 2개년도에 비해서 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상장 패턴이 서로 두드러지게 나타난다. 고농도 미세먼지 사례의 500hPa geopotential height은 한반도 주변에서 양의 anomaly가 강하게 나타나는 반면에 황사 사례에서는 한반도 북쪽에 강한 음의 anomaly가 나타나며 기압골이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 850hPa windspeed에서는 고농도 미세먼지 사례에서는 한반도 근처에 음의 anomaly가 형성되어 있지만, 황사 사례에서는 양의 anomaly가 형성되어 있다. 이러한 패턴은 본 연구에서 분석한 예보 검증 전체 기간에서의 종관기상장 특징과 거의 유사한 특징을 보이고 있다. 하지만, 200hPa windspeed에서 고농도 미세먼지 사례는 한반도 주변에 양의 anomaly를 보이며, 황사 사례에서는 음의 anomaly를 보인다. 이는 전체 예보 검증 분석 기간에서의 종관기상장과 다른 패턴을 보인다. 850hPa temperature에서 고농도 미세먼지는 한반도 주변에 양의 anomaly를 보이며, 황사는 한반도와 일본 열도에 걸쳐서 양의 anomaly를 보이지만, 만주 지역의 좁은 지역에 음의 anomaly를 보인다. 850hPa RH는 뚜렷한 특징이 나타나지

않으며 SST에서는 고농도 미세먼지는 양의 anomaly를 보이지만, 황사에서는 음의 anomaly를 보인다.

500hPa 기준으로는 고농도 미세먼지에서는 결과적으로 고기압 anomaly 시스템이 나타나며 황사에서는 저기압 anomaly 시스템이 나타나고 있다. 이러한 종관기상장에 대한 차이가 예측성에도 차이가 나게 하는지 예보 검증을 실시하였다.

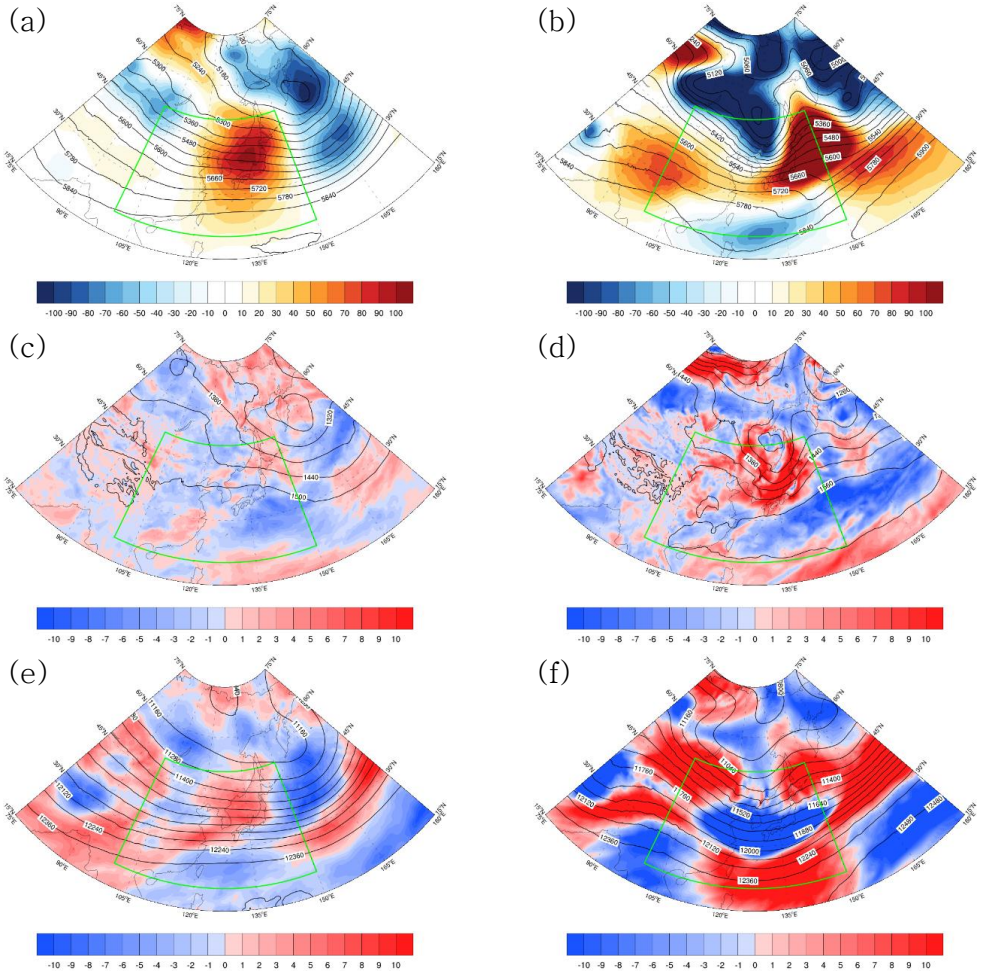

Figure 38. Same as Figure 14, but during Oct–Mar 2016/17.

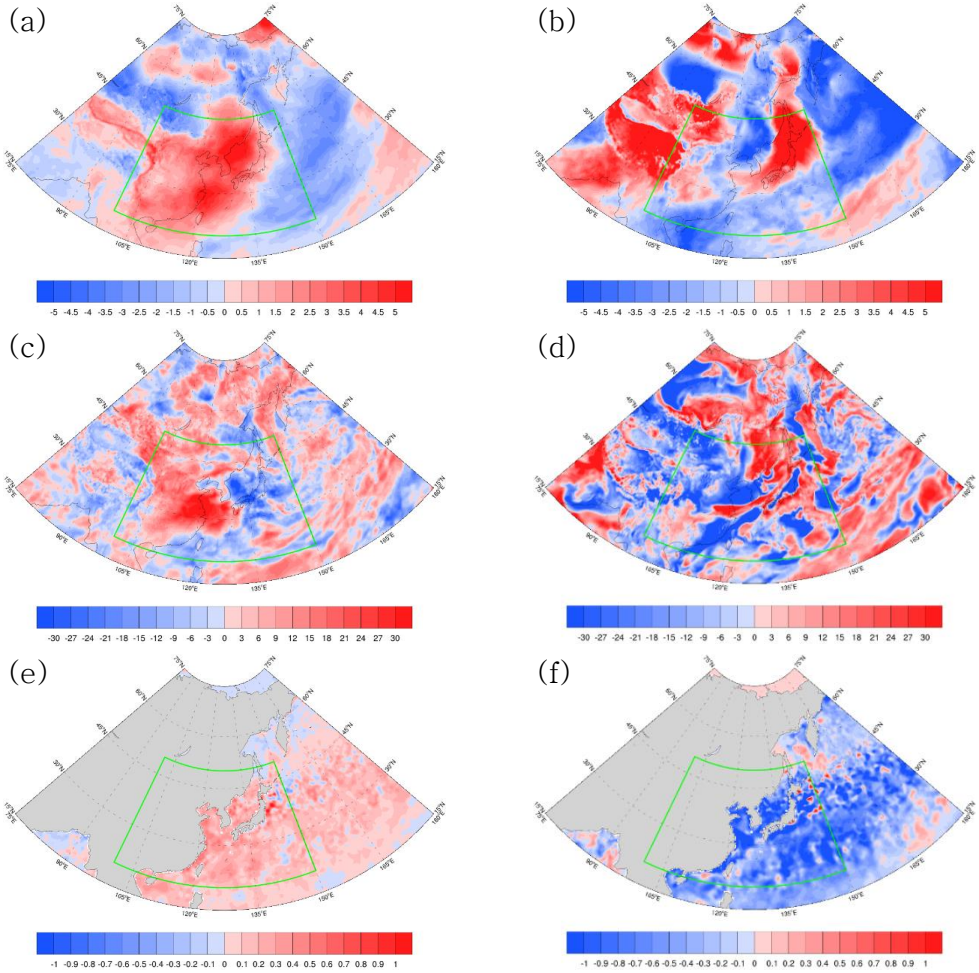

Figure 39. Same as Figure 15, but during Oct−Mar 2016/17.

3.2.4.2. RMSE

2016/17년 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 RMSE에 대해 분석을 진행하였다(Figure 40). 2015/16년도와는 달리 고농도 미세먼지와 황사 사례의 RMSE에 대한 차이가 비교적 나타나는 것을 확인할 수 있다. 96시간 예보장부터 216시간 예보장까지는 대체적으로 500hPa geopotential height와 블로킹지수 모두 고농도 미세먼지보다 황사 사례의 RMSE가 4개 모델 전반적으로 높은 값을 보인다. 240시간 예보장에서는 고농도 미세먼지와 황사 사례의 차이가 gph와 블로킹지수 모두 크게 나타나지는 않지만, 전반적으로 고농도 미세먼지가 황사 사례보다 RMSE가 낮게 나타나는 것은 명백한 특징이라고 볼 수 있다.

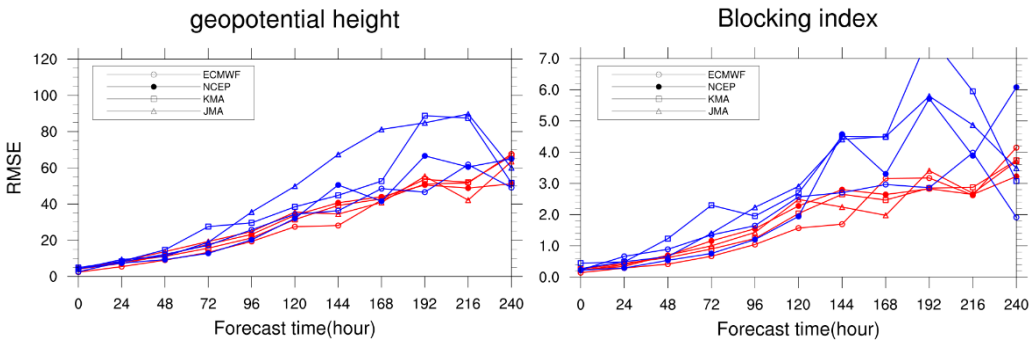

Figure 40. Same as Figure 16 but during Oct−Mar 2016/17.

3.2.4.3. 500hPa gph 편차

2016/17년 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서 세부적으로 예보 검증 결과를 분석하기 위해 각 모델 별로 예보장에서 산출한 500hPa geopotential height의 편차에 대해 Figure 41~44에서 분석을 진행하였다. Figure 41,42은 고농도 미세먼지에 대해서, Figure 43,44은 황사에 대해서 분석을 진행하였다. 고농도 미세먼지 사례(Figure 41,42)에서 120시간 예보장에서는 4개 모델 모두 한반도의 서쪽인 중국 지역에는 과대모의를, 일본 열도와 동해 지역은 과소모의를 하는 것을 확인할 수 있다. 240시간 예보장에서는 ECMWF, NCEP, JMA에서는 한반도를 중심으로 동쪽에 gph의 과소모의가 강하게 나타나며 이는 강한 기압골을 모의하는 것으로 보인다. 반면에, KMA는 한반도와 북동부지역에 과대모의가 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

황사 사례(Figure 43,44)는 이전 연도와 마찬가지로 4개 모델 모두 고농도 미세먼지 사례보다 편차가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 각 모델 별로 차이는 있지만 한반도를 중심으로 북쪽은 과대모의, 남쪽은 과소모의하는 경향을 보인다. 이는 황사 사례에 있는 기압골에 대해서 모의를 할 때 위도가 내려갈수록 기압골의 세기와 영역을 더 강하고 더 남쪽으로 치우친 예보를 하기 때문이라고 생각할 수 있다.

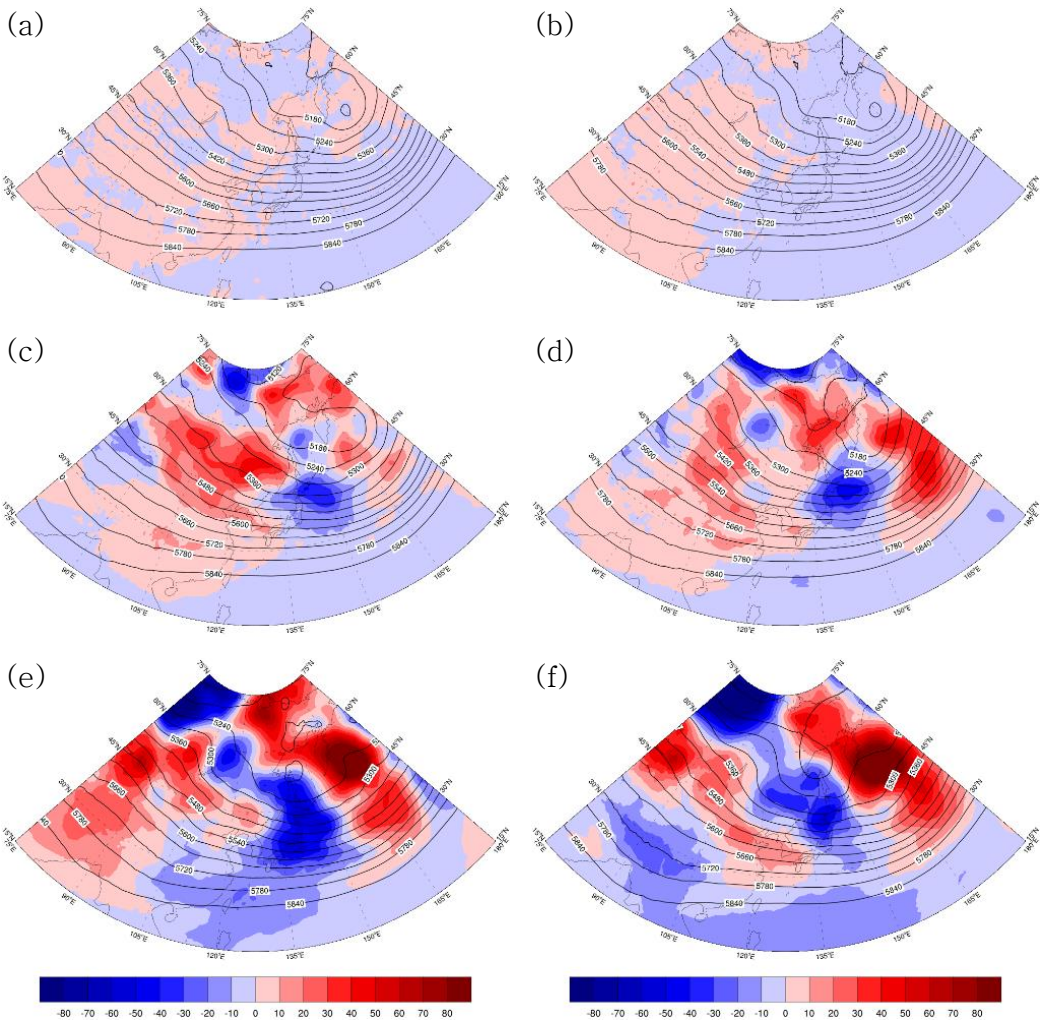

Figure 41. Same as Figure 17, but during Oct−Mar 2016/17.

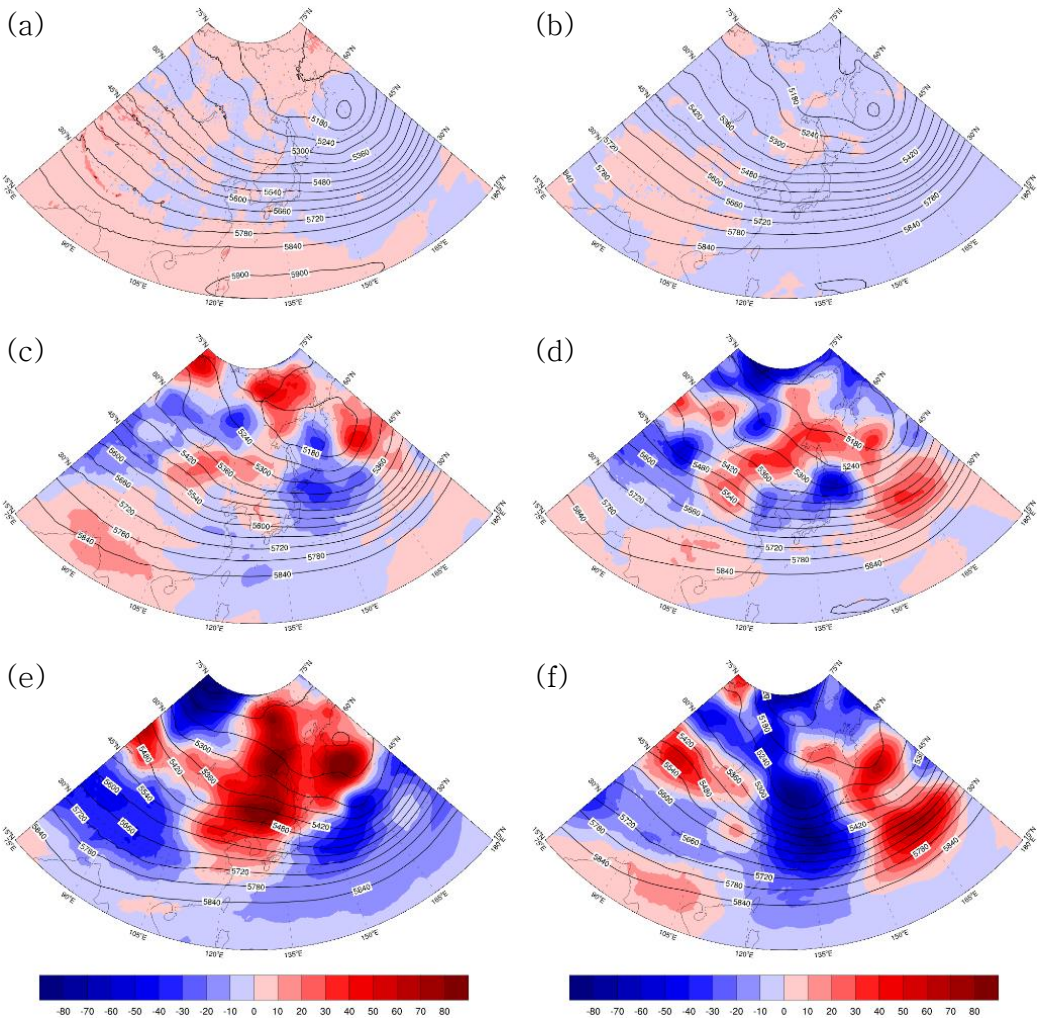

Figure 42. Same as Figure 18, but during Oct−Mar 2016/17.

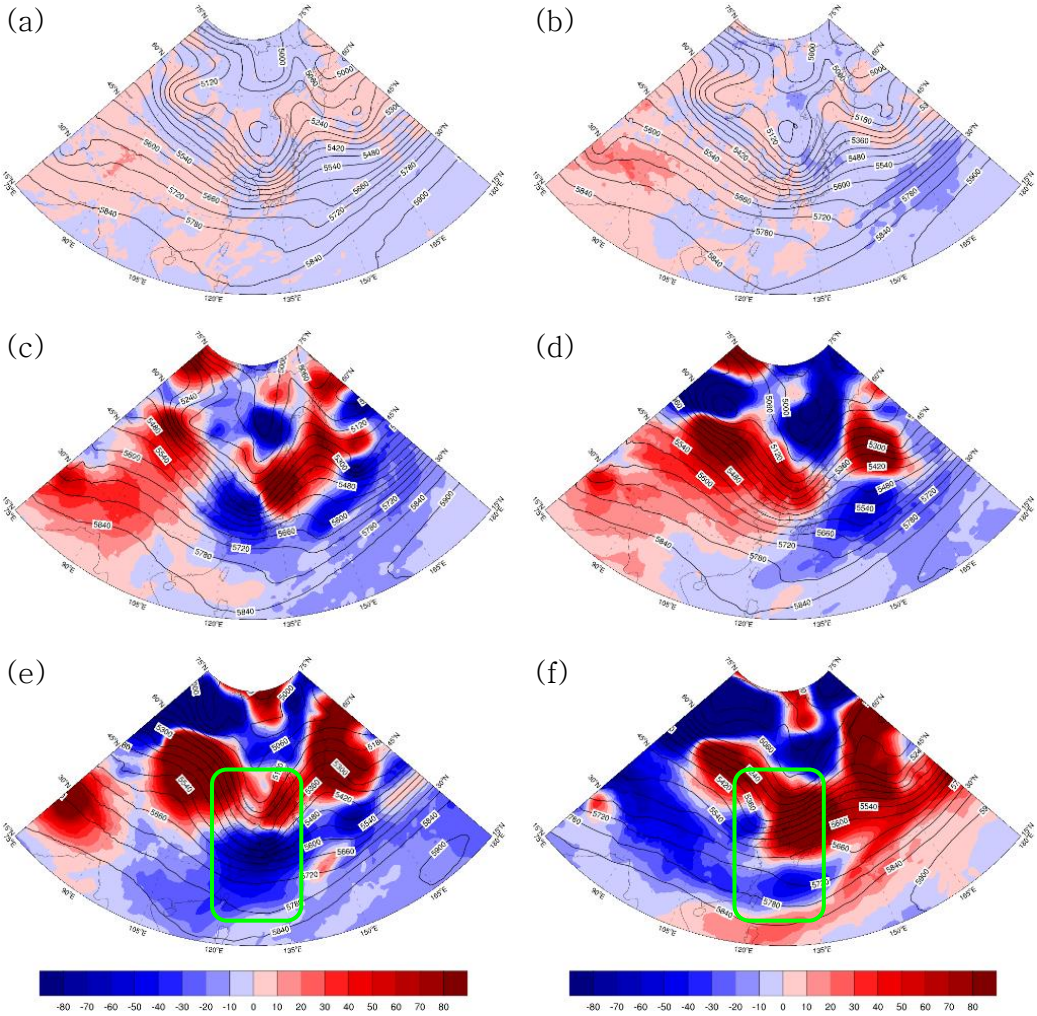

Figure 43. Same as Figure 19, but during Oct–Mar 2016/17.

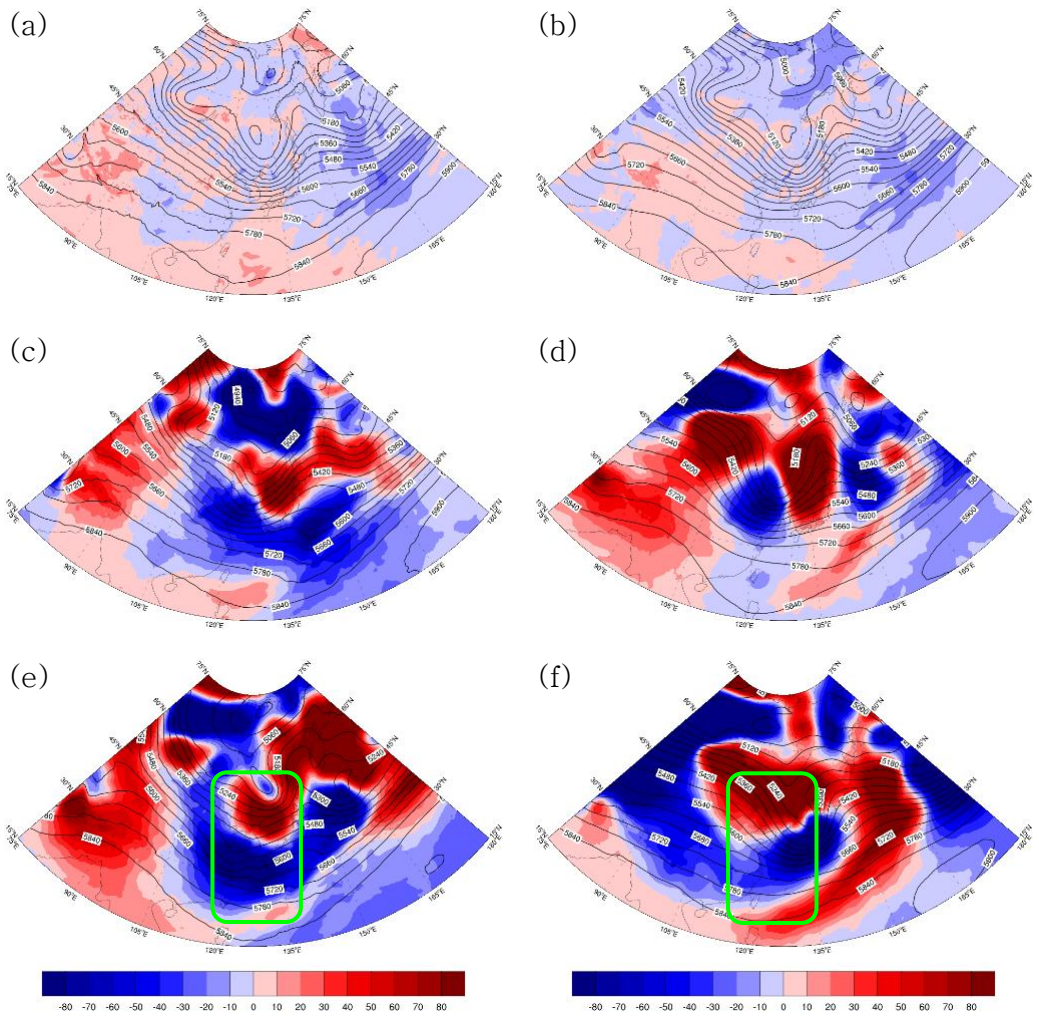

Figure 44. Same as Figure 20, but during Oct−Mar 2016/17.

3.2.4.4. 블로킹지수 편차

2016/17년 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에 대해서 예보장에서 산출한 블로킹지수의 편차 분석을 진행하였다(Figure 45). 2016/17년 또한 고농도 미세먼지보다 황사 사례에서 블로킹지수의 편차가 크게 나타난다. 예보장의 예보 시간이 길어짐에 따라 황사 사례가 고농도 미세먼지 사례에 비해서 도메인 영역의 블로킹지수 편차의 크기가 더 크다. 황사 사례를 보면 120시간 예보장에서는 NCEP을 제외한 3개 모델은 비슷한 패턴의 편차 곡선을 보이며, 120E부근에선 과소모의, 130~140E에서는 과대모의를 보인다. 240시간 예보장에서는 4개 모델이 각기 다른 패턴을 보이며 120E의 서쪽은 비교적 작은 편차를 보이지만, 120~150E에서는 JMA는 블로킹지수를 과소모의하지만, 나머지 모델들은 과대모의하는 것을 볼 수 있다.

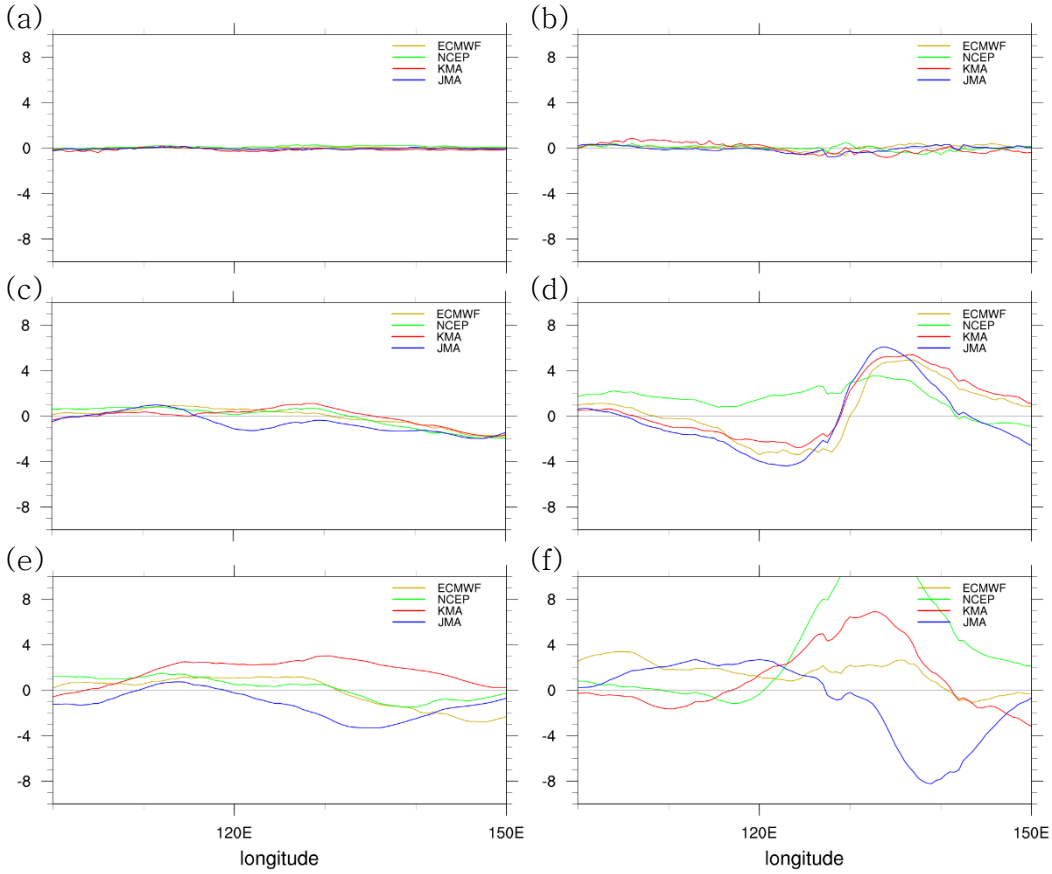

Figure 45. Same as Figure 21, but during Oct−Mar 2016/17.

3.2.5. 2018/19년

3.2.5.1. 종관기상장 분석

2018/19년 10~3월에서의 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상장을 분석하였다(Figure 46,47). 2018/19년에서는 직전에 분석을 진행한 2016/17년에서 분석한 종관기상장과 비슷하게 예보 검증 분석 기간에 대한 종관기상장의 패턴과 같은 패턴이 나타난다. 2016/17년과 마찬가지로 500hPa geopotential height에서 고농도 미세먼지는 한반도 주변에 양의 anomaly가 나타나며 황사는 몽골, 만주 지역에 음의 anomaly가 나타난다. 850hPa windspeed에서 고농도 미세먼지는 한반도 주변에 음의 anomaly가 나타나며, 황사는 양의 anomaly가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 200hPa windspeed에서 고농도 미세먼지는 한반도를 기준으로 북쪽은 양의 anomaly 남쪽은 음의 anomaly를 보이지만, 황사는 한반도 주변 영역에서 양의 anomaly를 보인다. 850hPa temperature에서 고농도 미세먼지는 한반도 주변 지역에 걸쳐서 양의 anomaly가 나타나고, 황사에서는 한반도와 산둥반도, 일본 열도에 길게 양의 anomaly가 나타나지만, 만주, 몽골 지역에는 음의 anomaly가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 850hPa RH는 뚜렷한 특징을 찾기가 어려우며, SST에서 고농도 미세먼지는 양의 anomaly를 보이지만, 황사는 음의 anomaly를 보인다. 여기서 주목할 점은 SST는 전체 분석

기간이나 각 연도 별에 대한 것 모두 일정한 특징을 보이지 않고 양과 음의 anomaly가 서로 번갈아 가며 나타나는 걸 보인다. 이를 통해 SST는 고농도 미세먼지와 황사 사례를 구분하는 종관기상변수로는 잘 활용될 수 없는 걸 알 수 있다.

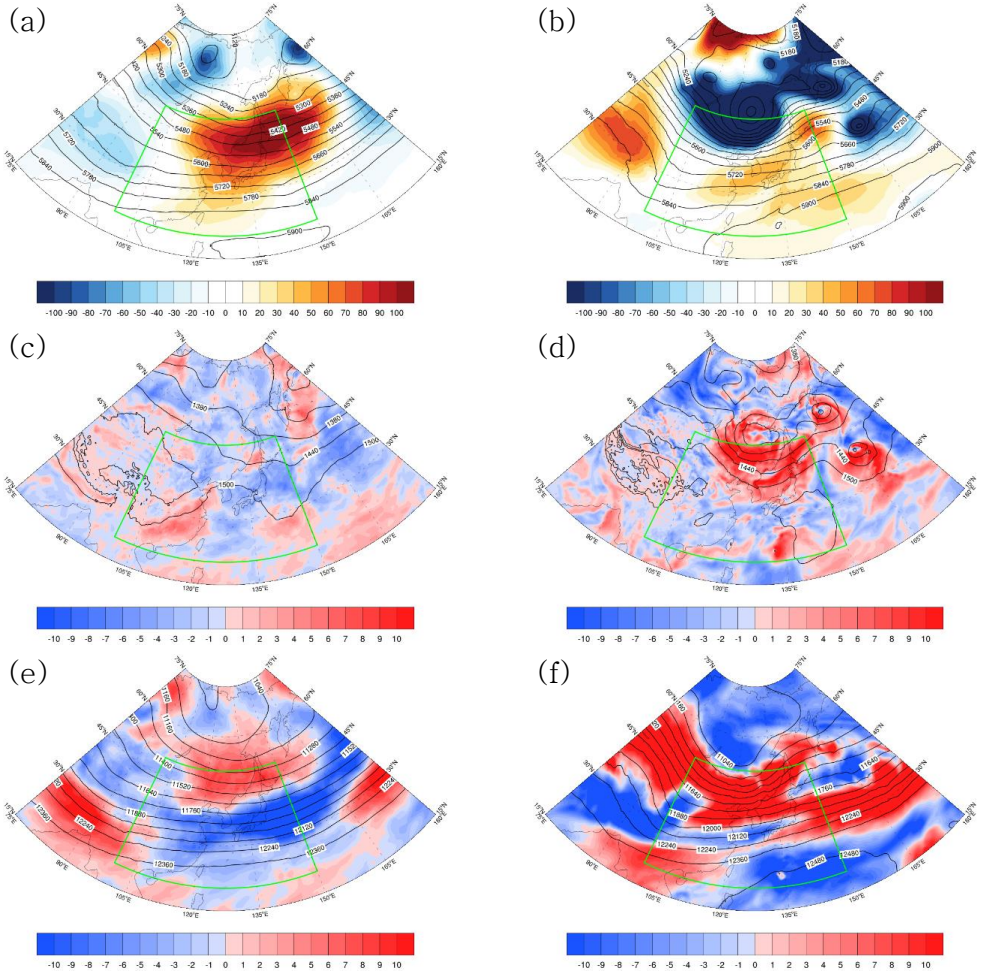

Figure 46. Same as Figure 14, but during Oct–Mar 2018/19.

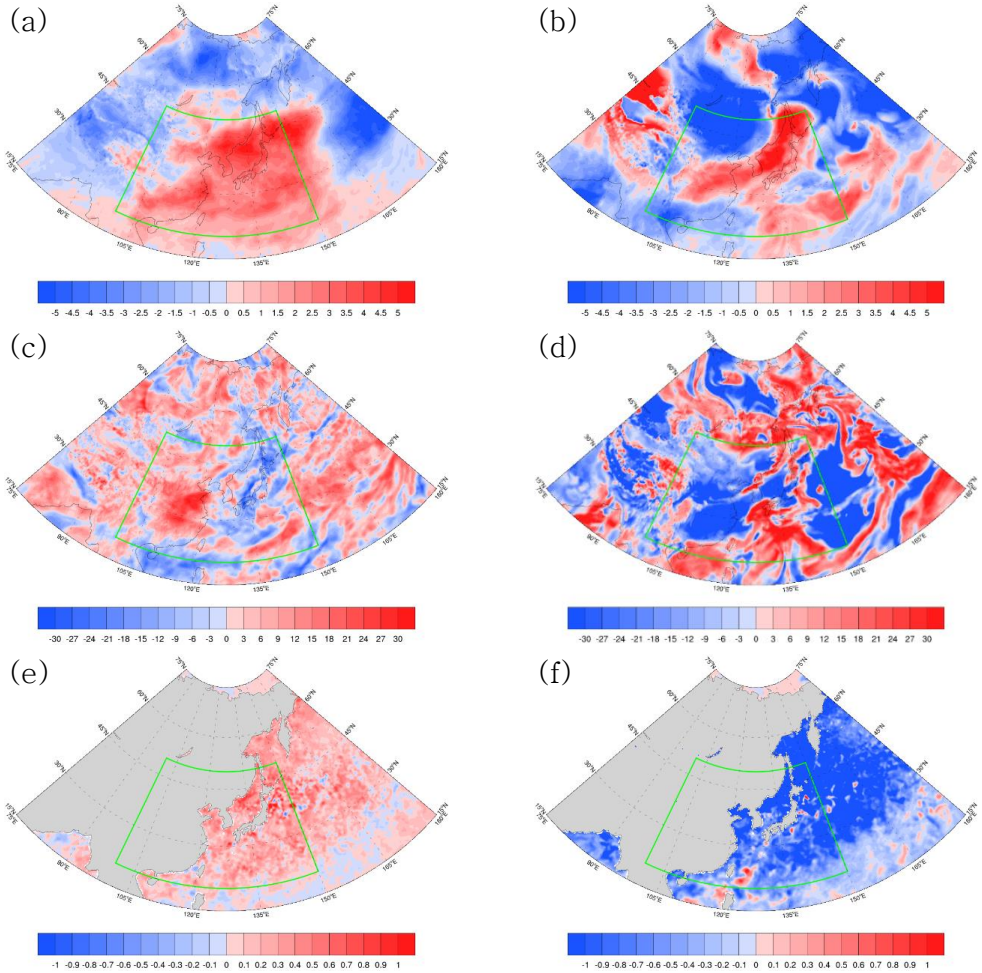

Figure 47. Same as Figure 15, but during Oct–Mar 2018/19.

3.2.5.2. RMSE

2018/19년 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 RMSE에 대해 분석을 진행하였다(Figure 48). 2018/19년도에서는 고농도 미세먼지와 황사 사례에서 각 모델들의 RMSE가 모델 별로 두 사례의 RMSE차이가 다르게 나타나며, 고농도 미세먼지에 비해 황사의 RMSE가 각 모델 들의 스프레드가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이번 연도에는 NCEP 모델이 다른 모델에 비해 RMSE가 눈에 띄게 예보 시간이 길어질수록 커지는 것을 확인할 수 있다.

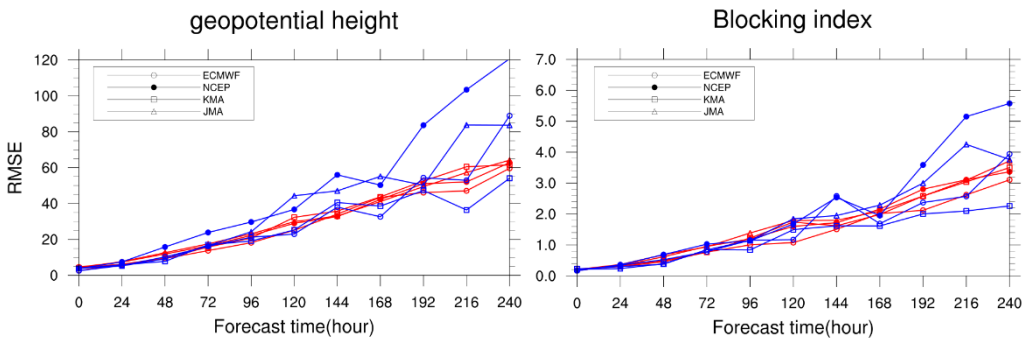

Figure 48. Same as Figure 16 but during Oct−Mar 2018/19.

3.2.5.3. 500hPa gph 편차

2018/19년 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에서 세부적으로 예보 검증 결과를 분석하기 위해 각 모델 별로 예보장에서 산출한 500hPa geopotential height 편차에 대해 Figure 49~52에서 분석을 진행하였다. Figure 49,50는 고농도 미세먼지에 대해서, Figure 51,52는 황사에 대해서 분석을 진행하였다. 고능도 미세먼지 사례(Figure 49,50)에서는 전체 분석 기간에서 산출한 패턴과 거의 비슷한 특징을 보인다. Figure 49,50에서 120시간 예보장에서는 4개 모델 모두 한반도와 그 동서 지역 부근에서 전체적으로 과대모의하는 것을 볼 수 있으며, 240시간 예보장에서는 KMA을 제외한 3개 모델에서 한반도 북서쪽 몽골지역(green box)에 강한 양의 편차를 보이며 gph를 과대모의하는 것을 볼 수 있고, 한반도 동쪽 지역(green circle)인 일본 열도 부근에서는 gph를 과소모의하는 것을 볼 수 있다. 이는 모델 들이 일본 열도 쪽으로 기압골을 강하게 예보하는 것으로 생각할 수 있다.

황사 사례(Figure 51,52)는 120시간 예보장에서는 한반도 서쪽 지역에서는 전반적으로 과대모의를 하지만, 동쪽 지역에는 전반적으로 과소모의하는 것을 확인할 수 있다. 240시간 예보장은 그 연장선 상으로 편차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 다른 연도와 마찬가지로 4개 모델

모두 고농도 미세먼지 사례보다 편차가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 4개 모델 모두 중국대륙를 포함한 한반도 서쪽 지역에서는 gph를 과대모의, 일본 열도를 포함한 한반도 동쪽지역에서는 과소모의를 보인다. 이는 한반도 북쪽에 있는 기압골을 북서태평양 지역으로 좀 더 치우치게 모의를 하는 것으로 볼 수 있다.

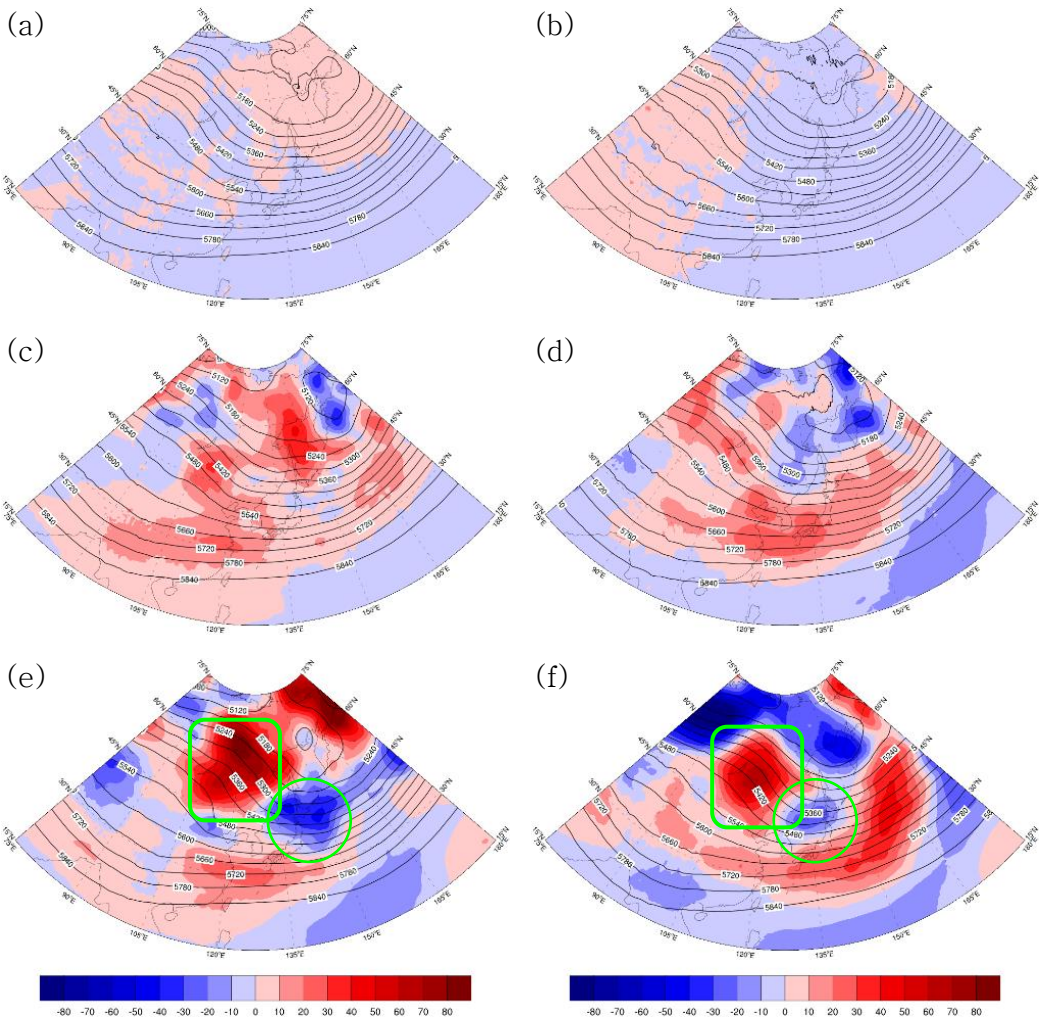

Figure 49. Same as Figure 17, but during Oct–Mar 2018/19.

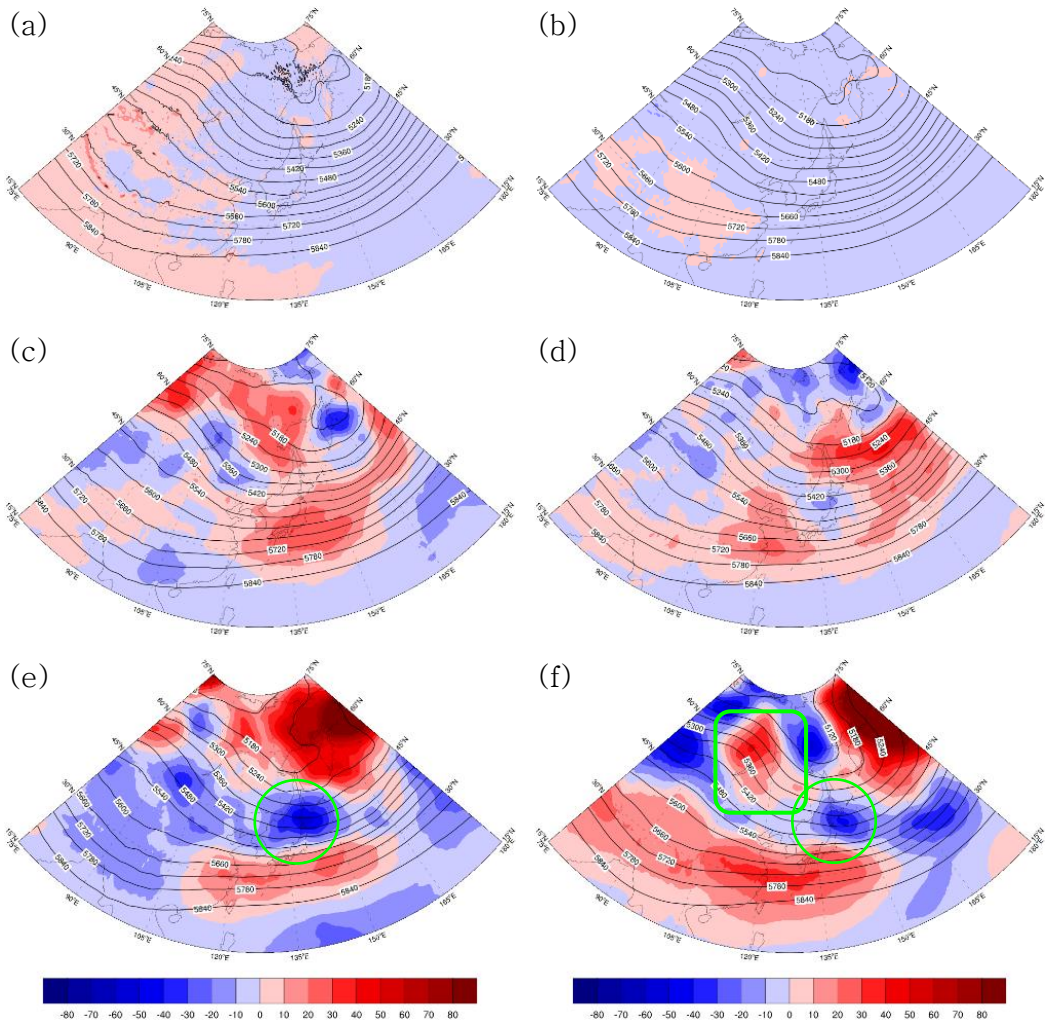

Figure 50. Same as Figure 18, but during Oct−Mar 2018/19.

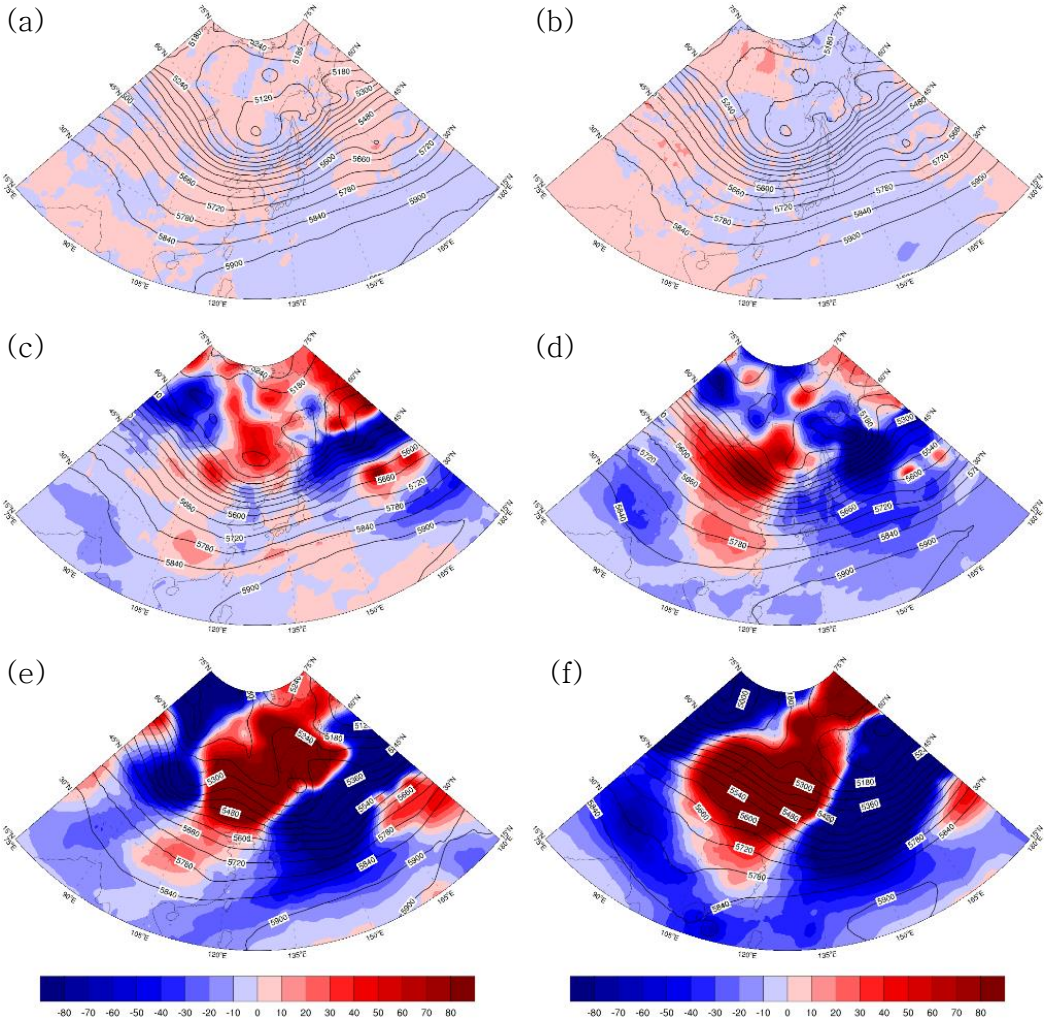

Figure 51. Same as Figure 19, but during Oct−Mar 2018/19.

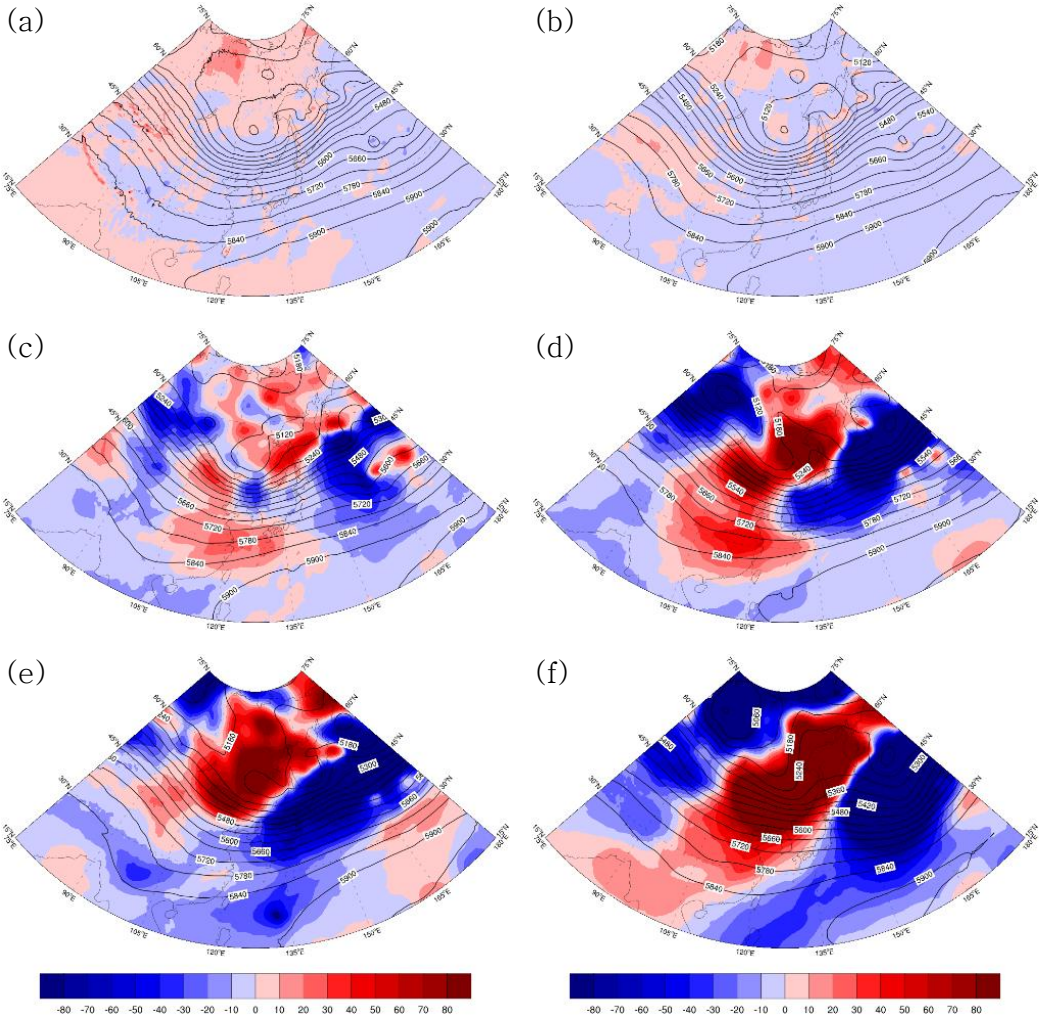

Figure 52. Same as Figure 20, but during Oct−Mar 2018/19.

3.2.5.4. 블로킹지수 편차

2018/19년 10~3월의 고농도 미세먼지와 황사 사례에 대해서 예보장에서 산출한 블로킹지수의 편차 분석을 진행하였다(Figure 53). 2018/19 또한 고농도 미세먼지보다 황사 사례에서 블로킹지수의 편차가 크게 나타난다. 다른 연도와 마찬가지로 예보장의 예보 시간이 길어짐에 따라 황사 사례가 고농도 미세먼지 사례에 비해서 도메인 영역의 블로킹지수 편차의 크기가 더 크다. 고농도 미세먼지 사례에서는 240시간 예보장 기준으로 NCEP을 제외한 3개 모델은 도메인 영역 전반적으로 블로킹지수를 과소모의하는 것을 확인할 수 있다. 황사 사례에선 120시간 예보장을 봤을 때, 고농도 미세먼지와 비교해보면 편차의 차이가 비교적 적게 나타난다. 하지만, 예보 시간이 더 길어진 240시간 예보장에서는 4개 모델들의 편차 곡선의 스프레드가 더 커지며, 4개 모델 전반적으로 도메인 영역의 서쪽에서 동쪽으로 진행할수록 양의 편차에서 음의 편차로 변하는 걸 볼 수 있다. 이는 도메인 영역 서쪽에서는 블로킹지수가 과대모의된다는 걸 의미하며, 동쪽에서는 과소모의된다는 걸 의미한다고 볼 수 있다.

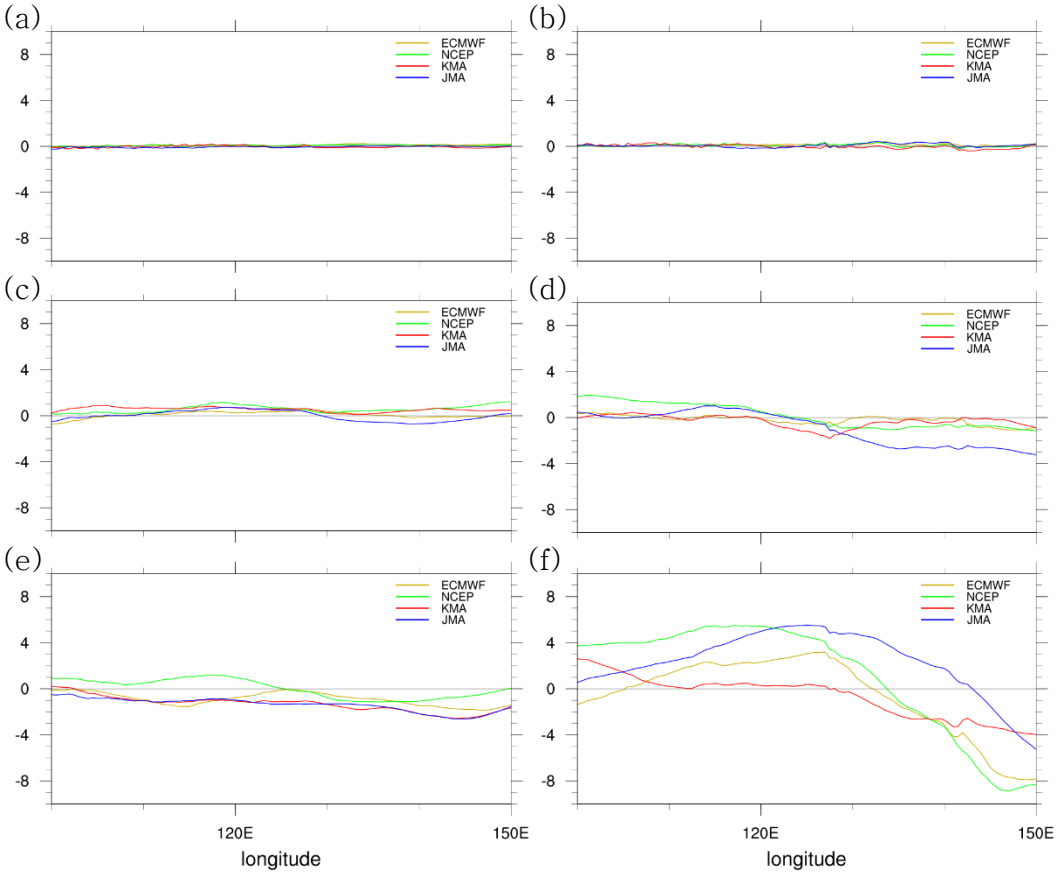

Figure 53. Same as Figure 21, but during Oct−Mar 2018/19.

제 4 장. 요약 및 결론

최근 미세먼지에 대한 사회적 관심이 증가하면서 미세먼지에 대한 연구가 많이 진행되었다. 특히, 미세먼지의 농도를 예측하는 수치 모델에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 모델에 사용되는 종관기상장의 예측성에도 미세먼지를 예측하는 데에 있어서 중요성이 대두되고 있다.

본 연구는 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관 기상 시스템을 분석하여 그 차이에 의한 종관기상장의 수치 예보 모델에 대한 예측성을 평가하고자 하였다. 연구를 위해 분석한 종관기상장의 종관기상변수는 총 6개로 500hPa geopotential height, 850hPa windspeed, 200hPa windspeed, 850hPa temperature, 850hPa relative humidity, sea surface temperature이며 6개 변수에 대한 anomaly를 분석하였다. 분석을 진행한 기간은 2014/15~2018/19년 10~3월이며 5개년의 연도별 분석도 진행하였다.

전체 기간에 대해서 고농도 미세먼지에서는 500hPa gph에서 한반도 부근에 강한 양의 anomaly가 나타나며 850hPa temperature에서도 마찬가지로 한반도 부근에 강한 양의 anomaly가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 850hPa와 200hPa windspeed에서는 한반도에 음의 anomaly가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 고농도 미세먼지 사례가 발생할 때의 기상조건이 한반도 주변에서 고기압 시스템이 자리한다는 것을

알 수 있으며, 이는 상,하층의 대기의 정체를 불러일으킨다. 이로 인해 미세먼지의 소산이 일어나지 않고 축적되어 PM의 농도가 높아지는 현상을 나타내게 한다. 또한 temperature도 한반도 주변에 높게 나타나기 때문에 여러 대기 오염 물질들의 화학적 반응을 더 잘 일으키게 해서 고농도 미세먼지를 유발하게 하는 것으로 볼 수 있다.

황사에서는 500hPa gph에서 만주와 몽골 지역에 강한 음의 anomaly가 나타나며 850hPa temperature에서는 만주, 몽골 지역에 마찬가지로 강한 음의 anomaly가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 850hPa와 200hPa의 windspeed는 한반도 주변에 양의 anomaly를 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 몽골 고비 사막에서 저기압이 발원하여 사막 모래 먼지를 상승시켜 강한 바람으로 황사 모래 먼지를 이동시켜 한반도에 영향을 주게 하는 원리에 부합하는 기상조건이다. 또한 강한 windspeed와 함께 낮은 temperature가 동반되어 황사는 저기압 시스템과 추운 날씨를 가지는 기상조건으로 일어난다고 볼 수 있다.

이러한 사실을 기반으로 2014/15~2018/19년 10~3월에서 발생한 고농도 미세먼지와 황사 사례 기간에서 TIGGE의 4개 모델 ECMWF, NCEP, KMA, JMA에 500hPa geopotential height와 블로킹지수에 대한 예보장에 따른 예보 검증을 진행하였다. 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 예보 검증은 20-50N, 100-150E 도메인에서 진행하였으며, 500hPa geopotential

height와 그를 이용한 블로킹지수에 대한 예보 검증을 진행하였다. 분석 기간 전체에서 고농도 미세먼지가 황사 사례보다 500hPa geopotential height, 블로킹지수 모두 예측성이 좋은 것을 확인할 수 있었으며, 예보 시간이 길어짐에 따라 예측성의 차이가 커지는 걸 확인할 수 있었다. 연도별 예보 검증은 연도별로 다소 차이가 있지만, 궁극적으로는 고농도 미세먼지가 황사보다 예측성이 더 좋게 분석할 수 있다. 이러한 차이는 고농도 미세먼지의 고기압 시스템과 황사의 저기압 시스템으로 인한 기상조건의 차이로 볼 수 있다. 고기압 시스템은 정적인 시스템이기 때문에 기상을 더 잘 예측할 수 있지만 저기압 시스템은 기압골과 같은 요란한 시스템을 갖고 있기 때문에 기상장을 예측하는 데에 좀 더 어려움이 있을 수 있다. 이러한 기상 시스템의 차이가 두 사례의 예측성에도 영향을 줄 수 있다고 볼 수 있다.

하지만 연도별로 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상장에 대한 분석과 예보 검증을 진행한 결과, 연도별로 다소 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 14/15년에서는 고농도 미세먼지 사례에서는 500hPa gph에서 한반도 주변에 음의 anomaly가 나타나고 한반도 북동쪽에 기압골이 발달되어 있는 것을 볼 수 있었다. 황사 또한 음의 anomaly와 한반도 북서쪽에 기압골이 발달되어 있는 것을 볼 수 있었다. 이러한 시스템의 차이는 예측성에도 반영이 되어 고농도 미세먼지와 황사의 예측성의 차이가 전체 기간에서 나타난 차이보단 적은 차이를 보였다. 15/16년에서는 고농도 미세먼지와

황사에서의 500hPa gph의 anomaly 패턴이 비슷하게 나타나는 것이 두드러지는 특징이다. anomaly의 강도는 황사가 더 크게 나타나지만 두 사례 모두 한반도 북서쪽에 음의 anomaly와 기압골이 발달되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 기상장의 유사성은 예측성에서도 반영되어 두 사례의 예측성도 크게 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. 16/17년과 18/19년은 전체 기간에서의 결과와 비슷한 기상장 분석 결과와 예측성의 결과가 나타난다. 고농도 미세먼지에서는 500hPa gph에서 한반도에 양의 anomaly가 나타나고 황사에서는 한반도 북서쪽에 음의 anomaly와 기압골이 발달되어 있는데 이러한 기상장의 차이가 예측성에서도 반영된다고 볼 수 있다. 하지만, 모델마다, 예보장의 예보 시간마다 차이가 있으며 황사에서의 예측성의 변동성이 다소 큰 것을 확인할 수 있었다.

14/15~18/19년 10~3월에서의 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상장과 예보 검증에 대한 분석의 결과, 고농도 미세먼지와 황사의 기상 시스템에 따라 예보 검증의 결과가 차이가 나는 것을 확인할 수 있었으며 이는 고농도 미세먼지와 황사 사례에서의 기상장과 그에 대한 수치 모델의 예보에도 많은 도움이 될 것으로 생각된다. 하지만, 이 연구에서는 두 사례에서 나타나는 종관기상장의 특징이 예보 검증 결과에 어떤 원인으로 나타나게 하는지는 밝혀내지 못했다. 추후에 고농도 미세먼지와 황사 사례의 종관기상장의 구조가 두 사례의 예측성에 차이를 생기게 하는지 역학적인

메커니즘을 밝혀내는 것도 좋은 연구가 될 수 있을 거라 생각한다. 또한, 본 연구에서 연도별로 분석한 결과는 전체 기간에서의 분석 결과와 다소 차이를 보이는데 연도별로 차이나는 결과를 연구하는 것도 좋은 연구가 될 수 있을 거라 생각한다. 또한, 본 연구에서 연구한 두 사례의 예측성에 대해서도 CMAQ과 같은 대기화학모델을 사용한 실험을 통해 좀 더 면밀하게 두 사례에서의 기상조건에 대한 역할을 연구할 수 있을 거라 생각한다.

참고 문헌

Jung, MI, Son, SW, Kim, HC, Kim, SW, Park, RJ and Chen, D. 2019. Contrasting synoptic weather patterns between non-dust high particulate matter events and Asian dust events in Seoul, South Korea. Atmospheric Environment 214. DOI: https://doi. org/10.1016/j.atmosenv.2019.116864

Lee, S., Ho, C.-H., Choi, Y.-S., 2011. High-PM_{10} concentration episodes in Seoul, Korea: background sources and related meteorological conditions. Atmos. Environ. 45, 7240-7247.

조유진, 이효정, 장임석, & 김철희. (2017). CMAQ 모델링을 통한 초기 기상장에 대한 미세먼지 농도 예측 민감도 연구. 한국대기환경학회지 (국문), 33(6), 554-569.

Shin, U., Park, S.-H., Park, J.-S., Koo, J.-H., Yoo, C., Kim, S., Lee, J., 2020, unpublished.

Yun, S., Yoo, C., 2019. The Effects of Spring and Winter Blocking on PM_{10} Concentration in Korea. MDPI, Atmosphere, 10, 410. doi:10.3390/atmos10070410

TIBALDI, S., MOLTENI, F., 1990. On the operational predictability of blocking. Tellus A 42, 343–365. https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.1990.t01-2-00003.x

SAUSEN, R., KÖNIG, W., SIELMANN, F., 1995. Analysis of blocking events from observations and ECHAM model simulations. Tellus A 47, 421–438. https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.1995.t01-3-00003.x

R. Swinbank, M. Kyouda, P. Buchanan, L. Froude, T. M. Hamill, T. D. Hewson, J. H. Keller, M. Matsueda, J. Methven, F. Pappenberger, M. Scheuerer, H. A. Titley, L. Wilson, and M. Yamaguchi. The TIGGE project and its achievements. Bulletin of the American Meteorological Society, 97(1):49–67, Mar. 2015. doi: 10.1175/bams-d-13-00191.1

Abstract

Forecast verification of synoptic weather fields of

high-$\mathbf{PM_{10}}$ and yellow dust periods

using TIGGE data

Ryu, Seung-Woo

Dept. of Atmospheric Sciences

The Graduate School

Yonsei University

In recent years, the interest in Particulate Matters(PMs) such as $\mathrm{PM_{10}}$, $\mathrm{PM_{2.5}}$ has grown socially due to increasing pollution emissions from China's high economic growth, the weather factors, climate change, the interest in people's health and several environmental problems. Accordingly, emission analysis, accurate diagnosis, and studies of PMs as well as Yellow dust, including $\mathrm{PM_{10}}$, which have affected environment in Korea, have been conducted. In particular, the many studies using numerical models have been conducted in the causes and long-range

transport of PMs, and the performance of PMs forecast using them has recently drawn much attention. Models that predict PMs and Yellow dust have a principle of predicting the spatial distribution and concentration of PMs of Yellow dust by using the atmospheric chemical component data and the synoptic weather fields as the initial condition, but the predictability of numerical models related to synoptic weather fields is closely related to the predictability of synoptic weather fields of high-PMs periods.

In this study, it is necessary to conduct a study on whether weather fields of high-PM_{10} and Yellow dust is simulated well in differences between the synoptic weather fields of them, based on the previous study showing that high-PM_{10} and Yellow dust periods have high- and low-pressure anomaly system each other on synoptic weather system. Therefore, we compare and analyze the predictability of high-PM_{10} and Yellow dust periods by using forecast verifications about forecast fields of weather system affecting high-PM_{10} and Yellow dust periods using TIGGE data.

Keywords: Particulate Matter, Yellow dust, Synoptic weather fields, forecast fields, forecast verification