

아시아/태평양 지역 극한 기후 감시 및 분석

Monitoring and Analyzing Extreme Climate Events of Asia-Pacific Countries

김선태, 이우섭, 이은정 기후분석팀

발간사

전세계적으로 이상기후 감시에 대한 관심 및 필요성이 높아지고 지구온난화로 인한 가뭄, 폭염, 한파 등 이상기후의 발생 빈도 및 강도의 증가로 인한 피해가 급증하고 있습니다. 그러므로 이상기후의 발생에 따른 사회·경제적 피해 경감을 위한 정확도 높은 이상기후 정보에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이에 부응하기 위해 APEC 기후센터(APEC Climate Center, APCC)는 아시아 태평양(아태) 지역 이상기후 대응능력을 강화하고, 아태지역 국가들의 번영에 기여하기 위해서 여러 가지 미션들을 수행해 왔습니다.

APCC가 아태지역에서 이상 기후 대응능력을 강화시키는데 중추적 역할을 하기 위해서는 이상 기후 감시, 분석 및 예측 등을 포함하는 이상기후 연구에 대한 높은 관심과 노력이 요구됩니다. 특히 정확한 이상 기후 예측 정보 제공을 통한 아태지역의 이상기후 대응 능력을 강화하기 위해서는 아태지역 국가에서의 이상 기후 현상에 대한 이해가 필요하며, 더 나아가서 이상기후 현상의 지속적인 감시 및 관련된 과학적인 정보를 축적하는 것이 필요합니다.

그러므로 이 연구보고서는 기온 및 강수 관련 이상 기후를 감시 할 수 있는 지수들을 사용하여, 아태지역에서 2018년 발생한 이상 기후들을 분석 정리하였습니다. 아울러, 아태 지역의 과거 이상 기후 발생 추세를 분석하였으며, 특히 동아시아에서 생긴 이상기후와 관련된 대기 및 해양 순환장 분석을 통해서 2018년 발생한 이상기후의 원인에 대하여 규명하고자 하였습니다. 이 연구보고서의 결과들은 앞으로 수행될 이상 기후 감시 및 규명 연구에 중요한 밑거름이 될 것으로 생각됩니다.

이 연구보고서가 발간되기까지는 많은 분들의 도움이 있었습니다. 무엇보다도 자문위원으로서 아낌없는 조언과 격려를 해 주신 정지훈 교수와 유창환 교수에게 깊은 감사를 드립니다. 이 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 이상 기후 관련 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가길 바랍니다.

2019년 3월
APEC 기후센터
원장 권 원 태

ABSTRACT

This study presents an analysis of the extreme temperature and precipitation events that occurred in 2018. The extreme hot days and wet days in 2018 increased significantly compared to those during the baseline period (1981–2010) whereas the number of the extreme cold days are within a statistical inter-quantile range over the same period. The regions in North America and east Asia suffered from a record high number of extreme hot days in summer 2018. To understand extreme climate events that are occurring currently, we first analyzed the features of the extreme climate events during the baseline period and found positive trends in the number of the extreme hot days and a negative trend in the number of the extreme cold days. The Northern hemisphere, in particular, had the larger positive trends in extreme hot days; furthermore, the negative trends were larger during the summer-to-fall season than during other seasons. Both of these indicate strong global warming during these seasons. In terms of extreme wet days, positive trends dominate in south and east Asia. We also computed the correlation coefficients between the extreme events and atmospheric and oceanic variables, including sea surface temperature, geopotential height at 500 hPa (Z500), and sea level pressure (SLP) to investigate atmospheric and oceanic circulations associated with extreme events during the baseline period. This information was utilized to reveal the possible dynamics behind the record high increase in extreme hot days in east Asia. It is concluded that this is attributable to positive Z500 anomalies that developed near east Asian region, as during the baseline period, and that the negative Z500 or SLP anomalies that developed in the tropical north Pacific contributed to the enhancement of the positive Z500 anomalies.

목 차

1. 서론	1
2. 자료 및 방법	3
2.1 관측 자료	3
2.2 이상 기후 정의 및 감시	4
3. 월별 이상 기후 모니터링	6
3.1 1월 이상 기후 모니터링	6
3.1.1 아태지역 1월 이상 기온 및 강수 특성	6
3.1.2 기온/강수 주별 특성	8
3.1.3 대기/해양 순환장 특성	11
3.1.4 1월 이상 기후 원인 분석 토론	12
3.2 2월 이상 기후 모니터링	13
3.2.1 2월 이상 기후 특성	13
3.2.2 기온/강수 주별 특성	15
3.2.3 2월 대기/해양 순환장 특성	17
3.2.4 2월 이상 기후 원인 분석 토론	19
3.3 3월 이상 기후 모니터링	19

3.3.1 3월 이상 기온 및 강수 특성-----	19
3.3.2 기온/강수 주별 특성-----	21
3.3.3 대기/해양 순환장 특성-----	23
3.3.4 3월 이상 기후 원인 분석 토론-----	25
3.4 4월 이상 기후 모니터링-----	25
3.4.1 이상기온 및 강수-----	25
3.4.2 4월 기온/강수 주별 특성-----	27
3.4.3 대기/해양 순환장 특성-----	29
3.4.4 지역별 이상 기후 원인 분석 토론-----	31
3.5 5월 이상 기후 모니터링-----	32
3.5.1 5월 이상기온 및 강수 특성-----	33
3.5.2 5월 기온/강수 주별 특성-----	35
3.5.3 대기/해양 순환장 특성-----	38
3.5.4 지역별 이상 기후 원인 분석 토론-----	39
3.6 6월 이상 기후 모니터링-----	40
3.6.1 6월 이상기온 및 강수 특성-----	40
3.6.2 6월 기온/강수 주별 특성-----	42
3.6.3 대기/해양 순환장 특성-----	44
3.6.4 지역별 이상 기후 원인 분석 토론-----	46
3.7 7월 이상 기후 모니터링-----	47
3.7.1 7월 이상기온 및 강수 특성-----	47
3.7.2 7월 기온/강수 주별 특성-----	50
3.7.3 대기/해양 순환장 특성-----	52
3.7.4 지역별 이상 기후 원인 분석 토론-----	54
3.8 8월 이상 기후 모니터링-----	55
3.8.1 8월 이상기온 및 강수 특성-----	55
3.8.2 8월 기온/강수 주별 특성-----	58

3.8.3 대기/해양 순환장 특성-----	60
3.8.4 지역별 이상 기후 원인 분석 토론-----	62
3.9 9월 이상 기후 모니터링-----	63
3.9.1 9월 이상기온 및 강수 특성-----	63
3.9.2 9월 기온/강수 주별 특성-----	65
3.9.3 대기/해양 순환장 특성-----	68
3.9.4 지역별 이상 기후 원인 분석토론-----	70
3.10 1월-9월 이상기후 요약-----	70
 4. 1981-2010 평년기간에서 이상기후 특성 분석-----	74
4.1 이상 기온 추세 분석-----	74
4.2 이상 강수 추세 분석-----	78
4.3 이상기온/강수 발생 주요 패턴 case 연구-----	80
 5. 요약 및 결론-----	86
 I REFERENCES-----	88

그림 목차

- Figure 1. Boxed regions for monitoring and analyzing extreme climates. Northern Eurasia (N.Eura, 25°E–190°E, 40°N–80°N), East Asia (E.Asia, 75°E–150°E, 15°N–60°N), South Asia (S.Asia, 60°E–140°E, 10°S–35°N), North America (N.Ame, 190°E–310°E, 10°N–75°N), South America (S.Ame, 270°E–330°E, 60°S–10°N), Australia (Aus, 110°E–180°E, 50°S–0°N). ----- 5
- Figure 2. Spatial pattern of (a) 90th percentile temperature, (b) the number of days over 90th percentile temperature, (c) 90th percentile temperature anomalies relative to the 1981–2010 base period, (d) 10th percentile temperature, (e) the number of days below 10th percentile temperature, and (f) 10th percentile temperature anomalies relative to the 1981–2010 base period for January 2018. ----- 7
- Figure 3. Spatial pattern of (a) 90th percentile precipitation, (b) the number of days over 90th percentile precipitation, (c) 90th percentile precipitation anomalies relative to the 1981–2010 base period for January 2018. ----- 8
- Figure 4. Spatial distribution of weekly average surface temperature anomalies for (a) the first week, (b) second week, (c) third week, and (d) fourth week of January. Taken from <http://co-anal.kma.go.kr>. ----- 9
- Figure 5. Spatial distribution of weekly average precipitation anomalies for (a) the first week, (b) second week, (c) third week, and (d) fourth week of January 2018. Taken from <http://co-anal.kma.go.kr>. ----- 10
- Figure 6. (a) Spatial pattern of January mean SST anomalies in 2018, (b) time series of AO index, and (c) MJO phase diagram in January 2018. ----- 11
- Figure 7. Spatial patterns of January mean (left) Z500 and (right) SLP anomalies in 2018. ----- 12
- Figure 8. Same as Figure 2 except for February 2018. ----- 14

Figure 9. Same as Figure 3 except for February 2018.	15
Figure 10. Same as Figure 4 except for February 2018.	16
Figure 11. Same as Figure 5 except for February, 2018.	17
Figure 12. (a) Time-series of the AO index and (b) phase diagram of the MJO in February.	18
Figure 13. Same as Figure 7 except for February mean in 2018.	19
Figure 14. Same as Figure 2 except for March 2018.	20
Figure 15. Same as Figure 3 except for March 2018.	21
Figure 16. Same as Figure 4 except for March, 2018.	22
Figure 17. Same as Figure 5 except for March, 2018.	23
Figure 18. (left) Time serie of AO index and (right) phase diagram of the MJO in March 2018.	24
Figure 19. Same as Figure 6 except for March mean in 2018.	24
Figure 20. Same as Figure 2 except for April 2018.	26
Figure 21. Same as Figure 3 except for April 2018.	27
Figure 22. Same as Figure 4 except for April, 2018.	28
Figure 23. Same as Figure 5 for April, 2018.	29
Figure 24. Evolution of Equatorial Pacific (a) SST anomalies, (b) 850 hPa zonal wind anomalies, and (c) subsurface temperature anomalies (taken from NOAA ENSO outlook, http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml).	30
Figure 25. Spatial patterns of April mean Z500 anomalies in 2018.	31
Figure 26. Spatial distribution of (a) snow cover anomaly of April 28, 2018, (b) Weekly mean temperature anomaly, and (c) Weekly mean precipitation anomaly from April 22 to April 28, 2018.	32
Figure 27. Same as Figure 2 except for May 2018.	33
Figure 28. Same as Figure 3 except for May 2018.	35

Figure 29. Same as Figure 4 except for May, 2018.	36
Figure 30. Same as Figure 5 except for May, 2018.	37
Figure 31. Evolution of Equatorial Pacific (a) SST anomalies, (b) 850 hPa zonal wind anomalies, and (c) subsurface temperature anomalies (taken from NOAA ENSO outlook).	38
Figure 32. Same as Figure 25 except for May mean in 2018.	39
Figure 33. Total rainfall for the period May 16 to May 28, 2018 (source: https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/sagar-indian-ocean).	40
Figure 34. Same as Figure 2 except for June 2018.	41
Figure 35. Same as Figure 3 except for June 2018.	42
Figure 36. Same as Figure 4 except for June, 2018.	43
Figure 37. Same as Figure 5 except for June, 2018.	44
Figure 38. Evolution of Equatorial (a) SST anomalies (120°E–80°W) and (b) zonal wind anomalies (80°E–80°W) averaged over 5°N–5°S (taken from NOAA ENSO outlook). (c) Spatial distribution of global SST anomalies and (d) time series of AO index for June 2018.	45
Figure 39. Same as Figure 7 except for June mean in 2018.	46
Figure 40. Same as Figure 2 except for July 2018.	48
Figure 41. Same as Figure 3 except for July 2018.	49
Figure 42. Same as Figure 4 except for July, 2018.	51
Figure 43. Same as Figure 5 except for July, 2018.	52
Figure 44. (a) Spatial distribution of SST anomaly and (b) Evolution of Equatorial zonal wind anomalies (80°E–80°W) averaged over 5°N–5°S (taken from NOAA ENSO outlook).	53
Figure 45. Same as Figure 25 except for July mean in 2018.	54
Figure 46. Spatial distribution of (a) 200 hPa GPH anomalies, and (b) Outgoing Longwave Radiation anomalies for July, 2018.	55
Figure 47. Same as Figure 2 except for August, 2018.	57

Figure 48. Same as Figure 3 except for August, 2018.	58
Figure 49. Same as Figure 4 except for August 2018.	59
Figure 50. Same as Figure 5 except for August 2018.	60
Figure 51. Monthly mean (a) SST anomalies and (b) OLR anomalies.	61
Figure 52. Same as Figure 25 except for August mean in 2018.	62
Figure 53. Spatial distribution of (a) 200 hPa GPH anomalies, and (b) 500 hPa GPH anomalies for August, 2018.	63
Figure 54. Same as Figure 2 except for June 2018.	64
Figure 55. Same as Figure 3 except for June 2018.	65
Figure 56. Same as Figure 4 except for September, 2018.	66
Figure 57. Same as Figure 5 except for September, 2018.	67
Figure 58. Evolution of Equatorial (a) SST anomalies (120°E–80°W) and (b) zonal wind anomalies (80°E–80°W) averaged over 5°N–5°S. (c) Spatial distribution of global SST anomalies and (d) time series of AO index for September, 2018.	69
Figure 59. Same as Figure 7 except for September mean in 2018.	70
Figure 60. Box-and-whiskers plot for the regional average of the number of the extreme hot days (red colors) and extreme cold days (blue colors) in each calendar month over the base period of 1981–2010. Red and blue lines indicate the hot and cold days occurred in 2018.	72
Figure 61. Same as Figure 60 except for extreme wet days.	73
Figure 62. Time evolution of the number of hot days averaged over the 6 separated regional domains in each calendar month from 1981 to 2010 (see Figure 1).	75
Figure 63. Same as Figure 62 except for extreme cold days.	76
Figure 64. Linear trends of the number of extreme (a) hot days and (b) cold days area-averaged in the 6 separated regions for each calendar month over the period 1981–2010.	78

Figure 65. Same as Figure 62 except for extreme wet days. -----	79
Figure 66. Same as Figure 64 except for the number of extreme wet days. --	80
Figure 67. Spatial patterns of the correlation coefficients between (left) SST, (middle) SLP, (right) Z500 anomalies and East Asian hot day index in each calendar month for 1981–2010. -----	83
Figure 68. Same as Figure 67 except for East Asian cold day index. -----	84
Figure 69. Same as Figure 67 except for East Asian wet day index. -----	85

표 목차

Table 1. Climate variability modes obtained from some international climate centers.-----	4
--	---

1. 서론

최근 이상 기후 현상이 빈번하게 발생하고 있고, 이 때문에 사회/경제적 피해가 급증하고 있다(Coumou and Rahmstorf 2013; Cai et al. 2014; Min et al. 2015; Herring et al. 2015; Trenberth et al. 2015). 특히, 농업, 교통, 에너지, 환경, 보건 등 다양한 분야에 피해와 영향을 준다. IPCC 보고서(IPCC 2012, 2013)는 1950년 대 이후로 저온 날 수는 감소하고 있고, 고온 날수는 증가하고 있다고 보여주고 있으며, 다소 더 낮은 신뢰도 이지만 유럽, 아시아, 호주에서 폭염이 그리고 더 많은 지역에서 이상 강수의 수가 증가하였음을 보여주었다. 그런데 지구 온난화와 관련된 기후 변화가 이상 기후 현상들의 빈도와 강도에 영향을 미칠 가능성이 제기되어왔으며, 특히 IPCC 4차 보고서에 의하면 기후변화에 따라 heat wave나 홍수가 빈번하게 그리고 강도는 더 강할 가능성이 있다고 말하고 있다. 2015년 파리협정에서는 2020년 이후 신 기후체제에서 극한 기후 현상 증가에 따른 개도국들의 피해와 손실 가능성에 대한 국가간 지원체제 구축 등 대책 마련에 대한 요구들이 있었다.

APEC 기후 센터(APEC Climate Center, APCC)는 아시아/태평양(아태) 지역의 이상 기후감시 및 예측의 중추적 역할을 수행하기 위해 설립되었으며, 그러한 역할을 통해 이상기후 대응능력들을 강화시켜 아태지역 국가들의 사회/경제적 번영에 기여하기 위해서 여러 가지 미션들을 수행해왔다. 그런데 APCC가 아태지역에서 이상 기후 대응능력을 강화시키는데 중추적 역할을 하기 위해서는 이상 기후 감시, 분석 및 예측 등을 포함하는 이상 기후 연구들의 증대가 요구된다. 특히 좀더 정확한 이상 기후 예측 정보 제공을 통한 아태지역의 이상 기후 대응능력을 강화하기 위해서는 아태지역 국가에서의 이상 기후 현상에 대한 이해가 필요하며, 더 나아가서 이상기후현상의 지속적인 감시 및 관련된 과학적인 정보를 축적하는 것이 필요하다.

지구 규모의 이상 기후 감시 및 분석이 기능하도록 국제 연구 프로젝트를 구성하는 등 세계적으로 많은 노력들이 있었으며(예. Karl et al. 1999), 특히 국제 연구 협의체(예. Expert Team on Climate Change Detection and Indices(ETCCDI; Peterson 2005), <http://etccdi.pacificclimate.org/indices.shtml>; Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions(STARDEX), <https://cr>

udata.uea.ac.uk/projects/stardex/]를 구성하였으며, 이를 통해서 이상 기온/강수 관련된, 지수 개발들이 이루어졌다. 다른 연구자들이 활용 가능한 관련된 분석 패키지 또한 배포하였다. 이상 기후 지수들은 몇가지 카테고리로 분류가 가능하다. 예를 들면 백분위 기반 지수, 절대값 지수, 임계값 기반 지수, 이상 기후 발생 기간 기반 지수들이 있다. 그 중에 백분위 기반 지수가 일일 이상 기후 감시가 가능한 지수이다. 본 연구에서는 백분위 기반으로 하여 이상 기온/강수를 정의하여, 2018년 1월부터 현재까지 월별 이상 기후 감시 및 분석이 이루어졌다.

더 나아가서 6개의 지역(제2절의 자료 및 방법 참조)으로 나누어서 지역별로 이상기후 발생의 추세를 분석하였으며, 특히 세부적으로 동아시아 지역에서 이상 기후 발생과 관련된 대기/해양 순환장을 분석하였다. 다른 5개의 지역에 관해서는 내년에 분석이 수행될 예정이며 추후 분석 결과들은 내년부터 수행될 지역별 이상 기후 발생 원인(attribution) 분석의 중요한 자료로 활용될 예정이다.

본 연구는 제2절에서 자료 및 분석 방법 등이 기술되었으며, 제3절에서는 2018년 1월부터 8월까지 분석된 이상 기후 모니터링 결과들을 월별로 정리하였다. 네 번째 절에서는 base period 즉 1981년에서 2010년의 이상 강수/기온 지수들에 대한 추세와 그 추세와 비교하여 2018년 이상기후 현상들은 어떠한지 분석하였다. 그리고 case 연구로서 동아시아에서 이상기후현상과 관련된 대기/해양 순환장 분석을 수행하였다. 마지막 절에서는 본 연구의 결론이 기술되었다.

2. 자료 및 방법

2.1 관측 자료

이상 기온 및 강수 지수를 정의 하기 위해서 National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research(NCEP-NCAR) 재분석장(Kalnay et al. 1996)으로 부터의 일 기온 및 강수 자료가 사용되었다. 그런데 NCEP 재분석장의 강수 자료의 문제에 대하여 선행연구에서 보고 되었으며(예, Janowiak et al. 1998) 추후 재분석 자료들을 포함하는 관측 자료들 사이에서 이상 강수 분석 결과의 일관성 혹은 불확실성을 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 기상청 “이상기후 합동 분석 시스템(<http://co-anal.kma.go.kr/>)”에서 사용된 자료들과 일관성을 위해서 NCEP 자료들이 사용되었다. 재분석자료의 수평 해상도는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 이고, 자료 기간은 모두 1948년부터 현재까지 이다. 월 해면기압(sea level pressure, SLP), 500hPa 지위고도(Z500)를 위해서 역시 NCEP-NCAR 재분석장 자료가 사용되었다.

관측 해수면 온도(sea surface temperature, SST) 분석을 위해서 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5(ERSST v5; Huang et al. 2017) 월 자료가 사용되었다. ERSST v5는 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 수평 해상도를 가지며, 자료 기간은 1854년부터 현재까지 이다. 본 연구에서는 1981년 이후의 관측 자료들을 중심으로 분석하였으며, 1981년에서 2010년을 평년 기간으로 하여, 1981년에서 현재까지의 기온, 강수, Z500, SST, SLP 편차가 정의되었다.

El Niño-Southern Oscillation(ENSO), Madden-Julien Oscillation(MJO), Artic Oscillation(AO)등 매월 주요 기후 모드들의 감시도 이루어졌다. 관련된 지수들은 국제 기후 센터의 웹사이트들(Table 1)을 통해 다운받을 수 있다.

Table 1. Climate variability modes obtained from some international climate centers.

Climate Indices	Websites
Nino 3.4	http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/
MJO	http://www.bom.gov.au/climate/mjo/
AO	http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao_index.html

2.2 이상 기후 정의 및 감시

본 연구에서는 백분위 기반으로 하는 이상기온/강수 지수들을 정의하였다. 이상 기온/강수를 위한 백분위 기준값들은 특정 평년기간 즉, 1981-2010 기간에서 얻어지는데, 그 평년 기간에서 기후값을 계산하고 그 기후값으로부터 일별 기온/강수 편차를 계산하여, 일별 기온 및 강수 편차의 90 혹은 10 백분위 기준값을 얻었다. 기준값 보다 높은 기온의 날들을 이상 고온의 날들, 비슷한 방법으로 10 백분위 보다 낮은 기온을 가진 날들은 이상 저온의 날들로 정의하였다. 이상 강수의 날들은 일별 양의 강수 편차가 90 백분위 기준값을 넘는 날들로 정의하였다.

이상기온/강수의 모니터링과 분석을 위해서 아태지역을 총 6개의 세부 지역으로 나누었다(Figure 1). 즉 동아시아 지역(E.Asia, 75°E-150°E, 15°N-60°N), 남 아시아 지역(S.Asia, 60°E-140°E, 10°S-35°N), 북 유라시아 지역(N.Eura, 25°E-190°E, 40°N-80°N), 호주 지역(Aus, 110°E-180°E, 50°S-0°N), 북 아메리카 지역(N.Ame, 190°E-310°E, 10°N-75°N), 남아메리카 지역(270°E-330°E, 60°S-10°N)으로 분류하였다. 분류된 지역 들에서 1981-2010 동안 발생한 이상기온/강수와 관련된 대기/해양 순환장들의 특징을 분석하기 위해서, 매월 이상기온/강수의 날들을 지역 평균하여 지역별 이상기온/강수 지수를 생산하였으며, 이들 지수들과 월평균 Z500, SST, SLP 편차와 상관관계 분석을 수행하였다. 여기서 이상 고온 날수의 지역 평균한 지수는 이상 고온 지수, 이상 저온 날수는 이상 저온 지수, 이상 강수의 날수의 지역 평균한 지수는 이상 강수 지수라고 명명 하였다.

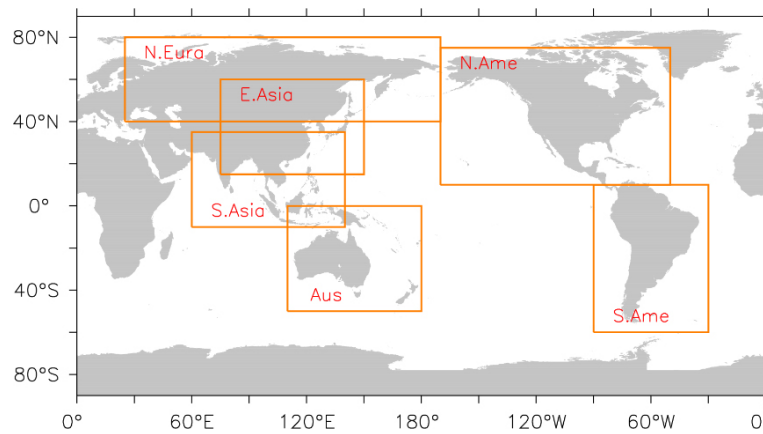


Figure 1. Boxed regions for monitoring and analyzing extreme climates. Northern Eurasia (N.Eura, 25°E–190°E, 40°N–80°N), East Asia (E.Asia, 75°E–150°E, 15°N–60°N), South Asia (S.Asia, 60°E–140°E, 10°S–35°N), North America (N.Ame, 190°E–310°E, 10°N–75°N), South America (S.Ame, 270°E–330°E, 60°S–10°N), Australia (Aus, 110°E–180°E, 50°S–0°N).

3. 월별 이상 기후 모니터링

3.1 1월 이상 기후 모니터링

3.1.1 아태지역 1월 이상 기온 및 강수 특성

북반구의 미국 중동부지역, 러시아 중남부에서 이상 저온(즉, 10 백분위 기준값 이하 온도)이 5일 이상 있었고, 중국 동부 지역에서는 10일 이상 있었다. 특히 미국 중부 지역은 이상 저온 날들의 1월 평균이 이상 저온 기준 온도보다 4℃ 이상 낮았다. 남반구의 북서부 호주는 5일에서 10일 사이의 이상 저온 날들이 있었으며, 이상 저온 평균은 이상 저온 기준 온도보다 역시 4℃ 이상 낮았다. 중국의 남서지역과 미국의 서부지역은 이상 고온이 1월 중 약 15일 이상 있었는데 이상 고온날들의 평균은 기준값보다 2℃ 이상 높았다. 러시아 북동쪽에서 10일 이상 이상 고온을 겪었는데, 이 때문에 이상 고온 기준 온도보다 5℃ 이상 높았다.

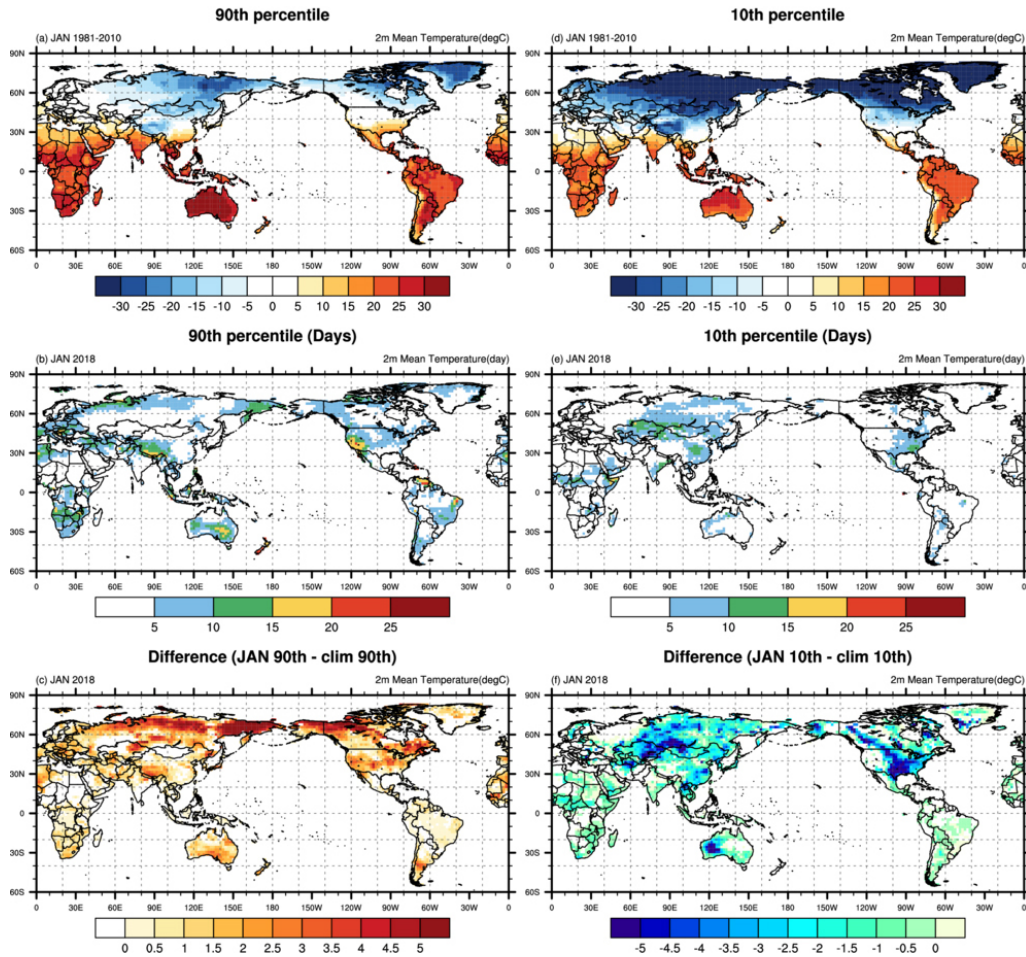


Figure 2. Spatial pattern of (a) 90th percentile temperature, (b) the number of days over 90th percentile temperature, (c) 90th percentile temperature anomalies relative to the 1981-2010 base period, (d) 10th percentile temperature, (e) the number of days below 10th percentile temperature, and (f) 10th percentile temperature anomalies relative to the 1981-2010 base period for January 2018.

이상 강수 기준 값 이상 되는 날이 러시아 북부 지역, 캐나다 서부 지역, 미국 북부 지역에서 5일 이상 있었다. 동/남 아시아 지역의 베트남, 인도네시아에서 이상 강수의 날들이 20일 이상 있었다. 그 이상 강수 날 들의 평균 강수량은 이상 강수 기준보다 5mm 이상 증가하였다. 서호주 지역에서 이상 강수일이 10일 이상 있었고, 이때 평균 강수량은 이상 강수 기준보다 7mm이상 많았다(Figure 2).

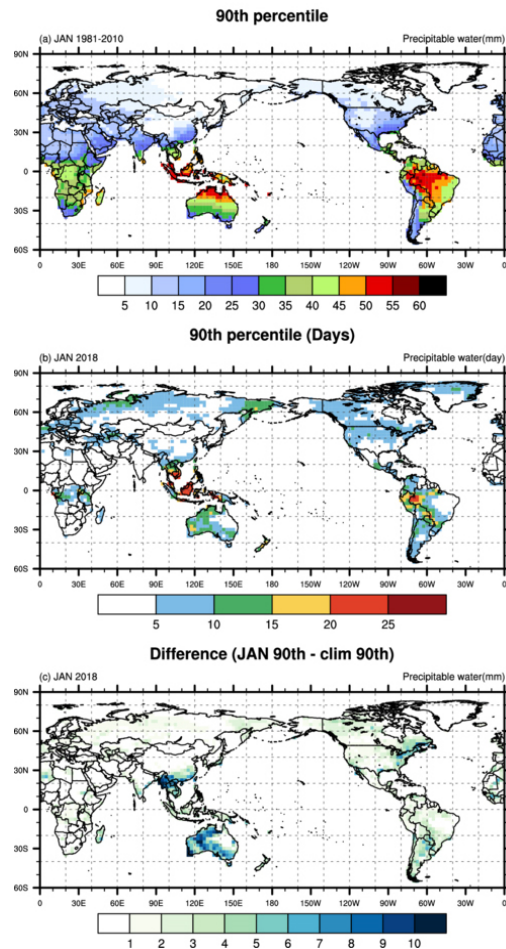


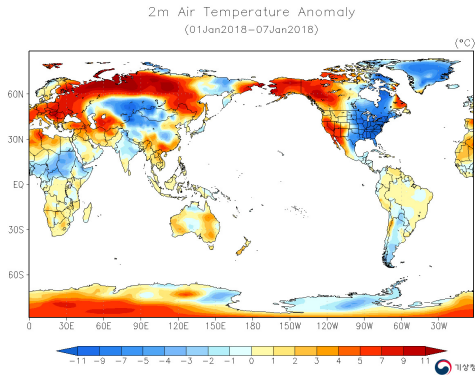
Figure 3. Spatial pattern of (a) 90th percentile precipitation, (b) the number of days over 90th percentile precipitation, (c) 90th percentile precipitation anomalies relative to the 1981–2010 base period for January 2018.

3.1.2 기온/강수 주별 특성

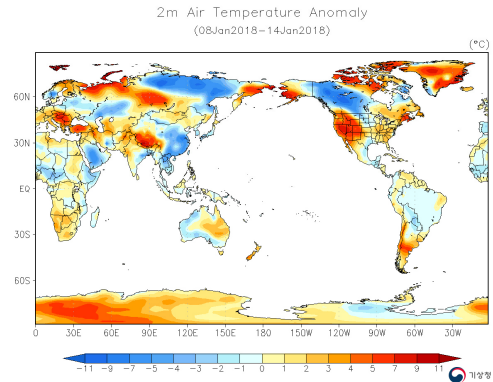
1월 첫 7일은 러시아 대부분 지역에서 강한 양의 기온 편차가 우세하였고, 1월 중반을 지나면서 점차 음의 기온편차 편차를 보였다. 북아메리카 서부지역에서 강한 양의 기온 편차를 보였고, 북미의 동부지역 대부분에서 강한 음의 기온편차를 보였다. 미국 서부 지역은 한달내내 양의 기온 편차가 우세 하였고, 2번째와 4번째 주에서 캐나다 서부 지역은 평년보다 기온이 다소 낮았고, 3번째 주에서 강한 양의 기온 편차를 보였다. 또한 아시아 대부분 지역에서 평년보다 기온이 다소 높았다. 4주째에서는 한반도를 포함한 대부분

분 동아시아 지역에서 평년보다 기온이 낮았다. 호주 남부 지역에서의 1월 내내 양의 기온 편차를 보였고, 특히 1월 중순 이후 양의 기온 편차가 상당히 증가 하였다.

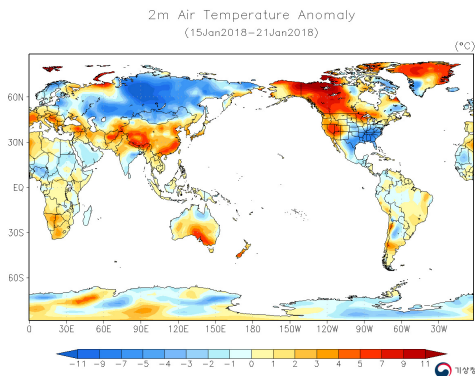
(a) 1 week



(b) 2 week



(c) 3-week



(d) 4-week

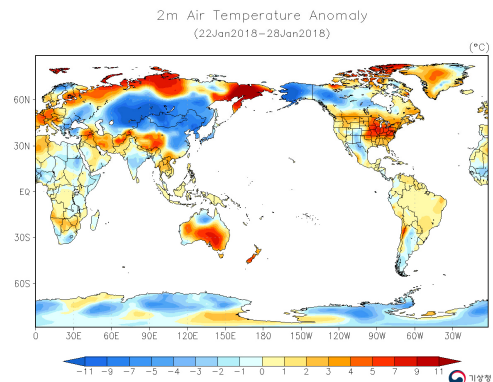


Figure 4. Spatial distribution of weekly average surface temperature anomalies for (a) the first week, (b) second week, (c) third week, and (d) fourth week of January. Taken from <http://co-anal.kma.go.kr>.

강한 양의 강수 편차가 인도차이나 반도, 중국 서부 지역, 남아시아 섬 나라들 1월 첫 주에 있었고, 남미의 북서부 지역에서 1월 내내 평년보다 많은 강수가 있었다. 미국은 2번째주에서 서부지역에서 양의 강수 편차가 있었고, 나머지 주에서는 평년보다 강수가 적었다. 호주에서는 1월 내내 양의 강수 편차가 북부 지역에 집중되었다. 러시아에서는 중북부 지역에서 평년보다 다소 강수가 증가하였고, 캄차카 반도에서 1월 4째주에 강한 양의 강수 편차가 존재하였다.

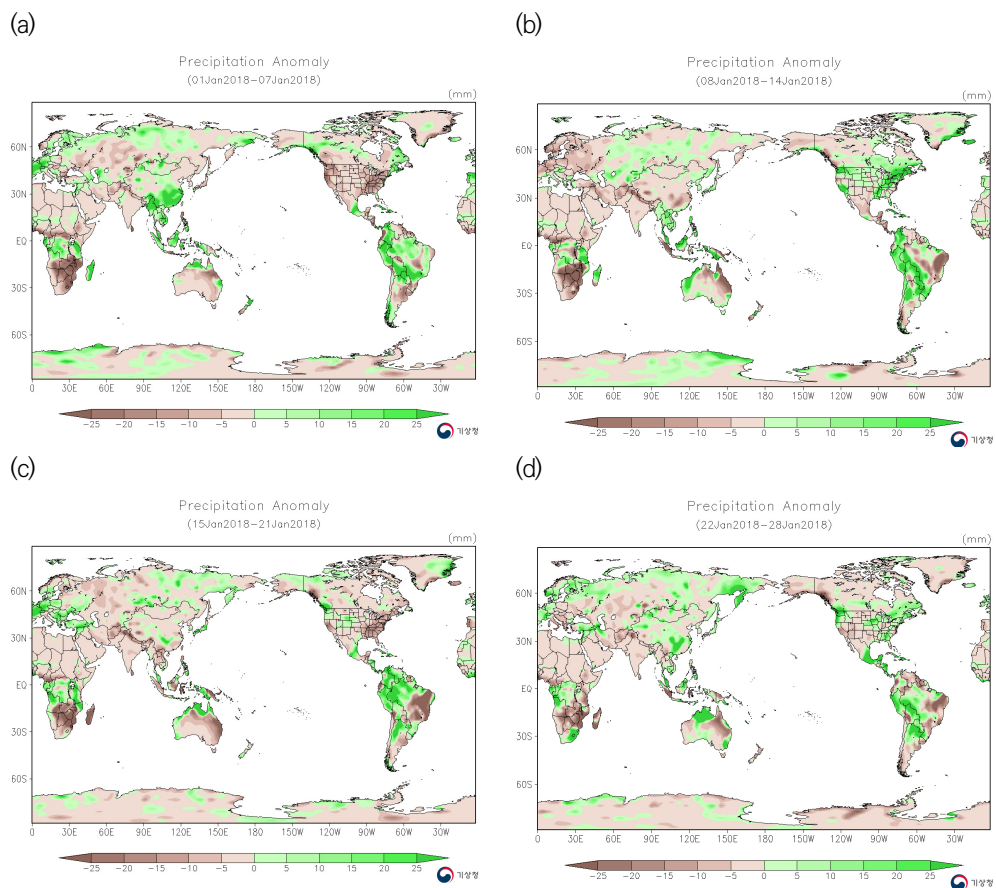


Figure 5. Spatial distribution of weekly average precipitation anomalies for (a) the first week, (b) second week, (c) third week, and (d) fourth week of January 2018. Taken from <http://co-anal.kma.go.kr>.

3.1.3 대기/해양 순환장 특성

3.1.3.1 기후변동 모드 특성

태평양에서는 작년 가을부터 발달한 라니냐(Nino3.4=-0.9℃)가 여전히 유지되고 있었다. 인도양에서는 뚜렷한 SST 모드들의 발달을 볼 수 없었으며, 대서양에서는 북대서양의 SST 편차가 1.5℃ 이상의 양의 값을 보였다(Figure 6). 북극 진동인 AO 지수는 1월 전반적으로 음의 값을 보였으며, 특히 1월 초반과 후반에 강한 음의 값이 유지되었다. 1월 MJO는 매우 활발하였다. 1월 초·중반 MJO는 인도양에 위치했으며, 중반 이후 maritime continent 지역으로 동진하였으며, 후반에는 강한 강도를 유지하면서 서태평양으로 진행하였다.

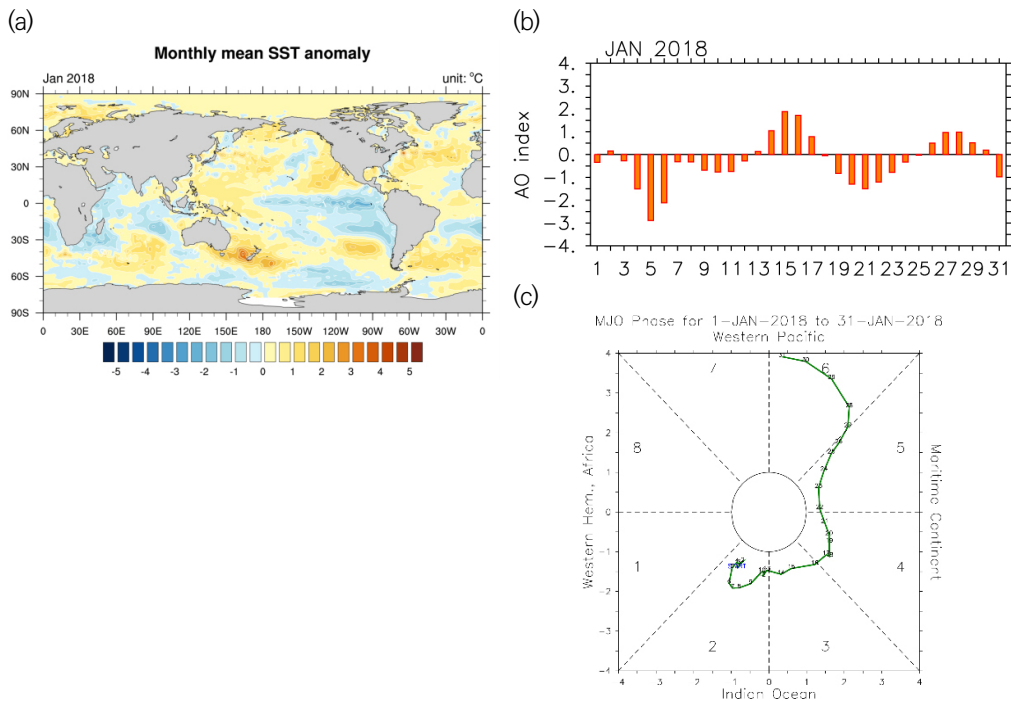


Figure 6. (a) Spatial pattern of January mean SST anomalies in 2018, (b) time series of AO index, and (c) MJO phase diagram in January 2018.

3.1.3.2 1월 대기순환장 특성

우랄산맥의 양의 Z500 편차를 시작으로 양 과 음의 Z500 편차가 반복되는 구조를 보였다(Figure 7). 특히 우랄 산맥의 양의 지위고도 편차 발달과 알류산에서 음의 지위고도 편차가 발달하였다. 북아메리카 대륙의 동부지역에서 뚜렷하게 양의 지위고도 편차를 보였다. 남반구에서는 뉴질랜드 근처에서 호주 남동쪽으로 확장한 양의 지위고도 편차가 우세하였다.

지상에서의 해면 기압은 대기 중층 지위고도 편차의 분포와 거의 일치하였다(Figure 7). 즉 우랄산맥, 알류산 그리고 미국에서 북동쪽 대서양에서 강한 고기압 편차가 발달하였으며, 우리나라 동북쪽으로 저기압성 편차가 발달하였다. 남아시아에서 호주까지 확장된 저기압성 편차가 있었다.

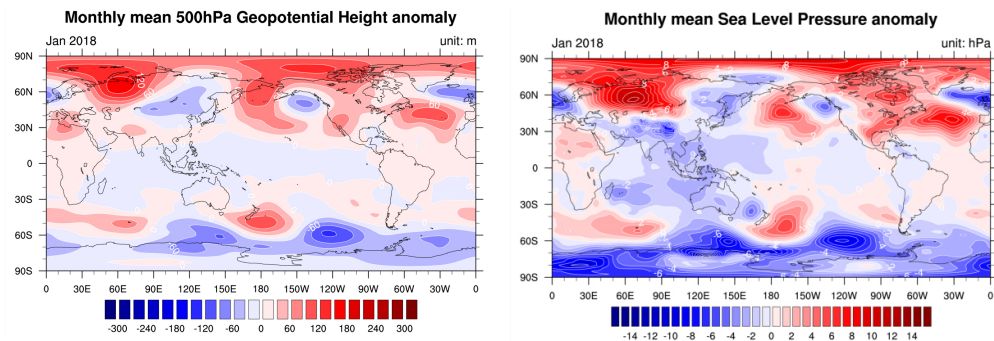


Figure 7. Spatial patterns of January mean (left) Z500 and (right) SLP anomalies in 2018.

3.1.4 1월 이상 기후 원인 분석 토론

호주 북쪽과 남아시아에서 이상 강수는 라니냐와 관련 서태평양에서 대류활동이 활발했던 것과 MJO와 동반된 강수 밴드가 일부 기여했던 것으로 보인다. 아울러 서호주 지역에서 이상 강수날이 많았는데 이 때문에 일사량의 감소로 이상 저온 여름을 겪은 것으로 보인다. 남동호주 지역에서 이상 고온은 호주 남동지역에서 뉴질랜드 지역까지 확장한 양의 지위고도 편차와 관련이 있는 것으로 보인다.

동아시아와 북아메리카 이상 저온은 일부 음의 AO와 관련이 있으며, 이로 인하여 북극의 찬 기류가 중위도로 내려왔기 때문인 것으로 사료된다. 아울러 우랄산맥과 알류산 해에 발달한 강한 양의 지위고도 편차(즉, 블로킹)는 동아시아의 이상 저온 발생에 기여하였던 것으로 보인다.

3.2 2월 이상 기후 모니터링

3.2.1 2월 이상 기후 특성

2월에 5-10일 이상의 날 동안 이상 고온을 갖는 지역들은 중국 중서부 지역, 미국 남동부 지역, 그리고 멕시코, 페루, 칠레 일부 지역이었다. 한반도를 포함한 동아시아 지역에서 2월 이상 고온 날들의 평균 온도는 기준 보다도 2℃ 이상 높았으며, 미국 동부 지역에서 평균온도는 4℃ 이상 높았다. 그리고 2월에 시베리아 동쪽으로 10일 이상 고온이 있었던 지역들이 존재하였다. 이에 반해서 중국 동부, 한반도, 일본을 포함하는 동아시아 일부 지역, 미국 서/북부 지역에서 이상 저온이 5일 이상이었다. 이들 지역에서 이상저온 날들의 평균은 그 기준 보다 -2℃ 이상 더 낮았다(Figure 8).

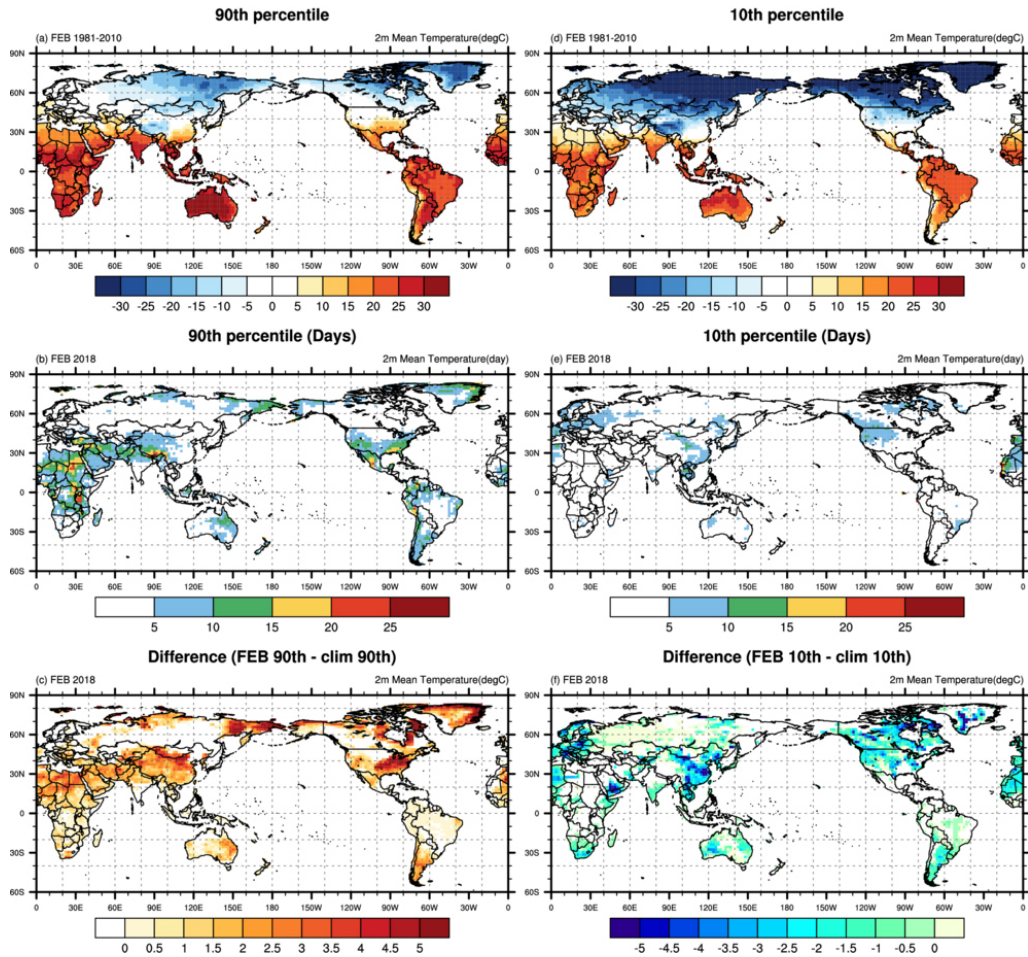


Figure 8. Same as Figure 2 except for February 2018.

위에서 언급한 이상 고온을 겪은 시베리아 동쪽 지역, 미국 동부지역에서 이상 강수 기준 보다 많은 강수가 내린 날이 5-10일 이상이었고, 특히 미국 동부 지역에서는 이상 강수 기준보다 평균 9-10mm 이상 많았다. 필리핀, 인도네시아 지역을 포함하는 남아시아 일부 지역 그리고 호주 북서남부 지역에서 5일 이상 이상 강수가 내린 날이 있었으며, 이상 강수 기준보다 역시 5mm 이상 증가하였다(Figure 9).

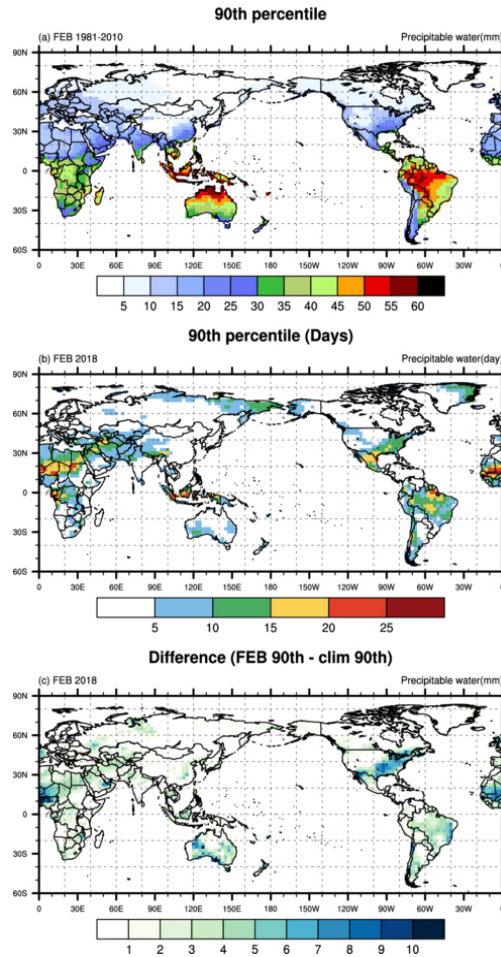


Figure 9. Same as Figure 3 except for February 2018.

3.2.2 기온/강수 주별 특성

2월 첫 주 평균 기온은 미국 알래스카에서 캐나다 중부, 그리고 미국 동부까지 평년보다 낮았고, 미국 서부 지역은 양의 기온 편차를 보였다. 그 이후 미국 동부는 점점 평년보다 기온이 낮아졌고, 알래스카 지역은 2월 말까지 양의 기온 편차를 보였다. 미국 서부는 2주부터 기온이 높아졌으며, 3-4주에는 강한 양의 기온 편차를 보였다. 러시아 캄차카 반도 근처 서부지역은 2월 내내 평년 보다 기온이 높았으며, 두번째 주에 러시아 북부지역에서 강한 양의 기온 편차가 있었다. 2월 마지막 주에서는 유라시아 대부분 지역이 평년보다 기온이 낮았다. 동아시아에서는 1월 후반부터 진행된 평년보다 낮은 기온이 2월

초/중반까지 지속되었으며, 이후 한반도는 평년기온 수준이었고, 중국지역은 평년보다 높았다(Figure 10).

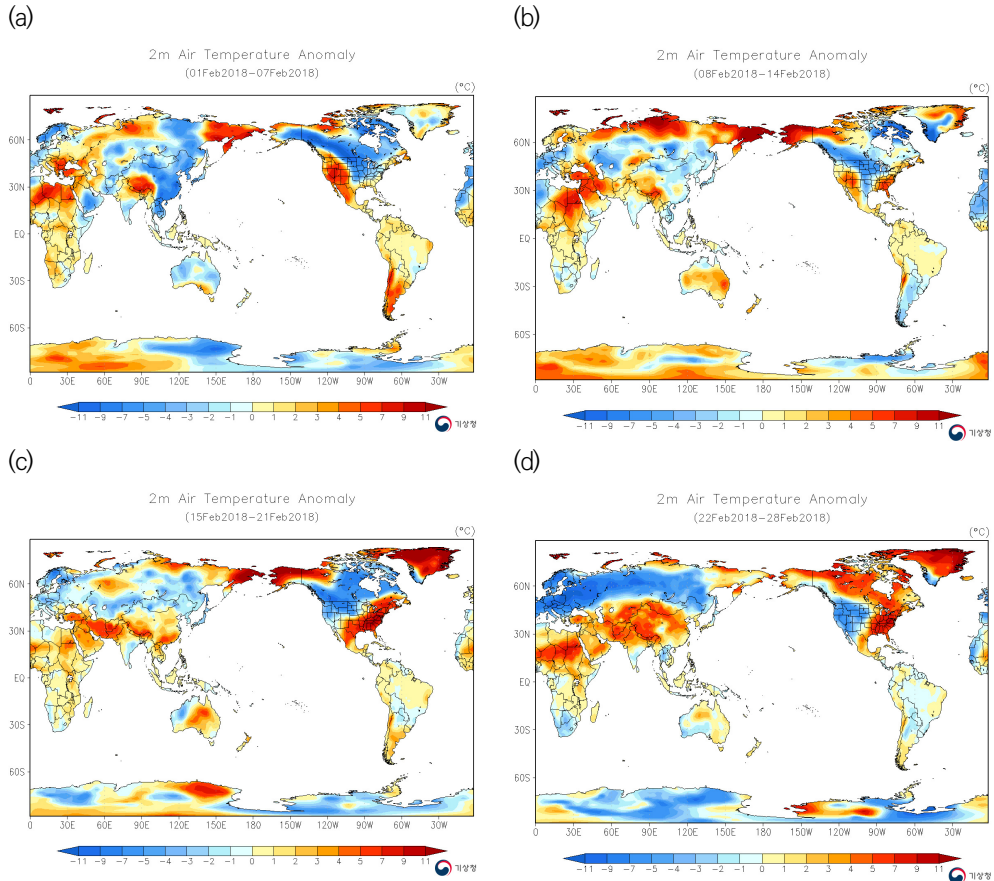


Figure 10. Same as Figure 4 except for February 2018.

2월 주 평균 강수 편차(Figure 11)는 적도 주변 국가 들에서 4주 내내 평년보다 다소 강한 비가 내렸다. 호주 동북부지역에서는 두번째 주를 제외하고 양의 강수 편차를 보였다. 동아시아는 2월 4주 내내 음의 편차가 우세하였고, 특히 첫주와 두번째 주에 중국 동부 지역에 강한 음의 강수 편차가 있었다. 미국 동부 지역에서 다소 강한 양의 강수 편차가 있었다. 북유라시아 지역은 평년 수준의 강수 편차를 보였다.

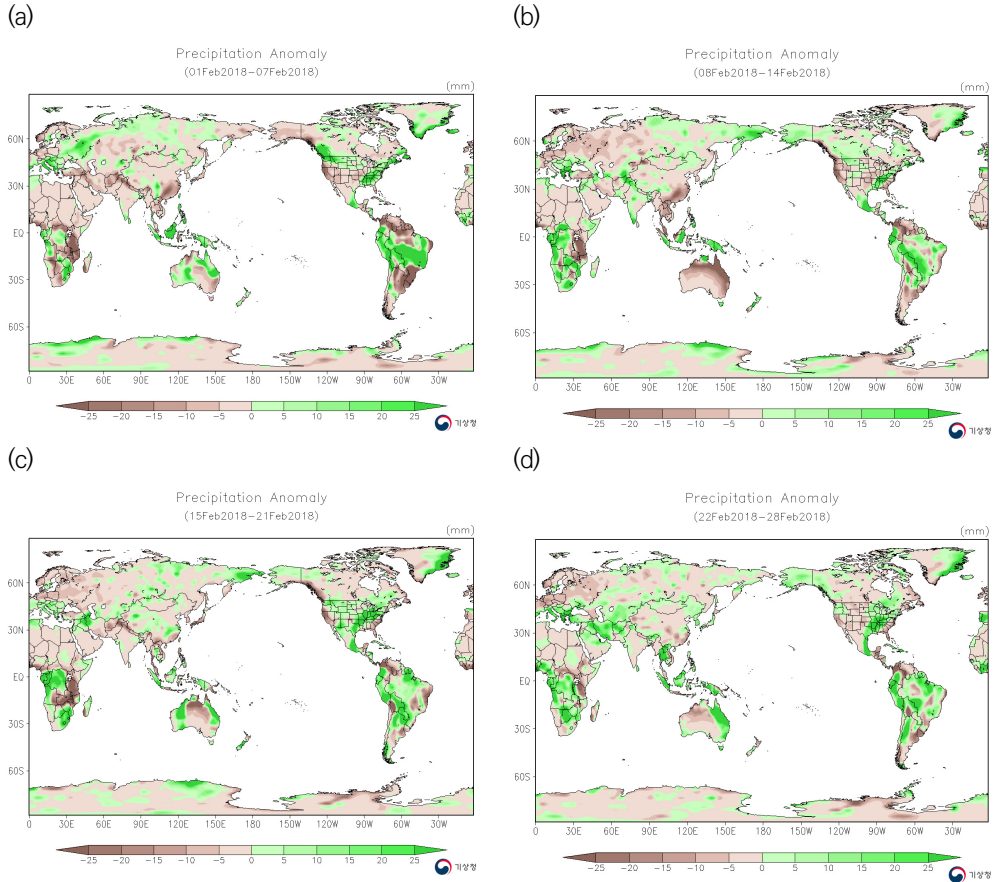


Figure 11. Same as Figure 5 except for February, 2018.

3.2.3 2월 대기/해양 순환장 특성

3.2.3.1 2월 기후 변동 모드 특성

전체적으로 전지구 해수면 온도 편차 분포는 1월 상태와 상당히 비슷하며, 라니냐 강도(Nino3.4=-0.9°C)가 감소하고 있는 상태이다. 북극 진동인 AO 지수는 2월 중반까지 양의 값을 보였으며 이후 2월 말까지(약 25일) 지수의 값은 작았다(Figure 12 (a)). 25일 경 이후부터 음의 값을 보였다. 2월 MJO는 1월 후반 phase 6에서 상당한 강도를 유지한 채로 phase 7으로 진행하였으며, 중순 이후 2월 후반까지 그 강도는 감소한 상태로 phase 8에서 phase 1을 지나 phase 2로 발달하였다(Figure 12 (b)).

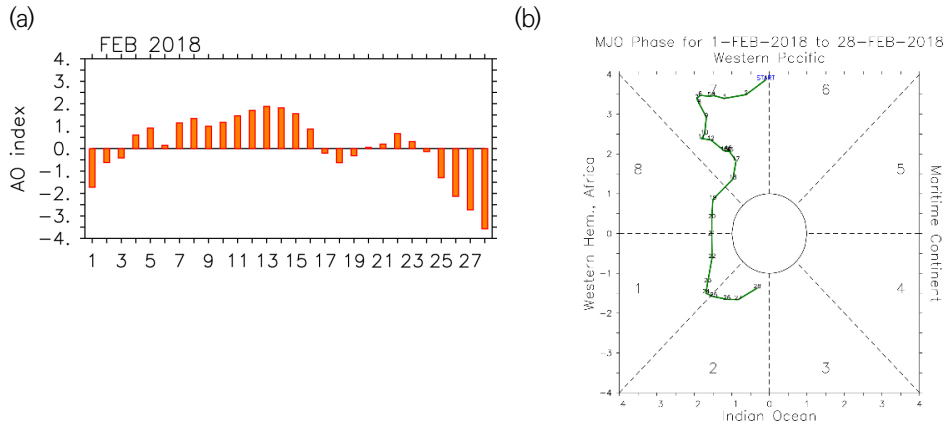


Figure 12. (a) Time-series of the AO index and (b) phase diagram of the MJO in February.

3.2.3.2 2월 대기 순환 특성

우랄산맥 부근과 베링 해 부근의 양의 500hPa 지위고도 편차가 형성 되었고, 그 사이로 한반도 상공으로 음의 지위고도 편차를 보였다. 북미 북동쪽에서 남쪽으로 쌍극자 지위고도 편차 패턴을 보였다. 베링해 부근의 양의 지위고도와 함께 이는 전형적인 라니냐와 관련된 상층 대기의 원격상관 패턴과 비슷한 모습을 보였다(Figure 13).

상층의 지위고도 배치와 일관성 있게 한반도에서 북동쪽으로 저기압성 순환 편차가 있었다. 약하지만 라니냐의 영향으로 서태평양에서 음의 해면 기압 편차를 자리하고 있었다. 북미 북동부 지역에 강한 양의 Z500 편차가 형성되었지만, 지상에서는 고기압성 순환 편차가 있었다.

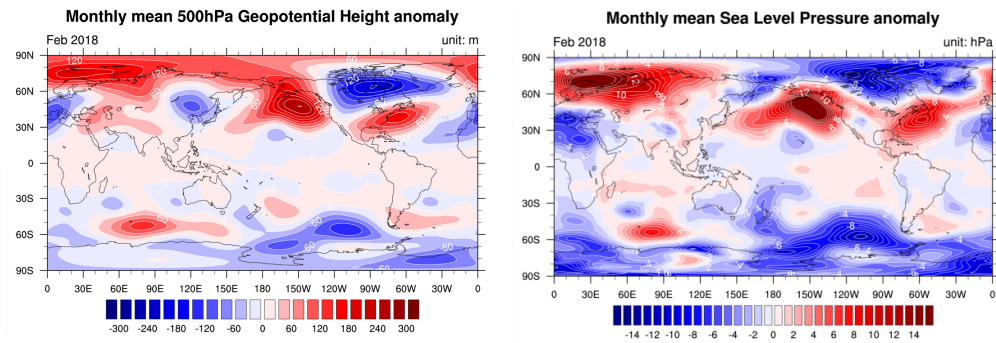


Figure 13. Same as Figure 7 except for February mean in 2018.

3.2.4 2월 이상 기후 원인 분석 토론

동아시아의 이상 저온은 우랄산맥 주변 기압능과 베링해 부근 기압능이 한반도 북동쪽에 저기압성 편차형성에 기여하고, 이로 인하여 북쪽의 찬공기가 동아시아의 기온 하강에 영향을 미친것으로 보인다. 북미 북동쪽으로 상층과 하층의 경압구조는 미국 동부의 북쪽의 찬공기의 남하와 불안정성증가를 유발하게 되고, 결국 이상 저온 및 이상 강수 발생에 기여한 것으로 보인다.

3.3 3월 이상 기후 모니터링

3.3.1 3월 이상 기온 및 강수 특성

중국 북부 및 몽골 지역에서 10-15일 이상의 이상 고온을 겪었으며, 한반도 역시 10일 이상 동안 이상 고온이 있었다. 이들 지역에서 이상 고온 기준 온도 보다 약 4℃ 이상 높았다. 러시아 남부와 동부 지역에서 5일이상 이상 고온의 날들이 있었으며, 기준보다 2-3℃ 높았다. 이에 반해 러시아 서부 지역에서 이상 저온 현상이 15일 이상 있었던 곳도 있었으며, 이들 지역에서 이상 기온 평균은 그 기준보다 -4℃ 이상 낮았다. 인도차이나 반도 지역에서는 이상고온의 날은 매우 적었고, 이상 저온의 날들이 최대 5일정도 있었다.

캐나다 북부와 미국의 남부 및 멕시코 북부 지역에서 이상고온 이 5일 이상 있었으며, 그 평균이 이상 기온 기준보다 2℃ 이상 높았다. 캐나다와 미국의 서쪽 지역 과 미국 남동

부 지역에서 이상 저온의 날들이 있었다.

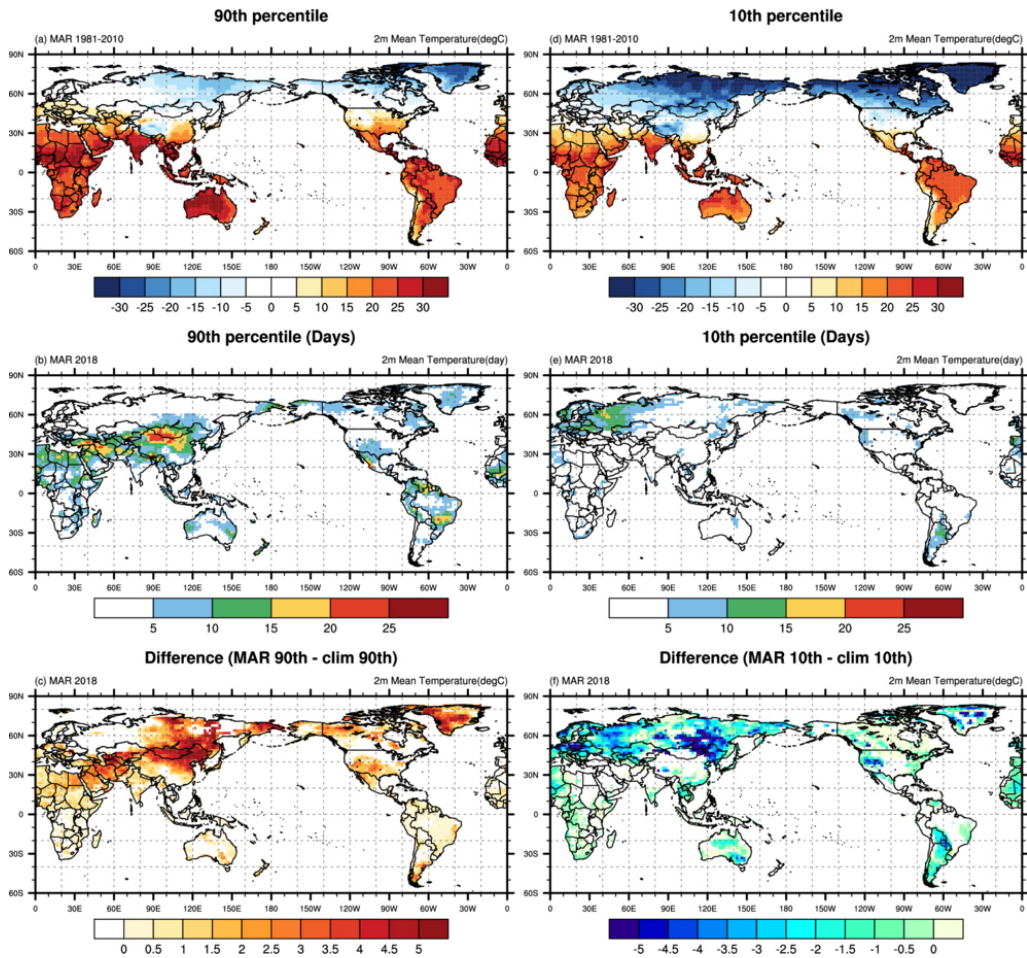


Figure 14. Same as Figure 2 except for March 2018.

대부분의 동남아시아 국가 들에서 이상 강수 기준 값 이상 되는 날이 5-10일 이상 있었고, 하지만 이상 강수날 들의 평균 강수량은 이상 강수 기준보다 그렇게 높지 않았다. 호주 북부 지역에서 이상 강수날 들의 평균 강수량은 이상 강수 기준보다 9mm 이상 높았다. 미국 남동부 지역에서 이상 강수 기준 보다 역시 5mm 이상 높았다.

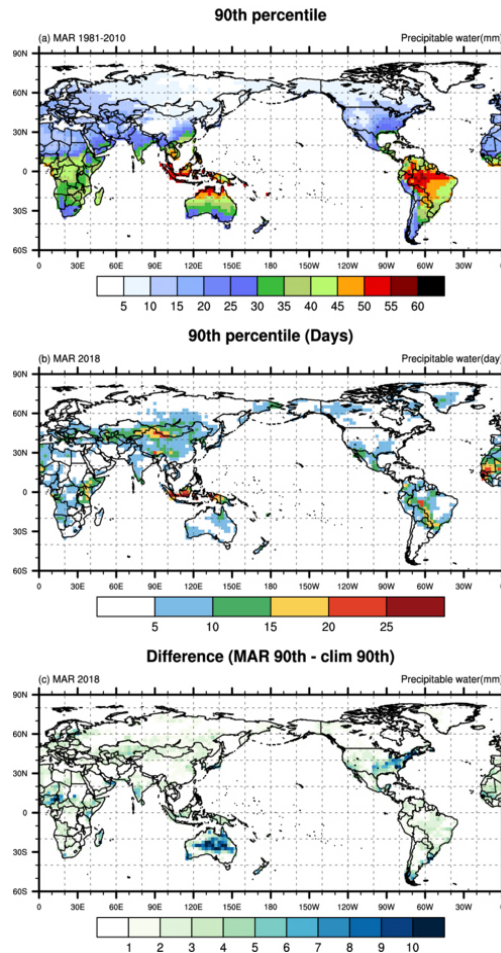


Figure 15. Same as Figure 3 except for March 2018.

3.3.2 기온/강수 주별 특성

아시아 대륙에서는 러시아 국경을 기준으로 북쪽으로 3월 한달 내내 기온에서 음의 편차가 우세했고, 남쪽으로는 양의 편차가 우세했다. 그 양의 편차는 점차 러시아 북동부 쪽으로 확장하였다. 이에 반해서 북미대륙은 캐나다 북쪽으로 3주까지 양의 편차가 지속하였고, 2주동안 미국 동부와 서부지역은 음과 양의 편차가 쌍극자 형태로 반복되는 기온 편차 상태를 보였다. 3주이후 미국 남부 지역(즉 텍사스 주)에 양의 편차가 점차 강화되었다(Figure 16).

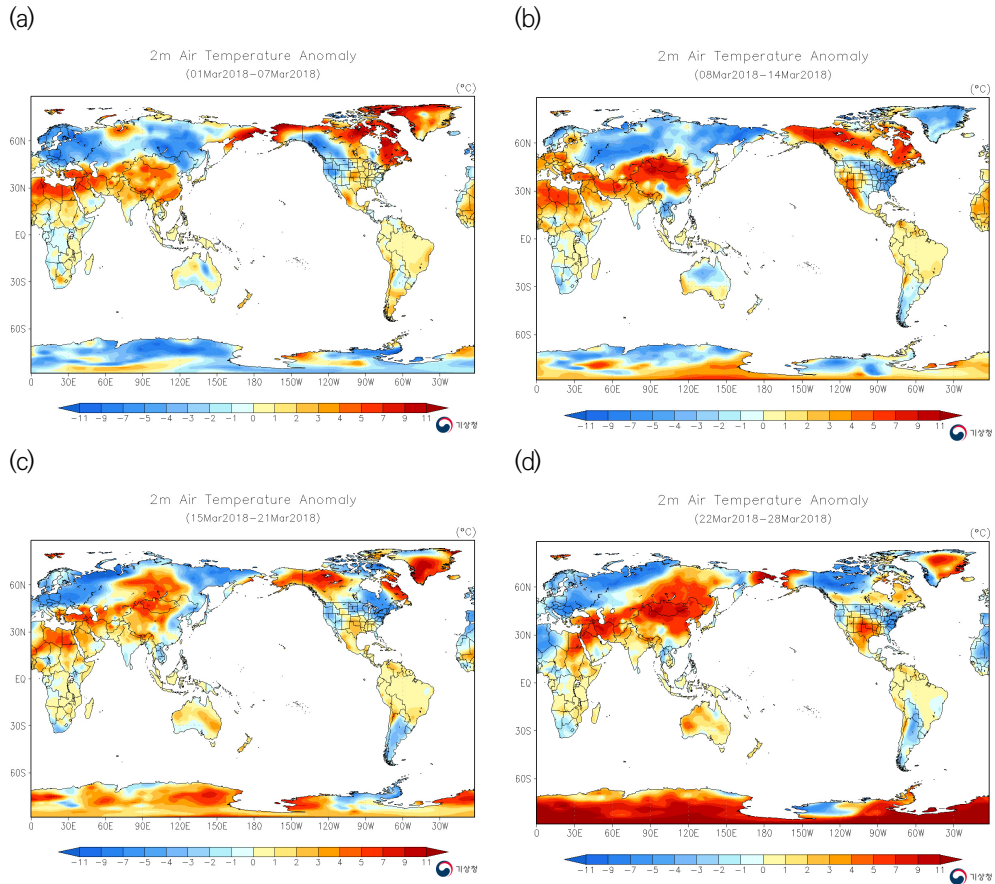


Figure 16. Same as Figure 4 except for March, 2018.

동/남아시아(한반도, 일본, 동중국, 인도차이나, 필리핀 등)는 4주동안 양과 음의 강수 편차가 나타났다. 즉 1주와 3주에 양의 강수 편차를, 2주와 4주에 음의 강수 편차를 보였다. 호주는 3월 1주에 북동부지역에 평년보다 많은 비가 내렸으며, 퀸스랜드 북부지역은 3월 내내 양의 편차를 보였다. 북미 지역에서는 캐나다 서남부 지역과 미국 캘리포니아주 북부 지역과 텍사스주를 제외하고 강한 양의 강수 밴드가 관측되지 않았다. 3월 내내 캘리포니아 주는 양의 강수가 3월 4주에 캐나다 서남부와 미국 텍사스 주를 중심으로 양의 강수 편차가 있었다(Figure 17).

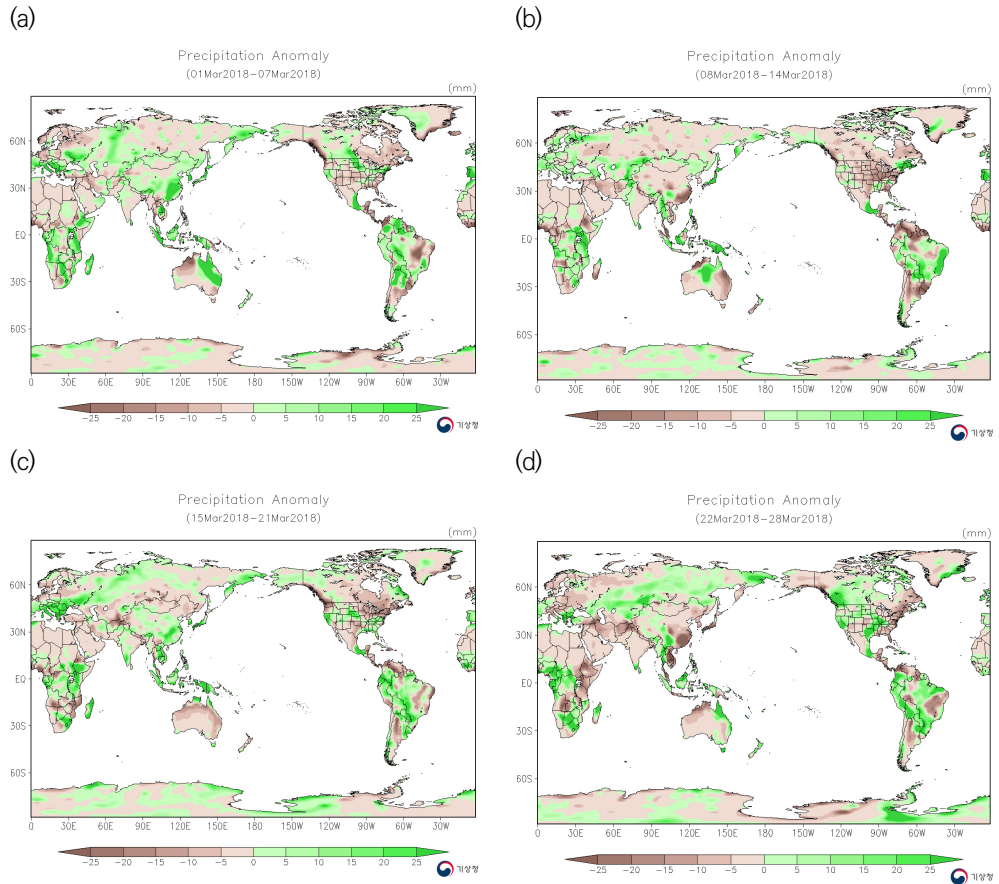


Figure 17. Same as Figure 5 except for March, 2018.

3.3.3 대기/해양 순환장 특성

3.3.3.1 기후 변동 모드 특성

3월 SST편차는 1월과 비슷한 분포를 보였으며, 특히 동적도 태평양에서 약한 라니냐 상태(Nino3.4=-0.7°C)를 유지하였다. 3월 전반적으로 MJO 활동은 약하였다. AO지수는 3월 19일 경까지 음의 값을 유지하다가 그 후로 약한 양의 값을 유지하였다(Figure 18).

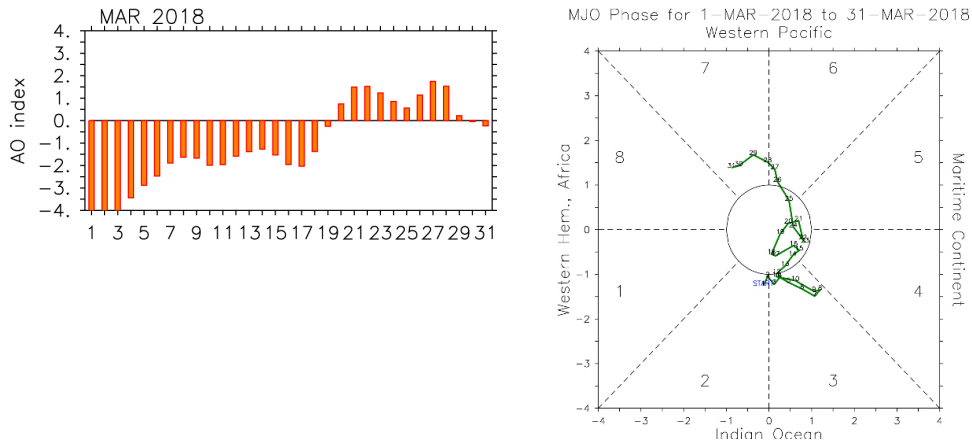


Figure 18. (left) Time series of AO index and (right) phase diagram of the MJO in March 2018.

3.3.3.2 대기 순환장 특성

500hPa 지위고도 편차에 의하면 아시아 대륙에서는 뚜렷한 기압능/골의 발달을 볼 수 없었다. 즉, 북쪽으로 음의 지위고도 남쪽으로 양의 지위고도가 발달하는 형태를 보였다(Figure 19). 이러한 패턴은 유라시아 대륙과 북서 태평양 사이의 서저 동고의 기압 편차 패턴과 일관된다. 양의 지위고도 편차가 북미 동북부에서 아이슬란드까지 확장되었다. 중앙 태평양에서 North Pacific Oscillation(NPO, Rogers 1981)-like 패턴이 발달하였다.

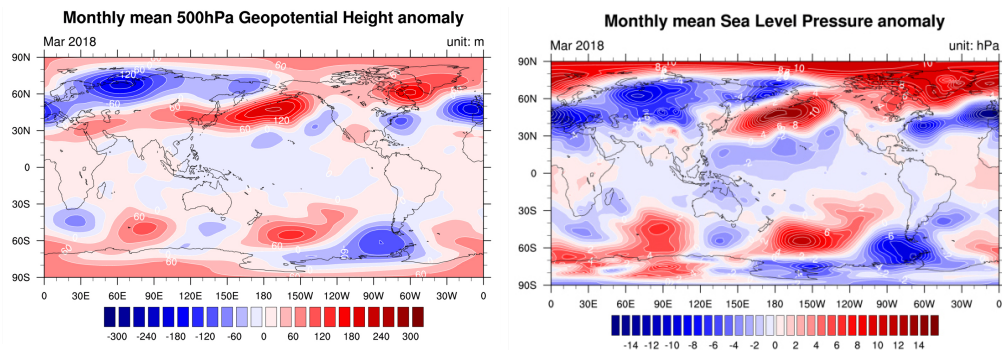


Figure 19. Same as Figure 6 except for March mean in 2018.

3.3.4 3월 이상 기후 원인 분석 토론

전반적으로 아시아 태평양 중위도 지역 국가의 3월 기후는 서에서 동으로 이동하는 기압배치의 주로 영향을 받은 것으로 보인다. 북 유라시아대륙에 음의 지위고도가 자리하여 북쪽의 찬공기의 남하가 적어서, 전반적으로 동아시아가 따뜻했던 것으로 분석된다. 3월 초중반에 음의 AO 영향으로 러시아 지역에 평년보다 기온이 낮았으며, 점차 양의 AO 지수 값이 되고, 극의 영향이 감소하게 되어서 점차 양의 기온 편차가 러시아 지역까지 확장된 것처럼 보인다. 그리고, 중앙 태평양에서 해면 기압 편차의 NPO-like 패턴은 ENSO 위상 전이 때 역할을 하는 것으로 알려졌으며, 특히 Central Pacific(CP) 타입의 엘니뇨 발달과 관련이 있음을 과거 연구에서 밝혀진 바 있다(예, Yu and Kim 2011). 그러므로, 올해 겨울철에는 CP 타입 엘니뇨 발달을 기대해 볼 수 있을 것으로 사료된다.

3.4 4월 이상 기후 모니터링

2018년 4월은 관측자료에 따르면, 대부분의 지역에서 평균기온의 증가 추세를 이어가면서, 평균이상이었다. 2016년 4월(1.08°C)과 2017년 4월(0.89°C)의 평균 기온만큼 높지는 않지만 2018년 4월(0.83°C)은 세 번째로 가장 따뜻한 4월이었다. APEC 기후센터에 따르면 ENSO는 2018년 11월까지 중립조건이 유지될 것으로 예측된다. 이 예측은 Nino3.4지역의 해수면 온도(0.5°C)를 기준으로 하였다.

2018년 4월에는 많은 기상이변이 발생하였다. 특히 인도의 우타르 프라데시(Uttar Pradesh)와 라자스탄(Rajasthan)지역에서 폭풍우와 먼지, 강풍으로 인해 100명이 사망하고, 약 300명이 부상자가 발생하였다.

3.4.1 이상기온 및 강수

500hPa 상층 기압 패턴은 지표기온과 연관성이 매우 크다. 2018년 4월의 GPH 500hPa의 고기압성 편차는 북미에서 유럽을 걸쳐 한반도 동부에 이르기까지 뚜렷하게 나타나며, 캐나다 동부에서 영국서부의 해양에는 저기압성 편차가 나타난다. 캄차가 반도

주변에서는 동시베리아의 저지 고기압(blocking high)과 연관된 저기압성 편차가 나타난다. 이러한 고기압과 저기압 패턴은 양의 온도 편차와 음의 온도 편차 영역을 잘 반영하고 있다. 2018년 4월의 평균온도는 시베리아 해, 유럽 및 동아시아에서 정상보다 높았고 북미의 중부 및 동부 지역에서는 정상보다 낮았다. 이상 기온의 패턴은 평균기온 편차 패턴과 매우 유사하다. 따라서 2018년 4월의 이상 기온은 중위도 지역인 시베리아 해, 유럽 및 동아시아 지역에서 발생하였으며, 이 지역은 약 7~9일 이상의 이상고온이 발생하였다. 또한 이들 지역에서 이상 기온의 평균은 기준보다 약 $2\sim3^{\circ}\text{C}$ 이상 높았다. 이상저온은 북미의 중부와 동부지역에서 뚜렷하게 나타났으며, 평균 15일 이상 나타났으며, 기준온도에 비해 약 -5°C 이하로 낮았다(Figure 20).

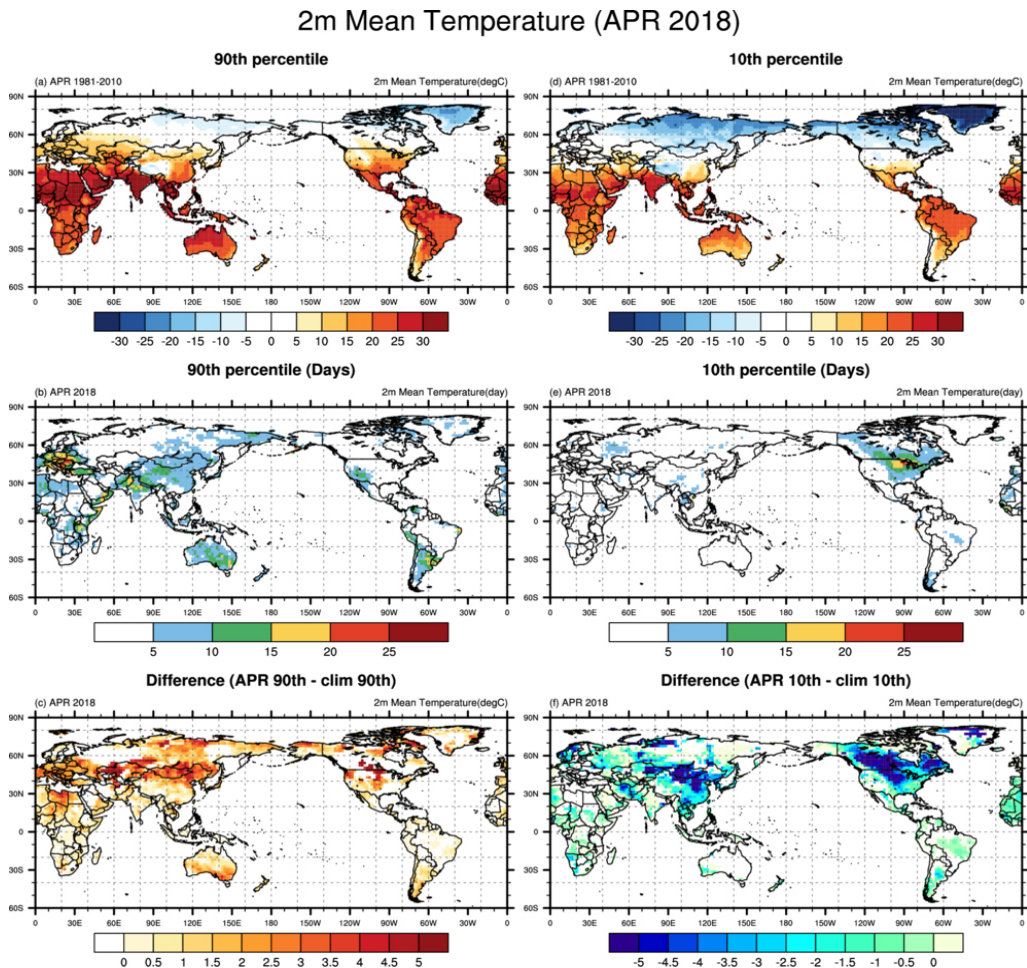


Figure 20. Same as Figure 2 except for April 2018.

대부분의 아태지역 국가 들에서 이상 강수 기준 값 이상 되는 날이 5일 미만 있었고, 인도차이나 반도는 약 20일 이상 이다. 2018년 4월 이상 강수는 전지구가 약 5일 미만으로 발생하였으며, 중국중부, 북부와 한반도 지역에서 약 10일정도의 이상강수가 발생하였다. 이러한 이상강수량은 기준치보다 약 10mm 높게 나타났다(Figure 21).

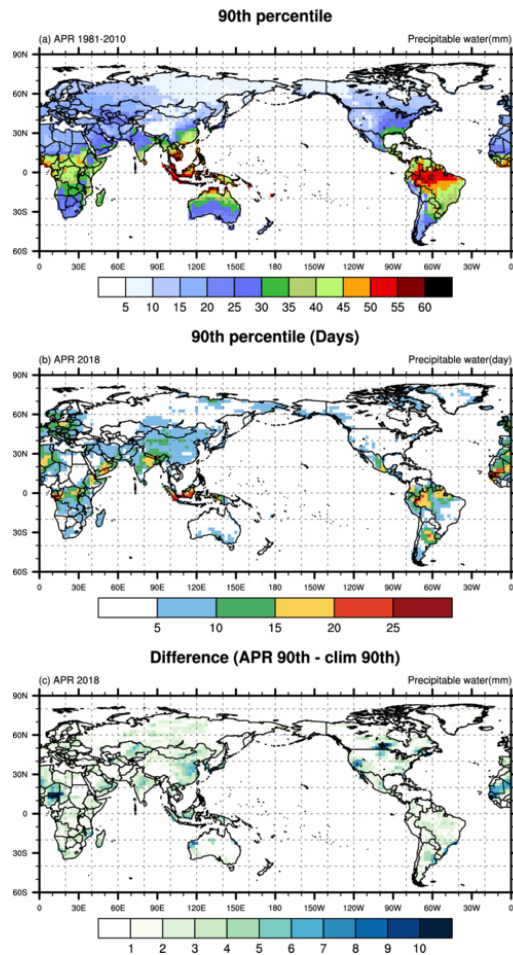


Figure 21. Same as Figure 3 except for April 2018.

3.4.2 4월 기온/강수 주별 특성

4월의 주별 기온의 변동성은 매우 크다. 4월 첫 주에는 유라시아를 중심으로 음의 편차를 보이며, 인도 북동쪽에 강한 양의 편차가 나타났다. 또한 미 서부에서 강한 양의

편차를 보이고, 북미 북부에서는 음의 편차가 우세했다. 북미의 이런 패턴은 4월 한달내 내 지속되었다. 4월 2주에는 아시아 북부 지역을 중심으로 양의 편차가 우세했으며, 또한 서유럽과 몽골지역에서 강한 양의 편차가 나타났다. 이러한 경향은 4월 4주까지 지속되었다.

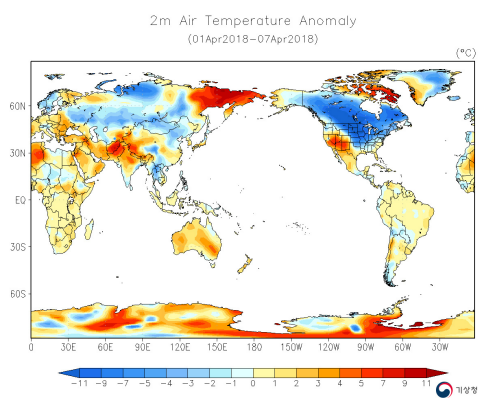
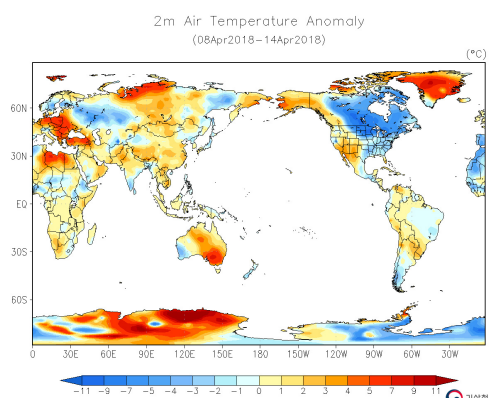
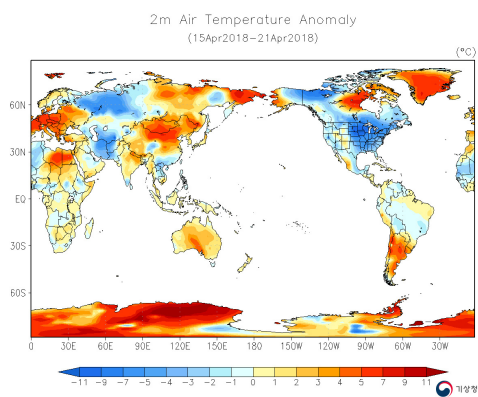
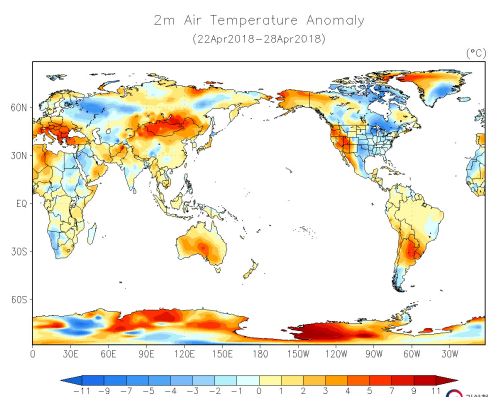
a) 1st weekb) 2nd weekc) 3rd Weekd) 4th Week

Figure 22. Same as Figure 4 except for April, 2018.

4월 1주의 강수는 한반도와 중국 중부에서는 양의 편차를 보였으며, 중국남부와 동남 아시아(필리핀, 베트남 등)는 음의 강수 편차를 보였다. 4월 2주에는 베트남과 라오스를 중심으로 강한 음의 강수 편차를 보였으며, 3주에는 중국 남부와 미국 전역에서 음의 편차가 매우 우세하였다. 4주에는 미국전지역의 음의 편차가 강화되는 모습을 보였다 (Figure 23).

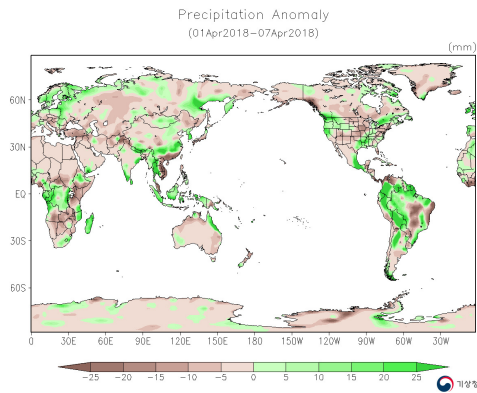
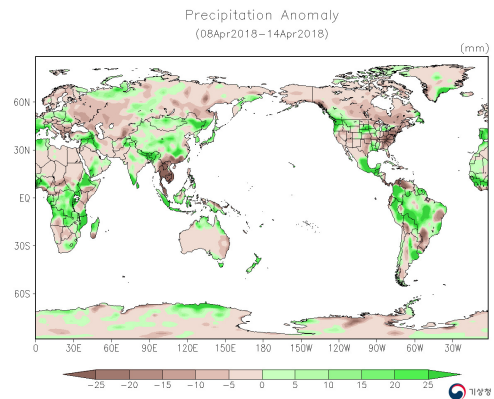
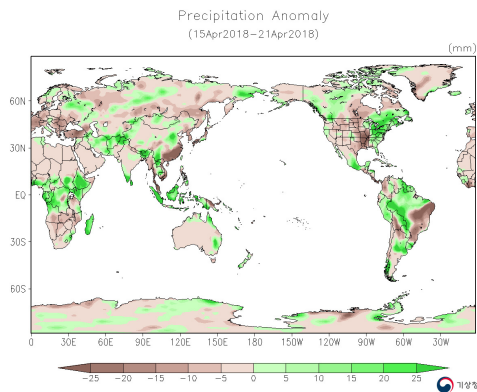
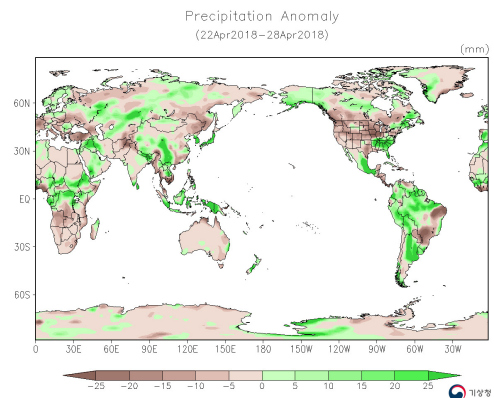
a) 1st weekb) 2nd weekc) 3rd Weekd) 4th Week

Figure 23. Same as Figure 5 for April, 2018.

3.4.3 대기/해양 순환장 특성

3.4.3.1 기후 변동 모드 특성

지난 8월부터 음의 해수면 편차가 중/동 태평양에서 나타나고 있다. 4월 현재 Nino 3.4 지수는 -0.44°C 로 동태평양 부근에서 음의 해수면 온도 편차가 나타나지만 중립으로 진행되는 경향이 뚜렷이 나타나고 있다. 1월부터 서-중태평양에서는 서풍 편차가 지속되다가 3월 들어서 중태평양에서는 동풍편차, 서태평양에서는 서풍편차가 강해지고 있으며, 이러한 패턴은 소강상태를 보이다가 4월 중순 이후 다시 강하게 나타나고 있다. 4월 해저수온을 보면, 남미대륙에 접한 Nino2지역 부근은 제외하고는 전반적으로 모두 양

편차값을 보이고 있으며, 해수면에서도 3월까지 약하게 존재했던 음의 편차가 사라졌다.

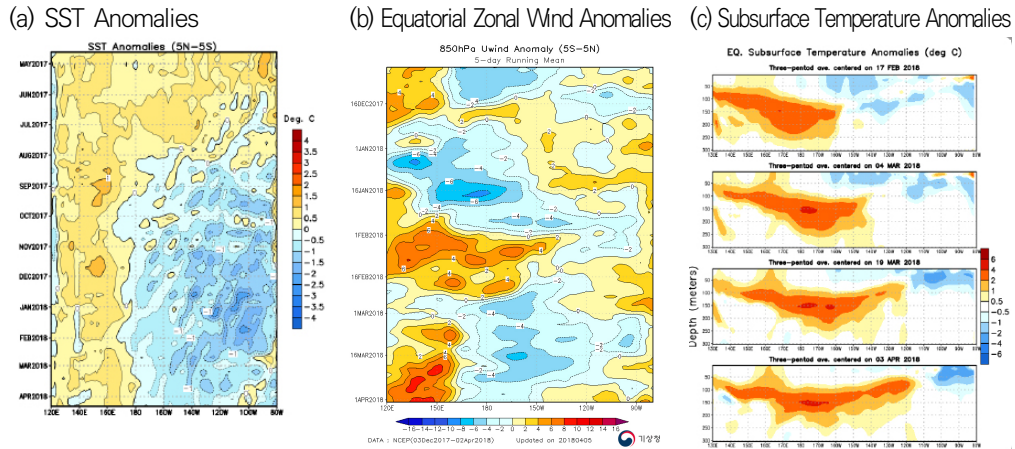


Figure 24. Evolution of Equatorial Pacific (a) SST anomalies, (b) 850 hPa zonal wind anomalies, and (c) subsurface temperature anomalies (taken from NOAA ENSO outlook, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWink/MJO/enso.shtml>).

3.4.3.2 대기 순환 특성

500hPa 상층 기압 패턴은 지표기온과 연관성이 매우 크다. 2018년 4월의 500hPa 지위고도의 고기압성 편차는 북미에서 유럽을 걸쳐 한반도 동부에 이르기까지 뚜렷하게 나타나며, 캐나다 동부에서 영국서부의 해양에는 저기압성 편차가 나타난다. 캄차카 반도 주변에서는 동시베리아의 저지 고기압(blocking high)과 연관된 저기압성 편차가 나타난다. 이상 고/저온은 상층고기압의 패턴과 유사하게 발생하였다.

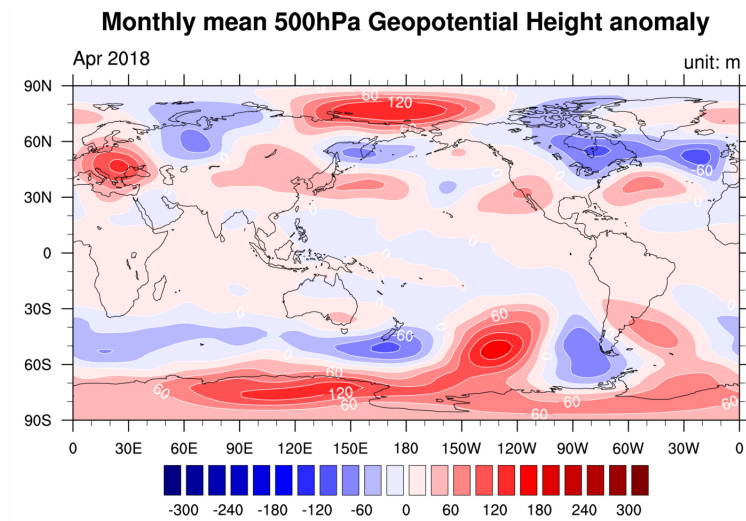


Figure 25. Spatial patterns of April mean Z500 anomalies in 2018.

3.4.4 지역별 이상 기후 원인 분석 토론

4월 하순의 북반구 눈덮힘(snow cover) 패턴은 대부분 평년 평균보다 많았다. 특히 북미와 캐나다 지역, 중국남부지역, 동중 유럽에서 서중 러시아, 몽골지역에 양의 편차를 보인다. 늦은 4월의 눈덮힘은 북반구 기후에 영향을 미친다(기상청 2016). 따라서 미국 중서부, 러시아 중서부 지역에는 낮은 기온을 유도하고, 미국 서부와 유럽 남부와 중국 북부에는 따뜻한 기온이 나타난다.

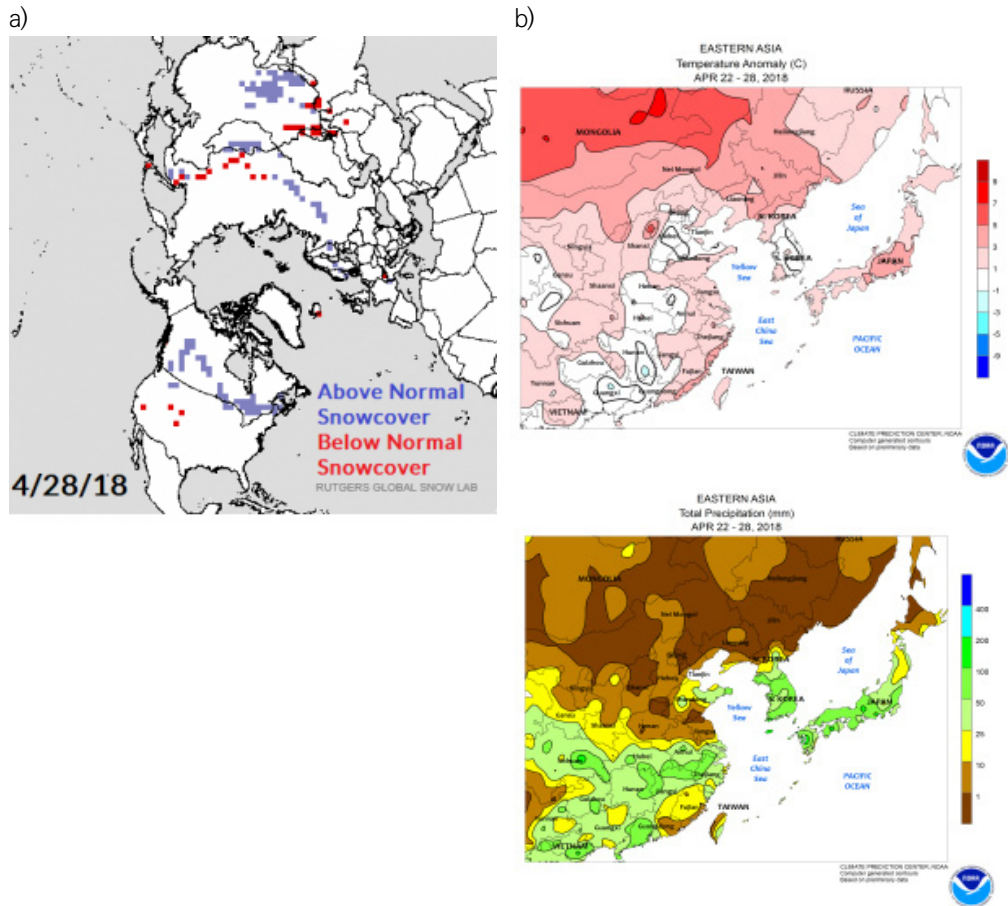


Figure 26. Spatial distribution of (a) snow cover anomaly of April 28, 2018, (b) Weekly mean temperature anomaly, and (c) Weekly mean precipitation anomaly from April 22 to April 28, 2018.

3.5 5월 이상 기후 모니터링

2018년 5월은 관측자료에 따르면, 대부분의 지역에서 평균기온의 증가 추세를 이어가면서, 평균이상의 평균기온을 유지하였다. 1880년 세계 기록이 시작된 이래 4번째로 높은 5월 기온을 보였다. 2018년 5월 기온은 평년 기후값 대비 0.80°C 높게 나타났다. 평균 기온 편차는 미국과 유럽 인접부근에서 약 3.0°C 를 넘었으며, 반대로 캐나다 북동부와 중부 러시아 전역에 걸쳐서 평균 기온이 -0.3°C 로 나타났다. 북아메리카, 유럽, 아시아 및 대서양, 태평양 및 인도양에서는 양의 편차가 관측되었으며, 그린란드의 남부 해안가에서 캐나다 북동부와 북 대서양에서는 음의 편차가 나타났다.

전형적으로 2018년 5월의 강수량 편차는 전세계적으로 다양하게 나타났다. 평년보다 건조한 상태를 보이는 곳은 미 서부, 북 멕시코, 동 브라질, 남 칠레, 포르투갈과 북동 유럽, 호주에서 나타났으며, 평년보다 많은 강수량은 미동부, 한반도를 포함한 동아시아 지역에서 나타났다.

3.5.1 5월 이상기온 및 강수 특성

500hPa 상층 기압 패턴은 지표기온과 연관성이 매우 크다. 2018년 5월의 GPH 500hPa의 고기압성 편차는 북미에서 북유럽을 걸쳐 한반도 북부, 북서태평양에 이르기 까지 뚜렷하게 나타나며, 아이슬란드와 시베리아에서는 저기압성 편차가 나타난다. 또한 알래스카 지역에서는 저기압성 편차가 나타난다. 이러한 고기압과 저기압 패턴은 양의 온도 편차와 음의 온도 편차 영역을 잘 반영하고 있다(Figure 27).

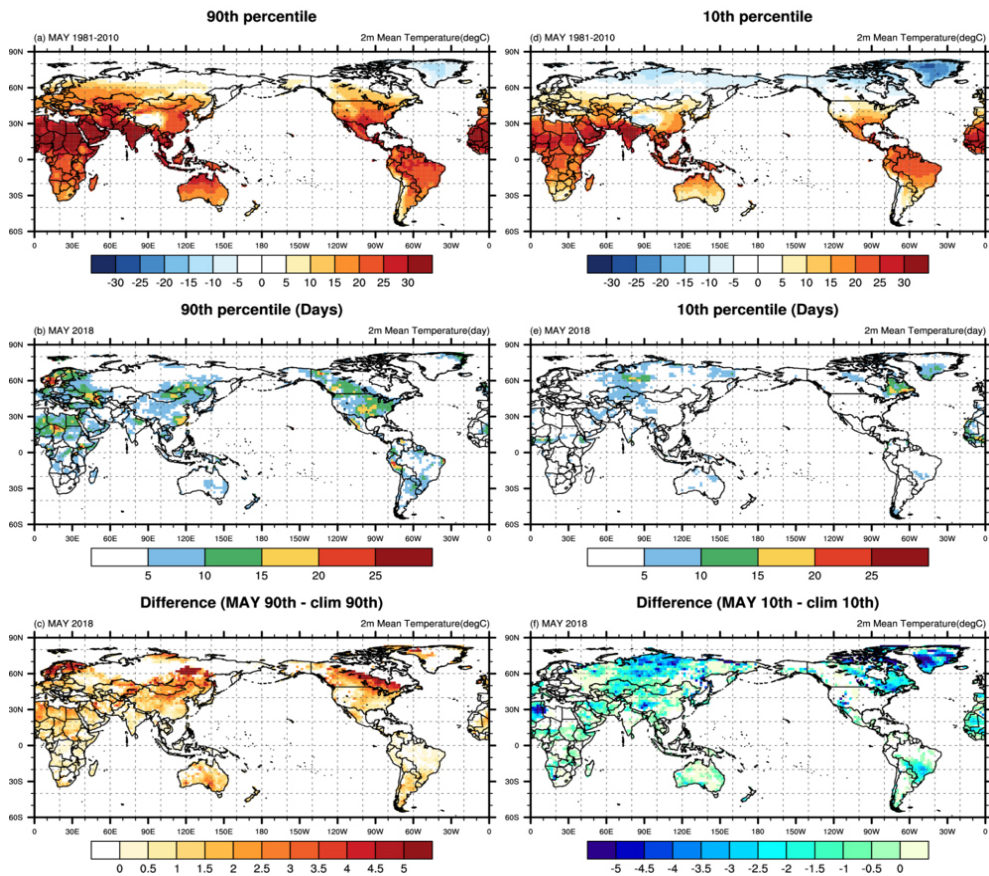


Figure 27. Same as Figure 2 except for May 2018.

2018년 5월의 평균온도는 미동부, 유럽 및 동아시아에서 평년보다 높았고 중시베리아, 캐나다 북부에서는 평년보다 낮았다. 이상 기온의 패턴은 평균기온 편차 패턴과 매우 유사하다. 따라서 2018년 5월의 이상 고온은 몽골 동부와 그 주변, 일본 중부지역, 중국 남동부지역에서 나타났으며, 또한 캐나다 남서부에서 미국 동부, 북유럽 지역에서 높은 기온편차가 나타났다. 이상 저온은 카리브 해, 서 시베리아, 동아프리카 북부와 벵골 만, 카자흐스탄과 러시아 중부에서 나타났다.

- 북미의 2018년 5월 기온(+1.74℃)은 1998년(+1.94℃) 이후로 2번째로 높았다.
- 스톡홀름은 1993년에 기록한 최고기온보다 2.2℃ 높은 온도로 가장 높은 최고기온을 기록했다.
- 호주의 평균기온은 0.19℃ 높았으며, 최고 기온이 높은 지역은 New South Wales(+1.31℃)이다. 또한 최저기온은 -0.49℃로 43번째 추운 날씨로 기록되었다. Cold front로 인해 호주 남동부지역에 평년보다 낮은 기온 나타났기 때문이다.

2018년 5월의 강수량 편차는 전세계적으로 상당히 다양하게 분포되어있다. 미국과 북부 멕시코, 칠레 동부 브라질 지역, 그리고 북부 및 동부 유럽지역에 걸쳐 강수량이 평년보다 적었으며, 미국 남부, 중부와 남미 남부와 중부 및 유럽 남동부, 터키, 아프리카, 동아시아 지역에서는 강수량이 많았으며, 특히 한반도와 일본지역에서 강수량이 많았다.

- 호주는 2018년 5월이 1900년 강수량 관측을 한 이래로 8.7mm로 3번째로 건조한 달이었다.
- 아르헨티나 북부 지역에서 많은 강수를 기록했으며, 특히 코르도바와 산타페 지역은 주변지역에 비해 가장 비가 많이 왔다.
- 2018년 5월 가뭄은 스웨덴 지역에 많은 영향을 미쳤다. 특히 Visby, Gotland는 1985년 관측이래로 5월에 가장 건조한 월로 기록되었으며, 평균 강수량은 1.7mm로 이전 기록(1866년 5월)보다 1.1mm 적었다.

대부분의 아태지역 국가 들에서 이상 강수 기준 값 이상 되는 날이 5일 미만 있었고,

인도차이나 반도와 브라질 북부지역은 약 20일 이상 이다. 2018년 5월 이상 강수는 전지구가 약 5일 미만으로 발생하였으며, 미국 동부지역과 남아메리카 대부분지역, 아프리카 중부와 한반도를 포함한 동아시아 지역에서 약 10일정도의 이상강수가 발생하였다. 이러한 이상 강수량은 기준치보다 약 10mm 높게 나타났다(Figure 28).

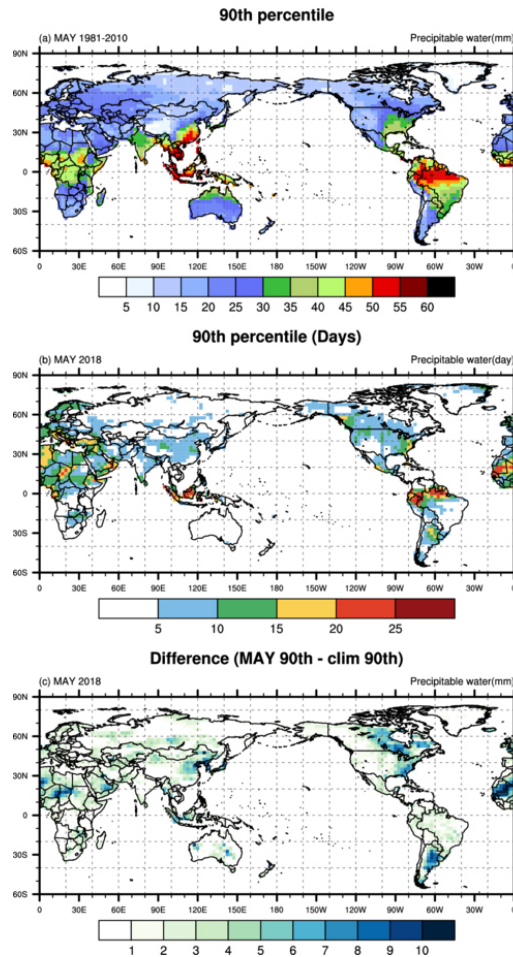


Figure 28. Same as Figure 3 except for May 2018.

3.5.2 5월 기온/강수 주변 특성

5월의 주변 기온의 변동성은 매우 크다. 5월 첫 주에는 아프리카 북동부와 지중해를 중심으로 강한 양의 편차를 보이며, 러시아에서 음의 편차를 보이며, 인도 북서쪽에 강한

양의 편차가 나타났다. 또한 미국 전역에 걸쳐서 강한 양의 편차를 보이고, 캐나다 북동부에서는 음의 편차가 우세했다. 북미의 이런 패턴은 5월 한달 내내 지속되었다. 5월 2주에는 아시아 북부 지역(몽골)을 중심으로 양의 편차가 우세했으며, 또한 서유럽에서 강한 양의 편차가 나타났다. 서유럽지역의 강한 양의 편차는 5월 4주까지 지속되었다(Figure 29).

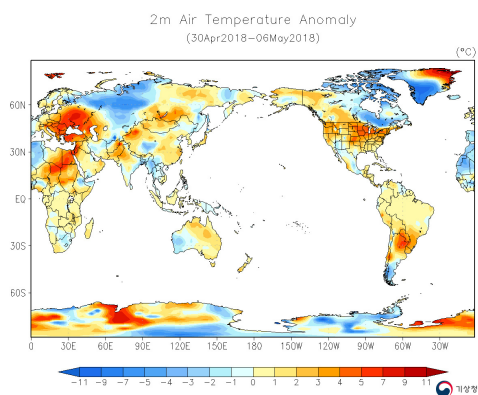
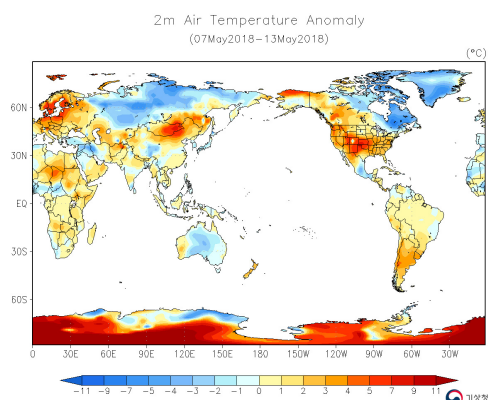
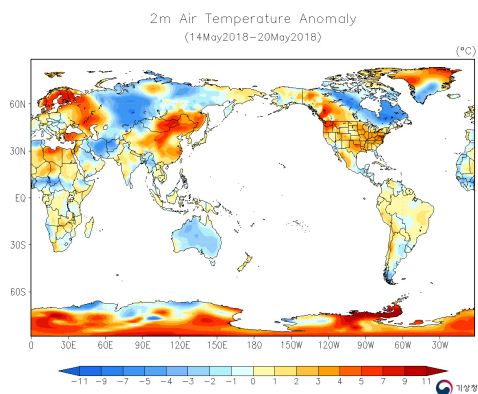
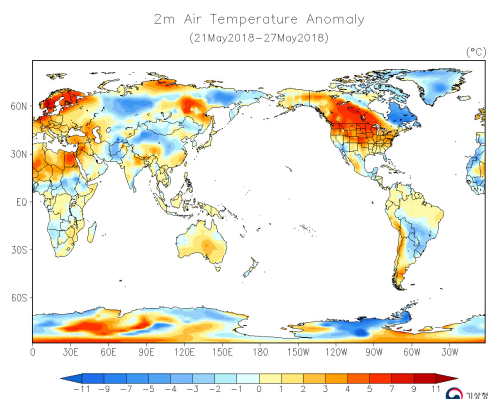
(a) 1st week(b) 2nd week(c) 3rd Week(d) 4th Week

Figure 29. Same as Figure 4 except for May, 2018.

5월 1주의 강수는 한반도와 중국 중남부, 인도까지 이르는 강수밴드에서 양의 편차를 보였으며, 중국북부와 몽골과 유럽 중부지역에서는 음의 강수 편차를 보였다. 미국 북동부와, 브라질, 아르헨티나 지역에서도 양의 강수편차를 보였다. 5월 2주에는 베트남과

라오스를 중심으로 강한 음의 강수 편차를 보였으며, 미국 대부분 지역에서도 강한 음의 강수 편차를 보였다. 5월 3주에는 중국 동부와 한반도, 일본 북부지역에서 양의 편차가 매우 우세하였다. 4주에는 유럽 남부지역에서 강한 양의 편차가 우세한 모습을 보였다 (Figure 30).

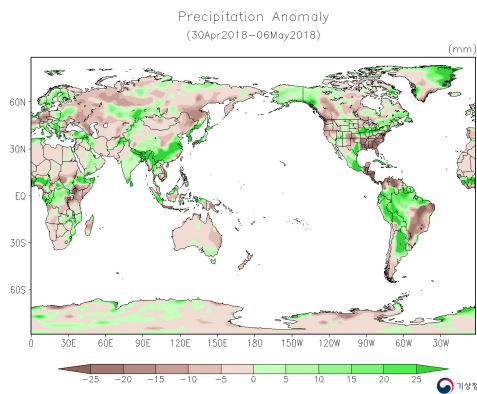
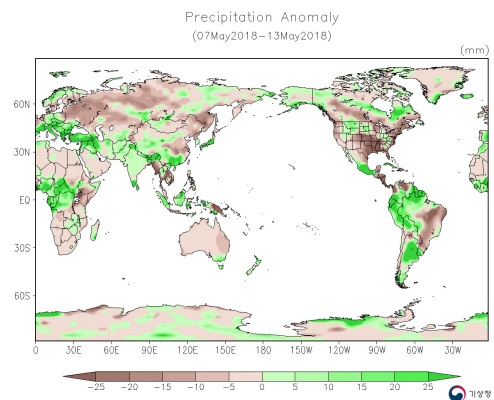
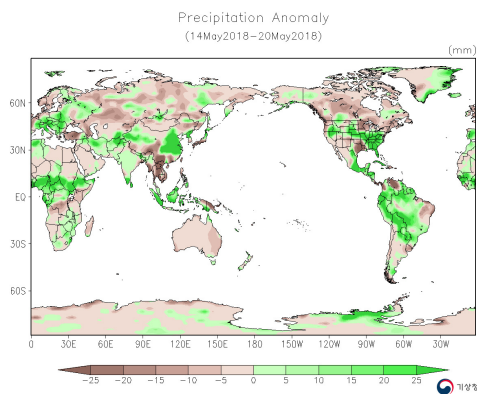
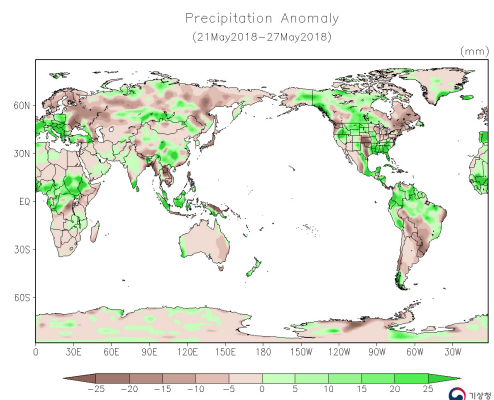
(a) 1st week(b) 2nd week(c) 3rd Week(d) 4th Week

Figure 30. Same as Figure 5 except for May, 2018.

3.5.3 대기/해양 순환장 특성

3.5.3.1 기후 변동 모드 특성

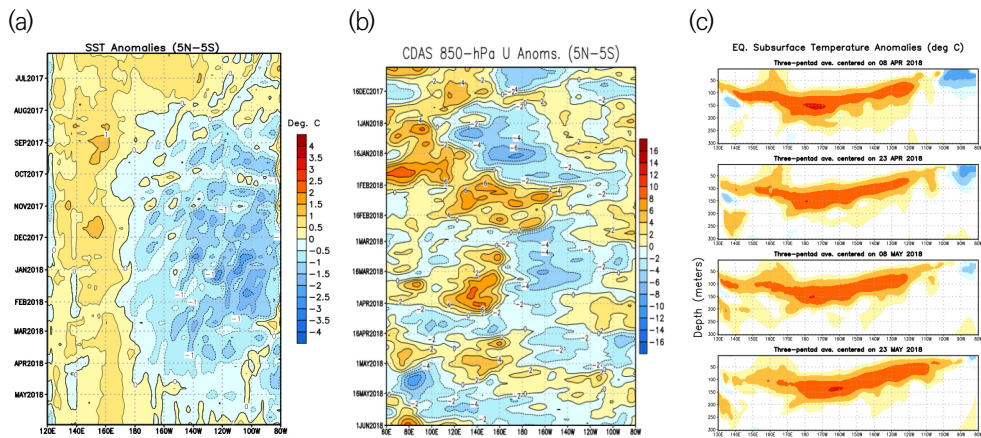


Figure 31. Evolution of Equatorial Pacific (a) SST anomalies, (b) 850 hPa zonal wind anomalies, and (c) subsurface temperature anomalies (taken from NOAA ENSO outlook).

지난 8월부터 음의 해수면 편차가 중/동 태평양에서 나타나고 있다. 5월 현재 Nino 3.4 지수는 -0.24°C 로 동태평양 부근에서 음의 해수면 온도 편차가 나타나지만 중립으로 진행되는 경향이 뚜렷이 나타나고 있다. 2018년 5월 초부터 SST는 대부분의 적도 태평양에 걸쳐 평균과 유사하다. 2018년 1월 중순까지 적도 중태평양에서는 동풍 편차가 나타나며, 2018년 2월말과 2018년 4~5월에 MJO는 하층바람의 동쪽으로 전파하는데 기여하였다. 5월 해저 수온을 보면 남미대륙에 접한 Nino2지역을 제외하고는 전반적으로 모두 양 편차값을 보이고 있으며, 해수면에서도 3월까지 약하게 존재했던 음의 편차가 사라졌다.

3.5.3.2 대기순환장 특성

500hPa 상층 기압 패턴은 지표기온과 연관성이 매우 크다. 2018년 5월의 GPH 500hPa의 고기압성 편차는 북대서양에서 유럽을 걸쳐 한반도 북동부에 이르기까지 뚜렷하게 나타나며, 캐나다 북부에서 영국 북서부의 해양에는 저기압성 편차가 나타난다. 이

상 고/저온은 상층고기압의 패턴과 유사하게 발생하였다.

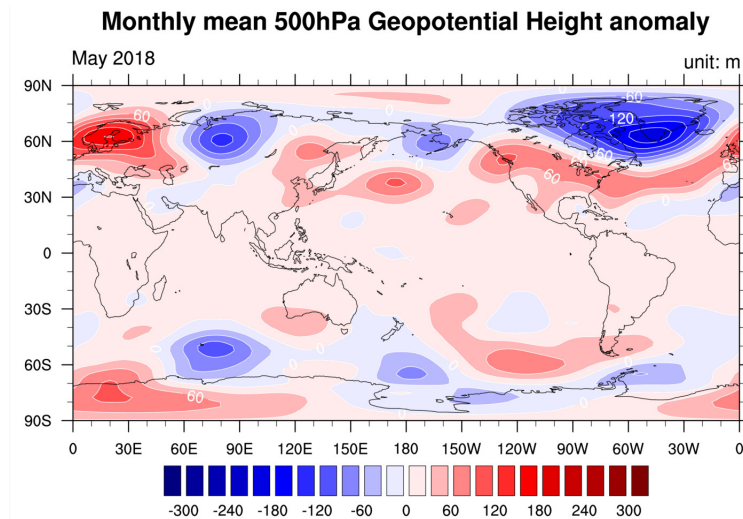


Figure 32. Same as Figure 25 except for May mean in 2018.

3.5.4 지역별 이상 기후 원인 분석 토론

5월 소말리아 희귀 열대성 사이클론이 발생하였다. 일주일 만에 서로 다른 저기압인 열대성 폭풍 “Sagar”와 사이클론 “Mekunu”가 각각 소말리아와 오만에 상륙했으며, 그 영향으로 이례적으로 많은 강수량을 기록하였다. 두 폭풍은 서 아라비아 해 지역에서 짧은 간격으로 형성되었으며, 아덴 만에서 각각 다른 방향으로 진행해 나갔다. 결과적으로 예멘과 동부 지부티의 남동쪽 연안에서 40-160mm, 서부 지역에서는 180mm의 강수량을 기록하였다. 또한 Mekunu는 오만지역에 하루 중 280mm의 폭우를 내렸다.

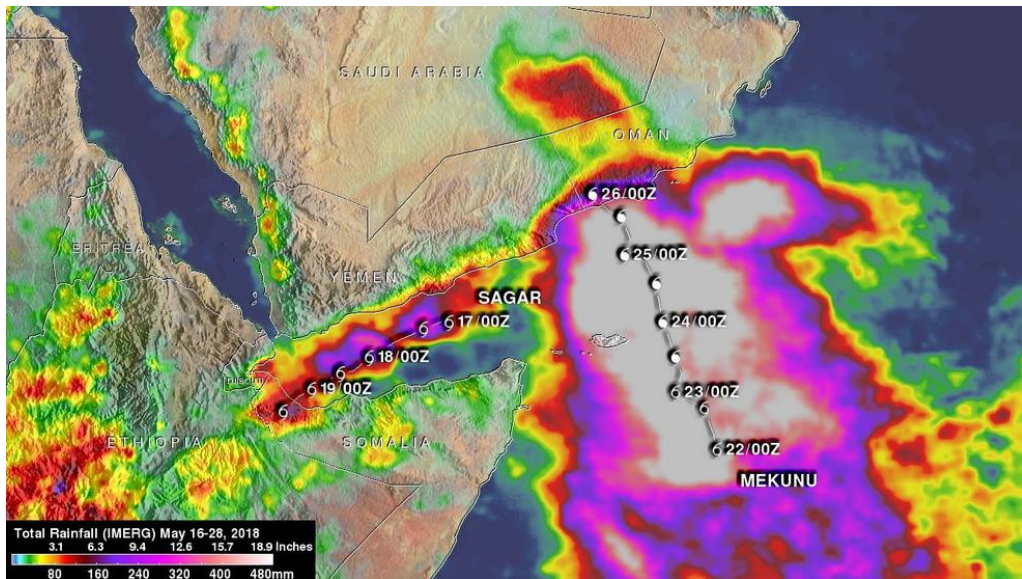


Figure 33. Total rainfall for the period May 16 to May 28, 2018 (source: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/sagar-indian-ocean>).

3.6 6월 이상 기후 모니터링

3.6.1 6월 이상기온 및 강수 특성

6월 한달 동안 이상 고온이 러시아 동북부지역에서 15-20일 이상 있었고, 더욱이 기온 값이 이상고온 기준 값보다 상당히 높았는데, 이상 고온 날들의 평균값은 기준 값보다 5°C 이상 높았다. 중국 중서부, 인도 북부, 사우디, 아프리카 북부 국가 들은 7-15일 이상 이상 고온이 있었으며, 그 평균값은 1.5°C 이하 였다. 북아메리카 지역에서는 캐나다 서부 지역에서 10일 이하, 미국 중남부 지역에서 15일 이하의 이상 고온의 날들이 있었고, 남아메리카 지역에서 브라질 서부 해안 지역에서 15일 이하의 이상 고온 값 이상의 날들이 있었다. 캐나다 서부 지역에서 이상고온은 기준값보다 평균 4°C 이상 높았다. 이상 저온의 날들은 러시아 서부와 동부 지역에서 약 5일 이상 있었고, 계절적으로 겨울인 남아프리카 나라들에서 이상 저온의 기준값보다 큰 날들이 10-15일 이상 있었다.

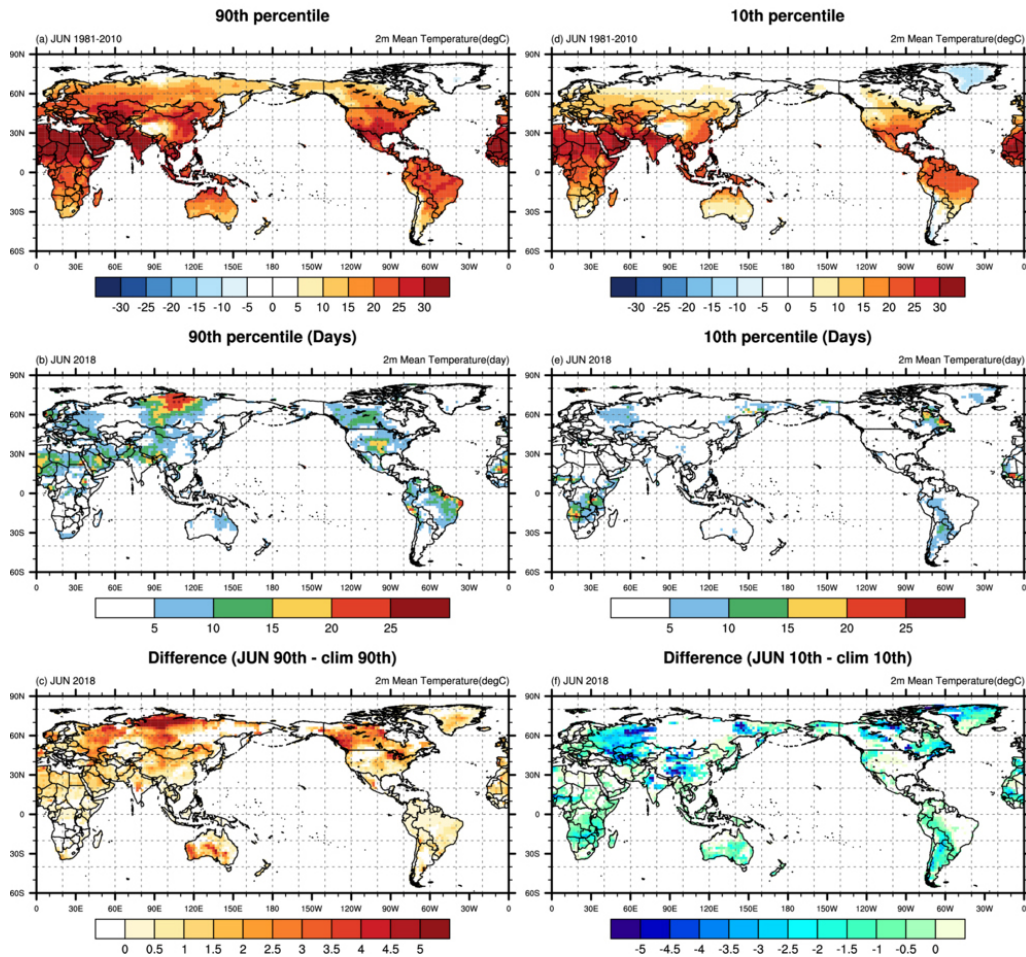


Figure 34. Same as Figure 2 except for June 2018.

캐나다 거의 전역, 러시아 중북부, 중국 서부 지역에서 5-10일 정도의 이상 강수가 발생했다. 이상 강수의 평균은 인도차이나, 중국 동부, 미국 동부 지역들을 포함하는 많은 지역에서 이상 강수 기준값 보다 그렇게 높지는 않았다. 북 아프리카 지역에서는 이상강수의 날이 다른 지역보다 특히 많았는데 10-15일 이상 이었다.

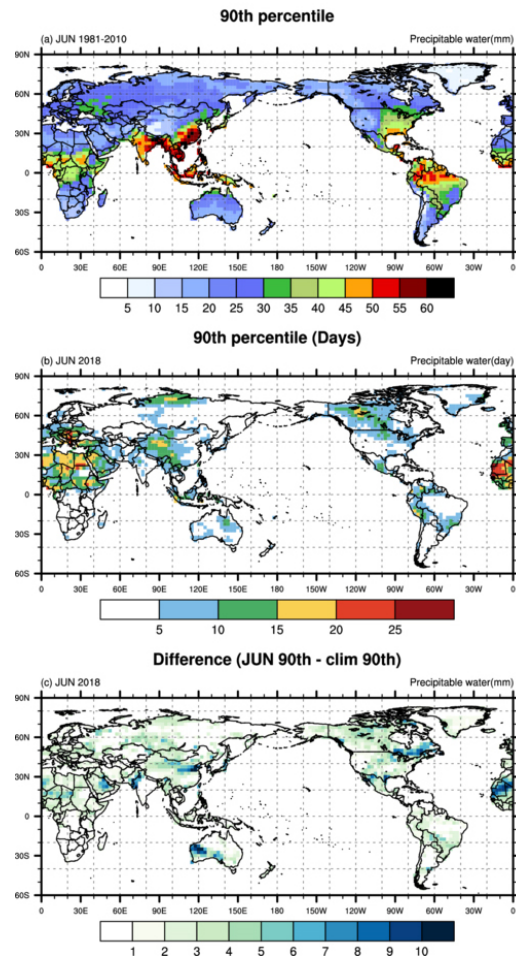


Figure 35. Same as Figure 3 except for June 2018.

3.6.2 6월 기온/강수 주별 특성

러시아 중부지역에서 양의 기온 편차가 지속적으로 증가하였고, 러시아 서부지역에서 음의 편차가 감소하고 4주째 양의 편차가 발달하였다. 러시아의 동쪽에 음의 기온 편차는 4주 내내 유지되었다. 동아시아 지역에서는 눈에 띄는 변동은 관측되지 않았으며, 호주의 동북부 지역에서 음과 양의 기온 편차가 일주간격으로 반복되어 나타났다. 캐나다의 서부 지역에서 6월 1주에 양의 기온 편차가 나타났고 점차 서부 지역으로 양의 편차가 확장하였으며, 3주째 그 값이 대폭 증가하였다. 미국은 전지역이 6월 동안 양의 기온 편차가 우세 하였으며, 특히 2주동안 중부 지역에서 강한 양의 편차가 나타났다(Figure 36).

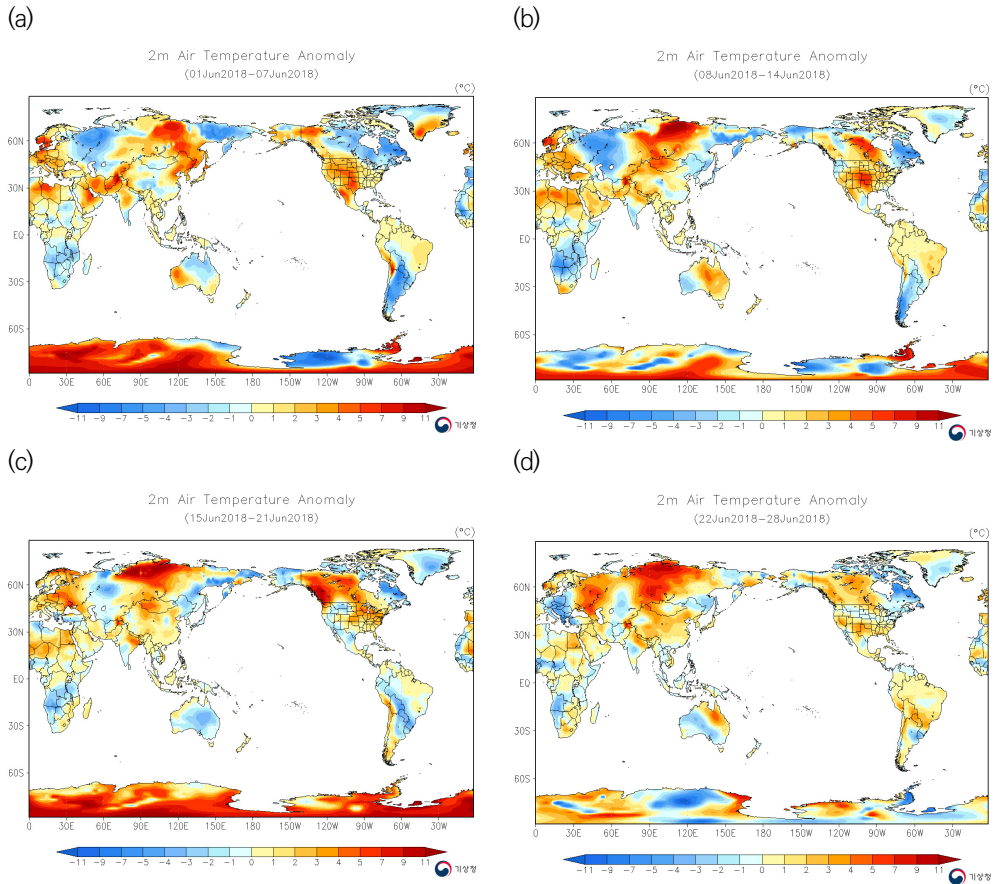


Figure 36. Same as Figure 4 except for June, 2018.

6월 강수는 동아시아 지역에서 대체로 3주까지 음의 강수 편차를 보였고, 4주에 양의 강수 편차가 나타났다. 호주는 1주에 퍼스 지역에서 강한 양의 강수 편차가 있었던 것을 제외하고, 대체로 강수가 적었다. 페루와 칠레에서 1, 2, 4주에 양의 강수 편차가 있었다. 캐나다 서부, 미국 동부 지역은 6월 내내 평년 보다 강수가 많았으며, 미국 서부 지역은 평년대비 강수가 적었다(Figure 37).

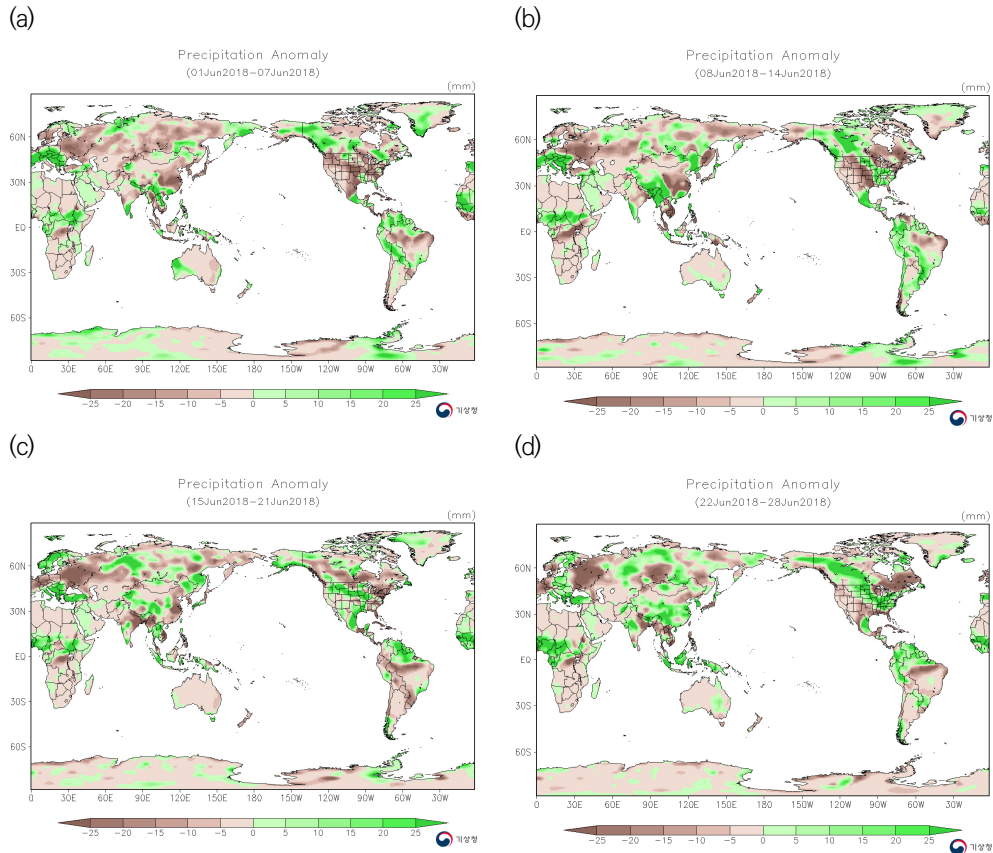


Figure 37. Same as Figure 5 except for June, 2018.

3.6.3 대기/해양 순환장 특성

3.6.3.1 기후 변동 모드 특성

6월 초부터 양의 SST 편차가 적도 태평양 전역을 걸쳐서 나타났으며, 특히 6월 평균 Nino 3.4 지수는 0.13°C 이었다(Figure 38 (a), (c)). 2018년 1월 중순, 3월 중순 4월 중순, 6월 초까지 서인도양에서부터 동태평양으로 전파되는 서풍 편차가 뚜렷하였으며(Figure 38 (b)), 이는 동/중앙 적도 SST 편차 증가에 영향을 미친 것으로 사료된다. 남인도양은 수온이 평년보다 높았고, 북인도양은 수온이 평년보다 다소 낮았으며, 북대서양에서는 남북방향의 tripole 해수면 온도 편차 구조를 보였다(Figure 38 (c)). AO지수는 거의 중립 수준이었다(Figure 38 (d)).

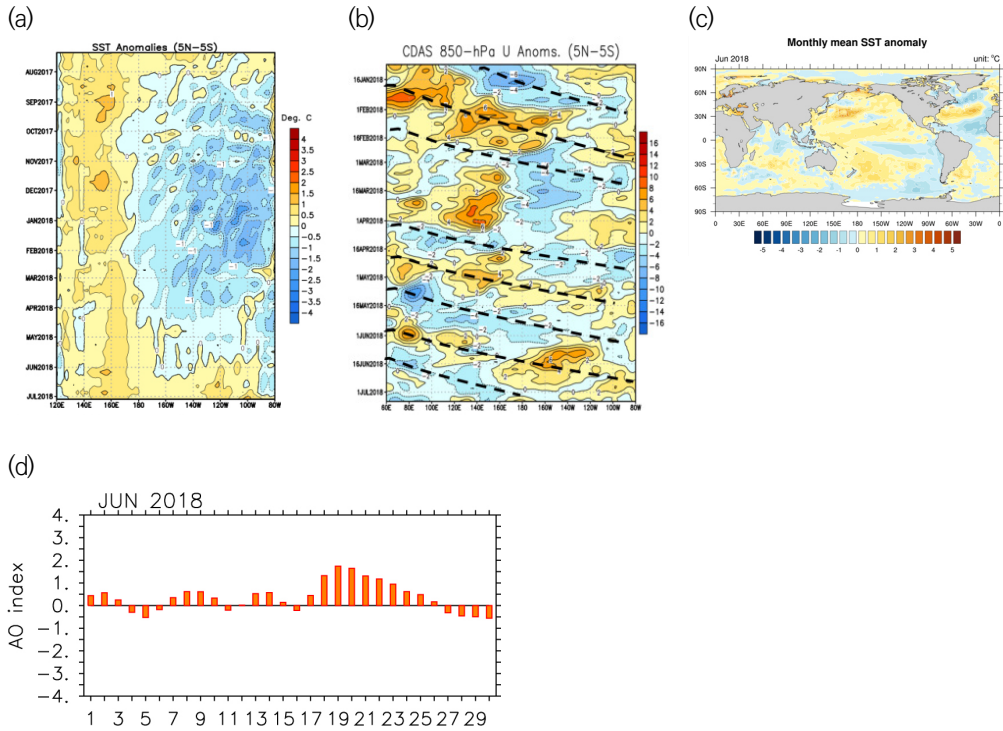


Figure 38. Evolution of Equatorial (a) SST anomalies (120°E–80°W) and (b) zonal wind anomalies (80°E–80°W) averaged over 5°N–5°S (taken from NOAA ENSO outlook). (c) Spatial distribution of global SST anomalies and (d) time series of AO index for June 2018.

3.6.3.2 대기순환장 특성

가장 특징적인 대기 순환장은 구조는 북대서양에서 동쪽으로 wave-like 구조를 보이고 있다는 것이다. 즉 북대서양에서 시작하여 양과 음의 지위고도 편차가 반복되었다. 특히 우랄 지역에서 음의 지위고도, 중앙 러시아에서 양의 지위고도가 뚜렷하게 나타났다. 그리고 태평양에서는 동중국해에서 약한 음의 지위고도 편차가 일본 동쪽으로 양의 지위고도 편차를 보였다. 중위도에서 해수면 기압 편차는 앞선 지위고도 편차 분포와 일관된 분포를 보였다. 열대지역에서는 엘니뇨 발달의 영향으로 해수면 기압 편차가 서태평양에서 증가하였고, 인도양에서 양의 SLP 편차가 티벳 고원 근처에서 음의 SLP 편차가 있었다(Figure 39).

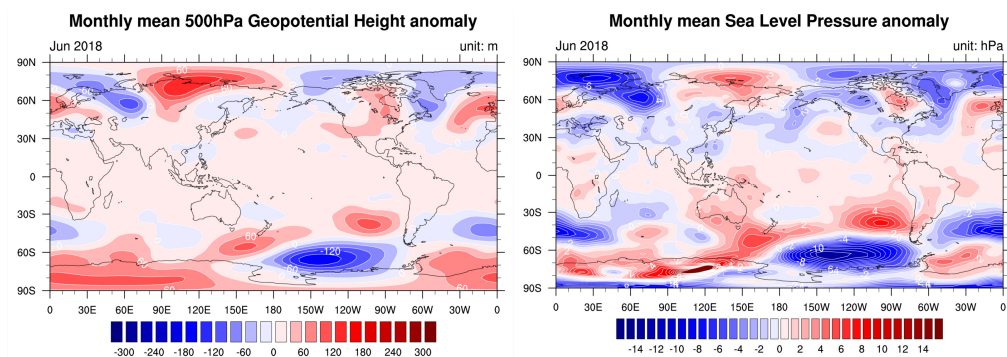


Figure 39. Same as Figure 7 except for June mean in 2018.

3.6.4 지역별 이상 기후 원인 분석 토론

6월에 발생한 이상 기후 현상 중 특히 현저했던 것은 러시아 중부지역에서 거의 한달 동안 유지된 이상 고온 현상이다. 이는 이 지역 에서 강하게 발달한 양의 지위고도 편차와 관계된 것으로 보인다. 전체적으로 북반구 이상고온/저온의 날들이 많았던 지역들과 Figure 39에서 양의 혹은 음의 지위고도 편차가 발생한 위치와 거의 일치하며, 이는 북대서양에서 동쪽으로 확장되는 wave-like 패턴 발생원인을 분석을 하는 것이 필요하다는 것을 말해준다. 중위도 여름철 기후에 대한 대서양의 영향을 보여주는 최근 연구들(예, Johnson et al. 2018)이 있으며, 또한 대서양에서 봄철부터 남북방향의 tripole 해수면 편차 패턴을 현저하게 유지하고 있는데, 이와 관련한 원격상관 연구가 필요할 것으로 사료된다.

남아시아 및 동아시아에서 이상 강수는 Figure 39의 6월 평균 SLP 편차분포를 보면 알 수 있듯이 일부 몬순 지역 즉 아프리카와 인도, 그리고 동아시아에서 강화된 몬순 순환과 관련이 있다고 볼 수 있겠다. 특히 인도 몬순의 강화는 인도양의 음의 해수면 온도 편차와 일부 관계가 있는 것으로 보인다.

3.7 7월 이상 기후 모니터링

2018년 7월은 관측자료에 따르면, 대부분의 지역에서 평균기온의 증가 추세를 이어가면서, 평균이상의 기온을 유지하였다. 7월 전지구 평균 기온은 평년(15.8℃)보다 0.75℃ 높았으며, 1880년 관측 이래로 4번째 높은 기온을 기록하였다. 2018년 7월은 전 지구 육지와 해양에서 평균이상의 기온을 기록하였다. 평균 이상의 기온은 북반구에서 가장 뚜렷하게 나타났으며, 특히 미 서부, 캐나다 동부, 아프리카 북부, 동아시아, 그리고 유럽과 서아시아 지역에서는 평균보다 2.0℃ 높았다. 평년 보다 낮은 기온은 러시아 중부와 서부, 캐나다 북부, 남아메리카 남부의 일부 지역에서만 나타났다.

2018년 7월 강수량은 캐나다, 멕시코, 미국 중서부, 유럽, 러시아, 아시아 지역에서 평균 보다 적은 양의 강수를 기록하였다. 평년 보다 많은 강수량을 기록한 지역은 미국 동부, 아르헨티나 북부, 몽골, 인도와 일본에서 나타났다.

3.7.1 7월 이상기온 및 강수 특성

2018년 7월 이상기온은 평균기온 분포와 매우 유사하다. 북반구 대부분의 지역에서 평년보다 높은 기온을 보였으며, 또한 강한 열파(heat wave)가 곳곳에서 발생하였다 (Figure 40).

- 캐나다의 Ontario지역에서는 평년보다 4.0℃ 높은 기온을 기록했으며, Ontario지역의 Cornwall과 Kapuskasing에서는 가장 높은 기온을 기록하였다.
- 미국은 1998년과 같이 11번째로 높은 기온을 기록하였다.
- 7월 중순 Scandinavia 반도지역의 최고 기온은 30℃ 이상을 기록하였으며, 노르웨이인 Badu Foss 지역에서 33.5℃의 최고기온을 기록하였다. 노르웨이 전체 평균 기온은 평년보다 4.3℃ 높았으며, 이 기록은 1900년 관측이래로 가장 뜨거운 7월이며, 2014년 7월과 같은 값이다. 또한 핀란드도 33.4℃ 이상을 기록하였다.
- 한반도에서는 두번째로 높은 평균기온과 최고기온을 기록하였으며, 35℃ 이상의 기온을 기록하였다. 특히 의성에서는 39.9℃로 7월 한달동안 가장 높은 기온을 기록하였다.

- 일본도 7월 중순에 폭염의 영향이 매우 컸다. 7월 15일에는 최고기온이 35.0℃까지 도달했으며, 몇몇 관측지점에서는 새로운 기록을 세웠다. Kumagaya에서는 관측 이래 최고기온인 41.1℃를 온도가 관측되었다.

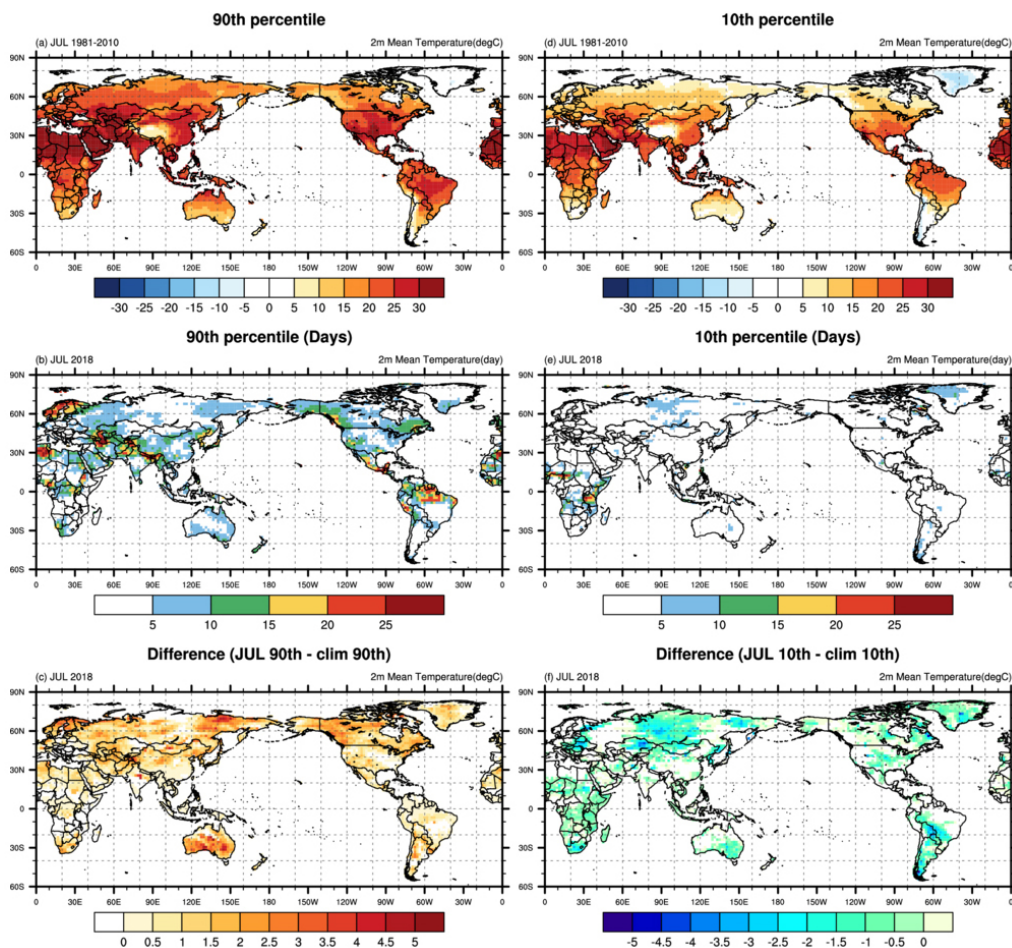


Figure 40. Same as Figure 2 except for July 2018.

전형적으로 2018년 7월의 강수량 편차는 전세계적으로 상당히 다양하게 분포되어있다. 미국과 북부 멕시코, 칠레 동부 브라질 지역, 그리고 북부 및 동부 유럽지역에 걸쳐 강수량이 평년보다 적었으며, 미국 남부, 중부와 남미 남부와 중부 및 유럽 남동부, 터키, 아프리카, 동아시아 지역에서는 강수량이 많았으며, 특히 한반도와 일본지역에서 강수량

이 많았다(Figure 41). 대부분의 아태지역 국가 들에서 이상 강수 기준 값 이상 되는 날이 5일 미만 있었고, 인도차이나 반도와 브라질 북부지역은 약 20일 이상이다. 2018년 7월 이상 강수는 전지구가 약 5일 미만으로 발생하였으며, 미국 동부지역과 남아메리카 대부분지역, 아프리카 중부와 한반도를 포함한 동아시아 지역에서 약 10일 정도의 이상강수가 발생하였다. 이러한 이상강수량은 기준치보다 약 4-5mm 높게 나타났다.

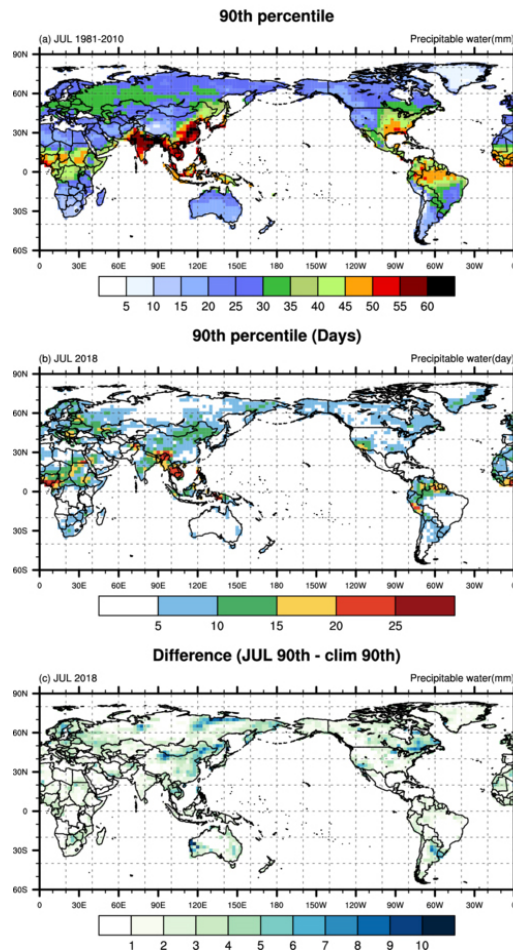


Figure 41. Same as Figure 3 except for July 2018.

- 호주는 2018년 7월이 1900년 강수량 관측을 한 이래로 8.7mm로 3번째로 건조한 달이었다.

- 아르헨티나 북부 지역에서 많은 강수를 기록했으며, 특히 코르도바와 산타페 지역은 주변지역에 비해 가장 비가 많이 왔다.
- 2018년 7월 가뭄은 스웨덴 지역에 많은 영향을 미쳤다. 특히 Visby, Gotland는 1985년 관측 이래로 7월에 가장 건조한 월로 기록되었으며, 평균 강수량은 1.7mm로 이전 기록(1866년 5월)보다 1.1mm 적었다.

3.7.2 7월 기온/강수 주별 특성

2018년 7월의 주별 기온의 변동성은 매우 크다. 7월 첫 주에는 아프리카 북동부와 지중해를 중심으로 강한 양의 편차를 보이며, 러시아에서 음의 편차를 보이며, 인도 북서쪽에 강한 양의 편차가 나타났다. 또한 동시베리아를 중심으로 알래스카까지 강한 양의 편차를 보이고, 캐나다 북동부에서는 음의 편차가 약간 우세하게 나타난다. 7월 2째주에는 유럽전지역과 인도 북부 지역에서 양의 편차를 보였으며, 이러한 패턴은 7월 말까지 유지되었다. 특히 노르웨이 지역에서 강한 양의 편차가 나타났다. 7월 3주에는 동아시아 지역에서 양의 편차가 나타났으며, 이러한 현상은 7월말까지 유지되면서 한반도와 일본은 극심한 폭염이 나타났다(Figure 42).

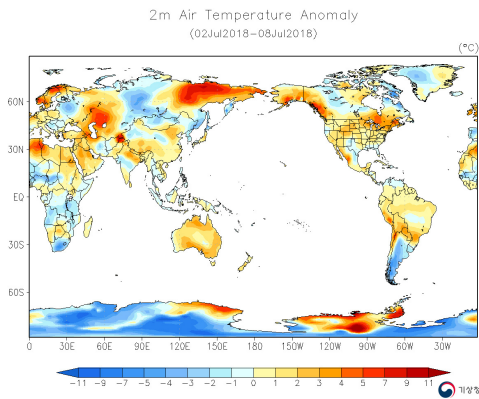
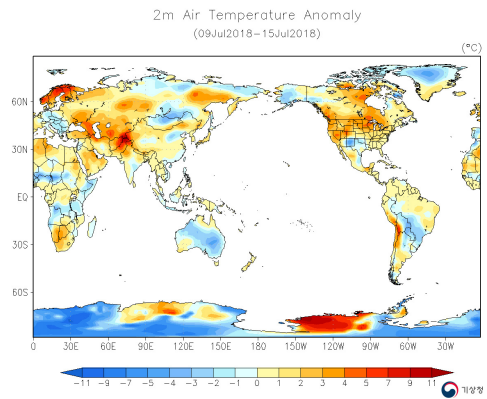
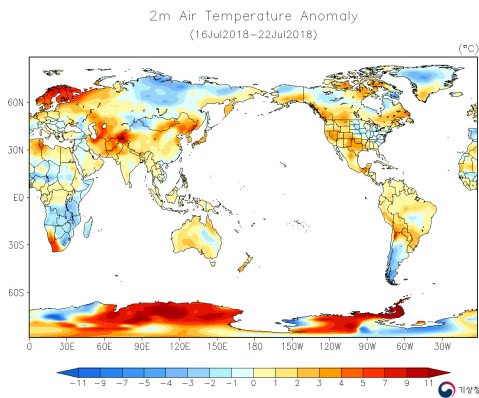
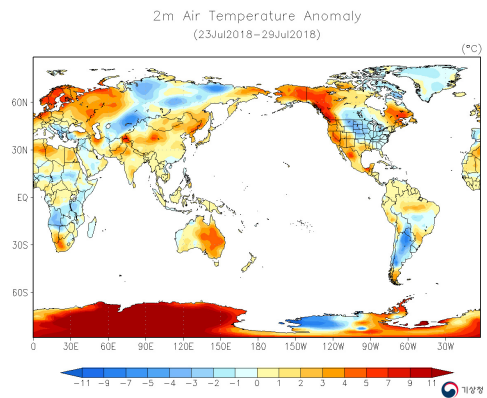
(a) 1st week(b) 2nd week(c) 3rd Week(d) 4th Week

Figure 42. Same as Figure 4 except for July, 2018.

2018년 7월 1주의 강수는 중국 중남부, 미국 동남부, 아프리카 중부지역에서 양의 편차를 보였으며, 중국북부와 유럽 북부지역에서는 음의 강수 편차를 보였다. 7월 2주에는 노르웨이와 러시아 중부지역, 캄차카 반도에서 강수량이 평년보다 적었다. 3주에는 시베리아 전역과 한반도, 일본을 포함한 동아시아 지역에서 강한 음의 편차를 나타냈으며, 이러한 패턴은 7월 마지막주까지 지속되었다. 4주에는 유럽 동부지역과 미국 중남부 지역에서 강한 양의 편차가 우세한 모습을 보였다(Figure 43).

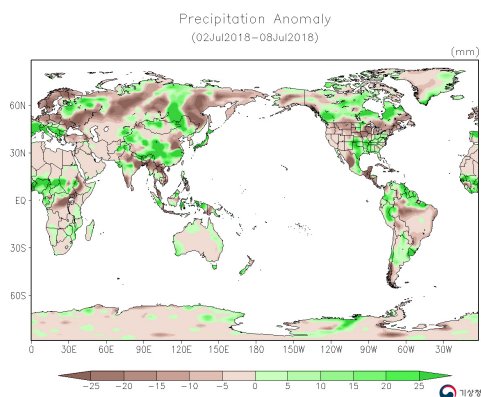
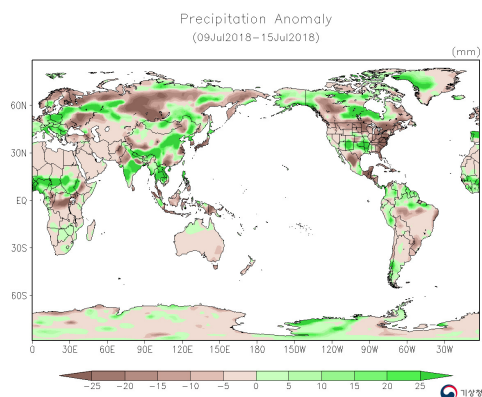
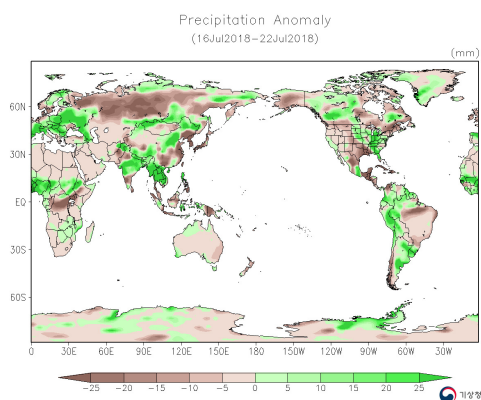
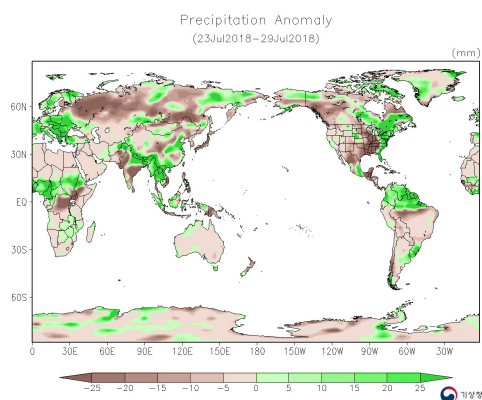
(a) 1st week(b) 2nd week(c) 3rd Week(d) 4th Week

Figure 43. Same as Figure 5 except for July, 2018.

3.7.3 대기/해양 순환장 특성

3.7.3.1 기후 변동 모드 특성

약한 양의 편차를 유지하고 있던 열대 중동태평양의 해수면온도가 7월에는 소폭 감소하며 엘니뇨 중립상태가 지속되고 있다. NINO12 지역에서는 음의 편차가 나타나고 있는 반면 북태평양 북위 30도 선에서 양의 편차가 관측되었다. 열대 서태평양에서 고온이 지속되고 있으며 대류활동 또한 활발히 나타나고 있다. 열대 인도양과 열대 대서양에서는 약한 양의 편차가 나타나고 있으며 북대서양 중앙에는 음의 편차가, 유럽과 아프리카와 마주하는 동편에서는 양의 편차가 나타난다. 지난 4월 중반부터 양의 해수면 편차가 중/

동 태평양에서 나타났다가 7월에 다소 감소하여 7월말 현재 Nino 3.4 지수는 0.3°C (Figure 44 (a))이고, 지난 6월 이후 동태평양에서는 서풍 편차 지속되고 서태평양에서는 동풍편차가 지속되며 7월중순부터 적도 태평양 전역으로 서풍편차가 우세해지고 있다 (Figure 44 (b)).

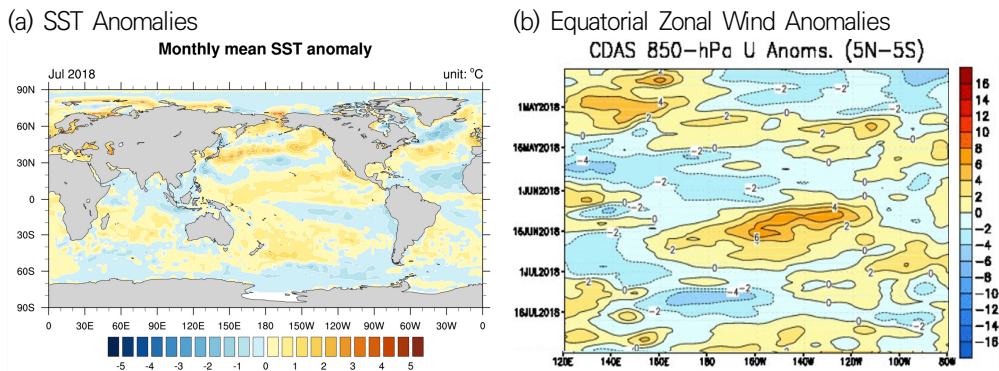


Figure 44. (a) Spatial distribution of SST anomaly and (b) Evolution of Equatorial zonal wind anomalies (80°E – 80°W) averaged over 5°N – 5°S (taken from NOAA ENSO outlook).

3.7.3.2 대기순환장 특성

500hPa 상층 기압 패턴은 지표기온과 연관성이 매우 크다. 세계 여러 지역에서 극도로 높은 기온은 지구 온난화 뿐만 아니라 상층 고기압이 평년보다 강화되어 대류권 대기온도가 평년보다 높았기 때문이다(Figure 45). 또한 극 제트기류와 아열대 제트가 북쪽으로 이동하면서, 사행이 커졌기 때문이다.

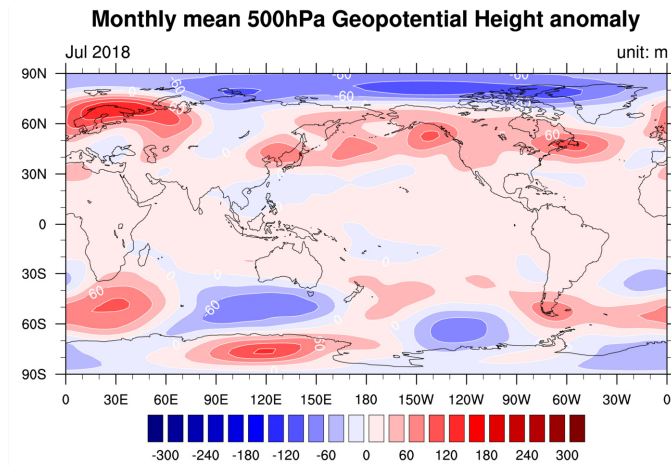


Figure 45. Same as Figure 25 except for July mean in 2018.

3.7.4 지역별 이상 기후 원인 분석 토론

일본 지역은 7월초에 상당한 강수량을 기록했다. 집중호우로 인해 많은 피해가 발생하였으며, 7월 중순부터는 한반도와 일본 전역에 걸쳐 극도로 높은 온도가 지속되었다. 따라서 7월 중순부터 발생한 폭염에 기여한 것으로 간주되는 대기 및 해양조건에 대해 간략하게 요약하였다. 2018년 7월 초순의 강수는 North Pacific Subtropical High(NPSH)의 발달로 인해 장마전선이 북쪽으로 이동되면서 종료되었다. NPSH의 발달로 인하여 한반도와 일본 전지역의 기온이 평년보다 훨씬 높게 나타났다. 일본 동부지역에서는 월평균 기온 편차가 2.8°C 로 1946년 이후 7월에 가장 높았다. 또한 한반도는 7월 전국 평균 기온은 26.8°C 로 평년보다 2.3°C 높아 매우 높은 온도를 기록하였다. 북극에 음의 지위고도, 중위도에 양의 지위고도가 나타나는 양의 북극진동 패턴이 나타나고, 상층 제트류의 양화 및 북상되면서 대기 흐름이 느려지고 정체하고 있었다(Figure 46 (a)). 열대와 아열대 서태평양에서 대류활동이 활발하면서 보상하강 운동으로 중위도 지역에 하강기류가 발달하면서 NPSH가 더욱 확장하였다(Figure 46 (b)).

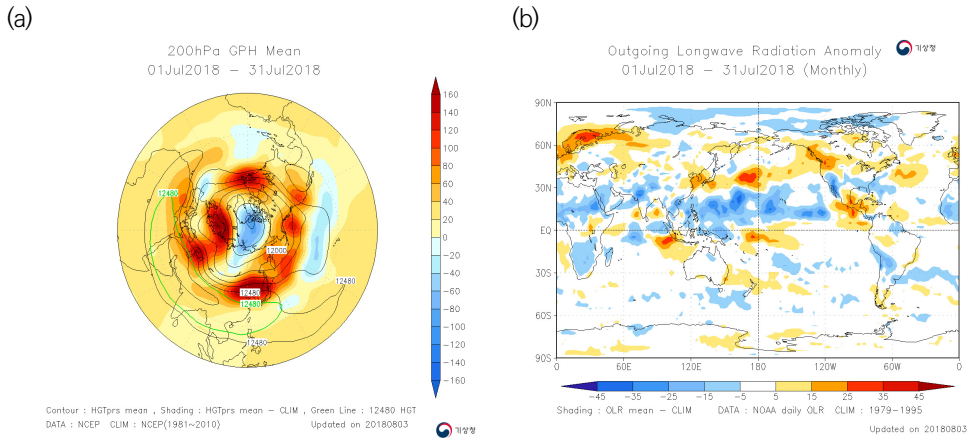


Figure 46. Spatial distribution of (a) 200 hPa GPH anomalies, and (b) Outgoing Longwave Radiation anomalies for July, 2018.

3.8 8월 이상 기후 모니터링

2018년 8월은 전세계 육지와 해양의 대부분 지역에서 평균기온보다 더 따뜻한 기후 특성을 나타냈다. 평균기온은 바렌츠 해와 서태평양지역에서 뚜렷하게 상승하였으며, 아프리카, 아시아, 유럽 및 북미 전역에서도 상승하였다. 반대로, 평균보다 낮은 온도를 기록한 곳은 캐나다 북부와 남미 전역이며 기온은 약 1.5℃ 정도이다.

전체적으로 2018년 8월의 전지구 평균 기온은 평균기온 보다 0.74℃ 높았으며, 1880년 관측 이래로 15번째 높은 온도이다. 2018년 8월 전지구 육지 평균은 평균 기온 13.8℃ 보다 0.94℃ 높은 기온을 보였으며, 139년 관측자료 이래로 6번째로 높은 기온을 기록했다. 2018년 8월 강수량 편차는 전 세계에서 다양하게 나타났다. 8월 강수량은 일반적으로 미국, 캐나다 남부, 서부 알래스카, 남미, 호주, 중부유럽, 북부 및 남부 아시아의 서쪽에 걸쳐 더 건조하게 나타났다. 반대로 동아시아 북부, 캐나다 동부 지역에서 평균이상의 강수량을 보였다.

3.8.1 8월 이상기온 및 강수 특성

2018년 8월 이상기온은 평균기온 분포와 매우 유사하다. 북반구 중위도에서 90퍼센

타일 값은 약 20℃ 이상이며, 열대지역에서는 30℃ 이상의 기온분포를 보인다. 북반구 대부분의 지역에서 평년보다 높은 기온을 보였으며, 특히 인도 북부 지역에서는 20일 이상의 고온현상이 발생하였으며, 한반도에서도 15일 이상의 고온현상이 발생하였다. 이상 저온은 호주 서부에서 5-10일 발생하였으며, 캐나다 동북부에서 약 10일 발생하였다. 한반도와 한반도 북부지역에서는 평년보다 약 4도 이상의 높은 기온을 기록했으며, 알래스카와 호주 남중부지역에서도 약 5도 이상의 높은 기온을 보였다.

- 2018년 8월 유럽은 평년보다 2.40℃ 높은 기온을 기록하였다. 이 값은 2015년에 0.12℃를 초과하는 값이다. 평균기온 편차가 2.0℃를 넘은 해는 최근 2003(2.17℃), 2015(2.28℃), 그리고 2018년이다.
- 뉴질랜드는 1981~2010년 평균보다 약 1℃ 높은 기온을 보여, 9번째로 높은 기온을 기록하였다.
- 한반도는 2018년 8월 평균기온이 평년대비 2.2℃(27℃) 높았으며, 한반도에서 가장 더운 8월을 기록하였다. 또한 한반도 평균 최고기온은 32.2℃로 2번째로 높은 기온을 보였으며, 한반도 대부분의 지역에서 최고기온을 경신하였다. 특히 서울에서는 39.6℃의 월 최고기온을 기록되어 111년 관측사상 가장 높은 값을 나타냈다.
- 반면, 아르헨티나 북부 지역에서는 평년보다 추운 낮은 기온을 보였으나, 남부지역은 평년보다 따뜻한 기온을 보였다. 아르헨티나 전체 평균은 평년보다 0.4℃ 낮은 기온을 보였다.

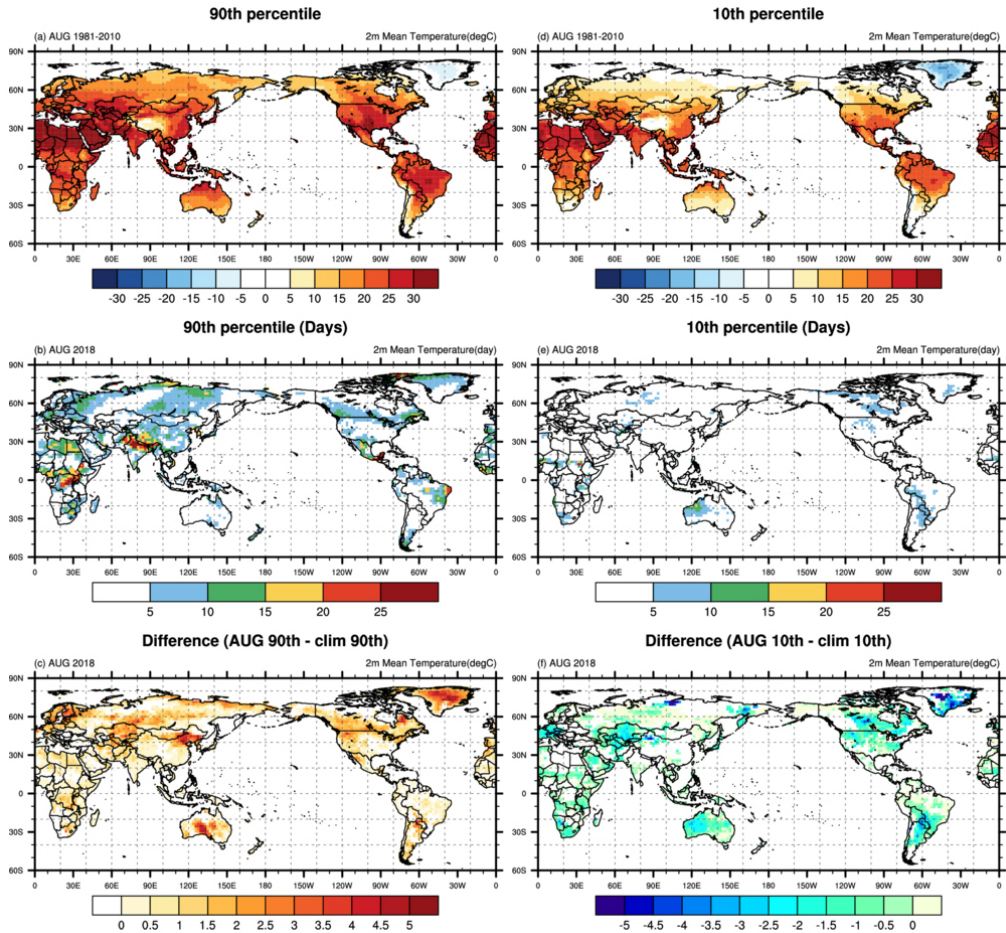


Figure 47. Same as Figure 2 except for August, 2018.

한반도를 포함한 동아시아, 남아시아 지역의 90퍼센타일의 강수량은 약 50mm 이상이며, 대부분의 북반구 중위도는 약 25mm이다. 이상 강수는 아프리카 북부에서 약 20일 이상 발생하였으며, 또한 파키스탄과 동남아시아 지역에서 10일 이상의 일수가 발생하였다. 그러나 이상강수의 양은 빈도수가 상대적으로 적은 중국 북동부 지역과 몽골 남부 지역에서 7mm 이상 더 많은 양을 기록하였다.

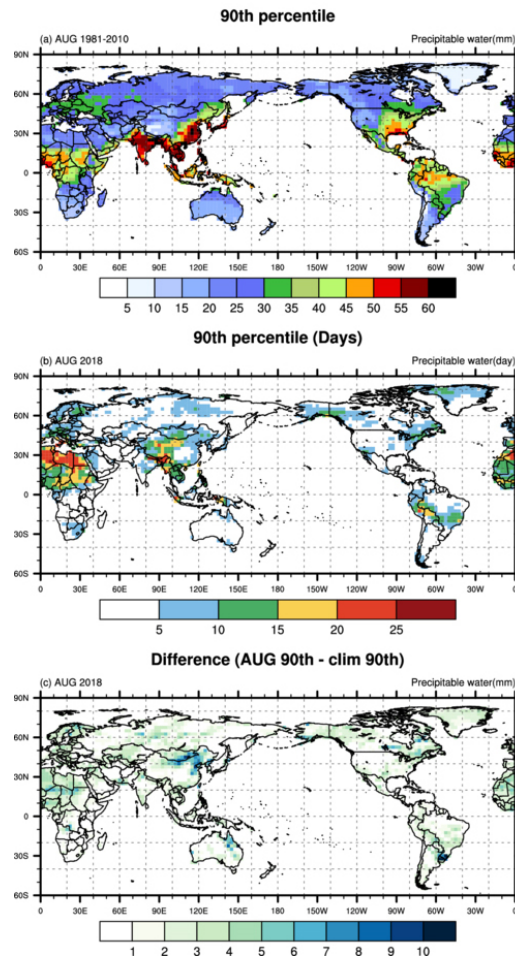


Figure 48. Same as Figure 3 except for August, 2018.

3.8.2 8월 기온/강수 주별 특성

2018년 8월의 주별 기온의 변동성은 매우 크다. 8월 첫 주에는 아프리카 북동부와 지중해를 중심으로 강한 양의 편차를 보이며, 러시아북부지역에서 음의 편차가 나타나며, 한반도와 동아시아 지역, 그리고 인도를 포함한 남아시아 지역에서 강한 양의 편차가 나타났다. 반면 동시베리아를 중심으로 알래스카까지 강한 음의 편차를 보이고, 그린랜드와 캐나다 남부에서는 양의 편차가 약간 우세하게 나타난다. 8월 2째주에는 유럽 전지역과 인도 북부 지역에서 양의 편차를 보였다. 이러한 패턴은 8월 첫 주부터 2주까지 유지되었다. 특히 인도 북서부 지역에서 강한 양의 편차가 지속되었다. 8월 3주에는 동시베리아

지역에서 양의 편차가 나타났으며, 이러한 현상은 8월말까지 유지되었으며, 또한 아시아 전지역에서 양의 편차가 나타났다.

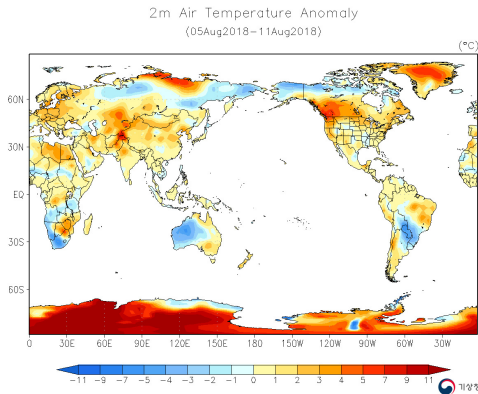
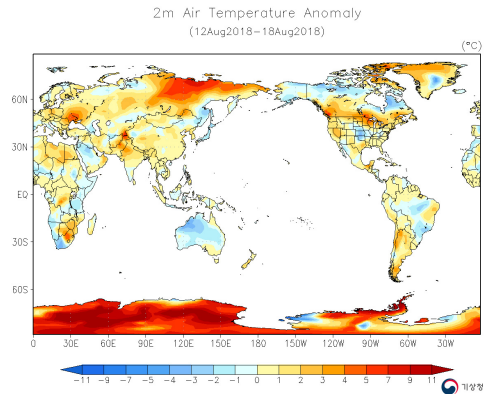
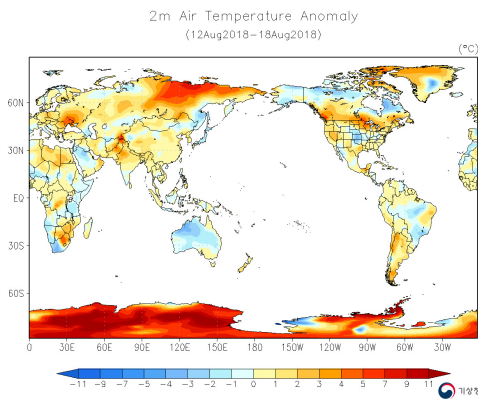
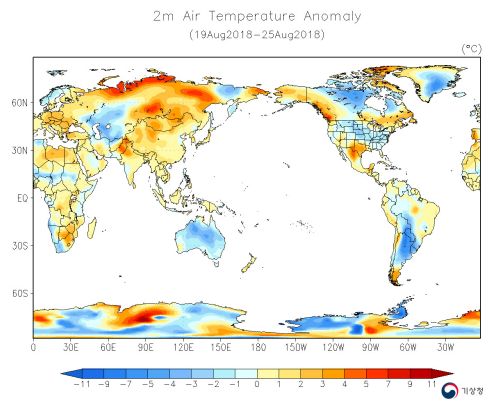
(a) 1st week(b) 2nd week(c) 3rd Week(d) 4th Week

Figure 49. Same as Figure 4 except for August 2018.

2018년 8월 1주의 강수는 인도지역과 한반도 일본, 중국 북동부, 동유럽 동남지역에서 평년 보다 강수량이 적었으며, 중국남부와 동남아시아 지역, 미국 동부에서는 강수량이 평년보다 많았다. 8월 2주에는 노르웨이와 동남아시아 지역, 일본에서 강수량이 평년보다 많았다. 이러한 패턴은 3주에도 유지되었으며, 사하라 지역에서는 4주까지 강수량 양의 편차가 더욱 강해지는 모습을 보이고 있다.

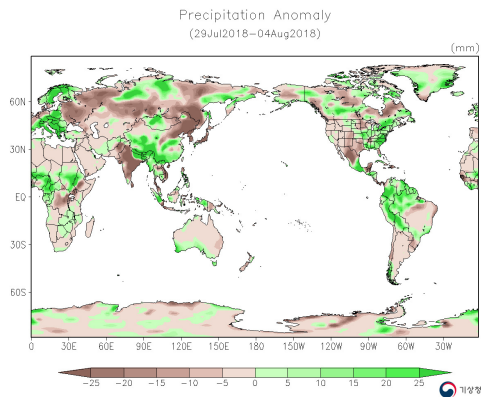
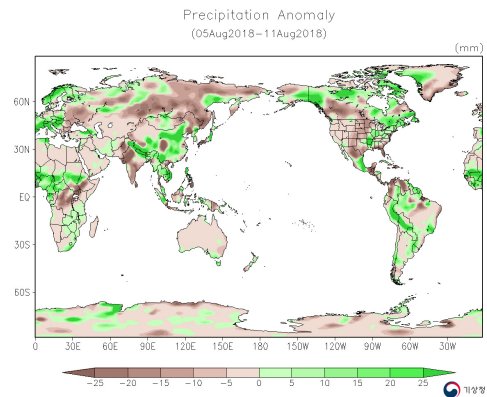
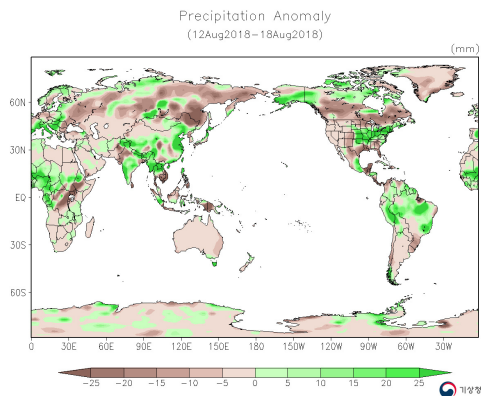
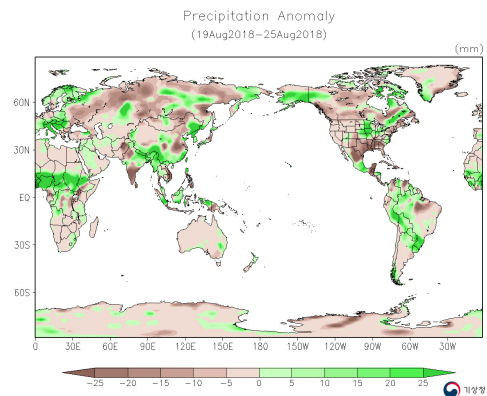
(a) 1st week(b) 2nd week(c) 3rd Week(d) 4th Week

Figure 50. Same as Figure 5 except for August 2018.

3.8.3 대기/해양 순환장 특성

3.8.3.1 기후 변동 모드 특성

적도 태평양에서는 뚜렷한 양의 SST 편차가 서태평양에서 관측되었다. Nino3.4 지역에서 SST 편차는 약 0.1°C 높게 나타났으며, SOI 지수는 약 -0.3°C 이었다. 북태평양지역에서, 양의 SST 편차는 5°N , 165°E 지역에서 미서부 해안까지, 한반도 동쪽해안에서 알루샨의 남쪽까지, 그리고 걸프 해안에서 나타나고 있다. 그리고 음의 편차는 30°N , 175°E 에서 30°N , 160°W 사이에서 나타났다(Figure 51 (a)). 대류활동은 필리핀에서 10° - 2°N 지역까지 밴드형태로 강화되며, 인도양에서 Maritime Continent까지 약화되는 모습을 보였다(Figure 51 (b)).

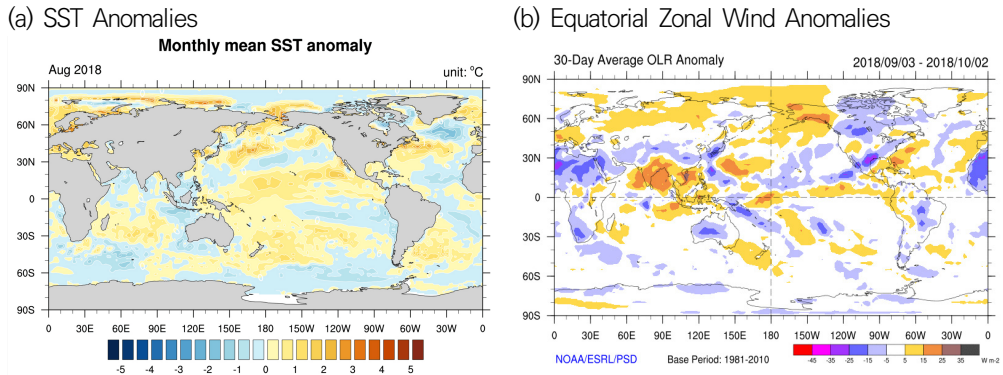


Figure 51. Monthly mean (a) SST anomalies and (b) OLR anomalies.

3.8.3.2 대기순환장 특성

8월에도 500hPa 상층 기압 패턴은 지표기온과 연관성이 매우 컸다. 세계 여러 지역에서 극도로 높은 기온은 지구 온난화 뿐만 아니라 상층 고기압이 평년보다 강화되어 대류권 대기온도가 평년보다 높았기 때문이다. 북반구에서 Polar Vortex는 북아메리카 지역으로 이동한 모습을 보이며, Wave train은 동아시아 북서쪽에서 북태평양의 북쪽까지 나타난다. 따라서 상층대기에서 고기압성 편차는 중국 북동지역과 랍태프해 주변에서 나타나며, 저기압성 편차는 쿠릴제도 주변에서 나타난다.

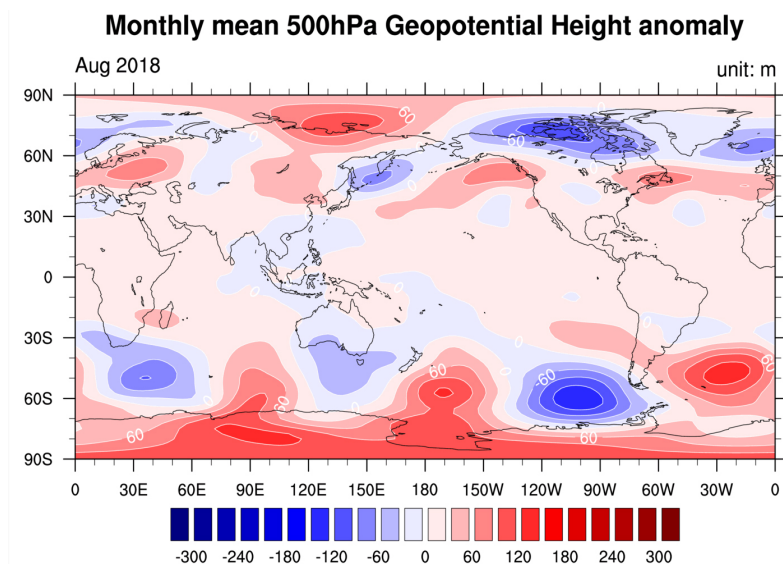


Figure 52. Same as Figure 25 except for August mean in 2018.

3.8.4 지역별 이상 기후 원인 분석 토론

동아시아 지역은 7월 중순부터 8월 중순까지 고기압과 태풍의 영향으로 무더위가 지속되다가, 8월 후반에 태풍의 상륙과 잦은 비로 무더위가 점차 누그러졌다. 동아시아(우리나라와 일본) 주변 대기상층에 티벳 고기압이, 대기 중/하층에는 북태평양고기압이 평년보다 강하게 발달하여 덥고 습한 공기가 유입된 가운데, 맑은 날씨로 인한 강한 일사 효과까지 더해져 무더운 날씨가 이어졌다. 우리나라는 북서쪽에 대륙 고기압성 편차, 동북쪽 오호츠크해 저기압성 편차가 초중반까지 정체되어 유지 되었으며, 이러한 기압계 패턴은 상하층 순압 구조로 나타났다. 남중국해 부근에서 상승기류가 활발했고, 이 상승 기류는 우리나라와 일본 남부지역에서 하강기류로 바뀌면서, 북태평양고기압이 발달하는데 기여한 것으로 분석된다(Lee and Lee 2016). 이러한 폭염현상은 태풍 솔릭이 통과한 후, 우리나라 북쪽 상층에 찬 공기가 위치하고, 남쪽에는 북태평양고기압이 발달하면서 남북으로 폭이 좁은 수증기 통로가 형성되어, 고기압 가장자리에서 대기 하층(850hPa)에서의 강풍대를 따라 많은 양의 수증기가 지속적으로 유입되면서 강수량이 증가하면서 종료 되었다.

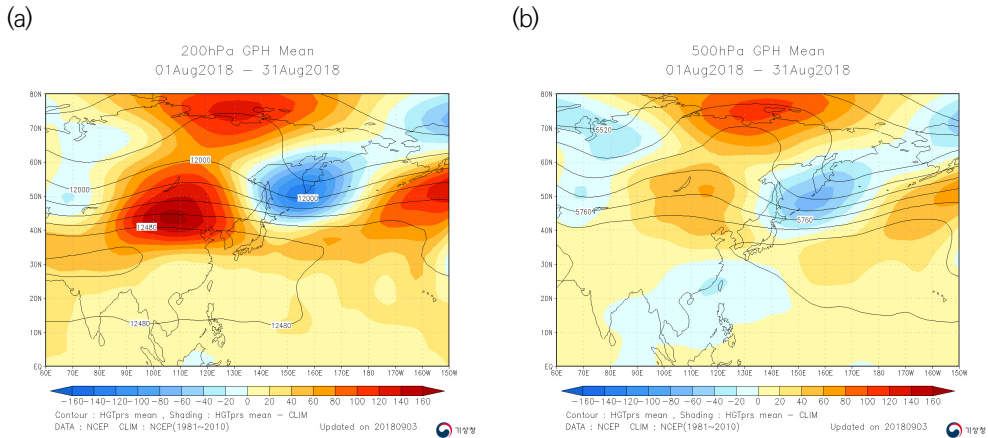


Figure 53. Spatial distribution of (a) 200 hPa GPH anomalies, and (b) 500 hPa GPH anomalies for August, 2018.

3.9 9월 이상 기후 모니터링

3.9.1 9월 이상기온 및 강수 특성

9월 한달 동안 러시아 대부분 지역에서 이상 고온이 5일 이상 있었으며, 특히 러시아 동부 추코트카 지역에서 이상 고온이 25일 이상 있었다. 이 때문에 이 지역에서 이상고온 기준값 보다 평균 약 4.5°C 이상 컸다. 아시아 지역에서는 중국 남부 지역과 근방 나라들 인도 차이나 반도 국가 등에서 5일-10일의 이상고온을 겪었다. 미국은 동부 지역에서 5일 이상 이상고온이 있었고, 특히 아틀랜타, 플로리다 주에서 이상고온이 상대적으로 심하게 발생하였는데, 10일-15일 이상고온이 발생하였다. 남미 대부분 지역에서는 5일 이상의 이상고온이 있었는데, 특히 코스타리카에서는 이상 고온이 10일 이상 있었던 지역들이 존재하였다.

이상저온의 날들은 대부분 아시아/태평양 지역에서 상당히 적었으며, 북미의 캐나다 지역에서만 5일 이상의 이상저온의 날들이 있었다. 이상저온 날들의 평균 값은 기준 값 보다 -2°C 이하로 낮았으며, 미국과 경계 부근 일부 지역에서 -4°C 이하로 낮았다(Figure 54).

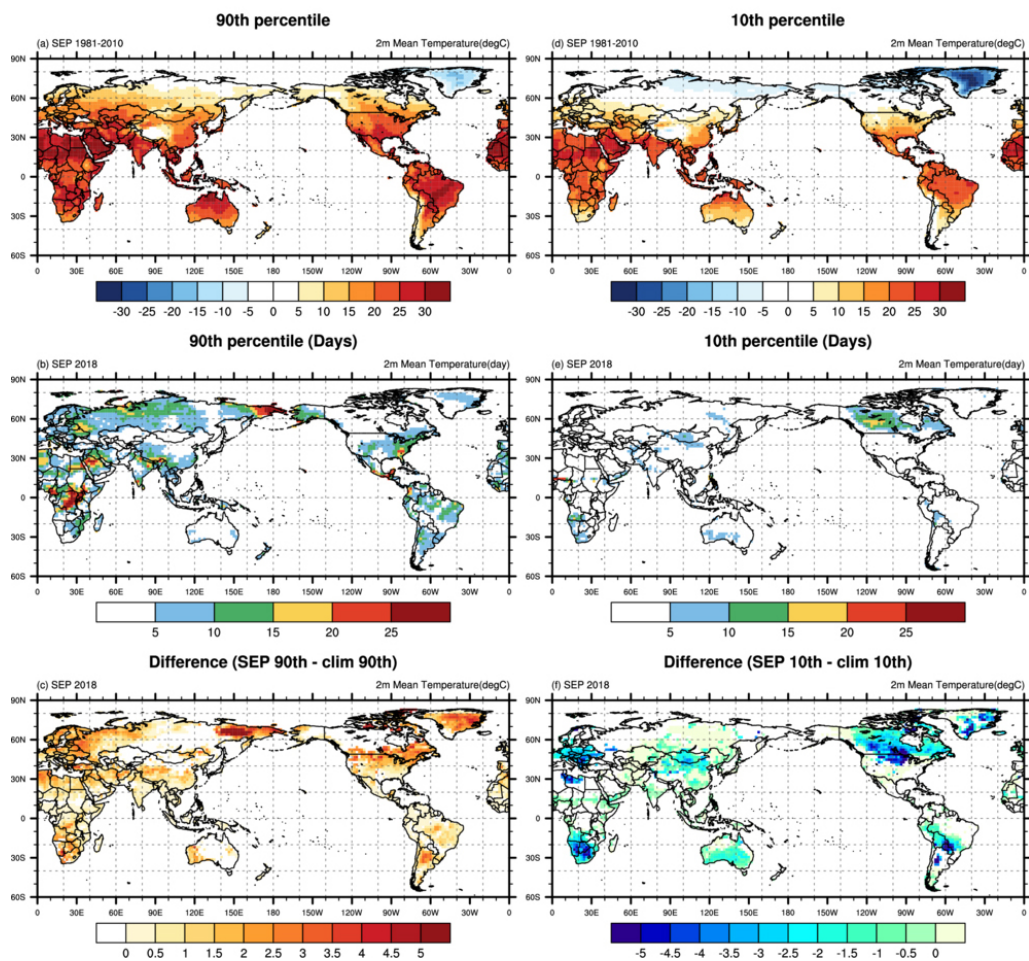


Figure 54. Same as Figure 2 except for June 2018.

전반적인 이상 강수의 날수 분포는 이상 고온 날수의 분포와 상당히 닮아 있었다. 러시아에서는 거의 전지역에서 5-10일의 이상 강수의 날들이 있었고, 러시아 동부에서 15일 이상의 이상 강수가 내렸다. 중국 남부 지역과 근방 국가들, 한반도, 일본 남부 지역과 미국 동부지역에서 이상 강수가 5일 이상 있었다. 특히 미국 남동부 일부 해안 지역에서는 10-15일 이상의 이상 강수의 날들을 겪었다. 남미에서는 서부의 국가들에서 이상 강수가 5일 이상 있었다.

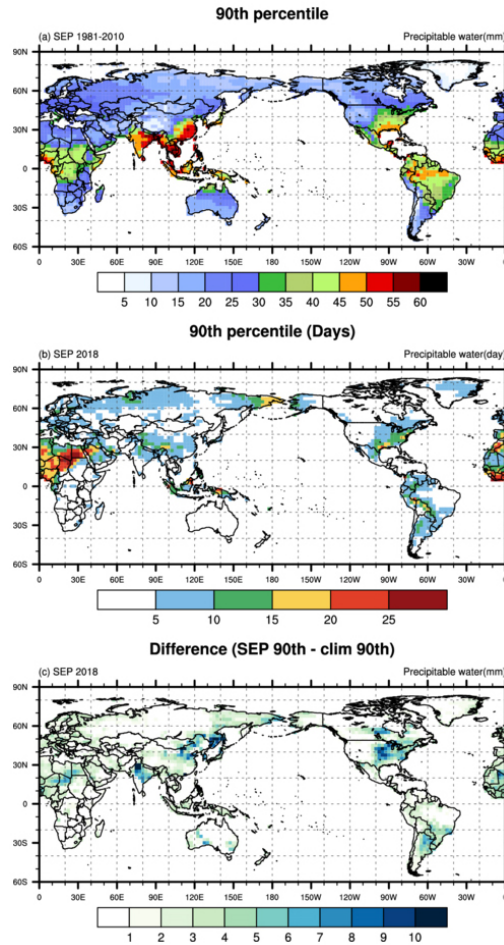


Figure 55. Same as Figure 3 except for June 2018.

3.9.2 9월 기온/강수 주별 특성

러시아에서는 첫 7일 동안 우랄 지역에서 북쪽은 양의 기온 편차 남쪽은 음의 기온 편차를 보였고, 중부 지역에서는 음의 기온 편차, 동부 지역에서는 강한 양의 기온 편차가 있었다. 시간이 지나면서 중부와 서남부의 음의 기온 편차는 약해지고, 양의 기온편차로 변화였으며, 결국 4주에서는 러시아 전 지역에서 양의 기온 편차를 보였다. 특히 러시아 중북부 지역은 4주에서 평년보다 약 10℃ 이상 상승하였고, 동부 지역은 4주내내 평년보다 상당히 증가한 값을 보였다(약 10℃ 이상). 몽골 지역에서는 3주까지 음의 기온 편차를 보였고, 중국은 전반적으로 한달동안 양의 기온 편차를 유지하였다. 한반도와 일본은 다

소 약한 기온 편차 변동을 보였다. 호주의 서남부 지역은 3주까지 음의 기온 편차를 보였고, 북부 지역은 1주에 양의 기온 편차가 있었고, 나머지 주 들에서는 약한 기온 편차를 보였다. 캐나다는 한달내내 음의 기온 편차를 유지하였고, 미국 동부는 양의 기온편차가 우세하였고, 3주에서는 기온이 상당히 증가하였다. 남미의 아르헨티나는 전반적으로 9월 내내 평년보다 따뜻하였다.

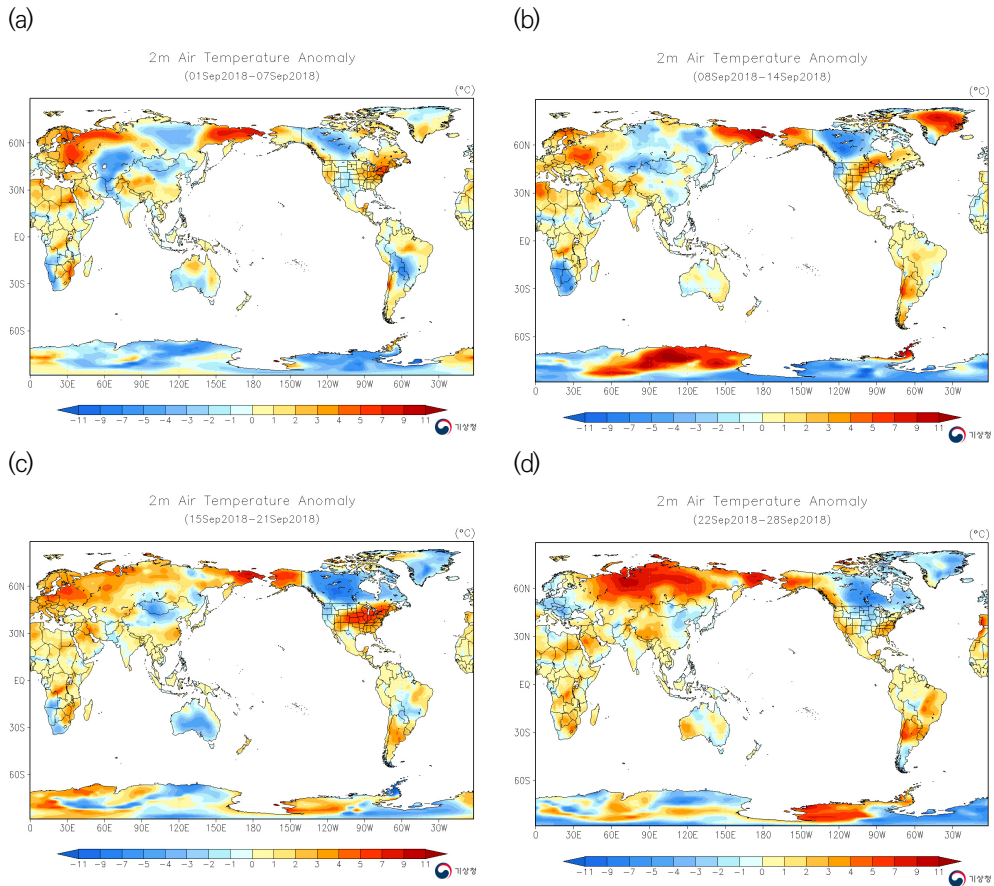


Figure 56. Same as Figure 4 except for September, 2018.

미국 동부는 9월 내내 양의 강수 편차, 서부/중부는 음의 강수 편차가 우세하였다. 캐나다는 남부 및 동부에서 양의 강수 편차, 북부 에서는 음의 강수 편차가 우세하였다. 남미 지역에서 페루, 볼리비아, 파라과이는 9월 내내 평년보다 강수가 많았고, 브라질 동부 지역은 평년보다 상당히 강수가 적었다. 호주는 9월내내 약한 음의 강수 편차를 보였

다. 인도차이나 대부분 지역에서 약한 양의 강수 편차를 보였던 3주를 제외하고, 음의 강수 편차를 보였고, 인도네시아와 필리핀은 9월동안 양의 강수 편차를 보였다. 중국 남부, 한반도에서는 1주와 3주에서 양의 강수 편차를 보였고, 2주와 4주에서 강수가 평년보다 적었다. 1주에서 중국 동북부와 러시아 블라디보스토크 근방에서 상당한 크기의 양의 강수 편차가 있었다. 1주에 러시아 서부 지역은 평년보다 강수가 상당히 적었고, 동부 끝 지역에서 1주를 제외하고 양의 강수 편차가 우세하였다.

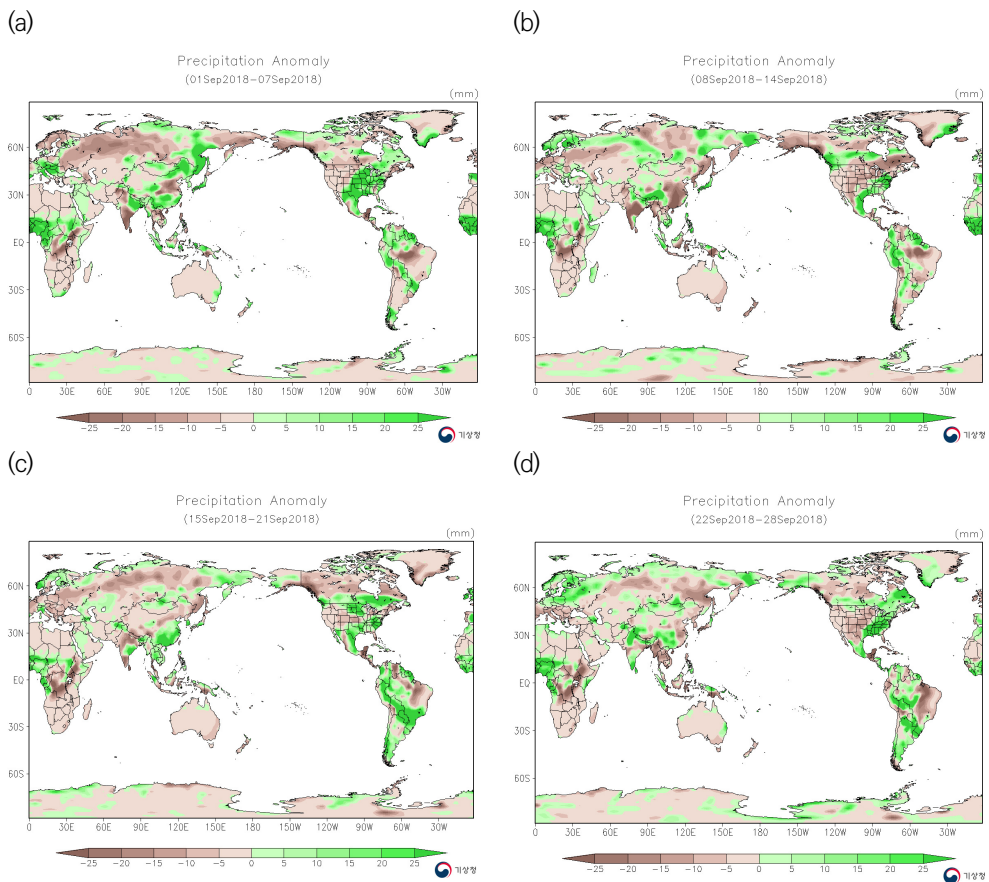


Figure 57. Same as Figure 5 except for September, 2018.

3.9.3 대기/해양 순환장 특성

3.9.3.1 기후 변동 모드 특성

중양 적도 태평양에서는 SST 편차가 8월 중순까지 증가하다가 9월 말경까지 증가가 주춤하였으며, 9월 말경 다시 증가하는 경향을 보였다. 9월 평균 Nino 3.4 지수는 0.46°C 로서 중립 값을 보였다. 인도양에서는 양의 IOD가 9월에 증가를 시작하는 경향을 보였으며($\text{DMI} = 0.99^{\circ}\text{C}$), 적도 대서양에서도 8월보다 SST 편차가 증가하였다(Figure 58 (a)). 동서 바람 편차는 9월 동안 서풍 편차가 서 인도양에서 상당히 증가하였고 9월 후반 서풍 편차가 동 적도 태평양까지 확장 및 발달하였다(Figure 58 (b)). 적도 태평양에서 서풍 편차의 증가는 중양/동 적도의 양의 SST 편차가 더 증가할 가능성을 의미한다. 9월 평균 SST 편차를 보면, 인도양에서 IOD-like 구조, 베링과 척치해에서 강한 양의 SST 편차가 있었다. 북 열대 태평양에서 양의 SST 편차, 남동 열대 태평양에서 음의 SST 편차 분포를 보이는 양의 PMM(Pacific Meridional Mode)-like 구조를 보였으며, 북 대서양은 2018년 봄철부터 유지되었던 음-양-음 남북방향 SST tripole 구조의 형태를 보였다(Figure 58 (c)). 극 진동은 9월 전반적으로 양의 값을 가졌으며, 특히 9월 후반 양의 AO 지수가 상당히 증가하였다(Figure 58 (d)).

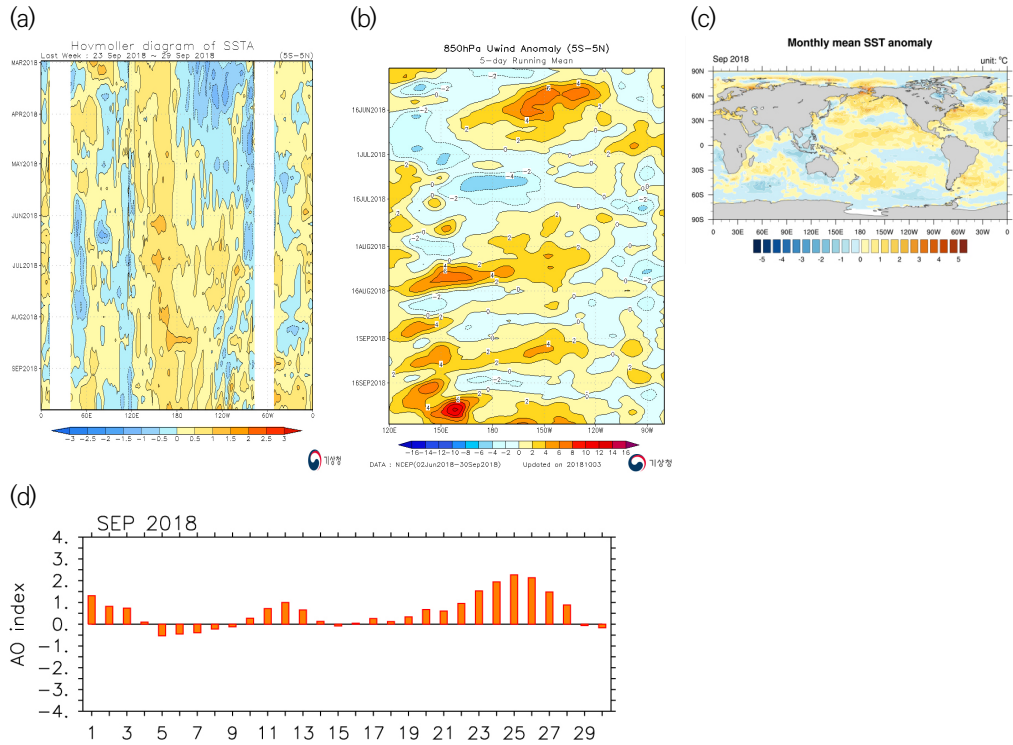


Figure 58. Evolution of Equatorial (a) SST anomalies (120°E–80°W) and (b) zonal wind anomalies (80°E–80°W) averaged over 5°N–5°S. (c) Spatial distribution of global SST anomalies and (d) time series of AO index for September, 2018.

3.9.3.2 대기순환장 특성

북유라시아 지역에서 동서 방향으로 베링해까지 확장된 양의 지위고도 편차, 그리고 알래스카에서 남동쪽으로 양과 음의 지위고도 편차가 반복되는 파동 전파 형태를 보였다 (Figure 59). 북 대서양 동쪽으로 북에서 남으로 음과 양의 지위고도 편차, 한반도 근방에 음의 지위고도 편차가 있었다. 중위도에서 해수면 기압 편차 분포는 상층의 지위고도 편차 분포와 상당히 일치하였으며, 북태평양에서는 양의 NPO 패턴을 보였다.

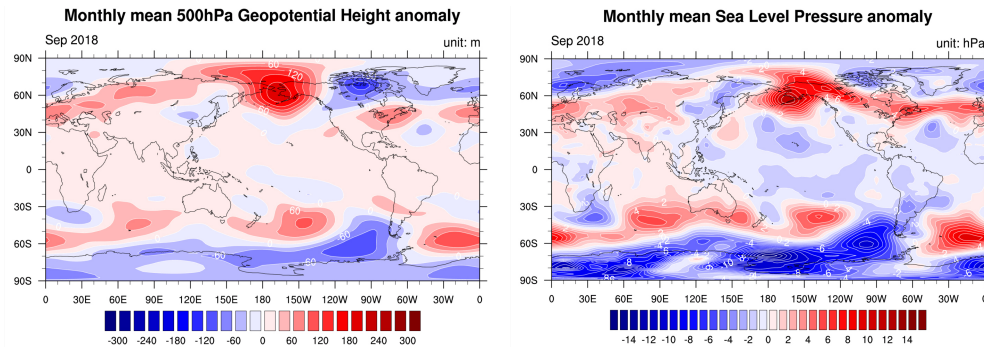


Figure 59. Same as Figure 7 except for September mean in 2018.

3.9.4 지역별 이상 기후 원인 분석토론

러시아 지역에서의 이상 고온은 러시아 지역을 덮고 있었던 양의 지위고도 편차와 관련이 있으며, 즉 제트류의 북쪽으로의 shift를 의미하며, 극 지역에서 찬 공기 남하를 막은 듯 보인다. 러시아 동부 지역에서 상당한 이상 고온 발생은 베링해 부근 고기압성 편차와 상관이 있으며, 많은 일사량과 남쪽 해양에서 고온 다습한 공기의 유입과 관련이 있는 듯 보인다. 캐나다 지역에서 이상 저온의 발생은 캐나다 부근에서 기압골 발달과 이와 관련된 극에서 찬 공기의 유입과 관련 지을 수 있겠다. 미국 동부의 이상 고온과 이상 강수 발생은 미국 동부 지역 근처 북 대서양에서 발달한 고기압성 순환과 관련이 있으며, 해양으로부터 고온 다습한 공기의 유입이 가능하게 했다.

3.10 1월-9월 이상기후 요약

2018년 1월에서 9월까지 이상 고온/강수 발생 날수에 대한 현황을 파악하기 위해서, 1981-2010 평년기간과 비교하였다. Figure 60을 살펴 보면, 2018년 이상 저온의 날이 평년 범위보다 상당히 많았던(즉 이상치 수준), 북미의 4월을 제외하고 대부분의 각 지역별 평균된 이상 저온 날수는 그 평년기간에서 발생했던 날 수의 50% 범위(inter-quantile range) 혹은 최대/최소 범위였다는 것을 확인 할 수 있다. 특히 북반구에서 2018년 여름 철로 갈수록, 평년 기간에 비해서 상당히 이상 저온의 날수가 적었다. 그러나 이상 고온 날수는 평년 간의 최대 범위를 넘는 지역들이 많았으며, 겨울철에서 여름철로 진행할수록

그 범위를 넘는 경향이 뚜렷하였다. 특히 동아시아와 남아시아 지역에서 평년 기간과 비교를 하면, 동아시아에서는 3월, 7월, 8월에 상당히 이상 고온 지수가 증가하였고, 남아시아에서는 7월, 8월에 평년 기간에서 이상치 값보다 더 많이 발생했다. 그리고 유라시아 지역에서 5월부터 7월, 9월에 북미에서 5월부터 9월까지 평년기간에서 이상고온 보다 상당히 많았다. 결국 여름철 동안 북반구에서 폭염이 상당히 심했음을 보여준다.

이상 강수에 대하여 유라시아 지역에서는 이상 강수가 많았던 7월을 제외하고, 평년 기간범위내에 있었고, 동아시아에서는 3월부터 8월까지 이상 강수가 전반적으로 평년 범위보다 많았고, 남아시아에서는 올해 전반적으로 이상 강수가 평년범위 보다 상당히 증가하였다. 북미는 2월, 6월에 남미는 1월에 이상 강수가 많았다. 호주에서는 이상 강수가 여름철에서 가을철인 1월에서 5월에 평년보다 상당히 증가하였다. 전체적으로 2018년 이상 강수의 변동 경향이 이상 고온과 상당히 비슷하였다.

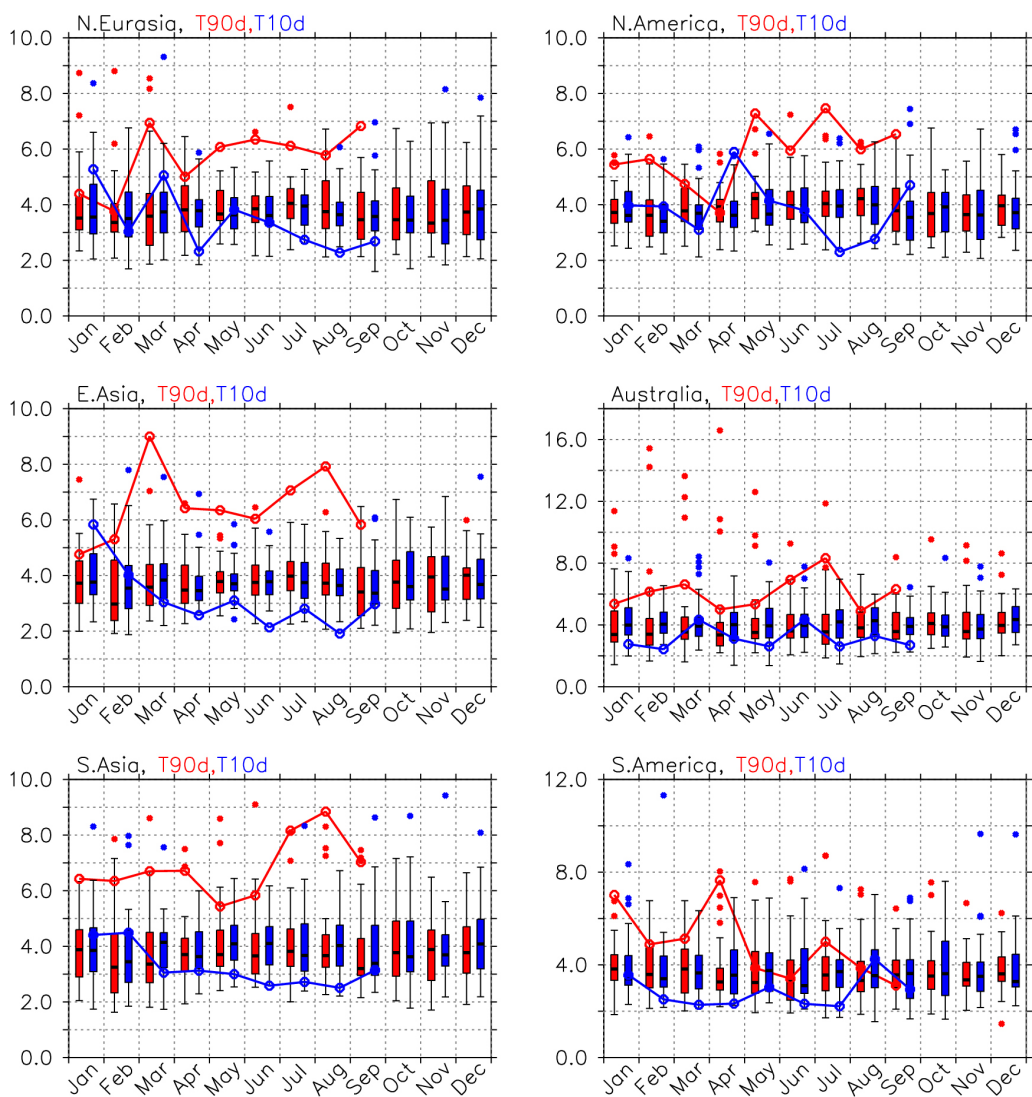


Figure 60. Box-and-whiskers plot for the regional average of the number of the extreme hot days (red colors) and extreme cold days (blue colors) in each calendar month over the base period of 1981–2010. Red and blue lines indicate the hot and cold days occurred in 2018.

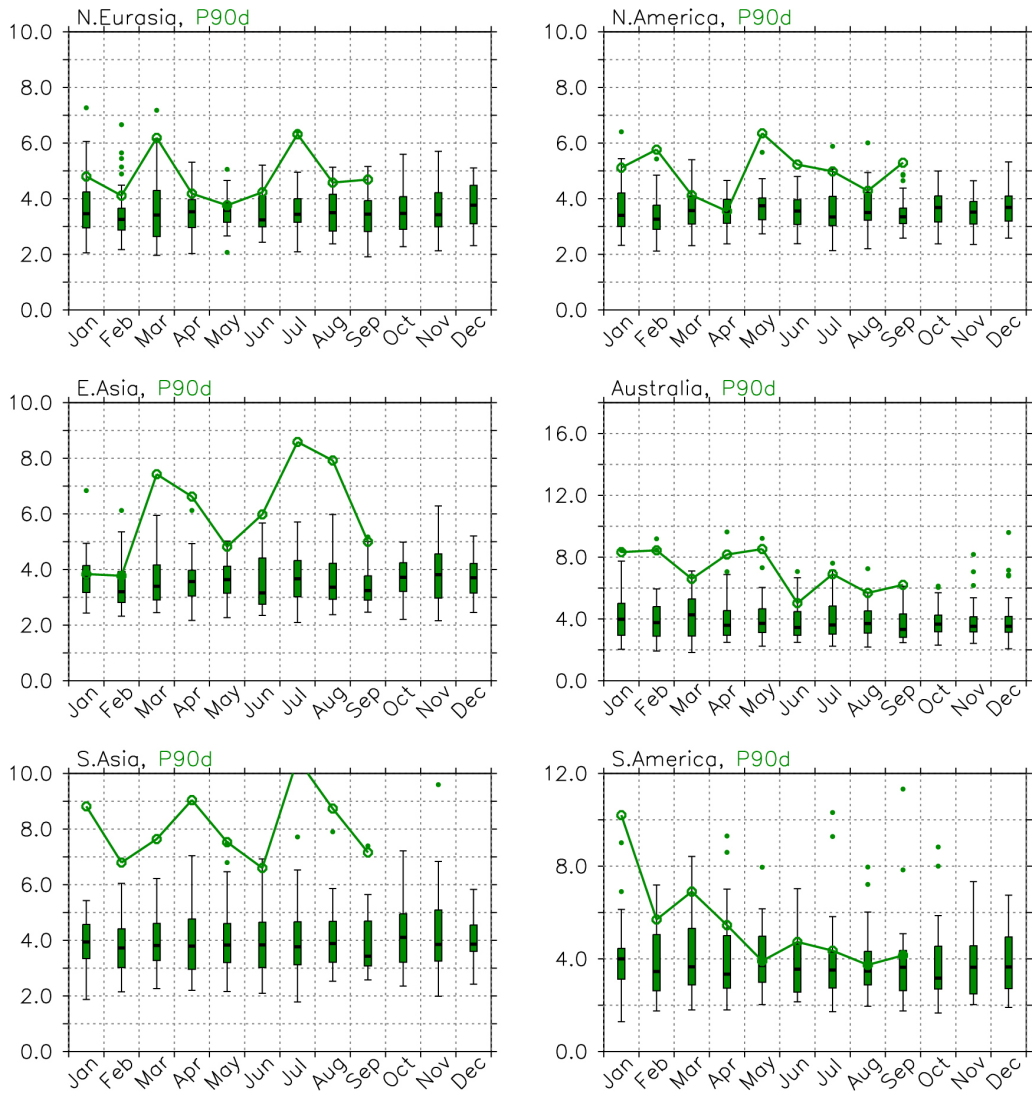


Figure 61. Same as Figure 60 except for extreme wet days.

4. 1981-2010 평년기간에서 이상기후 특성 분석

4.1 이상 기온 추세 분석

현재 일어나고 있는 이상기후의 현황을 파악하기 위해서, 평년 기간으로 정의된 1981-2010에서 이상고온/강수의 추세를 분석하는 것이 필요하다. Figure 62는 1981년에서 2010년까지 각 지역마다 그리고 매달 발생한 이상 고온의 6개의 지역 평균 날수를 보여준다. 먼저 북 유라시아 지역에서 평년 기간 전반기보다 후반기에 이상 고온 날수의 증가 경향을 확인할 수 있다. 특히 그 증가 경향이 9월에서 11월에서 더 크다. 유라시아 지역에서 평년 기간 후반 즉 2002, 2007, 2008년 겨울철과 2010년 여름철에 다른 년도와 비교해서 이상 고온이 갑자기 증가한 사례들이 있었다. 동/남 아시아 지역에서는 북 유라시아처럼 1998년 이후 분명한 이상고온 날수의 다소 비약적인 증가를 보였다. 남아시아에서는 다른 해와 비교해서 1998년과 2010년도 봄철과 여름철에 이상 고온 날수가 대폭 증가하였다. 북미에서는 1월부터 6월까지 이상 고온이 특히 많았던 해를 파악하기는 힘들다. 9월부터 12월에서만 후반기 증가경향이 뚜렷하다. 남미지역에서는 전반에서 중반으로 감소 경향, 중반에서 후반으로 증가경향을 보였다. 남아시아처럼 1998년과 2010년에서 이상 고온 날수가 다른 해보다 상당히 많았다. 호주 지역 평균 이상 고온 날수는 후반기에서 증가 경향은 뚜렷하지 않았다. 다만 강했던 1982/83, 1997/98, 2009/10 엘니뇨 해에 이상 고온의 날수가 상당히 증가하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

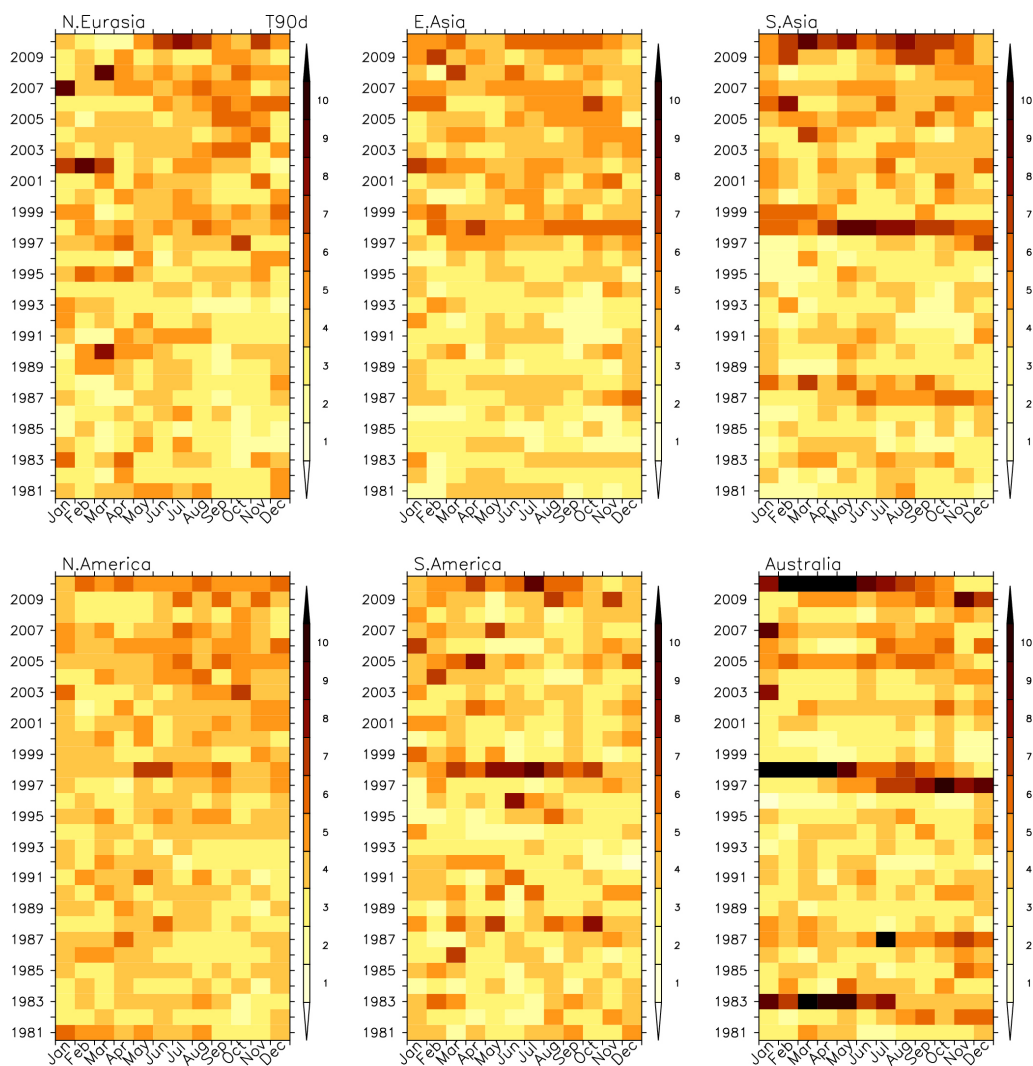


Figure 62. Time evolution of the number of hot days averaged over the 6 separated regional domains in each calendar month from 1981 to 2010 (see Figure 1).

이상 저온에 대해서는(Figure 63) 대체로 평년 기간 후반에서 감소하는 경향을 보였다. 북 유라시아와 동/남 아시아에서 이상 저온의 날수가 증가가 1990년대에 증가하였고, 2000년대에 감소하는 경향을 보였다. 특히 남아시아에서 1992년에서 1997년까지 다른 기간에 비해 대폭 증가하였다. 북미에서는 1월에서 6월까지 1990년대에 증가 2000년대에 감소 경향을 보였고, 봄철에서는 뚜렷한 변동성을 7월에서 12월달에 1980년대에 상대적으로 이상 고온의 날수가 많았고, 2000년 이후 이상 저온의 날들이 감소하는 경향이

뚜렷하였다. 남미에서는 1992년에서 1994년에 평년 기간의 다른 해에 비해서 상당히 증가하였고, 특히 여름철에 5-10년 주기의 변동성이 존재하였다. 호주에서는 1991년에서 2001년 동안 다른 decade에 비해서 이상 저온 날수가 많았다.

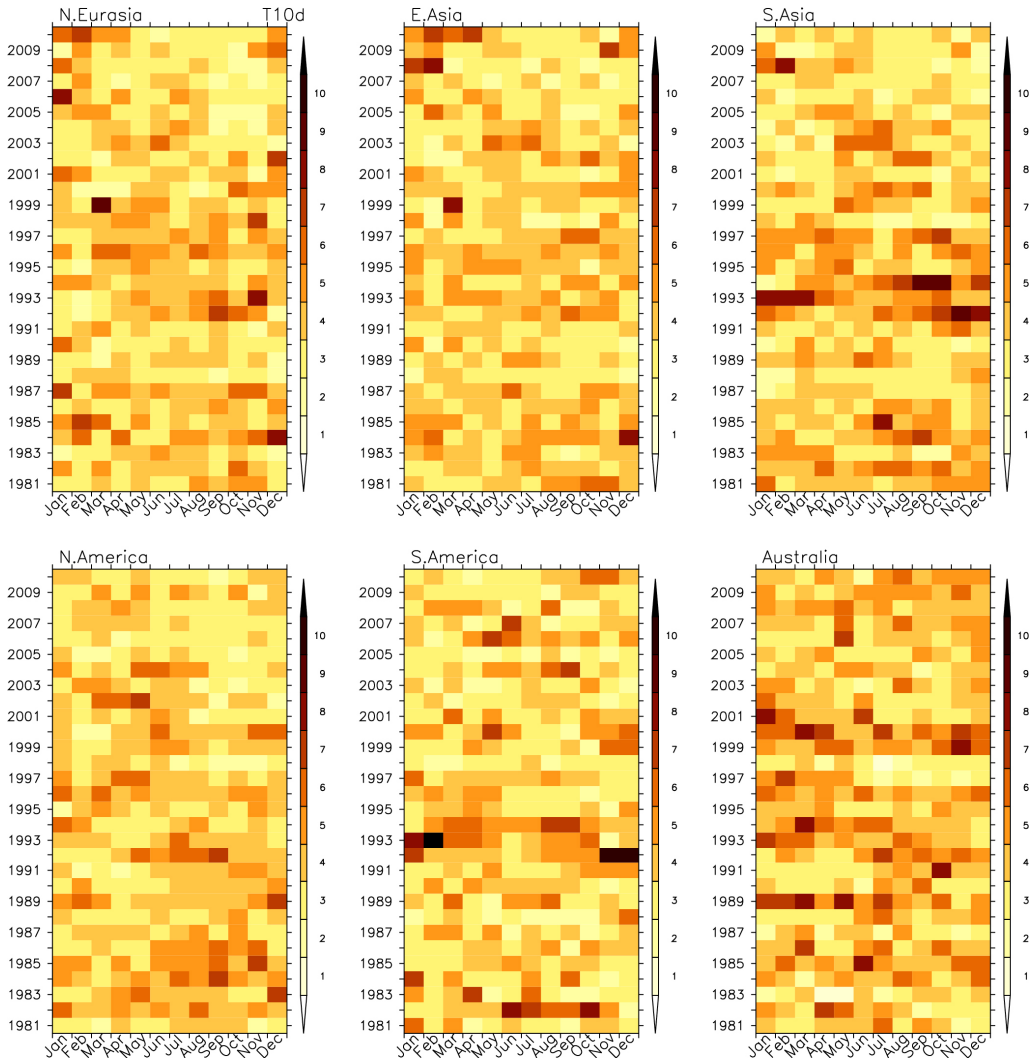


Figure 63. Same as Figure 62 except for extreme cold days.

좀더 자세하게 평년 기간 동안 이상기후 현상 추세를 분석하기 위해서 각 지역에서 평균 이상 기온/강수 날 수의 선형 추세를 계산하였다(Figure 64 (a)). 대체로 이상 고온

날수는 증가 추세 경향, 이상 저온 날수에서는 감소 추세의 경향을 보였다. 특히 이상 고온 날 수는 봄철과 가을철 추세 값의 double peak 특성이 전 6개의 지역에서 나타났다. 북 유라시아 지역은 가을철에 상대적으로 큰 양의 추세를 보였고, 특히 10월에 가장 큰 양의 추세 값을 가졌다. 겨울철과 봄철(즉 12월-3월)에 약한 양의 추세를, 4월에서 6월에서는 추세 값이 아주 작았다. 동아시아와 남아시아 지역에서는 공통적으로 2월과 8월에 이상 고온 날수의 증가 추세의 double peak이 존재하였다. 그런데 남아시아에서는 12월에 상당한 크기의 양의 추세 값을 보이지만, 동아시아에서는 이상 고온 날 수의 추세 값이 작았다. 북미 지역에서는 이상고온 날수의 증가 추세 값이 여름철과 가을철에서만 그 값이 컸다. 남미와 호주의 북반구 가을철에 이상 고온 날 수의 추세 값이 전반적으로 다른 지역 보다 작았다. 호주 지역은 2월에, 남미 지역은 4월에 가장 큰 이상 고온 날수의 추세 값을 보였다.

이상 저온 날수는 특히 가을철 동안 이상 고온 날 수의 증가 추세와 반대 경향이 강하였다(Figure 64 (b)). 동아시아와 북 유라시아에서 추세 값 변동이 비슷하였는데, 10월에 가장 큰 추세 값을 보였다. 겨울철 즉 12-2월 북 유라시아 지역에서 이상 저온 날 수는 양의 추세 값을 가졌다. 남아시아 지역에서는 5, 6월을 제외하고 음의 추세 값을 보였고, 12월에 가장 컸다. 북미 지역에서는 9월에 음의 추세 값이 가장 컸으며, 남미 지역에서는 7월에 가장 컸다. 호주 지역에서는 추세 값이 변동폭이 가장 작았으며, 7월에 가장 큰 음의 추세 값을 보였다.

특히 북반구에 있는 지역들 즉 북 유라시아, 북미, 동아시아 지역에서 가을철에 이상 고온의 양의 추세 값이 크고, 동시에 이상 저온의 음의 추세 값이 크다는 것은 가을철에 온난화가 다른 계절 보다 더 빨리 진행됨을 의미한다. 그리고 동아시아와 북미 지역에서 1월 및 2월 달에 이상 고온과 저온 날들이 모두 양의 추세 값을 보였다. 이는 겨울철에 기온 변동성이 점점 커져 간다는 것을 의미하며, 겨울철에 극에서 영향이 온난화가 진행될수록 커지는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다(Barnes 2013; Cohen et al. 2014). 가을철에 다른 계절에 비해 온난화 가속에 대한 이유를 좀 더 연구를 통해 밝히는 것도 의미가 있어 보인다.

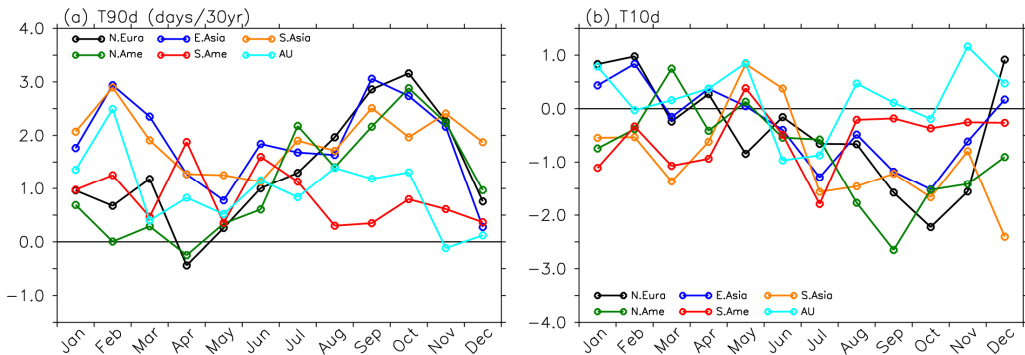


Figure 64. Linear trends of the number of extreme (a) hot days and (b) cold days area-averaged in the 6 separated regions for each calendar month over the period 1981–2010.

4.2 이상 강수 추세 분석

90 백분위 이상 강수가 있었던 날들의 경향을 평년 기간에서 보면(Figure 65), 북 유라시아, 동아시아, 남아시아, 북미 지역에서 증가 경향 혹은 감소 경향은 뚜렷하지 않고, 이상 강수 날수의 경년 변동성이 우세하다. 남아시아에서는 증가, 감소 변동에서 2005년 이후에 이상 강수의 증가 폭이 컸다. 남미와 호주에서는 12월에서 3월 1998년 이후 이상 강수의 날수의 증가가 뚜렷하였고, 다른 계절에서는 경년 변동이 우세하였다.

평년 기간 동안 이상 강수 날수의 추세를 분석하기 위해서, 각 지역, 월별로 선형 추세값을 계산하였다(Figure 66). 뚜렷한 이상 강수 날수의 증가 지역은 전 12월에 대하여 남미, 봄, 가을 겨울철에서 호주 지역, 2월에서 7월, 9월에서 12월에 남아시아 지역, 여름철 동아시아 지역들이다. 그 외 지역들과 계절들에서는 뚜렷한 추세값을 보이지 않았다.

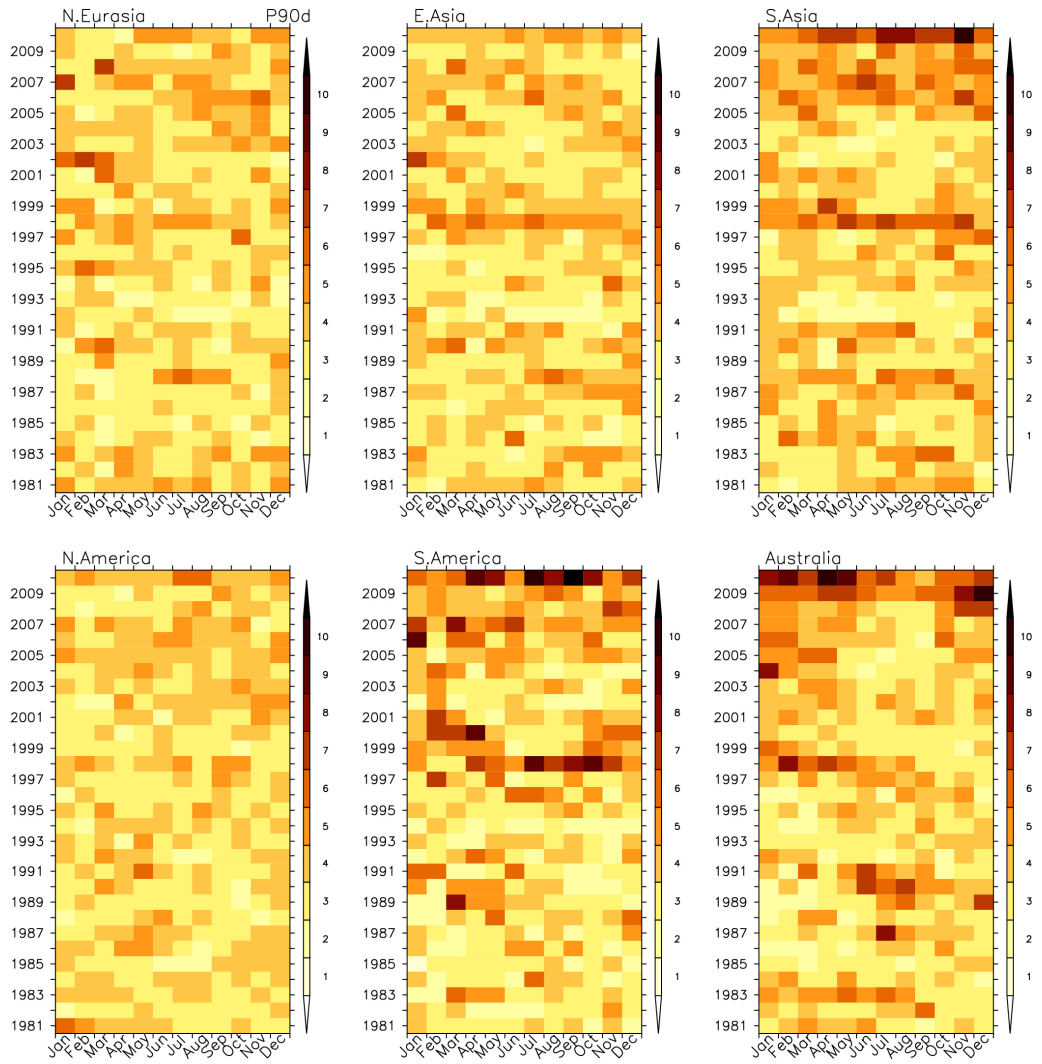


Figure 65. Same as Figure 62 except for extreme wet days.

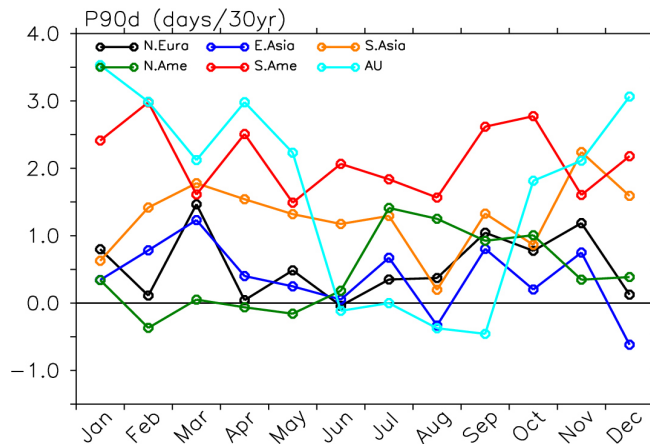


Figure 66. Same as Figure 64 except for the number of extreme wet days.

4.3 이상기온/강수 발생 주요 패턴 case 연구

본 절에서는 이상 고온 지수(Figure 67)와 이상 저온 지수(Figure 68) 그리고 이상 강수 지수(Figure 69)를 1981년에서 2010년까지 SST, SLP, Z500 편차와 상관계수 분석을 수행하여, 이상 기후 지수들의 변동과 관련된 대기/해양 순환장을 살펴보았다. 지수와 변수들의 선형 trend는 제거한 뒤 상관계수들이 계산되었다. 본 연구에서는 동아시아 지역에서 이상 기후 변동에 한정하였다. 추후 연구에서 나머지 5개의 지역 들에서 이상 기후 변동과 관련된 대기/해양 순환장 분석이 수행될 것이며, 더 나아가서 실제 특정 지역에서 대기/해양 변수들과의 상관성이 존재하는 것에 대하여 역학적으로 의미가 있는 것인지 규명하는 것도 역시 필요하다. 먼저 이상 고온 지수의 관련하여 유의한 상관계수 지역을 살펴보면, 여름철부터 겨울철 즉 6월부터 1월까지 동아시아 이상 고온은 북인도양에서 SST 편차와 유의한 양의 상관관계를, 아울러 6월과 9월-11월에 이상 고온에 대하여 열대 대서양 SST 편차와 양의 상관관계를 보였다. 동아시아에서 이상고온발생과 북대서양 양의 SST 편차와의 관계는 최근 연구에서 보고된 바 있다(Johnson et al. 2018). 적도 태평양 SST 편차는 9월 동아시아 이상 고온과 유의한 음의 상관관계를 보였다. 하층 대기에서는 1월 4월 10월 12월 동아시아 이상 고온 발생은 전형적인 동아시아 몬순 시스템의 패턴과 닮아 있었다. 즉 유라시아 대륙에 음의 상관관계, 한반도/일본 동쪽의 SLP 편차와 음의 상관관계가 있었다. 상층 대기에서는 한반도 위 혹은 주위의 Z500

편차와 이상고온 발생과 유의한 양의 상관관계가 존재하였다.

동아시아에서 이상 저온 날수의 변동은 이상 고온 날수 변동 대한 SLP, Z500 편차와의 관계와 거의 반대이다. 즉 북유라시아 부근에 SLP, 동아시아/한반도 부근의 Z500 편차와 음의 상관관계를 보였다. SST에 대해서는 유의한 상관관계를 갖는 지역이 적었다. 즉 4월에 열대 대서양 SST 편차, 8월에 북 인도양과 음의 상관관계, 10월에 동적도 태평양에서 SST편차와 양의 상관관계를 보였다. 동아시아지역에서 이상 강수 날수의 증가와 관련된 대한 해양/대기 패턴은 이상 고온과 관련된 패턴과 상당히 유사점이 많다. 이는 동아시아는 몬순 시스템에 의해서 기온/강수가 결정되기 때문인 것으로 보이며, 이러한 유사점에 대해서 좀더 연구가 필요하며, 이를 통해 효율적인 이상고온/강수의 감시/예측에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

위에서 분석된 이상 기후 관련 패턴들은 현재 일어난 이상 기후들에 대한 원인을 규명하기 위해 참고 자료로 사용될 수 있다. 예를 들면, 2018년 이상 고온이 평년기간 보다 상당히 많이 발생했던 달(Figure 60) 즉, 3월, 7-8월에 상하층 대기와 SST 편차 분포를 본 절에서 분석된 패턴들과 비교를 통해서, 차이점들이 무엇인가를 파악하여 보았다. 아프리카 대륙 서쪽으로 3월 열대 대서양 SST 편차와 7-8월 북 인도양 양의 SST 편차와 상당한 관계가 있는데, 2018년 3월, 7-8월 SST 편차(Figure 24, Figure 44, Figure 51)를 보면 아프리카 서쪽 주변 북 열대대서양에서는 약한 음의 SST 편차구조를 북인도양 부근에서는 SST 편차값이 아주 작거나, 음의 편차를 보였다. 그러므로, 평년 기간에 해양 관련 기작이 작용하지 않았던 것으로 보인다. 대기에서는 3월에 서 러시아에 음의 SLP편차와 중국과 한반도 부근에 양의 Z500 편차 관련이 있는데, 2018년 3월 SLP 편차를 보면(Figure 25), 서 러시아에 강한 음의 SLP편차가 있는 것을 확인 할 수 있고, 또한 3월 Z500 편차를 보면, 남북 방향의 음-양의 Z500 편차구조를 보이고 있었다. 그러므로 어느정도 3월 이상 고온은 평년 기간에서 이상 고온 발생과 관련된 대기 순환이 역할을 했던 것으로 보인다. 7월 과 8월에서는 SLP 편차에 대해서 이상고온과 동아시아 주변에서 유의한 상관관계가 있는 곳을 찾기 힘들고, Z500 편차에서는 한반도 부근 양의 상관관계가 있는데, 7-8월 Z500 편차를 보면 유사한 Z500 편차 패턴이 보인다. 특히 한반도 부근 북서쪽으로 파동 형태의 Z500 편차 구조 또한 평년기간에서 상관관계 패턴과 상당히 유사하였다. 그러면 왜 평년기간 보다 이상 고온 날수가 더 증가하였느냐 하는 문제가

있다. 지구 온난화의 진행 때문일 수도 있고, 다른 대기 혹은 해양에서 동아시아 부근 Z500 편차의 강화에 기여하는 뭔가를 찾아야 한다. 그런데, 2018년 3월과 7-8월에 북서 열대 태평양 부근에 저기압성 편차가 공통적으로 유지되고 있었는데, 이는 평년기간의 상관관계 분석에서는 관측되지 않는 패턴이었다(오히려 북서태평양에서 고기압성 편차와 유의한 상관관계를 보임). 이 북서태평양에서의 저기압성 편차를 이상 고온 발생 증가에 연결 지어 볼 수 있겠다. 즉 온난해역(warm pool) 부근에 저기압성 편차는 해들리 순환과 관련되어 동아시아 부근에 양의 Z500 편차 발달을 증가시켰으며, 이상 고온 발생에 기여한 것으로 보인다.

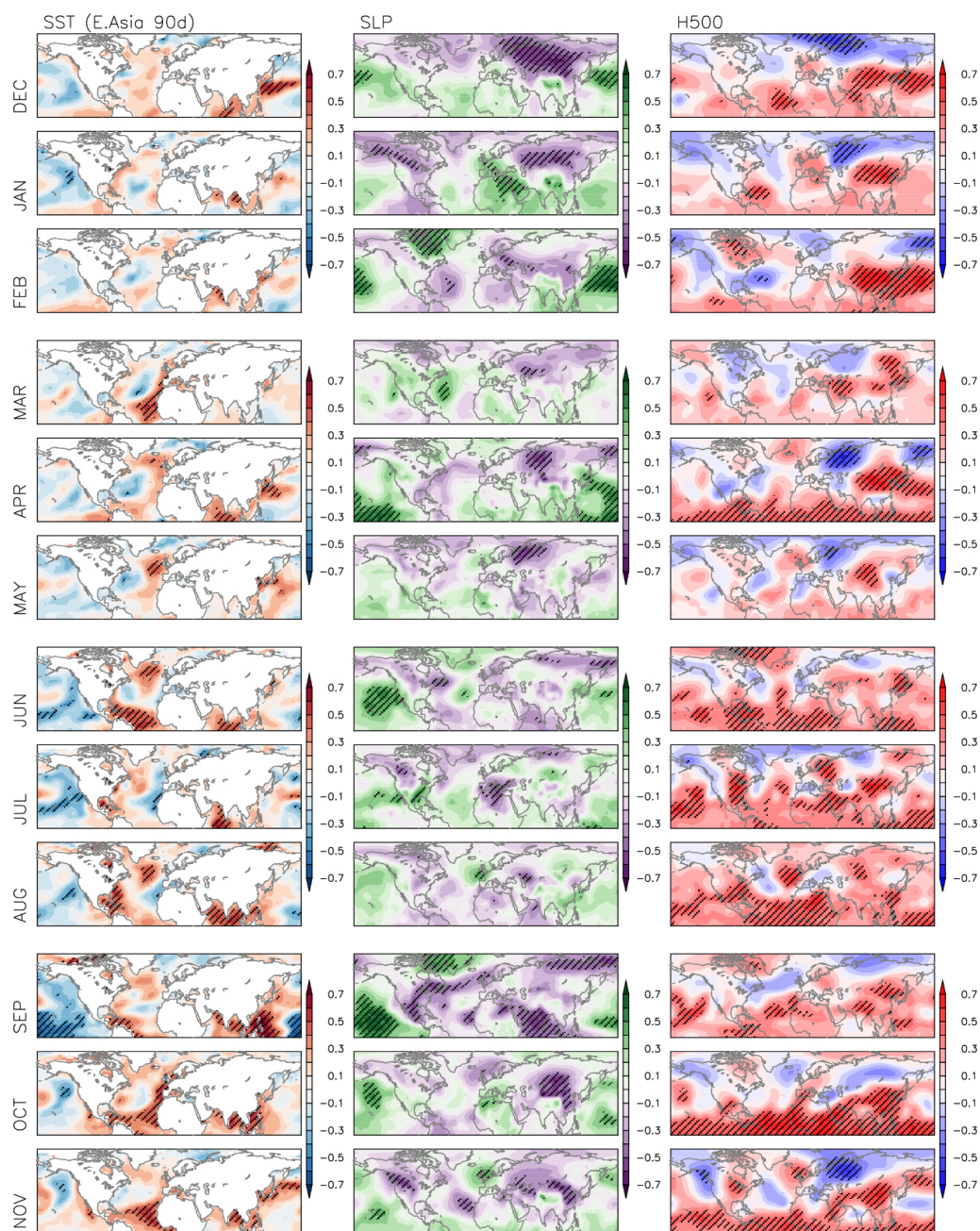


Figure 67. Spatial patterns of the correlation coefficients between (left) SST, (middle) SLP, (right) Z500 anomalies and East Asian hot day index in each calendar month for 1981-2010.

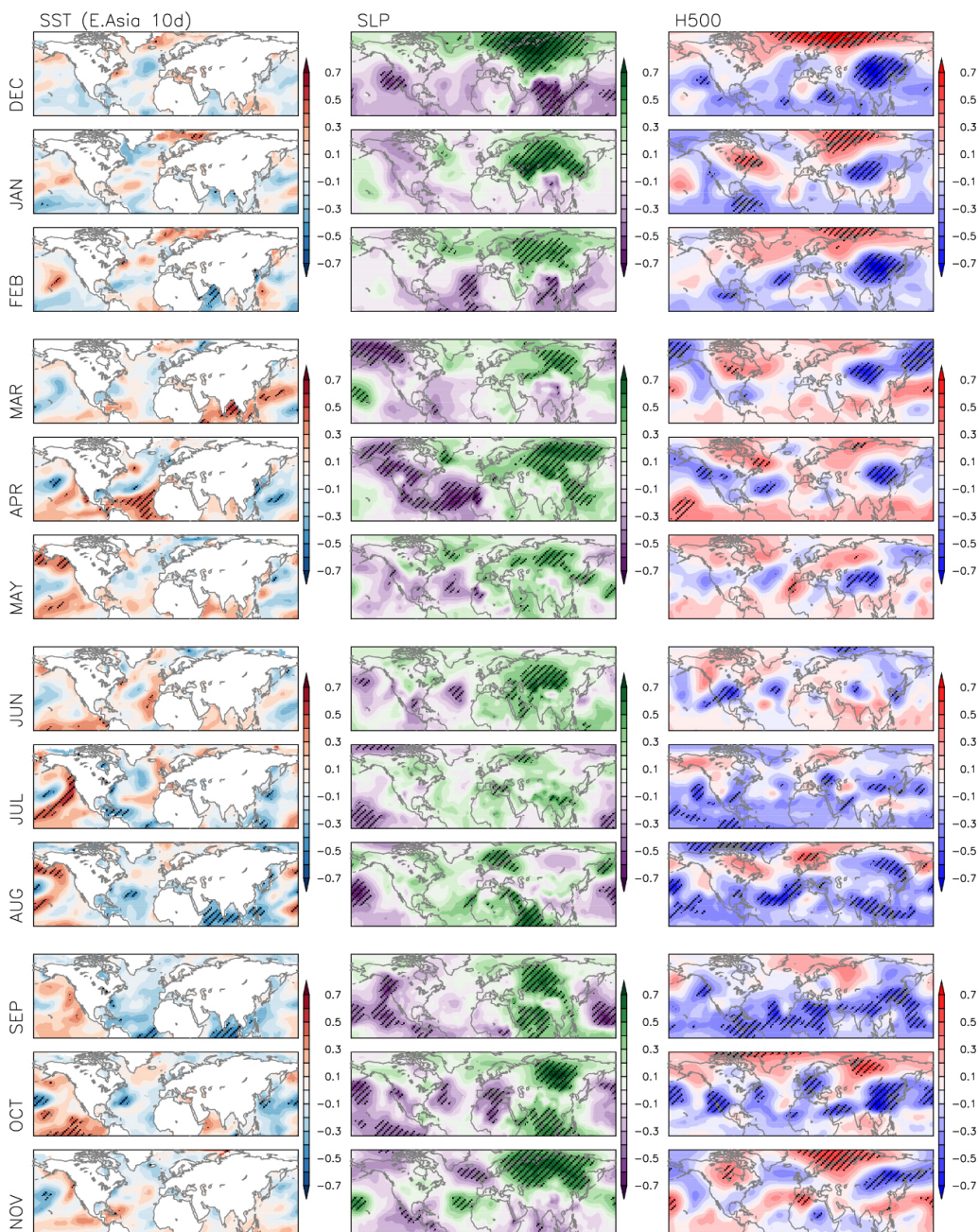


Figure 68. Same as Figure 67 except for East Asian cold day index.

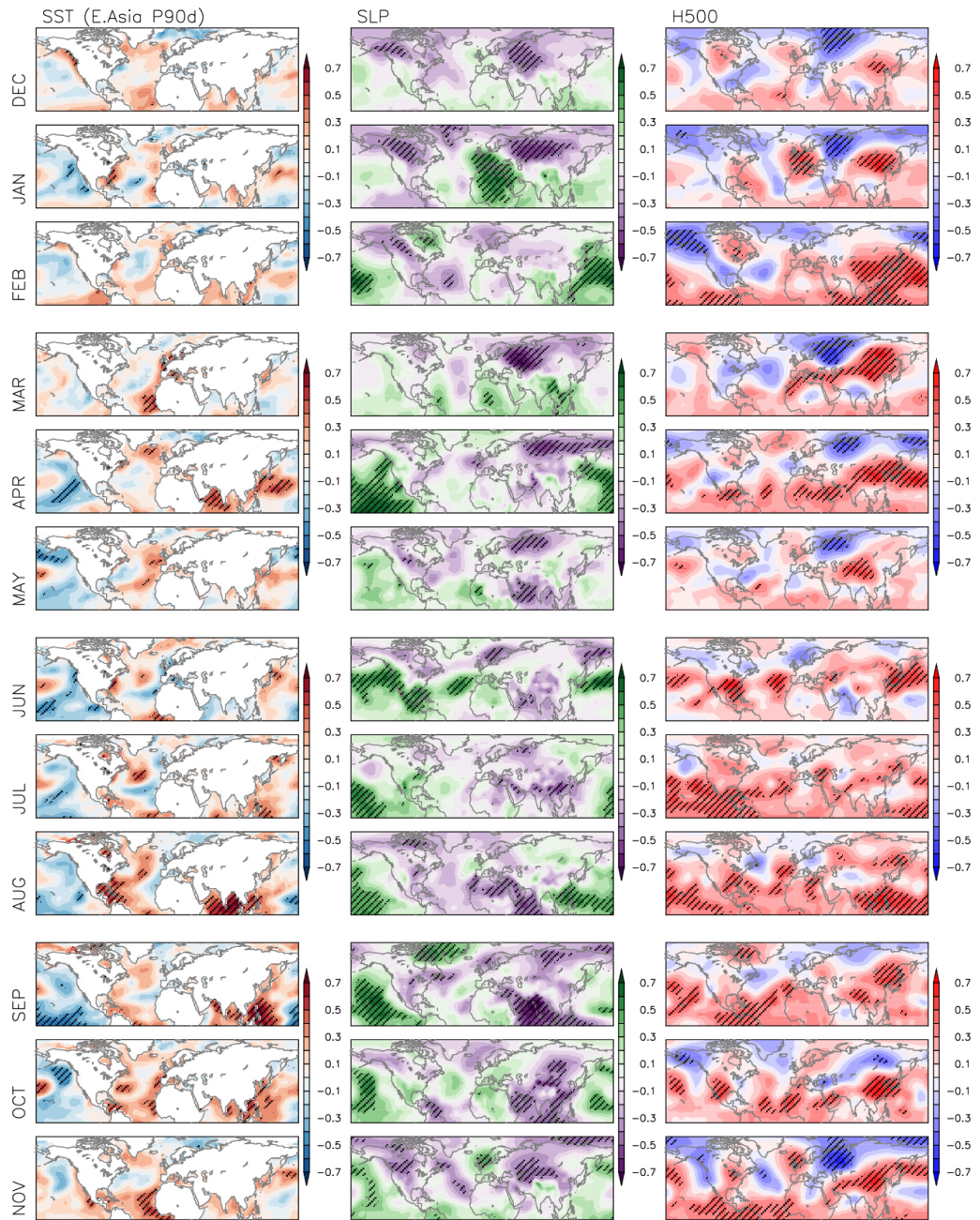


Figure 69. Same as Figure 67 except for East Asian wet day index.

5. 요약 및 결론

본 과제에서 2018년 1월부터 8월까지 이상 기후(즉 이상고온, 이상 저온, 이상 강수) 감시 및 분석이 수행되었으며, 아울러 평년 기간에서 이상 기후 추세 및 이상 기후 발생 관련 순환장의 분석을 수행하였다. 그리고 현재 일어난 이상 기후 감시 및 원인 분석 연구에 활용하기 위해서 평년기간 이상 기후 관련 대기/해양 순환장을 분석 하였다.

먼저 2018년도에 발생한 이상 기후를 정리하면, 이상 저온의 날이 평년기간의 최대/최소 범위였고, 특히 북반구에서 2018년 여름철로 갈수록, 평년 기간에 비해서 상당히 이상 저온의 날수가 적었다. 그러나 이상 고온 날수는 평년 기간의 최대 범위를 넘는 지역들이 많았으며, 겨울철에서 여름철로 진행할수록 그 범위를 넘는 경향이 뚜렷하였다. 결국 올해 북반구 지역에서 여름철 동안 폭염이 평년 기간보다 상당히 심했던 것이 확인되었다. 올해 이상 강수는 대체적으로 활발하게 발생했다. 동아시아와 남아시아에서 올해 전반적으로 이상 강수가 평년범위 보다 상당히 증가하였다. 북미는 2월, 6월에 남미는 1월에 이상 강수가 많았다. 호주에서는 이상 강수가 여름철에서 가을철 즉 1월에서 5월에 평년보다 이상 강수가 상당히 증가하였다. 전체적으로 2018년 이상 강수의 변동 경향이 이상 고온과 상당히 비슷하였다.

평년 기간(1981-2010)에서 분석된 이상 고온/저온, 강수 추세 경향은 대체로 이상 고온 날수는 증가 경향, 이상 저온 날수에서는 감소 추세의 경향을 보였다. 특히 북반구에 있는 지역들 즉 북 유라시아, 북미, 동아시아 지역에서 가을철에 이상 고온의 양의 추세 값이 크고, 동시에 이상 저온의 음의 추세 값이 컸는데 이는 북반구 가을철에 온난화가 다른 계절 보다 더 빨리 진행됨을 의미한다. 가을철 이상 고온 추세가 큰 이유에 대하여 더 상세한 연구가 필요하지만, snow-albedo feedback이 가을철에 상대적으로 강하기 때문인 것으로 사료된다. 아울러 동아시아와 북미 지역에서 1월 및 2월 달에 이상 고온과 저온 날들이 모두 양의 추세 값을 보였는데, 이는 겨울철에 기온 변동성이 점점 커져 간다는 것을 의미한다. 이 같은 겨울철 기온 변동성 증가는 극에서 영향이 온난화가 진행될수록 커지는 것과 관련이 있는 것으로 보인다. 뚜렷한 이상 강수 날수의 증가 추세를 보이는 지역은 12월에 대하여 남미, 봄, 가을 겨울철에서 호주 지역, 2월에서 7월, 9월에서 12월에 남아시아 지역, 여름철 동아시아 지역들이었다.

동아시아 지역에서 계산된 이상 기후 지수들과 관련하여 평년기간에서 대기/해양장과 상관관계 분석결과는 일반적으로 북대서양, 한반도 주변, 북인도양에서 SST 편차와 유의한 양의 상관관계를 보였다. 하층 대기에서는 유라시아 대륙에 음의 상관관계, 한반도/일본 동쪽의 SST 편차와 음의 상관관계가 있었다. 상층 대기에서는 중국에서 한반도, 일본까지 동서 방향으로 펼쳐진 Z500 편차와 유의한 양의 상관관계가 존재한다. 동아시아에서 이상 저온 날수의 변동은 이상 고온 날수 변동 대한 SLP, Z500 편차와의 관계와 반대의 특징을 보였다. 동아시아 이상 강수 날수의 증가와 관련된 대한 해양/대기 패턴은 이상 고온과 관련된 패턴과 상당히 유사점이 많았다. 위와 같은 결과를 올해 여름 동아시아 이상고온과 연결하였을 때, 동아시아 부근 Z500 편차에서 많은 유사점이 발견 되었다. 이에 더하여 평년 보다 상당히 증가한 이상 고온 날들에 대하여 여름철 북서 태평양에서 발달한 저기압성 편차를 가능한 원인으로서 주목하였다. 즉 워풀(warm pool) 부근에 저기압성 편차는 남북 방향의 순환 즉 해들리 순환과 관련되어 동아시아 부근에 고기압성 편차를 발달시키며, 결국 이상 고온 발생에 기여한 것으로 보인다.

본 연구에서 일부 이상 기후 발생 관련 대기/해양 순환장 분석을 통하여 일부 발생 원인을 규명하고자 하였다. 그러나 주성분 분석, 유사성 분석, 합성장 분석등을 이용하여, 좀더 체계적인 원인 규명 분석 방법이 요구된다. 아울러 이상 기후 발생에 영향을 줄 수 있는 기후 물리 변수 들 즉 해빙, 눈덮힘, 토양 수분 등의 분석도 필요하다. 그리고, 이상 기후 이벤트들을 분류하기 위해서 본 연구에서는 신속한 자료 획득의 장점 때문에 재분석 자료를 사용하였는데, 분석 결과의 robustness를 확보하기 위해서 재분석 자료들 사이의 결과의 일관성을 살펴봐야 한다. 이들은 추후 연구에서 수행될 예정이다.

REFERENCES

- Barnes, E. A., 2013: Revisiting the evidence linking Arctic amplification to extreme weather in midlatitudes. *Geophysical Research Letters*, **40**, 4734–4739.
- Cai, W., and Coauthors, 2014: Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, **4**, 111–116.
- Cohen, J., and Coauthors, 2014: Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, **7**, 627–637.
- Coumou, D., and S. Rahmstorf, 2012: A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, **2**, 491.
- Herring, S. C., M. P. Hoerling, J. P. Kossin, and T. C. Peterson, 2015: Explaining extreme events of 2014 from a climate perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **96**, S1–S172.
- Huang, B., V. F. Banzon, E. Freeman, J. Lawrimore, W. Liu, T. C. Peterson, T. M. Smith, P. W. Thorne, S. D. Woodruff, and H.-M. Zhang, 2017: Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 4 (ERSST.v4): Part I. Upgrades and intercomparisons. *Journal of Climate*, **28**, 911–930.
- IPCC, 2012: Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, Field, C. B., et al. eds., A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 1–19 pp.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Janowiak, J. E., A. Gruber, C. R. Kondragunta, R. E. Livezey, and G. J. Huffman, 1998: A comparison of the NCEP–NCAR reanalysis precipitation and the GPCP rain gauge–satellite combined dataset with observational error considerations. *Journal of Climate*, **11**, 2960–2979.
- Johnson, N. C., S. P. Xie, Y. Kosaka, and X. Li, 2018: Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown. *Nat Commun*, **9**, 1724.

- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437–471.
- Karl, T. R., N. Nicholls, and A. Ghazi, 1999: CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. *Climatic Change*, **42**, 3–7.
- Lee, W. S., and M. I. Lee, 2016: Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *International Journal of Climatology*, **36**, 4815–4830.
- Min, S.-K., and Coauthors, 2015: Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: A review. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, **51**, 103–121.
- Peterson, T. C., 2005: Climate Change Indices. *WMO Bulletin*, **54** (2), 83–86.
- Rogers, J., 1981: The North Pacific Oscillation. *Journal of Climatology*, **1**, 39–57.
- Trenberth, K. E., J. T. Fasullo, and T. G. Shepherd, 2015: Attribution of climate extreme events. *Nature Climate Change*, **5**, 725–730.
- Yu, J.-Y., and S. T. Kim, 2011: Relationships between Extratropical Sea Level Pressure Variations and the Central Pacific and Eastern Pacific Types of ENSO. *Journal of Climate*, **24**, 708–720.
- 가상청, 2016: 기후감시 및 분석 기반의 장기예보 가이드스 (II), 194pp.

【연구자】

김선태 선임연구원

이우섭 선임연구원

이은정 연구원

연구보고서 2018-03

아시아/태평양 지역 극한 기후 감시 및 분석

I S B N 979-11-5698-235-7

발 행 2019년 3월

발 행 인 권 원 태

발 행 처 APEC기후센터
부산시 해운대구 센텀7로 12

제작·인쇄 경성문화사

이 보고서는 APEC기후센터 홈페이지(<http://www.apcc21.org/>)에서 이용하실 수 있습니다.
또한 보고서에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 단, 무단 전재 및
복제를 금합니다.