

여름철 계절내 진동 예측 시스템 개선 IV: BSISO 예보 해석 및 활용 가이드언스 마련

Improvement of Real-Time Forecast System on the BSISO IV: Increasing
Practical Usefulness of BSISO Forecast Information by Creating Guidelines

김해정, 정유림, 문자연, 오상명 예측기술팀

발간사

2주에서 2개월에 해당하는 시간규모인 S2S(Subseasonal to seasonal)는 극한 현상이 가장 빈번히 발생하는 기간으로 알려져 있습니다. 따라서 S2S에 대한 충분한 이해와 신뢰도 높은 예측은 농업, 수자원, 보건, 에너지, 재해의 사전 대비 등 사회·경제적 측면에서도 매우 중요하게 여겨지고 있습니다. 특히 여름철 계절내 진동(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO)은 S2S 예측의 중요한 잠재적 인자로 알려져 있습니다. 그리고 이의 변동에 따른 지역적 우기와 건기의 발생은 아시아 몬순 지역 자연 재해의 약 80%에 달하는 극한 기후현상에 큰 영향을 미치기 때문에 BSISO에 대한 모니터링 및 예측 요구는 나날이 증가하고 있습니다. 이러한 사회적 요구에 발맞추어 2013년부터 APEC기후센터는 BSISO 예측 정보를 실시간으로 제공하고 있으며 더 나은 예측 정보를 제공하기 위해 끊임 없이 노력하고 있습니다.

2018년 우리는 BSISO 실시간 예측 정보의 실질적인 활용을 높이기 위하여 BSISO 예측 지수에 기반 한 북서태평양 열대저기압 발생 지수를 개발하고 동아시아 여름철 기온에 대한 BSISO의 기여도를 연구하였습니다. BSISO 예보의 가치를 창출하여 최종 수요자들의 의사결정을 지원하고자 하는 취지에서 기획되었다고 볼 수 있습니다. 이는 1993년 Allan H. Murphy가 가치의 측면에서 바라본 좋은 예보를 위한 노력과도 부합한다는 점에서 더욱 의의를 갖습니다. 이미 우리 센터에서는 지난 2016년 BSISO 정보에 기반 한 호우 확률 예보 방안을 마련하고 서비스한 바 있는데, 기후 예측 정보와 실질적인 활용, 그 사이의 간극을 메우기 위한 연구들을 시리즈로 발간하게 된 것에 기쁘게 생각합니다.

끝으로 연구를 맡아 수행해준 김해정 선임연구원과 정유림 연구원의 노고에 감사드립니다. 연구가 순조롭게 진행될 수 있도록 다방면으로 도와준 문자연 선임연구원과 오상명 연구원에게도 감사의 뜻을 전합니다. 이 연구보고서가 밑거름이 되어 추후 예보와 활용 사이의 원활한 흐름을 창출할 선진 프레임워크가 개발되길 바랍니다.

2019년 3월
APEC 기후센터
원장 권 원 태

ABSTRACT

The goal of this project is to provide the better forecasts for BSISO. To do this, we have tried to improve the recognition of the value of BSISO data by investigating how to apply and interpret it in terms of the genesis of tropical cyclones over the Western North Pacific (WNP) and the variability of temperatures, especially Korean heat waves, over the Asian monsoon region.

There were BSISO phase preferences in the genesis of tropical cyclones in the WNP region and the occurrence of heat waves in Korea. From Jul.-Oct., when BSISO1 is in phases 5, 6, and 7, and BSISO2 is in phases 8, 1, and 2, it could influence the large-scale zonal wind related to the monsoon trough, which could contribute towards creating a synoptic-scale environment favorable to the genesis of tropical cyclones in the WNP.

In terms of the heat wave that occurs in Korea in July and August, BSISO1 in phases 6, 7, 8, and 1 and BSISO2 in phases 1, 2, 3, and 4 could intensify convective activity over the western Pacific. This convection could contribute towards creating Pacific-Japan pattern and North Pacific pattern, especially east-west elongated anticyclonic circulations off the coast of East Asia and the Bering Sea, which could in turn lead to the long-lasting heat wave.

목 차

1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	3
2.1 BSISO 지수	3
2.2 관측 자료	3
2.2.1 태풍 발생 자료	3
2.2.2 한반도 폭염 자료	4
2.2.3 대규모 순환장 자료	4
3. 연구내용	6
3.1 서태평양 열대 저기압 발생에 대한 BSISO 예보의 활용 가능성 평가	6
3.1.1 서태평양 열대 저기압의 특성	6
3.1.2 서태평양 열대 저기압과 BSISO 의 연관성	7
3.1.3 BSISO 기반 WNP ISGPI 개발	14
3.1.4 서태평양 열대 저기압 발생 예측에 대한 BSISO 활용 가능성	23
3.2 아시아 몬순 지역 기온 예측에 대한 BSISO 예보의 활용 가능성 평가	32

3.2.1 한반도 폭염 특성-----	32
3.2.2 한반도 폭염과 BSISO 의 연관성-----	34
3.2.3 사례분석-----	45
 4. 결론 및 토의-----	 50
4.1 결론-----	50
4.2 토의-----	50
4.3 성과-----	51
4.4 기대 효과-----	52
 I. REFERENCES-----	 53

1. 서론

2013년 7월부터 APCC 홈페이지를 통해 서비스(김해정, 2013)되고 있는 여름철 계절 내 진동(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO)은 아태지역 여름철 기후 및 특이 기상 발생에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다. APCC BSISO 예측 정보는 일반적으로 짧게는 2주에서 길게는 1개월 이상 믿을 만한 수준의 BSISO 예보를 생산하는 것으로 나타나(김해정, 2014) BSISO의 영향으로 인한 수문 기상학적 극한 현상에 대한 예측뿐만 아니라 계절내 시간 규모에 내에서 다양한 응용 분야에서의 활용도 가능해졌다. 이에 2016년에는 BSISO 예측 정보를 활용하여 아시아 몬순 지역의 호우 확률 예보를 생산하였고 더불어 향후 1주~2주 동안의 메콩강 유역 호우를 BSISO 예측 정보를 통해 어떻게 전망할 수 있는지를 정리한 활용 가이드를 만들었다(김해정, 2016). 그러나 호우뿐만 아니라 다양한 기상 현상들이 BSISO의 변동에 영향을 받지만 예측의 관점에서 그들의 관계를 풀어내고자 한 연구는 여전히 미흡한 실정이다. 그 중 열대 저기압 발생과 기온 변동은 아시아 몬순 지역의 여름철에 가장 큰 이슈라 할 수 있기에 이들에 대한 BSISO의 기여도와 BSISO 예측 정보의 활용 가능성을 파악하는 것이 우선적으로 수행이 되어야 한다. APCC의 BSISO 서비스는 실무에 유용한 정보를 제공해 줄 수 있으나 기존에 phase diagram 형태의 콘텐츠는 대기의 현재·미래 상태를 직관적으로 이해하기 어려운 측면이 있어 전문가뿐만 아니라 일반 사용자도 BSISO 예측의 의미를 파악하거나 활용할 수 있는 좀 더 유용한 정보에 대한 필요성이 제기되어 왔다. 따라서 열대 저기압과 기온에 대한 BSISO 예보의 활용 가이드를 마련한다면 APCC BSISO 예측 정보의 활용을 증진시킬 수 있을 뿐만 아니라 사용자에게 좀 더 유익한 정보를 제공할 수 있게 될 것이다.

연구 목적

- 서태평양 열대 저기압 발생에 대한 BSISO 예보의 활용 가능성 평가
- 아시아 몬순 지역 기온 예측에 대한 BSISO 예보의 활용 가능성 평가

본 과제는 “BSISO 예측 정보 시스템의 실시간 운영” 과제와 더불어 더 나은 APCC BSISO 정보 생산을 궁극적인 목표로 두고 있다. ‘더 나은 BSISO 정보’ 즉 더 쓸모 있는 정보를 만들기 위한 여러 가지 노력 중 본 과제는 세 번째 전략인 사용자로 하여금 APCC BSISO 정보의 가치와 유용성을 알리는 일에 해당된다(그림 1).

2 | 여름철 계절내 진동 예측 시스템 개선 IV: BSISO 예보 해석 및 활용 가이드선 마련

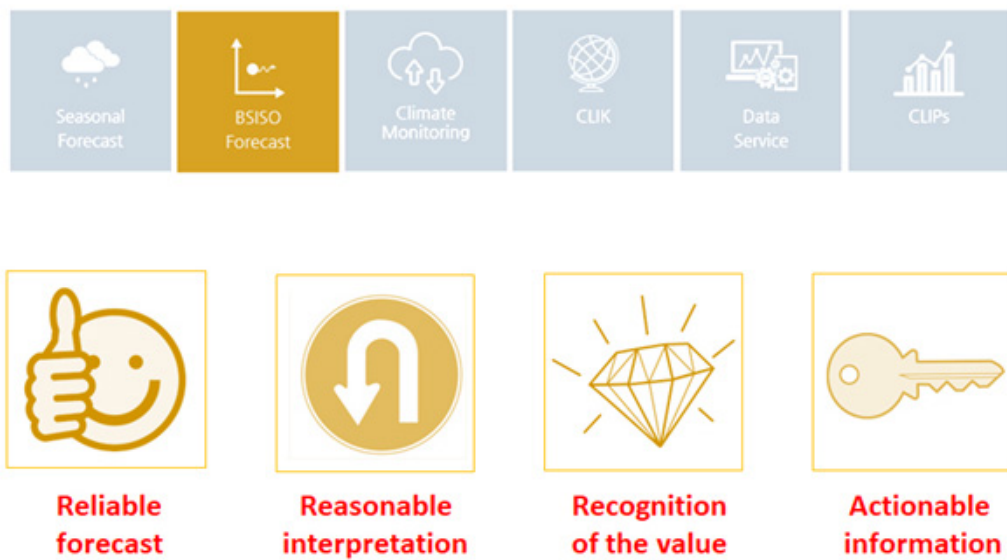


Figure 1. Strategy for practical use of BSISO forecast for the better information.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 BSISO 지수

본 연구에서는 Lee et al.(2013)의 BSISO 지수를 활용하여 두 특이 기상과 BSISO와의 연관성을 찾아내었고 APCC 실시간 BSISO 모니터링/예측 정보를 생산하였다. BSISO 예측 정보를 활용하여 서태평양 열대저기압 발생을 예측하기 위해서는 먼저 BSISO 지수 예측을 위한 모델 자료가 필요하다. 본 연구에서는 BSISO 예보 참여모델 중 예측성이 가장 우수한 ECMWF로부터 생산된 BSISO 예측 지수를 사용하였고 표 2.1에서 ECMWF의 상세 정보를 볼 수 있다.

Table 2.1. Details of the ECMWF model for BSISO operational forecast.

Institute	Model	Ensemble Size	Forecast Period	Update Frequency	Resolution
ECMWF	ECMWF Ensemble Prediction System	51	32 days	Twice per week	T639, T319 L62

2.2 관측 자료

2.2.1 태풍 발생 자료

본 연구에서 사용한 열대저기압 자료는 International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS; <http://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs>) v03r09 (Knapp et al., 2010) 이다. 본 자료는 최대 풍속이 34 knots (17m/s) 이상일 때를 열대저기압 발생의 기준으로 삼았다. 본 연구에서는 전체 열대저기압 자료 중 서태평양 지역에 대해서만 1981년부터 2010년까지 30년 동안의 자료를 사용하였다.

2.2.2 한반도 폭염 자료

본 연구에서는 각 지점에서 최고기온이 33도 이상일 때를 폭염으로 규정한 Lee and Lee (2016)의 폭염 정의를 사용하였다. BSISO에 의한 대규모 순환장의 변동과 한반도 폭염의 관련성을 보기 위하여 폭염일은 총 지점수의 50% 이상이 폭염에 해당되는 날로 정하였다. 분석 기간은 1981년부터 2014년까지의 7월과 8월이다.

2.2.3 대규모 순환장 자료

열대저기압 분석 및 BSISO 와 연관된 순환장 분석을 위해서 표 2.2의 변수들을 사용하였다. 대규모 순환장에 대한 BSISO의 영향을 추정하기 위하여 BSISO1과 BSISO2의 영향장을 결합하였고 그 방법은 2018년 APCC 연구보고서인 “BSISO 예측 정보 시스템의 실시간 운영”의 2.2.2항에 기술하였다.

Table 2.2. Description of the circulation data from the observation.

	Name	Source	Res.	Unit	Period	File directory
T2M	2 meter temperature	ERA Interim	480x241	K	1981-2015	/data21/01.WORK/ECMWF_interim
SH	Specific Humidity at 2m	NCEP/DOE AMIP- II Reanalysis	192x94	kg/kg	1981-2015	/data21/01.WORK/00.DATA/02.R2
SH	Specific humidity	NCEP Reanalysis Daily Averages	144x73	kg/kg	1981-2015	/data21/01.WORK/00.DATA/11.R1
RH	Relative Humidity on Pressure Levels	NCEP/DOE AMIP- II Reanalysis	144x73	%	1981-2015	/data21/01.WORK/00.DATA/02.R2
MSLP	Mean Sea Level Pressure	NCEP/DOE AMIP- II Reanalysis	144x73	Pascal	1981-2015	/data21/01.WORK/00.DATA/02.R2
RH	Relative Humidity on Pressure Levels	NCEP/DOE AMIP- II Reanalysis	144x73	%	1981-2015	/data21/01.WORK/00.DATA/02.R2
OLR	Outgoing Longwave Radiation	NOAA	144x73	W/m2	1981-2015	/data21/BSISO_R1/MONI/10.READY
Z500	Geopotential Heights on Pressure Levels	NCEP/DOE AMIP- II Reanalysis	144x73 L17	m	1981-2015	/data21/01.WORK/00.DATA/02.R2
OMEGA	Omega on Pressure Levels	NCEP/DOE AMIP- II Reanalysis	144x73 L17	Pascal/s	1981-2015	/data21/01.WORK/00.DATA/02.R2
U	U-wind on Pressure Levels	NCEP/DOE AMIP- II Reanalysis	144x73 L17	m/s	1981-2015	/data21/01.WORK/00.DATA/02.R2
V	V-wind on Pressure Levels	NCEP/DOE AMIP- II Reanalysis	144x73 L17	m/s	1981-2015	/data21/01.WORK/00.DATA/02.R2
SST	Sea Surface Temperature	NOAA Daily Optimum Interpolation SST	1440x720	°C	1982-2015	/data21/01.WORK/00.DATA/04.NOAA/SST
PRCP	Precipitation	GPCP 1DD V1.2 Combined Data Sets	360x180	mm/day	1997-2014	/data21/01.WORK/00.DATA/08.GPCP
PRCP	Precipitation	APHRO_MA V1101 daily precipitation with 0.25deg grids	360x280	mm/day	1981-2007	/data21/01.WORK/00.DATA/06.APHRODIT E/MA

3. 연구내용

3.1 서태평양 열대 저기압 발생에 대한 BSISO 예보의 활용 가능성 평가

3.1.1 서태평양 열대 저기압의 특성

1981년부터 2010년까지 30년 동안 서태평양 지역에서 발생한 열대 저기압의 수는 총 998개이다. 그림 2는 분석 기간 동안 열대 저기압의 발생 갯수를 월별로 나타낸 그래프이다. 열대저기압 발생 빈도는 월마다 다른데 월간 변동의 1.5 표준편차(99개)를 넘는 7월~10월은 다른 월에 비해 열대저기압이 많이 발생하는 시기라고 볼 수 있다. 전체 열대 저기압의 68%인 677개가 7월~10월 동안 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 열대저기압이 빈번히 발생하는 7월~10월을 분석 기간으로 정하고 BSISO와의 관련성을 조사하였다.

그림 3은 1981년부터 2010년까지 JASO 기간 동안의 677개 열대저기압의 발생 위치를 나타낸 그림이다. 열대저기압은 100°E~180°E, 그리고 0~40°N에 걸쳐 곳곳에서 발생하고 상대적으로 저위도와 서쪽 지역에서 빈번히 발생한다.

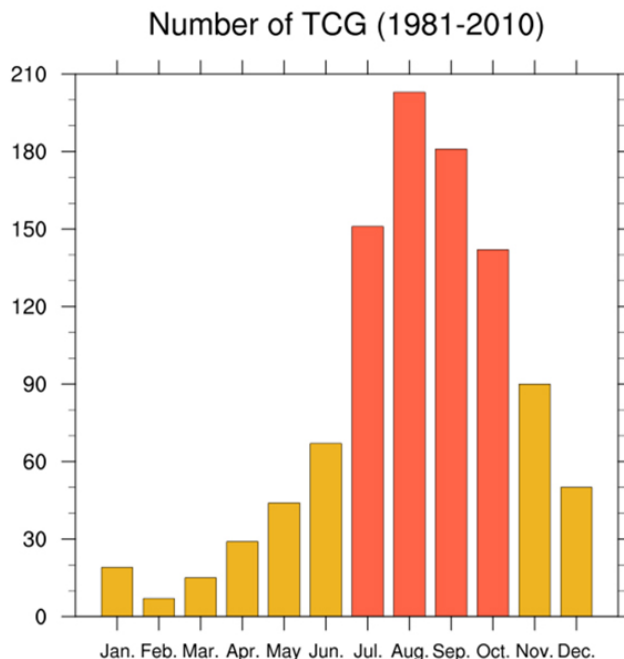


Figure 2. Monthly number of tropical cyclone occurrence over the Western North Pacific during 1981~2010.

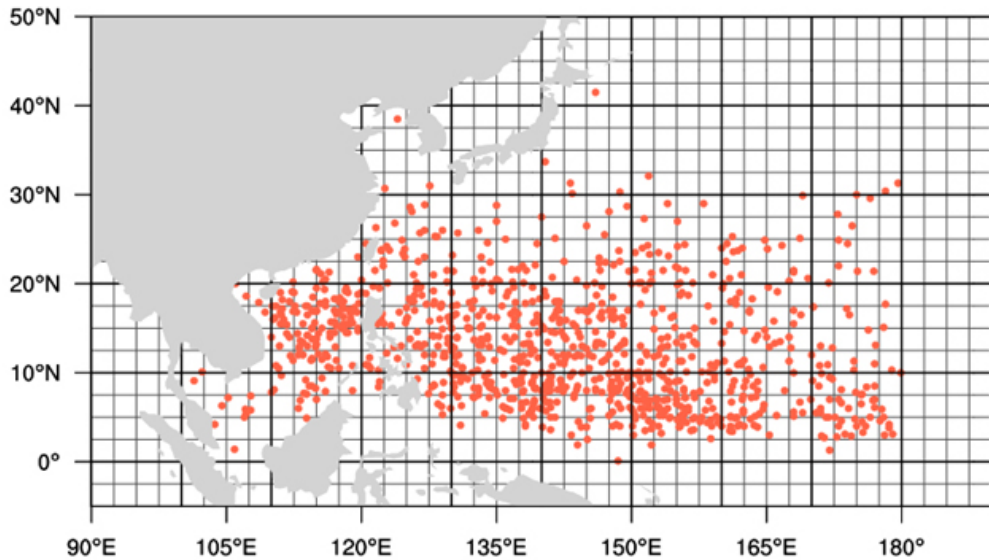


Figure 3. Location of tropical cyclone genesis over the Western North Pacific for JASO during 1981~2010.

3.1.2 서태평양 열대 저기압과 BSISO 의 연관성

7월~10월 동안의 BSISO와 열대저기압 발생과의 관련성을 알아보았다. 표 3.1은 BSISO가 활발할 때 위상에 따라 열대저기압 발생 확률을 나타내었다. BSISO1은 Phase 5,6,7 일 때, BSISO2는 Phase 8,1,2 일 때 다른 phase 에 비해 열대저기압 발생이 상대적으로 빈번히 일어났다. 그림 4은 BSISO가 약할 때에 비해서 BSISO가 강할 때의 열대저기압 발생 확률 변화를 나타낸 그래프이다. 이 결과에서도 마찬가지로 BSISO가 약할 때에 비해서 강한 BSISO1 일 때는 Phase 5,6,7, 그리고 강한 BSISO2일 때는 Phase 8,1,2에서 열대저기압 발생의 증가가 나타났다. 즉, 서태평양 열대 저기압 발생에 BSISO는 phase preference가 존재하는 것으로 보인다. 이 phase preference를 확인하기 위하여 각 BSISO 모드의 위상별로 합성장 분석을 수행하였다. 그림 5는 BSISO1에 대한 OLR과 열대저기압 발생 빈도의 합성장 분석으로 BSISO의 phase가 진행함에 따라 태풍과 같은 열대 저압부가 발달하기 좋은 지역도 인도양에서 태평양으로 이동한다. BSISO의 대류 지역이 서태평양이나 태평양 중앙에 위치한 Phase 5,6,7 일 때 열대저기압의 발생 확률이 높아지는 반면 강한 대류구역이 인도양이나 인도차이나 반도에 있는 Phase 1,2,3의 경우에 서태평양은 고기압성 순환에 의해서 열대저기압 발생이 억제된다. BSISO2에

서도 phase preference를 확인할 수 있다(그림 6). BSISO의 대류 지역이 서태평양에 위치한 Phase 8,1,2 일 때 열대저기압의 발생확률이 높아지는 반면 고기압성 순환이 서태평양에 있는 Phase 3,4,5의 경우에 열대저기압 발생이 억제된다.

Table 3.1. Probability of TC occurrence when BSISO is active.

Phase	BSISO1	BSISO2
1	0.13	0.21
2	0.13	0.20
3	0.11	0.14
4	0.18	0.16
5	0.25	0.15
6	0.24	0.19
7	0.21	0.16
8	0.16	0.21

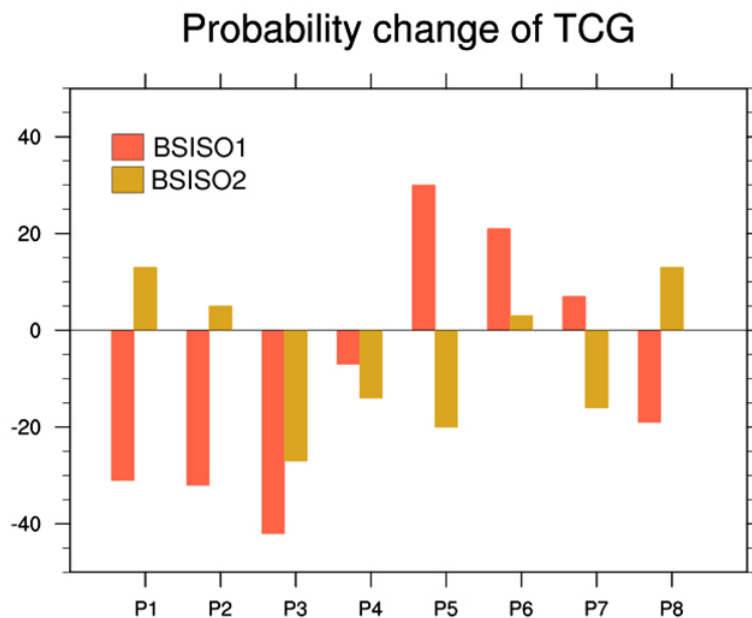


Figure 4. Probability change of TC occurrence in each of BSISO related to non-BSISO state.

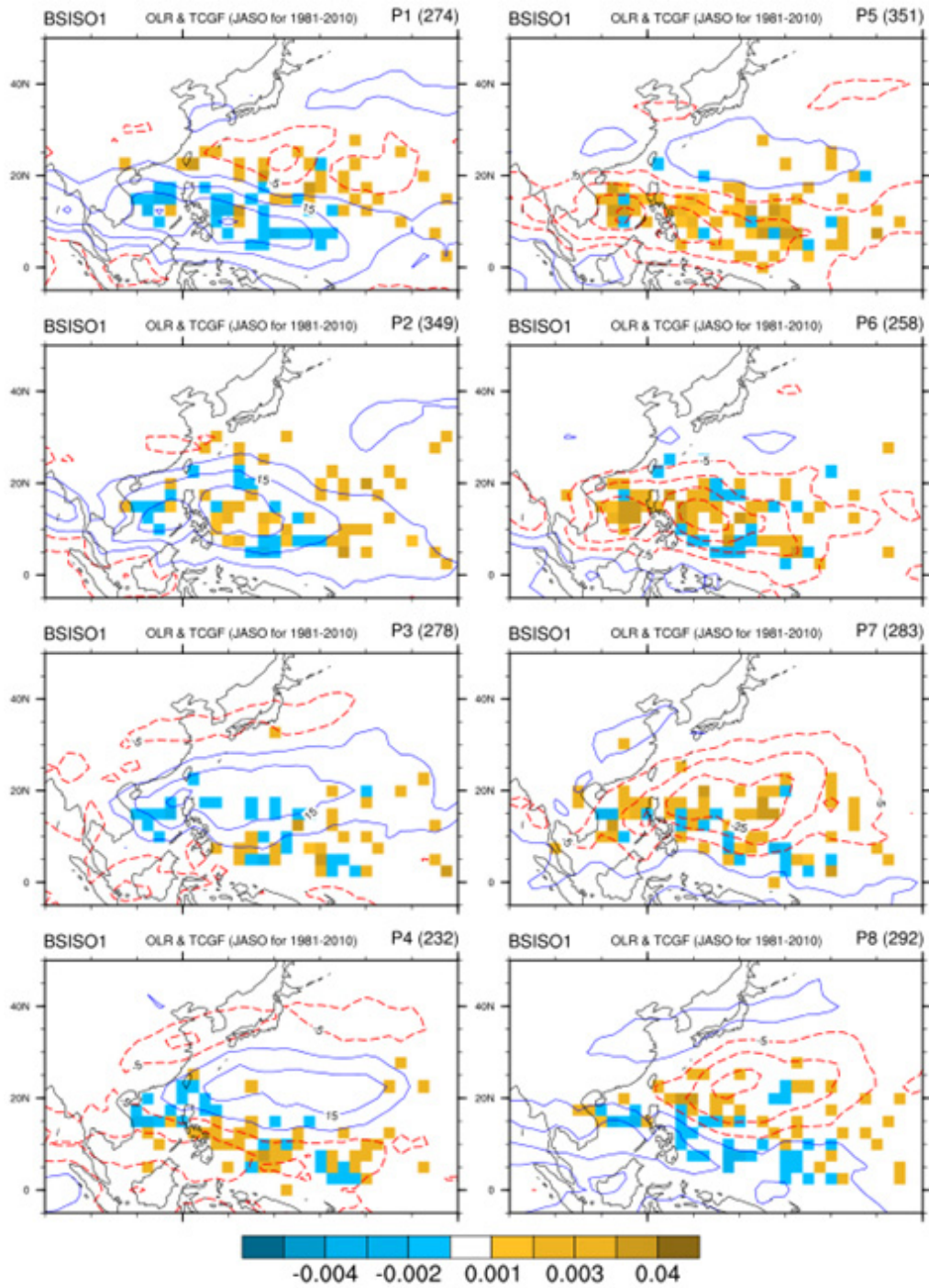


Figure 5. Composite anomaly of Tropical Cyclone Genesis Frequency (TCGF, shaded) and Outgoing Longwave Radiation (OLR, contour) for BSISO1 in JASO during 1981~2010.

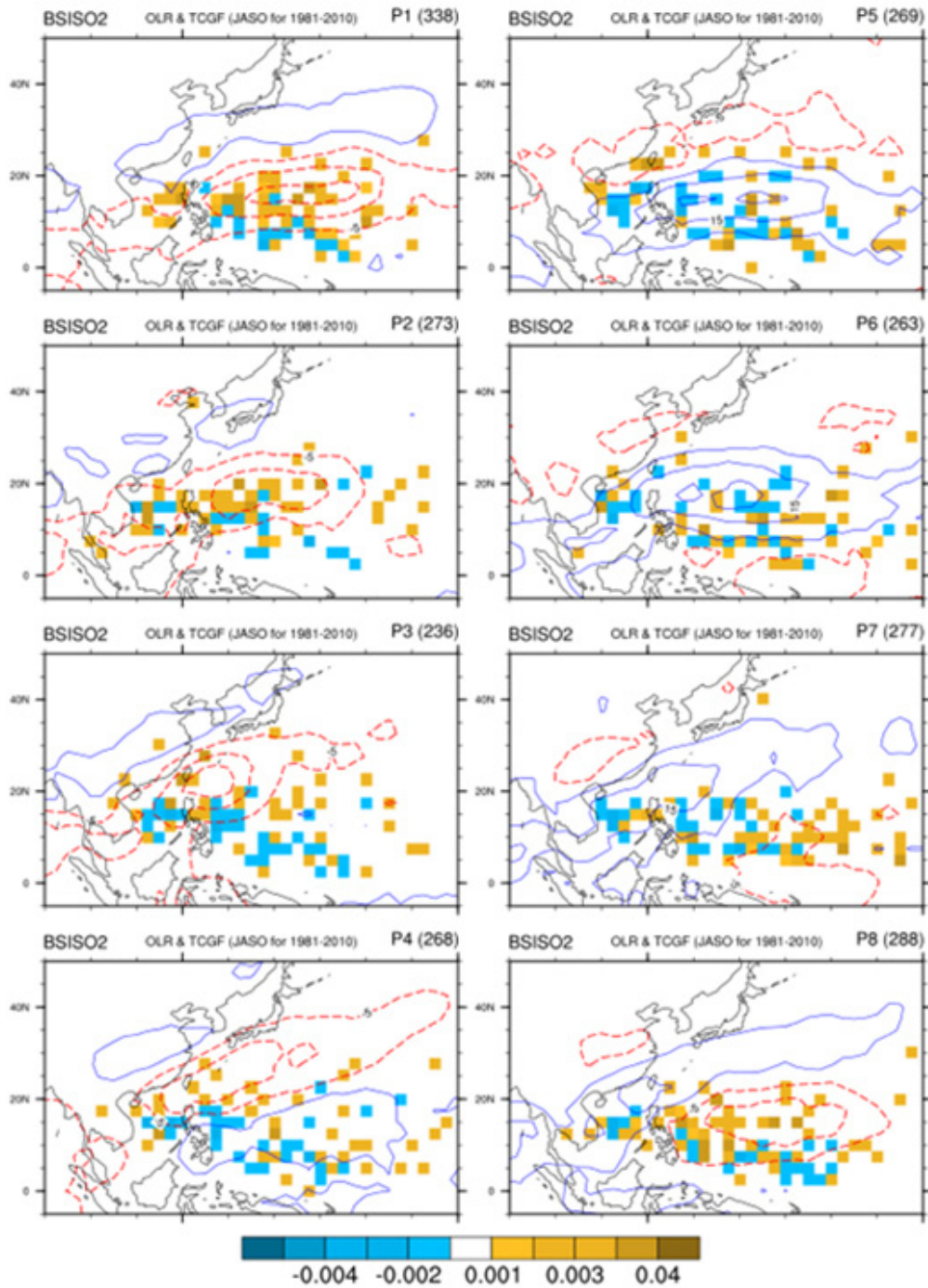


Figure 6. Same as Figure 5, but for BSISO2.

Ritchie and Holland (1999)는 하층 대기 흐름에 기반하여 북서태평양 지역에서 발생한 열대저기압의 발생을 5가지 특성(Shear Line (SL), Confluence Region (CR), Easterly Wave (EW), Monsoon Gyre (GY), Pre-existing Tropical Cyclone (PTC))으로 구분 지었다(그림 7). 이들 중 SL, CR, GY 패턴은 몬순 기압골과 관련이 있는데 몬순 기압골은 열대저기압을 생성하는데 가장 최적의 환경이다(Gray, 1968, 1998). 몬순 기압골의 강한 대류성 구름지역을 중심으로 북서쪽은 하층의 저기압성 순환과 상층의 발산구조에 의해 열대저압부가 발생하기 유리하고 인도차이나 반도에서부터 필리핀 해 동쪽으로 뻗어 나온 몬순 기압골에 의해 수반된 남서풍은 양의 와도를 증가시키게 되고 강한 와도는 공기 수렴과 상승기류를 유도하여 열대 저기압 발생에 호조건을 제공 한다(서 등, 2017). SL 패턴은 몬순 기압골을 따라 수평 바람장의 저기압성 시어를 가진다. CR 패턴은 몬순 서풍과 동풍이 합류하는 지점이다.

그림 8은 열대 저기압 발생에 영향을 주는 BSISO phase 들(BSISO1은 Phase 5,6,7; BSISO2는 Phase 8,1,2)의 하층 바람장 아노말리를 나타낸다. BSISO1은 영향 phase인 5,6,7에서 동서 수평으로 뻗은 저기압성 아노말리가 phase의 이동에 따라 점차 북동진하는 양상을 보인다. Phase 5에서는 서태평양에서는 인도차이나 반도에서부터 동쪽으로 연속된 저기압성 아노말리가 뻗어나와 GY 패턴이 중앙태평양에서는 EW의 패턴이 보인다. Phase 6과 phase 7의 중앙태평양에서 CR 패턴을, phase 7의 서태평양에 SL 패턴이 나타난다. 이는 Yoshida et al. (2014)의 결과와도 유사하다. BSISO2는 영향 phase인 8,1,2에서 phase의 이동에 따라 약간 남서-북동으로 기울어진 형태의 저기압성 아노말리가 북서진하면서 그 규모가 점차 작아진다. 대체로 SL 패턴으로 보여지고 중앙태평양에서의 열대저기압 증가는 EW 패턴의 영향으로 보인다. 결국 열대저기압 발생과 관계된 BSISO phase 동안 BSISO는 몬순기압골과 관련된 대규모 동서 바람장에 영향을 줄 수 있고 이는 열대저기압 발생에 적합한 중관 규모 환경을 만드는데 기여한다(Yoshida et al., 2014).

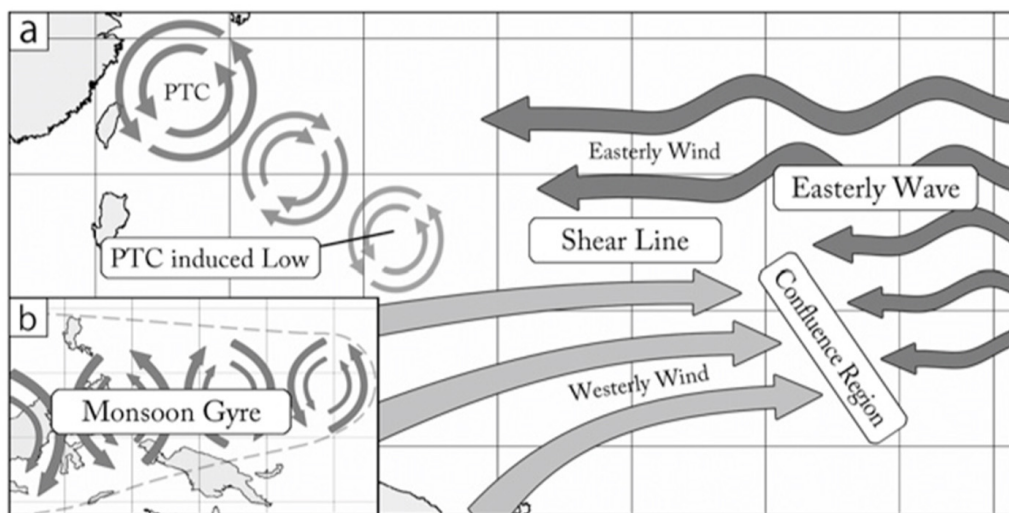


Figure 7. A schematic image of the five flow patterns contributing to TCG based on RH99.

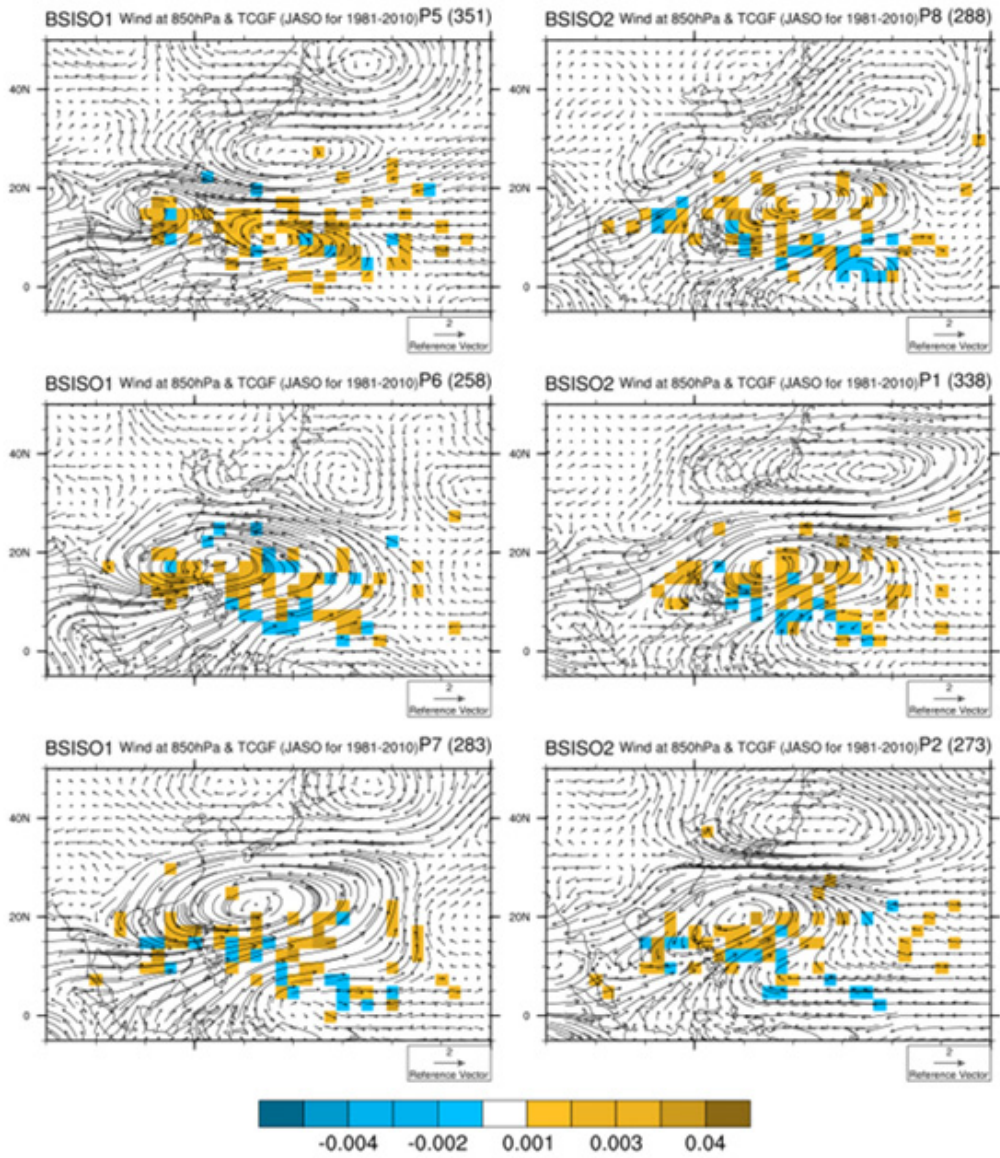


Figure 8. Composite wind anomaly at 850 hPa and the frequency of TCG for favorable phases of BSISO in JASO.

3.1.3 BSISO 기반 WNP ISGPI 개발

열대저기압은 열대 지역에서 대기-해양 상호작용으로 발생하는 강력한 저기압 시스템으로써 BSISO 정보를 활용하여 열대저기압 발생을 추정하기 위해서는 열대저기압을 정량적으로 나타낼 수 있는 지표(변수)가 필요하다. 2018년 Moon et al.(2018)은 종전에 계절 규모에서 열대저기압을 진단하던 Genesis Potential Index (ENGPI)의 한계를 보완하고 계절내 시간 규모에서 열대저기압의 변동을 정량화하기 위하여 BSISO를 활용한 ISGPI (Intraseasonal Genesis Potential Index)를 고안하였다. 그러나 이는 북반구 여름철인 5월~10월 동안 열대 해상 전체에서 발생하는 열대저기압에 대해서 개발된 지수라서 지역마다 상이한 기후학적 특성과 계절적 특성을 각각 반영하기에는 다소 한계가 있었다. 북서태평양의 경우 열대저기압이 빈번히 발생하는 기간은 7월~10월이고 여름철 몬순 흐름과 무역풍이 만나 수렴이 일어나는 특성을 가지고 있다. 또한 최근 연구 결과 (Hung et al., 2016)에 따르면 북서태평양에서의 태풍 발생 빈도는 BSISO2와 밀접히 관련되어 있어 BSISO1의 영향만이 고려된 ISGPI의 개선이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 BSISO의 impact이 고려된 북서태평양 지역에 특화된 열대저기압 지수인 WNP_ISGPI를 개발하였다.

3.1.3.1 WNP_ISGPI 개발

서태평양에 지역 특화된 ISGPI를 개발하는 과정은 기본적으로 Moon et al.(2018)의 프로세스를 따랐다. 그림 9에서 보여지는 것처럼 열대저기압이 빈번히 발생하는 지역을 $10^{\circ}\times 5^{\circ}$ 의 26개 격자로 구획하였다. 먼저 BSISO1과 2의 16개 위상에 대한 열대 저기압 발생빈도(Tropical Cyclone Genesis Frequency, TCGF) 합성장에 대해 이 26개 격자의 영역 평균 값을 일렬로 나열하면 총 416개(8 phase x 2 BSISO modes x 26 grids)의 샘플이 만들어진다. 그 후 열대저기압 발생에 영향을 줄 수 있는 7가지 변수들(표 3.2)에 대해 BSISO 위상에 따라 합성장 분석을 수행한 후 TCGF와 똑같은 방식으로 샘플을 확보한다. TCGF로 구성된 샘플은 종속변수로 두고 나머지 7가지 변수들의 샘플은 독립변수로 둔 뒤 step-wise linear regression 기법과 F-test를 사용하여 WNP_ISGPI를 계산할 다중 인자들을 추출하였다. 열대저기압 발생을 조절할 수 있는 7개의 영향인자들과

TCGF와의 아노말리 상관 계수는 표 3.2에 나타내었고 최종적으로 선택된 인자들과 WNP_ISGPI를 계산하는 수식은 표 3.3에서 볼 수 있다. 네 가지 변수는 500 hPa에서의 연직속도, 850 hPa에서의 상대와도, 200 hPa과 850 hPa 사이의 연직 시어(VZS), 그리고 6000 hPa에서의 상대습도이다. 네 가지 인자들과 TCGF의 복합 상관 계수는 0.75이다.

열대 저기압이 발생하기 위해서는 해양의 에너지원이 충분히 존재해야 하며 그 에너지가 대기 중으로 잘 전달될 수 있어야 한다(서 등, 2017). 이를 위해서는 다음과 같은 기본적인 배경장이 존재해야 한다(Gray, 1979).

1. 섭씨 26.5도 이상의 해수면 온도 및 상대적으로 깊은 해양 혼합층 필요. 이는 열대 저기압 발생에 필요한 기본적인 에너지 공급원으로 작용
2. 연직 바람 시어가 작을 때 열대 저기압 형성에 좋은 조건이 됨. 연직 바람 시어가 작으면 대류셀이 연직으로 성장할 수 있으며 대류셀에서 발생하는 잠열이 좁은 지역에 집중되어 열대 저기압으로 성장할 수 있는 에너지를 충분히 공급받을 수 있음
3. 대기 상태는 습한 공기 덩어리가 지속적으로 상승할 수 있는 조건부 불안정
4. 공기 덩어리를 상승시키는데 도움을 주는 하층 수렴과 함께 하층 와도가 존재해야 함
5. 잠열 방출을 통해 에너지를 공급받으며 상승운동을 도와주는 높은 중층 습도
6. 열대 저기압으로 발달이 가능한 초기 섭동이 존재해야 함. 초기 섭동은 열대 수렴대에서 발생하는 대류 활동, Easterly Wave, Mixed Rossby-Gravity Wave 등의 열대 지역의 여러 파동 등이 초기 섭동으로 작용할 수 있음

WNP_ISGPI 계산을 위해 선택된 네 가지 인자들은 위에서 설명된 해양의 에너지가 대기 중으로 잘 전달될 수 있는 기본적인 배경장과 관련이 있는 변수들이어서 서태평양 열대저기압 발생을 진단할 수 있는 인자들이 잘 도출되었다고 판단된다.

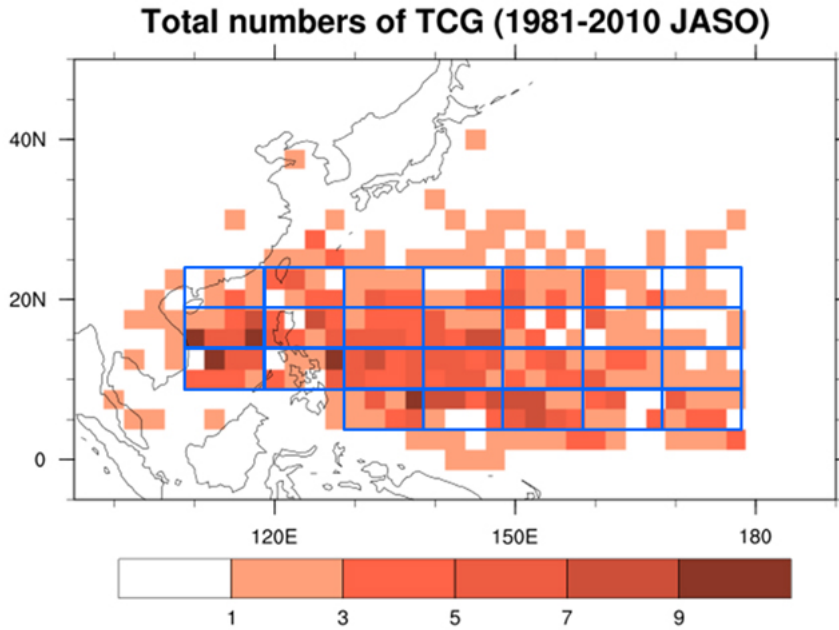


Figure 9. Total number of tropical cyclone genesis during JASO of 1981~2010. Box($10^{\circ} \times 5^{\circ}$) indicates the selected locations of samples for stepwise regression analysis and matches high frequency region of tropical cyclone genesis.

Table 3.2. Correlation coefficients between 7 candidate factors and the tropical cyclone genesis frequency (TCGF) anomaly as well as between each of the two candidate factors. The bold indicates statistically significant number at 95% confidence level.

	TCGF	V_{ZS}	ω_{500}	ζ_{r850}	RH_{600}	V_S	U_{x850}	U_{y850}
TCGF	1.0	-0.17	-0.72	0.69	0.57	-0.52	-0.17	-0.67
V_{ZS}	-0.17	1.0	0.28	0.06	-0.50	-0.16	0.36	-0.04
ω_{500}	-0.72	0.28	1.0	-0.80	-0.89	0.66	0.39	0.79
ζ_{r850}	0.69	0.06	-0.80	1.0	0.53	-0.79	-0.01	-0.91
RH_{600}	0.57	-0.50	-0.89	0.53	1.0	-0.39	-0.49	-0.57
V_S	-0.52	-0.16	0.66	-0.79	-0.39	1.0	-0.16	0.77
U_{x850}	-0.17	0.36	0.39	-0.01	-0.49	-0.16	1.0	0.01
U_{y850}	-0.67	-0.04	0.79	-0.91	-0.57	0.77	0.01	1.0

Table 3.3. Complex correlation coefficients from stepwise selection of the influential factors for BSISO index and the multi-linear regression equation. The regression coefficients are normalized to reflect their relative contribution.

BSISO Index	V_{ZS}	$w500$	ζ_{r850}	RH_{600}	V_S	U_{x850}	U_{y850}
OLR & U850 [5°N–25°N, 110°E–180°E]	0.747 ³	0.717 ¹	0.743 ²	0.750⁴			
Equation	$(-0.612) \times w500 + (0.318) \times \zeta_{r850} + (-0.120) \times V_{ZS} + (-0.205) \times RH_{600}$						

3.1.3.2 WNP ISGPI 검증

개발된 WNP_ISGPI는 열대저기압 발생에 대한 BSISO의 영향을 잘 나타낼 수 있어야 한다. 따라서 WNP_ISGPI는 BSISO의 발달 모습뿐만 아니라 BSISO 발달에 따르는 TCGF의 변동도 잘 나타낼 수 있어야 한다. 먼저 1981년부터 2010년까지 JASO 기간에 대해 WNP_ISGPI를 계산한 뒤, BSISO 위상에 따른 WNP_ISGPI 합성장 분석을 통해 TCGF 아노말리가 그에 상응하는 패턴을 나타내는지 확인하였다(그림 10, 그림 11). BSISO의 대류 구역과 양의 WNP_ISGPI 아노말리의 위치가 일치하고 특히 서태평양 지역에서는 BSISO1이 phase 5,6,7 일 때, BSISO2가 phase 8,1,2 일 때 음의 대류성 아노말리와 양의 WNP_ISGPI가 지배적이어서 phase preference가 있음을 다시 한번 확인할 수 있었고 개발된 WNP_ISGPI가 BSISO의 변동을 잘 표현한다고 볼 수 있다. 따라서 BSISO로 기인한 TC genesis를 잘 진단할 수 있는 지수가 마련된 것으로 판단된다.

분석기간 동안 발생했던 677개의 열대저기압 중심과 그때 양의 WNP_ISGPI 중심과의 거리를 계산해보았다. 둘 사이의 거리가 가까울수록 WNP_ISGPI가 실제 열대저기압 발생 위치를 잘 모의할 것이다. 677개 케이스에 대한 실제 열대저기압 중심과 그 때 WNP_ISGPI 중심의 차이의 평균은 497 km이고 그중 가장 작았던 사례는 11 km, 가장 컸던 사례는 954 km의 거리 차이를 보였다(표 3.4).

열대저기압에 있어서 현업 기관들은 일반적으로 태풍의 이동 경로, 강도, 구조 등을 예보한다. 열대저기압 예측에 대한 검증 역시 태풍의 발생보다는 이동 경로와 강도를 중심으로 이루어진다. 비록 서태평양 열대저기압의 발생 시점에서의 오차가 아닌 허리케인 이동 경로에 대한 오차이지만 현업 기관들로부터 검증 결과를 살펴보니, 2017년을 기준

으로 5일 전 예보에 있어서 ECMWF는 약 300 km, 영국기상청은 약 400 km, 미국 해양 대기청 국가허리케인센터에서는 약 370 km, 그리고 미국 해양대기청의 testbed인 Developmental Testbed Center에서 분석한 오차는 약 740 km이다. 미 합동태풍정보 센터에서 발표한 5일 전 북서태평양 열대저기압 이동 경로 오차는 약 460 km이다(그림 12). 따라서 본 연구를 통해 개발된 WNP_ISGPI 는 현 기술 수준에 부합하는 정도로 열대저기압을 진단하는 것으로 여겨진다.

서태평양 열대저기압 발생에 대한 WNP_ISGPI의 적중률(Probability of Detection, POD)을 계산하기 위하여 표 3.5처럼 열대저기압의 케이스를 나누었다. 여기서는 WNP_ISGPI의 유용성을 살펴보기 위한 검증이므로 forecast를 개발된 WNP_ISGPI로 두었고 실제 열대저기압의 중심으로부터 반경 500 km 이내에 양의 WNP_ISGPI 가 있으면 그때를 사건이 있음(yes)에 대한 기준으로 두었다. 이때 기준으로 둔 500 km 반경은 표 3.4의 평균 중심 거리 차이 497 km에 근거하였다.

$$\text{Probability of Detection (POD)} = \frac{\text{hits}}{\text{hits} + \text{misses}}$$

적중률은 0.36으로 북서태평양 열대저기압이 발생할 시 대략 3개 중 하나는 WNP_ISGPI로 나타난다고 해석할 수 있겠다. 이는 BSISO가 여름철 아시아몬순 지역 계절내 변동의 약 20%만을 설명할 수 있는 현상이라는 점에서는 납득이 가는 수준의 적중률이라 볼 수 있고 북서태평양 열대저기압 진단에 합리적인 사용이 가능한 지표라고 생각할 수 있겠다.

실제 사례를 통해 WNP_ISGPI의 유용성을 살펴보고자 하였다. 2002년 8월 22일에 발생한 15호 태풍 루사를 사례로 선택하였고(그림 13) 그때의 태풍 발생 지점과 WNP_ISGPI를 도식화하였다(그림 14). 푸른색 음영이 있는 지점은 WNP_ISGPI가 1.0 이상의 값을 가지는 즉 열대저기압 발생 가능성이 높은 지역이고 검정색 점은 실제 태풍 루사가 발생한 위치이다. 태풍 루사가 발생한 지점은 양의 WNP_ISGPI 영역 안에 놓여 있고 음영의 중심과 검정색 점 사이의 거리는 약 217 km로 가까워 개발된 WNP_ISGPI가 실제 태풍 발생의 위치를 잘 표현한다고 볼 수 있다. 3.1.3절에서 개발된 WNP_ISGPI에 대해서는 이후부터 관측 WNP_ISGPI라고 칭하겠다.

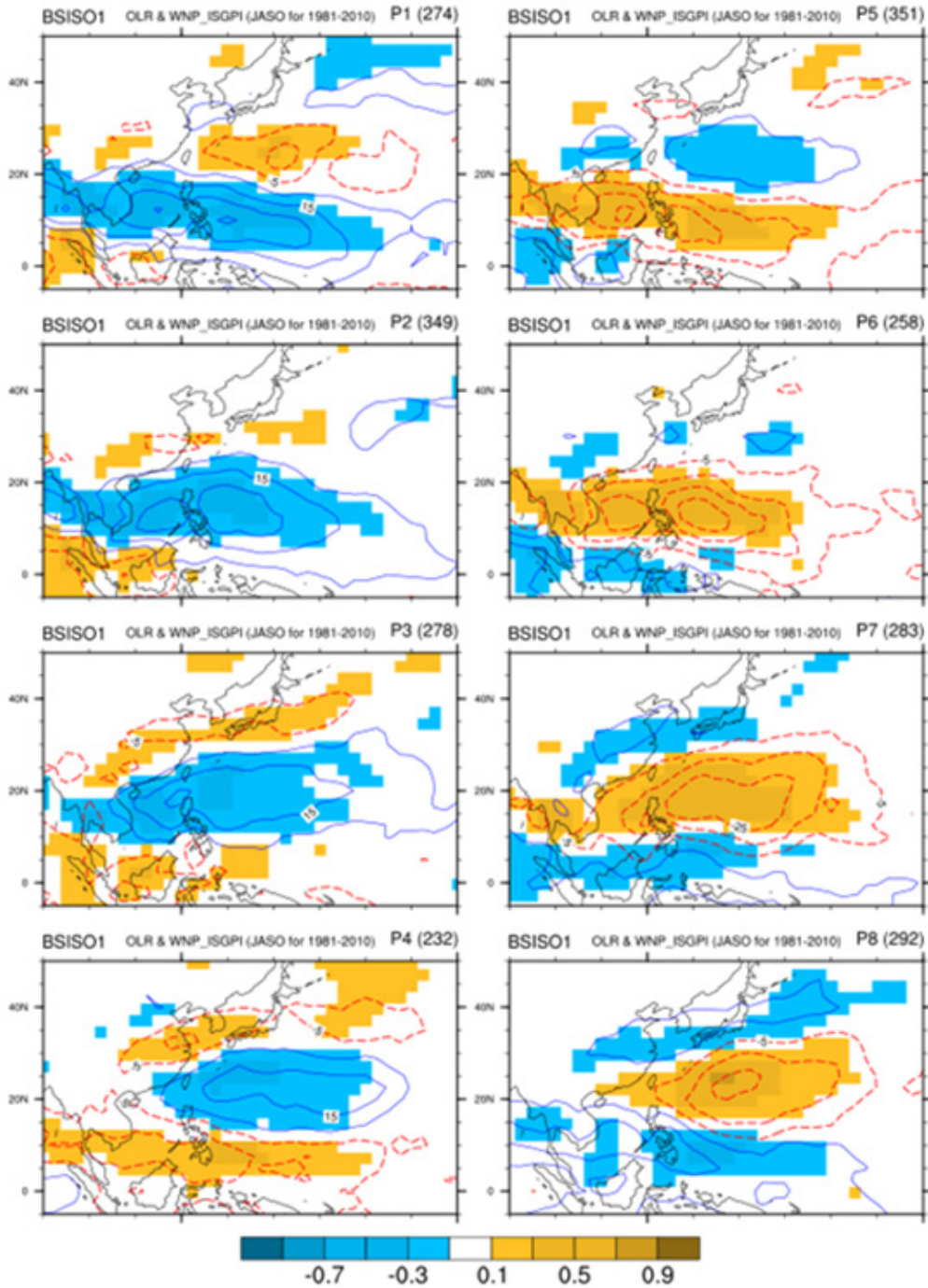


Figure 10. Composite anomaly of OLR (shading) and WNP_ISGPI (contour, blue indicates positive anomaly and red indicates negative anomaly) according to each phases of BSISO1.

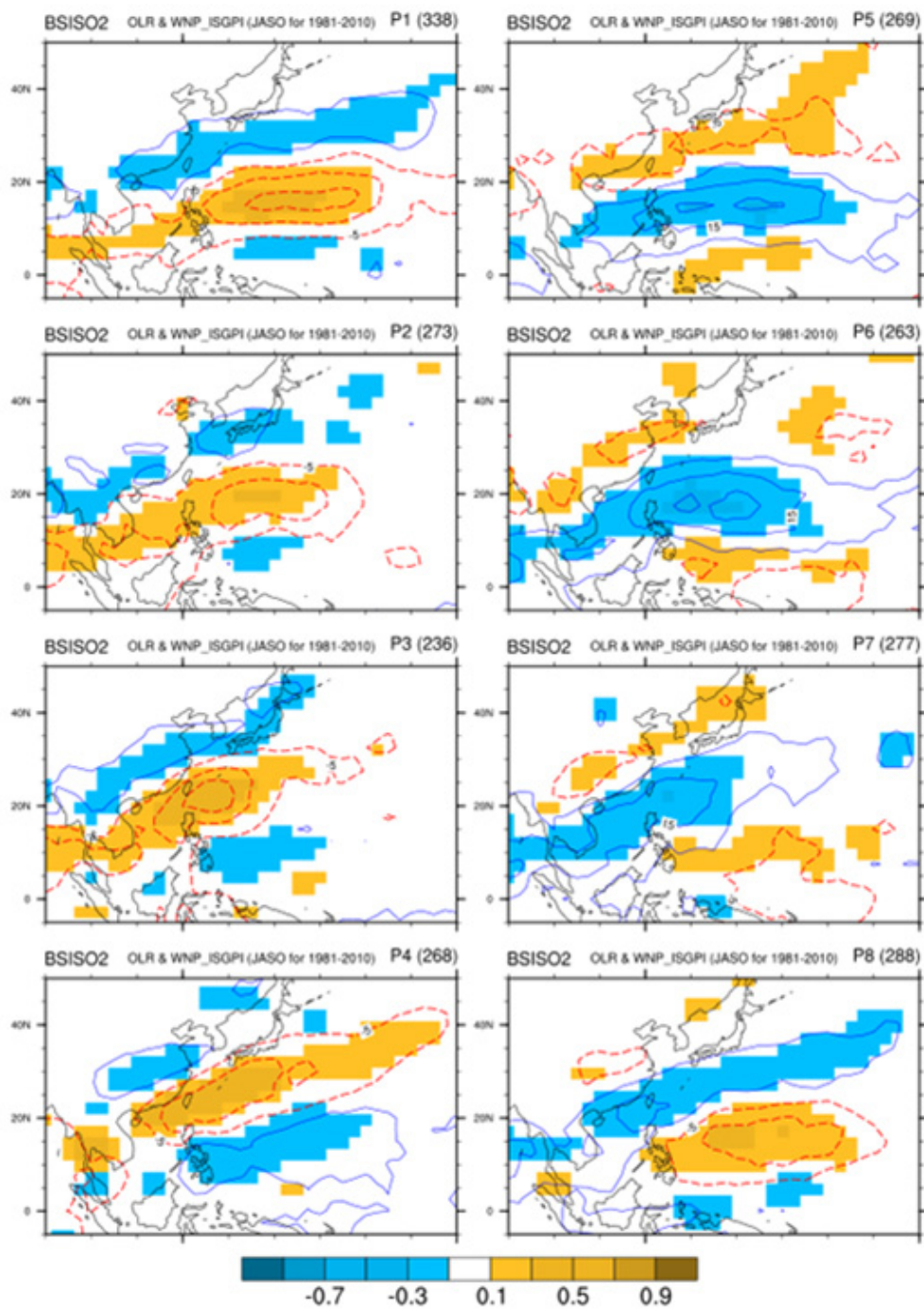


Figure 11. Same as Figure 10, but for BSISO2.

Table 3.4. Distance between TC genesis location and WNP_ISGPI center.

Distance (km)	Average	Minimum	Maximum
For all case	497	11	954
For active BSISO	497	11	954
For non-active BSISO	482	77	780

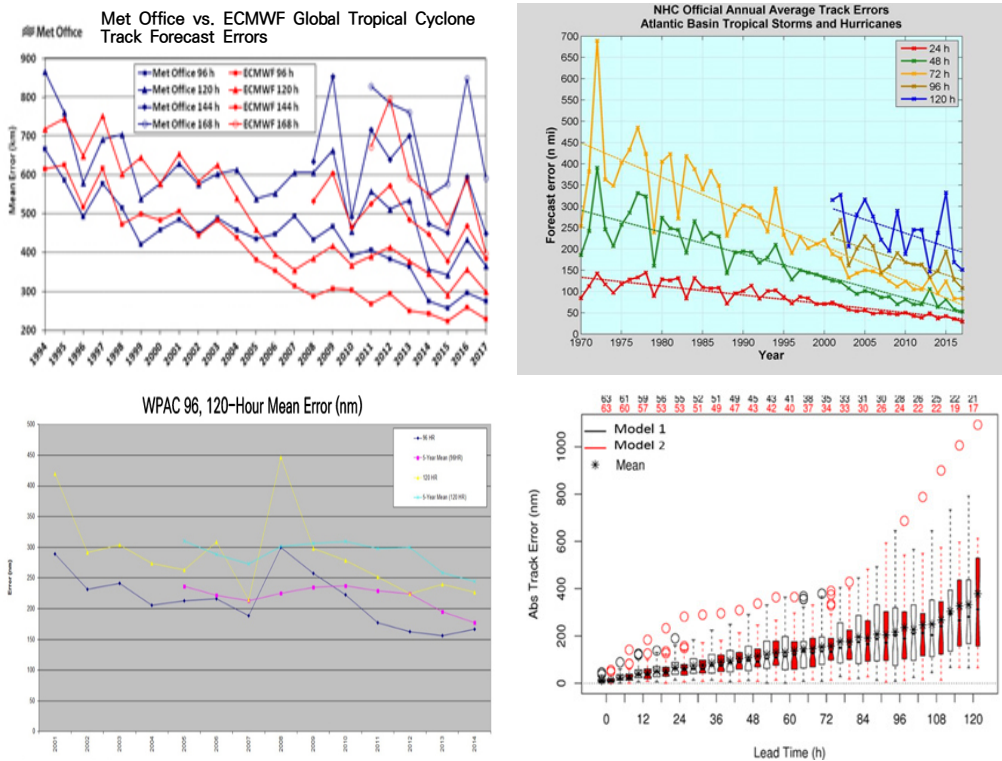


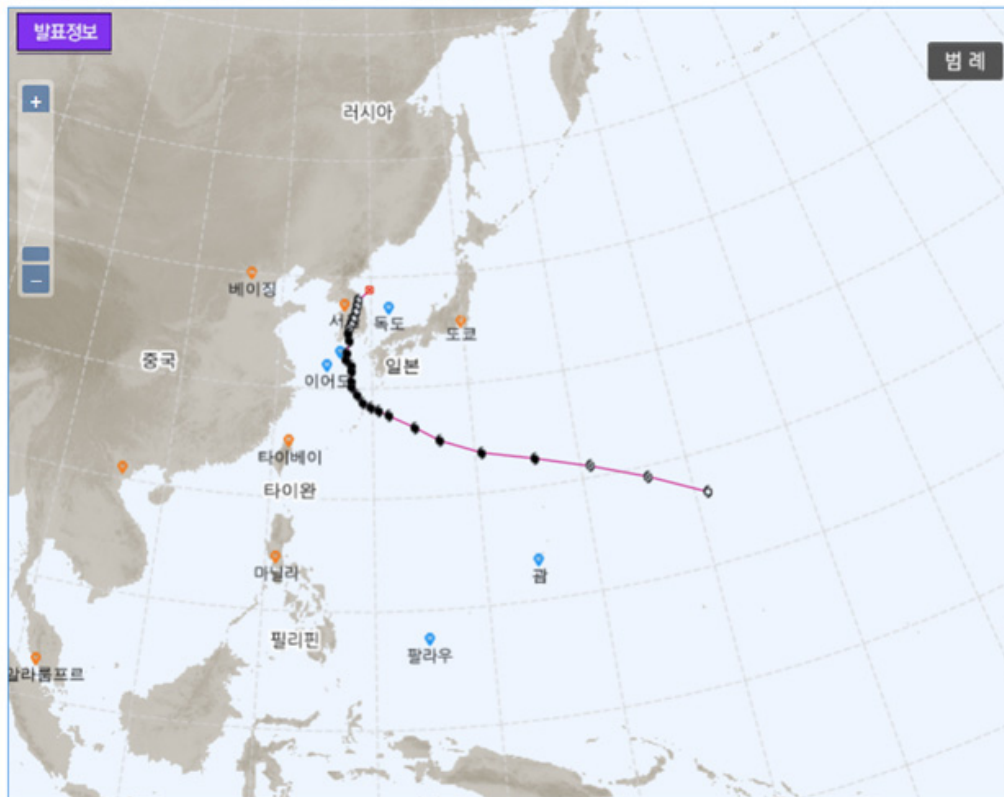
Figure 12. Graphs of TC track forecast error from operational forecast center Lead-Time Met Office, ECMWF, NHC, JTWC and DTC.

Table 3.5. Categorical contingency table for binary event.

		Observed		Total
		Yes	No	
Forecast	Yes	Hits a	False Alarms b	Forecast yes a+b
	No	misses c	Correct rejections d	Forecast no c+d
Total		Observed yes a+c	Observed no b+d	N a+b+c+d

태풍정보 | 태풍 찾아보기

2002년 제15호 태풍 루사(RUSA)



일시(KST) ▲	중심위치		중심기압	최대풍속		강풍반경	강도	크기	진행방향	이동속도
	위도(°N)	경도(°E)	(hPa)	초속 (m/s)	시속 (km/h)	(km)				(km/h)
2002/08/23 09:00	16.5	161.0	1000	18	65	180	약	소형	서북서	26

Figure 13. Case of TC Rusa (2002) showing its observed track and genesis information. Retrieved from www.weather.go.kr/weather/typhoon/typhoon_06_01.jsp.

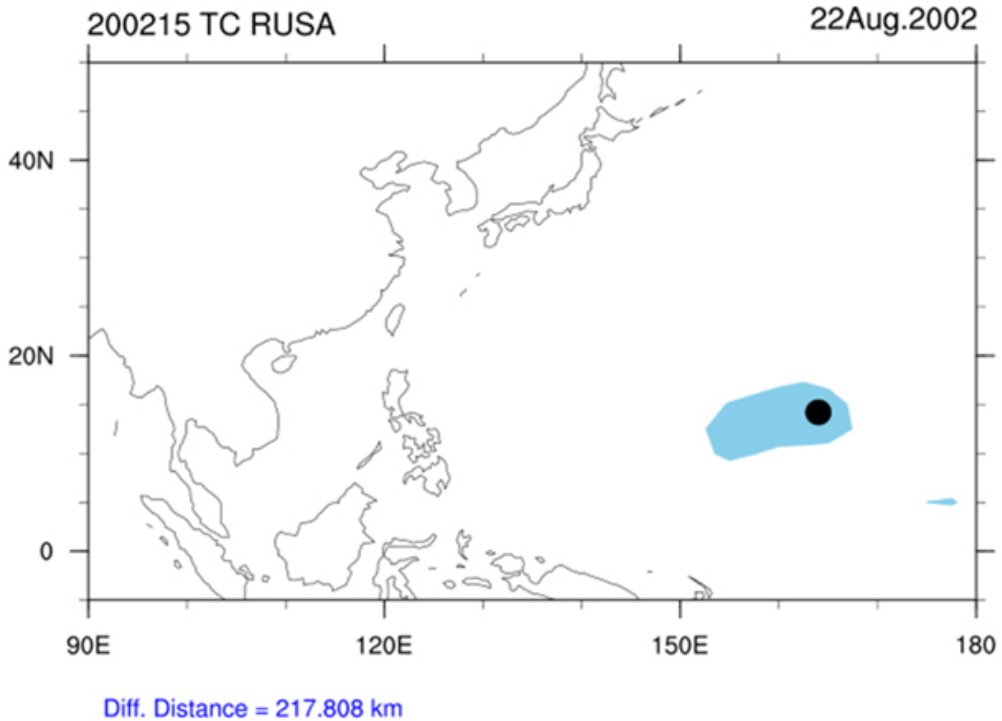


Figure 14. Case of TC Rusa (2002) showing the positive value of WNP_ISGPI (shading) and observed location of the TC Rusa genesis (black dot). The difference of distance between real genesis location and the center of positive area in WNP_ISGPI is about 218 km.

3.1.4 서태평양 열대 저기압 발생 예측에 대한 BSISO 활용 가능성

서태평양 열대저기압을 진단할 수 있는 지수가 잘 개발이 되었으니 실제 이것이 모니터링과 예측에도 유용하게 쓰일 수 있는지 확인해보았다.

3.1.4.1 모니터링

BSISO 모니터링 지수와 관측 WNP_ISGPI 합성장을 활용하여 1981년부터 최근까지의 WNP_ISGPI 모니터링 장을 생산했다. WNP_ISGPI의 유용함을 따져보기 위해서 관점을 두 가지로 나누어보았는데 첫째는 실제 열대저기압이 발생했을 때 WNP_ISGPI 모니터링이 그를 잘 잡아내었는가, 둘째는 WNP_ISGPI 모니터링을 생산했는데 이것으로

부터 우리가 실제 열대저기압의 위치를 진단할 수 있는가이다.

실제 열대저기압이 발생했을 때 그 발생 지점과 BSISO 모니터링 지수로 추정된 WNP_ISGPI 양의 중심이 얼마나 거리 차이를 가지는지 계산한 결과 분석 기간 동안 평균적으로 478 km, 최소 9 km, 최대 912 km의 오차가 있음을 알 수 있었다(표 3.6). 이는 3.1.3에서 다룬 결과와 유사한 수치이다. 중심 거리 차이에 있어서 월별 의존성이 있는지도 확인해보았다. WNP_ISGPI로 열대저기압을 추정함에 있어서 7월과 8월에 발생하는 열대저기압은 다른 월에 발생한 것들에 비해 평균 오차와 최소 오차가 작아 WNP_ISGPI 모니터링을 활용하기에 더 좋은 달로 판단된다.

실제 열대저기압이 발생했을 때 그 발생 지점 반경 500 km 이내에 BSISO 모니터링 지수로 추정된 WNP_ISGPI의 양의 값이 존재하는지, 그것이 어느 정도의 적중률을 보이는지 POD로 계산해보았다(표 3.7). 북서태평양에 열대저기압 발생이 활발한 7월~10월 전체에 대해서는 0.34의 적중률을 보였고 3개 중의 1개의 열대저기압 발생을 WNP_ISGPI 모니터링을 통해 살펴볼 수 있다. 적중률서에도 8월 열대저기압 발생에 WNP_ISGPI 모니터링을 활용하는 것이 더 낫다는 월별 의존도가 보이나 다른 월과의 값 차이는 미미하다.

677개 열대저기압 케이스에 대해 모니터링 WNP_ISGPI 와 관측 WNP_ISGPI의 평균된 패턴 상관은 0.32 였다. BSISO가 강했던 235개의 케이스에 대해서는 0.43으로 더 높은 패턴 상관 평균을 가졌고 BSISO가 약했던 109개의 케이스에 있어서는 0.06의 낮은 값을 가져 BSISO가 강할 때 더 정확한 WNP_ISGPI를 만들어내는 것으로 나타났다(표 3.8).

Table 3.6. Distance between TC genesis location and the center of WNP_ISGPI monitoring.

Distance (km)	Average	Minimum	Maximum
JASO	478	9	912
Jul.	447	99	870
Aug.	473	9	912
Sep.	514	193	873
Oct.	484	208	827

Table 3.7. Probability of detection for the location of TC genesis using WNP_ISGPI monitoring.

	POD
JASO	0.34
Jul.	0.33
Aug.	0.35
Sep.	0.34
Oct.	0.33

Table 3.8. Pattern correlation between Observed ISGPI and Monitoring WNP_ISGPI for JASO period.

	Pattern Correlation
For all case	0.32 (677)
For active BSISO	0.43 (235)
For non-active BSISO	0.06 (109)

모니터링 WNP_ISGPI로부터 우리가 열대저기압 발생을 얼마나 유추할 수 있는가라는 두 번째 관점에서의 평가를 위하여 3.1.3에서 개발한 관측 WNP_ISGPI를 열대저기압 발생의 참값으로 두고 모니터링 WNP_ISGPI와 각 격자별로 상관관계를 구하여보았다(그림 15, 표 3.9). JASO 동안 북서태평양 전반에 0.3 이상의 상관값을 나타내고 이기간 동안 열대저기압이 가장 빈번히 발생하는 지역인 필리핀해 부근(그림 9 참고)에서는 0.5 이상의 높은 값을 가진다. 월별로 살펴보면 10월의 상관계수는 상대적으로 낮은 값을 보이고 8월에 가장 높게 나타난다. 따라서 JASO 뿐만 아니라 8월의 열대저기압을 모니터링 함에 있어서 WNP_ISGPI가 잘 쓰일 수 있겠다고 판단된다.

또한 주어진 영역전체 각각 격자에 대해서 적중률을 구하였다(그림 16). 만약 특정 날짜의 특정 격자에서 모니터링 WNP_ISGPI가 양의 값을 가지는데 해당 날짜의 해당 격자에서 실제 열대저기압도 발생을 했다면 Hit으로 아니면 False alarm으로, 모니터링 WNP_ISGPI가 음의 값인데 실제 열대저기압 발생이 있으면 Miss, 없으면 Correct reject 로 구분하였다. 그 결과 대부분의 지역에서 0.3 이상의 적중률을 보였고 열대저기압 발생이 빈번한 지역(그림 9의 box 영역)에서는 평균적으로 2개의 열대저기압 중 절반은 모니터링 WNP_ISGPI가 표현할 수 있는 것으로 나타났다.

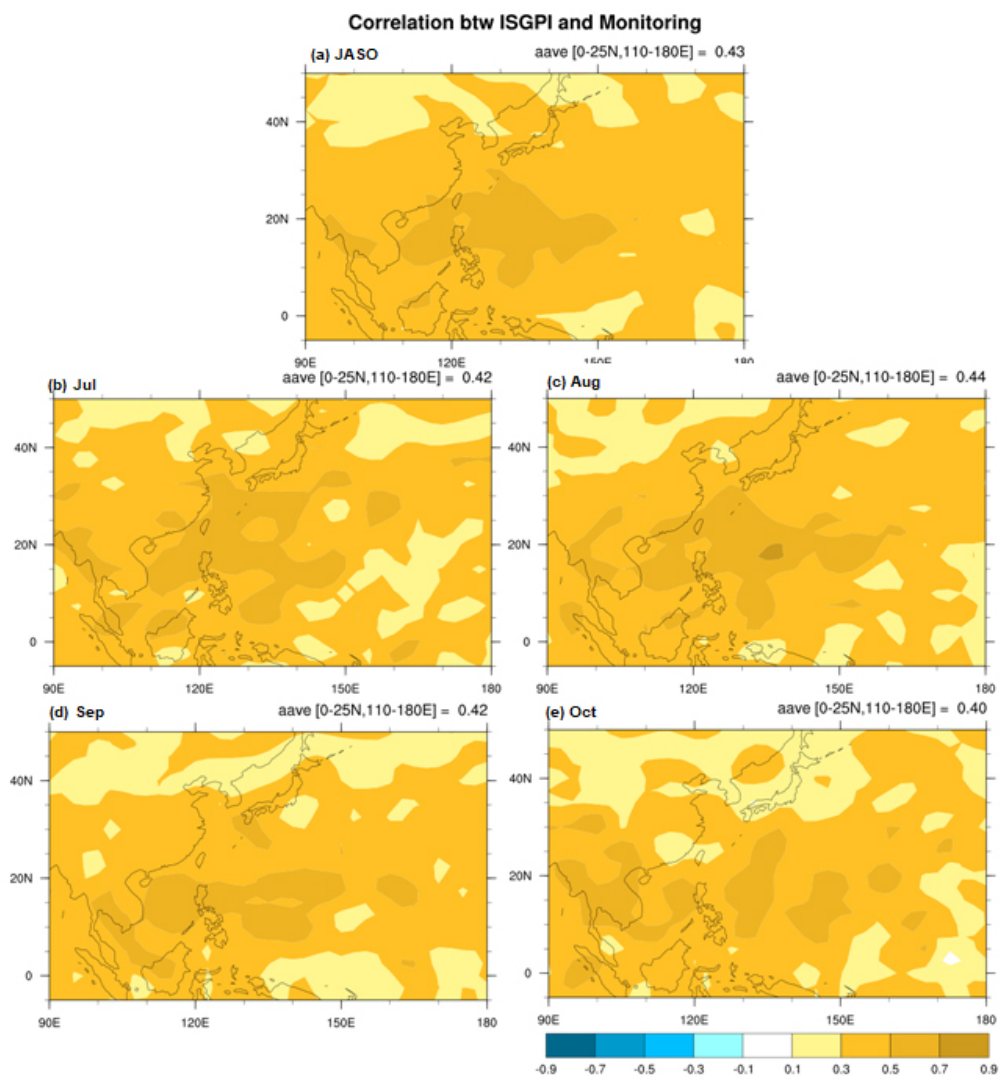


Figure 15. Correlation coefficient map between real WNP_ISGPI and monitoring WNP_ISGPI for JASO and each month over the WNP region.

Table 3.9. Area averaged correlation coefficient between real WNP_ISGPI and monitoring WNP_ISGPI for JASO and each month over the WNP region. * indicates significant value at 95% confidence level.

	aave(Corr)
JASO	0.43*
Jul.	0.42*
Aug.	0.44*
Sep.	0.42*
Oct.	0.40*

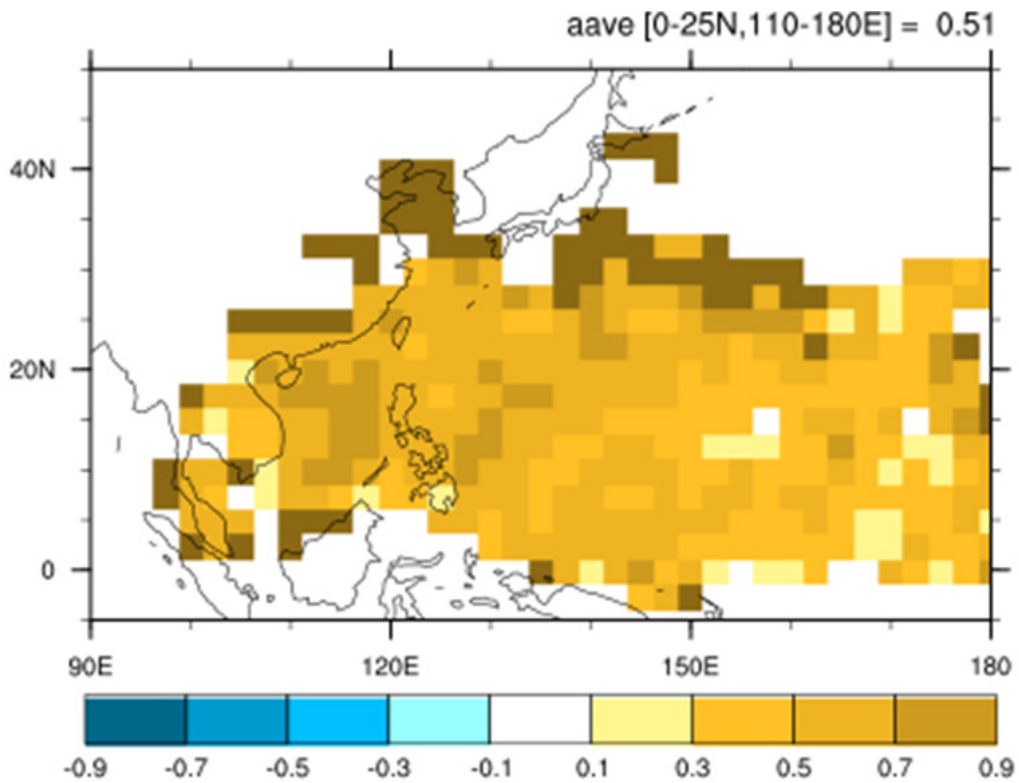


Figure 16. Probability of detection map between TC genesis and monitoring WNP_ISGPI for JASO over the WNP region.

3.1.4.2 예측

일반적으로 ENSO 와 관련된 북서태평양 열대저기압의 변동성을 보면 엘니뇨 시기에는 열대저기압의 발생 위치가 남동쪽으로 편향되어 나타나며 라니냐 시기에는 열대 저기압의 발생 위치가 북서쪽으로 편향된다. ENSO에 의한 북서태평양 열대 저기압 발생 위치 변동은 ENSO와 관련된 북서태평양 지역의 순환장 변동과 관련이 있다. 동태평양에 따뜻한 해수면 온도가 존재하는 경우, 태평양 적도 부근 지역에서 서풍 아노말리가 발달하게 되고 Rossby wave response에 의해 북서태평양 남동쪽에 양의 와도를 형성한다. 또한 적도 부근의 서풍 아노말리(무역풍의 약화)에 의해 몬순 기압골이 동쪽으로 크게 확장하여 북서태평양 남동쪽의 양의 와도를 크게 증가시키게 된다. 즉, 엘니뇨 시기의 북서태평양 동남쪽의 강화된 양의 와도는 공기 수렴과 상승기류를 유도하여 이 지역에서의 열대 저기압 발생에 호조건을 제공한다. 라니냐의 경우, 위의 반응과 반대의 대기장을 유도하여 북서태평양 남동쪽에서는 고기압 아노말리가 형성되고 몬순 기압골은 서쪽으로 크게 위축된다. 이러한 배경장은 북서태평양 남동쪽에서의 열대 저기압 발생을 억제하며, 몬순 기압골이 존재하는 북서태평양 북서쪽 지역에서 열대 저기압 발생에 호조건을 제공한다(서 등, 2017). 이러한 북서태평양 열대저기압 발생에 있어서 엘니뇨해와 라니냐해의 뚜렷한 대조는 그림 17에서도 확인 할 수 있다.

해마다 각 phase별로 BSISO가 강한 날의 수를 계산한 뒤 Nino3.4 지수와의 상관관계를 구하였다(표 3.10). BSISO2가 강한 날 phase dependency가 있는 것으로 보이는데 유의한 phase에 대해 해석하자면 BSISO2는 엘니뇨 때 좀 더 빈번한 Phase7 의 날수를 가지고 라니냐 때 Phase2와 3인 날이 많은 것으로 판단된다. BSISO2의 Phase7은 북서태평양의 동남쪽에서 양의 대류 구역이 나타나고 북서쪽에는 대류활동이 억제되는 패턴이다(그림 11). BSISO2의 Phase2와 3은 북서태평양 북서쪽에서 대류 활동이 활발해질 수 있는 패턴을 가지고 있어(그림 11) 일반적으로 알려진 ENSO와 북서태평양 열대 저기압 변동의 관계에서 BSISO2의 기여가 있음을 알 수 있다.

2014년부터 2018년 동안 ECMWF로부터 생산된 BSISO 예측 지수를 활용하여 WNP_ISGPI를 예측해보았다. 그 중 라니냐해인 2016년의 두 열대저기압의 예측 사례를 보여주고자 한다. 그림 18은 2016년 8월 14일에 발생한 7호 태풍 CHANTHU 의 사례

로 (f)는 8월 14일 초기장을 사용한 리드0 일 때 WNP_ISGPI 예보, (e)는 8월 11일 초기장을 사용한 리드3 일 때의 예보, (a)는 7월 28일 초기장을 사용한 리드17 일 때의 예보이다. 태풍 CHANTHU의 경우 BSISO로 추정한 WNP_ISGPI 예측을 통해 약 13일 이전부터 태풍 발생을 예상할 수 있었다. 그림 19는 2016년 8월 19일에 발생한 9호 태풍 민들레의 사례로 8월 1일 초기장을 사용하여 WNP_ISGPI를 예측한 그림이다. (a)는 리드3일 때이고 (f)로 갈수록 리드가 길어지며 리드 18일 때 9호 태풍 민들레가 발생하였다. 본 사례의 경우 약 2주 전부터 태풍 발생을 예상할 수 있었다.

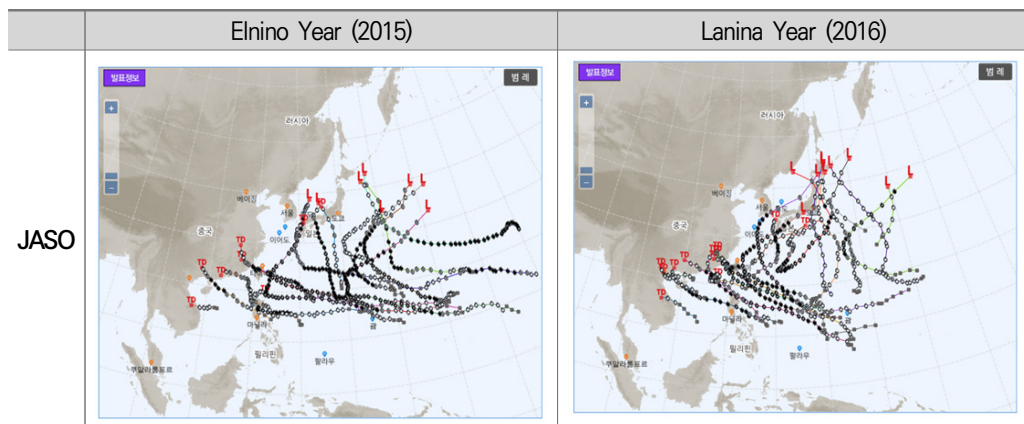


Figure 17. Distinctions of TC genesis between Elnino year (2015) and Lanina year (2016). Retrieved from www.weather.go.kr/weather/typhoon/typhoon_06_01.jsp.

Table 3.10. Correlation coefficient between the number of strong BSISO day in each phase and Nino3.4 index for JASO. * indicates significant value at 99% confidence level.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
BSISO1	-0.05	-0.06	-0.34	0.03	-0.12	-0.32	0.18	0.27
BSISO2	-0.20	-0.53*	-0.44*	0.00	-0.14	0.37	0.48*	0.26

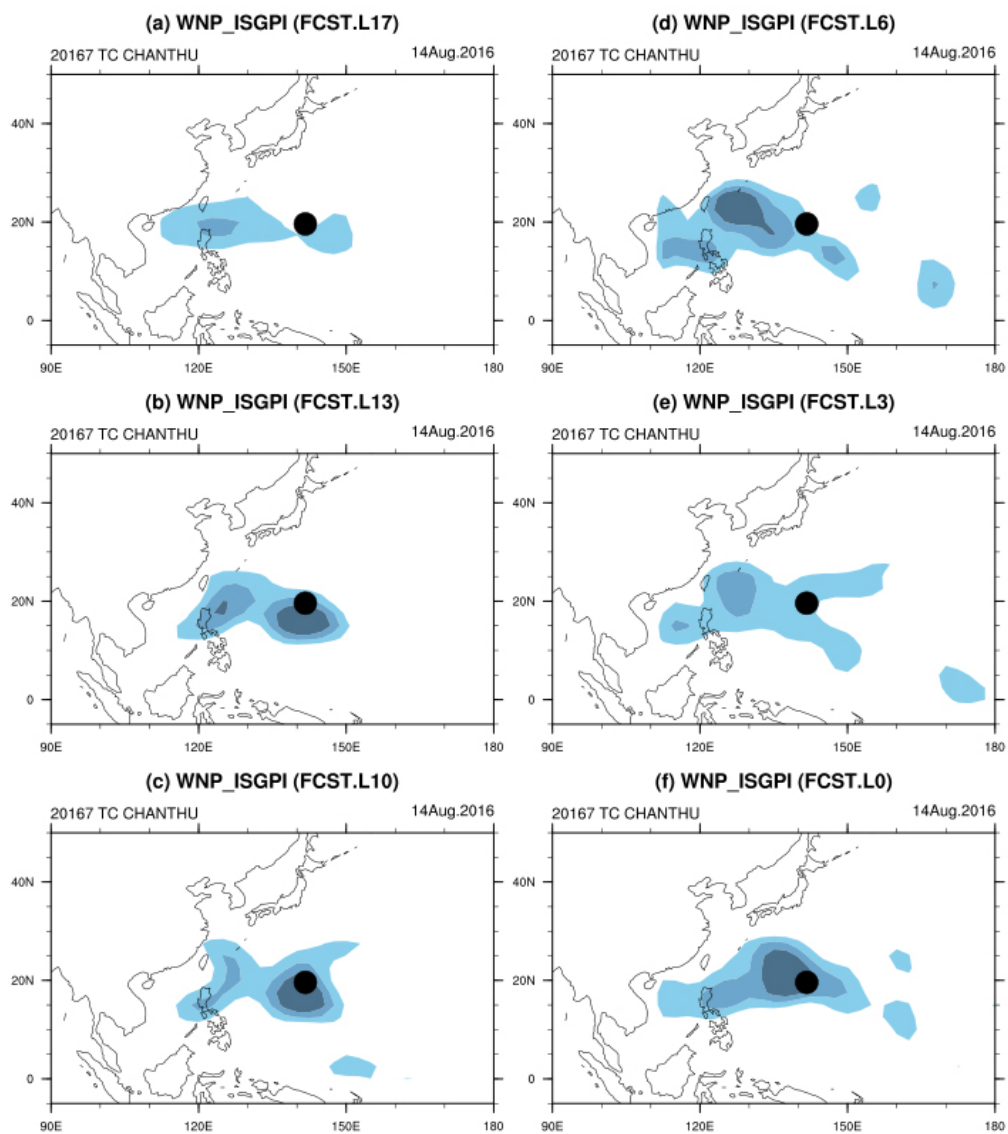


Figure 18. WNP_ISGPI forecast for 2016 TC CHANTHU genesis.

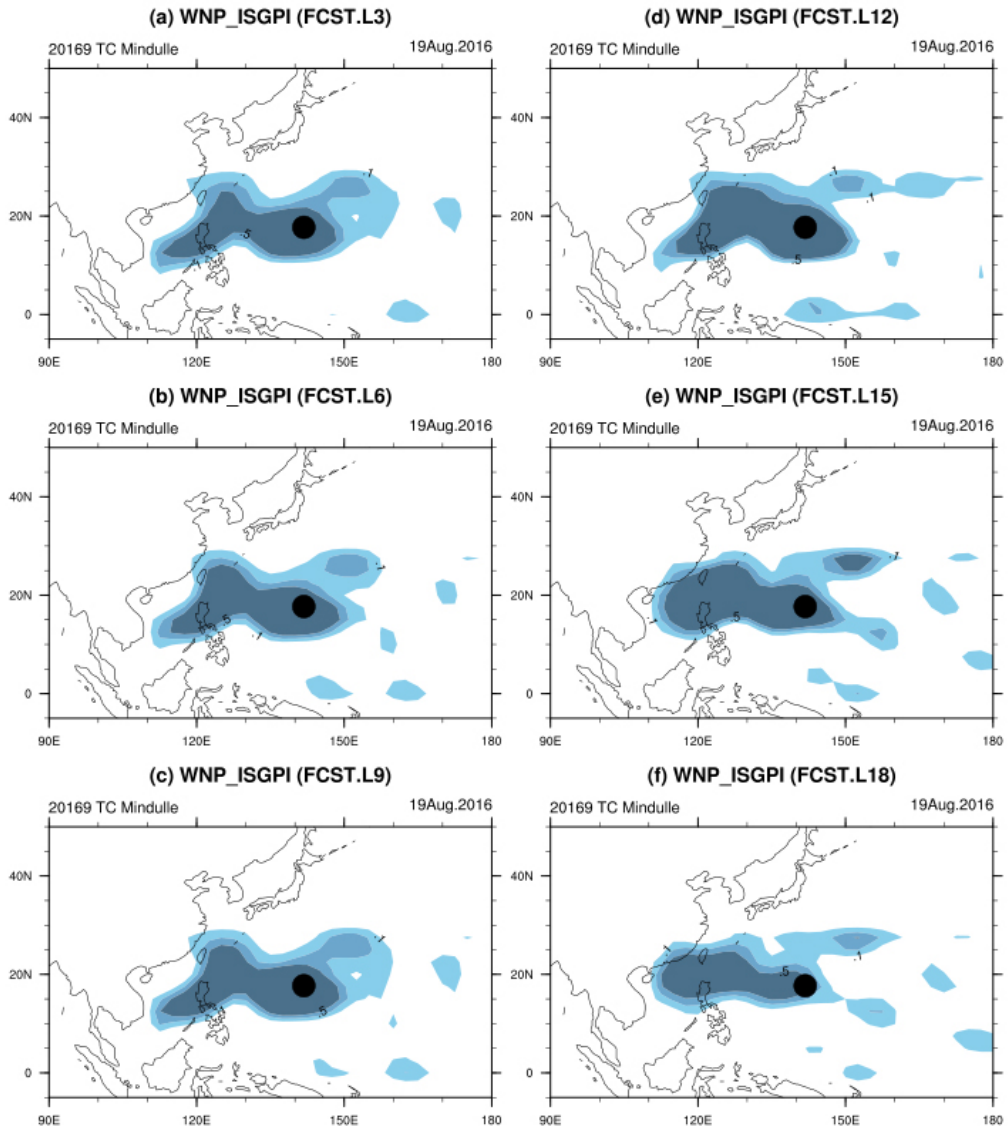


Figure 19. WNP_ISGPI forecast for 2016 TC Mindulle genesis initiated from 1st of August.

3.2 아시아 몬순 지역 기온 예측에 대한 BSISO 예보의 활용 가능성 평가

3.2.1 한반도 폭염 특성

2016년에 발간된 기상청 기후감시 및 분석 기반의 장기예보 가이드스(II)에 의하면 우리나라 폭염 발생 시 크게 세 가지 대기 순환 구조를 가진다(그림 20).

- 1) CGT 패턴과 다른 모습이지만 중위도 파동형태의 대기순환장(Wave type)
- 2) PJ 패턴과 관련된 열대 지역에서 기원한 파동 형태의 대기 순환장(PJ type)
- 3) 여름철 주요 기압계인 북태평양 고기압의 강화 및 약화에 따른 대기 순환장 (NP type)

Wave type 패턴일 때는 중위도 제트기류 지역을 따라 뚜렷한 파동 형태가 나타나 동아시아 상공에 고기압성 순환이 강화되는 모습이다. PJ 패턴일 때는 열대 서태평양 지역의 대류활동에 의해 북쪽으로 전파하는 로스비파가 유도되어 동아시아 지역에서는 대류 활동이 억제되는 고기압성 순환, 그 북쪽인 오호츠크해 지역에서는 다시 저기압성 순환이 나타난다. NP 패턴일 때는 북태평양 고기압 자체가 매우 강화되어 서쪽 방향으로 확장하여 우리나라를 덮는 구조이다(장기예보 가이드스, 2016). 이 세 패턴 모두 한반도를 포함한 동아시아 지역에 고기압성 순환이 발달하게 되어 무더운 날씨가 나타날 수 있는 호조건을 형성 한다.

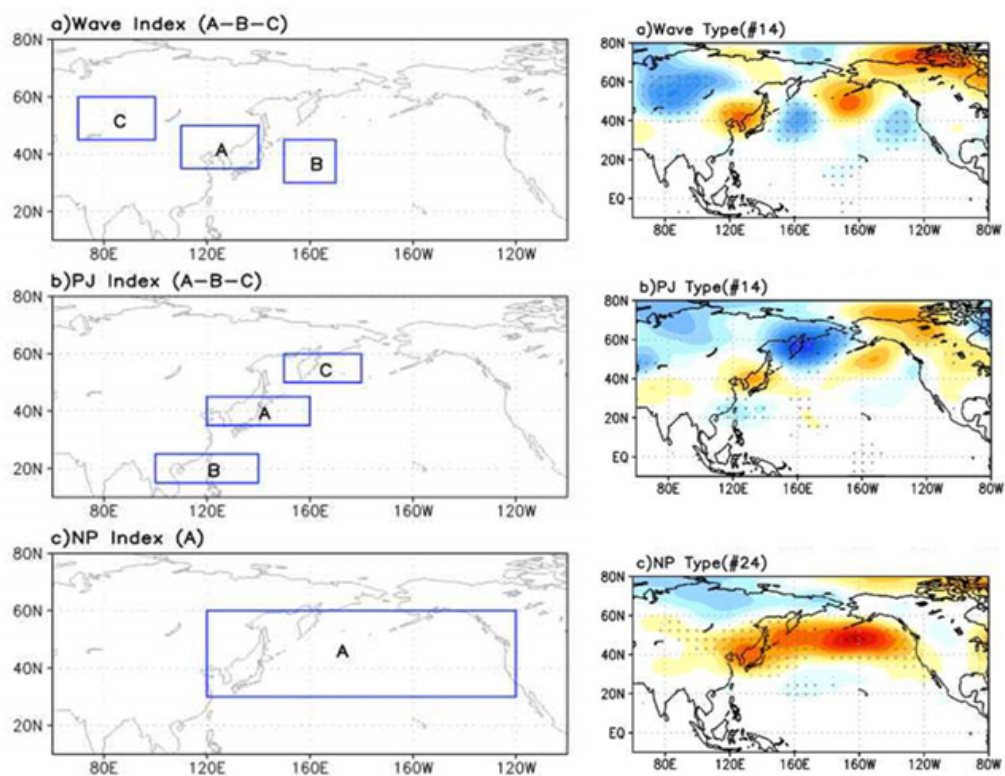


Figure 20. Major atmospheric structure during heat wave event in Korea, (a) Wave type, (b) PJ type and (c) NP type.

3.2.2 한반도 폭염과 BSISO 의 연관성

한반도 폭염과 BSISO의 관계를 살펴보기 위하여 BSISO 위상에 따른 한반도 폭염 일수를 계산하였다(그림 21). 폭염 일수는 BSISO의 위상에 따라 dependency가 있고 그 양상은 BSISO1과 2가 서로 다르다. BSISO1의 phase 6,7,8,1 그리고 BSISO2의 phase 1,2,3,4가 상대적으로 많은 폭염일수와 관련이 있다. 영향 phase에서의 대기 순환장 분석을 통해 둘의 관계를 좀 더 명확히 하고자 하였다(그림 22~29). BSISO 강약과 폭염 유무의 조합으로 네 가지 사례를 만들고 상호 비교함으로써 폭염에 대한 BSISO 기여 기작을 알고자 하였다.

CASE1: (a)~(d) BSISO도 강하고 폭염도 있었던 날들

CASE2: (e)~(h) BSISO가 강했지만 폭염이 없었던 날들

CASE3: (i)~(l) BSISO가 약했는데 폭염이 있었던 날들

CASE4: (m)~(p) BSISO도 약하고 폭염도 없었던 날들

그림 22는 BSISO1에 대한 네 가지 사례를 OLR 분석을 통해 나타낸 그림이다. CASE1의 경우 열대 서태평양 지역에 음의 OLR 아노말리가, 한반도를 포함한 동아시아 지역에 양의 아노말리가 위치한 것을 볼 수 있다. 이 때 음의 아노말리는 동서로 길게 늘어선 특징이 있다. CASE2에서도 열대 서태평양 지역에 음의 OLR 아노말리가 나타나지만 CASE1과 달리 동아시아에 유의한 양의 아노말리는 보이지 않는다. CASE3에서도 서태평양의 음의 아노말리가 나타나는데 CASE1에 비해 국지적이다.

그림 23은 500 hPa 지위고도에 대한 BSISO1의 네 가지 사례를 보여준다. CASE1의 경우 북서태평양에서 저기압성 순환이 동아시아에서 고기압성 순환이 강화되는 것을 볼 수 있는데 이 고기압성 순환의 패턴이 동서로 길게 늘어져 날짜변경선까지 뻗어 있는 것이 특징이다. 남중국해에서부터 오호츠크해 지역까지 동아시아 연안을 따라 로스비 파동의 패턴이 나타나는 모습은 PJ 패턴의 구조와 유사하고 (d)처럼 강화된 고기압성 순환이 북태평양 전체를 덮고 있는 모습은 NP 패턴과도 유사하다. CASE2의 경우 로스비

파동의 패턴의 위치가 CASE1과는 어긋나고 있어 동아시아 지역에 고기압성 순환의 중심이 자리 잡지 못하고 있다. CASE3은 CASE1에 비해 서태평양에서의 저기압성 순환은 두드러지지 않는다. 동아시아 지역의 고기압성 순환의 강화는 유사하지만 동쪽으로의 확장이 이루어지지 못하고 날짜변경선 부근에 저기압성 아노말리를 함께 가진다.

CASE1의 한반도 상공 고기압이 동서방향으로 늘어서는 기압계를 가지는 것은 중위도 제트가 한반도 지역에서 약화되어 대기 상층의 흐름이 정체되는 것과 관계가 있다(그림 24). 반면 CASE3에서는 약화된 중위도 제트가 날짜변경선 인근에서 다시 강화되는데 이는 그림 23의 CASE3에서 보여 지는 저기압성 순환과 관계가 있다. 2016 장기예보 가이던스에 따르면 우리나라 여름철 고온 현상의 강도와 지속기간을 살펴보면 NP 타입 일 때 지속기간이 가장 길고, wave 타입 일 때 가장 짧다. 고온 강도는 PJ 타입 일 때 가장 강하게 나타난다. 이는 CASE1 일 때 대기 흐름의 정체로 고온 현상이 오래 지속될 수 있는 NP 타입 패턴과 고온 강도가 강할 수 있는 조건인 PJ 타입이 잘 만들어지는 것으로 생각된다. 반면 CASE3 일 때는 상대적으로 NP 타입 패턴보다는 고온 지속기간이 짧은 wave 타입과 PJ 패턴이 잘 만들어지는 것 같다.

이러한 대기 순환 타입의 차이는 고온역 분포에서도 잘 나타난다. 그림 24에서 CASE1 일 때는 한반도를 포함하여 동서방향으로 넓은 범위에 걸쳐 고온역이 나타나는 반면 CASE3 일 때는 고온역이 150°E 까지만 유지된다. 이는 그림 22에서 보았던 것처럼 기본적으로 서태평양 지역의 대류 활동의 범위에서 기인한 결과라고 보여진다.

BSISO1이 Phase 1,6,7,8에서 활발할 때는 서태평양 지역에 대류 활동이 더욱 활발해져 PJ 타입과 NP 타입의 대기 패턴이 유도되어 중위도 제트를 약화시켜 기압계의 정체를 가져와 폭염이 잘 일어날 수 있는 조건이 되었다. 반면 BSISO1이 활발하지 않더라도 서태평양 지역 대류 활동이 강할 때는 PJ 타입의 대기 패턴에 의해 한반도 폭염이 발생할 수 있고 더불어 wave 타입의 대기 패턴의 영향도 받을 수 있다.

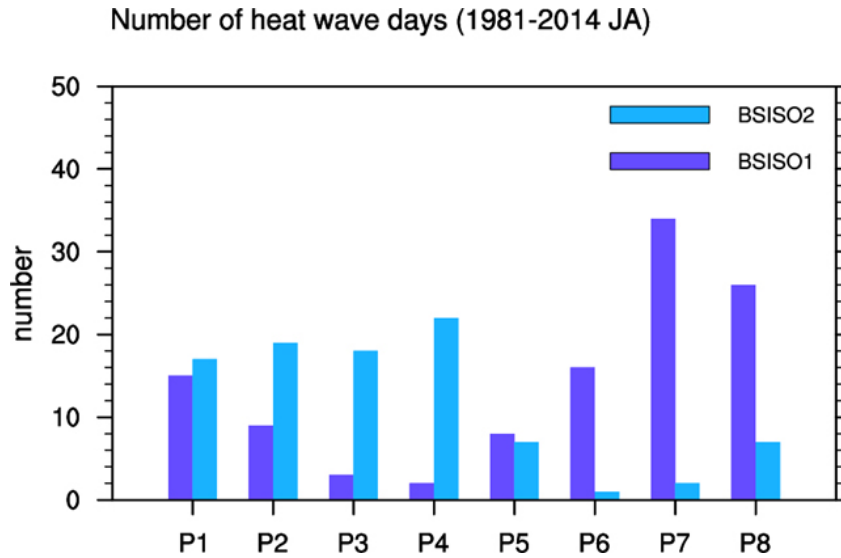


Figure 21. The number of heat wave days in each phases of BSISO for July-August during 1981~2014.

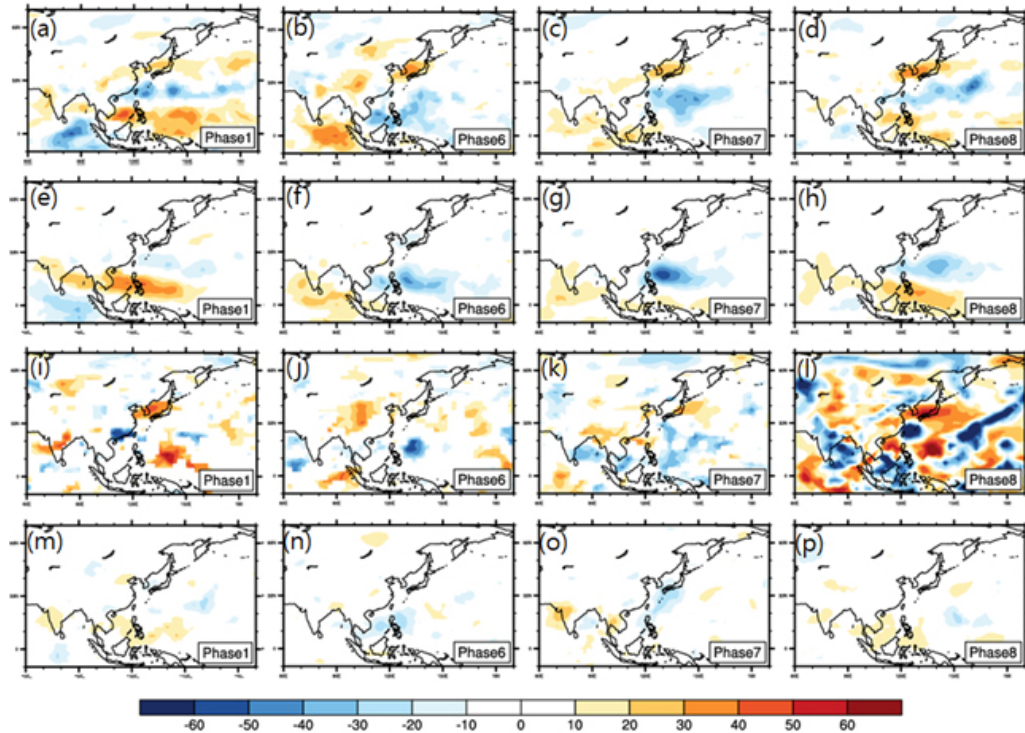


Figure 22. Composite anomalies of OLR in the influential phases for the case of strong BSISO1 and heat wave event (a)~(d), strong BSISO1 and no heat wave event (e)~(h), weak BSISO1 and heat wave event (i)~(l) and weak BSISO1 and no heat wave event (m)~(p).

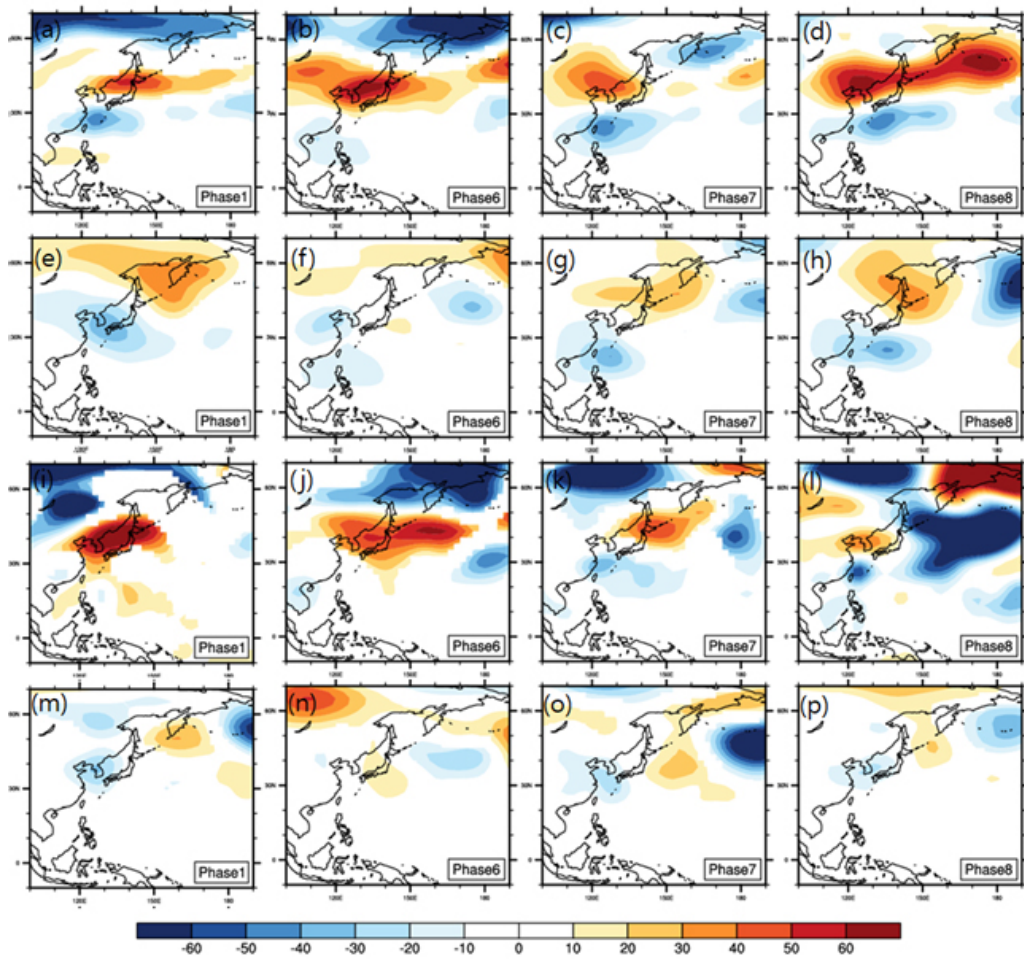


Figure 23. Same as Figure 22, but for geopotential height at 500 hPa.

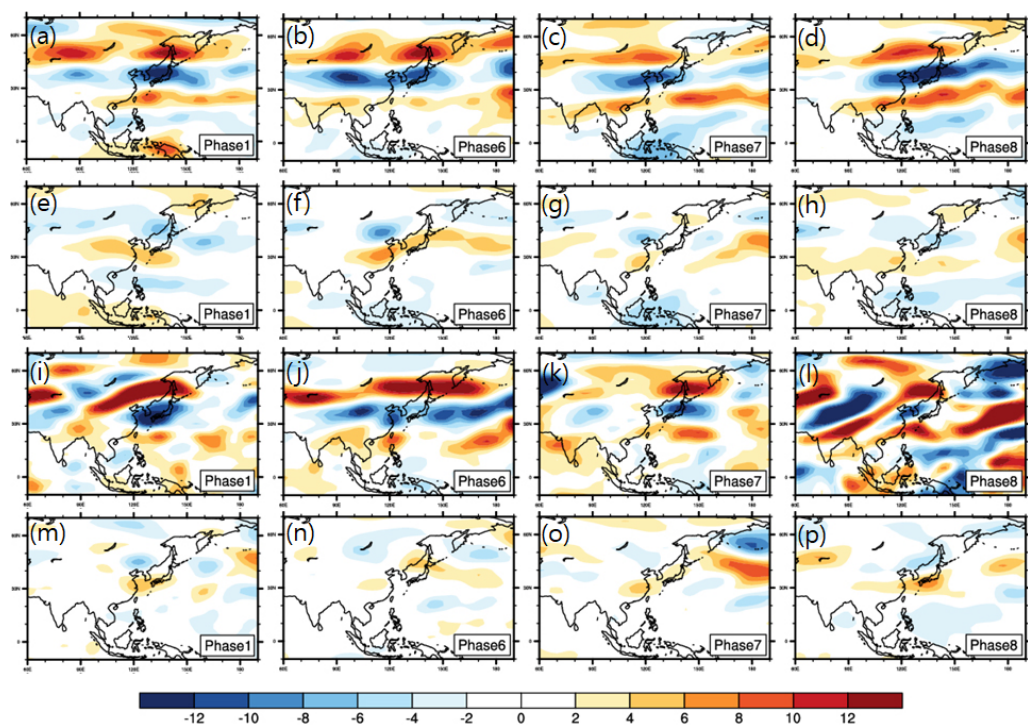


Figure 24. Same as Figure 22, but for zonal wind at 200 hPa.

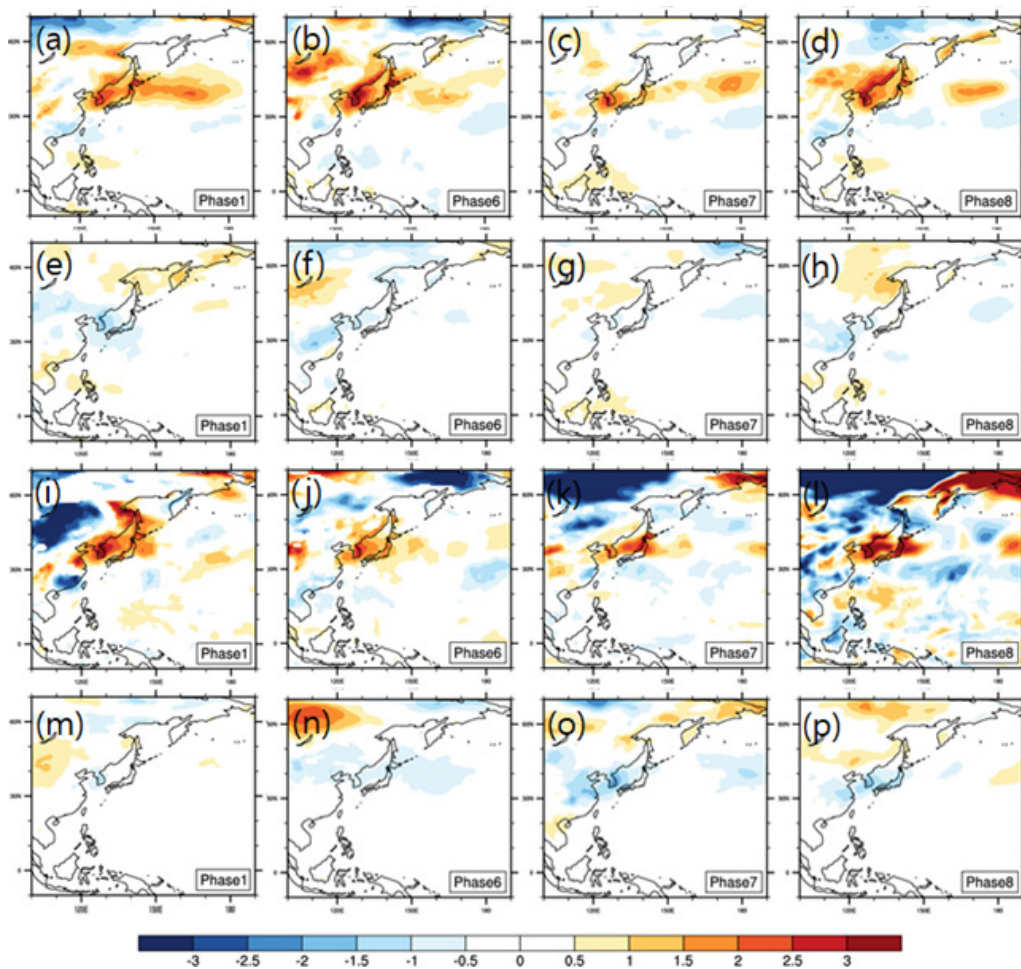


Figure 25. Same as Figure 22, but for 2m temperature.

그림 26~29는 BSISO2에 대한 분석이다. 그림 26은 OLR에 대한 BSISO2의 네 가지 사례를 보여준다. CASE1의 경우 열대 서태평양 지역에 음의 OLR 아노말리가, 한반도를 포함한 동아시아 지역에 양의 아노말리가 위치하였고 이 때 음의 아노말리는 동서로 넓게 퍼져 있다. CASE2에서도 열대 서태평양 지역에 음의 OLR 아노말리가 나타나지만 CASE1과 달리 동아시아에 유의한 양의 아노말리는 보이지 않는다. CASE3에서는 Phase2를 제외하곤 서태평양의 음의 아노말리가 체계적인 모습을 갖추고 있지 않다. 즉, BSISO로 인해 어떠한 대류 구역이 형성되었다고 보기 힘들다.

그림 27는 500 hPa 지위고도에 대한 BSISO2의 네 가지 사례를 보여준다. CASE1의 경우 북서태평양에서 저기압성 순환이 동아시아에서 고기압성 순환이 강화되는 것을 볼 수 있는데 이 고기압성 순환의 패턴이 동서로 길게 늘어져 베링해 부근에서 또 하나의 중심을 갖는 것이 특징이다. 남중국해에서부터 오후츠크해 지역까지 동아시아 연안을 따라 로스비 파동의 패턴이 나타나는 모습은 PJ 패턴의 구조와 유사하고 강화된 고기압성 순환이 북태평양 전체를 덮고 있는 모습은 NP 패턴과도 유사하다. CASE2의 경우 동아시아 지역에 고기압성 순환의 중심이 자리 잡지 못하고 있다. CASE3은 CASE1과 비교해봤을 때 서태평양에서의 저기압성 순환이 두드러지지 않고 동아시아 지역의 고기압성 순환이 동쪽으로 확장하지 못해 베링해 부근에 저기압성 아노말리를 함께 가지는 것이 특징이다.

BSISO1의 경우처럼 CASE1의 한반도 상공 고기압이 동서방향으로 늘어서는 기압계를 가지는 것은 중위도 제트가 한반도 지역에서 약화되어 대기 상층의 흐름이 정체되는 것과 관계가 있다(그림 28). 반면 CASE3에서는 CASE1에서 두드러지게 나타나는 북태평양의 150°E~180°E 지역에서 중위도 제트의 약화가 체계적인 패턴을 갖추지 못하고 있는데 이는 그림 27의 CASE3에서 보여지는 저기압성 순환과 관계가 있다. CASE1 일 때 대기 흐름의 정체로 고온 현상이 오래 지속될 수 있는 NP 타입 패턴과 고온 강도가 강할 수 있는 조건인 PJ 타입이 잘 만들어지는 것으로 생각된다. 반면 CASE3 일 때는 상대적으로 NP 타입 패턴보다는 고온 지속기간이 짧은 wave 타입과 PJ 패턴이 잘 만들어지는 것 같다.

이러한 대기 순환 타입의 차이는 고온역 분포에서도 잘 나타난다. 그림 29에서 CASE1 일 때는 한반도를 포함하여 동서방향으로 넓은 범위에 걸쳐 고온역이 나타나는

반면 CASE3 일 때는 고온역이 국지적으로 유지된다. 이는 그림 26에서 보았던 것처럼 기본적으로 서태평양 지역의 대류 활동의 범위에서 기인한 결과라고 보여진다.

BSISO2가 Phase 1,2,3,4에서 활발할 때는 서태평양 지역에 대류 활동이 더욱 활발해져 PJ 타입과 NP 타입의 대기 패턴이 유도되어 중위도 제트를 약화시켜 기압계의 정체를 가져와 폭염이 잘 일어날 수 있는 조건이 되었다. 반면 BSISO2가 활발하지 않을 때는 서태평양 지역 대류 활동이 강하지 않아 PJ 타입 보다는 wave 타입의 대기 패턴의 영향을 받을 수 있다.

CASE1 일 때 영향 phase들을 살펴보면 서태평양 대류 구역의 위치나 분포 그리고 그에 상응하는 대기 순환 패턴들이 BSISO1과 BSISO2 둘 다 서로 유사함을 알 수 있다. 그 이유는 CASE1에 사용된 샘플들이 서로 유사한 날들로 선택되었기 때문이었다. 그 말은 PJ 패턴 혹은 NP 패턴으로 폭염에 영향을 줄 수 있는 날들은 주로 서태평양에 대류 활동이 활발할 때이고 그때의 BSISO1의 위상은 1,6,7,8, BSISO2의 위상은 1,2,3,4 라는 것과 같다. 종합하면 BSISO가 서태평양에서(동쪽으로 확장된) 활발한 대류 구역을 가지는 위상에서는 PJ 패턴과 NP 패턴이 잘 형성되어 동아시아 지역에 동서로 넓게 뻗은 고기압성 순환이 만들어지고 중위도 제트의 약화는 이 순환이 유지되는 것을 도와줘 한반도에 더운 공기가 유입될 수 있는 호조건이 된다.

표 3.11과 3.12를 통해 CASE1과 2를 비교해보면 합성장 분석 시 사용된 샘플의 크기가 CASE1이 CASE2보다 월등히 적다. 그 말은 영향 phase에서 BSISO가 강하다 할지라도 폭염인 날보다는 아닌 날들이 더 많다는 것이다. BSISO의 강도와 위상이 같음에도 불구하고 폭염이 일어나는 날과 아닌 날이 발생한다는 것은 CASE2 일 때 BSISO의 영향 뿐만 아니라 다른 기작들도 혼재되어 three-cell 형태의 로스비파동의 특징이 덜 나타날 수 있음을 시사한다. 그 기작에 대한 것은 추후 심도 깊은 분석을 통해 알아낼 수 있을 것이다. 본 연구를 통해 폭염에 영향을 주는 강한 BSISO의 기작에 대한 설명은 가능하겠으나 위상과 강도의 함수인 BSISO 예측 지수만으로 향후 2주 뒤의 폭염 여부를 전망해야 한다면 지금의 분석 결과는 난감할 수 있는 가이드가 될 수 있으므로 위상과 강도의 함수인 BSISO 지수를 모니터링과 예측을 위한 공간장으로 표현할 수 있는 방안이 필요하다. 그 방안은 2018년 APCC 연구보고서인 “BSISO 예측 정보 시스템의 실시간 운영”의

2.2.2항에서 제시한 방법을 만들어 낼 가능성이 있겠고 이는 차년도 BSISO 영향 분석시스템 개발 연구에서 다루고자 한다.

Table 3.11. Sample size of each case for BSISO1 in composite analysis.

	P1	P6	P7	P8
CASE1	15	16	34	26
CASE2	67	51	71	96
CASE3	4	6	7	1
CASE4	31	44	31	41

Table 3.12. Sample size of each case for BSISO2 in composite analysis.

	P1	P2	P3	P4
CASE1	17	19	18	22
CASE2	123	87	57	79
CASE3	9	13	8	10
CASE4	38	40	35	59

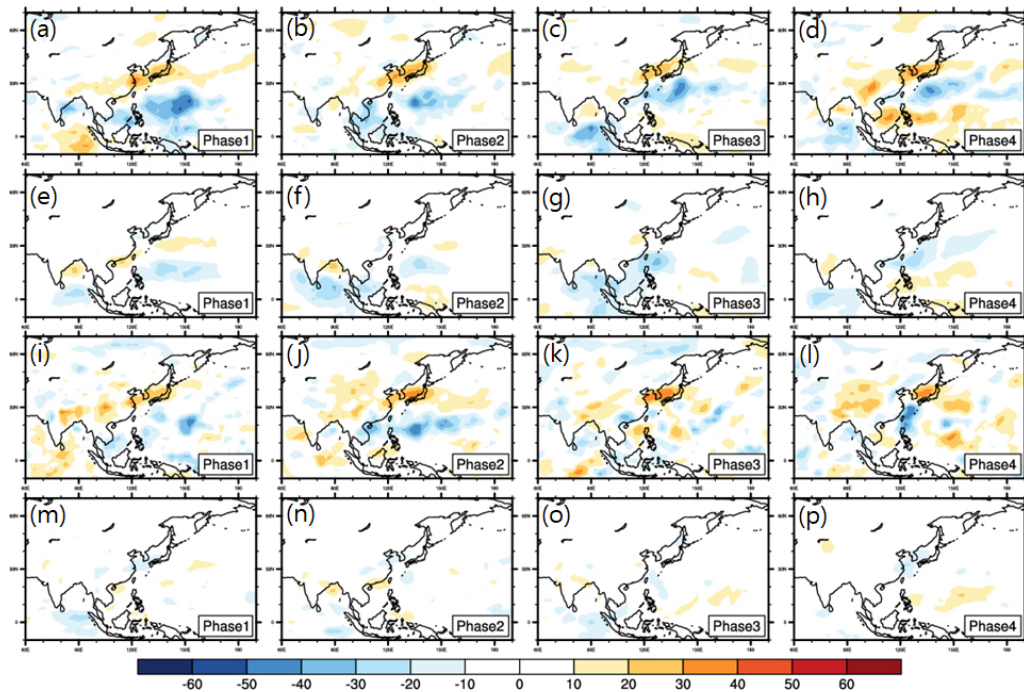


Figure 26. Composite anomalies of OLR in the influential phases for the case of strong BSISO2 and heat wave event (a)~(d), strong BSISO2 and no heat wave event (e)~(h), weak BSISO2 and heat wave event (i)~(l) and weak BSISO2 and no heat wave event (m)~(p).

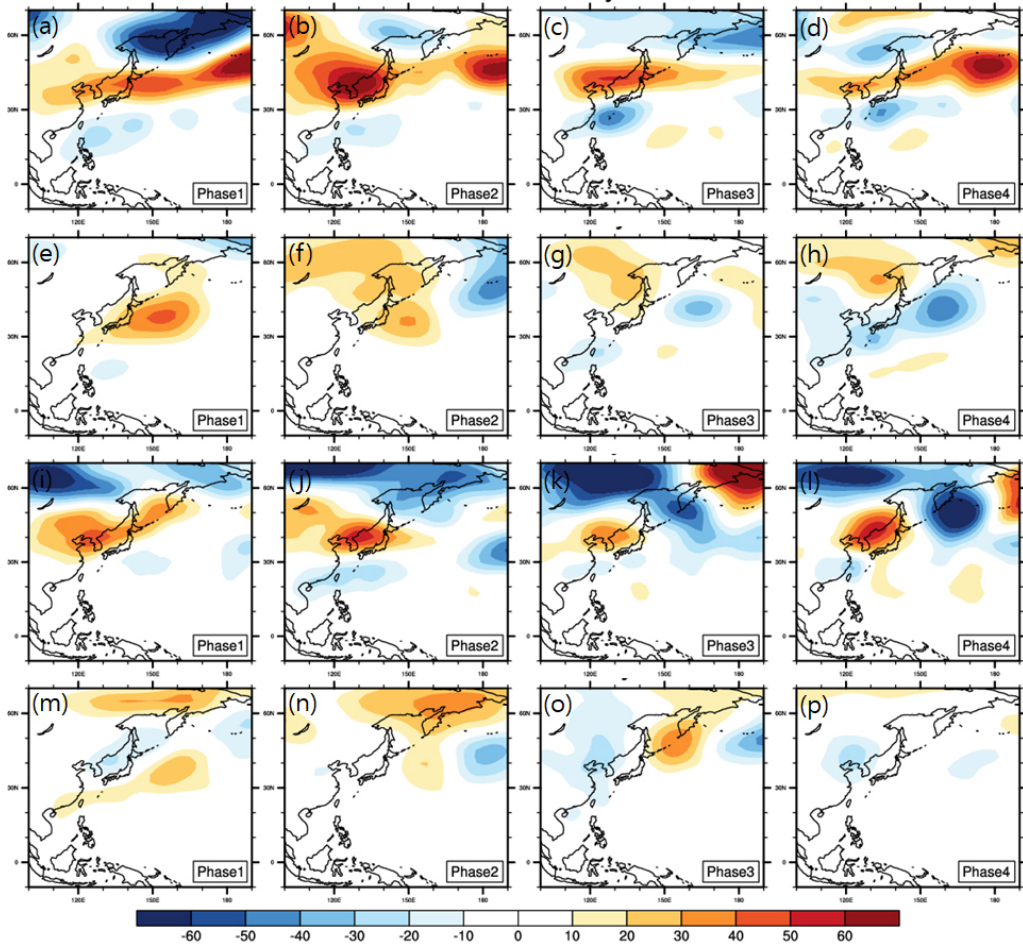


Figure 27. Same as Figure 26, but for geopotential height at 500 hPa.

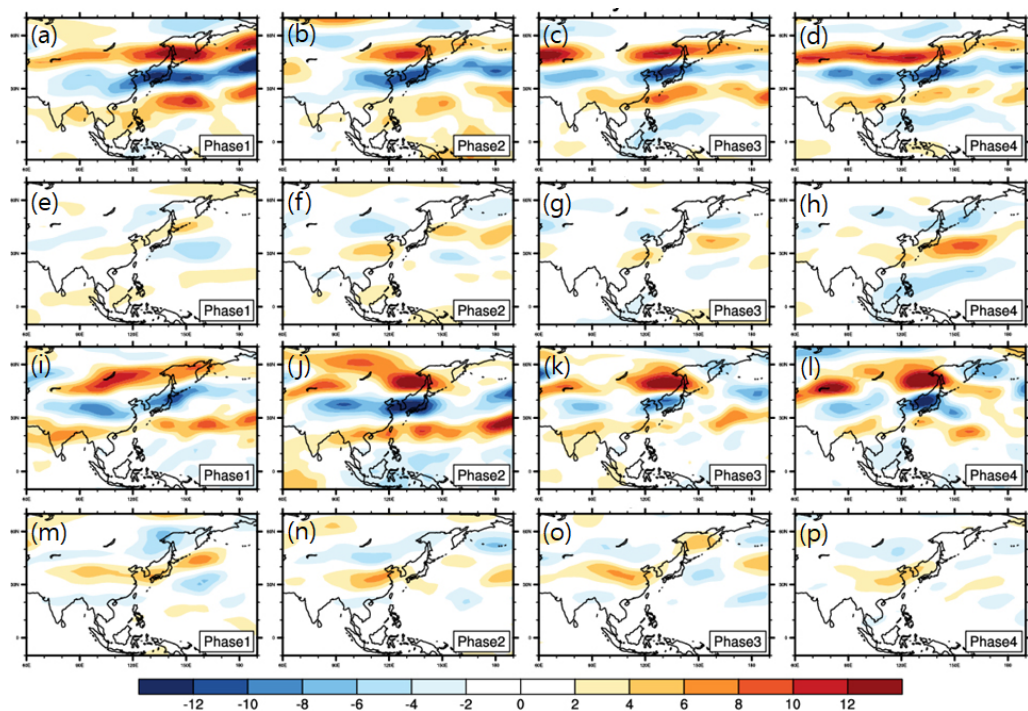


Figure 28. Same as Figure 26, but for zonal wind at 200 hPa.

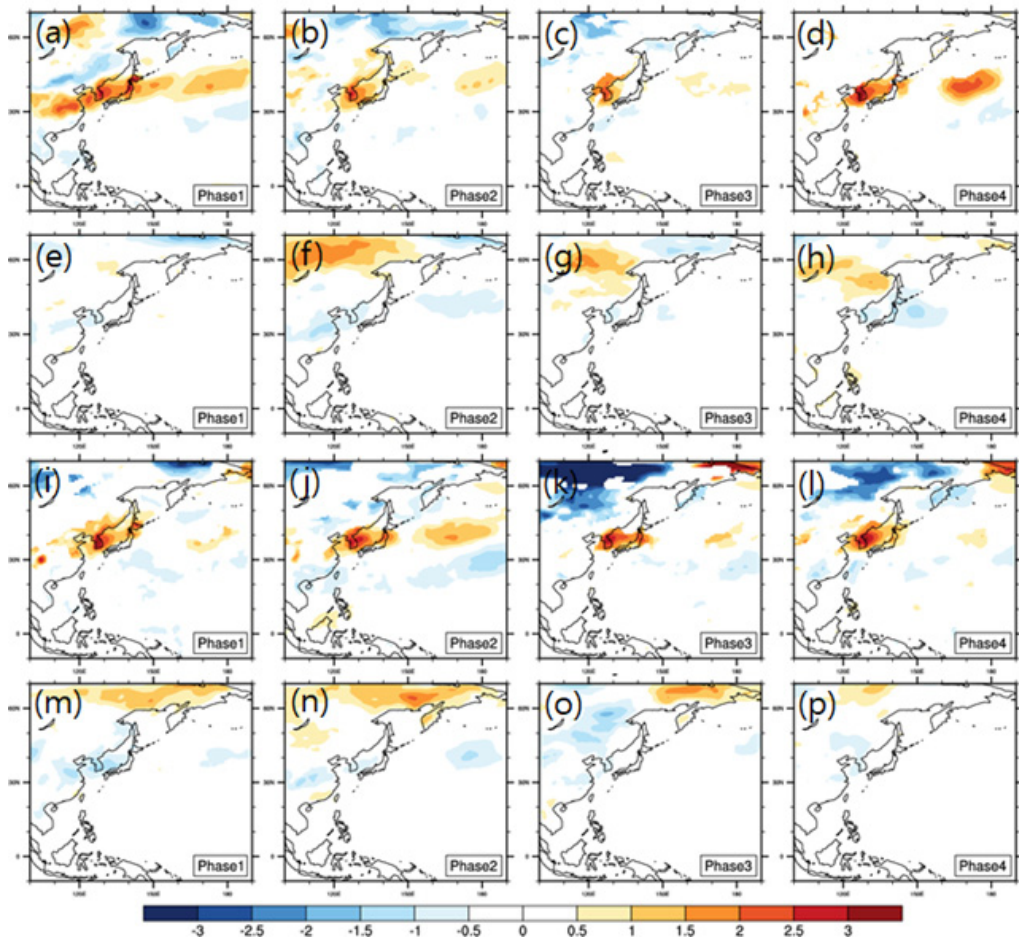


Figure 29. Same as Figure 26, but for 2m temperature.

3.2.3 사례분석

한반도 폭염이 극심했던 1994년과 2018년에 대해서 BSISO의 기여를 살펴보았다.

1994년의 경우 폭염일인 7/12~27, 7/30~31, 8/5~10, 8/14 총 25일 중 BSISO의 강도가 1.0 이상인 날에 대해서 phase diagram에 BSISO 지수를 표시하였다(그림 30). 강한 BSISO1의 날수가 강한 BSISO2의 날수보다 많았다. 3.2.2에서 도출한대로 BSISO1에서는 모든 날의 점들이 Phase 1,6,7,8의 영역에 배치되어있고 BSISO2에서도 영향 phase 중 일부인 3,4에 점들이 몰려있음을 볼 수 있다. 그림 31에서는 이때의 대기 패턴을 볼 수 있는데 서태평양 지역에 대류 활동의 강화가, 한반도 인근에 대류 활동의 억제

두드러지고 150°E 까지도 대류 강화 구역이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 서태평양 대류 강화로부터 시작되는 파동 형태의 PJ 패턴을 확인할 수 있고 동쪽으로 길게 뻗은 우리나라 주변에 위치한 고기압성 순환으로부터 NP 패턴도 엿보인다. 이러한 뚜렷한 열대지역 시그널에 의해 우리나라는 동쪽으로 길게 뻗은 고온역에 위치하게 되었다.

2018년의 경우 폭염 기간인 7/11~8/16 중 BSISO의 강도가 1.0 이상인 날에 대해서 phase diagram 에 BSISO 지수를 표시하였다(그림 32). 2018년에도 폭염 기간 동안에는 BSISO1의 날들이 6,7,8의 위상을 가지고 있었고 BSISO2는 2,3,4의 위상을 가진 날들로 구성이 되어 3.2.2에서 도출한 결과를 증명하는 사례가 되었다. 이 때의 대기 패턴은 그림 33에서 확인할 수 있는데 오호츠크해 부근의 잦은 태풍의 이동으로 우리나라에서 동쪽으로 길게 늘어진 양의 OLR, 500 hPa 지위고도, 기온 아노말리가 끊어진 모습을 보이지만 CASE1의 모습과 닮은 것을 볼 수 있다. 2018년도는 1994년보다 CASE1에 해당하는 날 수가 더 많은데 이는 1994년에는 8월 상순에 태풍의 영향으로 두 차례의 많은 비가 내려 더위가 일시적으로 누그러졌으나, 2018년에는 장마 종료 후 강수 현상이 매우 적었기 때문에 뜨거운 열기가 식지 못하고 지속적으로 누적되면서 폭염과 열대야가 더욱 강화되는 특징을 보였기 때문이다.

2016년에는 7월 후반부터 나타난 무더위가 8월 후반까지 이어지다 누그러졌다. 특히 2016년 8월 폭염일수 역대 가장 많았고, 8월 1~25일 기간 동안 전국 평균기온과 평균 최고기온이 28.0℃(편차 +2.6℃)와 33.6℃(편차 +3.5℃)로 1973년 이래 가장 높았으며, 강수량은 가장 적었다. 2016년의 폭염 원인 역시 베링 해 부근의 강한 고기압의 발달로 기압계 흐름이 정체된 가운데 북태평양 고기압 확장과 강한 일사까지 더해지면서 기온이 큰 폭으로 올라 무더위가 지속되었다. 그림 34 (a)에서 보는 것처럼 이때 BSISO1은 8월 상순과 중순에 강한 phase 7,8의 상태였는데 이는 앞서 논의한 우리나라 폭염에 영향 phase 와 일치한다. (b)~(d) 는 ECMWF로부터 생산한 BSISO 지수의 예측을 나타내는데 모두 8월 상, 중순에 강한 BSISO1이 phase 7,8의 상태가 될 것을 나타내고 있어 7월 후반부터 나타난 폭염이 지속될 수 있음을 예상할 수 있었다.

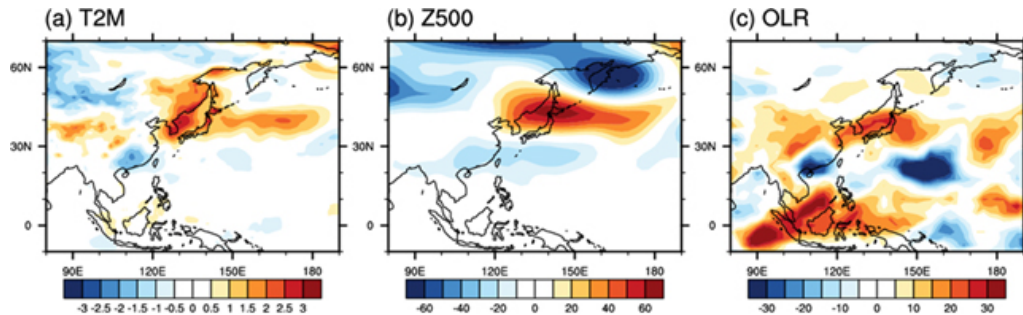
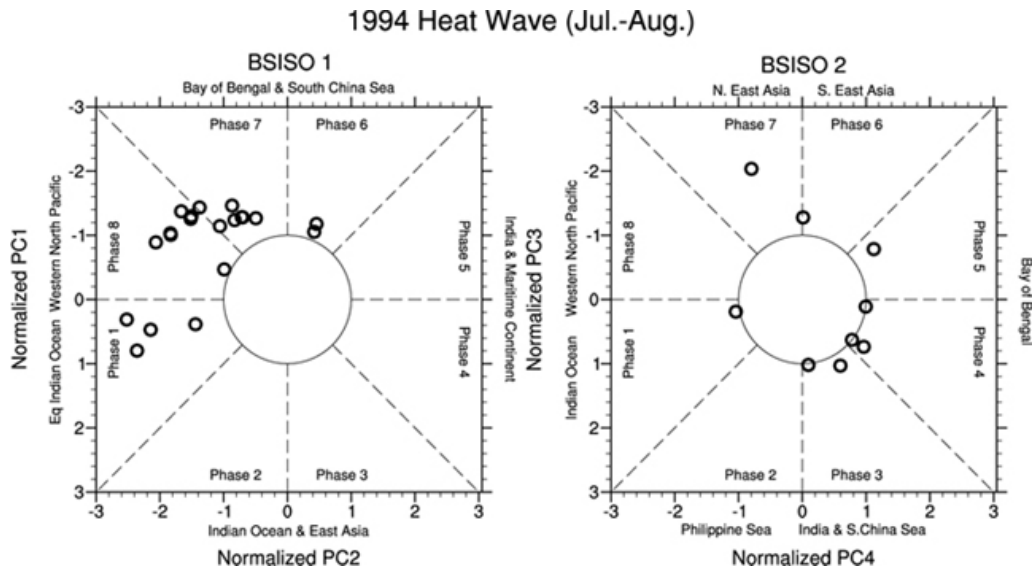


Figure 31. Anomaly of 2m temperature, geopotential height at 500 hPa and OLR for Korea heat wave case in 1994.

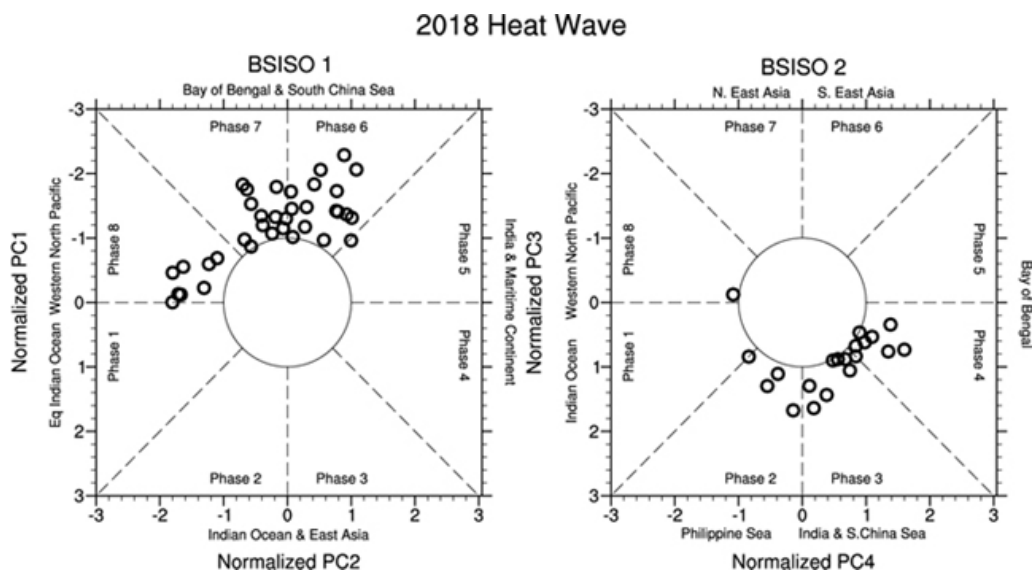


Figure 32. Phase diagram for Korean heat wave case in 2018.

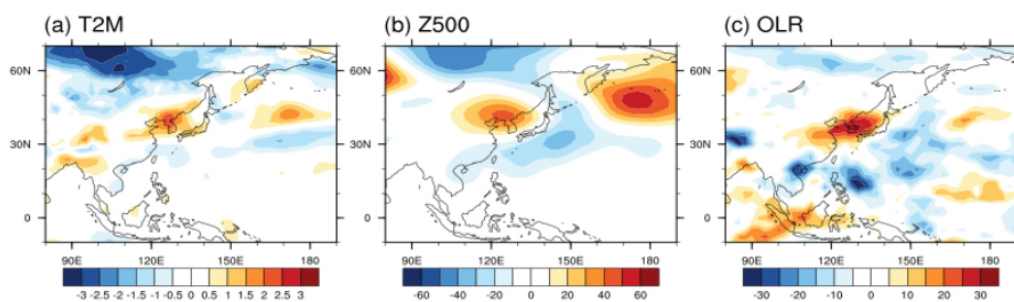


Figure 33. Anomaly of 2m temperature, geopotential height at 500 hPa and OLR for Korea heat wave case in 2018.

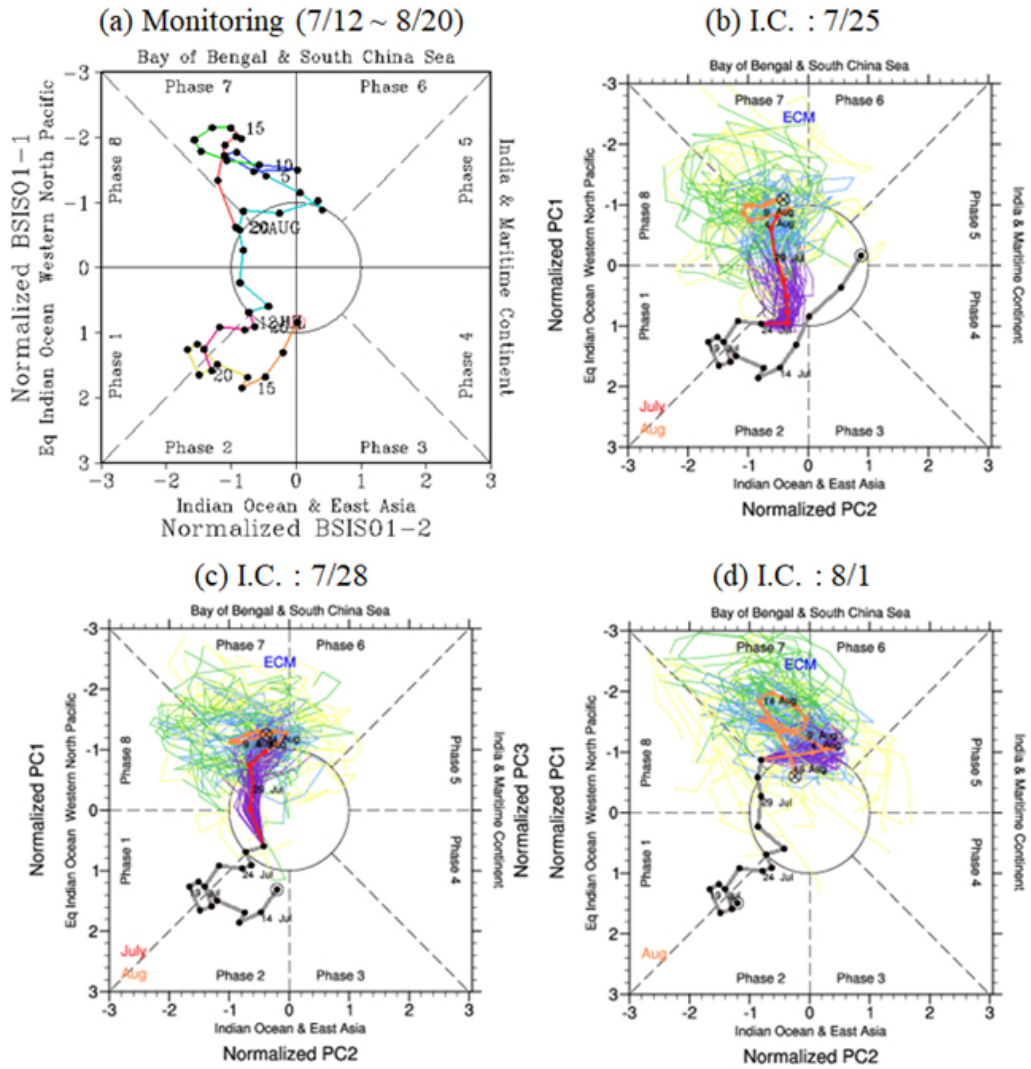


Figure 34. BISO forecast for 2016 heat wave period.

4. 결론 및 토의

4.1 결론

본 과제는 더 나은 BSISO 예보를 추구하기 위해 BSISO 정보의 가치와 유용성을 발굴하는 연구로써 북서태평양 열대 저기압 발생 및 아시아 몬순 지역 기온(우리나라 폭염을 중심으로)에 대한 BSISO 지수 활용/해석 가이드선 마련을 통해 목표를 달성하고자 하였다.

서태평양 열대 저기압 발생과 우리나라 폭염 발생에 대하여 BSISO는 phase preference가 존재하는 것으로 보였다. 7월~10월에 발생하는 서태평양 열대 저기압에는 BSISO1 일 때는 Phase 5,6,7, 그리고 BSISO2일 때는 Phase 8,1,2가 몬순기압골과 관련된 대규모 동서 바람장에 영향을 줄 수 있었고 이는 열대저기압 발생에 적합한 중관 규모 환경을 만드는데 기여하였다. 7월과 8월의 우리나라 폭염 발생에는 BSISO1 일 때 Phase 6,7,8,1, 그리고 BSISO2 일때는 Phase 1,2,3,4가 서태평양 대류 활동을 강화시킬 수 있었고 이는 PJ 패턴과 NP 패턴 형성에 기여하게 되는데 특히 베링해에서부터 한반도를 포함한 동아시아까지 동서로 길게 늘어진(정체된) 고기압성 흐름을 만들어 폭염이 지속되는 특징을 보였다.

서태평양 열대저기압 발생과 우리나라 폭염 발생에 있어서 BSISO의 영향 여부를 이해할 수 있었을 뿐만 아니라 그들의 모니터링과 약 2주 정도의 사전 예측에 대해서도 BSISO 지수의 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

4.2 토의

기상청 태풍 현업은 수평분해능 약 35 km의 태풍모델(DBAR)을 1일 4회 운영 중인데 이 횟수는 태풍 발생 시에 이루어지는 운영 현황이다. 예측 기간은 72시간이고 주로 태풍 경로 및 강도를 예측한다. 본 연구에서는 열대저기압 예보에 있어서 S2S의 목적에 맞게 2주 이전의 사전 예측이 BSISO 정보를 통해서 이루어질 수 있는지를 확인하였고 그 가능성을 보았다. 이 결과들을 통해 현재 단기 예보에서 이루어지고 있는 열대저기압 예측에 BSISO가 좀 더 앞선 혹은 다양한 정보를 제공할 수 있는 또 하나의 정보로 인식되고

활용될 수 있기를 바란다.

모델의 평가는 크게 모델의 예측값과 관측값의 일치도 정도를 판별하는 기술적 평가와 모델 예측 결과가 필요로 하는 정보의 효율적 제공 정도를 파악하는 실용적 평가로 나누어 볼 수 있다(Murphy, 1993; 이우진, 2006). 기술적 평가는 모델 예측과 비교할 수 있는 사용 가능한 관측 자료로부터 직접 비교함으로써 이루어지고, 실용적 평가는 예측 정보의 만족도, 모델의 처리 속도 및 비용 등 경제적 요소를 분석함으로써 이루어진다(예보관 훈련용 기술서). 본 연구에서는 열대저기압 추정을 위한 지수(WNP_ISGPI)를 사용함으로써 결정론적 예측을 하고자 하였다. 그러나 드물게 발생하는 현상의 특성 때문에 모니터링과 예측을 검증할 수 있는 잣대가 마땅치 않았다. 추후 서태평양 열대저기압 발생에 대한 확률 예보에 대한 연구도 수행된다면 사용자에게 좀 더 신뢰도 높은 정보를 제공할 수 있으리라 기대한다.

또한 방법론에 있어서도 BSISO 모니터링, 예측 정보에 기반한 WNP_ISGPI 정보 생산 방식에 변화를 줄 수 있다. BSISO 지수로부터 WNP_ISGPI를 바로 추정하는 것이 아니라 BSISO 지수로 WNP_ISGPI 계산에 사용되는 인자들에 대한 추정을 먼저 한 후 그들을 사용하여 WNP_ISGPI를 계산하는 방식이 있을 수 있다. 추후 새로운 방법과 현 방식과의 비교도 더 나은 예측 정보 생산의 한 시도가 될 수 있겠다.

4.3 성과

본 연구를 통해 달성한 성과는 다음과 같다.

- 서태평양 열대저기압 발생에 대한 BSISO 활용 가이드선 마련
 - WNP_ISGPI 개발하여 지수 형태의 BSISO 예측 정보를 공간적인 정보 정보로 변환
- 동아시아 여름철 기온 변동에 대한 BSISO 해석 가이드선 마련
 - BSISO 지수를 바탕으로 우리나라 폭염 발생 기작과의 관련성을 타진함으로써 BSISO 에 관한 기존 지식을 업그레이드

- BSISO의 두 모드 각각의 8개의 위상 중 관심 현상과 관련이 있는 위상 파악 및 관련 메커니즘 규명으로 예측정보의 간결화 도모

4.4 기대 효과

- BSISO 영향이 직접적으로 미치는 아태지역 개도국 예보 실무진들의 실무 지원으로 이상기후 대응 역량 강화 및 국내 중장기 예측 기술력 향상에 기여 가능
- 서태평양 열대저기압 발생과 한반도 폭염 발생에 대한 이해도 제고를 통한 APCC BSISO 연구진들의 역량 강화
- 다양한 현상으로서의 활용 가능성을 타진함으로써 추후 APCC BSISO 예측 정보 활용 증대

REFERENCES

- Gray, W. M., 1968: Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, 96, 669–700.
- _____, 1979: Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation. *Meteorology over the Tropical Oceans*, D. B. Shaw, Ed., Royal Meteorological Society, 155–218.
- _____, 1998: The formation of tropical cyclones. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 67. 37–69. 10.1007/BF01277501.
- Hung, C., H. J. Lin, P. Kao, M. F. Shih, and W. Fong, 2016: Boreal summer intraseasonal oscillation impact on western North Pacific typhoons and rainfall in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 27, 893–906, doi: 10.3319/TAO.2016.05.30.01(A)
- Kim, H-J., 2013: Improvement of real-time forecast system on the BSISO (I) : Verification of the BSISO forecast, APCC Research Report
- Kim, H-J., 2014: Improvement of real-time forecast system on the BSISO (II) : Multi-model ensemble method development in BSISO forecast, APCC Research Report
- Kim, H-J., 2016: Improvement of real-time forecast system on the BSISO (III) : Understanding practical usefulness of BSISO information by making a guide for operational forecasts, APCC Research Report
- Knapp, K.R., M.C. Kruk, D.H. Levinson, H.J. Diamond, and C.J. Neumann, 2010: The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 363–376, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>
- Lee, J.Y., Wang, B., Wheeler, M.C. et al., 2013: Real-time multivariate indices for the boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region. *Clim Dyn* (2013) 40: 493. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1544-4>
- Lee, W.S, and M. Lee, 2016: Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns, *Int. J. Climatol.*, 36 : 4815–4830, DOI: 10.1002/joc.4671
- Moon, J., B. Wang, S. Lee, and K. Ha, 2018: An Intraseasonal Genesis Potential Index for Tropical Cyclones during Northern Hemisphere Summer. *J. Climate*, 31, 9055–9071, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0515.1>
- Murphy, A.H., 1993: What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather

forecasting. Wea. Forecasting 8, 281–293.

Ritchie, E.A. and G.J. Holland, 1999: Large-Scale Patterns Associated with Tropical Cyclogenesis in the Western Pacific. Mon. Wea. Rev., 127, 2027–2043, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2027:LSPAWT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2027:LSPAWT>2.0.CO;2)

Yoshida, R., Y. Kajikawa, and H. Ishikawa, 2014: Impact of boreal summer intraseasonal oscillation on environment of tropical cyclone genesis over the Western North Pacific. SOLA, 10, 15–18, doi:10.2151/sola.2014-004

기상청, 2016: 기후감시 및 분석 기반의 장기예보 가이드선(II)

서경환, 안순일, 예상욱, 정철, 민승기, 이준이, 국종성, 김백민, 권민호, 최용상, 정지훈, 함유근, 김형석, 2017: 기후학자가 쓴 기후역학 교과서. 동화기술, 432. ISBN:9788942591015

이우진, 2006: 컴퓨터와 날씨 예측. 광고 이택스 284 pp.

【연구자】

김해정 선임연구원

문자연 선임연구원

정유림 연구원

오상명 연구원

연구보고서 2018-07

여름철 계절내 진동 예측 시스템 개선 IV: BSISO 예보 해석 및 활용 가이드스 마련

I S B N 979-11-5698-239-5

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.