

발간등록번호

11-1360620-000326-01



ISBN 979-11-92280-52-3

---

# 우리나라 여름철 위험기상 예보 한계 돌파를 위한 정책연구

---

2023. 11.



우리나라 여름철 위험기상 예보 한계 돌파를 위한 정책연구의

최종보고서를 다음과 같이 제출합니다.

2023 년 11 월 4 일

연구용역책임자      국    중    성    인

연구용역기관장      포항공과대학 직인

## 제 출 문

기 상 청 장 귀 하

본 보고서를 “우리나라 여름철 위험기상 예보 한계 돌파를 위한 정책연구”  
최종보고서로 제출합니다.

2023 년 11월 4일

- 연구용역기관명 : 포항공과대학
- 연구기간 : 2023. 6. 8. ~ 2023.11. 4.
- 연구용역책임자 : 국 중 성
- 참여연구원
  - 연구원 : 손 석 우
  - 연구원 : 최 용 상
  - 연구원 : 김 주 완
  - 연구원 : 박 찬 일
  - 연구원 : 황 재 영
  - 연구원 : 이 중 화

## 요 약

기후변화 가속화에 따라 위험기상이 증가하고 있으며 특히 한반도 여름철 위험기상은 북태평양고기압과 밀접하게 관련되어 있으나 그 중요성에 비해 이해가 부족함. 우리나라 여름철 위험기상의 예측성 향상을 위해서는 이에 대한 정확한 이해가 필수적이며 관측을 포함하여 구체적인 연구조사가 수반되어야 함.

북태평양고기압의 구조 및 변동성 등 지금까지 수행되어 온 연구 내용들과 이와 관련하여 발생하는 위험기상 현상과 그 영향범위에 대해 조사하여 과학적으로 규명된 부분과 규명되지 않은 부분을 구별하여 파악하였음. 이해의 한계를 극복하는 데 필요한 내용뿐만 아니라 그 연구를 위해 필요한 관측 요소들을 조사하고 이를 관측하기 위한 방법 및 현황을 정리함. 과거의 연구를 기반으로 한 조사와 더불어 현재와 미래에 대한 방향성을 조사하기 위하여 현재 활발히 연구활동을 수행중인 국내 관련 전문가들을 대상으로 북태평양고기압 연구에 대한 수요조사를 진행했고, 국외 관련 전문가들을 대상으로는 각 국가별 상황을 포함한 자문을 진행했음. 조사 내용을 취합하여 참여 연구진들의 긴밀한 의견교환과 현업기관인 기상청, 기상과학원과의 토의를 통해 여름철 기상예보 한계 돌파를 위한 정책을 제언함.

북태평양고기압 가장자리를 따른 남풍기류와 수증기의 유입, 북태평양고기압의 영향하에 있을 때 안정된 대기에서의 단열 승온, 대기-해양 부등가열 차이와 관련된 북태평양고기압의 확장과 수축 그리고 그에 따른 기압경도의 변화 등 북태평양고기압의 구조에 따라 폭염과 집중호우가 동시에 나타나는 복합극한기상이 발생할 수 있음. 시공간적으로 큰 규모인 북태평양고기압이 일시적인 시간규모와 종관규모에 해당하는 시스템 또는 요란과 상호작용하며 여름철 한반도 기상 특성을 조절함. 중위도 저기압과 대기천에 대한 연구가 활발하나 한반도와 관련된 특성과 발달기작 등에 대한 연구는 거의 없음. 한편으로는 엘니뇨와 같은 대규모 순환시스템의 대기-해양 상호작용에 영향을 받는 등 북태평양고기압과 관련된 현상들은 다중규모 특성을 가지며 한반도의 장마 전후를 포함한 여름철 위험기상에 영향을 주지만 아직 명확한 규명은 부족함. 이와 같은 다중규모의 특성은 동아시아 기후모의시 모의 영역 내 열대 저기압이 발생하면 북태평양고기압에 대한 모의 성능이 급격히 낮아지는 것과 같이 기후모델의 예측성을 저해하는 난제가 됨. 따라서 북태평양고기압의 변동성 이해를 위해서는 경년 규모에서 수일 이내의 짧은 시간규모와 공간적으로 대규모 순환부터 매일의 종관규모 시스템까지 고려해야 함.

다양한 위험기상의 조절자로서 북태평양고기압의 영향에 대한 연구를 위해 북태평양

고기압 지수에 대한 연구도 꾸준히 수행되었음. 현업에서는 실제 예보에 활용하기 위하여 특정 지위고도 값 등을 사용하여 북태평양고기압의 위치 및 규모를 파악해 왔음. 최근 지구온난화에 따라 특정 지위고도의 실효성이 감소하고 있어 일반화된 지수 개발에 대한 현업의 요구가 증대되고 있으나 아직 정립된 것은 없음.

연구현황 조사를 통해 추가 연구가 필요한 부분을 실제로 수행하기 위해서는 시공간적으로 고해상도이고 준실시간부터 기후적 시간규모까지의 관측자료가 필수적이고 특히 대기의 연직구조 파악을 위한 연직관측 자료가 필수적임. 필요한 기상 변수로는 연직 온도 프로파일, 해수면 온도, 수증기, 바람 그리고 구름 관련 변수들이 핵심적임. 현재 관측자료 대용으로 사용하는 고품질의 재분석 자료가 다수 존재하나 관측 공백 지역에 해당하는 지역에서는 저품질이고 북태평양고기압의 영향 범위는 대부분 대표적인 관측 공백 지역에 해당함.

관측의 공백을 채우기 위해서는 현장관측과 위성관측의 병행을 통한 상호보완이 필요함. 현장관측으로는 북태평양고기압 대상 지역의 지상관측소, 선박, 그리고 항공기를 이용한 라디오존데와 낙하존데 관측이 필요하고, 위성관측으로는 우리나라 천리안 위성 2A호의 기상 산출물의 활용 및 해외 위성관측자료 활용이 필요함. 위성관측 자료는 위성에서 수신한 기본자료(레벨2 자료)를 고도화하여 사용할 수 있으므로 위성자료를 활용한 준재분석자료(레벨3과 레벨4 자료)의 개발이 필수적임. 준재분석자료를 생산하기 위해서는 산출 알고리즘의 개발이 반드시 병행되어야 하며 방대한 양의 위성자료 처리를 위한 산출기법 고도화가 필요함. 또한 핵심 관측요소 외에도 다른 요소와의 연관성 조사를 통해 개별 산출물을 보조 변수로 활용 및 종합하여 북태평양고기압의 구조와 변동성을 파악할 수 있는 북태평양고기압 활용산출물 개발도 필요함. 궁극적으로 관측자료를 활용하여 재분석 자료를 고도화함과 동시에 현업 예보의 초기장에 활용할 수 있는 알고리즘의 개발이 필수적임.

현황조사 분석을 통해 관측자료의 개선, 국제 공동연구의 필요, 북태평양고기압 메커니즘의 이해가 주요 시사점으로 도출되었음. 이를 바탕으로 각 주제별로 국내 최고의 관련 전문가들을 대상으로 북태평양고기압 연구에 대한 수요조사를 진행한 결과와 국외 자문단의 의견을 통한 국제적 여건을 반영하여 총 4개의 전략과제와 13개의 세부과제를 선정했음. 전략과제는 북태평양고기압 관측전략, 위험기상 예측 개선 전략, 북태평양고기압 변동 원인 규명 전략, 예측성 및 미래변화 연구 전략이며 각 전략과제별로 2~4개의 세부과제를 선정하고 9년간의 추진전략 및 로드맵(세부과제 및 추진전략은 본문 참조)을 제시함.

국내외 수요에 대응할 수 있는 정책적 추진 방향을 제언함.

북태평양고기압의 확장과 수축에 대한 이해가 필수적이나 우리의 이해가 매우 제한적

이기 때문에 한반도 위험기상의 예측성 향상을 위해서는 북태평양고기압의 거동에 대한 집중적인 연구가 필요하며 이는 정부의 적극적인 연구개발(R&D) 투자를 통해서만 가능함.

향후 추진되어야 할 연구개발(R&D)은 북태평양고기압 모니터링을 위한 관측 개선과 북태평양고기압 거동 역학 이해 증진을 병행하는 방향이 되어야 함.

위성자료의 불확실성을 줄이고 활용성을 높이기 위해서는 현장 관측의 확대가 필수적임. 효율적인 관측 예산 활용과 관측자료 활용 극대화를 위해서는 다양한 국내 관련 기관과의 협력을 통해 집중관측을 수행해야 하며 관측망의 효율적 구성을 위해서는 일본, 중국, 대만 기상청 및 연구기관과의 국제협력이 필요함.

우리나라 여름철 위험기상 예보 한계 돌파를 위해서는 우리나라에서 명확한 연구방향을 제시하고 선제적인 예산을 확보하여 국제협력 연구의 주도권을 가질 필요가 있음.

현재 우리나라 위험기상 및 기후변동/변화에 대한 연구는 세계적인 수준으로 전문가들이 다양한 국내 대학 및 연구소에 분포하고 있으므로 기상청과 원활히 소통하고 협업하면서 국내 연구능력을 극대화하고 일관된 방향으로 추진하기 위해서는 대학 중심의 연구단 형태로 연구개발(R&D)이 진행될 필요가 있음.

주제어: 북태평양고기압, 위험기상, 북서태평양, 집중관측, 국제협력

## Abstract

With the acceleration of climate change, extreme weather events are increasing, and summertime extreme weather events over the Korean Peninsula are closely related to the North Pacific Subtropical Anticyclone, but its fundamental dynamics are poorly understood despite its importance. In order to improve the predictability of summertime extreme weather events in Korea, a fundamental understanding of the dynamics of the North Pacific Subtropical Anticyclone is essential and should be accompanied by well-designed research, including an observational campaign.

This report is divided into two parts: a review of the status quo and a survey (Sections 1 to 4), and suggestions for the future (Section 5). The review takes stock of what has been done to date on the structure and variability of the North Pacific Subtropical Anticyclone and its associated extreme weather events, and what is and is not scientifically understood. We trace what types of observations are needed to overcome the limitations of our understanding, and what research is needed within our current observational framework. In addition to the review based on previous research, we conducted a needs assessment for North Pacific subtropical anticyclone research with national experts who are currently actively engaged in research, and consulted with international experts who have ongoing approaches in their country.

The second part proposes strategies to overcome the limitations of summer weather forecasts by compiling the results of the review, exchanging views with participating researchers, and discussing with the Korea Meteorological Administration and the National Institute of Meteorological Sciences.

Compound extreme weather events, such as heat waves and heavy rainfall, can occur simultaneously with the expansion and contraction of the North Pacific Subtropical Anticyclone, depending on the structure of it. In addition, the North Pacific Subtropical Anticyclone interacts with various timescale disturbances to control the weather characteristics of the Korean Peninsula during the summer. Although there have been many studies on mid-latitude synoptic eddies and atmospheric rivers, there have been few studies on the characteristics and development mechanisms related to the Korean Peninsula. Since the North Pacific Subtropical Anticyclone has

multi-scale characteristics, it has been influenced by large-scale air-sea interactions and affects summer extreme weather in a short time during the late pre-monsoon period on the Korean Peninsula, but there is still a lack of clear understanding. For summer forecast, this multi-scale characteristic of the North Pacific Subtropical Anticyclone hampers its predictability, as evidenced by the sharp decline in simulation performance when a tropical cyclone develops within the East Asian climate model simulation domain. Therefore, to understand the variability of the North Pacific Subtropical Anticyclone, it is necessary to consider time scales from decades to days and spatial scales from large-scale circulation to daily synoptic systems.

Based on the literature review, we suggest that quasi-real-time observations with high spatial and temporal resolution are needed. Key meteorological variables are vertical temperature profiles, sea surface temperature, water vapor, wind and cloud related variables. Currently, several high quality reanalysis data are available, but their uncertainty is very large, especially in the areas of observational gaps. Meanwhile, a significant variability of the North Pacific Subtropical Anticyclone lies in the notable observational gap.

To fill the observational gaps, a combination of in-situ and satellite observations is needed to complement each other. In-situ observations require radiosondes and drop-sondes from ground stations, ships and aircraft in the North Pacific Subtropical Anticyclone target area, while satellite observations require the use of meteorological data from the Geostationary Korea Multi Purpose Satellite-2A and international satellite observations. It is essential to develop quasi-reanalysis data (level 3 and level 4 data) by upgrading the basic data (level 2 data) received from satellites. To produce quasi-reanalysis data, it is necessary to develop computational algorithms in parallel and to improve computational techniques for processing large amounts of satellite data. There is also a need to develop the use of the North Pacific Subtropical Anticyclone by linking key observations to other factors. Finally, it is essential to develop algorithms that use observations to improve reanalyses and to be used in the initial conditions of forecasts.

Key research directions suggested here are the improvement of observational data, the need for international collaborative research, and the understanding of the mechanism of the North Pacific Subtropical

Anticyclone. A total of four strategic tasks and 13 subtasks have been proposed based on the results of a needs assessment of national experts in each topic and consultation with international experts. The strategic tasks are 1) Strategy for monitoring the North Pacific Subtropical Anticyclone, 2) Strategy for improving extreme weather prediction, 3) Strategy for understanding the variability of the North Pacific Subtropical Anticyclone, and 4) Strategy for the predictability and future changes of the North Pacific Subtropical Anticyclone. For each strategic task, two to four sub-tasks were proposed, along with a nine-year implementation plan and roadmap.

Finally, policy suggestions were made for future research directions.

First, intensive research on the behavior of the North Pacific Subtropical Anticyclone is needed to improve the predictability of extreme weather in the Korean Peninsula. This can only be achieved through strong government-led investment in research and development (R&D). Second, future research and development (R&D) efforts should be directed towards improving observations for monitoring the North Pacific Subtropical Anticyclone and improving our understanding of the dynamics of its behavior.

Increasing the number of in-situ observations is essential to reduce the uncertainty of satellite data and maximize their usefulness. In order to efficiently use observation resources and maximize the usefulness of observations, observation campaigns should be conducted in collaboration with various domestic agencies, and international collaboration with research institutes and meteorological agencies in Japan, China and Taiwan is necessary for the efficient organization of the observation network. To overcome the limitations of summer extreme weather forecasts in Korea, it is necessary for Korea to take the lead in international collaborative research by providing a clear research direction and securing pre-emptive funding.

Keywords: North Pacific Subtropical Anticyclone, extreme weather, western North Pacific, observational campaign, International collaboration

# 목 차

<b>1</b>	<b>개요</b>	
1.1.	목적 및 배경	3
1.2.	범위 및 내용	6
<b>2</b>	<b>북태평양고기압에 기인하는 여름철 위험기상 관련 현황 조사·분석</b>	
2.1.	북태평양고기압 관련되어 발생하는 위험기상 현상 및 그 영향범위 조사	11
2.2.	북태평양고기압 구조 및 변동성 관련 연구개발 사례 조사 및 분석	24
2.3.	북태평양고기압 관련 여름철 위험기상에 대한 이론 및 예측기술 현황 조사	40
<b>3</b>	<b>북태평양고기압 구조 및 변동특성 파악을 위한 관측 전략</b>	
3.1.	관측가능 요소 및 장비 특성에 따라 도출 가능한 요소 조사	53
3.2.	핵심요소를 고려하여 북태평양고기압 구조파악을 위한 관측전략 제시	63
<b>4</b>	<b>기후위기 시대에 적합한 기상정책 마련을 위한 수요조사 및 시사점 제시</b>	
4.1.	북태평양고기압에 대한 이해 및 예측성 향상을 위한 시사점	79
4.2.	북태평양고기압에 대한 이해 및 예측성 향상을 위한 국외전문가 자문	116
4.3.	시사점 및 추진전략	125
<b>5</b>	<b>우리나라 여름철 기상예보 한계 돌파를 위한 정책적 제언</b>	
5.1.	국내외 수요에 대응할 수 있는 정책적 추진 방향 제언	133
	<b>참고문헌</b>	
	<b>부록: 국외 전문가 자문 원문</b>	

# 표목차

표 3.1.	동아시아(한/중/일) 정지궤도 위성 특성	54
표 3.2.	미국/유럽 극궤도 위성 특성	55
표 3.3.	GK-2A의 북태평양고기압 주요 기상요소 산출특성	56
표 3.4.	인공지능 기술을 접목한 기상산출물 산출 방법	64
표 3.5.	여름철 위험기상 및 북태평양고기압 관련 주요 연구들의 과학적 현안에 대한 위성 원격 자료의 활용 전략	73

# 그림목차

그림 1.1.	2022년 우리나라 위험기상과 관련된 북태평양지역의 특성(그림출처: 2022 기상기후보고서(기상청, 2023))	3
그림 1.2.	2018년 여름철 위험기상과 관련된 북태평양고기압의 특성(그림출처: 경향신문 기사(2018년 7월 30일))	4
그림 1.3.	2020년 여름철 위험기상과 관련된 북태평양고기압의 특성(그림출처: 한겨레신문 기사(2020년 8월 3일))	4
그림 1.4.	2023년 장마철 호우 기압계 (좌), 8월 고온 기압계 (우) (그림출처: 기상청)	4
그림 2.1.	1994년(왼쪽), 2013년(중간), 2016년(오른쪽) 폭염 사례들에 대하여 폭염 발생 전(위), 폭염 도중(중간), 폭염 종료 후(아래)의 500-hPa 지위고도(검은 실선)와 온도(음영). 5,880 gpm과 5,850 gpm은 각각 굵은 실선과 점선으로 표시됨(그림출처: Min et al. 2019)	12
그림 2.2.	자기조직화지도를 통해 분류된 6가지 서울 폭염사례 유형. 음영은 해면기압 편차를, 벡터는 1,000-hPa 바람 편차를 나타냄(그림출처: 백승운 외 2018)	13
그림 2.3.	총 431일의 폭염일수에 대하여 자기조직화지도를 통해 분류된 3가지 날씨 패턴. 검은 실선은 500-hPa 지위고도를, 벡터는 850-hPa 바람을 나타냄. 5,880 gpm을 굵은 실선으로 별도 표시함(그림출처: Yoon et al. 2018)	14
그림 2.4.	동아시아 여름철 기후에 영향을 주는 기단들 및 정체전선의 모식도(그림출처: Park et al. 2021a)	15
그림 2.5.	1979~2018년 동안 발생한 318개의 한반도 여름철 집중호우 사례의 3차원(상층, 중층, 하층) 대기순환 모식도(그림출처: Park et al. 2021b)	16



## CONTENTS

그림 2.6. 2020년 장마 (a) 전반기와 (b) 후반기의 500-hPa 지위고도(검은 실선), 850-hPa 상당온위 아노말리(음영), 연직적분된 수증기속 아노말리(벡터); 북태평양고기압 가장자리는 5,880 gpm을 굵게 표시하여 나타냄. 5,880 gpm의 기후값은 굵은 초록 실선으로 표시함(그림출처: Park et al. 2021c) ..... 18

그림 2.7. (a) 전기 몬순시기(6~7월)와 (b) 후기 몬순시기(8~9월) 동아시아 대기권의 기후학적 특성에 대한 모식도. 검은실선은 850-hPa 지위고도, 음영은 대기권 빈도를 나타냄. “L”은 이동성 중위도저기압을 표시함 ..... 19

그림 2.8. 몬순기압골이 강한 년도(위)와 약한 년도(아래)의 북서태평양 하층대기 순환장. 850-hPa 유선함수를 검은실선, 상향장파복사를 음영, 태풍 발생위치를 빨간 점으로 표시함. 초록색 굵은 파선은 몬순기압골의 축을 나타냄(그림출처: Wu et al. 2012) ..... 21

그림 2.9. 북서태평양 태풍의 평균적인 월별 진로(그림출처: 태풍백서 2011) ..... 22

그림 2.10. 1979-2016년 동안의 여름철 북태평양고기압 강도에 따른 태풍 경로 변화(그림출처: Camp et al. 2018) ..... 23

그림 2.11. 7월 평균 (a)해면기압과 지표면 바람, (b)500hPa 오메가, (c)250hPa 풍속, (d)상대도와, (e)250hPa 지위고도 비대칭성분과 비지균풍의 기후값(그림출처: Miyasaka and Nakamura. 2005) ..... 24

그림 2.12. 1998년 8월 11-16일 동안 평균된 (a)북태평양고기압 중심에서의 남북방향 순환과 연관된 수증기 sink, (b)500hPa 지위고도(그림출처: Jinhai et al. 2001) ..... 25

그림 2.13. 북태평양고기압 주변 순환의 첫 번째(왼쪽)와 두 번째(오른쪽) 주성분의 수평분포. (a, b) 여름철(JJA) 평균, (c, d) 6월, (g, h) 8월(그림출처: Dong et al. 2017) ..... 26

그림 2.14. (a) 6월, (b) 7월, (c) 8월의 500hPa 고도의 지위고도(contour)와 수평 바람 기후값(vector). 빨간원은 WRP 지수로 산정한 북태평양고기압의 서쪽 경계를 나타내고, 파란선은 WRP에 가장 가까운 지위고도를 의미함(그림출처: Yang et al. 2017) ..... 27

그림 2.15. (a) 특정 지위고도를 이용한 북태평양고기압 지수(H)와 강수량 사이의 관계와 (b) 에디 지위고도를 이용한 북태평양고기압 지수(He)와 강수량 사이의 관계 산포도(그림출처: He et al. 2018) ..... 28

그림 2.16. 북반구 여름철 15년 (1979-1993) 평균 850 hPa 지위고도 합성장. 여름철 평균 1480 m 등치선을 굵은 실선으로 표기하였고, 6월, 7월, 8월 평균 1,480 m 등치선을 점선으로 표기함(그림출처: Lu and Dong 2001) ..... 29

## 그림목차

그림 2.17. 북태평양고기압의 동서 방향 변동성과 관련된 잠재 메커니즘 및 이에 따른 동아시아 강수 영향 모식도(그림출처: Cheng et al. 2019) ..... 30

그림 2.18. 초여름 및 늦여름에서의 10-30일 주기의 남북 방향 북태평양고기압 변동성을 조절하는 메커니즘 모식도(그림출처: Zhou and Li 2022) ..... 31

그림 2.19. 북태평양고기압의 강한 후퇴 해(SRY)와 약한 후퇴 해(WRY)의 전반기와 후반기 200hPa의 남북방향 바람 아노말리(shading)와 wave activity flux(vector)(그림출처: Dong and He. 2020) ..... 31

그림 2.20. (a) 500 hPa 및 (b) 850 hPa 지위고도장을 활용한 북태평양고기압의 경년변동성(그림출처: Sui et al. 2007 및 Lu and Dong 2001) ..... 33

그림 2.21. 북태평양고기압 경년 강화 현상과 관련된 주요 지역의 해수면 변동성 및 관련된 메커니즘 모식도. 빨간색/파란색 실선은 따뜻한/차가운 해수면 온도에 의한 Gill-타입 반응을 나타냄(그림출처: He et al. 2015a) ..... 34

그림 2.22. 여름철 장기추세가 제거된 북태평양고기압 지수 및 열대 해수면온도 웨이블릿(wavelet) 파워스펙트럼(그림출처: Sui et al. 2007) ..... 36

그림 2.23. ENSO와 PDO에 대한 해면기압과 열대 상층 바람의 회귀 성분(그림 출처: Matsumura and Horinouchi. 2016) ..... 36

그림 2.24. 두 개의 재분석자료를 활용한 (b,d)1958-1979년 및 (a,c)1980-1999년 여름철에서의 500-hPa 지위고도의 5870-m 등치선(그림출처: Zhou et al. 2009) ..... 37

그림 2.25. AR4에서 모의된 북태평양고기압(NPSH)과 북대서양고기압(NASH)의 시나리오별 강(그림출처: Li et al. 2012) ..... 38

그림 2.26. (a) AR5의 RCP8.5 시나리오에서 전망된 지위고도(shading)와 바람(vector)의 Historical 모의 대비 차이와 북태평양고기압의 경계를 의미하는 He(contour), 파란선은 Historical 모의, 빨간선은 RCP8.5 시나리오, (b) 북서태평양 영역평균된 He의 미래 변화량(그림 출처: He et al. 2015) ..... 38

그림 2.27. 1989년부터 2010년까지의 여름철(6-8월) 평균 해면 기압 (등치선 간격 4 hPa) (그림 출처: North et al. 2014) ..... 40

그림 2.28. 2016년 (a) 7월과 (b) 8월, 2018년 (c) 7월과 (d) 8월 500hPa 지위고도장의 (위) 재분석장과 (중간) 모델결과, 그리고 (아래) 그 차이(그림출처: Yoon et al. 2021) ..... 42

## CONTENTS

그림 2.29. 화북지역에 폭염이 발생할 때 나타나는 수평 바람 아노말리. ERAIM, RegCM, FROALS은 각각 재분석자료, 대기모델, 대기해양접합모델의 결과를 의미함(그림출처: Lin et al. 2018) .....	43
그림 2.30. 2019년 8월 24일 00UTC 초기시간인 UM, KIM 모델의 강수 예측과 각 시기의 (4번째 열) 5,880 gpm 지위고도장. 빨간색, 파란색, 검은색 선은 각각 UM, KIM, ERA5를 의미함(그림출처: 직접 분석) .....	45
그림 2.31. 지역기후모델을 이용한 동아시아 여름 몬순 모의 시 아열대 북서태평양(110-145°E, 20-32°N)에서 영역평균한 (a) 강수량, (b) 중층 지위고도, (c) 하층 순환, (d) 해수면 온도의 변화. CTL, SOM, SOM_ISN은 각각 WRF 모델만을 이용한 실험, WRF 모델에 해양모델이 접합된 실험, WRF 모델에 해양모델과 간헐적 스펙트럴넛징이 적용된 실험을 의미함(그림출처: Cha et al. 2009) .....	46
그림 2.32. 2023년 6호 태풍 카눈의 모델 별 진로 (위), ECMWF 모델(왼쪽 아래)과 NCEP 모델(오른쪽 아래)의 500hPa 지위고도 예측장 .....	47
그림 2.33. GFS 2014년 10월 6일 00 UTC 분석장을 초기조건으로 사용한 WRF 모델의 3일 예측에서 나타나는 500hPa 순환(벡터)과 지위고도(contour). GFSANL과 GFSFCST는 각각 GFS 분석장, GFS 3일 예측장을 나타내고, SN과 NOSN은 스펙트럴넛징을 적용/미적용한 WRF 모델 3일 예측 결과를 각각 의미함(그림출처: Moon et al. 2018) .....	48
그림 2.34. WRF 모델을 이용한 1994년 5월 1일부터 8월 31일까지의 지역기후모의에서 나타나는 500hPa 지위고도의 재분석자료와 모의결과 사이의 공간상관관계 변화; SP, ISP, NOSP는 각각 스펙트럴넛징, 간헐적 스펙트럴넛징, 넛징 미적용 실험을 의미함(그림출처: Cha et al. 2011) .....	49
그림 3.1. 북태평양고기압 관측 가능 위성 (*정지궤도위성: GK2A (한국), Himawari (일본), **극궤도위성: JPSS/Aura (미국), Metop/Sentinel (유럽)) .....	54
그림 3.2. 북태평양 및 주변지역의 (왼쪽) 라디오존데 및 (오른쪽) 지상관측 네트워크 분포 .....	57
그림 3.3. 미국 해양대기청(NOAA) 이동형 하층 대기 프로파일링 시스템(CLAMPS, Collaborative Lower Atmospheric Mobile Profiling System) 측정장비. (왼쪽) 바람장 연직구조 관측을 위한 도플러 라이다, (가운데) 온도 및 습도 연직 관측을 위한 대기 복사 분광계, (오른쪽) 구름 조건에서도 온도 및 습도 관측이 가능한 마이크로파 라디오미터 .....	59
그림 3.4. 낙하존데(dropsonde) 구조 및 항공기를 이용한 관측 예시(Vömel et al. 2016) .....	60

## 그림목차

그림 3.5. GK-2A의 북태평양고기압 주요 기상요소 산출 정확도 비교 (출처: 차세대 기상·기후 관측위성 개발 사업 성능지표 보고서 2021. 기상청) .....	63
그림 3.6. 미국 NOAA AVHRR (MetOp-1/2) Level 2/3 자료 .....	65
그림 3.7. 미국 NOAA GeO-Polar Blended Global Sea Surface Temperature Analysis (Level 4) 자료 .....	65
그림 3.8. 미국 Real-Time U.S. Composite Satellite Imagery .....	65
그림 3.9. 미국 SLIDER(Satellite Loop Interactive Data Explorer in Real-time) .....	67
그림 3.10. 유럽 EUMETSAT Level 3 전구 TCWV(Total Column Water Vapor) 자료 .....	68
그림 3.11. 유럽 EUMETSAT Level 3 전구 TCWV(Total Column Water Vapor) 자료 정확도 검증 .....	69
그림 3.12. 유럽 EUMETSAT Level 3 Climate Data Record(CDR) Cloud fraction 자료 .....	70
그림 3.13. 유럽 EUMETSAT Level 3 Microwave UTH(Upper Tropospheric Humidity) 자료 · 71	
그림 3.14. 유럽 EUMETSAT Online Map Service인 EUMETVIEW .....	71
그림 3.15. 북서태평양 낙하존데 여름철 상시관측 예시 및 자료 활용 전략 .....	75
그림 3.16. 북태평양고기압 특별관측 프로그램 예시(이사부호 관측 배경그림: Sohn 2020) .....	75
그림 3.17. 하층 대기 프로파일링 슈퍼사이트 구축 형태의 예시, (왼쪽) 미국 해양대기청(NOAA)의 이동형 프로파일링 사이트 Collaborative Lower Atmospheric Mobile Profiling System, (가운데) 미국 국립대기과학연구소(NCAR) Integrated Sounding System, (오른쪽) DOE의 Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Mobile Facility .....	76

# I . 개요



- 1.1. 목적 및 배경
- 1.2. 범위 및 내용

# 1 개요

## 1.1 목적 및 배경

### □ 사업배경

- 최근 기후변화의 가속화에 따라 위험기상이 증가하고 있으며, 특히 2022년은 이상기후가 종합적으로 발생한 해로 기록되었음. 남부지방 역대 최장가뭀으로 시작하여 서울 남부지역에 시간당 100mm 이상 집중호우로 강남 일대가 침수되어 인명사고가 발생했고, 기록적으로 빠른 열대야를 시작으로 여름철 폭염이 지속되어 온열질환자가 총 1,564명 발생함. 7월부터 9월까지 총 5개의 태풍이 내습했으며 그중 일강수량 342.4mm의 비를 뿌린 태풍 힌남노에 의해 전력설비 고장으로 전국 89,743호에 정전 사태를 비롯하여 포항제철소 가동이 중단되는 큰 경제적 손실이 발생함.
- 열대야 일수가 역대 4위를 기록했고, 서울 및 경기 일대에는 6월 말에 열대야가 나타나 가장 빨랐던 열대야로 기록됨. 이런 다양한 이상기후에 대응하고자 2023년 3월 관계부처 합동으로 '2022년 이상기후 보고서'를 발간하고, 2022년의 기록적인 더위와 태풍의 내습등 여름철 위험기상 발생에는 북태평양고기압의 확장과 그 가장자리를 따른 고온다습한 공기의 유입이 원인인 것으로 분석됨(그림1.1).



그림 1.1. 2022년 우리나라 위험기상과 관련된 북태평양지역의 특성(그림출처: 2022 기상기후 보고서(기상청, 2023))

- 이와 같은 현상은 비단 2022년의 문제가 아니며 최근 위험기상이 더욱 빈번하고 강하게 발생하고 있음. 특히 여름철 위험기상의 배경에는 북태평양고기압의 역할이 중요하게 분석되고 있음 (그림1.2~1.4).



그림 1.2. 2018년 여름철 위험기상과 관련된 북태평양고기압의 특성(그림출처: 경향신문 기사(2018년 7월 30일))



그림 1.3. 2020년 여름철 위험기상과 관련된 북태평양고기압의 특성(그림출처: 한겨레신문 기사(2020년 8월 3일))



그림 1.4. 2023년 장마철 호우 기압계 (좌), 8월 고온 기압계 (우) (그림출처: 기상청)

- 이처럼 우리나라 여름철 위험기상 현상 (집중호우, 몬순, 폭염, 태풍 등)은 북태평양 고기압과 밀접한 관계가 있으나, 지금까지 그 구조 및 변동성의 원인이 불명확함.
- 북태평양고기압의 위치와 크기 그리고 영향범위 파악의 중요성에 대한 필요성이 증대되고 있으나 이를 파악하기 위한 관측 등 구체적인 연구 조사는 이루어지고 있지 않음.

○ 필요성

- 최근 기후변화의 가속화에 따라 위험기상 (가뭄, 집중호우, 몬순, 폭염, 태풍 등)이 더욱 빈번하고 강하게 발생하고 있으며 한반도 여름철 위험기상현상은 북태평양고기압의 변동성과 밀접한 관계가 있음.

○ 시급성

- 우리나라 여름철 위험기상과 관련한 북태평양고기압의 이해 부족은 우리나라 여름철 위험기상에 대한 예보를 어렵게 할 수 있으므로 이에 대한 정확한 파악이 시급함.

□ 사업목적

- 북태평양고기압 연구 기술 현황 및 관측 현황 조사 분석
- 북태평양고기압에 대한 과학적 이해 및 예측성 향상을 통해 기후 위기 시대에 적합한 기상예보 정책 방향 제언

□ 사업 기간

2023년 6월 8일 ~ 2023년 11월 3일

1.2. 범위 및 내용

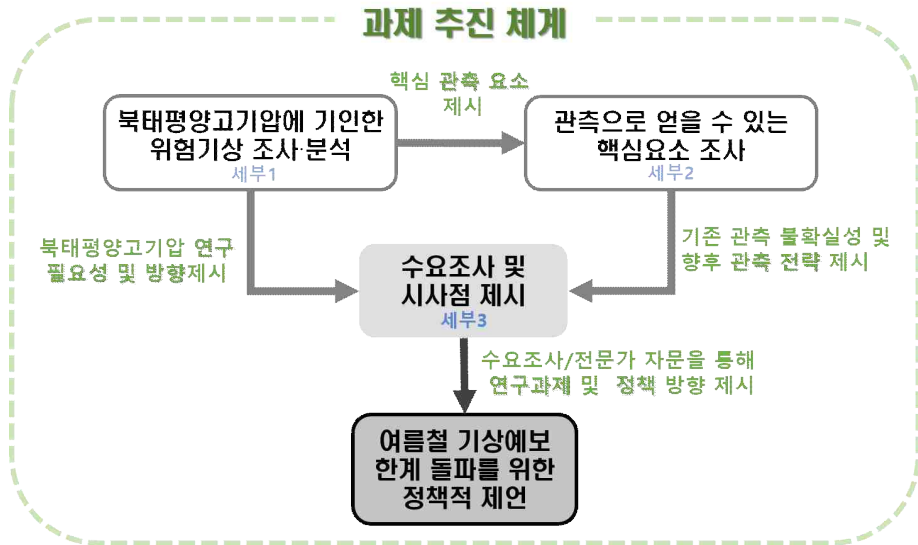
□ 사업 범위 및 내용

세부사업	사업내용
<p>현황조사 분석 [세부1]북태평양고기압에 기인하는 여름철 위험기상 관련 현황 조사·분석</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 북태평양고기압과 관련되어 발생하는 위험기상 현상 및 그 영향 범위 조사</li> <li>▪ 북태평양고기압의 구조 및 변동성 관련 유사 연구개발 사례 조사·분석</li> <li>▪ 북태평양고기압 관련 여름철 위험기상에 대한 이론·관측·예측 기술 현황 조사 및 분석</li> </ul>
<p>관측 현황 조사 및 전략 제시 [세부2]북태평양고기압 구조 파악을 위해 관측으로 얻을 수 있는 핵심요소 조사</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 관측가능 요소 및 장비 특성에 따라 도출 가능한 요소 조사</li> <li>▪ 핵심요소를 고려하여 북태평양고기압 구조파악을 위한 관측전략 제시</li> </ul>
<p>연구개발 수요조사 [세부3]기후위기 시대에 적합한 기상정책 마련을 위한 수요 조사 및 시사점 제시</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 북태평양고기압에 대한 이해 및 예측성 향상을 위한 국내외 관련 기관의 연구 기술 수요조사</li> <li>▪ 여름철 위험기상 예보정책 마련을 위한 시사점 제시</li> </ul>
<p>정책 제언 [세부4]우리나라 여름철 기상예보 한계 돌파를 위한 정책적 제언</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 국내외 수요에 대응할 수 있는 정책적 추진 방향 제언</li> <li>▪ 국제 공동 관측 프로젝트 추진에 필요한 국가 간 협력 방안 제언</li> </ul>

- 북태평양고기압에 기인한 위험기상에 대한 조사 및 분석 결과 도출된 핵심요소를 관측으로 얻기 위한 전략 수립
- 북태평양고기압에 기인한 위험기상에 대한 연구현황과 북태평양고기압과 관련한 관측 현황을 파악하여 기존 연구 및 기존 관측의 불확실성을 극복하기 위한 전략

제시

- 북태평양고기압과 관련된 조사 내용을 기반으로 국내 전문가들로부터 연구사업의 수요조사 실시 및 국외 전문가에게 자문을 통해 시사점 제시
- 본 사업을 통해 조사된 결과를 토대로 여름철 기상예보 한계 돌파를 위한 정책 제언



□ 기대효과

- 북태평양고기압과 관련된 위험기상 예보 능력 향상에 관한 사업추진 정책 수립에 활용
- 관측 분야 역량 강화 및 전문인력 양성에 기여

## 2. 북태평양고기압에 기인하는 여름철 위험기상 관련 현황 조사·분석



- 2.1. 북태평양고기압 관련되어 발생하는 위험기상 현상 및 그 영향범위 조사
- 2.2. 북태평양고기압 구조 및 변동성 관련 연구개발 사례 조사 및 분석
- 2.3. 북태평양고기압 관련 여름철 위험기상에 대한 조사 및 분석

## 2 북태평양고기압에 기인하는 여름철 위험기상 관련 현황 조사·분석

### 2.1. 북태평양고기압에 관련되어 발생하는 위험기상 현상 및 그 영향범위 조사

#### 2.1.1 폭염/이상고온과 북태평양고기압의 관련성 조사

□ 여름철 북태평양고기압이 한반도로 확장함에 따라 그 가장자리를 따라 온난습윤한 공기가 유입되거나, 북태평양고기압이 한반도를 완전히 덮을 경우 일사량의 증가에 의해 이상고온 현상이 발생할 수 있다. 따라서 많은 선행연구들이 한반도 이상고온, 폭염과 연관된 중관~대규모 순환 특성을 분석해왔고 특히, 북태평양고기압의 구조와 변동성을 이해하기 위한 노력을 기울여왔다.

- 한반도 폭염/이상고온 현상에 대한 연구들은 사례분석 중심으로 많이 이루어졌다. 대표적인 예로, 1987년과 1994년에 발생한 폭염 현상은 각각 엘니뇨, 태풍 바네사의 영향으로 북태평양고기압의 가장자리가 한반도 부근에 자리 잡으면서 발생하였다(Kim et al. 1998). 2004년에 밀양에서 발생한 이상고온 현상은 티벳 고원의 적설량이 평년보다 적음으로 인해 발생한 대기-해양 부동가열 차이의 증가로 북태평양고기압이 더욱 강하게 확장함으로써 발생하였다(Byun et al. 2006). 2015년에 울산에서 발생한 폭염 또한 북태평양고기압의 이상 확장과 긴밀히 연관되었다(Yoon et al. 2018). Min et al. (2019)는 폭염이 특히 심했던 3개년도(1994, 2013, 2016)에 대하여 폭염의 중관규모 특성을 정리하였다. 공통적으로 폭염의 발생 전과 종료 후에 북태평양고기압 가장자리의 위치는 한반도보다 남쪽에 위치했으며, 폭염 기간에는 한반도 바로 위에 놓였던 것으로 확인되었다(그림 2.1). 가장자리를 따라 온난습윤한 공기의 유입보다는 안정된 대기의 하강운동에 따른 단열승온 과정에 의한 기온의 증가가 두드러졌다.
- 한편, 2018년에 발생한 기록적인 폭염의 경우 북태평양고기압보다는 캄차카반도에 위치한 준정체적 고기압의 영향을 받은 것으로 보고되었다(Yeh et al. 2018). 이러한 북태평양고기압과 직접적으로 연관되지 않은 폭염은 북반구 전체에 걸친 대규모 순환과 연관되어 있으며 최근 뚜렷한 증가추세를 보이는데(Yoon et al. 2020), 이러한 사례들에서도 북태평양고기압이 간접적으로나마 영향을 끼쳤을 수 있으므로 추가적인 연구가 필요하다.

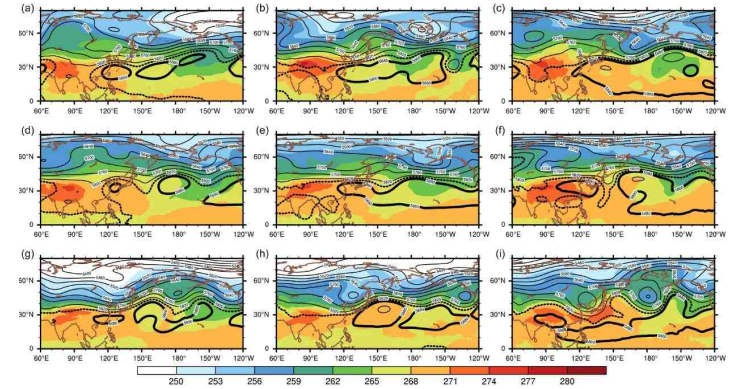


그림 2.1. 1994년(왼쪽), 2013년(중간), 2016년(오른쪽) 폭염 사례들에 대하여 폭염 발생 전(위), 폭염 도중(중간), 폭염 종료 후(아래)의 500-hPa 지위고도(검은 실선)와 온도(음영). 5.880 gpm과 5.850 gpm은 각각 붉은 실선과 점선으로 표시됨(그림출처: Min et al. 2019)

- 사례분석뿐만 아니라 장기간의 자료를 사용한 한반도 이상고온의 중관 패턴 연구도 이루어졌다. 백승운 외 (2018)는 1979~2016년 동안 서울에서 발생한 폭염사례들의 합성장 분석을 통해 남고북저 형태의 기압배치 구조가 유의미하게 나타남을 보였다. 하지만 자기조직화지도 방법론을 해면기압에 적용하여 군집분석을 시도한 결과 다양한 중관적 배경이 폭염과 연관될 수 있음이 나타났다. 전체의 약 17.5%를 차지하는 군집 1의 경우 남동쪽의 북태평양고기압과 서쪽의 중위도저기압 사이로 따뜻하고 습한 공기가 유입되는 패턴으로 기온과 상대습도가 모두 높게 나타난다는 특성이 있다(그림 2.2a). 반면, 군집 2와 군집 3은 각각 전체 사례의 38.6%를 차지하며 한반도 동쪽으로 이상확장한 북태평양고기압과 서쪽에 위치한 저기압성 순환에 의해 남풍기류가 유입되며 폭염이 발생하는 구조이다(그림 2.2b,c). 군집 4는 전체의 20.2%를 차지하며 북태평양고기압이 한반도 전체를 뒤덮는 패턴이다(그림 2.2d). 편차로는 저기압성 편차가 나타나지만 이로 인해 지상 풍속이 약화하고 안정된 대기에서의 단열승온 및 일사량 증가가 폭염 메커니즘으로 추정된다. 마지막으로 군집 5와 군집 6은 전체의 약 23.7%를 차지하며 북태평양고기압과 한반도로 동풍이 우세한 기압패턴이 나타나 편현상에 의해 지상 기온이 증가할 수 있는 조건을 보여준다. 이들 유형에서는 북태평양고기압과의 직접적인 연관성은 뚜렷하지 않다.



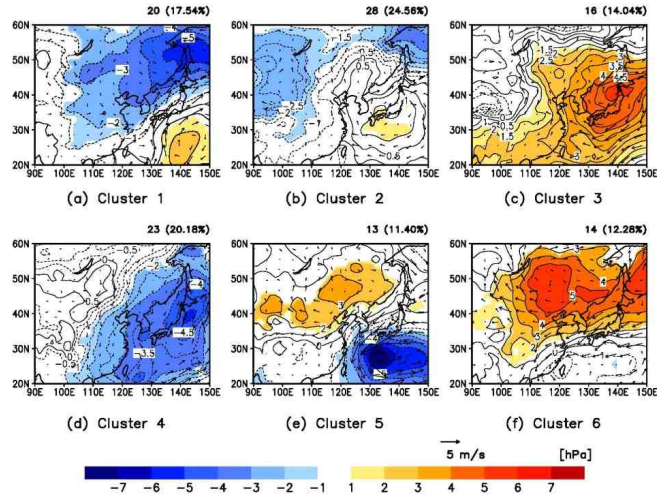


그림 2.2. 자기조직화지도를 통해 분류된 6가지 서울 폭염사례 유형. 음영은 해면기압 편차를, 백터는 1,000-hPa 바람 편차를 나타냄(그림출처: 백승운 외 2018)

- Yoon et al. (2018)은 전국의 지상 기온 관측자료를 활용하여 1980~2016년 동안 발생한 폭염 사례의 군집분석을 시도하였다. 군집분석에는 k-평균 알고리즘이 이용되었으며 다음 세 유형을 얻었다. 군집 1은 북태평양고기압이 남한지역을 완전히 덮은 유형으로 지상 바람이 매우 약하고 전국적으로 폭염이 발생하기 좋은 환경이다. 전체 폭염일수 중에 가장 많은 비중을 차지하며 8월에 특히 빈번히 발생하는 유형이다(그림 2.3a). 군집 2는 북태평양고기압의 가장자리가 뚜렷하지 않으며 한반도 상공에 오메가-형태의 중관규모 기압능이 발달하는 유형으로 전체 폭염일수 중에 가장 작은 비중을 차지한다(그림 2.3b). 하층에는 동풍계열 바람이 우세하여 동해안의 지상 기온은 상대적으로 낮으며 태백산맥의 서쪽 중부내륙지역에서 주로 폭염이 발생하는 편향상이 두드러진다. 마지막으로 군집 3은 북태평양고기압이 남한지역 중간에 걸쳐있는 유형이며 남부지방에는 폭염이, 중부지방에는 강수에 의해 상대적으로 저온이 나타나는 유형이다(그림 2.3c). 군집 1에 이어 전체 폭염일수 중 두 번째로 많은 비중을 차지하며 군집 1과 달리 8월보다 7월에 더욱 자주 발생한다. 또한, 군집 3은 한반도 집중호우와도 긴밀하게 연관된 패턴으로 북태평양고기압의 구조에 따라 폭염과 집중호우가 동시에 나타나는 복합극한기상(compound extremes; Zscheischler et al. 2020)이 발생할 수 있음을 암시하므로 심도 있는 연구가 요구된다.

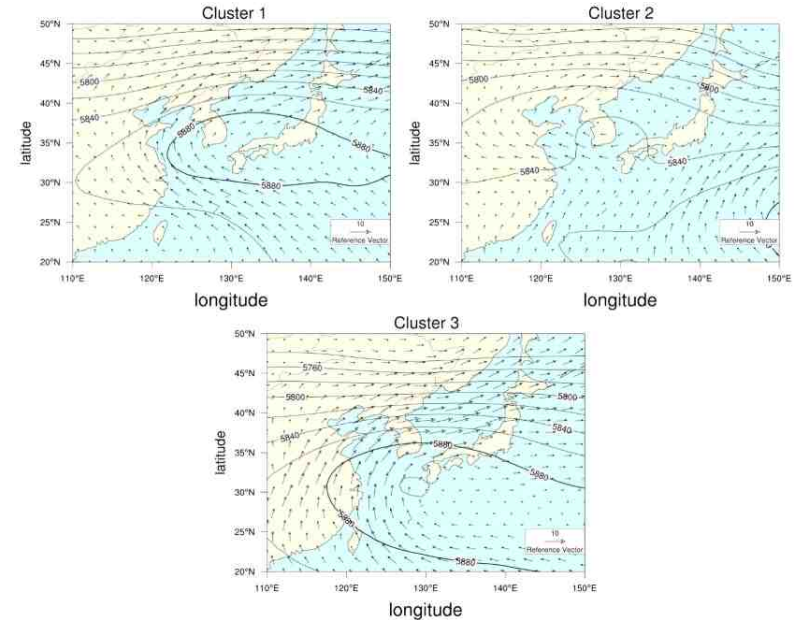


그림 2.3. 총 431일의 폭염일수에 대하여 자기조직화지도를 통해 분류된 3가지 날씨 패턴. 검은실선은 500-hPa 지위고도를, 백터는 850-hPa 바람을 나타냄. 5.880 gpm을 굵은 실선으로 별도 표시함(그림출처: Yoon et al. 2018)

- 종관규모 관점에서 기술되는 북태평양고기압의 위치 및 구조는 대규모 대기순환의 영향을 크게 받으며 결정된다. 실제로 유라시아의 대기변동과 열대대류의 이상활동에서 기인한 준정체 로스비파동이 폭염과 연관된 북태평양고기압의 변동성에 큰 영향을 끼친다는 사실이 지속적으로 보고되고 있다(Lee and Lee 2016; Liu et al. 2019; Yeo et al. 2019; Yoon et al. 2020; Choi et al. 2020; Noh et al. 2021; Choi et al. 2021; Cha et al. 2022). 이러한 로스비파에 의한 북태평양고기압의 변동성은 2.3. 절인 “북태평양고기압 관련 여름철 위험기상에 대한 조사 및 분석”에서 상세히 정리하였다.

### 2.1.2 장마/집중호우와 북태평양고기압의 관련성 조사

- 여름철 한반도의 기후는 장마의 영향을 매우 크게 받는다. 장마는 고전적으로 열적으로 서로 다른 성질을 갖는 여러 기단들 사이에서 형성되는 정체전선에 의해 지속적으로 비가 내리는 현상으로 여겨져 왔는데(류상범 2001; 차은정 2006; 서경환 외 2011; Lee et

al. 2017; 그림 2.4), 특히 해양성 기단인 북태평양고기압은 온난 습윤한 남서류를 지속적으로 한반도에 유입시켜 이상고온 뿐만 아니라 여름철 집중호우에도 큰 영향을 끼친다.

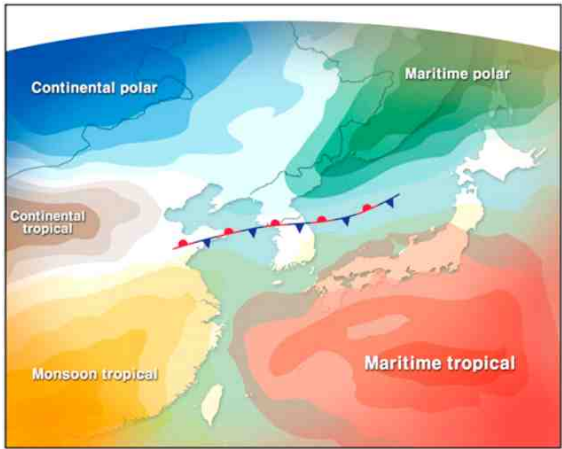


그림 2.4. 동아시아 여름철 기후에 영향을 주는 기단들 및 정체선의 모식도(그림출처: Park et al. 2021a)

- 많은 선행연구에서 한반도 여름철 집중호우의 공통적인 특성으로 북태평양고기압의 이상확장과 기압경도가 큰 북태평양고기압 가장자리를 따라 많은 양의 수증기 수송을 꼽았다(Lee et al. 1998, 2008; Shin and Lee 2005; Sohn et al. 2013; Song and Sohn 2015). 그러나 최신 연구들은 북태평양고기압 가장자리를 따른 수증기 수송에 있어 보다 일시적인 시간규모를 갖는 종관규모 요란의 중요성을 제시하고 있다. Park et al. (2021b)은 1979~2018년간 발생한 318개의 집중호우 사례(태풍의 직접 영향 제외)의 합성장 분석을 통해 집중호우는 일반적으로 경압불안정을 통해 발달하는 하층 저기압과 이상 확장한 북태평양고기압이 함께 기여한다고 밝혔다(그림 2.5). 하층 저기압이 접근함에 따라 북태평양고기압 북서쪽 가장자리의 기압경도가 강화되고 이는 수증기 수송의 순간적인 강화를 일으킨다. 이는 북태평양고기압이 한반도를 완전히 덮고 있는 경우에도(일반적으로, 이상고온 조건), 종관규모 저기압의 발달 및 접근 때문에 북태평양고기압 가장자리가 조절될 수 있음을 암시한다. 이는 여름철 집중호우가 장마에 대한 일반적인 인식과 달리 수일 이상 지속되지 않는 단속적인 특성을 나타내는 주요 원인이기도 하다. 따라서 북태평양고기압의 변동성을 이해하기 위해서는 경년~계절내 규모뿐만 아니라, 수일 이내의 짧은 시간규모에서도 나타날 수 있으므로 관련된 추가적인 연구가 필요하다.

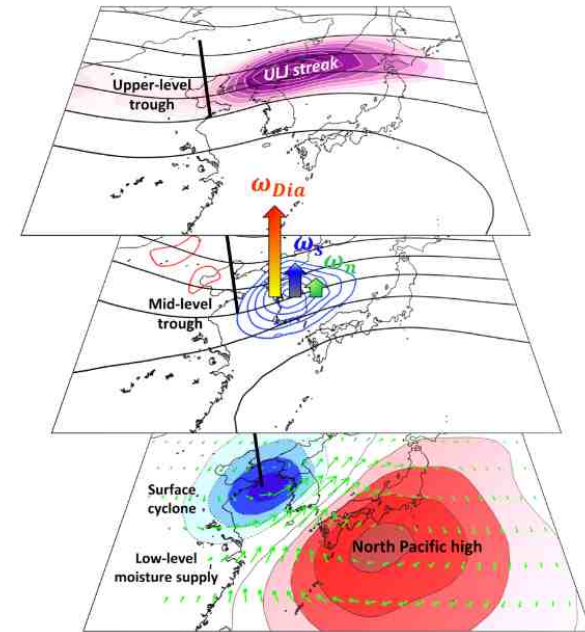


그림 2.5. 1979~2018년 동안 발생한 318개의 한반도 여름철 집중호우 사례의 3차원(상층, 중층, 하층) 대기순환 모식도(그림출처: Park et al. 2021b).

- 전체 사례 합성장 분석에 이어 Park et al. (2021a)은 군집 분석을 활용한 318개 집중호우 사례들의 지상 일기패턴 분류를 통해 집중호우시 나타나는 북태평양고기압의 상세한 구조를 제시하였다. 전체 사례 중 약 40%를 차지하는 “Quasi-stationary frontal boundary between low and high”에서는 북태평양고기압의 가장자리가 한반도 남동쪽에 위치하고, 준정체적인 저기압성 순환이 북쪽에 위치하여 남고북저형 기압배치를 이룬다. 두 기압계의 경계에 전선면이 발달하고 많은 수증기가 남서류를 통해 유입되며 때때로 일시적인 중 $\alpha$ ~종관규모 요란이 전선면을 따라 동반되기도 한다. 이 유형은 Shin et al. (2022)에서도 한반도 집중호우의 주요 패턴으로 지목되었다. 반면, 전체 사례의 약 21%를 차지하는 “Local disturbance at the edge of the North Pacific high”에서는 종관규모의 저기압성 순환이 나타나지 않는 대신 한반도가 북태평양고기압 가장자리의 바로 아래에 놓여있는 패턴이 나타난다. 한반도로 수송되는 수증기는 저기압성 순환의 도움 없이 북태평양고기압에 의해서만 지배되며, 경계를 따라 발생하는 국지규모~중규모의 요란에 의해 집중호우가 발생한다. 전체의 약 29%는 경압불안정을 통해 발달

하는 하층 저기압이 매우 두드러지게 나타나는 유형인데(“Extratropical cyclone from eastern China”), 이 중 북태평양고기압 가장자리의 영향을 함께 받는 사례가 전체의 13.5%, 받지 않는 사례가 약 15.4%를 차지한다. 즉, 한반도 집중호우와 연관된 북태평양고기압의 구조는 다양할 수 있으며, 때때로 북태평양고기압의 직접적인 영향 없이도 집중호우가 발생할 수 있다.

- Park et al. (2021a)에서 분류한 각 집중호우 유형들은 강수강도와 지속시간 간에 유의미한 차이가 발견되지 않았는데, 이는 북태평양고기압이 집중호우의 발생 자체보다는 발생의 호조건에 큰 영향을 주기 때문에 해석할 수 있다. 이러한 결과는 역대 최장 장마로 기록된 2020년 여름철 발생한 집중호우에도 해당된다. Park et al. (2021c)은 2020년 발생한 15건의 집중호우 사례에 대하여 종관규모-대규모 대기순환 특성을 정리하였는데, 특히 장마 전반기(6월 말~7월 말)와 후반기(7월 말~8월 중순)에 발생한 집중호우에서 북태평양고기압의 구조에 뚜렷한 차이가 있음을 보였다. 전반기에는 북태평양고기압의 북상이 평년에 비해 억제된 반면 동중국 내륙까지의 서쪽 확장이 크게 두드러졌다(그림 2.6a). 이로 인해 한반도는 북태평양고기압의 가장자리를 따른 온난습윤한 남서류의 영향을 매우 적게 받았지만, 동중국으로 다량 수송된 수증기에 의해 이 지역에서 온대저기압이 강하게 발달하였고 한반도를 통과하면서 수차례 단속적인 집중호우가 발생하였다. 반면, 북반구 대규모순환 변동으로 북태평양고기압이 7월 말 갑작스럽게 북상하였고, 그 가장자리가 한반도 위에 놓이면서 다량의 수증기가 수송되었다(그림 2.6b). 가장자리를 따라 중규모 요란의 지속적인 발달을 통해 집중호우가 연속적으로 발생하면서 보다 지속적인 집중호우가 발생하였다. 즉, 2020년 장마 전반기의 북태평양고기압은 중국내륙의 중위도저기압 발달을 촉진하여 집중호우에 간접적으로 영향을 끼친 반면, 후반기에는 강한 수증기 수송을 통해 직접적으로 집중호우 호조건을 만든 것이다. 이처럼 북태평양고기압은 한반도 집중호우에 다양한 방식으로 영향을 줄 수 있다.

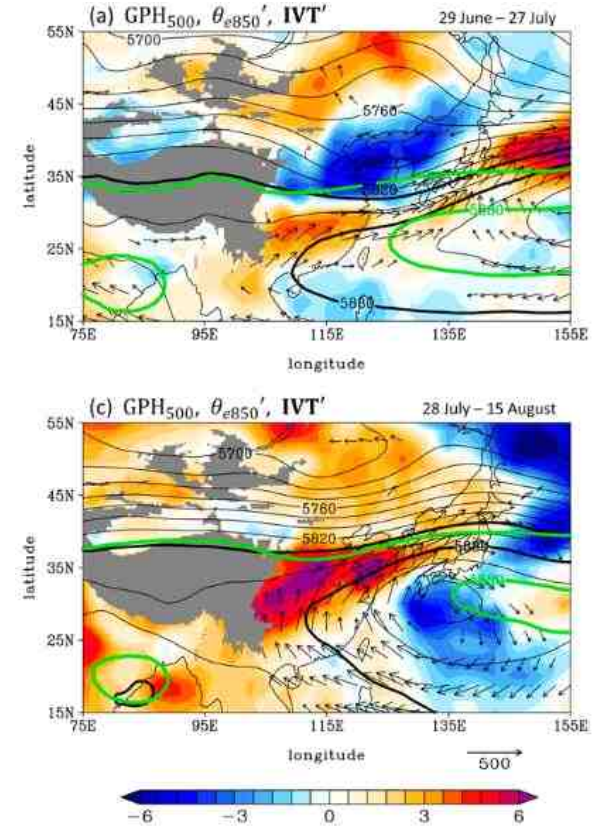


그림 2.6. 2020년 장마 (a) 전반기와 (b) 후반기의 500-hPa 지위고도(검은 실선), 850-hPa 상당온위 아노말리(음영), 연직적분된 수증기속 아노말리(벡터). 북태평양고기압 가장자리는 5,880 gpm을 굵게 표시하여 나타냄. 5,880 gpm의 기후값은 굵은 초록 실선으로 표시함(그림출처: Park et al. 2021c).

### 2.1.3 한반도에 영향을 끼치는 중위도저기압 및 대기천과 북태평양고기압의 관련성 조사

- 여름철 한반도에 영향을 끼치는 중위도저기압에 대한 연구는 현재 매우 부족한 실정이다. 일부 연구에서 동아시아 중위도저기압의 계절별 기후학적 특성을 보고한 바 있으나(Lee et al. 2020; Kang et al. 2021), 여름철 중위도저기압의 특성, 발달기작, 강수 영향에 관한 체계적인 분석은 아직 이루어진 바 없으며, 북태평양고기압과의 관련성 또한 알려



진 바가 거의 없다.

- 동아시아에서 발생하는 중위도저기압은 주로 티벳고원 후면의 동중국지역, 알타이-사안 산맥 후면의 몽골 사막지역, 그리고 일본 앞바다 쿠로시오 해역에서 발원하는데(Lee et al. 2020), 각 발원지의 지리적 위치를 고려할 때 북태평양고기압과 상호작용하며 한반도에 직접적인 영향을 끼치는 저기압은 주로 티벳고원 후면에서 발원한 것으로 생각된다. 최근의 한반도 집중호우 연구들에서 중위도저기압과 같은 중규모 요란의 중요성을 지적하고 있음을 감안할 때(Park et al. 2021a,b,c), 중위도저기압이 북태평양고기압과 어떻게 상호작용하는지에 관한 이론적, 수치적인 연구가 필요한 상황이다.
- 최근 대기전은 동아시아에서 큰 주목을 받고 있다. Kamae et al. (2017a,b)은 여름철 동아시아 여름 몬순의 발달 및 쇠퇴가 동아시아 여름철 대기전 활동과 일치함을 밝혔다. 보다 구체적으로 Pan and Lu (2020)과 Park et al. (2021d)은 북태평양고기압의 가장자리를 따라 대기전이 빈번하게 발생하며, 북태평양고기압의 계절내 변화가 대기전의 기후학적인 계절내 변화를 이해하는데 핵심임을 보였다. 특히 Park et al. (2021d)은 북태평양고기압이 서쪽으로 강하게 확장하는 전기 몬순시기(6~7월)에 몬순 남서류를 따라 대기전이 더욱 강하고 빈번하게 발생한다고 밝혔으며(그림 2.7a), 후기 몬순시기(8~9월)에는 북태평양고기압이 북상하지만 동중국에서 몬순기압골이 발달하며 몬순 남서류가 크게 약화하고 대기전도 전기 몬순시기에 비해 상대적으로 덜 빈번하게 발생한다고 하였다(그림 2.7b). 그러나 대기전은 여전히 북태평양고기압 가장자리를 따라 자주 발생하는데, 이는 북태평양고기압 가장자리를 정확히 파악하고 예측하는 것이 전기 몬순과 후기 몬순 모두에 중요함을 암시한다. 한반도 강수의 경우 전기와 후기 몬순 시기 모두 대기전의 영향을 크게 받는데, 특히 강한 강수일수록 더욱 그렇다.

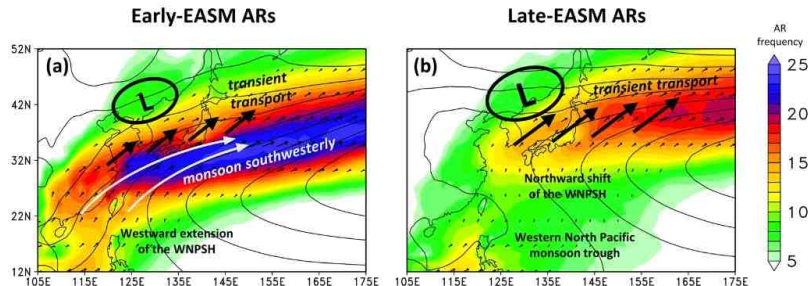


그림 2.7. (a) 전기 몬순시기(6~7월)와 (b) 후기 몬순시기(8~9월) 동아시아 대기전의 기후학적 특성에 대한 모식도. 검은 실선은 850-hPa 지위고도, 음영은 대기전 빈도를 나타냄. "L"은 이동성 중위도저기압을 표시함.

- Kamae et al. (2017a,b)은 동아시아 여름철 대기전이 엘니뇨-남방진동과 관련된 뚜렷한 경년변동이 있음을 보였다. 엘니뇨가 약화하는 여름철 인도-서태평양의 대기-해양 상호작용으로 인해 북태평양고기압이 서쪽으로 강하게 확장하는 현상이 발생한다. 이를 Indo-western Pacific capacitor (IPOC) effect라고 하는데, IPOC effect에 의해 서쪽으로 이상 확장한 북태평양고기압은 가장자리를 따라 더욱 강한 몬순남서류를 유발하고 이는 대기전 활성성을 더욱 강화시키는 것이다. Guo et al. (2021)은 북반구 여름 계절내 진동(Boreal summer intraseasonal oscillation)과 연관된 북태평양고기압의 변동이 몬순 남서류를 조절하여 동아시아 대기전의 계절내 변동을 야기함을 밝혔다. Park et al. (2021d)은 북태평양고기압의 가장자리가 몬순남서류의 발달을 결정할 뿐만 아니라 중위도저기압의 주요 경로이기도 함을 간접적으로 보였는데, 이는 대기전이 준정체적인 몬순남서류와 중위도저기압에 의한 일시적인 수증기수송의 합쳐진 결과로 형성됨을 의미한다. 이는 대기전이 다중규모 특성을 가지고 있다는 최신 연구와도 일치하는 결과이다(Park et al. 2023). 따라서 북태평양고기압의 변동성을 이해하는 것은 동아시아 여름철 대기전의 기후학적 특성 뿐만 아니라 변동성과 다른 지역의 대기전과 구별되는 동아시아 대기전만의 고유한 특성을 이해하는 데에도 필수적이라고 할 수 있다.

### 2.1.4 한반도에 영향을 끼치는 열대저기압과 북태평양고기압의 관련성 조사

- 여름철 북서태평양에서 발생하는 열대저기압은 일반적으로 북서태평양고기압의 기압능 남쪽에서 발달하는 몬순기압골에서 주로 발생한다(McBride 1995; Chen et al. 2004a,b; Wu et al. 2012; Molinari and Vollaro 2013). Molinari and Vollaro(2013)는 약 70~80%의 북서태평양 열대저기압이 몬순 기압골 내에서 발생한다고 보고하였다. 이는 몬순 기압골이 여름철 북반구의 열대수렴대와 일치하며 연직 시어가 약하고 하층의 저기압성 와도가 지속적으로 존재하여 열대요란이 만들어지기 좋은 환경이기 때문이다. 특히 Wu et al.(2012)은 북서태평양 열대저기압 활동의 경년변동이 몬순기압골의 변동과 매우 밀접한 관련이 있음을 보였는데, 몬순기압골이 동쪽으로 길게 확장한 경우(북태평양고기압이 평년보다 동쪽에 위치)에 서쪽으로 후퇴한 경우(북태평양고기압이 평년보다 서쪽으로 확장)보다 열대저기압의 발생 지역이 더욱 넓어짐을 보였다(그림 2.8). 경우에 따라 몬순 기압골 존재하는 열대 서태평양보다 더욱 동쪽인 중앙태평양에서 상층에서 만들어진 요란에 의해 열대저기압이 생성되기도 한다(Chan et al. 2019; Hamaguchi and Takayabu 2021). 하지만 이들 역시 북태평양고기압의 남쪽 가장자리를 따라 서진하며 몬순기압골에 도달 후 급격히 발달하는 과정을 거친다. 상술했듯 몬순 기압골과 북태평양고기압은 긴밀히 연관되어 있으므로, 북서태평양의 구조와 변동성에 대한 이해는 열

대저기압의 생성 및 초기 발달을 예측하는데 매우 중요하다고 볼 수 있다(Wang et al. 2013).

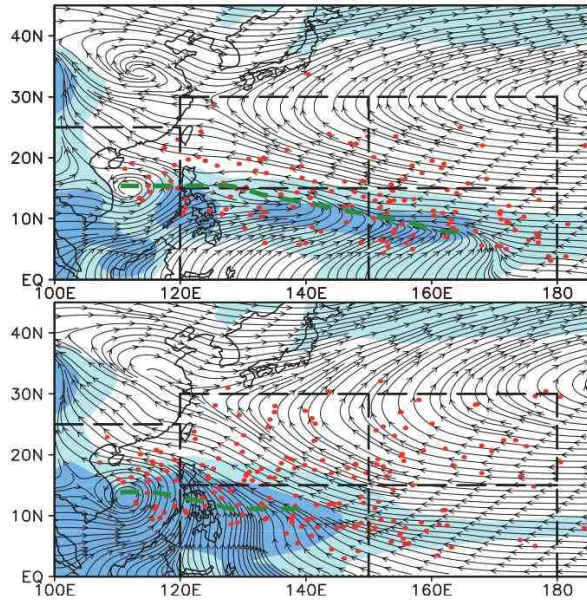


그림 2.8. 몬순기압골이 강한 년도(위)와 약한 년도(아래)의 북서태평양 하층대기 순환장. 850-hPa 유선함수를 검은실선, 상향장파복사를 음영, 태풍 발생위치를 빨간 점으로 표시함. 초록색 굵은 파선은 몬순기압골의 축을 나타냄(그림출처: Wu et al. 2012).

- 북태평양고기압은 열대저기압의 진로에도 큰 영향을 끼친다. 일반적으로, 북태평양고기압이 서쪽으로 강하게 확장하는 6~7월에 열대저기압은 남중국해로 이동하거나 대만 또는 동중국에 상륙하지만, 북태평양고기압의 기압능이 북동쪽으로 이동하는 8월과 더욱 동쪽으로 후퇴하는 9월에는 한국과 일본으로 향하는 열대저기압의 수가 증가한다(그림 2.9). 이는 열대저기압의 진로를 결정하는 지향류가 북태평양고기압의 가장자리에 의해 크게 영향받기 때문이다(Chan and Gray 1982; Ho et al. 2004; Liu and Chan 2008; Sun et al. 2015; Wu et al. 2020).

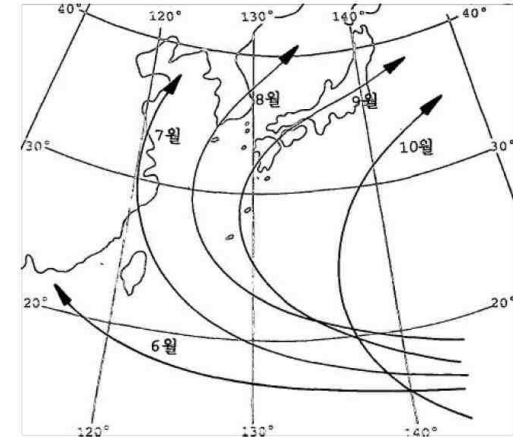


그림 2.9. 북서태평양 태풍의 평균적인 월별 진로(그림출처: 태풍백서 2011).

- 일례로, 최기선과 김백조(2007)는 1951~2004년 한반도에 상륙한 열대저기압을 분석하여 1980년대 후반 들어 증가했음을 발견하였는데, 북태평양고기압의 위치가 동쪽으로 수축한 것과 관련 있음을 보였다. 이어 최기선 외(2012)는 북태평양고기압 변화에 따라 한반도로 향하기 좋은 남풍계열의 지향류가 해당 시기에 실제로 증가했음을 보였다. Lee et al. (2019)은 1982~2016년 한국, 일본으로 향하는 북서태평양 열대저기압을 분석한 결과 9월에 중위도로 북상하는 열대저기압이 유의미하게 증가한 반면 8월 말에는 감소했음을 보였는데, 이러한 추세에도 북태평양고기압의 변화에 따른 지향류 변화가 일부 기여한 것으로 나타났다. Camp et al. (2018)에서는 북태평양고기압 지수를 활용하여 북태평양고기압의 동서 방향 변동성에 따라 태풍의 진로가 바뀔 수 있음을 보고하였으며(그림 2.10), Lee et al. (2021)에서 북태평양 10년 주기 진동이 음의 위상일 때 9월의 북태평양고기압이 더욱 수축하고 한국/일본으로 열대저기압이 더욱 북상하기 좋은 지향류가 형성됨을 보인 바 있다.
- 열대저기압은 북태평양고기압으로부터 일방적으로 영향을 받는 것은 아니다. Sun et al. (2015)은 열대저기압의 크기가 클수록 북상에 따른 북태평양고기압의 동쪽으로는 후퇴가 강하게 일어나고 이로 인해 열대저기압의 북상이 더욱 촉진될 수 있음을 보였다. Park et al. (2021a)은 태풍의 직접적인 영향을 받아 집중호우가 발생할 때 태풍과 북태평양고기압 사이의 강한 기압경도를 따라 남풍계열의 수증기 수송이 강하게 이루어짐을 보였다. 또한, 태풍이 대류권 상층에 유도하는 고기압성 발산흐름에 의해 상층 기압



능이 유도되고 이러한 기압능의 영향이 순압적으로 하층으로 전달되어 북태평양고기압의 부분적 강화를 야기할 수 있음을 보였다. 열대저기압은 전향 후 중위도순환과도 강하게 상호작용하는데(Evans et al. 2017; Keller et al. 2019), 이로 인해 열대저기압-북태평양고기압 상호작용의 양상은 열대저기압이 전향하기 전과 후에 크게 다를 것으로 추측된다. 후자의 경우 열대저기압이 중위도 시스템(상층 제트, 기압골 등), 북태평양고기압과 복합적으로 상호작용할 가능성이 있고, 이는 열대저기압의 발달, 진로, 강수 영향 등에 있어서 급격한 변화를 야기할 것으로 예상되는 바 이와 관련한 별도의 심층적인 분석이 필요하다.

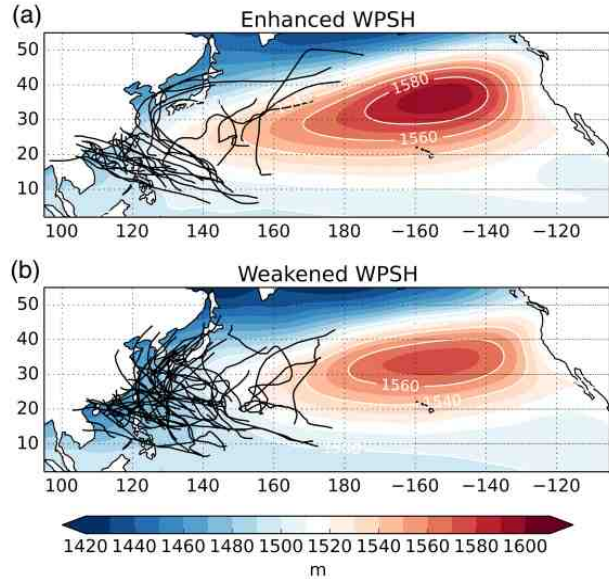


그림 2.10. 1979-2016년 동안의 여름철 북태평양고기압 강도에 따른 태풍 경로 변화(그림출처: Camp et al. 2018)

## 2.2. 북태평양고기압 구조 및 변동성 관련 연구개발 사례 조사 및 분석

### 2.2.1 북태평양고기압 발달 및 유지 메커니즘 조사

□ 대부분의 관측 프로그램들이 북태평양고기압의 중심보다는 경계에서 발생하는 위험 기상 현상을 관측하는데 집중되어 있어 중심 구조에 관한 연구는 매우 제한적이고, 그나마 직접 관측 자료보다는 재분석 자료 등을 이용해 월~계절 규모 평균 분석에 국한되어 있다.

- Miyasaka and Nakamura(2005)는 여름철 태평양의 해면기압, 고기압성 순환, 상승 및 하강기류 등의 기후값 분석을 통해 중태평양에 위치한 북태평양고기압 중심의 3차원 구조 특성을 확인하였다. 이들은 재분석 자료의 분석을 통해 고기압 중심의 상층에는 남북방향으로 쌍극자 형태의 와도가 존재한다는 것, 이 와도들이 각각 남쪽과 북쪽에서 순압성 구조와 경압성 구조를 가지며 대류권 중간에서 하강기류가 지배적이라는 것을 보였다(그림 2.11). 또한, 파동모델을 이용해 행성파의 이류와 연관된 와도 수송이 이러한 고기압의 연직 순환 구조를 야기할 수 있다고 분석하였다.

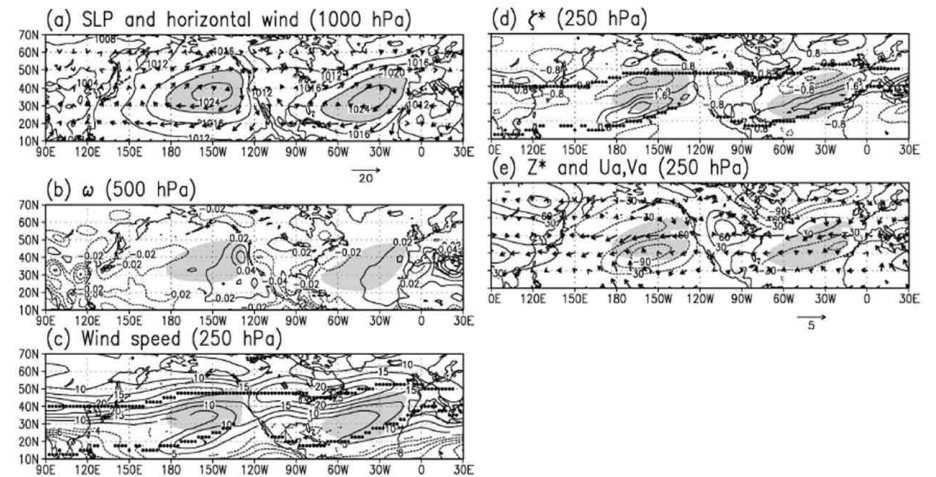


그림 2.11. 7월 평균 (a)해면기압과 지표면 바람, (b)500hPa 오메가, (c)250hPa 풍속, (d)상대와도, (e)250hPa 지위고도 비대칭성분와 비지균풍의 기후값(그림출처: Miyasaka and Nakamura, 2005)

- Jinhai et al.(2001)은 1998년 8월 남중국해 여름 몬순 실험(SCSMEX)의 고해상도 관

측자료와 NCEP 재분석 자료를 사용하여 북서태평양 여름 몬순 및 외부 열 강제력과 관련하여 북태평양고기압의 수직 순환 구조와 연간 변동 특성을 조사하였다(그림 2.12). 북태평양고기압 연직 순환 구조의 평균 성분과 섭동 성분간 특징이 다르다는 것을 밝혔는데, 이는 고기압 주변의 북서태평양 여름 몬순과 연관된 강수가 발생할 때 북쪽에서 고기압과 관련된 하강기류가 발생해 강수 발생 위치에 따라 북태평양고기압의 구조가 변할 수 있기 때문이다. 북태평양고기압의 북쪽과 남쪽 지역에서 각각 상층과 하층에서 하강기류가 발달해 고기압이 열대와 중위도 시스템을 연결하는 고리가 될 수 있다는 것을 밝혔고, 이를 통해 열대 몬순 강수, 해상 SST 및 동아시아 육상-해상 열 대비와 관련된 잠열 방출이 북태평양고기압의 연평균 아노말리에 상당한 영향을 미칠 수 있다고 제시하였다.

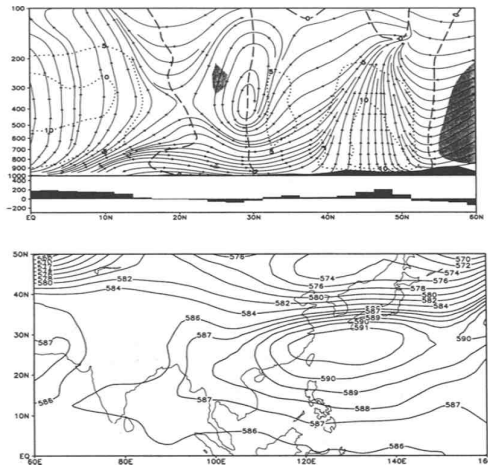


그림 2.12. 1998년 8월 11-16일 동안 평균된 (a)북태평양고기압 중심에서의 남북방향 순환과 연관된 수증기 sink, (b)500hPa 지위고도(그림출처: Jinhai et al. 2001)

- Dong et al.(2017)은 EOF 분석을 통해 초여름(6월)과 늦여름(8월) 북태평양고기압의 주요 순환 구조를 비교 분석하였다. 분석결과, 6월과 8월의 첫 번째 순환 모드가 북서태평양 지역에서 고기압성 순환에 의해 특징되지만, 두 번째 순환 모드는 6월과 8월 각각 북태평양에서 동서 방향과 남북 방향의 쌍극자로 특징된다는 것을 보였다(그림 2.13). 특히 첫 번째 순환 모드인 고기압성 순환은 북위 20°N에 중심을 두며 서쪽으로 100°E까지 확장하는데 동아시아 지역에 남서풍 바람을 유도해 온난다습한 공기를 수송하는 역할을 한다. 또한, 6월에는 이러한 고기압성

순환은 북위 30°N 이남에 국한되지만, 8월에는 북쪽으로 더 확장해 한반도와 일본에 직접적인 영향을 줄 수 있다는 것을 보였다. 이들은 북태평양고기압의 주요 순환 모드와 ENSO(El Niño-Southern oscillation)의 연관성을 검토하였는데 6월과 8월 첫 번째 순환 모드가 ENSO의 발달 단계와 연관되어 있다는 것을 밝혔다.

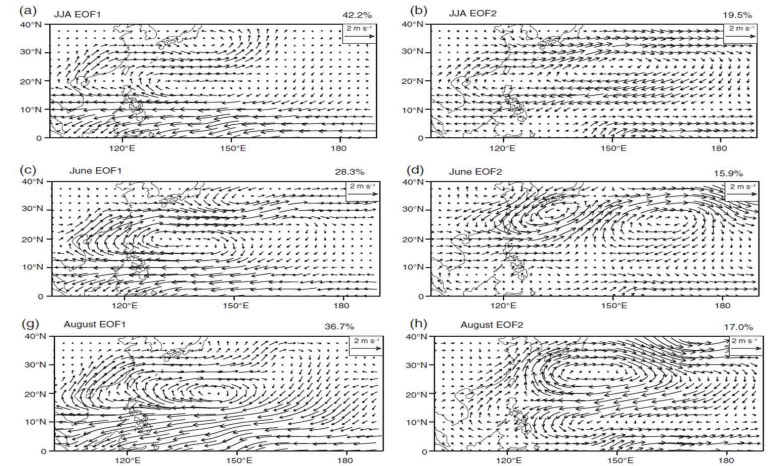


그림 2.13. 북태평양고기압 주변 순환의 첫 번째(왼쪽)와 두 번째(오른쪽) 주성분의 수평 분포. (a, b) 여름철(JJA) 평균. (c, d) 6월, (g, h) 8월(그림출처: Dong et al. 2017)

- 북태평양고기압의 경계뿐만 아니라 중심의 3차원 구조를 일변화에서부터 계절평균 규모까지 파악할 수 있도록 북태평양고기압에 대한 원격탐사 및 집중관측프로그램 자료가 필요하다.

### 2.2.2 북태평양고기압의 지수에 대한 연구 조사

□ 북태평양고기압이 한반도를 포함한 동아시아 기상 및 기후에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 이를 정량적으로 분석하기 위해서는 북태평양고기압의 서쪽 경계, 강도, 영역 등의 특성을 정의할 수 있는 객관적 지수를 개발하는 것이 반드시 필요하다. 하지만 대부분의 현업, 연구들에서 북태평양고기압의 특성을 정의하는 지수로 특정 값을 이용한다는 한계가 있다.

- Hui and Shuqing (2003)은 기존의 지위고도를 기반으로 한 북태평양고기압 지수에서 높이의 증가 추세 영향을 배제하기 위해 특정 지역(22.5~30°N, 115~140°E)에 대한 500hPa 상

대외도 평균을 기반으로 북태평양고기압의 경도 위치를 측정하는 지수를 제안하였다.

- Yang et al. (2017)은 북태평양고기압의 경계를 정의하기 위해 서쪽 기압능 지점(westward ridge point, WRP)이란 역학적 지수를 제시하였다. 경도풍 이론을 기반으로 고기압의 서쪽 경계에서는 기압경도력이 최대가 되고 풍속이 최대가 될 수 있기 때문에, 이들은 10~45 °N와 90~150 °E 영역 안에서 동서방향 바람이 0이고, 남북방향 바람은 최대가 되는 지점으로 WRP를 정의하였다(그림 2.14). 기존 연구에서 제안된 지수와 비교했을 때 WRP 지수는 객관성, 신뢰성, 예측 가능성, 실용성에서 우수함을 보여 널리 활용될 가능성이 높다고 제시하였다.

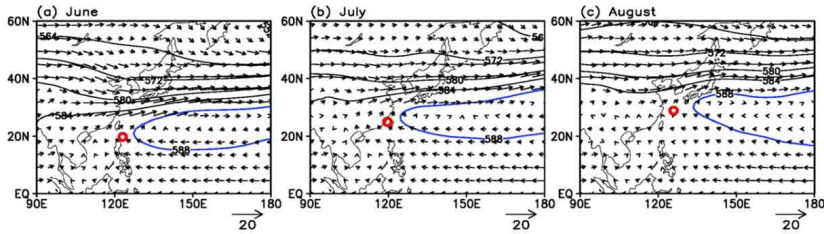


그림 2.14. (a) 6월, (b) 7월, (c) 8월의 500hPa 고도의 지위고도(contour)와 수평 바람 기후값(vector). 빨간원은 WRP 지수로 산정한 북태평양고기압의 서쪽 경계를 나타내고, 파란선은 WRP에 가장 가까운 지위고도를 의미함(그림출처: Yang et al. 2017)

- He et al. (2018)은 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) 모델들의 미래 온난화 실험에서 측고방정식(Hypsometric equation)을 기반으로 진단적으로 산출한 지위고도가 지속적으로 상승하는 추세를 갖기 때문에 특정 지위 고도 값으로 북태평양고기압을 정의할 경우 미래 고기압의 서쪽 경계와 장기 추세 및 변동성을 잘못 전망할 수 있는 한계가 있다는 것을 밝혔다. 이러한 문제를 해결하기 위해 그들은 에디 지위고도를 사용하여 북태평양고기압 지수를 정의하였는데 에디 지위고도는 전체 지위고도 값에서 동서방향 평균 지위고도 값을 빼 값을 의미한다. 에디 지위고도를 이용하여 북태평양고기압의 넓이 지수(110-180 °E, 10-85 °N에서 에디 지위고도가 0보다 큰 영역의 합), 강도 지수(110-180 °E, 10-85 °N에서 에디 지위고도가 0보다 큰 값의 합), 서쪽 경계 지수(90-180 °E에서 에디 지위고도가 0 이상인 가장 서쪽 지역)를 정의하였다. 에디 지위고도를 CMIP5 모델에 적용한 결과 특정 지위고도 값을 사용할 때보다 강수량과 지위고도 사이의 관계가 온난화의 영향을 받지 않도록 현실적으로 개선되었고(그림 2.15), 미래 북태평양고기압의 서쪽 경계도 효과적으로 규정될 수 있으며 잘못된

추세가 발생하지 않는다는 것을 보였다.

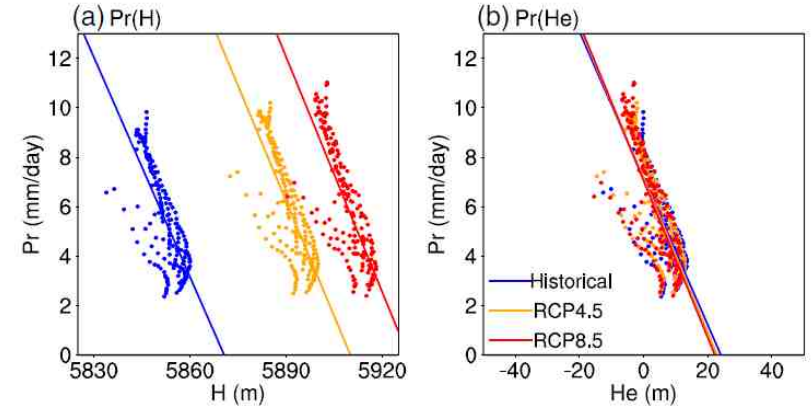


그림 2.15. (a) 특정 지위고도를 이용한 북태평양고기압 지수(H)와 강수량 사이의 관계와 (b) 에디 지위고도를 이용한 북태평양고기압 지수(He)와 강수량 사이의 관계 산포도(그림출처: He et al. 2018)

- 이처럼 북태평양고기압의 특성을 정량적으로 분석하기 위해서는 지역, 시간, 온난화 등의 영향을 받지 않는 일반화된 지수를 개발하는 것이 반드시 필요하다.

### 2.2.3 북태평양고기압의 계절 및 계절내 변동성에 대한 연구 조사

- 기후학적으로 북태평양고기압은 뚜렷한 계절내 변동을 보인다. 초여름과 늦여름 사이에, 필리핀해에서부터 일본 남부지역까지 북태평양고기압은 북진하며, 7월 이후에는 동쪽으로 쇠퇴한다 (그림 2.16). 이러한 북태평양고기압의 기후학적인 계절내 변화는 한반도를 포함한 동아시아 지역에 기후학적인 강수에 영향을 미친다.



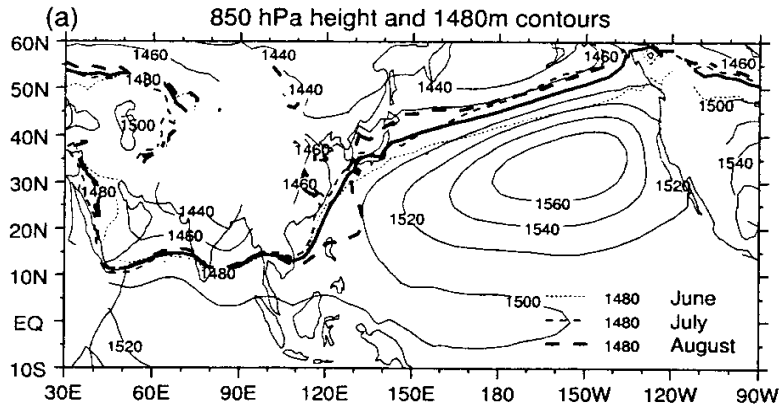


그림 2.16. 북반구 여름철 15년 (1979-1993) 평균 850 hPa 지위고도 합성장, 여름철 평균 1,480m 등치선을 굵은 실선으로 표기하였고, 6월, 7월, 8월 평균 1,480m 등치선을 점선으로 표기함(그림출처: Lu and Dong 2001)

- 기후학적 계절 변동 외에도 북태평양고기압은 계절내 규모에서 뚜렷한 동서 방향 변동성을 가지며 이는 동아시아 지역 기후에 중요한 역할을 한다(그림 2.17). Lu (2001)는 북태평양고기압의 동서 방향 계절내 변동성이 남북 방향 변동성보다 뚜렷하다고 보고하였다. 열대 서태평양 지역 워풀(warm pool)에서의 열대 변동성이 강할 때 북태평양고기압은 동쪽으로 쇠퇴하며, 열대 변동성이 약할 때 서쪽으로 확장하는 것을 확인하였다. Mao et al. (2010)에서는 8단계로 구성된 계절내 시간규모에서의 북태평양고기압 위상변화를 나타내었고, 이는 적도 서태평양에서부터 북쪽 및 북서쪽으로 전파되는 로스비파 형태를 지닌 순환-대류 시스템(Rossby wave-like coupled circulation-convection system)에 의해서 조율됨을 확인하였다. 로스비파 형태를 지닌 순환-대류 시스템과 관련된 저기압성 순환이 남중국해와 필리핀해에 도달하게 되면 북태평양고기압은 북동쪽으로 쇠퇴하게 되며, 반대로 고기압성 순환이 존재하면 남서쪽으로 확장함을 밝혔다. Zhu et al. (2023)에서는 북태평양고기압의 동서 방향 계절내 변동성이 여름철 계절내 진동(BSISO, Boreal Summer Intraseasonal Oscillation)의 첫 번째 및 두 번째 모드와 연관성이 있을 수 있음을 밝혔다.

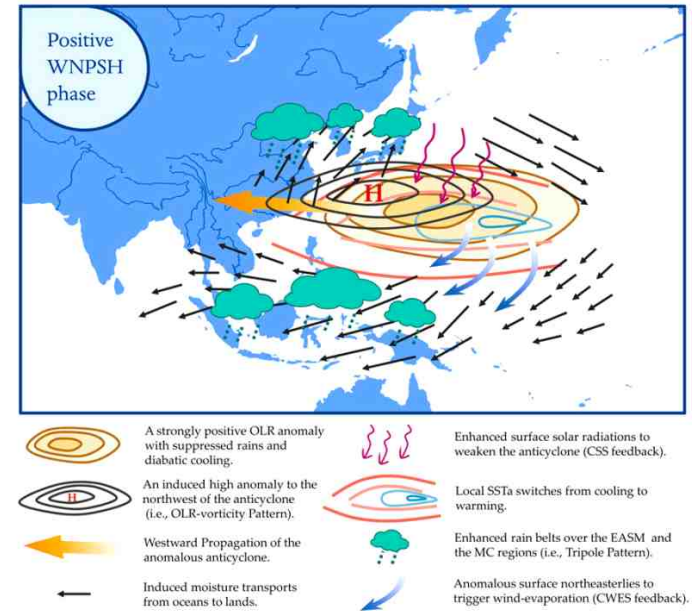


그림 2.17. 북태평양고기압의 동서 방향 변동성과 관련된 잠재 메커니즘 및 이에 따른 동아시아 강수 영향 모식도(그림출처: Cheng et al. 2019)

- Zhou and Li (2022)에서는 북태평양고기압의 남북 방향 계절내 변동성을 조사하였다. 여름철 북태평양고기압의 남북-방향 계절내 변동성은 10-30일 주기의 변동성을 가짐을 확인하였다. 이러한 변동성의 영향은 초여름보다 늦여름에 더욱 강한 것을 확인하였다. 초여름에는 중-고위도에서부터 전파되어 오는 로스비파 원격상관(teleconnection)에 의한 고기압성 및 저기압성 순환이 북태평양고기압 북쪽에 위치하면서 남북 방향의 계절내 변동을 조율하게 된다. 반면 늦여름에는 열대 남중국해 지역의 대류 현상의 변동성이 태평양-일본 패턴(Pacific-Japan pattern)을 유도하면서 남북 방향의 쌍극자 형태의 순환을 만들고, 이에 따라 북태평양고기압이 남북 방향으로의 계절내 변동을 일으킨다(그림 2.18). Seo et al. (2012)에서는 2011년 7월 사례분석을 통해서 북태평양고기압의 북쪽에서의 이상 확장 현상이 북대서양에서부터 동쪽으로 전파해 오는 로스비파와 북서태평양 지역에서 발생한 대류 현상에 의한 비단열 과정에 의해서 발생하는 로스비파의 북쪽에서의 전파와 관련이 있음을 밝혔다. Dong and He (2020)는 북태평양고기압의 동서 방향 계절내 이동이 중위도파동의 일종인 실크로드 패턴과 연관성이 크다는 것을 보였다(그림 2.19).

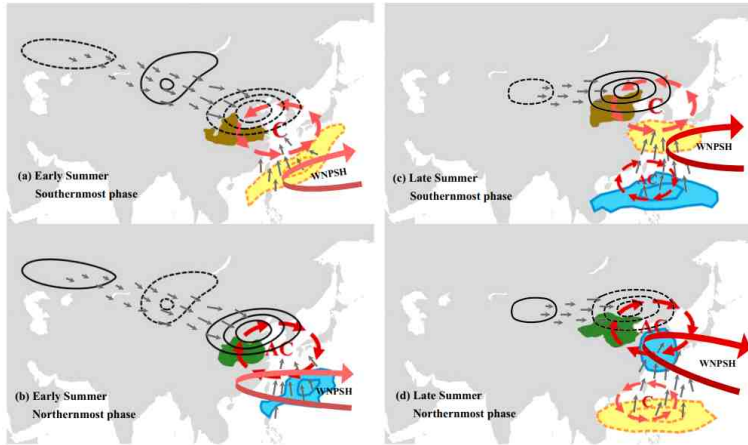


그림 2.18. 초여름 및 늦여름에서의 10-30일 주기의 남북 방향 북태평양고기압 변동성을 조율하는 메커니즘 모식도(그림출처: Zhou and Li 2022)

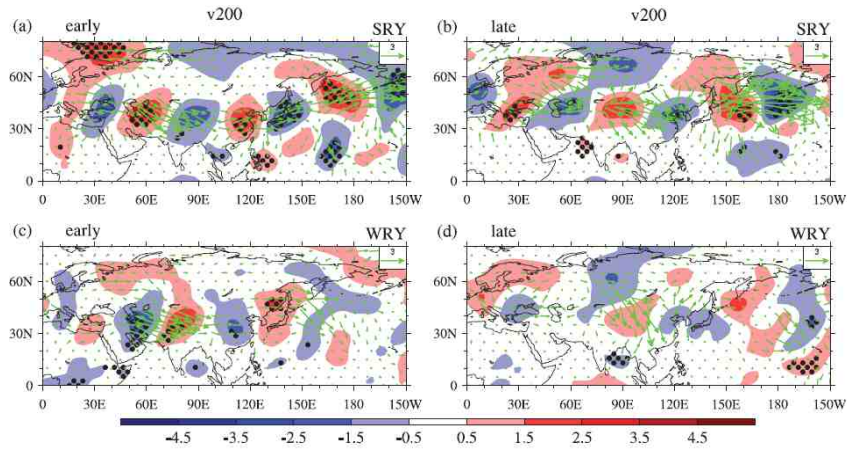


그림 2.19. 북태평양고기압의 강한 후퇴 해(SRY)와 약한 후퇴 해(WRY)의 전반기와 후반기 200hPa의 남북방향 바람 아노말리(shading)와 wave activity flux(vector) (그림출처: Dong and He, 2020)

- 앞서 서술된 북태평양고기압의 계절내 변동성을 설명하는 선행연구들은 주로 양쯔강 지역 및 남중국 지역 강수의 계절내 변동성을 설명하기 위해 연구를 진행해 왔으며 북

태평양고기압 계절내 변동성 그 자체를 중심으로 한 연구가 아니다. 또한, 많은 연구가 북태평양고기압의 서쪽 확장에 초점이 맞춰져 있으며 북태평양고기압의 동쪽에서의 쇠퇴에 관해서는 많은 연구가 되어있지 않다. 따라서 서쪽 확장뿐 아니라 동쪽에서의 쇠퇴를 포함한 포괄적인 계절내 변동성에 대해 이해할 필요가 있고 많은 선행 연구가 중국지역의 강수 영향을 중점적으로 진행되었기에 한반도 계절내 강수 변동성과 관련된 북태평양고기압의 계절내 변동성 연구 또한 필요하다.

### 2.2.4 북태평양고기압의 경년 및 장기 변동성에 관한 연구 조사

여름철 북태평양고기압의 경년 및 장기 변동성에 관련된 연구는 계절내 변동성 연구보다 많이 진행되어왔다. 선행연구들에서 경년 및 장기 변동성과 관련된 주요 지역으로 열대 인도양(Tropical Indian Ocean), 열대 중앙태평양(Central Pacific Ocean), 해양성 대륙(Maritime Continent), 필리핀해 지역을 포함한 북서태평양(Western North Pacific Ocean), 열대 대서양(Tropical Atlantic Ocean)이 있으며(He et al. 2015a, 2015c), 이 지역들의 변동성은 주로 엘니뇨 남방진동(El Nino-Southern Oscillation)과 연관되어 설명되어왔다. 또한, 경년 및 장기 변동성에 관련된 연구는 시간규모에 따라 크게 북태평양고기압의 경년변동성, 북태평양고기압의 경년변동성의 장기 변동성(interdecadal variability), 북태평양고기압의 장기추세 및 미래기후 변화로 구분 지을 수 있다. 본 절은 시간규모를 중심으로 북태평양고기압 경년 변동성과 앞서 서술된 주요 지역들의 변화가 어떻게 연관성이 있는지 조사하였다.

#### ○ 경년변동성

- 그림 2.20은 북태평양고기압의 경년변동성을 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 동서 방향으로의 북태평양고기압의 경년변동성이 뚜렷함을 알 수 있다. 이는 850-hPa 및 500-hPa 지위고도 변화에서 모두 뚜렷하게 나타난다.

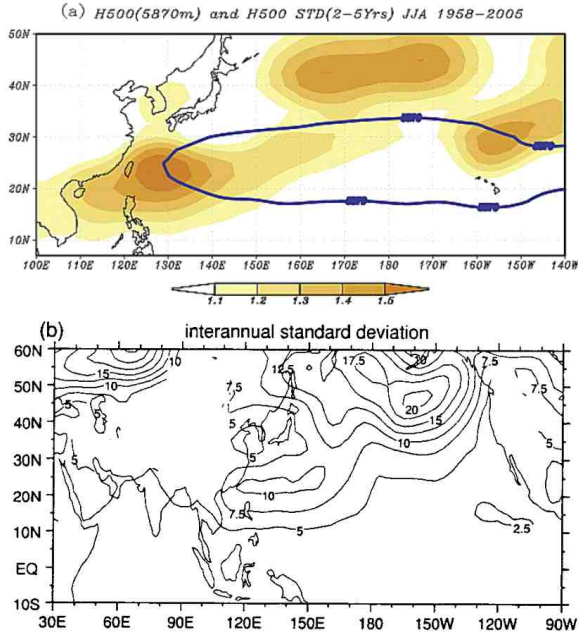


그림 2.20. (a) 500hPa 및 (b) 850hPa 지위고도장을 활용한 북태평양고기압의 경년변동성(그림출처: Sui et al. 2007 및 Lu and Dong 2001)

- 이러한 동서 방향 변화는 크게 두 가지로 구분된다(Wei et al. 2018). 첫 번째로는 북태평양고기압의 순수한 동서 방향 이동을 의미하며, 이는 인도양 및 동아시아 몬순 지역의 잠열 방출과 관련된 내부 변동성으로 설명된다(Liu et al. 2001). 두 번째는 북태평양고기압 강도의 변화와 동반된 동서 방향 이동을 의미하며, 이는 외부 강제력에 의한 요소로 알려져 있다. 외부 강제력으로는 (1) 열대 인도양, (2) 열대 중앙태평양, (3) 해양성 대륙, (4) 필리핀해를 포함한 북서태평양, (5) 열대 대서양의 변동성이 주요한 요소로 알려져 있다 (그림 2.21).
- 열대 인도양 해수면 온도 상승은 주로 엘니뇨의 봄철 쇠퇴와 연관이 있다. 여름철에 지속되는 열대 인도양 해수면 온도 상승에 의한 깊은 대류의 증가는 켈빈파를 발생시킨다. 켈빈파에 의한 바람장의 변화는 에크만 수송을 유발하고, 적도 지역의 약한 대류와 북서태평양 아열대지역의 고기압성 순환을 만들어 북태평양고기압을 강화하게 만든다고 보고되었다(Xie et al. 2009; Wang et al. 2000). Zhang et al. (2016)에서는 수치모델링 실험을 통해 이러한 엘니뇨 남방 진동의 변동성만으로는 북태평양고기압의 강화가 설명

되지 않으며, 쇠퇴하는 엘니뇨 남방 진동의 변동성과 해수면 온도의 계절 변화의 상호 작용(C-mode; Stuecker et al. 2015)이 중요함을 추가적으로 밝혔다.

- 열대 중앙태평양 지역의 경우, 라니냐가 발달하는 시점에서 해수면 온도가 감소한다. 이에 따른 로스비파 반응을 통해서 북서태평양 지역에 고기압성 순환이 존재하게 되고, 이는 북태평양고기압을 강화하는 호조건이 된다(Wang et al. 2013).
- 해양성 대륙 지역의 경우, 엘니뇨-남방진동의 변동성과 연관된 해양성 대륙 지역 부근의 해수면 온도 증가로 인해 남북 방향 순환(meridional overturning circulation) 또는 국지적 해들리 순환(local Hadley circulation)으로 불리는 해양성 대륙 지역의 상승/북서태평양 지역의 하강기류가 강화된다. 강화된 하강 기류는 북태평양고기압을 강화하는 호조건이 된다(Sui et al. 2007; Lu et al. 2006).
- 북서태평양 지역(필리핀해지역)의 대류 강도의 변화도 북태평양고기압의 경년변동성이 관련이 있다고 알려져 있다(Lu and Dong 2001). 따뜻한 중앙태평양 및 동태평양 해수면 온도 아노말리는 대기순환(atmospheric bridge)을 통해 북서태평양 지역의 해수면 온도를 감소시키며, 이에 따라 약해진 대류 현상은 차가운 북서태평양 해수면 온도의 북서쪽에 고기압성 순환을 만들게 되며 북태평양고기압의 서쪽으로의 확장을 돕는다.
- 북서대서양 지역의 해수면 온도 상승으로 발생한 켈빈파가 열대 인도양 지역 및 적도 서태평양의 동풍을 강화시키고, 중앙태평양 및 동태평양에 약한 대류현상을 야기시킨다. 약해진 대류현상의 로스비파 반응을 통해 북태평양고기압이 강화된다(Feng and Chen 2021).

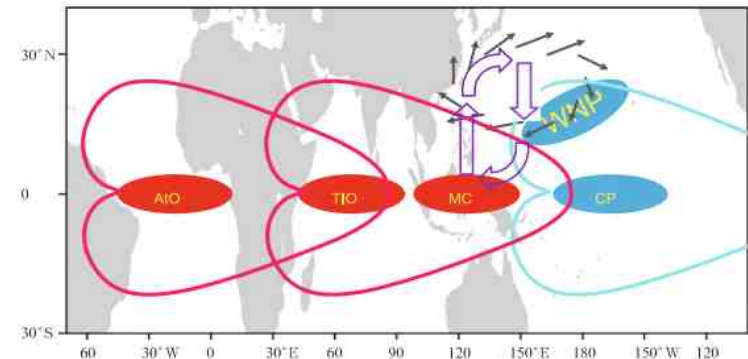


그림 2.21. 북태평양고기압 경년 강화 현상과 관련된 주요 지역의 해수면 변동성 및 관련된 메커니즘 모식도. 빨간색/파란색 실선은 따뜻한/차가운 해수면 온도에 의한 길(Gill)-타입 반응을 나타냄(그림출처: He et al. 2015a)



- 그 밖에, 북태평양고기압의 경년변동성을 설명할 수 있는 인자로 남아시아 고기압성 순환(South Asian High)과 북태평양고기압의 상호작용(Wei et al. 2018), 북서태평양지역에서의 계절 변화에 따른 배경장 변화와 북태평양고기압 간의 대기-해양 피드백(Convection-Wind-Evaporation-Sea surface temperature; Chang et al. 2000; Xiang et al. 2013; Cheng et al. 2019), 여름철 계절내 진동(BSISO) 및 동아시아-태평양 원격상관(Wang et al. 2023)이 제시되었다.

○ 장기변동성(Interdecadal variability)

- Sui et al. (2007) 및 Riyu et al. (2008)은 북반구 경년변동성이 두 개의 주요 모드(예: 2~3, 3~5년 주기)로 구분 지어진다고 보고하였다. 2~3년 주기의 모드는 해양성 대륙 지역에서의 해수면 온도 상승에 의한 국지적 해들리 순환/남북 방향 순환과 연관이 있고(Wu and Zhou 2008), 3~5년 주기의 진동은 북서태평양 지역 해수면 온도(Sui et al. 2007; He et al. 2015c) 및 열대 인도양의 해수면 온도(Chen and Zhou 2014)와 연관이 있다고 보고되었다. 1990년대를 중심으로 이전 기간에는 3~5년 주기의 모드가, 이후 기간에는 2~3년 주기의 모드가 북태평양고기압의 경년변동성을 설명한다(그림 2.22). 다른 선행연구들에서도 단주기(1~2년/2~3년)와 장주기(4~5년/3~6년) 형태의 북태평양고기압 경년변동성이 존재한다고 보고하였고(Park et al. 2010; Cheng et al. 2019) 시간에 따라 지배적인 경년변동성의 주기가 변함을 보였다. Matsumura and Horinouchi (2016)는 북태평양고기압의 경년변동성은 ENSO와 연관이 있지만, 장기변동성은 아열대 제트의 남북이동을 야기하는 Pacific Decadal Oscillation (PDO)과 더 큰 관련이 있다고 제시하였다(그림 2.23).

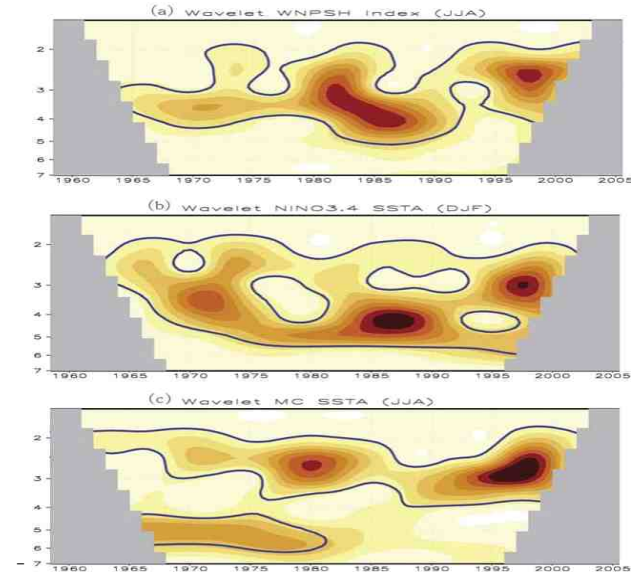


그림 2.22. 여름철 장기추세가 제거된 북태평양고기압 지수 및 열대 해수면온도 웨이브릿(wavelet) 파워스펙트럼(그림출처: Sui et al. 2007)

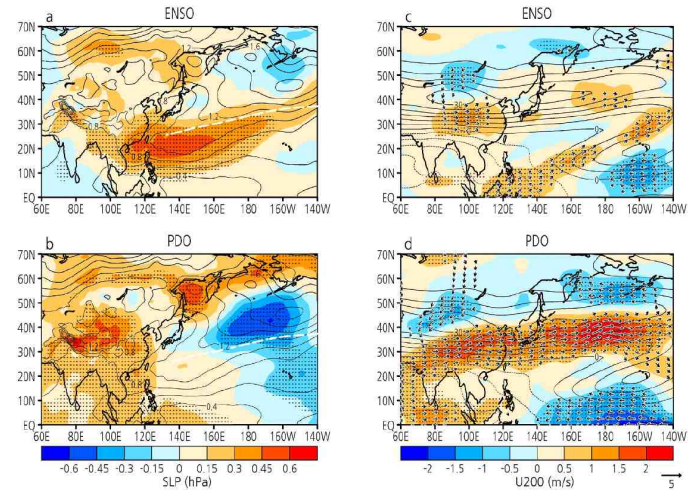


그림 2.23. ENSO와 PDO에 대한 해면기압과 열대 상층 바람의 회귀 성분 (그림 출처: Matsumura and Horinouchi. 2016)

○ 장기 추세 및 미래기후 변화

- 초기 연구들에서는(Zhou et al. 2009; Gong and Ho 2002) 1970년대 말부터 열대 인도양 및 서태평양 해수면 온도 상승으로 인해 생기는 로스비파 반응으로 북태평양고기압이 서쪽으로 확장한다고 보고하였다(그림 2.24). 하지만, Wu and Wang (2015)에서는 전 지구적으로 장기추세를 제거했을 때, 1970년 이후 기간에서의 북태평양고기압 서쪽으로 확장이 뚜렷하지 않다고 이야기하였다. He et al. (2015b)에서는 지위고도를 활용하여 북태평양고기압 장기추세를 살펴볼 때 지구온난화로 인한 영향이 지위고도에 반영되기에 에디 지위고도 변수를 이용해서 북태평양고기압의 장기추세를 살펴보아야 한다고 밝혔으며, Huang et al. (2015)에서는 북태평양고기압이 오른쪽으로 후퇴하는 장기 추세를 보인다고 보고하였다.

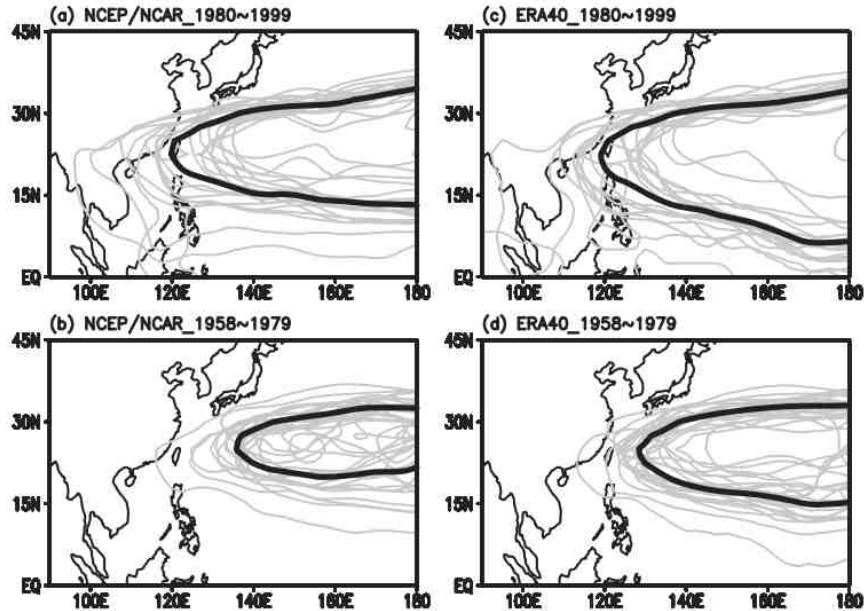


그림 2.24. 두 개의 재분석자료를 활용한 (b,d) 1958~1979년 및 (a,c) 1980~1999년 여름철에서의 500-hPa 지위고도의 5870-m 등치선(그림출처: Zhou et al. 2009)

- 미래기후 변화와 관련한 북태평양고기압 변화와 관련하여 Li et al. (2012)은 IPCC 4차 기후변화평가보고서(Assessment Report 4, AR4)의 결과들을 분석해 대륙-해양 간의 열적 대비가 커지기 때문에 북태평양고기압이 미래기후에 강해질 것으로 전망하였으며(그림 2.25), Yang et al. (2022)은 북태평양의 동서 방향 변동성이 미래기후에 더욱 커진다고 보고하였다. 그러나 5차 기후변화평가보고서의 결과들을 분석한 He et al. (2018)은 에디 지위고도 방법을 활용해 북태평양고기압을 정의한 결과 미래기후에 고기압이 오른쪽으로 쇠퇴한다고 전망하였다(그림 2.26).

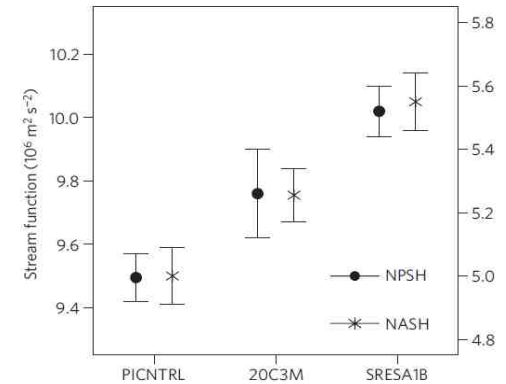


그림 2.25. AR4에서 모의된 북태평양고기압(NPSH)과 북서태평양고기압(NASH)의 시나리오별 강도 (그림출처: Li et al. 2012)

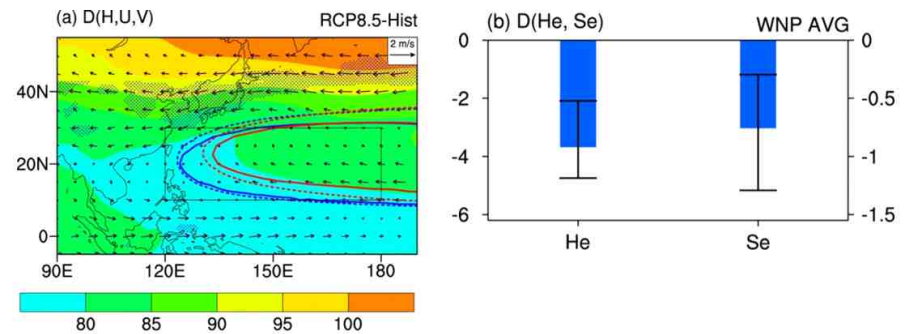


그림 2.26. (a) AR5의 RCP8.5 시나리오에서 전망된 지위고도(shading)와 바람(vector)의 Historical 모의 대비 차이와 북태평양고기압의 경계를 의미하는 He(contour), 파란선은 Historical 모의, 빨간선은 RCP8.5 시나리오. (b) 북서태평양 영역 평균된 He의 미래 변화량(그림 출처: He et al. 2015)

- 앞서 관측에서의 장기추세 결과에서도 확인할 수 있듯이 북태평양고기압 및 그 변동성을 정의하는 방법에 따라 상이한 결과를 보인다. 따라서 북태평양고기압의 장기 추세 및 미래기후에서의 그 변화를 이해하는데 있어서 주의가 필요하다(Cherchi et al. 2018). 또한, 북태평양 기후 모의에 적합한 기후변화 예측 모델 결과를 이용한 미래 북태평양고기압 변화 및 변동성 변화 연구가 요구된다.

## 2.3. 북태평양고기압 관련 여름철 위험기상에 대한 이론 및 예측 기술 현황 조사

### 2.3.1 여름철 위험기상관련 북태평양고기압에 대한 이론 연구 현황 조사

- 북태평양고기압은 기본적으로 아열대 고기압의 한 종류이다. 따라서 동서 평균 관점에서 대기대순환을 이해할 때 아열대 고기압은 해들리 순환의 가장자리에 위치하는 하강기류와 관련이 있으며 위도 약 30° 부근에서 띠 모양으로 길게 걸쳐서 나타난다. 하지만 해들리 순환이 약해지는 북반구 여름철에서는 아열대 고기압이 더욱 강해지고 국지화되어 나타난다(그림 2.27). 이는 여름철 아열대 고기압이 해들리 순환으로 설명이 되는 겨울철 아열대 고기압과는 다른 방식으로 설명이 되어야 함을 시사한다.

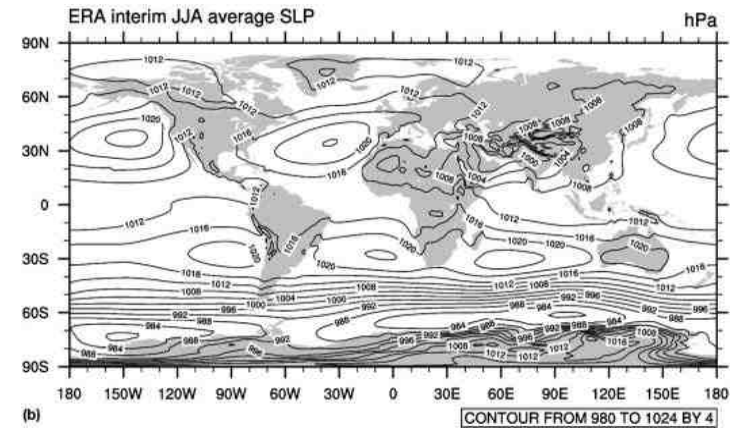


그림 2.27. 1989년부터 2010년까지의 여름철(6~8월) 평균 해면 기압 (등치선 간격 4 hPa)(그림출처: North et al. 2014)

- 많은 선행연구에서 여름철 북태평양고기압의 발달 및 유지 메커니즘을 설명하려고 노력해왔다. 하지만 북태평양고기압의 발달 및 유지 메커니즘이 정확하게 정립이 되지 않은 실정이며 현재까지도 많은 연구가 진행되고 있다. 선행연구에서 제시된 기후학적인 관점에서의 북태평양고기압의 발달 및 유지 메커니즘에 대한 가설을 아래와 같이 정리할 수 있다.

#### ○ Monsoon-diabatic heating mechanism (Rodwell and Hoskins 1996, 2001)

- Rodwell and Hoskins (1996, 2001)에서는 몬순 지역(북아메리카 몬순)에서의 상승기류와 관련된 비단열 과정 길(Gill)-타입 반응으로 생기는 로스비파(Rossby wave)가 하강

기류를 만들고, 이 하강기류가 북태평양고기압을 형성한다고 설명한다. 수치 모형실험을 통해 해당 메커니즘은 비단열 과정을 강제력으로 주어진 선형 모델에서도 북태평양고기압이 모의되며 지형효과 및 비선형 과정이 추가되었을 때 북태평양고기압 형성이 더욱 잘 되는 것을 확인하였다.

○ Local (shallow) land-sea thermal contrast (Liu et al. 2004; Miyasaka and Nakamura 2005)

- 앞서 서술된 Rodwell and Hoskins (1996, 2001)에서는 얇은 대류 현상 및 깊은 대류 현상까지 포함한 문순 지역 비단열 과정이 중요한 역할을 한다고 서술하였다. 이와는 달리 Miyasaka and Nakamura (2005)에서는 상대적으로 뜨거운 대륙과 차가운 해양의 열적 대비로 인한 국지적인 얇은 냉각-가열 현상이 북태평양고기압 형성에 중요한 역할을 한다고 밝혔다. 수치 모형실험을 통해 대륙-해양 간의 국지적인 얇은 냉각-가열 원리에 의해서 북태평양고기압의 강도가 관측의 70% 정도까지 설명하였고, 깊은 대류 현상에 의한 북태평양고기압 형성의 기여도는 다소 작은 것으로 확인하였다.

○ Diabatic amplification of cloud-reduced radiative cooling (Bergman and Hendon 2000)

- Bergman and Hendon (2000)에서는 깊은 대류 지역에서 구름에 의한 복사 냉각의 감소 현상, 얇은 대류 지역에서의 복사 냉각 증가 현상, 그리고 구름 내부에서의 잠열 방출에 의한 열대 순환 장의 강화 현상을 통해 비단열 과정이 북태평양고기압을 형성에 주요한 역할을 함을 제시하였다

○ Air-sea interaction (Seager et al. 2003)

- Seager et al. (2003)에서는 Rodwell and Hoskins (1996, 2001)에서 제시된 문순에 의한 비단열 과정에 의해 북태평양고기압이 형성되나 그 강도는 약하며, 대기-해양 간의 양의 상호작용이 북태평양고기압을 강화하고 대양의 동쪽에 위치하며 계절 순환(seasonal cycle)을 조율함을 밝혔다.

○ Tibetan Plateau (Wang et al. 2008; Son et al. 2019, 2020)

- Wang et al. (2008) 및 Son et al. (2019, 2020)에서는 티벳 고원에서의 비단열 가열과정 (열적 효과) 및 지형효과에 의한 로스비파의 반응이 북태평양고기압의 유지 및 발달에 기여할 수 있음을 확인하였다.

□ 그 밖의 북태평양고기압을 설명하기 위한 다양한 메커니즘(예: 태평양 지역 적도순환 대에 의한 남북방향 순환 메커니즘; Park et al. 2010)들이 제시되어왔으나, 상술하였

듯이 북태평양고기압 발생 및 유지 메커니즘이 아직 완벽히 정립되지 않았다. 따라서 선행연구들에서 제시된 다양한 메커니즘에 대한 많은 논의가 필요하고, 메커니즘들에 대한 종합적인 이해가 필요하다. 추가로 잘 고안된 모형실험 설계를 통해 제시된 메커니즘들이 북태평양고기압에 미치는 상대적인 영향에 대해 이해해 볼 필요가 있다(Son et al. 2020).

2.3.2 폭염/이상고온 현상과 북태평양고기압에 대한 이론 및 예측 기술 현황

- 수치모형을 이용한 폭염 모의 시 폭염에 대한 북태평양고기압의 영향은 폭염 특성에 따라 다를 수 있다. 예로 Yoon et al. (2021)은 2016년과 2018년 우리나라에 큰 영향을 준 폭염의 예측성이 북태평양고기압 모의에 따라 차이가 날 수 있다고 제시하였다 (그림 2.28). 2016년 8월 폭염의 경우 종료 시기가 예상보다 더 오래 지속되었는데 이는 대부분의 수치모형들이 실제와 달리 한반도 주변의 북태평양고기압을 수축하게 모의했기 때문이다. 수치모형들이 북태평양고기압을 현실적으로 모의하지 못한 것은 캄차카지역의 블록킹 현상의 모의 실패, 북서태평양의 열대저기압 강도의 과다모의 등과 연관될 수 있다. 2016년 폭염은 북태평양고기압이 이와 같은 주변 현상들과 상호작용하면서 한반도에 영향을 줬, 고기압 자체의 모의뿐만 아니라 주변 현상들의 모의까지 성공해야 하는 복잡한 환경이었다. 반면 2018년 폭염의 경우 북태평양고기압이 지배적으로 강했고 주변 현상들의 영향이 상대적으로 적었기 때문에 폭염 모의 오차가 크지 않았다.

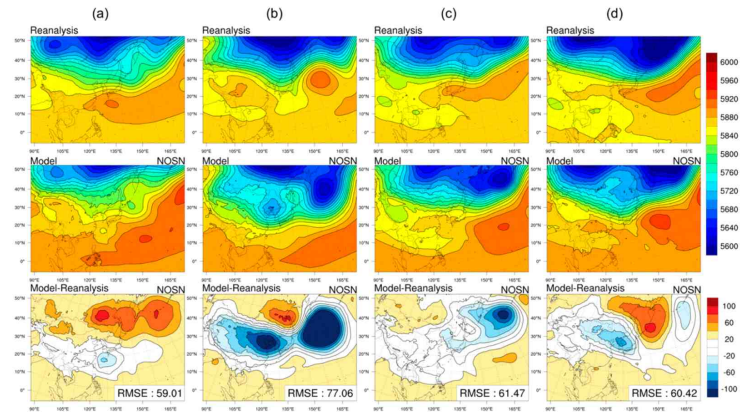


그림 2.28. 2016년 (a) 7월과 (b) 8월, 2018년 (c) 7월과 (d) 8월 500hPa 지위고도장의 (위) 재분석장과 (중간) 모델결과, 그리고 (아래) 그 차이(그림출처: Yoon et al. 2021)



- 또한 Li et al. (2018)은 화남과 화중 지역의 폭염 예측 시, 대기모델만을 사용할 때보다 대기-해양 결합 모델을 사용할 경우 개선된다는 것을 보였는데 그 이유는 결합 모델을 사용할 경우 대기-해양 상호작용이 현실적으로 반영되어 북태평양고기압의 변동성이 폭염에 맞게 모의 되기 때문이었다 (그림 2.29). 이처럼 북태평양고기압의 시공간적 변화 모의가 성공적이어야 동아시아 지역의 폭염 예측이 현실적일 수 있고, 이를 위해서는 대기-해양 상호작용, 중위도저기압 및 열대저기압, 아열대 지역의 대류, 캄차카 블록킹 등과 같이 북태평양고기압의 변화에 영향을 줄 수 있는 다양한 요소들의 예측을 개선할 수 있는 기술이 동반될 필요가 있다.

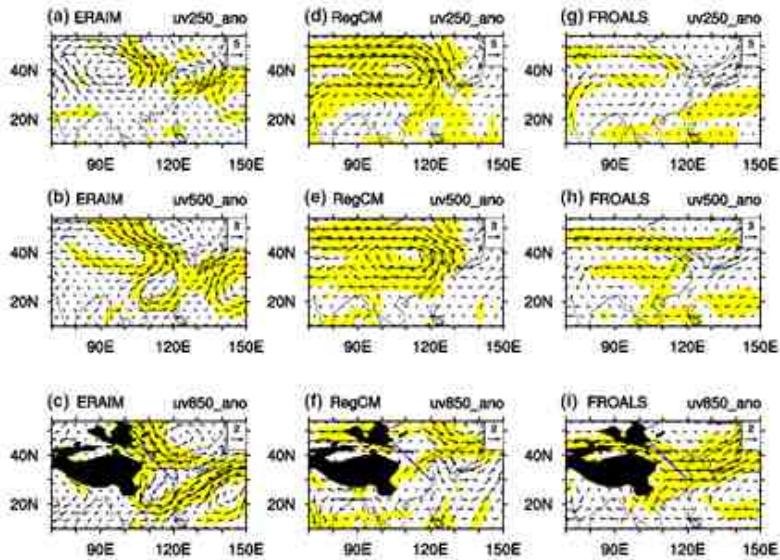


그림 2.29. 화북지역에 폭염이 발생할 때 나타나는 수평 바람 아노말리; ERAIM, RegCM, FROALS은 각각 재분석자료, 대기모델, 대기해양접합모델의 결과를 의미함(그림출처: Lin et al. 2018)

- 북태평양고기압의 변동성을 초래하는 기후모드들이 이상고온의 계절내~계절 및 계절예측에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 예측성 관점에서 현업적/기술적으로 진단/평가한 연구는 다소 부족한 실정이다. 토양수분 초기화를 통한 지면 상태의 현실적인 반영이 폭염 예측에 도움이 된다는 최신 연구들이 있으나(Yoon et al. 2018, 2023; Seo et al. 2019), 북태평양고기압과의 직접적인 연관성은 불분명하다.

### 2.3.3 장마/집중호우(중위도저기압 및 대기천 포함)와 북태평양고기압에 대한 이론 및 예측기술 현황

- 북태평양고기압과 관련된 집중호우, 중위도저기압, 대기천에 대한 이론적, 관측적 연구들은 앞 절에서 정리하였다. 이러한 내용을 바탕으로 북태평양고기압의 변동성을 초래하는 기후모드들이 문순의 강화 및 이에 의한 동아시아 여름문순과 여름철 강수/집중호우의 계절내~계절 및 계절예측에의 활용 가능성이 여러 연구들에서 제시된 바 있다 (Kosaka et al. 2013; Takaya et al. 2020; Ham et al. 2021; Qiao et al. 2021; Zhou et al. 2021). Kamae et al. (2017a,b)은 IPOC effect 이론을 기반으로 겨울철 엘니뇨 진단을 통해 이듬해 여름철 동아시아 대기천의 활동을 미리 예측할 수 있을 것으로 제안한 바 있다.
- 북태평양고기압의 북서쪽 경계지역에서 한반도로 유입되는 수증기 수송 통로가 형성될 경우 우리나라에서 호우가 발생할 확률이 매우 높아진다. 따라서 북태평양고기압의 정확한 시공간 변화 예측은 한반도 호우 예측에 필수적이라 할 수 있다. 하지만 아직까지 북태평양고기압 변화의 정확한 예측은 매우 어려운 도전적인 과제이다. 그림 2.30과 같이 예측시간이 증가할수록 UM과 KIM 모델의 북태평양고기압 서쪽 경계 모의가 달라져 한반도 호우 예측도 차이가 나게 된다. 두 모델에서 북태평양고기압의 변화 모의가 다른 이유는 필리핀 주변의 아열대 대류의 모의가 차이가 나기 때문이다. 이처럼 한반도 호우 모의를 개선하기 위해서는 북태평양고기압 변화에 영향을 주는 요소들의 예측을 개선할 수 있는 기술이 요구된다. 예로 북태평양고기압 변화에 영향을 주는 아열대 대류 모의를 개선하기 위해 적운대류모수화를 최적화하는 것이 필요할 수 있다.



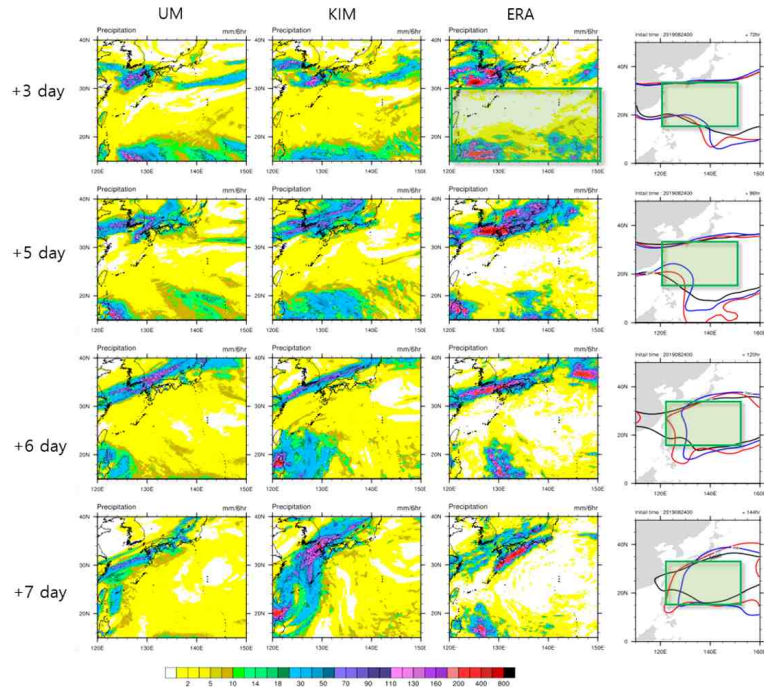


그림 2.30. 2019년 8월 24일 00UTC 초기시간인 UM, KIM 모델의 강수 예측과 각 시기의 (4번째 열) 5,880 gpm 지위고도장; 빨간색, 파란색, 검은색 선은 각각 UM, KIM, ERA5를 의미함(그림출처: 직접 분석)

- 또한 여름철 한반도에 영향을 주는 장마 예측 성능을 높이기 위해서는 북태평양의 강력한 대기-해양 상호작용을 예측에 반영해 북태평양고기압의 변화 모의를 개선할 필요가 있다. Cha et al. (2009)은 대기모델만 사용할 경우 강수-하층순환-북태평양고기압-해수면온도 사이의 관계가 비현실적으로 모의 돼 한반도 장마와 연관된 동아시아 여름 몬순 모의가 실패하지만, 대기-해양 결합 모델을 사용할 경우 변수들 간의 상호 관계 모의가 개선되어 몬순 모의 오차를 줄일 수 있다는 것을 보였다. 특히, 몬순 지역의 강수가 물리모수화방안의 과도한 반응으로 과다 모의될 경우 북태평양고기압이 수축하게 되고, 이로 인해 몬순 강수대 또한 남쪽으로 이동해 한반도 장마 예측의 위치 오차가 발생할 수 있다고 제시하였다. 따라서 현실적인 장마 예측을 위해서는 북태평양고기압의 시공간적 변화에 영향을 줄 수 있는 강력한 대기-해양 상호작용의 반영이 필요할 수 있다.

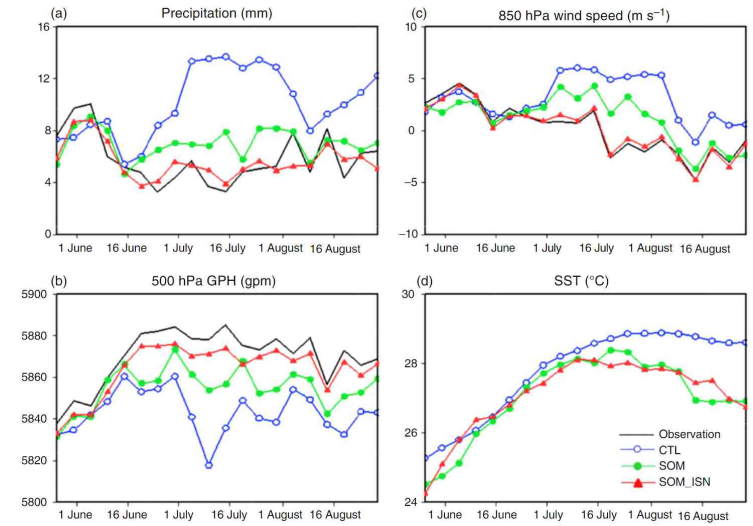


그림 2.31. 지역기후모델을 이용한 동아시아 여름 몬순 모의 시 아열대 북태평양 (110~145°E, 20~32°N)에서 영역 평균한 (a) 강수량, (b) 중층 지위고도, (c) 하층 순환, (d) 해수면 온도의 변화. CTL, SOM, SOM\_ISN은 각각 WRF 모델만을 이용한 실험, WRF 모델에 해양모델이 접합된 실험, WRF 모델에 해양모델과 간헐적 스펙트럴 넷징이 적용된 실험을 의미함(그림출처: Cha et al. 2009)

### 2.3.4 열대저기압과 북태평양고기압에 대한 이론 및 예측기술 현황 조사

- Wang et al. (2013)은 동아시아 여름몬순의 강도 및 열대저기압의 경년변동과 북태평양고기압의 경년변동이 매우 밀접하게 연관됨을 보였다(상관계수 크기 0.7 이상). 북태평양고기압의 경년변동은 중앙태평양 해수면 온도의 변화에 기인한 대기-해양 상호작용과 크게 관련 있는데, 이는 기후모형에 의해 잘 예측됨을 보임으로써 북태평양고기압이 열대저기압 활동성의 계절예측에 활용될 수 있음을 보였다. Wang and Wang (2019)은 중앙-동태평양과 열대 북대서양의 상호작용 또한 북태평양고기압의 경년변동에 영향을 끼치며 북태평양 열대저기압의 장기예측에 활용될 수 있음을 제안한 바 있다.
- 이외에도 Camp et al. (2018)과 Moon et al. (2021) 또한 각각 기후모형과 중규모모형을 이용하여 북태평양고기압의 정확한 예측이 북태평양 열대저기압의 진로 예측에 매우 중요함을 보인 바 있다. 이는 열대저기압의 진로예측에 있어 중요한 요소 중 하나인 지향류의 예측이 북태평양고기압에 크게 영향을 받기 때문이다. 태풍 주변의 평균적인 흐름인 지향류는 중관 또는 대규모 현상에 크게 영향을 받는데 열대저기압이 북태평양고기압 경계

에서 주로 활동하기 때문에 고기압의 모의가 열대저기압 예측에 크게 영향을 준다. 그림 2.32와 같이 ECMWF와 NCEP의 현업 중기 예측 모델이 모의한 북태평양고기압의 공간분포가 차이가 나 한반도로 향하는 2023년 6호 태풍 카눈의 진로가 다르게 예측되었다.

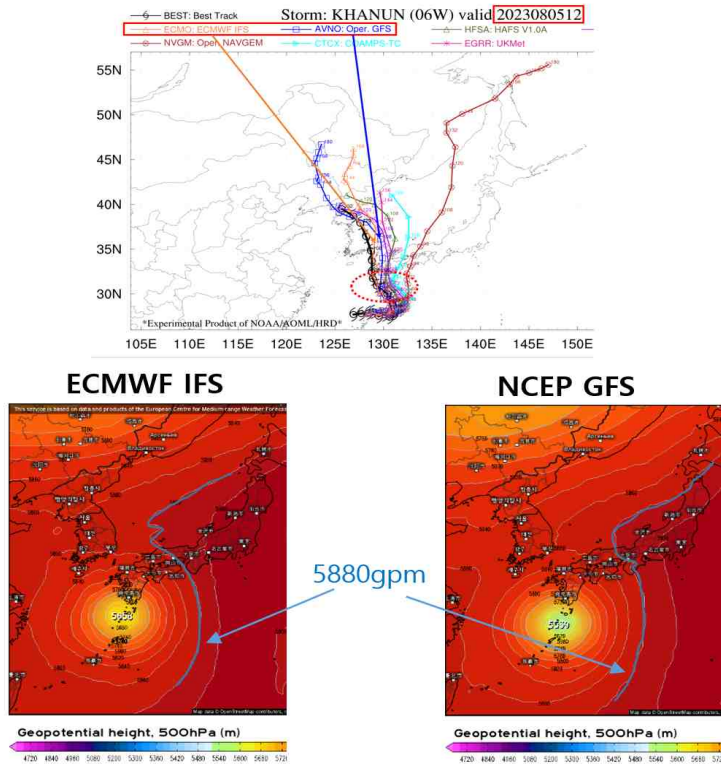


그림 2.32. 2023년 6호 태풍 카눈의 모델 별 진로 (위), ECMWF 모델(왼쪽 아래)과 NCEP 모델(오른쪽 아래)의 500hPa 지위고도 예측장(그림출처: 직접 분석)

- 또한, Moon et al. (2018)은 중규모 수치모델을 이용한 열대저기압 5일 예측에서 측면경계조건의 한계로 북태평양고기압 모의에 오차가 발생해 열대저기압 예측에 영향을 줄 수 있다는 것을 보였다(그림 2.33). 이러한 문제를 해소하기 위해 모의 영역 내부에도 경계조건을 모델 해에 반영하는 스펙트럴넛징 기법을 적용하였고, 이를 통해 북태평양고기압 모의 오차를 줄임으로써 열대저기압 주변의 지향류 모의가 개선되어 현실적인 태풍 진로 예측이 가능하였다.

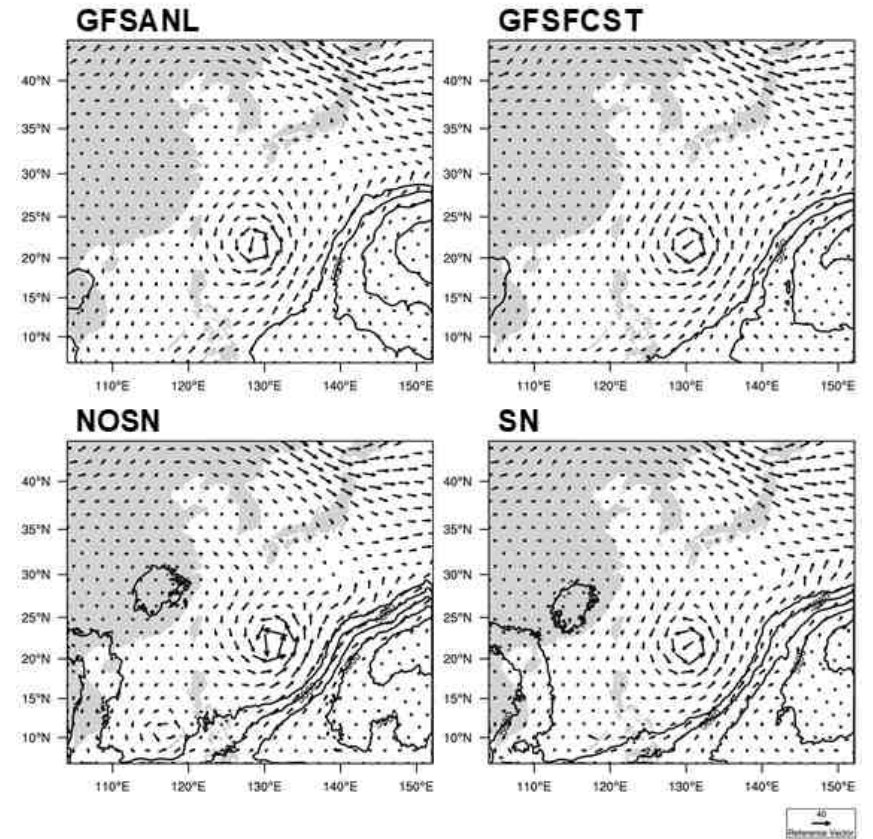


그림 2.33. GFS 2014년 10월 6일 00 UTC 분석장을 초기조건으로 사용한 WRF 모델의 3일 예측에서 나타나는 500 hPa 순환(벡터)과 지위고도(contour). GFSANL과 GFSFCST는 각각 GFS 분석장, GFS 3일 예측장을 나타내고, SN과 NOSN은 스펙트럴넛징을 적용/미적용한 WRF 모델 3일 예측 결과를 각각 의미함(그림출처: Moon et al. 2018)

- 열대저기압과 북태평양고기압의 예측은 서로 상호 영향을 줄 수 있다. Cha et al. (2011)은 중규모 모델 기반의 지역기후모델을 이용한 동아시아 기후 모의 시 모의 영역 내 열대저기압이 발생할 때마다 북태평양고기압 모의성능이 급격하게 낮아진다는 것을 밝혔다(그림 2.34). 열대저기압 예측이 고기압 모의에 크게 영향을 받기 때문에 북태평양고기압 모의 오차는 다음에 형성되는 열대저기압 모의 오차의 원인으로 작용해 지속적으로 모델성능을 낮추는 영향을 줄 수 있다. 유사하게 여러 개의 태풍이 모의영역 내에서

발생할 경우 태풍과 고기압 사이의 상호작용이 현실적으로 모의되지 못하기 때문에 다중태풍에 대한 수치모델의 모의 성능이 단일태풍에 비해 일반적으로 낮다. 따라서, 열대저기압 예측 성능을 높이기 위해서는 열대저기압과 북태평양고기압 사이의 상호작용 모의를 개선할 수 있는 기술이 필요하다.

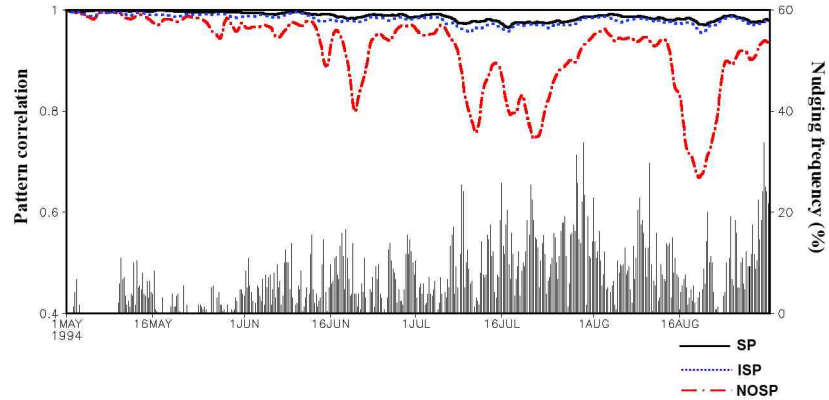


그림 2.34. WRF 모델을 이용한 1994년 5월 1일부터 8월 31일까지의 지역기후모의에서 나타나는 500hPa 지위고도의 재분석자료와 모의결과 사이의 공간 상관관계 변화; SP, ISP, NOSP는 각각 스펙트럴넛징, 간헐적 스펙트럴넛징, 넛징 미적용 실험을 의미함(그림출처: Cha et al. 2011)

### 3. 북태평양고기압 구조 및 변동 특성 파악을 위한 관측 전략



- 3.1. 관측가능 요소 및 장비 특성에 따라 도출 가능한 요소 조사
- 3.2. 핵심요소를 고려하여 북태평양고기압 구조 파악을 위한 관측 전략 제시



### 3 북태평양고기압 구조 및 변동 특성 파악을 위한 관측 전략

#### 3.1 관측가능 요소 및 장비 특성에 따라 도출 가능한 요소 조사

##### 3.1.1 북태평양고기압의 위성 원격 관측 조사

□ 선행연구에서는 지상 관측자료 및 재분석 자료를 사용하여 다양한 기후인자와 북태평양고기압 사이의 관련성을 파악해 왔다. 하지만 빠르게 변동하는 북태평양고기압의 특성을 이해하기에는 자료의 시·공간적 한계가 있다. 이러한 한계점을 극복하고 북태평양고기압을 더 면밀히 이해하기 위해 위성 원격 관측자료의 활용이 필수적이다. 위성 원격 관측자료는 시·공간적으로 고해상도(수 분, 수 킬로미터)로 제공되어 준실시간으로 지구 전체를 모니터링 할 수 있다. 현재 전 세계의 기상위성들이 북태평양 지역의 고해상도 관측자료를 실시간으로 제공하고 있으므로, 이를 활용한다면 기존 관측자료의 한계를 극복하고 시간적으로 변동하는 북태평양고기압의 특성 파악을 기대할 수 있다. 이에 따라, 북태평양고기압을 관측할 수 있는 전 세계의 기상위성을 조사하고 도출 가능한 요소들을 조사하였다.

##### ○ 북태평양고기압 관측 가능 위성

- 기상위성은 지구의 날씨와 기후를 감시하기 위한 인공위성으로, 정지궤도 기상위성, 극궤도 기상위성, 지구 관측 위성이 있다. 그림 3.1은 북태평양 지역의 고해상도 관측 자료를 제공하는 기상위성, 극궤도 기상위성, 지구 관측 위성 및 관측 지역을 보여주고 있다. 북태평양고기압 관측이 가능한 위성 원격 관측으로 동아시아(한국, 중국, 일본) 정지궤도 위성, 미국과 유럽 극궤도 위성, 그리고 위성 자료 합성을 통해 생산된 활용산출물의 사용이 가능하다.

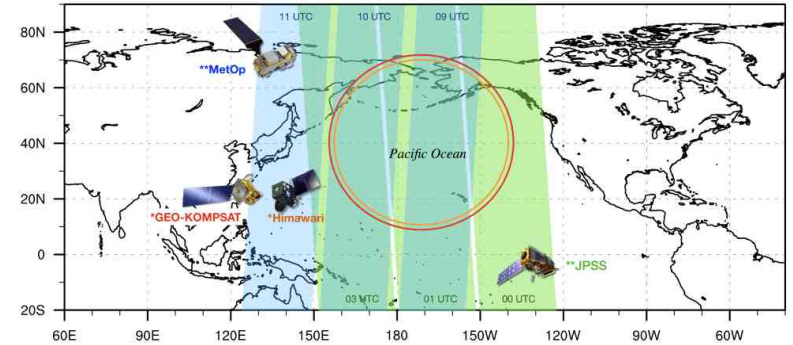


그림 3.1. 북태평양고기압 관측 가능 위성 (\*정지궤도위성: GK2A (한국), Himawari (일본), \*\*극궤도위성: JPSS/Aura (미국), Metop/Sentinel (유럽))

표 3.1과 3.2는 동아시아(한국, 중국, 일본) 정지궤도 위성과 미국과 유럽 극궤도 위성의 관측 특성 및 관측 변수, 가용기간을 나타낸 표이다.

표 3.1. 동아시아(한/중/일) 정지궤도 위성 특성

국가	위성	세부내용	가용기간
한국	GK2A (GEO-KOMPSA T-2A) 천리안위성 2A호	센서: AMI [공간] 가시채널 0.5 km, 적외채널 2 km [시간] 아시아태평양/한반도 2분, 전지구 10분 [변수] 구름 탐지, 대기운동벡터, 복사량, 청천복사량, 연직 온도 프로파일, 연직 습도 프로파일, 대기안정도지수, 해수면온도, 지표면온도 등 총 52개 기본 산출물 생산	약 2029년 (2019/7/25정식 운영, 수명 10년)
	GK2B (GEO-KOMPSA T-2B) 천리안위성 2B호	센서: 해양탐색계 GOCI-II [공간] 0.25 km [시간] 1시간 (한반도 중심 Local Area 기준) [변수] 해양전선 등 해양 환경 관련 총 26개 해양정보 산출물 생산 센서: 환경탐색계 GEMS [공간] 3.5 km (남북방향) 8 km (동서방향) [시간] 8회/1일 [변수] 에어로졸 및 기체 관련 총 9개 산출물 생산	
일본	Himawari-9	센서: AHI [공간] 가시채널 0.5-1 km, 근적외 및 적외채널 1-2 km [시간] 전 지구 10분 [변수] Cloud Mask, Atmospheric Motion Vector, Sea Surface Temperature, etc	2022-2029
중국	FY4A : FengYun-4 Series	센서: AGRI [공간] 0.5-4 km, 시간해상도: 전지구 15분, [변수] 지구관측 센서: GIRS [공간] 3.5 km (남북방향) 8 km (동서방향), 시간: 중국 60분 이내, 중규모 30분 이내, [변수] 대기온습도 프로파일	2016년 12월-2023년 12월

표 3.2. 미국/유럽 극궤도 위성 특성

국가	위성	세부내용	가용기간
미국	JPS (Joint Polar Satellite System)	<b>센서: ATMS</b> [공간] 15.8-74.8 km, [변수] 대기 온도 및 습도 자료 <b>센서: CrIS</b> [공간] 32 steps of 48 km [변수] 연직 대기온도 및 습도 프로파일 <b>센서: VIIRS</b> [공간] 채널에 따라 상이 375, 750 m, [변수] 구름, 에어로졸 등 대기, 해양 관련 <b>센서: OMPS</b> [공간] 50 km [변수] 연직오존 프로파일	2011-현재
유럽	Metop: EUMETSAT Metop-B and C	<b>센서: AMSU-A</b> [공간] 48 km [변수] 대기 상층 온도 프로파일 관련 <b>센서: AVHRR</b> [공간] 1 km [변수] 구름, 해수면, 식생 등 지구 관측 <b>센서: HIRS</b> [공간] 10km [변수] 온도프로파일, 수분함량, 지표면알베도 등 대기 수직 정보관련 <b>센서: IASI</b> [공간] 12km [변수] 대기 온도 및 습도	2012년 9월-현재, 2019년 11월-현재
유럽	Sentinel : EUMETSAT, Sentinel 3A, 3B and-6 Michael Freilic	<b>센서: SRAL</b> [공간] 300km [변수] 해양 지표 지형도 및 육지/해양 지표 온도 관련 <b>센서: MWR</b> [공간] 3-5km [변수] 대기수증기 및 수액 함량 관련	2016/2-현재, 2018/4-현재

- 전 세계의 위성 원격 관측이 북태평양고기압 관측에 사용 가능하나, 특히 천리안 위성 2A호(Geo-KOMPSAT-2A, GK-2A)의 사용이 북태평양고기압을 관측하기에 적합하다. GK-2A는 국내 최초로 개발된 정지궤도 기상위성으로 북태평양고기압의 관측에 활용할 수 있는 대표적인 기상위성이다. 10분 간격의 전구 관측이 가능하며, 아태지역과 한반도는 2분 간격의 관측이 가능하기 때문에 보다 신속하게 한반도 위험기상 감시와 대비가 가능하다. 위성이 기압을 직접 관측하지 않지만 대기의 수증기 분포를 관측하는 등 관련 요소를 통해 북태평양고기압을 추정할 수 있다. 따라서, GK-2A에서 제공하는 52개의 기상산출물 중 북태평양고기압 관련 핵심 관측요소인 대기온도, 수증기, 해수면온도, 구름광수대 등의 산출 알고리즘과 산출 정확도를 조사하였다.

표 3.3. GK-2A의 북태평양고기압 주요 기상요소 산출 특성  
(출처: 천리안위성 2A호 기상자료처리시스템 알고리즘 문서(ATBD))

변수	산출물	산출정확도	산출방법
온도	해수면온도	-0.0181 K	위성관측자료를 실시간 수신함과 동시에 실측-RTM-기후장-초기치 자료의 일치점 자료 생산 및 해수면온도 산출 알고리즘에 필요한 경험적 회귀 산출계수와 Hybrid 계수를 각각 유도하여 해수면온도를 실시간 계산함
	연직온도 프로파일	-0.14 K	적외채널 복사휘도를 이용하여 청천화소에서의 연직 온도 프로파일을 1차원 변분법적 방법으로 산출함
수증기	연직습도 프로파일	1.32 %	적외채널 복사휘도를 이용하여 청천화소에서의 연직 습도 프로파일을 1차원 변분법적 방법으로 산출함
바람	대기운동벡터	표적 별 평균오차 -0.44 m/s	시간적으로 연속된 위성영상으로부터 얻은 밝기온도 편차를 통해 표적과의 교차상관식을 계산하여 표적 내의 구름 혹은 수증기의 이동 변위를 산출함
구름	운정산출물 (운상, 운정기압, 운정온도, 운정고도), 구름광학두께	운상 91 % 운정기압 19.17 hPa 운정온도 4.01 K 운정고도 -580 m 구름광학두께 주간 -1.92 % 주야간 -31.07 %	일음상과 액체상의 파장에 따른 흡수율 차이를 이용하여 적외 파장에서의 운상 산출 및 구름방출율 비율 경계값 검사를 통합하여 산출함. 산출된 운상 정보를 바탕으로 운정 온도, 운정기압, 고도로 변환함 가시/근적외채널을 사용하여 구름광학두께를 산출함

- GK-2A는 광범위한 지역을 자주 관측할 수 있는 장점이 있지만, 기하적 관측 오차로 인한 왜곡으로 하층 자료의 불확실성이 나타나는 한계가 있다. 특히, 위성 영상은 적도 상공에서 지구의 대기상태를 관측하기 때문에 위성자료만으로는 대기의 3차원적인 수직 구조를 파악하기에는 어려움이 있다.
- 알고리즘 최적화 및 레이더 등의 위성자료와는 다른 강점을 가진 타 자료와의 융합을 통해 관측 장비의 한계를 극복한다면 북태평양고기압의 구조 및 변동 특성 파악을 위한 GK-2A의 활용성이 증가할 것으로 기대한다.

### 3.1.2 북태평양고기압의 지상 및 항공 관측 조사

□ 북태평양고기압의 변동성 및 영향을 이해하기 위해서는 다양한 대기 변수들의 활용이 요구된다. 특히 위성 원격 관측에 기반한 북태평양고기압의 감시 및 여름철 위험기상 예측을 위해서는 위성자료에서 대기 변수들의 정확도가 중요하며 이러한 정확도의 검증 및 개선은 직접 관측 및 지상 원격 관측과의 상호 비교를 통해서 이루어진다. 해당 부분에서는 북태평양고기압과 관련된 기상 특성 및 변동성을 관측할 수 있는 지상 및 항공 관측 장비 및 요소들을 조사하였다.

#### ○ 상시 지상 관측 네트워크

- 전 지구 기상, 기후 감시의 기반을 제공하는 지상 관측 네트워크는 크게 지상 관측소를 기반으로 하는 지표 대기 감시와 라디오존데(기상관측용 풍선)를 활용한 고층 대기(연직 구조) 관측으로 이루어진다. 해당 자료는 현장관측(in-situ) 방식에 기반한 대기의 직접관측으로 온도, 습도, 풍향, 풍속, 기압, 운량, 복사량 등의 기본적인 대기 역학 및 물리 변수를 높은 정확도로 산출한다.
- 지상관측소 및 라디오존데의 상시 운영 여건은 국가별 지역별로 크게 차이가 있으며, 따라서 자료의 산출 빈도 및 공간적인 밀도도 지역에 따라서 큰 차이가 있다. 그림 3.2는 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization)에 등록된 라디오존데 및 지상 기상관측소의 공간분포를 나타낸다. 한국의 경우는 높은 밀도의 기상관측 네트워크를 보유하고 있어, 지상에서 발생하는 기상현상을 중규모(~100km) 수준까지 분석할 수 있는 자료를 생산한다.



그림 3.2. 북태평양 및 주변 지역의 (왼쪽) 라디오존데 및 (오른쪽) 지상관측 네트워크 분포. 이해를 돕기 위해 여름철 북태평양고기압의 일반적인 위치 및 수증기 수송 경로를 표시함

- 그러나 한반도 영역보다 큰 종관배경에 영향을 받는 기상 현상의 예측 또는 1일 이상의 예측 선행시간을 확보하기 위해서는 해상을 포함한 한반도 주변지역의 관측정보가 중요하며 한반도에 영향을 미치는 지역은 계절에 따라 차이가 있다. 편서풍 및 남서풍의 영향을 크게 받는 한반도 여름철 위험기상은 중국, 서해, 동중국해 및 북서태평양에서 발달하는 현상에 크게 영향을 받으므로 이러한 현상들의 감시와 정확한 예측을 위해서는 해당 지역의 기상 감시가 필요하다.

- 상층 대기의 상태 변수(온도, 습도, 풍향, 풍속, 기압)를 제공하는 라디오존데 관측은 한국에서는 6시간 또는 12시간 간격으로 운영되며 한반도 날씨 예측성에 영향을 주는 중국에서는 대부분 12시간 간격으로 관측이 이루어진다. 이러한 상시 상층 대기 관측은 일반적으로 육지에서만 이루어지기 때문에 한반도 여름철 위험기상에 영향을 미치는 북서태평양에서는 그 관측 빈도가 매우 낮으며 (그림 3.2) 12시간 단위의 낮은 관측 빈도로 인해, 상시 관측만으로는 해상에서 발달하여 한반도 위험기상에 영향을 미치는 다중규모(multi-scale) 현상들의 정확한 정보를 얻는데 한계가 있다.

- 기상 관측소에서 이루어지는 상시 기상관측 또한 지표 대기의 감시에 국한되는 경우가 대부분으로, 해당 정보만으로는 한반도 위험기상 발달에 큰 영향을 미치는 수증기 수송 및 중규모 수렴 현상의 3차원적인 구조를 파악하는데 어려움이 따른다.

#### ○ 지상 원격 관측 장비

- 지상에서 이루어지는 지표 대기의 직접 관측 이외에 대기의 광학 특성을 활용하여 원격으로 대기의 수증, 바람장, 온도, 습도를 산출하는 장비가 개발되어 활용되고 있다. 대기 중에 존재하는 물질의 광학 특성과 물리적인 대기 변수의 상관성을 이용하여 추정하는 방식으로 직접 관측보다 정확도는 다소 낮으나 관측 범위가 넓고 지상관측만으로는 얻기 어려운 3차원 대기 정보를 산출할 수 있어 기상 예측에 중요한 관측 장비로 자리 잡고 있다. 대표적으로 대기 중의 수증과 바람장 정보를 3차원으로 산출하는 레이더와 윈드 프로파일러 장비가 중규모 관측 네트워크로 상시 운영되고 있다.

- 이밖에 미국에서는 중규모 대류계 발달 과정의 특별관측을 위해 고해상도 관측이 가능한 이동형 레이더 장비(NOAA X-band mobile 레이더 등)를 운영하고 있으며 다른 중규모 관측 장비와 함께 중규모 대류계 발달을 포함한 위험기상 연구에 활발히 활용되고 있다.

- 중규모 전선 및 대류계와 같은 여름철 위험기상의 이해 및 예측에는 대기 하층

온도, 수증기, 하층수렴(바람장) 정보가 매우 중요하다. 이를 위해서 대기하층의 연직구조 파악에 특화된 다음과 같은 원격장비들이 개발되어 운영되고 있다.

- 도플러 라이다: 레이저에 대한 대기 중 미립자(에어로졸 등)의 후방 산란 및 도플러 효과를 활용하여 연직적인 바람장 정보를 산출. 기상 상황 및 레이저에 강도에 따라서 대류권 하층 및 중층까지 바람장 프로파일 측정 가능.
- 대기 복사 분광계: 간섭계(interferometer)를 활용하여 대기에서 방출되는 복사를 파장별 스펙트럼으로 분리, 대기 하층의 온도 및 습도 프로파일을 산출.
- 마이크로파 라디오미터: 하향 마이크로파(약 22~60 GHz)를 다수의 채널(약 10~20 개)로 분리하여 대기의 하층 온도 및 습도 프로파일을 산출. 복사 분광계보다 연직해상도가 낮으나 구름 내 정보 산출이 가능하여 흐린 날에도 측정이 가능하며 복사 분광계와 상호 보완적으로 활용됨.
- 차등흡수라이다(Differential Absorption Lidar, DIAL): 서로 다른 두 파장대의 레이저에 대한 대기 중 물질의 후방 산란 차이를 이용하여 해당 물질의 공간 분포를 산출. 대기 가스상 물질 또는 수증기의 공간분포 측정을 위해 활용됨.



그림 3.3. 미국 해양대기청(NOAA) 이동형 하층 대기 프로파일링 시스템(CLAMPS, Collaborative Lower Atmospheric Mobile Profiling System) 측정장비. (왼쪽) 바람장 연직구조 관측을 위한 도플러 라이다. (가운데) 온도 및 습도 연직 관측을 위한 대기 복사 분광계. (오른쪽) 구름 조건에서도 온도 및 습도 관측이 가능한 마이크로파 라디오미터

- 하층 대기의 연직 프로파일 자료 산출을 위해 다양한 지상 원격 관측 장비가 개발되어 활용되고 있으나, 운영면에서는 아직 초기 단계로 연구를 중심으로 하는 특별관측에 주로 활용되고 있다. 또한 타 기상 관측장비에 비해 상대적으로 고가이며 높은 운영 기술 수준을 필요로 하기 때문에 여름철 위험기상의 감시를 위한 현업운영을 위해서는 해당 장비를 효율적으로 운영할 수 있는 전문가 양성도 함께 필요한 실정이다.

○ 항공 기상 관측 장비

- 지상관측이 어려운 지역 또는 해상 지역에서의 기상관측자료를 얻기 위해서 항공 관측이 활용된다. 현업에 활용되는 기본적인 항공관측은 WMO의 AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay)를 통해서 민간 항공기 운항 시 항공기에서 측정된 온도, 습도, 기압, 풍향, 풍속 정보를 기상 관측 네트워크에 공유하는 방식으로 진행되며 해당 관측은 라디오존데와 함께 중요한 상층대기 정보를 제공한다.
- 그러나 AMDAR를 통해서 측정되는 정보는 민간 항공기의 운항 경로에 크게 좌우되며 대기의 연직 프로파일은 항공기의 이착륙이 이루어지는 공항에서만 산출되므로 해당 정보의 공간적인 분포는 매우 제한적이다. 한반도 여름철 기상에 큰 영향을 미치는 북태평양고기압 지역은 민간 항공기의 운항이 제한적으로 이루어지고 있어 해당 정보의 산출 또한 매우 부족하다.
- 이러한 한계점을 극복하기 위해서 기상 관측용 항공기를 이용한 해상 지역의 특별관측이 이루어진다. 기상 관측용 항공기는 항공기의 경로를 따라서 직접 측정하는 온도, 습도, 기압, 바람장의 정보 이외에도 DIAL, 라디오미터, 낙하존데(dropsonde), GNSS RO 등의 장비를 활용하여 대기의 연직 온도, 습도 프로파일을 산출한다.
- 낙하존데는 항공기를 이용한 관측에서 가장 자주 활용되는 관측기법으로 기존의 라디오존데와 같이 온도, 습도, 기압, 위치정보를 원격으로 전송하는 센서를 항공기에서 투하한 후 낙하산을 이용하여 천천히 하강시키며 대기 상태의 연직 정보를 얻는 방법이다(그림 3.4). 해당 방법은 동시에 넓은 지역에서 다수의 대기 프로파일을 산출할 수 있어 태풍, 한랭전선, 대기전 연구 등에 많이 활용된다.

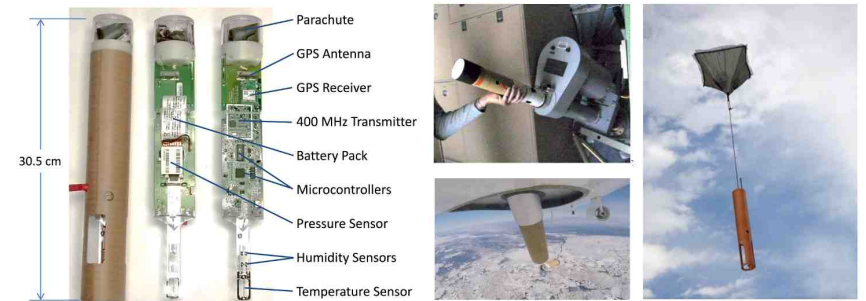


그림 3.4. 낙하존데(dropsonde) 구조 및 항공기를 이용한 관측 예시(Vömel et al. 2016)



## ○ 선박 기상 관측 장비

- 관측이 부족한 해상지역에서는 선박과 부이(buoy)를 활용한 대기 관측이 이루어진다. 일반적으로 자발적 관측선(Voluntary Observing Ship, VOS) 제도를 통해서 민간 선박이 운항 경로에 따른 대기 및 해양 표층 관측 정보를 공유하며, 추가로 자동화된 선박 기상관측 프로그램 (Automated Shipboard Aerological Programme, ASAP)을 통해 라디오존데를 이용한 대기 상층정보를 생산하고 이러한 자료는 현업에서 활용되는 GTS를 통해 공유된다.
- 해상에서 대기 연직 프로파일 정보를 제공하는 ASAP의 경우 세계 기상 및 기후 감시프로그램 및 날씨의 현업예보에 중요한 정보를 제공하나, 대부분의 관측이 대서양과 북서태평양 지역에 국한되어 있어 아열대 서태평양 지역의 영향을 크게 받는 한반도 여름 위험기상의 예측에 기여하는 바는 크지 않은 것으로 판단된다.
- 상시 선박 관측프로그램(VOS, ASAP 등)은 제한적인 지역에서만 운영되며 관측 밀도가 높지 않기 때문에, 원하는 위치의 정보를 높은 밀도로 얻기 위해서 선박을 이용한 특별관측이 수행된다. 특별관측은 일반적으로 관측이 부족한 지역의 대기 및 해양 상호작용 연구를 위해서 수행되며 표층대기의 온도, 습도, 기압 이외에도 선상에서 비양하는 라디오존데를 통해 해당 대기 변수들의 프로파일링이 해양 관측과 함께 이루어진다.
- 미국의 DYNAMO(Dynamics of the Madden-Julian Oscillation) 선박 관측 프로그램과 한국 해양과학원의 이사부호를 이용한 “북서태평양 해양-대기 상호작용 및 태풍 급강화 현상 연구” 등이 대표적인 사례이다.

## ○ 성과 및 한계

- 상시 지상 관측 네트워크는 기상 감시 및 예측을 위한 기반을 제공하나 한반도 여름철 위험기상에 영향을 미치는 아열대 북서태평양 지역의 연직 관측은 매우 부족한 실정이다.
- 지상 원격 관측 장비를 활용하여 관측소 기반의 하층대기 온도, 습도, 바람장 프로파일링이 가능하나 전문적인 연구 인력을 필요로 하는 장비의 특성상 현업 운영에는 한계가 존재한다.
- 항공기 및 선박에 기반한 낙하존데, 라디오존데 및 원격 관측을 통해서 해양(아열대 서태평양) 지역의 대기 관측 연구가 일부 진행되었으나, 높은 관측 비용으로 인해서 특별관측 위주의 연구만 수행되었다.

## □ 기존 동아시아-북서태평양 특별관측 프로그램

## ○ The THORPEX Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC)

- T-PARC 캠페인은 태평양 지역에서 발생하는 위험기상 현상(태풍)의 연구 및 예측성 향상을 위해 2008년 동중국해 및 아열대 서태평양 지역에서 수행된 관측 프로그램으로 항공기를 이용한 낙하존데 관측이 중심을 이룬다. 미국, 대만, 일본, 독일의 Falcon 20 (DLR), WC-130J (USAF), P-3 (NRL), ASTRA (DOTSTAR)와 같은 다수의 항공기가 관측에 참여하였다.
- 태풍 주변에 다수의 낙하존데를 투여하여 태풍의 발달과 관련된 위험기상 현상의 이해 및 예측성에 기여하였으며, 국제협력을 통한 관측 공백 지역의 감시 및 관측 자료 공유를 통한 위험기상 현상의 예측성 향상에 기여한 국제공동 관측 프로그램으로 평가되고 있다.

## ○ Asian Monsoon Year (AMY)

- 몬순지역의 강수 및 수자원 이해를 위한 관측 캠페인으로 GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment) - AsiaPEX (Asian Precipitation Experiment) 와 이어지는 일본의 몬순 강수 관측 연구이다. 2007~2012년의 기간 동안 진행되었으며 2008~2010년에 동남아시아의 넓은 지역에 대한 집중관측을 수행하고 해당 기간 동안 특별 재분석자료를 생산하여 대기 현상 분석을 수행하였다.
- 아시아 지역의 강수 및 수자원 연구에 기여한 특별관측 프로그램으로 평가되고 있으며, 계절내 및 계절(subseasonal to seasonal, S2S) 및 지역규모의 몬순 강수 관측 및 모델링 연구에 중점을 둔 AMY-II가 2025~2028년을 목표로 계획되고 있다. 계획중인 AMY-II는 일본 지역내 강수 연구에 더 중심을 두고 있다.

## ○ Prediction of rainfall campaign in the Pacific (PRECIP)

- PRECIP은 미국 NSF(National Science Foundation)의 지원을 중심으로, 대만과 일본에서 2022년 여름부터 진행된 태평양지역 강수 연구 국제 캠페인이다. 대만에 배치된 다수의 레이더 관측과, 3대의 항공기(대만 ASTRA, 미국 NOAA P-3, 한국 King-Air) 관측 및 전구/중규모 모델링 연구로 구성되어 있다.
- 극한 강우를 유발하는 다중규모(multi-scale) 현상의 열/역학적 특성 및 미세물리 과정을 연구하는 데 중점을 두고 있으며, 대만 지역을 중심으로 관측이 이루어지고 있는 한계는 있으나 다양한 기상 현상과 그 발생과정에 대한 연구를 통해 강수 예측성을 향상시키고 강수변화에 대한 이해를 높일 것으로 판단되고 있다.

### 3.2 핵심요소를 고려하여 북태평양고기압 구조파악을 위한 관측전략 제시

#### 3.2.1. 위성 원격 관측 자료 개발 및 활용 전략

□ 북태평양고기압의 구조 파악을 위해 관측 자료 및 재분석 자료 등이 사용되고 있으나, 관측소 수의 부족, 재분석 자료의 불확실성 등으로 인해 북태평양고기압을 파악하는데 여전히 한계가 있다. 이에, 기존 관측 자료 사용의 한계점을 개선하기 위해 북태평양고기압 감시를 위한 위성 원격 관측 자료 활용을 제시하고자 한다.

##### ○ 위성 기본자료 (Level 2) 정확도 향상

- 북태평양고기압의 구조 및 변동성 파악을 위해 우리나라 정지궤도 기상위성인 천리안위성 2A호의 52개 기상산출물을 활용할 수 있다. 현재, 전체 기상산출물 중 31개의 산출물(북태평양고기압 관련 핵심 관측 요소인 대기온도/수증기/해수면온도/구름대 등 포함)은 목표 정확도에 부합하고 있으나, 세계 최고 수준의 기상위성의 정확도에 비해서는 낮은 성능을 보이고 있다.

- 그림 3.5는 북태평양고기압관련 주요 기상 요소별 세계 최고 수준(GOES-16/NOAA, MSG/SEVIRI SST data record/EUMETSAT 기준)의 위성의 산출 정확도와 GK-2A의 산출 정확도를 기반으로 작성된 것이다. 북태평양고기압 관측의 정확도를 향상시키기 위해 천리안위성 2A호의 Level 2 (L2) 자료 자체의 산출물 정확도를 개선이 이루어진다면 기존 관측 자료의 불확실성을 개선하고 보다 효과적인 북태평양고기압 감시/예측이 가능할 것으로 기대한다.

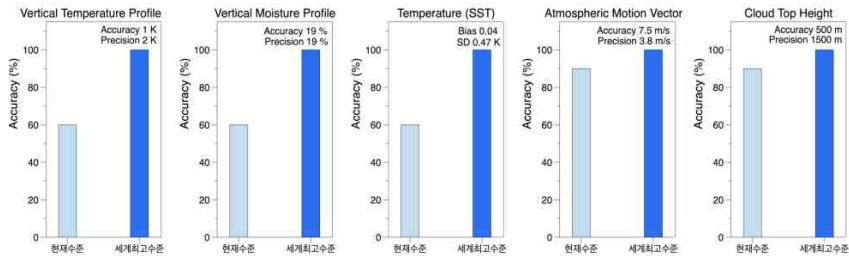


그림 3.5. GK-2A의 북태평양고기압 주요 기상요소 산출 정확도 비교 (출처: 차세대 기상·기후 관측위성 개발 사업 성능지표 보고서 2021. 기상청)

- 현재 우리나라의 기상위성 천리안위성 2A호에는 영상기(Imager)만 탑재가 되어있고, 탐측기(Sounder)가 없기 때문에 대기의 연직 온도 및 습도 프로파일을 정확하

게 파악하기 어렵다는 한계가 있다. 현재 우리나라는 천리안위성 2A호에 탑재된 기상영상기의 적외체널 복사회도를 이용하여 청천화소에서의 연직 온도 및 습도 프로파일을 1차원 변분법칙 방법으로 산출하고 있다. 복사전달모델 RTTOV의 등압면을 기반으로 0.005 hPa로부터 1,050 hPa까지 각 등압면에서의 온도를 온도 프로파일 (K)로, 각 등압면에서의 수증기를 습도 프로파일 혼합비 (g/kg) 및 상대습도 (%)로 산출하고 있기 때문에 정확한 연직 프로파일 계산에 어려움이 있다.

- 이를 위해 기존 산출 알고리즘에 인공지능 기술을 적용할 수 있다. 최근 인공지능 기술을 접목한 기상위성 산출 기법에 대한 연구가 다수 보고되고 있으며, 기존 산출방법에 비해 향상된 정확도를 보고하고 있다 (표 3.4).
- 더불어, 제시된 북태평양고기압 관련 핵심 관측요소 외에도 다른 요소와의 연관성 조사를 통해 현재 개별 산출물을 보조 변수로 활용 및 종합하여 북태평양고기압의 구조 및 변동성을 파악할 수 있는 북태평양고기압 활용 산출물 개발을 기대할 수 있다.

표 3.4. 인공지능 기술을 접목한 기상산출물 산출 방법

변수	개발 방법	참고문헌
연직 온도 프로파일	중국 FY-4A위성의 GIIRS(Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder)자료에 ANN(Artificial Neural Network) 기술을 적용하여 대기온도프로파일을 산출. 인공지능 기술을 접목한 결과, 위성 관측 및 복사 전달 모델에서 발생하는 오차의 감소 효과를 확인	Huang et al. (2021)
해수면 온도	다중 위성 및 지상 관측 자료 융합을 통해 개발되는 기존의 청천(Cloud-Free) 영역 해수면 온도 산출 기법과 다르게, 최초로 Aqua 위성에 탑재된 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)의 단일채널 자료에 기계학습 기법을 적용하여 청천 일 해수면온도 추정 방법을 개발	Sunder et al. (2020)
수증기/바람	대기운동벡터의 추적오차(tracking error)에 대한 불확실성을 개선하기 위해 RF(Random Forest) 기계학습 기법에 기반한 오차 특성화 방법이 개발. 고해상도 모델을 이용해 추적된 바람 오차의 특성이 적절함을 입증	Joaquim et al. (2020)
구름	인공지능 기술 적용을 통해 구름 탐지, 구름 광학두께 등의 구름 산출시 발생하는 주야간 불연속 문제를 개선할 수 있을 것으로 전망. 야간 가시체널 위성 영상을 활용하여 야간 구름 탐지 정확도가 향상되고, 각종 구름 특성의 복원 및 산출의 정확도 향상 가능 관련하여, 기계학습/딥러닝 기법을 적용하여 산출된 구름 산출물이 기존의 전통적 알고리즘 기법에 비해 정확도가 크게 향상됨이 다수의 연구를 통해 보고	Okamura et al. (2017), Hadizadeh et al. (2019), Goroooh et al. (2020), Mahajan and Fataniya (2020), Min et al. (2020), Wang et al. (2020)

○ 위성 기본자료를 활용한 준재분석자료(Level 3/Level 4) 개발

- 위성 기본자료는 제공 정보가 상이하므로 기상위성자료의 다양한 변수를 종합적으로 분석하기 위해서는 기존자료의 보정 및 격자화를 통해 새로운 통계자료인 Level 3 (L3) 자료의 개발이 필요하다.
- 또한, 기상위성자료 외에도 해외 극궤도위성자료, 지상관측자료, 재분석자료, 레이다 자료의 활용이 가능하므로, 이를 융합한 Level 4 (L4) 자료의 개발을 통해 북태평양고기압의 구조 및 변동성 파악에 활용할 수 있다.
- 뿐만 아니라 개선 및 새로 개발된 자료들을 동시에 비교하여 분석에 활용할 수 있는 모바일 웹 혹은 구현이 가능한 도구를 통하여 북태평양고기압 감시 및 예보 분석에 활용할 수 있다.
- 해외 주요 기관들의 L3/L4 자료 개발 동향
  - 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서는 미국, 일본, 유럽의 정지궤도 위성 관측 자료 (Infrared Imagery)와 미국, 유럽의 저궤도 위성 관측 자료 (Infrared SST data)를 융합하여 전구 해수면 온도 자료를 생산하고 있다 (그림 3.6, 그림 3.7) (센서/위성 정보: ABI/GOES-East and West, AHI/Himawari, AVHRR/MetOp, SEVIRI/Meteosat, VIIRS/SNPP).

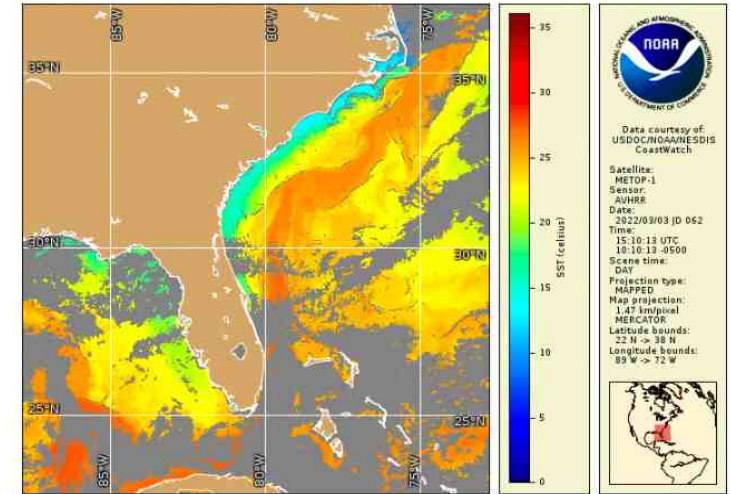


그림 3.6. 미국 NOAA AVHRR (MetOp-1/2) Level 2/3 자료

- 미국 위스콘신대학교의 SSEC(Space Science and Engineering Center)는 Real-Time U.S. Composite Satellite Imagery를 통해 정지궤도 기상위성의 실시간 자료를 시각화하여 제공하고 있으며, 시간 변화에 따른 연속 이미지(animation)를 제공하여 변수들의 시간에 따른 변화를 한눈에 확인할 수 있다 (그림 3.8)(<https://www.ssec.wisc.edu/data/geo/#/animation>).

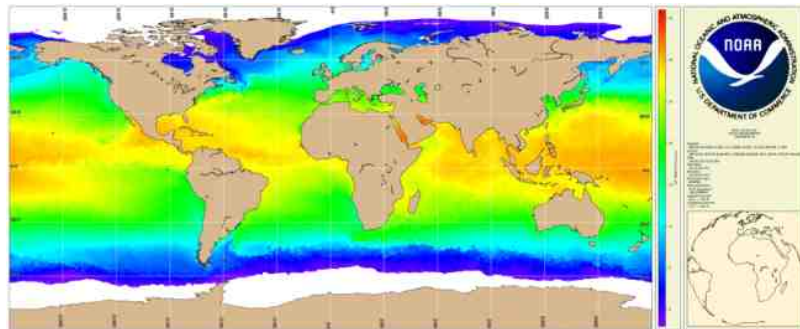


그림 3.7. 미국 NOAA GeO-Polar Blended Global Sea Surface Temperature Analysis (Level 4) 자료

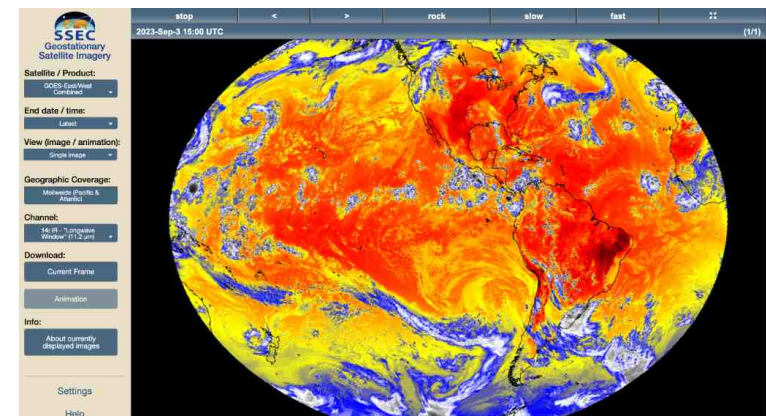


그림 3.8. 미국 Real-Time U.S. Composite Satellite Imagery

· 미국 CIRA(Cooperative Institute for Research in the Atmosphere)는 NOAA의 RAMMB(Regional and Mesoscale Meteorology Branch)와 NESDIS(National Environmental Satellite Data and Information Service)와 협업하여 GOES-16과 Himawari-8의 자료를 효율적으로 제공하기 위해 SLIDER(Satellite Loop Interactive Data Explorer in Real-time)를 개발하였다 (그림 3.9). 해당 페이지에서는 GOES-16과 Himawari-8 외에도 한국의 GK-2A, 유럽의 Meteosat-9/10, 미국의 JPSS와 같은 다른 정지궤도 위성의 자료 또한 함께 모니터링이 가능하며, 필요한 시간, 지역, 변수에 맞추어 overlay를 하여 여러 센서가 관측하는 변수를 함께 비교 분석이 가능하다 (<https://rammb-slider.cira.colostate.edu/>).

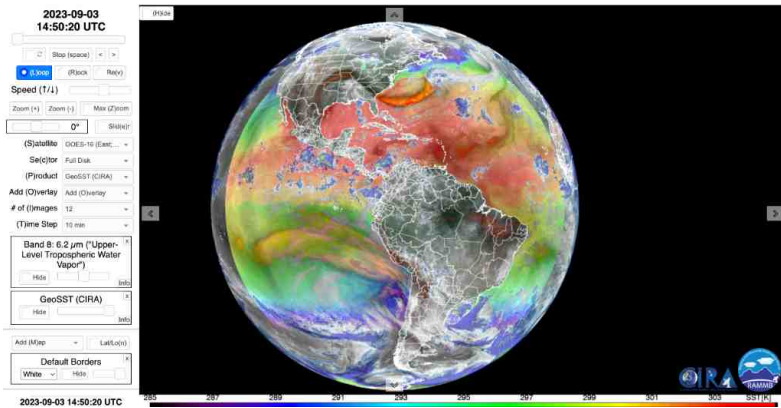
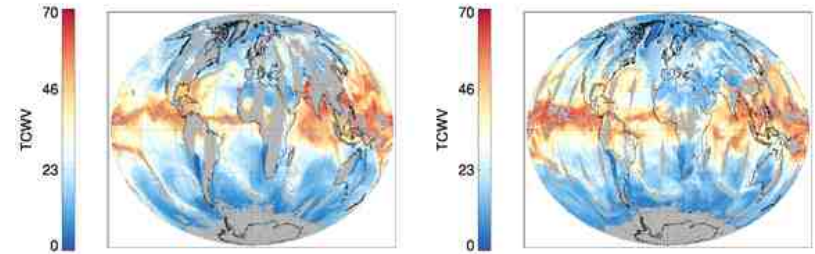


그림 3.9. 미국 SLIDER(Satellite Loop Interactive Data Explorer in Real-time)

· 유럽 EUMETSAT(The European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)은 Microwave 센서의 관측 자료(SSM/I, SSMIS, AMSR-E, TMI)와 near-infrared 센서의 관측 자료(MERIS, MODIS-Terra, OLCI)를 융합하여 Level 3 전구 TCWV(Total Column Water Vapor) 자료를 생산하고 있다 (그림 3.10).

MODIS와 MERIS 센서의 원격 관측 자료의 Level 2 TCWV 자료를 지상관측 ARM 관측 자료와 검증한 결과, 두 자료 모두 0.98의 상관계수로 높은 정확도를 보였다 (RMSD: MODIS-Terra 1.3 kg/m<sup>2</sup>, MERIS 1.8 kg/m<sup>2</sup>). OLCI 센서의 원격 관측 자료의 Level 2 TCWV 자료와 지상관측 GNSS 자료 간의 검증 결과 또한 상관계수는 0.98, RMSD는 1.3 kg/m<sup>2</sup>로 나타났다. 반면 MERIS, MODIS-Terra, OLCI 위성 원격 관측 자료를 융합하여 생산된 Level 3 TCWV 자료의 경우, 전

구 내 빙하가 없는 해양지역에서 정확도 검증을 수행한 결과, Merged Microwave and C3S 자료에 비해 0.0 kg/m<sup>2</sup>의 오차를 보였으며, AIRS와 ERA5는 0.75 kg/m<sup>2</sup>의 오차를 보였다. 그림 3.11은 융합자료와 (a) ERA5, (b) Merged Microwave (MMV), (c) C3S, (d) AIRS-AMSU ver.6, (e) GOME Evolution, (f) Infrared Microwave Sounding (IMS) 간의 편차 (bias) (왼쪽행)와 RMSD (오른쪽행)를 나타내고 있다.



Global maps of daily TCWV in units of kg/m<sup>2</sup> from the combined microwave and near-infrared imager data record: 1 July 2007 (left) and 1 July 2015 (right). Grey areas mark regions that are not observed by the satellites.

그림 3.10. 유럽 EUMETSAT Level 3 전구 TCWV(Total Column Water Vapor) 자료



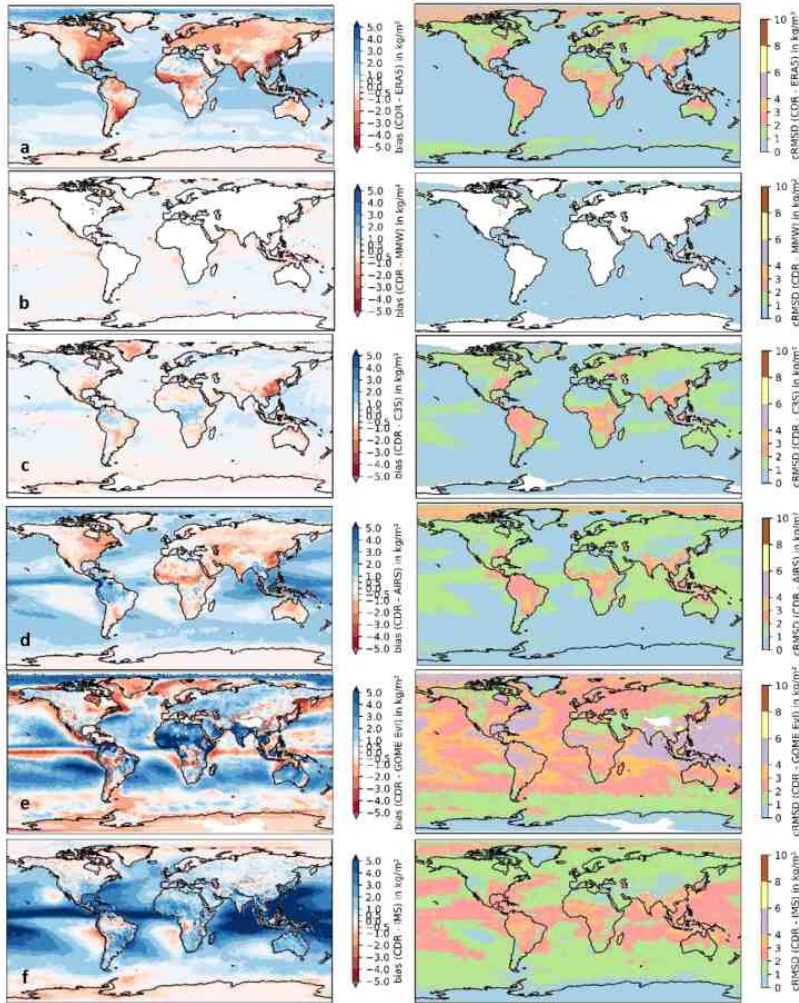


그림 3.11. 유럽 EUMETSAT Level 3 전구 TCWV(Total Column Water Vapor) 자료 정확도 검증

유럽 EUMETSAT은 극궤도 및 정지궤도 위성 자료를 기반으로 Level 3 Climate Data Record(CDR)를 생산하고 있다 (그림3.12). 극궤도 위성 NOAA와 MetOp의 AVHRR 관측 자료를 기반으로 Level 3 전구 운량, 운정 온도/압력/고도, 운상, 구름 광학두께, 구름 유효 반경 및 수액 경로 자료를 생산하고 있으며, 정지궤

도 위성 MSG(Meteosat Second Generation)에 탑재된 SEVIRI 관측 자료를 기반으로 Level 3 운량, 운정 온도/압력/고도 자료를 생산하고 있다.

생산된 Level 3 운량의 경우 (Cloud Fractional Cover) 목표 정확도는 평균 오차 10% (absolute) 이었으며, CALIPSO 위성 원격 관측자료에 비해 -10%, MODIS 위성 원격 관측자료에 비해 -10~-20%, 지상관측자료에 비해 3.6%의 평균 오차를 보이고 있다. 운정고도의 경우, 목표 정확도는 평균 오차 1,200m 기준, CALIPSO 위성 원격관측자료와 -2.661m 평균 오차를 보이고 있고, 운정압력의 경우 110hPa 평균 오차 목표 대비 MODIS 위성 원격 관측자료와 -40~-50hPa, ISCCP 자료와 -20-60hPa의 평균 오차를 보이고 있다.

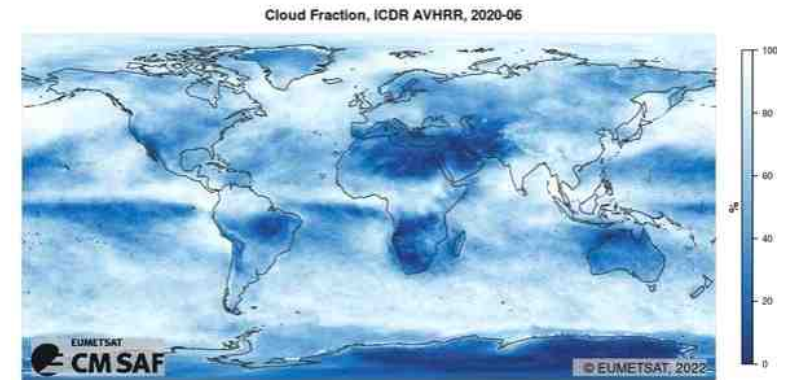


그림 3.12. 유럽 EUMETSAT Level 3 Climate Data Record(CDR) Cloud fraction 자료

NOAA-15, MetOp-A/B에 탑재된 AMSU-B(Advanced Microwave Humidity Sounding Unit B)와 NOAA-18, MetOp-A/B에 탑재된 MHS(Microwave Humidity Sounder) 관측 자료를 기반으로 Level 3 Microwave UTH(Upper Tropospheric Humidity) 자료를 생산하고 있다 (그림 3.13).

생산된 Level 3 자료의 경우, 일반적으로 ERA-Interim 자료에 비해 3% 높은 정확도(accuracy), 8% 높은 정밀도(precision), 0.1%/year 높은 안정도(stability)를 보이고 있다.

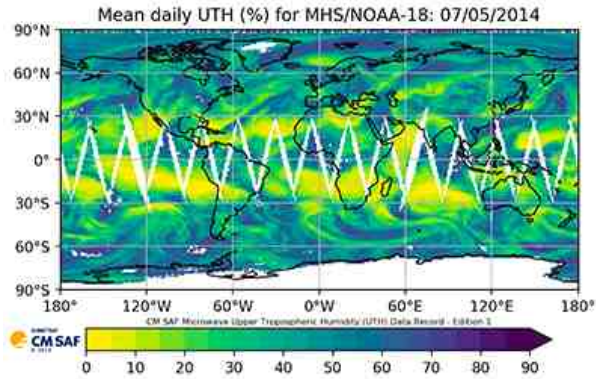


그림 3.13. 유럽 EUMETSAT Level 3 Microwave UTH(Upper Tropospheric Humidity) 자료

유럽 EUMETSAT은 사용자들이 수요에 맞추어 EUMETSAT의 위성 관측 자료를 시각화할 수 있는 웹 기반 온라인 지도 서비스 (OMS, Online Map Service)인 EUMETVIEW를 운영하고 있다 (그림 3.14). EUMETSAT 관할의 위성 자료들을 서로 “add layer“하여 함께 모니터링이 가능하며 원하는 “time step“을 조정하여 이미지의 영상화 기능을 제공하고 있다.

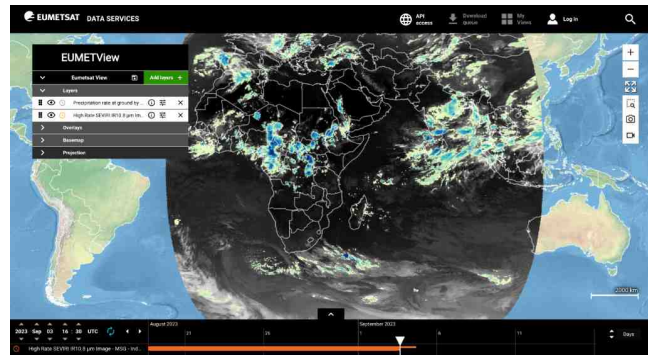


그림 3.14. 유럽 EUMETSAT Online Map Service인 EUMETVIEW (<https://view.eumetsat.int/>)

#### ○ 북태평양고기압 연구에의 기상위성자료의 활용성 제고

- 지금까지 많은 선행 연구들이 장기간 재분석자료를 활용하여 북태평양고기압 변

동의 원인 및 기작을 분석해왔으나 현재 제공되는 재분석자료들 간의 불확실성이 크게 나타남에 따라 이를 활용한 북태평양고기압의 변동 규명에도 잠재적인 불확실성이 존재할 것으로 예상된다.

- 기존 연구에서 북태평양고기압의 변화를 확인하기 위해 특정 지위고도 값(예: 5,880 gpm)이 활용되고 있으나, 재분석 자료의 불확실성으로 인해 재분석 자료들 간에 북태평양고기압 가장자리가 상이하게 나타난다. 또한, 재분석자료의 시간 해상도는 수 시간 이내로 실시간으로 변동하는 북태평양고기압의 구조를 파악하기에 한계가 있다고 판단된다.
- 또한, 운량, 강수량, 그리고 복사 수지의 경우 재분석자료가 위성 관측 결과와 큰 차이를 보이므로 정확도가 향상된 위성 기본자료의 활용을 통한 북태평양고기압에 기인하는 여름철 위험기상의 실시간 예보 및 영향 분석이 필요하다.
- 북태평양고기압과 관련되어 발생하는 위험기상 현상 및 그 영향범위를 분석하기 위해 기존 연구에서도 지상 관측자료 및 재분석 자료를 사용하여 왔으나, 기존 자료에서는 관측소 부족, 비교적 큰 시간해상도 등의 시공간적 한계를 지닌다. 장마/집중호우 등의 영향을 살펴보기 위해서는 구름의 발달 및 강수 과정, 수증기의 이동 등의 물리현상을 실시간으로 살펴보는 것이 중요하다.
- 위성 원격 자료는 아태지역과 한반도를 2분 간격으로 관측한다는 점에서 기존 자료보다 매우 큰 이점을 지닌다. 하지만 위성은 지구를 상부에서 관측하고 있어, 대기의 하부 또는 대기 및 구름 형성과 관련된 연직 프로파일에 대한 정보를 얻기 힘들다. 반면, 기상레이더의 경우, 구름이나 미세한 수증기 물방울에 반사 및 산란을 통해 돌아온 전파를 수신하여 구름 및 대기의 상태를 관측하기 때문에, 위성 원격 자료와 융합하여 활용한다면 대기 및 구름의 3차원적인 구조를 파악하는데 큰 도움이 될 것으로 전망된다. 따라서, 기상위성과 레이더자료를 함께 활용하여 북태평양고기압 변동의 원인 및 기작을 분석하고 이를 기반으로 실시간 감시를 할 수 있는 해석자료와 분석기법의 제시가 반드시 필요하다.
- 위성은 기본적으로 물리현상(구름과 강수 과정, 수증기 이동 등)을 수 분/수 시간 및 수 킬로미터 해상도로 탐지한다는 점에서 재분석자료에서는 볼 수 없는 다양한 대기 정보를 갖고 있다. 다만 우리나라 천리안위성의 위성 기본자료(L2) 정확도 개선이 선행되어야 하며, 이후 평균화 및 격자화를 통해 개발된 준재분석자료(L3/L4)를 통해 기존의 관측자료 및 재분석자료의 한계를 극복할 수 있다. 위성 원격탐사 자료는 북태평양고기압 연구와 감시의 목적에 맞게 기본자료 및 준재분석자료의 형태로 가공되어야 하며, 이를 통해 북태평양고기압의 구조 및 변동성,

북태평양고기압에 기인하는 여름철 위험기상에 대한 전반적인 이해도를 획기적으로 높일 수 있을 것이다.

- 위성자료의 정확도를 평가하고 개선하기 위해서는 타 자료와의 비교검증이 필요하다. 위성자료 검증에는 상시관측(낙하존데)과 특별관측(라디오존데 및 하층 대기 프로파일링 사이트)에서 얻어지는 관측 산출물을 활용할 수 있다. 지상관측 네트워크를 통해 얻어지는 관측 산출물은 관측 분포가 일정하지 않으므로 위성자료와의 콜로케이션(collocation)을 통해 두 자료의 위치보정을 수행한 후 검증을 진행한다. 현재 지상관측 네트워크는 북태평양고기압 지역의 관측이 부재하나 추후 북태평양고기압 지역의 집중관측 및 특별관측이 이루어진다면 위성자료의 정확도를 정량적으로 파악하고 개선하는데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.
- 또한 기상위성자료는 수치예보모델의 주요 입력 자료로 활용되므로 수치예보모델의 정확도 성능에도 큰 영향을 미친다. 따라서, 기상위성자료의 정확도 개선과 자료 생산은 자료동화예의 위성 활용도 향상에도 큰 기여를 할 것으로 예상된다.
- 본 연구에서는 기존 연구의 과학적 현안을 도출하였으며, 각 현안을 해결하기 위한 위성 원격탐사 자료의 활용 전략을 요약하였다.

표 3.5. 여름철 위험기상 및 북태평양고기압 관련 주요 연구들의 과학적 현안에 대한 위성 원격 자료의 활용 전략

연구 주제	과학적 현안	활용 전략
재분석자료에서의 북태평양고기압 불확실성	재분석자료(5,880 gpm) 경계 상이, 수시간내 변동성 파악 한계	위성 기본자료(L2) 기반 정밀 분석 및 단기간내 변동성 파악
북태평양고기압에 기인하는 여름철 위험기상 (장마/집중호우/폭염)	재분석자료 내 구름/강수/수증기 관련 물리과정 빈약	위성 기본자료 동시 비교 분석을 통한 위험기상 발생 물리과정 집중 분석
북태평양고기압이 여름철 한반도에 끼치는 영향	재분석자료(5,880 gpm) 경계 상이, 타 변수와의 동시 비교 분석 불가	위성 기본자료 및 준재분석자료(Level 3/Level 4) 자료 기반 모니터링
북태평양고기압의 발달 및 유지 메커니즘 (대기-해양 상호작용)	재분석자료(5,880 gpm) 경계 상이, 수시간내 변동성 파악 한계	위성 기본자료 및 준재분석자료 기반 모니터링
자료동화예의 위성자료 활용 및 정확도 향상	입력자료에 따른 재분석자료의 불확실성 존재	위성 관측자료의 정확도 향상을 통한 수치모델링 정확도 향상

### 3.2.2. 북태평양고기압 이해 및 위성 자료 개선을 위한 관측 전략

□ 북태평양고기압 지역은 높은 정확도로 대기분석 및 예측의 기반이 되는 직접관측의 밀도가 매우 낮아 다양한 분석 및 위성자료가 존재함에도 예측 불확실성이 높은 지역이다. 다음과 같은 북태평양고기압 지역의 여름철 상시 및 특별관측 수행을 통해 여름철 한반도 위험기상 발달에 영향을 미치는 대기 하층의 온도 및 수증기 수송구조를 파악하고, 위성 원격 자료 개선을 위한 기반 정보를 구축하는 방안을 제시하고자 한다.

#### ○ 낙하존데를 이용한 여름철 상시 관측

- 직접 관측이 부족한 북서태평양(북태평양고기압 경계) 지역에 대한 여름철 낙하존데 관측을 통해 해당 지역의 대기 온도, 습도, 기압, 바람장 정보를 높은 연직 해상도로 산출할 수 있다. 해당 자료는 1) 북태평양고기압 특성 이해를 위한 분석 연구, 2) 모델 자료동화를 통한 북태평양고기압 예측성 향상, 3) 북태평양고기압 감시 위성 자료 개선에 활용될 수 있다.

- 낙하존데 상시관측은 북태평양고기압의 활동성 및 한반도 영향이 큰 6~8월의 기간 동안 진행하며, 항공기 운영 및 낙하존데 관측비용을 고려하여 주 1회, 20 지점 관측을 목표로 한다. 관측 지점은 변동성과 불확실성이 크며 한반도 위험기상 발달에 영향이 큰 북태평양고기압의 서쪽 경계를 대상으로 하며 한반도-필리핀-괌을 연결하는 경로에 대하여 관측을 수행하는 것이 효율적으로 판단된다. 참고로 임차를 통해 운영할 수 있는 낙하존데 관측이 가능한 항공기는 다음과 같다.

#### • 회사를 통한 임차 가능 기종(상시 관측용):

DAS G-IV (일본, 회사임차), ASTRA G-100 (대만, 회사임차)

#### ○ 북서태평양 특별관측 프로그램

- 한반도 장마 및 동아시아 지역의 여름 몬순 변동성에 미치는 북태평양고기압의 영향을 이해하기 위한 복합 관측 프로그램을 제시하고자 한다. 해당 관측 프로그램은 대기 중하층 온도, 습도, 바람장, 기압장의 연직구조를 충분히 산출하여 북태평양고기압 및 그 영향을 정량적으로 검증하고 이해하는 것을 목표로 하며 다음과 같은 다양한 연구 활동을 통해서 활성화 될 수 있다. 모든 활동이 여름기간 전체에 대해서 동시에 진행될 필요는 없으나, 한반도 위험기상 영향이 높은 1달의 기간 동안 특별관측을 진행하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.



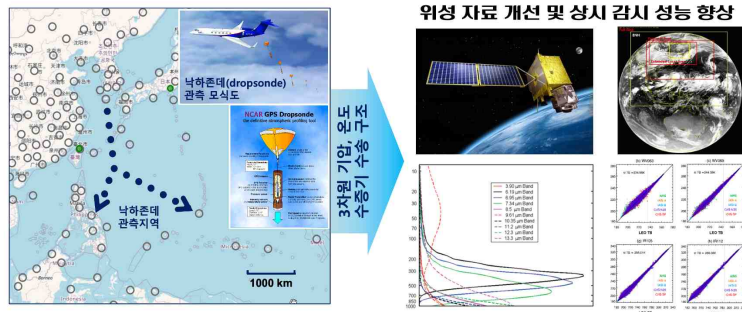


그림 3.15. 북서태평양 낙하존데 여름철 상시관측 예시 및 자료 활용 전략

- 국제 협력을 통한 상시 라디오존데 사이트 관측 빈도 증가 (일 4~8회)
- 하층 대기 온도, 습도, 바람장 프로파일링 슈퍼사이트 구축
- 연구용 선박을 활용한 선상 라디오존데 관측 (일 4~8회)
- 북서태평양 지역의 낙하존데 관측 (주 2~4회, 회당 ~20지점 관측)

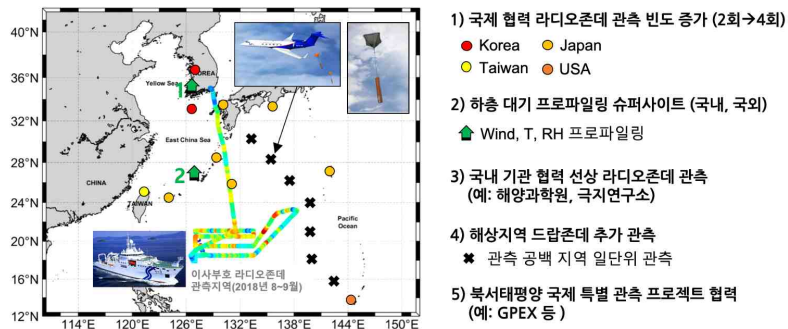


그림 3.16. 북태평양고기압 특별관측 프로그램 예시(이사부호 관측 배경그림: Sohn 2020)

- 하층 대기 프로파일링 슈퍼사이트는 높은 시간 해상도로 대기하층의 온도, 습도, 바람장 변화를 감지할 수 있으므로 중규모 현상에 영향을 미치는 대기 상태의 변화를 연구할 수 있는 장점이 있으며 해당 사이트의 운영을 통해 하층 관측에 중요한 기상기술을 습득할 수 있는 장점이 있다. 하층 대기 프로파일링 사이트는 이동형과 설치형의 다양한 형태로 구축할 수 있으며 (그림 3.17), 특별관측을 위한 거점으로 활용하거나, 레이더와 같은 다양한 장비와 조합하여 활용할 수 있다. 한반도 거점 관측소와 같이 유지 및 관리가 쉬운 경우는 미국 국립대기과학연구소

(NCAR) 또는 에너지국(DOE)과 같이 고정형으로 설치하는 것이 다양한 활용에 유리하며, 여름 관측을 위해 국외에 설치하는 경우 미국 해양대기청(NOAA)에서 운영하는 이동형 장비의 활용이 효율적일 것으로 판단된다.



그림 3.17. 하층 대기 프로파일링 슈퍼사이트 구축 형태의 예시: (왼쪽) 미국 해양대기청(NOAA)의 이동형 프로파일링 사이트 Collaborative Lower Atmospheric Mobile Profiling System, (가운데) 미국 국립대기과학연구소(NCAR) Integrated Sounding System, (오른쪽) DOE의 Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Mobile Facility.

○ 국제 협력을 통한 북서태평양 관측 연구 활성화

- 북태평양고기압의 변동성은 여름철 동아시아 몬순과 깊은 관계가 있기 때문에 중국, 대만, 일본 등 주변 국가의 날씨 및 위험기상 연구에 중요하며, 해당 국가들 또한 다양한 관측연구를 진행하고 있기 때문에 국제협력 활성화를 통해 복합적인 관측자료의 확보가 가능하다.
- 추가로 북서태평양은 열대성 폭풍 및 대류활동이 활발한 지역으로 국제적으로 많은 관심을 받고 있어, 직접적으로 날씨의 영향을 받지 않은 유럽 및 미국의 관측 연구활동도 활발하다. T-PARC 관측 연구의 경우 낙하존데 및 원격 프로파일링 장비를 탑재한 독일의 기상관측용 항공기가 참여하였고, PRECIP 2022의 경우도 대만의 기상 관측 항공기 이외에 미국 NOAA의 기상 항공기 및 다수의 레이더 관측 협력이 수행되고 있다.
- 항공기를 이용한 낙하존데 및 기상관측은 높은 기술을 필요로 하고 관측 비용이 높아 특별관측 연구 계획 시 국제협력 활성화를 통한 공동 관측 및 자료 공유가 효율적인 방안으로 판단된다.
- 공동 연구를 통해 도입이 가능한 기종(공동 연구용):  
NCAR G-V (미국, 공동연구), NOAA Global Hawk (미국), NOAA P-3 (미국), USAF WC-130J (미국 공군)



## 4. 기후위기 시대에 적합한 기상정책 마련을 위한 수요조사 및 시사점 제시



- 4.1. 북태평양고기압에 대한 이해 및 예측성 향상을 위한 수요조사 및 시사점
- 4.2. 북태평양고기압에 대한 이해 및 예측성 향상을 위한 국외 전문가 자문
- 4.3 시사점 및 추진전략

## 4 기후위기 시대에 적합한 기상정책 마련을 위한 수요조사 및 시사점 제시

### 4.1 북태평양고기압에 대한 이해 및 예측성 향상을 위한 수요조사 및 시사점

- 북태평양고기압에 기인하는 여름철 위험기상 관련 현황 조사분석에서 북태평양고기압 자체에 초점을 둔 수축과 확장을 포함한 변동성에 대한 역학과정 연구의 필요성과 북태평양고기압 관련 악기상에 대한 영향 연구, 기상예보를 위한 모델링 연구 및 현업화에 적용을 위한 예측관련 연구 그리고 기후변화시대의 필요에 맞는 북태평양고기압과 한반도 악기상 관련 미래변화에 대한 연구의 필요성을 도출함.
- 북태평양고기압 구조 파악을 위해 관측으로 얻을 수 있는 핵심요소 조사를 통해 낙하존데 및 기상 위성을 활용한 북태평양고기압 모니터링의 필요성과 이를 위한 국제공동 집중관측 캠페인의 필요성을 도출함. 또한 모니터링 사업에서 수집된 관측에 기반한 자료동화 개선 연구는 위험기상 예보 한계 돌파에 중요한 역할을 할 것으로 필요 연구로 도출함.
- 북태평양고기압 관련 연구 및 관측 현황 조사분석을 통해 도출된 필요 연구들을 수집한 결과 4개의 전략과제와 13개의 세부과제를 선정함.

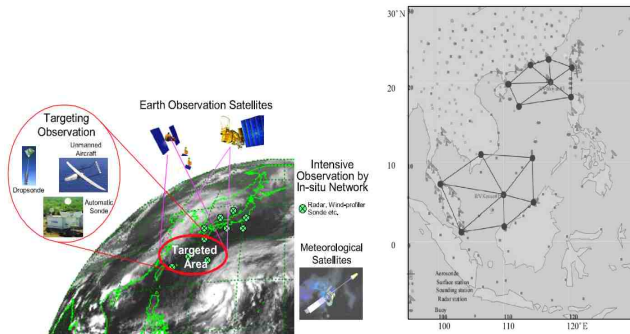
#### □ 북태평양고기압 연구를 위한 전략과제 및 세부과제

전략과제	세부과제
북태평양고기압 관측 전략	북태평양고기압 및 한반도 위험기상 국제 공동 집중 관측 캠페인
	낙하존데를 활용한 북태평양 상시 모니터링
	기상위성을 활용한 북태평양고기압 감시 연구
	북태평양고기압 관측에 기반한 자료동화 개선 연구
위험기상 예측 개선 전략	북태평양고기압과 관련된 한반도 여름철 폭염 메커니즘 규명 및 예측
	북태평양고기압 가장자리의 확장과 이동에 관한 모델링 연구
	북태평양고기압이 태풍 활동에 미치는 영향 연구
북태평양고기압 변동 원인 규명 전략	북태평양고기압의 수축과 확장에 대한 이론 연구
	단-중기 북태평양고기압 변동에 대한 역학 과정 연구
예측성 및 미래변화 연구 전략	북태평양고기압이 한반도 날씨 예보에 미치는 영향 연구
	딥러닝을 이용한 북태평양고기압 수축/확장 예측 연구
	북태평양고기압 변동에 대한 모델링 및 예측성 연구
	북태평양고기압의 미래 변화

#### □ 북태평양고기압 관측 전략 관련

##### 1) 북태평양고기압 집중관측 캠페인

제안과제 제목	북태평양고기압 및 한반도 위험기상 국제공동 집중관측 캠페인
제안자	이규원 (경북대학교)
연구필요성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 북태평양고기압의 발달 및 이로 인한 고기압 가장자리의 한반도 접근은 한반도 여름철 위험기상 발달에 직접적인 영향을 미침.</li> <li>• 북태평양고기압의 강도 및 가장자리에 대한 정보는 북태평양 지역, 북태평양-한반도 사이의 지역에서 관측자료의 부족으로 그 정확도가 매우 낮은 실정임.</li> <li>• 따라서 북태평양고기압의 진화와 한반도로 확장과정에 대한 실황 감시, 확장 메커니즘 이해, 예측 정확도 향상을 위하여 관측 부재 영역에 대한 상시관측 강화 및 집중관측이 요구됨.</li> <li>• 북태평양고기압과 한반도의 위험기상의 연관성을 파악하기 위해서는 북태평양고기압, 북태평양고기압 가장자리, 한반도로 연결되는 경로상에서 연속적인 관측망을 구축하여야 함.</li> <li>• 이러한 관측망은 전천후(청천/구름/강수), 대기 전층(대기하층/중층/상층), 다양한 기상변수(온도, 습도, 압력, 구름, 강수, 등)를 관측할 수 있는 다목적 관측망으로 구성하여야 함.</li> </ul>
연구개발 동향 및 규모/국내외 관련 연구	<p>1) 국내 연구:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- KORMEX(Korea Monsoon Experiment)/KEOP(Korea Enhanced Observing Period)/ProbeX(Predictability and Observation Experiment of Korea: WMO 프로그램과 연계한 장마, 위험기상과 연계된 역학적 특성 분석, 수치예보 영향 분석 등에 대한 실험.</li> <li>- ICE-POP2018(International Collaborative Experiments for Pyeongchang 2018 Olympic and Paralympic winter games): 평창 동계올림픽 지원을 위한 WMO RDP/FDP 프로그램. 국내 최초 국제공동 집중관측 캠페인.</li> <li>- 수도권 집중관측 프로그램(2021~2026): 수도권에서 발생하는 중규모대류계의 이해 및 발달과정 특성 분석을 위한 집중관측 프로그램으로 인천 및 수도권에 관측 인프라를 구축함.</li> </ul> <p>2) 국외 연구:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- THORPEX(The Observing System Research and Predictability Experiment)/TReC(THORPEX Regional Campaign): WMO 주도로 역학과정 및 예측 가능성, 관측 시스템, 자료동화 및 관측 전략, 사회경제적 응용을 목적으로 전구 및 지역 규모의 관측 캠페인 연구</li> <li>- SCSMEX(South China Sea Monsoon Experiment)/SCMREX(Southern China Monsoon Rainfall Experiment): 남중국해, 중국 남부에서 몬순 및 몬순 강수와 연관된 다년간 관측 연구.</li> </ul>

	 <p>&lt;Asia TReC의 태풍 관측 체계(Cho, 2005)&gt;</p> <p>&lt;SCSMEX의 집중관측 기간인 1998년 5월-8월의 현장관측 네트워크.&gt;</p>
<p><b>연구개발 목표 및 내용</b> (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)</p>	<p><b>연구개발 목표:</b> 북태평양과 한반도 사이에서 대기 전층, 전천후 기상관측을 위한 관측망 확보 및 국제공동 집중관측 캠페인 수행을 통한 북태평양고기압 진화 및 이에 따른 한반도 위험기상 발생 메커니즘 연구에 대한 기반 자료 확보.</p> <p><b>1. 1단계(5년):</b></p> <p>1) 연구개발 목표: 북태평양고기압 진화 및 한반도로 확장 감시를 위한 관측망 기반 구축 및 운영</p> <p>2) 연구개발 내용:</p> <p>(1) 국제 협력을 통한 전천후 상층대기 감시</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 라원존데 공동관측 및 활용을 위한 국제(한국, 일본, 대만, 미국 등) 협의</li> <li>- 국제협력을 통한 현업용 라원존데 시간 해상도 향상(일부경비 지원 협의)</li> <li>- 북태평양 전천후 관측 수퍼사이트(2 사이트) 구축</li> <li>- 연구용선박(RV)을 활용한 북태평양고기압 관측(상층, 원격탐사 등) 협의</li> <li>- RV에 기상관측 장비(원격탐사 장비) 구축 및 운영</li> <li>- 존재망 추가 확보를 위한 사이트 조사 및 국제협력을 통한 존재 사이트 구축</li> </ul> <p>(2) 한반도 집중호우 집중관측망 구축</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 한반도내 집중호우 관측을 위한 수퍼사이트(2 사이트) 구축 기반 연구</li> <li>- 수퍼사이트 지점, 원격탐사 관측 장비 구축</li> <li>- 집중관측자료 기반 집중호우 기초 분석</li> </ul> <p>(3) 전천후 수퍼사이트를 활용한 기상산출물 생성 원형 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 집중관측 자료에 대한 기초 품질관리</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지점, 원격탐사 자료를 활용한 기상산출물 생성기술 원형 개발</li> <li>- 집중관측자료 수집 플랫폼 설계 및 구축</li> </ul> <p><b>2. 2단계(4년):</b></p> <p>1) 연구개발 목표: 북태평양고기압과 한반도 위험기상의 상관성 연구를 위한 집중관측 및 관측 산출물 생산</p> <p>2) 연구개발 내용:</p> <p>(1) 국내외 협력을 통한 북태평양고기압-한반도 경로상 전천후 기상감시</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 국제협력을 통한 높은 시간해상도(4회/일) 현업용 존데 자료 확보 (8 사이트 이상)</li> <li>- 전천후 관측 수퍼사이트 관측전략 수립 및 관측 운영</li> <li>- RV에 기상관측 장비 구축 및 운영</li> <li>- 북태평양고기압 상층관측 강화를 위한 존재망 추가 확보 및 집중관측</li> </ul> <p>(2) 한반도 집중호우 집중관측 캠페인</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 한반도 집중호우 관측을 위한 계획 수립</li> <li>- 한반도내 집중호우 지역에 대한 여름철 집중관측 캠페인 (집중호우 관측 지역은 타 과제와 협의)</li> <li>- 집중관측자료 기반 집중호우 특성 분석</li> </ul> <p>(3) 집중관측자료를 활용한 기상산출물 생성</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 집중관측 자료 품질관리</li> <li>- 지점, 원격탐사 자료를 활용한 기상산출물 생성</li> <li>- 집중관측자료 수집 플랫폼 개선 및 운영</li> </ul> <p><b>3. 집중관측 캠페인 일정</b></p> <table border="1" data-bbox="1500 989 2139 1268"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="5">1단계</th> <th colspan="4">2단계</th> </tr> <tr> <th>1차년</th> <th>2차년</th> <th>3차년</th> <th>4차년</th> <th>5차년</th> <th>6차년</th> <th>7차년</th> <th>8차년</th> <th>9차년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>상층대기관측 (국외 현업용)</td> <td></td> <td></td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>상층대기관측 (국외 추가사이트)</td> <td></td> <td></td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>연구용선박(RV) 관측</td> <td></td> <td></td> <td>○</td> <td></td> <td>○</td> <td></td> <td>○</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>한반도 집중관측 캠페인 (한반도 존데 3 사이트 포함)</td> <td></td> <td></td> <td>○</td> <td></td> <td>○</td> <td></td> <td>○</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>전천후 수퍼사이트 (국외 수퍼사이트)</td> <td></td> <td></td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		1단계					2단계				1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	6차년	7차년	8차년	9차년	상층대기관측 (국외 현업용)			○	○	○	○	○			상층대기관측 (국외 추가사이트)			○	○	○	○	○			연구용선박(RV) 관측			○		○		○			한반도 집중관측 캠페인 (한반도 존데 3 사이트 포함)			○		○		○			전천후 수퍼사이트 (국외 수퍼사이트)			○	○	○	○	○		
	1단계					2단계																																																																
	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	6차년	7차년	8차년	9차년																																																													
상층대기관측 (국외 현업용)			○	○	○	○	○																																																															
상층대기관측 (국외 추가사이트)			○	○	○	○	○																																																															
연구용선박(RV) 관측			○		○		○																																																															
한반도 집중관측 캠페인 (한반도 존데 3 사이트 포함)			○		○		○																																																															
전천후 수퍼사이트 (국외 수퍼사이트)			○	○	○	○	○																																																															
<p><b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 북태평양고기압 진화 및 한반도 내 확장에 대한 연구를 위한 기본 관측 자료로 활용함</li> <li>- 전천후 관측 자료를 이용한 위성알고리즘 검증 및 재분석장 생성을 위한 자료동화 연산자 개발에 활용</li> <li>- 북태평양고기압과 한반도 경로상에 전천후 기상관측 자료 확보</li> <li>- 북태평양고기압의 진화와 한반도 위험기상의 상관성 분석을 위한 기본 자료</li> </ul>																																																																					

	<p>로 활용할 수 있음.</p> <p>- 한반도 내 집중호우에 대한 상세 연구를 위한 기초자료로 활용</p>																																																					
<p><b>예상되는 총 연구기간/ 연구비</b></p>	<p>- 총연구개발비: 400억/9년</p> <p>- 연차별 연구개발비</p> <p style="text-align: right;">(단위:억원)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="5">1단계</th> <th colspan="4">2단계</th> <th rowspan="2">합계</th> </tr> <tr> <th>1차년</th> <th>2차년</th> <th>3차년</th> <th>4차년</th> <th>5차년</th> <th>6차년</th> <th>7차년</th> <th>8차년</th> <th>9차년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>정부 지원금</td> <td>5</td> <td>76</td> <td>85</td> <td>70</td> <td>70</td> <td>26</td> <td>60</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>400</td> </tr> <tr> <td>민간</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td>5</td> <td>76</td> <td>85</td> <td>70</td> <td>70</td> <td>26</td> <td>60</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>400</td> </tr> </tbody> </table>		1단계					2단계				합계	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	6차년	7차년	8차년	9차년	정부 지원금	5	76	85	70	70	26	60	4	4	400	민간	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	합계	5	76	85	70	70	26	60	4	4	400
			1단계					2단계					합계																																									
		1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	6차년	7차년	8차년	9차년																																												
정부 지원금	5	76	85	70	70	26	60	4	4	400																																												
민간	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																												
합계	5	76	85	70	70	26	60	4	4	400																																												

2) 낙하존대를 활용한 북태평양 상시 모니터링

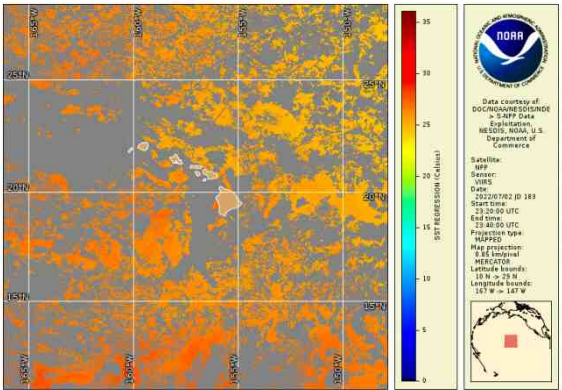
제안과제 제목	낙하존대(드랍존대)를 활용한 북태평양 상시 모니터링
<b>제안자</b>	김주완 (공주대학교 대기과학과)
<b>연구필요성</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압은 집중호우를 포함한 한반도 여름철 강수 발달 및 날씨 예측성에 큰 영향을 미치는 요소임.</li> <li>한반도로 확장된 북태평양고기압은 중위도 저기압과의 상호작용을 통해 한반도에 집중호우를 유발하거나, 그 세력이 강한 경우 여름철 폭염을 유발하기도 하므로 반복적으로 나타나는 위험기상의 원인으로 작용.</li> <li>또한 북태평양고기압의 구조는 중국 및 아열대 지역으로부터 수송되는 수증기의 경로를 결정하여 한반도의 여름철 강수량에 큰 영향을 미치며, 늦여름에는 북상하는 태풍의 경로를 지배하는 지향류를 형성하여 태풍 예보에도 중요한 요소로 작용함.</li> <li>이와 같은 북태평양고기압의 중요성에도 불구하고 북태평양고기압의 변동성이 높은 북서태평양(동중국해 및 필리핀해) 지역은 기상관측 밀도가 매우 낮은 관측 공백지역이며, 해당 지역의 자료정확도는 매우 낮은 수준임.</li> <li>북서태평양은 해양지역의 특성상 직접관측(지상 및 고층 관측) 자료가 적어 정확한 기상 분석 자료의 생성 및 위성 자료의 검보정이 어렵고, 이러한 관측 공백은 해당지역의 영향을 크게 받는 한반도 여름철 기상 예보 정확도를 제한하는 결정적인 요소임.</li> <li>북태평양고기압과 관련된 문순강수 이해를 위한 북서태평양 지역의 특별관측이 대만, 미국, 일본의 연구자들을 통해서 진행되었으나 아직 특별관측을 통한 사례이해에 국한되어 있음.</li> <li>특히 한반도의 정지궤도 기상위성(천리안 2A)의 발사 이후 위성 자료의 검보정을 위한 북서태평양 지역의 관측이 부재하여 위성 알고리즘의 성능향상이 제한적으로 이루어짐. 정지궤도 기상위성의 북서태평양 지역의 성능향상을 여름철에 국한된 기간만이라도 검증에 활용할 수 있는 상시 대기 프로파일링 자료의 산출이 시급함.</li> <li>여름철 위험기상 예측성 및 천리안 2A 위성의 여름철 기상 감시 성능향상을 위해서는 관측공백 문제가 큰 북서태평양(동중국해 및 필리핀해) 지역의 상시 프로파일링이 5년 이상 이루어져야 함. 분석 및 위성 자료의 개선을 위한 관측은 정확도가 가장 높은 항공기 기반 직접 관측 자료(낙하존대)로 이루어지는 것이 가장 효율적임.</li> </ul>
<b>연구개발 동향 및 규모/ 국내의 관련 연구</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>일본은 GAME (1995-2006), MAHASRI (2006-16), AsiaPEX (2019-)로 이어지는 대규모 프로젝트를 통해 동아시아 문순 강수 연구 및 집중관측 프로그램을 운영하고 관측기반의 강수 및 수자원 연구를 지원.</li> <li>미국(PRECIP)은 대만(TAHOPE)과 협력을 통해 동아시아 문순전선에 대한 현상연구 및 집중관측을 수행. 특히 2022년에는 대만 주변 지상 및 원격 관측 (레이다 10지점 이상, 라디오존데 10지점, 윈드프로파일러 3지점 등)과 동아시아지역의 항공 관측(항공기 3대)을 포함하는 대규모 국제 관측 프로그램을 2.5개월(5월말-8월초)에 걸쳐서 수행.</li> </ul>

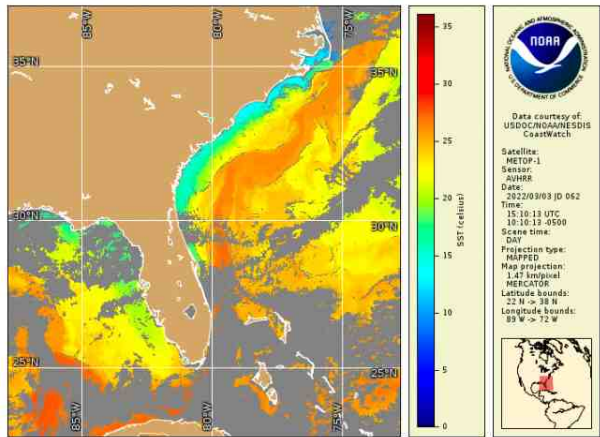
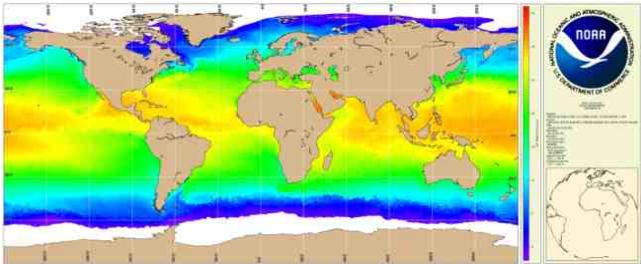
	<ul style="list-style-type: none"> <li>WCRP (World Climate Research Programme) 프로그램은 전지구 강수 예측성 향상을 다음과 같은 국제 관측, 분석, 예측성 연구를 수행             <ol style="list-style-type: none"> <li>YoP (Year of Precipitation) 캠페인 조직, 2) 강수 데이터베이스 구축, 3) 분석 및 모델링, 4) 국제 공동 연구 조직</li> </ol> </li> </ul>
<b>연구개발 목표 및 내용</b> (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)	<p><b>1단계 (1-5년차)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>북서태평양 대기 온도, 수증기, 바람장 프로파일 및 지상 기압 관측을 위한 항공기 낙하존데 관측 설계</li> <li>기상관측 항공기 기반의 낙하존데를 이용한 북서태평양(동중국해 및 필리핀해) 대기 프로파일링 (2-9차년 여름철 상시 관측수행, 6-8월 주1회)</li> <li>낙하존데 자료 품질검사 및 데이터베이스 구축</li> <li>집중관측 지원을 위한 항공기 낙하존데 관측 설계 및 집중관측 수행 [*집중관측이 계획된 기간(약 1개월, 3-5년)에는 집중관측 프로그램에 적합하게 관측 지점과 관측 빈도를 조정 - 집중관측 프로그램의 항공관측 부분을 담당]</li> <li>낙하존데 관측 및 동화자료 기반의 북태평양고기압 변동성 분석</li> </ul> <p><b>2단계 (6-9년차)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>낙하존데 상시관측 및 집중관측 수행</li> <li>낙하존데 동화시스템을 활용한 북태평양고기압 예측성 기여도 분석 (자료동화 및 모델링 팀 협력)</li> <li>낙하존데 관측 및 동화자료 기반의 북서태평양 수증기 수송 분석 및 위성 알고리즘 개선을 위한 기반자료 생산(위성 연구팀 협력)</li> </ul>
<b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>북서태평양 지역 기상자료 개선 및 한반도 강수 예보 불확실성 감소</li> <li>현업 모델의 북태평양고기압 변동성 및 강수 예측성 개선</li> <li>북태평양고기압의 날씨규모 변동성 이해</li> </ul>
<b>예상되는 총 연구기간/연구비</b>	9년/ 450억

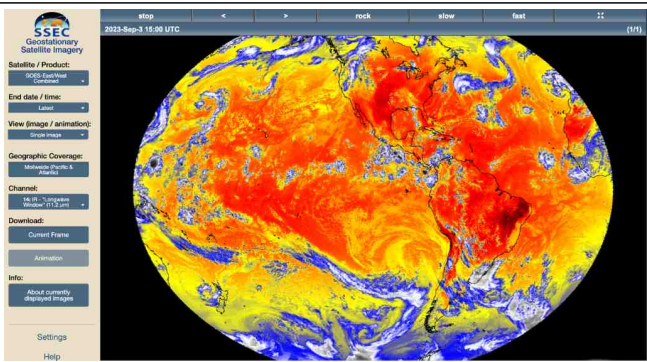
### 3) 위성자료 활용 연구

<b>제안과제 제목</b>	기상위성을 활용한 북태평양고기압 감시 연구
<b>제안자</b>	최용상 (이화여자대학교)
<b>연구필요성</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압의 구조 및 변동성의 이해가 한반도의 여름철 위험기상 현상의 예보에 필수적임에 따라 선행연구에서는 관측자료 및 재분석 자료를 사용하여 다양한 기후인자와 북태평양고기압 사이의 관련성을 파악하였으나 시간적으로 빠르게 변동하는 북태평양고기압의 구조 및 변동성 자체를 이해하기에는 여전히 한계가 있음.</li> <li>위성 원격 관측 자료는 시·공간적으로 고해상도의 품질로 제공되어 실시간으로 지구 전체를 모니터링 할 수 있으므로 전 세계의 정지궤도 기상위성, 극궤도 기상위성, 지구 관측 위성 등을 활용한다면 기존 관측자료의 한계를 극복하고 시간적으로 변동하는 북태평양고기압의 관측을 기대할 수 있음.</li> <li>기상위성 자료를 활용한 북태평양고기압 감시 연구는 다음 두 가지 측면의 연구 개발이 필요함.             <ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. 기상위성자료 정확도 개선 및 위성자료 생산 알고리즘 개발</b> <ol style="list-style-type: none"> <li><b>1.1 L2(Level 2) 자료 산출물 정확도 향상</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>기존의 북태평양고기압의 관측에 활용할 수 있는 대표적인 정지궤도 기상위성인 천리안위성 2A호의 L2 자료는 총 52개의 기상산출물 중 31개의 산출물(북태평양고기압 관련 핵심 관측요소인 대기온도/수증기/해수면온도/구름대 등 포함)이 목표정확도에 부합하나, 세계 최고 수준의 위성의 정확도에 비해서는 여전히 낮은 성능을 보이고 있으므로 L2 자료 자체의 산출물 정확도를 개선이 필요함.</li> <li>더불어, 북태평양고기압의 구조 및 변동성을 파악하기 위해서는 현재 개별 산출물을 보조 변수로 활용 및 종합한 북태평양고기압 활용 산출물 개발이 필요함.</li> </ul> </li> <li><b>1.2 L2 자료를 활용하여 L3(Level 3) 및 L4(Level 4)자료 개발</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>기존 L2 자료에서 제공하는 변수들은 알고리즘 별 제공하는 정보가 다르기 때문에 다양한 자료들과 종합적으로 살펴보기 위해서는 기존 L2 자료의 격자화를 통해 새로운 통계자료인 L3 자료의 개발이 필요함.</li> <li>또한, 기상위성자료 외에도 지상관측자료, 재분석 자료 혹은 레이더 자료의 사용이 가능하므로 이를 융합한 L4 자료의 개발을 통해 북태평양고기압을 종합적으로 감시/예측하는 것이 필요함.</li> </ul> </li> </ol> </li> <li><b>2. 기상위성자료 활용 및 자료동화 정확도 향상</b> <ol style="list-style-type: none"> <li><b>2.1 위성/레이더 자료를 활용한 북태평양고기압 변동성의 원인 및 기작 규명</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>선행 연구들은 대부분 장기간 자료의 사용이 가능한 재분석 자료를 활용하여 북태평양고기압 변동의 원인 및 기작을 제시하였으나 재분석 자료들 간에 불확실성이 존재함에 따라 이를 활용한 북태평양고기압의 변동 규명에도 불확실성이 크게 나타남.</li> <li>따라서, 위성/레이더 자료를 활용하여 북태평양고기압 변동의 원인 및 기작을 규명하고 이를 통해 북태평양고기압의 실시간 감시를 위한 가이드라인을 제공하는 것이 필요함.</li> </ul> </li> <li><b>2.2 자료동화에의 위성자료 활용 및 정확도 향상</b></li> </ol> </li> </ol> </li> </ul>



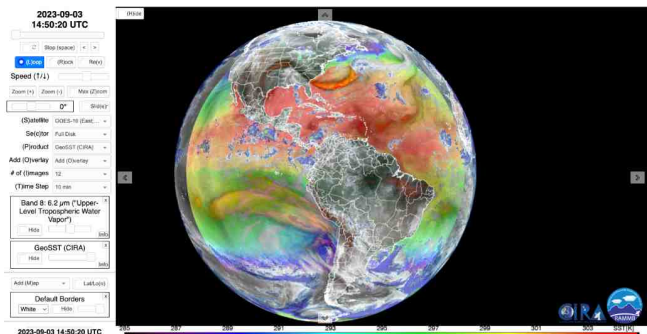
	<p>- 넓은 영역에 대해 모니터링이 가능한 위성자료는 수치예보모델의 주요한 입력 자료로 사용되어 자료동화에서 중요도가 매우 높으므로 자료동화에의 위성자료 활용 및 정확도의 개선이 필요함.</p>
<p>연구개발 동향 및 규모/ 국내의 관련 연구</p>	<p><b>1. 기상위성자료 정확도 개선 및 재분석 자료 생산 알고리즘 개발</b></p> <p><b>1.1. L2(Level 2) 자료 산출물 정확도 향상</b></p> <p>1) 연직온도프로파일</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Huang et al. (2021)은 중국의 FY-4A위성의 GIIRS(Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder)자료에 ANN(Artificial Neural Network) 기법을 통해 대기온도프로파일을 산출. 인공지능 기술을 접목한 결과 위성 관측 및 복사 전달 모델에서 발생하는 오차가 감소한 효과를 확인함.</li> </ul> <p>2) 해수면온도</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 정천(Cloud-Free) 해수면온도는 주로 다중 위성 및 지상 관측 자료와의 융합을 통해 개발됨. Sunder et al. (2020)은 최초로 Aqua위성에 탑재된 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)의 단일채널 자료에 기계학습 기법을 적용하여 정천 일 해수면온도 추정 방법을 개발함.</li> </ul> <p>3) 수증기/바람</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 대기운동벡터의 추적 오차(tracking error) 불확실성을 개선하기 RF와 같은 기계학습을 이용한 오차 특성화 방법이 개발되었고, 고해상도 모델을 이용해 추적된 바람 오차의 특성이 적절함을 입증함(Joaquim et al. 2020).</li> </ul> <p>4) 구름</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 인공지능 기술 적용을 통해 구름 탐지, 구름 광학두께 등 구름 산출물의 주야간 불연속 문제가 개선될 것으로 전망. 야간 가시채널 위성 영상으로 야간 구름 탐지 정확도가 향상되고, 각종 구름 특성의 복원이 가능함.</li> <li>- 기계학습/딥러닝 기법을 적용한 구름 산출물이 적통적 알고리즘 기법에 비해 정확도가 크게 향상되었음을 다시의 연구를 통해 보고됨(Okamura et al. 2017; Dröchner et al. 2018; Hadizadeh et al. 2019; Goroooh et al. 2020; Håkansson et al. 2020; Mahajan and Fataniya 2020; Min et al. 2020; Wang et al. 2020).</li> </ul> <p><b>1.2. L2 자료를 활용하여 L3(Level 3) 및 L4(Level 4)자료 개발</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 미국 NOAA VIIRS (SNPP) Level 3 (Temporal coverage: Near real time+3days)</li> </ul>
	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 미국 NOAA AVHRR (MetOp-1/2) Level 2/3 (Temporal coverage: Near real time+3days)</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- 미국 NOAA GeO-Polar Blended Global Sea Surface Temperature Analysis (Level 4)는 미국, 일본, 유럽의 정지궤도 위성 관측 자료 (Infrared Imagers) 와 미국, 유럽의 저궤도 위성 관측 자료 (Infrared SST data)를 융합하여 전구 해수면 온도 자료를 생산함.</li> </ul> <p>(센서/위성: ABI/GOES-East and West, AHI/Himawari, AVHRR/MetOp, SEVIRI/Meteosat, VIIRS/SNPP)</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- 미국 SatCORPS at NASA Langley Research Center in support of ACTIVATE의 ACTIVATE-MODIS-MERRA 2 merged CERES MODIS (satellite) and MERRA-2 (model) dataset (pixel-level geostationary cloud products)</li> <li>- 미국 Real-Time U.S. Composite Satellite Imagery는 위스콘신대학교의 SSEC(Space Science and Engineering Center)는 정지궤도 기상위성의 실시간 자료를 시각화하여 제공하고 있으며, 시간 변화에 따른 연속 이미지(animation)를 제공하여 변수들의 시간에 따른 변화를 한눈에 확인할 수 있음(<a href="https://www.ssec.wisc.edu/data/geo/#/animation">https://www.ssec.wisc.edu/data/geo/#/animation</a>).</li> </ul>
--	---

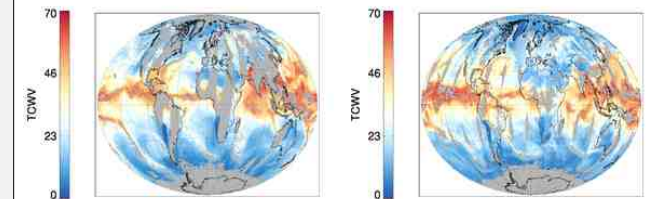


- 미국 SLIDER(Satellite Loop Interactive Data Explorer in Real-time)은 CIRA(Cooperative Institute for Research in the Atmosphere)가 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 RAMMB(Regional and Mesoscale Meteorology Branch)와 NESDIS(National Environmental Satellite Data and Information Service)와 협업하여 GOES-16과 Himawari-8의 자료를 효율적으로 활용할 수 있는 툴을 제공하고자 개발됨.

- 해당 페이지에서는 GOES-16과 Himawari-8 외에도 한국의 GK-2A, 유럽의 Meteosat-9/10, 미국의 JPSS와 같은 다른 정지궤도 위성의 자료 또한 함께 모니터링 할 수 있으며, 원하는 시간, 지역, 변수에 맞추어 overlay를 하여 여러 센서가 관측하는 변수를 함께 비교 및 분석할 수 있다는 장점이 있음 (<https://rammb-slider.cira.colostate.edu/>).

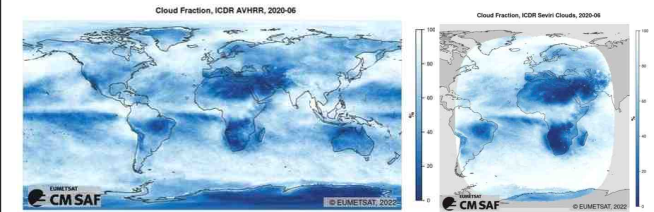


- 유럽 EUMETSAT은 Microwave 센서의 관측 자료(SSM/I, SSMIS, AMSR-E, TMI), near-infrared 센서의 관측 자료(MERIS, MODIS-Terra, OLCI)를 융합하여 Level 3 전구 TCWV(Total Column Water Vapor) 자료를 생산함.

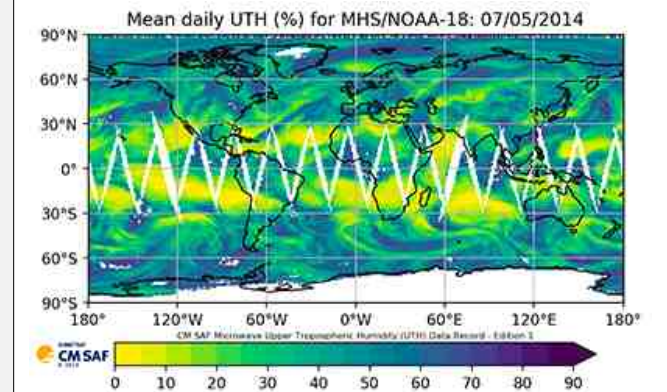


Global maps of daily TCWV in units of  $kg/m^2$  from the combined microwave and near-infrared imager data record: 1 July 2007 (left) and 1 July 2015 (right). Grey areas mark regions that are not observed by the satellites.

- 유럽 EUMETSAT은 극궤도 및 정지궤도 위성 자료를 기반으로 Level 3 Climate Data Record(CDR)을 생산. 극궤도 위성 NOAA와 MetOp의 AVHRR 관측 자료를 기반으로 Level 3 전구 운량, 운정 온도/압력/고도, 운상, 구름 광학두께, 구름 유효 반경 및 수액 경로 자료를 생산하고 있으며, 정지궤도 위성 MSG(Meteosat Second Generation)에 탑재된 SEVIRI 관측 자료를 기반으로 Level 3 운량, 운정 온도/압력/고도 자료를 생산하고 있음.

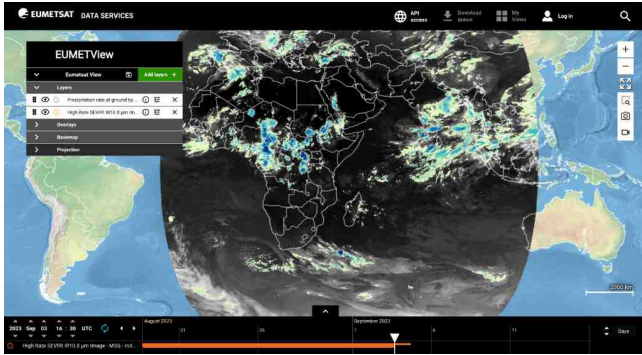


- 유럽 EUMETSAT은 NOAA-15, MetOp-A/B에 탑재된 AMSU-B(Advanced Microwave Humidity Sounding Unit B)와 NOAA-18, MetOp-A/B에 탑재된 MHS(Microwave Humidity Sounder) 관측 자료를 기반으로 Level 3 Microwave UTH(Upper Tropospheric Humidity) 자료 생산함.



- 유럽 EUMETSAT이 관리하는 EUMETVIEW는 사용자들이 수요에 맞추어 EUMETSAT의 위성 관측 자료를 시각화할 수 있는 웹 기반 온라인 지도 서

비스 (OMS, Online Map Service). EUMETSAT 관할의 위성 자료들을 서로 "add layer"하여 함께 모니터링이 가능하며 원하는 "time step"을 조정하여 이미지의 영상화 기능을 제공함(<https://view.eumetsat.int/>).



**2. 기상위성자료 활용 및 자료동화 정확도 향상**

**2.1. 위성/레이더 자료를 활용한 북태평양고기압 변동성의 원인 및 기작 규명**

- 대부분의 선행연구에서는 재분석 자료를 사용하여 북태평양고기압 변동의 원인 및 기작을 파악하였으며 위성/레이더 자료를 활용하여 북태평양고기압 자체를 감시/예측한 연구는 부재함.

**2.2. 자료동화에서의 위성자료 활용 및 정확도 향상**

- 위성산출물(북태평양고기압 관련 핵심 관측요소인 대기온도/수증기/해수면 온도/구름대 등 포함)의 정확도를 평가하고 위성자료의 활용에 대한 자료동화에서의 영향을 살펴봄(Eyre et al. 2020; Kim et al. 2018; Lee et al. 2022).
- 최적내삽법, 보간법 등을 사용하여 기존 위성자료에서 나타나는 시공간적 공백을 개선하고 위성자료의 자료동화 적용을 평가함 (Park et al. 2009)
- 최적보간, 기계학습 기법 등의 자료동화기법을 통해 다중위성과 현장 관측 자료들을 융합하여 고해상도 자료 생산 방법에 대해 제시함(Sunder et al. 2020; Barth et al. 2021; Jung et al. 2022).

연구개발 목표 및 내용  
(단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)

**1. 기상위성자료 정확도 개선 및 위성자료 생산 알고리즘 개발**

**1단계(5년):**

- Level 2(L2) 자료 산출물 정확도 향상: 해외 최선도 기관의 정확도와 비교하여 유사한 성능을 갖출 수 있도록 물리 기반 알고리즘에 인공지능 기법 도입

연직온도프로파일	- 기존의 대기연직정보 알고리즘을 고해상도로 개선하여 연직 프로파일을 고해상도로 산출 및 검증 - 해외 선진기관 위성기반 기후자료와의 정확도/변동성/추세 비교를 통한 자료 품질 검증
해수면온도	- 인공지능 기술을 적용한 해수면온도 산출 알고리즘 고도화 - 현재 산출되고 있는 천리안위성 2A호 해수면온도

	L3/L4 자료 개선 - 해외 선진기관 위성기반 기후자료와의 정확도/변동성/추세 비교를 통한 자료 품질 검증
수증기	- 인공지능기술을 적용한 청천복사량 산출 알고리즘 고도화 - 인공지능기술을 적용한 구름/강수 지역의 전천복사량 자료 산출 - 해외 선진기관 위성기반 기후자료와의 정확도/변동성/추세 비교를 통한 자료 품질 검증
바람	- 인공지능기술을 적용한 대기운동벡터 산출 및 알고리즘 고도화 - 고도할당오차 개선 및 품질정보에 대한 정보 제공 - 해외 선진기관 위성기반 기후자료와의 정확도/변동성/추세 비교를 통한 자료 품질 검증
구름	- 인공지능기술을 적용한 구름 산출 알고리즘 고도화 - 해외 선진기관 위성기반 기후자료와의 정확도/변동성/추세 비교를 통한 자료 품질 검증
북태평양고기압	- 연직온도프로파일, 해수면온도, 수증기, 바람, 구름 및 보조 변수들을 종합하여 북태평양고기압의 구조 및 변동성을 파악할 수 있는 활용 산출물 개발 - 북태평양고기압을 중점적으로 모니터링하고 예보를 위해 활용될 수 있도록 자료 품질 검증

**2단계(4년):**

- 정지궤도 기상위성 관측 기반 북태평양고기압을 실시간 모니터링 및 초단기 예측할 수 있는 현업 툴 및 가이드라인 개발
- 기상위성 L2 자료의 격자화(L3)로 위성 기반 기후분석 자료 생산
- 타자료와의 융합(L4) 자료 개발: 지상관측, 레이더, 재분석자료 등
- 상시관측과 특별관측에서 얻어지는 관측 산출물과의 비교검증을 통한 정확도 개선
- 자료동화에 필요한 위성자료 요구사항 정의

**2. 기상위성 원격탐사 자료를 활용한 북태평양고기압 원인 및 기작 규명**

**1단계(5년):**

- 북태평양고기압 관련 핵심 기상위성 관측변수(L2)의 분석
- 위성영상 분석을 통한 북태평양고기압의 가장자리 경계 및 중심 구조 파악
- 북태평양고기압의 일변동성/계절내 변동성/경년 변동성 등 분석
- 레이더 원격탐사 관측망과 융합 기법 개발

**2단계(4년):**

- 위성 자료(L3/L4)를 이용한 북태평양고기압 발생과 연계된 한반도 여름철 위험기상(폭염, 집중호우, 장마, 태풍 진로) 특성 분석
- 기상위성의 수치예보모델링 자료동화 적용 및 검증



<p><b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기상위성 L2 자료 정확도 향상을 통한 위성자료 활용도 제고</li> <li>- 기상위성 L3/L4 자료 개발을 통해 위성자료 기반 북태평양고기압 모니터링 Tool 제공</li> <li>- 북태평양고기압 모니터링 및 수반되는 한반도 여름철 위험기상 예보 정확도 향상</li> <li>- 북태평양고기압의 변동과 관련된 원인과 기작을 이해하고 북태평양고기압의 감시를 위한 가이드라인을 제시</li> <li>- 기상위성 자료의 정확도 개선 및 L3 자료의 개발을 통해 자료동화의 불확실성 해소에 기여</li> </ul>
<p><b>예상되는 총 연구기간/연구비</b></p>	<p>9년 / 90억원</p>

4) 관측에 기반한 자료동화 개선 연구

제안과제 제목	북태평양고기압 관측에 기반한 자료동화 개선 연구
<p><b>제안자</b></p>	<p>계준경 (National Center for Atmospheric Research)</p>
<p><b>연구필요성</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 북태평양고기압의 크기 및 강도 변화는 여름철 한반도 악기상 현상 (태풍 (Lee et al. 2019), 폭염 (Lee and Lee, 2016; Yoon et al. 2018), 집중호우 (Jung et al. 2015; Park et al. 2021))등과 상관 관계를 갖음</li> <li>• 여름철 악기상 현상에 대한 예측성을 향상시키기 위해서 북태평양고기압의 시공간적 구조 및 변동성에 대한 관측과 이를 활용한 연구가 필요함</li> <li>• 북서태평양의 지리적 특성 상 직접 관측이 부족하며, 이는 수치 모델링의 초기 자료 품질을 저하시킴</li> <li>• 북서태평양의 위성 원격탐사 관측은 기기 특성, 대기 현상, 구름 효과 등에 의해 오차가 존재하며 (기상청 2021), 이 오차를 파악하고 보정하기 위해 직접 관측을 활용한 위성 자료동화 개선이 요구됨 (Auligné et al. 2007)</li> <li>• 자료동화 시스템을 고도화 하기 위해 북태평양고기압과 한반도 악기상 현상들과의 상호 연관성을 분석할 수 있는 특별관측이 필수적임</li> <li>• 따라서 북태평양고기압 및 관련 악기상 현상의 이해를 높이고 예보 정확성을 향상시키기 위해 특별관측을 활용한 자료동화 연구가 요구됨</li> </ul>
<p><b>연구개발 동향 및 규모/국내의 관련 연구</b></p>	<p>기상장의 변동성이 큰 북태평양고기압의 가장자리에서 발생하는 다양한 악기상 현상들 (태풍, 폭염, 집중호우 등)을 대상으로 하는 집중 관측 및 자료동화 연구는 꾸준히 진행되어 왔으나, 북태평양고기압 자체에 대한 장기간에 걸친 관측 및 자료동화 연구는 부재함</p> <p><b>T-PARC (2008)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- THORPEX (The Observing Research and Predictability EXperiment) Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC)은 북서태평양과 동아시아의 악기상 현상을 분석하고 예측성을 향상시키기 위한 2008년에 수행한 국제 공동 집중관측 프로그램임 (Parsons et al. 2017)</li> <li>- T-PARC 자료를 활용하여 목표관측 전략 (Wu et al. 2007; Yamaguchi et al. 2009; Kim et al. 2008), 낙하존데 및 항공기 관측 자료동화 및 태풍 예보 (Jung et al. 2010), 중규모 자료동화 시스템 개발 (Wu et al. 2006; Wu et al. 2010)의 연구가 진행됨</li> </ul> <p><b>PRECIP (2023)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 동아시아 문순과 관련된 집중 호우의 메커니즘을 파악하기 위해 2022년 여름철 대만과 북서태평양을 대상으로 국제공동 집중관측 캠페인을 진행하였음 (Bell et al. 2023)</li> <li>- 해당 관측을 이용하여 집중호우의 미세물리 과정 (Bell et al. 2023), 장마 전선과 동반한 호우 시스템 (DeHart et al. 2023), 집중관측 자료동화 (Chung et al. 2023; Yang et al. 2023), 적도 해상 대류 현상에 대한 모델링 (Rios-Berrios et al. 2023) 등의 연구가 진행중임</li> </ul>

<p><b>연구개발 목표 및 내용</b> (단계별 기술: 총 9년, 5+4년)</p>	<p><b>1단계 (1-5년차): 관측 시스템 모의 실험을 통한 관측 전략 수립 및 준실시간 자료동화 시스템 개발</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>관측 시스템 모의 실험을 수행하여 특별관측 (낙하 존데, 라디오 존데, 항공기 관측, 선박 관측, 부이 등) 효과 선제 분석</li> <li>관측 시스템 모의 실험을 통해 북태평양고기압 및 한반도 약기상 예보 성능 향상을 위한 최적의 관측 전략 제시 (관측종, 관측 지역, 관측 기간 등)</li> <li>특별관측 기간 동안 현업 자료동화 시스템을 이용한 목표 관측 전략 제시</li> <li>특별관측을 위한 준실시간 자료동화 시스템 개발</li> </ul> <p><b>2단계 (6-9년차): 특별관측을 활용한 자료동화 수행 및 자료동화 시스템 개선</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압 및 관련 약기상 개별 사례들에 대한 특별관측 효과 분석</li> <li>장기간 (5년) 수집된 특별관측을 이용하여 현업 수치모델 및 자료동화 시스템의 정량적, 통계적 특성과 오차를 진단 및 개선</li> <li>자료동화를 통한 북태평양고기압과 한반도 기상요소의 상관 관계 파악</li> <li>특별관측을 활용하여 현업 전지구/지역규모 자료동화 시스템의 오차공분산 평가 및 개선</li> <li>특별관측을 이용한 위성 자료동화 시스템 오차 평가 및 개선</li> </ul>
<p><b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압과 관련 약기상 현상에 대한 이해도 및 예측성 향상</li> <li>동아시아 기후, 기상 특성에 최적화된 자료동화 시스템의 고도화</li> <li>미래 북서태평양 관측 시스템 개발 및 운영에 가이드 라인 제시</li> </ul>
<p><b>예상되는 총 연구기간/ 연구비</b></p>	<p>9년/ 30억</p>

□ 위험기상 예측 개선 전략

1) 북태평양고기압과 한반도 폭염

제안과제 제목	북태평양고기압과 관련된 한반도 여름철 폭염 메커니즘 규명 및 예측
<p><b>제안자</b></p>	<p>이명인(울산과학기술원)</p>
<p><b>연구필요성</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>고온과 관련된 극한 현상인 폭염은 해양에서는 녹조의 증가 및 어패류의 폐사 등 해양 생태계에 영향을 미칠 수 있으며, 육지에서는 온열질환 등 인명 피해를 야기할 수 있음.</li> <li>최근 10년간 자연재난으로 인한 인명피해는 호우, 태풍보다 폭염에 의한 사례가 많았으며(행정안전부, 2021), SSP(Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오에 따르면 우리나라 폭염 일수는 미래에 증가할 것으로 전망됨(국립기상과학원, 2022).</li> <li>폭염으로 인한 피해가 증가함에 따라 이를 선제 대응하기 위해서 발생 원인에 대한 명확한 분석과 예측 정확도 향상이 필요함.</li> <li>국내 주요 폭염 사례에서는 한반도까지 확장한 북태평양고기압이 동반되었기 때문에 두 현상은 서로 관련성이 높음.</li> <li>북태평양고기압의 가장자리가 한반도 남쪽 혹은 중앙에 위치할 경우 따뜻하고 습한 공기가 한반도 내로 유입됨에 따라 강수 증가를 유도할 수 있으며, 한반도 북쪽에 위치할 경우 한반도는 고기압의 영향으로 폭염이 유도될 수 있음. 이와 같이 북태평양고기압은 확장 시기와 범위에 따라 한반도 폭염에 미치는 영향이 상이할 가능성이 있음.</li> <li>북태평양고기압과 한반도 폭염에 대한 선행 연구는 주로 특정 사례 분석에 집중되어 있으며, 두 현상의 관련성에 대한 정량적인 분석은 부족함. 또한, 모형기반의 북태평양고기압과 한반도 폭염 연구는 거의 수행되지 않았음.</li> <li>북태평양고기압과 관련된 한반도 여름철 폭염 메커니즘을 관측과 모형을 활용하여 정밀 분석하고 이를 기반으로 폭염 예측성 향상 방안 마련이 필요함.</li> </ul>
<p><b>연구개발 동향 및 규모/ 국내의 관련 연구</b></p>	<p>[국외]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2013-2014년 겨울철, 2019년 여름철 북동태평양 지역에서 발생한 해양 폭염은 북태평양고기압의 강도 변화와 관련된 것으로 보고됨(Bond et al., 2015, Amaya et al. 2020).</li> <li>2021년 6월 캐나다, 미국 북서부 지역에서 발생한 기록적인 육지 폭염은 북태평양고기압의 강화 및 저지 고기압 발달과 관련된 것으로 알려짐(White et al. 2023).</li> </ul> <p>[국내]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2021년 7월 한반도 동해에서 발생한 해양 폭염은 평년보다 강하게 발달한 북태평양고기압에 영향을 받은 것으로 보고됨(이강진 등, 2022).</li> <li>한반도 여름철 주요 육지 폭염 사례(1994년, 2016년, 2018년)에서는 공통적으로 한반도까지 확장한 북태평양고기압이 원인으로 지목되었음(김지영 등, 2008; 이희동 등, 2020).</li> <li>국내에서 발생한 여름철 육지 폭염 사례에 대한 군집분석 결과에 따르면, 대부분의 유형은 북태평양고기압의 가장자리가 한반도 남부 또는</li> </ul>

	<p>중심 지역에 위치했으나, 일부 유형은 북태평양고기압이 한반도까지 발달하지 않는 모습을 보인 것으로 보고됨(이현철 등, 2020).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 한반도 여름철 폭염은 2가지 원격상관 패턴(서태평양-북미 또는 태평양-일본 패턴과 관련된 북서태평양에서 남북 방향의 로스비파 전파, 전지구 원격상관 패턴과 관련된 인도 대륙에서 동서 방향의 로스비파 전파)으로 유도되어 동아시아에 형성된 고기압성 순환과 관련된 것으로 보고됨(Kim et al. 2019; Yeo et al. 2019).</li> <li>• 국내외 북태평양고기압-폭염 연구는 주로 특정 사례 분석에 집중되어 있으며, 북태평양고기압과 관련된 한반도 폭염 메커니즘 및 예측에 대한 연구는 여전히 부재함.</li> </ul>
<p><b>연구개발 목표 및 내용</b> (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)</p>	<p><b>1단계 (5년)</b> <b>[북태평양고기압-한반도 폭염의 메커니즘 규명]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 군집분석을 통한 북태평양고기압-폭염 발생 과정 이해 및 특성 분석</li> <li>• 폭염의 시작, 유지, 종료 단계에서의 북태평양고기압의 특성 분석</li> <li>• 북태평양고기압 강도 및 확장에 따른 폭염 강도 및 발생 빈도 분석</li> <li>• 폭염 발생과 관련된 북태평양고기압 계절내 변동 분석 및 지수화 연구</li> </ul> <p><b>[북태평양고기압과 관련된 한반도 여름철 폭염 계절내 예측]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 현업모형에서의 폭염 및 북태평양고기압의 형태, 발달-유지-후퇴 양상, 변동성 등에 대한 계절내 (1-2개월) 예측성 평가</li> <li>• 북태평양고기압 예측오차가 한반도 폭염 예측에 미치는 영향 분석 및 개선 방안 제시</li> <li>• 현업모형과 S2S(Subseasonal-to-seasonal) 모형들에서의 북태평양고기압과 연관된 한반도 폭염의 예측성능 비교 분석</li> </ul> <p><b>2단계 (4년)</b> <b>[북태평양고기압-한반도 폭염의 변동성 이해 및 통계적 예측]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 폭염 발생과 관련된 북태평양고기압의 경년 및 장기 변동성 분석 및 변동을 초래하는 원인 분석 (예, 원격상관 패턴, 해양 및 지면자료의 상호작용 등)</li> <li>• 북태평양고기압 기반 한반도 폭염에 영향을 주는 예측인자 파악</li> <li>• 북태평양고기압 기반 한반도 폭염 예측 통계 모형 개발 및 예측성 진단</li> </ul> <p><b>[북태평양고기압과 관련된 한반도 여름철 폭염 장기 예측]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 현업 모형에서의 폭염 및 북태평양고기압의 형태, 발달-유지-후퇴 양상, 변동성 등에 대한 장기 (3-6개월) 예측성 평가</li> <li>• 북태평양고기압-폭염의 예측성에 영향을 미치는 외부적 요인 (예, 해빙, 토양수분, 적설, 해수면 온도 등) 파악</li> <li>• 파악된 외부적 요인을 토대로, 초기조건을 개선하여 북태평양고기압과 관련된 폭염 예측성능에 미치는 영향 분석</li> <li>• 현업모형과 C3S(Copernicus Climate Change Service) 모형들에서의 북태평양고기압과 연관된 한반도 폭염의 예측성능 비교 분석</li> </ul>
<p><b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 한반도 여름철 폭염 발생 메커니즘 이해 및 예측성 향상</li> <li>• 북태평양고기압과 관련된 폭염 메커니즘 규명 및 폭염 예측 가이드라인 제시</li> </ul>
<p><b>예상되는 총 연구기간/ 연구비</b></p>	<p>9년 / 30억</p>

2) 북태평양고기압과 한반도 장마 및 집중호우

제안과제 제목	북태평양고기압 가장자리의 확장과 이동에 관한 모델링 연구
<p><b>제안자</b></p>	<p>장은철 (공주대학교)</p>
<p><b>연구필요성</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 장마로 대표되는 한반도 여름철 밴드형 강수 시스템은 북태평양고기압의 가장자리에서 수분 공급과 경계면 형성으로 인한 상승 운동에 의해 발생함.</li> <li>• 밴드형 강수가 발생하는 구조는 북태평양고기압 가장자리에 이동하는 고기압, 중위도 저기압이 부딪혀 경계면을 형성하거나 고기압 가장자리를 따라 중규모 또는 중규모의 저기압이 연속으로 지나면서 연속된 강수가 형성되는 것이 대표적인 것으로 분석됨.</li> <li>• 북태평양고기압 가장자리에서 나타나는 경계면 구조는 강수 형성의 핵심이지만 재분석자료를 제외하면 활용 가능한 자료가 거의 없음.</li> <li>• 장마를 포함한 강수 밴드가 북태평양고기압 가장자리의 확장 및 이동 따라 한반도에 유입되는 시점, 강도 등이 결정되지만 이를 결정하는 요인에 대한 명확한 영향과 과정이 밝혀지지 않았음.</li> <li>• 기존의 연구들에서 제시된 북태평양고기압의 확장과 이동에 관여하는 요인들을 전구/지역 대기/결합 모델에 적용하고 실험을 수행하여 개별 또는 복합적인 영향을 파악할 필요가 있음.</li> <li>• 장마철 집중호우 발생에 북태평양고기압 가장자리의 영향은 위치 측면에서만 논의되었고, 고기압 가장자리 강도가 강수 강도에 미치는 영향에 대한 연구는 사실상 수행되지 않았음.</li> <li>• 모델링을 통해 얻은 결과를 관측에서 얻은 결과와 비교하여 북태평양고기압의 이동과 확장에 관여하는 주요 요인의 영향을 파악하고, 이를 토대로 북태평양고기압 모의 성능 향상을 위한 모델 개선 방안을 파악할 필요가 있음.</li> <li>• 나아가 북태평양고기압과 연관되어 발생하는 밴드형 강수의 강도를 결정하는 요인을 파악하고 과정을 이해할 필요가 있음.</li> </ul>
<p><b>연구개발 동향 및 규모/ 국내의 관련 연구</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 국립기상과학원에서 수행된 장마특이 기상연구센터의 연구를 통해 장마철 강수의 메커니즘을 분석하고 개념모형을 제시하였으며, 역학적으로 변형장을 이용한 북태평양고기압의 가장자리를 정의하여 강수를 실제로 발생시킬 수 있는 경계면 구조를 제시하였음.</li> <li>• 고기압 가장자리의 정의가 역학적으로 새롭게 제시됨에 따라 장마철에 형성되는 강수의 강도와 고기압 가장자리 경계면 강도와와의 관계에 대한</li> </ul>

	<p>연구가 시도되고 있으나 현재까지 명확한 근거가 제시되지는 않음.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Park et al. (2021)은 한반도 여름철 집중호우와 연관된 배경장의 특성을 분류하고 특징을 분석하였으며, 이 결과에서 북태평양고기압이 관여된 패턴들의 특성을 제시하였음.</li> <li>• 북태평양고기압의 확장에 관한 북대서양 진동 패턴과 남중국해 대류 운동과의 연계성에 대한 연구 결과가 제시된 바 있음.</li> <li>• 기존 연구들은 주로 재분석 자료를 이용하여 기상장의 패턴 분류와 연계성 분석을 통해 주요 요인의 역할을 분석하였으나 북태평양고기압의 daily scale 수준으로의 확장과 이동에 대한 연구 결과는 제시되지 못하였음.</li> </ul>
<p><b>연구개발 목표 및 내용</b> (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)</p>	<p><b>1단계 (5년)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 재분석 자료를 통해 daily scale의 북태평양고기압 가장자리의 확장과 이동에 대한 분석을 수행.</li> <li>- 북태평양고기압 가장자리 행태에 관련된 주요 변수들을 도출</li> <li>- 고기압 가장자리의 경계면 강도를 표현하는 변수를 새롭게 도출하고 경계면에서 발생하는 집중호우와의 관계에 관한 연구를 수행</li> <li>- 대기 모델을 이용하여 주요 변수들을 독립적으로 조작 처방하여 요인들의 북태평양고기압에 미치는 영향을 파악</li> <li>- 결합모델을 이용한 실험과 대기모델 실험 결과를 비교하여 북태평양고기압의 행태에 관련된 해양의 역할과 대기-해양 상호작용의 역할을 파악</li> <li>- 북태평양고기압 경계면 강도를 변화시키는 실험을 수행하여 강수 강도에 미치는 영향을 파악</li> </ul> <p><b>2단계 (4년)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 모델 실험 결과를 관측 또는 재분석 자료와 비교하여 모델의 현실 모의 한계점 파악</li> <li>- 모델의 한계점 파악을 통해 모델의 개선 가능성 분석</li> <li>- 모델의 개선 및 개발을 수행하여 현실 북태평양고기압의 모의 개선을 확인</li> <li>- 개선된 모델을 이용하여 북태평양고기압의 행태에 연관된 새로운 요인과 과정을 파악</li> <li>- 북태평양고기압 가장자리의 위치와 강도 및 형태의 모델 개선을 통한 장마철 집중호우 모의 성능 개선 정도를 파악</li> </ul>

<p><b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 북태평양고기압 가장자리에 영향을 미치는 요인과 그 영향을 통해 강수 밴드의 형성과 이동의 구조를 이해</li> <li>- 한반도 장마철 강수 예측에 직접적인 영향을 미치는 북태평양고기압의 모델 내 모의 성능을 향상시켜 과학적 이해를 향상시키고 강수 예측 성능의 개선을 기대</li> <li>- daily scale의 북태평양고기압의 변화 구조를 파악하여 여름철 단기 및 중기 강수 예측에 대한 이해도 향상과 예측 기술 개선을 기대</li> </ul>
<p><b>예상되는 총 연구기간/연구비</b></p>	<p>9년 / 36억</p>

3) 북태평양고기압과 한반도 영향 태풍

제안과제 제목	북태평양고기압이 태풍 활동에 미치는 영향 연구
제안자	차동현 (울산과학기술원 지구환경도시건설공학과)
연구필요성	<ul style="list-style-type: none"> <li>전 세계에서 수온이 가장 높은 북서태평양은 매년 30개 내외의 태풍이 발생해 천문학적인 피해를 야기함. 한반도의 경우도 매년 2~3개 태풍의 영향을 받아 전체 자연재해 중 거의 절반에 달하는 피해가 발생함.</li> <li>2002년 태풍 투사는 5조원 이상, 2003년 태풍 매미는 3조원 이상의 피해를 야기했고, 2022년 태풍 힌남노의 경우 포항에 500mm 이상의 기록적인 폭우를 초래해 심각한 인명 및 재산 피해를 일으킴.</li> <li>최근 기후변화로 인해 북서태평양의 태풍 강도가 더욱 강해지고, 한반도가 포함된 중위도 지역의 태풍 활동이 더욱 빈번해지고 있다는 것이 밝혀졌기에, 태풍 피해를 줄이기 위해서는 태풍에 대한 이해 증진 및 예측성 향상이 필요함.</li> <li>북서태평양 태풍은 다양한 기후지수(ENSO, PDO, IOD, PJ 등) 뿐만 아니라 중위도기압골과 같은 종관현상의 영향을 받음. 특히 북태평양고기압은 태풍의 진로에 큰 영향을 주는 지향류를 결정하기 때문에 둘 사이에서 나타나는 물리적 연관성을 정확히 이해하는 것이 필요함.</li> <li>수치모델의 북태평양고기압 경계지역 예측 오차로 인해 태풍 활동 오차가 야기될 수 있어 태풍 예측을 개선하기 위해서는 북태평양고기압과 태풍 사이의 상호작용을 이해하는 것이 요구됨.</li> </ul>
연구개발 동향 및 규모/국내의 관련 연구	<p>[국외]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>태풍은 북서태평양 연안 국가에 천문학적인 피해를 야기하기 때문에 태풍에 관한 다양한 연구가 수행되고 있음. 최근 북서태평양에서 태풍의 급강화(Rapid Intensification) 현상을 이해하고 개선하려는 관측 및 모델링 연구가 국제적으로 활발하게 이뤄지고 있음.</li> <li>기후변화로 인한 대규모 기상장의 변화가 북서태평양 태풍활동에 미치는 연구가 지속적으로 수행되고 있음. 특히 기후변화로 인하여 태풍 진로에 큰 영향을 미치는 북태평양고기압이 어떻게 변화하였는지에 대한 연구가 수행되고 있음.</li> <li>미국, 일본, 중국, 대만, 한국이 국제 공동 관측 프로그램들(T-PARC2, PRECIP등)을 통해 위험기상현상이 빈번히 발생하는 북태평양고기압 경계 지역의 집중관측을 수행하고 있음.</li> </ul> <p>[국내]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>기상청과 한국형수치예보모델사업단은 한국형독자수치예보모델(KIM)을 개발해 독자적인 태풍예측을 수행하고 있음.</li> <li>대한민국 공군, 한국과학기술정보연구원 등은 제한지역모델인 WRF를 기반으로 고해상도 중기 태풍예측모델을 개발해 운영하고 있음.</li> <li>Cha et al.(2011)은 4개월 지역기후모의에서 과도한 태풍 활동 모의가 북태평양고기압의 비현실적인 수축을 야기해 태풍이 더 과도모의될 수 있다는 문제점을 제기하였고, Park et al.(2022)은 단기 태풍예측에서 사용하는 물리과정모수화에 따라 북태평양고기압 모의가 달라 태풍 예측의 차이가 발생한다는 것을 밝힘.</li> <li>국내외 북태평양고기압-태풍 연구는 주로 특정 사례 분석에 집중되어</li> </ul>

	<p>있어 일반화하기 힘들며, 수치모델이 모의한 북태평양고기압과 태풍 사이의 연관성에 대한 연구는 매우 부족함.</p>
연구개발 목표 및 내용 (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)	<p><b>1단계 (5년)</b> [관측 및 재분석자료를 이용한 북태평양고기압과 태풍활동 사이의 연관성 이해 증진]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>군집분석을 이용한 태풍의 특성 구분 및 북태평양고기압과 연관된 태풍 군집의 특성 파악</li> <li>북태평양고기압이 태풍활동에 미치는 영향 분석을 통한 최적 지향류 산출법 개발</li> <li>태풍, 북태평양고기압, 그 외 종관규모현상(예: 중위도기압골) 사이에서 나타나는 상호작용 파악</li> <li>한반도 상륙 시기 북태평양고기압 확장/수축의 일반화와 태풍 진로 사이의 연관성 조사</li> </ul> <p>[수치모델에서 나타나는 북태평양고기압과 태풍 예측 관계 분석]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>군집 별 단기-중기 수치모델의 북서태평양 태풍 활동(진로, 강도, 강수) 예측 성능 검증</li> <li>수치모델들의 북태평양고기압 예측 오차가 단기-중기 태풍 예측 성능에 미치는 영향 조사</li> <li>한반도 상륙 시기 북태평양고기압과 태풍의 상호작용의 수치모델 예측 능력 분석</li> <li>현업 지원을 위한 북서태평양고기압과 태풍 예측 연관성에 관한 단기-중기 예보 가이던스 개발</li> </ul>
	<p><b>2단계 (4년)</b> [관측자료와 자료동화를 통한 북태평양고기압과 연관된 태풍 예측 개선]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>다양한 북태평양고기압 관측자료의 활용을 위한 자료동화 준비 과정 개발</li> <li>하이브리드(앙상블+변분법) 방식의 자료동화기법 및 전천대기 위성 복사 자료의 동화 기법 개발</li> <li>Observing System Experiment(OSE)를 통한 북태평양고기압 관측자료 별 태풍 예측에 대한 영향 조사</li> </ul> <p>[북태평양고기압과 관련된 태풍 예측 향상을 위한 수치모델 고도화]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>태풍과 북태평양고기압의 예측을 향상시키기 위한 수치모델의 수평/연직해상도 향상</li> <li>북태평양고기압과 태풍활동의 상호작용을 현실적으로 모의할 수 있는 최적 물리과정 개발</li> <li>수치모델의 북태평양고기압과 태풍 예측 결과의 오차를 감소시킬 수 있는 인공지능기반의 후처리기술 개발</li> </ul>
	<p><b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>북서태평양 태풍 발생 메커니즘 이해 및 예측성 향상</li> <li>북태평양고기압과 관련된 태풍 활동 메커니즘 규명 및 태풍 예측 가이던스 제시</li> </ul>
<b>예상되는 총 연구기간/연구비</b>	9년 / 30억



□ 북태평양고기압 변동 원인 규명 전략

1) 북태평양고기압의 수축과 확장 연구

제안과제 제목	북태평양고기압의 수축과 확장에 대한 이론 연구
제안자	문우석(부경대학교 환경대기전공)
연구필요성	<ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압의 수축과 확장에 따라서 한반도의 여름 날씨가 결정된다고 볼 수 있다. 즉, 북태평양고기압의 수축과 확장을 주관하는 역학을 이해하는 것은 한반도 여름 날씨의 중장기 예보력 향상에 크게 기여할 것이다.</li> <li>중위도 날씨가 Baroclinic instability에 의해서 발생한 중관 규모의 파동의 역학을 통해서 설명한다. 그러나 파동의 비선형적 소멸과정은 카오스적인 성격을 지니면서 근본적인 예보의 한계성을 만들어내고 있다.</li> <li>중관 규모 파동의 발달과 소멸 과정은 카오스적이지만 중관 규모 파동이 제트 기류와 교류하면서 만들어내는 제트 기류의 움직임은 주기적인 성격을 보인다. 이는 예보가 가능할 수 있다는 것을 내포한다.</li> <li>남반구 중위도 강수량의 시간적 변화에는 25일의 주기성이 강하게 나타난다. 비가 많이 내리지 않는 시기가 존재하면 대략 12에서 13일 후에는 비가 많이 내리는 시기가 있을 것이라는 예보가 가능하다.</li> <li>25일의 주기성은 wave-mean interaction으로 설명할 수 있는 현상임이 밝혀졌다. 특히, 이러한 역학은 대기에서만 발생하는 현상이 아닌 유체에서 일반적으로 존재하는 현상으로 20년 전에 태양의 대류를 연구하면서 발견되었다. 최근에는 해양 역학에 적용함으로써 북극과 남극해의 45년 주기성을 설명하는 데 이용하였다.</li> <li>Wave-mean interaction의 최근 이론을 북태평양과 동아시아 대륙에 적용한다면 여름철 북태평양고기압의 수축과 팽창을 조율하는 역학적 과정을 밝혀낼 수 있을 것으로 기대된다.</li> </ul>
연구개발 동향 및 규모/국내외 관련 연구	<p><b>1. Eddy Memory 효과</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>태양의 대류 현상을 연구하는 과학자들이 난류를 구성하는 에디들의 현재 운동이 과거 평균장의 영향을 받는다는 것을 밝혀냈음. 이를 반영하여 새로운 난류 모사 모형을 만들었는데 이를 Minimal tau approximation이라 명하였음 (Brandenburg et al, 2004).</li> <li>해양에서는 평균장의 불안정도에 의해서 발생하는 에디들이 다시 평균장에 귀속되는 데 이런 일련의 과정속에서 평균장이 천천히 변한다. 이러한 변화에는 45년 주기성을 포함하고 있다. 평균장의 주기성을 만들어내는 가장 중요한 물리적 과정이 Eddy memory 효과이다. (Manucharyan et al, 2017)</li> <li>대기에서도 똑같은 현상이 발생한다. 남반구 중위도 25일 주기성은 중관 규모 에디들과 평균장을 나타내는 제트 기류와의 상호 작용에 의해서 발생한다. 해양 그리고 태양 대류와 마찬가지로 Eddy memory 효과가 가장 중요한 메커니즘이다. (Moon et al, 2021)</li> <li>전 지구 규모의 큰 대기의 진동이 Eddy memory 효과로 나타날 수 있으며 동서로 진행하기도 하며 크기가 증폭되기도 한다. 또한 Blocking의 초기 발달 과정과 동일하게 정지된 상태에서 크기가 증가하기도 한다. (Moon et al, 2022a)</li> </ul>

	<p><b>2. 전 지구 규모의 대기 운동 방식적</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>큰 규모의 대기 운동은 평균장의 형태를 결정하는 Planetary geostrophic motion과 중관 규모의 에디들의 움직임을 나타내는 Quasi-geostrophic motion의 상호 작용으로 묘사할 수 있다. (Dolaptchiev and Klein 2013, Moon and Cho, 2020)</li> <li>해양과 대류의 열적차이를 고려한 경계 조건을 바탕으로 Planetary geostrophic motion의 해를 찾으면 여름철 한반도에서 보여지는 북태평양고기압과 대륙성 저기압의 형태를 지닌 평균장이 나온다. 기후변화로 제트 기류가 약해지는 데 이는 북태평양고기압과 대륙성 저기압의 강도를 강하게 함 (Moon et al, 2022b)</li> </ul>
연구개발 목표 및 내용 (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)	<p><b>1단계 (1-5년차)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>다양한 지면 열속 (해양과 대기의 열속 분포)에 반응하는 대기의 평균장 구현 (Planetary Geostrophic motion의 Steady state solution 구축): 해양의 상태에 따라서 달라지는 북태평양의 평균적 크기와 위치에 대한 이론적 연구</li> <li>다양한 평균장에서 나타나는 Baroclinic instability 연구 (한반도 여름철은 북태평양고기압과 대륙성 저기압이 평균장을 만든. 이러한 평균장에서 발견되는 불안정도에 대한 연구가 필요함.)</li> <li>중관 규모의 파동들이 만들어내는 Eddy heat flux와 Eddy momentum flux의 시공간적 특성을 파악</li> <li>Eddy memory 효과로 나타나는 wave-mean interaction의 특징을 묘사</li> </ul> <p><b>2단계 (6-9년차)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압의 수축과 팽창을 나타내는 전 지구 규모 대기 파동의 성격 규명</li> <li>전 지구 규모 대기 파동의 역학을 통한 예측성 파악</li> <li>Eddy memory 효과와 평균장과의 관계 규명</li> <li>Planetary geostrophic motion을 기반으로 한 simple dynamic 모델 구축 (북태평양의 수축과 팽창을 시뮬레이션할 수 있는 가장 간단한 모델 개발)</li> </ul>
최종 성과물의 활용방안 및 기대효과	<ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압의 역학 규명은 국지적인 주제가 아닌 대기 역학의 새로운 프레임워크를 제시하는 연구 주제임</li> <li>북태평양고기압의 수축과 팽창에 대한 역학적 연구는 날씨의 카오스적인 성질에 의해서 규정된 예보의 한계를 극복하는 데 가장 중요한 역할을 할 이론이 될 수 있다.</li> <li>기후 변화가 불러올 한반도 여름철 기후 변동에 대한 이론적 예측을 가능하게 할 것이다.</li> </ul>
예상되는 총 연구기간/연구비	9년 / 36억

2) 북태평양고기압 변동에 대한 역학 연구

제안과제 제목	단-중기 북태평양고기압 변동에 대한 역학 과정 연구
제안자	손석우 (서울대학교 지구환경과학부)
연구필요성	<ul style="list-style-type: none"> <li>여름철 북태평양고기압이 한반도로 확장할 때, 그 가장자리를 따라 온 난 습윤한 공기가 수송되면서 한반도에 집중호우가 발생함.</li> <li>북태평양고기압이 한반도 북쪽으로 북상하는 경우에는, 오히려 일사량이 증가하면서 한반도에 이상고온 현상이 발생함.</li> <li>북태평양고기압의 확장과 축소는 열대저기압의 진로를 결정하는 지향류와 밀접한 연관이 있어, 한반도 여름철 태풍을 예보하는데 가장 중요한 인자임.</li> <li>이와 같이 북태평양고기압은 여름철 한반도 날씨를 결정하는 주요 인자임에도 불구하고, 북태평양고기압의 발생-유지 역학 및 시공간 변동성에 대한 연구는 부족한 실정임.</li> <li>북태평양고기압의 계절, 경년, 장기 변동성과 관련한 선행 연구가 일부 있으나, 북태평양고기압의 단기-중기 및 계절내(~30일) 변동성에 관한 연구는 상대적으로 부족함.</li> <li>선행연구에서 북태평양고기압의 단기-중기 변동성은 특정 지역 강수량의 변동성을 결정하는 인자로써 보고되었을 뿐이며, 북태평양고기압 자체의 단기-중기 변동성에 대한 연구는 거의 없음. 특히 선행연구들은 중국 일부 지역의 강수량에 집중되어 있으며, 한반도 날씨와 연관된 북태평양고기압의 변동성을 분석한 연구는 전무함.</li> <li>단-중기 북태평양고기압 변동성에 대한 일부 메커니즘이 소개되었으나, 그 메커니즘들의 상대적인 중요성에 관한 정량적인 연구는 부재함.</li> <li>여름철 한반도 날씨의 단-중기 예측을 개선하기 위해서, 현업 모형에서 북태평양고기압의 예측성을 평가하고 역학 과정에 기반한 모형 오차 분석이 필요함.</li> </ul>
연구개발 동향 및 규모/국내의 관련 연구	<ul style="list-style-type: none"> <li>양쯔강 지역 10-30일 시간규모 강수와 연관된 기후인자로 북태평양고기압의 변동성이 언급됨.</li> <li>북태평양고기압의 남북-방향 변동성과 관련하여, 초여름에는 중-고위도에서 전파되어 오는 로스비파 원격상관이, 늦여름에는 열대 남중국해 지역의 이상 대류 현상과 관련된 태평양-일본 패턴이 중요한 역할을 하는 것으로 보고됨.</li> <li>북태평양고기압의 단-중기 변동성, 변동 역학, 예측성에 대한 복합적 연구는 부재함.</li> </ul>

<p><b>연구개발 목표 및 내용</b> (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)</p>	<p><b>1단계 (1-5년차)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>인공지능을 이용하여 북태평양고기압의 단-중기 변동성에 대한 군집 분석 수행. 각 군집의 특성 분석을 통해 북태평양고기압의 단-중기 변동성의 특성 분석.</li> <li>각 군집과 관련된 종관규모 현상(예, 중위도 저기압, 대기의 강 등) 및 악기상(예, 집중호우, 폭염, 태풍 경로 등) 특성 분석.</li> <li>각 군집을 결정하는 역학과정 이해. 이를 통해 북태평양고기압의 변동성을 초래하는 인자 파악.</li> <li>각 군집의 계절내, 계절, 경년, 및 장기 변동성 분석. 특히 기후변동성 및 기후변화 관점에서 북태평양고기압의 변화를 이해.</li> <li>북태평양고기압 변동성을 활용한, 단기 및 중기 예보 가이드스 제시.</li> </ul> <p><b>2단계 (6-9년차)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>현업 모형에서의 북태평양고기압 예측성 평가. 특히 각 군집별 예측 오차를 정량화하고, 이로 토대로 오차 특성을 이해.</li> <li>북태평양고기압 예측 오차가 여름철 집중호우와 폭염 예측에 미치는 영향 분석.</li> <li>북태평양고기압 예측 오차가 태풍 경로 예측에 미치는 영향 분석.</li> <li>역학 과정 이해를 토대로, 현업 모형의 오차의 원인을 분석하고 개선 방안을 제시.</li> </ul>
	<p><b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>단-중기 북태평양고기압 변동성 이해.</li> <li>단-중기 북태평양고기압 변동에 따른 한반도 악기상 발생 역학 이해 및 예보 가이드스 제시.</li> <li>현업 모형의 북태평양고기압 예측성 평가 및 오차 개선.</li> </ul>
	<p><b>예상되는 총 연구기간/연구비</b></p> <p>9년 / 36억</p>

□ 예측성 및 미래변화 연구 전략

1) 북태평양고기압이 한반도 날씨 예보에 미치는 영향 연구

제안과제 제목	북태평양고기압이 한반도 날씨예보에 미치는 영향 연구
제안자	유창현 (이화여자대학교)
연구필요성	<ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압의 위치와 강도는 동아시아 여름몬순(Chang et al., 2000; Lee et al., 2005; Park et al., 2010; Wang et al., 2000; Wang et al., 2018)과 태풍 경로(Du et al., 2011; Ho et al., 2004; Wu et al., 2005)에 영향을 준다고 알려짐</li> <li>북태평양고기압에 의한 남풍은 동아시아 지역으로의 수분 수송을 강화시켜 장마와 같은 강우대 형성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있음 (Ding and Johnny 2005; Zhang et al. 1999; Chang et al. 2000).</li> <li>북태평양고기압은 엘니뇨남방진동과 같은 열대 장주기 변동성과 연관된 정년변동을 보이는 것으로 알려져 있으며(Chang et al. 2000; Choi and Kim 2019; Preethi et al. 2017), 또한 미래기후 시나리오에서 그 위치와 변동성의 증가를 보임(He and Zhou 2015; Cherchi et al. 2018; Li et al. 2012; Chen et al. 2020; Lu and Dong 2001)</li> </ul>
연구개발 동향 및 규모/국내의 관련 연구	<p>국내외 북태평양고기압 변동성 및 예측성에 관한 개인연구로 한반도 기상 현상과 연결지어 종합적인 분석이 이루어지지 않음</p> <p>(과제번호 1365003603) 기후예측 시스템에서 역학코어 개선 방안 및 계절 강수 예측능력 향상에 관한 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>[2021] 기상청 기후및기후변화감시·예측정보융합기술개발 사업</li> <li>북태평양고기압의 변동성과 관련된 역학코어 간 예측성능 비교</li> </ul> <p>(과제번호 1345353489) 수치모델을 활용한 계절내 예측성의 장기 변동 평가에 따른 예측성 개선</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>[2022] 교육부 이공학술연구기반구축 사업</li> <li>한반도 주변 여름철 기상의 주요 요소인 북태평양고기압과 동아시아 몬순의 여름내(조여름/늦여름) 시간규모 현상에 대해 주별 예측성과 원인 분석</li> </ul> <p>(과제번호 1345109425) 한반도 및 동아시아 여름철 몬순/장마 시스템의 계절내 성분의 시공간적 특징과 엘니뇨와의 관계</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>[2009] 과기부 일반연구자지원 사업</li> <li>여름철 북태평양 아열대 고기압의 변동성에 관한 연구</li> </ul> <p>(과제번호 1345109868) 기후변화에 따른 한반도 상륙 태풍특성 변화 예측</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>[2007] 과기부 신진교수연구지원 사업</li> <li>태풍강도를 결정하는 북태평양고기압 변동성, 열대해역의 wind shear,</li> </ul>

	ENSO 등에 관한 기상학적 요인 분석
연구개발 목표 및 내용 (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)	<p><b>최종 목표:</b> 북태평양고기압에 따른 한반도 극한기상 예측성 변화 이해와 향상 방안 연구</p> <p><b>1단계(5년): 북태평양고기압과 한반도 극한기상 간의 관계 및 예측성 연구</b> 1-2차년도</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압의 강도 변화 및 남북/동서 방향 확장 정의</li> <li>북태평양고기압의 강도 변화 및 남북/동서 방향 확장에 따른 한반도 기상 변화 통계적 분석</li> </ul> <p>3-4차년도</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>머신러닝 기법 등을 활용한 한반도 극한기상 유발하는 패턴 정의</li> <li>관측 및 S2S(Subseasonal-to-seasonal) 데이터베이스 활용 북태평양고기압과의 극한기상 유발 패턴 간 통계적 관계성 분석</li> </ul> <p>4-5차년도</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압 강도 및 확장에 따른 극한기상 유발 패턴 예측성 변화 연구</li> <li>북태평양고기압-한반도 극한기상 유발 패턴 예측성 변화에 영향을 미치는 해수면온도, 주변 기압계와 같은 경계조건 역할 조사</li> <li>관측과 S2S(Subseasonal-to-seasonal) 데이터베이스 비교 분석을 통한 한반도 극한기상 예측성 향상 방안 제시</li> </ul> <p><b>2단계(4년):</b> 6-7차년도</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>근미래기후 내 북태평양고기압-한반도 극한기상 유발 패턴 관계성 변화 분석</li> <li>근미래기후 내 북태평양고기압-한반도 극한기상 유발 패턴 예측성 변화 분석</li> </ul> <p>7-8차년도</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>근미래기후 내 예측성 및 관계성 변화에 영향을 미치는 경계조건 요소 변화 분석</li> </ul> <p>8-9차년도</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>근미래기후 내 한반도 극한기상 예측성 향상 방안 제시</li> </ul>
	<p><b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>동아시아지역의 여름철 날씨예측 및 계절예측성 향상에 기여</li> <li>한반도 극한기상 발달 원인 이해 및 예측성 향상에 기여</li> <li>북태평양고기압 발달/변동 메커니즘 이해 확대</li> <li>북태평양고기압 및 한반도 극한기상 관련 분야 연구자 육성</li> </ul>
<p><b>예상되는 총 연구기간/연구비</b></p>	9년 / 30억원

2) 딥러닝을 이용한 북태평양고기압 수축과 확장 예측 연구

제안과제 제목	딥러닝을 이용한 북태평양고기압 수축/확장 예측 연구
제안자	함유근 (전남대학교)
연구필요성	<ul style="list-style-type: none"> <li>여름철 북태평양고기압이 한반도로 남쪽에 경계가 위치한 경우, 고기압 가장자리를 따라 온난 습윤한 공기가 수송되면서 한반도에 집중호우가 발생하며, 북태평양고기압이 한반도까지 북상하는 경우, 일사량이 증가하면서 한반도에 이상고온 현상이 발생함.</li> <li>또한, 북태평양고기압의 확장 정도는 태풍 및 이동성 저/고기압의 이동 경로 및 한반도 인근 전선, 종관규모 저기압의 형성에 영향을 주는 한반도 기상/기후 변동의 주요 인자임.</li> <li>이는 북태평양고기압의 중심 위치 및 강도 뿐만 아니라, 수축과 확장에 따른 경계의 위치가 한반도 기후 예측의 주요 인자임을 의미함.</li> <li>북태평양고기압의 강도는 상대적으로 쉽게 지수화되어 이와 관련된 연구들이 상대적으로 많이 이루어져 왔으나, 북태평양고기압의 규모, 혹은 2차원 경계의 위치 변화를 정량화하는 기법이 없어 이의 변화에 따른 기후 변동성 및 규모의 변화가 한반도 기후 예측성에 미치는 영향은 정량화된 바 없음.</li> <li>고기압의 경계를 정의하기 위해 등지위고도선의 특정값 (e.g. 5880 gpm)을 활용하고, 장마철 평균장을 이용한 연구에서는 상당 온위의 남북 경도를 이용해 정의하나, 해당 정의들이 종관 규모 시스템과 태풍의 이동 방향과 일치하지 않는 경우들이 많이 발생함.</li> <li>또한, 기존의 북태평양고기압 경계 지수들은 한반도 기후에 영향을 주는 정체 전선 이외의 경계면도 같이 나타나, 한반도 기후와의 관련성을 연구하기에 어려움이 있음.</li> <li>또한, 전지구 모형 예측 결과에서는 모델 계통 오차로 인해 동일 지위 고도장을 분석에 활용하기 어려움.</li> </ul>
연구개발 동향 및 규모/국내의 관련 연구	<p>국내</p> <p>장은철등 (2020) 은 북태평양 전선과 관련되어 있는 북태평양고기압 가장자리를 기압 경도가 큰 지역으로 정의하고, 해당 정의를 사용할 시 북태평양 경계의 변동과 장마 강도 변동이 높은 관련성이 나타남을 보임.</p> <p>국외</p> <p>Riyu (2002) 는 북서태평양 고기압의 강도를 북서태평양 고기압의 평균 위치의 경계 지역의 850hPa 지위고도장 지역 평균으로 정의 하고, 이의 경년 변동을 연구. 북서태평양 고기압의 서진과 북진의 경년 변동은 큰 관련성이 없음을 보임.</p> <p>Liu et al. (2019), Wang et al. (2023) 는 500hPa 의 5860gpm 등 지위고도선으로 북서태평양 고기압의 가장자리로 지수화하여 2018년 여름철 북서태평양 고기압이 크게 북진하였음을 보임.</p> <p>Tang et al. (2022) 는 북태평양 지위고도장의 Empirical Orthogonal</p>

	<p>Function (EOF) 첫 번째 모드가 북태평양고기압의 남북 확장과 관련되어 있음을 보임. 해당 PC time-series를 지수화하여, 북태평양고기압의 남북 확장과 관련된 기후 인자를 정량화함.</p> <p>Hu et al. (2023) 는 EOF 기반의 북태평양고기압의 남북 확장 지수와 5880gpm 기준의 남북 확장 지수의 경년 변동에 높은 유사성이 있음을 보임.</p>
연구개발 목표 및 내용 (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)	<p><b>1단계 (1-5년차)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 딥러닝 기반 Edge 트래킹 기법 적용을 통한 북태평양고기압의 남북 및 동서 3차원 경계 위치 정량화 시스템 개발</li> <li>- 딥러닝 기반 북태평양 강도 트래킹 기법 개발</li> <li>- 개발된 딥러닝 기법과 기존 Edge 및 강도 트래킹 기법과의 비교 분석</li> <li>- 비지도 학습을 통한 북태평양고기압 강화, 확장, 축소 군집화</li> <li>- Semantic Segmantation 딥러닝 기반 3차원 북태평양고기압 경계 예측 시스템 개발</li> <li>- Multi-Channel 딥러닝 모델에 기반한 북태평양고기압 지역별 경계 예측 시스템 개발</li> <li>- 3차원 북태평양고기압 경계 기반 한반도 강수 및 온도 예측 시스템 개발</li> </ul> <p><b>2단계 (6-9년차)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 딥러닝 기법에 기반한 동아시아 강수 관련 주요 종관 현상 (대기의 강, 정체 전선 등) 과 북태평양고기압 경계간 관련성 연구</li> <li>- Explainable AI 기법을 활용한 북태평양 확장 및 수축 예측 민감도 정량화</li> <li>- 개념적 이해를 위한 북태평양 확장 및 수축과 관련된 대규모 기후 인자 개발</li> <li>- 북태평양 확장/수축과 대규모 기후 인자간 비선형 관련성 분석</li> </ul>
최종 성과물의 활용방안 및 기대효과	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 북태평양고기압의 확장 및 수축 예측 성능 향상</li> <li>- 북태평양고기압 변동에 따른 한반도 악기상 예측 성능 향상 및 발생 메커니즘 이해</li> <li>- 북태평양고기압 확장 및 발달 메커니즘 이해</li> </ul>
예상되는 총 연구기간/연구비	9년/ 30억원

3) 북태평양고기압 변동 모델링 및 예측성 연구

<b>제안과제 제목</b>	<b>북태평양고기압 변동에 대한 모델링 및 예측성 연구</b>
<b>제안자</b>	유진호 (APEG기후센터)
<b>연구필요성</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압은 대기 하층에서는 북동태평양에 중심을 두고 상층으로 갈수록 서쪽으로 치우치며, 그 변동은 고기압의 북쪽에선 순압적인(Barotropic)구조가, 고기압의 남쪽은 경압적인(Baroclinic) 구조가 지배적으로 지역과 고도에 따라 특성이 상이한 복잡한 형태를 가져 3차원 구조의 포괄적 이해가 필요함</li> <li>북태평양고기압은 대륙과 해양의 열적 차이에 의해 기본적으로 유지되나, 그 변동은 ENSO와 같은 경년변동은 물론 열대 계절내진동, 태풍 또는 온대저기압과 같은 중관규모 날씨 현상과도 영향을 주고 받으며 다양한 시간규모에서 나타나고 있음</li> <li>따라서 예보의 핵심 도구이자 북태평양고기압의 다양한 시간규모의 특성을 이해하고 재현하기 위해서는 수치모델을 활용한 연구가 필수적임</li> <li>그러나 수치모델의 북태평양고기압의 재현 수준은 모델간 편차가 커서 관측에서 분석된 북태평양고기압 변동 메커니즘을 모델에서 그대로 적용하기 어려우므로 모델의 북태평양 모의 수준을 체계적으로 진단하고, 수치모델에 적합한 북태평양고기압의 진단 도구와 기준을 제시할 필요가 있음</li> <li>특히 동아시아 극한 기상의 발생과 관련이 깊은 중위도 계절내 규모의 변동에 대해서는 변동성 및 예측성능의 평가가 매우 부족한 상황이므로 계절내 규모의 예측에서 모델의 예측성능과 예측성능에 영향을 미치는 요인 (대기-해양 결합 작용 등)에 대한 분석을 통해 예측성능 향상을 위한 핵심 프로세스를 도출할 필요가 있음</li> <li>이를 위해 다수의 모델을 비교, 평가하여 우리나라 현업 예측 모델의 수준과 장단점을 분석하고, 중요 개선사항을 명확히 할 필요가 있음</li> </ul>
<b>연구개발 동향 및 규모/국내의 관련 연구</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>엘니뇨 등 해수면 온도 강제력(forcing)으로 인한 북서태평양에서의 상하층 대기 반응을 모의하는데 있어 기후예측모델이 보이는 모델 오차(bias)를 제시하는 연구가 많음 (Paek et al., 2015; Li et al., 2021; Zhang et al., 2020)</li> <li>기후예측모델에서 모의하는 북태평양고기압 및 그와 관련된 강수 등의 오차는 대부분 북태평양 지역에서의 해양과 대기의 상호작용(Wang et al. 2003), 대기 상층과 하층 사이의 관계(Huang et al. 2018), 또는 열대 대류 현상과 관련된 북서태평양으로의 대기 파동 전파(He et al. 2013) 등을 어떻게 모의하는가에 따라 달리 나타나는 것으로 알려져 있음.</li> <li>이와 관련된 대부분의 연구가 관측 기반의 메커니즘 연구 또는 관측에서 밝혀진 메커니즘을 기후예측모델이 얼마나 잘 재현하며, 어떤 부분에서 한계가 있는지를 밝히고 있음(Kim and Lim, 2023).</li> <li>북태평양고기압 변동에 영향을 미치는 다양한 요인들(예컨대, 열대 대류 활동, 해수면 온도 변화 등)의 변화에 따른 기후예측모델의 북태평양고기압 예측성 민감도 연구 등은 아직 미비한 실정임.</li> <li>또한 북태평양고기압 변동에 영향을 미치는 다양한 요인들의 민감도에 따른 기후예측모델의 개선에 대한 종합적 연구도 부재함.</li> </ul>

<b>연구개발 목표 및 내용 (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)</b>	<p><b>1단계 (5년)</b> <b>[기후예측 모델의 북태평양고기압 재현 성능 분석]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압의 기후값 및 계절변화에 대한 우리나라 및 타 국가 예측모델의 재현 성능 분석 및 구조적 오차 진단</li> <li>북태평양고기압의 경년 변동 및 계절내 변동에 대한 예측모델의 재현 성능 및 핵심 물리과정 분석</li> <li>고주파 변동(중위도 고·저기압)이 북태평양고기압의 유지 및 변동에 미치는 영향 분석</li> <li>기후값 오차와 변동성 오차의 상호-영향 분석</li> </ul> <p><b>[모델 기반 북태평양고기압 감시-예측 인자 선정]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>예측모델의 북태평양고기압의 변동성 및 기후값 재현특성을 고려해 북태평양고기압 변동을 대표하는 인자 설정 기법 도출</li> <li>신뢰성 확보를 위해 다양한 모델을 대상으로 대표인자 설정 기법 검증</li> <li>중장기 예보 적용을 통한 현업 예보 활용성 평가 및 환류</li> </ul>
	<p><b>2단계 (4년)</b> <b>[계절내 규모 예측 성능 분석 및 핵심 개선 프로세스 도출]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>변동 특성 및 극한기상 영향을 고려한 북태평양고기압의 계절내 예측 성능(~4주) 평가 기준 설정</li> <li>계절내 변동 관련 핵심 물리과정의 모델 예측 성능 분석 및 북태평양고기압 예측성능에 미치는 영향 평가</li> <li>최우선 개선 프로세스 선정 및 물리과정 개선을 위한 민감도 실험</li> <li>북태평양고기압 예측성능 향상을 위한 최우선 개선 프로세스 도출 및 개선 방향 도출</li> </ul>
	<p><b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>수치모델의 북태평양고기압 모의 특성에 대한 상세한 이해</li> <li>모델 기반 북태평양고기압 예측 인자의 현업 예측 활용</li> <li>북태평양고기압의 계절내예측 향상을 위한 최우선 개선 과제 도출</li> </ul>
<b>예상되는 총 연구기간/연구비</b>	9년 / 30억



4) 북태평양고기압의 미래 변화

제안과제 제목	여름철 북태평양고기압의 장기 변동 및 미래 변화
제안자	국종성 (포스텍)
연구필요성	<ul style="list-style-type: none"> <li>최근 한반도 위험기상의 강도와 빈도가 강해지고, 그로 인한 인명 및 재산피해도 늘어나고 있음. 이러한 한반도 위험기상은 북태평양고기압의 확장 및 수축과 밀접한 관련성을 가짐. 따라서, 북태평양고기압의 장기 변동 및 미래 변화는 한반도 위험기상의 변화에 가장 중요한 요소로 작용함.</li> <li>이러한 중요성에도 불구하고 북태평양고기압의 미래 변화는 매우 제한적으로 진행되어 왔음. 북태평양고기압의 평균적인 강도의 변화 뿐만 아니라, 계절내 변동성의 변화도 지구온난화 시기의 기후 예측성에 매우 중요함.</li> <li>북태평양고기압은 아열대 고기압으로 열대 대류활동 및 해들리 순환에 직접적인 영향을 받지만, 매우 다양한 기후요소 및 규모별 상호작용에 의해 영향을 받는 것으로 알려짐. 미래 기후변화와 관련하여 다양한 기후요소가 북태평양고기압과의 상호작용이 어떻게 반응하는지에 대한 연구가 필요함.</li> <li>북태평양고기압의 장기 변화 및 미래 변화를 연구하기 위해서는 기후모형의 활용이 필수적임. CMIP5, 6 모형에서 기후모형을 이용한 북태평양고기압 연구가 진행되었으나, 여전히 현재의 기후모형이 북태평양고기압 모의에 다양한 구조적 오차가 존재함. 신뢰성 높은 북태평양고기압의 장기 변동 및 미래변화를 이해하기 위해서는 모형의 구조적 오차를 이해하는 것이 필수적임.</li> <li>최근 탄소 중립 정책 등 온실가스 및 에어로졸 배출 등의 미래 변화에 대한 다양한 시나리오가 존재함. 다양한 기후변화 시나리오에 대한 북태평양고기압의 변동성 및 미래 변화에 대한 체계적 분석이 필요함. 이를 통해 위험기상 미래변화 등과 관련된 기후적응 정책을 뒷받침하는 기후정보 생산이 필요함.</li> </ul>
연구개발 동향 및 규모/국내의 관련 연구	<ul style="list-style-type: none"> <li>북태평양고기압의 장기변화와 관련해서는 몇몇의 연구가 진행되었으나, 이들 간의 주장이 일치되지 않음.</li> <li>- Gong and Ho (2002) Zhou et al. (2009): 1970년대 말부터 열대 인도양 및 서태평양 해수면 온도 상승으로 인해 생기는 로스비파 반응으로 북태평양고기압이 서쪽으로 확장한다고 보고</li> <li>- Wu and Wang (2015): 전 지구적으로 장기 추세를 제거했을 때, 1970년 이후 기간에서의 북태평양고기압 서쪽으로 확장이 뚜렷하지 않다고 주장.</li> <li>- He et al. (2015): 지위고도를 활용하여 북태평양고기압 장기 추세를 살펴볼 때 지구온난화로 인한 영향이 지위고도에 반영되기에 에디 지위고도 변수를 이용해서 북태평양고기압의 장기 추세를 살펴보아야 한다고 주장.</li> <li>- Huang et al. (2015): 북태평양고기압이 오른쪽으로 후퇴하는 장기 추세를 보인다고 보고</li> <li>북태평양고기압의 미래변화는 기후모형 모의자료를 이용해 연구가 진행되었</li> </ul>

	<p>으나, 구체적인 역학과정에 대한 연구는 부족하였음.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Li et al. (2012): IPCC 4차 기후변화평가보고서(Assessment Report 4, AR4)의 결과들을 분석해 대륙-해양 간의 열적 대비가 커지기 때문에 북태평양고기압이 미래기후에 강해질 것으로 전망</li> <li>- Yang et al. (2022): 북서태평양 열대대류의 변동성 강화로 북태평양의 동서 방향 변동성이 미래기후에 더욱 커진다고 보고</li> <li>- He et al. (2018): 5차 기후변화평가보고서의 결과들을 분석하여 에디 지위고도 방법을 활용해 북태평양고기압을 정의한 결과 미래기후에 고기압이 오른쪽으로 확장한다고 전망</li> </ul>
연구개발 목표 및 내용 (단계별로 기술: 총 9년, 5+4년)	<p><b>1단계 (1-5년차)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>기후모형들의 북태평양고기압 모의 능력 평가                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- CMIP6 기후모형의 북태평양고기압 모의능력 평가, 북태평양고기압의 변동성까지 고려한 평가 Metrics 개발</li> <li>- 북태평양고기압의 계절내 및 경년 변동성 모의 평가 및 변동 메커니즘 분석</li> <li>- 모형별 북태평양고기압의 모의 다양성 분석 및 원인 분석</li> </ul> </li> <li>북태평양고기압의 장기 변동 분석                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 관측 및 기후 모형에서 모의한 북태평양고기압의 장기 변동 및 원인 분석</li> <li>- 북태평양고기압의 확장/수축 패턴에 대한 장기 변동 및 동아시아 위험기상과의 관련성 분석</li> <li>- 북태평양고기압 거동의 장기 변동과 장기 기후 모드와의 상관성 분석</li> </ul> </li> <li>북태평양고기압의 미래 변화 전망                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- CMIP6 기후 모형이 모의하는 북태평양고기압의 장기 변화 양상 및 모형의 다양성 분석</li> <li>- CMIP6 모형에서 북태평양고기압의 확장/수축 패턴의 미래 변화 및 다른 기후 현상과의 상호작용 분석</li> <li>- 북태평양고기압 거동의 미래 변화와 동아시아 위험기상과의 관련성 변화 분석</li> </ul> </li> </ul> <p><b>2단계 (6-9년차)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>다양한 기후변화 시나리오에 따른 북태평양고기압의 미래 변화 전망                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 기후변화 시나리오 (온실가스, 에어로졸 배출 등)에 따른 북태평양고기압의 변화 및 변동성 변화 모의 실험</li> <li>- 탄소 중립 달성 정도에 따른 북태평양고기압의 거동 변화 및 동아시아 위험기상과의 관련성 변화 분석</li> <li>- 위험기상 발생 가능성에 기반한 북태평양고기압의 장기 거동의 임계값 등을 평가</li> </ul> </li> <li>북태평양고기압 변화 근미래 (5-30년) 예측시스템 개발                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 근미래 (5-30년) 동안 북태평양고기압 거동 변화에 영향을 미치는 핵심 예측 인자 추출</li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 시나리오 실험을 통한 북태평양고기압 변화 근미래 예측에 대한 Emulator 개발 및 검증</li> <li>- 다중 모형 및 다양한 실험을 기반으로 북태평양고기압 근미래 변화에 대한 Emergent constrain 발굴 및 이에 기반한 근미래 전망</li> <li>- 근미래 동안 북태평양고기압 임계값 형성 조건 제시</li> </ul>
<b>최종 성과물의 활용방안 및 기대효과</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기후모형의 북태평양고기압 모의에 대한 구조적 오차 및 개선방향 제시</li> <li>- 북태평양고기압 변동의 미래 변화 및 이에 따른 동아시아 위험기상의 전망</li> <li>- 북태평양고기압의 근미래 (5-30년) 예측시스템 구축</li> <li>- 위험기상과 관련된 북태평양고기압의 임계값 제시 및 기후적응 정책에 대한 과학정보 제공</li> </ul>
<b>예상되는 총 연구기간/연구비</b>	9년 / 30억원

## 4.2 북태평양고기압에 대한 이해 및 예측성 향상을 위한 국외 전문가 자문

- 북태평양고기압 관련 조사분석 결과 북태평양고기압의 영향 범위는 여러 국가에 걸쳐있고 특히 한국-중국-일본이 경계부에 위치하여 중요한 국가임. 북태평양고기압 관측을 위해 국제협력이 필수적임. 인접국의 관련 전문가 자문을 통해 노하우 및 시의성 있는 연구 현황과 관측 현황을 파악함.
- 중국과 일본의 관련 전문가 4인으로부터 북태평양고기압과 관련된 인접국의 연구 및 관측 현황과 우리 과제와의 중복성, 전문가들이 생각하는 필요 연구 주제나 시급한 연구 주제, 대규모 관측프로그램 참여 노하우 등을 수집함.
- 전문가 자문 주요 내용 요약
  - Dr Yuhei Takaya (일본) : 관측 불확실성의 가장 큰 원인이 대기 수증기 프로파일 관측임. 인공위성과 현장관측 모두 불확실성이 큼. 해결을 위해서 국제 공동 관측 캠페인이 필수적임. 단일 국가 규모의 진행은 가용 자원 및 가능 영역에 한계가 있음.
  - Prof. Yu Kosaka (일본) : 일본에서 연계할 수 있는 프로젝트 (Hotspot project, 일본을 중심으로 한 기후 시스템에 대한 프로젝트)가 진행되고 있음. 다음 단계의 Hotspot 프로젝트가 진행된다면 연계 고려 필요함.
  - Prof. Xiuqun Yang (중국) : 북태평양고기압 변동성을 다양한 규모에서 접근하는 총체적인 연구가 필요. 계절내 규모부터 십년 이상 주기까지 다양한 규모의 변동성과 그 원인에 대한 이해가 필요함.
  - Prof. Tianjun Zhou (중국) : 모델간 상호비교 프로젝트 (model intercomparison project)의 진행과 여기에 어울리는 관측 프로젝트를 함께 조직하는 것이 최우선 과제일 것. 북태평양고기압 변동성을 추정할 수 있는 다중 매트릭을 고안하고, 상호비교 프로젝트에 적용하는 것이 유용할 것.

□ 국외 전문가 자문 내용

1) 중국 IAP/CAS Prof. Tianjun Zhou

<p>국외 전문가</p>	<p>Tianjun Zhou (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)</p>
<p>1. 최근 여름철 동아시아 기상이면 빈발과 피해는 북태평양고기압의 확장/수축과 밀접한 연관이 있다. 이에 대한 다양한 규모에서의 변동성과 역할에 대한 이해가 여전히 제한적이다. 앞으로 어떤 연구가 이루어져야 한다고 생각하십니까</p>	<p>북태평양고기압의 관련하여 2018년 극한 폭염 현상을 들 수 있음. 지구 온난화의 영향력으로 설명했으나 interannual한 북태평양고기압의 북쪽 확장 메커니즘은 아직 불명확함.</p> <p>고기압의 변동성은 동아시아 여름 몬순시스템의 일부로 경년변동규모에 대해 연구되어 있음. 그러나 실질적인 예측을 위해서는 계절내에서 수십년 시간 규모까지의 예측 원천과 변화에 대해 관측에서 명확히 해야함.</p> <p>1970년대 후반 이후 고기압의 decadal 규모의 서쪽 확장은 열대 인도양의 basin 규모 온난화로 설명됐음.</p> <p>주요 물리 모수화 효과에 초점을 두어 다양한 모델 앙상블들에서 큰 불확실성이 나타나는 원인 규명이 필요함.</p> <p>북태평양고기압이 대양 순환 시스템이지만 극한 기후 현상은 regional-to-local 규모임. 따라서 행성규모 순환 시스템의 변동성과 여러 시간규모에 걸친 지역기후의 극한현상을 연결하는 역할에 대한 깊은 이해가 필요함.</p> <p>2020년과 2022년 여름에 고기압이 강화되었으나 동아시아는 2020년에는 극심한 홍수, 2022년에는 극심한 가뭄과 폭염이 발생했음 (He et. al. 2022, 2023). 고기압의 변동성과 관련된 지역규모의 극한현상에 대한 이해 필요.</p>
<p>2. 동중국해부터 북태평양 서부에 걸쳐 여름철 북태평양 고기압에 대한 현장 관측이 매우 제한적이었다. 북태평양 고기압을 모니터링하고 예측하는데 있어 가장 큰 불확실성이 무엇이고 어떤 관측이나 연구 이니셔티브가 필요하다고 생각하십니까</p>	<p>본인은 관측에 참여한 경험이 없으나 중요하다고 생각함. 대기의 연직속도의 편차는 홍수, 가뭄, 폭염 등 극한 기후의 직접적 원인임. ERA5 재분석 자료등이 기후연구에는 충분하다 여겨졌지만, 제시한 문제점이 있다면 북서태평양지역에 대한 온도, 바람, 기압, 습도등을 포함한 연직 프로파일 관측 강화 프로젝트가 필요할 것</p>
<p>3. 현재 진행중이거나 예정된 북태평양고기압 관련 연구프로젝트나 이니셔티브에 대한 정보를 제공해 주실 수 있으십니까?</p>	<p>중국에서는 북태평양고기압에 대한 대부분의 연구가 동아시아 여름철 몬순의 일부로 다뤄짐. 중국 국립자연과학재단 (NSFC)과 과학기술부는 다양한 몬순관련 프로젝트를 지원했음. NSFC의 “Response of the atmospheric circulation anomaly over western North Pacific associated with decaying ENSO to global warming and its mechanism”가 진행 중임. 북태평양 서부의 고기압 편차가 ENSO와 관련된 동아시아 기후 변동성의 핵심 가교역할을 한다는 것은 잘 정리되어 있는 내용임. 이 프로젝트는 지구온난화에 따른 ENSO 쇠퇴시동간 북태평양 서부의 대기순환 편차에 대한 반응을 조사하고 이상화된 모델 실험의 단계적 실행을 통해 대기순환의 반응에 대한 메커니즘을 규명하고자 함.</p>
<p>4. 북태평양고기압의 변동성은 동아시아 국가들의 극한</p>	<p>북태평양고기압의 계절 예측부터 경년 예측능력을 향상시키는 것이 가장 시급함. 새로운 모델 상호비교 프로젝트의 시작, 각 국가의 펀드 기관의 국제 협력</p>

<p>기상현상에 매우 중요하며 국가들간의 국제협력이 필수적입니다. 가장 시급한 국제 공동 연구 분야는 무엇이라고 생각하십니까? 또 국제협력을 어떻게 구성하는 것이 좋겠습니까? 그리고 국제협력 추진에 따른 예상되는 어려움은 무엇입니까?</p>	<p>프로그램 신청 또는 공동 관측프로그램 조직 등에 더 우선순위를 두어야 함. 새로운 관측자료와 함께 새로운 자료동화 방법도 권장함. 국제협력을 통한 장기 관측 시스템을 공동으로 설계, 구축, 유지하는 것이 가장 큰 어려움일 것.</p>
<p>5. 국제 협력과 관측 캠페인을 기획하는 경우 고려해야 할 사항에 대한 의견을 부탁드립니다.</p>	<p>북태평양고기압 변동성을 이해하는데 모델간 상호비교가 유력한 대안일 수 있음. 실제 SST 편차나 이상화된 SST 편차를 다양한 유역에 적용하거나 변화하는 다양한 강제력들에 대한 실험들을 동일한 방식으로 다중 모델에 수행하는 형태.</p> <p>북서태평양지역의 공동관측 캠페인도 중요함. 본인이 알기로 일본의 Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)와 NFSC가 공동으로 서태평양 기후 변화에 대한 다학제 연구를 추진중이고 여기서 일부 현장 캠페인을 지원함.</p> <p>이외에도 고기압을 정량화하는데 매트릭(Metric)을 이용하여 정량화하는 것도 매우 중요함. 고기압의 전통적인 지표가 지위고도 기반이나 지구 온난화에 따라 편향이 발생할 수 있으므로 고기압의 변동성 조사를 위해서는 다양한 매트릭을 이용하여 상호 비교할 필요가 있음.</p>

2) 중국 난징대학교 Prof. Xiuqun Yang

국의 전문가	Xiuqun Yang (Nanjing University)
1. 최근 여름철 동아시아 기상이변 빈발과 피해는 북태평양고기압의 확장/수축과 밀접한 연관이 있다. 이에 대한 다양한 규모에서의 변동성과 역할에 대한 이해가 여전히 제한적이다. 앞으로 어떤 연구가 이루어져야 한다고 생각하십니까?	<p>북태평양고기압의 subseasonal-to-interdecadal에 이르는 다양한 시간규모의 변동성과 그 원인을 철저히 조사할 필요가 있음.</p> <p>열대지방의 기후모드(ENSO, IOD, BSISO)와 중위도 및 고위도 지방의 기후모드(AP, NPO, NAO, PDO/AMO)의 복합적인 영향과 생성권까지 연관되어 있을 수 있음</p> <p>에어로졸 배출 및 대규모 도시화 (예, 양쯔강 삼각주 지역)와 같은 일부 지역적인 인간활동도 수십년 시간규모에 영향을 있을 수 있음</p> <p>subseasonal 규모에서 phase-asymmetric (Li et al., 2023)하게 밝혀진 북서열대태평양에서 BSISO가 북쪽으로 이동하여 동아시아에서 북태평양고기압이 빠르게 움직여 홍수와 가뭄이 빠르게 전환되는 원인이 되기도 함</p>
2. 동중국해부터 북태평양 서부에 걸쳐 여름철 북태평양고기압에 대한 현장 관측이 매우 제한적이었다. 북태평양고기압을 모니터링하고 예측하는데 있어 가장 큰 불확실성이 무엇이고 어떤 관측이나 연구 이니셔티브가 필요하다고 생각하십니까?	<p>위성 관측 외에 동아시아 국가들의 일부 섬과 해안 관측소에 관측자료가 제한적으로 존재한다고 생각됨. 매우 어렵겠지만 기존 관측자료를 통합하는 것도 필요함.</p> <p>북태평양고기압의 중요성을 고려할 때 국제협력 프레임워크하에서 공동 관측 및 연구 이니셔티브를 제안할 필요가 있음.</p> <p>한중일 간에 기후과학을 위한 국제협력 프레임워크가 존재하는 것으로 알고 있음. 기상분야 뿐 아니라 해양분야에서도 이런 이니셔티브가 적용될 수 있음</p>
3. 현재 진행중이거나 예정된 북태평양고기압 관련 연구프로젝트나 이니셔티브에 대한 정보를 제공해 주실 수 있으십니까?	<p>중국에는 북태평양고기압과 관련된 대규모 연구프로젝트나 이니셔티브가 없는 것으로 알고 있음.</p> <p>중국 펀드 기관에서 지원하는 동아시아 기상 및 기후변동에 대한 연구 프로젝트는 존재함. 북태평양고기압은 대기순환 시스템이므로 기후시스템과 관련된 프로젝트에는 북태평양고기압에 대한 것이 대부분 관여되어 있음.</p>
4. 북태평양고기압의 변동성은 동아시아 국가들의 극한 기상현상에 매우 중요하며 국가들간의 국제협력이 필수적입니다. 가장 시급한 국제 공동 연구 분야는 무엇이라고 생각하십니까? 또 국제협력을 어떻게 구성하는 것이 좋겠습니까? 그리고 국제협력 추진에 따른 예상되는 어려움은 무엇입니까?	<p>동아시아 국가 간 국제협력 체계하에서 공동 관측 또는 연구 이니셔티브가 필요하다는 데 동의함.</p> <p>“The multi-scale variabilities of the North Pacific Subtropical Anticyclone and their impacts” 는 좋은 주제이며 동아시아 국가들이 최우선 과제로 삼고 있는 공통 이슈라고 생각함.</p> <p>중국 Ministry of Science &amp; Technology (MOST)와 National Natural Science Foundation of China (NSFC)에서는 중국 과학자들이 관련 프로젝트에 지원해서 국제협력을 수행하는 것을 장려하고 있음. 한국에도 카운터파트가 되는 펀드 기관이 비슷한 지원을 하는지 모르겠음.</p>
5. 국제 협력과 관측 캠페인을 기획하는 경우 고려해야 할 사항에 대한 의견을 부탁드립니다.	<p>우선 The multi-scale variabilities of the North Pacific Subtropical Anticyclone and their impacts라는 주제에 대해 초점을 맞춘 국제 공동연구를 제안함.</p> <p>국제 협력 프레임워크하에서 관측 캠페인을 하는 것은 상대적으로 복잡하고 어려움. 중국에서는 CMA가 참여할 수 있을 것임</p>

3) 일본 University of Tokyo Dr. Yu Kosaka

국의 전문가	Yu Kosaka (University of Tokyo)
1. 최근 여름철 동아시아 기상이변 빈발과 피해는 북태평양고기압의 확장/수축과 밀접한 연관이 있다. 이에 대한 다양한 규모에서의 변동성과 역할에 대한 이해가 여전히 제한적이다. 앞으로 어떤 연구가 이루어져야 한다고 생각하십니까?	<p>일본의 여름철 기후 변동성에 대해 모식도가 개발되어 있음.</p> <p>3가지 주요 원격상관이 제시됨 Pacific-Japan (PJ) 패턴 (EAP 패턴으로도 불림), Asian jet를 따르는 실크로드 원격상관, Polar front jet에 따르는 wave train 패턴.</p> <p>PJ패턴과, 실크로드 패턴은 북태평양고기압 변동성에 직접적으로 영향을 줌.</p> <p>마지막 wave train 패턴은 오호츠크고기압 형성과 관련됨.</p> <p>실크로드패턴이 subtropical anticyclone에 미치는 영향은 zonal phase, seasonality, magnitude의 함수로 명확히 규명되지 않음</p> <p>이런 원격상관의 조합이 북태평양고기압에 어떤 영향을 주는가에 대한 연구 주제도 추천함</p> <p>통계분석과 이상화된 실험을 통해 변동성의 pure 모드를 추출해왔으나, 실제로는 변동성의 다중 모드가 동시에 진화하는 형태임</p> <p>이런 모드들(패턴들)의 비선형적 상호작용에 대한 이해가 필요 (2개 패턴의 조합에서 시작해서 3개 이상의 가능한 패턴들의 조합으로 확장 필요). 이와 관련된 coupling 실험이 몇 가지 있으나(e.g. Takemura and Mukougawa 2020, Hirota and Takahashi 2012) 충분치 않음. 이는 Kimoto 교수와 Watanabe 교수가 포함된 그룹에서 제안한 과제임.</p> <p>또 다른 주제는 고기압의 변동성 그 자체보다는 고기압의 영향 메커니즘에 대한 것임. 중위도 대기-해양 상호작용, 복사 강제력, 에어로졸, 수분 공급 그리고 다중규모 상호작용(TC activity, 메이유-장마-바이유 강수밴드, 중규모 강수밴드 등과의 상호작용)이 여기에 포함됨</p>
2. 동중국해부터 북태평양 서부에 걸쳐 여름철 북태평양고기압에 대한 현장 관측이 매우 제한적이었다. 북태평양고기압을 모니터링하고 예측하는데 있어 가장 큰 불확실성이 무엇이고 어떤 관측이나 연구 이니셔티브가 필요하다고 생각하십니까?	<p>직접 관측에 대한 경험이 없으므로 동료 과학자들로부터 수집한 내용임.</p> <p>위성 관측을 기반으로 하더라도 SST 변수들 간의 차이가 존재함. 선박관측과 여타의 SST 들과 비교하는 것이 유용함.</p> <p>중관규모에서 열대태풍과 구조화된 대류시스템의 직접 관측이 유용함.</p> <p>예측 모델을 사용한 Observation sensitivity experiments (OSE)와 Observation System Sensitivity Experiments (OSSE)는 예측 불확실성의 주요 원인을 파악하고 관측의 가치를 평가하는 유용함.</p>
3. 현재 진행중이거나 예정된 북태평양고기압 관련 연구프로젝트나 이니셔티브에 대한 정보를 제공해 주실 수 있으십니까?	<p>북태평양고기압을 대상으로 하는 프로젝트는 아직 없음. 관련 프로젝트로 extratropical air-sea interaction (the climate “hotspot” 프로젝트)을 들 수 있음. 이 프로젝트는 10여 년 전 Hisashi Nakamura 교수님이 연구책임자로 시작됨. 2023년도가 2단계 (the Hotsopt2 project) 마지막 해로 JAMSTEC의 Masami Nonaka 박사가 연구책임자로 참여하고 있음.</p> <p>일본 주변의 기후시스템에 초점을 둔 3단계를 신청하여 선정 절차가 진행중임 (선정 가능성이 매우 높지는 않음). 선정된다면 이 프로젝트에서 본인이 subtropical anticyclone 연구와 밀접한 관련이 있는 겨울과 여름의</p>

	<p>이상저온 및 이상 고온에 대한 연구팀을 이끌게 됨. SETAN 프로그램 (the Advanced Studies on Climate Change projection)은 Masahiro Watanabe 교수님이 이끄는 프로그램으로 저와 Yukiko Imada 박사 팀이 각각 기후변화의 attribution과 극한 현상에 대해 연구하고 있음. 일부 연구가 북태평양고기압과 관련이 있을 수 있음.</p>
<p><b>4. 북태평양고기압의 변동성은 동아시아 국가들의 극한 기상현상에 매우 중요하며 국가들간의 국제협력이 필수적입니다. 가장 시급한 국제 공동 연구 분야는 무엇이라고 생각하십니까? 또 국제협력을 어떻게 구성하는 것이 좋겠습니까? 그리고 국제협력 추진에 따른 예상되는 어려움은 무엇입니까?</b></p>	<p>관측 측면에서, Hotspot 프로젝트 연구자들은 일본 주변의 대기 및 해양 상태를 측정하기 위해 관측소 관측과 함께 여러 대의 선박과 항공기를 이용해 조직화된 동시 관측 수행. EEZ에 관심을 가지고 있으며 국제 공동 관측으로 확대될 수 있다면 좋을 듯. 실현 가능성은 확인 필요</p> <p>모델링 및 분석 연구에는 다중 모델 및 대규모 앙상블 시뮬레이션이 유용함. 하지만 방대한 시뮬레이션 및 예측 데이터 전송에 늘 어려움이 있음. 원격 서버나 클라우드 서비스에서 분석하는 방식으로 데이터 전송 및 관리 작업 부하를 줄여 협업을 하면 공동 연구를 촉진할 수 있을 것.</p>
<p><b>5. 국제 협력과 관측 캠페인을 기획하는 경우 고려해야 할 사항에 대한 의견을 부탁드립니다.</b></p>	<p>관측과 모델링/분석 팀이 모두 포함된 프로젝트의 경우, 두 활동이 분리되어 보일 수 있는데 이를 방지 하기 위해서 두 커뮤니티를 연결하는 설계가 필요함. 일기예보 및 분석을 통해 관측을 지원하고 관측 데이터를 동화 및 모델 프로세스 검증에 사용하는 방식도 좋을 것임.</p>

4) 일본 MRI-JMA Dr. Yuhei Takaya

국의 전문가	Yuhei Takaya (MRI-JMA)
<p><b>1. 최근 여름철 동아시아 기상이변 빈발과 피해는 북태평양고기압의 확장/수축과 밀접한 연관이 있다. 이에 대한 다양한 규모에서의 변동성과 역할에 대한 이해가 여전히 제한적이다. 앞으로 어떤 연구가 이루어져야 한다고 생각하십니까</b></p>	<p>1) 북태평양고기압의 미래변화</p> <p>CMIP 모델은 여전히 북태평양고기압의 미래 예측에 상당한 불확실성이 있음. 동아시아 극한 및 지역 기후변화의 새로운 constraint로 작용할 수 있는 것이 무엇인지에 대한 이해가 명확치 않음.</p> <p>2) 동아시아 극한기상 현상과 북태평양고기압 변동성의 climate drivers</p> <p>이전 연구에 따르면 climate driver의 다양한 원격강제력이 서로 다른 패턴의 북태평양고기압 편차를 강화함. response와 attribution의 차이를 명확히 구분하는 것이 중요함. 동아시아에서 극한 기상현상을 유발하는 climate driver에 대한 조사는 다양한 시간규모에 걸쳐있음. 북태평양고기압 발생에 대한 climate driver의 상대적인 기여도를 결정하고 예측가능성을 평가하는 내용을 포함한 광범위한 연구에도 불구하고 복합적인 극한 현상에 대한 우리의 이해는 여전히 제한적임. 더불어 물리적인 메커니즘에 대한 더 깊은 이해가 요구됨.</p> <p>3) 최첨단 역학 예측 모형의 성능 평가</p> <p>아시아 몬순 변동성과 극한 기상 현상 (빈도, 강도, 기간)을 예측하는 최첨단 역학 예측 모형(S2S 또는 C3S 데이터 아카이브 모델)의 성능을 평가하는 것은 중요한 연구 주제임. 재예측 기간과 앙상블 크기의 한계가 있다. 대규모 앙상블 예측 실험을 확대하면 한계 해결에 도움이 될 것.</p>
	<p>4) 북태평양고기압 변동성의 대기-해양 결합</p> <p>북태평양고기압 변동성에서 대기-해양 결합이 지배하는 물리적 메커니즘의 이해에 한계가 있음. 특히 다양한 climate drivers의 원격 강제력에 대해 모형이 서로 다른 반응을 보이는 이유가 명확히 밝혀지지 않았음</p> <p>5) 아시아 여름 몬순의 시간규모 상호작용</p> <p>예를 들어 아시아 몬순의 장기 변동에 대한 MJO와 BSISO와 같은 현상의 영향은 아직 정량평가가 부족함.</p>
<p><b>2. 동중국해부터 북태평양 서부에 걸쳐 여름철 북태평양고기압에 대한 현장 관측이 매우 제한적이었다. 북태평양고기압을 모니터링하고 예측하는데 있어 가장 큰 불확실성이 무엇이고 어떤 관측이나 연구 이니셔티브가 필요하다고 생각하십니까</b></p>	<p>현재 관측에서 가장 중요한 불확실성의 원인은 위성과 북태평양 서부 상공의 in-situ (sonde) 관측을 통해 얻은 대기 수분 프로파일임. 현업 예측과 분석을 위해서는 부이(Buoy)를 이용한 지면 기압 측정이 매우 중요함 (Centurion et al. 2017).</p> <p>1번 질문에 대한 답변과 관련하여, 자료동화의 불확실성의 상당 부분은 모델 물리과정의 한계에서 비롯됨. 특히 대류 과정과 대기-해양 상호작용의 불확실성이 중요한 역할을 함.</p> <p>대기 대류과정의 왜곡은 바람분석의 정확도에 영향을 줌. 따라서 대기와 해</p>



	<p>양 모두에서 연직 프로파일 관측에 집중하면 모델 물리과정을 개선하는데 크게 기여할 수 있고 궁극적으로 전반적인 불확실성을 줄일 수 있음. 또한 온도와 습도 프로파일을 정확하게 분석하는 것은 이해 증진을 위해 필수적임. 이를 위해서 관측자료의 개선뿐만 아니라 지속적인 모형 개선도 필요함.</p> <p>Reference: Centurioni, L., A. Horányi, C. Cardinali, E. Charpentier, and R. Lumpkin, 2017: A Global Ocean Observing System for Measuring Sea Level Atmospheric Pressure: Effects and Impacts on Numerical Weather Prediction. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 231-238, <a href="https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00080.1">https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00080.1</a>.</p>
<p><b>3. 현재 진행중이거나 예정된 북태평양고기압 관련 연구프로젝트나 이니셔티브에 대한 정보를 제공해 주실 수 있으십니까?</b></p>	<p>1) AsiaPEX: GEWEX Regional Hydroclimate Project in Asia AsiaPEX 프로젝트는 GEWEX Regional Hydroclimate 프로젝트 중 하나로 주로 육상 강수에 초점을 두고 있음. 북서태평양을 포함한 아시아 몬순 변동성에 초점을 둠. 집중 국제 관측 수행을 계획하고 있고 그 관측을 활용하여 AMY 재분석과 같은 재분석에 활용할 계획임. Reference: Terao, T., et al., 2023. "AsiaPEX: Challenges and Prospects in Asian Precipitation Research." Bulletin of the American Meteorological Society, 104, E884-E908</p> <p>2) MEXT-program for the Advanced Studies of Climate Change Projection (SENTAN) SENTAN 프로젝트는 기후변화에 초점을 맞춘 일본의 대표적인 연구 프로그램으로 1주제와 3주제에 북태평양고기압과 동아시아 기후 관련 연구자들이 포함됨. Website: <a href="https://www.jamstec.go.jp/sentan/eng/">https://www.jamstec.go.jp/sentan/eng/</a></p> <p>3) JAMSTEC 관측 캠페인 JAMSTEC은 정기적으로 관측 캠페인을 실시하여 YMC (Year of the Maritime Continent)와 같은 국제 프로젝트에 크게 기여함. 계획에 대한 자세한 사항은 JAMSTEC의 Kunio Yoneyama 박사에 문의.</p> <p>4) Hotspot3 (선정 절차 중) Hotspot 3는 Hotspot2의 후속으로 제안된 프로젝트임. 이 프로젝트는 아시아 몬순 변동성을 포함하도록 연구범위가 확장됨. Hotspot2의 시작은 프로젝트 선정 여부에 따라 결정될 것. 본인은 이 프로젝트에서 아시아 몬순에 초점을 맞춘 세부 그룹 일원임. Hotspot2 Website: <a href="https://www.jamstec.go.jp/apl/hotspot2/index_e.html">https://www.jamstec.go.jp/apl/hotspot2/index_e.html</a></p>
<p><b>4. 북태평양고기압의 변동성은 동아시아 국가들의 극한 기상현상에 매우 중요하며 국가들간의 국제협력이 필수적입니다. 가장 시급한 국제</b></p>	<p>국제 관측캠페인은 단일 국가의 자원만으로는 충분치 않을 수 있기 때문에 다국적 협력이 필요한 가장 필수적인 연구 활동임. 해양 예측의 SynObs나 WMO JET-EOSDE 활동과 같은 이니셔티브와 같이 자료동화에 대한 관측 영향의 상호 비교를 수행하기 위해서도 다국적 협력이 필요함. 각기 다른 기간, 목표, 중점 분야를 가진 여러 프로젝트를 조율하는 것도 주요 도전과제임.</p>

<p><b>공동 연구 분야는 무엇이라고 생각하십니까? 또 국제협력을 어떻게 구성하는 것이 좋겠습니까? 그리고 국제협력 추진에 따른 예상되는 어려움은 무엇입니까?</b></p>	<p>SynObs: <a href="https://oceanpredict.org/synobs/#section-overview">https://oceanpredict.org/synobs/#section-overview</a> The8thWMOWorkshopontheImpactofVariousObservingSystemsonNumericalWeatherPredictionandEarthSystemPrediction(WMOJET-EOSDEactivity): <a href="https://community.wmo.int/en/meetings/8th-wmo-impact-workshop-home">https://community.wmo.int/en/meetings/8th-wmo-impact-workshop-home</a></p>
<p><b>5. 국제 협력과 관측 캠페인을 기획하는 경우 고려해야 할 사항에 대한 의견을 부탁드립니다.</b></p>	<p>연구 관측을 수행하고 있는 위에 언급된 프로젝트와 가급적이면 1년 전부터 연락을 취해 협업 기회를 모색할 것을 추천함.</p> <p>일본에서는 대규모 앙상블 모의 데이터 세트인 d4PDF (Mizuta et. al. 2017)를 만들어 미래 변화와 극한현상의 근원 메커니즘을 연구하는 데 중요한 자료로 활용하고 있음. 현재 MRI는 다음 대규모 앙상블 모의를 위한 차기 시스템인 T-EEC을 개발 중임. T-SEC는 해양분석에 네트워킹이 포함된 부분 해양 결합 시스템임. d4PDF를 이용한 협업이나 향후 대규모 앙상블을 적극 환영함. 본인은 d4PDF 모델을 사용하여 모델 민감도 실험을 수행했음.</p> <p>국제활동과 연계하여 연구 가시성을 증대시킬 수 있음. WCRP에 WGSIP (Working Group on Seasonal to Interannual Prediction) 등의 예가 있음. 본인은 현재 CMA의 Hongli Ren 박사와 함께 계절별 몬순 예측에 관한 이니셔티브를 공동 주도하고 있음. WGSIP내에는 극한 현상 예측에 초점을 맞춘 이니셔티브도 있음.</p> <p>WCRP Lighthouse 활동중 하나인 Earth system Change (EPESC)는 원인 규명 및 예측 연구를 적극적으로 추진하고 있음. 주요 포커스는 근미래(decadal) 예측과 기후예측임. 몬순 관련 연구의 경우 CLIVAR/GEWEX 몬순 패널 및 WWRP (World Weather Research Programme) working group on Tropical Meteorology Research (WGTMR)와 같은 조직과 긴밀한 관계를 구축하는 것이 프로젝트에 도움이 될것임.</p> <p>WGSIP website: <a href="https://www.wcrp-climate.org/wgsip-overview">https://www.wcrp-climate.org/wgsip-overview</a></p> <p>CLIVAR/GEWEX Monsoon Panel website: <a href="https://www.clivar.org/clivar-panels/monsoons">https://www.clivar.org/clivar-panels/monsoons</a></p> <p>WGTMR website: <a href="https://community.wmo.int/en/activity-areas/wwrp/wwrp-working-groups/wwrp-tropical-meteorology-research">https://community.wmo.int/en/activity-areas/wwrp/wwrp-working-groups/wwrp-tropical-meteorology-research</a></p> <p>Reference: Mizuta, R., and Coauthors, 2017: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 1383-1398, <a href="https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1">https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1</a></p>

### 4.3 시사점 및 추진전략

#### ○ 시사점 1: 관측자료 개선

- 위성 관측자료뿐만 아니라 재분석자료에서도 북태평양고기압의 확장과 수축 관련 불확실성이 매우 큼

: 북태평양고기압 연구에 가장 많이 활용되는 것은 관측자료와 재분석자료지만 관측 자료는 관측소의 부족과 시간 해상도의 문제가 있고, 재분석자료의 경우는 재분석 자료들 간의 불확실성이 크다는 문제가 있음. 이러한 시공간적 한계는 여름철 위험 기상을 유발하는 구름의 발달과 강수 과정, 수증기의 이동 등의 물리현상을 파악하는데 큰 불확실성이 됨. 따라서 특별관측과 재분석 자료의 고도화를 통한 불확실성의 해소가 절실함

- 북태평양고기압 변동성의 핵심 지역에 대한 현장 관측 확대를 통해 위성 관측의 정확도를 높여 불확실성을 줄임으로써 예측성을 향상시키는 것이 가장 현실적인 대안임

- 효율적인 위성 자료 품질 향상을 위해서 상시관측 및 집중관측의 병행이 필요함

: 위성 관측자료의 검증 및 개선에는 직접 관측 및 지상 원격 관측과의 상호비교가 필수적임. 또한 직접관측은 관측이 북태평양고기압에 중요한 지역의 대기 하층의 온도 및 수증기 수송 구조를 직접적으로 파악할 수 있음. 이를 위해 한반도 여름철 위험기상 시기인 6월에서 8월까지 주 1회 약 20개 지점에 대한 낙하존데 상시관측이 필요함. 또한 위험기상이 가장 빈발하는 한달에 대해서는 복합관측 프로그램(상시 라디오존데 빈도 증대, 슈퍼사이트 구축, 선상 라디오 존데 관측, 상시 낙하존데 관측 빈도 증대)으로 집중관측의 추가가 필요함

- 현장 관측 및 위성관측의 개선이 자료동화 개선 연구와 상호보완적 관계가 되도록 병행하는 것이 필요함

: 재분석자료의 고도화를 위해 위성 원격자료가 필수적임. 특히 아시아태평양지역과 한반도를 2분 간격으로 관측하는 천리안위성 2A호의 활용이 적합함. 이를 위해 천리안위성의 기본자료 정확도 개선의 선행과 격자화 등이 요구됨. 개선된 기상위성 자료는 수치예보모델의 주요 입력 자료로 활용되므로 수치예보모델의 정확도 향상에 기여할 수 있음. 또한 위성 원격 자료의 개별 산출물을 보조변수로 활용하여 북태평양고기압 활용산출물을 개발할 필요가 있음.

#### ○ 시사점 2: 국제 공동연구 필요

- 현장 관측의 비용 효율화와 배타적 경제 수역 (Exclusive Economic Zone; EEZ) 등에 대한 원활한 관측을 위해서 동아시아 국가와 공동 관측이 반드시 필요함.
- 현재 진행 중인 국제 관측프로그램과의 연계가 필요함
- 관측뿐만 아니라 예측성 개선을 위한 국제 공동 모델링/자료동화 협력과 같은 다각도의 국제협력이 필요함.

: 북태평양고기압 관측 프로그램을 진행하기 위해서는 관측 프로그램을 수행하고 있는 국내 다른 기관들뿐만 아니라 북태평양고기압 영향지역 해당 국가들의 참여를 이끌고 국내외 협력을 활성화하여 전방위적인 공동 연구를 진행할 수 있는 기반 마련이 중요함. 국내 한국해양과학기술원, 극지연구소, 국립해양조사원 등과 협력하여 기존의 상시 관측 프로그램에 관측을 추가하거나 새로운 협력 프로그램을 진행하는 등 이미 선진화 되어있는 국내 기술력을 최대한 활용할 필요가 있음. 국제 협력과 관련하여 중국과 일본 전문가 자문 결과 현재 북태평양고기압을 직접 타겟으로 하는 관측프로그램은 없음. 그러나 육상 강수에 초점을 두고 아시아 몬순 변동성을 연구하는 AsiaPEX 프로젝트가 활발히 진행 중이므로 이로부터 얻을 수 있는 이점과 한계점을 명확히 하여 방향성을 고려할 필요가 있음.

#### ○ 시사점 3: 북태평양고기압 메커니즘 이해

- 북태평양고기압 관련 연구가 다수 있었으나 북태평양고기압 자체 메커니즘에 대한 연구는 제한적임.

: 북태평양고기압은 한반도 폭염과 집중호우 모두와 긴밀하게 연관되며 북태평양고기압의 이상 확장, 수축이 종관규모 요란과 함께 다양한 시공간규모에서 복합극한 기상을 발생시키며 북태평양고기압 가장자리에서 더욱 극적인 영향이 있음. 그러나 북태평양고기압의 변동의 관점에서 종관규모뿐만 아니라 행성규모 시스템 등 복합적인 시스템의 중첩과 상호작용에 대한 다양한 시공간규모의 영향 관련 이론적, 수치적으로 정량화된 연구는 제한적이었음.

- 북태평양고기압의 시간규모별 확장과 수축에 대한 메커니즘이 정립되지 못했고 이는 예측성 저하로 연결됨.

: 북태평양고기압은 등지위고도선의 특정 값을 지수로 대표하여 사용됐을 뿐 그 자

체의 역학과 기작에 대한 연구는 매우 제한적임. 따라서 북태평양고기압 자체의 구조와 발달 및 유지 등에 대한 연구가 필수이며 이와 같은 한반도 위험기상과 관련 깊은 대상에 대한 이해의 부족은 시스템을 이해하는데 잃어버린 고리가 되어 예측적 관점에서는 위험기상 예보의 한계가 됨. 현재 기후에서 이런 이해의 부재는 미래 변화 연구에서도 반복되어 기후변화시대에 정확한 가이드를 제시하지 못하고 있음. 주요 대기모드의 기후변화 예측은 상당 부분 사회에 가이드를 제시하고 있으나 대기모드와 더불어 동아시아, 특히 한반도에 복잡적이고 중요한 역할을 하는 북태평양고기압 미래변화의 이해 부족은 기후변화를 대비하는 시대에 불확실성으로 남겨짐

○ 시급성 있게 추진되어야 할 연구 주제

- 복합극한기상을 유발하는 북태평양고기압, 동아시아 여름철 대기권과 북태평양고기압 변동, 태풍, 중위도 시스템, 북태평양고기압 간의 복합적인 상호작용 연구
- 북태평양고기압 발달과 유지 메커니즘과 그 영향에 대한 메커니즘의 정립, 북태평양고기압 지수 개발, 근미래의 북태평양고기압의 변화 연구

□ 수요조사에 기반한 추진 전략 및 로드맵

○ 북태평양고기압 관측 전략

전략	세부과제	1단계					2단계			
		1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	7년차	8년차	9년차
북태평양고기압 관측전략	북태평양고기압 및 한반도 위험기상 국제 공동 집중관측 캠페인	관측관측 및 국제협력의 준비 및 기반 연구	국제협력용 통합 전천후 관측 대기 감시 및 기상 산출물 생성			집중관측 자료를 활용한 기후 위기 산출물 생성				
	낙하준대를 활용한 북태평양 상시 모니터링	관측기 낙하준대 관측결과 및 기반 연구	낙하준대를 이용한 분석용량인 대기 프로파일링			낙하준대자료 DB 구축 및 분석 지원체계 확충(연구용) 조사연구				
	기상위성을 활용한 북태평양고기압 감시 연구	올레 기반 관측리듬에 대응 가능 기법 도입	NP에 실시간 모니터링 시스템 개발			원격 관측 자료를 활용한 알고리즘 개선 및 운영				
	북태평양고기압 관측에 기반한 자료통화 개선 연구	관측 시스템 호환성을 고려 최적의 관측전략 제시	통합관측 후계 관측망		특별 관측을 위한 온-실시간 자료동화 시스템 개발 및 운영		원격 자료용화 시스템 안정화가 될 개선			

○ 위험기상 예측 개선 전략

전략	세부과제	1단계					2단계			
		1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	7년차	8년차	9년차
위험 기상 예측 개선 전략	북태평양고기압 관련된 한반도 여름철 폭염 메커니즘 규명 및 예측	NP-관변도 폭염의 메커니즘 규명	NP-관변도 한반도 여름철 폭염 메커니즘 예측			NP-관변도 폭염의 변동성 이해 및 통계적 예측		NP-관변도 여름철 폭염의 변동성 예측		
	북태평양고기압 가장자리의 확장과 이동에 관한 모델링 연구	NP의 확장 및 이동 연구	NP-관변 메커니즘 규명			NP-관변도 동쪽우회 연구		장기 및 집중호우 예측		
	북태평양고기압이 태풍 활동에 미치는 영향 연구	NP의 태풍 활동 시과의 연관성 지화	수치모델에서 나타나는 북태평양고기압과 태풍 예측 관계 분석			관측 자료는 자료순위를 통한 NP에 관련된 내용 예측 개선		NP의 관변도 태풍 예측 정확도 향상 및 수치모델 고도화		

○ 북태평양고기압 변동 원인 규명 전략

전략	세부과제	1단계					2단계			
		1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	7년차	8년차	9년차
북태평양고기압 변동 원인 규명 전략	북태평양고기압의 수축과 확장에 대한 이론 연구	관측 연속 관측결과와 재처분용 고기압 생성 연구	NP의 열대(energy)의 상호작용			에디 모멘트 효과와 NP		NP-기반 모형 정립		
	단-중기 북태평양고기압 변동에 대한 역학 과정 연구	NP의 단-중기 변동의 특성 분석	NP 기후 변동성 예측 연구		NP의 위상 기압 연구		정립 모형에 NP의 역할 연구			

○ 예측성 및 미래 변화 연구 전략

전략	세부과제	1단계					2단계			
		1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	7년차	8년차	9년차
예측성 및 미래 변화 연구 전략	복태평양고기압이 한반도 날씨예보에 미치는 영향 연구	NPH 남동/동서 확장과 한반도 기상변화		국한 기상 관망 NPH 확장 제한 분석			중미래 NPH 확장의 기상 변화		중미래 한반도 날씨 예측 향상 방안 제시	
	딥러닝을 이용한 복태평양고기압 수축/확장 예측 연구	딥러닝 기반 NPH edge 트race 기압 가법		Multi-channel 기반 NPH 지역별 단계별 예측 시스템 개발			Explainable AI 기법들을 이용한 NPH 확장 민감도 정량화		딥러닝 기반 NPH 확장, 수축 예측 모델 통합	
	복태평양고기압 변동에 대한 모델링 및 예측성 연구	기후예측 모델의 NPH 재현 능력 분석		모델 기반 NPH 감지·예측 선지 진정			계통내 규모 예측 성능 분석 및 핵심 가진 프로세스 도출			
	복태평양고기압의 미래변화	NPH의 장기 변동 분석		NPH 미래 변화 전망		다양한 기후변화 시나리오에 따른 NPH의 미래 변화 전망		NPH 변화 근대화(S-30년) 예측 시스템 개발		

## 5. 우리나라 여름철 기상예보 한계 돌파를 위한 정책적 제언



### 5.1. 국내외 수요에 대응할 수 있는 정책적 추진 방향 제언



## 5 우리나라 여름철 기상예보 한계 돌파를 위한 정책적 제언

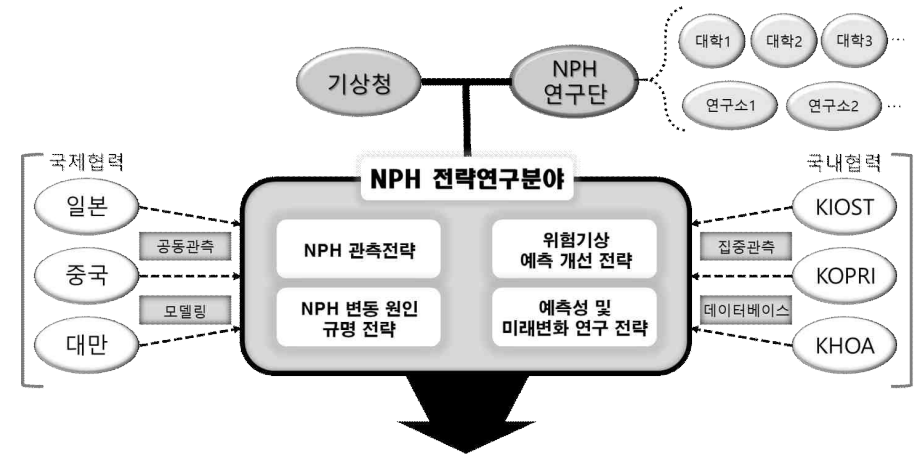
### 5.1 국내외 수요에 대응할 수 있는 정책적 추진 방향 제언

#### □ 제언

- 최근 빈번한 한반도 및 동아시아 위험기상은 북태평양고기압의 변동과 밀접한 관련이 있다는 과학적 근거는 충분함. 따라서 한반도 위험기상의 예측성 향상을 위해서는 북태평양고기압의 확장/수축에 대한 이해가 필수적이나, 현재 우리의 이해는 매우 제한적임. 북태평양고기압 변동과 관련된 다수의 연구가 있음에도 불구하고, 대부분이 다른 기상현상을 설명하기 위한 부차적인 경우가 많았고, 북태평양고기압에 중점을 둔 연구는 매우 제한적이었음. 한반도 위험기상의 예측성 향상을 위해서는 북태평양고기압의 거동에 대한 집중적인 연구가 필요하며, 이는 정부의 적극적인 R&D 투자를 통해서만 가능함.
- 현재까지 수행되어 왔던 북태평양고기압 연구 결과들을 리뷰 분석한 결과, 북태평양고기압 예측 향상을 위한 두 가지 시급한 연구 현안이 도출되었음. 북태평양고기압의 관측자료 불확실성과 북태평양고기압의 거동 역학에 대한 이해 부족임. 따라서, 향후 추진되어야 할 연구개발(R&D)의 방향은 북태평양고기압 모니터링을 위한 관측 개선과 북태평양고기압 거동 역학 이해 증진을 병행하는 방향으로 추진되어야 함.
- 현업을 위한 북태평양고기압의 상시 모니터링은 위성자료를 기반으로 이루어져야 하나, 위성자료의 불확실성을 감소시키고 활용성을 높이기 위해서는 현장 관측의 확대가 반드시 필요함. 북태평양고기압의 현장 관측은 다양한 기후/기상 조건 및 계절 변화를 고려할 수 있는 상시 관측과 다양한 시공간적 변수를 얻을 수 있는 집중관측이 병행되어야 함.
- 북태평양고기압의 거동의 핵심 지역인 북서태평양/동중국해 지역은 현재 우리나라 다양한 기관에서 산발적으로 관측이 이루어지고 있음. 효율적인 관측 예산 활용과 관측자료 활용 극대화를 위해서는 기상청뿐만 아니라 연구선을 운영하고 있는 해양과학기술원, 극지연구소 등 다양한 국내 여러 관련 기관과의 협력을 통해 체계적인 북태평양고기압 집중관측이 이루어져야 함.
- 북태평양고기압의 거동은 한반도뿐만 아니라 동아시아 지역의 위험기상과 밀접한

관련성을 가지고 있고, 인접 국가 (일본, 중국, 대만 등) 들도 북태평양고기압의 거동 연구에 큰 관심을 두고 있음. 따라서, 북태평양고기압 연구는 원활한 관측망 구성과 연구 효율 극대화를 위해서 일본, 중국, 대만 기상청 및 연구기관과의 국제협력을 통해 이루어져야 함. 특히, 북태평양고기압에 대한 집중관측과 예측 모델링 분야에서 동아시아 국가 간 국제협력이 반드시 필요함. 우리나라에서 명확한 연구방향 제시와 선제적인 예산확보를 통해 국제협력 연구의 주도권을 가질 필요가 있음.

- 현재 우리나라의 위험기상 및 기후 변동/변화에 대한 연구는 세계적 수준임. 북태평양고기압과 관련된 다양한 분야에서 세계적 수준의 연구자가 국내 여러 대학 및 연구소에 다양하게 분포하고 있음. 성공적인 북태평양고기압 연구를 위해서는 국내 전문가를 적극 활용하여 집약할 필요가 있음. 기상청과 협업 및 소통을 원활하게 하고, 국내 연구 능력을 극대화하고 일관된 방향으로 추진하기 위해서는 대학 중심의 연구단 형태로 연구 개발 (R&D)이 진행되는 것이 바람직함.



북태평양고기압 모니터링 고도화와 거동 역학 이해 증진을 통해 한반도 위험 기상 예측성 향상

## 참고문헌





## 참고문헌

- Afzali Gorooh, V., Kalia, S., Nguyen, P., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Ganguly, S., & Nemani, R. R. (2020). Deep neural network cloud-type classification (DeepCTC) model and its application in evaluating PERSIANN-CCS. *Remote Sensing*, 12(2), 316.
- Amaya, D. J., A. J. Miller, S.-P. Xie, and Y. Kosaka. 2020: Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave. *Nature Communications*, 11(1), 1903. doi:10.1038/s41467-020-15820-w.
- Auligne, T., McNally, A. P., & Dee, D. P. (2007). Adaptive bias correction for satellite data in a numerical weather prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133(624), 631-642. <https://doi.org/10.1002/qj.56>
- Bell, M. and cuauthors 2023: Overview of the Prediction of Rainfall Extremes Campaign In the Pacific (PRECIP) 2022, 103rd American Meteorological Society Annual Meeting, 8-12 January 2023, Denver, Colorado.
- Bell, M., J. C. DeHart, C. Nam, T. Chan, M. Yang, K. Tsuboki, 2023: Microphysics of Heavy Rainfall Observed during the Prediction of Rainfall Extremes Campaign In the Pacific (PRECIP) 2022, 15th International Conference on Mesoscale Convective Systems, 22-25 May 2023, Fort Collins, Colorado. Dehart, J. C., M. Bell, T. Barbero, 2023: Investigating the Relationships Between Rotation and Heavy Rainfall Along the Mei-yu Front During PRECIP 2022, 15th International Conference on Mesoscale Convective Systems, 22-25 May 2023, Fort Collins, Colorado.
- Bergman, J. W., & Hendon, H. H. (2000). The impact of clouds on the seasonal cycle of radiative heating over the Pacific. *Journal of the atmospheric sciences*, 57(4), 545-566.
- Bond, N. A., M. F. Cronin, H. Freeland, and N. Mantua, 2015: Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific. *Geophysical Research Letters*, 42(9), 3414-3420. doi:10.1002/2015GL063306.
- Camp, J., & coauthors (2019). The western Pacific subtropical high and tropical cyclone landfall: Seasonal forecasts using the Met Office GloSea5 system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145, 105-116. <https://doi.org/10.1002/qj.3407>
- Cha, D. H., & Lee, D. K. (2009). Reduction of systematic errors in regional climate simulations of the summer monsoon over East Asia and the western North Pacific by applying the spectral nudging technique. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D14).
- Cha, D. H., Jin, C. S., Lee, D. K., & Kuo, Y. H. (2011). Impact of intermittent spectral nudging on regional climate simulation using Weather Research and Forecasting model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D10).
- Cha, Y., Choi, J.W., Kim, E.-S. & Ahn, J.-B. (2022). Occurrence of heatwave in Korea by the displacement of South Asian high. *Climate Dynamics*, 58, 1699-1718. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05987-3>
- Chang, C. P., Zhang, Y., & Li, T. (2000). Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge.

*Journal of Climate*, 13(24), 4310-4325.

- Chang, M., Ho, C.-H., Chan, J. C. L., Park, M.-S., Son, S.-W., & Kim, J. (2019). The Tropical transition in the western North Pacific: The case of tropical cyclone Peipah (2007). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5151-5165. <https://doi.org/10.1029/2018JD029446>
- Chen, T.-C., Wang, S.-Y., Huang, W.-R., & Yen, M.-C. (2004b). Variation of the East Asian Summer Monsoon Rainfall\*. *Journal of Climate*, 17, 744-762. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0744:VOTEAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0744:VOTEAS>2.0.CO;2)
- Chen, T.-C., Wang, S.-Y., Yen, M.-C., & Gallus, W. A. (2004a). Role of the monsoon gyre in the interannual variation of tropical cyclone formation over the western North Pacific. *Weather and Forecasting*, 19, 776-785. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2004\)019<0776:ROTMGI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2004)019<0776:ROTMGI>2.0.CO;2)
- Chen, X., & Zhou, T. (2014). Relative role of tropical SST forcing in the 1990s periodicity change of the Pacific-Japan pattern interannual variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(23), 13-043.
- Cheng, T. F., Lu, M., & Dai, L. (2019). The zonal oscillation and the driving mechanisms of the extreme western North Pacific subtropical high and its impacts on East Asian summer precipitation. *Journal of Climate*, 32(10), 3025-3050.
- Cherchi, A., Ambrizzi, T., Behera, S., Freitas, A. C. V., Morioka, Y., & Zhou, T. (2018). The response of subtropical highs to climate change. *Current Climate Change Reports*, 4, 371-382.
- Choi, K.-S., & Kim, B.-J. (2007). Climatological Characteristics of Tropical Cyclones Making Landfall over the Korean Peninsula. *JOURNAL OF THE KOREAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, 43, 97-109.
- Choi, N., Lee, M.-I., Cha, D.-H., Lim, Y.-K., & Kim, K.-M. (2020). Decadal Changes in the Interannual Variability of Heat Waves in East Asia Caused by Atmospheric Teleconnection Changes. *Journal of Climate*, 33, 1505-1522. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0222.1>
- Choi, W., Ho, C.-H., Jung, J., Chang, M., & Ha, K.-J. (2021). Synoptic conditions controlling the seasonal onset and days of heatwaves over Korea. *Climate Dynamics*, 57, 3045-3053. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05853-2>
- Chung, K., and P. Do, 2023: IMPACT OF ENSEMBLE DATA ASSIMILATION WITH SURFACE MOISTURE AND RADAR DATA ON HEAVY RAINFALL FORECAST: A CASE STUDY OF TAHOPE-2022, 15th International Conference on Mesoscale Convective Systems, 22-25 May 2023, Fort Collins, Colorado.
- Evans, C., & coauthors. (2017). The extratropical transition of tropical cyclones. Part I: Cyclone evolution and direct impacts. *Monthly Weather Review*, 145, 4317-4344. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0027.1>
- Feng, J., & Chen, W. (2021). Roles of the North Indian Ocean SST and tropical North Atlantic SST in the latitudinal extension of the anomalous western North Pacific anticyclone during the El Niño decaying summer. *Journal of Climate*, 34(21), 8503-8517.
- Gong, D. Y., & Ho, C. H. (2002). Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. *Geophysical Research Letters*, 29(10), 78-1.

- Gray, W. M., (1977). Tropical Cyclone Genesis in the Western North Pacific. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 55, 465-482, [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.55.5\\_465](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.55.5_465)
- Guo, X., Zhao, N., Kikuchi, K., Nasuno, T., Nakano, M., & Annamalai, H. (2021). Atmospheric Rivers over the Indo-Pacific and its Associations with Boreal Summer Intraseasonal Oscillation. *Journal of Climate*, 34, 9711-9728, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0290.s1>
- Hadizadeh, M., Rahnema, M., & Hesari, B. (2019). Verification of two machine learning approaches for cloud masking based on reflectance of channel IR3. 9 using Meteosat Second Generation over Middle East maritime. *International Journal of Remote Sensing*, 40(23), 8899-8913.
- Ham, Y.-G., Kim, J.-G., Lee, J.-G., Li, T., Lee, M.-I., Son, S.-W., & Hyun, Y.-K. (2021). The origin of systematic forecast errors of extreme 2020 East Asian summer monsoon rainfall in GloSea5. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL094179. <https://doi.org/10.1029/2021GL094179>
- Hamaguchi, Y., & Takayabu, Y. N. (2021). An Initiation Process of Tropical Depression-Type Disturbances under the Influence of Upper-Level Troughs. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78, 4001-4019, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0334.s1>
- He, C., & Zhou, T. (2015c). Decadal change of the connection between summer western North Pacific subtropical high and tropical SST in the early 1990s. *Atmospheric Science Letters*, 16(3), 253-259.
- He, C., Lin, A., Gu, D., Li, C., Zheng, B., Wu, B., & Zhou, T. (2018). Using eddy geopotential height to measure the western North Pacific subtropical high in a warming climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 131, 681-691.
- He, C., Zhou, T., & Wu, B. (2015a). The key oceanic regions responsible for the interannual variability of the western North Pacific subtropical high and associated mechanisms. *Journal of Meteorological Research*, 29(4), 562-575.
- He, C., Zhou, T., Lin, A., Wu, B., Gu, D., Li, C., & Zheng, B. (2015b). Enhanced or weakened western North Pacific subtropical high under global warming?. *Scientific reports*, 5(1), 16771.
- He, C., Zhou, T., Zou, L., & Zhang, L. (2013). Two interannual variability modes of the Northwestern Pacific subtropical anticyclone in boreal summer. *Science China Earth Sciences*, 56(7), 1254-1265. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4443-y>
- Ho, C.-H., Baik, J.-J., Kim, J.-H., Gong, D.-Y., & Sui, C.-H. (2004). Interdecadal Changes in Summertime Typhoon Tracks. *Journal of Climate*, 17, 1767-1776, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1767:ICISTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1767:ICISTT>2.0.CO;2)
- Hu, S., Zhou, T., Wu, B., & Chen, X. (2023). Seasonal prediction of the record-breaking northward shift of the western Pacific subtropical high in July 2021. *Advances in Atmospheric Sciences*, 40(3), 410-427.
- Huang, P., Guo, Q., Han, C., Tu, H., Zhang, C., Yang, T., & Huang, S. (2021). An improved method combining CNN and 1D-Var for the retrieval of atmospheric humidity profiles from FY-4A/GIIRS hyperspectral data. *Remote Sensing*, 13(23), 4737.
- Huang, Y., Wang, B., Li, X., & Wang, H. (2018). Changes in the influence of the western Pacific subtropical high on Asian summer monsoon rainfall in the late 1990s. *Climate Dynamics*, 51(1&#8211;2), 443-455. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3933-1>
- Huang, Y., Wang, H., Fan, K., & Gao, Y. (2015). The western Pacific subtropical high after the

- 1970s: westward or eastward shift?. *Climate Dynamics*, 44, 2035-2047.
- Hui, Y., & Shuqing, S. (2003). Longitudinal displacement of the subtropical high in the western Pacific in summer and its influence. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20, 921-933.
- Jinhai, H., Bing, Z., Min, W., & Feng, L. (2001). Vertical circulation structure, interannual variation features and variation mechanism of western Pacific subtropical high. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18, 497-510.
- Jung, S. P., S. R. In, H. W. Kim, J. Sim, S. O. Han, and B. C. Choi, 2015: Classification of atmospheric vertical environment associated with heavy rainfall using long-term radiosonde observational data, 1997-2013. *Atmosphere*, 25, 611-622, doi: 10.14191/Atmos.2015. 25.4.611 (in Korean with English abstract).
- Kamae, Y., Mei, W., & Xie, S.-P. (2017a). Climatological relationship between warm season atmospheric rivers and heavy rainfall over east Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 95, 411-431. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2017-027>
- Kamae, Y., Mei, W., Xie, S.-P., Naoi, M., & Ueda, H. (2017). Atmospheric rivers over the northwestern Pacific: Climatology and interannual variability. *Journal of Climate*, 30, 5605-5619. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0875.1>
- Kang, J. M., Lee, J., Son, S.-W., Kim, J., & Chen, D. (2020). The rapid intensification of East Asian cyclones around the Korean Peninsula and their surface impacts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD031632. <https://doi.org/10.1029/2019JD031632>
- Keller, J. H., and coauthors. (2019). The extratropical transition of tropical cyclones. Part II: Interaction with the midlatitude flow, downstream impacts, and implications for predictability. *Monthly Weather Review*, 147, 1077-1106, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0329.1>
- Kim, H. M., B.-J. Jung, Y. -H. Kim, and H.-S. Lee, 2008: Adaptive observation guidance applied to Typhoon Rusa: Implications for THORPEX-PARC 2008. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 44, 297-312.
- Kim, H.-G., Min, K.-D., Yoon, I.-H., Moon, Y.-S., Lee, D.-I. (1998). Characteristics of the extraordinary high temperature events occurred in Summers of 1987 and 1994 over the Korean Peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 34, 47-64
- Kim, M.-K., J.-S. Oh, C.-K. Park, S.-K. Min, K.-O. Boo, and J.-H. Kim, 2019: Possible impact of the diabatic heating over the Indian subcontinent on heat waves in South Korea. *International Journal of Climatology*, 39(3), 1166-1180, doi:10.1002/joc.5869.
- Kim, O. Y. & C.-M. Lim (2023). Predictability of the Western North Pacific Subtropical High and Associated East Asian Monsoon Rainfall in APCC Multi-Models. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 128, <https://doi.org/10.1029/2023JD038476>
- Kosaka, Y., Xie, S.-P., Lau, N.-C., & Vecchi, G. A. (2013). Origin of seasonal predictability for summer climate over the Northwestern Pacific. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 7574-7579, <https://doi.org/10.1073/pnas.1215582110>
- Lee, D.-K., Kim, H.-R., & Hong, S.-Y. (1998). Heavy rainfall over Korea during 1980-1990. *Korean Journal of Atmospheric Sciences*, 1, 32-50.
- Lee, D.-K., Park, J.-G., & Kim, J.-W. (2008). Heavy rainfall events lasting 18 days from July 31

- to August 17, 1998, over Korea. Journal of the Meteorological Society of Japan, 86, 313-333.
- Lee, J., Son, S.-W., Cho, H.-O., Kim, J., Cha, D.-H., Gyakum, J. R., & Chen, D. (2020). Extratropical cyclones over East Asia: climatology, seasonal cycle, and long-term trend. *Climate Dynamics*, 54, 1131-1144. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05048-w>
- Lee, J.-Y., & coauthors (2017). The long-term variability of Changma in the East Asian summer monsoon system: A review and revisit. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 53, 257-272. <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0032-5>
- Lee, M., Cha, D.-H., Moon, J., Park, J., Jin, C.-S., & Chan, J. C. L. (2019). Long-term trends in tropical cyclone tracks around Korea and Japan in late summer and early fall. *Atmospheric Science Letters*, 20, 1-9. <https://doi.org/10.1002/asl.939>
- Lee, M., D.-H. Cha, J. Moon, J. Park, C.-S. Jin, S., and Johnny C. L. Chan, 2019: Long-term trends in tropical cyclone tracks around Korea and Japan in late summer and early fall. *Atmospheric Science Letters*, 20(11), e939. <https://doi.org/10.1002/asl.939>
- Lee, M., Kim, T., Cha, D.-H., Min, S.-K., Park, D.-S. R., Yeh, S.-W., & Chan, J. C. L. (2021). How does Pacific Decadal Oscillation affect tropical cyclone activity over Far East Asia? *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL096267. <https://doi.org/10.1029/2021GL096267>
- Lee, W.-S., & Lee, M.-I. (2016). Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *International Journal of Climatology*, 36(15), 4815-4830. <https://doi.org/10.1002/joc.4671>
- 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. *Int. J. Climatol.*, 36, 4815-4830, doi: 10.1002/joc.4671.
- Li, C., Lu, R., & Dunstone, N. (2021). Prediction of the western North Pacific subtropical high in summer without strong ENSO forcing. *Journal of Meteorological Research*, 35(1), 101-112. <https://doi.org/10.1007/s13351-021-0113-3>
- Li, W., Li, L., Ting, M., & Liu, Y. (2012). Intensification of Northern Hemisphere subtropical highs in a warming climate. *Nature Geoscience*, 5(11), 830-834.
- Liu, B., Zhu, C., Su, J., Ma, S., & Xu, K. (2019). Record-breaking northward shift of the Western North Pacific subtropical high in July 2018. *Journal of the Meteorological Society of Japan Series*, 97, 913-925. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-047>
- Liu, B., Zhu, C., Su, J., Ma, S., & Xu, K. (2019). Record-breaking northward shift of the western North Pacific subtropical high in July 2018. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 97(4), 913-925.
- Liu, K. S., & Chan, J. C. L. (2008). Interdecadal Variability of Western North Pacific Tropical Cyclone Tracks. *Journal of Climate*, 21, 4464-4476. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2207.1>
- Liu, Y. M., Wu, G. X., Liu, H., & Liu, P. (2001). Condensation heating of the Asian summer monsoon and the subtropical anticyclone in the Eastern Hemisphere. *Climate Dynamics*, 17, 327-338.
- Liu, Y., Wu, G., & Ren, R. (2004). Relationship between the subtropical anticyclone and diabatic heating. *Journal of Climate*, 17(4), 682-698.
- Lu, R. (2001). Interannual variability of the summertime North Pacific subtropical high and its relation to atmospheric convection over the warm pool. *Journal of the Meteorological*

- Society of Japan. Ser. II, 79(3), 771-783.
- Lu, R., & Dong, B. (2001). Westward extension of North Pacific subtropical high in summer. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 79(6), 1229-1241.
- Lu, R., LI, Y., & Dong, B. (2006). External and internal summer atmospheric variability in the western North Pacific and East Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 84(3), 447-462.
- Macbride, J. (1995). Tropical Cyclone formation, *Global Perspectives on Tropical Cyclones*, Chapter 3, World Meteorological Organization, Russel Elsberry, 63-105.
- Mahajan, S., & Fataniya, B. (2020). Cloud detection methodologies: Variants and development—A review. *Complex & Intelligent Systems*, 6, 251-261.
- Mao, J., Sun, Z., & Wu, G. (2010). 20-50-day oscillation of summer Yangtze rainfall in response to intraseasonal variations in the subtropical high over the western North Pacific and South China Sea. *Climate dynamics*, 34, 747-761.
- Min, K.-H., Chung, C.-H., Bae, J.-H., & Cha, D.-H. (2019). Synoptic characteristics of extreme heat waves over the Korean Peninsula based on ERA Interim reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 40, 3179-3195. <https://doi.org/10.1002/joc.6390>
- Min, M., Li, J., Wang, F., Liu, Z., & Menzel, W. P. (2020). Retrieval of cloud top properties from advanced geostationary satellite imager measurements based on machine learning algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111616.
- Miyasaka, T., & Nakamura, H. (2005). Structure and formation mechanisms of the Northern Hemisphere summertime subtropical highs. *Journal of climate*, 18(23), 5046-5065.
- Molinari, J., & Vollaro, D. (2013). What Percentage of Western North Pacific Tropical Cyclones Form within the Monsoon Trough?. *Monthly Weather Review*, 141, 499-505. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00165.1>
- Moon, J., Park, J., Cha, D.-H., & Moon, Y. (2021). Five-day track forecast skills of WRF model for the western North Pacific tropical cyclones. *Weather and Forecasting*, 36, 1491-1503. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0092.1>
- Noh, E., Kim, J., Jun, S.-Y., Cha, D.-H., Park, M.-S., Kim, J.-H., & Kim, H.-G. (2021). The role of the Pacific-Japan pattern in extreme heatwaves over Korea and Japan. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093990. <https://doi.org/10.1029/2021GL093990>
- North, G. R., Pyle, J. A., & Zhang, F. (Eds.). (2014). *Encyclopedia of atmospheric sciences* (Vol. 1). Elsevier.
- Okamura, R., Iwabuchi, H., & Schmidt, K. S. (2017). Feasibility study of multi-pixel retrieval of optical thickness and droplet effective radius of inhomogeneous clouds using deep learning. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(12), 4747-4759.
- Paek, H., Yu, J. Y., Hwu, J. W., Lu, M. M., & Gao, T. (2015). A source of AGCM bias in simulating the western Pacific subtropical high: Different sensitivities to the two types of ENSO. *Monthly Weather Review*, 143(6), 2348-2362. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00401.1>
- Pan, M., & Lu, M. (2020). East Asia atmospheric river catalog: Annual cycle, transition mechanism, and precipitation. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL089477. <https://doi.org/10.1029/2020GL089477>
- Park, C., and and Coauthors, 2021: Diverse synoptic weather patterns of warm-season heavy



- rainfall events in South Korea. *Mon. Wea. Rev.*, 149, 3875-3893, doi: 10.1175/MWR-D-20-0388.s1.
- Park, C., & coauthors (2021a). Diverse Synoptic Weather Patterns of Warm-Season Heavy Rainfall Events in South Korea. *Monthly Weather Review*, 149, 3875-3893, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0388.s1>
- Park, C., & coauthors (2021c). Record-breaking summer rainfall in south korea in 2020: Synoptic characteristics and the role of large-scale circulations. *Monthly Weather Review*, 149, 3085-3100, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0051.s1>
- Park, C., S.-W. Son, J. Kim\*, E.-C. Chang, J.-H. Kim, E. Jo, D.-H. Cha, and S. Jeong (2021). Diverse synoptic weather patterns of warm-season heavy rainfall events in South Korea. *Mon. Wea. Rev.*, DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0388.1>.
- Park, C., Son, S.-W., & Guan, B. (2023). Multiscale nature of atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL102784. <https://doi.org/10.1029/2023GL102784>
- Park, C., Son, S.-W., & Kim, H. (2021). Distinct features of atmospheric rivers in the early versus late east Asian summer monsoon and their impacts on monsoon rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD033537. <https://doi.org/10.1029/2020JD033537>
- Park, C., Son, S.-W., & Kim, J.-H. (2021b). Role of baroclinic trough in triggering vertical motion during summertime heavy rainfall events in Korea. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78, 1687-1702, DOI: 10.1175/JAS-D-20-0216.1
- Park, J. Y., Jhun, J. G., Yim, S. Y., & Kim, W. M. (2010). Decadal changes in two types of the western North Pacific subtropical high in boreal summer associated with Asian summer monsoon/El Niño-Southern Oscillation connections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D21).
- Parsons, D. B., and Coauthors, 2017: THORPEX Research and the Science of Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 160, 807-830, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00025.1>.
- Qiao, S., Chen, D., Wang, B., Cheung, H.-N., Liu, F., Cheng, J., et al. (2021). The longest 2020 Meiyu season over the past 60 years: Subseasonal perspective and its predictions. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093596. <https://doi.org/10.1029/2021GL093596>
- Rios-Berrios R., and G. H. Bryan, 2023: Sensitivity of Tropical Oceanic Convection to Horizontal Model Resolution in Idealized Simulations Forced with PRECIP Observations, 15th International Conference on Mesoscale Convective Systems, 22-25 May 2023, Fort Collins, Colorado.
- Riyu, L. Indices of the summertime western North Pacific subtropical high. *Adv. Atmos. Sci.* 19, 1004-1028 (2002). <https://doi.org/10.1007/s00376-002-0061-5>
- Riyu, L., Ying, L., & Ryu, C. S. (2008). Relationship between the zonal displacement of the western Pacific subtropical high and the dominant modes of low-tropospheric circulation in summer. *Progress in Natural Science*, 18(2), 161-165.
- Rodwell, M. J., & Hoskins, B. J. (1996). Monsoons and the dynamics of deserts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122(534), 1385-1404.
- Rodwell, M. J., & Hoskins, B. J. (2001). Subtropical anticyclones and summer monsoons. *Journal of Climate*, 14(15), 3192-3211.

- Seager, R., Murtugudde, R., Naik, N., Clement, A., Gordon, N., & Miller, J. (2003). Air-sea interaction and the seasonal cycle of the subtropical anticyclones. *Journal of climate*, 16(12), 1948-1966.
- Seo, E., Lee, M.-I., Jeong, J.-H., Koster, R. D., Schubert, S. D., Kim, H.-M., et al. (2019). Impact of soil moisture initialization on boreal summer subseasonal forecasts: Mid-latitude surface air temperature and heat wave events. *Climate Dynamics*, 52(3&#8211;4), 1695&#8211;1709. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4221-4>
- Seo, K. H., Son, J. H., Lee, S. E., Tomita, T., & Park, H. S. (2012). Mechanisms of an extraordinary East Asian summer monsoon event in July 2011. *Geophysical Research Letters*, 39(5).
- Shin, C.-S., & Lee, T.-Y. (2005). Development mechanisms for the heavy rainfalls of 6-7 August 2002 over the Middle of the Korean Peninsula. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 83, 683-709.
- Shin, U., Park, S.-H., Yun, Y.-R., & Oh, C. (2022). Synoptic Features of August Heavy Rainfall Episodes Accompanied By a Quasi-Stationary Front Over the Korean Peninsula and Its Relationship With the Western Pacific Subtropical. *Frontiers in Earth Science*, 10, 1-13, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.940785>
- Sohn, B. J., Ryu, G.-H., Song, H.-J., & Ou, M.-L. (2013). Characteristic Features of Warm-Type Rain Producing Heavy Rainfall over the Korean Peninsula Inferred from TRMM Measurements. *Monthly Weather Review*, 141, 3873-3888, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00075.1>
- Son, J. H., Seo, K. H., & Wang, B. (2019). Dynamical control of the Tibetan Plateau on the East Asian summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, 46(13), 7672-7679.
- Son, J. H., Seo, K. H., & Wang, B. (2020). How does the Tibetan Plateau dynamically affect downstream monsoon precipitation?. *Geophysical Research Letters*, 47(23), e2020GL090543.
- Song, H.-J., & Sohn, B.-J. (2015). Two heavy rainfall types over the Korean Peninsula in the humid East Asian summer environment: A satellite observation study. *Monthly Weather Review*, 143, 363-382, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00184.1>
- Stuecker, M. F., Jin, F. F., Timmermann, A., & McGregor, S. (2015). Combination mode dynamics of the anomalous northwest Pacific anticyclone. *Journal of Climate*, 28(3), 1093-1111.
- Sui, C. H., Chung, P. H., & Li, T. (2007). Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high. *Geophysical research letters*, 34(11).
- Sun, Y., Zhong, Z., Yi, L., Li, T., Chen, M., Wan, H., Wang, Y., & Zhong, K. (2015). Dependence of the relationship between the tropical cyclone track and western Pacific subtropical high intensity on initial storm size: A numerical investigation. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 120, 11451-11467, <https://doi.org/10.1002/2015JD023716>
- Sunder, S., Ramsankaran, R. A. A. J., & Ramakrishnan, B. (2020). Machine learning techniques for regional scale estimation of high-resolution cloud-free daily sea surface temperatures from MODIS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 228-240.
- Takaya, Y., Ishikawa, I., Kobayashi, C., Endo, H., & Ose, T. (2020). Enhanced Meiyu-Baiu

- rainfall in early summer 2020: Aftermath of the 2019 super IOD event. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL090671. <https://doi.org/10.1029/2020GL090671>
- Tang, H., Hu, K., Huang, G., Wang, Y., & Tao, W. (2022). Intensification and Northward extension of Northwest Pacific anomalous anticyclone in El Niño decaying mid-summer: an energetic perspective. *Climate Dynamics*, 58(1-2), 591-606.
- Teixeira, J. V., Nguyen, H., Posselt, D. J., Su, H., & Wu, L. (2021). Using machine learning to model uncertainty for water vapor atmospheric motion vectors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(3), 1941-1957.
- Wang, B., Bao, Q., Hoskins, B., Wu, G., & Liu, Y. (2008). Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia. *Geophysical Research Letters*, 35(14).
- Wang, B., Wu, R., & Fu, X. (2000). Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?. *Journal of Climate*, 13(9), 1517-1536.
- Wang, B., Wu, R., & Li, T. (2003). Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation. *Journal of Climate*, 16(8), 1195-1211. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)16<1195:AOIAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1195:AOIAI>2.0.CO;2)
- Wang, B., Xiang, B., & Lee, J.-Y. (2013). Subtropical High predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 2718-2722. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214626110>
- Wang, C., & Wang, B. (2019). Tropical cyclone predictability shaped by western Pacific subtropical high: integration of trans-basin sea surface temperature effects. *Climate Dynamics*, 53, 2697-2713. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04651-1>
- Wang, C., Platnick, S., Meyer, K., Zhang, Z., & Zhou, Y. (2020). A machine-learning-based cloud detection and thermodynamic-phase classification algorithm using passive spectral observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(5), 2257-2277.
- Wang, Y., Hu, H., Ren, X., Yang, X. Q., & Mao, K. (2023). Significant northward jump of the western Pacific subtropical high: The interannual variability and mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(6), e2022JD037742.
- Wang, Y., Hu, H., Ren, X., Yang, X. Q., & Mao, K. (2023). Significant northward jump of the western Pacific subtropical high: The interannual variability and mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(6), e2022JD037742.
- Wei, W., Zhang, R., Wen, M., Yang, S., & Li, W. (2019). Dynamic effect of the South Asian high on the interannual zonal extension of the western North Pacific subtropical high. *International Journal of Climatology*, 39(14), 5367-5379.
- White, R. H., S. Anderson, J. F. Booth, G. Braich, C. Draeger, C. Fei, C. D. G. Harley, S. B. Henderson, M. Jakob, C.-A. Lau, L. Mareshet Admasu, V. Narinesingh, C. Rodell, E. Roodcroft, K. R. Weinberger, and G. West, 2023: The unprecedented Pacific Northwest heatwave of June 2021. *Nature Communications*, 14(1), 727. [doi:10.1038/s41467-023-36289-3](https://doi.org/10.1038/s41467-023-36289-3).
- Wu, B., & Zhou, T. (2008). Oceanic origin of the interannual and interdecadal variability of the summertime western Pacific subtropical high. *Geophysical Research Letters*, 35(13).
- Wu, C.-C., G.-Y. Lien, J.-H. Chen, and Fuqing Zhang, 2010: Assimilation of Tropical Cyclone Track and Structure Based on the Ensemble Kalman Filter (EnKF). *J. Atmos.*

- Sci.*, 67, 3806-3822.
- Wu, C.-C., J.-H. Chen, P.-H. Lin, and K.-H. Chou, 2007: Targeted observations of tropical cyclones based on the adjoint-derived sensitivity steering vector. *J. Atmos. Sci.*, 64, 2611-2626.
- Wu, C.-C., K.-H. Chou, Y. Wang, and Y.-H. Kuo, 2006: Tropical cyclone initialization and prediction based on four-dimensional variational data assimilation. *J. Atmos. Sci.*, 63, 2383-2395.
- Wu, L., & Wang, C. (2015). Has the western Pacific subtropical high extended westward since the late 1970s?. *Journal of Climate*, 28(13), 5406-5413.
- Wu, L., Wen, Z., Huang, R., & Wu, R. (2012). Possible linkage between the monsoon trough variability and the tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 140, 140-150. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00078.1>
- Wu, Q., Wang, X., & Tao, L. (2020). Interannual and interdecadal impact of Western North Pacific Subtropical High on tropical cyclone activity. *Climate Dynamics*, 54, 2237-2248. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05110-7>
- Xiang, B., Wang, B., Yu, W., & Xu, S. (2013). How can anomalous western North Pacific subtropical high intensify in late summer?. *Geophysical Research Letters*, 40(10), 2349-2354.
- Xie, S. P., Hu, K., Hafner, J., Tokinaga, H., Du, Y., Huang, G., & Sampe, T. (2009). Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *Journal of climate*, 22(3), 730-747.
- Yamaguchi, M., T. Iriguchi, T. Nakazawa, and C.-C. Wu, 2009: An observing system experiment for Typhoon Conson (2004) using a singular vector method and DOTSTAR data. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 2801-2816.
- Yang, K., Cai, W., Huang, G., Hu, K., Ng, B., & Wang, G. (2022). Increased variability of the western Pacific subtropical high under greenhouse warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(23), e2120335119.
- Yang, S.C., J. Liu, H. Yeh, S. Chen, W. Chang, K. Chung, and P. Chang 2023: Applying the multi-scale radar ensemble data assimilation system to investigate the heavy precipitation episode during TAHOPE/PRECIP-IOP3, 15th International Conference on Mesoscale Convective Systems, 22-25 May 2023, Fort Collins, Colorado.
- Yeh, S. W., Won, Y. J., Hong, J. S., Lee, K. J., Kwon, M., Seo, K. H., & Ham, Y. G. (2018). The record-breaking heat wave in 2016 over South Korea and its physical mechanism. *Monthly Weather Review*, 146, 1463-1474. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0205.1>
- Yeo, S.-R., S.-W. Yeh, and W.-S. Lee, 2019: Two Types of Heat Wave in Korea Associated With Atmospheric Circulation Pattern. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(14), 7498-7511. [doi:10.1029/2018JD030170](https://doi.org/10.1029/2018JD030170).
- Yeo, S.-R., Yeh, S.-W., & Lee, W.-S. (2019). Two types of heat wave in Korea associated with atmospheric circulation pattern. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JD030170>
- Yoon, D., Cha, D. H., Lee, G., Park, C., Lee, M. I., & Min, K. H. (2018). Impacts of synoptic and local factors on heat wave events over southeastern region of Korea in 2015.

- Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, 12081&#8211;012096. <https://doi.org/10.1029/2018jd029247>
- Yoon, D., Cha, D.-H., Lee, M.-I., Min, K.-H., Kim, J., Jun, S.-Y., & Choi, Y. (2020). Recent changes in heatwave characteristics over Korea. *Climate Dynamics*, 55, 1685&#8211;1696. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05420-1>
- Yoon, D., D. H. Cha, G. Lee, C. Park, M. I. Lee, and K. H. Min, 2018: Impacts of synoptic and local factors on heat wave events over southeastern region of Korea in 2015. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 123, 12-081, doi: 10.1029/2018JD029247.
- Yoon, D., Kang, T., Cha, D.-H., Song, C.-K., Lee, M.-I., Min, K.-H., et al. (2023). Role of land&#8211;atmosphere interaction in the 2016 Northeast Asia heat wave: Impact of soil moisture initialization. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD037718. <https://doi.org/10.1029/2022JD037718>
- Zhang, D., Martin, G. M., Rodriguez, J. M., Ke, Z., & Chen, L. (2020). Predictability of the western North Pacific subtropical high associated with different ENSO phases in GloSea5. *Journal of Meteorological Research*, 34(5), 926&#8211;940. <https://doi.org/10.1007/s13351-020-0055-1>
- Zhang, W., Li, H., Stuecker, M. F., Jin, F. F., & Turner, A. G. (2016). A new understanding of El Niño's impact over East Asia: Dominance of the ENSO combination mode. *Journal of Climate*, 29(12), 4347-4359.
- Zhou, P., & Li, X. (2022). Comparison of Intraseasonal Variation of the Meridional Displacement of the Western North Pacific Subtropical High in Early and Late Summer. *Journal of Climate*, 35(19), 6361-6379
- Zhou, T., Yu, R., Zhang, J., Drange, H., Cassou, C., Deser, C., ... & Okumura, Y. (2009). Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s. *Journal of Climate*, 22(8), 2199-2215.
- Zhou, Z.-Q., Xie, S.-P., & Zhang, R. (2021). Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118, e202225511, <https://doi.org/10.1073/pnas.2022255118>
- Zhu, Z., Zhou, Y., Jiang, W., Fu, S., & Hsu, P. (2023). Influence of compound zonal displacements of the South Asia high and the western Pacific subtropical high on Meiyu intraseasonal variation. *Climate Dynamics*, 1-17.
- Zscheischler, J., & coauthors. (2020). A typology of compound weather and climate events. *Nature Review Earth and Environment*, 1, 333-347, <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>
- 국립기상과학원, 2022: 남한상세 기후변화 전망보고서, 70 pp. [Available online at <http://www.climate.go.kr/home/bbs/view.php?code=71&bname=scenario&vcode=6752&cpag e=1&vNum=Notice&skind=&sword=&category1=&category2=>]
- 기상청 2021: 차세대기상, 기후관측위성개발사업성능지표보고서.
- 기상청. (2011). 태풍백서
- 김지영, 이대근, Jan Kysely, 2008: 한반도와 유럽에서 발생한 폭염의 종관기후학적 특성 비교, *대기*, 18(4), 355-365.
- 류상범. (2001). 장마의 정의와 어원. *한국기상학회지*, 11, 6-12.
- 백승윤, 김상욱, 정명일, 노준우, 손석우. (2018). 자기조직화지도를 이용한 서울 폭염사례 분류 연구. *기후*

- 변화학회지, 9, 209-221, <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.3.209>
- 변희룡, 황호성, 고혜영. (2006) 2004년 밀양의 이상더위의 특징과 종관적 원인. *대기*, 16, 187-201.
- 서경환, 손준혁, 이준이. (2011). 장마의 재조명, *대기*, 21, 109-121
- 이강진, 권민호, 강현우, 2022: 2021년 7월 동해에서 발생한 극한 고온현상과 기작, *대기*, 32(1), 17-25. doi:10.14191/Atmos.2022.32.1.017.
- 이현철, 조영준, 임병환, 김승범, 2020: K-평균 군집분석을 활용한 여름철 남한지역 폭염 날씨유형 분류 및 사상자와의 관련성 연구, *한국방재학회논문집*, 20(3), 11-18, doi:10.9798/KOSHAM.2020.20.3.11.
- 이희동, 민기홍, 배정호, 차동현, 2020: 2016년과 2018년 한반도 폭염의 특징 비교와 분석, *대기*, 30(1), 1-15, doi:10.14191/Atmos.2020.30.1.001
- 장은철, 김주완, 이규원, & 손석우. (2020). 장마철 정체전선 구조 이해를 위한 북태평양고기압 가장자리의 역학적 정의와 변동성. *한국기상학회 학술대회 논문집*, 152-152.
- 차은정. (2006). 장마의 의미. *한국수자원학회지*, 39, 69-72
- 최기선, 차유미, 김태룡 (2012). 한반도에 상륙한 태풍 빈도수의 십년간 변동 특성. *한국지구과학회지*, 33, 49-58.
- 행정안전부, 2021: 재해연보(자연재난), 492 pp. [Available online at [https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do;jsessionid=Hii1yP2FySqoKhg-mRt6-pFA.node30?bbsId=BBSMSTR\\_00000000014&nttId=97685#none](https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do;jsessionid=Hii1yP2FySqoKhg-mRt6-pFA.node30?bbsId=BBSMSTR_00000000014&nttId=97685#none)].

## 부록: 국외 전문가 자문 원문



1. Tianjun Zhou (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, zhoujt@lasg.iap.ac.cn)

#### Research Questions for oversea advisers

1. Recently, East Asia has been experiencing frequent extreme weather events with rapidly increasing damage. Extreme summer weather events in East Asia are closely related to the expansion and contraction of the North Pacific Subtropical Anticyclone. Therefore, gaining insights into the temporal dynamics of this anticyclone at various scales is of utmost importance. Despite numerous previous studies, our understanding of its variability remains limited. Given our current understanding of the North Pacific Subtropical Anticyclone, what research questions do you think we should be addressing in the future?

1) One example of extreme heat event related to the North Pacific Subtropical Anticyclone (NPSA) is the 2018 case. Although detection and attribution studies highlight the contribution of global warming, the mechanism for the interannual norward extension of the subtropical high for such kind of extreme remains unclear:

References:

Ren Liwen, Tianjun Zhou and Wenxia Zhang, 2020, Attribution of the record-breaking heat event over Northeast Asia in summer 2018: the role of circulation, *Environ. Res. Lett.* 15 054018

2) Mechanisms of NPSA variation, especially on interannual timescale as part of the East Asian summer monsoon system, have been extensively studied. For practical prediction, predictability sources from intra-seasonal to decadal timescales and their possible changes should be clarified in observation and warming climate. The decadal scale westward extension of the subtropical high since the late 1970s was explained by the basin scale warming of tropical Indian Ocean (Zhou et al. 2009). For NPSA projection, reasons for large uncertainty in different model ensembles should be clarified, focusing on the impacts of key physical parameters in cloud and convection schemes and model resolution.

References

- Chen, X. & Zhou, T. (2018) Relative contributions of external SST forcing and internal atmospheric variability to July–August heat waves over the Yangtze River valley. *Climate Dynamics*, 51, 4403–4419.
- Chen, X., Zhou, T., Wu, P., Guo, Z. & Wang, M. (2020) Emergent constraints on future projections of the western North Pacific Subtropical High. *Nature Communications*, 11, 2802.
- Zhou, Tianjun, R. Yu, J. Zhang, H. Drange, C. Cassou, C. Deser, D. L. R. Hodson, E. Sanchez-Gomez, J. Li, N. Keenlyside, X. Xin, Y. Okumura (2009), Why the Western

Pacific Subtropical High has Extended Westward since the Late 1970s. *Journal of Climate*, 22, 2199–2215.

- Chen, X., & Zhou, T. (2014) Relative role of tropical SST forcing in the 1990s periodicity change of the Pacific–Japan pattern interannual variability. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 119, 13043–13066.
  - Chen, X., Wu, P. L., Roberts, M. J. & Zhou T. (2018) Potential underestimation of future mei-yu rainfall with coarse-resolution climate models. *Journal of Climate*, 31, 6711–6727.
- 3) The NPSA is a basin-scale circulation system, but extreme climate events are usually regional-to-local scale. It still requires deeper understanding on the dynamics connecting the variability of planetary-scale circulation system with regional climate extremes across multiple time scales. For example, the North Pacific subtropical anticyclone was stronger than normal condition in the summers of 2020 and 2022, but subtropical East Asia experienced extreme flood in 2020 and extreme drought and heat waves in 2022 (He et al. 2022, 2023). Efforts should be devoted to the understanding of regional scale climate extremes associated with the variability of subtropical anticyclone.

References

- He C, Zhou W, Li T, Zhou T, Wang Y (2022) East Asian summer monsoon enhanced by COVID-19. *Clim Dynam* 59 (9):2965–2978. doi:10.1007/s00382-022-06247-8
- He C, Zhou T, Zhang L, Chen X, Zhang W (2023) Extremely hot East Asia and flooding western South Asia in the summer of 2022 tied to reversed flow over Tibetan Plateau. *Clim Dynam* 61 (5):2103–2119. doi:10.1007/s00382-023-06669-y

2. Given the limited in-situ observations over the western North Pacific including the East China Sea, where the North Pacific Subtropical Anticyclone is most active in summer, our monitoring and research predominantly rely on satellite and reanalysis data. In the context of monitoring and forecasting the North Pacific Subtropical Anticyclone, what, in your opinion, constitutes the most significant source of uncertainty in current observations? Furthermore, what specific observations and research initiatives do you believe are necessary to reduce this uncertainty?

This is a good point that I have never touched. Anomalous vertical velocity of atmosphere is the direct driver of climate extremes including floods, droughts and heat waves. Usually the circulation, temperature and winds in the latest reanalysis such as ERA5 are thought to be accurate enough for climate research. But if this viewpoint is actually lack of verification, it is necessary to launch a project of enhanced vertical profile observation, including the temperature, wind, pressure, humidity et al., over the WNP region.



3. Could you please provide information on any ongoing or upcoming research projects or initiatives related to the North Pacific Subtropical Anticyclone in your country?

In China, most studies on the North Pacific Subtropical Anticyclone are treated as part of East Asian summer monsoon. Both NSFC and the Ministry of Science and Technology have supported lots of projects on monsoon. For example, there is an ongoing Project supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) named "Response of the atmospheric circulation anomaly over western North Pacific associated with decaying ENSO to global warming and its mechanism". It is well established that the anomalous anticyclone over the western North Pacific is the key atmospheric bridge connecting East Asian climate variability to El Niño-Southern Oscillation (ENSO). This project aims to investigate the response of the anomalous atmospheric circulation over the western North Pacific during the decaying phase of ENSO to global warming, and to elucidate the mechanism for the responses of the atmospheric circulation anomaly by using a hierarchy of idealized model experiments.

4. The variability of the North Pacific Subtropical Anticyclone is very important for extreme weather events in East Asian countries. International cooperation with these nations is essential. What do you believe are the most pressing international collaborative research areas? How should we structure international cooperation efforts? What are the expected difficulties in promoting international cooperation?

Improving the prediction skill of NPSA from seasonal to interannual timescale should be the most urgent. Together launching new model intercomparison project, applying international cooperation program from funding agencies in each country, or organizing coordinated observations should be of higher priority.

In addition, new data assimilation method along with new observational data are also encouraged. The major difficulty is how to jointly design, construct and maintain a long-term observational system through international collaboration.

5. To enhance the predictability of extreme summer weather events in Korea, we are embarking on an intensive research project focused on the North Pacific subtropical anticyclone. This includes the possibility of international collaboration and an observational campaign. Your input is valuable. Please share your suggestions and comments that we should take into account when planning this project.

A model intercomparison for understanding the NPSA variation in past and future may be a candidate. Multi-models run the same suit of designed experiments such as those

driven by realistic or ideal SST anomalies in different basins or changing other forcings like sea ice or snow cover, or modifying GHG and aerosol, based on different scientific targets.

As mentioned in the response to the 2nd topic, collaborated observational campaign in the WNP region is also crucial. In my knowledge, the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) and NSFC are jointly supporting some collaborations on the multi-disciplinary study on the climate change in the western Pacific, including some field campaign.

In addition to above questions, for the technical details for subtropical anticyclone research, the Metric used to quantify the subtropical anticyclone is very important. Traditional metric on the subtropical anticyclone is primarily based on geopotential height, but geopotential height increases systematically under global warming which may lead to systematic bias to the variability of the subtropical anticyclone (He et al.2015, 2018; Cherchi et al.2018; He and Zhou 2022). Therefore, multiple metrics should be used to examine the variability of the subtropical anticyclones, and inter-comparison among different metrics should be helpful.

#### References

- Cherchi A, Ambrizzi T, Behera S, Freitas ACV, Morioka Y, Zhou T (2018) The Response of Subtropical Highs to Climate Change. *Current Climate Change Reports* 4 (4):371-382. doi:10.1007/s40641-018-0114-1
  - He C, Lin A, Gu D, Li C, Zheng B, Wu B, Zhou T (2018) Using eddy geopotential height to measure the western North Pacific subtropical high in a warming climate. *Theor Appl Climatol* 131 (1):681-691. doi:10.1007/s00704-016-2001-9
  - He C, Zhou T, Lin A, Wu B, Gu D, Li C, Zheng B (2015) Enhanced or Weakened Western North Pacific Subtropical High under Global Warming? *Scientific Reports* 5:16771. doi:10.1038/srep16771
- He C, Zhou T (2022) Distinct Responses of North Pacific and North Atlantic Summertime Subtropical Anticyclones to Global Warming. *J Climate* 35 (24):4517-4532. doi:10.1175/jcli-d-21-1024.1

## 2. Xiuqun Yang (Nanjing University, xqyang@nju.edu.cn )

**Research Questions for oversea advisers**

6. Recently, East Asia has been experiencing frequent extreme weather events with rapidly increasing damage. Extreme summer weather events in East Asia are closely related to the expansion and contraction of the North Pacific Subtropical Anticyclone. Therefore, gaining insights into the temporal dynamics of this anticyclone at various scales is of utmost importance. Despite numerous previous studies, our understanding of its variability remains limited. Given our current understanding of the North Pacific Subtropical Anticyclone, what research questions do you think we should be addressing in the future?

Multi-scale variabilities of the North Pacific Subtropical Anticyclone (NPSA) ranging from subseasonal-to-interdecadal time scales and their causes need to be thoroughly explored. The causes might be associated with the combined effects of both climate modes originating from the tropics (e.g., ENSO, IOD, BSISO) and from the mid-and-high latitudes (e.g., AO, NPO, NAO, or PDO/AMO) and even from the stratosphere. Some strong regional human activities such as aerosol emissions and large scale urbanization (say, in Yangtze River Delta region) may also have impacts on decadal time scales. On the subseasonal time scale, the boreal summer intraseasonal oscillation (BSISO) in the northwestern tropical Pacific which has been recently found to be phase-asymmetric (Li et al., Journal of Climate, 2023) may migrate northward, causing NPSA rapid movement and associated rapid transition between flood and drought in East Asia.

7. Given the limited in-situ observations over the western North Pacific including the East China Sea, where the North Pacific Subtropical Anticyclone is most active in summer, our monitoring and research predominantly rely on satellite and reanalysis data. In the context of monitoring and forecasting the North Pacific Subtropical Anticyclone, what, in your opinion, constitutes the most significant source of uncertainty in current observations? Furthermore, what specific observations and research initiatives do you believe are necessary to reduce this uncertainty?

Besides the satellite observations, I believe there exist limited other observations at some islands and coastal stations across East Asian countries. This need an integration of those existing observations, although it is quite difficult. Given the importance of NPSA to the East Asian countries, a joint observation and research initiative deserves to be proposed under an international cooperation framework. To my knowledge, there exists such a type of international cooperation framework among China, Japan and Korea for climate science. It is noted that such an initiative might not be only for the meteorological sector but for the oceanographic sector, which are separated in China.

8. Could you please provide information on any ongoing or upcoming research projects

or initiatives related to the North Pacific Subtropical Anticyclone in your country?

To my knowledge, there are not big research projects or initiatives specifically for NPSA in China. There do exist some research projects on the East Asian weather and climate variabilities supported by Chinese funding agencies, which are more or less involved in the NPSA. Since NPSA is an atmospheric circulation system, its variabilities are under climate system. Most of the ongoing related projects were proposed in the context of climate system.

9. The variability of the North Pacific Subtropical Anticyclone is very important for extreme weather events in East Asian countries. International cooperation with these nations is essential. What do you believe are the most pressing international collaborative research areas? How should we structure international cooperation efforts? What are the expected difficulties in promoting international cooperation?

As mentioned before, I believe that a joint observation or research initiative is necessary and of interest under an international cooperation framework among East Asian countries. The theme entitled “The multi-scale variabilities of the North Pacific Subtropical Anticyclone and their impacts” is good topic. I consider this is a commonly shared issue with a top priority for East Asian countries. As I know, both the Ministry of Science & Technology (MOST) of China and National Natural Science Foundation of China (NSFC) encourage Chinese scientists to implement international cooperation through applying for relevant projects. I am not sure if the counterparts of Korean funding agencies have similar mechanisms.

10. To enhance the predictability of extreme summer weather events in Korea, we are embarking on an intensive research project focused on the North Pacific subtropical anticyclone. This includes the possibility of international collaboration and an observational campaign. Your input is valuable. Please share your suggestions and comments that we should take into account when planning this project.

One of my suggestions at first is to develop an international collaborative research project focusing on the issue of “The multi-scale variabilities of the North Pacific Subtropical Anticyclone and their impacts”. The observational campaign under the international cooperation frame is relatively complicated and difficult. In China, this may get CMA involved.

3. Yu Kosaka (University of Tokyo, ykosaka@atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp )

**Reply to “Research Questions for oversea advisers”**

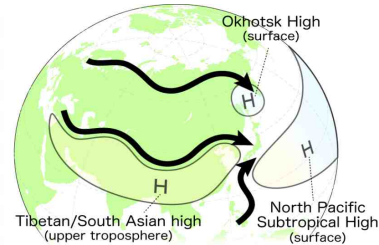
Yu Kosaka

Research Center for Advanced Science and Technology

The University of Tokyo

1. Recently, East Asia has been experiencing frequent extreme weather events with rapidly increasing damage. Extreme summer weather events in East Asia are closely related to the expansion and contraction of the North Pacific Subtropical Anticyclone. Therefore, gaining insights into the temporal dynamics of this anticyclone at various scales is of utmost importance. Despite numerous previous studies, our understanding of its variability remains limited. Given our current understanding of the North Pacific Subtropical Anticyclone, what research questions do you think we should be addressing in the future?

We have developed a schematic image for the summer climate variability for Japan that there are three key influence (teleconnection) pathways: the Pacific-Japan (PJ) pattern from the south (also called as the EAP pattern), the Silk Road teleconnection along the Asian jet, and the wavetrain pattern along the Polar Front jet (see the right figure). The first two patterns directly



affect the N Pacific subtropical anticyclone variability, whereas the last one is related to the formation of the Okhotsk High. First, influence of the Silk Road pattern on the Subtropical Anticyclone, as a function of zonal phase, seasonality, and magnitude, is not clear (to me). I wonder if there is a nonlinear dependence on the magnitude. The second, and more ambitious theme is how the combination of these teleconnections affects the anticyclone. We have extracted a “pure” mode of variability by statistical analysis and idealized simulations, but the reality is that multiple modes of variability evolve simultaneously. Predictive understanding requires the nonlinear interactions of these modes/patterns, beginning from a combination of two patterns and then expanding to three and more possible patterns. There are a few such studies examining such coupling (e.g. Takemura and Mukougawa 2020, Hirota and Takahashi 2012), but are not enough. This is an idea for funding proposal emerged from a group in Japan incl. Profs. Kimoto and Watanabe.

Another topic would be the influence mechanism of the Subtropical Anticyclone, rather than the variability of anticyclone itself. (If this is not relevant here, please ignore.) This will involve midlatitude air-sea interaction, radiative feedback, aerosols, moisture supply, and

multiscale interactions (e.g. interaction with TC activity, Meiyu-Changma-Baiu rainband, meso-scale rainband, etc).

2. Given the limited in-situ observations over the western North Pacific including the East China Sea, where the North Pacific Subtropical Anticyclone is most active in summer, our monitoring and research predominantly rely on satellite and reanalysis data. In the context of monitoring and forecasting the North Pacific Subtropical Anticyclone, what, in your opinion, constitutes the most significant source of uncertainty in current observations? Furthermore, what specific observations and research initiatives do you believe are necessary to reduce this uncertainty?

I have no experience on observations, and below are just what I learned from interactions with others. I learned that there are considerable (~a few degrees) differences among SST products, even though all are based on satellite observations. Ship observations and comparison with different SST products may be useful. In synoptic scales, direct observations within a tropical cyclone and around an organized convective system may be also valuable (but I am not involved in studies on those scales, so I don't have any specific perspective).

Observation sensitivity experiments (OSE) and observation system sensitivity experiments (OSSE) with a prediction model are useful to identify the key source of prediction uncertainty and evaluate the value of observations.

3. Could you please provide information on any ongoing or upcoming research projects or initiatives related to the North Pacific Subtropical Anticyclone in your country?

I don't know any projects specifically targeted at the Subtropical Anticyclone. A related project may be the extratropical air-sea interaction (the climatic “hotspot” project). This project started more than a decade ago by Prof. Hisashi Nakamura as the PI, and this academic year is the last year of the 2nd phase (the hotspot2 project) with the PI Dr. Masami Nonaka of JAMSTEC. Now we are applying for the 3rd phase, which focuses on the climate system around Japan. We will soon receive the result of the first step, and if successful, we will submit a longer proposal, and then have an interview. (Note that the chance is not very high.) In this project, I will lead a team on hot and cold extremes both in winter and summer, which will have strong linkage with the subtropical anticyclone studies.

In the SENTAN program (The Advanced Studies on Climate Change Projection) led by Prof. Masahiro Watanabe, my and Dr. Yukiko Imada's teams work on attribution of climate changes and extreme events, respectively, whereas studies can be related to the subtropical anticyclone.

4. The variability of the North Pacific Subtropical Anticyclone is very important for

extreme weather events in East Asian countries. International cooperation with these nations is essential. What do you believe are the most pressing international collaborative research areas? How should we structure international cooperation efforts? What are the expected difficulties in promoting international cooperation?

From observational perspective, in the hotspot projects, researchers have conducted a coordinated simultaneous multi-ship and airplane observations together with station observations to measure atmospheric and oceanic conditions around Japan. They care about the EEZ, and if it can be expanded to international coordinated observations, it would be pressing. I don't know how this is feasible, though.

For the modelling and analysis studies, multi-model and large ensemble simulations are useful, but transfer of huge simulation and prediction data is always a bottle neck. Accessing and analyzing them on remote servers or on the cloud service would reduce the data transfer and management workloads and promote collaboration studies.

5. To enhance the predictability of extreme summer weather events in Korea, we are embarking on an intensive research project focused on the North Pacific subtropical anticyclone. This includes the possibility of international collaboration and an observational campaign. Your input is valuable. Please share your suggestions and comments that we should take into account when planning this project.

I have described my ideas above. I would add here that a project including both observations and modelling/analysis teams, the two activities can easily be separated or appear to be separated. To avoid this, a project design that links the two communities would be useful. For example, support observations by weather forecasting and analysis, and use the observational data to assimilation (e.g. OSE) and model process validation.

#### 4. Yuhei Takaya (MRI-JMA, yuhei.takaya@mri-jma.go.jp )

##### **Research Questions for oversea advisers**

1. Recently, East Asia has been experiencing frequent extreme weather events with rapidly increasing damage. Extreme summer weather events in East Asia are closely related to the expansion and contraction of the North Pacific Subtropical Anticyclone. Therefore, gaining insights into the temporal dynamics of this anticyclone at various scales is of utmost importance. Despite numerous previous studies, our understanding of its variability remains limited. Given our current understanding of the North Pacific Subtropical Anticyclone, what research questions do you think we should be addressing in the future?

##### 1) Future Change of the North Pacific Subtropical High (NPSH)

CMIP models still exhibit substantial uncertainty in predicting the NPSH's future behavior. How can this uncertainty be narrowed, and what could serve as a reliable emergent constraint for regional climate change? Specifically, we lack a clear understanding of reasonable constraints, which could select more reliable projections of extremes in East Asia.

##### 2) Climate Drivers of the NPSH Variability and Extreme Weather Events in East Asia

Previous studies indicate that different remote forcing of climate drivers reinforce different patterns of NPSH anomalies. Clear distinction of response and attribution may be utmost important. The investigation of climate drivers responsible for extreme weather events in East Asia spans various timescales. Despite extensive research, our understanding of compound extreme events remains limited. This includes determining the relative contributions of climate drivers to NPSH occurrences and assessing their predictability. Additionally, there is a need for a deeper understanding of the underlying physical mechanisms.

##### 3) Assessing the Capability of State-of-the-Art Dynamical Prediction Models

Evaluating the performance of state-of-the-art dynamical prediction models (models in S2S or C3S data archives) in predicting the Asian monsoon variability and extreme weather events, including their frequency, intensity, and duration, is obviously a crucial research objective. However, addressing this question has remained challenge due to limitations in reforecast periods and ensemble sizes. Expanding large ensemble prediction experiments may help address these limitations.

##### 4) Atmosphere-Ocean Coupling in NPSH Variability

The physical mechanisms governing atmosphere-ocean coupling in NPSH variability are

not yet fully understood. Particularly, why models exhibit different responses to remote forcing from various climate drivers has not been clearly answered.

#### 5) Time-Scale Interactions in the Asian Summer Monsoon

For example, the influence of phenomena like the Madden-Julian Oscillation (MJO) and Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO) on longer-term variations of the Asian monsoon still lacks quantitative evaluation.

#### 6) Feedback Processes Impacting NPSH Variability and Predictability

Investigating the influence of various feedback processes on the variability and predictability of the North Pacific Subtropical High is important to enhance the predictive capability. These processes include El Niño-Southern Oscillation (ENSO) with its Bjerknes feedback, Pacific Meridional Mode (PMM) with its Westerly Wind Stress feedback, and the Indian-Pacific Ocean Capacitor (IPOC) with its self-sustaining energy conversion mechanism.

2. Given the limited in-situ observations over the western North Pacific including the East China Sea, where the North Pacific Subtropical Anticyclone is most active in summer, our monitoring and research predominantly rely on satellite and reanalysis data. In the context of monitoring and forecasting the North Pacific Subtropical Anticyclone, what, in your opinion, constitutes the most significant source of uncertainty in current observations? Furthermore, what specific observations and research initiatives do you believe are necessary to reduce this uncertainty?

I think that the most significant source of uncertainty in current observations stems from atmospheric moisture profile measurements obtained via satellites and in-situ (sonde) observations over the western North Pacific. For operational forecasting and analysis, surface pressure measurements from buoys are also crucial (Centurioni et al. in 2017).

Also associated with the response to the first question, I emphasize that a substantial portion of uncertainty in the analysis (data assimilation) arises from the limitations of model physics. Specifically, uncertainties in convection schemes and air-sea interactions (which include not only surface physics but also the atmosphere and ocean boundary layers) play an important role. The misrepresentation of atmospheric convection also affects the accuracy of wind analyses. Therefore, an extensive focus on observing vertical profiles in both the atmosphere and ocean can significantly contribute to improving the representation of model physics, ultimately leading to a reduction in overall uncertainty. Furthermore, obtaining more accurate analyses of temperature and

humidity profiles is essential for advancing our understanding. However, it's important to note that achieving this requires not only enhanced observations but also ongoing model improvements.

Reference: Centurioni, L., A. Horányi, C. Cardinali, E. Charpentier, and R. Lumpkin, 2017: A Global Ocean Observing System for Measuring Sea Level Atmospheric Pressure: Effects and Impacts on Numerical Weather Prediction. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 231–238, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00080.1>.

3. Could you please provide information on any ongoing or upcoming research projects or initiatives related to the North Pacific Subtropical Anticyclone in your country?

#### 1) AsiaPEX: GEWEX Regional Hydroclimate Project in Asia

The AsiaPEX project is one of the GEWEX Regional Hydroclimate Project in Asia, with a primary focus on terrestrial precipitation. However, it also encompasses broader research of the Asian monsoon variability, including the western North Pacific. The project also plans to conduct intensive international observations and subsequently utilize them for reanalysis purposes, akin to the AMY reanalysis.

Reference: Terao, T., et al., 2023. "AsiaPEX: Challenges and Prospects in Asian Precipitation Research." Bulletin of the American Meteorological Society, 104, E884–E908

#### 2) MEXT-Program for The Advanced Studies of Climate Change Projection (SENTAN)

The SENTAN Project is a flagship research program in Japan focused on climate change, includes scientists working on the North Pacific Subtropical High and its relevance to East Asian climate within Themes 1 and 3.

Website: <https://www.jamstec.go.jp/sentan/eng/>

#### 3) JAMSTEC Observational Campaign

JAMSTEC regularly conducts observational campaigns, which have contributed significantly to international projects like YMC (Year of the Maritime Continent). For detailed information on their plans, please contact Dr. Kunio Yoneyama at JAMSTEC.

#### 3) Hotspot3 (has not yet been adopted):

Hotspot3 is a proposed project as a successor of Hotspot2. This project expands its research scope to include the Asian monsoon variability. The initiation of Hotspot3 is contingent upon the adoption of the project application. I am also a member of the



sub-group focusing on the Asian monsoon within this project.

Hotspot2 Website: [https://www.jamstec.go.jp/apl/hotspot2/index\\_e.html](https://www.jamstec.go.jp/apl/hotspot2/index_e.html)

4. The variability of the North Pacific Subtropical Anticyclone is very important for extreme weather events in East Asian countries. International cooperation with these nations is essential. What do you believe are the most pressing international collaborative research areas? How should we structure international cooperation efforts? What are the expected difficulties in promoting international cooperation?

I think, an international observational campaign is the most essential research activity that requires multi-national collaboration, given that a single nation's resources may not suffice for it. Multinational collaboration is also necessary for conducting an intercomparison of observational impacts in data assimilation, such as initiatives like SynObs in Ocean Predict or the WMO JET-EOSDE activity.

One of the primary challenges lies in coordinating research efforts across different projects, each with varying timeframes, objectives, and areas of focus.

Website:

SynObs: <https://oceanpredict.org/synobs/#section-overview>

The 8th WMO Workshop on the Impact of Various Observing Systems on Numerical Weather Prediction and Earth System Prediction (WMO JET-EOSDE activity):

<https://community.wmo.int/en/meetings/8th-wmo-impact-workshop-home>

5. To enhance the predictability of extreme summer weather events in Korea, we are embarking on an intensive research project focused on the North Pacific subtropical anticyclone. This includes the possibility of international collaboration and an observational campaign. Your input is valuable. Please share your suggestions and comments that we should take into account when planning this project.

I would kindly advise to initiate contact with the above-mentioned projects that are conducting research observations well in advance, preferably a year before, to explore opportunities for collaboration.

In Japan, our colleagues have created a dataset of large ensemble simulations, d4PDF

(Mizuta et al. 2017), which is invaluable for studying future changes and the underlying mechanisms of extreme events. Currently, the Meteorological Research Institute is developing the next system, T-SEC, for the next large ensemble simulations. T-SEC is a partially ocean coupled system with nudging to the ocean analysis. Collaboration using d4PDF or the future large ensembles are highly welcomed. I have conducted model sensitivity experiments using the d4PDF model.

Furthermore, establishing connections with international activities can significantly enhance research visibility. For instance, there is WGSIP (Working Group on Seasonal to Interannual Prediction) in WCRP (World Climate Research Programme). I am currently co-leading an initiative on the seasonal monsoon prediction with Dr. Hongli Ren of CMA. There is also an initiative within WGSIP focused on predicting extremes.

As one of the WCRP Lighthouse activities, Explaining and Predicting Earth System Change (EPESC) actively promotes attribution and prediction studies. Its main focus is decadal prediction and climate projection. For monsoon-related research, establishing close links with organizations like the CLIVAR/GEWEX Monsoon Panel CLIVAR/GEWEX Monsoon Panel, and the WWRP (World Weather Research Programme) Working Group on Tropical Meteorology Research (WGTMR) may be valuable for your project.

WGSIP website: <https://www.wcrp-climate.org/wgsip-overview>

CLIVAR/GEWEX Monsoon Panel website: <https://www.clivar.org/clivar-panels/monsoons>

WGTMR website: <https://community.wmo.int/en/activity-areas/wwrp/wwrp-working-groups/wwrp-tropical-meteorology-research>

Reference: Mizuta, R., and Coauthors, 2017: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 1383–1398, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1>.