

출원번호통지서

출원일자 2021.10.19
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(1069894)
출원번호 10-2021-0139542 (접수번호 1-1-2021-1197154-27)
(DAS접근코드17FE)
출원인명칭 공주대학교 산학협력단(2-2004-033237-6)
대리인성명 특허법인이룸리온(9-2016-100061-5)
발명자성명 김소희 안중배 장은철
발명의명칭 역학모형 및 통계적 기법을 활용한 태풍의 동아시아 상륙빈도 예측 방법

특허청장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 이용하여 특허로 홈페이지(www.patent.go.kr)에서 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 은행 또는 우체국에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
4. 기타 심사 절차(제도)에 관한 사항은 특허청 홈페이지를 참고하시거나 특허고객상담센터☎ 1544-8080)에 문의하여 주시기 바랍니다.
※ 심사제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-지식재산제도

【서지사항】

【서류명】	특허출원서
【참조번호】	1069894
【출원구분】	특허출원
【출원인】	
【명칭】	공주대학교 산학협력단
【특허고객번호】	2-2004-033237-6
【대리인】	
【명칭】	특허법인이룸리온
【대리인번호】	9-2016-100061-5
【지정된변리사】	김윤선
【발명의 국문명칭】	역학모형 및 통계적 기법을 활용한 태풍의 동아시아 상륙빈도 예측 방법
【발명의 영문명칭】	Technique to predict the frequency of typhoons landing in East Asia using a dynamic model and a statistical method
【발명자】	
【성명】	김소희
【성명의 영문표기】	KIM, So Hee
【주민등록번호】	971231-2XXXXXX
【우편번호】	46265
【주소】	부산광역시 금정구 오륜대로 42-15, 105호(부곡동, 노블파크)

【발명자】

【성명】 안종배

【성명의 영문표기】 AHN, Joong Bae

【주민등록번호】 571016-1XXXXXX

【우편번호】 48272

【주소】 부산광역시 수영구 무학로63번길 142, 202동 2301호(민락동, 센텀비스타동원2차)

【발명자】

【성명】 장은철

【성명의 영문표기】 CHANG, Eun Chul

【주민등록번호】 801023-1XXXXXX

【우편번호】 31163

【주소】 충청남도 천안시 서북구 불당17길 14, 113동 103호 (불당동, 불당아이파크)

【출원언어】 국어

【심사청구】 청구

【공지에외적용대상증명서류의 내용】

【공개형태】 논문발표

【공개일자】 2021.08.01

【공지에외적용대상증명서류의 내용】

【공개형태】 논문발표

【공개일자】 2021.09.01

【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】**【과제고유번호】** 1365003375**【과제번호】** KMI2020-01411**【부처명】** 기상청**【과제관리(전문)기관명】** 한국기상산업기술원**【연구사업명】** 기후 및 기후변화 감시 예측정보 응용 기술개발(R&D)**【연구과제명】** GRIMs 지역기후모델을 이용한 SSP 시나리오 기반 동아시아
상세 기후변화 정보 산출**【기여율】** 1/1**【과제수행기관명】** 공주대학교**【연구기간】** 2021.01.01 ~ 2021.12.31**【취지】** 위와 같이 특허청장에게 제출합니다.

대리인 특허법인이룸리온

(서명 또는 인)

【수수료】**【출원료】** 0 면 46,000 원**【가산출원료】** 28 면 0 원**【우선권주장료】** 0 건 0 원**【심사청구료】** 7 항 451,000 원**【합계】** 497,000 원**【감면사유】** 전담조직(50%감면)[1]**【감면후 수수료】** 248,500 원

【첨부서류】

1.기타첨부서류[위임장]_1통 2.공지예외적용대상(신규성상
실의예외, 출원시의특례)규정을 적용받기 위한 증명서류_1
통 3.공지예외적용대상(신규성상실의예외, 출원시의특례)규
정을 적용받기 위한 증명서류_1통

1 : 기타첨부서류

[PDF 파일 첨부](#)

2 : 공지예외적용대상(신규성상실의예외, 출원시의특례)규정을_적용받기_위한_증명
서류

[PDF 파일 첨부](#)

3 : 공지예외적용대상(신규성상실의예외, 출원시의특례)규정을_적용받기_위한_증명
서류

[PDF 파일 첨부](#)

【발명의 설명】

【발명의 명칭】

역학모형 및 통계적 기법을 활용한 태풍의 동아시아 상륙빈도 예측 방법
 {Technique to predict the frequency of typhoons landing in East Asia using a dynamic model and a statistical method}

【기술분야】

【0001】 본 발명은 태풍의 동아시아 상륙빈도 예측 방법에 관한 것으로, 더 상세하게는 역학 모형과 통계적 기법을 결합하여 예측하는 방법에 관한 것이다.

【발명의 배경이 되는 기술】

【0002】 태풍은 북서태평양 열대 해상에서 발생한 열대저기압의 한 종류로, 한국 기상청과 일본 기상청에서는 중심 부근의 최대 풍속이 17.2m/s 이상인 열대저기압을 태풍으로 분류하고 있다.

【0003】 2013년에 필리핀을 강타한 하이옌(Haiyan)과 2016년에 대만을 강타한 메란티(Meranti)처럼 최근 강한 슈퍼태풍이 빈번하게 발생하여 동아시아 국가에 인명 및 재산피해를 입히고 있다.

【0004】 사회가 발달함에 따라 피해규모는 기하급수적으로 커지므로, 이런 피해를 최소화하기 위해서는 신뢰할만한 태풍 상륙 예측기술의 개발이 필요하다.

【0005】 그러나 태풍의 발생 및 발달 과정은 매우 복잡하기 때문에 이를 예측하기란 쉽지 않다. 가장 먼저 시도된 예측 방법은 태풍이 빈번하게 발생하는 시

기 이전의 대기 및 해양 조건과 태풍 활동 사이의 통계적 관계를 사용한 것이다.

【0006】 이런 통계적 방법은 기존의 관계가 이후에도 계속 지속된다는 전제 하에 개발되었다. 그러나 기후는 경년변동이나 십년변동과 같은 자연적인 기후변동과 인간에 의한 인위적인 기후변화로 인해 지속적으로 움직인다.

【0007】 따라서, 통계적 방법은 전제부터 오류가 있기 때문에 예측 결과를 신뢰하기 어렵다.

【0008】 이후 집합대순환모형(Coupled General Circulation Model; CGCM)이 개발됨에 따라 기후 움직임이 반영될 수 있는 역학 기후모형을 통해 태풍 활동을 예측하고자하였다.

【0009】 그러나 역학 기후모형의 공간해상도보다 작은 규모의 태풍을 예측하기에는 여전히 한계가 있었다.

【0010】 이러한 한계에도 불구하고, CGCM은 태풍 활동과 관련된 연직시어나 하층와도와 같은 대규모 환경변수를 유의하게 예측할 수 있다. 따라서 역학 기후모형으로 생산된 대규모 환경변수와 태풍 활동 사이의 통계적 관계를 이용한 예측방법이 다양하게 개발되었다.

【0011】 이와 관련하여 한국 등록 특허 제10-1646587호에 북서태평양 태풍 활동성에 대한 하이브리드 계절 예측 방법이 개시되어 있다.

【0012】 이 발명은 태풍의 발생위치와 이동경로를 산정하는데 요구되는 ACE(Accumulated tropical cyclone kinetic energy) 태풍활동지수를 예측하는 방법

에 관한 것이다. 예측된 ACE 태풍활동 지수를 통해 태풍 발생위치와 이동 경로를 예측할 수 있다.

【0013】 태풍의 상륙은 태풍의 발생위치와 이동 경로가 복합적으로 작용한 결과이다. 따라서 제10-1646587호에 개시된 방법에 의해 예측된 태풍 발생위치와 이동 경로 정보만으로는 실질적으로 태풍 상륙을 예측하기 어렵다.

【0014】 또한, 한국 기상청에서 사용하고 있는 계절예측시스템의 역학 모델링 예측자료를 사용하기 때문에, 해당 예측시스템의 예측이 실패할 경우에는 무용지물이 될 수 있다는 단점이 있다.

【발명의 내용】

【해결하고자 하는 과제】

【0016】 상기와 같은 문제점을 감안한 본 발명은, 하층 상대와도와 태풍 상륙빈도의 상관관계를 이용하여 추가적인 과정 없이 태풍의 상륙빈도를 예측하는 방법을 제공함에 목적이 있다.

【0017】 또한, 본 발명은 추후 다른 예측자료에서도 응용될 수 있으므로 하나의 예측 시스템이 아니라 다양한 예측시스템으로 확대 구축해 안정적으로 예측할 수 있게 함에 다른 목적이 있다.

【과제의 해결 수단】

【0019】상기와 같은 기술적 과제를 해결하기 위한 본 발명 태풍의 동아시아 상륙빈도 예측 방법은, 컴퓨팅 장치의 프로세서에서 수행되는 방법으로서, a) 예측 지역 및 기간을 설정하고, 설정된 지역 및 기간 동안의 태풍 상륙빈도를 산출하는 단계와, b) 관측된 하층 상대와도와 관측된 태풍 상륙빈도 사이의 통계적 관계를 분석하여 표준패턴을 산출하는 단계와, c) 예측된 하층 상대와도와 관측된 태풍 상륙빈도 사이의 통계적 관계를 분석하여 예측패턴을 산출하고 잠재적 예측인자를 선정하는 단계와, d) 잠재적 예측인자 중에서 가장 좋은 예측결과를 도출하는 최적의 예측인자를 선별하는 단계와, e) 최적의 예측인자를 사용하여 예측 모델을 구축하고 검증하는 단계와, f) 미래의 예측인자를 예측 모델에 대입하여 미래의 태풍 상륙빈도를 예측하는 단계를 포함할 수 있다.

【발명의 효과】

【0021】본 발명은 역학모형과 통계적 기법을 결합하여, 복잡한 과정 없이 태풍의 상륙빈도를 즉시 예측할 수 있는 효과가 있다.

【0022】또한, 본 발명은 다른 예측자료로도 응용이 가능하므로 단일 예측시스템에서의 불확실성을 최소화하여 안정적인 태풍 상륙빈도 예측을 가능하게 하는 효과가 있다.

【도면의 간단한 설명】

【0024】 도 1은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 태풍의 동아시아 상륙 빈도 예측 방법의 순서도이다.

도 2는 도 1을 보완 설명하기 위한 관계 모식도이다.

도 3은 동아시아 지역의 상륙 예측지역 구분 예시도이다.

도 4는 각 지역에서 1980년부터 2018년까지 관측된 태풍의 월평균 상륙 빈도를 나타내는 그래프이다.

도 5는 표준 패턴의 예시도이다.

도 6은 예측 패턴의 예시도이다.

도 7은 잠재적 예측인자 및 최적 예측인자를 기재한 표이다.

도 8은 예측기간 동안 관측된 태풍 상륙빈도, 예측된 태풍 상륙빈도 및 교차 검증 결과 그래프이다.

【발명을 실시하기 위한 구체적인 내용】

【0025】 본 발명의 구성 및 효과를 충분히 이해하기 위하여, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예들을 설명한다. 그러나 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예에 한정되는 것이 아니라, 여러가지 형태로 구현될 수 있고 다양한 변경을 가할 수 있다. 단지, 본 실시예에 대한 설명은 본 발명의 개시가 완전하도록 하며, 본 발명이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위하여 제공되는 것이다. 첨부된 도면에서 구성요소는 설명의 편의를 위하여 그 크기를 실제보다 확대하여 도시한 것이며, 각 구성요소의 비율은

과장되거나 축소될 수 있다.

【0026】 '제1', '제2' 등의 용어는 다양한 구성요소를 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소는 위 용어에 의해 한정되어서는 안 된다. 위 용어는 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용될 수 있다. 예를 들어, 본 발명의 권리범위를 벗어나지 않으면서 '제1구성요소'는 '제2구성요소'로 명명될 수 있고, 유사하게 '제2구성요소'도 '제1구성요소'로 명명될 수 있다. 또한, 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 표현하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 발명의 실시예에서 사용되는 용어는 다르게 정의되지 않는 한, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 통상적으로 알려진 의미로 해석될 수 있다.

【0027】 특히 본 발명은 태풍의 동아시아 상륙 빈도 예측 방법에 관한 것이며, 이러한 방법은 적어도 프로세서, 데이터 저장 수단, 디스플레이를 포함하는 컴퓨팅 장치에서 수행되는 것으로 한다.

【0028】 즉, 특별한 설명이 없더라도 본 발명을 구성하는 각 단계의 수행 주체는 프로세서가 될 수 있다.

【0030】 도 1은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 태풍의 동아시아 상륙 빈도 예측 방법의 순서도이며, 도 2는 도 1을 보완 설명하기 위한 관계 모식도이다.

【0031】 도 1과 도 2를 각각 참조하면 본 발명 태풍의 동아시아 상륙 빈도 예측 방법은, 예측지역 및 기간을 설정하는 단계(S11)와, 관측된 태풍 상륙빈도를

산출하는 단계(S12)와, 상륙한 태풍의 하층 상대와도와 관측된 태풍의 상륙빈도 사이의 통계적 관계를 파악하는 단계(S13)와, 예측된 태풍의 하층 상대와도와 관측된 태풍 상륙빈도 사이의 통계적 관계를 파악하는 단계(S14)와, 통계적으로 유의한 지역을 잠재적 예측인자로 선정하는 단계(S15)와, 잠재적 예측인자 중 최적의 예측인자를 선별하는 단계(S16)와, 상기 최적의 예측인자들을 이용하여 통계모델을 구축하고 검증하는 단계(S17)와, 미래 예측인자로 미래 태풍 상륙빈도를 예측하는 단계(S18)를 포함할 수 있다.

【0032】 이하, 상기와 같이 구성되는 본 발명 태풍의 동아시아 상륙 빈도 예측 방법의 구체적인 구성과 작용에 대하여 설명한다.

【0033】 먼저, 본 발명은 역학 모형 및 통계적 기법을 결합하는 것으로, 역학 모형 및 통계적 기법의 결합은 태풍 활동의 예측에 있어서 역학 모형이나 통계적 기법을 단독으로 사용할 때 발생하는 단점을 보완하기 위함이다.

【0034】 통계적 기법만 사용하는 것은 기후변동에 취약하며, 전지구 계절예측에 사용되는 역학모형은 공간해상도가 약 50km에서 150km 내외로, 상대적으로 작은 규모의 기상현상인 태풍을 모의하여 예측하기에 한계가 따른다.

【0035】 이러한 한계를 극복하기 위해 역학 모형의 예측 결과를 바탕으로 통계적 기법을 결합하여 태풍의 상륙빈도를 예측하였다.

【0036】 본 발명에서 사용되는 용어로서 하층은 850hPa~500hPa를 의미하며, 이 층의 대기 순환은 모두 태풍 경로와 밀접하게 연관되어 있으므로 이 중 어느 층

의 상대와도를 선택해도 무관하다.

【0037】 또한, 관측이라함은 과거 또는 현재에 발생한 태풍 또는 상륙 빈도의 실제 데이터이며, 예측이라함은 기상 현상을 종합하여 과거 또는 현재에 발생한 태풍 또는 상륙 빈도를 예상한 결과로 이해될 수 있다.

【0038】 본 발명에서 역학 모형은 역학 기후모형 중 하나인 PNU CGCM의 1980년부터 2018년의 39년간의 자료를 바탕으로 2019년 태풍 상륙빈도를 예측하는 실시예를 바탕으로 본 발명의 효과를 입증하였다.

【0039】 먼저, S11단계와 같이 태풍의 상륙 예측지역 및 기간을 설정한다.

【0040】 도 3은 동아시아 지역의 상륙 예측지역 구분 예시도이다.

【0041】 편의상 동아시아 지역은 남동아시아지역(SEA), 중동아시아지역(MEA), 북동아시아지역(NEA)으로 구분할 수 있으며, 본 발명에서도 이러한 지역 구분을 사용한다.

【0042】 도 4는 각 지역에서 1980년부터 2018년까지 관측된 태풍의 월평균 상륙 빈도를 나타내는 그래프이다.

【0043】 일반적으로, 북서태평양에서 태풍은 다양한 경로로 육지에 상륙하거나 영향을 준다.

【0044】 본 발명에서는 상륙빈도를 예측하기 위해 태풍 경로와 밀접하게 관련된 하층 상대와도를 예측인자로 사용한다. 그러므로, 동아시아 전체 영역을 태풍 경로에 따라 세 영역으로 세분화한다.

【0045】 즉, 세분화된 하나의 영역을 지나가는 태풍들은 모두 유사한 하층 대기 순환의 영향을 받는다.

【0046】 세분화된 영역에 대한 구체적인 위·경도 정보는 다음과 같다.

【0047】 한반도와 일본을 포함하는 북동아시아(northern East Asia; NEA) 영역은 $30\sim40^{\circ}$ N $124\sim143^{\circ}$ E이고, 대만, 푸젠성, 저장성, 장쑤성, 상하이로 포함하는 중동아시아(middle East Asia; MEA) 영역은 $22\sim40^{\circ}$ N $117\sim124^{\circ}$ E이며, 남중국과 베트남 필리핀을 포함하는 남동아시아(southern East Asia; SEA) 영역은 $5.7\sim23.5^{\circ}$ N $117\sim127^{\circ}$ E이다.

【0048】 그리고 위 세 영역을 모두 포함하는 영역을 도 4에 도시한 바와 같이 동아시아(entire East Asia; EEA)으로 정의하였다.

【0049】 또한, 세분화된 영역을 태풍이 지나가면 해당 영역에 상륙한 것으로 간주하였다. 이는 실제로 육지에 상륙하지 않은 채 인근 바다를 지나가더라도 실제로 태풍의 영향으로 피해를 입을 수 있음을 고려한 것이다.

【0050】 한편, 도 4의 월평균 태풍 상륙빈도를 바탕으로 예측기간을 설정할 수 있다. 예측지역별로 태풍이 빈번하게 상륙하는 시기가 예측기간에 포함되면 더욱 효과적으로 예측이 이루어질 수 있다.

【0051】 따라서 예측기간은 NEA, MEA, EEA의 경우 연간 총 태풍의 70% 이상이 상륙하는 7월~9월이고, SEA의 경우 연간 총 태풍의 약 72%가 상륙하는 7월~11월이다.

【0052】 즉, 예측기간을 영역에 따라서 차등 적용하거나, 다수가 속하는 7월 내지 9월로 정할 수도 있다.

【0053】 그 다음, S12단계와 같이 관측된 태풍 상륙빈도를 산출한다.

【0054】 하층 상대와도의 관측 값은 예측기간에 대해 평균된 채로 도 2의 하층 상대와도 저장부(21)에 저장된다.

【0055】 예를 들어 예측지역이 NEA인 경우, 하층 상대와도 저장부(21)에는 매년 7월~9월동안 평균된 39년간의 하층 상대와도 자료가 저장된다.

【0056】 이와 마찬가지로 사용하고자 하는 예측모형의 예측자료도 동일한 방법으로 하층 상대와도 저장부(22)에 저장된다.

【0057】 또한 설정한 예측지역 및 기간에 따라 지역별로 태풍 상륙빈도를 산출하여 태풍 상륙빈도 저장부(23)에 저장된다. 예를 들어 NEA의 태풍 상륙빈도는 매년 7월~9월 동안 NEA영역을 지나간 태풍의 개수이다.

【0058】 그 다음, S13단계와 같이 상륙한 태풍의 하층 상대와도와 관측된 태풍의 상륙빈도 사이의 통계적 관계를 파악한다.

【0059】 즉, 하층 상대와도 저장부(21)의 하층 상대와도와 태풍 상륙빈도 저장부(23)의 태풍 상륙빈도 사이의 상관계수를 공간적으로 나타낸다. 여기서 산출된 공간패턴을 표준패턴이라 지칭하며, 표준패턴 저장부(24)에 저장한다.

【0060】 여기서 상관계수는 아노말리 상관계수 (Anomaly correlation coefficient; ACC)로 아래의 수학적 식 1로 정의된다.

【0061】 【수학식 1】

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})(T_i - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}}$$

【0062】 ACC는 각 격자점마다 산출되며, V는 해당년도에 관측된 하층 상대와도의 예측기간(7~9월 또는 7~11월)동안 평균값(즉, 하층 상대와도 저장부(21)의 값), T는 해당년도의 예측기간동안 관측된 총 태풍 상륙빈도(즉, 태풍 상륙빈도 저장부(23)의 값), \bar{V} 과 \bar{T} 는 각각의 평균값이고, N은 예측년도 개수이다.

【0063】 이렇게 산출된 표준패턴은 두 관측 자료의 1980-2018년 평균값에 대한 시간별 편차들의 상관관계를 보여준다. 값이 1에 가까우면 두 변수사이의 양의 상관을, -1에 가까우면 음의 상관을 보여주며 0에 가까우면 두 변수가 관련성이 낮음을 의미한다.

【0064】 표준패턴에서 통계적으로 유의한 음(양)의 상관관계를 보이는 와도의 중심을 N(P)로 표시한다. N과 P가 위치한 지점에 각각 음과 양의 와도가 발생했을 때, 태풍이 자주 발생하거나 전향류가 강해져 태풍 상륙이 빈번해지게 된다.

【0065】 다시 말해서 이들은 태풍의 상륙빈도를 예측하는데 중요한 역할을 하는 상대와도를 나타내므로 추후 예측인자를 선정하는데 지표로 사용된다.

【0066】 도 5는 미국 해양대기청(NOAA)에서 제공하는 NCEP-DOE II 재분석자료 중 700hPa 상대와도를 관측 자료로써 사용하여, 설정 가능한 예측지역마다 S13 단계를 수행한 표준패턴 예시이다. 즉, 1980-2018년 동안 관측된 태풍의 (a)NEA, (b)MEA, (c)SEA, (d)EEA 상륙빈도와 관측된 700hPa 상대와도 사이의 상관계수를 공간적으로 나타낸 것이다. 하얀색 실선은 95%, 98%, 99% 신뢰구간에서 통계적으로 유의함을 보여주며, 그 중 중요한 역할을 하는 상대와도 중심에 N과 P를 표시하였다.

【0067】 NEA의 표준패턴은 동중국-한반도의 N, 남·동중국 및 열대 태평양의 P로 구성된다(도 5a). MEA의 표준패턴은 동서방향으로 길게 이어진 동중국-한반도-일본의 N과 인도차이나반도-남중국-동중국해의 P로 구성되며(도 5b), SEA의 표준패턴은 남·동중국의 N, 인도차이나반도-필리핀 해 및 한반도의 P로 구성된다(도 5c). 마지막으로 EEA의 표준패턴은 동중국-한반도 및 적도 부근의 N, 인도차이나반도 및 필리핀 해의 P로 구성된다(도 5d). 이런 N과 P의 배치는 각 지역의 태풍 상륙과 관련된 고유한 환경을 보여주며, 다른 관측 자료를 사용하여도 유사하게 나타난다. 이때 유사도의 판단은 90%이상 일치하는 경우로 한정할 수 있다.

【0068】 그 다음, S14단계와 같이 예측된 태풍의 하층 상대와도와 관측된 태풍 상륙빈도 사이의 통계적 관계를 파악한다.

【0069】 하층 상대와도 저장부(22)에 저장된 예측 값에 대해서 ACC의 공간패턴을 구하여 예측패턴이라 지칭하고, 예측패턴 저장부(25)에 저장한다.

【0070】 여기서의 ACC는 상기 S13 단계의 상관계수 계산식 중 V에 관측 값이

아닌 역학 모형의 예측 값을 사용한다. PNU CGCM의 자료를 사용한 예측패턴의 실시 예는 도 6에 나타내었다.

【0071】 표준패턴(도 5)과 예측패턴(도 6)의 N과 P의 배치를 비교했을 때 서로 유사하고 예측패턴(도 6)의 N과 P 중 하나 이상이 통계적으로 유의하다면, 현재 사용된 역학모형에 통계적 기법을 결합하여 태풍 상륙빈도를 예측할 수 있음을 의미한다.

【0072】 그 다음, S15단계에서는 통계적으로 유의한 지역을 잠재적 예측인자로 선정한다.

【0073】 여기서 통계적으로 유의함의 기준은 신뢰도 95% 신뢰구간이다.

【0074】 예측패턴(도 6)에서 통계적으로 유의하게 나타난 N 또는 P 영역의 상대와도를 잠재적 예측인자로 선정하며, 영역 평균한 값을 잠재적 예측인자 저장부(26)에 저장한다. 통계적으로 유의한 주요한 와도 중심의 위치는 사용되는 예측 모형, 리드타임(lead time), 상대와도의 층에 따라 조금씩 달라질 수 있다.

【0075】 도 7은 PNU CGCM을 사용한 본 발명의 잠재적 예측인자 및 최적 예측인자를 기재한 표이다.

【0076】 도 7에 도시한 바와 같이 NEA의 경우 x1(27-32 ° N, 109-115 ° E), x2(10-15 ° N, 138-145 ° E), MEA의 경우 x1(21-32 ° N, 110-115 ° E), x2(49-54 ° N, 140-150 ° E), SEA의 경우 x1(38-43 ° N, 110-118 ° E), x2(13-18 ° N, 96-104 ° E), EEA의 경우 x1(10-18 ° N, 93-98 ° E), x2(2-6 ° N, 102-109 ° E) 영역의 상대와도가

위 조건에 적합하여 잠재적 예측인자로 선정되었다.

【0077】 해당 영역은 도 6에서 검은색 박스로 표시되었으며, 검은색 점선은 통계적으로 유의함을 의미한다. 또한 NEA, SEA 및 EEA의 경우 500hPa의 상대와도가, MEA의 경우 700hPa의 상대와도가 사용되었다.

【0078】 그 다음, S16단계에서는 상기 잠재적 예측인자 중 최적의 예측인자를 선별한다.

【0079】 이처럼 최적의 예측인자 구성을 찾음으로써 불확실성을 제거하고 예측성을 효과적으로 증가시킬 수 있다.

【0080】 최적의 예측인자를 선별하는 구체적인 예로서, 예측인자 구성을 바꿔가면서 회귀분석을 통해 회귀식을 반복해서 구하고 그 결과를 비교한다.

【0081】 이때 최적의 회귀식은 평균 제곱근 편차(root mean squared errors, RMSE)가 최소가 되고 결정계수와 F값이 최대가 되는 경우이다.

【0082】 평균 제곱근 편차(RMSE)은 모델이 예측한 값과 관측 값의 차이를 다룰 때 사용되는 측도로 정밀도를 표현하며, 정의는 아래의 수학식 2와 같다.

【0083】 【수학식 2】

$$RMSE = \sqrt{E(\hat{y} - y)^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

【0084】 위의 수학적 식 2에서 n 은 총 년도를 의미하고, y_i 는 i 번째 해에 실제 관측된 태풍의 상륙빈도, \hat{y}_i 는 회귀식에서 i 번째 예측인자(x_i)를 대입했을 때의 예측된 태풍의 상륙빈도를 의미한다.

【0085】 또한, F 값은 y (관측된 태풍의 상륙빈도)가 x (예측인자, 즉 상대와도)와 여러 중 무엇에 의해 더 설명되는지를 비교하기 위한 값이며, 아래의 수학적 식 3으로 표현된다.

【0086】 【수학적 식 3】

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{SSR/1}{SSE/(n-2)}$$

【0088】 위의 수학적 식 3에서 SST(total sum of squares), SSR(regression sum of squares), SSE(error sum of squares)는 각각 아래의 수학적 식 4와 같이 정의된다.

【0089】 【수학적 식 4】

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

【0090】 위의 수식식 4에서 \bar{y} 는 관측된 태풍의 n년간의 평균 상륙빈도를 뜻한다.

【0091】 또한, 결정계수는 y(관측된 태풍의 상륙빈도)의 총변동량 중에서 x(예측인자, 즉 상대와도)에 의해서 설명된 분량으로 표본에 대한 회귀모형의 설명력을 의미한다. 결정계수의 값이 클수록 (1에 가까울수록) 모형이 적합하다고 평가할 수 있다.

【0092】 결정계수는 아래의 수식식 5로 정의된다.

【0093】 【수식식 5】

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

【0094】 해당 과정을 통해 최종적으로 선별된 예측인자는 예측인자 저장부(27)에 저장된다.

【0095】 본 실시예에서는 예측지역별로 잠재적 예측인자가 2개씩 선정되었으므로, 예측인자로서 x1과 x2가 단독으로 사용되는 두 가지 경우와 함께 사용되는 한 가지 경우에 대해 수행되었다.

【0096】 비교 결과는 도 7에 나타내었으며 굵은 글씨로 최종 선별된 경우를 표시하였다. NEA와 SEA의 경우 x1과 x2를 함께 사용할 때, MEA의 경우 x2만 단독으

로 사용할 때, EEA의 경우 x1만 단독으로 사용할 때 최적의 회귀식이 나타났다.

【0097】 그 다음, S17단계와 같이 최적의 예측인자들을 이용하여 통계모델을 구축하고 검증한다.

【0098】 각 예측지역별 최적의 회귀식은 통계모델 예측부(28)에 저장된다. 그러나 이는 고정된 자료에서의 최적의 회귀식을 구한 것이므로 과적합(overfitting) 문제로부터 자유로울 수 없다.

【0099】 과적합 문제는 기계 학습(machine learning)에서 학습데이터를 과하게 학습함으로써 학습데이터에서는 좋은 결과를 보이거나, 실제 데이터에 대해서는 큰 오차를 보이게 되는 현상을 뜻한다.

【0100】 즉, 본 실시예에서 학습된 1980년부터 2018년까지의 태풍 상륙빈도에 대해서는 잘 예측하나, 학습되지 않은 2019년에 대해서는 좋은 예측성을 보이지 못할 수 있음을 의미한다.

【0101】 따라서 학습되지 않은 데이터에 대한 예측성을 평가할 필요가 있으며, 만약 학습되지 않았음에도 불구하고 회귀식의 예측성이 높으면 예측 값에 대한 신뢰도가 높아지게 된다.

【0102】 이를 위해 교차검증(cross-validation)의 일종인 leave-one-out cross-validation을 사용한다.

【0103】 이 방법은 각 년도의 태풍 상륙빈도를 구할 때 해당년도를 제외한 나머지 년도의 예측인자를 사용하여 회귀식을 구한 뒤 해당 년도의 예측인자를 대

입하여 상륙빈도를 예측한다.

【0104】 도 8은 1980-2018년 예측기간의 관측된 태풍 상륙빈도(파란색)와 예측된 태풍 상륙빈도(노란색) 및 교차검증 결과(주황색) 예시를 도시한 것이다. 왼쪽 상단의 SCOR은 관측 값과 예측 값의 상관계수이고, 오른쪽 상단의 FCOR은 관측 값과 교차검증 결과 사이의 상관계수이다. 그리고 상관계수의 *와 ** 표시는 각각 95%, 99% 신뢰수준에 대해 유의함을 의미한다.

【0105】 본 실시예에서 개발된 모델의 예측 결과는 모든 예측지역에 대해 통계적으로 99% 신뢰수준에 대해 유의하다. 교차검증 결과도 NEA 및 SEA의 경우 관측 값과의 상관계수가 99% 신뢰수준에 대해 유의하게 나타나며, MEA 및 EEA의 경우도 95% 신뢰수준에 대해 유의하게 나타난다. 이는 본 발명에서 제시하는 모델의 예측 값이 안정적임을 시사한다.

【0106】 본 발명의 검증 통과 기준은 SCOR과 FCOR 둘 다 통계적으로 95%이상 신뢰수준에 대해 유의할 경우이다.

【0107】 그 다음, S18단계와 같이 미래 예측인자로 미래 태풍 상륙빈도를 예측한다.

【0108】 즉, 미래 예측자료에서 산출한 미래 예측인자를 태풍 상륙빈도 예측부(28)에 대입하여 미래 태풍 상륙빈도를 예측한다.

【0109】 구체적으로, PNU CGCM의 2019년 예측자료에서 최적의 예측인자를 산출하고 이를 태풍 상륙빈도 예측부(28)에 대입함으로써 수행된다.

【0111】 이상에서 본 발명에 따른 실시예들이 설명되었으나, 이는 예시적인 것에 불과하며, 당해 분야에서 통상적 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 범위의 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 다음의 청구범위에 의해서 정해져야 할 것이다.

【부호의 설명】

【0113】 21:하층 상대와도 저장부(관측)

22:하층 상대와도 저장부(예측)

23:태풍 상륙빈도 저장부

24:표준패턴 저장부

25:예측패턴 저장부

26:잠재적 예측인자 저장부

27:예측인자 저장부

28:태풍 상륙빈도 예측부

【청구범위】

【청구항 1】

컴퓨팅 장치의 프로세서에서 수행되는 방법으로서,

- a) 예측지역 및 기간을 설정하고, 설정된 지역 및 기간 동안의 태풍 상륙빈도를 산출하는 단계;
- b) 관측된 하층 상대와도와 관측된 태풍 상륙빈도 사이의 통계적 관계를 분석하여 표준패턴을 산출하는 단계;
- c) 예측된 하층 상대와도와 관측된 태풍 상륙빈도 사이의 통계적 관계를 분석하여 예측패턴을 산출하고 잠재적 예측인자를 선정하는 단계;
- d) 잠재적 예측인자 중에서 가장 좋은 예측결과를 도출하는 최적의 예측인자를 선별하는 단계;
- e) 최적의 예측인자를 사용하여 예측 모델을 구축하고 검증하는 단계; 및
- f) 미래의 예측인자를 예측 모델에 대입하여 미래의 태풍 상륙빈도를 예측하는 단계를 포함하는 태풍의 상륙빈도 예측 방법.

【청구항 2】

제1항에 있어서,

상기 a) 단계의 태풍 상륙빈도는,

설정된 예측지역범위에 대해 매년 예측기간동안 태풍의 중심이 지나가는 총 빈도인 것을 특징으로 하는 태풍의 상륙빈도 예측 방법.

【청구항 3】

제1항에 있어서,

상기 b) 단계의 상관성은,

아래의 수학적 식 1로 표현되는 아노말리 상관계수 방법으로 산출되는 것을 특징으로 하는 태풍의 상륙빈도 예측 방법.

[수학적 식 1]

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})(T_i - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}}$$

ACC는 각 격자점마다 산출되는 상관성이며, V는 해당년도에 관측된 하층 상대와도의 예측기간동안 평균값, T는 해당년도의 예측기간동안 관측된 총 태풍 상륙빈도, \bar{V} 과 \bar{T} 는 각각의 평균값, N은 예측년도 개수

【청구항 4】

제1항에 있어서,

상기 c) 단계의 잠재적 예측인자 선정조건은,

예측패턴에서의 음의 상대와도와 양의 상대와도의 배치가 표준패턴에서의 음의 상대와도와 양의 상대와도의 배치가 90% 이상 유사할 때, 예측패턴의 음의 상대와도와 양의 상대와도 중 95% 신뢰 구간에 대해 상관성이 높은 지역을 선정하는 태풍 상륙빈도 예측 방법.

【청구항 5】

제1항에 있어서,

상기 d)단계의 최적의 예측인자 선별조건은,

예측인자 구성을 바꿔가면서 반복적으로 회귀식을 구했을 때 평균 제곱근 오차(root mean squared errors, RMSE)가 최소가 되고, 결정계수와 F값이 최대가 되는 경우인 것을 특징으로 하는 태풍 상륙빈도 예측 방법.

【청구항 6】

제1항에 있어서,

상기 e)단계의 통계모델 구축과 검증은,

각각 회귀분석과 leave-one-out 교차검증(cross-validation)을 통해 이루어지며, 상기 leave-one-out 교차검증은 각 년도의 태풍 상륙빈도를 구할 때 해당년도를 제외한 나머지 년도의 예측인자를 사용하여 회귀식을 구한 뒤 해당년도의 예측인자를 대입하여 상륙빈도를 예측하는 것을 특징으로 하는 태풍 상륙빈도 예측 방법.

【청구항 7】

제6항에 있어서,

상기 교차검증의 통과 기준은,

관측 값에 대해 예측 값과 교차검증 결과 값의 상관계수를 구했을 때, 모두 95% 신뢰구간에 대해 통계적으로 유의할 경우인 것을 특징으로 하는 태풍 상륙빈도

예측 방법.

【요약서】**【요약】**

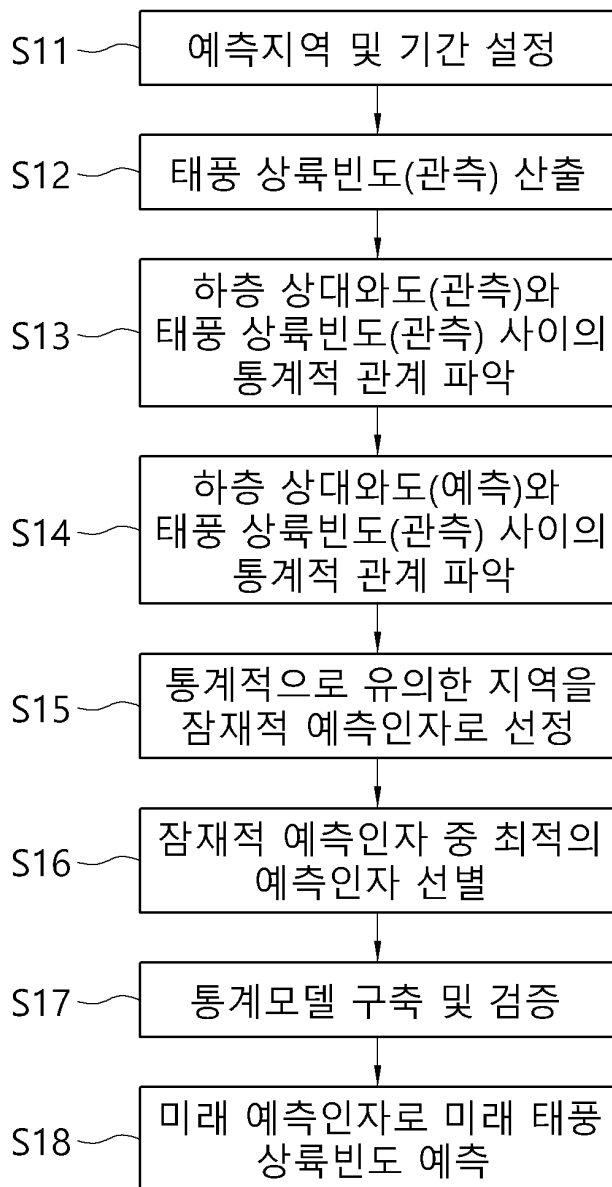
본 발명은 태풍 상륙빈도 예측 방법에 관한 것으로, 컴퓨팅 장치의 프로세서에서 수행되는 방법으로서, a) 예측지역 및 기간을 설정하고, 설정된 지역 및 기간 동안의 태풍 상륙빈도를 산출하는 단계와, b) 관측된 하층 상대와도와 관측된 태풍 상륙빈도 사이의 통계적 관계를 분석하여 표준패턴을 산출하는 단계와, c) 예측된 하층 상대와도와 관측된 태풍 상륙빈도 사이의 통계적 관계를 분석하여 예측패턴을 산출하고 잠재적 예측인자를 선정하는 단계와, d) 잠재적 예측인자 중에서 가장 좋은 예측결과를 도출하는 최적의 예측인자를 선별하는 단계와, e) 최적의 예측인자를 사용하여 예측 모델을 구축하고 검증하는 단계와, f) 미래의 예측인자를 예측 모델에 대입하여 미래의 태풍 상륙빈도를 예측하는 단계를 포함할 수 있다.

【대표도】

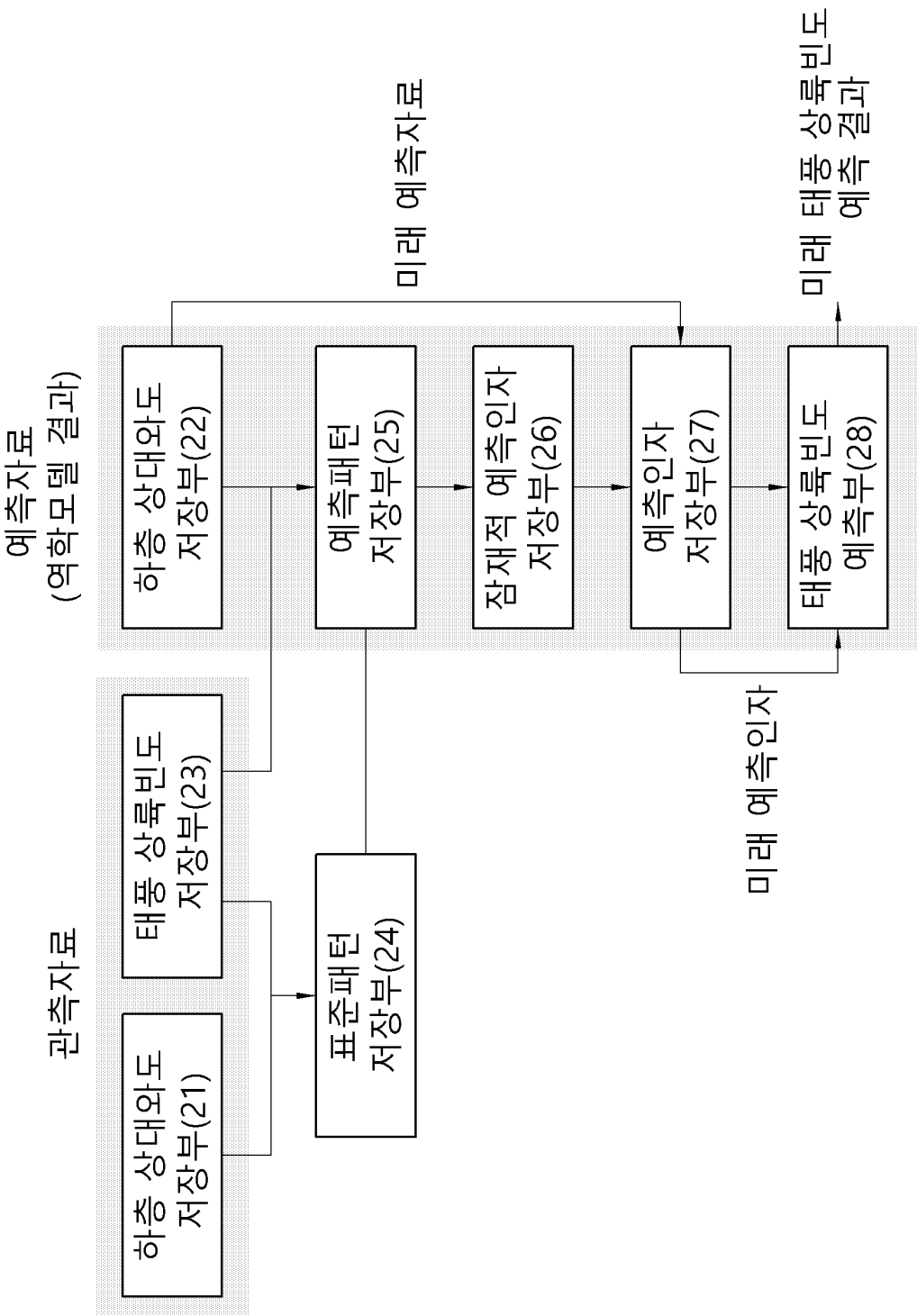
도 1

【도면】

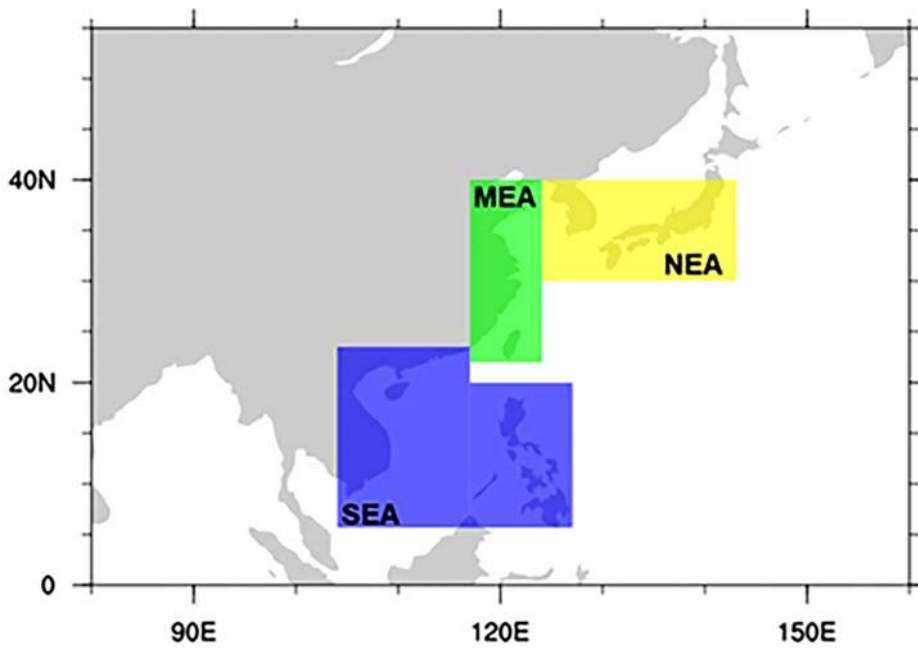
【도 1】



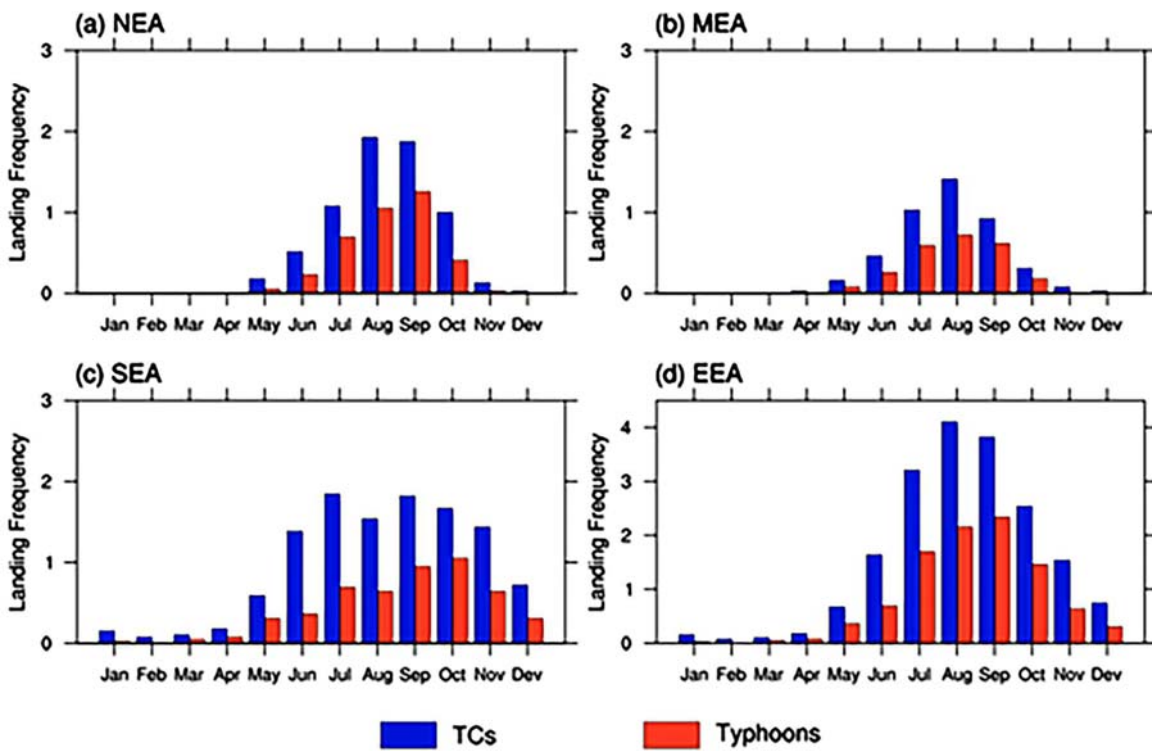
【도 2】



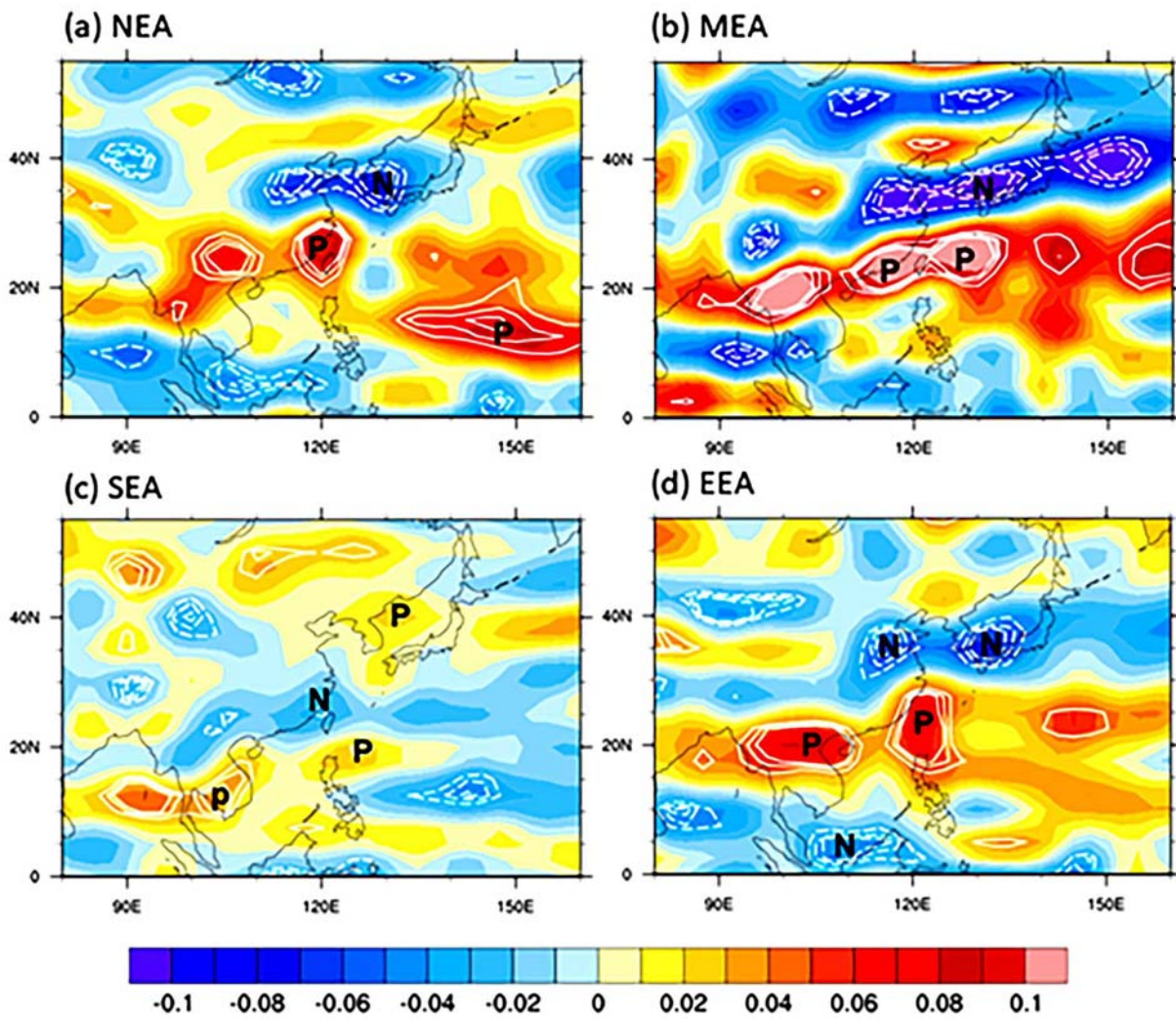
【도 3】



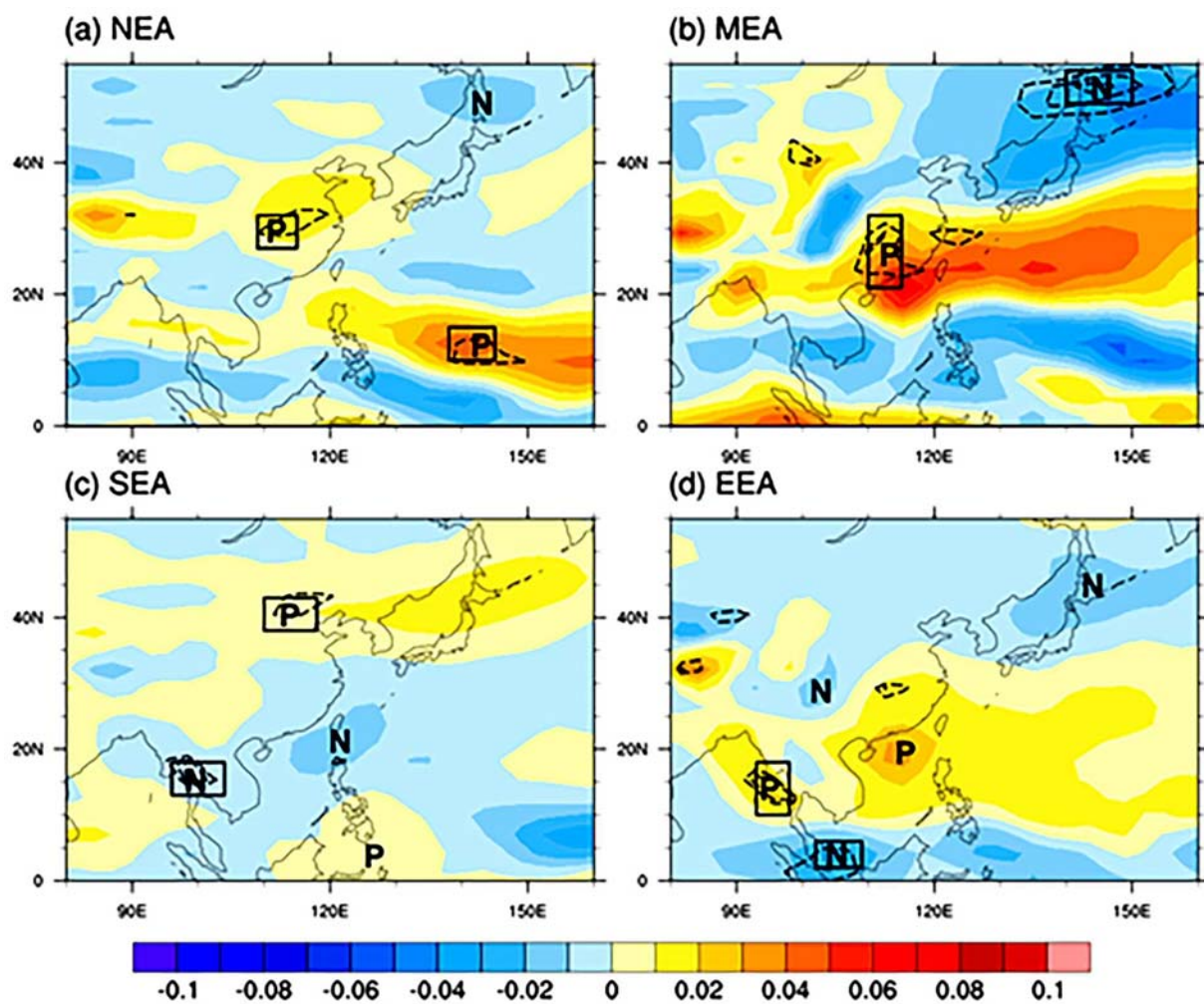
【도 4】



【도 5】



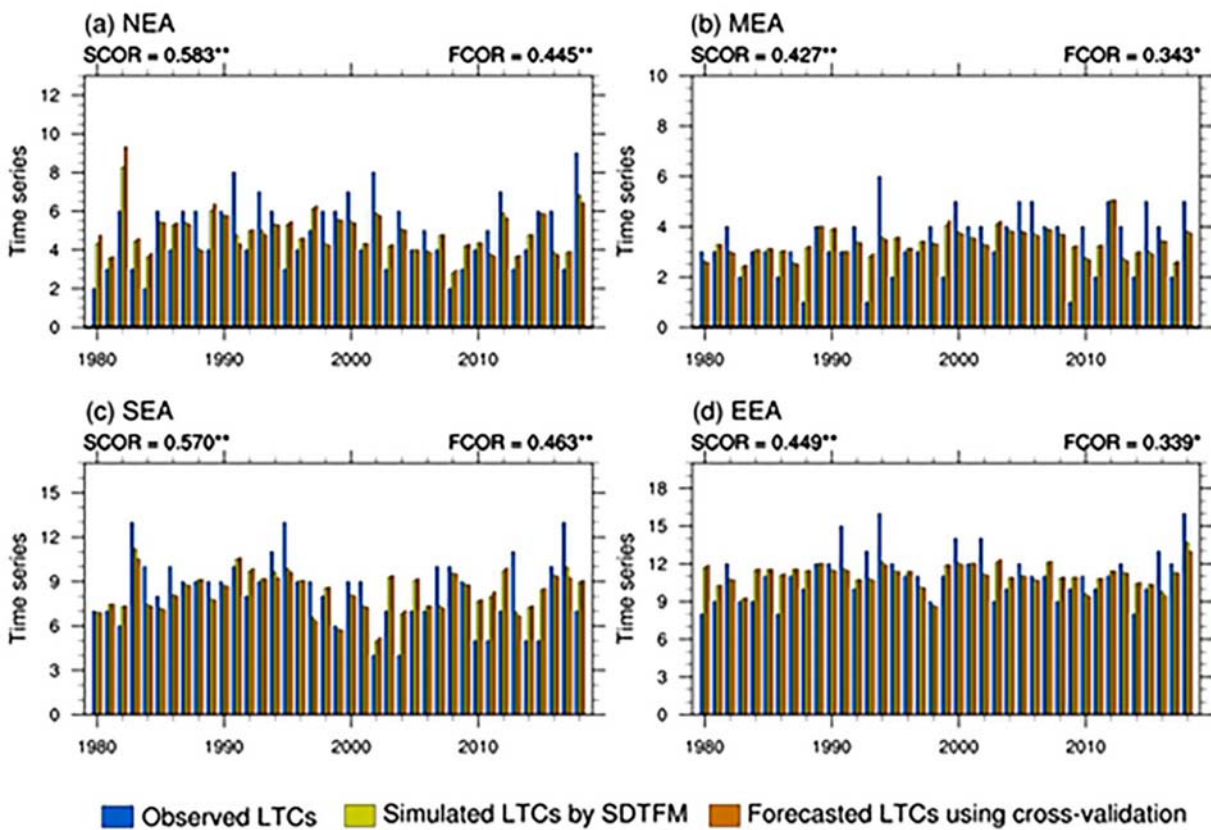
【도 6】



【도 7】

Domain	Predictors	RMSE	R ²	F_ratio
NEA	x_1	1.67	0.14	6.00
	x_2	1.70	0.11	4.63
	x_1, x_2	1.49	0.34	9.28
MEA	x_1	1.18	0.13	5.59
	x_2	1.14	0.18	8.27
	x_1, x_2	1.14	0.20	4.60
SEA	x_1	2.23	0.11	4.53
	x_2	2.15	0.17	7.79
	x_1, x_2	1.97	0.32	8.64
EEA	x_1	1.84	0.20	9.36
	x_2	1.92	0.13	5.42
	x_1, x_2	1.82	0.24	5.65

【도 8】





저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석 사 학 위 논 문

통계기법 및 역학적 모형을 활용한
동아시아 태풍 장기 예측

The seal of Pusan National University is a large, light blue circular emblem. It features a stylized open book in the center with the Korean characters '부산' (Busan) written on it. Above the book is a crown-like symbol. The year '1946' is inscribed below the book. The outer ring of the seal contains the text 'PUSAN NATIONAL UNIVERSITY' in English and '부산대학교' in Korean.

김 소 희

부산대학교 대학원
지구환경시스템학부 대기과학전공

2021년 8월

통계기법 및 역학적 모형을 활용한 동아시아 태풍 장기 예측

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함

김 소 희

부산대학교 대학원

지구환경시스템학부 대기과학전공

지도교수 안 중 배

김소희의 이학석사 학위论문을 인준함

2021년 6월 29일

위원장 하 경 자 인

위 원 서 경 환 인

위 원 안 중 배 인

차 례

차 례	i
표 차 례	ii
그림차례	iii
요 약	v
제 1 장. 서 론	1
제 2 장. 모델 및 자료	4
2.1. 접합대순환모형 (Coupled general circulation model, CGCM)	4
2.2. 자료	5
2.3. 예측 지역 및 기간	6
제 3 장. 태풍과 대기 순환의 관계	10
제 4 장. PNU CGCM v2.0의 태풍예측 가능성	19
제 5 장. 통계-역학 태풍 예측 모형 (SDTFM)	23
제 6 장. 결 론	29
참고문헌	32
Abstract	38

표 차 례

Table 3.1 The years in which typhoons landed above and below than normal over NEA, MEA and SEA.	15
Table 4.1 The initial condition and atmospheric variables used as predictor for each domain.	21
Table 5.1 SDTFM and the predictors to be used for SDTFM.	25

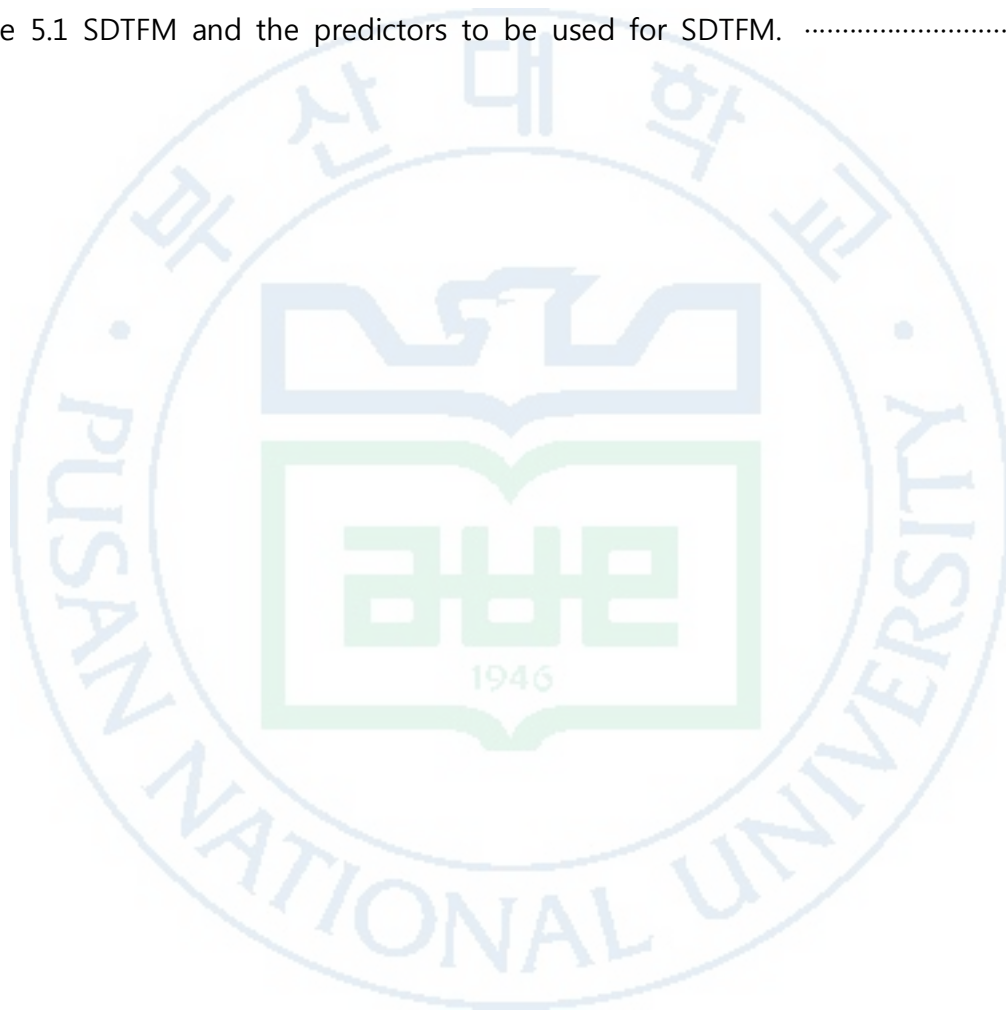


그림 차례

Fig. 2.1 The southern (blue), middle (green) and northern (yellow) part of the East Asian coast used to define typhoons landing in East Asia.	7
Fig. 2.2 Annual cycle of typhoons that affected East Asia from 1980-2018. Yellow box is typhoon season to be predict.	8
Fig. 2.3 Extinction date of the typhoons that occurred in June.	9
Fig. 3.1 Regression of (a) relative vorticity and (b) horizontal wind at 500hPa from R2 against the observed typhoons over NEA for the 1980-2018. (c) and (d) are the same as (a) and (b), but at 700hPa. 'P' ('N') in (a) and (c) indicates the positive (negative) relative vorticity center, and solid (dashed) white lines indicate the positively (negatively) significant areas at the 95%, 98% and 99% confidence levels. Shading in (b) and (d) indicates the areas at the 95% confidence level.	13
Fig. 3.2 Composite of 5,880gpm line representing summer Western North Pacific High at 500hPa in AN_Year (solid line) and BN_Year (dashed line) over NEA (red line), MEA (green line) and SEA (blue line).	14
Fig. 3.3 As in Fig. 3.1. But for typhoons landfall over MEA.	16
Fig. 3.4 As in Fig. 3.1. But for typhoons landfall over SEA.	17
Fig. 3.5 As in Fig. 3.1. But for typhoons landfall over EEA.	18
Fig. 4.1 Regression of relative vorticity at (a) 500hPa, (b) 700hPa, (c) 500hPa and (d) 500hPa from PNU CGCM against the observed typhoons over (a) NEA, (b) MEA, (c) SEA and (d) EEA for the 1980-2018 period. 'P' ('N') indicates the positive (negative) relative vorticity. Solid (dashed) white lines indicate the positively (negatively) significant areas at the 95%, 98% and 99% confidence levels.	22
Fig. 5.1 Time series of the observed typhoons, simulated typhoons by SDTFM and the forecasted typhoons by SDTFM using LOOCV for the 1980-2018 period over (a) NEA, (b) MEA, (c) SEA and (d) EEA. 'SCOR' ('FCOR') is correlation coefficient between observed typhoons and simulated (forecasted) typhoons for every year during the period 1980-2018. ***, ** and * indicate significance at the 99%, 98% and 95% confidence level	26

- Fig. 5.2 Regression of relative vorticity (left column) and horizontal wind (right column) at (a-b) 500hPa, (c-d) 700hPa, (e-f) 500hPa and (g-h) 500hPa from R2 against the PNU CGCM v2.0 predicted typhoons over (a-b) NEA, (c-d) MEA, (e-f) SEA and (g-h) EEA for the 1980-2018 period. In the left column, 'P' ('N') indicates the center of positive (negative) relative vorticity, and the solid (dashed) white lines indicate the positively (negatively) significant areas at the 95%, 98% and 99% confidence levels. 'COR' is spatial correlation between vorticity patterns for each domain. Shading in right column indicates the areas at the 95% confidence level. 27
- Fig. 5.3 Difference in steering flows between BN_Year and AN_Year for (a) NEA, (b) MEA, (c) SEA and (d) EEA. The color of streamline represents the difference in averaged wind speeds, and the black box represents each domain defined in Fig. 2.1. Shading indicates the areas at the 95% confidence level. 28
- Fig. 6.1 Annual variability and trends of typhoons. 31

통계기법 및 역학적 모형을 활용한 동아시아 태풍 장기 예측

김 소 희

부산대학교 대학원 지구환경시스템학부 대기과학전공

요약

본 연구에서는 Pusan National University coupled general circulation model (PNU CGCM)이 예측한 대기 순환과 동아시아 태풍 사이의 상관관계를 이용하여 태풍의 중장기 예측을 위한 Statistical-Dynamic seasonal Typhoons Forecast Model (SDTFM)을 개발하고 그 예측성을 검증하였다. 해양자료동화 (ocean data assimilation)와 시간지연방법 (time-lag method)을 활용하여 생산되는 총 40개의 앙상블 멤버는 초기조건의 오차와 모형의 불확실성이 감소시켜 동아시아의 태풍을 예측하는 새로운 SDTFM의 개발을 가능하게 한다. SDTFM의 결과에 따르면 한반도, 일본을 포함하는 northern East Asia (NEA)와 entire East Asia (EEA)에 대해서는 5월 출발 적분 예측부터 유의한 예측성이 나타났으며, middle East Asia (MEA)과 남중국, 필리핀, 베트남을 포함하는 southern East Asia (SEA)에 대해서는 2월 출발 적분 예측부터 유의한 예측성이 나타났다. SEA를 제외한 다른 영역에서는 태풍의 연변동성을 99% 신뢰수준에 대해 유의하게 예측하였으며, 교차검증을 시행하여도 95% 이상의 신뢰수준에 대해 유의한 결과가 나타났다. 한편 SEA의 경우 다른 지역에 비해 지향류가 뚜렷하지 않아 본 연구에서 개발한 SDTFM에서 유의한 결과가 나오지 않았다. 그러나 NEA, MEA, EEA에 대해서는 유의한 태풍 예측이 이루어졌기 때문에 동아시아 내습태풍 예측 기술 발전에 이바지할 것으로 보인다.

제 1장. 서 론

태풍은 북서태평양에서 발생하는 열대저기압으로 강한 돌풍, 집중 호우와 같은 위험기상을 동반한다. 최근 하이옌 (2013), 사이클론 팜 (2015)과 같은 강한 태풍의 발생빈도가 증가하는 추세이며 아시아 국가에 심각한 피해를 일으키고 있다 (Mori and Takemi, 2016). 특히 필리핀을 내습한 하이옌은 풍속이 강한 태풍으로 손꼽히며, 사피어-심프슨 허리케인 등급 (Saffir-Simpson hurricane wind scale, SSHWS) 중 가장 높은 5등급에 해당한다. 전 세계 인구의 20% 이상이 거주하는 동아시아는 태풍과 같은 극한 기상에 더욱 취약하며, 기후변화로 인한 해수면의 상승과 맞물리면 그 피해가 기하급수적으로 증가할 수 있다 (IPCC, 2014; 2019). 따라서 신뢰할 수 있는 동아시아 태풍의 중장기 예측은 태풍 대비를 가능하게 함으로써 다양한 유형의 피해를 최소화하고 막을 수 있게 한다.

아직까지 기후변화에 따른 태풍활동의 변화는 명확하게 밝혀진 바가 없으나, 지역에 따라 추세차이가 있음은 분명하다 (Lee et al., 2012). Tu et al. (2009)은 Bayesian change point analysis를 이용하여 1970년~2006년 기간에 대해 대만 부근에서 발생한 열대저기압이 2000년을 기점으로 3.3개에서 5.7개로 증가했음을 밝힌 바 있다. 또한 Park et al. (2011)은 1977년~2008년 동안 일본과 한반도의 태풍시즌이 장기화됨에 따라 육지에 상륙하는 태풍의 수가 증가하고 강수량과 태풍 파괴력 지수 (power dissipation index, PDI)가 미래에 유의하게 증가할 것임을 보였다.

이런 중장기 예측의 중요성에도 불구하고 태풍의 생성과 발달 과정이 복잡하기 때문에 발생빈도, 크기, 강도와 진로를 예측하는 것은 초단기적으로도 어렵다. 가장 처음 시도된 태풍의 중장기 예측 방법은 태풍시즌이 시작되기 전의 대기 및 해양 상태를 예측인자로 사용하는 통계적 방법론이다 (Chan et al., 1998; 2001; Fan and Wang, 2009). 그러나 이 방법은 이후에도 기존의 통계적인 관계가 유효할 것이라는 가정을 바탕으로 하기 때문에 경년변동이나 십년변동과 같은 기후변동에 매우 취약하다 (Vitart and Stockdale, 2001). 2000년대 이후 접합대순환모형 (Coupled General Circulation Model, CGCM)의 발전과 더불어 태풍의 발생빈도와 진로 예측에 역학적 방법을 사용하기 시작했다. 그러나 지속적인 모형의 발전과 개선에도 불구하고 여전히 공간해상도는 낮았으며 태풍과 관련된 물리적인 과정이 불명확했기 때문에 태풍 예측에 어려움을 겪었다 (Zhang et al., 2017). 게다가 lead time이 길어짐에 따라 초기조건에 영향이 감소하여 예측성이 떨어진다는 단점도 있다.

그러나 역학 모형은 태풍과 밀접하게 관련된 연직시어나 하층와도와 같은 대규모 환경변수의 예측에 대해 유의한 결과를 보인다. 따라서 많은 연구자들은 선형회귀나 포아송 회귀분석과 같은 통계방법을 이용해 역학모형으로 생산된 예측인자 (예, 연직시어, 하층와도 등)와 예측요소 (예, 태풍의 발생빈도 및 진로) 사이의 관계를 밝히고 이를 통해 태풍을 예측하고자 하였다. 이런 모형을 Statistical-Dynamic seasonal Typhoon Forecast Model (SDTFM) 이라 하며, 허리케인 (예, Vitart and Stockdale, 2001; Vitart et al., 2003; Vitart, 2006; Zhao et al., 2010; Chen and Lin, 2011, 2013; Vecchi et al., 2011; Vecchi and Villarini, 2014; Camp et al., 2015; Xiang et al., 2015) 뿐만 아니라 태풍의 진로 (예, Liu and Chan, 2003; Goh and Chan, 2010; Au-Yeung and Chan, 2011; Sun and Ahn, 2011; Wang et al., 2013; Zhang et al., 2013, 2016, 2017)와 발생빈도 (예, Chan et al., 1998; Fan, 2007, 2010; Fan and Wang, 2009; Lu et al., 2010; Wang et al., 2013; Zhang et al., 2013, 2016; Kim et al., 2017)의 중장기 예측에 활용되고 있다.

SDTFM의 예측성은 일반적으로 사용된 역학모형이 예측인자를 얼마나 잘 예측하는가에 따라 좌지우지된다 (Vecchi et al., 2011, 2014; Li et al., 2013; Kim et al., 2015; Murakami et al., 2016; Zhan and Wang, 2016; Zhang et al., 2016). 그러나 예측요소와 예측인자 사이에 물리적인 관계가 바탕이 될 때 안정적으로 예측할 수 있기 때문에 적절한 예측인자를 찾는 것도 중요하다 (Zhang et al., 2017). 지금까지 북서태평양의 태풍활동과 2년 진동 (quasi-biennial oscillation, QBO), 엘니뇨-남방진동 (El Nino-Southern Oscillation, ENSO) 사이의 관계에 대해 활발하게 연구되었다 (Chan, 1985, 1995; Lander, 1994; Saunders et al., 2000; Wang and Chan, 2002; Camargo and Sobel, 2005; Ho et al., 2009). 그 외에도 북극진동이나 남극진동과의 상관관계를 분석한 연구도 있다 (Ho et al., 2005; Wang and Fan, 2007; Choi and Byun, 2010). 하지만 이런 연구들은 대부분 태풍의 발생지점이나 발생빈도와 상관관계를 분석한 것이다. 실제 태풍 피해는 진로가 가장 큰 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 태풍 진로에 초점 맞춰 내습빈도를 예측하고자 하였다. 이와 관련하여 여러 선행연구들이 대류권 중하층 (700hPa, 500hPa)의 순환이 태풍 진로와 밀접한 관계를 가지는 것을 보여주었다 (Chan and Gray, 1982; Harr and Elsberry, 1991; 1995). 이를 바탕으로 본 연구에서는 각 지역별 태풍을 예측하기 위해 CGCM이 예측한 중하층 대기 순환을 예측인자로 사용하였다.

Sun and Ahn (2011)은 앞서 1979년~2009년 기간에 대해 Asia Pacific

Economic Cooperation Climate Center (APCC)의 multi-model Ensemble (MME) prediction system의 참여 모형인 Pusan National University coupled general circulation model (PNU CGCM) v1.0을 이용해 SDTFM을 개발한 바가 있으나 남중국에 내습한 태풍만 예측할 수 있었다. 본 연구에서는 PNU CGCM v2.0을 이용해 태풍시즌동안 동아시아 국가 전체의 내습태풍에 대해 새로운 SDTFM을 개발하고 결과를 검증하고자 한다. v1.0과 달리 PNU CGCM v2.0은 해양자료동화 (ocean data assimilation, ODA)를 활용하며, 시간지연방법 (time-lag method)으로 매달 총 40개의 앙상블 멤버를 생산한다. 확장된 앙상블 멤버는 초기조건의 오차와 모형의 불확실성을 감소시켜 새로운 SDTFM의 개발을 가능하게 한다 (Weigel et al., 2008).

2장에서는 본 연구에 사용된 자료 및 기간과 예측지역을 설명하고, 3장에서는 태풍 진로와 대기 순환 사이의 관계를 분석하였다. 4장에서는 3장에서 살펴본 관계를 바탕으로 PNU CGCM v2.0에 대한 SDTFM로서의 개발 가능성을 살펴보았다. 5장에서는 PNU CGCM v2.0과 다중회귀를 이용해 SDTFM을 개발하고, 예측 결과를 검증 및 분석하였다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 요약 및 결론을 제시하였다.

제 2장. 모델 및 자료

2.1 접합대순환모형 (Coupled general circulation model, CGCM)

본 연구에서 사용한 CGCM은 PNU CGCM v2.0으로, APCC의 Long-range Multi-model Ensemble (LR-MME) prediction system 참여모형 중 하나이다 (예, Ahn et al., 2012; Williams et al., 2015). 매달 8개월 예측을 APCC에 제공하기 위해 PNU CGCM v2.0은 해양 자료 동화 (ODA)를 활용하여 총 40개의 앙상블을 생산한다. 국제기관에서 최첨단 CGCM을 사용하여 장기 예측을 할 때 생산하는 앙상블 멤버의 수를 고려하면 총 40개의 앙상블 멤버는 초기 조건 오류 및 모델 불확실성을 최소화할 수 있을 만큼 충분히 크다. 그밖에 모형의 성능과 관련된 자세한 사항은 다른 논문에서 구체적으로 서술되어있다 (예, Ahn and Kim, 2014; Jo and Ahn, 2015; Sun and Ahn, 2015; Bayasgalan and Ahn, 2018).

모형의 예측성은 앙상블 멤버 수와 모형의 특징 뿐 만 아니라 사용하는 앙상블 기법에 따라 다르다 (Seong et al., 2017; Oh and Suh, 2017). 본 연구에서 사용한 기법은 각 앙상블 멤버를 단순 평균하는 simple composite method (SCM)로, 다른 기법에 비해 간단하며 예측성을 보완하는데 효과가 좋아 보편적으로 사용되는 방법이다 (Min et al., 2014).

2.2 자료

본 연구에서 사용된 태풍 자료는 일본 도쿄의 지역 특별 기상 센터 (Regional Specialized Meteorological Centre, RSMC)의 best track 자료로, 아시아 지역의 태풍 연구에서 널리 사용되고 있다 (Sun and Ahn, 2011; 최기선 et al., 2015; Zhang et al., 2017). 10분 평균 최대풍속을 기준으로 열대저기압은 열대저압부 (~33kt), 열대 폭풍 (~63kt), 태풍 (64kt~)으로 나뉜다. 태풍까지 발달하지 않아도 열대 폭풍도 동아시아 국가에 충분히 피해를 입힐 수 있기 때문에 본 연구에서는 내습 태풍에 열대 폭풍과 태풍을 모두 포함하였다. 태풍과 관련된 대기 순환을 분석하기 위해 National Centers for Environmental Prediction- Department of Energy (NCEP-DOE) Reanalysis 2 (R2)의 월평균 수평바람과 상대와도 자료를 사용하였다 (Kanamitsu et al., 2002). 재분석 자료는 1979년 1월부터 이용 가능하며 17개의 연직층으로 구성되어 있으며, 수평적인 간격은 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 으로 총 144X73개의 격자점을 가진다.

2.3 예측 지역 및 기간

태풍 피해는 동아시아 전 해안지역에 걸쳐 발생하기 때문에 예측 지역은 동아시아 전체로 설정하였다. 그러나 동아시아는 저위도부터 중위도까지 광범위하기 때문에 지역별로 태풍에 작용하는 메카니즘이 다를 수 있다. 따라서 지역별로 적합한 모형 개발을 위해 예측 지역을 세분화하였다 (Chan and Xu, 2009; Huang and Chan, 2014; Zhang et al., 2017). 한반도와 일본을 포함하는 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ $124^{\circ}\sim 143^{\circ}\text{E}$ 를 북동아시아 (northern East Asia, NEA)로, 대만, 푸젠성, 저장성, 장쑤성, 상하이로 포함하는 $22^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ $117^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$ 를 중동아시아 (middle East Asia, MEA)로, 남중국과 베트남 필리핀을 포함하는 $5.7^{\circ}\sim 23.5^{\circ}\text{N}$ $117^{\circ}\sim 127^{\circ}\text{E}$ 를 남동아시아 (southern East Asia, SEA)로, 세 영역을 모두 합한 지역을 동아시아 전체 (entire East Asia, EEA)로 정의하였다 (Fig. 2.1). 열대 폭풍과 태풍이 각 영역을 지나갈 경우 해당 영역을 내습하였다고 가정하였으며 지역별 내습태풍을 NEA 태풍, MEA 태풍, SEA 태풍, EEA 태풍으로 정의하였다. 만약 한 개의 태풍이 두 개 이상의 영역을 지나가면 지나간 모든 지역에 모두 내습하였다고 가정하였다.

본 연구는 1980년부터 2018년까지 총 39년에 대해 진행되었으며, Fig. 2.2는 연구기간 동안 동아시아 지역별 내습태풍의 평균적인 발생빈도를 나타낸 것이다. 모든 지역에서 7월~9월 (JAS)에 집중적으로 내습태풍이 발생하며, NEA 경우 75%, MEA 경우 76%, SEA 경우 46%, EEA의 경우 61%가 이 시기에 발생한다. 따라서 JAS 동안의 대기 순환이 50% 이상의 내습태풍과 상호작용하기 때문에 본 연구에서는 JAS 평균된 대기 순환을 사용하였다. 한편 태풍시즌은 6월에 발생한 태풍이 7월의 대기 순환 영향으로 내습하는 경우를 포함하여 6월~9월 (JJAS)로 정의하였다 (Fig. 2.3). 이 시기에 발생한 내습태풍은 1년 동안 발생한 내습태풍 중 NEA 경우 87%, MEA 경우 87%, SEA 경우 58%, EEA 경우 70%를 차지하므로 매년 발생하는 대부분이 이에 포함된다.

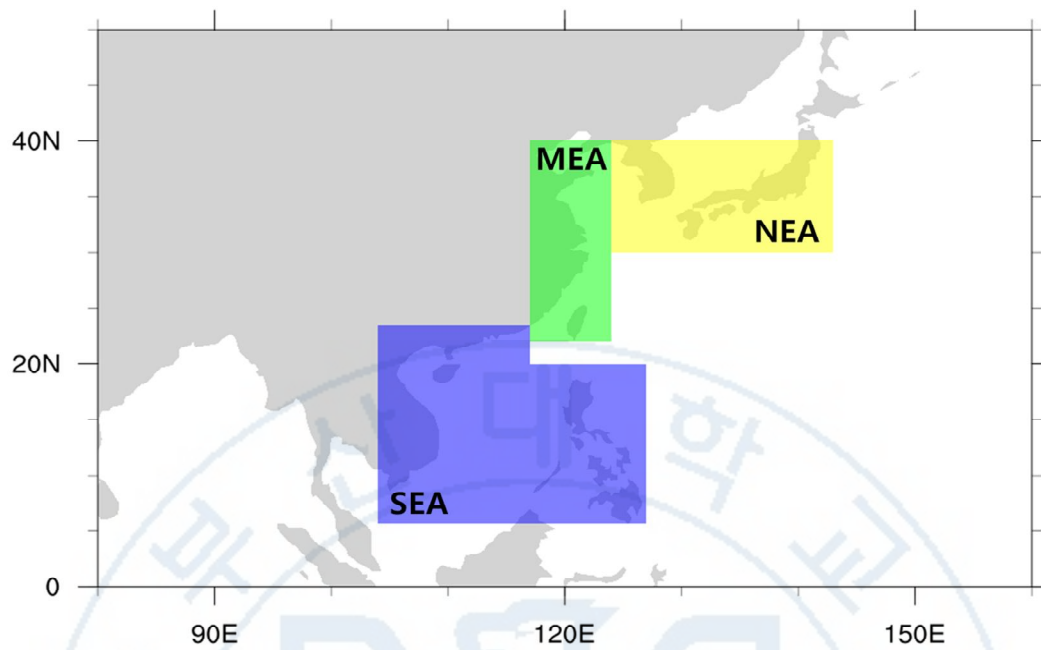


Fig. 2.1 The southern (blue), middle (green) and northern (yellow) part of the East Asian coast used to define typhoons landing in East Asia.

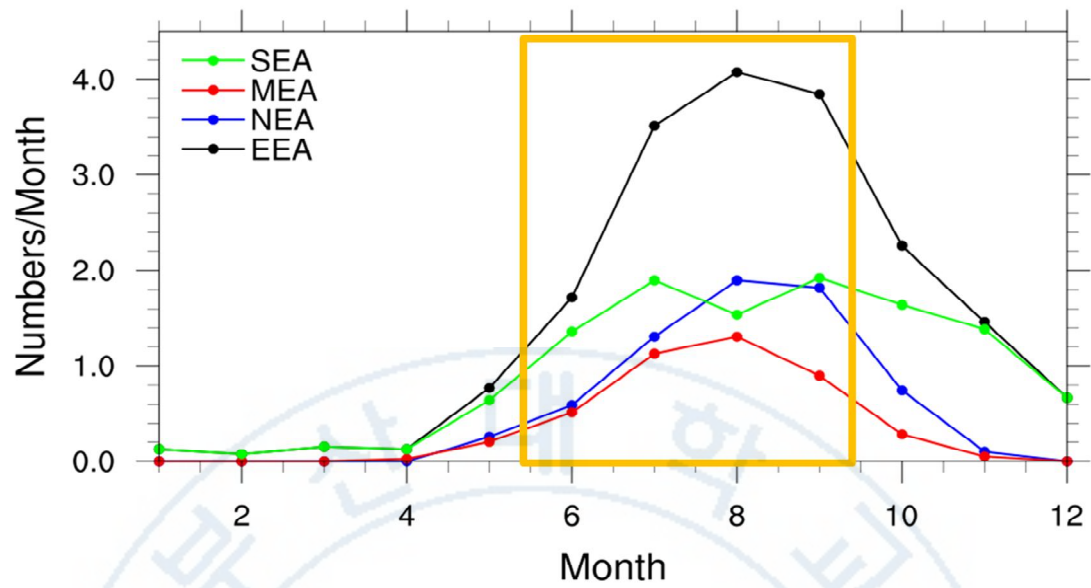


Fig. 2.2 Annual cycle of typhoons that affected East Asia from 1980-2018. Yellow box is typhoon season to be predict.

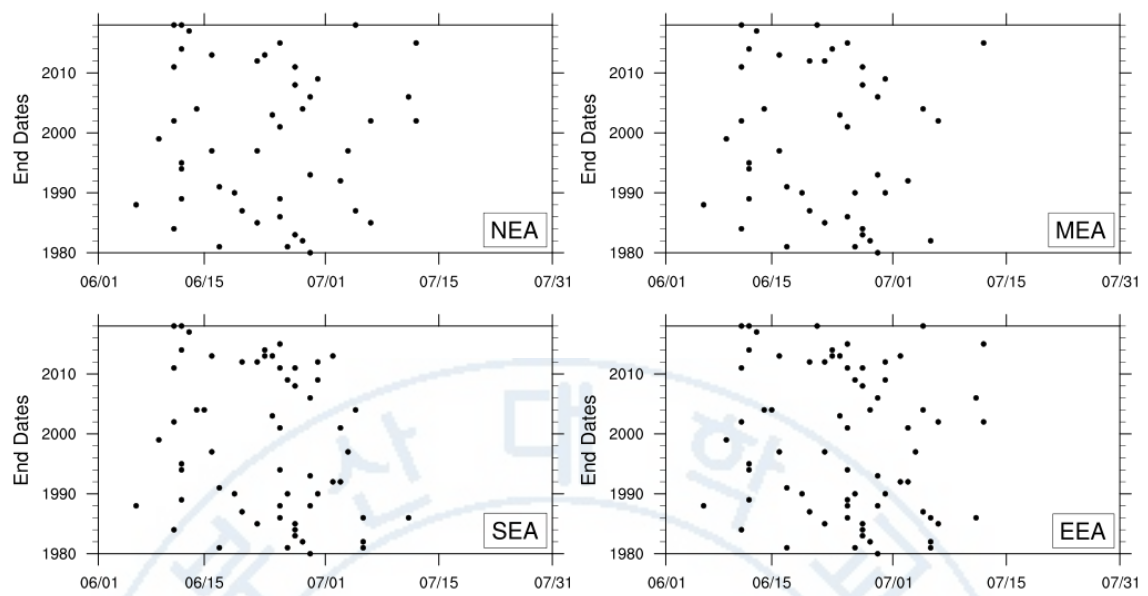


Fig. 2.3 Extinction date of the typhoons that occurred in June.

제 3 장. 태풍과 대기 순환의 관계

중하층 대기 순환을 예측인자로 사용하기 위해 700hPa, 500hPa의 상대와도와 수평바람을 이용하여 지역별 내습태풍과의 관계를 분석하였다 (Zhang et al., 2017). Fig. 3.1은 재분석자료의 상대와도, 수평바람과 NEA 태풍 사이의 회귀상관으로, 태풍이 NEA로 내습하기 유리한 대기 순환을 보여준다. 이때 (a)와 (b)는 500hPa에서의 NEA 와도 패턴과 바람 패턴을, (c)와 (d)는 700hPa에서의 NEA 와도 패턴과 바람 패턴을 나타낸다. NEA 와도 패턴에 표기된 'P'는 양의 상대와도의 중심을, 'N'은 음의 상대와도의 중심을 의미하고 흰색 실선과 점선은 각각 양과 음의 95%, 98%, 99% 신뢰수준에 대해 유의함을 나타낸다. 또한 NEA 바람 패턴의 shading은 95% 신뢰수준에 대해 유의함을 나타낸다. NEA 와도 패턴은 한반도를 중심으로 한 음의 상대와도와 동중국과 열대 태평양을 중심으로 한 양의 상대와도로 구성된다. 열대 태평양에 위치한 양의 상대와도는 500hPa보다 700hPa에서 더 뚜렷하나, 한반도에 위치한 음의 상대와도나 동중국에 위치한 양의 상대와도는 크기나 중심의 위치가 두 층에서 상당히 유사하다.

이런 패턴이 나타나는 원인을 분석하기 위해 북서태평양 고기압 (Western North Pacific High, WNPB)에 대한 composite analysis를 수행하였다 (최우석 et al., 2010). Fig. 3.2는 지역별 태풍의 내습빈도에 따라 500hPa에서 여름철 WNPB의 경계를 경험적으로 의미하는 5,880gpm선을 나타낸 그림이다. 빨간색, 초록색, 파란색은 각각 NEA, MEA, SEA 경우를 의미하며, 연구기간동안 상위 33%의 내습이 발생한 해를 AN_Year (above normal year)로, 하위 33%의 내습이 발생한 해를 BN_Year (below normal year)로 정의하였다. 실선과 점선은 각 지역별 AN_Year와 BN_Year의 5,880gpm선을 나타내며, 구체적인 내용은 표 3.1에 정리되어 있다. NEA BN_Year (빨간 점선)에 WNPB가 동서방향으로 확장하지만 NEA AN_Year (빨간 실선)에는 수축한 모습을 보인다. 이는 WNPB가 수축하여 중국동부에 상대적으로 저기압성 흐름이 발생할 때 NEA에 태풍이 내습하기 유리함을 의미한다.

NEA 와도 패턴 중에서 동중국을 중심으로 한 양의 상대와도는 상대적으로 저기압성 흐름을 유발하여, 한반도와 일본 남부에 뚜렷하고 강한 남동풍 아노말리와 열대 지역에 서풍 아노말리를 유발한다 (Fig. 3.1). Choi et al (2010)에 따르면 NEA 바람 패턴에서 나타난 대규모 대기 순환은 하층 상대와도와 연직 바람시어에 영향을 미쳐 태풍이 SEA로 진입하는 것을 저지하고 NEA로 내습하도록 이동시킨다. 게다가 NEA

바람 패턴은 북서태평양 몬순이 강할 때의 대기 순환과 유사하며, Wang and Fan (1999)은 북서태평양 몬순의 강한 대류가 태풍발생에 유리한 조건인 저기압성 흐름을 일으킴을 밝힌 바 있다. Wang and Chan (2002)과 최기선 et al. (2015)은 북서태평양 몬순이 강할 때 북서태평양 동쪽해역에서 발생한 태풍이 NEA로 빈번하게 북상함을 밝혔다. 또한 최기선 et al. (2015)은 Wang and Fan (1999)이 개발한 북서태평양 몬순 지수와 한반도 내습태풍 사이에 뚜렷한 양의 상관관계가 있음을 보였다. 따라서 Fig. 3.1에 나타난 회귀된 중하층 대기 순환은 NEA 태풍과 관련된 특징적인 패턴으로 간주될 수 있다.

Fig. 3.3은 재분석자료의 상대와도, 수평바람과 MEA 태풍 사이의 회귀패턴을 나타낸 그림이다. MEA 와도 패턴인 (a)와 (c)에서 북서태평양과 동아시아를 가로지르는 유의한 dipole 패턴이 두 층에서 유사하게 나타나며, MEA 바람 패턴인 (b)와 (d)에서도 유사하게 나타난다. 이는 남중국에 내습한 태풍과 관련된 대기 순환을 분석했던 Sun and Ahn (2011)의 결과와 유사하다. 중국 동부에서 북서태평양까지 이어지는 강한 음의 상대와도와 인도차이나에서 북서태평양까지 이어지는 강한 양의 상대와도로 구성된 MEA 와도 패턴은 아열대 지역에 강한 동풍 아노말리를, 열대지역에 강한 서풍 아노말리를 유발시킨다. MEA의 회귀패턴 원인도 NEA의 경우와 마찬가지로 WNPB 수축과 관련있다. Fig. 3.2에서 MEA AN_Year (초록 실선)에 수축한 WNPB는 WNPB가 수축할 때 MEA로 더 많은 태풍이 내습함을 의미한다.

MEA 와도 패턴은 열대의 서풍 아노말리와 아열대의 동풍아노말리를 통해 SEA로의 태풍진입을 방해하고 MEA로 태풍을 이동시킨다 (Fig. 3.3). 특히 동중국을 중심으로 한 양의 상대와도가 NEA 와도 패턴보다 MEA 와도 패턴에서 동서방향으로 더 확장되었기 때문에 아열대의 동풍 아노말리가 MEA 바람 패턴에서 더 뚜렷하며, 태풍을 NEA가 아닌 MEA로 이끄는 주된 원인이 된다. 이와 관련하여 일부 연구는 아열대 지역과 열대 지역의 상반되는 흐름이 하층에서 저기압성 바람시어와 와도를 발생시켜 태풍이 발생하기에 유리한 환경을 조성함을 밝히고 있다 (Harr and Elsberry, 1995; Chu, 2004; Chu et al., 2007). 다시 말해 수축한 WNPB와 관련된 아열대의 동풍 아노말리와 열대의 서풍 아노말리는 태풍 생성과 발달에 적합한 환경을 조성하고 MEA로 내습하도록 돕는다.

Fig. 3.4는 재분석자료의 상대와도, 수평바람과 SEA 태풍 사이의 회귀패턴을 나타낸 그림이다. SEA 와도 패턴은 중국 중부를 중심으로 한 음의 상대와도와 필리핀 해를 동서방향으로 가로지르는 양의 상대와도로 구성된다. 중국 중부를 중심으로 한 음의 상대와도는 두 층의 SEA 와도 패턴에서 유사하게 나타나나 필리핀 해를 가로지

르는 양의 상대와도는 500hPa에서는 한 개로, 700hPa에서는 두 개로 분리되어 나타난다. 필리핀 해의 강한 대류는 하층에서 수평바람을 수렴시키고, 양의 상대와도를 더욱 강화시킨다. 이런 순환은 태풍발생에 유리한 환경으로, SEA로 태풍이 내습할 가능성을 증가시킨다. 또한 SEA 바람 패턴에서 나타난 한반도와 일본남부 부근의 북풍 아노말리는 태풍이 중위도로 이동하는 것을 방해한다.

SEA 와도 패턴은 NEA, MEA 와도 패턴과 달리 WNPH에서 상대적으로 떨어진 곳에서 통계적으로 유의하게 나타난다. 또한 SEA 바람 패턴에는 열대의 서풍 아노말리가 존재하지 않으며, 이는 약한 여름 몬순 기압골과 관련된 바람 패턴과 유사하다. Wang and Chan (2002)과 최기선 et al (2015)은 북서태평양 몬순이 약할 때, 북서태평양의 서쪽해역에서 발생한 태풍이 SEA로 빈번하게 상륙함을 보인 바 있다. Fig. 3.2는 SEA의 경우 NEA, MEA와 다르게 WNPH가 확장했을 때 SEA로 빈번하게 내습함을 보여주며, 이는 선행연구 (Harr and Elsberry, 1995; Choi et al, 2010)와 유사한 결과이다. 또한 SEA AN_Year과 BN_Year 사이에 WNPH의 발달차이가 미미하며, 이는 WNPH가 SEA 태풍에 상대적으로 미치는 영향이 적음을 보여준다. 이러한 결과는 중위도 (NEA, MEA)와 저위도 (SEA)에서 태풍 진로에 영향을 미치는 기후요소가 다름을 시사하며, 예측 지역을 세분화하는 것이 타당함을 보여준다.

Fig. 3.5는 재분석 자료의 상대와도, 수평바람과 EEA 태풍 사이의 회귀를 나타낸다. EEA 와도 패턴은 동북아시아에 동서방향으로 긴 음의 상대와도와 인도차이나에서 동중국해까지 이어진 양의 상대와도로 구성된다. 또한 두 층의 패턴을 비교하면 음의 상대와도는 700hPa보다 500hPa에서 동서방향으로 더 확장되나, 양의 상대와도는 유사하다. EEA 와도 패턴은 일본 남부의 남풍 아노말리, 열대 지역의 강한 서풍 아노말리, 아열대 지역의 유의하고 강한 동풍 아노말리를 포함한 EEA 바람 패턴을 유발한다. 이는 NEA와 MEA 바람 패턴의 주요 특징으로, 세분화된 지역 중 SEA 태풍이 가장 많음에도 불구하고 EEA 패턴에서 SEA 패턴의 특징이 거의 나타나지 않는 것은 SEA 태풍보다 NEA와 MEA 태풍이 대기 순환과 더 밀접한 관련이 있음을 시사한다.

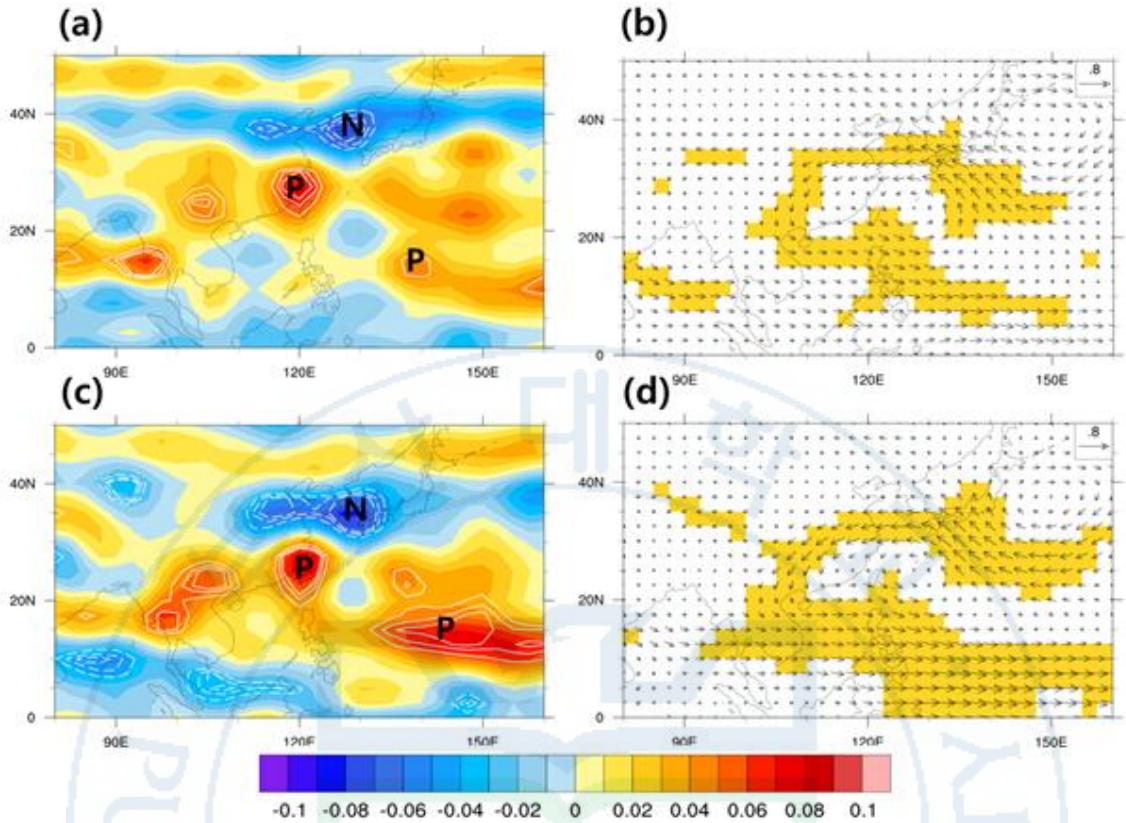


Fig. 3.1 Regression of (a) relative vorticity and (b) horizontal wind at 500hPa from R2 against the observed typhoons over NEA for the 1980–2018. (c) and (d) are the same as (a) and (b), but at 700hPa. 'P' ('N') in (a) and (c) indicates the positive (negative) relative vorticity center, and solid (dashed) white lines indicate the positively (negatively) significant areas at the 95%, 98% and 99% confidence levels. Shading in (b) and (d) indicates the areas at the 95% confidence level.

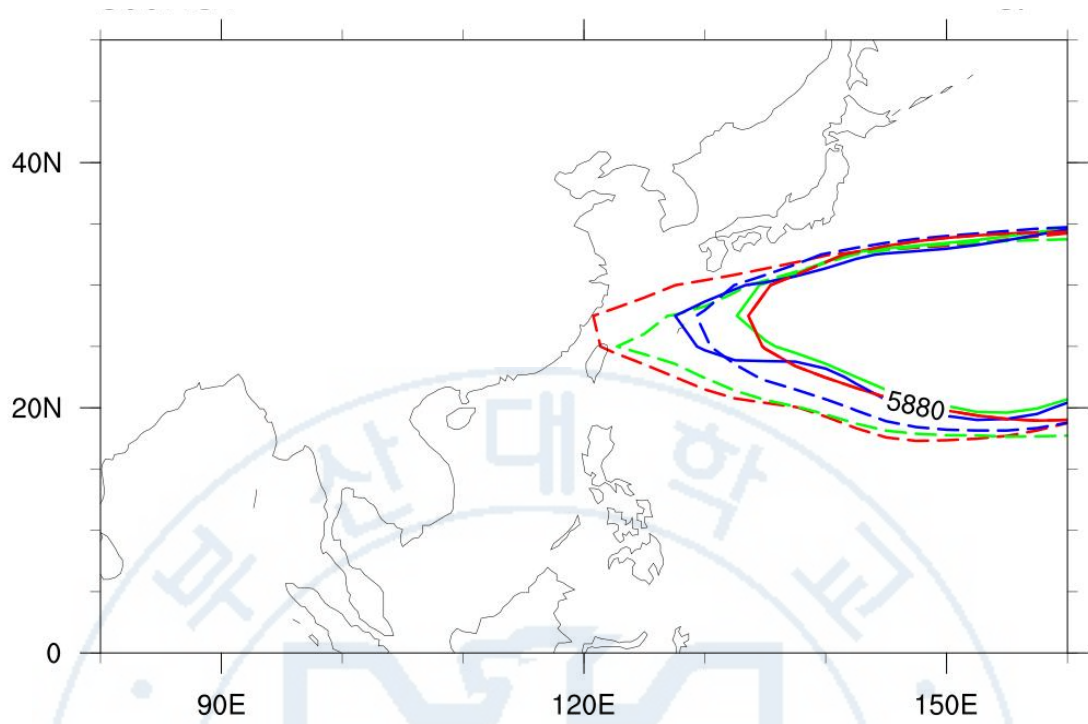


Fig. 3.2 Composite of 5,880gpm line representing summer Western North Pacific High at 500hPa in AN_Year (solid line) and BN_Year (dashed line) over NEA (red line), MEA (green line) and SEA (blue line).

Table. 3.1 The years in which typhoons landed above and below than normal over NEA, MEA and SEA.

Domain	AN_Years	BN_Years
NEA	1982, 1985, 1988, 1990, 1991, 1993, 1997, 2000, 2002, 2004, 2012, 2016, 2018	1980, 1983, 1984, 1995, 1996, 2001, 2003, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2017
MEA	1981, 1990, 1992, 1994, 2000, 2001, 2004, 2005, 2006, 2012, 2013, 2015, 2018	1980, 1983, 1986, 1987, 1988, 1991, 1993, 1995, 1996, 1997, 1999, 2009, 2011, 2014, 2017
SEA	1984, 1994, 1995, 2001, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013, 2017	1980, 1982, 1985, 1986, 1988, 1992, 1998, 1999, 2000, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2010, 2014, 2015, 2016, 2018
EEA	1982, 1985, 1989, 1990, 1991, 1993, 1994, 2000, 2001, 2002, 2004, 2009, 2012, 2013, 2016, 2018	1980, 1983, 1984, 1986, 1987, 1992, 1996, 1998, 1999, 2003, 2006, 2007, 2008, 2010, 2014, 2015

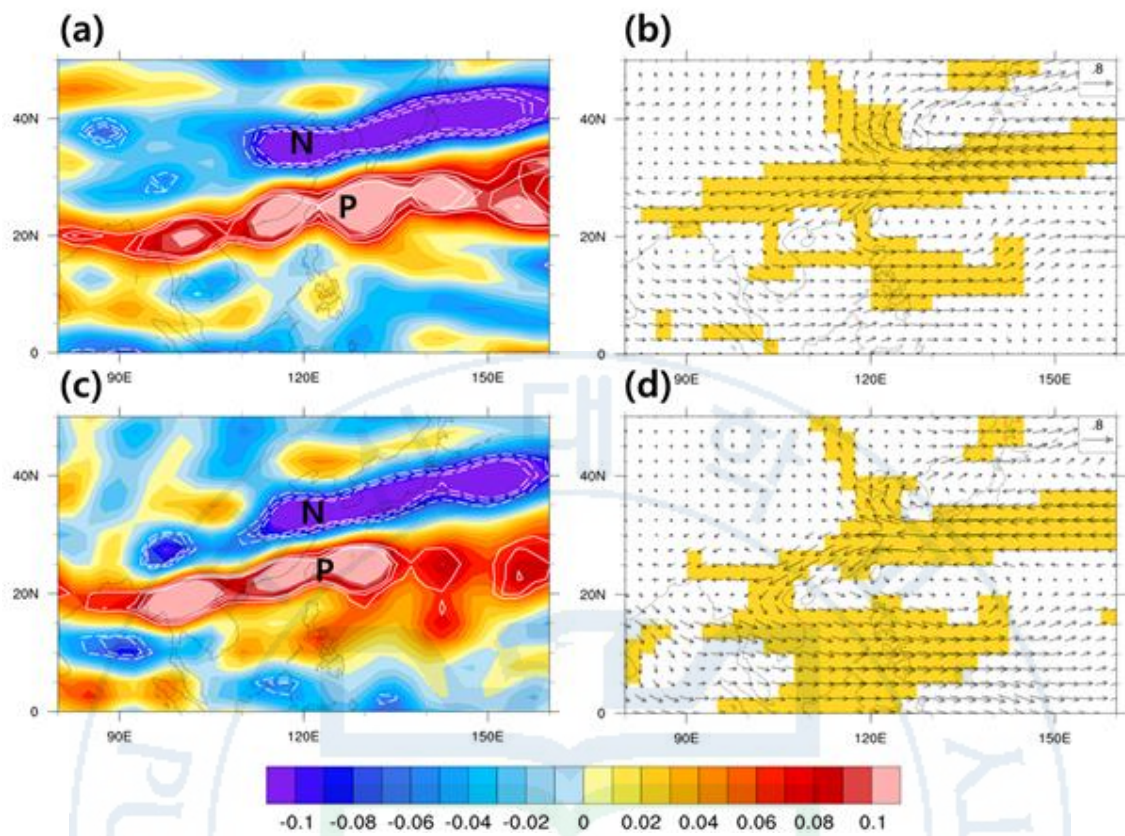


Fig. 3.3 As in Fig. 3.1. But for typhoons landfall over MEA.

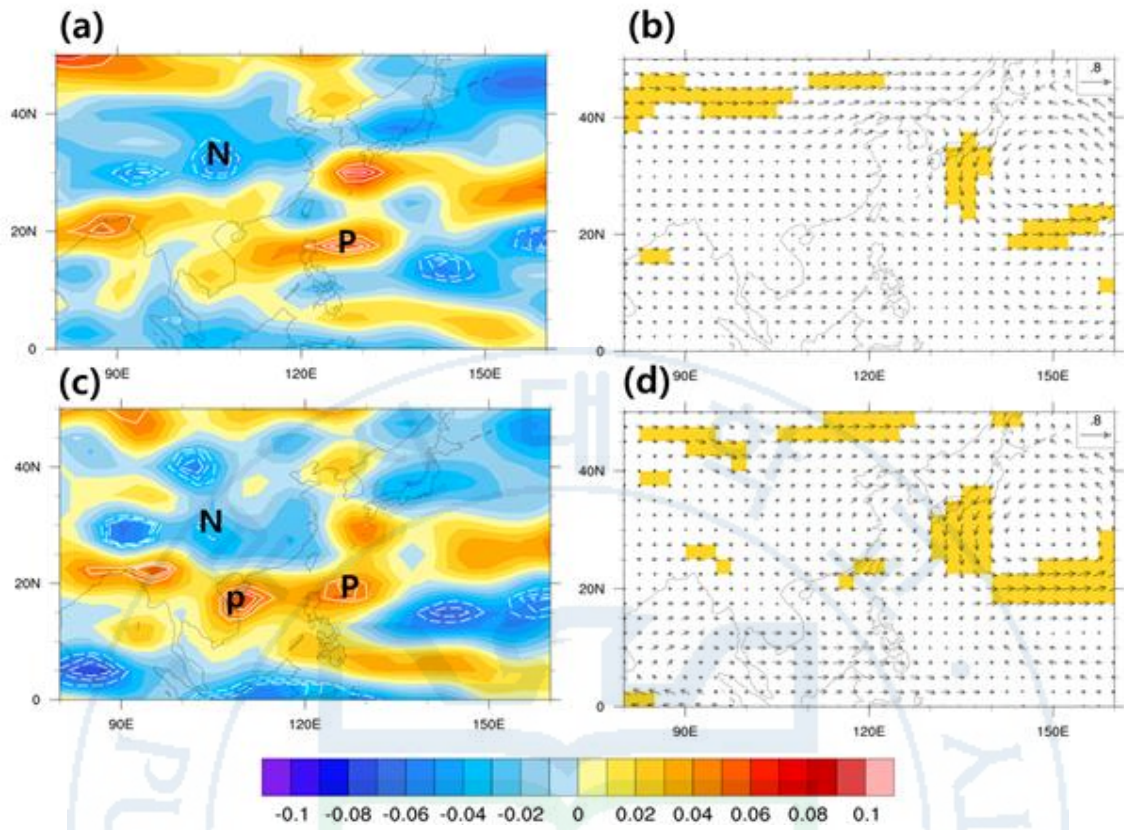


Fig. 3.4 As in Fig. 3.1. But for typhoons landfall over SEA.

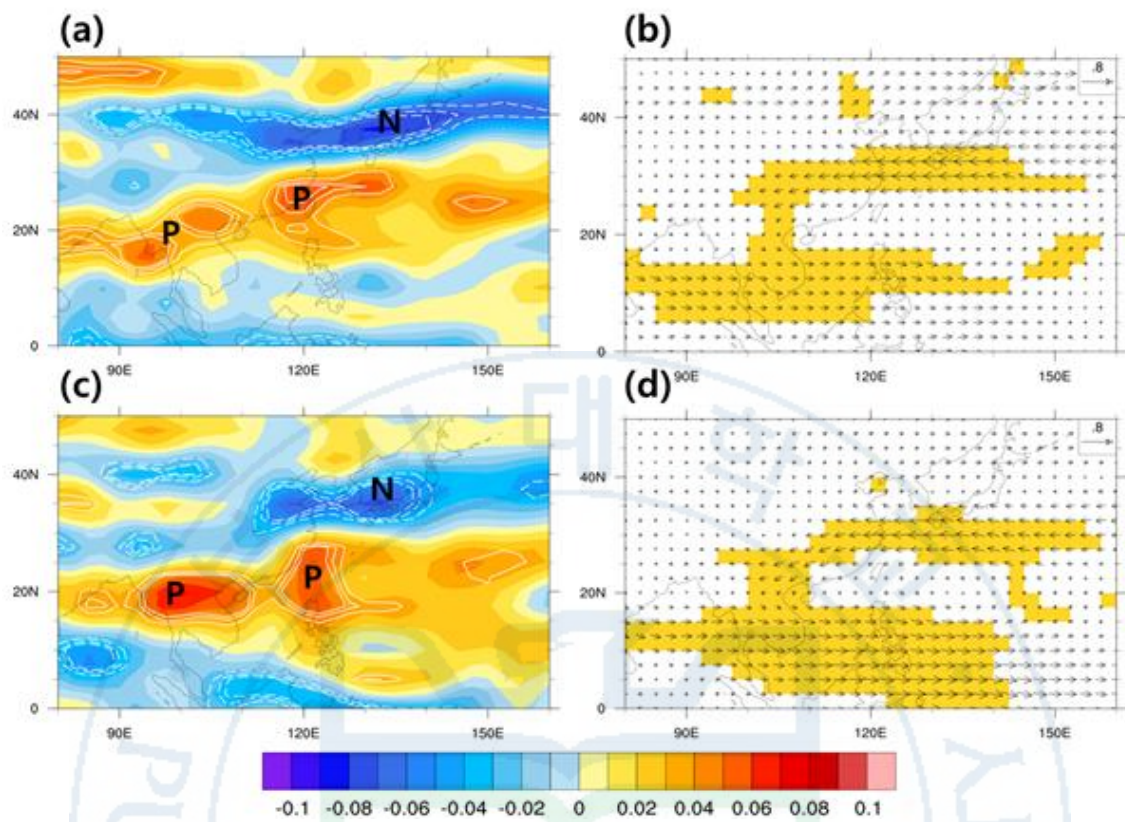


Fig. 3.5 As in Fig. 3.1. But for typhoons landfall over EEA.

제 4장. PNU CGCM v2.0의 태풍예측 가능성

SDTFM에 사용된 역학모형의 예측성은 성공적인 모형 개발을 결정한다 (Vitart and Stockdale, 2001). 그런 관점에서 대기 순환에 대한 PNU CGCM v2.0의 예측성을 평가할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서 예측인자로 사용하는 중하층 대기 순환은 다른 기상 요소에 비해 상대적으로 예측하기 어렵다. 하층 바람은 지표 경계면 흐름의 불균일하고 격변하는 특성으로 인한 매우 복잡하고 이해하기 어려운 지표면의 영향을 강하게 받기 때문이다. 이러한 과정을 매개변수화하기 어렵기 때문에 지역적 영향에 따라 시뮬레이션 된 바람에 큰 오류가 발생한다. 이런 바람의 순간 변화를 제거하기 위해 본 연구에서는 월평균 자료를 사용하였다. 또한 태풍예측에는 태풍 진로와 관련된 대규모 대기 순환이 중요하기 때문에 격자점마다 시간변동성의 유사성을 분석하는 것은 본 연구의 예측성 평가방법으로써 적합하지 않다 (이상민 et al, 2016). 그러므로 본 연구에서는 3장에서 밝힌 내습태풍과 대기 순환의 관계를 바탕으로 예측성을 평가하고 SDTFM을 개발하였다.

예측한 상대와도와 관측된 태풍 사이의 회귀를 구하기 위한 hindcast 자료는 1월 (6-month to 8-month)부터 6월 (1-month to 3-month) 초기조건으로 모델 적분한 결과이다. Table. 4.1은 지역별 유의한 예측성이 나타나는 초기 조건과 예측인자로 선정된 변수가 정리되어 있다. PNU CGCM v1.0을 사용했던 선행연구에서 7월 초기조건 (0-month to 2-month)에서만 예측성을 보였던 것과 달리 MEA와 SEA의 경우 2월 초기조건 (5-month to 7-month)부터 유의한 예측성이 나타난다. 이는 PNU CGCM v2.0의 중장기 예측이 안정적임을 의미하고, EEA의 경우 NEA와 마찬가지로 5월 초기조건 (2-month to 4-month)부터 유의한 예측성이 나타난다. 효과적인 중장기 예측을 위해 유의한 예측성이 나타나는 가장 빠른 초기조건을 사용하였으며, 관측된 태풍에 대해 예측한 대기 순환의 회귀 패턴을 구해본 결과 (그림은 생략) 유일하게 500hPa보다 700hPa에서 더 유의한 패턴이 나타난 MEA의 경우만 700hPa 상대와도를 예측인자로 사용하였다.

Fig. 4.1은 PNU CGCM v2.0이 예측한 상대와도와 지역별 관측된 태풍의 회귀상관을 구한 것이다. 그림에 표기된 'P'은 양의 상대와도 중심을, 'N'은 음의 상대와도 중심을 의미하고 하얀 실선과 점선은 각각 양과 음의 95%, 98%, 99% 신뢰수준에 대해 유의함을 나타낸다. NEA 와도 패턴 (Fig. 3.1 (a))에 나타난 한반도를 중심으로 한 음의 상대와도는 Fig. 4.1 (a)에서 일본 북부로 이동하지만, 동중국과 북태평양의 양의 상대와도는 거의 유사한 위치에 나타난다. Fig. 4.1 (b)은 MEA의 경우로, MEA

와도 패턴 (Fig. 3.3 (c))의 유의한 dipole 패턴이 유사하게 나타난다. SEA의 경우인 Fig. 4.1 (c)은 SEA 와도 패턴 (Fig. 3.4 (a))과 비교해보면 중국 중부를 중심으로 한 음의 상대와도는 비슷한 위치에 나타났으나, 필리핀 해를 중심으로 한 양의 상대와도는 인도차이나반도 동부지역으로 서쪽방향으로 이동하여 나타난다. Fig 4.1 (d)은 EEA 와도 패턴 (Fig. 3.5 (a))에서 북동아시아를 가로질러 나타난 음의 상대와도가 중국 중부와 일본으로 분리되어 나타나나, 인도차이나부터 동중국해까지의 양의 상대와도는 EEA 와도 패턴과 유사하게 나타난다. 이 결과를 바탕으로 3장에서 살펴본 회귀패턴에서 나타난 와도의 중심위치에 작은 변화는 있으나, PNU CGCM v2.0이 내습 태풍과 관련된 대기 순환을 대부분 유의하게 예측하기 때문에 SDTFM으로 충분히 개발가능하다고 판단하였다.



Table. 4.1 The initial condition and atmospheric variables used as predictor for each domain.

Domain	Initial condition	Atmospheric variable
NEA	May	500hPa Vorticity
MEA	February	700hPa Vorticity
SEA	February	500hPa Vorticity
EEA	May	500hPa Vorticity



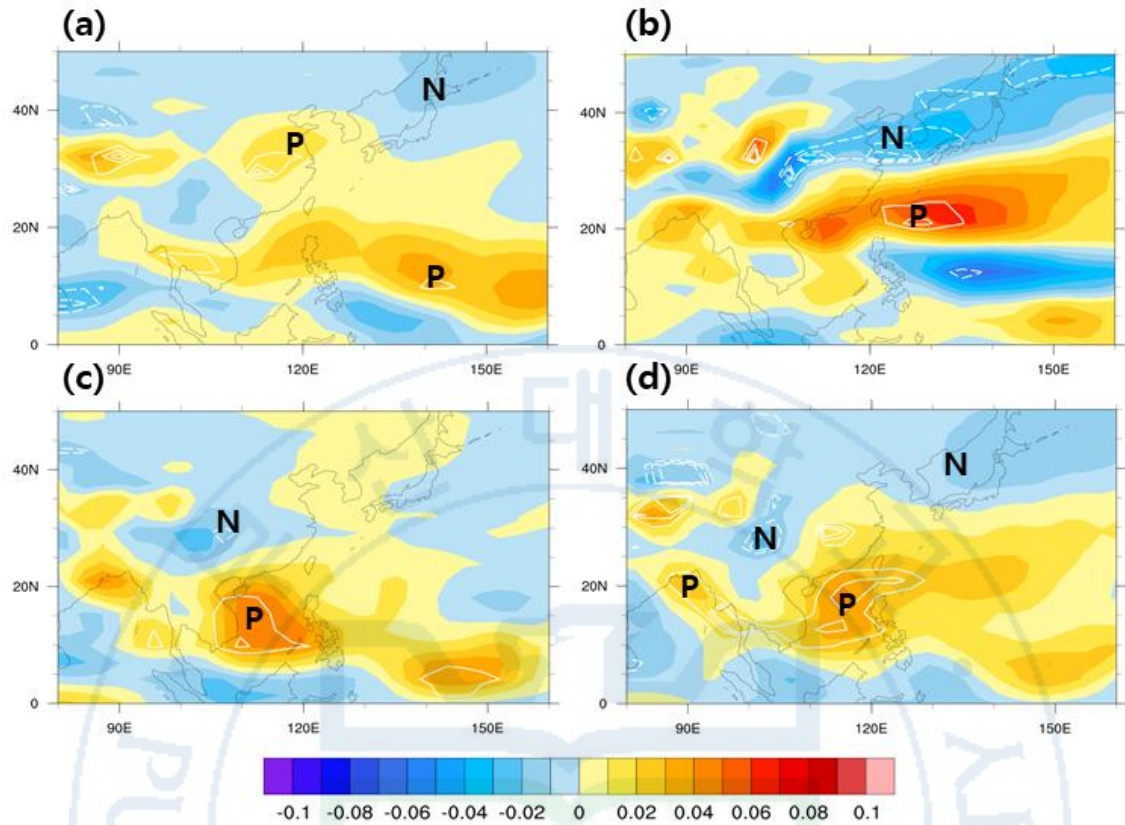


Fig. 4.1 Regression of relative vorticity at (a) 500hPa, (b) 700hPa, (c) 500hPa and (d) 500hPa from PNU CGCM against the observed typhoons over (a) NEA, (b) MEA, (c) SEA and (d) EEA for the 1980-2018 period. 'P' ('N') indicates the positive (negative) relative vorticity. Solid (dashed) white lines indicate the positively (negatively) significant areas at the 95%, 98% and 99% confidence levels.

제 5장. 통계-역학 태풍 예측 모형(SDTFM)

본 연구에서 SDTFM을 개발하기 위해 사용한 다중회귀는 2개 이상의 독립적인 예측인자를 가지며, 일반적으로 예측인자의 수가 적을수록 과적합을 피할 수 있기 때문에 성능이 더 좋은 것으로 알려져 있다 (Davis, 1976). 본 연구에서는 Fig. 4.1에서 강한 유의성을 나타내는 상대와도의 영역을 선정하고, 그 영역의 상대와도를 영역 평균하여 예측인자로 사용하였다. 선정된 영역과 개발된 SDTFM은 Table 5.1에 정리되어 있으며, EEA를 제외한 예측인자를 서로 독립적이다.

Fig. 5.1은 1980년부터 2018년까지 39년 동안 관측된 태풍 (파란색), SDTFM으로 예측한 태풍 (노란색), 교차검증 결과 (주황색)의 시계열을 나타낸 것이다. Leave-One-Out-cross-Validation (LOOCV)은 모델을 검증하기 위해 수행되었으며 (Sun and Ahn, 2011), 'SCOR'은 관측된 태풍과 예측된 태풍 사이의 상관계수를, 'FCOR'은 관측된 태풍과 교차검증 결과 사이의 상관계수를 나타낸다. NEA, MEA, SEA, EEA의 SCOR는 각각 0.495, 0.537, 0.385, 0.538로 모두 98% 이상 신뢰수준에 대해 유의하며 (Fig. 5.1), FCOR은 0.340, 0.431, 0.199, 0.403으로 SEA를 제외한 다른 영역에서 95% 이상 신뢰수준에 대해 유의하게 나타난다. 이는 개발된 SDTFM이 SEA 태풍을 제외한 NEA, MEA, EEA 태풍의 예측에 효과적으로 활용될 수 있음을 의미한다.

한편 교차검증만으로는 현업에서 북서태평양 태풍을 예측할 때 활용될 수 있음을 입증하기에는 부족하다. 추가적인 검증을 위해 SDTFM로 예측한 태풍과 재분석자료의 상대와도, 수평바람과의 회귀를 구해보았다 (Fig. 5.2). 왼쪽 그림의 흰색 실선과 점선은 각각 양과 음의 95%, 98%, 99% 신뢰수준에 대해 유의함을 의미하고, 오른쪽 그림의 shading은 95% 신뢰수준에 대해 유의함을 의미한다. Fig. 5.2 (a)는 NEA 와도 패턴의 주요 특징 (예, 한반도를 중심으로 한 음의 상대와도, 동중국과 열대 태평양을 중심으로 한 양의 상대와도)을 보여주며, 두 패턴의 공간상관계수는 0.552이다. Fig. 5.2 (b)는 NEA 바람 패턴에서 나타나는 일본 부근의 남동풍 아노말리와 열대의 서풍 아노말리가 유의하며, 이런 바람 패턴은 태풍이 SEA이 아닌 NEA로 진입하도록 한다. Fig. 5.2 (c)도 MEA 와도 패턴과 유사하며 두 패턴 사이의 공간상관계수는 0.817이다. 그러나 MEA 바람 패턴에서 나타난 태풍을 발생, 발달, 이동시키는 아열대와 열대지역의 바람 아노말리는 Fig. 5.2 (d)에서 통계적으로 유의하지 않지만 뚜렷하게 나타난다. Fig. 5.2 (e)와 (f)에는 SEA 와도 패턴과 바람 패턴의 주요 특징이 나타나지 않으며, Fig. 5.2 (e)와 SEA 와도 패턴의 공간상관계수는 0.034이다. SEA 태

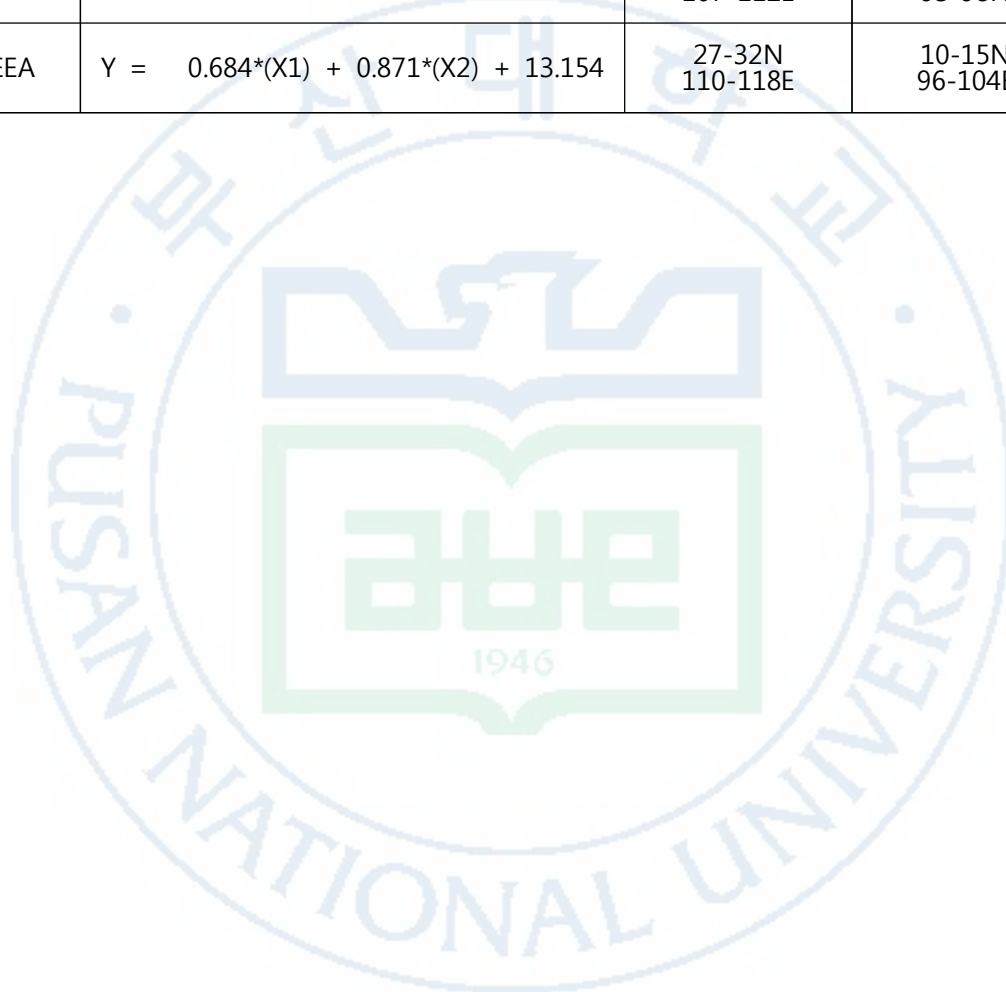
풍에 대한 SDTFM의 낮은 예측성의 원인을 찾기 위해 지역별 내습태풍과 관련된 지향류의 차이를 분석하였다.

Fig. 5.3 은 지역별 AN_Year 과 BN_Year 의 지향류 차이를 나타낸 그림이다. 지향류는 850hPa 에서 200hPa 의 평균류를 의미하며, 태풍 움직임의 70%~90%를 설명한다 (Holland, 1993). 검은색 박스는 Fig. 2.1 에서 정의된 지역별 영역을, 유선 (streamline)의 색깔은 풍속의 차이를 나타내며, shading 은 95% 신뢰수준에 대해 유의함을 의미한다. (a)와 (b)에서 지역별 박스안의 유선 (예, NEA 영역의 남동풍 아노말리, MEA 영역의 동풍 아노말리)은 내습태풍에 직접적으로 작용하는 지향류로, NEA와 MEA의 경우 AN_Year 과 BN_Year 사이에 큰 풍속 차이가 있다. 그러나 (c)에서 SEA와 관련된 지향류의 풍속 차이는 미미하며, 이는 내습과 관련된 대기 순환에 차이가 거의 없음을 시사한다. 즉 SEA 태풍에 강하게 작용하는 지향류가 부재함을 의미한다. 한편 EEA의 경우인 (d)에서 EEA 태풍과 관련된 지향류의 차이가 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 5.2 (g)는 북동아시아를 가로지르는 음의 상대와도와 인도차이나에서 동중국해까지 이어지는 양의 상대와도로 구성된 EEA 와도 패턴과 유사하며, 두 패턴의 공간 상관계수는 0.729이다. Fig. 5.2 (f)의 회귀된 바람 패턴은 통계적으로 유의하진 않지만 EEA 바람 패턴과 유사한 특징을 보인다. 그러므로 이런 결과는 본 연구에서 개발된 SDTFM이 NEA, MEA, EEA 태풍에 대해 상당한 예측성을 바탕으로 효과적인 예측이 이루어짐을 나타낸다.

Table. 5.1 SDTFM and the predictors to be used for SDTFM.

Domain	SDTFM	Predictor1 (X1)	Predictor2 (X2)
NEA	$Y = 0.803*(X1) + 0.476*(X2) + 5.615$	27-34N 110-118E	7-12N 138-146E
MEA	$Y = -0.370*(X1) - 0.652*(X2) + 3.846$	29.5-32N 120-129E	27-32N 105-109E
SEA	$Y = 0.512*(X1) + 0.260*(X2) + 6.718$	7-12.5N 107-112E	7-15N 93-98N
EEA	$Y = 0.684*(X1) + 0.871*(X2) + 13.154$	27-32N 110-118E	10-15N 96-104E



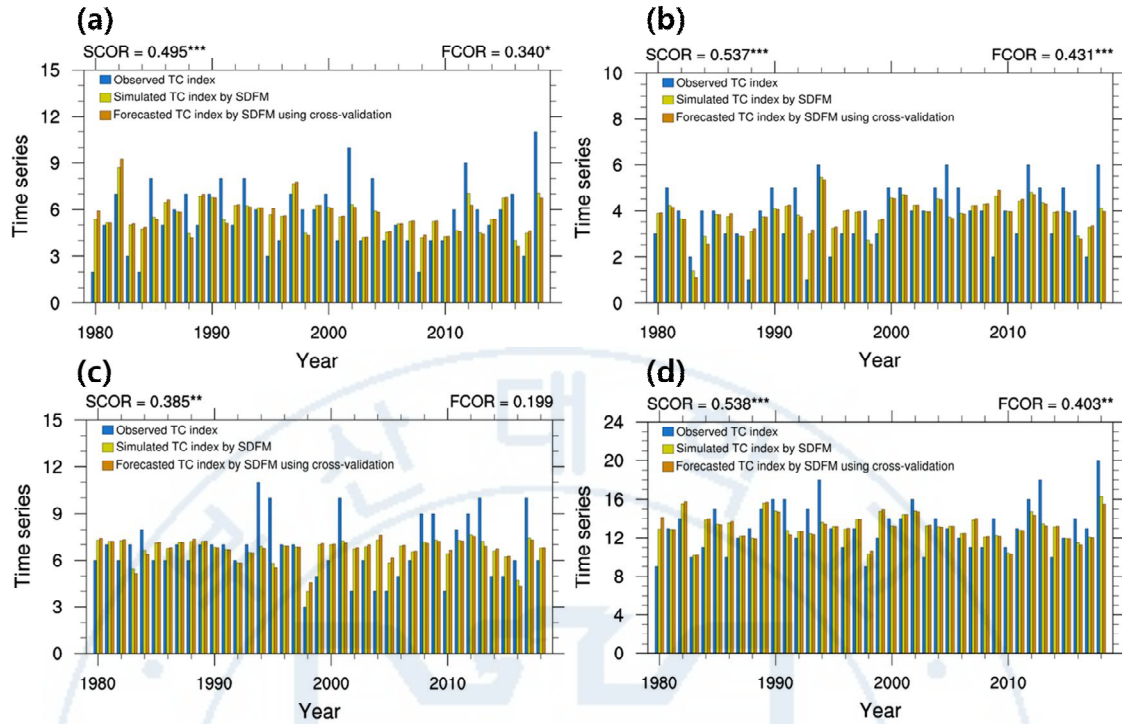


Fig. 5.1 Time series of the observed typhoons, simulated typhoons by SDTFM and the forecasted typhoons by SDTFM using LOOCV for the 1980–2018 period over (a) NEA, (b) MEA, (c) SEA and (d) EEA. ‘SCOR’ (‘FCOR’) is correlation coefficient between observed typhoons and simulated (forecasted) typhoons for every year during the period 1980–2018. ***, ** and * indicate significance at the 99%, 98% and 95% confidence level.

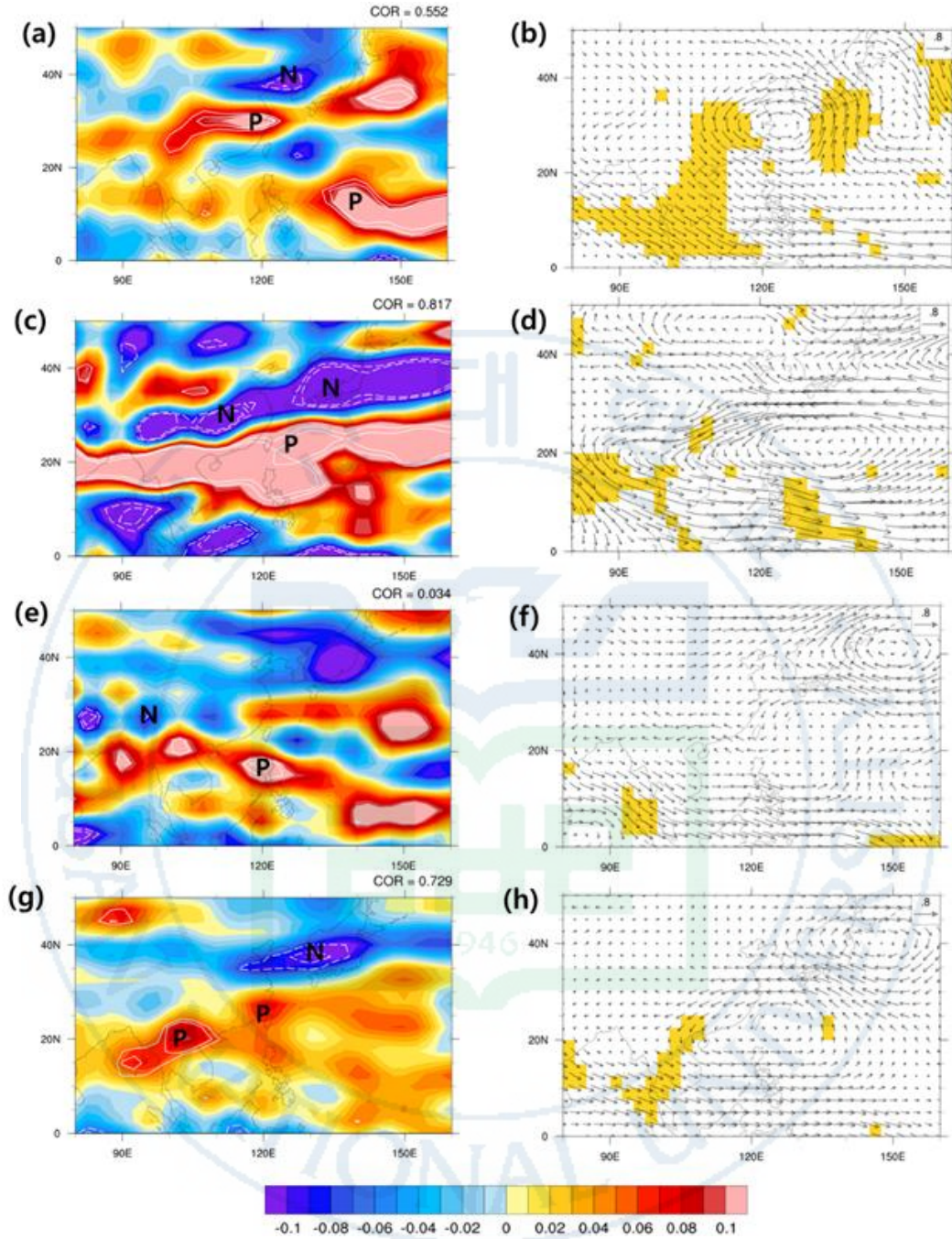


Fig. 5.2 Regression of relative vorticity (left column) and horizontal wind (right column) at (a-b) 500hPa, (c-d) 700hPa, (e-f) 500hPa and (g-h) 500hPa from R2 against the PNU CGCM v2.0 predicted typhoons over (a-b) NEA, (c-d) MEA, (e-f) SEA and (g-h) EEA for the 1980-2018 period. In the left column, 'P' ('N') indicates the center of positive (negative) relative vorticity, and the solid (dashed) white lines indicate the positively (negatively) significant areas at the 95%, 98% and 99% confidence levels. 'COR' is spatial correlation between vorticity patterns for each domain. Shading in right column indicates the areas at the 95% confidence level.

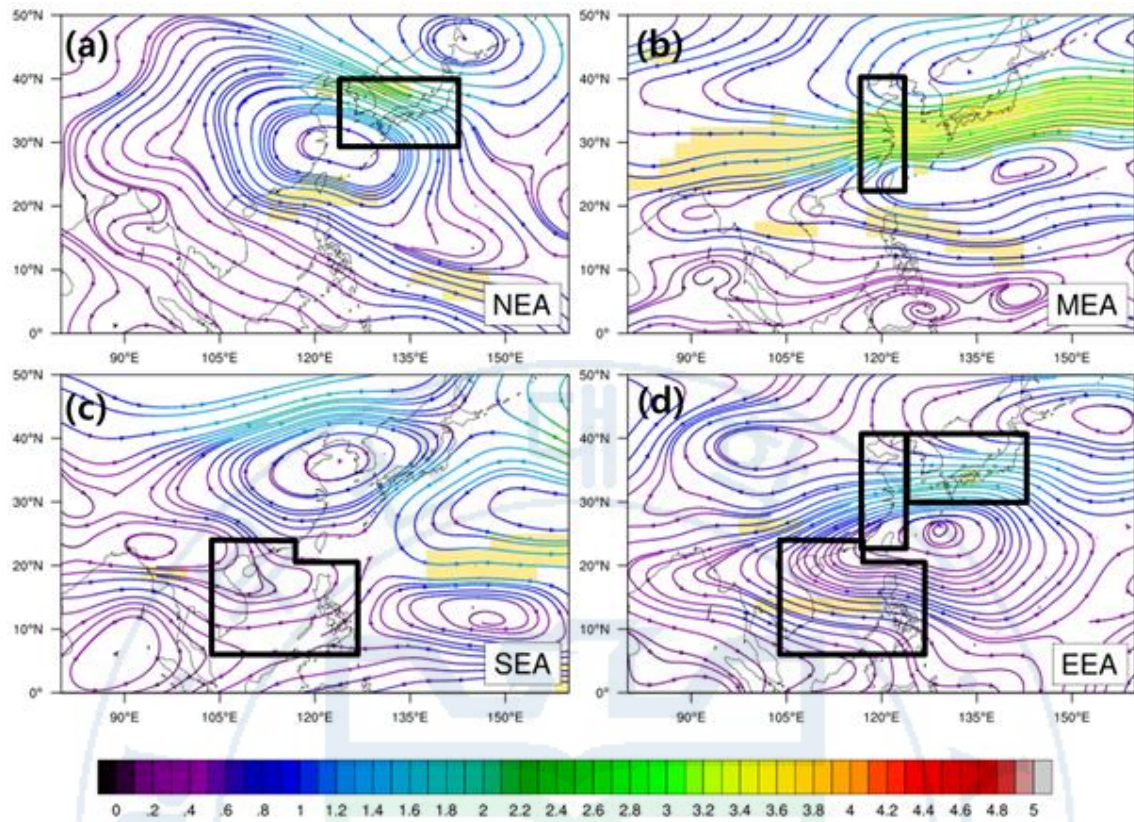


Fig. 5.3 Difference in steering flows between BN_Year and AN_Year for (a) NEA, (b) MEA, (c) SEA and (d) EEA. The color of streamline represents the difference in averaged wind speeds, and the black box represents each domain defined in Fig. 2.1. Shading indicates the areas at the 95% confidence level.

제 6장. 결 론

본 연구는 동아시아 태풍과 대기 순환의 상관관계를 밝히고, 그 관계를 기반으로 역학모형과 다중 회귀를 이용한 SDTFM을 개발하였다. 태풍은 여름철 동아시아 국가에 막대한 경제적, 사회적 피해를 입히며 기후 변화에 따라 점차 빈도가 증가하고 있다 (Fig. 6.1). 태풍에 대한 중장기 예측은 이러한 피해를 최소화하는데 효과적이며 지속적으로 개발되고 있다. 본 연구에서 사용된 CGCM은 APCC MME prediction system에 참여하고 있는 PNU CGCM v2.0이다. 이 모형은 시간지연방법을 활용하여 매달 총 40개의 앙상블 멤버를 생산한다. 모든 앙상블 멤버를 단순 평균하여 사용하였으며, 정확한 예측을 위해 예측지역을 NEA (한반도와 일본 포함), MEA (대만, 푸젠성, 저장성, 장쑤성, 상하이 포함), SEA (남중국, 베트남, 필리핀 포함)와 EEA (동아시아 전체)으로 세분화하였다. 그리고 각 영역을 지나가는 열대폭풍과 태풍을 내습 태풍으로 정의하였으며, 7월의 대기 순환에도 영향을 받는 6월 발생 태풍까지 포함하여 태풍시즌은 JJAS로 설정하였다.

적절한 예측인자를 찾기 위해 관측된 태풍과 중하층 상대와도 사이의 회귀상관을 분석한 결과 모든 영역에서 유의한 회귀패턴이 관찰되었다. WNPH의 경계를 대표하는 5,880gpm 선의 composite analysis에 따르면, WNPH가 수축할 때 NEA와 MEA 패턴에서 동중국에 상대적으로 저기압성 흐름이 나타나고, 이 흐름이 한반도의 고기압성 흐름과 만나 강한 지향류를 생성한다. 아열대의 동풍 아노말리와 열대의 서풍 아노말리는 하층 상대와도와 연직 바람시어에 영향을 미쳐 태풍 발생과 발달을 돕는다. 특히 열대의 서풍 아노말리는 태풍이 SEA로 진입하는 것을 막고, 중위도로 이동하게 한다. 반면 SEA의 경우 일본 부근에 유의한 북풍 아노말리는 태풍의 북상을 저지하여 SEA로 진입할 가능성을 높인다. 또한 필리핀 해 부근의 저기압성 흐름의 아노말리는 양의 상대와도를 강화시킴으로써 태풍발생에 유리한 환경을 제공한다. 따라서 NEA와 MEA의 경우와 달리 SEA 패턴은 태풍의 진로보다 발생과 더 관련 있다. 한편 EEA의 경우 대기 순환과 직접적으로 관련 있는 NEA, MEA 경우의 특징이 두드러지게 나타났다.

PNU CGCM v2.0으로 SDTFM을 개발한 결과 NEA와 EEA 경우는 5월 초기조건으로 적분 출발한 예측부터, MEA와 SEA 경우는 2월 초기조건으로 적분 출발한 예측부터 유의한 예측성이 나타났다. 예측된 상대와도와 관측된 태풍사이의 회귀패턴에서 유의한 영역의 상대와도를 예측인자로 선정하고, 다중선형회귀를 활용해 SDTFM을 개발하였다. 개발된 모형은 모든 영역에 대해 98% 이상 신뢰수준에 대해 유의한 값

을 예측하였다. LOOCV의 결과에 따르면 SEA를 제외한 NEA, MEA, EEA에 대해서 95% 이상 신뢰수준에 대해 유의한 값을 보였다. 다시 말해 NEA, MEA, EEA에 대한 SDTFM은 지역별 내습태풍에 대해 효과적으로 사용될 수 있음을 시사한다.

태풍에 대한 대기 순환의 영향은 지역마다 다르다. NEA와 MEA 태풍과 관련된 대기 순환은 빈번한 태풍 발생과 뚜렷한 내습을 의미하지만, SEA 태풍과 관련된 대기 순환의 경우 오직 태풍 발생을 의미한다. 따라서 SEA의 경우 대기 순환을 예측인자로 사용한 본 연구의 SDTFM에서는 유의하지 않은 예측을 보였다. 그러나 NEA, MEA, EEA에 대한 유의한 예측은 동아시아 내습태풍 예측 기술 발전에 유용하게 활용될 것이다.



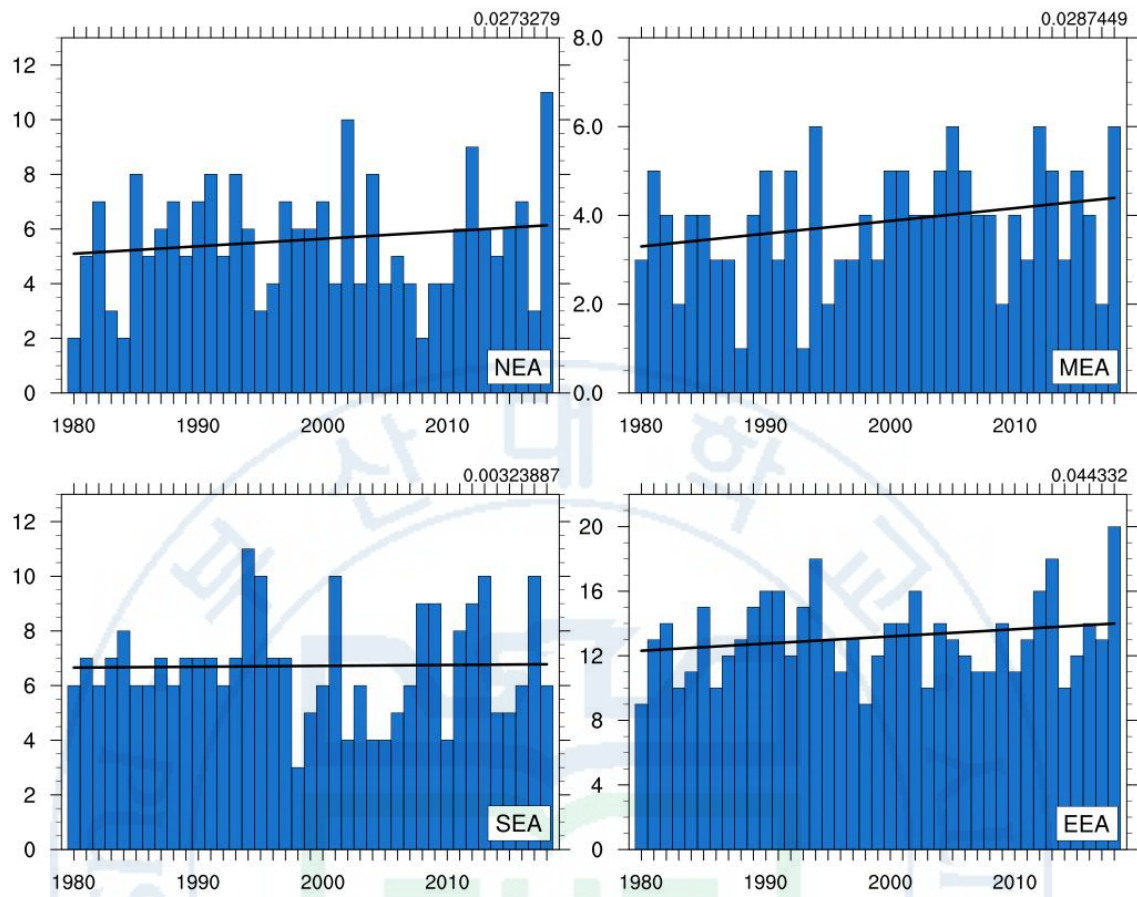


Fig. 6.1 Annual variability and trends of typhoons.

참고문헌

- 이상민, 강현석, 김연희, 변영화, and 조천호. 2016. '2014 년 계절예측시스템과 중기예측모델의 예측성능 비교 및 검증', *대기*, 26: 59-72.
- 최기선, 박기준, 이경미, 김정윤, and 김백조. 2015. '북서태평양 몬순이 한국 영향태풍활동에 미치는 영향', *한국지구과학회지*, 36: 68-81.
- 최우석, 허창회, and 김형석. 2010. '대규모 순환장이 북서태평양 태풍활동에 끼치는 영향: 2009 년의 예', *한국기후변화학회지*, 1: 133-45.
- Ahn, J.-B., S.-B., Lee, and S.-B. Ryoo. 2012. 'Development of 12-month ensemble prediction system using PNU CGCM V1. 1', *Atmosphere*, 22: 455-464.
- , and H.-J., Kim. 2014. 'Improvement of 1-month lead predictability of the wintertime AO using a realistically varying solar constant for a CGCM', *Meteorological Applications*, 21: 415-18.
- Au-Yeung, A., and J. Chan. 2011. 'Potential use of a regional climate model in seasonal tropical cyclone activity predictions in the western North Pacific', *Climate Dynamics*, 39.
- Bayasgalan, G., and J.-B. Ahn. 2018. 'Seasonal prediction of high-resolution temperature at 2-m height over Mongolia during boreal winter using both coupled general circulation model and artificial neural network', *International Journal of Climatology*, 38: 5418-29.
- Camargo, S. J., and A. H. Sobel. 2005. 'Western North Pacific Tropical Cyclone Intensity and ENSO', *Journal of Climate*, 18: 2996-3006.
- Camp, J., M. Roberts, C. MacLachlan, E. Wallace, L. Hermanson, A. Brookshaw, A. Arribas, and A. A. Scaife. 2015. 'Seasonal forecasting of tropical storms using the Met Office GloSea5 seasonal forecast system', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141: 2206-19.
- Chan, J. C. L., and W. M. Gray. 1982. 'Tropical Cyclone Movement and Surrounding Flow Relationships', *Monthly Weather Review*, 110: 1354-74.
- . 1985. 'Tropical Cyclone Activity in the Northwest Pacific in Relation to the El Niño/Southern Oscillation Phenomenon', *Monthly Weather Review*, 113: 599-606.
- . 1995. 'Tropical Cyclone Activity in the Western North Pacific in Relation to the Stratospheric Quasi-Biennial Oscillation', *Monthly Weather Review*, 123: 2567-71.
- , J.-e. Shi, and C.-man. Lam. 1998. 'Seasonal Forecasting of Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific and the South China Sea', *Weather and Forecasting*, 13: 997-1004.
- , ———, and K. Liu. 2001. 'Improvements in the Seasonal Forecasting of Tropical

- Cyclone Activity over the Western North Pacific', *Weather and Forecasting*, 16: 491-98.
- , and M. Xu. 2009. 'Inter-annual and inter-decadal variations of landfalling tropical cyclones in East Asia. Part I: time series analysis', *International Journal of Climatology*, 29: 1285-93.
- Chen, J.-H., and S.-J. Lin. 2011. 'The remarkable predictability of inter-annual variability of Atlantic hurricanes during the past decade', *Geophysical Research Letters*, 38.
- , and ———. 2013. 'Seasonal Predictions of Tropical Cyclones Using a 25-km-Resolution General Circulation Model', *Journal of Climate*, 26: 380-98.
- Choi, J.-W., and H.-R. Byun. 2010. 'Possible relationship between western North Pacific tropical cyclone activity and Arctic Oscillation', *Theor. Appl. Climatol.*, 100: 261-74.
- Choi, K.-S., C.-C. Wu, and E.-J. Cha. 2010. 'Change of tropical cyclone activity by Pacific-Japan teleconnection pattern in the western North Pacific', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115.
- Chu, P.-S. 2004. 'ENSO and tropical cyclone activity. Hurricanes and Typhoons: Past, Present, and Potential, RJ Murnane and K.-B. Liu, Eds', *Columbia University Press*, 297: 332.
- , X. Zhao, C.-T. Lee, and M.-M. Lu. 2007. 'Climate prediction of tropical cyclone activity in the vicinity of Taiwan using the multivariate least absolute deviation regression method', *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 18: 805.
- Davis, R. E. 1976. 'Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean', *Journal of Physical Oceanography*, 6: 249-266.
- Fan, K. 2007. 'North Pacific sea ice cover, a predictor for the Western North Pacific typhoon frequency?', *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50: 1251-57.
- , and H. Wang. 2009. 'A New Approach to Forecasting Typhoon Frequency over the Western North Pacific', *Weather and Forecasting*, 24: 974-86.
- . 2010. 'A Prediction Model for Atlantic Named Storm Frequency Using a Year-by-Year Increment Approach', *Weather and Forecasting*, 25: 1842-51.
- Goh, A. Z.-C., and J. C. L. Chan. 2010. 'An Improved Statistical Scheme for the Prediction of Tropical Cyclones Making Landfall in South China', *Weather and Forecasting*, 25: 587-93.
- Harr, P. A., and R. L. Elsberry. 1991. 'Tropical Cyclone Track Characteristics as a Function of Large-Scale Circulation Anomalies', *Monthly Weather Review*, 119: 1448-68.
- , and ———. 1995. 'Large-Scale Circulation Variability over the Tropical Western

- North Pacific. Part I: Spatial Patterns and Tropical Cyclone Characteristics', *Monthly Weather Review*, 123: 1225-46.
- Ho, C.-H., J.-H. Kim, H.-S. Kim, C.-H. Sui, and D.-Y. Gong. 2005. 'Possible influence of the Antarctic Oscillation on tropical cyclone activity in the western North Pacific', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110.
- , H.-S. Kim, J.-H. Jeong, and S.-W. Son. 2009. 'Influence of stratospheric quasi-biennial oscillation on tropical cyclone tracks in the western North Pacific', *Geophysical Research Letters*, 36.
- Holland, G. 1993. 'Tropical cyclone motion. Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting', *World Meteorological Organization Tech. Document WMO/TD*, 560.
- Huang, W.-R., and J. C. L. Chan. 2014. 'Dynamical downscaling forecasts of Western North Pacific tropical cyclone genesis and landfall', *Climate Dynamics*, 42: 2227-37.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- . 2019. Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press.
- Jo, S., and J.-B. Ahn. 2015. 'Improvement of CGCM prediction for wet season precipitation over Maritime Continent using a bias correction method', *International Journal of Climatology*, 35: 3721-32.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. Yang, J. Hnilo, M. Fiorino, and G. Potter. 2002. 'NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2) 1631-1643, Bul. of the Atmos', *Met. Soc.*
- Kim, H.-M., E. K. M. Chang, and M. Zhang. 2015. 'Statistical-Dynamical Seasonal Forecast for Tropical Cyclones Affecting New York State', *Weather and Forecasting*, 30: 295-307.
- Kim, O.-Y., H.-M. Kim, M.-I. Lee, and Y.-M. Min. 2017. 'Dynamical-statistical seasonal prediction for western North Pacific typhoons based on APCC multi-models', *Climate Dynamics*, 48: 71-88.
- Lander, M. A. 1994. 'An Exploratory Analysis of the Relationship between Tropical Storm Formation in the Western North Pacific and ENSO', *Monthly Weather Review*, 122: 636-51.

- Lee, T.-C., T. R. Knutson, H. Kamahori, and M. Ying. 2012. 'Impacts of Climate Change on Tropical Cyclones in the Western North Pacific Basin. Part I: Past Observations', *Tropical Cyclone Research and Review*, 1: 213-35.
- Li, X., S. Yang, H. Wang, X. Jia, and A. Kumar. 2013. 'A dynamical-statistical forecast model for the annual frequency of western Pacific tropical cyclones based on the NCEP Climate Forecast System version 2', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118: 12,061-12,74.
- Liu, K. S., and J. C. L. Chan. 2003. 'Climatological characteristics and seasonal forecasting of tropical cyclones making landfall along the South China Coast', *Monthly Weather Review*, 131: 1650-62.
- Lu, M.-M., P.-S. Chu, and Y.-C. Lin. 2010. 'Seasonal Prediction of Tropical Cyclone Activity Near Taiwan Using the Bayesian Multivariate Regression Method', *Weather and Forecasting*, 25: 1780-95.
- Min, Y. M., V. N. Kryjov, and S. M. Oh. 2014. 'Assessment of APCC multimodel ensemble prediction in seasonal climate forecasting: Retrospective (1983–2003) and real-time forecasts (2008–2013)', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119: 12,132-112,150.
- Mori, N., and T. Takemi. 2016. 'Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean', *Weather and Climate Extremes*, 11: 53-69.
- Murakami, H., G. Villarini, G. A. Vecchi, W. Zhang, and R. Gudgel. 2016. 'Statistical-Dynamical Seasonal Forecast of North Atlantic and U.S. Landfalling Tropical Cyclones Using the High-Resolution GFDL FLOR Coupled Model', *Monthly Weather Review*, 144: 2101-23.
- Oh, S.-G., and M.-S. Suh. 2017. 'Comparison of projection skills of deterministic ensemble methods using pseudo-simulation data generated from multivariate Gaussian distribution', *THEORETICAL AND APPLIED CLIMATOLOGY*, 129: 243-262.
- Park, D.-S. R., C.-H. Ho, J.-H. Kim, and H.-S. Kim. 2011. 'Strong landfall typhoons in Korea and Japan in a recent decade', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116.
- Saunders, M. A., R. E. Chandler, C. J. Merchant, and F. P. Roberts. 2000. 'Atlantic hurricanes and NW Pacific typhoons: ENSO spatial impacts on occurrence and landfall', *Geophysical Research Letters*, 27: 1147-50.
- Seong, M.-G., M.-S. Suh, and C. Kim. 2017. 'Intercomparison of prediction skills of ensemble methods using monthly mean temperature simulated by CMIP5 models', *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 53: 339-351.

- Sun, J., and J.-B. Ahn. 2011. 'A GCM-based forecasting model for the landfall of tropical cyclones in China', *Advances in Atmospheric Sciences*, 28: 1049.
- , and ———. 2015. 'Dynamical seasonal predictability of the Arctic Oscillation using a CGCM', *International Journal of Climatology*, 35: 1342-53.
- Tu, J.-Y., C. Chou, and P.-S. Chu. 2009. 'The Abrupt Shift of Typhoon Activity in the Vicinity of Taiwan and Its Association with Western North Pacific–East Asian Climate Change', *Journal of Climate*, 22: 3617-28.
- Vecchi, G. A., M. Zhao, H. Wang, G. Villarini, A. Rosati, A. Kumar, I. M. Held, and R. Gudgel. 2011. 'Statistical–Dynamical Predictions of Seasonal North Atlantic Hurricane Activity', *Monthly Weather Review*, 139: 1070-82.
- , and G. Villarini. 2014. 'Next Season's Hurricanes', *Science*, 343: 618-19.
- Vitart, F., and T. N. Stockdale. 2001. 'Seasonal Forecasting of Tropical Storms Using Coupled GCM Integrations', *Monthly Weather Review*, 129: 2521-37.
- , D. Anderson, and T. Stockdale. 2003. 'Seasonal Forecasting of Tropical Cyclone Landfall over Mozambique', *Journal of Climate*, 16: 3932-45.
- . 2006. 'Seasonal forecasting of tropical storm frequency using a multi-model ensemble', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132: 647-66.
- Wang, B., and Z. Fan. 1999. 'Choice of South Asian summer monsoon indices', *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80: 629-38.
- , and J. C. L. Chan. 2002. 'How Strong ENSO Events Affect Tropical Storm Activity over the Western North Pacific', *Journal of Climate*, 15: 1643-58.
- , B. Xiang, and J.-Y. Lee. 2013. 'Subtropical High predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110: 2718-22.
- Wang, H., and K. Fan. 2007. 'Relationship between the Antarctic oscillation in the western North Pacific typhoon frequency', *Chinese Science Bulletin*, 52: 561-65.
- Weigel, A. P., M. A. Liniger, and C. Appenzeller. 2008. 'Can multi-model combination really enhance the prediction skill of probabilistic ensemble forecasts?', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134: 241-260.
- Williams, K. D., C. M. Harris, A. Bodas-Salcedo, J. Camp, R. E. Comer, D. Copsey, D. Fereday, T. Graham, R. Hill, T. Hinton, P. Hyder, S. Ineson, G. Masato, S. F. Milton, M. J. Roberts, D. P. Rowell, C. Sanchez, A. Shelly, B. Sinha, D. N. Walters, A. West, T. Woollings, and P. K. Xavier. 2015. 'The met office global coupled model 2.0 (GC2) configuration', *Geoscientific Model Development*, 8: 1509-1524.
- Xiang, B., S.-J. Lin, M. Zhao, S. Zhang, G. Vecchi, T. Li, X. Jiang, L. Harris, and J.-H. Chen. 2015. 'Beyond Weather Time-Scale Prediction for Hurricane Sandy and Super

- Typhoon Haiyan in a Global Climate Model', *Monthly Weather Review*, 143: 524-35.
- Zhan, R., and Y. Wang. 2016. 'CFSv2-Based Statistical Prediction for Seasonal Accumulated Cyclone Energy (ACE) over the Western North Pacific', *Journal of Climate*, 29: 525-41.
- Zhang, W., Y. Leung, and J. C. L. Chan. 2013. 'The Analysis of Tropical Cyclone Tracks in the Western North Pacific through Data Mining. Part I: Tropical Cyclone Recurvature', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52: 1394-416.
- , G. Villarini, G. A. Vecchi, H. Murakami, and R. Gudgel. 2016. 'Statistical-dynamical seasonal forecast of western North Pacific and East Asia landfalling tropical cyclones using the high-resolution GFDL FLOR coupled model', *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8: 538-65.
- , G. A. Vecchi, G. Villarini, M. Hiroyuki, R. Gudgel, and Y. Xiaosong. 2017. 'Statistical-Dynamical Seasonal Forecast of Western North Pacific and East Asia Landfalling Tropical Cyclones using the GFDL FLOR Coupled Climate Model', *Journal of Climate*, 30: 2209-32.
- Zhao, M., I. M. Held, and G. A. Vecchi. 2010. 'Retrospective Forecasts of the Hurricane Season Using a Global Atmospheric Model Assuming Persistence of SST Anomalies', *Monthly Weather Review*, 138: 3858-68.

Statistical-Dynamic seasonal Prediction for landfalling typhoons in East Asia

So-Hee Kim

Division of Earth Environmental System
Atmospheric Science Major, The Graduate School
Pusan National University

Abstract

A Statistical-Dynamic seasonal Typhoon Forecast Model (SDTFM) which utilizes the correlation between typhoons and atmospheric circulation predicted by Pusan National University coupled general circulation model (PNU CGCM) version 2.0 for seasonal prediction of typhoon has been developed and verified its predictability. A total of 40 ensemble members utilizing different ocean data assimilation and time-lag methods, enables the development of a new SDTFM that predicts typhoons by reducing the initial condition error and model uncertainty. According to the results of SDTFM, for entire East Asia (EEA) and the northern East Asia (NEA) including the Korea Peninsula and Japan, a significant predictability appears in the forecast integrated with the initial conditions of May. But for middle East Asia (MEA) including Taiwan, Fujian, Zhejiang, Jiangsu and Shanghai and southern East Asia (SEA) including South China, the Philippines, and Vietnam, forecast with February initial conditions are better. The annual variability of typhoons is significantly predicted at the 99% confidence level except SEA. The results are significant at 95% confidence level even after cross-validation. The reason for the relatively low predictability in SEA seems to be due to no outstanding steering flow in the region. Therefore, there is insignificant result from the SDTFM of SEA, but significant predictions for NEA, MEA and EEA will contribute to the development of East Asian landing typhoon prediction.

RESEARCH ARTICLE

Dynamical-statistical long-term prediction for tropical cyclone landfalls in East Asia

So-Hee Kim¹  | Joong-Bae Ahn²  | Jianqi Sun³ 

¹Department of Atmospheric Sciences, BK21 School of Earth and Environmental Systems, Pusan National University, Busan, South Korea

²Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, South Korea

³Nansen-Zhu International Research Centre (NZC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Correspondence

Joong-Bae Ahn, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, South Korea.
Email: jbahn@pusan.ac.kr

Funding information

Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development, Grant/Award Number: PJ01489102

Abstract

This study develops a statistical-dynamical seasonal typhoon forecast model (SDTFM) that utilizes the statistical correlation between East Asia (EA) tropical cyclone (TC) landfall and atmospheric circulation predicted by a coupled general circulation model for seasonal prediction and its predictability is verified. A total of 40 ensemble members produced through different data assimilation and time-lag methods introduced as a way to reduce the initial condition error and model uncertainty enabled the development of the new SDTFM. According to the results, the SDTFM developed in this study showed significant predictability in TC landfall prediction when using the month of May for the initial conditions for the entire East Asia (EEA) and its three sub-domains: Northern East Asia (NEA), Middle East Asia (MEA), and Southern East Asia (SEA). The predicted TC season is July–September (JAS), and only for SEA, including South China, the Philippines, and Vietnam, it is July–November (JASON) considering the relatively long landfall period. The models developed for each domain significantly predict the interannual variability of TC landfall at the 99% confidence level. The cross-validated results are still significant at the 99% confidence level in NEA and SEA and the 95% confidence level in MEA and EEA.

KEYWORDS

CGCM, seasonal prediction, statistical-dynamical model, tropical cyclones (TCs), typhoons landfall

1 | INTRODUCTION

Tropical cyclone (TC) is a rapidly rotating storm system that develops by obtaining energy from warm tropical ocean. It is called typhoons (in the Western North Pacific), hurricanes (in the Atlantic and Eastern North Pacific) or cyclones (in the South Pacific and Indian Ocean) according to the area of occurrence, and are accompanied by hazardous weather, including strong

winds and heavy rains. In recent years, strong TCs are frequently occurring, such as Haiyan in 2013 and Meranti in 2016, which have caused serious damage in East Asia (Mori and Takemi, 2016). In particular, Haiyan that made landfall in the Philippines is one of the strongest TCs ever recorded in the region, classified as a Category 5 storm on the Saffir-Simpson hurricane wind scale. East Asia resides more than 20% of the world's population, making it more vulnerable to extreme weather such as

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© 2021 The Authors. *International Journal of Climatology* published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of Royal Meteorological Society.

TCs. Moreover, climate change could make the damage caused by TC more severe. Tu *et al.* (2009) showed that TC activity near Taiwan increased from 3.3 per year before 2000 to 5.7 per year after 2000 during the period from 1970 to 2006. Park *et al.* (2011) showed that the number of EA TCs that make landfall will increase as the TC season lengthens, and the precipitation and the Power Dissipation Index (PDI), defined as the sum of the maximum one-minute sustained wind speed cubed when the cyclone is at least of tropical storm strength, will increase significantly in the future. In addition, rising sea levels due to climate change is particularly adding to the damage caused by TCs that make landfall (IPCC, 2014, 2019). Therefore, reliable seasonal predictions of East Asia (EA) TCs that make landfall will help prevent and minimize various types of damage by preparing for them in advance.

Despite the importance of seasonal predictions about TCs, due to the complex and chaotic nature of a TC's occurrence and development, it is difficult to predict its generation, size, intensity, and track, even just a few days ahead. The first type of attempt at seasonal predictions of EA TCs that will make landfall is a statistical method that uses atmospheric and ocean initial conditions as predictors before the onset of the TC season (Chan *et al.*, 1998; Chan *et al.*, 2001; Fan and Wang, 2009). However, this method is vulnerable to climate variations, such as inter-annual and decadal variations, because it is based on the assumption that statistical relationships will be valid for the next season and beyond (Vitart and Stockdale, 2001). Since the 2000s, with the development of the Coupled General Circulation Model (CGCM), it has been possible to use dynamic methods to predict TC frequency and movement. However, despite the continuous development and improvement of the model, our poor understanding of the physical processes associated with TCs, and the sparse spatial resolution of the dynamic models, make TC-related predictions difficult (Zhang *et al.*, 2017). Moreover, as the lead time increases, the prediction ability of the dynamic models becomes lower because the influence of the initial conditions decreases as well.

However, the dynamic models generally have a meaningful ability to predict large-scale environmental variables, such as vertical shear and the low-level vorticity closely related to TCs. Therefore, many researchers have paid attention to the relationship between large-scale environmental variables produced by a dynamic model and observed predictands (e.g., the frequency of, or landfalls made by, TCs) using statistical methods such as linear regression and Poisson regression, and have attempted to predict TCs by utilizing the relationship. Such hybrid models called a statistical-dynamical

seasonal typhoon forecast model (SDTFM) are often used for seasonal prediction of the track (Liu and Chan, 2003; Sun and Ahn, 2011; Wang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013, 2016, 2017) and the frequency (Chan *et al.*, 1998; Fan, 2007, 2010; Fan and Wang, 2009; Wang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013, 2016; Kim *et al.*, 2017) of EA TCs that make landfall, as well as Atlantic TCs that make landfall (Vitart and Stockdale, 2001; Zhao *et al.*, 2010; Vecchi *et al.*, 2011; Vecchi and Villarini, 2014; Camp *et al.*, 2015; Xiang *et al.*, 2015).

The predictability of an SDTFM generally depends on how well the used dynamic model predicts the predictors (Vecchi *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2015; Murakami *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017). However, it is also important to select appropriate predictors to develop an effective SDTFM, because a prediction based on the physical correlation between predictand and predictor is relatively stable (Zhang *et al.*, 2017). Therefore, it is necessary to analyse the correlation between landfalling TCs (LTC) and large-scale atmospheric variables. The damage caused by TCs is more related to their storm tracks than to where and how often they occur, so this study focuses on predicting TC tracks. In this regard, several previous studies have shown that the flow in the lower and middle troposphere (700 hPa and 500 hPa) significantly affects the movement of EA TCs (Chan and Gray, 1982; Harr and Elsberry, 1991, 1995). Based on those, this study intends to use the atmospheric circulation predicted by the CGCM for the prediction of TC landfalls in each domain.

Sun and Ahn (2011) previously developed an SDTFM for the period 1979–2009 using v1.0 of the Pusan National University (PNU) CGCM, which is a participation model of the Asia Pacific Economic Cooperation (APEC) Climate Center multi-model ensemble (APCC MME) prediction system. However, the SDTFM developed by them only predicts LTCs in South China. This study develops a new SDTFM for LTCs that influence all East Asian countries by using PNU CGCM v2.0. Unlike v1.0, PNU CGCM v2.0 utilizes ocean data assimilation and produces a total of 40 ensemble members for each month by using time-lag methods. Extended ensemble members reduce the error in initial conditions as well as in the model uncertainty (Weigel *et al.*, 2008), enabling the development of a new SDTFM for EA TC landfalls.

Section 2 describes the CGCM, the data, and the predicted domains and TC season used in this study, and Section 3 analyses the relationship between atmospheric circulation and TC landfall for each domain. Section 4 examines the possibility that the PNU CGCM can be developed as an SDTFM based on the relationships discussed in Section 3. In Section 5, the SDTFM is developed using PNU CGCM v2.0 and linear regression, and the

predicted results are verified. Section 6 compares the model developed in this study with other models, and Section 7 presents a summary and a conclusion to the study.

2 | MODEL AND DATA

2.1 | The coupled general circulation model

The CGCM utilized in this study (PNU CGCM v2.0) is one of the participating models of the Long-range Multi-model Ensemble (LR-MME) prediction system of the APCC (Jeong *et al.*, 2008; Ahn *et al.*, 2012). The PNU CGCM forecast data of eight-month leads with 40 ensemble members are provided to the APCC each and every month. The ocean data assimilation (ODA) is used when initial conditions of each ensemble member are produced. A total of 40 ensemble members is large enough to minimize the initial conditions error and model uncertainty, considering the number of ensemble members produced by global institutes producing long-term predictions using state-of-the-art CGCMs. The details and performance of the model were introduced and studied by several authors (Ahn and Kim, 2014; Jo and Ahn, 2015; Bayasgalan and Ahn, 2018).

The ensemble prediction ability of the model depends on the ensemble method used, as well as the number and features of the ensemble members (Oh and Suh, 2017; Seong *et al.*, 2017). The method used in this study is a simple composite method (SCM) that arithmetically averages each ensemble member. The method is widely used because it is simple and has relatively better predictability compared to other sophisticated methods (Min *et al.*, 2014; Ahn and Lee, 2016; Kim *et al.*, 2021).

2.2 | The data

Observed TC data used in this study are the best track data from the Regional Specialized Meteorological Center (RSMC) Tokyo, which are widely used in TC research in Asia (Sun and Ahn, 2011; Choi *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2017). TCs in Western North Pacific are classified into tropical depression (~33kt), tropical storm (~47kt), severe tropical storm (~64kt), and typhoon (64kt~) according to the maximum wind speed averaged over 10 min. In this study, EA LTCs included tropical storms, severe tropical storms, and typhoons that affected the domain. It is because, although a tropical storm is not generally stronger than a typhoon, it still causes great damage. The monthly average atmospheric variables, such as horizontal wind and relative vorticity, from the

National Centers for Environmental Prediction of the Department of Energy (NCEP-DOE) Re-analysis 2 (R-2) are used to analyse the atmospheric circulation related to EA TC landfalls (Kanamitsu *et al.*, 2002). The horizontal resolution of the re-analysis data is $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ with 17 vertical levels spanning January 1979 to the present.

2.3 | Forecast region and period

The research domain covers the whole of EA because LTCs cause damage across all regions of EA. The TC tracks that determine the landing area in EA are all different for each TC and can be divided into three types (Figure S1). This means that regional prediction of TC landfall is possible through atmospheric circulation affecting each type of TC track. Therefore, the forecast region was subdivided into three climatically similar regions (Chan and Xu, 2009; Huang and Chan, 2014; Zhang *et al.*, 2017). The domains located 30°N to 40°N and 124°E to 143°E includes the Korean Peninsula and Japan, 22°N to 40°N and 117°E to 124°E includes Taiwan, Fujian, Zhejiang, Jiangsu, and Shanghai, and 5.7°N to 23.5°N and 117°E to 127°E includes South China, Vietnam, and the Philippines. The entire East Asia (EEA) comprises Northern East Asia (NEA), Middle East Asia (MEA), and Southern East Asia (SEA), as marked in Figure 1. In this study, if a TC passes through one domain, it is regarded as a TC making landfall in the domain. If a TC passes through more than one domain, it is assumed that all those domains are affected by the

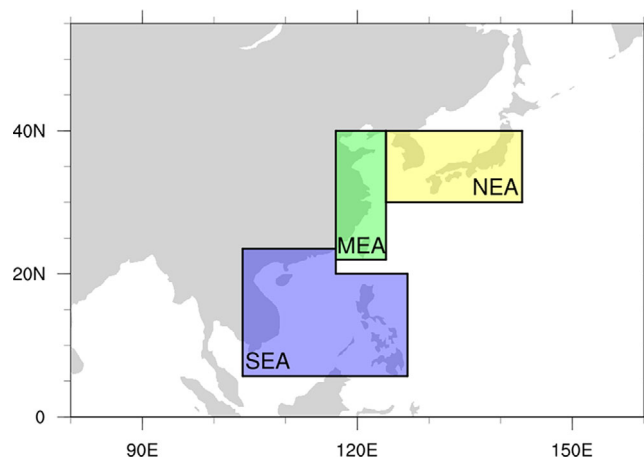


FIGURE 1 Sub-domains used to define tropical cyclones (TCs) making landfall in East Asia. The domains located 30°N to 40°N and 124°E to 143°E , 22°N to 40°N and 117°E to 124°E , and 5.7°N to 23.5°N and 117°E to 127°E are northern East Asia (NEA), Middle East Asia (MEA), and southern East Asia (SEA), respectively. Entire East Asia (EEA) contains all three sub-domains [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

TC. Moreover, the subdivision of the forecast region is appropriate to simulate different regional trends in EA TC activity (Lee *et al.*, 2012).

The research period for this study is from 1980 to 2018. Figure 2 shows the average monthly landfall frequency of EA TCs and typhoons for each domain. For NEA, MEA, and EEA, 73% (81%), 76% (79%), and 59% (63%) of the total annual TCs (typhoons) land from July–August–September (JAS), respectively. This period during which most of the total annual landfalls occur is defined as the predicted TC season for these domains. For SEA, a TC lands at least once a month from May to November, which is longer than the other domains. In particular, in July–August–September–October–November (JASON), typhoons land relatively frequently, so it is defined as SEA TC season. During this period, 72% (78%) of the total annual TCs (typhoons) land on SEA. In addition, atmospheric circulation used in this study is averaged during each TC season for each domain.

3 | RELATIONSHIP BETWEEN EA TC LANDFALLS AND ATMOSPHERIC CIRCULATION

In order to use mid- and low-level atmospheric circulation as a predictor, the relationship with TC landfalls for

each domain is examined using the relative vorticity and horizontal wind at 700 hPa and 500 hPa. Figure 3 presents a regression of the relative vorticity and horizontal wind in the re-analysis data for NEA LTCs, which show favourable atmospheric circulation for TC to land in NEA. Figure 3a,c shows the NEA vorticity pattern at 500 hPa (700 hPa), and Figure 3b,d shows the NEA wind pattern at 500 hPa (700 hPa). P (N) in the NEA vorticity patterns indicate the centre of positive (negative) vorticity, and the solid (dashed) lines indicate the positively (negatively) significant areas at 95%, 98%, and 99% confidence levels. Shading in the NEA wind patterns also indicates an area at the 95% confidence level. The NEA vorticity patterns consist of a negative vorticity over the Korean Peninsula, and positive vorticities over east China and the tropical Pacific (see Figure 3a,c). The negative vorticity over the Korean Peninsula and the positive vorticity over the tropical Pacific are more evident and significant at 700 hPa (Figure 3c) than at 500 hPa (Figure 3a), but the overall patterns in both layers are similar. The regression patterns indicate atmospheric circulation in support of TC landfalls, and previous studies allow understanding of the patterns.

On both the interannual and interdecadal timescale, the western North Pacific subtropical High (WNPSH) can have a significant impact on the EA TC activities (Choi and Moon, 2012; Wang *et al.*, 2013). Therefore, composite

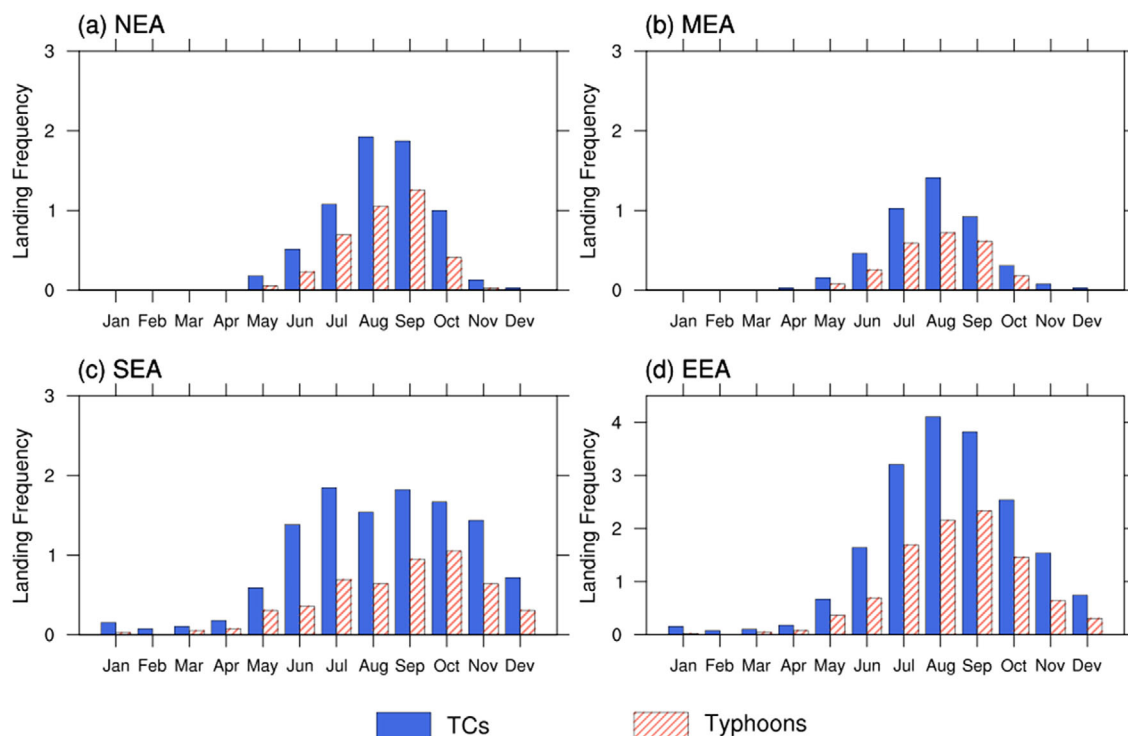


FIGURE 2 Average monthly landfall frequency of TCs and typhoons from 1980 to 2018 in (a) NEA, (b) MEA, (c) SEA, and (d) EEA. The TCs include tropical storms, severe tropical storms, and typhoons [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

FIGURE 3 Regression of (a) relative vorticity and (b) horizontal winds at 500 hPa from re-analysis 2 (R-2) against the observed TC landfalls over NEA for 1980–2018; (c) and (d) are the same as (a) and (b), but at 700 hPa. P (N) in (a) and (c) indicate the positive (negative) vorticity centre, and the solid (dashed) lines indicate positively (negatively) significant areas at the 95%, 98% and 99% confidence levels. Shading in (b) and (d) indicates the areas at the 95% confidence level [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

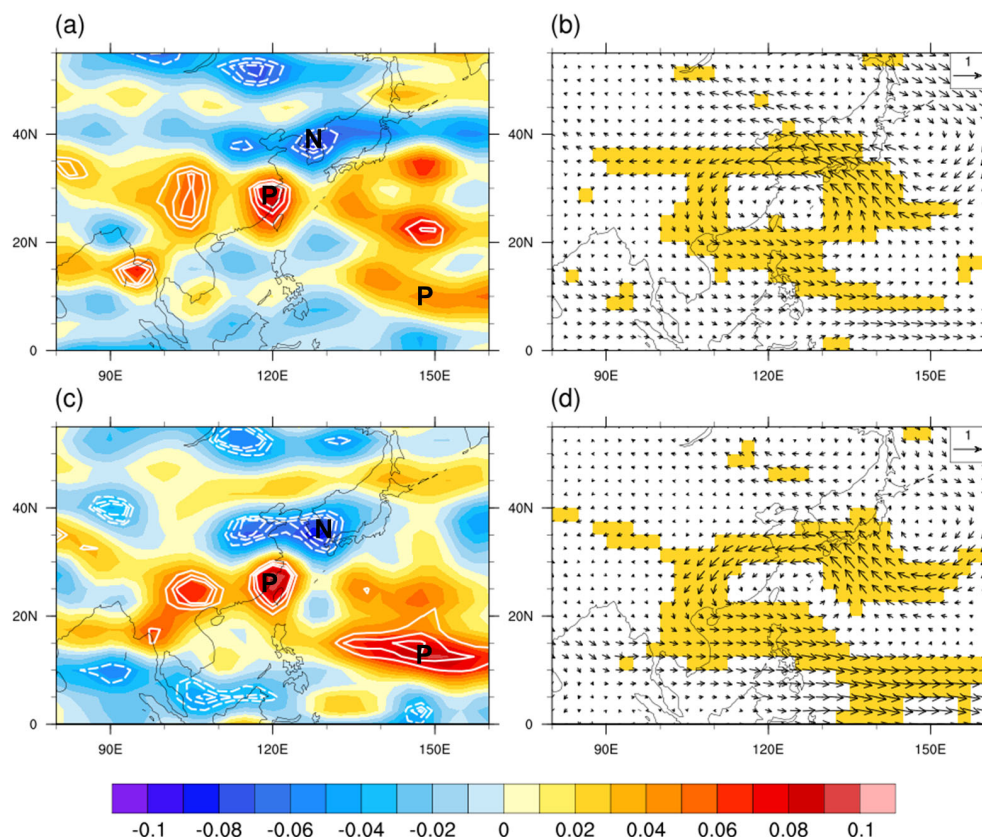


TABLE 1 The years in which TCs made landfall at above- and below-normal levels over NEA, MEA, SEA and EEA

Domain	Above-normal years (AN_Years)	Below-normal years (BN_Years)
NEA	1991, 1993, 2000, 2002, 2012, 2018	1980, 1981, 1983, 1984, 1995, 2003, 2008, 2009, 2013, 2017
MEA	1994, 2000, 2005, 2006, 2012, 2015, 2018	1983, 1986, 1988, 1993, 1995, 1999, 2009, 2011, 2014, 2017
SEA	1983, 1994, 1995, 2013, 2017	1982, 1999, 2002, 2004, 2010, 2011, 2014, 2015
EEA	1991, 1994, 2000, 2002, 2018	1980, 1981, 1983, 1984, 1986, 1998, 2003, 2008, 2014

analysis was conducted to examine the effects of WNPSH on TC landfalls for each domain. The years in which the landfall frequency deviates from the normal range ($-1\sigma \sim +1\sigma$) are defined as above-normal years (AN_Years) or below-normal years (BN_Years) and are summarized in Table 1. Figure 4 shows 5,880 gpm lines at 500 hPa during the AN_Years (solid) and BN_Years (dashed), which empirically represent the boundary of the summer WNPSH. In the NEA BN_Years, the WNPSH

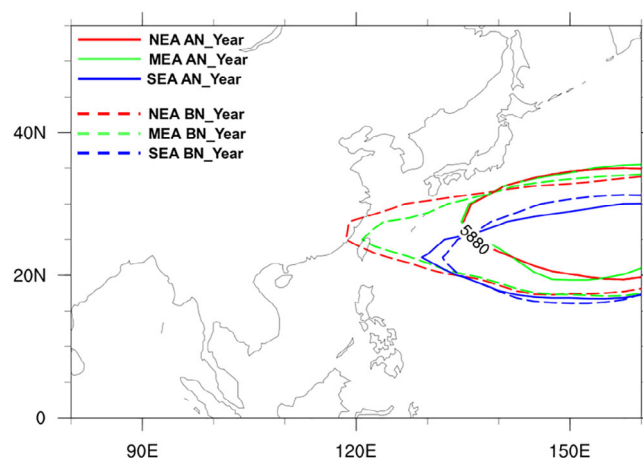


FIGURE 4 Composite of 5,880 gpm lines empirically representing the summer Western North Pacific high at 500 hPa in the above-normal years (AN_years) (solid line) and the below-normal years (BN_Years) (dashed line) over NEA, MEA and SEA [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

expanded in the zonal direction, while it contracted in the NEA AN_Years. This means that the contraction of WNPSH could be related to the positive vorticity over east China shown in the NEA vorticity patterns (Figure 3a,c). The positive vorticity together with the negative vorticity over the Korean Peninsula constitutes a

dipole pattern, which is analogous to the positive Pacific-Japan (PJ) teleconnection pattern. In this regard, previous studies showed that TCs land more frequently on NEA when the PJ pattern is positive than negative (Choi *et al.*, 2010a; Kim *et al.*, 2012). Kim *et al.* (2012) also reported that during the negative PJ pattern, the WNP SH expands in the zonal direction (like NEA BN_Years in Figure 4), which prevents TCs from taking a northeastward track.

The significant positive vorticity over east China produces an anomalous cyclonic flow (Figure 3b,d). In particular, the negative vorticity over the Korean Peninsula contributes to the TC landfall into NEA by strengthening anomalous southeasterlies over the Korean Peninsula and the south of Japan. In addition, the contradicting flows between the subtropics and tropics can generate cyclonic wind shears and positive vorticity in the lower troposphere (Harr and Elsberry, 1995; Chu *et al.*, 2007). This atmospheric circulation favours TC generation and prevents TCs from entering SEA by affecting the low-level vorticity and vertical wind shear, allowing more TCs into NEA (Choi *et al.*, 2010b). Meanwhile, the NEA wind pattern is associated with the strong Western North Pacific (WNP) monsoon. Wang and Fan (1999) found that strong convection of the WNP monsoon induces anomalous cyclonic flow, which is a circulation condition favourable for TC generation. Wang and Chan (2002) and Choi *et al.* (2015) showed that when the WNP

monsoon is strong, TCs generated in the eastern part of the WNP frequently move towards NEA. Choi *et al.* (2015) also showed a positive correlation between the WNP monsoon index defined by Wang and Fan (1999) and LTCs in Korea.

The positive vorticity in the tropical Pacific, the other major component of the NEA vorticity pattern, could be associated with Madden-Julian oscillation (MJO). Kim *et al.* (2008) examined the variability of TC activities according to the MJO category and found that the MJO-related convection centre is strongly related to NEA LTCs. They showed that when the convection occurs in the tropical Pacific, TCs occur more and have northward tracks because of the influence of the monsoon trough enhanced by the anomalous westerlies. Thus, the regressed circulation shown in Figure 3 can be regarded as the characteristic pattern at the middle and lower levels associated with TCs making landfall in NEA.

Figure 5 shows the relative vorticity and the horizontal wind from the re-analysis data regressed onto TC landfalls in MEA. The regressed vorticities are similar regardless of the level, which show that MEA LTCs strongly correlate with mid- and low-level atmospheric circulation. The MEA vorticity patterns consist of negative vorticities from east China to the east of Japan and positive vorticities from the Indochina Peninsula to the North Pacific (Figure 5a,c). This dipole pattern causes distinctly contradicting wind anomalies in subtropics and

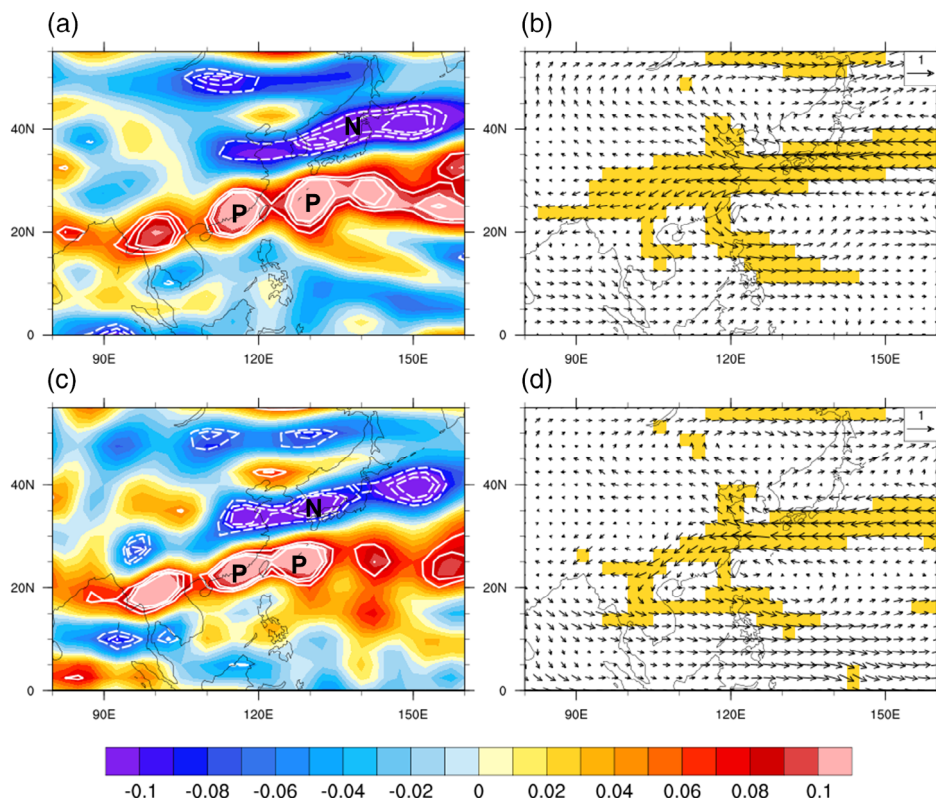


FIGURE 5 As in Figure 3, but for TC landfalls over MEA [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

tropics, aiding landfalls into the MEA (Sparks and Toumi, 2021). In Figure 4, the contracted WNPSH enables frequent landfall on MEA. These characteristics are similar to those shown in the NEA pattern, but there are important (albeit small) differences that determine the landing area. The latitude at which the anomalous easterlies shown in the NEA wind pattern is 30°N to 40°N , while it is 25°N to 35°N in the MEA wind pattern. Before landing on NEA, the strong anomalous easterlies at 25°N to 35°N make TCs land on MEA, and the weakened TCs are mostly extinct without propagating to NEA. In contrast, the anomalous easterlies at 30°N to 40°N allow TCs to land in NEA without dissipation. Owing to this difference, only 14 TCs have passed both sub-domains in 39 years, which is extremely low compared to 153 NEA LTCs and 101 MEA LTCs. In addition, the MEA vorticity patterns do not show the positive vorticity associated with MJO in the tropical Pacific. Therefore, the NEA and MEA patterns are clearly different, and the circulation pattern shown in Figure 5 represents the atmospheric circulation associated with MEA landfalls (especially the steering flow).

Figure 6 shows the regression of the relative vorticity and the horizontal winds of the re-analysed data onto TC landfalls in SEA. The main features of the SEA vorticity pattern at both levels are similar and are relatively more significant at 700 hPa. The patterns consist of positive vorticity over the sea near the Korean Peninsula, negative

vorticities near 25°N , and positive vorticities near 15°N (Figure 6a,c). The significant anomalous northwesterlies over Japan shown in the SEA wind patterns are related to the positive vorticity over the sea near the Korean Peninsula, which means a lack of flow to help a TC propagate to the mid-latitudes (Figure 6b,d). The vorticity pattern in the mid-latitudes is relatively insignificant compared to other sub-domains (Compared with Figures 3 and 5), which could result from the weak relationship between SEA LTCs and WNPSH. In this regard, Figure 4 shows that for SEA, the difference in the development of WNPSH during the AN_Years and BN_Years is negligible. On the other hand, the positive vorticities near 15°N are favourable for the generation of TCs, increasing the likelihood of landfall in SEA. The positive vorticities with negative vorticities near 25°N induce anomalous easterlies near 20°N , which is the steering flow that lands TCs into SEA. Meanwhile, this wind pattern is associated with a weak summer monsoon trough. Wang and Chan (2002) and Choi *et al.* (2015) showed that when the WNP monsoon is weak, TCs in the western part of the WNP frequently made landfall in SEA. Thus, the patterns shown in Figure 6 contain atmospheric circulations specific to frequent SEA TC landfalls.

Figure 7 shows the regression between relative vorticity and horizontal winds with TC landfalls in EEA. The EEA vorticity patterns (Figure 7a,c) are composed of negative vorticities around 40°N , positive vorticities around

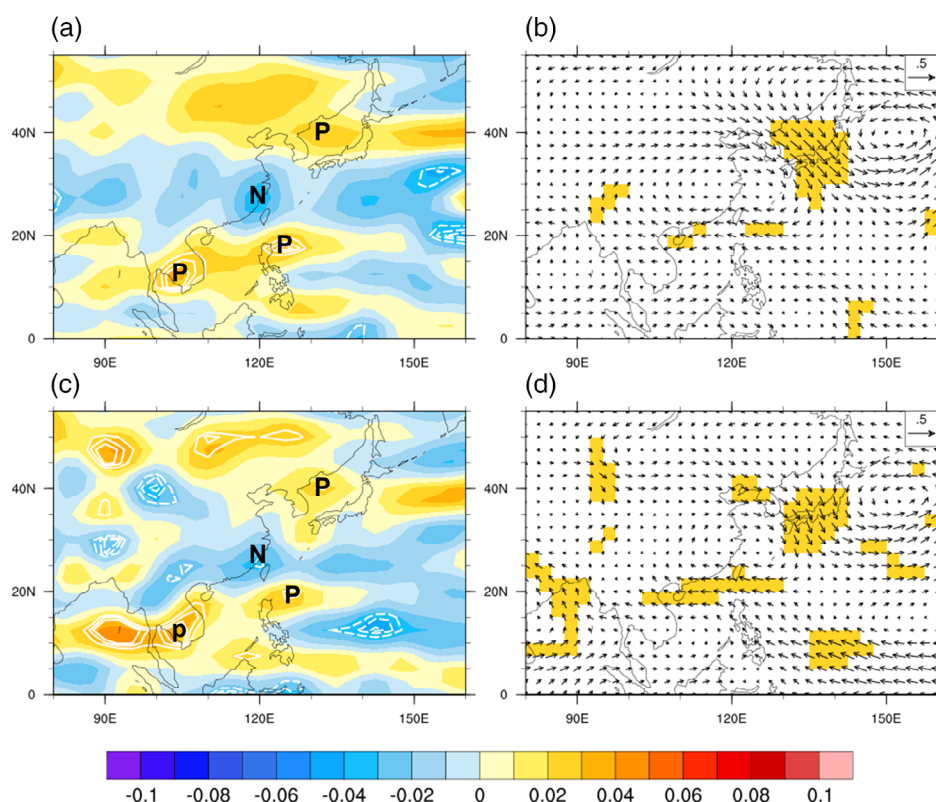


FIGURE 6 As in Figure 3, but for TC landfalls over SEA [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

20°N, and negative vorticity near the equator. The negative vorticities around 40°N expand further zonally at 500 hPa and the negative vorticity near the equator is more significant at 700 hPa, but the overall phases of the pattern in both layers are similar. The EEA vorticity patterns induce the EEA wind patterns, including the strong anomalous westerlies in the tropics, and the anomalous easterlies in the subtropics. In these patterns, the main features of the NEA and MEA patterns are captured together. Although SEA landfalls occur most frequently compared to landfalls in other regions, the weak wind pattern of SEA is masked by the strong wind patterns of NEA and MEA. This suggests that one forecast region covering all of EA smooths out the unique circulation characteristics associated with TC landfalls on each sub-domain. This could result in erroneous predictions, so the subdivision of the forecast region in this study is reasonable.

4 | POSSIBILITY OF PREDICTING TC LANDFALLS USING PNU CGCM V2.0

The prediction ability of the dynamic model is crucial to determining successful SDTFM development (Vitart and Stockdale, 2001). From that perspective, the predictability of PNU CGCM v2.0 for the atmospheric circulation

discussed in Section 3 is evaluated. However, it is relatively difficult to predict the atmospheric circulation at the mid and low levels used as predictors, compared to other meteorological elements. That is because low-level wind is strongly influenced by surface processes, which are extremely complex and difficult to understand due to the inhomogeneous and turbulent nature of the surface boundary flows. Such conditions make it difficult to parameterize these processes, resulting in great error in wind simulated according to local influences. The turbulent variations of the wind are eliminated in this study by using monthly averaged data. Evaluating the similarity of temporal variations at each grid point is a general method of predictability evaluation, but it is not appropriate in this study related to large-scale circulation (Lee *et al.*, 2016). Thus, we focused on whether the CGCM similarly predicts relative vorticity and horizontal wind related to the TC landfalls. This study evaluates predictability based on atmospheric circulation discussed in Section 3, and then develops the SDTFM.

The hindcast data needed for regression between predicted relative vorticity and observed TC landfalls are the output from model integration with the January (six-month to eight-month) to June (one-month to three-month) initial conditions. Of the seven-month initial conditions, the May initial conditions (two-month to six-month) were used because its regression results were stable for all domains. Since the regression of predicted

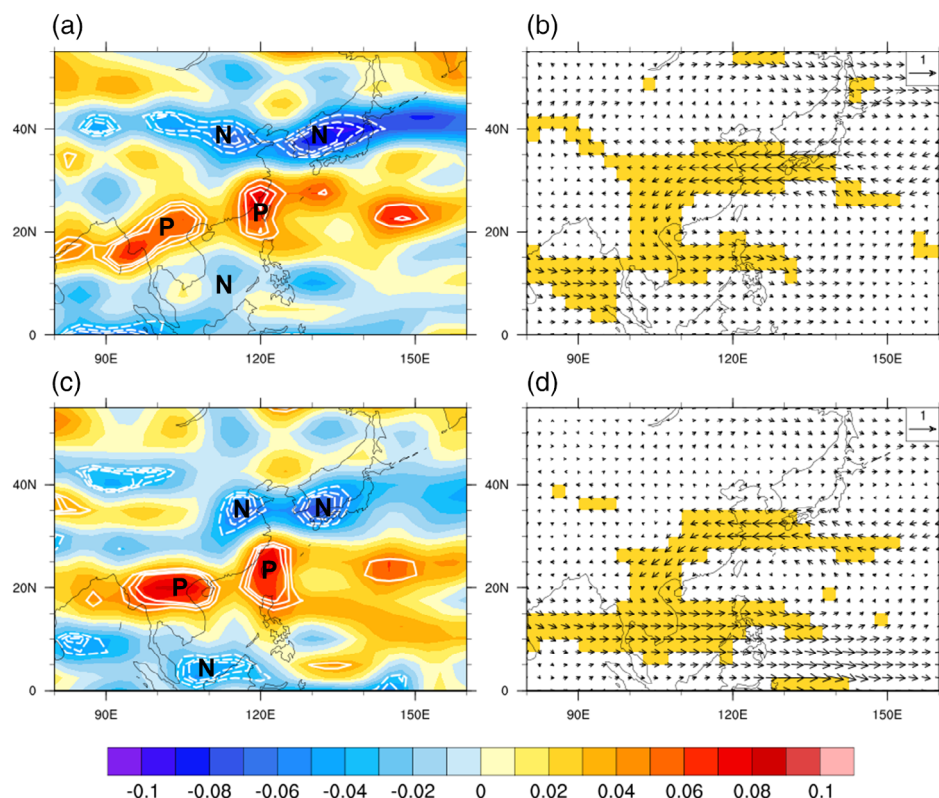


FIGURE 7 As in Figure 3, but for TC landfalls over EEA [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

atmospheric circulation for observed TC landfalls is more significant at 700 hPa only in MEA (not shown), atmospheric circulation at 700 hPa is used as a predictor only in MEA. In this regard, we have already seen in Section 3 that the patterns associated with TC landfalls at 500 hPa and 700 hPa are similar for each domain. Therefore, we select the layer that PNU CGCM predicts more significantly and compare it with the regression pattern using re-analysis data at the same layer.

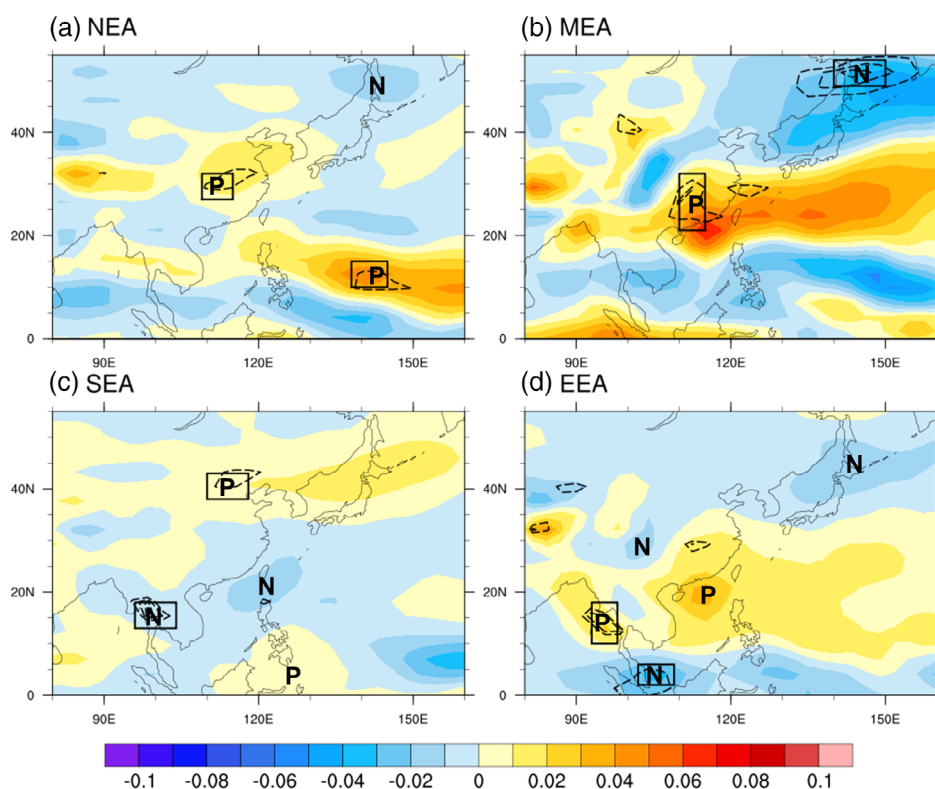
Figure 8 shows the regression between the relative vorticity predicted by PNU CGCM v2.0 and the observed TC landfalls for each domain. P (N) indicate the centre of positive (negative) vorticity, and the dashed lines indicate the significant areas at the 95%, 98%, and 99% confidence levels. In Figure 8a, the positive vorticities over east China and the tropical Pacific shown in the NEA vorticity pattern appear similar, but the negative vorticity shifts to the north of Japan. Figure 8b shows that the positive vorticity centre shown in the MEA vorticity pattern appears similar, but the negative vorticity shifts to the north of Japan. In Figure 8c, the positive vorticity over the Korean Peninsula and Japan shown in the SEA vorticity pattern appears similar, but the other vorticities are shifted relatively south. The negative vorticities near 25°N shift to 15°N and the positive vorticity near 15°N shifts to 5°N. Figure 8d for EEA shows that the two negative vorticities around 40°N, shown in the EEA vorticity

pattern, shift to central China and Japan, respectively. However, the positive vorticities around 20°N and the negative vorticity near the equator maintain similar positions. Considering these results, PNU CGCM v2.0 is sufficiently developable as SDTFM because it can significantly predict the unique characteristics of the circulation discussed in Section 3.

5 | THE STATISTICAL-DYNAMICAL SEASONAL TYPHOON FORECAST MODEL

Regarding predictors for SDTFM development, Wilks (2006) reported that many predictors in multivariate regression do not necessarily give better predictability because of overfitting problems. In particular, the model in this study is based on simultaneous relationships and therefore does not require as many predictors as those based on lagged relationships (Wang *et al.*, 2009). Sections 3 and 4 suggest that the vorticities in the boxed regions in Figure 8 have a significant impact on the TC landfalls for each domain. Thus, they are defined as potential predictors for each domain and are summarized in Table 2. x_1 and x_2 for NEA are associated with steering flow and MJO, respectively, and those for MEA only relate to steering flow. In this regard, Sparks and

FIGURE 8 Regression of relative vorticity at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 500 hPa, and (d) 500 hPa from the PNU coupled general circulation model (PNU-CGCM) onto the observed TCs over (a) NEA, (b) MEA, (c) SEA, and (d) EEA for 1980–2018. The dashed lines indicate significant areas at the 95%, 98%, and 99% confidence levels. P (N) indicates the centres of positive (negative) vorticity, and boxes are the areas selected as potential predictors [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]



Toumi (2021) showed a negligible correlation between the MEA landfall frequency and large environmental climate indices (PMM, El-Nino, and PDO, etc.). They emphasized the importance of steering flow in landfall prediction for MEA. x_1 for SEA makes it difficult for a TC to enter the mid-latitudes, and x_2 helps a TC enter SEA with frequent TC generation and distinct steering flow (albeit weak). The potential predictors of EEA are also associated with frequent TC landfalls in terms of their occurrence and steering flow.

For each domain, the regression was repeated for three cases of predictors, and the best-case was determined by comparing the results. Of the three cases, the first uses only x_1 as predictor, the second uses only x_2 , and the third uses x_1 and x_2 together. The method used was the same as Kim *et al.* (2017), which selected one or two predictors from the potential predictors depending on the initial conditions. The goodness-of-fit measures were used to minimize the root mean squared errors (RMSE), and maximize the coefficient of determination (R^2) and the F -ratio (Wilks, 2006). Table 3 summarizes the results for each case of predictors, where the best-case is the third case (x_1 and x_2) for NEA and SEA, the second case (x_2) for MEA, and the first case (x_1) for EEA, respectively. Finally, Table 4 lists the SDTFMs developed with the best-case of predictors. All regression equations are significant with p -values up to 0.006 in the F -test. Each regression coefficient is significant at the 99.9% confidence level using the student's t -statistic.

Figure 9 shows the time series of observed TC landfalls, TC landfalls predicted with the SDTFM, and cross-validated TC landfalls for the 39 years from 1980 to 2018. Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) was applied to verify the SDTFM (Sun and Ahn, 2011). SCOR and FCOR are the correlation coefficients of the observed TC landfalls with the predicted and cross-validated TC landfall, respectively. The SCOR for NEA, MEA, SEA, and EEA were 0.583, 0.427, 0.570, and 0.449, respectively, which were significant at the 99% confidence level. The FCOR for NEA, MEA, SEA, and EEA were 0.445, 0.343, 0.463, and 0.339, respectively. They are significant at the 99% confidence level for NEA and SEA and 95% confidence level for MEA and EEA. These results mean that the developed SDTFM can be used effectively to predict TC landfalls.

Domain	Atmospheric variable	x_1	x_2
NEA	500 hPa vorticity	27–32°N 109–115°E	10–15°N 138–145°E
MEA	700 hPa vorticity	21–32°N 110–115°E	49–54°N 140–150°E
SEA	500 hPa vorticity	38–43°N 110–118°E	13–18°N 96–104°E
EEA	500 hPa vorticity	10–18°N 93–98°E	2–6°N 102–109°E

To further evaluate the SDTFM, the relative vorticity and horizontal wind in the re-analysis data regress onto predicted TC landfalls (Figure 10). The solid (dashed) lines in the left column indicate the positively (negatively) significant areas at the 95%, 98%, and 99% confidence levels, and shading in the right column is significant for the 95% confidence level. Figure 10a shows the main characteristics of the NEA vorticity pattern (Figure 3a) (e.g., negative vorticity over the Korean Peninsula and positive vorticities over east China and tropical Pacific), and their pattern correlation coefficient is 0.625. Figure 10b shows the anomalous southeasterlies over Japan and the westerlies in the tropics shown in the NEA wind pattern. Figure 10c is also similar to the MEA vorticity pattern (Figure 5c), with a pattern correlation coefficient of 0.764. In addition, the significant wind anomalies associated with MEA LTCs shown in the MEA wind pattern are evident and statistically significant in Figure 10d. The pattern correlation coefficient between Figure 10e and the SEA vorticity pattern (Figure 6a) is 0.761, indicating that the relationship between circulation and SEA TC landfalls was reflected well by the SDTFM. Although not statistically significant, Figure 10f shows the wind features related to SEA

TABLE 3 Results of goodness-of-fit measures of the potential predictors for each domain

Domain	Predictors	RMSE	R^2	F_{ratio}
NEA	x_1	1.67	0.14	6.00
	x_2	1.70	0.11	4.63
	x_1, x_2	1.49	0.34	9.28
MEA	x_1	1.18	0.13	5.59
	x_2	1.14	0.18	8.27
	x_1, x_2	1.14	0.20	4.60
SEA	x_1	2.23	0.11	4.53
	x_2	2.15	0.17	7.79
	x_1, x_2	1.97	0.32	8.64
EEA	x_1	1.84	0.20	9.36
	x_2	1.92	0.13	5.42
	x_1, x_2	1.82	0.24	5.65

Note: Bold means that it is selected as the final predictor.

TABLE 2 Potential predictors that could be used in the statistical-dynamical seasonal typhoon forecast model (SDTFM) for each domain

LTCs, such as the anomalous northwesterlies over Japan and the anomalous easterlies near 20°N. Figure 10g is also similar to the EEA vorticity pattern (Figure 7a) (e.g., negative vorticity around 40°N, and positive vorticities around 20°N), with a pattern correlation coefficient at 0.737. Figure 10h shows the anomalous subtropical easterlies and the anomalous tropical westerlies, which are similar to the EEA wind pattern (Figure 7c) and are statistically significant. These results indicate that the PNU CGCM performs well in predicting the observed spatial-temporal relationship of TC landfalls with atmospheric circulation, despite the spatial shift in the position of the major vortices shown in Figure 8 (Sun and Ahn, 2011).

TABLE 4 SDTFM for each domain

Domain	SDTFM
NEA	$y = 4.872 + 0.872x_1 + 0.816x_2$
MEA	$y = 3.359 - 0.526x_2$
SEA	$y = 8.308 + 0.900x_1 - 1.076x_2$
EEA	$y = 11.128 - 0.900x_1$

6 | COMPARING WITH OTHER FORECASTS

This study produces improved the prediction results compared to existing studies. As mentioned in Section 1, Sun and Ahn (2011) predicted the TC landfalls in south China from 1979 to 2009, with the same CGCM with lower versions. The period of our study was 1980–2018, and the predicted region covered the whole of EA, so the spatial-temporal range was wider than Sun and Ahn (2011). In addition, they used the initial conditions of July, but the current models predicted LTCs earlier than theirs using the initial conditions of May. Zhang *et al.* (2017) predicted the LTCs for NEA, MEA, SEA, and EEA using the initial conditions from January to June. The hybrid model developed by them used 4–5 predictors for each domain, with different initial conditions for each predictor. In comparison, our model was simple because only one initial condition was used to compute the predictors. Tian and Fan (2019) predicted the TC landfalls in China during June–July–August using relative vorticity as a predictor. In China, typhoons land more frequently in September than in June (Figure 2b,c), but September was excluded from their forecast season. The season in

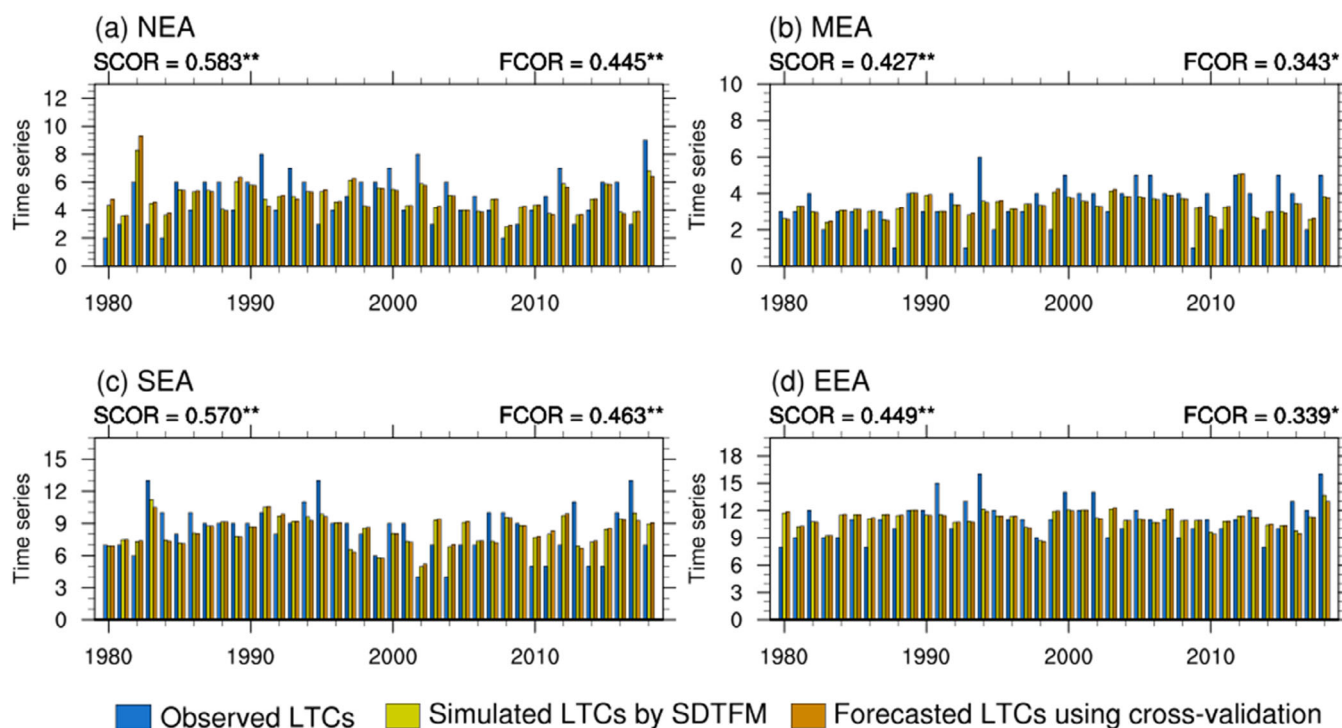


FIGURE 9 Time series of the observed TC landfalls, the simulated TC landfalls from the SDTFM, and the forecast TC landfalls from the SDTFM using leave-one-out cross-validation (LOOCV) for the 1980–2018 period over (a) NEA, (b) MEA, (c) SEA, and (d) EEA. SCOR (FCOR) are the correlation coefficients between the observed TC landfalls and the simulated (forecast) TC landfalls for every year from 1980 to 2018. * and ** indicate the significance at the 95% and 99% confidence levels [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

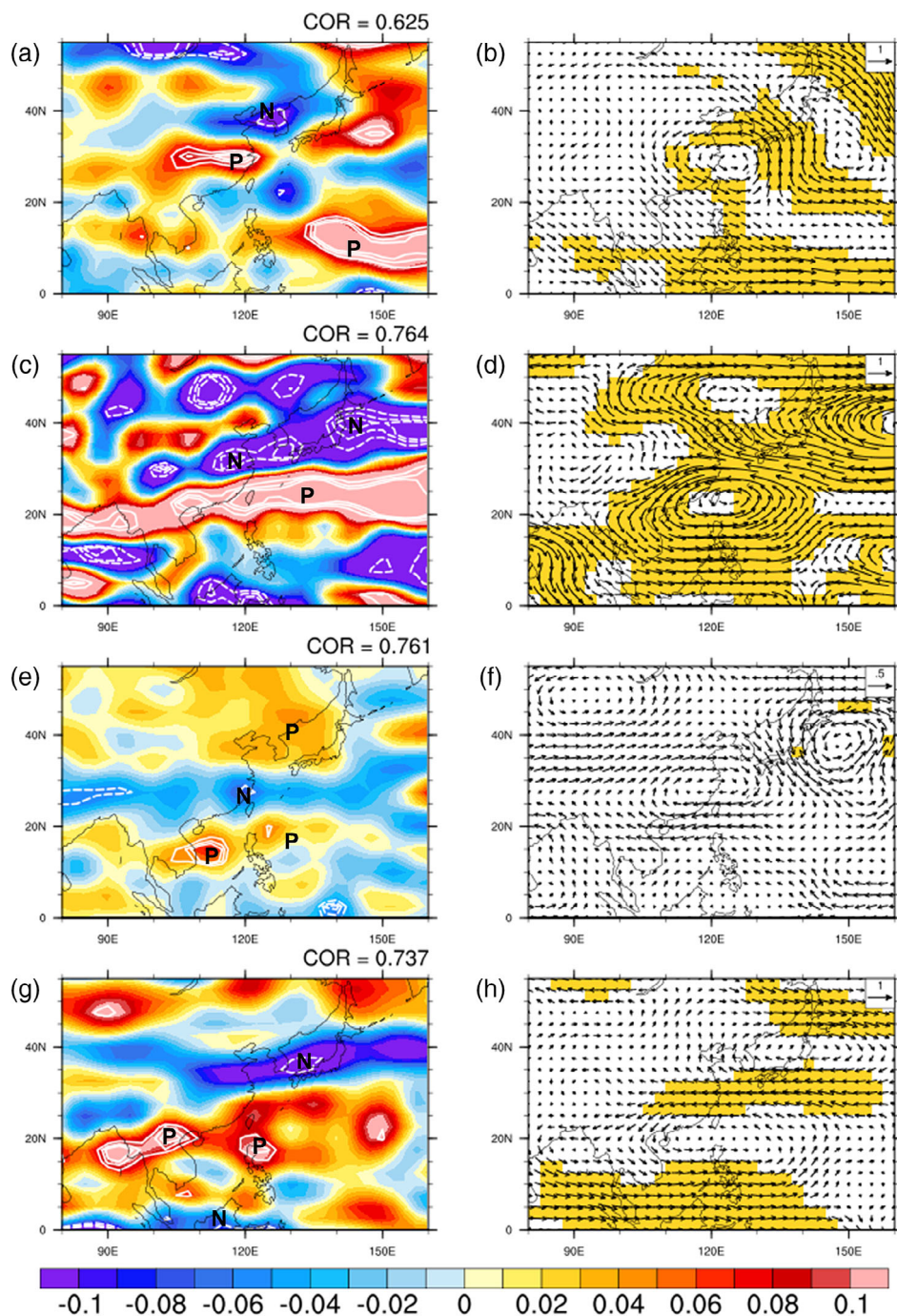


FIGURE 10 Regression of relative vorticity (left column) and horizontal wind (right column) at (a,b) 500 hPa, (c,d) 700 hPa, (e,f) 500 hPa, and (g,h) 500 hPa from R-2 onto the PNU-CGCM-predicted TC landfalls over (a,b) NEA, (c,d) MEA, (e,f) SEA, and (g,h) EEA for 1980–2018. In the left column, P (N) indicates positive (negative) vorticity, and the solid (dashed) lines indicate positively (negatively) significant areas at the 95%, 98%, and 99% confidence levels. COR is the spatial correlation with vorticity patterns for each domain. The shading in the right column indicates the areas at the 95% confidence level [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

this study is JAS/JASON, which is more advantageous in predicting TCs during frequent typhoon landfalls.

7 | SUMMARY AND CONCLUSION

This study examines the correlation between TC landfall and atmospheric circulation, and based on that relationship, develops an SDTFM using the dynamic model and linear regression. LTCs in EA inflict serious economic and social damage on countries along the Western Pacific

during boreal summer, and its landfall frequency during the TC season is gradually increasing in accordance with climate change, especially in the NEA, MEA and EEA (Figure S2). The long-term prediction of TC landfalls in EA is effective in minimizing such damage and is being continuously developed. The CGCM used in this study was PNU CGCM v2.0, which is a model participating in the APCC MME prediction system. The model produces a total of 40 ensemble members every month utilizing time-lag method, and SCM is used for ensemble prediction in this study. The SDTFMs are made for each of four

regions: NEA, including the Korean Peninsula and Japan; MEA, including Taiwan, Fujian, Zhejiang, Jiangsu, and Shanghai; SEA, including South China, Vietnam, and the Philippines; and EEA. Tropical storms, severe tropical storms, and typhoons passing through each domain were defined as TC landfall. In addition, the predicted TC season was defined as JASON for SEA and JAS for the other domains, with more than 60% of TC landfalls occurring during this period.

To find appropriate predictors, the relationships between observed TC landfalls and mid- and low-level atmospheric circulation were analysed, and significant regression patterns were found in each domain. The NEA and MEA LTCs are affected by the anomalous subtropical easterlies and anomalous tropical westerlies. Such flow affects the low-level vorticity and vertical wind shear, inducing an environment favourable for TC generation and development. In particular, the anomalous subtropical easterlies determine the landing area, and the anomalous tropical westerlies prevent the TCs from entering SEA and help them move to the mid-latitudes. Meanwhile, the SEA LTCs are related to anomalous northwesterlies over Japan and anomalous easterlies at 20°N. They prevent TCs from moving to the mid-latitudes and allow them to land on SEA. In addition, the positive vorticity over the Philippine Sea provides an environment favourable for TC generation.

As a result of evaluating the potential of PNU-CGCM v2.0 to develop SDTFM, significant regression patterns were found for all domains when integrated with the May initial conditions. In the regression between the predicted relative vorticity and observed TC landfalls, the vorticities in significant areas were selected as potential predictors. Of three cases of potential predictors, the best-case was found by comparing the regression results while changing the predictors. The developed model offered significant predictions at the 99% confidence level for all domains. According to the LOOCV result, the SDTFM still predicted TC landfalls at the 99% confidence level for NEA and SEA, and 95% confidence level for MEA and EEA. That is, the SDTFM developed in this study can be used to predict TC landfalls in EA and its sub-domains.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out with the support of the “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ01489102)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

So-Hee Kim: Data curation; formal analysis; investigation; methodology; software; visualization; writing –

original draft. **Joong-Bae Ahn:** Conceptualization; funding acquisition; project administration; resources; supervision; validation; writing – review and editing. **Jianqi Sun:** Conceptualization; methodology.

ORCID

So-Hee Kim  <https://orcid.org/0000-0002-8179-2868>

Joong-Bae Ahn  <https://orcid.org/0000-0001-6958-2801>

Jianqi Sun  <https://orcid.org/0000-0002-3879-6986>

REFERENCES

- Ahn, J.-B. and Kim, H.-J. (2014) Improvement of 1-month lead predictability of the wintertime AO using a realistically varying solar constant for a CGCM. *Meteorological Applications*, 21(2), 415–418. <https://doi.org/10.1002/met.1372F>.
- Ahn, J.-B. and Lee, J. (2016) A new multimodel ensemble method using nonlinear genetic algorithm: an application to boreal winter surface air temperature and precipitation prediction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(16), 9263–9277. <https://doi.org/10.1002/2016JD025151>.
- Ahn, J.-B., Lee, S.-B. and Ryoo, S.-B. (2012) Development of 12-month ensemble prediction system using PNU CGCM V1. 1. *Atmosphere*, 22(4), 455–464. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2012.22.4.455>.
- Bayasgalan, G. and Ahn, J.-B. (2018) Seasonal prediction of high-resolution temperature at 2-m height over Mongolia during boreal winter using both coupled general circulation model and artificial neural network. *International Journal of Climatology*, 38(14), 5418–5429. <https://doi.org/10.1002/joc.5848>.
- Camp, J., Roberts, M., MacLachlan, C., Wallace, E., Hermanson, L., Brookshaw, A., Arribas, A. and Scaife, A.A. (2015) Seasonal forecasting of tropical storms using the Met Office GloSea5 seasonal forecast system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(691), 2206–2219. <https://doi.org/10.1002/qj.2516>.
- Chan, J.C.L. and Gray, W.M. (1982) Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships. *Monthly Weather Review*, 110(10), 1354–1374. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<1354:Tcmasf>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<1354:Tcmasf>2.0.Co;2).
- Chan, J.C.L., Shi, J.-E. and Lam, C.-M. (1998) Seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the Western North Pacific and the South China Sea. *Weather and Forecasting*, 13(4), 997–1004. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0997:Sfotca>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0997:Sfotca>2.0.Co;2).
- Chan, J.C.L., Shi, J.-E. and Liu, K. (2001) Improvements in the seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the Western North Pacific. *Weather and Forecasting*, 16, 491–498. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2001\)016<0491:IITSFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2001)016<0491:IITSFO>2.0.CO;2).
- Chan, J.C.L. and Xu, M. (2009) Inter-annual and inter-decadal variations of landfalling tropical cyclones in East Asia. Part I: time series analysis. *International Journal of Climatology*, 29(9), 1285–1293. <https://doi.org/10.1002/joc.1782>.
- Choi, K.-S. and Moon, I.-J. (2012) Changes in tropical cyclone activity that has affected Korea since 1999. *Natural Hazards*, 62, 971–989. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0131-7>.
- Choi, K.-S., Park, K.-J., Lee, K.-M., Kim, J.-Y. and Kim, B.-J. (2015) Possible influence of Western North Pacific monsoon on

- tropical cyclone activity around Korea (in Korean with English abstract). *Journal of the Korean Earth Science Society*, 36(1), 68–81. <https://doi.org/10.5467/JKESS.2015.36.1.68>.
- Choi, K.-S., Wu, C.-C. and Cha, E.-J. (2010a) Change of tropical cyclone activity by Pacific-Japan teleconnection pattern in the western North Pacific. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D19), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2010jd013866>.
- Choi, W., Ho, C.-H. and Kim, H.-S. (2010b) Influence of large-scale environments on tropical cyclone activity over the Western North Pacific: a case study for 2009 (in Korean with English abstract). *The Korean Society of Climate Change Research*, 1(2), 133–145.
- Chu, P.-S., Zhao, X., Lee, C.-T. and Lu, M.-M. (2007) Climate prediction of tropical cyclone activity in the vicinity of Taiwan using the multivariate least absolute deviation regression method. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 18(4), 805. [https://doi.org/10.3319/TAO.2007.18.4.805\(A\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2007.18.4.805(A)).
- Fan, K. (2007) North Pacific sea ice cover, a predictor for the Western North Pacific typhoon frequency? *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(8), 1251–1257. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0076-y>.
- Fan, K. (2010) A prediction model for Atlantic named storm frequency using a year-by-year increment approach. *Weather and Forecasting*, 25(6), 1842–1851. <https://doi.org/10.1175/2010waf2222406.1>.
- Fan, K. and Wang, H. (2009) A new approach to forecasting typhoon frequency over the Western North Pacific. *Weather and Forecasting*, 24(4), 974–986. <https://doi.org/10.1175/2009waf2222194.1>.
- Harr, P.A. and Elsberry, R.L. (1991) Tropical cyclone track characteristics as a function of large-scale circulation anomalies. *Monthly Weather Review*, 119(6), 1448–1468. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<1448:Tctcaa>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<1448:Tctcaa>2.0.Co;2).
- Harr, P.A. and Elsberry, R.L. (1995) Large-scale circulation variability over the tropical Western North Pacific. Part I: Spatial patterns and tropical cyclone characteristics. *Monthly Weather Review*, 123(5), 1225–1246. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<1225:Lscvot>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<1225:Lscvot>2.0.Co;2).
- Huang, W.-R. and Chan, J.C.L. (2014) Dynamical downscaling forecasts of Western North Pacific tropical cyclone genesis and landfall. *Climate Dynamics*, 42(7), 2227–2237. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1747-3>.
- IPCC. (2014) Climate change 2014: synthesis report. In: Pachauri, R.K. and Meyer, L.A. (Eds.) *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC. 151 pp.
- IPCC. (2019) Summary for policymakers. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B. and Weyer, N. (Eds.) *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, (in press). IPCC.
- Jeong, H.-I., Ashok, K., Song, B.G. and Min, Y.M. (2008) Experimental 6-month hindcast and forecast simulation using CCSM3. In: *APCC 2008 Technical Report*. South Korea: APEC Climate Center.
- Jo, S. and Ahn, J.-B. (2015) Improvement of CGCM prediction for wet season precipitation over maritime continent using a bias correction method. *International Journal of Climatology*, 35(13), 3721–3732. <https://doi.org/10.1002/joc.4232>.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S., Hnilo, J., Fiorino, M. and Potter, G. (2002) *NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2)*. U.S.A.: Bul. of the Atmos. Met. Soc, pp. 1631–1643.
- Kim, G., Ahn, J.-B., Kryjov, V.N., Lee, W.-S., Kim, D.-J. and Kumar, A. (2021) Assessment of MME methods for seasonal prediction using WMO LC-LRFMME hindcast dataset. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E2462–E2481. <https://doi.org/10.1002/joc.6858>.
- Kim, H.-M., Chang, E.K.M. and Zhang, M. (2015) Statistical-dynamical seasonal forecast for tropical cyclones affecting New York state. *Weather and Forecasting*, 30(2), 295–307. <https://doi.org/10.1175/waf-d-14-00089.1>.
- Kim, J., Ho, C., Kim, H., Sui, C. and Park, S.K. (2008) Systematic variation of summertime tropical cyclone activity in the Western North Pacific in relation to the Madden-Julian oscillation. *Journal of Climate*, 21(6), 1171–1191. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1493.1>.
- Kim, J.-S., Yoon, S.-K., Moon, Y.-I. and Lee, J.-H. (2012) Atmospheric circulation of Pacific-Japan (PJ) and typhoon-induced extremes in the Nakdong River Basin (in Korean with English abstract). *Journal of Korea Water Resources Association*, 45(12), 1309–1319. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2012.45.12.1309>.
- Kim, O.-Y., Kim, H.-M., Lee, M.-I. and Min, Y.-M. (2017) Dynamical-statistical seasonal prediction for western North Pacific typhoons based on APCC multi-models. *Climate Dynamics*, 48(1), 71–88. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3063-1>.
- Lee, S.-M., Kang, H.-S., Kim, Y.-H., Byun, Y.-H. and Cho, C. (2016) Verification and comparison of forecast skill between global seasonal forecasting system version 5 and unified model during 2014 (in Korean with English abstract). *Atmosphere*, 26(1), 59–72. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2016.26.1.059>.
- Lee, T.-C., Knutson, T.R., Kamahori, H. and Ying, M. (2012) Impacts of climate change on tropical cyclones in the Western North Pacific Basin. Part I: Past observations. *Tropical Cyclone Research and Review*, 1(2), 213–235. <https://doi.org/10.6057/2012TCRR02.08>.
- Li, X., Yang, S., Wang, H., Jia, X. and Kumar, A. (2013) A dynamical-statistical forecast model for the annual frequency of western Pacific tropical cyclones based on the NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(21), 12,061–12,074. <https://doi.org/10.1002/2013jd020708>.
- Liu, K.S. and Chan, J.C.L. (2003) Climatological characteristics and seasonal forecasting of tropical cyclones making landfall along the South China Coast. *Monthly Weather Review*, 131(8 PART 1), 1650–1662. <https://doi.org/10.1175/2554.1>.
- Min, Y.M., Kryjov, V.N. and Oh, S.M. (2014) Assessment of APCC multimodel ensemble prediction in seasonal climate forecasting: retrospective (1983–2003) and real-time forecasts (2008–2013). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(21), 12,132–12,150. <https://doi.org/10.1002/2014JD022230>.
- Mori, N. and Takemi, T. (2016) Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean. *Weather and Climate Extremes*, 11, 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.09.002>.

- Murakami, H., Villarini, G., Vecchi, G.A., Zhang, W. and Gudgel, R. (2016) Statistical–dynamical seasonal forecast of North Atlantic and U.S. landfalling tropical cyclones using the high-resolution GFDL FLOR coupled model. *Monthly Weather Review*, 144(6), 2101–2123. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-15-0308.1>.
- Oh, S.-G. and Suh, M.-S. (2017) Comparison of projection skills of deterministic ensemble methods using pseudo-simulation data generated from multivariate Gaussian distribution. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(1–2), 243–262. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1782-1>.
- Park, D.-S.R., Ho, C.-H., Kim, J.-H. and Kim, H.-S. (2011) Strong landfall typhoons in Korea and Japan in a recent decade. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D7), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2010jd014801>.
- Seong, M.-G., Suh, M.-S. and Kim, C. (2017) Intercomparison of prediction skills of ensemble methods using monthly mean temperature simulated by CMIP5 models. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 53(3), 339–351. <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0039-y>.
- Sparks, N. and Toumi, R. (2021) On the seasonal and sub-seasonal factors influencing East China tropical cyclone landfall. *Atmospheric Science Letters*, 22(2), e1014. <https://doi.org/10.1002/asl.1014>.
- Sun, J. and Ahn, J.B. (2011) A GCM-based forecasting model for the landfall of tropical cyclones in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28(5), 1049–1055. <https://doi.org/10.1007/s00376-011-0122-8>.
- Tian, B. and Fan, K. (2019) Seasonal climate prediction models for the number of landfalling tropical cyclones in china. *Journal of Meteorological Research*, 33(5), 837–850. <https://doi.org/10.1007/s13351-019-8187-x>.
- Tu, J.-Y., Chou, C. and Chu, P.-S. (2009) The abrupt shift of typhoon activity in the vicinity of Taiwan and its association with Western North Pacific-East Asian climate change. *Journal of Climate*, 22(13), 3617–3628. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2411.1>.
- Vecchi, G.A. and Villarini, G. (2014) Next season's hurricanes. *Science*, 343(6171), 618–619. <https://doi.org/10.1126/science.1247759>.
- Vecchi, G.A., Zhao, M., Wang, H., Villarini, G., Rosati, A., Kumar, A., Held, I.M. and Gudgel, R. (2011) Statistical–dynamical predictions of seasonal North Atlantic hurricane activity. *Monthly Weather Review*, 139(4), 1070–1082. <https://doi.org/10.1175/2010mwr3499.1>.
- Vitart, F. and Stockdale, T.N. (2001) Seasonal forecasting of tropical storms using coupled GCM integrations. *Monthly Weather Review*, 129(10), 2521–2537. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2521:Sfotsu>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2521:Sfotsu>2.0.Co;2).
- Wang, B. and Chan, J.C.L. (2002) How strong ENSO events affect tropical storm activity over the Western North Pacific. *Journal of Climate*, 15(13), 1643–1658. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1643:Hseeat>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1643:Hseeat>2.0.Co;2).
- Wang, B. and Fan, Z. (1999) Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(4), 629–638.
- Wang, B., Xiang, B. and Lee, J.-Y. (2013) Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(8), 2718–2722. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214626110>.
- Wang, H., Scheme, J.K.E., Kumar, A., Wang, W., Long, L., Chelliah, M., Bell, G.D. and Peng, P. (2009) A statistical forecast model for Atlantic seasonal hurricane activity based on the NCEP dynamical seasonal forecast. *Journal of Climate*, 22, 4481–4500.
- Weigel, A.P., Liniger, M.A. and Appenzeller, C. (2008) Can multi-model combination really enhance the prediction skill of probabilistic ensemble forecasts? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134(630), 241–260. <https://doi.org/10.1002/qj.210>.
- Wilks, D.S. (2006) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. International Geophysics Series*, Vol. 91, 2nd edition. U.S.A.: Academic Press, p. 627.
- Xiang, B., Lin, S.-J., Zhao, M., Zhang, S., Vecchi, G., Li, T., Jiang, X., Harris, L. and Chen, J.-H. (2015) Beyond weather time-scale prediction for hurricane sandy and super typhoon Haiyan in a global climate model. *Monthly Weather Review*, 143(2), 524–535. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-14-00227.1>.
- Zhang, W., Leung, Y. and Chan, J.C.L. (2013) The analysis of tropical cyclone tracks in the Western North Pacific through data mining. Part I: Tropical cyclone recurvature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(6), 1394–1416. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-12-045.1>.
- Zhang, W., Vecchi, G.A., Villarini, G., Hiroyuki, M., Gudgel, R. and Xiaosong, Y. (2017) Statistical–dynamical seasonal forecast of Western North Pacific and East Asia landfalling tropical cyclones using the GFDL FLOR coupled climate model. *Journal of Climate*, 30(6), 2209–2232. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0487.1>.
- Zhang, W., Villarini, G., Vecchi, G.A., Murakami, H. and Gudgel, R. (2016) Statistical–dynamical seasonal forecast of western North Pacific and East Asia landfalling tropical cyclones using the high-resolution GFDL FLOR coupled model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(2), 538–565. <https://doi.org/10.1002/2015ms000607>.
- Zhao, M., Held, I.M. and Vecchi, G.A. (2010) Retrospective forecasts of the hurricane season using a global atmospheric model assuming persistence of SST anomalies. *Monthly Weather Review*, 138(10), 3858–3868. <https://doi.org/10.1175/2010mwr3366.1>.

SUPPORTING INFORMATION

Additional supporting information may be found in the online version of the article at the publisher's website.

How to cite this article: Kim, S.-H., Ahn, J.-B., & Sun, J. (2021). Dynamical–statistical long-term prediction for tropical cyclone landfalls in East Asia. *International Journal of Climatology*, 1–15. <https://doi.org/10.1002/joc.7382>