

키워드 네트워크 분석법을 활용한 태풍 연구동향 분석

최소영* · 조용성**†

*고려대학교 에너지환경대학원 박사과정, **고려대학교 식품자원경제학과 교수

Exploration of typhoon research trends using keyword network analysis

Choi, SoYoung* and Cho, Yongsung**†

*Ph.D. Student, Graduate School of Energy and Environment, Korea University, Seoul, Korea

**Professor, Department of Food and Resource Economics, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Due to frequent occurrences of abnormal weather caused by climate change, damages from natural disasters are increasing. In particular, typhoons account for 54.2% of the total damage and 57.8% of the total recovery costs in the country. As the frequency and intensity of typhoons invading the Korean Peninsula are increasing, accurate prediction of typhoon track and intensity is essential. However, typhoon intensity prediction technology has not improved significantly compared to typhoon track prediction. In this study, we investigated recent trends in typhoon research and development using keyword network analysis of domestic and international research papers from 2017 to 2021, and visualized the results with VOS viewer. As a result of the analysis, The trend of typhoon research is summarized into four clusters as follows: first, Cluster 1 represents the research on the prediction of tracking the typhoon patch, and intensity. Second, Cluster 2 represents studies of data assimilation and modeling based on observation data. third, Cluster 3 shows the research on the correlation between climate change and typhoons, and Cluster 4 are study of the interaction between typhoons and atmospheric circulation. In particular, the research topics of Cluster 1 are linked and expanded with the research topics of Cluster 2, Cluster 3, and Cluster 4. In order to improve the accuracy of typhoon prediction, further research needs to be conducted on various characteristics and intensity of typhoons due to climate change accordingly.

Key words : Keyword Network Analysis, VOS Viewer, Cluster, Research Trends, Typhoon

1. 서론

기상청(2020)에 따르면, 전지구 평균기온이 지속적으로 증가하고 있으며, 지구온난화로 인한 자연재해 피해가 매년 증가하고 있다. 자연재해는 태풍, 홍수, 호우(豪雨), 대설, 한파, 폭염, 지진 등 자연현상으로 인해 발생하는 재산 및 인명 피해로 정의하며, 자연재해로 인한 피해는 생태계, 건강, 사회기반시설, 산업, 사회 등 전 분야에 걸쳐 광범위하게 발생하고 있다(Green Technology Center, 2014). 행정안전부 재해연보(Ministry of the Interior and Safety,

2020)에 따르면 최근 10년간(2010~2019년) 자연재해로 인한 재산피해는 연평균 3,526억원, 사회적 복구비용은 연평균 8,236억원 이상 소요된 것으로 조사되었다. 특히 태풍으로 인한 피해는 10년간(2010~2019년) 1조 9,128억 원으로 국내 전체 자연재해 피해 규모의 54%를 차지하였고, 피해 복구비용 역시 4조 7,242억 원으로 전체 복구비의 약 58%를 차지하고 있다.

태풍은 강풍과 호우를 동반하여 강풍으로 인한 농작물 및 시설물 피해, 교통 운행 중단, 폭풍해일로 인한 항만시설 파괴, 호우로 인한 농경지 및 도로유실, 시설 침수, 산

†Corresponding author : yscho@korea.ac.kr (Anam-dong, Seoungbuk-gu, Seoul 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3037)

ORCID 최소영 0009-0002-0676-6608

조용성 0000-0002-1382-6261

사태 등 대규모 재산 피해를 일으키는 주요 원인이다 (Korea Meteorological Administration, 2020). 주목해야 할 점은 2000년부터 2009년까지 10년 동안 발생한 태풍 중 국내에 영향을 준 것은 약 11%였으나, 2010년부터 2019년까지의 기간동안에는 약 15%로 증가하였다. 2002년 발생한 ‘루사(RUSA)’, 2003년 발생한 ‘매미(MAEMI)’, 2012년 ‘볼라벤(BOLAVEN)’, 2016년 ‘차바(CHABA)’ 모두 등급이 ‘강’이었으나, 2020년 발생한 폭풍 ‘바비(BABI)’와 ‘마이삭(MAYSACK)’의 등급은 ‘매우 강’이었고, 태풍 ‘하이선(HAISHEN)’의 등급은 ‘초강력’이었다. 이처럼 최대풍속 44 m/s 이상인 ‘매우 강’ 등급의 태풍이 증가 추세를 보이고 있다(National Typhoon Center of Meteorological Administration, 2021a). 또한 2020년 중심부 최대 풍속이 44~54 m/s에 달하는 매우 강한 강도의 태풍 3개(바비, 마이삭, 하이선)가 짧은 간격으로 연달아 한반도에 영향을 준 사례처럼, 이례적으로 강한 강도를 가지거나 예상 진로를 벗어나는 등 태풍 예측의 불확실성이 증가하고 있다(National Typhoon Center of Meteorological Administration, 2021a). 이처럼 태풍의 발생 빈도와 강도가 점점 커지는 것과 달리 태풍 관련 국가 연구비는 미미한 수준이다. 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)에 등록된 최근 10년(2011~2020)간 태풍 관련 정부의 연구 투자비는 총 454.7억원이며, 2020년도의 태풍 관련 연구비는 70.3억원으로 정부의 전체 연구개발사업비(약 24조원) 대비 0.03%에 불과하다(National Typhoon Center of Meteorological Administration, 2021b).

한반도에 내습하는 태풍의 빈도와 강도가 커지고 있는 상황에서 태풍으로 인한 피해를 저감하기 위해서는 정확한 태풍의 진로 및 강도 예측이 필요하다. 그동안 관측 및 수치모델링 기술의 발달로 태풍 진로 예측기술은 크게 발전하였지만, 태풍 강도에 대한 예측기술은 향상되지 못하였다. 정확한 태풍 강도 예측을 위해서는 다양한 환경조건, 해양-대기 상호작용, 태풍 내부 역학과정의 이해와 정확한 진로 예측이 이루어져야 하는데 이와 관련된 기술개발이 저조한 상황이다(Oh et al., 2016).

본 연구에서는 2017년부터 2021년 기간동안의 태풍 관련 국내·외 논문에 대한 키워드 네트워크 분석(keyword network analysis)을 적용하여 태풍 분야의 최근 연구개발 동향을 파악하고 태풍 예측의 정확도 향상을 위한 국내 R&D 추진 방향을 제시하였다.

2. 국내·외 태풍 연구동향 및 문헌분석

기상청 국가태풍센터(National Typhoon Center of Meteorological Administration, 2021b)에 따르면, 2017년~2021년 기간동안 총 522건의 태풍 관련 논문이 발표되었으며, 그중 태풍의 예측 및 모델링 분야 290건(55.5%), 태풍의 특성 및 영향 분야 201건(37.2%), 태풍의 감시 및 탐지 분야 논문이 37건(7.3%)으로 조사되었다. 조사된 522건의 논문들은 Web of Science (WOS) 문헌 정보 중 해당 분야 전문가 검토를 거쳐 확정된 검색 키워드로 논문 데이터를 1차 추출하고, 논문 제목, 키워드, 초록, 필요 시 본문 내용을 검토하여 최종 선별되었다. 논문에 기반한 분야별 주요 연구동향은 아래와 같다.

태풍의 예측 및 모델링에 대한 연구는 크게 태풍의 진로, 강도 예측 모형 연구, 예측 모형의 정확도 향상을 위한 다양한 시도로 구분할 수 있으며, 최근 많이 이용하는 태풍 예측모형은 Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF), Weather Research and Forecasting (WRF), Hurricane Analysis and Forecast System (HAFS), GFDL High-Resolution Forecast-Oriented Low Ocean Resolution model (HiFLOR), Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System (MOGREPS-G), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Ensemble (ECMWFENS), National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System (NCEP GEFS)로 조사되었다 (National Typhoon Center of Meteorological Administration, 2021b).

대표적으로 Zhang et al. (2017)은 2010년 발생한 허리케인 Earl과 Karl에 대하여 HWRF 모델의 경계층(PBL)에서 연직와류확산도(vertical eddy diffusivity, Km) 수정이 열대저기압(TC)의 급속 강화(RI) 예측에 미치는 영향을 평가하였다. Fukuda and Yamaguchi (2019)는 일본 기상청(JMA), 유럽 중기기상예보센터(ECMWF), 미국 국립환경예측센터(NCEP), 영국 기상청(UKMO)의 글로벌 앙상블을 이용해 2016년~2018년까지 발생한 열대저기압을 대상으로 검증한 결과, TC 경로 예측 시 70% 확률원반 경을 결정하기 위해 기존 통계 및 단일 앙상블보다 다중 앙상블 기법이 더 효과적이라는 연구 결과를 발표하였다. 비슷한 시도로 Lin et al. (2018)은 태풍 파나피의 중심에 대한 앙상블 자료동화(Ensemble Data Assimilation, EDA)가 태풍 진로와 강도 예측을 향상시킨다는 연구 결과를 발표하였다. Bass et al. (2017)은 SSHS (Saffir-Simpson

Hurricane Scale)의 한계를 극복하기 위하여 연안 파랑 시뮬레이션 모델을 사용하여 2008년 발생한 허리케인 아이크와 78개의 합성 열대저기압에 대한 해일 및 파도 반응을 SSHS, IKE (Integrated Kinetic Energy), HSI (Hurricane Surge Index) 및 SS (Surge Scale)로 평가하였다. Olande and Velden (2019)은 정지궤도기상위성에서 TC 강도 추정에 사용하는 ADT (advanced Dvorak technique)의 업데이트 및 새로운 기능을 소개하였다. 구체적으로 항공기 기반 TC 강도 추정에 대한 미세조정, 강도 추정 체계에 위성 기반 마이크로파 정보 통합, 보다 정교하고 자동화된 TC 중심 분석, 태풍에 대한 강도 추정치 조정, 그리고 지표풍 반경 추정에 관한 개선 사항이 포함되었다.

한편 태풍의 특성 및 영향 연구들은 태풍의 진로, 강도, 크기에 영향을 미치는 다양한 인자에 대한 연구, 태풍의 위험 요인 및 평가 도구 관련 연구, 기후변화가 태풍에 미치는 영향에 대한 연구가 주로 진행되었다. 대표적으로 Potter et al. (2019)은 2017년 발생한 태풍 Harvey가 TCHP (Tropical cyclone heat potential)가 낮았음에도 불구하고 급속하게 강화된 원인에 대해 연구하였고, Huang et al. (2020)은 2018년에 발생했던 Super Typhoon 망쿠티 (Mangkhut)가 예측과는 달리 전향하게 된 요인에 대한 논문을 발표하였다. 한편 Pan et al. (2018)은 2015년에 발생한 Super Typhoon 사우델로르(Soudelor)에 의해 발생한 저장성 지역의 집중호우 분포, 강도, 유발 요인과 역학관계를 중규모 지상관측, 레이더 반사도, 위성 구름사진과 NCEP의 지구예보시스템(GFS) 정보 등을 종합분석하여 상륙 태풍과 해안지형 간 상호작용으로 인한 집중호우 발생 관련성을 제시하였다. Kutty and Gohil (2017)은 사이클론이 생성되는 동안 중간 대류권에서의 소용돌이 역학을 조사하고 열대저기압의 강화에서 중층 소용돌이의 발달이 매우 중요하다는 결과를 제시하였다. Soloviev et al. (2017)와 Hlywiak and Nolan (2019)은 해열 및 염분 구조와 내부 소용돌이 역학에 대한 연구를 발표하였고, Russell et al. (2017)는 대서양 열대저기압(TC)의 주요 전조 현상인 African Easterly Waves (AEWs)에 대한 연구 논문을 발표하였다. Li et al. (2017)은 동아시아와 북미에서 발생한 저기압에 의해 유발된 전리층 교란의 형태학적 특성을 연구하였으며, 열대저기압(TC)에 영향을 미치는 여러 요인들 중 방사능(Choudhury et al., 2020)을 비롯한 계절적 급속 강화 현상(Liu et al., 2018; Ng and Vecchi, 2020), 미세먼지와 관계(Cao and Rohli, 2019), 대기운동벡터(Atmospheric Motion Vectors, AMVs)의 영향(Lim

et al., 2019), 대규모($500 \text{ km} \leq r \leq 2,200 \text{ km}$) 외향 장파복사(Outgoing Longwave Radiation, OLR)와 수증기(water vapor, WV)의 영향(Smith and Toumi, 2021) 등에 대한 다각적인 연구가 진행되었다. 또한 Lauton et al. (2021)는 Genesis Potential Index가 열대저기압 발생 임계값을 얻기 위한 유효한 지표가 될 수 있음을 시사하는 연구를 발표하였으며, Chen et al. (2018)은 동아시아 아열대 상층 제트기류가 열대저기압에 미치는 영향을 조사하였다. Ruiz-Salcines et al. (2021)은 태풍으로 인한 해일 위험 및 위험 평가를 위한 도구를 개발하였다. 일반적으로 기후변화로 인한 해수면 온도 상승에 따라 태풍의 연평균 발생 건수는 감소하는 반면, 태풍의 최대 풍속은 강해지는 추세를 보이는 것으로 보고됨에 따라, 관련 논문이 많이 발표되었다(Qian et al., 2019; Wang and Lin, 2019; Wang et al., 2018; Yamada et al., 2019; Yamaguchi and Maeda, 2020; Yang et al., 2017).

태풍 발달 감시 및 탐지 분야는 해안 레이더를 이용한 태풍 강도 및 발달에 대한 물리적 메커니즘 연구, 무인항공시스템을 이용한 위험 감시, 위성 관측(적외선 및 마이크로파 진단)을 통한 태풍 활동 조사 분석 연구가 주로 진행되었다. Cha et al. (2020)은 차세대 기상 레이더(Next Generation Radar, NEXRAD)를 활용하여 Polygonal Eyewall에서 발달하는 바람을 5분 간격으로 관측함으로써 태풍의 강도 및 발달에 대한 물리적 메커니즘을 연구하였고, Li and Toumi (2018)는 고주파 레이더를 이용해 태풍 발생 시 해류를 관측하여 다양한 강도, 크기, 전향 속도를 조사하였다. Ryan et al. (2019)은 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) G-IV 항공기를 이용하여 열대저기압 형성 및 지형에 영향을 미치는 해양 대기 상태를 직접 측정하였고, Martinez et al. (2019)은 고해상도 항공기 관측자료를 분석하여 허리케인 퍼트리샤의 급격한 강도 변화 프로세스를 분석하였다. Christophersen et al. (2018)은 Global Hawk 무인항공기시스템 내 드롭윈즈존데와 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 관측에 관한 논문을 발표하였다. Dafis et al. (2020)은 다중 위성에서 측정된 적외선 및 마이크로파 결합, ERA5 재분석자료를 활용하여 연직풍속전단과 와류 기울기를 계산하여 심층대류와의 상호작용을 조사하고 심층대류가 2005년부터 2018년 사이에 발생한 9개의 지중해 열대성 저기압의 강화에 기여한 정도를 분석하여 제시하였습니다. 이외에 Jaiswal et al. (2019)은 인도 극지 위성 SCATSAT-1에서 검색된 준실시간 해수면 바람 벡터를 적용하여 비대칭 바

람 반경의 중심 결정, 크기 추정 및 분석을 위한 TC의 중 규모 수준 모니터링 가능성을 제시하였고, Singh and Prasad (2017)는 인도-프랑스 공동위성인 Megha-Tropiques의 마이크로파 탐측기 SAPHIR를 사용하여 열대저기압의 진로 예측에 미치는 습도의 영향 등을 조사하였다.

3. 연구방법 및 분석자료

3.1. 키워드 네트워크 분석

빅데이터 기반의 연결망(Network Analysis) 분석, 즉 네트워크 분석기법은 특정 주제(연구자, 연구기관, 연구 분야 등)를 중심으로 관련 이슈들이 어떠한 관계망을 형성, 상호작용을 하고 있는지를 정성적으로 분석하여, 도출한 이슈의 관계성과 맥락을 함께 살핌으로써 기존의 계량-통계적 분석을 보완하는 시사점을 도출할 수 있다. 네트워크 분석의 경우, 네트워크를 통해 분야 간 상호연관성을 이해하고 이를 통해 미래의 유망분야를 예측하거나 제안하는 데 도움이 되며, 유망분야가 확산되는 경로의 예측 및 연구자들에게 연구의 방향성 제시, 그리고 연구과제의 방향과 목표가 올바르게 진행되고 있는지에 대한 판단 근거를 제시하는 등의 장점이 있다(Lee, 2006).

Callon et al. (1991)은 co-word 분석기법을 활용해 키워드를 연결강도에 따라 군집화한 뒤, 각 키워드를 군집내, 군집간 연결 정도에 따라 전략 다이어그램에 배치하고 해당 키워드의 위치변화를 추적하였다. Shibata et al. (2008)은 과학 출판물의 인용 네트워크를 위상 클러스터링 방법을 사용하여 나타내고, 각 클러스터 내에 문헌의 위치를 추적하였다. 또한 각 클러스터를 대표하는 특징이 있는 용어를 선정하여 클러스터의 진화를 모니터링하였으며, 유사한 주제는 강한 연결을 보이는 반면, 다른 주제를 다루는 논문은 약한 연결을 보여 지식 영역에서 강한 연결을 보이는 클러스터 출현(emergence)을 탐지할 수 있다는 것을 밝혔다.

본 연구에서 사용하는 VOSviewer는 Van Eck & Waltman

이 2010년 개발한 Tool로 주로 과학출판물의 연구자, 연구기관, 국가, 키워드 또는 초록 등의 네트워크 데이터를 기반으로 클러스터 맵(map)을 생성하고 네트워크 시각화, 오버레이 시각화 및 밀도 시각화 기능을 제공한다. 맵(map)에는 다양한 형태의 서지 결합 링크가 표시되며 링크의 강도가 높을수록 클러스터 내 라벨이 커지고 선이 굵게 표기된다. 일반적으로 유사도가 높은 용어는 서로 가깝게 위치하고, 유사도가 낮으면 멀리 위치하며, 유사한 그룹은 라벨과 연결선이 동일한 색으로 시각화된다(Waltman et al., 2010).¹⁾

3.2. 분석대상 및 전처리과정

본 연구에서는 한국, 미국, 일본, 중국, 대만의 기상청 및 기상 관련 연구기관에서 발표한 논문을 정성적으로 분석하기 위해 2017년부터 2021년까지의 Web of Science (WOS) 문헌 정보를 활용하였다. WOS는 가장 많이 사용되고 권위 있는 연구 문헌 검색 엔진으로, 전 세계 주요 연구 결과에 대한 포괄적인 범위를 제공하며, 과학, 예술, 인문학 및 사회 과학(예: 정치학, 건축학 및 철학)을 포함하여 100개 이상의 주제가 포함된 종합 데이터베이스이다. 인용 색인에는 SCI (Science Citation Index), SSCI (Social Science Citation Index), A&HCI (Arts and Humanities Citation Index), ESCI (Emerging Sources), SciELO(남미권), KCI(한국 국내 학술지)가 포함되어 있다. Fig. 1은 태풍 논문 기반 키워드 네트워크 분석을 위한 단계별 프로세스를 보여주고 있다.

본 연구에서는 2021년 기상청 국가태풍센터에서 발표한 「태풍예측기술 향상을 위한 중장기 발전방안 연구」 내 용 중 분야별 연구동향 분석에 사용한 522개의 논문 데이터를 키워드 네트워크 분석을 위한 데이터로 활용하였다. 분석에 사용된 논문들은 다음과 같은 과정을 통해 선별되었다. 먼저, 분석을 위해 기상기술 분류체계와 기상청 R&D 중장기 로드맵 내 태풍 전략과제의 핵심 키워드를 참고하여 검색어 후보를 1차 선별한 후, 해당분야 전문가

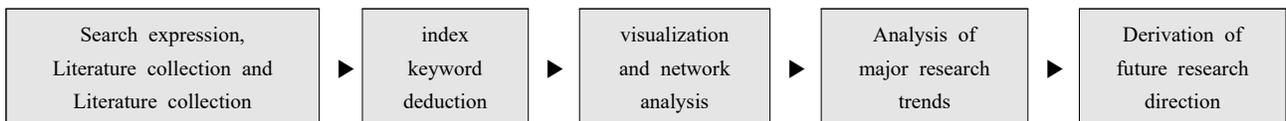


Fig. 1. Typhoon research trend analysis process

1) VOSviewer 프로그램에 대한 자세한 내용은 <https://www.vosviewer.com>을 참조

Table 1. Typhoon-related keywords and search expression

Main classification	Middle classification	Search keywords
Typhoon	Monitoring and detection systems	multi-satellite observation, observation
		low-level circulation, disturbance
		variability, multi-scale, scale-interaction, ensemble, short-to-mid
	Characteristics and impact	activity, size, wind radius, scale, transition, variability analysis
		risk analysis, damage, risk assessment, impact forecast
	Forecasting and modeling	prediction, rapid intensification, interaction
		multi-model variability
Search expression		
(TITLE-ABS-KEY ((tropical AND (cyclone OR cyclogene*)) OR hurricane OR typhoon) AND (forma* OR center OR activity* OR trac* OR disturbance OR circulation OR observation OR intensity OR prediction OR variability OR interaction OR ensemble OR operation* OR damage OR risk OR impact OR forecast OR intensification OR interaction OR radius OR transition OR "steering flow") AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017)))		

Table 2. Research status by typhoon field

Field	Forecasting and modeling	Characteristics and impact	Monitoring and detection systems	Total
Number of papers (%)	290 (55.5%)	194 (37.2%)	38 (7.3%)	522 (100%)

검토를 거쳐 검색 키워드를 최종 확정하였다. 다음으로는 데이터베이스(DB)에서 제공하는 검색 연산자를 활용하여 검색 키워드를 하나의 검색식으로 구성하여 검색조건에 부합하는 문헌 3,186건을 수집하였다. 이때 사용한 검색 키워드와 검색식은 Table 1과 같다.

검색된 총 3,186개 논문의 제목, 키워드, 초록 및 본문 내용을 검토하여 태풍으로 인한 관광 피해, 질병 발생 등 태풍 감시 및 예측과 직접 관련되지 않는 2,664개의 논문은 제외한 후, 최종 분석대상 논문으로 총 522개를 선택하였다. Table 2에 나타나 있듯이 총 522건의 논문 중 ‘태풍 예측 및 모델링 분야’ 연구가 290건으로 가장 많고, ‘태풍 특성 및 영향분석’이 194건, ‘태풍 감시 및 탐지’ 연구가 38건 수행되었다.

각 분야별 분석을 위한 유효 논문은 태풍 발생을 감시하고 이후의 태풍 강도를 비롯한 크기-위치 분석 기술에 관한 연구, 태풍에 영향을 미치는 영향 인자의 물리적-지리적 특성 정보를 확보하기 위한 이론 및 기술에 관한 연구, 태풍의 진로나 크기, 강우 특성 연구, 태풍의 다양한

활동 변동성에 영향을 미치는 인자 평가 및 분석, 과거 태풍의 사례연구, 태풍 발생 확률을 수치화하여 모니터링하는 시스템 구축, 정지궤도위성에서 나타나는 구름의 모양을 판별하여 태풍 중심 탐지, 수치모델 및 대기-해양 접합 모델 등 관련 모델을 이용한 태풍의 진로와 강도 예측을 포함하는 것으로 최종 선별하였다.

최종 수집한 522개의 데이터에서 학술지 또는 저자가 부여하는 인덱스 키워드를 987개 수집하고, 동시 출현빈도(co-occurrence) 횟수를 3 이상으로 설정하여, 태풍과 연관성이 낮은 키워드를 정제한 후 최종 322개의 인덱스 키워드를 네트워크 분석에 적용하였다. VOS viewer 프로그램을 사용하여 키워드의 밀집도와 상호관계를 2차원 공간에 네트워크로 시각화하고 유사도 계수를 바탕으로 키워드를 그룹화한 후, 클러스터별 상위 연관 키워드의 공통된 특징을 파악하여 클러스터별로 네이밍하고 각 클러스터를 구성하고 있는 키워드들의 연결 관계와 해당되는 주요 논문 내용을 살펴 연구 동향을 파악하였다.

4. 키워드 네트워크 분석 결과

태풍 분야 최신 연구동향 키워드 시각화 및 네트워크 분석 결과는 Fig. 2와 같다. 4개의 클러스터 중 Cluster 1 (157건, 48.8%)은 태풍 진로 및 강도 예측, Cluster 2 (115건, 35.7%)는 관측자료 기반 자료동화 및 모델링, Cluster 3 (41건, 12.7%)는 기후변화와 태풍 간 상관관계 연구, Cluster 4 (9건, 2.8%)는 태풍과 대기순환 상호작용으로 구분하였다.²⁾

Fig. 3은 키워드 네트워크 분석에 활용한 322개의 밀도를 나타내고 있다. 노란색에 가까울수록 키워드 출현 빈도, 연결 강도와 연결수가 많으며, 색이 얼어질수록 출현 빈도, 연결 강도와 연결수가 상대적으로 적은 키워드를 의미한다.

한편, Table 3은 키워드 네트워크 분석에 활용한 322개 중 출현빈도가 3개 이상인 키워드별 연결수, 연결 강도, 출현 빈도를 보여주고 있다. Fig. 2에서 보여준 것처럼 키워드의 연결수와 연결 강도가 높은 키워드는 주로 Cluster 1과 Cluster 2에서 추출된 것임을 알 수 있다.

Fig. 4부터 Fig. 8은 각 클러스터별 동시 출현 빈도 (occurrences) 3 이상, 총 연결강도(total link strength)가 20(상위 30%) 이상의 용어 중 클러스터별 주요 연구 동향을 대표할 수 있는 연관 키워드를 보여주고 있다.

Fig. 4에 나타나 있는 Cluster 1의 핵심 키워드는 ‘intensity’, ‘landfall’, ‘rapid intensification’, ‘track’으로 제시되어 태풍의 진로 및 강도 예측을 위한 연구로 명명하였으며, Cluster 2의 자료동화 및 모델, Cluster 3의 태풍 영향요인, Cluster 4의 대기 상호작용 연구로도 확장되는 모습을 볼 수 있다. 핵심 키워드와 관련하여 열대저기압의 계절적 급속 강화 현상 연구, 다중 앙상블을 이용한 70% 확률 반경 결정 및 진로 예측 개선, 이상적인 수치모의에서 열대저기압(TC)의 강도 변화, 전지구모델에 의한 강수 예측 정확도 평가 연구, 통계기법 및 머신러닝을 활용한 계절별 열대저기압 변동성 연구가 수행되었다.

Fig. 5와 Fig. 6에 나타나 있는 Cluster 2의 핵심 키워드는 ‘data assimilation’, ‘forecasting, observations’, ‘ensembles’로 제시되어 관측자료 기반 자료동화 및 모델링 연구로 명명하였다. 핵심 키워드와 관련하여 항공기 기반 TC 강도

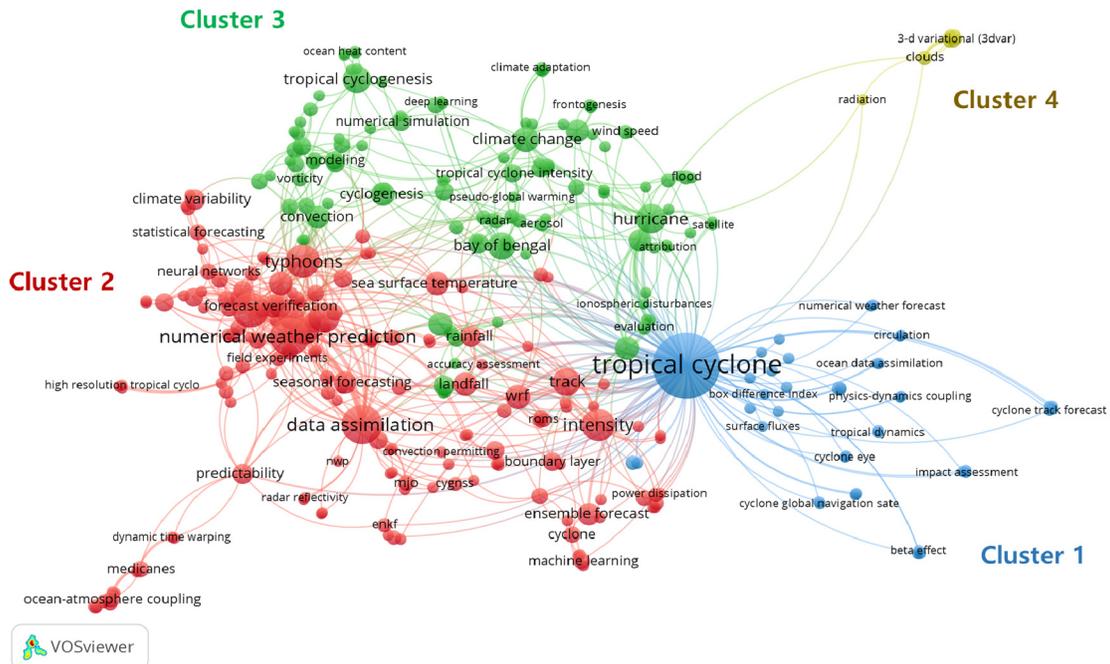


Fig. 2. Latest research trends in the field of typhoons, keyword visualization

2) 괄호 안 숫자는 분석에 활용한 322개 키워드 중 해당 클러스터로 분류된 키워드 개수 및 비중을 나타냄.

Table 3. Number of connections, connection strength, frequency of appearance by keyword

Cluster	keyword	Number of connections	connection strength	requery of appearance	Cluster	keyword	Number of connections	connection strength	requery of appearance
1	boundary layer	6	6	4	2	cyclogenesis	13	13	7
1	climate change	24	24	9	2	data assimilation	30	67	27
1	cyclone	7	7	3	2	dropsondes	17	31	7
1	ensemble forecast	7	10	6	2	ensembles	26	40	14
1	extratropical transition	11	11	6	2	enso	11	11	4
1	global warming	12	15	6	2	extratropical cyclones	9	9	3
1	hurricane intensity	9	9	3	2	forecast verification	21	30	7
1	hwrf model	7	10	3	2	forecasting	24	66	20
1	intensity change	4	4	3	2	forecasting techniques	12	13	4
1	intensity	23	40	16	2	hurricane	25	33	13
1	landfall	11	17	7	2	mjo	8	8	3
1	machine learning	5	5	3	2	model evaluation	13	15	3
1	medicanes	8	8	3	2	madden-julian oscillation	9	9	4
1	numerical simulation	7	7	4	2	mesoscale models	9	10	3
1	ocean-atmosphere coupling	5	6	3	2	modeling	9	14	4
1	predictability	12	13	5	2	monsoon trough	11	13	7
1	precipitation	24	27	10	2	neural networks	8	9	3
1	rainfall	10	15	5	2	numerical analysis	9	14	4
1	rapid intensification	25	37	16	2	numerical weather prediction	39	78	24
1	remote sensing	28	35	11	2	operational forecasting	8	9	3
1	sea surface temperature	13	17	7	2	optimization	9	10	4
1	storm surge	7	7	3	2	performance	13	15	3
1	tropical cyclogenesis	15	15	10	2	regional models	11	17	4
1	tropical cyclone intensity	10	11	4	2	regression analysis	7	8	3
1	typhoon	13	16	7	2	satellite observations	9	18	8
1	track	15	28	10	2	seasonal prediction	7	7	5
1	typhoons	31	45	17	2	seasonal forecasting	12	12	6
1	uncertainty	8	8	4	2	short-range prediction	13	13	3
1	tropical cyclone	127	181	95	2	skill	15	23	5
1	waves	9	9	3	2	statistical forecasting	10	10	3
2	aircraft observations	15	23	7	2	statistical techniques	5	6	3
2	algorithms	8	10	3	2	storm environments	6	6	3
2	atmosphere	14	15	6	2	storm tracks	5	6	3
2	atmosphere-ocean interaction	6	7	3	2	stratosphere	6	8	3
2	bay of bengal	14	15	10	2	subtropical cyclones	9	9	3
2	climate variability	5	5	5	2	subtropical high	7	7	3
2	climatology	3	4	3	2	wind	10	10	3
2	climate models	10	10	4	2	wind shear	11	11	4
2	cloud resolving models	7	7	3	2	wrf	15	21	8
2	convection	14	14	6	2	wrf model	8	8	5

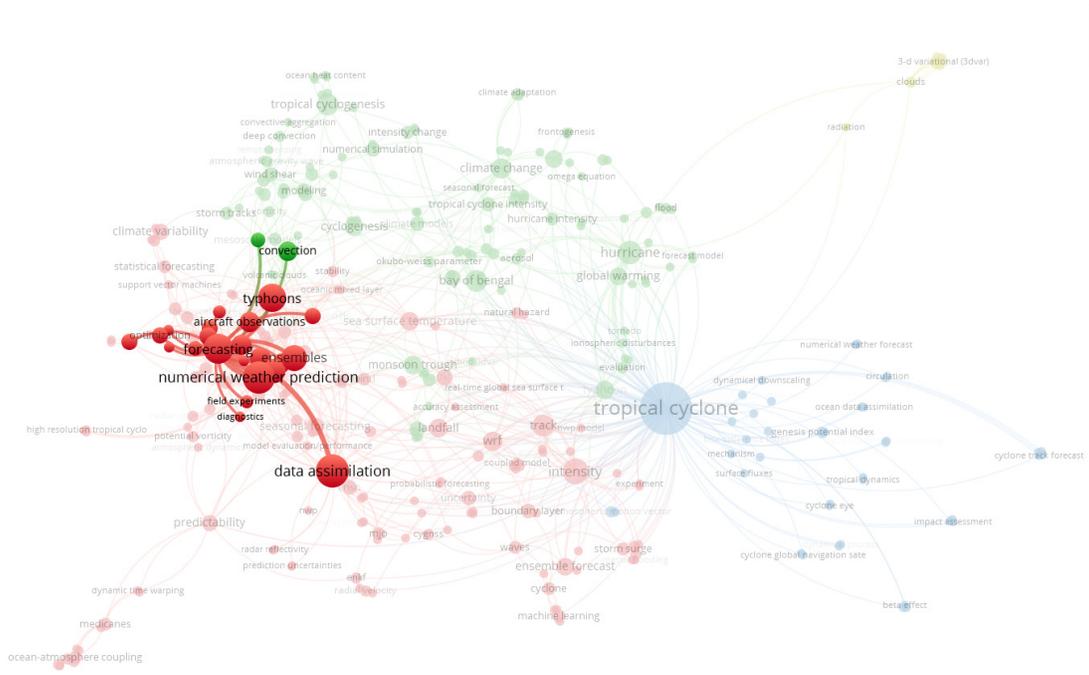


Fig. 5. Cluster 2 main keyword research paper mapping results (1)

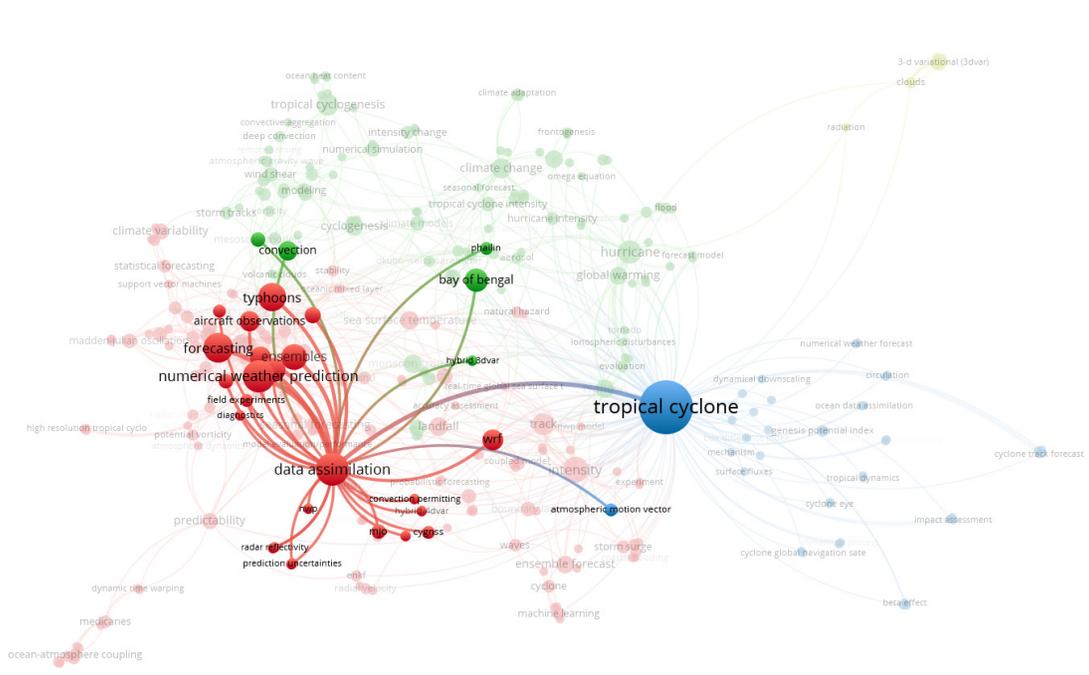


Fig. 6. Cluster 2 main keyword research paper mapping results (2)

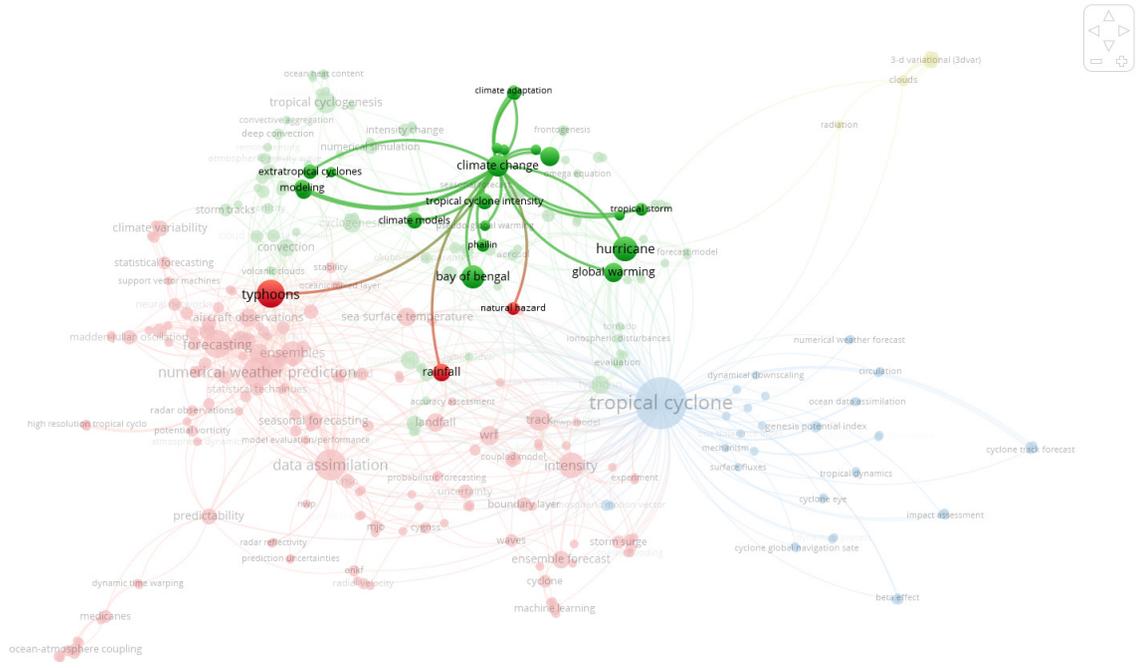


Fig. 7. Cluster 3 main keyword research paper mapping results (1)

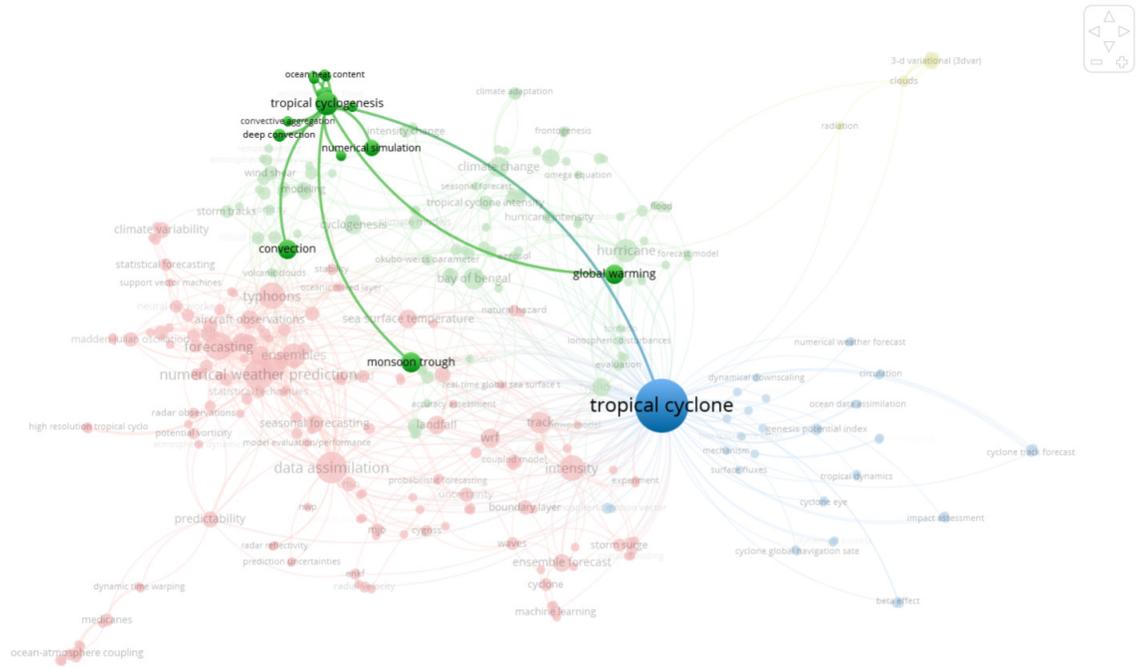


Fig. 8. Cluster 3 main keyword research paper mapping results (2)

추정에 대한 미세 조정 연구, 위성관측자료를 활용한 열대저기압 강도 변화에 따른 중심 구조 변화 연구, 지역적 환경요인을 고려한 허리케인 예측 모델 개선, 대기-해양 결합 자료동화, 위성자료와 드롭존데 자료 결합을 통한 열대저기압 예측 개선 연구, 남인도양 사이클론 활동 변화 예측을 위한 고해상도 현장 실험이 수행되었다.

Fig. 7과 Fig. 8의 Cluster 3은 Cluster 1(태풍 예측)의 서브 클러스터로 핵심키워드는 ‘climate change’, ‘global warming’, ‘climate models’, ‘bay of bengal’로 제시되어 기후변화와 태풍 간 상관관계 연구로 명명하였다. 핵심키워드와 관련하여 해수면 온도, 대기중력과, 풍속 등 열대저기압 진로 예측에 영향을 미치는 외부 요인 연구, 지구 온난화 시뮬레이션을 통한 허리케인 변화 연구, 엘니뇨가 열대저기압에 미치는 영향 분석, 기후변화로 인한 폭풍해일 영향 평가 연구가 수행되었다.

Cluster 4 역시 Cluster 1(태풍 예측)의 서브 클러스터로 출현빈도가 3개 이하인 키워드가 ‘radiance’, ‘clouds’, ‘hadley circulation’, ‘stratosphere-troposphere coupling’, ‘sudden stratospheric warming’으로 제시되어 태풍과 대기순환 상호작용 연구로 명명하였다. 관련 연구로는 중간권 및 성층권 대기에서의 대기중력과 관측 및 분석연구, 대기 순환 모형을 이용한 성층권-대류권 사이의 상호작용 연구, 열대저기압이 방출하는 중력파가 열대지역 및 북반구 대기 순환에 미치는 영향에 대한 연구가 수행된 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론 및 제언

본 연구는 2017년부터 2021년까지 발표된 논문을 대상으로 키워드 네트워크 분석(keyword Network Analysis)과 VOSviewer 프로그램을 활용한 시각화를 통해 5년간 국내외에서 수행한 주요 연구주제 키워드를 도출하고 키워드 간 연결성을 살펴 태풍 연구 동향을 파악했다.

분석 결과, 5년간 발표한 국내외의 태풍 논문은 태풍 진로 및 강도 예측(Cluster 1), 관측자료 기반 자료동화 및 모델링(Cluster 2), 기후변화와 태풍 간 상관관계 연구(Cluster 3), 태풍과 대기순환 상호작용(Cluster 4)으로 구분되었다. 특히, 국내외 논문 키워드 네트워크 분석 결과에서는 태풍 진로 및 강도 예측, 관측자료 기반 자료동화 및 모델링 연구가 다수 수행되었고, 기후변화 및 대기순환과 태풍과의 상관관계로 연구 주제가 확장되고 있는 경향을 보이고 있었다. 향후 태풍의 진로 및 강도 예측성 향

상을 위해서는 다양한 환경요인, 해양-대기 상호작용, 태풍 내부 역학과정에 대한 이해 등 태풍의 특성에 대한 연구가 중요하며, 관련하여 기후변화로 인해 변화하는 태풍 특성 변화에 대한 연구의 확대가 필요하다.

한편, 향후 태풍 R&D의 원활한 추진을 위해서는 다음과 같은 R&D 정책 및 제도적 보완이 필요하다. 첫째, 국가 태풍 R&D 역량 결집을 위해 국가태풍센터, 국가기상위성센터, 기상레이더센터, 수치모델링센터, 국립기상과학원 등 기상청 내 관계 부서 간 긴밀한 연계·협력을 기반으로 태풍 통합 R&D 프로그램을 추진할 필요가 있다.

둘째, 태풍분야 해외 우수 인력이 국내 연구에 참여할 수 있는 제도적 기반을 마련해야 한다. 현재 기상청 및 과기정통부(연구재단) 연구개발사업 연구책임자의 소속기관이 국내 기관으로 제한되어 있어 해외 연구자의 R&D 참여가 어려운 상황이다. 장기적으로 국가연구개발사업 관리 규정 내 연구책임자의 거주국 및 소속기관에 대한 제한을 한시적으로 해제하거나, 과학기술정보통신부에서 시행 중인 해외 우수연구자 지원사업을 활용하여 해외 우수연구자가 국내 연구에 참여할 수 있는 제도적 기반을 마련할 필요가 있다.

본 연구에 사용한 논문데이터는 검색 키워드를 기반으로 추출함에 따라 일부 논문의 누락이 발생할 가능성을 배제할 수 없으며, 키워드 네트워크 분석을 통한 클러스터링 과정에 대한 정확도 검증 방법이 없다는 연구방법론적 한계를 보유하고 있으므로, 분석결과는 보조적인 수단으로 활용하는 것이 바람직할 것이다. 또한 본 연구는 5년간 연구논문에서 추출한 키워드 간 관계성에만 집중하여 시기별 연구주제의 변화 양상을 반영하지 못하였고, tropical cyclone, hurricane, typhoon 등 의미가 동일한 키워드가 독립적인 키워드로 반영되는 한계점을 가지고 있다. 하지만 이러한 연구의 제약과 한계점에도 불구하고 태풍 관련 국내·외 논문에 대한 키워드 네트워크 분석(keyword network analysis)을 통해 태풍 분야의 최근 연구개발 동향을 파악하였고, 이를 토대로 태풍 예측 정확도 향상을 위한 국내 R&D 추진 방향을 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

사사

본 논문은 2021년 기상청 국가태풍센터의 자체연구 내용역사업으로 수행한 「태풍 예측기술향상을 위한 중장기 발전방안 연구」 결과를 기초로 작성하였습니다.

References

- Bass B, Irza JN, Proft J, Bedient P, Dawson C. 2017. Fidelity of the integrated kinetic energy factor as an indicator of storm surge impacts. *Nat Hazards* 85(1): 575-595. doi: 10.1007/s11069-016-2587-3
- Callon M, Courtial JP, Laville F. 1991. Co-word analysis as tool for describing the network of interactions between basic and technological research: The case of polymer chemistry. *Scientometrics* 22: 155-205. doi: 10.1007/BF02019280
- Cao W, Rohli RV. 2019. Impacts of particulate matter on Gulf of Mexico tropical cyclones. *Phys Geogr* 40(3): 294-305. doi: 10.1080/02723646.2019.1565476
- Cha TY, Bell MM, Lee WC, DesRosiers AJ. 2020. Polygonal eyewall asymmetries during the rapid intensification of hurricane Michael (2018). *Geophys Res Lett* 47(15): e2020GL087919. doi: 10.1029/2020GL087919
- Chen X, Zhong Z, Lu W. 2018. Mechanism study of tropical cyclone impact on East Asian subtropical upper-level jet: A numerical case investigation. *Asia-Pac J Atmos Sci* 54(4): 575-585. doi: 10.1007/s13143-018-0087-y
- Choudhury D, Gupta A, Rani SI, George JP. 2020. Impact of SAPHIR radiances on the simulation of tropical cyclones over the Bay of Bengal using NCMRWF hybrid-4DVAR assimilation and forecast system. *J Earth Syst Sci* 129: 209. doi: 10.1007/s12040-020-01473-2
- Christophersen H, Atlas R, Aksoy A, Dunion J. 2018. Combined use of satellite observations and Global Hawk unmanned aircraft dropwindsondes for improved tropical cyclone analyses and forecasts. *Weather Forecast* 33(4): 1021-1031. doi: 10.1175/WAF-D-17-0167.1
- Dafis S, Claud C, Kotroni V, Lagouvardos K, Rysman JF. 2020. Insights into the convective evolution of Mediterranean tropical-like cyclones. *Q J R Meteorol Soc* 146(733): 4147-4169. doi: 10.1002/qj.3896
- Fukuda J, Yamaguchi M. 2019. Determining 70 percent probability-circle radii of tropical cyclone track forecasts with multiple ensembles. *SOLA* 15: 250-256. doi: 10.2151/sola.2019-045
- Green Technology Center. 2014. Discovering and analyzing future convergence technologies for climate.
- Hlywiak J, Nolan DS. 2019. The influence of oceanic barrier layers on tropical cyclone intensity as determined through idealized, coupled numerical simulations. *J Phys Oceanogr* 49(7): 1723-1745. doi: 10.1175/JPO-D-18-0267.1
- Huang L, Wan QL, Liu CX, Huang HJ. 2020. Ensemble based diagnosis of the track errors of super typhoon Mangkhut (2018). *J Meteorol Res* 34(2): 353-367. doi: 10.1007/s13351-020-9086-x
- Jaiswal N, Kumar P, Kishtawal CM. 2019. SCATSAT-1 wind products for tropical cyclone monitoring, prediction and surface wind structure analysis. *Curr Sci* 117(6): 983-992.
- Korea Meteorological Administration. 2020. Korea Meteorological Administration 2020 abnormal climate report.
- Kutty G, Gohil K. 2017. The role of mid-level vortex in the intensification and weakening of tropical cyclones. *J Earth Syst Sci* 126: 94. doi: 10.1007/s12040-017-0879-y
- Lauton G, Marta-Almeida M, Dorfschäfer GS, Lentini CAD. 2021. Metocean modulators of the first recorded South Atlantic hurricane: Catarina. *Geophys Res Lett* 48(6): e2020GL091416. doi: 10.1029/2020GL091416
- Lee WH. 2006. Development of new technology derivation methodology and indicators through analysis of scientific and technological information. Seoul, Korea: Science and Technology Policy Institute. Policy Report 2005-9.
- Li W, Yue JP, Yang Y, Li Z, Guo JY, Pan Y, Zhang KF. 2017. Analysis of ionospheric disturbances associated with powerful cyclones in East Asia and North America. *J Atmos Sol Terr Phys* 161: 43-54. doi: 10.1016/j.jastp.2017.06.012
- Li Y, Toumi R. 2018. Improved tropical cyclone intensity forecasts by assimilating coastal surface currents in an idealized study. *Geophys Res Lett* 45(18): 10019-10026. doi: 10.1029/2018GL079677
- Lim AH, Jung JA, Nebuda SE, Daniels JM, Bresky W, Tong M, Tallapragada V. 2019. Tropical cyclone

- forecasts impact assessment from the assimilation of hourly visible, shortwave, and clear-air water vapor atmospheric motion vectors in HWRF. *Weather Forecast* 34(1): 177-198. doi: 10.1175/WAF-D-18-0072.1
- Lin KJ, Yang SC, Chen SS. 2018. Reducing TC position uncertainty in an ensemble data assimilation and prediction system: A case study of typhoon Fanapi (2010). *Weather Forecast* 33(2): 561-582. doi: 10.1175/WAF-D-17-0152.1
- Liu S, Tao D, Zhao K, Minamide M, Zhang F. 2018. Dynamics and predictability of the rapid intensification of super typhoon Usagi (2013). *J Geophys Res: Atmos* 123(14): 7462-7481. doi: 10.1029/2018JD028561
- Martinez J, Bell MM, Rogers RF, Doyle JD. 2019. Axisymmetric potential vorticity evolution of hurricane Patricia (2015). *J Atmos Sci* 76(7): 2043-2063. doi: 10.1175/JAS-D-18-0373.1
- Ministry of the Interior and Safety. 2020. 2019 disaster annual report.
- National Typhoon Center of Meteorological Administration. 2021a. Korean peninsula impact typhoon analysis report 2020.
- National Typhoon Center of Meteorological Administration. 2021b. Research on mid-to long-term development plans to improve typhoon prediction technology.
- Ng CHI, Vecchi GA. 2020. Large-scale environmental controls on the seasonal statistics of rapidly intensifying North Atlantic tropical cyclones. *Clim Dyn* 54(9): 3907-3925. doi: 10.1007/s00382-020-05207-4
- Oh YJ, Moon IJ, Kim SH, Lee W, Kang K. 2016. Validations of typhoon intensity guidance models in the Western North Pacific (in Korean with English abstract). *Atmosphere* 26(1): 1-18. doi: 10.14191/Atmos.2016.26.1.001
- Olander TL, Velden CS. 2019. The Advanced Dvorak Technique (ADT) for estimating tropical cyclone intensity: Update and new capabilities. *Weather Forecast* 34(4): 905-922. doi: 10.1175/WAF-D-19-0007.1
- Pan JS, Teng DG, Zhang FQ, Zhou LL, Luo L, Weng YH, Zhang YJ. 2018. Dynamics of local extreme rainfall of super typhoon Soudelor (2015) in East China. *Sci China Earth Sci* 61(5): 572-594. doi: 10.1007/s11430-017-9135-6
- Potter H, DiMareo SF, Knap AH. 2019. Tropical cyclone heat potential and the rapid intensification of hurricane Harvey in the Texas bight. *J Geophys Res: Oceans* 124(4): 2440-2451. doi: 10.1029/2018JC014776
- Qian Y, Murakami H, Nakano M, Hsu PC, Delworth TL, Kapnick SB, Ramaswamy V, Mochizuki Y, Morioka Y, Doi T, Kataoka T, Nasuno T, Yoshida K. 2019. On the mechanisms of the active 2018 tropical cyclone season in the North Pacific. *Geophys Res Lett* 46(21): 12293-12302. doi: 10.1029/2019GL084566
- Ruiz-Salcines P, Appendini CM, Salles P, Rey W, Vigh JL. 2021. On the use of synthetic tropical cyclones and hypothetical events for storm surge assessment under climate change. *Nat Hazards* 105(1): 431-459. doi: 10.1007/s11069-020-04318-9
- Russell JO, Aiyyer A, White JD, Hannah W. 2017. Revisiting the connection between African easterly waves and Atlantic tropical cyclogenesis. *Geophys Res Lett* 44(1): 587-595. doi: 10.1002/2016GL071236
- Ryan K, Bucci L, Delgado J, Atlas R, Murillo S. 2019. Impact of Gulfstream-IV dropsondes on tropical cyclone prediction in a regional OSSE system. *Mon Weather Rev* 147(8): 2961-2977. doi: 10.1175/MWR-D-18-0157.1
- Shibata N, Kajikawa Y, Takeda Y, Matsushima K. 2008. Detecting emerging research fronts based on topological measures in citation networks of scientific publications. *Technovation* 28(11): 758-775. doi: 10.1016/j.technovation.2008.03.009
- Singh SK, Prasad VS. 2017. Impact of megha-tropiques SAPHIR radiances in T574L64 global data assimilation and forecasting system at NCMRWF. *Int J Remote Sens* 38(16): 4587-4610. doi: 10.1080/01431161.2017.1323279
- Smith M, Toumi R. 2021. A dipole of tropical cyclone outgoing long-wave radiation. *Q J R Meteorol Soc* 147(734): 166-180. doi: 10.1002/qj.3912
- Soloviev AV, Lukas R, Donelan MA, Haus BK, Ginis I.

2017. Is the state of the air-sea interface a factor in rapid intensification and rapid decline of tropical cyclones. *J Geophys Res: Oceans* 122(12): 10174-10183. doi: 10.1002/2017JC013435
- Waltman L, Van Eck NJ, Noyons ECM. 2010. A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *J Informetr* 4(4): 629-635. doi: 10.1016/j.joi.2010.07.002
- Wang LX, Lin TC. 2019. Forests affected by frequent and intense typhoons challenge the intermediate disturbance hypothesis. *Biotropica* 51(6): 797-801. doi: 10.1111/btp.12711
- Wang XC, Han SZ, Wang X, Dong YJ. 2018. The influence of two kinds of el nino events on the strong tropical cyclone generation and strength in the Pacific Ocean. *J Ocean Univ China* 17(5): 1011-1018. doi: 10.1007/s11802-018-3560-4
- Yamada Y, Kodama C, Satoh M, Nakano M, Nasuno T, Sugi M. 2019. High-resolution ensemble simulations of intense tropical cyclones and their internal variability during the El Niños of 1997 and 2015. *Geophys Res Lett* 46(13): 7592-7601. doi: 10.1029/2019GL082086
- Yamaguchi M, Maeda S. 2020. Slowdown of typhoon translation speeds in mid-latitudes in September influenced by the pacific decadal oscillation and global warming. *J Meteorol Soc Jpn Ser II* 98(6): 1321-1334. doi: 10.2151/jmsj.2020-068
- Yang YX, Yang L, Wang FM. 2017. Analyzing the influences of two types of El Niño on Tropical Cyclone Genesis with a modified genesis potential index. *Chin J Oceanol Limnol* 35(2): 452-465. doi: 10.1007/s00343-016-5295-7
- Zhang JA, Rogers RF, Tallapragada V. 2017. Impact of parameterized boundary layer structure on tropical cyclone rapid intensification forecasts in HWRF. *Mon Weather Rev* 145(4): 1413-1426. doi: 10.1175/MWR-D-16-0129.1