Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 35, No. 3 (2025) pp. 385-393
https://doi.org/10.14191/Atmos.2025.35.3.385
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 노 트
(Research Note)

울릉도와 독도에 영향을 미치는 열대저기압 활동의 기후적 특성과 장기 변화

이지영[1] · 박두선[1),2),3)*] · 임교선[1),3)]
[1)]경북대학교 대기과학과 BK21 위험기상 교육연구팀, [2)]경북대학교 지구과학교육과,
[3)]경북대학교 대기원격탐사연구소

(접수일: 2025년 6월 20일, 게재확정일: 2025년 7월 12일)

Climatological Characteristics and Long-term Changes of Tropical Cyclones Affecting Ulleung-do and Dok-do

Ji-Yeong Lee[1)], Doo-Sun R. Park[1),2),3)*], and Kyo-Sun Lim[1),3)]

[1)]BK21 Weather Extremes Education & Research Team, Department of Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea
[2)]Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu, Korea
[3)]Center for Atmospheric REmote Sensing (CARE), Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Manuscript received 20 June 2025; accepted 12 July 2025)

Abstract Tropical cyclone (TC) activity on Ulleung-do and Dok-do must be defined and analyzed separately from that on the mainland of Korea (i.e., the Korean Peninsula) because they are located 130 km and 216 km from the eastern coast of the Korean Peninsula, respectively. Furthermore, the recent increase in the frequency and intensity of TCs toward the eastern part of the Korean Peninsula implies a growing impact on the islands. Hence, we investigated the climatological characteristics and long-term change of TC activity on Ulleung-do and Dok-do, as well as the underlying environmental changes, for the period 1945~2022. According to our results, TCs mainly influence the islands from July to September (JAS) in terms of frequency, but with peak intensity in September and October. There was a statistically significant change in 1985 in the number of TCs affecting the Ulleung-do and Dok-do, marking an increase in frequency of 0.45 and a decrease in central pressure of 6.09 hPa. In contrast, no significant change point was observed for TCs affecting the mainland of Korea. The increase in the frequency of TCs affecting the Ulleung-do and Dok-do is attributed to the strengthening of the subtropical high over the east of Japan. Meanwhile, the stronger TCs are driven by increased sea surface temperature (SST) and weakened vertical wind shear along their tracks. Our results suggest that a statistical seasonal forecasting model tailored to Ulleung-do and Dok-do is required.

Key words: Tropical cyclones, Ulleung-do, Dok-do, Korea, Climate

*Corresponding Author: Doo-Sun R. Park, Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea.
Phone: +82-53-950-5918, Fax: +82-53-950-5946
E-mail: dsrpark@knu.ac.kr

1. 서 론

동해상의 유일한 도서 지역인 울릉도와 독도는 섬이라는 지리적 요인으로 인해 열대저기압 영향에 취약하다. 울릉도, 독도와 같은 도서 지역은 지리적으로 고립되어 있으며 인구 및 시설이 해안가에 몰려 있기 때문에 열대저기압과 같은 자연재해에 취약한 것으로 알려져 있다(Adrianto and Matsuda, 2002). 국가재난안전포털의 자연재난상황통계 자료를 활용하여 1998~2022년의 경상북도 울릉군의 피해액을 2022년 화폐가치 기준으로 조사한 결과, 열대저기압으로 인한 피해액이 전체 피해액의 88%에 달하였다. 특히, 항만, 어항, 도로 분야 피해액이 열대저기압 총피해액의 77%로 크게 나타났는데, 이런 시설들이 제 기능을 하지 못하면 주민들과 물자 수송이 마비되고 지역이 장기간 고립될 수 있어 복구가 어려워지고 더 큰 피해가 발생할 수 있다(NDSP, 2025).

울릉도, 독도 지역의 수자원 공급 측면에서도 열대저기압은 중요한 역할을 담당하고 있다. 1975년부터 2022년까지 울릉도의 월평균 강수량은 8월과 9월에 각각 170.83 mm, 164.65 mm로 가장 높은 강수량을 보인다. 마찬가지로 독도의 2010~2022년 동안 월평균 강수량은 8월에 79.12 mm, 9월에 66.96 mm로 연간 가장 높다. 이와 같은 8~9월 울릉도와 독도의 많은 강수량은 2차 우기와 높은 관련성을 가지고 있으며, 2차 우기의 주된 원인은 열대저기압으로 알려져 있다(Song and Ho, 2003; Cha et al., 2007).

최근 동해를 지나가는 열대저기압의 빈도수와 강도가 증가함에 따라 우리나라 최동단에 위치한 울릉도-독도에 미치는 열대저기압의 영향도 증가했을 것으로 여겨진다. 한반도 영향 열대저기압을 분석한 기존 연구에 따르면, 열대저기압의 경로가 과거에 비해 영동 산간 및 해안 지역으로 이동하면서 열대저기압이 남해와 동해를 지나가는 비율이 증가하여 해당 지역에서 열대저기압 피해 규모가 증가하고 있다(Park et al., 2006; Park et al., 2008a; Seol, 2010). 남동쪽으로 상륙하는 한반도 영향 열대저기압의 전향점은 일반적으로 중국 내륙보다는 동중국해를 지나간다. 열대저기압은 해상을 지나며 에너지를 공급받아 강한 강도를 유지할 수 있기 때문에 최근의 한반도 상륙 열대저기압 경로 변화는 강한 열대저기압의 비율을 증가시켰다(Choi and Kim, 2007). 이는 강한 열대저기압 대부분의 이동 경로가 한반도 동쪽으로 더 치우친 경향이 있다는 Park et al. (2016)과 Nam et al. (2023)의 연구 결과와 일맥상통한다. Ahn et al. (2008)은 남한에 상륙하지 않고 서해와 동해를 통과하는 열대저기압 활동의 장기 변화를 비교하여 분석하였는데, 서해를 통과하는 열대저기압은 발생빈도와 강도가 거의 변하지 않은 반면 동해를 통과하는 열대저기압은 발생빈도와 강도 모두 점차 증가한다는 사실을 밝혔다. 이는 동해상에 위치한 울릉도, 독도에 최근 열대저기압이 미치는 영향이 증가할 수 있었음을 시사한다.

울릉도-독도에 영향을 미치는 열대저기압은 한반도 영향 열대저기압과는 다른 기후적 특성을 보일 수 있음에도 불구하고 아직까지 울릉도-독도 영향 열대저기압 활동 변화를 직접 살펴본 연구 결과는 거의 없었다. Nam et al. (2018)에 따르면 열대저기압 경로의 동서 방향 차이가 열대저기압의 강도나 크기보다 열대저기압 피해의 범위와 분포에 더 지배적인 영향을 미치며, 동서 방향 상륙 위치가 250 km만 달라도 열대저기압 피해의 범위와 분포가 크게 달라질 수 있다. 울릉도와 독도는 한반도로부터 각각 130 km, 216 km 이상 동쪽으로 떨어진 위치에 있기 때문에, 열대저기압 피해 분포의 열대저기압 경로 민감도를 고려할 때, 울릉도-독도 지역만을 위한 별도의 영향 열대저기압 정의와 분석이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 울릉도-독도 영향 열대저기압의 진로, 빈도, 강도 등의 기후적인 특성을 분석하였다. 그리고 울릉도-독도 영향 열대저기압 활동의 장기변동성을 분석하고 그 원인을 분석하였다.

2. 자료 및 방법

울릉도-독도 영향 열대저기압의 기후 분석을 위해 1945년부터 2022년의 기간에 대해 Joint Typhoon Warning Center (JTWC)의 최적 경로(best track) 자료를 사용하였다. 최적 경로 자료는 6시간 간격 자료이므로, 울릉도-독도 영향 면적이 좁아 영향 열대저기압으로 선택되지 않는 사례를 최소화하기 위해 기존 연구를 따라 자료를 1시간 간격으로 선형내삽하였다(Park et al., 2011, 2014; Nam et al., 2018). 최적 경로 자료에서 2000년 이전의 자료에는 중심기압이 존재하지 않아 Atkinson and Holliday (1977)에서 제안한 공식을 사용하여 최대풍속으로부터 중심기압을 산출하였다[식(1)].

$$V_{max} = 6.7(1{,}010 - p_c)^{0.644} \quad (1)$$

여기서 p_c는 hPa 단위의 중심기압이고 V_{max}는 knot 단위의 최대풍속을 나타낸다.

기상관측소 자료는 울릉도 종관기상관측(ASOS)과 독도 방재기상관측(AWS) 자료의 일강수량과 최대풍속, 최대순간풍속 자료를 사용하였다. 독도는 모든 일 자료가 존재하는 2010년부터 2022년까지의 자료를 사용하였고, 결측이 존재하는 시기의 열대저기압 사례는 제외하였다.

기존 연구를 참고하여 울릉도-독도 영향 열대저기

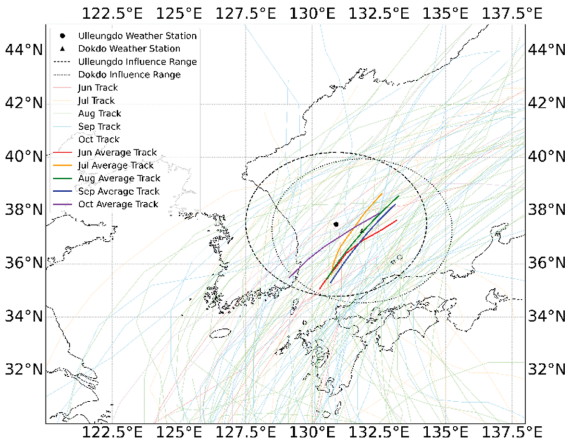

Fig. 1. Influence area of Ulleung-do and Dok-do, and mean (thick lines) and all (thin lines) TC tracks for each month during 1945~2022. A dot and dashed line indicate the location of the weather station and influence area of Ulleung-do, while a triangle and dotted line indicate those of Dok-do.

압은 울릉도 ASOS 또는 독도 AWS 위·경도를 기준으로 반경 300 km 이내에 열대저기압의 중심이 위치할 때로 정의하였고(Fig. 1), 한반도 영향 열대저기압은 열대저기압의 중심이 한반도 해안선의 300 km 이내로 진입한 경우로 정의하였다(Park et al., 2016; Nam et al., 2018; Kim et al., 2023; Nam et al., 2023). 여기서 열대저기압은 생애에 한 번이라도 최대풍속이 34 knots 이상 도달한 사례로 정의하였으며, 열대저기압에 의한 간접적인 영향을 고려하기 위해 최대풍속이 34 knots에 도달한 이후에는 최대풍속이 34 knots보다 약화된 상태까지 포함하여 분석하였다(Park et al., 2008b). 열대저기압 영향 기간은 열대저기압의 중심이 앞서 정의한 영향 반경 내에 체류한 시간으로 정의하였다. 진입 강도는 영향 반경 내 처음 진입한 시점의 중심기압, 최대풍속 값으로 정의하였으며, 누적 강수량은 영향 기간 동안의 일강수량을 누적하여 계산하였다.

진로 밀도(track density)는 $5^{o} \times 5^{o}$ 격자 안에 들어온 열대저기압 경로 빈도수를 평균하여 산출하였으며, 동일한 열대저기압이 같은 격자 내를 여러 번 이동하는 경우 한 번만 계산에 포함하였다(Lee et al., 2019). 진로 밀도 분석에는 북위 30^{o} 위로 올라오는 열대저기압의 발생부터 소멸까지 전체 수명 동안의 경로를 사용하였다.

울릉도-독도 영향 열대저기압 활동의 장기 변화를 분석하기 위해 변화점 분석(change point analysis)을 적용하였다(Chu, 2002). 본 연구에서는 20년 단위 윈도우(window)를 기준으로 변화점(change point)을 도출하였다. 구체적으로는 앞뒤로 10년의 자료가 존재하는 1955년부터 2012년까지 각 연도를 중심으로 전후 10년씩 총 20년 단위로 구간을 설정하였다. 이후 각 연도를 기준으로 전후 10년간 열대저기압 빈도수 차이에 대한 p-value를 산출하여 95% 신뢰구간에서 유의한 연도를 변화점으로 산출하였다. 선정된 변화점을 기준으로 변화점 전 기간을 P1, 이후 기간을 P2로 정의한 후 각 기간에 대해 영향 열대저기압의 진입강도와 영향 기간의 평균을 구하여 열대저기압 활동의 변화 경향성과 통계적 유의성을 분석하였다. 통계적 유의성은 Welch's *t*-test를 적용하여 판단하였다.

대기-해양장 분석은 ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) 자료를 사용하였다(Hersbach et al., 2020). ERA5 자료의 기본 수평해상도는 $0.25^{o} \times 0.25^{o}$이지만, 본 연구에서는 대규모 순환장 변화를 살펴보기 위해 이중선형보간법(bilinear interpolation)을 적용하여 $2.5^{o} \times 2.5^{o}$ 해상도로 변환 후 분석을 수행하였다. 분석에 사용한 변수는 해수면 온도(sea surface temperature; SST), 500 hPa 지위(geopotential), 500 hPa의 동서 및 남북 방향 바람(zonal and meridional wind)이다. 지위고도(geopotential height; GPH)는 지위를 표준중력가속도로 나누어 계산하였으며, 연직 바람 시어(vertical wind shear; VWS)는 식(2)와 같이 200 hPa과 850 hPa의 수평 바람벡터 차이의 크기로 계산하였다(Camargo et al., 2007).

$$\mathrm{VWS} = \sqrt{(u_{200} - u_{850})^2 + (v_{200} - v_{850})^2} \quad (2)$$

여기서 u_{200}와 u_{850}는 각각 200 hPa과 850 hPa에서의 동서 방향 바람이고 v_{200}과 v_{850}은 남북 방향 바람이다.

3. 연구 결과

3.1 열대저기압 활동 분석

분석 결과에 따르면 한반도 영향 열대저기압 활동은 울릉도-독도 영향 열대저기압 활동과 변동성이 완전히 일치하지 않는 것으로 보인다(Fig. 2). 1945년부터 2022년까지 한반도 영향 열대저기압과 울릉도-독도 영향 열대저기압의 연간 빈도수의 시계열을 살펴보면 경년 변동성은 유사하지만 결정계수는 0.2883으로 한반도 영향 열대저기압은 울릉도-독도 영향 열대저기압 변동성의 약 30% 정도밖에 설명하지 못한다. 통계적으로는 유의하게 높은 상관성이긴 하지만, 완전히 동일한 변동성을 보인다고 보긴 어려우므로 울릉도-독도 영향 열대저기압 활동을 별도로 분석할 필요가 있다.

울릉도-독도 영향 열대저기압의 기후적 특성을 분석한 결과, 울릉도-독도 영향 열대저기압은 대부분

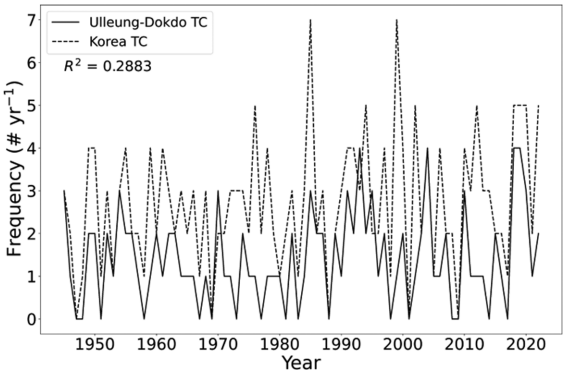

Fig. 2. Time series of the frequencies of TCs affecting the Ulleung-do and Dok-do (solid line) and TCs affecting mainland of Korea (dashed line) during 1945~2022, and the coefficient of determination (R^2) between the two time series.

7~9월에 집중되어 있는 것을 확인하였다(Table 1). 참고로 열대저기압 영향 월은 열대저기압이 영향 반경 내로 진입한 시점의 월로 정의하였다. 울릉도-독도 영향 열대저기압 빈도수는 8월에 0.564로 가장 많으며, 9월에 0.436으로 두 번째, 7월에 0.244로 세 번째로 많았다. 반면, 5월에 0.013, 6월과 10월에 0.077로 7~9월에 비해 상대적으로 매우 적은 열대저기압이 울릉도-독도에 영향을 미쳤다. 이에 따라 이후 분석은 7~9월만을 대상으로 수행하였다(Figs. 3-6).

한편, 울릉도-독도 영향 열대저기압의 강도, 영향 기간은 10월과 6월에도 7~9월만큼 높은 값을 보였다. 최적 경로 기준 중심 기압과 최대 풍속을 보면 진입 강도는 9월(975.44 hPa, 62.97 knots)에 가장 강하며, 8월(982.18 hPa, 54.64 knots)과 10월(983.29 hPa, 54.44 knots)에 비슷한 수준으로 각각 두 번째, 세 번째로 강하게 나타났다. 7월(987.82 hPa, 47.57 knots)은 10월보다 강도가 약하였으며, 6월(987.46 hPa, 49.31 knots)과 비슷한 수준으로 나타났다. 영향 기간은 7월(15.57 hr)에 가장 길게 나타났으며, 8월(12.80 hr)이 두 번째, 6월(11.83 hr)이 세 번째로 길게 나타났다. 9월(10.23 hr)과 10월(9.33 hr)은 다른 월에 비해 상대적으로 영향 기간이 짧게 나타났다. 월별 진로상의 차이는 거의 없으며 10월의 진로는 오히려 다른 월보다 길다는 점을 고려할 때(Fig. 1), 이는 여름에 비해 가을에 상층 제트가 더 강해 열대저기압의 이동속도가 더 빨랐기 때문으로 여겨진다. 최적 경로에서 5월은 다른 월에 비해 강도와 영향 기간 모두 작게 나타났다. 그러나 5월에는 영향 열대저기압이 1개뿐이며 영향 기간도 1시간에 불과하여 유의미한 결과로 보기에는 한계가 있다. ASOS와 AWS 기준으로는 울릉도와 독도 모두 9월과 10월에 거의 비슷한 수준으로 다른 월에 비해 최대풍속과 누적 강수량이 크게 나타났다. 특히, 최적 경로의 진입 강도와 달리 누적 강수량은 8월에 비해 10월에 더 많은 양을 기록했다. 이는 여름철에 비해 가을철에 더 강한 경압성으로 인해 열대저기압에 의한 호우 발생 가능성이 더 높기 때문으로 여겨진다(Park et al., 2023). 한편, 독도 AWS의 가용 가능 기간(2010~2022년) 동안에는 5월과 6월에 영향

Table 1. Monthly average of TC frequency (#), central pressure from best track (hPa), maximum sustained wind speed from best track (knot), effective period (hour), accumulated rainfall (mm), and daily maximum wind speed from weather stations (knot).

Month	5	6	7	8	9	10
Frequency	0.013	0.077	0.244	0.564	0.436	0.077
Central pressure from best track	996.97	987.46	987.82	982.18	975.44	983.29
Maximum sustained wind speed from best track	35.00	49.31	47.57	54.64	62.97	54.44
Effective period	1	11.83	15.57	12.80	10.23	9.33
Ulleungdo Accumulated rainfall	26.70	56.73	21.94	31.66	57.35	64.80
Ulleungdo Daily maximum wind speed	16.70	27.75	24.77	29.21	33.30	32.75
Dokdo Accumulated rainfall	-	-	2.75	5.42	28.17	28.00
Dokdo Daily maximum wind speed	-	-	29.06	36.93	40.74	43.93

을 준 열대저기압 사례가 없었다.

울릉도-독도 영향 열대저기압과 한반도 영향 열대저기압 빈도수의 장기변화 경향성을 변화점 분석 기법을 적용하여 분석한 결과, 변화점은 울릉도-독도 영향 열대저기압에서만 나타났다. 20년 단위 윈도우를 적용한 변화점 분석에서 울릉도-독도 영향 열대저기압 빈도수는 1985년에만 95% 신뢰구간에서 유의한 차이를 보였다(Fig. 3a의 노란색 선). 반면, 한반도 영향 열대저기압은 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의한 변화점이 나타나지 않았다(Fig. 3b의 노란색 선). 이 결과를 따라 1985년 이전 기간인 1945~1984년을 P1으로, 이후 기간인 1985~2022년을 P2로 정의하였다. 한편, 기존 몇몇 연구에 따르면 1980년대를 기점으로 climate regime shift가 있었다는 연구결과가 보고된 바 있었다. Reid et al. (2016)은 1985년을 전후로 북반구 지표면 온도와 북태평양의 SST가 가장 크게 증가하였으며, 급격한 온도 증가가 폭풍과 같은 환경 재해의 심화를 유발할 수 있다고 밝혔다. 또한, Park et al. (2011)에 따르면 한국과 일본에 상륙하는 열대저기압의 빈도수가 1980년대 후반을 기점으로 증가하였다. 이는 본 연구에서 울릉도-독도 영향 열대저기압이 1985년을 기점으로 증가한 결과와 시기적으로

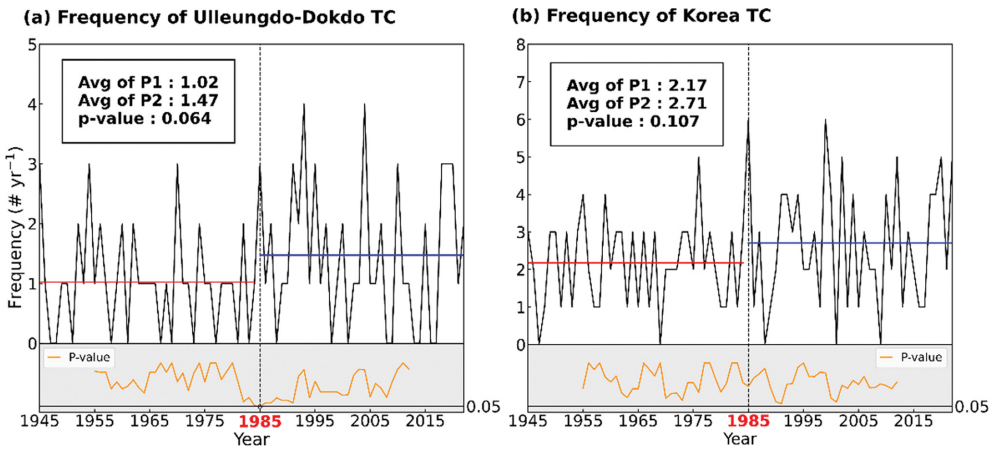

Fig. 3. Time series of TC frequency in JAS during 1945~2022 and 20-year moving-window p-values (yellow line) for (a) TCs affecting Ulleung-do and Dok-do and (b) TCs affecting mainland of Korea. The black circle marks the year when the 20-year moving-window p-value is significant at the 95% level. The red label denotes the change point. Boxed values indicate the mean TC frequency during P1 (red line) and P2 (blue line), and the p-value for their difference.

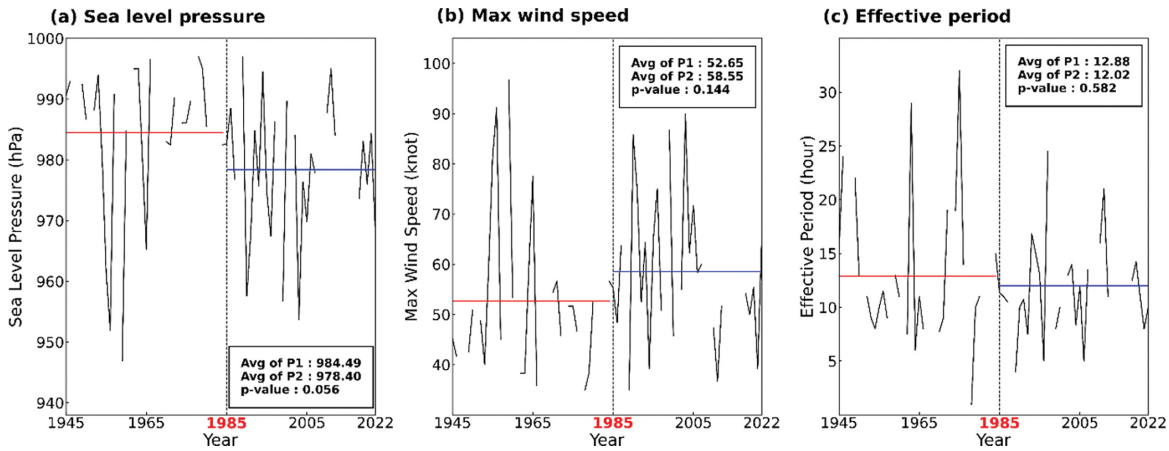

Fig. 4. Time series of (a) central pressure (hPa), (b) maximum sustained wind speed (knot), and (c) effective period (hour) in JAS during 1945~2022 for TCs affecting Ulleung-do and Dok-do. The red label denotes the change point. Boxed values indicate the mean values of each variable during P1 (red line) and P2 (blue line), and the p-value for their difference.

일치하는데, 울릉도와 독도가 동해안에 위치해 있다는 점을 고려할 때 일맥상통한 결과로 해석된다.

1985년을 기준으로 울릉도-독도 영향 열대저기압 빈도수는 유의미하게 증가하는 경향성을 보인 반면, 한반도 영향 열대저기압은 증가하는 경향은 보이지만 통계적으로 유의미하지는 않았다. P1, P2 기간의 울릉도-독도 영향 열대저기압의 평균 빈도수는 각각 1.02개, 1.47개이고 그 차이는 0.45개로 90% 신뢰구간에서 통계적으로 유의미하였다. 한반도 영향 열대저기압 빈도수는 P1 시기에 2.17개에서 P2 시기에 2.71개로 증가하지만 90% 신뢰구간에서 유의미하지 않았다. 한편, 주요 영향 월(7~9월)로 한정하더라도 한반도 영향 열대저기압 활동과 울릉도-독도 영향 열대저기압 활동 사이의 결정계수는 0.301로 앞서 전체 계절 동안의 비교 결과(Fig. 2)와 동일하게 나타났다.

울릉도-독도 영향 열대저기압의 강도도 유의미하게 증가하는 경향성을 보였다. 울릉도-독도 영향 열대저기압의 중심기압은 P1에 984.49 hPa에서 P2에 978.40 hPa로 감소하였으며, 이는 90% 신뢰구간에서 유의미하였다(Fig. 4a). 하지만 최대풍속 측면에서는 52.65 knots에서 58.55 knots로 증가하는 경향성은 보이나 90% 신뢰구간에서 유의미하지 않았다(Fig. 4b). 영향기간도 P1에 12.88 hr, P2에 12.02 hr로 큰 변화를 보이지 않았으며, 통계적으로도 90% 신뢰구간에서 유의미하지 않았다(Fig. 4c).

3.2 빈도수 및 강도 증가 원인 분석

울릉도-독도 영향 열대저기압 빈도수가 증가하는 원인을 분석하기 위해 진로 밀도 변화와 관련 대기장을 분석한 결과, P2 기간에 P1 기간에 비해 대만과 동중국해 부근에서 한반도로 향하는 열대저기압 경로와 일본 남동쪽의 열대저기압 경로가 통계적으로 유의미하게 증가한 사실을 확인하였다(Fig. 5a). 이는 일본열도 동쪽에 아열대 고기압의 세력이 강화와 관련된 것으로 여겨진다(Fig. 5b). 일본열도 상공의 고기압성 아노말리를 따라 남풍계열의 바람 벡터 아노말리가 일본 남부에 위치하며, 이는 동중국해와 일본 열도 남쪽에서 열대저기압이 북상하기에 유리한 환경으로 작용한 것으로 분석된다(Fig. 5b). 이들 지점에서 진로 밀도가 증가함에 따라 울릉도-독도 열대저기압의 영향 빈도수가 유의미하게 증가하게 된 것으로 여겨진다. 한편, 남중국해로 향하는 열대저기압의 진로 밀도는 감소하였는데, 이런 공간 패턴은 아열대 고기압의 후퇴와 몬순 골의 강화로 북쪽으로 향하는 흐름이 강해져 남중국해로 향하는 열대저기압은 감소하고 동아시아로 향하는 열대저기압은 증가했다는 선행 연구 결과와 일치한다(Tu et al., 2009; Park et al., 2011; Wang et al., 2011).

울릉도-독도 영향 열대저기압의 강도는 열대저기압 경로상 SST 증가, VWS 약화로 인해 증가한 것으로 분석되었다. 높은 SST는 열대저기압이 발달하기에 유리한 조건이다(Emanuel, 1999). Figure 6a를 보면 SST는 거의 모든 북서태평양 지역에서 유의미하게 증가하였으며, 이로 인해 한반도 영향 열대저기압 상륙강도는 증가한 것으로 알려져 있다(Park et al., 2011; Park et al., 2014; Lee et al., 2019). 마찬가지로 울릉도-독도 영향 열대저기압도 SST 증가로 인해 울릉도-독도 영향 반경 내 상륙할 때까지 강한 강도를 유지할 수 있었을 것이다. 또한, 경로상의 약한 VWS도 열대저기압의 구조를 파괴하는 과정을 억제하여(Gray,

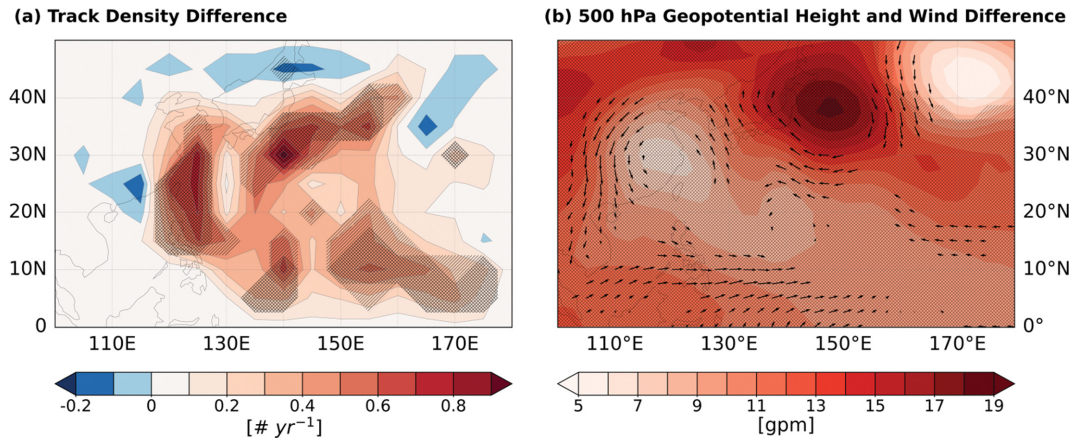

Fig. 5. Differences in (a) track density (#) of TCs that moved north of 30°N, and (b) 500 hPa geopotential height (gpm) and horizontal wind vectors between P1 and P2 (i.e., P2 minus P1). The linear hatching and crosshatching indicate differences are significant at the 90% and 95% confidence levels, respectively. Vectors significant at the 90% confidence level are only plotted.

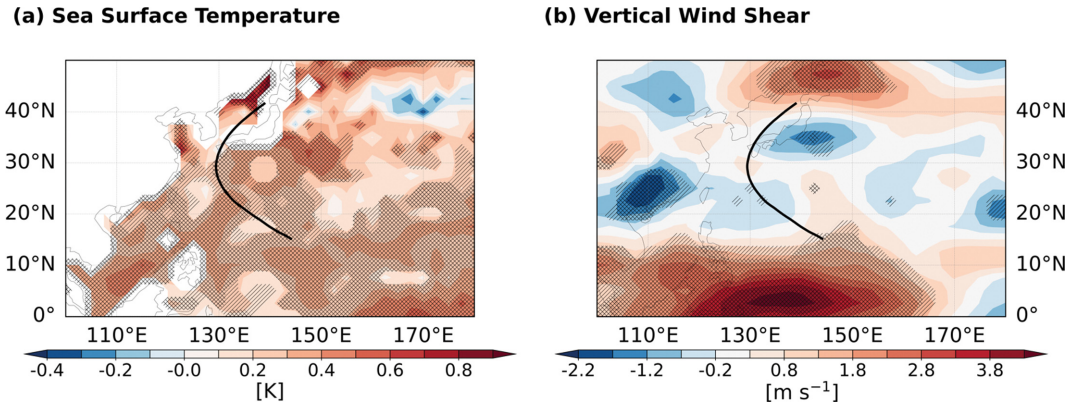

Fig. 6. Differences in (a) sea surface temperature (SST) (*K*), and (b) vertical wind shear (VWS) (m s^{-1}) between P1 and P2 (i.e., P2 minus P1). The linear hatching and crosshatching indicate differences are significant at the 90% and 95% confidence respectively. Black solid line shows the mean track of TCs affecting Ulleung-do and Dok-do.

1968; Wong and Chan, 2004), 열대저기압이 강도를 오래 유지할 수 있도록 도와주었을 것으로 보인다(Fig. 6b). 다만, 경로상의 VWS 약화는 SST 증가만큼 뚜렷하지 않아 그 영향은 상대적으로 작았을 것으로 판단된다. Park et al. (2014)은 서태평양 SST 증가에 따른 워커 순환 강화가 열대저기압의 최대강도 지점을 필리핀 동부 해역에서 동아시아 해안선으로 북서진시켜 중위도 동아시아에 상륙하는 열대저기압의 강도가 강해졌다는 것을 밝힌 바 있는데, 울릉도-독도 영향 열대저기압의 강도 증가는 이러한 열대저기압의 최대강도 지점 이동의 영향을 받았을 것이다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 울릉도-독도 영향 열대저기압의 기후적 특성을 분석하고, 변화점 분석 기법을 활용하여 장기변동성을 분석한 후, 그 변화 원인을 분석하였다. 울릉도-독도 영향 열대저기압과 한반도 영향 열대저기압의 1945~2022년 연간 빈도수의 결정계수는 0.2883으로, 한반도 영향 열대저기압이 울릉도-독도 영향 열대저기압 변동성의 약 30% 정도를 설명하였다. 통계적으로 유의하게 높은 상관성이지만, 완벽히 같은 변동성이라 보기는 어려우므로 본 연구에서는 울릉도-독도 영향 열대저기압을 별도로 분석하였다.

울릉도-독도 영향 열대저기압의 기후적 특성 분석 결과, 울릉도-독도는 주로 7~9월에 열대저기압의 영향을 많이 받은 것으로 나타났다. 울릉도-독도 영향 열대저기압의 빈도수는 8월이 가장 많았고 이어서 9월과 7월 순이었다. 반면, 열대저기압 강도와 영향 기간은 7~9월이 아닌 다른 월에 더 강하게 나타나기도 하였다. 최적 경로 기준 열대저기압의 진입 강도는 9월에 가장 강하고 8, 10월이 비슷한 수준으로 그 뒤를 이었다. 영향 기간은 7, 8, 6월 순으로 길었으며, 9월과 10월은 가을의 강한 상층 제트의 영향으로 이동속도가 빨라 상대적으로 짧게 나타났다. ASOS와 AWS 기준으로는 울릉도와 독도 모두 9, 10월에 최대풍속과 누적 강수량이 컸으며, 누적 강수량은 경압성이 강한 10월이 8월보다 많았다. 한편, 울릉도 ASOS 자료에 따르면 6월의 평균 최대풍속이 7월보다 더 강하게 나타났지만, 최댓값 측면에서는 6월이 40.82 knots로 7월의 45.29에 비해 약하였다. 다만, 5, 6, 10월 평균값의 경우, 영향 열대저기압 개수가 적어 평균값의 대표성이 다른 월에 비해 낮을 수 있다는 점을 고려할 때 해석상에 유의가 필요하다.

울릉도-독도 영향 열대저기압 기후 분석을 바탕으로 주요 영향 기간인 7~9월에 집중하여 열대저기압 활동의 장기변화 경향성을 분석하였다. 울릉도-독도 영향 열대저기압 빈도수의 변화점 분석 결과, 변화점은 1985년이었으며 이를 기점으로 빈도수와 강도가 유의미하게 증가하였다. 반면, 한반도 영향 열대저기압은 변화점을 가지지 않았으며 1985년을 기점으로 통계적으로 유의미한 증가를 보이지 않았다. 이는 두 영향 열대저기압 활동이 서로 다른 변화 경향성을 보인다는 점을 한 번 더 뒷받침한다. 울릉도-독도 영향 열대저기압의 빈도수 증가는 일본 열도 동쪽에서의 아열대 고기압 강화로 인해 동중국해 및 일본 열도 남쪽에서 한반도로 북상하는 경로가 증가한 결과로 분석된다. 이런 고기압 강화는 열대 중앙태평양 SST 상승에 따른 Gill-type response와 그에 의해 유도된 로스비 파열(Rossby wave train)에 기인한 것으로 여겨진다(Figs. 5b, 6a; Gill, 1980; Nitta, 1987; Park et al., 2019). 다만, 해당 메커니즘의 명확한 규명을 위

해서는 향후 추가 연구가 필요하다. 또한, 열대저기압 경로상의 SST 증가와 VWS 약화는 강도 유지에 유리한 조건을 조성하여 울릉도-독도 영향 열대저기압 강도 증가의 주요 원인으로 작용한 것으로 확인되었다. 한편, 상대와도(relative vorticity; RV)의 변화 경향성도 분석하였으나 경로상에서의 RV 증가는 명확히 드러나지 않았다(그림 생략).

한편, 추가적으로 ASOS와 AWS 관측자료를 활용하여 열대저기압 강도의 장기변화 경향성을 분석한 결과, 최대풍속과 누적 강수량 모두 1985년을 기점으로 통계적으로 유의미한 증가 경향성을 보이지 않았다(그림 생략). 이는 최적 경로를 기준으로 한 진입 강도의 변화 경향성과는 다른 결과이다. 즉, 울릉도 및 독도에 실제로 미치는 열대저기압의 영향은 단순한 진입 강도만으로는 충분히 설명할 수 없음을 시사하며, 따라서 실질적인 영향 분석을 위해서는 다른 형태의 강도 분석 접근법이 필요할 수 있음을 시사한다.

본 연구 결과, 울릉도-독도 영향 열대저기압 활동은 한반도 영향 열대저기압과는 다른 변동성을 보인다는 점을 확인하였다. 이는 울릉도·독도 지역에 대한 계절 전망 및 미래 기후변화에 따른 변화 전망에 있어 한반도 영향 열대저기압과는 별도의 통계 예측 모형이 필요함을 시사한다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 기초연구실(RS-202300207866) 사업과 한국기상산업기술원 기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발 사업(RS-2025-02309058)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Adrianto, L., and Y. Matsuda, 2002: Developing economic vulnerability indices of environmental disasters in small island regions. *Environ. Impact Assess. Rev.*, **22**, 393-414, doi:10.1016/S0195-9255(02)00012-4.

Ahn, S.-H., B.-J. Kim, S.-L. Lee, and H.-K. Kim, 2008: The characteristics of disaster by track of typhoon affecting the Korean Peninsula. *J. Korean Society of Hazard Mitigation*, **8**, 29-36.

Atkinson, G. D., and C. R. Holliday, 1977: Tropical cyclone minimum sea level pressure/maximum sustained wind relationship for the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 421-427, doi:10.1175/1520-0493(1977)105<0421:Tcmslp>2.0.Co;2.

Camargo, S., A. H. Sobel, A. G. Barnston, and K. A. Emanuel, 2007: Tropical cyclone genesis potential index in climate models. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **59**, 428-443, doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00238.x.

Cha, E.-J., M. Kimoto, E.-J. Lee, and J.-G. Jhun, 2007: The recent increase in the heavy rainfall events in August over the Korean Peninsula. *J. Korean Earth Science Society*, **28**, 585-597.

Choi, K., and B. Kim, 2007: Climatological characteristics of tropical cyclones making landfall over the Korean Peninsula. *In AGU Fall Meeting Abstracts*. A43B-1144.

Chu, P.-S., 2002: Large-scale circulation features associated with decadal variations of tropical cyclone activity over the Central North Pacific. *J. Climate*, **15**, 2678-2689, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<2678:LSCFAW>2.0.CO;2.

Emanuel, K. A., 1999: Thermodynamic control of hurricane intensity. *Nature*, **401**, 665-669, doi:10.1038/44326.

Gill, A. E., 1980: Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 447-462, doi:10.1002/qj.49710644905.

Gray, W. M., 1968: Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 669-700, doi:10.1175/1520-0493(1968)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2.

Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.

Kim, D., D.-S. R. Park, M. Chang, D.-H. Cha, and M. Lee, 2023: Reanalyzing the relationship of tropical cyclone frequency and intensity affecting South Korea with the Pacific decadal oscillation. *J. Climate*, **36**, 2847-2855, doi:10.1175/JCLI-D-22-0302.1.

Lee, M., D. H. Cha, J. Moon, J. Park, C.-S. Jin, and J. C. L. Chan, 2019: Long-term trends in tropical cyclone tracks around Korea and Japan in late summer and early fall. *Atmos. Sci. Lett.*, **20**, e939, doi:10.1002/asl.939.

Nam, C. C., D.-S. R. Park, and C.-H. Ho, 2023: Major decisive factors of tropical cyclone risk in the Republic of Korea: Intensity, track, and extratropical transition. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **59**, 359-366, doi:10.1007/s13143-023-00318-4.

_____, _____, _____, and D. Chen, 2018: Dependency of tropical cyclone risk on track in South Korea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **18**, 3225-3234, doi:10.5194/nhess-18-3225-2018.

NDSP, 2025: Natural Disaster Statistics. National Disaster

and Safety Portal. [Available online at: https://www.safekorea.go.kr].

Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II*, **65**, 373-390, doi:10.2151/jmsj1965.65.3_373.

Park, C., S.-W. Son, Y. N. Takayabu, S.-H. Park, D.-H. Cha, and E. J. Cha, 2023: Role of midlatitude baroclinic condition in heavy rainfall events directly induced by tropical cyclones in South Korea. *Mon. Wea. Rev.*, **151**, 3113-3132, doi:10.1175/MWR-D-23-0046.1.

Park, C.-Y., J.-Y. Moon, E.-J. Cha, W.-T. Yun, and Y.-E. Choi, 2008a: Recent changes in summer precipitation characteristics over South Korea. *J. Korean Geogr. Soc.*, **43**, 324-336.

Park, D.-S. R., C.-H. Ho, and J. Hwang, 2008b: Influence of typhoon landfall and its track characteristics in Gyeongsangbuk-do. *Atmosphere*, **18**, 525-532.

_____, _____, D. Kim, N.-Y. Kang, Y. Han, and H.-R. Oh, 2019: Tropical cyclone as a possible remote controller of air quality over South Korea through poleward-propagating Rossby waves. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **58**, 2523-2530, doi:10.1175/jamc-d-19-0058.1.

_____, _____, and J.-H. Kim, 2014: Growing threat of intense tropical cyclones to East Asia over the period 1977~2010. *Environ. Res. Lett.*, **9**, 014008, doi:10.1088/1748-9326/9/1/014008.

_____, _____, _____, and H.-S. Kim, 2011: Strong landfall typhoons in Korea and Japan in a recent decade. *J. Geophys. Res.*, **116**, D07105, doi:10.1029/2010jd014801.

_____, _____, J. Kim, K. Kang, and C. C. Nam, 2016: Highlighting socioeconomic damages caused by weakened tropical cyclones in the Republic of Korea. *Nat. Hazards*, **82**, 1301-1315, doi:10.1007/s11069-016-2244-x.

Park, J.-K., B.-S. Kim, W.-S. Jung, E.-B. Kim, and D.-G. Lee, 2006: Change in statistical characteristics of typhoon affecting the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **16**, 1-17.

Reid, P. C., and Coauthors, 2016: Global impacts of the 1980s regime shift. *Glob. Change Biol.*, **22**, 682-703, doi:10.1111/gcb.13106.

Seol, D.-I., 2010: Global warming and trends of typhoon variation. *J. Navig. Port Res.*, **34**, 453-458, doi:10.5394/KINPR.2010.34.6.453.

Song, H.-J., and C.-H. Ho, 2003: A study on typhoon influence on the secondary summer rainy season in the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **13**, 362-365.

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. *J. Climate*, **22**, 3617-3628, doi:10.1175/2009JCLI2411.1.

Wang, R., L. Wu, and C. Wang, 2011: Typhoon track changes associated with global warming. *J. Climate*, **24**, 3748-3752, doi:10.1175/jcli-d-11-00074.1.

Wong, M. L. M., and J. C. L. Chan, 2004: Tropical cyclone intensity in vertical wind shear. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1859-1876, doi:10.1175/1520-0469(2004)061<1859:TCIIVW>2.0.CO;2.