

## 대구광역시 근접 열대저기압의 영향 유형별 기후적 특성 분석 및 영향 유형 예측 모형 개발

서재원<sup>1)</sup> · 장형정<sup>1)</sup> · 박두선<sup>1),2)\*</sup>

<sup>1)</sup>경북대학교 지구과학교육과,

<sup>2)</sup>경북대학교 대기과학과, 대기원격탐사연구소, BK21 위험기상교육 연구팀

(접수일: 2025년 7월 25일, 수정일: 2025년 9월 18일, 게재확정일: 2025년 9월 22일)

## The Climatological Characteristics of Tropical Cyclones Passing Near Daegu Metropolitan City according to Influence Types, and the Development of an Influence Type Prediction Model

Jae-Won Seo<sup>1)</sup>, Hyung-Jeong Chang<sup>1)</sup>, and Doo-Sun R. Park<sup>1),2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>2)</sup>BK21 Weather Extremes Education & Research Team, Center for Atmospheric REmote Sensing (CARE),  
and Department of Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Manuscript received 25 July 2025; revised 18 September 2025; accepted 22 September 2025)

**Abstract** This study classified tropical cyclones (TCs) passing near Daegu as compound, rain-dominant, wind-dominant, or weak based on observed daily precipitation and maximum wind speed at the Daegu Automated Surface Observing System (ASOS). TCs of the compound type had the closest tracks to the Daegu ASOS and exhibited the highest maximum sustained wind speed (MSWS). These TCs maintained their intensity due to weak vertical wind shear and strong vertical velocity (VV) around the Korean Peninsula during their influence period. Rain-dominant TCs exhibited greater intensity in terms of mean sea level pressure (MSLP) while passing east of the Daegu ASOS. During the period influenced by rain-dominant TCs, high VV was observed because the Korean Peninsula was located south of the jet stream entrance. Wind-dominant TCs exhibited higher MSWS intensity while passing west of the Daegu ASOS, placing Daegu within the dangerous semicircle of TCs. Weak TCs had the farthest tracks from the Daegu ASOS and exhibited the lowest intensity in terms of MSWS and MSLP. The multiple linear regression model developed in this study performed poorly in predicting rainfall and maximum wind speed at Daegu, as well as determining the type of influence although it performed moderately well in predicting whether Daegu is influenced by a TC. This is because simple linear regression cannot capture nonlinear relationships, and the meteorological variables are at a synoptic scale much larger than that of Daegu. Addressing these limitations in future work could improve TC impact warnings for Daegu.

**Key words:** Tropical cyclone, Daegu metropolitan city, Precipitation, Wind speed, Multiple linear regression model

\*Corresponding Author: Doo-Sun R. Park, Department of Earth Science Education, BK21 Weather Extremes Education & Research Team, Center for Atmospheric REmote Sensing (CARE), and Department of Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, 221, Science Bldg #2, 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

열대저기압은 우리나라의 대표적인 위험기상으로 주로 강풍과 호우에 의해 피해가 발생하는데, 동일한 열대저기압 영향 하에서도 강풍과 호우 강도가 지역별로 다르게 나타나므로 지역별로 차별화된 경보 발령을 통해 사회경제적 영향을 효율적으로 관리할 필요가 있다(Lee and Lee, 1998; Jun et al., 2008; Lee et al., 2016). Lee and Choi (2013)는 열대저기압 상륙 시 특히 남부해안 지역, 경상남도 내륙지역, 동해안 지역에서 극한 강수 발생 빈도와 일 강수량 극값이 모두 높게 나타난다는 사실을 보였다. 또한, Lee et al. (2016)은 15년간(2000~2014) 열대저기압 내습 시 평균 1시간 최대강수량 및 10분 최대풍속이 높은 지역이 주로 남해안과 영동해안에 분포한다는 사실을 보였다.

한반도의 남동쪽에 위치한 경상도는 한반도 영향 열대저기압의 평균 이동경로 상에 위치하여 다른 지역보다 열대저기압에 의한 피해가 더 큰데(Lee et al., 2016), 그 이유는 한반도 영향 열대저기압 평균 이동경로가 남해안에 상륙한 후 경상도를 관통하여 동해안으로 빠져나가는 경로이기 때문이다(Park et al., 2016; Nam et al., 2023). 이러한 경로 하에서 경상도의 피해가 클 수 밖에 없는 이유는 (1) 경상도가 열대저기압의 위험반원에 위치하여 강한 풍속이 나타날 수 있으며(Park et al., 2015), (2) 남동풍 계열의 바람에 의해 태백산맥과 소백산맥에 의한 지형효과로 더 많은 강수가 유발될 수 있기 때문이다(Park and Lee, 2007; Lee and Choi, 2013).

한편, 경상도 북부지역에서 가장 많은 인구가 거주하는 대구광역시는 내륙에 위치하여 주변의 다른 경상북도 해안도시에 비해 열대저기압에 의한 피해가 상대적으로 적은 편이지만, 그럼에도 불구하고 대구광역시에 발생하는 전체 자연재난에 의한 피해 중 열대저기압에 의한 피해가 차지하는 비율은 가장 높다(국민재난안전포털, <https://www.safekorea.go.kr/>). 최근 26년간(1998~2023) 경상북도에서의 열대저기압에 의한 피해액은 약 2조 6천억원인 데에 비해, 대구광역시에서는 그의 4%에 못 미치는 약 960억원의 피해액이 발생하였다. 하지만 전체 자연재난에 의한 피해 중에서 열대저기압에 의한 피해가 차지하는 비율은 대구광역시에서 약 94%로 경상북도의 71%보다 더 높게 나타났다. 실제로 최근 대구광역시에 근접한 경로로 지나간 2023년 6호 태풍 카눈의 경우 대구광역시에 약 100억원 이상의 피해를 입히기도 하는 등 대구광역시는 내륙에 위치함에도 때때로 상당한 태풍 피해를 입었다.

본 연구에서는 대구광역시 근접 열대저기압의 영향 유형을 풍속과 강수량을 기준으로 분류하여 각 영향

유형별 영향기간 중 대기·해양장 특성을 분석하였다. 그리고 이를 기반으로 열대저기압과 대기·해양장 특성에 따른 대구광역시에의 영향 정도(풍속, 강수량)를 예측할 수 있는 간단한 회귀모형을 개발하여 그 성능을 검토하였다. 전술한 것처럼 몇몇 열대저기압의 경우 대구광역시에 영향이 크지 않은 경우도 찾아 오경보에 따른 열대저기압에 대한 대구 시민의 안전의식이 저하될 가능성이 있다. 본 연구를 기반으로 향후 대구광역시에 특화된 열대저기압 영향 예측 모형을 고도화하여 궁극적으로 보다 정확한 태풍 경보 정보를 제공함으로써 시민들의 안전의식을 제고하고 효율적인 방재대책 수립을 지원할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 1945~2022년 기간에 대해 Joint Typhoon Warning Center (JTWC)에서 제공하는 열대저기압 best track 자료와 대구 종관기상관측소(Automated Surface Observing System; ASOS) 자료를 사용하여, 열대저기압 진로 및 영향 유형 분석을 수행하였다. 보조적으로 1997~2022년 기간에 대해 방재기상관측소(Automated Weather Station; AWS) 자료도 활용하였다. JTWC 자료에서는 열대저기압의 중심 위치(위도, 경도), 최대지속풍속(maximum sustained wind speed; MSWS), 최저해면기압(minimum sea level pressure; MSLP) 정보를 사용하였다. JTWC의 1990년대 이전 자료에는 MSLP 정보가 없고 MSWS 정보만 존재하여 Atkinson and Holliday (1977)가 제안한 수식을 사용해 MSLP를 산출하였다[식(1)].

$$V_{max} = 6.7(1010 - p_c)^{0.644} \quad (1)$$

또한, 영향 기간을 정확히 산출하기 위해 기본 6시간 간격의 자료를 선형 내삽하여 1시간 간격 자료로 변환하여 분석을 수행하였다. 대구 영향권으로 진입 당시 강도가  $17 \text{ m s}^{-1}$  이상인 열대저기압만 분석에 활용하였다. ASOS 자료에서는 일강수량(daily precipitation), 일최대풍속(daily maximum wind speed) 정보를, AWS 자료에서는 일강수량(daily precipitation), 일최대순간풍속(daily maximum instantaneous wind speed) 정보를 분석에 활용하였다.

한편, 북서태평양 열대저기압 best track 자료는 JTWC 외에도 Regional Specialized Meteorological Center in Tokyo (RSMC), Hong Kong Observatory (HKO) 등에서도 제공되고 있으나, 본 연구에서는 JTWC 자료만을 활용하였다. 장기 변화 추세 측면에서는 서로 다른 best track 자료 간 불일치가 크다는 연구결과가 많이 보고된 바 있지만(Kossin et al., 2007;

Song et al., 2010), 본 연구는 장기간 기후적 특성에만 집중하므로 서로 다른 best track 자료 간의 비교는 추가적으로 수행하지 않았다. 또한, Wu and Zhao (2012)에서 JTWC best track이 역학적 시뮬레이션에 의해 계산된 열대저기압의 강도 장기 변화 추세와 가장 잘 일치하여 강도 측면에서 다른 best track 자료보다 신뢰도가 더 높다고 평가된 바 있어, 본 연구에서는 JTWC best track 자료만을 활용하였다.

대구 근접 열대저기압은 대구 ASOS (35.88°N, 128.65°E)를 기준으로 열대저기압 중심이 반경 300 km 이내에 진입한 경우로 정의하였으며, 그 결과, 총 107개의 열대저기압이 대구 근접 열대저기압으로 분류되었다. 열대저기압 중심이 대구 ASOS 기준 반경 300 km 내에 체류하는 시간을 영향 기간(influence period)으로 정의하였으며, 개별 열대저기압의 대구에의 영향 유형(influence type) 판별을 위해 영향 기간 중 ASOS에 기록된 일강수량과 일최대풍속의 최대값을 사용하였다. 본 논문에서는 편의를 위해 영향 기간 중 최대 일강수량은 일강수량으로, 최대 일최대풍속은 일최대풍속으로 줄여 작성하였다. 일강수량 상위 1%에 해당하는 49.50 mm와 일최대풍속 상위 10%에 해당하는 10.00 m s<sup>-1</sup>를 기준으로 각각 정의하여 (Table 1), 영향 기간 동안 일강수량과 일최대풍속이 모두 기준값 이상인 경우는 복합 영향 유형(compound type, 11개 사례), 일강수량은 기준값 이상이지만 일최대풍속은 기준값 미만인 경우는 강수 우세 유형(rain-dominant type, 18개 사례), 일강수량은 기준값 미만이지만 일최대풍속은 기준값 이상인 경우는 바람 우세 유형(wind-dominant type, 31개 사례), 일강수량과 일최대풍속이 모두 기준값 미만인 경우는 미미한 영향 유형(weak type, 47개 사례)으로 분류했다.

영향 유형별 배경장 특성 분석을 위해 ECMWF Reanalysis version 5 (ERA5) hourly 자료를 사용하였다 (Hersbach et al., 2020). 영향 기간 동안의 한반도 주변 (30~45°N, 120~135°E)의 vertical wind shear (VWS), 500 hPa vertical velocity (VV), 250 hPa zonal wind speed (i.e., 상층 제트), sea surface temperature (SST)의 평균 공간분포를 분석하였다.

**Table 1.** The upper 1, 5, 10% of daily precipitation and daily maximum wind speed observed in Daegu ASOS from 1945 to 2022.

|     | Daily precipitation<br>[mm] | Daily maximum wind speed<br>[m s <sup>-1</sup> ] |
|-----|-----------------------------|--------------------------------------------------|
| 1%  | 49.50                       | 14.30                                            |
| 5%  | 17.50                       | 11.50                                            |
| 10% | 7.00                        | 10.00                                            |

열대저기압 영향 예측 모델은 다중선형회귀분석(multiple linear regression) 기법을 기반으로 개발되었으며, 단계적 회귀분석(stepwise regression) 기법을 적용하여 통계적으로 유의미한 변수를 최종 선별하였다. 모델의 성능검증에는 leave-one-out cross validation 기법을 적용하였다. 회귀분석 시 설명변수로는 열대저기압의 영향 기간, MSWS, 관측소까지의 최단 거리, 영향 기간 중 평균 경도 및 영향 기간 중 대구광역시 주변(30.88~40.88°N, 123.65~133.65°E)의 VWS와 VV, 한반도 북동부(38~45°N, 126~135°E)의 upper-level jet, 한반도 남해(30~35°N, 122~130°E)의 SST의 영역 평균값을 활용하였다. 강수 영향 예측 모델은 일강수량을, 바람 영향 예측 모델은 일최대풍속을 종속변수로 각각 설정하였다. 즉, 이 모델은 열대저기압에 의한 대구 ASOS 기준 일강수량과 일최대풍속을 각각 예측하는 모델이다. 한편, best track의 MSWS 자료로부터 산출된 MSLP는 다중선형회귀분석 시 다중공선성(multicollinearity) 문제가 발생하여 설명변수에서 처음부터 배제하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 대구광역시 근접 열대저기압의 영향 유형별 기 후적 특성

ANOVA (analysis of variance) test 결과, 영향 유형에 따른 일강수량과 일최대풍속 값은 영향 유형 간에 95% 신뢰구간에서 유의미한 차이가 있었다(Table 2). 복합 영향 유형의 경우, 일강수량(103.06 mm), 일최대풍속(14.52 m s<sup>-1</sup>)의 평균이 다른 모든 유형에 비해 가장 높게 나타났다. 강수 우세 유형의 경우, 일강수량(88.85 mm)이 나머지 두 영향 유형(바람 우세 유형, 미미한 영향 유형)에 비해 상대적으로 높게 나타났으며, 바람 우세 유형의 경우, 일최대풍속(13.22 m s<sup>-1</sup>)이 나머지 두 유형(강수 우세 유형, 미미한 영향 유형)에 비해 상대적으로 더 강하게 나타났다. 미미한 영향 유형의 경우, 일강수량(15.14 mm)과 일최대풍속(7.19 m s<sup>-1</sup>)이 모든 영향 유형 중 가장 작게 나타났다.

대구 근접 열대저기압의 영향 유형을 오직 대구 ASOS 기록만을 기준으로 분류하였으므로 대구 ASOS가 열대저기압의 대구에서의 영향을 대표할 수 있는지 확인하기 위해 대구 ASOS 외에 달성, 대구 북구, 대구 서구 AWS에서 나타나는 열대저기압 영향 유형별 풍속 및 강수량을 추가적으로 분석하였다(Table 2). 분석결과, 각 AWS에서 나타나는 영향 유형별 일강수량 및 일최대풍속은 모두 ASOS에서 나타난 특성과 동일한 특성을 보이며, 이는 ASOS 자료가 대구에서의 열대저기압 영향을 대표할 수 있다는 것을 시사한다. 복합 영향 유형의 경우, ASOS와 마찬가지로 모

**Table 2.** The average of daily precipitation and daily maximum wind speed observed in Daegu ASOS (1945~2022), the average of daily precipitation and daily maximum instantaneous wind speed observed in Dalseong, Daegu Bukgu, Daegu Seogu AWS (1997~2022) according influence types. Parentheses represent standard deviation. The p-value comes from an ANOVA test.

|                    | Average of daily precipitation (Daegu ASOS) [mm] | Average of daily maximum wind speed (Daegu ASOS) [ $\text{m s}^{-1}$ ] | Average of daily precipitation (Dalseong AWS) [mm] | Average of daily maximum instantaneous wind speed (Dalseong AWS) [ $\text{m s}^{-1}$ ] | Average of daily precipitation (Daegu Bukgu AWS) [mm] | Average of daily maximum instantaneous wind speed (Daegu Bukgu AWS) [ $\text{m s}^{-1}$ ] | Average of daily precipitation (Daegu Seogu AWS) [mm] | Average of daily maximum instantaneous wind speed (Daegu Seogu AWS) [ $\text{m s}^{-1}$ ] |
|--------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Compound Type      | 103.06<br>( $\pm 32.60$ )                        | 14.52<br>( $\pm 4.23$ )                                                | 153.17<br>( $\pm 65.63$ )                          | 18.70<br>( $\pm 1.90$ )                                                                | 160.83<br>( $\pm 56.53$ )                             | 18.53<br>( $\pm 5.86$ )                                                                   | 168.33<br>( $\pm 65.77$ )                             | 16.57<br>( $\pm 3.40$ )                                                                   |
| Rain-Dominant Type | 88.85<br>( $\pm 44.66$ )                         | 6.95<br>( $\pm 1.67$ )                                                 | 81.62<br>( $\pm 41.23$ )                           | 15.18<br>( $\pm 4.68$ )                                                                | 89.27<br>( $\pm 63.82$ )                              | 12.13<br>( $\pm 5.39$ )                                                                   | 87.12<br>( $\pm 52.60$ )                              | 10.10<br>( $\pm 4.03$ )                                                                   |
| Wind-Dominant Type | 26.78<br>( $\pm 15.35$ )                         | 13.22<br>( $\pm 3.03$ )                                                | 29.17<br>( $\pm 22.74$ )                           | 17.67<br>( $\pm 3.87$ )                                                                | 33.83<br>( $\pm 17.54$ )                              | 14.87<br>( $\pm 2.75$ )                                                                   | 26.83<br>( $\pm 18.06$ )                              | 15.07<br>( $\pm 5.58$ )                                                                   |
| Weak Type          | 15.14<br>( $\pm 13.87$ )                         | 7.19<br>( $\pm 1.55$ )                                                 | 20.95<br>( $\pm 18.41$ )                           | 12.77<br>( $\pm 4.00$ )                                                                | 21.50<br>( $\pm 16.85$ )                              | 9.10<br>( $\pm 1.67$ )                                                                    | 21.50<br>( $\pm 22.08$ )                              | 11.16<br>( $\pm 2.00$ )                                                                   |
| P-Value            | 0.00                                             | 0.00                                                                   | 0.00                                               | 0.05                                                                                   | 0.00                                                  | 0.00                                                                                      | 0.00                                                  | 0.01                                                                                      |

**Table 3.** Influence period, maximum sustained wind speed (MSWS), minimum sea level pressure (MSLP), closest distance from ASOS, and average longitude of TC center during influence period according influence types based on JTWC best track. Parentheses represent standard deviation. The p-value comes from an ANOVA test.

|                    | Influence period [hr]   | MSWS [ $\text{m s}^{-1}$ ] | MSLP [hPa]                | Closest distance from ASOS [km] | Average longitude of TC center during influence period [ $^{\circ}\text{E}$ ] |
|--------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Compound Type      | 14.64<br>( $\pm 5.41$ ) | 27.80<br>( $\pm 2.67$ )    | 999.07<br>( $\pm 3.32$ )  | 108.59<br>( $\pm 54.72$ )       | 129.09<br>( $\pm 0.54$ )                                                      |
| Rain-Dominant Type | 11.89<br>( $\pm 5.36$ ) | 23.42<br>( $\pm 2.05$ )    | 998.02<br>( $\pm 5.72$ )  | 130.42<br>( $\pm 84.12$ )       | 129.00<br>( $\pm 0.59$ )                                                      |
| Wind-Dominant Type | 10.65<br>( $\pm 6.64$ ) | 25.31<br>( $\pm 1.84$ )    | 1001.82<br>( $\pm 1.06$ ) | 170.46<br>( $\pm 86.28$ )       | 128.03<br>( $\pm 0.18$ )                                                      |
| Weak Type          | 9.02<br>( $\pm 5.45$ )  | 23.99<br>( $\pm 1.10$ )    | 1000.82<br>( $\pm 3.08$ ) | 204.36<br>( $\pm 75.78$ )       | 129.70<br>( $\pm 0.59$ )                                                      |
| P-Value            | 0.03                    | 0.00                       | 0.00                      | 0.00                            | 0.00                                                                          |

든 AWS에서 일강수량(달성: 153.17 mm, 대구 북구: 160.83 mm, 대구 서구: 168.33 mm), 일최대순간풍속(달성: 18.7  $\text{m s}^{-1}$ , 대구 북구: 18.53  $\text{m s}^{-1}$ , 대구 서구: 16.57  $\text{m s}^{-1}$ )이 영향 유형 중 가장 높게 나타났다. 강수 우세 유형과 바람 우세 유형의 경우, 각각 일강수량(달성: 81.61 mm, 대구 북구: 89.27 mm, 대구 서구: 87.12 mm)과 일최대순간풍속(달성: 17.67  $\text{m s}^{-1}$ , 대구

북구: 14.87  $\text{m s}^{-1}$ , 대구 서구: 15.07  $\text{m s}^{-1}$ )이 나머지 두 유형에 비해 높게 나타났다. 미미한 영향 유형의 경우, 모든 AWS에서 일강수량(달성: 20.95 mm, 대구 북구: 21.50 mm, 대구 서구: 21.50 mm)과 일최대순간풍속(달성: 12.77  $\text{m s}^{-1}$ , 대구 북구: 9.1  $\text{m s}^{-1}$ , 대구 서구: 11.16  $\text{m s}^{-1}$ ) 모두 가장 낮게 나타났다.

각 유형 사이에 best track 자료 기반 변수(영향 기

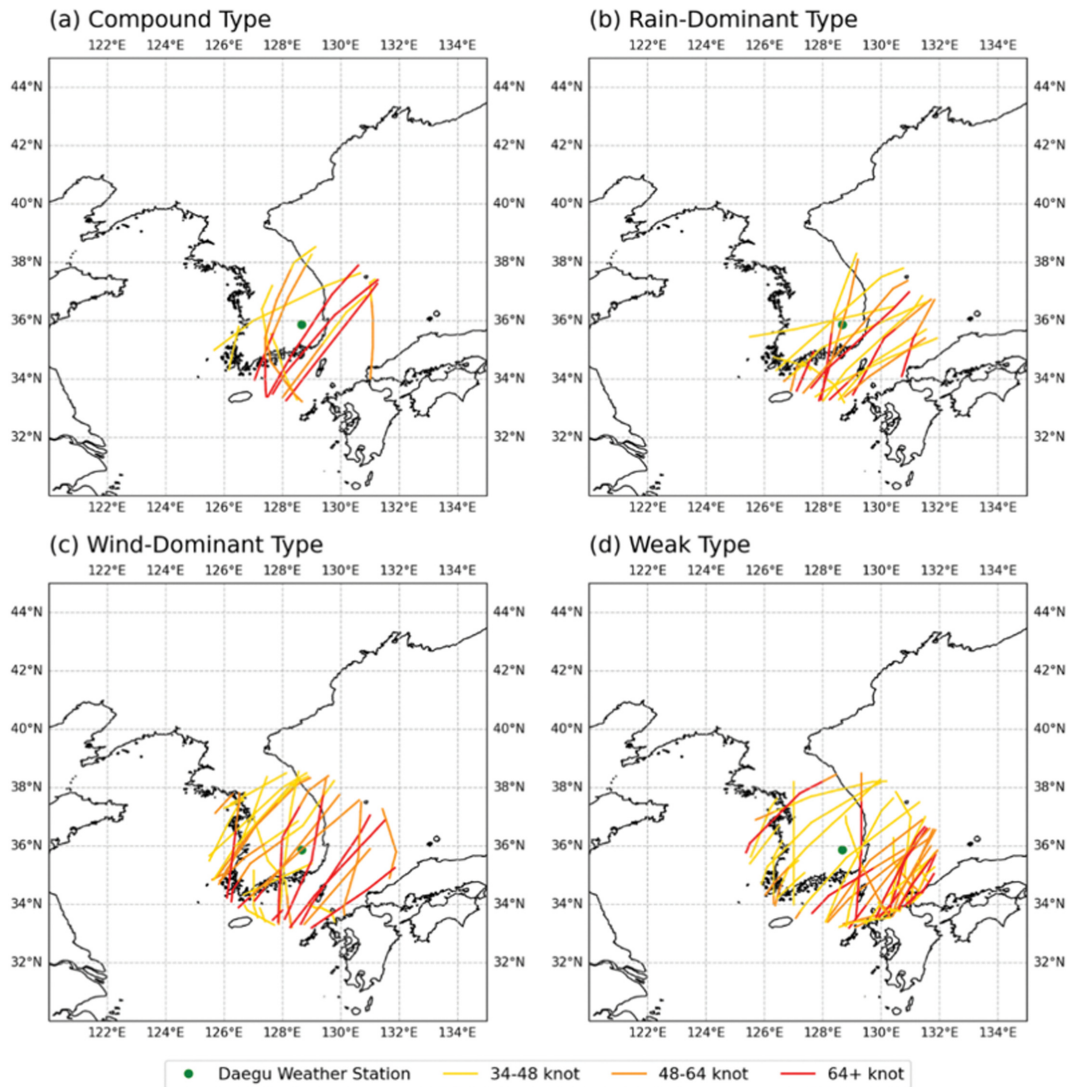


Fig. 1. TC tracks with intensity according to influence types.

간, MSWS, MSLP, 관측소까지의 최단 거리, 영향 기간 중 열대저기압의 평균 경도의 특성도 ANOVA test 결과 95% 신뢰구간에서 유의하게 다르게 나타났다 (Table 3). 복합 영향 유형은 영향 기간이 가장 길고, 대구 ASOS까지의 최단 거리가 가장 가깝다는 특성을 보였다. 또 MSWS가 영향 유형 중 가장 높게 나타났으며 MSLP는 강수 우세 유형 다음으로 낮게 나타났다. 즉, 강한 열대저기압이 대구광역시에 가까운 경로로 통과하는 경우로 정의할 수 있다 (Fig. 1a). 강수 우세 유형의 경우에는 MSWS 측면에서는 가장 약한 반면, MSLP 측면에서는 가장 강하게 나타났다. 또한, 대부분의 열대저기압이 대구광역시의 동쪽을 통

과하는 경로 상의 특성을 보였다 (Fig. 1b). 바람 우세 유형의 경우, MSLP 측면에서는 가장 약하게 나타난 반면, MSWS 측면에서는 두번째로 강하게 나타났다. 나머지 유형들에 비해 서쪽으로 약 1° 치우쳐 대구광역시의 서쪽을 주로 통과하는 경로를 보였다 (Fig. 1c). 이로 인해 대구광역시가 태풍의 위험반원에 위치하면서 일최대풍속이 크게 증가한 것으로 보인다. 미미한 영향 유형의 경우, 복합 영향 유형과 반대로 영향 기간이 가장 짧고, 관측소에서 가장 먼 경로를 가진다는 특성을 보였다 (Fig. 1d). MSWS와 MSLP 측면에서도 강수 우세 유형과 바람 우세 유형과는 달리 둘 중 하나라도 특별히 강한 특성을 보이지는 않았다. 이로

**Table 4.** Number of TC passed near Daegu ASOS per month by type of TC influence. Total number of TC over each month and total number of TC according influence types. Parentheses indicate monthly percentage of TC number for each influence type.

|                    | May            | Jun.            | Jul.          | Aug.          | Sep.          | Oct.            | Total         |
|--------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| Compound Type      | 0<br>(0%)      | 0.01<br>(10.0%) | 0.05<br>(21%) | 0.04<br>(7%)  | 0.04<br>(11%) | 0<br>(0%)       | 0.14<br>(10%) |
| Rain-Dominant Type | 0<br>(0%)      | 0.03<br>(30.0%) | 0<br>(0%)     | 0.05<br>(9%)  | 0.12<br>(32%) | 0.04<br>(50.0%) | 0.23<br>(17%) |
| Wind-Dominant Type | 0.01<br>(100%) | 0.03<br>(30.0%) | 0.09<br>(38%) | 0.18<br>(31%) | 0.06<br>(16%) | 0.03<br>(38%)   | 0.40<br>(29%) |
| Weak Type          | 0<br>(0%)      | 0.03<br>(30.0%) | 0.10<br>(42%) | 0.31<br>(53%) | 0.15<br>(41%) | 0.01<br>(13%)   | 0.60<br>(44%) |
| Total              | 0.01           | 0.10            | 0.24          | 0.58          | 0.37          | 0.08            | 1.37          |

인해 대구광역시에 미미한 영향을 미친 것으로 여겨진다.

대구 근접 열대저기압의 영향 유형별 상륙 개수는 월별로 서로 다른 특성을 보였다(Table 4). 대구 근접 열대저기압은 5~10월에 걸쳐 영향을 미치며, 그 중 85% 이상이 7~9월에 영향을 미쳤다. 이는 Park et al. (2006)에서 보여준 한반도 영향 열대저기압의 월별 상륙 개수 특성과 비슷한 결과로 대구가 한반도 영향 열대저기압의 주요 진로상에 위치한다는 점을 고려할 때 일맥상통한 결과로 분석된다. 가장 많은 열대저기압의 영향을 받는 7~9월 기간 동안 대구에 가장 많이 영향을 미치는 유형은 미미한 영향 유형인 반면, 6월에는 미미한 영향 유형이 강수 우세 유형, 바람 우세 유형과 같은 비율을 차지하였으며, 10월에는 강수 우세 유형이 가장 많은 비율을 차지하였다. 즉, 7~9월 잦은 태풍 경보 대비 대구에의 미미한 영향은 대구 시민의 태풍에 대한 경각심을 저해할 가능성이 높다. 한편, 미미한 영향 유형을 제외한 나머지 영향 유형만을 고려했을 때, 7월과 8월에는 바람 우세 유형이, 9월에는 강수 우세 유형이 가장 많이 영향을 미쳤다.

### 3.2 영향 유형별 배경장 특성

영향 유형별 배경장에도 특성이 있는 지 확인하기 위해 각 유형별로 한반도 주변의 대기 및 해양장 분석을 수행하였다(Fig. 2 & Table 5). 복합 영향 유형은 대구광역시 주변에서의 VWS ( $17.37 \text{ m s}^{-1}$ )가 비교적 약하게, VV ( $-0.15 \text{ Pa s}^{-1}$ )가 강하게 나타났다. 즉, 비교적 약한 VWS로 인해 영향 기간 중 강도가 강하게 유지될 수 있었고, 이에 따라 열대저기압 중심에서의 VV도 강하게 나타났을 것으로 여겨진다. 이로 인해 강풍과 함께 호우를 동반할 수 있었던 것으로 보인다. 한편, 한반도 북동쪽에서 상층 제트( $10.65 \text{ m s}^{-1}$ )는 강수 우세 유형( $14.01 \text{ m s}^{-1}$ )에 비해 느리게 나타났으며, 한반도 남해에서의 SST ( $298.36 \text{ K}$ )는 다른

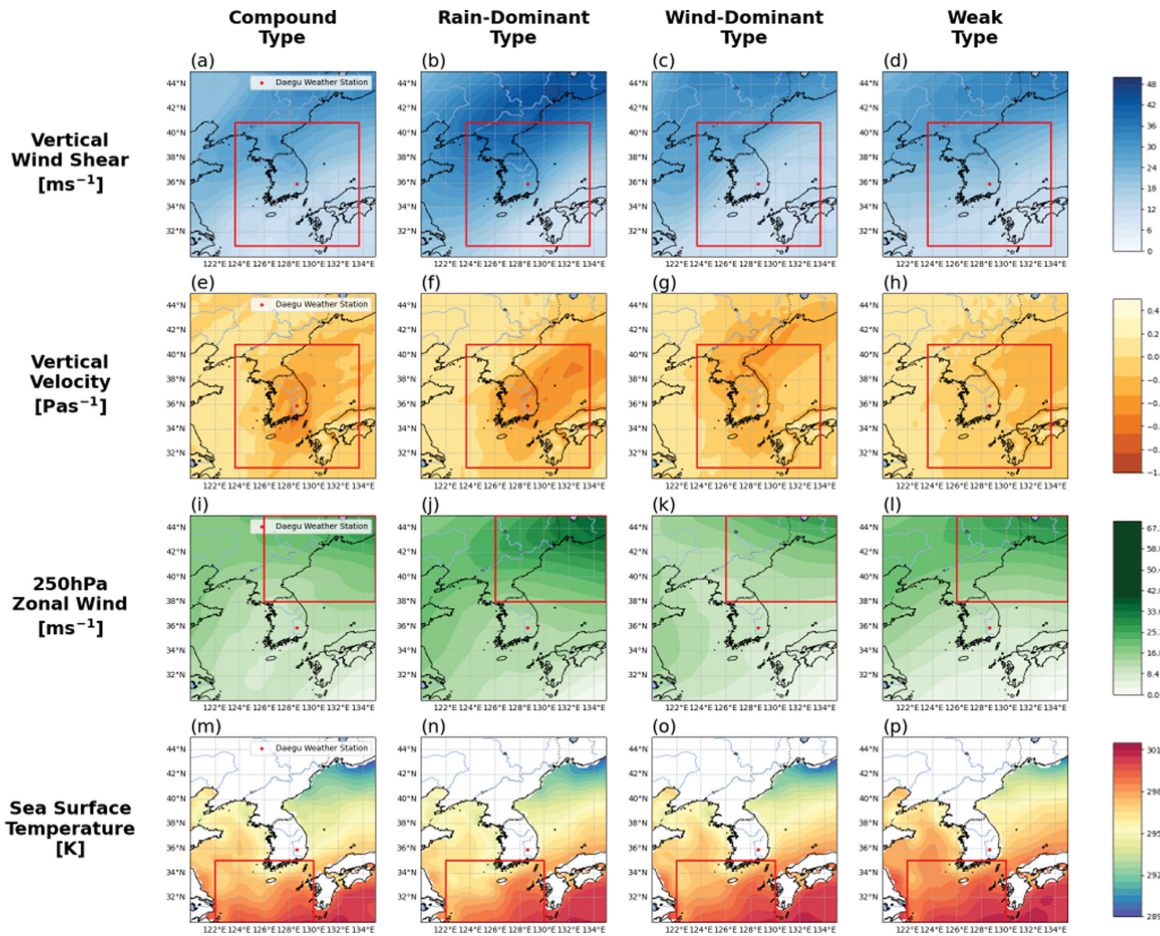
유형과 비교해 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다.

강수 우세 유형은 영향 유형들 중 VWS ( $22.32 \text{ m s}^{-1}$ )가 가장 강하게 나타났다. 복합 영향 유형과 반대로 강한 VWS로 인해 MSWS가 가장 낮게 나타난 것으로 여겨진다. MSWS는 약하지만 VV ( $-0.16 \text{ Pa s}^{-1}$ )는 복합 영향 유형보다도 강하게 나타났는데, 이는 제트 입구 남쪽의 2차 순환에 의한 상승 효과와 관련된 것으로 여겨진다. 한반도 북동부의 상층 제트가  $14.01 \text{ m s}^{-1}$ 로 영향 유형들 중 가장 빠르게 나타났으며, 한반도는 제트 입구 남쪽에 위치한다. 한반도 남해에서의 SST ( $298.18 \text{ K}$ )는 영향 유형들 중 가장 낮게 나타났다. 이러한 대기 및 해양장 특성은 강수 우세 유형이 10월에 가장 많은 비율을 차지하는 것과도 연관된 것으로 보인다.

바람 우세 유형은 복합 영향 유형과 비슷한 대기 및 해양장 특성을 보인다. 대구광역시 주변에서의 VWS ( $15.91 \text{ m s}^{-1}$ )가 영향 유형들 중 가장 약하게 나타났으며, VV ( $-0.15 \text{ Pa s}^{-1}$ )는 복합 영향 유형 만큼 강하게 나타났다. 한반도 북동부의 상층 제트( $9.25 \text{ m s}^{-1}$ )는 영향 유형들 중 가장 느리게 나타났다. 한반도 남해에서의 SST ( $298.73 \text{ K}$ )는 다른 영향 유형들과 비슷하게 나타났다. 복합 영향 유형과의 주요한 차이는 대구까지의 근접 거리, 열대저기압 중심의 동서 위치에 좌우되었을 것으로 여겨진다. 바람 우세 유형은 복합 영향 유형에 비해 대구까지의 거리가 멀고, 좀 더 서쪽에서 진입하는 특성을 보였기 때문에 강수보다는 바람에 의한 영향을 더 많이 준 것으로 분석된다.

미미한 영향 유형은 MSWS가 복합 영향 유형과 바람 우세 유형에 비해 약하게 나타났으나, 대구광역시 주변에서의 VWS ( $17.16 \text{ m s}^{-1}$ )는 복합 영향 유형보다 약하게 나타났다. 한편, VV ( $-0.1 \text{ Pa s}^{-1}$ )는 다른 영향 유형에 비해 가장 약하게 나타났고, 한반도 북동부의 상층 제트 ( $9.53 \text{ m s}^{-1}$ )도 약하게 나타났다. 하





**Fig. 2.** Vertical wind shear, vertical velocity, 250 hPa zonal wind, sea surface temperature around Korea peninsula for TC influence period according influence types.

**Table 5.** Average of vertical wind shear (VWS; 30.88~40.88°N, 123.65~133.65°E), vertical velocity (VV; 30.88~40.88°N, 123.65~133.65°E), 250 hPa zonal wind (upper-level jet; 38~45°N, 126~135°E), sea surface temperature (30~35°N, 122~130°E) according influence types. Parentheses represent standard deviation. The p-value comes from an ANOVA test.

|                    | Vertical Wind Shear<br>[m s <sup>-1</sup> ] | Vertical Velocity<br>[Pa s <sup>-1</sup> ] | 250 hPa Zonal Wind<br>[m s <sup>-1</sup> ] | Sea Surface Temperature<br>[K] |
|--------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|
| Compound Type      | 17.37<br>(±5.27)                            | -0.15<br>(±0.09)                           | 10.65<br>(±6.82)                           | 298.36<br>(±2.08)              |
| Rain-Dominant Type | 22.32<br>(±5.13)                            | -0.16<br>(±0.08)                           | 14.01<br>(±5.12)                           | 298.18<br>(±1.68)              |
| Wind-Dominant Type | 15.91<br>(±6.16)                            | -0.15<br>(±0.09)                           | 9.25<br>(±7.79)                            | 298.73<br>(±2.05)              |
| Weak Type          | 17.16<br>(±6.49)                            | -0.10<br>(±0.07)                           | 9.53<br>(±6.77)                            | 299.39<br>(±1.71)              |
| P-Value            | 0.01                                        | 0.00                                       | 0.09                                       | 0.07                           |

지만 한반도 남해의 SST (299.39 K)는 영향 유형들 중 가장 높게 나타났다. 이는 대구 근접 열대저기압의 강도는 SST보다 다른 요소, 예를 들어 진로와 같은 요소가 더 중요하게 작용함을 시사한다.

### 3.3 대구광역시 근접 열대저기압의 일강수량/일최대풍속 예측 모형

앞서 살펴본 특성에 따르면 열대저기압 정보(진로 및 강도)와 주변 환경장에 따라 대구광역시에의 실질적인 영향 정도를 산출할 수 있을 것으로 여겨진다. 본 연구에서는 시범적으로 간단하게 다중선형회귀분석으로 일강수량과 일최대풍속 예측 모형을 각각 개발하여 그 가능성을 확인했다(Table 6).

일강수량 예측 모형은 현업에 활용 가능한 수준의 성능을 보이지는 않았으나, 중요 변수에 대한 합리적 결과를 제공해주었다. Adjusted R-Squared값은 0.199, RMSE값은 0.162이었으며, 중요 변수로는 관측소까지의 최단 거리, VWS, VV가 산출되었다. 다만, VV의 회귀계수(regression coefficient)는 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의하지는 않았다. 각각의 회귀계수의 부호에 따르면 관측소까지의 최단 거리가 증가할수록 일강수량이 감소하고, VWS가 증가하거나 VV가 감소하면 일강수량이 증가하는 것으로 나타나 물리적으로 설명 가능한 결과를 보였다.

일최대풍속 예측 모형은 일강수량 예측 모형에 비해서는 좋은 성능을 보였으나, 여전히 현업에 활용 가능한 성능을 보이지 않았다. 하지만 일강수량 예측 모형에서 처럼 중요 변수에 대한 비교적 합리적 결과를 제공해주었다. Adjusted R-Squared 값은 0.366, RMSE 값은 0.147이었으며, 중요 변수로는 영향 기간, 영향 기간 중 열대저기압의 평균 강도, MSWS, 관측소까

지의 최단 거리가 선정되었다. 모든 회귀계수가 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의하였다. MSWS가 클수록, 영향 기간이 길수록, 열대저기압 경로가 서쪽으로 치우칠수록, 일최대풍속이 높게 나타나는 것으로 나타났다. 한편, 관측소까지의 최단 거리는 증가할수록 일최대풍속이 증가해, 직관적으로 이해하기 어려운 결과를 보였다.

대민 경보 측면에서는 풍속과 강수량 둘 중 어느 하나라도 특정 기준값 이상이 기록될 것인지 여부가 일강수량 값, 일최대풍속 값 자체보다 더 중요할 수 있으므로, 추가로 혼돈행렬(confusion matrix)을 만들어 영향 유무에 대한 예측 정확도를 평가하였다. 영향 유무 분류는 대구광역시 근접 열대저기압의 영향 유형 분류 시 사용한 일강수량(49.50 mm)과 일최대풍속(10.00 m s<sup>-1</sup>) 기준을 똑같이 적용하여, 모델 예측 일강수량과 일최대풍속 둘 중 하나라도 기준값 이상이라면 대구에 영향이 있음으로 분류하였다.

본 연구에서 개발한 모델은 영향 유무 예측 측면에서는 정확도(accuracy) 78%로 비교적 좋은 성능을 보였다(Table 7). 영향 있음으로 판정한 것 중 실제로 영향 있는 사례의 비율인 정밀도(precision) 0.77, 실제 영향 있음 사례 중 모델이 영향 있음으로 판정한 비율인 민감도(sensitivity) 0.85, 정밀도와 민감도의 조화 평균인 F1-score도 0.81로 비교적 높은 수치를 보였다.

하지만 강수와 강풍까지 구분하여 영향 유무를 분류한 경우에는 정확도 54%로 단순 영향 유무 예측에 비해 낮게 나타났다(Table 8). 복합 영향 유무의 경우, F1-score가 0.24로 가장 낮은 예측 성능을 나타냈다. 호우 영향 유무의 경우, F1-score 0.33으로 나타났으며, 강풍 영향 유무의 경우, F1-score 0.55로 복합 및 호우 영향 유무에 비해서는 상대적으로 높은

Table 6. Result of multiple linear regression.

| Model                          | Adj. R-Squared | RMSE  | Independent variable                                        | Regression coefficient | Standard Error | P-value |
|--------------------------------|----------------|-------|-------------------------------------------------------------|------------------------|----------------|---------|
| Precipitation model [mm]       | 0.199          | 0.162 | Closest distance from ASOS [km]                             | -0.22                  | ±0.06          | 0.00    |
|                                |                |       | VWS [m s <sup>-1</sup> ]                                    | +0.15                  | ±0.08          | 0.08    |
|                                |                |       | VV [Pa s <sup>-1</sup> ]                                    | -0.15                  | ±0.09          | 0.13    |
|                                |                |       | Influence period [hr]                                       | +0.22                  | ±0.08          | 0.01    |
| Wind model [ms <sup>-1</sup> ] | 0.366          | 0.147 | Average longitude of TC center during influence period [°E] | -0.25                  | ±0.05          | 0.00    |
|                                |                |       | MSWS [m s <sup>-1</sup> ]                                   | +0.41                  | ±0.08          | 0.00    |
|                                |                |       | Closest distance from ASOS [km]                             | +0.13                  | ±0.06          | 0.04    |



**Table 7.** The accuracy, precision, sensitivity, and F1-score of the influence test which is independent of type.

| Accuracy | Precision | Recall | F1-score |
|----------|-----------|--------|----------|
| 0.78     | 0.77      | 0.85   | 0.81     |

**Table 8.** Accuracy of influence test by type and F1-score of each influence type test.

| Types              | F1-score | Accuracy |
|--------------------|----------|----------|
| Compound Type      | 0.24     | 0.54     |
| Rain-Dominant Type | 0.33     |          |
| Wind-Dominant Type | 0.55     |          |
| Weak Type          | 0.73     |          |

성능을 보였다. 영향 없음의 경우, F1-score가 0.73로 가장 높게 나타났다. 이는 영향 없음이 가장 많은 비중을 차지하기 때문으로 여겨진다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 대구광역시 근접 열대저기압을 영향 유형에 따라 분류하여 기후적 특성과 배경장의 특성을 분석하고, 열대저기압에 의한 대구 지역에서의 일강수량과 일최대풍속을 예측하는 선형회귀모형을 개발하였다. 대구 ASOS를 기준으로 반경 300 km 이내에 진입한 대구 근접 열대저기압을 일강수량 49.50 mm, 일최대풍속 10 m s<sup>-1</sup>를 기준으로 복합 영향 유형, 강수 우세 유형, 바람 우세 유형, 미미한 영향 유형으로 분류하여 분석을 진행하였다.

영향 유형별 열대저기압의 기후적 특성을 분석한 결과, 유형별로 서로 다른 특성을 보였다. 복합 영향 유형의 경우, MSWS가 가장 강하게 나타났으며, 열대저기압이 대구 ASOS에 가장 가까이 통과하면서 강풍과 호우에 의한 영향이 복합적으로 나타났다. 강수 우세 유형의 경우, MSWS는 가장 약하지만, MSLP 측면에서는 가장 강하게 나타났으며, 대구 ASOS의 동쪽을 통과하는 경로 특성을 보였다. 이와 반대로, 바람 우세 유형의 경우, MSWS는 복합 영향 유형 다음으로 강하지만, MSLP 측면에서는 가장 약한 특성을 보였고, 대구 ASOS의 서쪽을 통과하는 경로 특성을 보였다. 이로 인해 열대저기압 통과 시 대구광역시는 위험반원에 위치하여 일최대풍속이 높게 관측되었을 것으로 사료된다. 미미한 영향 유형의 경우, MSWS와 MSLP 측면에서 모두 약한 열대저기압이 대구 ASOS에서 가장 멀리 통과하는 특성을 보였다.

대구 근접 열대저기압의 월별 상륙 개수도 영향 유형별로 다르게 나타났다. 전체 대구 근접 열대저기압

중 85% 이상이 7~9월에 상륙하며, 미미한 영향 유형이 가장 높은 비율을 차지했다. 일반적으로 열대저기압 근접 시 전국적인 관심이 집중되는 만큼, 가장 많은 비중을 차지하는 미미한 영향 유형은 대구 시민의 열대저기압에 대한 안전의식을 약화시키는 요인이 될 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 대구와 같은 지역에 특화된 별도의 경보 시스템을 운영함으로써 비의도적인 오경보를 최소화하는 데 도움이 될 수 있다. 미미한 영향 유형을 제외한다면, 7월과 8월에는 바람 우세 유형이, 9월에는 강수 우세 유형이 가장 많이 영향을 미쳤다.

대구 근접 열대저기압의 영향 기간 동안 한반도 주변의 배경장도 대구광역시에의 영향 유형을 결정하는데 기여를 한 것으로 여겨진다. 복합 영향 유형의 경우, 약한 VWS와 강한 VV로 인해 열대저기압이 강하게 유지될 수 있었을 것으로 분석된다. 단, 강한 VV의 경우, 배경장이 아닌 열대저기압 강도가 강하여 나타난 결과물로 해석할 수도 있다. 강수 우세 유형의 경우, 한반도 북동부의 상층 제트가 가장 빠르게 나타났다. 한반도가 제트 입구 남쪽에 위치하여 2차 순환에 의해 VWS 가장 강함에도 불구하고 VV도 가장 강하게 나타났다. 바람 우세 유형의 경우, 복합 영향 유형과 마찬가지로 약한 VWS와 강한 VV가 나타났다. 비슷한 배경장 특성 하에서 나타나는 두 영향 유형 간의 차이는 경로의 특성과 관련되어 있을 것으로 사료된다. 바람 우세 유형의 진로는 복합 영향 유형에 비해 대구 ASOS에서 먼 반면, 대구 ASOS의 서쪽에 위치하여 대구 ASOS가 위험반원에 위치하게 된다. 미미한 영향 유형의 경우, 영향 유형들 중 VV가 가장 약하게 나타났다. 하지만, 한반도 남해의 SST는 영향 유형들 중 가장 높게 나타났다. 이는 대구 근접 열대저기압의 대구 ASOS에의 영향이 SST보다 다른 요인에 의해 결정됨을 시사한다.

Best track 자료와 ERA5 자료를 설명변수로 하여 개발한 회귀모형에서 중요도가 높은 설명변수는 서로 다르게 나타났다. 일강수량 예측 모형에서는 관측소까지의 최단 거리, VWS, VV가, 일최대풍속 예측 모형에서는 영향 기간, 영향 기간 중 열대저기압의 평균 경도, MSWS, 관측소까지의 최단 거리가 중요한 설명변수로 산출되었다. 일강수량 예측 모형의 Adjusted R-squared은 0.199, RMSE는 0.162, 일최대풍속 예측 모형의 Adjusted R-squared는 0.366, RMSE는 0.147로 일최대풍속 예측 모형의 성능이 더 나은 성능을 보였으나, 두 예측 모형 모두 현업에 적용하기에는 미흡했다. 혼돈행렬을 사용하여 두 모형의 종합적인 영향 유무 예측성을 확인해본 결과, 정확도 78%로 의외의 준수한 성능을 보였다. 하지만 영향 유형 예측 정확도는 54%로 영향 유무 예측 정확도에 비해 매우 낮

은 성능을 보였다.

본 연구에서는 대구 근접 열대저기압의 영향 유형별 기후적 특성과 배경장 특성, 대구광역시에의 영향 간의 관계를 확인하였다. 이를 바탕으로 개발한 열대저기압 영향 유형 예측 모형은 현업에 적용하기에 미흡하였다. 예측 정확도가 낮았던 이유로는 (1) 단순한 선형회귀 방법으로는 변수 사이의 비선형적 관계를 나타낼 수 없다는 점과 (2) 대기장 변수가 종관규모로 분석 대상 지역인 대구보다 훨씬 더 커 지형 효과 등의 미시적 변수를 고려할 수 없다는 점을 들 수 있다. 또한, 대부분 변수가 95% 신뢰구간에서 정규분포 형태를 보이지만, 일강수량과 영향기간 중 평균 경도의 2개 변수는 정규분포의 형태를 따르지 않아 선형회귀 방법의 기본적인 가정이 위배된 측면도 모델의 정확도를 낮췄을 수 있다. 이를 보완하기 위해 후속 연구에서 머신러닝 등의 방법을 적용하고, 다양한 규모의 변수를 추가로 고려하여 모형을 개선시킬 필요성이 있다. 추후 연구를 통해 대구광역시에 특화된 열대저기압 영향 예측 모형을 개발한다면 보다 정확한 태풍 경보 등 효율적인 방재대책 수립에 필요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국연구재단 기초연구실(RS-2023-00207866)과 중견연구(RS-2025-00556009) 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- 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.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Jun, H.-D., M.-J. Park, and G.-Y. Kim, 2008: Damage analysis of meteorological disasters for each district considering the characteristics of a district. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **8**, 75-82.
- Kossin, J. P., K. R. Knapp, D. J. Vimont, R. J. Murnane, and B. A. Harper, 2007: A globally consistent reanalysis of hurricane variability and trends. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04815, doi:10.1029/2006gl028836.
- Lee, E.-G., and H.-Y. Lee, 1998: Spatial distribution and causative factors of typhoon disasters in Korea. *J. Korean Geogr. Soc.*, **33**, 179-190.
- Lee, S.-W., S.-H. Ahn, B. Lim, and G. Choi, 2016: Relationships between intensity of extreme climate events and magnitude of damages for different typhoon tracks in the Republic of Korea. *Journal of KARG*, **22**, 450-465.
- , and G. Choi, 2013: Spatio-temporal patterns of extreme precipitation events by typhoons across the Republic of Korea. *Journal of KARG*, **19**, 384-400.
- 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.
- Park, D.-S. R., C.-H. Ho, 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.
- , ———, C. C. Nam, and H.-S. Kim, 2015: Evidence of reduced vulnerability to tropical cyclones in the Republic of Korea. *Environ. Res. Lett.*, **10**, 054003, doi:10.1088/1748-9326/10/5/054003.
- 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.
- Park, S. K., and E. Lee, 2007: Synoptic features of orographically enhanced heavy rainfall on the east coast of Korea associated with Typhoon Rusa (2002). *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L02803, doi:10.1029/2006gl028592.
- Song, J.-J., Y. Wang, and L. Wu, 2010: Trend discrepancies among three best track data sets of western North Pacific tropical cyclones. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **115**, doi:10.1029/2009JD013058.
- Wu, L., and H. Zhao, 2012: Dynamically derived tropical cyclone intensity changes over the western North Pacific. *J. Clim.*, **25**, 89-98, doi:10.1175/2011jcli4139.1.