

한반도 접근 거리와 강도에 따른 북서태평양 열대저기압 Best-Track의 기관 간 정합성

Inter-Agency Consistency of Western North Pacific Tropical Cyclone Best-Track Data as a Function of Proximity to the Korean Peninsula and Intensity

박영현*

Young Hyun Park*

요 지 : 북서태평양에서는 복수 기관이 열대저기압 best-track 자료를 독립적으로 생산하며, 연안 방재 실무에서는 이들 자료가 상호 대체 가능한 것으로 간주되기도 한다. 본 연구는 이러한 가정이 어떤 조건에서 성립하는지를 검토하였다. 1977~2024년 KMA·JMA·JTWC 자료를 동일 열대저기압-동일 시각 기준으로 정합하고, 열대저기압 강도와 한반도 접근 거리를 두 축으로 기관 간 차이의 응답면을 분석하였다. 최대풍속의 기관 간 평균절대차는 열대폭풍 등급 6.14 kt에서 초강력 등급 28.48 kt로 4.6배 증가한 반면, 중심 위치의 0.1° 이내 일치율은 16.6%에서 68.1%로 상승하였다. 거리와 풍속 차이의 관계도 강도에 따라 달라져, 강도를 고려하지 않은 전체 기울기는 1,000 km당 -0.27 kt였으나 강도 등급별 기울기는 열대폭풍 +0.02 kt에서 초강력 +3.35 kt까지 증가하였다. 두 강도 국면을 모두 경험한 360개 열대저기압 가운데 343개(95.3%)에서는 강한 국면의 기관 간 차이가 더 크게 나타났다. 풍속비(JMA/JTWC)는 강도에 따라 1.01에서 0.80으로 변화하고 동일 강도 등급 내에서도 거리에 따라 달라져, 평균시간 규약의 차이만으로는 관측된 차이를 설명하기 어려웠다. 이상의 결과는 기관 간 정합성이 거리와 강도에 따라 달라지는 조건부 구조임을 보여주며, 자료원 선택 시 두 조건을 함께 고려해야 함을 시사한다.

핵심용어 : 열대저기압, 베스트트랙, 기관 간 정합성, 응답면, 연안 방재

Abstract : Multiple agencies independently produce tropical cyclone best-track datasets for the western North Pacific, and these datasets are often regarded as interchangeable in coastal hazard applications. This study examined when this assumption holds. KMA, JMA, and JTWC data for 1977–2024 were matched by cyclone and observation time, and inter-agency differences were analyzed on a response surface defined by intensity and proximity to the Korean Peninsula. The mean absolute difference in maximum wind speed increased 4.6-fold, from 6.14 kt for tropical storms to 28.48 kt for the super-strong class, whereas center-position agreement within 0.1° increased from 16.6% to 68.1%. The relationship between distance and wind-speed difference also varied with intensity. The unadjusted slope was -0.27 kt per 1,000 km, whereas class-specific slopes increased from +0.02 to +3.35 kt per 1,000 km. Of 360 cyclones experiencing both intensity phases, 343 (95.3%) showed larger inter-agency differences during the stronger phase. Wind-speed ratios (JMA/JTWC) varied from 1.01 to 0.80 with intensity and also with distance within intensity classes, indicating that averaging-time conventions alone cannot explain the observed differences. These results suggest that inter-agency consistency varies conditionally with distance and intensity, both of which should be considered in best-track source selection.

Keywords : tropical cyclone, best-track, inter-agency consistency, response surface, coastal hazard

1. 서 론

열대저기압의 시간별 중심 위치와 강도를 기록한 best-track 자료는 태풍 기후 특성 분석, 설계 외력 산정, 폭풍해일 및 수치모의의 입력 조건 구성 등 연안 방재 실무 전반에서 기초 자료로 사용된다. 특히 해일고나 설계 풍속을 산정하는 과

정에서 best-track이 제공하는 최대풍속과 중심 위치는 계산 결과를 직접 좌우하는 입력값이 되므로, 이 자료가 가진 불확실성의 크기와 구조를 파악하는 일은 산정 결과의 신뢰도를 판단하는 전제가 된다.

북서태평양 해역에서는 복수의 기관이 각기 독립적으로 best-track을 생산한다. 세계기상기구(WMO, World Meteorological

*한국해양과학기술원 해양공간개발에너지 연구부 책임연구원(Principal Research Scientist, Ocean Space Development & Energy Research Department, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Yeongdo-gu, Busan 49111, Korea, Tel: +82-51-664-3521, yhpark@kiost.ac.kr)

Organization)가 지정한 일본 기상청(JMA, Japan Meteorological Agency) 산하 지역특별기상센터(RSMC, Regional Specialized Meteorological Centre)가 공식 자료를 제공하고, 한국 기상청(KMA, Korea Meteorological Administration)은 한반도 영향 태풍을 중심으로 자체 자료를 축적해 왔으며, 미국 합동태풍경보센터(JTWC, Joint Typhoon Warning Center)는 군 운용을 목적으로 별도의 자료를 생산하고 있다.

이들 기관은 동일한 열대저기압을 대상으로 하면서도 관측 자산과 해석 절차, 자료 산출의 목적이 서로 다르다. 대표적으로 최대풍속의 평균시간 규약이 KMA와 JMA는 10분, JTWC는 1분으로 다르며, 위성 영상 해석 기법과 항공 정찰 자료의 가용 여부에서도 차이가 있다. 기관 간 차이의 성격은 변수에 따라 다를 수 있다. 강한 열대저기압에서 중심 위치의 일치도가 높아지는 것은 위성 영상에서 눈 구조가 뚜렷해져 중심 위치의 판독이 상대적으로 용이한 것으로 알려져 있다(Landsea and Franklin, 2013; Mayers and Ruf, 2019). 반면 위성 기반 최대풍속 추정에는 위성영상의 구름 구조와 온도 특성을 강도로 환산하는 간접적인 추정 과정을 거치므로, 그 오차 특성은 열대저기압 강도에 따라 달라지는 것으로 보고되어 왔다(Knaff et al., 2010).

그럼에도 실무에서는 자료의 접근성이나 편의에 따라 세 기관 중 하나를 선택하는 경우가 적지 않으며, 이때 어느 자료를 사용하더라도 분석 결과가 실질적으로 달라지지 않으리라는 전제가 암묵적으로 작동한다. 이 전제가 언제나 성립한다면 자료원 선택은 실무적 고려 사항에 지나지 않겠으나, 성립하지 않는 조건이 존재한다면 그 조건을 특정하는 일이 선행되어야 한다.

기관 간 best-track 자료에 차이가 존재한다는 사실 자체는 그동안 여러 연구를 통해 보고되어 왔다. IBTrACS (International Best Track Archive for Climate Stewardship) 구축 과정에서 수행된 기관 간 자료 비교 연구는 강도 추정값의 기관 간 편차가 특히 원해 구간에서 확대되며, 이는 직접 관측이 제한되어 위성 영상 기반의 간접 해석에 의존하는 정도가 높아지기 때문이라고 지적하였다(Knapp and Kruk, 2010). 또한 기관별 관측 자산과 운영 규칙의 차이가 강도 추정의 신뢰도에 영향을 미치며, 균질성 확보와 함께 기관 간 운영 규칙의 조화가 필요하다는 지적도 제기되었다(Barcikowska et al., 2012). 기관 간 차이가 단일한 환산 관계로 조정되지 않는다는 관찰 역시 보고된 바 있다(Lander, 2008). Bai et al.(2023)은 JTWC가 원해 태풍의 강도를 상대적으로 높게 보고하는 반면 RSMC Tokyo와 CMA는 자국 연안·육상 태풍에 지상 관측을 반영하여 상대적으로 높게 보고한다고 지적하였으나, 이를 연속적인 거리 축 위에서 정량화하거나 위치 정합성과 함께 검토하지는 않았다. 국내에서도 세 기관 자료의 시기별 특성과 상호 관계가 검토된 바 있으며(Park, 2026), 기관별 자료가 시기에 따라 서로 다른 양상을 보임이 보고되었다. 이들 연구는 기관 간 차이의 존재와 그 평균적 크기를 확인하

는 데 기여하였으나, 대체로 전 해역·전 기간을 대상으로 한 통합 통계를 제시하거나 단일 조건에서의 비교에 초점을 두었다. 그 결과 기관 간 차이가 어떤 조건에서 확대되고 어떤 조건에서 축소되는지, 즉 정합성의 조건부 구조는 충분히 규명되지 않았다.

정합성을 조건부로 파악해야 하는 이유는 두 가지다. 첫째, 정합성의 방향이 변수마다 다를 수 있다. 최대풍속과 중심 위치는 서로 다른 관측·해석 절차를 통해 결정되므로 한 변수의 기관 간 차이가 커질 때 다른 변수의 차이는 오히려 작아질 수 있으며, 이 경우 두 변수를 하나의 지표로 통합하면 상반된 신호가 상쇄되어 실제 구조가 은폐된다. 둘째, 조건들이 서로 얽혀 있을 수 있다. 열대저기압의 강도와 특정 지점까지의 거리는 독립이 아니며, 강한 열대저기압이 관측되는 위치가 지리적으로 편중되어 있다면 한 측면을 고려한 분석은 다른 축의 영향을 포함하여 실제 관계를 왜곡할 수 있다. 본 연구는 이 두 가지 가능성을 실제 자료에서 확인하고, 정합성이 거리·강도 평면 위에서 어떤 구조를 이루는지를 제시한다.

본 연구의 목적은 다음 세 가지를 확인하는 데 있다. 첫째, 최대풍속과 중심 위치의 기관 간 차이가 열대저기압 강도에 대하여 서로 반대 방향으로 반응하는지를 검토한다. 둘째, 거리의 효과가 강도에 조건부인지, 그리고 강도를 통제하지 않을 경우 그 효과가 어떻게 왜곡되는지를 정량화한다. 셋째, 관측된 강도 의존성이 열대저기압 집단 간 이질성만으로 설명될 수 있는지를 개체 내부 비교를 통해 검토한다. 본 연구는 기관 간 차이의 물리적인 원인을 규명하거나 어느 기관의 자료가 더 정확한지를 판정하지 않으며, 관측된 정합성의 구조를 정량적으로 기술하는데 한정한다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 Best-track 자료

본 연구는 KMA, JMA, JTWC 세 기관이 제공하는 best-track 자료를 1977년부터 2024년까지 48년간에 대하여 사용하였다(KMA, 2026; JMA, 2026; JTWC, 2026). 이 기간은 세 기관의 자료가 모두 존재하는 공통 구간에 해당한다. 기관별 자료 규모는 JMA 1,217개 열대저기압 44,950건, JTWC 1,408개 열대저기압 43,751건, KMA 1,215개 열대저기압 34,841건이다. 세 기관은 각각 독자적인 열대저기압 번호 체계를 사용하므로, 기관 간 비교에 앞서 동일 열대저기압을 식별하는 절차가 선행되어야 한다.

정합 분석에는 6시간 정시(00, 06, 12, 18 UTC) 기록만을 사용하였다. KMA와 JMA는 열대저기압이 자국 부근의 위험 지역에 접근할 때 3시간 간격으로 기록을 추가하나 JTWC에는 대응하는 시각이 존재하지 않아 정합쌍을 구성하지 못한다. 또한 JMA는 열대저기압 단계에서 최대풍속을 보고하지 않으므로 해당 구간의 공백과 0을 모두 결측으로 처리하였고,

그 결과 본 연구에서 분석 대상은 WMO가 지정한 열대폭풍 등급의 하한인 34 kt 이상으로 한정된다. 날짜변경선 동쪽에서 발생하여 서태평양으로 이동한 소수의 열대저기압 기록은 정도 처리의 일관성을 위해 제외하였다.

2.2 기관 간 정합 절차

본 연구는 Park(2026)에서 확정된 정합 규칙을 그대로 적용하였으며, 그 요지는 다음과 같다. 열대저기압의 식별은 IBTrACS 식별번호(SID; Knapp et al., 2010)를 매개로 하되, 시즌 번호를 ATCF(Automated Tropical Cyclone Forecast) 식별자로 변환하는 방식 대신 각 기관 궤적의 시각·위도·경도를 IBTrACS와 직접 대조하여 일치하는 기록이 가장 많은 SID를 부여하였다. 정합은 식별번호·관측 시각 조합을 기준으로 수행하였으며, 한 기관이 동일 시각에 복수 기록을 갖는 경우에는 상대 기관 좌표와 최근접 기록을 채택하였다. 이러한 경우는 IBTrACS가 하나로 통합한 열대저기압을 JTWC가 두 번호로 분리 등재한 7개 열대저기압 가운데 기록 중복은 2개 8개 시각(정합쌍의 0.02%)에서만 발생하였으며, 모두 분석 표본에 포함되지 않는 열대저압부 단계였다.

이 절차로 1977~2024년 기간의 세 기관의 열대저기압 자료가 전수 식별되었으며, 최종 정합쌍은 KMA-JMA 34,476개, JMA-JTWC 33,983개, KMA-JTWC 28,611개이며, 이 가운데 2.1절의 풍속 유효성 및 강도 조건을 적용한 JMA-JTWC 분석 표본이 24,486개이다. 세 조합의 정합쌍 수가 다른 것은 기관마다 공통으로 등재된 열대저기압과 기록 시각이 다르기 때문이다. 특히 KMA와 JMA가 3시간 간격으로 추가한 기록은 JTWC에 대응 시각이 없어 JTWC가 포함된 조합에서 제외된다. 산출 전 과정에서 구간별 표본수의 산출 폐쇄, 미배정·중복배정 여부, 원자료에서 최종 산출물까지의 단계별 추적을 검산 항목으로 확인하였다.

2.3 열대저기압 강도 분류

열대저기압의 강도 분류는 세계기상기구와 JMA의 10분 평균 최대풍속을 기준으로 하였다. 이는 세계기상기구의 표준 규약이며, 국내 실무에서 통용되는 태풍 등급 체계와도 일치하기 때문이다. 강도 등급은 세계기상기구가 북서태평양에 적용하는 체계에 따라 열대저압부(TD, 33 kt 이하), 열대폭풍(TS, 34~47 kt), 강한 열대폭풍(STS, 48~63 kt), 태풍(TY, 64 kt 이상)으로 분류한다. 다만 태풍 등급은 64 kt 이상 전체를 포괄하여 범위가 지나치게 넓으므로, 본 연구는 이를 다시 세 구간으로 세분화하였으며, 세 구간은 KMA가 사용하는 태풍 강도 등급의 강(64~84 kt), 매우강(85~104 kt), 초강력(105 kt 이상)에 해당한다. 본 연구는 최종적으로 열대폭풍부터 태풍(초강력)까지 다섯 구간을 사용하였다.

KMA 역시 중심 부근 최대풍속의 10분 평균을 기준으로 강도를 분류하므로 강도측과 평균시간이 일치하며, 세 구간의 하한(64 kt)은 세계기상기구 체계의 태풍 등급 하한과 동일

하다. 따라서 이 세분은 국제 표준 체계의 경계를 유지하면서 태풍 등급 내부의 해상도만을 높이는 것이다. 세분화 경계인 85 kt와 105 kt는 JMA 태풍 강도 등급 경계와도 같으며, 각 등급에 대응하는 KMA 등급은 Table 1에 함께 제시하였다.

2.4 거리측과 기준점의 선정

한반도 접근 거리를 나타내는 거리측은 이어도 종합해양과학기지(Ieodo Ocean Research Station, 이하 Ieodo ORS; 32.1228°N, 125.1822°E)를 단일 기준점으로 하여, 각 기록의 열대저기압 중심 위치로부터 이 지점까지의 구면거리로 정의하였다. 거리 계산에는 haversine 공식을 사용하였으며, 기준이 되는 열대저기압 중심 좌표는 JMA 자료를 사용하였다.

기준점을 복수의 대표 해안점이 아닌 단일 실측 관측 지점으로 설정한 데에는 세 가지 근거가 있다. 첫째, 이어도 기지는 좌표가 확정된 상설 해양관측 시설로서 연구자가 임의로 지정한 가상의 좌표가 아니며, 2003년 이후 풍속·기압·파랑의 실측 자료가 축적되어 있어 best-track 자료를 실측값과 직접 대조하는 후속 검증이 가능하다. 둘째, 이어도는 완전한 해상 지점이므로 육상 지형 자체를 기준점에 포함하지 않는 일관된 거리측을 제공한다. 셋째, 이어도는 한반도로 북상하는 열대저기압의 주요 통과 경로상에 위치하여 관측 거점으로 기능한다. 본 연구 자료에서 이어도로부터 500 km 이내를 통과한 열대저기압은 151개였으며, 한반도에 상륙한 열대저기압은 모두 이 반경 내를 통과하였다(Fig. 1).

거리 구간은 300, 500, 800, 1,500 km를 경계로 하여 다섯 개로 구분하였다. 여기서 500 km는 한반도에 상륙한 열대저기압이 모두 통과한 반경이고(Fig. 1), 1,500 km는 발생 직후의 미발달 열대저기압이 많은 저위도 해역과 북상 단계를 구분하는 경계이며, 300 km와 800 km는 그 안팎의 구간을 다시 나눈 경계이다. 500 km와 800 km는 JMA 태풍 크기 등급의 경계와 같은 값이나, 본 연구의 거리는 태풍의 크기가 아니라 열대저기압 중심과 기준점 사이의 거리이다. 300 km 이내 구간을 더 세분하지 않은 것은 강한 등급의 구간별 자료가 매우 적어 통계량을 산출할 수 없는 제약에 따른 것이다. 이 구간을 100 km 단위로 나눌 경우 매우강 등급의 구간별 기록이 1~11개에 그치고 초강력 등급에서는 기록 자체가 존재하지 않아 통계량을 산출할 수 없다. 본 연구의 한반도 접근 거리는 한반도 해안선까지의 최단거리가 아니라, 한반도 접근 경로상에 고정된 기준점까지의 거리이다. 이는 폭풍해일이나 연안 침수와 같이 해안의 피해 정도를 분석하는 측과는 성격이 다르며, 본 연구가 다루는 것은 자료의 정합성에 국한된다.

2.5 기관 간 차이 지표

기관 간 차이의 주요 지표로는 최대풍속의 평균절대차(mean absolute difference)를 사용하였다. 여기서 평균절대차는 동일

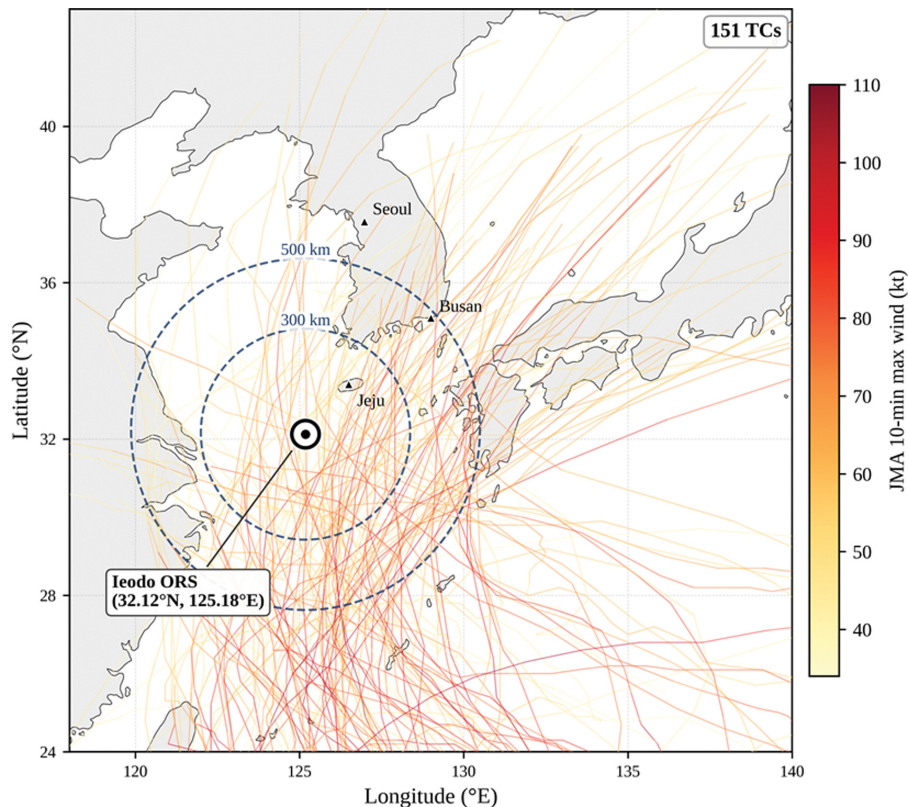


Fig. 1. Tracks of the 151 tropical cyclones that passed within 500 km of the Ieodo Ocean Research Station (Ieodo ORS; 32.12°N, 125.18°E) during 1977–2024. Line color denotes the JMA 10-min maximum wind speed. Dashed circles indicate radii of 300 and 500 km from the station.

열대저기압·동일 시각에 두 기관이 보고한 최대풍속 간 절대 차의 평균으로, 어느 한 기관의 값을 참값으로 두지 않는다. 최대풍속은 기관별 산출 절차의 차이가 가장 직접적으로 반영되는 변수이며, 설계 외력 산정이나 수치모의에서 결과를 좌우하는 값이기도 하다. 보조 지표로는 두 기관이 보고한 중심 위치 사이의 거리를 사용하였고, 중심기압은 JTWC가 2000년 이전에 값을 보고하지 않아 유효 표본이 특정 시기에만 편중되므로 제외하였다.

중심 위치의 차이는 평균과 함께 0.1° 이내 일치 비율을 병기하였다. 두 기관 모두 중심 위치를 0.1° 격자 단위로 보고하므로 위치 차이의 분포가 이산적으로 나타나며, 강한 등급 구간에서는 중앙값이 위도 0.1°에 해당하는 11.12 km에 고정되어 수렴의 정도를 나타내지 못하기 때문이다.

아울러 4장에서는 두 기관이 보고한 최대풍속 비율을 분석한다. 이 비율은 JMA의 10분 평균 최대풍속을 JTWC의 1분 평균 최대풍속으로 나눈 값으로 정의하며(이하 풍속비), 평균 시간이 짧은 JTWC의 값이 분모에 놓인다. 여기서 풍속비는 동일 지점의 풍속이 아니라 두 기관이 보고한 대표 최대풍속의 비율이므로, 풍속의 평균시간 규약 외에 바람장 구조와 추정 절차의 차이를 함께 포함한다. 모든 신뢰구간은 열대저기압 단위의 군집 부트스트랩($B = 10,000$)으로 산출하였다. 이는 동일 열대저기압 내 6시간 간격 기록이 서로 독립이 아니라는 점을 고려하기 위한 것으로, 개별 기록을 재표집 단

위로 사용할 경우 불확실성이 과소평가될 수 있다.

2.6 통계 분석 및 견고성 검토

거리와 강도의 관계는 개별 정합 기록을 대상으로 한 선형 회귀로 평가하였다. 각 강도 등급 내에서 거리 기울기를 산출한 뒤, 풍속 값을 설명 변수로 추가하여 등급 내부의 강도 차이를 통제하였다. 상호작용항은 표준화한 강도와 거리, 그리고 두 변수의 상호작용항을 포함한 회귀모형으로 평가하였으며, 계수의 신뢰구간은 열대저기압 단위 군집 부트스트랩으로 산출하였다. 결정계수는 개별 기록과 응답면 셀 평균에 대하여 각각 별도로 산출하였다. 셀 평균을 대상으로 한 값은 구간 평균화로 개별 기록의 산포가 제거되어 과도하게 높게 나타나므로, 두 값을 함께 제시하여 해석의 근거를 구분하였다. 열대저기압 내부 비교에는 대응 표본 t 검정을 사용하였다.

본 연구는 강도 분류의 기준으로 JMA 풍속을 사용하면서 동시에 JMA와 JTWC의 차이를 분석 대상으로 삼는다. 이 경우 강도 분류측과 비교 대상이 JMA를 공유하게 되므로, 강한 등급으로 분류된 구간에 JTWC 값이 상대적으로 큰 기록이 편중되어 기관 간 차이가 인위적으로 확대될 가능성이 있다. 이 가능성을 검토하기 위하여 강도 분류측을 JMA가 아닌 JTWC 1분 평균 풍속으로 대체하여 응답면을 재산출하였다. 그 결과 두 응답면의 셀 단위 순위상관은 $\rho = 0.96$ (Pearson

$r = 0.94$)로 나타났으며, 최강 등급 행에서 거리에 따라 차이가 단조 증가하는 양상 역시 양쪽 축에서 동일하게 유지되었다. 나아가 비교 기관쌍을 KMA-JTWC로 교체한 경우에도 같은 구조가 재현되었다. 따라서 확인된 발산 구조는 강도 분류에 사용된 풍속이나 비교 기관쌍의 선택에 의존하지 않는다.

3. 결 과

본 장에서는 기관 간 정합성을 강도와 거리 두 축에서 차

례로 검토한 뒤, 두 축을 결합한 응답면과 열대저기압 내부 비교를 통해 그 구조를 확인한다.

3.1 강도에 따른 정합성

강도 등급별 기관 간 차이의 공간 분포를 Fig. 2에 제시하였다. 등급이 상승할수록 개별 자료의 색이 짙어지는 동시에 분포 중심이 저위도로 이동하는데, 전자는 본 절에서 다루는 강도 의존성을, 후자는 3.2절에서 다루는 거리와 강도의 교란을 각각 예시한다.

기관 간 최대풍속의 차이는 열대저기압이 강해질수록 뚜렷

Table 1. Summary of inter-agency wind-speed and center-position differences by intensity class

Intensity class (KMA grade)	Wind-speed mean absolute difference (kt)	Mean position offset (km)	Agreement within 0.1° (%)	Exact position agreement (%)	n
TS 34–47 (no grade)	6.14	42.13	16.6	4.2	8,734
STS 48–63 (Normal)	8.36	30.76	23.9	6.8	6,165
TY 64–84 (Strong)	12.90	20.66	38.1	11.8	5,908
TY 85–104 (Very strong)	23.24	14.03	56.0	21.3	3,092
TY ≥ 105 (Super strong)	28.48	10.89	68.1	32.9	587

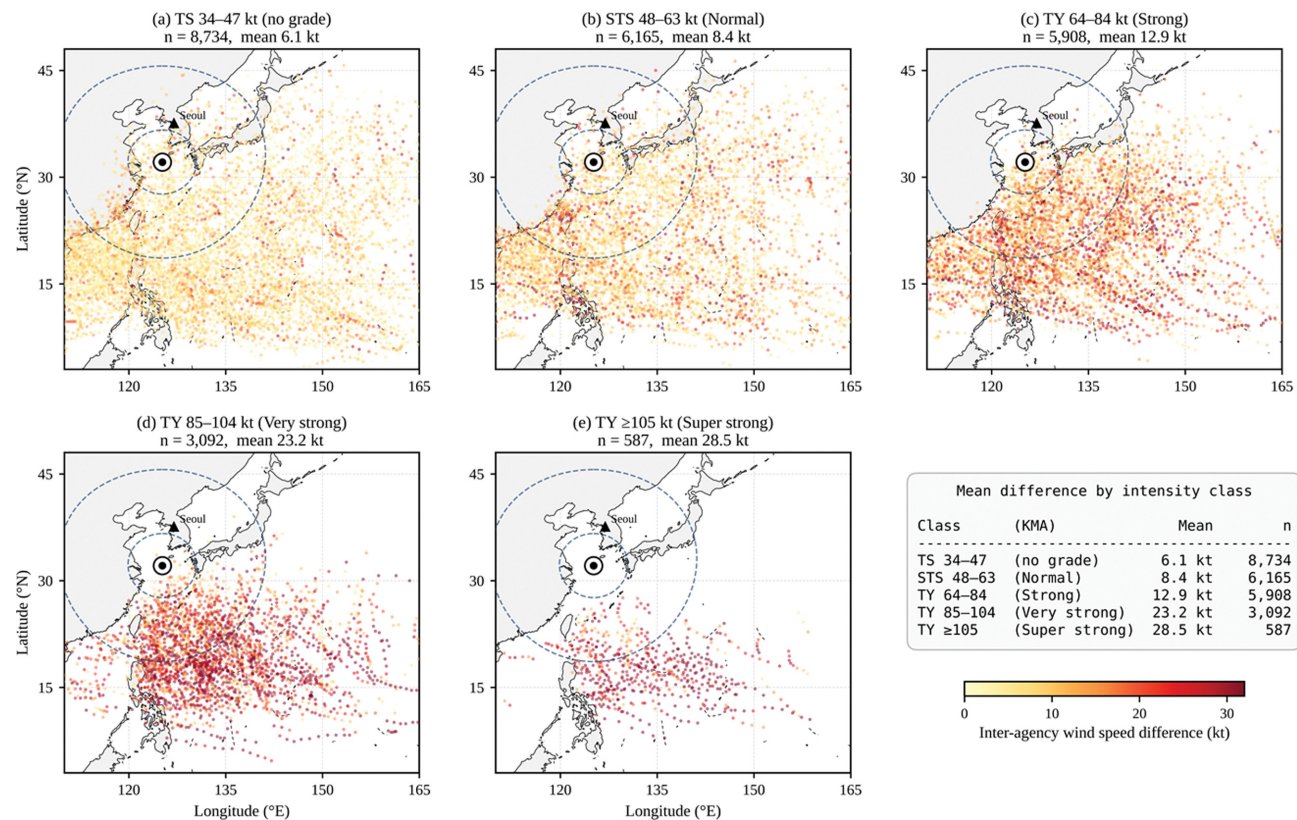


Fig. 2. Spatial distribution of the inter-agency absolute wind-speed difference (JMA–JTWC) by intensity class: (a) TS 34–47 kt, (b) STS 48–63 kt, (c) TY 64–84 kt, (d) TY 85–104 kt, (e) TY ≥ 105 kt. Panel (f) summarizes the mean difference for each class. Dashed circles indicate radii of 500 and 1,500 km from Ieodo ORS (open circle). Intensity classes follow the WMO western North Pacific scheme, with the typhoon category subdivided according to the KMA intensity grades given in parentheses.

하게 확대된다. JMA와 JTWC 사이의 평균절대차는 열대폭풍 등급 6.14 kt에서 시작하여 강한 열대폭풍 8.36 kt, 태풍(강) 12.90 kt, 태풍(매우강) 23.24 kt를 거쳐 태풍(초강력) 등급에서 28.48 kt로 증가한다(Table 1). 최약 등급과 최강 등급 사이에서 차이가 약 4.6배로 확대되며, 다섯 등급 전체에 걸쳐 단조 증가가 유지된다. 이러한 발산이 특정 기관쌍에 고유한 현상인지를 확인하기 위하여 비교 대상을 KMA-JTWC로 교체하여 동일한 분석을 수행하였다. 그 결과 KMA-JTWC의 등급별 값은 JMA-JTWC와 거의 동일하게 나타났으며, 두 기관쌍 간 차이는 전 강도 구간에서 최대 0.56 kt에 불과하였다. 이는 풍속 차이의 강도 의존적 증가가 JTWC를 포함한 두 기관쌍에서 공통으로 나타남을 보여준다. 이 차이가 두 기관의 평균시간 규약 차이로 설명될 수 있는지는 4장에서 별도로 검토하였다.

최대풍속과 달리 두 기관이 보고한 중심 위치의 차이는 열대저기압이 강해질수록 감소하였다. 평균 위치 차이는 열대폭풍 등급에서 42.13 km였으나, 강한 열대폭풍 30.76 km, 태풍(강) 20.66 km, 태풍(매우강) 14.03 km를 거쳐 태풍(초강력)에서는 10.89 km로 축소되었다. 최대풍속의 차이가 4.6배로 확대되는 바로 그 구간에서, 반대로 위치의 차이는 4분의 1로 감소하였다. 이러한 수렴은 일치율에서도 더 뚜렷하게 나타났다. 두 기관의 중심 위치가 0.1° (11.12 km) 이내로 일치한 기록의 비율은 열대폭풍 16.6%에서 강한 열대폭풍 23.9%, 태풍(강) 38.1%, 태풍(매우강) 56.0%, 태풍(초강력) 68.1%로 지속적으로 상승하였다. 좌표가 완전히 일치한 비율도 4.2%에서 32.9%로 증가하였다. 특히 초강력 등급에서는 전체 관측 시점의 3분의 2 이상에서 두 기관이 사실상 동일한 격자에 중심을 지정하였다.

한편 KMA와 JMA 사이의 비교는 본 연구에서 발산 구조를 검증하는 대상이 아니라 기준선으로만 활용하였다. 두 기관의 중심 위치 차이는 전체 기록의 다수에서 정확히 0으로 나타나는데, 이는 KMA가 상당 기간 JMA의 자료를 수치적으로 준용해 온 결과로 보인다(Park, 2026). 두 자료가 사실상 동일한 구간이 존재하는 이상, 이 조합에서는 거리나 강도에 따른 차이를 분석하는 것은 의미가 없다. 따라서 본 연구에서 강도 및 거리 의존적 발산 구조는 JTWC가 포함된 두 기관쌍, 즉 JMA-JTWC와 KMA-JTWC에서 확인된다.

3.2 거리에 따른 정합성

거리에 따른 정합성의 변화를 검토하기에 앞서, 거리와 강도가 서로 독립인지를 먼저 확인할 필요가 있다. 두 변수가 얹혀 있다면 거리만을 대상으로 한 분석은 강도의 효과를 포함한 결과를 산출하기 때문이다. 이어도로부터의 거리와 열대저기압 강도 사이의 상관계수는 -0.149 로, 원해로 멀어질수록 관측되는 열대저기압이 오히려 약해지는 경향이 확인되었다. 그러나 이 관계는 단조롭지 않으며, 거리 구간별로 태풍(매우강) 등급 이상이 차지하는 비율은 300 km 이내에서

가장 낮고 800~1,500 km 구간에서 가장 높으며, 1,500 km를 초과하는 구간에서는 다시 감소한다.

이러한 봉우리 형태의 분포는 표본의 지리적 구성과 관련된다. 이어도로부터 1,500 km를 초과하는 원해 구간에는 필리핀 동쪽 해상이나 저위도 태평양에서 발생한 직후의 미발달 열대저기압이 다수 포함된다. 반면 이어도 인근에 도달한 열대저기압은 대체로 중위도로 북상한 단계에 있어 강한 등급의 비율이 낮다. 그 결과 강도가 높은 열대저기압은 중간 거리대에 집중적으로 분포하게 된다. 이 분포는 Fig. 2의 (d)와 (e)에서 확인된다. 각 열대저기압이 생애 최대 강도에 도달한 지점의 분포 또한 같은 구조를 뒷받침한다. 최대 강도 도달 지점의 위도 중앙값은 태풍(강) 등급 21.6°N 에서 태풍(초강력) 등급 17.1°N 으로 낮아지며, 전체 1,173개 열대저기압 가운데 이어도 500 km 이내에서 최대 강도에 도달한 사례는 30개(2.6%)에 불과하다.

이러한 강도 구성의 영향은 강도를 고려하기 전과 후의 결과를 비교하면 명확하게 드러난다. 강도를 고려하지 않고 최대풍속의 절대차를 거리에 대해 회귀한 결과, 기울기는 1,000 km당 -0.27 kt로 나타났다. 이를 그대로 해석하면 이어도로부터 멀어질수록 기관 간 풍속 차이가 오히려 감소한다는 의미가 된다. 그러나 원거리 해석일수록 직접 관측이 제한되고 위성 기반 간접 추정에 대한 의존도가 높아진다는 점을 고려하면, 이러한 결과를 거리 자체의 효과로 해석하기는 어렵다. 이는 원거리 구간에 약한 열대저기압의 비중이 높아, 강도를 고려하지 않을 경우 이들의 낮은 평균절대차가 거리와의 관계에 함께 반영되기 때문이다.

실제로 강도 등급별로 구분하여 거리 기울기를 산출하면 그 부호가 반전되고, 기울기의 크기도 강도가 높아질수록 증가하였다(Table 2). 열대폭풍 등급의 기울기는 1,000 km당 $+0.02$ kt로 95% 신뢰구간 $[-0.22, +0.26]$ 이 0을 포함하였으며, 강한 열대폭풍 등급에서도 $+0.15$ kt $[-0.22, +0.54]$ 으로 거리와의 뚜렷한 관계가 확인되지 않았다. 반면 태풍(강)에서는 $+0.77$ kt $[+0.13, +1.46]$, 태풍(매우강)에서는 $+3.02$ kt $[+1.71, +4.27]$, 태풍(초강력)에서는 $+3.35$ kt $[+0.24, +6.75]$ 로 나타나 세 등급 모두 신뢰구간이 0을 포함하지 않았다. 다만 초강력 등급은 표본 수가 적어 신뢰구간이 상대적으로 넓었다. 따라서 거리와 기관 간 풍속 차이의 관계는 열대저기압의 강도에 따라 달라지며, 특히 태풍 등급 이상의 강한 열대저기압에서 거리가 증가할수록 기관 간 차이가 확대되는 경향이 나타났다.

등급을 고정하더라도 등급 내부에서 강도가 균일한 것은 아니다. 태풍(매우강) 등급에서 평균 강도는 300 km 이내 86.9 kt에서 1,500 km 초과 94.8 kt로 거리에 따라 증가하므로, 관측된 거리 효과가 등급 내부의 강도 차이에 기인할 가능성을 배제할 필요가 있다. 이를 확인하기 위해 각 등급 내에서 등급이 아닌 풍속 값 자체를 변수로 추가하여 회귀한 결과, 거리 기울기는 태풍(강) 등급 $+0.93$ kt $[+0.29, +1.63]$, 태풍(매

Table 2. Distance dependence of the inter-agency wind-speed mean absolute difference by intensity class (kt per 1,000 km). Adjusted slopes include wind speed as a covariate within each intensity class. Confidence intervals are from TC-clustered bootstrap (B = 10,000)

Intensity class	Within-class slope (a)	95% CI of (a)	Adjusted slope (b)	95% CI of (b)	No. of TCs	No. of records
TS 34–47	+0.02	[−0.22, +0.26]	+0.05	[−0.19, +0.29]	1,172	8,734
STS 48–63	+0.15	[−0.22, +0.54]	+0.19	[−0.18, +0.57]	879	6,165
TY 64–84	+0.77	[+0.13, +1.46]	+0.93	[+0.29, +1.63]	640	5,908
TY 85–104	+3.02	[+1.71, +4.27]	+2.84	[+1.57, +4.04]	360	3,092
TY ≥105	+3.35	[+0.24, +6.75]	+3.58	[+0.53, +6.87]	110	587

우강) 등급 +2.84 kt [+1.57, +4.04], 태풍(초강력) 등급 +3.58 kt [+0.53, +6.87]로 유지되었다(Table 2). 나아가 강도 범위를 85–94 kt로 좁혀 평균 강도가 거리에 따라 사실상 변하지 않는 표본(86.3~87.4 kt)을 구성한 경우에도, 평균절대차는 300 km 이내 8.0 kt에서 1,500 km 초과 23.2 kt로 증가하였다. 거리 효과는 등급 내부의 강도 분포로 환원되지 않는다.

중심 위치의 기관 간 차이는 거리에 거의 반응하지 않는다. 강도 등급 내에서 산출한 거리 기울기는 열대폭풍 1,000 km 당 +2.12 km, 태풍(강) +1.28 km, 태풍(매우강) 이상 +0.92 km이며, 상관계수는 모든 등급에서 0.06 수준에 머물러 거리와 위치 차이의 관계는 매우 약하였다. 이는 앞 절에서 확인한 위치의 강도 의존적 수렴과 대비된다. 중심 위치의 정합성은 열대저기압의 강도에는 민감하게 반응하지만 관측 지점으로부터의 거리에는 둔감하다. 반면 최대풍속의 정합성은 두 축 모두에 반응하며, 그 반응이 단순한 합이 아니라 상호작용의 형태를 띠는 점은 다음 절에서 확인한다.

3.3 거리와 강도에 따른 응답면

최대풍속의 평균절대차를 거리와 강도의 2차원 평면에 배치하면 정합성의 지형이 드러난다(Table 3, Fig. 3). 열대폭풍 등급에서는 거리와 관계없이 평균절대차가 5.7~6.9 kt 범위에 머무는 반면, 태풍(초강력) 등급의 원해 구간(1,500 km 초과)에서는 30.1 kt에 이르렀다. 두 조건 사이의 차이는 5배 이상이었다.

주목할 점은 이 지형이 두 축 중 어느 하나만으로는 설명되지 않는다는 것이다. 열대폭풍 등급의 행을 따라가면 거리가 1,500 km를 넘어서도 평균절대차에 실질적인 변화가 없으며, 강한 열대폭풍 등급에서도 7.0~8.5 kt 범위에 머문다. 반면 태풍(매우강) 등급의 행에서는 300 km 이내 9.1 kt에서 시작하여 300~500 km 12.8 kt, 500~800 km 17.2 kt, 800~1,500 km 21.2 kt, 1,500 km 초과 25.0 kt로 단조 증가한다. 거리가 기관 간 차이를 확대하는 현상은 열대저기압이 태풍 등급 이상일 때에만 발현되며, 이러한 강도 의존적 관계가 응답면의 대각 구조를 형성한다.

응답면에서 관측되는 조건부 관계는 회귀 계수로도 확인된다. 최대풍속의 절대차를 표준화한 강도와 거리에 대하여 회귀한 결과, 강도를 고려한 거리의 회귀 계수는 거리 1 표준편차 증가당 0.66 kt로 나타났다. 여기에 상호작용항을 추가하면 강도 6.14, 거리 0.75, 거리와 강도의 상호작용 계수 0.64가 얻어진다. 강도와 거리를 표준화하였으므로 주효과 계수는 다른 변수가 평균 수준에 있을 때 해당 변수가 1 표준편차 증가할 때 평균절대차가 얼마나 변하는지를 나타내며, 양의 상호작용 계수는 강도가 높아질수록 거리와 기관 간 차이의 관계가 강화됨을 의미한다. 상호작용항의 열대저기압 단위 군집부트스트랩 95% 신뢰구간은 [+0.27, +0.99]로 0을 포함하지 않았으며, 강도와 거리의 계수 역시 각각 [+5.79, +6.48], [+0.39, +1.13]으로 모두 양의 범위에 있었다. 이는 강도와 거리의 관계가 단순 가산적이지 않으며, 강도가 높아질수록 거리와 기관 간 차이의 양의 관계가 강화됨을 보여준다.

Table 3. Response surface of the inter-agency wind-speed mean absolute difference between JMA and JTWC (kt). Values are the mean [95% TC-clustered bootstrap CI, B = 10,000] and the number of matched records. Dashes indicate combinations with no matched record

Intensity (JMA 10-min)	< 300 km	300–500 km	500–800 km	800–1,500 km	> 1,500 km
TS 34–47	6.9 [5.6, 8.5] n = 89	5.9 [4.9, 6.9] n = 164	5.7 [5.0, 6.5] n = 327	6.4 [5.8, 7.1] n = 1,282	6.1 [5.9, 6.4] n = 6,872
STS 48–63	7.7 [6.3, 9.2] n = 103	7.0 [5.9, 8.3] n = 122	8.0 [6.7, 9.4] n = 309	8.3 [7.6, 9.0] n = 1,231	8.5 [8.0, 9.0] n = 4,400
TY 64–84	7.5 [5.4, 10.2] n = 113	10.8 [8.8, 12.8] n = 158	11.2 [9.7, 12.8] n = 342	13.0 [12.0, 13.9] n = 1,433	13.3 [12.5, 14.1] n = 3,862
TY 85–104	9.1 [5.0, 13.8] n = 16	12.8 [9.6, 16.4] n = 46	17.2 [14.5, 20.1] n = 157	21.2 [19.5, 22.9] n = 894	25.0 [23.7, 26.3] n = 1,979
TY ≥105	—	—	23.5 [15.7, 29.0] n = 10	23.1 [19.2, 27.3] n = 126	30.1 [28.1, 32.0] n = 451

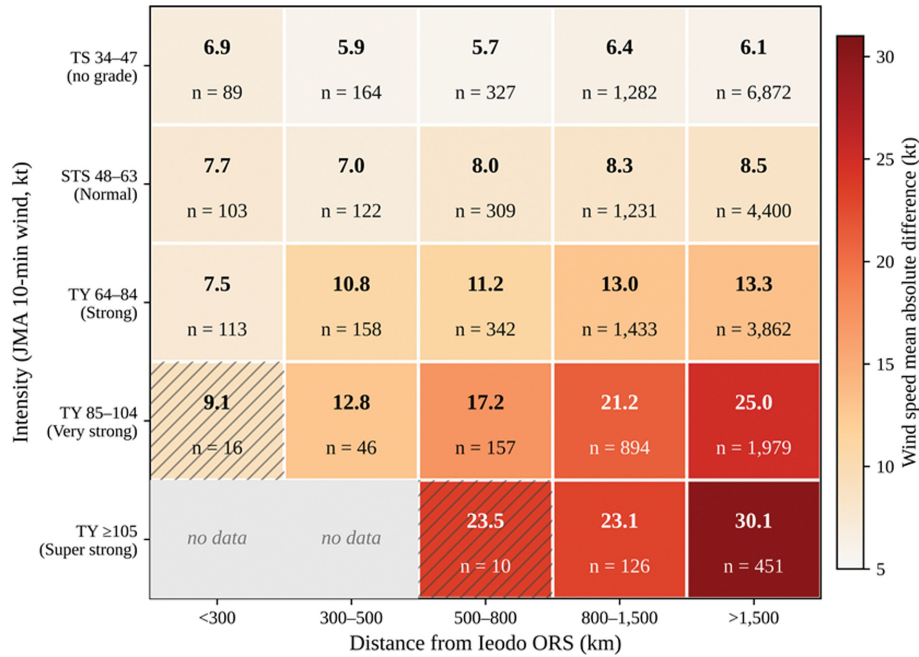


Fig. 3. Response surface of the inter-agency wind speed mean absolute difference between JMA and JTWC as a function of TC intensity and distance from Ieodo ORS. Each cell gives the mean absolute difference and the number of matched records. Hatched cells indicate sparse samples ($n < 30$); cells marked “no data” contain no matched record during 1977–2024.

Table 4. Response surface of the inter-agency center-position difference between JMA and JTWC. Values indicate the mean offset (km) and the percentage of records agreeing within 0.1°

Intensity (JMA 10-min)	< 300 km	300–500 km	500–800 km	800–1,500 km	> 1,500 km
TS 34–47	40.7, 19.1%	36.3, 19.5%	35.4, 21.7%	39.3, 18.7%	43.1, 15.9%
STS 48–63	33.3, 19.4%	26.9, 25.4%	24.8, 31.4%	30.7, 25.1%	31.2, 23.2%
TY 64–84	21.8, 38.1%	20.4, 30.4%	17.2, 44.4%	19.8, 41.1%	21.2, 36.8%
TY 85–104	23.2, 56.2%	13.6, 56.5%	13.2, 61.8%	13.4, 59.6%	14.3, 53.9%
TY ≥105	—	—	14.1, 50.0%	8.9, 79.4%	11.4, 65.4%

중심 위치의 응답면은 최대풍속과 대조적인 구조를 보인다 (Table 4). 최대풍속의 기관 간 차이가 가장 큰 우하단 영역에서는 중심 위치가 0.1° 이내에서 일치하는 비율이 54~65%에 이르는 반면, 최대풍속 차이가 가장 작은 좌상단 영역에서는 약 19%에 머문다. 즉 동일한 거리·강도 조건에서도 최대풍속의 차이는 확대되는 반면 중심 위치는 오히려 수렴하며, 이는 3.1절에서 확인한 변수별 정합성의 상반된 강도의 의존성이 거리까지 고려한 2차원 응답면에서도 유지됨을 보여준다.

이러한 거리·강도 구조는 회귀분석에서도 확인된다. 개별 기록을 대상으로 한 응답면 회귀의 결정계수는 $R^2 = 0.33$ 으로, 거리와 강도만으로 기관 간 최대풍속 차이의 변동 중 약 3분의 1을 설명하였다. 이는 두 변수가 기관 간 차이의 주요 구조를 형성하지만, 개별 기록 수준의 변동 전체를 설명하지는 못함을 의미한다. 한편 각 거리·강도 셀의 평균절대차를 대상으로 하면 $R^2 = 0.91$ 까지 높아지지만, 이 값은 연구자가 설정한 거리·강도 구간과 셀 평균화의 영향을 받으므로 응답면의 구조를 시각적으로 요약하는 기술적 지표로만 해석하였

다. 따라서 본 연구에서 거리와 강도의 결합 관계를 뒷받침하는 통계적 근거는 셀 평균의 높은 결정계수 자체가 아니라 개별 기록 기반 회귀에서 확인된 계수와 상호작용에 있으며, 다음 절에서는 동일 열대저기압 내부의 강도 변화를 비교하여 이러한 강도 의존성이 열대저기압 간 구성 차이만으로 설명되는지를 추가로 검토한다.

3.4 열대저기압 내부 비교

앞서 확인한 강도 의존성에 대해서는 다른 해석이 가능하다. 강한 열대저기압과 약한 열대저기압이 애초에 서로 다른 성격의 집단이어서, 관측된 차이가 열대저기압 자체의 이질성을 반영하는 것일 수 있다는 것이다. 이 가능성은 서로 다른 열대저기압을 비교하는 방식으로는 배제하기 어렵다. 하지만 동일 열대저기압의 서로 다른 강도 국면을 비교하면, 발생 해역·계절·경로 유형 등 열대저기압 개체에 고유한 특성의 영향을 상당 부분 줄인 상태에서 강도 변화와 기관 간 차이의 관계를 검토할 수 있다.

비교의 두 국면은 열대폭풍 등급(34~47 kt)과, 태풍(매우강)

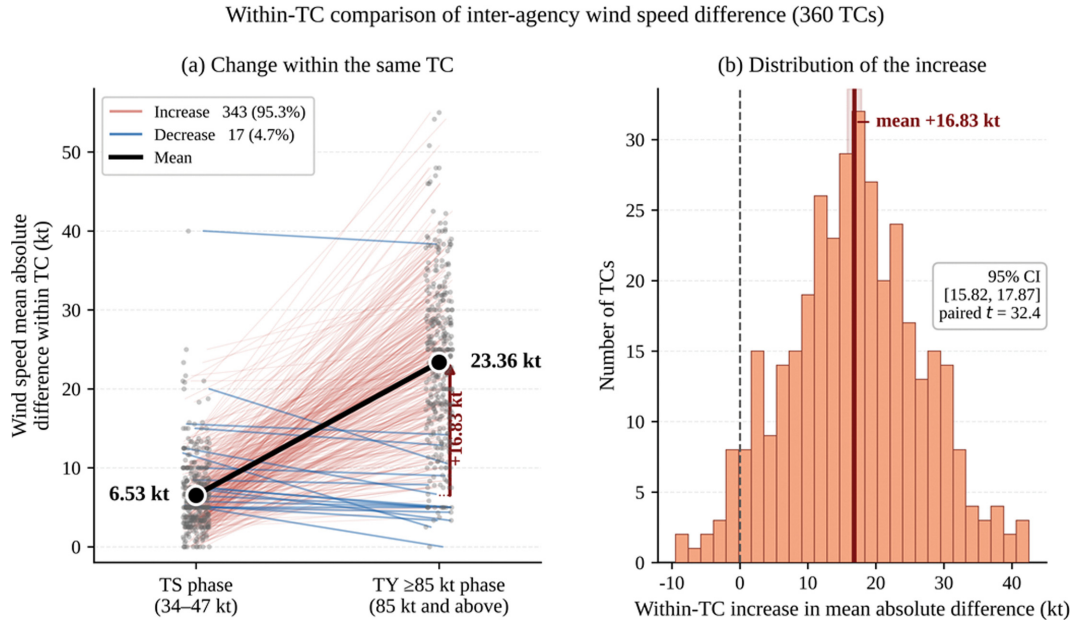


Fig. 4. Within-TC comparison of the inter-agency wind speed mean absolute difference for the 360 tropical cyclones that experienced both the TS phase (34–47 kt) and the TY ≥ 85 kt phase. (a) Change for each individual TC; red lines denote an increase, blue lines a decrease, and the thick black line the mean. (b) Distribution of the within-TC increase, with the shaded band showing the 95% bootstrap confidence interval of the mean.

등급 이상(85 kt 이상)으로 정의하였다. 두 등급은 강도 체계에서 서로 떨어져 있어 국면 간 대비가 뚜렷하다. 분석 기간 중 두 등급을 모두 거친 열대저기압은 360개였다. 이들의 약한 국면에서 기관 간 차이의 평균은 6.53 kt였으나 강해진 국면에서는 23.36 kt로 증가하였다. 열대저기압 개체별로 짝지어 비교한 결과 360개 가운데 343개(95.3%)에서 강한 국면의 차이가 더 컸으며, 개체 내부의 증가폭은 평균 16.83 kt, 95% 신뢰구간 [15.82, 17.87]로 0에서 충분히 떨어져 있었다(대응표본 $t = 32.4$). 차이값의 분포는 정규성을 가정하는 t 검정의 전체를 충족하였다(Shapiro-Wilk $p = 0.72$). 열대폭풍, 태풍(강), 태풍(매우강) 이상의 세 등급을 모두 경험한 열대저기압 가운데 273개(75.8%)에서는 등급이 상승할수록 차이가 단조적으로 증가하였다(Fig. 4).

동일 열대저기압 내부에서도 강한 등급에서 기관 간 차이가 일관되게 확대되었다는 결과는, 앞서 확인된 강도의 의존성이 서로 다른 열대저기압의 구성 차이만으로 설명되지 않음을 보여준다. 다만 강도 변화에서는 위경도 위치와 생애 단계의 변화가 함께 수반되므로, 이 결과를 강도의 독립적인 인과 효과로 해석하지는 않는다. 이 분석은 강도 상승에 수반되는 조건 전체에서 기관 간 차이가 체계적으로 확대됨을 보여준다. 평균시간 규약의 영향은 4장에서 검토하며, 강도 자체의 독립적인 기여를 분리하는 것은 후속 연구로 남긴다.

3.5 근해 강풍 구간의 표본 제약

이상의 결과를 해석할 때 한 가지 유의할 점이 있다. 강한 열대저기압이 강도를 유지한 채 이어도 인근까지 접근하는 사례 자체가 드물기 때문에, 응답면에서 방재상 가장 중요한 근

해·강풍 영역일수록 표본이 희박하다는 점이다. 태풍(매우강) 등급에서 이어도 300 km 이내에 해당하는 정합쌍은 16개에 불과하며, 이 구간의 평균절대차 9.1 kt에 대한 95% 신뢰구간은 [5.0, 13.8]로 다른 구간에 비해 현저히 넓다. 더 나아가 태풍(초강력) 등급에서는 이어도 500 km 이내로 접근한 사례가 1977~2024년 기간에 전혀 없다(Table 3). 105 kt 이상의 강도를 유지한 채 관측 거점 인근까지 복잡한 사례가 한 건도 없다는 뜻이며, 이는 Fig. 2의 (e)에서도 확인된다.

이러한 공백은 자료 처리 방식에서 비롯된 것이 아니라 자연 현상 자체의 성격을 반영한다. 열대저기압은 중위도로 북상하는 과정에서 대체로 약화되므로, 최고 강도를 유지한 채 한반도 인근 해역에 도달하는 사례는 본질적으로 희소하다. 다만 이는 연안 방재에서 중요한 근해·초강력 조합에 대한 기관 간 정합성을 관측 자료에 근거하여 평가할 수 없었음을 의미한다. 따라서 본 연구는 표본이 희소한 특정 거리·강도 조합의 차이를 확정적으로 해석하지 않는다.

4. 평균시간 효과 검토

3장에서 확인한 최대풍속의 발산은 두 기관이 서로 다른 평균시간 규약을 사용한다는 사실, 즉 JTWC가 1분 평균을, JMA가 10분 평균을 채택하고 있다는 점으로 설명될 여지가 있다. 본 장에서는 평균시간 규약만으로 설명되지 않는 잔차가 실재하는지를 확인한다.

4.1 강도에 따른 풍속비의 변화

평균을 취하는 구간이 짧을수록 관측되는 최대치는 커지거

Table 5. Inter-agency wind-speed differences before and after applying a fixed conversion factor of 0.88. Negative reduction rates indicate that the conversion increased the difference

Intensity class	Mean absolute difference before conversion (kt)	Mean absolute difference after conversion (kt)	Reduction in mean absolute difference (%)	Wind-speed ratio (JMA/JTWC)	n
TS 34–47	6.14	6.55	–6.7	1.01	8,734
STS 48–63	8.36	7.58	+9.3	0.96	6,165
TY 64–84	12.90	8.44	+34.6	0.89	5,908
TY 85–104	23.24	12.01	+48.3	0.81	3,092
TY ≥105	28.48	13.24	+53.5	0.80	587
All	11.02	8.12	+26.4	0.94	24,486

나 같아진다. 따라서 동일한 바람장에 평균시간만 다르게 적용한다면 풍속비는 1을 넘지 않아야 한다. 이 관계는 평균 연산의 성질에서 도출되므로, 풍속비 1은 평균시간 규약만을 가정할 때 기대되는 상한에 해당한다.

실제 자료에서 이 상한은 전체 정합쌍의 20.4%에서 초과되며, 등급별로는 열대폭풍 32.0%, 강한 열대폭풍 23.5%, 태풍(강) 11.7%, 태풍(매우강) 2.1%, 태풍(초강력) 0.5%로 약한 열대저기압일수록 많아진다. 이러한 초과는 두 기관이 모두 유효한 풍속을 보고한 기록에서 나타나며, 가장 흔한 조합은 JMA 35 kt 대 JTWC 30 kt와 같이 두 기관이 같은 시점을 한 단계 다르게 판정한 경우이다. 평균시간 규약의 차이가 두 기관의 값을 가르는 유일한 요인이라면 이러한 값은 원리적으로 나타날 수 없다.

실무에서는 1분 평균 풍속을 10분 평균 상당값으로 변환할 때 0.88을 단일 계수로 적용하는 관행이 널리 사용되어 왔다(WMO, 1993). 그러나 본 연구에서 이 계수를 적용한 결과는 열대저기압의 강도에 따라 다르게 나타난다(Table 5). 표에서 차이 감소율은 환산 전 평균절대차 대비 감소 비율로 정의하였으며, 음의 값은 환산 후 차이가 오히려 증가하였음을 의미한다. 태풍(초강력) 등급에서는 평균절대차가 28.48 kt에서 13.24 kt로 53.5% 감소하는 반면, 열대폭풍 등급에서는 6.14 kt에서 6.55 kt로 오히려 6.7% 증가한다. 이 구간의 평균 풍속비가 1.01로 1을 넘기 때문에 0.88을 곱하면 과소평가가 확대되는 것이다. 나아가 개선이 뚜렷한 구간에서도 잔차는 해소되지 않아, 환산 후 태풍(초강력) 등급의 잔차 13.24 kt는 열대폭풍 등급의 환산 전 차이 6.14 kt의 두 배를 넘는다.

문제는 풍속비 자체가 상수가 아니라는 데 있다. 강도 등급이 상승함에 따라 풍속비는 1.01, 0.96, 0.89, 0.81, 0.80으

로 단조 감소한다. 평균시간 차이를 하나의 고정 환산계수로 충분히 설명할 수 있다면, 풍속비가 강도에 따라 이처럼 체계적으로 변화하기는 어렵다.

4.2 거리에 따른 풍속비의 변화

평균시간 규약은 관측 지점과의 거리와도 무관하다. 평균시간 차이를 하나의 고정 환산계수로 충분히 설명할 수 있다면, 동일한 강도 조건에서 풍속비가 거리에 따라 체계적으로 변화할 이유는 크지 않다. 그러나 실제 자료에서는 그렇지 않다(Table 6). 열대폭풍 등급에서 풍속비는 이어도 300 km 이내 1.15에서 1,500 km 초과 1.00으로 감소하며, 태풍(매우강) 등급에서는 0.93에서 0.80으로 감소한다. 다섯 등급 모두에서 동일한 방향의 감소가 관측되고, 등급 내 거리 기울기는 1,000 km당 –0.012에서 –0.024 사이에 분포한다.

이는 4.1절에 추가적인 증거를 제공한다. 강도 의존성만으로는 강한 태풍의 관측 조건이 특수하다는 해석의 여지가 남지만, 강도를 고정한 상태에서 거리에 따른 변화가 나타난다면 그 해석은 성립하지 않는다. 규약으로 설명할 수 없는 변동이 서로 다른 두 축에서 모두 확인되는 셈이다. Table 6의 괄호 안의 값은 풍속비와 0.88의 차이로, 양의 편차는 0.88이 관측된 JMA/JTWC 풍속비보다 작아, 이를 JTWC 풍속에 적용하면 JMA 기준으로 과소평가됨을 의미하며, 음의 편차는 과대평가가 발생함을 뜻한다. 편차가 사실상 0에 가까운 구간은 태풍(강) 등급의 원해와 태풍(매우강) 등급의 300–500 km 구간(+0.01)에 국한된다. 단일 계수가 특정한 강도·관측 조건에서 도출된 값이며 그 조건을 벗어날 때 어긋난다는 해석이 가능하나(Harper et al., 2010), 본 연구의 자료만으로는 이를 확정할 수 없다.

Table 6. Response surface of the JMA/JTWC wind-speed ratio as a function of distance and intensity. Values in parentheses are deviations from the conventional factor of 0.88; positive values indicate underestimation by that factor

Intensity (JMA 10-min)	< 300 km	300–500 km	500–800 km	800–1,500 km	> 1,500 km
TS 34–47	1.15 (+0.27)	1.09 (+0.21)	1.05 (+0.17)	1.03 (+0.15)	1.00 (+0.12)
STS 48–63	1.05 (+0.17)	1.01 (+0.13)	0.98 (+0.10)	0.97 (+0.09)	0.94 (+0.06)
TY 64–84	0.95 (+0.07)	0.92 (+0.04)	0.90 (+0.02)	0.89 (+0.01)	0.89 (+0.01)
TY 85–104	0.93 (+0.05)	0.89 (+0.01)	0.85 (–0.03)	0.82 (–0.06)	0.80 (–0.08)
TY ≥105	—	—	0.83 (–0.05)	0.83 (–0.05)	0.79 (–0.09)

4.3 중심 위치 정합성을 통한 교차검증

평균시간 규약은 풍속의 산출에만 적용되는 개념이며 중심 위치의 결정과는 무관하다. 그럼에도 3.1절에서 확인하였듯 중심 위치의 기관 간 차이 또한 강도에 따라 체계적으로 변화하여, 0.1° 이내 일치율이 열대폭풍 16.6%에서 초강력 등급 68.1%로 상승한다. 즉 중심 위치 정합성은 평균시간 규약과는 무관하고, 거리에는 거의 반응하지 않지만 강도에는 뚜렷하게 반응한다. 평균시간과 무관한 중심 위치에서도 강도에 따른 체계적인 정합성 변화가 나타난다는 사실은, 기관 간 차이가 규약의 산출만은 아니며 강도에 따라 달라지는 관측 및 해석 조건이 함께 작용하고 있음을 시사한다.

이상의 검토는 평균시간 규약의 차이가 기관 간 풍속 차이의 일부만을 설명한다는 결론으로 이어진다. 근거는 네 가지다. 평균시간 규약만으로는 기대되지 않는 풍속비 1의 초과가 전체의 20%를 넘고, 단일 고정 계수로 설명된다면 큰 변화가 없어야 할 풍속비가 강도에 따라 1.01에서 0.80으로 변하며, 강도를 고정하더라도 거리에 따라 다시 변하고, 규약과 무관한 중심 위치에서도 강도에 따른 체계적인 정합성 변화가 나타난다. 잔여 부분의 요인별 분해와, 단일 환산계수를 바람장 전체에 적용할 때 발생하는 공간적 편의는 별도의 후속 연구에서 다룰 예정이다.

5. 논 의

5.1 조건부 정합성

기관 간 정합성을 하나의 수치로 요약하기는 어렵다. 최대 풍속과 중심 위치는 강도에 따라 서로 반대 방향의 정합성 변화를 보이며, 거리의 효과는 태풍 등급 이상에서만 나타나 강도가 높을수록 기관 간 차이를 크게 확대한다. 따라서 기관 간 정합성은 고정된 값이 아니라, 분석 변수와 거리·강도의 평면 위에서 조건에 따라 달라지는 조건부 구조로 이해할 필요가 있다. 최대풍속과 중심 위치의 정합성이 강도에 대하여 반대 방향으로 변하는 것은 두 변수의 결정 방식 차이로 해석할 수 있다. 중심 위치는 위성 영상에서 구조를 직접 판독하여 결정하므로, 열대저기압이 강해져 눈이 뚜렷해질수록 기관 간 결정이 수렴할 가능성이 있다. 반면 1987년 항공 정찰이 중단된 이후 북서태평양의 최대풍속은 주로 Dvorak 기법의 강도 지수를 풍속으로 환산하여 추정되며, JMA와 JTWC의 환산 관계는 강도가 높을수록 벌어진다(Knapp and Kruk, 2010). 따라서 위치 판독이 수렴하는 강한 강도에서 풍속 추정의 기관 간 차이는 오히려 확대될 수 있다. 거리 효과가 태풍 등급 이상에서만 나타나는 것은, 원해일수록 위성 기반 추정에 대한 의존이 커진다는 점과 강한 강도에서만 환산 관계가 벌어진다는 두 특성이 함께 작용한 결과일 가능성이 있다.

이는 자료원 선택의 문제를 다시 보게 한다. 어느 기관의 자료를 사용하든 결과가 크게 달라지지 않는다는 전제는 조건에 따라 성립하기도 하고 성립하지 않기도 한다. 이어도 인

근의 약한 열대저기압을 대상으로 하는 분석에서 기관 선택으로 발생한 차이는 6 kt 안팎에 머물지만, 원해의 초강력 등급을 대상으로 할 경우 그 차이는 30 kt에 이른다. 자료원 선택의 영향을 평가하려면 대상 열대저기압이 응답면의 어느 위치에 놓이는지를 먼저 확인해야 한다.

특히 3.2절에서 확인한 강도 구성에 따른 왜곡은 주의를 요한다. 강도를 통제하지 않은 채 거리 효과만을 산출하면 원해에서 정합성이 오히려 높아진다는 반대 방향의 결론이 도출된다. 기존 연구가 두 축 가운데 하나만을 다루었다면, 그 결과를 해석할 때 이러한 가능성을 함께 고려할 필요가 있다.

5.2 방재적 함의

한반도로 접근하는 열대저기압은 이어도를 통과하는 시점에 이미 중위도에 진입하여 약화된 경우가 많다. 약한 등급에서는 중심 위치의 기관 간 일치율이 20% 안팎에 그쳐 경로 기반 분석에서도 자료원 선택이 결과에 영향을 미칠 수 있다. 다만 최대풍속에서는 차이가 6 kt 안팎으로 작아 풍속 기반 분석의 자료원 민감도는 상대적으로 낮다. 반면 태풍(매우강) 강도를 유지한 채 근해에 접근하는 드문 경우에는 상황이 반대가 된다. 중심 위치는 절반 이상 일치하지만 최대 풍속의 기관 간 차이는 9 kt 이상으로 남는다. 또한 태풍(매우강) 전체 표본에서도 0.88 환산 후 평균절대차가 12.01 kt로 남아 단일 환산계수만으로 차이가 해소되지 않았다.

이 차이는 후속 계산에서 증폭된다는 점에서 특히 주의가 필요하다. 항력계수가 일정하다고 가정하면 풍응력은 풍속의 제곱에 비례하므로, 풍속의 상대차이는 응력에서 약 두 배로 확대된다. 초강력 등급 평균 풍속비 0.80에 관행적인 0.88을 적용하면 풍속이 약 10% 과대평가되어 풍응력 기준 약 21%의 과대평가가 되며, 반대로 열대폭풍 등급에서는 관측된 풍속비가 1.01이므로 풍속 약 13%, 응력 약 24%의 과소평가가 발생한다. 즉 단일 환산계수(0.88)는 값을 일정 비율로 이동시키는 것이 아니라, 약한 열대저기압은 과소평가하고 강한 열대저기압은 과대평가하는 방향성 있는 편의를 만든다. 폭풍해일과 파랑은 풍응력을 통해 구동되므로 이러한 입력 편의는 폭풍해일 및 파랑 모의 결과에도 영향을 미칠 수 있으며 이를 후속 연구에서 다룰 예정이다. 아울러 설계 외력의 산정이 극치 분포의 상단에 의존한다는 점을 고려하면, 기관 간 차이가 가장 큰 구간이 곧 설계값을 좌우하는 구간이라는 사실도 함께 유의할 필요가 있다.

이는 자료원을 하나로 확정하기보다 복수 자료원 사이의 차이를 불확실성 범위로 함께 제시하는 접근이 필요함을 시사한다. 본 연구의 응답면은 그러한 범위를 설정하기 위한 기초 자료로, 대상 열대저기압의 강도와 접근 거리가 결정되면 해당 조건에서 관측된 기관 간 차이를 자료원 선택에 따른 불확실성의 경험적 참고 범위로 활용할 수 있다. 다만 실제 적용 가능한 형태로 정식화하는 작업은 별도의 연구가 필요하다.

5.3 연구의 한계

본 연구에는 두 가지 주요 한계가 있다. 첫째, 3.5절에서 확인한 바와 같이 강한 열대저기압이 강도를 유지한 채 이어도 인근까지 접근한 사례가 희소하여, 근해·강풍 조건에서의 기관 간 정합성을 충분히 평가하기 어렵다. 둘째, 거리와 강도는 기관 간 차이의 체계적 구조를 규정하지만 그 설명력은 개별 기록 수준에서 $R^2 = 0.33$ 에 그친다. 두 변수만으로 설명되지 않는 변동이 상당 부분 남으며, 이는 응답면이 조건별 경향을 제시할 뿐 개별 사례의 차이를 예측하는 도구는 아님을 뜻한다. 향후에는 열대저기압의 공간적 위치와 발달 단계, 강도 변화율, 관측 시대 등 추가 조건을 고려하여 기관 간 정합성의 변동 요인을 검토할 필요가 있다.

6. 결 론

본 연구는 북서태평양 열대저기압 best-track 자료의 기관 간 정합성을 이어도 종합해양과학기지에서부터의 거리와 열대저기압 강도를 두 축으로 하는 응답면 위에서 검토하였으며, 다음의 결과를 얻었다.

첫째, 최대풍속의 기관 간 차이는 강도가 상승할수록 확대되어 열대폭풍 등급 6.14 kt에서 태풍(초강력) 등급 28.48 kt에 이르지만, 중심 위치는 같은 구간에서 수렴하여 0.1° 이내 일치율이 16.6%에서 68.1%로 상승한다. 정합성은 변수에 따라 반대 방향으로 움직이며 단일 척도로 요약되지 않는다.

둘째, 거리의 효과는 강도에 조건부이다. 열대폭풍 및 강한 열대폭풍 등급에서 거리는 유의한 효과를 갖지 않으나(1,000 km당 +0.02 kt, +0.15 kt), 태풍 등급 이상에서는 +0.77 kt에서 +3.35 kt까지 증가한다. 강도를 통제하지 않을 경우 이 효과는 -0.27 kt로 부호가 반전되어 나타난다.

셋째, 이러한 강도 의존성은 열대저기압 간 이질성만으로 설명되지 않는다. 열대폭풍과 태풍(매우강) 국면을 모두 경험한 360개 열대저기압 가운데 343개(95.3%)에서 동일 개체의 강한 국면에서 기관 간 차이가 더 크게 나타났다.

넷째, 기관 간 풍속 차이는 하나의 고정된 평균시간 환산 계수만으로 설명되지 않는다. 전체 정합쌍의 20.4%에서 JMA의 10분 평균 최대풍속이 JTWC의 1분 평균값보다 크게 나타났다고, 풍속비는 강도에 따라 1.01에서 0.80으로 변화하며, 강도를 고정하더라도 거리에 따라 다시 변한다(열대폭풍 등급 1.15 → 1.00).

다섯째, 105 kt 이상의 강도를 유지한 채 이어도 500 km 이내로 접근한 사례는 1977~2024년 기간에 존재하지 않아, 방재 관점에서 가장 중요한 조건의 정합성은 관측 자료에 근거하여 평가되지 못한 상태로 남는다.

이상의 결과는 연안 방재 실무에서 열대저기압 자료를 활용할 때 자료원에 따른 차이가 거리와 강도 조건에 따라 달라짐을 보여주며, 대상 열대저기압의 강도와 접근 거리를 함께 고려한 불확실성 평가가 필요함을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 정부(해양수산부)의 재원으로 한국해양과학기술원(KIOST)의 지원을 받아 수행된 연구임(KB0014. 해양에너지 및 항만·해양구조물 고도화 기술개발).

References

- Bai, L., Xu, Y., Tang, J. and Guo, R. (2023). Interagency discrepancies in tropical cyclone intensity estimates over the western North Pacific in recent years. *Atmospheric Science Letters*, 24(1), e1132.
- Barcikowska, M., Feser, F. and von Storch, H. (2012). Usability of best track data in climate statistics in the western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 140(9), 2818–2830.
- Harper, B.A., Kepert, J.D. and Ginger, J.D. (2010). Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions. WMO/TD-No. 1555, World Meteorological Organization, Geneva.
- JMA (2026). RSMC Tokyo best track data. RSMC Tokyo – Typhoon Center. <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html> (accessed September 2026).
- JTWC (2026). JTWC best track archive. <https://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html?best-tracks> (accessed September 2026).
- KMA (2026). Historical best track data. National Typhoon Center. <https://www.weather.go.kr/w/hazard/typhoon/history.do> (accessed September 2026) (in Korean).
- Knaff, J.A., Brown, D.P., Courtney, J., Gallina, G.M. and Beven II, J.L. (2010). An evaluation of Dvorak technique-based tropical cyclone intensity estimates. *Weather and Forecasting*, 25(5), 1362–1379.
- Knapp, K.R. and Kruk, M.C. (2010). Quantifying interagency differences in tropical cyclone best-track wind speed estimates. *Monthly Weather Review*, 138(4), 1459–1473.
- Knapp, K.R., Kruk, M.C., Levinson, D.H., Diamond, H.J. and Neumann, C.J. (2010). The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(3), 363–376.
- Lander, M.A. (2008). A comparison of typhoon best-track data in the western North Pacific: Irreconcilable differences. 28th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, Paper 4B.2.
- Landsea, C.W. and Franklin, J.L. (2013). Atlantic hurricane database uncertainty and presentation of a new database format. *Monthly Weather Review*, 141(10), 3576–3592.
- Mayers, D. and Ruf, C. (2019). Tropical cyclone center fix using CYGNSS winds. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(9), 1993–2003.
- Park, Y.H. (2026). Spatiotemporal consistency analysis of KMA, JMA, and JTWC tropical cyclone track records: Inter-agency

- comparison. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 26(5), 415-425 (in Korean).
- WMO (1993). Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. WMO/TD-No. 560, Tropical Cyclone Programme Report No. TCP-31. World Meteorological Organization, Geneva.

Received 12 September, 2026

Revised 14 October, 2026

Accepted 15 October, 2026