

실해역 기울기 계측 데이터를 기반으로 한 스마트 등부표의 안정도 분석

이제형, 채정근, 박종현, 이충진, 이동엽

한국항로표지기술원

leejh@katon.or.kr, jgchae@katon.or.kr, jpark2020@katon.or.kr, cjlee@katon.or.kr, dy1624@katon.or.kr

Stability Analysis of Smart Buoys Based on Real-time Ocean Tilt Measurement Data

Jehyeong Lee, Jeonggeun Chae, Jonghyun Park, Chungjin Lee, Dongyeob Lee

Korea Institute of Aids to navigation.

요약

본 논문은 LS-35급 및 LANBY-100급 스마트 등부표를 대상으로 실해역에서 수집된 기울기 계측 데이터를 분석하여 안정도 특성을 평가하였다. 등부표에 설치된 2축 경사계 센서를 통해 약 2개월간 데이터를 수집하였으며, 평균 기울기, 최대 기울기 및 상위 5% Peak 이벤트를 중심으로 분석을 수행하였다. 또한 풍속, 파고 및 파주기 데이터를 함께 활용하여 외부 환경 요인과 기울기 거동 간의 관계를 검토하였다. 분석 결과 LS-35급 등부표는 평균 기울기 5°이내, 최대 약 9°범위의 롤링 특성을 나타낸 반면, LANBY-100급 등부표는 평균 기울기 2°이내 약 최대 5°범위로 보다 안정적인 거동을 보였다. Peak 이벤트 분석 및 풍속 구간별 분포 분석 결과에도 두 등부표 간 기울기 거동 특성의 차이가 확인되었다. 또한 설계 단계에서 산정된 악조건 안정도 계산 결과와 비교한 결과 실해역 계측된 기울기 값은 계산 결과 대비 충분한 안정도 여유를 확인하였다. 본 연구는 실해역 계측 데이터를 기반으로 스마트 등부표의 안정도 특성을 분석한 결과로써 향후 실증 기반 안정도 평가 연구에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

본 논문은 실해역에 설치된 스마트 등부표를 대상으로 수집된 기울기 계측 데이터를 분석하여, 실제 운용 환경에서의 안정도 특성을 평가하였다 [1][2]. 대상 등부표에는 경사계 센서가 설치되어 실제 해상 조건에서 발생하는 롤링 거동을 계측하였으며, 수집된 데이터를 기반으로 등부표의 기울기 특성을 분석하였다. 또한 외부 해양환경 요인과의 관계를 함께 검토하여, 특정 환경 조건에서 나타나는 기울기 변화 특성을 분석하였다. 아울러 설계 단계에서 산정된 안정도 계산 결과와 실해역 계측 데이터를 비교함으로써, 계산 기반 평가와 실제 운용 특성 간의 차이를 정량적으로 검토하였다[3].

II. 실해역 계측 환경 및 데이터 구성

본 연구에서는 실해역에 설치된 스마트 등부표를 대상으로 기울기 계측 데이터를 수집하고, 이를 기반으로 안정도 분석을 수행하였다. 계측 대상 등부표는 여수 해역 및 광양항 인근 해역에 설치된 LS-35급 및 LANBY-100급 등부표로 구성되며, 설치 환경에 따라 외해 및 비교적 내해 조건에서 운용되고 있다. 각 등부표에는 2축 경사계 센서가 설치되어 실제 운용 중 발생하는 롤링 방향의 기울기 변화를 계측하였다.

기울기 데이터는 약 2개월간 1분 주기로 연속 수집되었으며, 각 계측 시점에서 X축 및 Y축 기울기 값을 기록하였다. 수집된 기울기 데이터는 절대값으로 처리하여 등부표의 롤링 크기를 정량화하였다. 외부 해양환경 요인과의 관계를 분석하기 위해 동일 기간에 관측된 풍속, 풍향, 파고 및 파주기 데이터를 함께 사용하였으며, 풍속 및 풍향 정보는 등부표 인근 해역의 기상 관측 자료를 기반으로 하였다[4]. 파고 및 파주기 정보는 여수 시 남면 유송리 동쪽 약 2 km 해상에서 관측된 데이터를 활용하였으며, 데이터는 기울기와 시간 축을 기준으로 정렬하여 분석에 적용하였다.

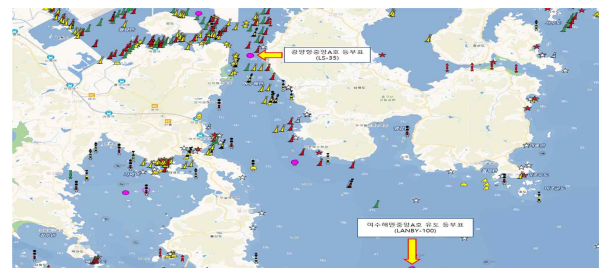


그림 1. 분석 대상 스마트 부표의 실해역 실증 위치

Fig. 1. Real-time ocean area verification location of the smart buoy being analyzed

III. 실해역 안정도 분석 결과

본 절에서는 LS-35급 및 LANBY-100급 스마트 등부표를 대상으로 수집된 실해역 기울기 계측 데이터를 분석하고, 두 등부표의 안정도 특성을 비교하였다. 분석은 평균 기울기 특성, Peak 이벤트 분포, 외부 환경 요인과의 관계, 그리고 설계 단계 안정도 계산 결과와의 비교를 수행하였다.

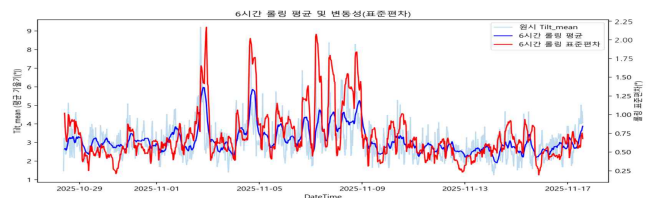


그림 2. 10월 광양중앙 A호 롤링 평균 및 변동성

Fig. 2. Rolling average and volatility at Gwangyang Central A (Oct.)

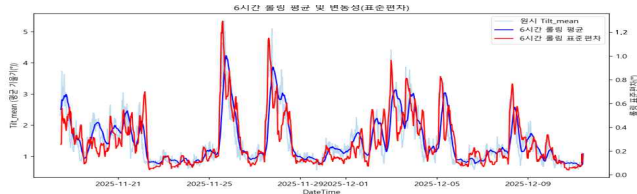


그림 3. 11월 ~12월 여수해만 중앙 A호 롤링 평균 및 변동성
Fig. 3. Rolling average and volatility at Yeosu Haeman Central A (Nov. - Dec.)

기울기 데이터 중 상위 5% 값을 Peak 이벤트로 정의하여 분석한 결과, LS-35급 등부표에서는 풍속 증가 구간에서 Peak 이벤트 발생 빈도가 상대적으로 증가하는 경향이 관찰되었다. 반면 LANBY-100급 등부표의 Peak 이벤트는 제한된 범위에서 분포하며, 평균 기울기 대비 큰 편차 없이 발생하는 특성을 보였다.

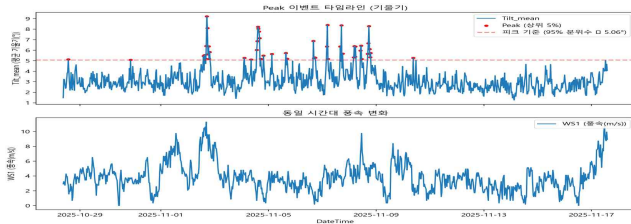


그림 4. 10월 광양 중앙 A호 Peak Event Timeline 및 풍속 동시 변화 분석
Fig. 4. Peak event timeline with wind speed (Oct., Gwangyang Central A)

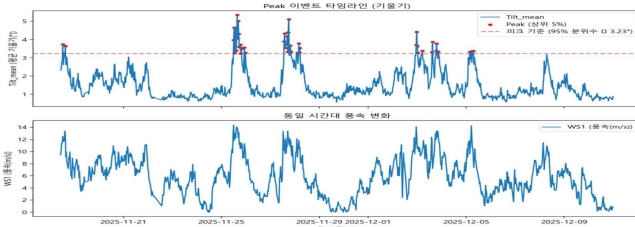


그림 5. 11월~12월 여수해만 중앙 A호 Peak Event Timeline 및 풍속 동시 변화 분석
Fig. 5. Peak event timeline with wind speed (Nov. - Dec., Yeosu Bay Central A)

풍속 구간별 기울기 분포 분석 결과에서도 LS-35급은 풍속 증가에 따라 분포 폭이 다소 확대되는 반면, LANBY-100급은 전반적으로 안정적인 분포를 유지하였다.

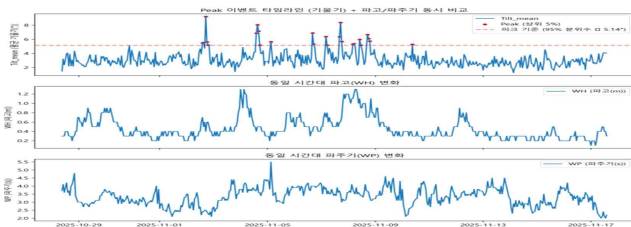


그림 6. 10월~11월 광양항중앙 A호 Peak Event Timeline 및 파고·파주기 동시 변화 분석
Fig. 6. Peak event timeline with wave height and period (Oct. - Nov., Gwangyang Port Central A)

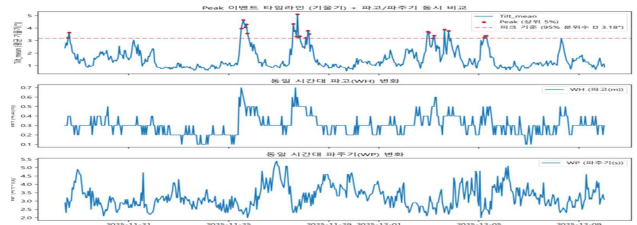


그림 7. 11월~12월 여수해만 중앙A호 Peak Event Timeline 및 파고·파주기 동시 변화 분석
Fig. 7. Peak event timeline with wave height and period (Nov. - Dec., Yeosu Bay Central A)

설계 단계에서 산정된 악조건 안정도 계산 결과와 실험역 계측 데이터를 비교한 결과, 두 등부표 모두 계산 결과에서 제시된 LS-35급 최대 경사각 21.8° 및 LANBY-100급 9°에 비해 실측 기울기 값이 현저히 낮은 수준으로 나타났다. LS-35급 등부표는 비교적 내해 환경에 설치되어 평균 기울기 5° 이내, 최대 약 9° 범위의 롤링 특성을 보였으며, LANBY-100급 등부표는 외해 환경에 설치되었음에도 불구하고 평균 기울기 2° 이내, 최대 약 5° 범위로 보다 안정적인 거동을 유지하였다. 이러한 결과는 등부표의 규모 및 구조적 특성에 따른 안정성 차이를 반영하는 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 논문에서는 LS-35급 및 LANBY-100급 스마트 등부표를 대상으로 실험역에서 수집된 기울기 계측 데이터를 분석하여, 실제 운용 환경에서의 안정도 특성을 비교·평가하였다. 약 2개월간 수집된 기울기 데이터를 기반으로 평균 기울기, Peak 이벤트 분포 및 외부 환경 요인과의 관계를 분석하였다. 분석 결과 LS-35급 등부표는 평균 기울기 5° 이내 최대 약 9° 범위의 롤링 특성을 나타냈으며, 풍속 증가 구간에서 기울기 분포 폭과 Peak 이벤트 발생 빈도가 다소 증가하는 경향을 보였다. 반면 LANBY-100급 등부표는 외해 환경에 설치되었음에도 불구하고 평균 기울기 2°이내, 최대 약 5° 범위로 상대적으로 안정적인 기울기 거동을 유지하였다. 또한 설계 단계에서 선정된 악조건 안정도 계산 결과와 비교한 결과, 두 등부표 모두 실제 계측된 최대 기울기 값이 계산 결과에서 제시된 경사각보다 현저히 낮은 수준으로 나타나, 실험역 운용 중 안정적인 거동을 보이는 것으로 확인되었다. 본 연구는 실험역 계측 데이터를 기반으로 스마트 등부표의 안정도 특성을 정량적으로 분석한 사례로서, 향후 실증 데이터 기반의 안정도 평가 및 운영 특성 분석을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2026년도 해양수산부의 재원으로 "26년도 항로표지 장비·용품 등 연구개발사업"의 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] 항로표지의 기능 및 규격에 관한 기준.
- [2] 이제형, 채정근, 이충진, 박종현, 이동엽, "스마트 대형 등부표의 구조 해석 및 안정성 검증 연구" 한국항해항만학회, 667-672, 2025.
- [3] Guideline G1099: On the Stability and Buoyancy of Marine Aids to Navigation". Edition 1.1., IALA, 2013.
- [4] 문범식, 국승기, 김태균, "LL-26(M) 등부표의 해역별 동적안정성에 관한 연구", 한국항해항만학회, 166-173, 2020.