

연안활동장소 위험도 평가를 위한 동적요소 예측 모듈 구축 Establishment of a Dynamic Factor Prediction Module for Risk Assessment in Coastal Activity Sites

유영재* · 전동수** · 박원경***
Young Jae Yoo*, Dong Soo Jeon** and Won Kyung Park***

요지 : 최근 지속적인 연안개발로 여가활동 장소 확대 및 접근성 증가를 가져왔으나, 그에 따른 안전사고도 증가하였다. 이러한 사고 요인은 인위적인 유형과 자연적인 유형으로 분류되며, 후자는 파도, 조석, 해무 및 바람 등 동적 요소로 구성된다. 기상청, 국립해양조사원 등 기관들은 이미 동적 요소 정보를 제공하고 있지만, 그 해상도가 낮아 국지적 위험도를 정밀하게 평가하기 어려운 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 기존 오픈시스템의 동적 정보를 활용하여 높은 해상도의 수치 시뮬레이션을 구축하였고, 이를 통해 국지적인 연안활동장소의 동적요소를 예측하는 자동화 모듈을 개발하였으며, 특히 모듈 구축 중 핵심인 수치예측 파랑 결과값과 파고 관측값을 비교검토 하였다.

핵심용어 : 연안활동장소, 위험도, 동적요소, 수치모델, 자동화 모듈

Abstract : Recent persistent coastal developments have expanded recreational areas and enhanced accessibility. However, this growth has also led to a rise in safety incidents. These accident factors can be divided into human-made and natural types. The latter is comprised of dynamic factors like waves, tides, sea fogs, and winds. While institutions like the Korea Meteorological Administration and the Korea Hydrographic and Oceanographic Agency already offer data on these dynamic factors, the resolution is often insufficient for a precise assessment of localized risks. In this study, to overcome these limitations, we utilized the dynamic information from existing open systems to construct a high-resolution numerical simulation. Through this, we developed an automated module to predict dynamic factors in localized coastal activity areas. Particularly during the module's construction, we compared and reviewed the numerical prediction results for waves with observed wave heights.

Keywords : coastal activity sites, risk assessment, dynamic factor, numerical simulation, automated module

1. 서 론

우리나라는 국토의 삼면이 바다인 연안지역을 중심으로 바닷가, 갯벌 등의 다양한 관광자원들이 분포하고 있으며 해양관광, 해양스포츠 등 여가활동의 수요가 증대되고 있다(Song, 2019).

연안육역 관광지 개발 및 방파제, 돌제 등의 건설로 인해 접근성이 쉬워지면서 연안사고 또한 증대되고 있다. 연안사고의 인위적인 유형은 안전 미준수, 음주, 수영 미숙, 추락, 자살, 부주의 등이 있으며, 자연적인 유형은 파도, 조석, 해무 및 바람에 의한 추락, 충돌 등 다양한 사고유형이 있다(Park et al., 2021).

최근 해수면 상승과 이상고파 발생빈도 증가 등 자연적인

위험요인은 지속적으로 악화되고 있다. 광범위한 연안활동구역의 위험관리 사각지대를 최소화하기 위한 연안 모니터링 기술의 도입과 인력 제약으로 인한 현장안전관리의 업무를 경감시킬 수 있는 방안이 마련되어야 하며 현행 연안해역 관리체계의 시·공간적 한계성을 보완할 수 있는 지속적인 위험 모니터링 기술 도입이 필요한 실정이다.

우리나라에서는 기상청에서 제공하는 실시간 관측자료, 국립해양조사원에서 해양정보 및 예보 등 자연적인 동적요소(파랑, 조석, 해무, 풍속)에 관한 정보를 오픈시스템으로 제공하고 있다. 그러나 이러한 시스템은 연안 위험관리를 위한 목적으로 구축되지 않았기 때문에 연안안전 위험도 평가에 직접 활용하기는 어려우며, 연안안전 위험도 평가에 사용되는 요소는 해당 연안의 상세지형 영향이 반영된 해상도 높은 정

* (주)대영엔지니어링 기술연구소 과장(Manager, DY Engineering Co., Ltd.)
** (주)대영엔지니어링 기술연구소 차장(Deputy General Manager, DY Engineering Co., Ltd.)
*** (주)대영엔지니어링 기술연구소 전무(Corresponding author: Won Kyung Park, Senior Managing Director, Coastal & Ocean Engineering Laboratory, DY Engineering Co., Ltd. 43 Digital-ro, 34-Gil, Guro-gu, Seoul 08378, Korea, Tel: +82-2-2050-7641, Fax: +82-2-2050-7630, ocean21c@hanmail.net)

보가 필요하다.

본 연구에서는 해양경찰청에서 지정, 관리되고 있는 주요 위험구역 40개소를 대상으로 동적요소 예보를 위한 예측모듈을 구축하였고, 파랑 산출을 위해 광역과 해상도 높은 상세역 수치모형을 구축하였다. 광역에서는 기상청에서 제공하는 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System) 수치예보모델 자료를 이용하여 바람장을 모의하고, 위험구역 40개소에 대한 상세역 파랑은 광역과 연계하여 모의하였다. Do and Kim(2018)의 연구에서는 기상청의 GDAPS 수치예보모델 자료가 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 재분석 자료, WRF(Weather Research & Forecasting) 예측자료와의 비교에서 가장 낮은 RMSE(Root Mean Squared Error) 및 가장 높은 상관계수를 나타내어 GDAPS의 우수한 예측성이 확인된 바 있다. 각 위험구역별 동적요소를 예측하고 연안안전통합시스템의 동적 위험도 평가에 매일 6시간 간격으로 4번 실시간 예보를 제공하고 있으며, 자료 수집 및 예측과 예보 과정을 자동화로 구축하였다. 예보자료의 신뢰성을 확인하기 위해 파랑 산출값은 기상청 파고부이 자료와 비교검증 하였다.

2. 동적요소 예측 모듈 구축 방법

2.1 이용자료

동적 위험도 평가에 사용되는 동적요소는 파랑, 조석, 해무, 풍속으로 구성된다. 파랑 산출을 위해 광역에서 바람장을 모의하였으며, 기상청의 GDAPS 수치예보모델을 이용하였다. 조석은 광역 개방경계조건에서 FES2004(Finite Element Solution) (Lyard et al., 2006)로부터 추출한 주요 8개 분조의 진폭과 위상각을 입력하여 모의하였으며, 해무와 풍속은 기상청의 LDAPS(Local Data Assimilation and Prediction System) 수치예보모델 원시자료를 이용하였다(Table 1).

GDAPS와 LDAPS는 기상청(KMA) ‘국가기상슈퍼컴퓨터 산출자료 공개 서비스’를 통해 제공되며, FTP 서버 접속을 이용하여 무료로 자료를 제공받을 수 있다. 산출자료는 등압면 자료와 단일면 자료 2종류가 제공되며, 데이터 형식은 WMO (World Meteorological Organization)에서 제시한 GRIB2 형식으로 제공하고 있다. 등압면 자료는 가장 많이 사용하고 있는 수치예보 자료로서 모델면(수치모델 안에서의 연직 층)에서 계산된 기상요소를 표준 등압면 값으로 내삽하여 대기의 상태를 3차원으로 표현할수 있는 특성을 가지고 있다. 단일면 자료는 기상요소 중 강수량처럼 연직으로의 변화가 없는 단일 층에서만 나타나는 기상요소와 토양층에서 정의되는 변수들을 표현한다. GDAPS는 기상청 전지구예보모델(UM N1280 L70)로 전지구 범위에서 수평분해능은 약 10 km 연직층수는 70층으로 구성되어 있으며, 운영시간은 00, 12 UTC (협정세계시)에 예측기간 12일, 06, 18 UTC에 예측기간 3.5 일 자료를 3시간 간격으로 제공하고 있다. LDAPS는 기상청 국지예보모델(UM 1.5 km L70)로 한반도 주변을 크게 포함하여 수평분해능 약 1.5 km 연직층수 70층으로 구성되어 있으며, 운영시간은 00, 06, 12, 18 UTC에 예측기간 48시간, 03, 09, 15, 21 UTC에 예측기간 3시간 자료를 1일 8회 제공하고 있다. 예측자료의 시간간격은 1시간이다.

본 연구에서 사용된 기상청 자료는 해무와 풍속자료를 추출하기 위해 단일면 자료를 이용하였으며, GRIB2 파일 형식 자료는 메타데이터 분석을 위해 NetCDF 파일로 변환하는 전처리 과정을 거쳤다.

2.2 예측 모듈의 구성

광역모델은 한반도 인근의 바람장 수치모의를 실시간으로 수행하기 위해, 우리나라 연안의 해수 순환에 대해 모의할 수 있도록 개발된 유한요소 모형인 ADCIRC 모형(ADvanced CIRCulation model)에 파랑수치모형인 SWAN 모형(Simulating

Table 1. Content of the utilized data

| | Wave | Tidal | Sea fog | Wind |
|------------------|------------|---|--------------------|----------------------|
| Data source | GDAPS | FES2004 | LDAPS | |
| Data type | Wind field | 8 Tidal constituents | Sea fog visibility | Synthetic wind speed |
| Detailed Content | U10, V10 | M ₂ , S ₂ , K ₁ , O ₁ , N ₂ , P ₁ , K ₂ , Q ₁ | VISI (m) | U10, V10 |

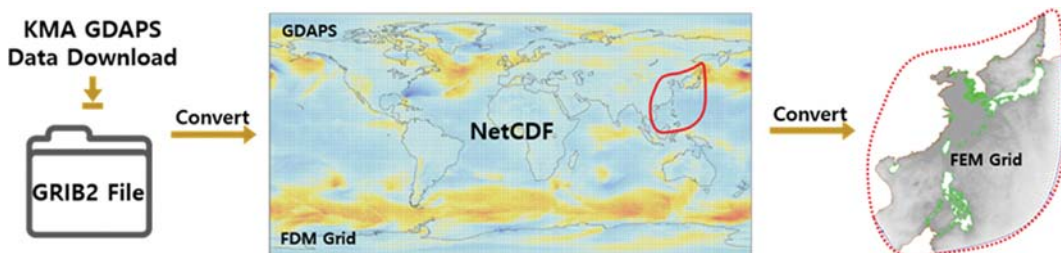


Fig. 1. Configuration of the large region simulation design.

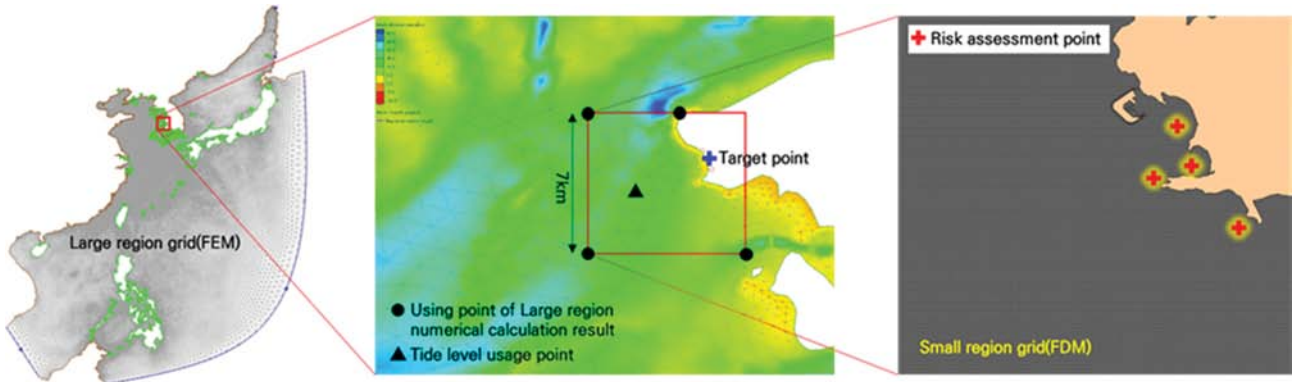


Fig. 2. Configuration of the small region simulation design.

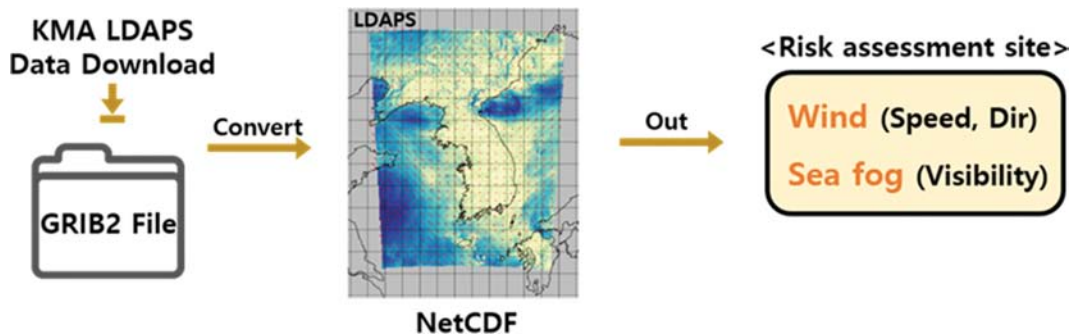


Fig. 3. Configuration of sea fog and wind speed data extraction.

WAVes Near shore model)을 결합시키고, 폭풍해일 모의를 효율적으로 실행하기 위해 한국을 강타하는 태풍의 발원지점

을 포함하는 북서태평양까지 격자범위를 확장하면서 서남해안의 해저 특성을 잘 표현한 NWP-G258k(North Western Pacific Grids having 258,000 vertices) FEM(Finite Element Method) 격자 체계를 구축하였다. 예측 모듈을 통해 산출된 조위 결과는 국립해양조사원의 조위 관측자료와 비교검증 하였으며 (Suh et al., 2015), 기상청 GDAPS 자료의 유무를 확인하고 취득하여 구축된 광역에 맞게 가공하고 바람장을 모의한다 (Fig. 1).

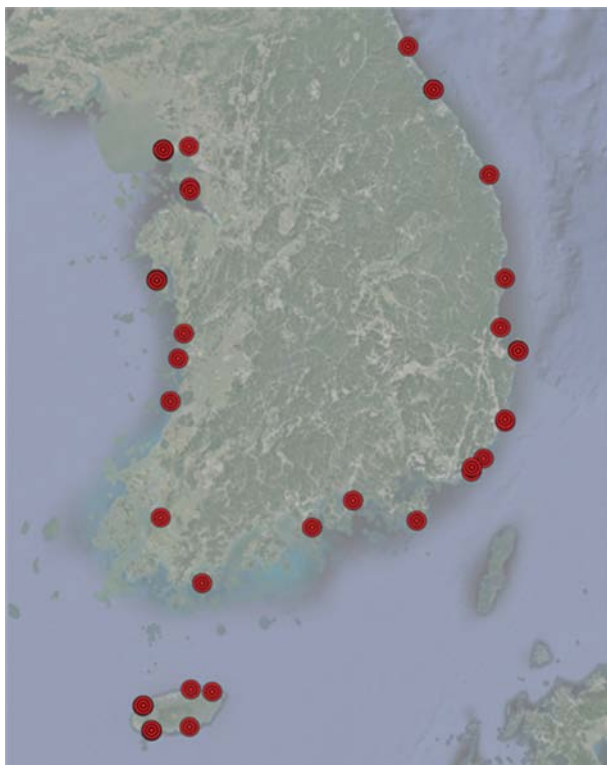


Fig. 4. Location Map of the 40 Risk Sites.

상세역은 위험구역(40개소)별로 격자망을 구축하고 광역에서 모의되는 파랑결과를 상세역 경계 입력자료로 이용하여 위험구역 40개소에 대한 파랑요소를 산출하였다. 이때 조위는 광역모의 결과를 이용하여 상세역역 수위 조건을 시계열로 변동되도록 입력하여 산출하였다. 사용되는 수치모델은 계산 효율성과 재현성을 고려하여 유한차분법(FDM) 격자망을 구성하는 SWAN 모델을 이용하였다(Fig. 2).

풍속과 해무의 값은 LDAPS 자료의 유무를 확인 및 취득 후 위험구역 지점별로 추출되어 제공되며(Fig. 3), 본 연구에서 구축한 모듈의 위험구역지점 40개소 위치는 Fig. 4에 나타내었다.

2.3 예측 모듈의 운영

입력자료로 활용되는 외부 오픈시스템의 실시간 자료는 구축된 FTP서버 내에서 수집, 분석, 산출과정을 수행한다(Fig. 5). 모듈의 시작은 기상청(KMA)서버 내 GDAPS 자료의 업

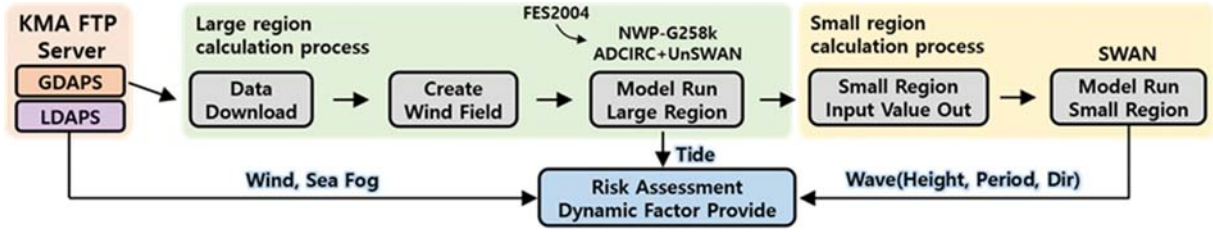


Fig. 5. Dynamic factor modeling and data provision flow chart.

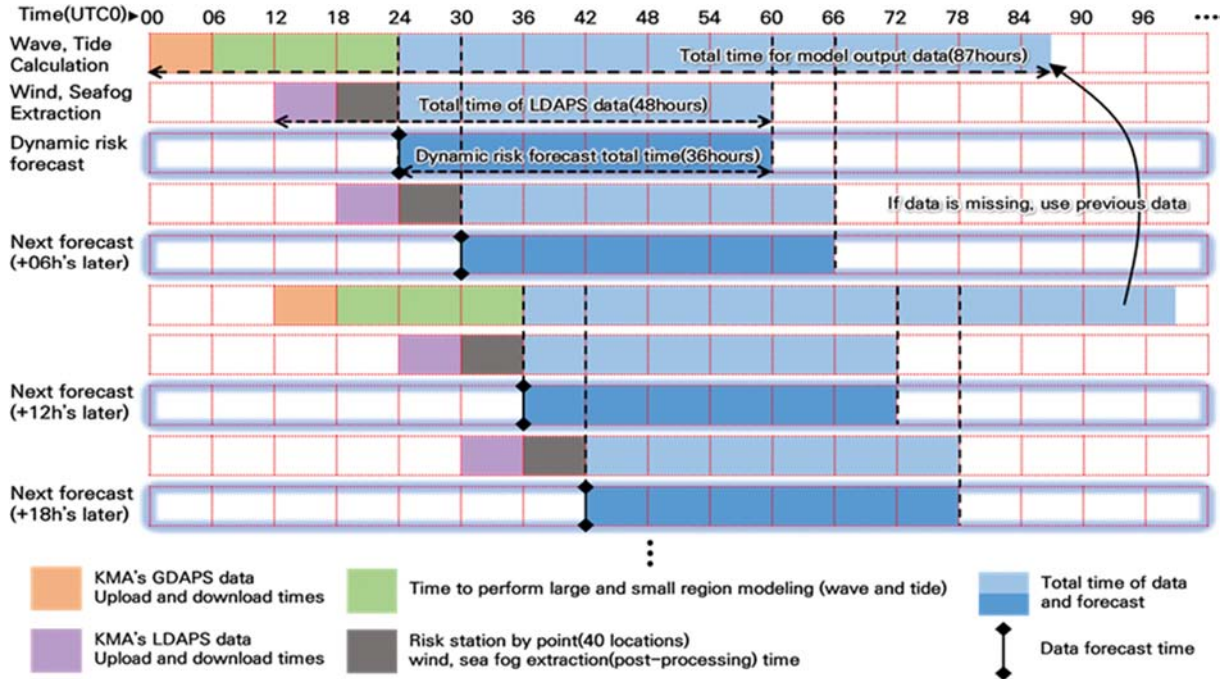


Fig. 6. Conceptual diagram of data download, numerical calculation and forecast time.

로드 유무를 확인하고 대상 데이터를 자동으로 수집 후, 광역모의를 위해 모델 입력 바람장(총 87시간, 1시간 간격)을 생성하기 위한 전처리를 거친다.

모델 입력 바람장 생성이 완료되면 광역 모의를 수행하고 결과에서 상세역 제원을 추출하여 상세역 모의까지 수행한다. 파랑 및 조석 모의결과는 총 계산시간 중 첫 24시간(Cold start)을 제외한 초반 36시간을 시간대에 맞추어 예보하며 모의는 하루 12시간 간격으로 2번 수행한다. 풍속과 해무는 예

보 12시간 이전의 LDAPS 자료를 위험구역 지점별로 수집하며 하루 6시간 간격 4번 예보한다(Fig. 6). 동적요소 예보 제공시간은 1시간 간격(Forecast provide time step)으로 총 36시간 연안안전통합시스템(Fig. 7)에 예보된다.

연안안전통합시스템에서 제공중인 위험도 평가는 Park et al.(2021)에서 수립한 위험도 평가체계 방법을 적용하고 있으며, 동적요소 위험도 평가의 경우 AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석을 통해 고려된 가중치를 각 요소별로 곱하여

Table 2. Prediction-Observation statistical analysis result

| Division Start time (dd/hh) | RMSE | | | | | CORR | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 07/03 | 07/15 | 08/03 | 08/15 | 09/03 | 07/03 | 07/15 | 08/03 | 08/15 | 09/03 |
| Anmyeondo | 0.57 | 0.54 | 0.47 | 0.51 | 0.5 | -0.23 | -0.18 | -0.03 | 0.02 | 0.04 |
| Gijang | 1.56 | 1.72 | 2.25 | 2.69 | 2.27 | -0.17 | 0.13 | 0.95 | 0.85 | 0.77 |
| Guryoungpo | 1.16 | 0.9 | 1.38 | 2.2 | 2.24 | 0.56 | 0.63 | 0.86 | 0.76 | 0.68 |
| Haegumgang | 3.47 | 3.8 | 4.13 | 3.88 | 2.14 | -0.37 | -0.37 | 0.84 | 0.87 | 0.85 |
| Hyeopjae | 1.73 | 2.16 | 1.06 | 1.16 | 0.75 | -0.59 | 0.12 | 0.8 | 0.88 | 0.87 |
| Oryukdo | 1.92 | 1.66 | 1.33 | 1.52 | 1.2 | -0.39 | 0.06 | 0.9 | 0.9 | 0.85 |
| Saryangdo | 2.26 | 2.66 | 2.92 | 2.25 | 0.87 | 0.04 | 0.04 | 0.59 | 0.48 | -0.02 |
| Yeongok | 1.14 | 0.91 | 0.68 | 0.9 | 1.05 | 0.18 | 0.26 | 0.68 | 0.69 | 0.76 |

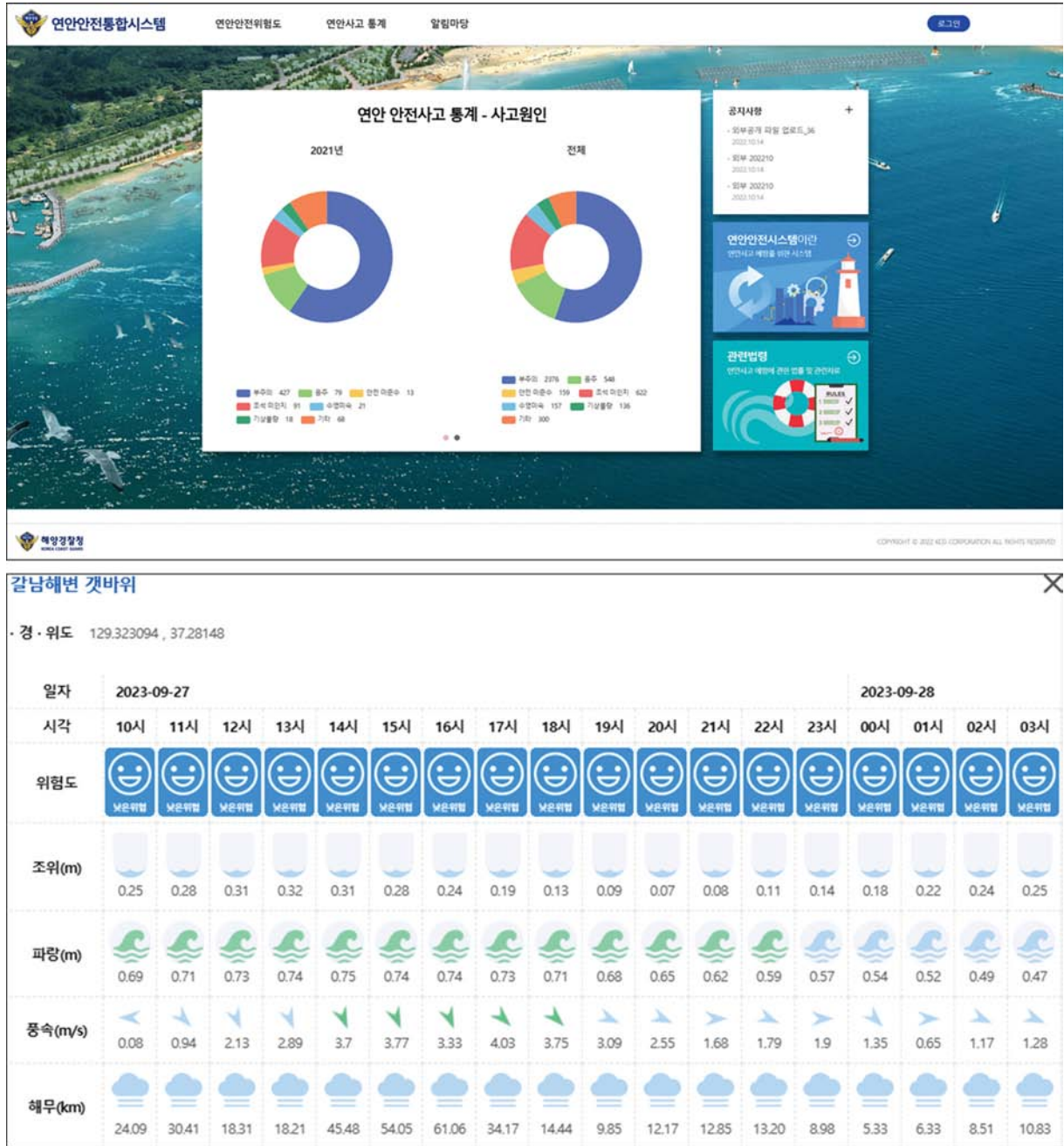


Fig. 7. Coastal safety integrated system homepage and dynamic risk webpage.

합한 값을 5단계(1. 낮은위험, 2. 위험증가, 3. 보통위험, 4. 높은위험, 5. 매우높은위험)로 제공하고 있다.

2.4 예측 결과 검증

상세역의 파랑 산출 결과는 기상청의 파고부이 관측자료를 통해 검증하였다. 동해, 서해, 남해 및 제주도를 포함하여 검증 가능한 기상청 파고부이 8개 지점을 선택(Fig. 8)하여 파고를 비교하였다. 검증에 이용된 자료의 기간은 23년 8월 한 반도를 내습한 제6호 태풍 칸운(Khanun) 내습 기간으로 적용하였으며, 태풍 내습 기간 예보 시간대별 통계 분석 지표를 산정하였다.

칸운 내습 기간 기상청 파고부이의 관측값과 시간대별 상세역 파랑 예측 결과는 Fig. 9와 같이 나타나며 예측값은 초기 24시간(Cold start)를 제외한 나머지 63시간을 나타내었다. 태풍 내습 기간(음영구간, 10일 03시~10일 15시)에서 파랑 예측값은 내습 전후에 비해 높게 산정 되었으며, 관측값 보다 크게 산정되는 것으로 나타났다.

Table 2는 검증에 이용한 파고부이 8개 자료와의 통계 분석을 통한 RMSE와 상관도를 나타내었으며 태풍 내습 기간에 대해 산정하였다. 분석결과 08일 03시 자료부터 안면도를 제외한 지역의 상관도는 높은 것으로 나타나 전체적인 RMSE는 높은 오차율을 보였다.

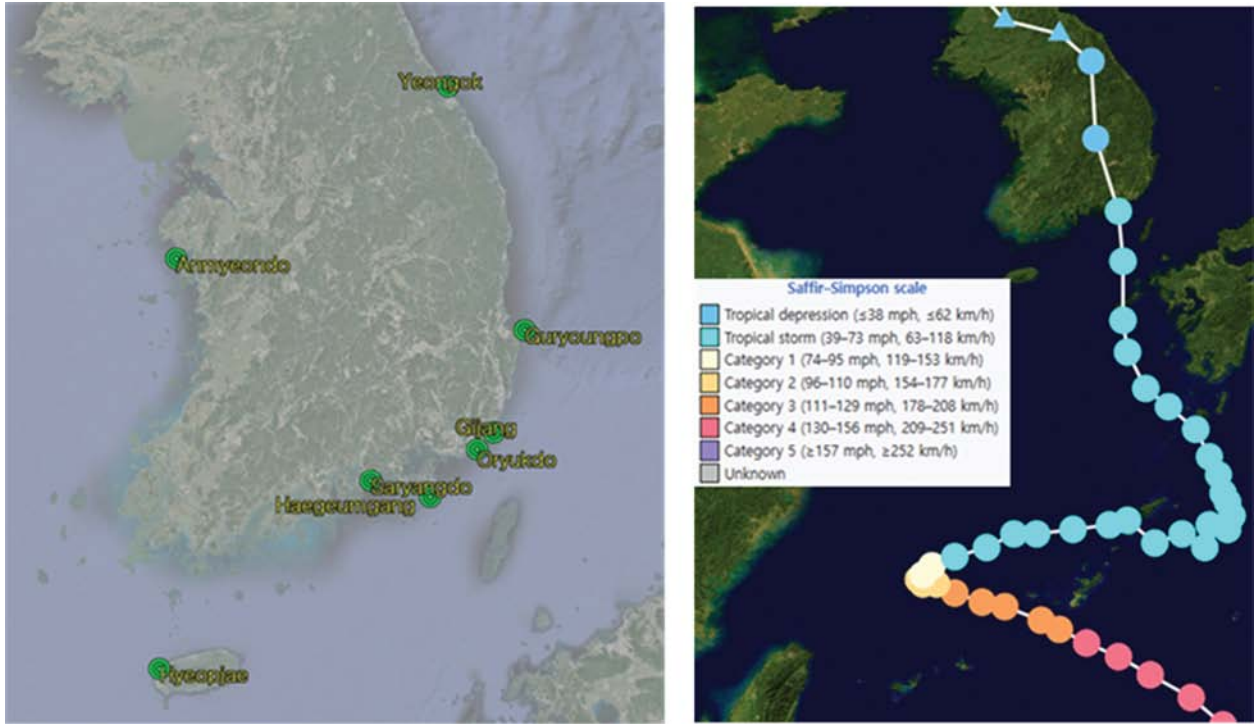


Fig. 8. Verification wave buoy location map and Khanun Typhoon path.

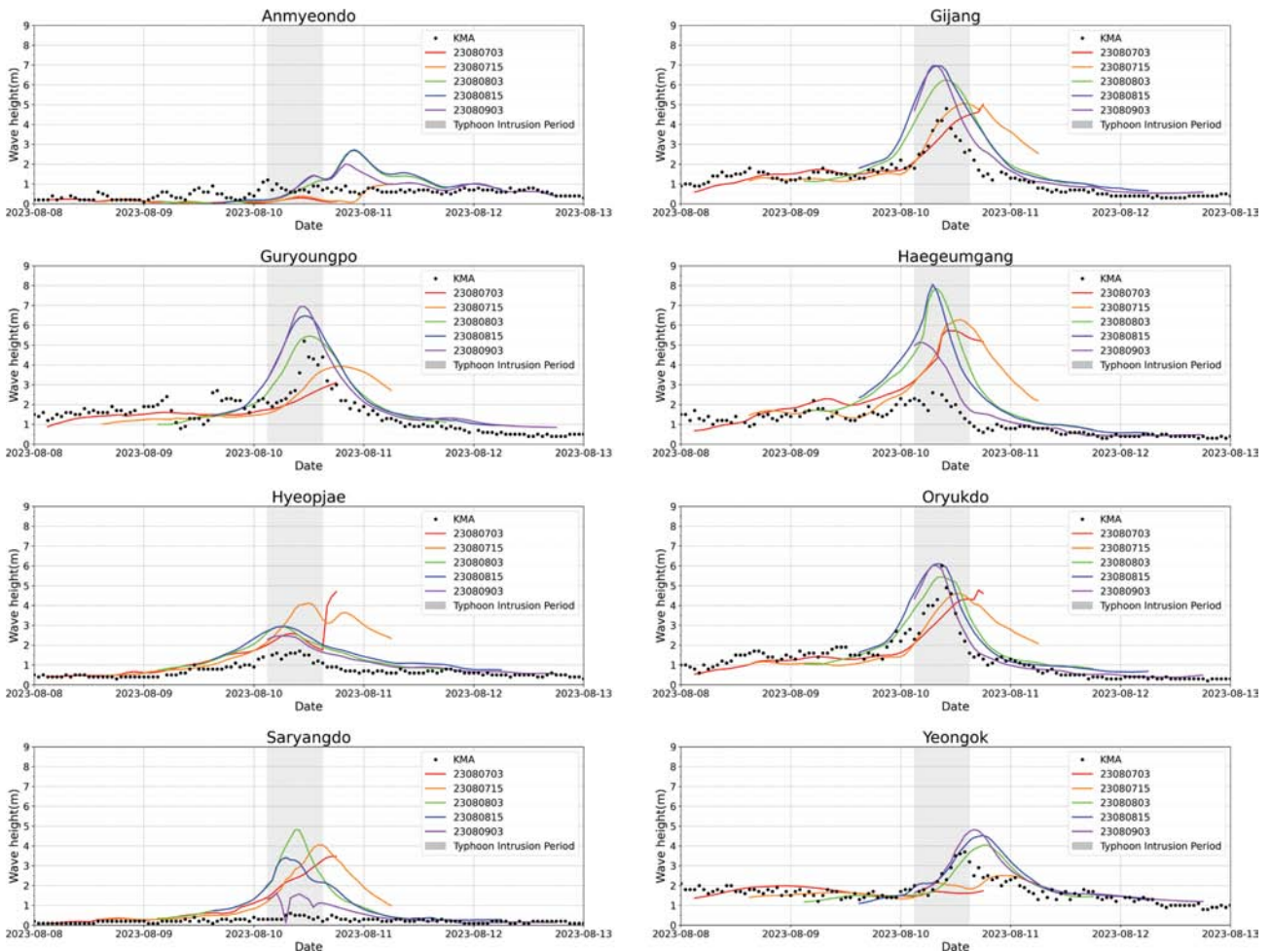


Fig. 9. Prediction result-Observation buoy Wave comparison result.

3. 결 론

광범위한 연안활동구역의 위험관리 사각지대를 최소화하고 인력 제약으로 인한 현장안전관리의 골든타임 확보 방안이 필요하며, 이를 위해 연안 모니터링 기술의 도입과 실시간 위험도 예측 기술 확보는 시급한 문제이다. 본 연구는 객관성 및 현실성이 강화된 실시간 연안안전 위험도 예측의 평가 지표 가중치 및 평가·예측 기술 확보를 목표로 연구하였다.

외부 오픈시스템인 기상청(KMA) GDAPS, LDAPS 자료를 이용하여 위험도 평가구역 동적요소 산출 및 제공을 위한 자동화 모듈을 구축하였고, 이 모듈의 산출결과인 파랑, 조위, 해무, 풍속 값을 연안안전통합시스템의 동적 위험도 평가에 제공한다. 동적요소는 오픈시스템의 자료수집을 시작으로 모델 입력제원 생성, 계산, 계산 오류검토, 자료정리, 자료전송, 예보를 1일 4회(00, 06, 12, 18 UTC) 수행 중이다.

대상 평가구역의 동적요소 산출결과는 신뢰성 검토를 위해 수치모의 결과와 기상청 파고부이를 비교검증 하였다. 태풍 카눈 내습 기간의 파고부이와 파랑 예측값 상관도 분석을 통해 태풍 내습 시기에 가까워지거나 도달한 시기의 파랑예측값은 높은 상관도를 나타내었으나, 전반적으로 오차율이 큰 것으로 나타났다.

본 연구는 모듈을 구축한 초기단계 과정으로 모델의 파라미터는 서해, 동해, 남해 모두 동일하게 구성되어 있다. 특히 서해 안면도의 경우는 동해에 비해 큰 오차율을 나타내어, 서남해 지역에 대한 추가 검토가 필요한 단계이다. 장기간의 예측값과 관측값을 비교검토하여 지점별 물리적 파라미터 개선을 통해 오차율을 최소화 할 필요가 있다.

본 모듈의 주요 목적은 연안안전 골든타임 사수를 위한 위험도 평가 모니터링을 제공하여 해양경찰의 현장 대응 여부를 고민할 수 있는 기준을 제공하려는 의도로 개발하였다. 물론 예측의 정량적 정확도도 중요하지만, 개별적으로 제공되는 동적 평가요소(조석, 파랑, 풍속, 해무) 자료를 한 곳에 취합하고 예측 시간별로 위험한 요소에 대한 정보를 사전에 제공하여 현장에서 선제적 대응에 활용할 수 있는 자료로 사용할 수 있도록 개발하였다.

추후 예측 오차를 줄이기 위한 모델 개선 및 보완 방안 연

구를 수행하고, 연안안전통합시스템 동적위험도 평가의 실용성과 신뢰성을 높이기 위해 실제 사용자 피드백을 반영하여 시스템을 지속적으로 업데이트 할 계획이다. 이와 같이 연구의 확장과 발전을 위한 다양한 방안을 모색하며, 연안 활동 구역의 위험 관리 및 안전 확보를 위한 기술 발전에 지속적으로 기여할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2023년 해양경찰청 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(20200527 연안활동장소에 대한 위험도 평가 및 예측 체계 개발).

References

- Do, K.D. and Kim, J.A. (2018). A study on the predictability of eastern winter storm waves using operational wind forecasts of KMA. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 30(5), 223-233 (in Korean).
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. and Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56, 394-415.
- Park, S.J., Park, S.H., Seo, H.J. and Park, S.M. (2021). A study on evaluation system of risk assessment at coastal activity areas. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 33(6), 226-237 (in Korean).
- Suh, S.W., Lee, H.Y., Kim, H.J. and Fleming, J.G. (2015). An efficient early warning system for typhoon storm surge based on time-varying advisories by coupled ADCIRC and SWAN. *Ocean Dynamics*, 65, 617-646.
- Song, C.Y. (2019). A study on the improvement of safety management for coastal accidents in Korea. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(7), 95-103 (in Korean).

Received 13 October, 2023

Revised 26 October, 2023

Accepted 27 October, 2023