

고품질 조위 예측 서비스를 위한 Transformer 기반 시계열 모델 및 플랫폼 구축

장승혁¹, 김규호², 최우진², 장윤혁², 조성윤*
¹서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 학부생
²건국대학교 컴퓨터공학과 학부생
 *한국전자기술연구원

contiloop@seoultech.ac.kr, rbgh001@naver.com, chldnws37@naver.com,
 a01040503919@gmail.com, sycho@keti.re.kr

Transformer-Based Tide Prediction Model and Platform Implementation for Maritime Services

Seung-Hyeok Jang¹, Kyu-Ho Kim², Woo-Jin Choi²,
 Yun-Hyuk Jang², Sung-Yoon Cho*

¹Department of Electronic & IT Media Engineering,
 Seoul National University of Science and Technology,

²Dept of Computer Science, Kon-Kuk University,

*Korea Electronics Technology Institute

요약

본 논문은 조화 분석(Harmonic Analysis)을 통해 천문조를 분리하고, Transformer 인코더 기반 시계열 예측 모델(TimeXer)을 활용하여 비선형적 기상조 잔차를 예측하는 하이브리드 조위 예측 기법을 제안한다. 제안 모델은 기상 변수 간의 복잡한 비선형적 관계를 효과적으로 학습하였으며, 2025년 상반기 인천항 관측 데이터 검증 결과, 기존 국립해양조사원 예측치 대비 MAE 26.8%, RMSE 23.5%의 성능 향상을 달성하였다. 추가로 RAG 기반 AI Agent를 결합한 실제 조위 예측 서비스 플랫폼을 Hugging Face Spaces와 Supabase 환경에 성공적으로 구축 및 배포함으로써, 정확한 조위 정보가 필수적인 자율운항 및 해상 신서비스 분야에서의 실질적인 적용 가능성을 명확히 증명하였다.

1. 서론

기후변화와 해양 산업의 고도화로 인해 정확한 조위 예측은 자율운항, 항만 운영, 재난 방재 등에서 필수적이다. 그러나 해양데이터는 극한 환경에서 얻어지기 때문에, 센서의 오작동이 자주 발생하여 데이터 품질이 저하되며, 조위 변화의 복잡한 역학 특성으로 인해 신뢰도가 낮다. 이에 따라 물리 기반 모델과 딥러닝 시계열 모델을 융합한 예측 기술의 필요성이 대두되고 있다.

2. 관련 연구 및 한계

국내에서는 국립해양조사원의 바다누리 시스템이 대표적으로 활용되지만, 조위 예측치 성능 검토 결과 2025년 상반기(1~7월) 인천 지역의 경우 평균 절대 오차(MAE)가 13.68cm, 최대 오차가 246cm에 달했다. 또한 국내외 주요 연구기관들은 물리 기반 수치 모델을 사용하여 예측을 수행하고 있으나 이는 고도의 컴퓨팅 자원을 필요로 한다.



[그림 1. 시스템 아키텍처 다이어그램]

3. 시스템 설계 및 구현

3.1 학습 데이터

본 연구는 국립해양조사원 API를 통해 전국 48개 관측소의 조위·기상 데이터를 5분 단위로 수집하였다. 연속적인 결측치가 30분 미만인 경우 선형 보간하여, 원시 데이터의 특성을 최대한 보존하며, 결측치 없는 데이터를 확보하였다. 이후 조위 데이터를 MATLAB(T_TIDE)을 이용해 조화분석(Harmonic Analysis)을 실시하여, 천문조(Astronomical Tide)와 기상조(Meteorological Tide)로 분리하였다.

3.2 제안된 예측 모델 구조

천문조는 주기성을 띠기 때문에 한 번의 계산으로 연 단위의 미래를 예측할 수 있다. 반면 기상조는 비주기적이며 비선형적인 특성을 가지기 때문에, 예측을 위해 별도의 모델링이 필요하다.

기상조 예측을 위해 Transformer encoder 기반 시계열 예측 모델 TimeXer[1]을 활용하였다. 기상조 위와 기압, 풍속, 풍향, 기온을 입력 변수로 사용하였으며, 모델 학습에는 약 1년 분량의 데이터를 사용했다. 모델은 과거 144 steps(12h)를 보고 미래 72 steps(6h)를 한 번에 예측한다.

3.3 학습 결과

어텐션(Attention) 맵을 분석한 결과 모든 지역에서 조위와 기압 사이의 어텐션 스코어가 가장 높았다. 이는 기압과 해수면의 관계인 역기압 효과를 효과적으로 학습했다는 것을 암시한다. 또한 모든 지역에서 시간정보의 어텐션 스코어는 낮았다. 이는 조화 분석에서 이미 시간적 패턴을 추출했기 때문이다.

모델 일반화 능력은 Attention map clustering 분석을 통해 지역별 학습 모델 간의 유사성을 정량적으로 분석하여 검증했다. 예시로, 인천 모델이 어텐션 유사도가 가장 낮은 지역과 높은 지역에서 예측을 수행하도록 했다. 그 결과 최대 MAE가 2 cm 이내로 균일한 성능차이를 보였다. 이는 모델이 변수들의 물리적 관계를 잘 학습하였기 때문에, 단일 모델이 여러 지역의 조위를 예측할 수 있는 확장성을 제시한다.

3.4 실험 결과

25년 상반기 동안 인천항에서 수집된 조위 데이터를 성능 검증 기준으로 3.2 장에서 제안된 예측 모델과 국립해양조사원 예측치의 성능 비교 검증을 수행한 결과는 다음과 같다.

(cm)	기준 모델	제안 모델	개선율(%)
MAE	13.68	10.02	26.8
RMSE	18.54	14.17	23.5
최대오차	246	123.7	49.7

나아가, 결측치 구간에 따라 적응적으로 선택되는 보간 로직을 적용하고 높은 강도의 노이즈를 주입한 견고성 실험을 실시하였다. 그 결과 노이즈가 없을 때와 비교했을 때 MAE는 4.08 cm, 최대 오차는 12.64 cm에 불과했다.

3.5 조위 예측 서비스

본 활동에서 개발한 조위 예측 서비스 플랫폼 구조는 [그림 1]과 같으며, 이는 Hugging Face Spaces를 배포 환경으로, Supabase를 데이터베이스로 채택하여 구축되었다.

서비스 제공 계층에서는 예측치 시각화, RAG 기반 AI 챗봇 서비스, API 배포를 구현하였으며, 나아가 센서 오류 및 노이즈 생성 시나리오를 통해 예측 결과의 신뢰도를 검증할 수 있도록 하였다.

예측 결과와 사용자 질의는 Supabase를 통해 실시간으로 처리된다. Gradio를 이용하여 예측 조위 그래프를 제공한다. 특히, Google Gemini를 활용한 AI 챗봇은 데이터베이스에 접근하며, “2025년 8월 1일 00시 조위는?”와 같은 질문을 할루시네이션(hallucination) 없이 제공하도록 설계되었다.

4. 결론

본 논문은 조화 분석과 Transformer 기반 시계열 모델을 결합한 하이브리드 조위 예측 방법을 제안하였다. 제안 모델이 기상 변수 간의 복잡한 비선형적 관계를 효과적으로 학습하였으며, 그 결과 국립해양조사원 예측치 대비 뛰어난 성능과 견고성을 입증했다. 마지막으로 AI Agent를 결합한 조위 예측 서비스 플랫폼을 구축함으로써, 자율운항 및 해상 신서비스에서 실질적인 적용 가능성을 성공적으로 증명하였다.

참고문헌

[1] Y. Wang et al., “TimeXer: Empowering transformers for time series forecasting with exogenous variables,” *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, 2024

※ 본 논문은 해양수산부 스마트 해운물류 융합인재 및 기업지원(스마트해운물류 x ICT멘토링)을 통해 수행한 ICT멘토링 프로젝트 결과물입니다.