

주기적 특성을 활용한 Conv1D-LSTM 기반의 조위 예측 모델 설계

황신혁, 성주형, 조성운

한국전자기술연구원 스마트네트워크연구센터

{htlsgur0105, jh.sung, sycho}@keti.re.kr

Design of a Conv1D-LSTM-Based Tide Prediction Model Utilizing Periodic Characteristics

Shinhyuk Hwang, Juhyung Sung, Sungyoon Cho

Korea Electronics Technology Institute

요약

본 연구에서는 조위 데이터의 시계열 분석을 통한 주기적 특성을 효과적으로 반영하기 위해, 1차원 합성곱 계층(Conv1D)과 장단기 메모리 순환신경망(LSTM)으로 구성된 인코더 - 디코더 기반 예측 모델을 제안한다. 제안된 모델의 입력은 과거 24시간의 조위값과 천문 주기를 반영한 시간 특성으로 구성되며, 출력은 미래 24시간 동안의 조위를 시간 단위로 예측하는 구조로 구성된다. 또한, 제안된 모델은 1차원 합성곱 계층을 활용하여 조위 시계열 내 단기적인 변화 양상과 형태적 특징을 추출하며, 이후 다층 LSTM으로 구성된 인코더-디코더 구조를 통해 시간 흐름에 따른 장기적인 의존성과 시계열의 구조적 흐름을 학습한다. 예측 대상 지역의 1년간 데이터를 월별로 분할하여 계절별 예측 성능을 평가한 결과, 고조 및 저조 시점에서의 위상 정렬을 안정적으로 수행하는 것을 확인했으며, 제안된 모델을 통한 조위 예측값은 평균 조위값 대비 약 5% 이내의 오차의 정확도를 나타냈다.

I. 서론

최근 기후 변화로 인한 해수면 상승, 잦은 연안 침수, 이상 기후 현상 등으로 조위 예측의 중요성이 더욱 부각되고 있다[1]. 또한 자율운항 선박(Maritime Autonomous Surface Ship, MASS)의 등장과 함께, 안전하고 효율적인 항로 계획 및 실시간 해상 판단을 위해 정밀한 해양 데이터 확보가 필수적이며, 그중 조위는 해안 도시의 재해 예방, 항만 및 선박의 운항 계획, 해양 구조물의 설계, 어업 활동 등 다양한 해양 산업 및 방재 분야에서 핵심 기초자료로 활용된다. 특히 태풍, 폭우, 해일과 같은 극한 기상 현상과 조위가 중첩될 경우 고조가 극대화되어 연안 지역에 심각한 피해를 초래할 수 있어, 조위의 정밀하고 신뢰도 높은 예측은 필수적이다. 조위는 주로 지구와 달, 태양 간의 인력 작용에 의해 유도되는 천문조(Astronomical Tide)에 기초하며, 약 12.42시간의 주기를 갖는 반일주기 성분(Moon semidiurnal tide, M2)이 주요한 주기적 변동을 형성한다. 이러한 특성은 조위 데이터를 주기적 시계열로 해석할 수 있게 하며, 반복적인 패턴 학습에 강점을 가지는 딥러닝 기반 시계열 예측 모델에 적합한 예측 대상으로 작용한다.

본 논문에서는 조위 예측을 위해 Conv1D-LSTM 기반의 인코더 - 디코더 구조를 설계한다[2]. 입력 시점의 시간 정보를 사인 및 코사인 함수로 인코딩하여 조위의 주기성과 시간 흐름을 효과적으로 반영하며[3], 이를 통해 시계열 내재 주기성을 학습하고 학습된 모델에 대한 예측 정확도 향상을 도모한다.

II. 본론

1. 조위 데이터 특성 분석

본 연구에서는 시계열 기반 조위 예측 모델의 학습을 위해, 국립해양조사원에서 제공하는 전라남도 목포 지역의 2024년 1년간 시간 단위의 실측 조위 데이터를 활용한다. 실측 조위값은 정규화를 통해 0에서 1 사이의 값

으로 변환하여 모델 학습의 안정성을 확보하고, 모델의 계절 일반화 성능을 평가하기 위해 전체 데이터를 월별로 분할하여, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11월 데이터를 학습용으로, 4, 8, 12월 데이터를 검증용으로 설정한다. 조위의 주기성을 효과적으로 반영하기 위해, 입력 시점의 시간 정보를 사인(sin) 및 코사인(cos) 함수로 변환하여 원형 시간 인코딩을 수행한다. 이는 시계열 데이터 내에서의 상대적 시간 위치를 주기 함수로 표현함으로써, 모델이 특정 시간대에 반복되는 조위 패턴을 보다 명확히 학습할 수 있도록 돕는다. 시간 주기 인코딩에 사용된 수식은 다음과 같다:

$$\begin{aligned}\sin(hour) &= \sin\left(\frac{2\pi \cdot hour}{T}\right), \\ \cos(hour) &= \cos\left(\frac{2\pi \cdot hour}{T}\right)\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 $hour$ 는 시간 단위 시점이며, T 는 주요 주기 성분이다.

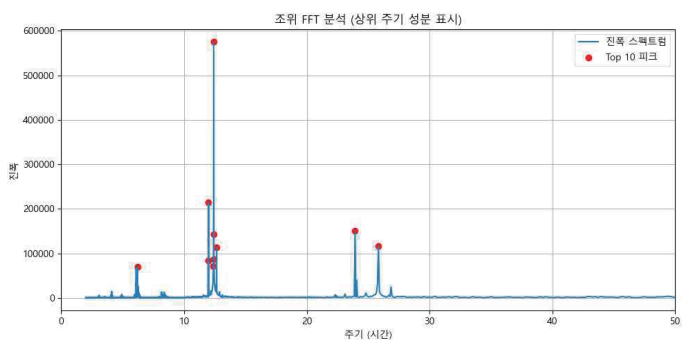


그림 1 목포 지역 조위 FFT 분석 결과

그림 1은 목포 지역 조위 데이터에 대해 수행한 FFT(Fast Fourier Transform) 분석 결과를 나타낸다. 분석 결과, 약 12.42시간에 해당하는 M2 성분이 조위 시계열에서 가장 강한 주파수 성분으로 확인되었으며, 본 연구에서는 이를 기반으로 수식 (1)의 주기 성분을 설정한다. 해당 주기

정보를 활용함으로써, 모델은 시간 흐름상 상대적인 위치에 따른 조위 패턴을 보다 정밀하게 인식할 수 있다.

2. 제안된 예측 모델 시스템 구조

조위 시계열의 주기적 패턴과 시간 흐름을 효과적으로 학습하기 위해, 1차원 합성곱 계층(Conv1D)과 순환신경망(LSTM)으로 구성된 인코더-디코더 기반의 예측 모델을 설계했다. 입력은 과거 24시간 동안의 조위 값과 천문 주기를 반영한 시간 특성으로 구성되며, 출력은 향후 24시간 동안의 조위를 1시간 단위로 순차적으로 예측하는 구조이다.

인코더는 먼저 두 개의 Conv1D 계층을 통해 조위 시계열 내의 단기적인 변화 양상과 형태적 특징을 추출하며, 이는 고조·저조 시점에서 나타나는 급격한 변화나 리듬의 반복 구조를 효과적으로 감지하는 데 활용된다.

디코더는 Auto-regressive 방식으로 구성되어, 초기 입력값으로 0을 사용하고 이전 시간 스텝의 예측 결과를 반복적으로 다음 입력으로 활용하여 예측 시퀀스를 확장한다. 디코더의 출력은 선형 계층(Fully Connected Layer)을 통해 실수 형태의 조위값으로 변환된다.

모델 학습에는 평균제곱오차(Mean Squared Error, MSE)를 손실 함수로 사용하였으며, 최적화는 Adam 옵티마이저(learning rate = 0.001)를 통해 수행되었다. 학습은 총 500 epoch 동안 반복되었으며, 과적합을 방지하고 일반화 성능을 높이기 위해 LSTM 계층에 dropout 비율 0.3을 적용했다. 그림 2는 주기적 특성을 활용한 Conv1D-LSTM 기반 인코더-디코더 구조의 전체적인 흐름을 도식화한 것으로, 입력 시계열로부터 특징을 추출하고 예측 시퀀스를 생성하는 전 과정을 시각적으로 설명한다.

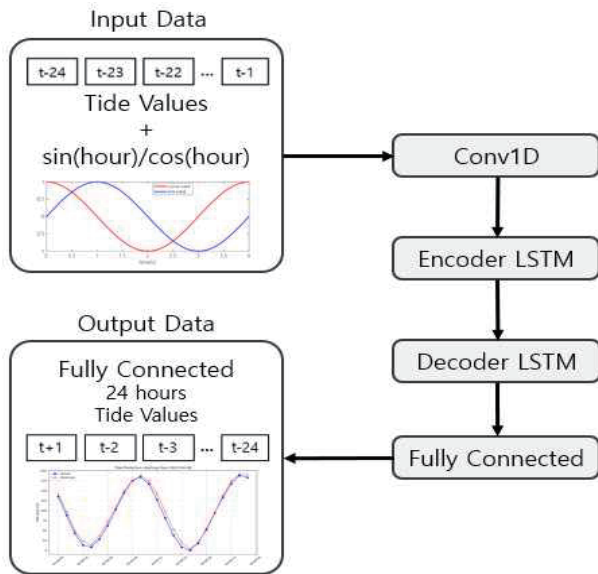


그림 2. 주기 패턴 인식을 위한 Conv1D-LSTM 조위 예측 모델 구조

3. 실험 결과

모델은 검증용 데이터셋으로 설정된 기간에 대해 하루 단위 예측을 반복 수행하였으며, 입력에 주기적 특성의 포함 여부에 따른 월별 평균 예측 성능을 비교한 결과, 주기적 특성을 포함한 경우가 전반적으로 더 우수한 성능을 보였다. 특히 4월의 경우 MAE(Mean Absolute Error, MAE)가 13.1 cm에서 10.7 cm로 감소하여 약 18%의 성능 향상이 나타났고, 8월과 12월에도 각각 8.7%, 5.0% 수준의 오차 감소가 확인되었다. 이는 목포 지역의 평균 조위값인 약 250 cm를 기준으로 약 5% 내외의 상대 오차에 해당하며, 계절에 따라 예측 정확도의 차이가 존재함을 시사한다. 이러한 수준의 오차는 실시간 조위 예측 응용에 있어 실용 가능한 정확도를 확보한 것으로 평가된다.

표 1. 검증용 데이터셋 월별 성능 지표

월	입력	MSE(cm ²)	RMSE(cm)	MAE(cm)
4	조위	264.4	15.7	13.1
	조위+주기	182.7	13.2	10.7
8	조위	301.2	16.8	13.8
	조위+주기	248.8	15.3	12.6
12	조위	325.3	17.2	14.1
	조위+주기	294.9	16.4	13.4

그림 3은 검증용 데이터셋에 해당하는 4월, 8월, 12월 중 4월 11일부터 20일까지의 10일간 예측 결과를 시각화한 것이다. 전체적으로 모델은 고조 및 저조 시점을 중심으로 조위 변화의 흐름을 안정적으로 포착하였으며, 실측값과 유사한 곡선 패턴을 유지했다. 특히 시간 정보를 사인(sin) 및 코사인(cos) 함수로 변환하여 입력한 방식은 약 12.42시간 주기의 조위 특성을 효과적으로 반영하였고, 급격한 변화가 나타나는 구간에서도 예측 곡선의 위상 정렬과 구조가 뚜렷하게 유지되는 경향을 보였다.

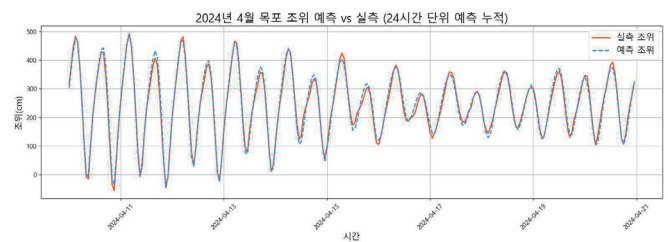


그림 3. 2024년 4월 조위 시계열: 실측값과 예측값 비교 그래프

III. 결론

본 논문은 조위의 주기적 특성을 효과적으로 반영하기 위해 Conv1D-LSTM 기반의 시계열 모델을 기반으로 하여 향후 24시간 동안의 조위 변화를 연속적으로 예측하는 조위 예측 모델을 제안하였다. 입력 변수는 과거 24시간의 실측 조위값과 함께 주기 정보를 내재화한 사인(sin) 및 코사인(cos) 함수로 구성되었으며, Conv1D 계층은 조위의 패턴 변화를 감지하고, LSTM 기반 인코더-디코더 구조는 시간 흐름에 따른 장기 의존성을 학습하도록 설계되었다. 실험을 통해 제안한 모델은 시계열 곡선의 위상 정렬과 구조적 흐름을 안정적으로 재현했으며, 목포 지역 평균 조위값(약 250 cm)을 기준으로 약 5% 이내의 MAE를 기록하여 실용적인 수준의 예측 정확도를 확인했다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00238653, 스마트선박용 수로정보 표준개발)

참 고 문 헌

- [1] Ministry of Oceans and Fisheries. (2022). Notice of Partial Amendment to the Enforcement Decree of the Coastal Management Act. Ministry of Oceans and Fisheries,
- [2] Shi, X., Chen, Z., Wang, H., Yeung, D.-Y., Wong, W.-K., & Woo, W.-c. (2015). Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 28, 802 - 810.
- [3] Hewamalage, H., Bergmeir, C., & Bandara, K. (2019). LSTM-MSNet: Leveraging forecasts on sets of related time series with multiple seasonal patterns. *arXiv preprint arXiv:1909.04293*. <https://arxiv.org/abs/1909.04293>