

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

물리 기반 신경망을 활용한 RC 기둥의 비선형 시간 이력 응답 예측

Physics Informed Neural Network-Based Prediction of Nonlinear Time History of RC Columns

○안 세 진*

An, Se Jin

황 지 민*

Hwang, Ji Min

황 원 준**

Hwang, Won Jun

김 승 직***

Kim, Sung Jig

키워드 : 딥러닝, 물리기반신경망, 비선형 시간 이력 해석, 철근콘크리트 기둥

Keywords : DeepLearning, Physics-Informed Neural Network, Nonlinear Time History Analysis, Reinforced Concrete

철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 기둥은 지진 하중 작용 시 비선형적인 재료 및 구조 거동을 나타낸다. 이러한 응답을 정밀하게 예측하는 것은 내진성능평가와 성능기반 내진설계에 중요하다. 하지만, 기존의 수치해석을 통한 응답 예측은 계산 비용이 크고, 최근 주목받고 있는 데이터 기반 신경망은 대규모 학습 데이터와 낮은 일반화 성능이라는 한계를 지닌다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 지진 하중 하에 RC 기둥의 비선형 시간 이력 응답을 예측하는 새로운 구조의 물리 기반 신경망(Physics Informed Neural Network, PINN)을 제안한다.

제안한 모델은 그림1과 같이 손실함수에 운동방정식을 물리 손실로 내재화하여 구조 응답을 물리적으로 반영한다. 또한, Multi-GRU 기반 다중 서브네트워크 구조와 구간별 자기회귀 메커니즘을 적용해 구조 응답의 시간 의존성을 학습한다. 이를 통해 Zhang et al.(2020)의 PhyLSTM² 모델의 성능 저하와 과도한 학습량 문제를 보완하였다.

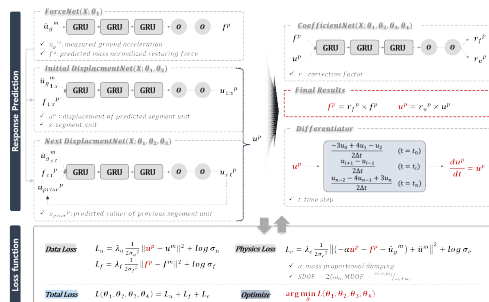


그림 1. 제안한 PINN 구조

모델의 검증은 단일 RC 기둥 모델 및 총 2층 RC 기둥 모델을 대상으로 수행하였다. 인공지진파 97개(Zhang et al., 2020)와 실제 지진파 103개(PEER NGA West2)를 사용하여 OpenSees 동적해석으로 응답 데이터셋을 구축하였다. 지진파는 Dynamic Time Warping K-means로 군집화한 후, 각 군집에서 2개씩을 학습용으로, 나머지는 테스트용으로 사용하였다.

수치 실험 결과, 인공지진파에 대한 단일 RC 기둥의 변위 및 복원력은 모두 $R^2 \geq 0.9$ 를, 실제 지진파 입력에서도 $R^2 \geq 0.8-0.9$ 를 유지하였다. 2층 RC 기둥 응답 예측의 경우, 기존 모델 대비 학습 속도가 약 3.7배 향상되었으며, 평균 R^2 는 0.8 수준으로 안정적인 성능을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 PINN은 데이터 기반 GRU 및 PhyLSTM² 대비 적은 학습량으로도 높은 정확도와 효율성을 보였다. 이를 통해 PINN 기반 RC 기둥 응답 예측 모델의 적용 가능성을 확인하였다.

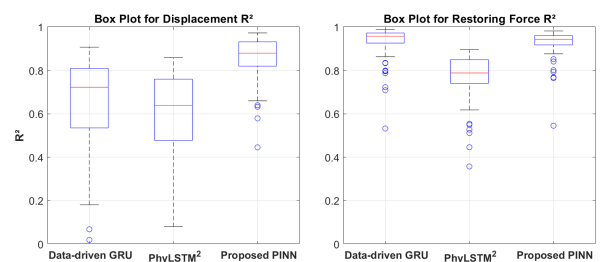


그림 2. 실제 지진파에 대한 단일 RC 기둥 응답 예측 BoxPlot

* 계명대 대학원 석사과정

** 계명대 대학원 박사과정

*** 계명대 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Keimyung University, sjkim4@kmu.ac.kr)

이 연구는 2025년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호:RS-2025-16070313

참고문헌

1. Zhang, R., Liu, Y., & Sun, H. (2020). Physics-informed multi-LSTM networks for metamodeling of nonlinear structures. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 369, 113226.