

내압을 받는 축소규모 원전 격납건물 구성요소의 대리모델 기반 전역 민감도 분석

Surrogate Model-Based Global Sensitivity Analysis of Components of a Test Mock-Up Nuclear Containment Building subjected to Internal Pressure

손호영* · 이종륜** · 주부석***

Son, Hoyoung · Lee, Jong-Ryun · Ju, Bu-Seog

요약

확률론적 위험성 평가는 하중, 재료특성 등과 같은 불확실성 인자를 고려하여 구조물의 안전성을 평가하는 기법이지만 모든 불확실성을 고려하는 것은 현실적으로 불가능하다. 또한 원전 격납건물은 콘크리트, 철근, 라이너, 텐던이 복잡하게 결합되어 있다. 따라서 전역민감도 분석을 통해 격납건물의 불확실성 인자 검토하고 선정하는 작업은 필요하다. 따라서 본 연구는 대리모델을 기반으로 축소규모 원전 격납건물의 전역 민감도 분석을 수행하고 격납건물의 주요 영향인자를 분석하고자 한다. 유한요소 해석 모델을 기반으로 대리모델의 학습데이터를 생성하였으며 구축된 대리모델의 성능지표를 분석하였을 때 높은 회귀성능을 갖는 것으로 판단된다. 대리모델을 기반으로 전역 민감도 분석을 수행한 결과 콘크리트의 인장균열이 발생하는 내압수준에서 민감도 지수는 콘크리트의 압축강도가 높지만, 전체적인 내압 구간에서 민감도 지수는 텐던의 탄성계수 및 항복강도가 높은 것으로 나타났다.

Keywords : 원전 격납건물, 대리모델, 전역 민감도, 불확실성 인자

1. 서론

체르노빌 및 스리마일 섬 원전 사고 이후 내압에 의한 원전 격납건물의 안전성이 대두됨에 따라 많은 연구자에 의해 격납건물의 내압 성능평가는 수행되었다. 최근들어 하중, 재료 특성 등의 불확실성을 고려한 확률론적 안전성 평가에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다. 하지만 모든 불확실성 인자를 고려한 내압성능 평가는 현실적으로 불가능하기 때문에 주요 영향인자의 식별은 중요하다. 원전 격납건물은 콘크리트, 라이너, 철근, 텐던에 대한 재료특성과 확률분포는 다르기 때문에 전역 민감도 분석을 수행하여 주요 영향인자를 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 축소규모 원전 격납건물의 주요 영향인자 분석을 위해 대리 모델 기반 전역 민감도 분석을 수행하였다.

2. 대리모델 기반 전역 민감도 분석

2.1 대리모델 구축

본 연구는 축소규모 격납건물의 대리모델 구축을 위해 인공신경망(ANN) 알고리즘을 적용하였다. Ju et al.(2023)의 연구에서 구축 및 검증된 축소규모 격납건물의 유한요소 모델을 이용하여 재료 특성의 불확실성을 고려하여 100회의 비선형 유한요소 해석을 수행하였으며 해석결과를 ANN 모델의 학습데이터로 사용하였다. ANN 모델의 예측성능은 성능지표(MSE, RMSE, R2)를 사용하여 검토하였다. 학습데이터의 MSE, RMSE, R2는 각각 0.0969, 0.3113, 0.9969로 나타났으며 테스트 데이터의 MSE, RMSE, R2는 각각 0.0696, 0.3113, 0.9968로 나타났다. MSE, RMSE는 0에 가까울수록, R2는 1에 가까울수록 예측성능이 높은 것을 의미하기 때문에 본 연구의 ANN 모델은 높은 회귀성능을 갖는 것으로 판단된다. 따라서 구축된 ANN모델을 이용하여 축소규모 격납건물의 전역 민감도 분석을 수행하였다.

* 정회원 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 연구박사 shyoung0623@khu.ac.kr

** 학생회원 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 석사과정

*** 정회원 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수 bju2@khu.ac.kr

2.2 전역 민감도 분석 결과

본 연구는 전역 민감도 분석을 위해 SOBOL 기법을 이용하였다. SOBOL 기법에서 민감도 지수는 입력변수에 대한 출력변수 분산의 기댓값을 출력변수의 전체 분산으로 나눈 값으로 정의된다(유영서 등, 2020). 그림 1과 그림 2는 각각 주효과에 대한 민감도 지수 및 주효과와 교호작용을 고려한 총 민감도 지수를 나타내었다. 그림 1 및 그림 2에서 콘크리트의 인장균열이 발생하는 0.6MPa 부근에서 콘크리트의 압축강도에 대한 민감도 지수가 급격히 증가하며 텐던의 탄성계수 및 항복응력의 민감도 지수가 감소하는 현상이 나타났다.

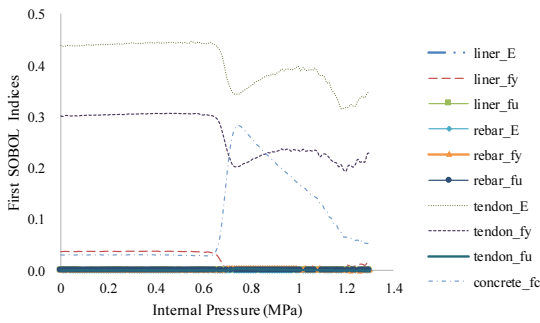


그림 1. 주효과에 대한 민감도 지수

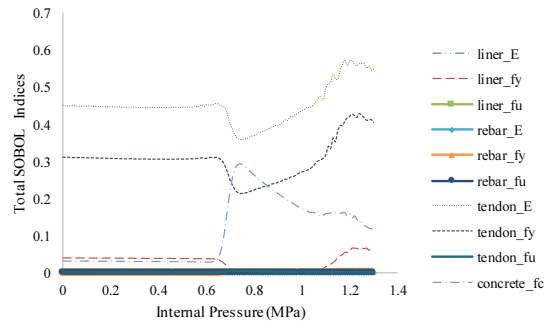


그림 2. 총 민감도 지수

3. 결론

본 연구는 축소규모 원전 격납건물의 주요 불확실성 영향인자를 분석하기 위해 대리모델 기반 전역 민감도 분석을 수행하였다. ANN 알고리즘의 대리모델을 구축하였으며 평가지표를 분석한 결과 구축된 대리모델은 높은 회귀성능을 갖는 것으로 나타났다. 대리모델을 기반으로 격납건물의 구성요소의 재료 특성에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 일부 구간은 콘크리트의 압축강도에 대한 민감도 지수가 높지만 전체 구간에서 민감도 지수는 텐던의 탄성계수 및 항복강도가 높은 것으로 나타났다. 현재 연구는 방위각 135도, 높이 6200mm의 데이터를 이용하여 민감도 지수를 검토하였지만 추후연구를 통해 다양한 위치에서 민감도 지수를 검토하고, 재료특성의 민감도 지수 및 구조적 거동을 고려하여 확률론적 내압성능 평가를 위한 한계상태를 분석하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다.(NO. 2106034)

참고문헌

유영서, 이동혁, 김선숙, 박철수 (2020) 전역 민감도 분석을 이용한 건물 에너지 성능평가의 합리적인 개선, 대한건축학회 논문집, 36(5), pp.177~185.

Ju, B. S., Son, H. Y. (2023) Reevaluation of failure criteria location and novel improvement of 1/4 PCCV high fidelity simulation model under material uncertainty quantifications, *Nuclear Engineering and Technology*, 55(9), pp. 3493~3505.