Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 34, No. 3, pp. 283~290, June, 2022
https://doi.org/10.4334/JKCI.2022.34.3.283

pISSN 1229-5515
eISSN 2234-2842
www.jkci.or.kr

다층 쉘요소와 보-트러스 모델을 이용한 원자력발전소 격납건물의 비선형 동적해석

비덱 투사 [1)] · 삼다니 아자드 [1)] · 두이두안 응웬 [2)] · 이태형 [3)*]

[1)]건국대학교 인프라시스템공학과 대학원생 [2)]Vinh University Lecturer [3)]건국대학교 인프라시스템공학과 교수

Nonlinear Dynamic Analyses of Reactor Containment Building Using Multi-Layer Shell Model and Beam-Truss Model

Bidhek Thusa,[1)] Md Samdani Azad,[1)] Duy-Duan Nguyen,[2)] and Tae-Hyung Lee[3)*]

[1)]Graduate Student, Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Rep. of Korea
[2)]Lecturer, Vinh University, Vinh 461010, Vietnam
[3)]Professor, Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Rep. of Korea

ABSTRACT The objective of this study is to investigate linear and nonlinear analysis schemes for evaluating seismic performance of a reactor containment building (RCB) in the advanced power reactor 1400 nuclear power plant (NPP). Two structural modeling schemes, the multi-layer shell model (MLSM) and beam-truss model (BTM), are developed to simulate the seismic behaviors of RCB. A full three-dimensional finite element model is additionally constructed to verify the numerical modeling schemes used. A set of input ground motions with response spectra compatible with US NRC 1.60 design spectrum is generated to perform linear and nonlinear time-history analyses. The floor response spectra and floor displacements are obtained at different elevations of the structure since those are critical outputs for evaluating seismic behaviors of RCB and secondary components. The results show that the difference in seismic responses between linear and nonlinear analyses becomes larger as earthquake intensity increases. The linear analysis underestimates floor displacement while it overestimates floor acceleration. BTM and MLSM are good options for seismic performance evaluation of NPP structures by nonlinear time-history analyses.

Keywords : nonlinear analysis, reactor containment building, beam-truss element model, multi-layer shell model, floor response spectrum

1. 서 론

원자력에너지는 청정에너지로 지난 수십년 동안 석탄에 이어 두 번째 주요 에너지원으로서의 역할을 해왔다. 하지만, 체르노빌(우크라이나)와 후쿠시마(일본)에서의 원자력발전소(이하 원전) 사고로 인해 수많은 사람과 환경에 심각한 피해가 발생하여 원전이 위험한 시설로 인식되기도 한다. 게다가 한국에서도 경주(2016년)와 포항(2017년)에서 각각 중진 규모의 지진이 발생하여 원전의 안전에 대한 우려가 커지기도 하였다. 따라서, 원전구조의 내진성능에 관한 연구를 계속할 필요가 있다.

유한요소법은 원전구조물을 포함한 토목구조물의 지진거동을 모사하는데 가장 효율적인 방법으로 여겨진다. 격납구조(reactor containment building, RCB)는 원전의 가장 중요한 구조물로, 지진거동을 평가하기 위해서는 집중질량모델(lumped-mass stick model, LMSM)이나 연속체요소(solid element)로 모델링하는 것이 일반적이다. LMSM은 가장 단순한 모델로 격납건물을 선형탄성보요소로 모델링하고 층의 질량을 절점에 집중시킨 모델이다. 이 모델링기법은 원전구조(Choi et al. 2008; Yang et al. 2019; Nguyen et al. 2020)나 다른 구조물(Cho et al. 2011)의 내진설계 및 지진취약도해석에 널리 사용된다. LMSM은 모델링이 단순하고 계산이 빠르지만, 대부분 선형해석에 국한된다. 반면에 연속체요소를 이용한 3차원 유한요소모델(3D FEM)은 가장 정확하고 신뢰할 수 있는 모델로 여겨진다(Huang et al. 2018). 하지만 이 방법은 비선형 응답이력해석을 수행하기 어려울 정도로 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있어 내진설계나 확률해석에는 적합하지 않다.

원전구조의 응답해석을 위해서는 LMSM과 3D FEM 외에

*Corresponding author E-mail : thlee@konkuk.ac.kr
Received January 05, 2022, Revised February 28, 2022, Accepted April 22, 2022
ⓒ2022 by Korea Concrete Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

도 쉘요소나 보-트러스요소를 기반으로 한 모델을 사용하기도 한다(De Grandis et al. 2009; Hur et al. 2017). 쉘요소의 하나인 다층쉘요소 모델(multi-layer shell element model, MLSM)을 이용하여 내압 또는 지진에 의한 원전구조의 비선형거동을 해석한 연구도 진행되었다(Nakamura et al. 2010). 한편, 전단벽 해석을 위해 개발된 보-트러스 모델(beam-truss model, BTM)은 주로 건축구조 해석에 사용되었고(Lu and Panagiotou 2014) 원전 격납구조에 적용된 경우는 드물다. 선행연구에서 LMSM 및 3D FEM을 이용한 원전의 지진취약도해석을 수행한 사례가 많이 있지만, 이들은 대부분 구형원전(예, CANDU, AP1000 등)에 해당된다. 국산 신형원전인 APR-1400 원전에 대해 선형 및 비선형해석의 차이를 정량적으로 분석한 연구는 아직 수행된 바 없다.

본 연구의 목적은 APR-1400 원전의 격납건물에 대한 내진성능을 평가하는 것이다. MLSM과 BTM을 이용하여 격납건물을 모델링하였고, 3D FEM으로 모델을 검증하였다. US NRC 1.60(NRC 2014) 설계스펙트럼에 부합하는 일련의 지진파를 생성하여 선형 및 비선형 응답이력해석을 수행하였다. RCB의 지진거동은 층응답스펙트럼으로 표현하였고, 선형 및 비선형해석의 차이를 정량화하였다.

2. 구조해석모델

2.1 격납구조의 개요

본 논문에서는 국내에서 개발한 APR-1400 원전의 격납건물을 대상으로 해석을 수행하였다. 격납건물은 철근콘크리트구조로 반경 23.5 m, 높이 54.0 m, 두께 1.22 m의 실린더와 반지름 23.2 m, 평균 두께 1.07 m의 돔으로 구성된다. Fig. 1은 APR-1400 원전의 단면도를 보여주며 격납건물은 파선으로 표시되어 있다. 격납건물의 치수 및 철근 상세는 Fig. 2와 같다. 프리스트레스는 본 연구에서 고려하지 않았다. 구조해석을 위한 주요 재료특성 값은 콘크리트의 포아송비 0.2, 단위중량 2,400 kg/m^3, 압축강도 30.0 MPa, 철근의 항복강도 413 MPa으로 가정하였다.

2.2 다양한 구조해석모델

2.2.1 다층쉘요소 모델(MLSM)

격납건물은 SAP2000(CSI 2013)에서 제공하는 smeared MLSM을 이용하여 모델링하였다. 쉘요소는 다양한 두께의 여러 층(layer)로 구성되며 각 층은 Fig. 3과 같이 철근 또는 콘크리트층을 나타낸다. Fig. 4의 콘크리트와 강재 비선형 재료모델은 각각 해당하는 층에 할당되어 구조체의 비선형거동을 모사할 수 있다. MLSM은 복합구조의 재료역학에서 유도되었으며 면내와 면외거동의 상호작용과 면내 휨-전단 상호작용을 모사할 수 있다(Miao et al. 2006).

4-노드 다층 쉘요소는 합성구조에 대한 텐서요소의 혼합보간이론(theory of mixed interpolation of tensorial components)으로 유도되었다. 철근콘크리트의 비선형거동을 모사하기 위해 다층으로 구성된 단면에 면내 적분점을 배치하였다. 즉, 콘크리트와 철근을 개별적인 쉘요소로 정의하고 이들이 완벽하게 접합된 적층구조를 구성한다고 가정한다(Fig. 3). 각 층은 각각에 맞는 두께와 재료모델을 할당한다. 중립면에서 축변형률과 곡률을 계산하고 평면유지 가정에 의해 다른 층

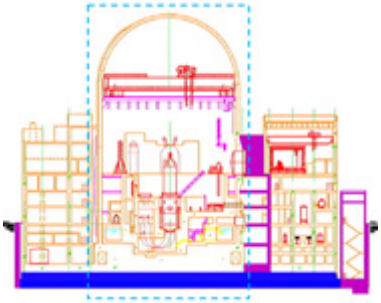


Fig. 1 Elevation view of APR-1400 nuclear power plant (Nguyen et al. 2020)

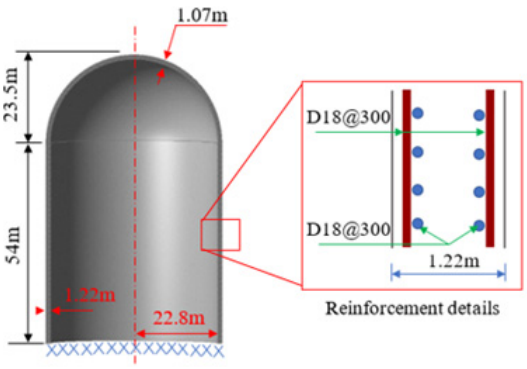


Fig. 2 Dimensions of RCB and reinforcement details (Nguyen et al. 2020)

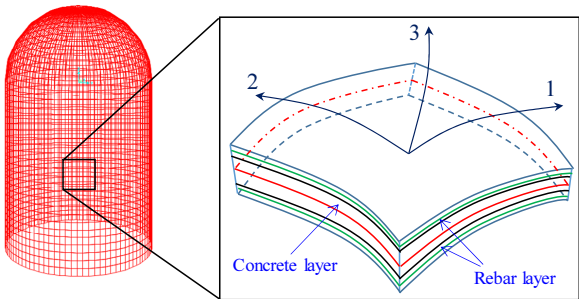
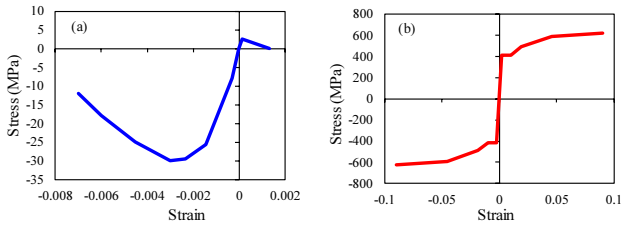


Fig. 3 Concrete and rebar layers in MLSM



(a) Concrete (b) Reinforcing bar

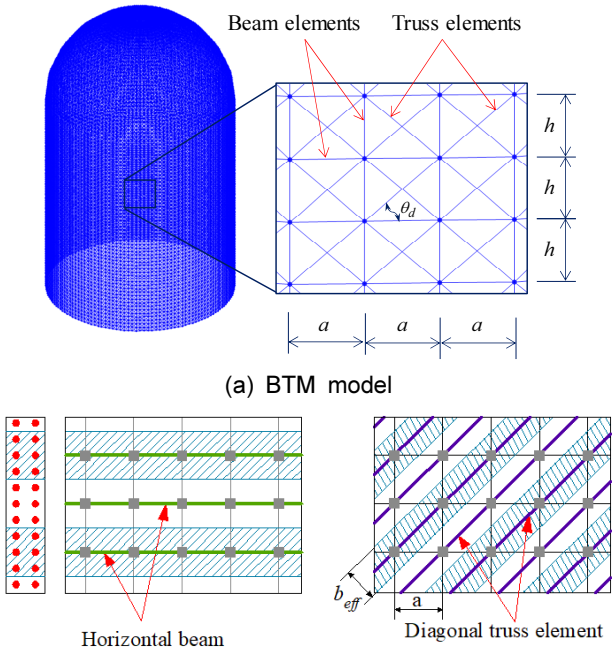
Fig. 4 Nonlinear material models in SAP2000 for MLSM

의 축변형률을 계산한 후 각 층의 재료모델에 의해 응력을 계산한다. 마지막으로 수치적분법에 따라 부재력을 계산한다.

MLSM은 3D FEM에 비해 자유도를 크게 감소시키기 때문에 계산 시간이 적게 소요되면서도 휨거동을 잘 모사하기 때문에 격납구조와 같은 대형구조의 비선형해석에 적합한 해석법이라고 할 수 있다.

2.2.2 보-트러스 모델(BTM)

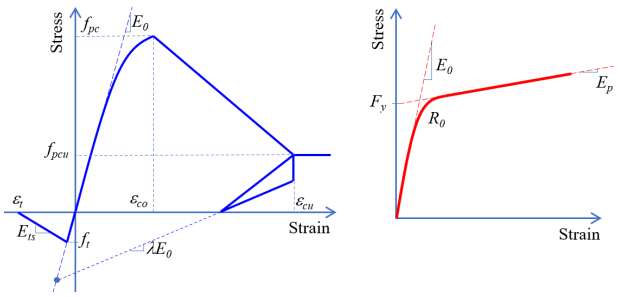
BTM은 Fig. 5(a)와 같이 연속체인 벽체를 보와 트러스요소의 조합으로 모사한다(Lu and Panagiotou 2014). BTM은 연속체요소에 비해 자유도가 적고 모델이 단순하여 대형구조물의 비선형거동을 해석하기에 유리한 장점이 있다. 보와 트러스요소의 길이는 요소의 민감도 분석을 통해 결정되며 본 연구에서는 패널 한 변의 길이를 1.0 m로 설정하였다(Nguyen et al. 2021). 보 요소의 폭은 벽의 두께(1.22 m)와 동일하며 보의 길이는 패널 한 변의 길이와 같다. 대각선 트러스 요소의 유효 폭(b_{eff})은 패널의 길이(a)와 $\sin(\theta_d)$의 곱으로, θ_d는 대각선과 수평 요소 사이의 각도이다.



(a) BTM model

(b) Horizontal beams (c) Diagonal trusses

Fig. 5 Modeling scheme of BTM



(a) Concrete (b) Reinforcing bar

Fig. 6 Nonlinear material models in OpenSees for BTM

본 연구에서는 OpenSees(Mazzoni et al. 2006)을 이용하여 BTM을 구현하였다. 수직 및 수평 보요소는 철근콘크리트의 합성거동을 고려하도록 파이버모델링을 적용하였고. 대각선 트러스 요소는 순수한 콘크리트의 거동을 모사한다. Fig. 5(b)와 (c)는 각각 수평 보요소와 대각선 트러스요소의 구성을 보여준다. 비선형 재료모델은 OpenSees에서 제공하는 *concrete02*와 *steel02* 모델을 각각 콘크리트와 강재부분에 적용하였다(Fig. 6). 여기서, 강재의 경화기울기(E_p)는 탄성계수의 1 %로 가정하였다.

2.2.3 3차원 유한요소모델(3D FEM)

MLSM과 BTM을 이용한 격납건물 모델을 검증하기 위해 3D FEM으로 격납건물을 모델링하였다. ANSYS(ANSYS Inc. 2019)에서 제공하는 *solid187*, *beam189*, *conta174* 요소를 각각 콘크리트, 철근, 콘크리트-철근 접촉면 모델링에 적용하였다. 계산시간을 고려하여 선형해석 만을 수행하였다. 콘크리트의 물성치는 탄성계수 33,000 MPa, 포아송비 0.18, 단위중량 24.0 kN/m^{3}를 적용하였고, 철근은 탄성계수는 2.0×10^5 MPa, 포아송비 0.3, 단위중량 78.5 kN/m^{3}를 적용하였다. 요소 민감도해석을 바탕으로 64,299개의 solid 요소와 24,647개의 보 요소를 사용하여 격납건물을 모델링하였다(Fig. 7).

2.2.4 고유치해석 결과

앞서 설명한 세 가지 모델에 대해 고유치해석을 수행하였다. Table 1에서는 각 모델의 대표적인 10개 모드에 대한 고

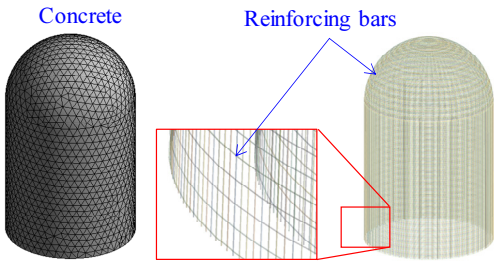


Fig. 7 Concrete meshes and grid of reinforcing bars in 3D FEM

Table 1 Natural frequencies (Hz) of three models

Mode	MLSM	BTM	3D FEM
1	4.01	3.99	3.92
2	4.01	3.99	3.92
3	5.28	5.90	5.75
4	5.28	5.90	5.77
5	6.19	6.16	6.55
6	6.19	6.16	6.55
7	6.62	7.58	6.93
8	6.62	7.58	6.93
9	8.72	8.81	8.69
17	11.54	11.93	11.71

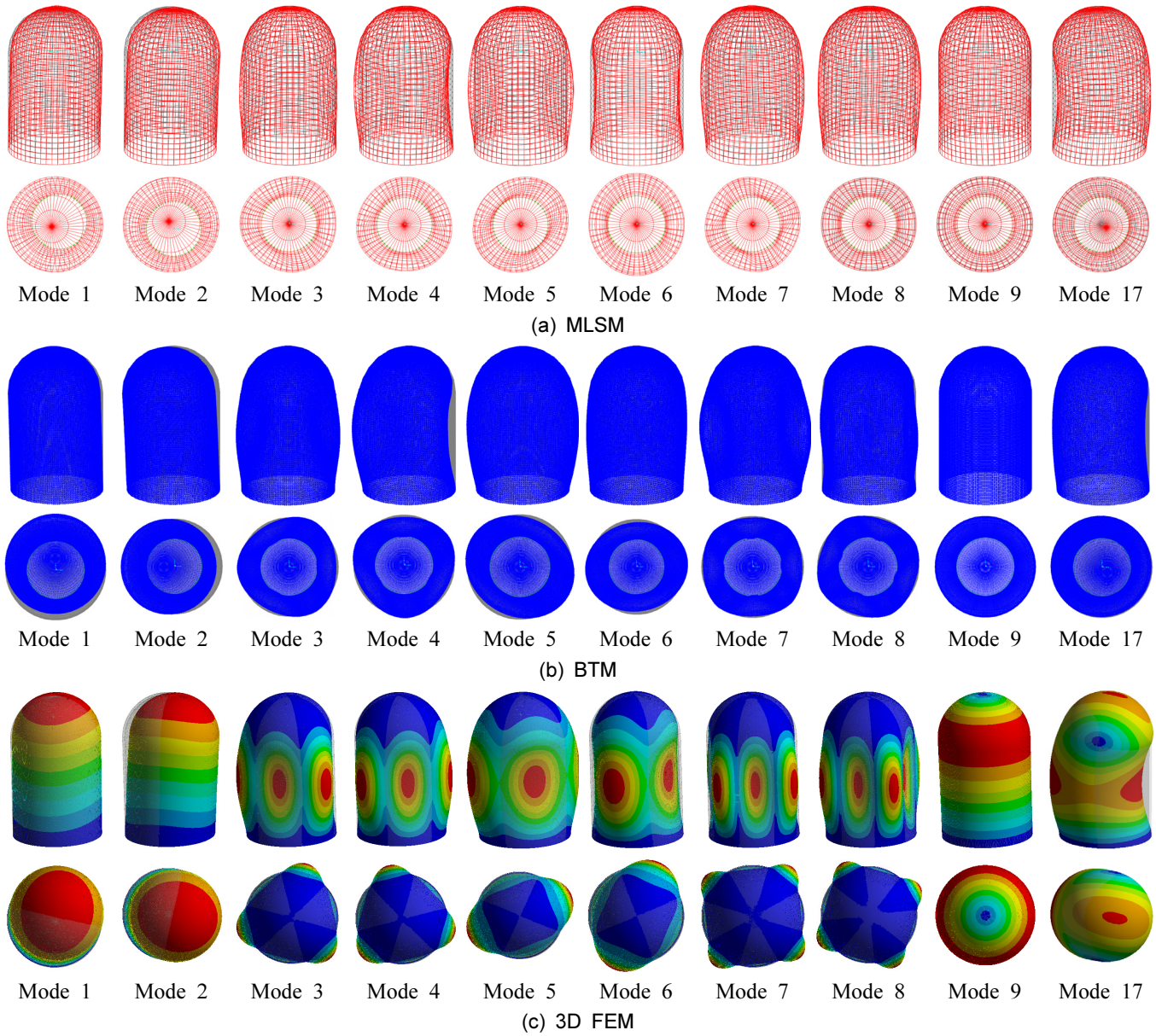


Fig. 8 Representative mode shapes of (a) MLSM, (b) MLSM, and (c) 3D FEM

유진동수를 비교하였다. MLSM, BTM, 3D FEM을 이용한 모델의 고유진동수가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서는 각 모델의 주요한 진동모드의 모드형상을 보여주는데, 모드형상 역시 잘 일치하는 것을 확인하였다.

2.3 입력 인공합성지진파

APR-1400 원전은 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA) 0.3 g의 안전정지지진에 대해 US NRC 1.60 설계스펙트럼(NRC 2014)을 사용하여 내진설계되었다. 본 연구에서는 응답이력해석을 수행하기 위해 SeismoSignal(SeismoSoft 2017)을 이용하여 NRC 1.60 설계스펙트럼에 부합하는 11개의 지반가속도 시간이력을 생성하였다. 시드 지반운동은 PEER 센터에서 제공하는 세계 역사지진에서 무작위로 선택하였다(PEER Center 2020). NRC 1.60 스펙트럼과 생성된 지

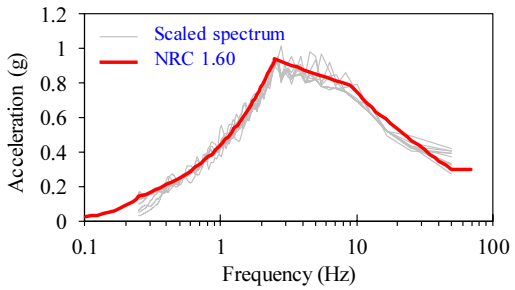


Fig. 9 Response spectra of input ground motions

진파의 스펙트럼을 Fig. 9에 나타내었다. 11개의 지반가속도 시간이력은 각각 선형해석과 비선형해석에 동일하게 적용되었으며 3절에서 제시하는 해석결과는 모두 11개 결과의 평균값을 나타낸다. 참고로, 특정한 지진파에 의한 결과에 대한 특이사항은 관찰되지 않았다.

3. 해석결과

3.1 선형탄성해석

격납건물은 축대칭구조이므로 수평지진의 방향에 관계없이 같은 응답을 나타내기 때문에 지반운동을 하나의 수평방향(X-방향)에 적용하여 해석을 수행하였다. 수치해석으로 운동 방정식을 풀기 위해 $\gamma = 0.5$, $\beta = 0.25$를 적용한 Newmark 방법을 이용하였다.

층응답스펙트럼(floor response spectrum, FRS)은 원전구조물의 내진설계 및 내진성능평가에서 가장 주목하는 지표이다. 전기, 전자 및 기계장치들의 내진성능은 그들이 위치한 층의 가속도응답에 영향을 받기 때문이다. MSLM과 BTM의 FRS는 XZ 평면의 교차점에서 계산하였고, 격납건물의 최상층과 중간층에서 FRS를 계산하였다.

격납건물 최상층에서 계산된 세 가지 구조모델의 평균 FRS는 Fig. 10에서 비교하였다. FRS는 고유진동수인 약 4.0 Hz 부근에서 증폭되는 것을 관찰할 수 있으며, 구조모델에 의한 차이는 최대 7 %로 무시할 만하다. 특히 3D FEM과 비교할 때 MLSM과 BTM의 FRS는 3.5 %의 작은 차이를 보인다. 이 결과로 MLSM과 BTM이 구조해석 모델로 유효하다는 것을 알 수 있다.

3.2 비선형해석

강진이 발생하면 구조물은 손상을 입게 되고 구조거동은 비선형거동을 하게 되므로 구조해석에서 이를 모사하기 위해서는 비선형해석이 필수적이다. 탄성해석과 같이 비선형

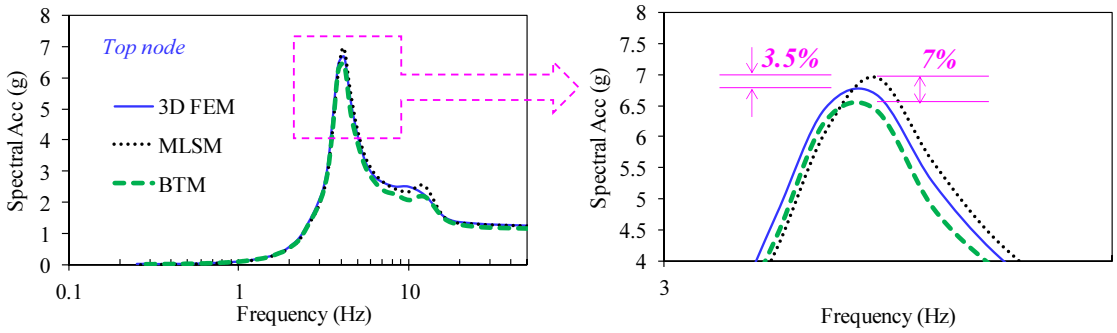


Fig. 10 Mean FRS of RCB at top nodes from MLSM, BTM, and 3D FEM for linear analyses

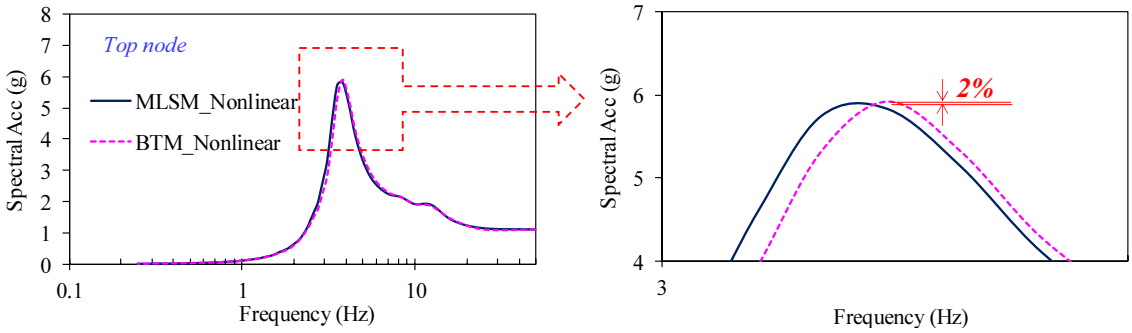


Fig. 11 Comparison of mean FRS of RCB between nonlinear MLSM and BTM

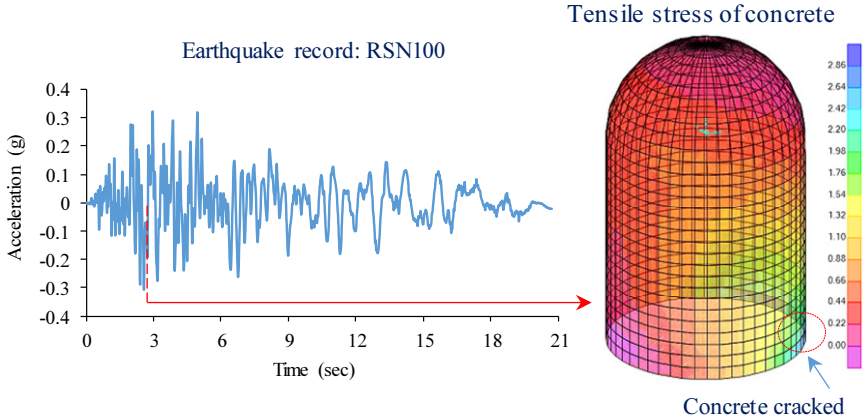


Fig. 12 Stress distribution of RCB under input ground motion

구조모델에 X-방향으로 인공합성지진파를 적용하여 응답이력해석을 수행하였다.

MLSM과 BTM을 적용한 모델의 FRS는 Fig. 11에서 비교하였다. 탄성해석의 결과와 비슷하게 고유진동수인 4.0 Hz 부근에서 증폭되는 것을 알 수 있다. MSLM과 BTM 사이 비선형 FRS 차이는 최대 2 %로 관찰되어 두 해석방법의 결과는 거의 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 시간응답해석 중 특정 시각에서 격납건물에 작용하는 콘크리트의 응력을 보여준다. 격납건물의 밑부분에 콘크리트 균열이 발생한 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 13은 비선형정적해석 과정에서 하중이 증가하여 구조물에 손상이 증가함에 따라 항복하는 철근의 분포가 증가하는 것을 보여준다. 이와 같이, 구조물을 구성하는 콘크리트의 균열, 철근의 항복 등이 발생하면 구조물의 강성이 저하되고, 이어서 구조물의 진동수가 작아지는 효과가 발생한다.

3.3 선형 및 비선형해석의 비교

Fig. 14는 선형 및 비선형해석의 평균 FRS를 비교한 것이다. 비선형해석에서 얻은 FRS는 MLSM의 선형 분석보다 약 17 % 낮은 반면 BTM은 9 % 낮은 것으로 관찰되었다. 비선형해석에서는 구조물 하부 콘크리트에 균열이 발생하고 강성이 감소하는 것을 모사하기 때문인 것으로 분석된다. 또한, FRS의 첨두값이 발생하는 진동수에도 변화를 관찰할 수 있는데, 비선형해석에서는 구조물의 강성감소로 인해 고유진동수가 감소하기 때문이다. Fig. 15에서는 각 해석의 층변위스펙트럼을 비교하였다. 강성감소로 인해 비선형해석의 경우 변위가 최대 18 %까지 더 크게 계산되는 것을 관찰할 수 있다.

확률론적 지진위험도평가에서는 다양한 지진강도 수준에 대해 원전의 내진성능을 평가해야 한다. 본 연구에서는 다양한 PGA에 대해 해석을 수행하기 위해 내진설계수준(0.3

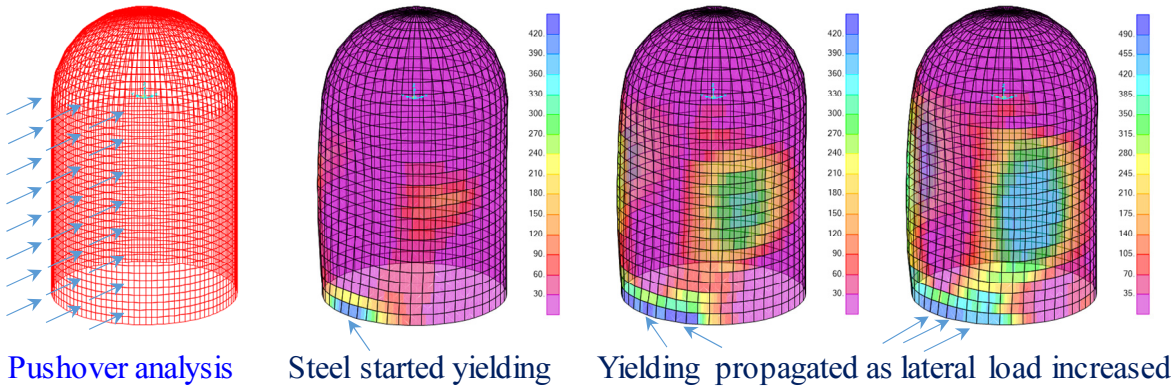


Fig. 13 Development of steel yielding at different damage states

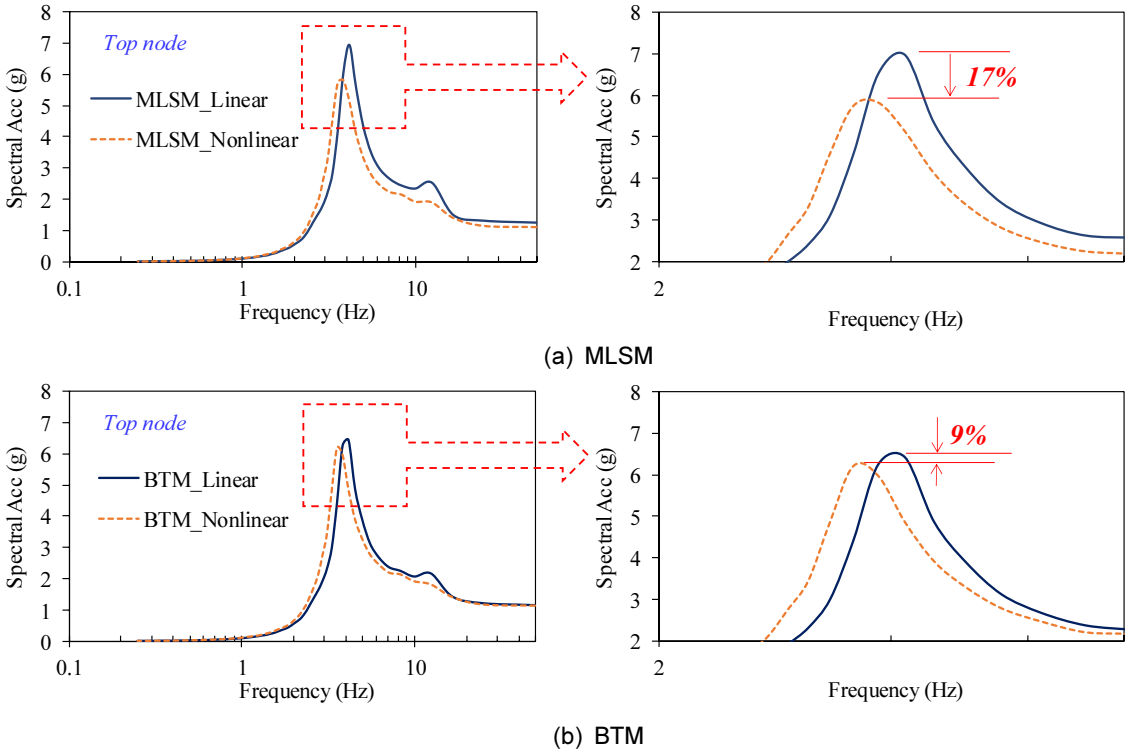


Fig. 14 Comparison of mean FRS between linear and nonlinear analyses for MLSM and BTM

g) 이외에도 PGA 0.6 g와 1.0 g에 대해 해석을 수행하여 FRS를 Fig. 16에 비교하였다. 모든 경우에 선형해석이 비선형해석보다 가속도응답을 과도하게 평가하는 것을 볼 수 있다. 또한 PGA가 커질수록 선형과 비선형 FRS의 차이가 증가하여 PGA가 0.6 g, 1.0 g인 경우 각각 27 %, 32 %의 차이를 보인다. 이와 같이 선형해석법으로 원전구조를 해석한다면 구조물의 가속도응답을 과대평가하여 과다설계를 초래할 수 있다. 이러한 오류를 방지하기 위해서는 원전구조의 내진설계나 내진성능평가 시 비선형해석방법을 사용하는 것이 필요하다.

본 연구의 결과를 종합해보면, MLSM과 BTM은 원전구조물의 비선형해석을 위한 효율적인 도구가 될 수 있다. 3D FEM을 이용한 비선형해석에는 너무 많은 시간비용이 소요된다는 점과 MLSM 및 BTM은 해석시간이 상대적으로 짧은 반면 구조물의 비선형거동을 충분히 모사할 수 있기 때문이다.

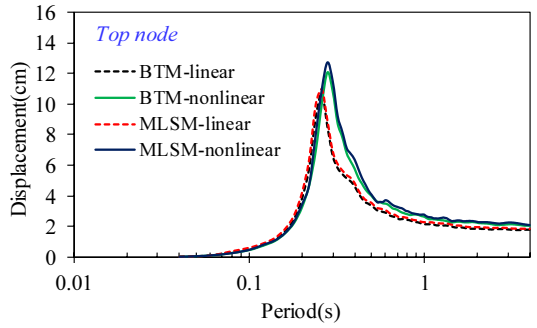
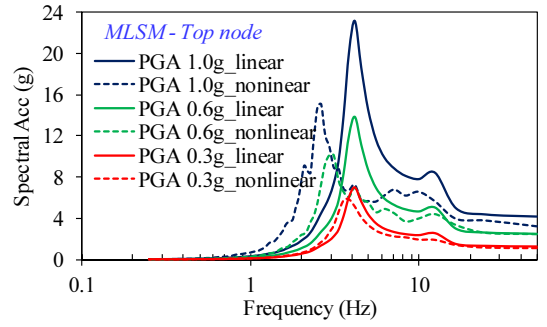
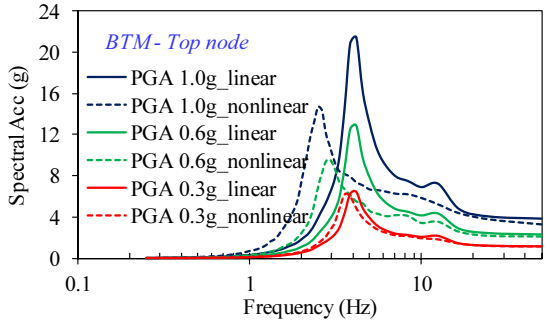


Fig. 15 Comparison of linear and nonlinear floor displacement spectra



(a) MLSM



(b) BTM

Fig. 16 FRS for various PGA levels

3.4 해석모델 작성 시 가정에 대한 고찰

앞서 기술한 바와 같이 본 연구에서는 해석의 난이도와 해석소요시간, 본 논문의 취지 등을 고려하여 텐던에 도입된 프리스트레스를 고려하지 않았다. 이러한 가정으로 인해 실제보다 낮은 지진동 수준에서 균열을 포함한 손상이 발생할 수 있으며, 비선형거동을 보이게 된다. 다시 말해 구조체의 내진성능을 실제보다 과소평가하는 결과를 일으킨다는 점을 밝혀둔다.

격납건물에 존재하는 관통부를 해석모델에 고려하지 않은 점도 실제 구조체의 동적거동과 차이를 유발할 수 있으며 국부적인 손상이 발생할 수 있다. 하지만, Pandey(1997)에 의하면, 실제 격납건물은 관통부의 균열이나 국부적인 손상을 방지하도록 철근상세를 고려하므로 관통부가 격납건물의 차폐기능에 영향을 주는 요소는 아니다.

4. 결　　론

MLSM과 BTM의 두 가지 모델링기법을 이용하여 APR-1400 원전 격납건물의 내진성능을 평가하였다. 설계스펙트럼에 부합하는 11개의 지진파를 생성하여 선형 및 비선형 응답이력해석을 수행하였다. 선형과 비선형 FRS를 비교하여 선형해석법과 비선형해석법의 차이를 비교하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) MLSM과 BTM에 의한 FRS와 변위응답 비교결과 두 모델링 기법은 선형 및 비선형해석에서 모두 잘 일치한다.
2) 선형 및 비선형해석에 의한 FRS는 차이를 보이며 PGA가 커질수록 그 차이는 더 벌어진다.
3) 선형해석은 비선형해석에 비해 가속도응답을 과대평가하고 변위응답을 과소평가한다.
4) MLSM과 BTM은 원전구조의 비선형해석에 적합한 해석기법으로 평가할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20201510100020).

References

ANSYS, Inc. (2019) *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*. Canonsburg, PA; ANSYS, Inc.

Cho, S. G., Kim, D., and Chaudhary, S. (2011) A Simplified Model for Nonlinear Seismic Response Analysis of Equipment Cabinets in Nuclear Power Plants. *Nuclear Engineering and Design* 241(8), 2750-2757.

Choi, I. K., Choun, Y. S., Ahn, S. M., and Seo, J. M. (2008) Probabilistic Seismic Risk Analysis of CANDU Containment Structure for Near-Fault Earthquakes. *Nuclear Engineering*

and Design 238(6), 1382-1391.

CSI (2013) *SAP2000, C. S. I.*, Computers and Structures Inc (CSI). Berkeley, CA, USA.

De Grandis, S., Domaneschi, M., and Perotti, F. (2009) A Numerical Procedure for Computing the Fragility of NPP Components under Random Seismic Excitation. *Nuclear Engineering and Design* 239(11), 2491-2499.

Huang, X., Kwon, O. S., Bentz, E., and Tcherner, J. (2018) Method for Evaluation of Concrete Containment Structure Subjected to Earthquake Excitation and Internal Pressure Increase. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 47(6), 1544-1565.

Hur, J., Althoff, E., Sezen, H., Denning, R., and Aldemir, T. (2017) Seismic Assessment and Performance of Nonstructural Components Affected by Structural Modeling. *Nuclear Engineering and Technology* 49(2), 387-394.

Lu, Y., and Panagiotou, M. (2014) Three-Dimensional Cyclic Beam-Truss Model for Nonplanar Reinforced Concrete Walls. *Journal of Structural Engineering* 140(3), 04013071.

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., and Fenves, G. L. (2006) *OpenSees Command Language Manual*. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center.

Miao, Z. W., Lu, X. Z., Jiang, J. J., and Ye, L. P. (2006) Nonlinear FE Model for RC Shear Walls Based on Multi-Layer Shell Element and Microplane Constitutive Model. *Computational Methods in Engineering and Science*, 21-23.

Nakamura, N., Akita, S., Suzuki, T., Koba, M., Nakamura, S., and Nakano, T. (2010) Study of Ultimate Seismic Response and Fragility Evaluation of Nuclear Power Building Using Nonlinear Three-Dimensional Finite Element Model. *Nuclear Engineering and Design* 240(1), 166-180.

Nguyen, D. D., Thusa, B., Han, T. S., and Lee, T. H. (2020) Identifying Significant Earthquake Intensity Measures for Evaluating Seismic Damage and Fragility of Nuclear Power Plant Structures. *Nuclear Engineering and Technology* 52(1), 192-205.

Nguyen, D. D., Thusa, B., Park, H., Azad, M. S., and Lee, T. H. (2021) Efficiency of Various Structural Modeling Schemes on Evaluating Seismic Performance and Fragility of APR 1400 Containment Building. *Nuclear Engineering and Technology* 53(8), 2696-2707.

NRC (2014) *US Nuclear Regulatory Commission 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*. Regulatory Guide 1.60, Revision 2, Rockville, Maryland, USA.

Pandey, M. D. (1997) Reliability-Based Assessment of the Integrity of Bonded Prestressed Concrete Containment Structures. *Nuclear Engineering and Design* 176(3), 247-260.

PEER Center (2020) *PEER Ground Motion Database*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, USA. http://ngawest2.berkeley.edu.

SeismoSoft (2017) *SeismoSignal - A Computer Program for Signal Processing of Strong-Motion Data*. available from http://www.seismosoft.com.

Yang, K. Y., Song, J. K., and Kim, J. S. (2019) Evaluation of Embedment Effect in Soil-Structure Interaction Analysis considering Dynamic Characteristics of Nuclear Power Plant Structure and Soil. *Journal of the Korea Concrete Institute* 31(5), 437-447. (In Korean)

요 약 본 연구의 목적은 선형 및 비선형해석법에 의한 APR-1400 원전 격납건물의 내진성능 평가를 수행하고 두 해석법의 차이를 규명하는 것이다. 격납건물의 지진거동을 모사하기 위해 다층쉘모델(MLSM)과 빔-트러스 모델(BTM)을 적용하였으며 연속체요소를 이용한 3차원 유한요소모델과 비교하여 유효성을 검증하였다. 선형 및 비선형 응답이력해석을 수행하기 위해 미국 NRC 1.60 설계스펙트럼에 부합하는 지반운동을 생성하였고, 다양한 지진강도에 대한 구조거동을 분석하기 위해 최대지반가속도를 변화시켰다. 구조물의 지진거동은 층응답스펙트럼과 층변위로 관찰하였다. 그 결과 지진강도가 증가할수록 선형과 비선형해석의 지진응답 차이가 커지는 것으로 나타났다. 선형해석은 층변위를 과소평가하는 반면 층가속도는 과대평가하는 것으로 밝혀졌다. BTM과 MLSM은 원전구조물의 비선형 응답이력해석에 적합한 구조해석모델이다.

핵심용어 : 비선형해석, 격납건물, 보-트러스 모델, 다층쉘모델, 층응답스펙트럼