

다양한 수치해석 모델과 지진 주파수 성분을 고려한 원전구조물의 지진 응답 평가

비덱 투사¹·두이두안 응웬²·박 효 상²·이 태 형^{3†}

¹건국대학교 사회환경공학부 석사과정, ²건국대학교 사회환경공학부 박사후과정, ³건국대학교 사회환경공학부 교수

Seismic Response Evaluation of NPP Structures Considering Different Numerical Models and Frequency Contents of Earthquakes

Bidhek Thusa¹, Duy-Duan Nguyen², Hyosang Park² and Tae-Hyung Lee^{3†}

¹Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, 05029, Korea

²Post-Doctoral Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, 05029, Korea

³Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, 05029, Korea

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effects of the application of various numerical models and frequency contents of earthquakes on the performances of the reactor containment building (RCB) in a nuclear power plant (NPP) equipped with an advanced power reactor 1400. Two kinds of numerical models are developed to perform time-history analyses: a lumped-mass stick model (LMSM) and a full three-dimensional finite element model (3D FEM). The LMSM is constructed in SAP2000 using conventional beam elements with concentrated masses, whereas the 3D FEM is built in ANSYS using solid elements. Two groups of ground motions considering low- and high-frequency contents are applied in time-history analyses. The low-frequency motions are created by matching their response spectra with the Nuclear Regulatory Commission 1.60 design spectrum, whereas the high-frequency motions are artificially generated with a high-frequency range from 10Hz to 100Hz. Seismic responses are measured in terms of floor response spectra (FRS) at the various elevations of the RCB. The numerical results show that the FRS of the structure under low-frequency motions for two numerical models are highly matched. However, under high-frequency motions, the FRS obtained by the LMSM at a high natural frequency range are significantly different from those of the 3D FEM, and the largest difference is found at the lower elevation of the RCB. By assuming that the 3D FEM approximates responses of the structure accurately, it can be concluded that the LMSM produces a moderate discrepancy at the high-frequency range of the FRS of the RCB.

Keywords : nuclear power plant, high-frequency ground motion, floor response spectra, lumped-mass stick model, 3D finite element model

1. 서론

경주지진(2016년)과 포항지진(2017년)은 한반도의 동남권에 위치한 원자력 발전소(NPP)에 인접한 지역에서 발생하였다. 한반도의 지질학적인 특성으로 이 지역에서 발생한 지진은 고주파 성분을 많이 포함하는 특징을 보였으며(Choi *et al.*, 2002; Joe and Choi, 2003), 2016년 경주지진으로 인해 인접한

원자력 발전소에 운전기준지진(OBE)에 따라 위험 경고 조치가 발생하였다. 따라서 고주파 성분을 포함하는 지진에 의한 NPP 구조물 및 내부구조의 지진 응답에 관한 연구가 필요하다.

많은 연구에서 근거리 및 원거리 지진(Choi *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2008; Nguyen *et al.*, 2018), 지속 시간(Nguyen *et al.*, 2019a), 다중 지점(Ahmed *et al.*, 2018), 단방향 및 양방향(Tran *et al.*, 2018)과 같은 지반 거동 특성을 고려한 NPP 구조물의 지진

†Corresponding author:

Tel: +82-2-450-4093; E-mail: thlee@konkuk.ac.kr

Received November 5 2019; Revised November 20 2019;

Accepted November 22 2019

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

응답 평가가 이루어졌다. 특히, 지진의 고주파 성분이 NPP 구조물 및 내부구조의 성능에 미치는 영향은 많은 연구를 통해 제시되었으며(Choi *et al.*, 2003; Elkhoraibi *et al.*, 2016; EPRI, 2014; EPRI, 2017; Ghiocel *et al.*, 2010; Moreschi *et al.*, 2012; Pan *et al.*, 2013; Rydell, 2014), Park 등(2017)에 의해 지진의 고주파 성분이 NPP 구조물과 시스템 및 내부구조의 응답에 미치는 영향에 대해 체계적으로 검토되었다. 최근, Nguyen 등(2020)에 의해 저주파 및 고주파 지진과 다양한 강도 측정치를 사용하여 APR1400에 대한 상세한 내진 성능 평가와 취약성 평가가 수행되었으며, 여러 연구에서 국내 지진을 적용하여 NPP의 내진 응답을 평가하였다(Kim *et al.*, 2016; Eem and Choi, 2018). 또한, 납-고무 받침과 같은 면진장치 및 TMD (Tuned Mass Damper)와 같은 에너지흡수장치가 NPP 구조물 및 구성요소의 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 조사하였다(Choun *et al.*, 2014; Jung *et al.*, 2016; Jung *et al.*, 2017; Kwag *et al.*, 2019; Lee and Song, 2015; Nguyen *et al.*, 2019b). 그러나 앞선 연구에서 NPP 구조물의 내진 해석을 수행하기 위해 집중 질량 막대 모델(LMSM) 또는 3차원 유한요소모델(3D FEM)과 같은 특정 수치해석 모델을 활용하였다. 이러한 수치해석 모델은 원자력 공학에서 널리 적용되고 있지만, 고주파 지진을 고려한 NPP 구조물의 내진 성능 평가에 서로 다른 수치해석 모델의 사용에 따른 영향 평가는 아직 구체적으로 이루어지지 않았다. 본 연구의 목적은 APR 1400 NPP 중 원자로격납건물(RCB)의 내진 성능 평가에 서로 다른 수치해석 모델 및 지진 주파수 성분 적용에 따른 영향을 평가하는 것이다. 두 가지 유형(LMSM 및 3D FEM)의 수치해석 모델을 개발하였으며, 저주파 및 고주파 성분으로 분류된 두 그룹의 지진파를 고려하였다. RCB의 내진 응답은 NPP의 내진 성능 평가에 가장 중요한 출력값 중 하나인 층응답스펙트럼(FRS)으로 평가하였으며, 저주파 및 고주파 지진에 따른 두 수치해석 모델의 FRS 결과를 정량화하였다.

2. 본 론

이 장에서는 본 연구에서 고려하는 대상구조물과 두 가지 수치해석 모델 및 주파수 성분에 따른 입력 지진파 특성을 소개하고, 시간 이력 해석 결과 중 FRS로 분석하는 방법을 소개한다.

2.1 원전격납구조물의 수치해석 모델링

한국전력(KEPCO)과 한국수력원자력(KHNP)이 개발한 APR 1400의 RCB를 해석 대상으로 선정하였다. RCB는 폭 23.5m, 높이 54m 및 두께 1.22m이며, 돔은 반경 23.2m와 평균 두께

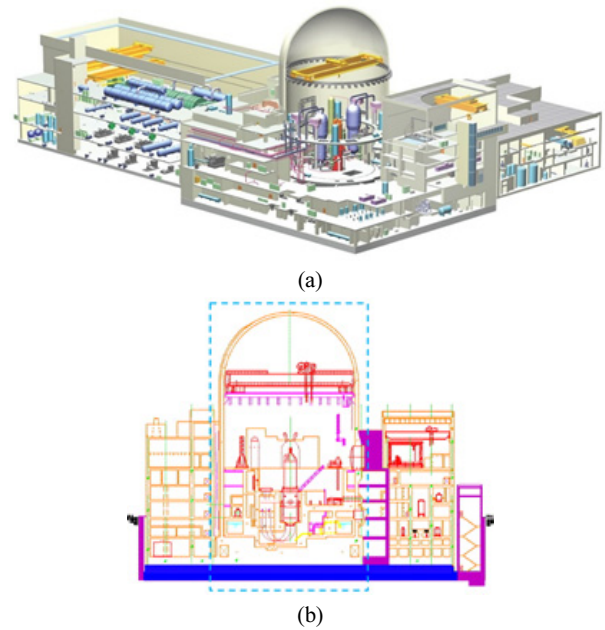


Fig. 1 General view (a) and cutting view of APR1400 (b)

1.07m로 구성되었다. Fig. 1은 APR 1400의 전체도 및 단면도(파랑색 파선)를 나타낸다.

2.2 집중 질량 막대 모델(LMSM)

NPP 구조물은 상용화된 범용 구조 해석 프로그램인 SAP2000 (ver.15)을 활용하여 개발되었으며, 면진 장치 및 LMSM을 적용하였다. 집중 질량과 등가 단면 특성은 구조물의 설계 단면에 근거하여 계산되었다(Kim and Lee, 2015; Lee *et al.*, 2016). RCB는 탄성 보-요소로 모델링되었고, 집중 질량은 보-요소를 구성하는 노드에 할당되었다. RCB는 강성변화와 내부구조 및 기타 설비의 위치를 고려하여 14개의 수직 요소로 구성하였다. 하부 절점(Node 1)은 기초-매트에 위치하고, 상단 절점(Node 15)은 구조물의 최상단에 위치한다. Fig. 2(a)는 SAP2000을

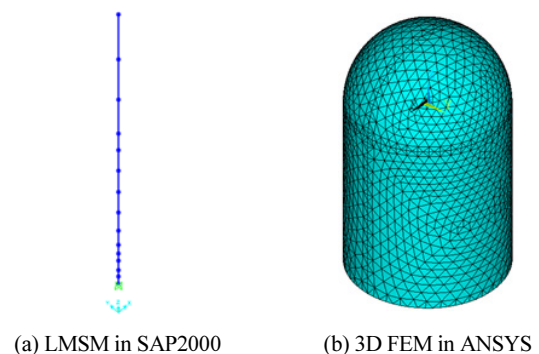


Fig. 2 Numerical models of RCB

활용한 RCB의 LMSM을 나타내며, Table 1은 RCB의 LMSM에서 절점 질량 및 구조적 특성을 보여준다.

Table 1 Structural properties of the RCB in LMSM

Node	Height (m)	Nodal Mass (ton)	Area (m ²)	Moment of inertia (m ⁴)	Shear area (m ²)	Torsional inertia (m ⁴)
1	16.76	87.07	202.90	56299.85	101.45	112634.22
2	20.27	166.52	202.90	56299.85	101.45	112634.22
3	23.46	185.42	202.90	56299.85	101.45	112634.22
4	27.73	189.29	202.90	56299.85	101.45	112634.22
5	31.09	170.39	202.90	56299.85	101.45	112634.22
6	34.59	234.68	202.90	56299.85	101.45	112634.22
7	40.53	314.15	202.90	56299.85	101.45	112634.22
8	47.24	333.05	202.90	56299.85	101.45	112634.22
9	53.94	318.02	202.90	56299.85	101.45	112634.22
10	60.65	310.43	202.90	56299.85	101.45	112634.22
11	66.44	376.80	202.90	56299.85	101.45	112634.22
12	70.56	279.92	179.76	47591.20	89.89	95199.65
13	78.63	355.52	179.76	35861.70	89.89	71732.03
14	70.56	279.92	179.76	47591.20	89.89	95199.65
15	78.63	78.63	179.76	35861.70	89.89	71732.03

2.3 3차원 유한요소 모델(3D FEM)

본 연구에서는 Fig. 2(b)와 같이 ANSYS(ver.19.2) 프로그램을 활용하여 3D FEM을 구성하였다. 3D FEM은 일반적으로 수치해석에서 가장 정확한 모델로 알려져 있으므로 단순화된 모델의 유효성 검증에 활용하였다. 작성된 모델은 탄성계수 33,037(MPa), 푸아송 비 ‘0.2778’ 및 단위중량 24.0(kN/m³)의 등방-탄성 재료(isotropic elastic material) 특성이 적용되었다.

3D FEM은 솔리드요소로 구성되며, 요소 크기에 따른 민감도 분석을 수행하기 위해 13,571~52,343개의 범위로 요소가 고려되었다. 민감도 분석을 통해 요소 크기에 따른 RCB 구조의 고유진동수 변화는 매우 미미한 것으로 나타났다. 따라서 해석모델의 정확도를 유지하면서 해석 소요 시간을 줄일 수 있는 최적 모델(즉, 요소 13,571개)을 적용하였다. 이 결과는 Uwizerimana(2015)에 의한 연구와 일치하는 결과를 보였다.

NPP 구조 모델은 직접-적분법을 적용하여 시간이력해석을 수행하였으며, Rayleigh 감쇠가 적용되었다. 구조 모델의 경계 조건은 바닥이 지면에 고정된 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 LMSM과 3D FEM의 고유치 해석을 수행하였고, LMSM과 3D FEM의 고유 주파수 및 모드 형상을 비교, 검토하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 3D FEM과 LMSM의 모드

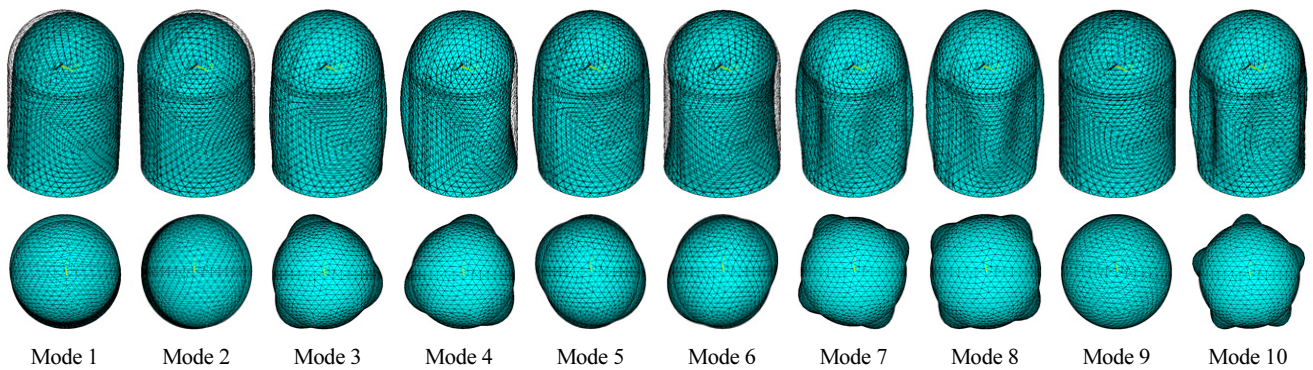


Fig. 3 Modal shapes of 3D FEM

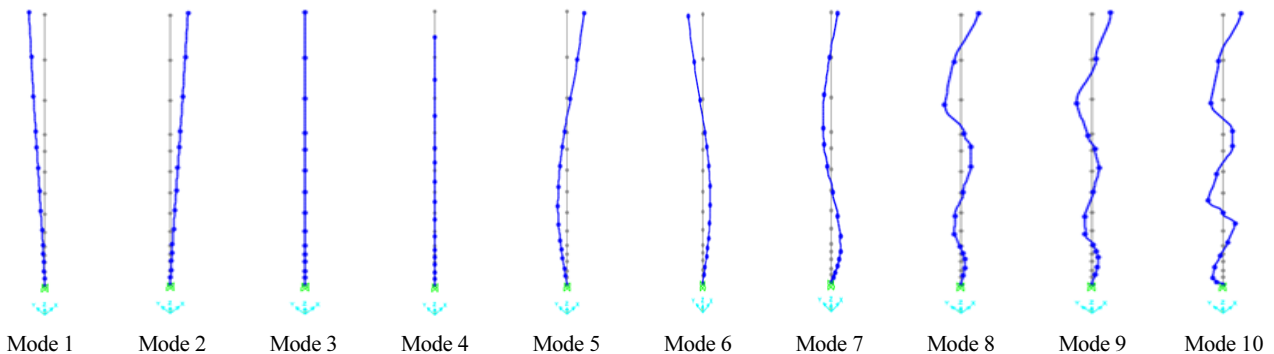


Fig. 4 Modal shapes of LMSM

Table 2 Natural frequencies (Hz) of 3D FEM and LSM

Mode	3D FEM		LMSM	
	frequency	note	frequency	note
1	3.97	Translation Y	3.85	Translation X
2	3.97	Translation X	3.85	Translation Y
3	5.39	-	8.37	Torsion
4	5.39	-	11.60	-
5	6.35	-	11.63	-
6	6.35	-	11.63	-
7	6.82	-	21.96	-
8	6.82	-	21.96	-
9	8.50	Torsion	24.20	-
10	9.90	-	24.20	-

형상을 보여준다. 기본 모드(병진 및 비틀림)의 경우 두 수치해석 모델의 결과는 매우 유사하다. 하지만 LMSM은 3D FEM에 발생할 수 있는 복잡한 진동 모드(예, 뒤틀림 모드)를 특성화할 수 없는 제한사항에 따라, LMSM의 비틀림 거동은 ‘모드 3’에 위치하고 3D FEM은 ‘모드 9’에 나타난다. Table 2는 두 모델의 고유치 해석 결과 중 10개의 저차 모드 고유 주파수를 나타낸다. LMSM과 3D FEM의 첫 번째 고유 주파수 값은 매우 유사한 것으로 나타났다. 하지만 3D FEM은 단순화된 LMSM에서 포착할 수 없는 복잡한 진동 모드가 포함되어 있으며, 두 모델에서 차수가 높아짐에 따라 고유 주파수 결과는 다르게 나타났다.

2.4 입력 지진파

지진파의 주파수 대역에 따른 RCB 응답의 영향을 평가하기 위해 저(low)주파수 및 고(high)주파수를 포함하는 정도에 따라 두 개의 지진파 그룹으로 분류하였고 시간이력해석에 적용하였다. 저주파수 지진 그룹은 NRC 1.60의 설계 스펙트럼(NRC,1973)과 일치하는 응답 스펙트럼을 가진 11개의 지진파로 구성되었으며, 이 그룹의 지진파는 10Hz~100Hz 대역의 주파수 범위를 갖는다. Fig. 5는 본 연구에서 사용한 저주파수 및 고주파수 지진파의 응답 스펙트럼을 나타낸다. 사용된 모든 지진파는 SeismoSignal(2017)과 RspMatch(2014) 프로그램을 사용하여 생성하였다.

2.5 RCB 구조의 응답

RCB의 지진 응답을 도출하기 위해 수평(X) 방향 지진파를 고려하여 선형-시간이력 해석을 수행하였다. FRS는 다양한 고유 주파수 영역에서 NPP 구조물의 내진 성능을 평가하기 위한 가장 중요한 출력 변수 중 하나이다. FRS는 RCB와 동일한

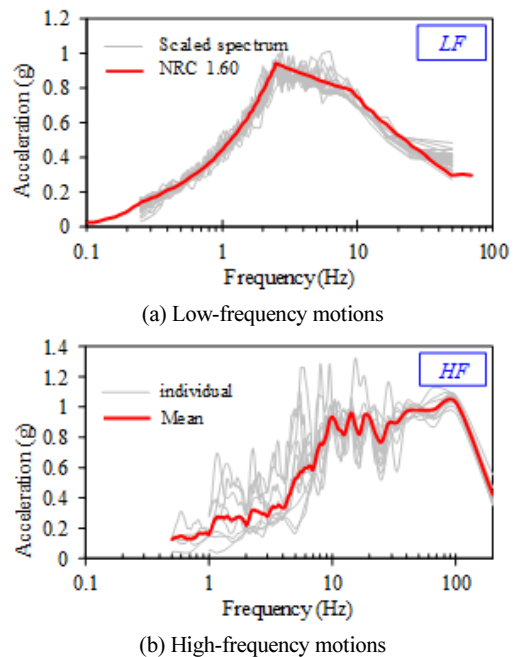


Fig. 5 Input ground motion

높이의 LMSM과 X-Z 평면의 교차점에서 도출되었다. 저주파수 및 고주파수 지진파 그룹 모두 LMSM과 3D FEM에 적용되었으며, FRS 결과를 도출하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 RCB에 저주파수 지진파가 작용하는 동안 서로 다른 높이에 발생하는 LMSM과 RCB의 FRS 결과를 보여주며, 파선은 평균 응답 스펙트럼을 나타낸다. FRS 결과로부터 LMSM과 3D FEM 모두, RCB에 상단 지점의 특정 고유 주파수(약, 3.9Hz)에서 크게 증폭되었지만, 낮은 높이(예, H=31m)에서는 약 11.5Hz에서 추가로 증폭되는 결과를 보였다.

Fig. 8은 RCB의 다양한 높이에서 저주파 성분 지진파에 의한 LMSM과 3D FEM의 FRS 결과 비교를 보여준다.

LMSM과 3D FEM의 FRS 결과는 대부분의 주파수 영역에서 매우 유사한 경향을 보였다. 하지만 낮은 높이(예, H=31m)의 RCB 고유 주파수(약, 3.9Hz)에서 FRS의 작은 차이를 확인할 수 있다. 일반적으로 3D FEM을 가장 정확한 수치 모델로 가정하기 때문에 LMSM의 저주파수 지진에 의한 RCB의 FRS를 추정할 수 있다.

문헌을 통해, 1차 구조물에 부착되는 계전기 및 전기설비와 같은 NPP의 2차 시스템은 고주파수 진동에 민감한 것으로 나타났다(EPRI, 2017; Park et al., 2017; Xie et al., 2019). 따라서, 본 연구에서 LMSM과 3D FEM을 사용한 고주파수 지진에 의한 RCB의 FRS 평가를 수행하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 고주파수 지진 시 LMSM과 3D FEM RCB의 서로 다른 높이의 FRS 결과를 보여준다. 모든 높이에서 FRS는 저주파수 수준에서 증폭되었을 뿐만 아니라 더 높은 고유 주파수 범위에서 확

대되었으며, RCB의 높이가 높아질수록 고주파수 범위에서 FRS의 증폭이 더 큰 것으로 나타났다. 이것은 고려된 지진의 고주파수 성분의 영향일 것으로 판단된다.

Fig. 11은 RCB의 서로 다른 높이에서 고주파수 지진에 의한 LMSM과 3D FEM의 평균 FRS의 비교를 보여준다. 상단 지점

(H=95m)에서 LMSM 및 3D FEM의 FRS는 고주파수 범위에서 약간의 차이를 보이지만, 매우 유사한 결과를 보였다. 높이가 낮아짐에 따라 두 FRS 결과는 비교적 큰 차이를 보이며, 하단 지점(H=31m)의 12Hz 보다 큰 주파수 영역에서 약간의 차이를 보이지만, 매우 유사한 결과를 보였다. 높이가 낮아짐에 따라

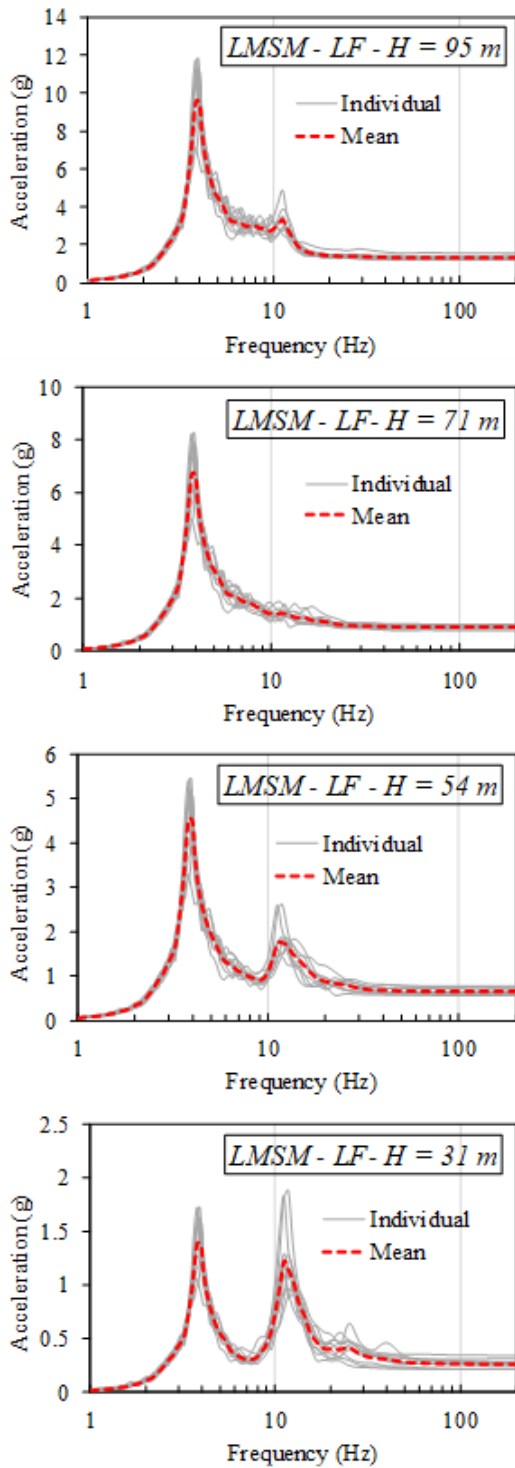


Fig. 6 FRS of LMSM RCB under low-frequency motions

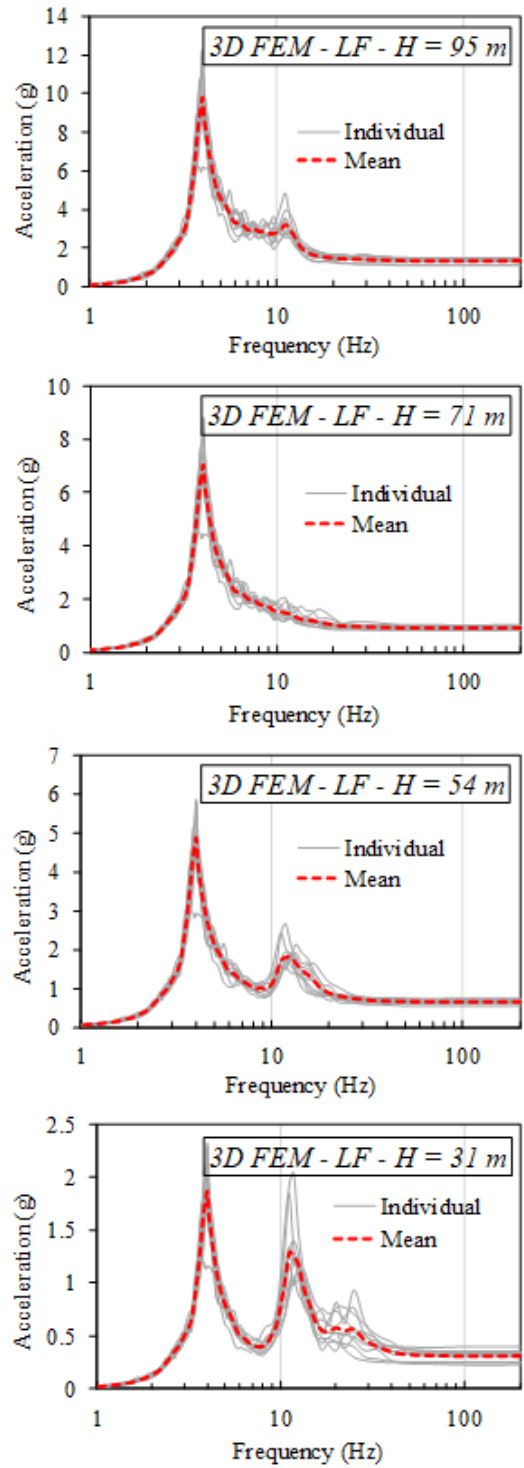


Fig. 7 FRS of 3D FEM RCB under low-frequency motions

두 FRS 결과는 비교적 큰 차이를 보이며, 하단 지점(H=31m)에서 12Hz 보다 큰 주파수 영역에서 가장 큰 차이를 보인다. 고차 모드와 관련된 높은 고유 주파수 범위에서 3D FEM이 실러더의 다양한 거동(찌그러짐, 뒤틀림 등)을 수용할 수 있는 반면, LMSM은 병진 모드 형태로만 거동하기 때문이라 판단된

다. 따라서, 3D FEM의 층응답은 LMSM의 층응답과 비교하여 상쇄되거나 축진될 가능성이 있다. 결과로부터 LMSM에서 고주파수 진동에 의한 RCB의 FRS 결과는 고주파수 범위에서 일정 수준의 부정확성을 내포하고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 LMSM과 3D FEM에서 도출한 FRS 결과로

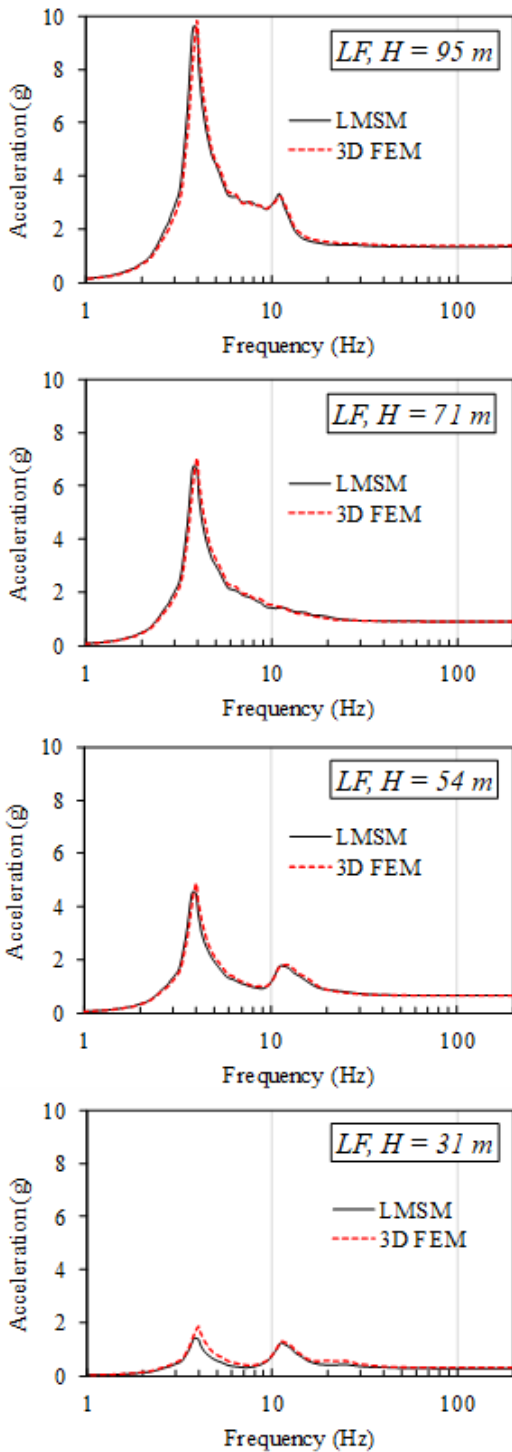


Fig. 8 Comparison of FRS of RCB between LMSM and 3D FEM under LF motions

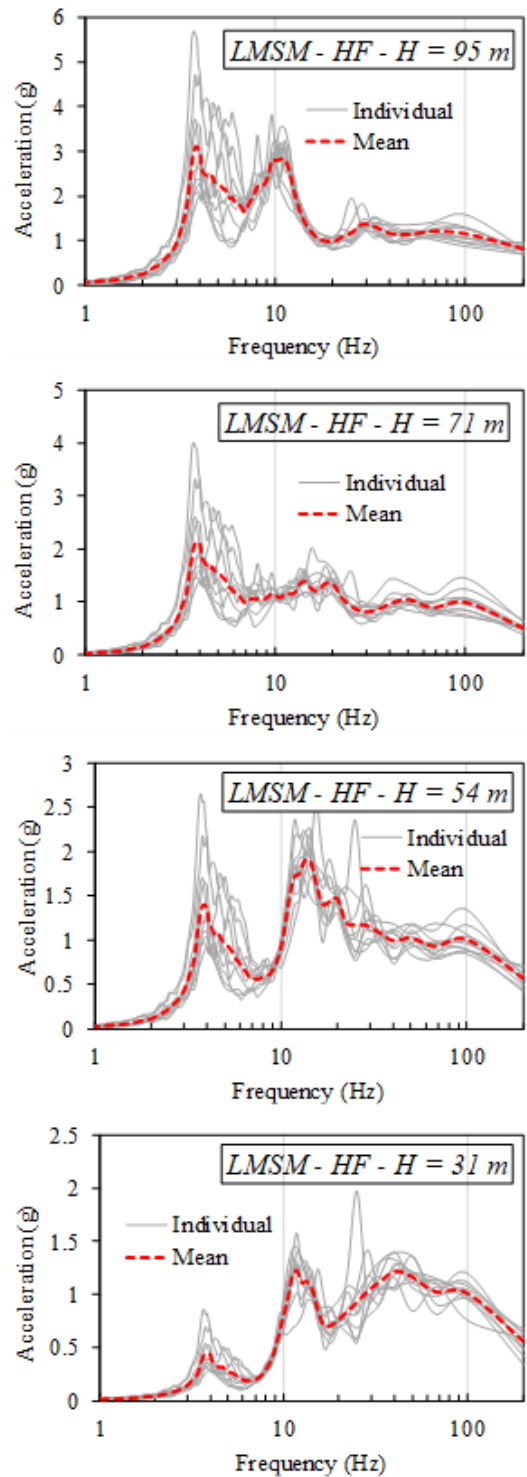


Fig. 9 FFRS of LMSM RCB under high-frequency motions

부터 두 수치해석 모델의 응답 차이를 정량화했다. LSM과 3D FEM에서 도출된 평균 FRS를 보다 명확하게 표현하기 위해 다른 인덱스를 활용하여 도시하였다. 활용한 인덱스는 Fig. 12와 같이 모든 지진파를 고려하여 계산되었으며, 저주파수 영역과 고주파수 영역을 구분하기 위해 10Hz의 임계값을 사용하

였다. 10Hz 보다 작은 고주 주파수영역에서 저주파수 및 고주파수 거동은 매우 유사하게 관찰되었으며, 10Hz 이상의 고주파수 영역에서 대부분의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 구체적으로, RCB의 하단 지점(H=31m)에서 가장 큰 차이를 보였으며, 중상부 지점(H=71m), 상부지점(H=95m) 및 중하부 지

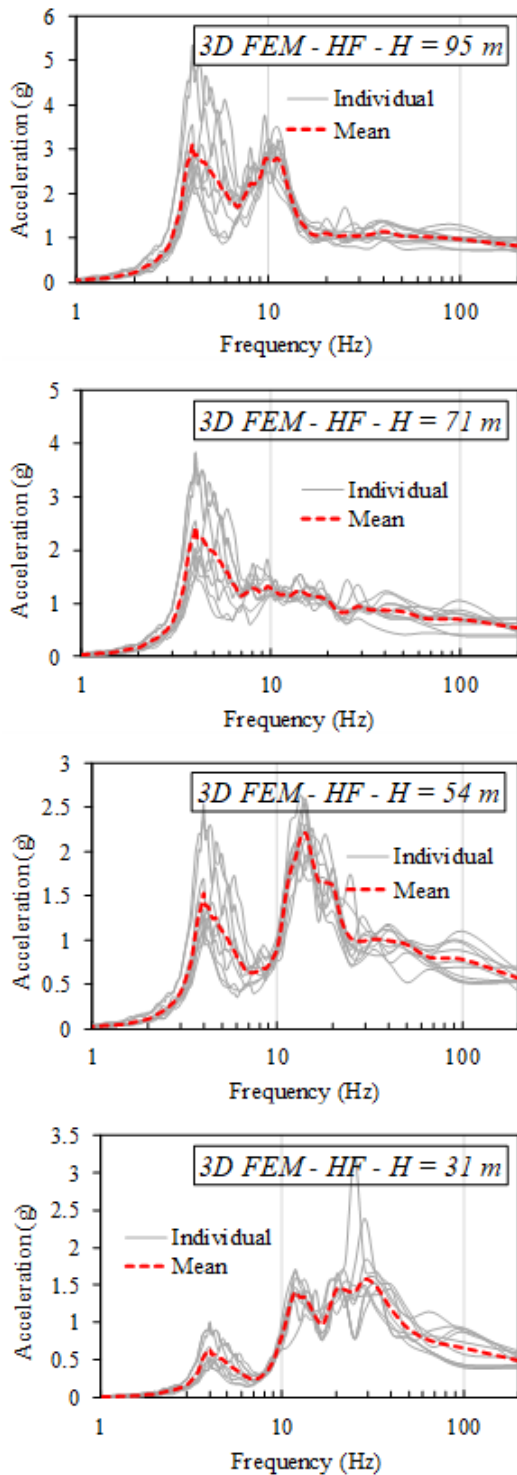


Fig. 10 FRS of 3D FEM RCB under high-frequency motions

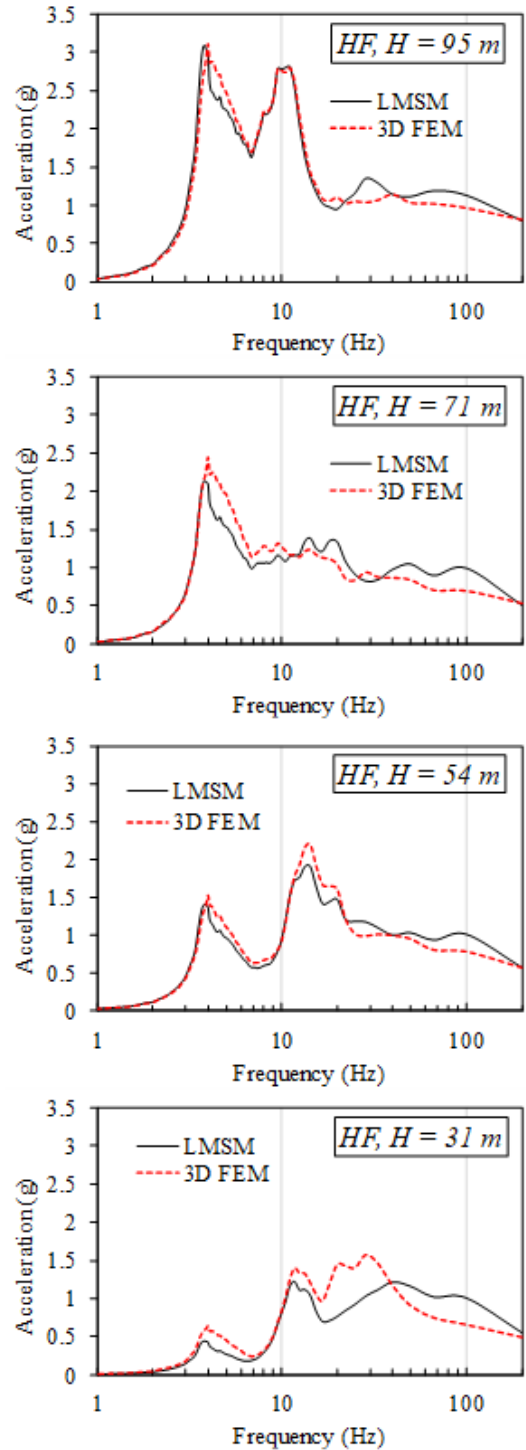


Fig. 11 Comparison of FRS of RCB between LSM and 3D FEM under HF motions

점(H=54m)순으로 나타났다. 이러한 결과는 앞서 언급한 것과 같이, 3D FEM에서 실러더의 복잡한 거동 형태에 기인하여 구조물의 응답이 증폭하거나 감소 될 수 있는 반면, LMSM은 병진 모드에서 강하게 진동하는 거동 특성 때문이다.

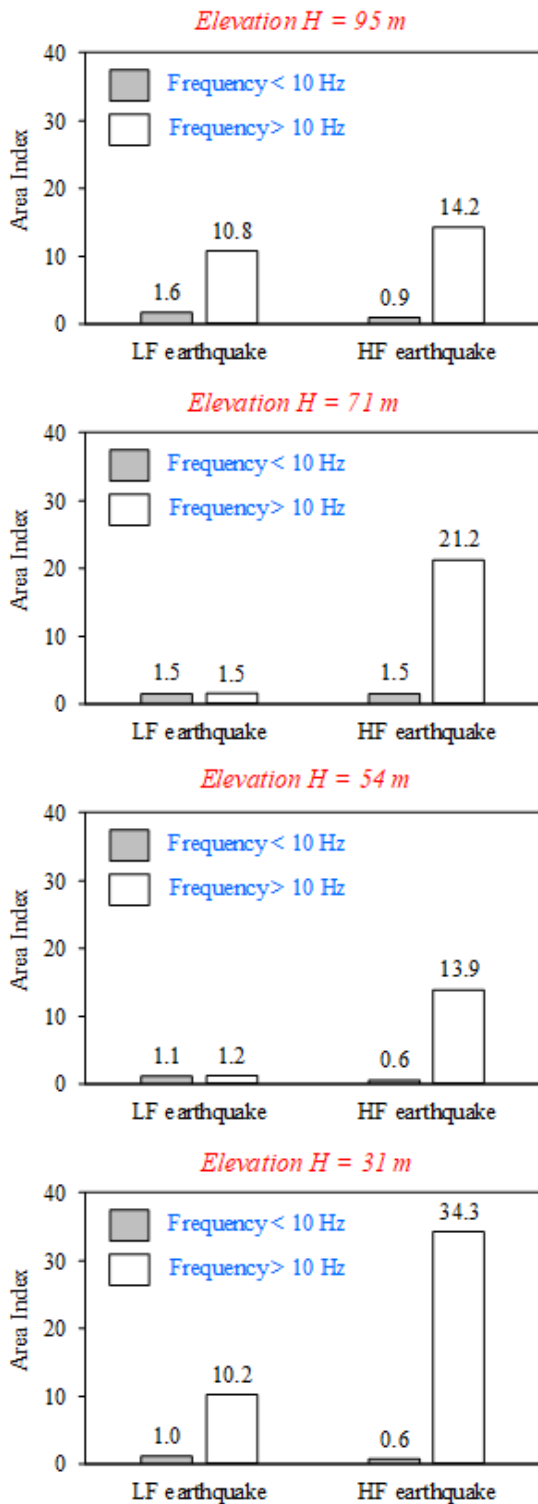


Fig. 12 Quantification of difference of FRS between LMSM and 3D FEM

3. 결론

본 연구에서는 APR 1400 NPP에서 RCB 구조물의 내진 성능을 평가하기 위해 LMSM 및 3D FEM의 일반적인 두 가지 수치해석 모델이 개발되었으며, 저주파수 및 고주파수 지진을 고려한 시간이력해석을 활용하여 평가되었다. 고려된 지진의 주파수 성분과 수치해석 모델의 영향을 평가하였으며, 수치해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) LMSM은 저주파수 거동에서 3D FEM의 시간 이력 응답을 근사할 수 있으며, 단순화된 모델에서의 FRS는 일반적으로 10Hz 미만의 낮은 고유 주파수 범위에서 3D FEM의 FRS와 매우 유사한 결과를 보인다.
- 2) 고주파수 지진파에 의한 LMSM과 3D FEM의 FRS 결과는 고주파수(10Hz 이상) 영역에서 유의미한 차이를 보이는 것으로 나타났다.
- 3) RCB의 FRS는 저주파수 지진파의 영향으로 구조물의 첫 번째 고유 주파수에서 증폭되었고, 고주파수 지진파의 영향으로 고주파수 범위에서 추가로 증폭되었다. RCB의 낮은 높이일수록, 고주파수 범위에서 FRS의 증폭량이 증가하는 것으로 나타났다.
- 4) LMSM은 고주파수 지진파의 영향에 따라, RCB의 FRS 중 고주파수 범위에서 일정 수준의 불일치성을 내포하고 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE) 산하 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20171510101860).

References

- Ahmed, K., Kim, D., Lee, S.H. (2018) Effect of the Incoherent Earthquake Motion on Responses of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structure, *Earthq. & Struct.*, 14(1), pp.33-44.
- Choi, I.K., Choun, Y.S., Seo, J.M. (2002) Re-evaluation of Seismic Fragility Parameters on Nuclear Power Plant Components Considering Uniform Hazard Spectrum, *J. Korean Nucl. Soc.*, 34(6), pp.586-595.
- Choi, I.K., Choun, Y.S., Ahn, S.M., Seo, J.M. (2006) Seismic Fragility Analysis of a CANDU Type NPP Containment Building for Near-fault Ground Motions, *KSCE J. Civil Eng.*, 10(2), pp.105-112.

- Choi, I.K., Choun, Y.S., Ahn, S.M., Seo, J.M.** (2008) Probabilistic Seismic Risk Analysis of CANDU Containment Structure for Near-fault Earthquakes, *Nucl. Eng. & Des.*, 238(6), pp.1382~1391.
- Choi, I.K., Choun, Y.S., Seo, J.M., Lee, J.R.** (2003) Consideration of High Frequency Ground Motion Effects on the Seismic Fragility of NPP Components, *Internal Symposium on Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facilities*, Vienna, Austria.
- Choun, Y.S., Park, J., Choi, I.K.** (2014) Effects of Mechanical Property Variability in Lead Rubber Bearings on the Response of Seismic Isolation System for Different Ground Motions, *Nucl. Eng. & Technol.*, 46(5), pp.605~618.
- Elkhorabi, T., Hashemi, A., Ostadan, F.** (2016) Effect of High Frequency Seismic Excitation on Standard Plant Design, *3rd Conference on Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering (TINCE)*, Paris, France.
- EPRI** (2014) High Frequency Program: High Frequency Testing Summary, Technical Report 3002002997, Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, USA.
- EPRI** (2017) Advanced Nuclear Technology: High-Frequency Seismic Loading Evaluation For Standard Nuclear Power Plants, Technical Report 3002009429, Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, USA.
- Eem, S.H., Choi, I.K.** (2018) Seismic Response Analysis of Nuclear Power Plant Structures and Equipment due to the Pohang Earthquake, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 22(3), pp.113~119.
- Ghiocel, D.M., Todorovski, L., Fuyama, H., Mitsuzawa, D.** (2010) Seismic SSI Response of Reactor Building Structures, *OECD NEA Seismic SSI Workshop*, Ottawa, Canada.
- Joe, Y.H., Choi, S.G.** (2003) Seismic Fragility Analyses of Nuclear Power Plant Structures based on the Recorded Earthquake Data in Korea, *Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-17)*, Prague, Czech Republic.
- Jung, J.W., Jang, H.W., Kim, J.H., Hong, J.W.** (2017) Effect of Second Hardening on Floor Response Spectrum of a Base-Isolated Nuclear Power Plant, *Nucl. Eng. & Des.*, 322, pp.138~147.
- Jung, J.W., Lee, S., Hong, J.W.** (2016) Floor Response Spectrum Analysis of a Base-isolated Nuclear Power Plant, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 29(4), pp.355~362.
- Kwag, S., Kwak, J., Lee, H., Oh, J., Koo, G.H.** (2019) A Numerical Study on Improvement in Seismic Performance of Nuclear Components by Applying Dynamic Absorber, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 32(1), pp.17~27.
- Kim, G.J., Yang, K.K., Kim, B.S., Kim, H.J., Yun, S.J., Song, J.K.** (2016) Seismic Response Evaluation of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structure Subjected to Gyeong-Ju Earthquake, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 20(7), pp.453~460.
- Kim, J.M., Lee, E.H.** (2015) Development and Verification of Simplified Beam-Stick Model of Seismically Isolated ARP1400 Nuclear Power Plant Structure, Research report, Central Research Institute of KHNP, KETEP Project No. 2014151010170B.
- Lee, E.H., Kim, J.M., Joo, K.H., Kim, H.** (2016) Evaluation of the Soil-Structure Interaction Effect on Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structures, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 20(6), pp.379~389.
- Lee, J.H., Song, J.K.** (2015) Comparison of Seismic Responses of Seismically Isolated NPP Containment Structures using Equivalent Linear-and Nonlinear-Lead-Rubber Bearing Modeling, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 19(1), pp.1-11.
- Moreschi, L.M., Pan, Q., Wang, S., Malushte, S.R.** (2012) Generation of In-Structure Response Spectra for Nuclear Power Plants Subjected to High-Frequency Ground Motion, *20th International Conference on Nuclear Engineering*, California, USA.
- Nguyen, D.D., Thusa, B., Lee, T.H.** (2018) Seismic Fragility of Base-Isolated Nuclear Power Plant considering Near-Fault Ground Motions, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 18(7), pp.315~321.
- Nguyen, D.D., Thusa, B., Lee, T.H.** (2019a) Effects of Significant Duration of Ground Motions on Seismic Responses of Base-Isolated Nuclear Power Plant, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 23(3), pp.149~157.
- Nguyen, D.D., Thusa, B., Park, H., Lee, H., Lee, T.H.** (2019b) Effects of Mechanical Properties of LRB on Seismic Performance of Base-Isolated NPP Structures, *Transaction of the 25th Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-25) Conference*, Charlotte, NC, USA.
- Nguyen, D.D., Thusa, B., Han, T.S., Lee, T.H.** (2020) Identifying Significant Earthquake Intensity Measures for Evaluating Seismic Damage and Fragility of Nuclear Power Plant Structures, *Nucl. Eng. & Technol.*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.06.013>.
- NRC** (1973) *Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, US Nuclear Regulatory Commission, Rockville, Maryland, USA.

- Pan, Q., Moreschi, M., Lu, G.** (2013) Effects of High Frequency Ground Motion on the Local Seismic Responses of Safety-Related Nuclear Structures, *Transactions of the 22nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-22)*, California, USA.
- Park, H.S., Nguyen, D.D., Lee, T.H.** (2017) Effect of High-Frequency Ground Motions on the Response of NPP Components: A State-of-the-Art Review, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 17(6), pp.285~294.
- Rydell, C.** (2014) *Seismic High-Frequency Content Loads on Structures and Components within Nuclear Facilities*, Licentiate Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- RspMatch** (2014) *Earthquake Generation using Time Domain Method*, Kunsan National University, Korea.
- SeismoSignal** (2017) *A Computer Program for Signal Processing of Strong-Motion Data*, Available from <http://www.seismosoft.com>.
- Tran, T.T., Nguyen, T.H., Kim, D.** (2018) Seismic Incidence on Base-Isolated Nuclear Power Plants considering Uni-And Bi-Directional Ground Motions, *J. Struct. Integr. & Maint.*, 3(2), pp.86~94.
- Uwizerimana, S.** (2015) *Structural Modeling and Dynamic Analysis of Nuclear Power Plant Structures*, Master Dissertation, The Ohio State University, USA.
- Xie, W.C., Jiang, W., Ni, S.H., Liu, W.** (2019) *Seismic Risk Analysis of Nuclear Power Plants*, Cambridge University Press.

요 지

본 연구의 목적은 원자로 1400(APR 1400) 원자력 발전소(NPP)의 원자로 격납건물(RCB) 내진성능에 대해 상이한 수치모델과 지진 주파수 성분의 영향을 평가하는 것이다. 집중 질량 막대 모델(lumped-mass stick model, LMSM)과 3차원 유한요소모델(three-dimensional finite element model, 3D FEM)의 두 가지 수치 모델이 시간이력해석을 수행하기 위해 개발되었다. LMSM은 기존의 집중 질량 보-요소를 사용하여 SAP2000으로 구성하였으며, 3D FEM은 각기둥 입체-요소를 사용하여 ANSYS로 작성되었다. 저주파수 및 고주파수 성분을 고려한 두 그룹의 지진파를 시간이력해석에 적용하였다. 저주파수 지진파의 응답스펙트럼을 NRC 1.60의 설계 스펙트럼과 일치되도록 조정하여 작성하였으며, 고주파수 지진파는 10Hz~100Hz의 고주파수 범위를 갖도록 생성하였다. RCB의 지진응답은 다양한 높이에서 층응답스펙트럼으로 검토하였다. 수치해석 결과, 저주파수 지진에 의한 구조물의 FRS 결과는 두 수치 모델에서 매우 유사한 결과를 보였다. 하지만, 고주파수 지진에 의한 LMSM의 FRS 결과는 고차 고유 주파수 영역에서 3D FEM과 큰 차이를 보였으며, RCB의 낮은 높이에서 명확한 차이를 보였다. 3D FEM이 정확한 구조물의 응답을 나타내는 것으로 가정한다면, RCB의 LMSM은 고주파수 지진에 의한 FRS 결과의 고차 고유 주파수 영역에서 일정 수준의 불일치성을 내포하고 있다.

핵심용어 : 원자력 발전소, 고주파 지진동, 층응답스펙트럼, 집중 질량 막대 모델, 3차원 유한요소 모델