



면진원전의 층응답스펙트럼 해석

정재욱¹ · 이상민¹ · 홍정욱^{1*}

¹한국과학기술원 건설 및 환경공학과

Floor Response Spectrum Analysis of a Base-isolated Nuclear Power Plant

Jae-Wook Jung¹, Sangmin Lee¹ and Jung-Wuk Hong^{1*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, 34141, Korea

Abstract

In order to secure the stability against strong earthquakes, isolation devices on the existing nuclear power plant have been introduced. By applying the isolation device on structures, it is possible to isolate structures from the ground motion. Therefore, the natural frequencies of the structures become longer, and the responses of the structures due to the ground motion decrease. Especially, when designing the nuclear power plant, it is important to ensure the safety of internal devices as well as the nuclear power plant itself. The floor response spectrum is commonly used in designing the internal devices. In this research, floor response spectrum is evaluated and the effect of second hardening behavior is investigated by performing earthquake analysis.

Keywords : floor response spectrum, isolation device, second hardening, base-isolated nuclear power plant

1. 서 론

원전 사고는 대규모의 인명피해 및 재산피해를 야기시킨다. 뿐만 아니라 방사능 유출로 인한 직·간접적인 피해가 지속적으로 발생할 수 있기에, 다른 시설물들에 비해 원전 구조물의 안전성 확보는 매우 중요하게 여겨진다. 특히 대규모 지진 발생 시 원전 구조물의 안전성을 확보할 수 있는 방안으로 원전 구조물 하부에 면진장치를 설치하는 방법이 도입되고 있다. 면진장치를 설치함으로써 원전구조물의 상부구조를 지반과 격리시켜 지진하중에 대한 응답을 감소시킬 수 있게 된다. 이때 설치된 면진장치에 의해 구조물의 고유주기가 길어지며, 구조물의 응답이 비면진 원전 구조물과는 달리 나타나게 된다.

원전구조물 설계 시 특정 층에 위치한 내부 기기와 같은 비구조요소의 설계를 위해서는 각 층의 최대 요구응답을 나타내는 층응답스펙트럼에 대한 연구가 필수적이다. 설계 층응답스펙트럼의 작성 기준에 관한 연구들이 진행된 바가 있다 (Choi *et al.*, 2013). 그 중 U.S. NRC(nuclear regulatory

commission)에서 작성한 Reg. Guide 1.122 (U.S. NRC, 1978)가 대표적이며, 여기서 구조물 주기의 불확실성을 고려하기 위한 첨두값 확장 및 평활화 방법을 제시하고 있다.

대규모 지진이 발생하여 면진장치의 변형률이 크게 발생할 경우 면진장치에 거동 특성 중 하나인 2차 경화가 나타나게 된다. 높은 변형률에서 면진장치의 강성이 증가하게 되어 이로 인해 전체 시스템의 고유주기에 영향을 주는데, 구조물 전체 응답에 영향을 미칠 수 있기에 이에 대한 고려도 필요할 것이다.

본 연구에서는 면진장치와 입력지진의 불확실성이 면진 원전의 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하였으며, 강진 발생 시 면진장치에 나타나는 2차 경화 현상이 층응답스펙트럼에 미치는 영향 또한 고려하고자 하였다.

2. 본 론

이 장에서는 면진장치 및 원전구조물의 수치해석 모델을 소개하고, 지진하중에 대한 층응답스펙트럼을 평가하고 면진

* Corresponding author:

Tel: +82-42-350-3616; E-mail: j.hong@kaist.ac.kr

Received June 27 2016; Revised August 10 2016;

Accepted August 11 2016

©2016 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.

장치의 2차 경화에 대한 영향을 평가하고자 한다.

2.1 APR1400 ANT 수치해석 모델

원전구조물의 지진해석을 위해 한국전력기술(KEPCO E&C)에서 개발된 APR14000 수치해석 모델을 사용하였다. 솔리드 요소를 사용하여 nuclear island(NI)를 하부에 모델링하였으며, bearing element를 사용하여 486개의 면진장치를 NI 하부에 부착하였다. 상부구조인 reactor containment building(RCB)와 Auxiliary building(aux. building)은 빔-스틱 모델을 사용하여 NI 상부에 배치되었으며, RCB와 Aux. building의 높이는 각각 77.88m와 46.64m이다. 수치해석 모델의 총 질량은 498,220ton이며, 1550개의 beam 요소와, 2570개의 solid 요소로 구성되어 있다. 본 연구에서는 다양한 bearing element를 사용하기 위해 기존 SAP2000 환경에서 개발된 수치해석 모델을 OpenSees 환경에서 사용할 수 있도록 모델을 변환하여 사용하였다.

지진해석을 위하여 30개의 지진입력 세트를 고려하였으며, Reg. Guide 1.60(U.S. NRC, 1973)에 기술된 0.5g 목표 스펙트럼을 만족시키도록 수정된 30개의 지진입력을 사용하여 지진해석을 수행하였다(Fig. 2).

Table 1은 수치해석 모델의 면진장치 부착 유무에 따른 고유치 해석 결과이다. 면진장치가 부착되지 않은 모델(base-

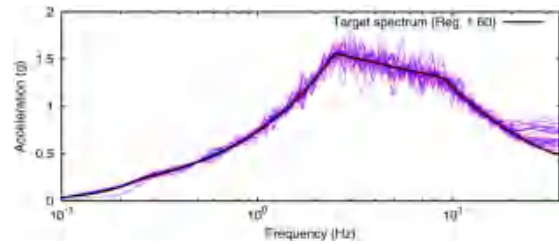


Fig. 2 Response spectra of 30 earthquakes and target spectrum(Reg. 1.60)

Table 1 Results of modal analysis

Mode number	Frequency(Hz)	
	Base-fixed model	Base-isolated model
1	3.710	0.476
2	3.715	0.477
3	5.647	0.709
4	6.049	3.546
5	7.272	3.572
6	8.128	6.997
7	9.874	7.483
8	11.380	7.947
9	11.445	8.752
10	11.536	9.880

fixed model)에서는 1~2차 모드의 고유진동수는 RCB의 병진방향 거동의 고유진동수를 의미하며, 3~4차 모드의 고유진동수는 Aux. building의 병진방향 거동의 고유진동수이다. 면진장치가 부착된 모델에서는 면진장치에 의한 모드가 추가되어, 1~2차 모드는 면진층의 병진방향 거동의 고유진동수, 3차 모드는 면진층의 회전 거동의 고유진동수이다. 4~5차

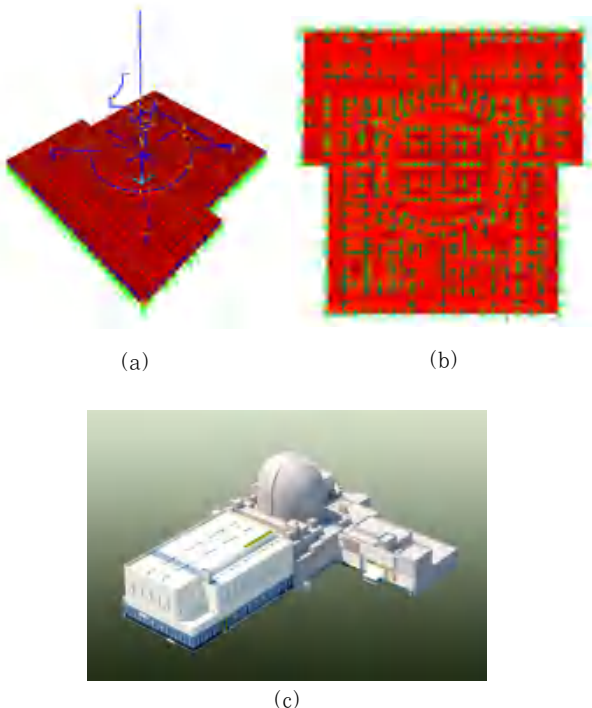


Fig. 1 (a) APR1400 numerical model, (b) distribution of base isolator, and (c) schematic of APR1400 (KEPCO and KHNP, 2013)

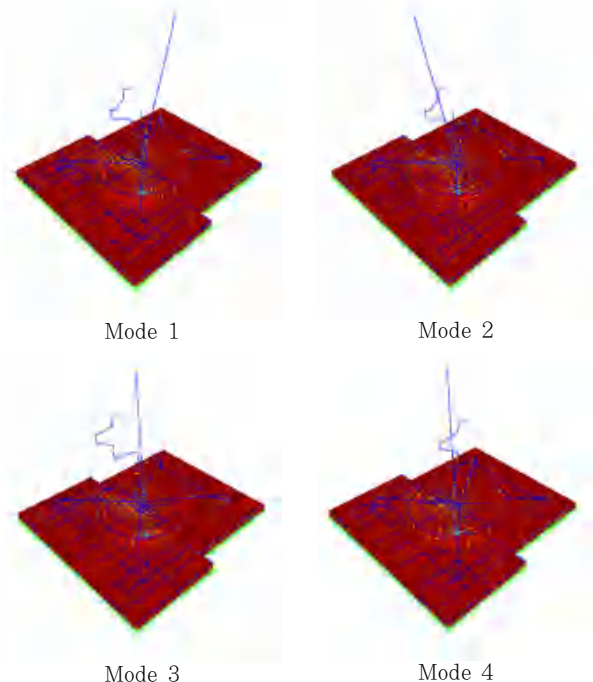


Fig. 3 Mode shapes of base fixed model

모드와 6~7차 모드는 각각 RCB와 Aux. building의 병진방향 거동의 고유진동수이다. Base fixed 모델의 주요 모드의 형상은 Fig. 3과 같다.

2.2 면진장치 모델

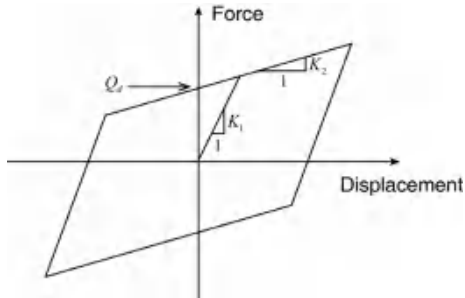


Fig. 4 Behavior property of bi-linear model

SAP2000에서 면진장치의 하중-변위 관계는 기본적으로 bi-linear 모델로 구성되어 있다(Wilson and Habibullah, 1998). 이 때, 1차강성(K_1), 2차강성(K_2), 그리고 특성강도(Q_d)에 의해 면진장치의 거동이 정의되며(Fig. 4), 면진장치의 거동특성은 Table 2에 요약되어 있다.

Table 2 Properties of base isolator

Parameter	Value
K_1 (MN/m)	524.755
K_2 (MN/m)	2.262
Q_d (MN)	2.251

면진장치 거동특성인 2차경화를 모사하기 위하여 Open Sees로 변환된 해석 모델에서는 bearing element를 사용하여 Bouc-Wen model(Mazzoni *et al.*, 2006)을 적용하였다. Fig. 5는 Bouc-Wen model의 거동특성을 나타낸다.

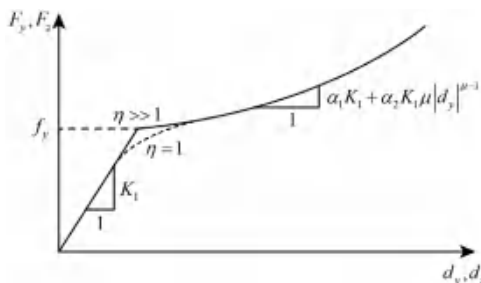


Fig. 5 Behavior property of Bouc-Wen model

Bi-linear 모델의 경우 1차강성, 2차강성, 특성강도로 거동 특성이 정의되나, Bouc-Wen 모델의 경우 소성영역의 거동이 선형 요소($\alpha_1 K_1$)와 비선형 요소($\alpha_2 K_1 \mu |d_y|^{\mu-1}$)의 합으로 정의되며 이를 사용하여 소성 영역에서 추가적으로 발생하는

경화된 2차경화의 거동을 모사하였다. 이 때, α_1 과 α_2 는 각각 선형, 비선형 경화 요소의 항복 후 강성비이며, μ 는 비선형 경화 요소의 지수이다. 결과적으로 bi-linear 모델에서는 항복 후 거동이 2차강성(K_2)에 의해 선형적으로 정의되나, Bouc-Wen 모델에서는 선형 요소($\alpha_1 K_1$)에 비선형 요소($\alpha_2 K_1 \mu |d_y|^{\mu-1}$)를 더하여 $\alpha_1 K_1 + \alpha_2 K_1 \mu |d_y|^{\mu-1}$ 로 정의되어 추가적인 경화를 모사할 수 있다.

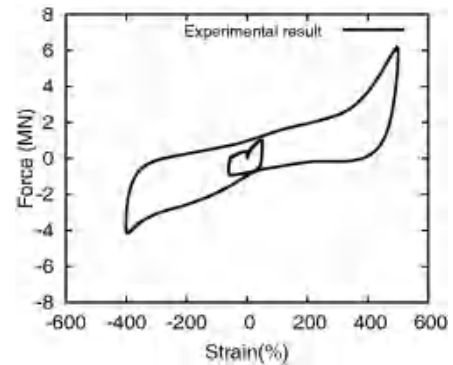


Fig. 6 Force-strain curves from experiment

Bouc-Wen 모델의 파라미터를 정의하기 위해 한국원자력연구원(KAERI)에서 수행한 면진장치의 실험 결과를 사용하였다. Fig. 6은 500%까지의 수평변형률에 대한 면진장치 실험 결과이다. 실험 결과로부터 약 300% 변형을 부근에서 2차 경화가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 적절히 모사할 수 있는 파라미터를 추정하기 위하여 다차원 공간에서 목적함수의 최대, 최소값을 정하는 접근법인 Nelder-Mead 방법(Nelder and Mead, 1965)을 사용하였다. 추정된 Bouc-Wen 모델의 파라미터는 Table 3과 같다.

Table 3 Parameters of Bouc-Wen model

Parameter	Value
K_1 (MN/m)	524.755
f_y (MN)	2.261
α_1	0.00431
α_2	0.00197
μ	7.73372

앞서 기술된 30개의 지진입력 중 임의의 1개 지진입력을 선택하여 지진강도에 따라 2차 경화가 발생하는 구간을 확인하였다. 0.5g 목표 스펙트럼을 만족시키도록 수정된 지진입력을 선형적으로 스케일링하여 PGA(peak ground acceleration) 레벨 0.9g, 1.0g의 입력지진에 대해 해석을 수행하였으며, 이 때 해석 모델의 질량중심에 위치한 면진장치를 선택하여 면진 장치의 하중-변위 곡선을 확인하였다(Fig. 7). 해석 결과 PGA 레벨 0.9g 지진강도에서는 2차경화가 확인되지 않았으며,

1.0g PGA 레벨의 지진강도에서부터 2차경화가 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서 설계지진하중(0.5g)에서는 2차경화의 영향이 없을 것으로 판단되며, PGA 레벨 1.0g에 가까운 설계초과지진하중이 발생하였을 때 2차 경화에 의한 영향이 발생할 것이다.

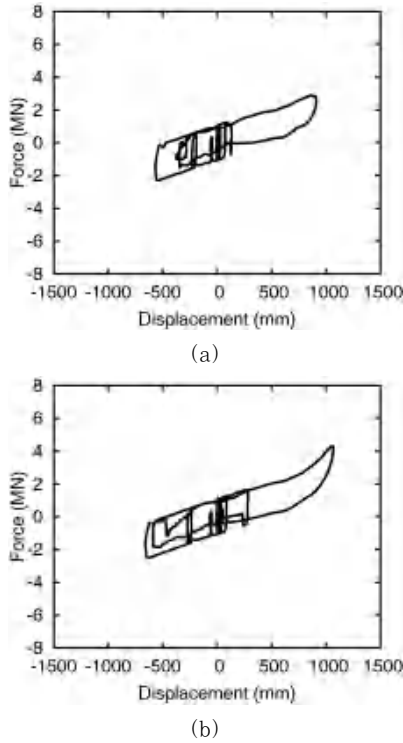


Fig. 7 Force-displacement curves considering (a) 0.90g and (b) 1.00g PGA level

2.3 설계지진하중에서의 층응답스펙트럼 평가

입력지진의 변동성, 면진장치 파라미터의 변동성이 층응답스펙트럼에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 입력지진의 변동성은 2.1절에서 기술된 30개의 지진입력을 통하여 고려하였으며, 면진장치 파라미터의 변동성은 Latin Hypercube Sampling(McKay *et al.*, 2000)을 사용하여 1차강성, 2차강성, 특성강도가 95%의 신뢰도를 기준으로 오차를 $\pm 20\%$ 이내로 가지도록 분포를 정의하여 30개의 파라미터 세트를 생성하였다. 입력지진의 변동성만을 고려한 30개의 지진 해석과, 면진장치의 변동성만을 고려한 30개의 지진 해석, 입력지진과 면진장치의 변동성을 동시에 고려한 900개의 지진 해석을 수행하였으며, 층응답스펙트럼의 평균값, 표준편차, 변동계수에 대해 평가하였다.

입력지진의 변동성, 면진장치의 변동성, 입력지진과 면진장치의 변동성을 동시에 고려한 층응답스펙트럼의 평균값을 RCB에서 가장 층응답이 클 것으로 판단되는 최상단 노드

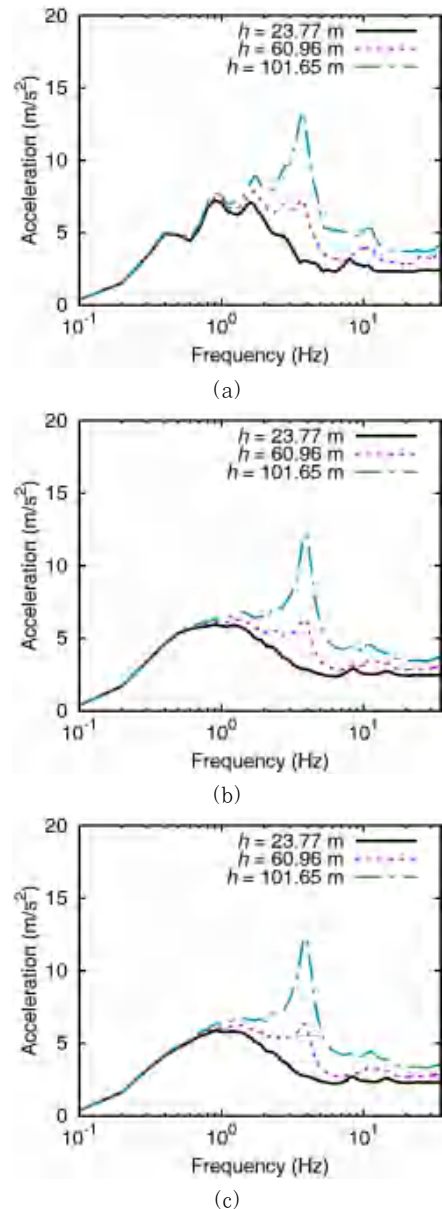
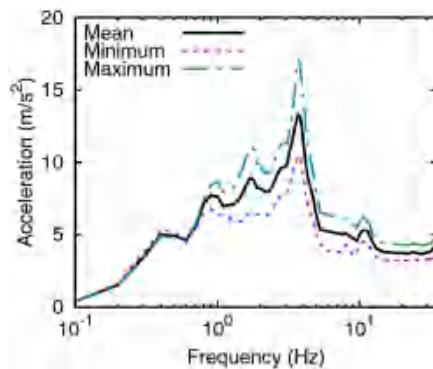


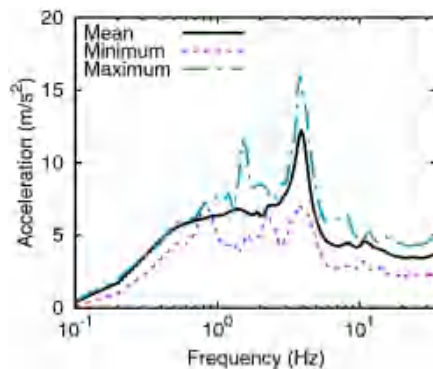
Fig. 8 Mean value of floor response spectra considering the variability of (a) isolator, (b) earthquake, and (c) isolator and earthquake simultaneously

($h=101.65\text{m}$)와 가장 작을 것으로 판단되는 최하단 노드($h=23.77\text{m}$), 그리고 두 노드의 가운데에 위치하는 노드($h=60.96\text{m}$)에서 추출하였다(Fig. 8). 그 결과 세 경우 모두 RCB에 해당하는 주파수 영역인 3~4Hz 부근에서 높이가 증가할수록 층응답이 증폭되는 결과를 일관적으로 보여주었다. 입력지진의 변동성만 고려한 경우와 입력지진과 면진장치의 변동성을 고려한 경우에는 결과가 거의 동일하게 나타났으며, 면진장치의 변동성을 고려한 경우에는 부분적으로 다소 차이가 있지만 전반적인 경향은 그 외의 경우와 유사하게 확인되었다.

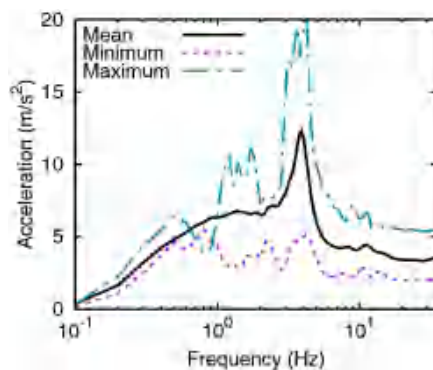
Fig. 9는 세 종류의 변동성(입력지진, 면진장치, 입력지진과



(a)



(b)

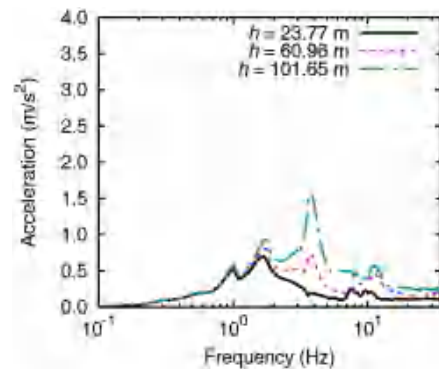


(c)

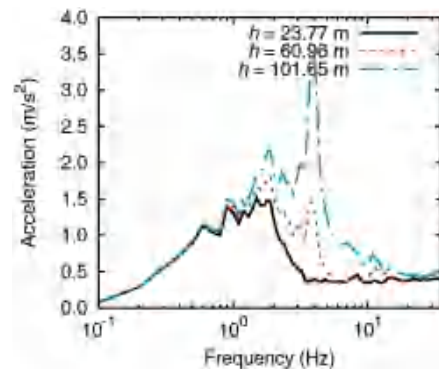
Fig. 9 Maximum, mean, and minimum value of floor response spectra at $h = 101.65\text{m}$ considering the variability of (a) isolator, (b) earthquake, and (c) isolator and earthquake simultaneously

면진장치)을 고려한 층응답스펙트럼의 최대, 최소 평균값이며, 최대, 최소의 기준은 층응답스펙트럼 아래의 넓이를 기준으로 구분하였다.

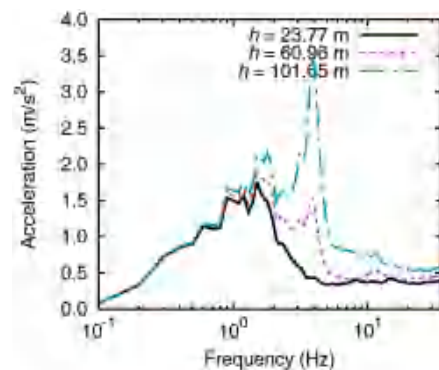
Fig. 10은 층응답스펙트럼의 표준편차이다. 평균값을 확인하였을 때와 유사하게 높이가 증가할수록 층응답스펙트럼의 표준편차 또한 증가하는 것으로 나타났으나, 면진장치의 변동성을 고려하였을 경우 그 외 다른 경우들에 비해 전반적으로 현저히 낮은 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 또한 층응답스펙트럼의 경우 최대, 최소값의 경우는 모든 변동성을 고려하였을 때가 다른 경우에 비해 확연하게 큰 차이를 보여준다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 Standard deviation of floor response spectra considering the variability of (a) isolator, (b) earthquake, and (c) isolator and earthquake simultaneously

지진의 변동성만 고려한 경우에 비해 모든 변동성을 고려할 경우 최대, 최소값 자체는 커지는데 반해, 표준편차의 경우는 두 경우에서 상당히 유사한 결과를 확인하였다.

Fig. 11은 세 종류의 변동성(입력지진, 면진장치, 입력지진과 면진장치)을 고려한 층응답스펙트럼의 변동계수이다. 앞서 표준편차를 사용하여 평가한 것과 유사하게 면진장치의 변동성만을 고려한 경우 그 외의 변동성을 고려한 경우에 비해 현저히 낮은 값을 보이는 것으로 확인되었으며, 입력지진을 고려한 경우와 입력지진과 면진장치를 동시에 고려한 두 경우는 거의 동일한 결과를 보여주었다. 그러나 표준편차에

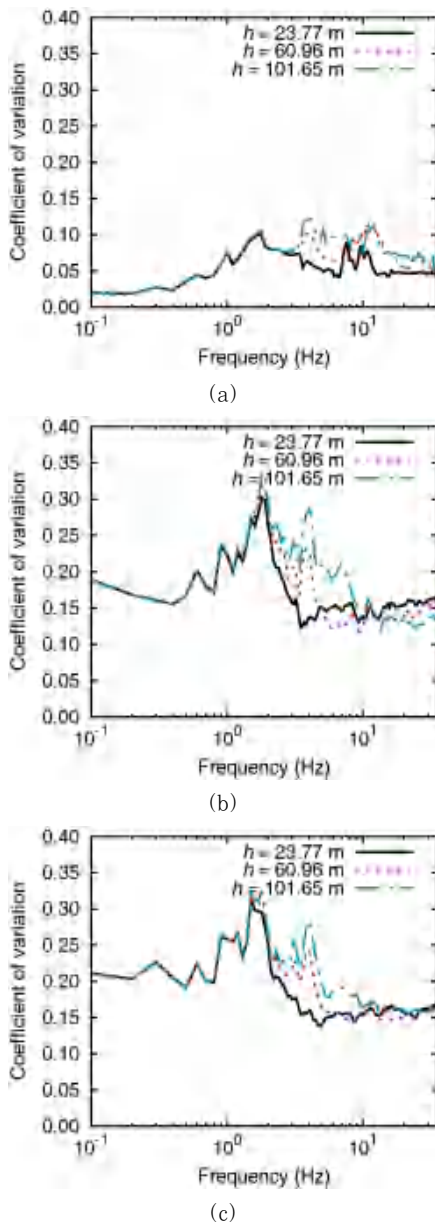


Fig. 11 CV(coefficient of variation) of floor response spectra considering the variability of (a) isolator, (b) earthquake, and (c) isolator and earthquake simultaneously

비해 값들이 일정한 범위(입력지진의 변동성 및 입력지진과 면진장치의 변동성을 동시에 고려한 경우 0.1~0.3, 면진장치의 변동성을 고려한 경우 0.1이내) 안에서 형성되는 것으로 확인되었다. 따라서 변동계수의 경우 상대적으로 표준편차나 평균값에 비해 높이에 따른 변동폭이 현저히 작으므로, 모든 경우에 대해 지진해석을 각각 수행하지 않더라도 이를 활용하여 변동성을 고려한 층응답스펙트럼의 분포를 간접적으로 추정할 수 있을 것이다.

결과적으로 층응답스펙트럼의 평균, 표준편차, 변동계수에 대하여 평가하였을 때, 면진장치의 변동성을 고려한 표준편차

및 변동계수가 그 외의 경우에 비해 현저히 낮으며, 입력지진의 변동성을 고려한 경우와 두 가지 변동성을 모두 고려한 경우의 평균, 표준편차, 변동계수 모두 스펙트럼 아래의 넓이를 기준으로 거의 일치하는 것으로 확인되었다. 따라서 입력지진의 변동성이 면진장치의 변동성에 비해 층응답스펙트럼에 미치는 영향이 지배적이며, 두 변동성을 동시에 고려한 900개의 지진해석을 모두 수행하지 않고 입력지진의 변동성만을 고려한 30개의 지진해석만을 수행하더라도 변동성이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하기에 충분할 것이다.

2.4 설계초과지진을 고려한 층응답스펙트럼 평가

한국원자력연구원(KAERI)에서 수행한 실험 결과에 의하면 면진장치는 약 500% 변형율(1120mm) 부근에서 파괴되며 이 이상으로 면진장치의 변위가 발생하면 면진장치 자체가 파괴되기 때문에 층응답스펙트럼을 도출하는 것이 무의미할 것이다.

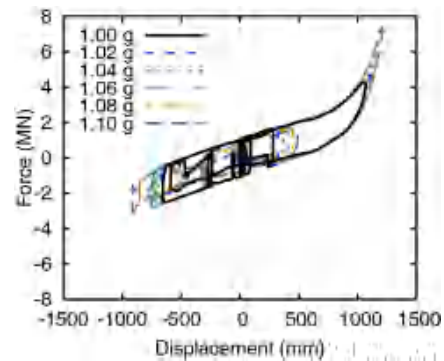


Fig. 12 Force-displacement curves according to the PGA level

따라서 1.00g에서부터 1.10g PGA 레벨까지 0.02g의 간격으로 PGA 레벨을 세분화하여 면진장치의 최대변위를 확인하였다(Fig. 12와 Table 4). 그 결과 1.04g PGA 레벨에서 면진장치 최대변위가 500% 변형율에 해당하는 1120mm 이상의 값이 발생하였으며, 따라서 PGA 레벨에 따른 해석 수행은 1.02g까지 수행하는 것으로도 충분할 것으로 판단된다.

Table 4 Maximum displacement of isolator according to the PGA level

PGA(g)	Maximum displacement of isolator
1.00	1068mm
1.02	1099mm
1.04	1128mm
1.06	1155mm
1.08	1182mm
1.10	1209mm

따라서 최종적으로 1.02g PGA 레벨에 대해 좀 더 명확한 비교를 위하여 1개 지진입력만을 수행하여 층응답스펙트럼을 비교하였다(Fig. 13).

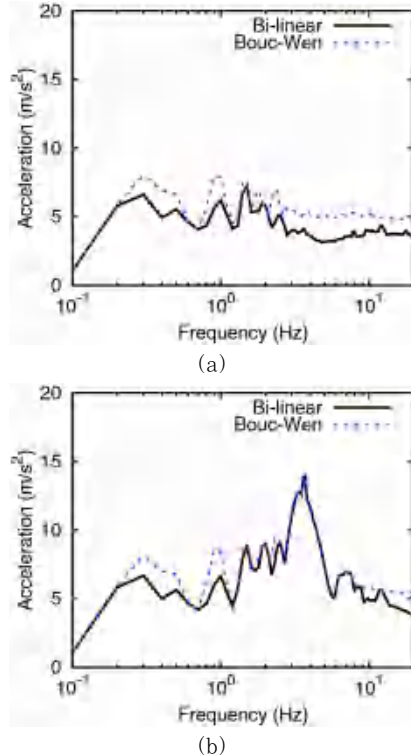


Fig. 13 Floor response spectrum of RCB(h =(a) 23.74m and (b) 101.65m) at 1.02g PGA level

Bi-linear 모델과 Bouc-Wen 모델의 차이는 고층부보다 오히려 저층부에서 뚜렷하게 나타났으며, 2차 경화의 의한 영향은 1.02g PGA 레벨에서, 각 주파수 영역에서 bi-linear 모델을 사용한 가속도 응답 대비 Bouc-Wen 모델을 사용한 가속도 응답이 약 20~30% 증폭되는 것으로 확인되었다. 특히 저층부($h=23.74\text{m}$)의 5~10Hz 부근의 주파수 영역에서 bi-linear 모델 대비 가속도 응답의 차이가 두드러지며 결과적으로 1.0g 이상의 강진을 고려할 시 저층부의 약 5~10Hz에 해당하는 내부기기의 설계 시 이에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 면진 원전의 층응답스펙트럼을 평가하고, 면진장치의 2차 경화가 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하였다. 변동성을 고려한 층응답스펙트럼 작성 시 입력지진의 변동성이 면진장치 특성의 변동성에 비해 지배적임을 확인

하였으며, 주파수 영역이나 높이에 따라 상대적으로 일정한 값을 보인 변동계수를 사용하여 변동성을 고려한 많은 해석을 모두 수행하지 않더라도 간접적으로 변동성이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가할 수 있음을 확인하였다. 또한 2차 경화가 층응답스펙트럼에 미치는 영향은 면진장치가 파괴되기 전으로 판단되는 1.02g의 PGA 레벨에서 약 20~30%의 응답의 증폭을 야기시키는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이며 (No. 2011T100200080), 국토교통부의 U-City 석·박사과정 지원사업으로 지원되었습니다.

References

- Kim, H.J., Choi, K.S., Yi, W.H., Yang, W.J. (2013) A Study on Evaluation of Floor Response Spectrum for Seismic Design of Non-Structural Components, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 17(6), pp.279~291.
- KEPCO & KHNP (2013) APR1400 Design Control Document Rev.0.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L. (2006) OpenSees Command Language Manual, Pacific Earthquake Engineering Research(PEER) Center.
- McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J. (2000) A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code, *Technometrics*, 42(1), pp.55~61.
- Nelder, J. A., Mead, R. (1965) A Simplex Method for Function Minimization. *The Comput. J.*, 7(4), 308~313.
- U.S. NRC (1978) Regulatory Guide 1.122, Development of Floor Design Response Spectra for Seismic Design of Floor-Supported Equipment or Components.
- U.S. NRC (1973) Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Plants.
- Wilson, E.L., Habibullah, A. (1998) SAP2000-Structural Analysis Users Manual. Computers and Structures, Inc.

요 지

대규모 지진에 대한 원전의 안전성을 확보하는 방안으로 기존 원전 구조물에 면진장치를 설치하는 방안이 도입되고 있다. 면진장치를 설치함으로써 상부구조와 지반의 거동을 격리시킬 수 있고, 구조물 자체의 고유주기가 길어지게 되는데, 이를 통해 지진하중에 대한 구조물의 응답을 감소시킬 수 있게 된다. 특히 원전구조물 설계 시 원전구조물 자체뿐만 아니라 원전 내부 기기에 대한 안전성 확보가 필수적이다. 이를 위해 특정 층에 위치한 기기의 설계를 위해 각 층의 최대 요구 응답을 나타내는 층응답스펙트럼이 일반적으로 사용된다. 본 논문에서는 원전 구조물의 지진해석을 통해 특정 층의 층응답스펙트럼을 평가하고, 면진 장치의 거동 특성중 하나인 2차 경화에 대한 영향 또한 평가하였다.

핵심용어 : 층응답스펙트럼, 면진장치, 2차경화, 면진 원전