

납-고무 받침에 의해 면진된 원전구조물의 응답에 대한 Bouc-Wen 모델 및 지진특성의 영향

Effect of Bouc-Wen Model and Earthquake Characteristics for Responses of Seismically Isolated Nuclear Power Plant by Lead-Rubber Bearing

송종걸^{1)*} · 손민균²⁾

Song, Jong-Keol^{1)*} · Son, Min-Kyun²⁾

¹⁾강원대학교 토목공학과, ²⁾한세이엔씨(주) ENG사업부

¹⁾Department of Civil Engineering, Kangwon National University, ²⁾Hansei E&C

/ A B S T R A C T /

In order to modeling seismic isolation system such as lead-rubber bearing (LRB), bilinear model is widely used by many researchers. In general, an actual force-displacement relationship for LRB has a smooth hysteretic shape. So, Bouc-Wen model with smooth hysteretic shape represents more accurately actual hysteretic shape than bilinear model. In this study, seismic responses for seismically isolated nuclear power plant (NPP) with LRB modelled by Bouc-Wen and bilinear models are compared with those of NPP without seismic isolation system. To evaluate effect of earthquake characteristics for seismic responses of NPP isolated by LRB, 5 different site class earthquakes distinguished by Geomatrix 3rd Letter Site Classification and artificially generated earthquakes corresponding to standard design spectrum by Reg. Guide 1.60 are used as input earthquakes. From the seismic response results of seismically isolated NPP, it can be observed that maximum displacements of seismic isolation modelled by Bouc-Wen model are larger than those by bilinear model. Seismic responses of NPP with LRB is significantly reduced than those without LRB. This reduction effect for seismic responses of NPP subjected to Site A (rock) earthquakes is larger than that to Site E (soft soil) earthquakes.

Key words: Nuclear Power Plant, Lead-Rubber Bearing, Bouc-Wen Model, Bilinear Model, Floor Response Spectrum, Earthquake Characteristics

1. 서 론

납-고무 받침(lead rubber bearing, LRB)에 의해 면진된 구조물은 고무의 유연성으로 인한 횡방향 강성의 감소로 구조물의 고유주기가 길어져서 결과적으로 지진가속도 응답이 감소된다. 납-고무 받침의 중앙부의 납심은 지진하중에 의한 소성변형을 통하여 지진에너지를 소산시켜 상부구조물에 전달되는 지진력을 감소시키는 역할을 한다. 납-고무 받침의 이력거동은 납심의 소성변형의 영향으로 비선형성이 크게 나타나기 때문에 해석모델로는 이선형(bilinear) 모델이 현재까지 일반적으로 사용된다. 이선형 모델은 분할선형(piecewise linear)의 형태로서 모델자체가 간단한 장점이 있지만 실제적인 완전한 이력거동을 나타낼 수 없는 단점이 있다. 이에 비하여

Bouc-Wen 모델[1, 2]은 이력응답의 비선형성 및 완전한 곡선형 이력거동을 표현하는 장점이 있다. Bouc-Wen 모델은 오래전부터 많은 연구가 진행되어왔으며 많은 분야에 활용되고 있는 상황이다. Bouc-Wen 모델은 차량 [3], MR 댐퍼[4], 면진장치[5] 등 많은 분야에서 이용되고 있으며 구조공학 분야에서 비선형 이력응답을 모사하는데 많이 사용되어왔다. Bouc-Wen 모델을 이용한 완전한 곡선형태의 이력거동을 기반으로 비탄성 응답스펙트럼[6], 강도감소계수[7], 비탄성 변위비[8] 등에 대한 연구가 수행되어왔다. 이러한 연구는 이선형 모델에 비하여 완전한 곡선형 이력거동을 나타내는 Bouc-Wen 모델이 실제적인 구조부재나 구조시스템의 응답을 보다 정확하게 표현할 수 있다는 연구배경으로부터 연구가 수행되었으며 이선형 모델과의 차이점도 비교하였다. 이러한 연구는 단자유도계 응답에 대한 연구로서 내진설계방법의 기본 자료로 활용될 수 있다. Bouc-Wen 모델은 몇 가지 변수를 사용하여 다양한 형태의 이력거동을 나타낼 수 있는 특징이 있으므로 실제적인 납-고무 받침의 비탄성 이력거동을 나타내기에는 적절하다.

*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received May 20, 2016; Revised November 19, 2016; Accepted January 5, 2017)

본 연구에서 납-고무 받침의 모델링에 많이 사용되는 이선형 모델과 실제적인 완만한 이력거동의 표현에 적합한 Bouc-Wen 모델의 의한 지진응답의 비교를 통하여 모델링 방법에 따른 지진응답의 차이를 비교하여 분석하였다. 또한 지진의 특성에 따른 면진원전의 지진응답을 비교하기 위하여 입력지진으로는 지반의 종류가 다른 5개 그룹의 가속도기록 222개 사용하였다. 또한 원전표준스펙트럼에 대응되는 30개의 인공지진도 사용하여 지진응답을 비교하였다. 지반의 종류에 따른 지진을 사용하여 납-고무 받침을 등가선형모델과 이선형모델로 모델링하여 지진응답과 지진취약도를 비교한 기존의 연구[9, 10]가 있다. 이 기존연구의 초점은 등가선형모델의 정확성이 이선형모델에 비하여 어느 정도인지를 분석하는 것이었다. 본 연구는 이선형 모델과 Bouc-Wen 모델의 비교에 의한 면진 원전의 지진응답의 평가가 주된 연구초점이다. 납-고무 받침에 의한 지진응답의 저감을 나타내는 면진효과를 분석하기 위하여 면진되지 않은 원전구조물과 면진된 원전구조물의 지진응답을 비교하였다. 지진응답으로는 면진장치의 최대변위, 격납구조물의 높이별 변위응답, 전단력, 가속도 응답을 비교하였으며, 원전 내부구조물의 가속도 응답 증폭정도 평가를 위하여는 격납구조물 최상층부에 대한 층응답스펙트럼을 구하여 평가하였다. 이러한 평가로부터 설계된 납-고무 받침의 면진효과를 분석하였으며, 면진장치에 의해 격납구조물의 상대변위, 전단력과 가속도 응답을 현저히 감소시킴을 확인하였다. 또한, 단단한 지반에서 계측된 지진보다 연약한 지반의 지진에 대해 면진에 의한 지진응답 저감효과가 감소함을 알 수 있었다. 이는 면진장치의 지진운동 저감효과는 원전구조물의 지반조건이 단단할수록 효과적임을 나타낸다.

2. 면진된 원전 구조물의 지진해석 모델

2.1 원전 구조물의 지진해석 모델링

해석에 사용한 원전 구조물의 모델은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 SASSI-2000[11]의 예제 구조물을 사용하였으며, 상부 구조물은 Fig. 1의 오른쪽 그림과 같이 격납구조물과 내부 구조물로 구분하여 모델링하였으며, 격납 구조물의 높이는 63.274 m, 내부 구조물의 높이는 28.346 m, 하부 매트는 6.696 m이다. 지진에 의해 유발되는 대부분의 비탄성응답은 면진

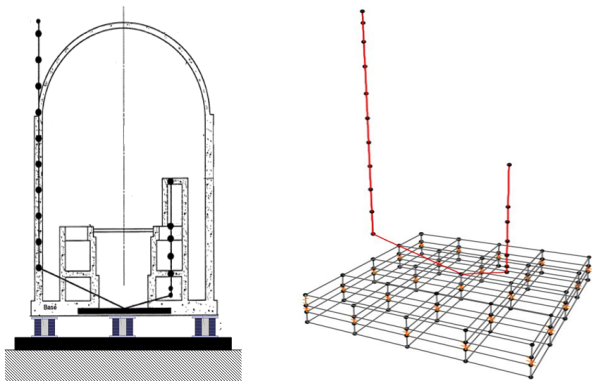


Fig. 1. Analytical modeling of seismically isolated nuclear power plant



Fig. 2. Lead Rubber Bearing

장치가 부담하고 상부 구조물은 탄성거동만 하게 되므로 격납구조물과 내부구조물은 탄성요소로 모델링하였다. 면진된 원전 구조물의 고유주기가 약 2초가 되도록 납-고무 받침을 설계하여 적용하였다.

OpenSEES[12]에서 Elastomeric Bearing 명령어를 이용하여 납-고무 받침을 모델링하였다. 가로세로의 길이가 40 m인 상부매트와 하부매트의 사이에 8 m 간격으로 25개의 면진장치(붉은 점으로 표시된 것이 면진장치)를 균일하게 배치하기 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 정사각형 형태로 면진장치를 배치하였다. 납-고무 받침의 일반적인 형상은 Fig. 2와 같다.

2.2 Bouc-Wen 모델을 이용한 납-고무 받침의 비선형 모델링

지진하중에 의해 유발되는 납-고무 받침의 수평방향 전단력 $F(t)$ 를 항복전단력 F_y 로 나눈 값을 정규화된 전단력 $z(t)$ 으로 정의한다면, 정규화된 전단력 $z(t)$ 를 Bouc-Wen 모델[1], [2], [13]을 이용하여 다음의 비선형 미분방정식에 의해 종속적인 거동을 하도록 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{z}(t) = A\dot{\mu}(t) - \beta|\dot{\mu}(t)||z(t)|^{n-1}z(t) - \gamma\dot{\mu}(t)|z(t)|^n \quad (1)$$

여기서 β 는 1차 이력형상 매개변수, γ 는 2차 이력형상 매개변수, n 는 이력형상의 완만한 특성을 결정짓는 지수이다. μ 는 납-고무 받침의 변위를 항복변위로 나눈 값인 변위연성도이다. β , γ 와 n 의 다른 Bouc-Wen 모델의 힘-변위 관계의 변화특성을 싸인파형의 반복하중에 대하여 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 또한 Fig. 3과 동일한 조건에 대하여 지진기록을 이용하여 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. β 와 γ 값을 증가시킴에 따라 공통적으로 강성이 저하되면서 변위응답이 증가하는 경향을 나타내며, γ 가 증가함에 따라 1사분면과 3사분면의 힘-변위 관계의 제하(unloading)시의 형상이 날카로워지는 경향을 나타낸다.

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 Bouc-Wen 모델의 힘-변위응답을 이선형 모델과 유사하도록 나타낼 수 있으며 단지 힘-변위 관계의 2사분면과 4사분면의 이력거동만 완만하게 나타내는 것이 다르도록 나타내는 Bouc-Wen 모델을 β 와 γ 를 조합하여 Fig. 6과 같이 구할 수 있으며 이 경우의 Bouc-Wen 모델의 변수는 $\beta=0.5$, $\gamma=0.5$, $n=2$ 를 사용하였다.

Bouc-Wen 모델과의 비교를 위하여 해석에 사용한 이선형 모델의 특성 (Fig. 5 참조)을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

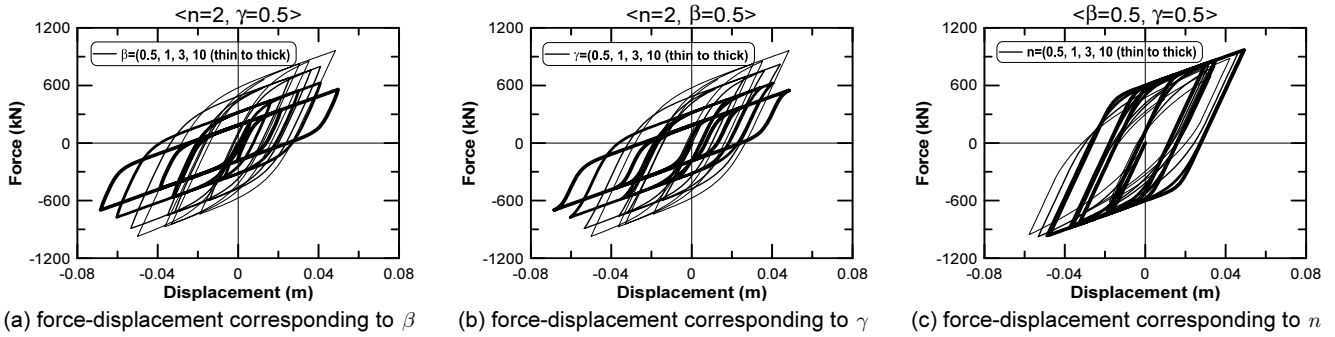


Fig. 3. Comparison of force-displacement relationship of LRB corresponding to several β, γ, n (cyclic loading)

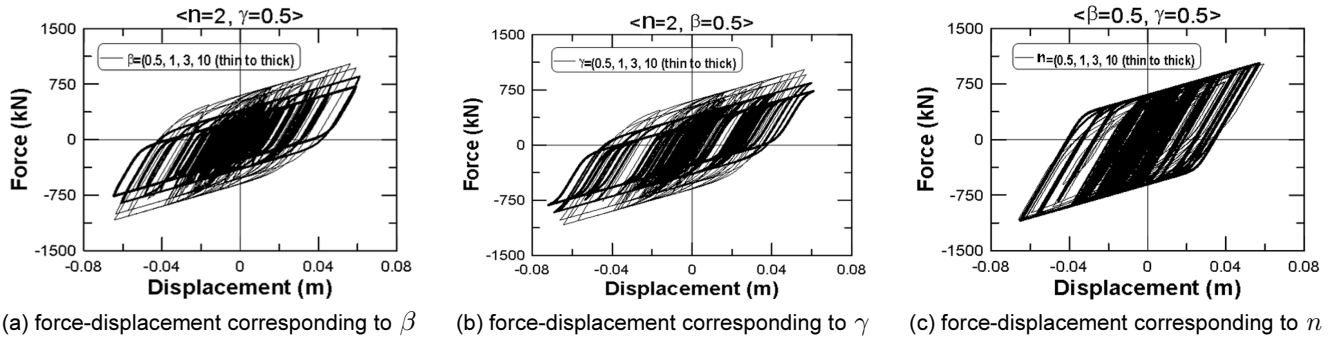


Fig. 4. Comparison of force-displacement relationship of LRB corresponding to several β, γ, n (seismic loading)

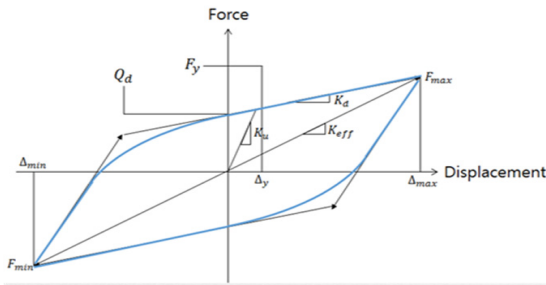


Fig. 5. Hysteretic behavior of LRB using by Bouc-Wen and bilinear models

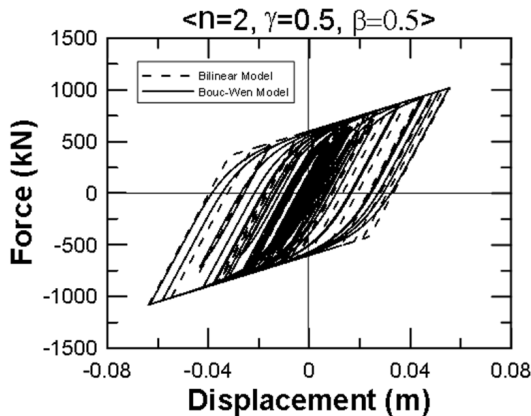


Fig. 6. Comparison of force-displacement relationship using by Bouc-Wen and bilinear models

Table 1. Design property of LRB (per each unit)

Model	Parameter	Value
Bilinear LRB Model	K_u (elastic stiffness)	$1.126 \times 10^6 \text{ KN/m}$
	K_c (second-slope stiffness)	$1.877 \times 10^5 \text{ KN/m}$
	Q_d (characteristic strength)	$1.502 \times 10^4 \text{ KN}$

2.3 해석에 사용된 지진의 특성

입력지진은 원전의 표준설계스펙트럼에 대응하는 인공지진과 5가지 지반의 종류에 따른 실제지진을 사용하였다. 인공지진은 한국원자력연구원 에서 면진원전 성능검증 기준을 검토하기 위해 RspMatch 프로그램[14]을 이용하여 RG 1.60 설계응답스펙트럼[15]에 부합된 ZPA 0.5 g의 인공지진 30개를 이용하였다. 실제지진은 Geomatrix 지반분류에 의한 5가지 지반 등급 A, B, C, D, E의 지진[9], [10], [16]을 사용했으며, A가 단단한 지반이며 E로 갈수록 연약한 지반을 나타낸다. Site A, B, C, D 각각 50 개씩 과 Site E는 22개 로 지진의 개수는 총 222개를 사용하였다. 실제지진과 인공지진의 응답스펙트럼을 작성하여 Fig. 7에 비교하여 나타내었다.

3. 면진모델과 지진특성에 따른 면진 원전의 지진 응답 비교

3.1 Bouc-Wen 모델과 이선형 모델의 적용시 납-고무 받침의 최대변위응답의 비교

Fig. 7에 나타난 Geomatrix 분류법을 이용한 각 Site 별 지진과 RG 1.60

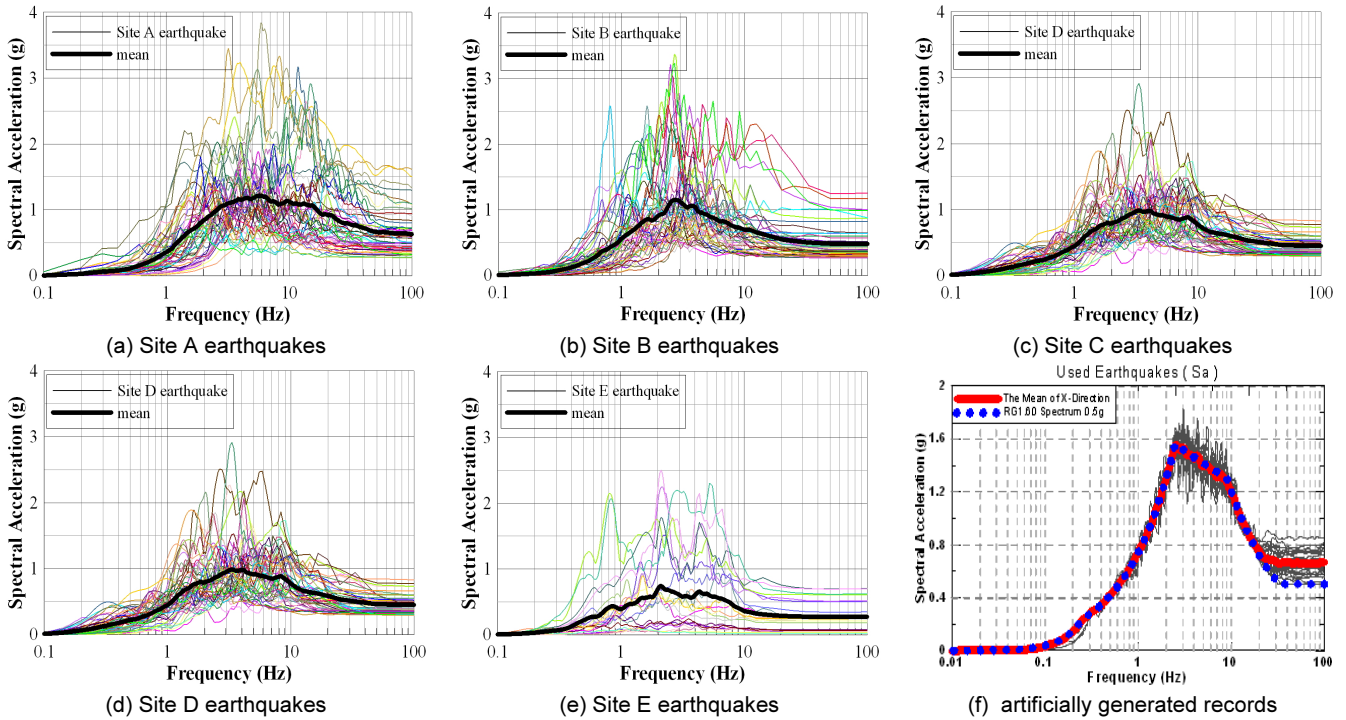


Fig. 7. Comparison of spectral accelerations for 5 different site earthquake groups and artificially generated records according to RG 1.60

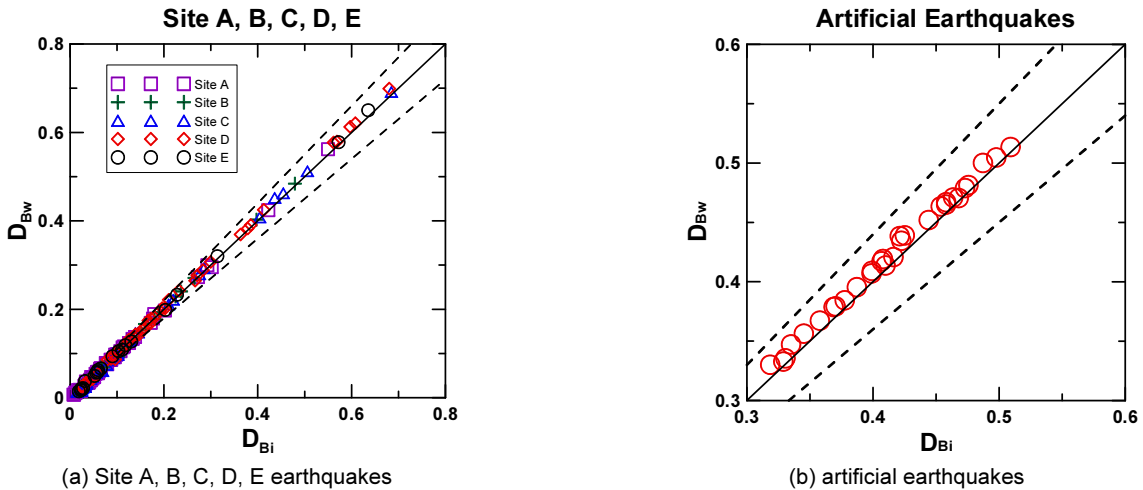


Fig. 8. Comparison of maximum displacement of LRB using by Bouc-Wen and bilinear models

의 30개 인공지진을 이용하여 Fig. 1에 나타난 면진 원전구조물의 응답이력 해석을 수행하였다. 납-고무 받침은 Bouc-Wen 모델과 이선형 모델로 구분하여 해석을 수행하여 납-고무 받침의 최대변위를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8의 가로축은 이선형 모델에 의한 최대변위를 나타내며, 세로축은 Bouc-Wen 모델에 의한 최대변위를 나타낸다. 최대변위 결과가 그림의 대각선에 가까울수록 Bouc-Wen 모델과 이선형 모델이 잘 일치함을 나타낸다. 두 지진 모두 대각선에 가깝게 나타나는 것을 알 수 있으며 Bouc-Wen 모델에 의한 면진장치의 최대변위 응답이 이선형 모델에 의한 최대변위 응답보다 약간 크게 평가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8에 나타난 Bouc-Wen 모델에 의한 최대변위(D_{BW})와 이선형 모델에 의한 최대변위(D_{Bi})의 차이를 평가하기 위하여 변위 불일치율을 다

음과 같이 정의하였다.

$$Discrepancy = \frac{D_{BW} - D_{Bi}}{D_{Bi}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

식(2)를 이용하여 Fig. 8에 나타난 최대변위로부터 두 모델에 따른 변위 불일치율을 구하여 Fig. 9에 나타내었다. 불일치율이 양의 값이면 Bouc-Wen 모델이 이선형 모델에 비하여 변위 응답을 크게 평가함을 의미하고, 불일치율이 음의 값을 나타내면 반대의 경우를 나타낸다. Site 별 가속도 기록에 대한 불일치율은 -16%~56%의 분포를 나타내며, 인공지진에서는 0.5%~4%의 분포를 나타낸다. 인공지진 보다는 실제지진기록에서 불일치율의 분포

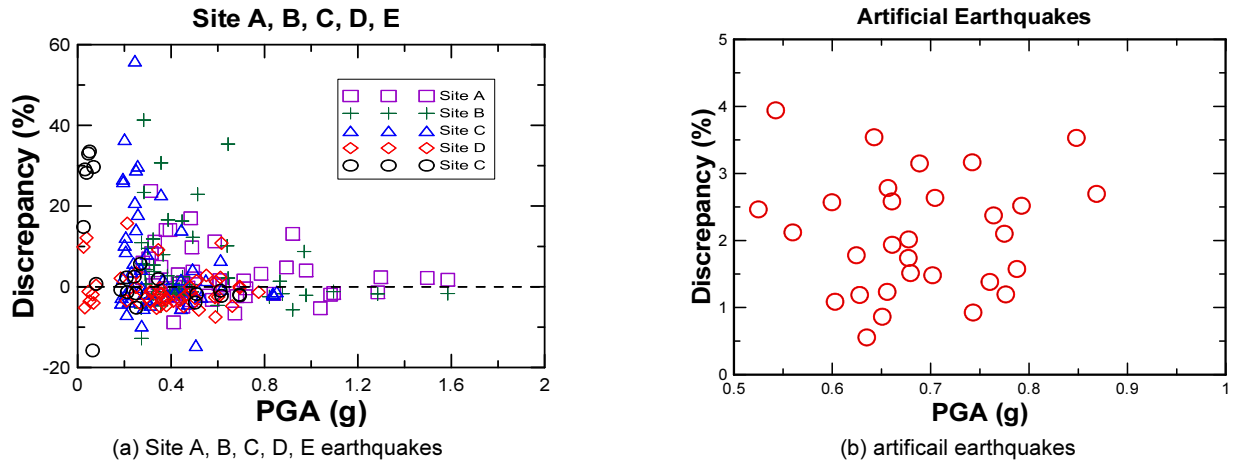


Fig. 9. Comparison of displacement discrepancy of LRB using by Bouc-Wen and bilinear models

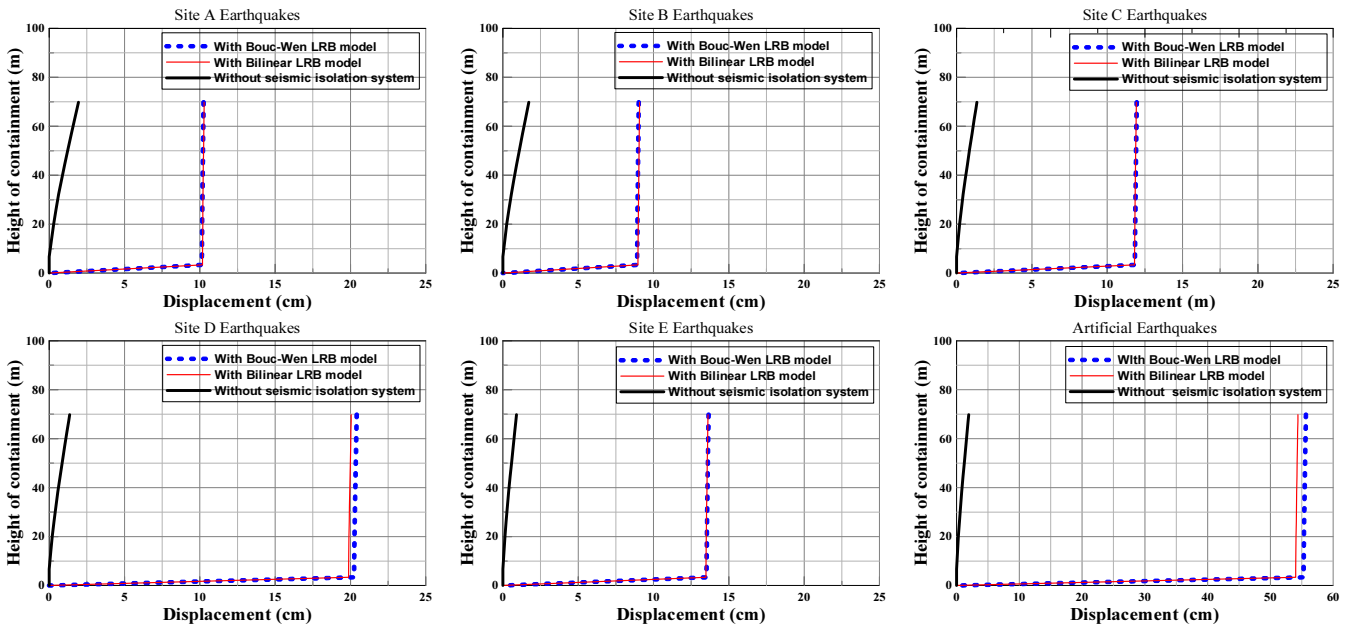


Fig. 10. Comparison of displacement for NPP containment structures using by Bouc-Wen and bilinear LRB models

가 다양하게 나타나는 것은 실제지진기록이 다양한 변동성 또는 불확실성을 많이 포함하기 때문으로 판단된다.

3.2 면진 적용 유무 및 면진장치 해석모델에 따른 격납구조물의 변위, 전단력, 가속도 응답의 비교

납-고무 받침에 의해 면진된 원전 격납구조물과 면진되지 않은 격납구조물의 변위응답을 구하여 이를 각 지진하중 그룹별로 평균을 구하여 Fig. 10에 비교하여 나타내었다. 납-고무 받침은 Bouc-Wen 모델과 이선형 모델을 적용한 경우로 구분하여 비교하였으며 입력지진으로는 Fig. 7에 나타난 각 Site 별 지진과 RG 1.60 스펙트럼에 대응하는 인공지진을 사용하였다. 면진이 적용된 경우에 대부분의 변위응답은 면진장치에서 발생하고 격납구조물의 하층과 상층의 변위응답 차이인 상대변위는 면진이 적용되지 않은 경우에 비하여 현저하게 작아지는 것을 알 수 있다. 면진이 적용되지

않은 경우의 격납구조물의 상대변위(격납구조물의 상층부와 하층부의 상대적인 변위 차이)는 Site A에서는 2 cm, Site B에서는 1.8 cm, Site C에서는 1.5 cm, Site D에서는 1.3 cm, Site E에서는 0.9 cm 정도로 연약지반으로 갈수록 격납구조물의 상대변위는 작아짐을 알 수 있다. 면진이 적용된 경우에는 상대변위가 지진하중의 종류에 구분 없이 약 0.1 cm 미만으로 비슷한 수준으로 줄어든다. 즉, 면진장치의 적용은 단단한 지반의 지진에 대하여 격납구조물의 상대변위를 저감시키는 면진효과가 보다 우수하게 나타남을 의미한다. 면진장치의 최대변위는 Site A에서는 10.1 cm, Site B에서는 9 cm, Site C에서는 11.9 cm, Site D에서는 20 cm, Site E에서는 13.5 cm 정도로 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 7에 나타난 가속도 응답스펙트럼의 평균값을 살펴 볼 때 Site A, B, C, D의 가속도 응답스펙트럼의 최대값은 1~1.2 g 정도로 비슷하지만 Site E의 경우는 가속도 응답스펙트럼의 최대치가 0.7 g 정도로 다른 지진에 비하여 작음을 알 수 있다. 이로부터 면진장치의 최대변위는 지진의 특성이 연약한 지반에 가까울수록 증가됨을 알

수 있다. Site E가 가장 연약한 지반에서 측정한 지진이지만 변위응답이 Site D 보다 작게 나온 것은 Site E에 해당하는 지진가속도 기록이 총 22개 정도로 구해질 정도로 Site E에 해당하는 강진이 많지 않아서 지진의 최대 지반가속도가 상대적으로 작기 때문이며 동일한 최대지반가속도 지진을 사용한다면 Site E 지진그룹의 면진장치 최대변위가 Site D 그룹의 지진에 비하여 크게 나타나리라 예측된다. 두 해석모델에 따른 변위응답은 개별 지진에 대한 평균값을 나타내었기 때문에 Site 별 변위응답은 Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 불일치가 양의 값과 음의 값이 서로 상쇄하는 이유로 차이가 크지 않으며, 인공지진에 대해서는 불일치율이 상쇄하는 것이 없으므로 Bouc-Wen 모델에 의한 변위응답이 약 3% 정도 이선형 모델에 비하여 크게 평가함을 알 수 있다.

납-고무 받침에 의해 면진된 원전 격납구조물과 면진되지 않은 격납구조물의 전단력을 구하여 이를 각 지진하중 그룹별로 평균을 구하여 Fig. 11에 비교하여 나타내었다. 면진이 적용된 경우에 전단력은 면진이 적용되지 않은 경우에 비하여 현저하게 작아지는 것을 알 수 있다. 면진이 적용되지 않은 경우의 격납구조물의 하층부의 밑면전단력은 Site A에서는 200 MN에서 면진이 적용되면 15 MN으로 1/13.3 수준으로 저감되고, Site B에서는 172 MN에서 면진이 적용되면 18 MN으로 1/9.6 수준으로 저감되고, Site C에서는 137 MN에서 면진이 적용되면 19 MN으로 1/7.2 수준으로 저감되고, Site D에서는 138 MN에서 면진이 적용되면 21 MN으로 1/6.6 수준으로 저감되고, Site E에서는 92 MN에서 면진이 적용되면 19 MN으로 1/4.8 수준으로 저감된다. 원전표준스펙트럼에 대응되는 인공지진에 대해서는 215 MN에서 면진이 적용되면 48 MN으로 1/4.5 수준으로 저감된다. Site A 지진그룹의 면진장치의 적용에 의한 격납구조물의 전단력 저감 효과가 가장 좋으며, 연약지반의 지진일수록 저감효과가 작아진다.

지진하중에 의한 원전 격납구조물에 작용하는 전단력이 면진장치의 적용에 의해서 감소하는 정도를 나타낼 수 있는 전단력 감소율(R_s)을 다음과 같이 정의하였다.

$$R_s = \left(\frac{V_N - V_{LRB}}{V_N} \right) \times 100 (\%) \tag{3}$$

여기서 V_N 은 비면진된 원전 격납구조물에 작용하는 전단력이며, V_{LRB} 은 납-고무 받침이 적용된 면진 원전격납구조물에 작용하는 전단력이다. Fig. 11의 전단력 결과를 식 (3)에 적용하여 전단력 감소율(R_s)을 구하여 Fig. 12에 비교하여 나타내었다. 면진장치의 적용에 의한 격납구조물의 하층부에서 전단력 감소율(R_s)은 Site A에서 Site E까지 각각 93%, 92%, 88%, 84%, 81%의 전단력 감소율이 나타났다. 단단한 지반의 지진일수록 면진장치의 적용에 의해 격납구조물에 작용하는 전단력을 연약한 지반의 지진에 비하여 더 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 이는 원전구조물이 건설되는 부지가 단단한 지반일수록 면진에 의한 지진하중의 저감 효과가 크다는 것을 의미한다.

납-고무 받침에 의해 면진된 원전 격납구조물과 면진되지 않은 격납구조물의 지진하중에 의한 가속도를 구하여 이를 각 지진하중 그룹별로 평균을 구하여 Fig. 13에 비교하여 나타내었다. 면진이 적용된 경우에 면진장치가 설치된 3.348 m 지점 보다 상부에 있는 격납구조물의 가속도 응답은 면진이 적용되지 않은 경우에 비하여 현저하게 작아지는 것을 알 수 있다. 면진이 적용되지 않은 경우는 단단한 지반조건인 지진(예 Site A)일수록 격납구조물의 상층부로 갈수록 가속도응답의 증폭정도가 연약한 지반의 지진(예 Site E)에 비하여 크게 나타난다. 면진이 적용되지 않은 경우의 격납구조물의 하층부의 가속도는 Site A에서는 0.64 g에서 면진이 적용되면 0.1 g 정도로 저감되고, Site B에서는 0.51 g에서 면진이 적용되면 0.09 g 정도로 저감되고, Site C에서는 0.35 g에서 면진이 적용되면 0.1 g 정도로 저감되고, Site D에서는 0.45 g에서 면진이 적용되면 0.08 g 정도로 저감되고, Site E에서는 0.27 g에서 면진이 적용되면 0.08~0.11 g 정도로 저감된다. 원전표준스펙트럼에 대응되는 인공지진에 대해서는 0.65 g에서 면진이 적용되면 0.31 g 정도로 저감된다. Site A 지진그룹의 면진장치의 적용에 의

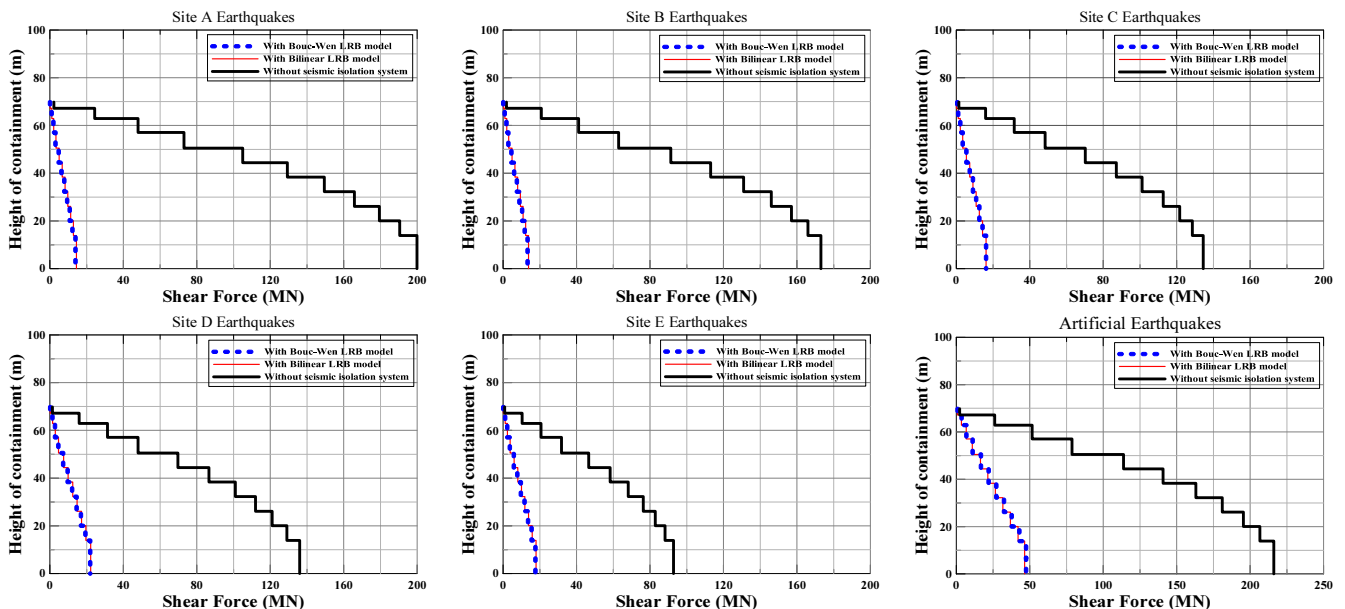


Fig. 11. Comparison of shear force for NPP containment structures using by Bouc-Wen and bilinear models

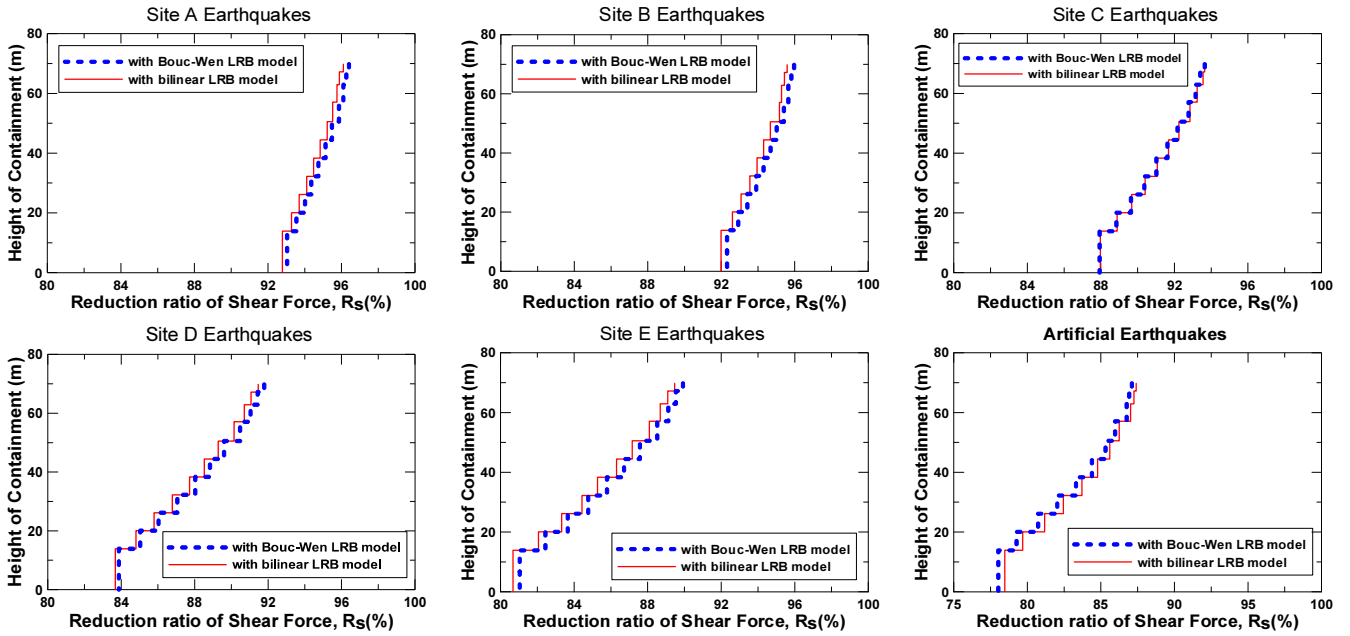


Fig. 12. Comparison of reduction ratio of shear forces (R_s) for NPP containment structures using by Bouc-Wen and bilinear models

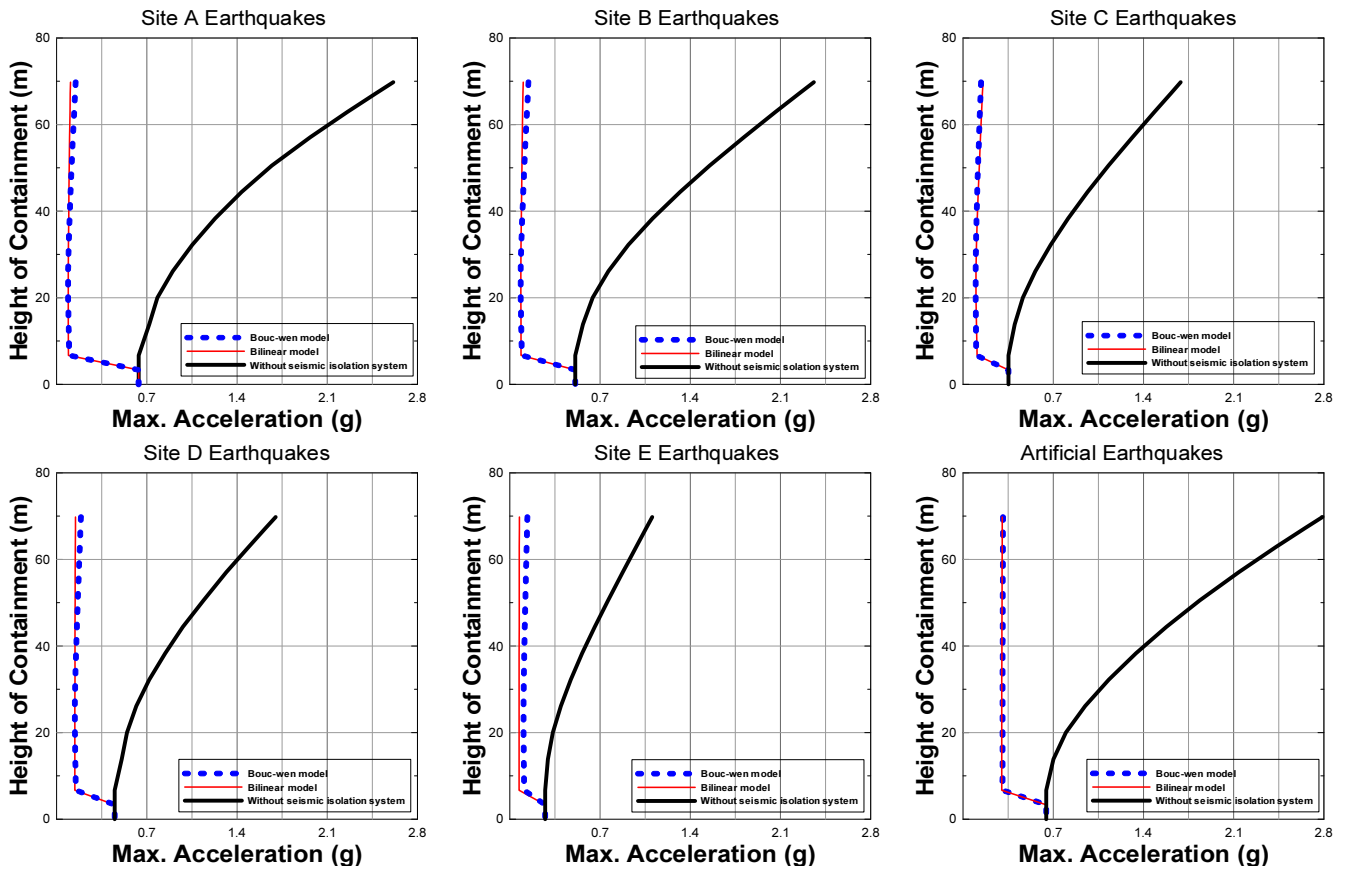


Fig. 13. Comparison of maximum acceleration of NPP containment structures using by Bouc-Wen and bilinear models

한 격납구조물의 가속도 저감효과가 가장 좋으며, 연약지반의 지진일수록 저감 효과가 작아진다. 연진장치의 두 모델에 따른 격납구조물의 가속도 응답의 차이는 대부분의 지진하중 그룹에서 크지 않으나 Site E 지진그룹에

서는 이선형 모델의 경우가 Bouc-Wen 모델의 경우보다 가속도 저감이 0.05 g 정도 차이로 크게 일어남을 알 수 있다.

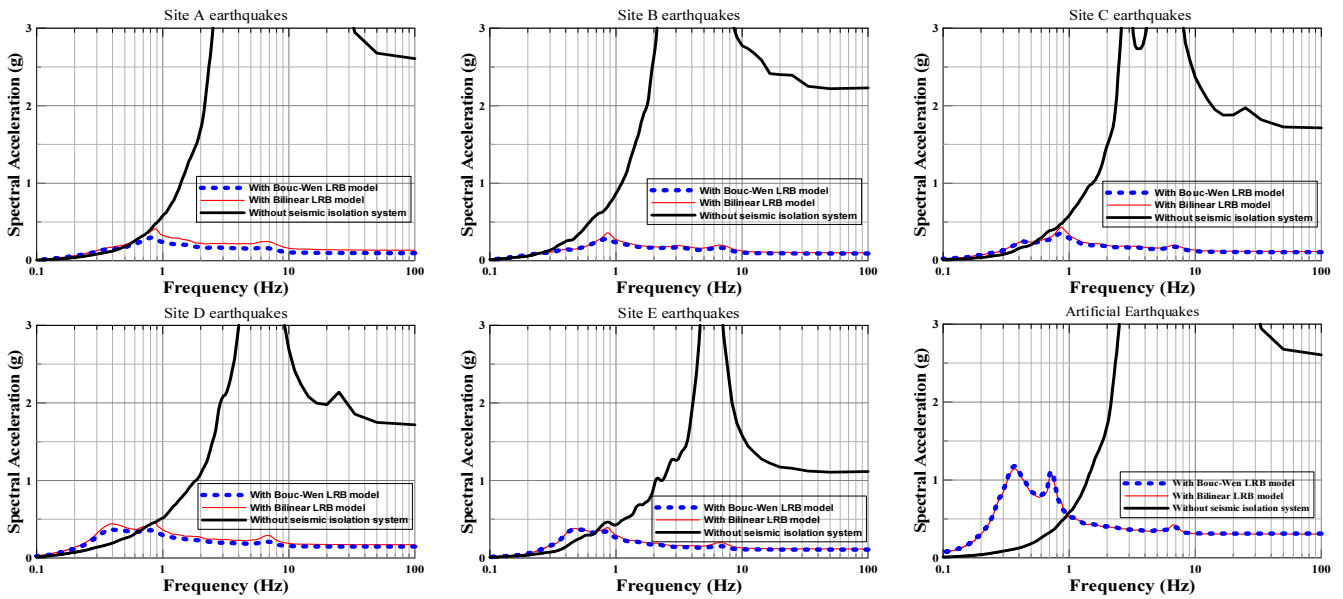


Fig. 14. Comparison of floor response spectrum at the top of NPP containment structures using by Bouc-Wen and bilinear models

3.3 면진 적용 유무 및 면진장치 해석모델에 따른 격납구조물의 최상층부 층응답스펙트럼의 비교

납-고무 받침에 의해 면진된 원전 격납구조물과 면진되지 않은 격납구조물의 최상층부에 대한 가속도 응답으로부터 층응답스펙트럼을 구하여 Fig. 14에 비교하여 나타내었다. 면진원전 격납건물 상층부에서 층응답스펙트럼은 면진장치의 고유진동수인 0.5 Hz와 0.9 Hz 부근에서는 두 개의 최대치가 나타나며, 지반이 연약할수록 즉 Site A에서 E로 갈수록 0.9 Hz 보다는 0.5 Hz에서 최대치가 발생하는 경향을 나타낸다. 이는 지반조건이 연약할수록 지진가속도의 장주기 성분이 많기 때문에 면진에 대한 고유진동수 중에서 저진동수의 응답이 크게 나타나기 때문이다. 7 Hz 부근이 격납구조물의 고유진동수로서 면진장치가 설치되지 않은 경우에 최대치를 나타내는 경향을 보인다. 1 Hz 이상의 층응답스펙트럼은 면진장치를 설치한 경우에 현저하게 줄어드는 경향을 나타내고 있어서 면진효과가 확인되고 있으며 원전구조물의 내부설비들은 대부분은 기계시설로 5 Hz 이상의 고진동수를 가지는 것이 일반적이므로 면진에 의한 층응답스펙트럼의 감소로 인한 설비의 안전성이 확보됨을 확인 할 수 있다. 0.8~1.0 Hz 범위의 진동수에서는 이선형 모델이 Bouc-Wen 모델에 비해 큰 층응답스펙트럼을 나타내며, 가장 큰 차이를 보이는 Site A의 개별지진에서는 최소 4%~ 최대 31%까지 차이가 발생한다. 일반적으로 100 Hz 부근의 가속도스펙트럼 값은 격납건물 상부층의 최대가속도 값과 거의 동일한 응답을 나타낸다. 이는 강제진동에 근접한 고진동수에는 최대지반가속도와 가속도 응답스펙트럼이 동일한 것과 같은 원리이기 때문이다. 100 Hz 진동수에서 Site A의 경우는 면진이 없을 경우의 가속도응답이 2.6에서 면진을 적용하면 0.2 정도로 1/13 정도로 저감되었다. Site B의 경우는 2.2 g에서 0.2 g로 1/11 정도 저감, Site C에서는 1.7 g에서 0.2 g로 1/8.5 정도로 저감, Site D에서는 1.7 g에서 0.2 g로 1/8.5 정도로 저감, Site E에서는 1.1 g에서 0.2 g로 1/5.5 정도로 저감, 원전표준스펙트럼에 대응하는 인공지진에 대해서는 2.6 g에서 0.35

g로 1/7.4 정도로 저감되었다. Site A에서 Site E로 갈수록 저감 정도가 작아진다. 이는 면진장치의 면진효과는 고진동수를 많이 포함하는 단단한 지반일수록 효과적임을 의미하며 연약지반으로 갈수록 면진효과는 줄어든다는 것을 의미한다.

4. 결론

이선형 모델과 Bouc-Wen 모델에 의해 모델링된 납-고무 받침에 의해 면진된 원전구조물의 다양한 지반조건에서 예측된 지진하중들과 원전표준 설계스펙트럼에 대응하는 인공지진에 대하여 응답이력해석을 수행하고 이를 면진이 적용되지 않은 경우와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이선형 모델과 Bouc-Wen 모델에 의한 면진장치의 최대변위응답의 비교로부터, Bouc-Wen 모델에 의한 면진장치의 최대변위응답이 이선형 모델에 의한 최대변위응답보다 전반적으로 크게 평가하고 있음을 알 수 있다. 두 모델에 의한 변위응답 차이를 불일치율로 나타낼 때, Site 별 가속도 불일치율은 Site C에서 가장 크게 나타나며, 약 최소-16%~ 최대 56%, 인공지진에서는 약 최소 0.5%~ 최대 4% 정도 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 실제지진기록의 불일치율이 큰 이유는 인공지진의 경우보다 실제지진이 다양한 지진특성 즉, 변동성이 많이 포함되었기 때문으로 판단된다.
- 2) 면진장치의 적용은 단단한 지반의 지진일수록 연약한 지반의 지진에 비하여 격납구조물의 상대변위를 저감시키는 면진효과가 보다 우수하게 나타난다.
- 3) 단단한 지반의 지진일수록 면진장치의 적용에 의해 격납구조물에 작용하는 전단력 및 가속도 응답을 연약한 지반의 지진에 비하여 더 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 이는 원전구조물이 건설되는 부지가 단단한 지반일수록 면진에 의한 지진하중의 저감 효과가 크다는 것을 의미한다.

- 4) 면진원전 격납건물 상층부에서 층응답스펙트럼은 면진장치의 고유진동수인 0.5 Hz와 0.9 Hz 부근에서는 두 개의 최대치가 나타나며, 지반이 연약할수록 즉 Site A에서 E로 갈수록 0.9 Hz 보다는 0.5 Hz에서 최대치가 발생하는 경향을 나타낸다. 이는 지반조건이 연약할수록 장주기 성분이 많기 때문에 면진에 대한 고유진동수 중에서 저진동수의 응답이 크게 나타나기 때문이다. 고진동수의 층응답스펙트럼의 비교로부터 지진이 Site A에서 Site E로 갈수록 면진적용에 의한 층응답스펙트럼의 저감효과 작아진다. 이는 면진장치의 면진효과는 고진동수를 많이 포함하는 단단한 지반일수록 효과적임을 의미하며 연약지반으로 갈수록 면진효과는 줄어든다는 것을 의미한다.
- 5) 납-고무 받침의 모델링에 사용한 이선형 모델과 Bouc-Wen 모델에 의한 모델기법에 의한 지진응답의 영향은 설계에 영향을 줄 정도로 큰 차이를 나타내지는 않는다. 그러나 면진장치의 설계 시에 Bouc-Wen 모델이 면진장치의 변위응답을 이선형모델 보다는 크게 평가하는 경향이 있음을 반영하여 설계하여야 할 것이다. 그러므로 설계의 목적으로는 Bouc-Wen 모델이 이선형 모델보다 보수적이며 실제적인 이력거동을 표현하므로 보다 적절하다고 판단된다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2015R1D1A3A01020276)임.

/ REFERENCES /

1. Bouc R, Mathematical mode for hysteresis, Report to the Centre de Recherches Physiques, Marseille, France, c1971, p.16-25.
2. Wen YK, Method for random vibration of hysteretic systems, Journal of Engineering Mechanics Division, 102(EM2), p.249-263.
3. Ok JK, Mun SH, Yoo WS, Lee SK, Sohn JH, Study on Bushing Modeling for the Vehicle Dynamics Analysis Using the Bouc-Wen Hysteretic Model, Transactions of KSAE, 2006;14(2):158-165.
4. Semi-active Control of a Seismically Excited Cable-Stayed Bridge Considering Dynamic Models of MR Fluid Damper
5. Moon SJ, Chung JH, Kim BH, Optimim Design of Base Isolators Using Bouc-wen Model, EESK J, Earthquake Eng. 2003 Sep; 15(2):395-402.
6. Song JK, Effect of Smooth Hysteretic Behavior for Inelastic Response Spectra, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2010;14(1):1-9.
7. Song JK, Evaluation of Strength Reduction Factors using Smooth Hysteretic Behavior, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2010;14(4):49-60.
8. Song JK, Evaluation of Inelastic Displacement Ratios for Smooth Hysteretic Behavior Systems, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2011;15(3):11-26.
9. Lee JH, Song JK, Comparison of seismic responses of seismically isolated NPP containment structures using equivalent linear- and nonlinear lead-rubber bearing modeling, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2015;19(1):1-12.
10. Lee JH, Song JK, Seismic Fragility Analysis of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structures using Equivalent Linear- and Bilinear- Lead Rubber Bearing Model, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2015;19(5):207-217.
11. Lysmer J, Ostadan F, Chin CC, A system for analysis of soil-structure interaction, SASSI 2000 theoretical manual, UC Berkeley; c1999.
12. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL, OpenSees: Open System of Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Center, Univ. of Calif., Berkeley. [cited 2007] Available from: <http://opensees.berkeley.edu>.
13. Harvey PS, Gavin HP, Truky isotropic hysteresis with arbitrary knee sharpness, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2013;00:1-6.
14. Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA, Bommer JJ, Markatis A, McCoy E, Mendis R, An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets, Journal of Earthquake Engineering, 2006;10(S1):67-89.
15. U.S. Atomic Energy Commision, Regulatory Guide 1.60, Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, c1973.
16. PEER Strong Motion Database[Internet]. Berkeley, California, Available from: <http://peer.berkeley.edu/smcat/sites.html>.
17. Baber TT, Noori MN, Random vibration of degrading, Pinching systems, Journal of Engineering Meachnics, 1985;111(8):1010-1026.
18. Aristotelis E, Charalampakis, Parameters of Bouc-Wen Hysteretic Model Revisited, 9th HSTAM International Congress on Mechanics Limassol, Cyprus, 2010, Jul 12-14.
20. A,E Charalampakis, V,K, Koumoussisl, On the response and dissipated energy of Bouc-Wen hysteretic model, Journal of Sound and Vibration 309, c2007, p.887-895.